

【別冊－2】

土研新技術ショーケース 2015 in 札幌

【特別講演】

豪雨・融雪による斜面災害の発生メカニズムとその対策

平成 27 年 1 月 15 日 (木)

(場所：アスティ 45 16 階)

室蘭工業大学 工学部

教授 木幡 行宏



# 豪雨・融雪による斜面災害の発生メカニズムとその対策

室蘭工業大学 大学院工学研究科  
くらし環境系領域 社会基盤ユニット

教授 木幡 行宏



## 内容

### ▶ 斜面災害

- ✓ 斜面災害の種類, 斜面災害の発生メカニズム
- ✓ 北海道における斜面災害
- ✓ 降雨量を基にした予知, 予測
- ✓ 新しい雨量指数－土壤雨量指数, 実効雨量－

### ▶ 中山峠の斜面災害と対策事例

- ✓ 災害の概要
- ✓ 災害形態と発生箇所, 周辺の地すべり地形
- ✓ 中山峠災害への対策

### ▶ 斜面災害への対策(盛土を中心として)



## ▶ 斜面災害の種類

### 地すべり



### 斜面崩壊



## 土石流



熊本県水俣市宝川内集地区の土石流被害(2003.7)



出典:水俣市



出典:熊本県

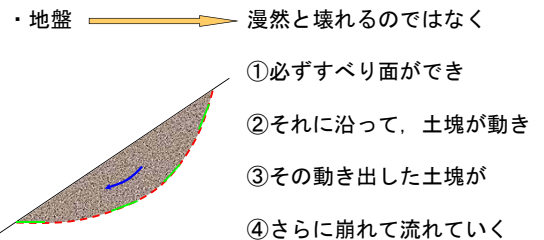


## ▶ 地すべり, 斜面崩壊, 土石流の相違点

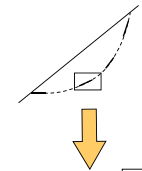
	地すべり	斜面崩壊	土石流
地質	特定の地質または地質構造の所に多く発生	地質との関連は少ない	崩壊の発生しやすい地質
土質	主として、粘性土をすべり面として滑動	砂質土の中でも多く発生	火山性堆積物など
地形	5~20°の緩傾斜面に発生、特に上部に台地状の地形を持つ場合が多い	30°以上の急傾斜地に多く発生	15°以上の河床勾配を持つ渓流に多く発生
活動状況	継続的、再発性	突発的	突発的
移動速度	0.01~10mm/日 一般に速度は小	10mm/日以上で、速度は大きい	石礫型: 5~10m/s 泥流型: 10~20m/s 速度は極めて大
土塊	土塊の乱れは少なく、原形を保ちつつ動く	土塊は攪乱される	土塊は水と一体化し流動化する
誘因	地下水による影響が大きい	降雨強度に影響される	降雨強度、連続雨量に影響される
規模	1~100haで規模は大きい	1000m <sup>3</sup> 以下で規模は小さい	1000m <sup>3</sup> ~数千m <sup>3</sup> 小~大
兆候	発生前に亀裂の発生、陥没、地下水変動などが生じる	兆候の発生は少なく、突発的に滑落	兆候の発生は少なく、突発的

## ▶ 斜面災害の発生メカニズム

### ● 地すべりと斜面崩壊



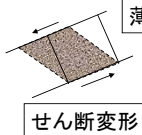
・すべり面 → 実際には



・面ではなく横ずれ変形



・せん断変形が非常に集中している破壊された薄い土の層



薄い土の層

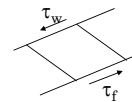
すべり面厚さ  
土の粒子の大きさの約20倍程度  
粘土 非常に薄い  
砂 厚さが見える  
礫 数十センチ

・すべり面に沿って、

「すべり破壊を生じさせようとする作用せん断力 $\tau_w$ 」



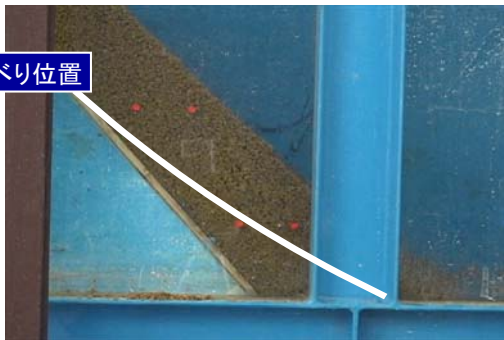
「すべり破壊に抵抗する力（土のせん断強度） $\tau_f$ 」



$\tau_f / \tau_w \rightarrow$  安全率  
> 1.0 ・ 斜面は壊れない  
< 1.0 ・ 斜面が壊れる



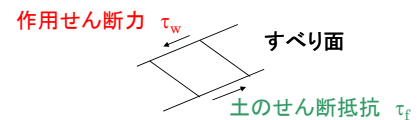
すべり位置



### 地盤の破壊を取り扱う方法論

- ①すべり面
- ②作用せん断力
- ③土のせん断強度
- ④安全率

という概念で体系が作られている。



$$\text{安全率} = \frac{\text{土のせん断強度 } \tau_f}{\text{作用せん断力 } \tau_w}$$

図2 斜面や壁面の下の掘削するな

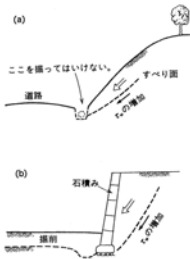
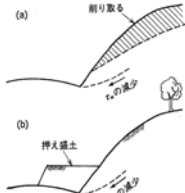


図3 (a)斜面の上の土を取り除く (b)斜面の前に盛土をする



$$\text{安全率} = \frac{\text{土のせん断強度 } \tau_f}{\text{作用せん断力 } \tau_w}$$

### 発生の原因と誘因

#### 発生の素因

- ・ 地すべり
  - ・ 地山自体が持つ構造上の弱線
  - ・ 一般に、一定期間後に休息し、再び活発化して運動を繰り返す場合が多い。
  - ・ 礫混じり崩積土や粘性土
- ・ 斜面崩壊
  - ・ 表層風化
  - ・ 突発的に発生
  - ・ 砂質土や火山灰質土



● 一時間雨量の目安



10~20mm  
【やや強い雨】  
ザーザーと降り、  
地面一面に水たまりができる。



20~30mm  
【強い雨】  
どしゃ降り、側溝  
や下水があふれ、  
小さな川の氾濫や、  
小規模の崖崩れが  
はじまる。



30~50mm  
【激しい雨】  
バケツをひっくり  
返したように降り、  
道路が川のように  
なる。

出典：札幌市危機管理対策室HP

● 一時間雨量の目安



50~80mm  
【非常に激しい雨】  
滝のように降り、  
都市部では地下室や  
地下街に雨水が流れ  
込む場合がある。



80mm 以上  
【猛烈な雨】  
息苦しくなるような  
圧迫感があり、大規  
模な災害の発生す  
るおそれ強い。

出典：札幌市危機管理対策室HP

● 斜面崩壊と雨の降り方

・ 長雨の影響

長雨が連続すると少量の雨でも斜面崩壊が発生



7~10日間続いた雨の後の少量の雨は、**要注意**

・ 融雪の影響

すべり面、土塊の間隙水圧の増加  
土塊の軟弱化が原因！！

短期間で融雪が進行



斜面変動に与える影響・・・大

変動が活発になる時期・・・3月~5月頃

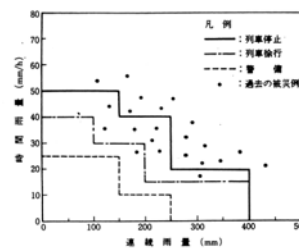
➤ 降雨量を基にした予知, 予測

● 鉄道における実施例 (旧国鉄→JR各社)

雨量指標	考え方
時間雨量	任意の時刻における前1時間の積算雨量
連続雨量	降り始めからの総雨量(ただし、12時間(JR九州では24時間)以内に降り止みは連続した降雨と見なす)
累積雨量	48時間以内の降り止みは連続した降雨と見なす総雨量で、特に「長雨」に対して危険とされる箇所に適用

- ・ JR各社では、沿線に独自の雨量計を配置、計測原則として、10km程度に1カ所配置
- ・ 加えて、気象庁からの短時間降雨量予測やアメダスを参照している

● 鉄道における実施例 (旧国鉄→JR各社)



- 雨量指標を、連続雨量と時間雨量、およびその組み合わせとする。
- 規制区間の最小単位は駅間
- 運転規制の発動者は駅長、解除は保守担当責任者
- 規制値は過去の災害事例と降雨履歴により定める

J R・・・降雨時の列車運転規制

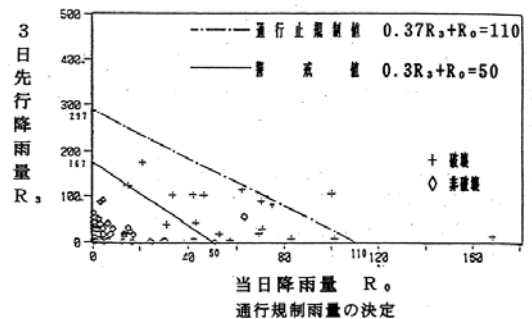
「降雨に対する運転規制基準作成要領」S47.9 国鉄

● 道路における実施例（旧道路公団→NEXCO）

・ 道路における規制方法・・・連続雨量と時間雨量

・ 連続雨量・・・・・・・・・・概ね、無降雨状態が3時間以上続いた時を、打ち切りとしている。ただし、地域により中断時間の取り扱いが異なる。

・ 当日雨量と3日先行降雨量



● 国土交通省における実施例

・ 鉄道、道路と同じ考え方  
連続雨量（先行雨量）と時間雨量に基づく

警戒体制を取る場合の基準雨量例

	前日までの連続雨量が100 mm以上あった場合	前日までの連続雨量が40～100 mmあった場合	前日までの降雨がない場合
第1警戒体制	前日の日雨量が50 mmを越えたとき	前日の日雨量が80 mmを越えたとき	前日の日雨量が100 mmを越えたとき
第2警戒体制	当日の日雨量が50 mmをこえ、時間雨量30mm程度の強雨が降り始めたとき	当日の日雨量が80 mmをこえ、時間雨量30mm程度の強雨が降り始めたとき	当日の日雨量が100 mmをこえ、時間雨量30mm程度の強雨が降り始めたとき

➤ 新しい雨量指数 - 土壌雨量指数 -

気象庁での検討  
10年間データの分析の結果、「土壌雨量指数」が最も土砂災害発生との相関が高い

平成20年5月28日から気象庁の大雨警報・注意報基準値が「時間雨量と連続雨量」から「時間雨量と土壌雨量指数」に変更

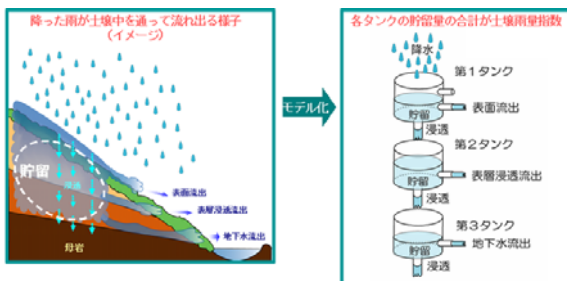
土壌雨量指数を活用して「土砂災害警戒情報」\*）が平成17年より運用されている。（北海道はH20年3月から）

その他：  
➤ 近年、局地的な集中豪雨が増加し、土砂災害が頻発している  
➤ 温暖化現象とおもわれる想定外の降雨量が見られる など

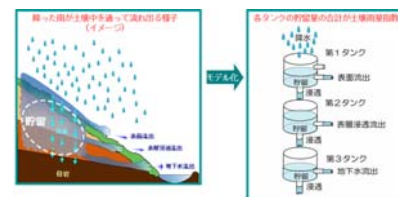
\*）土石流危険渓流、急傾斜地崩壊危険箇所周辺の住民への避難を促す情報として市町村長が発令する避難勧告等に利用される

土壌雨量指数の概念

「タンクモデル」を用いた土壌雨量指数の計算



降った雨が土壌中を通して流れ出る様子を孔の開いたタンクを用いてモデル化



● 土壌雨量指数：各タンクに残っている水分量（貯留量）の合計  
→ 土壌中の水分量に相当

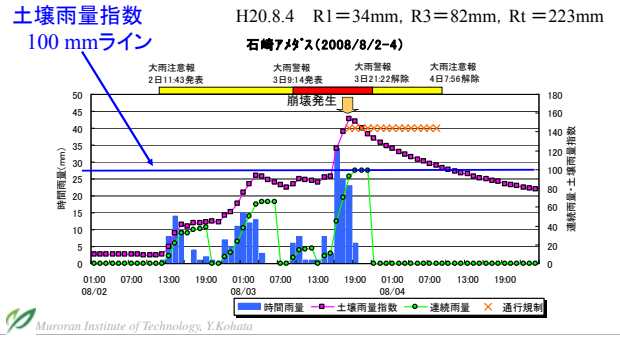
● 土壌雨量指数を利用する「タンクモデル」は、土砂災害発生の危険性把握を目的としたもので、地中に貯まった雨水を正確に推計するものではない

## 「タンクモデル」による土壌雨量指数の留意点

- ① 全国一律のパラメータを用いており、個々の傾斜地における植生、地質、風化等を考慮していない
- ② 比較的表層の地中をモデル化したものである  
従って、深層崩壊や大規模な地滑りなどにつながるような地中深い状況を対象としたものではない

## 崩壊発生時の雨量データ

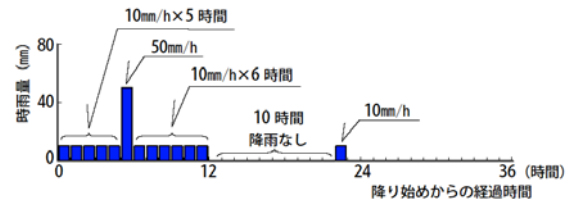
崩壊発生時の雨量データと土壌雨量指数に相関性あり  
(連続雨量ではなく土壌雨量指数の方が有効)



## 実効雨量

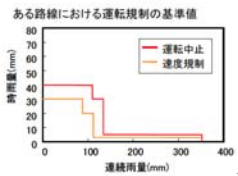
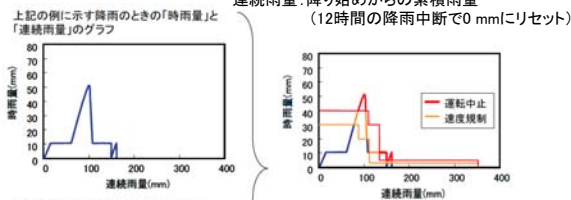
- 2008年6月より、JR東日本で導入した在来線の降雨時における列車の運転規制に用いる雨量指数
- 降った雨が時間の経過とともに浸透・流出することで変化する土中の水分に相当する量
- 線路及びその周辺での土砂災害との関連性がよい
- 線路及びその周辺での地質、地形及び過去の災害履歴を反映して、3種類の「実効雨量」を設定

ある線路において、下図のような雨が降った場合を一例として、現在の「時雨量」と「連続雨量」による運転規制と新しい「実効雨量」による運転規制の比較



## 従来の運転規制：時雨量と連続雨量の組み合わせ

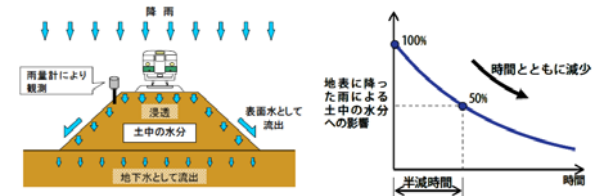
時雨量：1時間に降った雨量  
連続雨量：降り始めからの累積雨量  
(12時間の降雨中断で0mmにリセット)



連続雨量(mm)	時雨量(mm)
0以上 80未満	30以上
80以上 110未満	20以上
110以上 350未満	3以上
350以上	0以上
0以上 110未満	40以上
110以上 130未満	30以上
130以上 350未満	5以上
350以上	0以上

## 「実効雨量」による運転規制

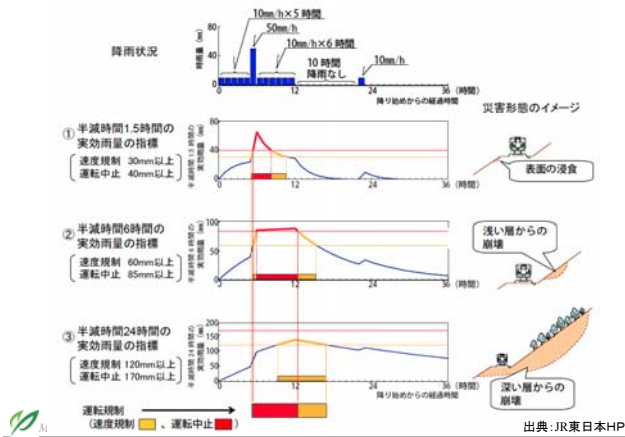
○「実効雨量」の概念



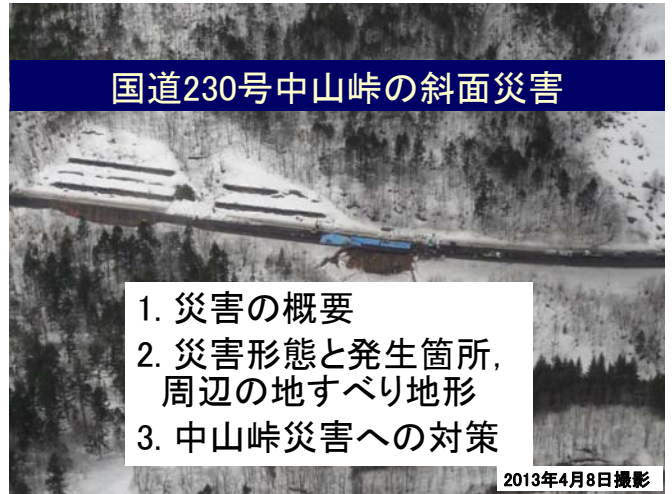
「実効雨量」は土中への降雨の新党、表面水としての流出、地下水としての流出を反映した指標  
→ 土中の水分の状況を表している



3つの指標のいずれかが基準値を上回ったときに運転規制を実施



## 国道230号中山峠の斜面災害



1. 災害の概要
2. 災害形態と発生箇所、周辺の地すべり地形
3. 中山峠災害への対策

2013年4月8日撮影

## 1. 災害の概要

札幌市と道南を結ぶ一般国道230号では、2年連続で融雪期に道路斜面災害が発生し、社会経済活動に大きな影響を与えた。



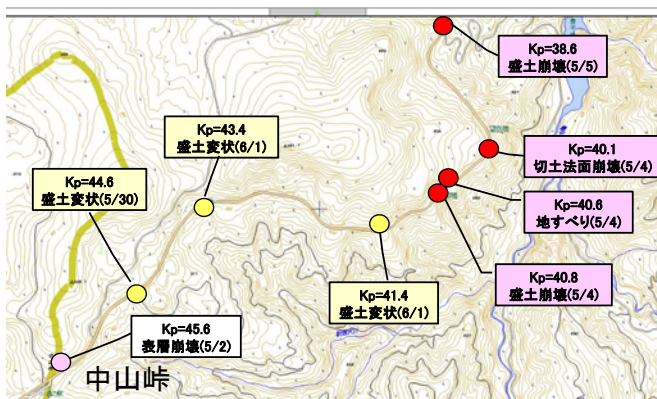
**24年度**  
**5月4～23日：全面通行止(20日間)**  
**5月23～26日：片側交互通行**  
 急激な融雪+大雨(累計雨量70mm)による地下水位の上昇により発生

**25年度**  
**4月7～12日：全面通行止(6日間)**  
**4月12～25日：片側交互通行(夜間通行止)**  
 急激な融雪+大雨(累計雨量82mm)による地下水位の上昇により発生

Muroran Institute of Technology, Y.Kohata



## 災害形態と発生箇所の詳細(H24)



Muroran Institute of Technology, Y.Kohata

## 災害箇所周辺の地質

新第三紀の安山岩や凝灰岩。熱水変質作用等を受け、岩盤が脆弱化。

KP34.4 盛土崩壊  
 地質：中新世角礫凝灰岩、凝灰岩

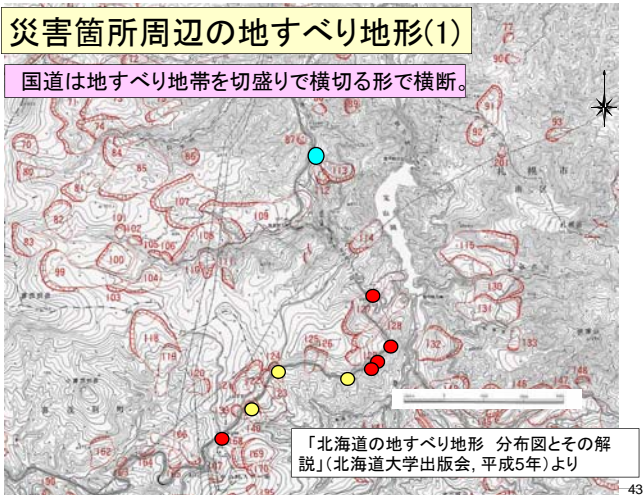
KP40.6 地すべり  
 地質：鮮新世普通輝石紫蘇輝石安山岩

KP40.8 盛土崩壊  
 地質：KP40.6に同じ

5万分の1地質図幅「定山溪」(地質調査所, 昭和28年)より

### 災害箇所周辺の地すべり地形(1)

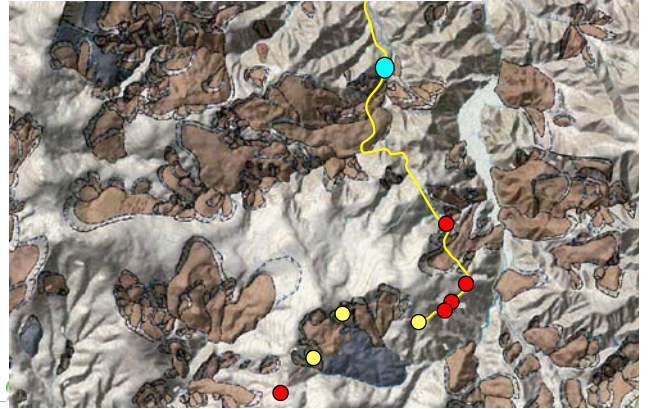
国道は地すべり地帯を切盛りで横切る形で横断。



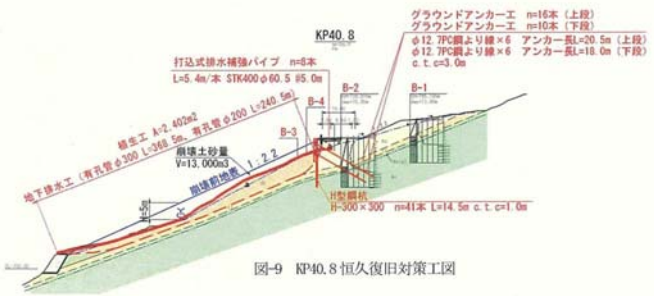
43

### 災害箇所周辺の地すべり地形(2)

地すべり地形分布図データベース(防災科学技術研究所)より

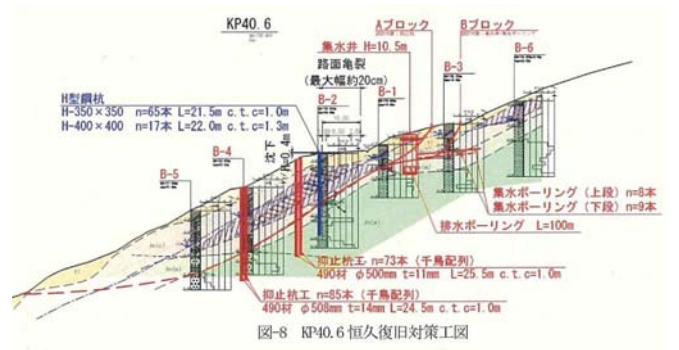


### 24年度



佐野ほか(2013):第56回(平成24年度)北海道開発局技術研究発表会)より引用

### 24年度盛土崩壊箇所



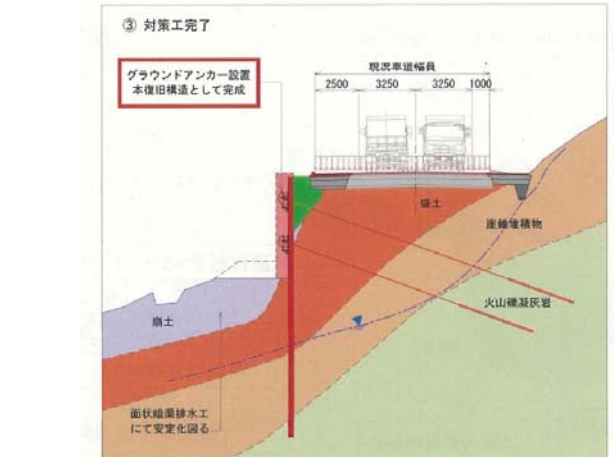
佐野ほか(2013):第56回(平成24年度)北海道開発局技術研究発表会)より引用



25年度

KP=38.6:盛土崩壊

2013年4月8日撮影



北海道開発局札幌開発建設部(2013)第2回国道230号中山峠災害対策検討委員会資料



2013年8月6日撮影

**【点検・維持管理】④融雪期における日常巡回の強化**

新たな視点:④融雪期における日常巡回の強化

- 災害兆候となる変状の早期かつ確実な発見に向けた点検頻度・点検手法の強化

対応策[1] 融雪期におけるパトロール頻度の強化

- 道路巡回の頻度強化(1日1回:H24年度から実施)を継続
- 路面・路肩部における軽微な変状発生時の早期発見・早期補修による災害発生防止

時期	融雪期の点検方法	融雪期	融雪期	融雪期	備考
H24年5月被災後	①定期点検(常時時、地震時等)	■	■	■	
	②融雪期における道路巡回強化(1回/1日)	■	■	■	1回/2日
	③融雪期における定期点検(1回/週)	■	■	■	
	④緊急点検実施に向けた管理基準の設定	■	■	■	
H25年4月被災後	①定期点検(常時時、地震時等)	■	■	■	
	②融雪期における道路巡回強化(1回/1日)	■	■	■	1回/2日
	③融雪期における定期点検(1回/週)	■	■	■	
	④融雪期における管理基準の設定(換算雨量の暫定運用)	■	■	■	12箇所追加
	⑤融雪期における積雪深度の発見確認	■	■	■	対策状況やデータ蓄積により基準値や運用見直し
	⑥道路クラックの早期発見と変状の発見計画	■	■	■	実施計画による確認
	⑦積雪による調査不可能箇所でのラコンパリの活用	■	■	■	
	⑧緊急点検実施に向けた管理基準の設定	■	■	■	※適宜実施

青字:H24被災以降に追加(強化)した項目 赤字:H25被災以降に追加(強化)した項目

北海道開発局札幌開発建設部(2013)第2回国道230号中山峠災害対策検討委員会資料

5-3. 維持管理 参考:換算雨量による管理基準

【参考:換算雨量(降雪・融雪)の算定方法】

【検討条件】

- ・気象データ:被災地近傍のテレメータ東中山・無意根(H11年~H25年)
- ・データ期間:各年の3月1日~積雪が無くなるまで
- ・融雪量を積雪換算雨量とし、以下の式で算出する。  
(降雨が無く積雪深が増加している場合は、0mmとして算出)

$$\text{積雪換算雨量} = \text{現在積雪の減少量} \times \text{雪密度}$$

- ・積雪密度:250, 350, 500(kg/m<sup>3</sup>)の3ケースで検討(下表①参照)  
『しまり雪』の密度250~500[kg/m<sup>3</sup>]のうち、道路設計時に使用している350[kg/m<sup>3</sup>]を採用(≒中間値)

【① 雪質と大まかな密度】

雪質	密度(kg/m <sup>3</sup> )
新雪	50~150
ふしまり雪	150~250
しまり雪	250~350
ざらめ雪	350~500
こしもざらめ雪	300前後

- ・総換算雨量:以下の式で算出

$$\text{総換算雨量} = \text{連続雨量} + \text{積雪換算雨量}$$

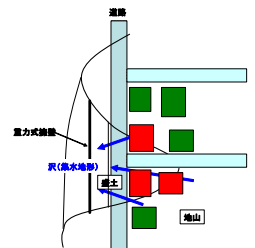
出典:日本電気学舎『積雪の分類と計測(1967)』

北海道開発局札幌開発建設部(2013)第2回国道230号中山峠災害対策検討委員会資料

▶斜面災害への対策(盛土を中心として)

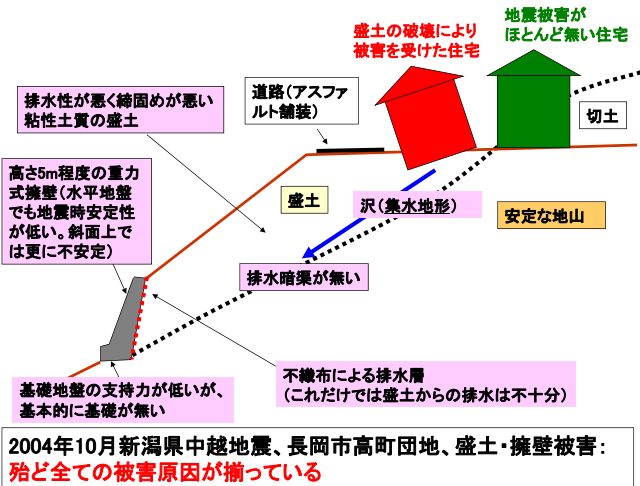


2004年10月新潟県中越地震  
■長岡市高町団地



東京理科大 龍岡文夫教授 提供

Miurou Institute of Technology, Y.Kohata



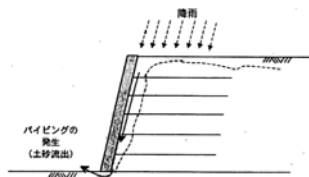
### 盛土の地震被害からの教訓

地下水のある盛土は地震に弱い！

重力式擁壁は地震に弱い！

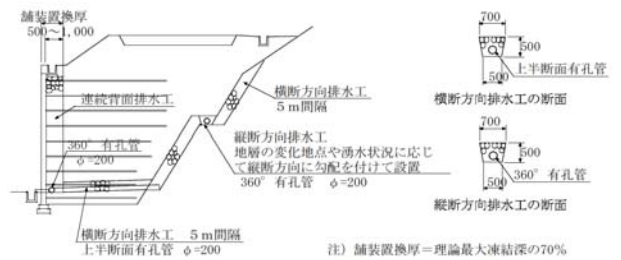
地震以外にも・・・

雨水や湧水の盛土内への浸入は危険！

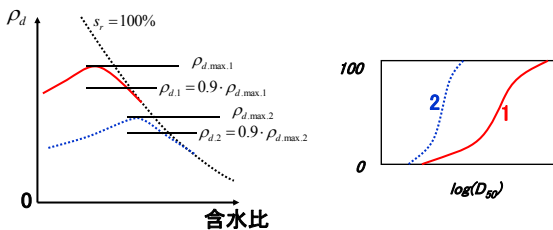


- 降雨による洗掘や土砂流出
- ・表面排水溝などの排水対策が最も有効
  - ・壁面がパネル形式の場合には、吸出し防止シートを敷設

### 標準的な排水工の例

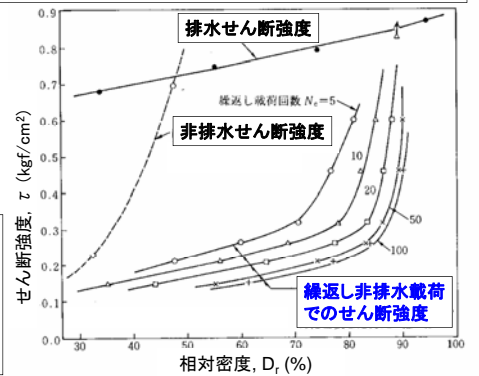


### 現在の設計、締固め度で管理



1. 最低締固め度を規定: 例 90% (良質の盛土材では低すぎる)
  2. 締固め度～せん断強度関係を参照しない場合が多い。締固め度が一人歩きする傾向！
- 例) 同一の締固め度に対して、良配合大粒径試料1の方が貧配合小粒径試料2よりも乾燥密度が大きくせん断強度が高い。この差は、積極的には考慮されていない。

等方圧密拘束圧= 1.0 kgf/cm<sup>2</sup>した中空供試体のねじりせん断試験による豊清砂の排水・非排水単調載荷せん断強度と非排水繰返しせん断強度の比較

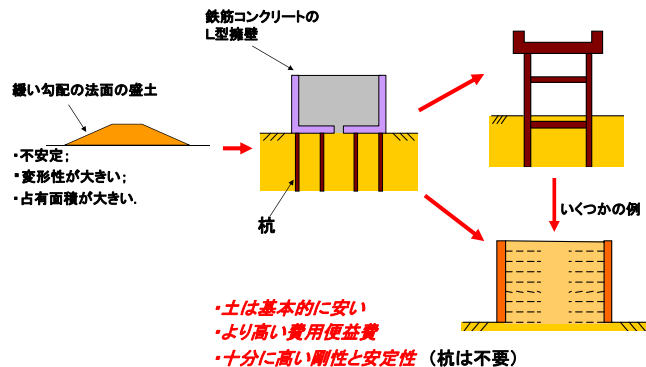


繰返し非排水載荷でのせん断強度に対する締固め度の影響

90%を超えると非常に大きい

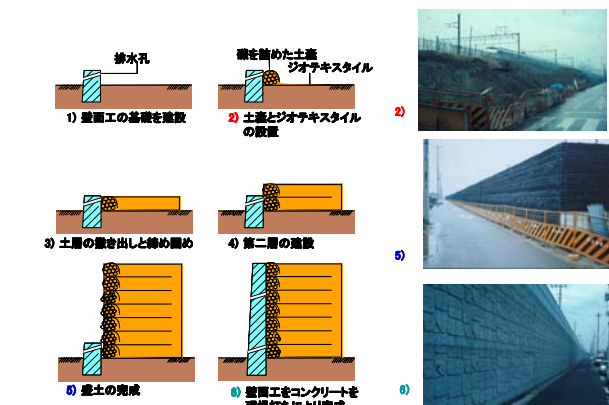
↑ 締固め度 90%

## 道路や鉄道における高架構造物の変遷



Muroran Institute of Technology, Y.Kohata

東京理科大 龍岡文夫教授 提供

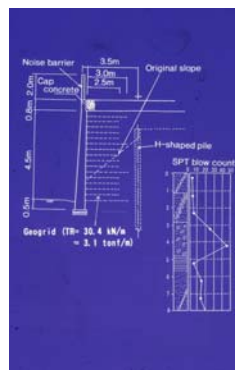


剛な一体壁面工を持つジオテキスタイル補強土擁壁の段階施工

Muroran Institute of Technology, Y.Kohata

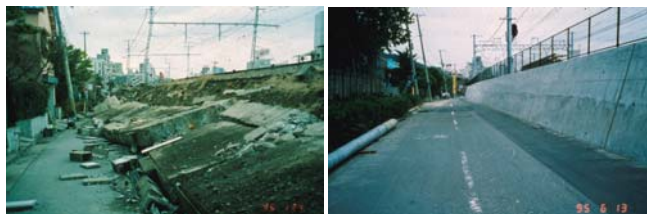
東京理科大 龍岡文夫教授 提供

## JR神戸線、東灘区ジオテキスタイル補強土擁壁 (1992年建設)



Muroran Institute of Technology, Y.Kohata

東京理科大 龍岡文夫教授 提供



1995年阪神淡路大地震： JR神戸線摂津本山～住吉間の盛土山側の崩壊したのり面のジオテキスタイル補強土擁壁と太径地山補強土工法による強化復旧 (1995年6月13日内村太郎氏撮影)

Muroran Institute of Technology, Y.Kohata

## JR神戸線、東灘区(完成直後)



Muroran Institute of Technology, Y.Kohata

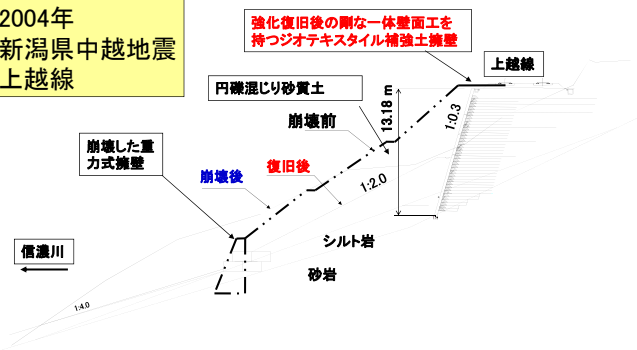
東京理科大 龍岡文夫教授 提供

## JR神戸線、東灘区(震災直後)



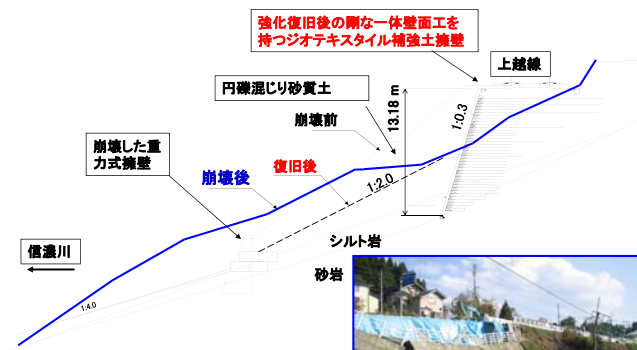
東京理科大 龍岡文夫教授 提供

2004年  
新潟県中越地震  
上越線

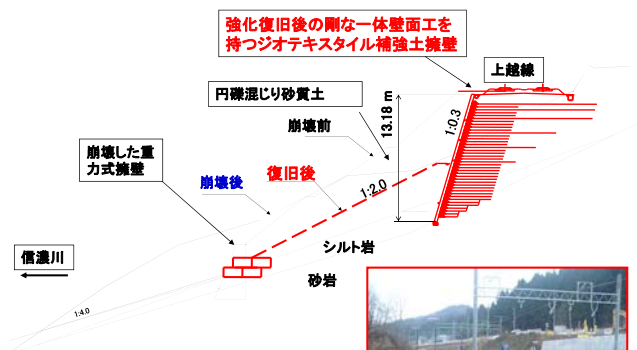


補強土工法による強化復旧:  
盛土復旧断面は、遥に小さい  
・より経済的  
・より短い復旧期間(20日間)

東京理科大 龍岡文夫教授 提供



補強土工法による強化復旧:  
盛土復旧断面は、遥に小さい  
・より経済的  
・より短い復旧期間(20日間)



補強土工法による強化復旧:  
盛土復旧断面は、遥に小さい  
・より経済的  
・より短い復旧期間(20日間)



## ジオテキスタイルを用いた工法 補強土壁工法 → 強化復旧に使える！

- ・復旧は原状復旧と同義ではない！
- ・崩壊による社会的影響が甚大な場合や高盛土など復旧が困難な場合などでは選択的に
  - 1)適切な排水処理と十分な締固めを行い、
  - 2)補強土工法など最新工法を採用して適切な建設コストで
  - 3)原状よりも構造的に強化した上で、
  - 4)迅速に機能復旧に務める必要がある。

