

降雨特性に応じた道路通行規制のあり方に関する研究

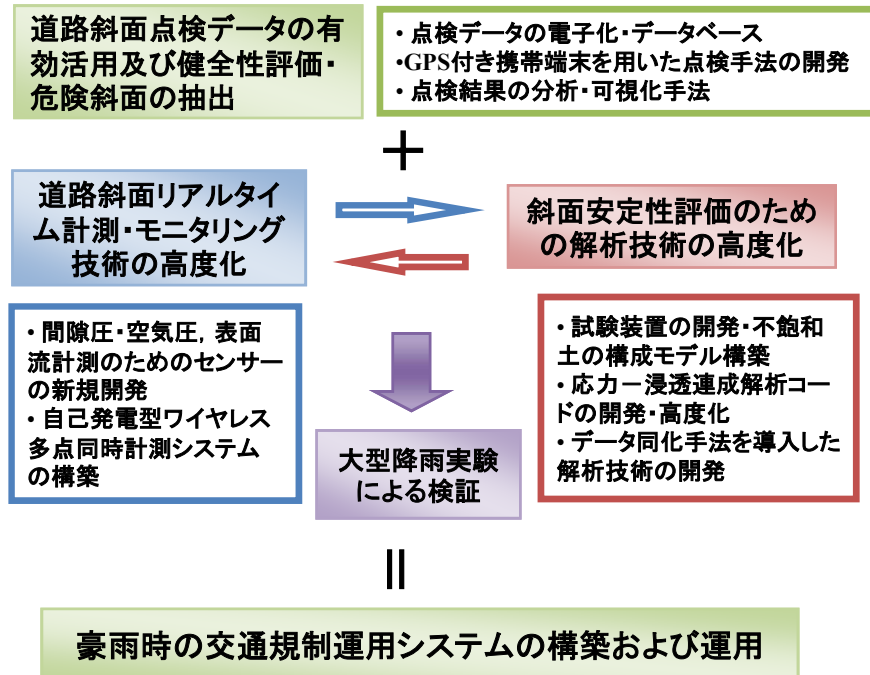
プロジェクトリーダー 小山倫史 関西大学・准教授

■ 研究の背景・目的

豪雨時における国道を対象とした道路通行規制の発令には、**事前通行規制区間**において**連続した時間雨量の累積を基準**としているため、**降雨特性に対応したきめ細やかな事前通行規制**ができないのが現状である。道路斜面は**多種多様な地形、地質構造、土質・岩質、地下水**を有しており、斜面への**豪雨時の雨水浸透・崩壊メカニズム**を考慮することなく、**降雨量の情報のみで、斜面安定性・崩壊危険度の評価・予測は困難**であり、交通規制を発令することは可能であっても、降雨終了後の交通規制の解除を行うことはできない。そこで、**降雨特性（降雨強度・降雨波形など）**や斜面の**地形・地質**などに応じた、「**きめ細やかで安全かつ最小限の事前通行規制**」を行うため、降雨特性と斜面安定性の関係を整理・分析・評価するなど、**降雨特性に応じた道路通行規制（発令から解除まで）**に関する研究を行う。

■ 研究の内容 ①

安定度調査表に基づいた道路斜面点検データの有効活用（点検記録の電子化を含めて）による**健全性評価および危険斜面の抽出**し、崩壊危険度の高い道路斜面に対して、**現場計測・モニタリング**（正確な斜面の現況把握）、**高精度な降雨観測情報（Xバンドレーダーによる高精度な降雨外力の把握）**および**数値解析（斜面安定性評価）**を組み合わせた統合的な**道路斜面の崩壊・危険度予測**を行うことで、**豪雨時の交通規制運用システム（規制発令から解除まで）**を構築する。



降雨特性に応じた道路通行規制のあり方に関する研究 (研究内容・スケジュール・研究体制)

■ 研究の内容 ②

具体的には、以下の項目について詳細な検討を行う。

- 交通規制等に関する雨量基準の事例(道路管理者、鉄道管理者など)の整理
- 斜面安定度調査表に基づいた斜面点検データの分析および危険斜面の抽出
- 過去の降雨特性と通行規制(斜面崩壊を含む)のデータ整理および分析
- 降雨特性と斜面安定度の検討(室内実験, 大型降雨実験, 数値解析による)
- 降雨特性(降雨強度・降雨波形)に応じた通行規制のあり方の検討
- 雨量通行規制運用システムの構築・試行運用および改善点の検討

■ 研究期間

平成25年度～平成27年度

■ 参加予定メンバー(体制)

地盤材料の要素試験, 現場計測・モニタリング, 数値解析を専門とする若手研究者・実務者を中心に構成された産・官・学連携かつ横断的なグループで研究開発にあたる。

顧問 沖村 孝 神戸大学名誉教授((一財)建設工学研究所)

学 関西大学, 京都大学, 大阪大学, 立命館大学, 岡山大学, 鹿児島大学, 横浜国立大学 + 追加メンバー検討中

産 (株)建設技術研究所, (株)日本工営, (株)アーステック東洋, 計測技研(株), 水文技術コンサルタント(株), 日鐵住金建材, 環境総合テクノス + 追加メンバー検討中

官 国土交通省近畿地方整備局(近畿技術事務所, 兵庫国道事務所), 防災科学技術研究所

	H25	H26	H27
雨量通行規制に関する事例の整理	■		
斜面点検データの分析・危険斜面の抽出	■		
降雨特性・通行規制のデータ整理	■		
降雨特性と斜面安定度の検討	■	■	
降雨特性に応じた通行規制の在り方の検討		■	■
雨量通行規制運用システムの構築および試行運用			■

背景

国道の異常気象時通行規制

豪雨時に崩壊の危険性が高まると
想定された区間を通行規制区間と
定め、豪雨時に通行を規制する



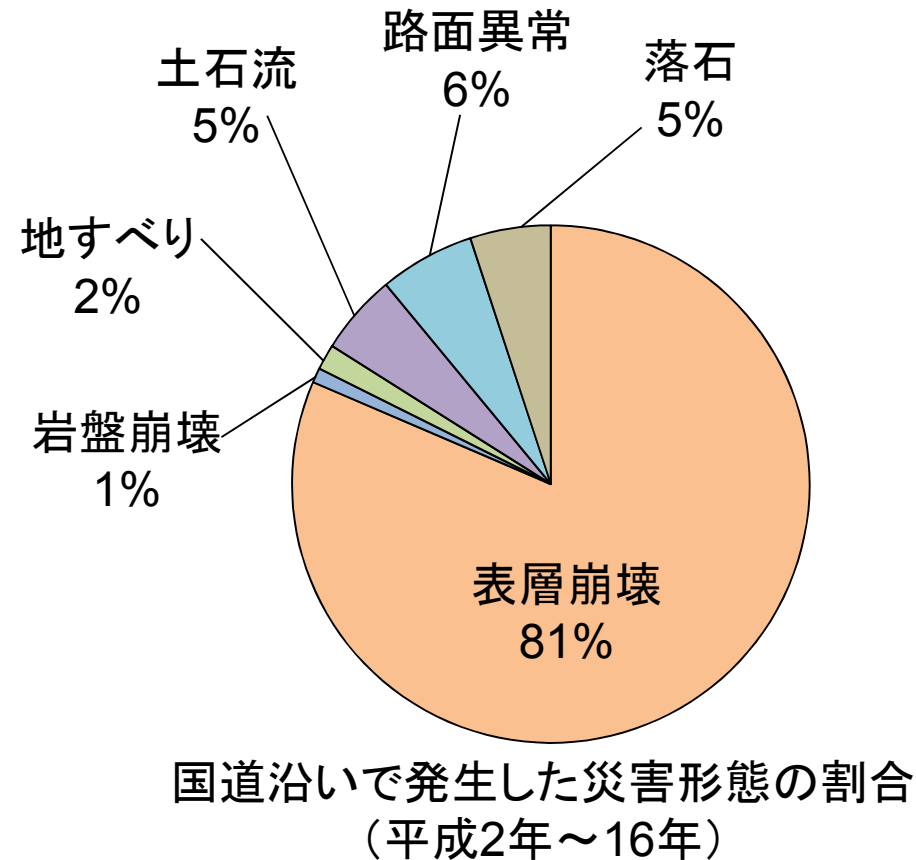
土砂災害による被害の影響を軽減

(人命の確保, 経済的影響の軽減など)

現状では

...

- 発令・・・雨量計による一律の「**累積雨量**」が規制開始のパラメータ
- 解除・・・2mm/hour以下の降雨が**3時間以上**継続した場合に解除



背景

- 危険時刻の判断が当該地域の過去の**災害経験**や降雨の**超過確率**によって判断されている

現在の問題点

- ①ある地域を対象とした大まかな判断には有用だが、**個別斜面の危険度予測には不十分**
- ②**規制の空振り率**（通行止めにしたにも関わらず、災害が発生しなかった割合）が**高い**
- ③**解除のタイミング**についての検討が不十分



個別斜面の危険度予測には

地形や地質、降雨の特性の情報を加味した雨量通行規制基準が必要

雨量通行規制の発令・解除の 判断支援システムの構築

≪従来≫ 降雨量の情報のみ(例えば, **連続雨量:160mm(発令)**,
無降雨継続時間:3時間(解除)など)

斜面の特徴



+地質・地形
+雨水浸透挙動 など

数値解析と現場計測・モニタリングを組み合わせた統合的なシステム

数値解析: 崩壊予測, シナリオの分析(「想定外を想像する!」)

外力, 境界条件



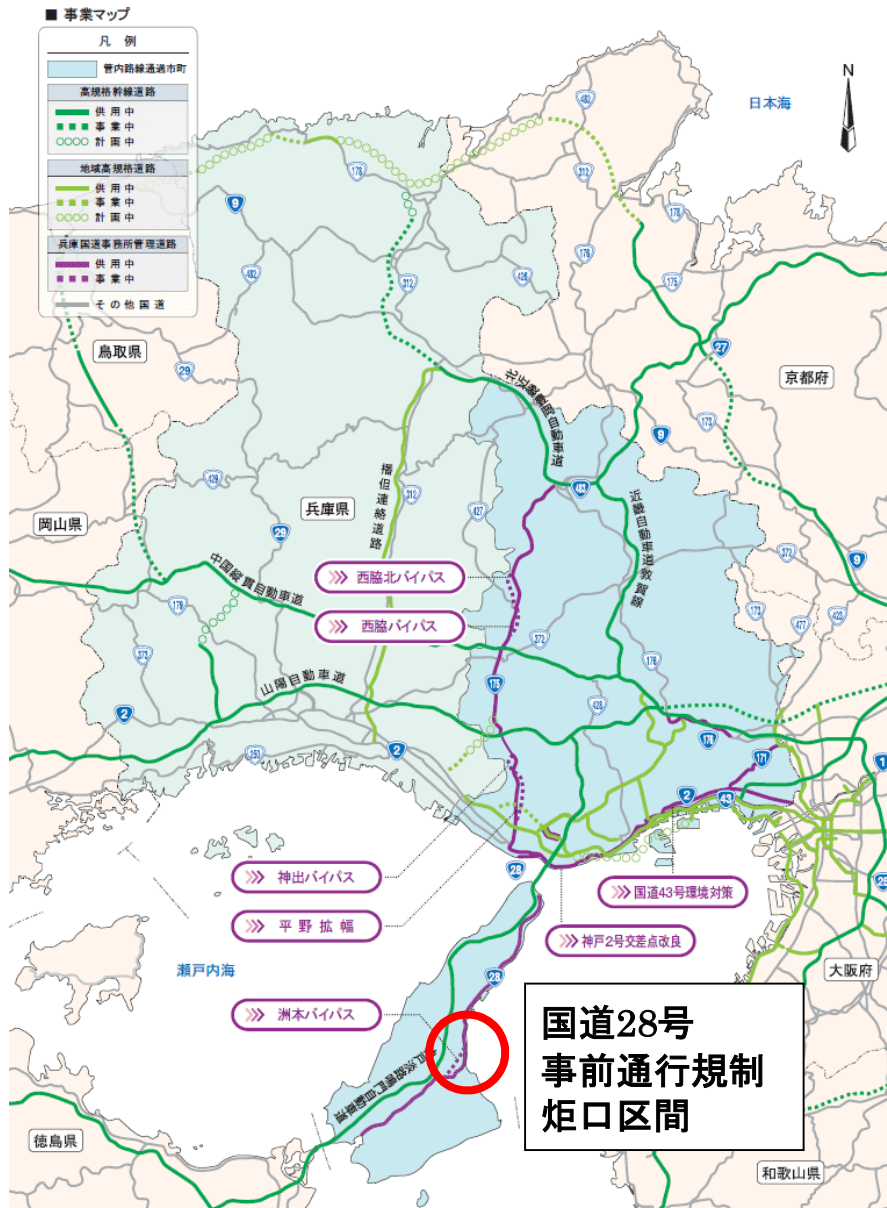
マッチング ⇒ モデルの高精度化

現場計測・モニタリング: 斜面の現状把握

予測精度の向上には, **精緻な解析モデル**(地質・物性, 構成モデルなど)
と**高精度な観測データ**(外力)が必要不可欠!

⇒「どの程度精緻なモデルを作るか」は斜面の重要度・危険度に応じて決定

対象区間：国道28号線「炬口区間」



路線	規制区間	延長 (km)	規制条件(通行止)	
			気象等基準値	気象等観測所
176号	西宮市塩瀬町名塩 ～ 西宮市塩瀬町生瀬	2.4	連続降雨量 160mm	名塩テレメーター
28号	① 兵庫県淡路市塩尾 ～ 洲本市安乎町平安浦	1.8	連続降雨量 160mm	塩尾テレメーター
	② 洲本市中川原町厚浜 ～ 洲本市炬口	2.9	連続降雨量 160mm	炬口テレメーター



国道28号線「炬口区間」の概要

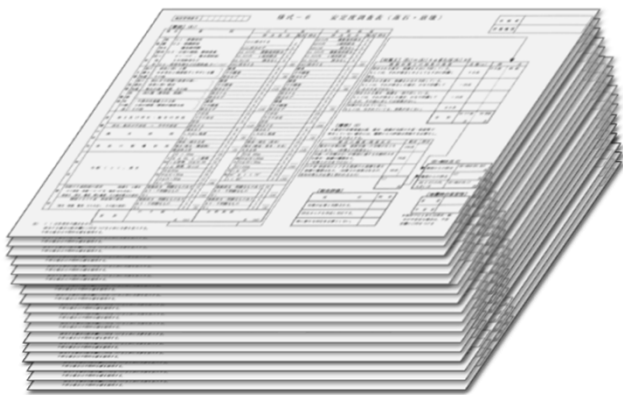


年		厚浜～炬口間(炬口区間)		
		区間	基準雨量	防災対象
1969	昭和44年	事前通行規制区間制定 淡路町～南淡町 延長50km	120mm	落石・洗掘
1970	昭和45年	淡路町～炬口 延長30.5km	160mm	
1971	昭和46年	現行基準160mm 規制区間2.9km	140mm	
1972	昭和47年		160mm (S46年点検により変更)	
1973 ～ 2010	昭和48年 ～ 平成22年			

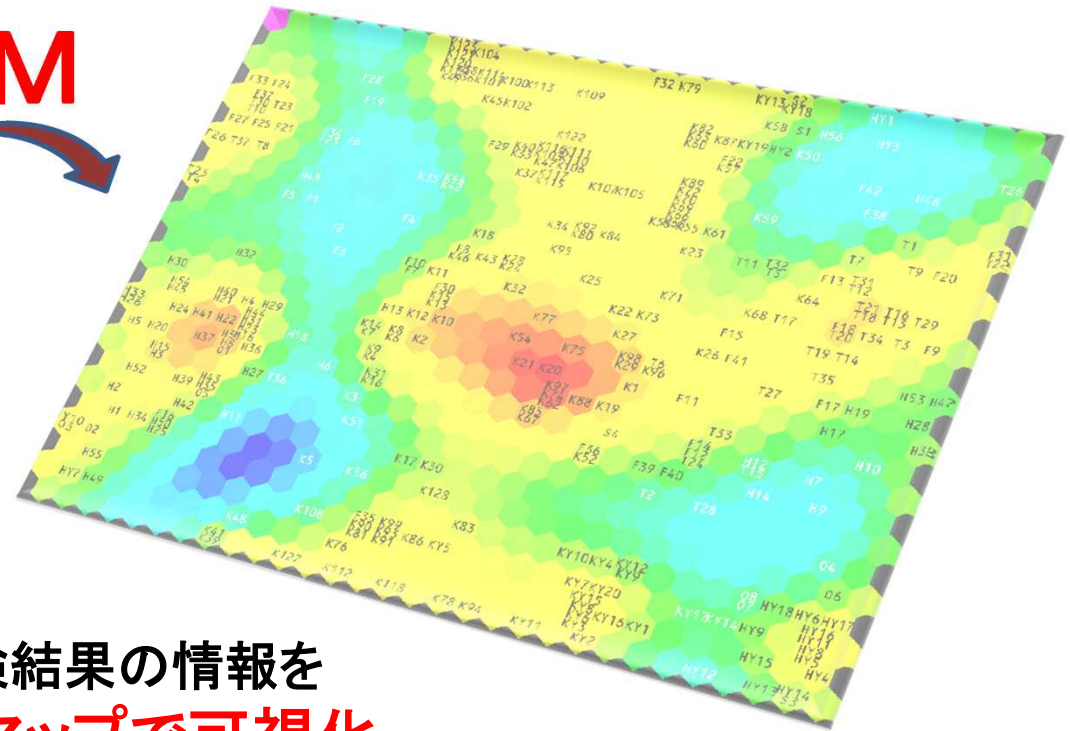
SOMを用いた道路のり面のクラスタリング

安定度調査表

膨大な数の点検結果



SOM



全点検結果の情報を 1枚のマップで可視化

- のり面ごとに作成
- 地質調査の専門家によって作成
- 点検項目ごとに重みづけ
- のり面の健全度を得点で表示

- のり面の特徴ごとに分類
- 全のり面の情報を1枚のマップで可視化
- 各点検項目の寄与度がわかる
⇒ “点検項目の見直し”
- 道路管理者が各種意思決定に利用

使用データ

国土交通省近畿地方整備局，兵庫国道事務所

安定度調査表

国道28号線

「落石・崩壊」を点検対象とする斜面の点検結果

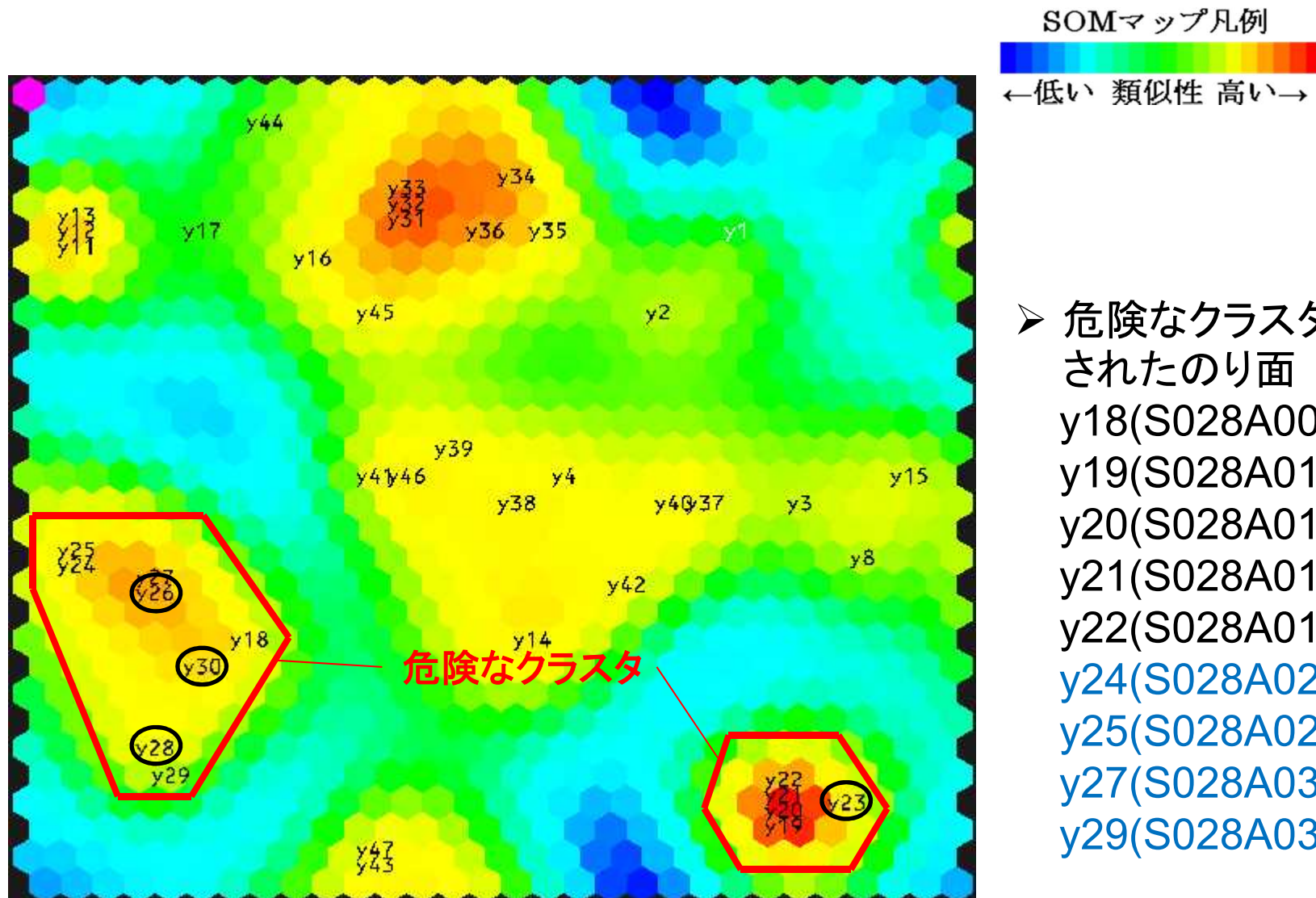
- 平成8年度の安定度調査表
- 平成19年度の安定度調査表

計 30箇所

健全性(危険度)の基準 (過去の崩壊箇所 全4箇所)

過去の崩壊箇所	距離標(kp)	原因
S028A023	41.2	昭和49年の台風8号
S028A028	41.95	平成16年の台風23号
S028A034	42.8	同上
S028A040	43.3	同上

全体マップ(斜面)



➤ 危険なクラスターに分類されたのり面

y18(S028A006)

y19(S028A010)

y20(S028A011)

y21(S028A014)

y22(S028A015)

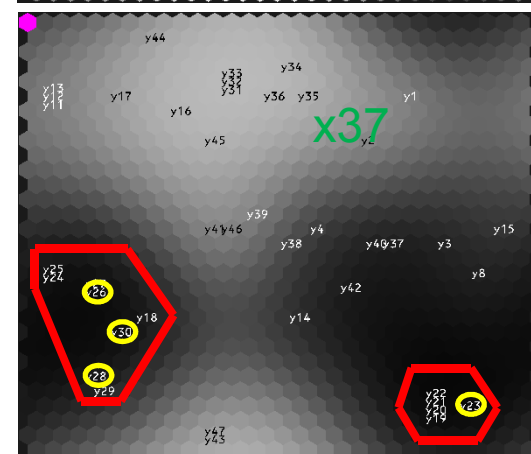
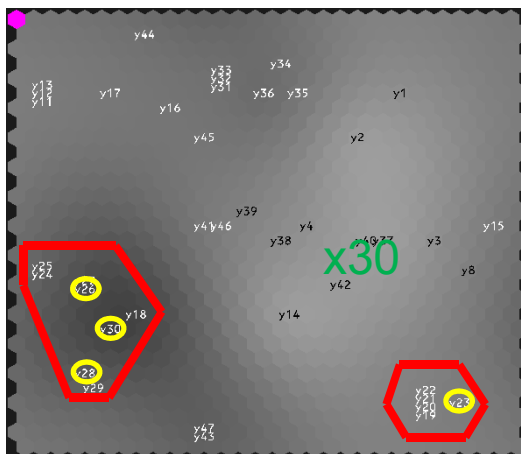
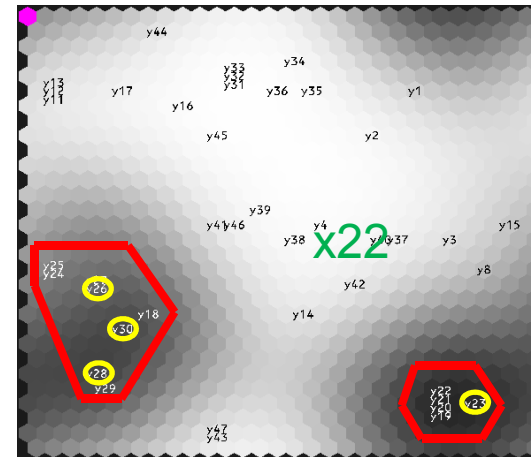
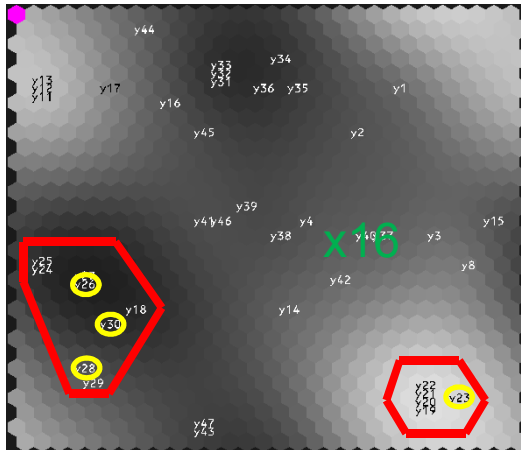
y24(S028A024)

y25(S028A025)

y27(S028A033)

y29(S028A039)

要素マップ(斜面)



危険なクラスタ

X16: 崖錐地形 (■ 該当する, □ 該当せず)

X22: 崩壊性の構造 (不透水性基盤上の土砂上部が硬質・脚部が脆弱な岩など)

(■ 顕著, □ 該当せず)

X30: 隣接するのり面・斜面等の変状 (■ 複数該当, □ なし)

X37: 地質区分 (■ 中・古生層, □ 段丘堆積物, 洪積層)

モデル調査斜面の選定



1. 検討結果から危険箇所と判断されている。
2. 近年の被災履歴から、**20年以内に5回程度出水や土砂流出が確認**され、**対象箇所の周辺は崩壊箇所**となっている。
3. 流域面積が、河川部を除き、最も大きい溪流の流末に位置する。
4. 地層概要として、**上層から表層は強風化花崗岩および花崗岩**からなると想定され、層構成および層厚は概ね区間内で類似している(代表的な斜面)と判断できる。

調査対象候補地の現地踏査状況(1)



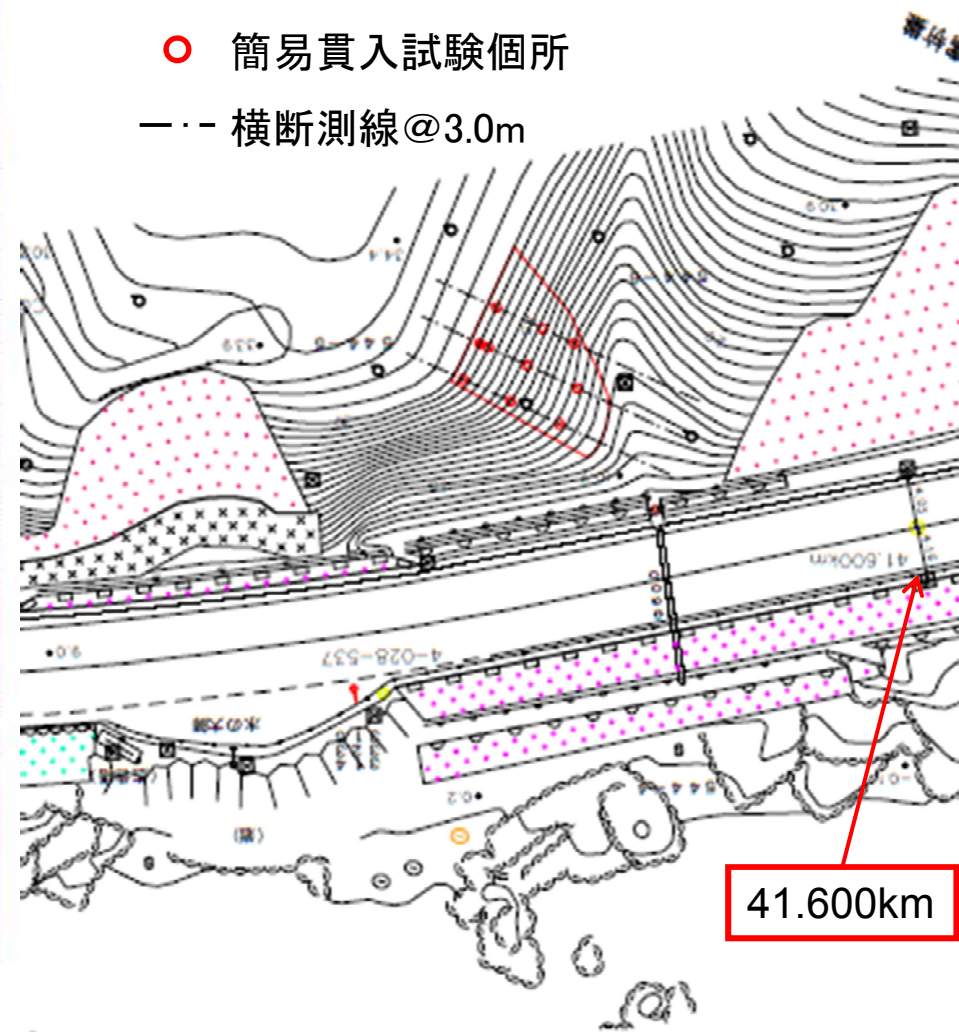
P-3 調査対象箇所の斜面状況
急傾斜を呈するが斜面下部はやや緩傾斜



P-4 調査対象箇所直上の尾根部
表層部は風化進行し土砂状

調査対象候補地の現地踏査状況(2)

- 調査対象範囲
- ボーリング調査箇所
- 簡易貫入試験箇所
- 横断測線@3.0m



土質調査結果

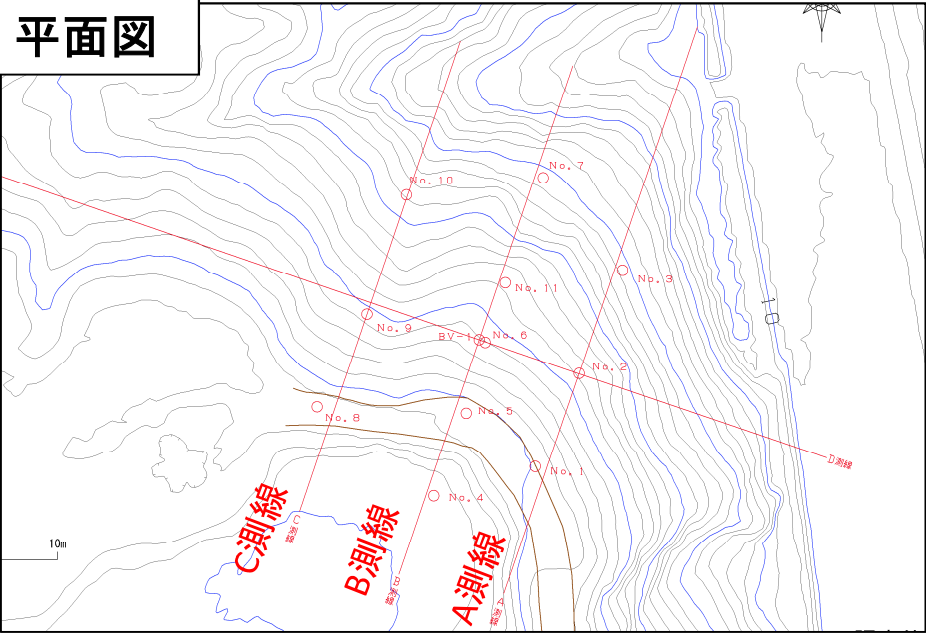
調査概要

ボーリング調査 1箇所
簡易動的コーン 10か所
(3測線)

調査箇所

41.600付近

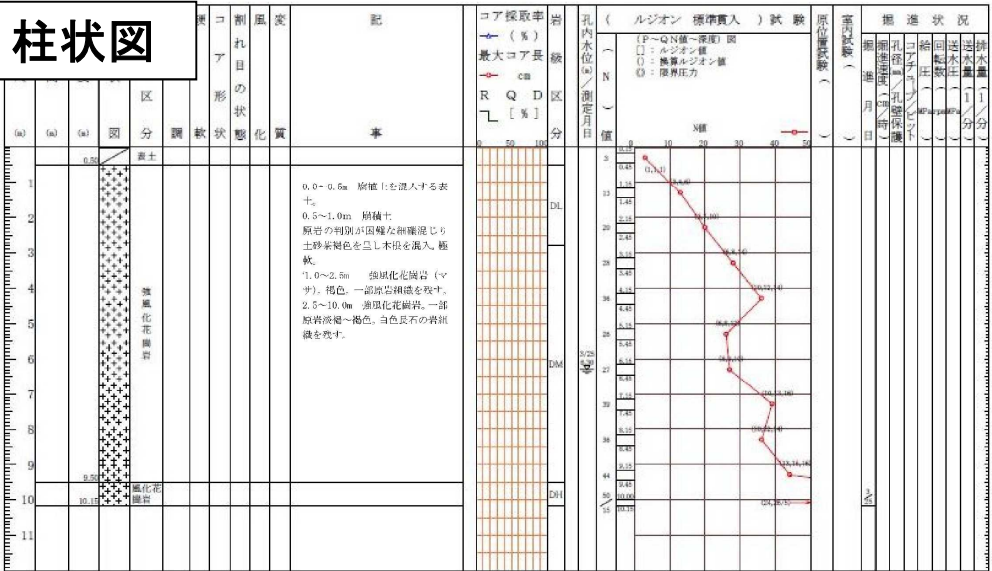
平面図



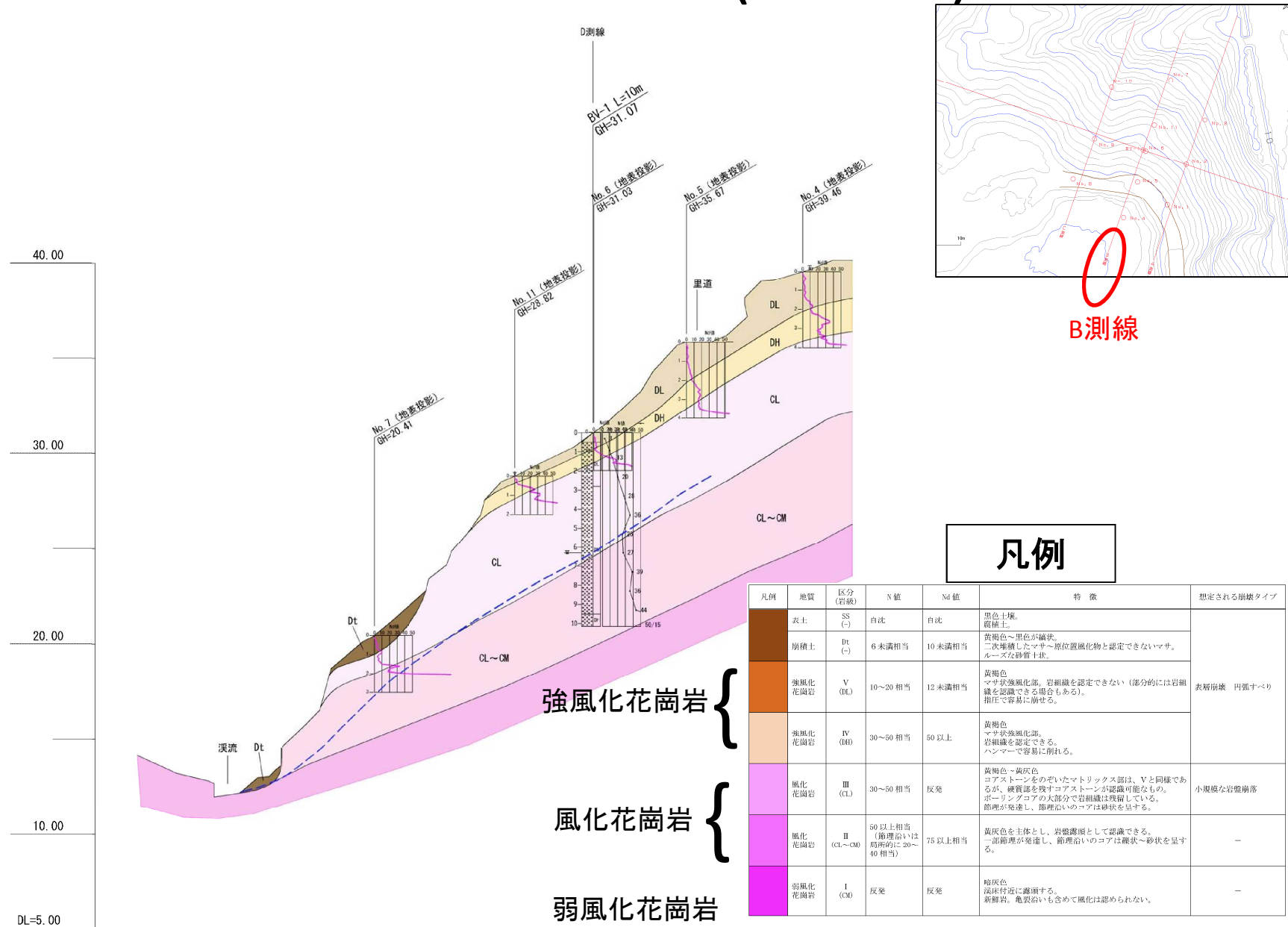
コア写真



柱状図



土質調査結果(B測線)



土質調査結果



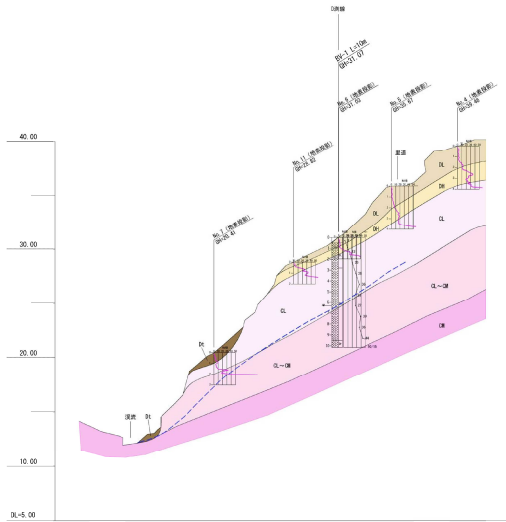
表土
湿潤である

強風化花崗岩
指圧で容易に崩せる。

強風化花崗岩
ハンマーで容易に削れる。

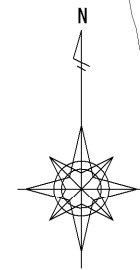
崩積土
写真では表層を覆う
崖錐堆積物

凡例	地質	区分 (岩種)	N値	Q値	特 徴	想定される崩壊タイプ
	表土	SS (-)	自決	自決	黒色土壌。 腐植土。	表層崩壊 円弧すべり
	崩積土	Dt (-)	6未満相当	10未満相当	黄褐色～黒色が腐植。 二次堆積したマサ～原位置風化物と認定できないマサ。 ルーズな砂質土状。	
	強風化 花崗岩	V (DL)	10～20相当	12未満相当	黄褐色 マサ状強風化部。岩組織を認定できない(部分的には岩組織を認識できる場合もある)。 指圧で容易に崩せる。	
	強風化 花崗岩	IV (DL)	30～50相当	50以上	黄褐色 マサ状強風化部。 岩組織を認定できる。 ハンマーで容易に削れる。	小規模な岩盤崩落
	風化 花崗岩	III (CL)	30～50相当	反発	黄褐色～黄灰色 コアストーンをのぞいたマトリックス部は、Vと同様であるが、横貫面を残すコアストーンが認識可能なもの。 ボーリングコアの大部分で岩組織は残存している。 節理が発達し、節理面は粗面を呈する。	
	風化 花崗岩	II (CL～CH)	50以上相当 (節理面は粗面的に20～40相当)	75以上相当	黄灰色を主体とし、岩盤露頭として認識できる。 一部節理が発達し、節理面は粗面を呈する。	—
	弱風化 花崗岩	I (CH)	反発	反発	黄灰色 浸食付着に露頭する。 新鮮部。亀裂面も含めて風化は認められない。	—



*撮影の前日に降雨あり。

計測機器設置位置



水位計 ... 1箇所(ボーリング箇所)

土壌水分計...解析対象断面
の最下流部に設置

テンシオメータ...

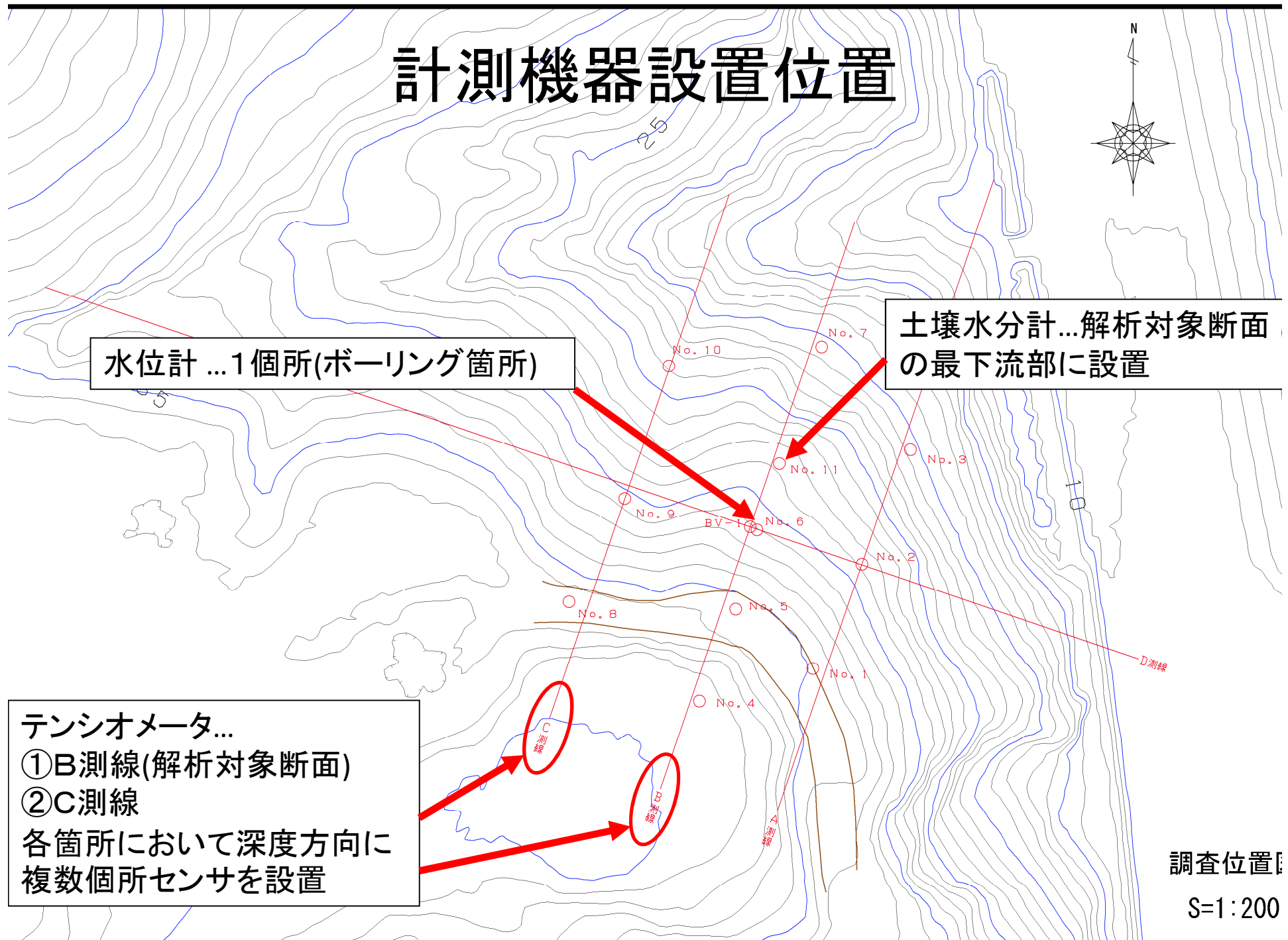
①B測線(解析対象断面)

②C測線

各箇所において深度方向に
複数箇所センサを設置

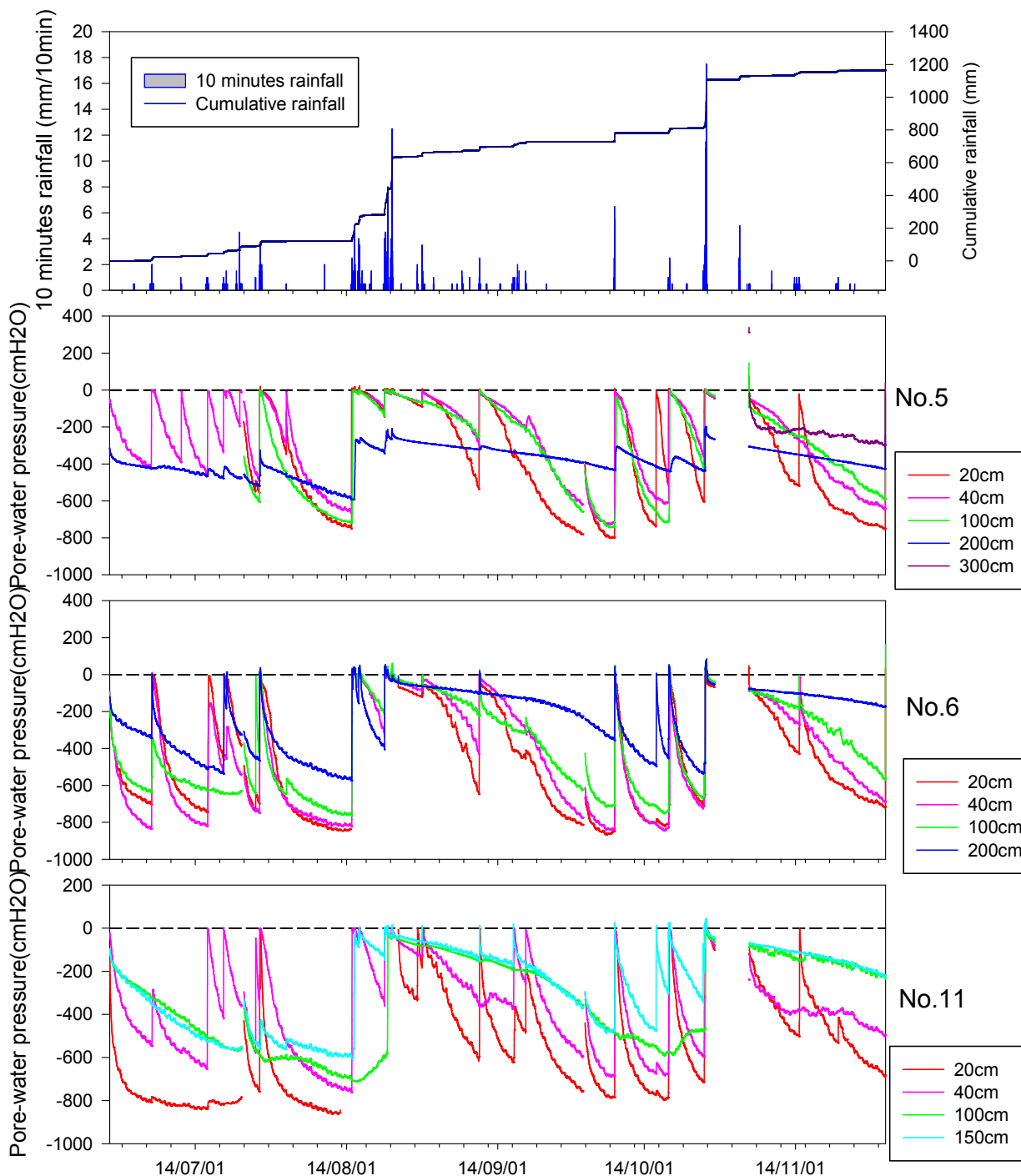
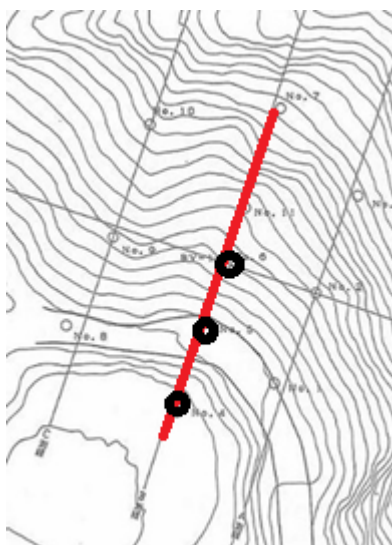
調査位置図

S=1:200



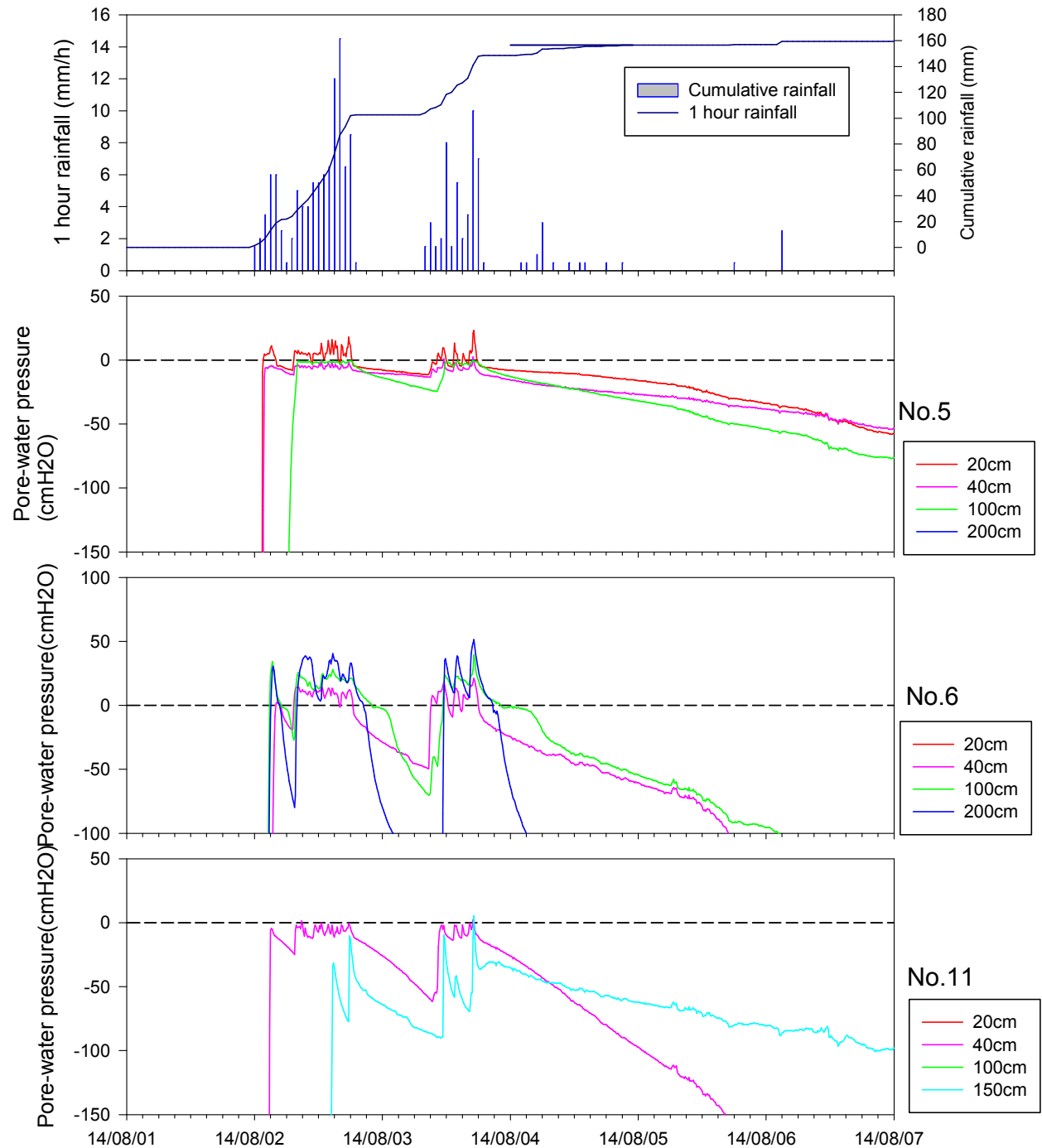
間隙水圧の変動

観測期間
6/13～11/19
総降水量
1163.5mm
降雨ピーク
80.0mm/h



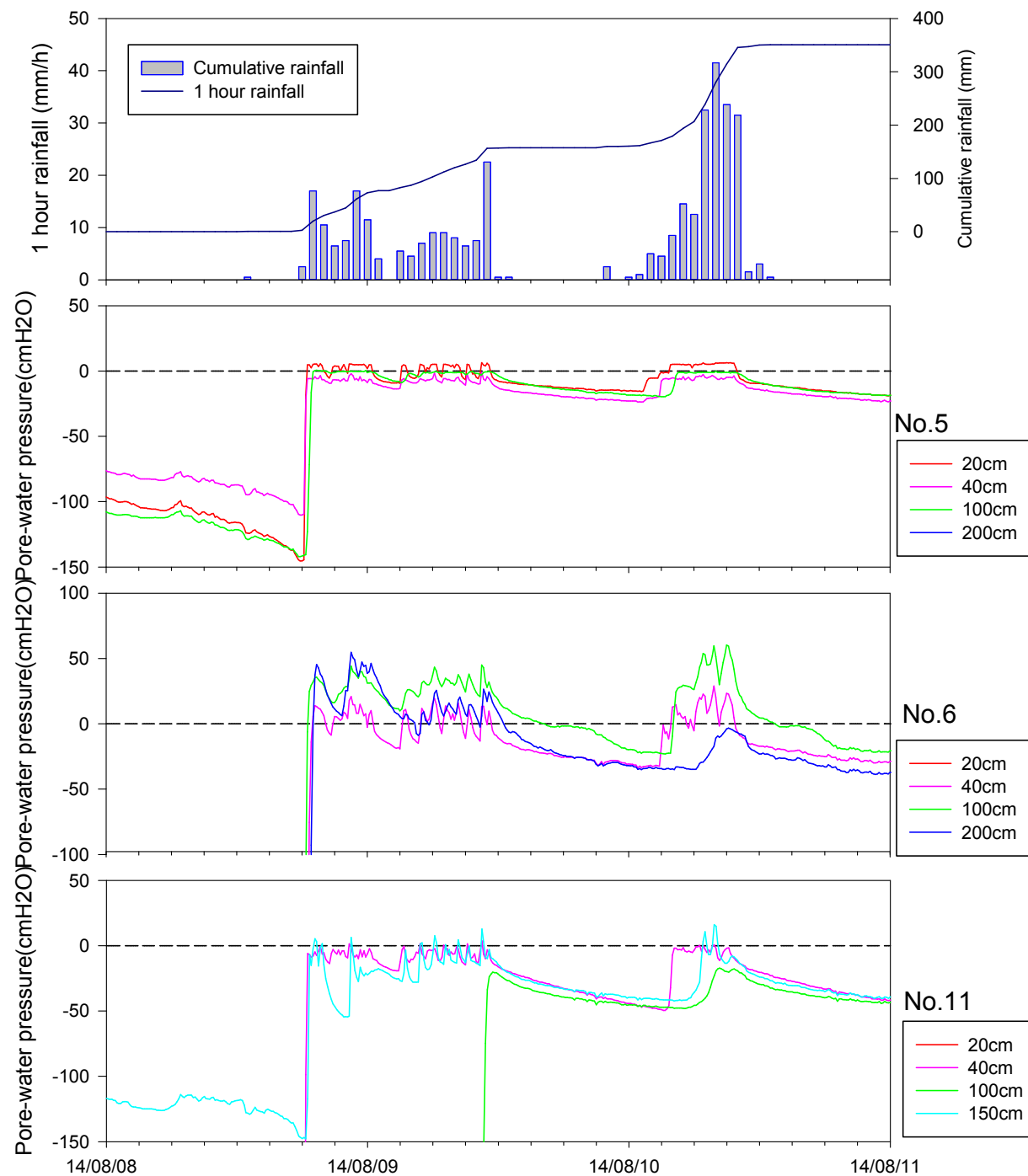
間隙水圧の変動

観測期間
8/1~8/7
総降水量
159.5mm
降雨ピーク
14.5mm/h



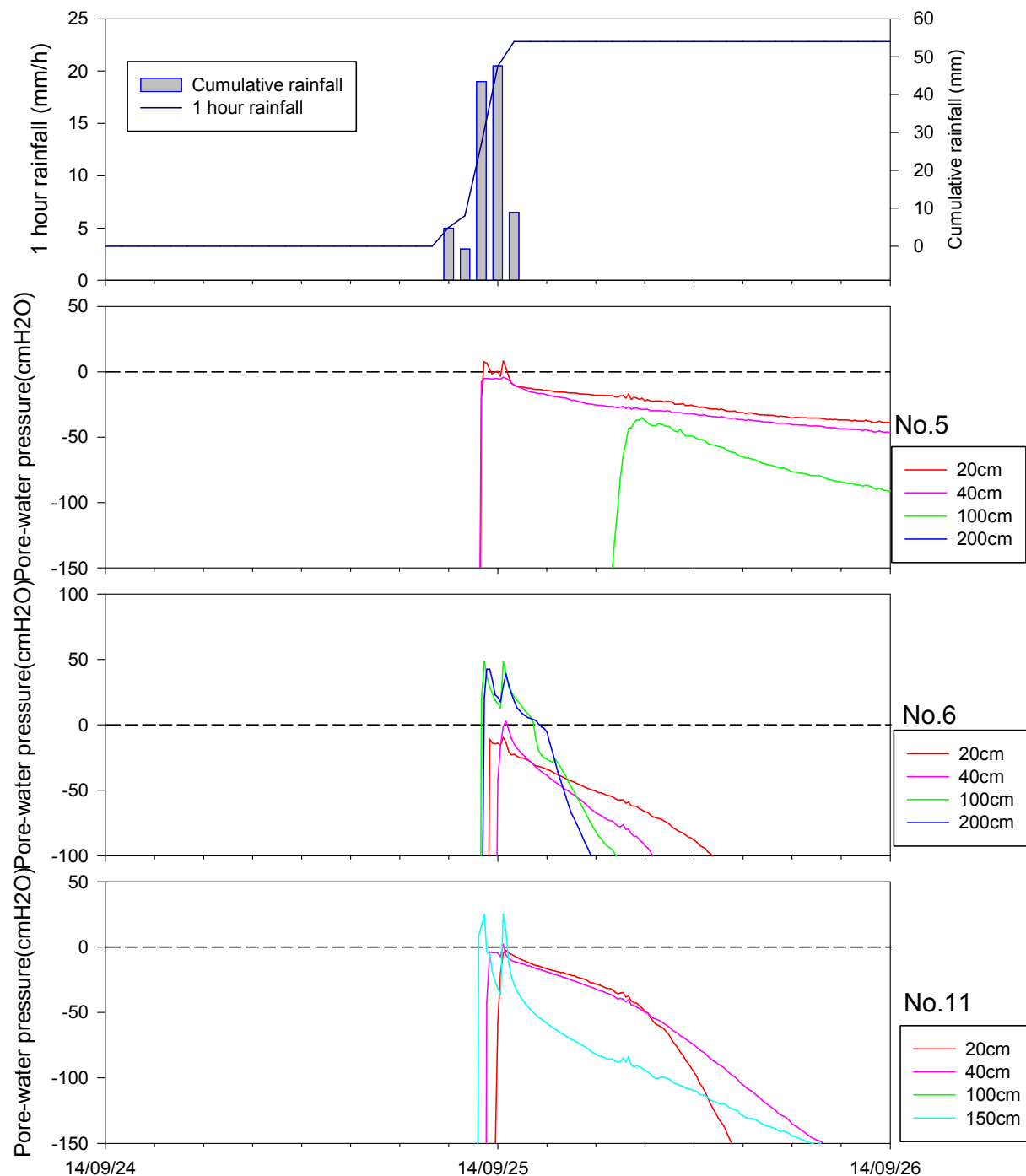
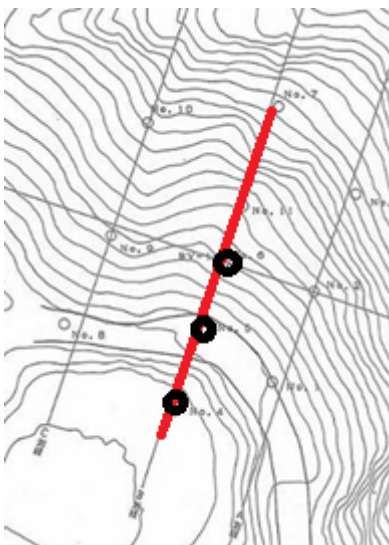
間隙水圧の変動

観測期間
8/8~8/11
総降水量
350.5mm
降雨ピーク
42mm/h



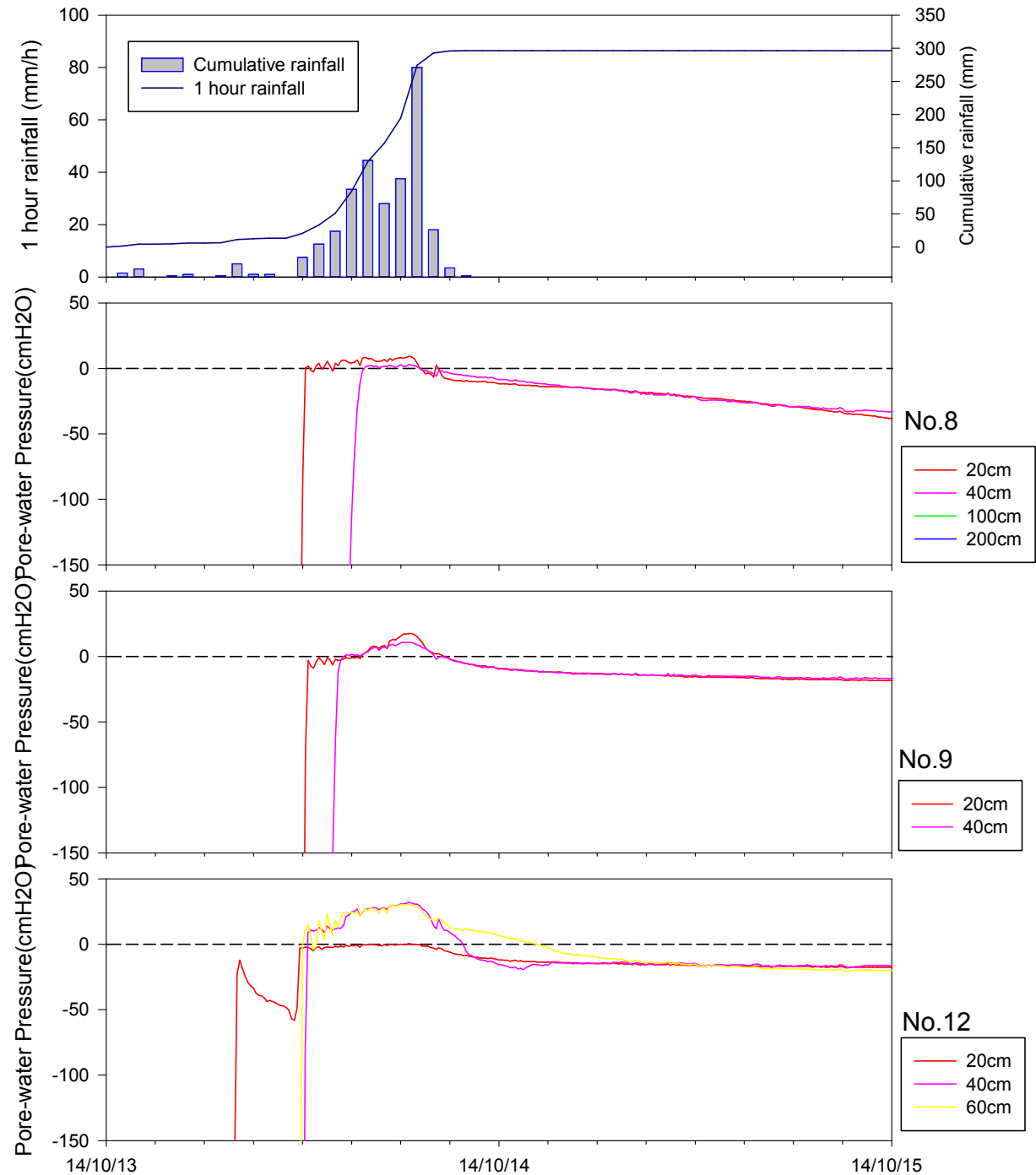
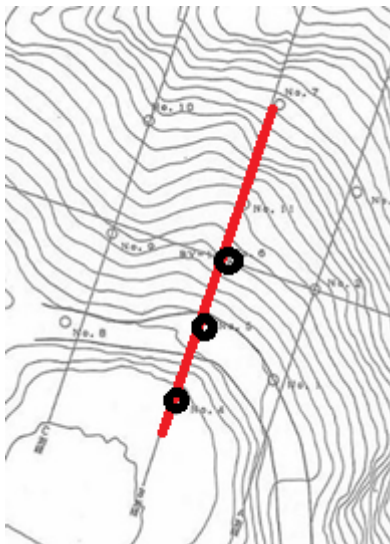
間隙水圧の変動

観測期間
9/24~9/26
総降水量
54mm
降雨ピーク
20.5mm/h



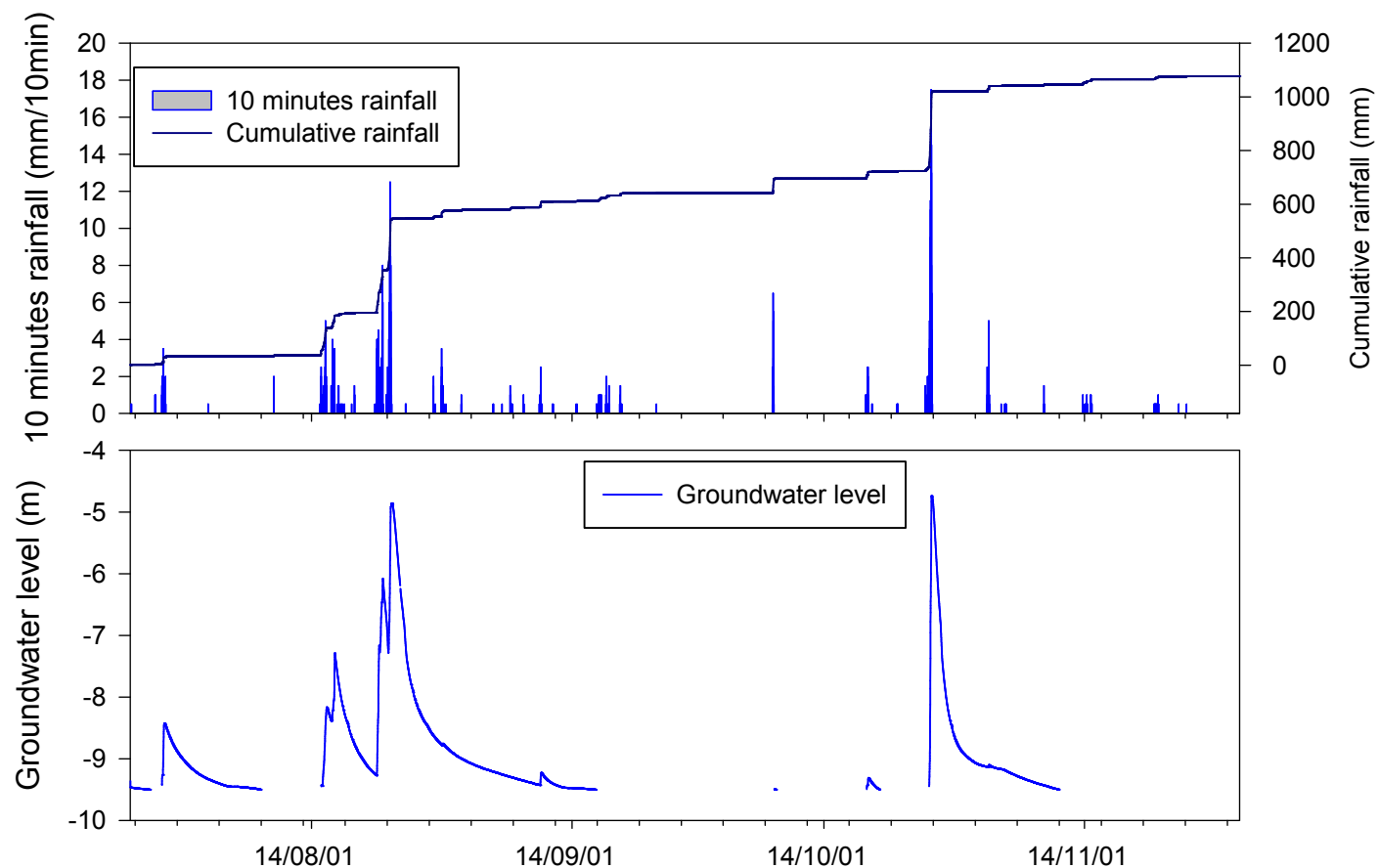
間隙水圧の変動

観測期間
10/13~10/15
総降水量
296.5mm
降雨ピーク
80.0mm/h



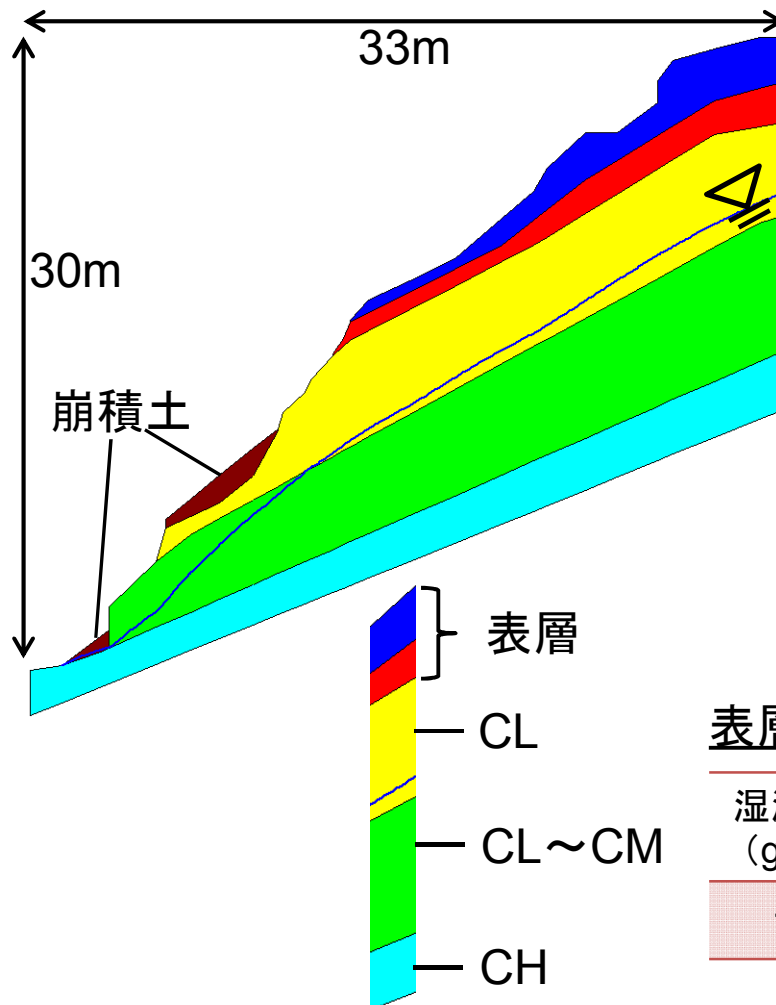
水位の変動

観測期間
7/10～11/19
総降水量
1163.5mm
降雨ピーク
80.0mm/h



現場概要

- 兵庫県洲本市中川原町厚浜～洲本市炬口の規制区間内の自然斜面(延長2.9km)
- 平成18年度安定度調査の結果より, SOMを用いて危険斜面を抽出
- 表層部(0～2.5m)はマサ状風化花崗岩, 表層以下(2.5m～)は弱風化花崗岩.
- 当該斜面では累積雨量**160mm**で規制発令



表土
湿潤である。

強風化花崗岩
指圧で容易に崩せる。

強風化花崗岩
ハンマーで容易に削れる。

崩積土
写真では表層を覆う。
崖錐堆積物

表層の物性値

湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	土粒子密度 (g/cm ³)	間隙比	飽和度 (%)
1.48	1.25	18.4	2.66	1.126	43.4

飽和・不飽和浸透流解析

支配方程式

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ K_r(\theta) K_{ij}^s \frac{\partial \psi}{\partial x_j} \right\} - q = \{c(\psi) + \beta S_s\} \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

水の収支

間隙の排水/貯留

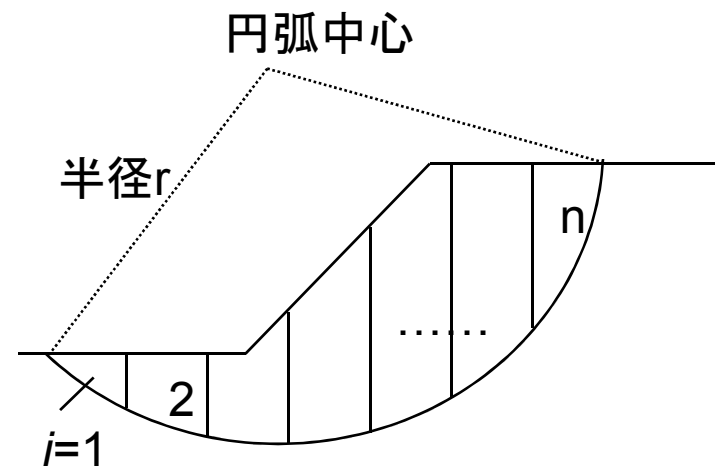
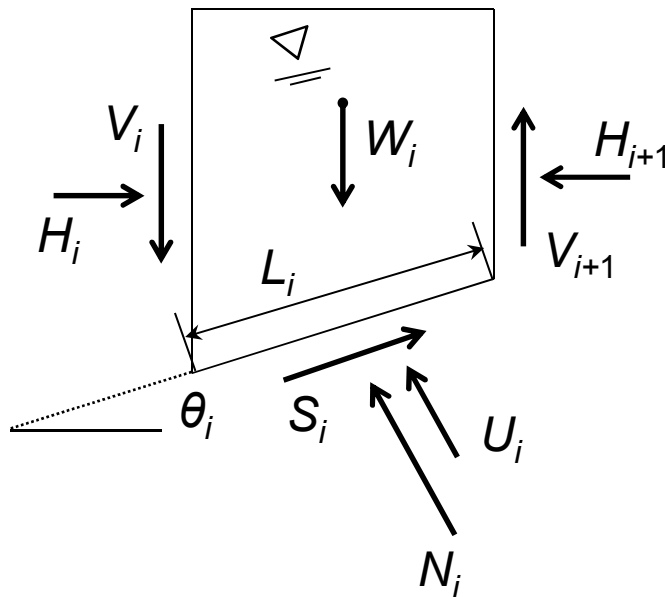
$i, j=1, 2 \text{ (1:x, 2:y)}$

θ : 体積含水率, ψ : 負の圧力水頭(マトリックサクション)
 q : 単位体積当たりのシンク/ソース流量, K_r : 相対透水係数
 K^s : 飽和透水係数, S_s : 比貯留係数, $C(\psi)$: 比水分容量
 β : 飽和領域=0, 不飽和領域=1

斜面安定解析(フェレニウス法)

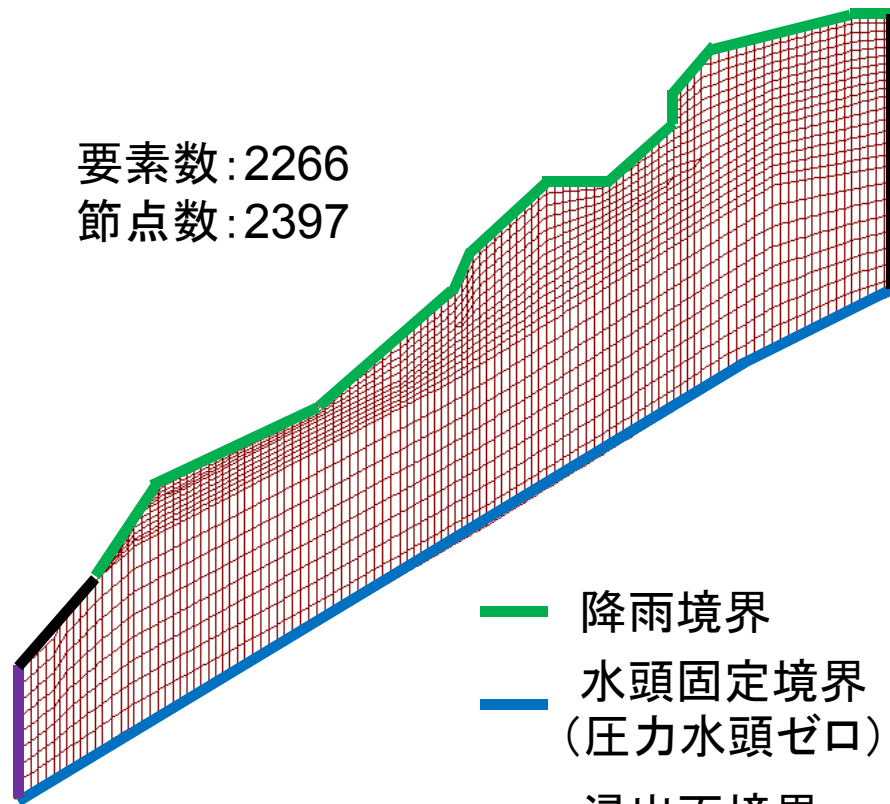
安全率の計算式

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i l_i + N_i \tan \varphi_i)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i}$$

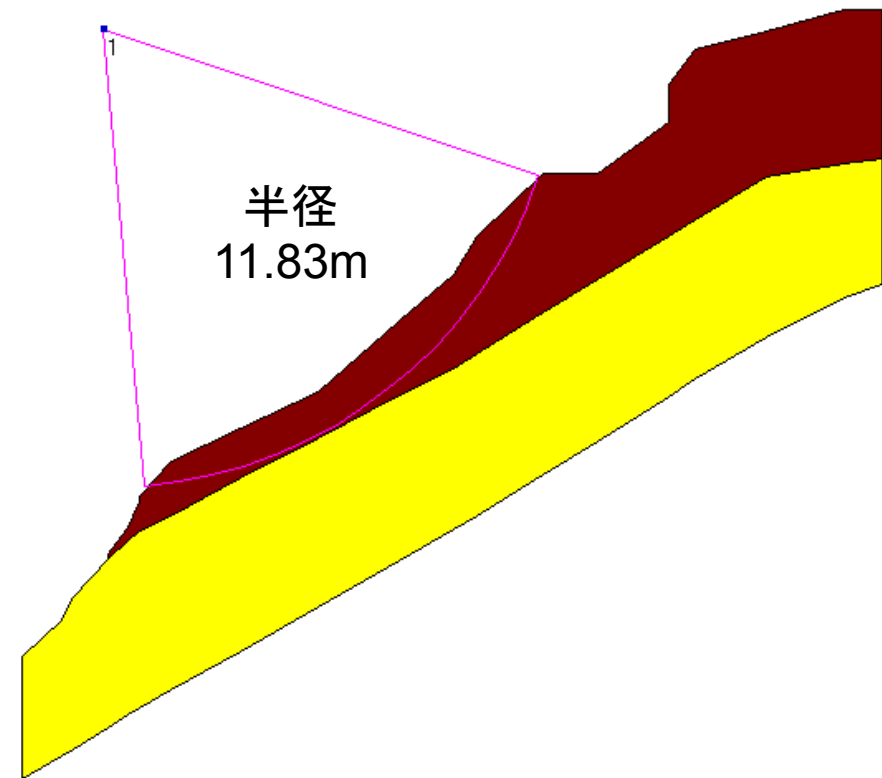


解析モデル

要素数:2266
節点数:2397



- 降雨境界
- 水頭固定境界
(圧力水頭ゼロ)
- 浸出面境界
- 不透水境界

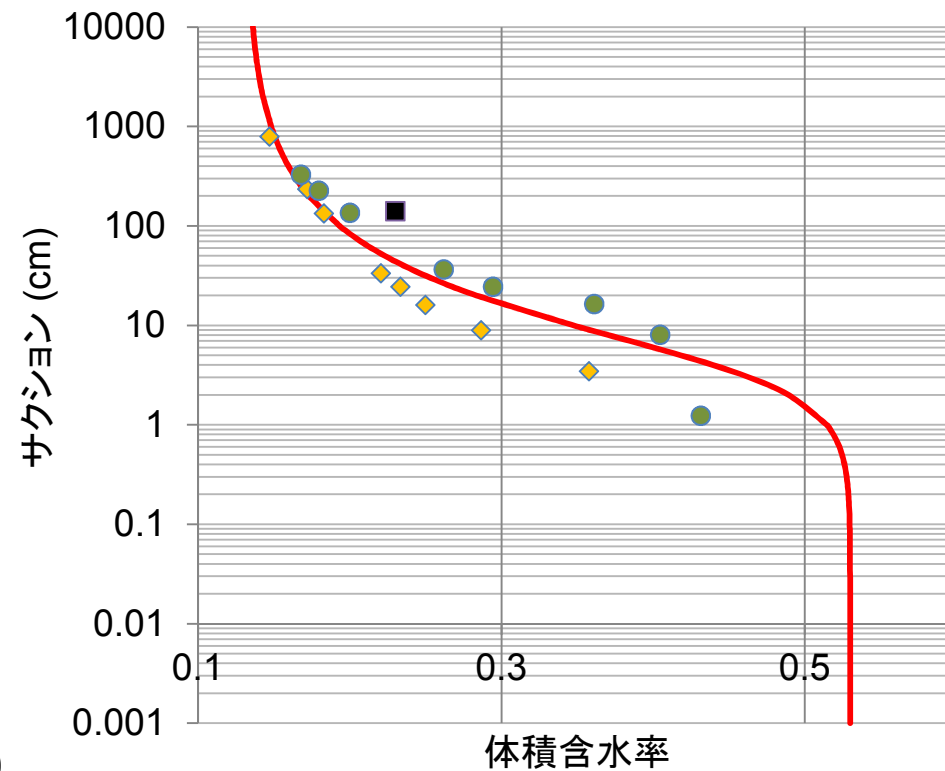
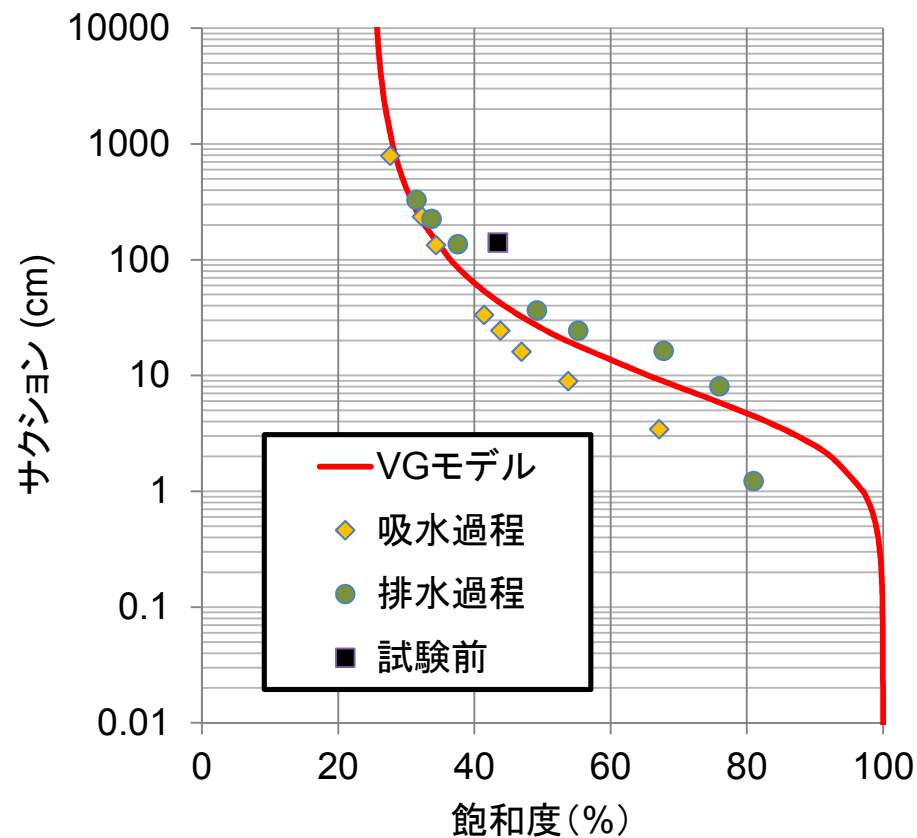


表層と岩盤層の境界付近にすべり面を想定

➤ 表層及びその下の岩盤一層のみをモデル化(表層崩壊のみを対象としているため)

保水性試験

結果

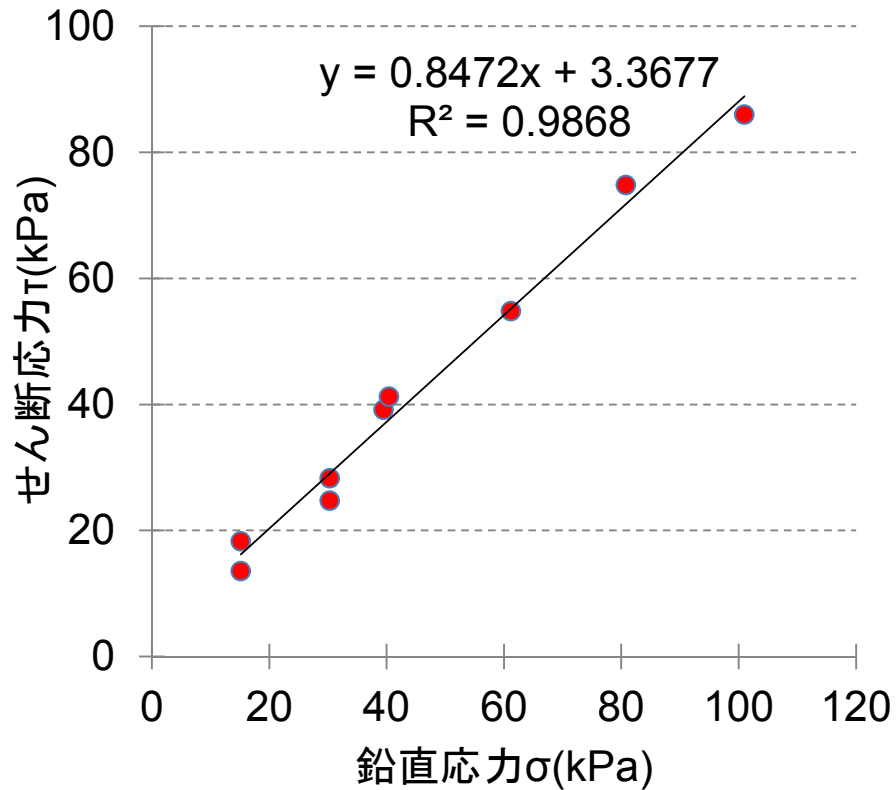


➤ 吸水過程と排水過程の間を通るようにVGモデルによりフィッティング

→ 降雨中だけでなく降雨終了後も解析を継続するため

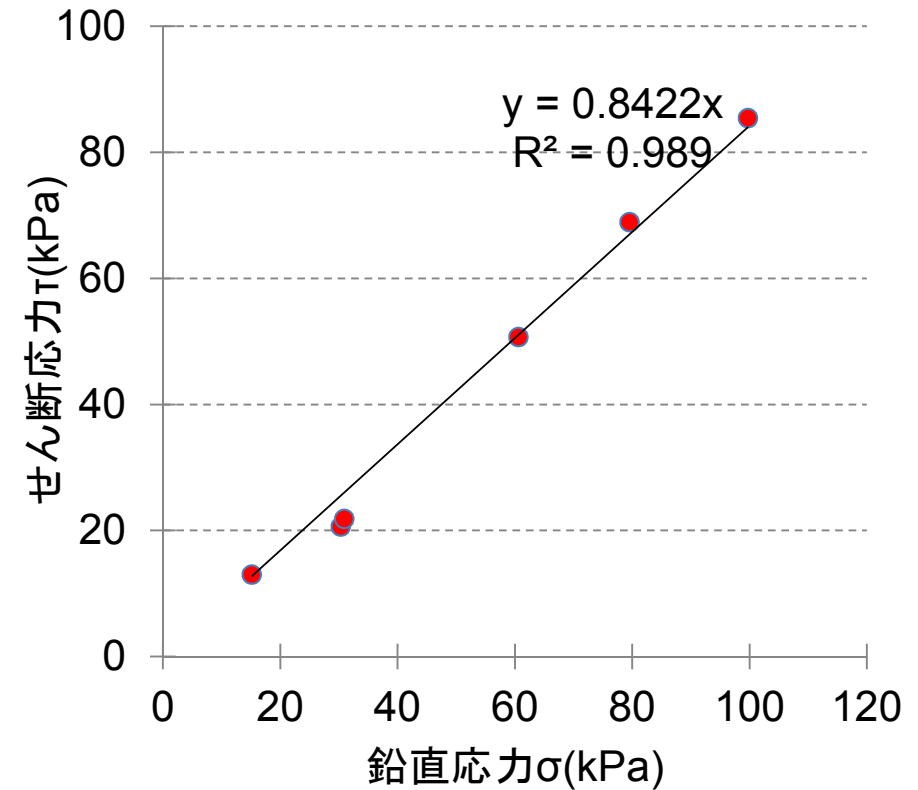
一面せん断試験

自然含水状態



$S_r = 40.35\%$
 $c = 3.3677 \text{ (kN/m}^2\text{)}$
 $\phi = 40.271(^{\circ})$

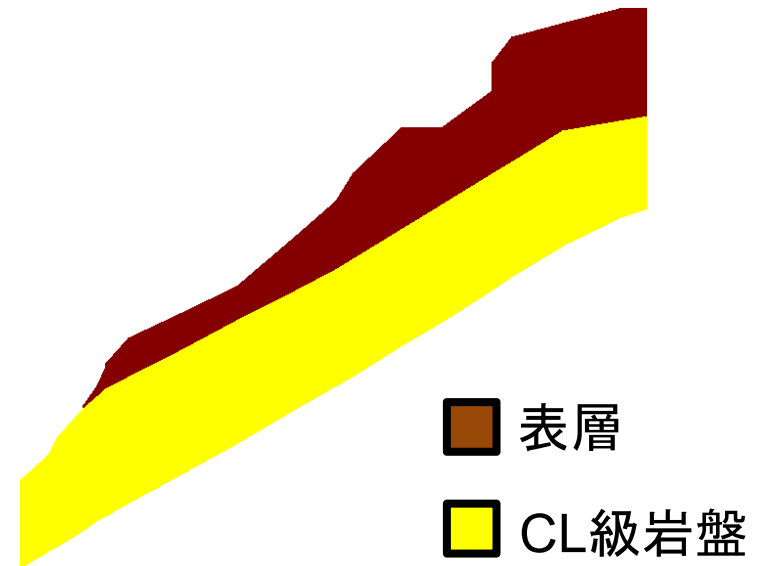
高飽和度状態



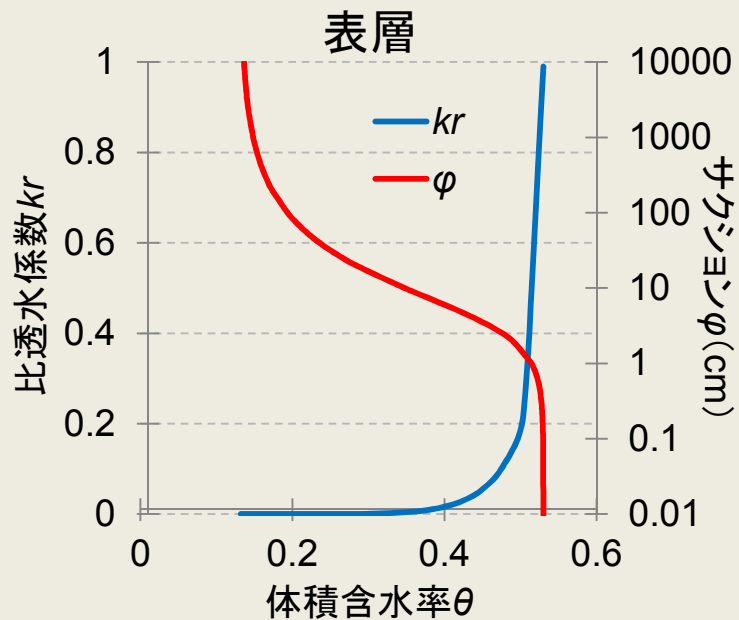
$S_r = 83.46\%$
 $c = 0 \text{ (kN/m}^2\text{)}$
 $\phi = 40.104(^{\circ})$

各層の物性値

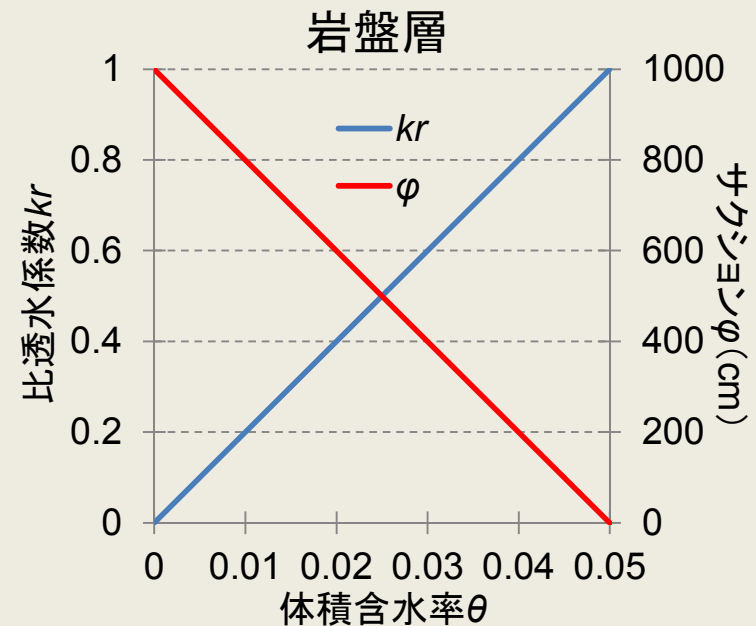
表土について各種実験を実施し、浸透流解析および安定解析に必要な物性値を決定した



不飽和特性



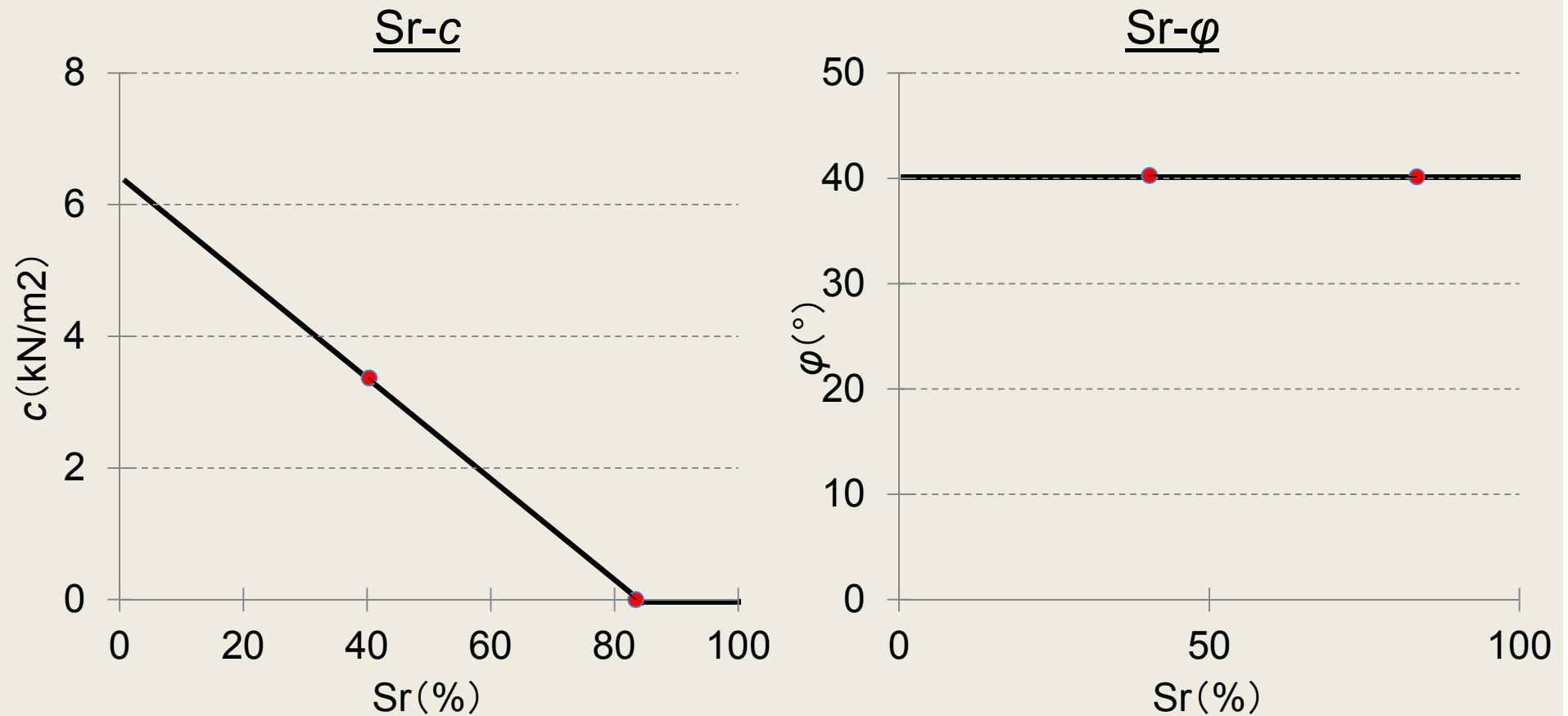
$$k = 3.8 \times 10^{-3} (\text{cm/sec})$$



$$k = 1.0 \times 10^{-8} (\text{cm/sec})$$

各層の物性値

表土の強度定数



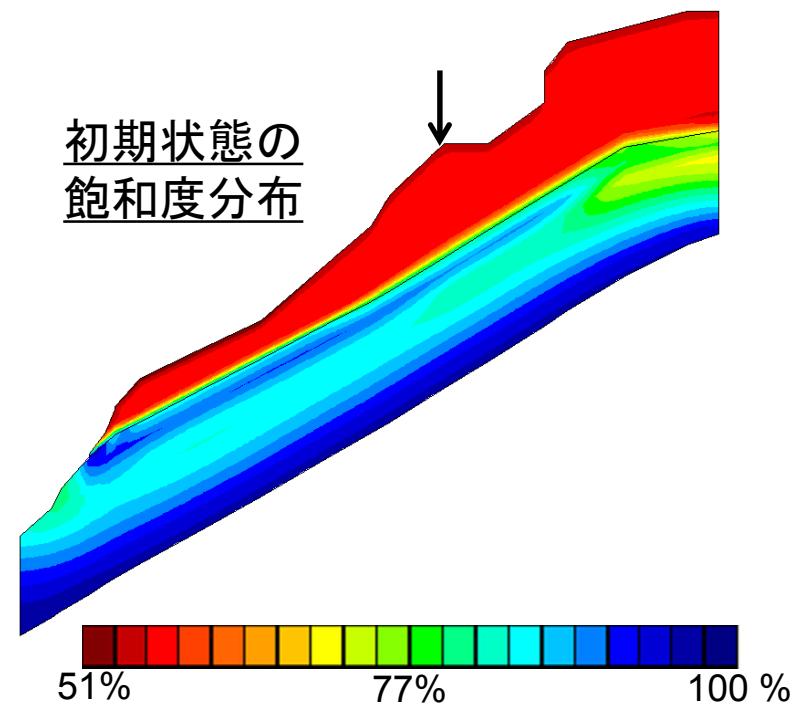
➤ 表土の強度定数については、一面せん断試験を行い、飽和度依存性を考慮

初期状態

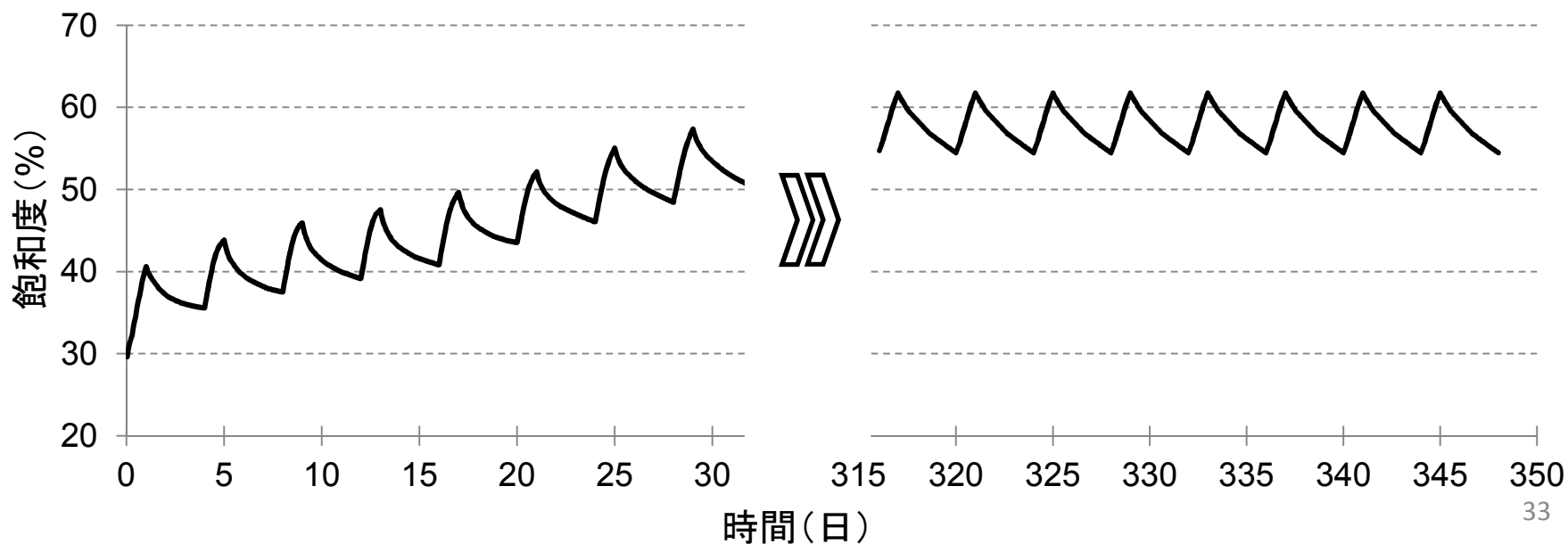
- 洲本での1年間の平均総降雨量: 1489mm
- 1mm以上の降雨日数: 97日, 無降雨日数: 268日

→ 降雨日1日当たりの平均降雨量15mmを4日に1日のペースで与え, 表層の飽和度が均一かつ定常となった状態を初期状態とした

初期状態の
飽和度分布



飽和度の経時変化



実効雨量とは

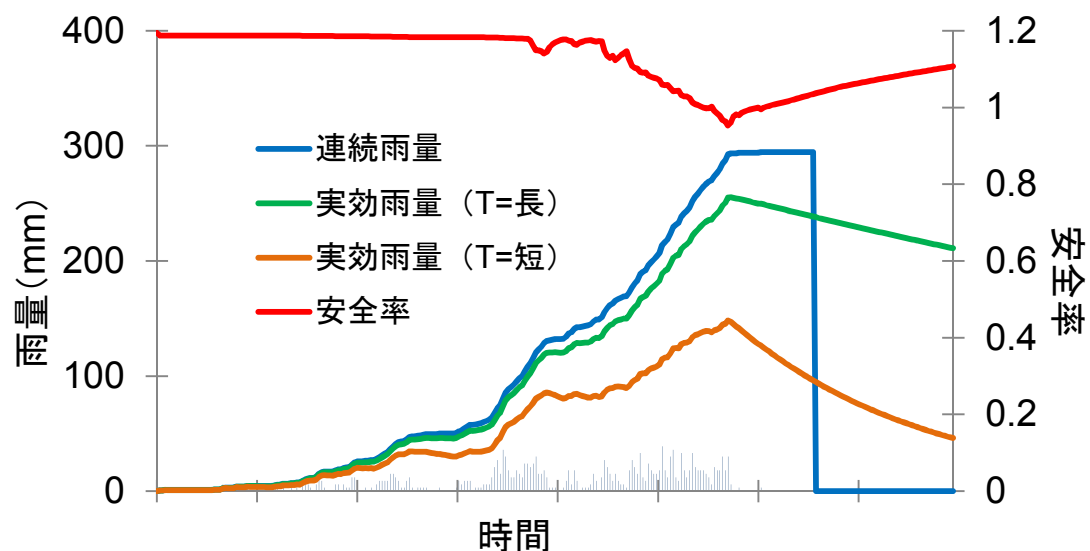
これまでに降った雨や現在降った雨が、地中にどの程度残存しているかを便宜的に示した値

計算式

$$R_G = R_0 + \alpha^1 R_1 + \alpha^2 R_2 + \dots + \alpha^n R_n$$

R_G : 実効雨量 (mm), R_n : n 時間前の雨量 (mm)

α : 1時間単位の減少係数 ($0 < \alpha < 1$) = $(0.5)^{1/T}$, T : 半減期 (hour)



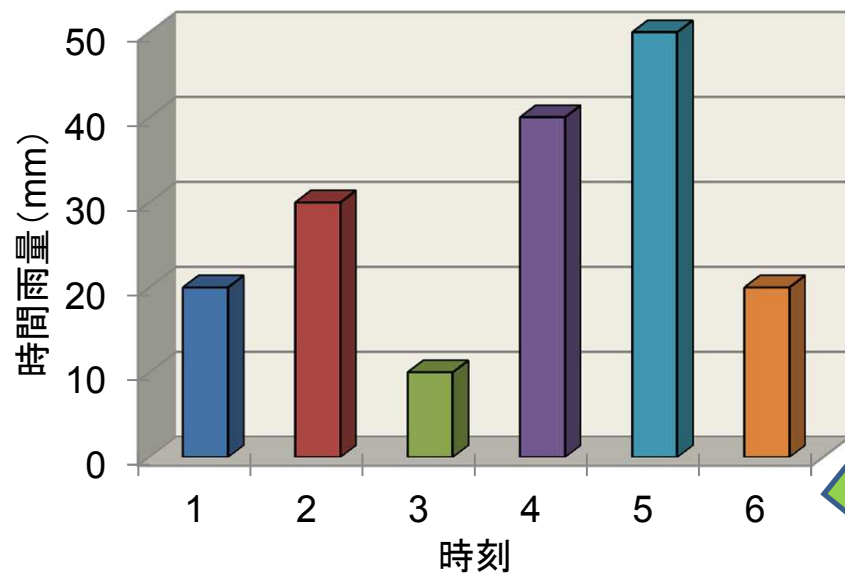
安全率の経時変化を実効雨量で表す



実効雨量のパラメータである半減期
(水の抜け具合)を決定する必要がある

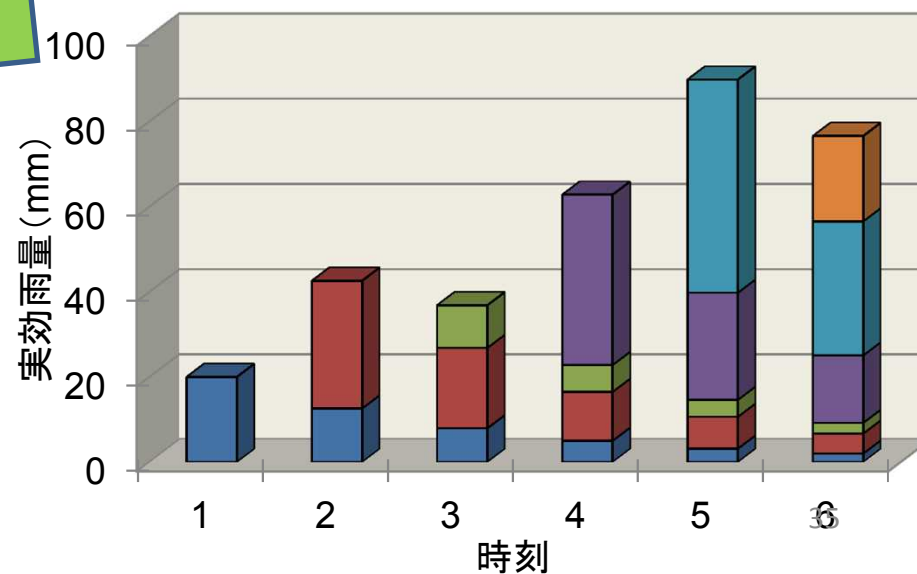
実効雨量とは

1.5時間半減期の場合...

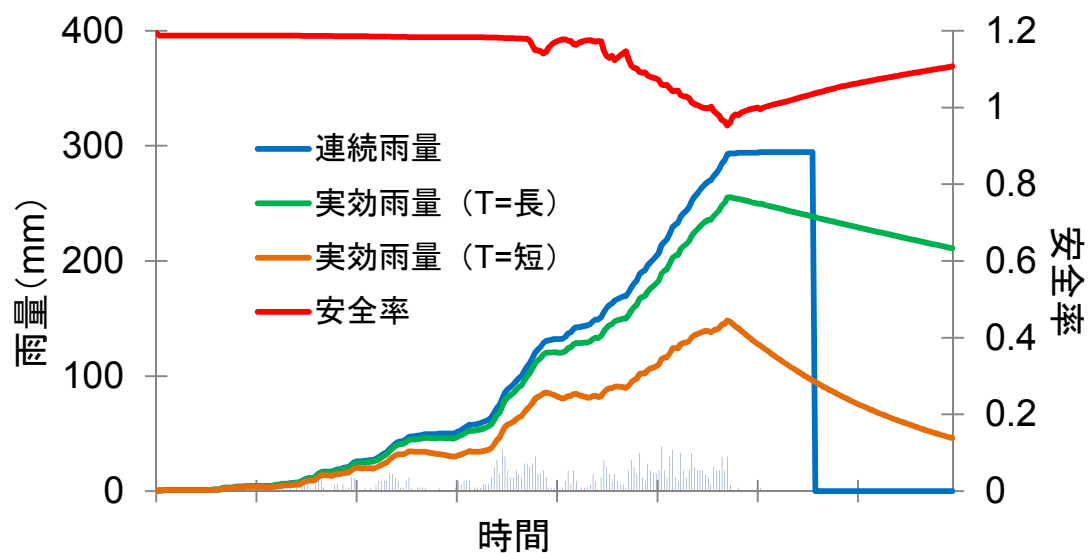
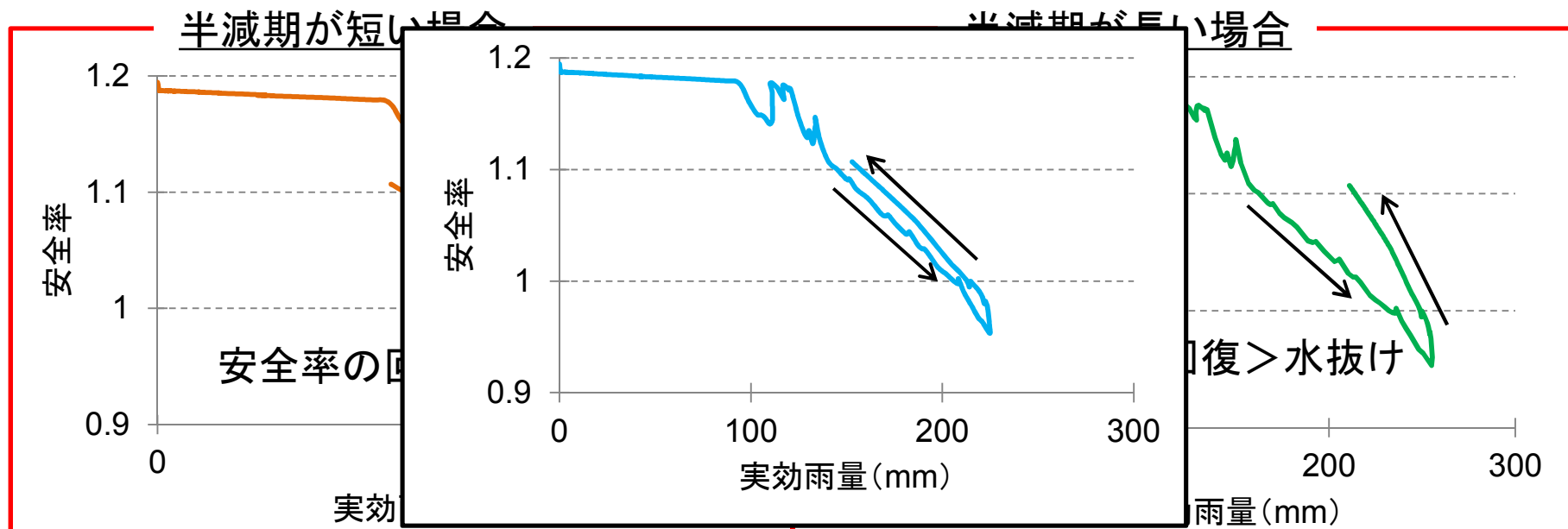


	1時	2時	3時	4時	5時	6時
6時の雨量						20.00
5時の雨量					50.00	31.50
4時の雨量				40.00	25.20	15.87
3時の雨量			10.00	6.30	3.97	2.50
2時の雨量		30.00	18.90	11.91	7.50	4.72
1時の雨量	20.00	12.60	7.94	5.00	3.15	1.98
実効雨量 合計	20.00	42.60	36.84	63.21	89.82	76.58

雨の効果は時間の経過とともに減少



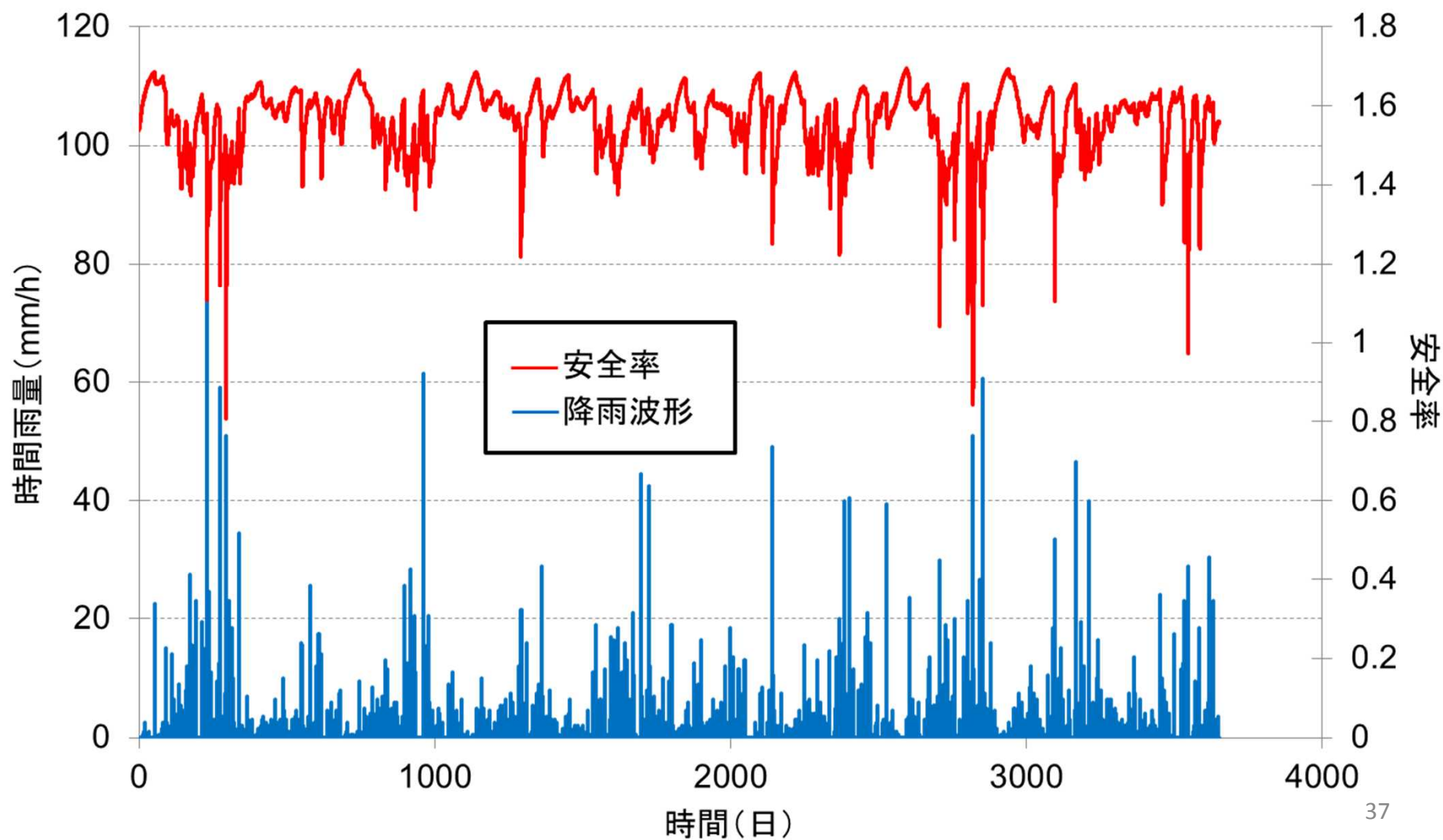
半減期の決定方法



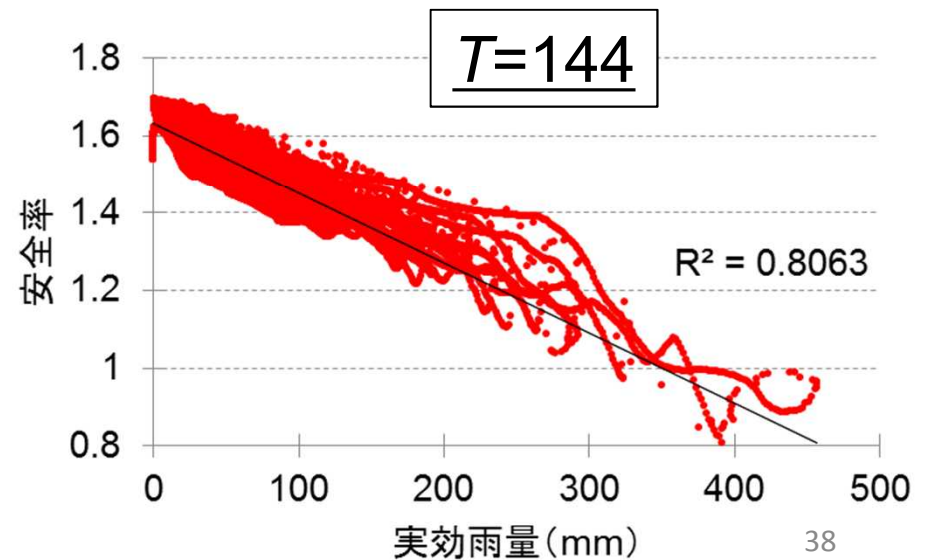
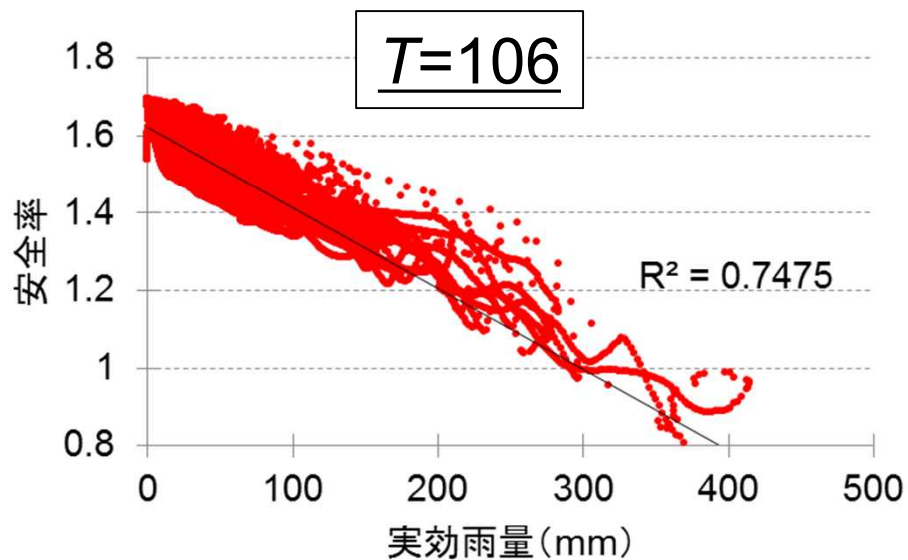
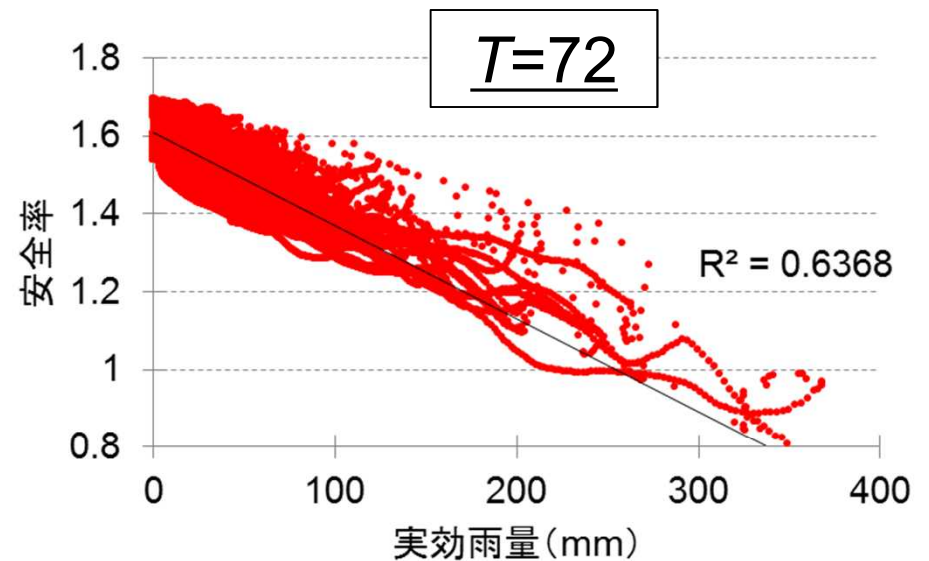
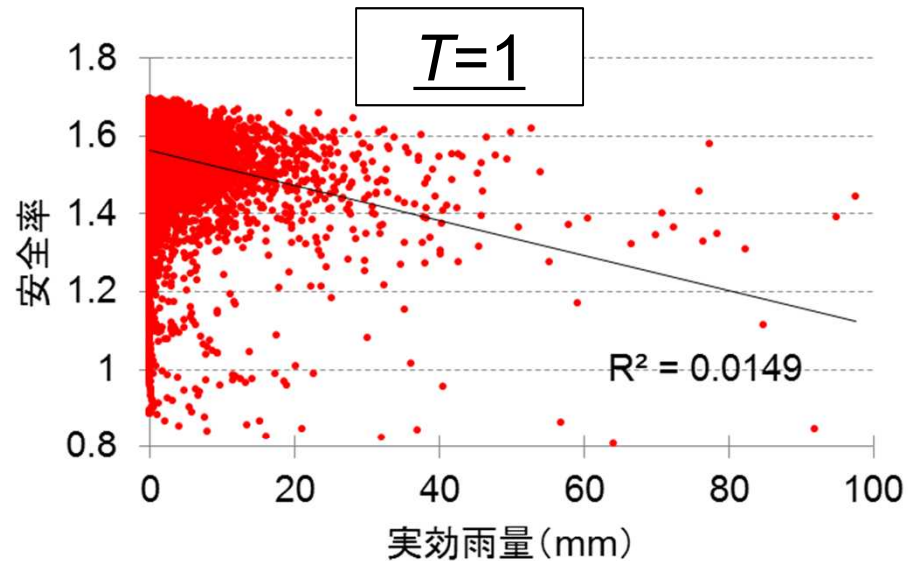
安全率と実効雨量の相関性が
最大となる半減期を調べる

行った解析概要

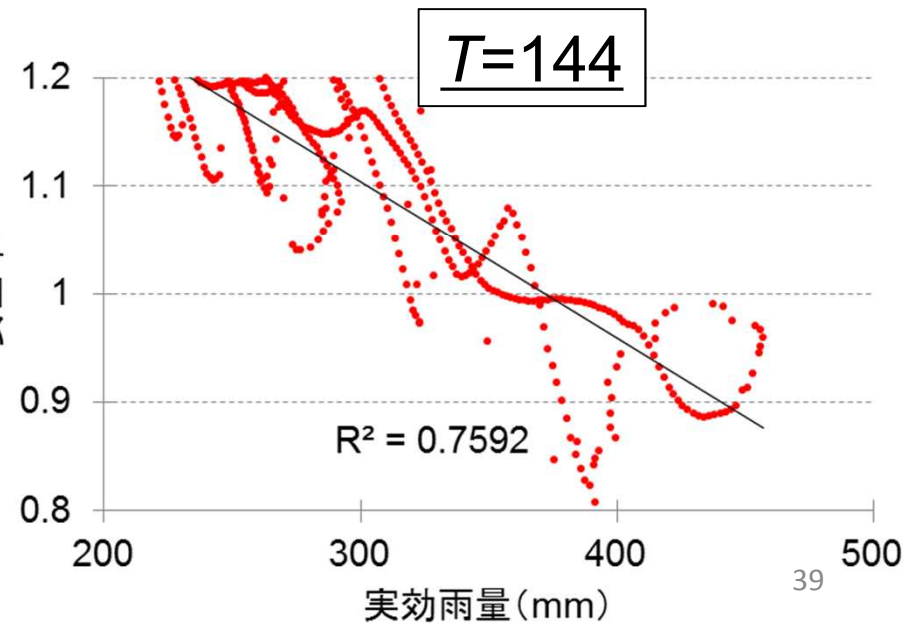
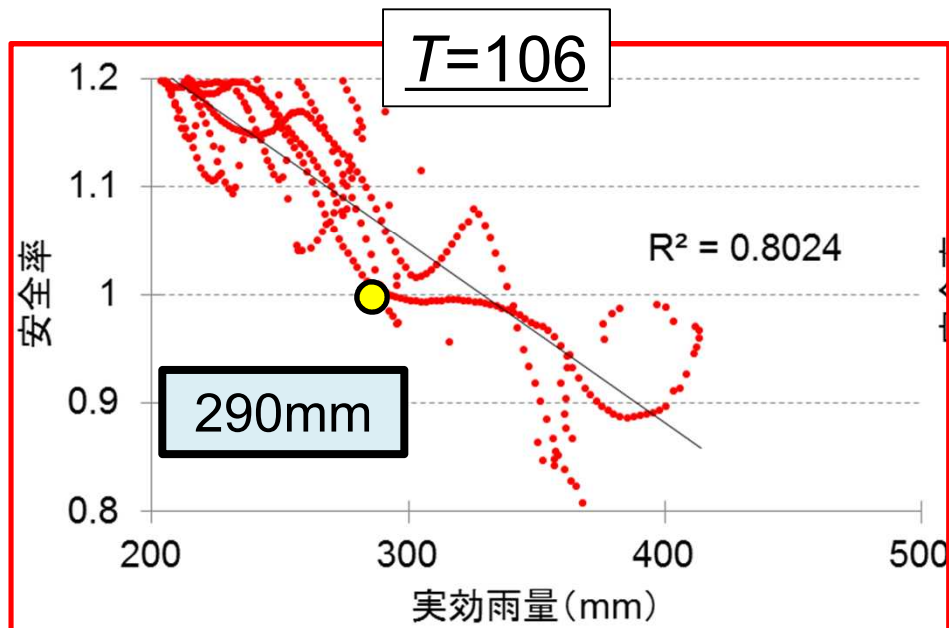
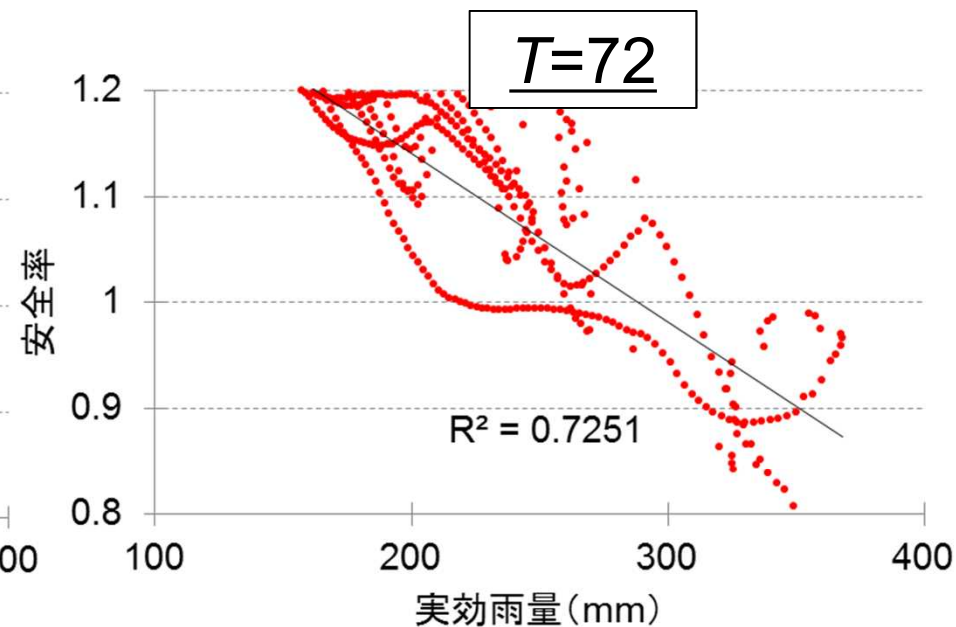
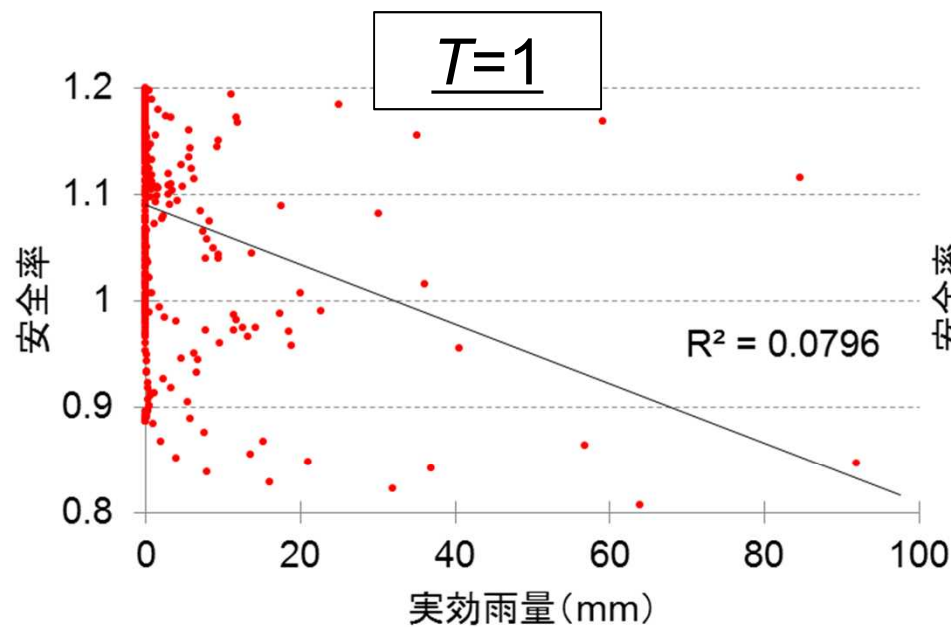
- 2004年1月1日0:00～2013年12月31日24:00までの10年間を解析
- 降雨外力は1時間雨量として与えた



Fsと実効雨量の関係

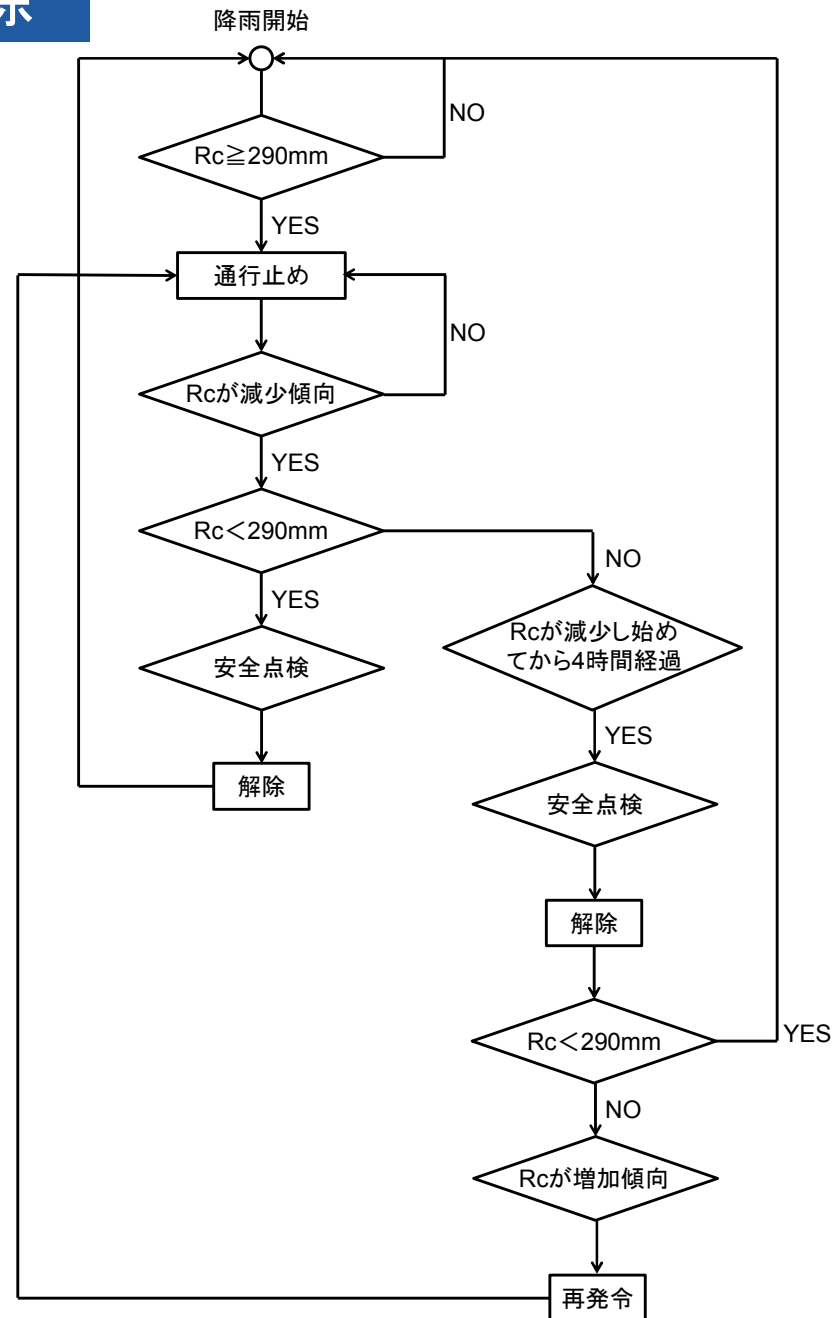


Fsと実効雨量の関係



規制の発令・解除

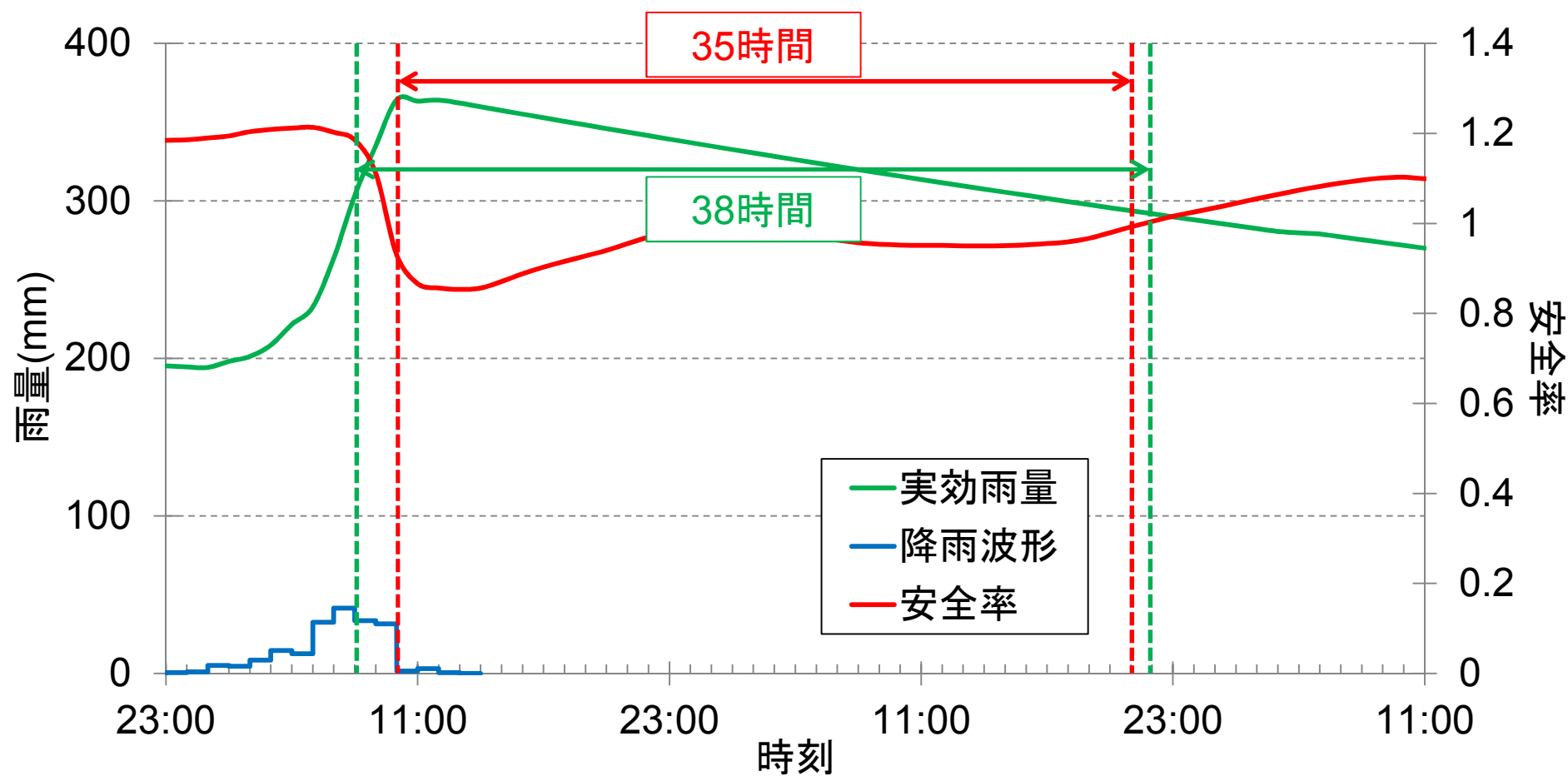
通行規制発令・解除 のフロー



規制の発令・解除

2014.8.9～8.12

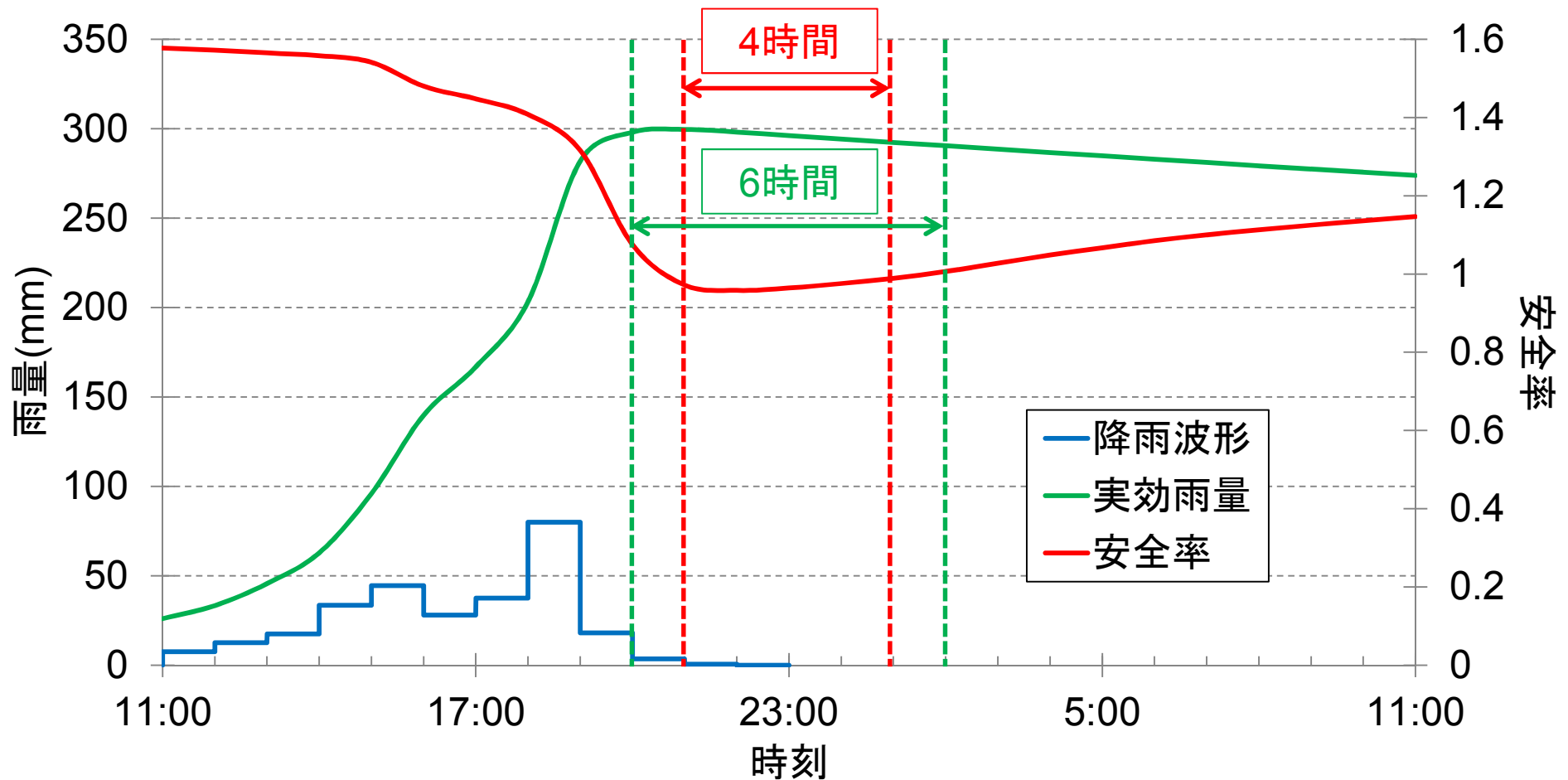
※9時間前に160mmの先行降雨あり



規制の発令・解除

2014.10.13～10.14

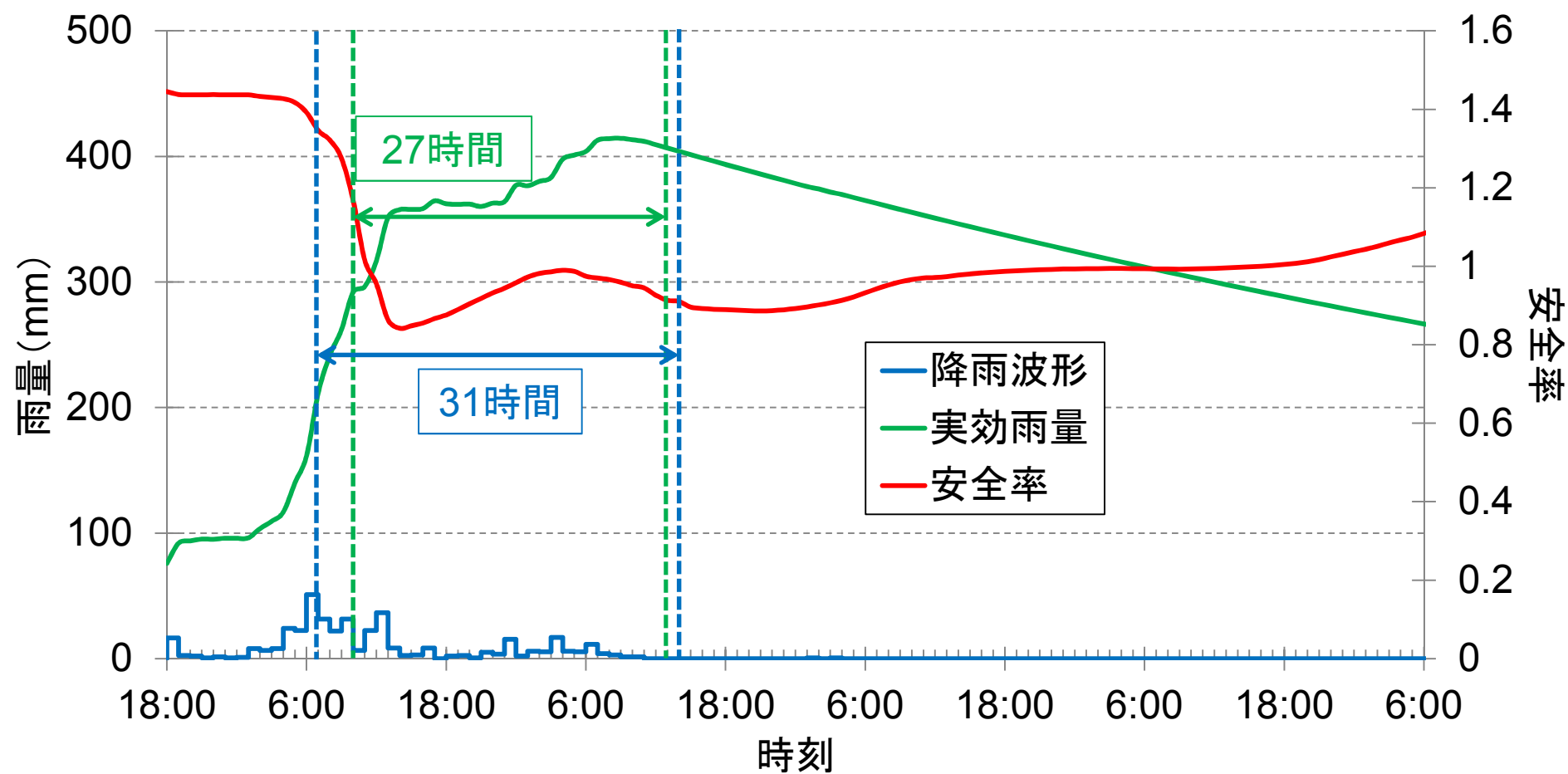
※1週間降雨なし



- 提案基準は、 $F_s < 1$ の時間帯を全てカバーすることができる
- 規制発令・解除のタイミングは $F_s < 1$ ・ $F_s > 1$ のタイミングと概ね一致している

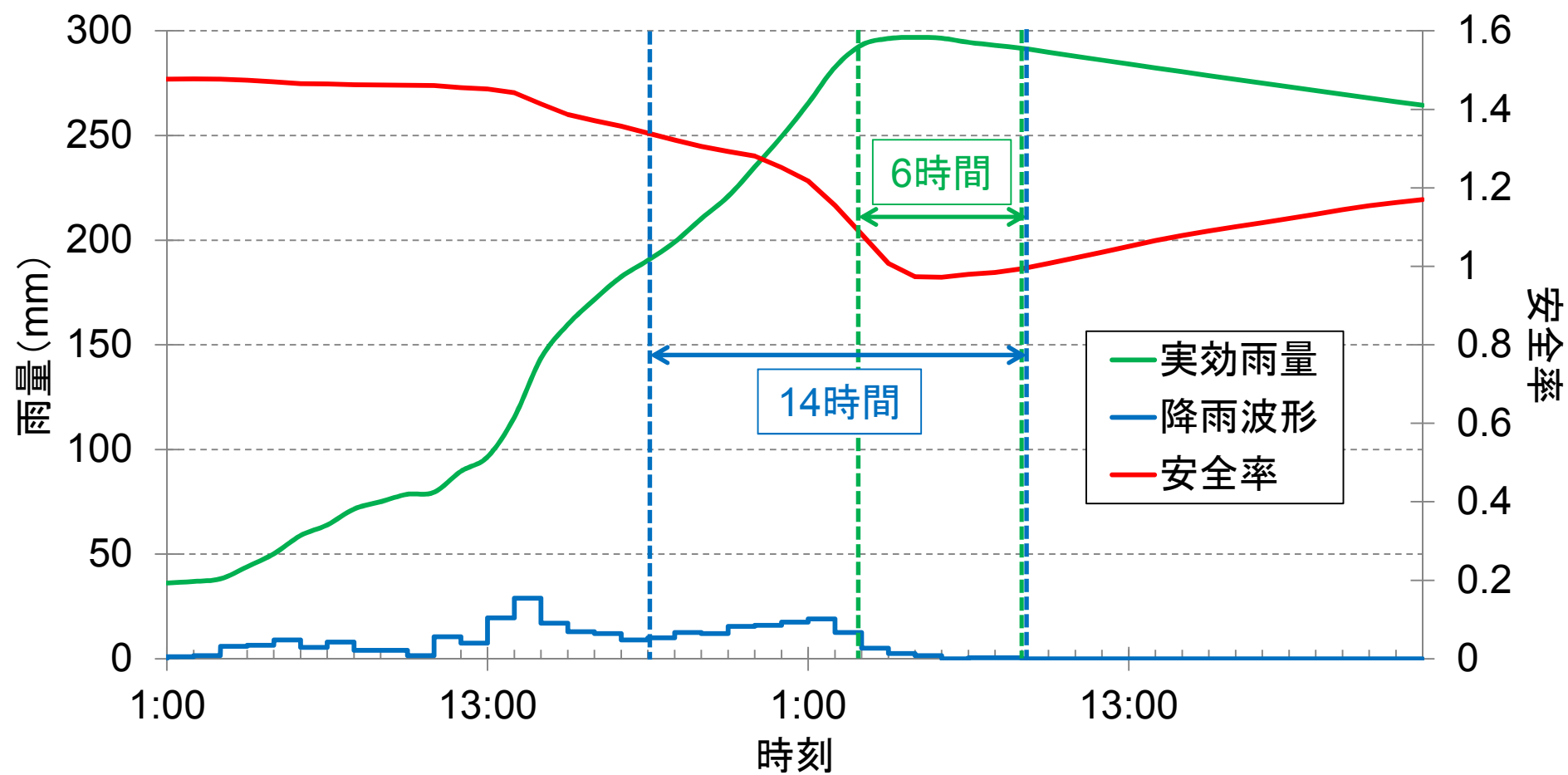
規制の発令・解除

2011.9.20～9.23



規制の発令・解除

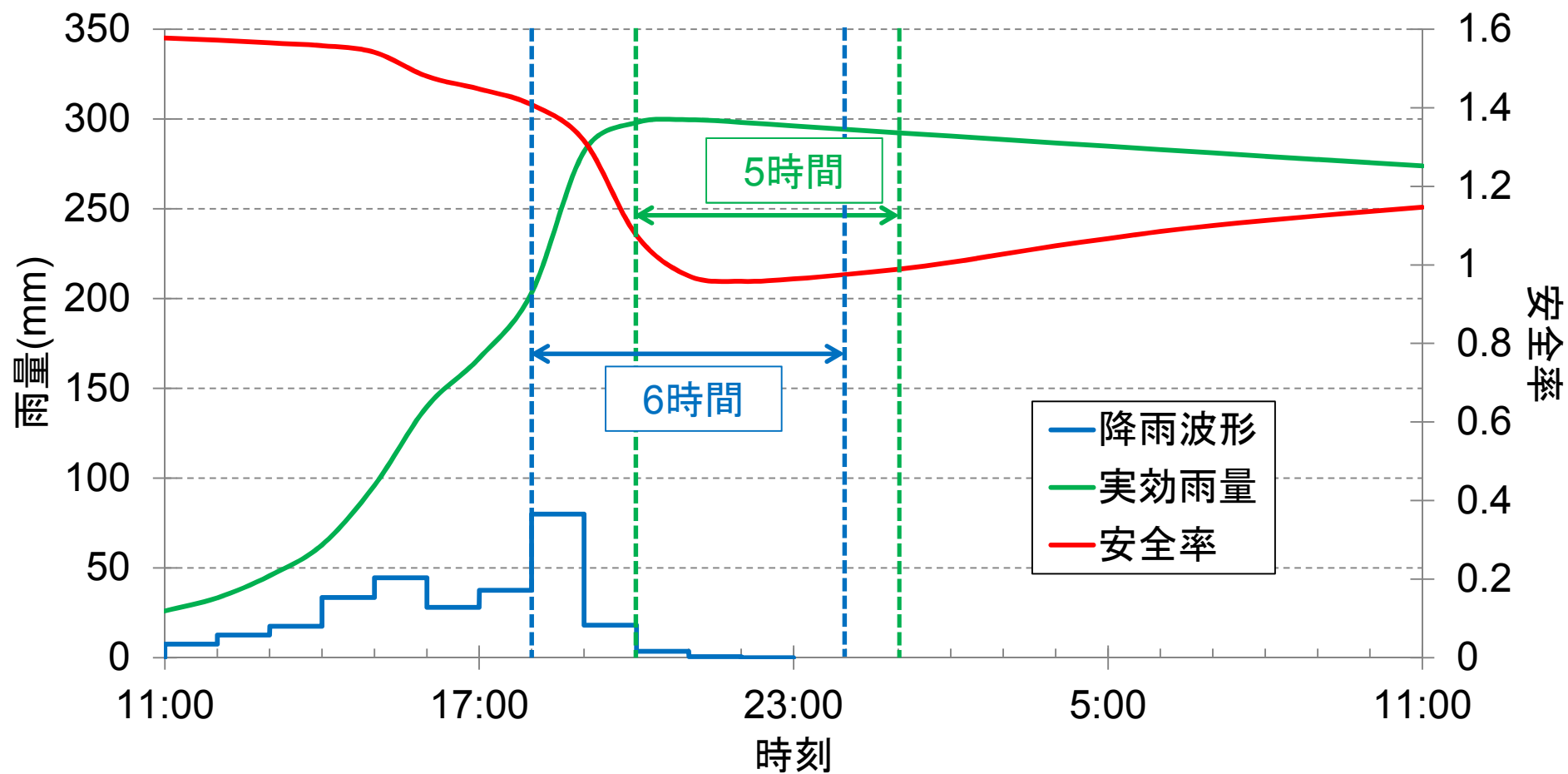
2013.9.16



規制の発令・解除

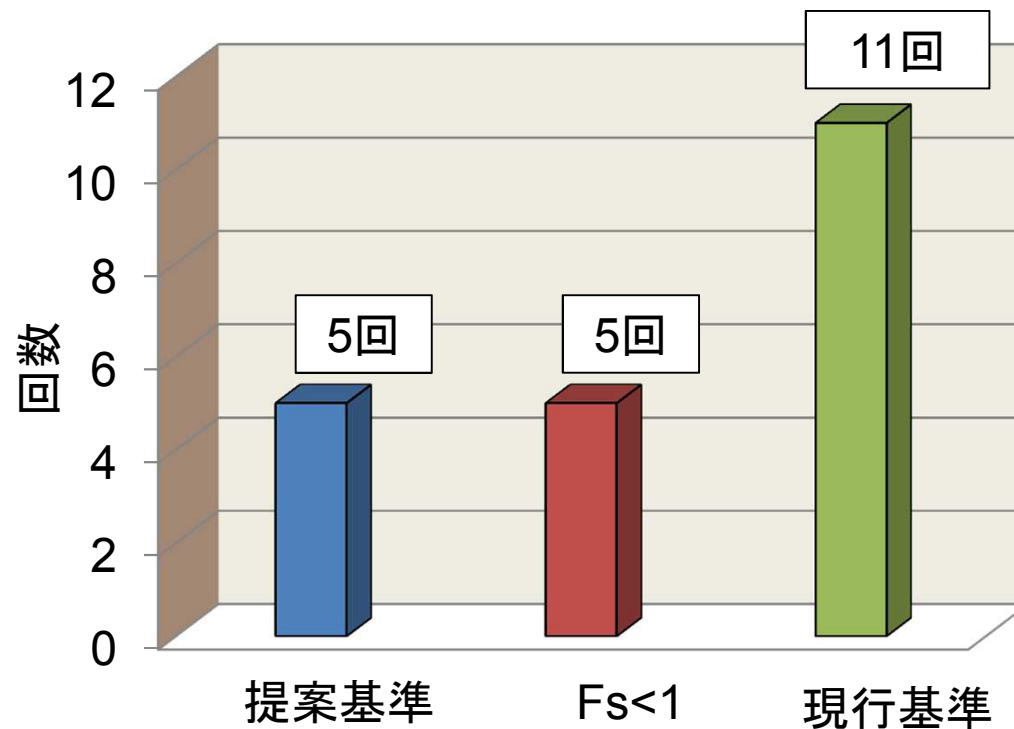
2014.10.13～10.14

※1週間降雨なし



規制の発令・解除

2004年～2014年の間の
規制発令回数



提案基準は、**先行降雨の影響**が反映されているため、**斜面が比較的乾いた状態**で発生した降雨では、規制を発令する必要がない場合がある

↓
現行の基準よりも規制の発令回数を減らすことができる

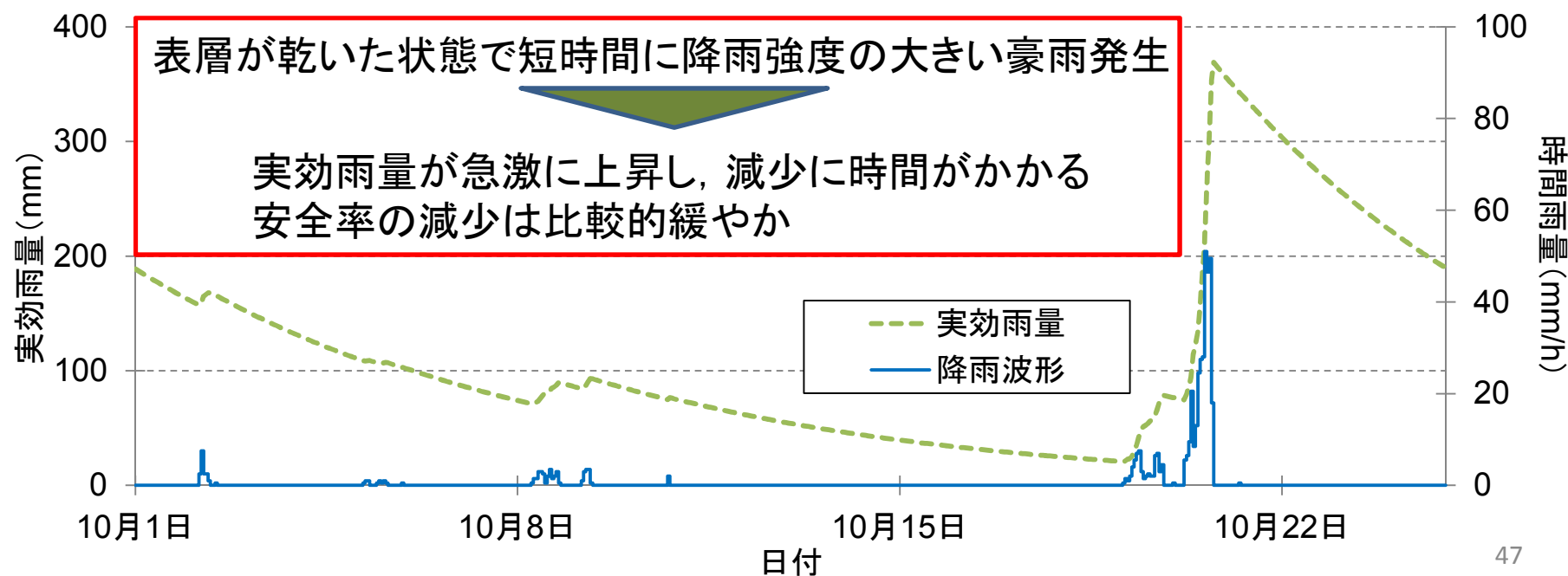
→ 通行規制発令・解除の空振り率改善が見込まれる

規制の発令・解除

発令時間

	提案基準	$F_s < 1$	現行基準
2004.10.20	37時間	13時間	7時間
2011.9.20	79時間	75時間	31時間
2013.9.16	6時間	4時間	14時間
2014.8.9	38時間	35時間	5時間
2014.10.13	6時間	4時間	6時間

解析上 $F_s < 1$ の時間帯と
実効雨量による規制時間
に差がある



規制の発令・解除

- 実効雨量が最大となる時刻から、安全率が最小値となる時刻を推測する

	実効雨量が 最大となる時刻 t_r	安全率が 最小となる時刻 t_f	$t_f - t_r$
2013.9.16	9月16日5時	9月16日6時	1時間
2014.8.9	8月9日10時	8月9日13時	3時間
2014.10.13	10月13日21時	10月13日22時	1時間

実効雨量が最大値を取ってから3時間経過すれば、安全率は回復し始める



実効雨量が最大値をとってから4時間後に解除

	改善前の 提案基準	改善後の 提案基準	現行基準
2004.10.20	37時間	5時間	7時間
2011.9.20	79時間	27時間	31時間
2013.9.16	6時間	6時間	14時間
2014.8.9	38時間	6時間	5時間
2014.10.13	6時間	5時間	6時間

- 通行規制時間の大幅な低減
- 安全率が1を下回る時刻と安全率が最小となる時刻を含む

まとめ

目的

特定の通行規制区間に対して、地形・地質、
降雨特性に応じた雨量通行規制基準を提案する

結果

- 実効雨量を用いることで、先行降雨の影響を考慮することができる。また、実効雨量は降雨終了後も引き続き計算が可能であることから、雨量通行規制解除の判断基準としても用いることができる。
- 実効雨量と数値解析結果より得られる安全率の相関関係より、実効雨量で用いる半減期を設定し、実効雨量による斜面安定度評価が可能となり、安全率の経時変化を概ね表すことができる。
- 先行降雨の影響が残った状態で次の降雨がくる場合には規制発令から解除まで比較的時間を要する傾向があり、規制解除に当たっては、実効雨量のみの規準以外の方法を検討する必要がある。
- 本研究で提案する手法では、斜面の安定性評価を考慮することにより、従来の雨量通行規制発令規準と比較して、規制発令回数を大幅に減少させることが可能となった(「きめ細やかで勝つ必要最小限の規制発令」)。

今後の課題(最終年に向けて)

- 本研究で提案した雨量通行規制発令・解除基準を仮想的に運用し、その検証を行う.
- 国道28号線, 雨量通行規制区間内の他の斜面(危険度の高いものを優先して)について同様の調査・解析を実施し, 雨量通行規制規準の高精度化を図る.
- 別路線(例えば, 国道9号線など)で地質・地形状況の異なる斜面について同様の解析を実施し, 雨量通行規制基準の設定を行い, 比較検討することで, 地質・地形の違いによる影響を調べる.
- 間隙水圧, 地下水位の計測に加え, 土壌水分量を計測し, データの蓄積を行うとともに, 計測結果を加味した雨量通行規制発令・解除方法について検討する.
- データ同化手法を用い, 計測結果と解析のマッチングを図ることで, 斜面内の雨水浸透・水収支を正確に表現できるモデルを構築し, 安定性評価と組み合わせることで, 新たな雨量通行規制発令・解除システムを構築する(タンクモデルの活用).