補強土工法の基礎から応用まで
－ RRR工法の歴史と特徴 －
（全編12回）No.2

1. 地盤･盛土の強化改良の必要性と補強土工法の概説

2. 盛土補強土工法による土構造物の復権と発展
－ 補強土の原理と40年の経験 －

3. 地山補強土工法による斜面の安定化

東京大学･東京理科大学名誉教授
龍岡文夫

今回は、
1. 地盤･盛土の強化改良の必要性と補強土工法の概説

です。

盛土補強土工法による土構造物の復権と発展
－盛土補強土の原理と40年の経験－１

緩勾配のり面を持つ盛土や重力式擁壁やL型擁壁などの従来形式の盛土構造物は、地震・洪水・豪雨など自然災害に対する耐力が低い、と言う問題がある。従って、道路・鉄道では建設費は高いが耐力が高いRC高架構造物に置き換わってきた傾向にある。
（続く）

これは、この講義での「盛土補強土構造物」に関する講義の内容の要約です。

堅苦しく、この段階では理解できない用語も沢山含まれているでしょう。しかし、全文を読んでください。

盛土補強土工法による土構造物の復権と発展
－盛土補強土の原理と40年の経験－２

この状況において、「**剛な一体壁面工を段階施工するジオテキスタイル擁壁**」は、従来形式の盛土や擁壁よりも建設費・維持管理費が低く、自然災害に対する耐力が高いことから、従来形式の盛土・擁壁に置き換わる工法として採用されるようになってきた。

鉄道構造物では標準工法となり、剛な一体壁面工を活用して橋台・橋梁にも発展してきて、新幹線構造物としても広く採用されている。この講義では、この工法の実務的利点、理論的根拠、施工法、設計法（特にレベル2設計地震動に対する耐震設計）を基本から説明し、全国各所での施工例を示す。

続きです。

この「剛な一体壁面工を段階施工するジオテキスタイル擁壁」とその発展形である各種補強土構造物は、東京大学と鉄道総合技術研究所で、引き続き東京理科大学などで、多くの技術者・研究者と学生がともに研究してきた技術であり、鉄道各社等に本格的に採用されている新しい技術です。

盛土補強土工法による土構造物の復権と発展

1)擁壁の力学的原理と補強土擁壁

a)従来形式の擁壁は片持ち梁！補強土擁壁は？

b)ジオテキスタイル補強土擁壁の施工例

2)補強土工法のメカニズム

3) 剛な一体壁面工を持つジオテキスタイル補強土擁壁

a)剛な一体壁面工の効用

b)段階施工の効用

c) 洪水・豪雨・津波と補強土およびレベル2地震動を考慮した耐震設計

4) GRS橋台とGRS一体橋梁

a) 従来形式の橋梁の諸問題を解決

b) 低い建設費、高い維持管理性・耐震性/耐津波性

c)施工例

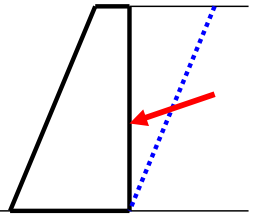
これは、盛土補強土工法の講義の項目です。

今日は、青の字で書かれた1-a)の部分の説明をします。

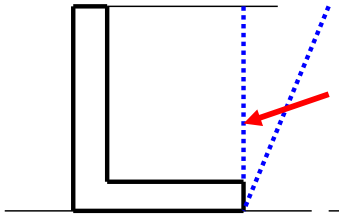
擁壁の抗土圧メカニズムと補強土擁壁

従来形式

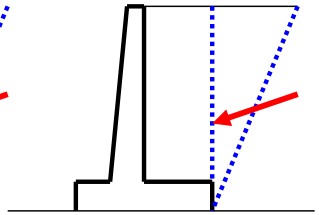
重力式
（石積み、無筋C）
（gravity）



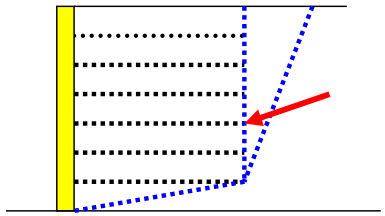
L型−RC
（cantilever）



逆T−RC
（T−shaped）



補強土擁壁
（reinforced soil）



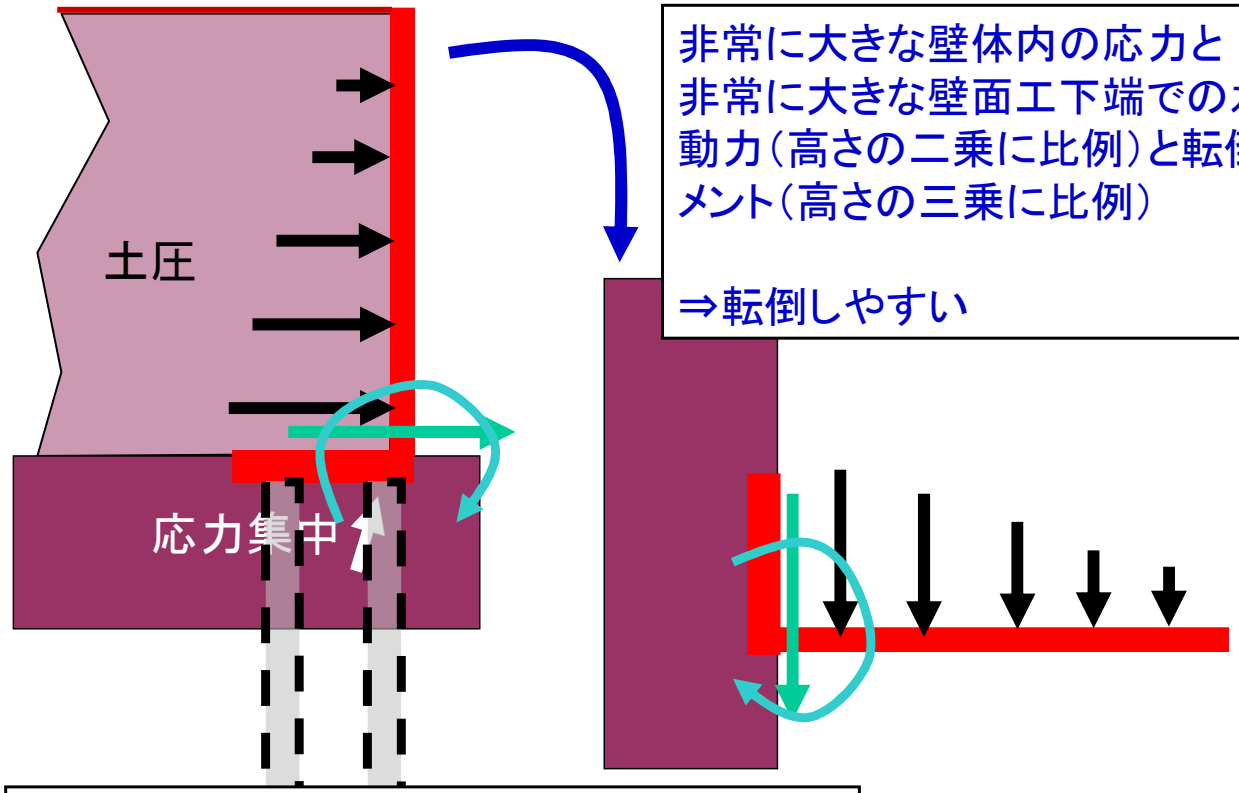
これは、擁壁の種類を示したものです。

従来式の擁壁は、このように幾つかの形式があります。

しかし、全ての形式で盛土は補強していません。また、力学的には全て片持ち梁構造です。

これらのために、本質的に色々な問題点があります。

従来型擁壁は片持ち梁構造物



非常に強固な壁体構造と杭基礎が必要

片持ち梁は、英語でcantileverと言います。

力学的には、片持ち梁の擁壁では、擁壁の背面に加わる土圧は全て、擁壁下端において、水平滑動荷重及び転倒モーメントとして作用します。

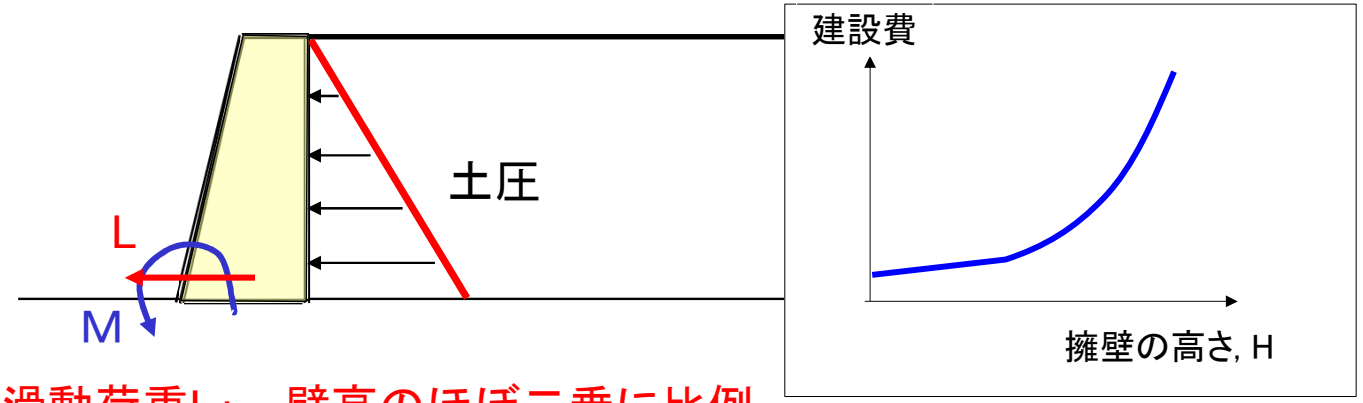
土圧の総計は、壁高の2乗に比例します。

従って、滑動荷重は壁高の2乗に比例して、転倒モーメントは壁高の3乗に比例します。

従って、擁壁構造物の下端の支持地盤には非常に大きな荷重が集中します。

また、壁体内のせん断力とモーメントも、壁高が大きくなると、同様に急増します。

従来型擁壁：
壁高が大きくなると、土圧による壁下端での滑動荷重とモーメント荷重は急激に増加



滑動荷重L:　壁高のほぼ二乗に比例
モーメント荷重M: 壁高のほぼ三乗に比例

５ｍ程度以上高くなると、急速に大型構造物になる

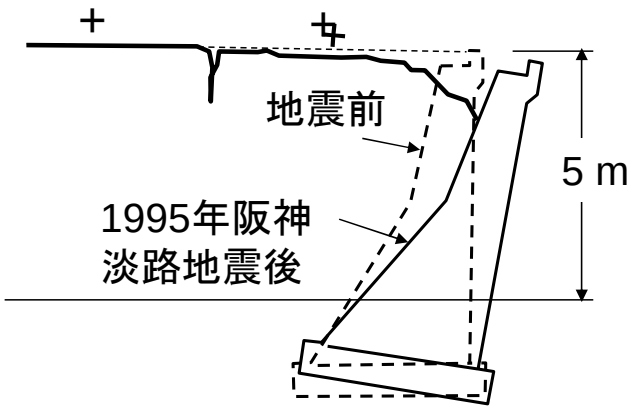
山岳地帯の擁壁は、非常に高くなり建設費が増大する傾向

片持ち梁の擁壁では、滑動荷重は壁高の2乗に、転倒モーメントは壁高の3乗に比例します。壁体内のせん断力とモーメントも同様に増加します。

その結果、壁高が大きくなると擁壁の構造物は急速に重量化して、また擁壁を支持する杭基礎の必要度の急増し、建設費は急速に増加します。

また 、転倒モーメントは壁高の3乗に比例する結果、片持ち梁の擁壁は、地震時に転倒しやすくなります。

1995年阪神淡路地震
多数の重力式やL型擁壁
壁体破壊，転倒



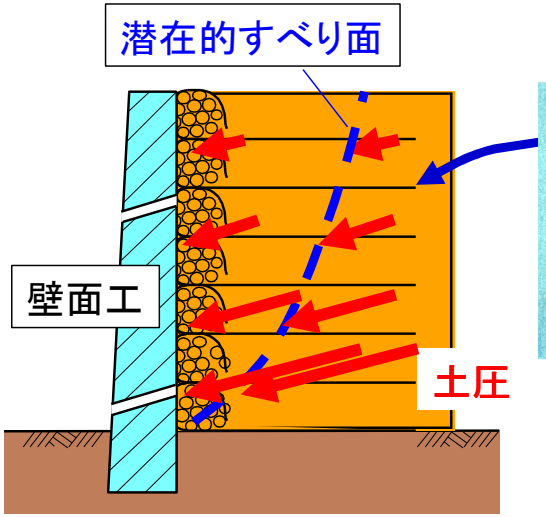
石屋川駅付近重力式
擁壁の被災状況

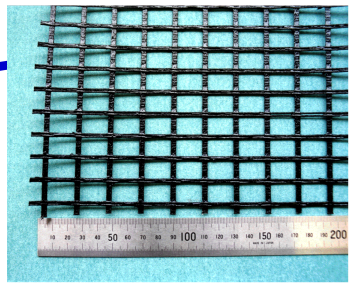
これは、片持ち梁形式である重力式擁壁が、1995年阪神淡路地震の時に転倒した例です。

擁壁の前に人が居れば、その人を殺すことになるので、このような転倒破壊は生じさせてはいけません。

ジオグリッド補強土(Geogrid-Reinforced Soil:)の擁壁(Retaining Wall: RW) GRS

- ジオグリッド(geo-grid): geo:大地、grid: 格子
- 補強土（reinforced soil）: 鉄筋補強土(steel-reinforced soil)もある





三つの構成要素:
- 土
- ジオグリッド補強材
- 壁面工

いずれも重要な構成要素

これは、補強盛土の擁壁の構造の説明です。

潜在的すべり面の位置と壁面工の背面に作用する土圧は、それぞれの高さに配置した補強材が抵抗していて、壁面工の下端で土圧全体に抵抗している訳ではありません。

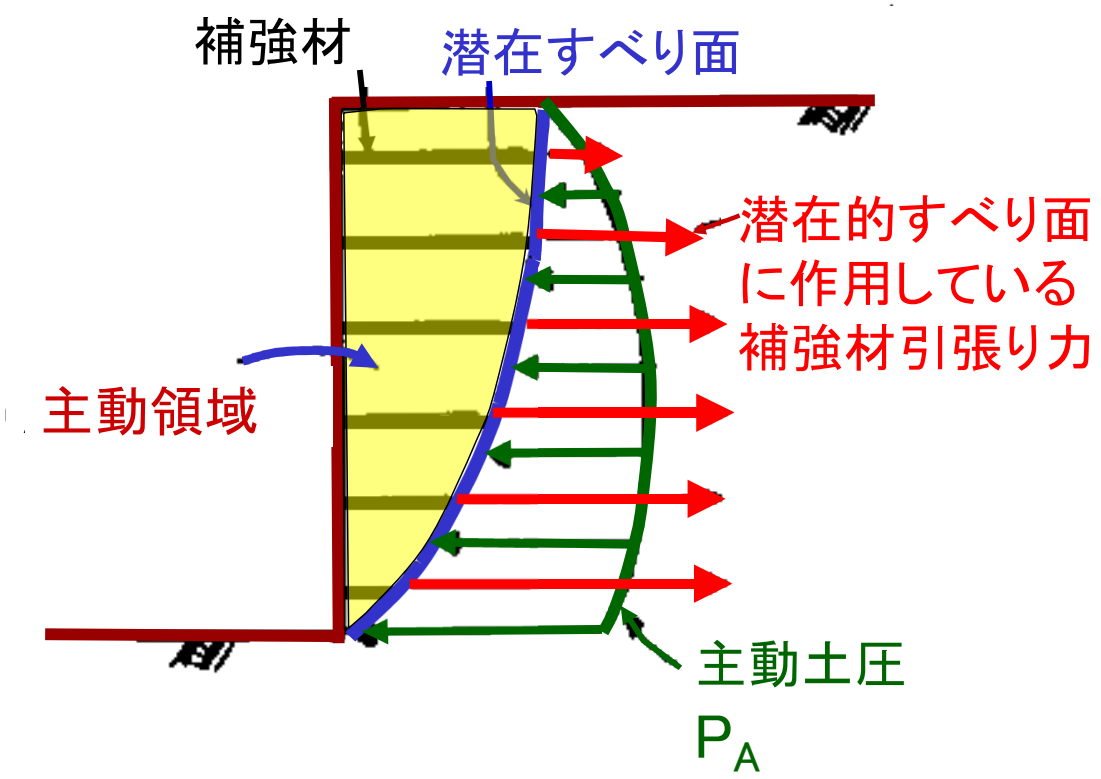
従って、片持ち梁構造ではありません。

このことを、次に説明します。

補強土擁壁における二種類の力の釣り合い:

(a) 潜在すべり面における力の釣り合い

(b) 壁面工における力の釣り合い



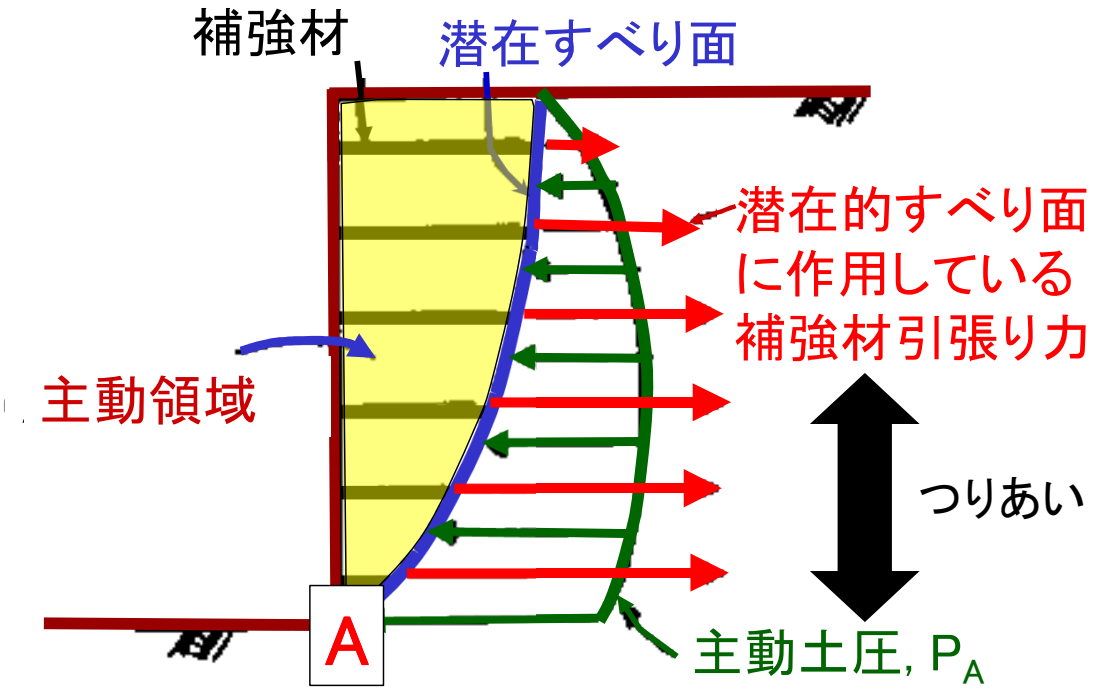
補強土擁壁には、この二つの力の力の釣り合いがあります。

(a)と(b)のいずれの釣り合いでは、補強材による抵抗力が作用荷重の土圧の総計よりも大きい必要があります。

（a）潜在すべり面における力の釣り合い

潜在すべり面で、各高さに作用する主働土圧に、各高さでの補強材引張り力が抵抗。

片持ち梁の構造ではないから、基礎地盤に大きな滑動せん断力と転倒モーメントが作用しない。



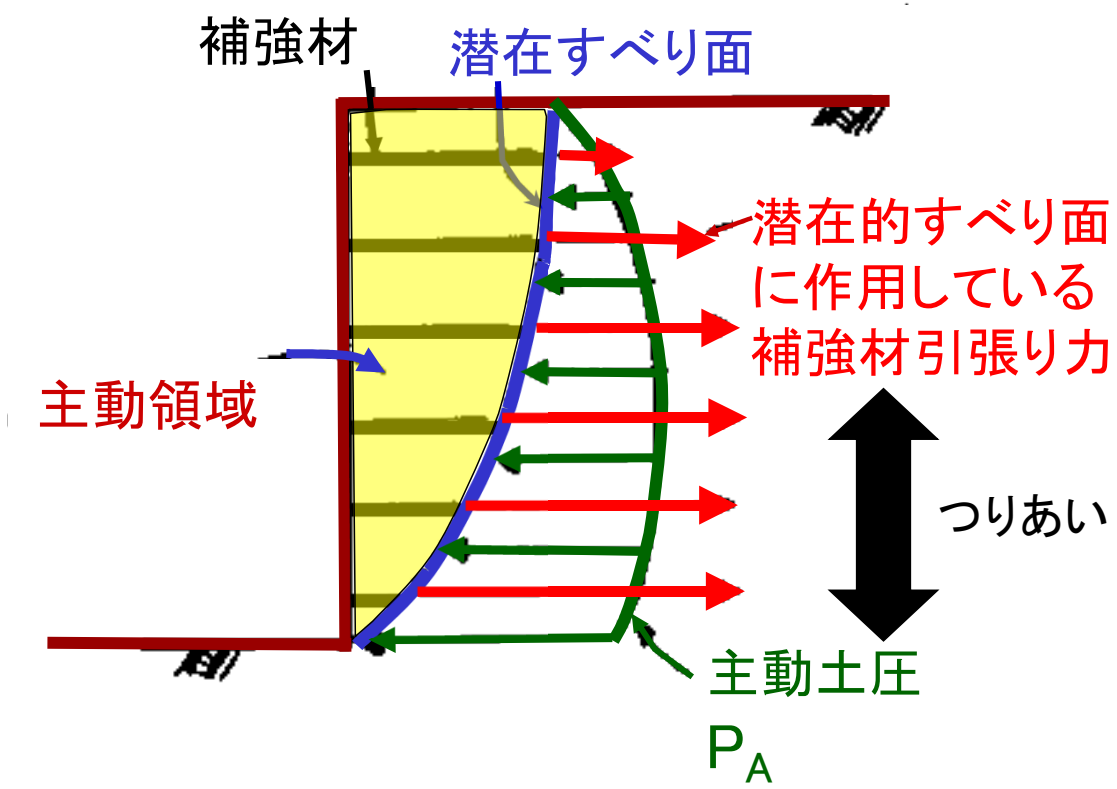
これは、(a)潜在すべり面における力の釣り合いを説明しています。

潜在すべり面では、各高さに作用する主働土圧に、各高さでの補強材引張り力が抵抗しています。

この点で片持ち梁の構造ではありません。

従って、図のAの位置に、基礎地盤に大きな水平滑動荷重と転倒モーメントが作用しません。

従って、擁壁が高くなっても特に大規模構造物にはならない。
この点では、従来型の擁壁が不要のように思える。 しかし、…



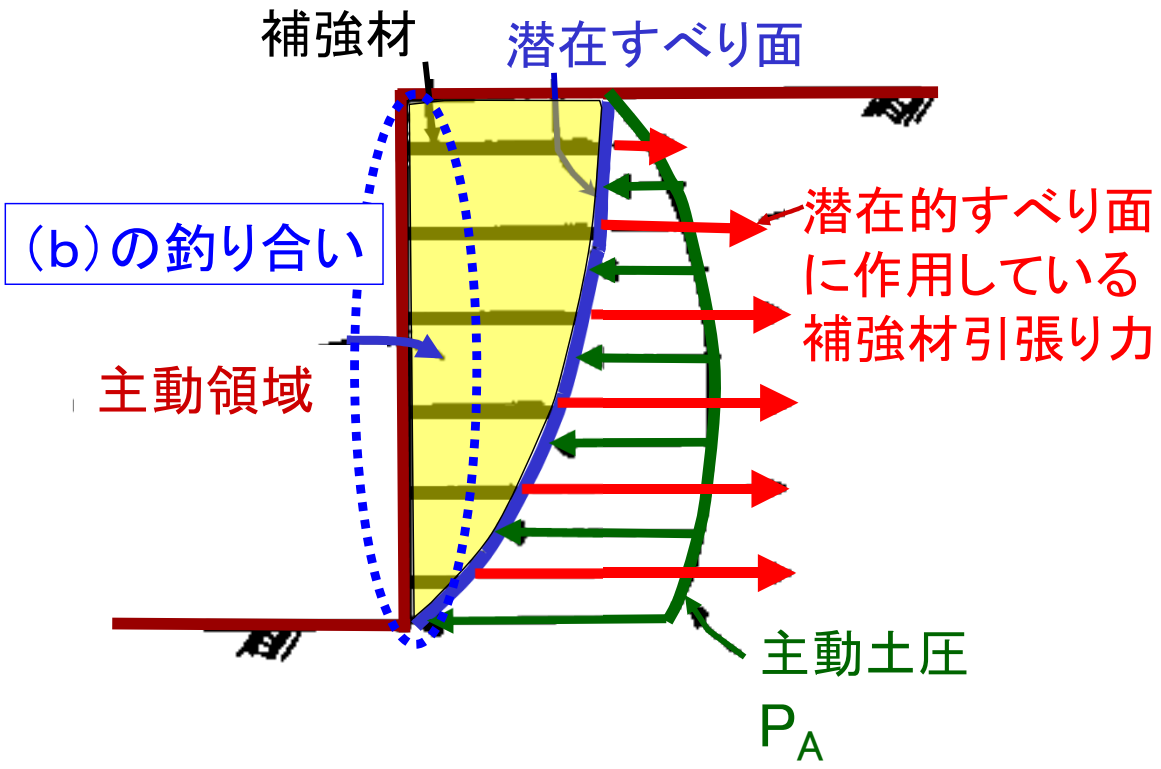
従って、擁壁が高くなっても特に大規模構造物にはならない。

(a)の力の釣り合いだけを考慮すると、従来型の擁壁が不要のように思える。

しかし、(a)の力の釣り合いを考察しても、潜在すべり面と壁面の間の主働領域の安定を検討することはできない。

主働領域の安定性の検討には、(b)の壁面に沿って力の釣り合いを検討する必要があります。

(b) 壁面工における力の釣り合いと主動領域の安定性を忘れてはいけない！⇒壁面工の重要性



もう一つは、

(b)壁面における力の釣り合いです。

壁面の位置で十分大きな土圧が作用することによって、主働領域の安定に必要な大きな拘束圧が発揮できます。

この土圧に対して、補強材が引っ張り抵抗できる必要があります。

この釣り合いが満たされると、主動領域の安定性が保たれます！

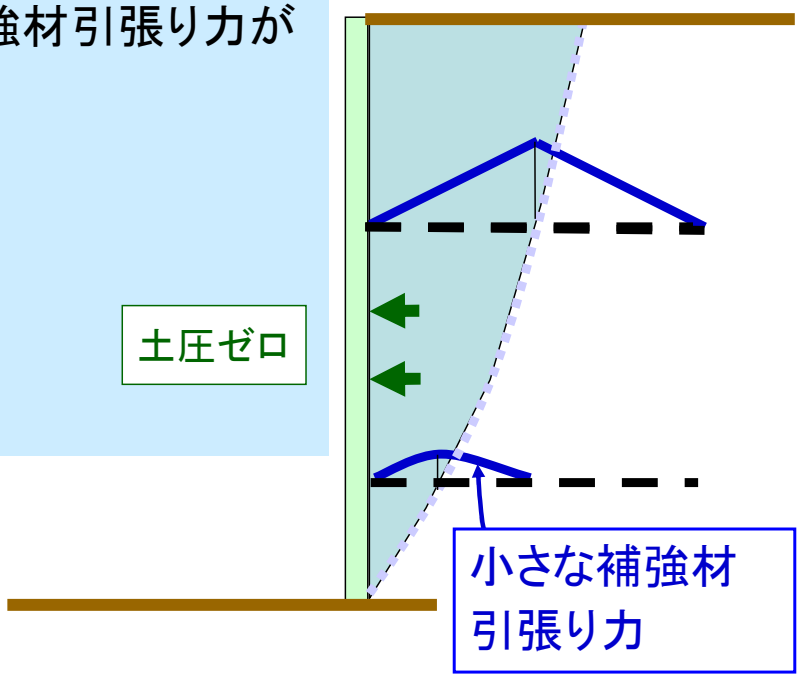
⇒ 壁面に十分大きな土圧が発生できるためには、壁面工に一定の剛性と一体性があることが重要になります。これを、次の説明します。

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

壁面での土圧がゼロ⇒
①主働域内の拘束圧が低い
②盛土下部では十分な補強材引張り力が発生しない

⇒主働域の剛性が低い
⇒盛土の変形が大きい

好ましくない不安定状態



これは、仮に壁面工が柔軟化であるか、剛性があっても補強材に連結されていない場合は、

・壁面に土圧が発生せず、
・従って、補強材に十分な引っ張り力が発揮されず、
・盛土に拘束圧を与えて主働領域を安定化させることができないこと、

を示しています。

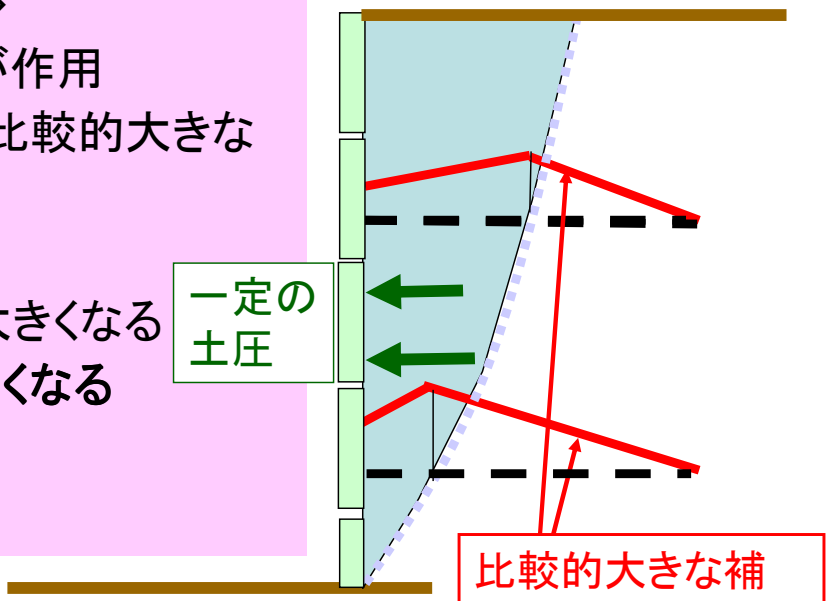
このような補強土擁壁は、不安定であり、建設してはいけません。

一定の剛性がある壁面工に補強材が連結されていて、壁面工背面に作用する土圧が比較的高い場合

壁面に一定の土圧が作用⇒
①主働域に一定の拘束圧が作用
②盛土下部の補強材でも、比較的大きな引張り力が発生

⇒主働域の剛性は比較的大きくなる
⇒盛土の変形は比較的小さくなる

安定で好ましい状態

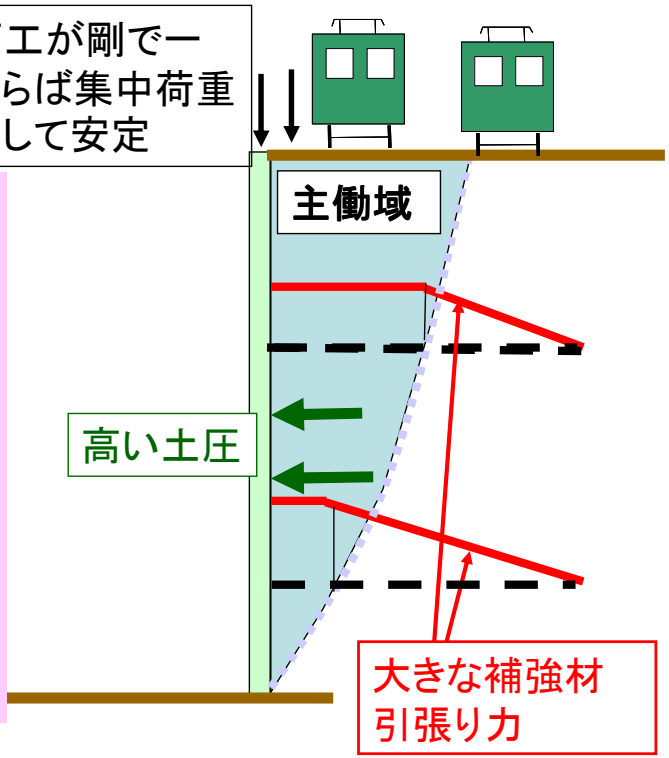


これは、主働領域が安定しているためには、

・壁面工に一定の剛性があり、
・その背面に補強材層が連結されていて、
・壁面工背面に十分に大きな土圧が作用して、主働領域に一定の拘束圧を加えられること、

が重要なことを説明しています。

剛な壁面工に補強材が連結されていて、壁面工背面に高い土圧が作用する場合



壁面に作用する土圧は大きい⇒
①主働域の拘束圧は高い
②盛土下部でも補強材に十分大きな引張り力が発生

⇒主働域の剛性は高い
⇒盛土の変形は小さい

安定で好ましい状態

これは、主働領域は、

・壁面工に高い剛性があり、

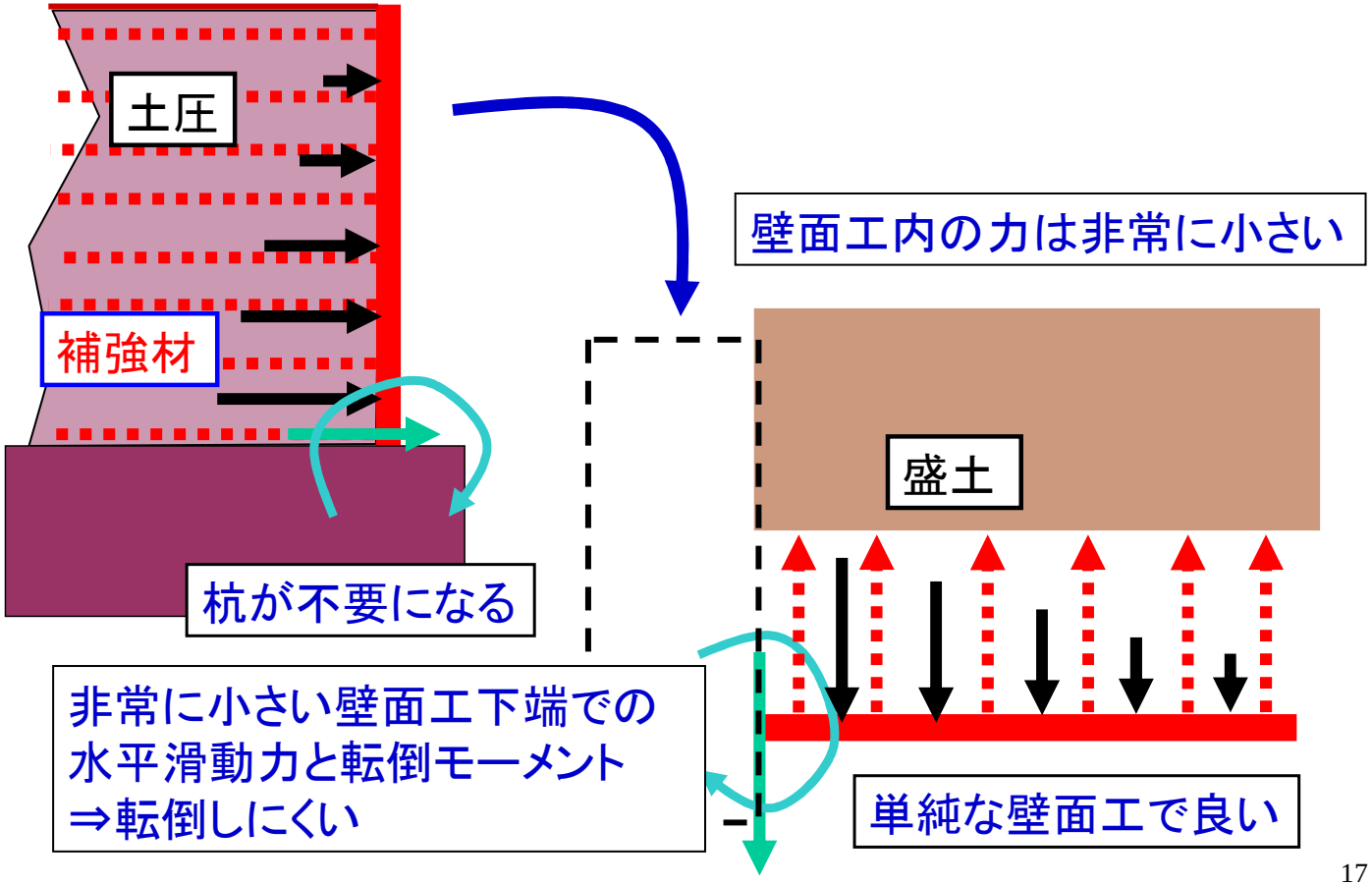
・その背面に補強材層が連結されていて、

・壁面工背面に大きな土圧が作用して、主働領域に大きな拘束圧を加えられること、

より安定することを説明しています。

このような補強土擁壁を建設する必要があります。

剛な一体壁面工を持つ補強土擁壁:　多数の近接した支点で支持された連続梁なので、壁面に土圧が作用しても・・・

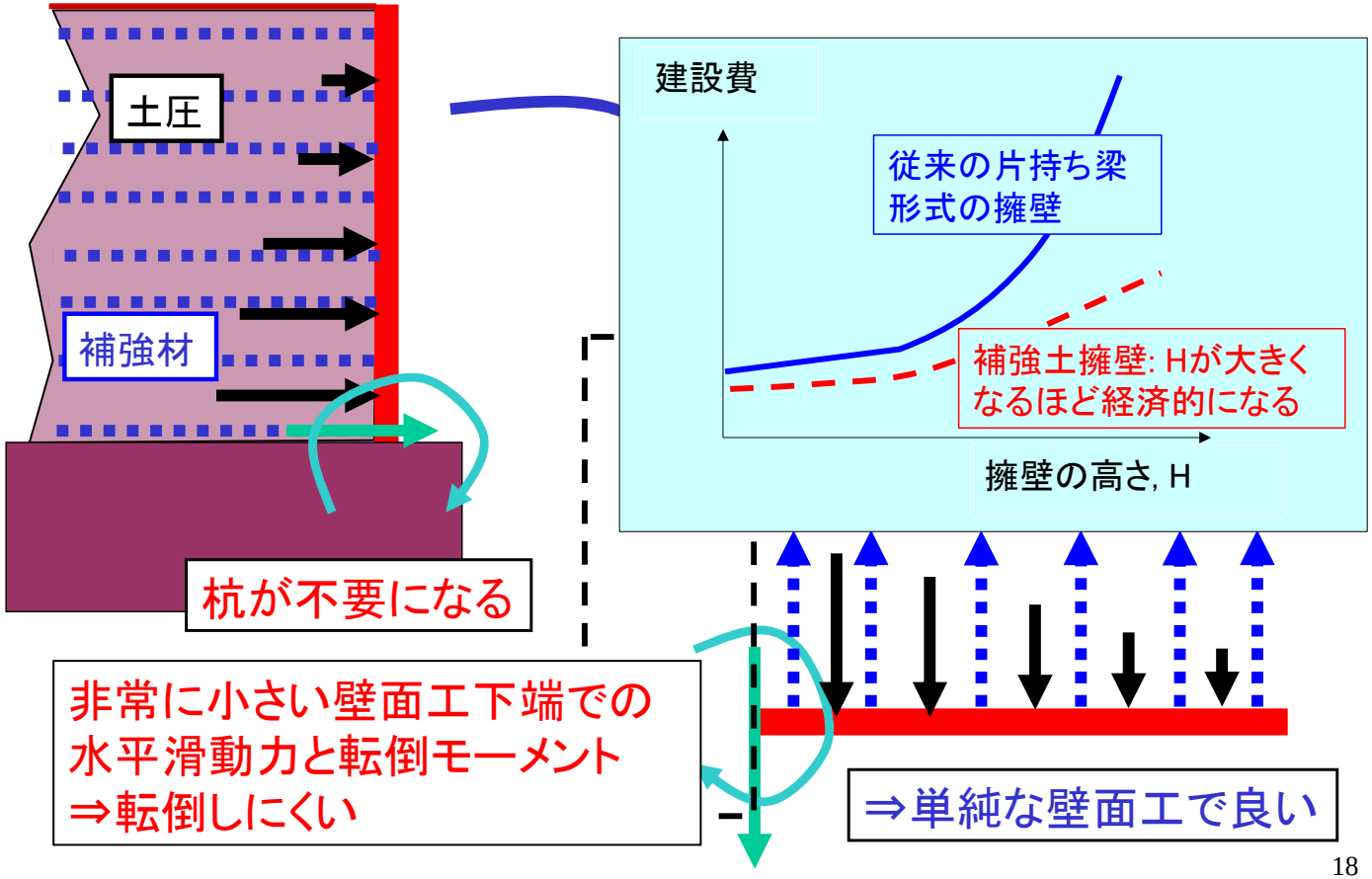


この壁面工は、一定の剛性と一体性があり背面に多層の補強材が連結してあるため、「多数の近接した支点で支持された連続梁」となっている。

このため、壁面工背面に作用する土圧によって壁面工内部に作用する力は、片持ち梁構造と比較すると、各段に小さくなります。従って、重厚な壁面工は不要になり、薄い壁面工で十分になります。

また、壁面工下端に作用する滑動力と転倒モーメントは小さくなるため、杭基礎で壁面工を支持する必要はなくなります。また、転倒しにくくなります。

剛な一体壁面工を持つ補強土擁壁:　多数の近接した支点で支持された連続梁なので、壁面に土圧が作用しても・・・

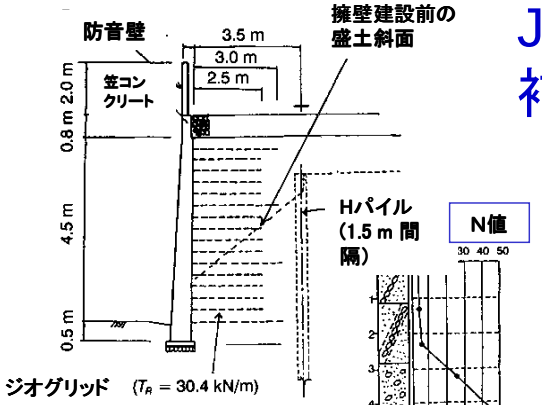


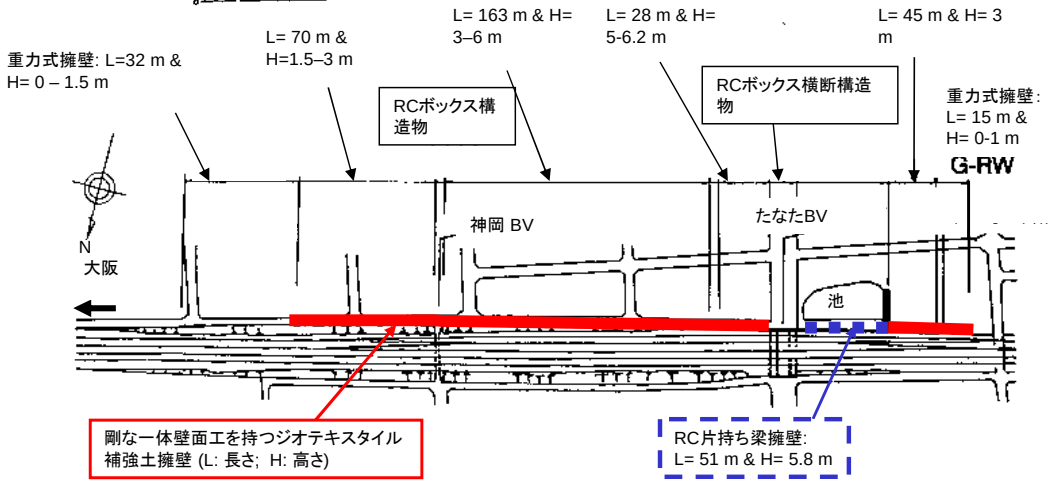
従って、片持ち梁構造の従来形式の擁壁では、壁高の増加に伴う土圧の総計の増加によって建設費は急速に増加するが、補強土擁壁では、そのような増加はない。

また、壁高が大きくなるほど、補強土擁壁は従来式擁壁よりも耐震性がより高くなる。

→壁高が大きくなるほど、補強土擁壁の方が有利になります。

JR神戸線，東灘区ジオテキスタイル補強土擁壁（1992年：建設中）





これは、1992年に、神戸市に建設されたJR神戸線の増線工事に関連して建設されたジオグリッド補強土擁壁です。

壁面工は剛で一体で、背面には補強材層が連結されています。

1992年7月（建設直後）

JR神戸線，東灘区
ジオテキスタイル補強土擁壁

1995年1月
（地震後1週間）

剛な一体壁面工を持つ
ジオテキスタイル補強土
擁壁は耐震性が高い！

1995年阪神淡路大震災では、、擁壁背後の線路、周辺の日本家屋や高速道路高架橋が大被害を受けました。

しかし、このジオグリッド補強土擁壁は無被害であり、非常に高い耐震性を示しました。

盛土補強土工法による土構造物の復権と発展

1)擁壁の力学的原理と補強土擁壁

a)従来形式の擁壁は片持ち梁！補強土擁壁は？

b)ジオテキスタイル補強土擁壁の施工例

2)補強土工法のメカニズム

3) 剛な一体壁面工を持つジオテキスタイル補強土擁壁

a)剛な一体壁面工の効用

b)段階施工の効用

c) 洪水・豪雨・津波と補強土およびレベル2地震動を考慮した耐震設計

4) GRS橋台とGRS一体橋梁

a) 従来形式の橋梁の諸問題を解決

b) 低い建設費、高い維持管理性・耐震性/耐津波性

c)施工例

次は、1-b)であり、

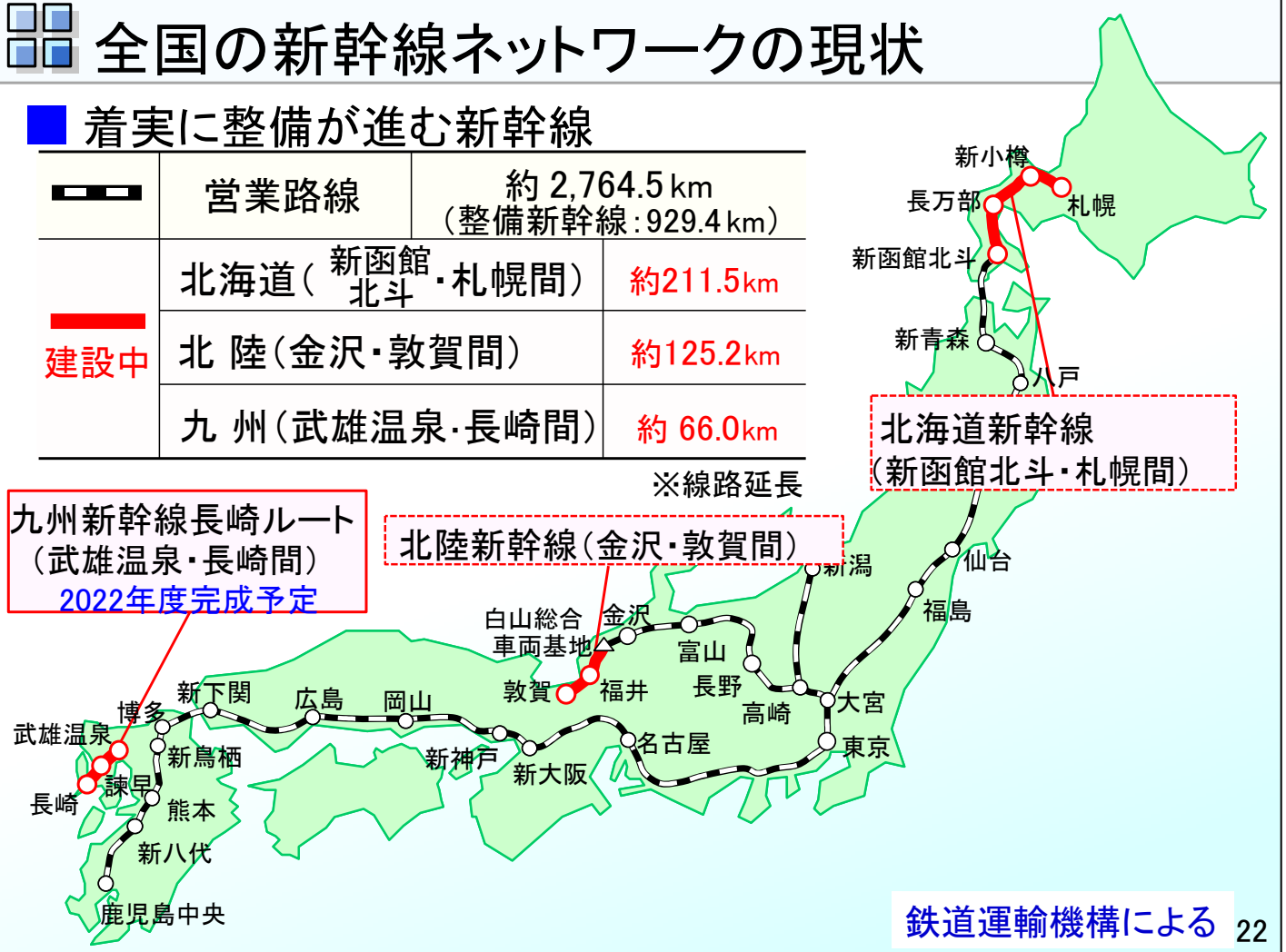
ジオテキスタイル補強土擁壁（ほとんどはジオグリッド補強土擁壁）の施工例を紹介します。

全国の新幹線ネットワークの現状

着実に整備が進む新幹線

	営業路線	約 2,764.5 km （整備新幹線：929.4 km）
建設中	北海道（新函館北斗・札幌間）	約211.5km
	北 陸（金沢・敦賀間）	約125.2km
	九 州（武雄温泉・長崎間）	約 66.0km

※線路延長



鉄道運輸機構による

このジオテキスタイル補強土擁壁は、今日、新幹線の擁壁等の土構造物の建設に全面的に採用されています。

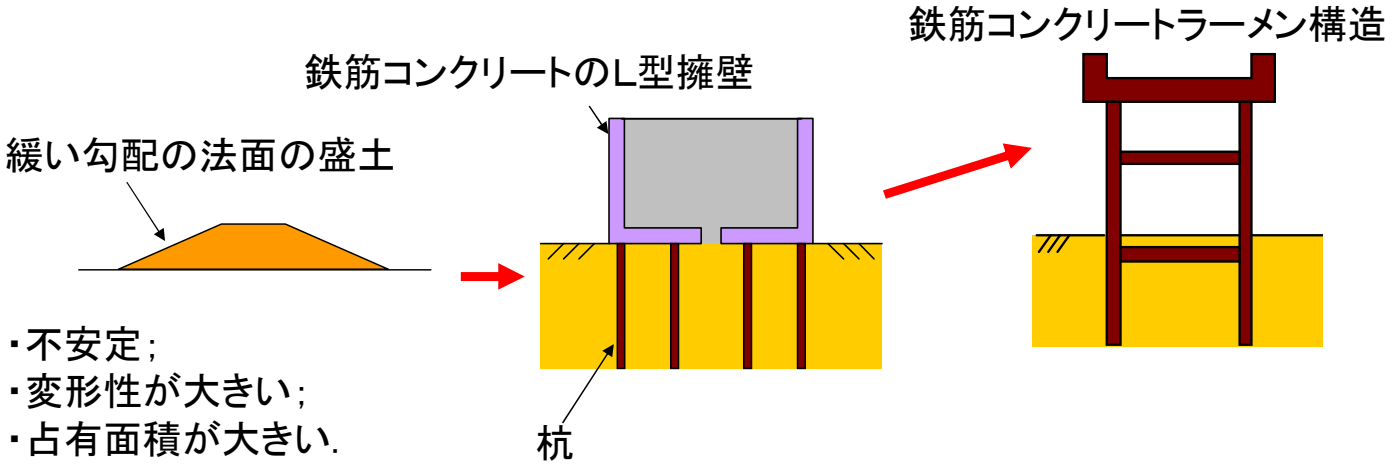
これから、そのような状態になった経緯を説明します。

これは、新幹線ネットワークの現状です。

黒の線路印が営業路線で、総延長は2,800km程度です。

赤の部分が現在建設中の区間です。

道路や鉄道における高架構造物の変遷にみる土構造物の復権と発展



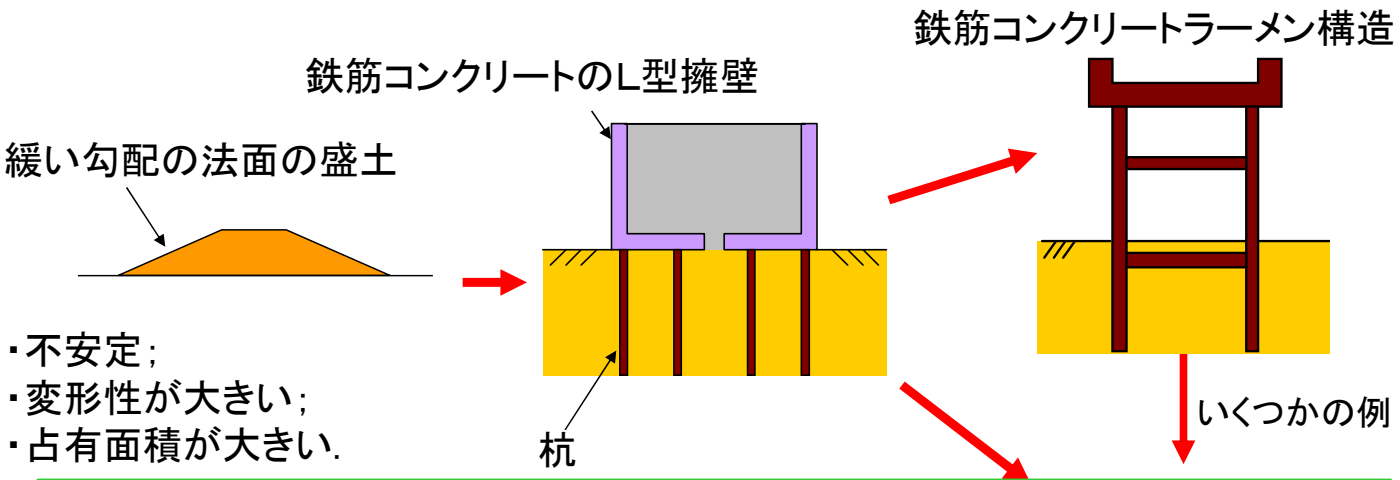
この図は、鉄道構造物での土構造物の放棄、その後の復権と発展の概略を説明したものです。

歴史的に見ると、高架構造物は古くは、盛土構造物が主要でした。

その後、盛土構造物からL型擁壁へ発展し、更に鉄筋エンクリートラーメン構造物へと進展しました。

これは、構造物の安全性の向上から見て、土木技術の発展を意味するものでした。

道路や鉄道における高架構造物の変遷にみる土構造物の復権と発展



鉄道構造物では、新設の従来式擁壁とテールアルメ擁壁は建設しなくなった

剛な一体壁面工を持つジオテキスタイル補強土擁壁

- 土は基本的に安い
- より高い費用便益費
- 十分に高い剛性と安定性（杭は不要の場合が多い）

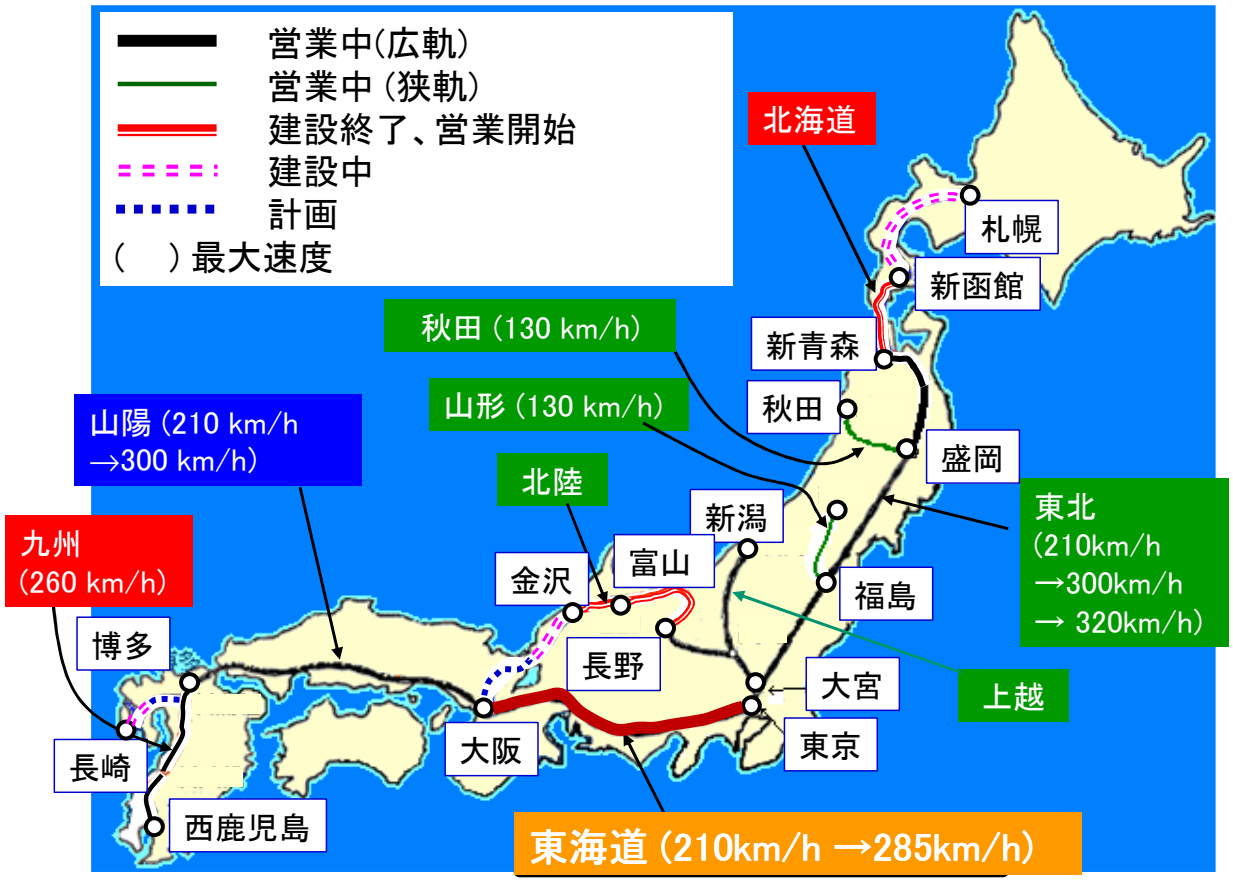
整備新幹線等で活用！

しかし、盛土の建設を止めてしまい、トンネルや斜面の掘削等で発生した土を利用せず、遠方まで運び谷間などを埋めるのは、経済的ではない。同時に、環境問題も引き起こします。

できるだけこのような掘削土を活用できて、より経済的で、しかも安定性も向上している土構造物が開発できれば、従来の盛土・擁壁構造物を全て鉄筋コンクリート構造物に変更する必要はなくなります。そのような新しい土構造物を採用すべきです。

その土構造物を復権させ発展させるあたらしい新技術が、補強土擁壁であり、典型的なのがこの図に示す「剛な一体壁面工を持つジオテキスタイル補強土擁壁」です。

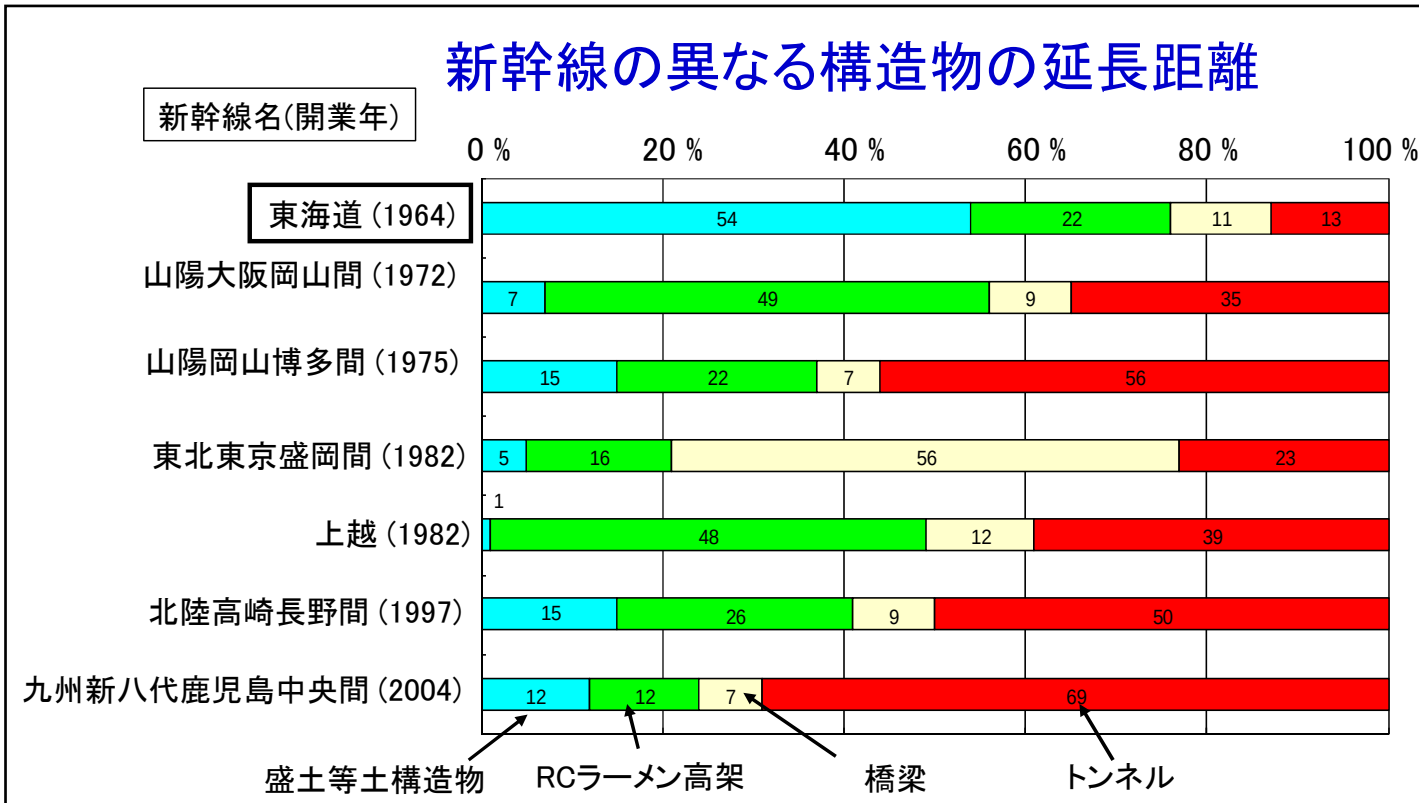
土木構造物から見た新幹線の三世代



第一世代(1964年開業)

では、「剛な一体壁面工を持つジオテキスタイル補強土擁壁」が、新幹線の擁壁等の土構造物として全面的に採用された経緯を見てみましょう。

日本の最初の新幹線は、1964年に開通した東海道新幹線です。



第一世代: 東海道(1964年開業)

盛土が主: – 長期に亘る残留沈下/橋台とボックスカルバートの裏で段差

– 地震と豪雨に対する安定性が不足

→ 今日まで長期に亘る大規模な維持補修

これは、新幹線の構造物での

・盛土等の土構造物、

・RCラーメン高架構造物、

・橋梁、

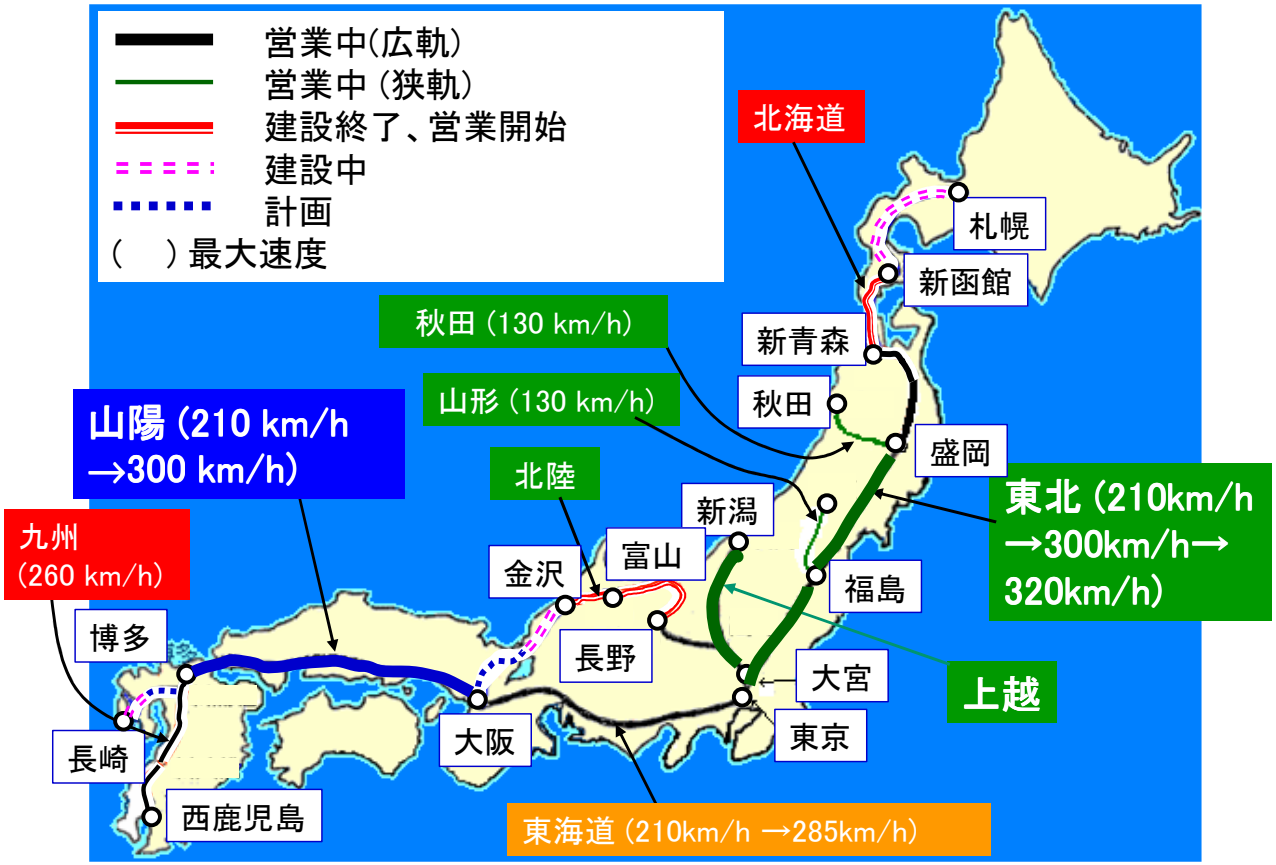
・トンネル

の建設距離の比較です。

1964年に開通した第一世代の新幹線である東海道新幹線の土木構造物は従来の工法と基準で建設されていて、盛土が多い上に耐震設計も不十分でした。そのため、建設直後から盛土の沈下の問題が生じ、豪雨と地震に対する安定性も不十分でした。そのため、今日に至るまで膨大な費用で維持管理・補修が行われています。

その結果、その後新幹線には盛土はできるだけ建設しない方針となってしまいました。

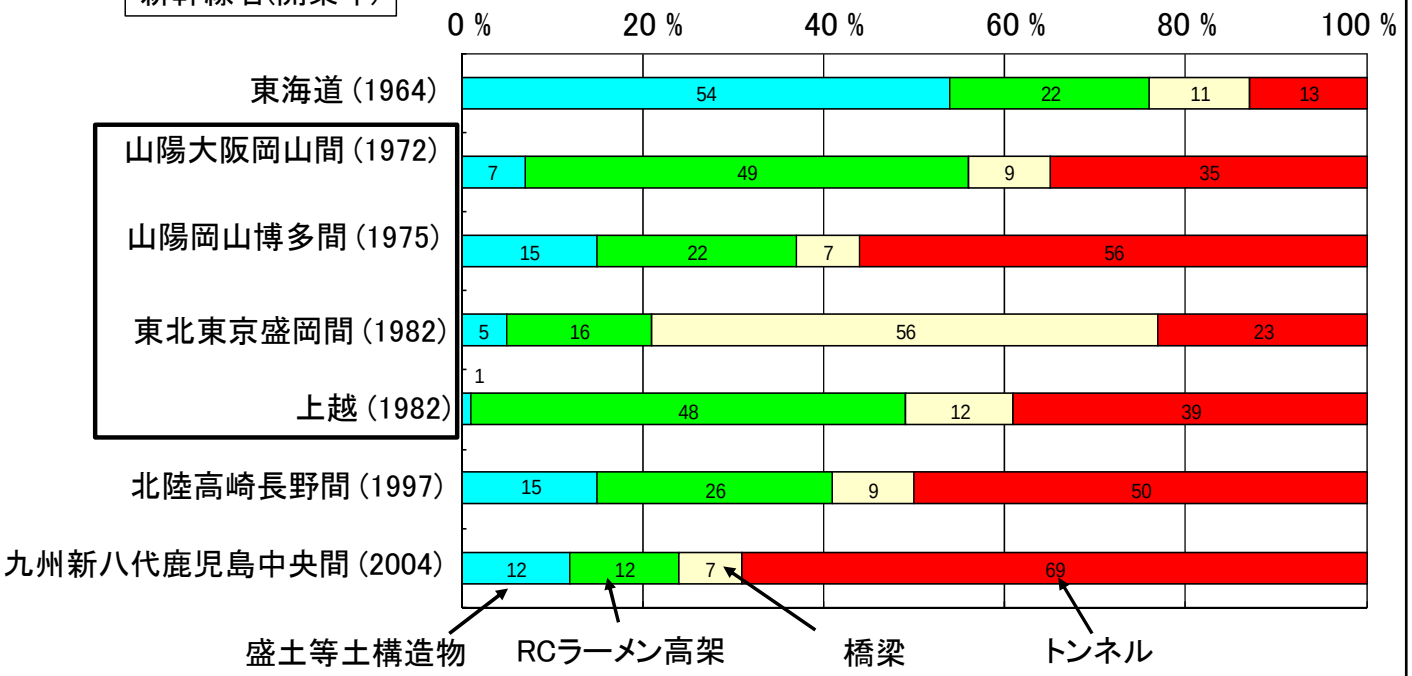
土木構造物から見た新幹線の三世代



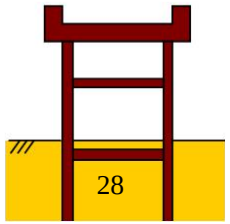
第二世代: 山陽(1972), 上越 (1975)、東北(東京盛岡間)(1982)

第二世代は、山陽新幹線、上越新幹線、東北新幹線(盛岡まで)です。

新幹線の異なる構造物の延長距離



第二世代: 山陽(1972年開業)、上越(1975年開業)、
東北(東京盛岡間)(1982年開業)
盛土構造物は基本的に不採用、RCラーメン高架が主:
しかし、盛土可能区間では、建設費は相対的にかなり高くなる
トンネル等の掘削土の処理のコスト・環境負荷

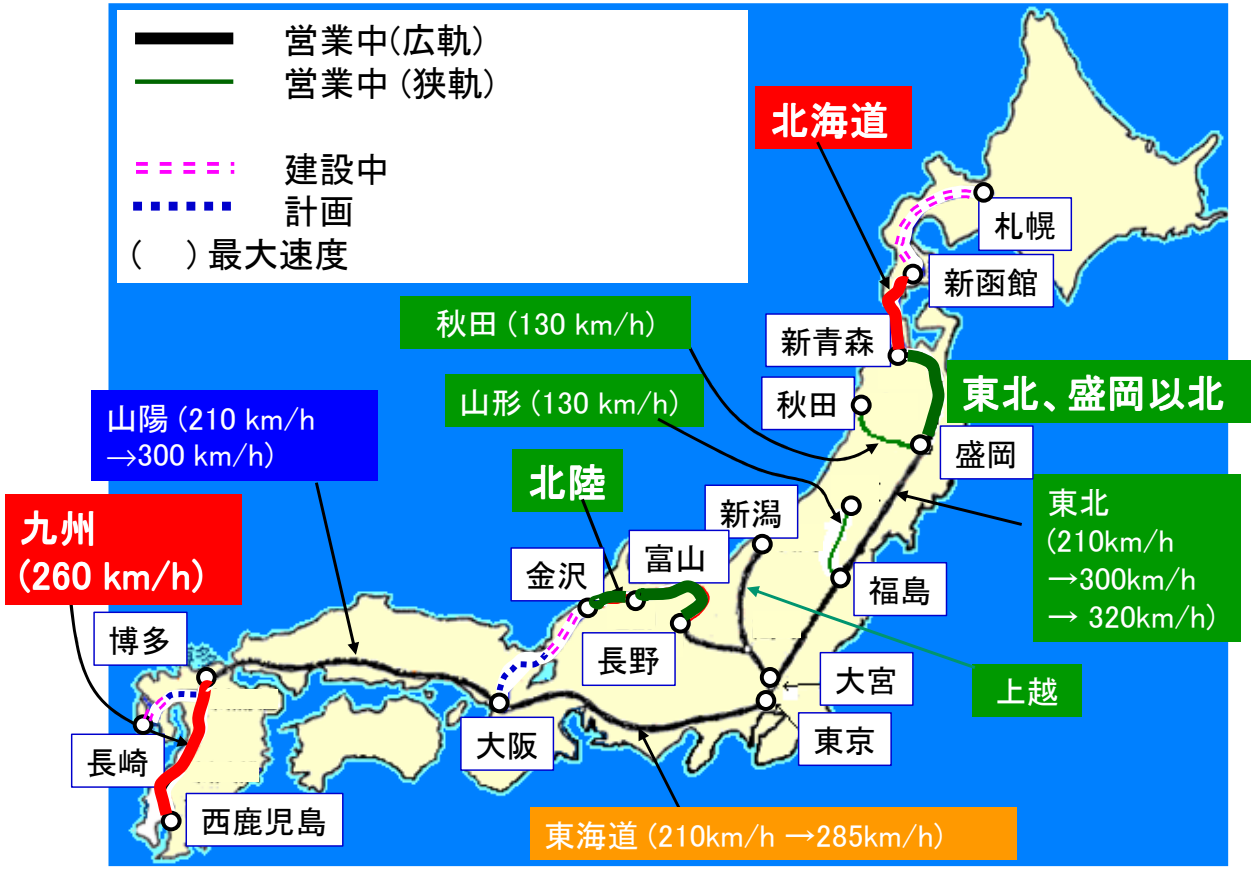


第二世代の山陽新幹線、上越新幹線、東北新幹線(盛岡まで)では、東海道新幹線での「盛土での悪い経験」に基づいて、盛土構造物は基本的に不採用でした。

このため、盛土等の土構造物の建設区間は、著しく減少しました。

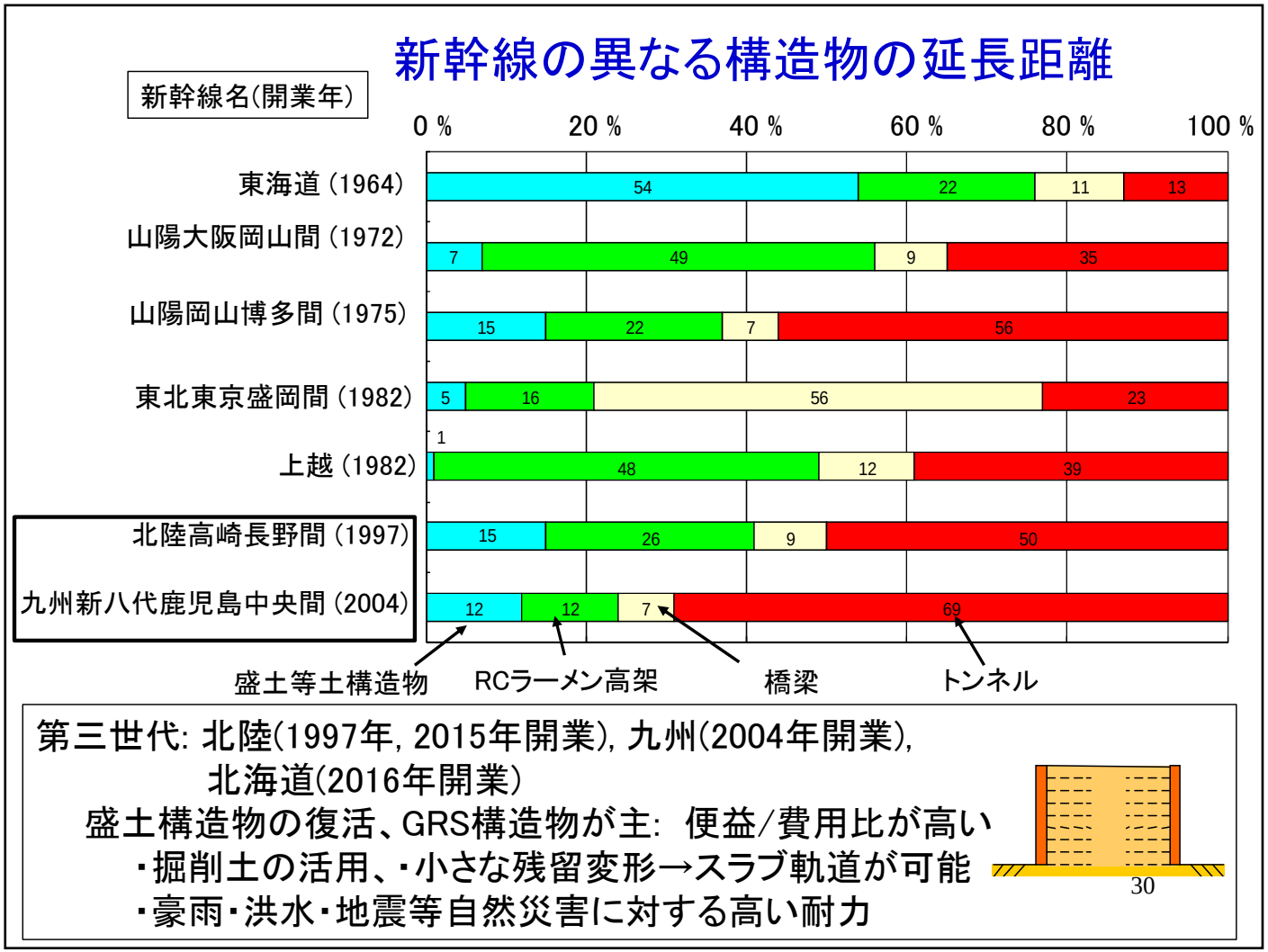
しかし、盛土可能区間でも盛土を建設しなかったため、建設費は相対的にかなり高くなりました。また、トンネル等の掘削土も使用しないで処理したため、コスト・環境負荷が問題となりました。

土木構造物から見た新幹線の三世代



第三世代: 北陸(1997), 九州(2004)、北海道(2016)

第三世代は、北陸新幹線、九州新幹線、北海道新幹線です。



第三世代では、盛土構造物が一定程度復活しました。これは、ジオグリッド補強土擁壁（GRS構造物）が開発されていて、それが広く採用されたためです。

以下が、その理由です。

・掘削土を活用できる。

・良い締固めが保証されて、構造的に安定であるため、残留変形を小さくできる。

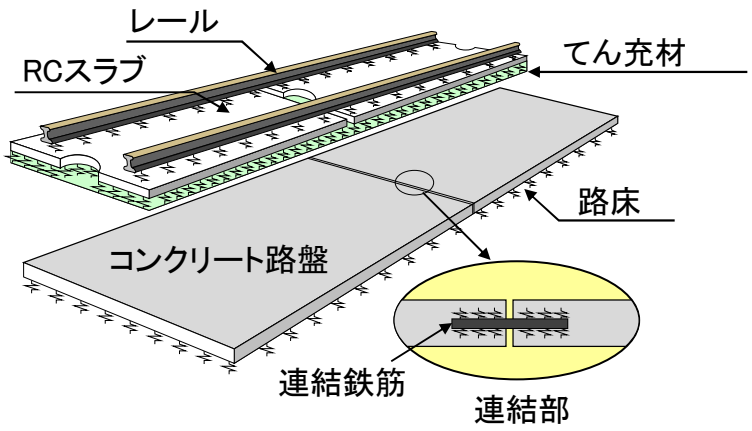
→維持管理費が低くなる。

→スラブ軌道が可能になる。

・豪雨・洪水・地震等自然災害に対して安定性が高い。

従って、総合的に見て、経済的です（便益/費用比が高い）。

連続RCスラブ軌道



鉄道運輸機構　玉井眞一氏による

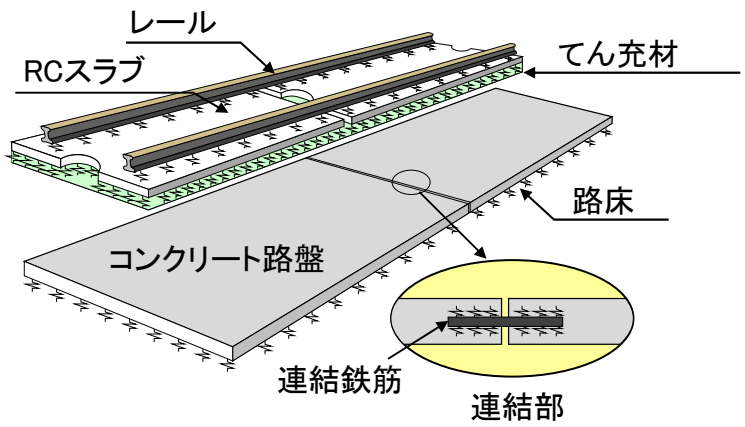
- 直接建設費は比較的高い
- しかし、維持管理費は大幅に減少
- 許容残留沈下は非常に小さい
- 1970年代山陽新幹線（岡山～博多間、1975開業)から、
  RC構造物にだけ使用（残留変形の大きい通常の盛土では使用不可）
- 北陸新幹線（東京～長野間, 1997年開業）から、
  GRS構造物にも使用開始（適切に設計・施工したGRS盛土では残留変形・沈下は十分に小さくなることを確認）

連続RCスラブ軌道は、車両が安定し乗り心地が良い。また、維持管理費は大幅に減少する。

しかし、建設費は比較的高い。また、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（残留変形が大きい通常の盛土では使用不可）

連続RCスラブ軌道



鉄道運輸機構　玉井眞一氏による

- 直接建設費は比較的高い
- しかし、維持管理費は大幅に減少
- 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（残留変形の大きい通常の盛土では使用不可）
- 北陸新幹線（東京～長野間, 1997年開業）から、
  GRS構造物にも使用開始（適切に設計・施工したGRS盛土では残留変形・沈下は十分に小さくなることを確認）

適切に設計・施工したGRS盛土では残留変形・沈下は十分に小さくなることを確認

→北陸新幹線（東京～長野間, 1997年開業）から、GRS構造物にも使用開始

→第二世代以降の新幹線では、パラスト軌道から連続RCスラブ軌道に変更。

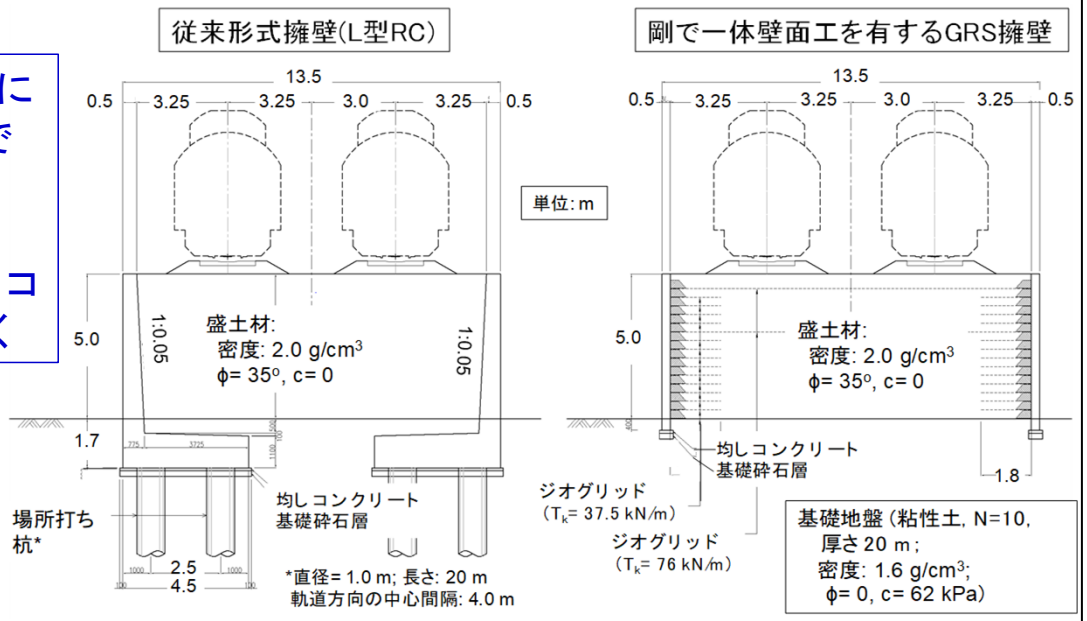
ジオテキスタイル補強土(GRS)の擁壁等のGRS構造物は、RC連続スラブ軌道に適合していて、全面的に採用している。

なお、盛土が多い東海道新幹線では、依然としてバラスト軌道。

従来工法による擁壁のコストを1.0とした時のGRS擁壁のLCCのコスト

レベル1設計地震動に対する設計の場合での試算

レベル2に対しては、コストの差がさらに開く



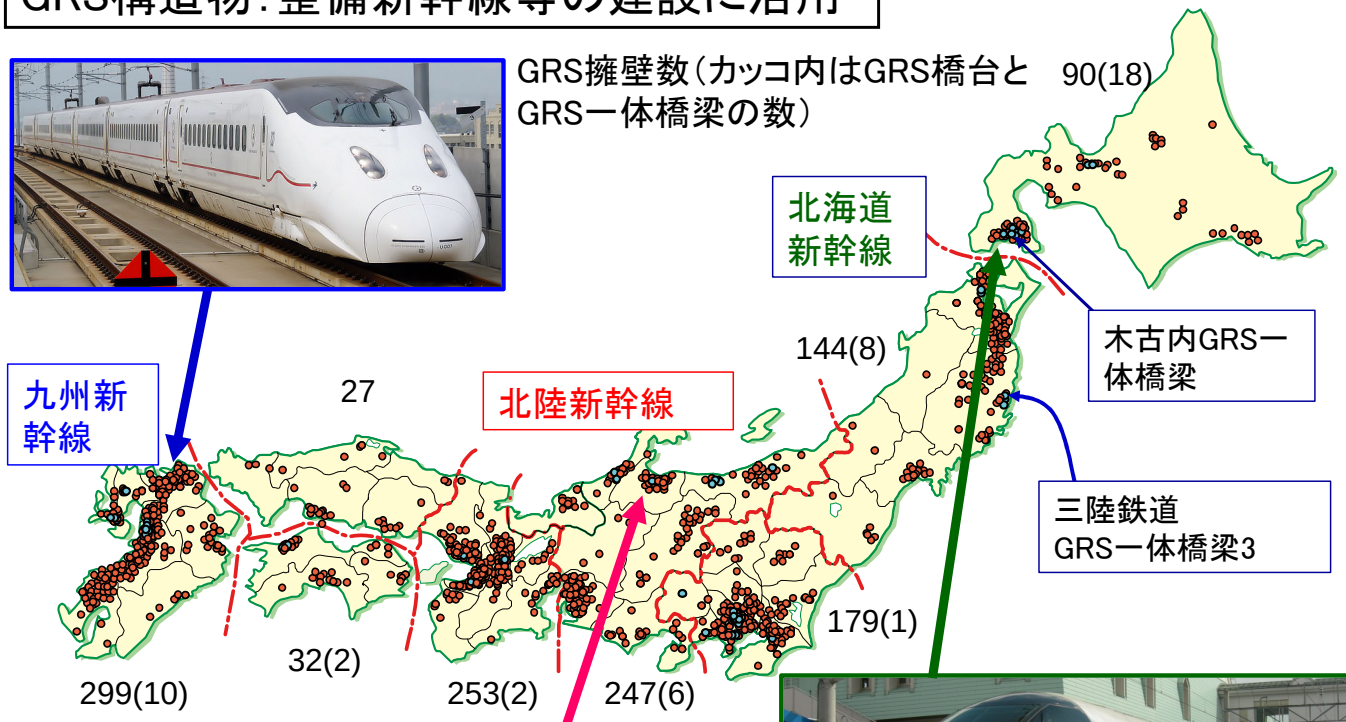
	直接建設費	20年間維持管理費: これまでの実績に基づく	総合LCC
この図の粘性土地盤の場合であり、従来形式の擁壁は杭支持であるがGRS擁壁は杭不使用の場合	0.32	0.5	0.33
硬質地盤で、何れも杭を使用しない場合	0.81	0.51	0.77

Life Cycle Cost(LCC, 建設費+長期維持管理費)の比較:

GRS構造物は、従来工法の構造物よりも、決定的にLCCが低い場合が多い。これが、GRS構造物が広く普及したことの大きな要因の一つ。

GRS構造物：整備新幹線等の建設に活用

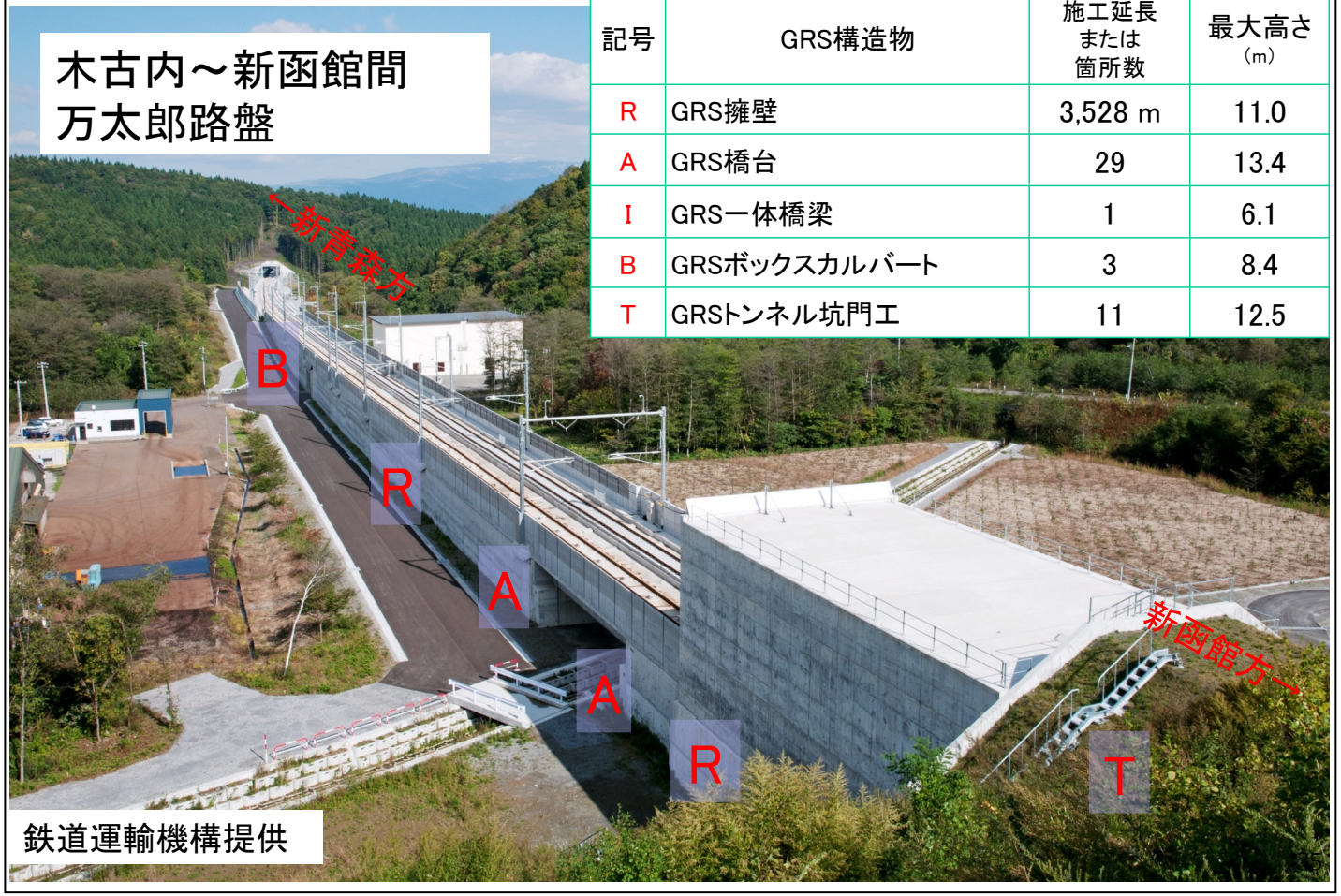
GRS擁壁数（カッコ内はGRS橋台とGRS一体橋梁の数）



第三世代の新幹線では、ジオテキスタイル補強土擁壁などGRS構造物は全面的に採用されている。

次頁以降に、その具体例を示す。

北海道新幹線でのGRS構造物の全面採用



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	29	13.4
I	GRS一体橋梁	1	6.1
B	GRSボックスカルバート	3	8.4
T	GRSトンネル坑門工	11	12.5

北海道新幹線での例です。

ここの現場での土木構造物は、全てジオテキスタイル補強土(GRS)の構造物です。

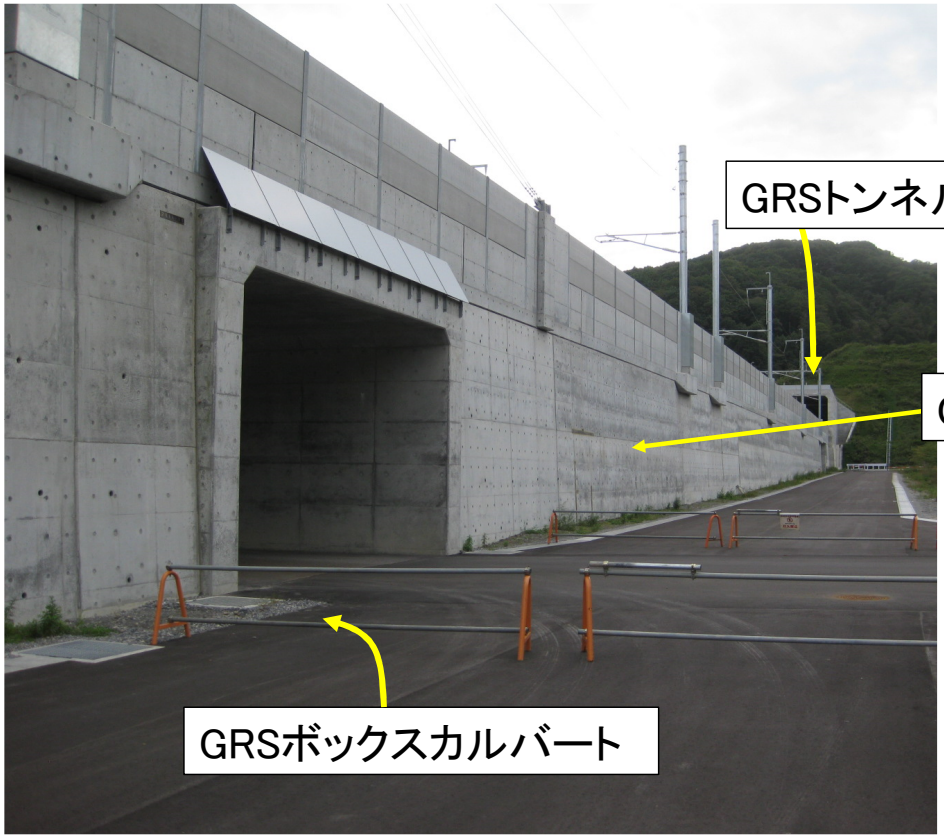
Rは擁壁、

Aは橋台(abutment),

Bはボックスカルバート、

Tはトンネル出入り口での坑門工です。

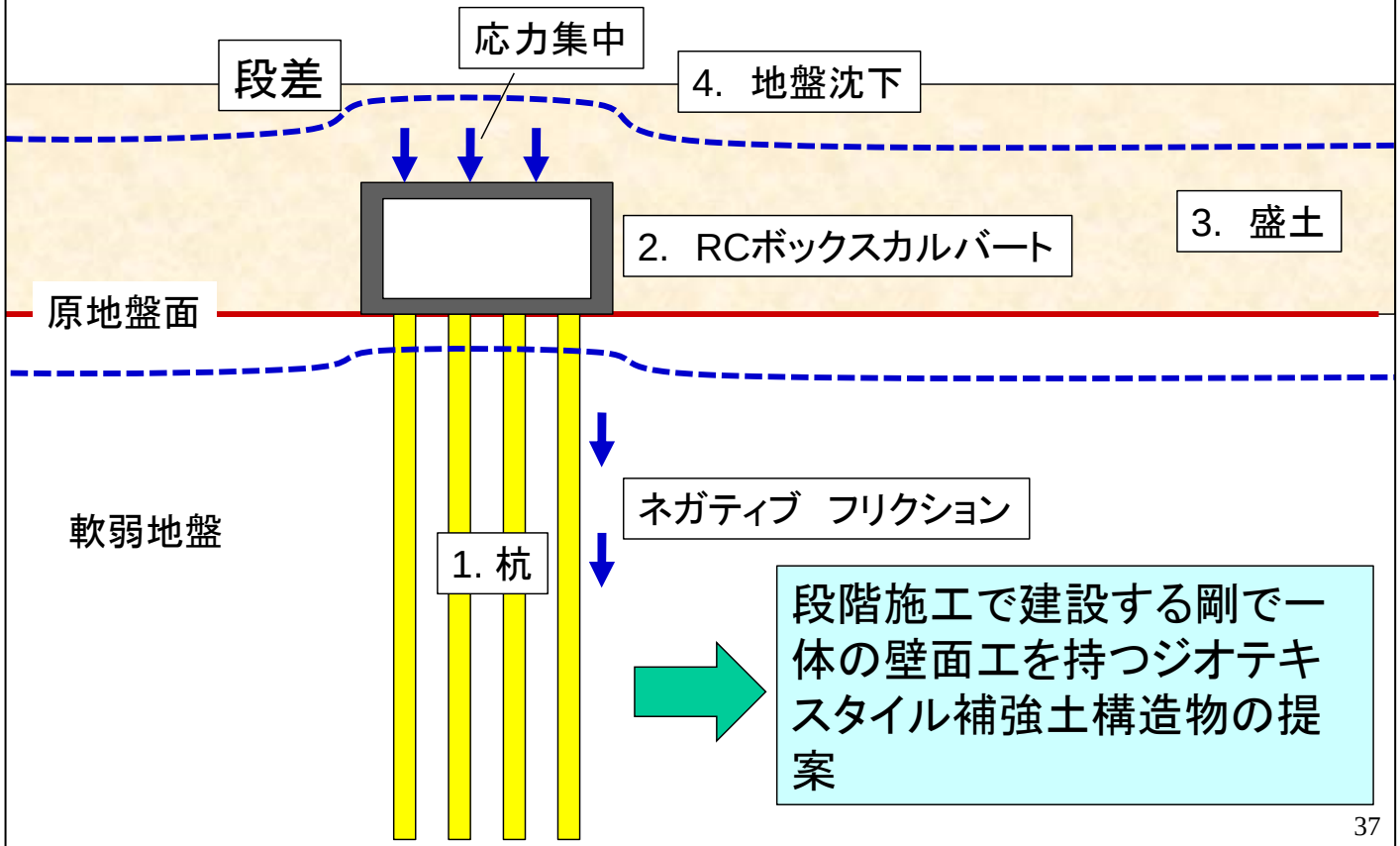
北海道新幹線： 典型的なGRS構造物



これは、ジオテキスタイル補強土の擁壁とボックスカルバートです。

ジオテキスタイル補強土工法を用いたボックスカルバートの意義は、次に説明します。

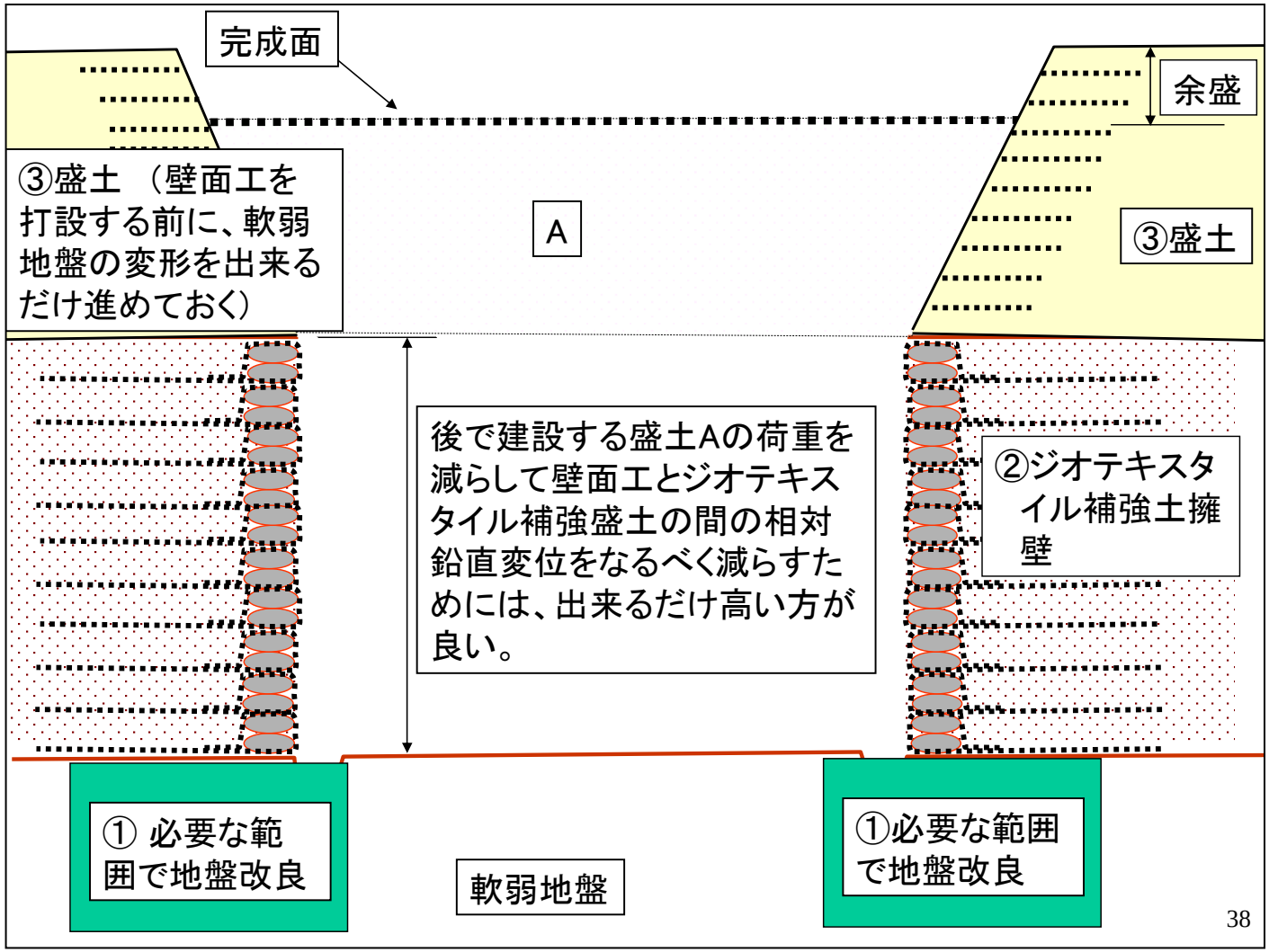
軟弱地盤上の道路・鉄道盛土でのRCボックスカルバートの建設:　　従来工法の問題点



従来形式のボックスカルバートは、1→2→3→4の順序で建設されます。しかし、各種の問題があります。

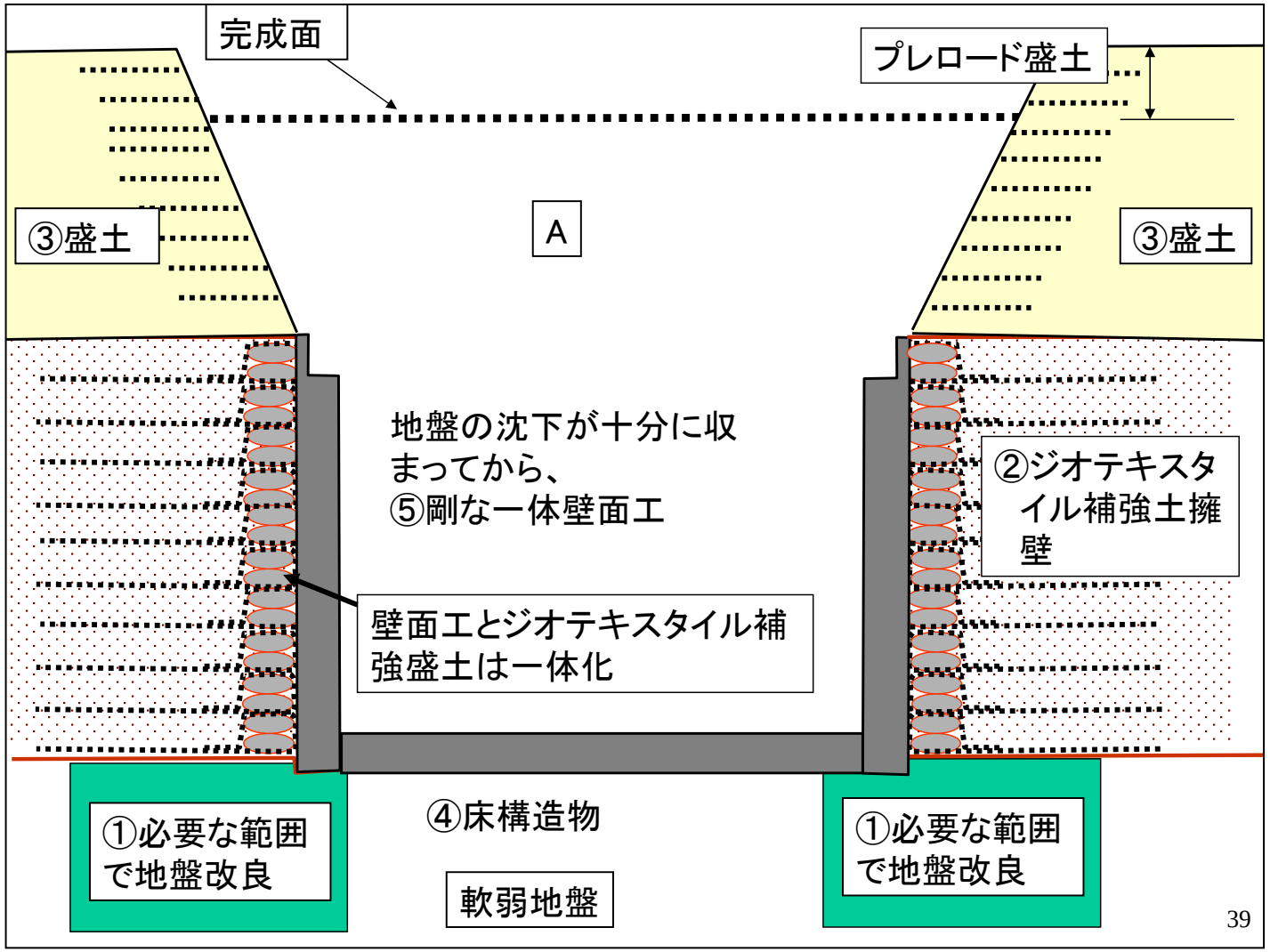
長期に沈下を生じさせないように杭で支持したボックスカルバートを最初に建設してから、次に盛土を建設します。

このため、段差、応力集中などの諸問題が生じます。



一方、ジオテキスタイル補強土でボックスカルバートを建設する場合は、まず②ジオテキスタイル補強土の擁壁を建設します。その次に③盛土をして、地盤沈下と補強盛土の沈下・変形を生じさせます。

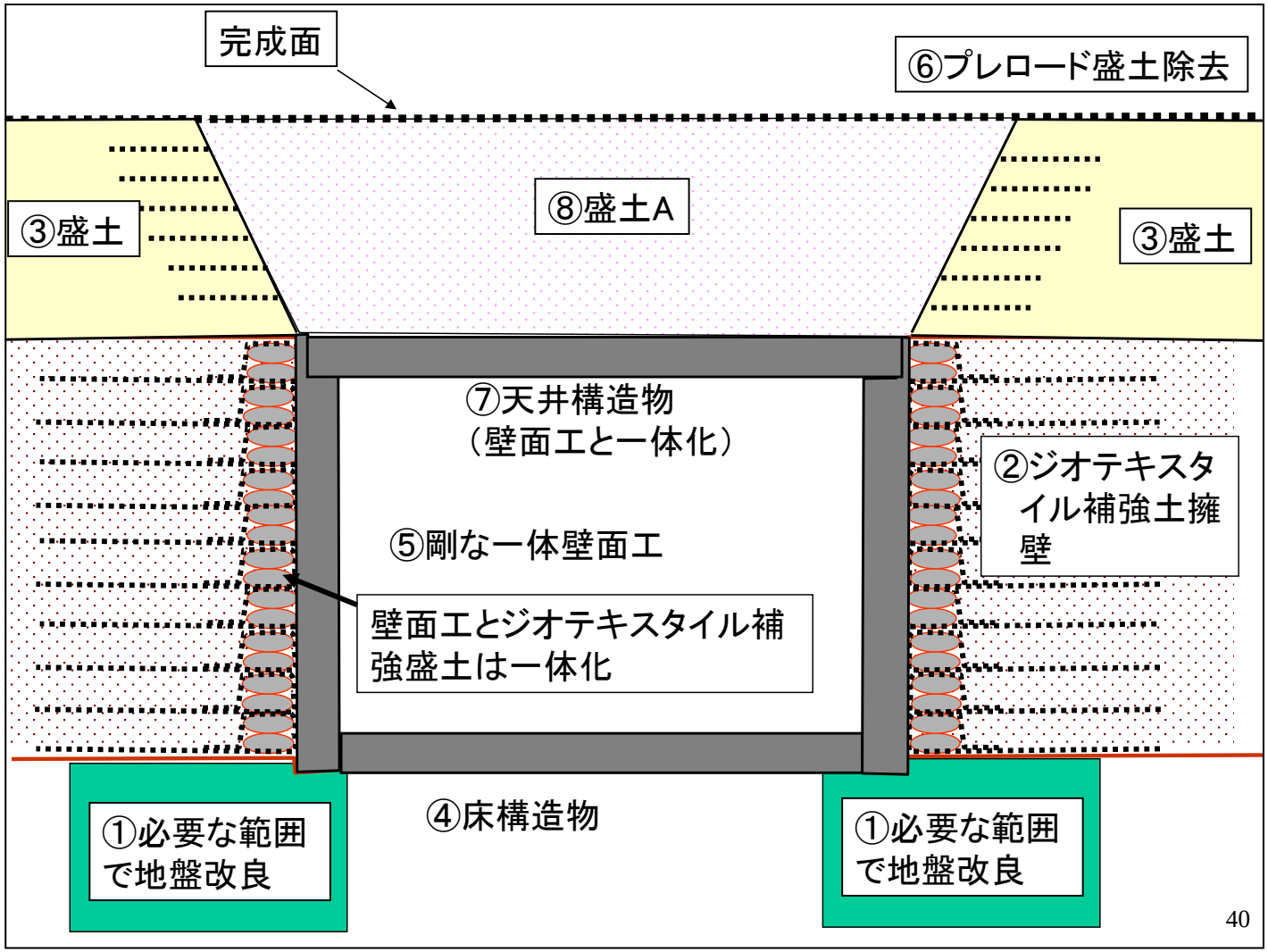
この段階では、まだ壁面工はありません。



③盛土による沈下変形が終了してから、剛で一体のRC壁面工を補強材と一体になるように建設します。

既に、支持地盤と補強盛土の主要な沈下変形は終了しているので、問題は生じません。

プレロード盛土は、地盤と補強盛土の変形を前もって進行させておくためです。地盤と補強盛土の変形が少なくなるように設計する必要があります。



次に、

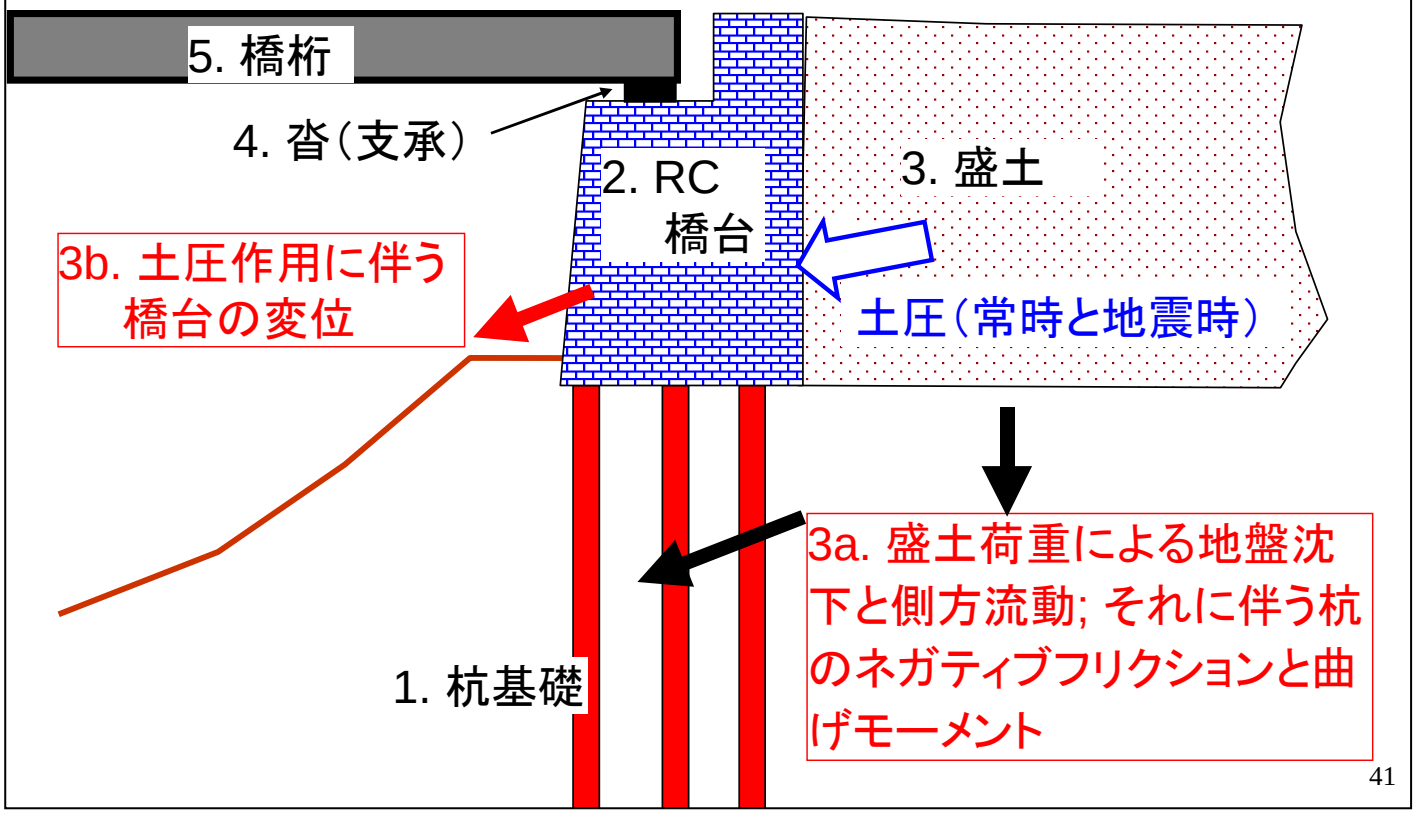
⑥地盤と補強盛土の変形を前もって進行させておくためのプレロード盛土を取り除き、

⑦天井構造物を建設し、

⑧最後に蓋としての盛土を建設して、

完成させます。

従来形式の橋台での諸問題(数字は施工順序)

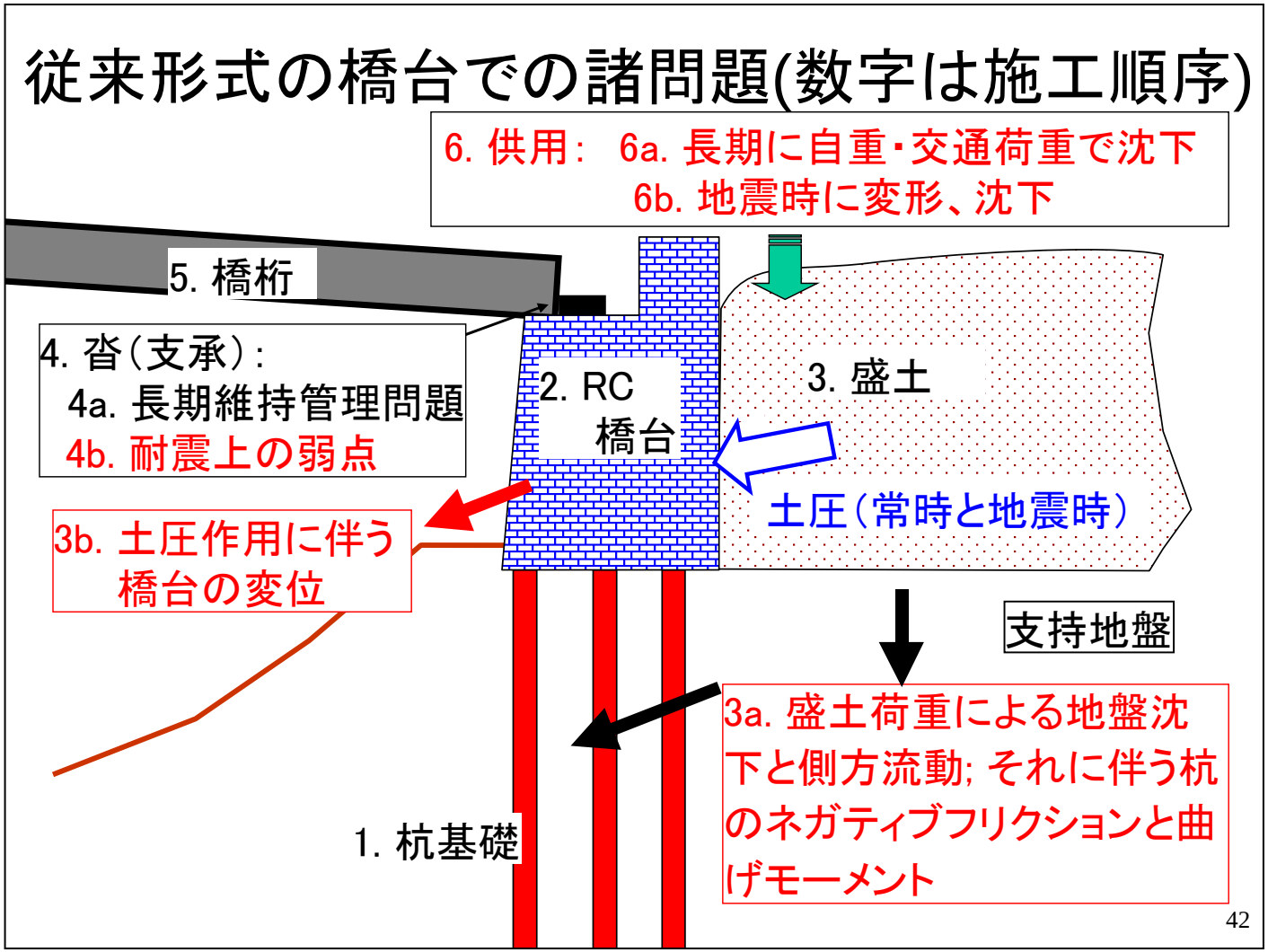


これは、従来形式の単純桁を支持する橋台での諸問題を説明した図です。

数字1→5は、施工順序と関連する問題の生起順です。

盛土は補強してないため、最初に建設する訳には行きません。このため、一度建設したら変位が生じたら問題が生じる杭基礎とRC橋台を建設してから、盛土を建設することになります。

しかし、そのことによって支持地盤が変形し、橋台には土圧が加わり変位が生じようとして、諸問題が生じます。



赤字は、関連する諸問題です。

温度変化による桁の伸縮変形が橋台等に加わり損傷が生じないように、桁は沓（支承, bearing）を介して橋台に支持されています。

支承は、回転は許容するが滑動は生じない固定支承と、回転と滑動を許容する可動支承があります。

これらは、建設費が高いだけではなく、長期維持費が嵩みます。また、地震時には過大な変位が生じて桁が外れる虞もあります。

また、橋台の背後の盛土は、長期交通荷重で次第に、地震時に突然沈下して、段差が形成されて交通を阻害します（次頁はその例です）。

橋台背面の状況（兵庫県南部地震）

- 兵庫県南部地震では，全線にわたり，橋台と盛土の境界部で大変形（JR総研舘山勝氏による）

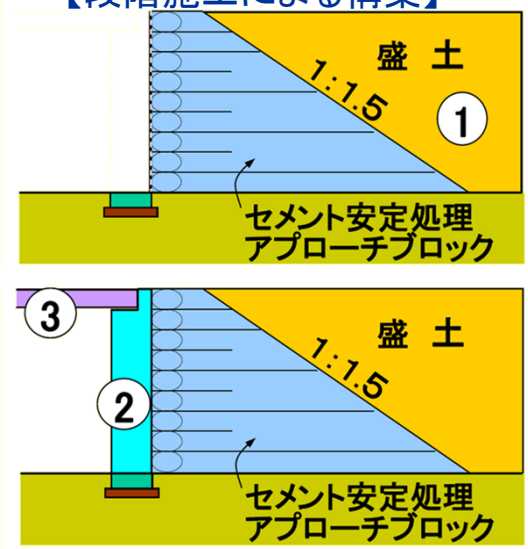
1995.1.17，JR神戸線新長田駅付近

これは、1995年阪神淡路大震災での例です。このような例は、非常に多数あります。

GRS橋台（セメント改良補強土橋台）

■ 施工順序

【段階施工による構築】



アプローチブロック・背面盛土の完了状況

① セメント改良アプローチブロック
　および 背面盛土の施工

② 橋台躯体の施工

③ 上部工（桁）の施工

従来形式の橋台での諸問題を解決できるのが、ジオテキスタイル補強土の橋台です。

①→③は、建設順序です。

①補強盛土建設に伴う支持地盤と盛土の沈下変形が収束してから、

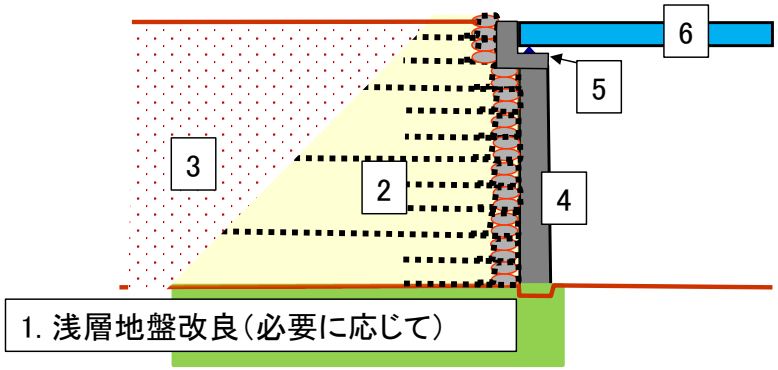
②桁を支える構造物として剛で一体の壁面工を補強材層と連結しながら建設し、

③最後に桁を設置します。

これは、北海道新幹線の現場です。

次頁は、別の角度から見た写真です。

北海道新幹線
万太郎路盤
高さ13.4 mのGRS橋台



建設中
2011年10月

完成直後
2012年8

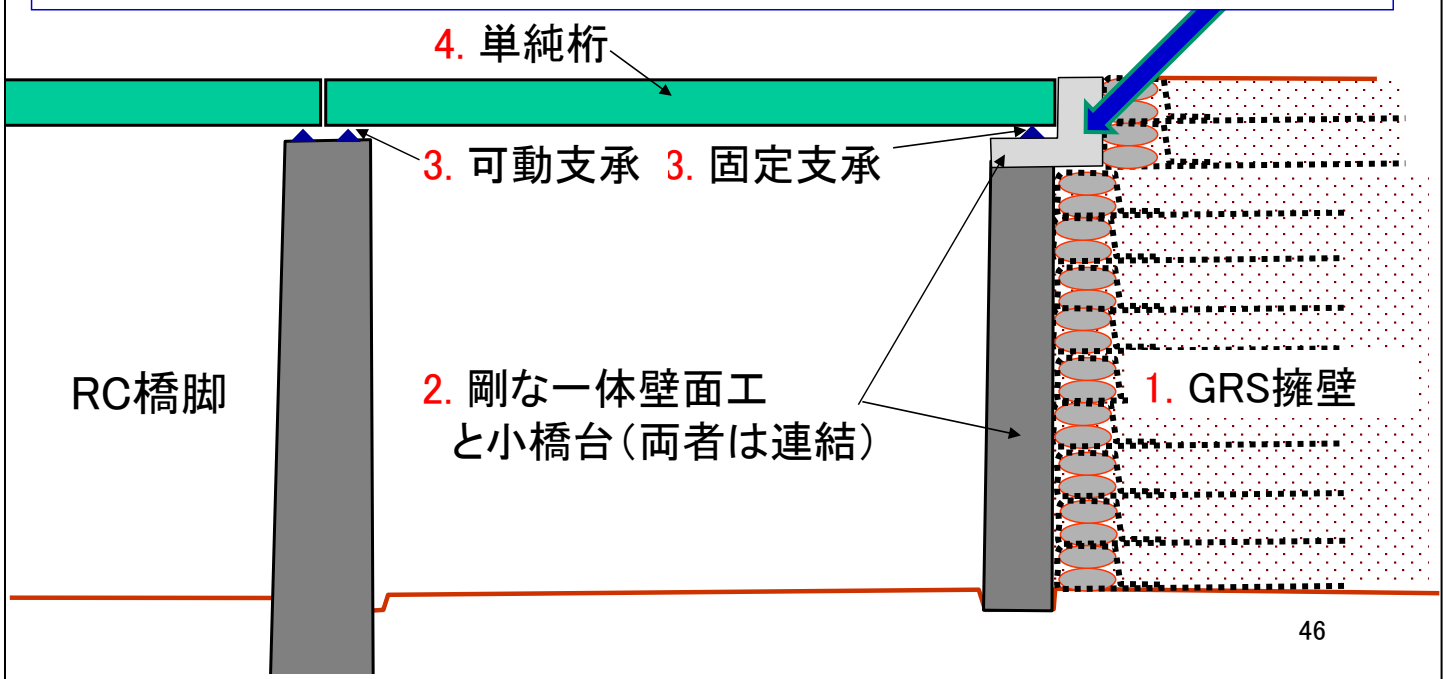
1→5は、ジオテキスタイル補強土の橋台の建設順序です。5は、単純桁を支持する固定支承です。

北海道新幹線の工事区間での橋台の総数は29ですが、その全てが、従来式の橋台からGRS橋台に置き換わりました。

これは、橋梁の技術の歴史において、画期的なことです。

ジオテキスタイル補強土の橋台（数字は施工順序）

小橋台は、剛な一体壁面工の上端に固定することによって安定化



従来形式の橋台よりも安定で経済的で、従来形式と同様に静定構造物

⇒①橋台の許容残留沈下が比較的大（強固でない地盤でも適用可）

②桁設計は従来通り単純桁の設計となり、容易

これは、ジオテキスタイル補強土の橋台の構造と施工順序1→4を示したものです。

以下の特徴があります。

a) 従来形式の橋台よりも遥かに安定で経済的

b) 従来形式と同様に静定構造物

その結果、

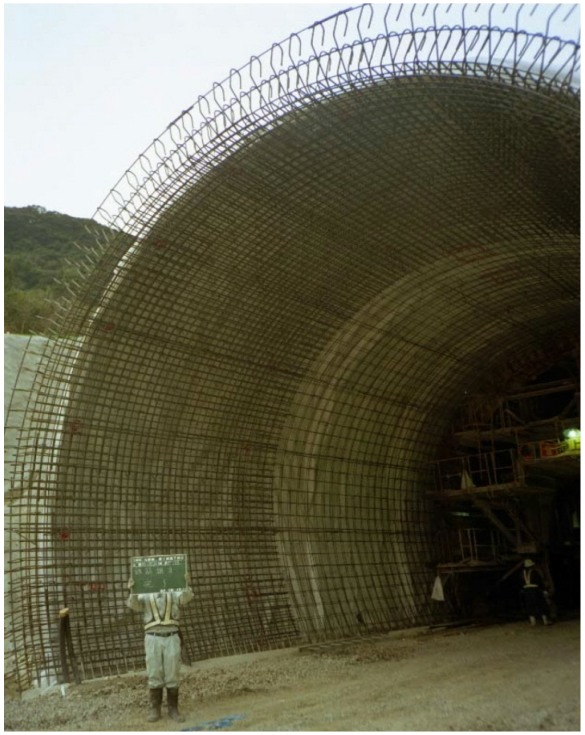
①支持地盤の変形による橋台の許容残留沈下が比較的大

→強固でない支持地盤でも適用可

→桁設計は従来通り静定構造物である単純桁の設計となり、容易になります。

② GRSトンネル坑門〔従来形式の問題点〕

■ 施工性の問題



覆工コンクリート

覆工コンクリートと一体化した面壁

面壁の完成後の背面の埋戻し

狭隘な面壁背面の埋戻し箇所

⇒ 構造・施工性に大きな課題あり

鉄道運輸機構による

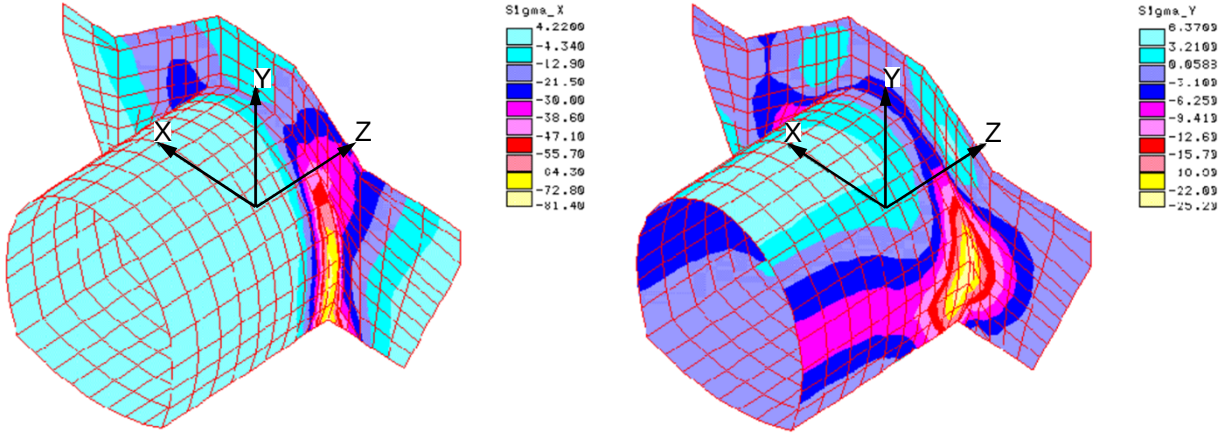
トンネルの出入り口では、斜面からの崩落土・落石から列車を護るために、坑門が建設されます。

従来式の坑門は、トンネル本体の覆工コンクリートに面壁を固定させます。

そのため、構造的に複雑になり盛土施工も困難になります。 応力集中も起こりやすく、地震時に損傷する例が多発しました。

② GRSトンネル坑門〔従来形式の問題点〕

経済性の問題



三次元解析による曲げ応力の検討事例（左:X(水平) 方向，右:Y(鉛直)方向）
（面壁：覆工コンクリートに剛結された片持ち状の一体構造）

・レベル2地震動に対する耐震設計
⇒ 躯体の慣性力および埋戻し土の地震時主働土圧が大

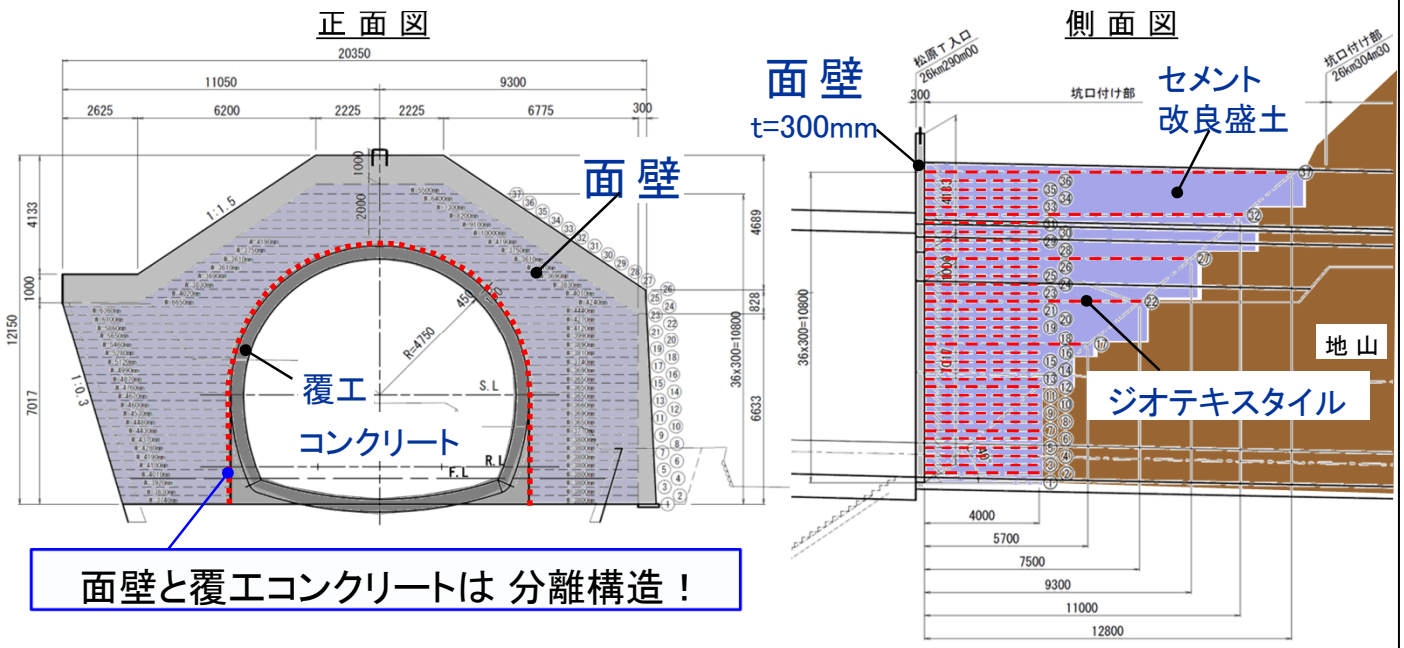
・連結されている覆工コンクリートと面壁の双方に大きな負担
⇒ 面壁の厚さ：大，覆工コンクリートの巻厚：大

さらに、トンネルの覆工コンクリートと面壁は連結されているので、地震時にはその連結部に応力集中が生じて破損する可能性があり、実際そのような事例が多く発生した。

②GRSトンネル坑門

鉄道運輸機構による

■ 従来の無補強の保護盛土の代替



・トンネル周囲に安定した構造体を構築 ⇒ 耐震性向上

・面壁と覆工コンクリートを分離 ⇒ 個別に経済的な設計

前述の、従来形式のトンネル坑門の諸問題は、ジオテキスタイル補強土構造物で坑門を建設すると解決されます。

面壁は、トンネル覆工と分離されており、補強盛土を建設してから建設されます。

②GRSトンネル坑門

鉄道運輸機構による

■ GRSト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ジオテキスタイルの敷設状況

③盛土が進行中の状況

面壁は、トンネル覆工と分離されており、補強盛土を建設してから建設されます。

このため、補強盛土の施工は単純になり、面壁とトンネル覆工の間に応力集中が生じません。

②GRSトンネル坑門

鉄道運輸機構による

GRSトンネル坑門の施工順序

④トンネル上部の盛土状況

⑤盛土の完了状況

⑥坑門の完成状況

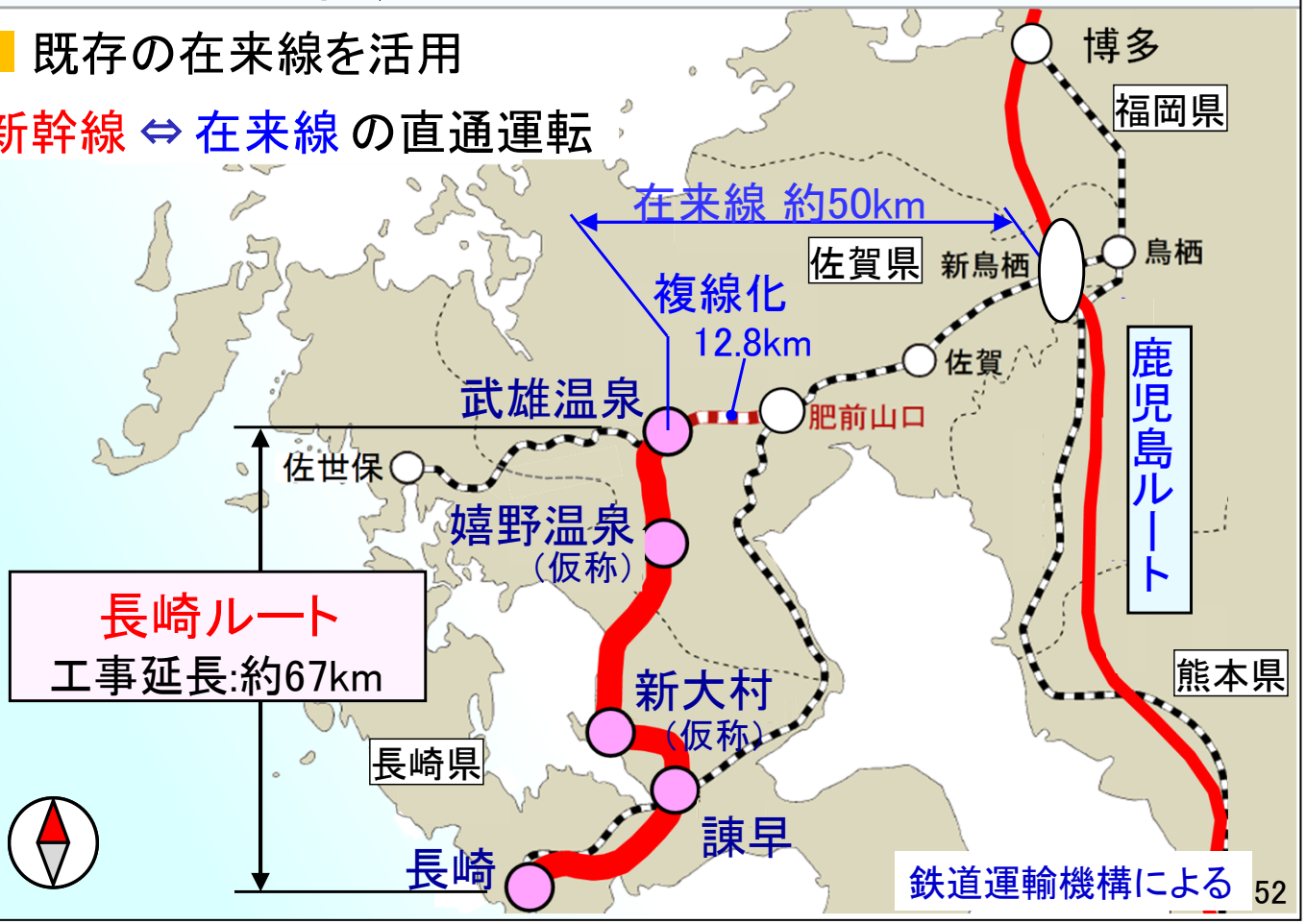
⇒ 新幹線の標準的な坑門形式として定着

これは、完成後です。

九州新幹線長崎ルートの概要

■ 既存の在来線を活用

新幹線 ⇔ 在来線 の直通運転

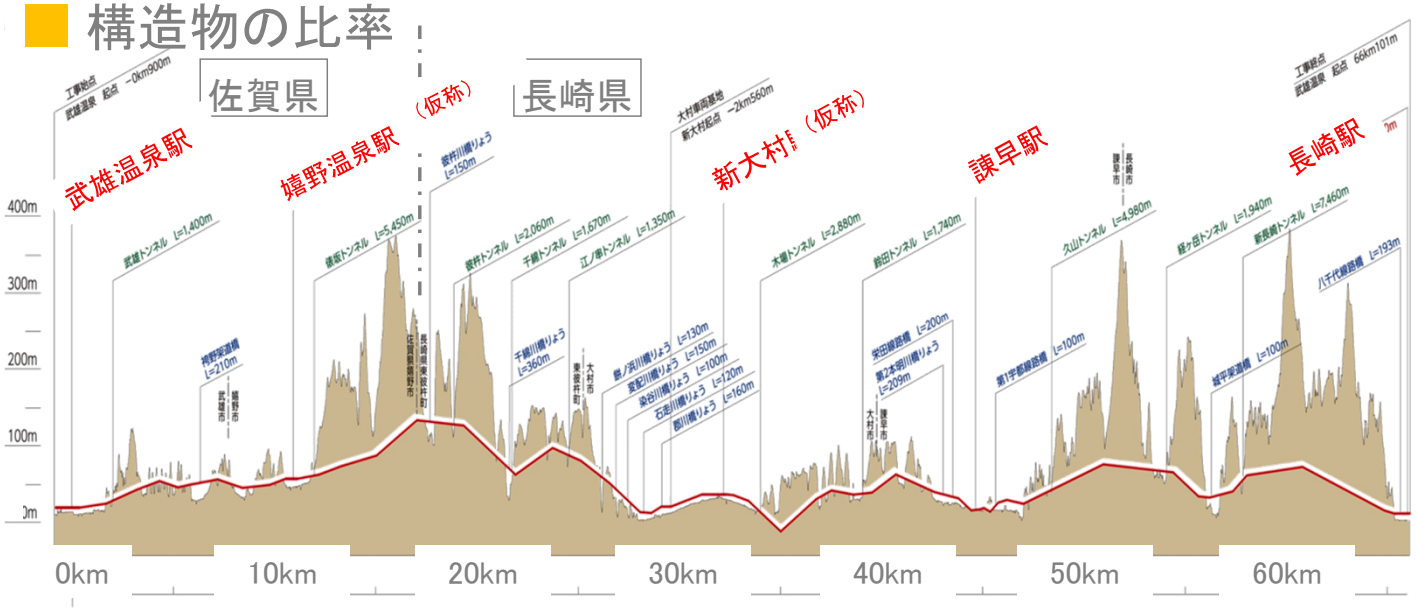


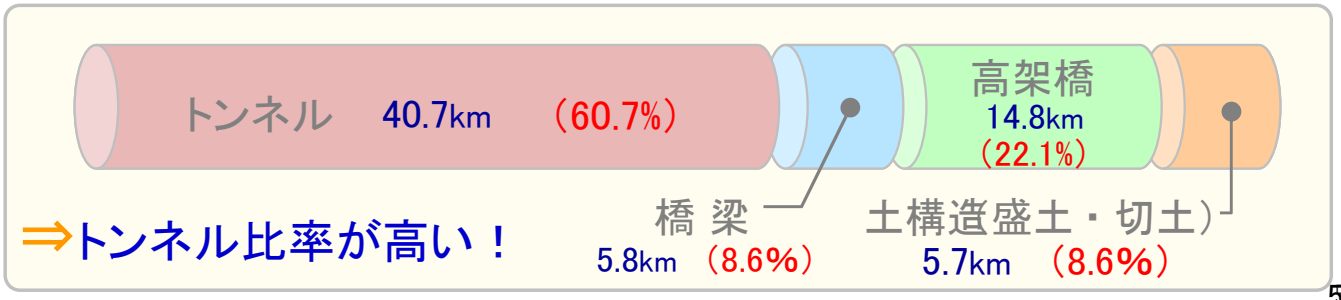
これは、現在建設中の九州新幹線の長崎ルートです。

九州新幹線長崎ルートの概要

鉄道運輸機構による

構造物の比率





このルートは山岳地帯で、トンネルが非常に多い。

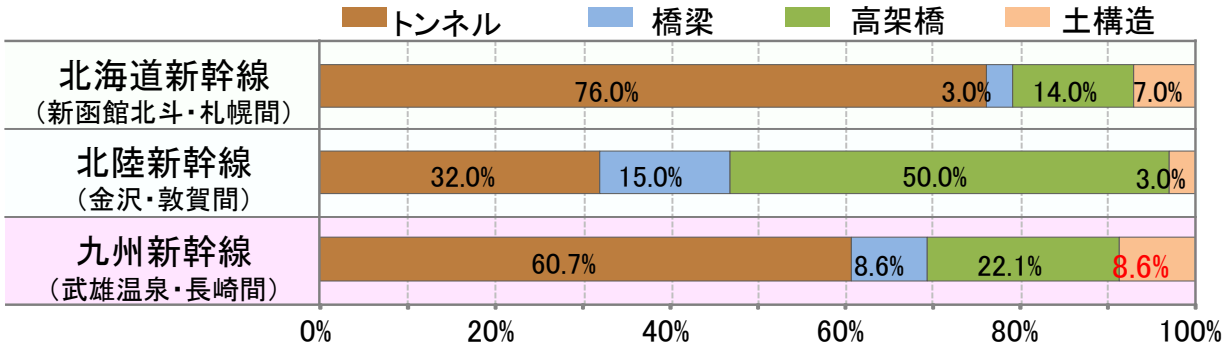
構造物比率の比較（建設中の3線区）

長崎ルートの特徴

※他線区のトンネル本数は認可時点

	線路延長	トンネル本数	単位延長あたりトンネル本数
北海道新幹線（新函館北斗・札幌間）	約211.5km	19 本	0.09本/km
北陸新幹線（金沢・敦賀間）	約125.2km	20 本	0.18本/km
九州新幹線（武雄温泉・長崎間）	約 66.0km	31 本	0.46本/km

単位延長あたりのトンネル本数が多い ⇒ 構造物種別が頻繁に変化



⇒ 長崎ルートは 土構造(盛土・切土)の比率が高く

様々なGRS構造物を積極的に採用！

鉄道運輸機構による

トンネル出口では橋台が必要であり、 トンネルが多いため橋台の数が増えています。

長崎ルートの特徴

重要な水がめ」である
山地近傍を通過

重要な水源への
減･渇水の影響が懸念

⇒ 周辺地下水環境への
配慮が不可欠

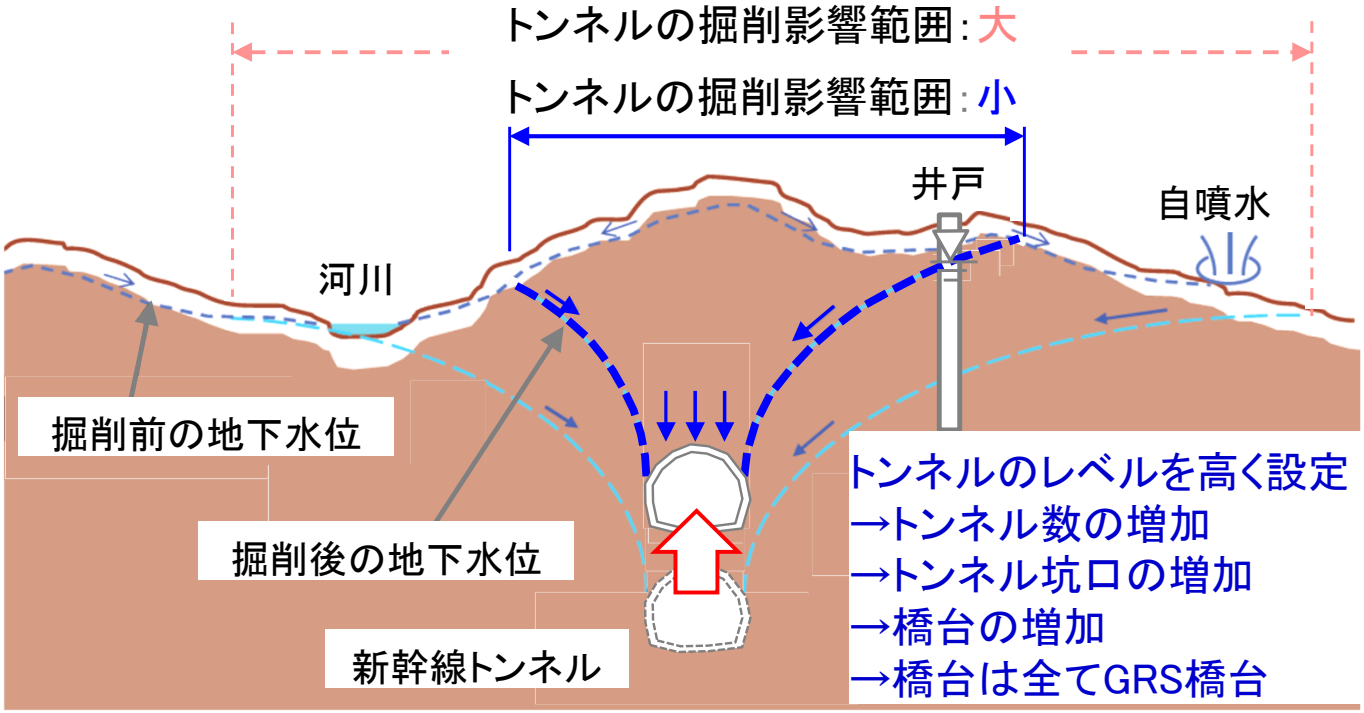
鉄道運輸機構による

山岳地帯にトンネルを建設すると、地下水位を低下させる恐れがあります。

周辺地下水環境への配慮

鉄道運輸機構による

■ トンネル縦断線形を高めに設定



⇒ トンネル掘削による周辺地下水環境への影響を低減！

出来る限り地下水位を低下させないためには、トンネルの位置を高くする必要があります。

トンネルの位置を高くしたため、トンネルの出入り口の数が増えて、橋台の数が増えました。

西九州ルートのGRS構造物

鉄道運輸機構による

様々なGRS構造物の採用

		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）	1,009 m	3,979 m うち 1,700 m:車両基地 384 m:回送線	4,988 m ※線路延長 （車基:壁面延長）
②	GRS トンネル坑門	15 箇所	40 箇所	55 箇所 55/62 ≒ 89%
③	GRS橋台（セメント改良補強土橋台）	34 基	46 基	80 基 80/80 = 100%
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

トンネル坑口部の約9割に GRSトンネル坑門 を採用

80のGRS橋台（従来形式の橋台はゼロ）！

GRS一体橋梁 を本格採用，PC構造(長スパン化)に挑戦！

その結果、この工事区間では橋台の数が80にもなりました。

その全てがジオテキスタイル補強土の橋台で建設されています。

さらに、橋梁と橋台を一体化したジオテキスタイル補強土の一体橋梁も建設されています。これは、後で説明します。

①GRS擁壁（盛土補強土壁）

■ 長崎県大村市

扇状地
（玉石混じり砂礫層）

こちらは長崎県大村市を撮影した航空写真です。

大村市平野部は、経ヶ岳や多良岳に代表される山々と長崎空港のある大村湾との間に広がる扇状地形で構成されています。

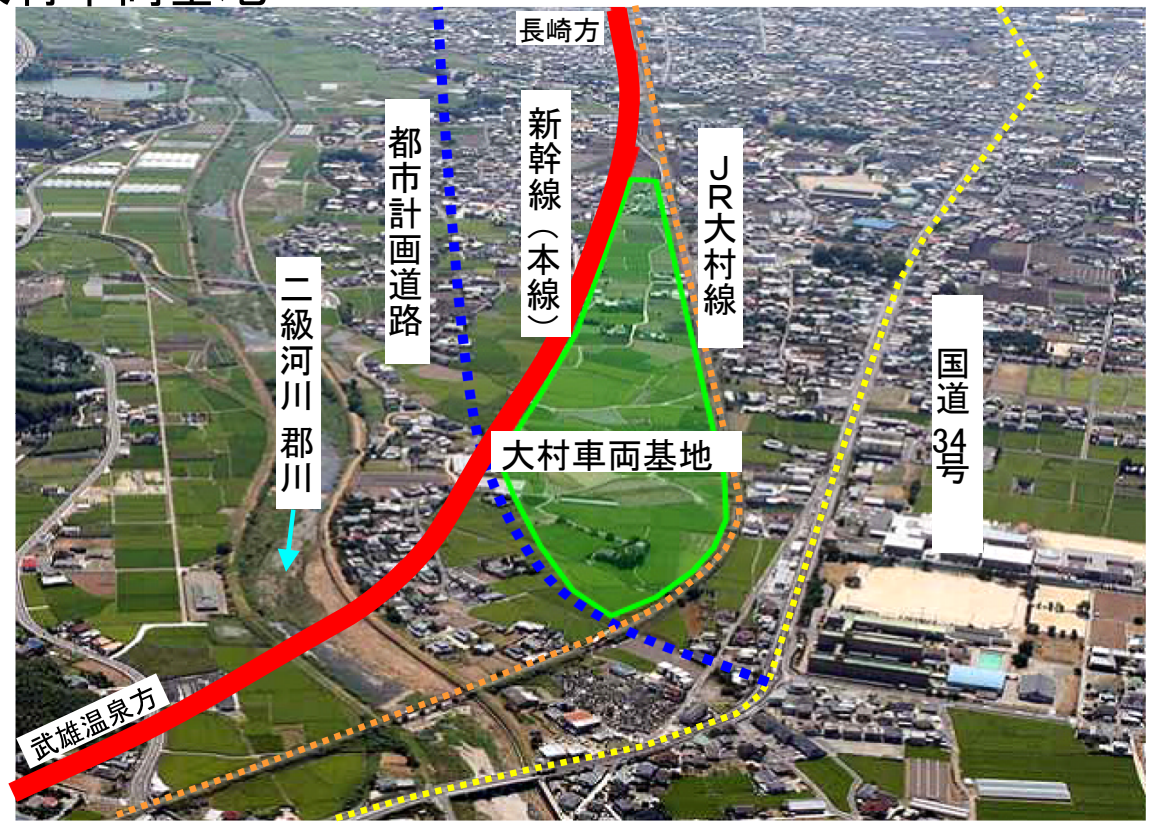
赤色で示しているように、長崎ルートはその大村市平野部を通ります。

大村車両基地では、大規模にジオテキスタイル補強土擁壁などが建設されました。

①GRS擁壁（盛土補強土壁）

鉄道運輸機構による

大村車両基地



長崎県県央振興局の資料に一部加筆

大村車両基地です。

①GRS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^3
※施工数量等は変更の可能性あり

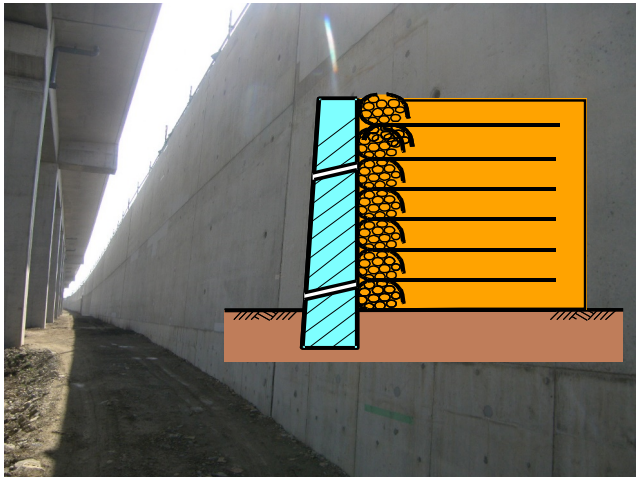
盛土補強土壁の施工数量
壁面延長：約 1,700 m
壁面面積：約 17,200 m^2
最大高さ：約 12.4 m
（平均高さ 9 m）
補強材敷設面積：約 24万 m^2

60

大村車両基地 北西側からの鳥瞰図

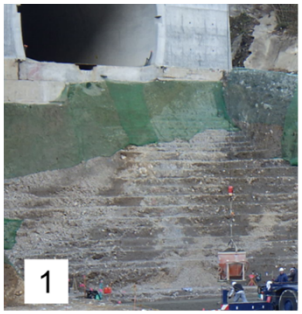
大村車両基地です。

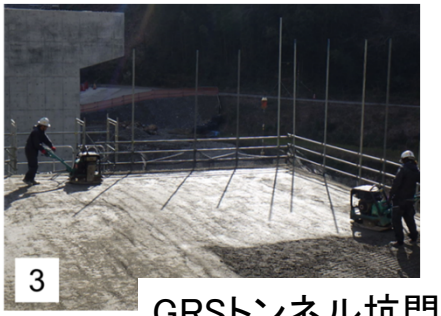
大村車両基地
GRS擁壁
(2019年3月)

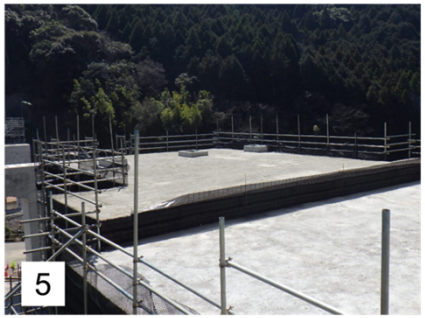


これが、大村車両基地の周辺のジオテキスタイル補強土擁壁です。

トンネル坑口でのGRS橋台の建設



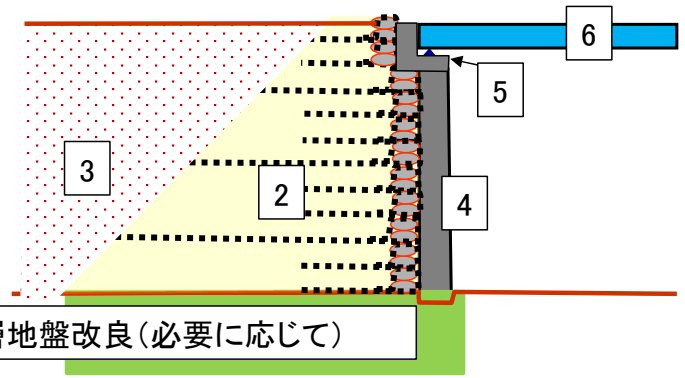




1. 地山の段切り掘削
2. 取付け盛土の建設（良く締固めたセメント改良土をジオグリッドで補強）
3. 盛土の締固め(修正プロクターによるw_{opt}で$(\rho_d)_{max}$の95%以上のρ_d)
4. ジオグリッド補強材層の配置
5. 完成した取付盛土
6. 取付け盛土の三面に剛な一体壁面工の建設

これは、ジオテキスタイル補強土の橋台の建設過程を示しています。

九州新幹線長崎ルート
建設中のジオテキスタイル補強土の橋台



63

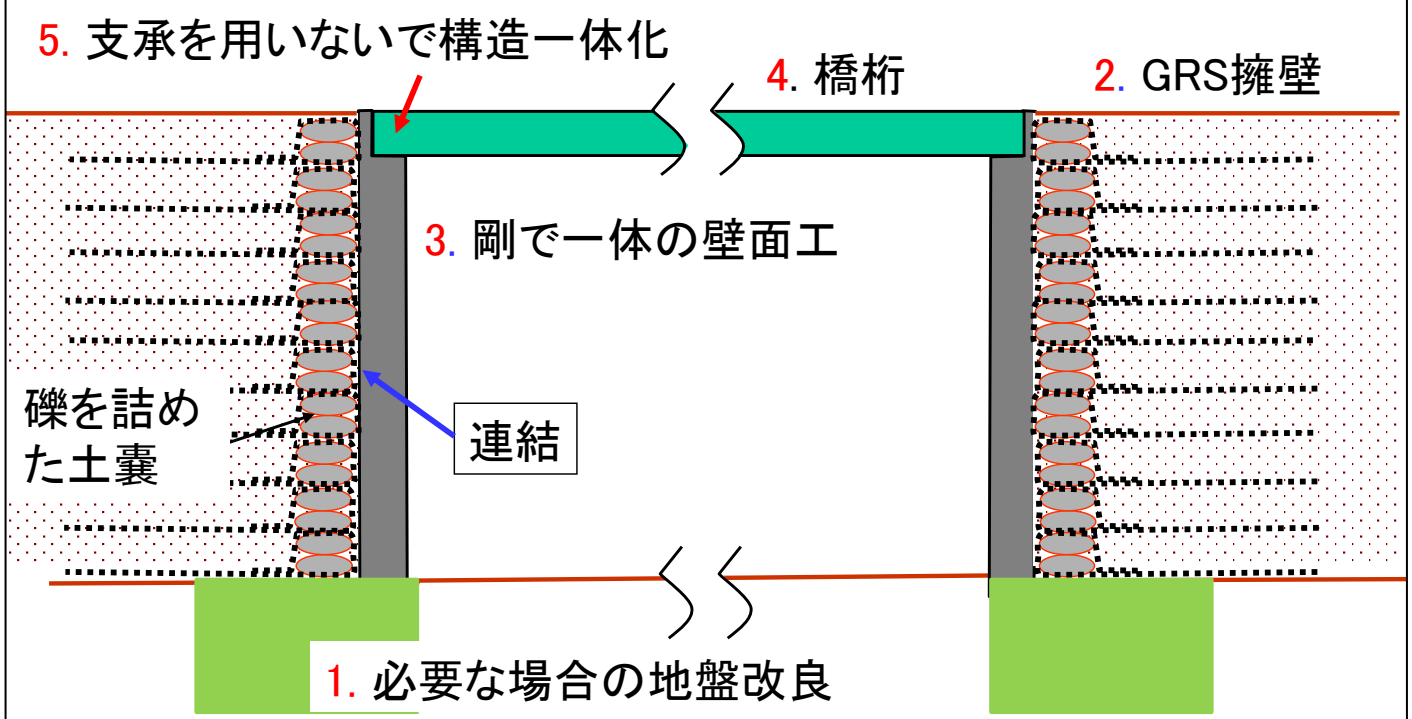
これは、九州新幹線の長崎ルートでのジオテキスタイル補強土の橋台で、トンネル坑口の前に建設中です。

九州新幹線長崎ルート
建設中のジオテキスタイル補強土の橋台

2017年1月24日

これも、九州新幹線の長崎ルートでのジオテキスタイル補強土の橋台で、トンネル坑口の前に建設中です。

GRS一体橋梁（数字は施工順序）

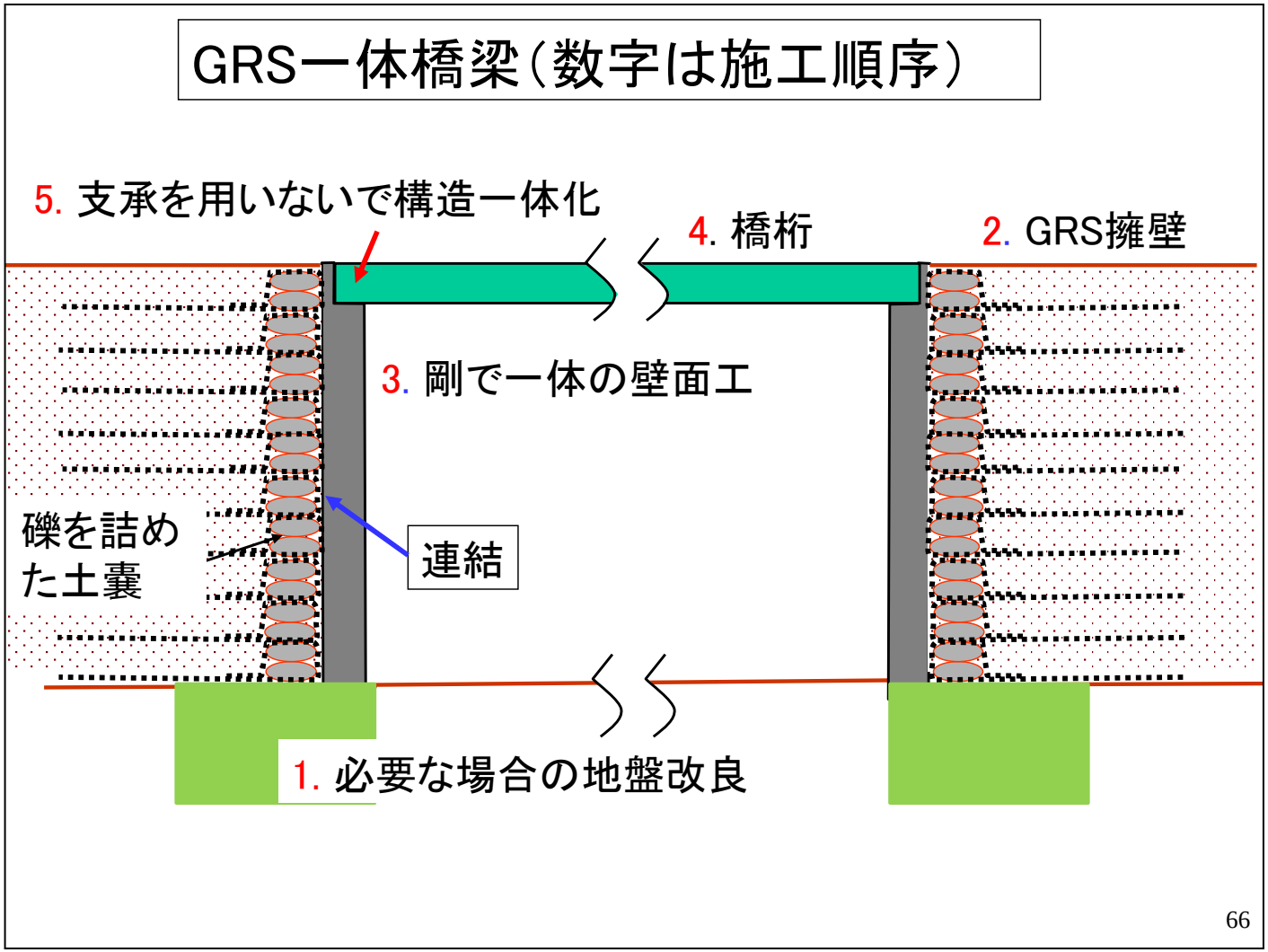


この図に示す橋梁の構造形式は、さらにもう一歩先に行っています。

この橋梁を、ジオテキスタイル補強土(GRS)一体橋梁と呼びます。

1→5は施工順序です。

GRS一体橋梁では、桁とそれを支持するRC構造物（壁面工）が支承を介さないで構造的に一体化しています。また、壁面工は補強盛土と一体化してあります。



桁、RC構造物（壁面工）と補強盛土が構造的に一体化してあります。

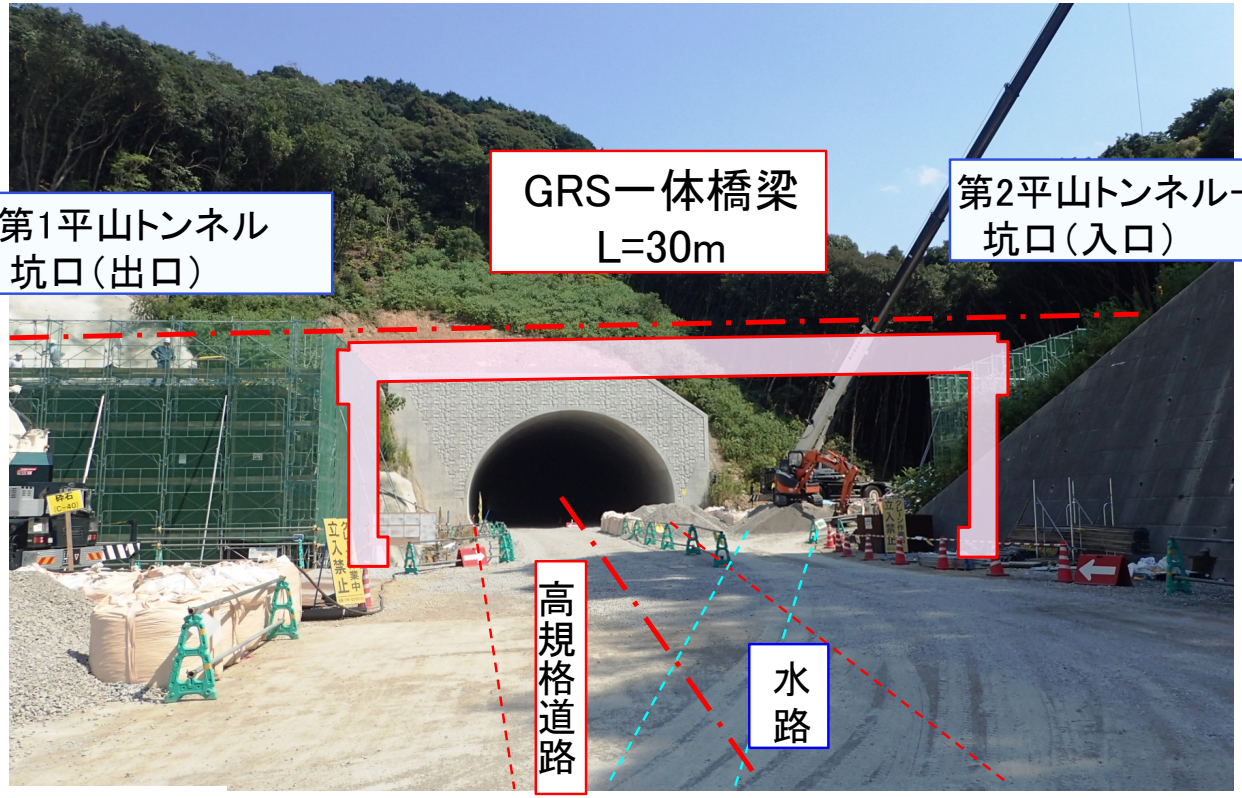
その結果、橋台裏の沈下による段差問題は解消し、盛土の安定と沓を用いないことにより、維持管理費が劇的に減少します。また、耐震性安定性が抜本的に向上します。また、建設コストも低下します。

これは理科大での研究が基礎になって実用化した例です。詳細は、後程説明します。

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



2017年1月24日

原種架道橋の施工箇所

九州新幹線長崎ルートで建設されたGRS一体橋梁の一つです。

まず、一対のジオテキスタイル補強土の橋台が建設されています。

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

2018年1月20日

完成したGRS一体橋梁です。

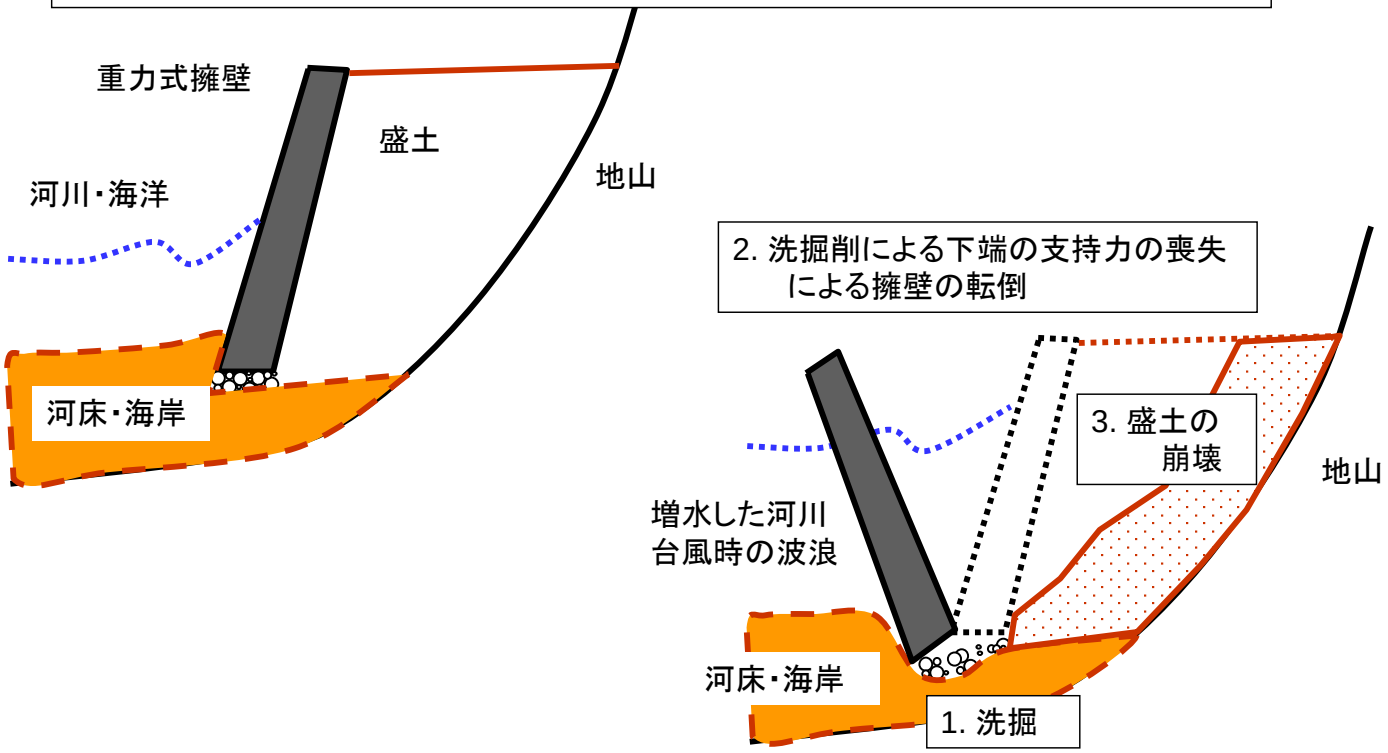
（接合部の施工後、床版と橋面工の施工後

69

これは、完成したGRS一体橋梁を上から見た写真です。

河川・海洋の護岸擁壁

支持地盤の洗掘⇒擁壁が転倒⇒盛土は容易に侵食・崩壊
⇒道路・鉄道等の機能喪失



次は、洪水時の河川の護岸や台風時の海岸護岸の被害についてです。

従来型の片持ち梁構造の擁壁の護岸は、支持地盤が侵食されると、擁壁は簡単に転倒してしまいます。

その結果、盛土は簡単に侵食・崩壊して、道路・鉄道等の機能が喪失して、避難・援助にも使えなくなります。

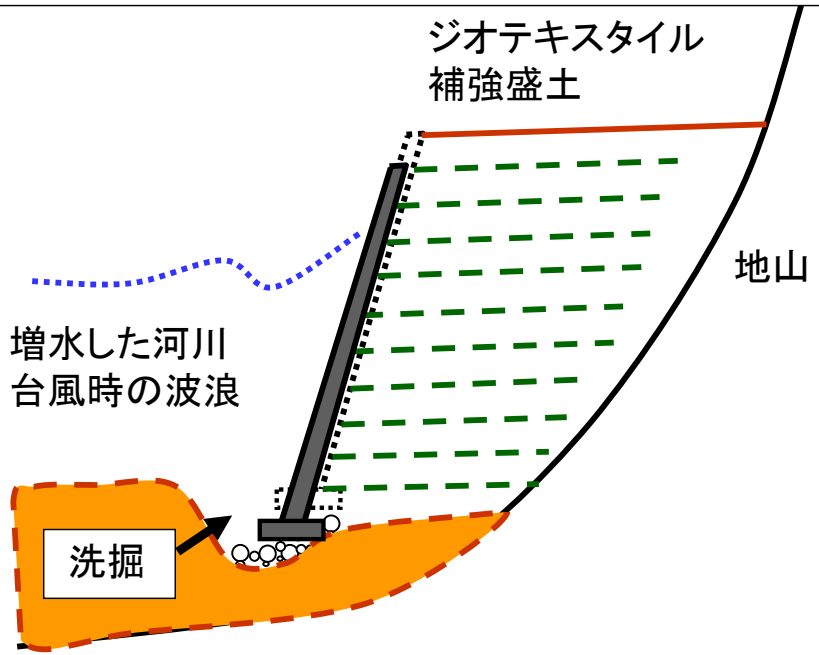
このような例は、多発しています。

剛な一体壁面工を有するジオテキスタイル補強土擁壁

支持地盤を洗掘されても、擁壁は転倒しにくい

⇒盛土は、容易には崩壊しない

⇒道路・鉄道等の応急機能は維持できる



一方、ジオテキスタイル補強土の擁壁は、片持ち梁構造ではありません。そのため、壁面工の下端の地盤が洗堀されて支持力が喪失しても、補強盛土本体の支持地盤が健全である限り、転倒しません。

従って、多少損傷しても盛土の機能は維持して、道路・鉄道等として応急機能は保持できます。

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

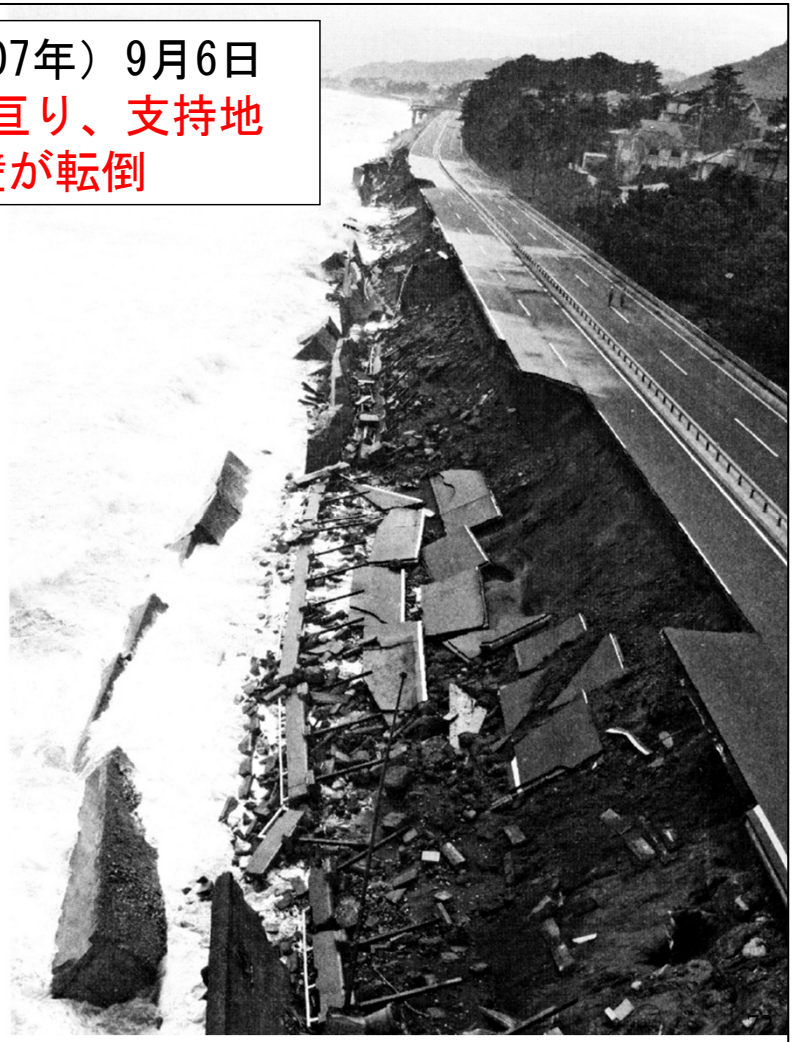
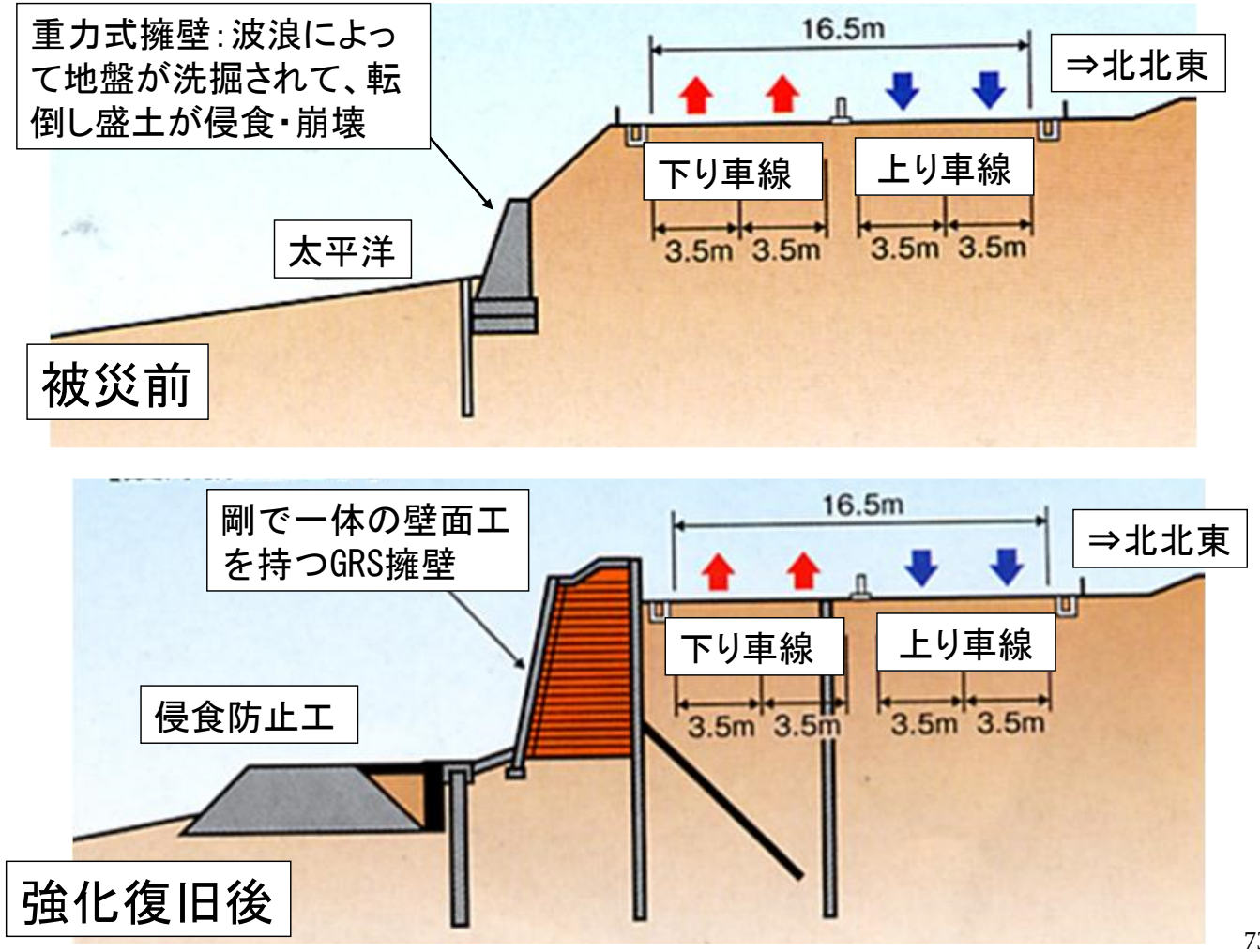


写真-1　被災時の様子（出典：横浜国道事務所WEBサイト[1)]）

これは、台風の時の波浪によって基礎地盤が洗堀されて、長さ1.5 kmに亘って転倒した海岸の重力式擁壁です。



上が転倒した海岸の重力式擁壁の模式図です。

下が復旧された擁壁で、ジオテキスタイル補強土の擁壁です。

2010年3月10日龍岡撮影

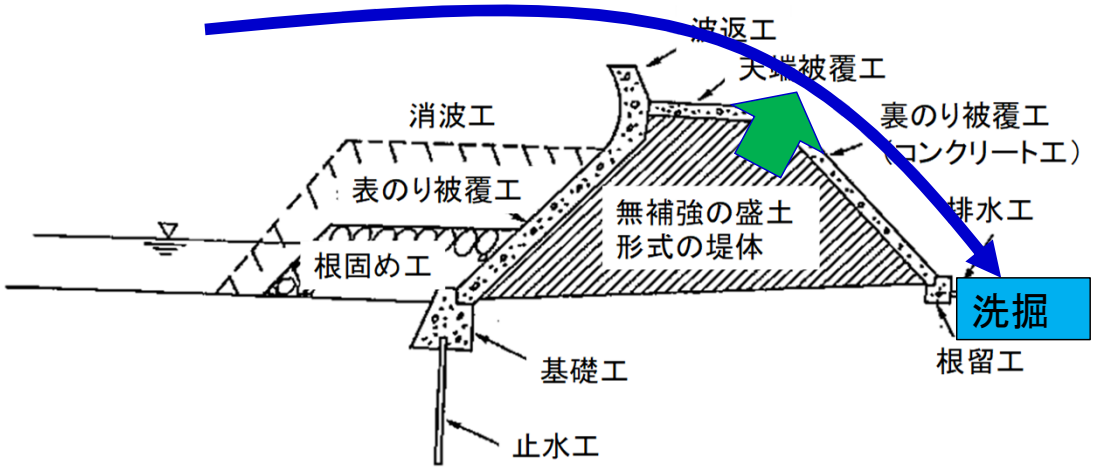
日本で初めての、外洋に面して波浪を受ける条件での
剛で一体の壁面工を持つジオテキスタイル補強土擁壁
⇒今後の適用例が増えることが期待できる

これは、ジオテキスタイル補強土擁壁の建設中の写真です。

完成後、何回も台風時の波浪の洗礼を受けましたが、全く被害は生じていません。

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：

①越流した津波が下流側裏のり面の基礎地盤を洗掘
②越流した津波が下流側裏のり面を急速流下→強烈な揚力
→盛土に固定されていない下流側裏のり面の不安定化
→盛土の急速な侵食→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）

2011年の東日本断震災では、各地で巨大津波によって海岸防潮堤が崩壊しました。

これは、そのメカニズムです。

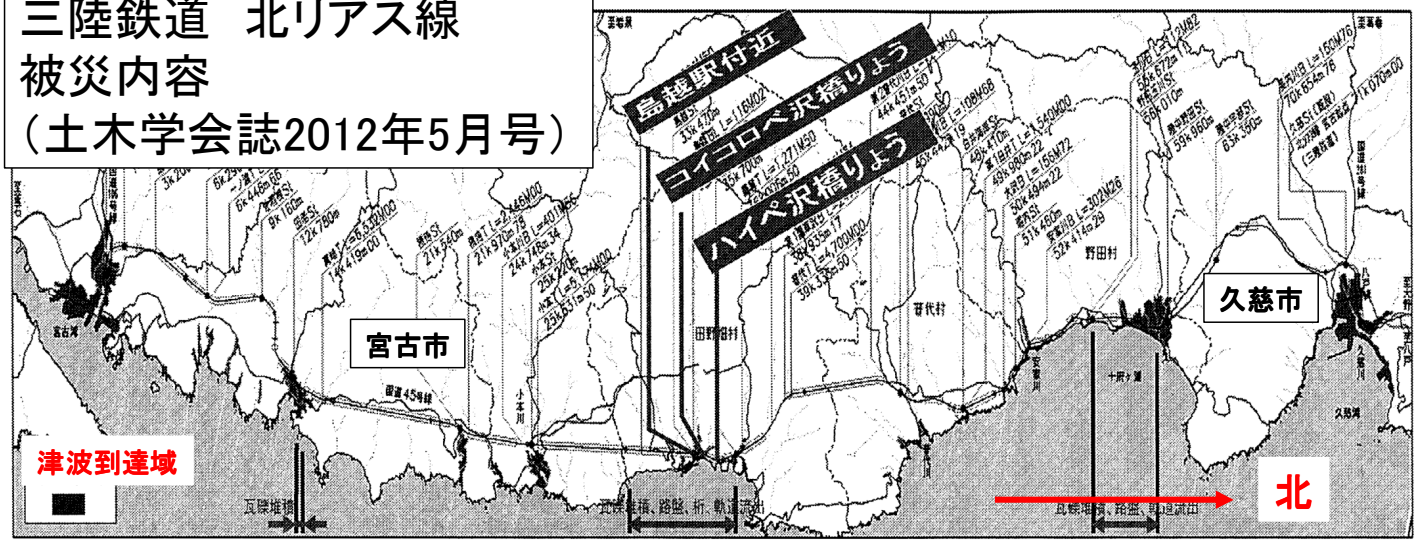
巨大津波の越流による盛土形式の防潮堤の機能喪失

⇒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）

多くの海岸防潮堤が、このように崩壊しました。

三陸鉄道　北リアス線
被災内容
（土木学会誌2012年5月号）



30年前、津波を考慮して、軌道面を高くして建設
- それでも、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
- 2011年東日本団震災で**非常に**激しい津波被害

三陸鉄道岩手県島越ー田野畑間
ハイペ沢橋梁

三陸鉄道も、津波によって大被害を受けました。

ハイペ沢

2011年3月30日

2014年5月19日

上は、地震直後の三陸鉄道のハイペ沢の写真です。

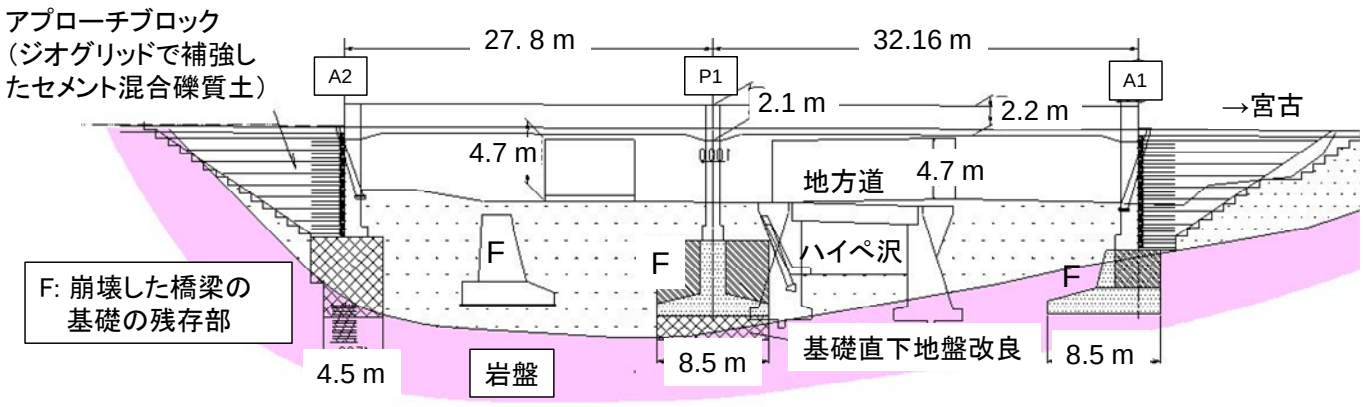
鉄道橋と道路橋が消えてしまっています。

下は、復旧後の写真です。三陸鉄道の橋梁は、ジオテキスタイル補強土一体橋梁で復旧されました。

この橋梁は、津波に対して非常に大きな抵抗力を持つことが評価されて採用されました。

あとで説明しますが、理科大での研究が役に立っています。

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)



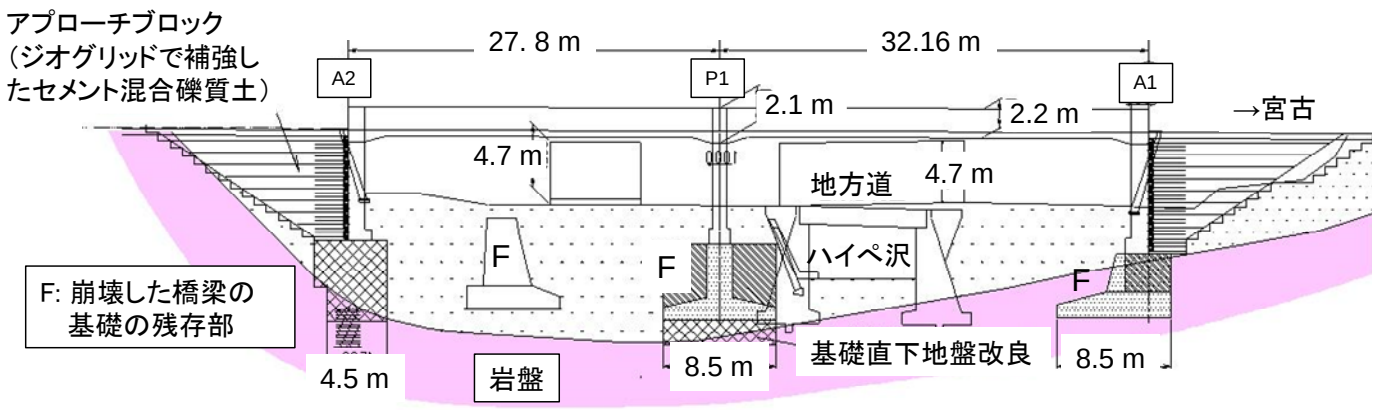
ジオテキスタイル補強土の橋台

2013年6月19日

ハイペ沢のジオテキスタイル補強土一体橋梁の構造と建設中の写真です。

一対のジオテキスタイル補強土の橋台が、まず建設されました。

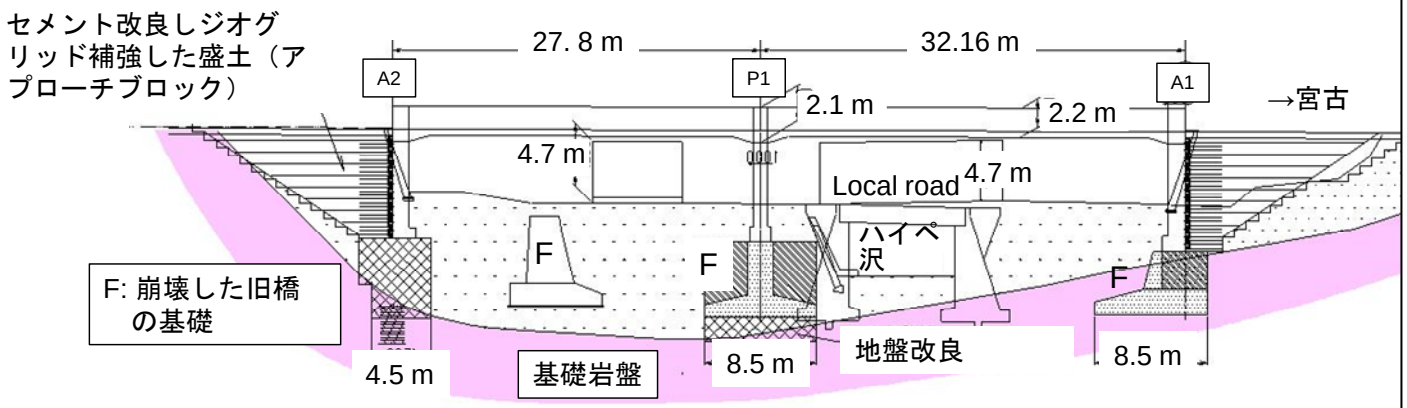
三陸鉄道岩手県島越ー田野畑間ハイペ沢橋梁
補強土一体橋梁での復旧(2012～2014年度建設)



2013年8月23日

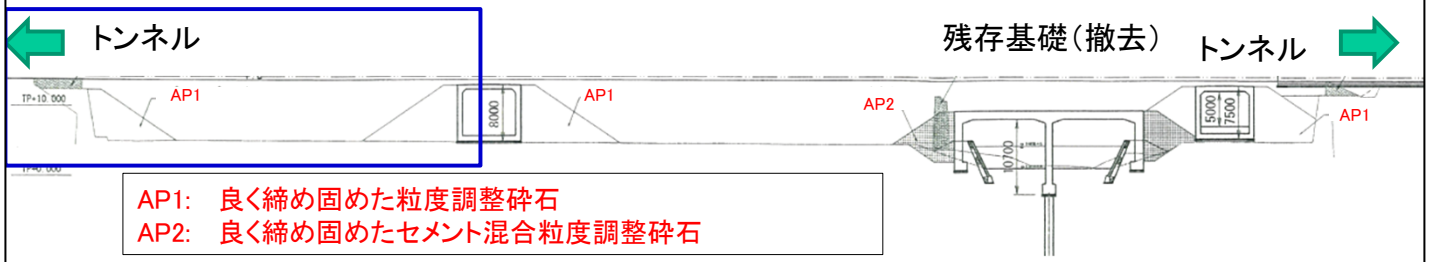
これは桁を建設している所です。

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)



完成して、列車が通過している所です。

2011年東日本大震災で、三陸鉄道北リアス線島越駅周辺：
住民の要望により、高架橋を防潮堤としての盛土に変更



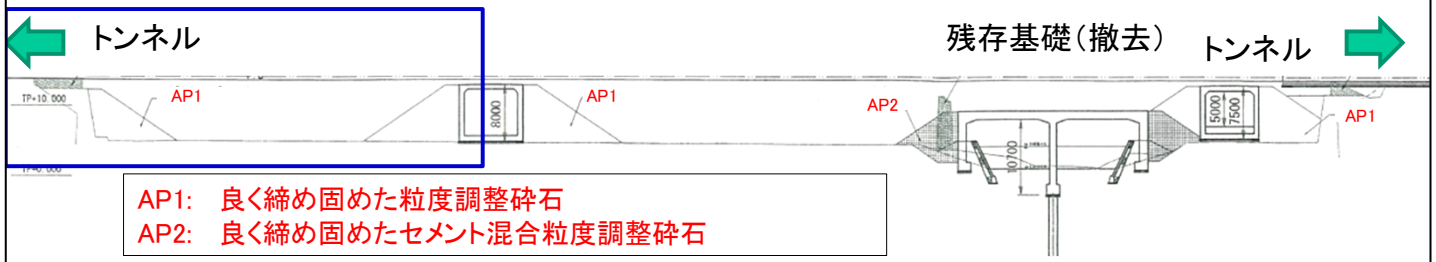
AP1:　良く締め固めた粒度調整砕石
AP2:　良く締め固めたセメント混合粒度調整砕石

陸側から

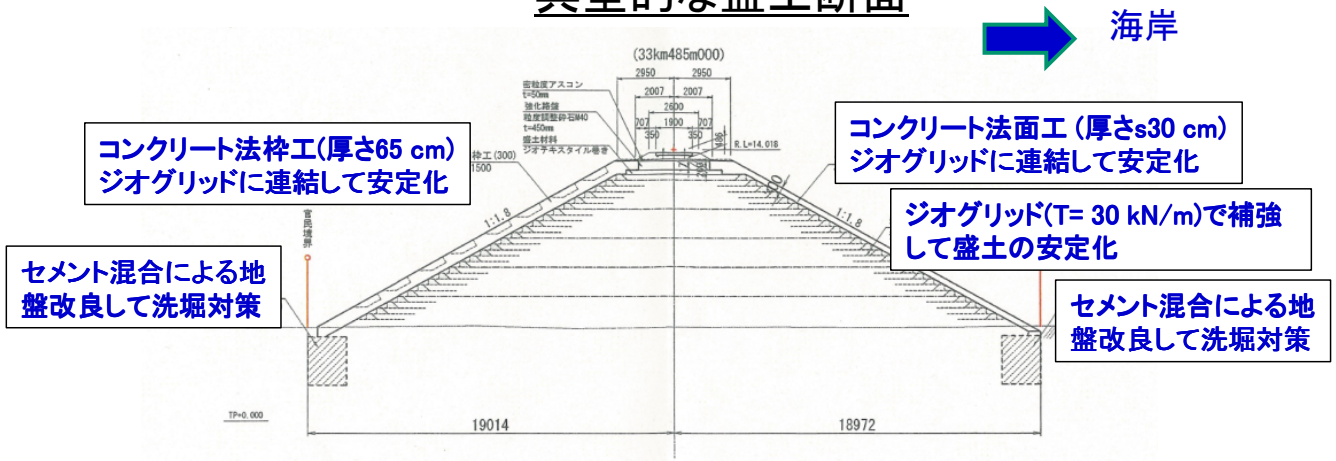
2011年3月30日

RCラーメン高架橋も、このように巨大津波によって完全に崩壊しました。

2011年東日本大震災で、三陸鉄道北リアス線島越駅周辺：住民の要望により、高架橋を防潮堤としての盛土に変更



典型的な盛土断面

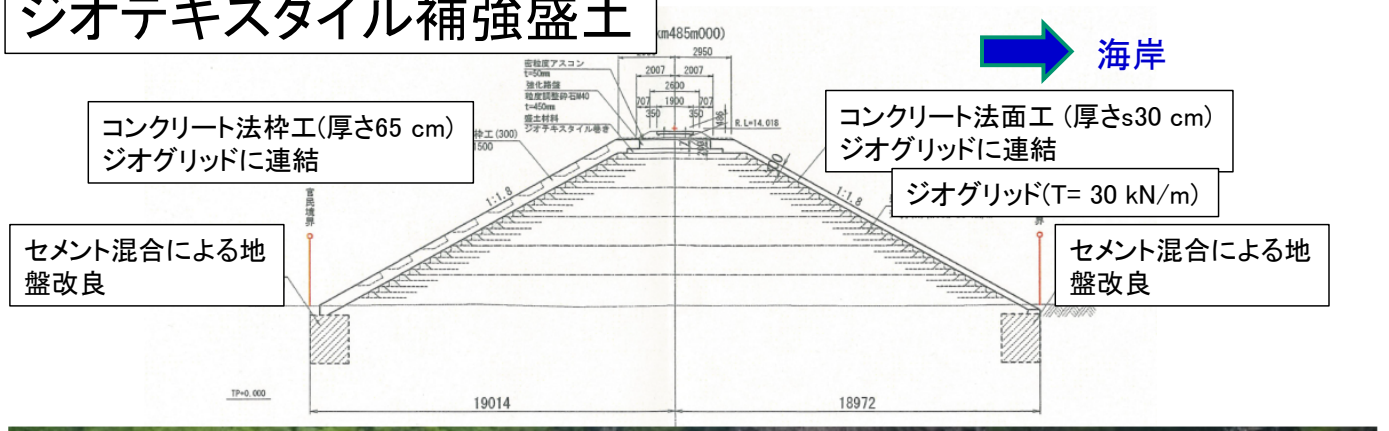


この場所では、ジオテキスタイル補強盛土が、膨張としても機能するように設計されて建設されました。

のり面工をRC層で多い、それを盛土を補強しているジオテキスタイル補強材と連結してあります。

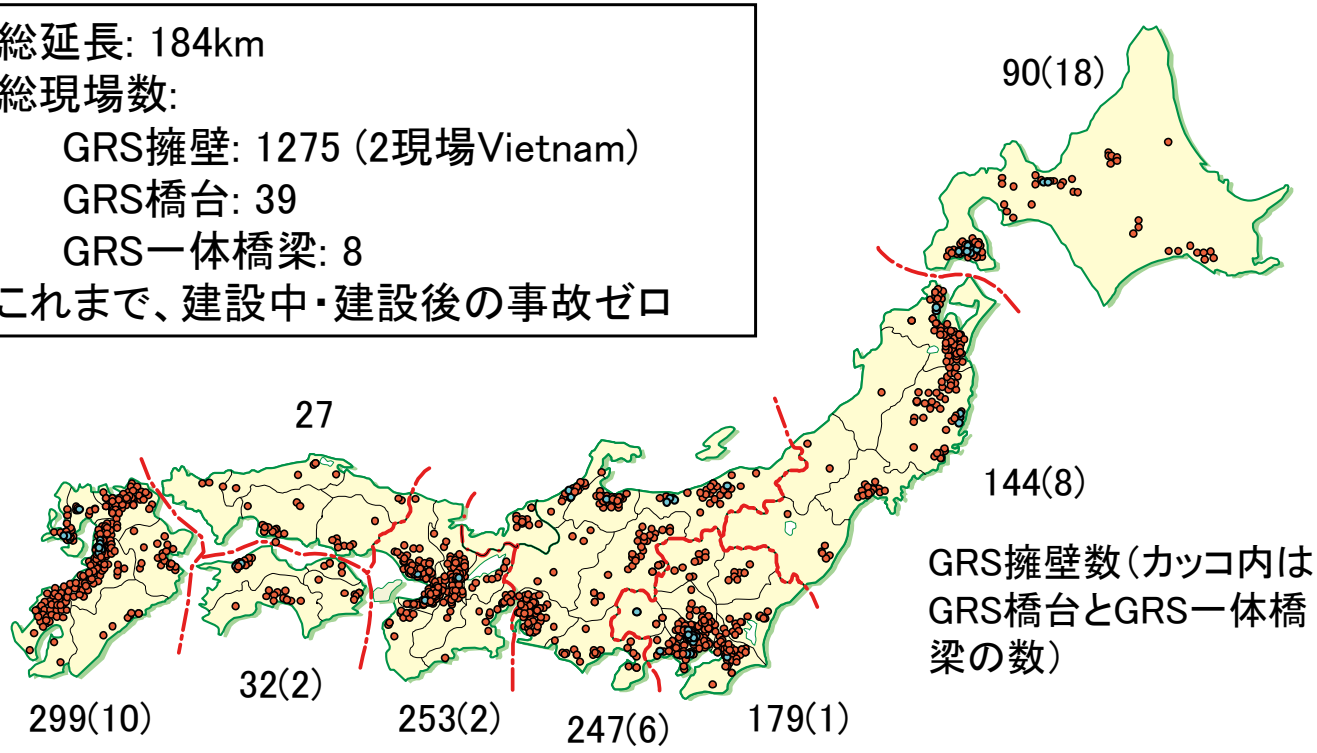
このため、津波に対する抵抗力は非常に高くなっています。

ジオテキスタイル補強盛土



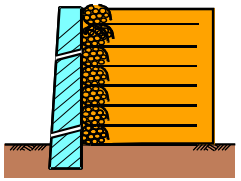
これは、ほぼ建設が終了して、のり面工を建設している時の写真です。

総延長: 184km
総現場数:
GRS擁壁: 1275 (2現場Vietnam)
GRS橋台: 39
GRS一体橋梁: 8
これまで、建設中・建設後の事故ゼロ



GRS擁壁数（カッコ内はGRS橋台とGRS一体橋梁の数）

2019年4月までに建設された「段階施工による剛な一体壁面工を持つジオテキスタイル補強土擁壁」とGRS橋台、GRS一体橋梁などの場所



これは、これまでに建設されたジオテキスタイル補強土の擁壁と橋台などの建設位置を示しています。1,300近い建設箇所で、これまで建設中と建設後に問題を起こした事例はゼロです。

RRR工法によるGRS構造物の施工実績

これは、ジオテキスタイル補強土構造物の建設の歴史です。

毎年の建設距離と累計の建設距離を示しています。

1982年に東京大学生産技術研究所で基礎研究が開始され、1988年から鉄道総合技術研究所で応用研究が開始されて、1989年から実用化に移されてました。

今日まで、建設された構造物の総距離は184 kmに達しました。

この間、巨大地震が何回も起きましたが、これらのGRS構造物は一つも被害を受けていません。

まとめ－１

- 我が国の鉄道の新設擁壁は、従来のL型擁壁等の片持ち梁形式から、ジオテキスタイル補強土(GRS)擁壁に切り替わった。

- 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等の盛土構造物も、GRS構造物が標準構造物になった。

- 最近は、多数の橋台と橋梁がGRS橋台とGRS一体橋梁に切り替っている。

今回の講義のまとめです。

まとめ－2

この背景は、適切に設計したGRS構造物は、
(1)建設が容易で工期が短く、直接建設費が従来工法よりも低いこと、
(2)地震・豪雨・洪水等自然災害に対する耐力が高いこと、
(3)剛な一体壁面工によって構造的に安定化し、剛な一体壁面工を電柱・防音壁・橋桁等の支持構造物として活用できること、
(4)橋台裏沈下の解消、長期安定性の向上による、長期維持管理費の低下、
の四点が揃っていることです。
その結果、GRS構造物の従来構造物に対する優位性が明確になり実績でも証明されてきました。

今回の講義のまとめです。

まとめ－3

これら四つの傾向は、以下の三つで要因が基礎となっている。

①ジオテキスタイル補強盛土体と剛で一体の壁面工の構造一体化（GRS一体橋梁では桁・剛一体壁面工・補強盛土の構造一体化）による補強土構造物の安定性と剛性の向上と、これらの設計での考慮。

②補強盛土の建設後に、盛土と支持地盤の変形が終了してから、剛な一体壁面工・桁を施工する段階施工。

③盛土構造物でもレベルII設計地震動に対する耐震設計を標準としたこと。

これらを、次回以降で説明。