

RRR工法技術講習会  
TKP市ヶ谷カンファレンスセンター  
2023年11月29日(水) 13:05~14:45

# GRS構造物

## -擁壁から橋台への発展-

東京大学名誉教授, 東京理科大学名誉教授  
龍岡 文夫

# GRS構造物 - 擁壁から橋台へ -

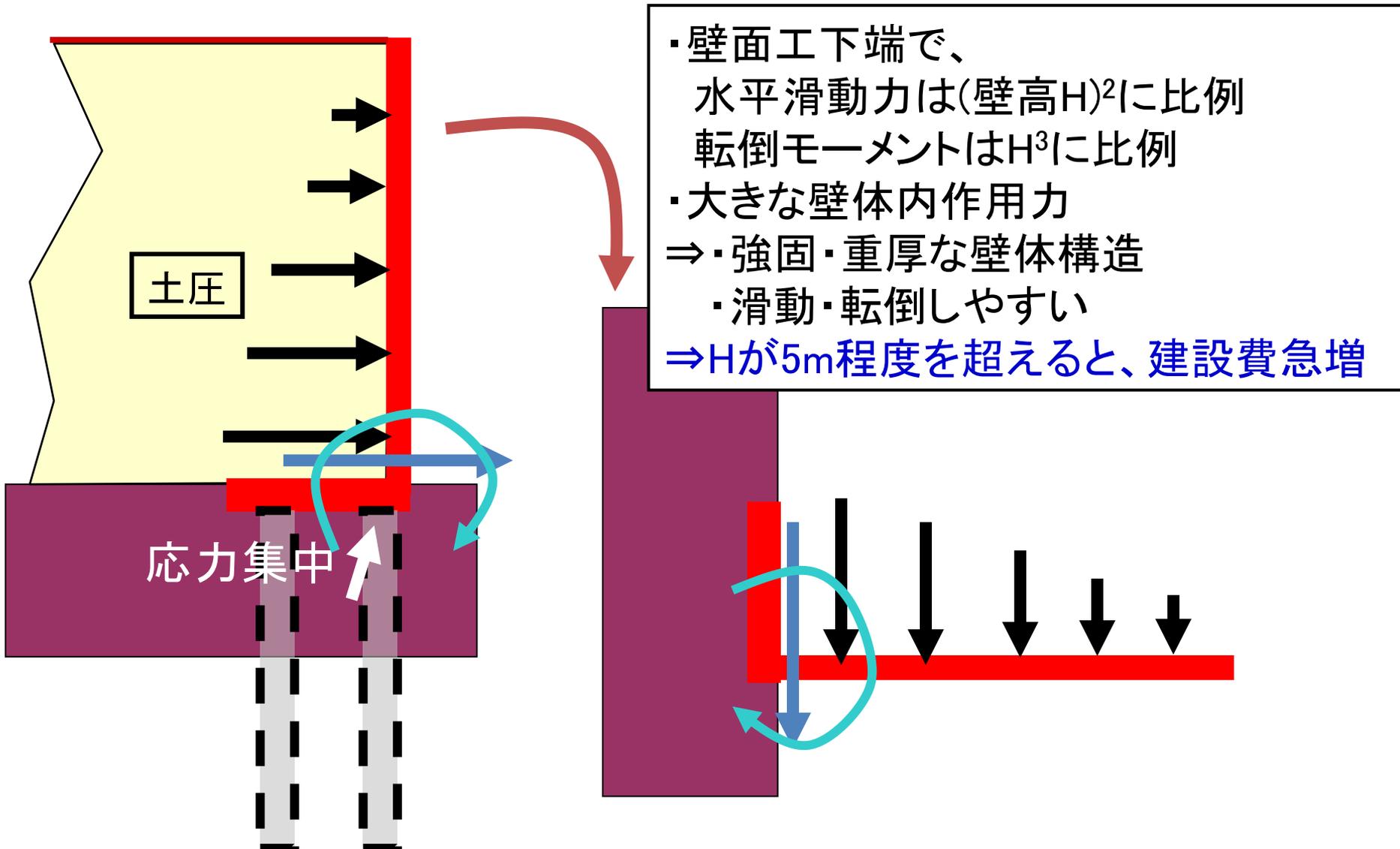
GRS: Geosynthetic-Reinforced Soil (ジオシンセティックス補強土)

- 1) 従来形式の擁壁は**片持ち梁**！ 補強土擁壁は非片持ち梁！
- 2) **剛な一体壁面工**を持つGRS構造物の最近の施工例
- 3) 剛な一体壁面工を持つGRS擁壁の特徴
  - ・剛な一体壁面工の効用の“発見”と活用
  - ・クリープは劣化に非ず、クリープでは強度は低下しない
  - ・**壁面工を盛土の後に建設**する効用の“発見”と活用
- 4) 自然災害で崩壊した土構造物のGRS構造物による**強化復旧**：  
**地震・洪水・豪雨・津波**
- 5) GRS擁壁から**GRS橋台・GRS一体橋梁**への発展
  - a) 従来形式の橋台・橋梁の諸問題
  - b) GRS橋台とGRS一体橋梁の利点 - 低い建設費・維持管理費、高い耐災性(地震、洗堀、津波等)
- 6) 新幹線西九州ルート、金沢・敦賀間でのGRS構造物
- 7) まとめ

# GRS構造物 - 擁壁から橋台への発展 -

- 1) 従来形式の擁壁は片持ち梁！ 補強土擁壁は非片持ち梁！
- 2) 剛な一体壁面工を持つGRS構造物の最近の施工例
- 3) 剛な一体壁面工を持つGRS擁壁の特徴
  - ・剛な一体壁面工の効用の“発見”と活用
  - ・クリープは劣化に非ず、クリープでは強度は低下しない
  - ・壁面工を盛土の後に建設する効用の“発見”と活用
- 4) 自然災害で崩壊した土構造物のGRS構造物による強化復旧：  
地震・洪水・豪雨・津波
- 5) GRS擁壁からGRS橋台・GRS一体橋梁への発展
  - a) 従来形式の橋台・橋梁の諸問題
  - b) GRS橋台とGRS一体橋梁の利点 - 低い建設費・維持管理費、高い耐災性(地震、洗堀、津波等)
- 6) 新幹線西九州ルート、金沢・敦賀間でのGRS構造物
- 7) まとめ

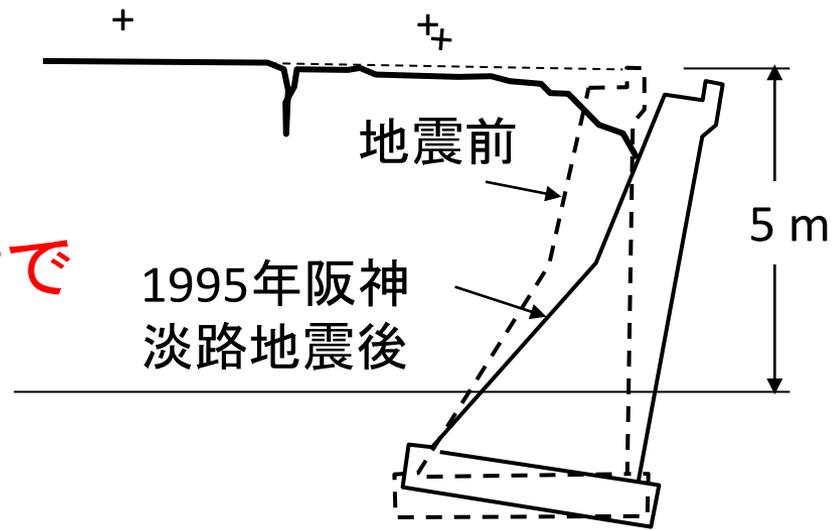
# 従来形式の擁壁は片持ち梁 (cantilever) 構造物



- ・壁面工下端で、  
水平滑動力は(壁高 $H$ )<sup>2</sup>に比例  
転倒モーメントは $H^3$ に比例
- ・大きな壁体内作用力  
⇒・強固・重厚な壁体構造  
・滑動・転倒しやすい  
⇒ $H$ が5m程度を超えると、建設費急増

通常は、**杭基礎**が必要 ⇒ 高建設コスト

# 1995年阪神淡路地震 多数の重力式やL型擁壁で 壁体破壊，転倒

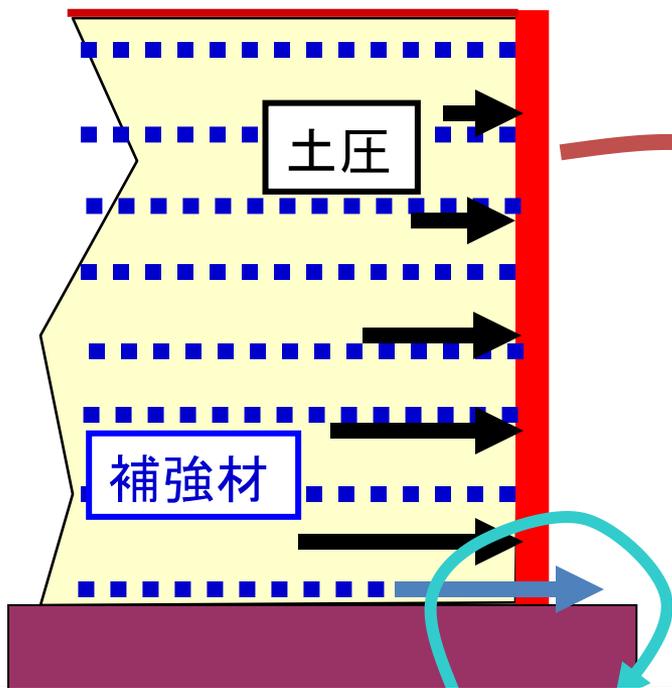


阪神電鉄  
石屋川駅付近  
重力式擁壁



# GRS擁壁の安定には剛な一体壁面工が必要！

しかし、支点間距離が小さく支点が多数の連続梁であり、非片持ち梁構造



土圧は大きくなるが、

①壁面工内の作用力は大きくなならない  
⇒簡素な壁面工で十分⇒コスト減

壁面工の水平滑動と転倒に対して、

②潜在すべり面を横切る補強材層で抵抗  
⇒滑動・転倒が生じにくい



③盛土に自立性があるので、盛土建設後での壁面工建設が可能になる  
(段階施工； 後で説明)

②&③⇒杭基礎が不要に\*  
⇒大幅なコスト減

\*ただし、支持力確保のために浅層地盤改良等が必要な場合がある

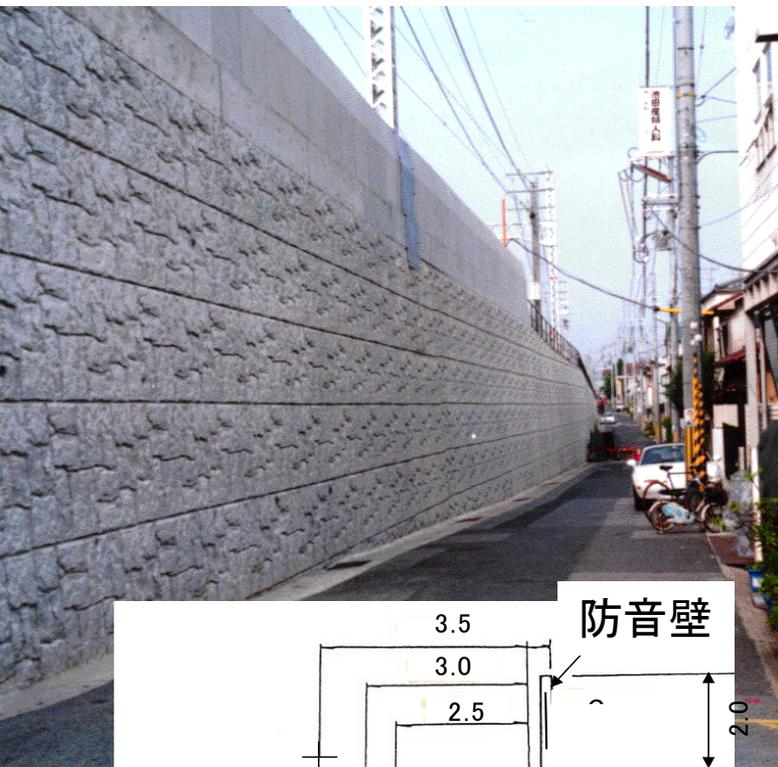
剛な一体壁面工を持つGRS構造物では、支点間距離= 30 cm

1992年7月(建設直後)

JR神戸線, 東灘区

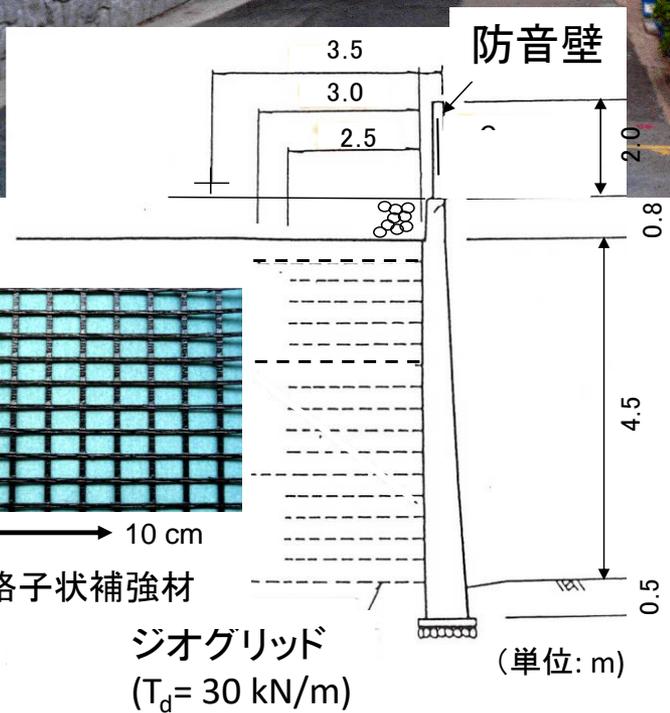
剛な一体壁面工を持つGRS擁壁

- ・GRS: Geosynthetic-Reinforced Soil  
ジオシンセティック補強土



1995年1月24日(地震1週間後)

非常に高い耐震性!



1992年7月(建設直後)

JR神戸線, 東灘区

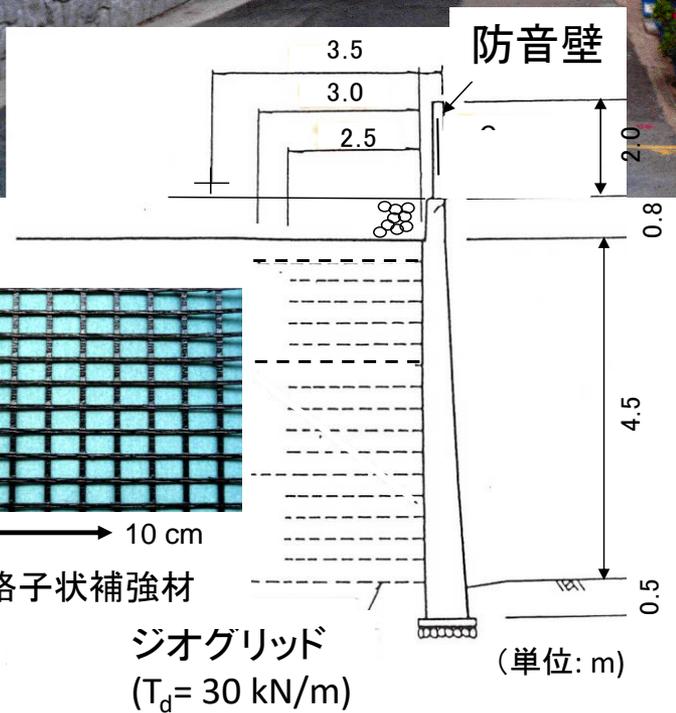
剛な一体壁面工を持つGRS擁壁

- ・GRS: Geosynthetic-Reinforced Soil  
ジオシンセティック補強土



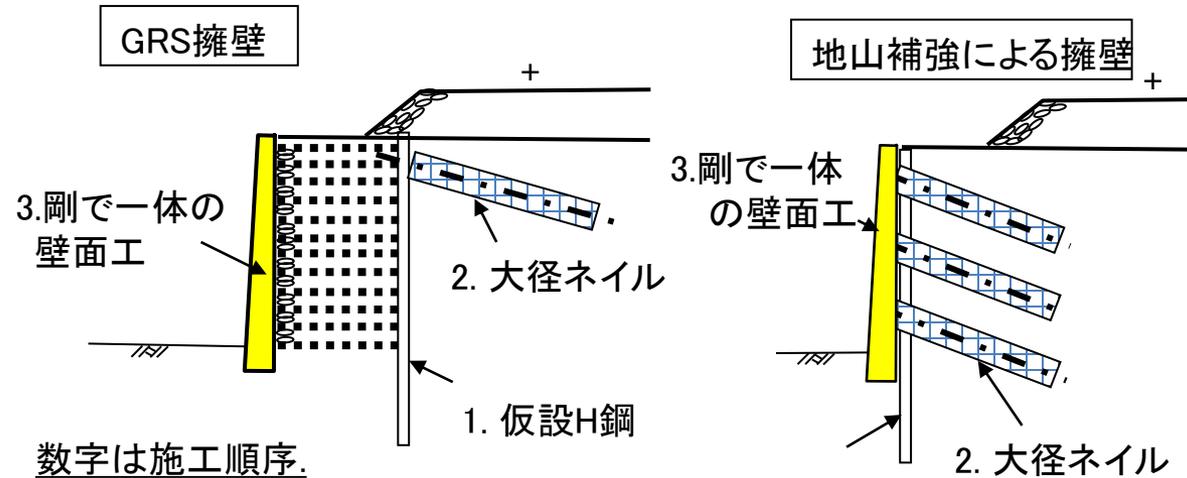
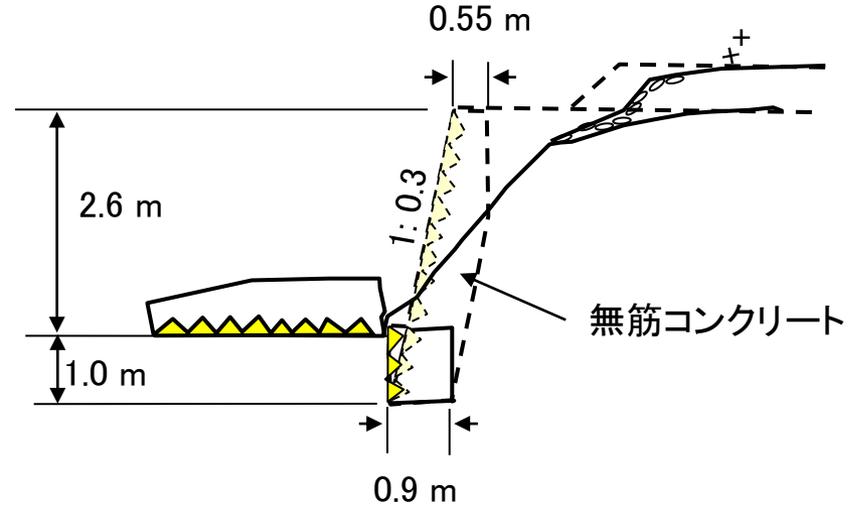
1995年1月24日(地震1週間後)

非常に高い耐震性!



# 1995年阪神淡路大震災での凭れ式擁壁の崩壊と強化復旧

## JR神戸線 摂津本山駅・住吉駅間の盛土山側のり面

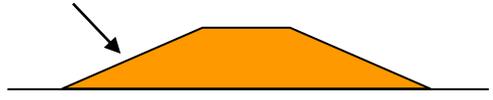


# GRS構造物- 擁壁から橋台への発展 -

- 1) 従来形式の擁壁は片持ち梁！ 補強土擁壁は非片持ち梁！
- 2) **剛な一体壁面工を持つGRS構造物の最近の施工例**
- 3) 剛な一体壁面工を持つGRS擁壁の特徴
  - ・剛な一体壁面工の効用の“発見”と活用
  - ・クリープは劣化に非ず、クリープでは強度は低下しない
  - ・壁面工を盛土の後に建設する効用の“発見”と活用
- 4) 自然災害で崩壊した土構造物のGRS構造物による強化復旧：  
地震・洪水・豪雨・津波
- 5) GRS擁壁からGRS橋台・GRS一体橋梁への発展
  - a) 従来形式の橋台・橋梁の諸問題
  - b) GRS橋台とGRS一体橋梁の利点 - 低い建設費・維持管理費、高い耐災性(地震、洗堀、津波等)
- 6) 新幹線西九州ルート、金沢・敦賀間でのGRS構造物
- 7) まとめ

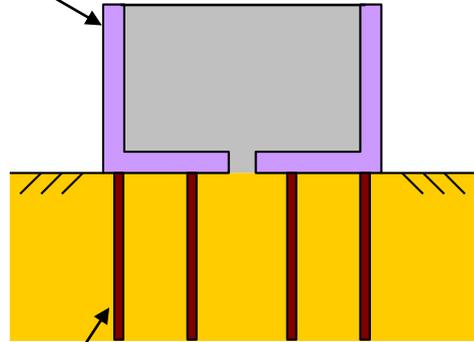
# 道路・鉄道における高架構造物の変遷

緩勾配法面の盛土



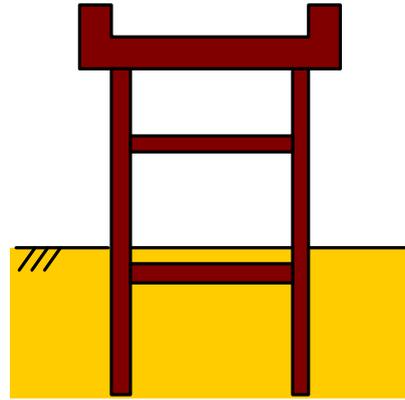
- ・占有面積が大きい。
  - ・豪雨・地震に対して不安定
  - ・長期残留変形が大きい（特に、支持地盤が軟弱な場合）
- ⇒維持管理コストが高い

鉄筋コンクリートのL型擁壁



杭

RC高架構造物

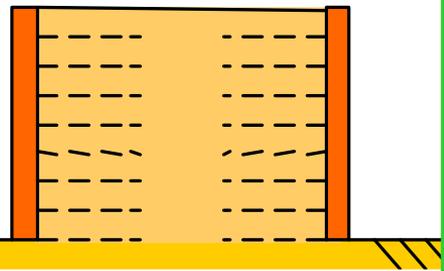


可能で適切な場合

鉄道では、  
新設擁壁として  
従来形式片持ち梁擁壁と  
他形式の補強土擁壁  
は建設しなくなった

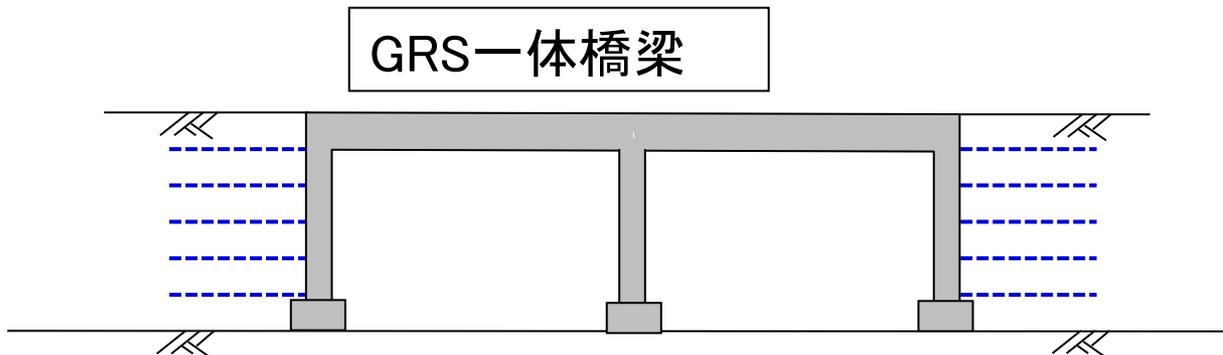
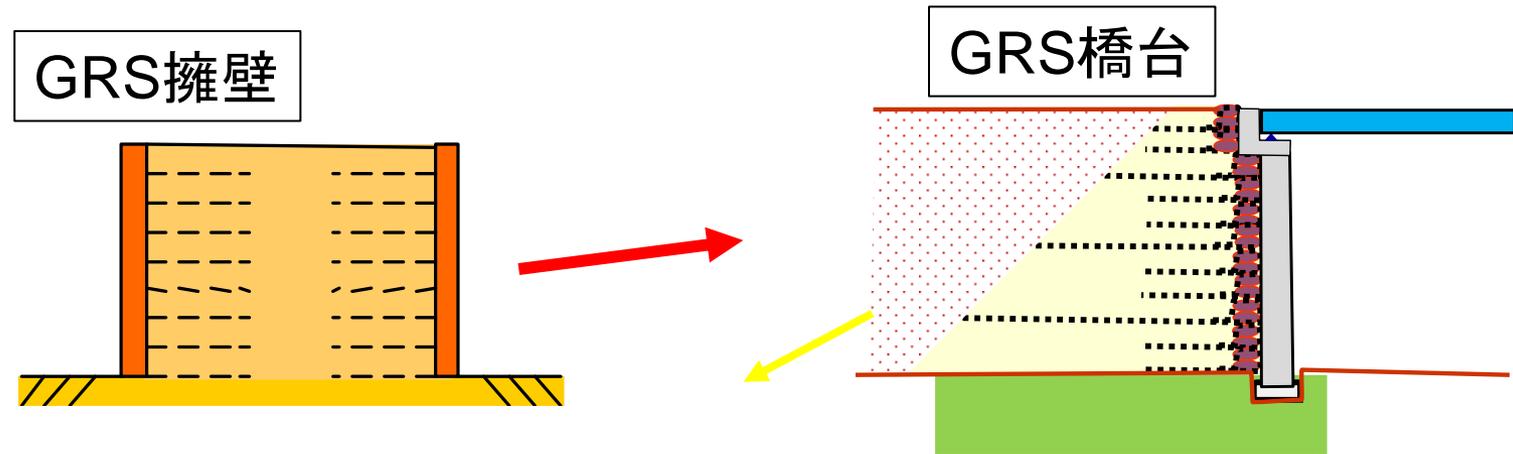
剛な一体壁面工を持つGRS擁壁、  
GRS橋台等

- ・十分な剛性と安定性  
(高い耐災性、低い維持管理費)
  - ・土構造物は基本的に低コスト (杭は基本的に不要)  
(RC高架の約1/2)
- ⇒高い性能と高い費用便益費  
新幹線等の建設で活用！



# 最近の剛な一体壁面工を持つGRS構造物の特徴

- ・GRS擁壁からGRS橋台・GRS一体橋梁、GRSトンネル坑門工、GRS Box culvert等へと発展
- ・新幹線等の鉄道の重要永久構造物として、従来形式の盛土、擁壁、橋台、単純桁橋梁等に替わり、広く活用（道路にも活用できる）



# 新幹線ネットワーク, 2022年

	供用中	2,830.5 km (2000年以降, 995.4 km)
 建設中	北海道(新函館北斗・札幌間)	211.5km
	北陸(金沢・敦賀間)	125.2km

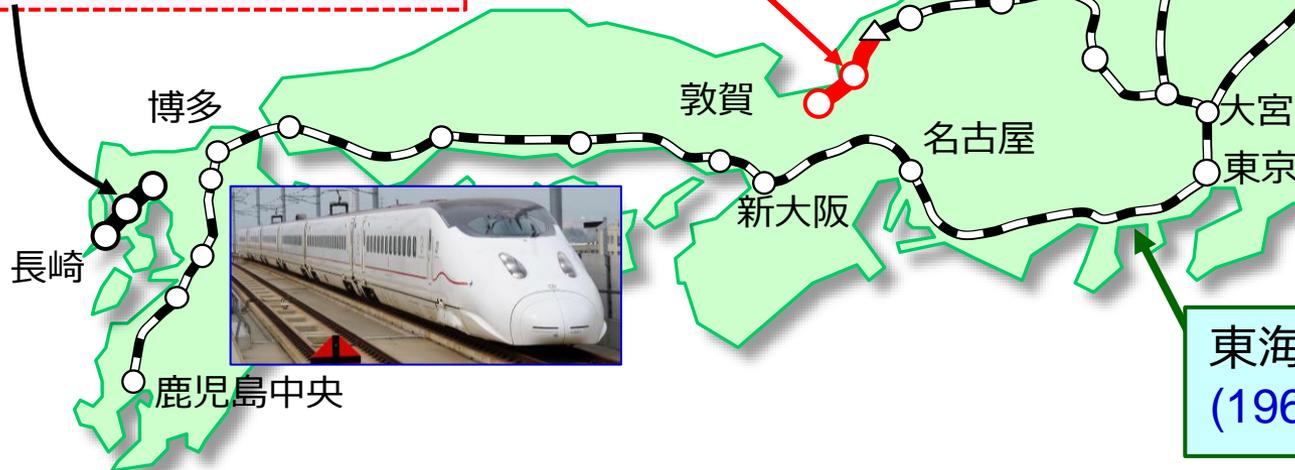


**北海道 (2016年3月開業)**



**九州 (西九州ルート) 2022年9月23日開業**

**北陸(2024年3月16日開業)**



**東海道 (1964年10月開業)**

# 北海道新幹線では、剛な一体壁面工を持つGRS構造物を広範囲に採用

木古内～新函館間  
万太郎路盤

←新青森方

B

R

A

A

R

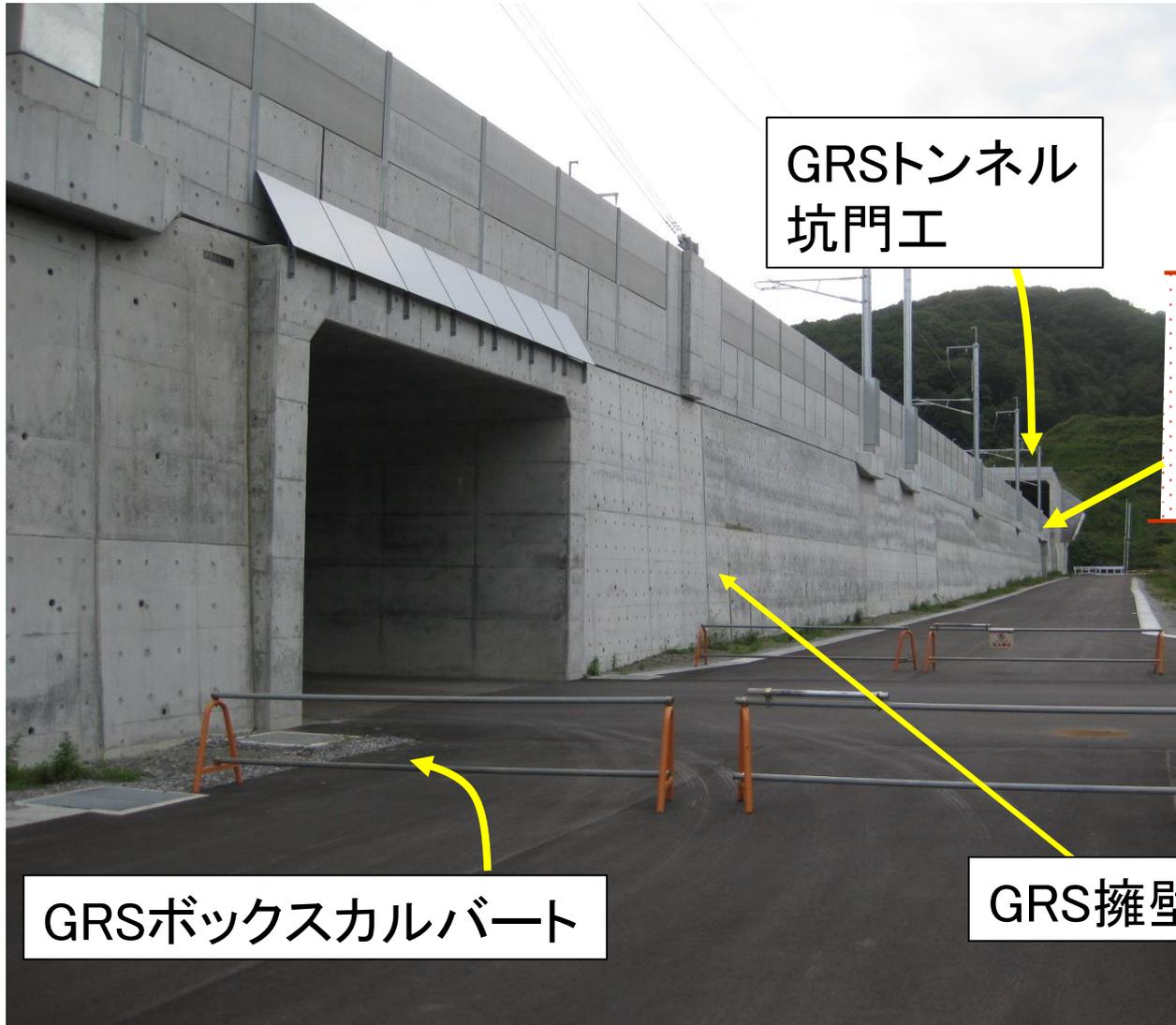
T

→新函館方

記号	GRS構造物	施工延長 または 箇所数	最大高さ (m)
R	GRS擁壁	3,528 m	11.0
A	GRS橋台	33	13.4
I	GRS一体橋梁(世界で初)	1	6.1
B	GRS一体ボックスカルバート	3	8.4
T	GRSトンネル坑門工	11	12.5

これらは、全て従来形式の盛土、擁壁、橋台等に替わって建設された

# 北海道新幹線では、剛な一体壁面工を持つGRS構造物を広範囲に採用

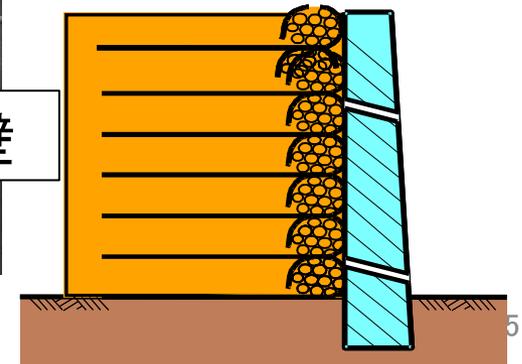
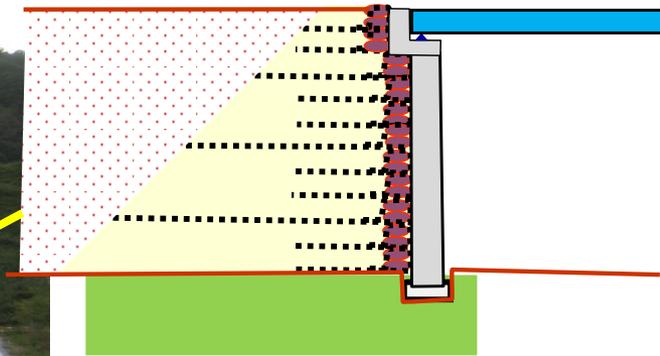


GRSトンネル  
坑門工

GRSボックスカルバート

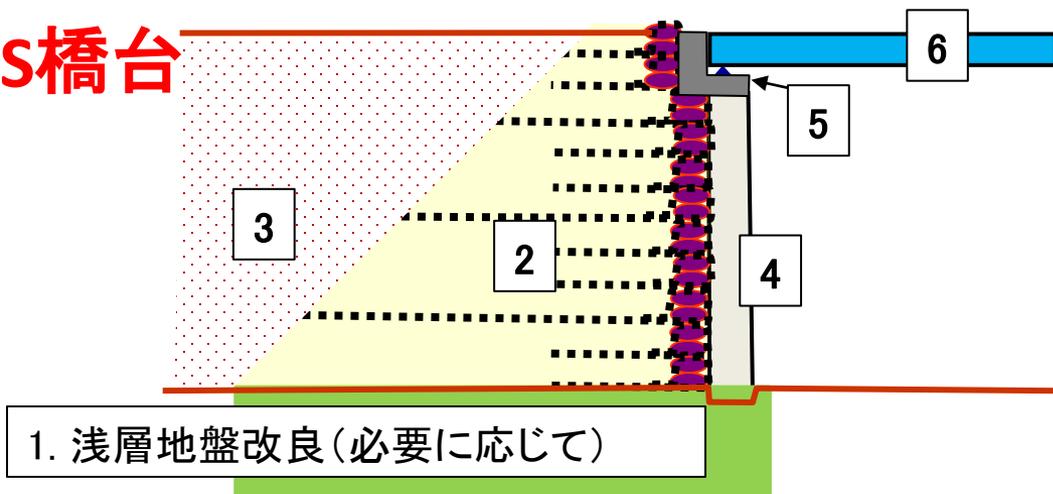
GRS擁壁

GRS橋台



# GRS擁壁から発展したGRS橋台

北海道新幹線、万太郎路盤  
高さ13.4 m  
(数字は施工順序)



現在まで、185あまりのGRS橋台(耐震性橋台)が建設

# GRS橋台からGRS一体橋梁への発展(数字は施工順序)

GRS橋台とは異なり、桁・壁面工の構造一体化で不静定構造物に ⇒ 安定した構造になり耐震性は著しく向上。一方、①壁面工の残留沈下、②桁の温度収縮・膨張による壁面工上端での繰返し水平変位による盛土沈下・土圧増加によって不静定力が発生 ⇒ 課題①、②は、GRS一体橋梁では、補強盛土建設後に補強材を連結して剛な一体壁面工を建設することで解決(後述)

## 5. 支承を用いなくて構造一体化

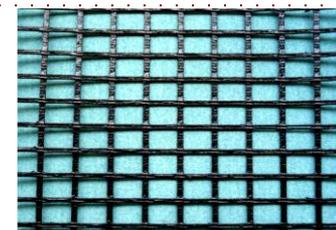
## 4. 橋桁

## 2. GRS擁壁

## 3. 剛で一体の壁面工

礫を詰め  
た土嚢

連結



PVA格子状補強材

10 cm

## 1. 表層地盤改良(必要な場合)

三陸鉄道

地方道

津波



ハイペ沢

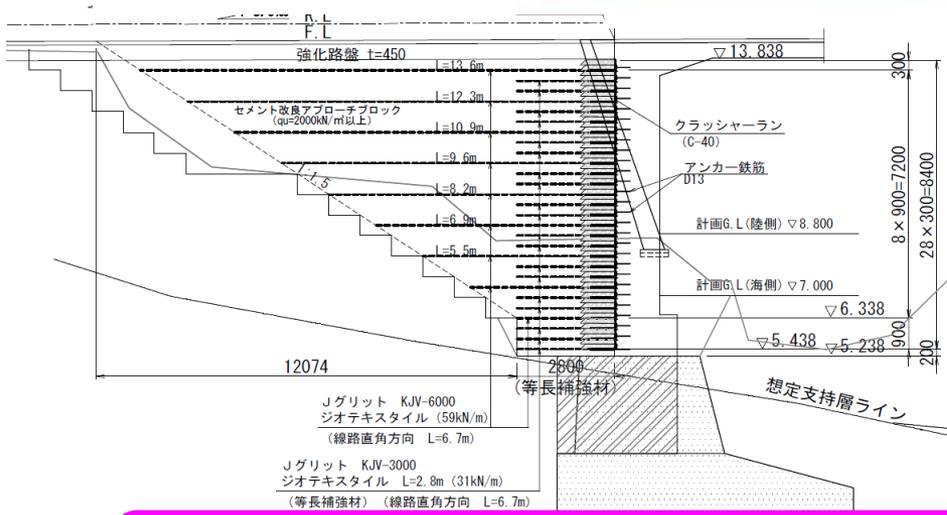
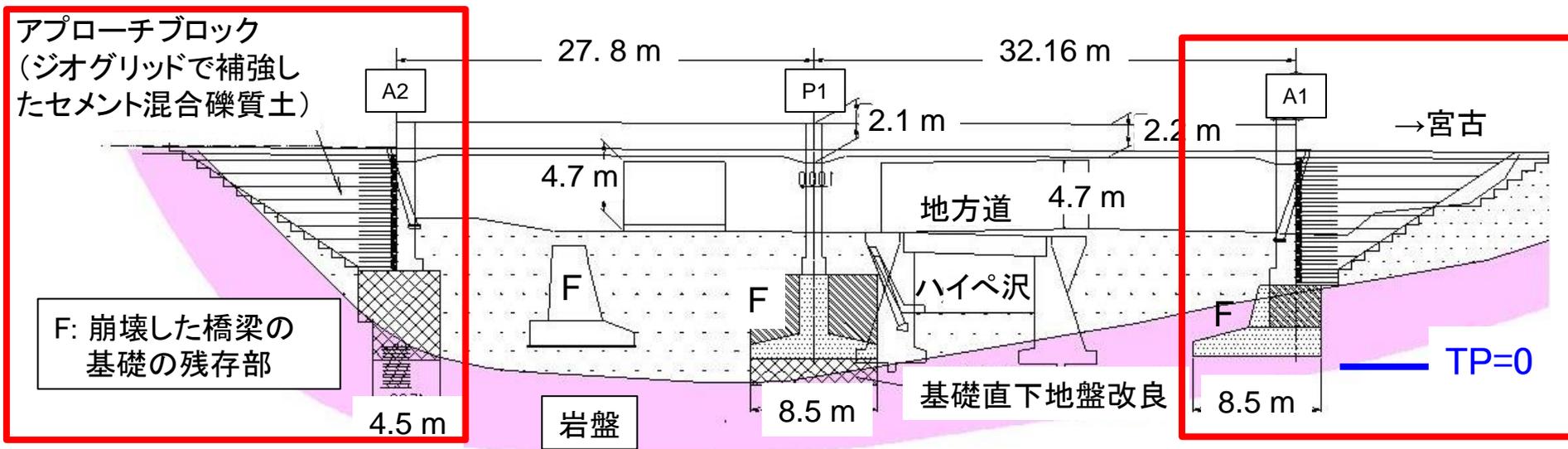
2011年3月30日



2011年東日本大震災  
による崩壊後に復旧さ  
れたGRS一体橋梁  
2014年5月19日

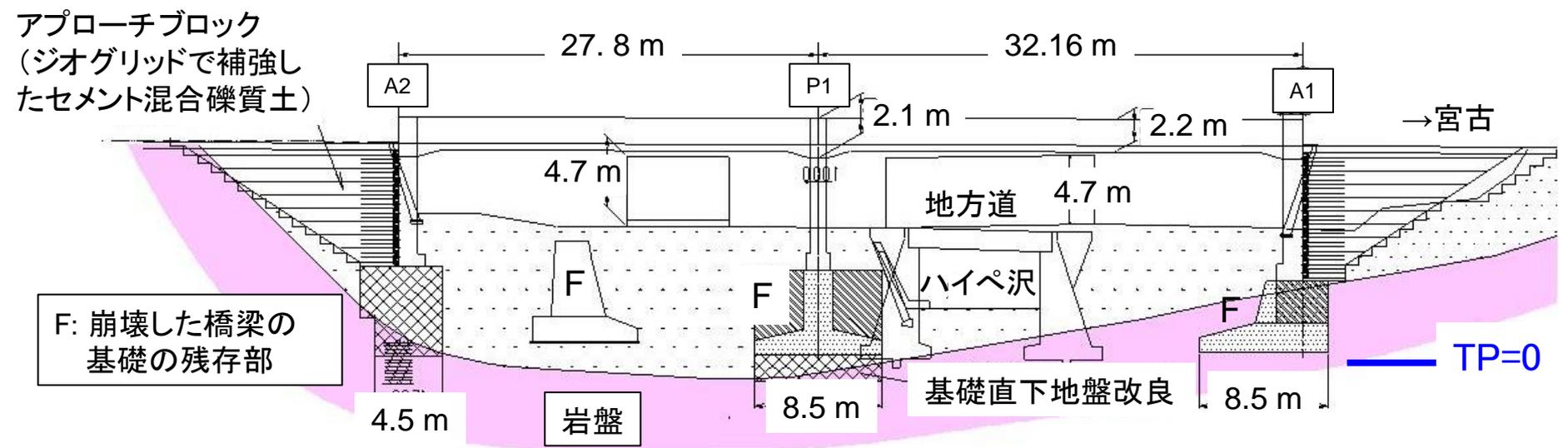
上の写真と同じアングル

# 三陸鉄道北リアス線 岩手県島越～田野畑間ハイペ沢橋梁 ジオシンセティック補強土一体橋梁での復旧(2012～2014年度建設)



- 等長補強材を全高さ亘り、3段ごとに長尺補強材を配置
- 等長補強材30kN/m; 長尺補強材60kN/m

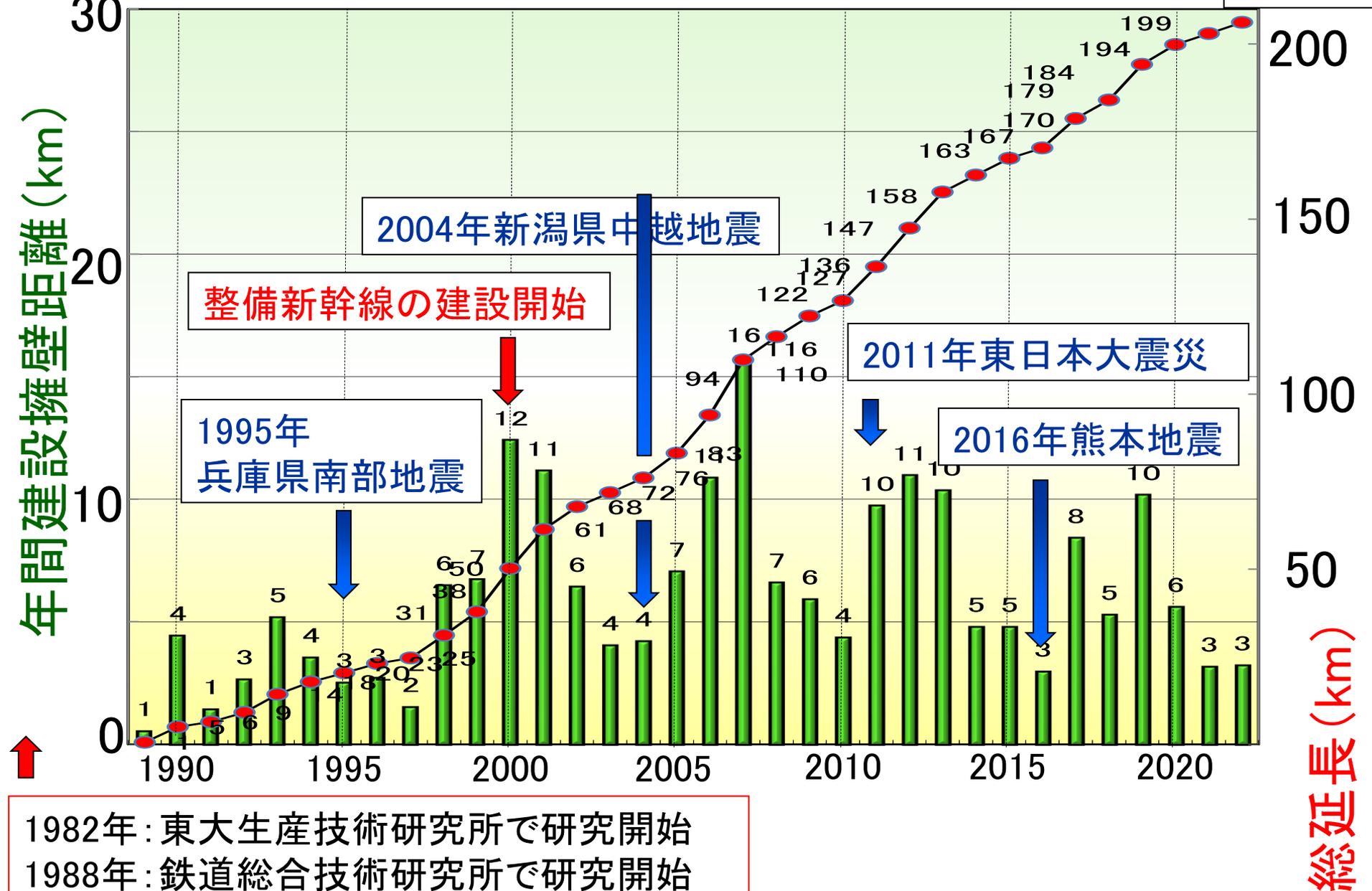
# 三陸鉄道北リアス線 岩手県島越～田野畑間ハイペ沢橋梁 ジオシンセティック補強土一体橋梁での復旧(2012～2014年度建設)



2014年4月6日

# 剛な一体壁面工を持つGRS構造物(擁壁、橋台等)の施工実績

206 km



# 2023年4月までに建設された剛な一体壁面工を持つ GRS構造物(擁壁、橋台等)

総延長: 206 km以上

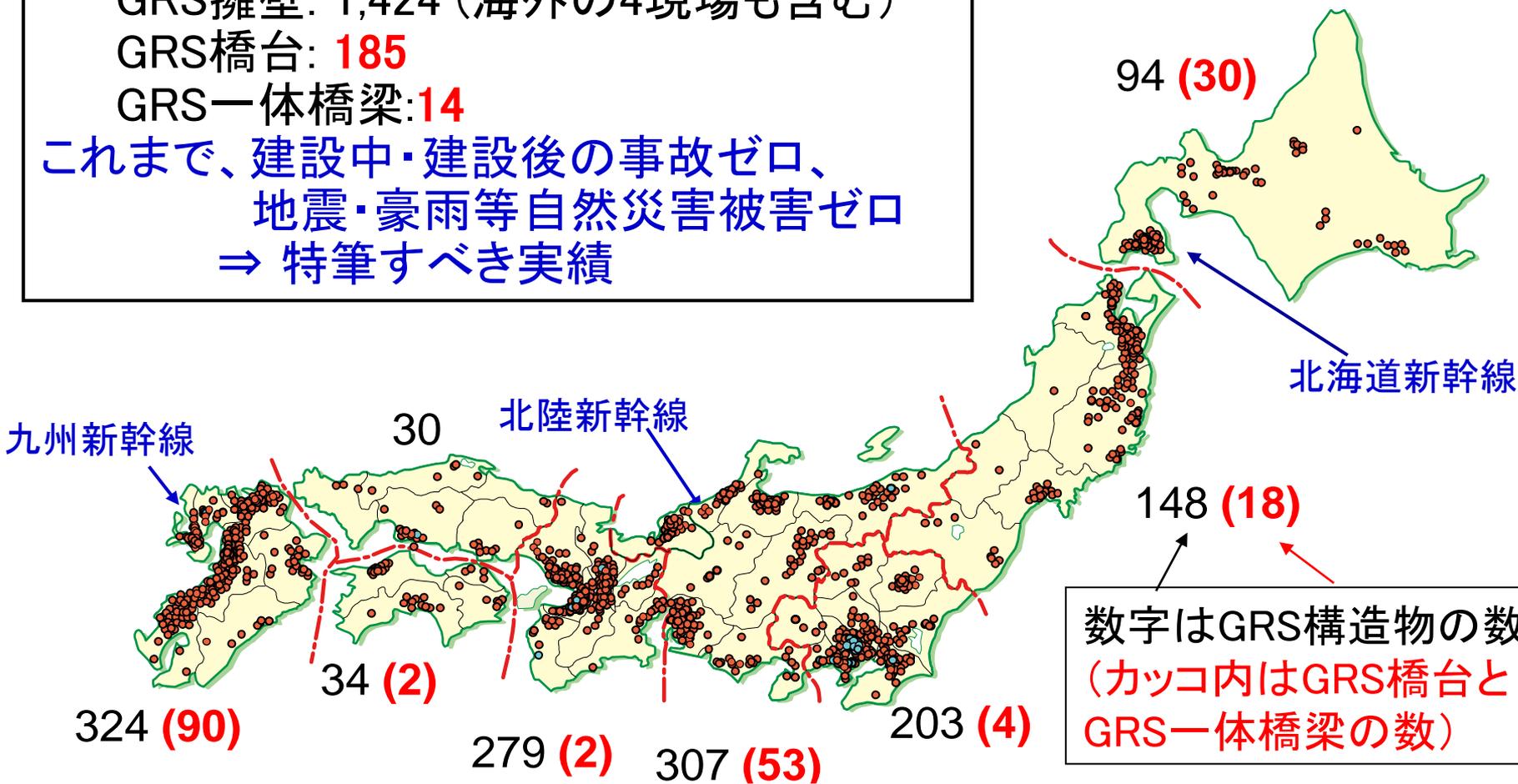
総現場数:

GRS擁壁: 1,424 (海外の4現場も含む)

GRS橋台: **185**

GRS一体橋梁: **14**

これまで、建設中・建設後の事故ゼロ、  
地震・豪雨等自然災害被害ゼロ  
⇒ 特筆すべき実績



## まとめ

- ・我が国の鉄道の新設擁壁は、従来のL型・重力式等の片持ち梁形式から剛な一体壁面工を持つジオシンセティック補強土(GRS)擁壁に切り替わった。道路でも活用されている。
- ・最近では、多数のGRS橋台が建設され、GRS一体橋梁も建設された。
- ・安定性の要求が極めて高く、許容変形が非常に小さい新幹線の擁壁・橋台等も、このようなGRS構造物が標準構造物になった。

その背景に、剛な一体壁面工を持つGRS構造物の三大特長がある。即ち、従来形式の擁壁、橋台、橋梁と比較して、

1. 杭基礎の省略、電柱・防音壁等付帯設備の設置、腹付け擁壁工等で高い施工性、短い工期等による直接建設費の大幅な削減
2. 橋台裏の盛土沈下・段差の解消等による維持管理費の大幅な削減。
3. 地震・豪雨・洪水等自然災害に対する高い耐力

⇒ 1～3を総合した性能(Performance)/Life Cycle Costは確実に向上  
これらは、実績で証明されてきた。

# GRS構造物- 擁壁から橋台への発展 -

- 1) 従来形式の擁壁は片持ち梁！ 補強土擁壁は非片持ち梁！
- 2) 剛な一体壁面工を持つGRS構造物の最近の施工例
- 3) 剛な一体壁面工を持つGRS擁壁の特徴
  - ・剛な一体壁面工の効用の“発見”と活用
  - ・クリープは劣化に非ず、クリープでは強度は低下しない
  - ・壁面工を盛土の後に建設する効用の“発見”と活用
- 4) 自然災害で崩壊した土構造物のGRS構造物による強化復旧：  
地震・洪水・豪雨・津波
- 5) GRS擁壁からGRS橋台・GRS一体橋梁への発展
  - a) 従来形式の橋台・橋梁の諸問題
  - b) GRS橋台とGRS一体橋梁の利点 - 低い建設費・維持管理費、高い耐災性(地震、洗堀、津波等)
- 6) 新幹線西九州ルート、金沢・敦賀間でのGRS構造物
- 7) まとめ

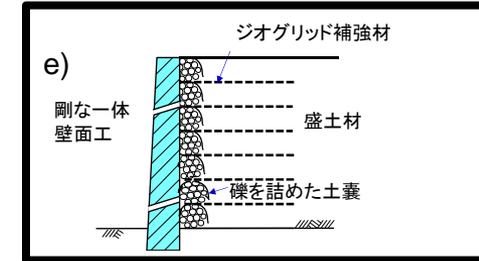
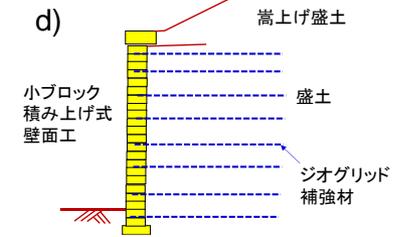
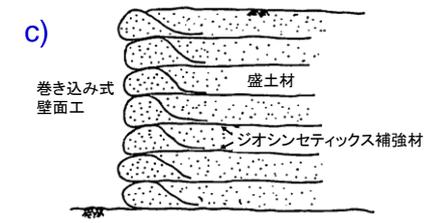
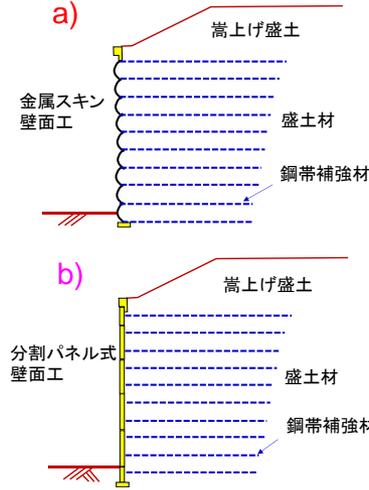
# 補強土擁壁の構成要素

- 裏込め盛土(様々な土質と締固め条件)
- 補強材(様々な素材・剛性・形状)
- 壁面工(様々な剛性・構造)  
(+ 排水工)

これらの組み合わせ

⇒ 多様な形式・構造の補強土擁壁

- 多様な機能・性能
- 多様なLife Cycle Cost, C/P比



剛な一体壁面工を持つGRS構造物の開発過程で直面した二つの難題:

1. (当時\*の通説) 補強土擁壁は壁面土圧が低い方が安定であり、

\* 1980年代 剛性・一体性がある壁面工は不要!

(実際は) 壁面工背後の盛土の安定には高い壁面土圧が必要であり、  
壁面工には剛性・一体性が必須 ⇒ 以下で説明

2. (当時\*の通説) 補強材には剛性・強度が高い金属製が最適!

ジオシンセティックス補強材は、剛性が低すぎ、クリープで長期的に劣化!

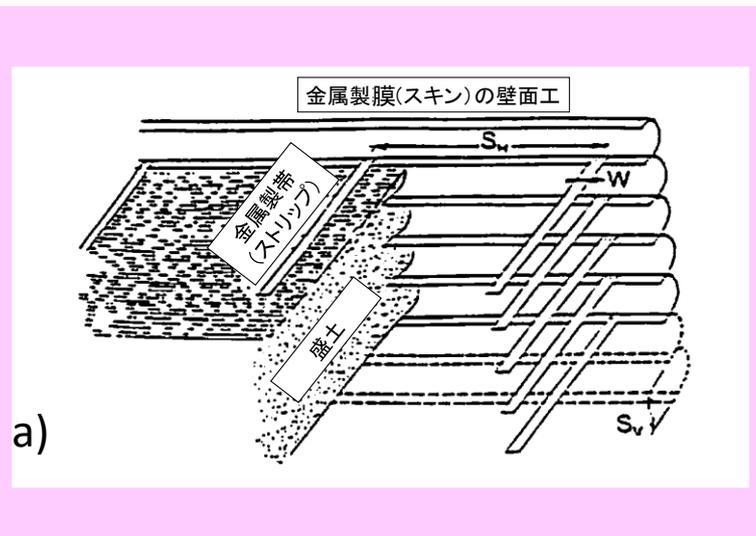
(実際は) ジオシンセティックス補強材は、剛性・強度は相対的に低いが面状で密な配置によって十分機能し、クリープは劣化現象ではない ⇒ 次節

# 補強材と壁面工の特徴による補強土擁壁の分類、その変遷

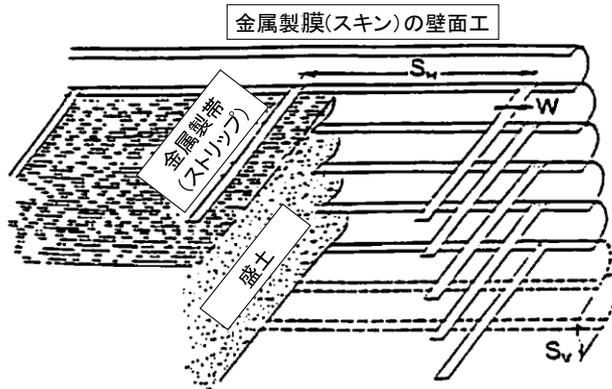
壁面工の剛性 補強材 の形状、材質	柔（大きな土圧は発揮で きない）	剛（大きな土圧が発揮）
帯状、 金属製		
面状（膜状あるいは グリッド状）、 石油高分子材料		

# 補強材と壁面工の特徴による補強土擁壁の分類、その変遷

壁面工の剛性 補強材 の形状、材質	柔(大きな土圧は発揮できない)	剛(大きな土圧が発揮)
帯状、 金属製	金属膜(skin)の壁面工、 初期テールアルメ擁壁 (図a)	
面状(膜状あるいは グリッド状)、 石油高分子材料		



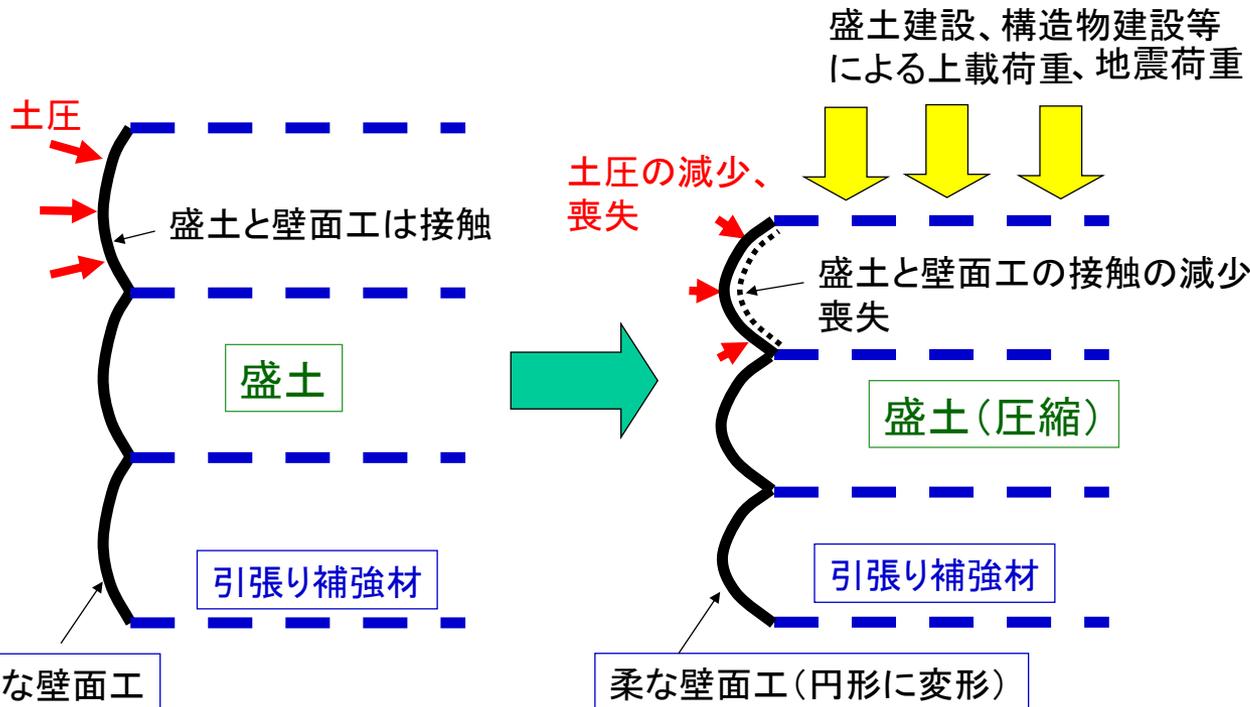
# 壁面工が金属膜(skin)のテールアルメ擁壁



1995年阪神淡路地震での  
テールアルメ擁壁の変状



盛土の鉛直圧縮⇒柔な壁面工の変形 ⇒壁面工と盛土との  
接触減少・喪失 ⇒水平土圧の減少⇒盛土の圧縮の進行  
⇒水平土圧の喪失⇒壁面・擁壁の過度な変形



# 壁面工が柔軟か、あるいは剛な壁面工に補強材が連結してないために、壁面工に土圧が発生しない場合

壁面での土圧は、ゼロか非常に低い⇒

①主働域内の拘束圧は、低い

②補強材/壁面工連結部の張力は、ゼロか非常に低い ⇒ 補強材に十分な引張り力が発揮されない(特に盛土下部で)

⇒主働域の剛性・強度は低い

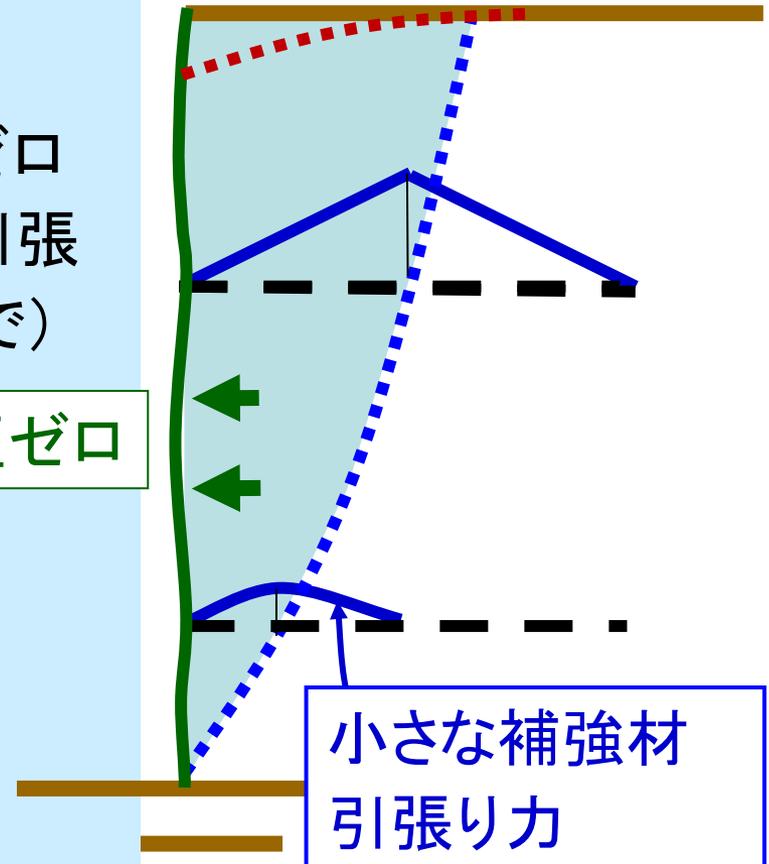
⇒盛土の変形が大きい

(特に壁面工近くの主働領域)

好ましくない不安定な状態

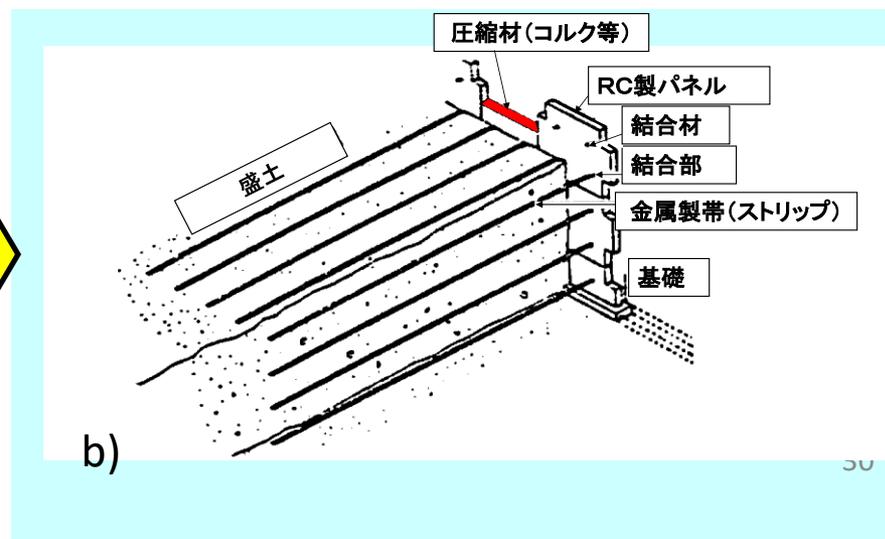
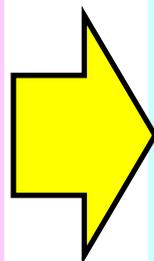
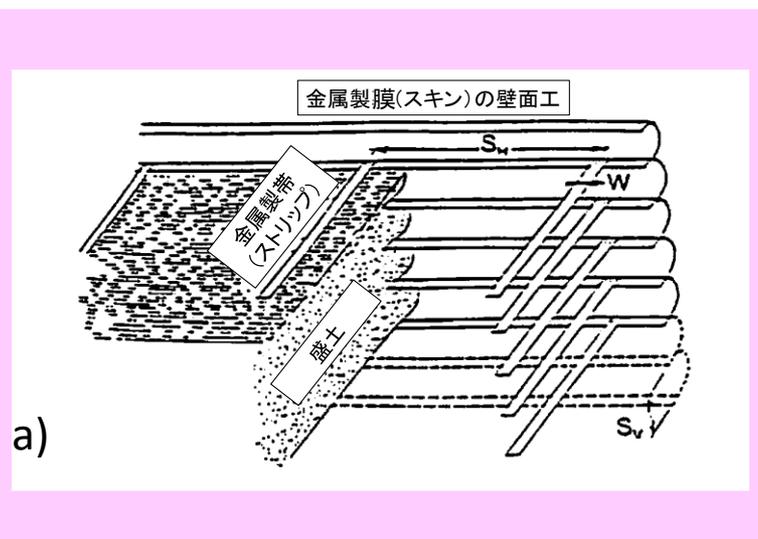
土圧ゼロ

小さな補強材  
引張り力



# 補強材と壁面工の特徴による補強土擁壁の分類、その変遷

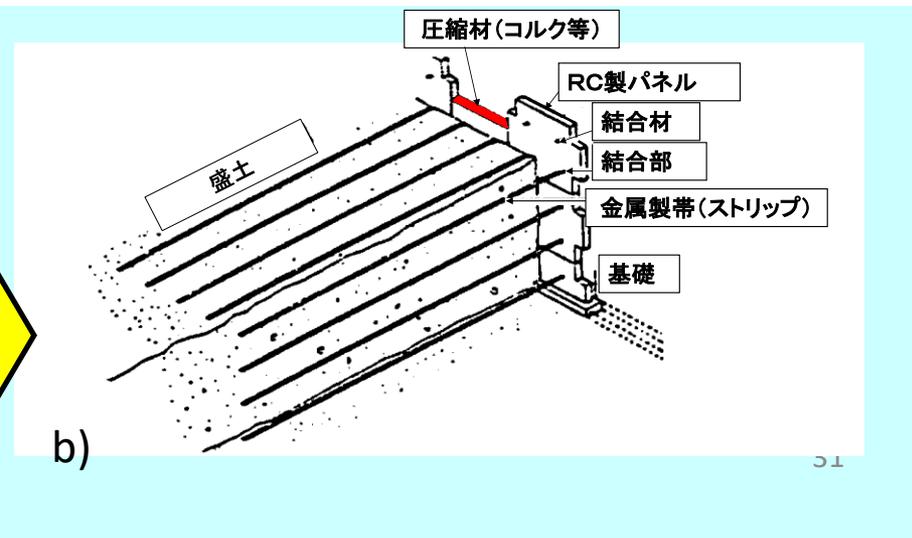
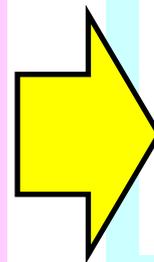
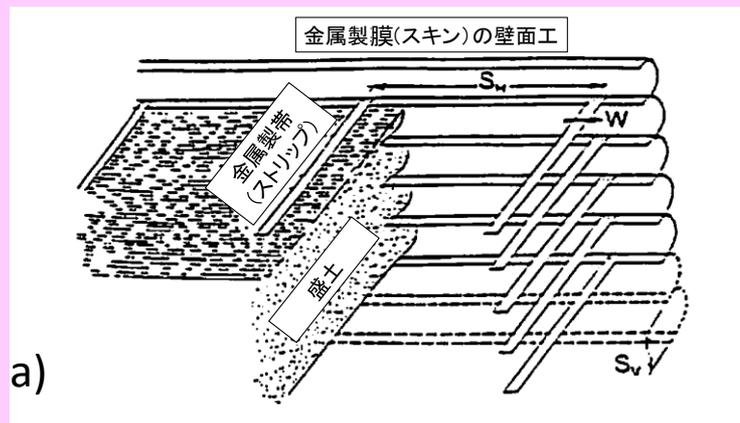
壁面工の剛性 補強材の形状、材質	柔(大きな土圧は発揮できない)	剛(大きな土圧が発揮)
帯状、金属製	金属膜(skin)の壁面工、初期テールアルメ擁壁(図a)	分割RCパネルの壁面工、現在の標準的テールアルメ擁壁(図b)
面状(膜状あるいはグリッド状)、石油高分子材料		



**初期のテールアルメ擁壁**での実際の最大の問題は、壁面工の剛性不足による壁面の過大な変形⇒補強土擁壁の過大な変形

⇒RC分割パネル式の壁面工に変更。しかし、「この変更は施工性と美観の向上のため」と説明され、「壁面の変形の抑制のため」とは説明されず。  
⇒「補強土擁壁は、剛性・一体性がある壁面工が大きな壁面土圧を維持することで安定化する」というメカニズムの理解には進展しなかった

■ 1980年代、GRS擁壁でも、上記のメカニズムの重要性は看過されていた



この壁面工では、壁面に一定程度大きな土圧が作用!

# 現在の「壁面工がRC分割パネルである標準的テールアルメ擁壁」での壁面土圧の説明と実際

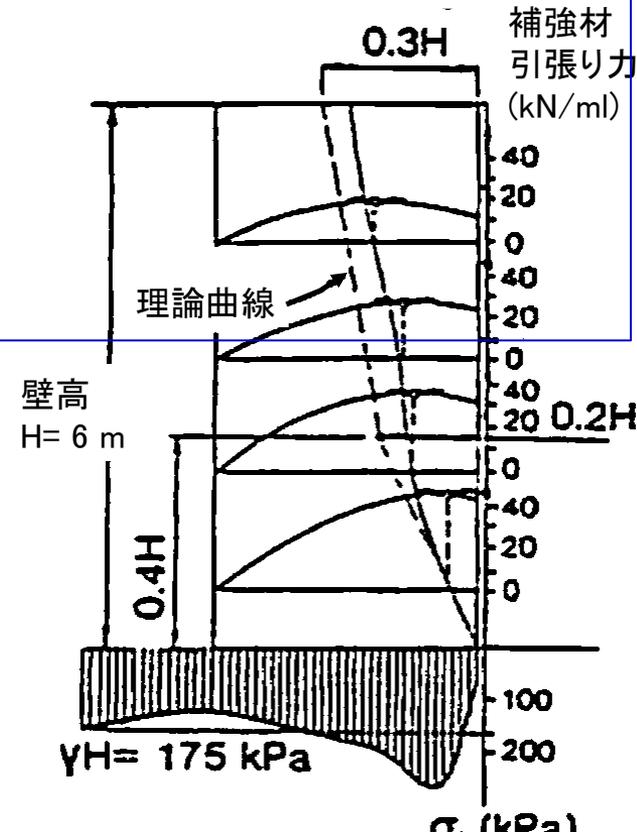
Vidalによる工法説明(その後伝承されてきた) 壁面工は土のこぼれだしを防ぐ程度の構造で十分であり、大きな土圧は作用しない

Schlosser, F. (1990): Mechanically stabilized earth retaining structures in Europe, *Design and Performance of Earth Retaining Structures, Geotechnical Special Publications No.25, ASCE* (Lambe and Hansen eds.), pp.347-378.

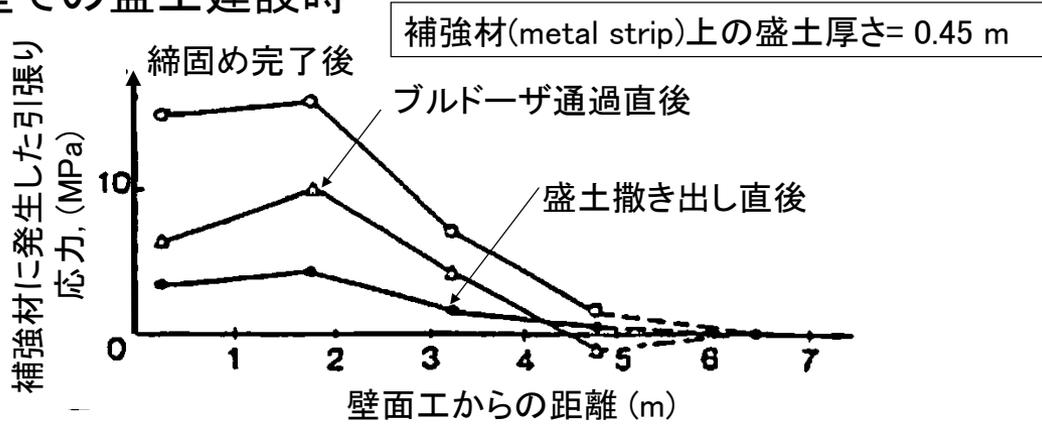
パネル式RC壁面工には大きな土圧が作用し、その結果盛土の変形は抑制され擁壁は安定化することを実証  
 ⇒金属膜の壁面工からRCパネル壁面工への変更は合理的であることを証明！

しかし、一般に対する工法説明では、この論文は無視され、混乱を与え続けた

高さ6mの実物大試験擁壁



実大擁壁での盛土建設時



# 一定の剛性がある壁面工に補強材が連結されていると、 壁面工背面に一定の土圧が作用⇒擁壁の安定化に貢献

壁面に一定の土圧が作用 ⇒

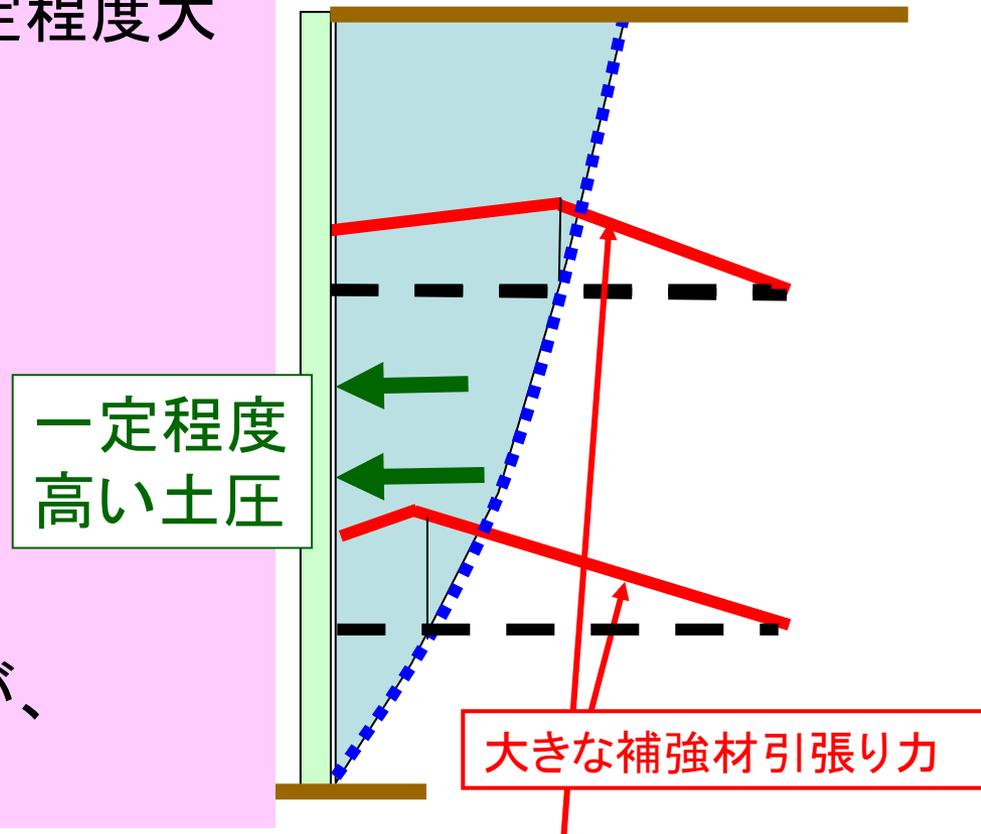
- ①主働域に、一定程度の拘束圧が作用
- ②盛土の下部でも、補強材に一定程度大きな引張り力が発生

⇒主働域の剛性と強度は、  
一定程度高くなる

⇒盛土の変形は、小さくなる

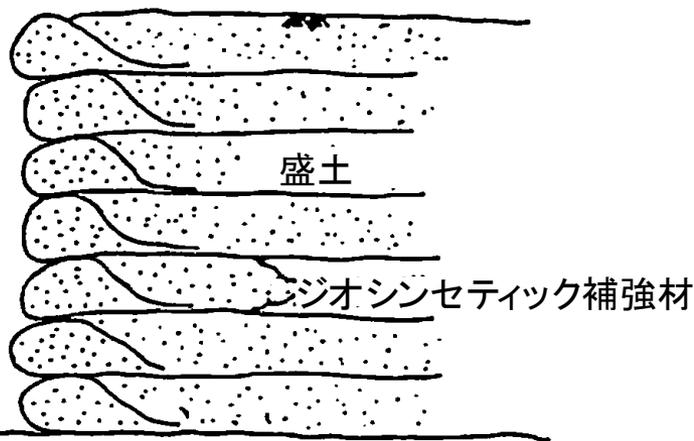
安定で好ましい状態

ただし、壁面工が剛で一体の方が、  
安定性はより高くなる



# 補強材と壁面工の特徴による補強土擁壁の分類、その変遷

壁面工の剛性 補強材の形状、材質	柔(大きな土圧は発揮できない)	剛(大きな土圧が発揮)
帯状、 金属製	金属膜(skin)の壁面工、 初期テールアルメ擁壁	分割RCパネルの壁面工、 現在の標準的テールアルメ擁壁
面状(膜状あるいは グリッド状)、 石油高分子材料	巻き込み式壁面のジオシンセティック補強土擁壁 (図c)	



研究開始時(1980年代初頭)、

- ・関東ロームのような問題が多い盛土材でも排水性のある補強材を用いれば自立的擁壁を建設できるのではないか？
  - ・RC壁面工を用いなくても擁壁構造物を建設できるのではないか？
- と想定して……

# 東京大学生産技術研究所千葉実験所での試験盛土No.1

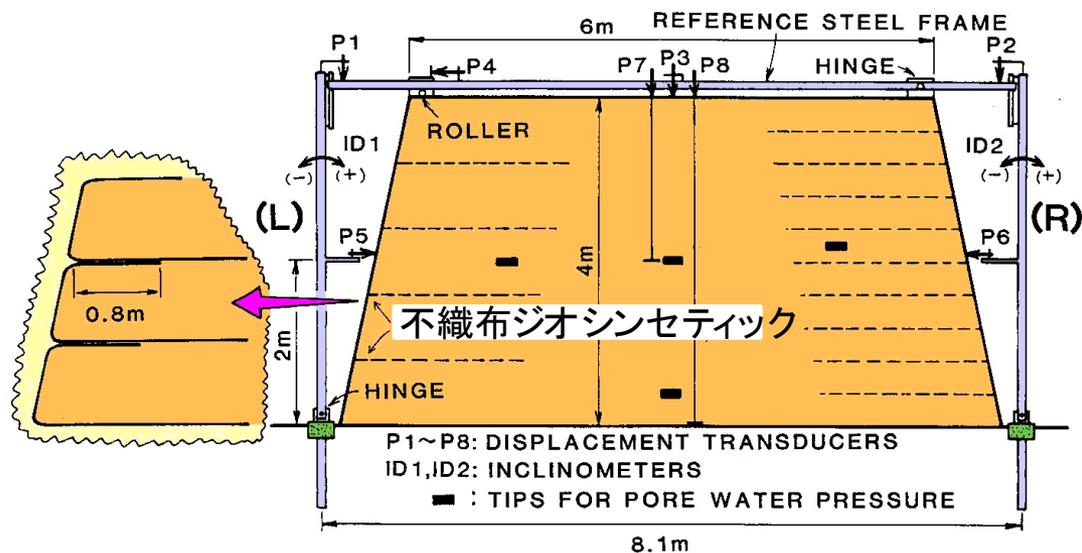
- 1982年建設
- 関東ローム盛土



- ・不織布(spun-bonded 100 % polypropylene)を配置:

排水と引張り補強(補強材としては使用例は無いが)

- ・壁面は巻き込み式(土嚢無)

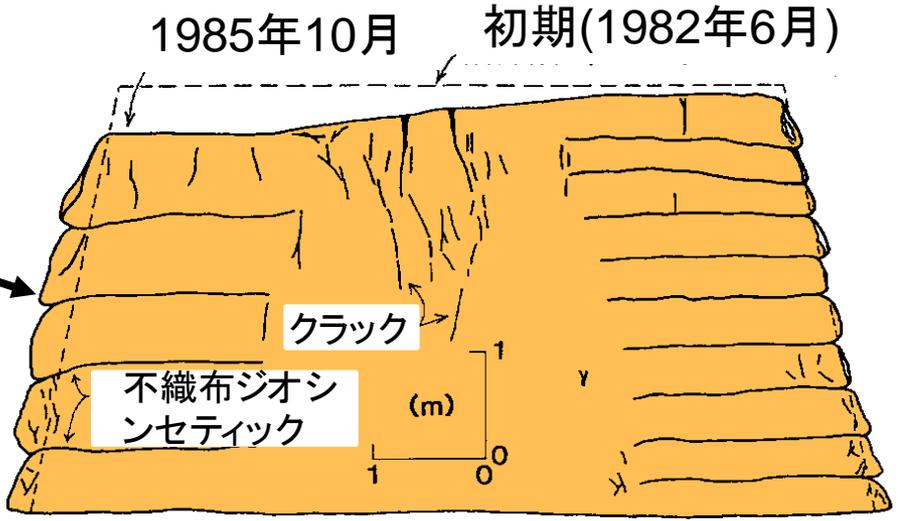


# 壁面は不織布ジオの巻き込み式(土嚢無)

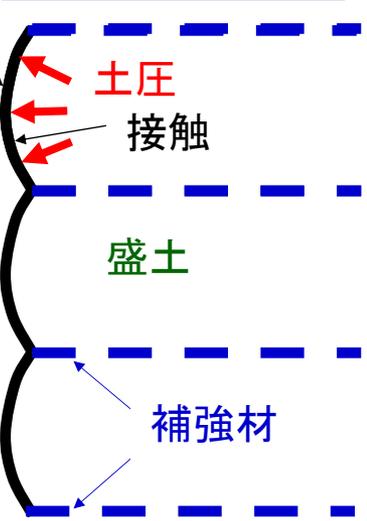
⇒降雨で盛土が湿潤化してサクシオンが減少・消滅して弱化して変形しようとしても有効に拘束できない、また、紫外線に劣化、美観も良くない..

⇒永久重要構造物には不適と認識(高い授業料であった)

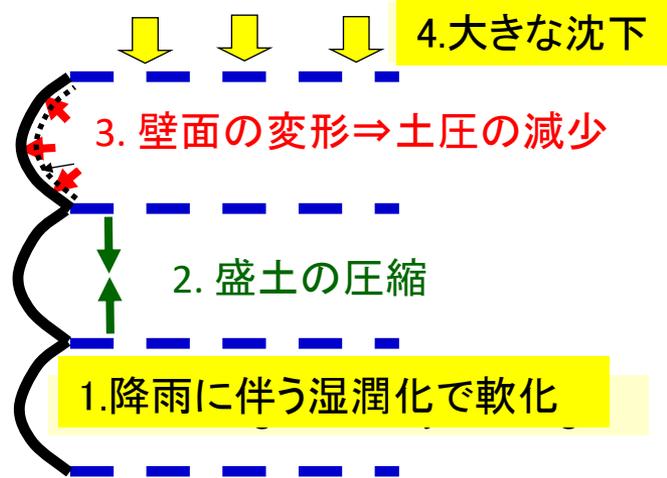
## 解決策は？



### 巻き込み式壁面

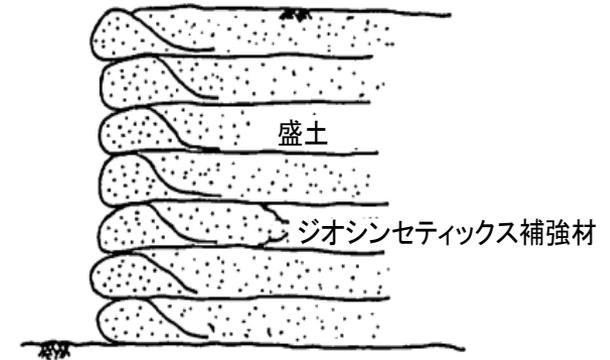


連鎖現象: 1→2→3→2→3  
→2→3 ..... ⇒4. 大変形



# 初期のジオシンセティック補強土(GRS)擁壁の課題とその解決 1/3

- ・壁面が巻き込み式GRS擁壁は、  
低建設費の仮設構造物としては、一定の実用性
- ・一方、仮設では、盛土の締固めと排水工が  
不十分な場合が多い



実際に、

- ①壁面での変形大⇒擁壁全体の変形大
- ②壁面の火災・機械的外力・紫外線に対する耐久性が低い  
⇒永久重要構造物としては不適と認識された！

①に対する従来の説明:

これは、ジオシンセティック補強材は、金属製補強材と比較すると剛性が低く、かつクリープしやすいため、である。

⇒しかし、上記は俗説であり、この現象が問題となった事例は知らない！

実際は、

- (1)盛土は引張強度・剛性はゼロであるので、一定の引張剛性があるジオシンセティック補強材を面状で密に配置すれば、盛土の引張ひずみを抑制できる。
- (2) ジオシンセティック補強材には、クリープによる長期強度低下はない(次節)

① + ②に対する方策: 壁面工の剛性・一体性を高める ⇒ 各種の試みと提案

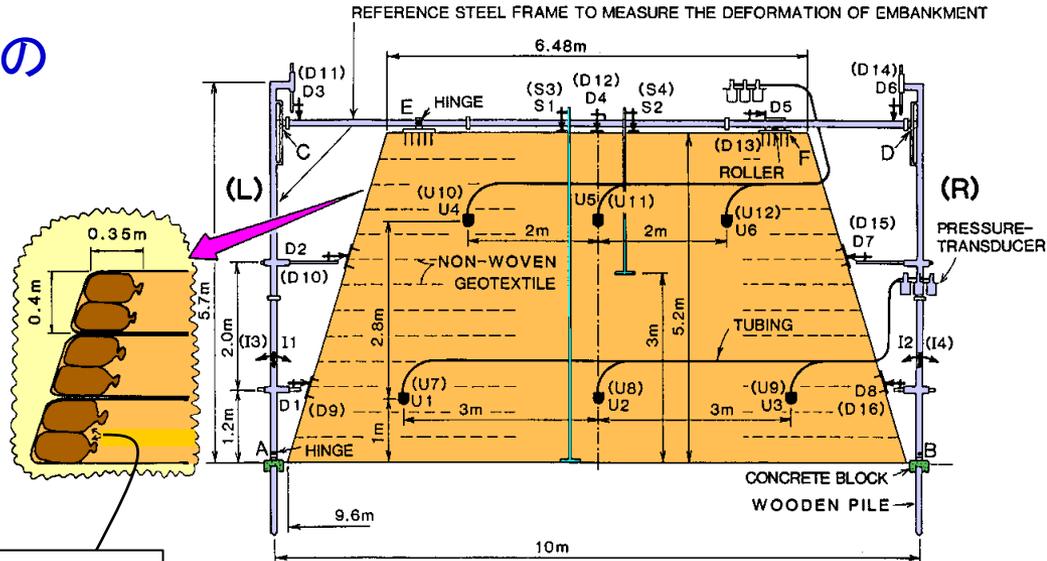
# 東大生研千葉実験所での盛土No. 2

- 1984年建設
- 関東ローム盛土(No.1盛土と同じ)
- 壁面背後に、各土層に2段の土嚢を置き補強材で巻き込んで、
- ①壁面近くでの締固めを容易にして、
- ②壁体の安定化



⇒現在のRRR-GRS擁壁の仮壁面工の原型

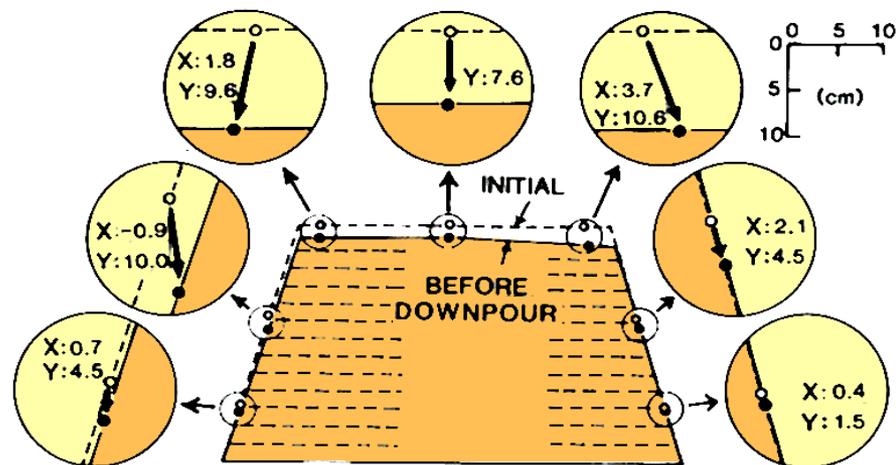
- 千葉No. 1よりも若干大きな規模



盛土材の関東ロームを詰めた  
不織布製の土嚢

CROSS-SECTION 1  
 D1~D8 : DISPLACEMENT TRANSDUCERS  
 S1~S2 : DISPLACEMENT TRANSDUCERS FOR SETTLEMENT  
 U1~U6 : TIPS FOR PORE WATER PRESSURE  
 I1~I2 : INCLINOMETERS

a) 1984年3月 - 1985年10月の変形



土嚢を用いたことによって:

- 壁面近くの締固めが容易になった
  - 壁面背後の盛土が安定化
- ⇒ 盛土の長期変形は非常小さくなった

さらに、

人工降雨試験(天端から、70 m<sup>3</sup>の水を供給)

b) 掘削によって露呈した断面, 1986

⇒ 両壁面ともに、安定を保った

(補強材が非常に短い右側壁面は  
若干転倒変位したが)

最上部3段の土層を  
撤去している。



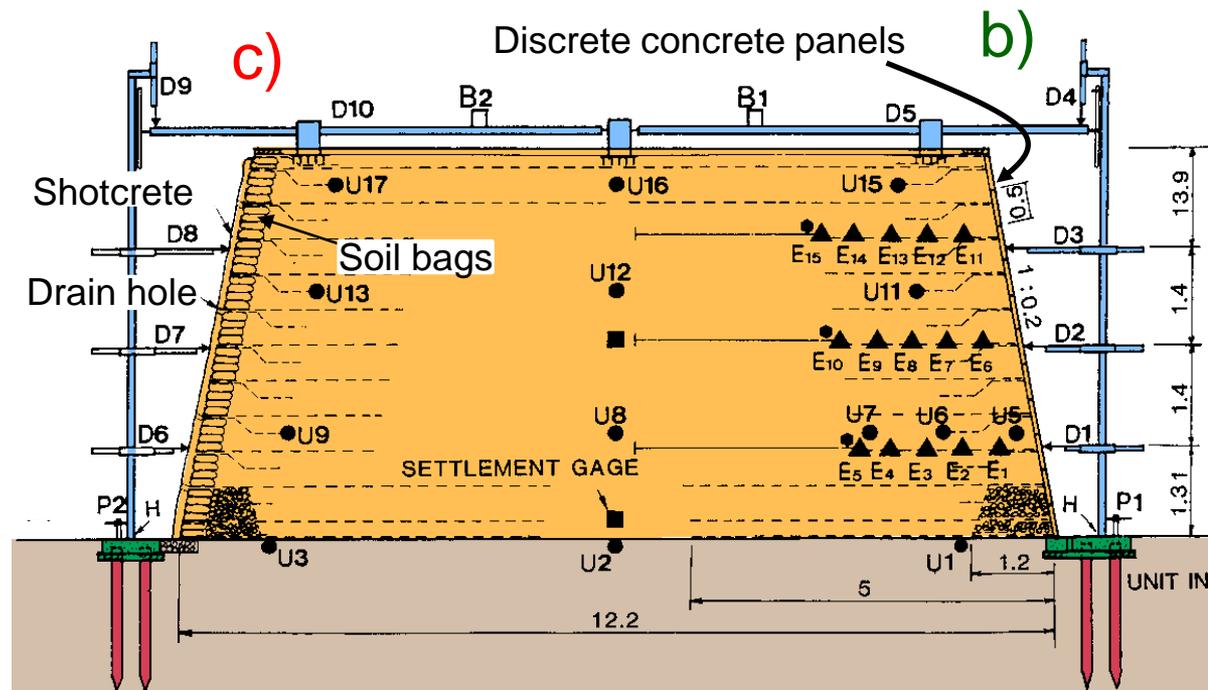
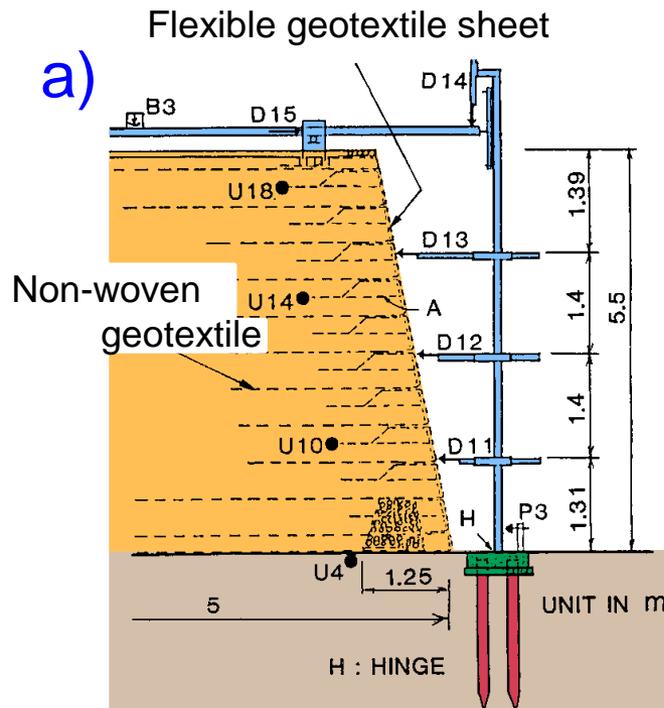
# 東大生研 千葉実験所での盛土 No. 3

- 1986年建設、関東ロームNo.1盛土、No.2盛土と同じ
- 壁面工の剛性の効果を確認するために、以下の三形式の壁面工

a) 補強材巻き込み式(土嚢無)

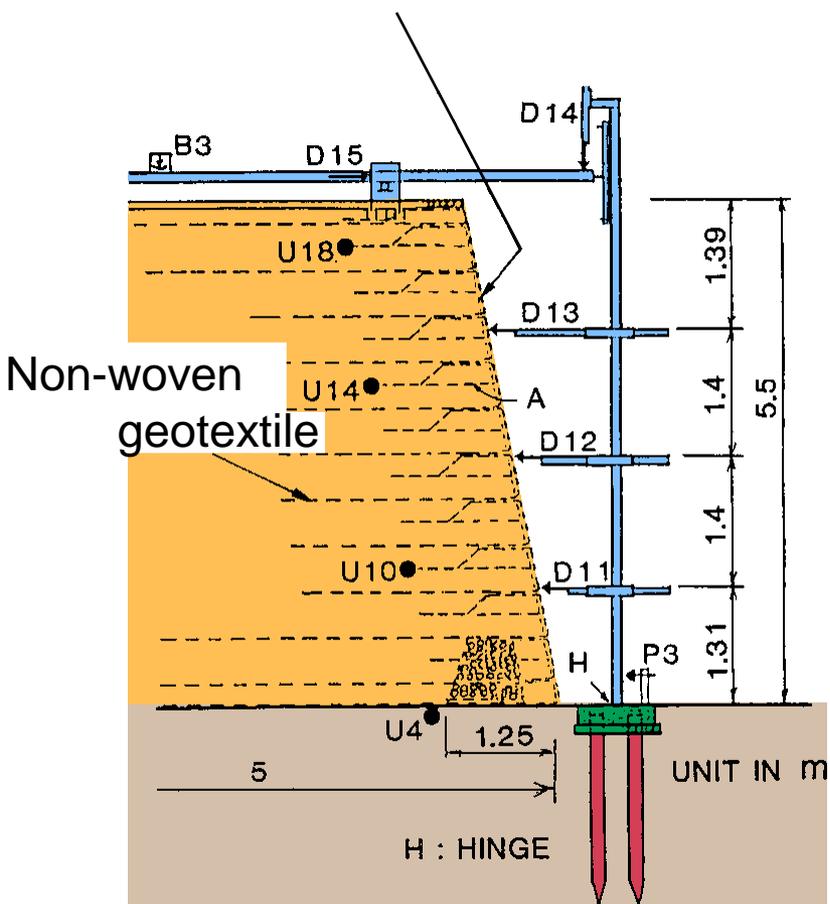
b) 分割パネル式(土嚢無)

c) 土嚢を補強材で巻き込み、厚さ8cmの吹付コンクリート(RRR GRS擁壁の原型)

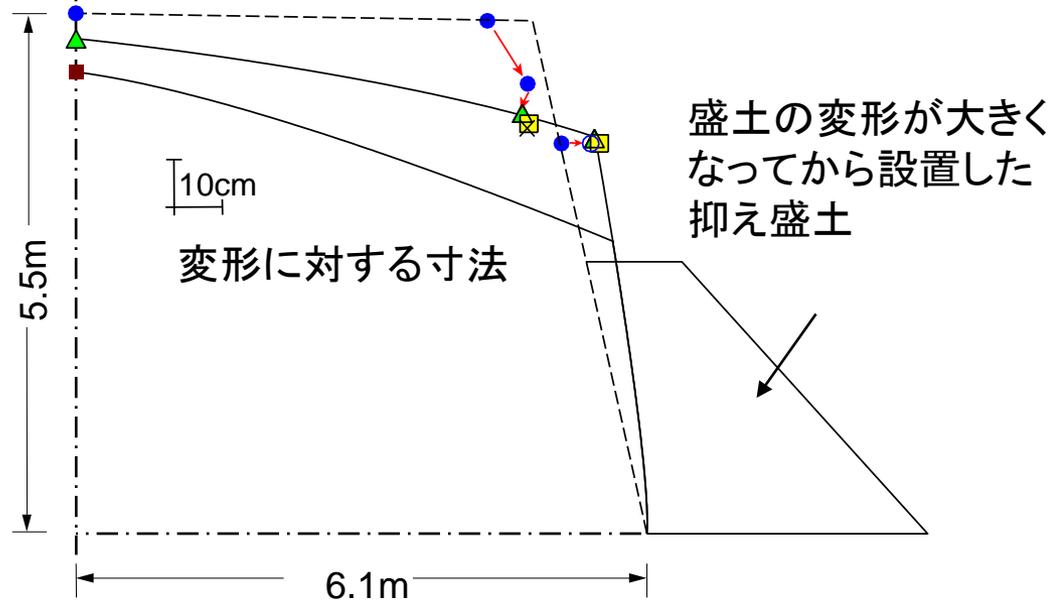


# 東大生研 千葉実験所での試験盛土 No. 3

a) 補強材巻き込み式(土嚢無)

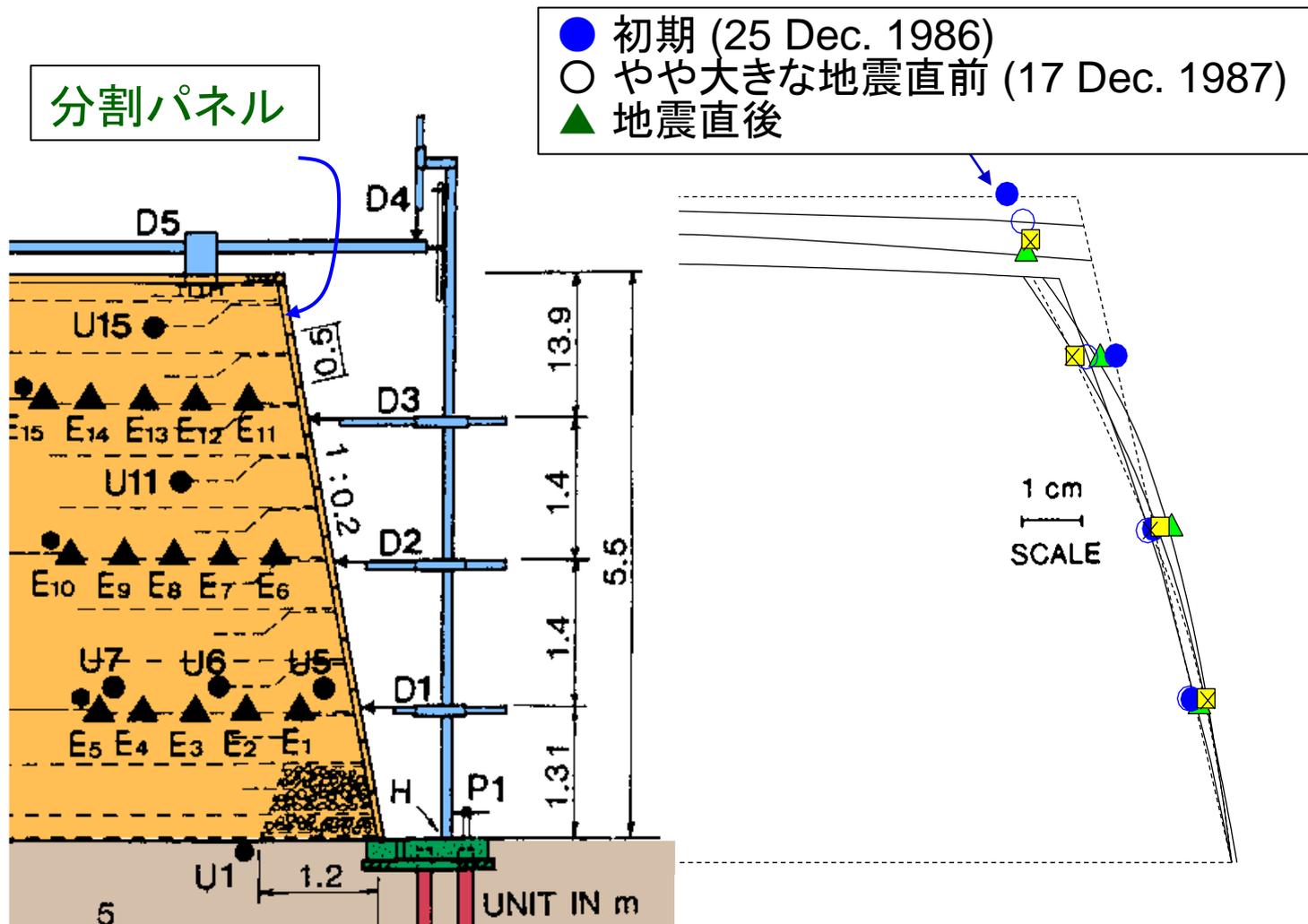


大変形



## b) 分割パネル式壁面工(土嚢無):

- a) 補強材巻き込み式(土嚢無)よりも、変形は相当小さい、  
しかし、許容変形が小さい重要永久構造物としては、依然として変形が大きい
- また、施工性が悪い(パネル背後の盛土の締固めとパネルの設置が難しい)

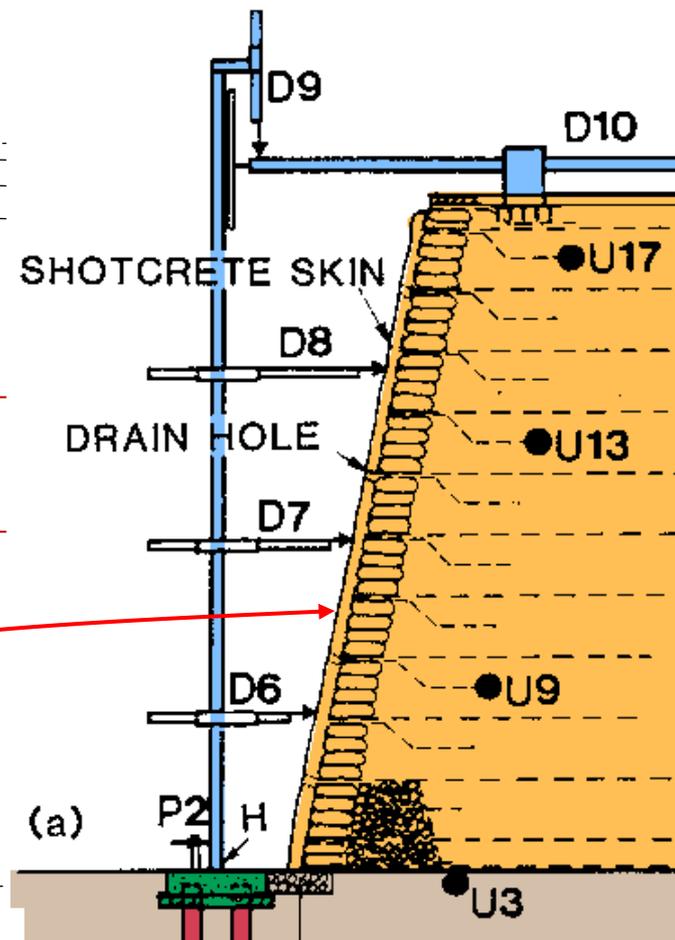
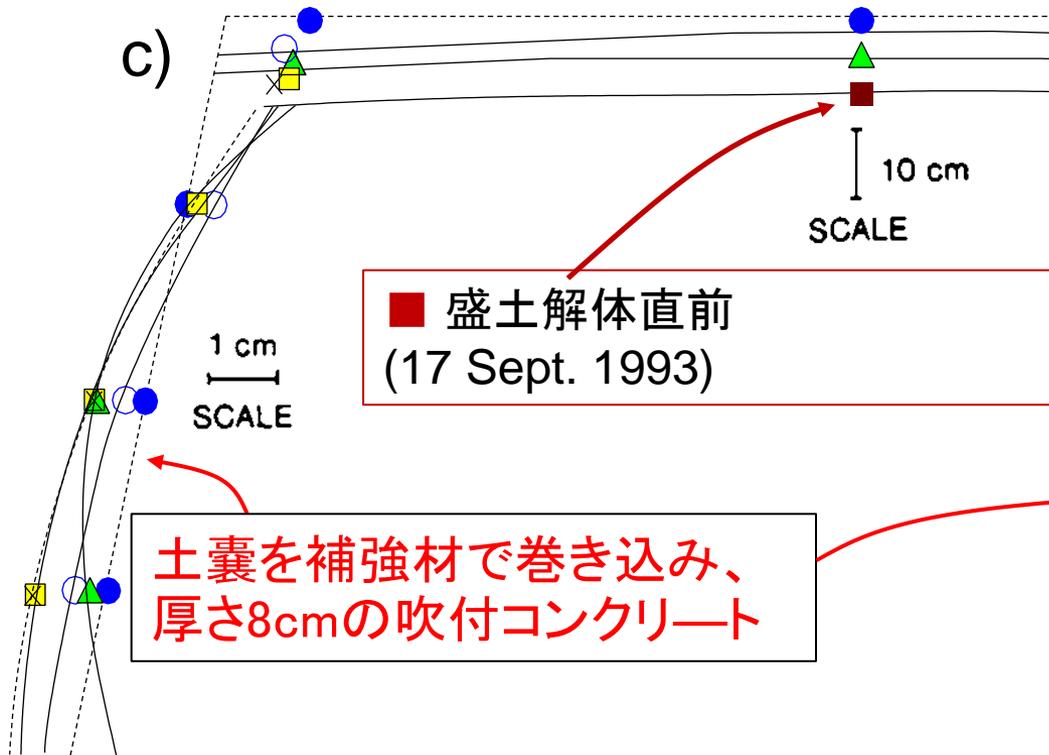


c) 土嚢を補強材で巻き込み、厚さ8cmの吹付コンクリートからなる壁面工

b) 分割パネル壁面工よりも変形は小さい

しかし、許容変形が小さい重要永久構造物としては、依然変形が大きい  
また外観が悪い

- 初期 (25 Dec. 1986)
- 比較的大きな地震直前 (17 Dec. 1987)
- ▲ 地震直後



c) 土嚢を補強材で巻き込み、厚さ8cmの吹付コンクリートからなる壁面工

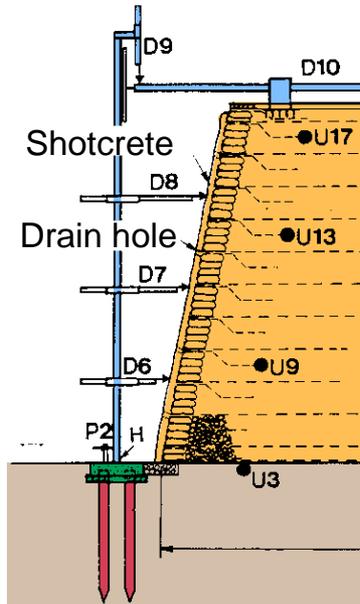
b) 分割パネル壁面工よりも変形は小さい

しかし、許容変形が小さい重要永久構造物としては、変形が大きい  
また外観が悪い

これらの問題を、剛な一体壁面工を段階施工することで解決

⇒ RRR GRS擁壁

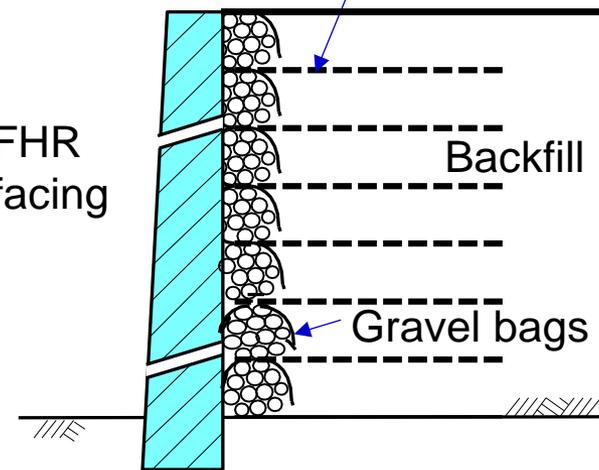
Geogrid



改善



FHR facing



これらを確認するために、鉄道総合技術研究所で試験盛土

# 鉄道総合技術研究所での試験盛土(建設1987年 - 1988年)

JR No. 2 (関東ローム),  
高さ5 m

JR No.1 (稲城砂),高さ 5 m  
ジオグリッド (破断強度= 27.4 kN/m)

剛な一体壁面工建設前

完成した剛な一体壁面工

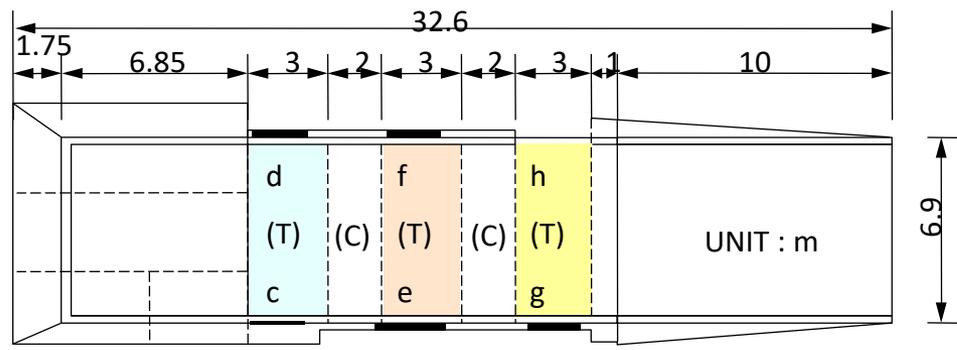


# JR No.1 (稲城砂)

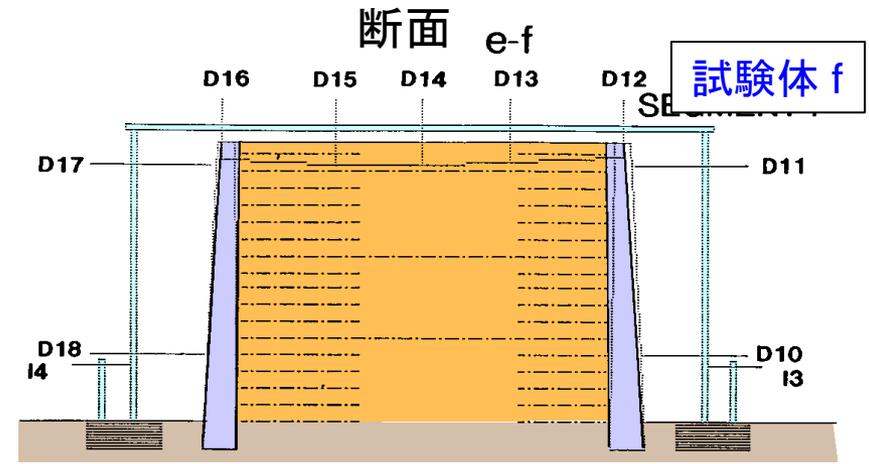
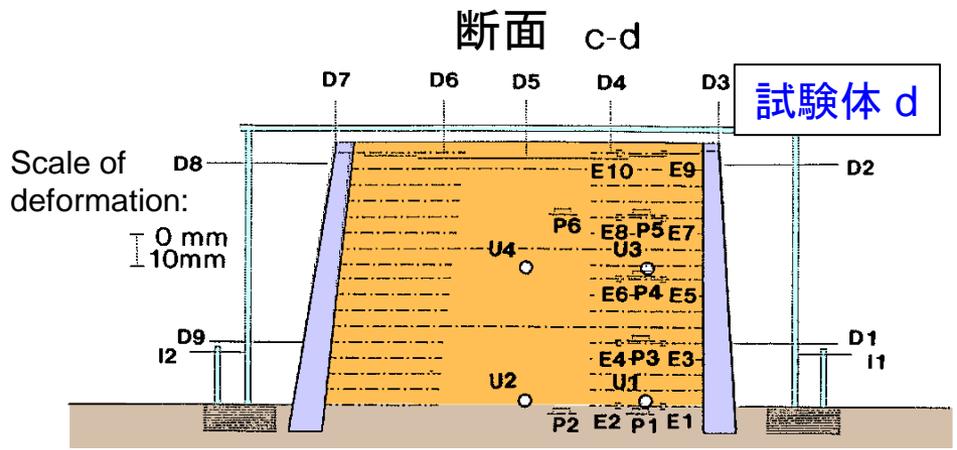
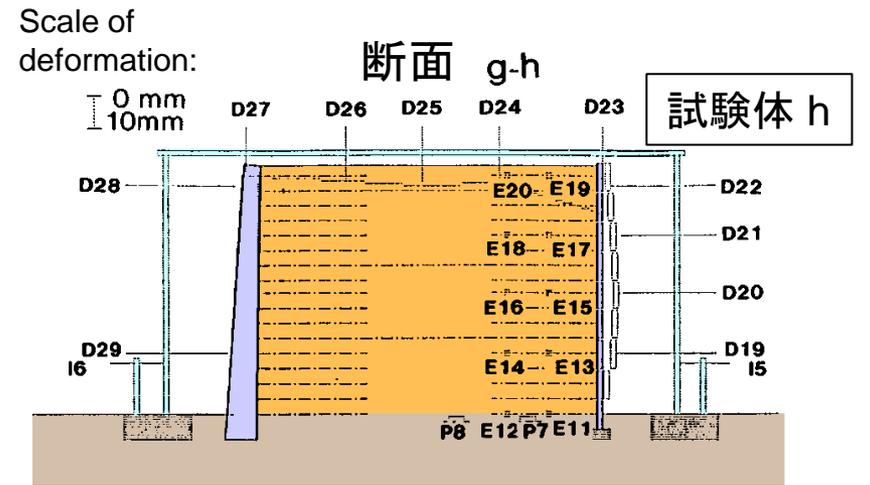
## 2年間の長期挙動

全ての壁面では補強材で巻き込んだ土嚢を配置):

- 試験体 h: 分割壁面工 ⇒ 比較的大きな変形
- 他の試験体: 剛な一体壁面工 ⇒ 全て非常小さい変形



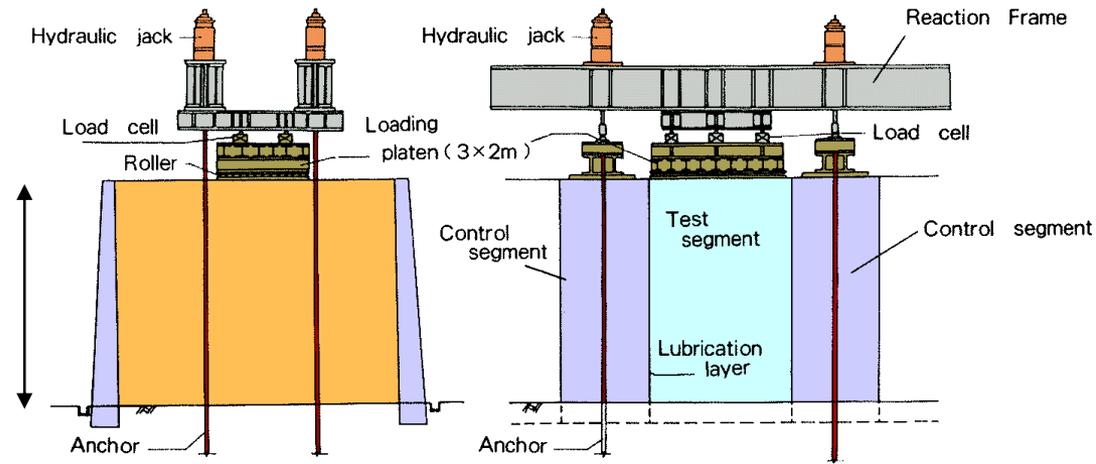
(T)試験領域; (C)非試験領域



# JR No.1 (稲城砂)

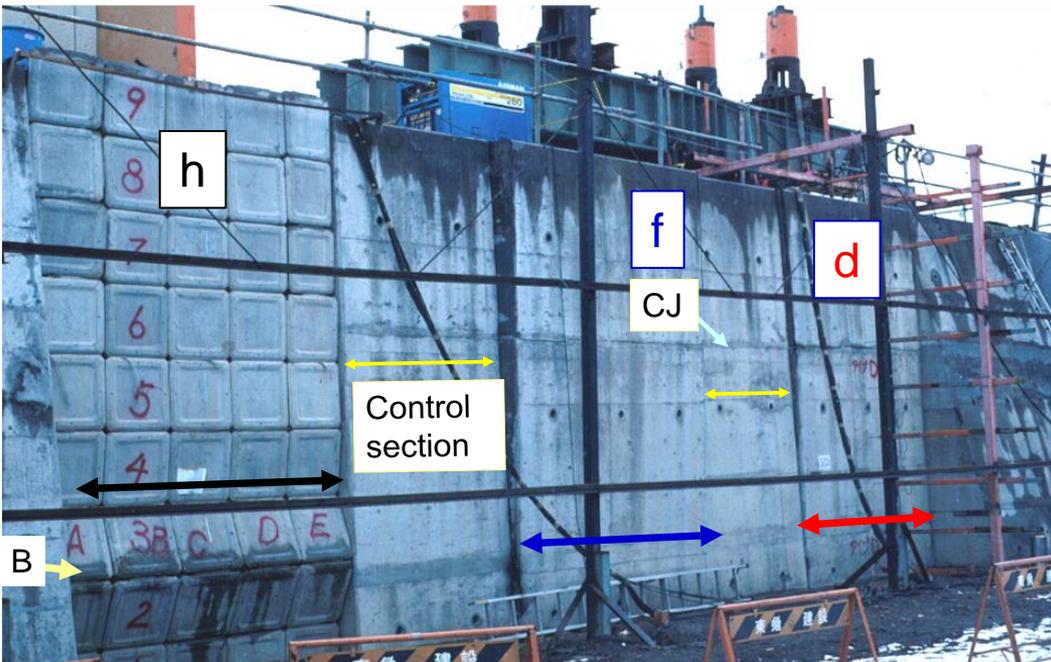
## 天端での鉛直載荷試験

壁高= 5 m



断面

前側から



試験体 h, f & d

h: 補強材長L= 2m  
分割パネル壁面工  
B: 座屈

f: 補強材長L= 1.5m  
一体壁面工(無筋)

d: 補強材長L= 2m  
一体壁面工(無筋)  
CJ: 打ち継ぎ目

# 試験体hの断面（掘削によって露出）

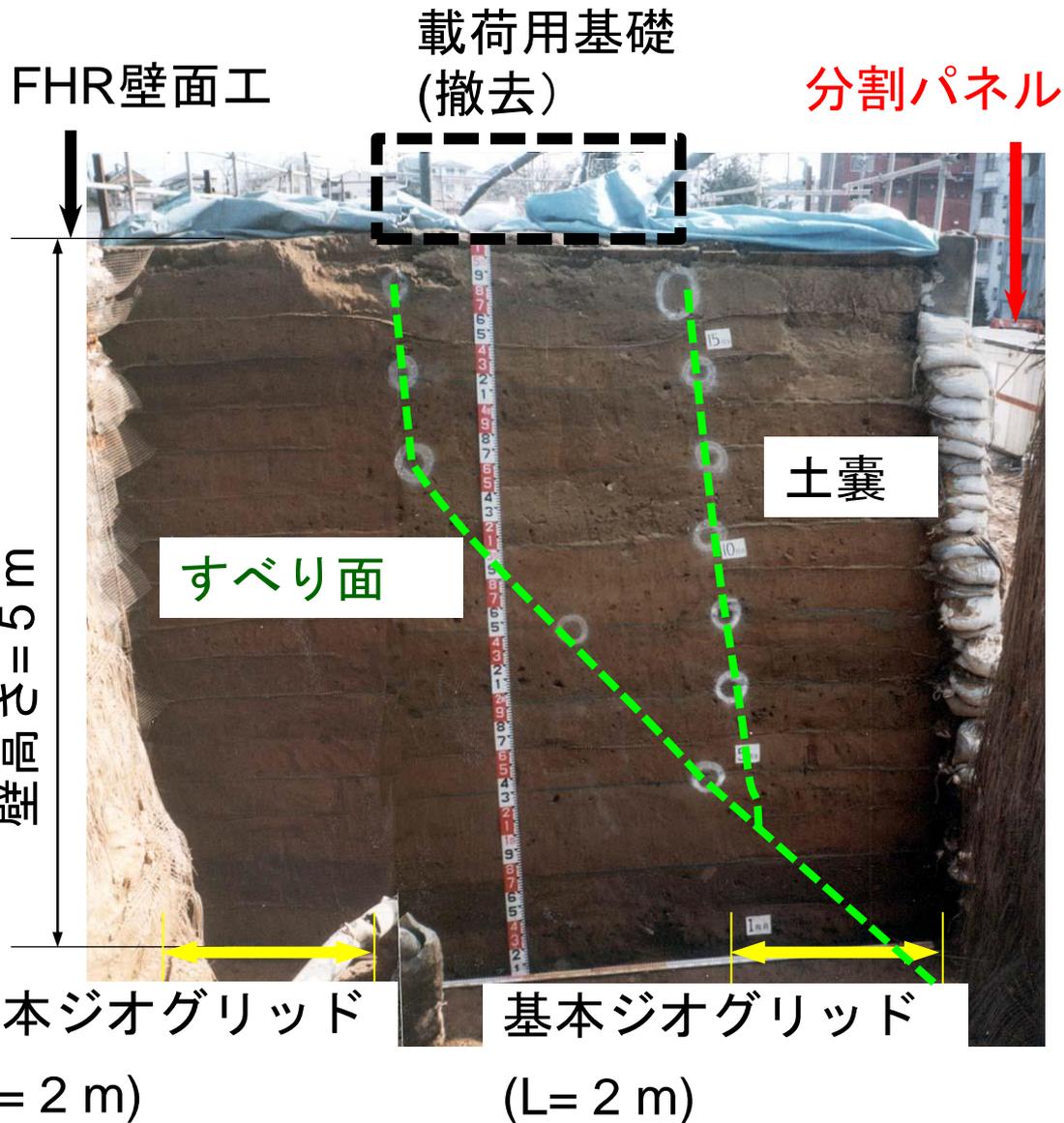
壁高 = 5 m

試験体 h



変位に対する寸法 10 cm

盛土断面はサクションで安定

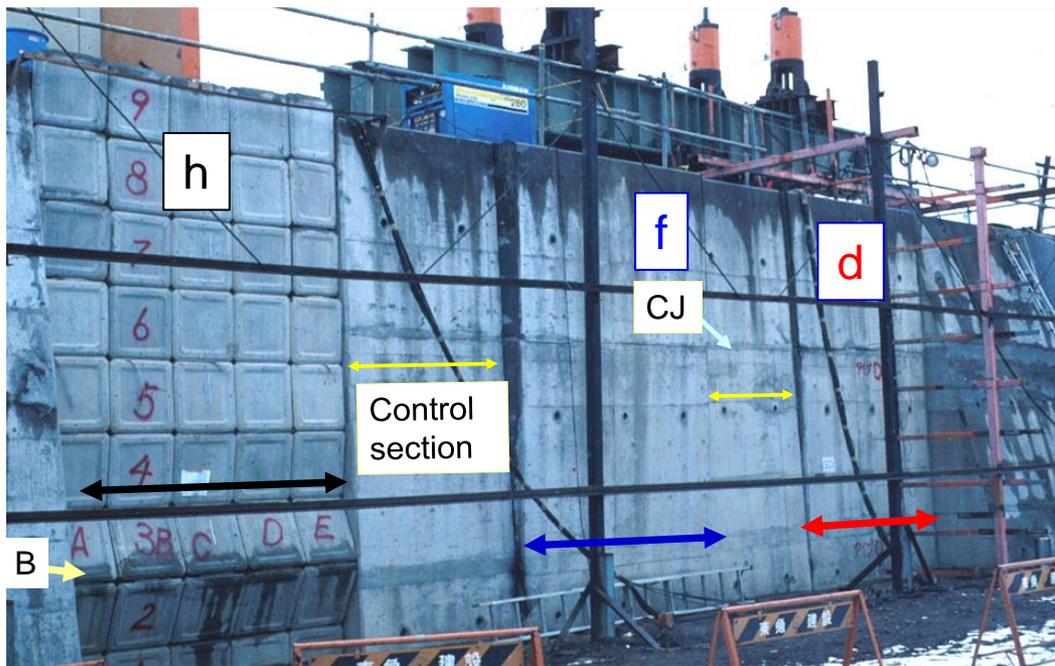


試験体h (分割パネル & ジオグリッド長  $L=2\text{ m}$ )

- 壁面工は座屈、最も変形が大きい

試験体f (一体壁面工 &  $L=1.5\text{ m}$ );

- h よりも安定 (ジオグリッドは短い)

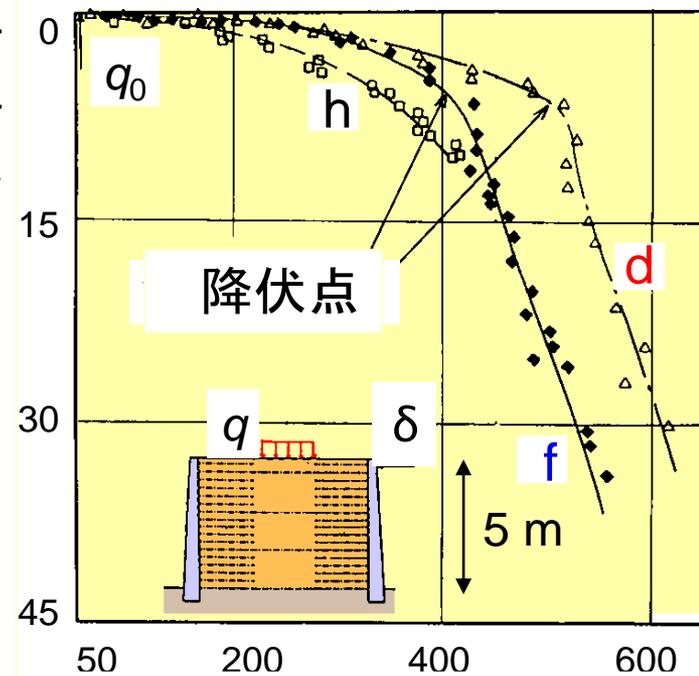


h: 補強材長  $L=2\text{ m}$   
分割パネル壁面工  
B: 座屈

f: 補強材長  $L=1.5\text{ m}$   
一体壁面工 (無筋)

d: 補強材長  $L=2\text{ m}$   
一体壁面工 (無筋)  
CJ: 打ち継ぎ目

壁面工上端水平変位,  $\delta$  (cm)



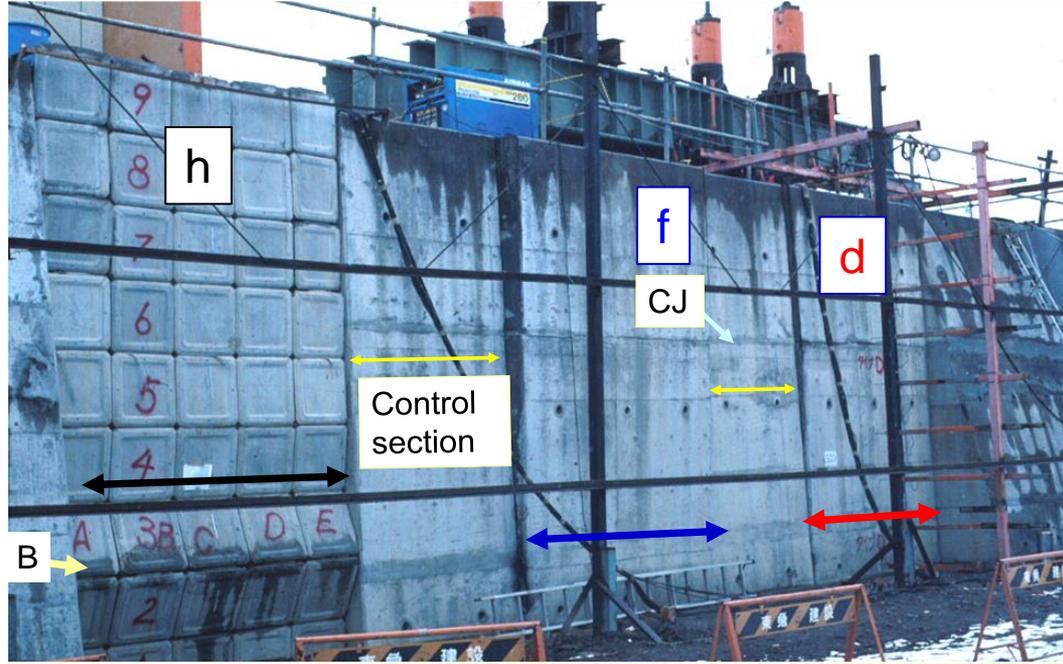
フーティング平均圧,  $q$  (kPa)

試験体 **d** (一体壁面工 & ジオグリッド長  $L=2\text{ m}$ ):

- **f** よりも安定 (ジオグリッドが長いから)
- **h** よりも安定 (壁面工の剛性が高いから).

しかし、壁面工は無筋コンクリートであったため、打ち継ぎ目 (CJ) が破損して変形が増大

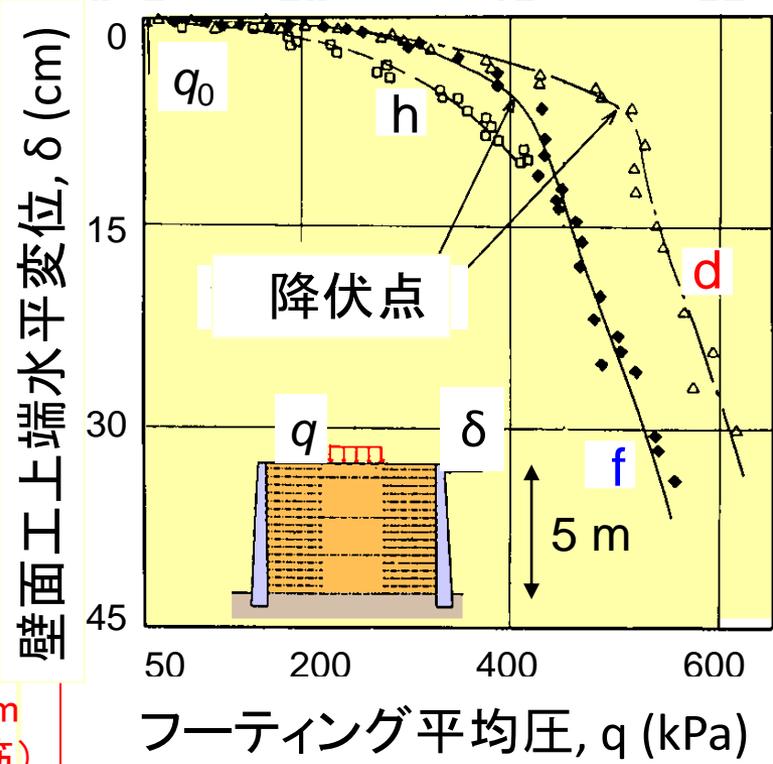
⇒ その後建設された FHR 壁面工は、全て少量の鉄筋で補強



**h**: 補強材長  $L=2\text{ m}$   
分割パネル壁面工  
**B**: 座屈

**f**: 補強材長  $L=1.5\text{ m}$   
一体壁面工 (無筋)

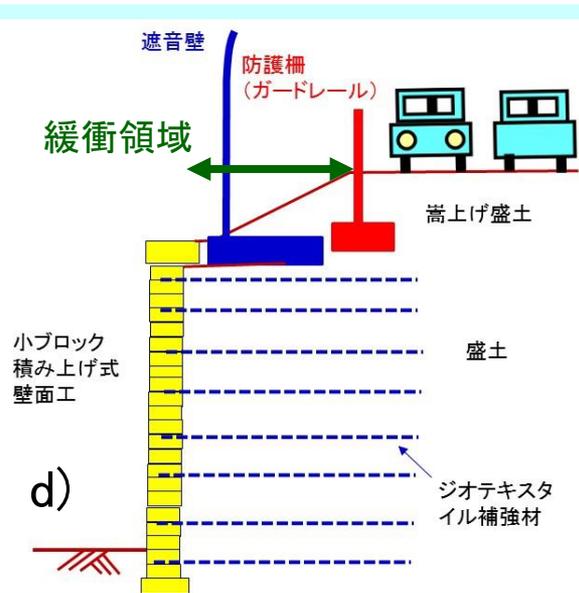
**d**: 補強材長  $L=2\text{ m}$   
一体壁面工 (無筋)  
**CJ**: 打ち継ぎ目



フーティング平均圧,  $q$  (kPa)

# 補強材と壁面工の特徴による補強土擁壁の分類、その変遷

壁面工の剛性 補強材の形状、材質	柔(大きな土圧は発揮できない)	剛(大きな土圧が発揮)
帯状、金属製	金属膜(skin)の壁面工、初期テールアルメ擁壁	分割RCパネルの壁面工、現在の標準的テールアルメ擁壁
面状(膜状あるいはグリッド状)、石油高分子材料	巻き込み式壁面のジオシンセティック補強土擁壁(図c)	分割RCパネル・ブロック式壁面工(図d)



## ジオグリッド補強材 + ブロック式壁面工:

- ・壁面工には一定の剛性があるのでGRS擁壁は安定化し、施工性も良いため、欧米で宅造盛土・道路等で普及
  - ・しかし、壁面工の剛性・一体性は高くない
    - ⇒ 壁面工のすぐ裏の盛土は安定性・剛性が不足して、道路・鉄道等の敷設は不可(緩衝領域が必要)
    - ⇒ 壁面工を構造物の基礎構造物として利用は不可
  - ・壁面工は盛土と同時に建設するので、建設中・建設後に地盤沈下が生じると、壁面工・助教材連結部や壁面工は損傷
- これらの課題は、剛な一体壁面工を盛土建設後に施工することで解決

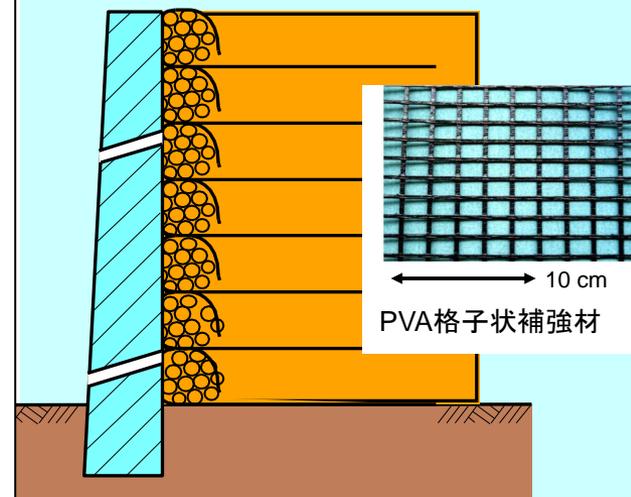
# 補強材と壁面工の特徴による補強土擁壁の分類、その変遷

壁面工の剛性 補強材の形状、材質	柔(大きな土圧は発揮できない)	剛(大きな土圧が発揮)
帯状、金属製	金属膜(skin)の壁面工、初期テールアルメ擁壁	RCパネルの壁面工、現在の標準的テールアルメ擁壁
面状(膜状あるいは)	巻き込み式壁面のジオン	剛な一体壁面工を持つジオンセティック補強土壁、剛一体壁面工GRS擁壁(図e)

**1-3: 全ての形式のGRS擁壁に共通した条件**  
**4 & 5: 剛一体壁面工を持つGRS擁壁の特徴**

- このGRS擁壁は、以下の条件を満足し、許容変形が小さく高い安定性が必要な永久重要構造物として成立！
- 1. 引き抜けない格子状補強材を密(鉛直間隔30cm)で適切な長さで配置
- 2. 盛土の十分な締固め
- 3. 十分な排水設備
- 4. 剛性が高い一体の壁面工の背面に補強材を連結  
→ 様々な効果と効用 (次に説明)
- 5. 盛土建設による支持地盤と盛土の変形が終了後、壁面工を補強材と良く連結して建設(次章で説明)

e) 剛一体壁面工GRS擁壁

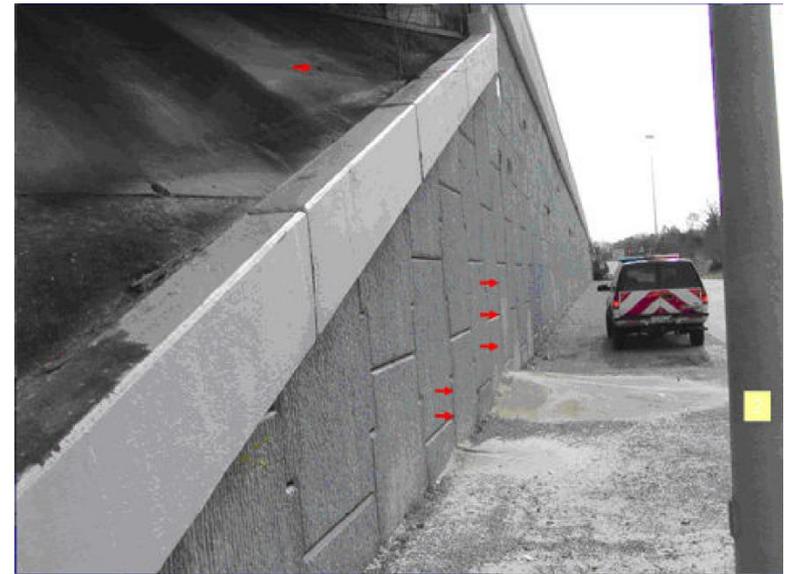


# 剛で一体な壁面工の効用-1

壁面工は一体なので、  
盛土材は流出しない



分割パネル式壁面工では、乾燥あるいは飽和した細砂盛土材が流出する虞



Transportation research board of the national academics  
(2012): Assessing the long-term performance of  
mechanically stabilized earth walls, NCHRP Synthesis

Texas Department of Transportation:  
<http://www.txdot.gov/business/resources/specifications/retaining-wall.html>

## 剛で一体な壁面工の効用-2

剛で一体の壁面工に補強材が連結

⇒壁面工背面に大きな土圧が作用しうる

壁面工上端や壁面工直近の盛土に集中荷重が作用しても、変形は小さく、擁壁は安定

- ・壁面工の間近に鉄道・道路を敷設できる
- ・壁面工は、防音壁・電柱の基礎や橋台として活用できる

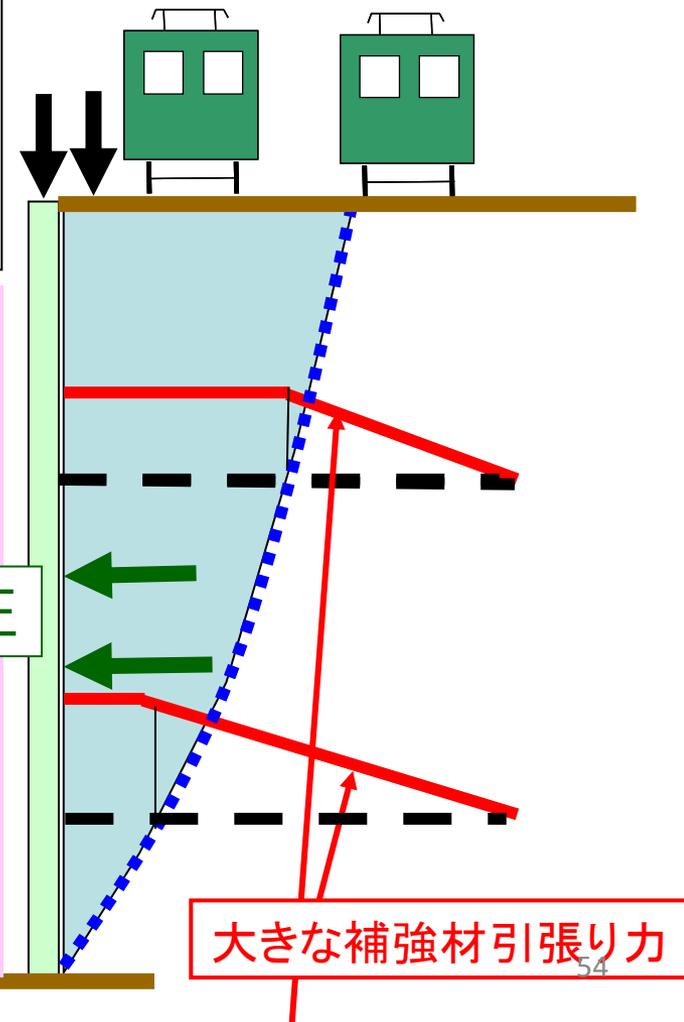
壁面に大きな土圧が作用しうる⇒

- ①主働域の拘束圧を、高い値に維持できる
- ②盛土下部でも補強材に十分大きな引張り力が発揮しうる

⇒主働域盛土の剛性・強度は、高い値に維持

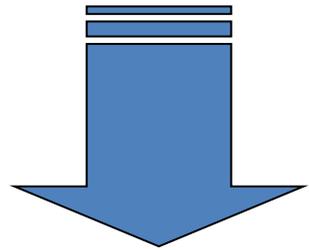
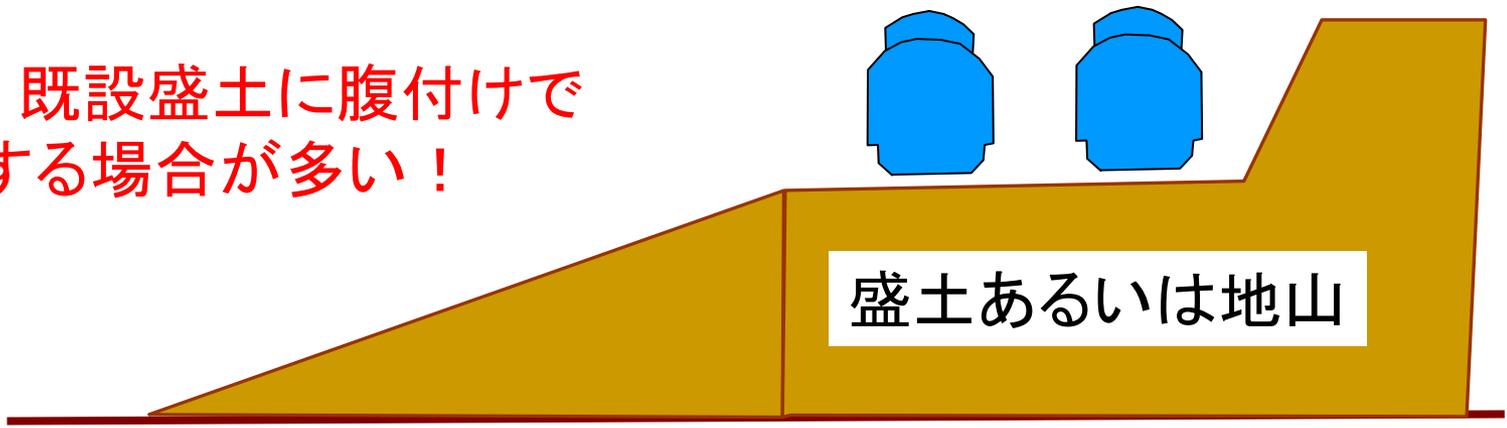
⇒補強土擁壁の変形を抑制

安定で好ましい状態

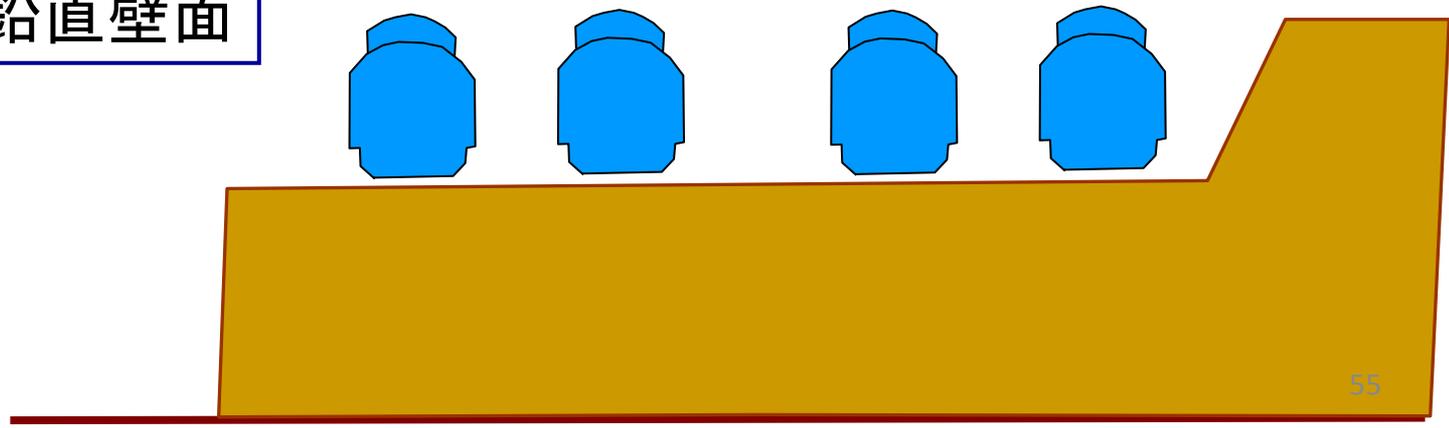


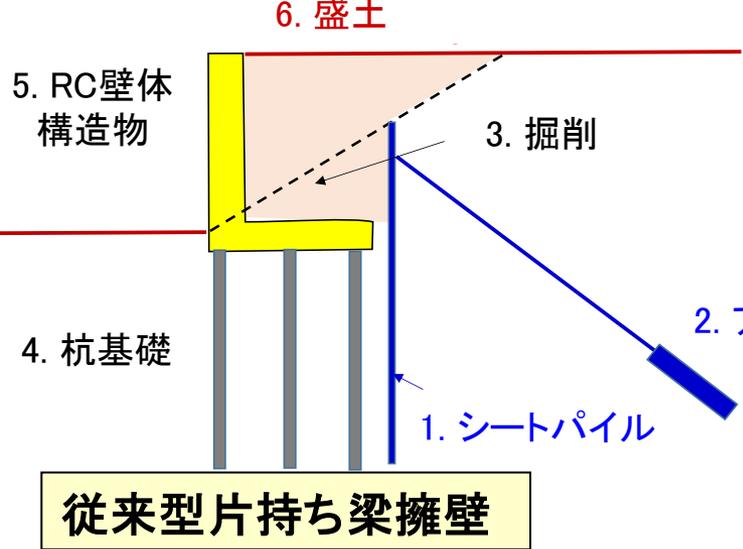
# 剛で一体的な壁面工の効用-3

我が国では、既設盛土に腹付けで擁壁を建設するケースが多い！

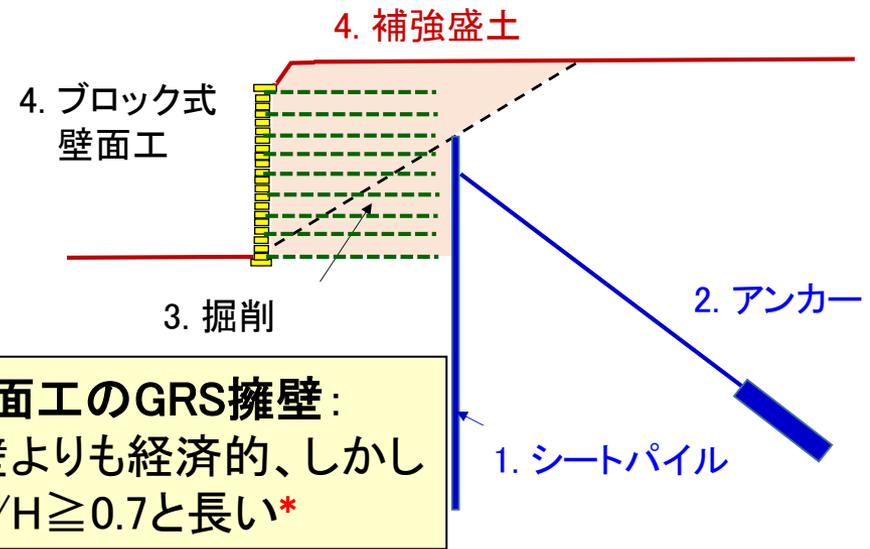


空間の創出  
安定な鉛直壁面





従来型片持ち梁擁壁

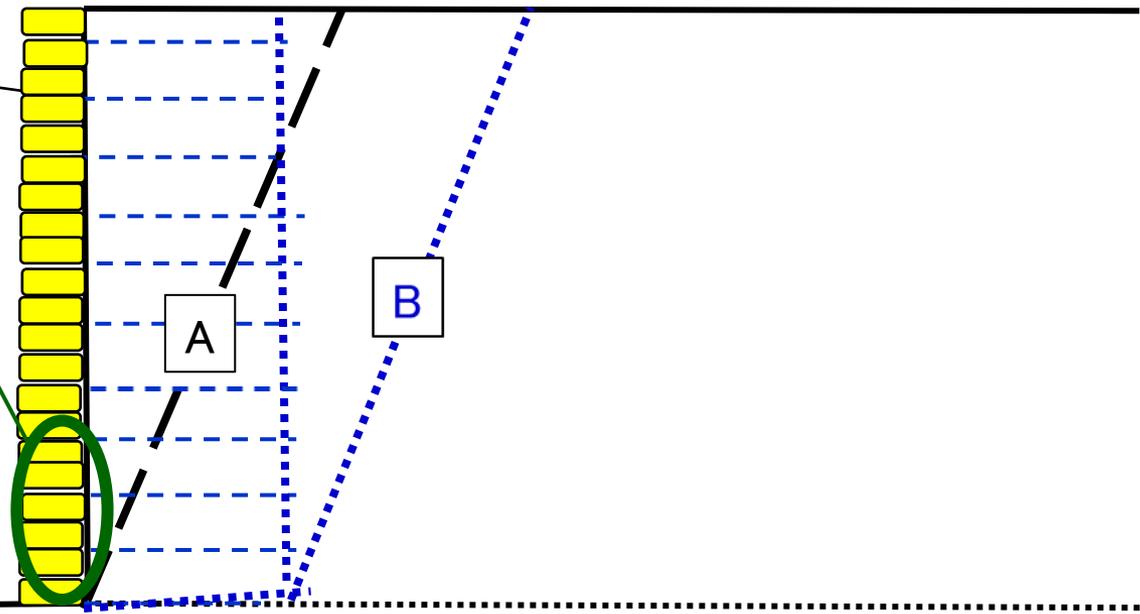


**ブロック式壁面工のGRS擁壁：**  
 従来型擁壁よりも経済的、しかし  
 補強材は $L/H \geq 0.7$ と長い\*

\*壁面工の剛性が不十分なために補強領域の  
 一体性が低いため(次頁で説明)

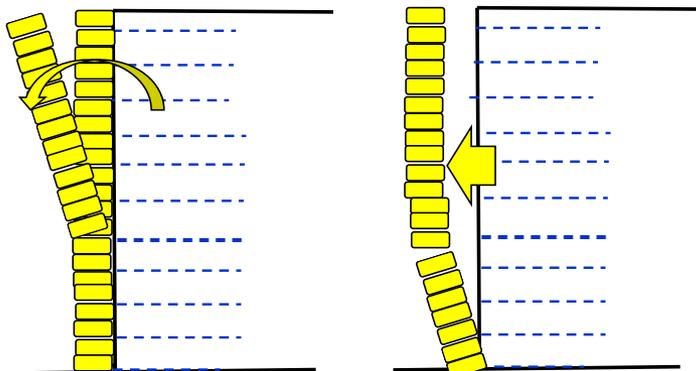
# ブロック式壁面工

地震時に転倒モードのために応力が集中⇒壁面工が抵抗できない虞⇒擁壁が転倒する虞

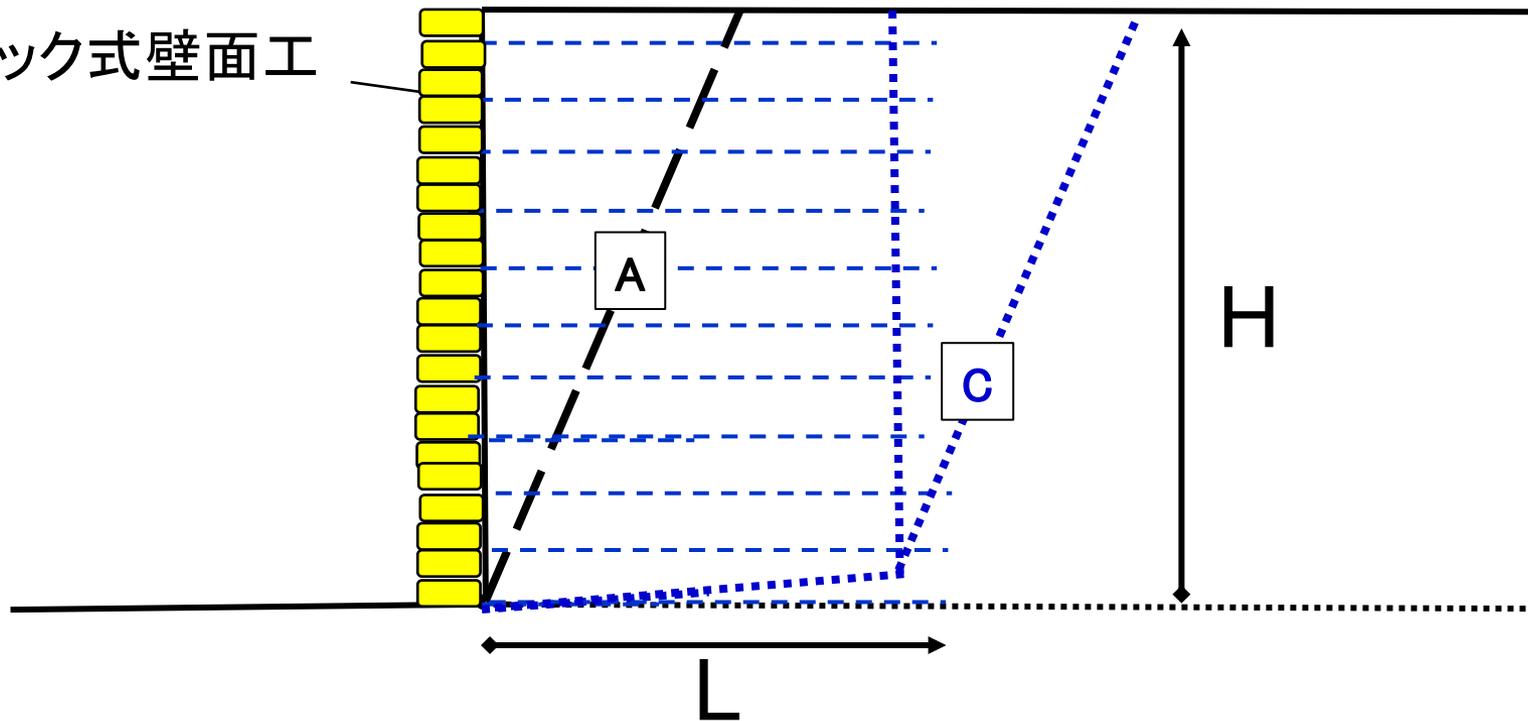


補強材が短いと、無補強盛土での主働すべり面Aを十分に横断せず、補強盛土でのすべり面Bは浅くなり、補強領域は滑動・転倒しやすくなる

壁面工の剛性が不足しているため、補強領域の一体性は低くなり、下図のように、補強領域内にすべりが生じて不安定化する虞もある



ブロック式壁面工

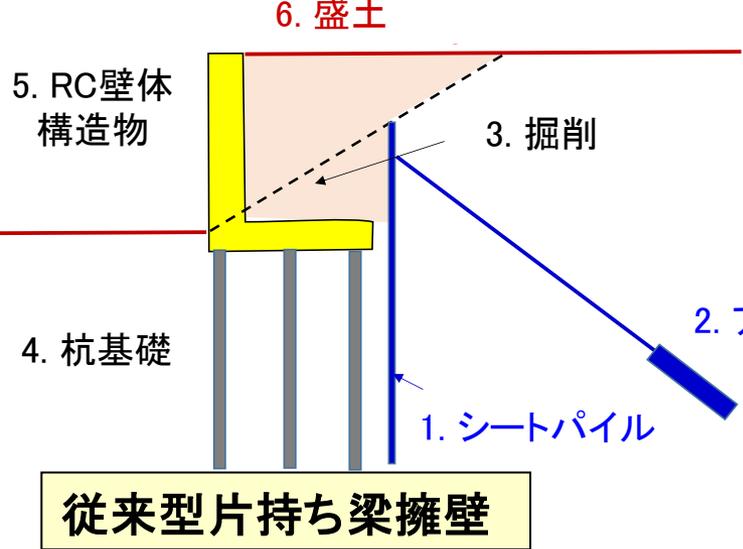


通常、補強材層を $L/H \geq 0.7$ と長くして、

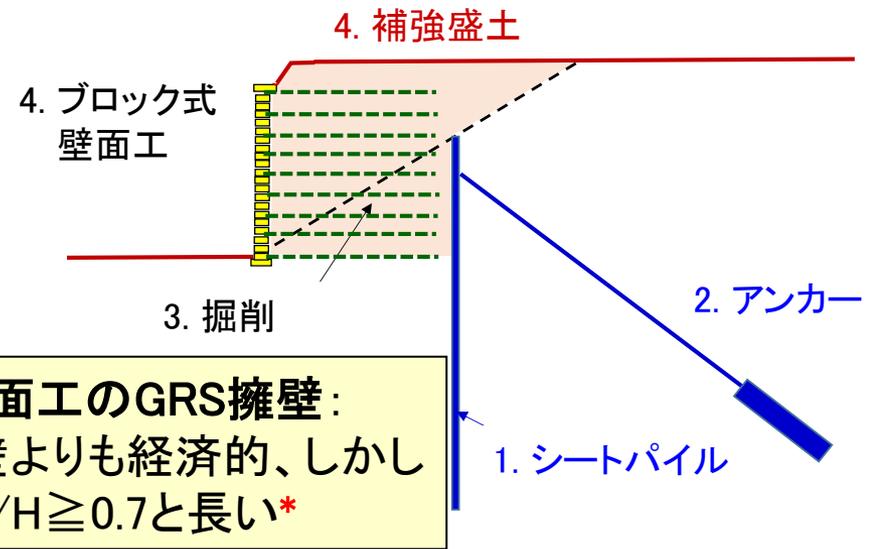
①潜在的な主働すべり面Aを十分に横断するようにし、

②補強盛土でのすべり面をCのように深くすることによって、

補強領域の一体性及び滑動と転倒に対する安定性を確保している

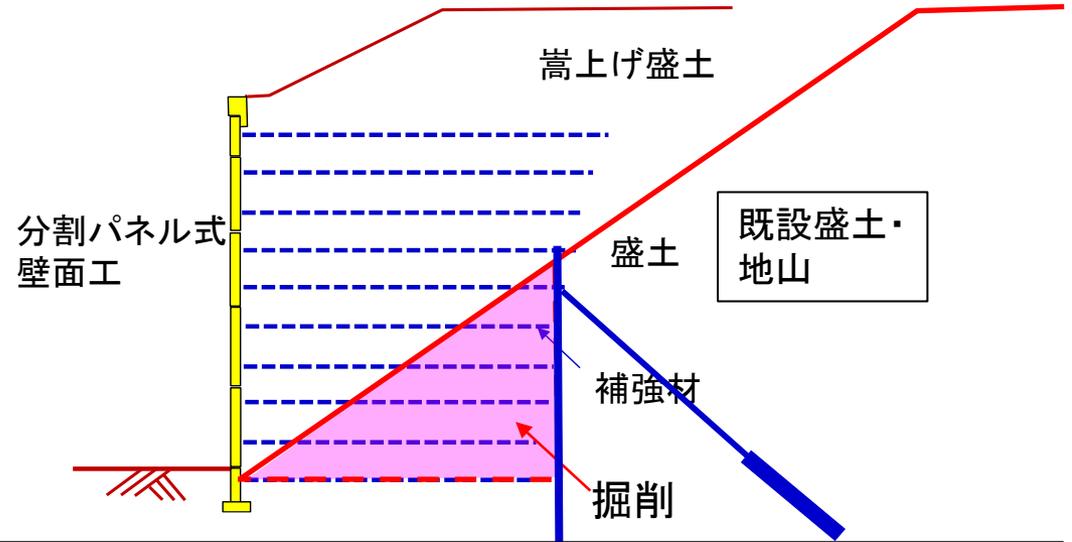


**ブロック式壁面工のGRS擁壁：**  
従来型擁壁よりも経済的、しかし  
補強材は $L/H \geq 0.7$ と長い\*

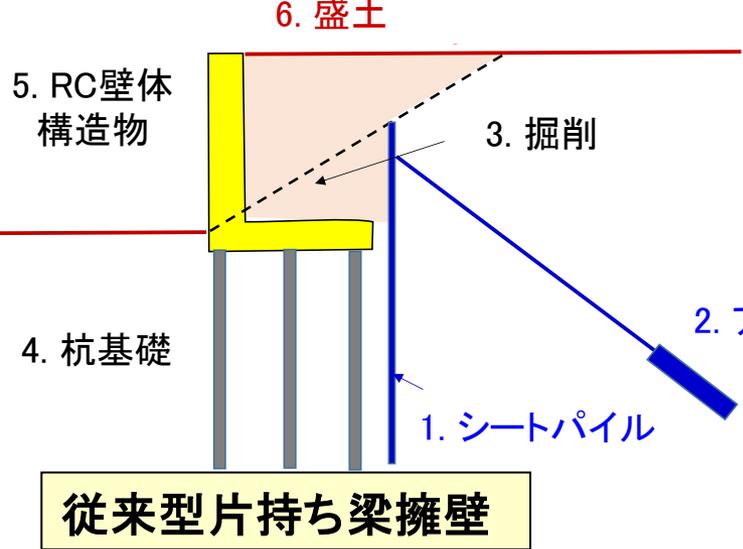


\*壁面工の剛性が不十分なために補強領域の  
一体性が低いため

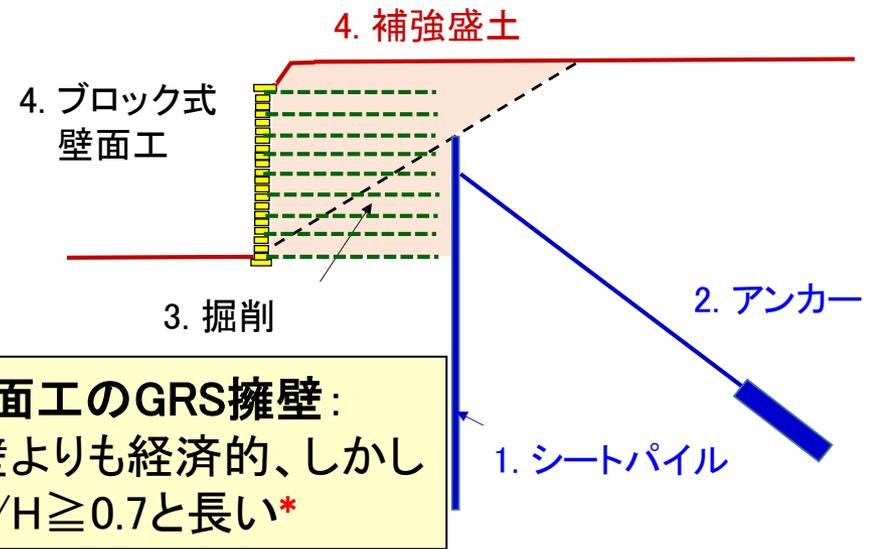
何れの工法も、既設盛土・地山  
の大規模な掘削、大掛かりな仮  
設構造物が必要となり、工事面  
積も広くなる  
⇒工期が長くなり経済性で問題



引き抜けやすい帯状金属製補強材と一体性が低い  
分割パネル式壁面工の補強土擁壁  
⇒引き抜けを防ぐため、補強材をかなり長くする必要



従来型片持ち梁擁壁

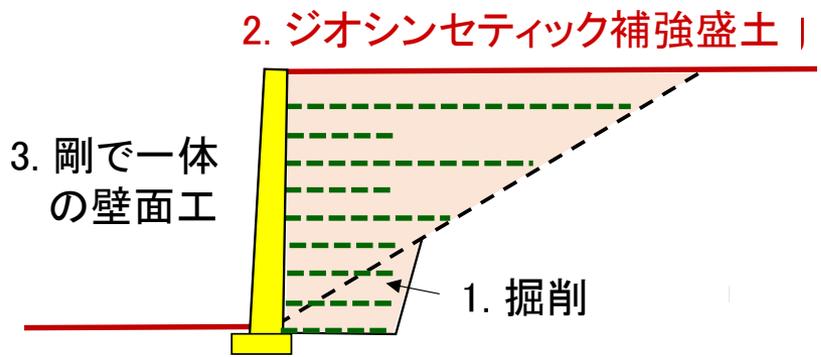


ブロック式壁面工のGRS擁壁：  
従来型擁壁よりも経済的、しかし補強材は $L/H \geq 0.7$ と長い\*

\*壁面工の剛性が不十分なために補強領域の一体性が低いため(次頁で説明)

上記の工法に対して、

剛な一体壁面工を有するGRS擁壁  
・盛土下部での補強材を短くできる(メカニズムは次頁以降で説明)



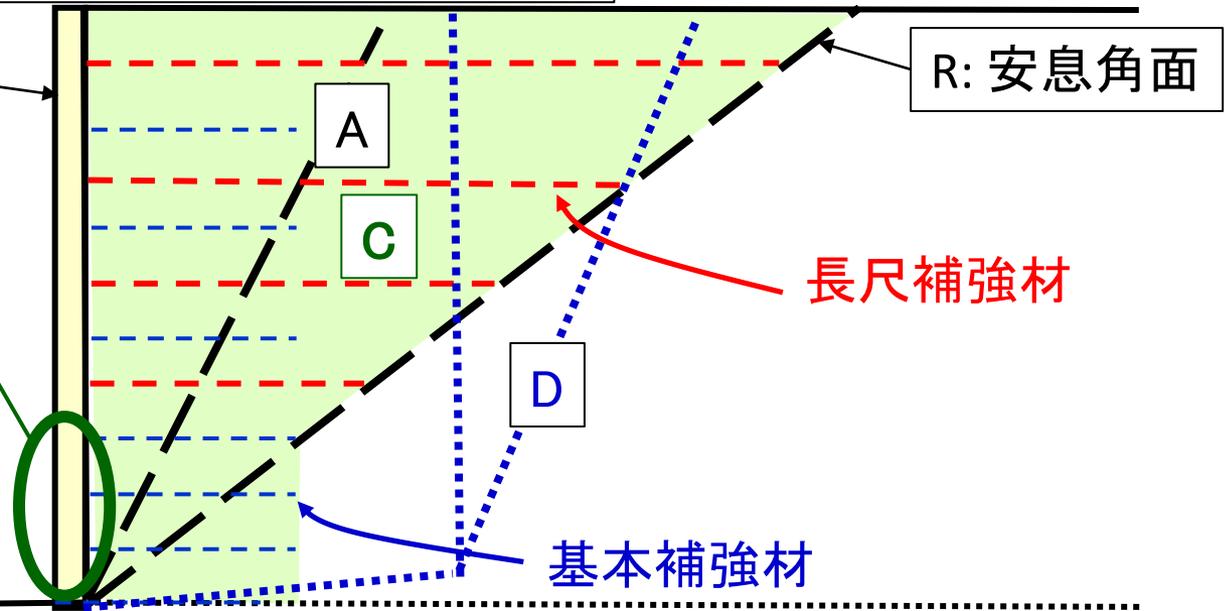
既設盛土の掘削量が縮小し、仮設構造物も不要となる  
⇒ 工期が短縮され、工事面積が限定され、非常に経済的になる。

# 剛一体壁面工を持つGRS擁壁の場合は・・・

剛で一体の壁面工

R: 安息角面

地震時に転倒モードのために応力が集中しても、剛な一体壁面工は抵抗できる  
⇒ つま先立ちが出来て転倒しにくくなる



短い基本補強材層は、盛土上部では潜在主働すべり面Aを十分に横断できない。  
そこで、

1) 安息角面Rまで長尺補強材層を配置

⇒ 補強領域はCのように拡大し、すべり面はDのように深くなる

2) 剛で一体の壁面工を全補強材層と連結すれば、

局所破壊が抑制されて、「壁面工プラス補強領域C」は一体化

⇒ 盛土上部で長尺補強材に発揮される大きな引き止め力は、補強領域下部に伝達

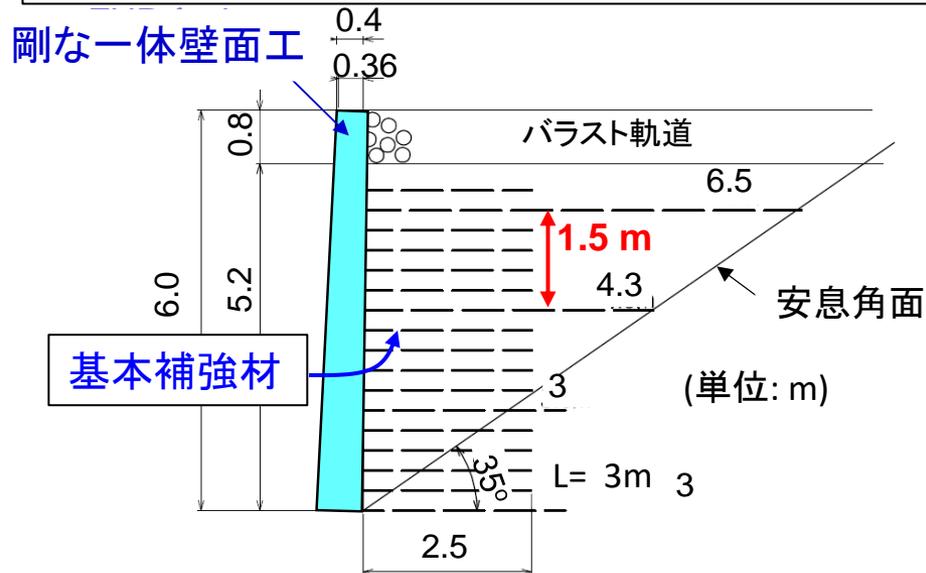
⇒ 一体となった「壁面工プラス拡大した補強領域C」は、転倒・滑動しにくくなる。

また、せん断変形も抑制される

⇒ 盛土底部の補強材が短くても、強い地震荷重に対しても安定(模型実験、安定解析で確認)

# 現在の設計法

(鉄道構造物等設計標準・同解説)

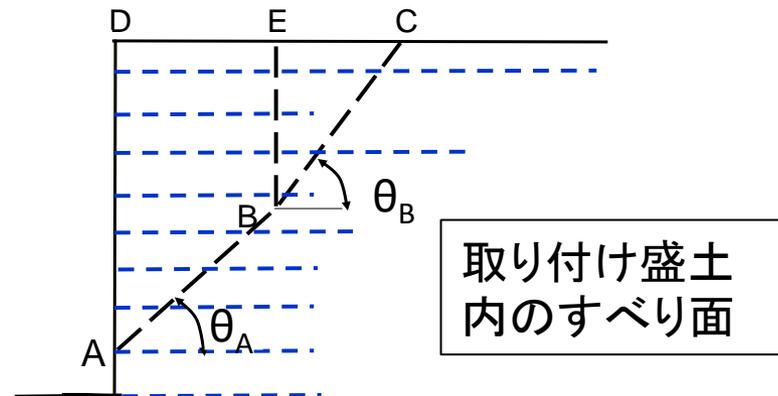


基本補強材の最小長さは、1), 2), 3)の最大値:

- 1) 壁高の35 %
- 2) 1.5 m
- 3) 安定解析による必要長: レベル2設計地震

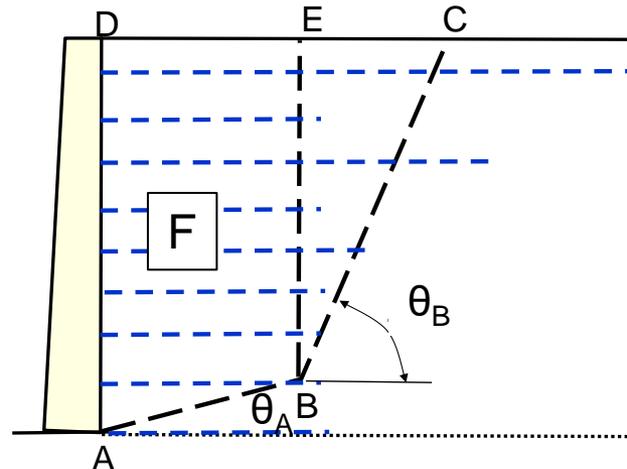
動に対して“二重楔すべり面に対して Newmark法で計算した滑動と転倒による残留変形” 及び“別途計算したせん断変形”の合計が許容値以下になる長さ

# Two-wedge安定解析(一般の場合)



試行すべり面の点AとB、角度 $\theta_A$ と $\theta_B$ を変化させて、滑動と転倒に対して最小の安全率を与える臨界すべり面を探索

剛な一体壁面工を用いることにより...



「壁面工と補強領域F」は一体として挙動し、点Aは必ず壁面工下端に位置する  
⇒安定性が向上

## L2設計地震動に対して耐震設計した例:

補強材の最小必要長Lは、

次の三つの値の**最大値**:

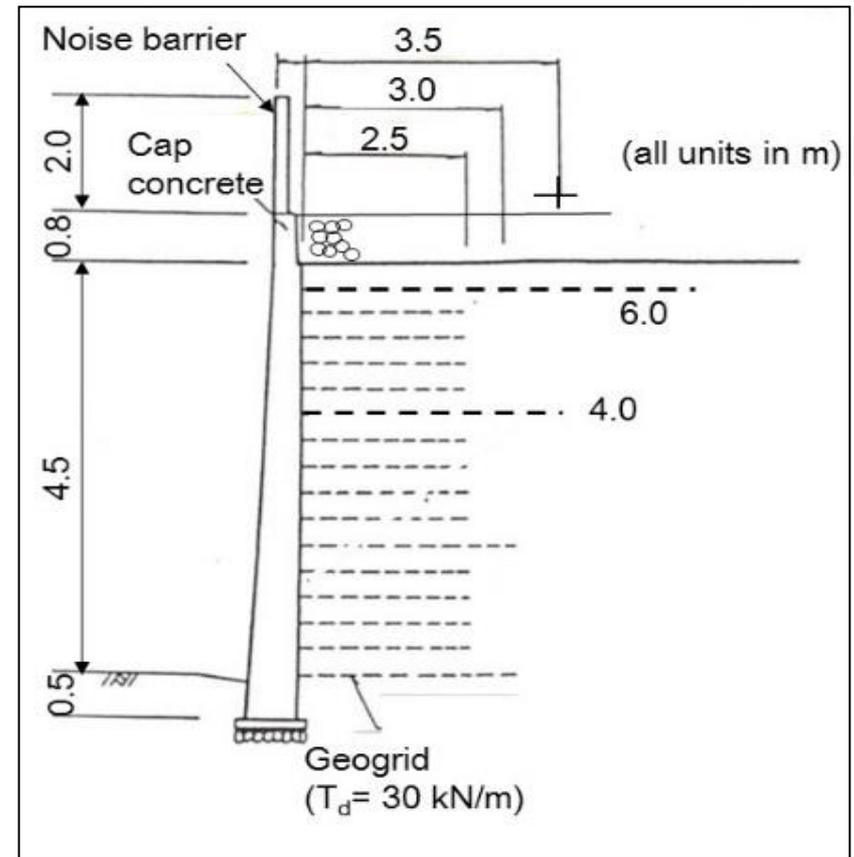
1) 1.5 m

2) 壁高さHの0.35 (35%) =  $5.3 \times 0.35 = 1.86$  m

3) 安定計算によって決まる長さ = **2.5 m**

(通常の5m程度以上高い擁壁では、

3)によって決定される)



5層毎1層に長尺補強材を用いる条件で、  
同長の基本補強材の長さLを、  
地震時安定解析によって決定:

$$\Rightarrow L/H = 2.5\text{m}/5.3\text{m} = 0.47$$

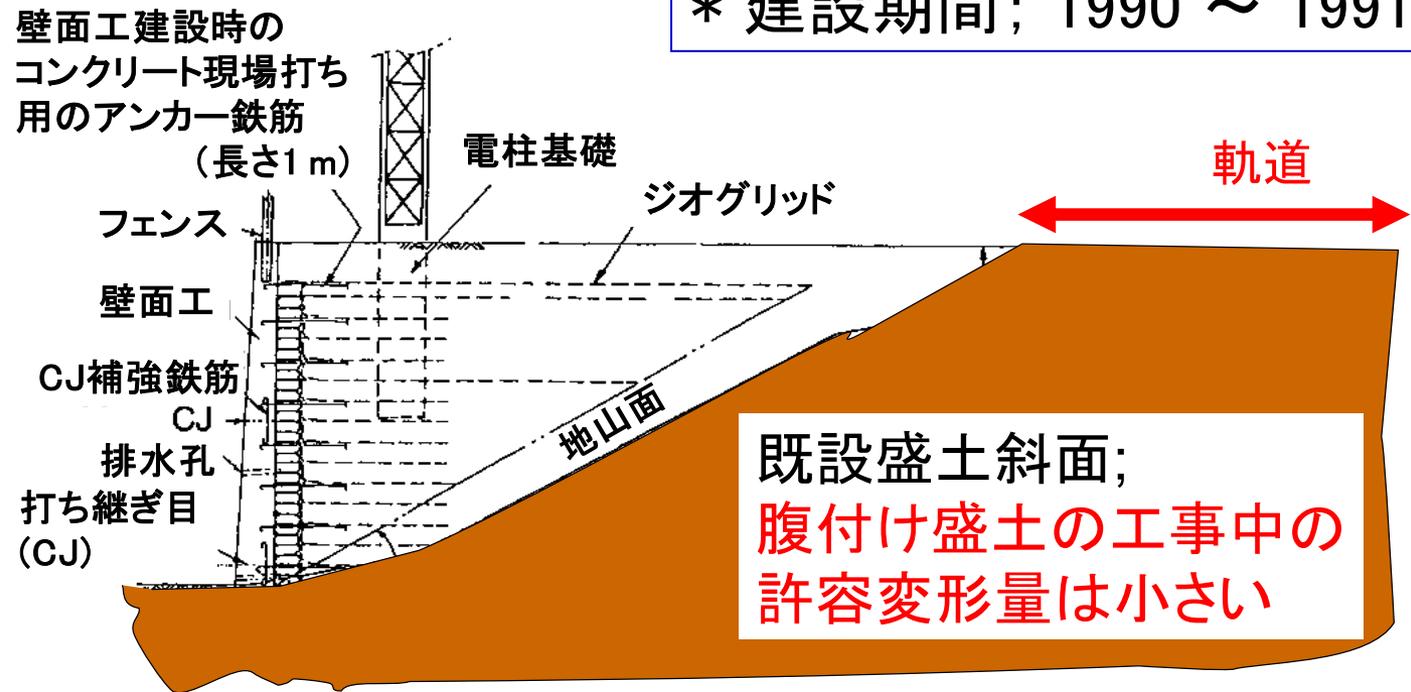
(注: 0.7よりもかなり小さい)

# 剛で一体な壁面工の効用-3(つづき)

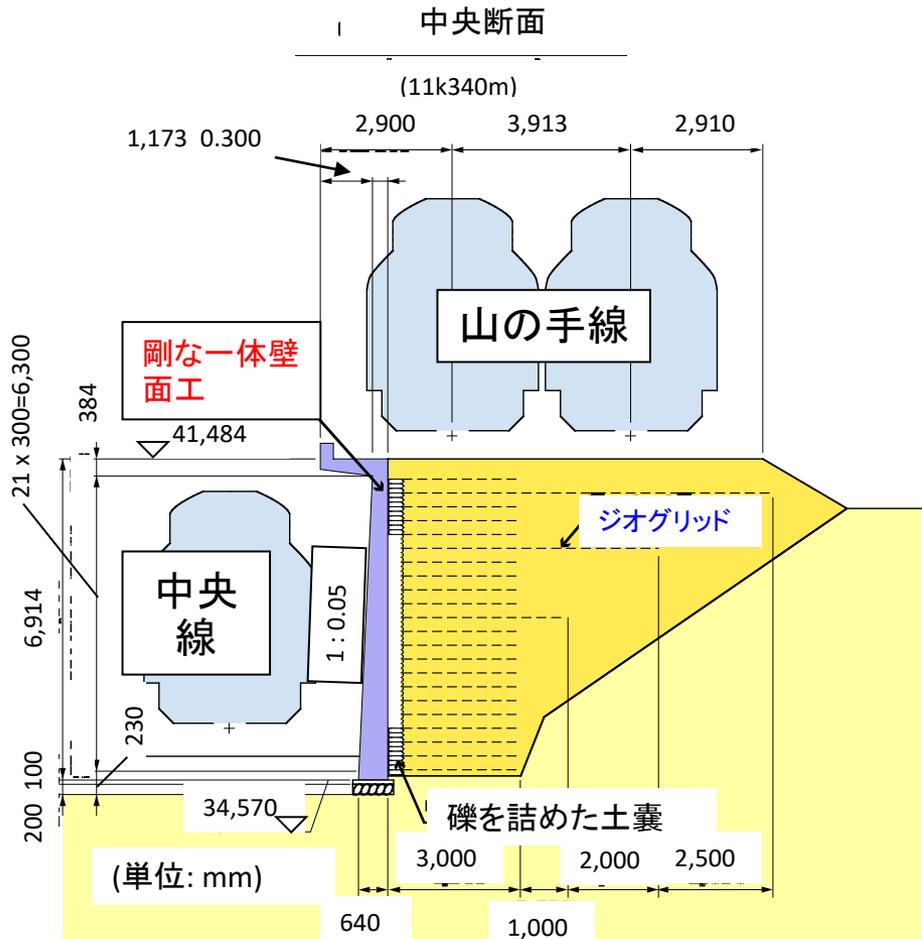
レベル2設計地震動に対してもGRS擁壁の全体安定性を失うことなく、盛土下部で補強材を短くできる

→腹付け擁壁工に有利

JR東海名古屋市枇杷島  
\* 最初の大規模工事  
\* 建設期間; 1990 ~ 1991年



# GRS擁壁の最も重要な工事例の一つ(1995年～2000年, 新宿)



見かけは、普通のRC擁壁  
-しかし、全く新しい形式の擁壁

- 従来形式の擁壁ならば10m以上長い杭が必要⇒GRS擁壁では杭を用いない
- 既設盛土の掘削量は大幅に縮減

# 剛で一体な壁面工の効用-4

壁面工が分割パネルのテールアルメ擁壁：一部での破壊が全体破壊となった事例

青森県南郷村付近

2001年8月崩壊



■ 「分割パネル式・ブロック式等の壁面工を用いた補強土擁壁」では、局所的に弱部があつて破壊が生じると、全体破壊への連鎖が生じる可能性（現在のGRS擁壁の安定解析では、この破壊メカニズムは検討していないが）。

一方、剛な一体壁面工を持つGRS擁壁では、この破壊メカニズムは生じにくい。この特長は、通常認識されておらず、隠れた余裕（冗長性）となっている。



June, 2010, Mexico,  
ハリケーンによる洪水で擁壁支持地盤が洗堀  
(by the courtesy of Dov Leshchinsky)

2015年6月4日、米国Wyoming州、Luskでの道路IS-85のテールアルメ擁壁を橋台にした桁の落橋(Chadrad. com. KCSR):

■推定メカニズム: 付近の河川の氾濫による洪水⇒分割パネル式の壁面工の支持地盤の洗掘⇒一部の下部壁面工の不安定化⇒壁面工全体の不安定化 ⇒壁面工上端の小橋台の不安定化⇒桁の落下

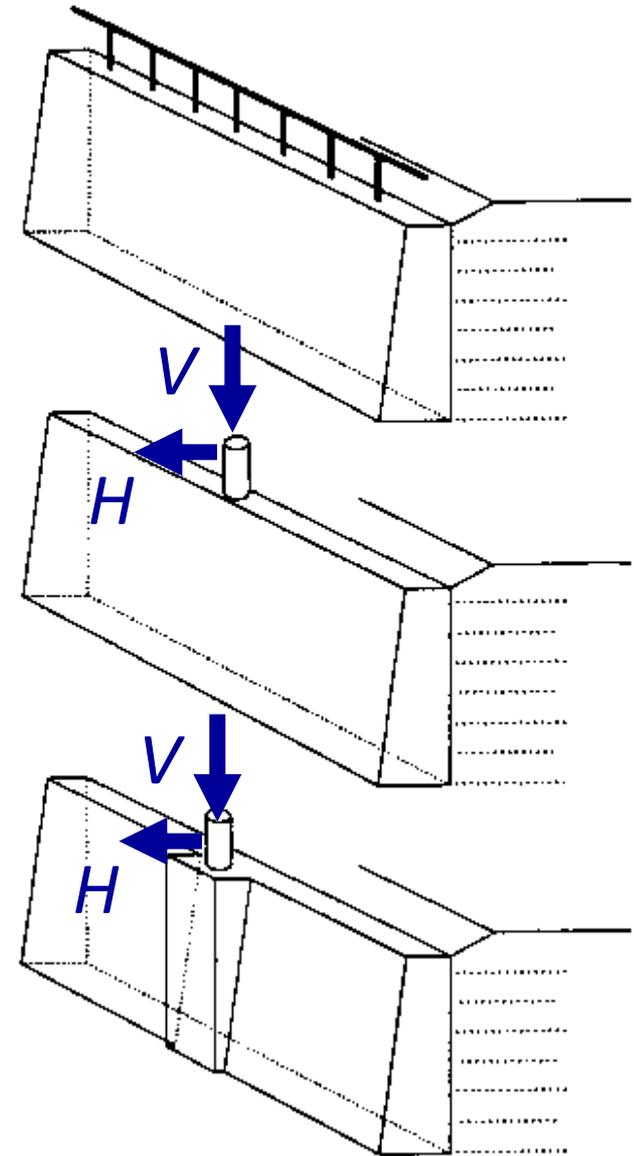


# 剛で一体な壁面工の効用-5

## 三次元効果による外荷重の支持！

鉛直打継ぎ目（水平距離20m）の間の区間：  
補強盛土全体と壁面工は、一体として集中荷重 $H$ ,  $V$ に抵抗

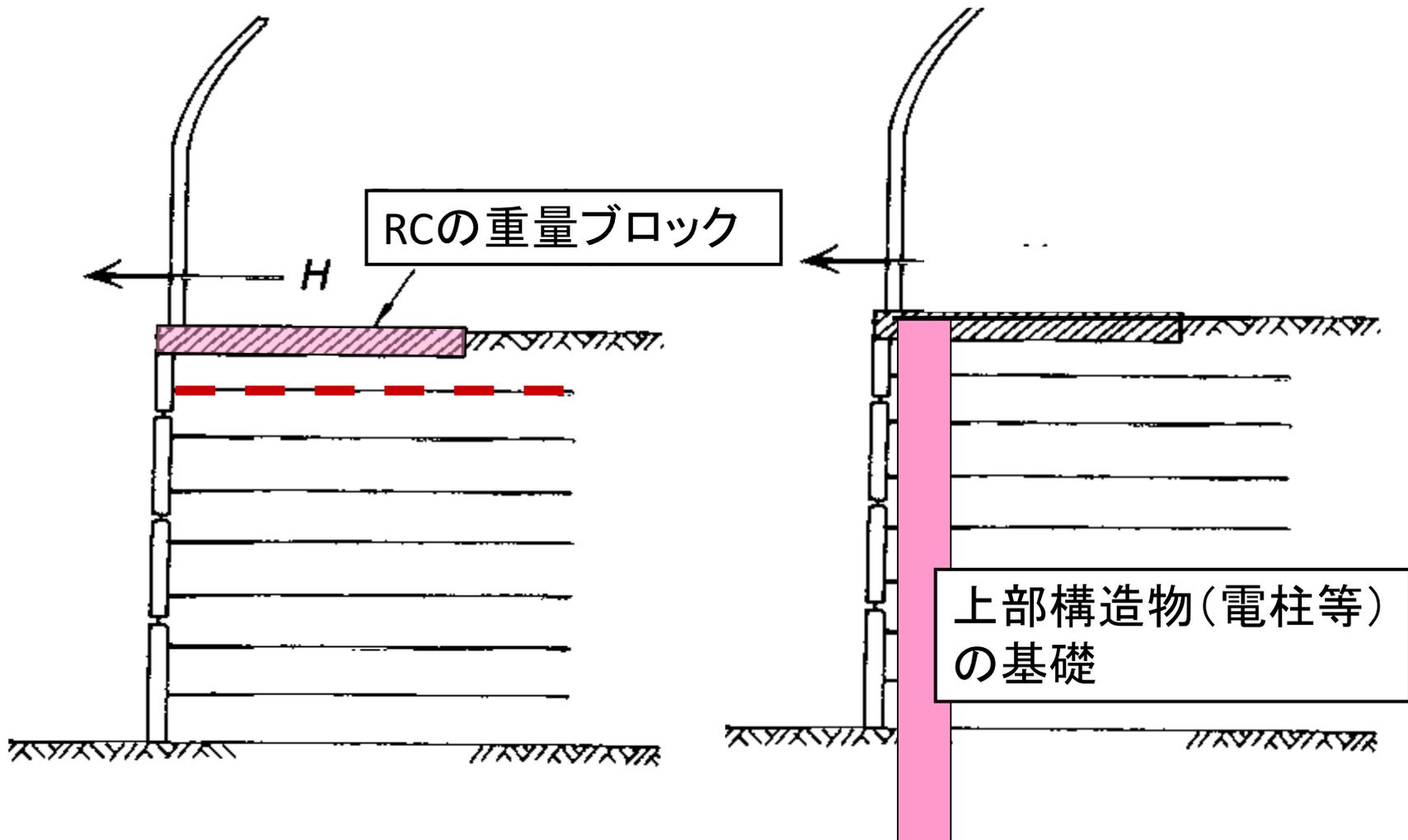
→剛な一体壁面工は、電柱・防音壁等の上部構造物の安定した基礎構造物として機能



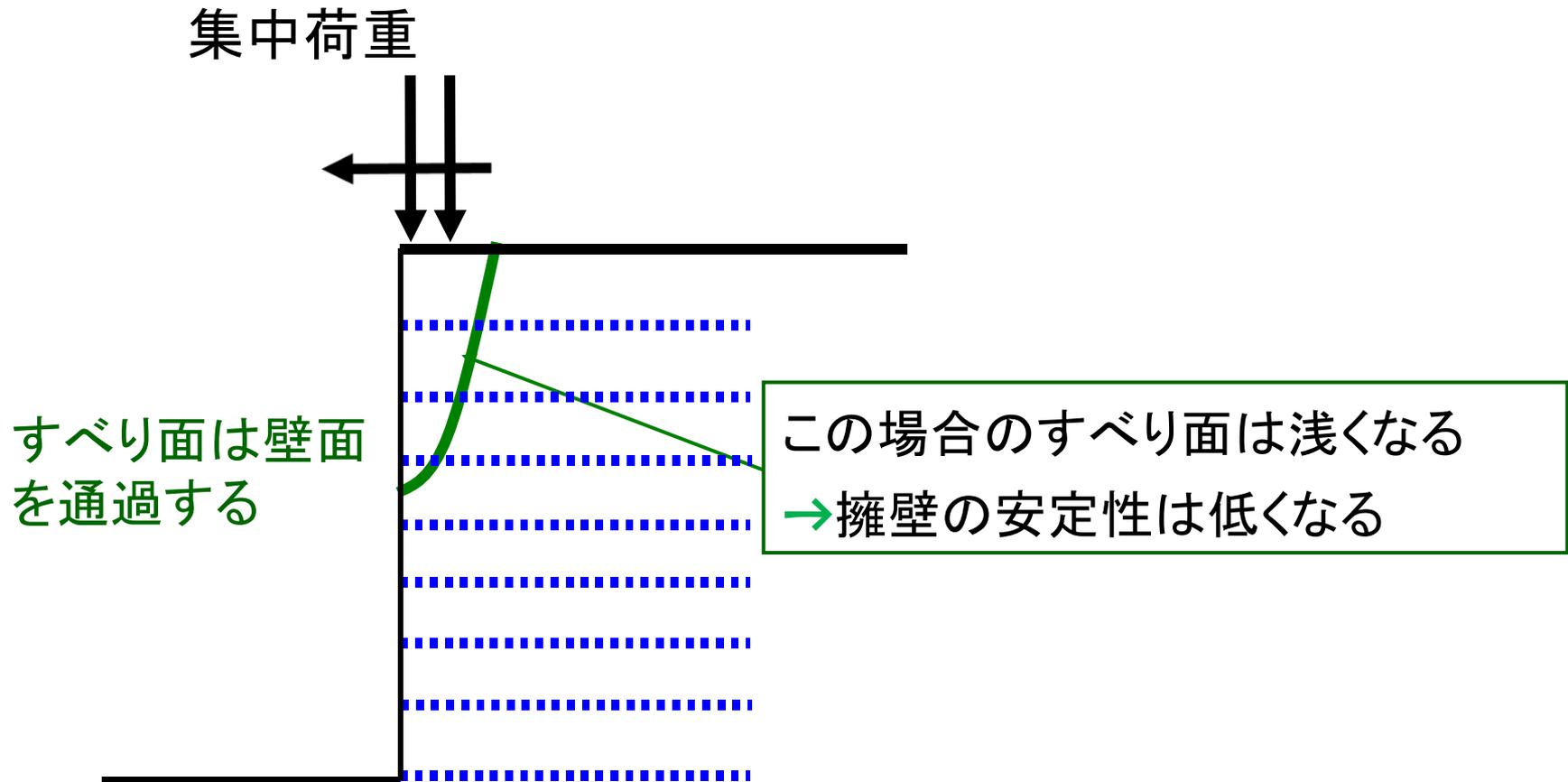
パネル式壁面工やブロック式壁面工では……

壁面工上端の集中荷重に、「**最上部のパネル(あるいはブロック)**  
**とそれに連結した補強材層**」だけが抵抗

しかも、最上層の補強材層は上載圧が低い  
ため引き抜けやすい  
⇒別途、基礎構造物が必要



壁面工に全体的剛性と一体性が無い場合は、  
天端での壁面近くの集中荷重に対する抵抗力は小さい



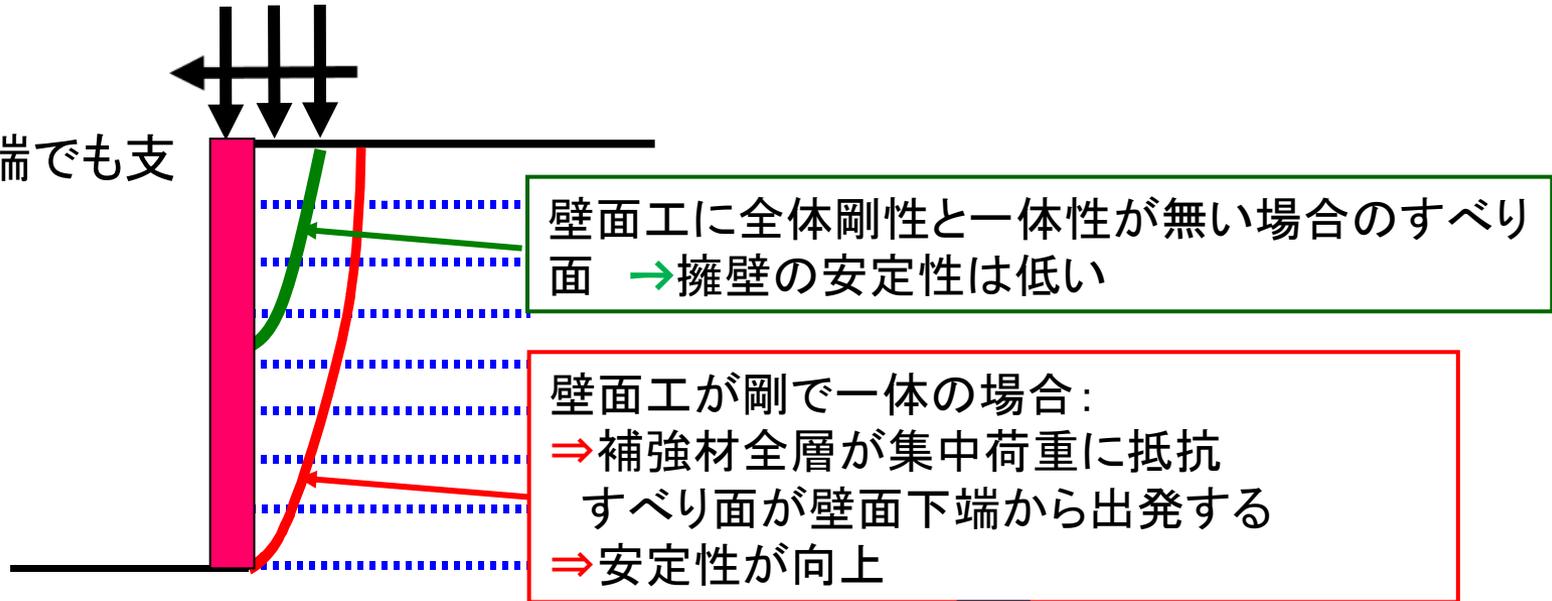
剛で一体な壁面工によって、壁面工上端での集中荷重に対する抵抗力は大幅に増加

a) 壁面工を基礎構造物としての活用

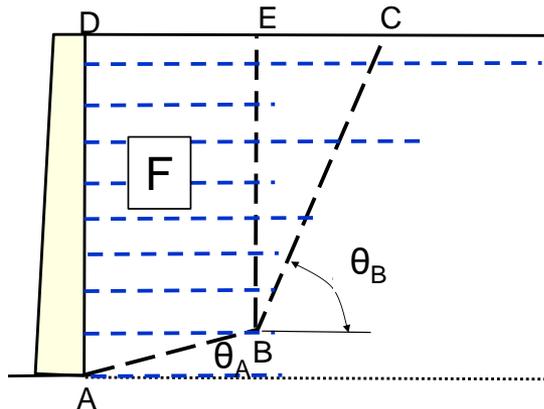
b) 橋台としての利用 ⇒ GRS橋台 ⇒ GRS一体橋梁

集中荷重:

壁面工上端でも支持できる

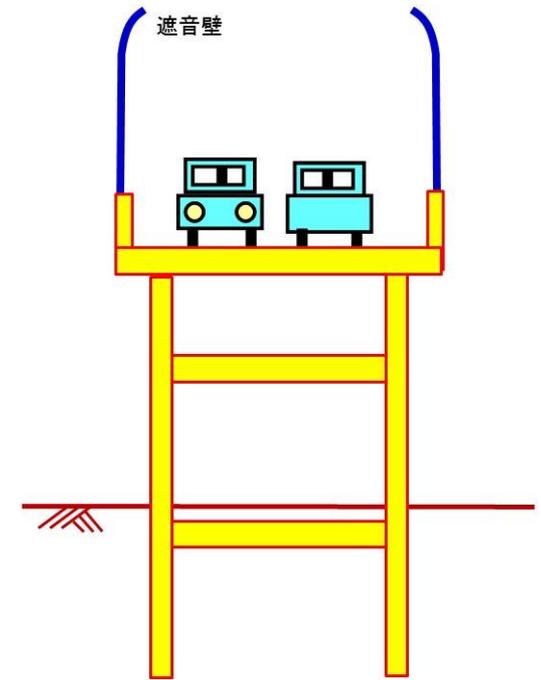
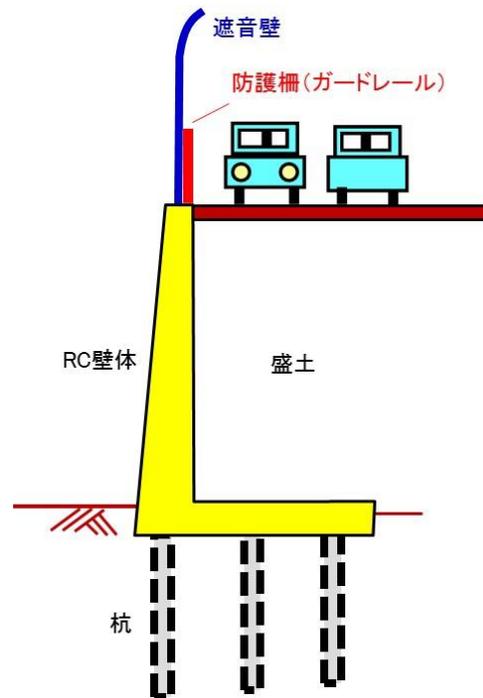
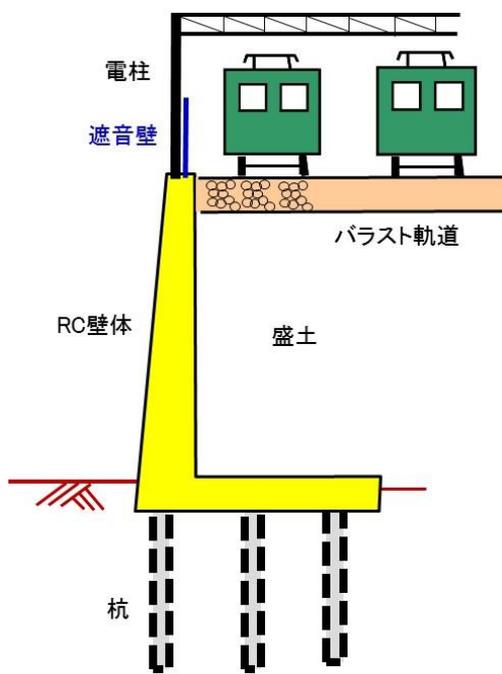


補強材と連結された剛一体壁面工を持つGRS構造物の適用範囲を広げるために、設計では、このメカニズムを考慮して、「剛な一体壁面工と前楔F」を一体としてレベル2設計地震動に対する安定性を2重楔法で解析し、高い耐震性を定量的に確認



# そもそも、従来形式の擁壁には**短所①,②**と**長所③,④**がある

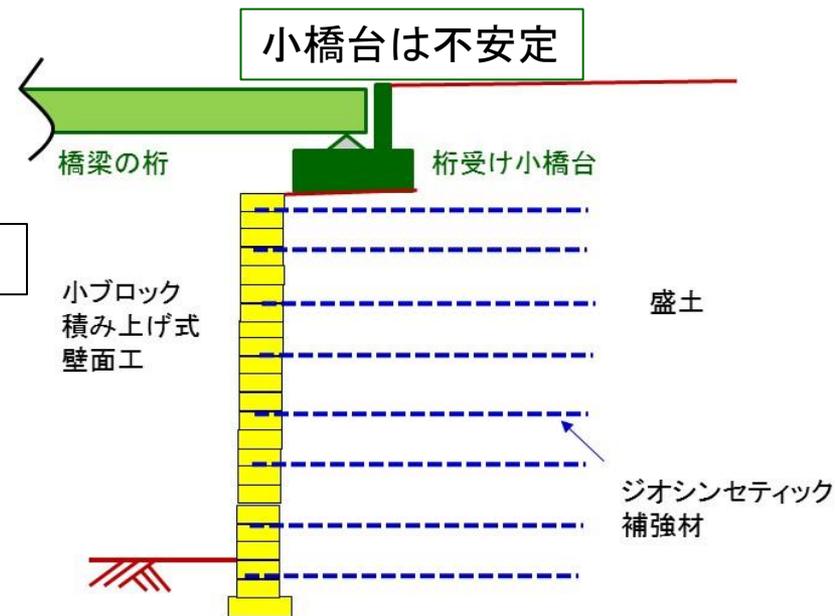
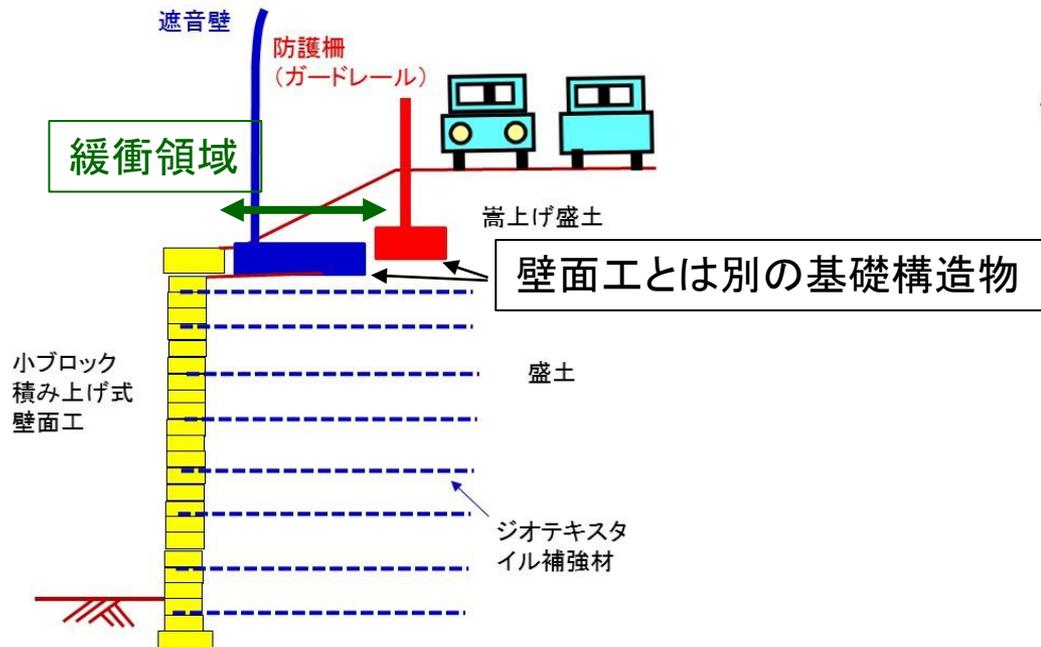
	基本構造	壁体	杭基礎	盛土施工	盛土天端の使用形態と敷地面積	壁面工を防護工・遮音工等の基礎や橋台として利用
従来形式 L型擁壁	盛土は無補強、壁面工は片持ち梁	堅牢な一体RC	①通常必要	②壁体建設後に施工	③壁面真実まで盛土天端使用可→敷地面積は限定	④利用可
RC高架			①通常必要		③敷地面積は限定	④利用可



各種補強土RWは、従来形式の擁壁の**短所①&②**を改善、しかし**長所③&④**を維持？

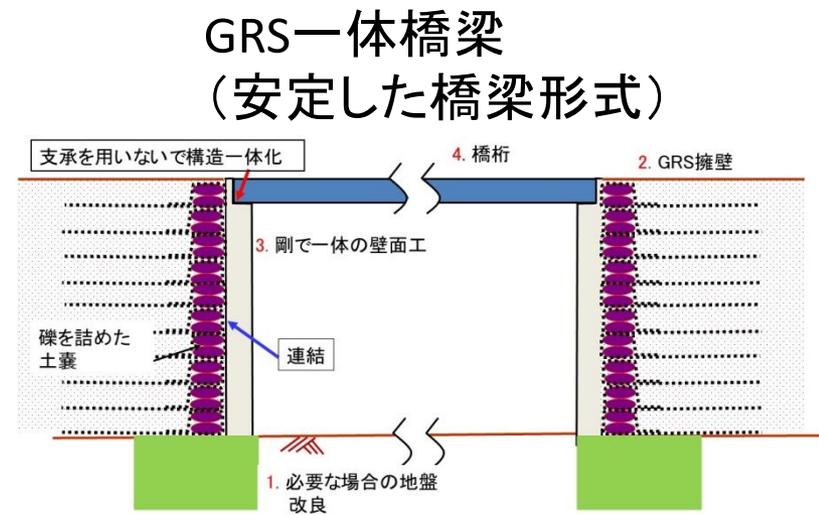
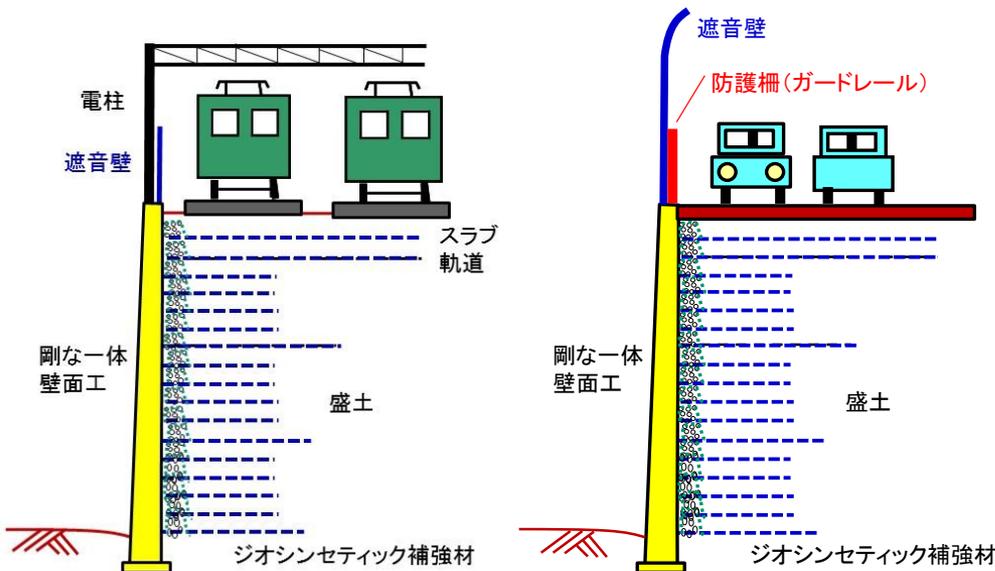
	基本構造	壁体	杭基礎	盛土施工	盛土天端の使用形態と敷地面積	壁面工を防護工・遮音工等の基礎や橋台として利用
従来形式L型擁壁	盛土は無補強、壁面工は片持ち梁	堅牢な一体RC	①通常必要	②壁体建設後に施工	③壁面真際の盛土天端使用可→敷地面積は限定	④利用可
剛性と一体性が低い壁面工を持つ補強土擁壁	盛土補強、片持ち梁構造ではない	一体性が無い	①通常不要(改善)	②壁体建設後に施工(改善せず)	③壁面真際は使用不可→敷地面積拡大(長所喪失)	③利用不可 → 別途、杭基礎などが必要(長所喪失)

従来形式L型擁壁の短所①を改善、しかし、長所③&④を喪失

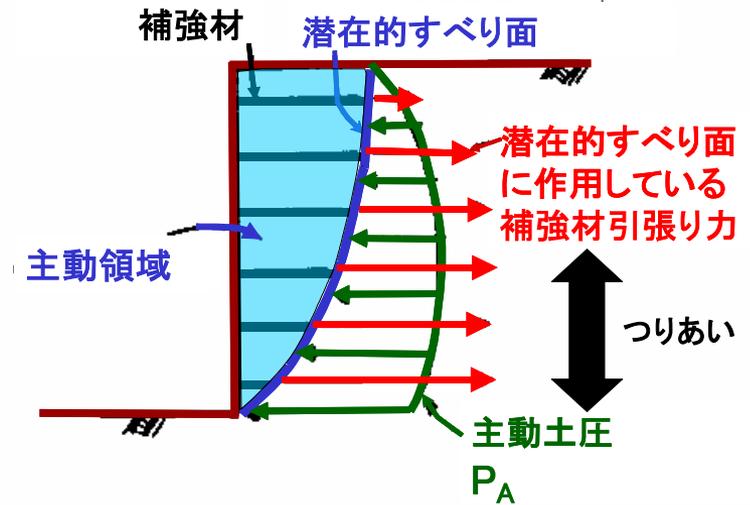


	基本構造	壁体	杭基礎	盛土施工	盛土天端の使用形態と敷地面積	壁面工を防護工・遮音工等の基礎や橋台として利用
従来形式L型擁壁	盛土は無補強、壁面工は片持ち梁	堅牢なRC構造	①通常必要	②壁体建設後に盛土施工	③壁面真実まで盛土天端使用可→敷地面積は限定	④利用可
剛な一体壁面工を持つGRS擁壁	盛土は補強、壁面工は支点間距離が短い連続梁	簡易なRC構造	①通常不要(改善)	②壁体建設前に施工(改善)	③壁面真実まで使用可→敷地面積は限定(長所保全)	④利用可(長所保全)

従来形式L型擁壁の短所①&②を改善、長所③&④を保全



# まとめ



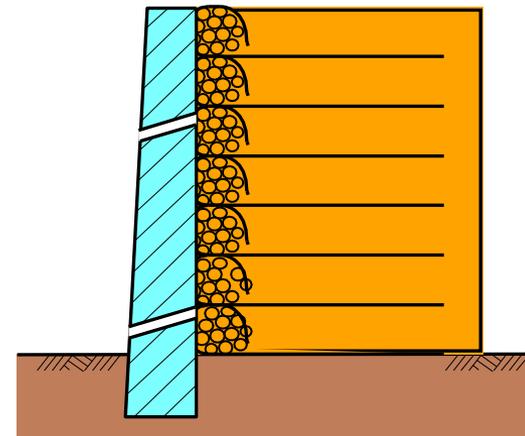
## 壁面工の役割: かつての説明(土圧悪玉論)

- 1) 補強土壁工法は「土圧軽減工法」と定義
- 2) 壁面工は、盛土のこぼれ出しを防ぐ程度のもので十分
- 3) 壁面工には、支持地盤の変形に対応できるように、変形性能が必要

これらの説明は、正しくない。

# 剛な一体壁面工を段階施工するジオシンセティック補強土擁壁

## 壁面工の役割： 適切な説明(土圧善玉論)



- 1) 補強土壁工法は、壁面土圧を軽減しないことによって、大きな補強材引張り力を発揮させ盛土に作用する拘束圧を高い値に維持し、盛土を安定化する工法
- 2) 壁面工は盛土のこぼれ出しを防ぐ程度のものではなく、擁壁の安定にとって必須の構造体。また、各種構造物の基礎にもなる。
- 3) 壁面工には、①建設中は盛土と支持地盤の変形に対応できる変形性能が必要。②しかし、完成後は高い剛性と一体性が必要。

⇒ 1), 2) & 3) を擁壁の安定計算で考慮することが必須

⇒ 3) での①と②の間の矛盾は、段階施工で解決(後ほど説明)

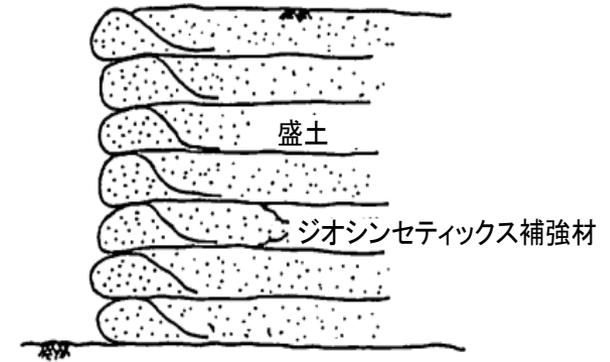
# GRS構造物- 擁壁から橋台への発展 -

- 1) 従来形式の擁壁は片持ち梁！ 補強土擁壁は非片持ち梁！
- 2) 剛な一体壁面工を持つGRS構造物の最近の施工例
- 3) **剛な一体壁面工を持つGRS擁壁の特徴**
  - ・剛な一体壁面工の効用の“発見”と活用
  - ・**クリープは劣化に非ず、クリープでは強度は低下しない**
  - ・壁面工を盛土の後に建設する効用の“発見”と活用
- 4) 自然災害で崩壊した土構造物のGRS構造物による強化復旧：  
地震・洪水・豪雨・津波
- 5) GRS擁壁からGRS橋台・GRS一体橋梁への発展
  - a) 従来形式の橋台・橋梁の諸問題
  - b) GRS橋台とGRS一体橋梁の利点 - 低い建設費・維持管理費、高い耐災性(地震、洗堀、津波等)
- 6) 新幹線西九州ルート、金沢・敦賀間でのGRS構造物
- 7) まとめ

# 初期のジオシンセティック補強土(GRS)擁壁の課題とその解決 3/3

- ・壁面が巻き込み式GRS擁壁は、  
低建設費の仮設構造物としては、一定の実用性
  - ・一方、仮設では、盛土の締固めと排水工が不十分な傾向
- 実際に、

- ①壁面での変形大⇒擁壁全体の変形大
- ②壁面の火災・機械的外力・紫外線に対する耐久性が低い  
⇒永久重要構造物としては不適と認識された！



①に対しての、従来の、特に1980年代での説明：

- a) ジオシンセティック補強材は金属製補強材よりも剛性が低いため、補強盛土の変形が大きくなる ⇒ これは誤認！ 実際は建設中の多少の変形は問題にならない(特にRRR工法では)。建設後の過大な残留変形が問題。残留変形は、盛土締固め不良、排水設備不備で大きくなる。ジオシンセティック補強材を用いても、良い締固め、排水設備整備。剛な一体壁面工によって、残留変形は問題にならなくなる。
- b) ジオシンセティック補強材はクリープしやすく、クリープ変形によって長期的に劣化\*と誤認 ⇒ 設計引張り破断強度を求める際に、実測引張り破断強度に非常大きな(過大な)クリープ低減係数を適用

この誤った説明\*はかなり浸透 ⇒しかし、これは根本的に誤り(次頁以降で説明)

a)とb)のような誤った説明・対応\*によって、「ジオシンセティック補強材として信頼できない」と、広く誤解を招いた。

応力,  $\sigma$

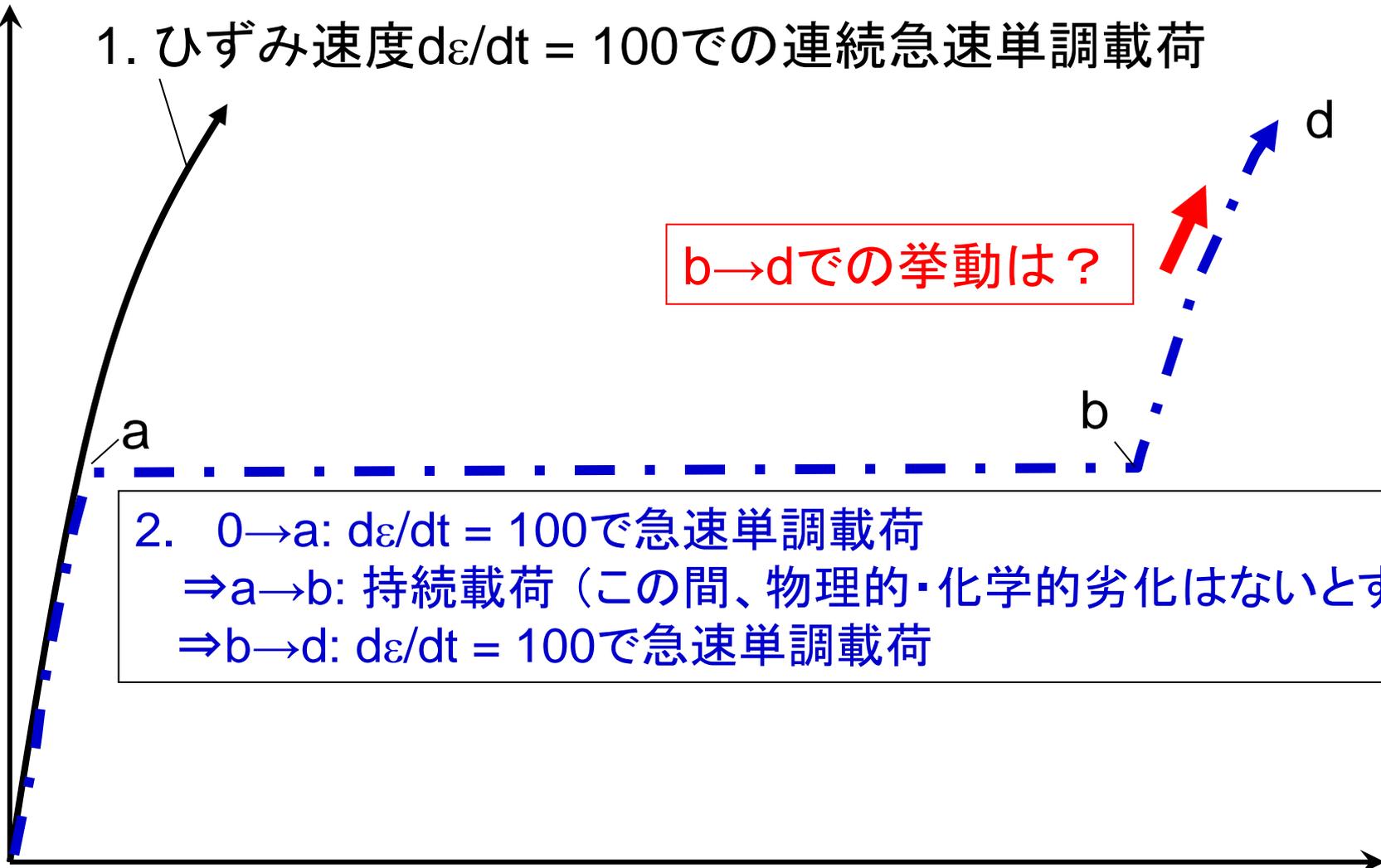
1. ひずみ速度  $d\varepsilon/dt = 100$  での連続急速単調載荷

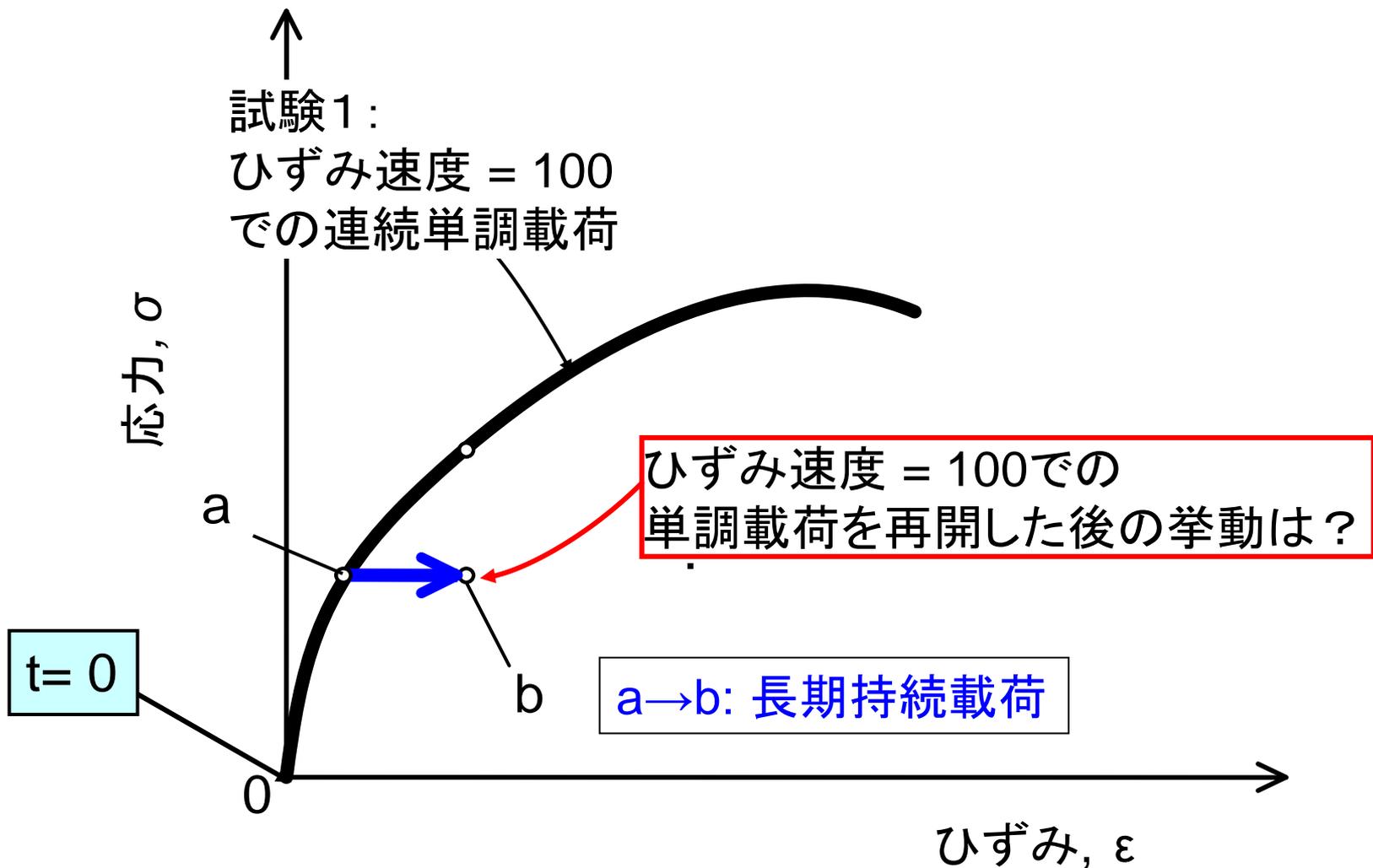
b→dでの挙動は？

2.  $0 \rightarrow a$ :  $d\varepsilon/dt = 100$  で急速単調載荷  
⇒  $a \rightarrow b$ : 持続載荷 (この間、物理的・化学的劣化はないとする)  
⇒  $b \rightarrow d$ :  $d\varepsilon/dt = 100$  で急速単調載荷

0

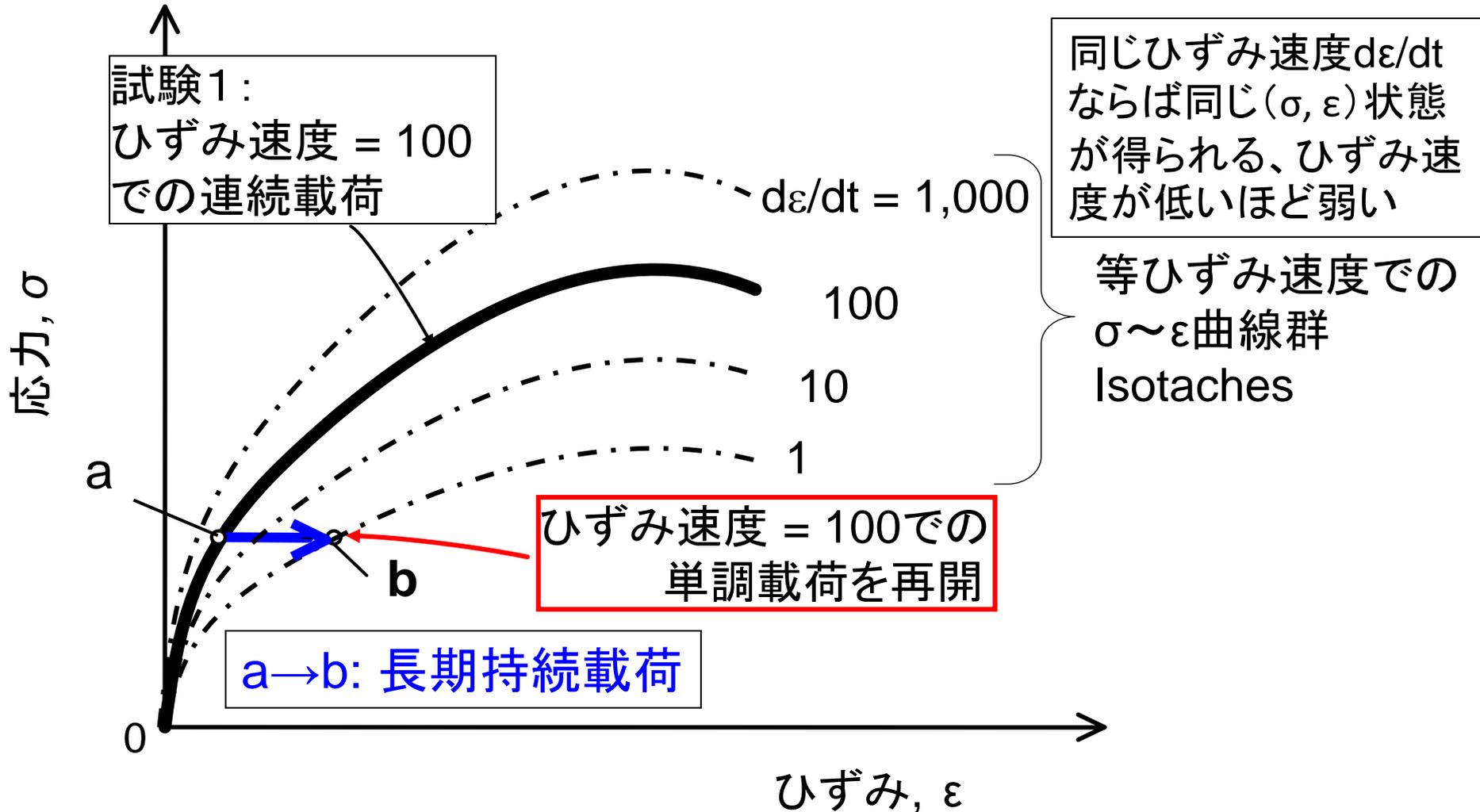
経過時間,  $t$





ジオテキスタイル補強材では、クリープは劣化現象ではない

持続载荷  $a \rightarrow b$  後に、ひずみ速度100での単調载荷を再開した時の実際の挙動は？

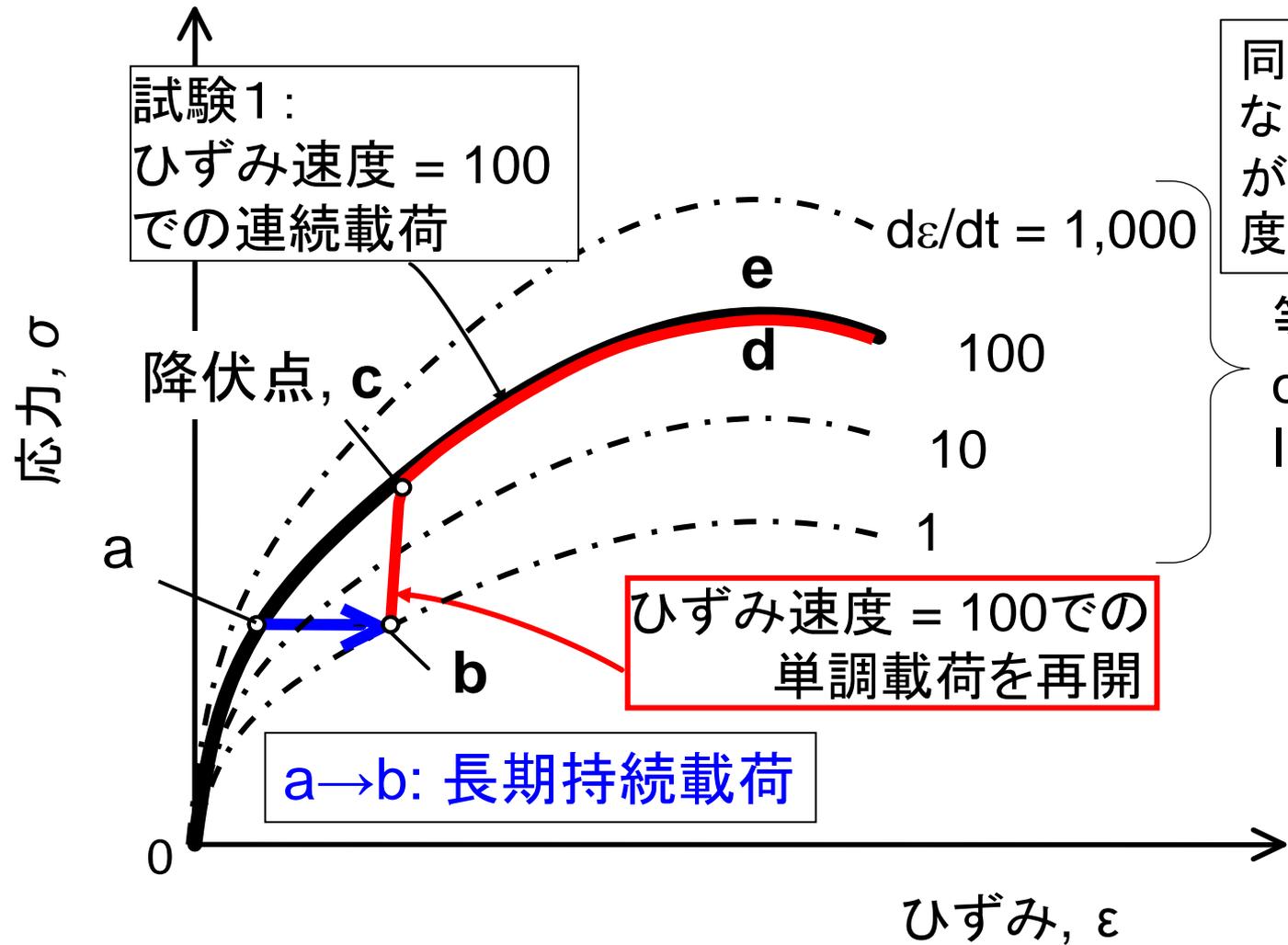


持続载荷後の挙動は、**b→c→e=d**

土と同様に、 $\sigma \sim \epsilon$ 挙動はひずみ速度に支配される

クリープ载荷後も、同じひずみ速度での元々のピーク強度は維持

⇒クリープは劣化現象ではない

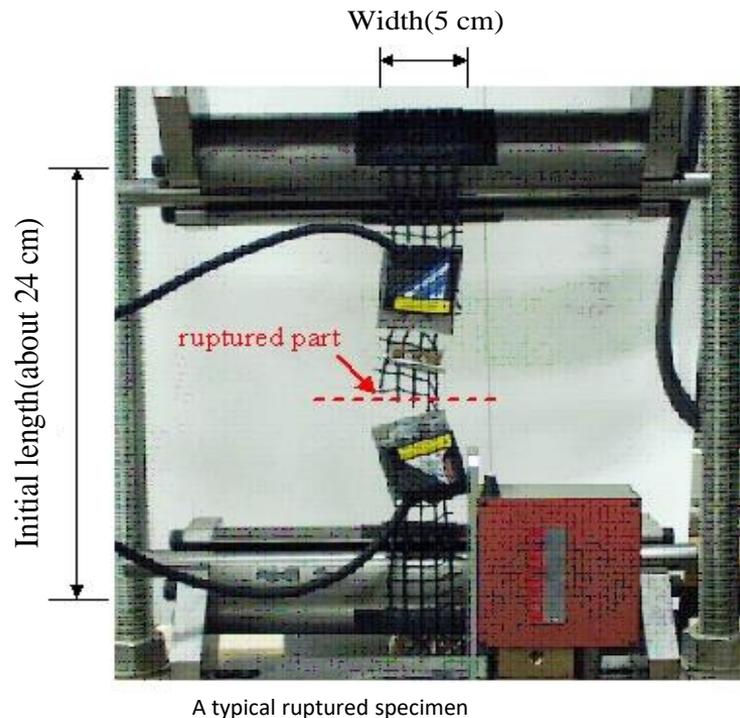
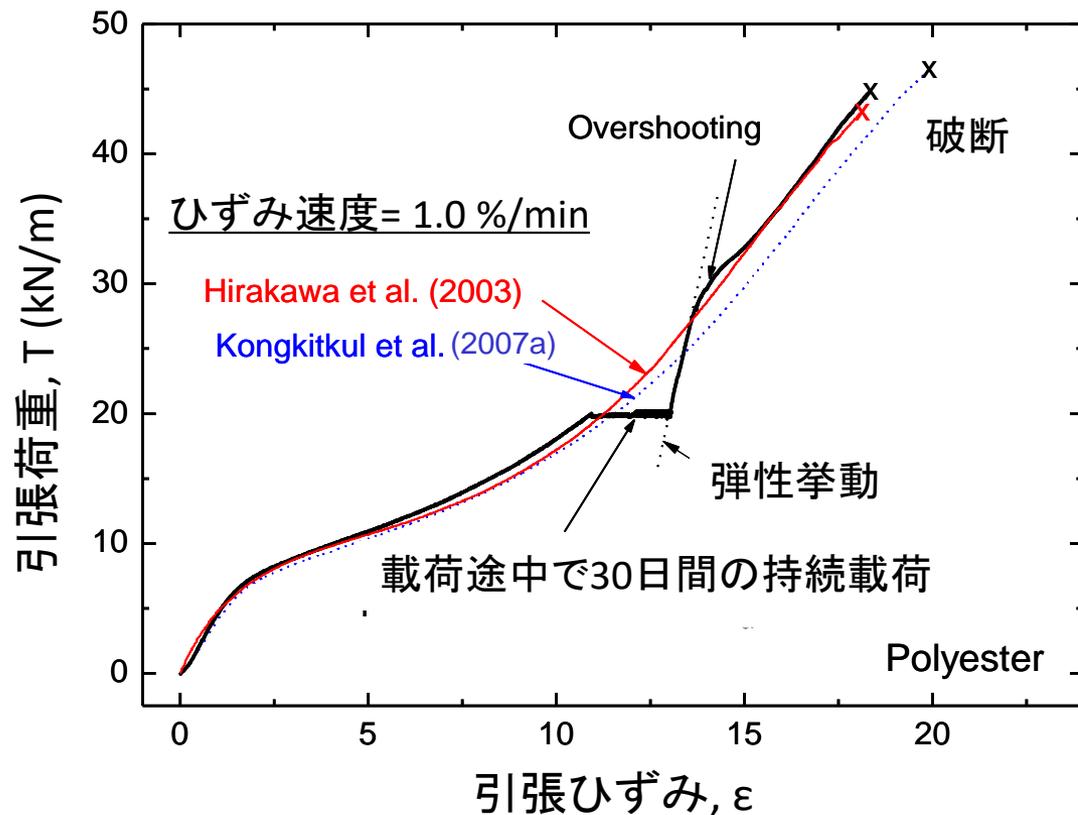


同じひずみ速度  $d\epsilon/dt$   
ならば同じ  $(\sigma, \epsilon)$  状態  
が得られる、ひずみ速度  
が低いほど弱い

等ひずみ速度での  
 $\sigma \sim \epsilon$  曲線群  
Isotaches

ジオグリッド補強材でも、持続载荷後に単調载荷を再開すると、

- ・初期剛性は高くなっており、
- ・同じひずみ速度でのピーク強度は維持されている



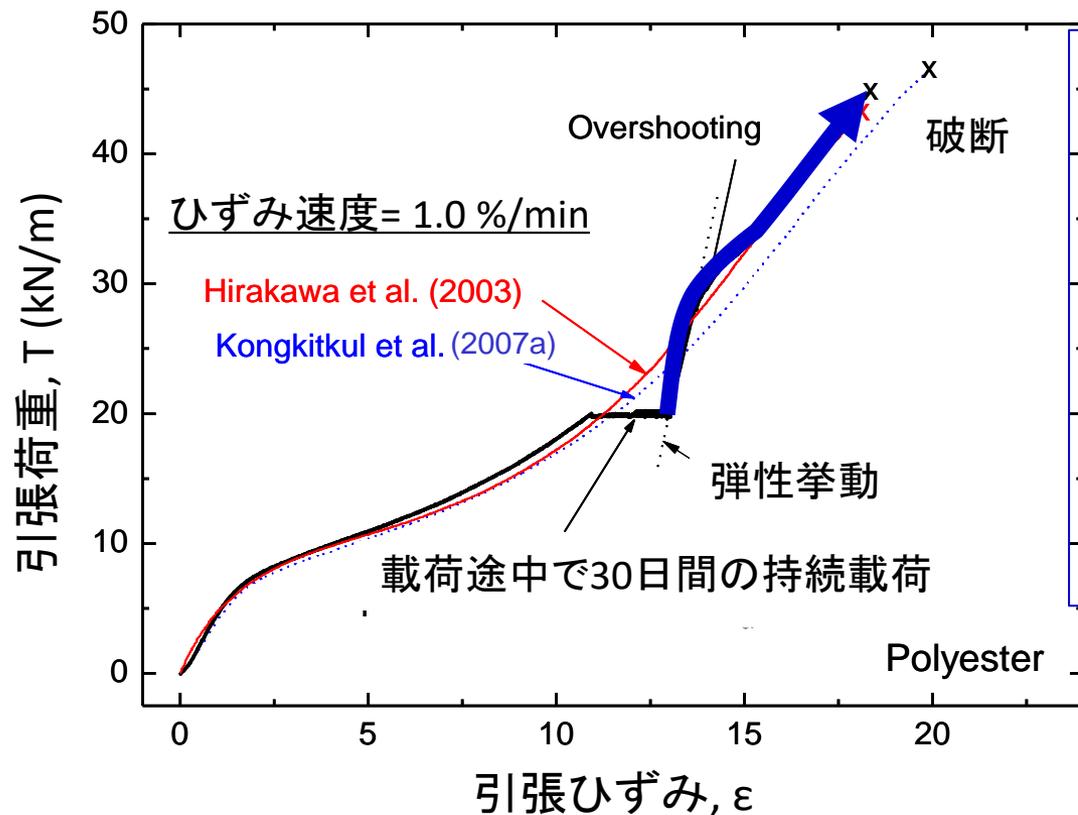
A typical ruptured specimen

**引張り破断試験**

Hirakawa et al. (2003) & Kongkitkul et al. (2004, 2007)  
*Geosynthetics International, S&F*

ジオグリッド補強材でも、持続载荷後に単調载荷を再開すると、

- ・初期剛性は高くなっており、
- ・同じひずみ速度でのピーク強度は維持されている



クリープは劣化現象ではない、従って.....

長期持続载荷後の降雨・地震による増加荷重に対して、

- ・変形の増加量は縮減
- ・最終強度は低下してない

# GRS構造物- 擁壁から橋台への発展 -

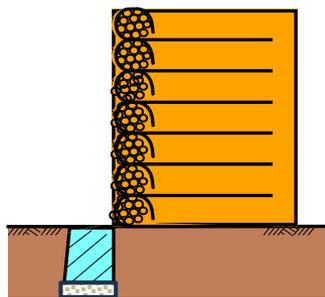
- 1) 従来形式の擁壁は片持ち梁！ 補強土擁壁は非片持ち梁！
- 2) 剛な一体壁面工を持つGRS構造物の最近の施工例
- 3) **剛な一体壁面工を持つGRS擁壁の特徴**
  - ・剛な一体壁面工の効用の“発見”と活用
  - ・クリープは劣化に非ず、クリープでは強度は低下しない
  - ・**壁面工を盛土の後に建設する効用の“発見”と活用**
- 4) 自然災害で崩壊した土構造物のGRS構造物による強化復旧：  
地震・洪水・豪雨・津波
- 5) GRS擁壁からGRS橋台・GRS一体橋梁への発展
  - a) 従来形式の橋台・橋梁の諸問題
  - b) GRS橋台とGRS一体橋梁の利点 - 低い建設費・維持管理費、高い耐災性(地震、洗堀、津波等)
- 6) 新幹線西九州ルート、金沢・敦賀間でのGRS構造物
- 7) まとめ

# 剛な一体壁面工を有するジオシンセティック補強土擁壁

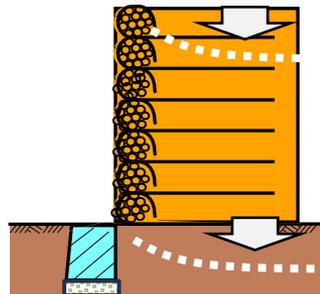
## 壁面工の役割の適切な説明(土圧善玉論):

- 1) 補強土壁工法は、壁面土圧を軽減しないことによって、大きな補強材引張り力を発揮させ盛土に作用する拘束圧を高い値に維持し、盛土を安定化する工法。
- 2) 壁面工は盛土のこぼれ出しを防ぐ程度のものではなく、擁壁の安定にとって必須の構造体。また、各種構造物の基礎にもなる。
- 3) 壁面工には、①建設中は盛土と支持地盤の変形に対応できる変形性能が必要。しかし、②完成後は高い剛性と一体性が必要。

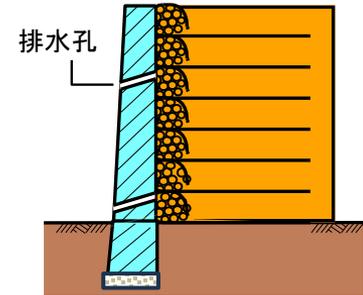
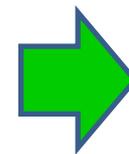
⇒3)における①と②の矛盾は、段階施工で解決



変形性と一定の安定性がある土嚢等の仮壁面工で盛土建設



盛土と支持地盤の変形



剛な一体壁面工を補強材層と連結して建設

# JR東海名古屋市枇杷島 新幹線ヤード

- 既設盛土に腹付け擁壁
- 平均壁高= 5m; 総延長= 930 m

工事開始前



補強盛土完成、  
壁面工建設前



完成



# JR東海名古屋市枇杷島

\* RRR擁壁の最初の大規模工事

• 建設期間; 1990 ~ 1991年

斜面のり先を若干掘削後、  
壁面工基礎を設置した段階



壁面工建設時の  
コンクリート現場打ち  
用のアンカー鉄筋  
(長さ1 m)

電柱基礎

ジオグリッド

軌道

フェンス

壁面工

CJ補強鉄筋

CJ

排水孔

打ち継ぎ目  
(CJ)

地山面

段切り

30°  
碎石を詰めた土嚢

既設盛土のり面に腹付け擁壁:  
既設盛土の工事中・工事後の許容変  
形量は小さい

# JR東海名古屋市枇杷島 新幹線ヤード

- 既設盛土に腹付け擁壁
- 平均壁高= 5m;
- 総延長= 930 m



建設15年後 2006年10月28日

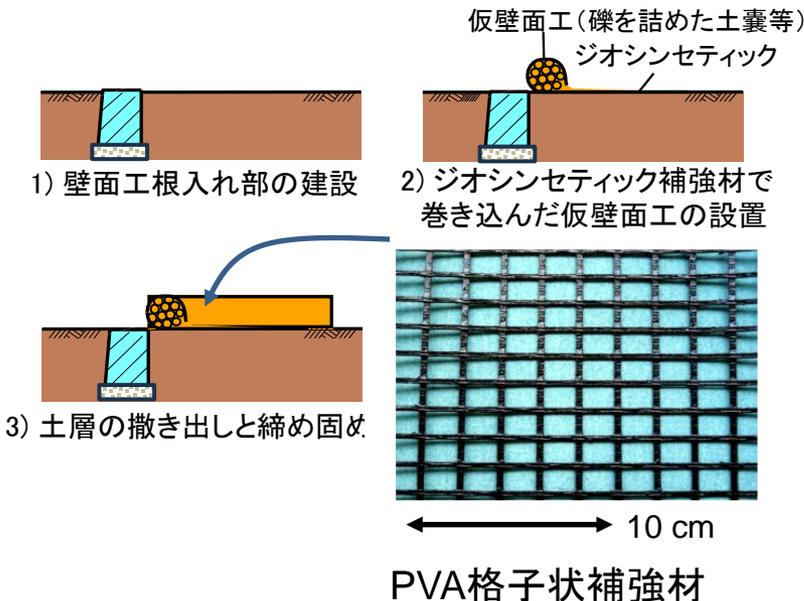
# 解決策としての盛土建設先行の段階施工 - 1

1) 壁面工根入れ部の設置

2) 碎石等礫を詰めた俵(土嚢)、あるいはL型溶接金網を仮壁面工として壁面に置き、補強材のジオシンセティック補強材で包み、撒き出した土層を締め固め、締め固めた盛土面に補強材を配置して、次の段階に移る。

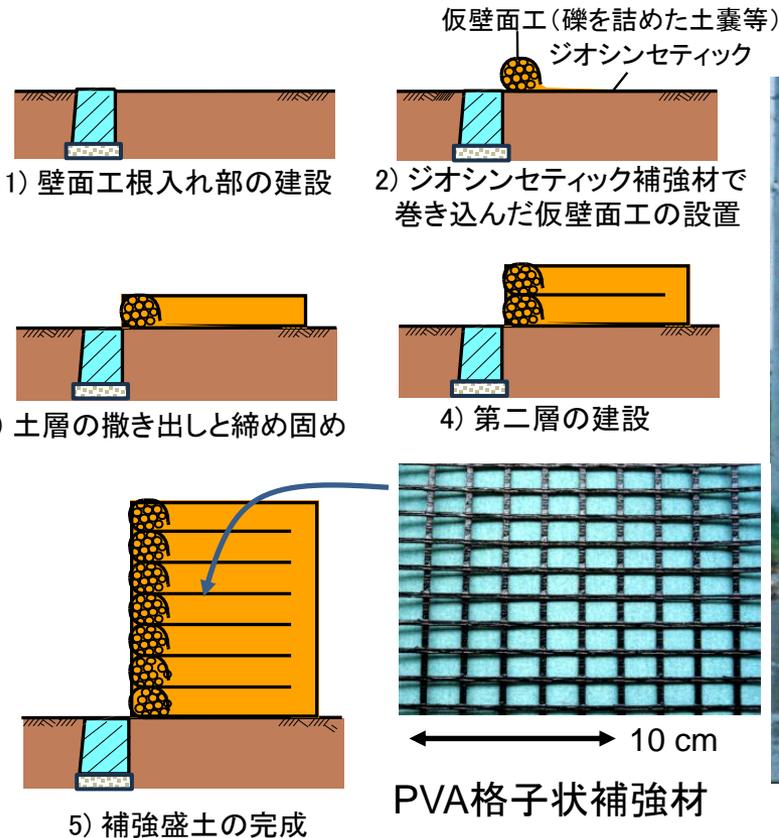
注) 仮壁面工は、変形性が必須であるが、①盛土締め固め時に安定で、②締め固めに伴う土圧と盛土が最終高さになった時の土圧に抵抗できる必要

・これらの矛盾した要求性能は、土嚢は問題なく満足。しかし、溶接金網を用いる場合には注意が必要(低コストでも安定性不足な物は使用してはならない)



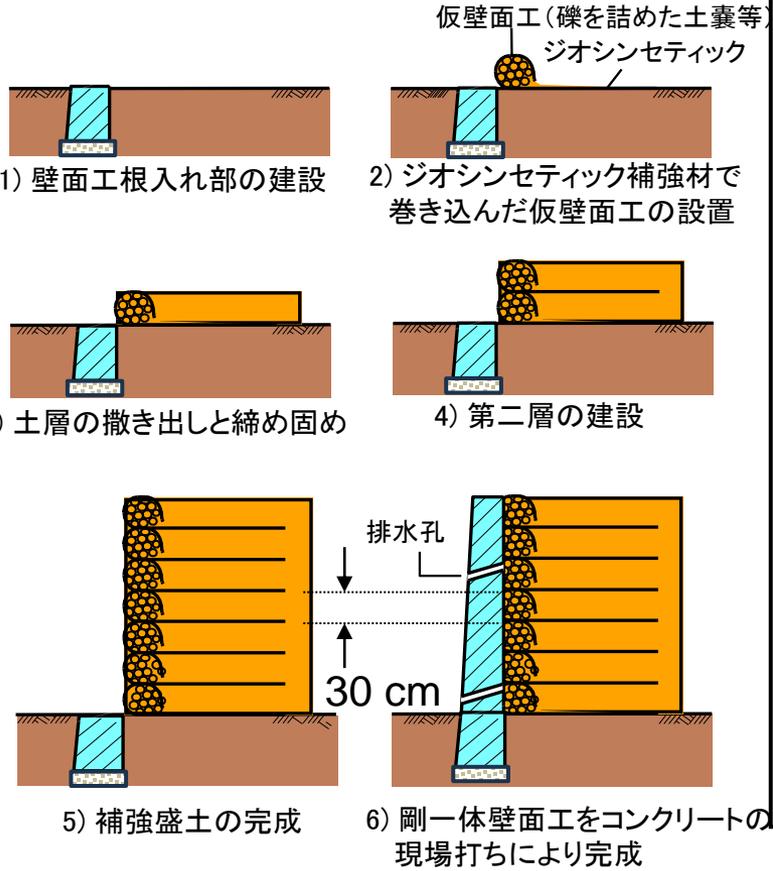
# 解決策としての盛土建設先行の段階施工 - 2

2) - 5) 碎石等礫を詰めた俵(土嚢)、あるいはL型溶接金網を仮壁面工として壁面に置き、補強材のジオシンセティック補強材で包み、撒き出した土層を締固め、締固めた盛土面に補強材を配置して、次の段階に移る。これを繰り返して、ジオシンセティック補強盛土を完成。



# 解決策としての盛土建設先行の段階施工 - 3

2) - 5) 碎石等礫を詰めた俵(土嚢)、あるいはL型溶接金網を仮壁面工として壁面に置き、補強材のジオシンセティック補強材で包み、撒き出した土層を締め固め、締め固めた盛土面に補強材を配置して、次の段階に移る。これを繰り返して、ジオシンセティック補強盛土を完成。



補強材層鉛直間隔= 30 cm

■ 鉛直間隔がもっと大きくても安定なGRS擁壁を建設できる。しかし、鉛直間隔大⇒ ①土との接触面積減少⇒補強効果低下。これを防ぐために高強度・高剛性の補強材が必要。②高強度の仮壁面工が必要⇒高コスト。

・補強材(geogrid)は相対的に低剛性で弱い。しかし、鉛直間隔小⇒ ①盛土との接触面積増加⇒効果的に土を補強。②仮壁面工が高コストではなくなる。

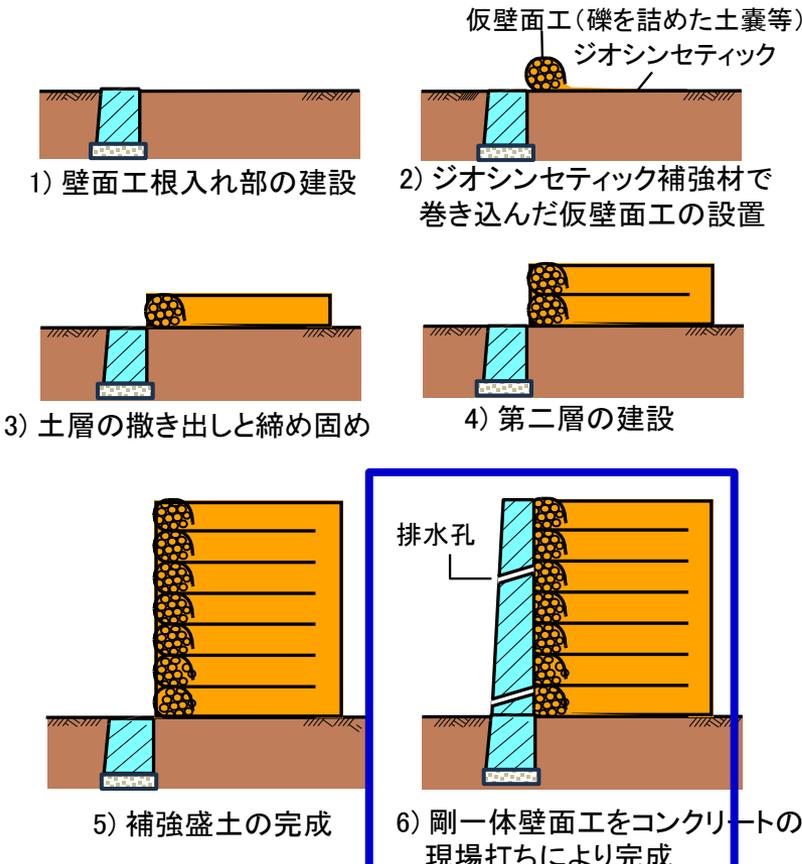
・盛土の締め固め層厚を 15 cm とし2層で30cmとすることによって、高い締め固め度を保証できる。

# 解決策としての盛土建設先行の段階施工 - 4

2)-5) 碎石等礫を詰めた俵(土嚢)、あるいはL型溶接金網を仮壁面工として壁面に置き、補強材のジオシンセティック補強材で包み、撒き出した土層を締め固め、締め固めた盛土面に補強材を配置して、次の段階に移る。

これを繰り返して、ジオシンセティック補強盛土を完成。

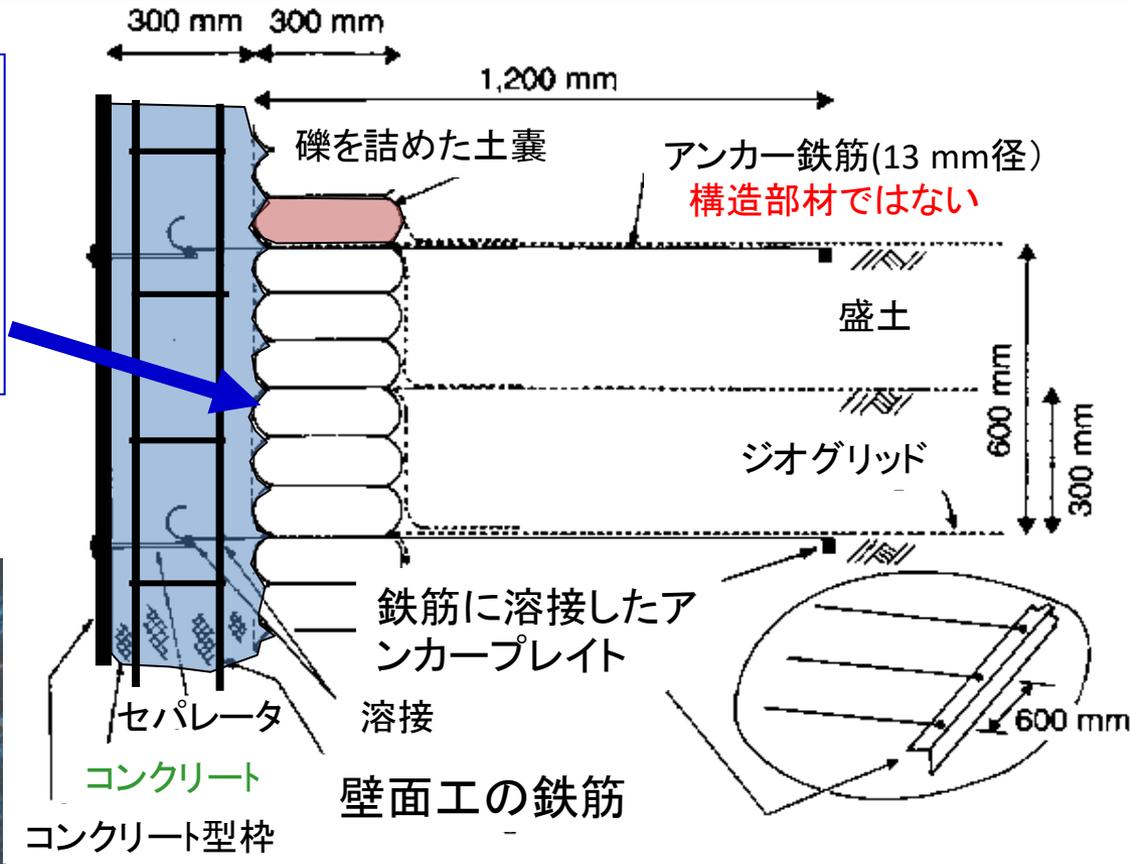
6) 盛土と地盤の変形が収束してから、薄いRC壁面工を全補強材層と連結されて補強盛土と一体になるように、現場打ちで建設。



# 剛な一体壁面工の現場打ち

内型枠無しでコンクリートを現場打ち

⇒コンクリートは土嚢内の礫に侵入して、壁面工とジオシンセティック補強材層と一体化



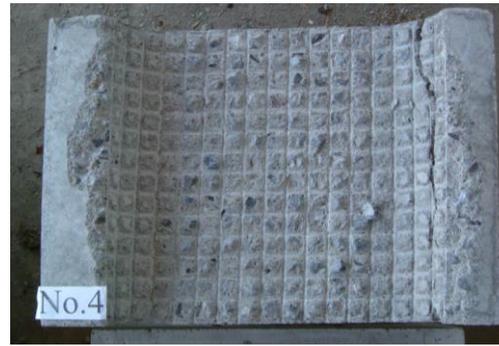
壁面工用の鉄筋

アンカー鉄筋の頭部

- ・コンクリート外型枠は、盛土内部でアンカーした鉄筋で固定、従って壁面の外側からの支保工は不要！
- ・アンカー鉄筋は、永久構造部材ではなく、擁壁の安定解析では考慮しない

# 補強材/壁面工の定着強度の現場実験と室内実験による評価

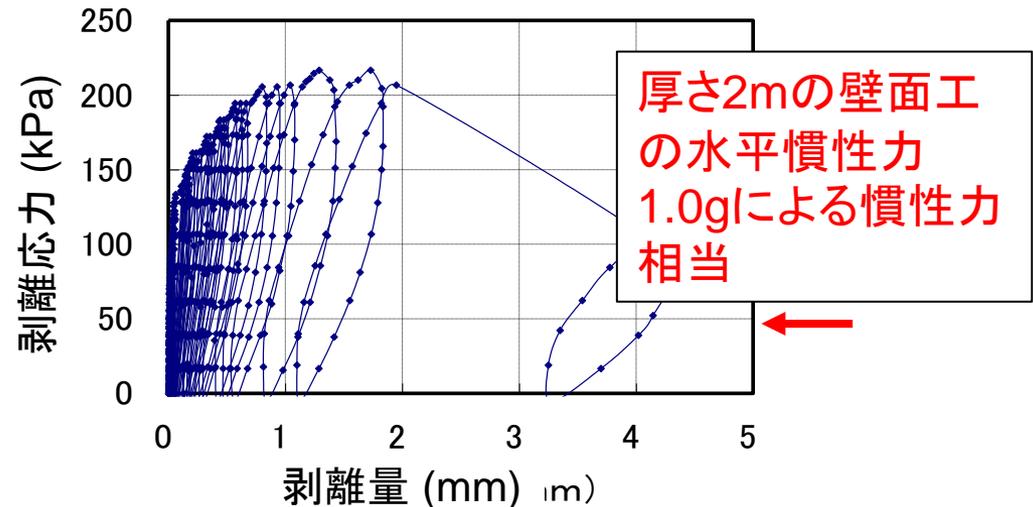
吊り上げ



室内剥離試験後の試験片(二軸PVAグリッド)

実大擁壁から切り出した試験片の吊り上げ: 重力加速度による定着強度の評価  
⇒剥離せず

典型的実験結果

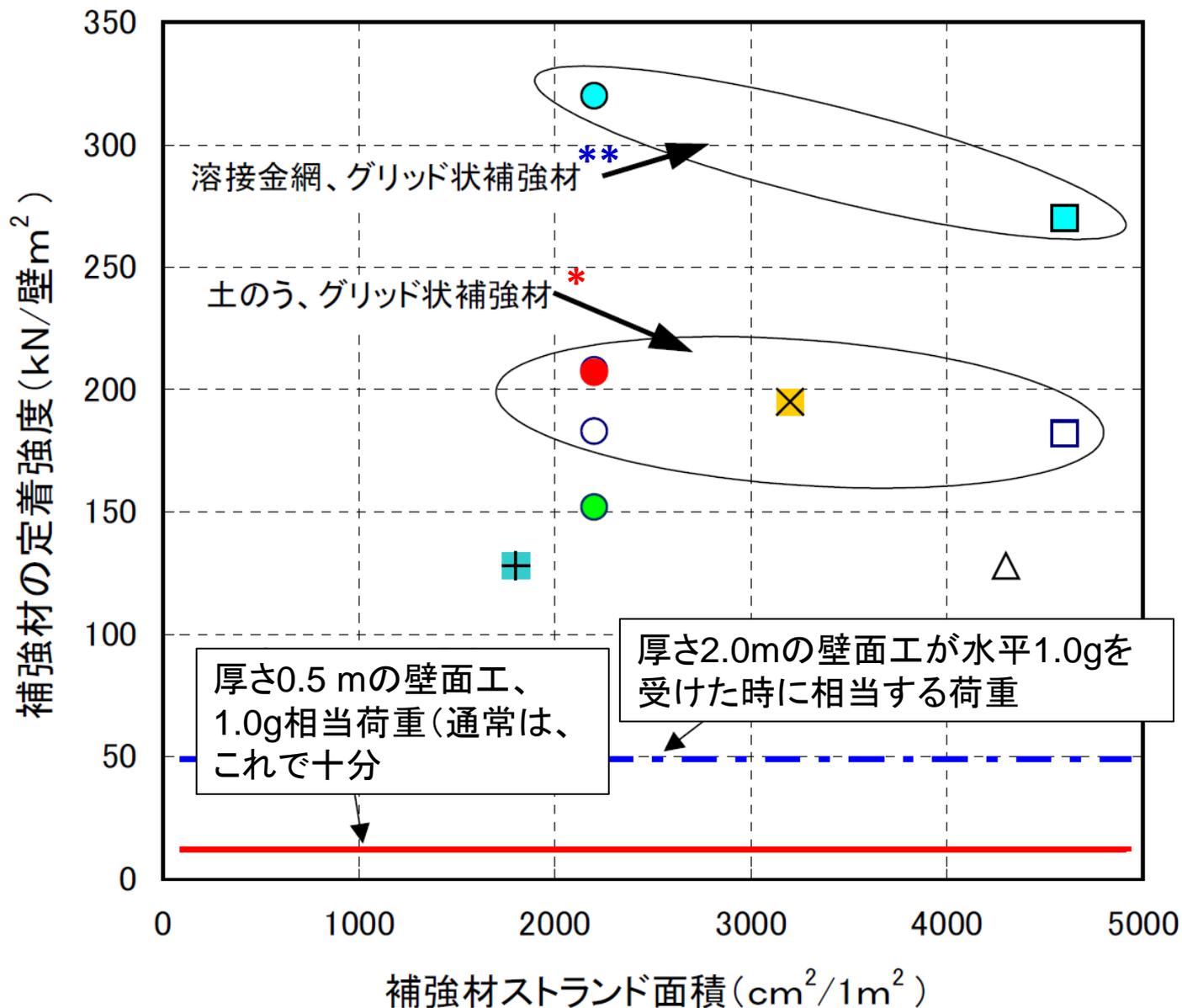


厚さ30cm程度の壁面工では、  
強震時でも剥離しない

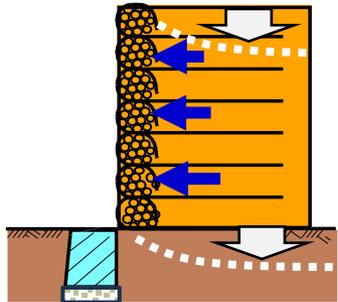
# 壁面工/補強材の定着強度

**\*\***  
**二軸PVAグリッドの**  
**データ: 大きな定着**  
**力が必要なGRS橋**  
**台とGRS一体橋梁**  
**に適用**

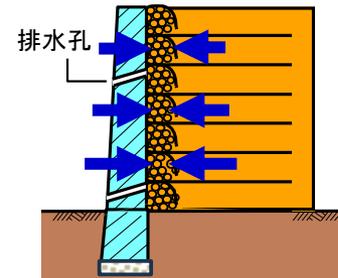
**\*と\*\***  
**定着強度は非常**  
**に大きい**



# 盛土先施工 / 剛一体壁面工後施工の利点 - 1



5) 補強盛土の完成



6) 剛一体壁面工をコンクリートの現場打ちにより完成

段階5)で、

- ①盛土重量による盛土と支持地盤の変形と
- ②壁面土圧による仮壁面工の変形は終了している

段階6)では、

- 1)剛な一体壁面工には、上記①、②による内部応力による損傷と変位による不安定化は生じない
- 2)壁面土圧は、仮壁面工から剛な一体壁面工に付け替わり内力となるので、補強土擁壁全体を不安定化させる外力とはならない
- 3)壁面工は、片持ち梁ではなく多支点支持の連続梁となる

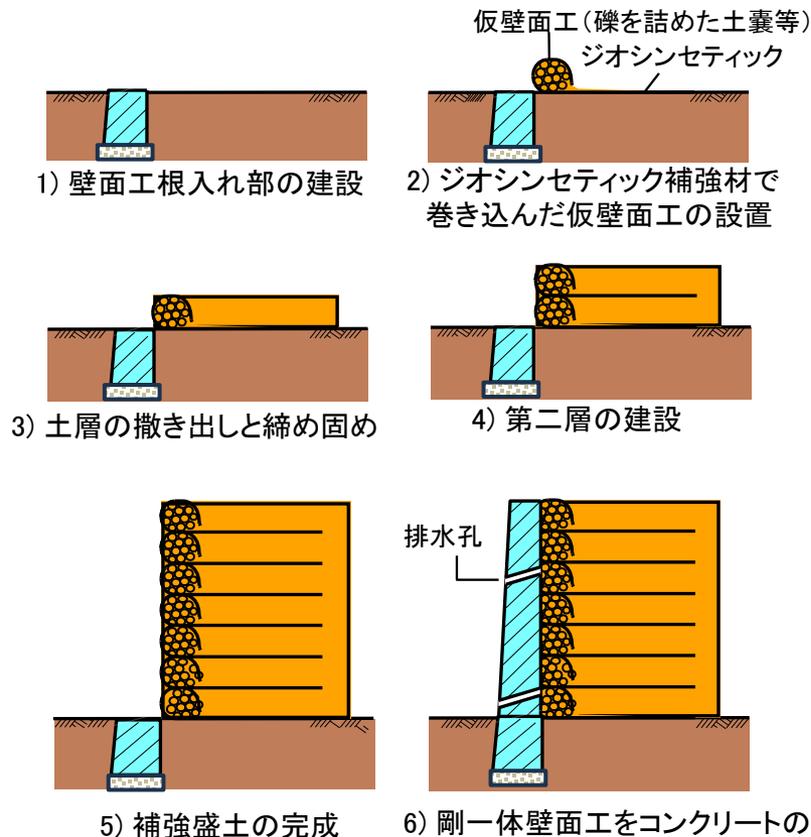
上記1), 2), 3)による構造工学的利点

1. 従来形式の擁壁では必要な壁面工の支持杭は通常不要となる
2. 供用時における交通荷重、地震荷重等に対するa), b)の設計において非常に有利になる(特にGRS橋台・一体橋梁の設計で)
  - a)壁面土圧による壁面工内部と補強材との連結部の損傷
  - b)剛な一体壁面工と補強盛土体の安定性

ただし、段階5)において、補強盛土はレベル1程度の地震動に対して安定である必要がある

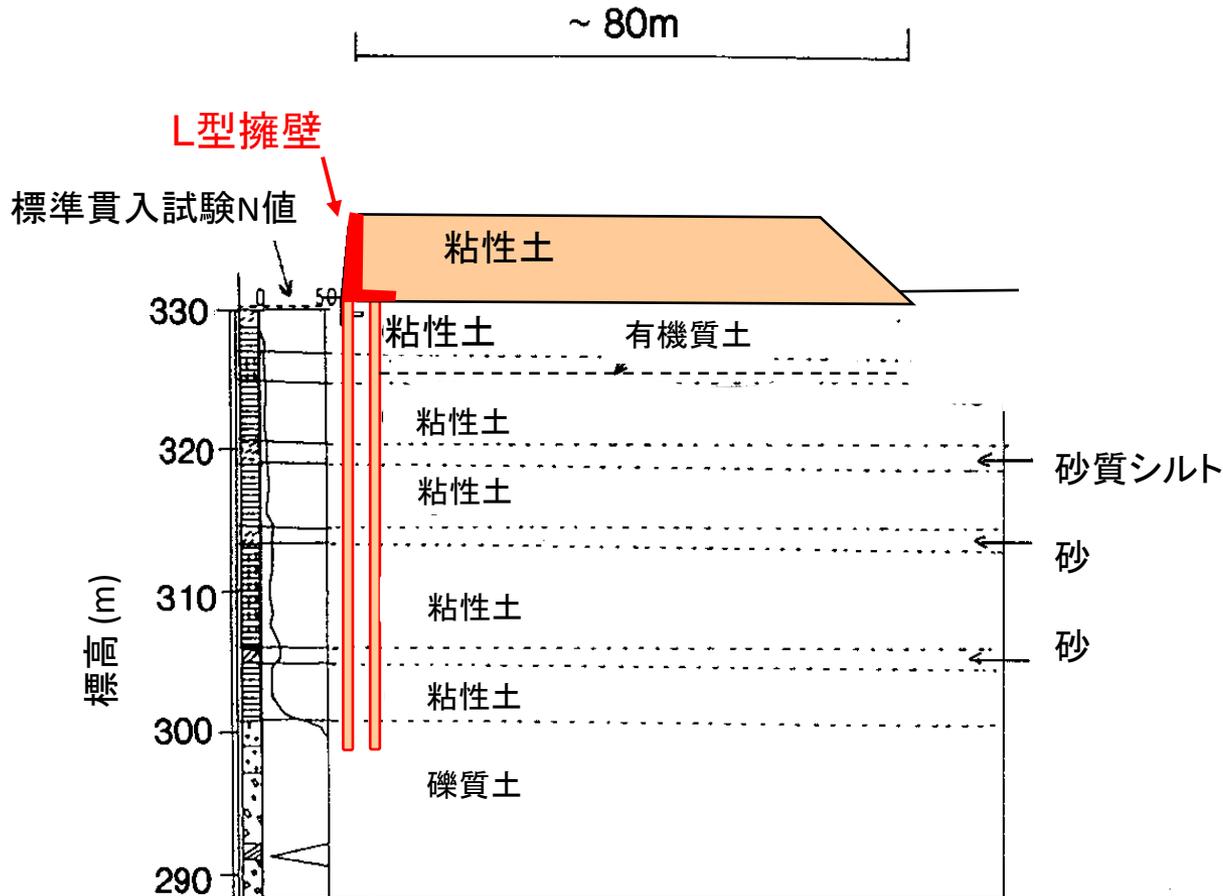
# 盛土先施工 / 剛一体壁面工後施工の利点 - 2

- 2) 壁面工と盛土の間に相対沈下が生じないので、壁面工と補強材の連結部が損傷しない。
- 従って、非常に圧縮性が高い軟弱地盤上でも、支持力不足による地盤を破壊を防げば、また圧縮性が高い盛土材を用いても、GRS擁壁を建設できる。



北陸新幹線長野車両基地建設期間：1993～1996年  
建設時平均壁高=3m；完成平均壁高=2m；総擁壁長=約2km

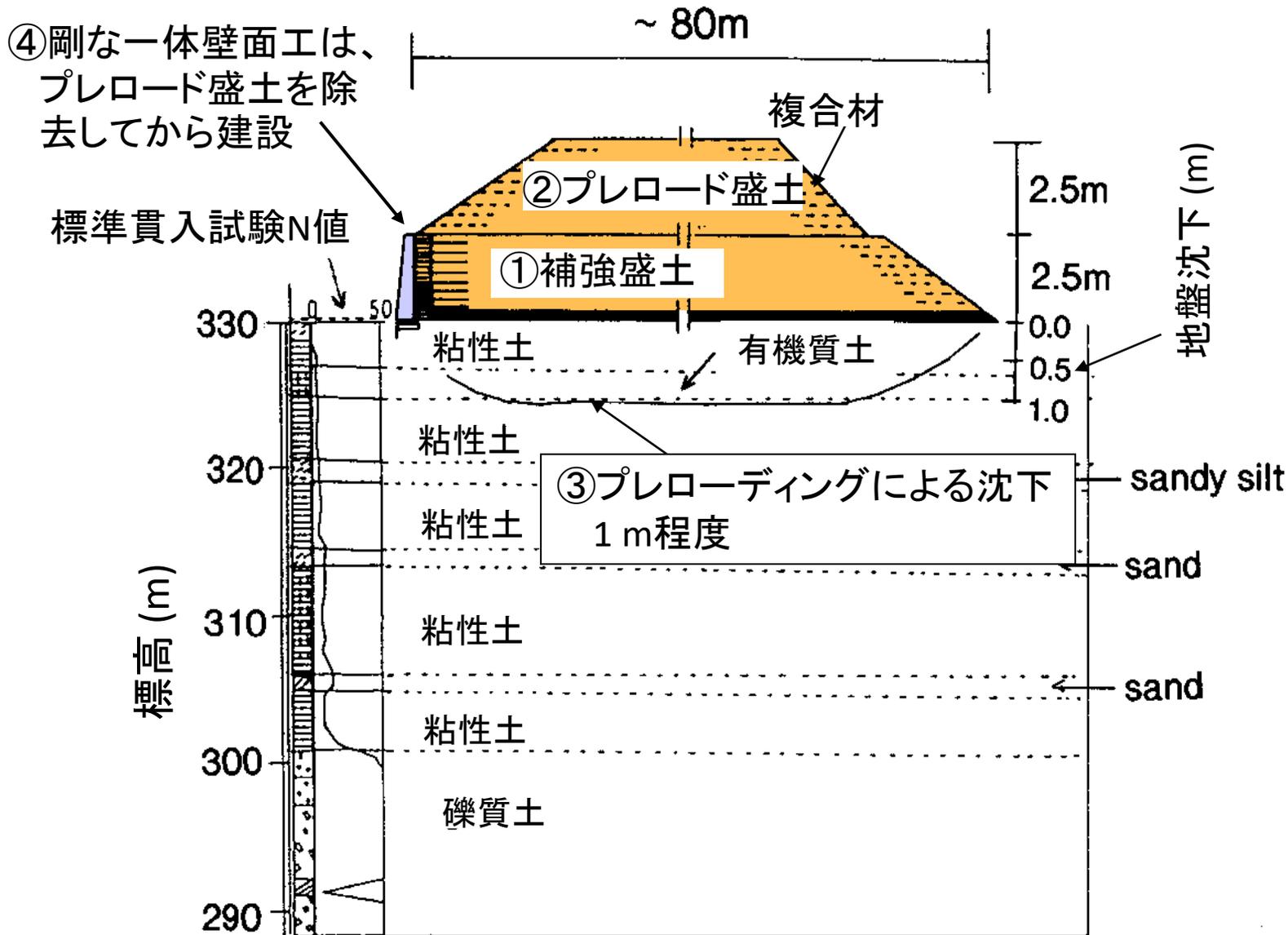
仮に、L型擁壁を採用すると……



# 北陸新幹線長野車両基地建設期間：1993～1996年

建設時平均壁高= 3 m; 完成平均壁高= 2 m; 総擁壁長= 約 2 km

解決策



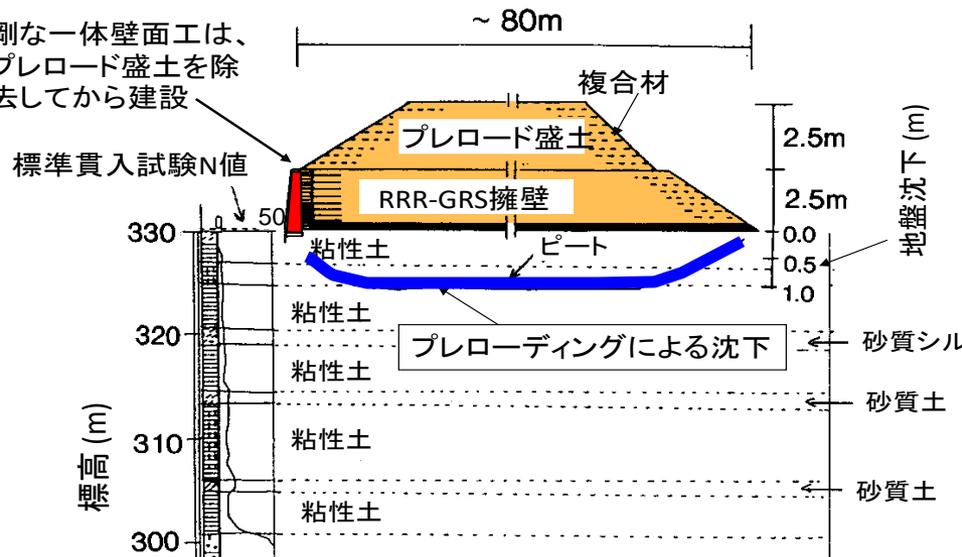
● プレロード盛土建設による地盤沈下は1m程度

盛土高さ: 初期(3 m)

⇒ 地盤沈下後(2 m)

● 壁面はかなり不規則に変形・変位、しかし剛一体壁面工はプレロード盛土除去後に施工したので、これによる問題は生じていない

剛な一体壁面工は、プレロード盛土を除去してから建設



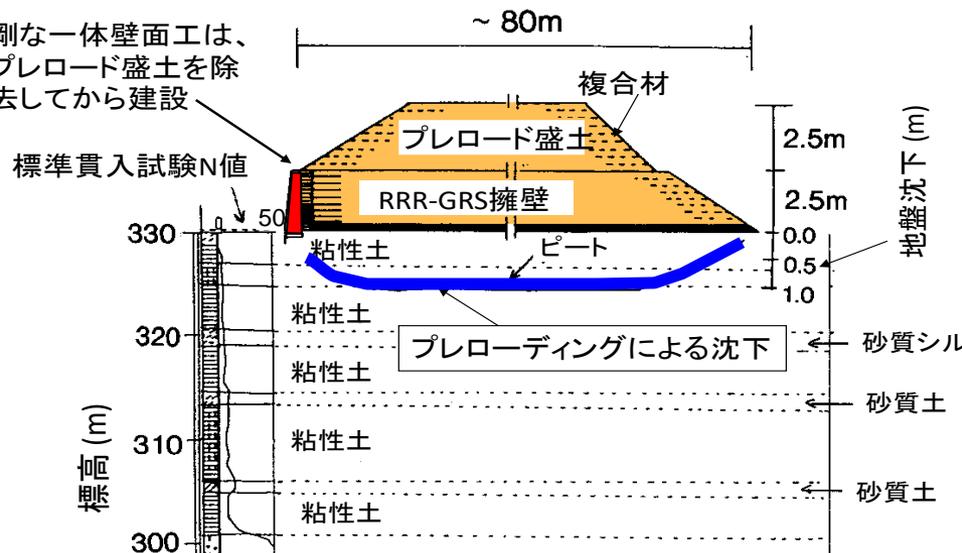
● プレロード盛土建設による地盤沈下は1m程度

盛土高さ: 初期(3 m)

⇒ 地盤沈下後(2 m)

● 壁面はかなり不規則に変形・変位、しかし剛一体壁面工はプレロード盛土除去後に施工したので、これによる問題は生じていない

剛な一体壁面工は、プレロード盛土を除去してから建設



建設18年後、  
2014年7月6日  
20年後の再訪

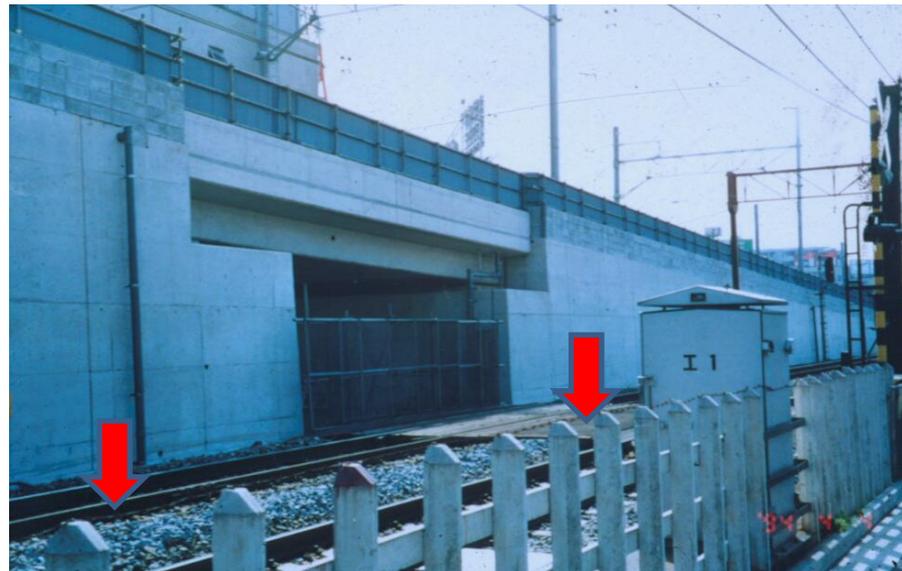
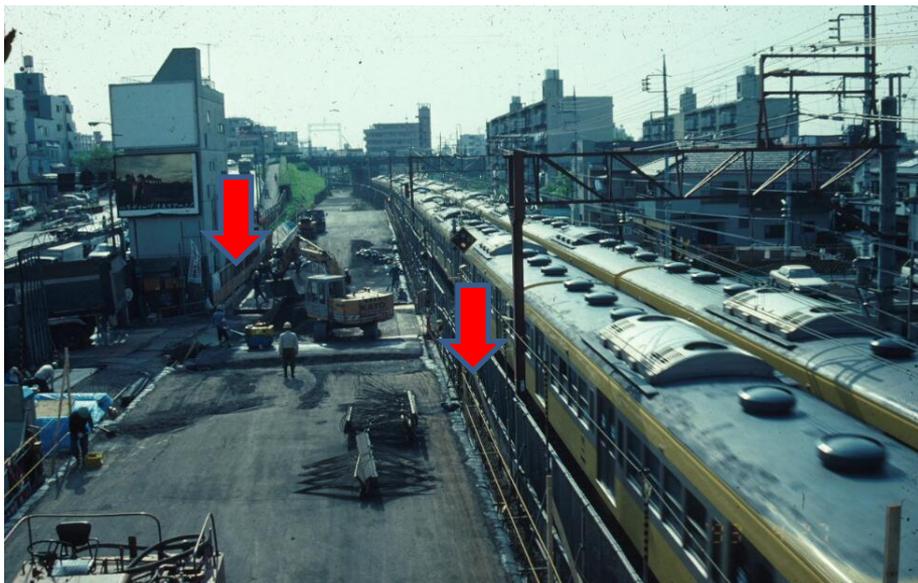


# 盛土先施工 / 剛一体壁面工 後施工の利点 - 3, 4

3) 壁面背後間際の盛土を重機で十分に締固められる。  
⇒壁面工背後に緩い盛土の弱部が形成されない



4) 盛土体の内部からコンクリート外型枠を支保  
⇒壁面の前で広い空間を占拠しないで施工ができる(↓の箇所)



# 京王線平山城址駅近傍 電車速度を上げるための 線路直線化工事

従来形式のL型RC擁壁：  
→大掛かりなコンクリート外型  
枠・内型枠とそれらの支保工  
が必要

剛な一体壁面工の建設に、  
・コンクリート内型枠とその支保工  
は不要  
・外型枠は盛土内部から支保(擁壁  
の前の支保工は不要)

従来形式L型RC擁壁



ジオシンセティック  
ク補強土擁壁

剛な一体壁面工  
の建設中

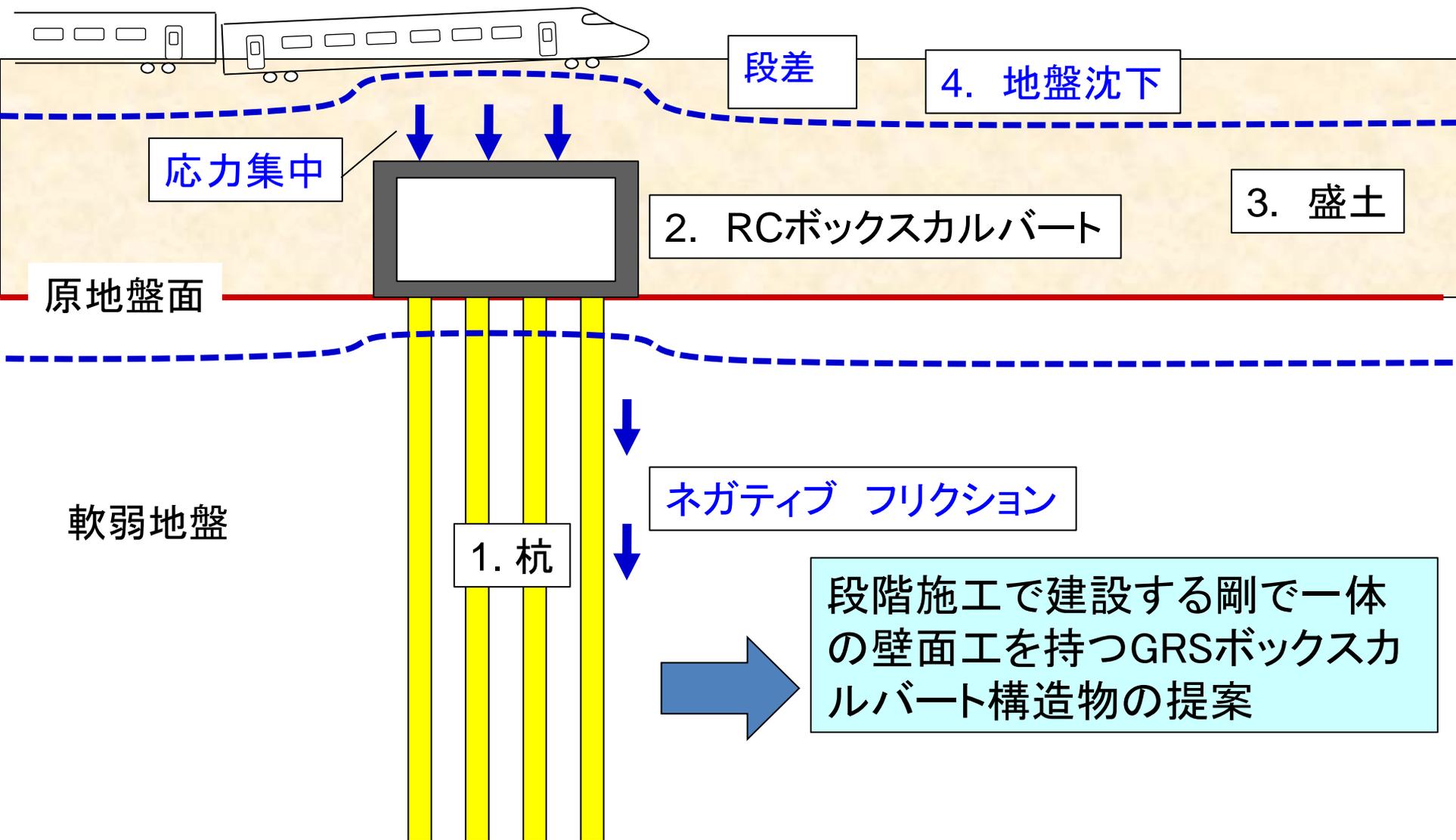


## 盛土先施工 / 剛一体壁面工後施工の利点 - 6

### 6) 壁面の位置・形状の正確な仕上げ、化粧が容易

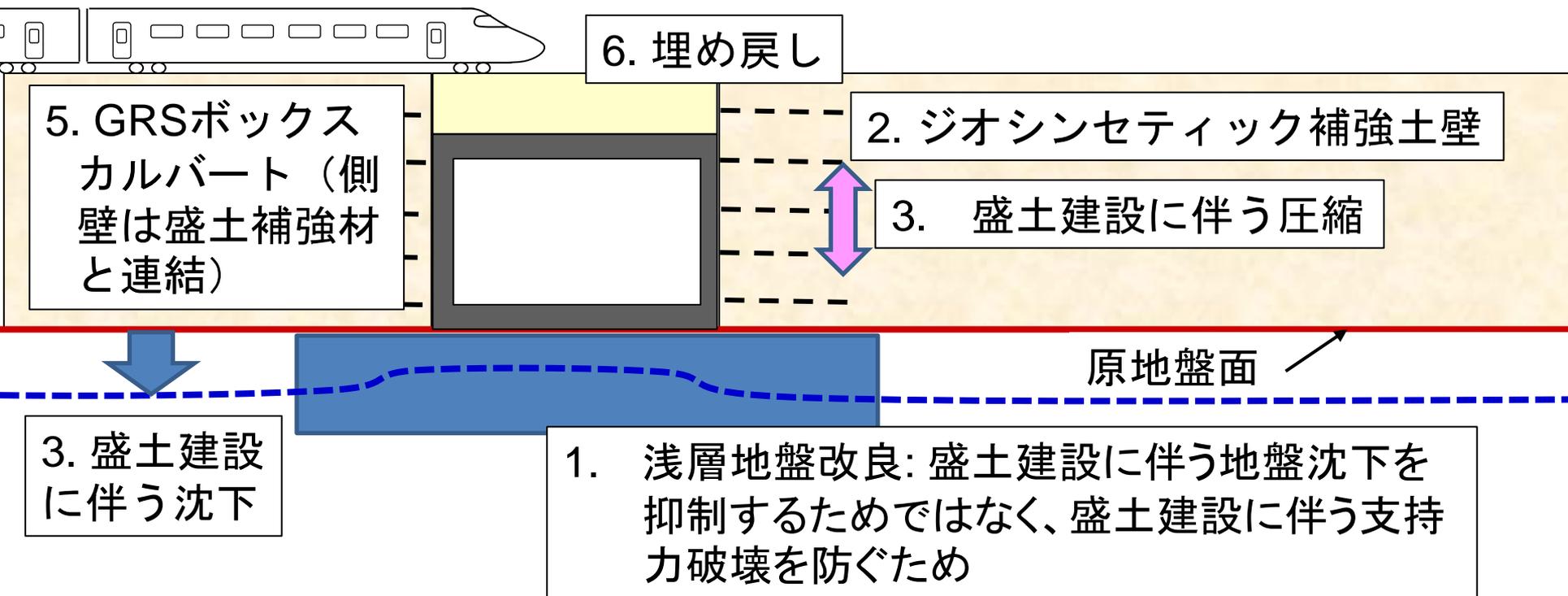


# 軟弱地盤上の道路・鉄道盛土でのRC box culvertの建設: 従来工法では諸問題が生じる



# 軟弱地盤上の道路・鉄道盛土でのGRSボックスカルバートの建設 ⇒ 段階施工による諸問題の解決

4. 盛土建設に伴う地盤沈下と盛土変形が十分に生じたことを確認。必要によってプレロード盛土を行う。



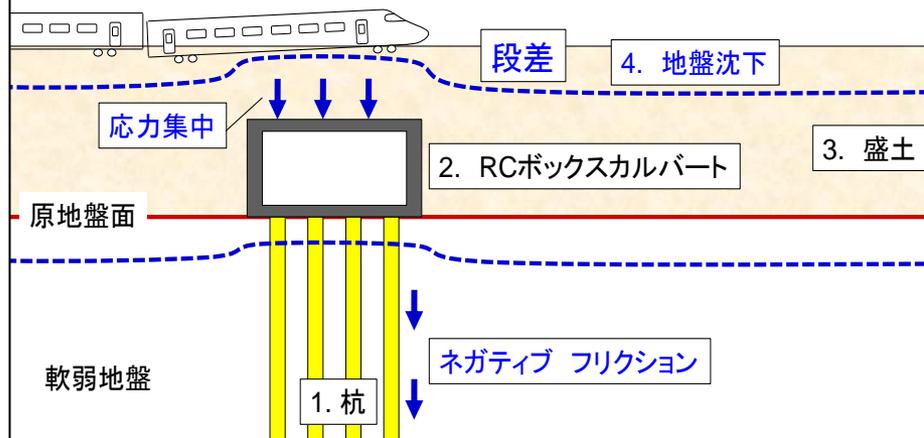
軟弱地盤

従来の構造物の先施工/盛土の後施工：  
**無補強盛土には自立性がない** ⇒ 許容変形・変位が小さいRC構造物を土留め機能を持つ抗土圧構造物として建設し、その後盛土を建設

⇒壁面工等RC構造物には、盛土建設に伴う盛土・支持地盤の変形・変位と土圧によって諸問題が発生

- ・また、杭基礎が必要(厚い軟弱地盤では多数、長尺の傾向)
- ・さらに、壁面工等RC壁体構造物の重厚化

## 盛土先行の段階施工の意義は？

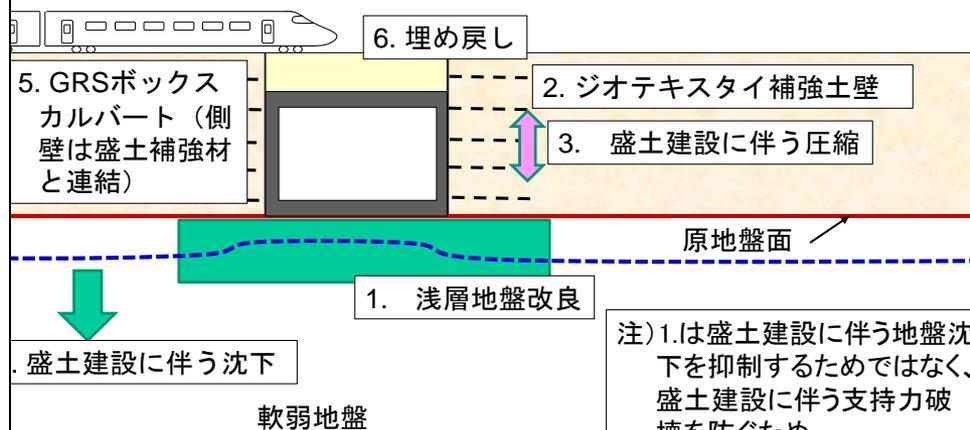


4. 盛土建設に伴う地盤沈下と盛土変形が十分に生じたことを確認。必要によってプレロード盛土を行う。

盛土の先施工/構造物の後施工：

**補強盛土には自立性がある** ⇒ RC構造物に先行して盛土を建設し、盛土・支持地盤の変形終了後に許容変形・変位が小さい壁面工等RC構造物を建設  
 ⇒RC構造物には、盛土建設に伴う支持地盤と盛土の変形・変位と土圧による変形・変位/不安定化は生じない

⇒さらに、補強材層と連結されたRC構造物は簡素になり、杭基礎は不要となる



注)1.は盛土建設に伴う地盤沈下を抑制するためではなく、盛土建設に伴う支持力破壊を防ぐため

# GRS構造物- 擁壁から橋台への発展 -

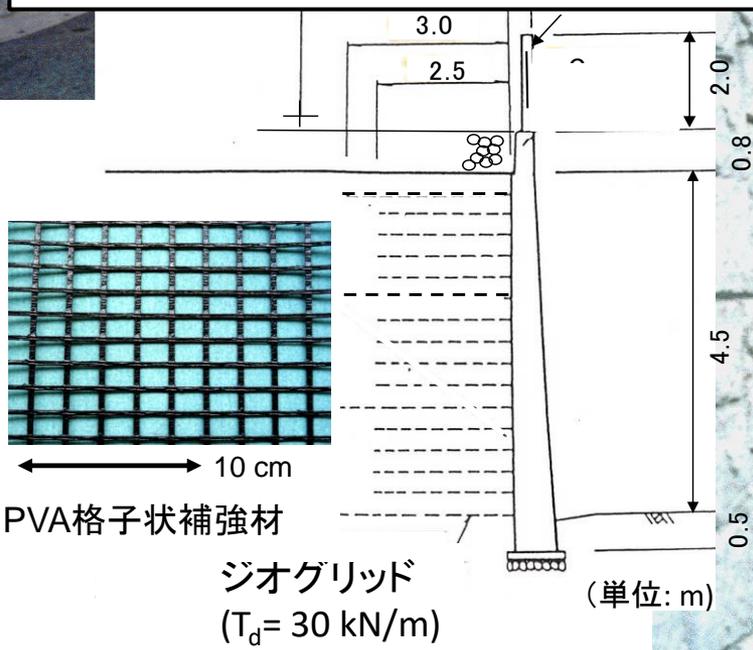
- 1) 従来形式の擁壁は片持ち梁！ 補強土擁壁は非片持ち梁！
- 2) 剛な一体壁面工を持つGRS構造物の最近の施工例
- 3) 剛な一体壁面工を持つGRS擁壁の特徴
  - ・剛な一体壁面工の効用の“発見”と活用
  - ・クリープは劣化に非ず、クリープでは強度は低下しない
  - ・壁面工を盛土の後に建設する効用の“発見”と活用
- 4) 自然災害で崩壊した土構造物のGRS構造物による強化復旧：  
地震・洪水・豪雨・津波
- 5) GRS擁壁からGRS橋台・GRS一体橋梁への発展
  - a) 従来形式の橋台・橋梁の諸問題
  - b) GRS橋台とGRS一体橋梁の利点 - 低建設費、高維持管理性・耐震性/耐津波性
- 6) 新幹線西九州ルート、金沢・敦賀間でのGRS構造物
- 7) まとめ

1992年7月建設直後

# JR神戸線たなた ジオシンセティック補強土 (GRS)擁壁

1995年1月, 兵庫県  
南部地震の1週間後

たなたGRS擁壁では、補強材全層がかなり短かった。これは、既設鉄道の運行を停止できず、その下の盛土内に補強材を配置できなかったための例外的配置  
⇒ このGRS擁壁のこの地震での挙動は、重要な技術的課題を提起



1992年7月建設直後

# JR神戸線たなた ジオシンセティック補強土 (GRS)擁壁

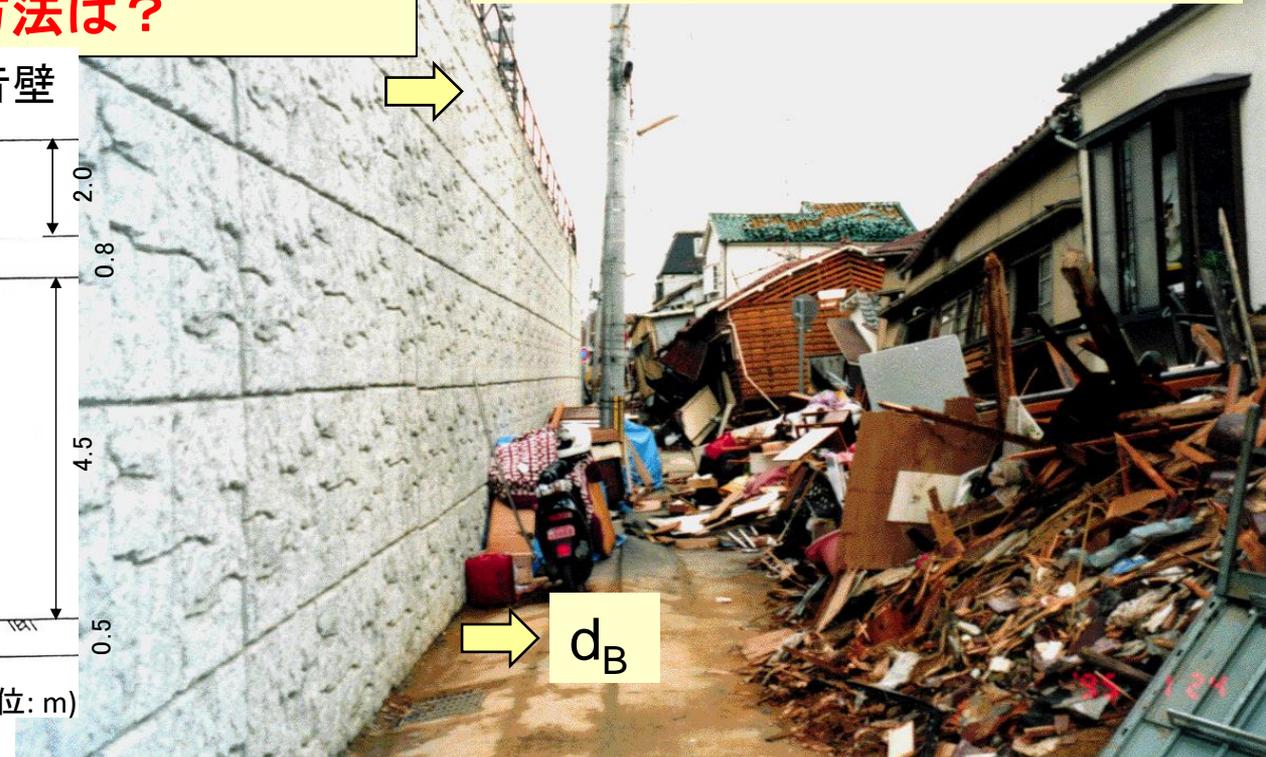
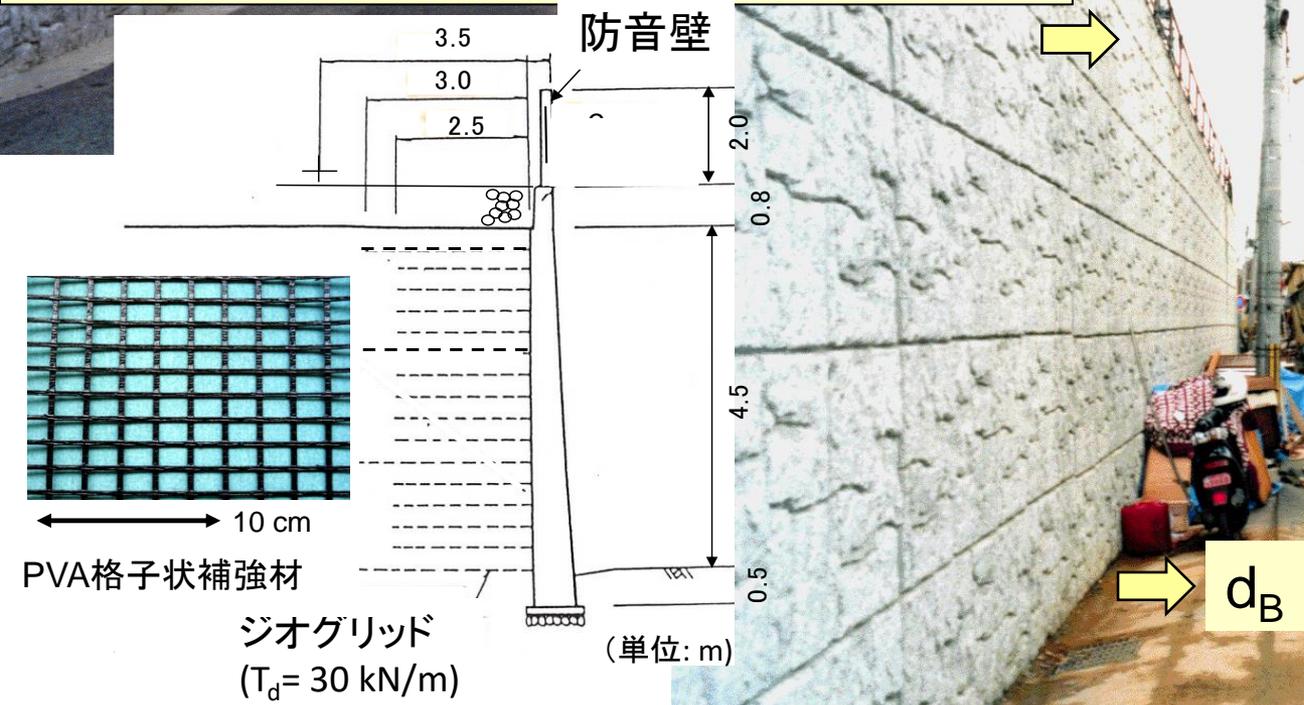
このやや大きな変形・変位は、補強材全層が短すぎたため

$$L/H = 2\text{m} / (\text{平均高さ}5\text{m}) = 40\%$$

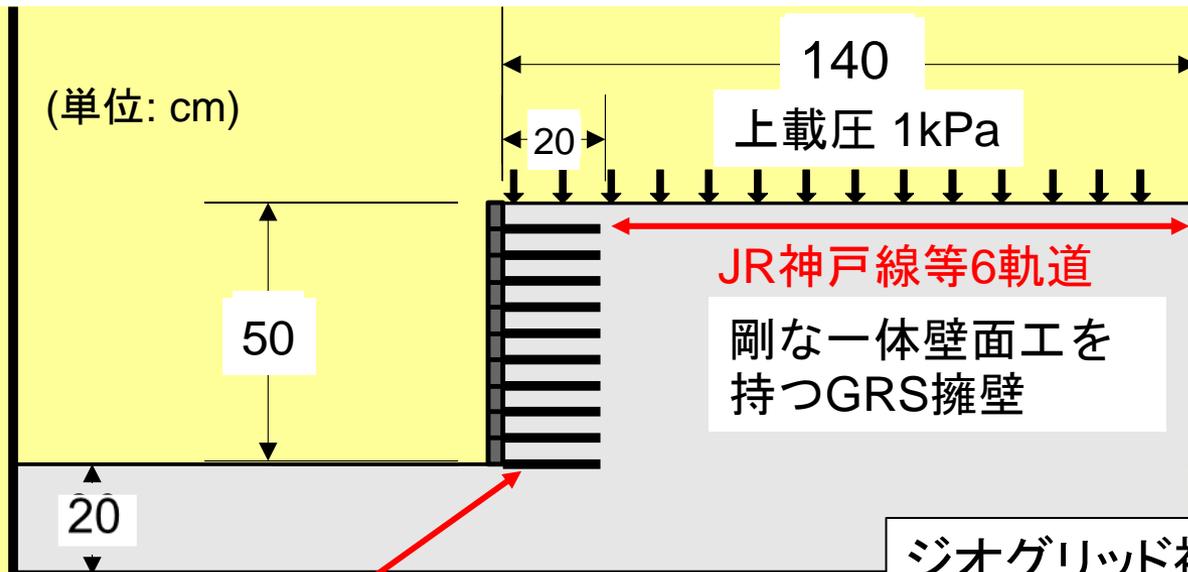
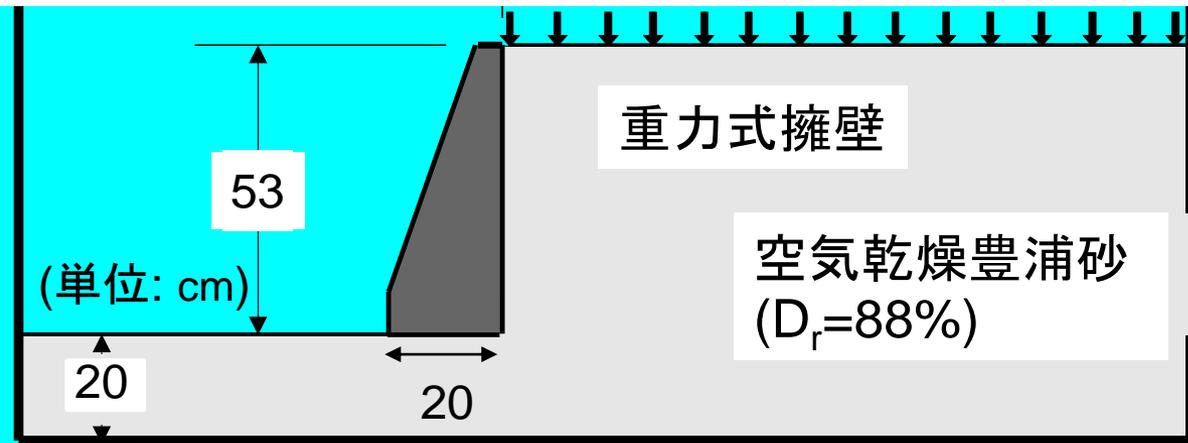
(下図の断面では  $H = 4.5\text{ m}$ )

⇒ **技術的課題No.1:**  
擁壁が十分安定でかつ経済的である適切な補強材の配置方法は？

高い耐震性、しかし、無視できない変形・変位：  
せん断変形  $\approx 2.7\%$   
底部水平滑動  $d_B/H \approx 2\%$   
⇒ 許容限界を若干超えた！



# 片持ち梁形式擁壁とGRS擁壁の振動台実験 (Koseki et al., 2008)



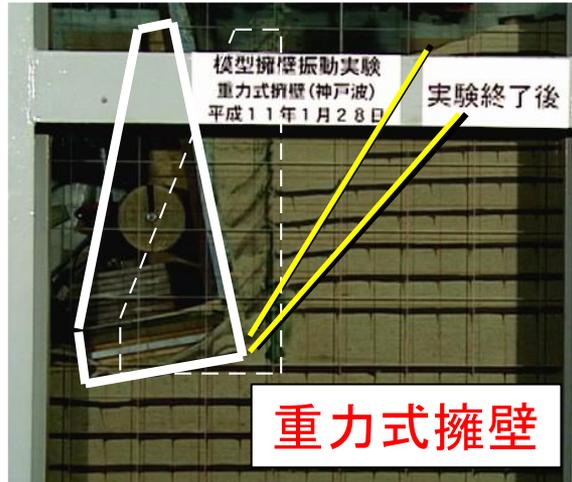
倒壊せず、しかし、小さくないの変形・変位



ジオグリッド補強材: 全層L/H= 0.4と短い、  
運行停止できない鉄道軌道の下には敷設  
できなかったための例外的な処置  
旧指針による耐震設計(水平震度  $k_h= 0.2$ 、  
許容安全率  $F_s= 1.5$ )

模型補強材 (厚さ0.2mm  
のリン青銅の格子10層)

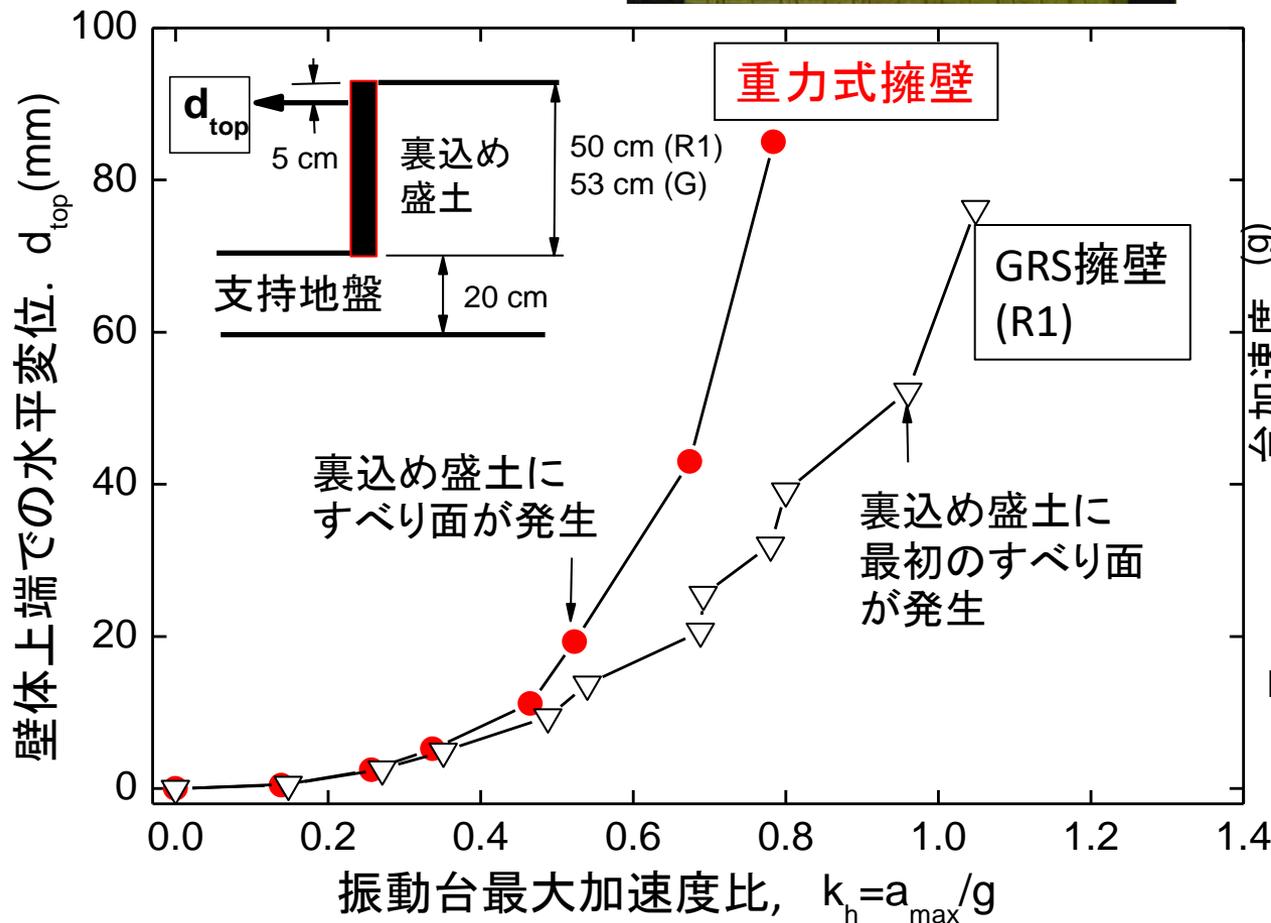
(Koseki et al., 2008)



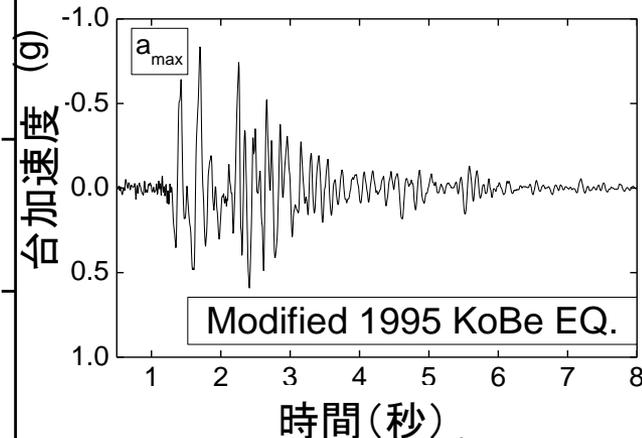
### 剛一体壁面工GRS擁壁 (R1):

- ・重力式よりも安定(より延性的な挙動)
- ・しかし、かなりのせん断変形

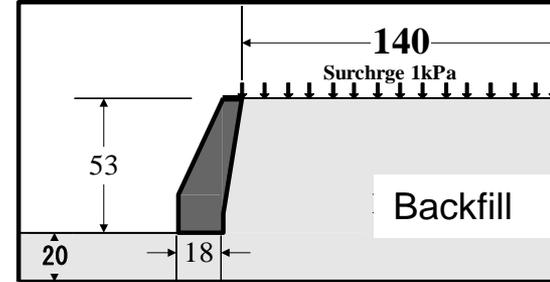
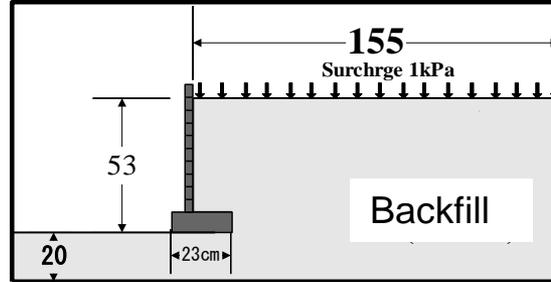
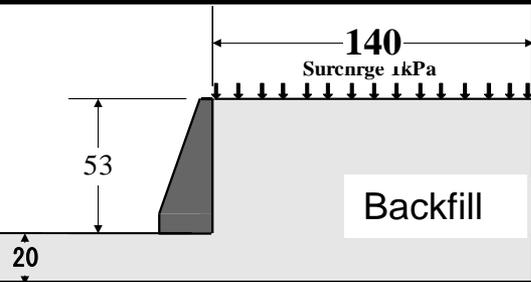
これらの模型擁壁の挙動は、実擁壁の挙動の傾向と類似



模型実験では、 $\alpha_{max}$ を段階的に増加



Koseki, J., Tateyama, M., Watanabe, K and Nakajima, S. 2008. Stability of earth structures against high seismic loads, Keynote Lecture, Proc. 13<sup>th</sup> ARC on SMGE, Kolkata, Vol. 2, pp.222-241.

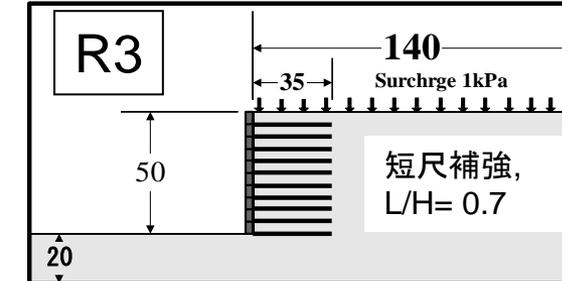
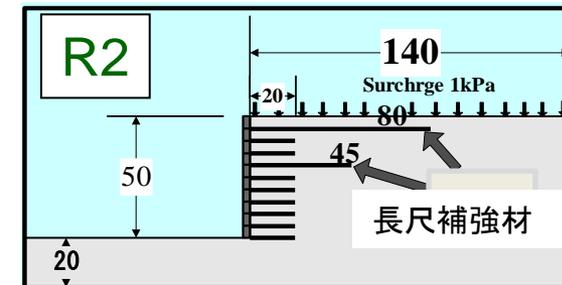
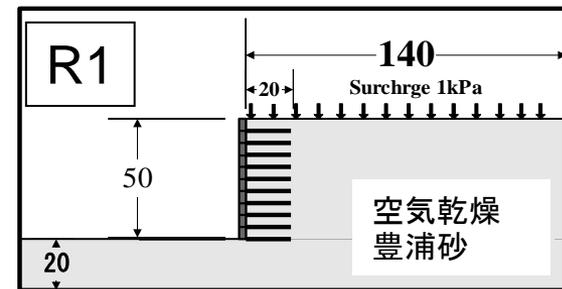
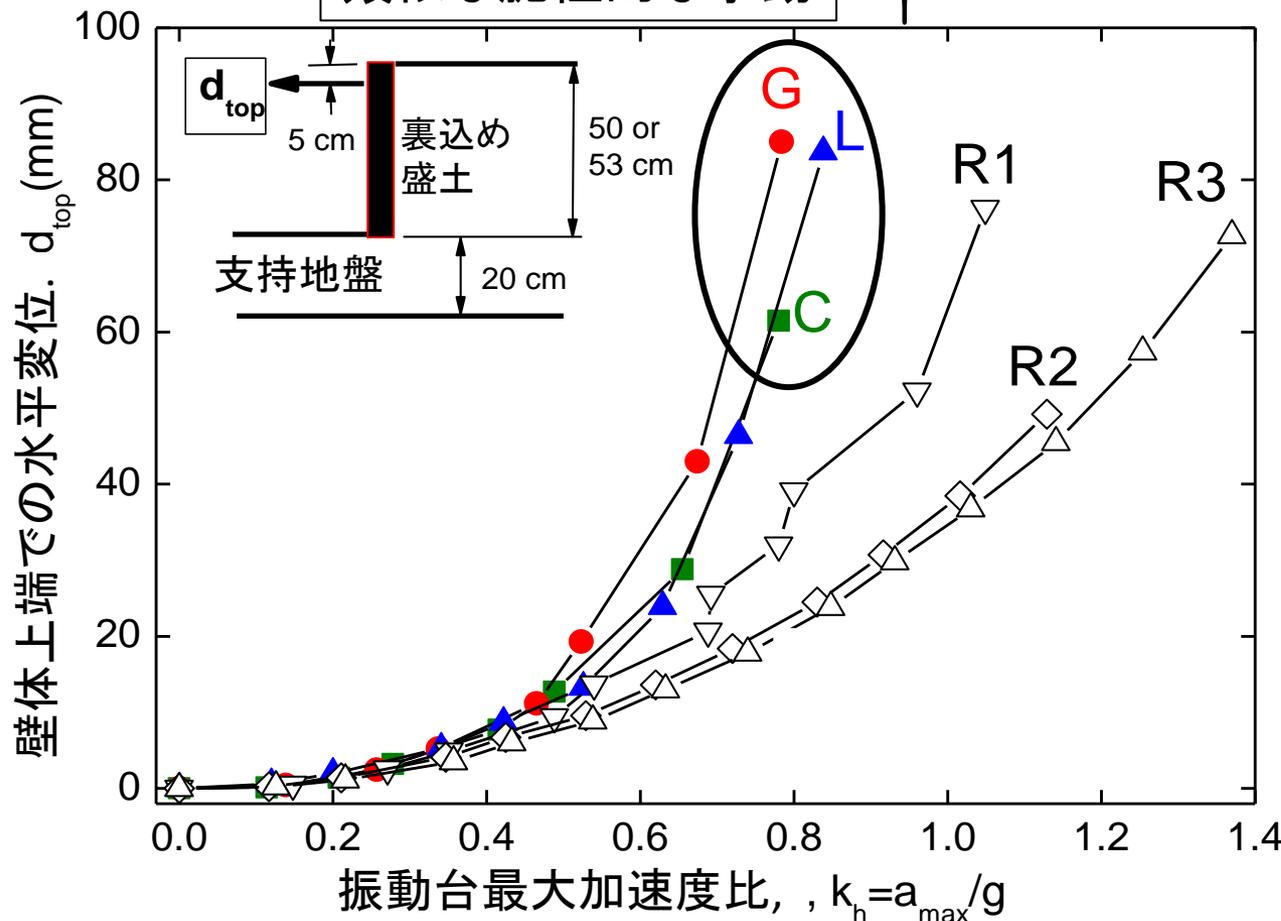


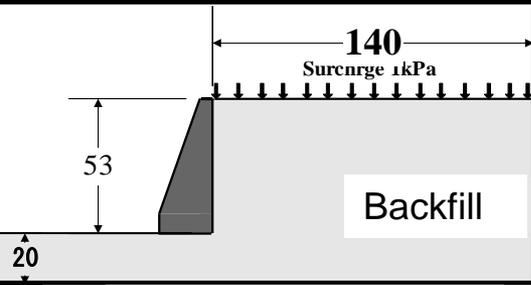
G: 重力式擁壁

C: 片持梁擁壁 (逆T)

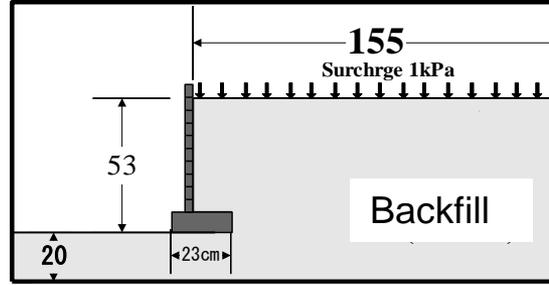
L: 片持梁擁壁 (もたれ式)

類似な脆性的な挙動

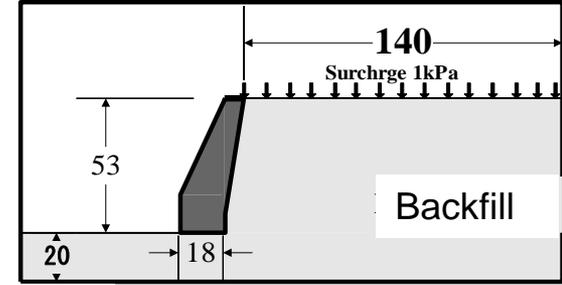




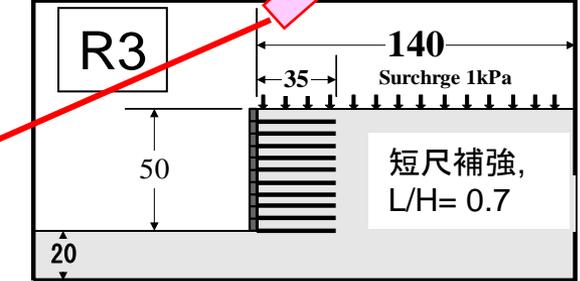
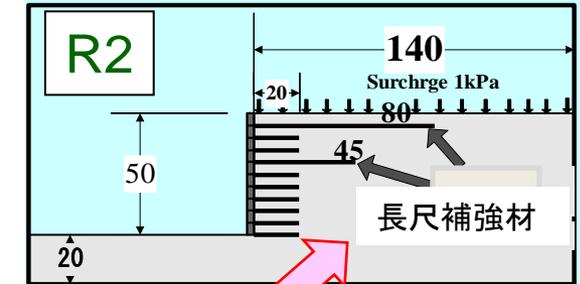
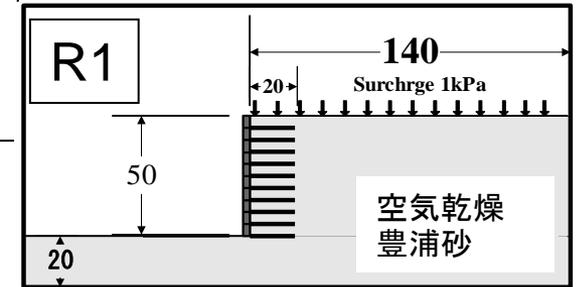
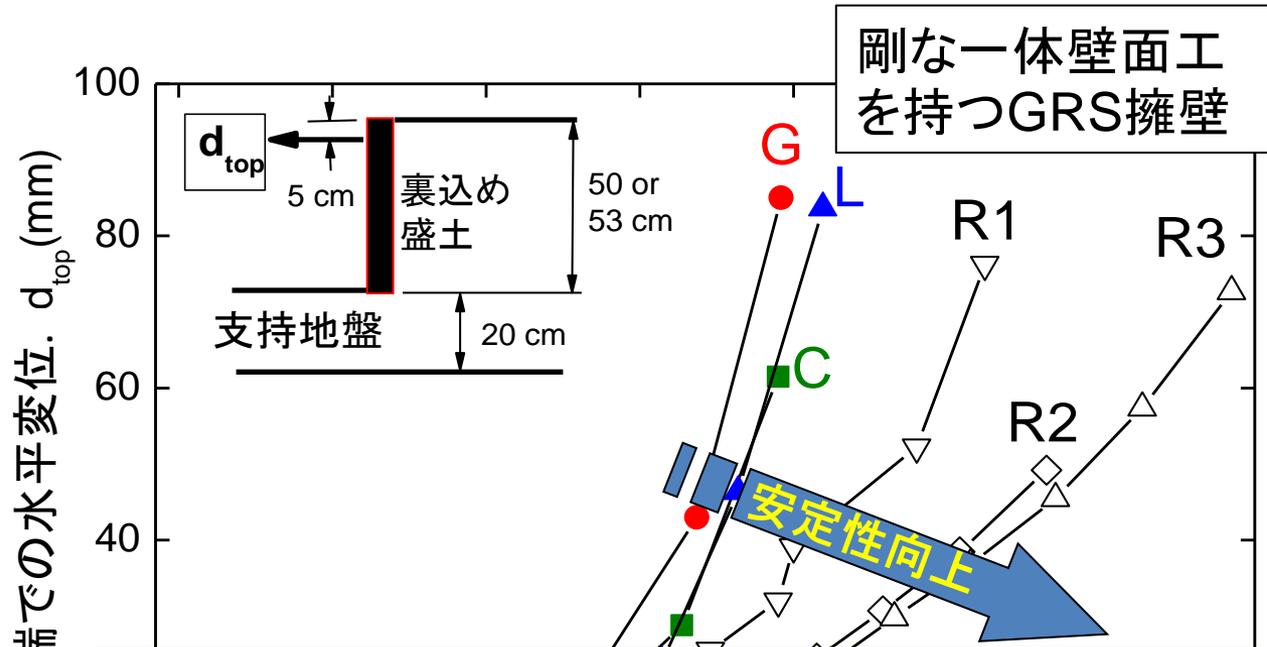
G: 重力式擁壁



C: 片持梁擁壁 (逆T)



L: 片持梁擁壁 (もたれ式)



R2: ①R1よりも安定、②R3と類似な安定性、③R3よりも補強材量が少ない、④腹付け擁壁の場合、R3よりも既設斜面の掘削が縮減 ⇒ 現在の基本的な補強材配置はR2

振動台最大加速度比,  $k_h = a_{max}/g$

剛な一体壁面工と補強領域が一体となって挙動 ⇒ 安定性の向上

# もう一つの基本的な技術課題: 耐震設計の合理化

JR神戸線たなた  
ジオシンセティック補強土  
(GRS)擁壁

このGRS擁壁は、旧耐震設計法で設計: 設計水平震度 $(k_h)_d = 0.2$  (Level 1), 安全率1.5。しかし、Level 2地震動 $k_h = \alpha_{max}/g > 0.8$ でも崩壊しなかった  
⇒ この想定外の高性能は、この原設計における各種の余裕によるもの

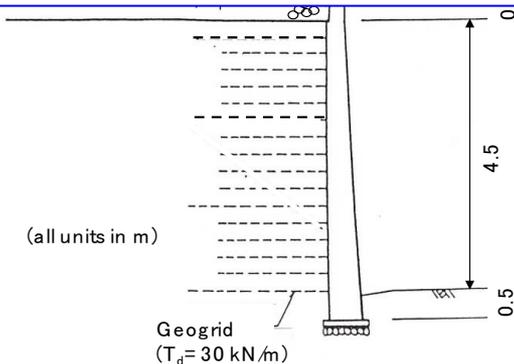
原設計での各種の余裕(→安定性の過小評価):

1) “**明示された余裕**”: 計算された安全率を $F_s$ とすると、  
“ $F_s - 1.0$ ”  $\geq 1.5 - 1.0 = 0.5$  ⇒ 施工が適切なほど、より有効に機能

2) “**明示されていない余裕**”: **冗長性(Redundancy)**

2a) 見掛けの粘着力 $c$ の無視 ⇒ 盛土が不飽和ならば、一定の $c$ は有効

2b) 浅い根入れ効果の無視 ⇒ 通常は、一定程度の根入れ効果は有効



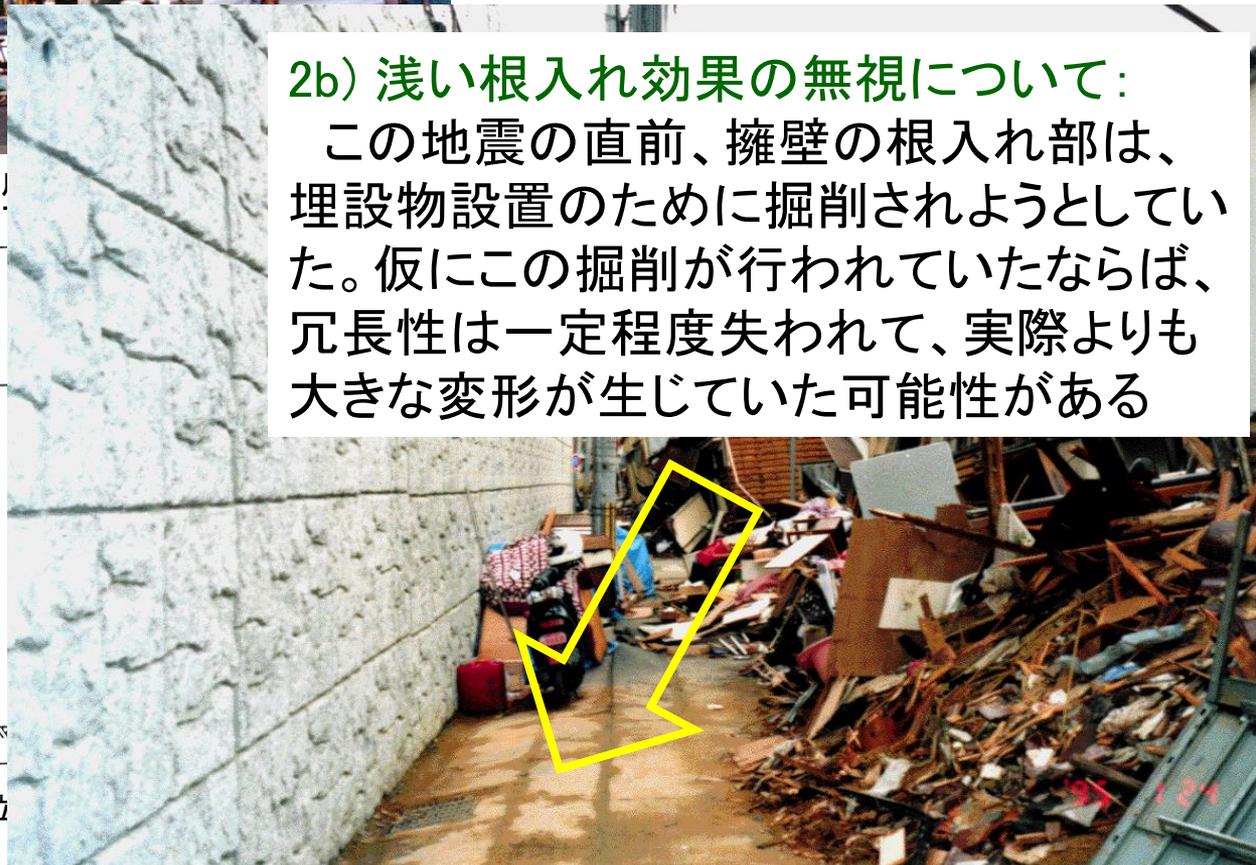
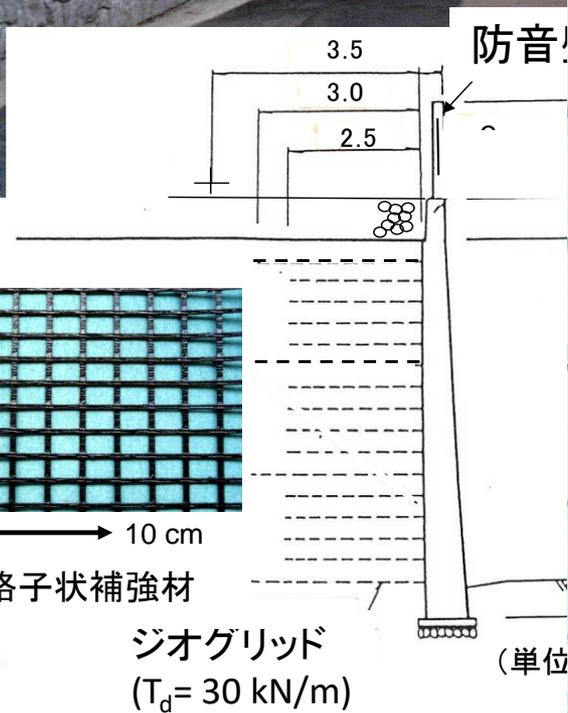
1992年7月建設直後



# JR神戸線たなた ジオシンセティック補強土 (GRS)擁壁

1995年1月, 兵庫県  
南部地震の1週間後

2b) 浅い根入れ効果の無視について:  
この地震の直前、擁壁の根入れ部は、埋設物設置のために掘削されようとしていた。仮にこの掘削が行われていたならば、冗長性は一定程度失われて、実際よりも大きな変形が生じていた可能性がある



1992年7月建設直後

## JR神戸線たなた ジオシンセティック補強土 (GRS)擁壁

このGRS擁壁は、旧耐震設計法で設計(設計水平震度( $k_h$ )<sub>d</sub> = 0.2 (Level 1), 安全率1.5)。しかし、Level 2地震動  $k_h = \alpha_{max}/g > 0.8$  でも崩壊しなかった  
⇒ この想定外の挙動は、この原設計における各種の余裕によるもの

原設計での各種の余裕(→安定性の過小評価):

- 1) “**明示された余裕**”: 計算された安全率を $F_s$ とすると、  
“ $F_s - 1.0$ ”  $\geq 1.5 - 1.0 = \mathbf{0.5}$  ⇒ 施工が適切なほど、より有効に機能
- 2) “**設計での明示されていない余裕**”: **冗長性(Redundancy)**
  - 2a) 見掛けの粘着力 $c$ の無視 ⇒ 盛土が不飽和ならば、一定の $c$ は有効
  - 2b) 浅い根入れ効果の無視 ⇒ 通常は、一定程度の根入れ効果は有効
  - 2c)  $\phi$ の過小評価 ( $\phi_{design} = 35^\circ$ ) ⇒ 締固めが良ければ、実際の $\phi_{peak}$ (ピーク強度)を過小評価
  - 2d)  $F_s = 1.0$  で崩壊と判定 ⇒ 実際は、「動的変位による慣性抵抗を考慮しない通常の極限釣り合い法で計算した $F_s$ 」が 1.0 以下になっても、直ちに崩壊する訳ではなく、残留変形が一定の値以下ならば許容できる

1992年7月建設直後

## JR神戸線たなた GRS擁壁



原設計での各種の余裕(→安定性の過小評価):

1) “明示された余裕”: 計算された安全率を $F_s$ とすると、

$$“F_s - 1.0” \geq 1.5 - 1.0 = 0.5$$

2) ”設計で明示されていない余裕”: 冗長性

2a) 見掛けの粘着力の無視 ( $c=0$ );

2b) 浅い根入れ効果の無視;

2c) 設計での $\phi$ の過小評価 ( $\phi_{\text{design}} = 35^\circ$ )

2d)  $F_s = 1.0$ で崩壊、 $F_s < 1.5$ を許容しない

「レベル2設計地震動を考慮する耐震設計」でも、これらの冗長性は長期に亘っては信頼できないとして活用せず、依然”隠された余裕“としておく方針

⇒耐震設計の合理化の方針:

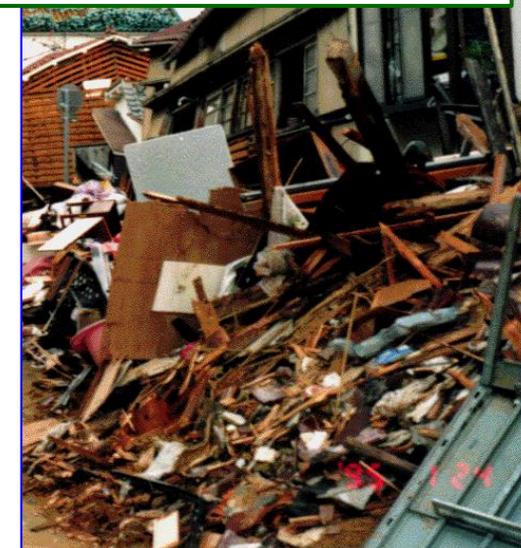
① 実際的なレベル2設計地震動を考慮

② 上記の赤字の部分の余裕を活用

実際の現象により良く対応した耐震設計法にする!

ただし、各種の不確定的な冗長性は残す。

1995年1月, 兵庫県  
南部地震の1週間後



原設計での各種の余裕(→安定性の過小評価):

1) “明示された余裕”: 計算された安全率を $F_s$ とすると、

$$“F_s - 1.0” \geq 1.5 - 1.0 = 0.5$$

2) ”設計で明示されていない余裕”: 冗長性

2a) 見掛けの粘着力の無視 ( $c=0$ );

2b) 浅い根入れ効果の無視;

2c) 設計での $\phi$ の過小評価 ( $\phi_{\text{design}} = 35^\circ$ )

2d)  $F_s = 1.0$ で崩壊、 $F_s < 1.5$ を許容しない

現在の鉄道構造物の「実際的なレベル2設計地震動を考慮する耐震設計」では、これらの余裕は施工が適切ならば信頼できるとして、顕在化させ活用。

即ち:

2c) ⇒ 従来の $\phi_{\text{design}}$ は「締固めの効果を反映していない残留強度 $\phi_{\text{res}}$ 」と見なし、良い締固めを保証できる場合は $\phi_{\text{peak}}$ と $\phi_{\text{res}}$ を用いる(ただし、粒径ゼロですべり変位ゼロで $\phi_{\text{peak}}$ から $\phi_{\text{res}}$ に瞬時低下と仮定→粒径が大きいほど大きくなる冗長性となっている)

1) & 2d) ⇒ Newmark法で算定した残留変形量に基づいて耐震性を評価:

1) ⇒ 「動的変形による慣性抵抗を考慮しないで計算した $F_s$ 」が1.0 - 1.5の間であれば、すべりによる残留変形が生じないとして許容

2d) ⇒ 「 $F_s$ の計算値」 $\leq 1.0$ の状態でも、残留変形が許容値以下ならば許容

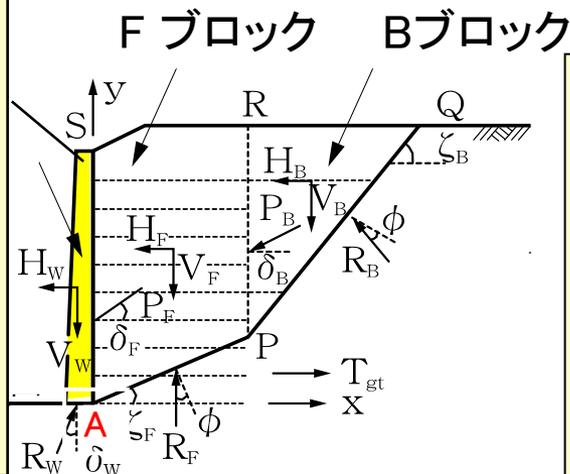
# レベル2設計地震動に対するGRS擁壁の残留変形解析

鉄道構造物等設計標準・同解説 土留め構造物:146-147頁、付属資料13

堀井克己・館山 勝・古関 潤一・龍岡 文夫 (1998): 剛壁面補強土壁の大規模地震時の安定・変形解析、ジオシンセティックス論文集No.13, 12月, 国際ジオシンセティックス学会日本支部

補強材と連結された剛一体壁面工とFブロックは一体として挙動するとする⇒

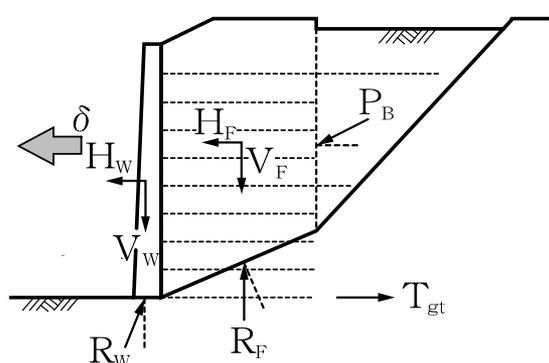
- ①すべり面は点Aから出発
- ②壁面工背面での土圧を算定して、それに対して補強材引張り破断強度は十分に大きいかを確認



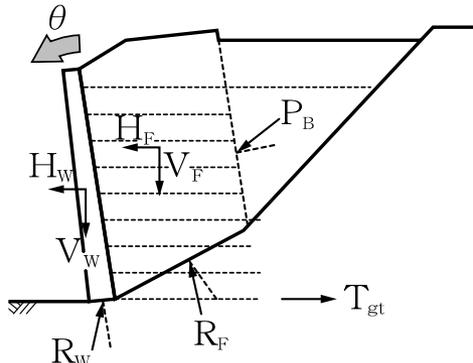
a)滑動とb)転倒に関して

- ①臨界すべり面の位置は $\phi_{peak}$ を用いて探索し、
- ②そのすべり面に沿って $\phi_{residual}$ が発揮されるとして力の釣合に基づきNewmark法により残留変位を計算

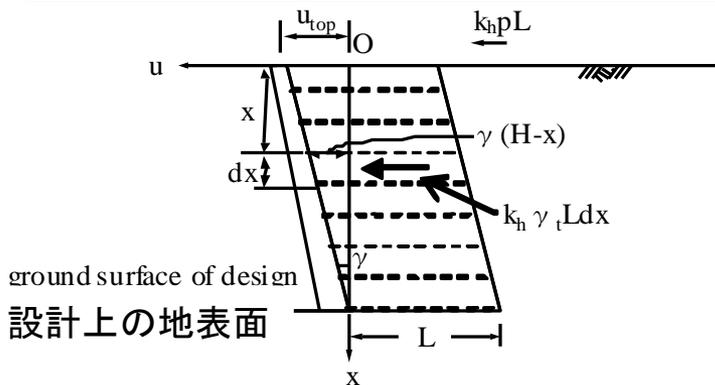
## 二重楔法 (Two-Wedge法) による力の釣合解析



a)滑動モード



b)転倒モード

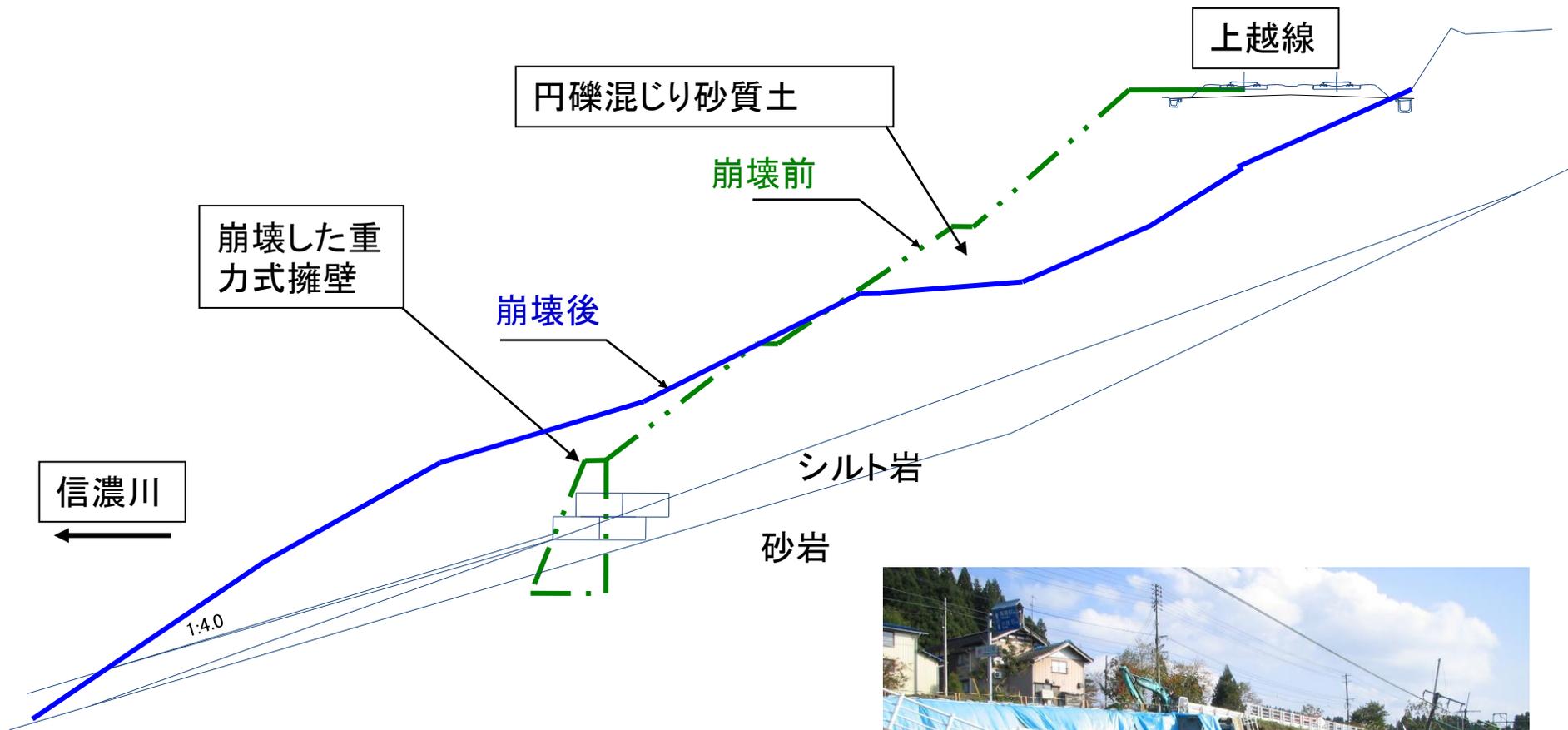


c)せん断変形モード

計算法は、模型実験結果と実例で検定。

合計残留変形は、夫々のモードでの残留変形を別個に計算して合計(安全側の近似)。三つのモードは連成して生じるので、本来は連成効果を考慮する必要、しかしその方法は未確立。

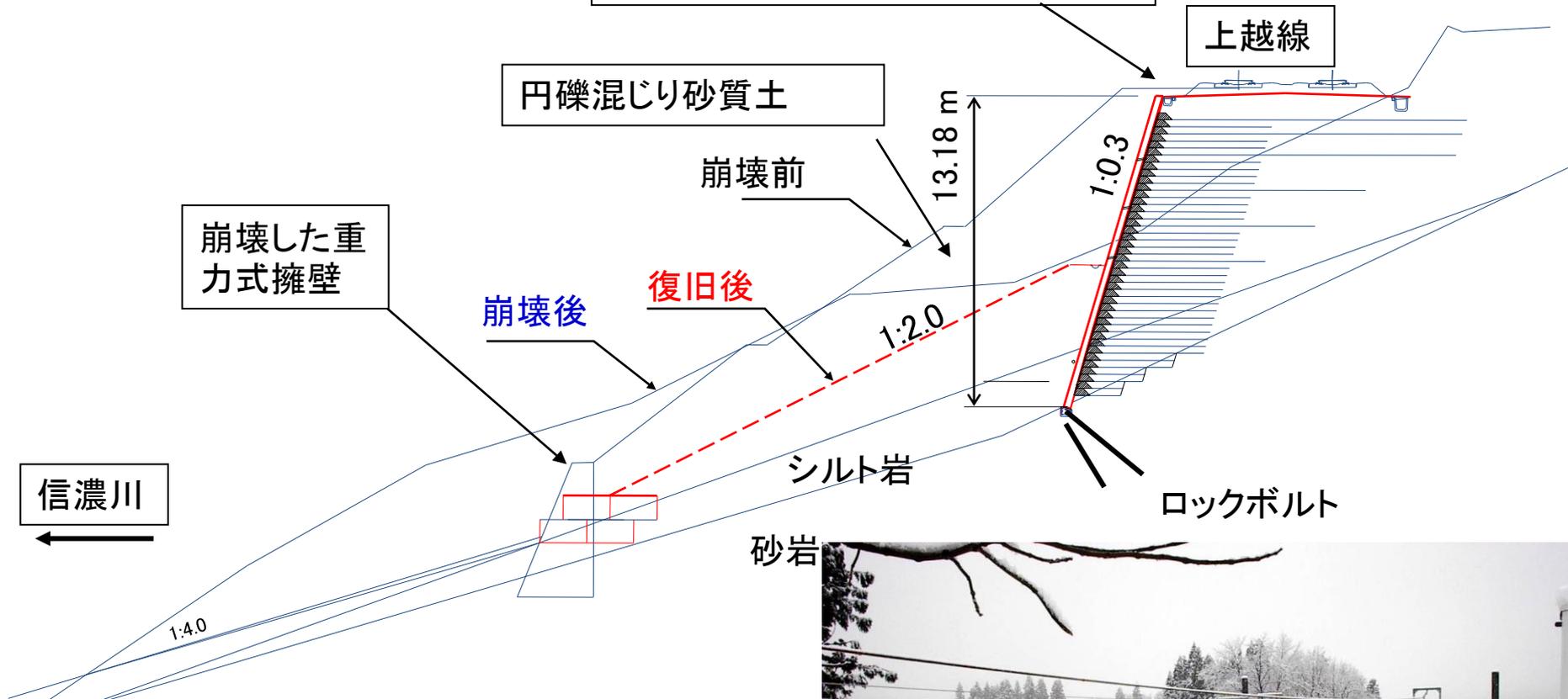
# 2004年新潟中越地震、JR東日本上越線



JR東日本上越線221k00m付近の崩壊(数か所)



強化復旧後の剛な一体壁面工を持つGRS擁壁の特徴



レベル2設計地震動を考慮した  
新しい耐震設計による強化復旧:  
従来工法による原状復旧よりも、

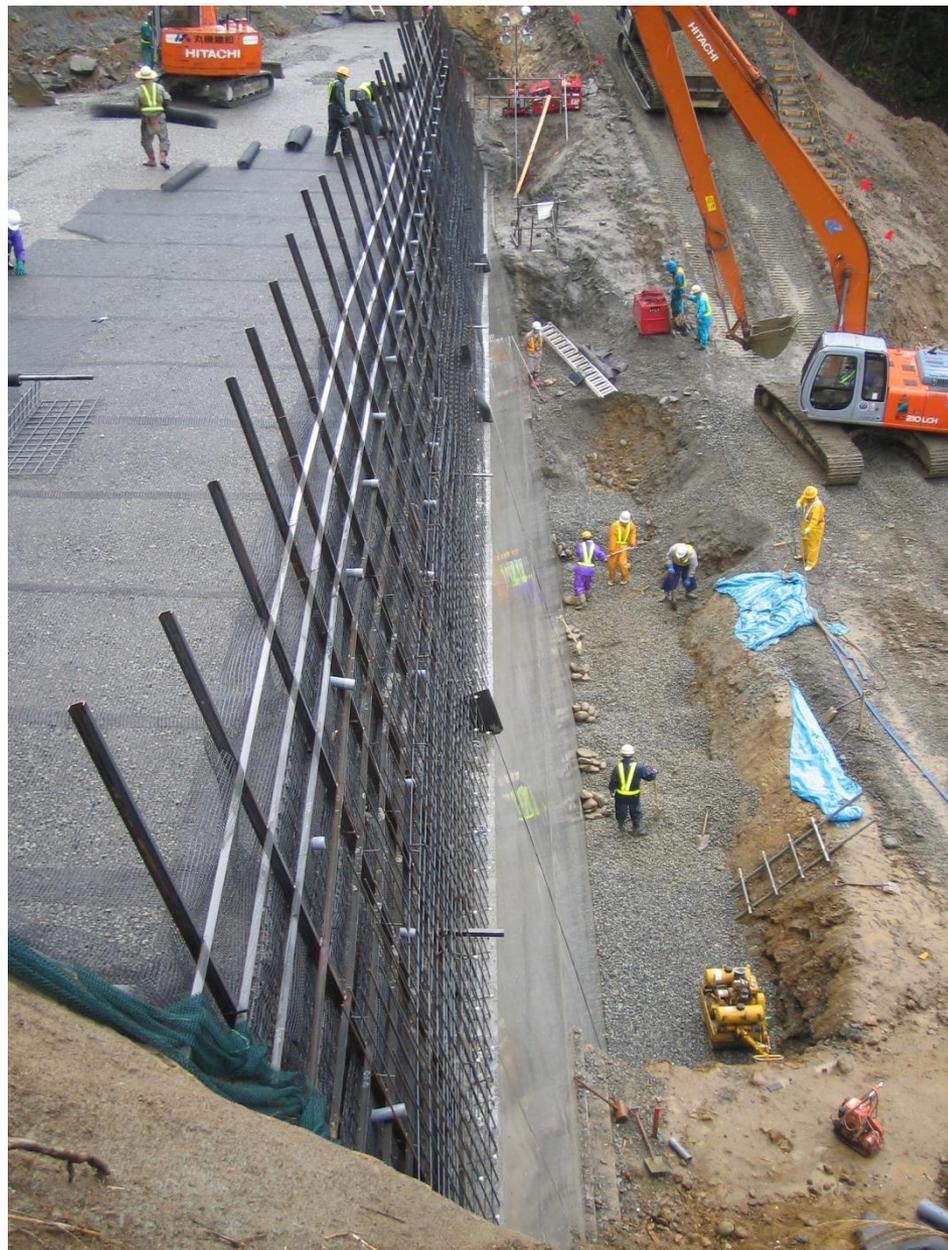
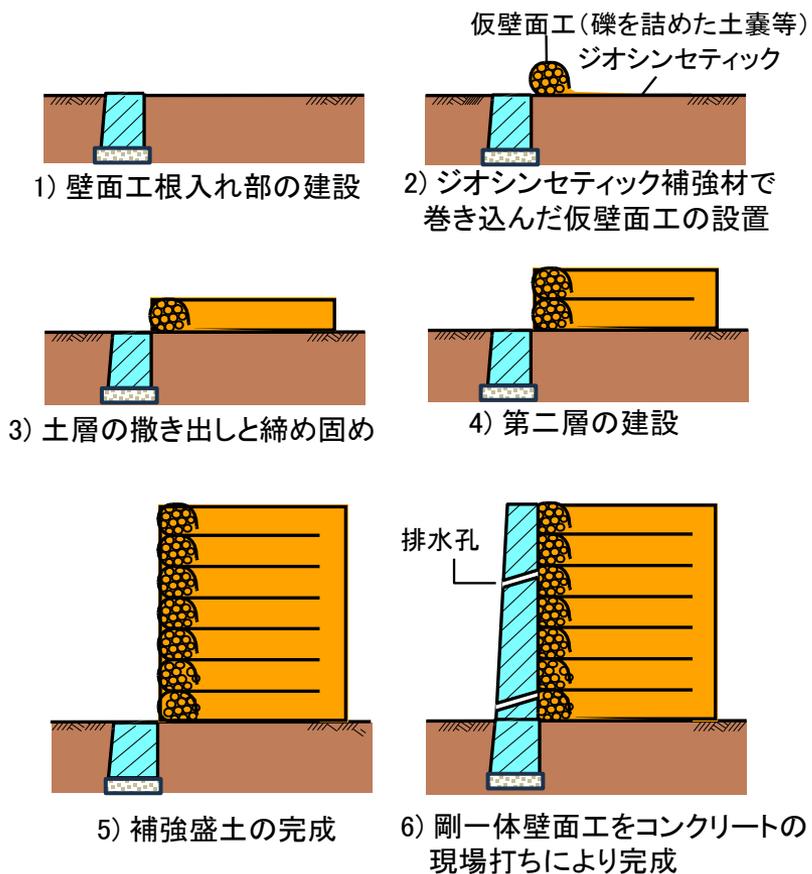
- ・より安定
- ・より短い工期
- ・より経済的

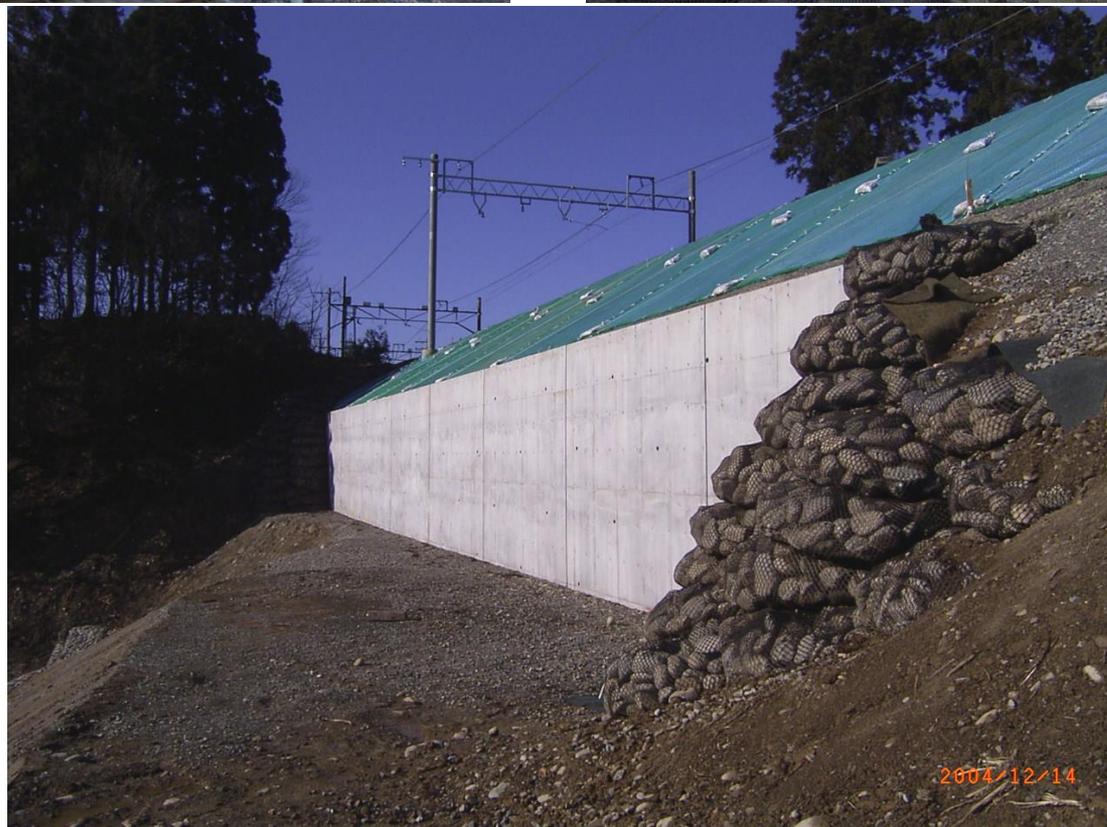


地震後初の列車

# 上越線盛土崩壊現場

## 剛で一体の壁面工を段階施工するジオシンセティック補強土盛土擁壁での強化復旧

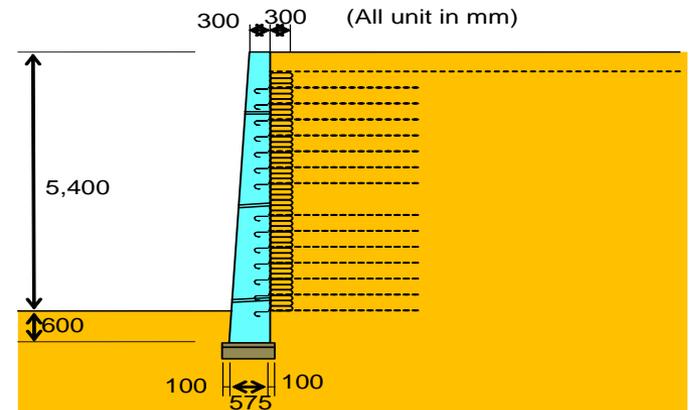




近接箇所

# 2011年東日本大震災では、レベル2設計地震動を考慮して耐震設計してあった剛で一体の壁面工を持つGRS擁壁の被害例はゼロ

青森県:	58
岩手県:	23
秋田県:	1
山形県:	3
宮城県:	9
福島県:	1
(合計)	95



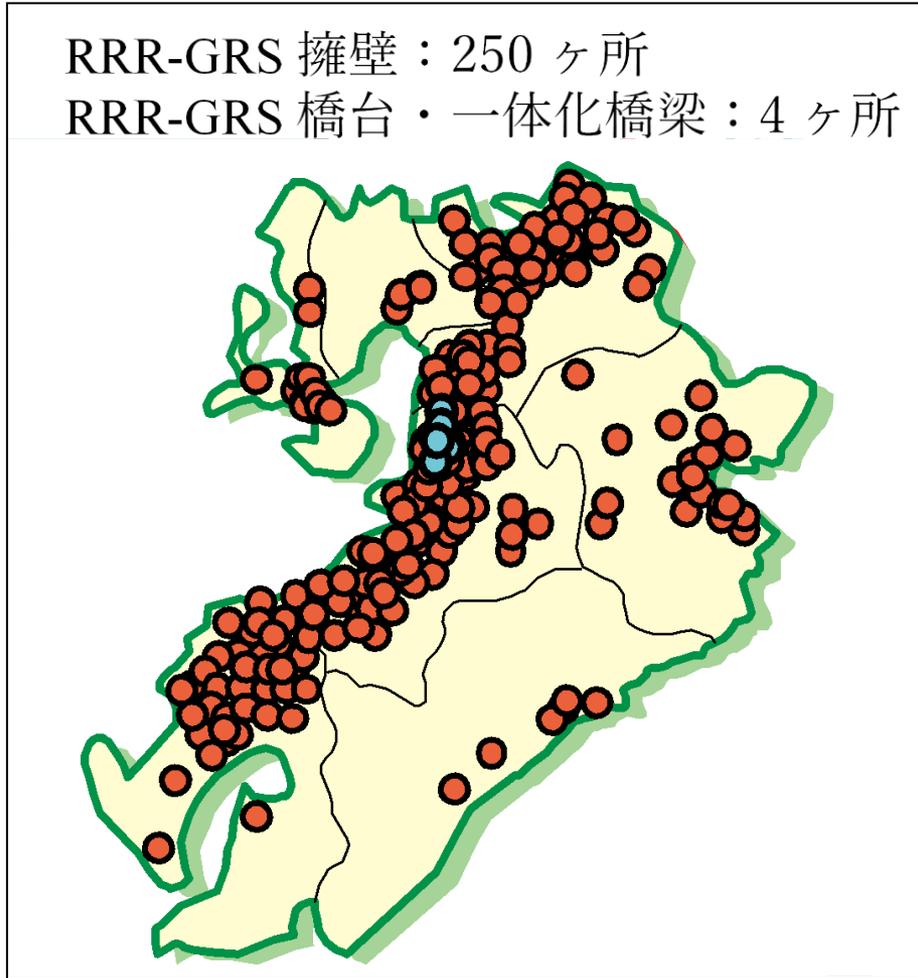
仙台市、名取側に近接  
1994年完成  
擁壁長= 400 m

# 2016年4月の熊本地震の被害地域 を含む九州地区

多数の剛な一体壁面工GRS構造物:  
レベル2設計地震動で耐震設計

⇒被害は皆無

これらの事例は、現在の耐震  
設計法は合理的であることを  
示している



2016年4月熊本地震発生時における九州地区のRRR -GRS構造物の施工箇所

# GRS構造物- 擁壁から橋台への発展 -

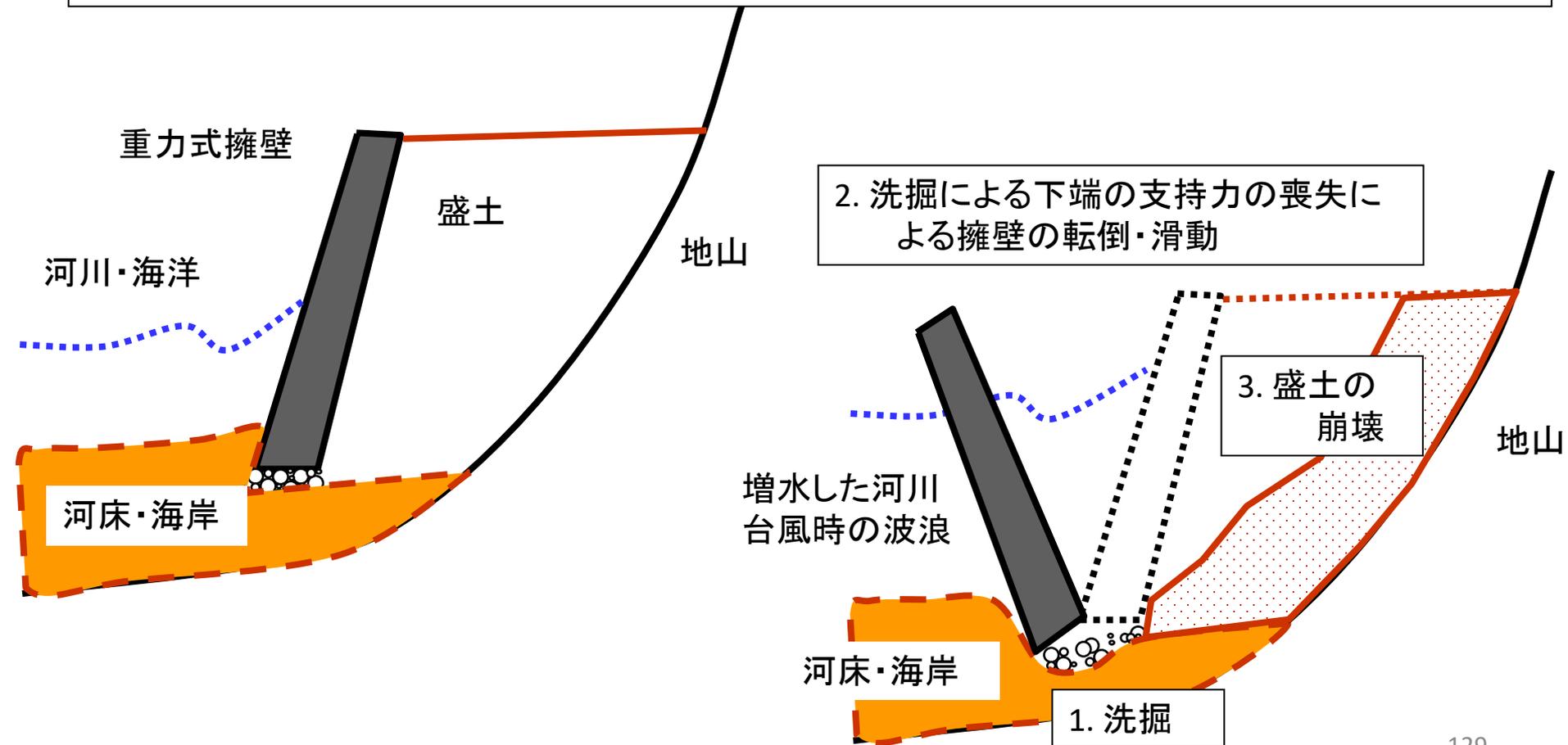
- 1) 従来形式の擁壁は片持ち梁！ 補強土擁壁は非片持ち梁！
- 2) 剛な一体壁面工を持つGRS構造物の最近の施工例
- 3) 剛な一体壁面工を持つGRS擁壁の特徴
  - ・剛な一体壁面工の効用の“発見”と活用
  - ・クリープは劣化に非ず、クリープでは強度は低下しない
  - ・壁面工を盛土の後に建設する効用の“発見”と活用
- 4) 自然災害で崩壊した土構造物のGRS構造物による強化復旧：  
地震・洪水・豪雨・津波
- 5) GRS擁壁からGRS橋台・GRS一体橋梁への発展
  - a) 従来形式の橋台・橋梁の諸問題
  - b) GRS橋台とGRS一体橋梁の利点 - 低い建設費・維持管理費、高い耐災性(地震、洗堀、津波等)
- 6) 新幹線西九州ルート、金沢・敦賀間でのGRS構造物
- 7) まとめ

# 河川・海岸の護岸擁壁

壁体の支持地盤の**洗掘**⇒擁壁が転倒・滑動

⇒盛土は容易に侵食・崩壊

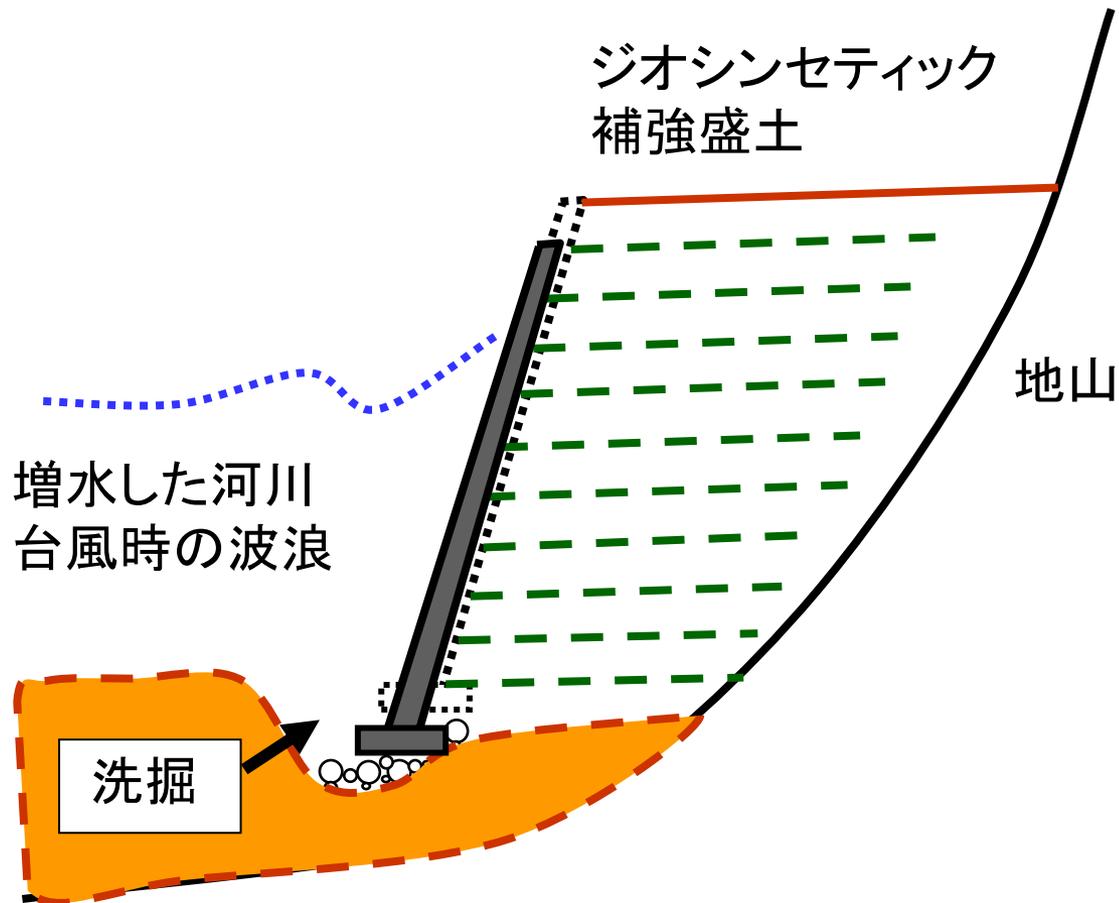
⇒道路・鉄道等の機能が完全に喪失



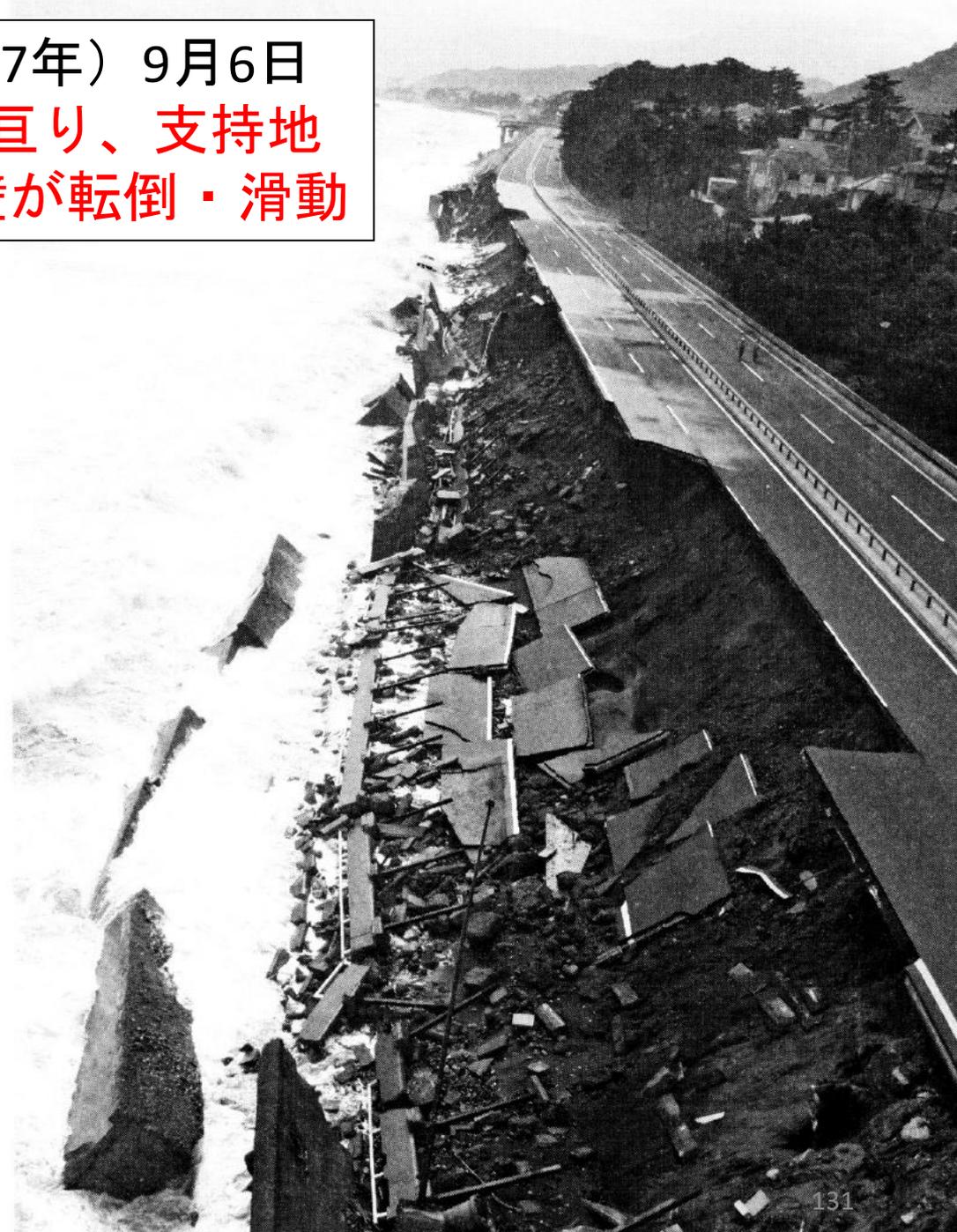
# 剛な一体壁面工を有するジオシンセティック補強土擁壁

壁面工の支持地盤が**洗掘**されても、壁面工と補強盛土は一体性を維持し転倒・滑動しにくく、背後盛土は崩壊しにくい(模型実験で確認)

⇒ 道路・鉄道等の応急機能は維持



西湘バイパス、平成19年(2007年) 9月6日  
～7日、台風9号で、1.5kmに亘り、支持地  
盤の洗掘によって重力式擁壁が転倒・滑動



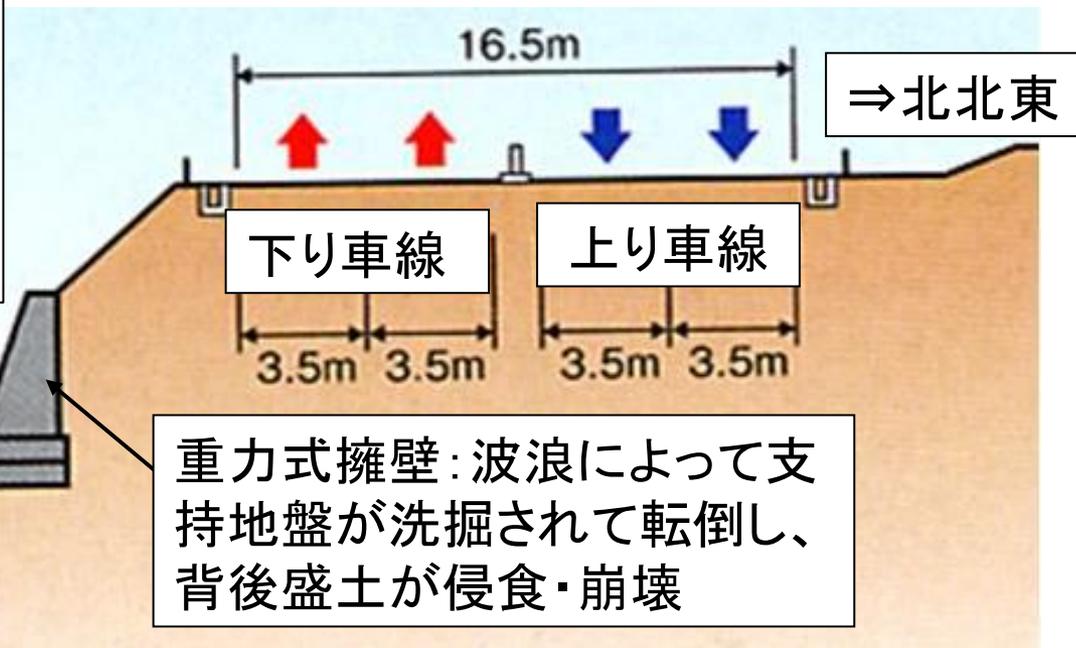
横浜国道事務所Webサイトから

この海岸擁壁の前浜は、道路建設後の60年間に100mほど消失。そのため、年2回程度越波を伴う波浪が擁壁を攻撃するようになった

太平洋

被災前

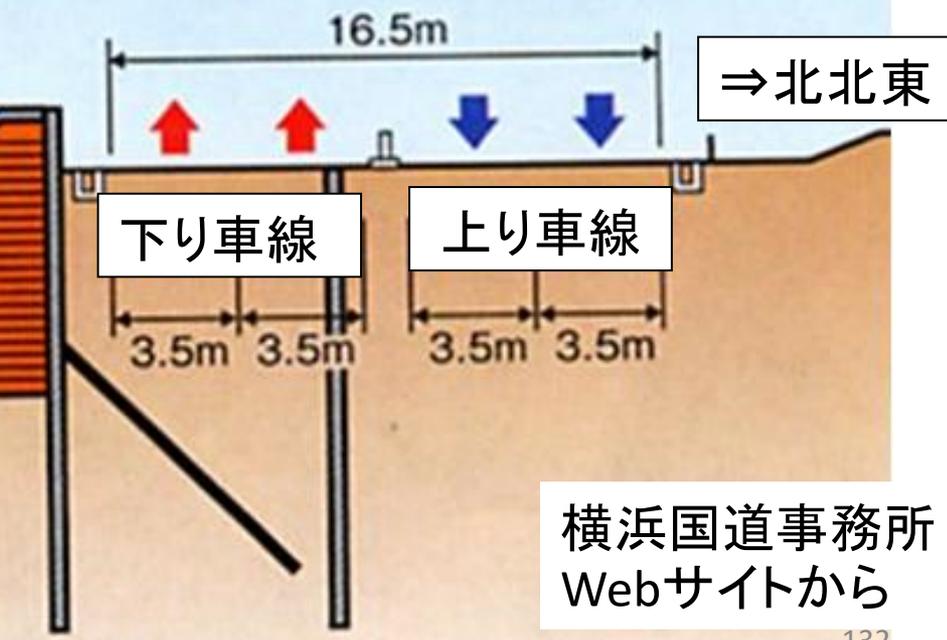
重力式擁壁：波浪によって支持地盤が洗掘されて転倒し、背後盛土が侵食・崩壊



剛で一体の壁面工を持つGRS擁壁

侵食防止工

強化復旧後



横浜国道事務所  
Webサイトから



2010年3月10日龍岡撮影

日本で初めての、外洋からの波浪を受ける条件での  
剛で一体の壁面工を持つジオシンセティック補強土擁壁  
⇒その後近接現場でも適用

# 建設の13年後



2023年10月26日龍岡撮影

平均2回ほど、越波を伴う波浪が擁壁を攻撃

# 2011年7月新潟県・福島県豪雨 飯山線入間川橋梁、洪水による橋台裏翼壁の基礎地盤の洗堀 ⇒ 橋台取付け盛土の流失

JR東日本による



- ・崩壊規模： 延長約6m 高さ約3.8m
- ・崩壊原因： 増水した川の流れによって支持地盤が洗堀されて石翼積壁が流失し、盛土が崩壊

2011年7月新潟県・福島県豪雨 飯山線入間川橋梁、洪水による橋台裏翼壁の基礎地盤の洗堀 ⇒ 橋台取付け盛土の流失

JR東日本による



# 入間川橋梁 橋台背面取付盛土の強化復旧

JR東日本による

## ■復旧のポイント

- 石積翼壁の代替として、**剛一体壁面工**  
**GRS擁壁**
- 工期約10日(昼夜施工)で列車運行再開
- **壁面工は列車運行再開後に施工**



取り付け盛土復旧 (土市方より)

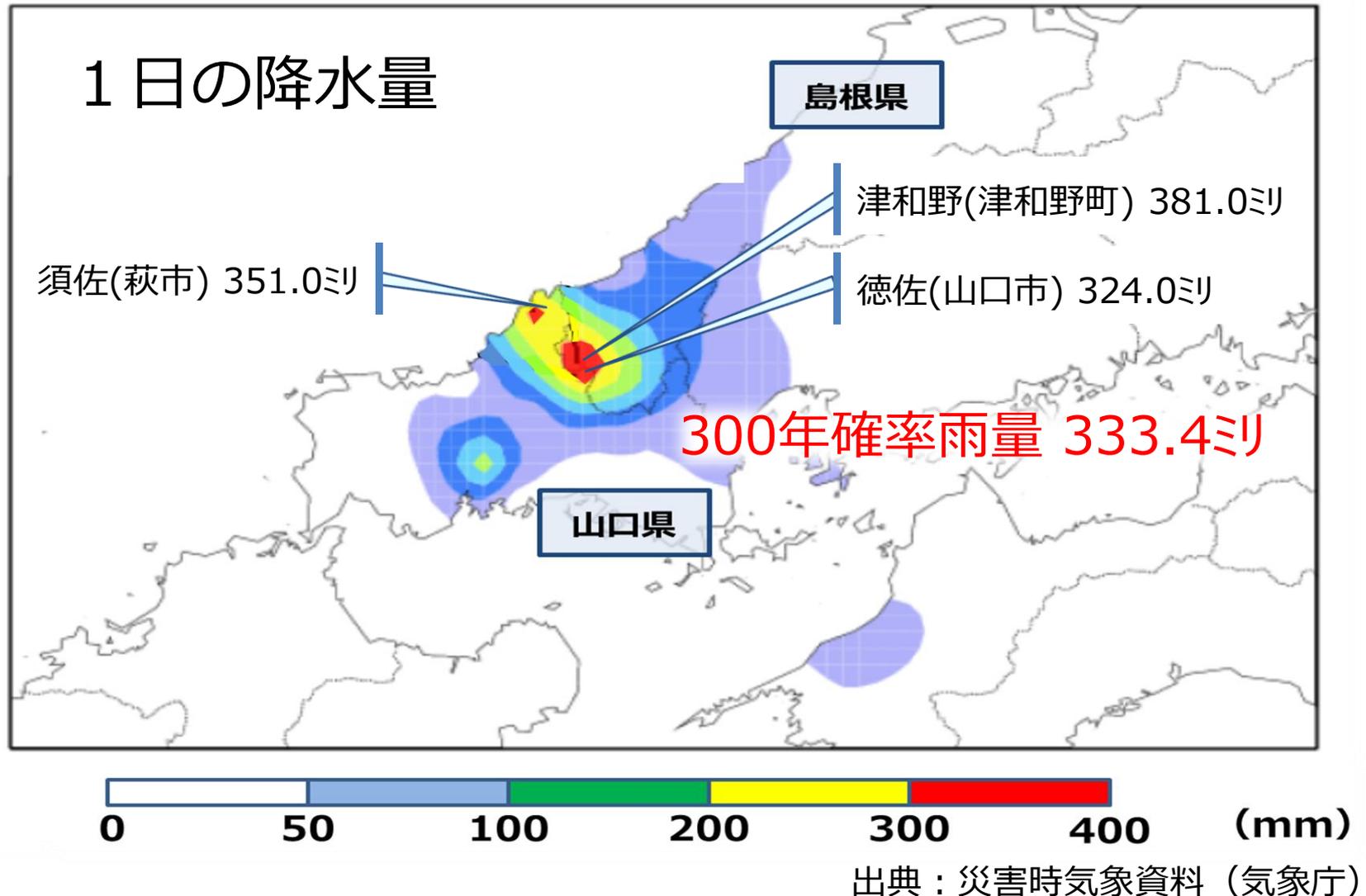


RC壁面工の施工後 (線路右側より)



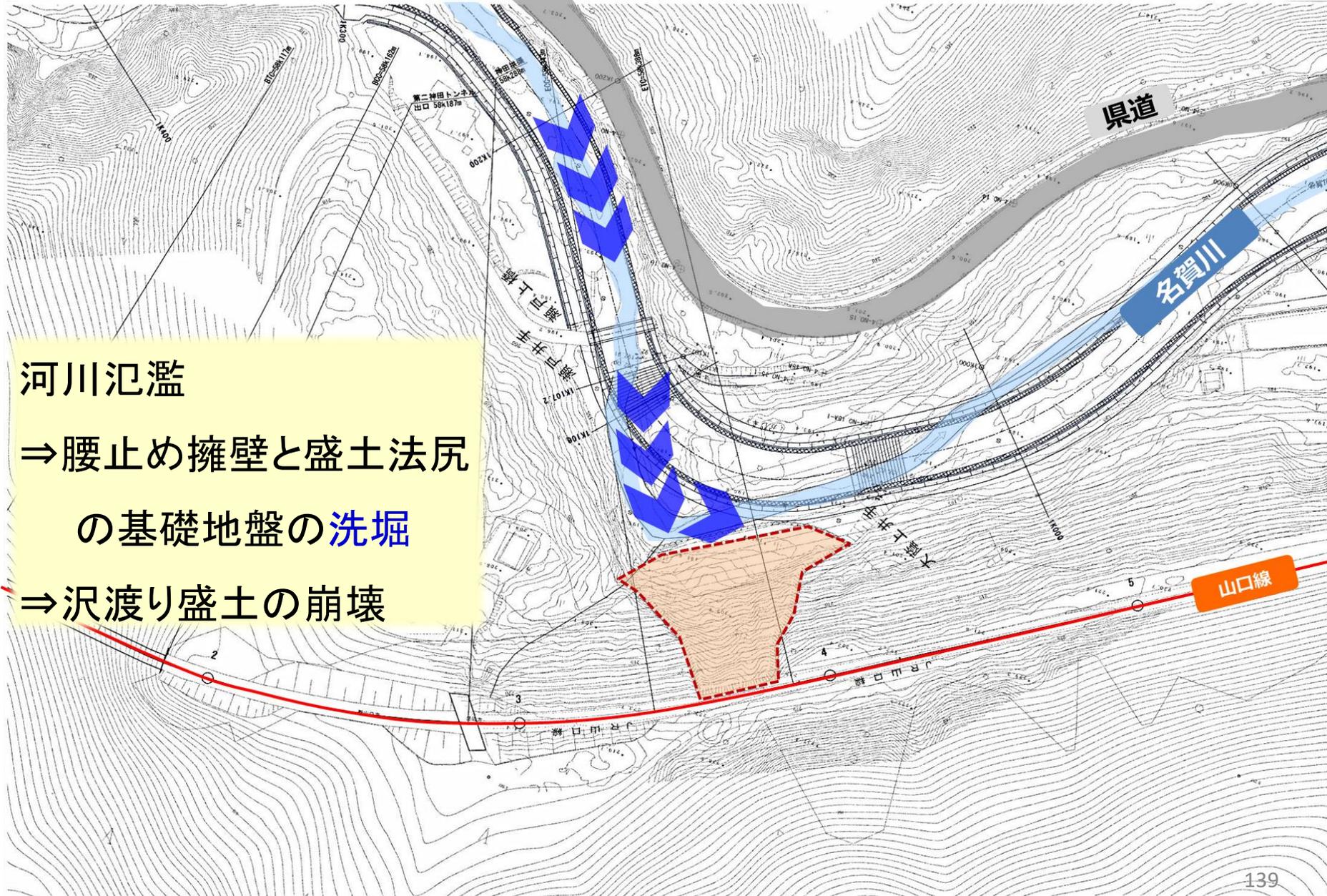
軌道復旧 (土市方より)

# 2013年 7月28日山口線・山陰線の豪雨災害と強化復旧



# 被害事例：58k400m付近

西日本旅客鉄道(株)



河川氾濫

⇒腰止め擁壁と盛土法尻  
の基礎地盤の洗堀

⇒沢渡り盛土の崩壊

# 被害事例：58k400m付近

西日本旅客鉄道(株)



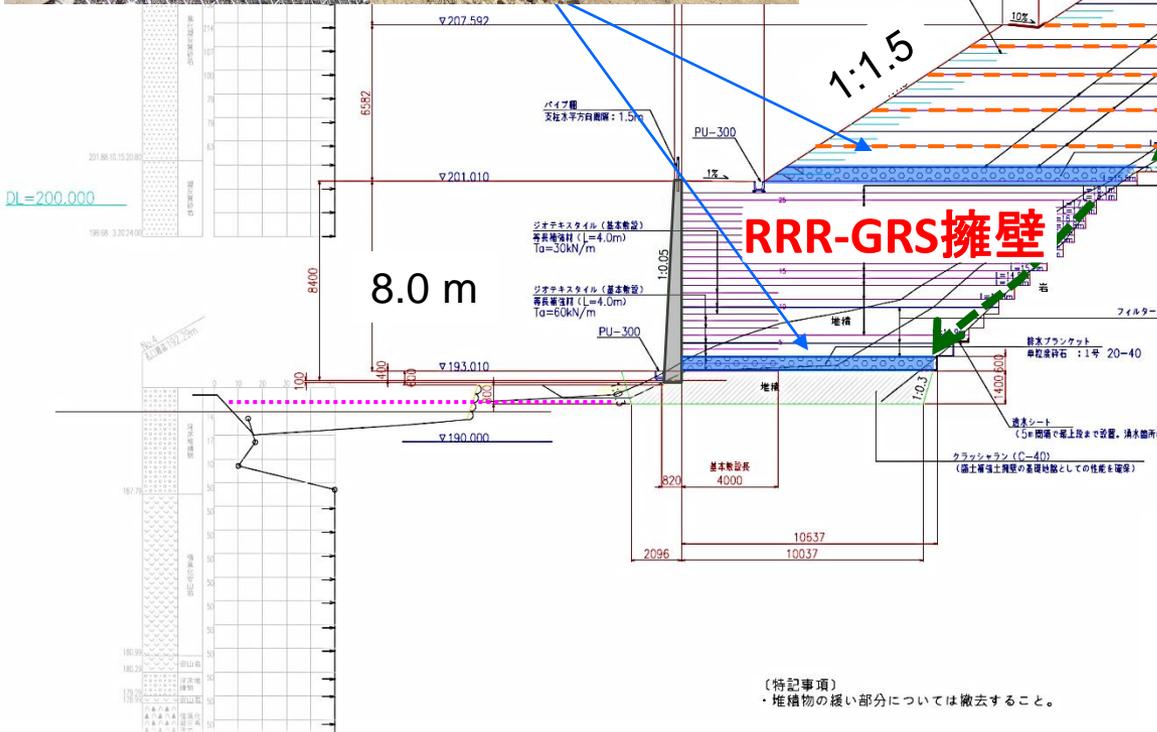
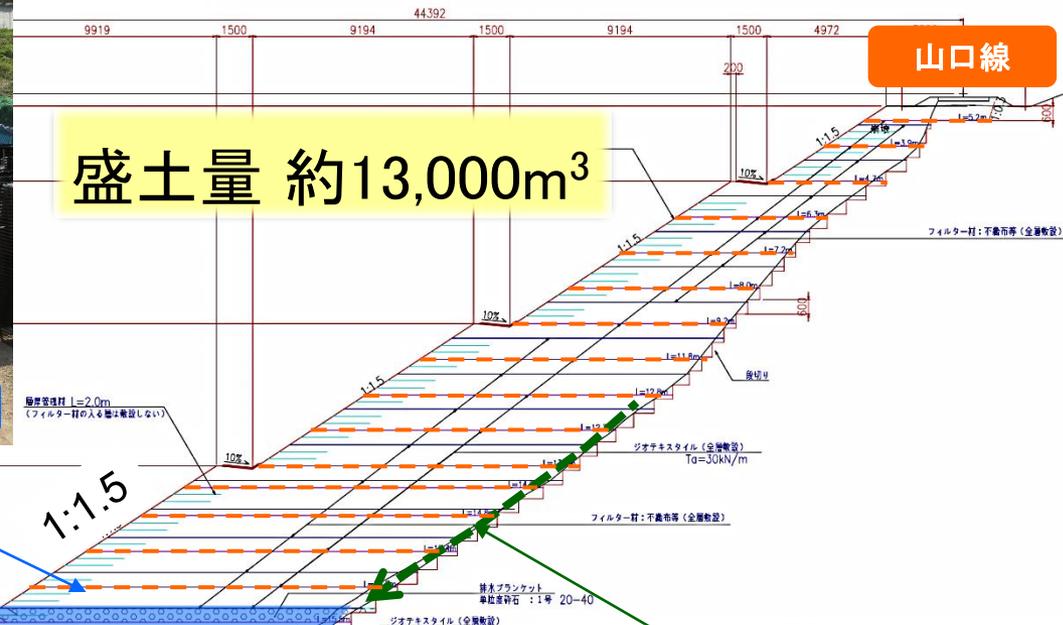


**排水ブランケット層配置**

テキ擁壁 D 標準断面図  
 S=1/200(A3)  
 状補強材設計長記入)

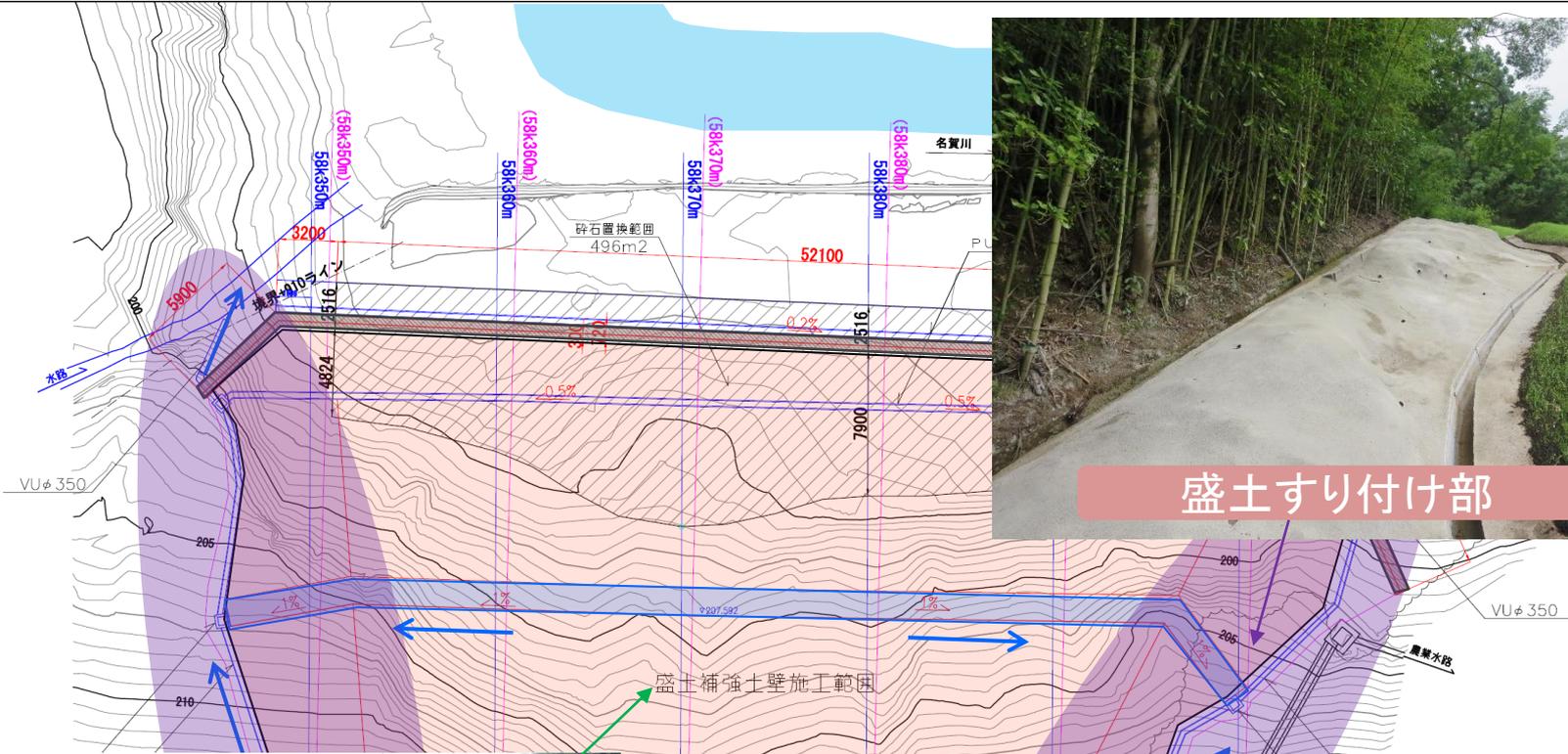
(58K370M00)  
 RL=223.298m  
 FL=222.778m

**盛土量 約13,000m<sup>3</sup>**

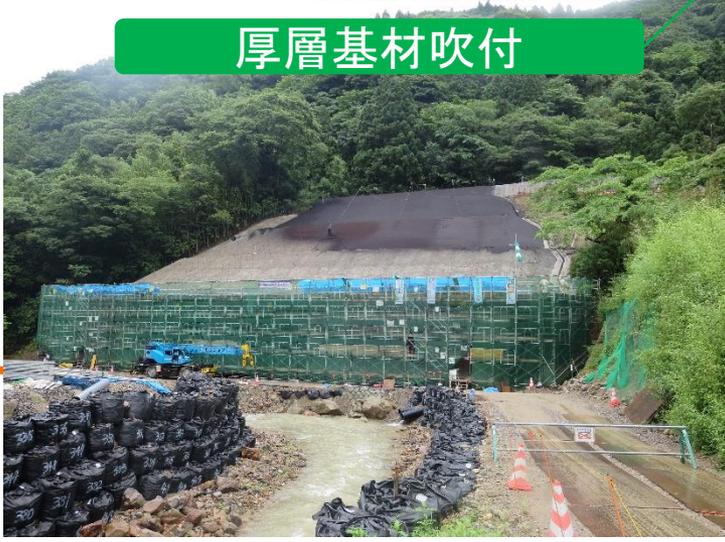


**透水マット設置**

# 排水対策(表面水)



厚層基材吹付



小段排水(犬走り)設置



# 剛な一体壁面工の打設前のGRS擁壁と盛土(2014年)

JR山口線

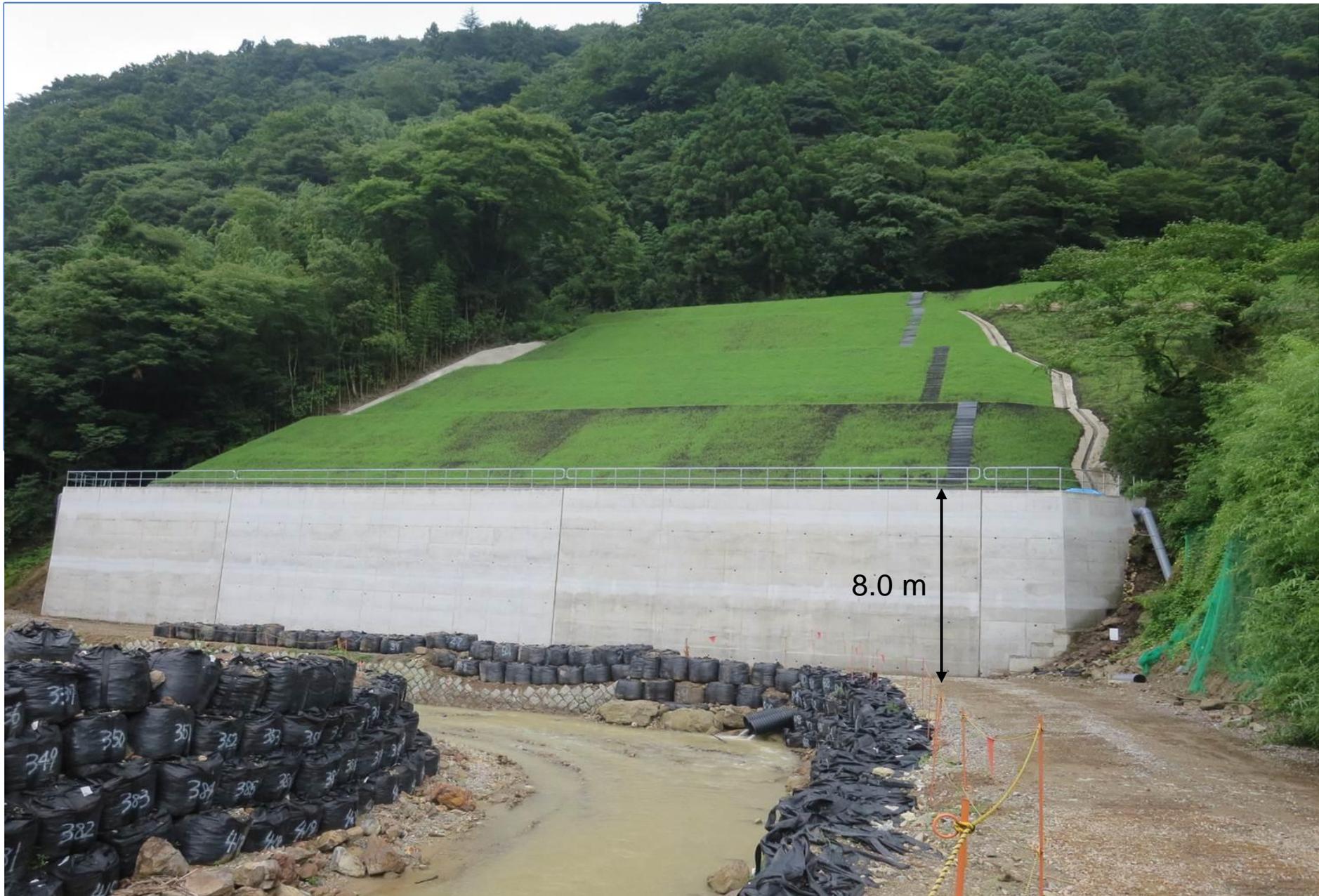
JR山口線:

被災後1年1か月で運転再開

名賀川

# 復旧事例：58k400m付近(2014年)

西日本旅客鉄道(株)



# 被害事例：白井トンネル出口付近（被災直後）



# 被害事例：白井トンネル出口付近（復旧後）

JR山口線

GRS擁壁

山口線の強化復旧箇所は、  
2018年7月豪雨で無被害



# JR山口線：白井トンネル出口付近（復旧後）



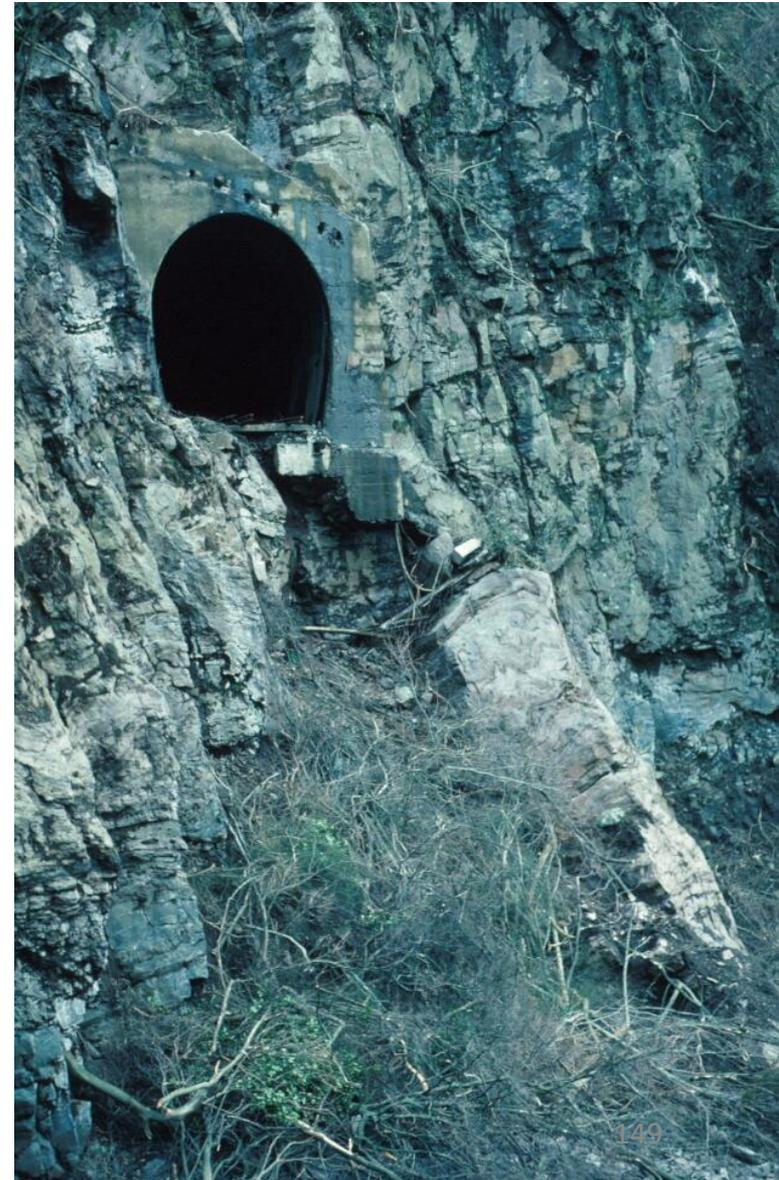
阿蘇:

↓: 洪水による豊肥線の盛土の越流浸食による流出



# 1990年水害による盛土の崩壊と復旧(JR九州)

- 流木による横断排水管渠の閉塞
- ⇒自然ダムの形成
- ⇒越流
- ⇒盛土の急速な侵食・崩壊



- 完全に崩壊した盛土： 6箇所
- ジオシンセティック補強盛土で強化復旧(1991年)

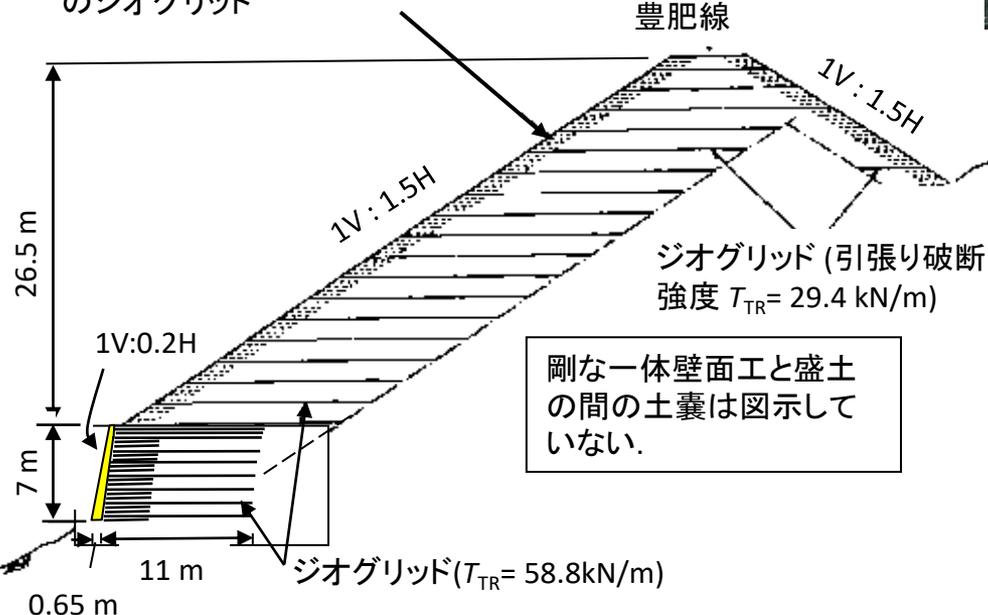
## GRS擁壁の建設の理由

- ・ 盛土の急勾配化と擁壁による  
土工量の減少
- ・ 盛土斜面の安定化
- ・ 大口径排水パイプの設置が容易



締固め管理用の低剛性のジオグリッド

豊肥線

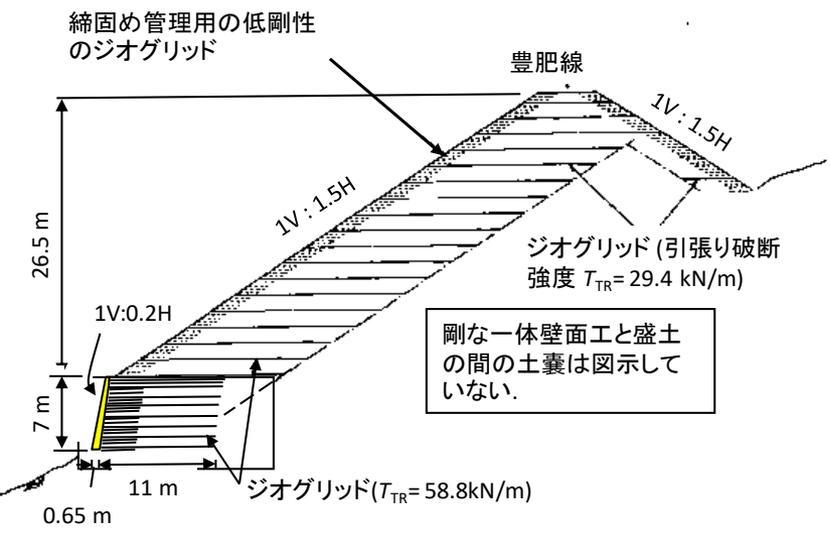


# 1990年水害による盛土の崩壊と1991年強化復旧(JR九州)

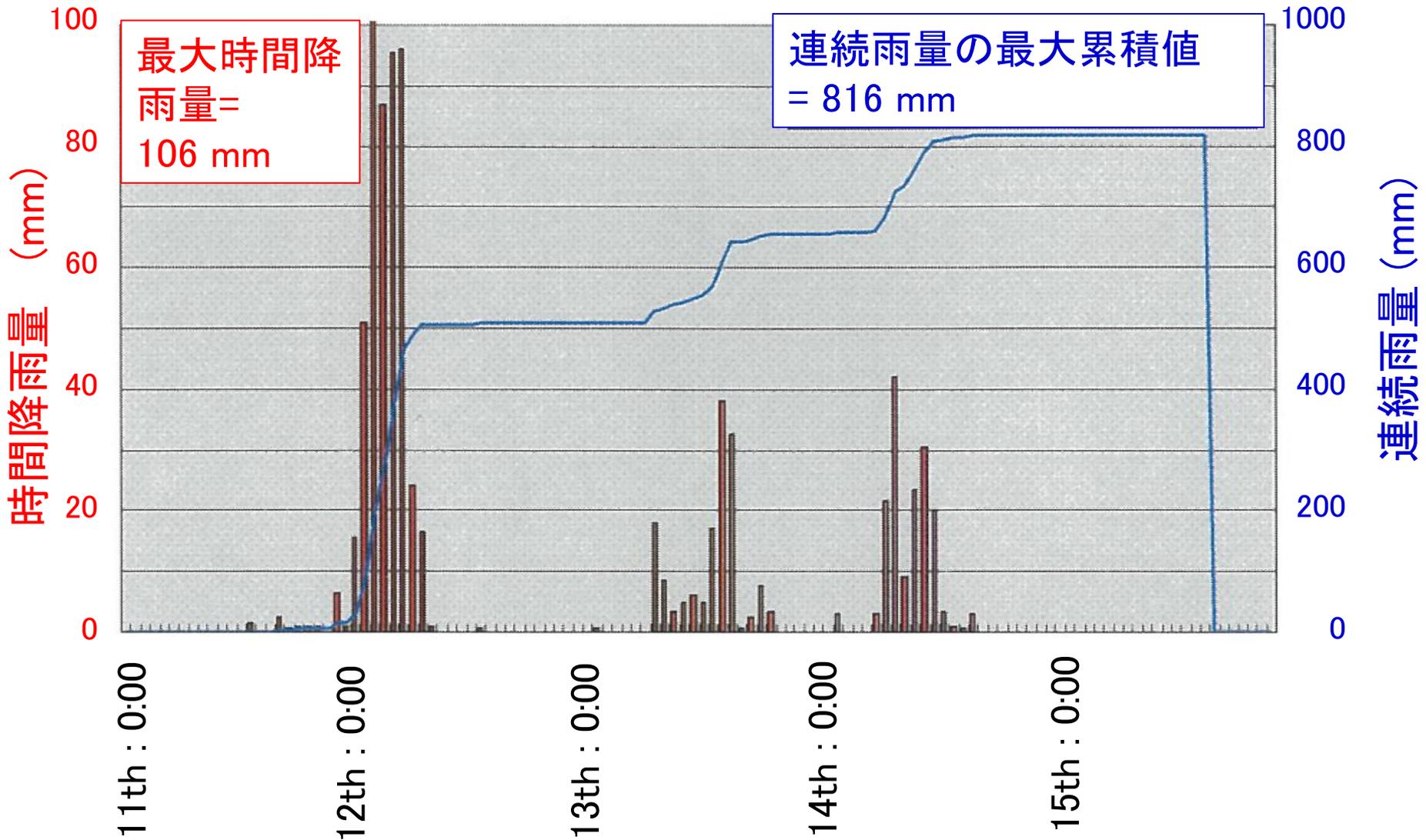


1992年 JR九州提供

1994: 龍岡撮影



# 2012年7月北九州豪雨(1990年豪雨を超えた雨量)



1990年

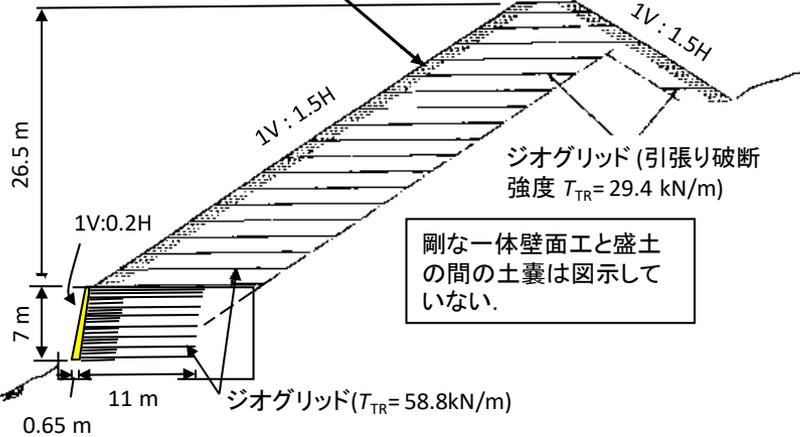


1994年

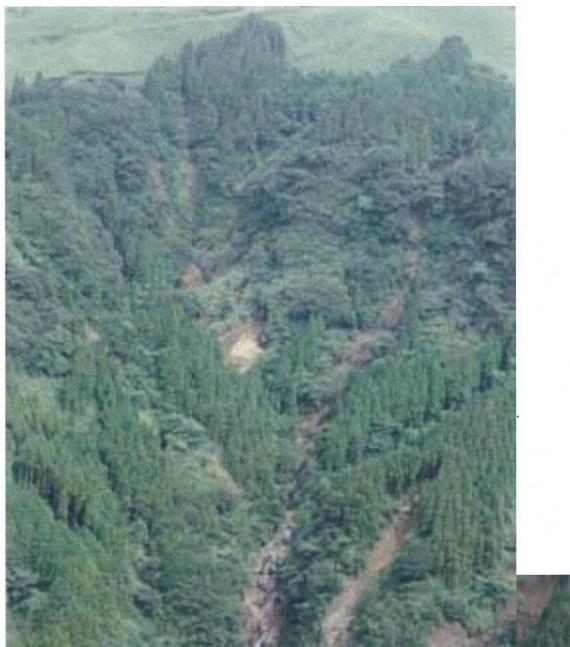


締め管理用の低剛性のジオグリッド

豊肥線



# 2012年7月北九州豪雨、豊肥線の再度の災害(より激しい越流)



1990年水害では残存し、1991年に復旧しなかった部分 ⇒ 越流で大きく侵食



(JR九州による)

# 2012年7月北九州豪雨、豊肥線の再度の災害(より激しい越流)



1991年に補強土工法で強化復旧した部分⇒損傷したが生き残った



(JR九州による)

2012年

1990年水害では残存し、1991  
年に復旧しなかった部分  
⇒越流で大きく侵食

1990年水害で侵食され消滅し、  
1991年に補強土工法で強化復旧  
した部分⇒損傷したが生き残った

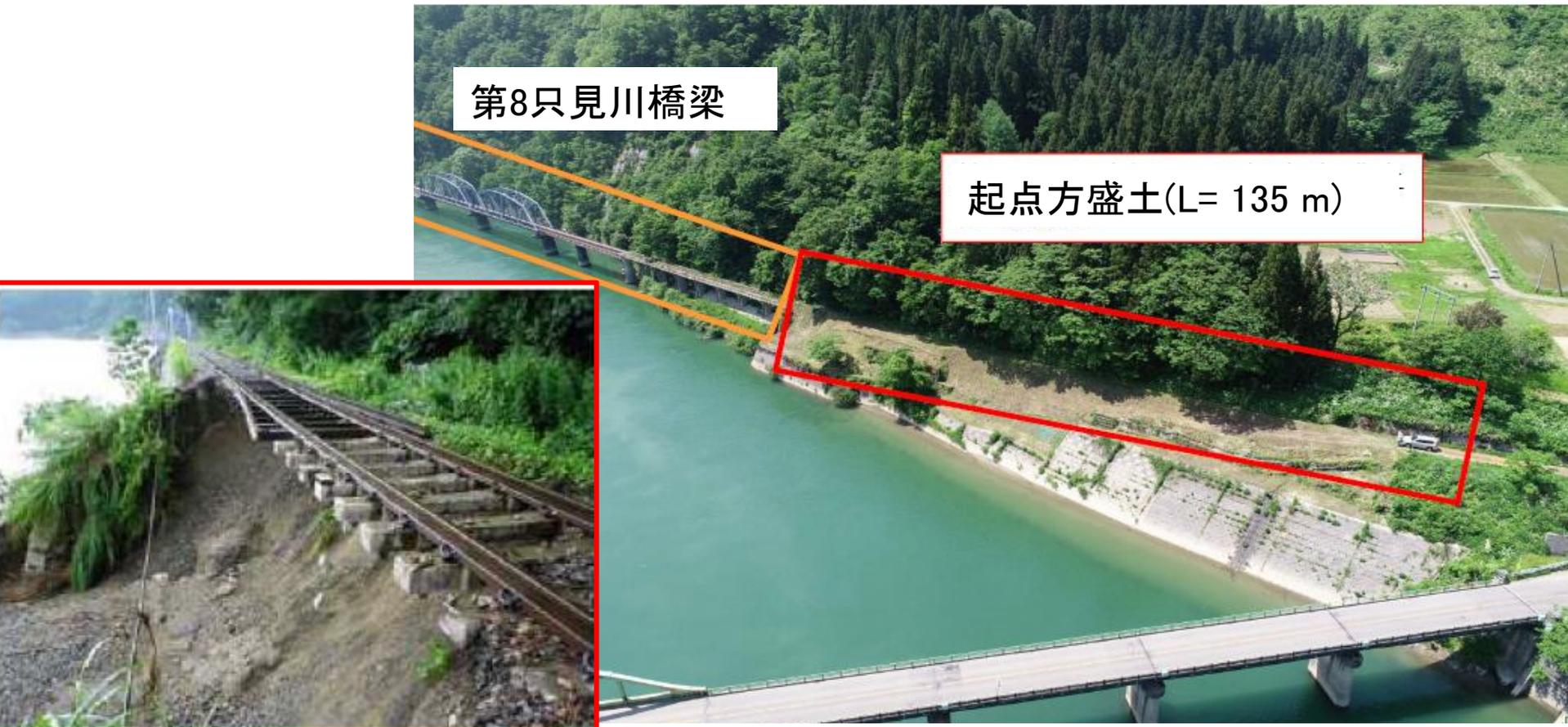


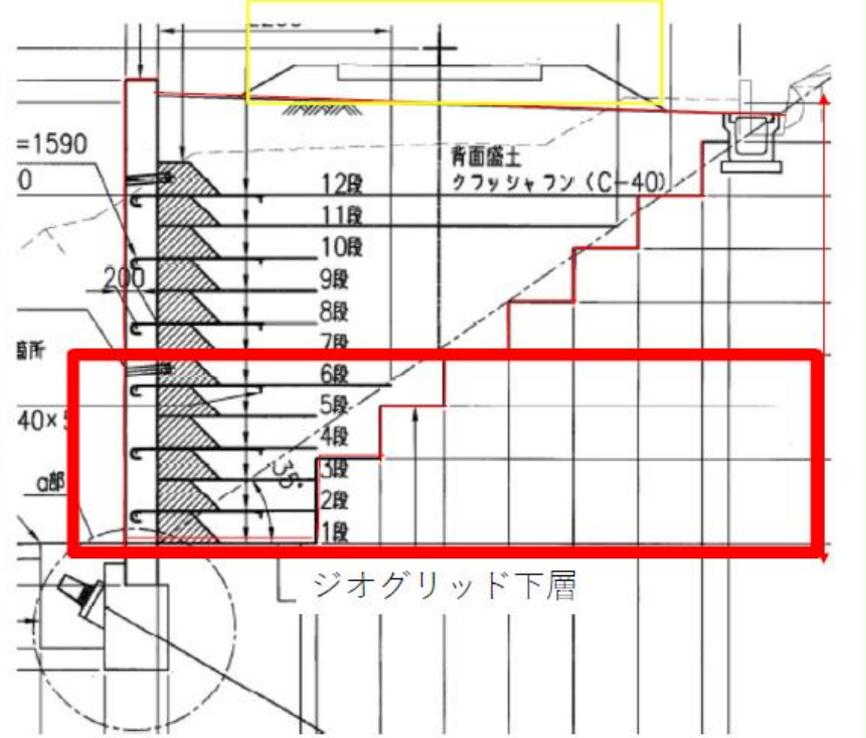
龍岡撮影

2012年11月26日龍岡撮影、侵食部は復旧工事のため掘削されている

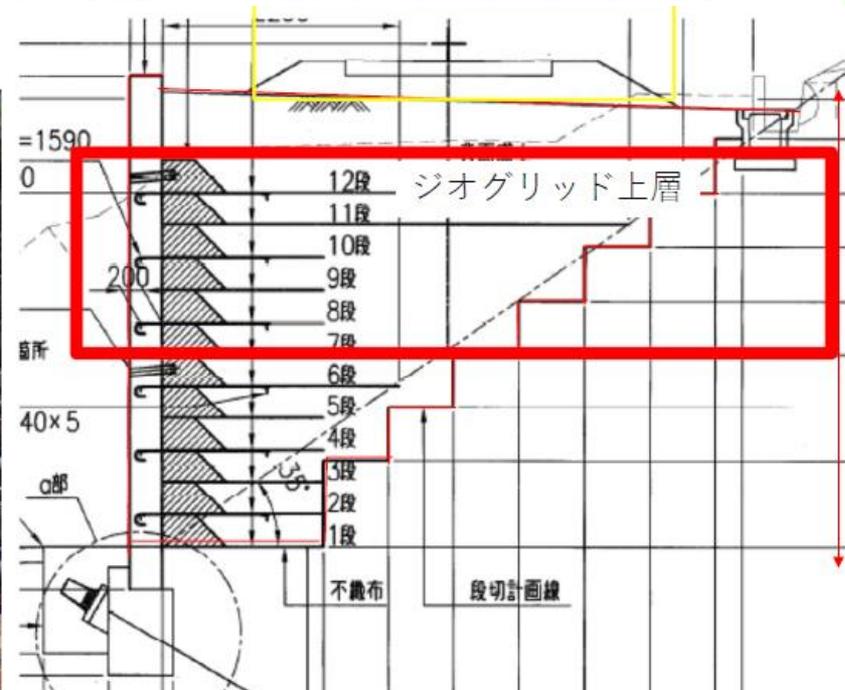
# JR東日本只見川線2011年7月27日～30日新潟・福島豪雨 (総降雨量711.5mm)による第8只見川橋梁取付盛土の浸透・越流による被害 → 剛な一体壁面工を持つGRS擁壁による強化復旧

片桐浩志(2023): 平成23年7月新潟・福島豪雨により被災した只見線復旧の取り組み、鉄道施設協会誌, No.66, 2月号, 46751-46754.





盛土施工完了時



剛一体壁面工を持つGRS擁壁によって、河川と山の斜面に挟まれた盛土の復旧工事を實現

被災前から悩まされていた地滑りに対して剛な一体壁面工を持つGRS擁壁＋グランドアンカー＋地盤改良工で有効な強化復旧を實現



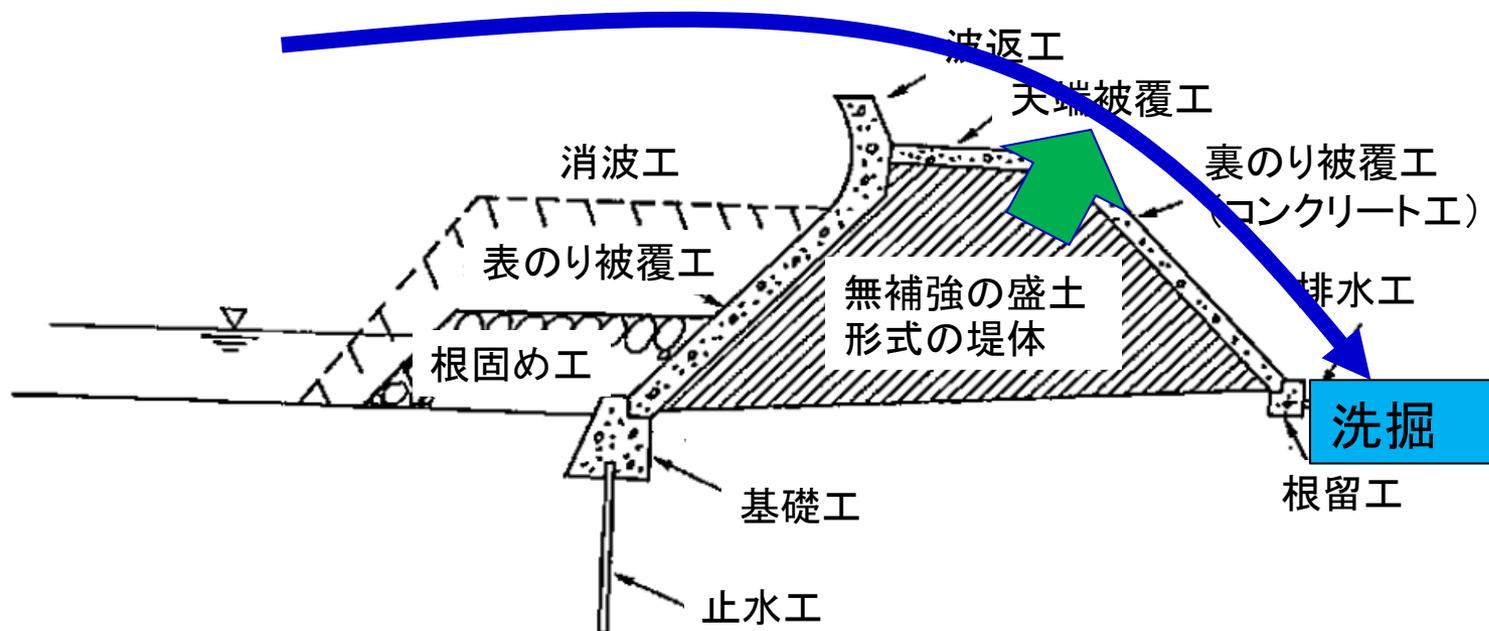
# 2011年東日本大震災

## 巨大津波の越流による盛土形式の防潮堤の崩壊・消滅:

①越流した津波が下流側のり先基礎地盤を洗掘

②越流津波が下流側のり面を急速流下→強烈な揚力

①&②⇒下流側のり面の盛土に非固定の被覆工の滑り出し等不安定化  
⇒露出した盛土裏の急速な侵食 ⇒ 盛土全断面の喪失



防潮堤の概念図(海岸保全施設技術研究会編:海岸保全施設の技術上の基準・同解説  
(平成16年6月)からの図に加筆

# 巨大津波の越流による盛土形式の防潮堤の機能喪失

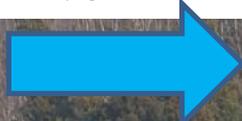
⇒ レベルII津波(越流津波)に対しても粘り強い挙動が必要



田野畑村 明戸(弁天崎西側)(東大古関潤一教授による)

# 三陸鉄道北リアス線島越駅周辺： ・津波で崩壊したRC高架橋

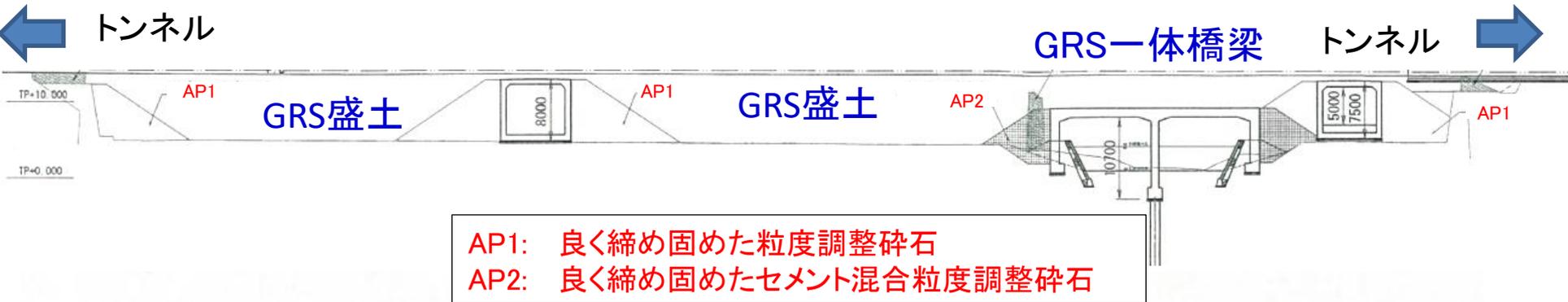
太平洋からの津波



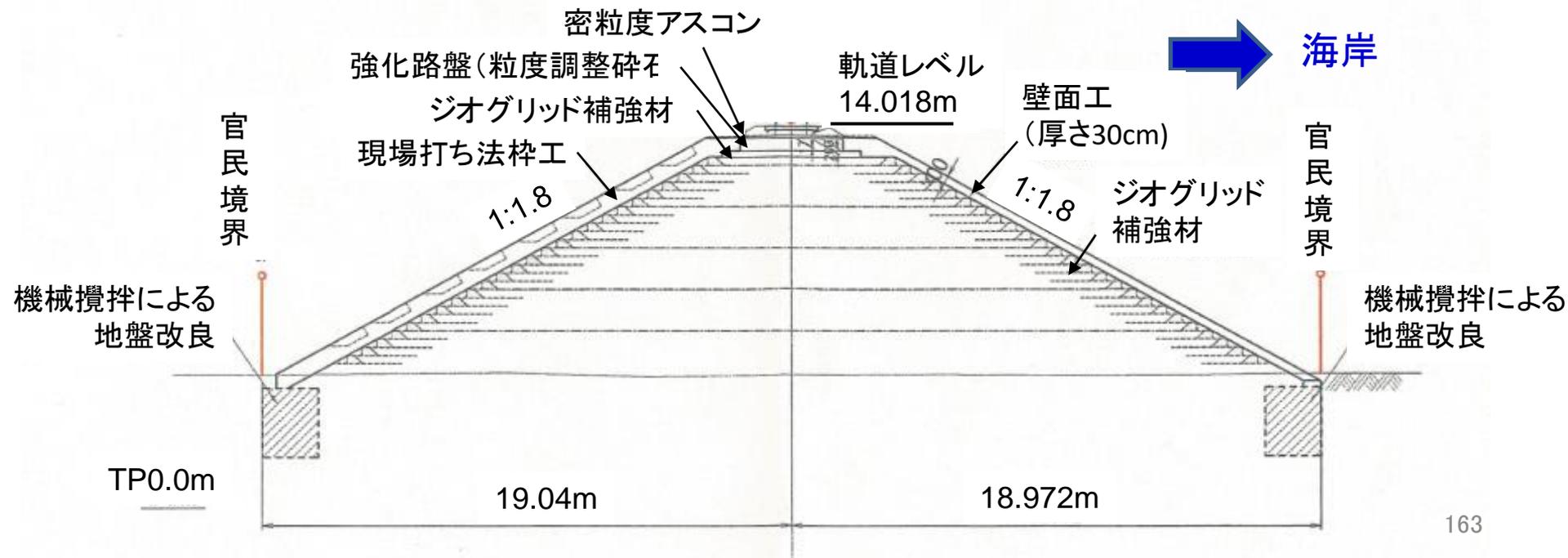
2011年3月30日

# 三陸鉄道北リアス線島越駅周辺:

- ・住民の要望によって、RC高架橋を防潮堤としての補強盛土に変更(被覆工はgeogridを介して盛土に固定)
- ・GRS一体橋梁も建設

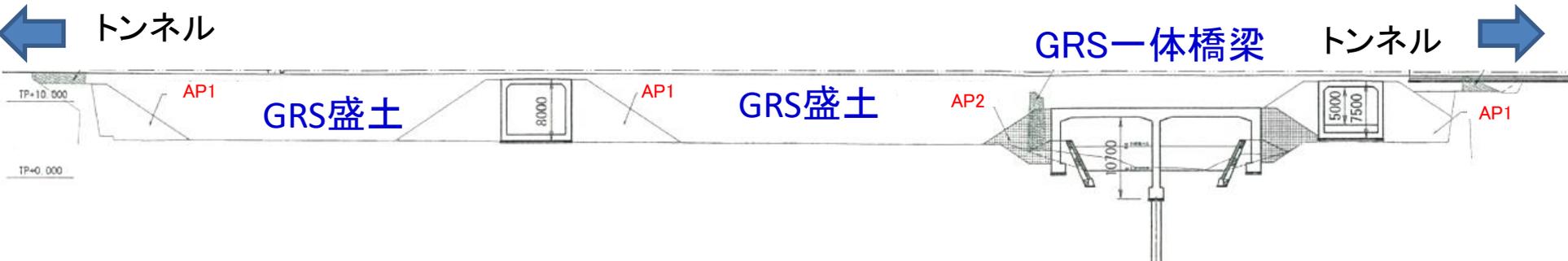


AP1: 良く締め固めた粒度調整碎石  
 AP2: 良く締め固めたセメント混合粒度調整碎石



### 三陸鉄道北リアス線島越駅周辺:

- ・住民の要望によって、RC高架橋を防潮堤としての補強盛土に変更(被覆工はgeogridを介して盛土に固定)
- ・GRS一体橋梁も建設



龍岡撮影

⇒陸側

2015年5月20日

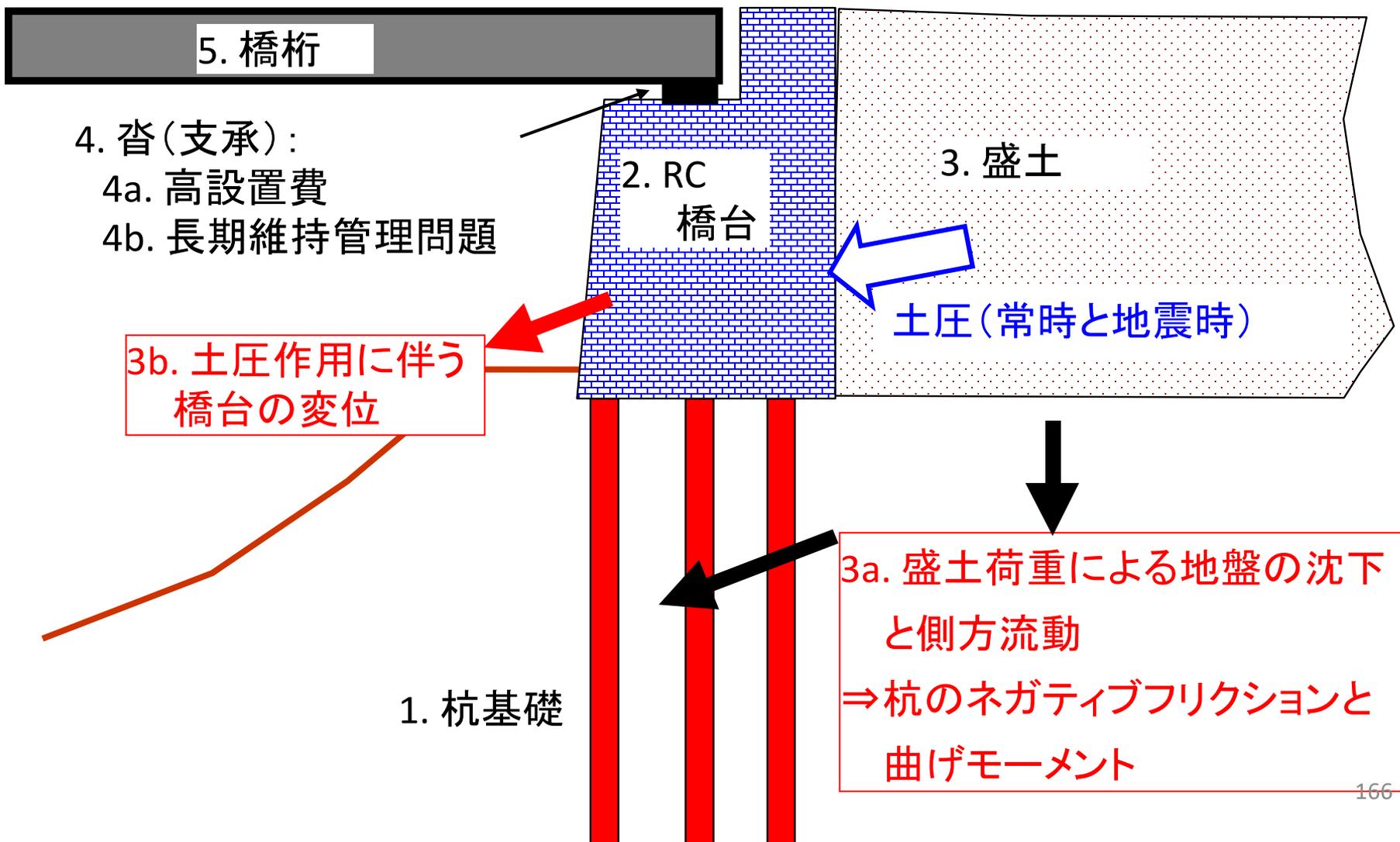


のり面工建設中

# GRS構造物- 擁壁から橋台への発展 -

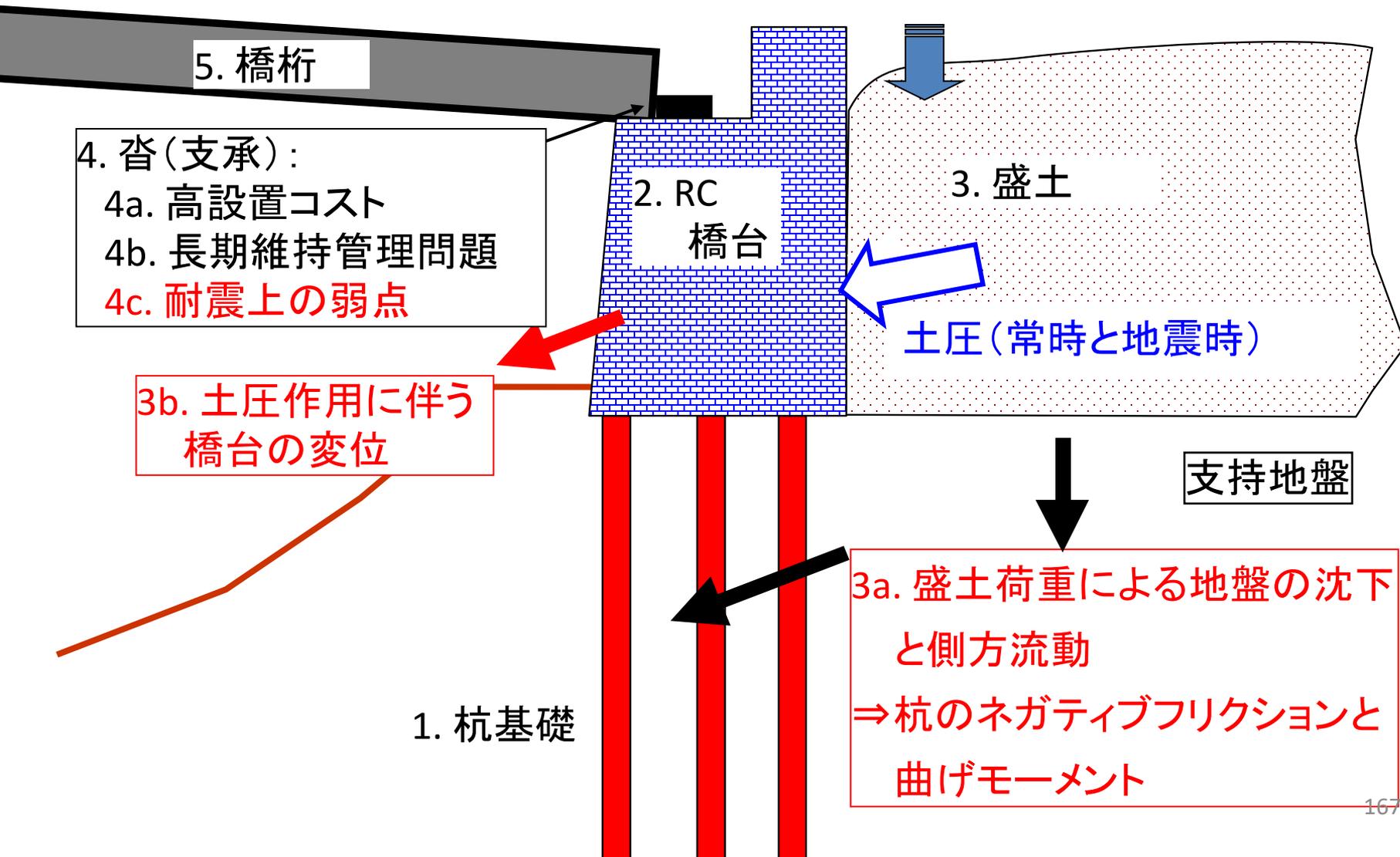
- 1) 従来形式の擁壁は片持ち梁！ 補強土擁壁は非片持ち梁！
- 2) 剛な一体壁面工を持つGRS構造物の最近の施工例
- 3) 剛な一体壁面工を持つGRS擁壁の特徴
  - ・剛な一体壁面工の効用の“発見”と活用
  - ・クリープは劣化に非ず、クリープでは強度は低下しない
  - ・壁面工を盛土の後に建設する効用の“発見”と活用
- 4) 自然災害で崩壊した土構造物のGRS構造物による強化復旧：  
地震・洪水・豪雨・津波
- 5) **GRS擁壁からGRS橋台・GRS一体橋梁への発展**
  - a) **従来形式の橋台・橋梁の諸問題**
  - b) GRS橋台とGRS一体橋梁の利点 - 低い建設費・維持管理費、高い耐災性(地震、洗堀、津波等)
- 6) 新幹線西九州ルート、金沢・敦賀間でのGRS構造物
- 7) まとめ

# 従来形式の橋台・橋梁における諸問題(数字は施工順序)



# 従来形式の橋台・橋梁における諸問題(数字は施工順序)

6. 供用中: 6a. 長期に自重・交通荷重で沈下  
6b. 地震時に変形、沈下



# 1995年阪神淡路大震災、JR神戸線

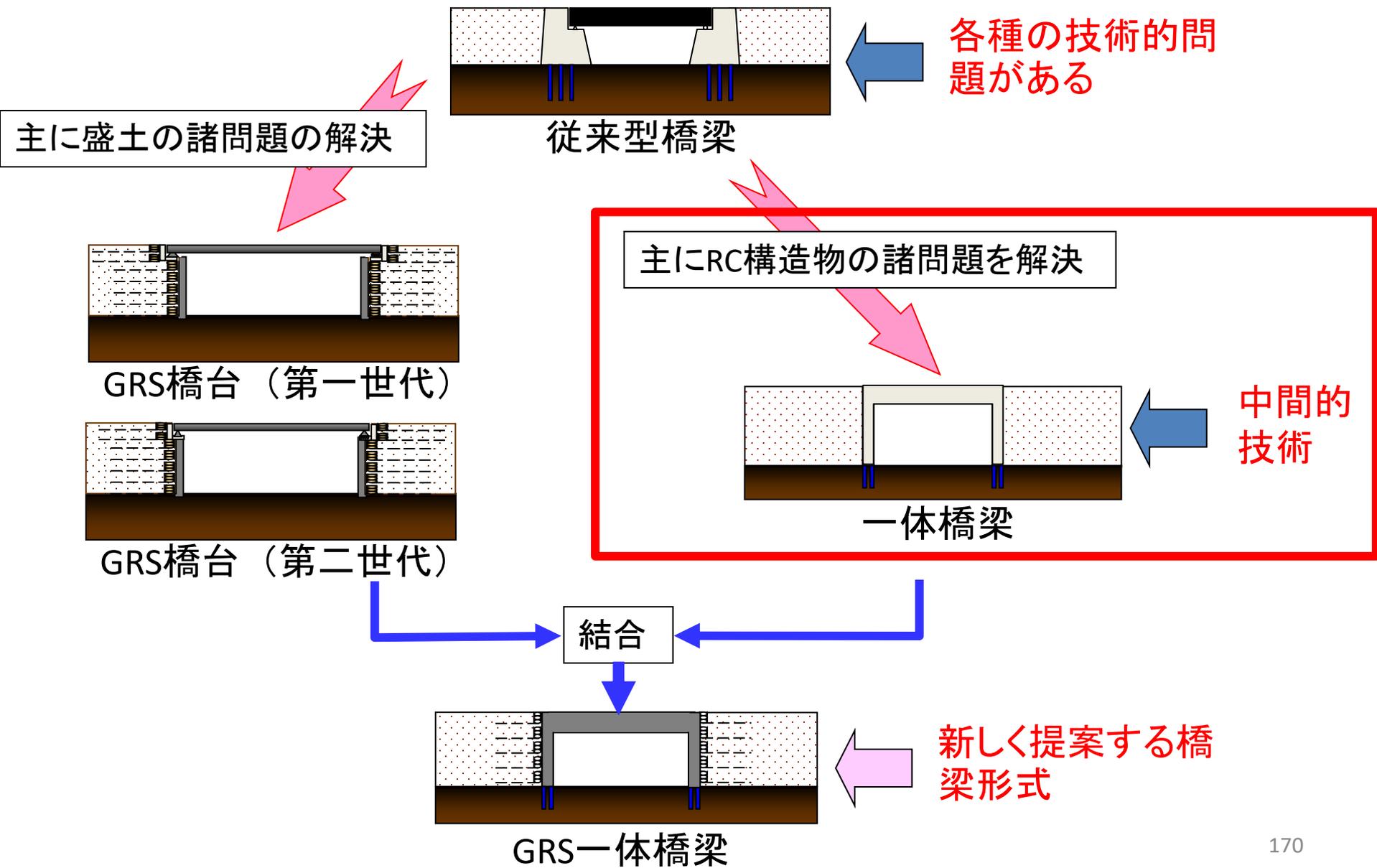


石積み擁壁の崩壊に伴う橋台の取付盛土の崩壊

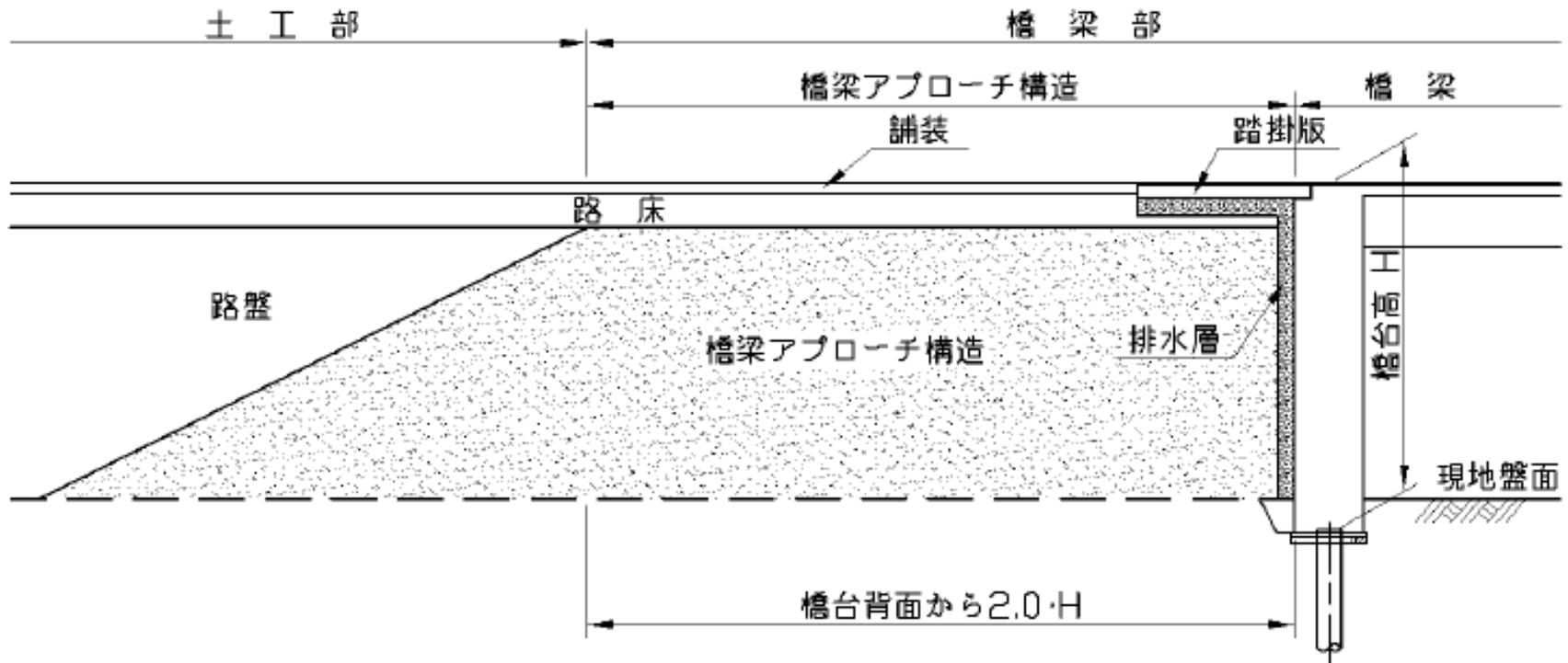
# 剛な一体壁面工を持つ補強盛土構造物Geosynthetic-Reinforced soil (GRS) structure の根源・特徴

- 1) 従来形式の擁壁は片持ち梁！ 補強土擁壁は非片持ち梁！
- 2) 剛な一体壁面工を持つGRS構造物の最近の施工例
- 3) 剛な一体壁面工を持つGRS擁壁の特徴
  - ・剛な一体壁面工の効用の“発見”と活用
  - ・クリープは劣化に非ず、クリープでは強度は低下しない
  - ・壁面工を盛土の後に建設する効用の“発見”と活用
- 4) 自然災害で崩壊した土構造物のGRS構造物による強化復旧：  
地震・洪水・豪雨・津波
- 5) GRS擁壁からGRS橋台・GRS一体橋梁への発展
  - a) 従来形式の橋台・橋梁の諸問題
  - b) GRS橋台とGRS一体橋梁の利点 - 低い建設費・維持管理費、高い耐災性(地震、洗堀、津波等)
- 6) 新幹線西九州ルート、金沢・敦賀間でのGRS構造物
- 7) まとめ

# GRS擁壁を活用したGRS橋台とGRS一体橋梁の開発経緯



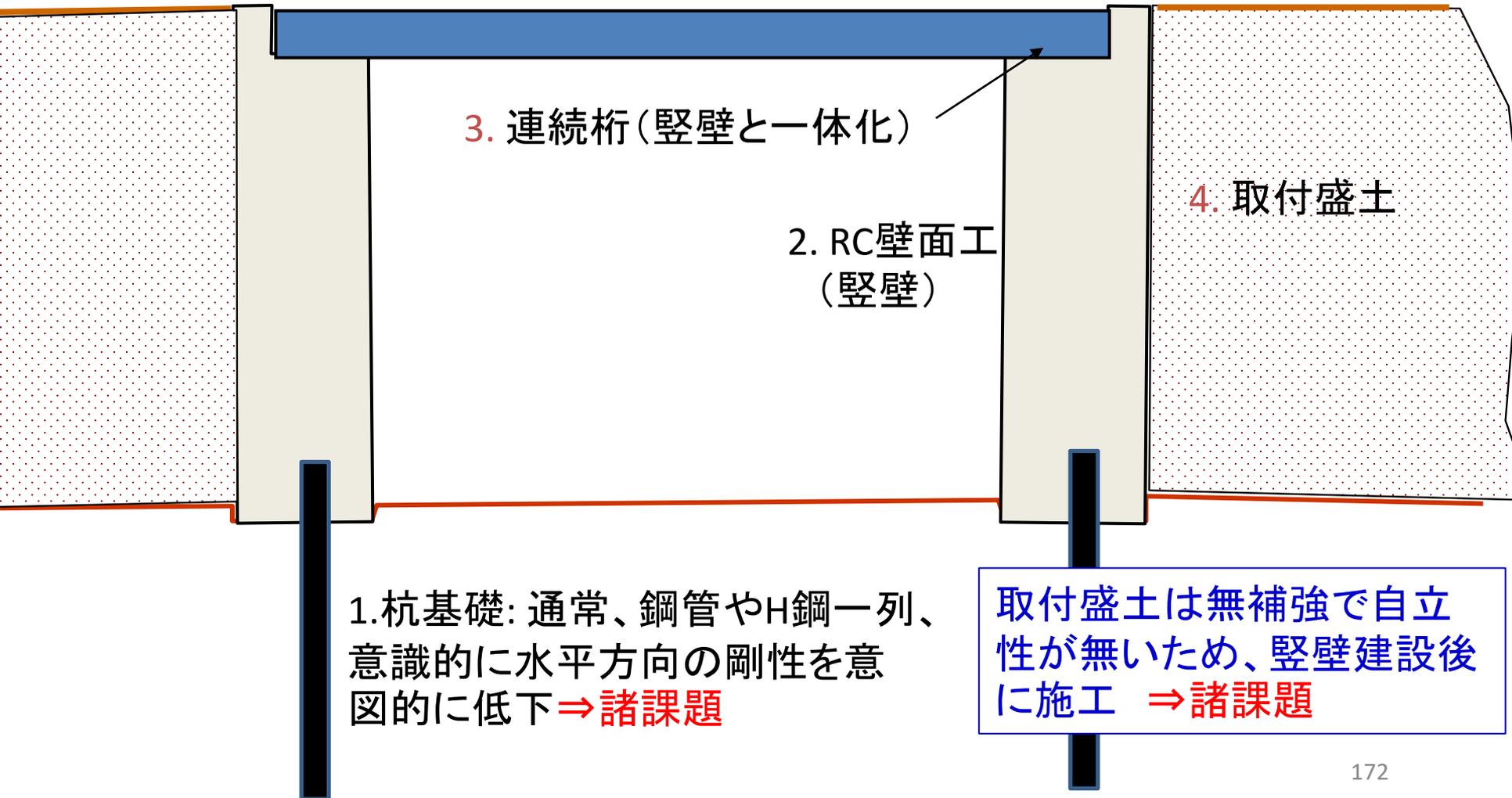
# 橋桁と橋台を一体化した橋梁(Integral bridge)



中谷昌一・竹口昌弘(2008): 道路橋下部構造の新技术開発と評価の課題, 特集「道路橋に係る技術開発及び評価の現状」、土木技術資料50-6.

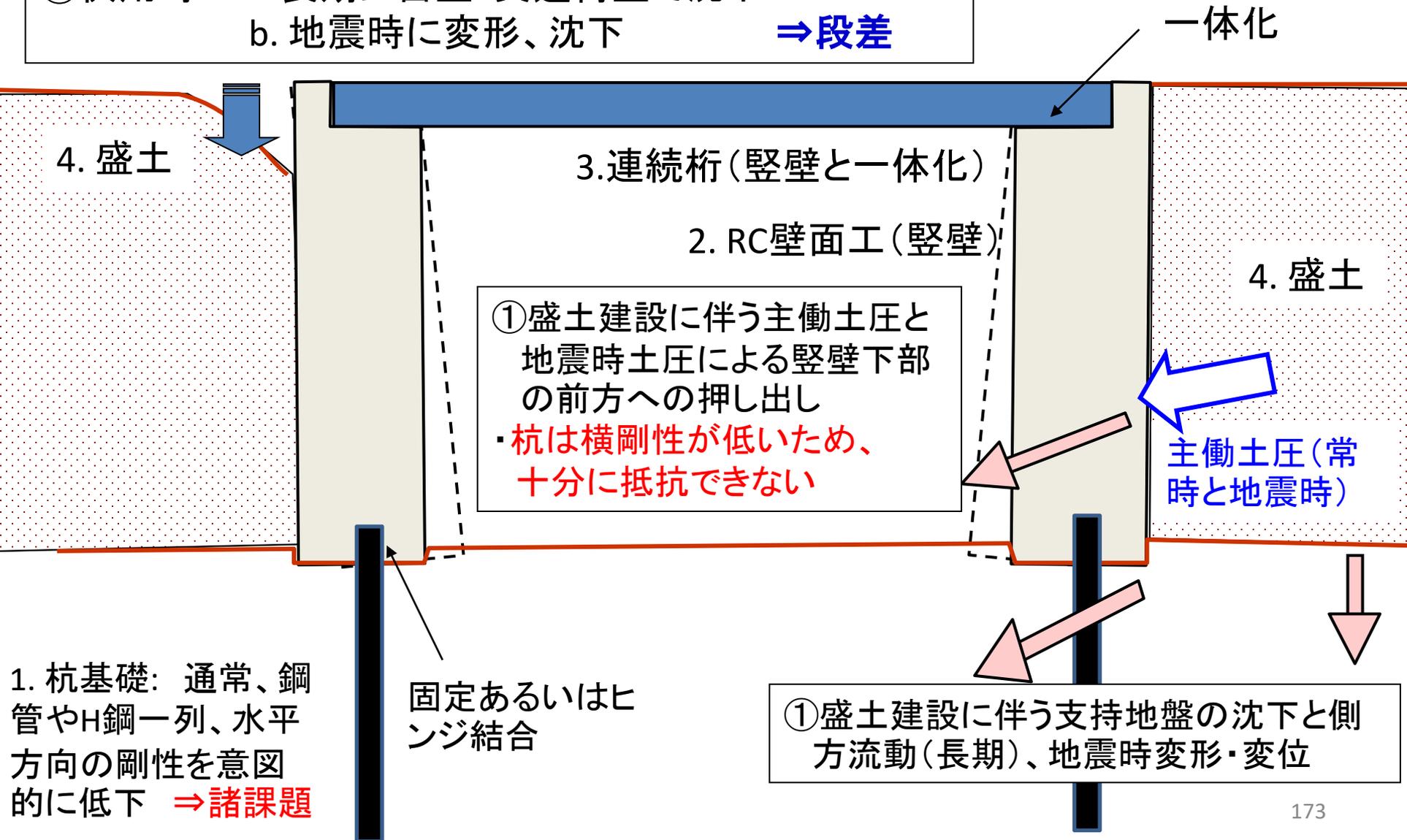
# 橋桁と橋台を一体化した橋梁(Integral bridge)

a) 沓(支承)の省略とb)連続桁による建設費と維持管理費の軽減  
→米国と英国等で盛んに建設、しかし、日本では限定的(理由は次頁以降)



# 一体橋梁での「未解決の古くからの諸課題①、②」

- ②供用時: a. 長期に自重・交通荷重で沈下  
b. 地震時に変形、沈下 ⇒ 段差



# 一体橋梁での新しい課題③, ④

④気温の季節変動による橋桁の熱伸縮・膨張に伴う壁面工上端の繰返し水平変位  
・杭は横剛性が低いため、十分に抵抗できない

盛土の主働崩壊に伴う沈下\*

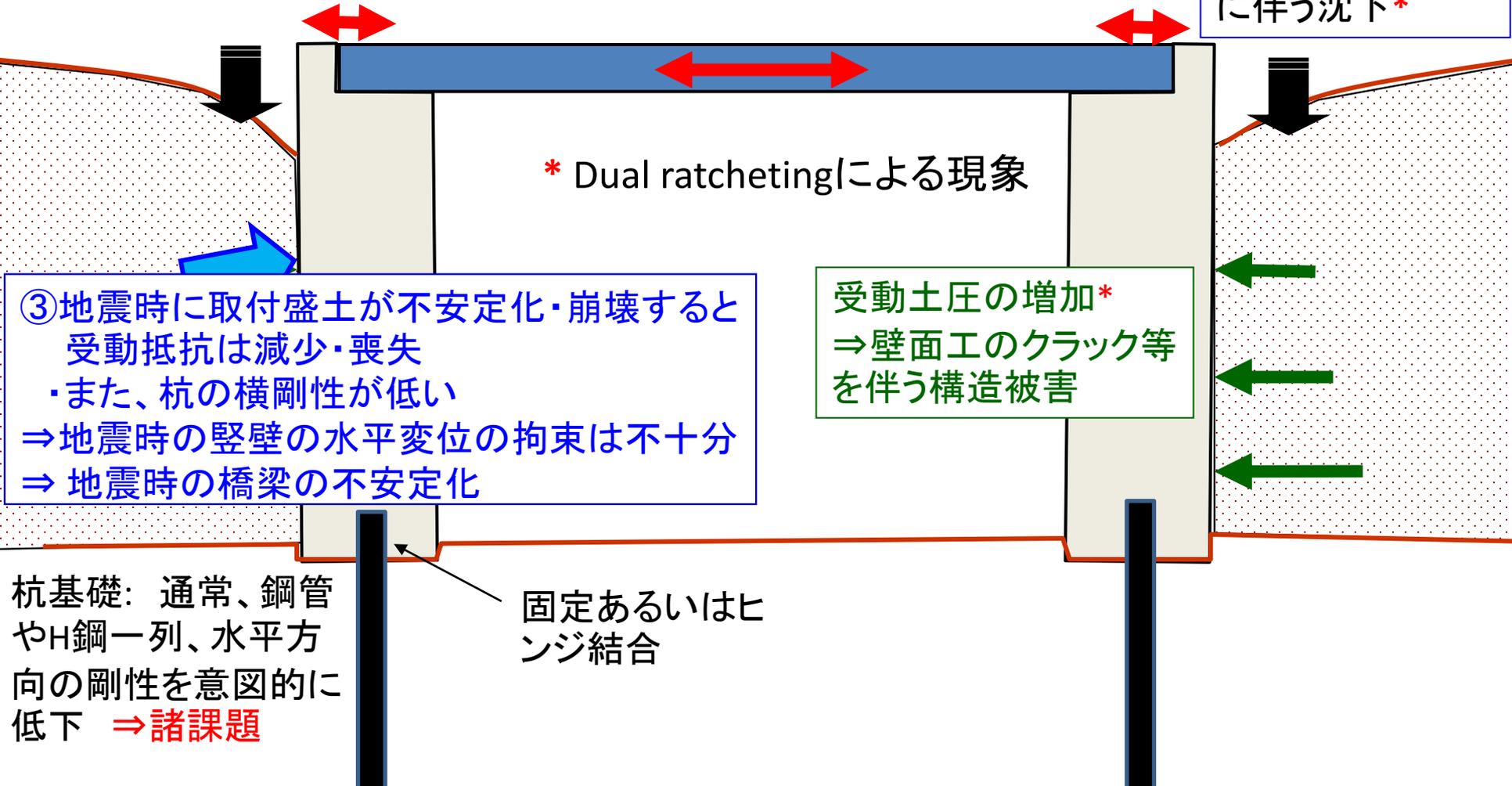
\* Dual ratchetingによる現象

受動土圧の増加\*  
⇒壁面工のクラック等を伴う構造被害

③地震時に取付盛土が不安定化・崩壊すると受動抵抗は減少・喪失  
・また、杭の横剛性が低い  
⇒地震時の縦壁の水平変位の拘束は不十分  
⇒地震時の橋梁の不安定化

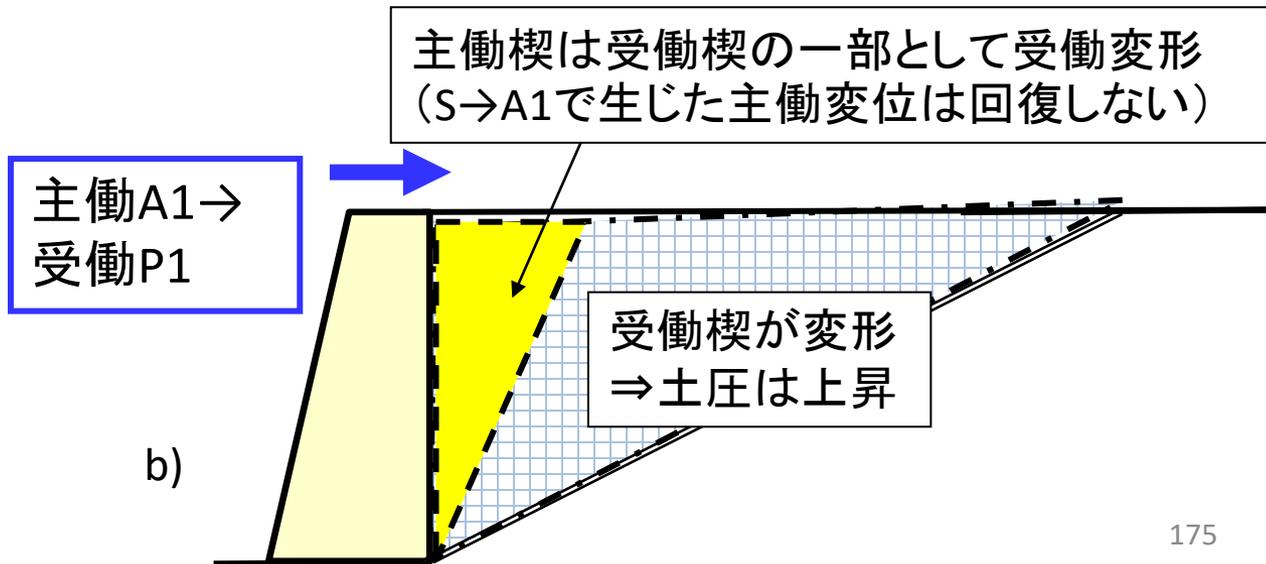
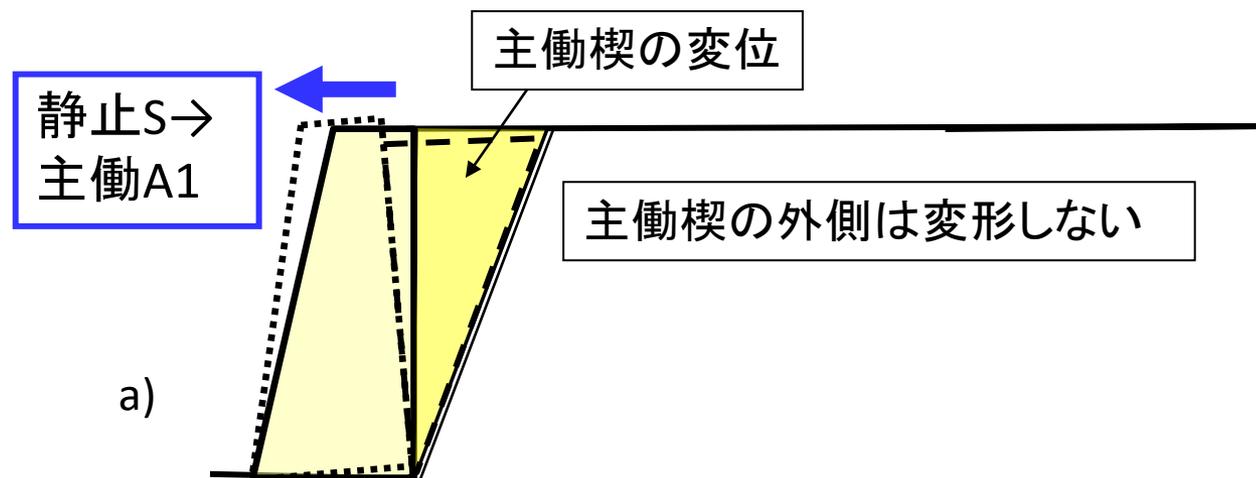
固定あるいはヒンジ結合

杭基礎: 通常、鋼管やH鋼一列、水平方向の剛性を意図的に低下 ⇒ 諸課題



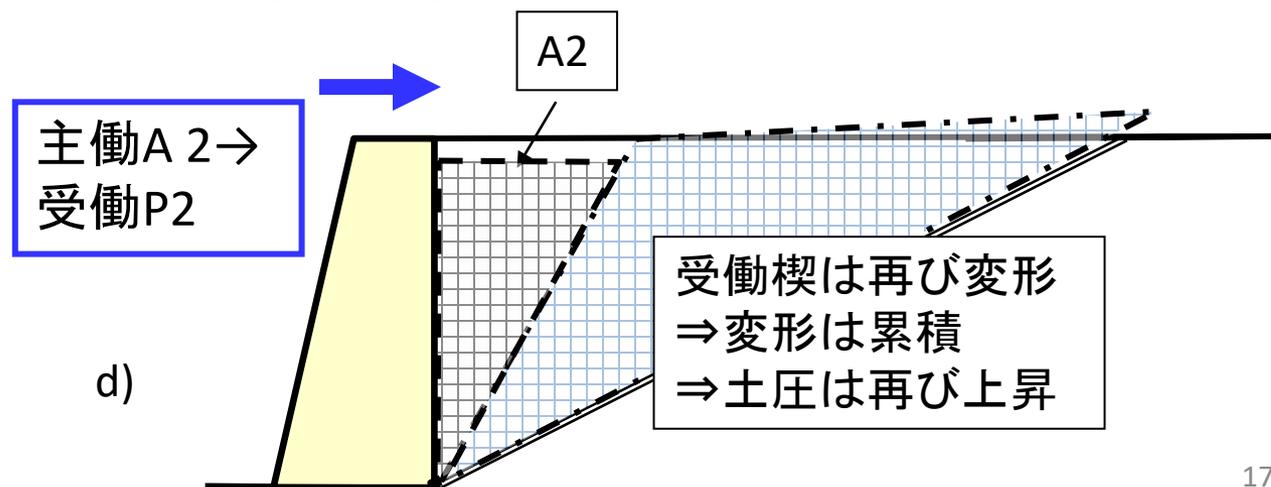
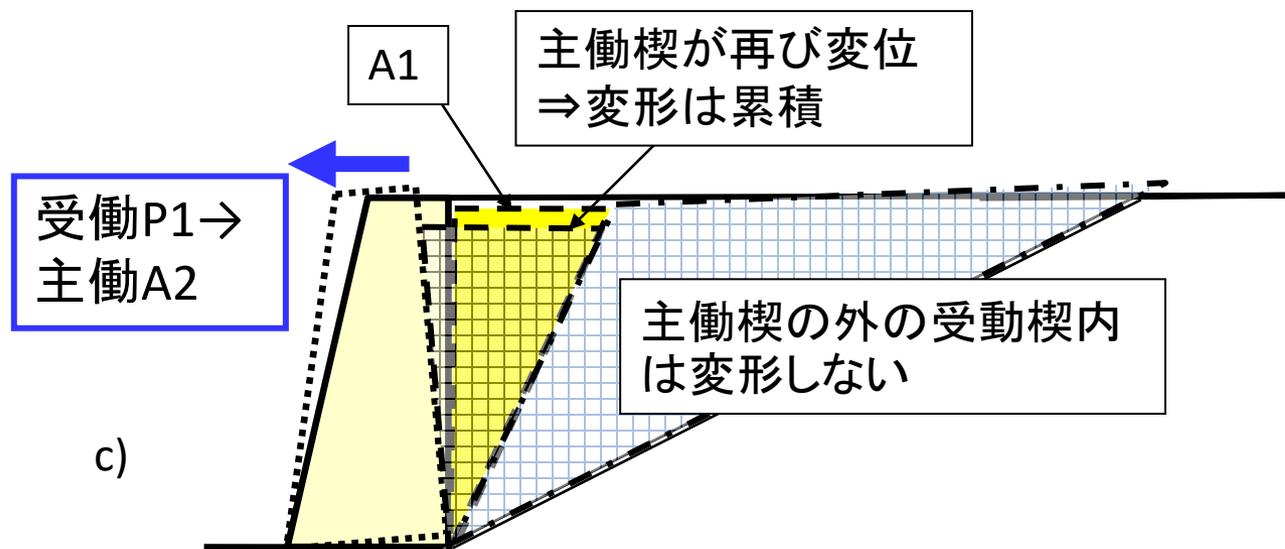
# 壁面工（豎壁）の小振幅の繰返し水平載荷⇒Dual ratcheting

主働土圧メカニズムと受働土圧メカニズムが交互に独立に生じる  
→盛土は沈下し続け、土圧は上昇し続ける



# 壁面工(豎壁)の小振幅の繰返し水平載荷⇒Dual ratcheting

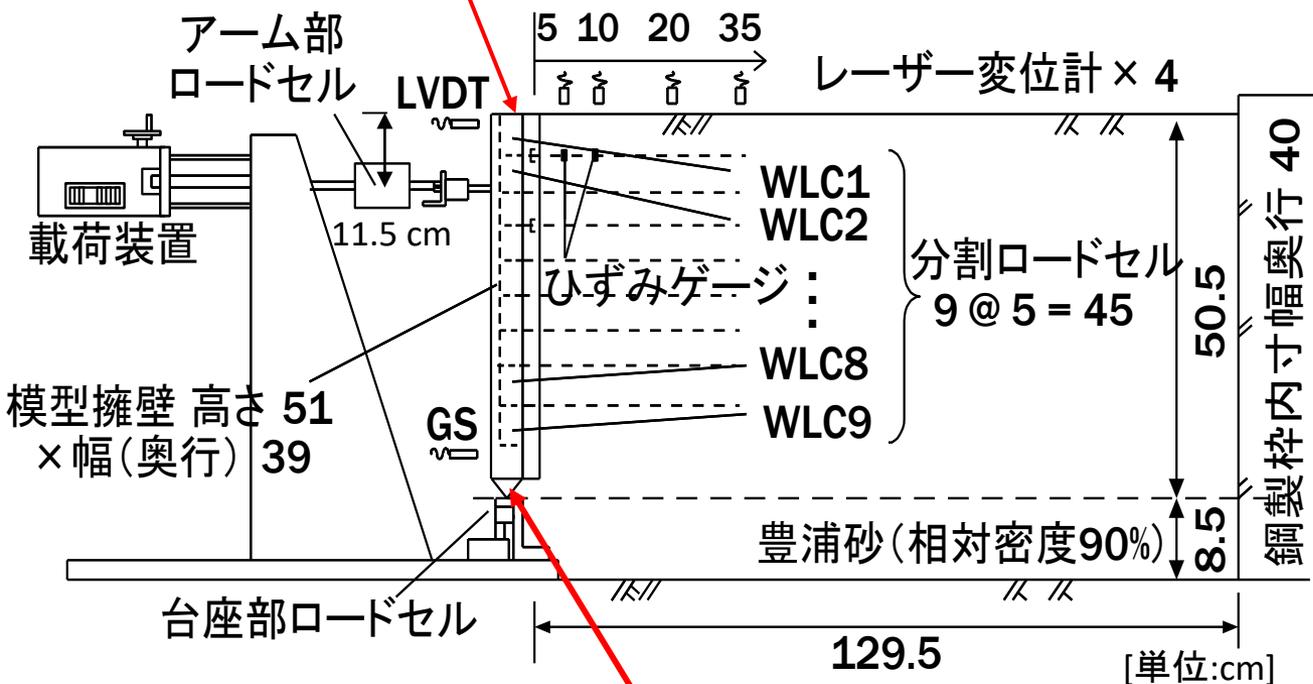
主働土圧メカニズムと受働土圧メカニズムが交互に独立に生じる  
→盛土は沈下し続け、土圧は上昇し続ける



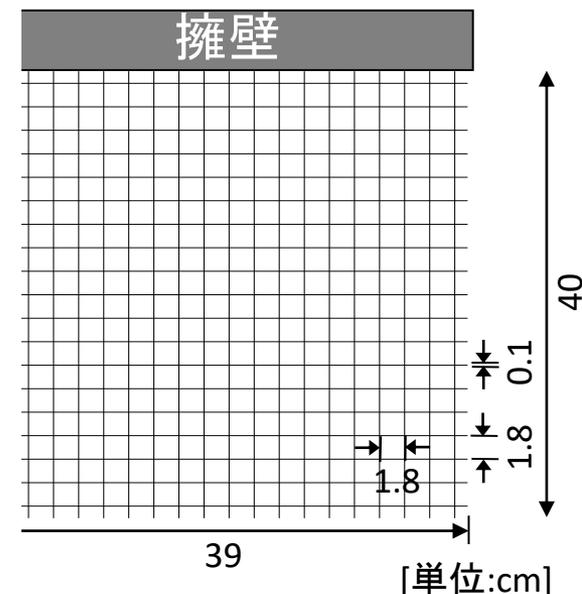
# 壁面工の繰返し水平載荷模型実験 (下図は盛土を補強した場合)

壁面工

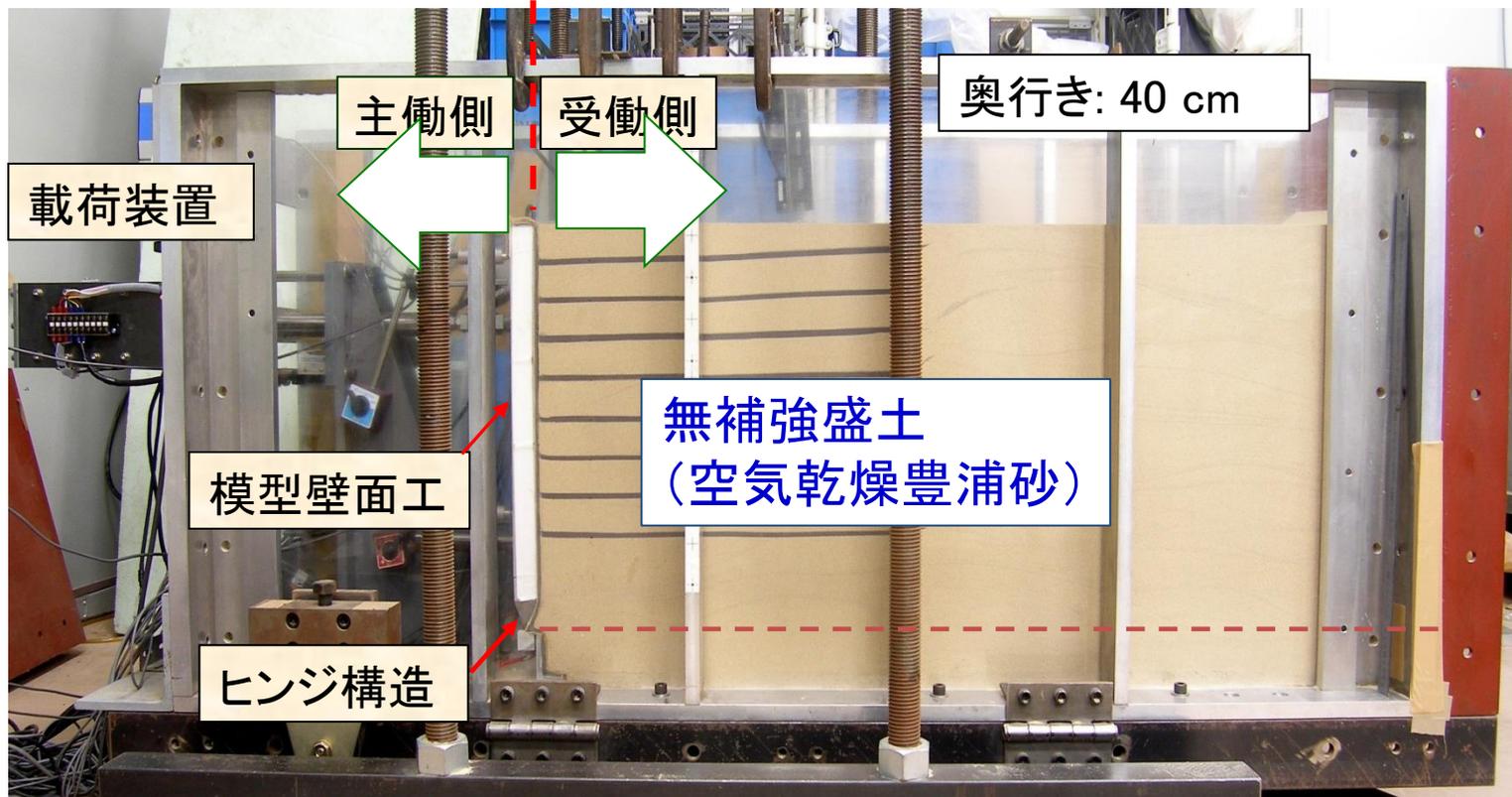
8層のポリエステル補強材  
(平面占有率 = 9.5%)現場で  
使用されているものから縦横  
材を1本ずつ間引いたもの。



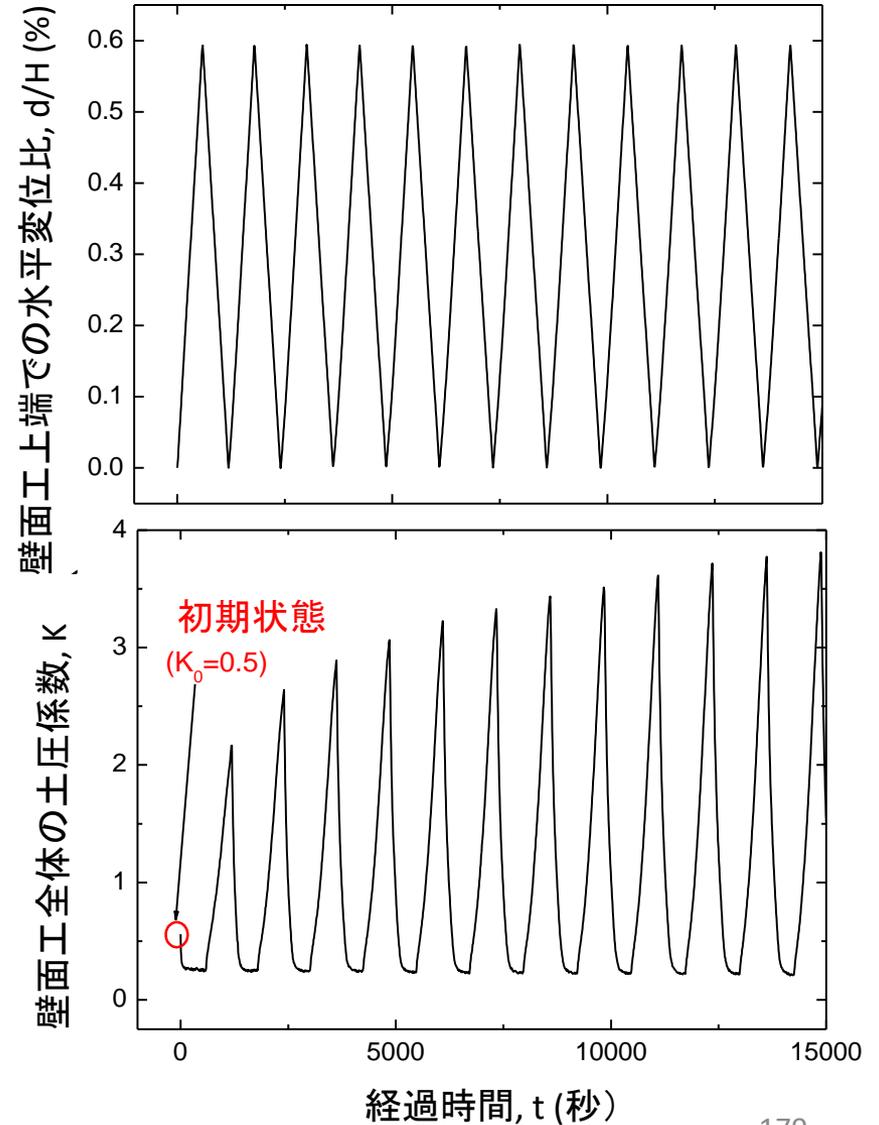
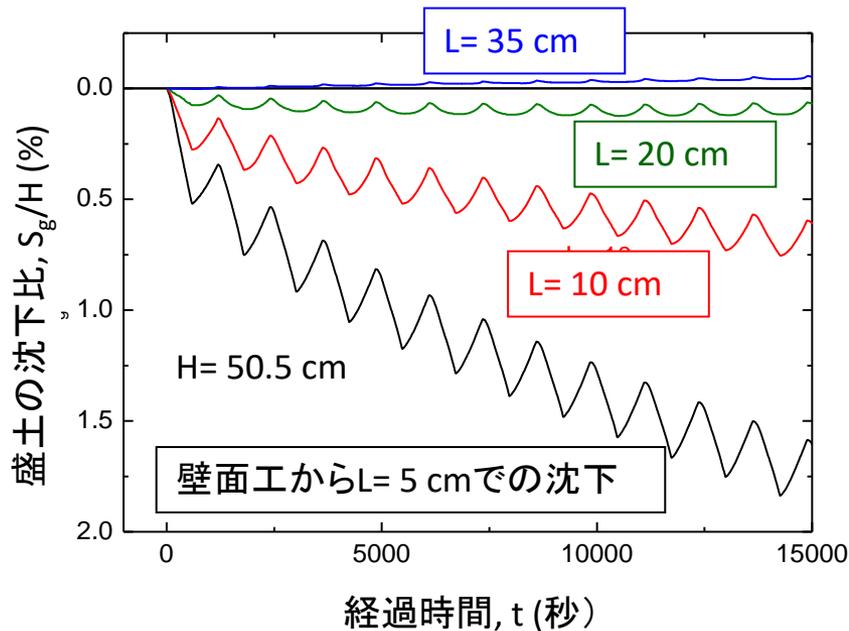
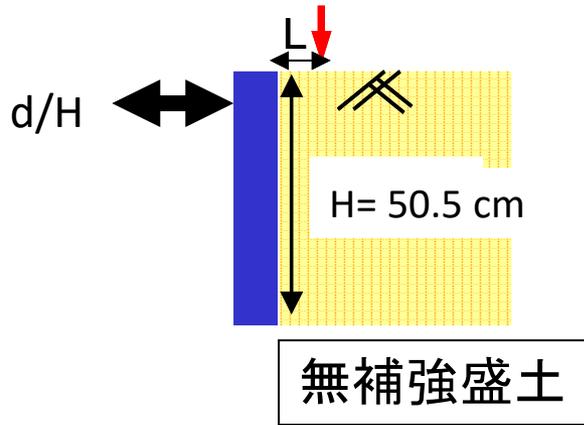
下端ヒンジ



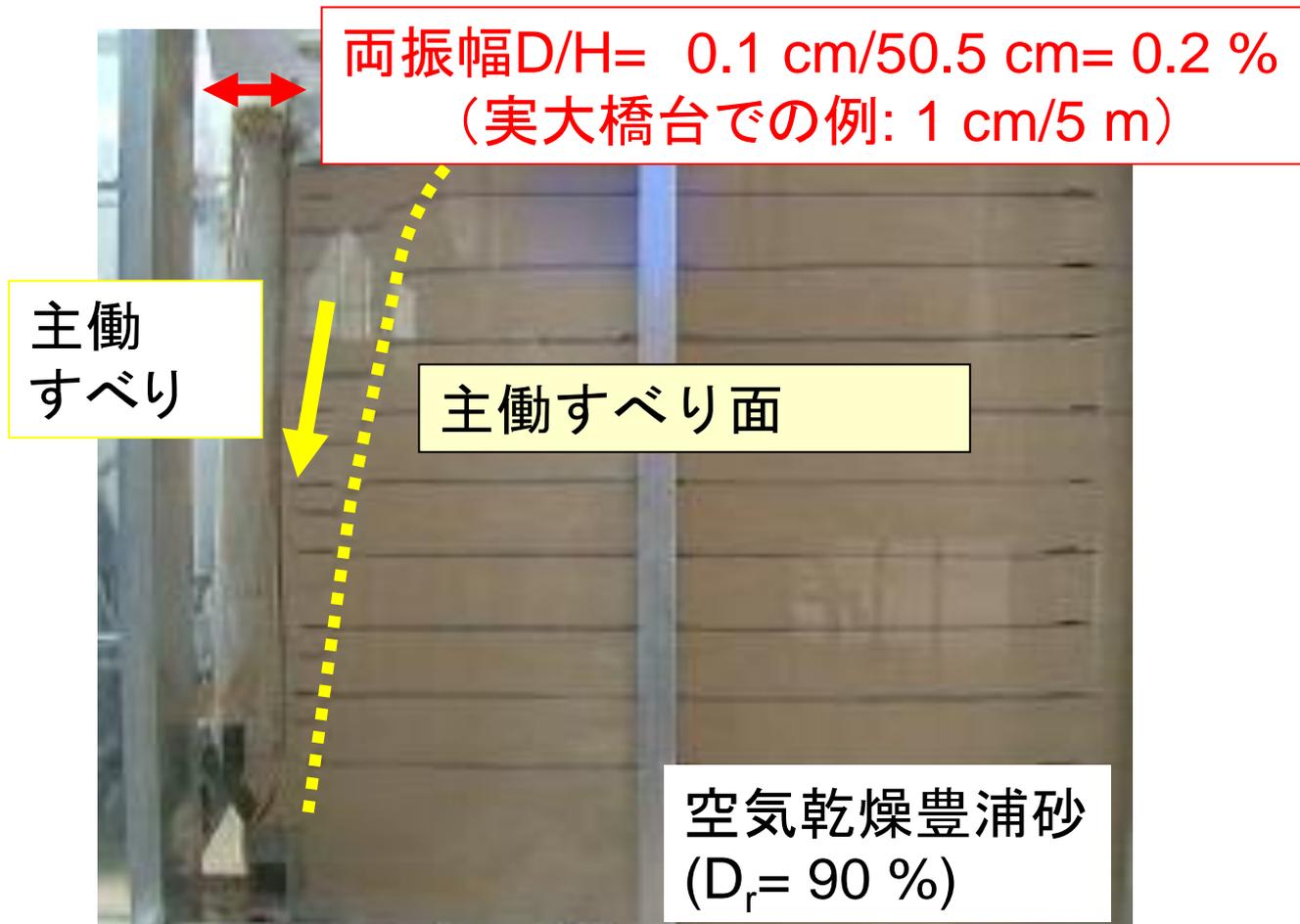
# 壁面工の繰返し水平載荷模型実験



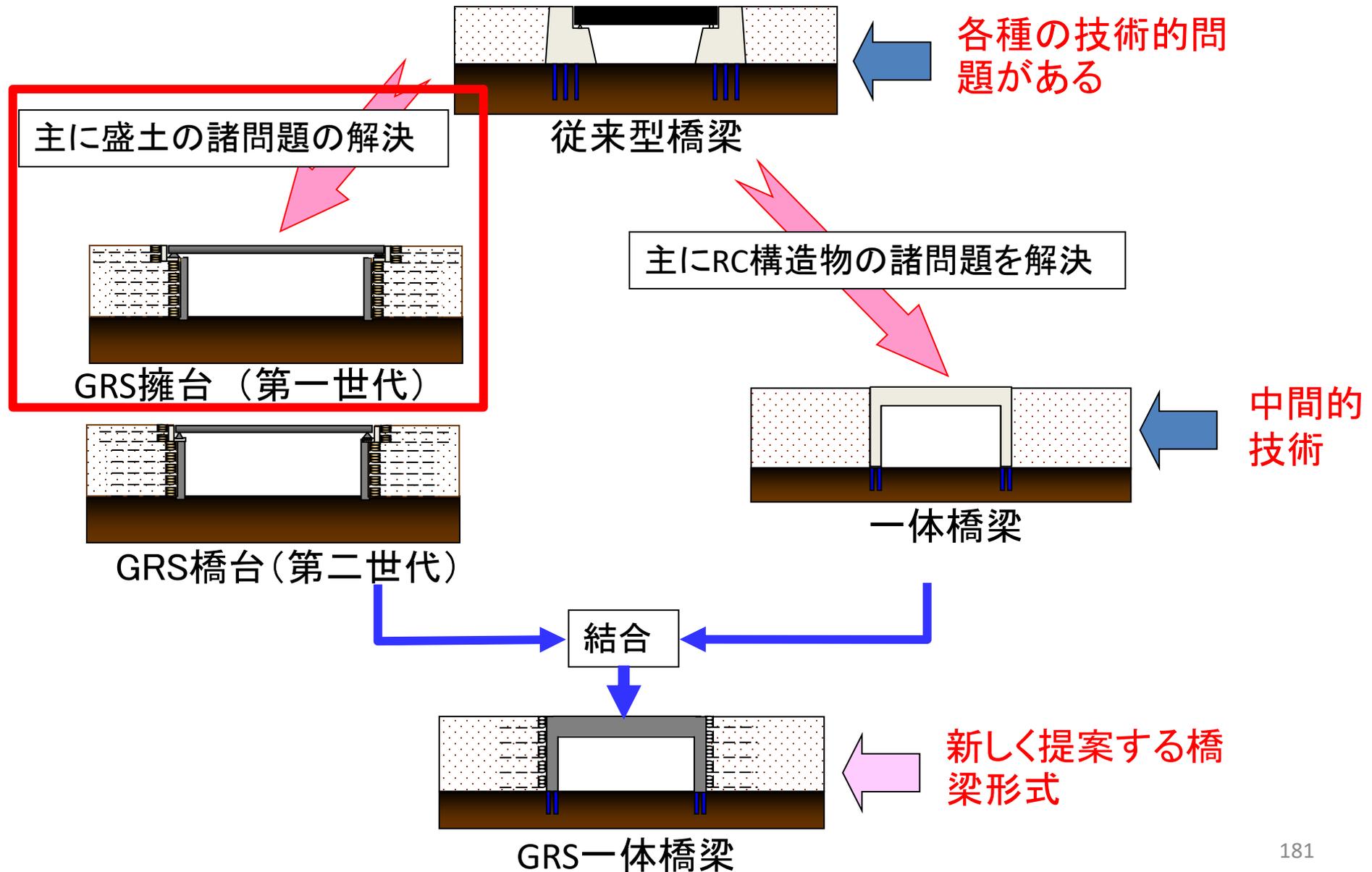
# 無補強盛土で壁面工下端がヒンジ支持の場合の実験例



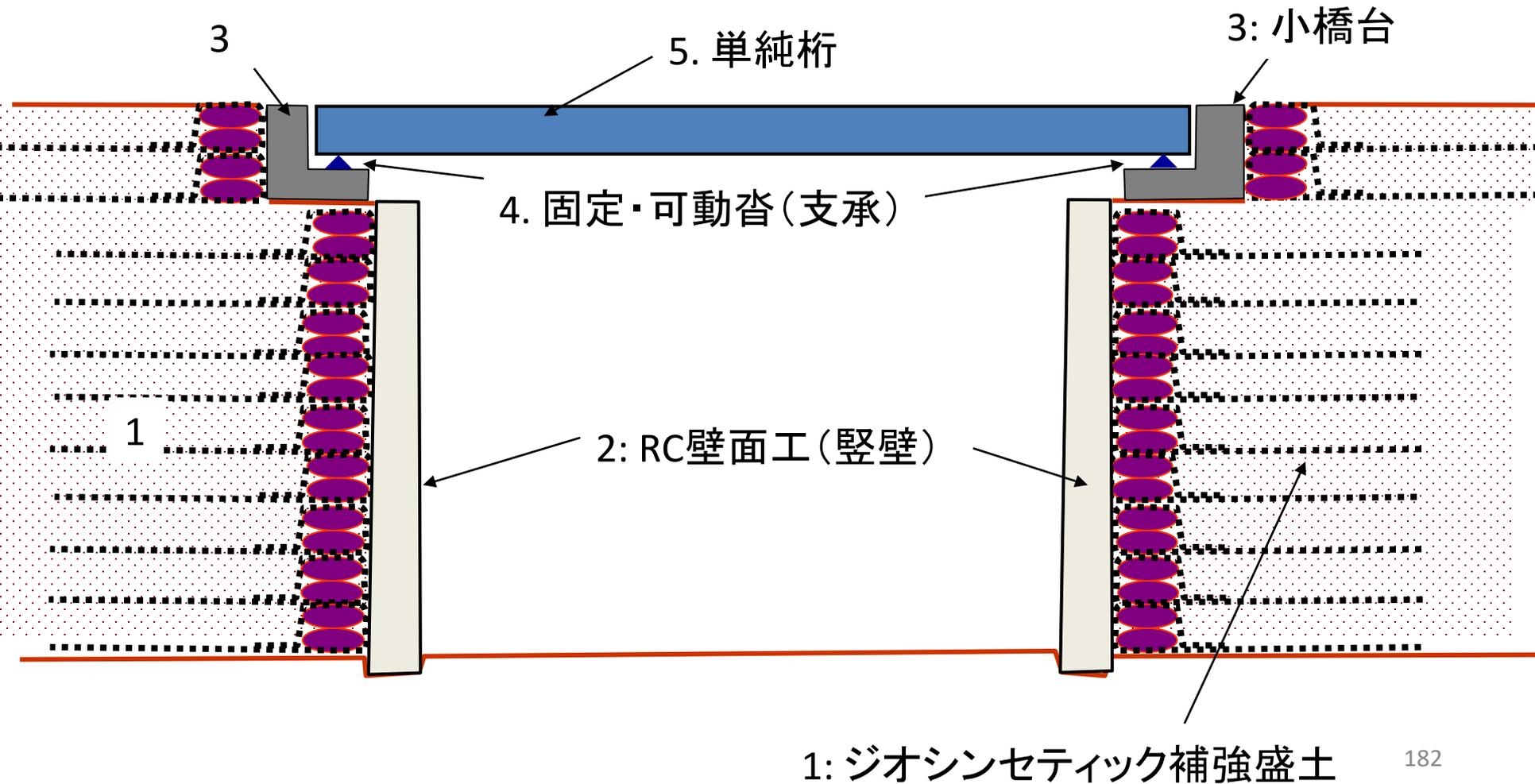
# 小振幅の繰り返し変位による無補強盛土の主働崩壊



# GRS擁壁を活用したGRS橋台とGRS一体橋梁の開発経緯



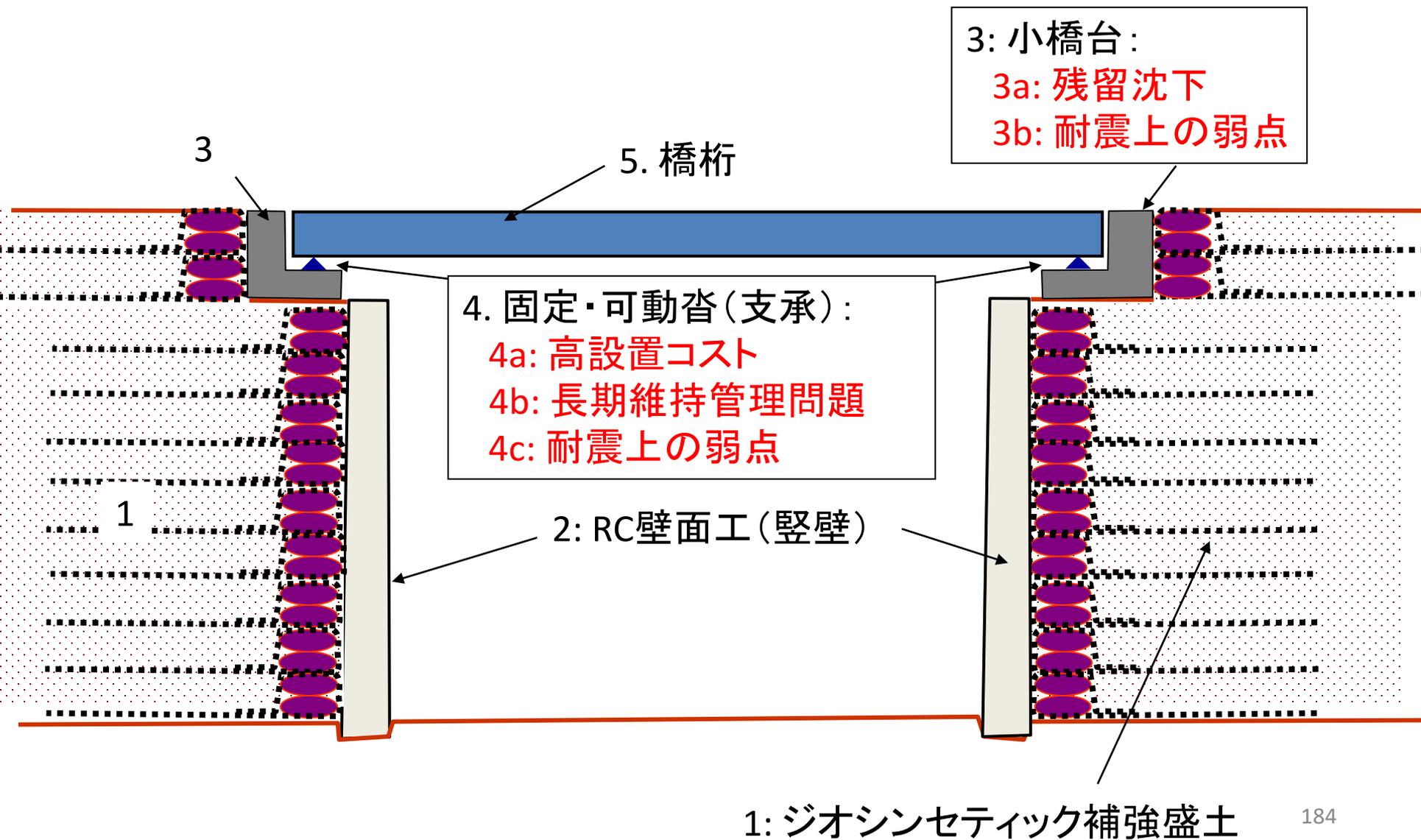
# 段階施工で建設した剛な一体壁面工を持つGRS擁壁を 発展させたGRS橋台（第一世代）（数字は施工順序）



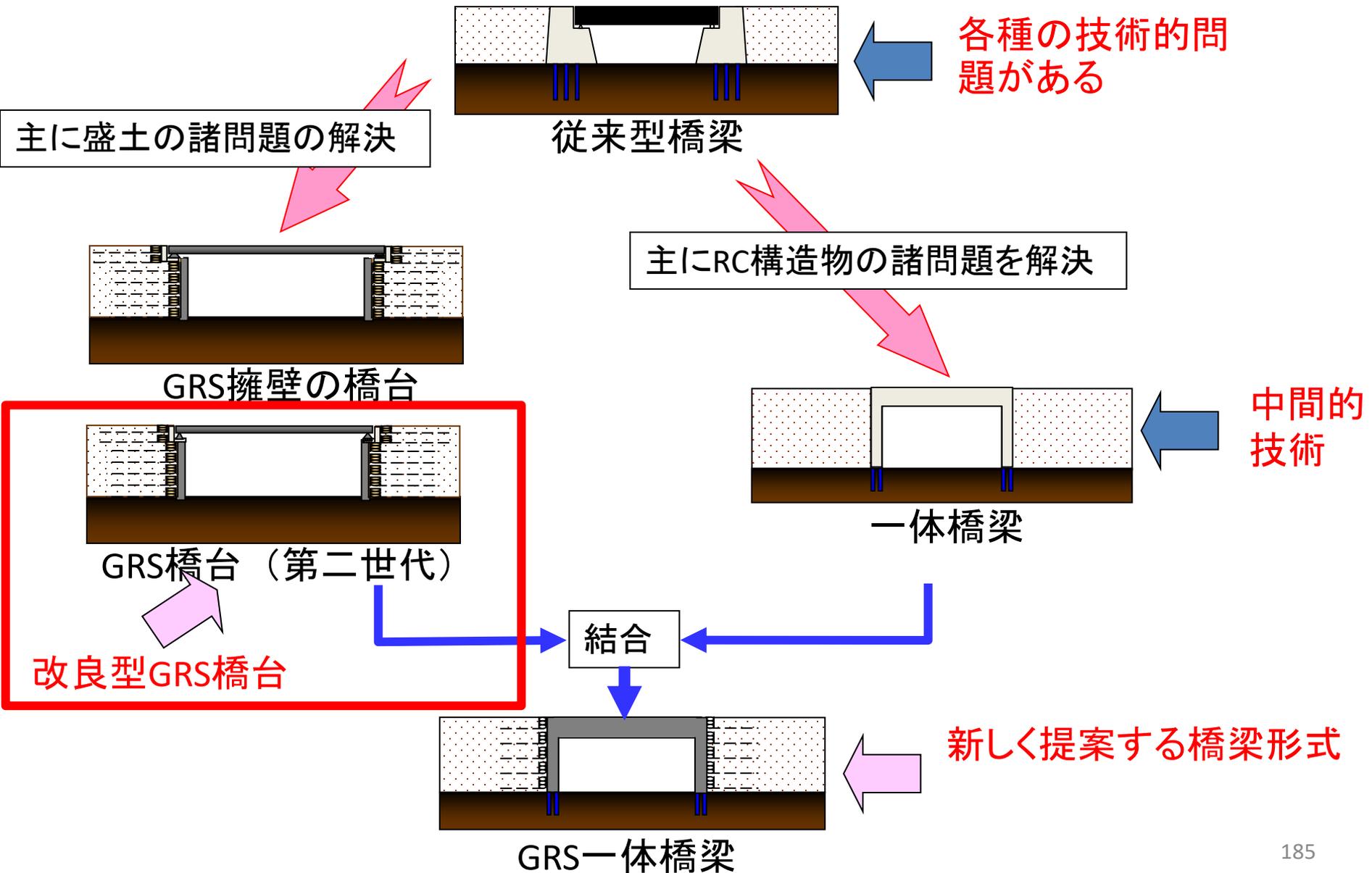
# 西武池袋線、桜台



# 段階施工で建設した剛な一体壁面工を持つGRS擁壁を 発展させたGRS橋台（第一世代）の諸問題

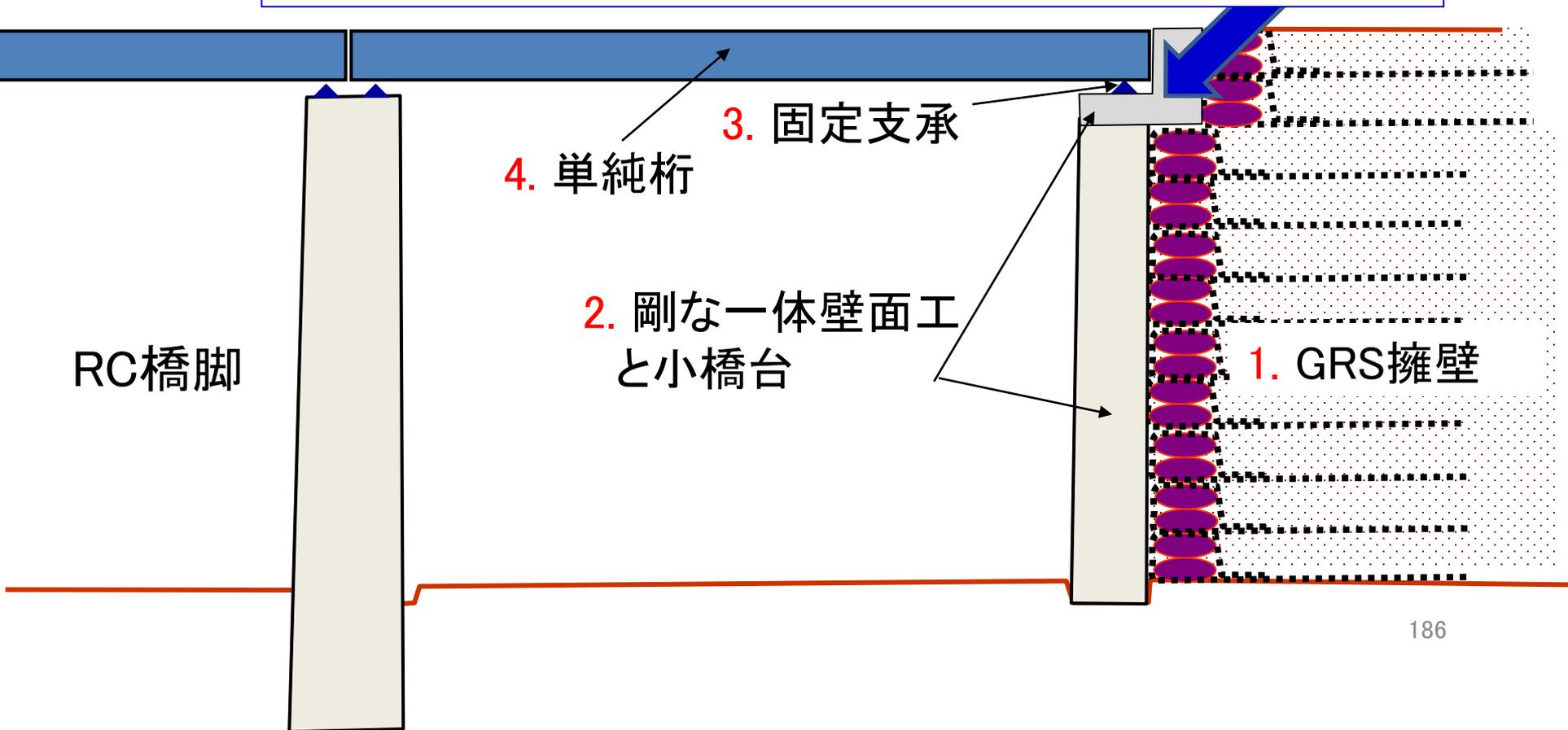


# GRS擁壁を活用したGRS橋台とGRS一体橋梁の開発経緯



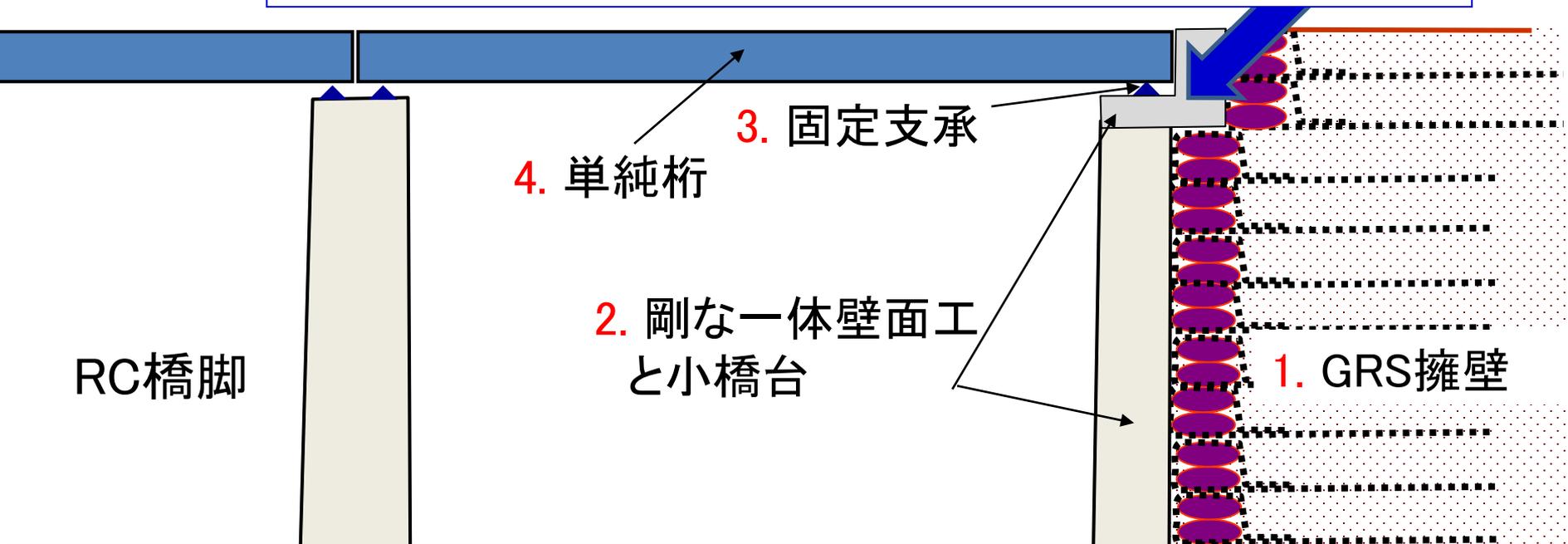
# 剛な一体壁面工を持つGRS擁壁から発展した 改良型GRS橋台(第二世代)

小橋台は、剛な一体壁面工との一体化によって安定



# 剛な一体壁面工を持つGRS擁壁から発展した 改良型GRS橋台(第二世代)

小橋台は、剛な一体壁面工との一体化によって安定



従来形式の橋台よりも、①耐震性が高く、②建設コストも低く、③壁体裏の盛土の残留沈下はほぼゼロ⇒長期維持管理費が大幅に削減

しかし、従来形式と同様に静定構造物なので、

a) 支持地盤の残留変形は、限定的ならば許容できる(強固でない支持地盤でも、表層地盤改良/プレロード工法等によって対応可能)

b) 桁設計は従来通りの静定構造物としての単純桁の設計となり、容易

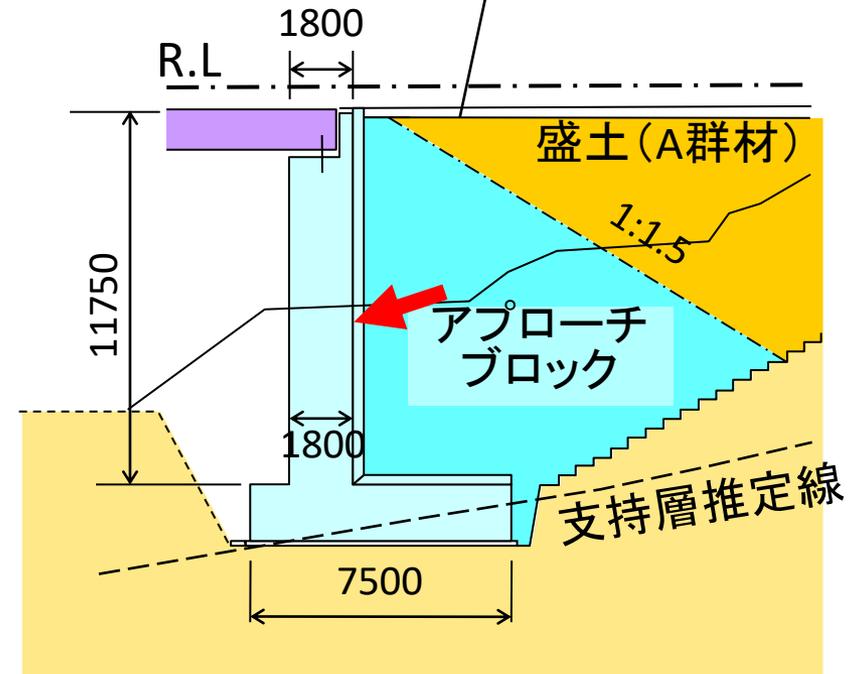
# 実現場での適用(2003, 九州新幹線鹿児島ルート)



# 従来橋台との比較(九州新幹線)

仮に、従来型橋台を設計すれば、

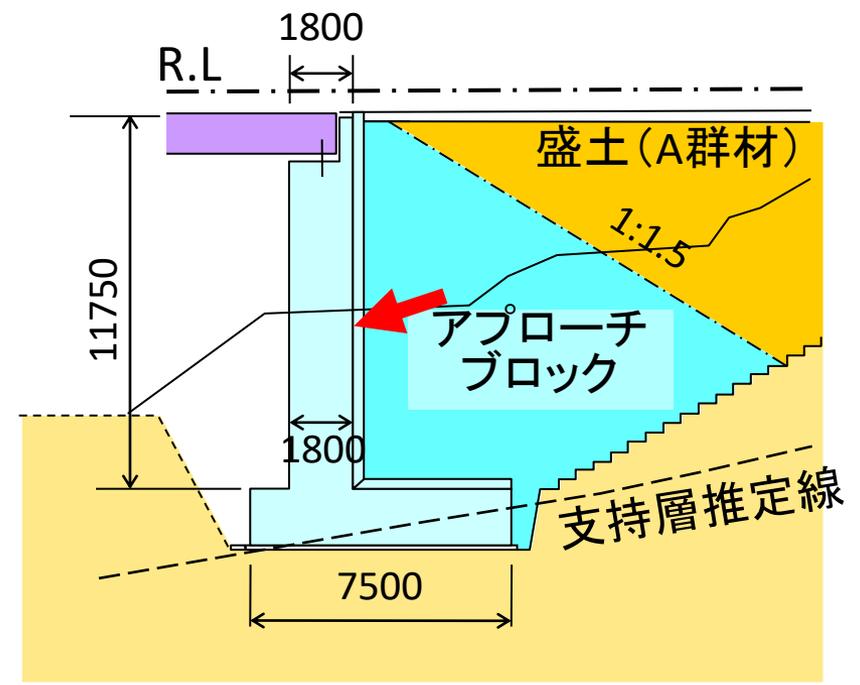
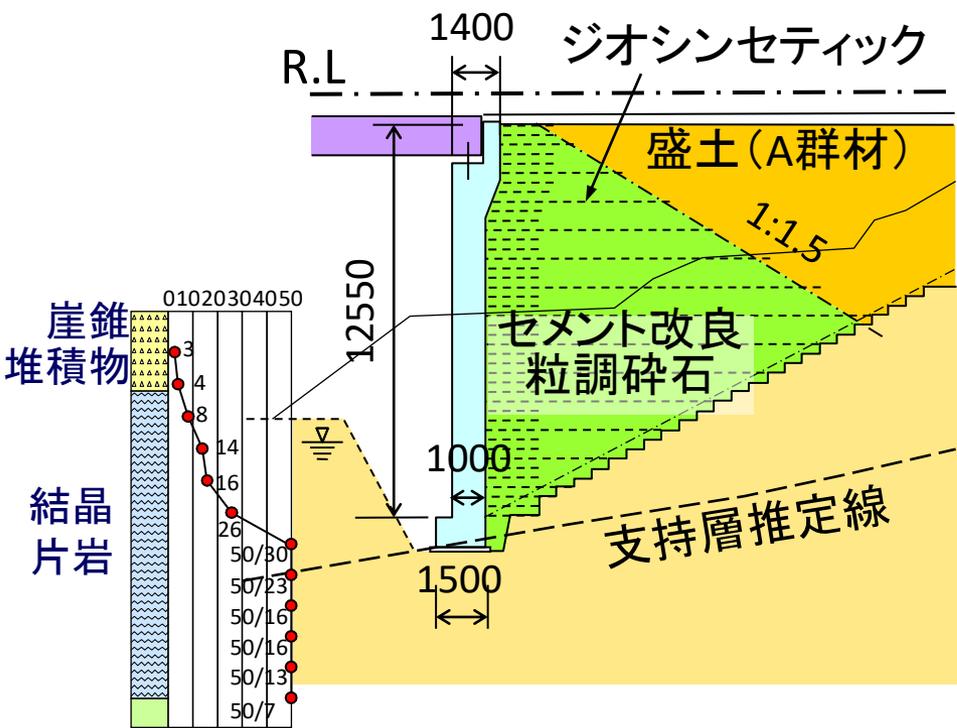
良く締固めた粒度調整砕石



逆T式橋台(従来形式)  
RC擁壁は、盛土を支える  
抗土圧構造物。  
主働動土圧が作用する。

# 従来橋台との比較(九州新幹線)

- 従来型橋台に比べて断面がスリム, 大幅に工事費節減、  
しかも、安定性は大幅に向上、維持管理費は大幅に低減



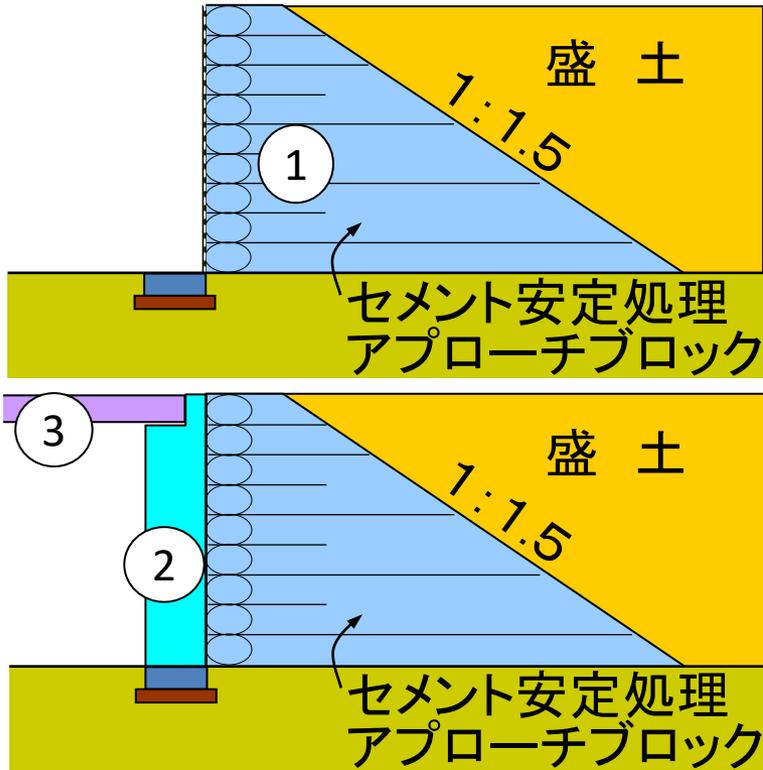
**GRS橋台(新形式)**  
 RC構造物は盛土を支えるが  
 盛土もRC構造物を支える。  
 地震時に主働動土圧は作用しない。

**逆T式橋台(従来形式)**  
 RC擁壁は、盛土を支える  
 抗土圧構造物。  
 主働動土圧が作用する。

**発想の転換!**

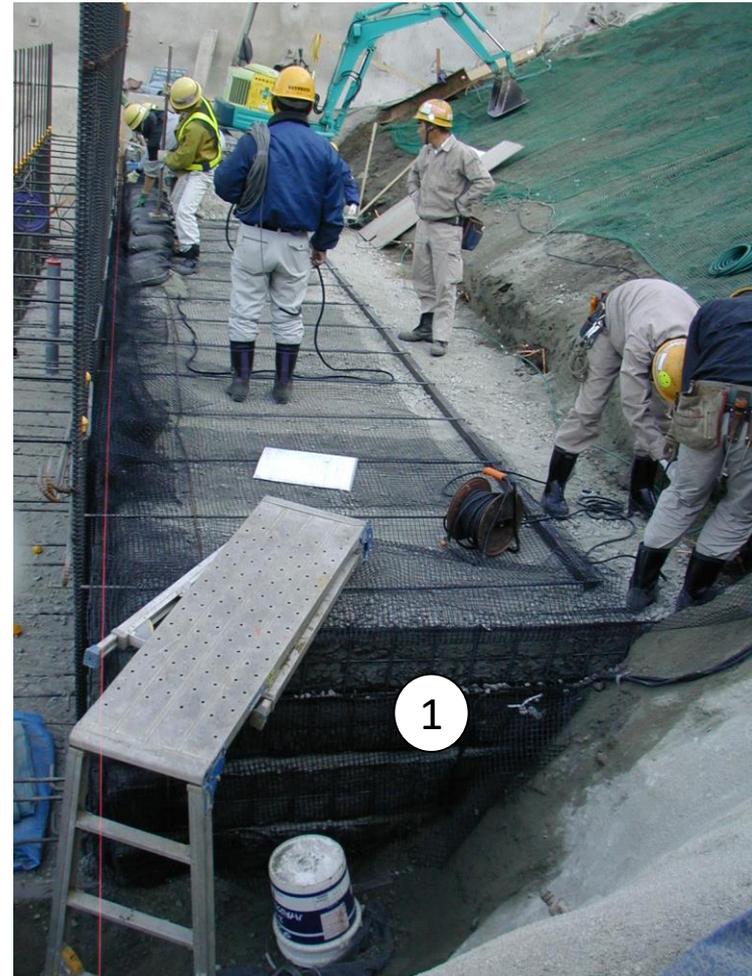
# 施工(九州新幹線)

## 段階施工



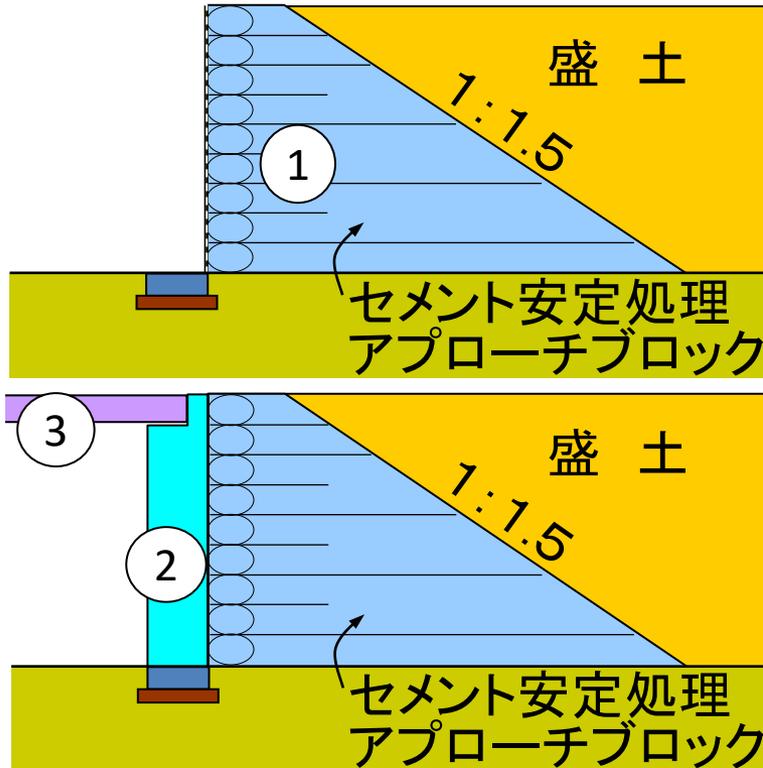
## 特徴

- 補強盛土建設後に壁面工を建設するため、支持地盤・盛土の沈下等によって生じる壁面工の変位と壁面工/盛土の相対沈下問題は回避



# 施工(九州新幹線)

## 段階施工



## 特徴

- 補強盛土建設後に壁面工を建設するため、支持地盤・盛土の沈下等によって生じる壁面工の変位と壁面工/盛土の相対沈下問題は回避

# 載荷試験, 2003年2月27日

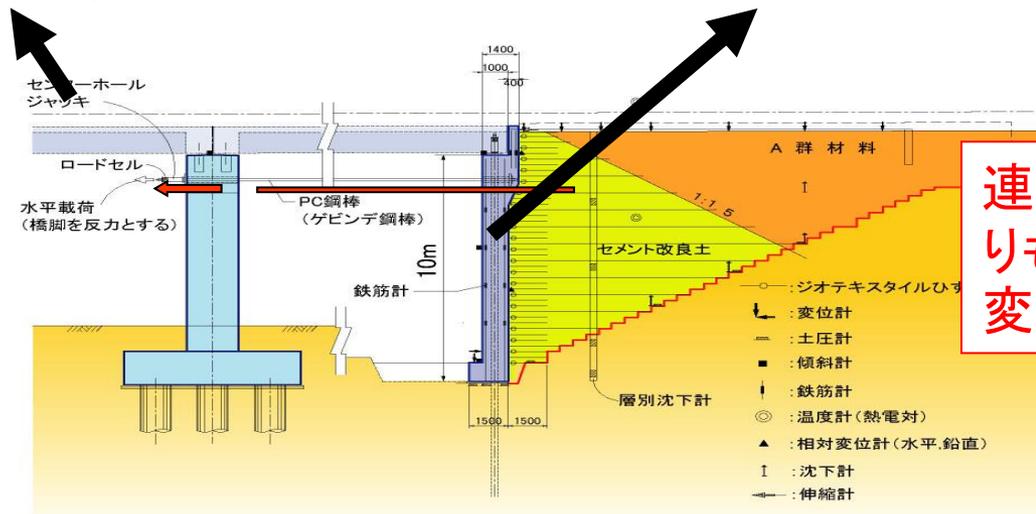
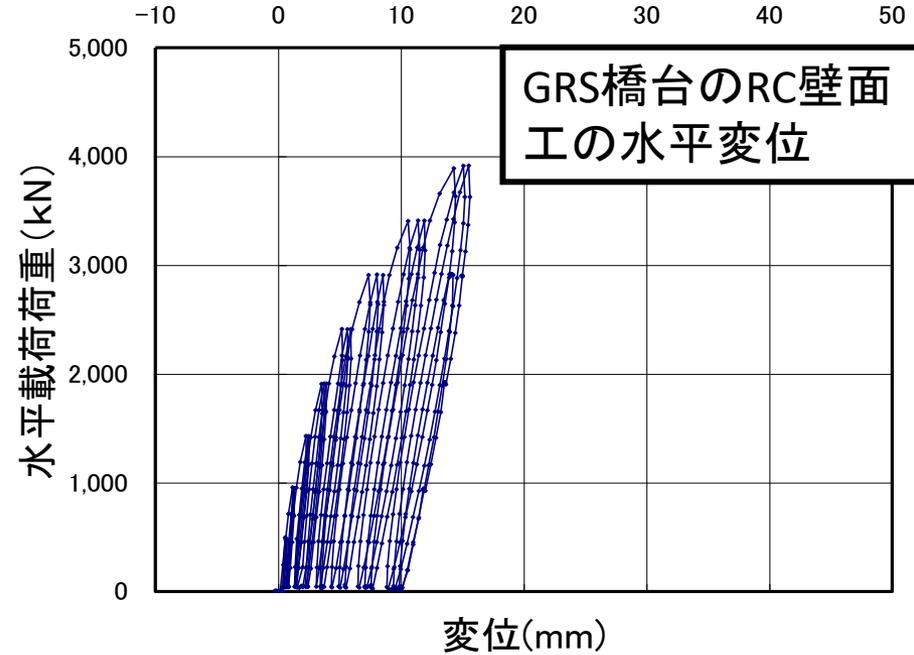
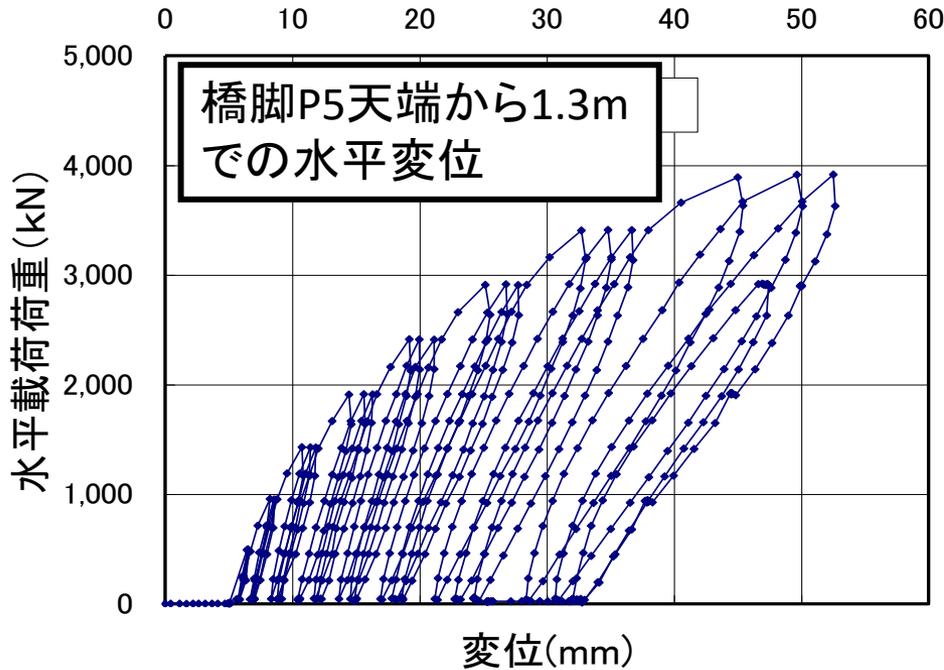
連結 <九州新幹線, 大牟田付近, 高田地区>



GRS橋台は、抗土圧構造物ではなく、盛土が壁面工を支えている  
⇒地震時に、主働動土圧は作用しないが、桁・壁面工の水平慣性力によって壁面工は盛土から分離する虞がある。

→引張試験による主動状態における壁面工と盛土の一体性の確認

# 現場載荷試験(2003年2月)



連結した二つの橋脚よりも橋台の方が、水平変位は遥かに小さい

# 剛な一体壁面工を持つGRS橋台(第二世代)

九州新幹線鹿児島ルート高田  
(最初の施工例)



北海道新幹線  
木古内～新函館間(万太郎)

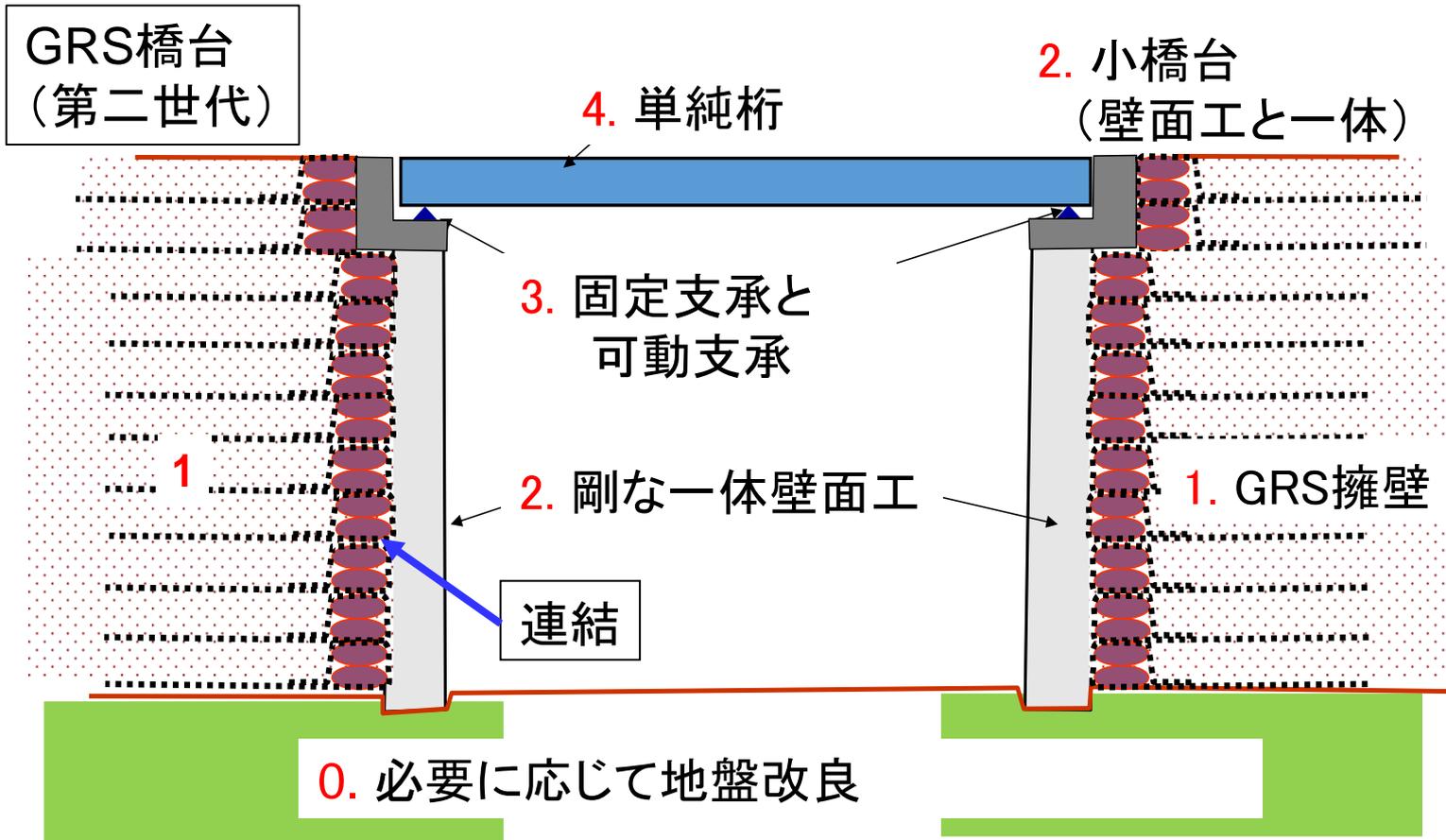


2022年までに、185あまり建設  
その内:

- ・33: 北海道新幹線、12(本州方) + 21(北海道方)
- ・79: 九州新幹線、1(高田) + 78(西九州ルート)
- ・49: 北陸新幹線、28(長野・金沢間) + 21(金沢・敦賀間)

# 一対の剛一体壁面工を持つGRS橋台(第二世代)で支承を介して単純桁を支持した橋梁

従来の単純桁橋梁よりも、耐震性が高く、低建設コストで、長期維持管理コストが低減 ⇒ 多くの適用例



九州新幹線西九州ルート、第一本明トンネル出口  
一対のGRS橋台に支持された単純桁, 2022年10月28日龍岡撮影



GRS橋台

GRS橋台

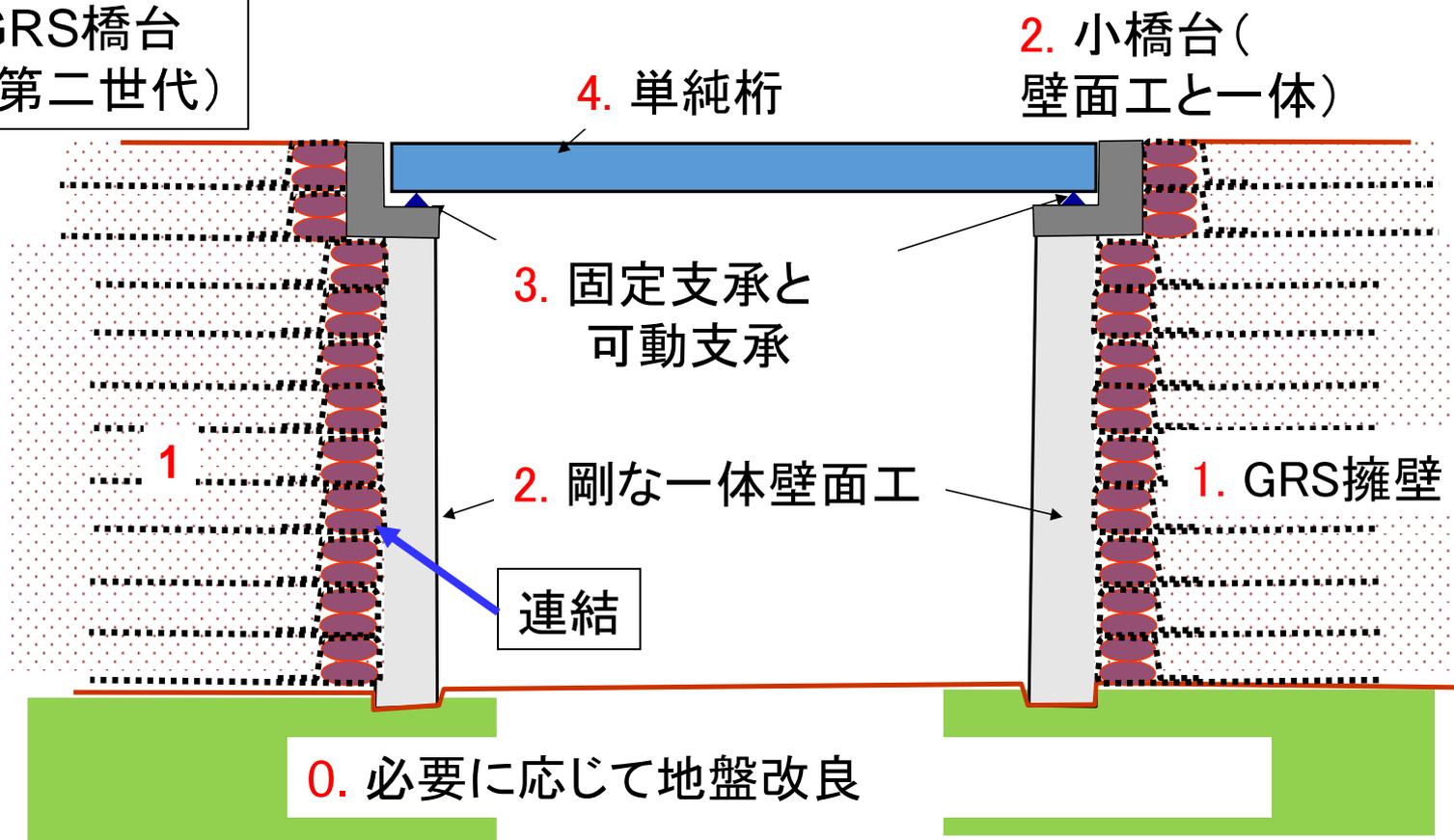


# 一対の剛一体壁面工を持つGRS橋台(第二世代)で支承を介して単純桁を支持した橋梁

従来の単純桁橋梁よりも、耐震性が高く、低建設コストで、長期維持管理コストが低減 ⇒ 幾つか適用例

しかし、支承の設置・維持管理費、可動支承部の桁の耐震性が課題  
⇒ これらの問題を解消できるGRS一体橋梁の開発

GRS橋台  
(第二世代)



4. 単純桁

2. 小橋台(壁面工と一体)

3. 固定支承と可動支承

1

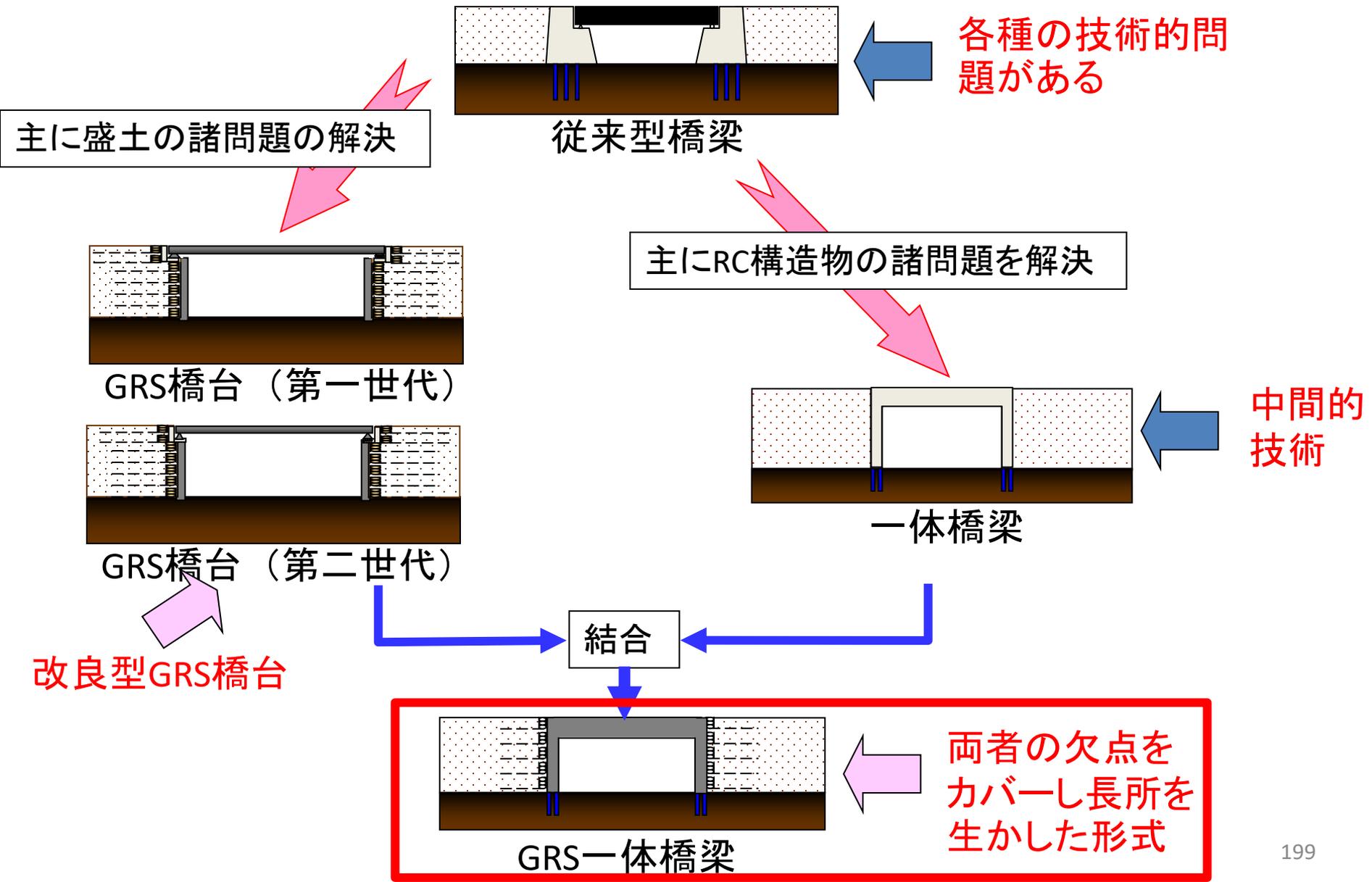
2. 剛な一体壁面工

連結

1. GRS擁壁

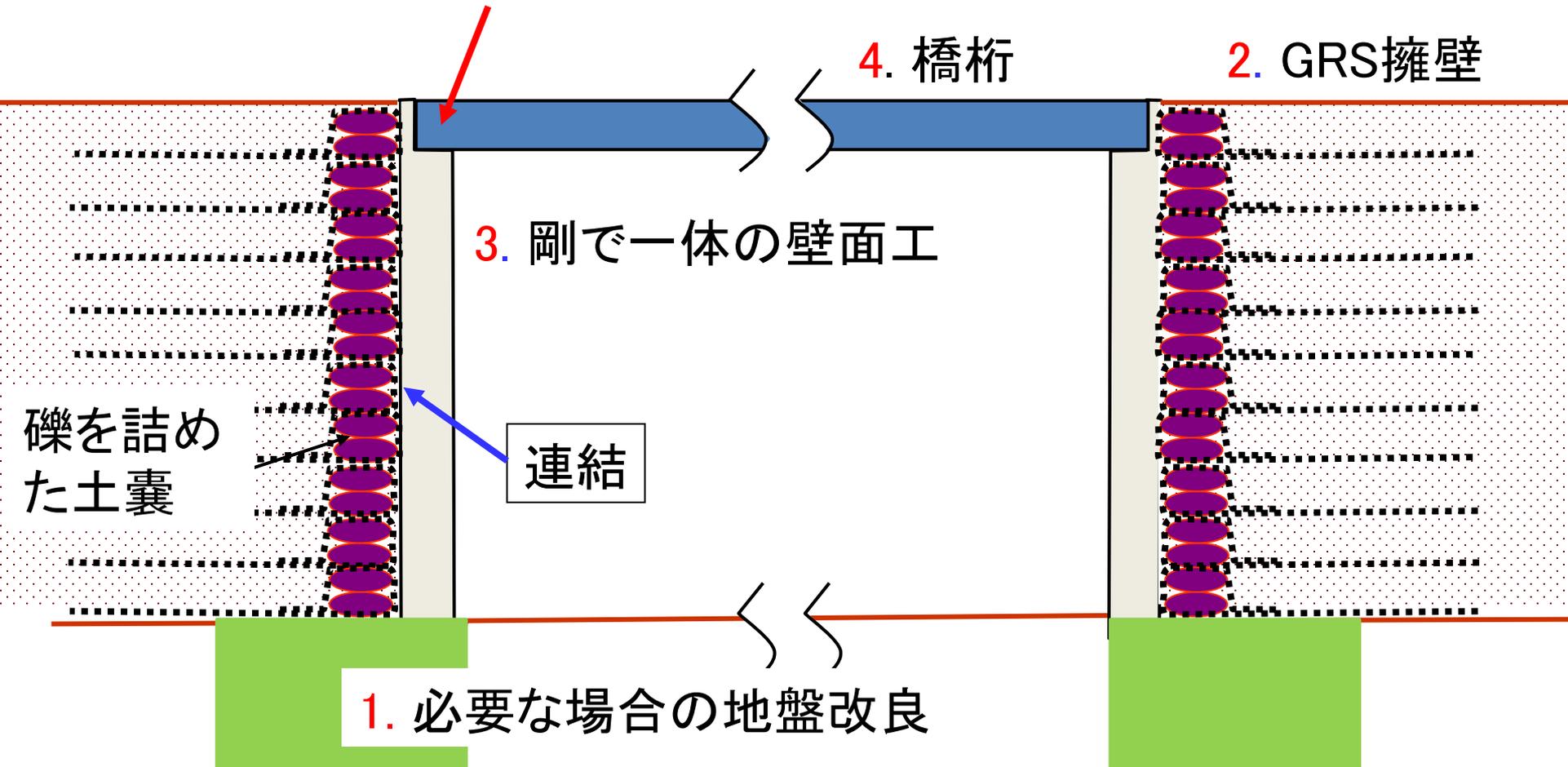
0. 必要に応じて地盤改良

# GRS擁壁を活用したGRS橋台とGRS一体橋梁の開発経緯



# GRS一体橋梁（数字は施工順序）

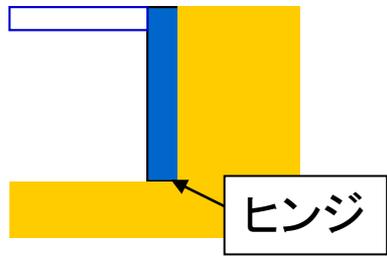
5. 支承無で構造一体化 ⇒ 桁の温度収縮・膨張によって壁面工に繰返し水平変位 ⇒ その悪影響は、GRS一体橋梁では解決される（以下説明）



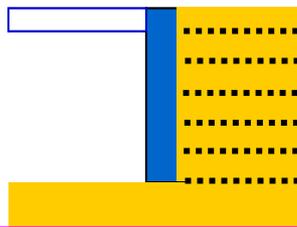
# 小型模型実験によるGRS一体橋梁の性能の検討

1. 壁面工の水平繰り返し載荷実験
2. 振動台実験

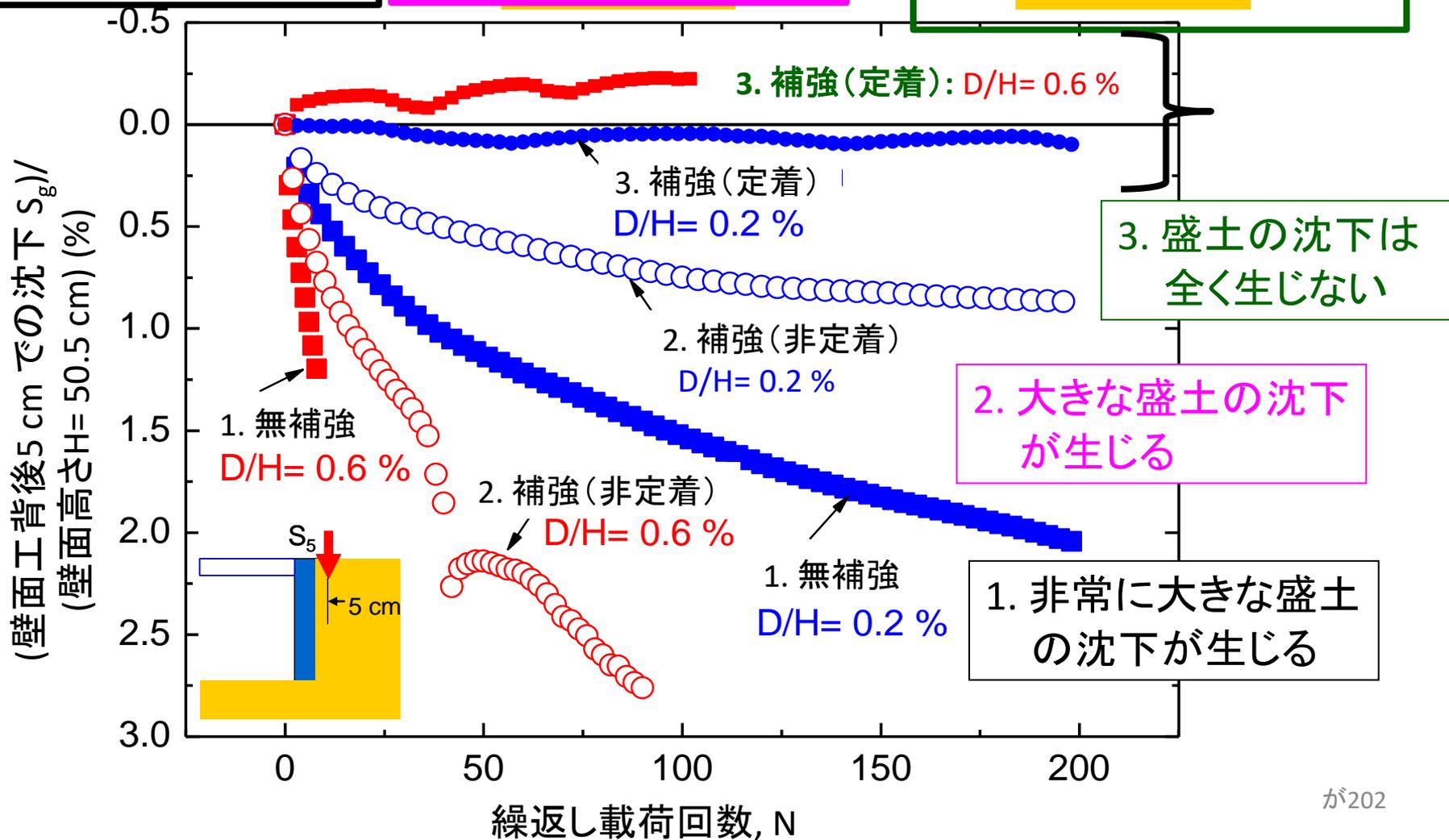
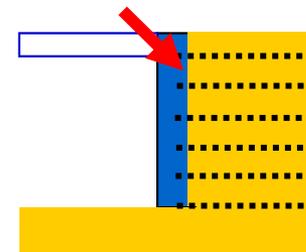
1. 無補強盛土



2. 補強盛土(補強材は壁面工背面に**非定着**)



3. 補強盛土(補強材は壁面工背面に**定着**)



3. 盛土の沈下は全く生じない

2. 大きな盛土の沈下が生じる

1. 非常に大きな盛土の沈下が生じる

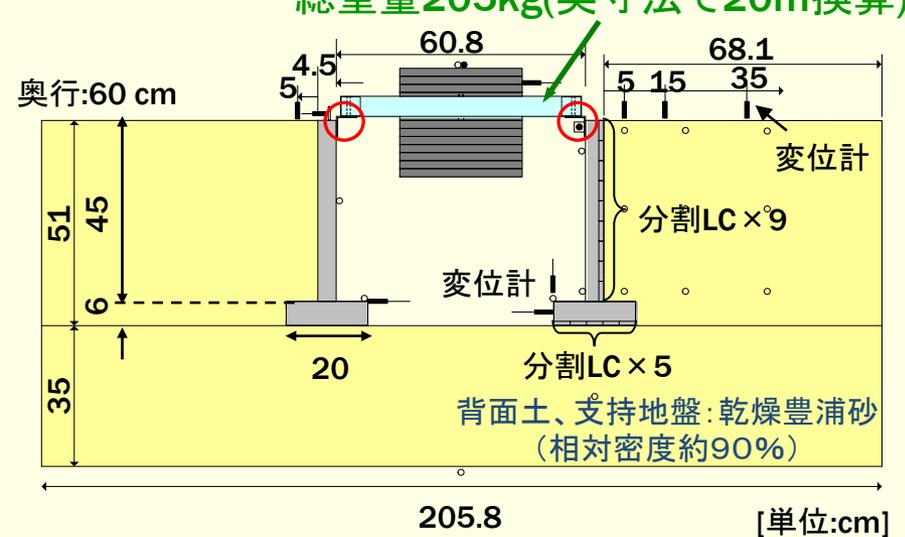
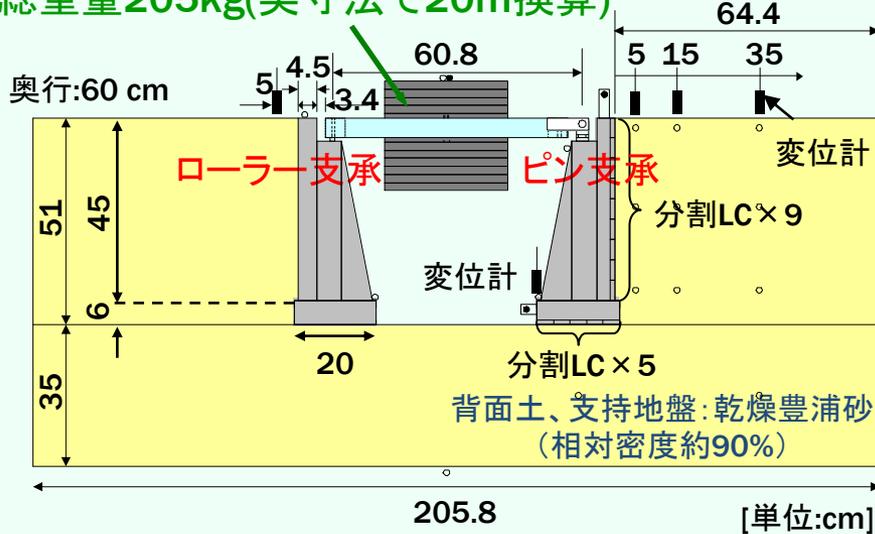
# 振動台実験①

## 重力式橋台橋梁

## 一体橋梁

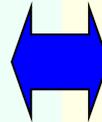
総重量205kg(実寸法で20m換算)

総重量205kg(実寸法で20m換算)



○ 支承部

ローラー支承とピン支承



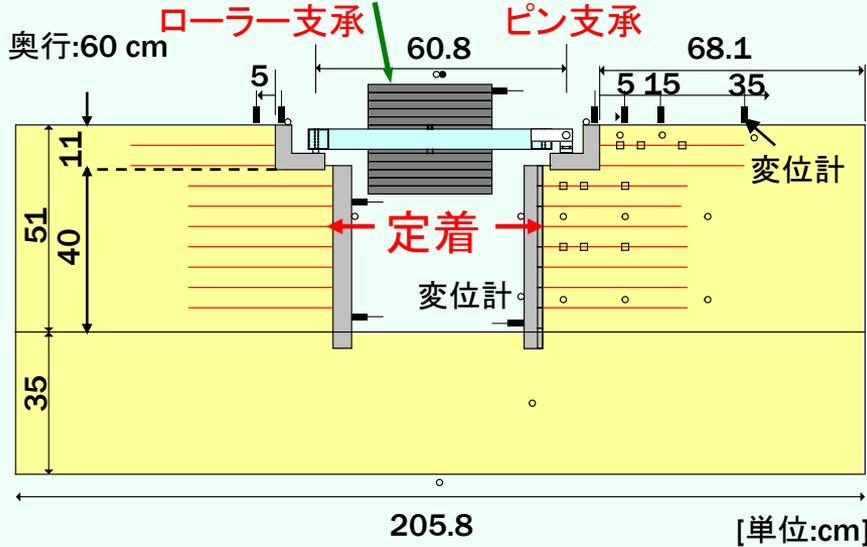
厚さ3 mmのL型金具

模型実験 : 縮尺比 $\lambda=1/10$   
重力場

# 振動台実験②

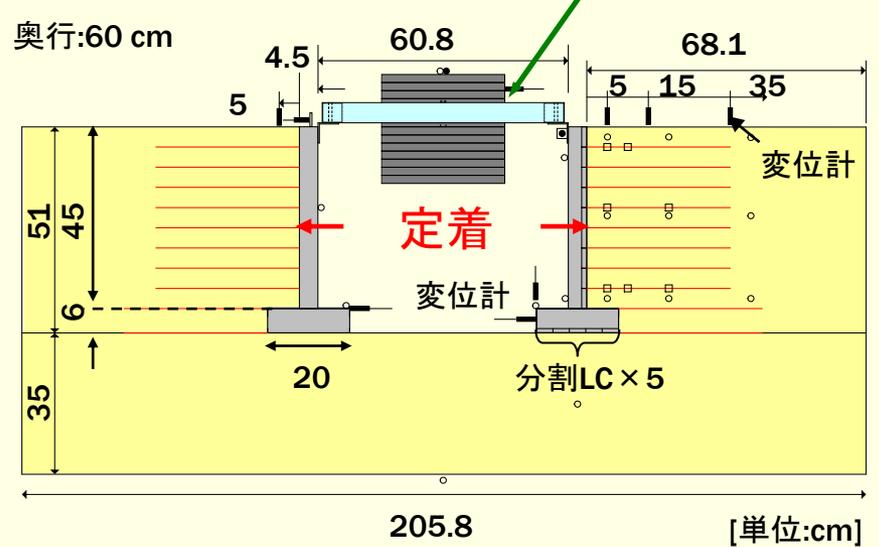
## 小橋台を持つGRS擁壁橋梁

総重量205kg(実寸法で20m換算)



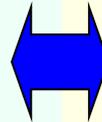
## GRS一体橋梁

総重量205kg(実寸法で20m換算)



### ○ 支承部

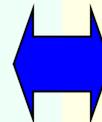
ローラー支承とピン支承



厚さ3 mmのL型金具

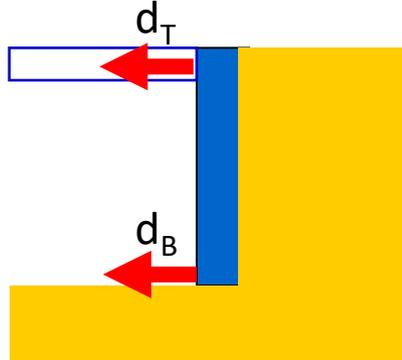
### ○ 補強材

小橋台部に2層、擁壁部に7層の合計9層



基礎部に2層、擁壁部に8層の合計10層

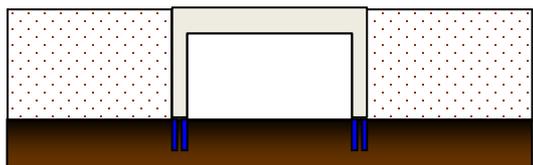
# 残留水平変位



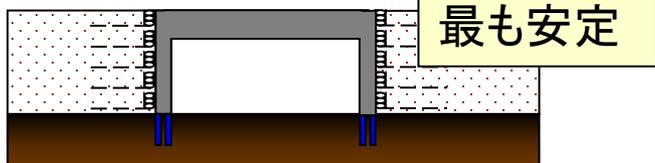
重力式橋台橋梁



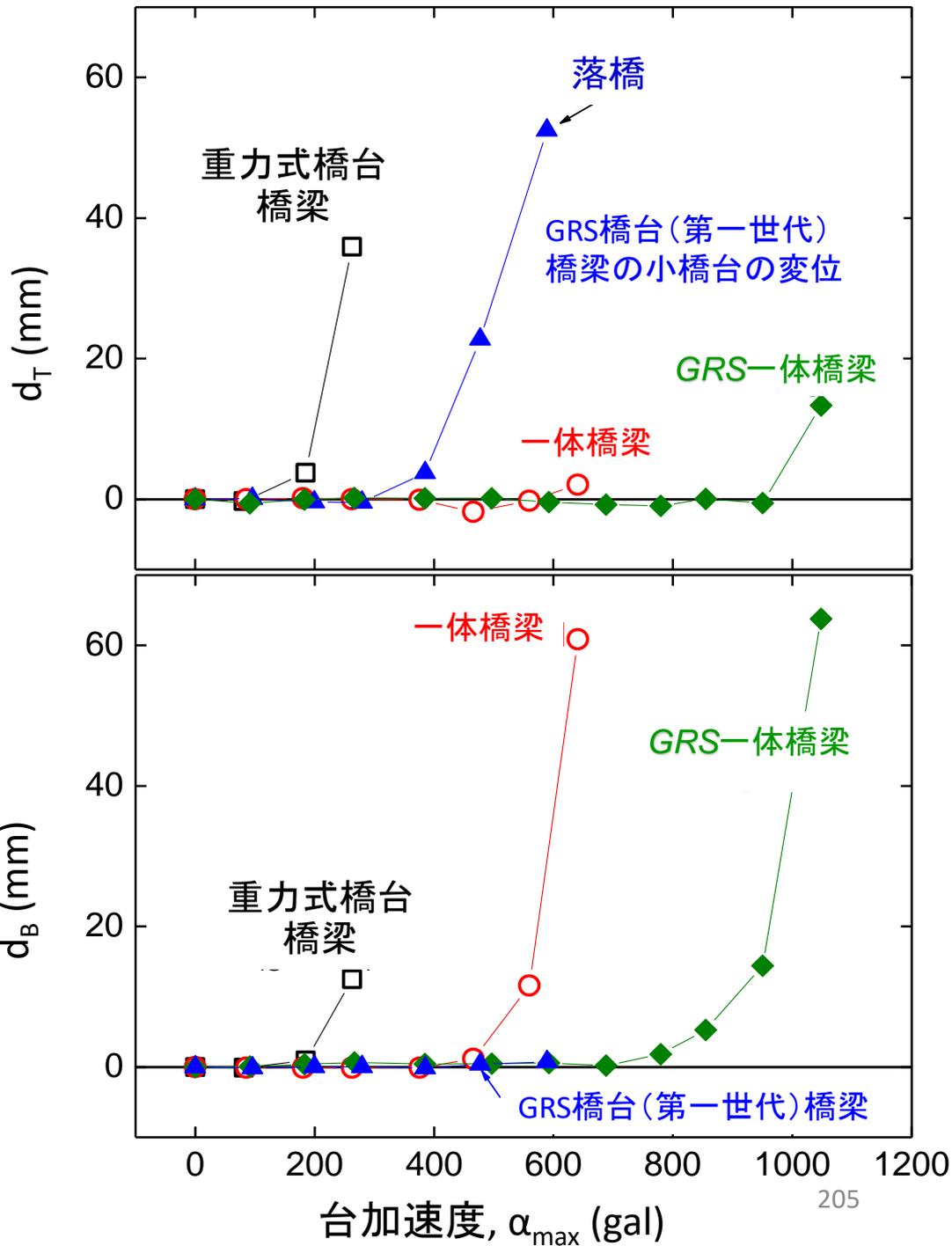
GRS橋台(第一世代)橋梁



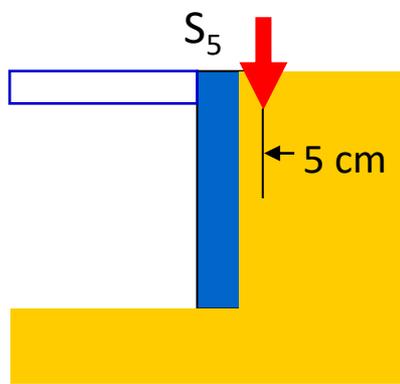
一体橋梁



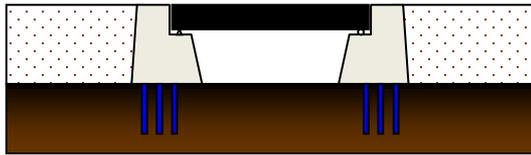
GRS一体橋梁



# 盛土の 残留沈下



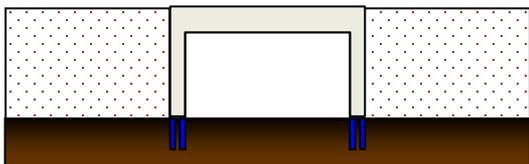
GRS一体橋梁では、盛土残留沈下はゼロ  
⇒鉄道・道路の橋台として、重要な特長



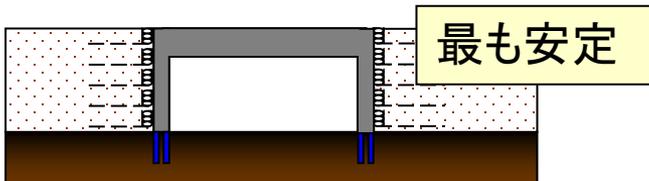
重力式橋台橋梁



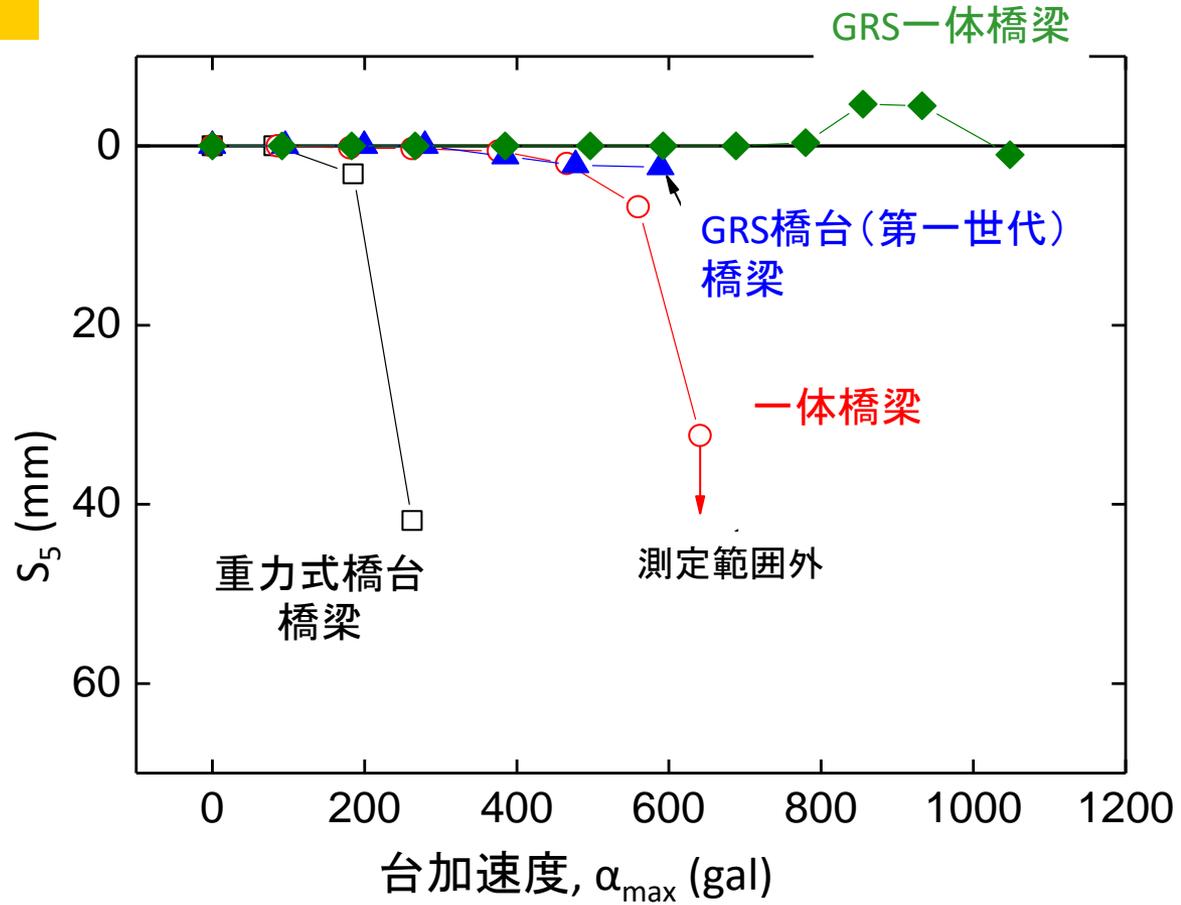
GRS橋台(第一世代)橋梁



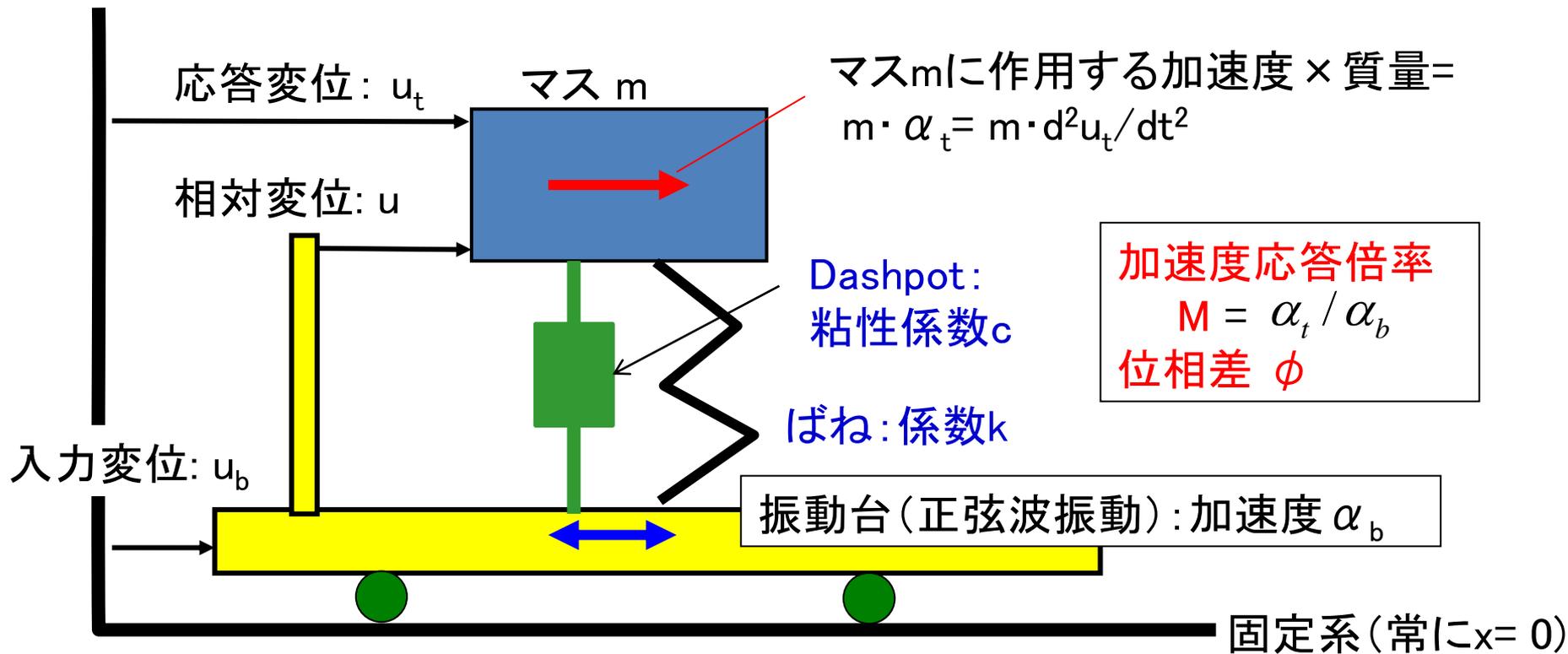
一体橋梁



GRS一体橋梁



# 一自由度系としての測定値(M, φ)から構造物特性(β, ξ)の算定



## 測定値

$$M = \sqrt{\frac{1 + 4\xi^2\beta^2}{(1 - \beta^2)^2 + 4\xi^2\beta^2}}$$

$$\phi = \text{atan}\left(\frac{-2\xi\beta^3}{1 - (1 - 4\xi^2)\beta^2}\right)$$

## 逆算値

振動数比:  $\beta = \omega_i / \omega_0 = f_i / f_0$   $f_i =$  入力振動数 (Hz)

減衰比:  $\xi = c\omega_0 / (2k)$

$$\omega_0 = \sqrt{k/m} = 2\pi f_0$$

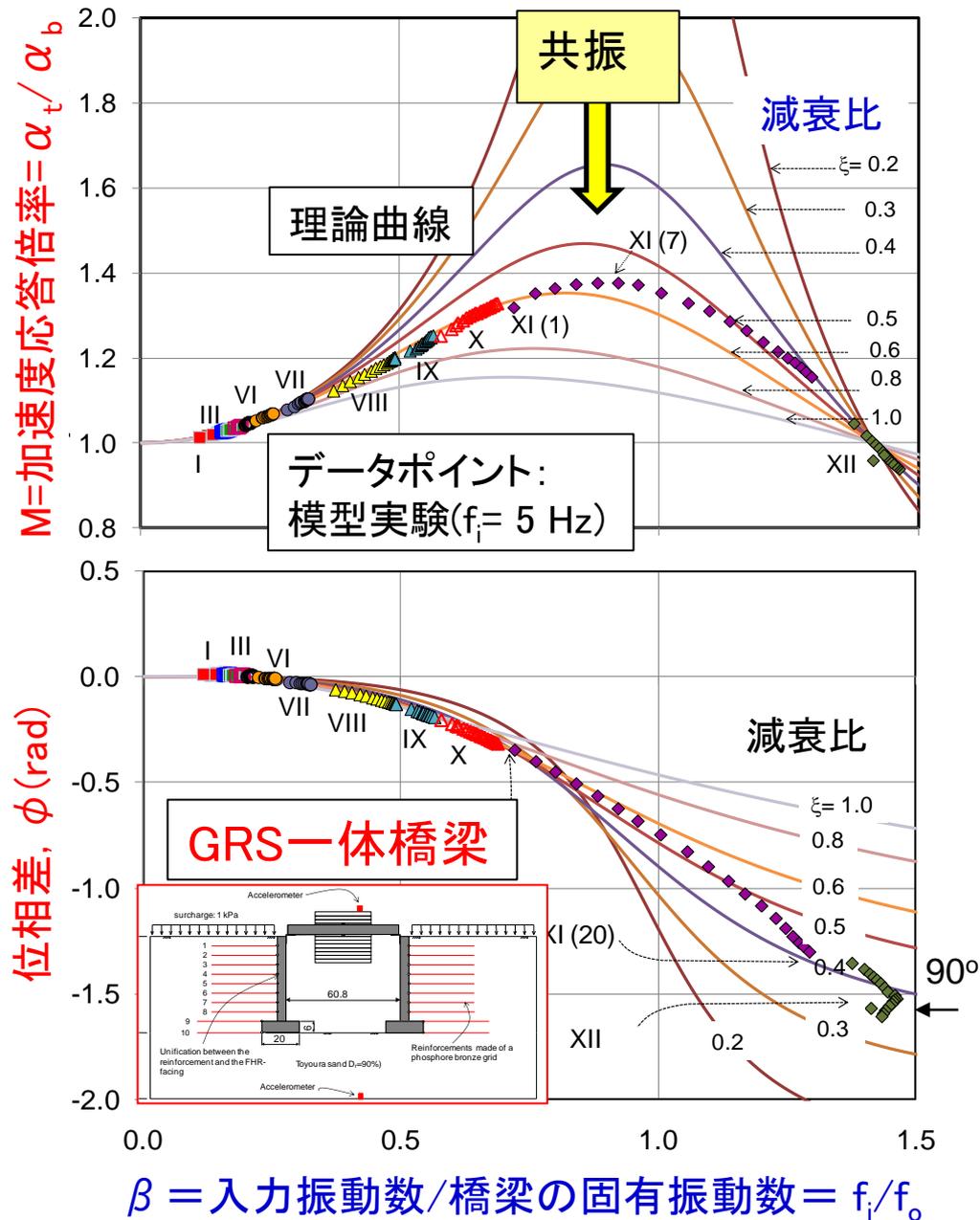
$f_0 =$  固有振動数(Hz)

# $M \sim \beta$ 関係と $\phi \sim \beta$ 関係の理論曲線と実験結果

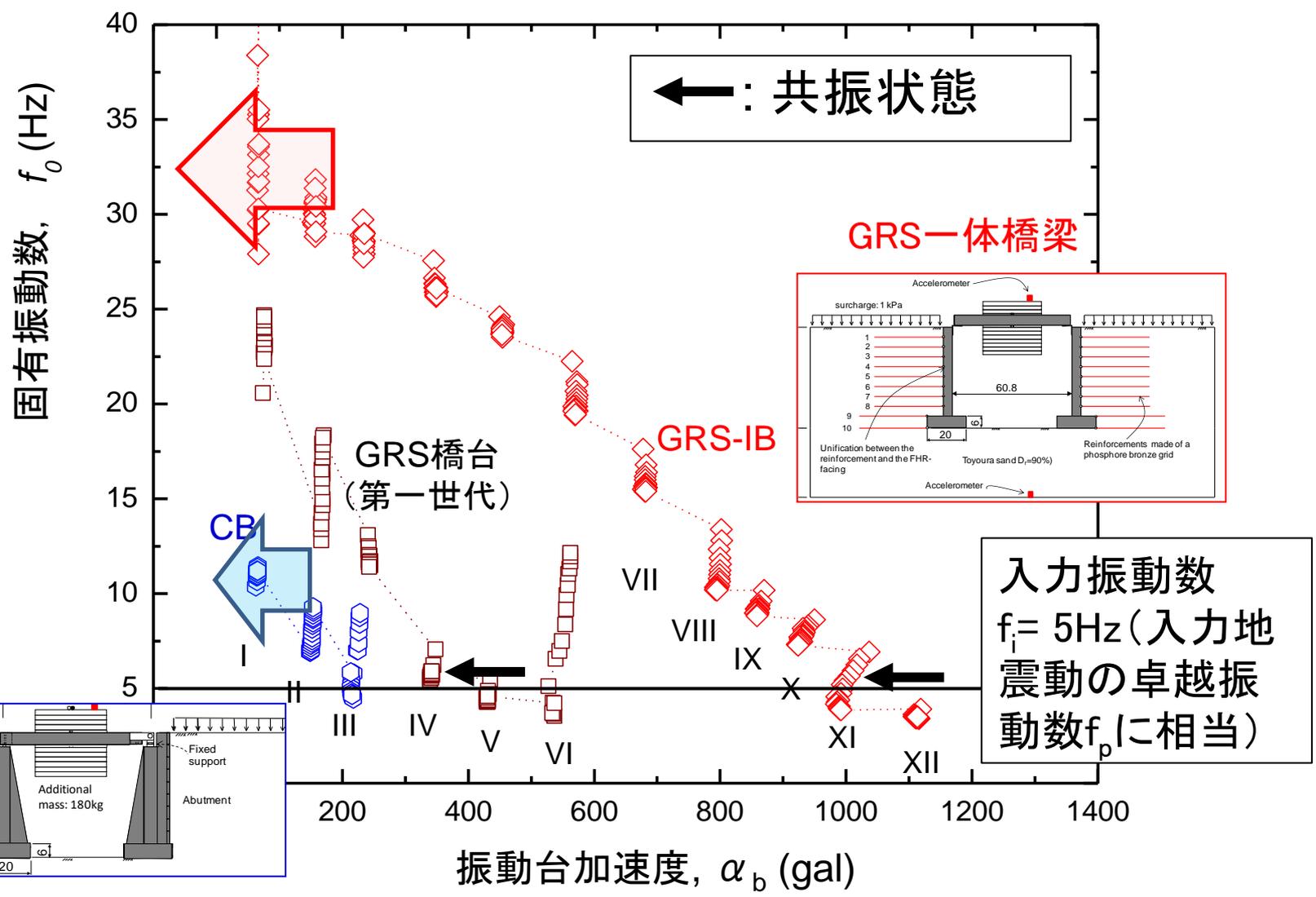
振動台実験 ( $f_i = 5$  Hz 正弦波入力) での橋梁モデルの非定常挙動

入力加速度  $\alpha_b$  の上昇に伴う応答加速度  $\alpha_t$  の上昇と繰返し載荷回数  
数の増加

- ⇒ 構造の損傷に伴う固有振動数  $f_0$  の減少
- ⇒  $\beta = f_i / f_0$  は、1.0 に向かって増加
- ⇒  $M = \alpha_t / \alpha_b$  の増加、 $\phi$  の増加
- ⇒ 共振状態 ( $\beta \approx 1.0$ ) へ接近
- ⇒ 共振状態での損傷の進行
- ⇒ 強度が不足すれば崩壊



GRS一体橋梁の方が、従来形式の単純桁橋CBよりも、  
 1)固有振動数  $f_0$  の初期値が大  $\Rightarrow$  応答倍率Mの初期値が小

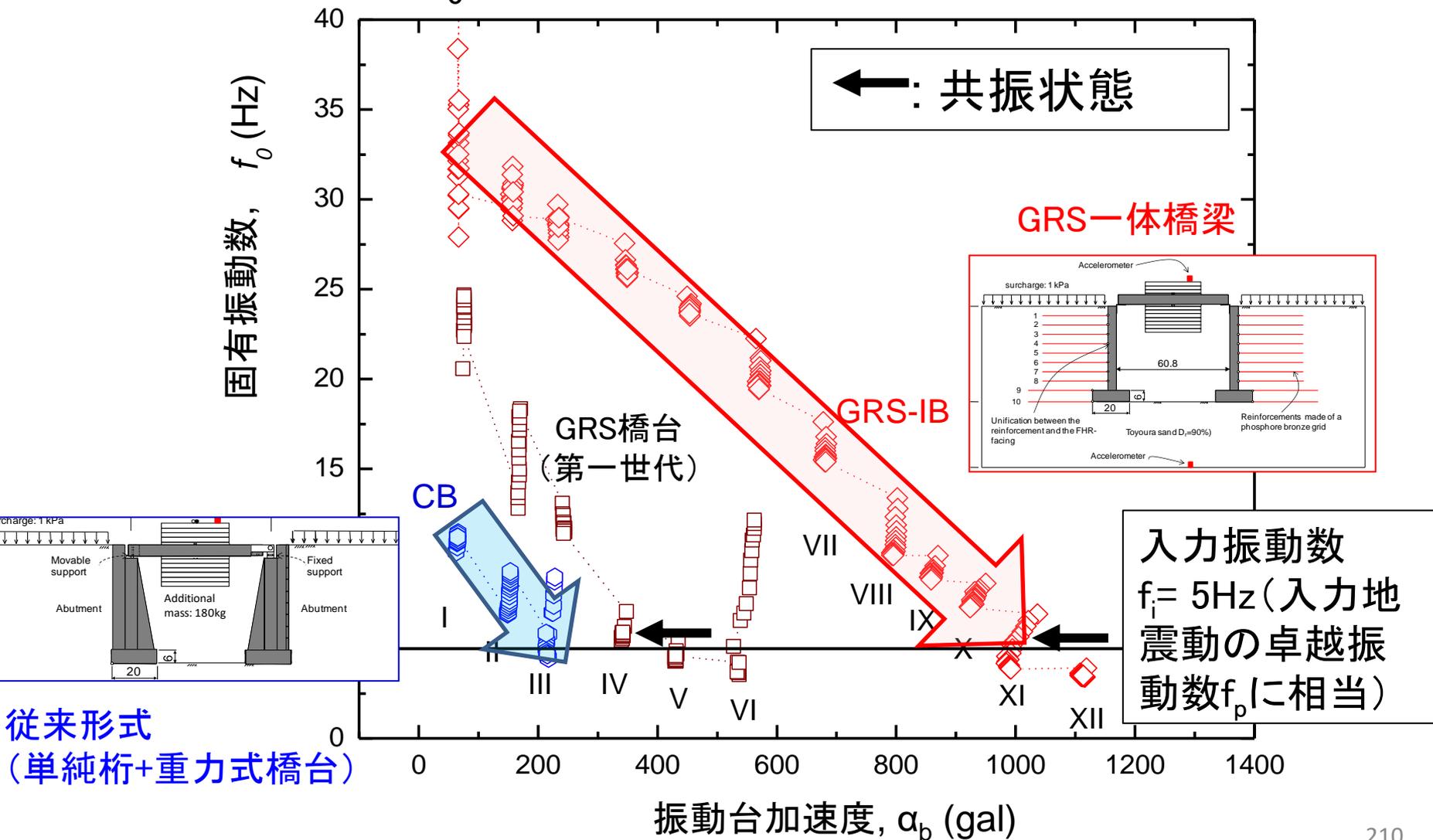


従来形式(単純桁+重力式橋台)

GRS一体橋梁の方が、従来形式の単純桁橋CBよりも、

1)固有振動数  $f_0$  の初期値が大  $\Rightarrow$  応答倍率Mの初期値が小

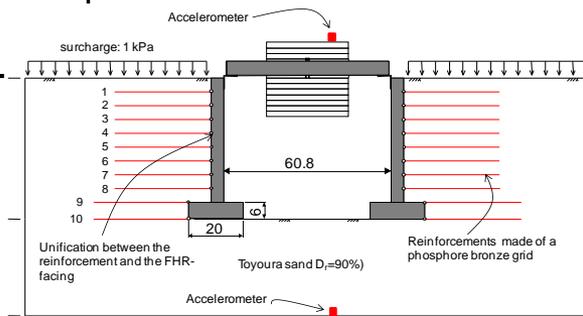
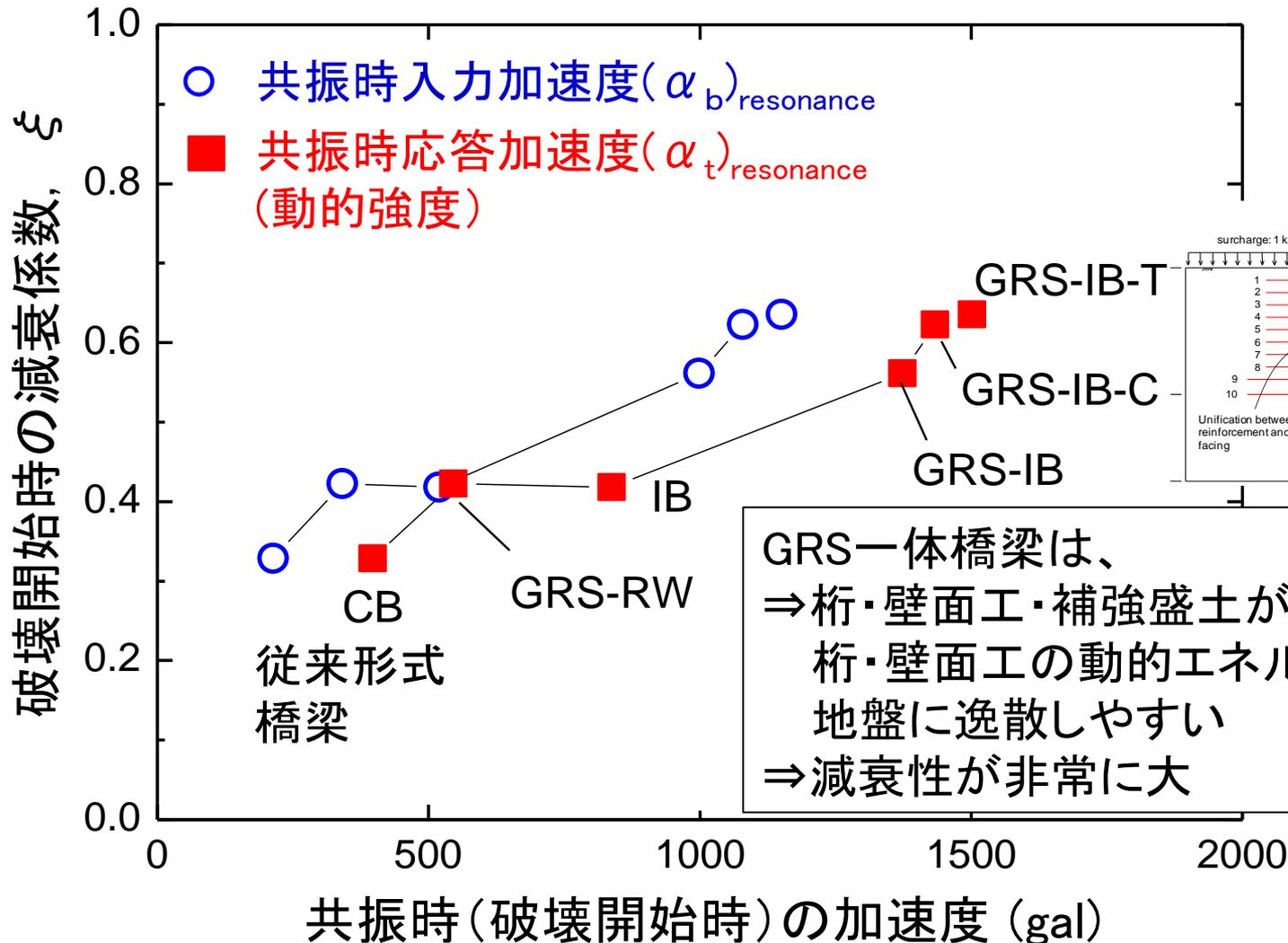
2)地震荷重による  $f_0$  の減少率が小  $\Rightarrow$  共振しにくい  $\Rightarrow$  Mの増加率が小



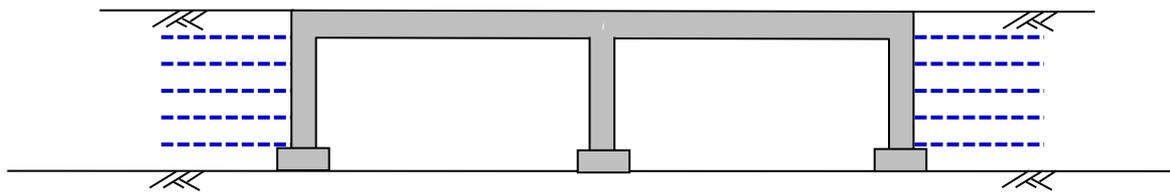
GRS一体橋梁の方が、

3)破壊時の応答加速度が大きい(動的強度が大きい)

4)減衰係数  $\xi$  が大  $\Rightarrow$  応答倍率Mが小



GRS一体橋梁は、  
 $\Rightarrow$  桁・壁面工・補強盛土が一体であるため、  
 桁・壁面工の動的エネルギーが盛土・支持  
 地盤に逸散しやすい  
 $\Rightarrow$  減衰性が非常に大



## ■ GRS一体橋梁が従来型橋梁よりも耐震性が高くなる四つの要因

橋桁・壁面工・補強盛土の構造一体化の効果は、

- 1)剛性が高い⇒固有振動数  $f_0$  の初期値が大きく、強地震動の卓越振動数  $f_p$  よりも確実に大になる⇒応答倍率  $M$  の初期値が小
- 2)不静定構造物であり、粘り強い⇒地震時の  $f_0$  の減少率が小  
⇒共振に到りにくい⇒応答倍率  $M$  の増加速度が小
- 3)桁・壁面工・補強盛土が一体性であるため、桁・縦壁の振動エネルギーが盛土・支持地盤に逸散しやすい ⇒減衰係数  $\xi$  が大⇒応答倍率  $M$  が小
- 4)破壊時の応答加速度が大きい(動的強度が大きい)

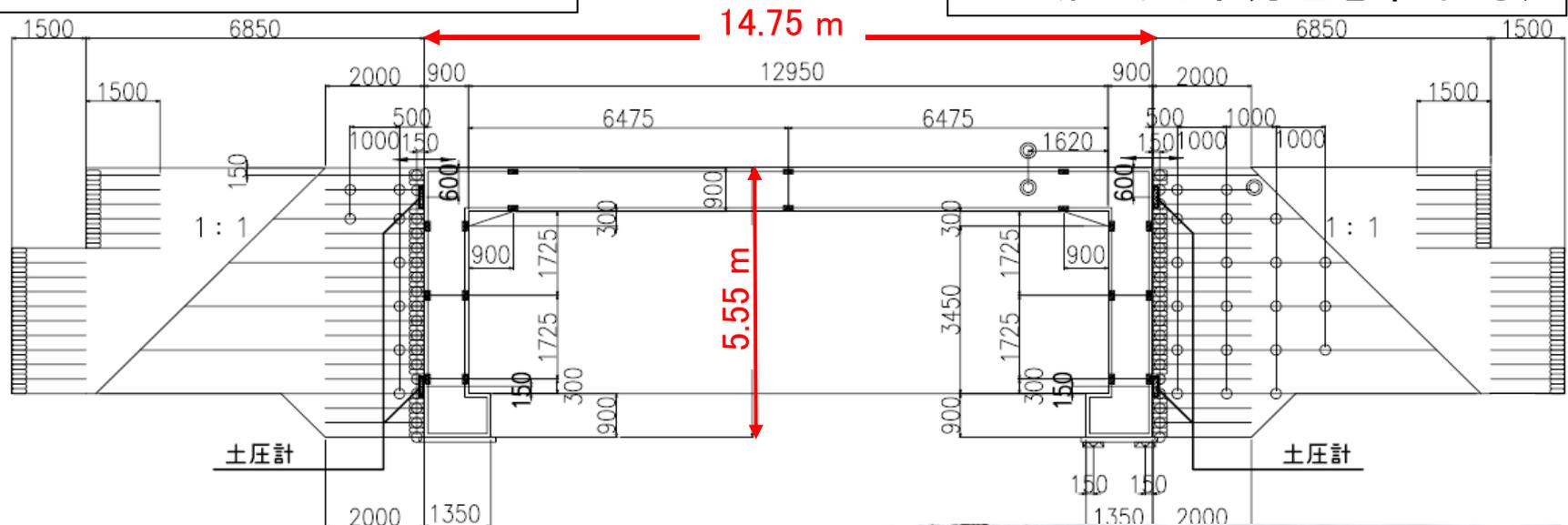
注) GRS一体橋梁の現在の耐震設計では、要因1), 2), 3)を考慮しないで、桁の設計震度は従来型単純桁橋梁と同一としている。このことは、設計における「明示していない余裕(冗長性, redundancy)」となっている。

# RRR-GRS一体橋梁実物大模型 (Koda et al., 2013)

## 鉄道総合技術研究所に2009年2月完成

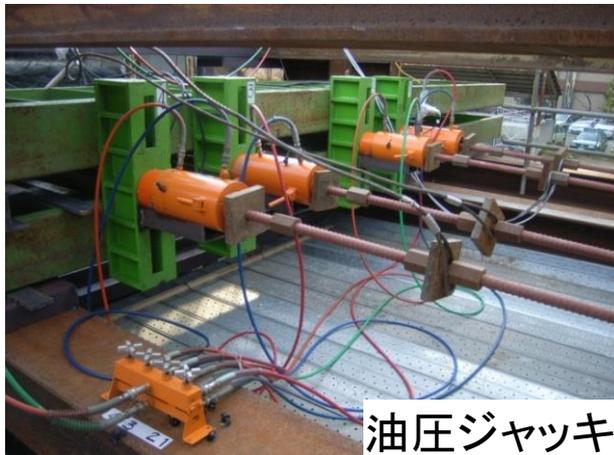
アプローチブロック  
セメント改良粒度調整碎石  
(新幹線等鉄道で採用)

アプローチブロック  
粒度調整碎石(道路では、  
この形式で十分と思われる)



# 実大模型の載荷試験(2012年1月) (Koda et al., 2013)

- 1) 気温の季節変動による桁の繰返し変形を再現した水平繰返し載荷
- 2) 固有振動特性を測定した起振実験
- 3) レベル2設計地震動荷重を模した大荷重での水平繰返し載荷



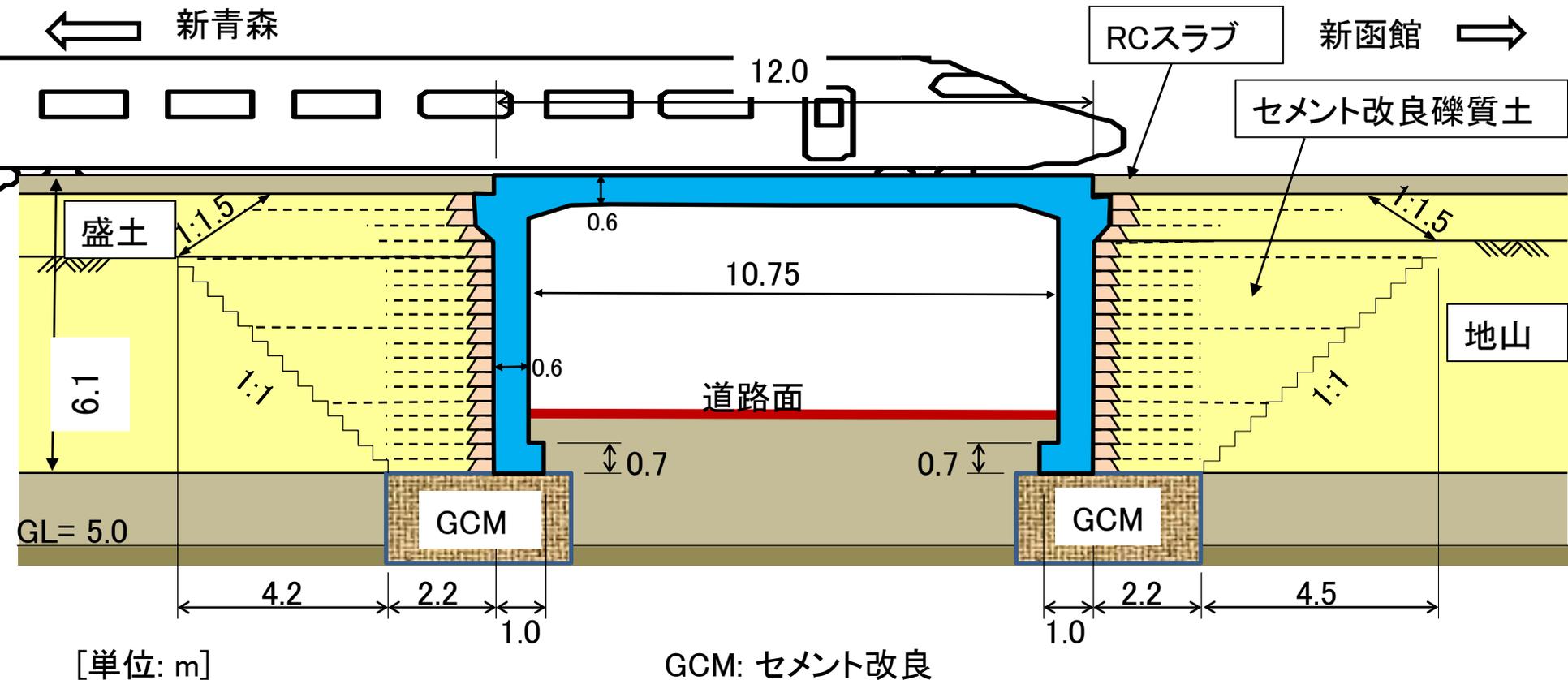
- 凡 例
- 営業路線
  - 整備計画路線 (建設中)
  - 整備計画路線 (申請中)



北海道新幹線、木古内  
GRS一体橋梁  
2011～2012建設



新幹線新青森～新函館間木古内、GRS一体橋梁(幅11.7 m):  
 ■桁は比較的短いが、長い歴史の第一歩



建設費： 従来形式の橋台・橋梁の1/2程度

# 新幹線新青森～新函館間木古内、GRS一体橋梁(幅11.7 m): ■桁は比較的短いが、長い歴史の第一歩



(2011年10月14日、龍岡撮影)



(2012年7月31日、龍岡撮影)

# 2011年東日本大震災

巨大津波により膨大な数・規模で橋梁・盛土形式の防潮堤が崩壊：

340を超える橋梁では、津波で桁あるいは取付け盛土、あるいは両方が流失



上流側か見たJR東日本気仙沼線本吉駅陸前小泉駅間の津谷川橋梁（橋げた流失、橋脚損壊：津波は高架橋の桁を越流：龍岡撮影）

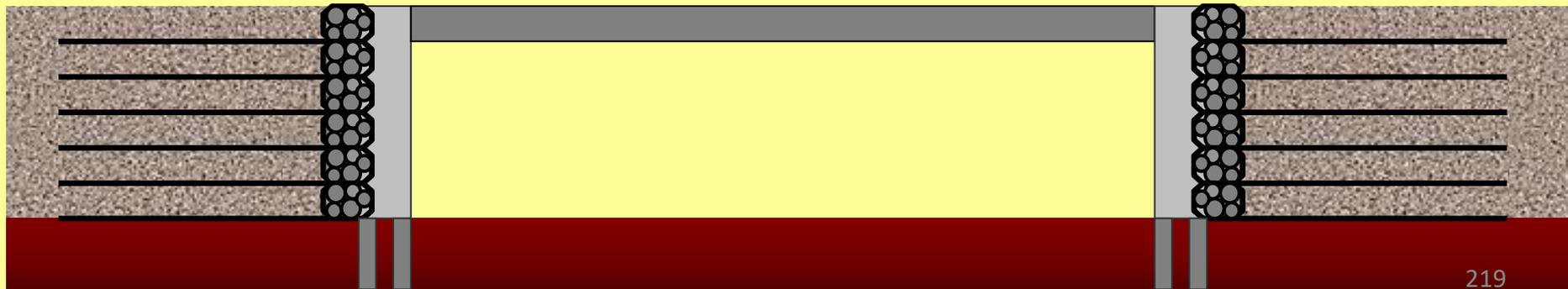
沓（支承）と取り付け盛土は、耐震上の弱点であるばかりでなく、津波に対しても弱点 → GRS一体橋梁の提案

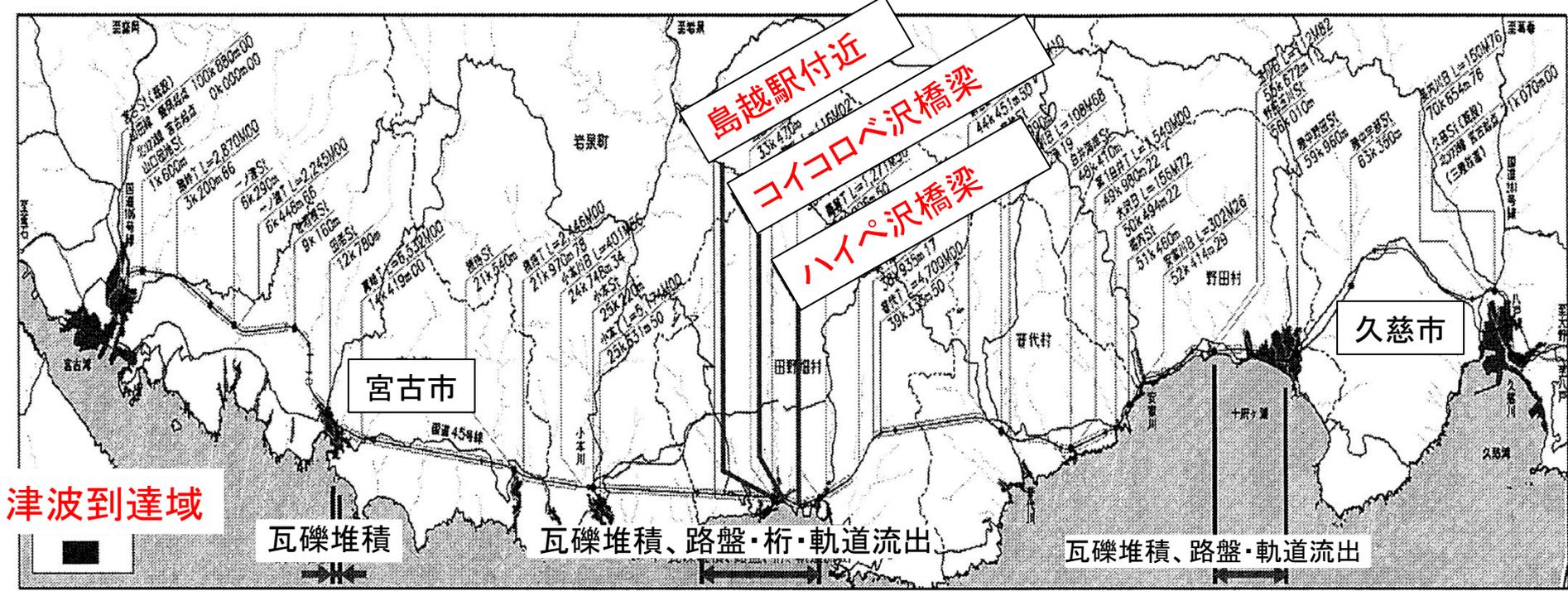


龍岡撮影

ジオシンセティック補強盛土

桁・壁面工・盛土： 一体構造





三陸鉄道 北リアス線 被災内容 (土木学会誌2012年5月号に加筆)

三陸鉄道北リアス線:  
 40年前、津波を考慮して建設  
 ・それでも、軌道はこの三か所  
 は最も低く、海岸に最も近く、  
 防潮堤は無かった  
 ・最も激しい津波被害

三陸鉄道岩手県  
 島越一田野畑間ハイペ沢橋梁



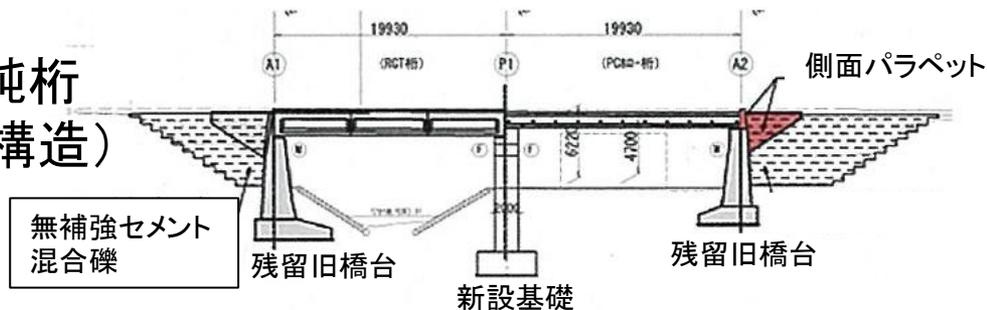
# 三陸鉄道岩手県島越一田野畑間コイコロベ沢橋梁 補強土一体橋梁での復旧(2012～2014年度建設)



# コイコロベ橋梁の三つの復旧案

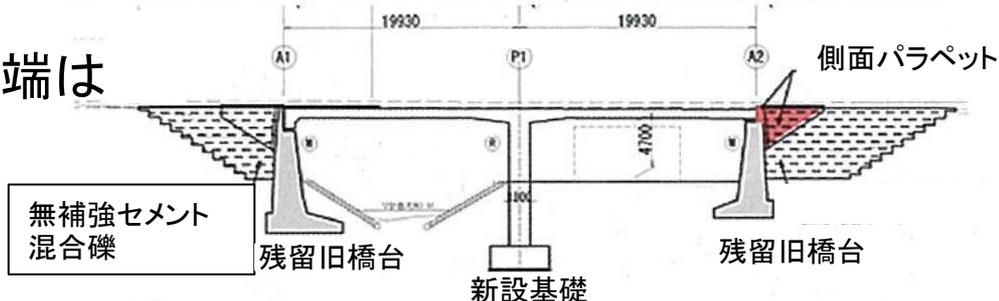
**建設コスト**    **維持管理コスト**    **耐震性**    **耐津波性**

2スパン単純桁  
(被災前の構造)



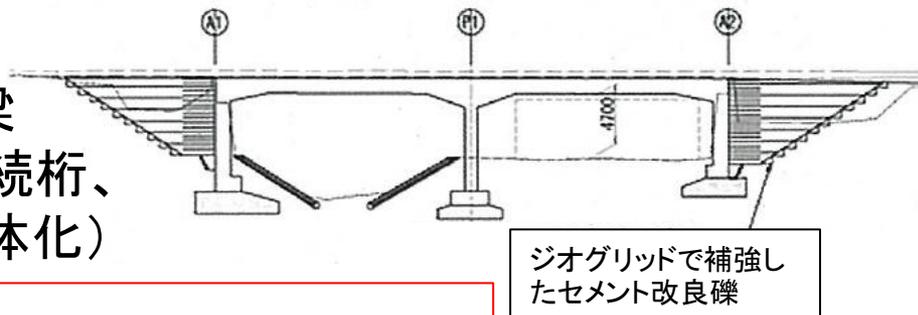
高    高    低    低

連続桁(両端は  
支承支持)



高    高    中間    低

GRS一体橋梁  
(支承無の連続桁、  
両縦壁と一体化)



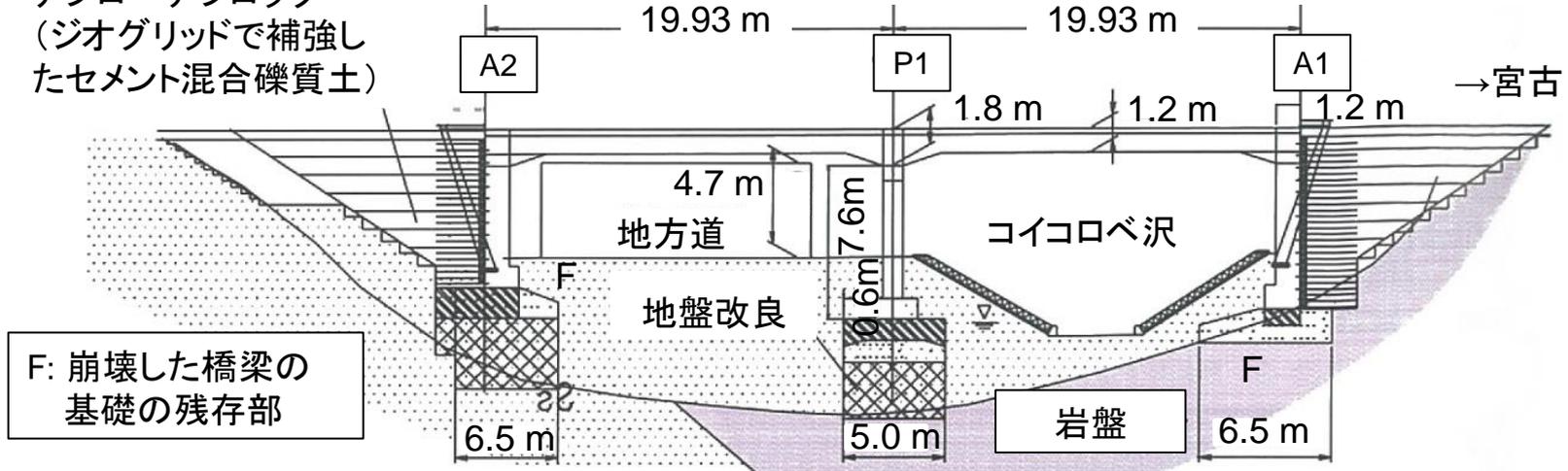
低    低    高    高

採用:

最も性能が高く、C/Pが良い

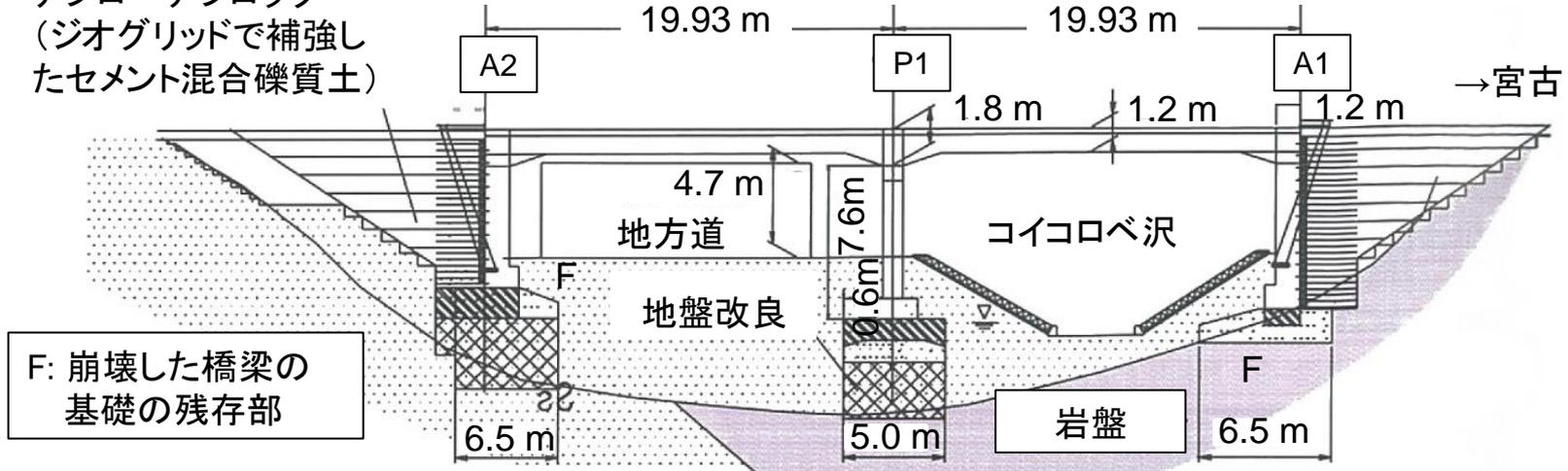
# 三陸鉄道岩手県島越一田野畑間コイコロベ沢桥梁 補強土一体桥梁での復旧(2012～2014年度建設)

アプローチブロック  
(ジオグリッドで補強し  
たセメント混合礫質土)



# 三陸鉄道岩手県島越一田野畑間コイコロベ沢桥梁 補強土一体桥梁での復旧(2012～2014年度建設)

アプローチブロック  
(ジオグリッドで補強し  
たセメント混合礫質土)

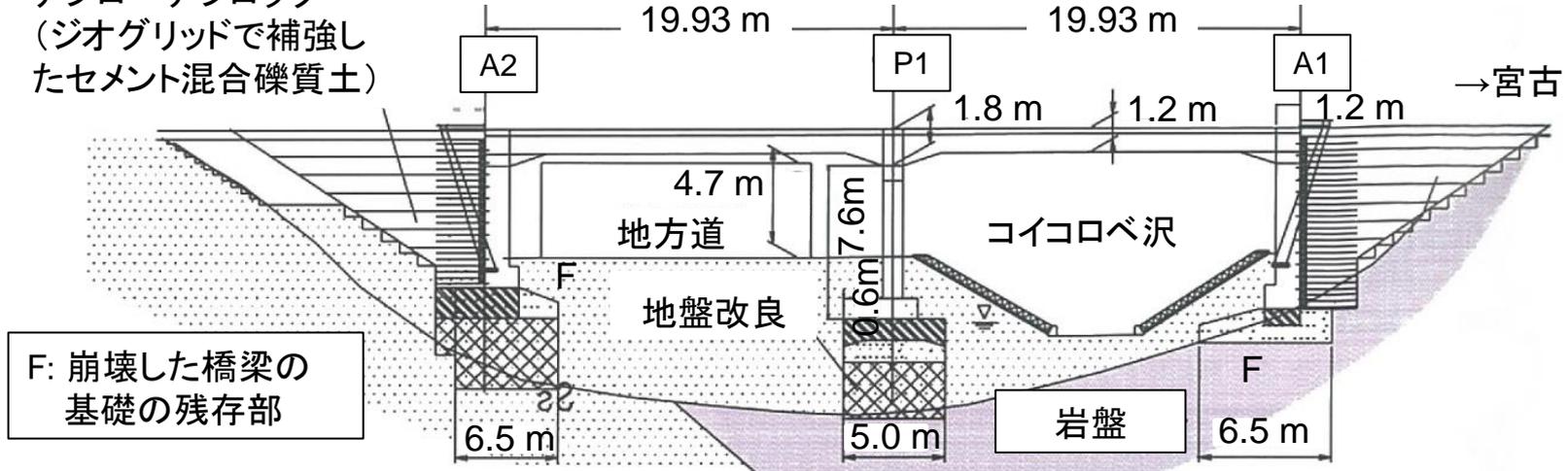


F: 崩壊した桥梁の  
基礎の残存部



# 三陸鉄道岩手県島越一田野畑間コイコロベ沢桥梁 補強土一体桥梁での復旧(2012～2014年度建設)

アプローチブロック  
(ジオグリッドで補強し  
たセメント混合礫質土)



龍岡撮影

2013年11月3日 <sup>225</sup>



三陸鉄道

地方道

ハイペ沢

2011年3月30日

太平洋



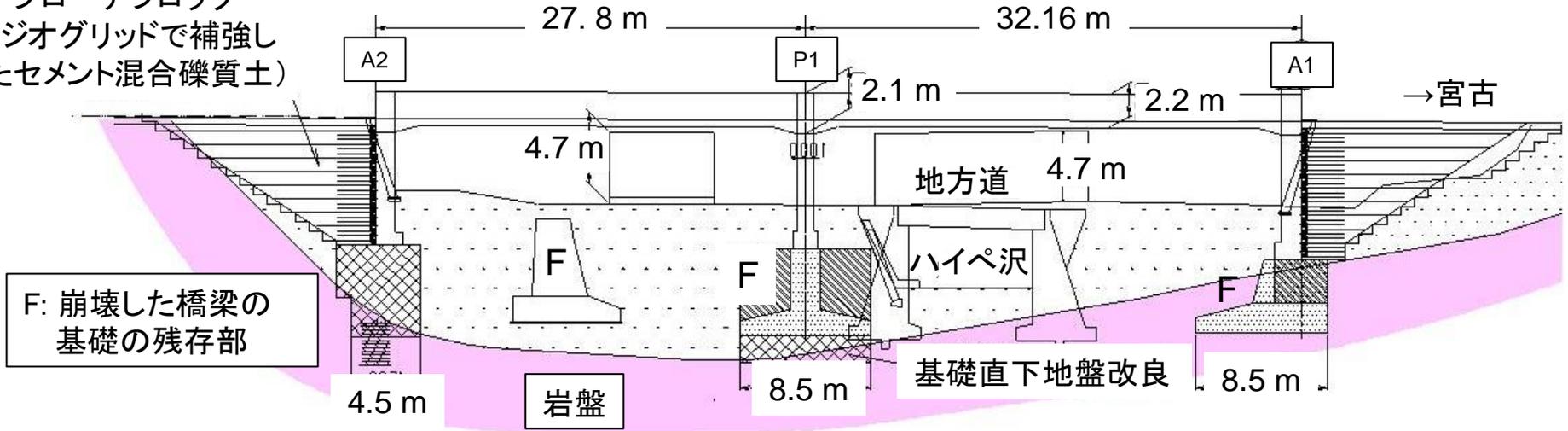
2014年5月19日



龍岡撮影

# 三陸鉄道岩手県島越一田野畑間ハイペ沢橋梁 補強土一体橋梁での復旧(2012～2014年度建設)

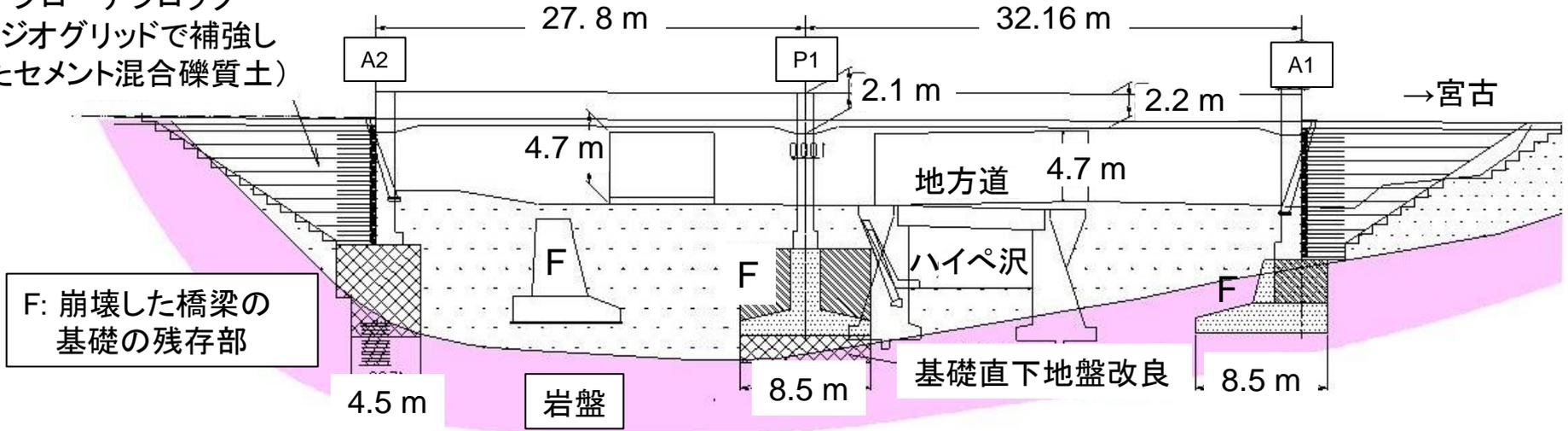
アプローチブロック  
(ジオグリッドで補強し  
たセメント混合礫質土)



2013年6月19日

# 三陸鉄道岩手県島越一田野畑間ハイペ沢橋梁 補強土一体橋梁での復旧(2012～2014年度建設)

アプローチブロック  
(ジオグリッドで補強し  
たセメント混合礫質土)



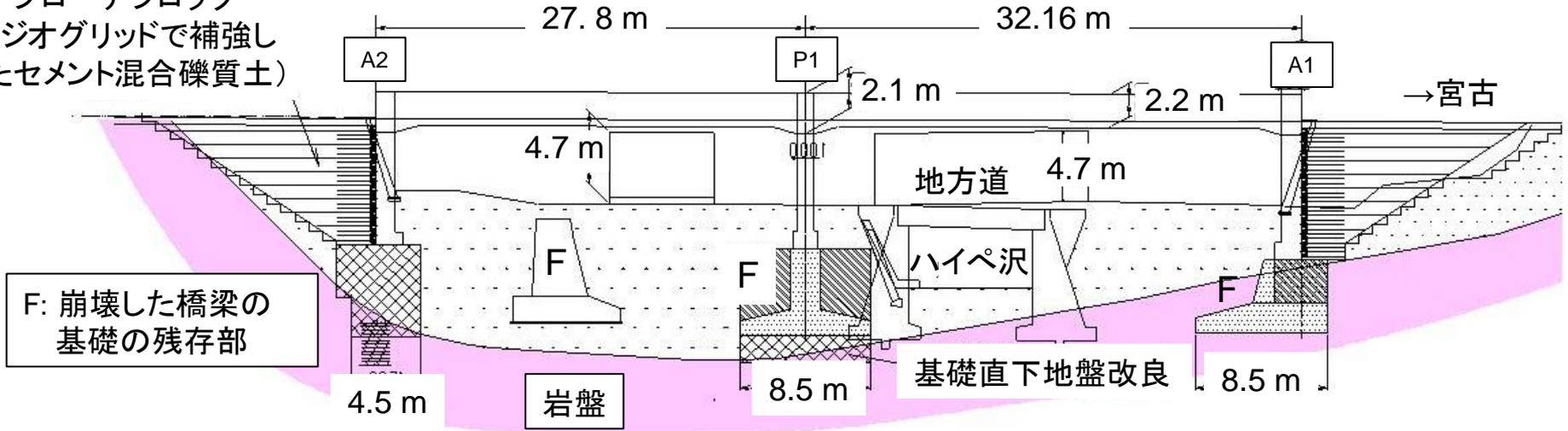
2013年8月23日



龍岡撮影

# 三陸鉄道岩手県島越一田野畑間ハイペ沢橋梁 補強土一体橋梁での復旧(2012～2014年度建設)

アプローチブロック  
(ジオグリッドで補強し  
たセメント混合礫質土)





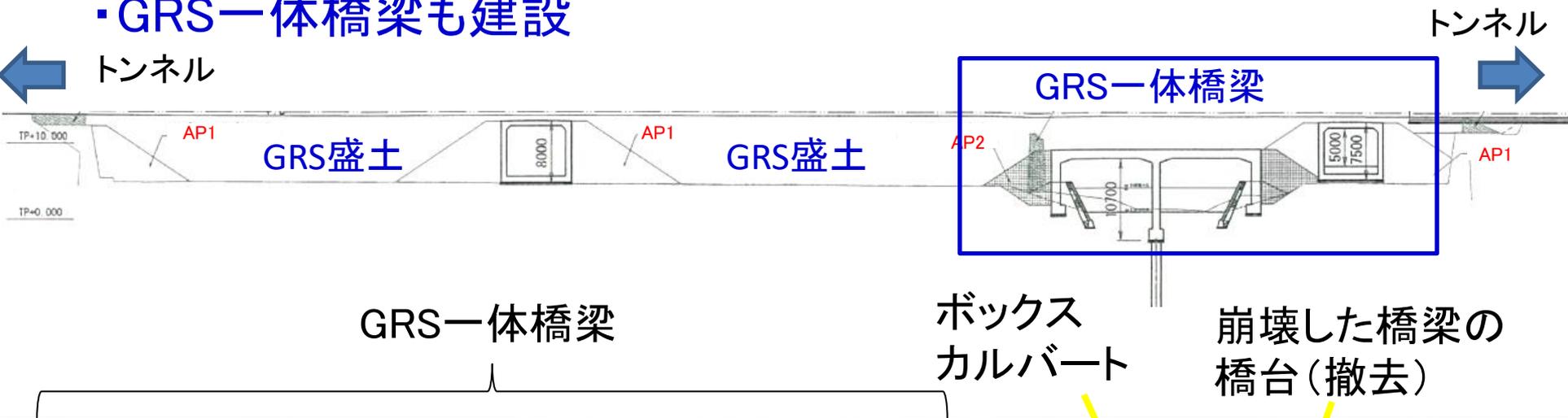
# 三陸鉄道北リアス線島越駅周辺:

- ・住民の要望によって、RC高架橋を防潮堤としての補強盛土に変更(被覆工はgeogridを介して盛土に固定)
- ・GRS一体橋梁も建設



# 三陸鉄道北リアス線島越駅周辺:

- ・住民の要望によって、RC高架橋を防潮堤としての補強盛土に変更(被覆工はgeogridを介して盛土に固定)
- ・GRS一体橋梁も建設



GRS一体橋梁

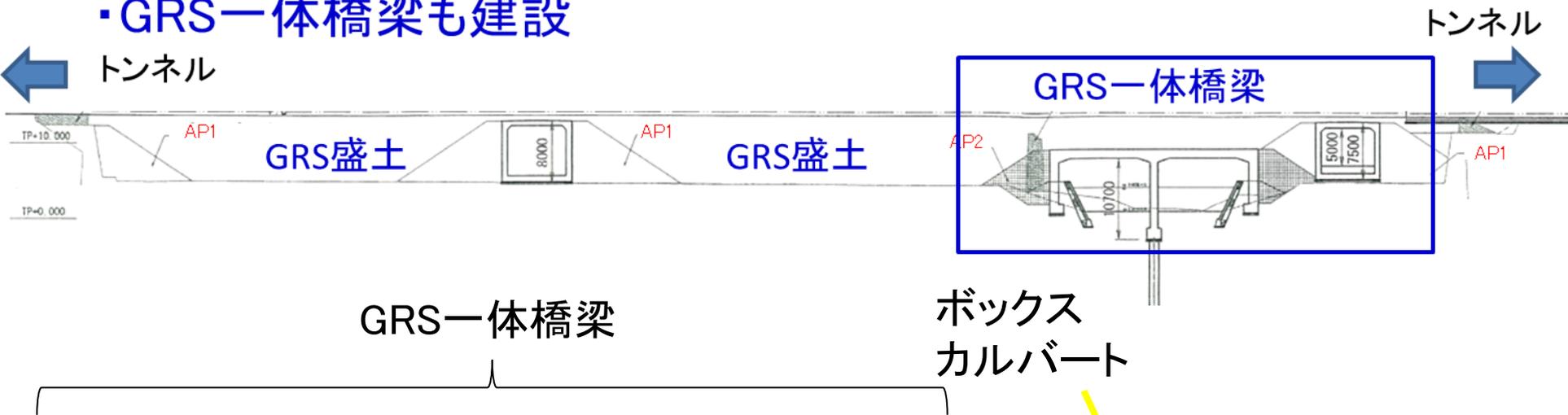
ボックス  
カルバート

崩壊した橋梁の  
橋台(撤去)



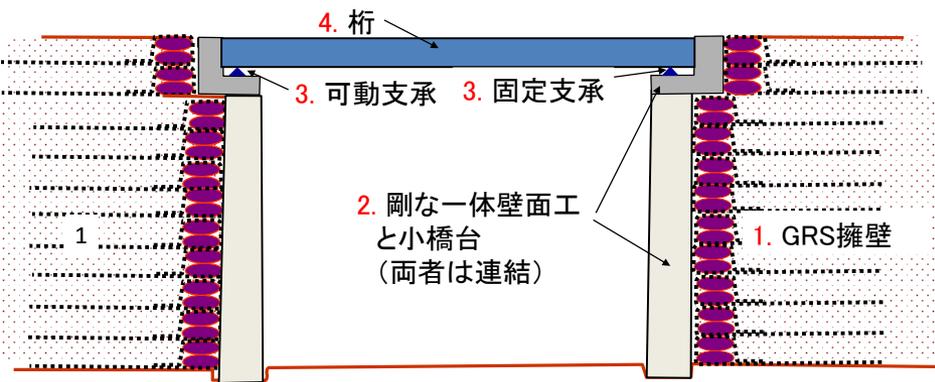
### 三陸鉄道北リアス線島越駅周辺:

- ・住民の要望によって、RC高架橋を防潮堤としての補強盛土に変更(被覆工はgeogridを介して盛土に固定)
- ・GRS一体橋梁も建設



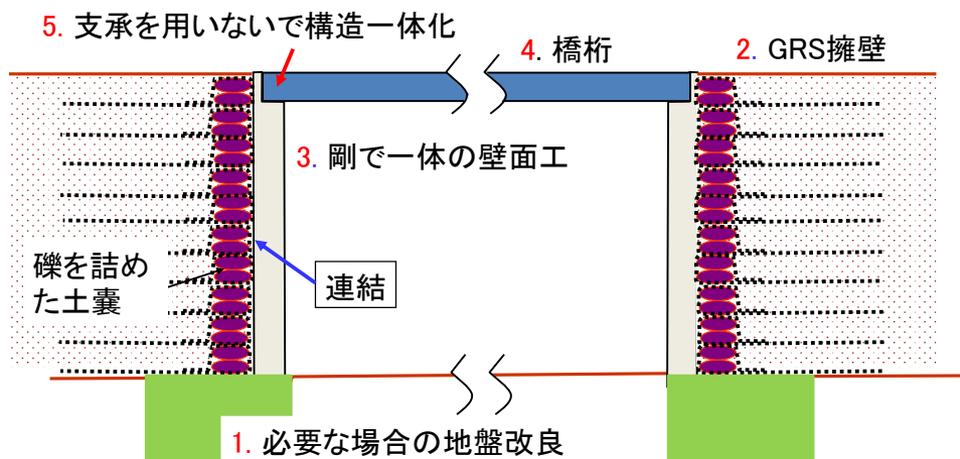
# GRS橋台＋単純桁 or GRS一体橋梁？

① 一对のGRS橋台で単純桁を支持した橋梁 (数字は施工順序)



169

② GRS一体橋梁 (数字は施工順序)



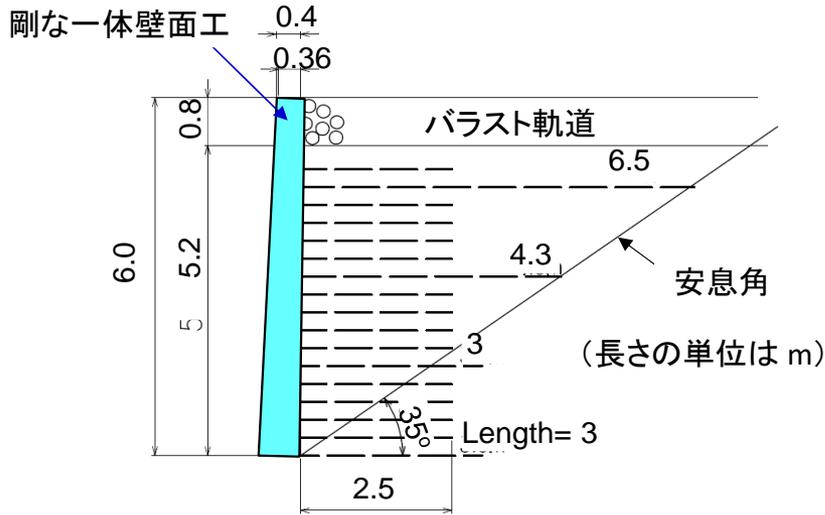
**静定構造物** ⇒ 壁面工の長期・地震時の沈下等残留変位は一定程度許容可  
⇒ 通常の単純桁橋梁の設計・施工

**不静定構造物** ⇒ 桁・壁面工連結後の壁面工の長期・地震時の沈下等の許容残留変位は限定的 ⇒ 設計・施工がやや高度

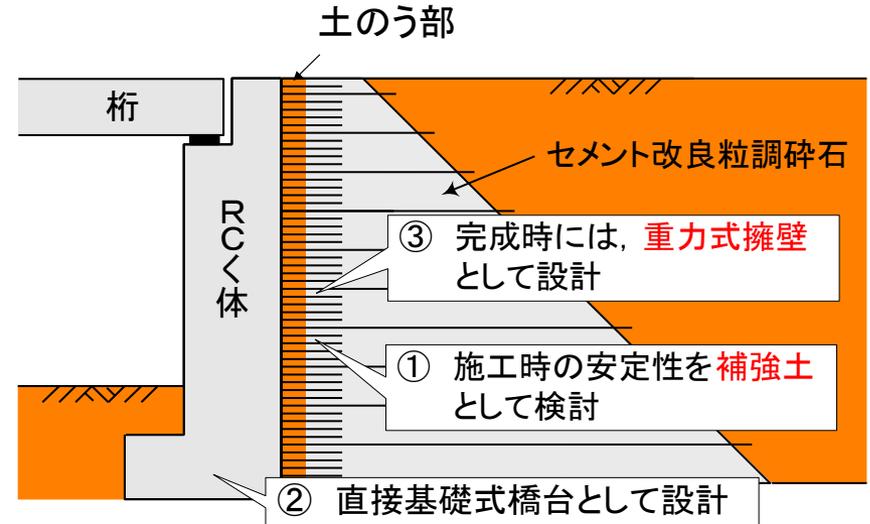
- 支持地盤が岩質、良く締まった礫質土層の場合は、②の採用が可
- ②の採用には支持地盤の残留変形抑制の対策が必要な場合は：
  - a) 地盤改良 and/or b) 桁・壁面工連結前に取り付け盛土のプレロード載荷
 ⇒ これらの対策でも対処できない場合は、①が適切
- 海外での建設等で、設計・施工を単純化したい場合も、①が適切

# GRS擁壁とGRS橋台/GRS一体橋梁で、 何故、補強材の基本配置形態が異なるのか？

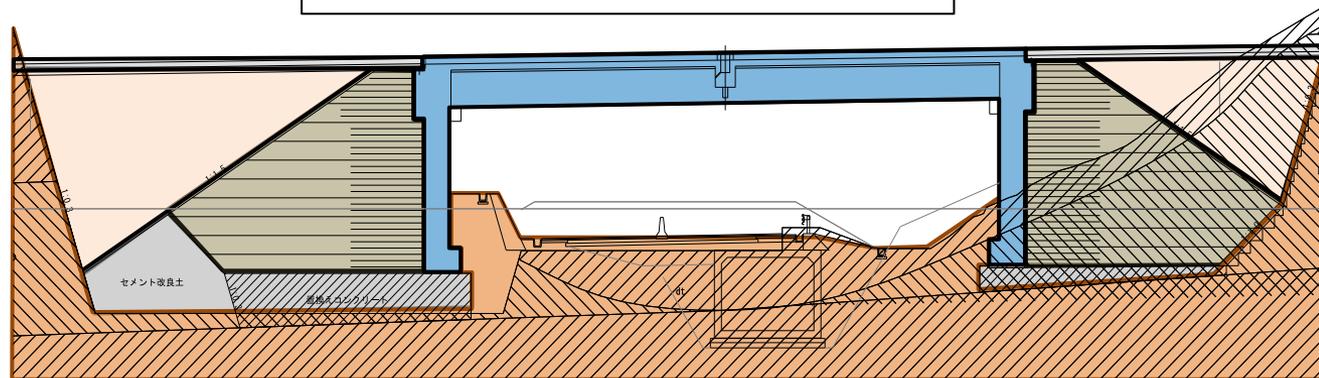
GRS擁壁： 上部ほど長い



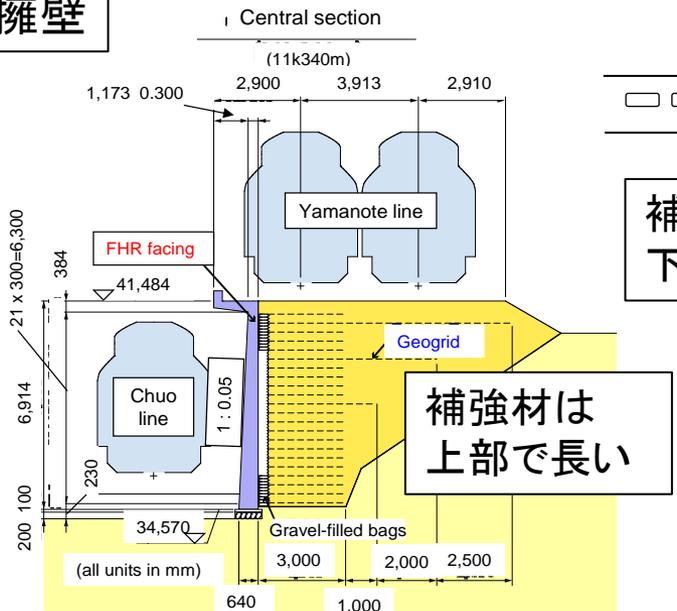
GRS橋台： 下部ほど長い



GRS一体橋梁： 下端が長い

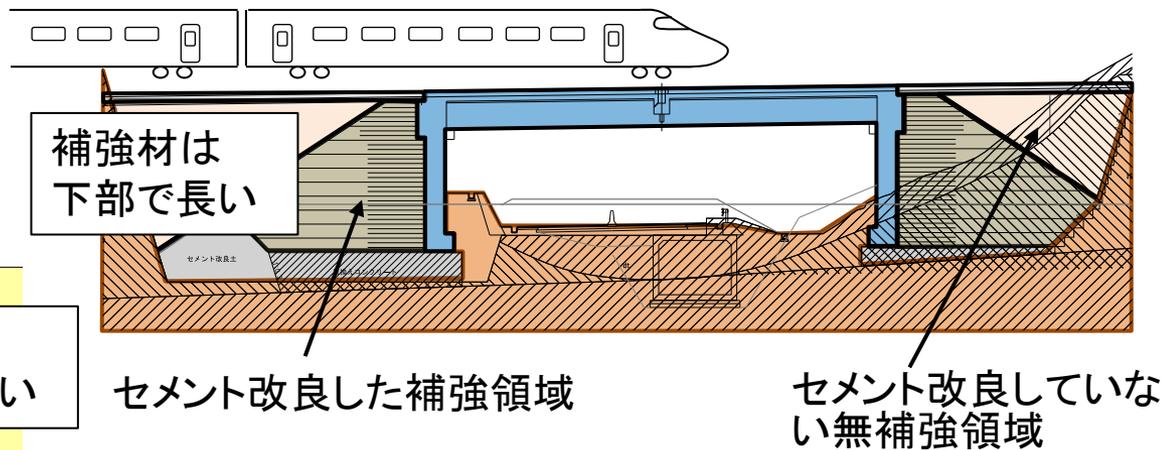


# GRS擁壁



- 既設斜面に建設する場合に、掘削を極小にするため。基本補強材層が短かくても、長尺補強材と剛な一体壁面工によって、高い安定性を確保。
- 線路・道路面直下の路盤部は、長尺補強材で安定化。
- 短い基本補強材を密に配置した領域とその背後の領域の間で若干の剛性・残留沈下に不連続性が生じる。しかし、鉄道・道路は壁面に平行なので。その影響は無視できる。

# GRS橋台、およびGRS一体橋梁(下図)



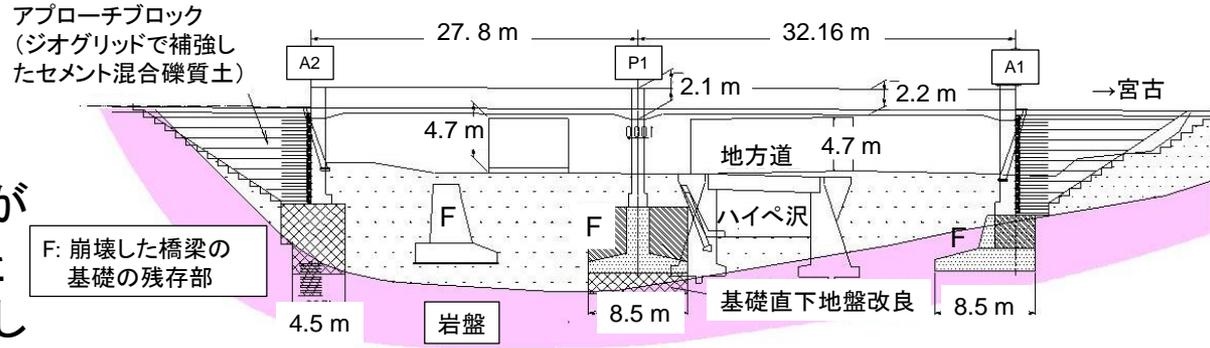
- 強震時に大きな桁水平慣性力が壁面工上端に作用するので、壁面工下端を中心した主働・受動転倒モーメントに対する安定性を確保するために補強領域の重心を低くするため。
- 変形性がある無補強領域の上に脆性的なセメント改良領域を建設すると、クラックが生じやすくなるため。
- 鉄道・道路の運行は壁面に直交する。また、セメント改良領域と無補強領域の間では剛性と残留変形特性に大差がある。これらのため、壁面直交方向で両者の厚さを連続的に変化させて剛性の急変と残留沈下による段差が生じないようにするため。

# 実際のGRS橋台とGRS一体橋梁の補強領域の形状は、支持地盤などの諸条件によって基本形から様々に変化

## 三陸鉄道、ハイペ沢橋梁:

支持地盤は岩盤あるいは良好な土質地盤の急勾配斜面

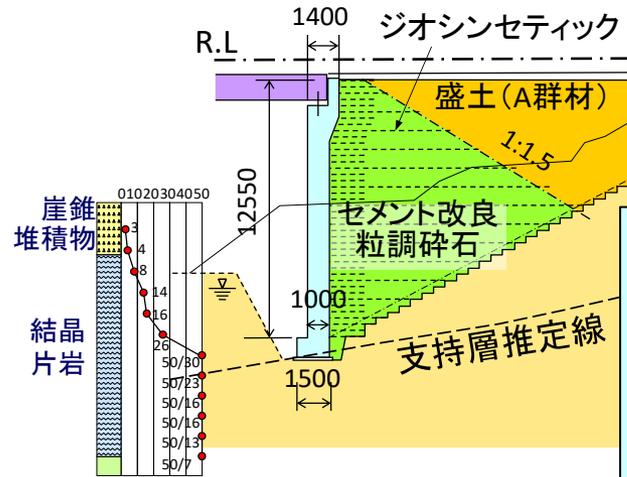
⇒セメント改良補強領域を段差が生じないように逆三角形にした上で、一定以上の体積を確保して安定化



## 九州新幹線鹿児島ルート、高田:

支持地盤はやや緩勾配の岩盤斜面

⇒セメント改良補強領域は、下部を省略



何れの場合も、  
①段差が生じないように工夫し、  
②地震時安定性を安定解析で確認

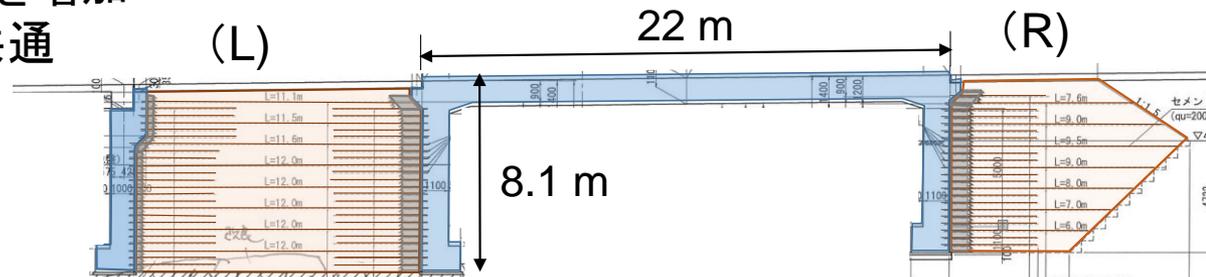
## 北陸新幹線、越前平林:

(R) 中間形態: 既設の補強盛土との干渉を小さくするためセメント改良補強領域の下部を一部省略、安定性を確保するために補強領域の体積を増加

(L) GRS橋台とGRS一体橋梁に共通

のセメント改良補強領域

⇒一定長の短尺基本補強材と一定長の長尺補強材を用いて盛土断面全面を補強



# GRS構造物- 擁壁から橋台への発展 -

- 1) 従来形式の擁壁は片持ち梁！ 補強
- 2) 剛な一体壁面工を持つGRS構造物
- 3) 剛な一体壁面工を持つGRS擁壁の  
・剛な一体壁面工の効用の“発見”と  
・クリープは劣化に非ず、クリープでは  
・壁面工を盛土の後に建設する効用
- 4) 自然災害で崩壊した土構造物のGR  
地震・洪水・豪雨・津波
- 5) GRS擁壁からGRS橋台・GRS一体橋  
a) 従来形式の橋台・橋梁の諸問題  
b) GRS橋台とGRS一体橋梁の利点  
費、高い耐災性(地震、洗堀、津
- 6) 新幹線西九州ルート、金沢・敦賀間でのGRS構造物
- 7) まとめ

【土木・建築基礎工事と機材の専門誌】

## 基礎工

2023  
Vol.51, No.5  
THE FOUNDATION ENGINEERING &  
EQUIPMENT, Monthly

5

特集▶九州・北陸で新たに整備された新幹線の基礎・土構造物



GRS 一体橋梁

設計・施工監理：(独) 鉄道・運輸機構九州新幹線建設局 (画像提供)

 RRR スリーアール工法協会

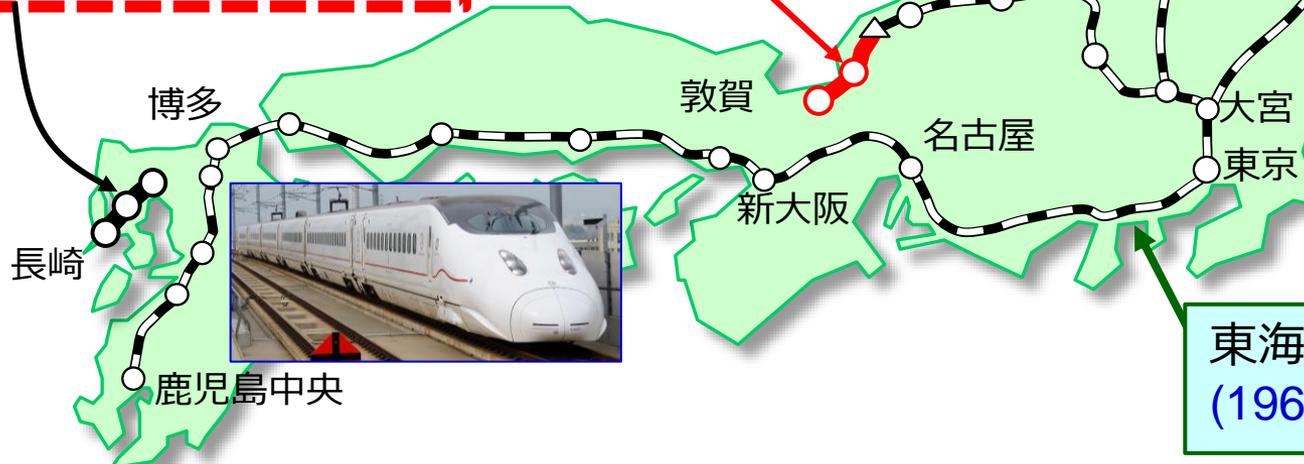
# 新幹線ネットワーク, 2022年

	供用中	2,830.5 km (2000年以降, 995.4 km)
 建設中	北海道(新函館北斗・札幌間)	211.5km
	北陸(金沢・敦賀間)	125.2km



九州  
(西九州ルート)  
2022年9月23日開業

北陸(2024年  
3月16日開業)



東海道  
(1964年10月開業)

# 西九州ルートでの剛一体壁面工を持つGRS構造物

## 様々なGRS (Geosynthetic-Reinforced Soil)構造物を採用

		佐賀県内	長崎県内	計
①	剛壁面を有する GRS擁壁 (盛土補強土壁)	1,000 m	4,100 m うち [ 1,700 m:車両基地 384 m:回送線 ]	5,100 m (盛土区間の96%)
②	GRS トンネル坑門	17 箇所	40 箇所	57 箇所 $\frac{55}{62} \div 92\%$
③	GRS橋台 (セメント改良 補強土橋台)	32 基	46 基	78 基 $78/88 \div 89\%$
④	GRS一体橋梁	2 箇所	5 箇所 うち [ 1 箇所:PC構造 1 箇所:回送線 ]	7 箇所

- ⇒
- ・車両基地において大規模なGRS擁壁を採用 鉄道運輸機構による
  - ・トンネル坑口部の約9割に GRSTンネル坑門を採用
  - ・88の橋台の内78がGRS橋台
  - ・GRS一体橋梁を本格採用, PC構造(長スパン化)に挑戦

# ① GRS擁壁(盛土補強土壁)

扇状地

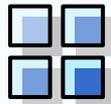
(玉石混じり砂礫層)

経ヶ岳

多良岳



大村市HPの資料に一部加筆



# GRS擁壁（盛土補強土壁）

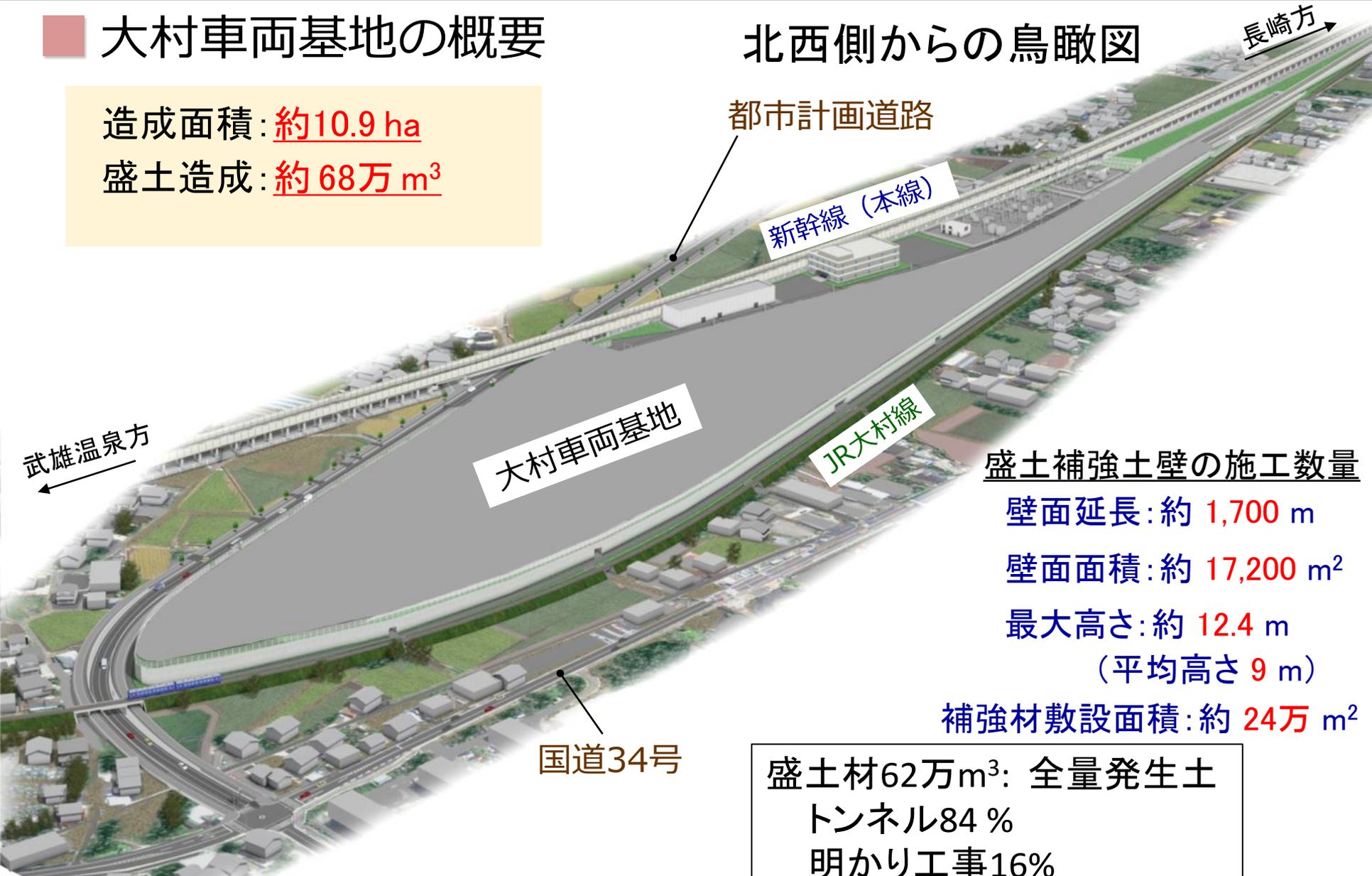
鉄道運輸機構による

## 大村車両基地の概要

造成面積：約10.9 ha

盛土造成：約68万 m<sup>3</sup>

## 北西側からの鳥瞰図



## 盛土補強土壁の施工数量

壁面延長：約 1,700 m

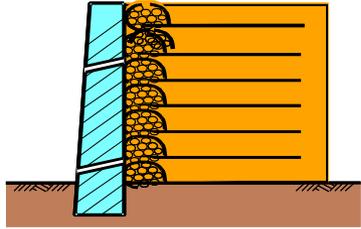
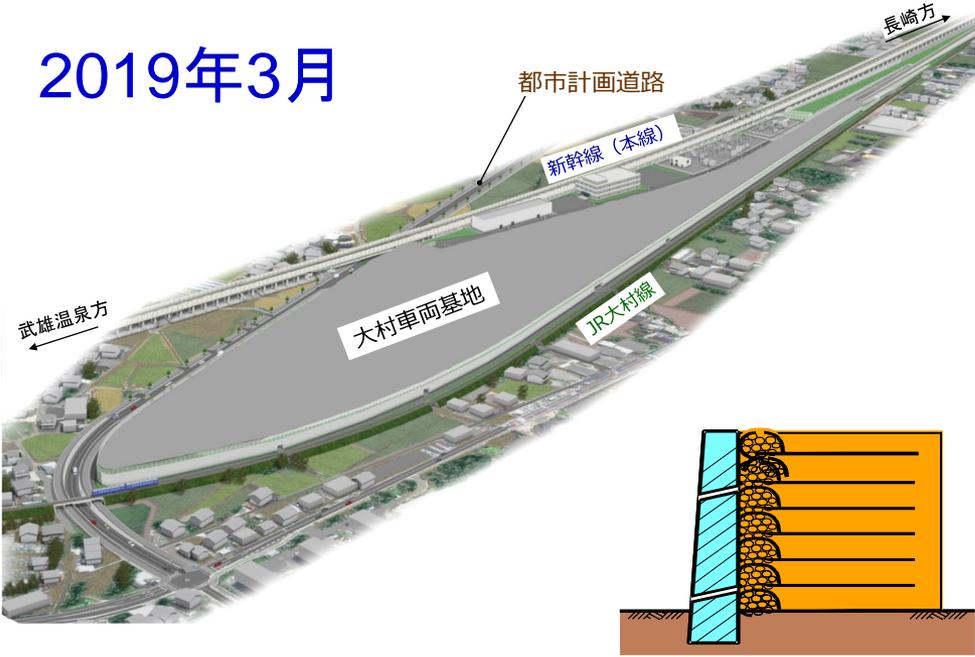
壁面面積：約 17,200 m<sup>2</sup>

最大高さ：約 12.4 m  
(平均高さ 9 m)

補強材敷設面積：約 24万 m<sup>2</sup>

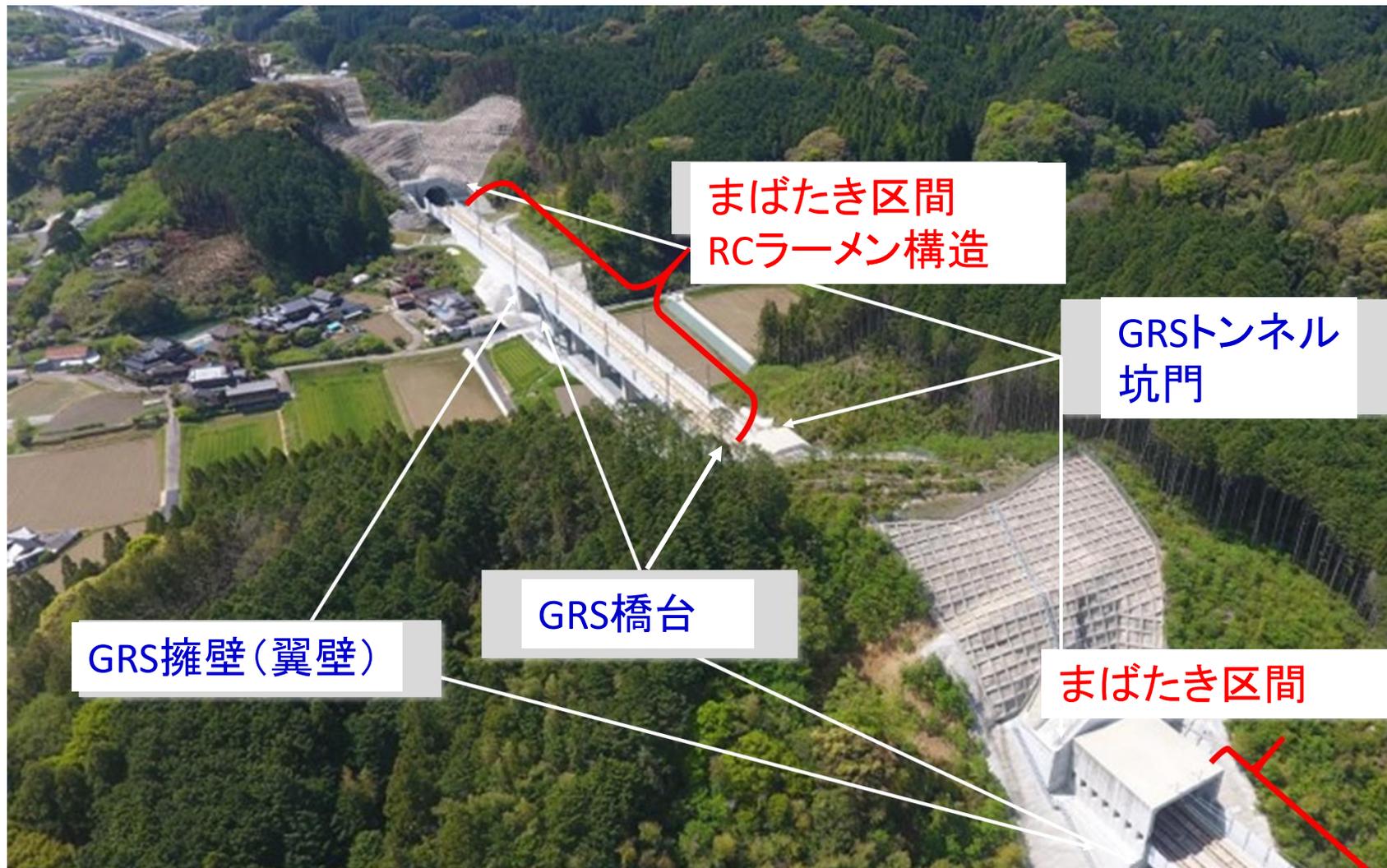
盛土材62万m<sup>3</sup>：全量発生土  
トンネル84 %  
明かり工事16%

2019年3月



## ■まばたき区間が多い:

坑口、土工区間で剛一体壁面工を持つGRS構造物を積極的に採用



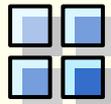
# トンネル坑口での剛一体壁面工を持つGRS橋台の建設



GRSトンネル坑門

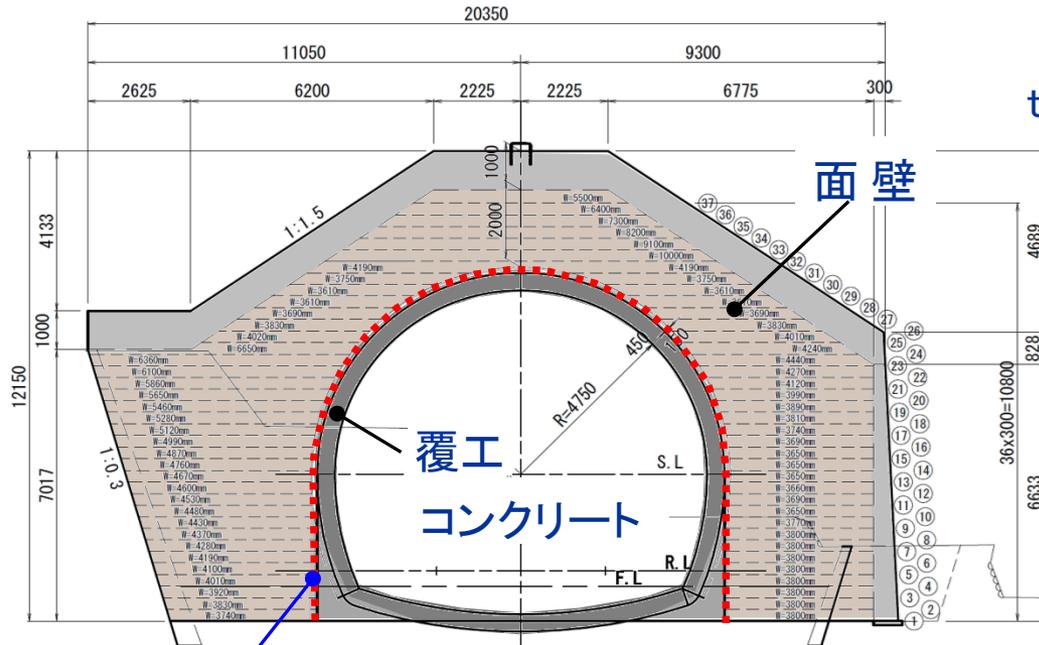


1. 地山斜面の段切り掘削
2. 取付け盛土の建設(プラント混合のセメント改良土を搬入)
3. 盛土の締固め:  $w$ =修正プロクターによる $w_{opt}$ 、 $\rho_d \geq 0.95(\rho_d)_{max}$ で管理
4. ジオグリッド補強材の配置
5. 取付け盛土(アプローチブロック)が完成
6. 取付け盛土の三面に剛な一体壁面工を建設

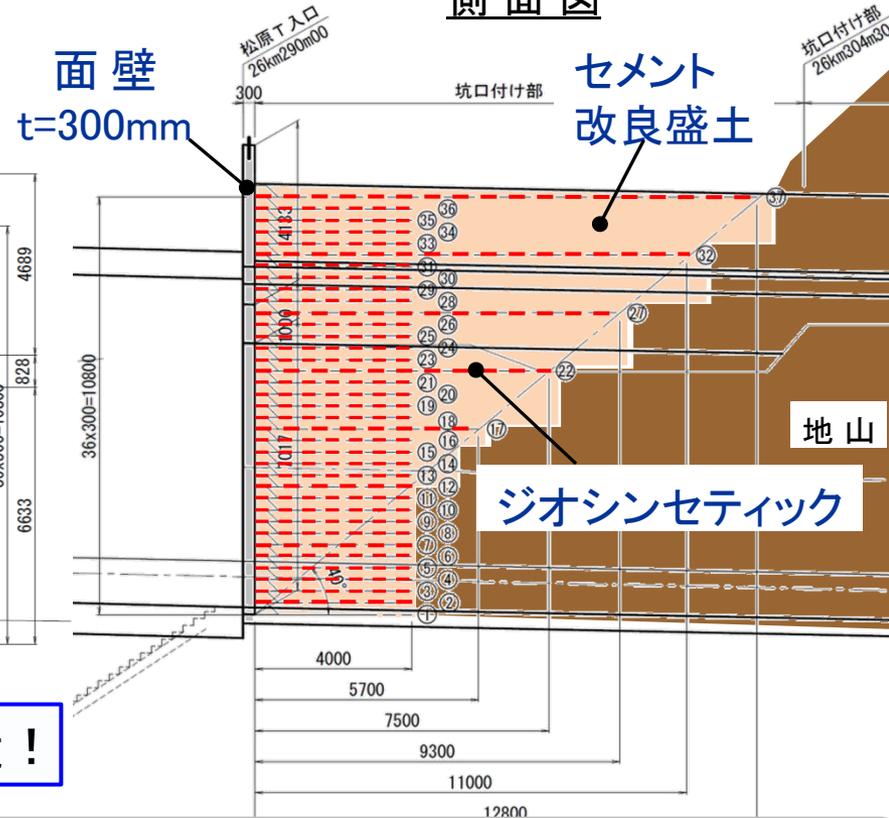


### 従来の「無補強の保護盛土プラス片持ち梁構造体の面壁」の代替

正面図



側面図



面壁とトンネル覆エコンクリートは 分離構造！

- ・斜面の崩落に対する列車の保護のためにトンネル周囲に耐震性が高い安定した構造体を構築する必要
- ・面壁とトンネル覆エコンクリートを分離して、面壁を最後に建設 ⇒ ①盛土の施工性向上、②トンネル覆エと連結した場合での連結部での地震時の応力集中による損傷を回避 ⇒ 施工性が良く、経済的で効果的な構造体

## GRSTンネル坑門の施工順序



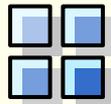
①セメント改良盛土の転圧状況



②ジオシンセティックの敷設状況



③盛土が進行中の状況



## の施工順序



④トンネル上部の盛土状況



⑤盛土の完了状況

面壁とトンネル覆工コンクリートは  
構造的に分離



⑥坑門の完成状況

⇒ 新幹線の標準的な  
坑門形式として定着

三ノ瀬トンネル出口

2018年6月24日龍岡撮影



橋台の高さ12m

彼杵トンネル出口



橋台の高さ10.3m

# 九州新幹線、西九州ルート、2022年10月27日龍岡撮影

三ノ瀬トンネル出口



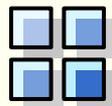
彼杵トンネル出口





GRSトンネル坑門工

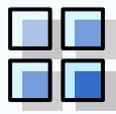
GRS橋台



## ■ 西九州ルートにおける本格的な採用

駅 間	構造物名称	スパン	構造種別
武雄温泉・嬉野温泉間	第1百木 架道橋	12.00 m	RC床板
武雄温泉・嬉野温泉間	椿原 架道橋	10.00 m	RC床板
嬉野温泉・新大村間	第1鬼橋架道橋 (車両基地回送線)	10.10 m	RC床板
諫早・長崎間	げんしゅ 原種 架道橋	30.00 m	PCT桁 (4主桁)
諫早・長崎間	原種 橋梁	20.00 m	RC床板
諫早・長崎間	貝津 橋梁	15.00 m	RC床板
諫早・長崎間	第4船石 架道橋	15.00 m	RC床板

⇒ 北海道新幹線・三陸鉄道で有効性が確認されたGRS一体橋梁を積極的に採用： 本線：6箇所，車両基地回送線：1箇所

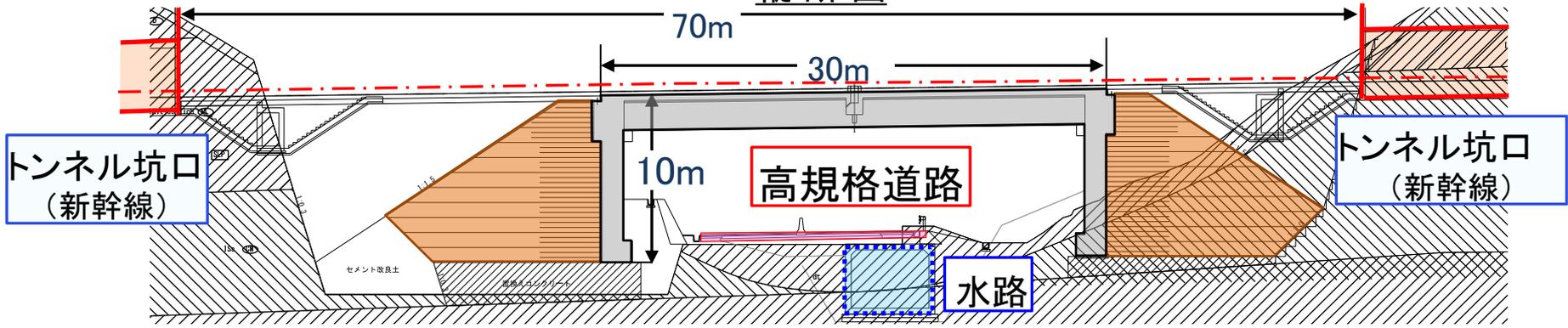


# 原種架道橋 GRS一体橋梁

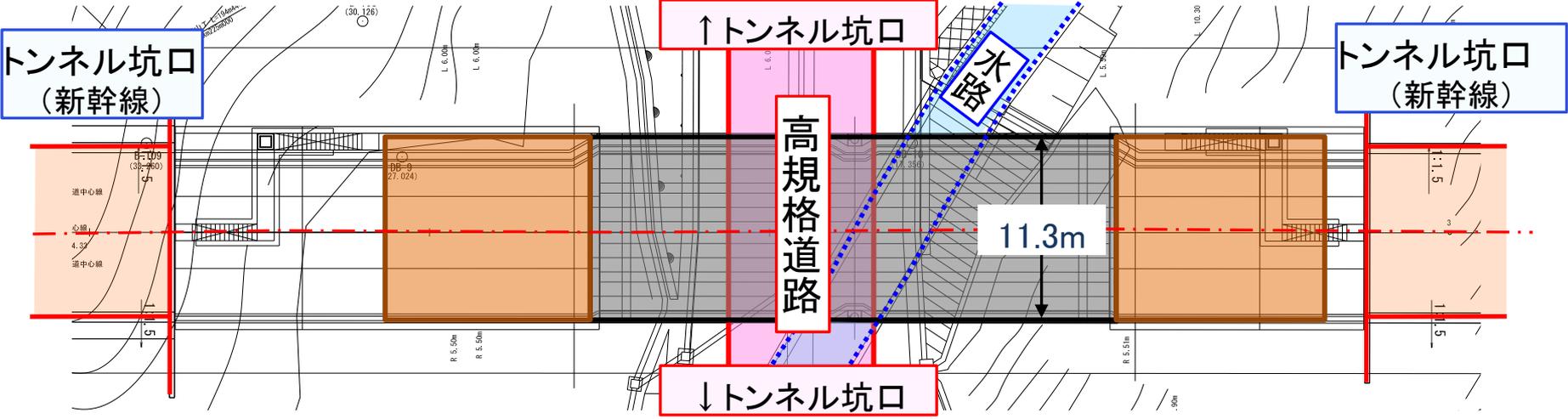
鉄道運輸機構による

## 4つのトンネルに挟まれた山間部

縦断図



平面図



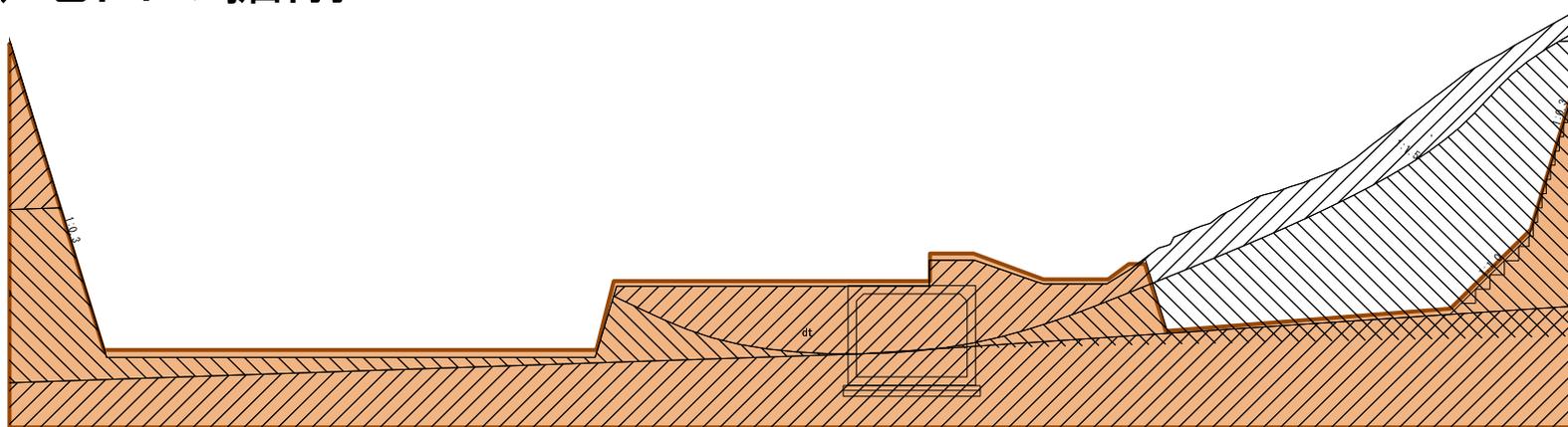
山間部の閉空間に位置し、管理用道路が確保できない(徒歩のみ可能)

⇒ 維持管理が大幅に軽減するPC構造のGRS一体橋梁を採用

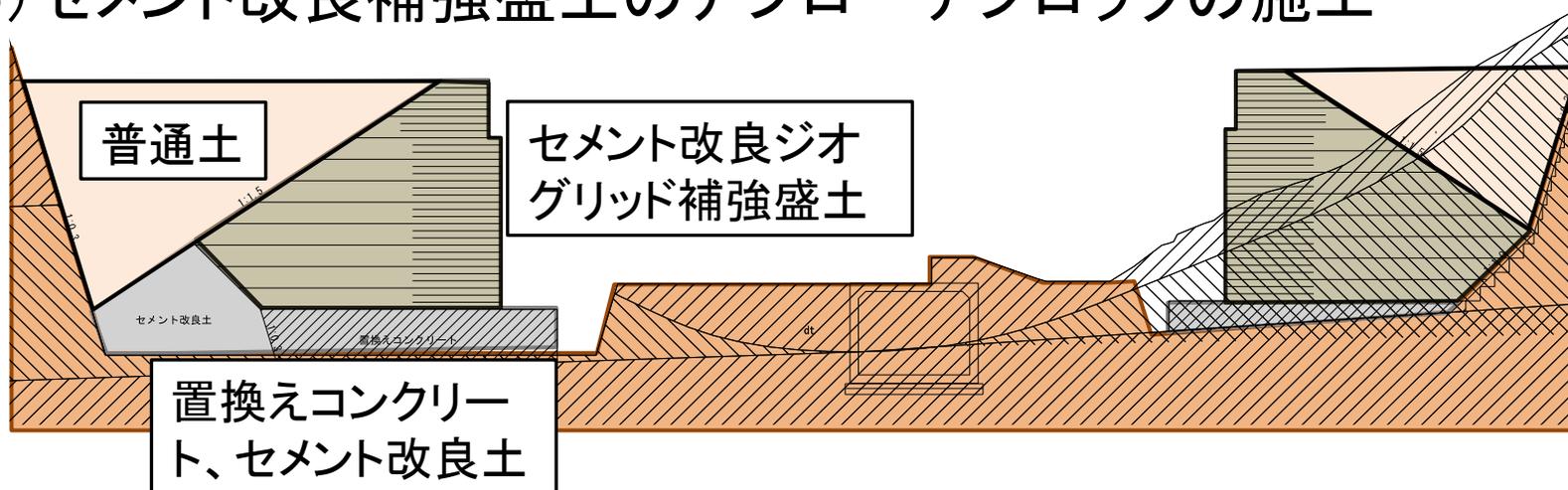


## 施工順序(その1)

(a) 地山の掘削



(b) セメント改良補強盛土のアプローチブロックの施工



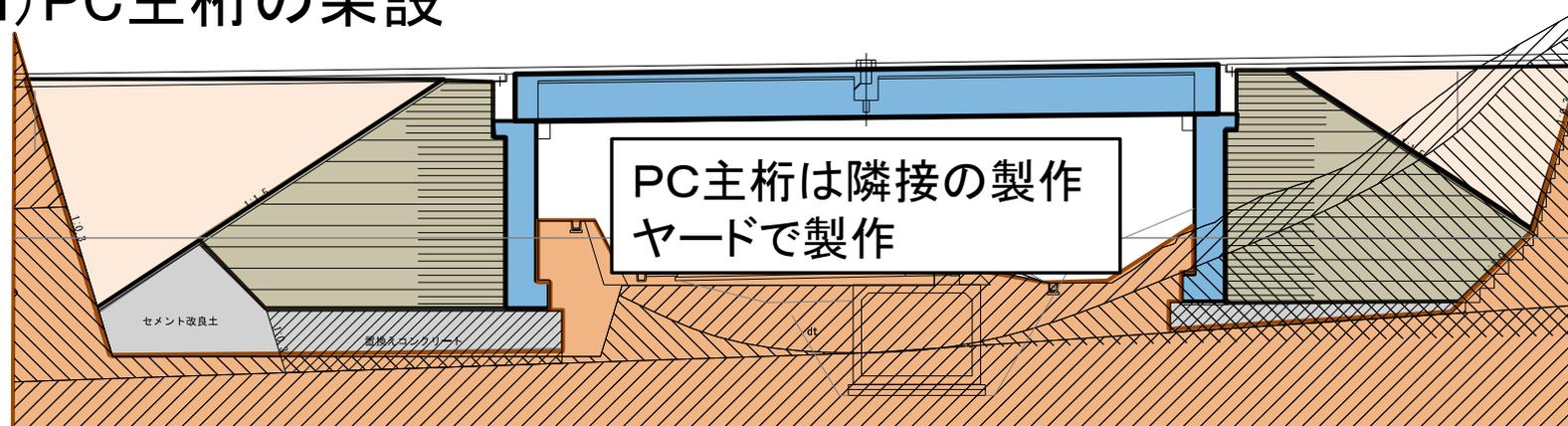


## 施工順序(その2)

### (c) 橋台豎壁(壁面工)の施工



### (d) PC主桁の架設



# 主桁(長さ30m)の架設

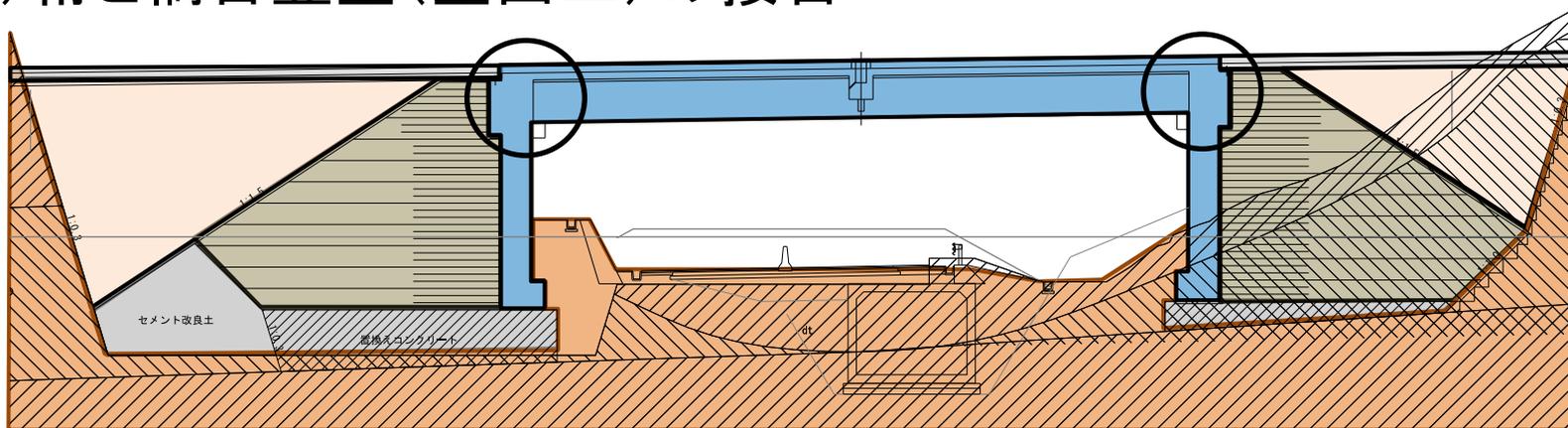


鉄道運輸機構による

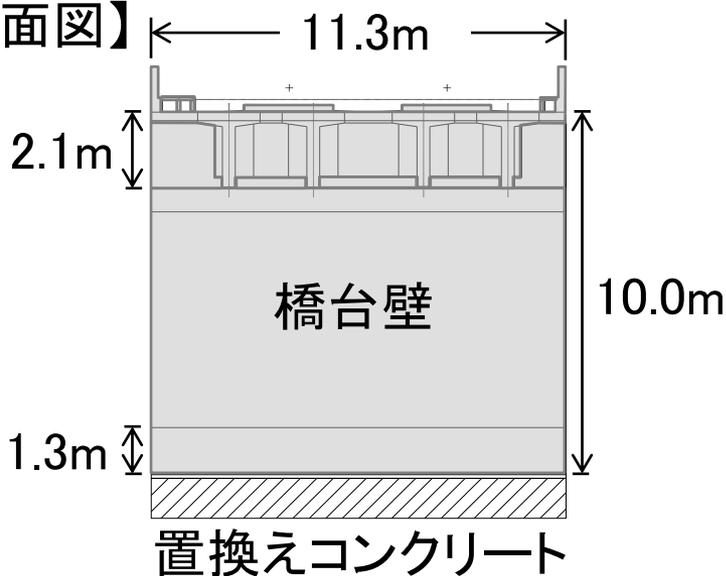


## 施工順序(その3)

(e) 桁と橋台豎壁(壁面工)の接合



【断面図】



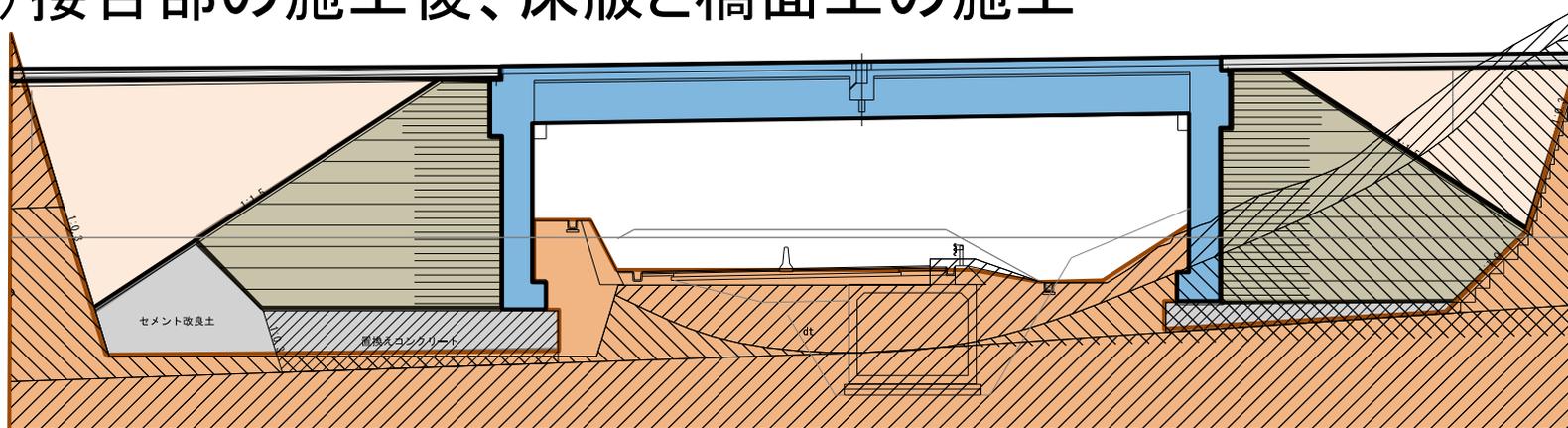
GRS一体橋梁にPC桁を用いることの課題

PC桁の端部を剛結することで、プレストレス二次力、クリープ、乾燥収縮、温度収縮が拘束され、不静定力が作用



## 施工順序(その4)

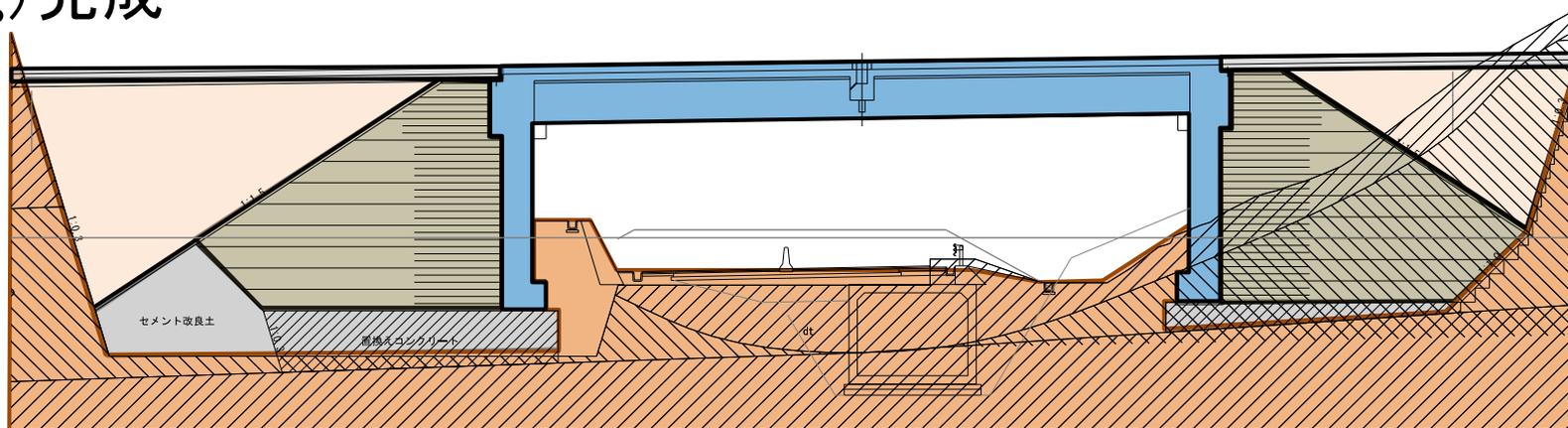
(f) 接合部の施工後、床版と橋面工の施工





## 施工順序(その5)

(g) 完成



2022年10月28日龍岡撮影

現場へは徒歩でしか行けない、管理用道路は確保できない

# 原種架道橋 GRS一体橋梁



# 原種架道橋 GRS一体橋梁

2022年8月  
鉄道運輸機構による

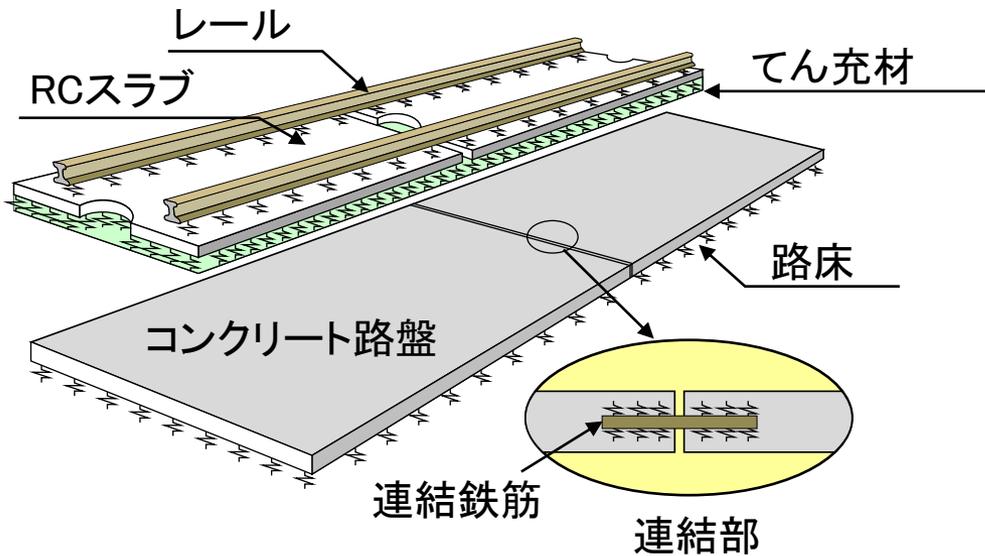
GRS一体橋梁

GRS擁壁(側壁)

連続RC  
スラブ軌道



# 連続RCスラブ軌道



- 建設費は比較的高い
- しかし、維持管理費は大幅に減少(約1/4)
- 許容残留沈下は非常に小さい
- 1970年代山陽新幹線(岡山～博多間、1975開業)からRC構造物にだけ使用
- 北陸新幹線(東京～長野間、1997年開業)から、剛一体壁面工を持つGRS構造物への適用を全面開始

# GRS一体橋の橋台部中央断面での残留変位

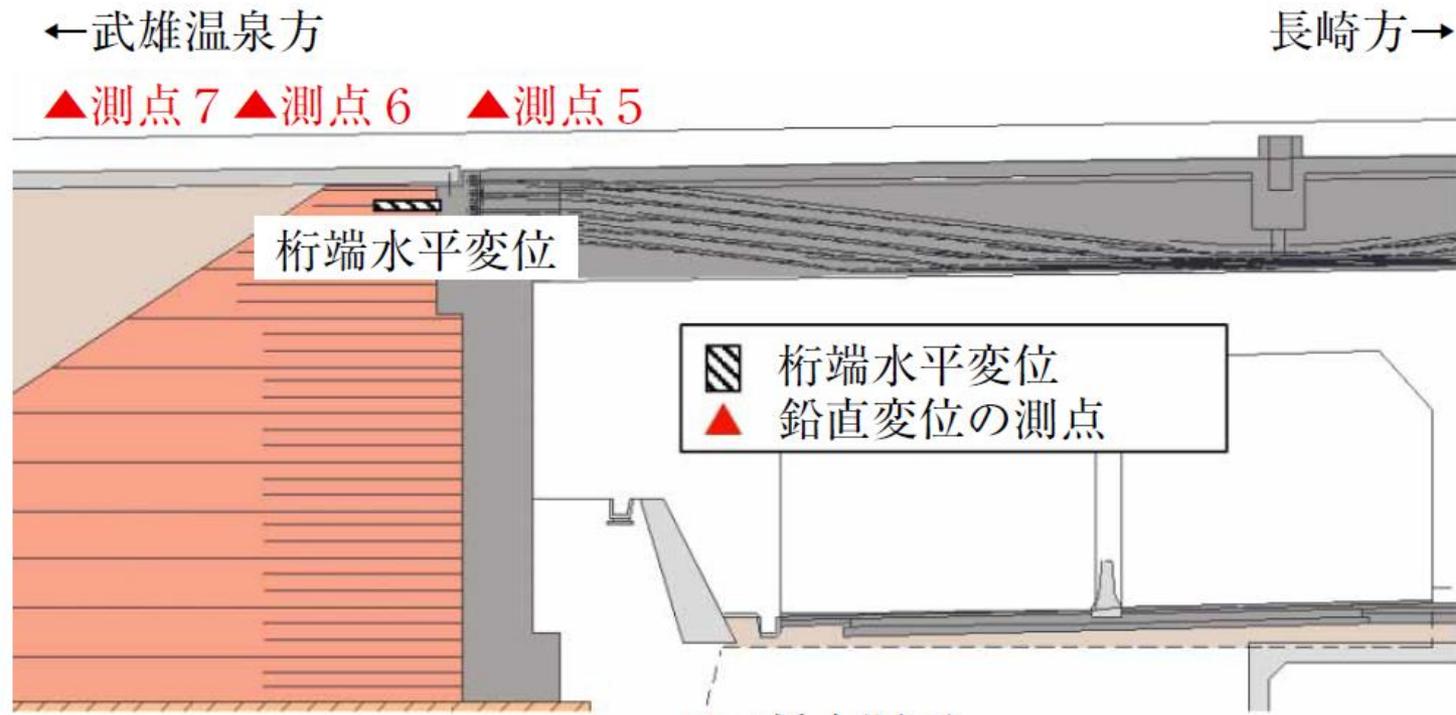
藤間陽介・阪田暁(2023): PC桁を用いた超スパンGRS一体橋梁の設計・施工、  
基礎工51, No.5, 5月号, 44-47頁

2018年11月9日～2022年2月1日: 測点5, 6, 7での沈下:

- 2mm～+2mm(沈下)の間でランダムに変化

開業後も、残留沈下問題は報告されていない

⇒橋台裏残留沈下⇒段差問題は生じていない



August 2022

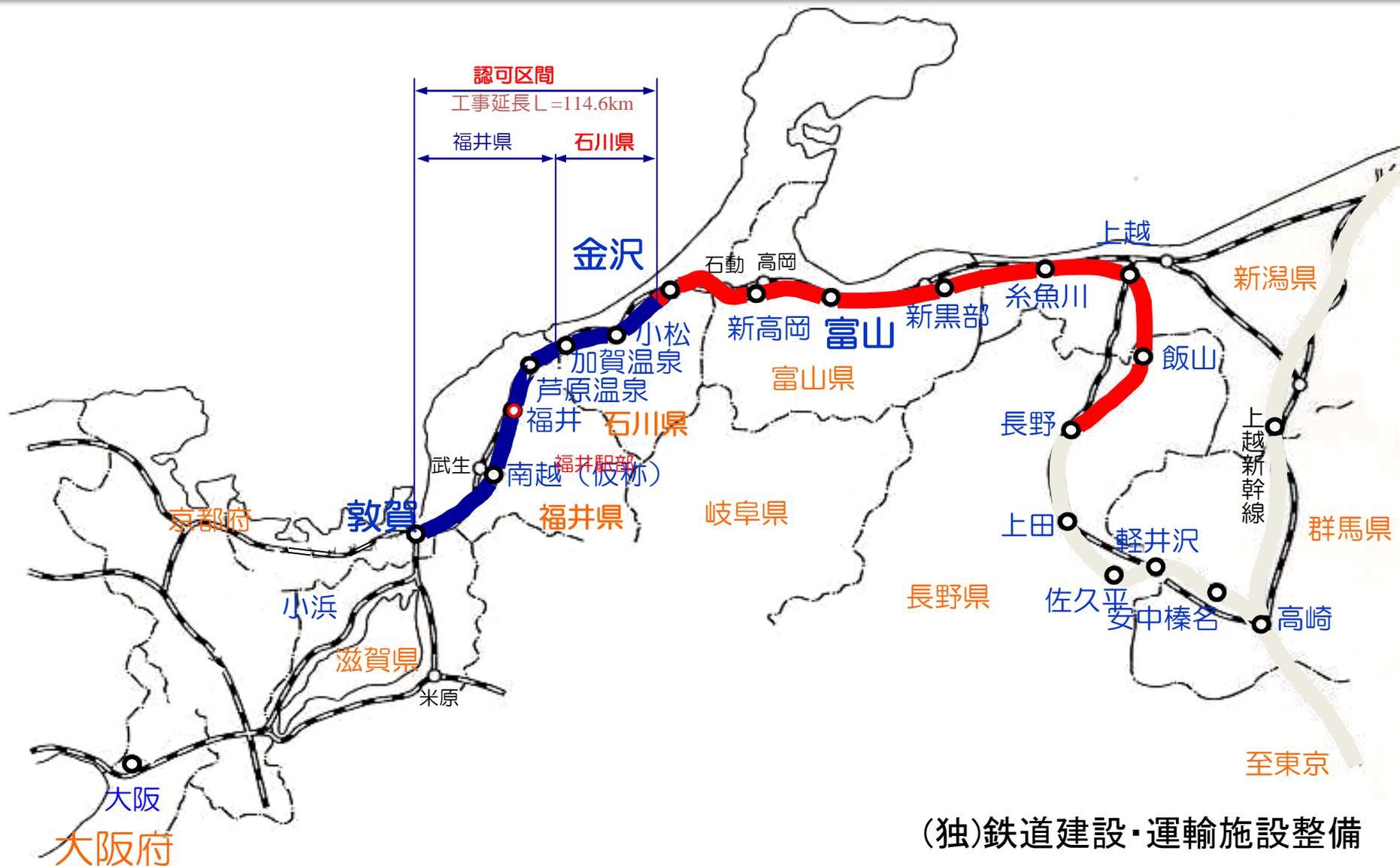
GRSトンネル坑門工



同様な短スパンGRS一体橋梁  
(合計6)の一つ

けたに注意 制限高3.8M

# 北陸新幹線金沢・敦賀間の概要



(独)鉄道建設・運輸施設整備  
支援機構 米澤豊司氏による

# 第1下新庄 GRS橋台

鉄道建設・運輸施設整備支援機構  
米澤豊司氏による





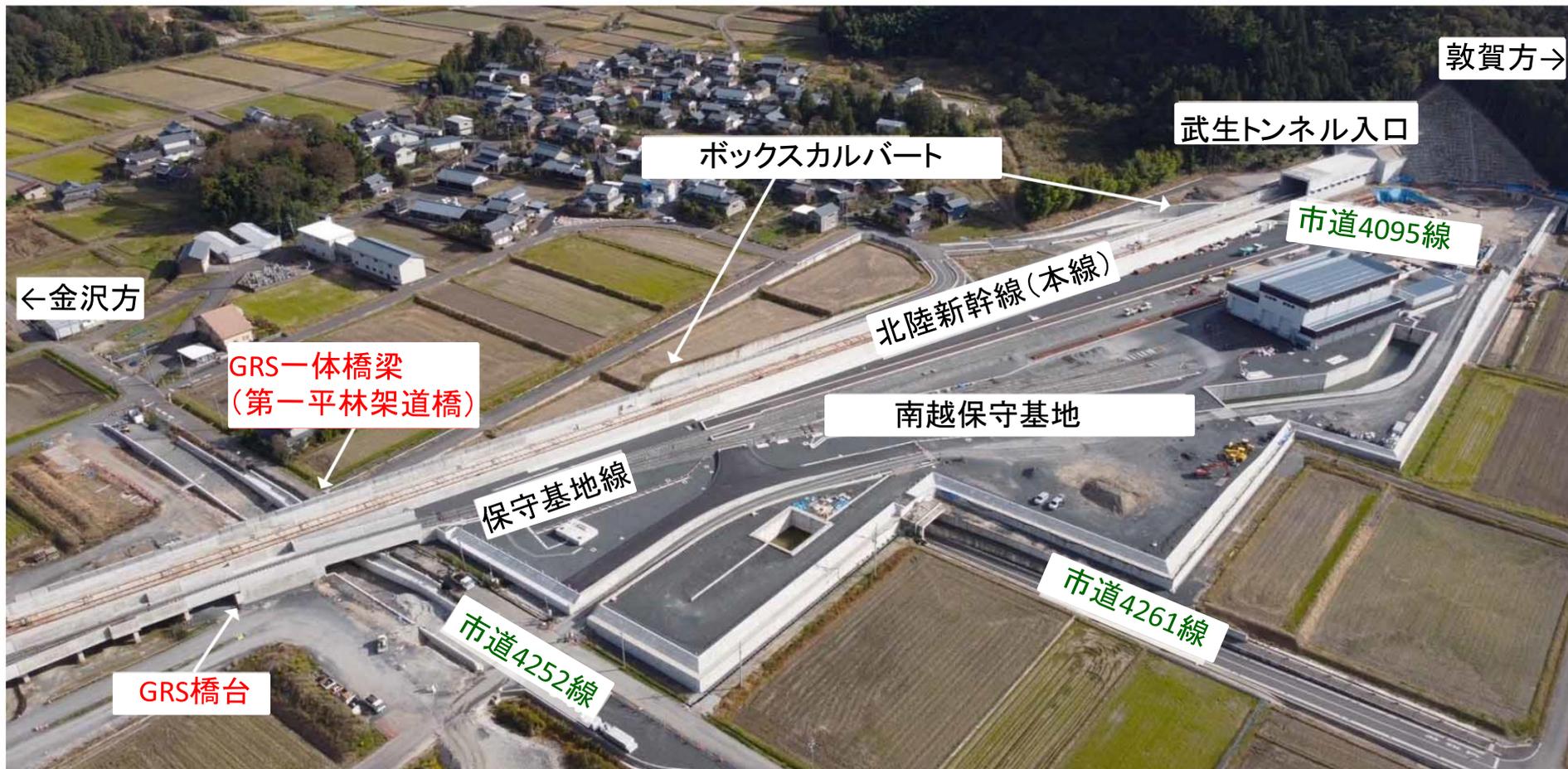
①

④

RRR-GRS橋台

# 北陸新幹線南越保守基地付近の GRS橋台とGRS一体橋梁

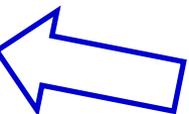
高野祐輔・長洲扶幹(2023): 島状アプローチブロックを有するGRS一体橋梁の設計・施工、  
基礎工Vol. 51, No.5, 5月号, 79頁



# 北陸新幹線南越保守基地付近のGRS橋台とGRS一体橋梁

高野祐輔・長洲扶幹(2023): 島状アプローチブロックを有するGRS一体橋梁の設計・施工、基礎工Vol. 51, No.5, 5月号, 79頁

南越保守基地



GRSボックスカルバート



GRS一体橋梁(保守基地線)

GRS擁壁

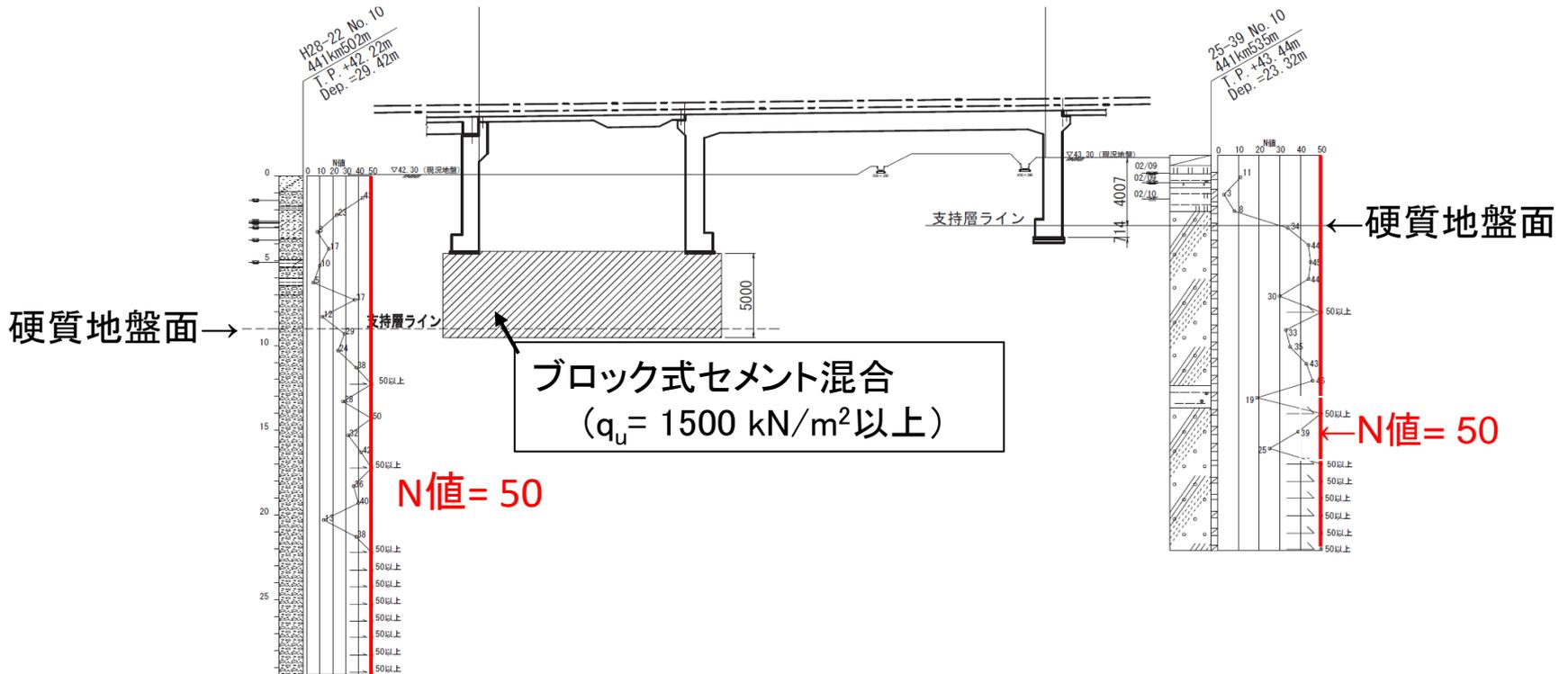
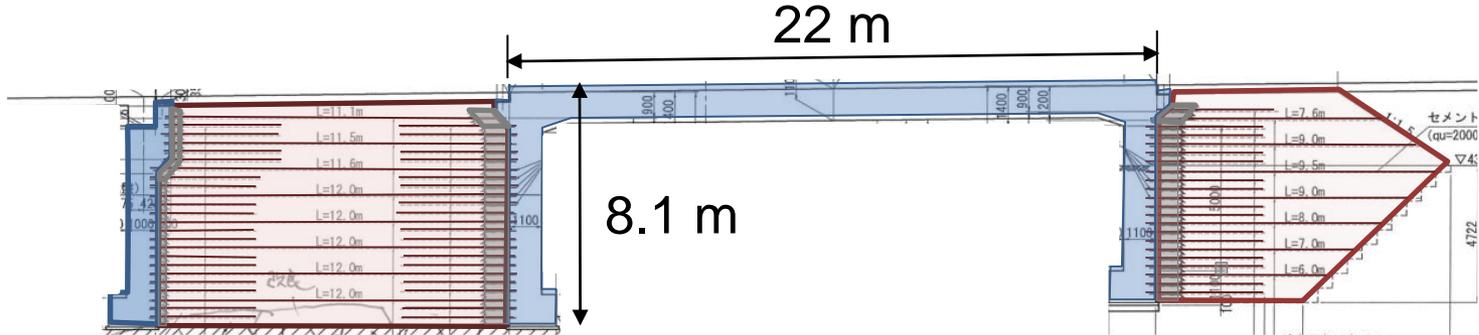
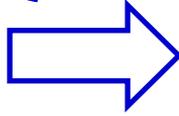
GRS一体橋梁(本線)

GRS橋台



# 北陸新幹線南越保守基地周辺の GRS橋台とGRS一体橋梁(本線)

敦賀



# GRS構造物- 擁壁から橋台への発展 -

- 1) 従来形式の擁壁は片持ち梁！ 補強土擁壁は非片持ち梁！
- 2) 剛な一体壁面工を持つGRS構造物の最近の施工例
- 3) 剛な一体壁面工を持つGRS擁壁の特徴
  - ・剛な一体壁面工の効用の“発見”と活用
  - ・クリープは劣化に非ず、クリープでは強度は低下しない
  - ・壁面工を盛土の後に建設する効用の“発見”と活用
- 4) 自然災害で崩壊した土構造物のGRS構造物による強化復旧：  
地震・洪水・豪雨・津波
- 5) GRS擁壁からGRS橋台・GRS一体橋梁への発展
  - a) 従来形式の橋台・橋梁の諸問題
  - b) GRS橋台とGRS一体橋梁の利点 - 低い建設費・維持管理費、高い耐災性(地震、洗堀、津波等)
- 6) 新幹線西九州ルート、金沢・敦賀間でのGRS構造物
- 7) まとめ

## まとめ-1/2

- ・我が国の鉄道の新設擁壁は、従来のL型・重力式等の片持ち梁形式から剛な一体壁面工を持つジオシンセティック補強土(GRS)擁壁に切り替わった。このGRS擁壁は、道路等でも活用されている。
- ・近年は、多数のGRS橋台が建設され、GRS一体橋梁も建設された。
- ・安定性の要求が極めて高く許容変形が非常に小さい新幹線の擁壁、橋台、橋梁等も、これらのGRS構造物が標準構造物になった。

その背景に、剛な一体壁面工を持つGRS構造物の三大特長がある。

すなわち、従来形式の擁壁、橋台、橋梁と比較して、

**(1)杭基礎が省略され、電柱・防音壁等付帯設備の設置と斜面上の腹付け擁壁等の設計・施工が容易になる。総じて、工期が短く直接建設費が低い。**

**(2)地震・豪雨・洪水・津波等自然災害に対する耐力が高い。**

**(3)橋台裏の盛土沈下の解消等により維持管理費が大幅に削減する。**

⇒(1), (2), (3)を総合して、**ライフサイクルコストは確実に低下。**

これらは、実績で証明されてきた。

## まとめ-2/2

上記三大特長(1), (2), (3)の根源は、他形式のGRS構造物にはない以下の四つの基本技術である。

- ①補強材全層と連結した**剛な一体壁面工**により以下の性能を発揮：
  - ・高い壁面土圧に伴い大きな補強材引張力・盛土内拘束圧が発揮されて、GRS構造物の常時・地震時荷重に対する安定性が向上。
  - ・盛土下部の補強材層の短縮が可能になり、腹付け擁壁工が合理化。
  - ・壁面工による電柱・防音壁・橋桁等の外荷重の直接支持。抑制。
- ②**剛な一体壁面工と補強材全層の連結に伴う構造一体化**(GRS一体橋梁では桁と壁面工の構造一体化も含めて)。その結果、不静定構造化して、地震荷重・外荷重や洗堀等に対する安定性が向上。
- ③上記①、②を考慮した上で、実際的な**レベルII設計地震動に対する耐震設計**の標準化。
- ④補強盛土建設に伴う地盤・盛土の変形の終了後、補強材と一体化した剛な一体壁面工を建設(**段階施工**)。その結果、壁面工は補強盛土建設時の盛土と支持地盤の沈下・変形と無縁になり、杭基礎不要で構造が簡素化。GRS構造物の完成後の残留沈下・残留変位は、大きく抑制。

# 鉄道構造物のレジリエンス向上 —被災前(維持管理)と復旧時の対応の取組み—

鉄道総合技術研究所

神田 政幸



Railway Technical Research Institute

1

## 講演内容

1. 鉄道構造物の現状と課題、研究開発の方向性
2. 鉄道構造物の災害対応—現状
  - 検査・診断技術
  - 補強技術
  - 早期復旧技術
  - 線状降水帯の発生に伴う災害に対する課題
3. 鉄道構造物の災害対応—今後
  - 流出物、土砂流出や浸透による強度低下に対応した診断・補強技術の取組み
  - 甚大な被害規模に対応した早期復旧技術の取組み
  - 流域治水に対応した取組み
4. 鉄道構造物の維持管理—検査・診断、デジタルメンテナンス



Railway Technical Research Institute

2

# 社会的背景と鉄道インフラの維持管理

研究開発  
の方向性

## 労働環境

■ 人口（特に生産年齢人口）減少時代

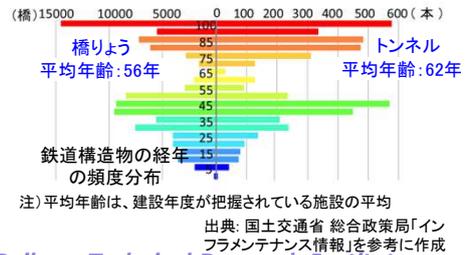
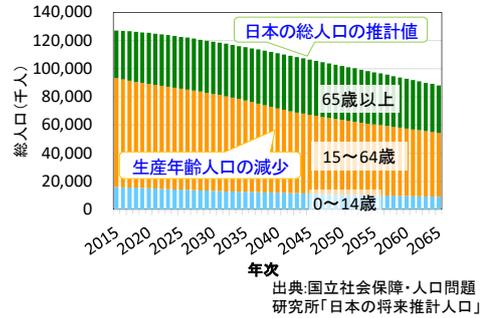
## 鉄道インフラ

■ 高度経済成長期の建造構造物が経年60年、今後も増加

- 労働力不足。熟練技術者確保が困難
- 労働環境改善、働き方改革
- メンテナンスコスト増の懸念  
⇒生産性向上 (i-Construction)

■ 新型コロナウイルス感染症が発生。運輸収入減。

コロナ禍により、鉄道経営の効率化の  
必要性が増し、さらにスピードアップ



Railway Technical Research Institute

# 鉄道構造物の維持管理の課題

研究開発  
の方向性

短い ← 構成要素の寿命・耐用期間 → 長い



検査 → 省力化策 / 省人化策

診断 → 検査周期延伸 / 設備異常検知

老朽化対策

措置  
補修・補強・取替



Railway Technical Research Institute

## 東北地方太平洋沖地震(2011年3.11)

研究開発  
の方向性



## 熊本地震(2016年4.14, 16)



Railway Technical Research Institute

5

## 大阪府北部の地震(2018年6.18)

研究開発  
の方向性



## 北海道胆振東部地震(2018年9.6)



Railway Technical Research Institute

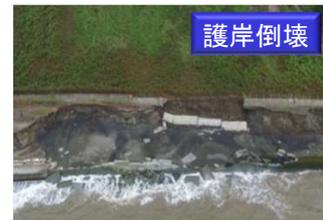
6

# 平成24年7月九州北部豪雨(2012年7.11~14)

研究開発  
の方向性



# 台風7、9、10、11号大雨(2016年8.16~8.31)



Railway Technical Research Institute

# 最近の豪雨災害

研究開発  
の方向性



平成 29 年 7 月 九州北部豪雨(2017.7.5~7.6)



平成 30 年 7 月 豪雨(2018.6.28~7.8)



基礎損傷(JR東日本)



橋梁基礎損傷(上田電鉄)



斜面崩壊, 橋梁倒壊(箱根登山鉄道)



盛土流出(阿武隈急行)

台風 19 号による大雨・暴風等(2019.10.10~13)

▶ 2020年以降: 線状降水帯の豪雨により毎年鉄道構造物は被害をうける



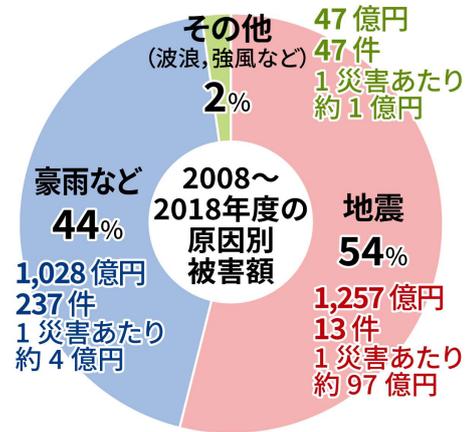
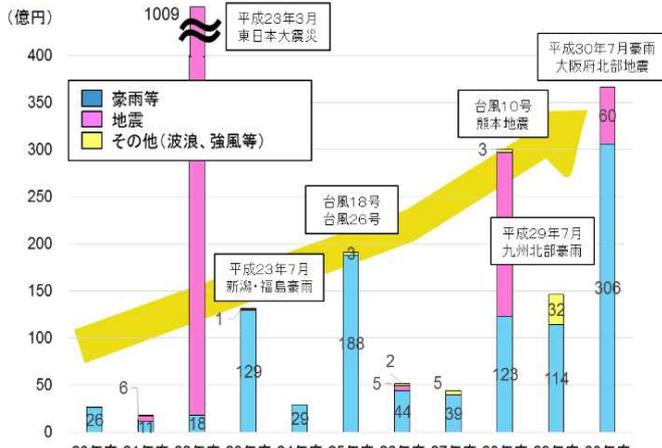
Railway Technical Research Institute

# 鉄道施設(構造物・軌道・・・)の被害額の推移

研究開発  
の方向性

自然災害による鉄道施設の被害額の推移(過去10年間)

過去10年間の原因別被害額



注) 鉄道事業者から提出される災害報告書による。但し、現時点では被害額が確定していない只見線、豊肥線、日田彦山線は被害想定額を加算。  
注) 平成30年度は被害額は平成31年2月末までに提出された災害報告書による集計結果。

国土交通省・平成30年度政策レビュー結果(評価書)「鉄道の防災・減災対策」2019.3 <<https://www.mlit.go.jp/common/001281980.pdf>>



Railway Technical Research Institute

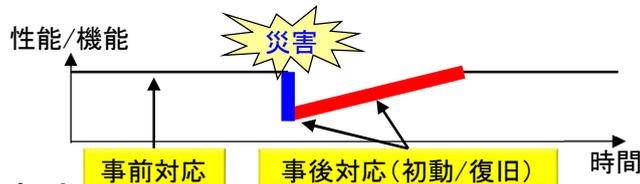
# 被害の特徴とレジリエンスの向上

研究開発  
の方向性

特徴

- ▶ 巨大地震、余震: 多数の地震動により損傷が進行。津波により、広域の沿岸部で被害が拡大。
- ▶ 局所的強雨、広域連続強雨: 越流により構造物の損傷が進行、拡大。

## 被災前後の構造物の性能曲線



- ▶ レジリエンスとは、「壊滅的な状態の回避」と「全体系機能の早期回復」を可能にする性能。

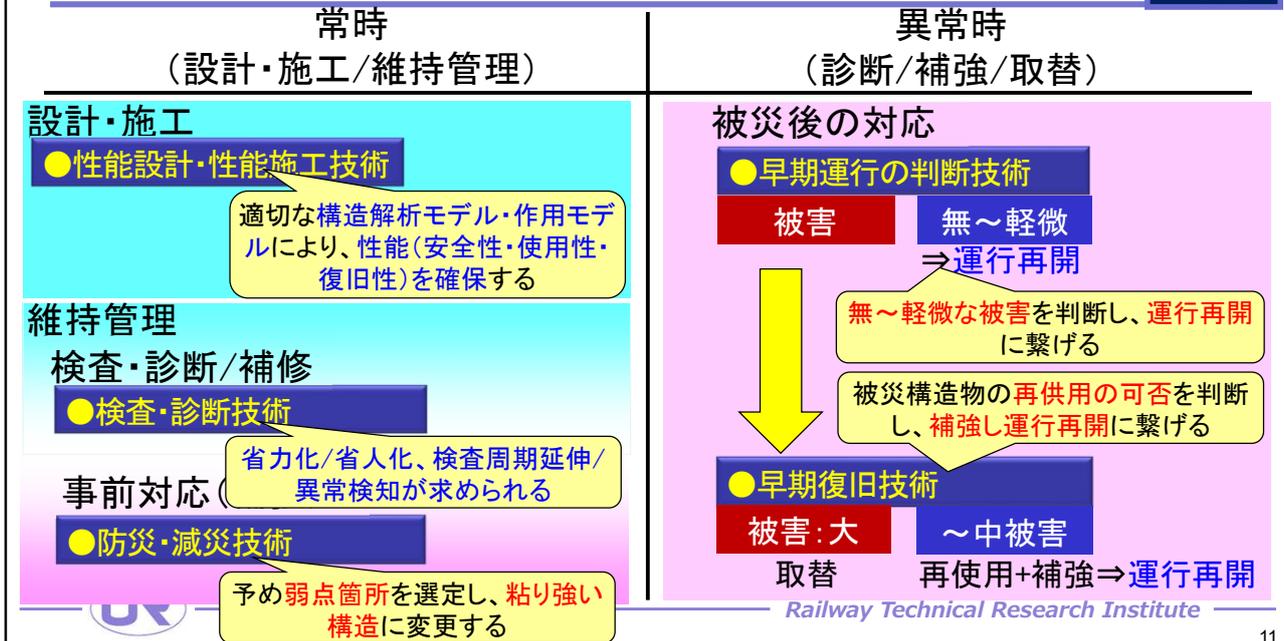
■ 鉄道のレジリエンスを高めるためには、事前対応(設計・施工、防災・減災技術)、事後対応(運行再開、早期復旧技術)が必要。



Railway Technical Research Institute

# 鉄道構造物のレジリエンス向上のための研究開発

研究開発  
の方向性



11

## 講演内容

1. 鉄道構造物の現状と課題、研究開発の方向性
2. 鉄道構造物の災害対応—現状
  - 検査・診断技術
  - 補強技術
  - 早期復旧技術
  - 線状降水帯の発生に伴う災害に対する課題
3. 鉄道構造物の災害対応—今後
  - 流出物、土砂流出や浸透による強度低下に対応した診断・補強技術の取組み
  - 甚大な被害規模に対応した早期復旧技術の取組み
  - 流域治水に対応した取組み
4. 鉄道構造物の維持管理—検査・診断、デジタルメンテナンス

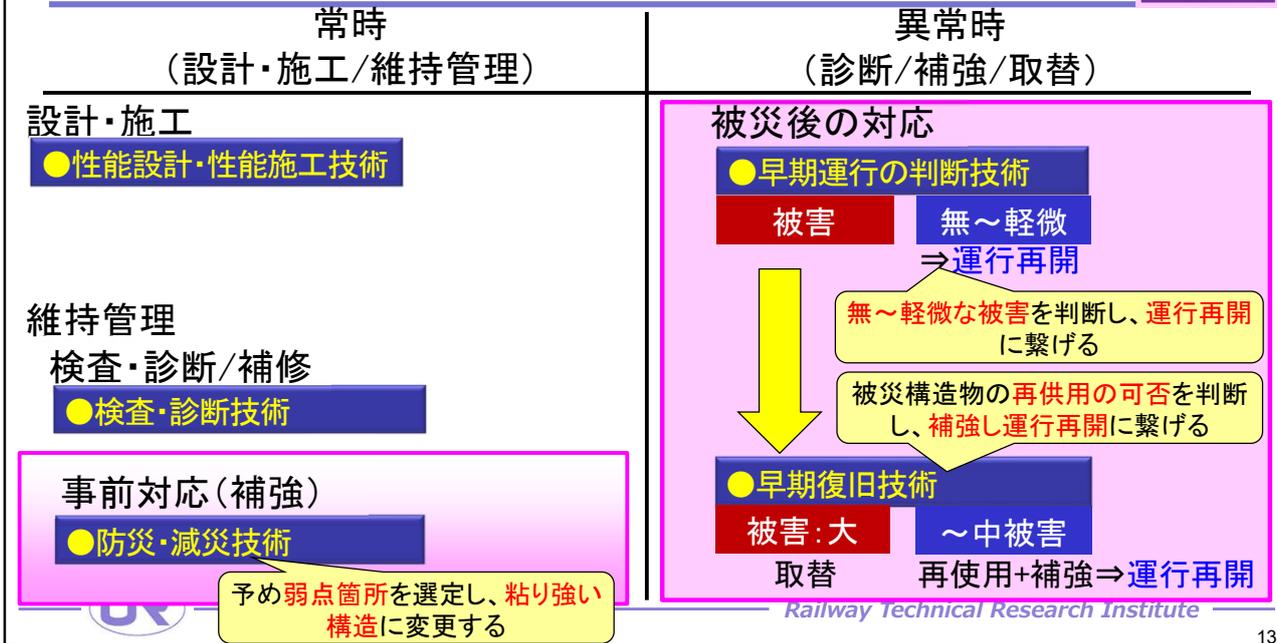


Railway Technical Research Institute

12

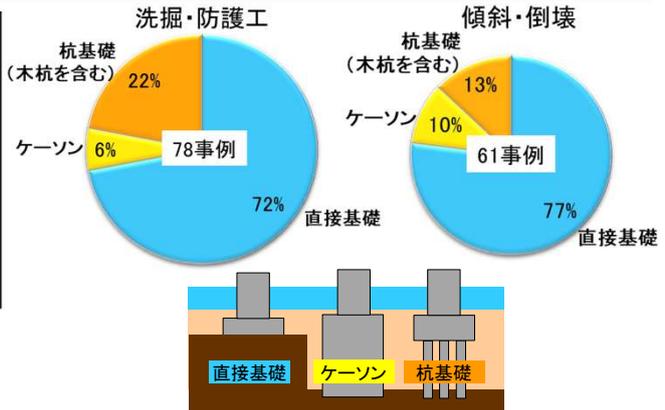
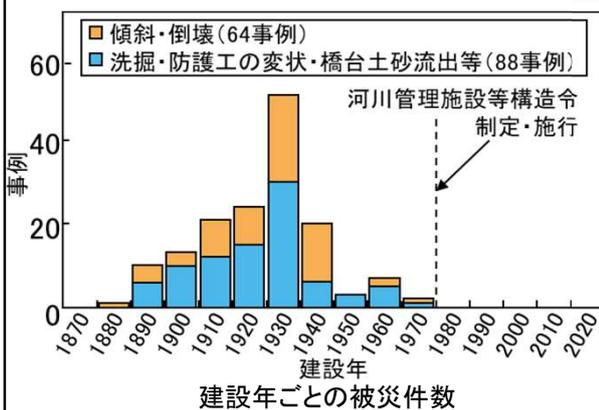
# 鉄道構造物のレジリエンス向上のための研究開発

災害対応  
現状



## 河川橋梁の被害分析:弱点箇所の抽出

災害対応  
現状



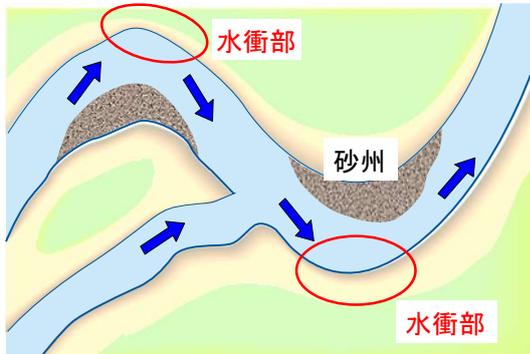
### 河川橋梁の構造条件

- 河川管理施設等構造令(1976)制定以前の河川橋梁で被害が発生
- 浅い基礎である、直接基礎に被害が集中



# 河川橋梁の被害分析：弱点箇所の抽出

災害対応  
現状



河川の流れ



被災要因別の被災件数(橋脚数)

## 河川橋梁の河川環境条件

- 流れの強い川岸の部分(水衝部)が流速・流量によって変化し、濁筋に変化をもたらす
- 洗掘被害の要因として、濁筋の変化が4割



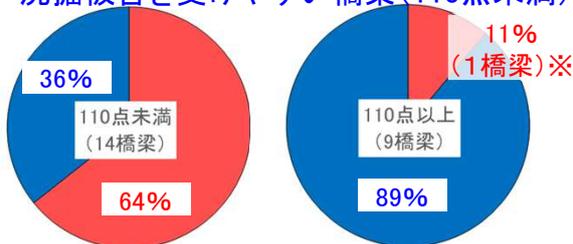
Railway Technical Research Institute

# 検査・診断技術：弱点箇所の抽出

災害対応  
現状

## 洗掘採点表

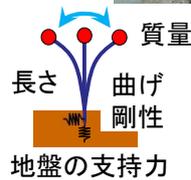
- 構造条件／防護条件(はかま工等)
  - 河川環境条件
- ⇒洗掘被害を受けやすい橋梁(110点未満)抽出



■被害 ■無被害  
洗掘被害リスクを有する橋梁の抽出  
(2019年以降、被害橋梁/無被害橋梁23橋梁)

※根入れが大きい橋梁であったが、河口部に位置する緩い堆積層のため流出した例

## 衝撃振動試験



橋梁下部工の固有振動数  
⇒健全度を判定

■ 多数の河川橋梁のうち、洗掘採点表や衝撃振動試験の結果から増水による被災リスクの高い橋梁を抽出

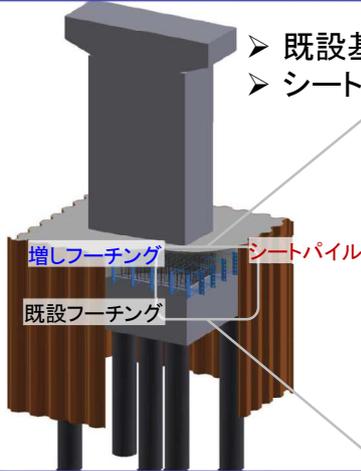
# 補強技術：粘り強い構造に変更する

災害対応  
現状

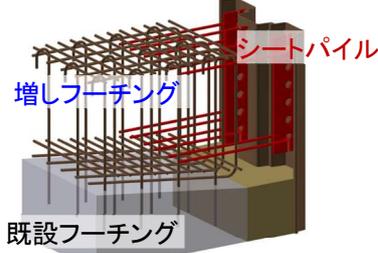
## シートパイル補強工法

※大林組、日本製鉄との共同研究成果

- 既設基礎をシートパイル(鋼矢板)で囲む
- シートパイルと既設フーチングを結合



### シートパイルと既設フーチングの結合方法



## 適用例



■ シートパイル補強工法を提供し、導入支援を図り、被災リスク低減に寄与

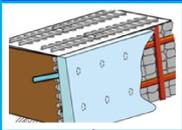


Railway Technical Research Institute

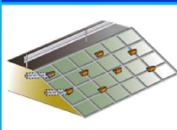
# 補強技術：降雨対策の例

災害対応  
現状

### 土留め壁補強法



### 盛土補強法



谷埋め盛土

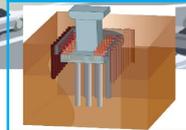
河川

河川橋梁

河川

河川沿いの盛土

### シートパイル補強法



### 桁移動制限装置



### 鋼桁・橋台・盛土 一体化工法



■ 河川橋梁、河川沿い盛土／谷埋め盛土に対して、各種の降雨対策を提供し、導入支援を図り、被災リスク低減に寄与

# 被災盛土の復旧方法(原状復旧)

災害対応  
現状

## <原状復旧の例>

① 被災



② 仮復旧



仮土留め施工  
大型土のう撤去



③ 本復旧  
盛土施工



運行再開(徐行)

徐行解除

- 仮復旧は早いものの、本復旧は被災前の盛土構造に戻すため(原状復旧)仮土留め施工、土のう撤去と盛土再構築で、工期、コストが増
- 被災箇所は弱点箇所⇒原状復旧の場合、再被害の可能性は否定できない

■ したがって、早期復旧、かつ強化復旧可能な工法が求められる



Railway Technical Research Institute

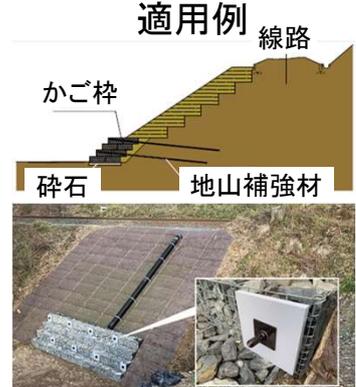
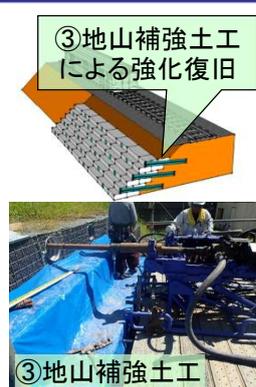
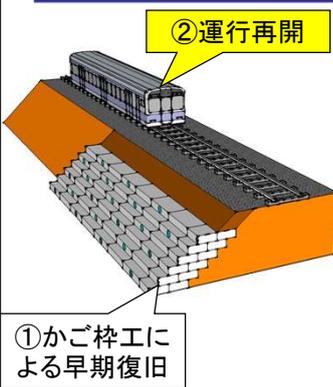
# 早期復旧技術: 早期、かつ段階的強化

災害対応  
現状

## かご枠工による早期・強化復旧法

※岡三リビック、小岩金網、  
ライト工業との共同研究成果

適用例



- かご枠+碎石による耐降雨強化、かつ早期復旧を実現
- 必要により予め配置した補強用パイプに地山補強材を施工し、耐震強化

■ かご枠工による復旧法を提供し、導入支援を図り、早期復旧に寄与



Railway Technical Research Institute

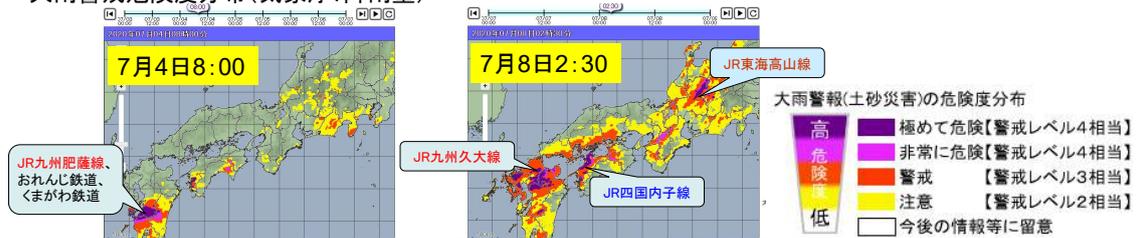
# 2020年以降の降雨災害

災害対応  
現状

## 令和2年7月豪雨(線状降水帯の発生)

- 令和2年7月豪雨⇒7/3から7/31にかけて日本付近に停滞した前線の影響で豪雨が発生。
  - 7/3～8:九州南部～北部・愛媛・岐阜に豪雨域が移動
  - 総降水量:2000mm超(長野・高知)、九州南・北部・東海地方:24・48・72時間降水量観測史上1位を記録

大雨警戒危険度分布(気象庁:降雨量)



- 線状降水帯:降雨が急激に変化(移動&停滞)、局所に集中豪雨が発生。

Railway Technical Research Institute

## 線状降水帯の発生に伴う災害に対する課題

災害対応  
現状



被災前の検査・診断技術や補強技術

課題: 構造物の高さを超える高出水

河川橋梁: 流木等の流出物による外力の増加

河川沿いの盛土/谷埋め盛土: 土砂流出や浸透による強度低下

被害規模の拡大

復旧時の早期復旧技術

河川管理者との連携



Railway Technical Research Institute

## 講演内容

1. 鉄道構造物の現状と課題、研究開発の方向性
2. 鉄道構造物の災害対応—現状
  - 検査・診断技術
  - 補強技術
  - 早期復旧技術
  - 線状降水帯の発生に伴う災害に対する課題
3. 鉄道構造物の災害対応—今後
  - 流出物、土砂流出や浸透による強度低下に対応した診断・補強技術の取組み
  - 甚大な被害規模に対応した早期復旧技術の取組み
  - 流域治水に対応した取組み
4. 鉄道構造物の維持管理—検査・診断、デジタルメンテナンス



## さらなるレジリエンス向上のための取組み

災害対応  
今後

被災前

復旧時

■ 検査・診断技術

■ 補強技術

流出物を考慮した河川橋梁／土砂流出や浸透による強度低下を考慮した河川沿いの盛土や谷埋め盛土の診断・補強技術

■ 早期復旧技術

甚大な被害規模の河川橋梁／河川沿いの盛土や谷埋め盛土の早期復旧技術

■ 国が進める「流域治水」に対応した取組み

河川橋梁／河川沿いの盛土の増水による被災リスク低減のため、  
鉄道事業者への支援

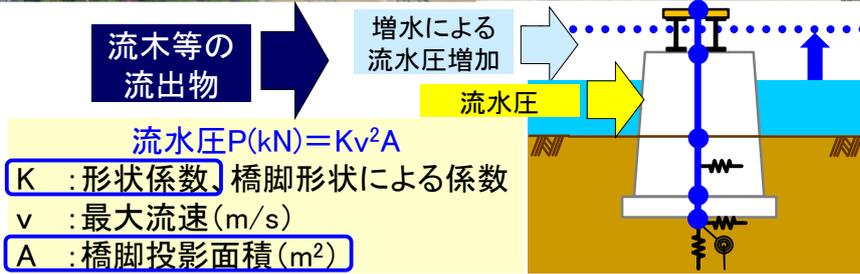


# 流出物を考慮した診断技術・補強技術

災害対応  
今後



流出物  
(流木等)



■ 流木等の流出物を考慮した河川橋梁の診断技術や補強技術の研究開発が必要

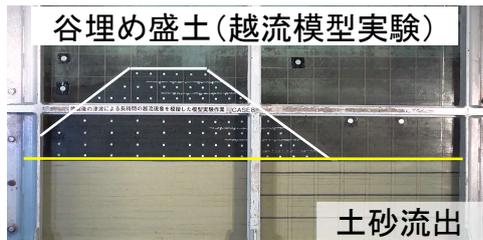
## 増水時の河川橋梁の診断 (安定計算)



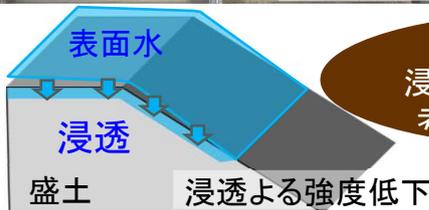
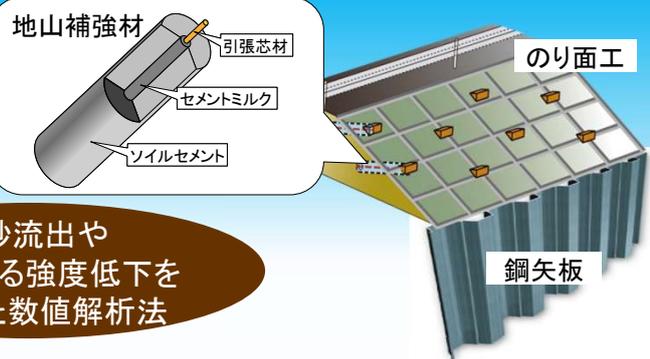
Railway Technical Research Institute

# 土砂流出／浸透を考慮した診断技術・補強技術

災害対応  
今後



## 流出対策工の提案



土砂流出や浸透による強度低下を考慮した数値解析法

対策工: のり面工・地山補強材、鋼矢板締め切り

■ 土砂流出や浸透による強度低下を考慮した数値解析法の確立と、これを活用した河川沿いや谷埋めの盛土の診断技術や補強技術の研究開発が必要



Railway Technical Research Institute

# 甚大な被害規模の河川橋梁の早期復旧

災害対応  
今後

- 甚大な被害の場合、**定量的な診断**ができないため再利用できなかった
  - 診断: 鋼桁や橋脚等が**再利用可能か否か**、適切な補強方法は**なにか**



- 橋台**再構築**
- トラス桁**再利用**(一部取替)



- 橋脚**再構築**
- 鋼桁**再利用**



- 橋台**再利用**
- 鋼桁**再利用**

- 甚大な被害規模の河川橋梁／河川沿いの盛土や谷埋め盛土の**早期復旧の診断・復旧技術**の研究開発が必要

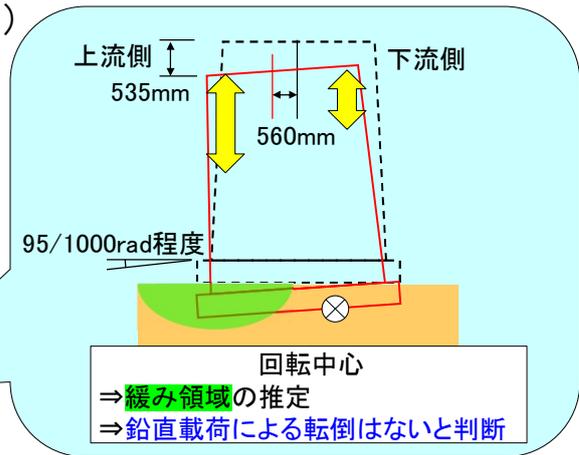
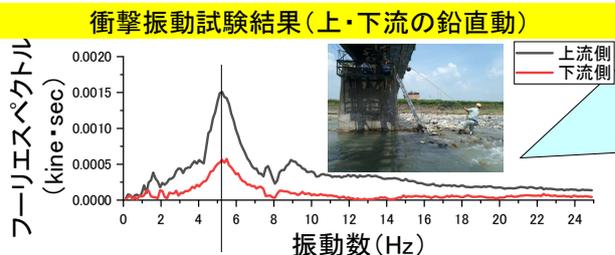
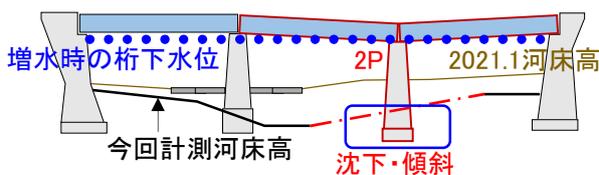


Railway Technical Research Institute

# 甚大な被害の被災橋梁を再利用し早期復旧

災害対応  
今後

- 被害規模の推定(洗掘領域: 緩み領域)



- 衝撃振動試験の鉛直振動により、**回転中心から緩み領域を推定**
- **水タンク等のプレロードによる締固めが可能と判断し、橋脚の再利用を決定**

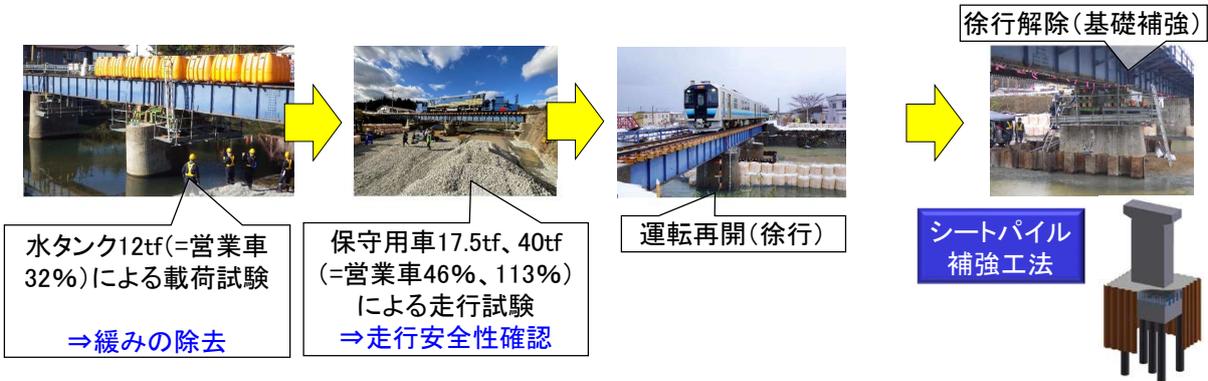


Railway Technical Research Institute

# 甚大な被害の被災橋梁を再利用し早期復旧

災害対応  
今後

## ■ プレロードによる締固め方法と補強方法



- 2022年8/9被災したが、診断の結果、鋼桁及び橋脚の再利用が可能と判断し、約4か月後の12/23に運行再開



Railway Technical Research Institute

# 流域治水への対応：鉄道事業者への支援

災害対応  
今後

## ■ 流域治水：気候変動による降雨量の増加に対応

- 都市部の河川のみならず⇒全国の河川を対象、ステークホルダー協働
- ①河川改修等の整備を加速化
- ②被害対象を減じる、③被害軽減・早期復旧



## 河川改修等の整備事業



- (鉄道事業者視点の)河川改修事例集／工法選定表が未整備

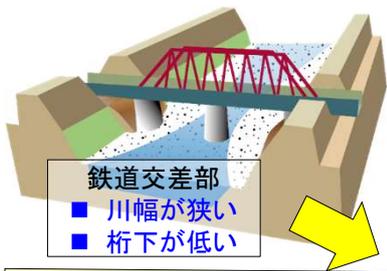
## ■ 鉄道事業者のための支援ツールとして、鉄道交差部の河川改修事例集／工法選定表を整備



Railway Technical Research Institute

# 鉄道交差部の河川改修事業

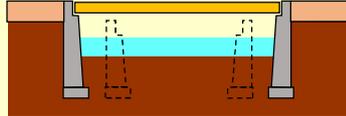
災害対応  
今後



鉄道交差部  
■ 川幅が狭い  
■ 桁下が低い

➤ 増水による被災リスクが存在し、河川管理者・鉄道事業者が連携して河川改修事業を進捗させる

河川幅増 & 桁下空間増  
仮線/別線方式による架替え

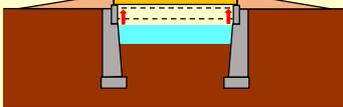


河川幅増  
非開削工法による河川拡幅

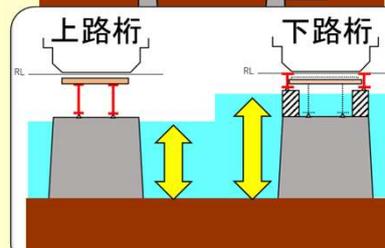
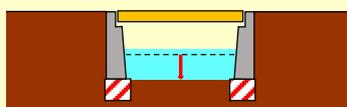


桁下空間増

沓座位置での桁扛上



河床掘削し基礎補強

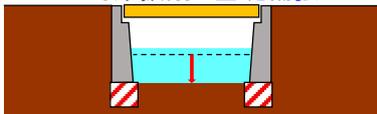


■ 鉄道交差部の河川改修工法選定表を整備するには、新しい河川空間確保の改修工法(桁扛上、河床掘削、桁種変更など)の研究開発が必要

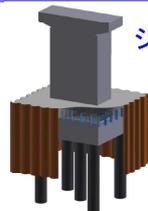
# 鉄道交差部の河川改修：河床掘削と基礎補強

災害対応  
今後

河床掘削し基礎補強



シートパイル補強工法



■ 鉄道交差部の河川改修事例集／工法選定表の整備により、鉄道事業者の選択の幅が広がることで、河川改修事業の進捗が促進



# さらなるレジリエンス向上のための取組み

災害対応  
今後

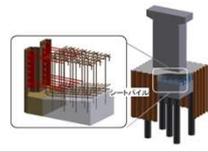
線状降水帯の発生、構造物の高さを超える高出水⇒被害規模の拡大

## 被災前

検査・診断技術  
⇒弱点箇所抽出



## 補強技術



## 復旧時

早期復旧技術  
⇒診断・補強



## 流域治水対応

河川改修事業  
⇒河川管理者との連携



- **被災前の対応** 流出物を考慮した河川橋梁の診断・補強技術、土砂流出や浸透による強度低下を考慮した河川沿いや谷埋めの盛土の診断・補強技術
- **復旧時の対応** 甚大な被害規模の河川橋梁、河川沿いや谷埋めの盛土の早期復旧のための診断・復旧技術
- **流域治水対応** 鉄道交差部の河川改修事例集／工法選定表の整備のほか、新しい河川空間確保の改修工法

■ 鉄道インフラのさらなるレジリエンス向上策となるソリューションを提供していく

Railway Technical Research Institute

33

## 講演内容

1. 鉄道構造物の現状と課題、研究開発の方向性
2. 鉄道構造物の災害対応一現状
  - 検査・診断技術
  - 補強技術
  - 早期復旧技術
  - 線状降水帯の発生に伴う災害に対する課題
3. 鉄道構造物の災害対応一今後
  - 流出物、土砂流出や浸透による強度低下に対応した診断・補強技術の取組み
  - 甚大な被害規模に対応した早期復旧技術の取組み
  - 流域治水に対応した取組み
4. 鉄道構造物の維持管理一検査・診断、デジタルメンテナンス

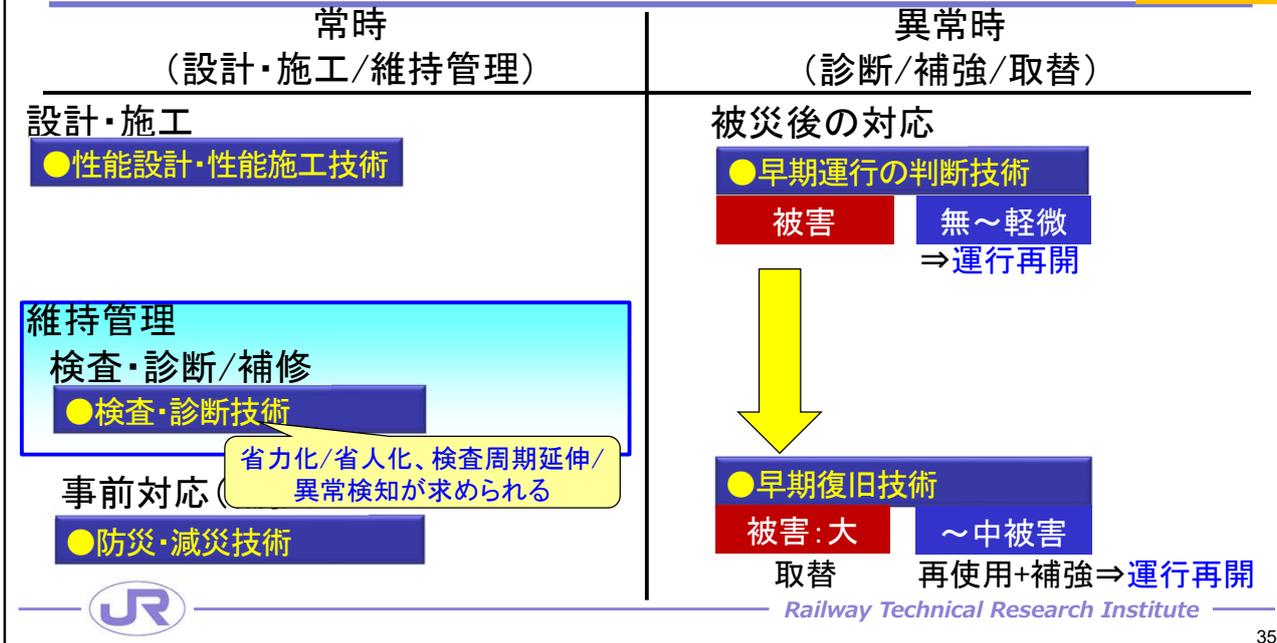


Railway Technical Research Institute

34

# 鉄道構造物のレジリエンス向上のための研究開発

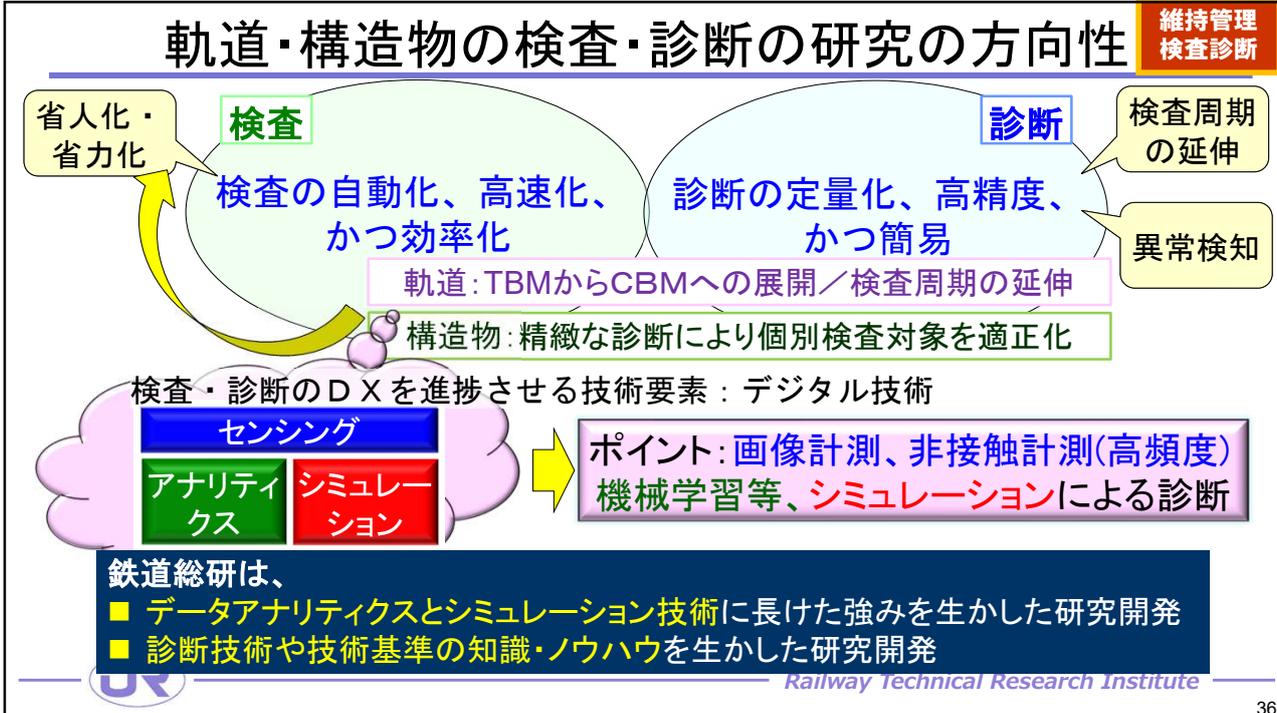
維持管理  
検査診断



35

# 軌道・構造物の検査・診断の研究の方向性

維持管理  
検査診断



36

# 鉄道構造物の検査・診断の研究事例

維持管理  
検査診断

**検査**

電子野帳システム

**検査**

3D画像構造物

目視検査

構造物の目視検査支援システム

**診断**

剥落箇所の推定

コンクリート片剥落予測支援システム

**診断**

慣性正矢  
軌道検測装置

加速度計

車上計測による  
共振橋りょうの抽出法

盛土

橋りょう

トンネル

**検査**

ビデオカメラによる長大橋りょうの振動計測システム

詳細モデル

レール変形

浮き

桁たわみ

簡易モデル  
⇒橋りょうへの影響推定

**診断** 車上計測による  
たわみ/あおり計測法

**検査・診断**

要注意箇所  
の表示

トンネル検査支援システム

ライセンサ  
カメラ

深層学習による  
ひび割れ検知

**検査** トンネル覆工  
のひび割れ検出システム



Railway Technical Research Institute

# 画像取得、3D画像作成、検査

維持管理  
検査診断

①画像の自動取得

現地

ウェアラブルカメラ

②SfM (Structure from Motion)

内業

3次元モデル生成

カメラ

③3次元モデル閲覧プログラム (検査)

複数の3次元モデルを並列表示 (視点同期)

時期①

時期②

任意の位置での形状比較

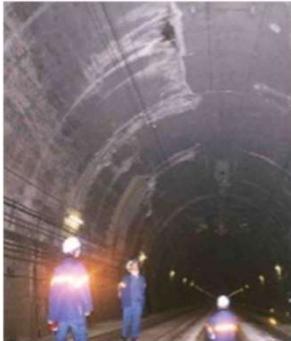
■ 目視検査支援システムにより検査精度向上、若手技術者の育成活用



Railway Technical Research Institute

# トンネル検査支援システム

維持管理  
検査診断



現地での目視検査・診断

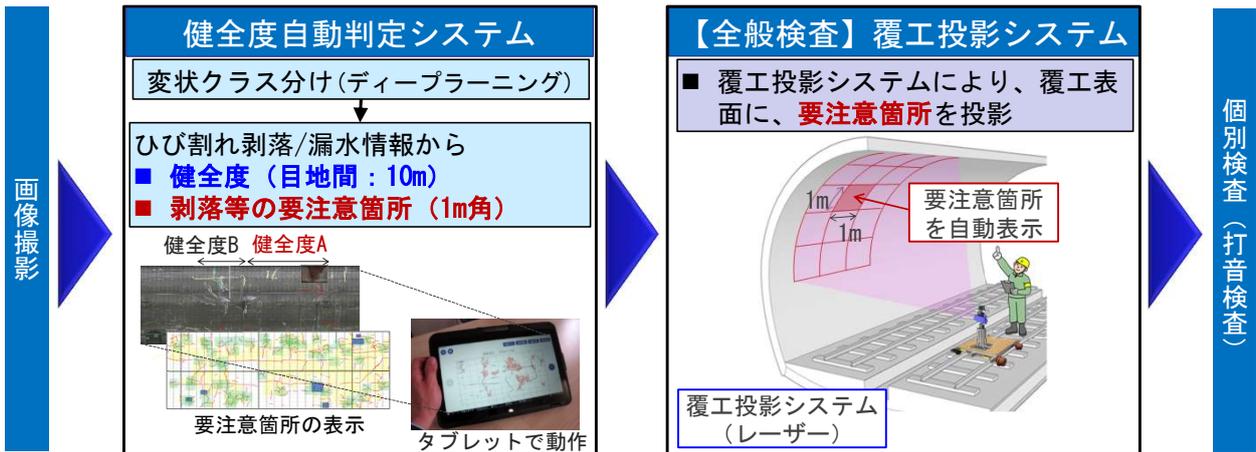
- 暗がりの中、遠方から目視検査・診断
- 対象構造物が大、ひび・損傷の位置特定が難  
⇒検査精度、時間、人を要する



Railway Technical Research Institute

# トンネル検査支援システム

維持管理  
検査診断



- 「健全度判定」「要注意箇所抽出」機能と「目視検査支援」機能
- 定量的診断(結果と位置)により個別検査対象削減⇒省力化・省人化

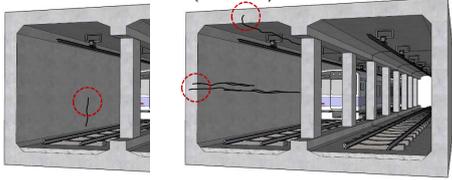


Railway Technical Research Institute

## 変状の抽出とクラス分け

程度：軽

程度：重



①施工時のひび割れ ②外力起源のひび割れ

程度：軽

程度：重

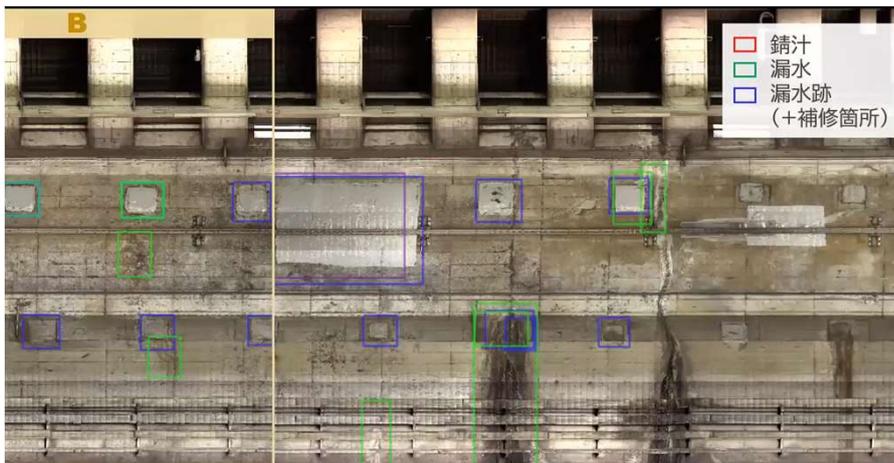


①漏水跡

②漏水(発生中)

③錆

## 健全度自動判定(目地間10m)と精度



### 健全度判定アルゴリズムの判定精度

		正答			
		A	B	C	S
自動判定	A	5	2	0	0
	B	0	32	2	0
	C	0	5	36	0
	S	0	0	3	0

(内訳)

■ 正しく判定：73事例

■ 安全側判定：4事例

■ 危険側判定：8事例

⇒90%の精度で  
実務上問題ない判定

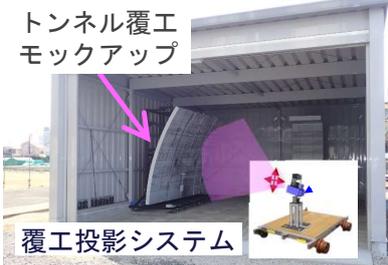
■ ひび割れ情報・漏水等の変状情報による健全度判定アルゴリズム

■ 教師用写真データの追加、検証中

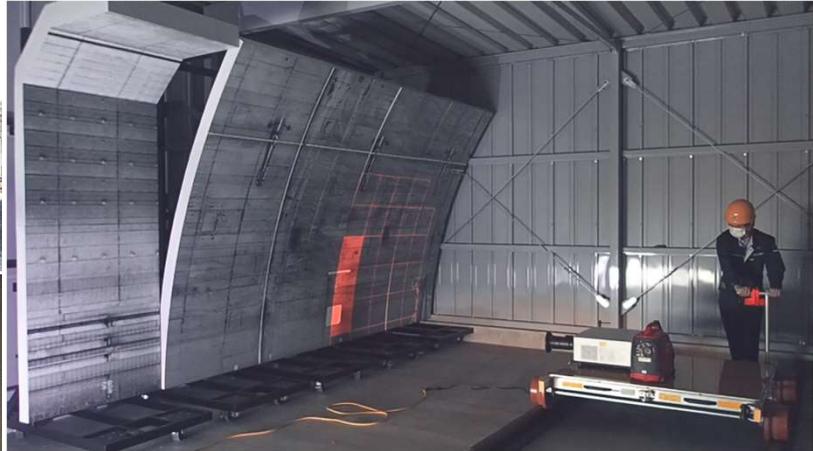
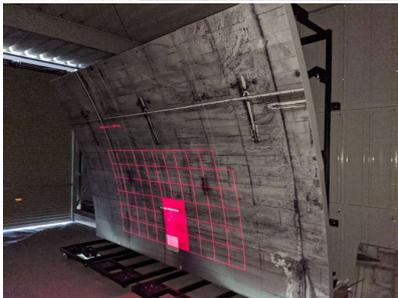
## 要注意箇所への覆工投影システム

維持管理  
検査診断

トンネル覆工  
モックアップ



覆工投影システム



- 要注意箇所を現地トンネル覆工に投影
- 全般検査支援(結果と位置の特定)⇒検査速度アップ



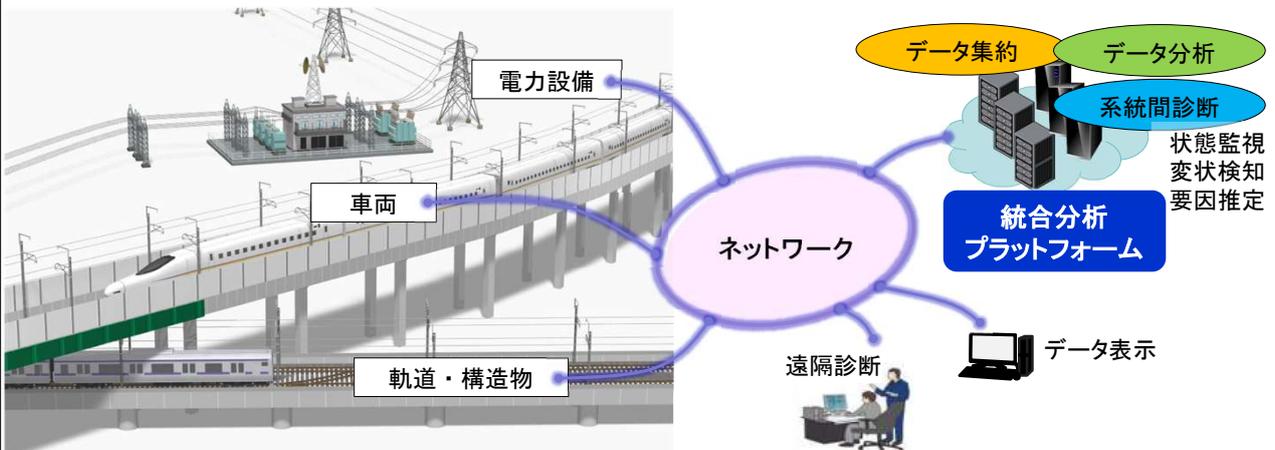
Railway Technical Research Institute

43

## 系統間連携による鉄道設備のメンテナンス

維持管理  
検査診断

- 従来、系統内の検査・診断をデジタル技術によって、省人化・省力化
- 統合分析プラットフォーム、ネットワークを介して、系統間連携による鉄道設備のメンテナンスのDXを実現⇒さらなる省人化・省力化を目指す



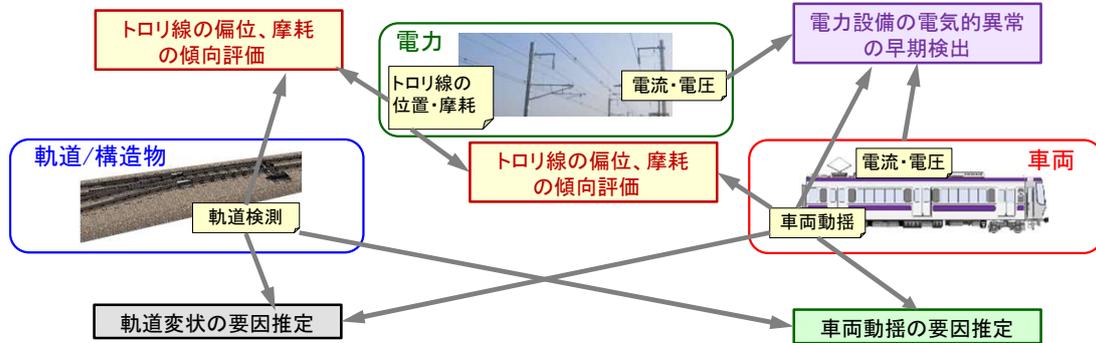
Railway Technical Research Institute

44

# 系統データ分析と統合分析プラットフォーム

維持管理  
検査診断

## ◆ 系統横断的なデータ分析



- 鉄道システムは車両・軌道/構造物・電力等からなる巨大・複合システム
- 設備変状・故障が他系統と相互に関係し、**要因は他系統の可能性も有する**  
⇒ 要因分析・推定、影響把握が容易  
⇒ 効果的な対策を実現

⇒ 統合分析プラットフォーム

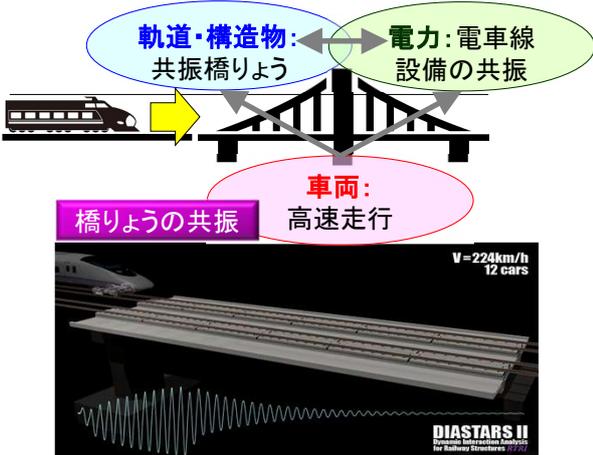


Railway Technical Research Institute

# 検測データによる共振橋りょうの抽出法

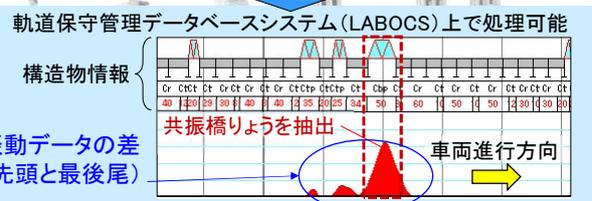
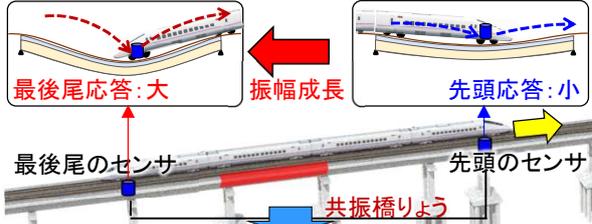
維持管理  
検査診断

鉄道車両の高速走行時



## 【開発手法】

共振橋りょう: 先頭と最後尾車両の振動の差が増幅



- 地上からの動的計測 ⇒ 共振橋りょうの抽出法により検査・診断の省力化・省人化
- (相互に関係する変状・異常) 系統間のデータ連携 ⇒ 要因推定、対策が容易な例



Railway Technical Research Institute

# 前方画像による設備等の概要情報

維持管理  
検査診断

平面動画

列車動揺

前方動画+設備抽出

マップ

GNSS位置情報

列車位置

軌道・構造物・電力設備の列車巡視の代替になりうる

- 統合分析プラットフォームのフロント画面として活用
- 各種情報（前方・平面動画、列車動揺、設備情報、map）を統合した鉄道版ビュとして開発中

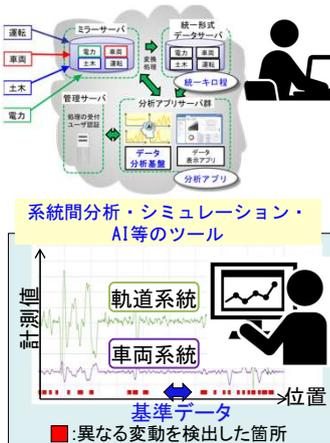


Railway Technical Research Institute

# デジタルメンテナンス：システム連携/車上計測

維持管理  
検査診断

## 統合分析プラットフォーム



## 車上計測データ

電車線設備

データ分析

予測

シミュレーション

認知

判断

AI等による自動判定

軌道・構造物

## 携帯端末目視検査/現地試験によるデータ

構造物用電子野帳

電子野帳システム

構造物の目視検査支援システム

トンネル検査支援システム

コンクリート片剥落予測支援システム

軌道用電子野帳



Railway Technical Research Institute

- 系統内の検査・診断をデジタル技術によって、省人化・省力化。
- 統合分析プラットフォームにより、異なる系統間の相互に関係する変状の検査・診断(現況診断、将来診断、主要因の推定)から、対策に繋がる。
- 他系統の技術者や研究者が、いつでも、簡単に、系統を超えた変状課題の解決⇒真の鉄道構造物のメンテナンスのDXIに達する。
- 鉄道構造物のレジリエンス向上(常時/異常時の対応)
  - ✓ 設計・維持管理
  - ✓ (被災前の)事前対応(診断/補強)
  - ✓ (被災後の)事後対応(診断/補強)



## 講演内容

1. 鉄道構造物の現状と課題、研究開発の方向性
2. 鉄道構造物の災害対応—現状
  - 検査・診断技術
  - 補強技術
  - 早期復旧技術
  - 線状降水帯の発生に伴う災害に対する課題
3. 鉄道構造物の災害対応—今後
  - 流出物、土砂流出や浸透による強度低下に対応した診断・補強技術の取組み
  - 甚大な被害規模に対応した早期復旧技術の取組み
  - 流域治水に対応した取組み
4. 鉄道構造物の維持管理—検査・診断、デジタルメンテナンス



鉄道構造物のレジリエンス向上  
—被災前(維持管理)と復旧時の対応の取組み—

鉄道総合技術研究所

神田 政幸



Railway Technical Research Institute

51

# RRR-Nail

(スリーアール・ネイル) について①

(ラディッシュアンカー・ロータスアンカー)

RRR工法協会 スリーアールネイル部会  
ライト工業株式会社 別府正顕

# まず、RRR（スリーアール）工法とは？

- ・ **RRRとは**、 “Reinforced-soil Railway/Road structures with Rigid facing”（剛壁面を有する補強土からなる鉄道・道路構造物）の略称です。
- ・ (公財)鉄道総合技術研究所と東京大学(当時)龍岡文夫教授との共同開発です。
- ・ 一般の盛土・擁壁や海岸・貯水池護岸および橋台・橋脚などにも広く用いられています。
- ・ RRR工法には、現在、4つの工法があります。
  - ①RRR-A工法：補強土橋台・橋梁工法
  - ②RRR-B工法：盛土補強土擁壁工法
  - ③RRR-C工法：切土補強土擁壁工法
  - ④RRR-D工法：水際防災補強盛土工法

# RRR工法の種類

工法名	構造物の種類		略称	
RRR-A工法	補強土橋台橋梁工法	補強土耐震性橋台	① RRR 橋台	
		補強土併用一体橋梁	補強盛土一体橋梁	② GRS 一体橋梁
			既設盛土一体化橋梁	③ NRS 一体化橋梁
RRR-B工法	盛土補強土擁壁工法	剛壁面盛土補強土壁	④ RRR 盛土擁壁	
RRR-C工法	切土補強土擁壁工法	剛壁面切土補強土壁	⑤ RRR 切土擁壁	
RRR-D工法	水際防災補強盛土工法	補強土併用一体堤防	⑥ RRR 防潮堤	
関連工法	補強土ボックスカルバート工法	補強土併用ボックスカルバート	⑦ GRS 一体ボックスカルバート	
	トンネル坑門補強土工法	補強土併用トンネル坑門壁	⑧ RRR トンネル坑門工	



RRR-A工法  
(A: Abutments)

RRR-C工法  
(C: Cut)



『RRR』：一般的には『GRS』

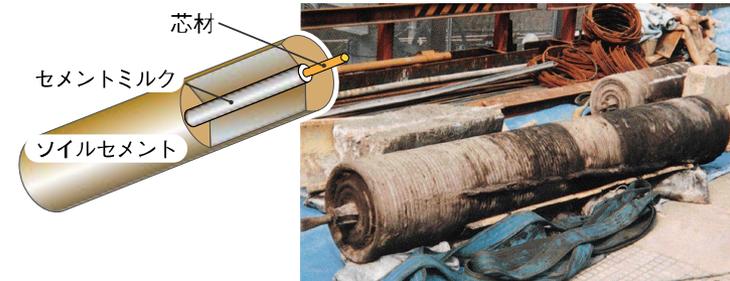
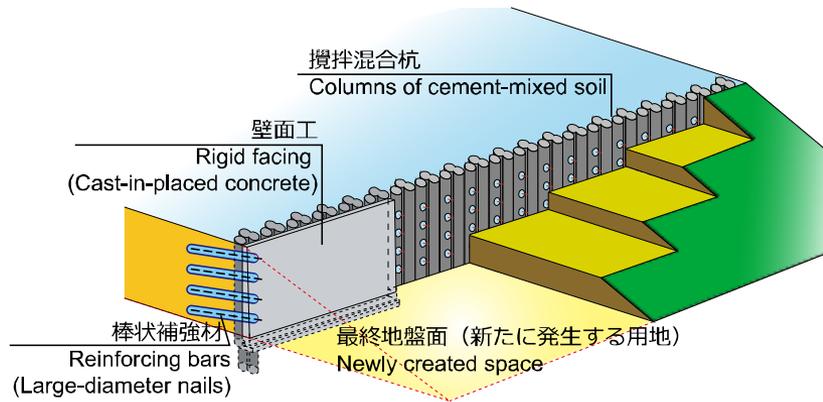
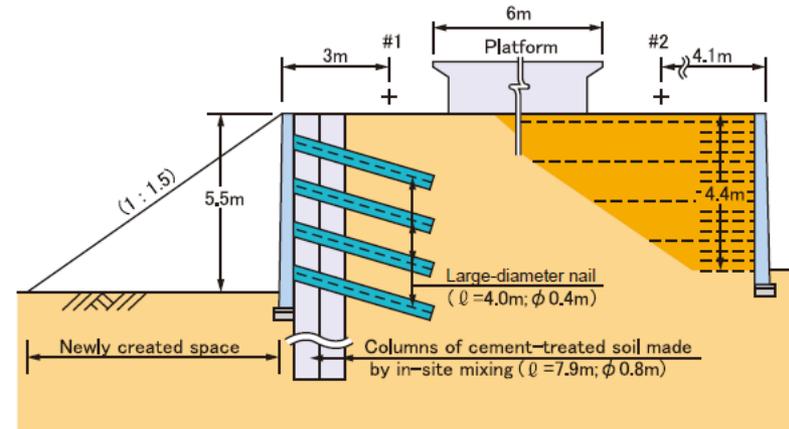
RRR-D工法  
(D: Disaster)

RRR-B工法  
(B: Bank)

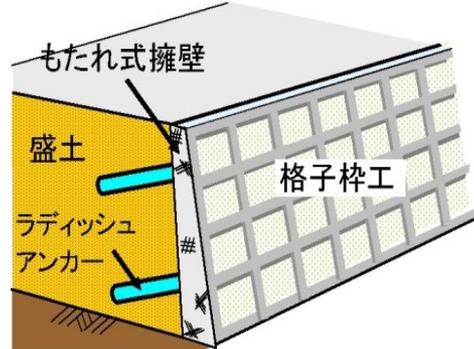


# RRR-C 工法の概要

・中径～大径の補強体と剛な壁面工を用いて既設盛土・自然斜面を安定に急勾配化する切土補強土擁壁工法です。また、既設土構造物の耐震対策にも用いられています。



補強材の構成 (大径補強体 (直径40cm))

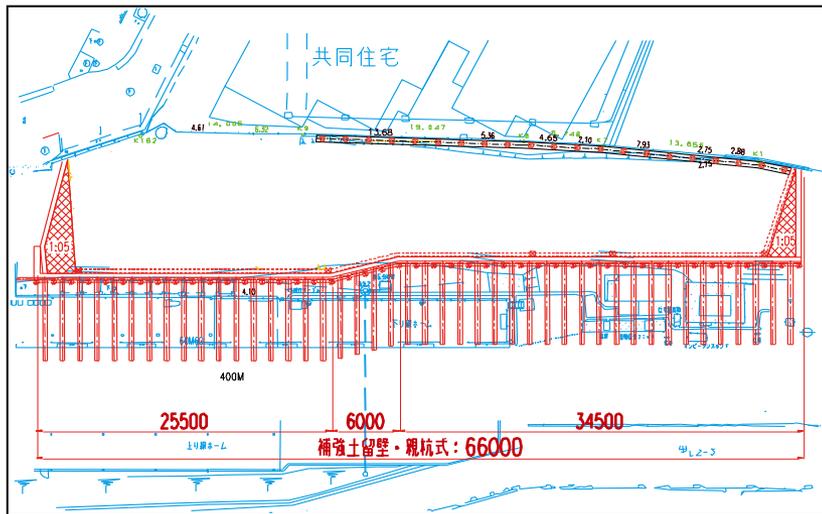
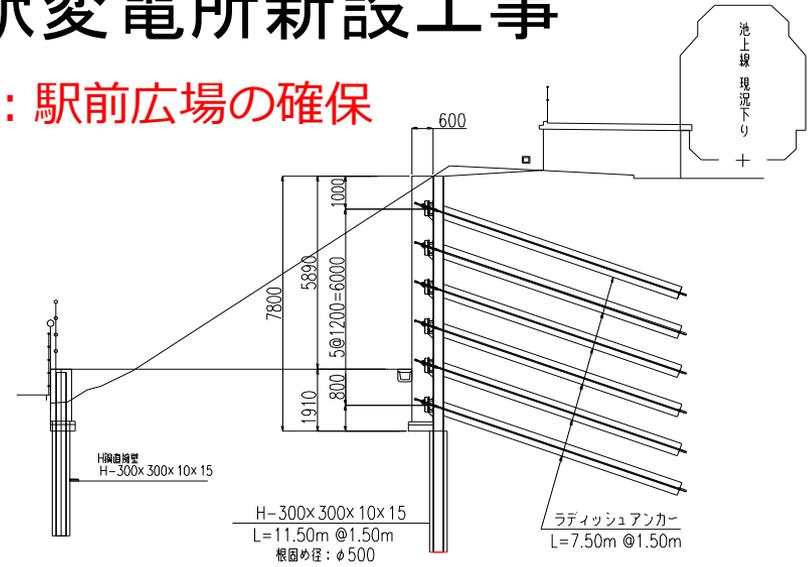


施工状況

# RRR - C工法の主な施工実績

## 東急池上線洗足池駅変電所新設工事

目的：駅前広場の確保



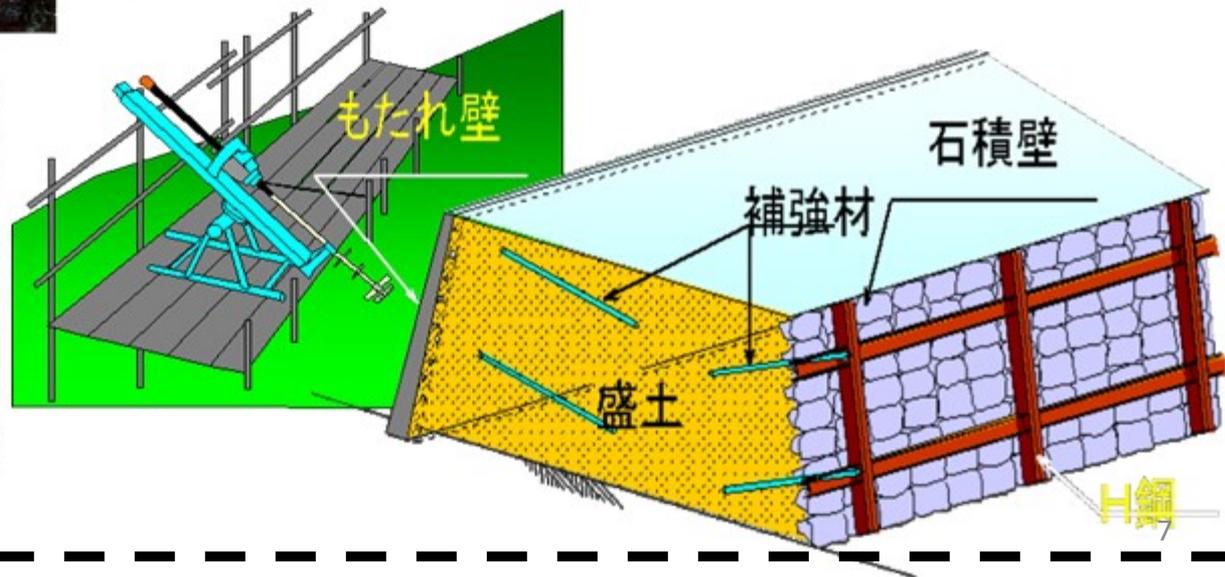
壁面コンクリート完成状況



- 兵庫県南部地震では、もたれ壁では転倒破壊、石積み壁では壁体破壊が多数見受けられた。



● 補強材を配置し、補強土壁に構造変更する方法が有力！



## 石積み壁の耐震補強例



施工前



完成

(RC壁：化粧型枠)



施工時



# 石積み壁の耐震補強例



施工前



完成

©2023 Google

# RRR - C工法の主な施工実績



吹付法枠による  
表面処理

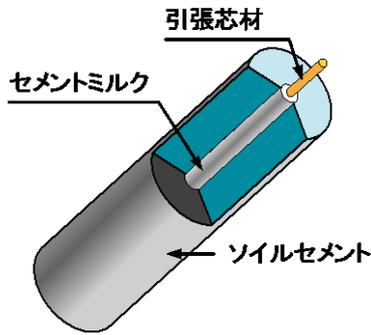


中径ラディッシュアンカーによる  
降雨対策例

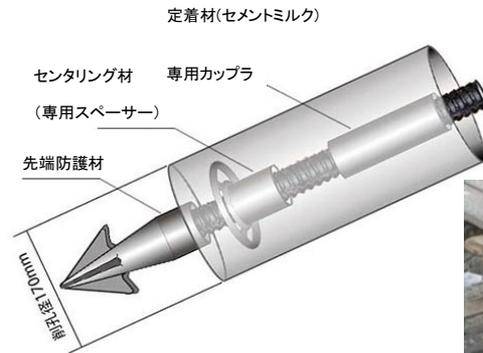


- 地山補強土工法に用いる棒状補強材の一種
- 中径～大径（標準径170～400mm程度）
- ラディッシュアンカー、キャロットアンカー、および、ロータスアンカーの総称

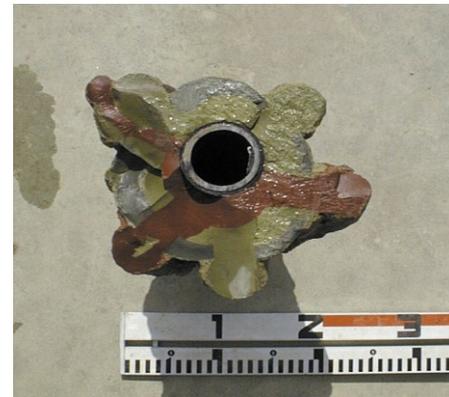
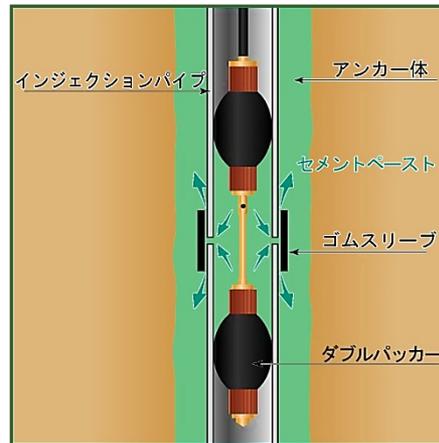
# RRR-Nail (スリーアール・ネイル) の種類



(a) ラディッシュアンカー



(b) キャロットアンカー

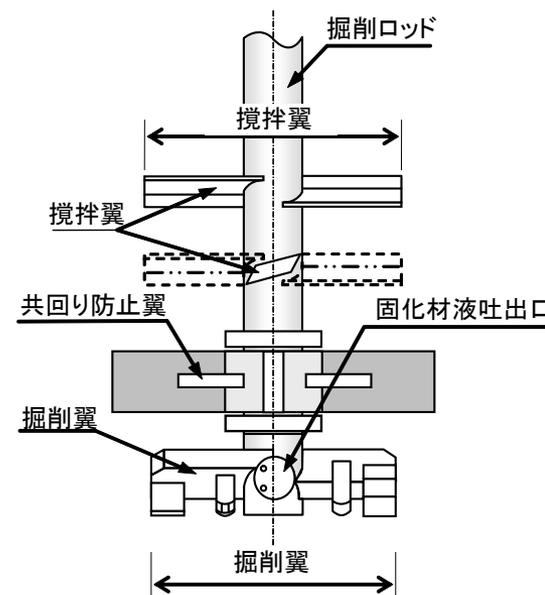


(c) ロータスアンカー

# RRR-Nail (スリーアール・ネイル) ラディッシュアンカー工法

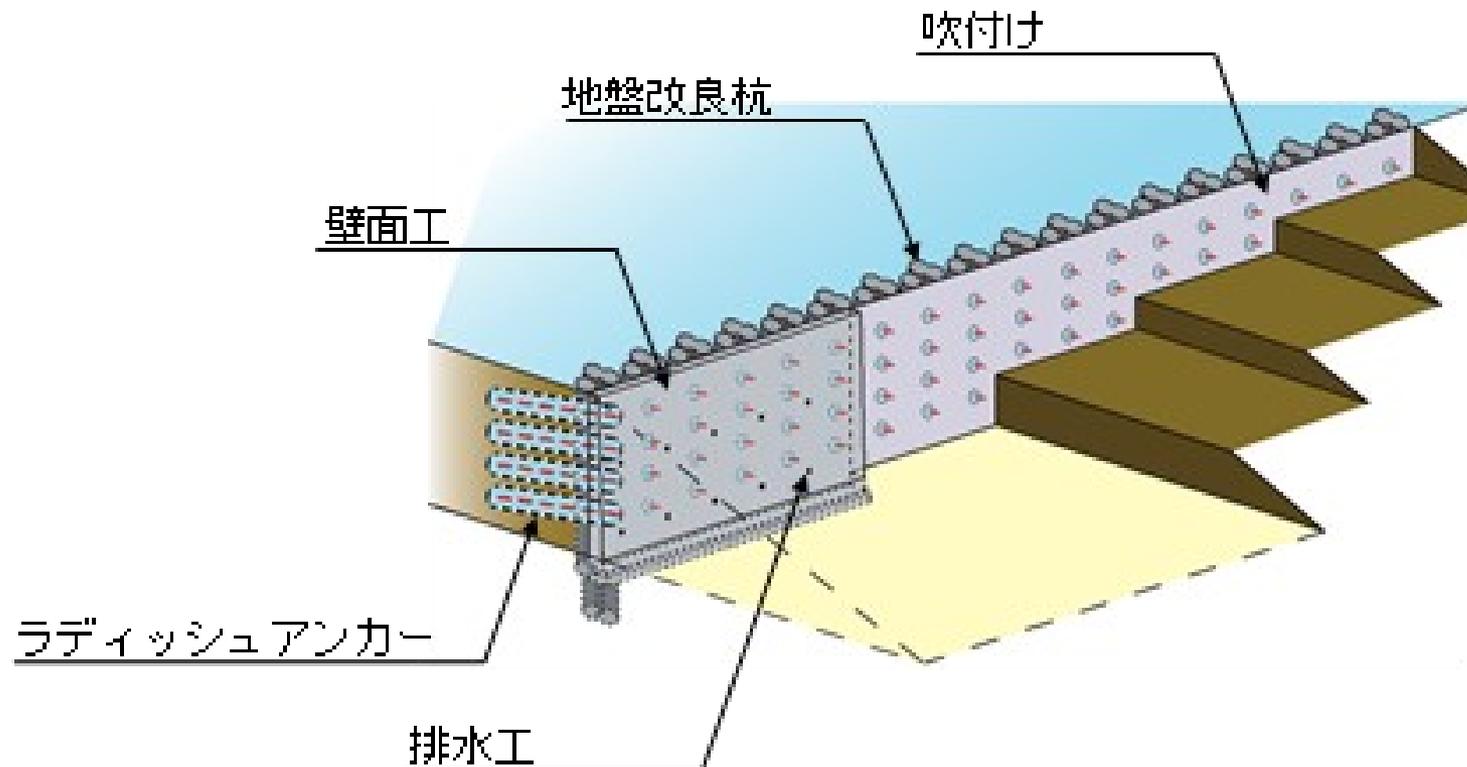
# ラディッシュアンカー（工法）とは？

- 原位置攪拌混合方式による棒状補強材の一種。
- 標準径である大径400mmと、狭隘地での施工を想定した中径200mmがあります。
- 従来工法（鉄筋挿入工法）と比べて径が大きいため、緩い盛土層でも十分な摩擦力が期待でき、アンカー長を短くすることができます。



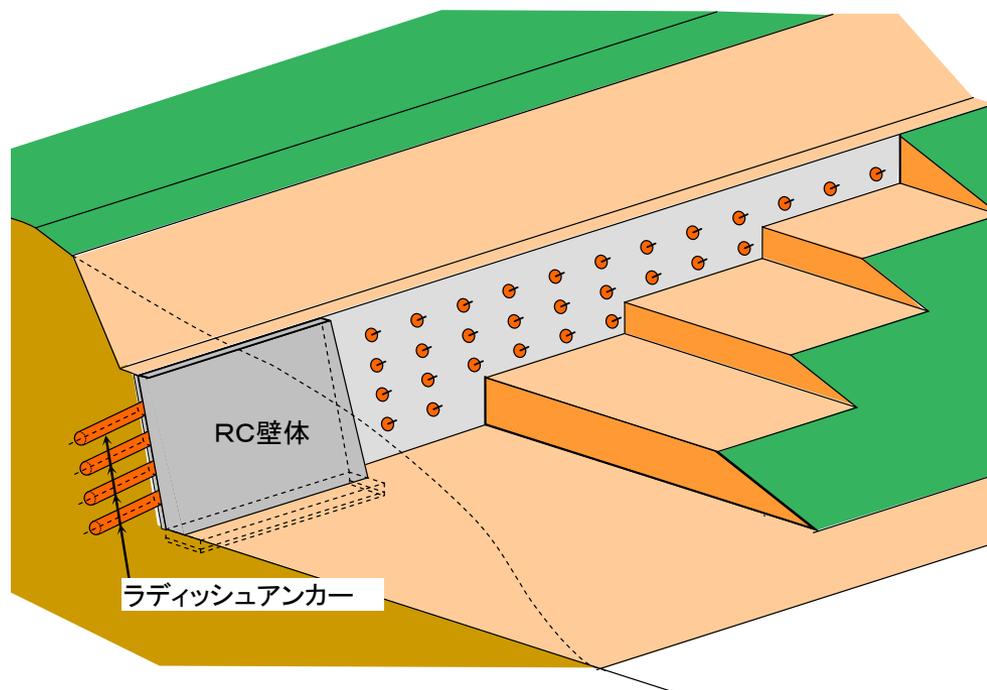
## ①盛土のり面急勾配化工

既設の鉄道盛土・道路盛土に対し、ラディッシュアンカーと剛壁面（RC壁）によりのり面を急勾配化し、用地の有効利用を図る工法です。



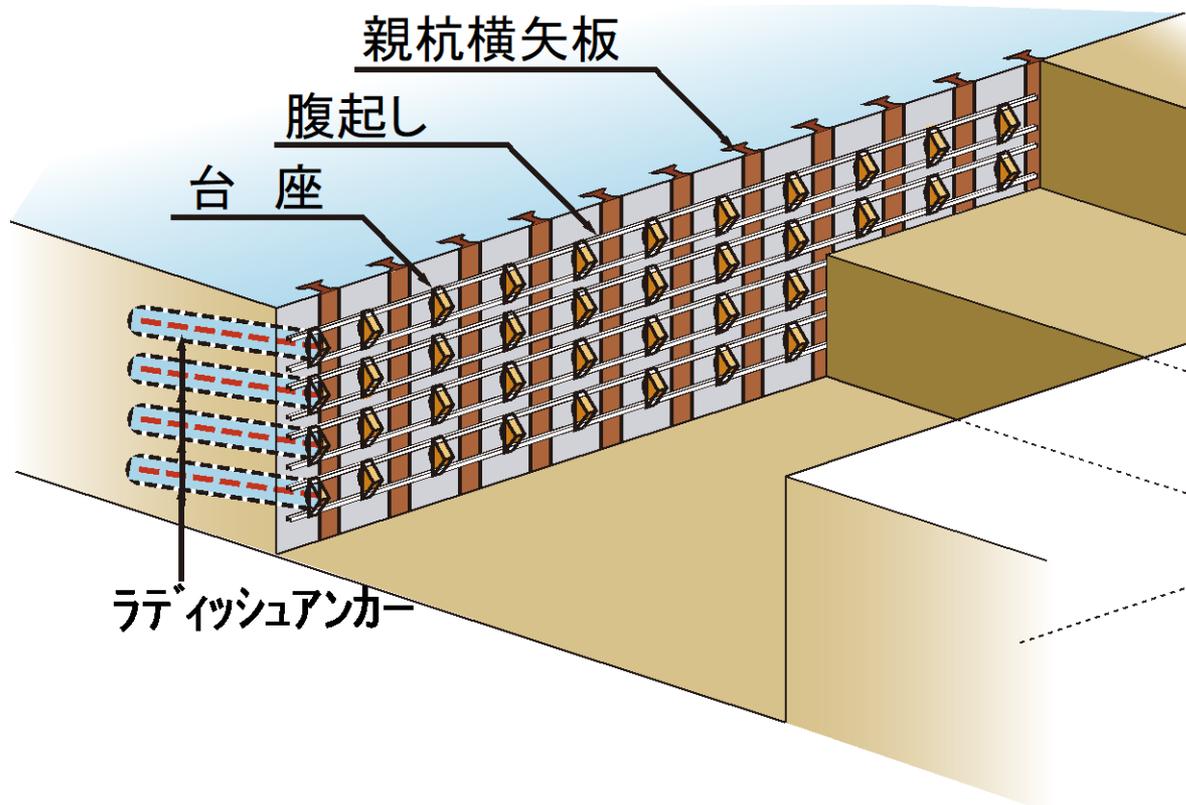
## ②切土補強土壁工

従来の裏込め栗石を用いた切土もたれ式擁壁の問題点を解消するために旧日本鉄道建設公団により開発された工法であり、ラディッシュアンカーは非自立性地山を対象とする「地山補強式土留め壁」に用いられます。



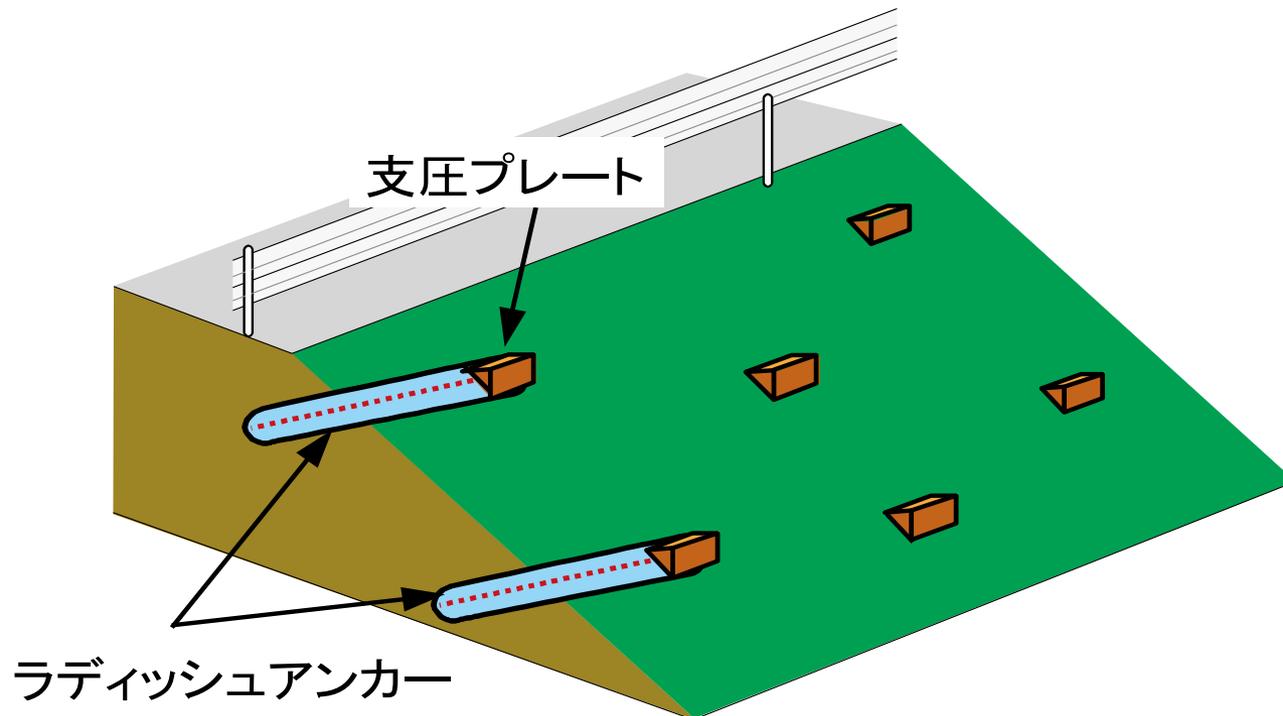
## ③補強土式掘削土留め工

親杭横矢板や鋼矢板などの仮土留め工の支保工として、グラウンドアンカーの代わりにラディッシュアンカーを用いる工法です。



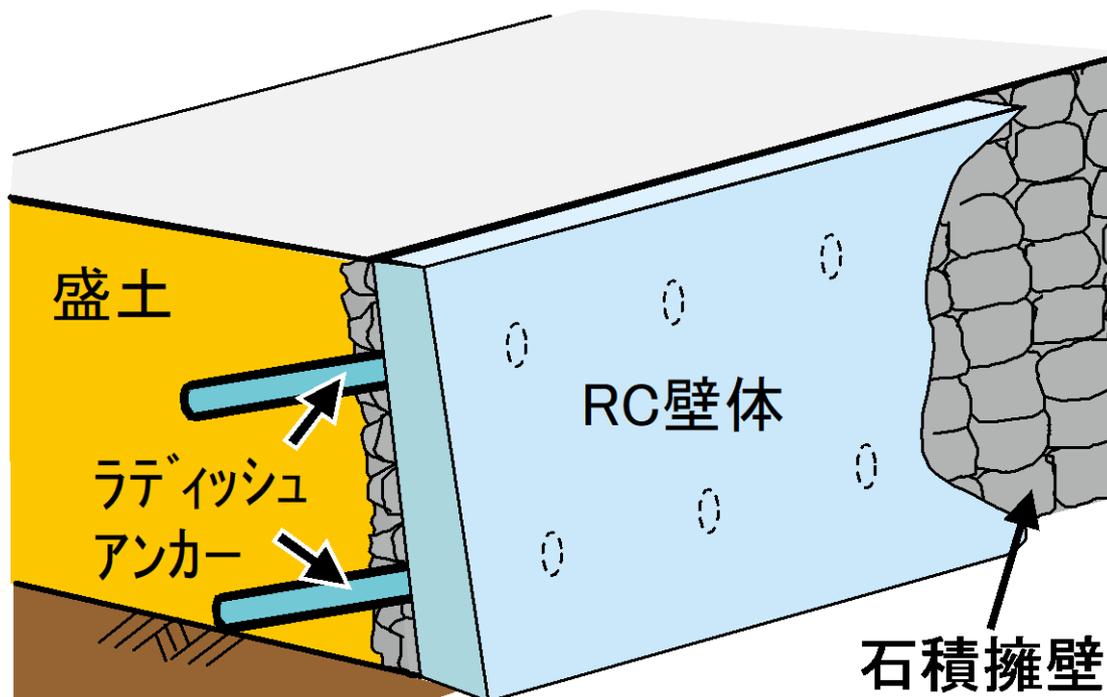
## ④ 斜面補強工

自然斜面、切土のり面、盛土のり面を対象として、掘削を伴わずにラディッシュアンカーと必要に応じたのり面工（支圧プレートや格子砕工など）を用いて、地震時や降雨時の安定性などを高める工法です。



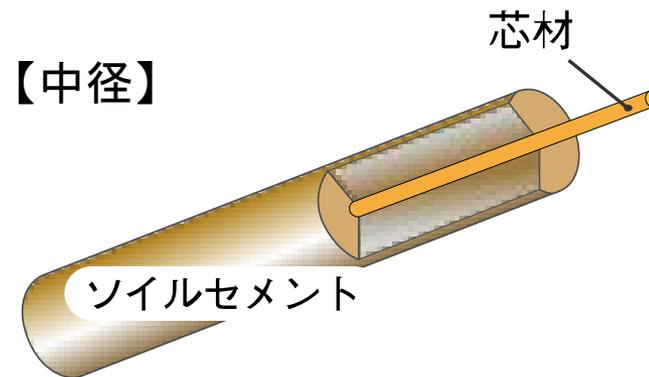
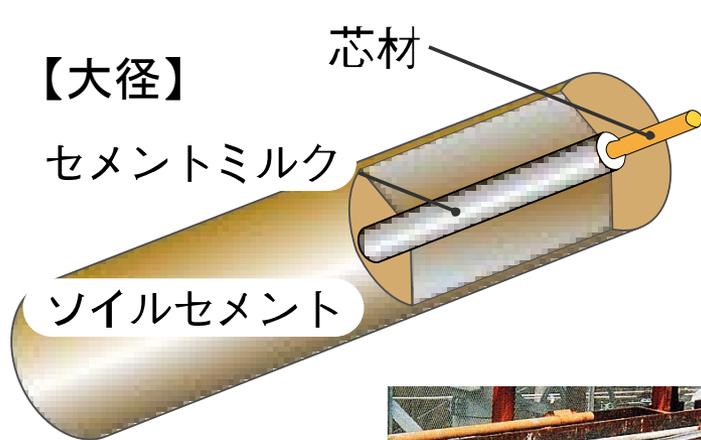
## ⑤ 既設擁壁補強工

既設の石積擁壁やもたれ式擁壁などに対し、ラディッシュアンカーとRC壁体を用いて耐震性の向上を図る工法です。



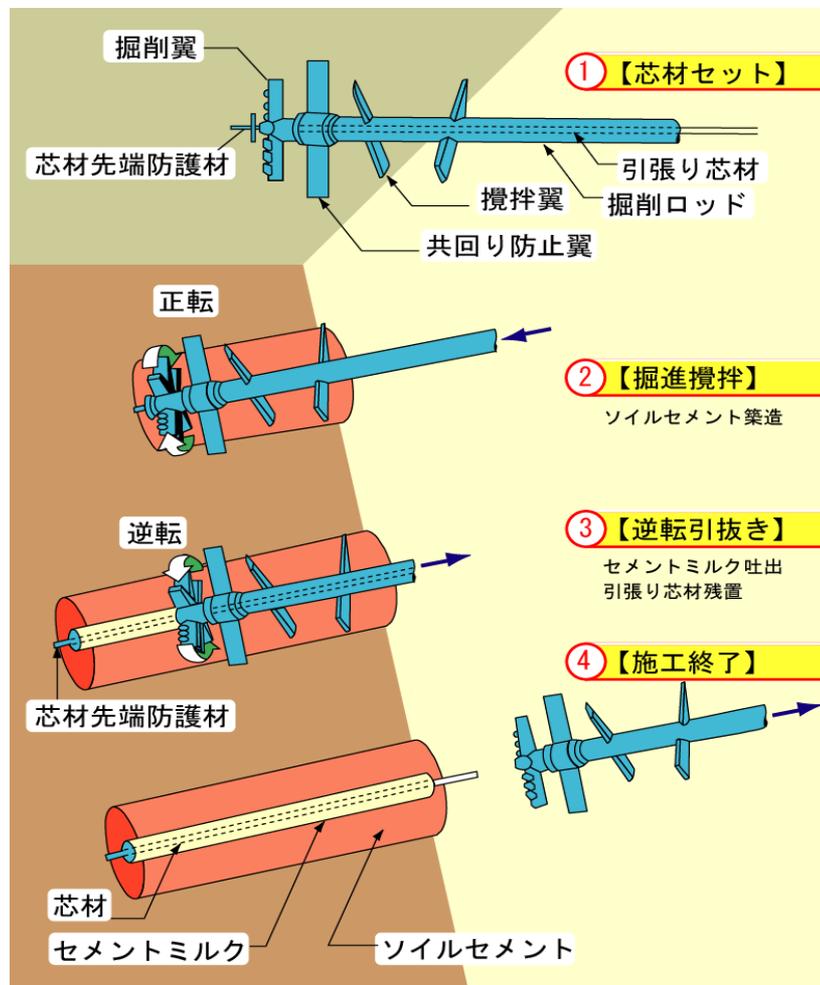
# ラディッシュアンカーの構造

- 大径 (400mm)  
芯材-セメントミルク-ソイルセメントの3層構造
- 中径 (200mm)  
芯材-ソイルセメントの2層構造

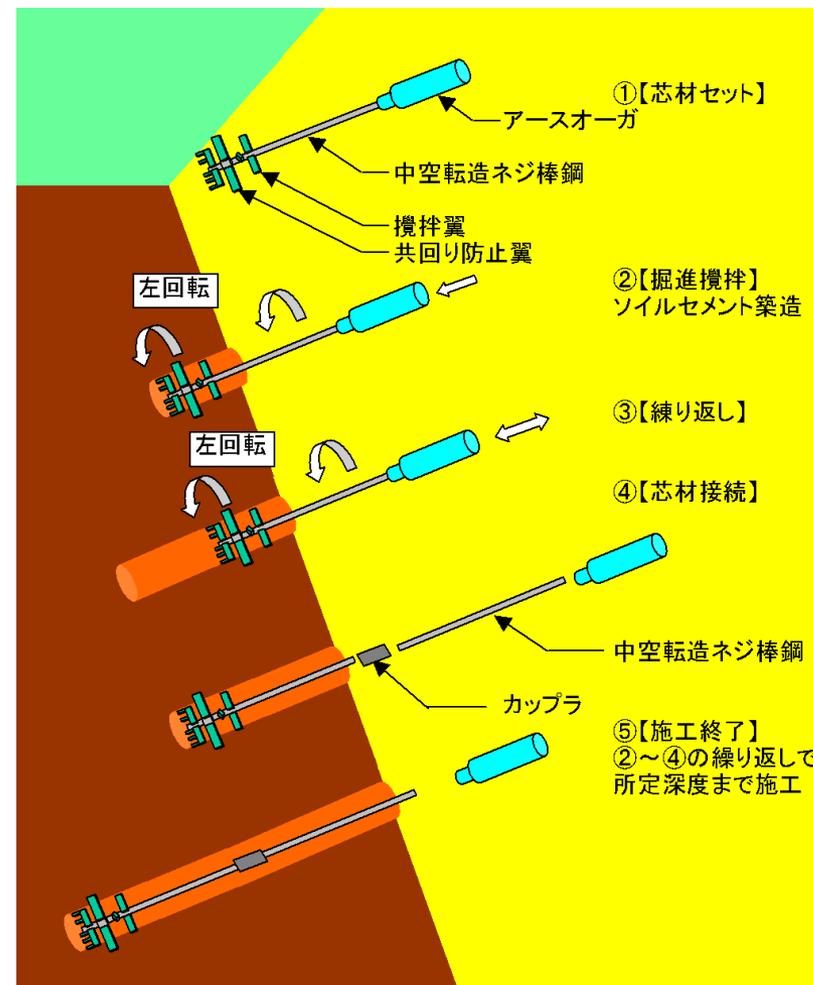


# ラディッシュアンカーの施工方法

## ・大径ラディッシュ

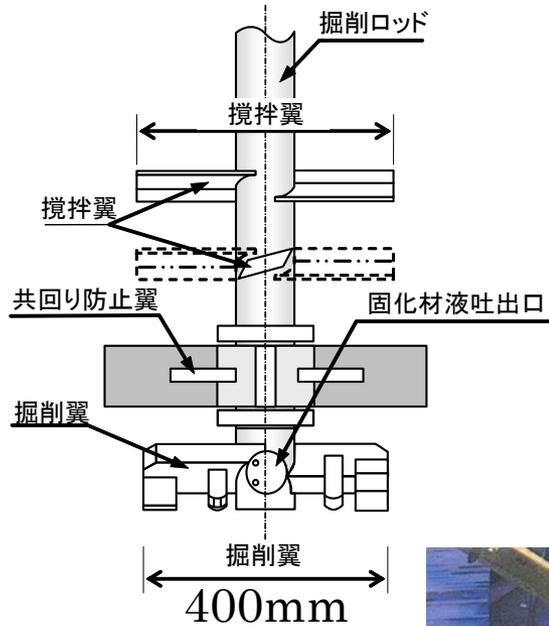


## ・中径ラディッシュ

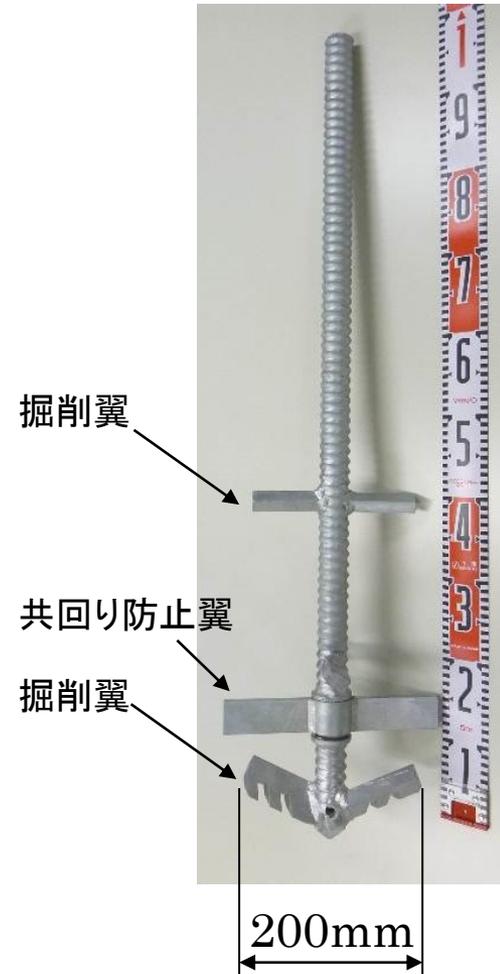


# ラディッシュアンカーの攪拌混合装置

## ・大径ラディッシュ



## ・中径ラディッシュ



# ラディッシュアンカーの施工機械



アーム型(大径ラディッシュ)



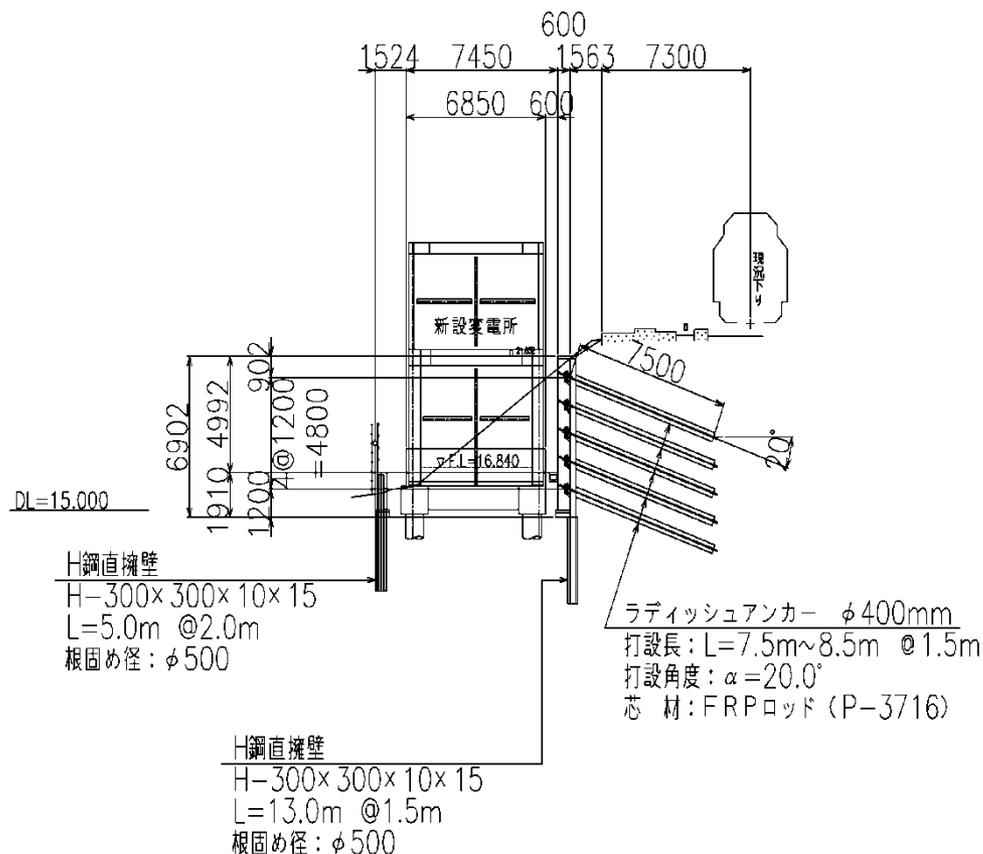
アンカー型(大径ラディッシュ)



インバーターチゼル型(中径ラディッシュ)

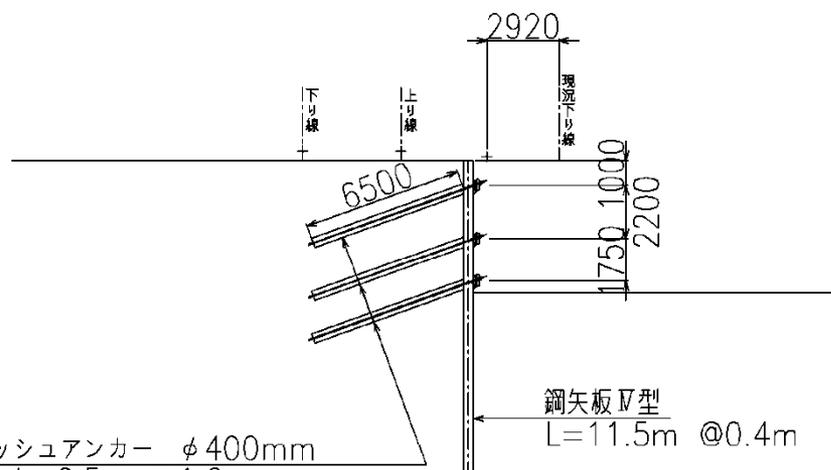
# 施工事例①：盛土のり面急勾配化工

- 施工目的：電所新設工事に伴う盛土のり面急勾配化
- 施工場所：東京都
- 施工時期：2006年（平成18年）



# 施工事例②：掘削土留め工

- 施工目的：高架橋新設工事に伴う仮土留め
- 施工場所：大阪府
- 施工時期：2012年（平成24年）



ラディッシュアンカー φ400mm

打設長：L=6.5m @1.2m

打設角度： $\alpha = 20.0^\circ$

芯材：ネジ節異形棒鋼（SD345 D35）

鋼矢板Ⅶ型  
L=11.5m @0.4m

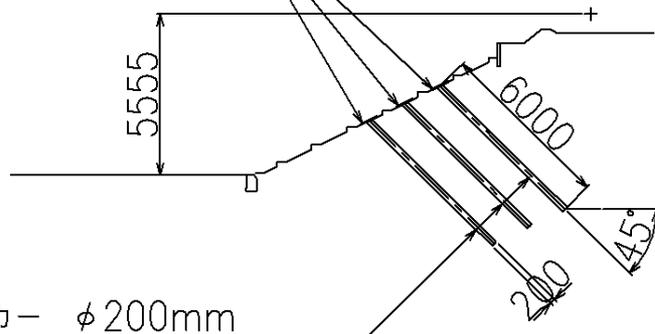


# 施工事例③：斜面補強工

- 施工目的：災害復旧対策
- 施工場所：宮城県
- 施工時期：2011年（平成23年）

受圧板

グリーンパネルミドルサイズ  
647×647



ラディッシュアンカー φ200mm

打設長：L=6.0m @ 1.3m（千鳥配置）

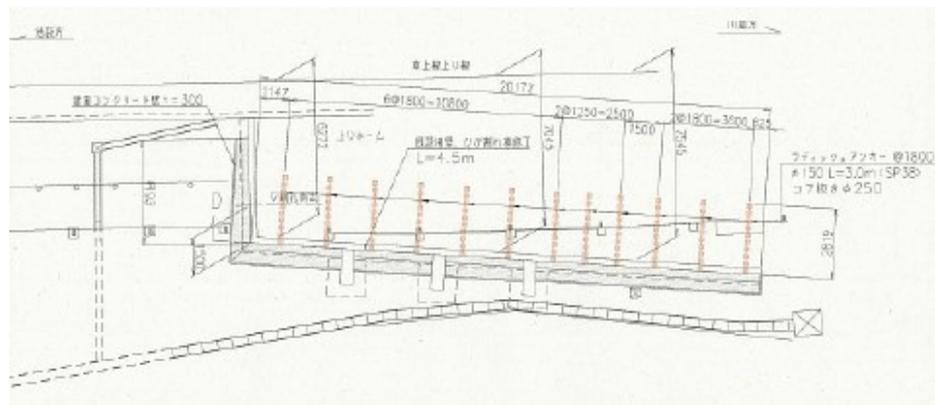
打設角度： $\alpha = 45.0^\circ$

芯材：中空転造ネジ棒鋼 SP38



# 施工事例④：既設擁壁補強工

- 施工目的：既設構造物（擁壁）の耐震対策
- 施工場所：東京都
- 施工時期：2010年（平成22年）



# RRR-nail (スリーアール・ネイル) ロータスアンカー工法

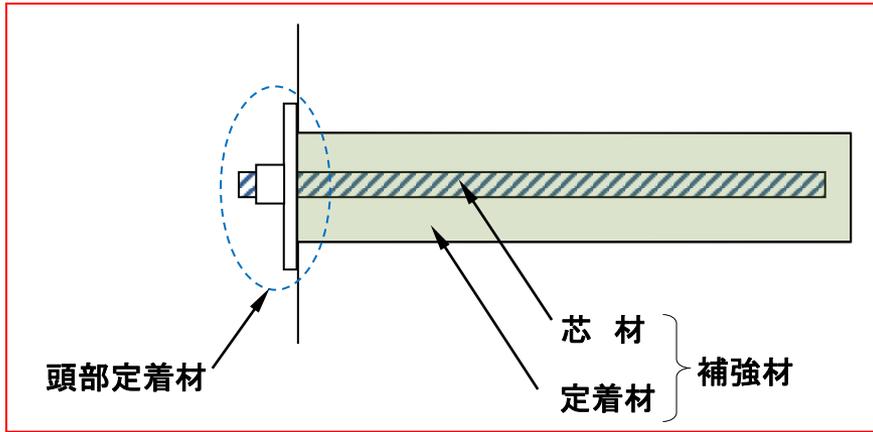
# ロータスアンカー工法の概要

## ロータスアンカーとは

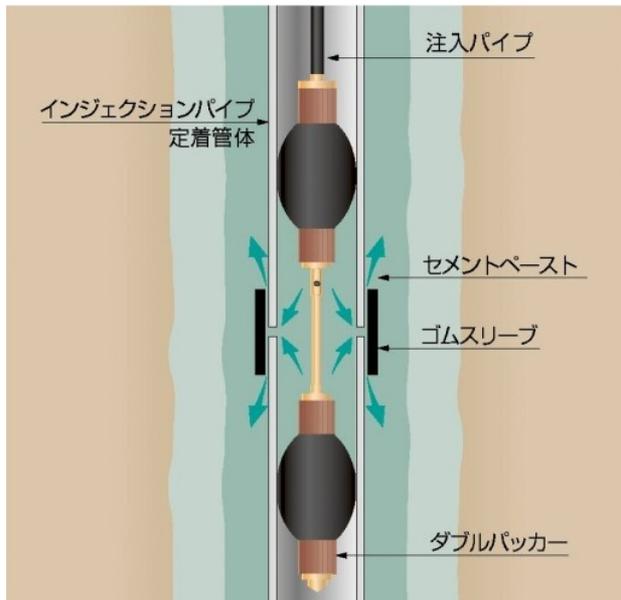
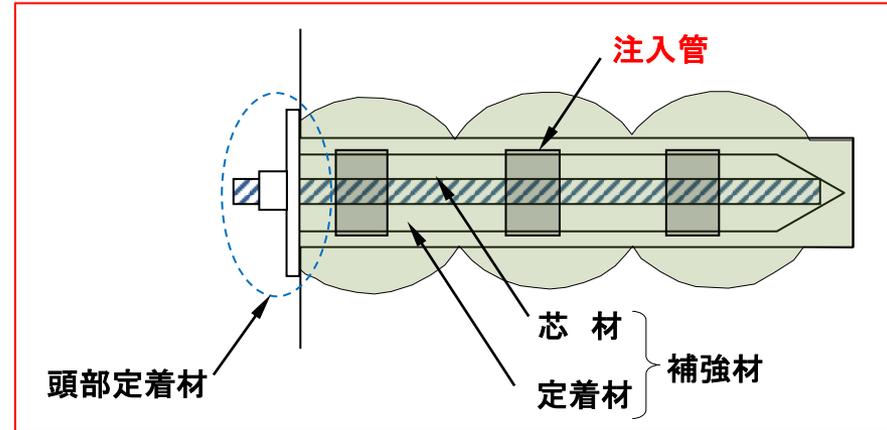
- *RRR-Nail* (スリーアール・ネイル) の一種
- 繰り返し注入 (加圧注入) により、削孔径よりも大きな補強体を造成する
- 通常の注入方法に対して1.5~2.0倍の周面摩擦抵抗が得られる

# 補強体の造成方法

## 一般的な地山補強土工法



## ロータスアンカー工法

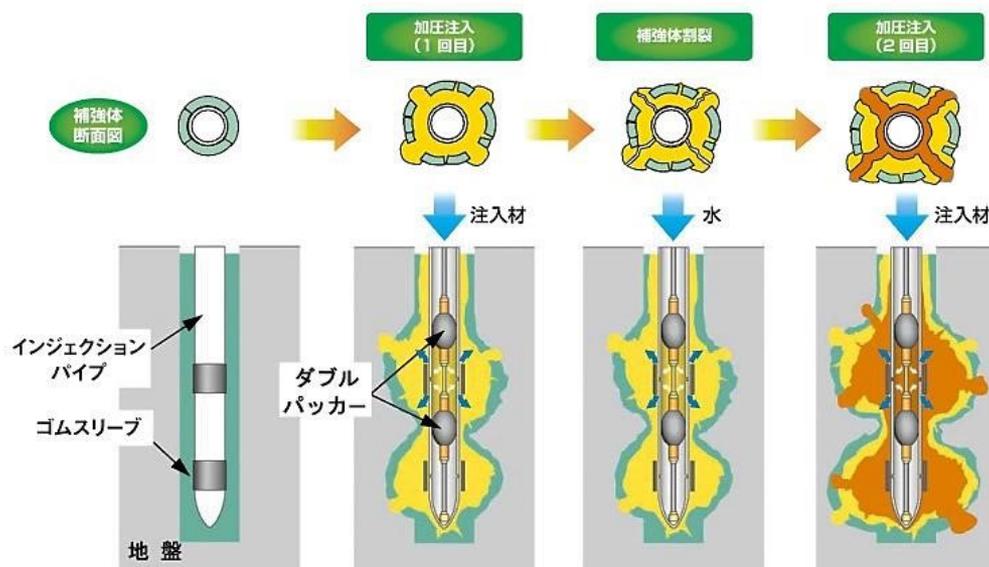


二重管ダブルパッカー注入のメカニズム

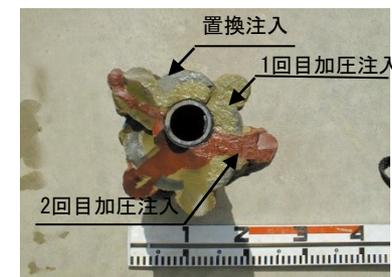


加圧注入状況（清水にて噴射）<sup>30</sup>

# 補強体径増加の概念



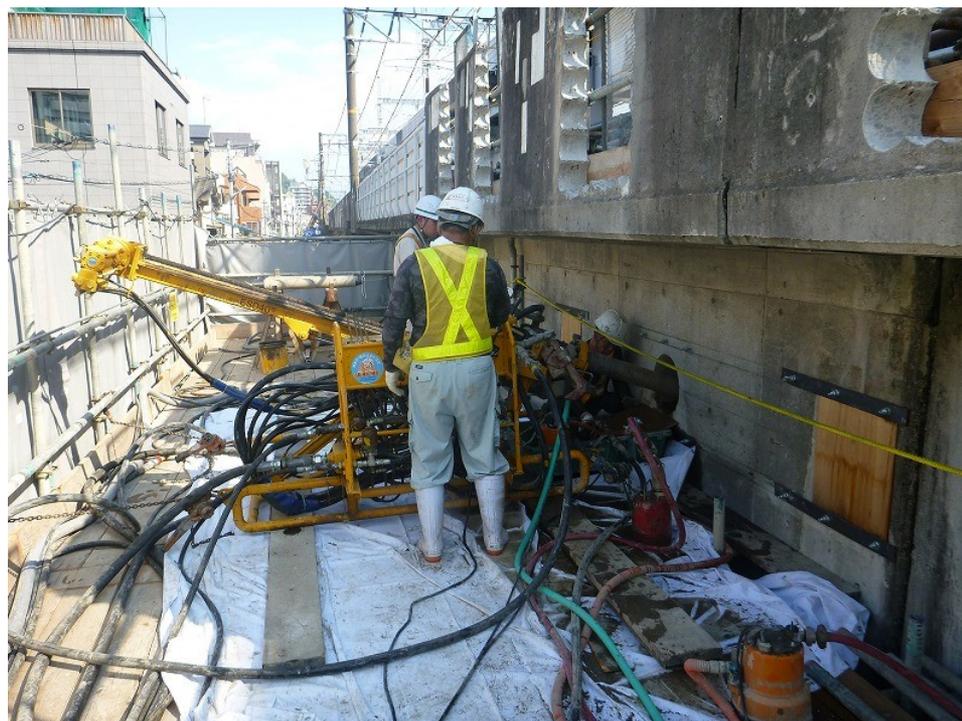
補強体の造成(概念図)



模擬地盤で造成した補強体断面

通常の注入圧力 (0.1~0.5MPa) に対して  
 1.5~2.0MPaを上限として注入  
 →球根状の補強体が形成され引抜き抵抗力が  
 1.5~2.0倍に向上

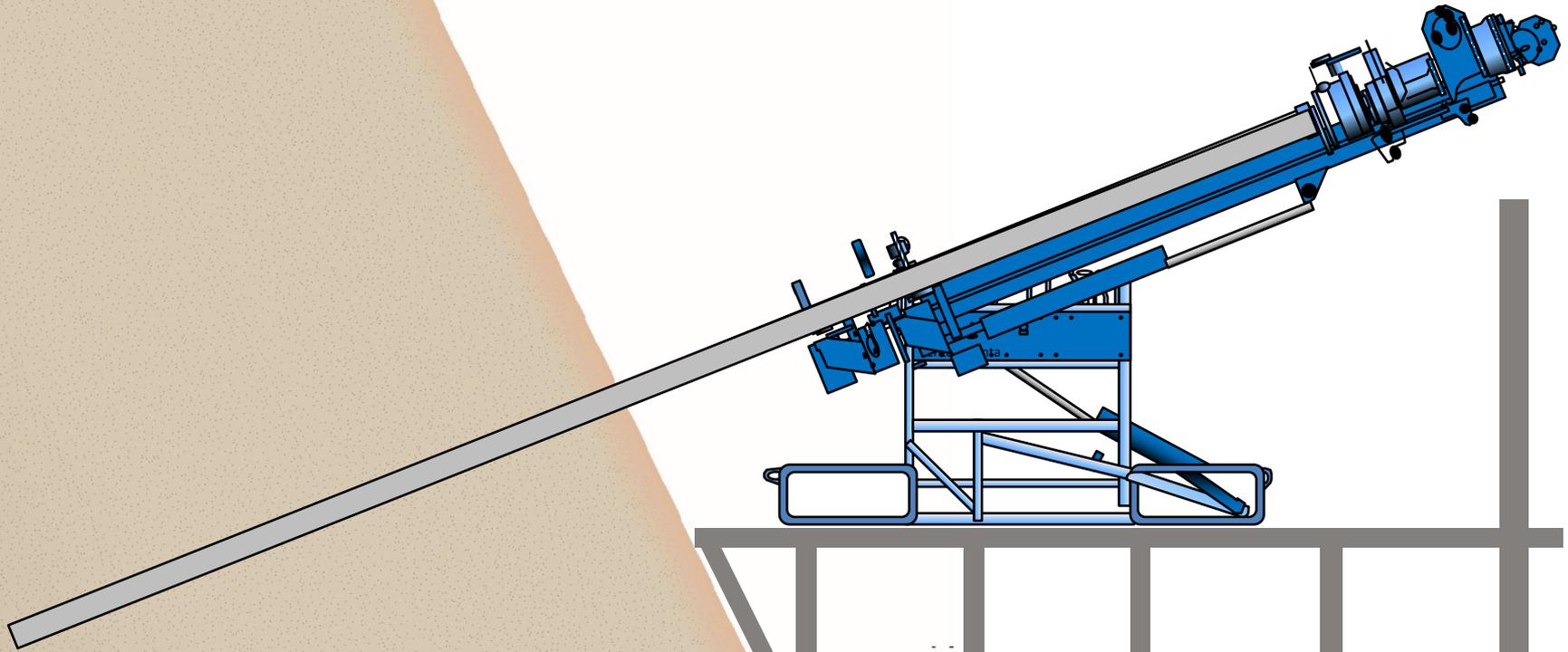
## 打撃機能を有した軽量・小型の削孔機を使用



型式	質量	全長	全幅	全高	型式	回転トルク	引抜き力	削孔能力
ESD40	490kg	2,720 mm	1,270 mm	1,100 mm	ESD40	2.4kN・m	14.2kN	20.0m

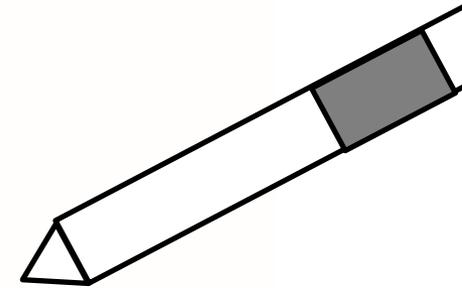
①

# 削孔



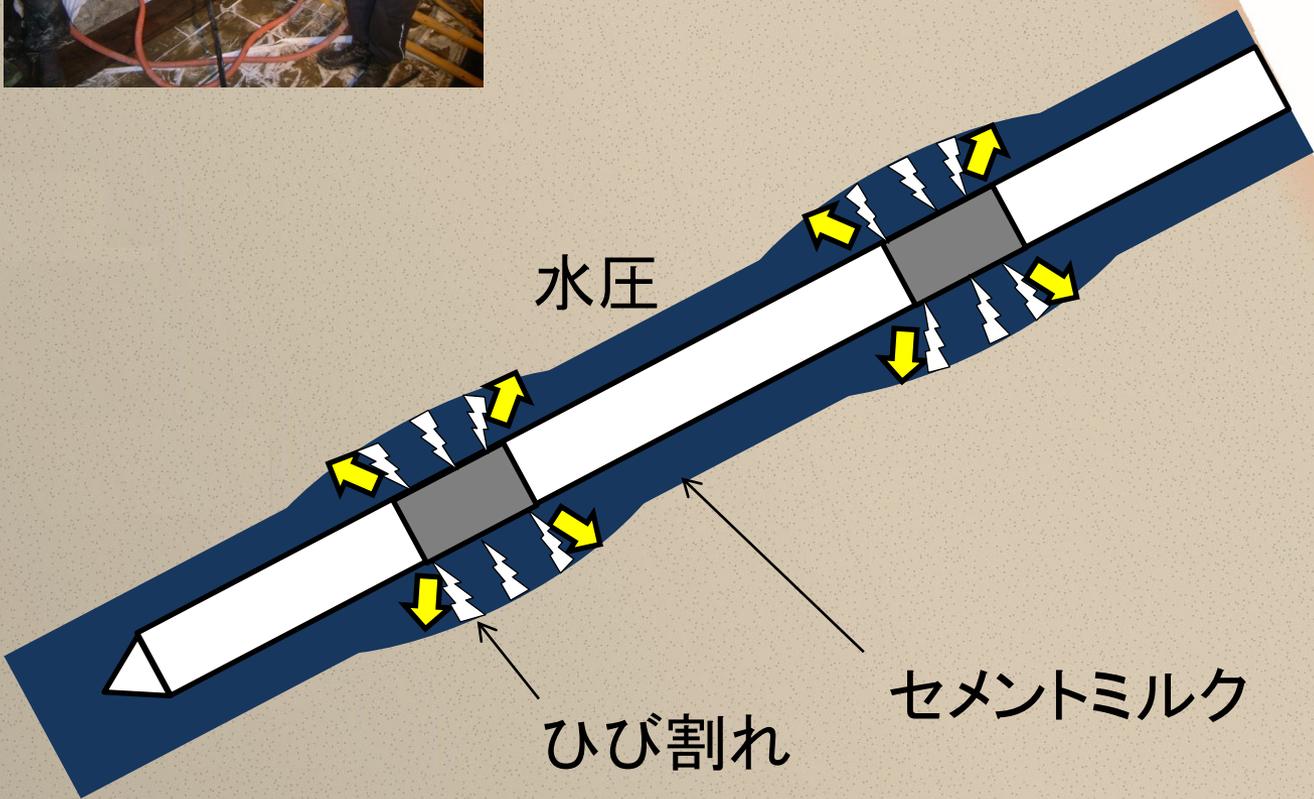


# ③インジェクションパイプ挿入



セメントミルク

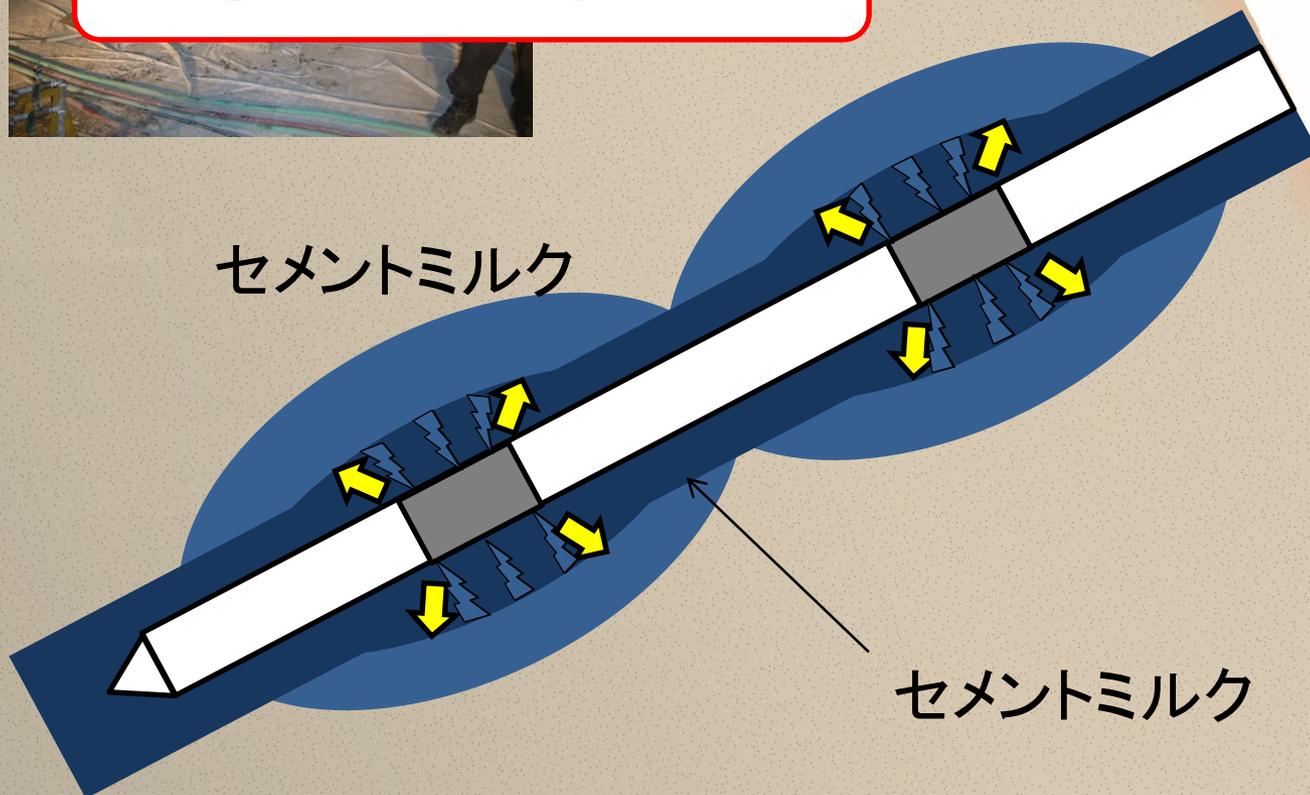
# ④ 水 割 り



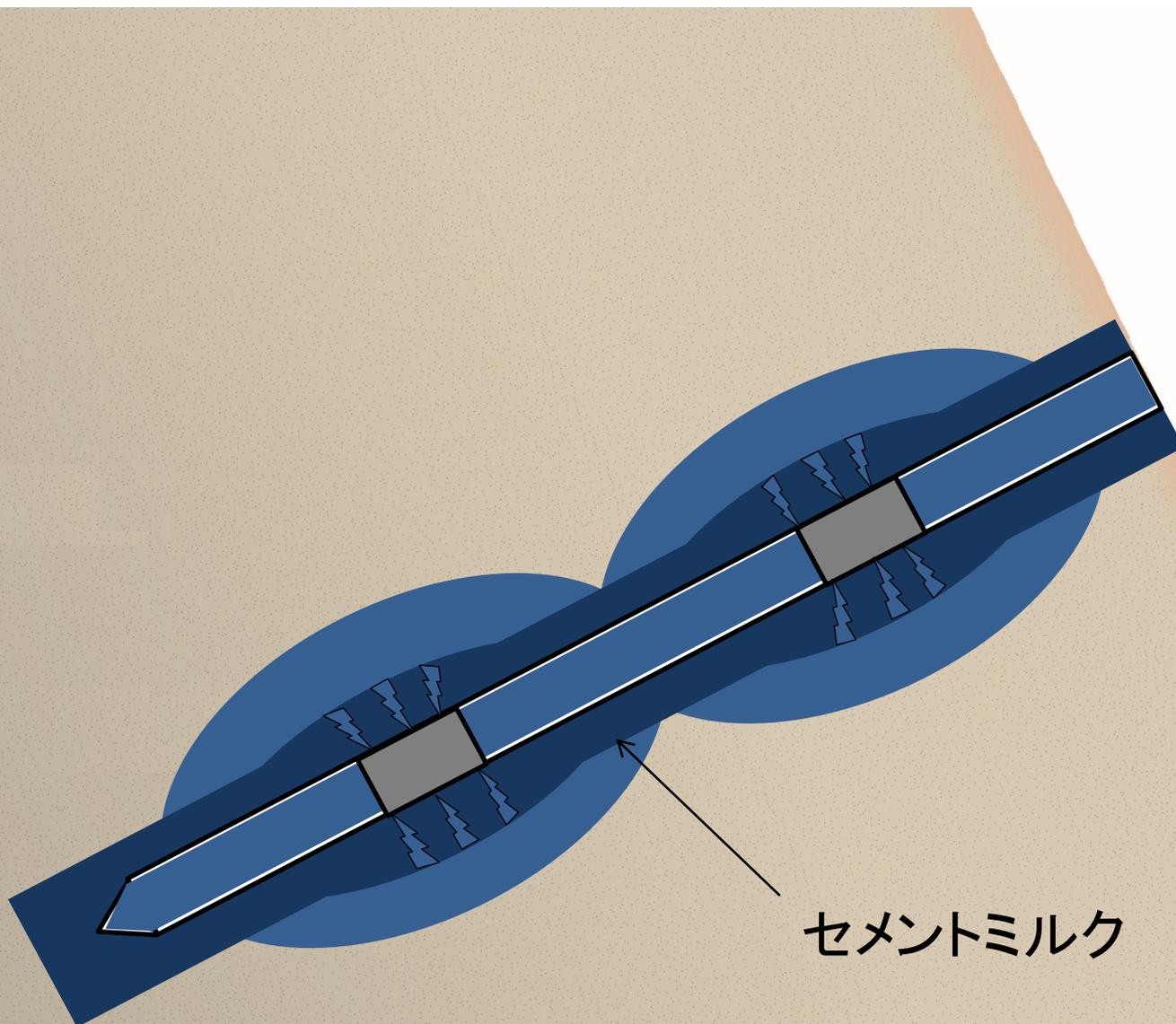
# ⑤ 加圧注入



補強材径の拡大！



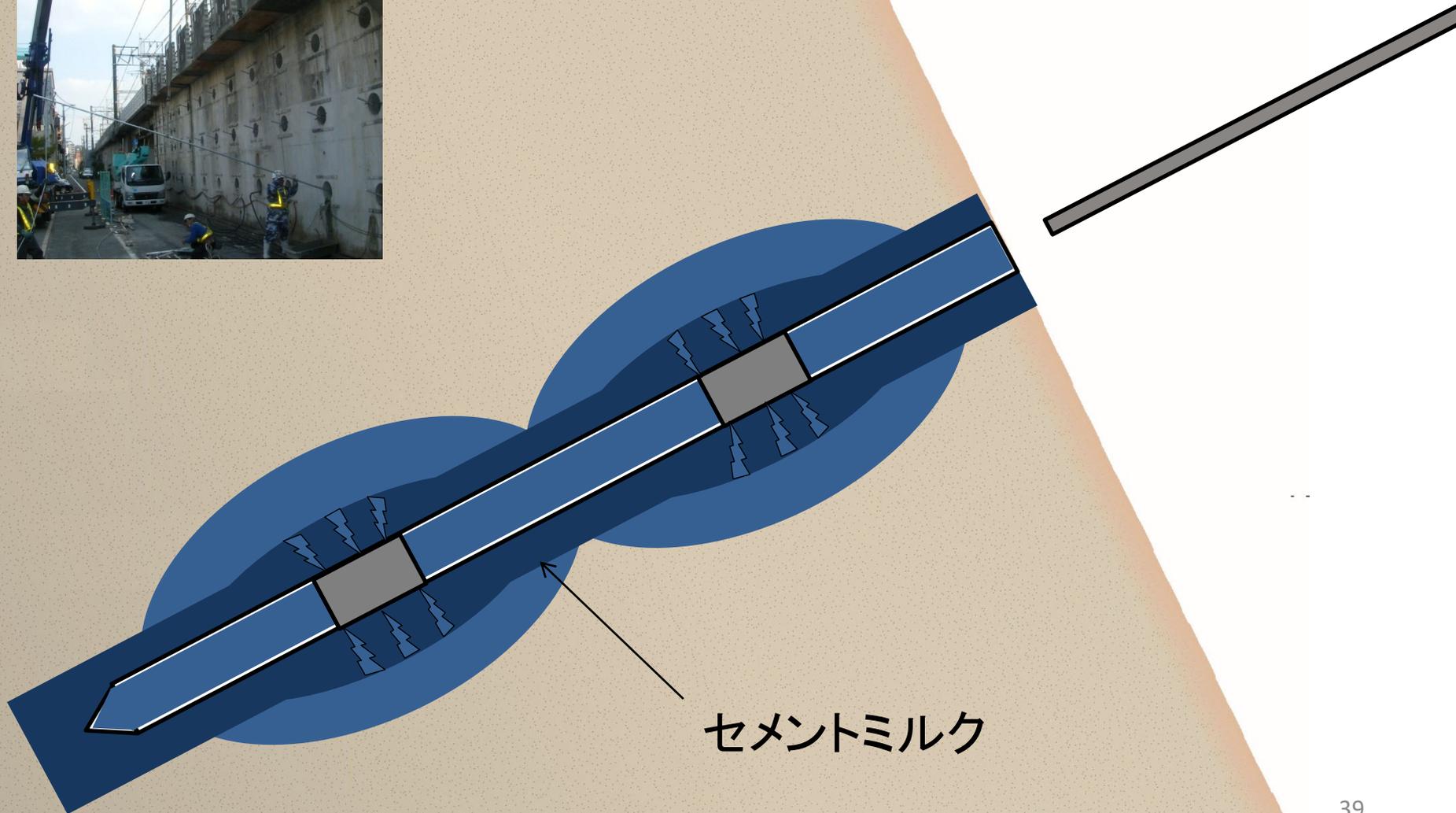
# ⑥ パイプ内注入



セメントミルク

⑦

# 芯材挿入・定着



セメントミルク

## 検証事項

- ① 注入時の軌道変状（隆起）の検証
- ② 設計に用いる補強材径の検証

(公財)鉄道総合技術研究所

(株)複合技術研究所

ライト工業(株) の3社で共同研究を実施した。

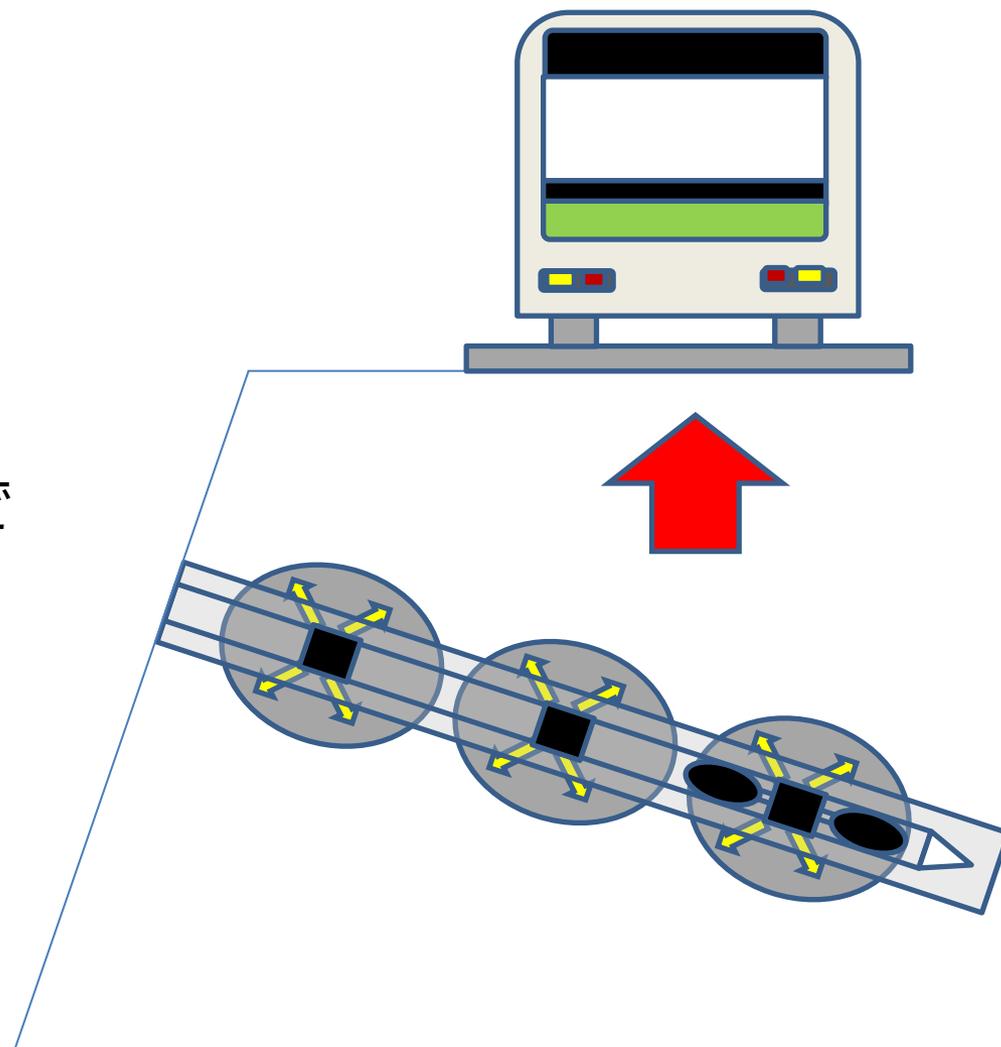
共同研究名称

「加圧注入型地山補強工法による補強効果の検証」

# 注入時の軌道変状の検証

鉄道軌道下において、ダブルパッカーによる加圧注入を行う場合に、その上に位置する軌道が隆起する可能性がある。

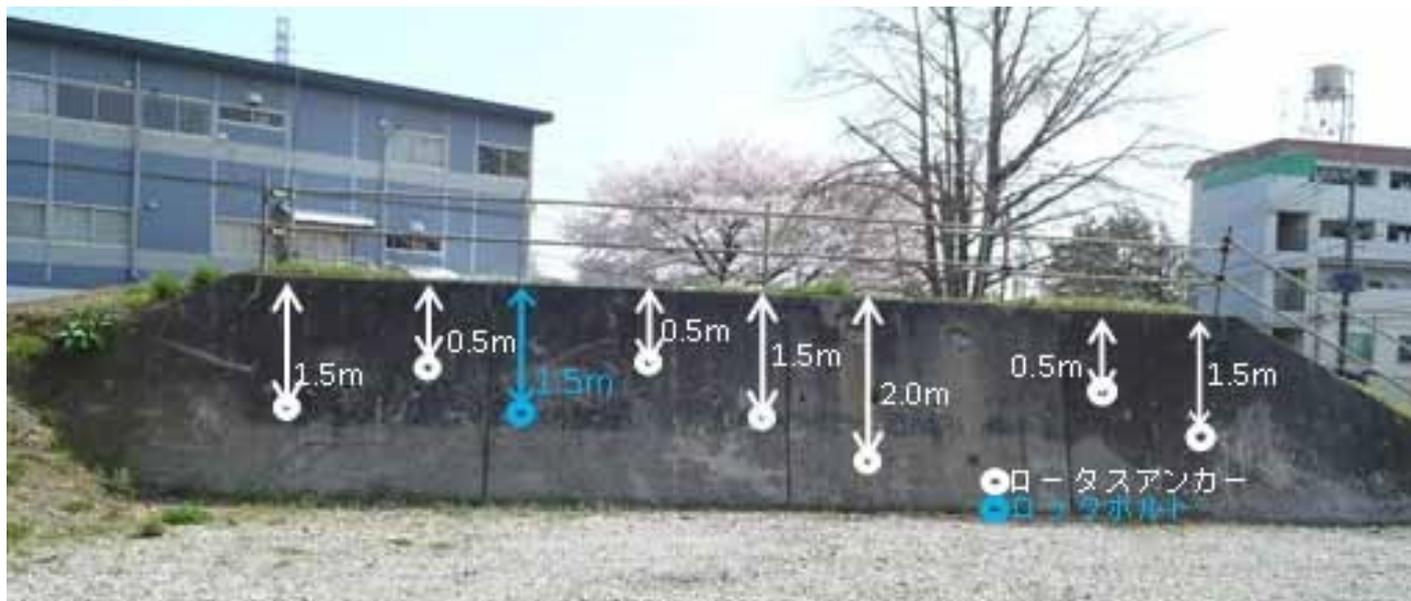
→目標値（5mm）までの隆起に押さえるための注入速度、注入圧力を見いだす。



# 注入時の軌道変状の検証

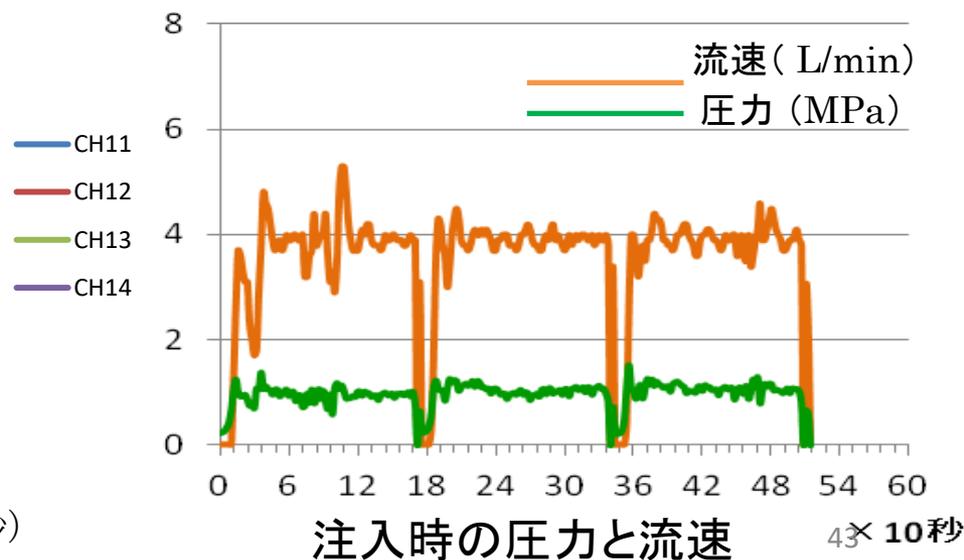
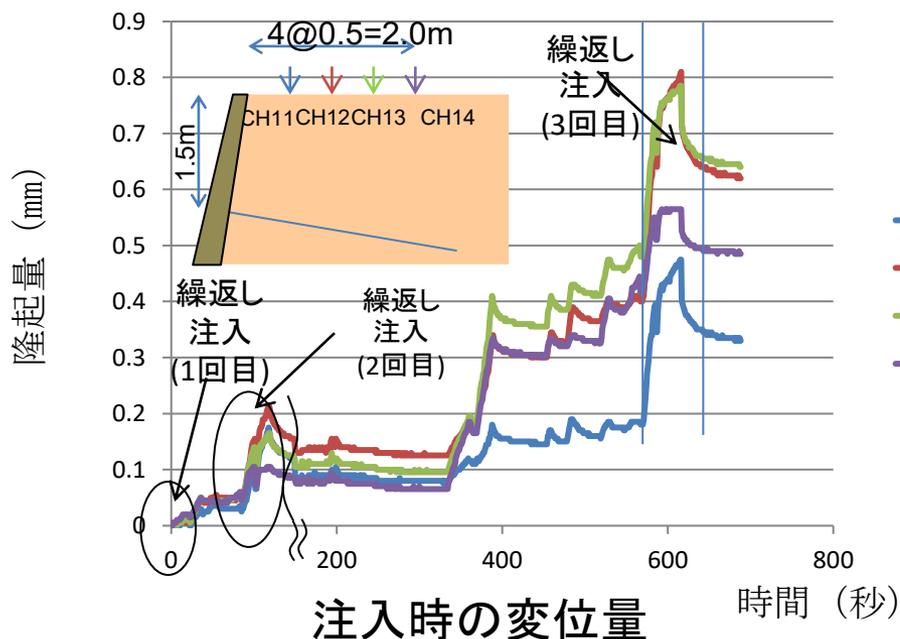


鉄道総合技術研究所内の盛土試験場にて施工時の軌道変状の検証試験を実施した

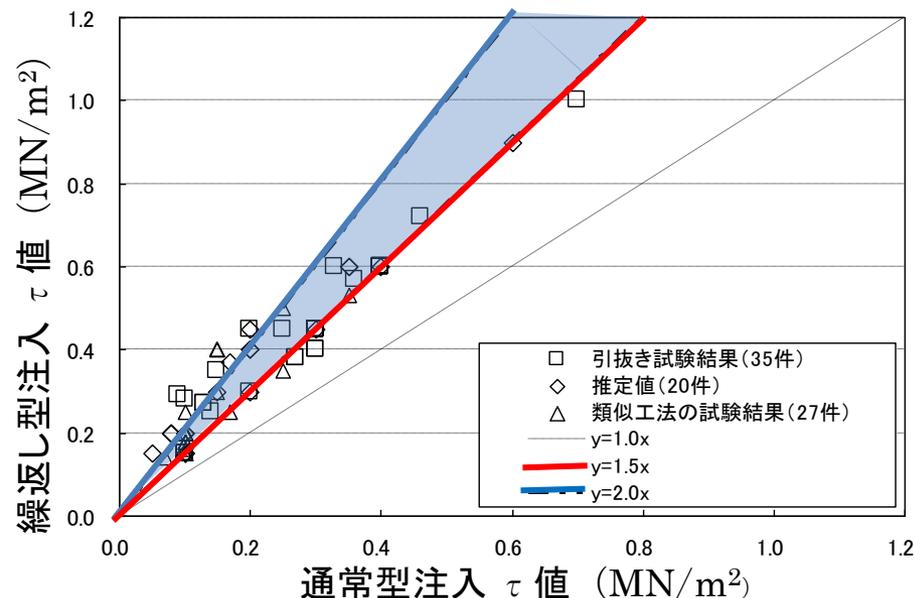
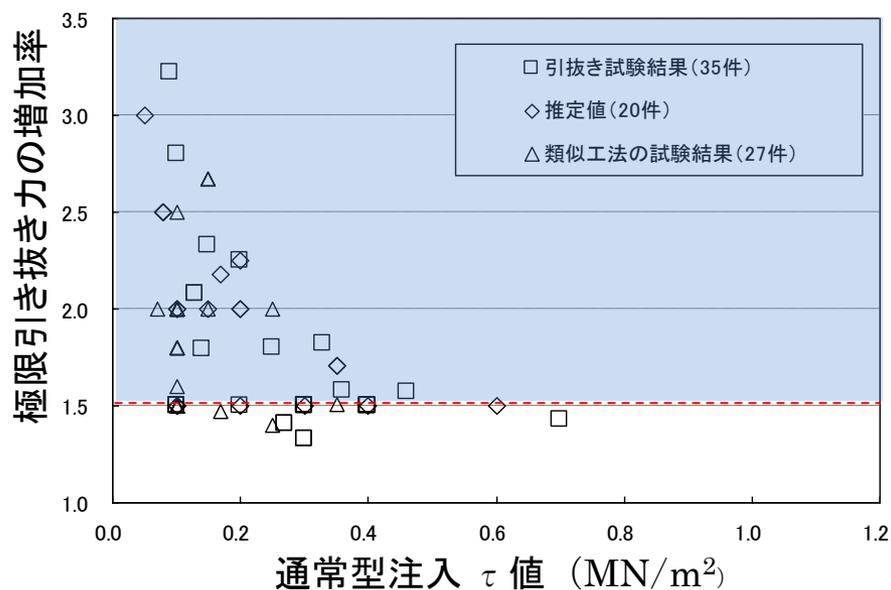


# 注入時の軌道変状の検証結果

- ◆ 削孔径の2倍となる注入量で繰返し注入を行なった結果、土かぶり1.5m位置での軌道変位は最大0.8mmの隆起量であった。
- ◆ 軌道直下での施工時は、注入圧力および注入速度を管理することにより、土かぶり1.5m程度では軌道レベルの変位はほぼ無視できる結果となった。

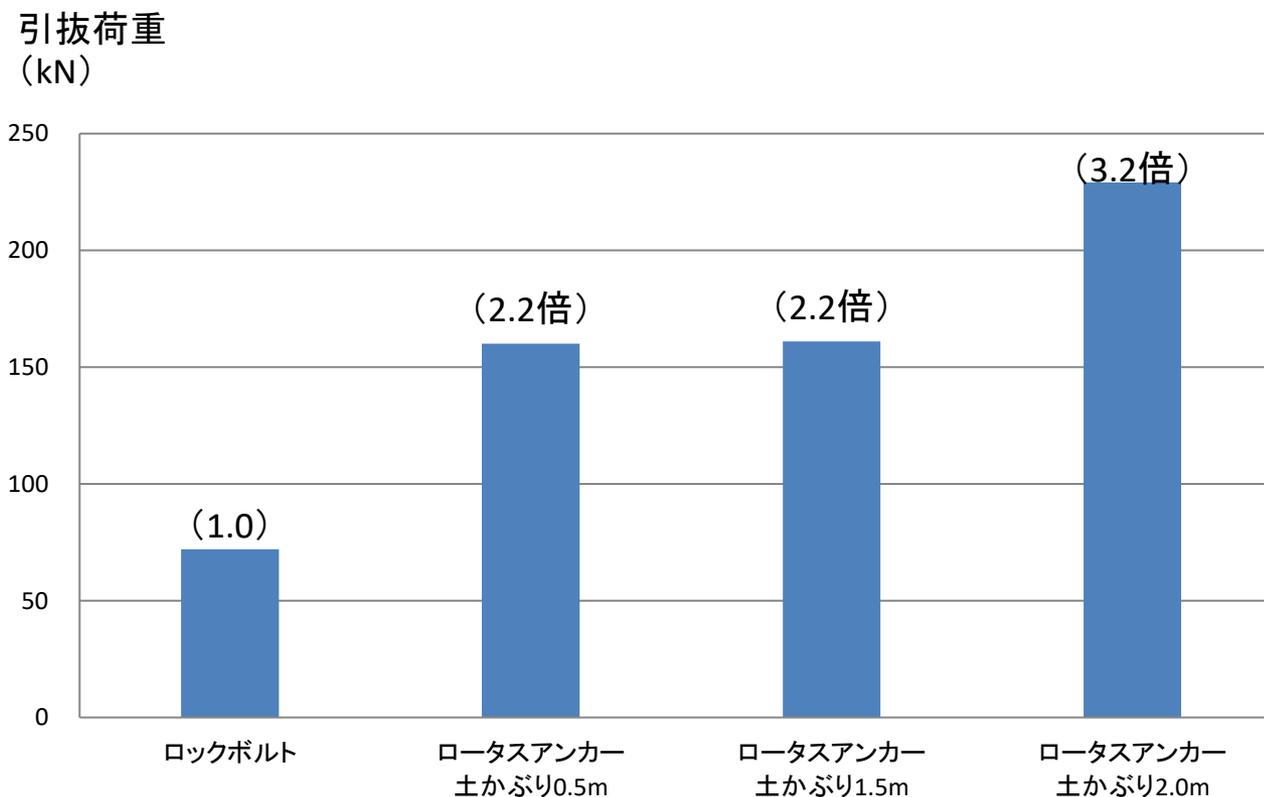


## (既往試験結果)



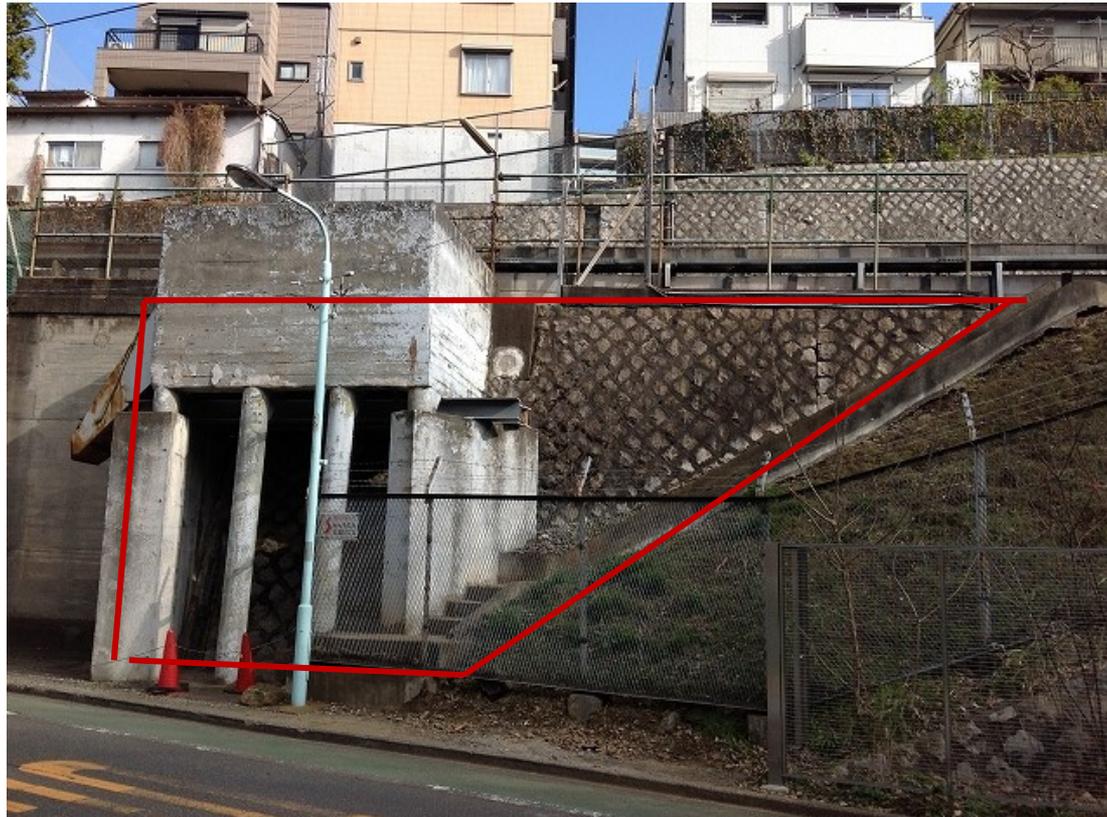
通常型の注入方式と比べ引抜き抵抗  
(極限周面摩擦抵抗力度) が1.5~2.0倍に向上

- ・ 既往の試験および試験施工の結果から、補強体の造成径は削孔径の2倍（砂質土）として、設計することが可能である。

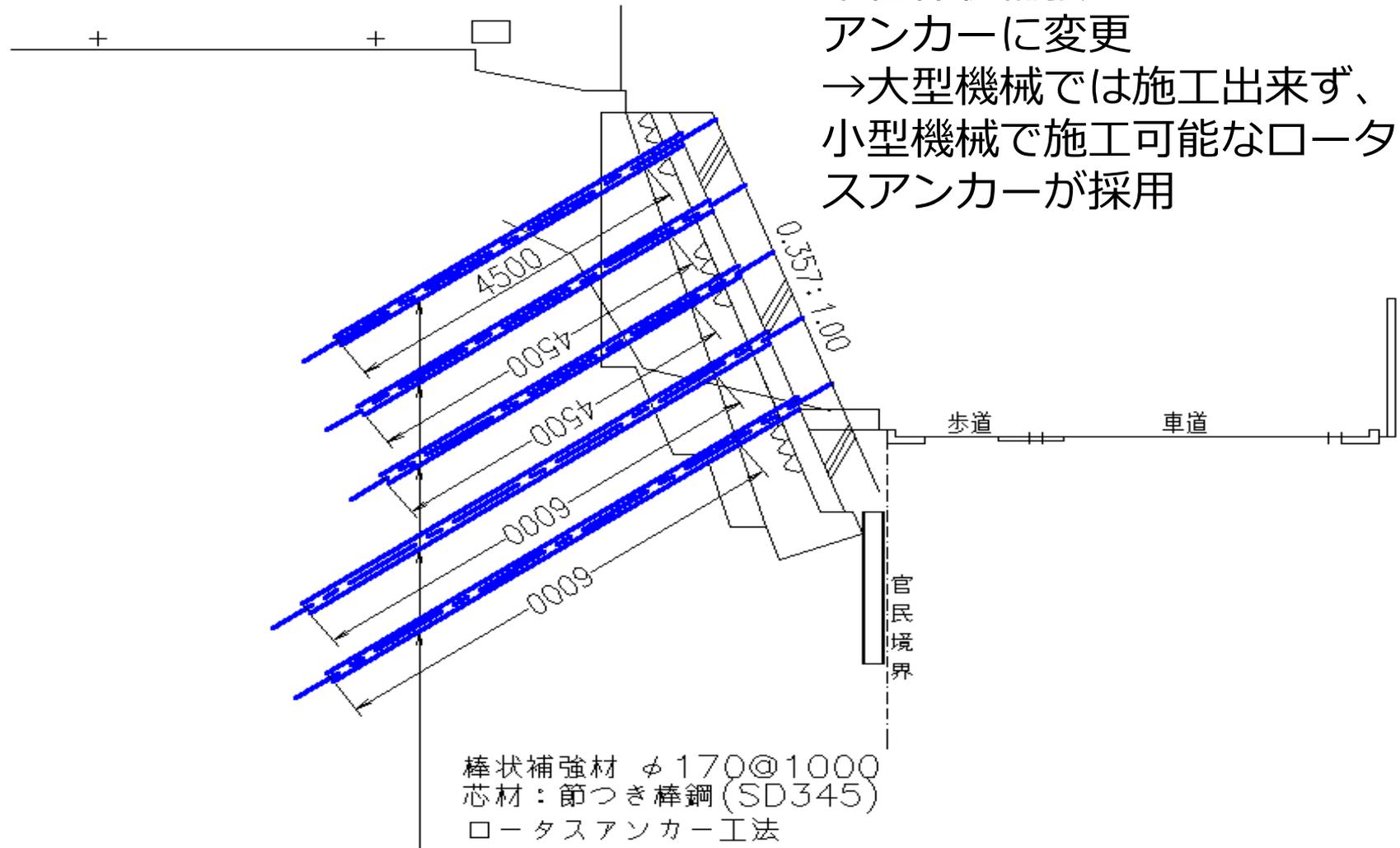


工事場所：東京都

工事目的：石積み擁壁耐震工事



中径棒状補強工からロータスアンカーに変更  
→大型機械では施工出来ず、  
小型機械で施工可能なロータスアンカーが採用





工事場所：兵庫県  
工事目的：法面耐震補強工事



変状状況写真(1)



坑口全景(クラック、浸出水状況)



パラベットクラック、浸出水、道路側へ傾斜



法面上部舗装ひび割れ、防護柵変形

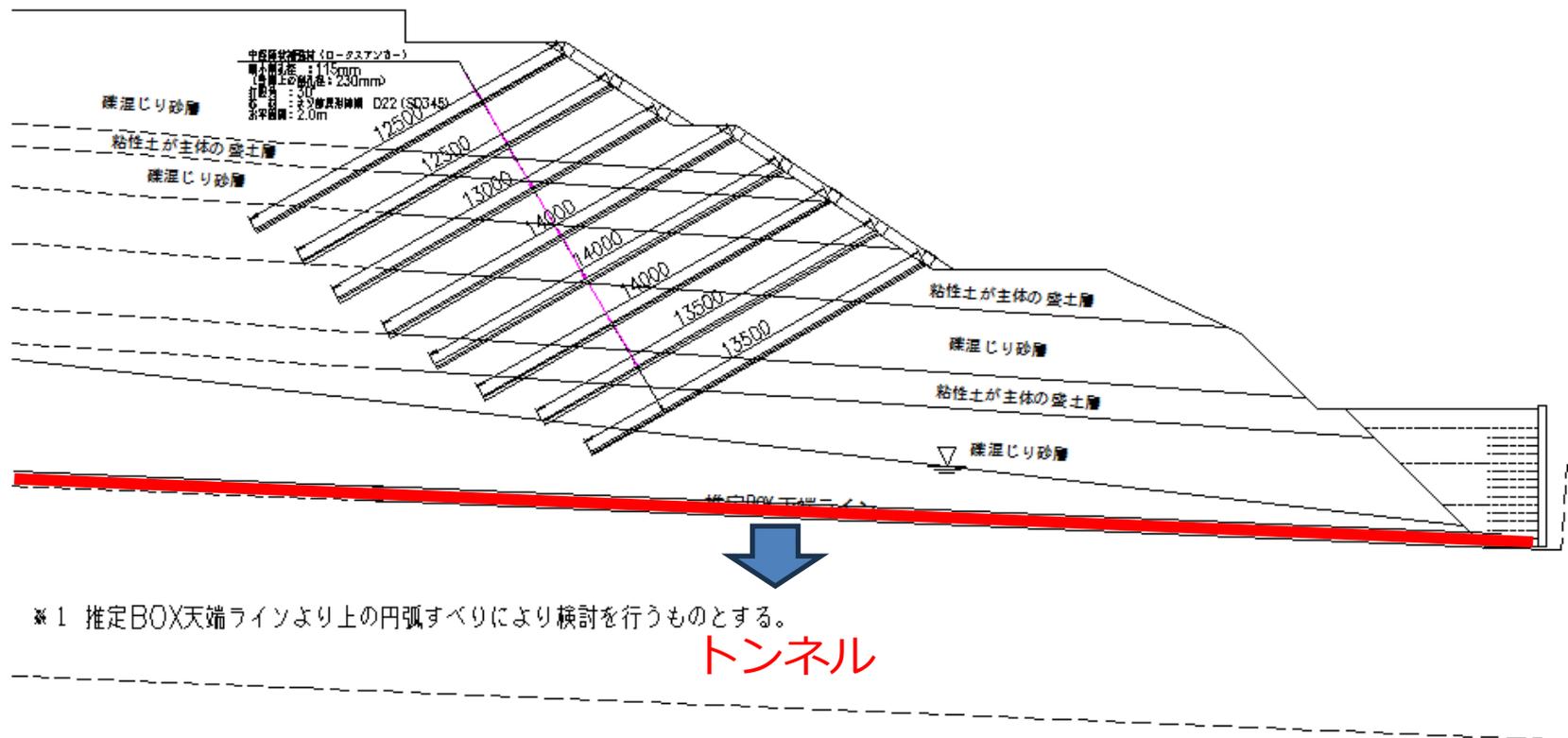


パラベットのひび割れ(貫通)



パラベットのひび割れ、漏水

# 標準断面図





現場全景



完了全景



削孔状況



プラント設置状況

# 社会貢献賞

「神戸市道垂水妙法寺玉坂トンネル  
上部盛土における既設道路盛土の  
地山・盛土補強土工法による耐震補強」

神戸市建設局 殿  
復建調査設計株式会社大阪支社 殿  
神戸大学大学院工学研究科地盤安全工学分野 殿  
株式会社複合技術研究所 殿  
ライト工業株式会社西日本支社 殿

あなたがたは上記業績により地盤工学  
の進展に顕著な貢献をしたと認められ  
ますので平成 27 年度社会貢献賞を贈  
呈致します

平成 28 年 4 月 20 日

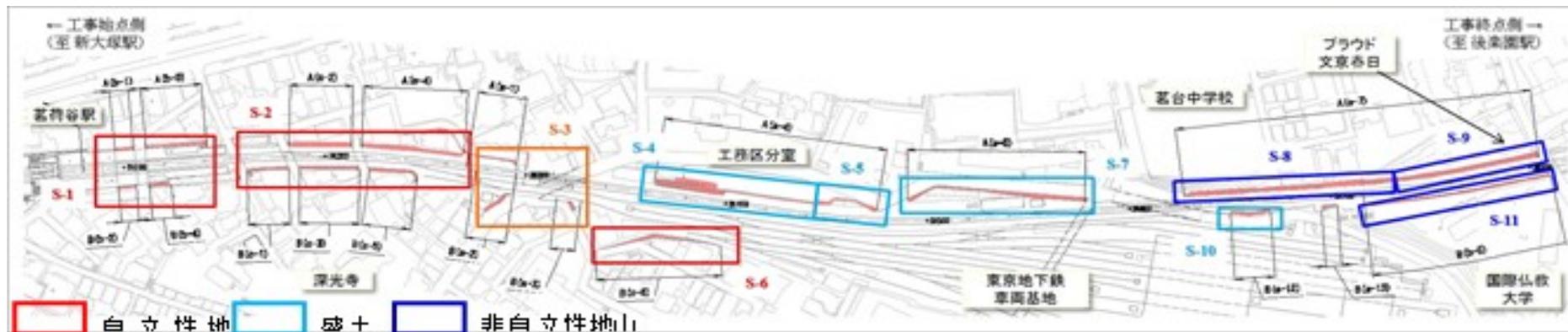
公益社団法人地盤工学会関西支部  
支部長 橋本 正



場所：東京都

工事目的：擁壁耐震補強





自立性地山



盛土



非自立性地山



夜間削孔



昼間注入

削孔と注入を別工程で行うことができる



鉄道の営業を止めずに施工を進めることができる

# 第19回 国土技術開発賞 創意開発技術賞受賞



ご清聴ありがとうございました  
次はキャロットアンカーの説明です

# RRR-Nail

(スリーアール・ネイル) について②

(キャロットアンカー)

RRR工法協会 スリーアールネイル部会  
小野田ケミコ株式会社 蓮香 朋宏

# キャロットアンカーとは？

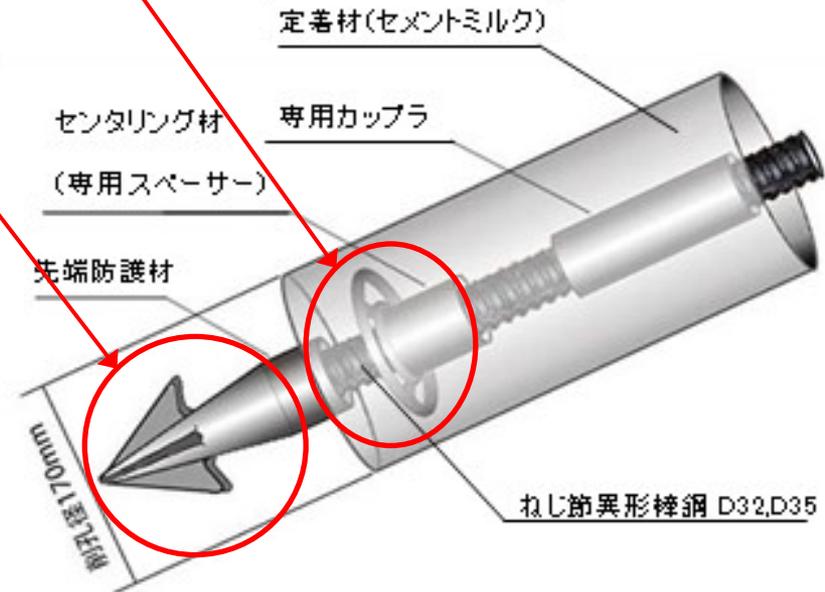
- ・高出力のロータリーパーカッションドリルを用いて削孔することにより、砂礫層・玉石を含む土層や障害物のある盛土に対応した工法
- ⇒ **ラディッシュアンカーで対応できない土層に対応**
- ・**Φ170mmのアンカー体**を築造し、その軸中心位置に槍状の**先端防護材**や**センタリング材(専用スペーサー)**を装着した引張り芯材を貫入し、中径棒状補強体を構築
- ・ケーシングロッドを用いることにより**長尺施工が可能(最大施工可能長20m)**

芯材の確実なセンタリング

地山への確実な定着



(a)キャロットアンカー補強体



(b)キャロットアンカー構造概要

# キャロットアンカー工法の施工設備

(a)クローラー型施工機(土足場)



(b)スキッド型施工機(単管足場)



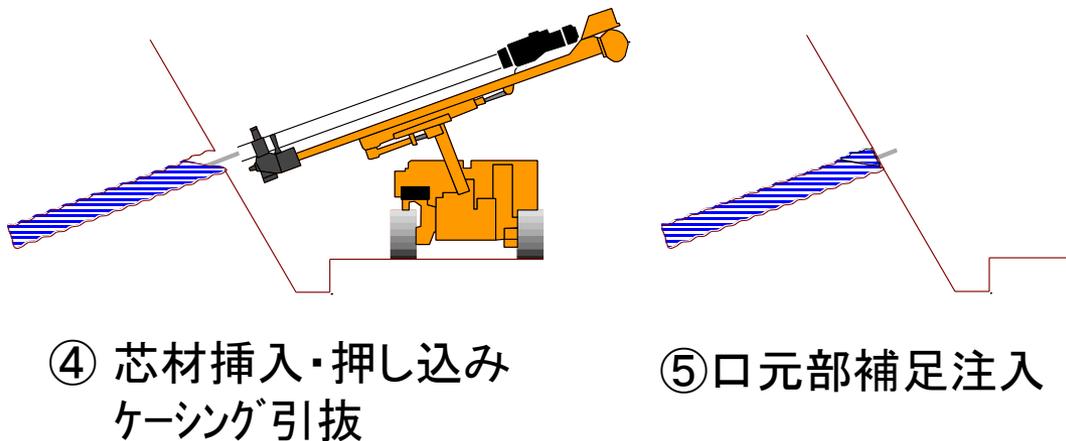
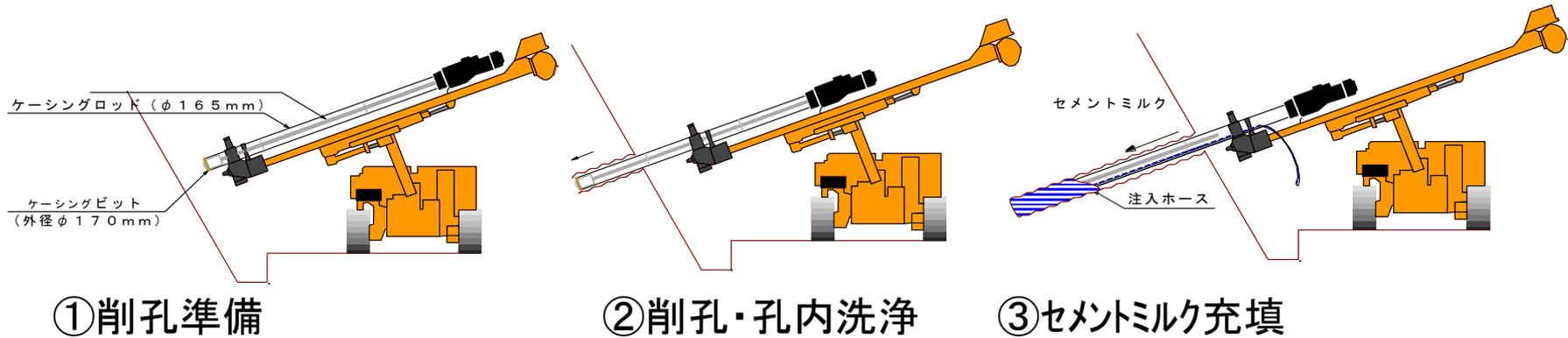
(c)ケーシングφ170mm(先端ビット)



(d)プラント設備



# キャロットアンカー工法の施工手順



補強材径：φ170mm (中径補強材)



# キャロットアンカーの特徴

## 先端防護材と専用スペーサー



(a)専用スペーサー



(b)先端防護材



(C)補強材径:φ170mm

適用地盤

硬

地山の摩擦抵抗

小

ロックボルト



軟

大

キャロットアンカー

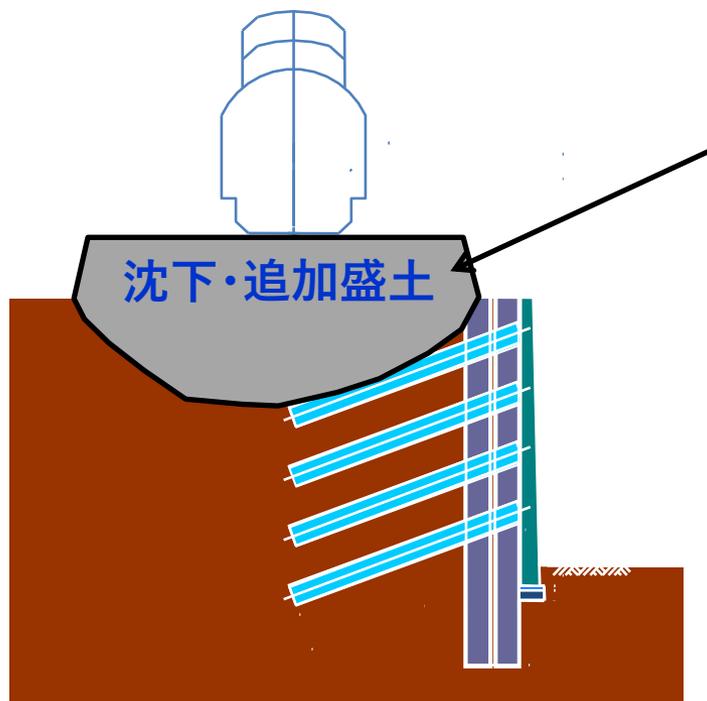
ラティッシュアンカー

長尺物→ キャロットアンカー

適用地盤の範囲が広く、長尺施工が可能<sup>5</sup>!

# 適用時のメリット 1

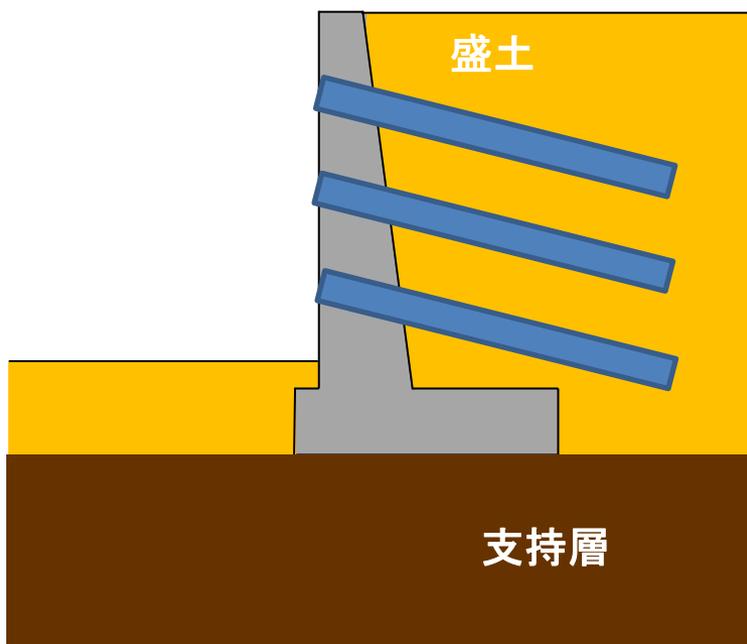
バラスト軌道



・沈下、追加盛土によるバラスト層厚の増大や土質の不確定性などから、ラッシュアンカーが適用できないことがある。



**適用地盤の範囲が広く、不確定な盛土地盤への適用性が高い  
キャロットアンカーの採用**



**現況構造物に補強材を増設。**



- ・鉄道などを供用しながら、単管足場などで簡易的に既設構造物を補強できます。
- ・既存構造物に開ける**削孔径が小さい**。

# 適用時のメリット 3

工 法	キャロットアンカー工法	グラウンドアンカー工法
略 図		
定 着 長	軟弱層でも定着できるので短い	支持層に定着するので長い
配置密度	多い	少ない
プレストレス	加えない	加える
腹 起 し	剛性の小さいものを密に配置	剛性の大きいものを粗に配置
親 杭	剛性の小さいものを浅く根入れ	剛性の大きいものを深く根入れ

**軟弱層を着底層にできるため、民地境界を侵さない。**

# 施工事例①：既設擁壁補強工

- 施工目的：既設擁壁の耐震補強
- 施工場所：岩手県
- 施工時期：2012年(平成24年)





# キャロットアンカー施工状況

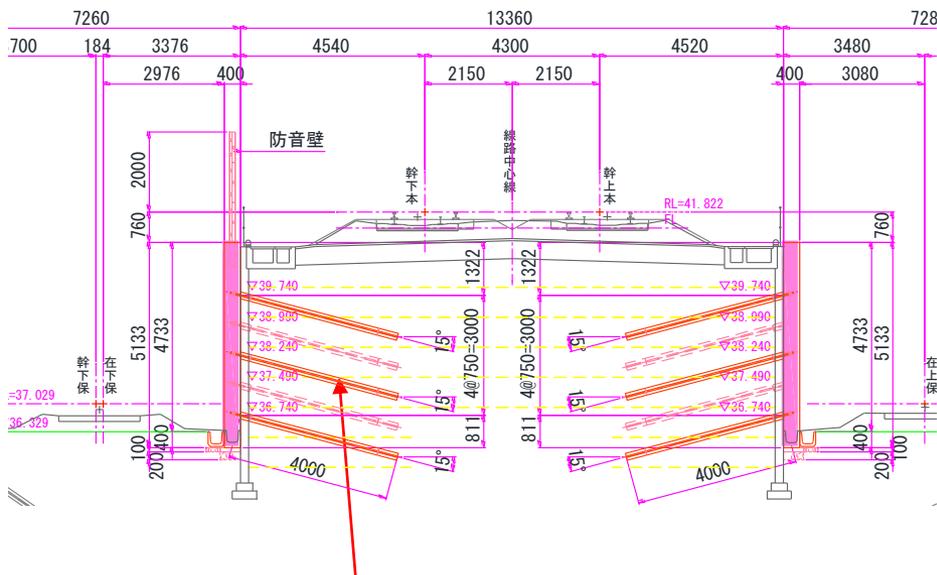


# キャロットアンカー施工後



# 施工事例②：既設補強土擁壁補強工

- 施工目的：既設擁壁の耐震補強
- 施工場所：青森県
- 施工時期：2014年(平成26年)



**補強土壁の補強材を回避**



**貨物線を共用しながらの施工**

# キャロットアンカー施工状況

クローラークレーン  
による仮設

施工時



通過時

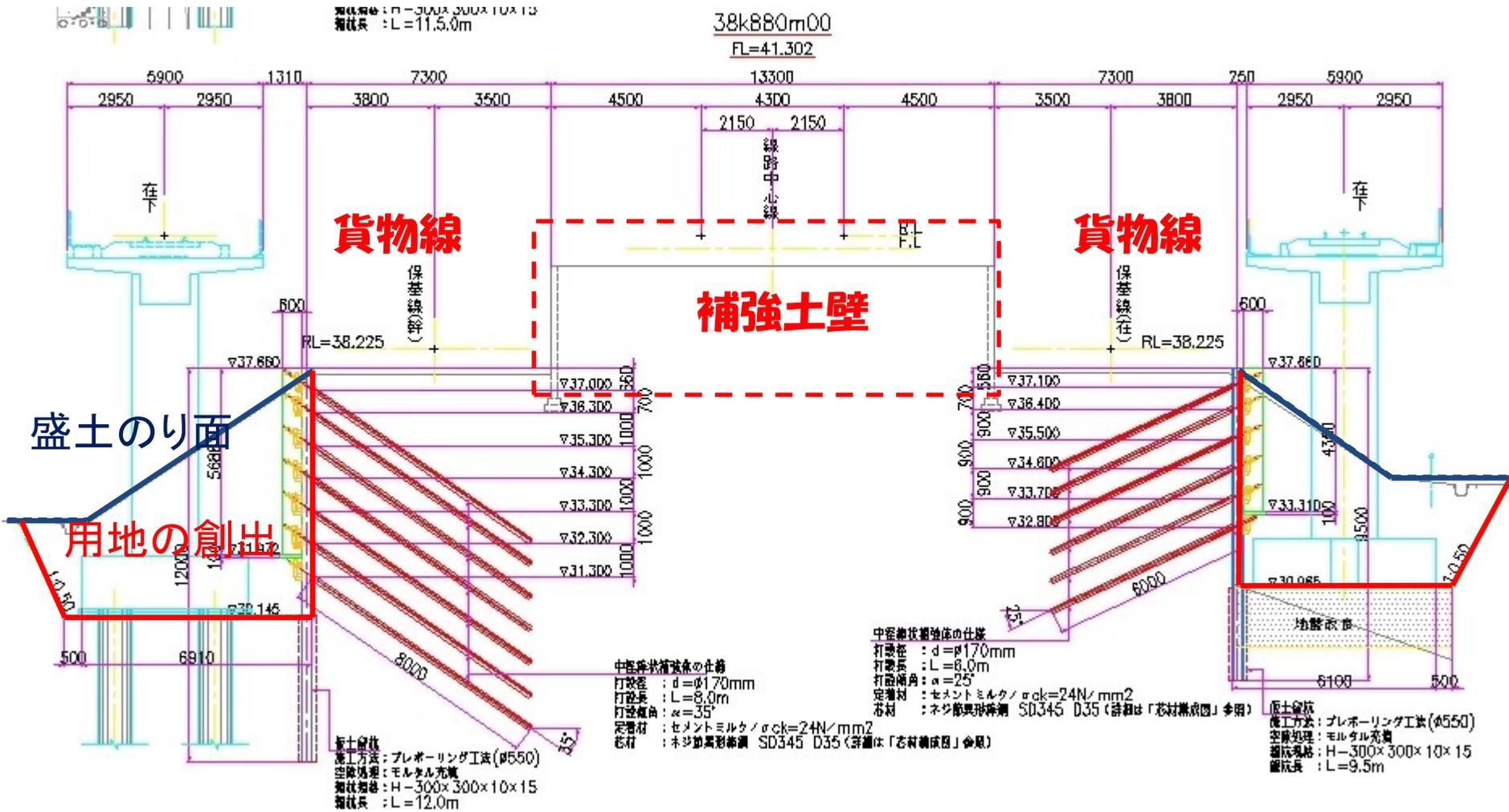


# キャロットアンカー施工状況

## 頭部処理工



# 計画図 (断面図)



最上段高▽37.66



( )内は地震時

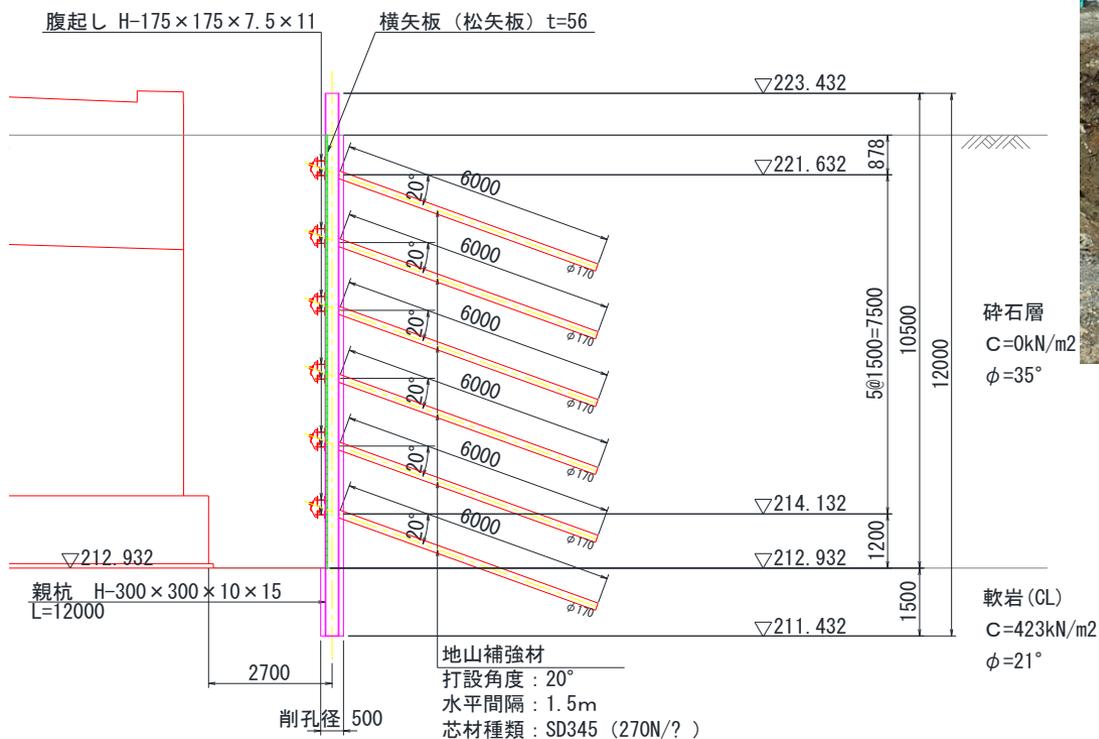
**N > 50の砂礫層や、盛土に介在する恐れのあるガウ等に対応する必要があった。**

# キャロットアンカー施工状況



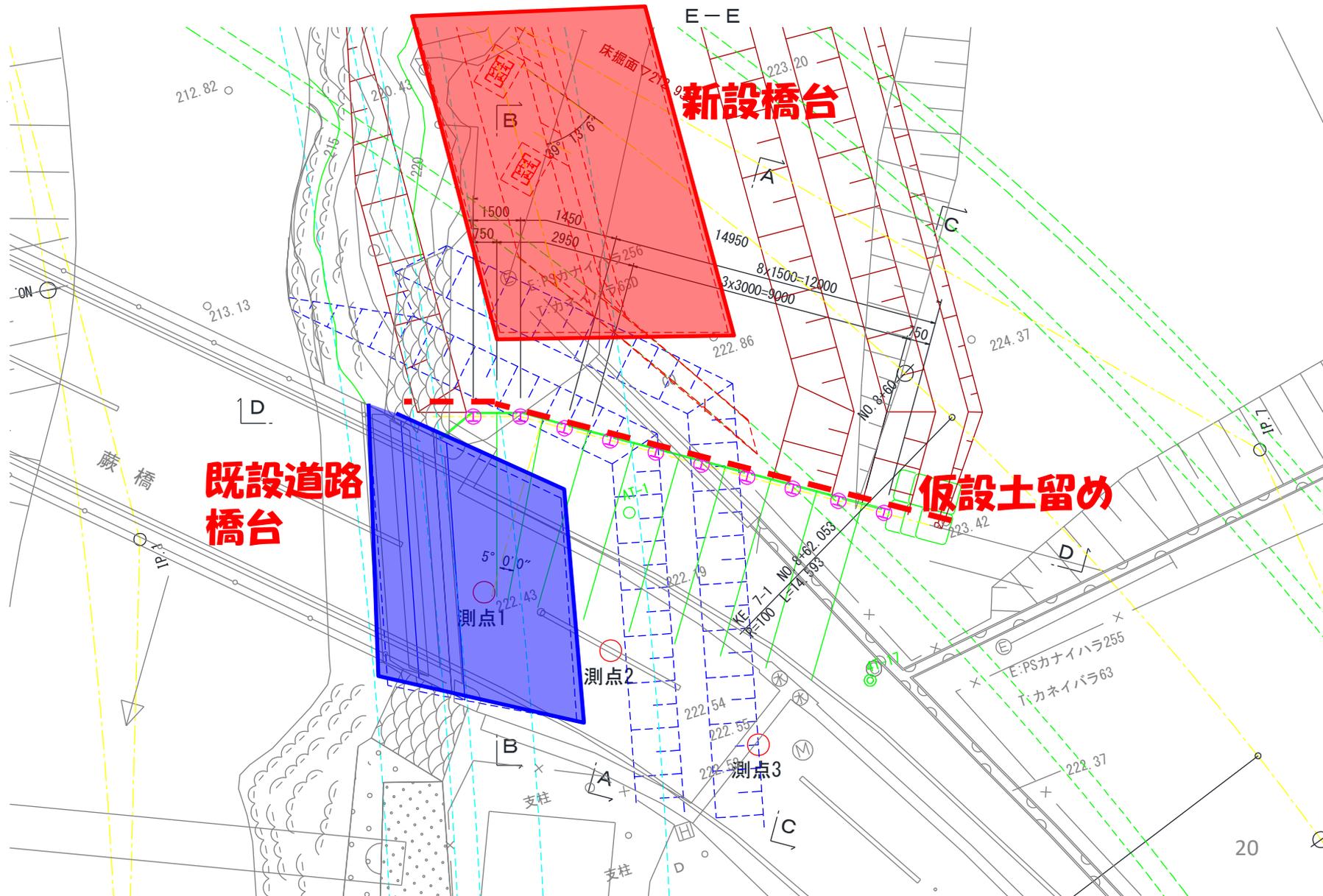
# 施工事例③：仮設土留め

- 施工目的：仮設土留め
- 施工場所：滋賀県
- 施工時期：2023年（令和5年）



**土足場による  
クローラー型機による施工**

**硬質な砕石層・軟岩層への適用**



# キャロットアンカー施工状況



- 1) 中口径であるため、周面摩擦抵抗が大きく、用地境界を犯さず、補強効果を発揮できる。**
- 2) 硬質地盤や、砂礫等でも適用できるため、適用土質選ばず良好な品質が確保可能である。**
- 3) 長尺施工が可能であるため、適用範囲が広い。**
- 4) 施工機械が小さく、簡易的な単管足場での施工が可能であることから、既設構造物の耐震補強が容易。**

**おわり**