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.8

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

2. 盛土補強土工法による土構造物の復権と発展の続きです。

補強土工法による土構造物の復権と発展

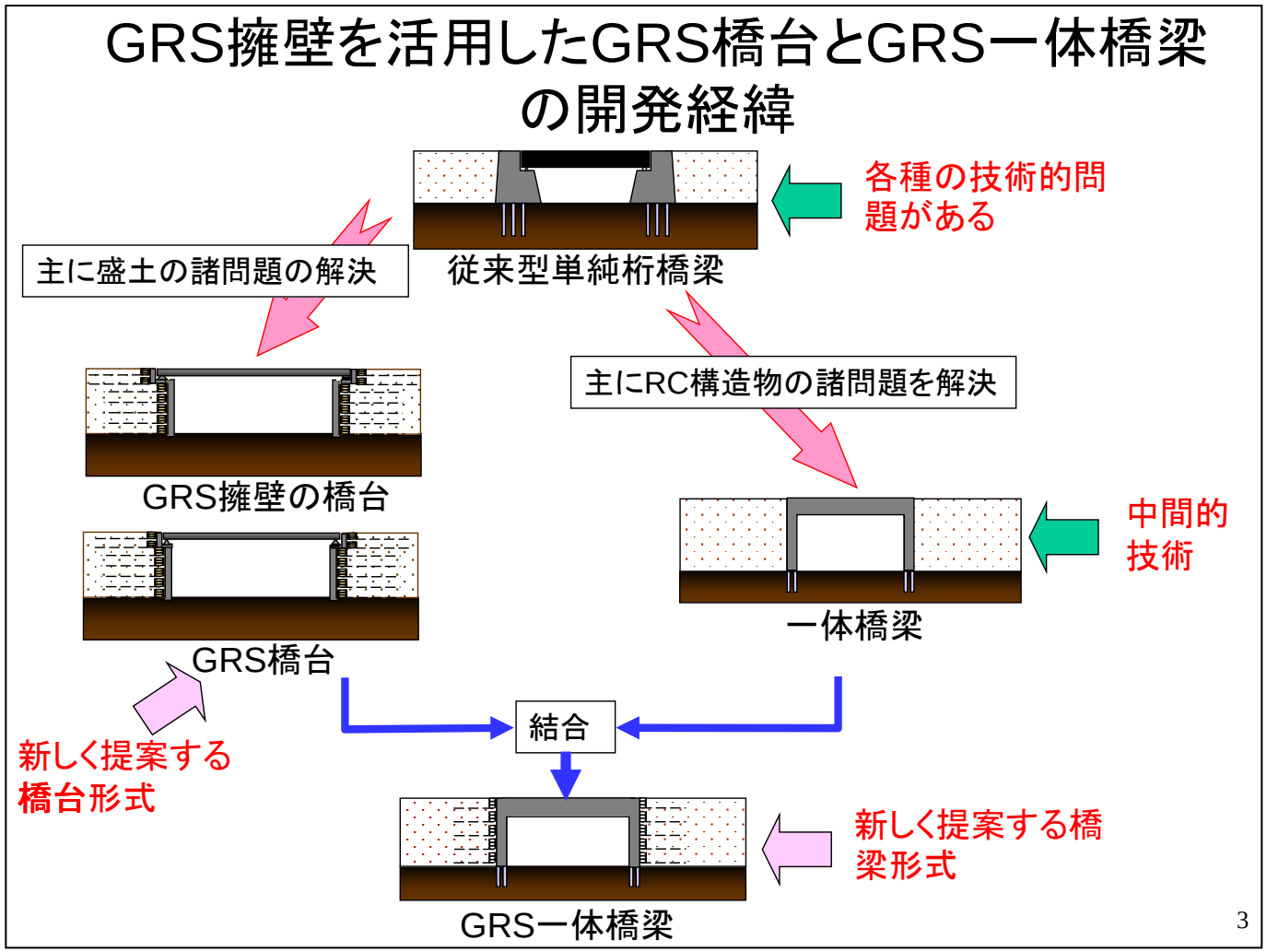
A. 盛土補強土工法
1)擁壁の力学的原理と補強土擁壁
 a)従来形式の擁壁は片持ち梁！補強土擁壁は？
 b)ジオテキスタイル補強土擁壁の施工例
2)補強土工法のメカニズム
3) 剛な一体壁面工を持つジオテキスタイル補強土擁壁
 a)剛な一体壁面工の効用
 b)段階施工の効用
 c)洪水・豪雨・津波と補強土
　およびレベル2地震動を考慮した耐震設計
4) GRS橋台とGRS一体橋梁
 a) 従来形式の橋梁の諸問題を解決
 b) 低い建設費、高い維持管理性・耐震性/耐津波性
 c)施工例

B. 地山補強土工法

今日は、橋梁の話です。補強土工法と言う地盤工学の講義との関係は何であろうか、と思うでしょう。

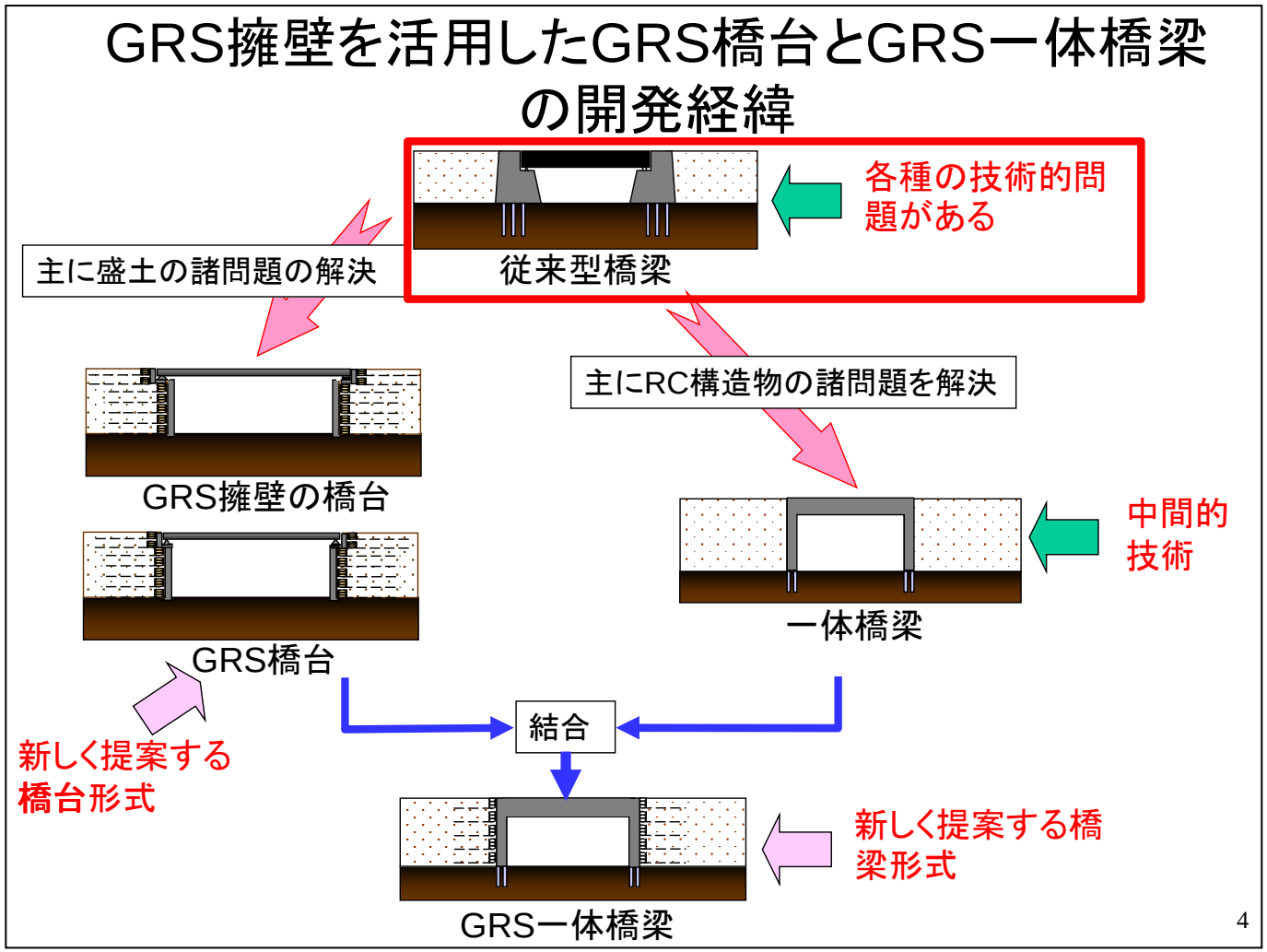
しかし、橋梁の設計・施工には構造工学だけでなく地盤工学が深くかかわりあっています。

まず、従来形式の橋梁の諸問題とその解決法を検討します。



これは、今日のテーマの構成です。まず、従来型の単純桁橋梁の諸問題を示し、その構造工学的な解決法として一体橋梁を説明し、次に地盤工学的解決法としてGRS橋台を説明します。

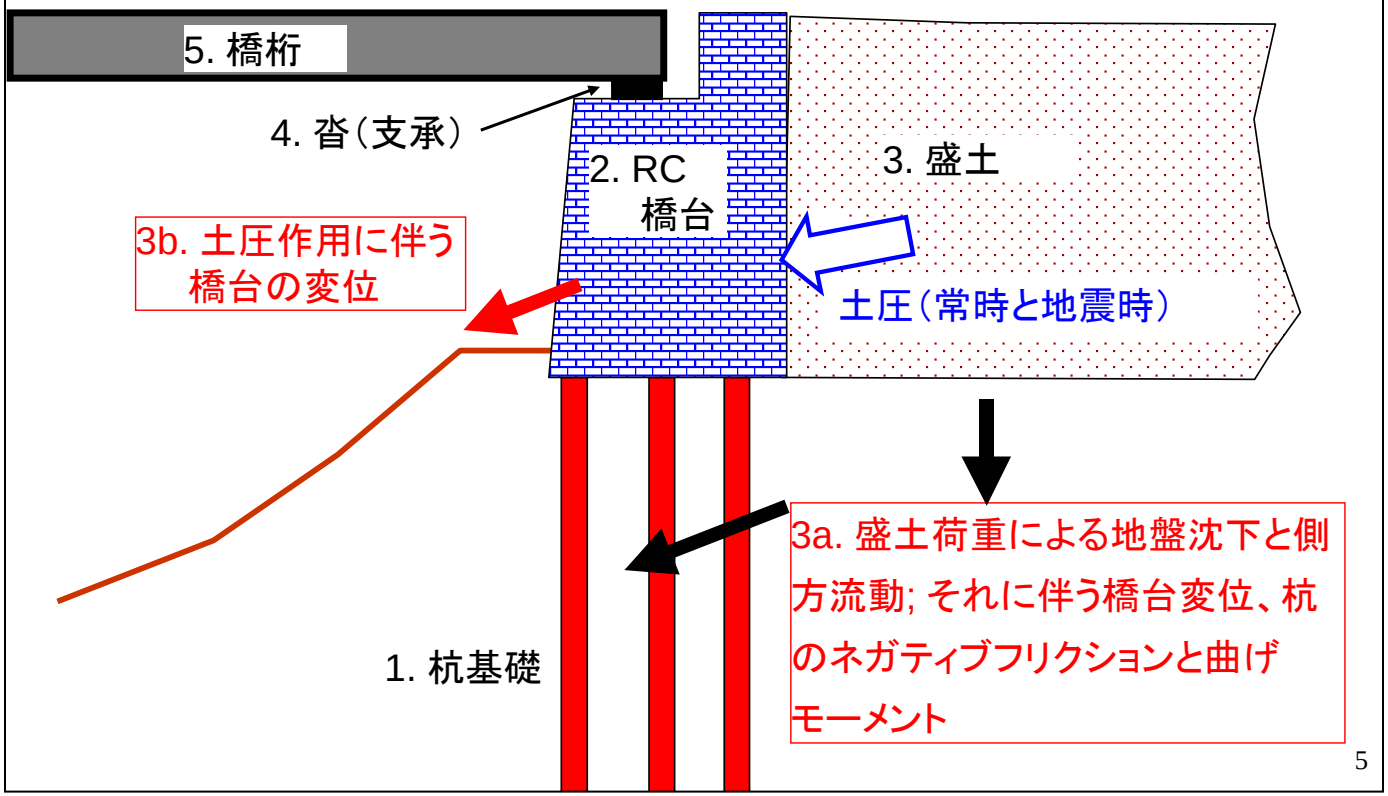
この二つの解決法は、それぞれ長所と欠点があり、それらの長所を生かし、それらの欠点を除去する方法として、この二つの技術を総合化したGRS一体橋梁を説明します。これらの技術は、東京大学、東京理科大学での長年に亘る基礎研究と鉄道総合技術研究所での応用研究によって開発されたものです。つまり、皆様が来年から行う卒業論文研究、およびその先の修士論文研究の成果が生かされたものです。



単純支持桁(simple-supported girder)、あるいは単純桁(simple girder)とは、片方の端が回転と水平変位に対して自由な支承で支持され、他の端が回転自由で水平変位が固定された支承で支持されていて、桁の内部応力状態が両支点での変位に影響されない静定構造物の桁であり、固定支承で橋台に対して水平変位が固定されています。

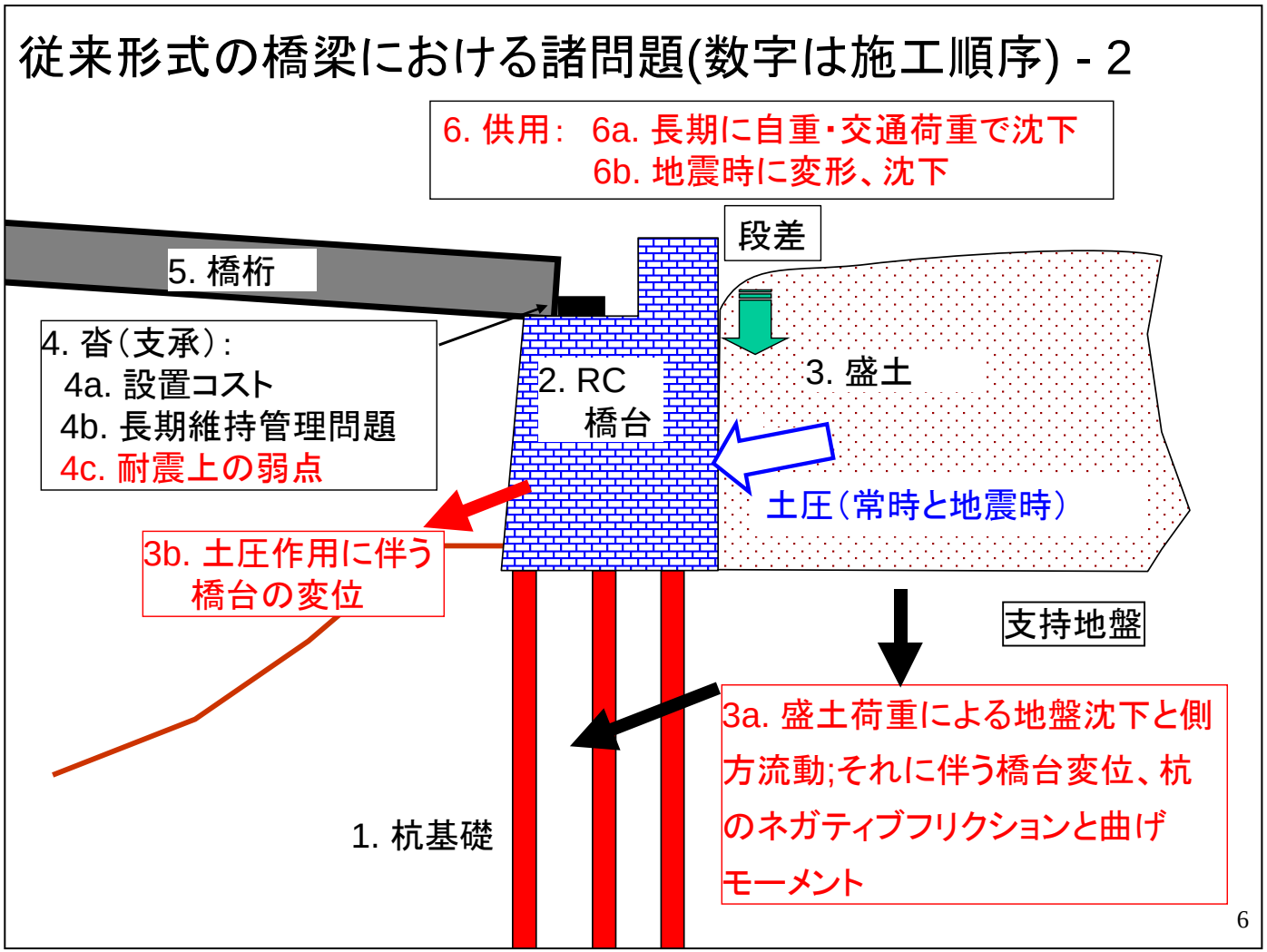
そもそも、支承(bearing)は沓(shoe)は、何のために必要なのでしょうか？これは、季節温度変化による桁の繰返し伸縮と様々な理由による橋台の変位によって桁と橋台構造物に応力が発生しないように、桁を静定構造物にするためです。しかし、この支承によって、様々な問題が生じます。

従来形式の橋梁における諸問題(数字は施工順序) - 1



これは、従来型の単純桁橋梁の諸問題のまとめです。

まず、取付盛土は無補強で自立性がないから、杭と橋台構造物をまず建設してから盛土を建設する必要があります。このため、盛土荷重による地盤沈下と側方流動に伴う橋台変位、杭のネガティブフリクションと曲げモーメントなどが生じます。また、橋台に作用する土圧に伴って橋台が変位しようとするので、それを防ぐために杭等の基礎構造物が必要になります。一度建設した橋台は変位させられないので、これらの対策は重要になりコストが掛かります。



また、支承には様々な問題があります。4a. 設置コストが高いこと、4b. 長期維持管理を継続しなければならないことが、まず問題になります。

また、支承と取付盛土は、地震荷重に対する二大弱点となります。

荷重が集中する支承は、地震時に損傷する場合が非常に多い。また、自由端では桁が支承から外れて、桁が落橋する場合もあります。

また、取付盛土は長期に亘り徐々に沈下して段差が生じるため、維持管理のコストがかかります。また、地震時に突然大きく沈下する場合が非常に多い。

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、地震による鉄道橋の橋台背面の取り付け盛土が大きく変位・沈下した状況です。

2007年3月25日能登半島地震
能登有料道路　能登大橋取り付け部





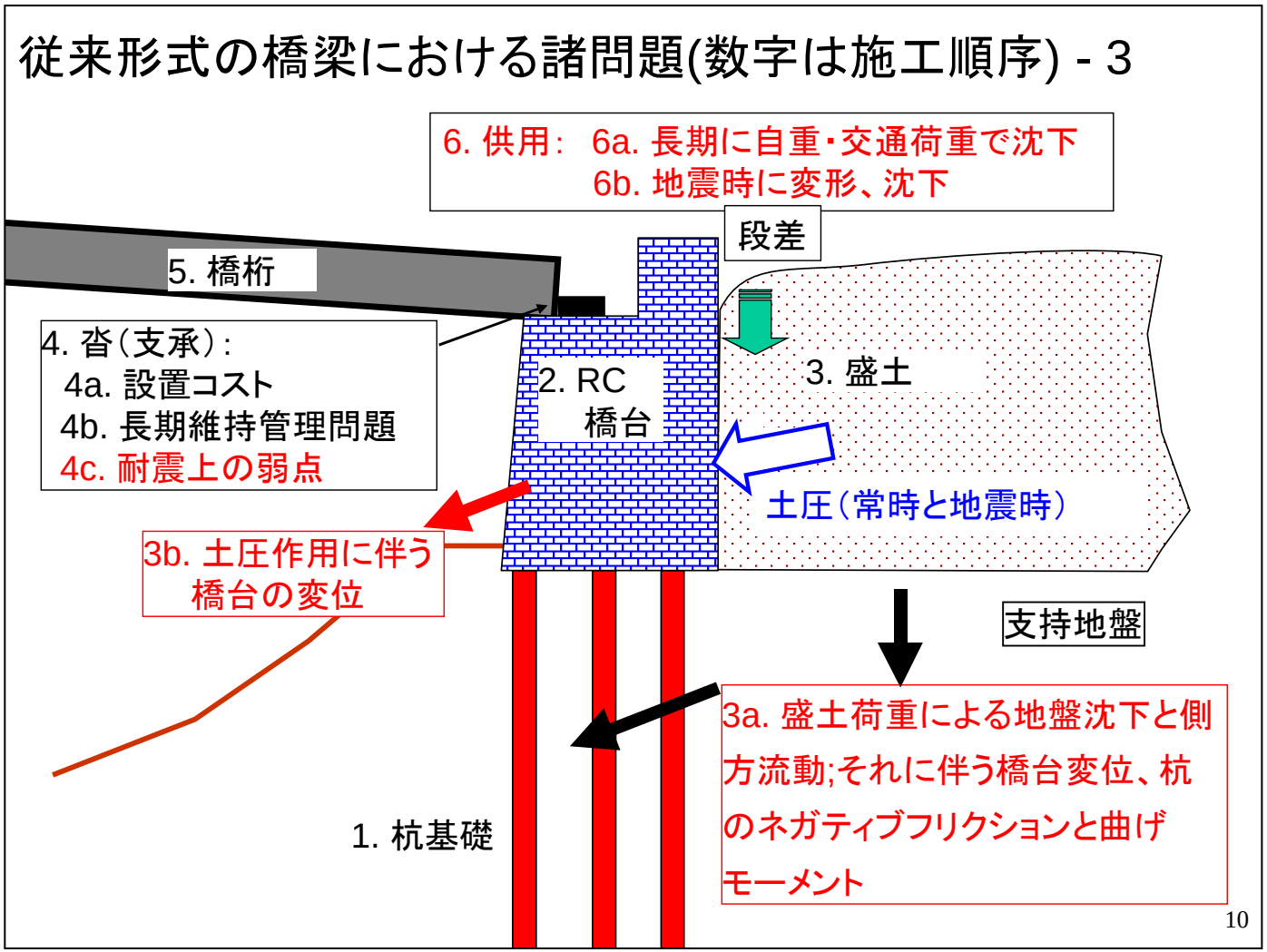
これは、地震による道路橋の橋台背面の取り付け盛土が大きく変位・沈下した状況です。





2007年7月16日新潟県中越沖地震
北陸自動車道

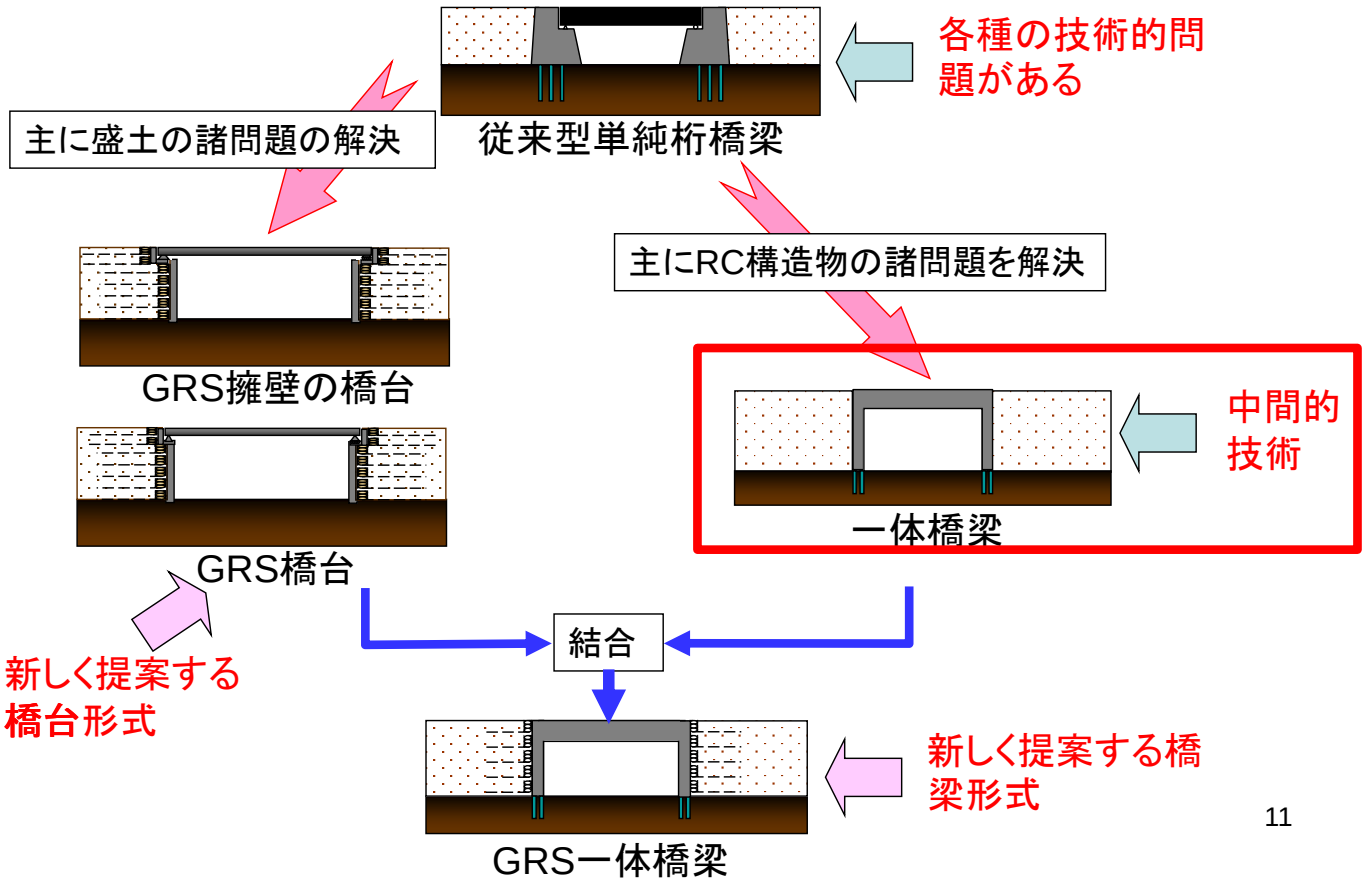
これも、地震による道路橋の橋台背面の取り付け盛土が沈下して緊急車両の通過も困難になった状況です。



さらに、支承と取付盛土は津波に対しても二大弱点であることは、前回の授業で説明しました。

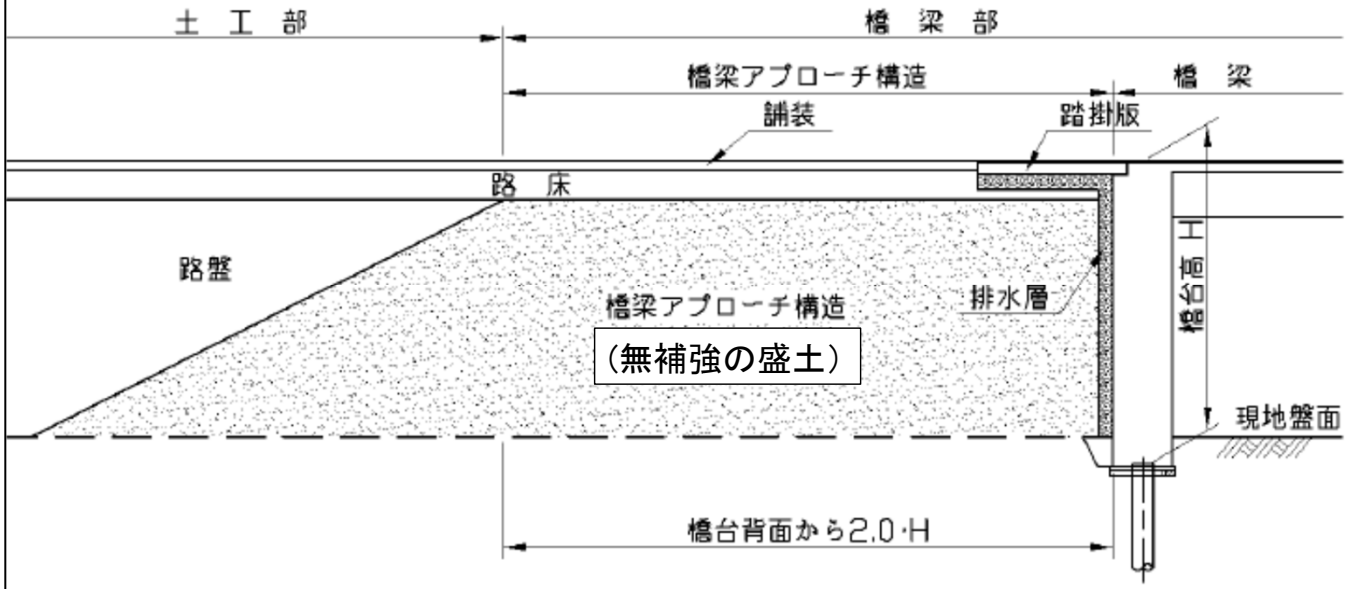
この図に纏めてある諸問題は、古くから認識されていました。そのため、古くから対策が研究されてきましたが、有効な対策がなかなか見つからない状態が、長い間続いてきました。

GRS擁壁を活用したGRS橋台とGRS一体橋梁の開発経緯



前述の問題の構造工学的な解決策が、一体橋梁です。

支承を除去して橋桁と橋台を構造一体化した橋梁(従来型一体橋梁； Integral bridge)

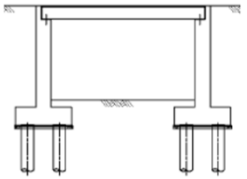
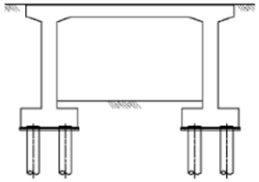
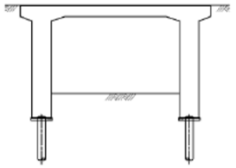
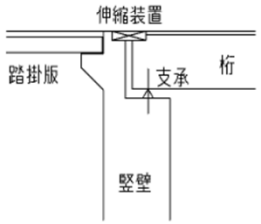
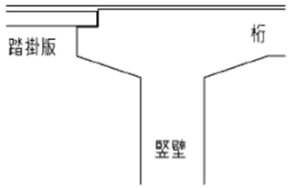
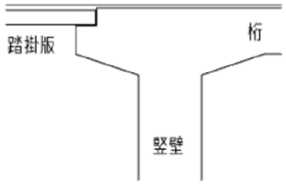


(原図)中谷昌一・竹口昌弘(2008): 道路橋下部構造の新技術開発と評価の課題、特集：道路橋に係わる技術開発及び評価、土木技術資料 50-6.

支承を除去して橋桁と橋台を構造的に一体化した橋梁であり、従来型一体橋梁（英語で、Integral bridge)と呼びます。

盛土は補強しておらず、杭は変形しやすいように一列の杭です。その理由と、そのための問題点を次頁以降で説明します。

従来型単純桁橋梁、ポータルラーメン橋、従来型一体橋梁の比較-1

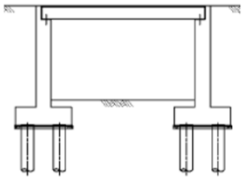
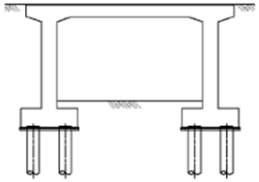
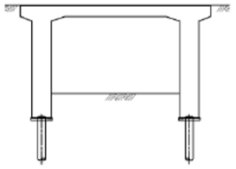
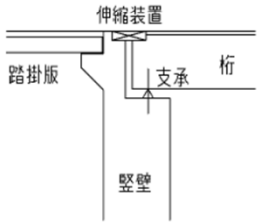
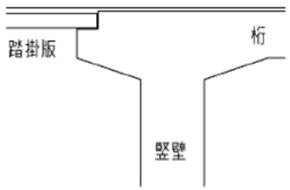
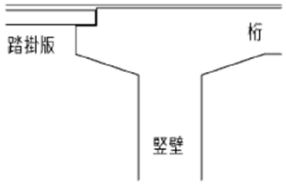
構造形式	従来橋	橋台部ジョイントレス構造	
		ポータルラーメン橋	従来型一体橋梁
概略図			
接続部 概略図			
支承条件	有（可動/固定/弾性等）	無（剛結）	無（剛結）
伸縮装置	有	無	無
温度変化による桁伸縮への対応	遊間を確保し，支承のせん断変形性能	橋台竪壁および基礎の変形性能	柔軟な橋台杭基礎の変形性能

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

これは、従来型単純桁橋梁、ポータルラーメン橋、従来型一体橋梁の構造の比較です。

ポータルラーメン橋と従来型一体橋梁は、支承が無いことが共通です。温度変化による桁伸縮に対して、ポータルラーメン橋は竪壁と杭に一定の剛性を持たせて抵抗して、竪壁の変位を抑制します。

従来型単純桁橋梁、ポータルラーメン橋、従来型一体橋梁の比較-2

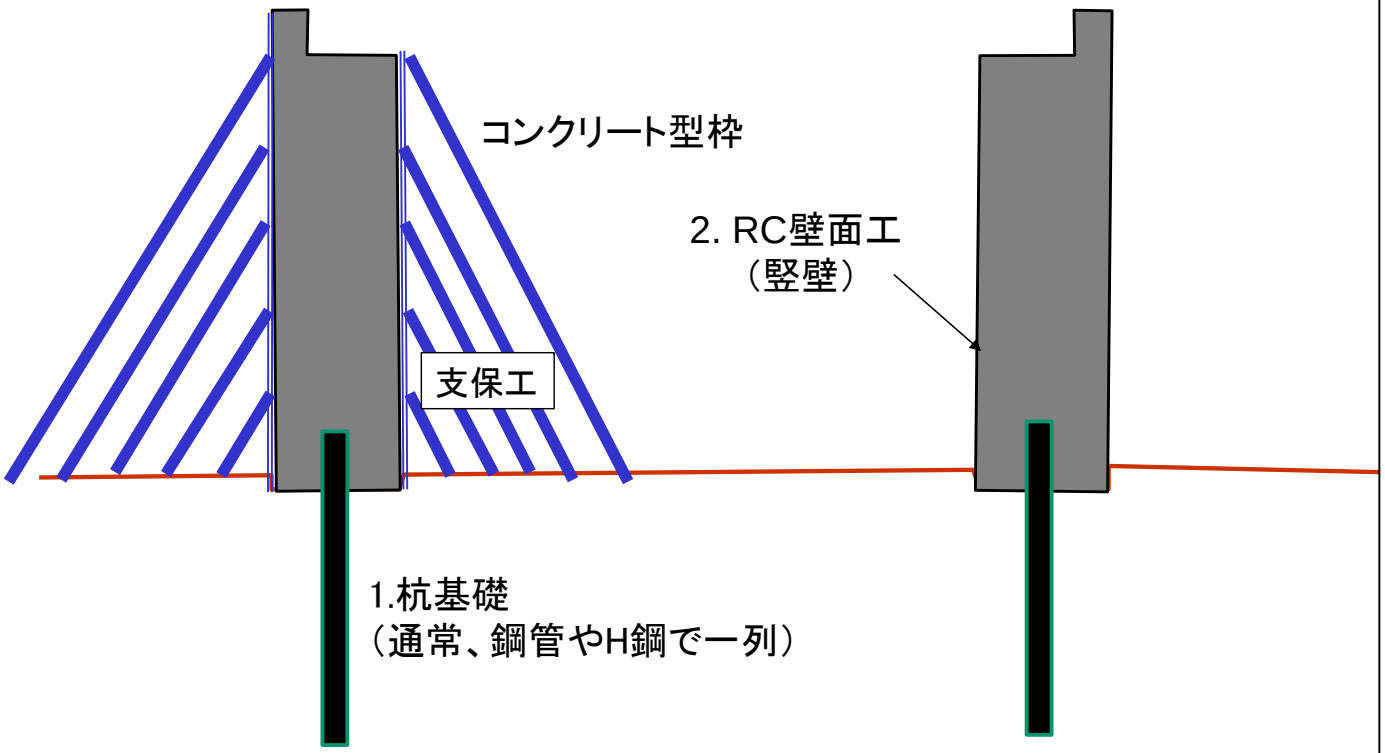
構造形式	従来橋	橋台部ジョイントレス構造	
		ポータルラーメン橋	従来型一体橋梁
概略図			
接続部 概略図			
支承条件	有（可動/固定/弾性等）	無（剛結）	無（剛結）
伸縮装置	有	無	無
温度変化による桁伸縮への対応	遊間を確保し，支承のせん断変形性能	橋台竪壁および基礎の変形性能	柔軟な橋台杭基礎の変形性能

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

一方、従来型一体橋梁では、温度変化による桁伸縮に対して、杭基礎は曲げ剛性が低い一列の鋼管やH鋼として、温度変化による桁伸縮の自由度を上げています。この自由度を上げるために、さらに裏込め盛土も柔軟にすることにして、良く締め固めない方が良い、と言う意見もあります。

しかし、それでは裏込め盛土が沈下して段差が生じやすくなり、舗装のoverlayなどによる補修費が高くなります。また、地震時の安定性も低くなります。

橋桁と橋台を一体化した橋梁の施工法



これは、従来型一体橋梁の建設法です。盛土の建設の前に、杭基礎、竪壁を建設します。

英国での一体橋梁の竪壁の建設例



Plate 1a Construction of the west abutment

TRL report TRL521 (2001)

一体橋梁の竪壁の建設にはコンクリート型枠の大掛かりな支保工が必要になります。

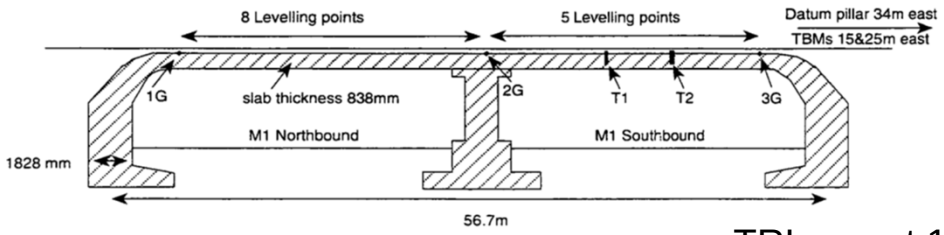
橋桁と橋台を一体化した橋梁の施工法



一体橋梁は、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できる　→米国と英国等で盛んに建設

また、取付盛土は無補強であり自立性が無いため、その施工は最後に行うことになります。次頁で説明しますが、そのために様々な問題が残ります。

英国の高速道路での典型的な一体橋梁



TRL report 165 (1995)

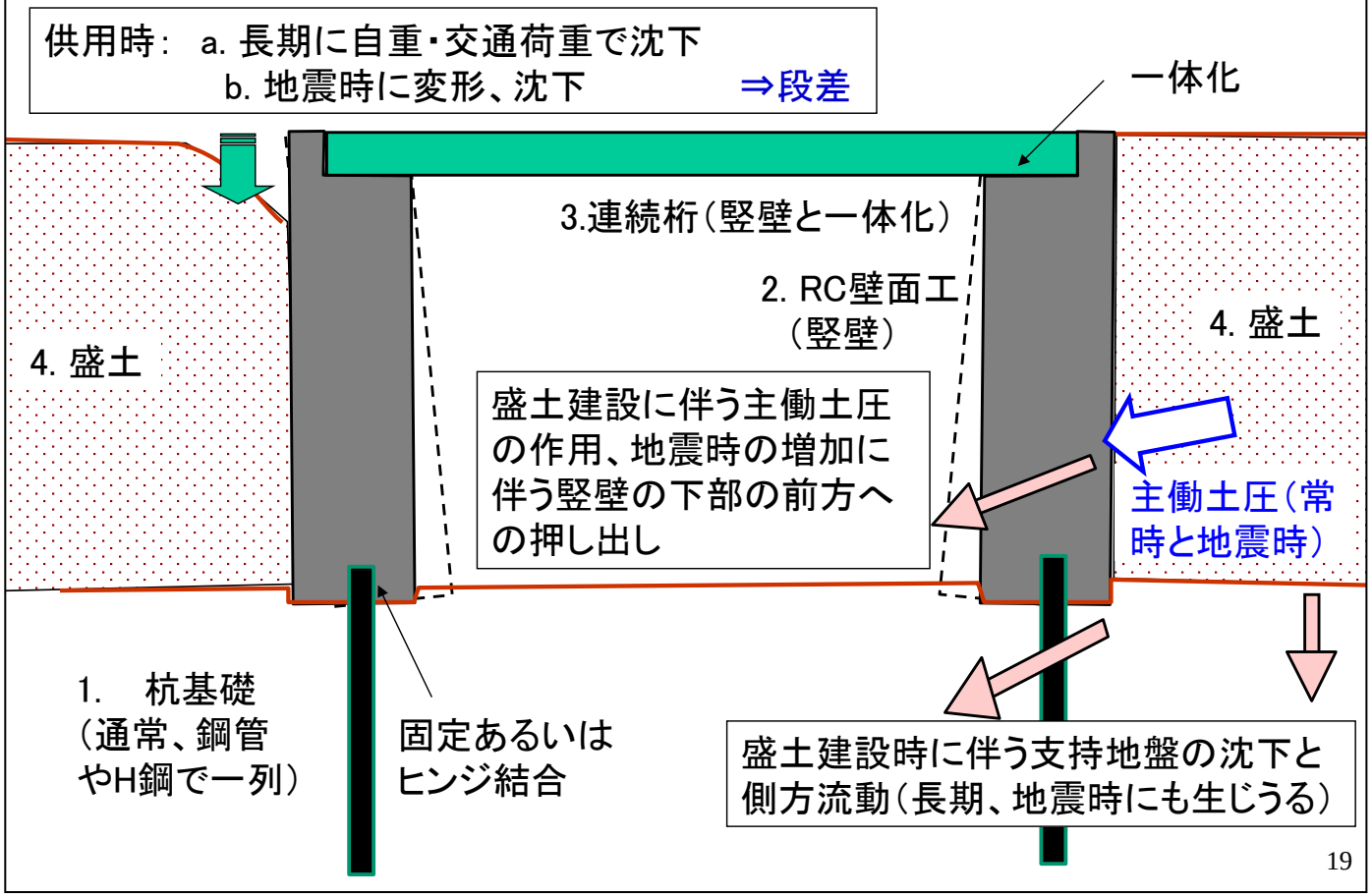


2007年8月内村太郎氏（埼玉大学）撮影

一体橋梁は、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できることから、米国では数万と英国では数千と盛んに建設されています。

これは、英国での例です。

一体橋梁 における未解決の「古くからの問題」



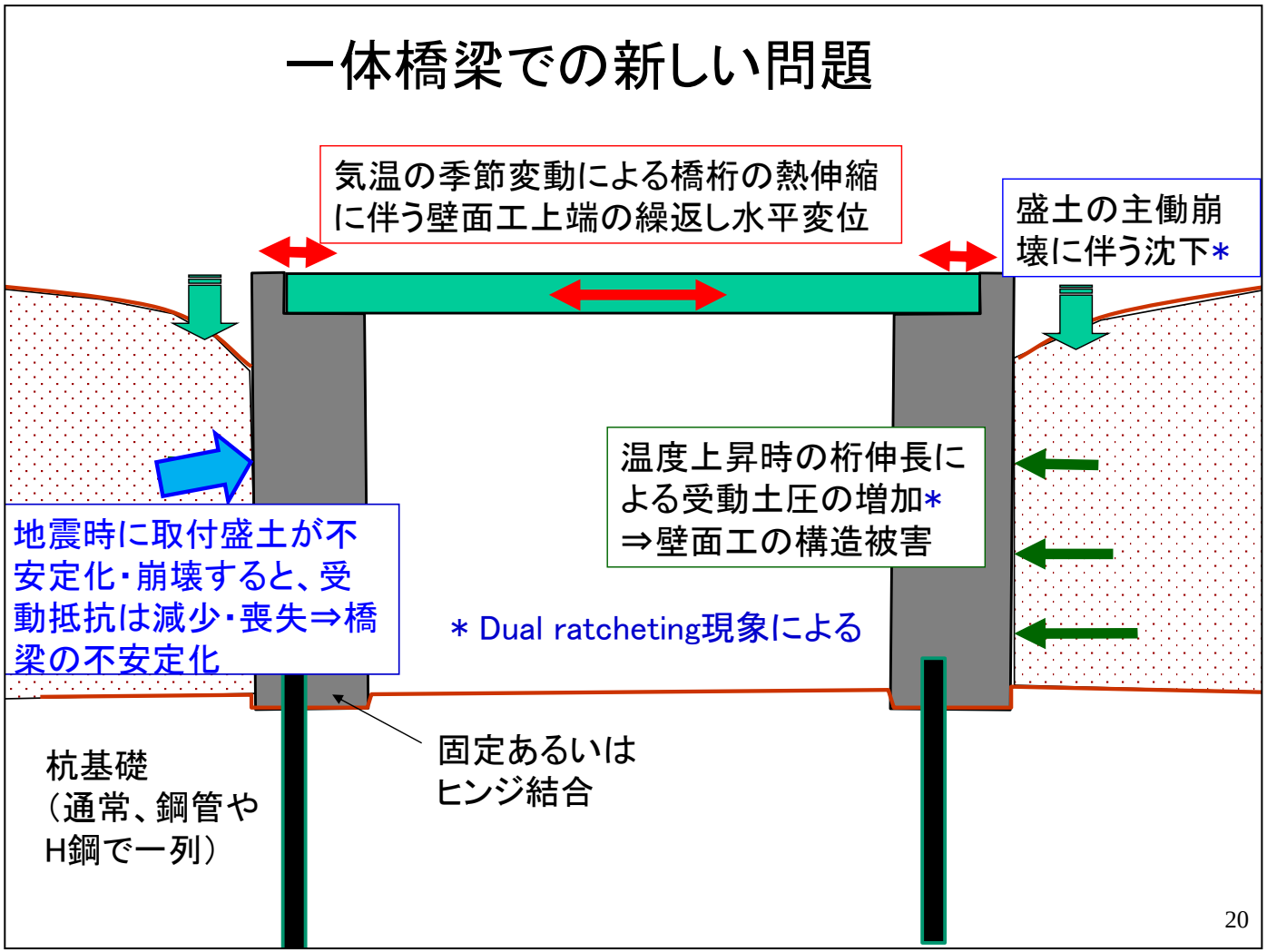
まず、従来型一体橋梁には、未解決な古くからの問題があります。

これらは、主に

1)盛土が無補強であることによるもの、

2)そのために盛土の施工は最後になるためのもの、

です。



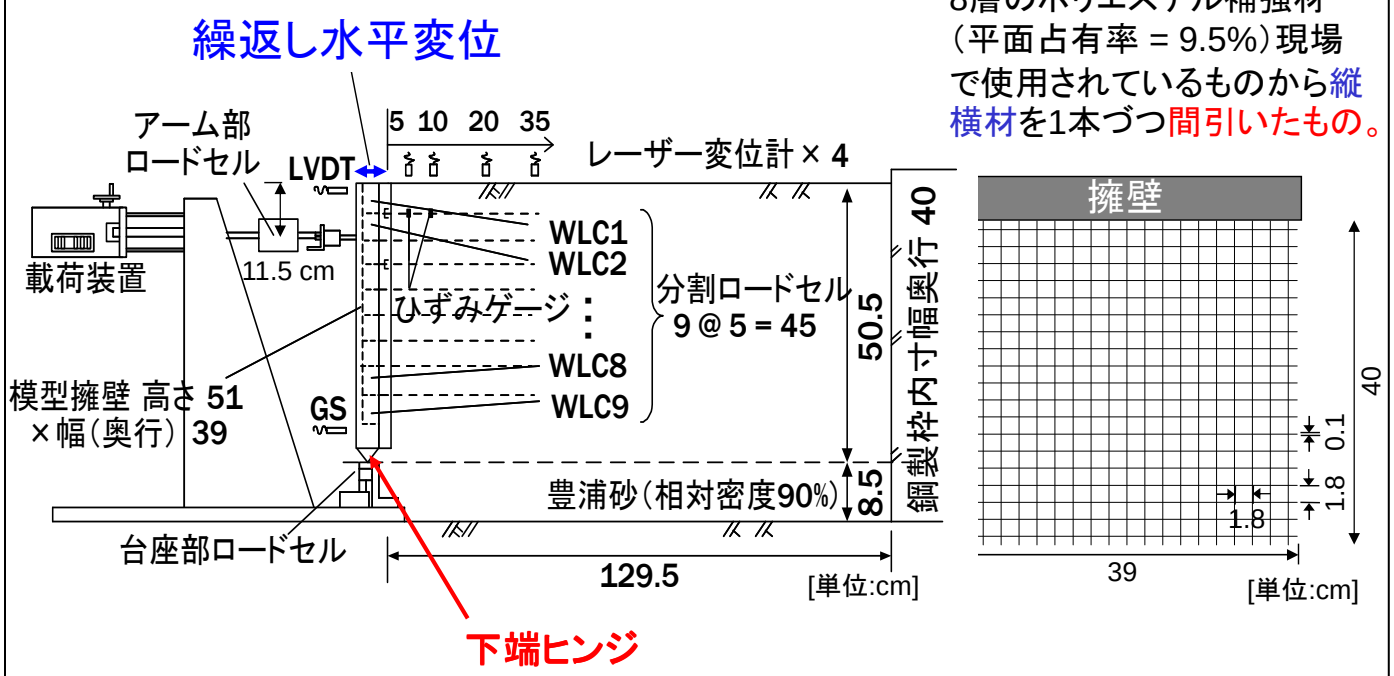
さらに、以下のような新しい問題が生じます。

まず、地震時に取付盛土が不安定化・崩壊して受動抵抗が減少・喪失すると、杭基礎の剛性が低いので、橋梁が不安定化する虞があります。

さらに、支承を用いていないことから、温度変化による桁の伸縮が竪壁上端に繰り返し水平変位となり、このため土圧の増加と盛土の沈下が同時に生じる、と言った複雑な問題が生じます。これは、直ちには理解しにくいと思いますので後で説明します。

前頁とこの頁で示した諸問題への対応は容易ではなく、そのためと思われますが、わが国では一体橋梁は幾つか建設されましたが、普及していません。

壁面工の繰返し水平載荷模型実験（東京理科大学）
（下図は盛土を補強した場合）



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本づつ間引いたもの。

21

これは、一体橋梁の問題を検討するために東京理科大学で行った実験の概要です。

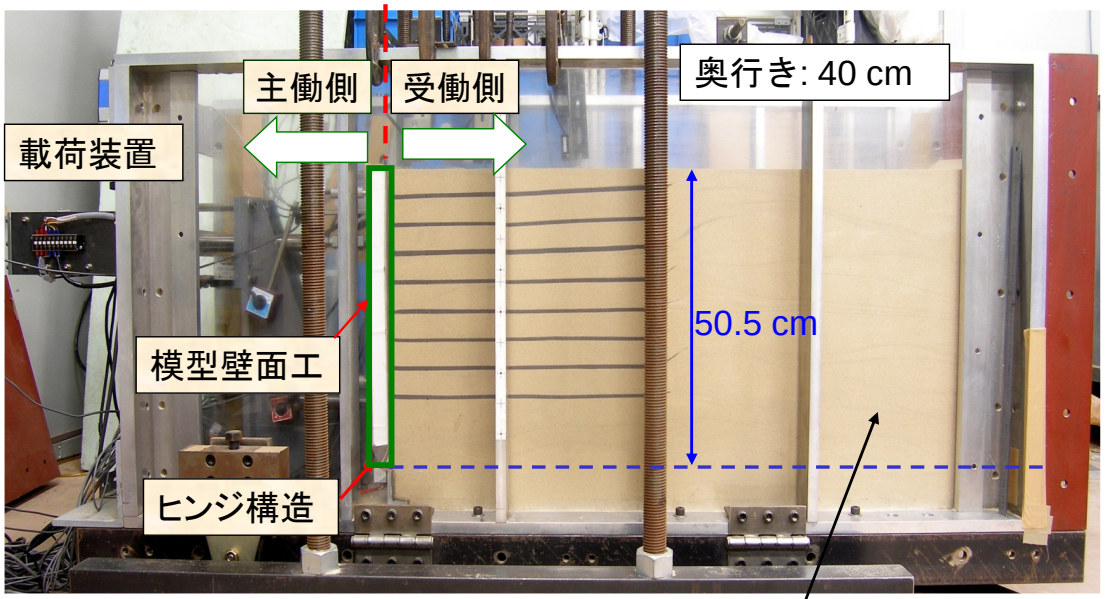
壁面工の背面の盛土は空気乾燥した豊浦砂であり、相対密度が90%になるように、無補強では空中落下法で、補強では突固め法により作成しています。

補強材はポリエステル補強材で、5cm間隔に計8層敷設してあり、模型擁壁と連結してあります。壁面工下端では、滑動は生じないものと想定していて、ヒンジ構造にしてあります。

また、繰返し載荷による擁壁の強制水平変位は、初期状態から見て主働領域だけで与えています。

壁面工の繰返し水平載荷の室内模型実験

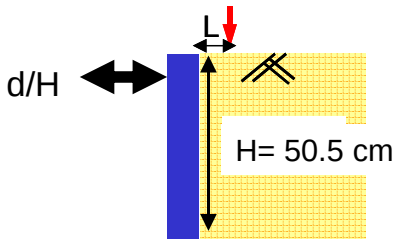
（東京理科大学： 相澤宏幸氏・相馬亮一氏・錦織大樹氏（修士論文研究）と平川大貴氏の実験）



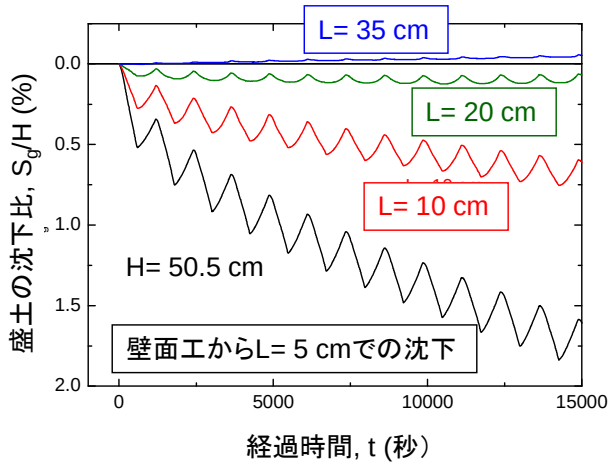
空気乾燥豊浦砂（無補強、あるいは水平補強材で補強）
横の黒線群は、砂の変形を観察するための染色した豊浦砂

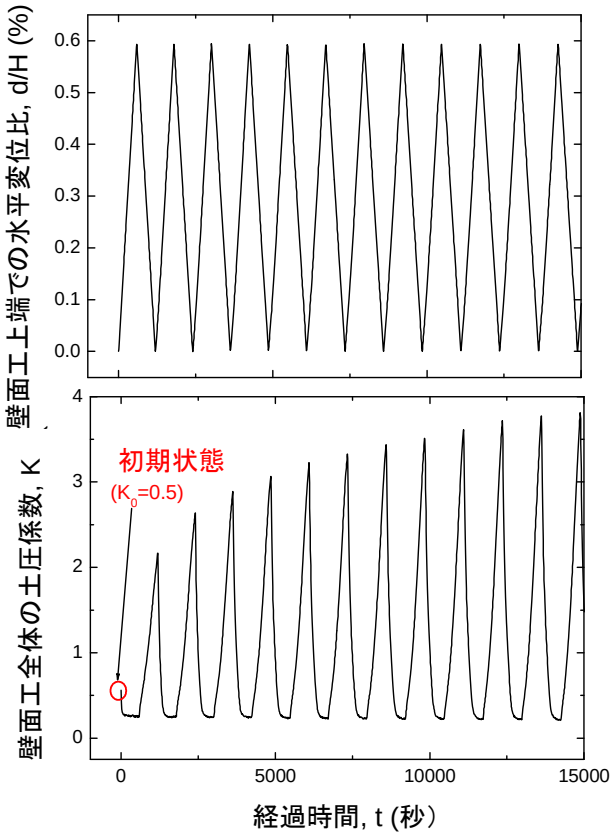
これは、模型の写真です。

無補強盛土で壁面工下端がヒンジ支持の場合の実験例



無補強盛土





23

これは、無補強盛土の場合です。壁面工上端での水平繰返し変位dの両振幅Dが僅か3mmで、壁の高さH= 50.5 cmに対して0.6%の場合です。

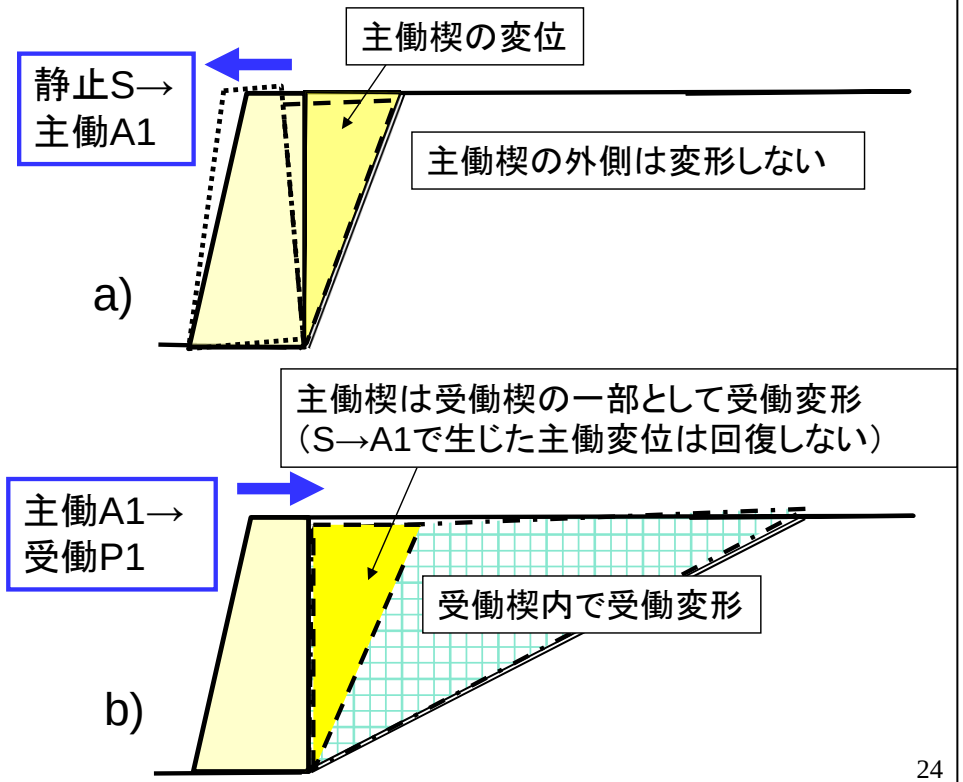
壁面工背面の土圧の総計Qを土圧係数$K=2Q/(\gamma \cdot H^2)$で表しています。Kの初期値は静止土圧係数です。繰返し載荷とともに、Kのそれぞれの繰返し回でのピーク値は受動土圧係数に向かって次第に増加しています。これは、非常に大きな土圧です。

また、壁面工背後の盛土は繰返し載荷とともに継続的に沈下しており、壁面工の近く(L= 5 cm)では、大きな沈下となっています。

なぜ、このようなことが生じるのでしょうか？

なぜ、壁面工の小さな繰返し水平変位によって、盛土は沈下して土圧は上昇するのか？

→Dual ratcheting現象（主働土圧メカニズムと受働土圧メカニズムが独立に生じる現象）



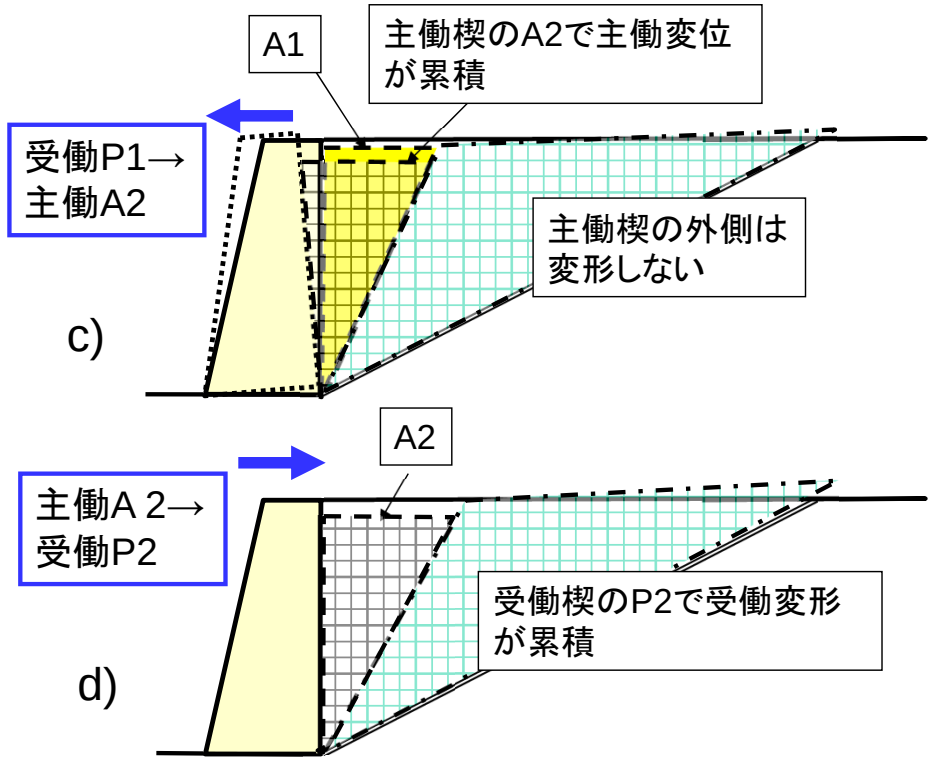
壁面工の小さな繰返し水平載荷によって、盛土は沈下して土圧は上昇するのは、Dual ratcheting現象（主働土圧メカニズムと受働土圧メカニズムが独立に生じる現象）のためです。ratchetとは、往復運動を与えた時、片方向の運動に対してだけに有効に反応して、逆方向の運動には反応しないことです。

つまり、主働楔は、段階a)では壁面工の主働変位によって沈下するが、段階b)の壁面の受動変位に対しては反応しません。

受動楔は、段階a)では壁面工の主働変位には反応しませんが、段階b)の壁面の受動変位によって発達して土圧が増加します。

なぜ、壁面工の小さな繰返し水平変位によって、盛土は沈下して土圧は上昇するのか？

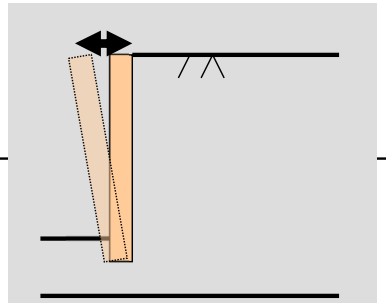
→Dual ratcheting現象（主働土圧メカニズムと受働土圧メカニズムが独立に生じる現象）

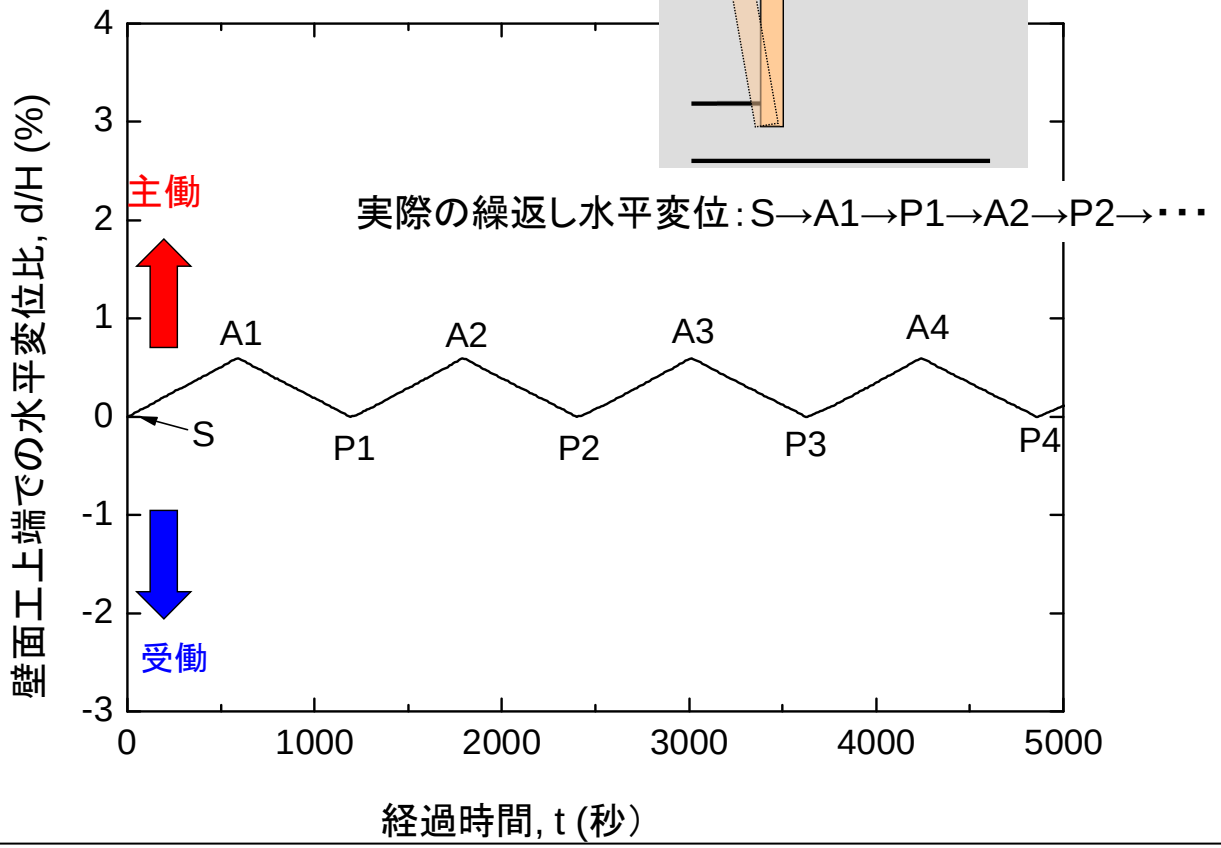


さらに、主働楔は、段階c)では壁面工の主働変位によって再度沈下するが、段階d)の壁面の受動変位に対しては反応しません。

受動楔は、段階c)では壁面工の主働変位には反応しませんが、段階d)の壁面の受動変位によって再度発達して土圧が増加します。

Dual ratchetメカニズム
（壁面工下端ヒンジ構造の場合）

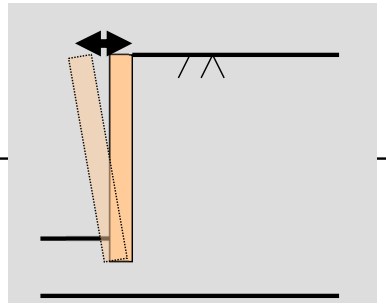


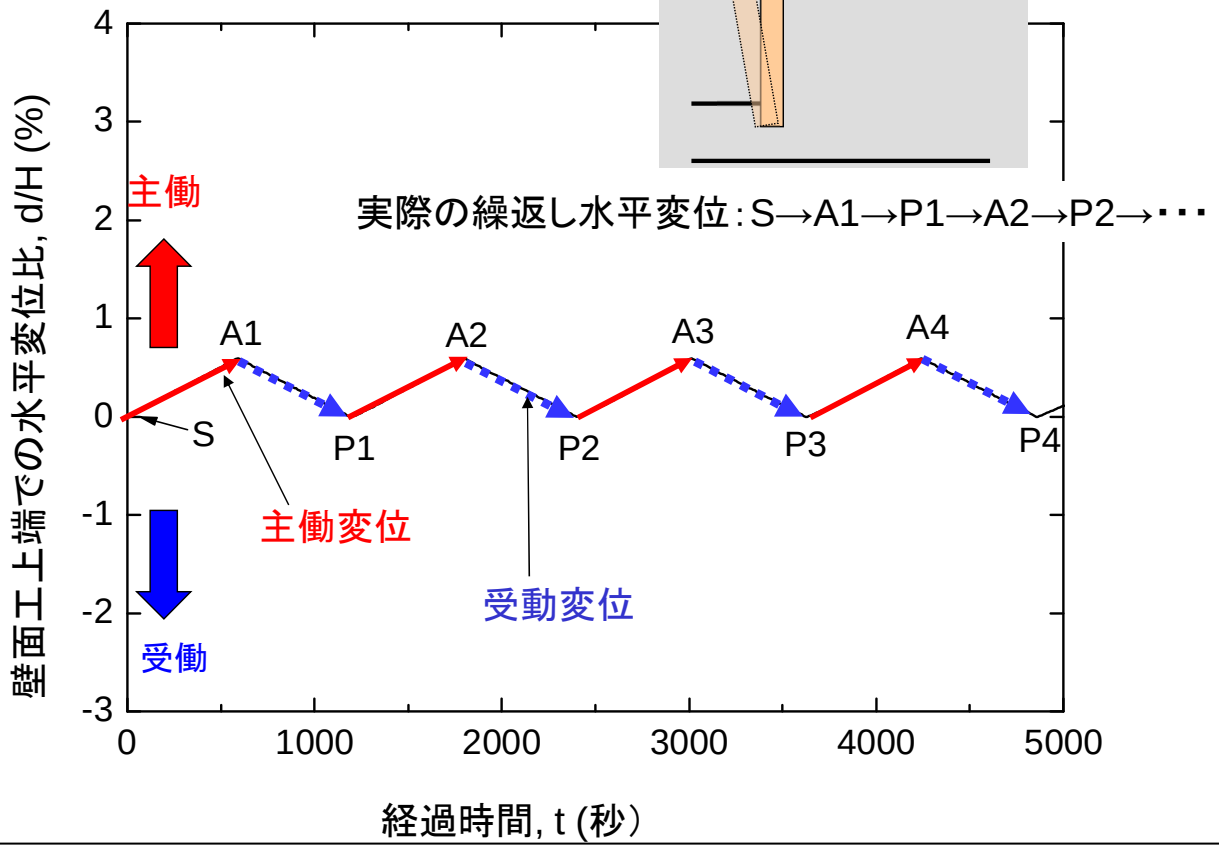


これは、Dual ratchetメカニズムを更に詳しく説明したものです。

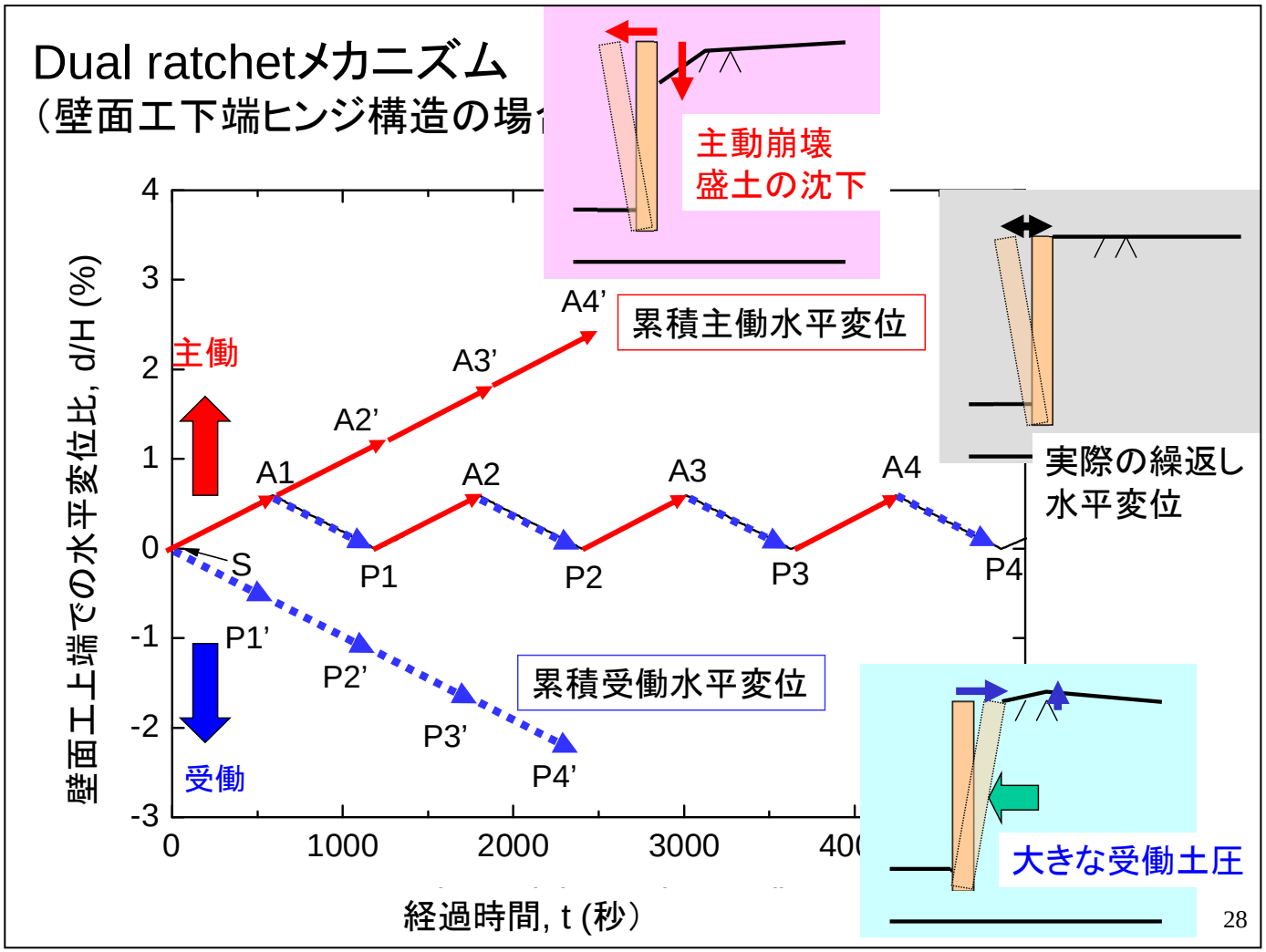
実験では、このように繰り返し水平変位を与えています。

Dual ratchetメカニズム
（壁面工下端ヒンジ構造の場合）

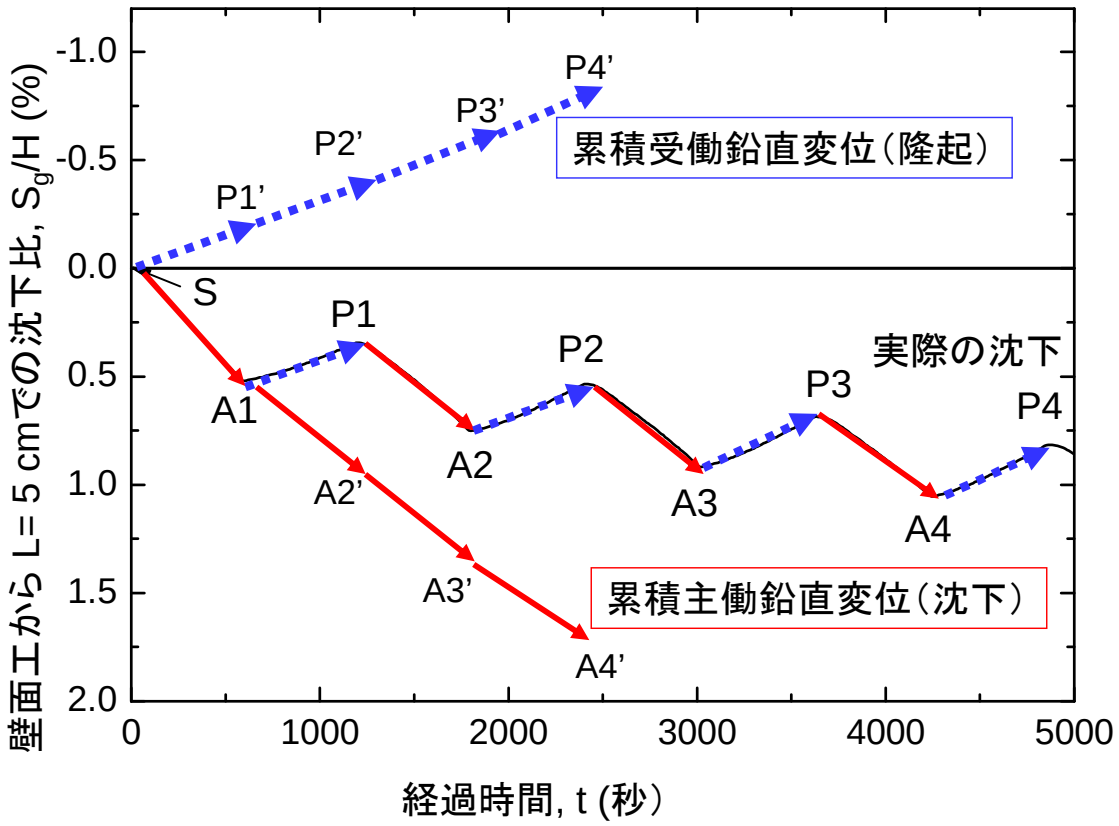




この繰り返し変位は、主働変位と受動変位に分解できます。



分解された主働変位と受動変位をそれぞれ集めるたのが、累積主働変位と累積受動変位です。

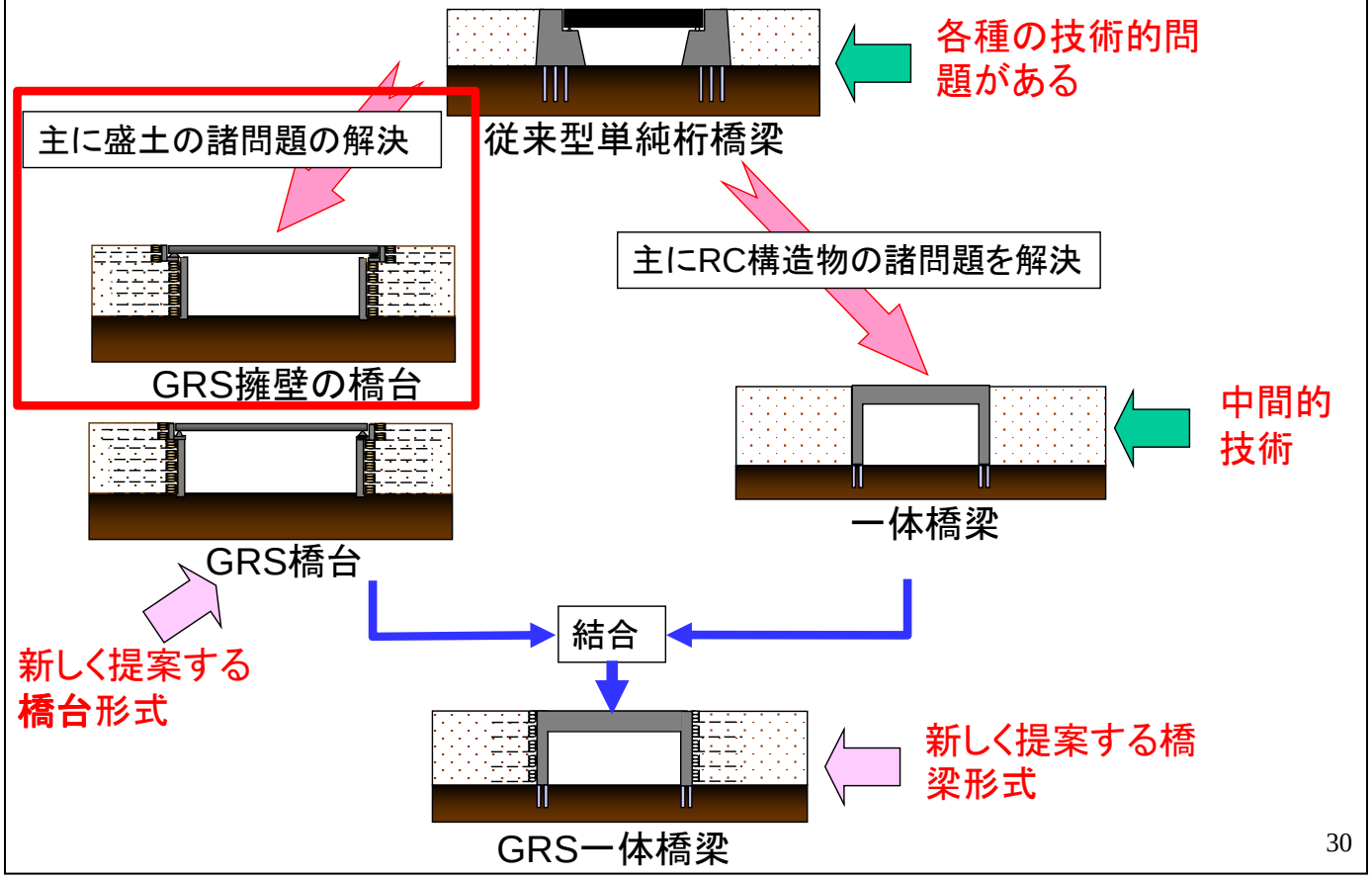


累積主働変位によって、主働楔の累積主働鉛直編（盛土の沈下）が生じます。

また、累積受動変位によって受動楔は発達してゆき、土圧が増加して行きます。

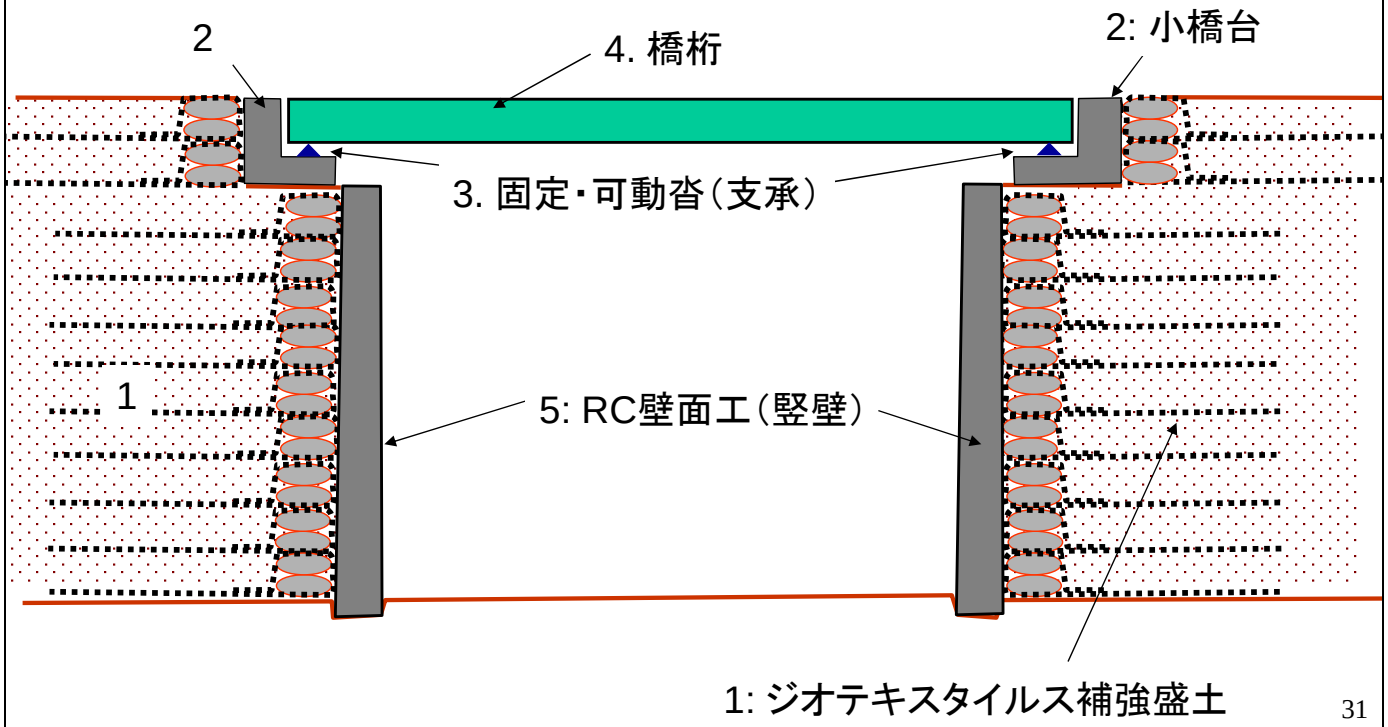
これらの現象は、従来型一体橋梁にとって伏兵であり、この工法の導入当初は橋梁技術者は認識していなかったようです。

GRS擁壁を活用したGRS橋台とGRS一体橋梁の開発経緯



一方、従来式の単純桁橋梁の諸問題を地盤工学的に解決しようとしたのが、ジオテキスタイル補強土擁壁を橋台として利用する方法です。

段階施工で建設した剛な一体壁面工を持つジオテキスタイルス補強土（GRS）擁壁を活用した橋梁形式（数字は施工順序）



この橋梁形式では、補強盛土の天端面で壁面近くに小橋台を設置して、桁の両端を支承を介して支持します。

片方の支承は回転に対して自由ですが水平変位に対して固定の「固定支承」で、反対側の支承は回転に対して自由であるとともに水平変位に対しても自由な「可動支承」です・

剛で一体の壁面工を持つ補強土擁壁の段階施工による橋台の建設（JR東海枇杷島新幹線車両基地，1991年）



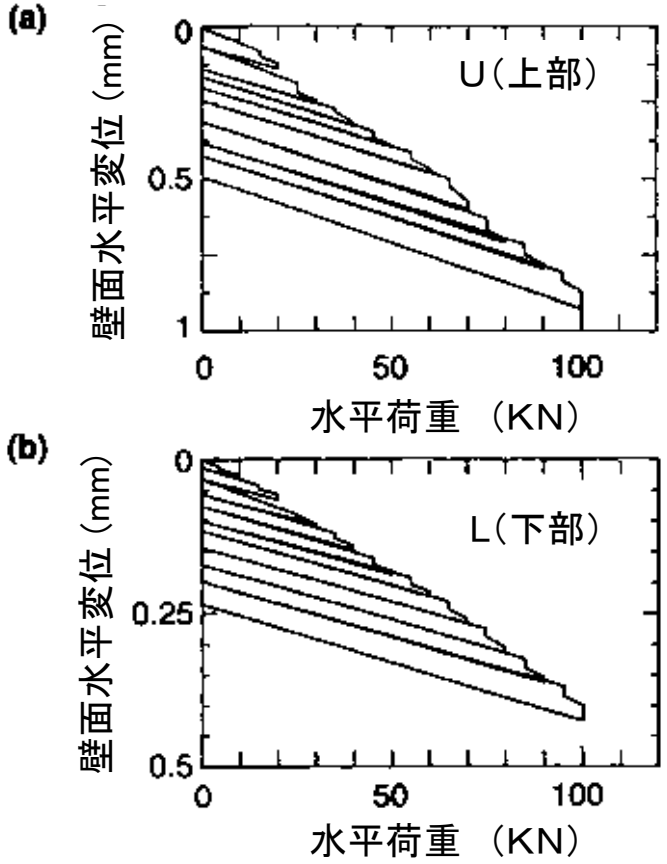
これは、ジオテキスタイル補強土擁壁を橋台として建設した最初の事例です。

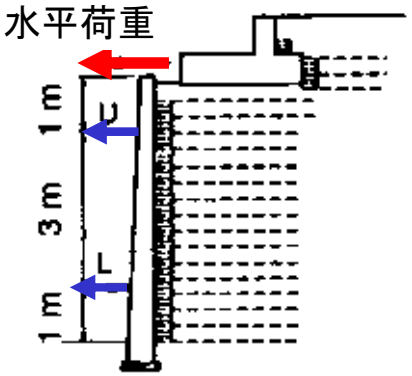
西武池袋線、桜台, 1993年



これは、東京で西武池袋線で、GRS擁壁の間に建設されたGRS擁壁の橋台です。

壁面工の剛性と一体性を確認するための
実物ジオテキスタイル補強土橋台の載荷試験



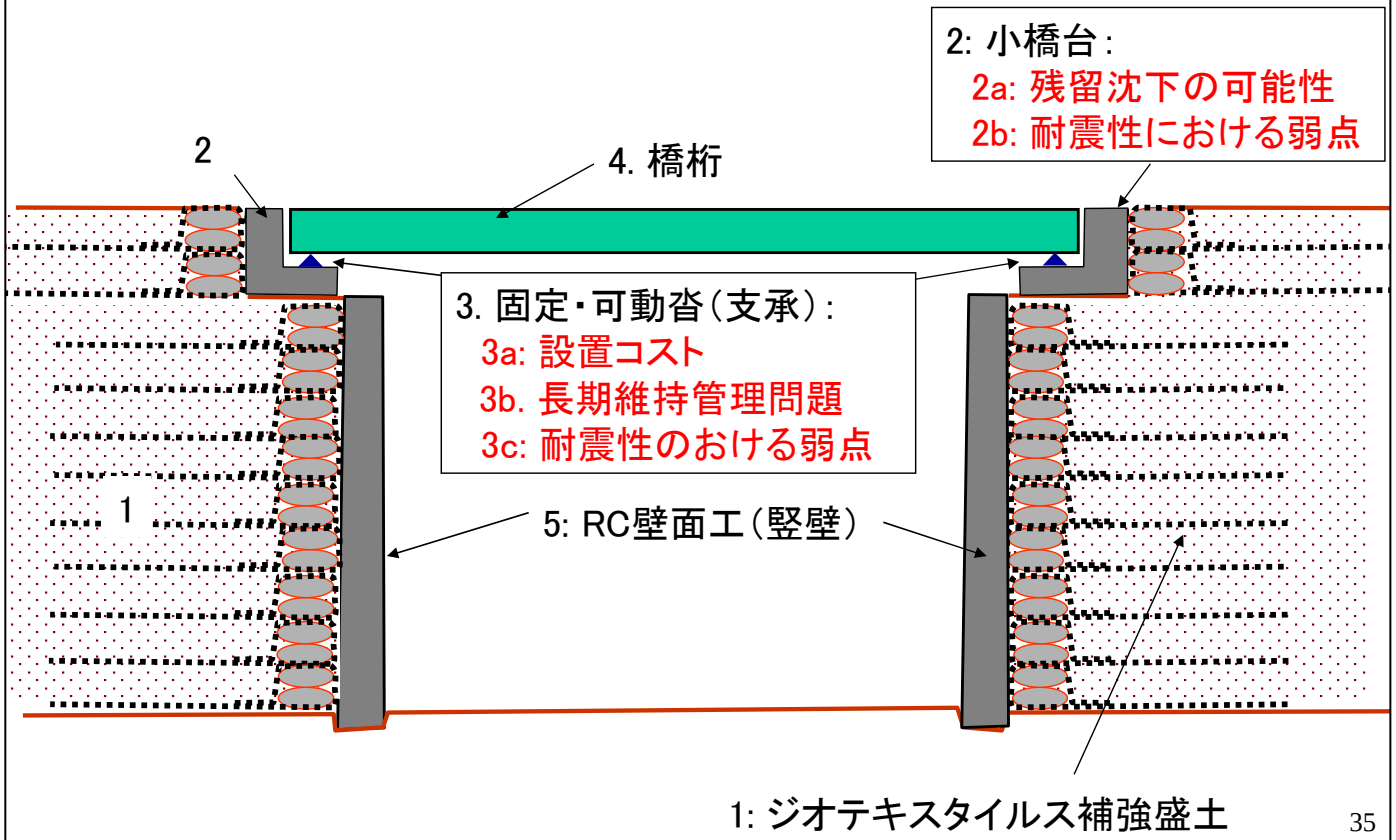


補強盛土と壁面工は
一体として挙動！

壁面工と補強盛土との一体性を確認するために、盛土天端の小橋台の水平載荷試験を行っています。

小橋台に水平荷重を加えているが、壁面工下端も反応しており、全ての補強材層が機能しています。これは、補強盛土と壁面工は一体として挙動していることを示しています。

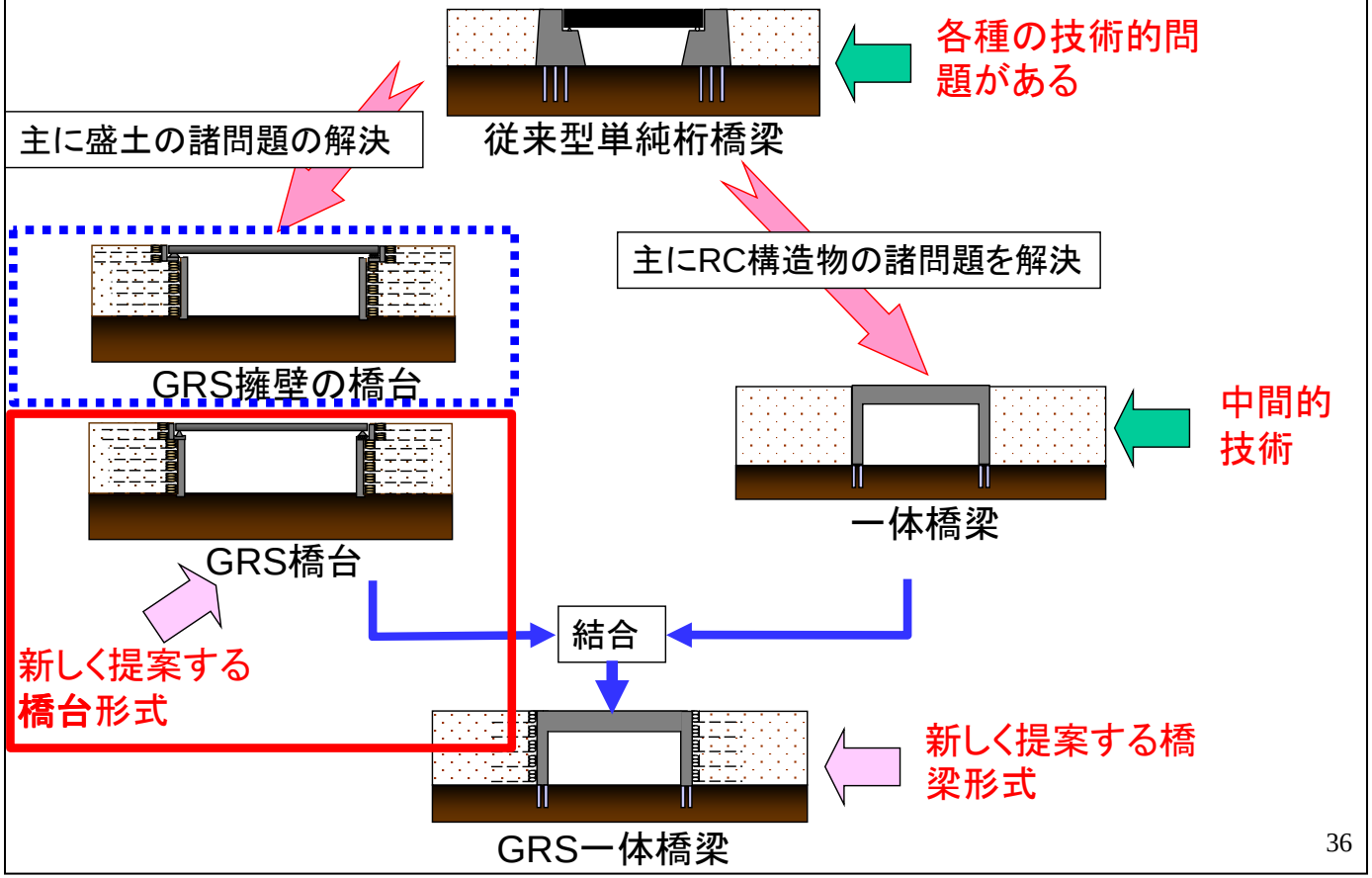
単純桁を一対のGRS擁壁橋台で支持する橋梁形式における諸問題



しかし、単純桁を一対のGRS擁壁橋台で支持する橋梁形式には、赤字で書いたような諸問題があります。

そのため、スパンが長くなり小橋台に加わる常時荷重と地震時荷重が大きくなる橋梁をこの形式で建設するのは難しいと判断しました。

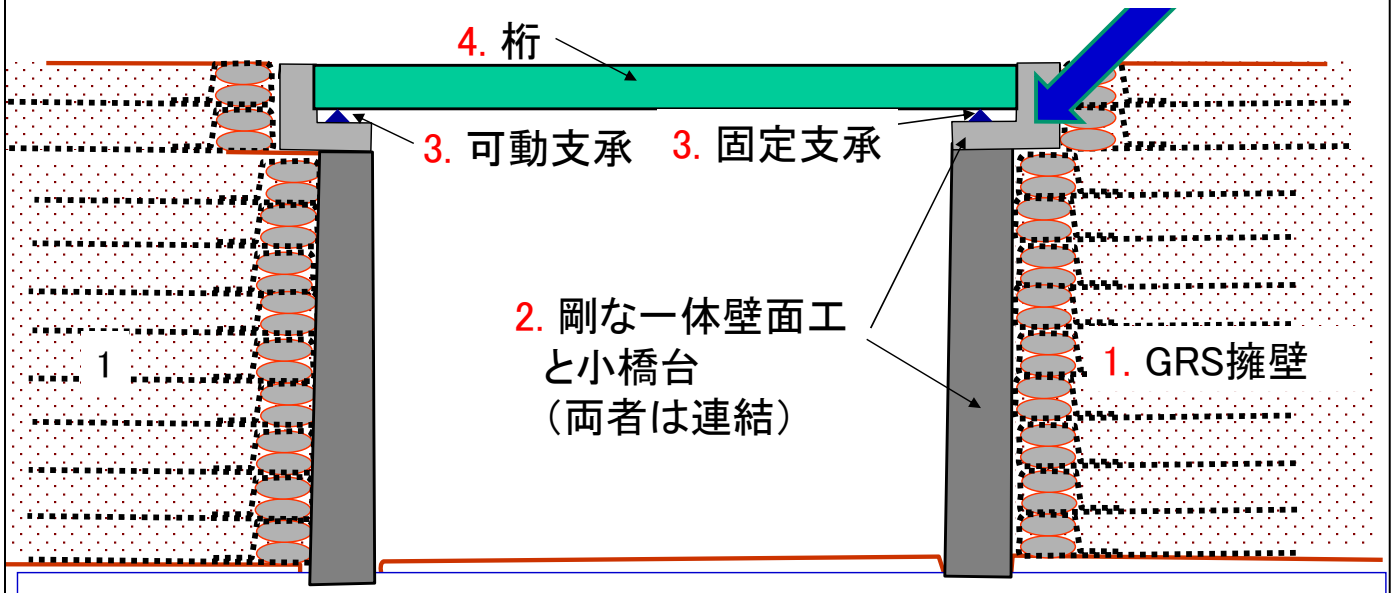
GRS擁壁を活用したGRS橋台とGRS一体橋梁の開発経緯



青の点線で囲んだGRS擁壁を橋台として用いる形式の諸問題を解決するために、赤の実線で囲んだ新しい形式のGRS橋台が案出されました。

単純桁を一対のGRS橋台で支持する新しい橋梁形式

小橋台は、剛な一体壁面工の上端に連結することによって安定化



一対の従来形式の橋台で単純桁を支持する橋梁よりも遥かに安定で経済的

従来形式と同様に静定構造物⇒

a)支持地盤の許容残留変形が比較的大（強固でない支持地盤にも適用可）

b) 桁設計は従来通り単純桁の設計となり、容易

これが、単純桁を一対のGRS橋台で支持する新しい橋梁形式です。

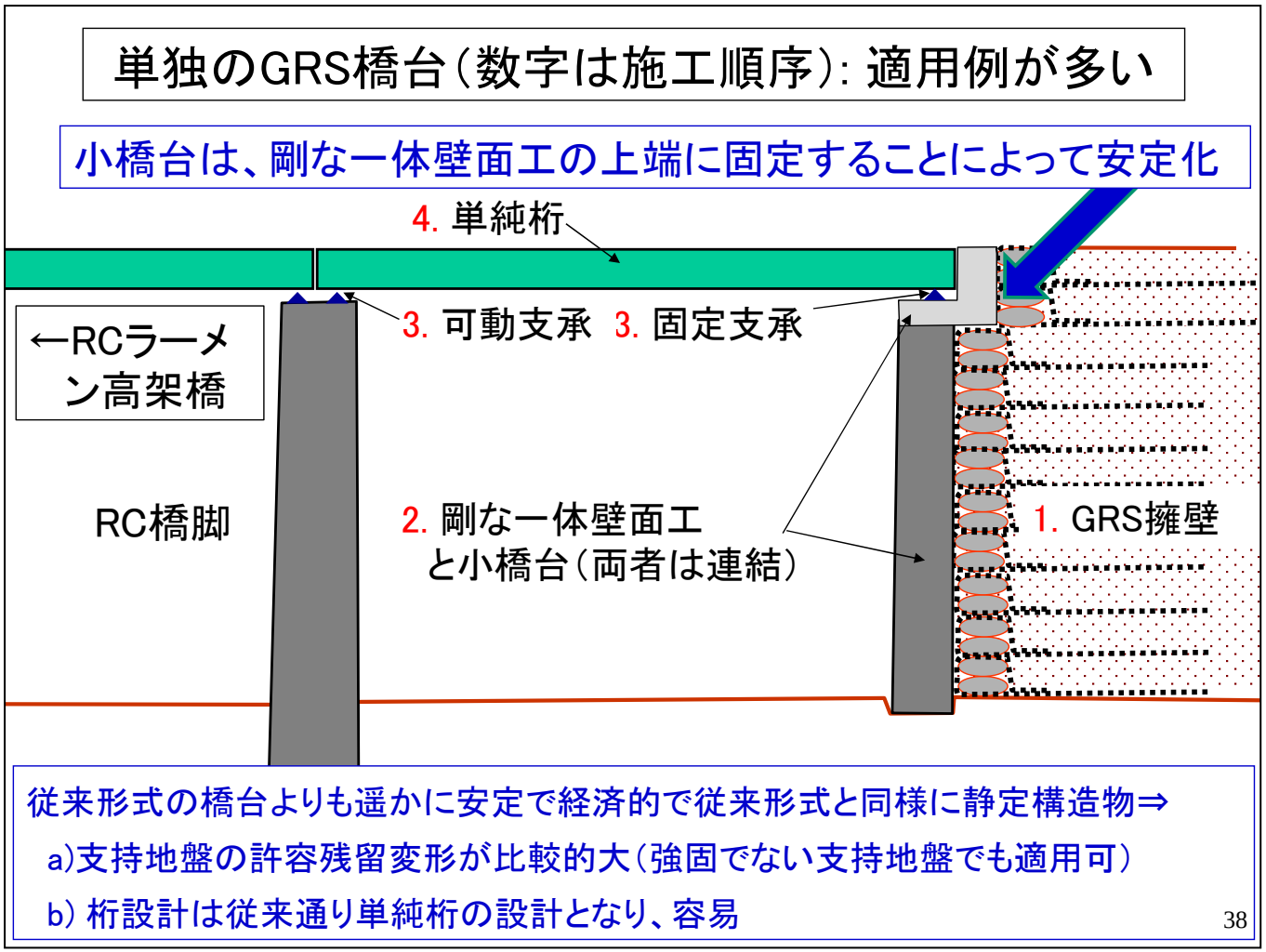
小橋台は、剛な一体壁面工の上端に連結することによって安定化させています。 その結果、従来形式の単純桁橋梁よりも遥かに安定で経済的になります。

更に、従来形式の単純桁橋梁と同様に静定構造物です。

そのため、

a)支持地盤の許容残留変形が比較的大きく、強固でない支持地盤にも適用できます。

b)また、桁設計は従来通り単純桁の設計となり、設計が容易になります。



実際は、トンネルの入り口の前に建設した盛土に単独のGRS橋台を建設して、それで単純桁を支持して、RCラーメン高架橋に接続する事例が多い。

この場合、GRS擁壁の方がRC橋脚よりも遥かに安定性が高いので、GRS擁壁の壁面工の上端に固定された小橋台に「水平変位に対して固定されている固定支承」を設置して、地震時に単純桁に作用する水平慣性力をGRS擁壁で受け止めるようにしています。逆側のRC橋脚には水平方向に可動な支承を配置しています。

実現場での適用（鉄道公団，九州新幹線）





耐震性橋台の施工

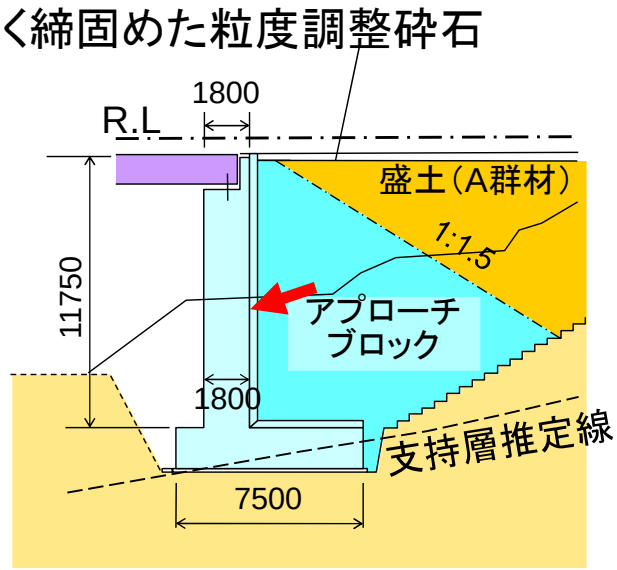


これは、前頁のGRS橋台が初めて建設された事例で、トンネルの入り口の前に建設して単純桁を支持して、RCラーメン高架橋に接続しています。

この形式の橋台を、一般的に耐震性橋台と呼称しています。

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、



逆T式橋台（従来形式）

RC構造物が盛土を支える。

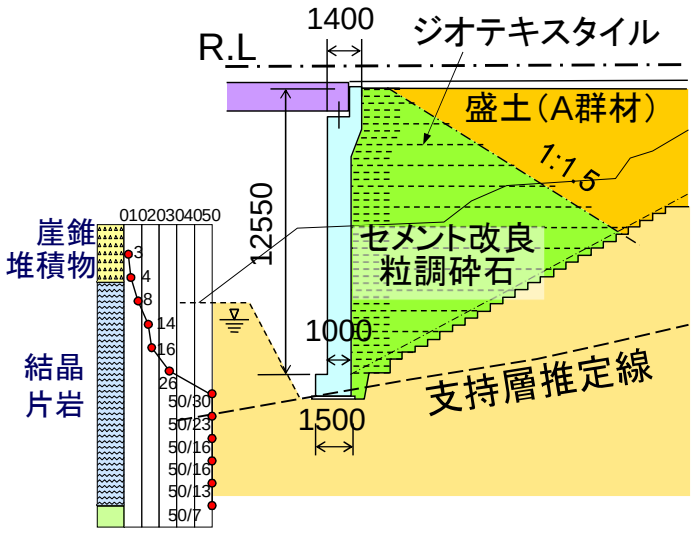
壁面工には主働動土圧が作用する。

右の図は、この場所に従来形式の抗土圧構造物として橋台を建設した場合です。

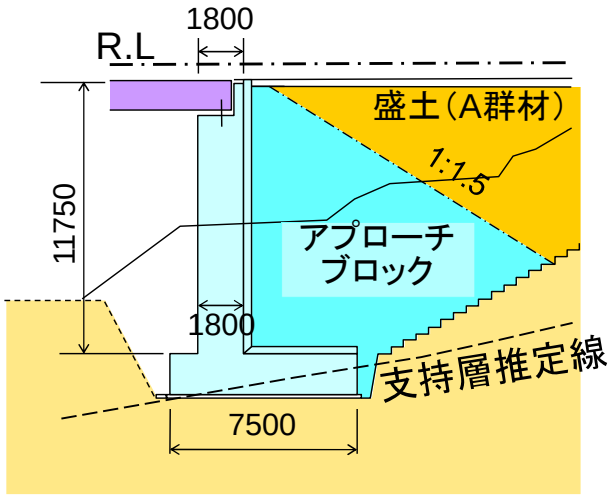
橋台構造物は逆T式擁壁であり、このRC構造物が無補強の自立できない盛土を支えます。擁壁には地震時に主働動土圧が作用するので、それに抵抗できるように設計します。

従来橋台との比較（九州新幹線）

●来橋台に比べて断面がスリム，大幅に工事費節減



GRS橋台（新形式： 耐震性橋台）
盛土がRC構造物を支える。
主働動土圧は作用しない。



逆T式橋台（従来形式）
RC構造物が盛土を支える。
壁面工には主働動土圧が作用する。

発想の転換（非常に難しい、特に現場技術では）

41

左は、実際に建設されたGRS橋台です。桁は、固定支承を介して剛で一体の壁面工の上端に連結した小橋台で支持されています。

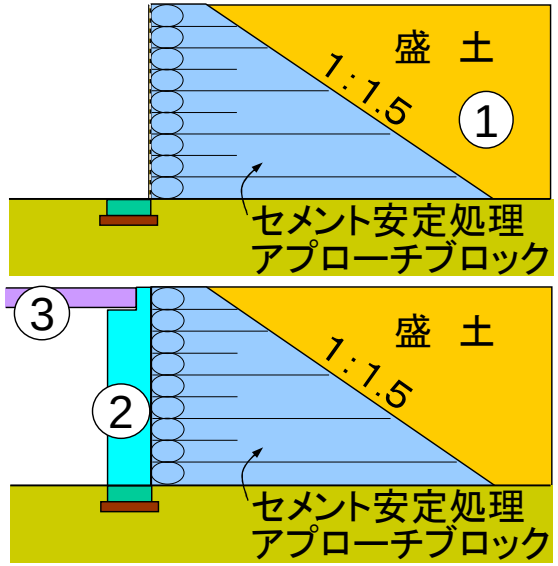
この場合、盛土がRC構造である壁面工を支えます。地震時には、壁面工に主働動土圧は作用せず、壁面工は盛土から分離しようとします。壁面工と補強材層の連結部はこの分離荷重に抵抗できる必要があります。

壁面工には地震時に受動動土圧が作用しますが、GRS擁壁はこれに対して十分な抵抗力を持っています。

新しい橋台のメカニズムを理解するのは、「RC構造物が盛土を支える」⇒「盛土がRC構造物を支える」と言う、発想の転換が必要です。

施工（九州新幹線）

段階施工





特徴

■段階的に施工を行うため，地盤の沈下等によって生じる，躯体と盛土の相対的変位の問題を回避できる。

これは、GRS橋台の段階施工を示しています。

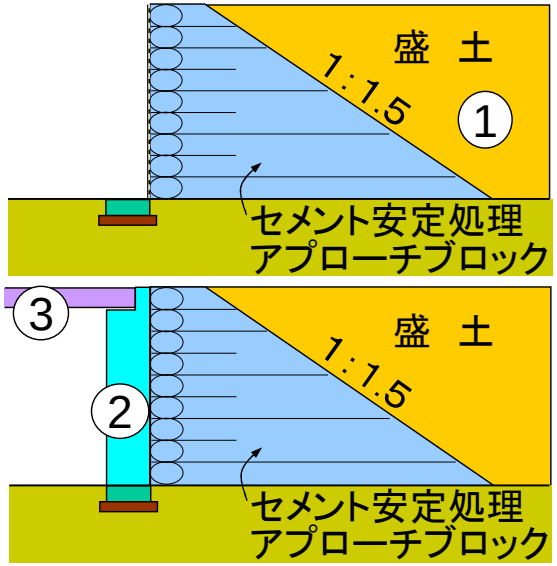
まず、①ジオテキスタイル補強した盛土を建設します。

②次に、盛土建設による支持地盤と盛土の変形が収束してから、剛な一体壁面工を建設します。

③最後に桁を設置します。

施工（九州新幹線）

段階施工





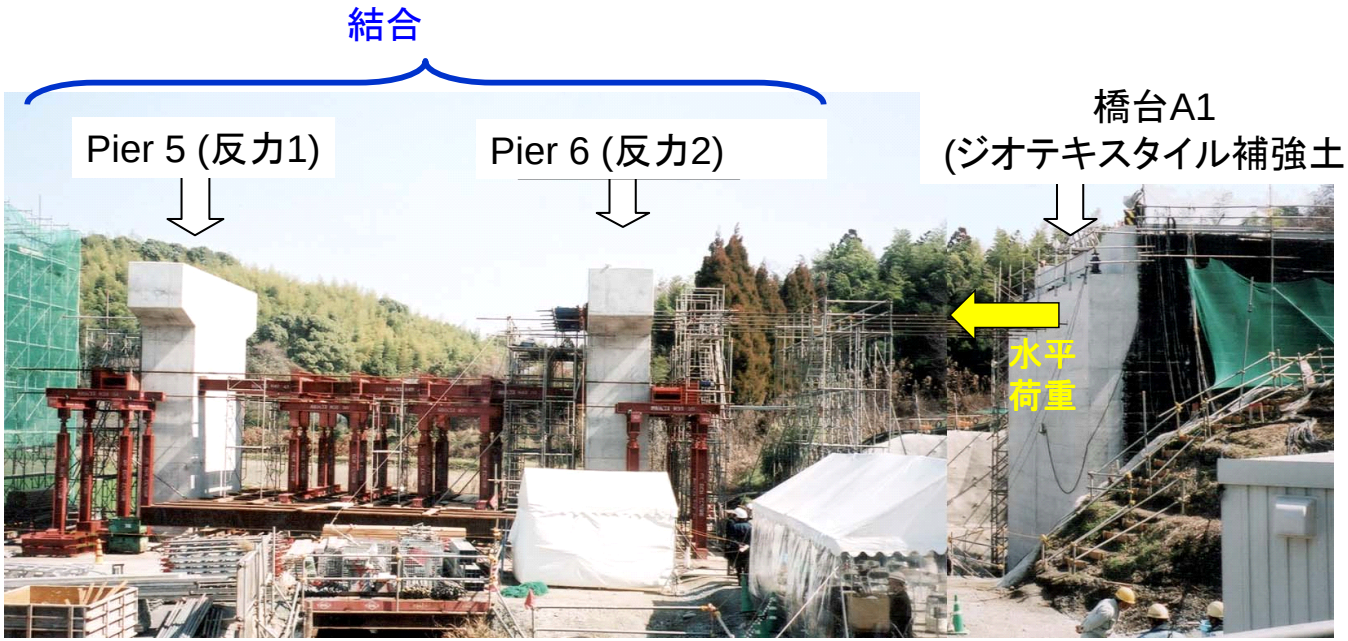
特徴

■段階的に施工を行うため，地盤の沈下等によって生じる，躯体と盛土の相対的変位の問題を回避できる。

完成したGRS補強土橋台です。

載荷試験，2003年2月27日

＜九州新幹線，大牟田付近，高田地区＞



橋台は、抗土圧構造物ではない。盛土が壁面構造物を支えている。
地震時主働土圧は作用しない。
→主動状態における壁面工と盛土の一体性の確認

壁面工と補強材層の連結部が十分大きな分離抵抗力を持つことを確認するために、実際の構造物で水平載荷試験を行っています。

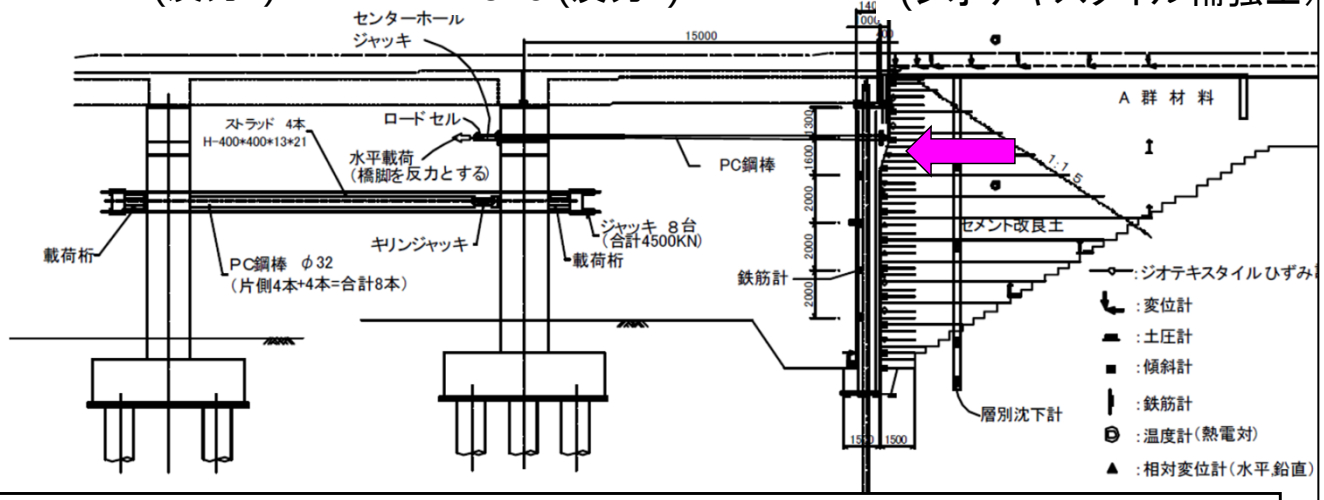
一対の橋脚を一体化して、水平荷重の反力装置としています。

載荷試験, 2003年2月27日

＜九州新幹線，大牟田付近，高田地区＞

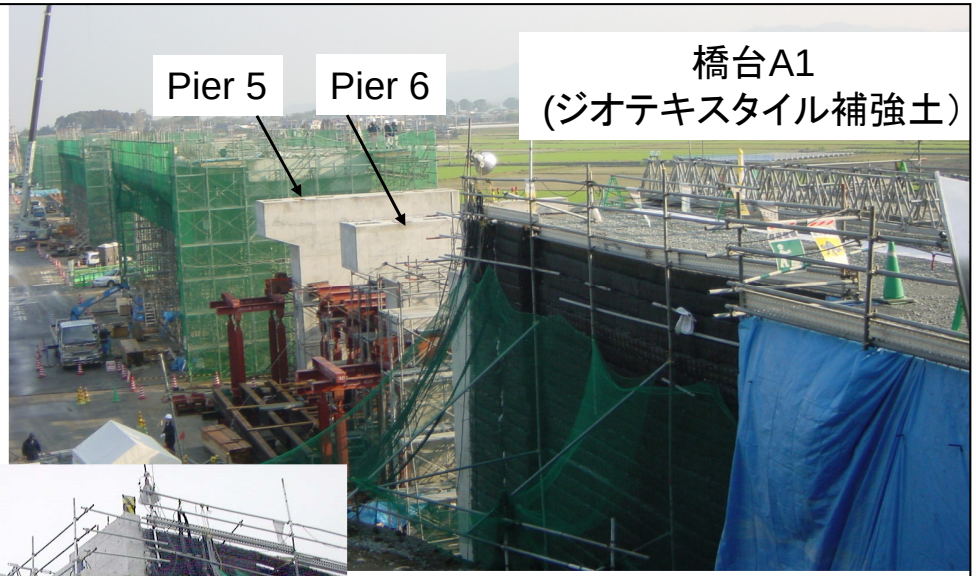
結合

Pier 5 (反力1)　　Pier 6 (反力2)　　橋台A1
(ジオテキスタイル補強土)



橋台は、抗土圧構造物ではない。盛土が壁面構造物を支えている。
地震時主働土圧は作用しない。
→主動状態における壁面工と盛土の一体性の確認

試験の詳細です。



水平引っ張り荷重を加えるためのPC鋼棒6本

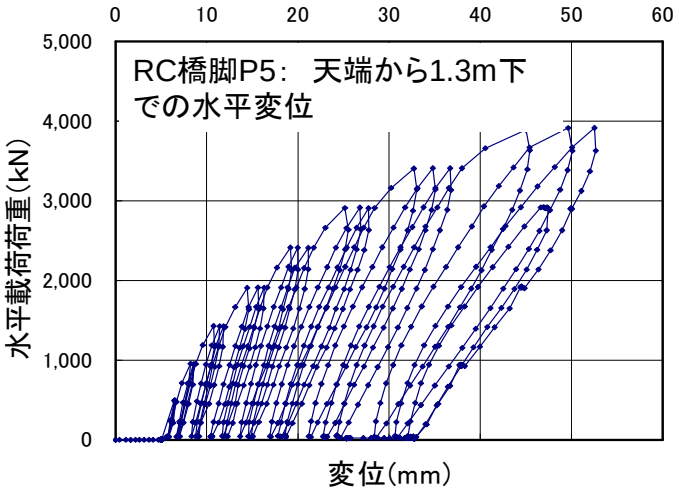


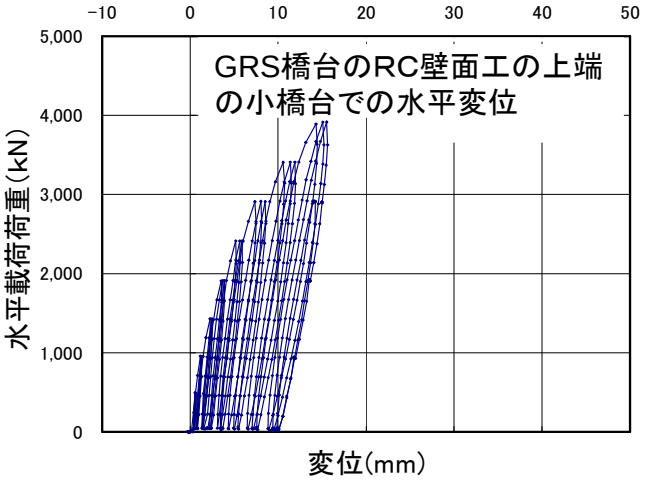
橋台A1
(ジオテキスタイル補強土)

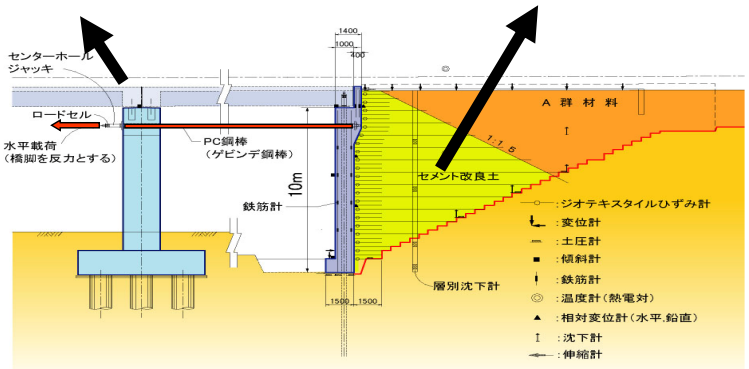
かなり大掛かりの現場載荷試験でした。

現場載荷試験(2003年2月)

①GRS橋台の方が遥かに安定
②壁面工と補強材の連結部は十分に強い





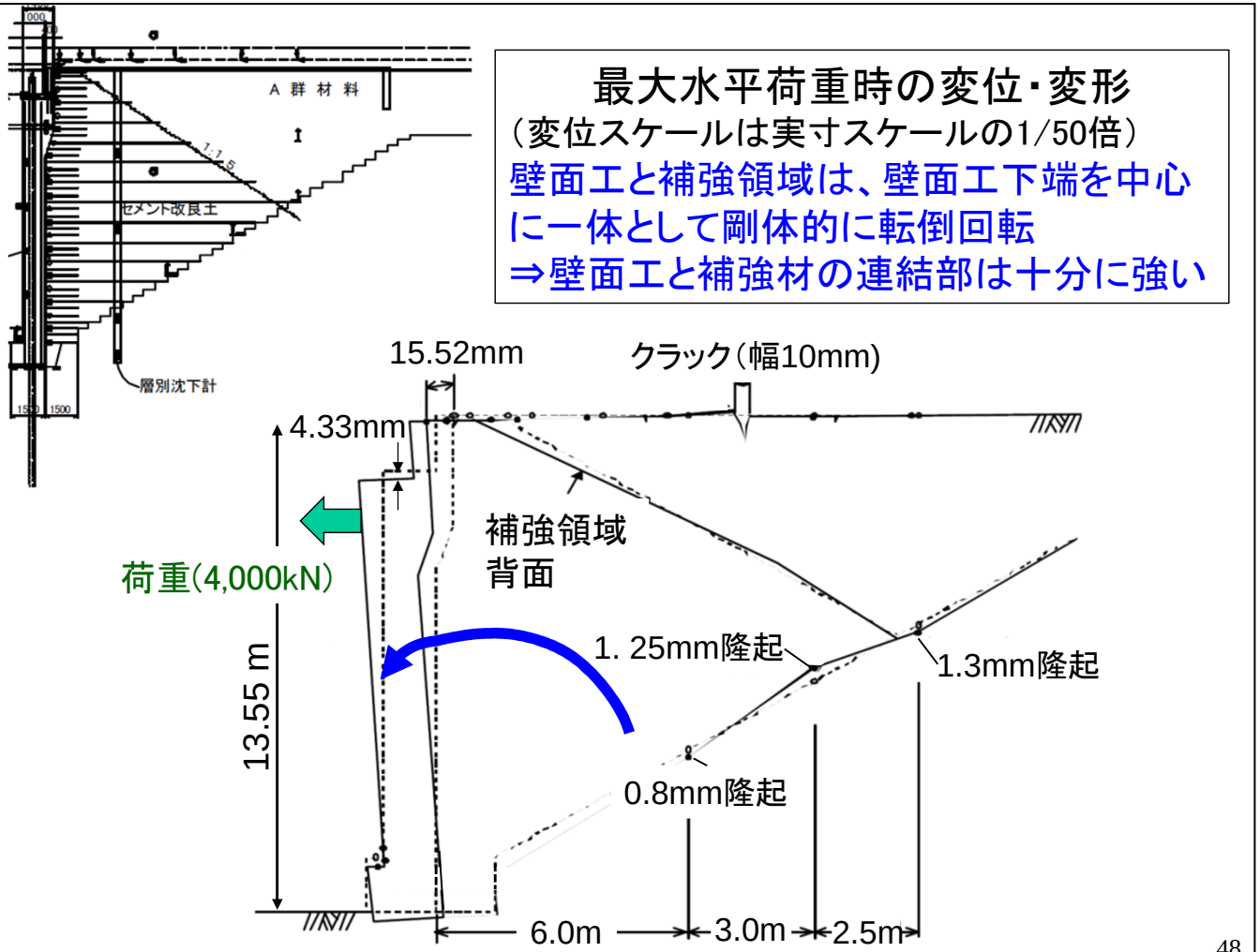


二つの橋脚よりも橋台の水平変位の方が遥かに小さい。

これが結果の一部です。

①一対の橋脚よりも、GRS橋台の方が遥かに安定であり、

②壁面工と補強材の連結部は十分に強いことが確認できました。

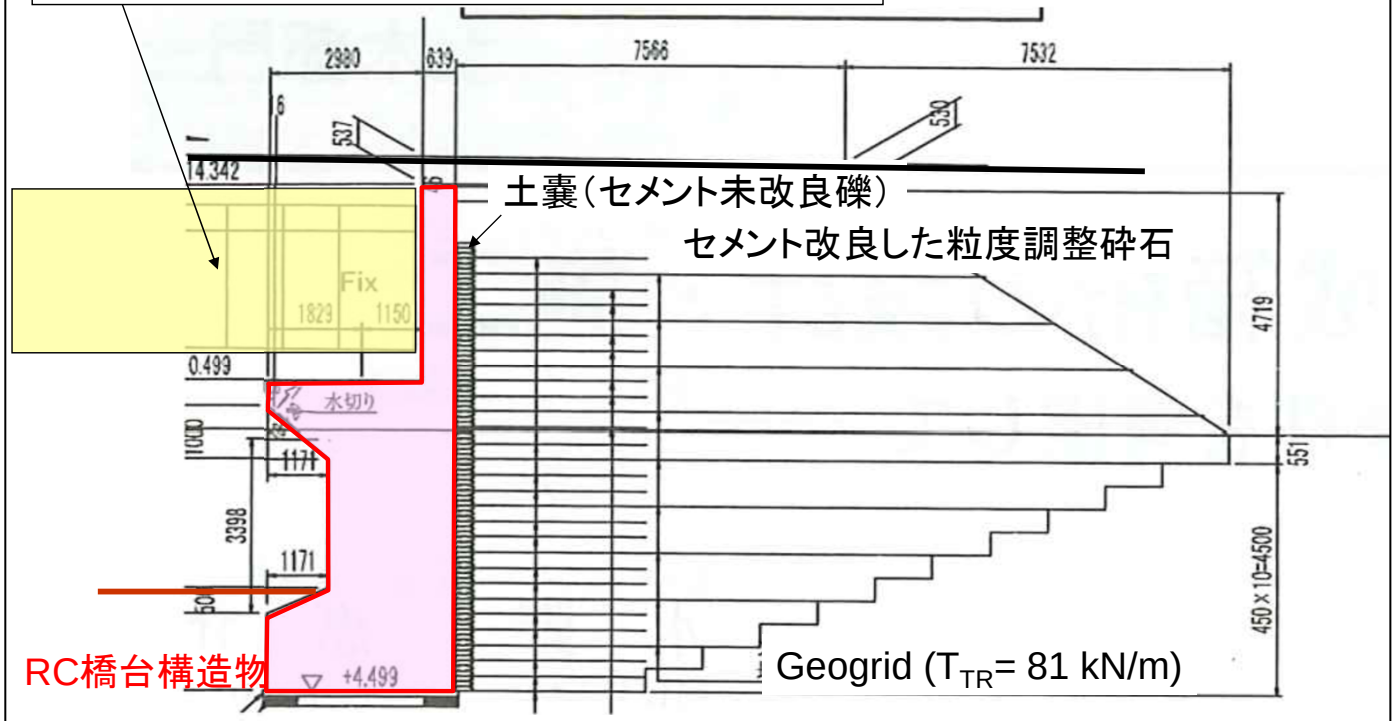


壁面工と補強領域は、壁面工下端を中心に一体として剛体的に転倒回転しました。

つまり、壁面工と補強材の連結部は十分に強いことが確認できました。

その後工事例、兵庫県、JR西日本、姫路新線舟場川橋梁

単純合成箱桁 (L= 64.3 m, W= 5.5 m)
工期 2007 - 2008



GRS橋台は、その後数多く建設されました。これは一例です。

その後工事例、兵庫県、JR西日本、姫路新線舟場川橋梁

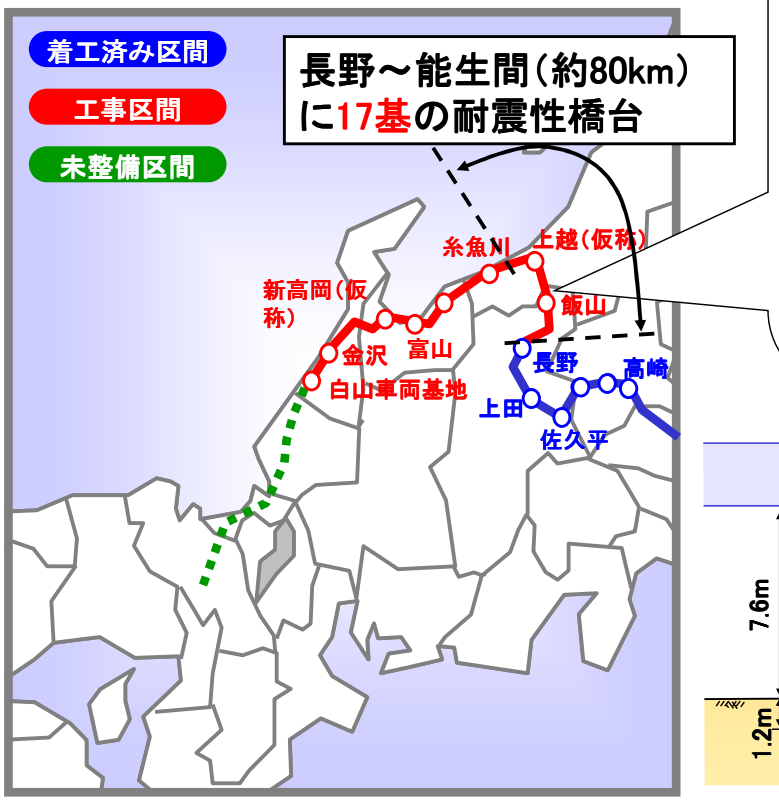






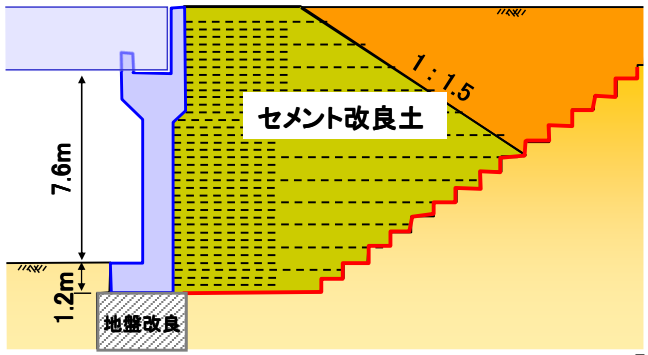
現場写真です。

実現場での適用
（鉄道建設運輸施設整備支援機構，北陸新幹線、2009年7月現在）



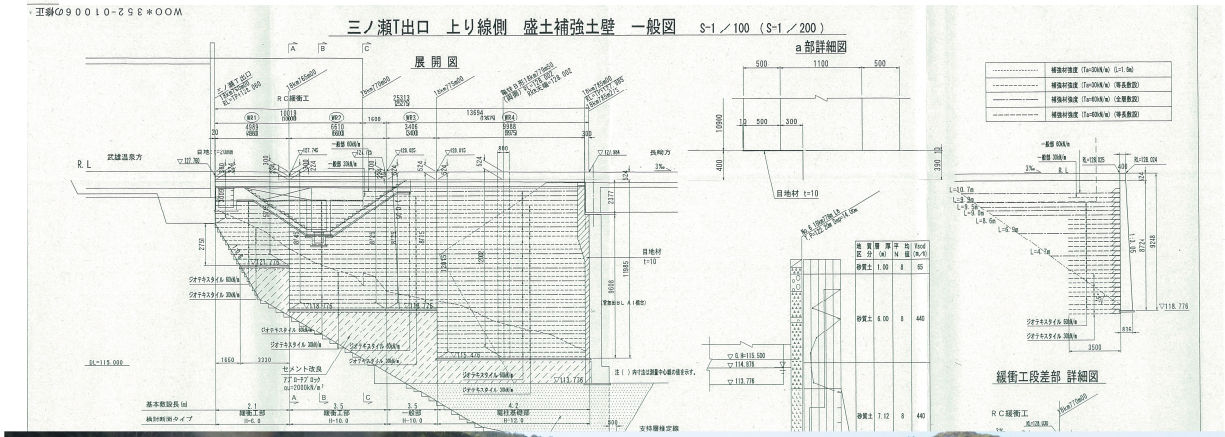


耐震性橋台の施工



北陸新幹線でも、数多く建設されました。

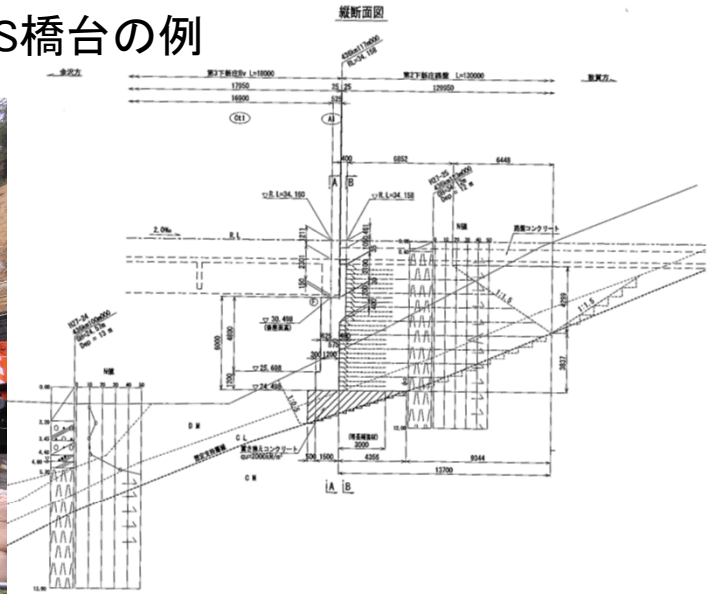
九州新幹線長崎ルートでのGRS橋台の例（合計80が建設中）

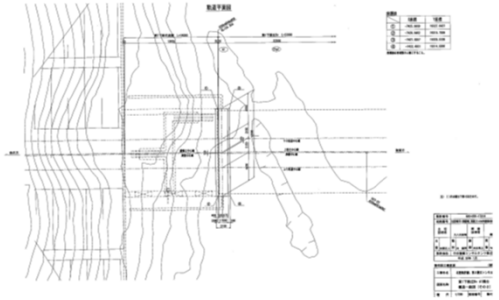


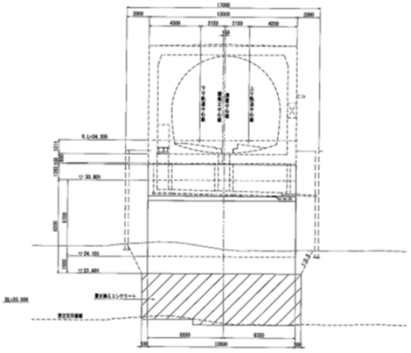


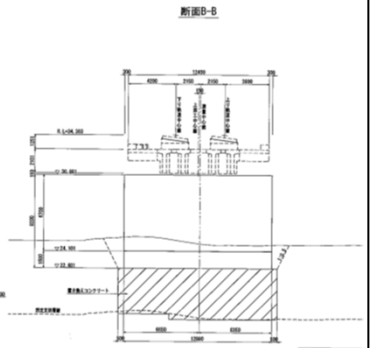
北陸新幹線金沢・敦賀間でのGRS橋台の例









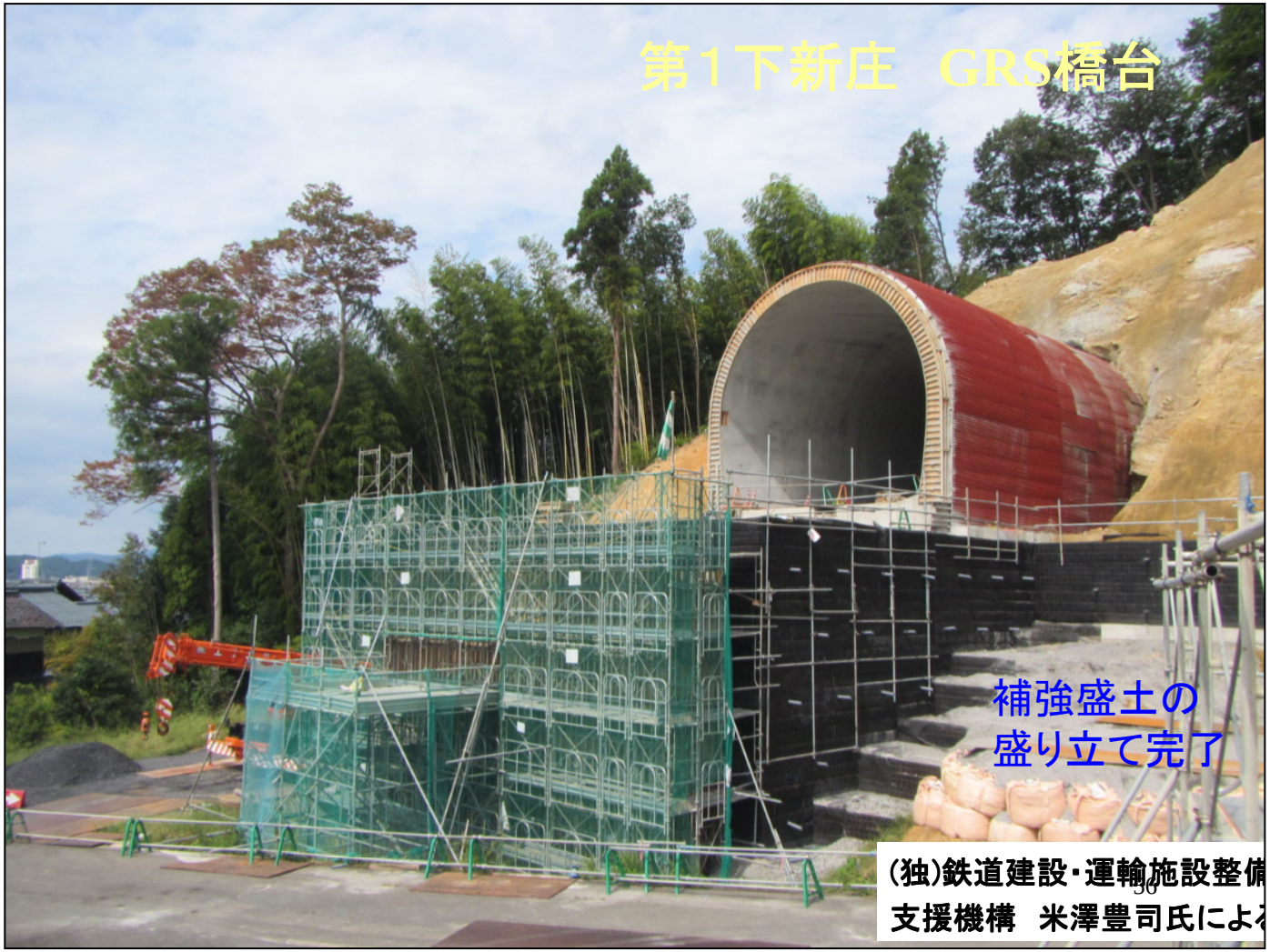


北陸新幹線金沢・敦賀間でのGRS橋台の例です。



(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
補強盛土の盛り立て
(独)鉄道建設・運輸施設整備
支援機構　米澤豊司氏による



(独)鉄道建設・運輸施設整備
支援機構　米澤豊司氏によ


第１下新庄　GRS橋台
竪壁（壁面工）の建設
(独)鉄道建設・運輸施設整備
支援機構　米澤豊司氏による

JR・新幹線での標準的橋台形式としてのGRS橋台

北海道新幹線
木古内～新函館間（万太郎）
－ 2011年10月－



建設済み、設計中

北海道新幹線	
（北海道方）	21
（本州方）	12
北陸新幹線	
（長野・新潟地区）	9
（富山地区）	2
九州新幹線	80
その他	
合計	124　箇所以上

これまで、120を超えるGRS橋台が建設あるいは設計されています。

近年の鉄道橋梁では、基本的に従来形式橋台はGRS橋台に置き換わってきました。

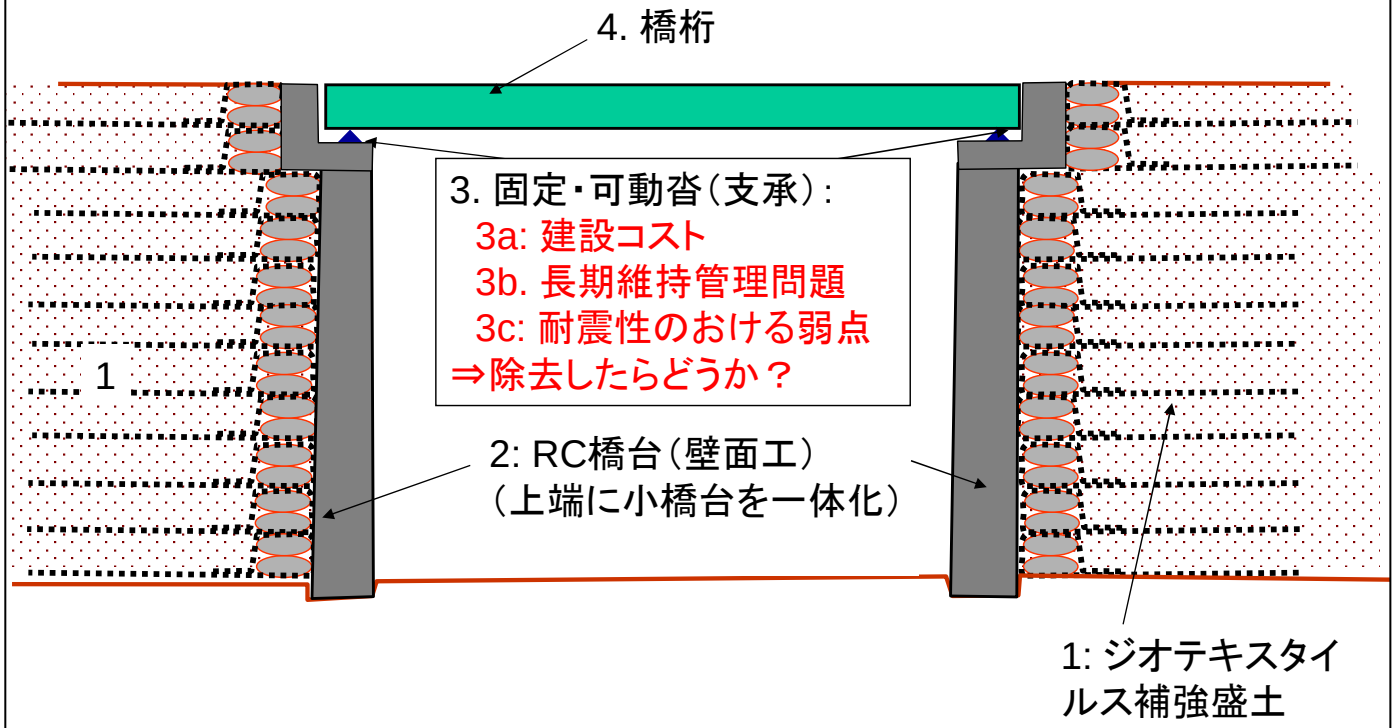
北海道新幹線木古内～新函館間（万太郎）
高さ14mの耐震性橋台　　－ 2012年8月－



GRS橋台は、まだ従来式単純桁橋梁と同様に、支承を用いています。

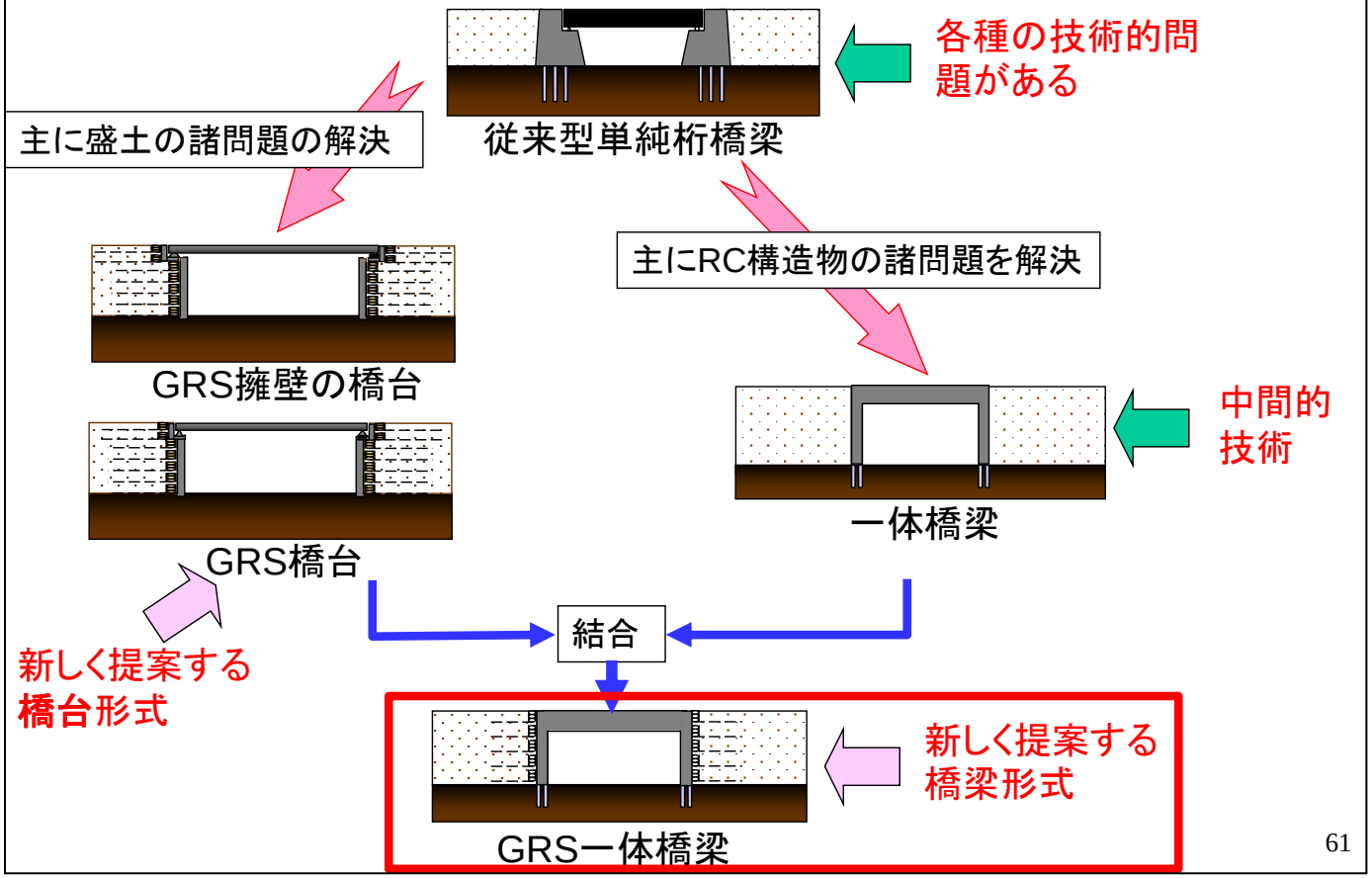
GRS擁壁を活用したGRS橋台（数字は施工順序）

支承による問題が残っている



GRS橋台は、まだ支承を用いているので、その問題が残っています。

GRS擁壁を活用したGRS橋台とGRS一体橋梁の開発経緯



そこで、「盛土はジオテキスタイル補強するが支承を用いるGRS橋台」の長所と「盛土は補強しないが支承を用いない一体橋梁」の長所を生かし、同時に両者の欠点を取り除く新しい橋梁形式として、GRS一体橋梁を提案しました。

次回は、GRS一体橋梁の研究の歴史と実際の建設を説明します。