

# 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.7

1. 地盤・盛土の強化改良の必要性和補強土工法の概説
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(続き)

#### 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

今回は、

c) 洪水・豪雨・津波と補強土および地震被害とレベル2地震動を考慮した耐震設計

のつづきで、主に洪水・豪雨・津波による従来形式の擁壁・擁壁の被害とジオテキスタイル補強土擁壁等の構造物による強化復旧について説明します。

## 前回説明した補強土擁壁の耐震設計のまとめ:

補強土擁壁の耐震性をレベル2設計地震動に対して確保する方法は？

### ■高い耐震性の前提を整える

- ・剛性のある一体壁面工、壁面工/補強材の連結等、適切な構造形式
- ・盛土の良い締固め、十分な排水設備等の適切な施工

### ■レベル2設計地震動に対する耐震設計を実施するが、計算できる冗長性を活用して無用に安全すぎるにはしない

- ①良く締固めた盛土では、 $\phi_{res}$  (従来の設計値)と $\phi_{peak} (> \phi_{res})$ を採用
- ②短期で修復可能な残留変形\*は許容(\*はNewmark法で計算)
- ③補強材の地震時設計引張り強度は、クリープ低減しない(従前から)
- しかし、長期的には信頼できない冗長性は設計に採用しない
- ④サクションによる見掛けの粘着力と⑤擁壁の一定の根入れ効果の無視

### 実際のレベル2設計地震動に対する耐震設計の実施によって

- ⇒GRS構造物の優位性を示せる: (1)GRS構造物では崩壊例が激減;  
(2)従来形式の擁壁よりも建設費+災害対策費を含む維持管理費  
(Life Cycle Cost)が低下

これは、前回の授業で説明した補強土擁壁の耐震設計のまとめです。

補強土擁壁には、高い耐震性が要求されるだけでなく、近年頻発している洪水・豪雨さらに津波などによる水害に対しても高い耐力が要求されるようになってきました。また、豪雨・台風の直後に地震が襲来する場合があります。

このような場合に対して、「盛土の良い締固め、十分な排水設備等の適切な施工」は重要になります。

その説明をします。

## 擁壁・盛土等の土構造物の水災害と 水災害に対するGRS構造物による防止策・強化復旧・強化補強

■自然災害：洪水、豪雨、津波

■災害のメカニズム

表面水・地下水の浸透、浸透流、越流、構造物が面する河川・海洋からの攻撃

⇒盛土・支持地盤での間隙水圧の上昇・サクシオン低下・浸透圧増加  
支持地盤の洗堀、盛土の内部侵食・表面侵食

⇒土構造物の不安定化（従来形式のみならず補強土構造物でも）

■対策：

・構造物の強化・安定化（特に、従来形式の擁壁・盛土での原状復旧から補強材、盛土と壁面工を適切に設計・施工した補強土構造物での強化復旧への方針転換）

・盛土・支持地盤内への浸透水の低減、盛土・支持地盤内からの排水、洗堀対策、浸透流による内部侵食・越流による侵食の対策等

擁壁・盛土等の土構造物の水災害とGRS構造物による水災害の防止策・水災害からの強化復旧・水災害に対する強化補強の課題のまとめです。

ここに、

水災害を起こす自然現象の種類、

水災害のメカニズム、

水災害の対策

が説明されています。

しかし、この説明は抽象的なので実感が沸かないと思います。そこで、以下、その内容を具体的に見ていきましょう。

東京理科大学  
二瓶教授による

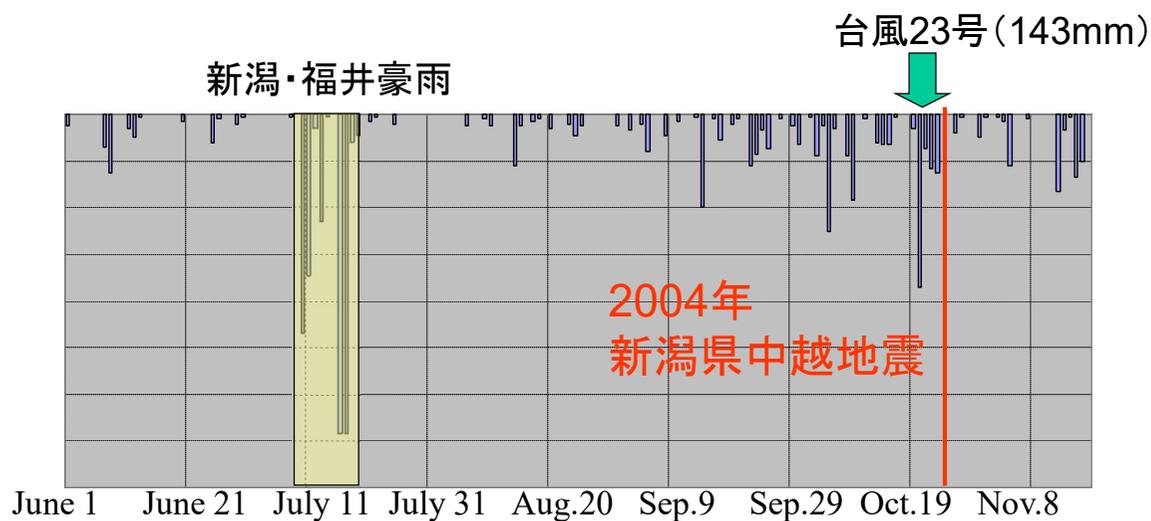
## 複合災害

地震



台風

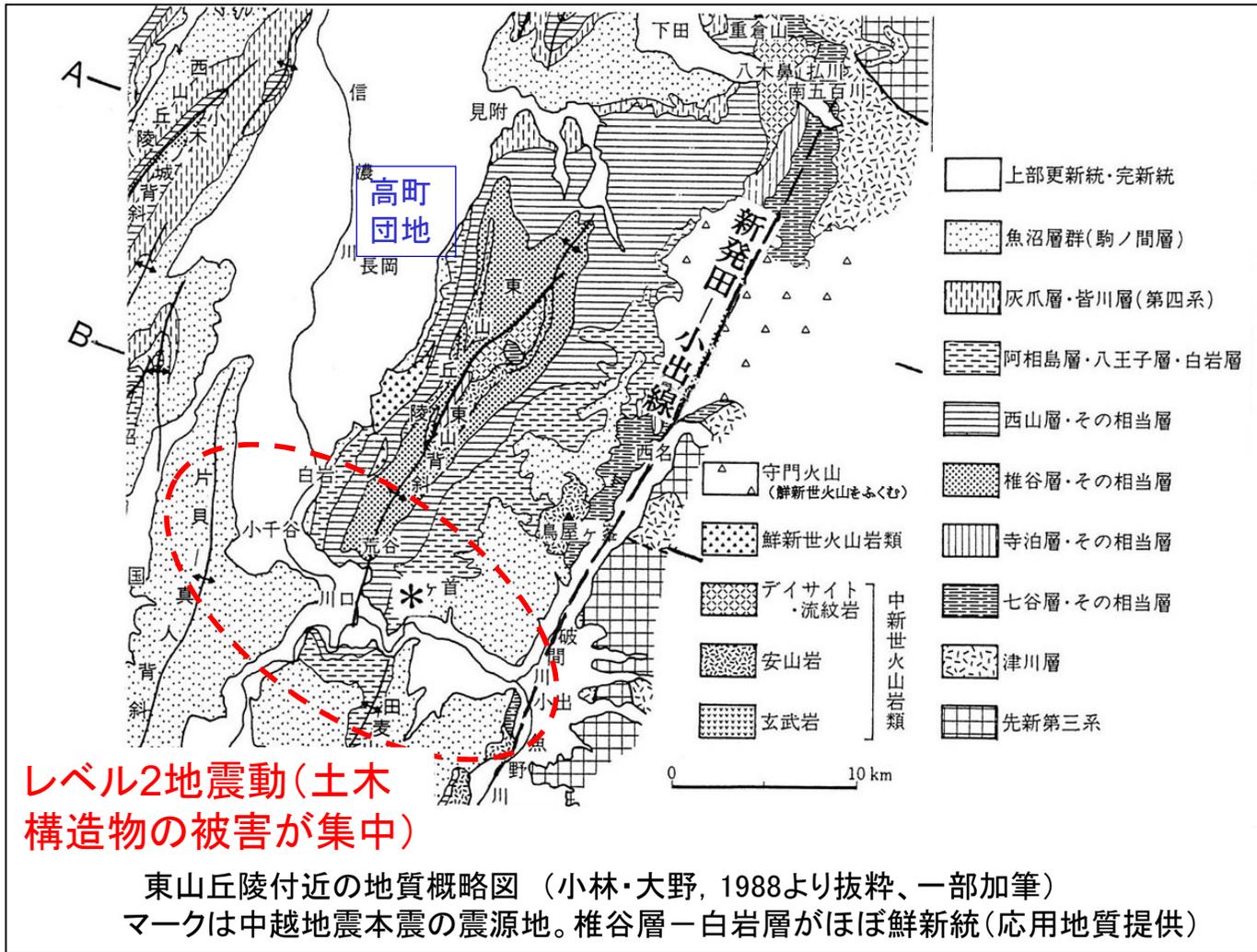
### 日雨量データ(堀の内)



従来は地震と台風は同時に襲来すると想定して設計するのは過大に安全側であるとして、それぞれ別個に対応するのが原則でした。

しかし、長期降雨・豪雨や台風の直後に地震が襲ったケースは少なくありません。

2004年新潟県中越地震では、直前の台風による豪雨によって地震被害が拡大しました。



赤点線の枠内では地震動レベルが高く、多くの被害が生じました。しかし、その外側でも、直前の豪雨のために土構造物と自然斜面の地震被害が拡大しました。代表的なのが、前に説明した信濃川右岸の道路・鉄道盛土の崩壊や、後で説明する高町団地盛土の崩壊です。

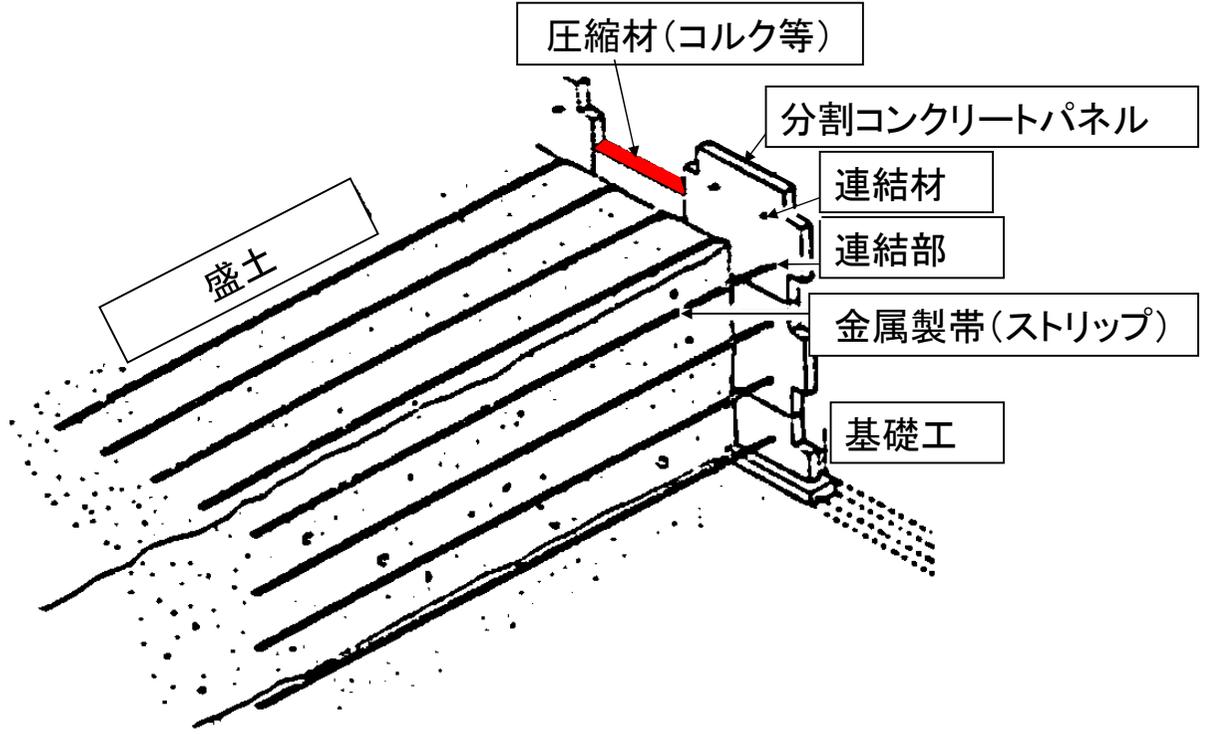
2004年10月新潟県中越地震での集水  
地形に建設されていた関越自動車道  
堀之内PAテールアルメ擁壁の変状



これは、地震動レベルが高  
かった領域でのテールアルメ  
擁壁の地震被害です。

倒壊しておらず、遠目には被  
害がないように見えます。

テールアルメ擁壁の構造です。



壁面工が分割コンクリートパネルからなる  
標準的テールアルメ擁壁(FranceのH. Vidalの発明)



分割パネルの間が開いた  
テールアルメ擁壁

近くに寄ると、分割パネルが、バラバラになっていることが分かります。

このような状態でも倒壊しなかったのは、「片持ち梁構造ではなく転倒しにくい」と言う補強土擁壁の特長のためです。つまり、補強土擁壁は従来式の片持ち梁構造の擁壁よりも基本的に耐震性が高いと言えます。しかし、この擁壁は結局取り壊されました。

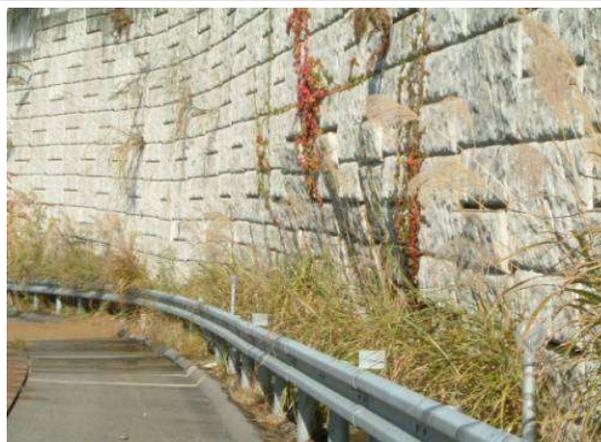
では、なぜこのように分割パネルがバラバラになったのでしょうか？

最初に気が付くのは、壁面全面に繁茂する植物です。これは、盛土内の含水比が高いことを示しています。



実際、パネルがずれていて、内部の盛土の含水比が非常に高いことを確認できました。

一カ所で分割パネルがずれて、  
その間から飽和した盛土材(砂  
質土)が大量に流出  
⇒盛土は、地震時には貯水槽状  
態であり液状化したことを示唆



地震時には、づれた分割パ  
ネル間から、飽和した盛土材  
の砂が大量に噴出しました。

これは、地震時に盛土は貯  
水槽状態であり液状化したこ  
を示唆しています。

北村ら: 強振動を受けたテールアルメの現地調査  
(第一次調査): 第40回地盤工学研究発表会(函館)、2005年7月

テールアルメ擁壁の盛土天  
端から噴砂  
⇒地震時は盛土は貯水槽状  
態であり、液状化したこと  
を示唆



盛土天端からも噴砂があっ  
たことも、盛土が液状化したこ  
とを示唆しています。

## テールアルメ擁壁

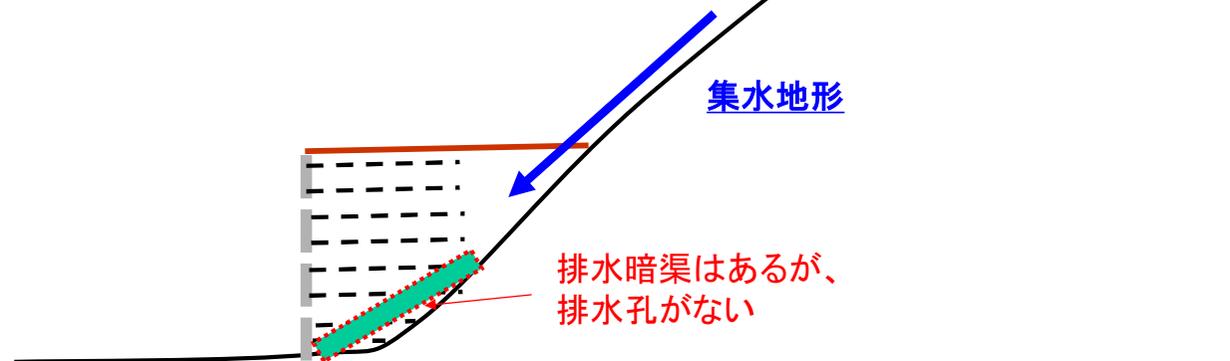
・元々壁面に排水孔がない、しかし、集水地形に建設する場合は、排水処理は必須

盛土材(河岸段丘砂礫の砂質土)は排水性は良いが、地震時に盛土は貯水槽状態

- a)壁面から漏水、壁面に植物が良く育っているのが、高含水比の間接的証拠
- b)ずれたパネル1枚の隙間から大量に盛土砂が流出。おそらく液状化したため。
- c)ずれたパネル間に手を入れると、極めて高い含水状態
- d)背面にある素堀排水から盛土内に地下水・表面水が流入

## 分割パネル状の壁面工

地震時にバラバラに挙動、隙間が出来て、盛土材が流出。



北村ら:強振動を受けたテールアルメの現地調査  
(第一次調査): 第40回地盤工学研究発表会(函館)、2005年7月

これが、この擁壁の変状のメカニズムとその原因のまとめです。

この擁壁は集水地形に建設されていて、排水暗渠は設置されていました。しかし、その出口が機能していなかった。背後からの表面水を有効に処理する横断排水管も設置されていなかった。また、壁面からの排水も十分ではなかった。これらのため、地震時に盛土内の地下水位が高かったことが推定されました。

つまり変状の主因は、盛土内への表面水の流入対策と盛土内からの排水対策が不十分であったためであり、擁壁形式が補強土擁壁であったためではない、と言えます。

# 2004年新潟県中越地震での長岡市高町団地の被害状況

(長岡技術科学大学:大塚 悟教授提供)

切土と盛土の境界

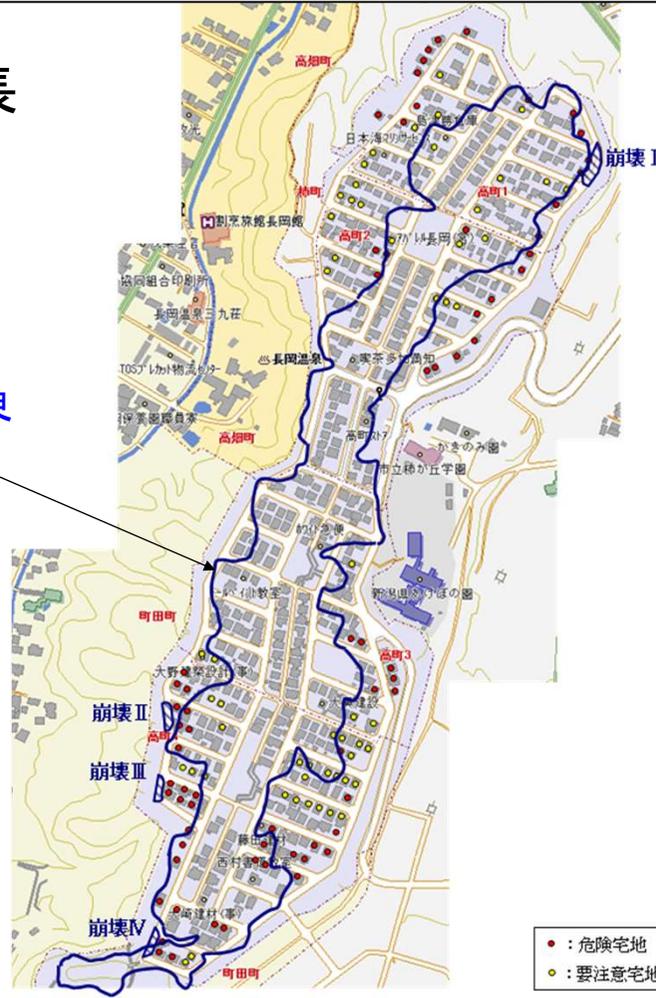


図 3.4.2 高町団地の建物被害図

この現場でも、谷を埋めた宅造盛土に大被害が生じました。

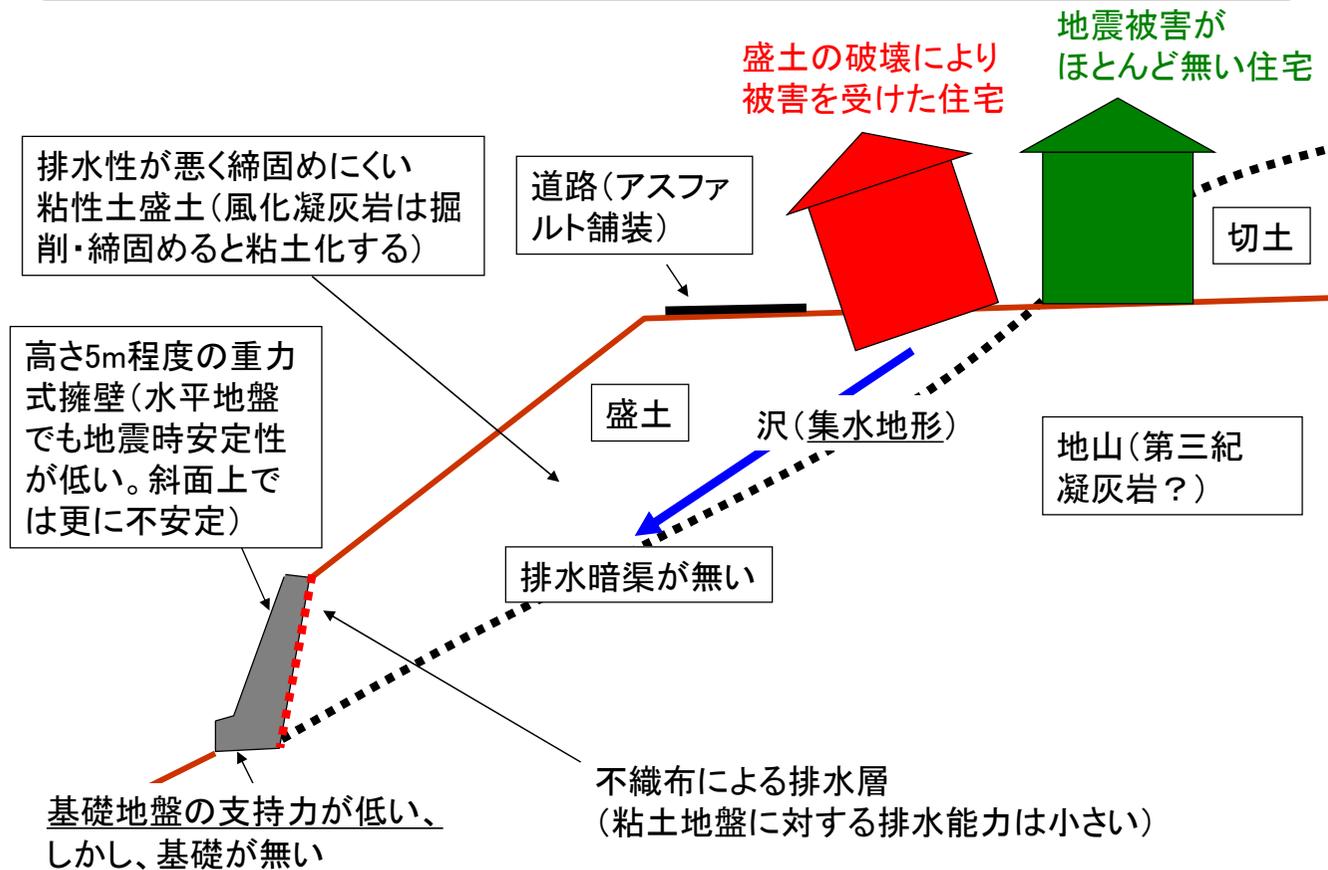


住宅地の中心部で、切土の上  
地震動は激しくなったため、  
住宅は全く無被害



ここは住宅地の中心部で、切土の上です。地震動は激しくなかったため、住宅には全く被害が見られません。

2004年10月新潟県中越地震での長岡市高町団地での  
典型的な盛土・擁壁被害： **殆ど全ての被害原因が揃っている**



このような住宅地では、高台の端の見晴らしの良い住宅の人気の高い。

ところが、そのような場所で盛土の箇所に被害が集中しました。

この図は、その状況と原因を示しています。

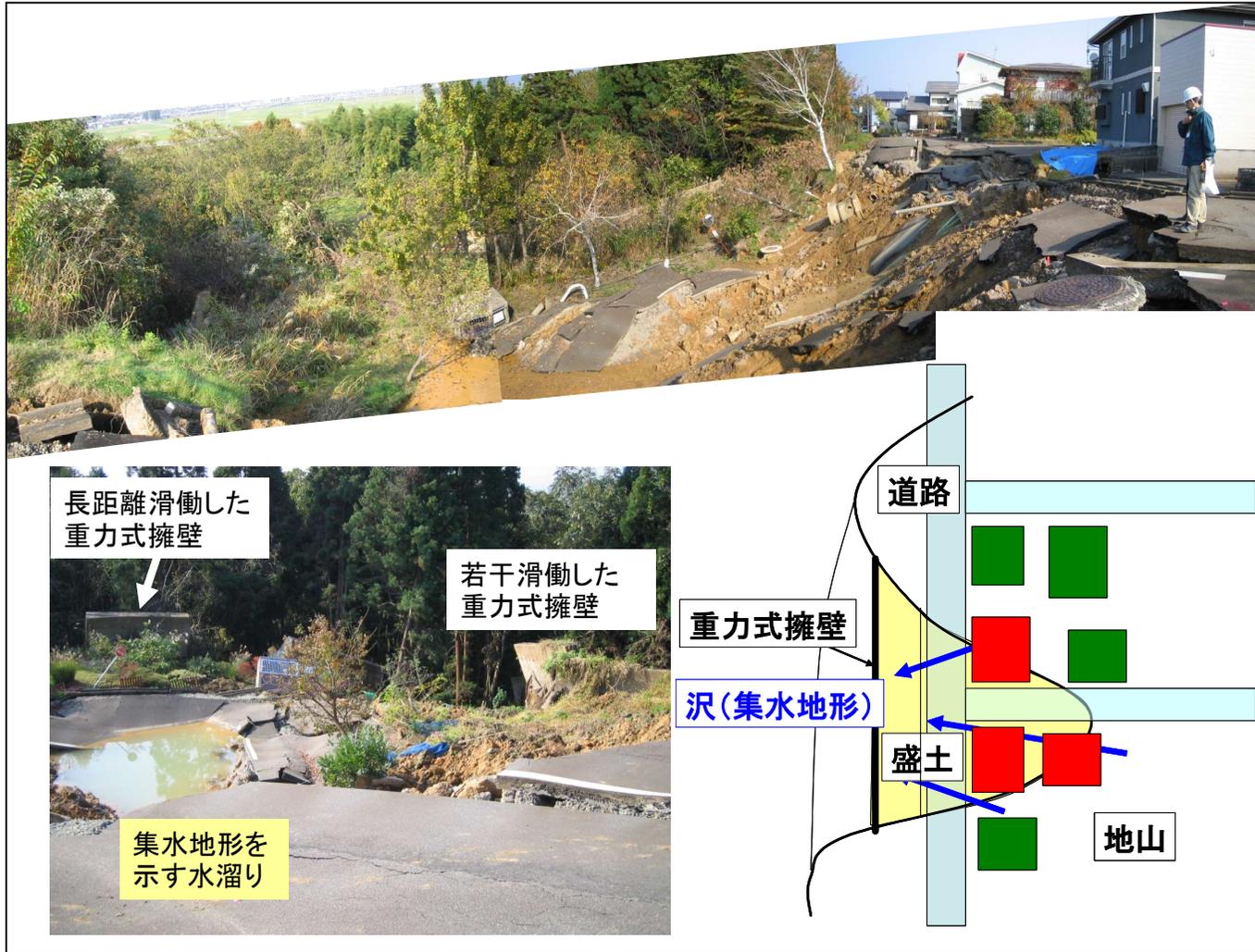
つまり、このような盛土は集水地形である沢を埋めて建設されましたが、盛土材は高含水比も粘性土であり、また排水暗渠がありませんでした。更に、擁壁は基礎の無い重力式擁壁でした。これらが、主な要因です。



切土部から盛土部に向かうと、途中で段差があり、その先は盛土部で沈下しています。盛土の上の住宅には何らかの被害が生じています。



さらにその先に行きますと、  
このような大被害となっています。  
これらの住宅は地震動による被害は皆無でも、支持地盤が崩壊しています。



これは、被害の全体の状況です。集水地形の沢の盛土なので、盛土が崩壊した跡には水溜まりができていました。

また、重力式擁壁は長距離滑働しています。(基礎が無かったため、倒壊しないで滑働したと思われる)

長距離滑働した重力式擁壁

若干滑働した重力式擁壁

集水地形を示す水溜り

重力式擁壁

沢(集水地形)

道路

盛土

地山

風化凝灰岩を掘削して得られた盛土材(実質粘性土)

崩壊した斜面に貯まった水



この写真は、この場所が集水地形であることを如実に示しています。

また、近接する地山を掘削して得られた風化凝灰岩を、盛土材を用いています。これは、掘削と土工によって、実質軟弱な飽和粘性土になってしまっています。

風化凝灰岩を掘削して得られた盛土材(実質粘性土) 飽和度が高い！



盛土材が、実質粘性土であり、如何に高含水比であるか、良く分かります。

長距離滑働した重力式擁壁  
(基礎が無かったが、倒壊し  
ないで滑働したと思われる)

50年以上前の、  
古い社会的要求・認識と  
古い技術



これは、長距離滑働した重力式擁壁の近接写真です。50年以上前の、耐震性に対する社会的要求・認識が低かった時代の古い技術によるものです。

このような構造物に原状復旧することは合理的ではないことは、明白です。

# 崩壊盛土のジオテキスタイル補強盛土による強化復旧の方法 (実際の復旧工事の詳細は若干異なる)

粘性土盛土ならば、排水性と引張り剛性を持つ**複合ジオテキスタイル**を用いて補強。締固めを良くする為に、ジオテキスタイル層の鉛直間隔を大きくすぎないようにする。あるいは、**補助補強材層**を配置する

適切な壁面工を用いて緑化工

壁面裏の排水工

原状復旧

暗渠排水口が閉塞しないような適切な処理

道路(アスファルト舗装)

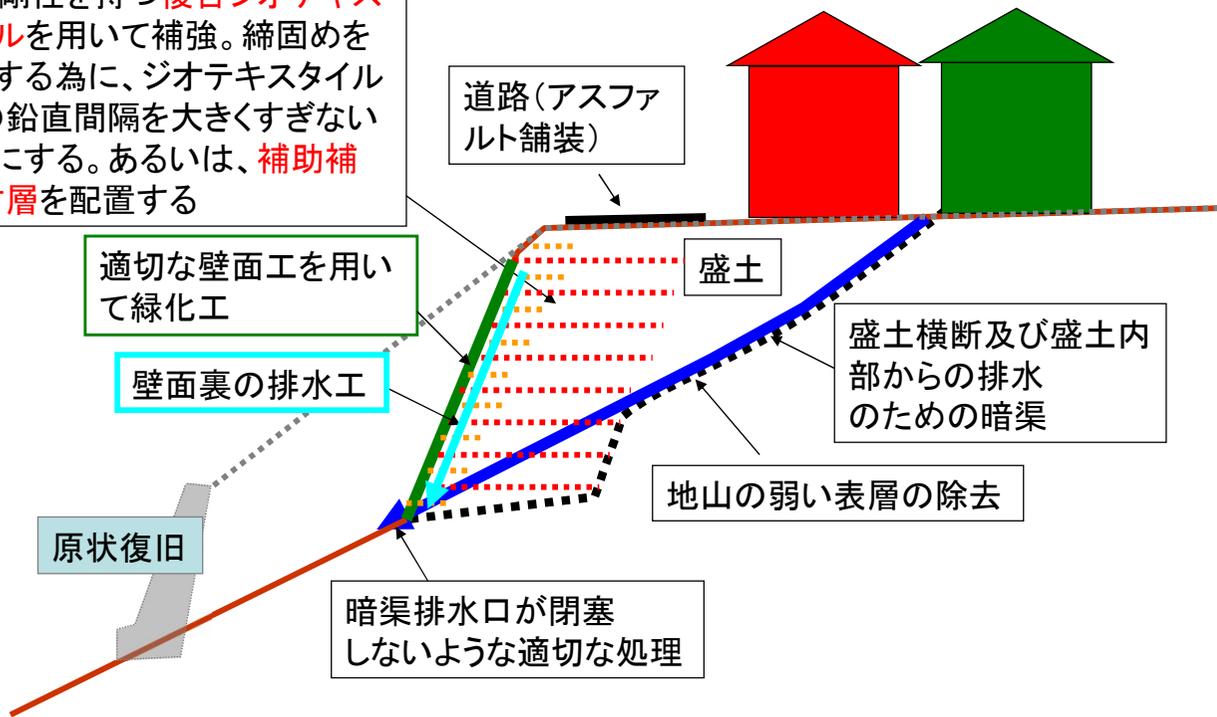
盛土

盛土横断及び盛土内部からの排水のための暗渠

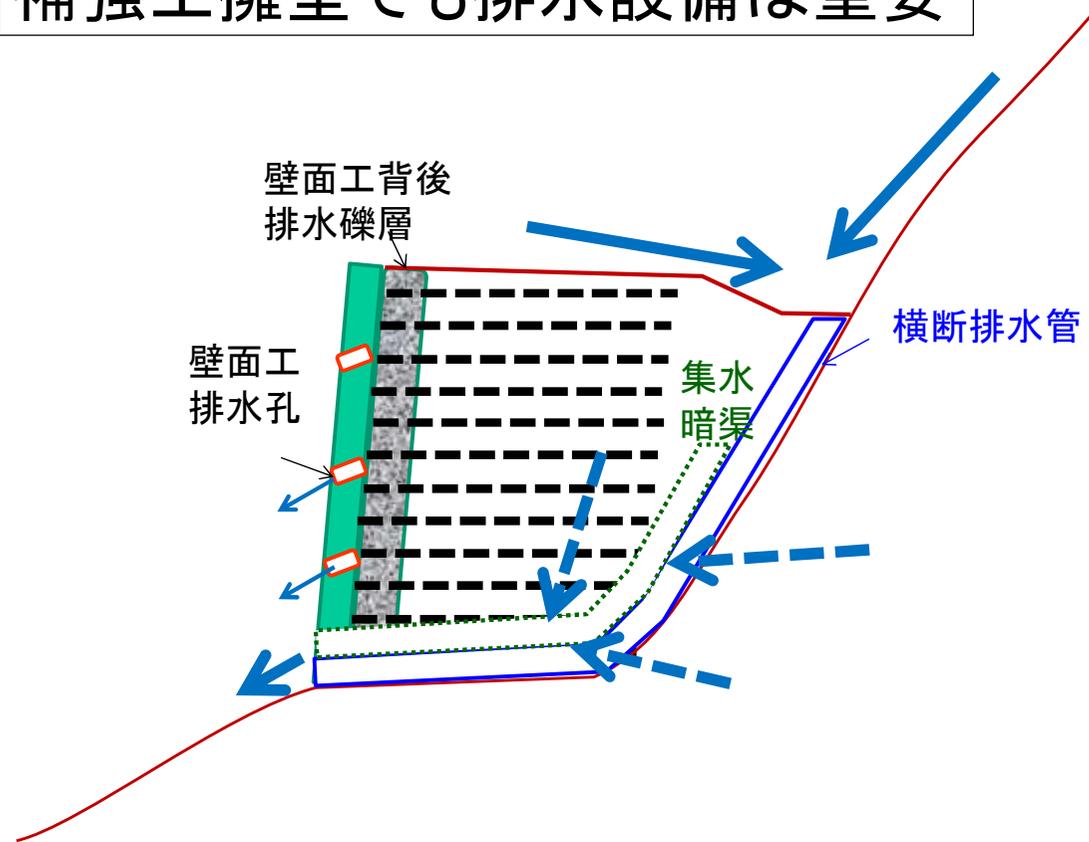
地山の弱い表層の除去

これは、このように崩壊した宅造盛土のジオテキスタイル補強土擁壁による強化復旧の方法を示しています。

この工事は、周回道路の土木工事としての強化復旧でした。



## 補強土擁壁でも排水設備は重要



従来形式の擁壁であっても、補強土擁壁であっても、盛土内の地下水位を低く保つように、様々な対策工が必要となります。

この対策工は、擁壁の地震時安定性を保つためだけでなく、地震時でない時の長期降雨・豪雨に対する安定性を保つために必要となります。

2004年新潟県中越地震直前、  
10月21日未明  
兵庫県養父(やぶ)市での  
テールアルメ擁壁の  
豪雨による崩壊

地盤工学会関西支部  
「平成16年台風23号による  
関西圏地盤災害」調査報告書



これは、2004年10月23日新潟県中越地震の前々日、10月21日未明兵庫県養父(やぶ)市で生じたテールアルメ擁壁の豪雨による崩壊です。

この事例も、補強土擁壁だから生じた豪雨災害ではなく、補強土擁壁でも排水対策と支持地盤対策が不備であると被害が生じうることを示しています。

斜面上で沢部の壁高20 m  
のテールアルメ擁壁



人家

小川



地盤工学会関西支部  
「平成16年台風23号による  
関西圏地盤災害」調査報告書

これは、被害の全景です。

斜面上で沢部の壁高20 m  
のテールアルメ擁壁



地盤工学会関西支部  
「平成16年台風23号による  
関西圏地盤災害」調査報告書

これは、被害の近景です。

2004年10月21日未明、  
兵庫県養父(やぶ)市  
におけるテールアルメ  
擁壁の崩壊

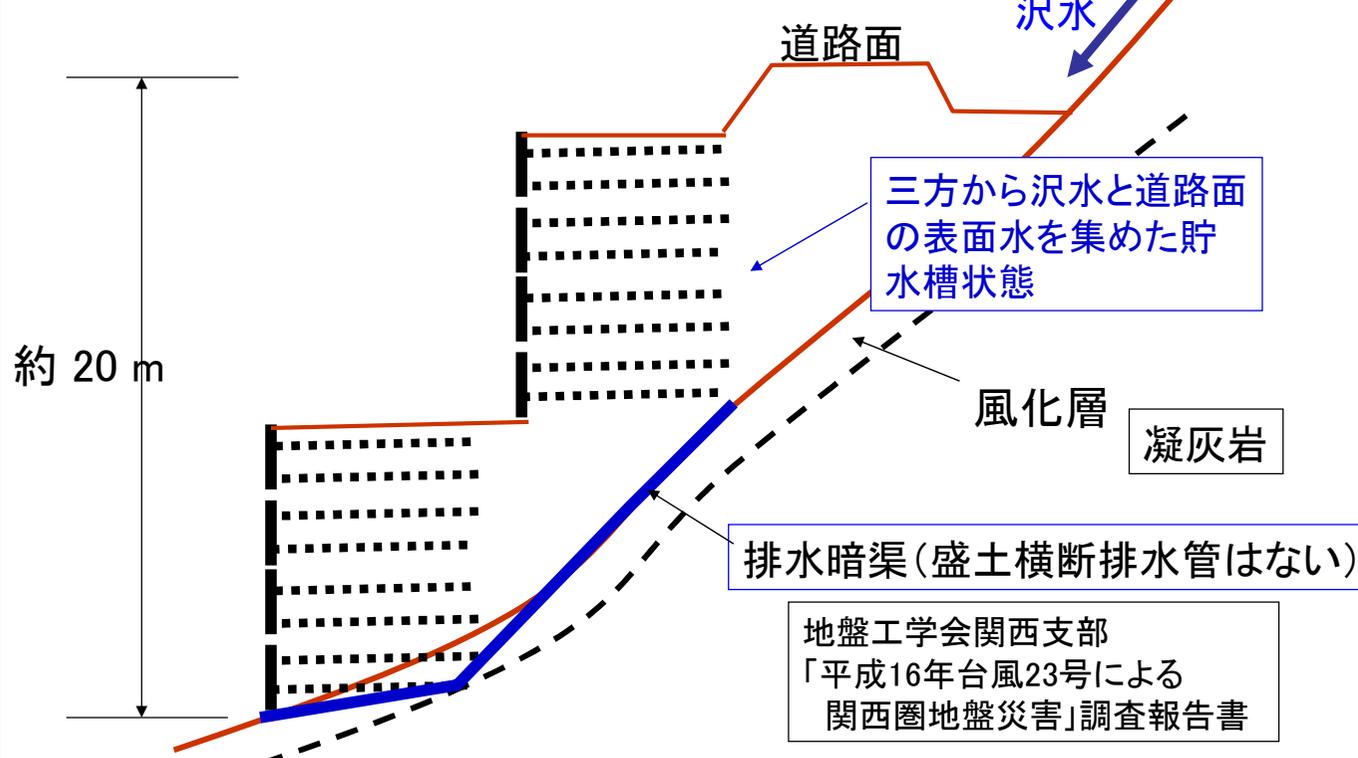


補強土擁壁全体が滑り出し  
た後の現場です。赤の矢印の  
位置にテールアルメ擁壁が存  
在していました。

これは、補強土擁壁とその支  
持地盤の全体が崩壊したこと  
を示しています。

地盤工学会関西支部  
「平成16年台風23号による  
関西圏地盤災害」調査報告書

前日240mm降雨、沢部で背後・左右三方からの集水：しかし、横断排水暗渠はない  
補強領域は風化凝灰岩の粘土化した盛土でセメント混合で安定化：透水性が極めて低いが、盛土内部からの排水設備はない。しかも、壁面工での排水孔は不十分。  
地山の表層は風化凝灰岩：しかし、段切りはなく、確実に除去していない  
地山面に沿った全体すべり層に対する安定を検討していない

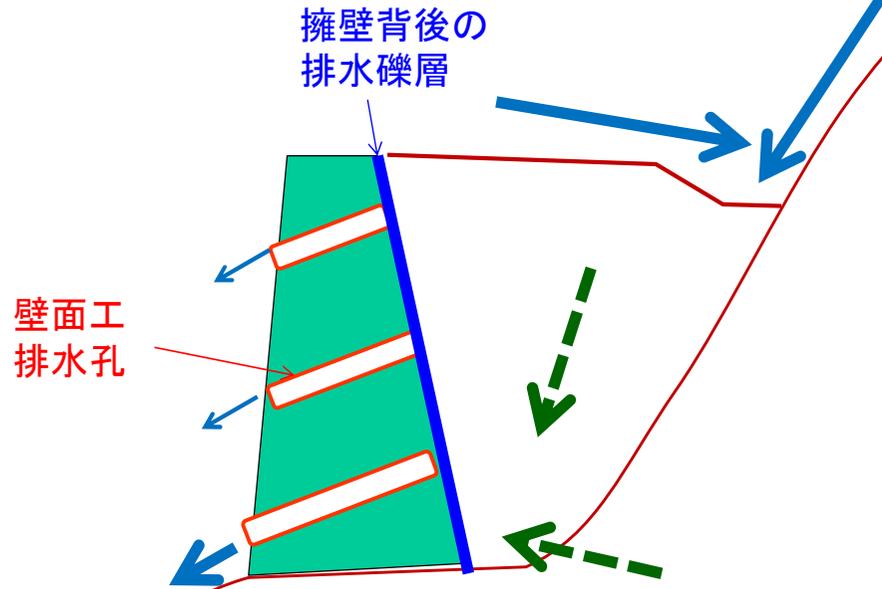


これは、この崩壊のメカニズムと原因をまとめたものです。

再度、この事例は、補強土擁壁だから生じた豪雨災害ではなく、補強土擁壁であっても排水対策と支持地盤処理が不備なために生じた災害であることを強調したいと思います。

本来、排水対策と支持地盤処理が十分であれば、補強土擁壁の方が従来形式の擁壁よりも、豪雨災害に対して、より低い建設費でより安定を保つように設計・建設することができます。

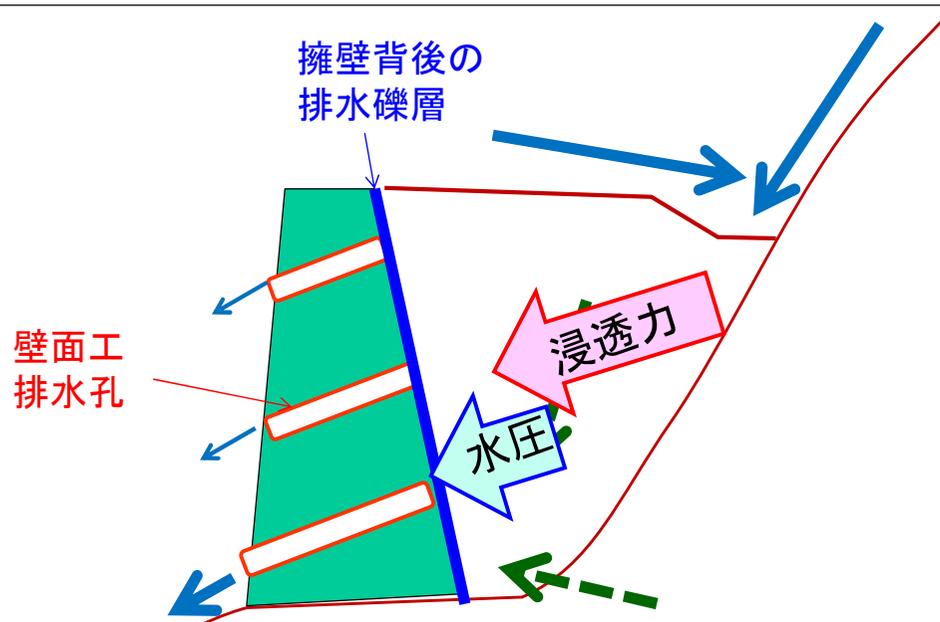
## 従来形式の擁壁では排水設備は重要



壁面裏からの排水の目的は？

では、擁壁の排水対策として、「通常行われている擁壁構造物(壁面工)に配置した排水孔による擁壁裏からの排水処理」の目的は、何でしょうか？

## 従来形式の擁壁では排水設備は重要



壁面裏からの排水の目的は？

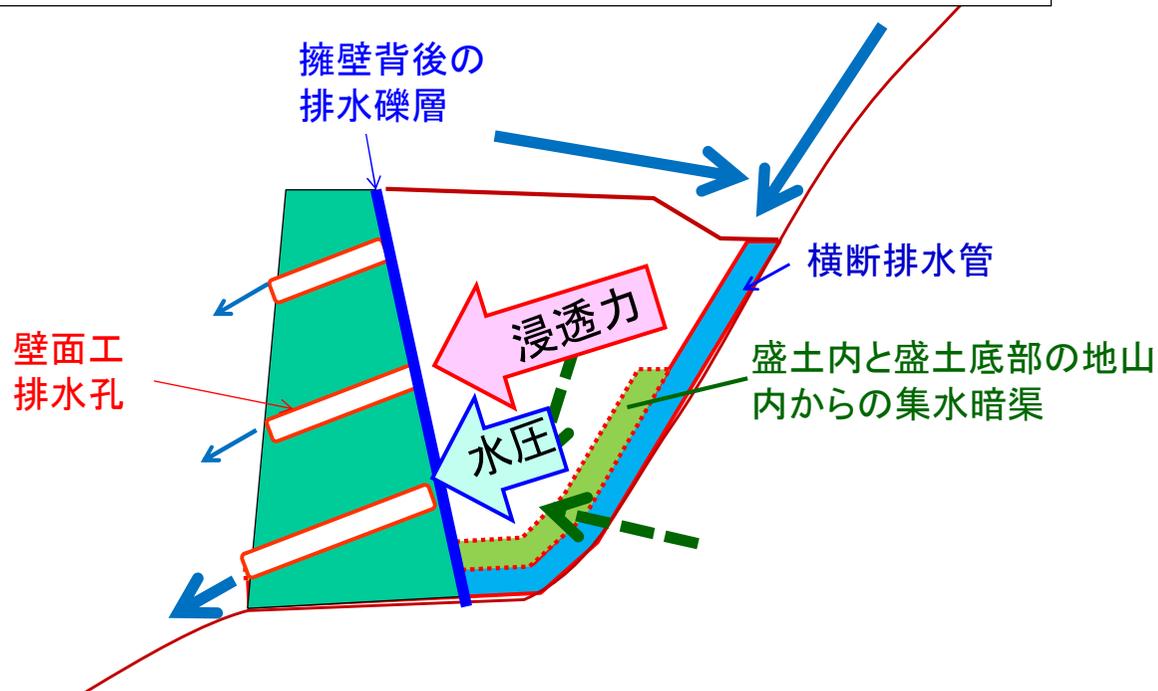
- ① 擁壁背面に作用する水圧の低下⇒擁壁自体の安定化
- ② 盛土内の地下水位を低下して浸透圧を低下⇒「擁壁+盛土」全体の安定化

目的は、二つあります。

第一は、擁壁背面に作用する水圧の低下による擁壁自体の安定化です。

第二は、盛土への表面水と地下水が多い場合は、盛土内の地下水位を低下させて盛土に作用する浸透力を低下させ、「擁壁+盛土」に作用する「有効主働土圧と浸透圧の合計荷重」を低下させて、全体の安定性を維持することです。この場合は、通常行われている「擁壁に配置した排水孔による擁壁裏からの排水処理」だけでは十分ではありません。

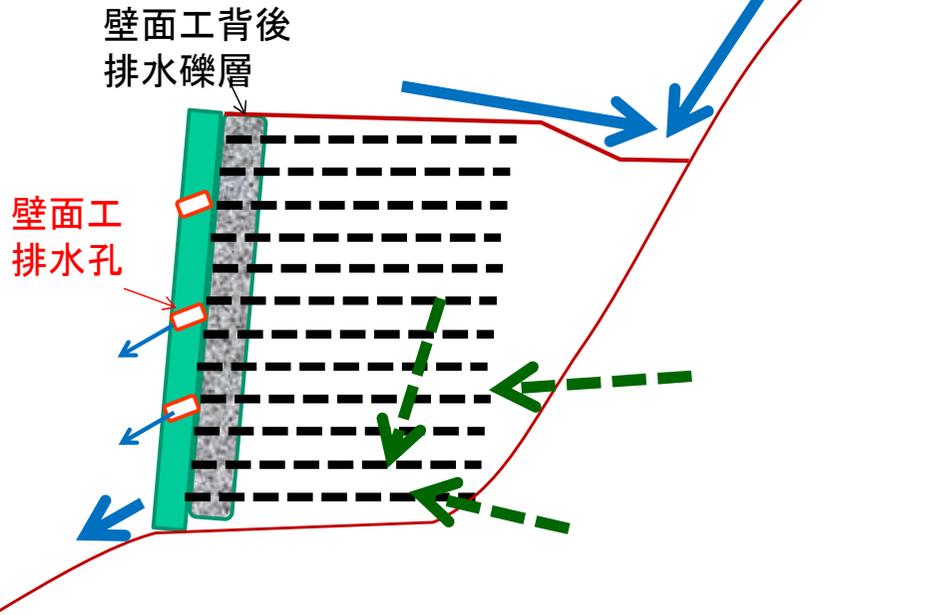
## 従来形式の擁壁では排水設備は重要



壁面裏からの排水は必要だが、これだけでは不十分な場合がある！  
盛土背後からの表面水を処理する横断排水管と地下水を（盛土の排水性が悪い場合は盛土からの浸透水も）処理する集水暗渠も必要

つまり、盛土背後からの表面水を処理する横断排水管と、地下水の処理と盛土の排水性が悪い場合は盛土からの浸透水も処理するための集水暗渠も必要になります。

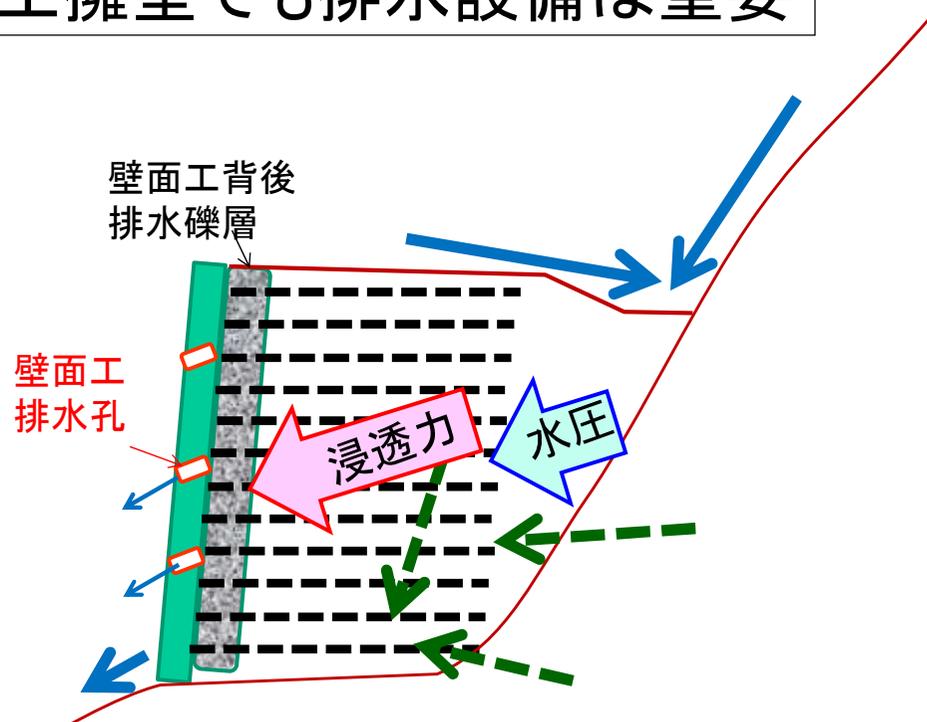
# 補強土擁壁でも排水設備は重要



では、補強土擁壁では、「壁面工に配置した排水孔による壁面裏からの排水処理」で十分でしょうか？

壁面裏からの排水だけで十分か？

## 補強土擁壁でも排水設備は重要

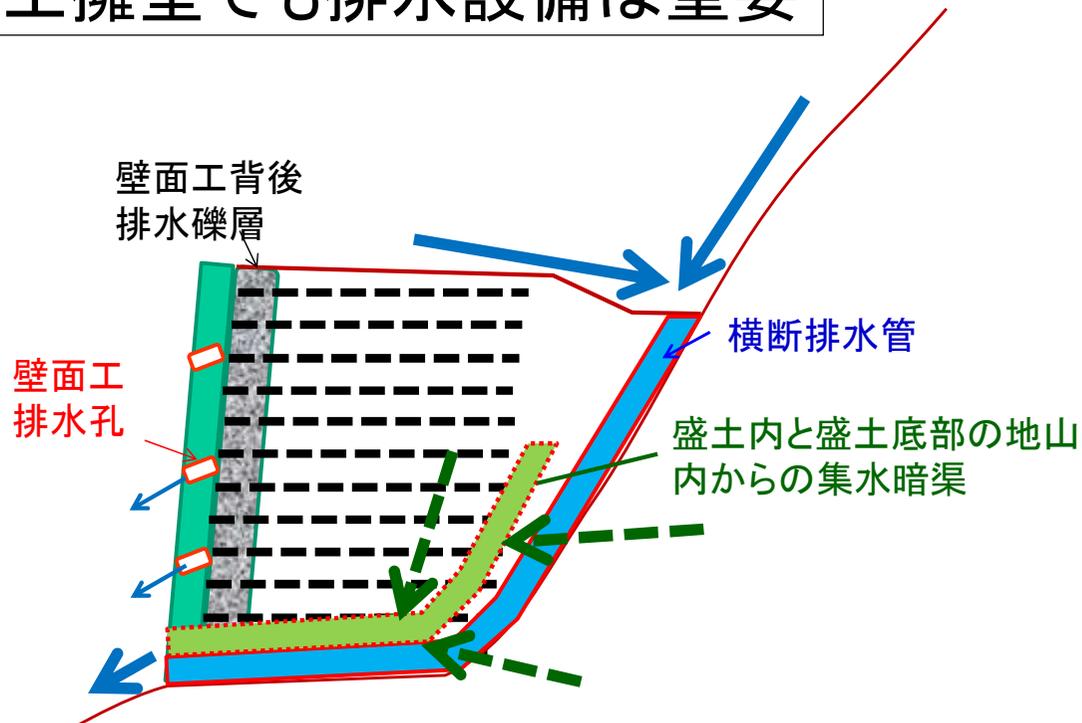


壁面工背面に作用する水圧を低下させるだけでなく、補強領域背後の水圧を低下して盛土内の地下水位を低下することによって浸透力を低下させて、「擁壁+盛土」全体を安定化させる必要がある。

前頁の問に対する答は、「必ずしも十分ではない」です。

壁面工裏からの排水が十分でも、裏込め盛土部の背後からの表面水と地下水が多く盛土内部の地下水位が高いと、裏込め盛土に浸透力が作用して、「擁壁+裏込め盛土」の全体が不安定化します。

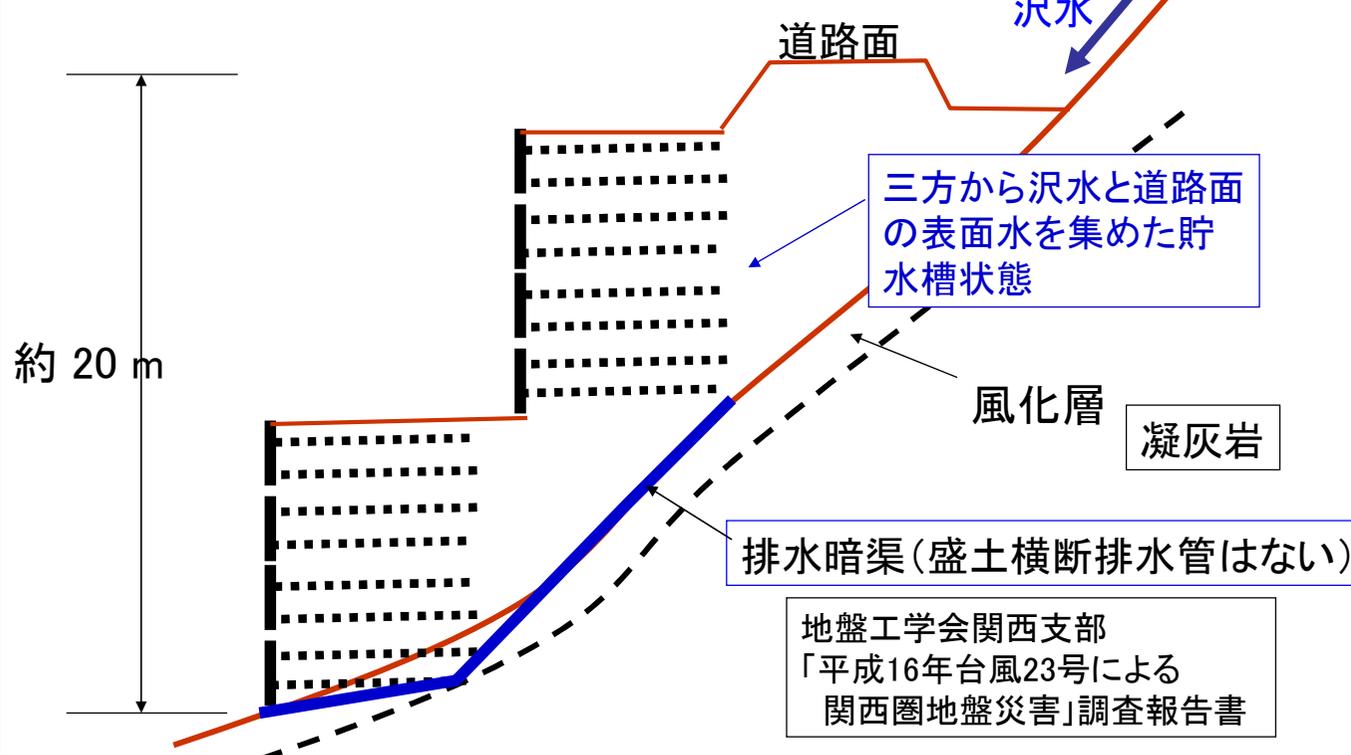
## 補強土擁壁でも排水設備は重要



壁面工裏からの排水は必要だが、これだけでは不十分な場合がある！盛土背後からの表面水を処理する横断排水路と地下水を（盛土の排水性が悪い場合は盛土からの浸透水も）処理する集水暗渠も必要

つまり、補強土擁壁でも、盛土背後からの表面水を処理するための横断排水管と、地下水の処理のために、また盛土の排水性が悪い場合は盛土内からの浸透水の処理のためにも集水暗渠が必要となります。

前日240mm降雨、沢部で背後・左右三方からの集水：しかし、横断排水暗渠はない  
補強領域は風化凝灰岩の粘土化した盛土でセメント混合で安定化：透水性が極めて低いが、盛土内部からの排水設備はない。しかも、壁面工での排水孔は不十分。  
地山の表層は風化凝灰岩：しかし、段切りはなく、確実に除去していない  
地山面に沿った全体すべり層に対する安定を検討していない



ここで、改めてこの事例を見て下さい。

この事例は、補強土擁壁だから生じた豪雨災害ではなく、補強土盛土であっても排水対策と支持地盤処理が不備なために生じた災害であることが理解されると思います。

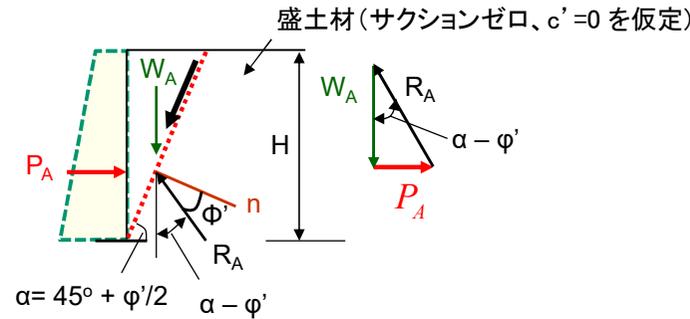
残念ながら、その後も同様な事例が生じており、それに対して「このような災害は補強土擁壁だから生じた」と結論し、排水対策と支持地盤対策の重要性を看過すると言う、短絡的な意見も散見されています。

従来型擁壁と補強土擁壁の壁面工に作用する水平荷重の大きさは？

補強土擁壁の場合は、補強材はこの水平荷重に抵抗する必要がある  
(ここでの議論では、補強しても主働すべり面は変化しない、と単純化)

①盛土内の間隙水圧がゼロの場合：  
⇒補強材が抵抗する必要がある水平荷重= 主働土圧  $P_A$

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{1 - \sin \varphi'}{1 + \sin \varphi'} = \frac{1}{2} \gamma \cdot H^2 \cdot K_A$$



注) 盛土からの排水が良好であれば、実際には常時に盛土内にサクシヨンが作用していて、見掛けの粘着力 $c'$ はゼロではないので、土圧は上記の $P_A$ よりも低い値となる。

しかし、通常的设计では、サクシヨンは豪雨時には低下あるいは消滅する可能性があるので期待せず、 $c' = 0$ としている。

従来型擁壁に作用する水平荷重の大きさと、補強土擁壁の場合は補強材が抵抗する必要がある水平荷重を理論的に説明したいと思います。

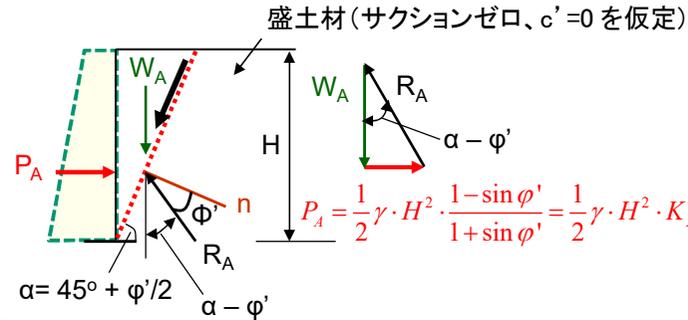
まず、①盛土内の間隙水圧がゼロの場合で、従来式の擁壁に作用する水平荷重は、擁壁背面に作用する水平主働土圧 $P_A$ です。

補強土擁壁では、補強材はこの土圧 $P_A$ に抵抗する必要があります。

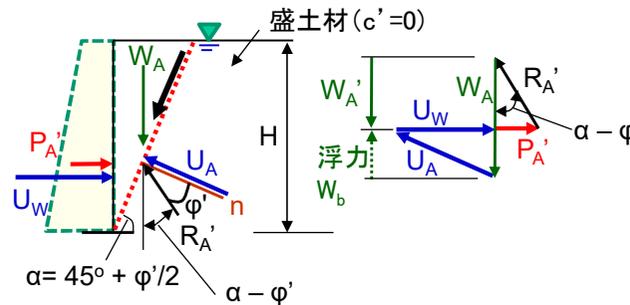
擁壁(壁面工)に作用する水平土圧の大きさは？

補強土擁壁の場合、補強材はこの水平土圧に抵抗できる必要がある  
(ここでの議論では、主働すべり面は補強しても変化しないと単純化)

①盛土内の間隙水圧がゼロの場合：  
⇒補強材が抵抗する必要がある水平荷重= 主働土圧  $P_A$



②壁面裏からの排水処理が悪い上に、  
盛土内からの排水設備も不十分な場合  
地下水位が盛土天端まで上昇しており、壁面背面の水圧  $U_W$  は主働すべり面に作用する間隙水圧  $U_A$  と同じであり深度に比例する場合：  
⇒補強材が抵抗する必要がある荷重  
= 有効主働土圧  $P_A'$  + 水圧  $U_W$   
(①の場合の  $P_A$  の2倍程度に増加)



$$P_A' = \frac{1}{2} \gamma' \cdot H^2 \cdot \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} = \frac{1}{2} \gamma' \cdot H^2 \cdot K_A : U_W = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot H^2$$

次に、②盛土内の地下水位が上昇している状態で、擁壁(壁面工)裏からの排水処理が悪い場合です。

従来形式の擁壁の背面に作用する荷重は、水圧  $U_W$  と有効主働土圧  $P_A'$  を合計した水平荷重であり、①の場合の2倍程度になります。

補強土擁壁での補強材は、この合計荷重に抵抗する必要があります。

①盛土内の間隙水圧がゼロの場合：  
⇒抵抗する必要がある水平荷重=  $P_A$

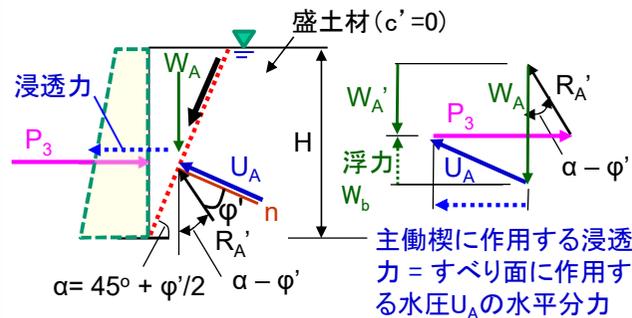
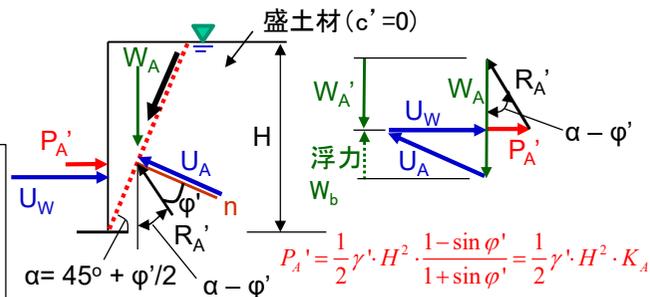
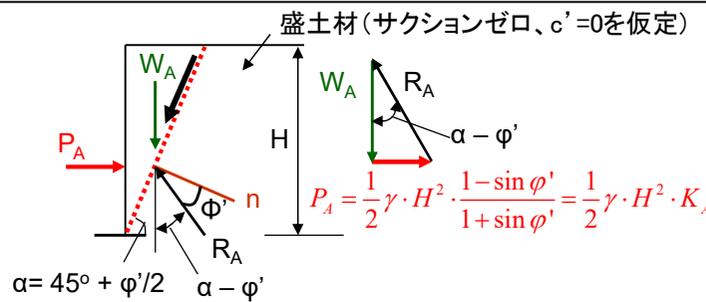
②地下水位が盛土天端に一致しており、壁面背面の水圧 $U_W$ は主働すべり面に作用する間隙水圧 $U_A$ と同じで深度に比例する場合：  
⇒抵抗する必要がある荷重=  $P_A' + U_W$   
(①の場合の $P_A$ の2倍程度に増加)

③盛土材の排水性が悪く、盛土内からの排水設備が不十分な場合

壁面背面での水圧 $U_W$ がゼロでも、主働すべり面に深度に比例する間隙水圧 $U_A$ が作用する場合(地下水位は盛土天端に位置すると単純化した解析)：

⇒補強材が抵抗する必要がある荷重=  $P_3$   
= (②の場合の $P_A'$ ) +  
主働楔に壁面方向に作用する浸透力  
= ②の場合の( $P_A' + U_W$ )

この場合、壁面裏からの排水だけでは問題が解決しない。



次は、③壁面工裏からの排水処理が良くて壁面工裏には水圧が作用していないが、盛土内の地下水位が上昇している場合です。この場合の理解は少々高度です。

この場合、裏込め盛土に浸透力が作用して、壁面工背面に作用する土圧 $P_3$ は、すべり面に作用する有効主働土圧 $P_A'$ に浸透力を加えた荷重となります。この $P_3$ は、「すべり面に作用する有効主働土圧 $P_A'$ と水圧 $U_A$ の水平分力の総計」であり、②の場合の壁面工に作用する荷重 $P_A' + U_W$ と同じです。従って、 $P_3$ は $P_A'$ よりも大きくなり、①の場合の2倍程度になります。

補強土擁壁の場合は、補強材はこの合計荷重 $P_3$ に抵抗す

る必要があります。

阿蘇:

1990年水害

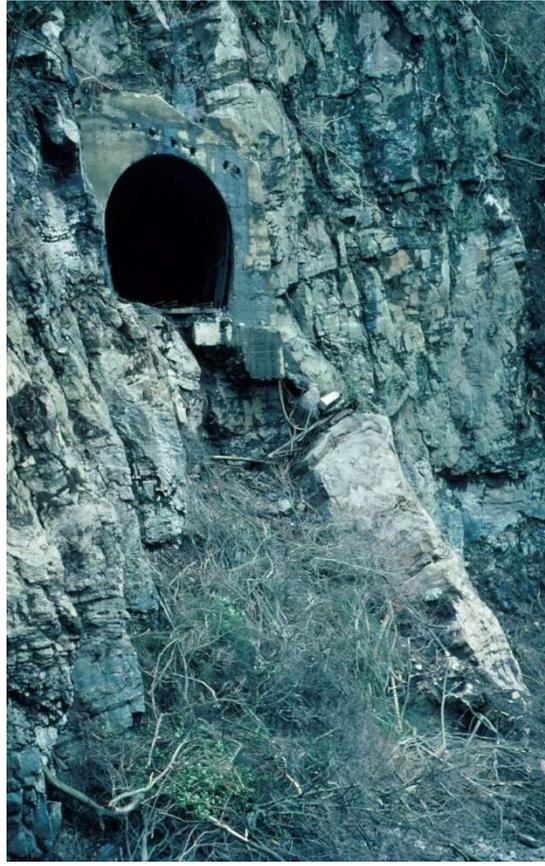
↓: 洪水による豊肥線の盛土の流出



次は、洪水による盛土被害です。これは、阿蘇山中の豊肥線です。破線がトンネルで、その間に盛土があります。1990年の豪雨で、これらの盛土が流失しました。茶色は泥流です。

## 1990年水害による盛土の崩壊と復旧(JR九州)

横断排水管渠の閉塞による  
自然ダム形成  
⇒越流  
⇒盛土の急速な侵食・崩壊

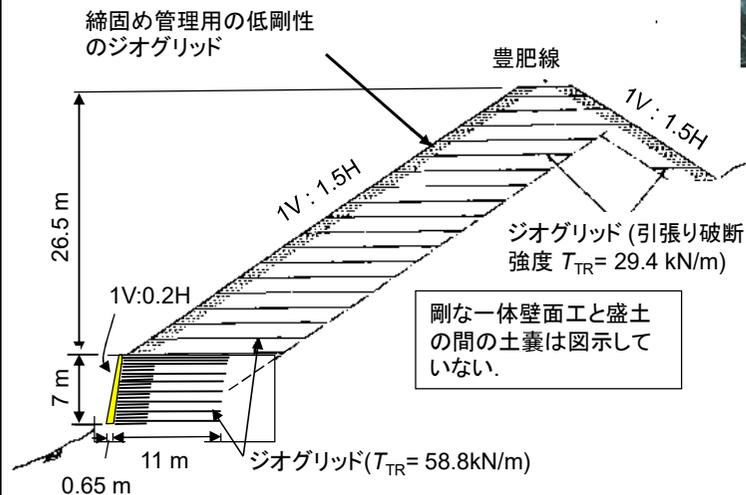


これは、トンネル間の盛土の例で、写真右の溪流の左岸側ではトンネル入り口の前の盛土は完全に流失しています。写真左側の盛土は生き残っています。このような現場が多数ありました。

- 完全に崩壊した盛土： 6箇所
- ジオテキスタイル補強盛土で強化復旧(1991年)

### GRS擁壁の建設の理由

- ・ 土工量の減少
- ・ 斜面の安定化
- ・ 大口径排水パイプの設置



流失した盛土は、ジオテキスタイル補強土擁壁とジオテキスタイルで補強した盛土で強化復旧されました。

# 1990年水害による盛土の崩壊と1991年強化復旧(JR九州)



1994年撮影

これは復旧後最初の列車と、1994年に撮影した写真です。

## 1990年水害による盛土の崩壊と復旧(JR九州)

横断排水管渠の閉塞による自然ダムの形成

⇒越流

⇒盛土の急速な侵食・崩壊



これは、他の現場です。

- 完全に崩壊した盛土： 6箇所
- ジオテキスタイル補強盛土で強化復旧(1991年)

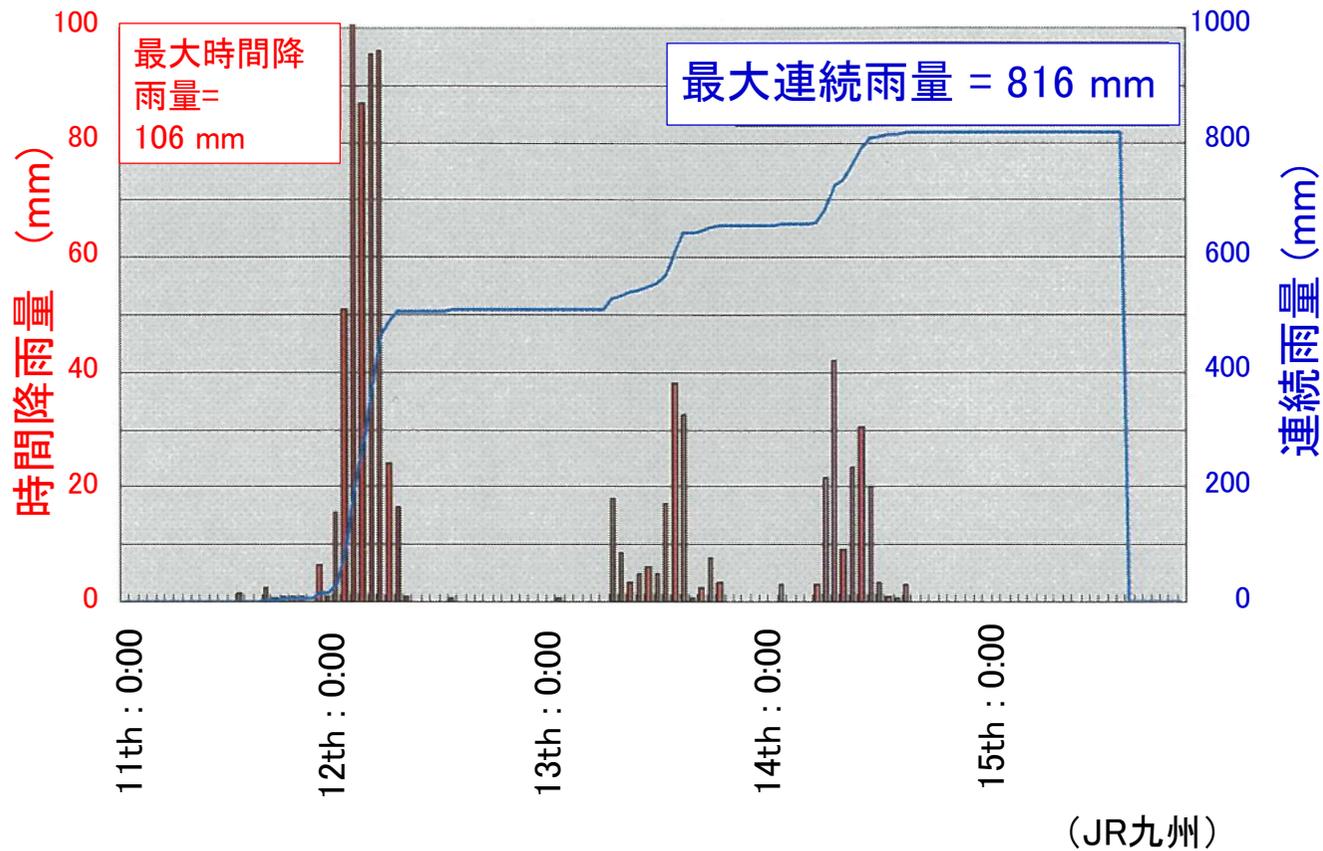
### GRS擁壁の建設の理由

- ・ 土工量の減少
- ・ 斜面の安定化
- ・ 大口径排水パイプの設置



これは、この現場で強化復旧工事を開始した所です。中央は、直径約3mの横断排水管路です。

## 2012年7月北九州豪雨(1990年豪雨を超えた雨量)



ところが、2012年に更に激しい豪雨が現場を襲いました。

トンネル内部から洪水流によって押し出されたレール  
(連鎖メカニズムによる)



上流側

ジオテキスタイル補強材に連結されていない壁面工

ジオテキスタイル補強盛土

Site 3

2012年

これは、2012年の水害が如何に激しかったか、を示す写真です。

このトンネルの反対側の入口付近で河川で洪水が生じ、その洪水が大量にトンネルを通過して、このトンネル入口で噴出しました。

トンネル内に敷設してあったレールの全体が、枕木ごと洪水流によって浮き上がり、押し出されたものです。

この現象は、最初に一部の枕木が浮き上がると更に洪水によって浮き上がり易くなり、この現象がその先の枕木に連鎖して、次々に枕木とレールが一体となってめくり上がって押し出された結果と思われます。

## Site 3

トンネル出口に隣接してジオテキスタイル補強盛土が建設されていたが、崩壊していなかった。

しかし、盛土の上流側の法面工は、残念ながらジオテキスタイル補強材と連結されていないため洪水流のため流失し、その背後の盛土は侵食されました。連結してあれば、盛土は侵食されなかったはず（大きな教訓です）。

侵食された盛土の部分に、トンネル内から押し出されたレイルが引っ掛かって、堆積してしまいました。

(JR九州)



これは、前頁の現場の俯瞰です。

トンネル出口に隣接してジオテキスタイル補強盛土が建設されていましたが、写真下側からの溪流からの洪水によって崩壊しなかったことに注目して下さい。

しかし、盛土の上流側の法面工は、残念ながらジオテキスタイル補強材と連結されていないため、トンネルから洪水流のため流失し、その背後の盛土は侵食されました。連結してあれば、のり面工は流失せず盛土は侵食されなかったはず（大きな教訓です）。

侵食された盛土の窪みの部分に、トンネル内から押し出されたレイルが引っ掛かって、まるでスパゲッティのように堆積してしまいました。

1990



1994



## Site 2

この現場は、2012年の水害では、次頁のようになりました。

## 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年に強化復旧しなかった部分:大きく侵食



(JR九州による)

2012年の水害では、上流の渓流に土石流が発生して、それが盛土の上流側に堆積して、横断排水路を塞ぎ、洪水流の激しい越流が生じました。

その結果、1990年水害では残存し、1991年に強化復旧しなかった盛土部分(青の矢印部分)が大きく侵食されました。

## 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)



(JR九州による)



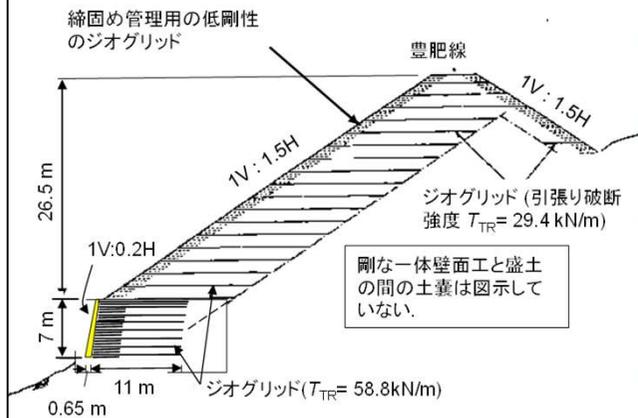
1991年に補強土工法で強化復旧した部分(損傷したが生き残った)



一方、この谷の滞筋(溪流の位置)にあり、1991年に流失した盛土部分であり、補強土工法で強化復旧した部分は、2012年の水害では、下流のり面に多数のガリ侵食が生じたが流失せず生き残りました。

## Site 2 2012年

ジオテキスタイル補強された盛土は、法面工がないため侵食されガリが形成されたが、その進展は遅かった



ジオテキスタイル補強された盛土は、法面工がないため侵食されガリが形成されたが、その進展は遅かった。

2012

Site 2

1990年水害では残存し、1991年に強化復旧しなかった部分：大きく侵食

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)



この写真は2012年11月26日撮影、侵食部は復旧工事のため掘削されている

補強盛土と無補強盛土では、越流に対する抵抗力は大きく異なることを示しています。

# 2011年7月新潟県・福島県豪雨 田沢トンネル付近の鉄道盛土の被害 (JR東日本による)



- ・盛土の崩壊規模： 延長約16m、高さ約6m
- ・崩壊原因： トンネル内側溝から排水しきれなくなった雨水が盛土上に溢れたため

これは、2011年の豪雨災害であり、トンネル入り口の前の盛土がトンネル内からの洪水による崩壊した状況です。

## 田沢トンネル付近のGRS擁壁による強化復旧(JR東日本)

### GRS擁壁による強化復旧

- 崩壊した緩斜面の盛土の代替  
運搬土量を削減できる(盛土材: 砕石C-40)  
より安定な構造物
- 約14日の昼夜施工で、壁面工打設前にj徐行  
運転で列車運行の早期再開
- コンクリート壁面工は列車運行再開後に施工



GRS擁壁による強化復旧

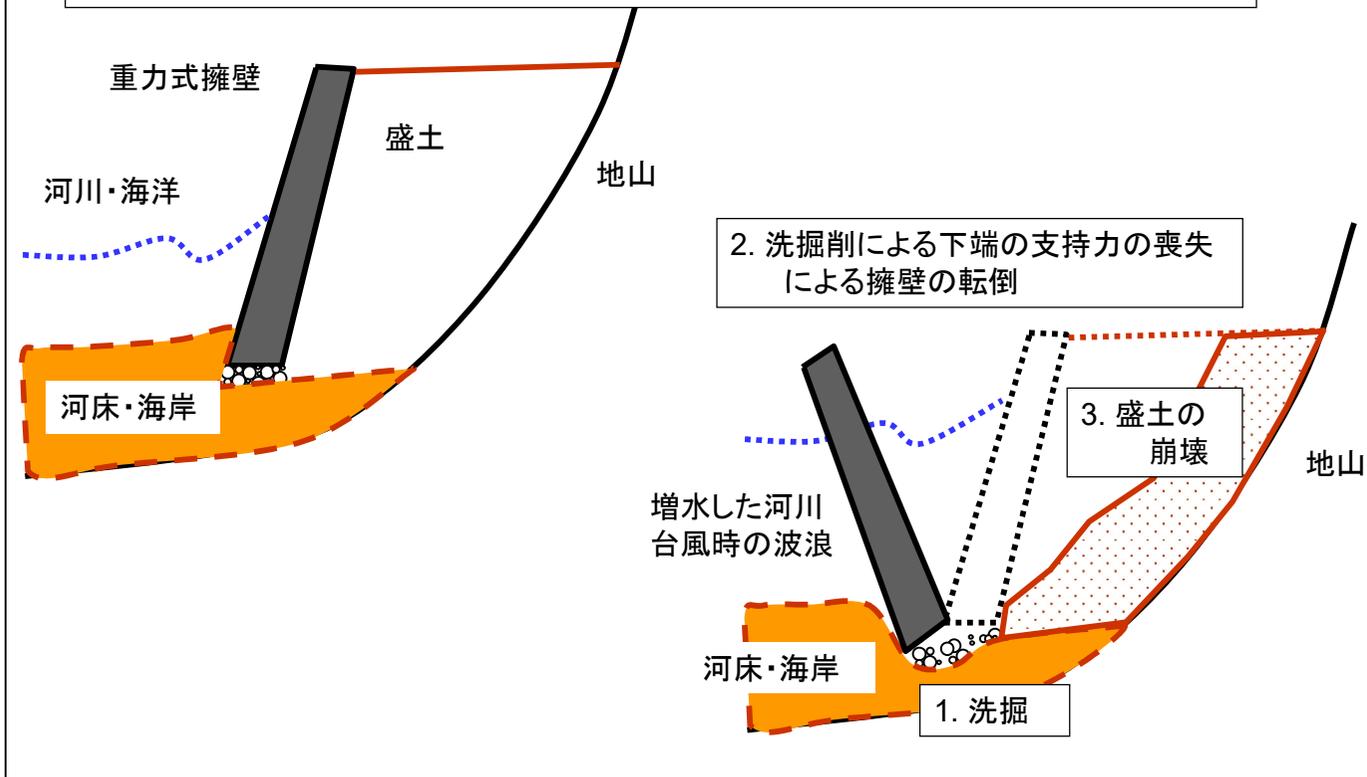


GRS擁壁による強化復旧(越後鹿渡方より) コンクリート壁面工の施工線路右側より)

崩壊した盛土は、GRS擁壁で強化復旧しました。わずか14日の施工で列車の運行が再開できて、列車運行再開後に剛な一体壁面工を建設しています。

## 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



次に、擁壁の基礎地盤が洪水等で洗掘されることによる被害です。

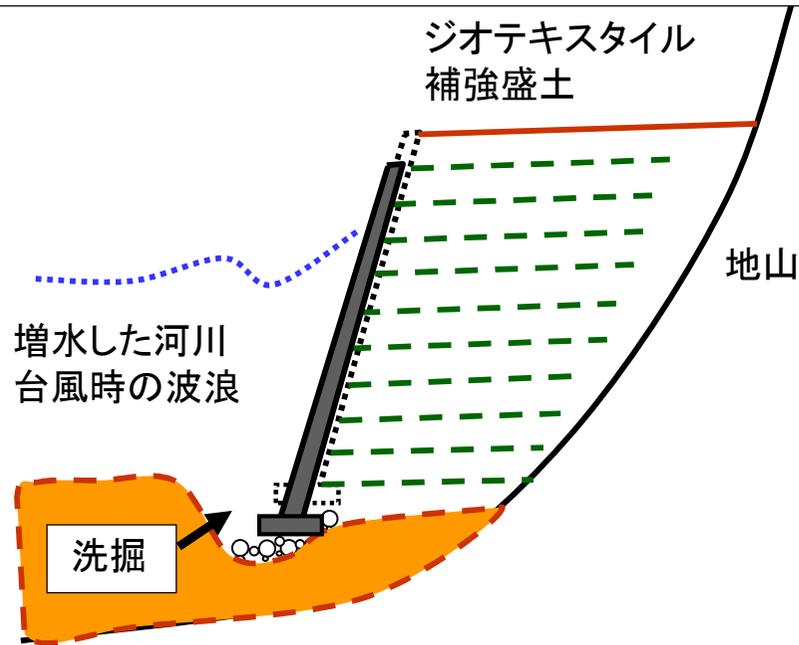
従来形式の擁壁は、片持ち梁構造であるため、杭基礎などで支持されていないと、このような被害が生じます。

## 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



補強土擁壁は、片持ち梁構造ではないため、仮に支持地盤が洗掘された場合、杭基礎などで支持されていなくても、容易には崩壊しません。

従って、道路・鉄道等の応急機能は維持できるようになります。これは、地震直後の避難・救援に非常に重要な機能です。

2011年7月新潟県・福島県豪雨  
飯山線入間川橋りょう 橋台背面の石積擁壁の崩壊



これは、2011年の豪雨により、河川を横断する鉄道橋梁の橋台の背面の石積み擁壁が、洪水による支持地盤の洗堀で崩壊した事例です。このような崩壊は、鉄道の橋梁だけでなく道路の橋梁で、数多く生じています。

2011年7月新潟県・福島県豪雨  
飯山線入間川橋りょう 橋台背面の石積み擁壁の崩壊

JR東日本による



これは、現場の近景です。橋台が河川敷に突出しているために、洪水の攻撃を受けやすいことが分かります。

# 入間川橋りょう 橋台背面擁壁のGRS擁壁による強化復旧

JR東日本による

## ■ GRS擁壁による強化復旧

- 石積翼壁の代替
- 約10日(昼夜施工)後、壁面工打設前に徐行運転で列車運行再開

コンクリート壁面工は列車運行再開後に施工



軌道復旧 (土市方より)



GRS擁壁による復旧 (土市方より)



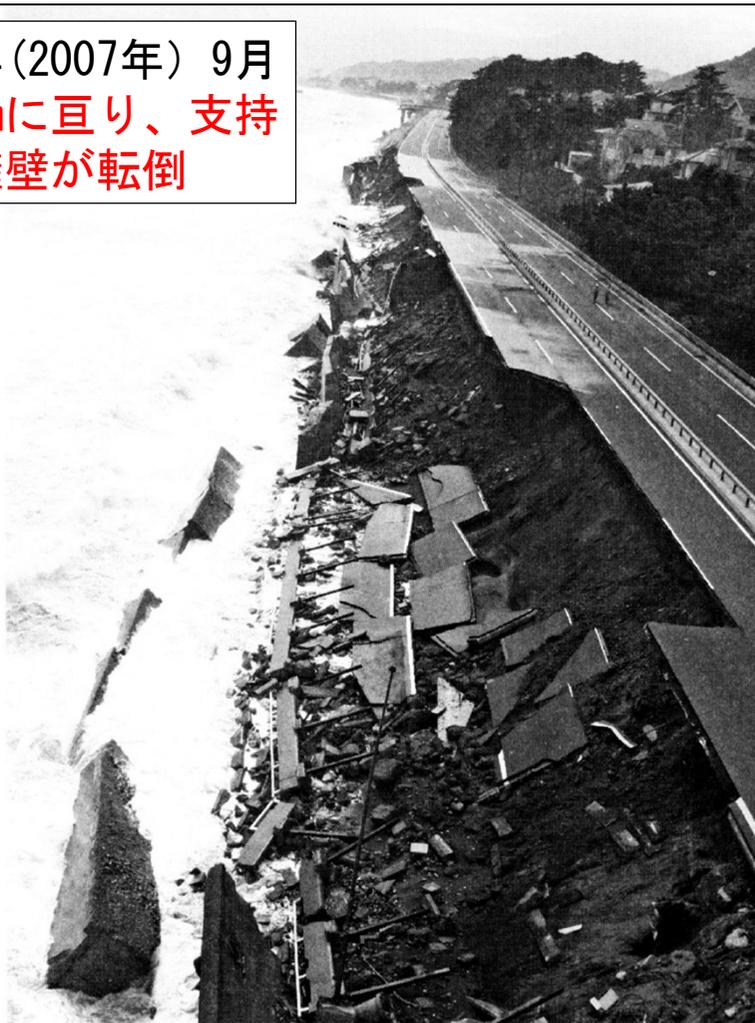
壁面コンクリート施工 (線路右側より)

この擁壁はジオテキスタイル補強土擁壁で強化復旧されました。僅か10日の施工で列車の運行が再開されて、剛な一体壁面工は列車運行が再開されてから施工されました。

国道西湘バイパス、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<sup>1)</sup>)

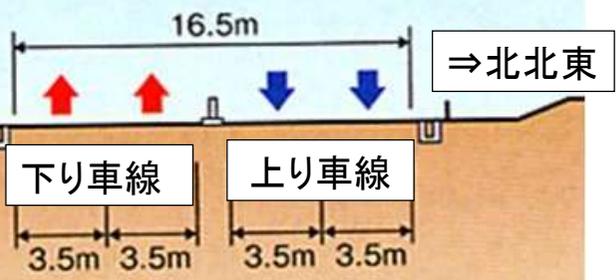


これは、2007年、海洋に面した従来形式の重力式擁壁が台風による海洋からの波浪によって支持地盤が洗掘されて、1.5 kmに亘って倒壊した事例です。

重力式擁壁：波浪によって地盤が洗掘されて、転倒し盛土が侵食・崩壊

太平洋

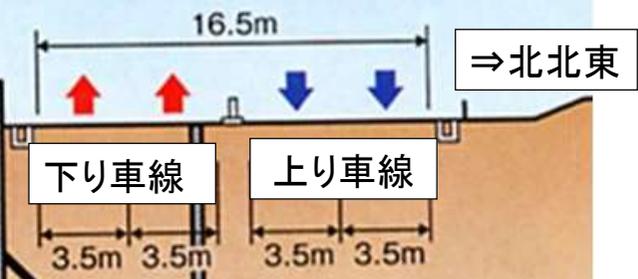
被災前



剛で一体の壁面工を持つGRS擁壁

侵食防止工

強化復旧後



上が、倒壊した重力式擁壁の断面図です。

下が、剛な一体壁面工を持つジオテキスタイル補強土擁壁による強化復旧です。



2010年3月10日龍岡撮影

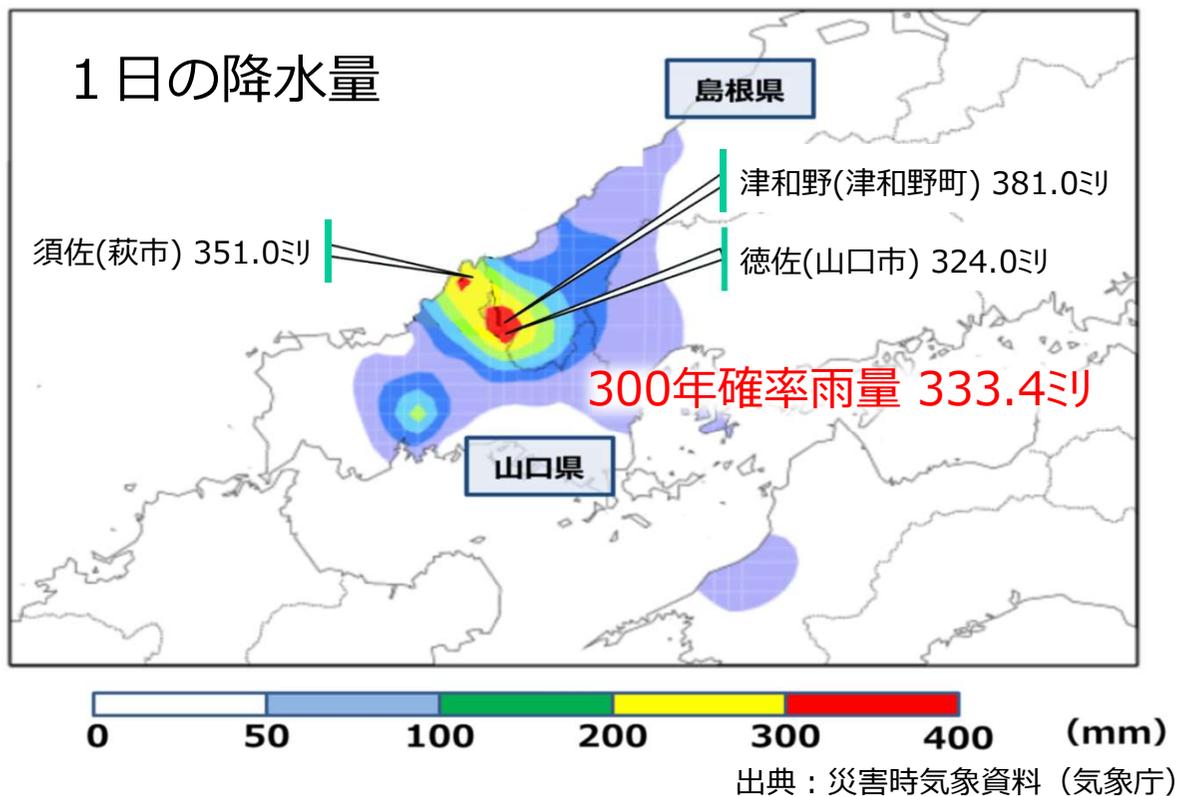
日本で初めての、外洋に面して波浪を受ける条件での  
剛で一体の壁面工を持つジオテキスタイル補強土擁壁  
⇒今後の適用例が増えることが期待できる

これは、建設中の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。前方は壁面工建設前、中央は建設中、後方は建設後です。

この擁壁はその後何回と台風の波浪を受けていますが、被害は生じていません。

# 平成25年(2013年) 7月28日山口線・山陰線の豪雨災害と強化復旧

これも、鉄道構造物の豪雨災害です。

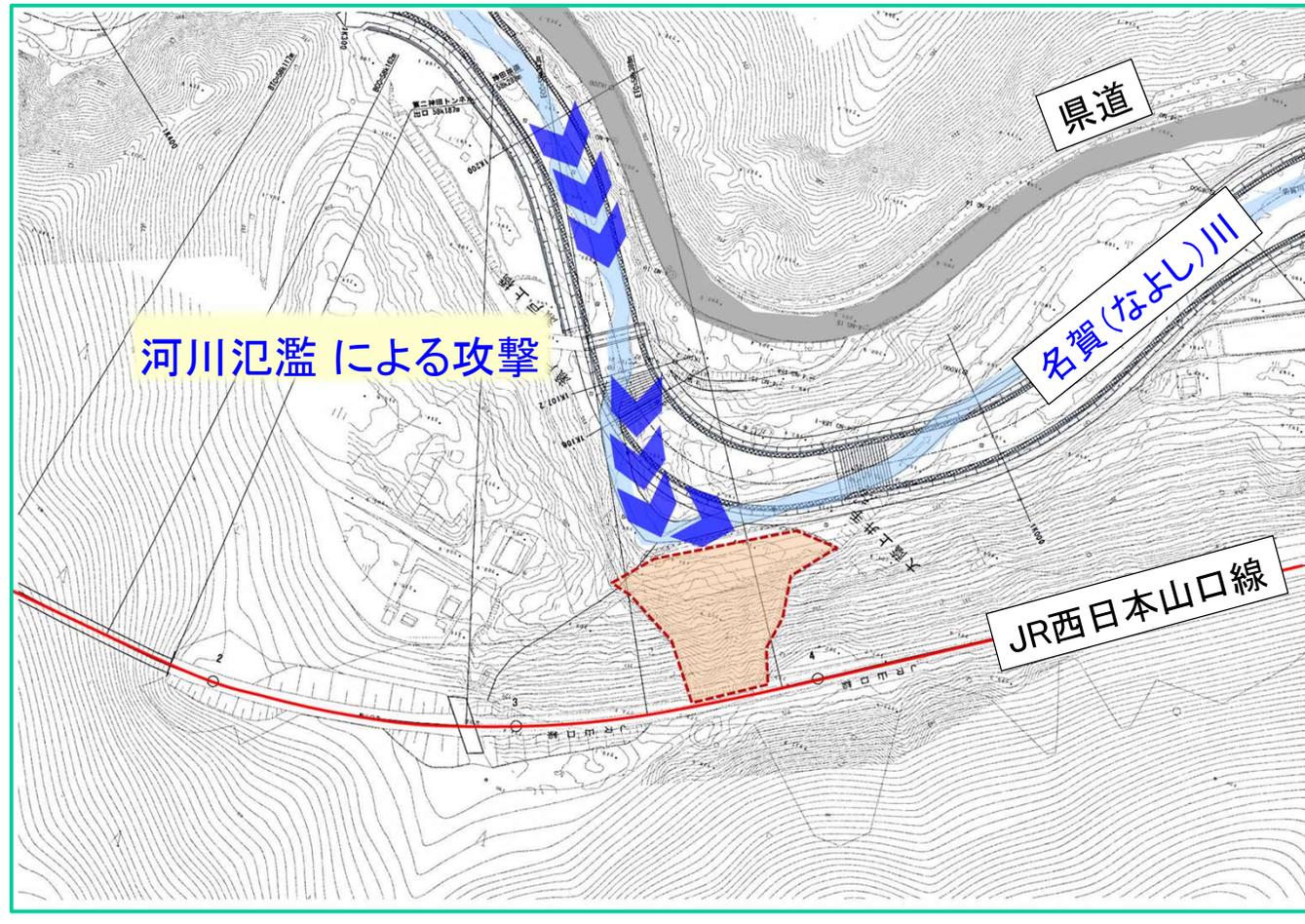


西日本旅客鉄道株

# 鉄道盛土の崩壊事例: 58k400m付近

西日本旅客鉄道株

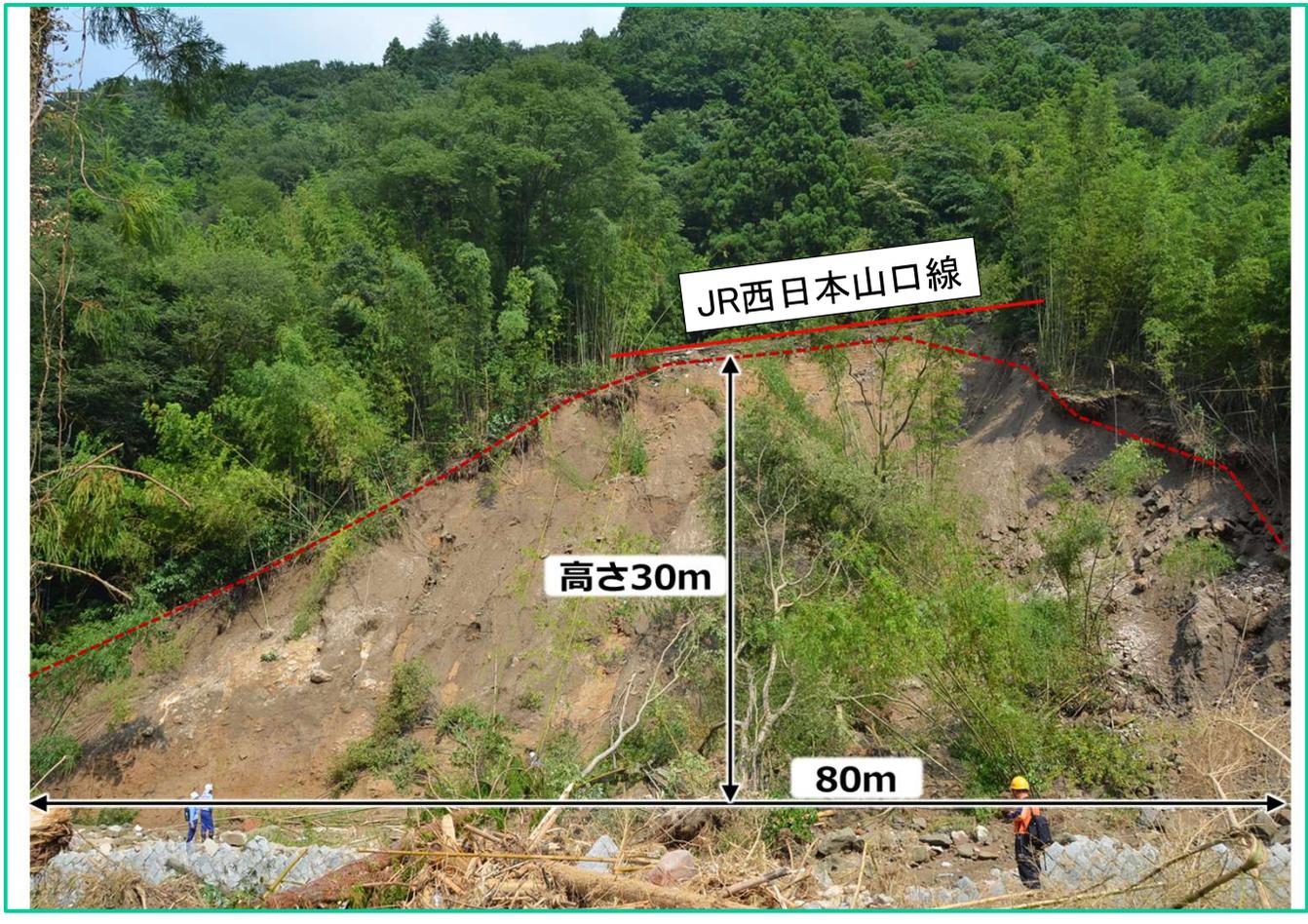
河川からの洪水が、鉄道盛土の法尻を正面から攻撃しました。



# 鉄道盛土の崩壊事例: 58k400m付近

西日本旅客鉄道(株)

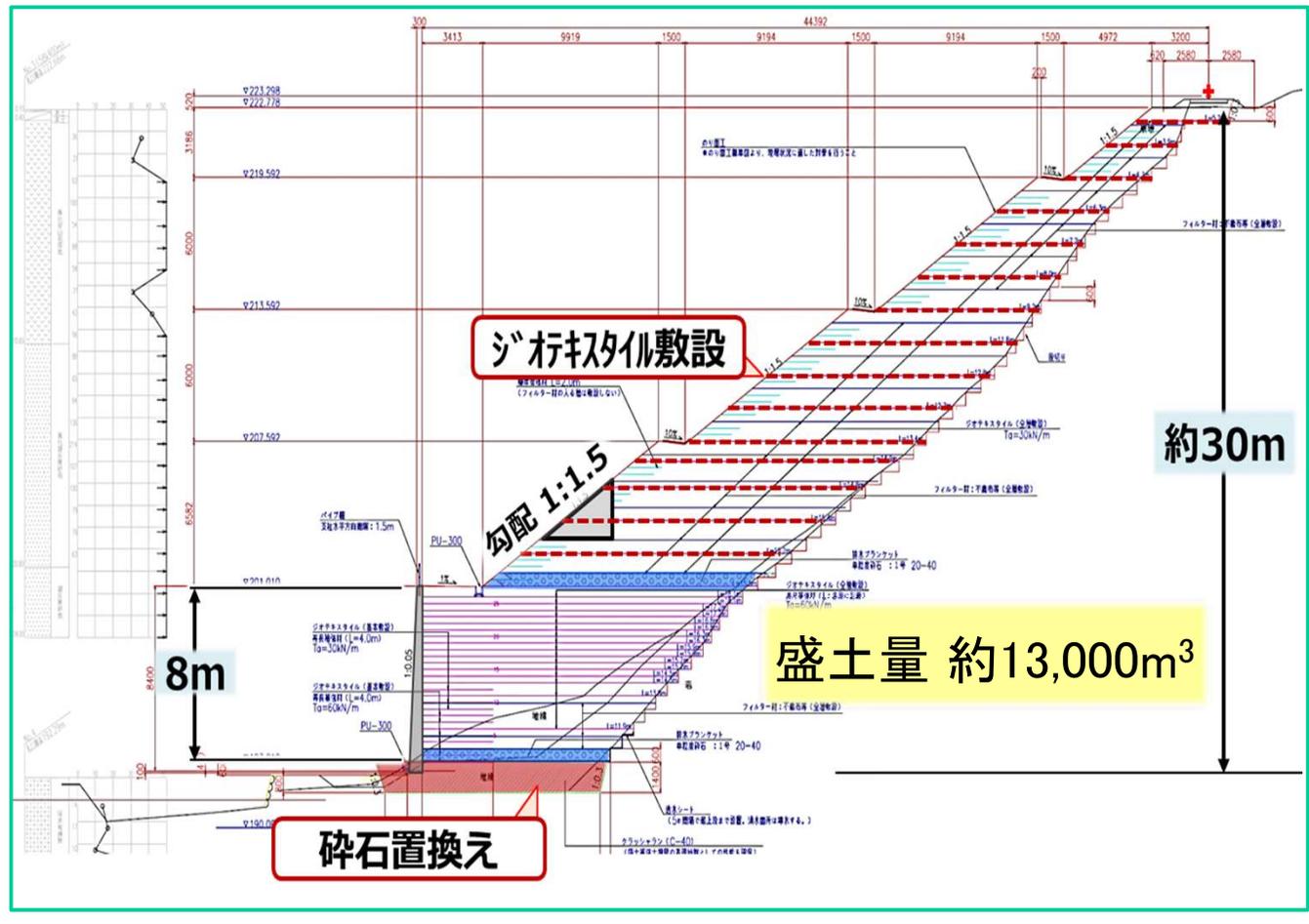
鉄道盛土は、法尻の腰土留め擁壁が洗い流されて、大きくすべり崩壊しました。



# 強化復旧事例 : 58k400m付近

西日本旅客鉄道(株)

この盛土は、GRS擁壁とジオテキスタイル補強した盛土によって強化復旧されました。



## 剛な一体壁面工の建設前のGRS擁壁と盛土



これは、剛な一体壁面工を打設する前です。

擁壁・盛土は、河川に攻撃される位置にあることが分かります。

JR西日本提供

## 強化復旧事例：58k400m付近

西日本旅客鉄道(株)



これは、剛な一体壁面工を打設した後です。

擁壁部は、背後の盛土の建設によりかなり変形します。この変形が生じた後に壁面工を段階施工しているため、この変形による壁面工及び壁面工と補強材との連結部の損傷は生じません。

剛な一体壁面工は、河川からの洪水に対して抵抗することが期待されました。実際、その後何回も洪水に攻撃されていますが、問題は生じていません。

# 被害事例：白井トンネル出口付近

西日本旅客鉄道(株)



前述の現場の近くでは、トンネル出口付近で、土石流が生じ、付近の盛土が流失しました。

GRS擁壁による強化復旧事例：白井トンネル出口付近)



GRS擁壁

これは、GRS擁壁による強化復旧後です。

復旧後



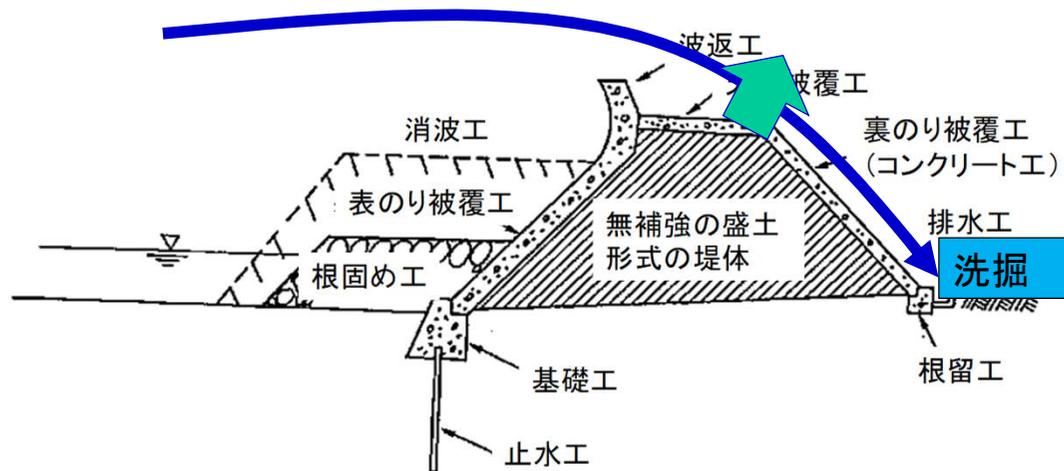
JR西日本提供

これは、GRS擁壁の上を観光列車が走っているところです。

## 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に向かって急速流下→強烈な揚力  
→盛土に固定されていない下流側裏のり面工の滑り出し  
→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年東日本大震災では、各所で巨大津波の越流によって盛土形式の防潮堤が崩壊して、機能を失いました。

これは一例です。

## 巨大津波の越流による盛土形式の防潮堤の機能喪失

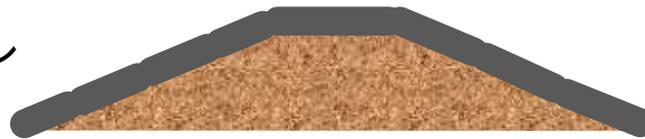
⇒レベルII津波(越流津波)に対しても粘り強い挙動が必要



田野畑村 明戸(弁天崎西側)(東大古関潤一教授による)

## 東京理科大学地盤研究室での模型実験

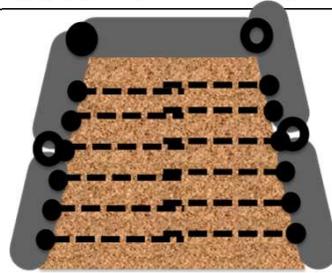
従来型の海岸防潮堤  
三面張りコンクリートパネル  
盛土無補強



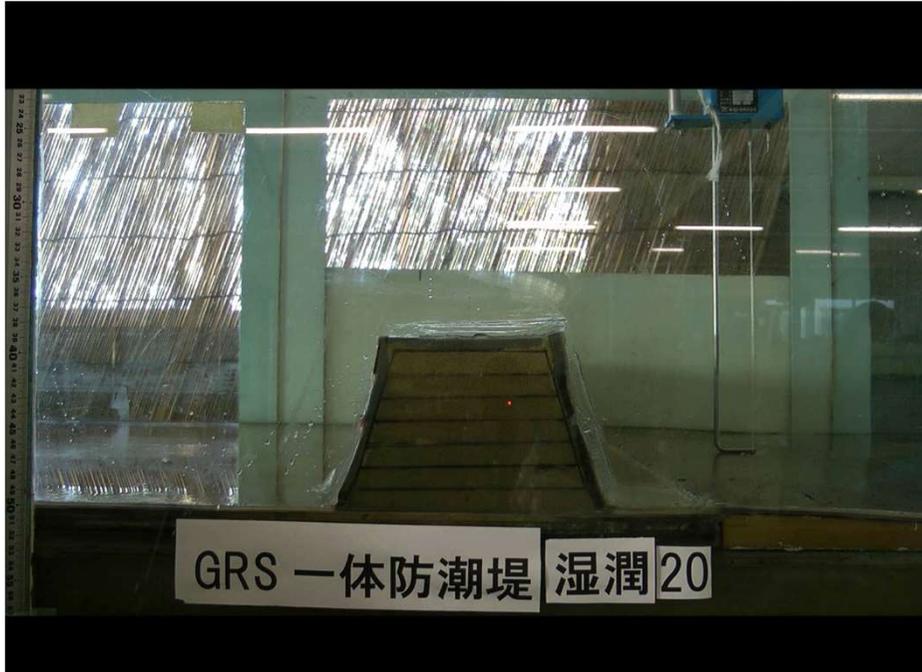
盛土は越流に対する抵抗力が低いことを示す模型実験です。このビデオは添付してあります。

## 東京理科大学地盤研究室での模型実験

三面張りコンクリートパネル  
(相互連結、補強材と連結)  
盛土補強



最小断面積



これは、剛な一体壁面工を補強材に連結してあるジオテキスタイル補強土の防潮堤の模型実験であり、この構造形式は越流に対して高い抵抗力を持っています。このビデオも添付してあります。



GRS 一体防潮堤 湿润20



沓(支承)は、耐震上の弱点であるばかりでなく、津波に対しても橋梁の弱点



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)

340を超える橋梁が津波で桁あるいは取付け盛土、あるいは両方を流失

橋梁も、津波により激しく被害を受けました。

単純桁を支える支承と取り付け盛土は、橋梁の耐震上の弱点であるばかりでなく、津波に対しても弱点

→ 支承がなく取付盛土が補強されているGRS一体橋梁で強化復旧



沓(支承)と取り付け盛土は、橋梁(特に単純桁の橋梁)の耐震上の弱点であるばかりでなく、津波に対しても弱点であることが明らかになりました。

これらの橋梁は、地震のみならず津波にも高い抵抗力を示すGRS一体橋梁で強化復旧することを提案しました。GRS一体橋梁は、次回の授業で説明します。

ジオテキスタイル補強土の橋台

桁・壁面工・補強盛土が一体となった構造



## 三陸鉄道 島越駅

2011年東日本大震災前



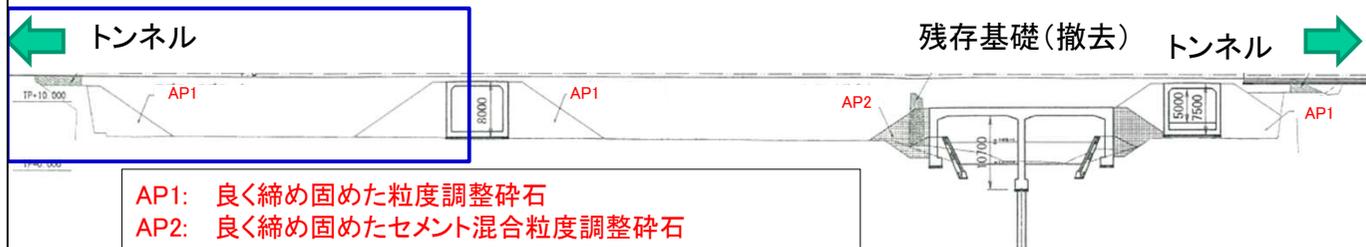
地震後,

RCラーメン高架橋は  
津波で崩壊



三陸鉄道の島越駅とそれに隣接するRCラーメン構造の高架橋も、津波によって完全に崩壊しました。

## 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、GRS一体橋梁も建設

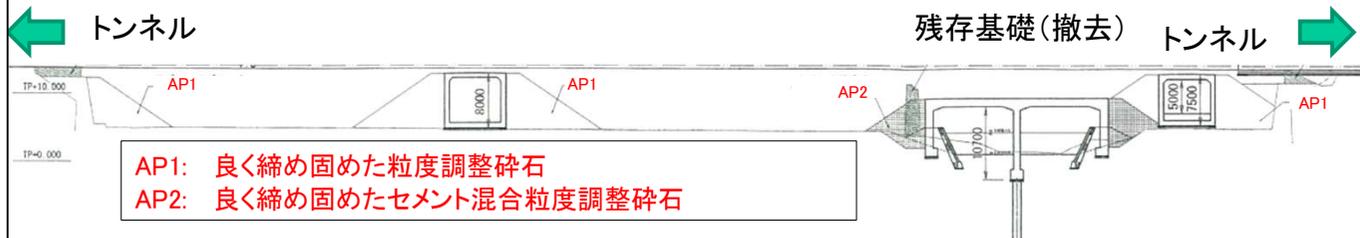


陸側から

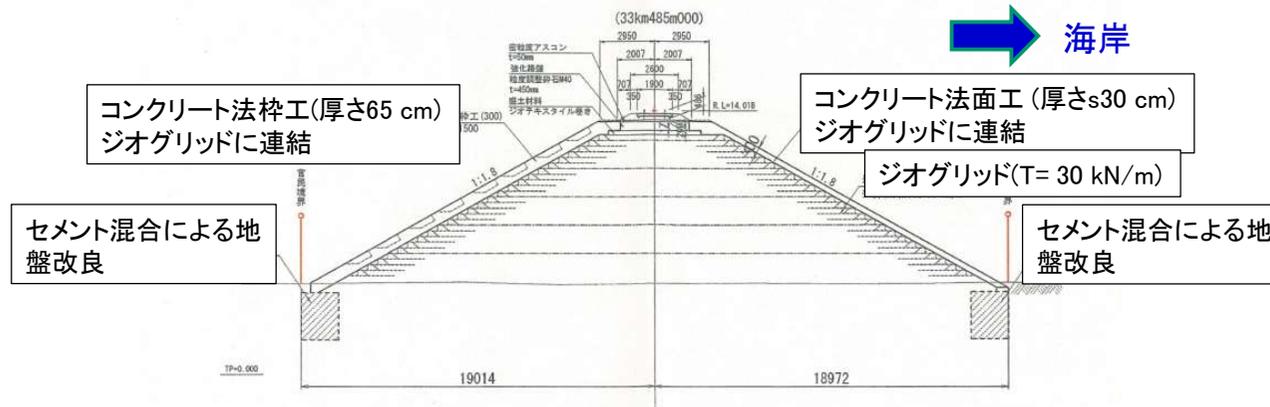
2011年3月30日

三陸鉄道北リアス線島越駅周辺のRC高架橋は、住民の要望によって、防潮堤としても機能する盛土に変更されました。

## 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、GRS一体橋梁も建設



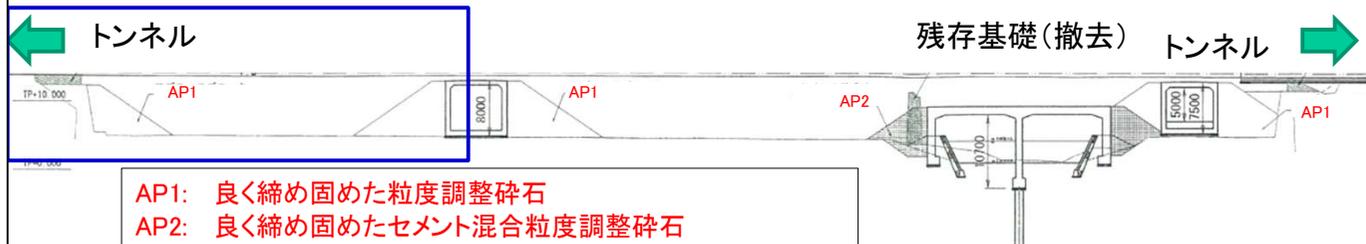
### 典型的な盛土断面



これが、防潮堤としても機能するジオテキスタイル補強した盛土の断面図です。

耐震性が高いだけでなく、コンクリートのり面工は補強材に連結されているので、越流した津波による法尻の洗堀と引き離し力によって不安定化しないので、盛土の侵食を防止できます。

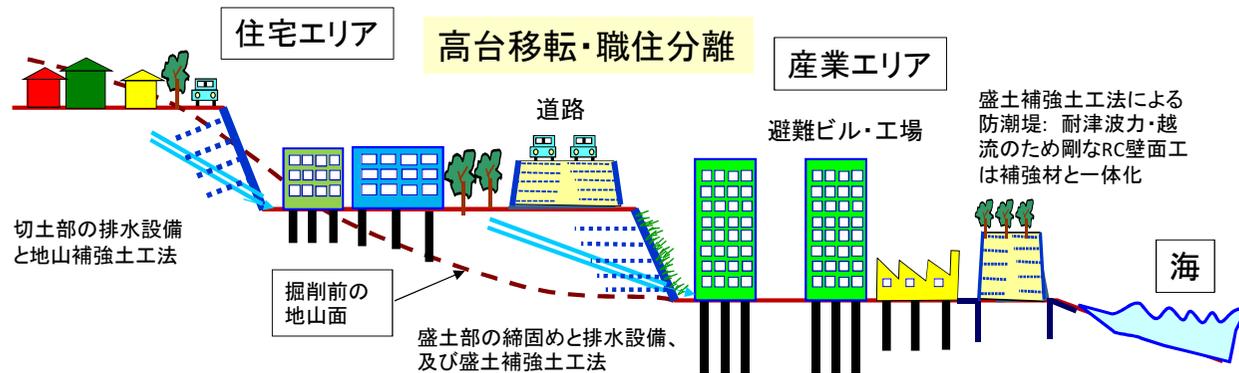
## 三陸鉄道北リアス線島越駅周辺：住民の要望により、高架橋を防潮堤としての盛土に変更、GRS一体橋梁も建設



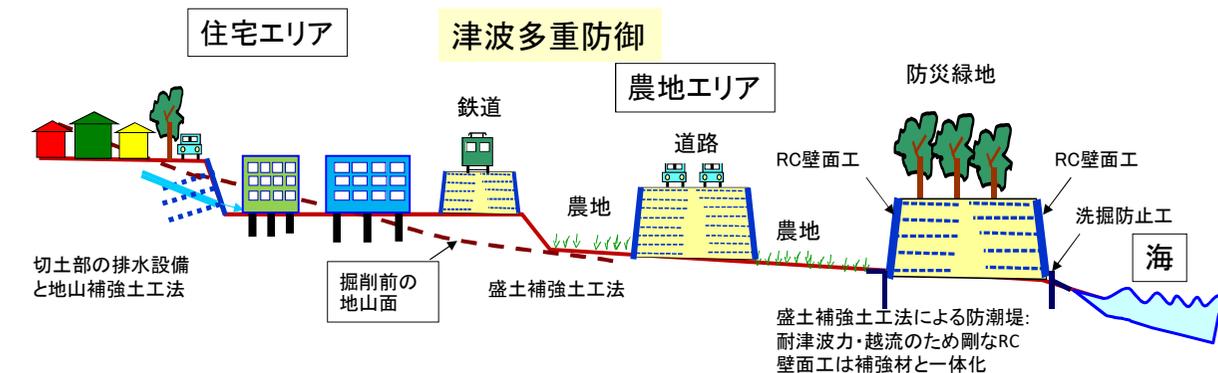
これはジオテキスタイル補強盛土の上で列車運行を再開した所であり、のり面工を施工している状態です。



# 多重津波防御施設と居住地高台移転構想での補強土工法の適用例(地盤工学会提言から)

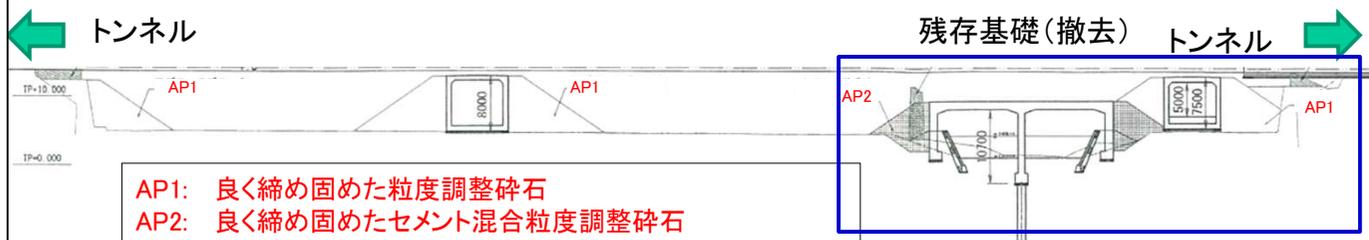


これは、地盤工学会によるものであり、このようなジオテキスタイル補強土擁壁・盛土を津波防潮堤として活用することの提案です。



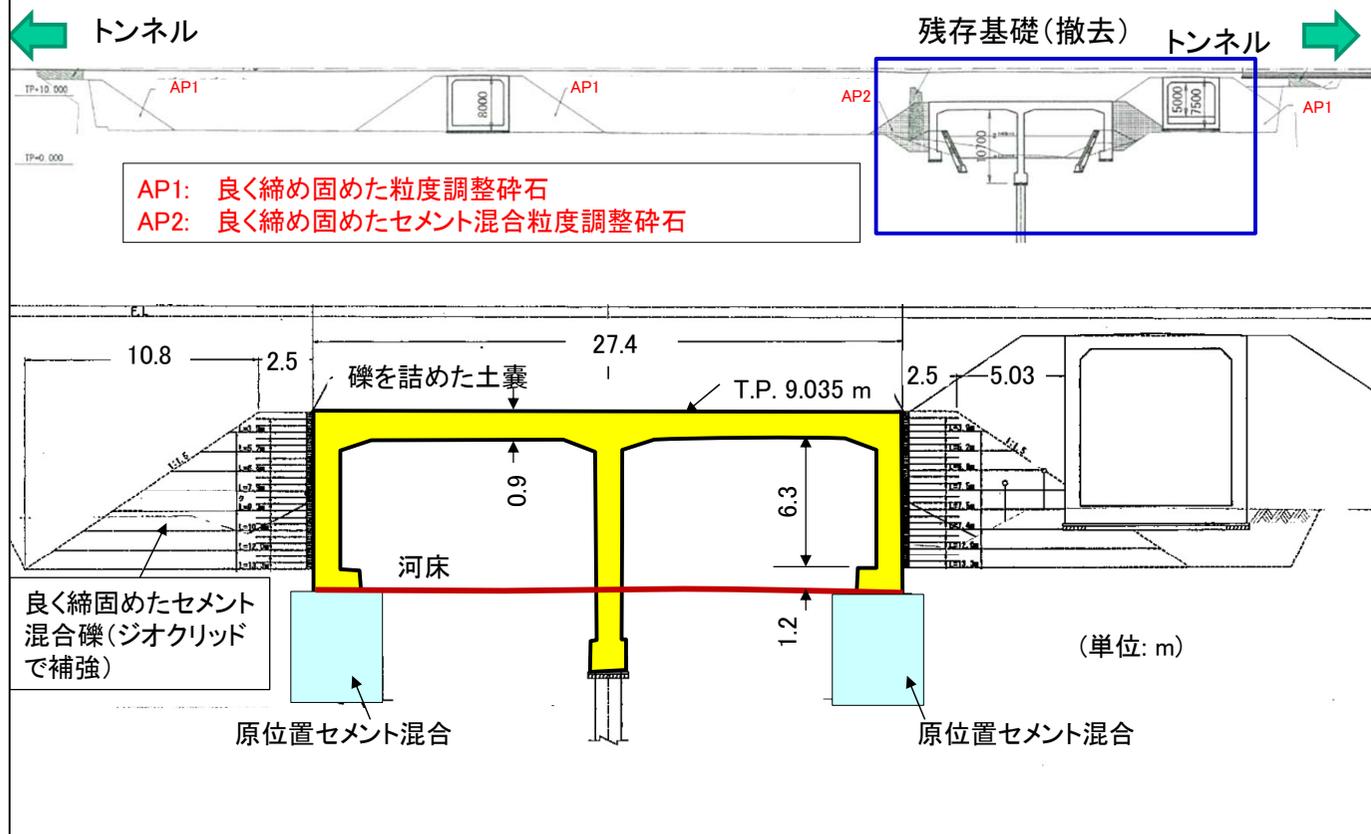
# 三陸鉄道北リアス線島越駅周辺：単純支持の橋梁も津波で流失 ⇒ GRS一体橋梁で強化復旧

三陸鉄道島越駅では、津波によって単純桁橋梁が完全に流失しました。



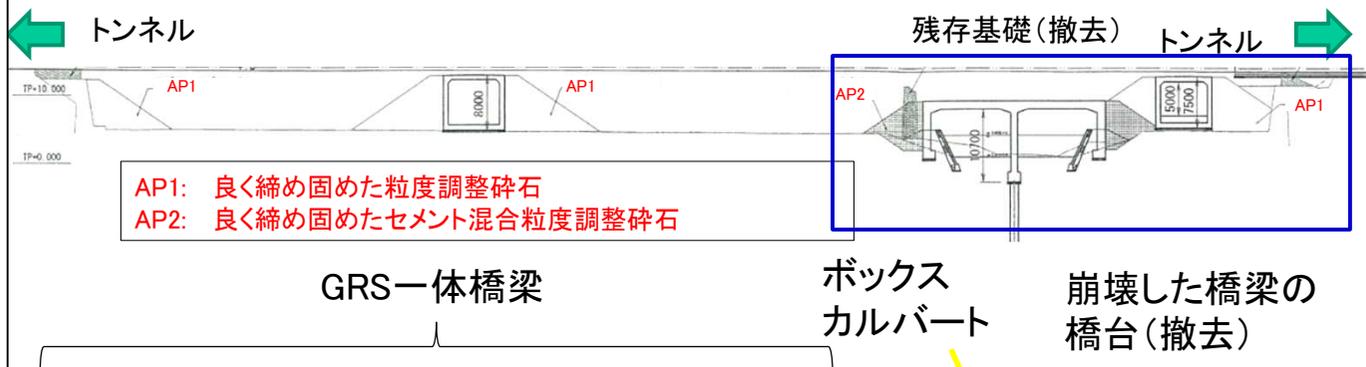
# 三陸鉄道北リアス線島越駅周辺：単純支持の橋梁も津波で流失 ⇒ GRS一体橋梁で強化復旧

これは、GRS一体橋梁で強化復旧したことを示す図です。



# 三陸鉄道北リアス線島越駅周辺：単純支持の橋梁も津波で流失 ⇒ GRS一体橋梁で強化復旧

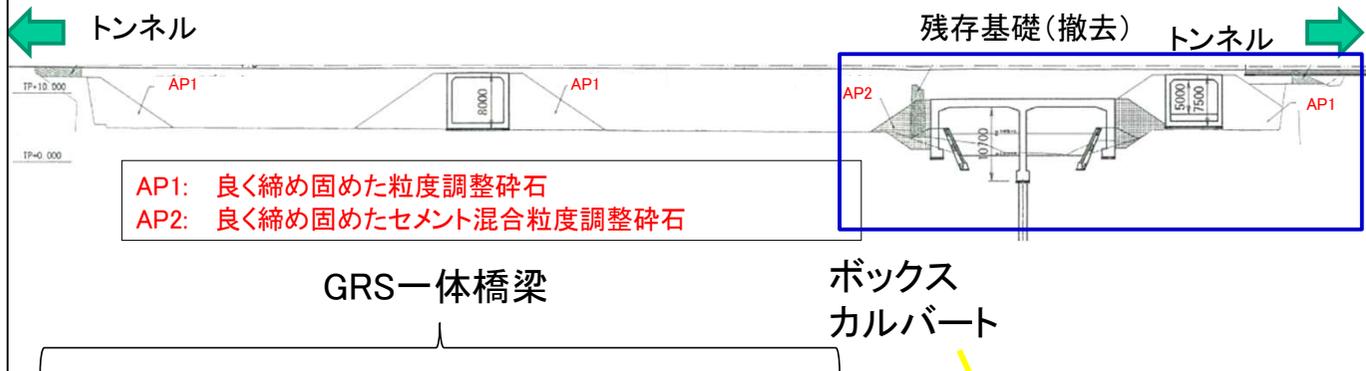
GRS一体橋梁の建設中であり、まずジオテキスタイル補強土の橋台を建設しています。



2013年6月19日

三陸鉄道北リアス線島越駅周辺：単純支持の橋梁も津波で流失 ⇒ GRS一体橋梁で強化復旧

これは、完成したGRS一体橋梁です。



## 擁壁・盛土等の土構造物の水災害と 水災害に対するGRS構造物による防止策・強化復旧・強化補強

■自然災害： 洪水、豪雨、津波

■災害のメカニズム

表面水・地下水の浸透、浸透流、越流、構造物が面する河川・海洋からの攻撃

⇒盛土・支持地盤での間隙水圧の上昇・サクシヨン低下・浸透圧増加  
支持地盤の洗堀、盛土の内部侵食・表面侵食

⇒土構造物の不安定化(従来形式のみならず補強土構造物でも)

■対策：

・構造物の強化・安定化(特に、従来形式の擁壁・盛土での原状復旧から補強材、盛土と壁面工を適切に設計・施工した補強土構造物での強化復旧への方針転換)

・盛土・支持地盤内への浸透水の低減、盛土・支持地盤内からの排水、洗堀対策、浸透流による内部侵食・越流による侵食の対策等

これは、これまで説明してきた

擁壁・盛土等の土構造物の水災害と水災害に対するGRS構造物による防止策・強化復旧・強化補強のまとめです。