

MIDAS  
CONSTRUCTION  
TECHNICAL  
DOCUMENT  
COLLECTION

地盤変形・トンネル分野 10



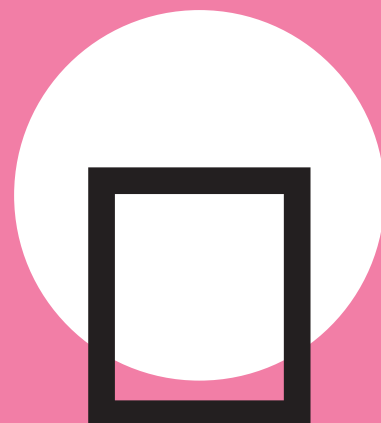
# MIDAS CONSTRUCTION TECHNICAL DOCUMENT COLLECTION

地盤変形・トンネル分野

## 10.

### 土構造物の実務的な 安定解析における諸課題

東京理科大学 龍岡 文夫 名誉教授、  
複合技術研究所 DUTTINE、Antoine 様



2017年2月7日  
MIDAS Geotech Seminar

# 土構造物の実務的な安定解析 における諸課題

東京理科大学土木工学科  
龍岡文夫  
複合技術研究所  
DUTTINE, Antoine

## 前回：土の締固めの原理・方法と設計への反映(本日のテーマ)

安定な土構造物の建設には、乾燥重量と含水比に加えて飽和度を管理した締固めが合理的である。ここでは、この新しい締固め管理法の原理と方法を説明する。締固めの良否とともに、粒径に応じて厚くなるせん断層の発達に伴うひずみ軟化、強度・剛性の異方性、三軸・平面ひずみ圧縮等での強度の関係、排水・非排水強度の関係等を考慮して安定解析に適切に反映することが重要である。この課題を、地震時土圧、基礎支持力、斜面安定を例として説明する。

## 今回：土構造物の実務的な安定解析における諸課題

斜面のスライス法による円弧すべり安定解析は、古典的な土質力学のテーマであり、今更議論の余地はないと通常考えられている。しかし、実務では依然重要であるにも関わらず、設計指針類・教科書等でスライス間土圧、間隙水圧・浸透圧・斜面に作用する水圧、地震力、飽和土の排水条件、非排水繰返し載荷への非排水強度の影響等の取り扱い法が異なる式が示されていて、しかも、その相違の説明が十分ではない。今回、この問題を統一的に説明をして適切に対処する方法を提示する。また、円弧すべり安定解析に基づくNewmark法による剛体すべり変位解析と準静的非線形FEM解析による連続体としての残留変形解析を説明し、飽和土では非排水繰返し載荷と締固めの影響を適切に考慮することが重要であることを説明する。

## 1. 藤沼ダムの事例

2. 円弧すべり安定解析法の理論的基礎と実施に当たっての留意事項
  - 2-1. 混乱した現状
  - 2-2. 円弧すべり安定解析の基礎
  - 2-3. Fellenius法とは
  - 2-4. 地下水位・浸潤面と自由水位の考慮
    - ・浸透流がない場合
    - ・定常浸透流がある場合
  - 2-5. 地震力の取り扱い
  - 2-6. 異なる設計指針等での排水状態での安全率の式の比較
3. Newark-D法と劣化剛性FEMによる盛土の地震時残留変形解析
  - 3-1. Newmark法の経緯
  - 3-2. 飽和土の非排水せん断強度の非排水繰返し载荷による劣化を考慮したNewmark-D法による剛体すべり解析
  - 3-3. 飽和土の非排水せん断剛性・強度の非排水繰返し载荷による劣化を考慮した準静的非線形FEMによる残留変形解析

3

## 2011東日本大震災 福島県の藤沼本堤

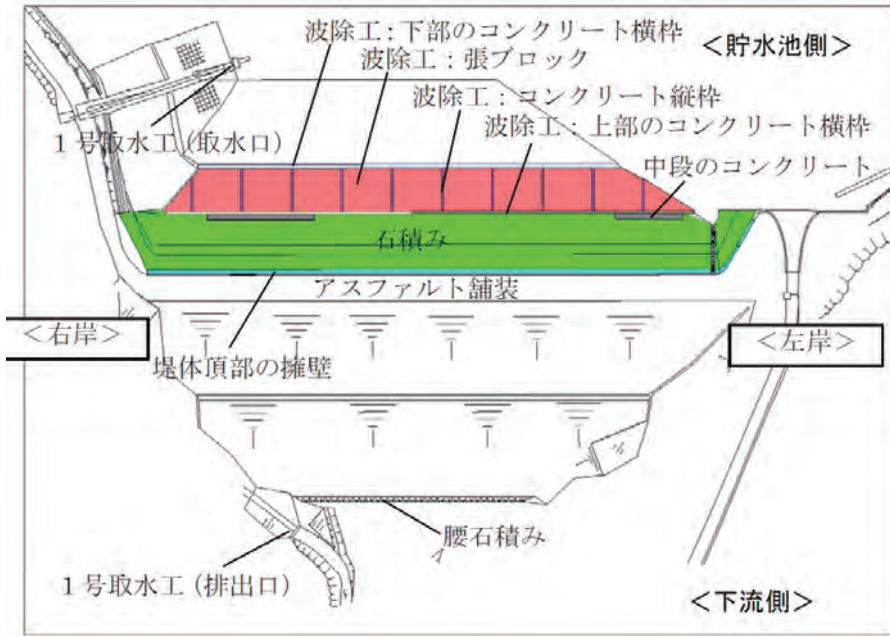
- 農業用灌漑ため池のアースフィルダム(H= 18.5 m; L= 133.2 m、中央・表面遮水壁は無い)
- 着工1937年4月; 第二次世界大戦で中断; 竣工1949年10月.
- 越流による破堤のため、死者7、行方不明1
- 福島県のため池総数 3,000\*. 約750が被災 (\* 全国で250,000)



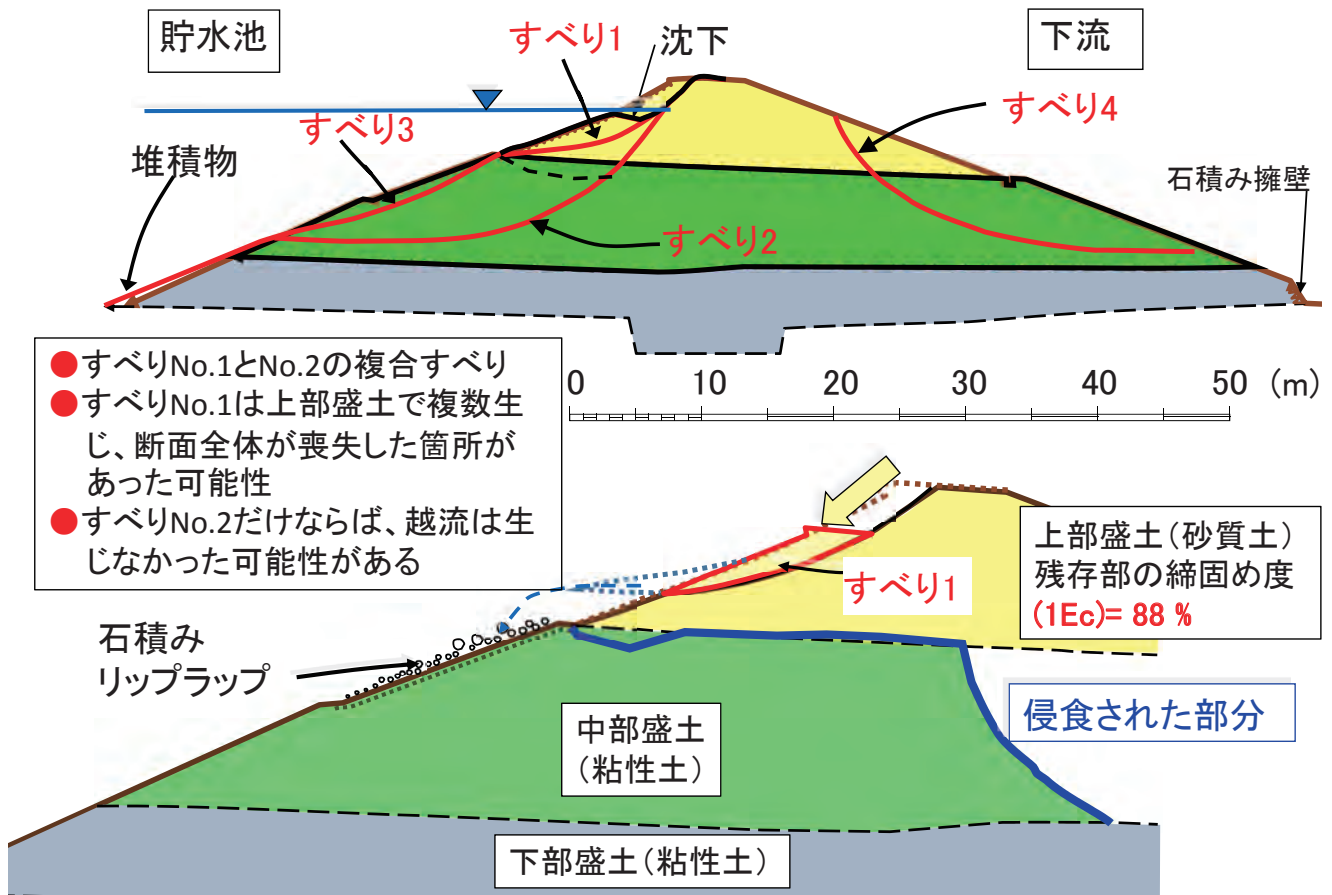
(福島県提供)

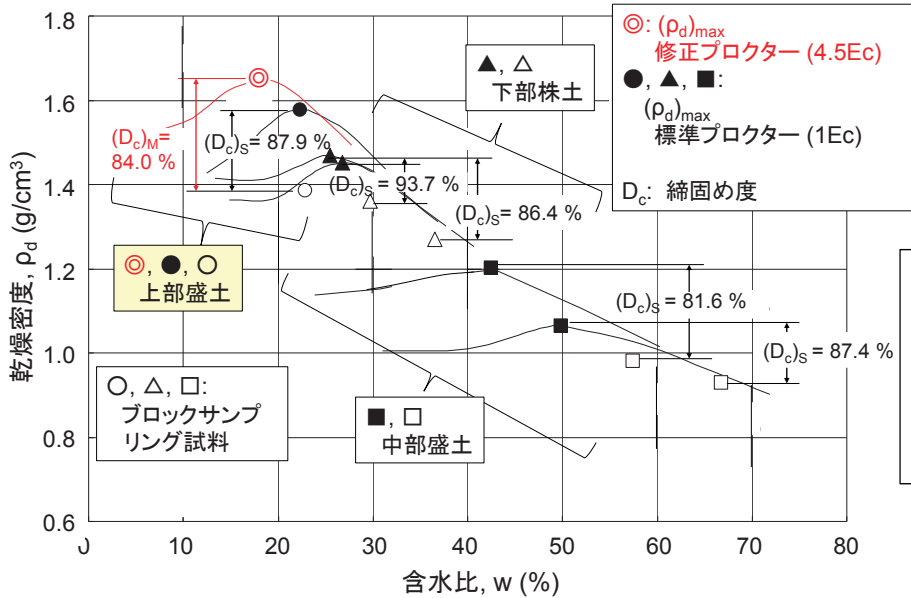
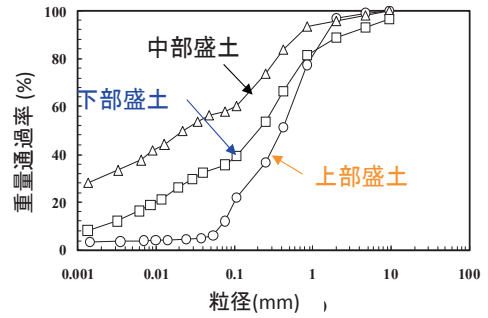
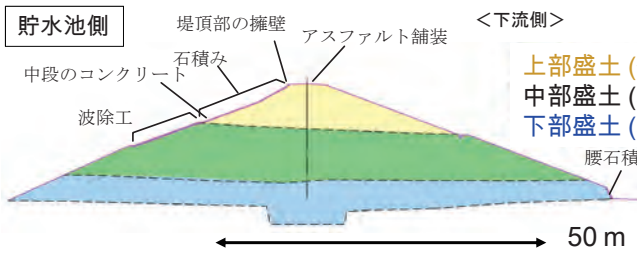


## 破堤前



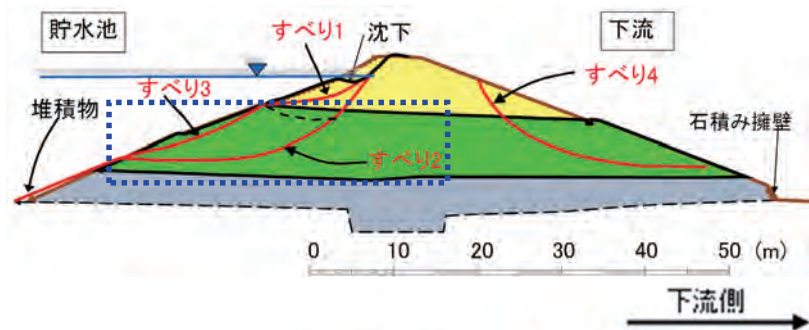
## 藤沼ダム：推定されたすべりNo.1～No.4(生起順)





全般的に低い締固め度  
 $(D_c)_{1Ec} < 90\%$   
 上部盛土は砂質土で  
 $(D_c)_{1Ec}$ が87.9%

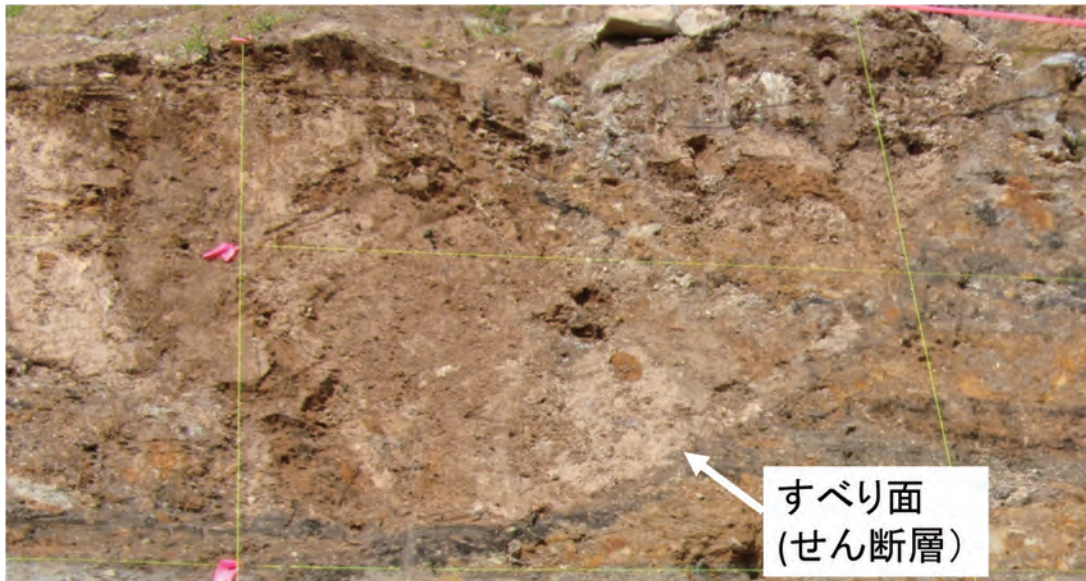
明瞭な円弧すべり破壊



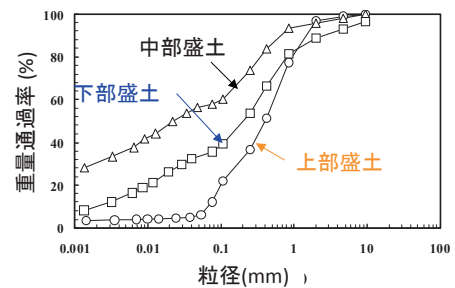
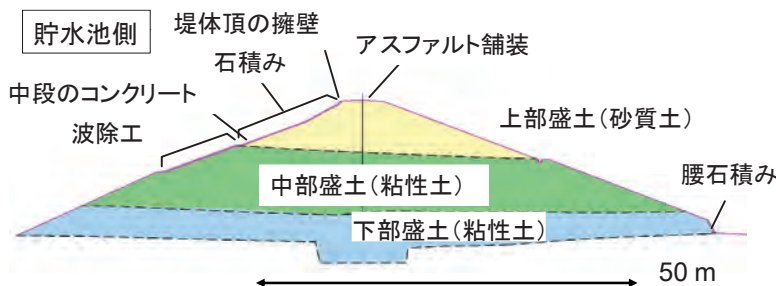


## 明瞭な円弧すべり破壊

b)



9



### ■崩壊の原因(推定):

- 1) 全般的に締固め度が非常に低い(近代的締固め基準がなく、近代的締固め機械もなく締固めエネルギーが不十分)
- 2) 上部盛土は、戦後の最も劣悪な条件の下で建設
  - a) 透水しやすく、侵食されやすい、締固め不足の場合は非排水繰返し載荷によって著しく弱化しやすい砂質土を使用
  - b) 締固め度が特に低い
 ⇒崩壊が上部盛土の一部で開始⇒越流しやすい状況となった  
 一部での越流開始後、早い速度で侵食が進展⇒破堤

### ■このような耐震診断・耐震補強が必要なため池は、全国で一万を超える！

Tanaka, T., Tatsuoka, F., Mohri, Y. (2012): Earthquake Induced Failure of Fujinuma Dam, *Proc. Int. Symp. on Dams for a Changing World, Kyoto, June 5, Vol. 6, pp.47-52.*

## 藤沼ダム：強化復旧工事は2014年度から開始

- 設計条件：崩壊した堤体よりも遥かに安定であり、2011年東日本大震災と同じレベルの地震動を受けても確実に安定であること\*を示す必要がある ⇒ ①盛土材の選択、②十分な締固めが必須

### 従来の慣用耐震設計:

設計せん断応力( $\tau_w$ )<sub>d</sub>:  $k_h = 0.15$  (レベルI設計地震動)

設計せん断強度( $\tau_f$ )<sub>d</sub>:  $1E_c$ での $D_c$ の管理値90%で含水比 $\gg w_{opt}$ での排水強度 → 円弧すべり解析による安全率 $F_s \geq 1.2$ を確認

- この設計法では、実際の流動的な大崩壊は説明できない！

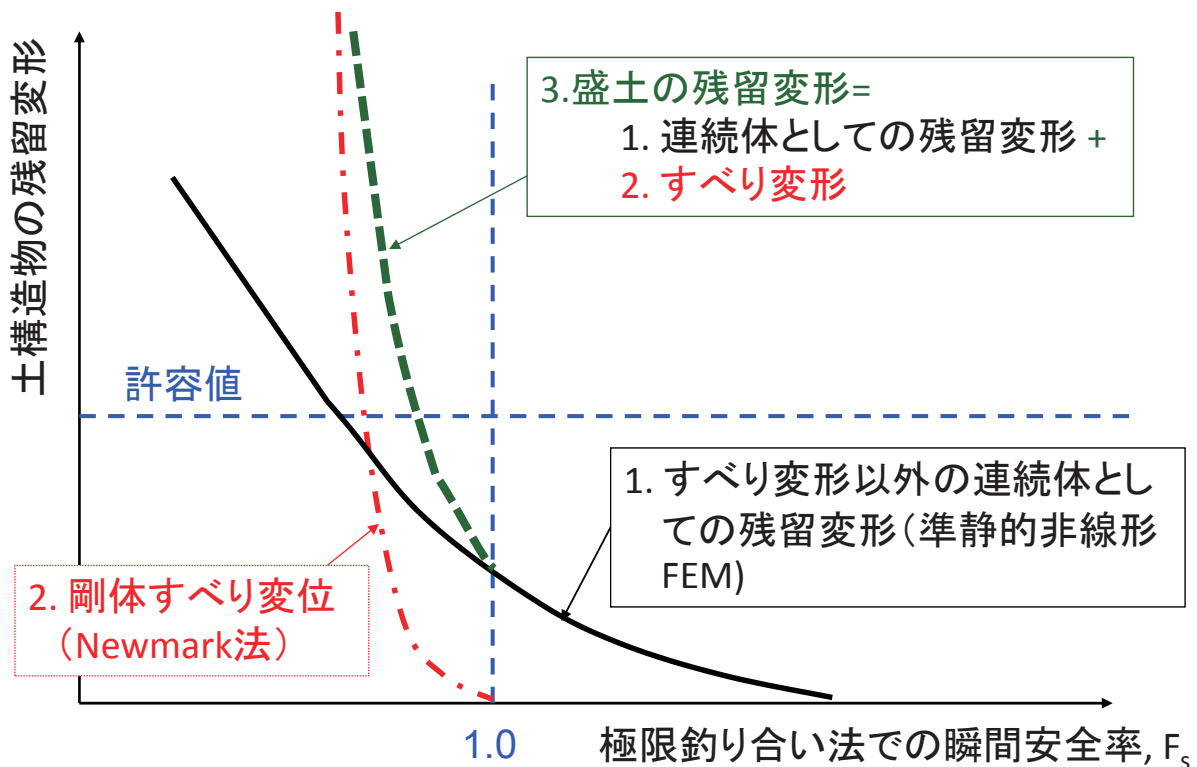
また、復興する堤体がレベル2設計地震動に対して非常に安定であることを示すことができない！

⇒ 旧堤体の崩壊を説明した上で、上記\*を示せる解析法が必要

①飽和部分では非排水せん断挙動であり、②非排水繰返し载荷によって強度と剛性は経時的に劣化することを考慮する必要がある。

⇒ **Newmark法(全応力法に基づく)**によるすべり変位解析と**準静的FEM残留変形解析**による残留変形解析と両解析結果の統合

### 実務的な耐震診断：Newmark-D法とFEMの組み合わせ



1. 藤沼ダムの事例
2. 円弧すべり安定解析法の理論的基礎と実施に当たっての留意事項
  - 2-1. 混乱した現状
  - 2-2. 円弧すべり安定解析の基礎
  - 2-3. Fellenius法とは
  - 2-4. 地下水位・浸潤面と自由水位の考慮
    - ・浸透流がない場合
    - ・定常浸透流がある場合
  - 2-5. 地震力の取り扱い
  - 2-6. 異なる設計指針等での排水状態での安全率の式の比較
3. Newark-D法と劣化剛性FEMによる盛土の地震時残留変形解析
  - 3-1. Newmark法の経緯
  - 3-2. 飽和土の非排水せん断強度の非排水繰返し載荷による劣化を考慮したNewark-D法による剛体すべり解析
  - 3-3. 飽和土の非排水せん断剛性・強度の非排水繰返し載荷による劣化を考慮した準静的非線形FEMによる残留変形解析

13

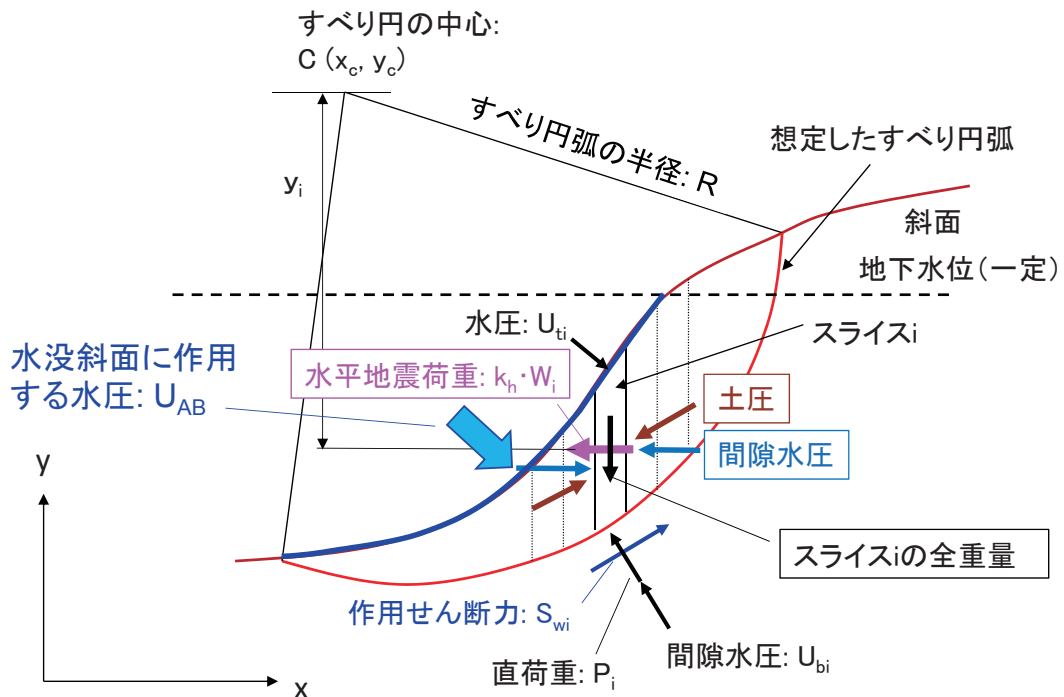
我が国の設計指針等における斜面の円弧すべり極限釣合い法による常時と地震時安定解析で用いられている安全率を求める諸式の総括

注

- 1)この式の背景は、雑誌基礎工の記事に説明してある。
- 2)この内容は、順次修正、追加される。

14

部分的に水没しているが浸透流がなく外荷重 $Q_i=0$ の斜面を対象として比較

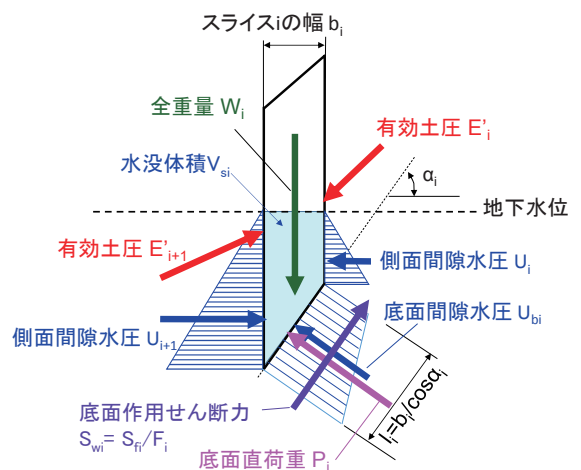


殆どの指針類はFellenius法に基づいている→Fellenius法による式に限定して比較 → 各種要因について異なる仮定 → 異なる式

青字a)の項目が合理的な仮定

- 1)スライス底面の有効直荷重 $P'_i$ を求める  
 際のスライス間の有効土圧に関する仮定
- a)スライス両側面での有効土圧の合力は、  
 スライス底面に平行
- b)スライス両側面での有効土圧のそれぞれがスライス底面に平行
- c)スライス間の有効土圧と間隙水圧を無視する

■地下水位により上のすべり土塊では、これらの仮定での $P'_i$ は同じである。しかし、b)では隣り合うスライス間の土圧に矛盾が生じ、c)では浸透力・地震荷重等の各種要因の $P'_i$ に対する影響を力の多角形に基づいて算定することが出来なくなる。





青字a)の項目が合理的な仮定

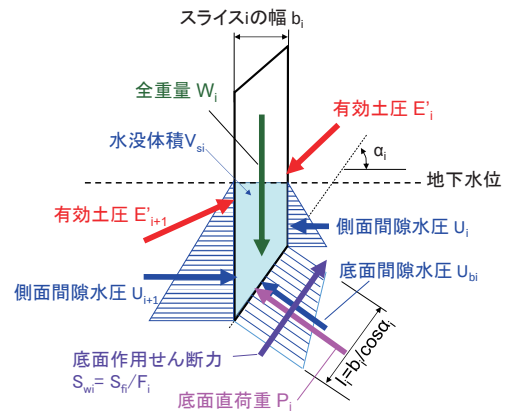
2)スライスの鉛直側面での間隙水圧の作用

方向:

a)水平(力学的に正しい):

いわゆる修正Fellenius法

b)無視 または スライス底面に平行(力学的に不合理で、スライス底面が急勾配になるほど $P'_i < 0$ となる): 古典的なFellenius法



3)滑動moment $M_d$ を計算する時の部分的/完全水没スライスの自重と斜面に作用する水圧 $U_{AB}$ の考慮法:

a)「有効重量 $W'_i$ を用いて $U_{AB}$ は用いない方法」と「全重量 $W_i$ と $U_{AB}$ を用いる方法」: 両者は等価であり、力学的に正しい

b)「 $W_i$ を用いて $U_{AB}$ を考慮しない」方法。

1)盛土内の地下水位が存在しない場合は正解

2)地下水位が高いが浸透流が無い場合は力学的に不合理で安全側 完全に水没して浸透流が無い斜面では安全率を約1/2に過小評価

3)浸潤面が高く斜面下方に向かう浸透流があるが斜面に水圧が作用していない斜面に対しては、実務的にほぼ妥当な近似法

17

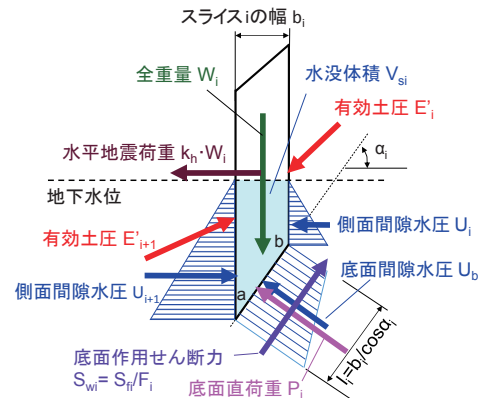
4)水平地震荷重の考慮の有無とその作用位置:

a)  $k_h \cdot W_i$ はスライスの重心に作用するとして $M_d$ を算定(力学的に正しい)

b)  $k_h \cdot W_i$ はスライスの底面に作用するとして $M_d$ を算定(力学的に不合理)

c)地震荷重によって生じる $\Delta u$ は考慮するが $k_h$ は考慮しない(地震動終了直後の安定性を検討していることになる)

d)耐震設計をせず常時の排水条件( $k_h=0$  &  $\Delta u=0$ )での安定性だけを確認



5)飽和土の地震時の排水条件:

a)飽和土に対して非排水条件

a1) 全応力法に基づき、非排水繰返し载荷による低下を考慮した非排水せん断強度

a2)  $\Delta u$ 法によって非排水せん断強度を算定

Newmark法に適用する場合は $k_h$ による $M_d$ を考慮する必要がある

b)常に排水条件と仮定

緩い土では危険側、密な土では安全側の仮定

18

## 各種設計指針等でのFellenius法による安全率計算式の設定条件

影響要因 解析法	滑動モーメント $M_G$ の影響要因			抵抗モーメント $M_R$ の影響要因(スライス底面有効直荷重 $P'_i$ の計算法)									備考
	常時の自重	地震荷重(水平)	$k_h \cdot W_i$ 載荷位置	スライス側面での常時及び地震時土圧	スライス側面での常時間隙水圧 $U_s$	浸潤面の位置	浸透力	地震時に排水状態の場合のせん断強度	飽和土の地震時せん断強度				
									排水せん断強度	全応力法	有効応力法( $\Delta u$ 法)		
Newmark-S	$W'_i$ もしくは $W_i \& U_{AB}$	$k_h \cdot W_i$	スライス重心	スライス底面に平行 <sup>1)</sup>	水平に作用 <sup>2)</sup>	考慮	上流側斜面では無視	$k_h \cdot W_i$ により $P'_i$ は減少	左に同じ	非排水せん断強度	有効応力法( $\Delta u$ 法)	1)Fellenius法での仮定 2)スライスの有効重量 $W'_i$ から $P'_i$ を計算、力学的に合理的	
Newmark-D													非排水繰返し載荷により劣化
国土省河川管理施設等構造令、河川砂防技術基準フィルダム対象	$W'_i$ もしくは $W_i \& U_{AB}$	$k_h \cdot W_i$	スライス底面 <sup>3)</sup>	スライス底面に平行	水平に作用 <sup>2)</sup>	考慮	考慮?	$k_h \cdot W_i$ により $P'_i$ は減少	左に同じ	有効応力法( $\Delta u$ 法)	有効応力法( $\Delta u$ 法)	3)見掛け上、 $M_G$ を過大評価 4)飽和土の地震時非排水強度を、緩い土では過大評価、密な土では過小評価	
フィルダム耐震設計指針平成3年5月													スライス重心
土地改良事業計画設計基準平成15年4月	$W'_i$ もしくは $W_i \& U_{AB}$	$k_h \cdot W_i$	スライス底面	スライス底面に平行	水平に作用 <sup>2)</sup>	考慮	考慮?	$k_h \cdot W_i$ により $P'_i$ は減少	左に同じ	UU試験に基づく。地震時 $P'_i$ =初期値- $k_h \cdot W_i \cdot \cos \alpha$ <sup>6)</sup>	有効応力法( $\Delta u$ 法)	5) $CU(c', \phi')$ 或いは $CD(c_d, \phi_d)$ 6)非排水状態で地震荷重の影響を考慮する意味が不明	
土地改良事業設計指針「ため池整備」平成27年5月1日													砂質土は $CD(c_d, \phi_d)$ 、粘性土 $CU(c', \phi')$
土地改良事業設計指針「ため池整備」平成27年5月1日	$W_i \& U_{AB}$	$k_h \cdot W_i$	記述なし	記述なし	記述なし	考慮	考慮?	記述なし	砂質土は $CD(c_d, \phi_d)$ 、粘性土 $CU(c', \phi')$	慣性直後に限りUU試験に基づく $c_{UU}, \phi_{UU}$	有効応力法( $\Delta u$ 法)	全体として詳細は不明。おそらく、上記基準と同様であろう。	

19

影響要因 解析法	滑動モーメント $M_G$ の影響要因			抵抗モーメント $M_R$ の影響要因(スライス底面有効直荷重 $P'_i$ の影響要因)									備考
	常時の自重	地震荷重(水平)	$k_h \cdot W_i$ 載荷位置	スライス側面での常時及び地震時土圧	スライス側面での常時間隙水圧 $U_s$	浸潤面の位置	浸透力	地震時に排水状態の場合のせん断強度	飽和土の地震時せん断強度				
									排水せん断強度	全応力法	有効応力法( $\Delta u$ 法)		
鉄道構造物等設計基準・同解説平成19年1月	$W_i(U_{AB})$ に関する注記なし	$k_h \cdot W_i$	スライス重心	スライス底面に平行	水平に作用	考慮(暗黙的)	無視	$k_h \cdot W_i$ により $P'_i$ は減少	左に同じ <sup>7)</sup>	有効応力法( $\Delta u$ 法)	有効応力法( $\Delta u$ 法)	7)飽和土で非排水強度を使用する規定はない。	
河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)平成24年2月													考慮しない <sup>9)</sup>
道路土工盛土工指針(平成22年4月)	$W_i(U_{AB})$ に関する注記なし	$k_h \cdot W_i$	スライス重心	スライス底面に平行	水平に作用	考慮(暗黙的)	無視	$k_h \cdot W_i$ により $P'_i$ は減少	左に同じ	有効応力法( $\Delta u$ 法)	有効応力法( $\Delta u$ 法)	盛土が主として慣性力で崩壊する考えられる場合	
道路土工軟弱地盤対策工指針(平成24年8月)													考慮しない <sup>9)</sup>
港湾の施設の技術上の基準・同解説(平成19年7月)	$W_i(U_{AB})$ に関する注記なし	考慮しない	スライス重心	スライス底面に平行	水平に作用	$M_i$ に対しては考慮、 $M_d$ に対しては不明	考慮しない	$k_h \cdot W_i$ により $P'_i$ は減少	左に同じ	有効応力法( $\Delta u$ 法)	有効応力法( $\Delta u$ 法)	11)繰返しせん断ひずみの大きさを考慮した全応力強度(動的強度)(おそらく、非常に低い $F_s$ となる)	
宅地防災マニュアルの解説(平成10年3月)													$k_h \cdot W_i$

20

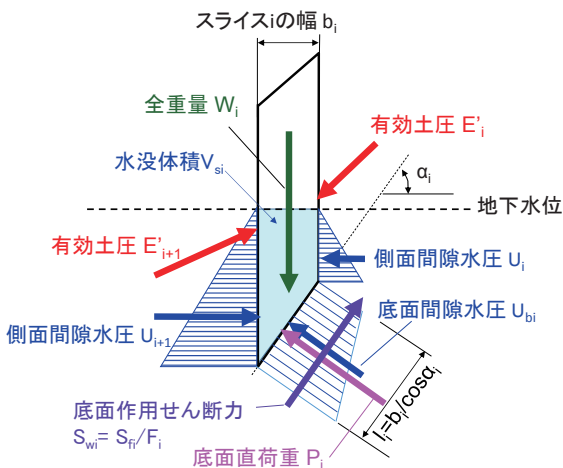
影響要因 解析法	滑動モーメント $M_0$ の影響要因			抵抗モーメント $M_1$ の影響要因(スライス底面有効直荷重 $P'_i$ の影響要因)							備考
	常時の自重	地震荷重(水平)	$k_h \cdot W$ 載荷位置	スライス側面での常時及び地震時土圧	スライス側面での常時間隙水圧 $U_s$	浸潤面位置	浸透力	地震時に排水状態の場合のせん断強度	飽和土の地震時せん断強度		
									排水せん断強度	非排水せん断強度	
								全応力法	有効応力法( $\Delta u$ 法)		
道路土工、切土・斜面安定工指針(平成21年度版)	$W_i(U_{AB})$ に関する注記なし	考慮しない <sup>12)</sup>		スライス底面に平行	水平に作用	考慮(暗黙的)	無視	$k_h \cdot W$ による $P'_i$ の減少は考慮しない <sup>13)</sup>			13)そもそも、耐震設計を行わない
Newmark- $\Delta u$ 法 河川堤防の指針に準拠した場合	$W_i(U_{AB})$ に関する注記なし	$k_h \cdot W_i$ <sup>14)</sup>	スライス重心	スライス底面に平行	水平に作用	考慮	無視			スライス側面で $\Delta u$ は水平 <sup>15)</sup>	14) $\Delta u$ と $k_h \cdot W$ を同時に考慮 15)非排水繰返し三軸試験で各繰返しサイクルでの $\Delta u$ の最大値から求めた値
Newmark- $\Delta u$ 法 自重による $M_0$ に関して正しい方法	$W'_i$ もしくは $W_i$ & $U_{AB}$	$k_h \cdot W_i$ <sup>14)</sup>	スライス重心	スライス底面に平行	水平に作用	考慮	無視			スライス側面で $\Delta u$ は水平 <sup>15)</sup>	
宅地防災研究会(2000):改訂版宅地防災マニュアルの解説[1]、平成12年5月	$W_i(U_{AB})$ に関する注記なし	$k_h \cdot W_i$	スライス重心	スライス底面に平行	水平に作用 <sup>16)</sup> スライス底面に平行 <sup>16, 17)</sup>	考慮(暗黙的)	無視	$k_h \cdot W$ により $P'_i$ は減少	左に同じ		16)原理的に異なった複数の式が示されている 17) $P'_i$ を過小評価、 $M_1$ を過小評価

### 各種設計指針等での安全率計算式を統一した表現にするための定義

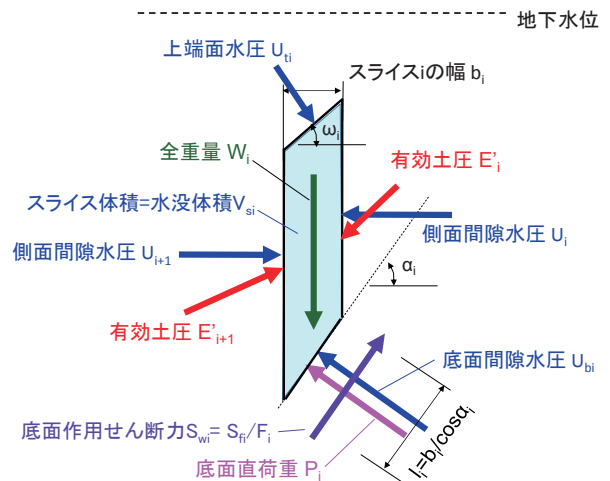
スライスの自重の定義:

- ①全重量 $W_i$ : スライスが地下水位の上か、部分的あるいは完全に水没しているにかかわらず、全単位体積重量 $\gamma_{total}$ (飽和あるいは不飽和)を用いて計算した重量
- ②有効重量 $W'_i =$ 全重量 $W_i -$ 浮力 $W_{bi}$ : 地下水位の上では $\gamma_{total}$ を、地下水位より下では水中重量 $\gamma'$ を用いて計算した重量、 浮力 $W_{bi} = V_{si} \cdot \gamma_w$

#### 部分的に水没しているスライス



#### 完全に水没しているスライス



各種設計指針等での安全率計算式を統一した表現にするための定義

浸透流がない斜面での滑動モーメント $M_d$ （両者は同じ内容）:

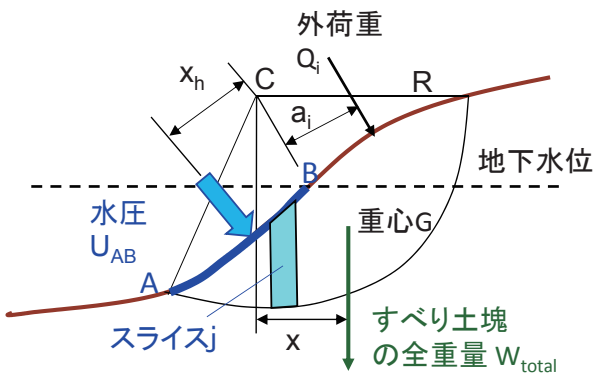
■有効応力的表現:  $M_d = \sum(R \cdot W'_i \cdot \sin \alpha_i) = W'_{total} \cdot x'$  (1)

■全応力的表現:  $M_d = \sum(R \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w = W_{total} \cdot x - M_w$  ( $M_w = U_{AB} \cdot x_h$ ) (2)

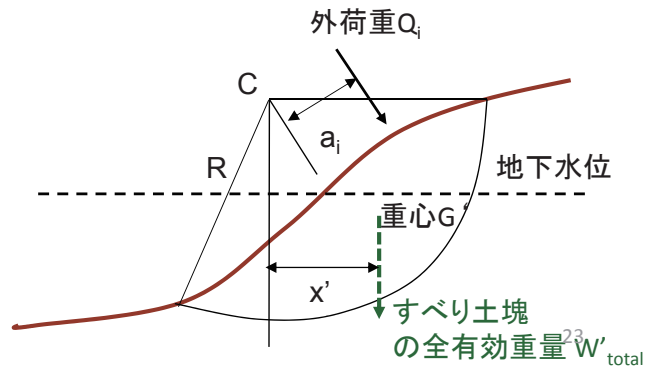
式2の根拠

- ①  $M_w = U_{AB} \cdot x_h$  は完全水没スライスの上端に作用する水圧による $M_d$ の合計。
- ② 隣り合うスライスの側面の間隙水圧による $M_d$ はキャンセルされて $M_d$ を生じない。
- ③ スライス底面に作用する間隙水圧は $M_d$ を生じない。

a) 全応力的表示



b) 有効応力的表示



各種設計指針等での安全率計算式

解析法	安全率 $F_s = \text{Min}(F_{global})$ の $F_{global}$ の内容 ( $Q_i = 0$ の場合)		備考
	初期状態(常時)	地震時(排水条件、もしくは非排水条件)	
Newmark-S	$\frac{\sum [c'_i \cdot l_i + W'_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R}$	排水条件: $y_i$ は $k_h \cdot W_i$ の円弧中心までの腕の長さ $\frac{\sum [c'_i \cdot l_i + (W'_i \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i / R)}$	
Newmark-D	あるいは、 $\frac{\sum [c'_i \cdot l_i + (W_i - W_{bi}) \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R}$ $W_{bi}$ はスライスに作用する浮力 $= u_i \cdot b_i$  分母では、有効重量 $W'_i = \text{全重量} W_i - \text{浮力} W_{bi}$ を用いている。これは $W_i$ と外水圧 $U_{AB}$ を用いた式と等価である。	非排水条件: $\tau_{fu}$ は、全応力法で求めた劣化を考慮した非排水せん断強度 $\frac{\sum [\tau_{fu}]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i / R)}$	
国土省河川管理施設等構造令、河川砂防技術基準(フィルダムが対象)		飽和しているかどうかに関わらず全て排水条件: $\frac{\sum [c'_i \cdot l_i + (W'_i \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R + k_h \cdot \sum (W_i \cdot \cos \alpha_i)}$	
フィルダム耐震設計指針平成3年5月		Newmark-S法とおなじ 飽和しているかどうかに関わらず全て排水条件: $\frac{\sum [c'_i \cdot l_i + (W'_i \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i / R)}$	
土地改良事業計画設計基準平成15年4月		飽和しているかどうかに関わらず全て排水条件: $\frac{\sum [c'_i \cdot l_i + (W'_i \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R + k_h \cdot \sum (W_i \cdot \cos \alpha_i)}$	国土省と同じ
土地改良事業設計指針「ため池整備」平成27年5月1日	明確な記述がない	明確な記述がない	

解析法	安全率 $F_s = \text{Min}(F_{\text{global}})$ の $F_{\text{global}}$ の内容 (Q <sub>i</sub> =0の場合)		備考
	初期状態(常時)	地震時(排水条件、もしくは非排水条件)	
鉄道構造物等設計標準・同解説平成19年1月	$\frac{\sum [c'_{\beta_i} \cdot l_i + W'_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i)}$	飽和しているかどうかに関わらず全て排水条件: $\frac{\sum [c'_{\beta_i} \cdot l_i + (W'_i \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W'_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W'_i \cdot y_i / R)}$	Newmark-S法と同じ
河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)平成24年2月	あるいは、 $\frac{\sum [c'_{\beta_i} \cdot l_i + (W_i - W_{bi}) \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i)}$ U <sub>bi</sub> は部分的に水没したスライスでの底面での間隙水圧=u <sub>i</sub> ・l <sub>i</sub> W <sub>bi</sub> はスライスに作用する浮力  分母に全重量W <sub>i</sub> を用いて、斜面に作用する水圧U <sub>AB</sub> による抵抗モーメントが含まれていない。従って、U <sub>AB</sub> >0の斜面に対してはM <sub>d</sub> を過大評価	排水条件: $\frac{\sum [c'_{\beta_i} \cdot l_i + (W'_i \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W'_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W'_i \cdot y_i / R)}$  非排水条件: 地震荷重によるΔU <sub>bi</sub> は考慮するがk <sub>h</sub> ・W <sub>i</sub> は考慮しない(地震動終了時が対象) $\frac{\sum [c'_{\beta_i} \cdot l_i + \{W'_i - (U_{bi} + \Delta U_{bi}) \cdot \cos \alpha_i\} \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i)}$  この式は部分的に水没したスライスが対象であり、完全水没したスライスに対しては書き直す必要がある。	上と同じ式  所謂Δu法
道路土工盛土工指針(平成22年4月)	U <sub>AB</sub> =0の斜面では、分子で浸透力の影響で考慮した実用的な近似式となっている。	飽和しているかどうかに関わらず全て排水条件: $\frac{\sum [c'_{\beta_i} \cdot l_i + (W'_i \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W'_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W'_i \cdot y_i / R)}$	それぞれの式を適用する条件は、上の表を参照
道路土工軟弱地盤対策工指針(平成24年8月)		非排水条件: 地震荷重によるΔU <sub>bi</sub> は考慮するがk <sub>h</sub> ・W <sub>i</sub> は考慮しない $\frac{\sum [c'_{\beta_i} \cdot l_i + \{W'_i - (U_{bi} + \Delta U_{bi}) \cdot \cos \alpha_i\} \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i)}$  非排水条件: τ <sub>f</sub> は、全応力法で求めた劣化を考慮した非排水せん断強度 $\frac{\sum [\tau_{f,u}]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W'_i \cdot y_i / R)}$	指針では式は示されていない。文章から解釈。
道路土工、切土・斜面安定工指針(平成21年度版)		排水条件: 地震力によるΔU <sub>bi</sub> とk <sub>h</sub> ・W <sub>i</sub> を考慮しない $\frac{\sum [c'_{\beta_i} \cdot l_i + W'_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i)}$	常時に対する式と同じ 25

解析法	安全率 $F_s = \text{Min}(F_{\text{global}})$ の $F_{\text{global}}$ の内容 (Q <sub>i</sub> =0の場合)		備考
	初期状態	地震時(排水条件、もしくは非排水条件)	
Newmark-Δu法 河川堤防の指針に準拠してΔuとともに地震荷重を考慮した場合	$\frac{\sum [c'_{\beta_i} \cdot l_i + (W_i - U_{bi} \cdot \cos \alpha_i) \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i)}$ 分母にW <sub>i</sub> を用いてU <sub>AB</sub> による抵抗モーメントが含まれていない。従って、U <sub>AB</sub> >0の斜面に対してはM <sub>d</sub> を過大評価。しかし、U <sub>AB</sub> =0の斜面では、分子で浸透力の影響で考慮した実用的な近似式	非排水条件: 地震荷重によるΔU <sub>bi</sub> とk <sub>h</sub> ・W <sub>i</sub> を同時に考慮 $\frac{\sum [c'_{\beta_i} \cdot l_i + \{W'_i - (U_{bi} + \Delta U_{bi}) \cdot \cos \alpha_i\} \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W'_i \cdot y_i / R)}$ 分母にW <sub>i</sub> を用いてU <sub>AB</sub> による抵抗モーメントが含まれていない。従って、U <sub>AB</sub> >0の斜面に対してはM <sub>d</sub> を過大評価。しかし、U <sub>AB</sub> =0の斜面では、分子で浸透力の影響で考慮した実用的な近似式	式の形は要確認
Newmark-Δu法 自重によるM <sub>d</sub> に関して正しい方法	$\frac{\sum [c'_{\beta_i} \cdot l_i + W'_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R}$	$\frac{\sum [c'_{\beta_i} \cdot l_i + \{W'_i - (U_{bi} + \Delta U_{bi}) \cdot \cos \alpha_i\} \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R + k_h \cdot \sum (W'_i \cdot y_i / R)}$	
港湾の施設の技術上の基準・同解説(平成19年7日)	$\frac{\sum [c'_{\beta_i} \cdot l_i + W'_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i)}$ 分母でW <sub>i</sub> を用いてU <sub>AB</sub> による抵抗モーメントが含まれていない。完全に水没した斜面に対して、安全率をかなり(1/2程度に)過小評価する。	記述がない。	簡易Bishop法も併記されている
宅地防災マニュアルの解説(平成10年3月)	$\frac{\sum [c'_{\beta_i} \cdot l_i + (W'_i \cdot \cos \alpha_i - U_{bi}) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i)}$ 分母にW <sub>i</sub> を用いて、U <sub>AB</sub> による抵抗モーメントが含まれていない。従って、U <sub>AB</sub> >0の斜面に対してはM <sub>d</sub> を過大評価。しかし、U <sub>AB</sub> =0の斜面では、分子で浸透力の影響で考慮した実用的な近似式	飽和しているかどうかに関わらず全て排水条件: 分子が異なる二つの式が示されている $\frac{\sum [c'_{\beta_i} \cdot l_i + \{W'_i \cdot \cos \alpha_i - U_{bi}\} - k_h \cdot W'_i \cdot \sin \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W'_i \cdot y_i / R)}$ $\frac{\sum [c'_{\beta_i} \cdot l_i + (W'_i \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W'_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W'_i \cdot y_i / R)}$	所謂有効応力法の場合



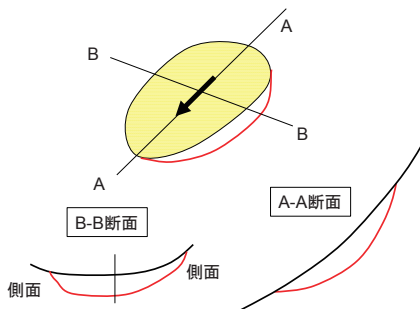
1. 藤沼ダムの事例
2. 円弧すべり安定解析法の理論的基礎と実施に当たっての留意事項
  - 2-1. 混乱した現状
  - 2-2. 円弧すべり安定解析の基礎
  - 2-3. Fellenius法とは
  - 2-4. 地下水位・浸潤面と自由水位の考慮
    - ・浸透流がない場合
    - ・定常浸透流がある場合
  - 2-5. 地震力の取り扱い
  - 2-6. 異なる設計指針等での排水状態での安全率の式の比較
3. Newark-D法と劣化剛性FEMによる盛土の地震時残留変形解析
  - 3-1. Newmark法の経緯
  - 3-2. 飽和土の非排水せん断強度の非排水繰返し载荷による劣化を考慮したNewmark-D法による剛体すべり解析
  - 3-3. 飽和土の非排水せん断剛性・強度の非排水繰返し载荷による劣化を考慮した準静的非線形FEMによる残留変形解析

27

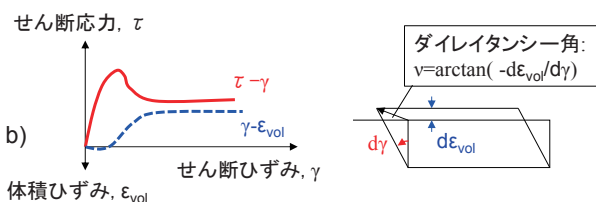
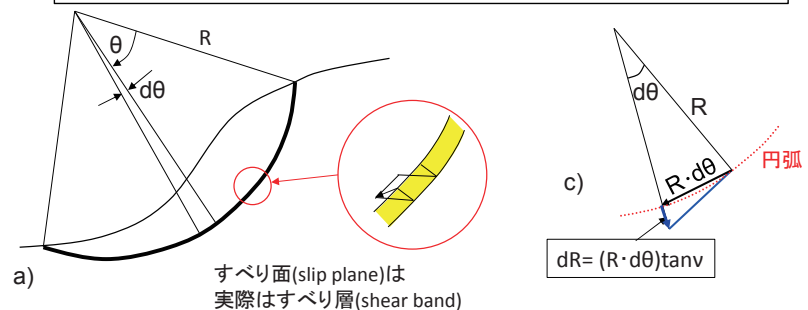
スライス法の構造 (step 1→step 4⑦):

- 1) すべり土塊の形状に関する仮定: 二次元
- 2) すべり面の形状に関する仮定: 円弧
- 3) 試行すべり面の仮定

三次元的すべりを  
二次元すべりでモデル化



すべり土塊の運動学(kinematics):  
Shear band が膨張していれば対数螺旋:  
 $R=R_0 \cdot \exp[\tan v \cdot (\theta - \theta_0)]$   
すべり量が多くなると実質的に  $v=0 \rightarrow$  円弧  $r_s$



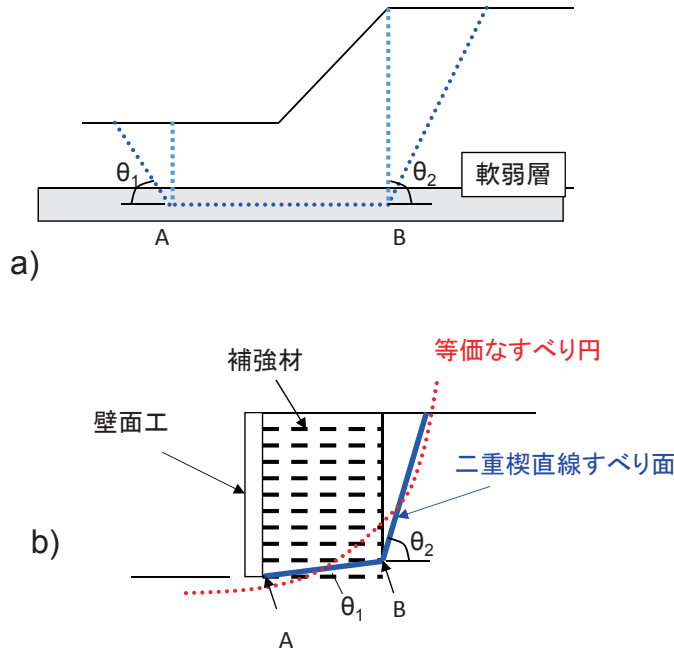
28



複合直線すべり面の例:

a) 水平軟弱薄層が存在する場合

b) 強度が明確に異なる領域で構成されている場合: 例) 補強土擁壁



29

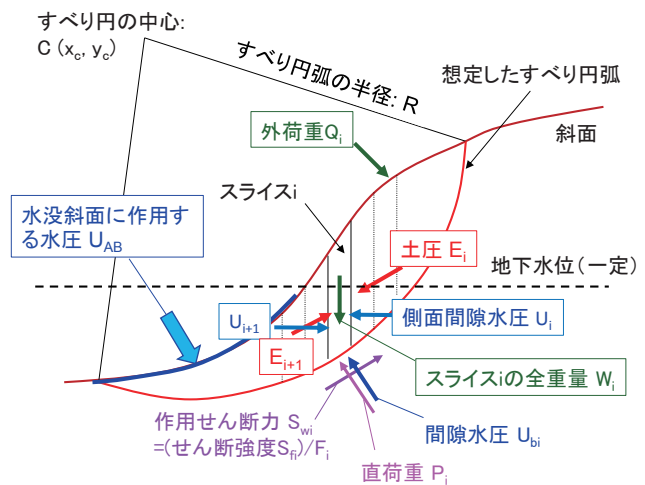
4) スライス法による円弧すべり極限釣り合い解析

- ① 試行すべり円弧に囲まれたすべり土塊を n 個の鉛直 slice に分割
- ② 円弧すべり安定解析での最も基本的な概念は、個々のスライスで定義される「土のせん断破壊に対する局所的安全率」:

$$F_i = \frac{\tau_{fi}}{\tau_{wi}}$$

$\tau_{wi}$ : 作用せん断応力

$$\tau_{fi} = c'_i + (\sigma_{ni} - u_i) \cdot \tan\phi'_i$$



30

## 4) 円弧すべりでの極限釣り合い解析

③すべり土塊全体の試行すべり面の中心Cの周りの抵抗モーメント $M_r$ の滑動モーメント $M_d$ に対する比で定義した全体安全率 $F_{global}$ は、

$$F_{global} = \frac{M_r}{M_d} = \frac{\sum \{R \cdot (\tau_{fi} \cdot l_i)\}}{\sum \{R \cdot (\tau_{wi} \cdot l_i)\}} \quad F_{global} = \frac{M_r / R}{M_d / R} = \frac{\sum (\tau_{fi} \cdot l_i)}{\sum (\tau_{wi} \cdot l_i)} = \frac{\sum (F_i \cdot \tau_{wi} \cdot l_i)}{\sum (\tau_{wi} \cdot l_i)}$$

④実際のすべり破壊は、必ず進行的。しかし、スライスNo. 1から最終スライスNo. nまで $F_i$ が全て等しいと仮定すると(即ち、破壊は進行的ではないと仮定すると)、個々のスライスに対する $F_i = \tau_{fi} / \tau_{wi}$ とすべり土塊全体に対する $F_{global}$ は同じになる。

$F_1 = F_2 = F_3 = \dots = F_i = \dots = F_n = F$  とすると、

$$\rightarrow F_{global} = \frac{\sum (F_i \cdot \tau_{wi} \cdot l_i)}{\sum (\tau_{wi} \cdot l_i)} = \frac{\sum (F \cdot \tau_{wi} \cdot l_i)}{\sum (\tau_{wi} \cdot l_i)} = \frac{F \cdot \sum (\tau_{wi} \cdot l_i)}{\sum (\tau_{wi} \cdot l_i)} = F$$

$F_{global}$ と $F_1 = F_2 = F_3 = \dots = F_i = \dots = F_n = F$ が一致する

31

4) ④実際は、すべり破壊が進行的で、

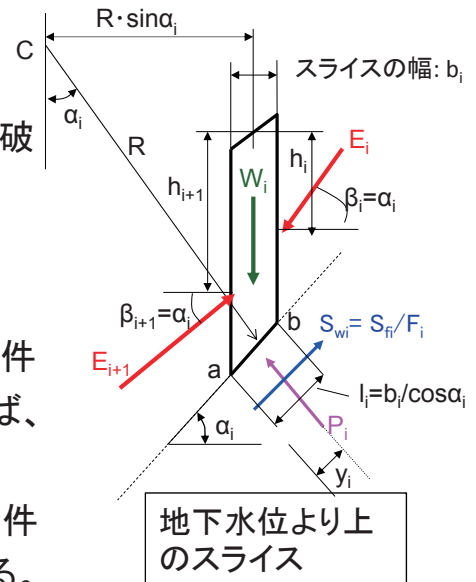
$$F_{global} \neq F_1 \neq F_2 \neq F_3 \neq \dots \neq F_i$$

→通常用いている安全率の基本的な定義は、進行性破壊の有無にかかわらず成り立つ以下の式:

$$F_{global} = \frac{M_r}{[M_d]_{Sw}} = \frac{R \cdot \sum (\tau_{fi} \cdot l_i)}{R \cdot \sum (\tau_{wi} \cdot l_i)} = \frac{R \cdot \sum (S_{fi})}{R \cdot \sum (S_{wi})} = \frac{\sum (S_{fi})}{\sum (S_{wi})}$$

(1)全てのスライスで $P'_i$ が力とモーメントの釣合いの条件を満たし、せん断強度 $S_{fi} = C'_i + P'_i \cdot \tan \phi'$ が正しければ、 $M_r$ は正解である。

(2)全てのスライスで $S_{wi}$ が力とモーメントの釣合いの条件を満たしていれば、 $[M_d]_{Sw} = R \cdot \sum (\tau_{wi} \cdot l_i)$ は正解である。



しかし、(1)が厳密に成り立つ実用的解法はない。Fellenius法では、 $M_r$ は近似解。また、(2)で言う**正解**の $[M_d]_{Sw}$ を求めるのは厳密法でも困難。Fellenius法では、近似値。従って、Fellenius法を含めて通常は**スライス自重 $W_i$ 等、地震荷重等による $[M_d]_{direct}$** を求めている。**正しく求めた $[M_d]_{direct}$** は、**正解の $[M_d]_{Sw}$** と等しい。ただし、 $W'_i$ と $W_i$ を混用するなど  $[M_d]_{direct}$ の算定を間違えている場合がある。これらは、後で詳しく説明。

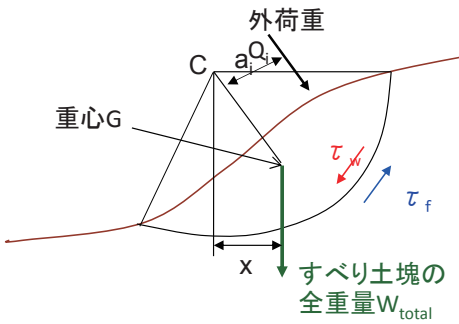
32

4) ⑤ 滑動モーメント  $M_d$  を求める:

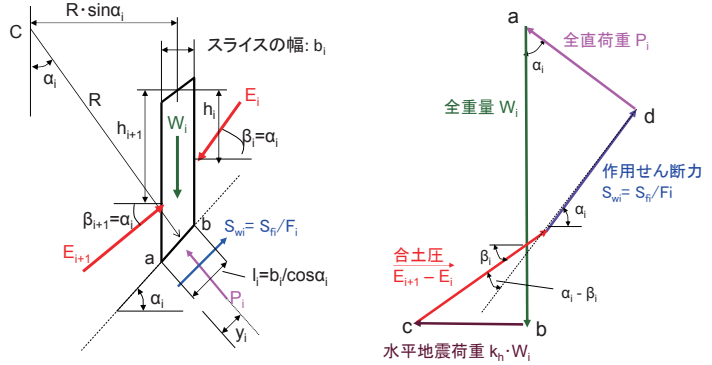
(1)  $[M_d]_{Sw} = R \cdot \sum(\tau_{wi} \cdot l_i) = R \cdot \sum(S_{wi})$  ( $M_d$ の本来の定義)

(2)  $[M_d]_{direct} = R \cdot \sum(W_i \cdot \sin \alpha_i) + \sum(Q_i \cdot a_i) = W_{total} \cdot x + \sum(Q_i \cdot a_i)$

隣り合うスライスの側面の土圧による滑動モーメントは打消し合い、スライス底面に作用する直荷重  $P_i$  による滑動モーメントはゼロ → 両者は(2)式には表れない。



すべり土塊に作用する滑動モーメント  $M_d$  (地震力、浸透力が無い場合)



地下水位よりも上のスライス  $i$  の幾何学条件と荷重条件 (外荷重、地震力が無い場合)

全てのスライスで  $s_{wi}$  と他の荷重・力の成分との間で力とモーメントの釣合いの条件が満たされていれば、正しく計算された(1)と(2)は同じ結果。

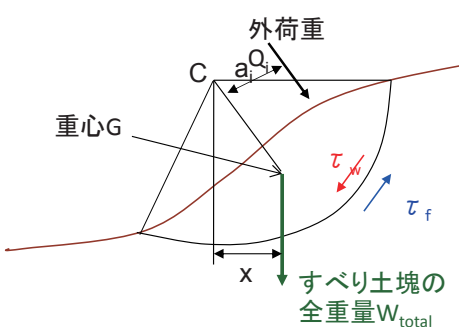
33

4) ⑤ 滑動モーメント  $M_d$  を求める:

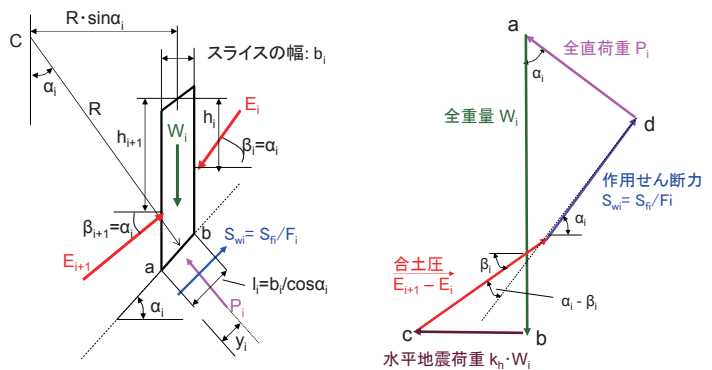
(1)  $[M_d]_{Sw} = R \cdot \sum(\tau_{wi} \cdot l_i) = R \cdot \sum(S_{wi})$  ( $M_d$ の本来の定義)

(2)  $[M_d]_{direct} = R \cdot \sum(W_i \cdot \sin \alpha_i) + \sum(Q_i \cdot a_i) = W_{total} \cdot x + \sum(Q_i \cdot a_i)$

(2)式は、スライス間の土圧の大きさ、方向、位置に関する仮定が異なるFellenius法、Bishop法、Janbu法などに共通して、正解である。通常は、(2)式を用いている。しかし、フィルダム、ため池堤体では、地震時に対して(1)に基づく近似解を用いている(水平地震荷重をスライス底面に加えていることと等価)。(2)式による  $M_d$  よりも大きくなる(後述)



すべり土塊に作用する滑動モーメント  $M_d$  (地震力、透水力が無い場合)



地下水位よりも上のスライス  $i$  の幾何学条件と荷重条件 (外荷重、地震力が無い場合)

24

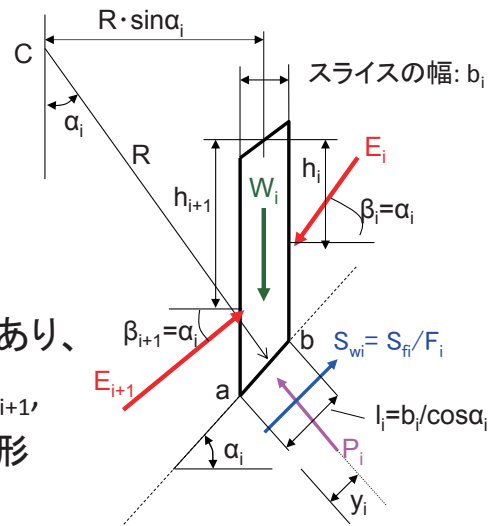
4) ⑥ 抵抗モーメント $M_r$ を求める:

$$F_{global} = \frac{\sum \{R \cdot S_{fi}\}}{M_d} = \frac{\sum \{R \cdot (c_{fi} \cdot l_i + P_i \cdot \tan \phi_i)\}}{M_d}$$

$$S_{fi} = \tau_{fi} \cdot l_i = c_i \cdot l_i + P_i \cdot \tan \phi_i$$

スライス底面での直荷重 $P_i$ は、高度な不静定力であり、その大きさと作用位置 $y_i$ は、スライス側面土圧 $E_i, E_{i+1}$ の大きさ、方向と位置( $h_i, h_{i+1}$ )だけではなく土の変形特性の関数。

⇒スライスに作用する荷重・力の水平・鉛直方向の力の釣合いとモーメントの釣合いの厳密な解析で「よりましな解」が得られるが、この解析だけでは正解は求まらない。



ここでは、水圧、間隙水圧が無い場合

水圧、間隙水圧がある場合は別途議論

ただし、無限長の直線すべりでは、 $P_i$ の正解は求まる。Fellenius法では、これと同様な状態を想定している。

35

## 1. 藤沼ダムの事例

## 2. 円弧すべり安定解析法の理論的基礎と実施に当たっての留意事項

## 2-1. 混乱した現状

## 2-2. 円弧すべり安定解析の基礎

## 2-3. Fellenius法とは

## 2-4. 地下水位・浸潤面と自由水位の考慮

- ・浸透流がない場合
- ・定常浸透流がある場合

## 2-5. 地震力の取り扱い

## 2-6. 異なる設計指針等での排水状態での安全率の式の比較

## 3. Newark-D法と劣化剛性FEMによる盛土の地震時残留変形解析

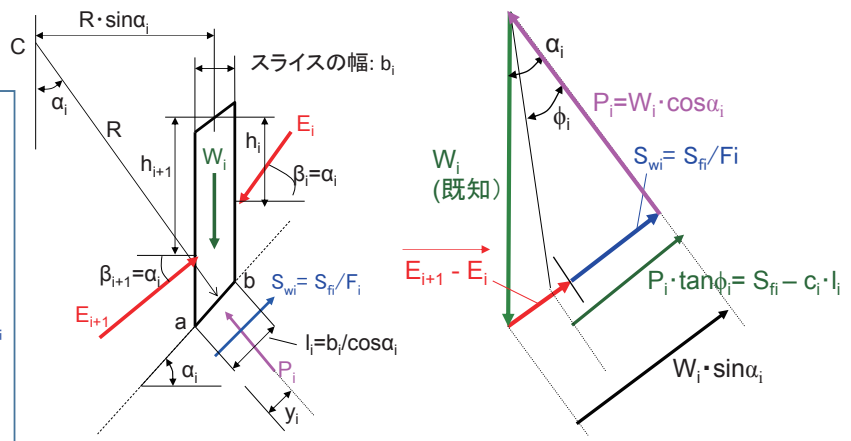
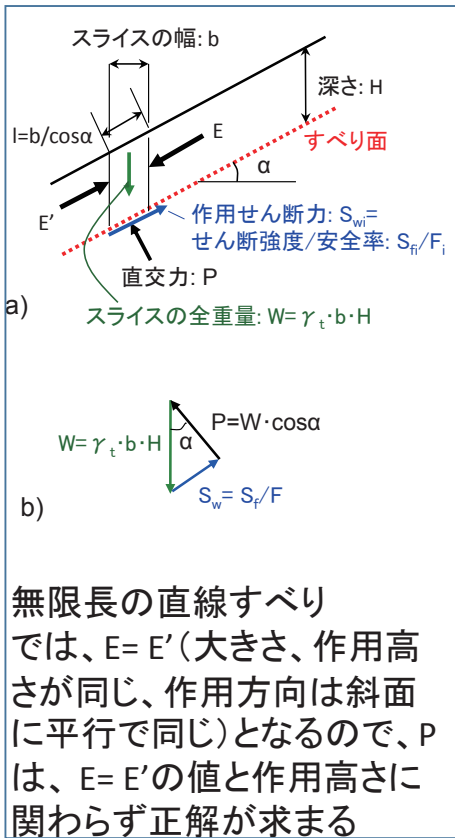
## 3-1. Newark法の経緯

## 3-2. 飽和土の非排水せん断強度の非排水繰返し载荷による劣化を考慮したNewark-D法による剛体すべり解析

## 3-3. 飽和土の非排水せん断剛性・強度の非排水繰返し载荷による劣化を考慮した準静的非線形FEMによる残留変形解析

36

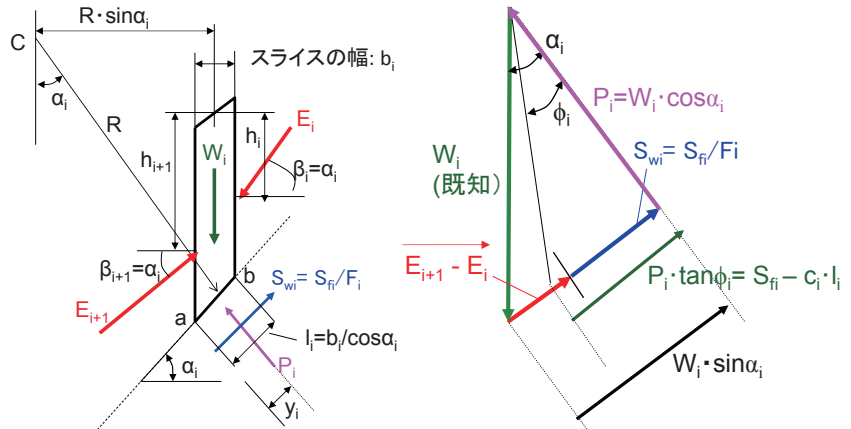
水圧、間隙水圧  
が無い場合



Fellenius法: 「スライス*i*側面の土圧 $E_i$ と $E_{i+1}$ の  
大きさ、方向と作用位置は不明で良いが、「こ  
れらのベクトル和  $\overrightarrow{E_{i+1}} - \overrightarrow{E_i}$  の作用方向はスラ  
イスの底と平行」と仮定すれば、上図に示す力  
の多角形から、スライス底面での直荷重は、  
 $P_i = W_i \cdot \cos\alpha_i$   
と求まる。

37

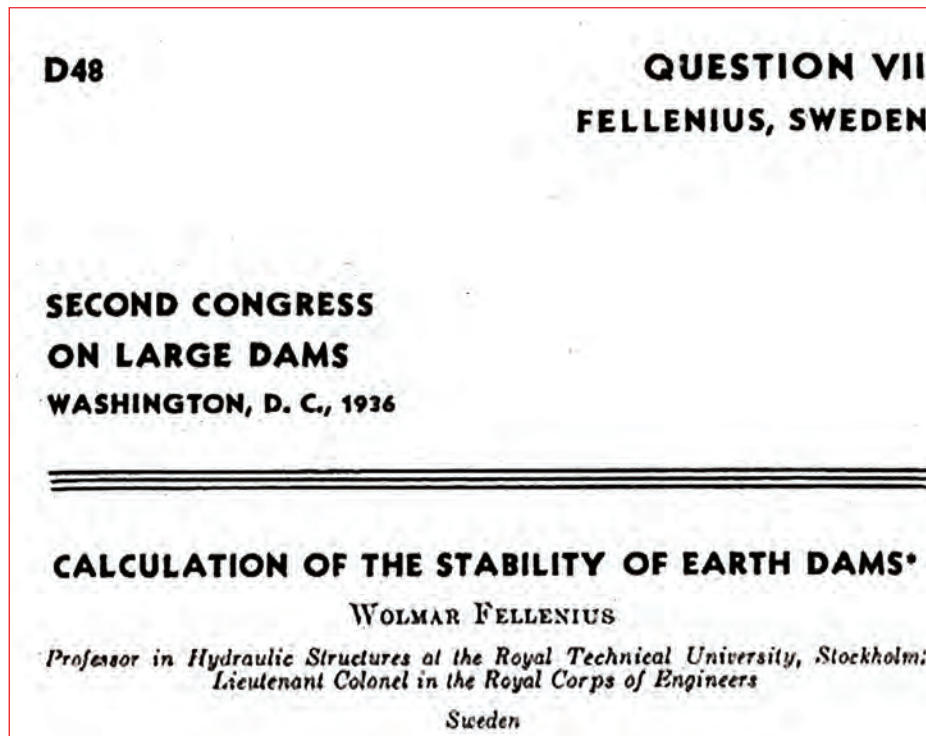
水圧、間隙水圧  
が無い場合



- 「各スライスの両側面に作用する土圧 $E_{i+1}$ と $E_i$ の夫々はスライス底面に平行」と仮定すると、同じ鉛直面で相隣り合うスライスに作用する土圧の間で矛盾が生じる。Fellenius法では、上記の力学的に許容できない仮定は必要ない。また、この仮定\*による土圧は各スライスで力とモーメントの釣り合いを満足していないかも知れないが、その検討はしない。
- Original Fellenius法はOrdinary-Method-of-Slicesとも呼ばれていて、この方法では「スライス間の土圧を無視して $P_i$ を求める」と説明されている。この方法でも、 $P_i = W_i \cdot \cos\alpha_i$  が得られる。しかし、スライス間の土圧を無視した方法では、スライス間の鉛直面に作用する間隙水圧、スライスに作用する浸透力、地震荷重等を考慮した上に示すような力の多角形を描くことができず、これらの要因を適切に考慮して $P'_i$ を求めることはできなくなる。



Fellenius自身は、「スライス間力を無視して $P_i$ を求める」とは言っていない。この課題は、より一般的に正確に議論している。



39

The loci and the directions of the forces working in the surfaces between the different elements are not previously known, but in drawing the plan of forces and the line polygon one may, within given limits, make certain assumptions concerning them. If the calculation is based upon reasonably similar assumptions it will not influence the result to any great extent.

「スライス間の鉛直側面に作用する力の位置と方向は未知であるが、力の多角形の図を作成する際に、この点に対して一定の限界内で適切な仮定をすることができる。類似な仮定に基づけば、その仮定の仕方は解析結果に大きくは影響しないであろう」

Fig. 5(次頁)に示す力の多角形でも、スライス間力を考慮している。

→図-2, 3参照

ただし、図-1に示されている力の多角形では、スライス両側面に作用する土圧及びそれらの合力の方向はスライス底面に平行には描かれていない。

40



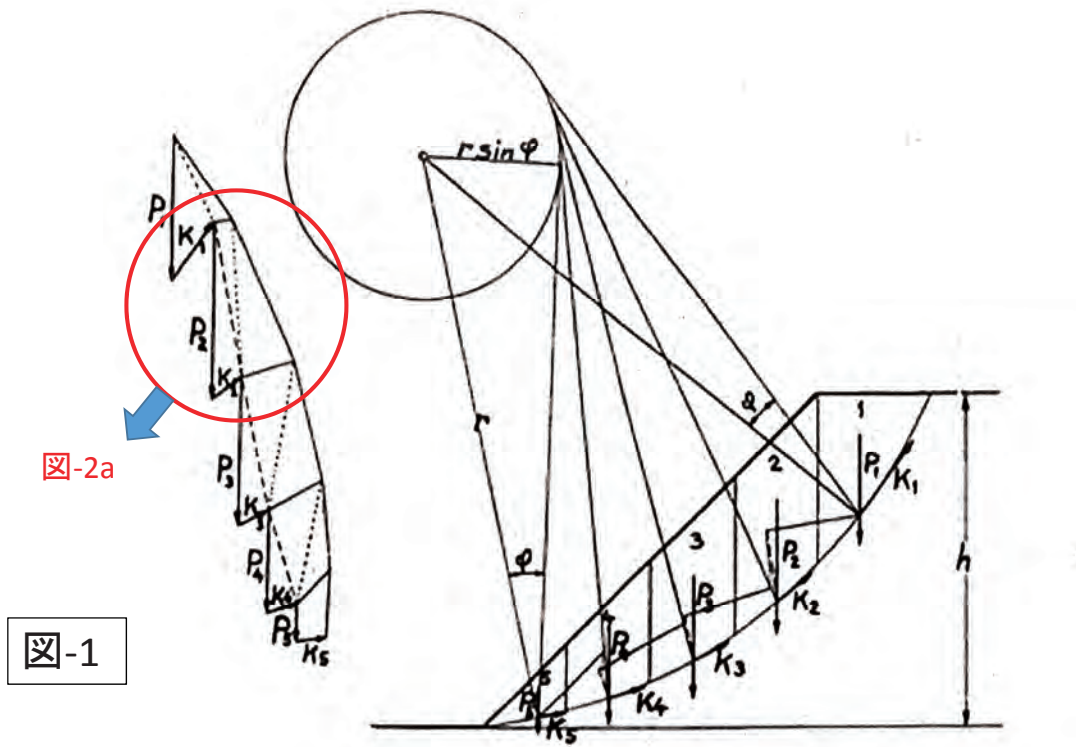


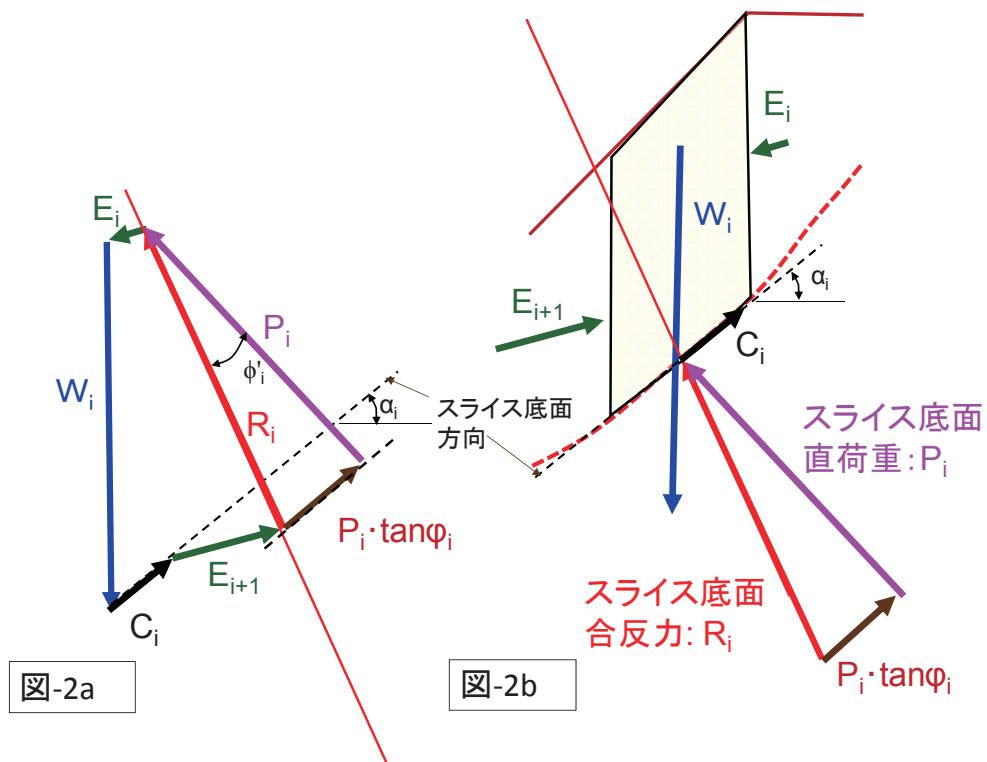
FIGURE 5.—Stability of slope; friction and cohesion, curved sliding surface through the toe of the slope. — Stabilité du talus, frottement et cohésion, surfaces cylindriques de glissement traversant la base du talus. — Stabilität einer Böschung; Reibung und Kohäsion, krumme Gleitfläche durch den Fusspunkt der Böschung. — Estabilidad del talud, rozamiento y cohesión, superficies cilíndricas de deslizamiento que atraviesan la base del talud.

41

これは、安全率  $F_s = 1.0$  の状態の考察である。

図-1を分析すると、図-2になる。力の多角形は正しく成立している。

図-2aには、図-1に描かれていない  $P_i$  と  $N_i \cdot \tan \phi_i$  のベクトルを描いている。

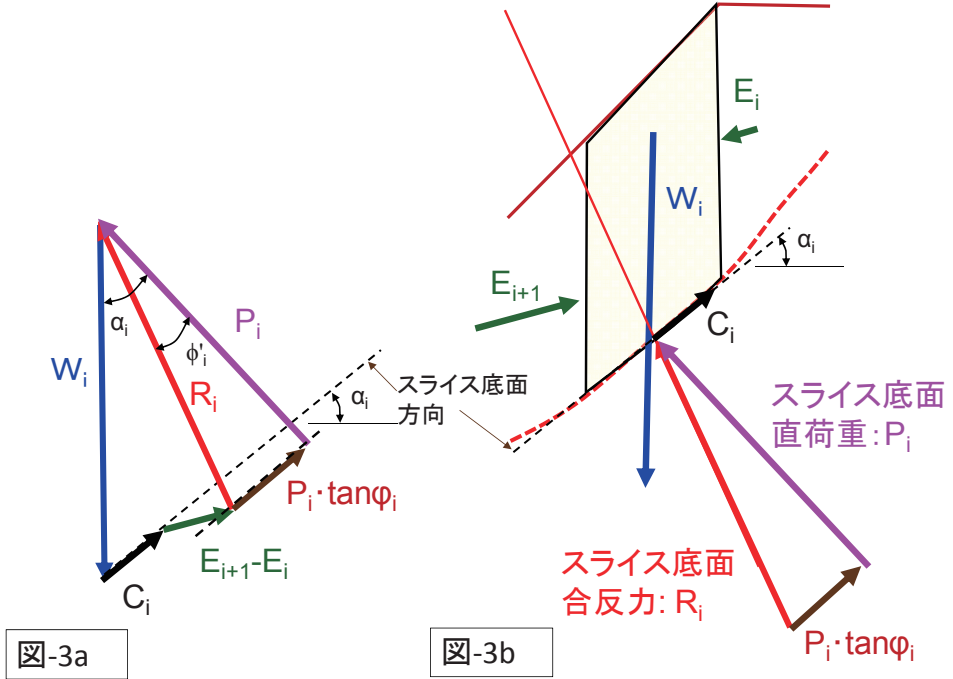


42

図-2bを書き換えると図-3aになる

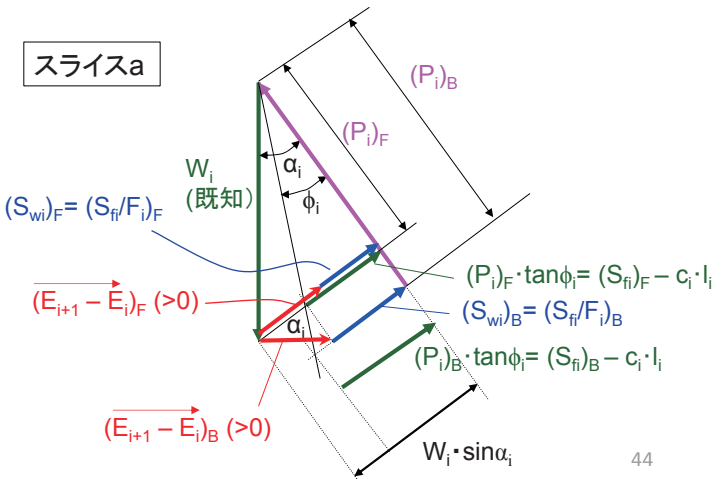
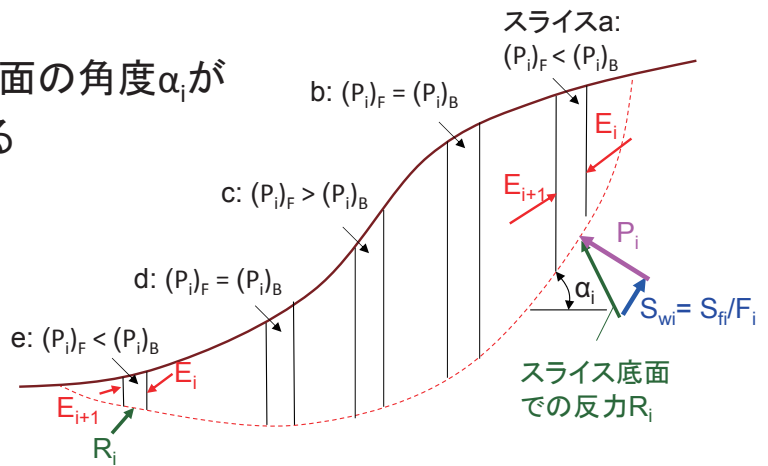
⇒スライス側面の土圧の合力  $\overline{E_{i+1} - E_i}$  の方向はスライス底面に平行ではない！

Felleniusは、かなり一般的なスライスでの力学的状態をキチンと考えていたことが分かる。



43

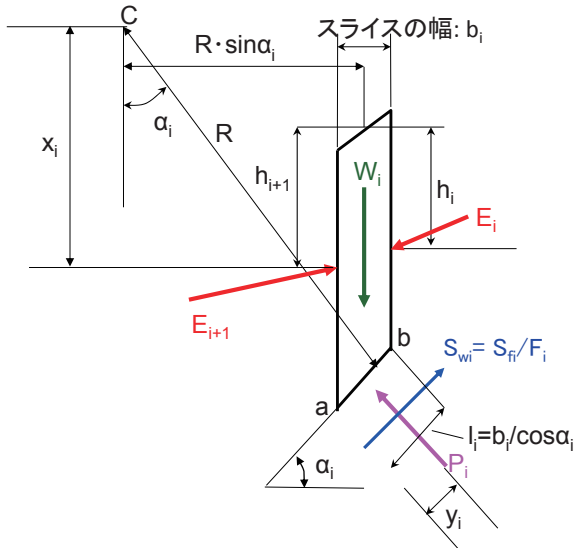
Fellenius法では、スライス底面の角度 $\alpha_i$ が大きいほど $P_i$ を過小評価する



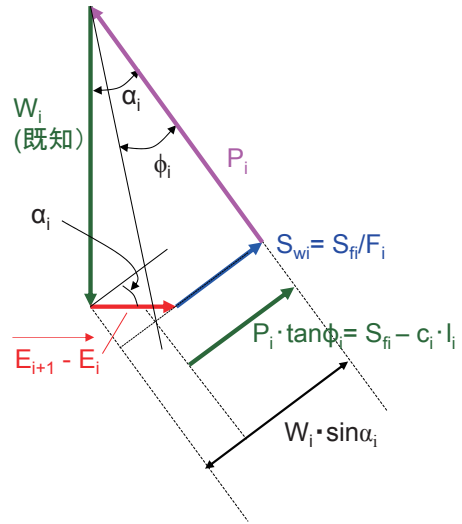
44

簡易Bishop法:

スライスの両側面に作用する土圧の合ベクトルの方向は水平  
 この仮定では、角度 $\alpha_i$ が大きいほど $P_i$ を過大評価する

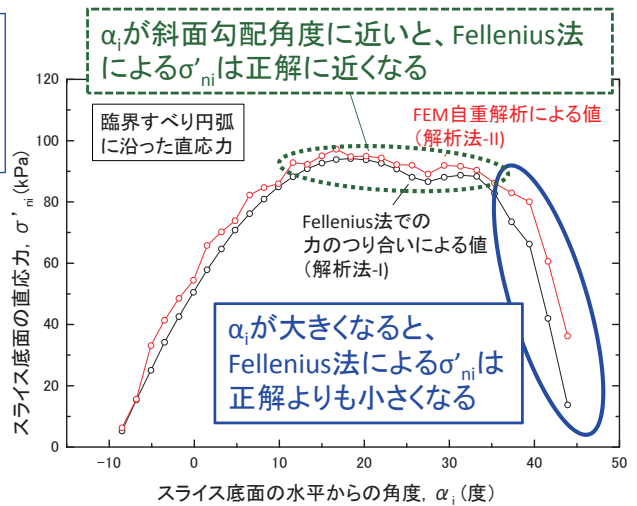
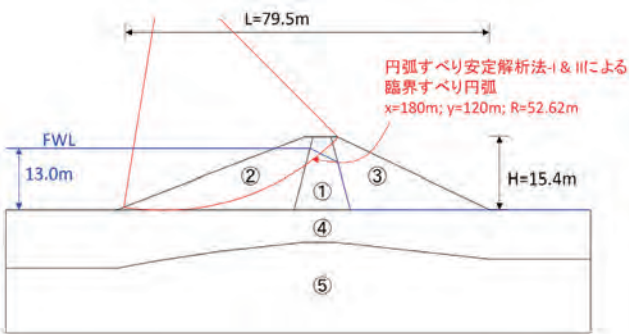


水圧、間隙水圧  
が無い場合



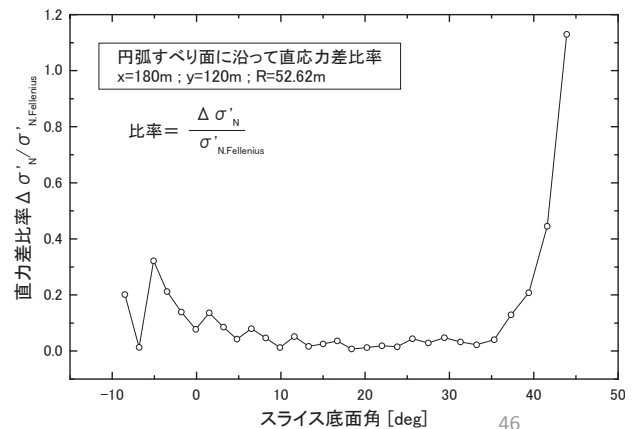
45

臨界すべり円弧に沿った、Fellenius法とFEM自重解析によるスライス底面での直応力 $\sigma'_{ni}$ の比較



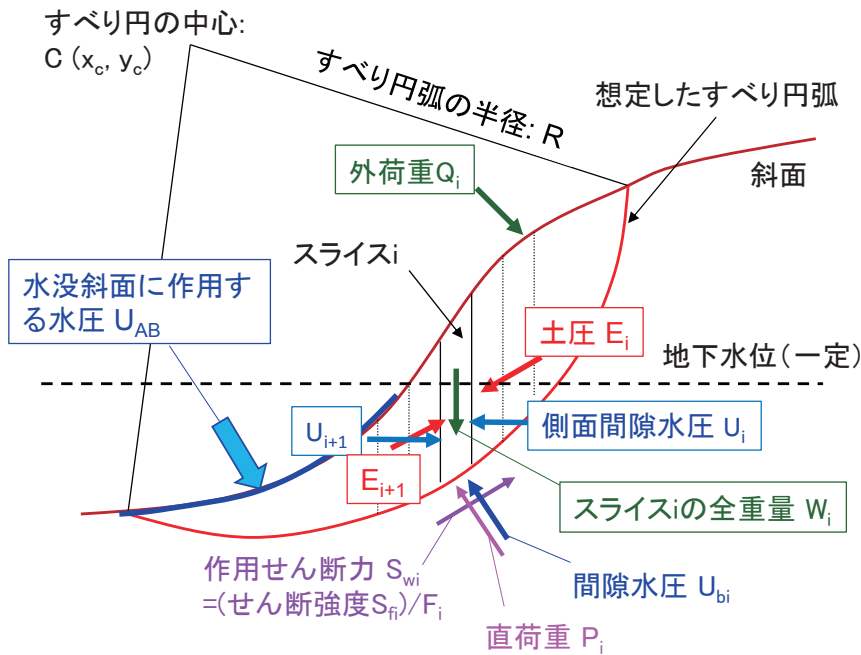
	円弧すべり解析法-I ( $P_i$ はFellenius法による力のつり合い式による値)	円弧すべり解析法-II ( $P_i$ はFEM自重解析による値)
安全率 $F_s$ ( $k_h = 0$ )	2.068	2.168
降伏震度 $k_{hy}$	0.146	0.159

↑ やや安全側



46

- 4) ⑦ 試行すべり円弧の中心位置Cの座標と半径Rを変化させて、安全率 $F_{global}$ の最小値 $F_s$ を求める。



## Fellenius法の特徴のまとめ

各スライス側面の土圧の大きさ、方向と作用位置は探索しないが、「**合土圧の作用方向はスライスの底と平行**」と仮定して、スライス底面での直荷重を水圧と間隙水圧がない場合は  $P_i = W_i \cdot \cos \alpha_i$  と求める。その結果、①  $c'$  が大きくなりすべり面が深くなるほど、②  $\alpha_i$  が斜面勾配角よりも大きくなるほど、③  $k_h$  が大きくなるほど、実際の  $P_i$  を過小評価する傾向になる。

この誤差は安全側である。逆に、①  $c'$  が小さくすべり面が浅いほど、②  $\alpha_i$  が斜面勾配角と類似なほど、③  $k_h$  が小さいほど誤差は小さくなる。

また、上記の仮定に基づくと、定常浸透流、外荷重、地震荷重の影響と、今回は検討結果を示さないが引張り補強の影響を式で直接明示できて、厳密法と比較すると、これらの要因と安全率の関係が理解しやすい、という大きな利点がある。

従って、わが国の設計指針類の殆どがFellenius法を採用していることは合理的である。しかし、留意すべき諸点がある。

1. 藤沼ダムの事例

2. 円弧すべり安定解析法の理論的基礎と実施に当たっての留意事項

2-1. 混乱した現状

2-2. 円弧すべり安定解析の基礎

2-3. Fellenius法とは

2-4. 地下水位・浸潤面と自由水位の考慮

・浸透流がない場合

・定常浸透流がある場合

2-5. 地震力の取り扱い

2-6. 異なる設計指針等での排水状態での安全率の式の比較

3. Newark-D法と劣化剛性FEMによる盛土の地震時残留変形解析

3-1. Newmark法の経緯

3-2. 飽和土の非排水せん断強度の非排水繰返し载荷による劣化を考慮したNewmark-D法による剛体すべり解析

3-3. 飽和土の非排水せん断剛性・強度の非排水繰返し载荷による劣化を考慮した準静的非線形FEMによる残留変形解析

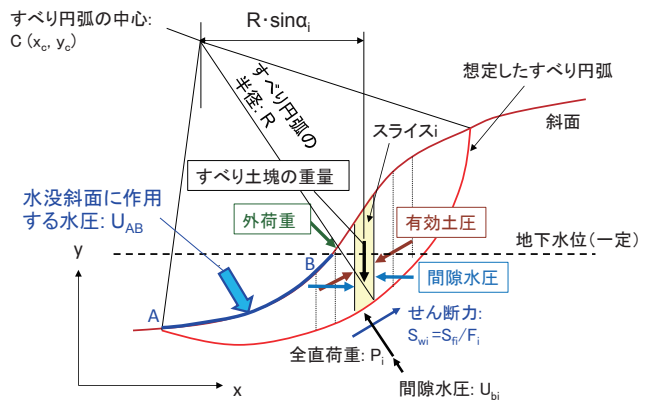
斜面内に地下水位が存在する次の三つのケースを検討

①浸透流が無い静水状態

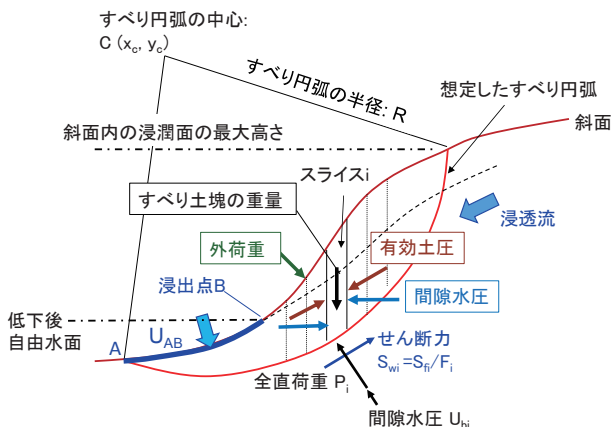
②斜面に向かう定常浸透流がある場合

③斜面深部に向かう定常浸透流がある場合

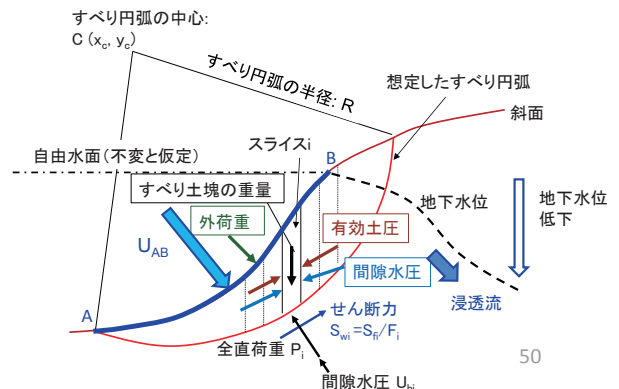
①浸透流が無い静水状態



②斜面に向かう定常浸透流がある

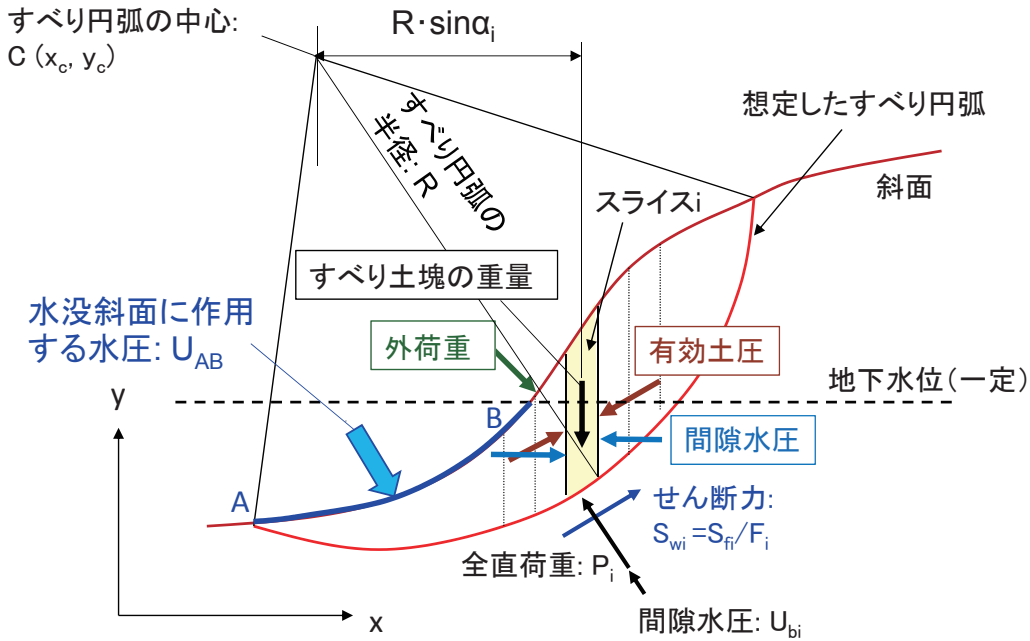


③斜面深部に向かう定常浸透流がある





①地下水位が存在するが、浸透流がない静水状態の斜面での水圧と間隙水圧の取り扱い



51

抵抗モーメント $M_r$ を求める場合での間隙水圧の取り扱い:

地下水位が存在するが浸透流がない斜面で、地震力が作用していない常時において、スライス $i$ の底面に作用する有効直荷重は...

$$P'_i = \sigma'_{ni} \cdot l_i$$

$\sigma'_{ni}$ はスライス底面に作用する有効直応力の平均値、 $l_i$ はスライス底面の長さ  
応力と力で表した排水せん断強度は、

$$\tau_{fd,i} = c'_i + \sigma'_{ni} \cdot \tan \phi'_i$$

$$S_{fd,i} = C'_i + P'_i \cdot \tan \phi'_i$$

$c'_i$ は有効応力での粘着力係数、 $C'_i = c'_i \cdot l_i$

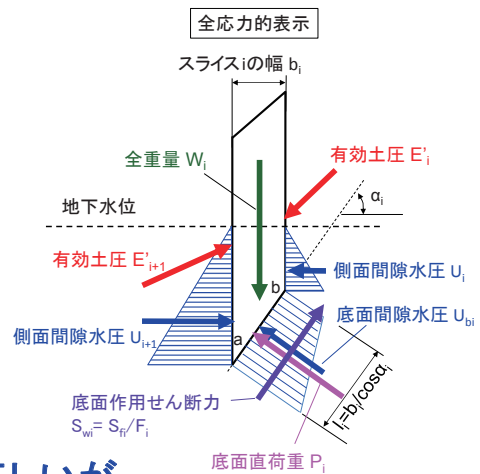
$\phi'_i$ は有効応力での内部摩擦角

$P'_i$ はせん断強度が発揮されている時の値  
で次式によって求まる

$$P'_i = P_i - U_{bi}$$

この式は有効応力の原理を表していて常に正しいが、

$U_{bi}$ が正しくても、 $P_i$ が間違っていると間違った $P'_i$ の値を得てしまう



52



$$P'_i = P_i - U_{bi}$$

この式は有効応力の原理を表していて常に正しいが、 $U_{bi}$ が正しくても、 $P_i$ が間違っていると間違った $P'_i$ の値を得てしまう

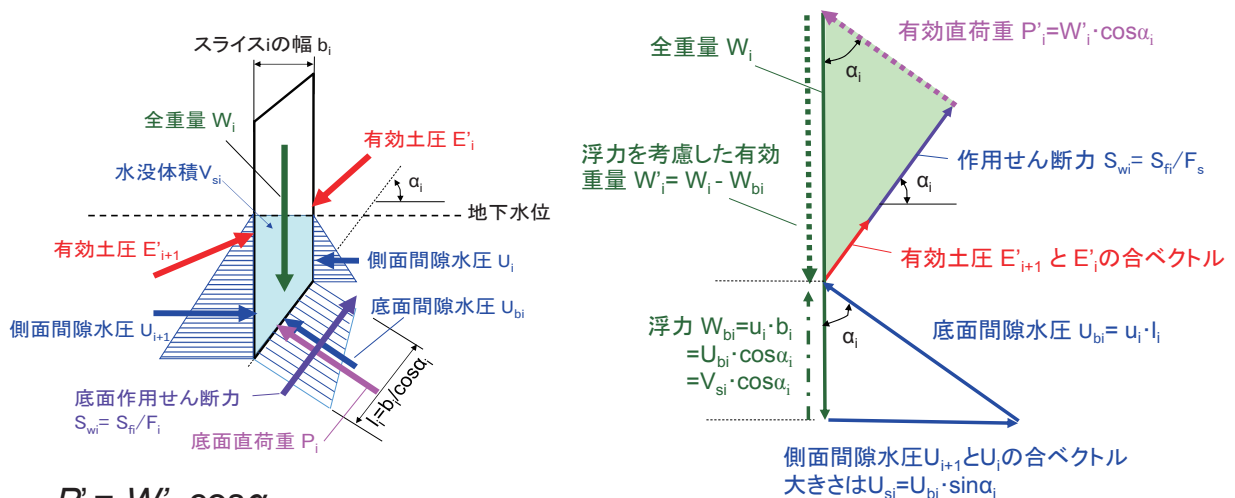
⇒ スライス両側面での間隙水圧の作用方向に関して二つの方法  
この二つの方法は、異なる $P_i$ の値を与える

- ・PWP-a: スライス両側面での間隙水圧の方向は水平: 力学的に正しい  
 この仮定に基づくFellenius法は、修正Fellenius法と呼ばれている  
 ほとんどの設計指針で採用されている
- ・PWP-b: スライス両側面での間隙水圧を無視  
 あるいは、その方向はスライス底面に平行  
 多くの教科書で、Fellenius法、あるいはOrdinary-method-of-slices  
 での仮定と説明されている。しかし、力学的に不合理であり、実  
 務的には過度に安全側の結果となる場合がある

53

- ・スライス側面での有効土圧の合ベクトルの作用方向はスライス底面に平行
- ・スライス側面での間隙水圧の方向が正しく水平  
 (修正Fellenius法と呼ばれている方法)

⇒ 部分的に水没したスライスiに作用する力の多角形:



$$P'_i = W'_i \cdot \cos\alpha_i$$

スライスiの有効重量  $W'_i =$  全重量  $W_i -$  浮力  $W_{bi} (= V_{si} \cdot \gamma_w = u_i \cdot b_i)$

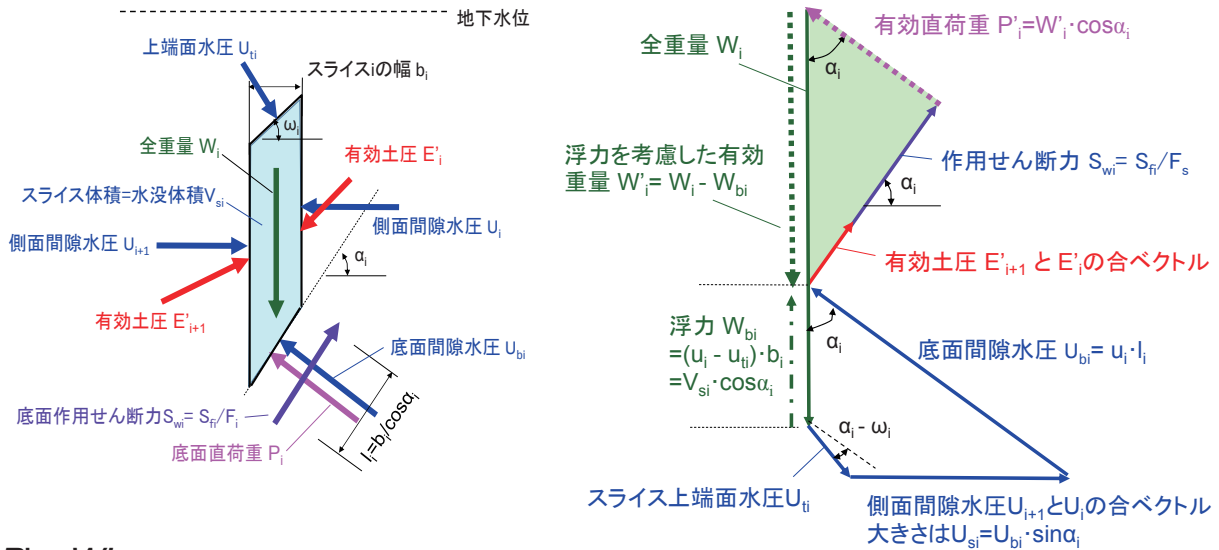
$$P'_i = (W_i - W_{bi}) \cdot \cos\alpha_i = (W_i - u_i \cdot b_i) \cdot \cos\alpha_i$$

$$= (W_i - u_i \cdot l_i \cdot \cos\alpha_i) \cdot \cos\alpha_i = W_i \cdot \cos\alpha_i - U_{bi} \cdot \cos^2\alpha_i$$

54

- ・スライス側面での有効土圧の合ベクトルの作用方向はスライス底面に平行
  - ・スライス側面での間隙水圧の方向が正しく水平
- (修正Fellenius法と呼ばれている方法)

⇒完全に水没したスライス*i*に作用する力の多角形:



$$P'_i = W'_i \cdot \cos\alpha_i$$

スライス*i*の有効重量  $W'_i =$  全重量  $W_i -$  浮力  $W_{bi} (= V_{si} \cdot \gamma_w = u_i \cdot b_i)$

この式は、部分的あるいは完全に水没したスライスに共通に成り立つ 55

殆どの指針類では、修正Fellenius法を用いている。

●フィルダム(国土省、農林水産省)

$$F_{global} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + W'_i \cdot \cos\alpha_i \cdot \tan\phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin\alpha_i)}$$

●道路・鉄道盛土、河川堤防、港湾土構造物

$$F_{global} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + W_i \cdot \cos\alpha_i \cdot \tan\phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin\alpha_i)}$$

分母で有効重量  $W'_i$  ではなく全重量  $W_i$  を用いることによる問題は、後ほど説明する

●Newmark-S, D法

●フィルダム(国土省、農林水産省)

- 建設省河川局開発課監修・(財)国土開発技術センター発行(1991): フィルダムの耐震設計指針(案)、平成3年6月、2.地震時安定性の検討、2.4安定計算、7~9頁式(2)~(6)
- 社団法人日本河川協会編(2014): 改訂新版建設省河川砂防技術基準(案)同解説、設計編[1]: 建設省河川局監修、技報堂出版、平成26年3月3日(改訂版新刷版第16刷)、第2章ダム設計、6.3堤体の設計、6.3.1すべり破壊に対する安全性、224-228頁に示されている諸式、(注)第1刷は昭和60年(1985年)10月31日
- 農林水産省農村振興局(2003); 土地改良事業計画設計基準、設計「ダム」-技術書(フィルダム編、平成15年4月、第9章フィルダムの設計、II-102頁式(9.1.6-1))

●道路盛土・河川堤防、鉄道盛土、港湾構造物、宅造盛土:

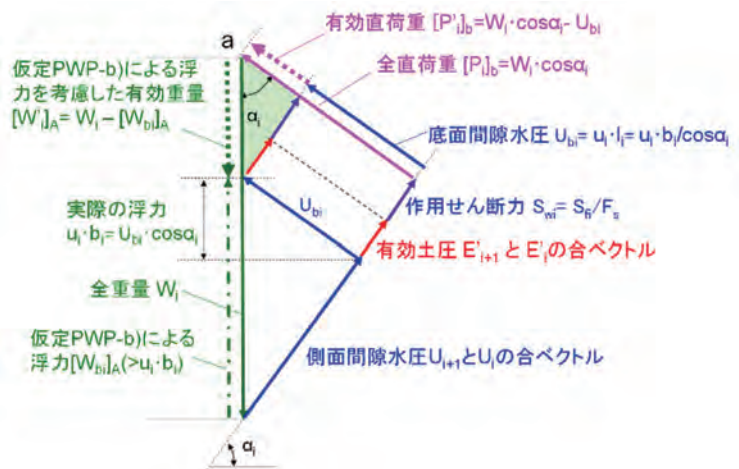
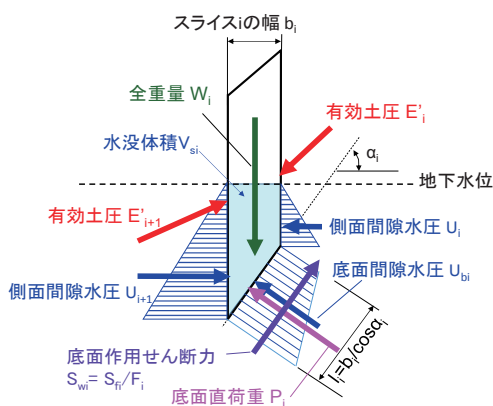
- (監修)建設省建設経済局民間宅地指導室(編集)宅地防災研究会(2000): 改訂版宅地防災マニュアルの解説 [I]、平成12年5月10日4版、(株)ぎょうせい、VI 盛土、VI.3. 盛土のり面の安定性の検討、121頁(式VI.3-1)。
- (公益社団法人)日本道路協会(2010): 道路土工、盛土工指針(平成22年度版)、平成22年4月、第4章設計、4-3-2常時の作用に対する盛土の安定性の照査、108 - 115頁、111頁式(解4-1)
- (公益社団法人)日本道路協会(2012): 道路土工、軟弱地盤対策工指針(平成24年度版)、平成24年8月、第5章軟弱地盤上の土工構造物の設計、5-4常時の作用に対する安定性の照査、145 - 151頁、149頁式(解5-15)
- (公益社団法人)日本道路協会(2009): 道路土工、切土工・斜面安定工指針(平成21年度版)、平成21年6月、第8章のり面保護工、8-4-2構造物公の設計・施工、(9)地山補強土工、296 - 300頁、297頁式(参8-6)
- (財)国土開発技術研究センター(2009): 河川土工マニュアル、平成21年4月、第3章河川土工の設計、3)安定計算法、85頁式(3-4)
- (財)国土技術研究センター(2012): 河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)、平成24年2月、第4章浸透に対する堤防の構造検討、4.3.3照査の方法、48頁に示されている式
- (社)日本港湾協会・国土交通省港湾局監修(2007): 港湾の施設の技術上の基準・同解説(下巻)、平成19年7月、3斜面の安定、3.2安定性の検討、668頁式(3.2.1)
- 国土交通省鉄道局監修・鉄道総合技術研究所編(2007): 平成25年改編鉄道構造物等設計標準・同解説、土構造物、平成19年1月、(株)丸善出版、3章盛土、3.1.2盛土の性能照査法、66頁式(解3.1.1)

57

- ・スライス側面での有効土圧の合ベクトルの作用方向はスライス底面に平行
- ・スライス側面での間隙水圧は無視 ⇒ これは「その作用方向はスライス底面に平行」と仮定していることと等価

(元々Fellenius法, Ordinary-method-of-slicesと呼ばれている方法)

⇒部分的に水没したスライス*i*に作用する力の多角形(間違っている):



$P'_i = [P_i]_b - U_{bi}$  → 正しい形式の式

$[P_i]_b = W_i \cdot \cos \alpha_i$  → 間違っている

$[P'_i]_b = W_i \cdot \cos \alpha_i - U_{bi} = (W_i - W_{bi} / \cos^2 \alpha_i) \cdot \cos \alpha_i$  → 間違っている

58

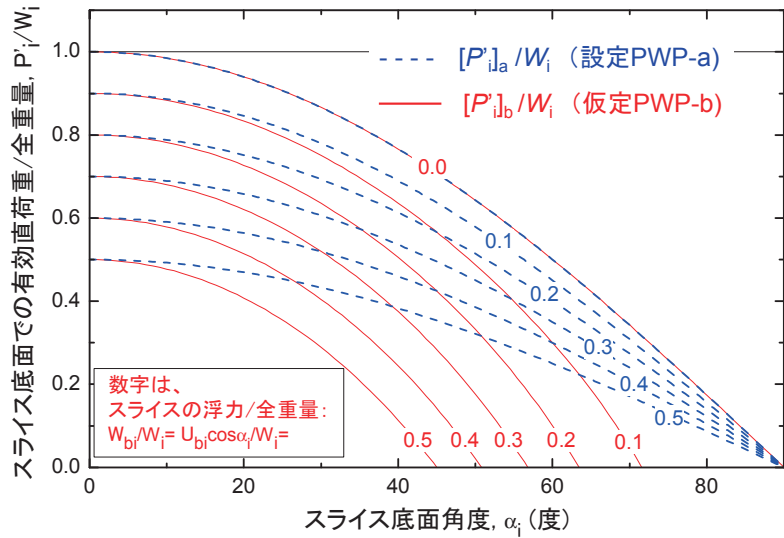
$W_{bi}/W_i$ をパラメータとした、PWP-a, PWP-bでの $P'_i/W_i$ と $\alpha_i$ の関係  
 $W_{bi}/W_i = 0.5$ はスライス全体が地下水位以下の場合

PWP-a: 修正Fellenius

$$\frac{[P'_i]_a}{W_i} = \left[ 1 - \frac{W_{bi}}{W_i} \right] \cdot \cos \alpha_i$$

PWP-b: 元々のFellenius

$$\frac{[P'_i]_b}{W_i} = \left[ 1 - \frac{W_{bi}}{W_i} \frac{1}{\cos^2 \alpha_i} \right] \cdot \cos \alpha_i$$



$\alpha_i \rightarrow 90^\circ$ でも $[P'_i]_a$ は常に正であり $\alpha_i=90^\circ$ で0に収束

⇒PWP-aが実務で用いられている

$\alpha_i$ 大 →  $[P'_i]_b$ は $[P'_i]_a$ に対して急減、容易に負になる。

この傾向は、 $W_{bi}/W_i$ が大きくなると急激に強くなる

⇒PWP-bは力学的に不合理で、過度に安全側になる場合がある 59

**方法b**(スライス側面での間隙水圧の作用方向はスライス底面に平行と仮定)は、現在でも多くの教科書等で紹介されている

$$F_{global} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W_i \cdot \cos \alpha_i - U_{bi}) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i)}$$

もしくは、

$$F_{global} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W_i \cdot \cos \alpha_i - U_{bi}) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R}$$

注: この式は部分的に水没したスライスだけに適用できる。全重量 $W_i$ と浮力 $W_{bi}$ を用いた次式が一般的条件に対して適用できる。

$$F_{global} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W_i - W_{bi} / \cos^2 \alpha_i) \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R}$$

例)

●かなり多くの教科書

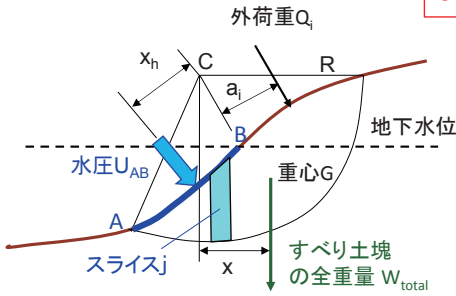
●土質工学ハンドブック(1982年)

●(監修)建設省建設経済局民間宅地指導室(編集)宅地防災研究会(2000):改訂版宅地防災マニュアルの解説[I]、平成12年5月10日4版、株ぎょうせい、第VI章盛土、VI.3.盛土のり面の安定性の検討、121頁、(式VI.3-1)。

なお、分母で有効重量 $W'_i$ ではなく全重量 $W_i$ を用いている問題は、次に説明する

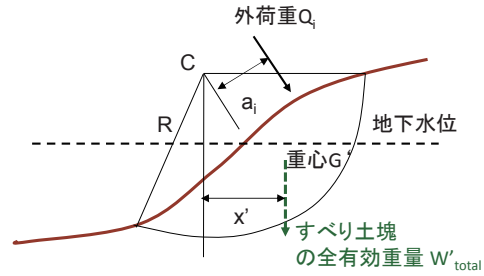
# 滑動モーメント $M_d$ を求める場合での水圧と間隙水圧の取り扱い:

a) 全応力的表示



a)とb)は、同じ結果

b) 有効応力的表示



$$\begin{aligned}
 [M_d]_{direct} &= R \cdot \sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + \sum (Q_i \cdot a_i) - M_w \\
 &= W_{total} \cdot x + \sum (Q_i \cdot a_i) - M_w \\
 M_w &= U_{AB} \cdot x_h
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [M_d]_{direct} &= W'_{total} \cdot x' + \sum (Q_i \cdot a_i) \\
 &= R \cdot \sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + \sum (Q_i \cdot a_i) \\
 W'_i &= W_i - W_{bi}
 \end{aligned}$$

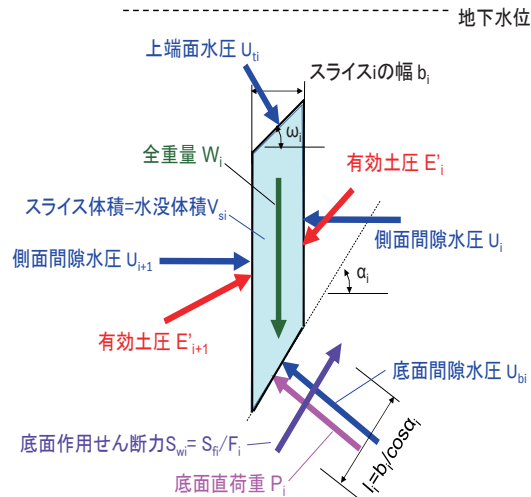
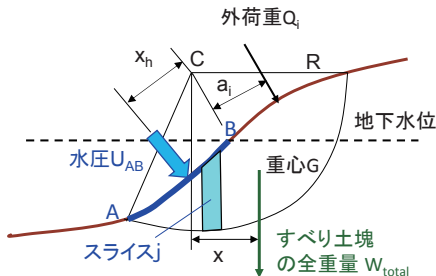
$M_w$ : 自由水位以下の斜面A-B間に作用している水圧の合計 $U_{AB}$ による滑動モーメント $M_d$ の減少分  
 ・すべり土塊に作用する浮力による $M_d$ の減少に相当する

$W_{bi}$  = スライスに作用する浮力  
 鉛直浸透流が無い場合は部分的に水没したスライスでは、

$$\text{浮力 } W_{bi} (= V_{si} \cdot \gamma_w) = U_{bi} \cdot \cos \alpha_i$$

61

a) 全応力的表示



$$\begin{aligned}
 [M_d]_{direct} &= R \cdot \sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + \sum (Q_i \cdot a_i) - M_w \\
 &= W_{total} \cdot x + \sum (Q_i \cdot a_i) - M_w
 \end{aligned}$$

$W_{total}$ は、すべり土塊の全重量。 $W_i$ は、各スライスの全重量で、 $R \cdot \sin \alpha_i$ はその腕の長さ。  
 [各スライスに作用している $M_d$ を發揮する力、水圧、間隙水圧の項目を積分すると・・・]:

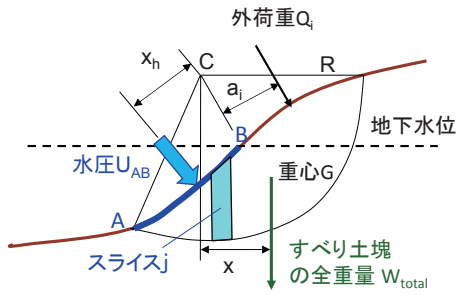
- ① モーメント $M_w = U_{AB} \cdot x_h$ ;  $U_{AB}$ は完全に水没したスライス上端面に作用する水圧の総和=自由水位以下の斜面部A~B間に作用している水圧 $U_{ti}$ の総和
- ② 相隣り合うスライス間の鉛直面に作用する間隙水圧と有効土圧による転倒モーメントは打ち消し合う
- ③ スライス底面に作用する間隙水圧と土圧は転倒モーメントを發揮しない
- ④  $R \cdot \sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) = W_{total} \cdot x$

$M_w$ は $M_d$ を減少させる。これは、スライス土塊に作用する浮力による $M_d$ の減少分を意味する。

実務では、 $M_d$ はこの全応力的表示の式を用いて計算している場合が多い

62



静水状態に対する修正Fellenius法での $F_{global}$ の正解は・・・

$$F_{global} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + W'_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i] + \sum (Q_i \cdot a_i)}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i)}$$

$$= \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + W'_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i] + \sum (Q_i \cdot a_i)}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R}$$

フィルダム(国土省、農林水産省)

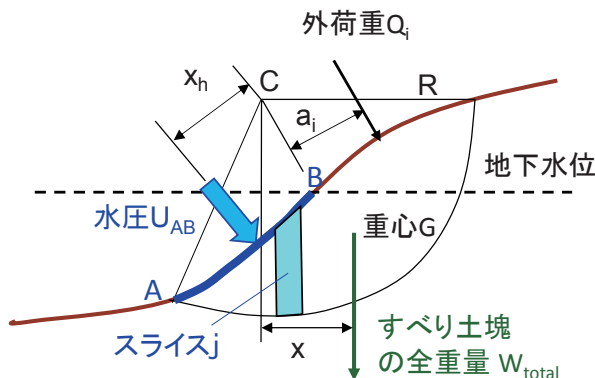
- 建設省河川局開発課監修・財国土開発技術センター発行(1991): フィルダムの耐震設計指針(案)、平成3年6月、2.地震時安定性の検討、2.4安定計算、7~9頁式(2)~(6)
- 社団法人日本河川協会編(2014): 改訂新版建設省河川砂防技術基準(案)同解説、設計編[1]: 建設省河川局監修、技報堂出版、平成26年3月3日(改訂版新刷版第16刷)、第2章ダム設計、6.3堤体の設計、6.3.1すべり破壊に対する安全性、224-228頁に示されている諸式、(注)第1刷は昭和60年(1985年)10月31日
- 農林水産省農村振興局(2003); 土地改良事業計画設計基準、設計「ダム」-技術書(フィルダム編、平成15年4月、第9章フィルダムの設計、II-102頁式(9.1.6-1)

63

所が、道路・鉄道・河川堤防・港湾構造物等の指針では、分母に $M_w$ が含まれていない下の式が示されている

$$F_{global} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + W'_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i] + \sum (Q_i \cdot a_i)}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i)}$$

この式を、下図のような $M_w > 0$ の斜面に適用すれば、 $M_d$ を過大評価して安全率を過小評価する



64

**道路盛土・河川堤防、鉄道盛土、港湾構造物、宅造盛土：**

- (監修)建設省建設経済局民間宅地指導室(編集)宅地防災研究会(2000):改訂版宅地防災マニュアルの解説[1]、平成12年5月10日4版、(株)ぎょうせい、VI.盛土、VI.3.盛土のり面の安定性の検討、121頁(式VI.3-1)。
- (公益社団法人)日本道路協会(2010):道路土工、盛土工指針(平成22年度版)、平成22年4月、第4章設計、4-3-2常時の作用に対する盛土の安定性の照査、108-115頁、111頁式(解4-1)
- (公益社団法人)日本道路協会(2012):道路土工、軟弱地盤対策工指針(平成24年度版)、平成24年8月、第5章軟弱地盤上の土工構造物の設計、5-4常時の作用に対する安定性の照査、145-151頁、149頁式(解5-15)
- (公益社団法人)日本道路協会(2009):道路土工、切土工・斜面安定工指針(平成21年度版)、平成21年6月、第8章のり面保護工、8-4-2構造物公の設計・施工、(9)地山補強土工、296-300頁、297頁式(参8-6)
- (財)国土開発技術研究センター(2009):河川土工マニュアル、平成21年4月、第3章河川土工の設計、3)安定計算法、85頁式(3-4)
- (財)国土技術研究センター(2012):河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)、平成24年2月、第4章浸透に対する堤防の構造検討、4.3.3照査の方法、48頁に示されている式
- (社)日本港湾協会・国土交通省港湾局監修(2007):港湾の施設の技術上の基準・同解説(下巻)、平成19年7月、3斜面の安定、3.2安定性の検討、668頁式(3.2.1)
- 国土交通省鉄道局監修・鉄道総合技術研究所編(2007):平成25年改訂版鉄道構造物等設計標準・同解説、土構造物、平成19年1月、(株)丸善出版、3章盛土、3.1.2盛土の性能照査法、66頁式(解3.1.1)

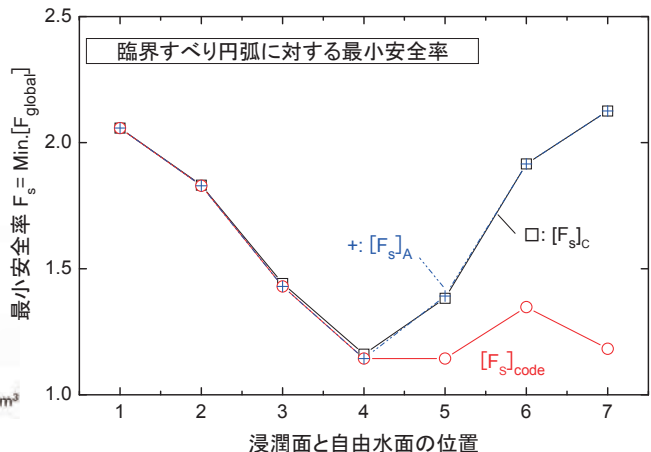
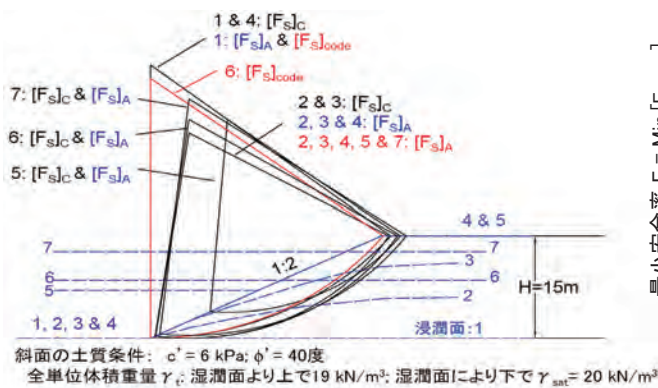
65

道路・鉄道・河川堤防・港湾構造物等の指針では、  
分母に $M_w$ が含まれていない下の式が示されている

$$[F_{global}]_{code} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + W'_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i] + \sum (Q_i \cdot a_i)}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i)}$$

この式は、

- ・下図での $M_w > 0$ であるケース5, 6, 7に適用すれば、安全率を過小評価
- ・ただし、すべり土塊が地下水位よりも上に位置するケース1と $M_w = 0$ の状態  
で定常浸透力があるケース2, 3, 4に対して適用できる実用的な近似式  
(次に説明)



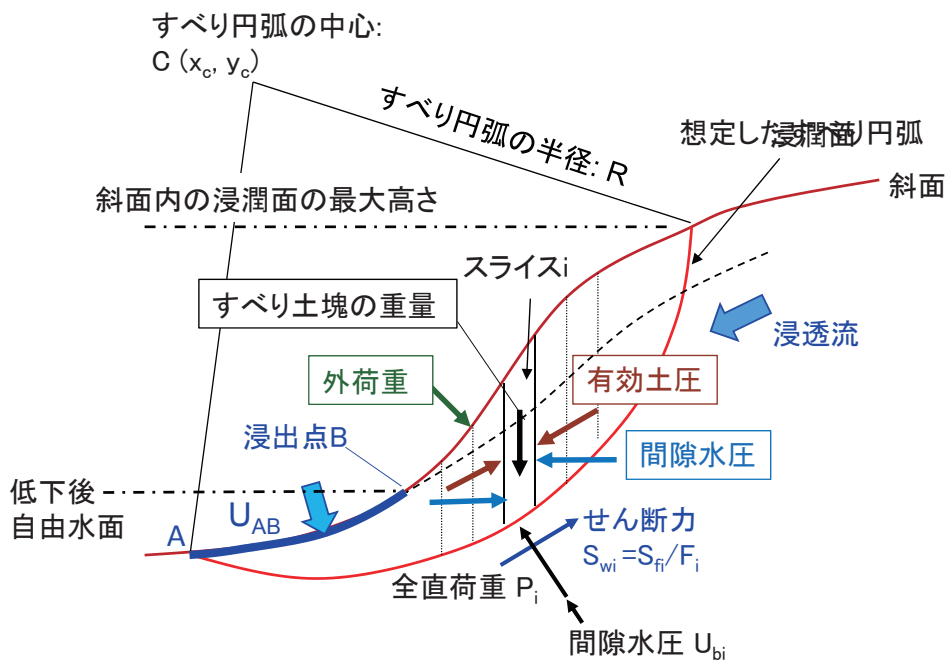
66

1. 藤沼ダムの事例
2. 円弧すべり安定解析法の理論的基礎と実施に当たっての留意事項
  - 2-1. 混乱した現状
  - 2-2. 円弧すべり安定解析の基礎
  - 2-3. Fellenius法とは
  - 2-4. 地下水位・浸潤面と自由水位の考慮
    - ・浸透流がない場合
    - ・定常浸透流がある場合
  - 2-5. 地震力の取り扱い
  - 2-6. 異なる設計指針等での排水状態での安全率の式の比較
3. Newark-D法と劣化剛性FEMによる盛土の地震時残留変形解析
  - 3-1. Newmark法の経緯
  - 3-2. 飽和土の非排水せん断強度の非排水繰返し载荷による劣化を考慮したNewmark-D法による剛体すべり解析
  - 3-3. 飽和土の非排水せん断剛性・強度の非排水繰返し载荷による劣化を考慮した準静的非線形FEMによる残留変形解析

67

## ②斜面下方に向かう定常浸透流が存在する斜面で常時の場合

背後からの地下水・表面水の供給が多い沢部盛土、豪雨時等に斜面内の地下水位が高くなった盛土、洪水時の堤防の川裏側の斜面、急激に貯水位が低下したフィルダム上流側法面では、斜面に向かう浸透流が生じる ⇒ 崩壊例が多い



68

単位体積の土要素に作用する力・応力の

二つの表現方法:

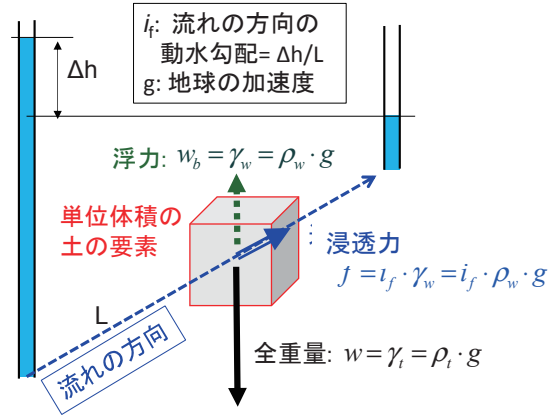
●全応力的表示

全重量 $W$ と間隙水圧 $u$

●有効応力的表示

三種類の体積力

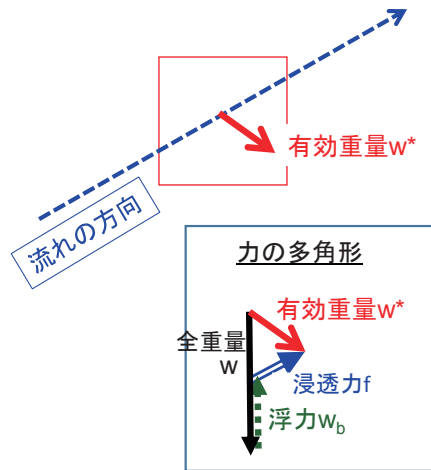
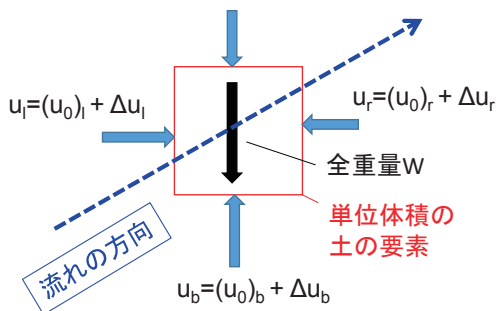
・全重量 $W$ , 浮力 $w_b$ , 流線方向の浸透力 $f$   
(合計として有効重量 $w^*$ )



全応力的表示

有効応力的表示

水圧 $u_t = \text{静水圧}(u_0)_t + \text{過剰間隙水圧}\Delta u_t$



69

スライス法でのスライスに作用する力・応力・水圧・間隙水圧の二つの表現方法:

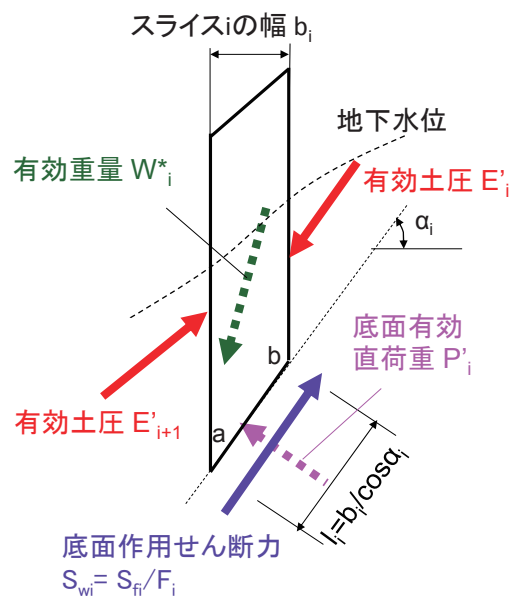
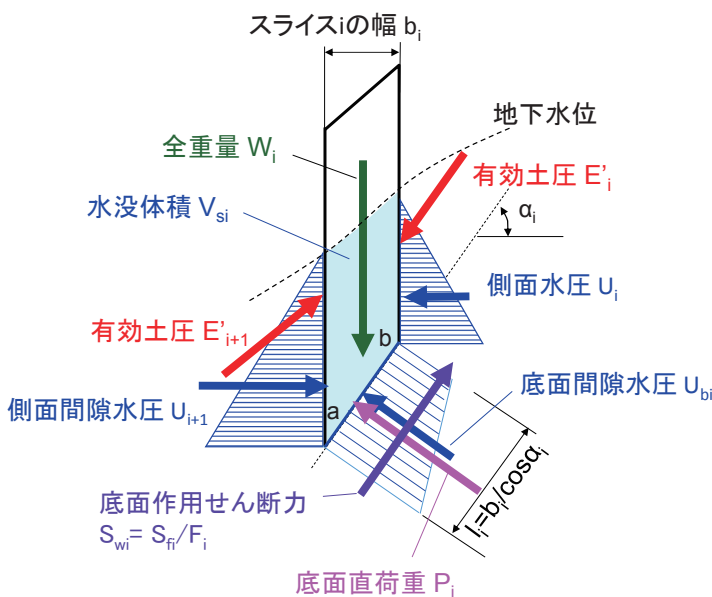
●全応力的表示:

全重量 $W_i$ , 間隙水圧 $U_{bi}$ ,  $U_i$  &  $U_{i+1}$ , 有効土圧 $E'_i$  &  $E'_{i+1}$ , せん断力 $S_{wi}$ , 全直荷重 $P_i$

●有効応力的表示: 有効重量 $W^*$ , 有効土圧 $E'_i$  &  $E'_{i+1}$ , せん断力 $S_{wi}$ , 有効直荷重 $P'_i$

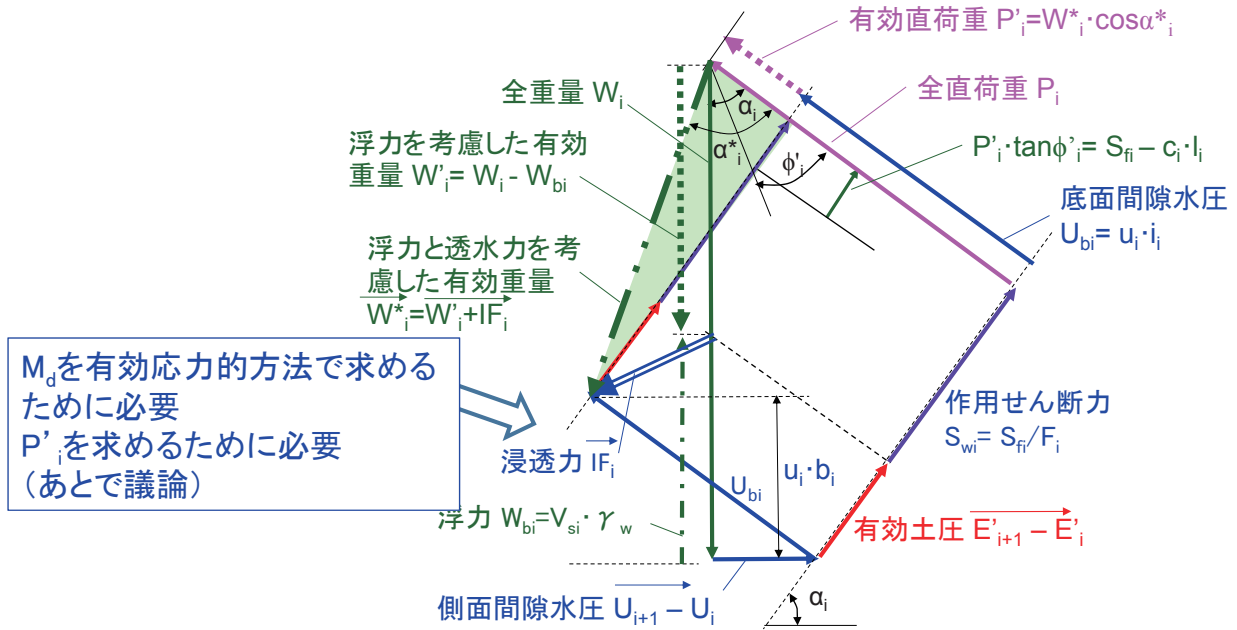
全応力的表示

有効応力的表示



70

●有効応力的表示： 有効重量 $W^*$ 、有効土圧 $E_i$  &  $E_{i+1}$ 、せん断力 $S_{wi}$ 、有効直荷重 $P'_i$



$M_d$ を有効応力的方法で求めるために必要  
 $P'_i$ を求めるために必要  
 (あとで議論)

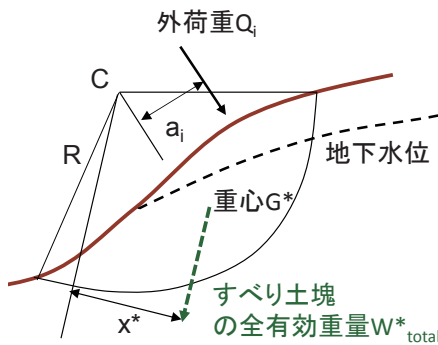
$$F_{global} = \frac{\sum [c'_i \cdot l_i + W^*_i \cdot \cos \alpha^*_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w} \quad (M_w = U_{AB} \cdot x_h)$$

しかし、この式を用いるためには、浸透力を求めなければならない。実務では面倒

71

浸透流が存在する場合での常時での滑動モーメント $M_d$ (両者同じ結果)

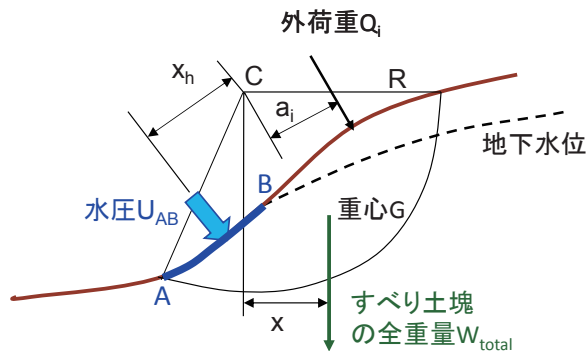
a)有効応力的表示



$$[M_d]_{direct} = \sum [R \cdot (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + IF_i \cdot z_i] + \sum (Q_i \cdot a_i) = W^*_{total} \cdot x^* + \sum (Q_i \cdot a_i)$$

斜面前の自由水位の低下  
 ・浸透力 $IF_i \cdot z_i$ の増加 $\Rightarrow M_d$ 増加

b)全応力的表示



$$[M_d]_{direct} = R \cdot \sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + \sum (Q_i \cdot a_i) - M_w = W_{total} \cdot x + \sum (Q_i \cdot a_i) - M_w$$

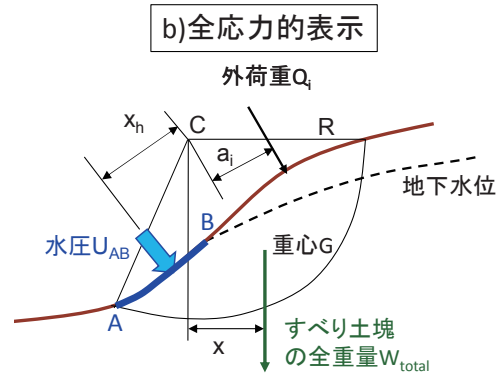
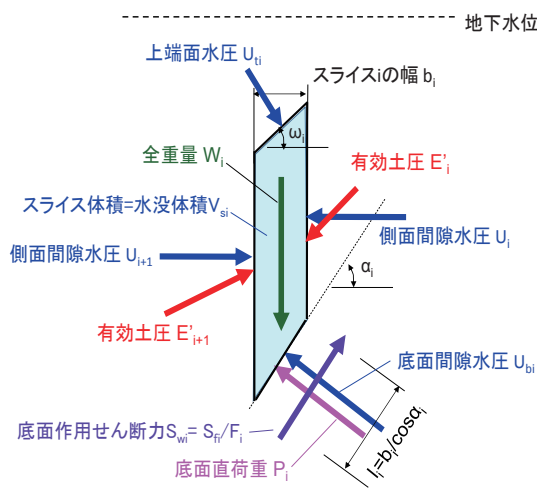
$$M_w = U_{AB} \cdot x_h$$

斜面前の自由水位の低下  
 ・ $M_w$ の減少 $\Rightarrow M_d$ 増加

実務では、全応力的表示で $M_d$ を計算：  
 浸透力を求めなくても、地下水位・浸潤面の位置が分かれば計算できるから

72





$$\begin{aligned}
 [M_d]_{direct} &= R \cdot \sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + \sum (Q_i \cdot a_i) - M_w \\
 &= W_{total} \cdot x + \sum (Q_i \cdot a_i) - M_w \\
 M_w &= U_{AB} \cdot x_h
 \end{aligned}$$

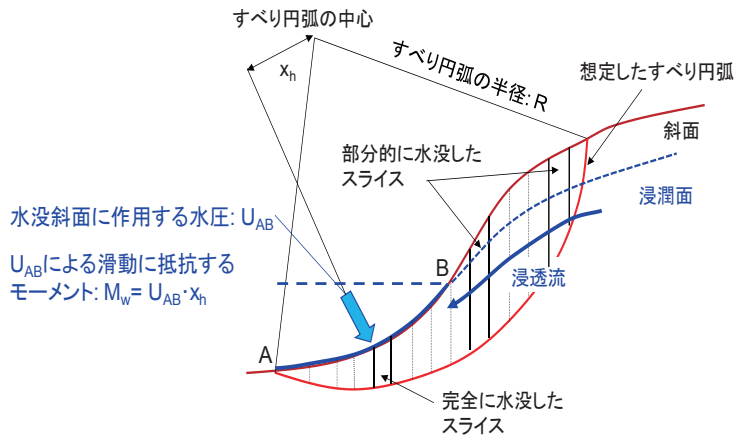
$W_{total}$  は、すべり土塊の全重量。

$W_i$  は、各スライスの全重量で、 $R \cdot \sin \alpha_i$  はその腕の長さ。

- ・モーメント  $M_w = U_{AB} \cdot x_h$ 、 $U_{AB}$  は完全に水没したスライス上端面に作用する水圧の総和=自由水位以下の斜面部A~B間に作用している水圧の総和
- ・相隣り合うスライス間の鉛直面に作用する間隙水圧による転倒モーメントは打ち消し合い、スライス底面に作用する水圧は転倒モーメントを発揮しない ⇒ これらは式に現われない

$M_w$  は  $M_d$  を減少させる。これは、スライス土塊に作用する浮力による  $M_d$  の減少分を意味する。

## 定常浸透流がある状態に対する修正Fellenius法での $F_{global}$ の正解は...



$M_r$ : 有効応力的表示

$M_d$ : 全応力的表示

$$F_{global} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + W^*_i \cdot \cos \alpha^*_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R} \quad (M_w = U_{AB} \cdot x_h)$$

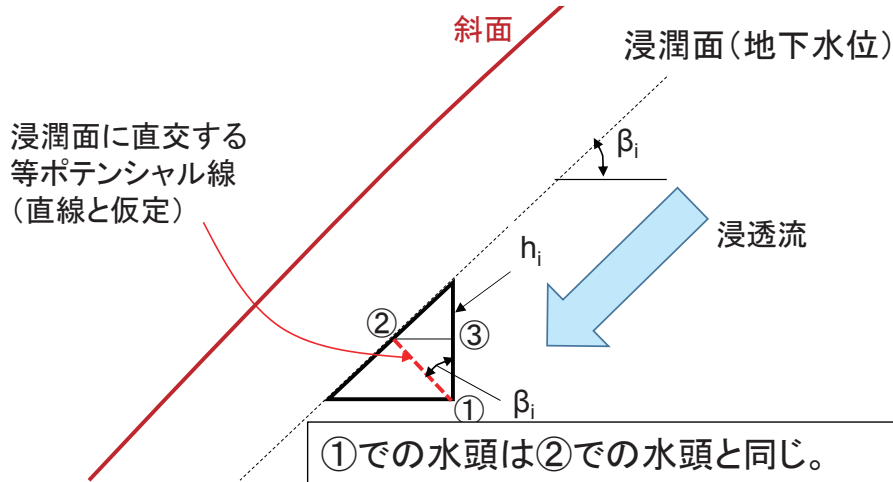
$M_r$ : 有効応力的表示  
(実用的な近似式)

$M_d$ : 全応力的表示

$$F_{global} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + W'_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R}$$

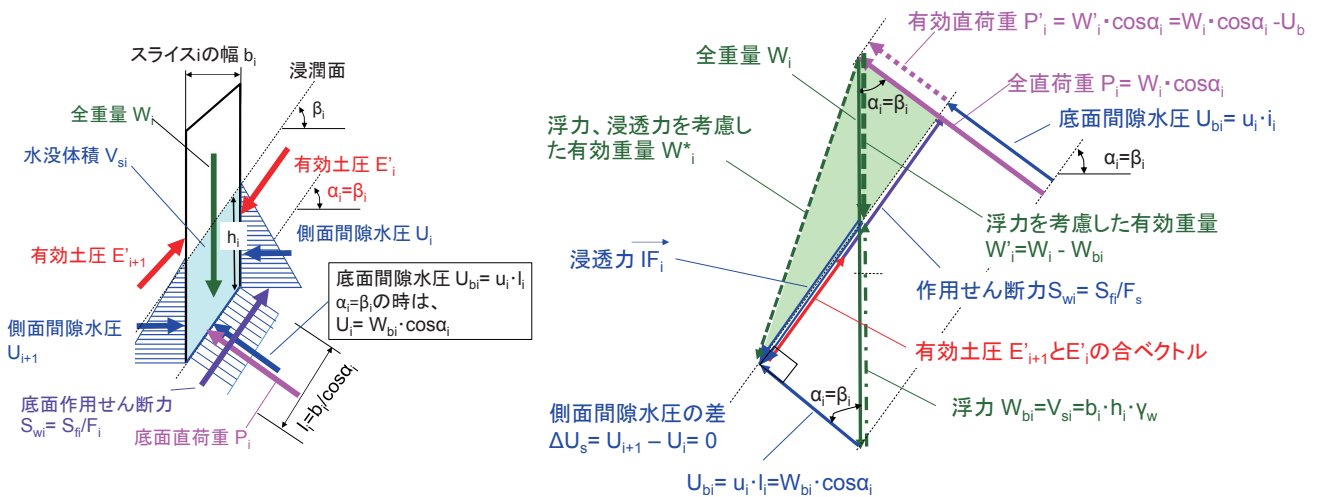
この式の説明は次頁以降

# 浸透流がある斜面内の間隙水圧



①での水頭は②での水頭と同じ。  
 従って、  
 ①での間隙水圧 $u_{bi}$ は $h_i \cdot \gamma_w$ (静水圧)ではなくて  
 ①-③間の水深( $=h_i \cdot \cos^2 \beta_i$ )による値 $= h_i \cdot \gamma_w \cdot \cos^2 \beta_i$

長大斜面内の長さ・深さ方向に一様な定常浸透流のように、①斜面内で等ポテンシャル面が直線で、かつ②スライス底面が浸潤面方向に平行( $\alpha_i = \beta_i$ )である場合：

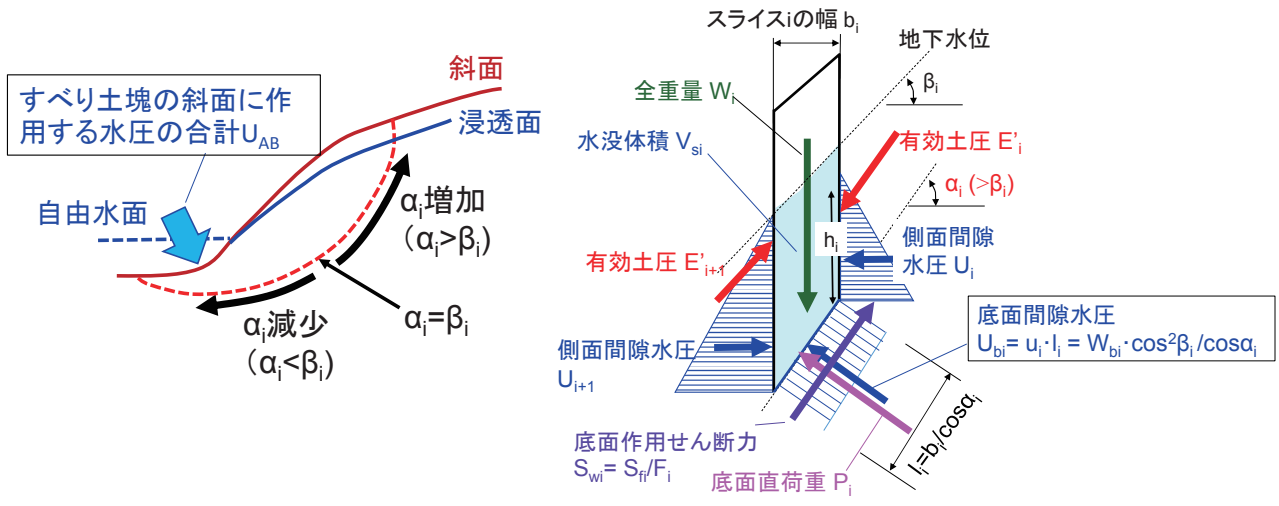


この場合は、スライス両側面での間隙水圧の差 $\Delta U_s = 0$ なので、

$$F_{global} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W_i \cdot \cos \alpha_i - U_{bi}) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + W'_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w}$$

ただし、 $U_{bi} \neq h_i \cdot \gamma_w$  (静水圧)  $\cdot l_i$ ;  $U_{bi} = h_i \cdot \gamma_w$  (静水圧)  $\cdot l_i \cdot \cos^2 \alpha_i$  である！！  
 静水状態に対して「スライス間隙水圧の作用方向はスライス底面に平行」と間違えて仮定した場合の式と同じ形の式 …… 混乱しやすい

しかし、通常は殆どのスライスの底面の方向は浸透流の方向と異なる ( $\alpha_i \neq \beta_i$ )



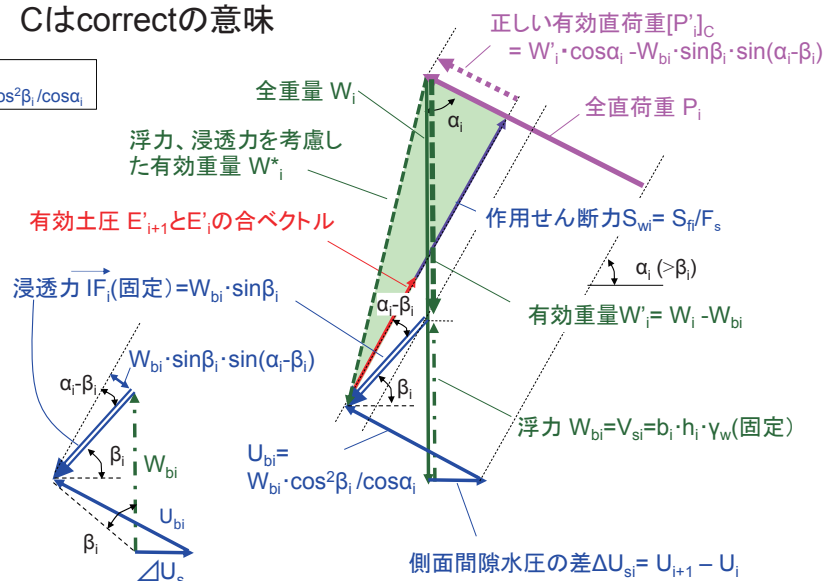
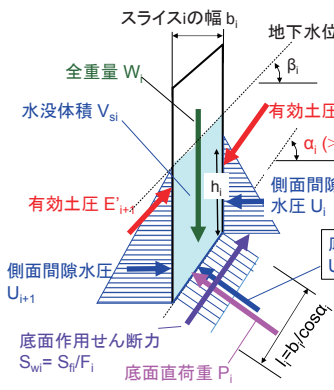
今、スライスの条件(基本的形状、土質等)と浸透流の状態が固定された状態 ( $\beta_i$ 一定) で、 $\alpha_i$ が変化するとする

等ポテンシャル線は直線であると仮定する

$\alpha_i \neq \beta_i$ の場合でのスライス底面の有効直荷重

$$[P'_i]_C = W'_i \cdot \cos \alpha_i - W_{bi} \cdot \sin \beta_i \cdot \sin(\alpha_i - \beta_i) = W_i \cdot \cos \alpha_i - W_{bi} \cdot \{\cos \alpha_i + \sin \beta_i \cdot \sin(\alpha_i - \beta_i)\}$$

Cはcorrectの意味



$$[F_{global}]_C = \frac{\sum [c'_i \cdot l_i + [W_i \cdot \cos \alpha_i - W_{bi} \cdot \{\cos \alpha_i + \sin \beta_i \cdot \sin(\alpha_i - \beta_i)\}] \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R}$$

$$[F_{global}]_C = \frac{\sum [c'_i \cdot l_i + [W_i \cdot \cos \alpha_i - W_{bi} \cdot \{\cos \alpha_i + \sin \beta_i \cdot \sin(\alpha_i - \beta_i)\}] \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R}$$

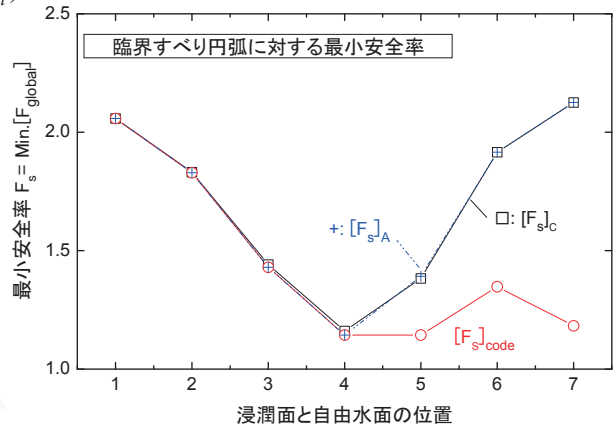
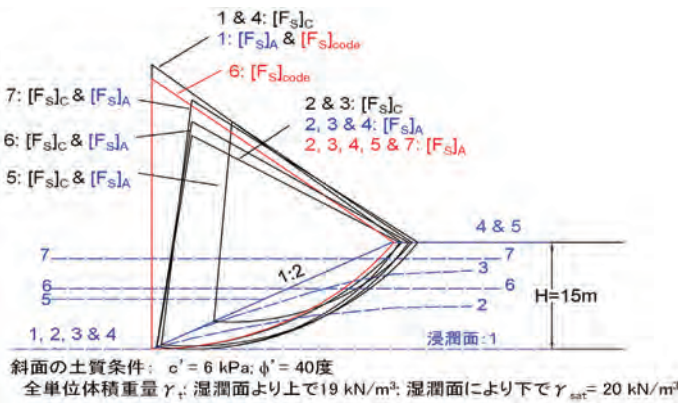
この式は、下図でのケース1~7の全てに適用できる

- ・  $\beta_i = 0$  ならば、静水状態に対する式aになる。
- ・  $\alpha_i - \beta_i = 0$  ならば、一般斜面に対する実用的な近似式aになる(この検討は次頁)。

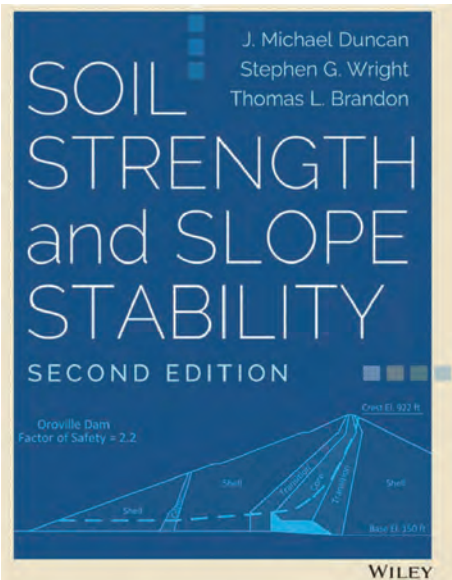
$$[F_{global}]_A = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + W'_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w} \quad (a)$$

- ・ 道路、鉄道、河川、港湾の指針類とDuncanの教科書では式aで  $M_w = 0$  とした式bが示されている。この式は、 $M_w = 0$  のケース1~4には実用的な近似式として適用できるしかし、 $M_w > 0$  のケース5~7では安全率を過小評価

$$[F_{global}]_{code} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + W'_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i)} \quad (b)$$



米国で最も実務家が参照しているtext book !



$$F = \frac{\sum [c' \Delta \ell + (W \cos \alpha - u \Delta \ell \cos^2 \alpha) \tan \phi']}{\sum W \sin \alpha} \quad (6.59)$$

$u$ は、浸透圧を考慮した正しい間隙水圧ではなく、水浸に比例した静水圧であり、この式は、

$$[F_{global}]_{code} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W_i - W_{bi}) \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i)} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + W'_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i)}$$

と同じ内容 !

しかし、浸透流のある斜面で、(6.59)式は

- ①分子が、何故浸透圧の影響が見掛け上含まれていないこの形で良いのか、説明がない !
- ②分母で、何故全重量,  $W$ , で良いのか、説明がない !  
前面に自由水位がある斜面に機械的に適用すれば、安全率を過小評価する

$$F_{\text{global}} = \frac{\sum [c'_i \cdot l_i + P'_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R}$$

次の三つの仮定で得られる「 $\alpha_i \neq \beta_i$ の時の $P'_i$ の値」を比較する:

①  $\alpha_i \neq \beta_i$ のスライスでも妥当な仮定:

$$[P'_i]_C = W'_i \cdot \cos \alpha_i - W_{bi} \cdot \sin \beta_i \cdot \sin(\alpha_i - \beta_i)$$

② 全てのスライスで $\alpha_i = \beta_i$ と仮定 (道路、鉄道、港湾等の指針類、Duncan et al.):

$$[P'_i]_{W'} = W'_i \cdot \cos \alpha_i = W_i \cdot \cos \alpha_i - W_{bi} \cdot \cos \alpha_i$$

③  $\alpha_i \neq \beta_i$ の全てのスライスでも、スライスの鉛直側面での間隙水圧の差はゼロと仮定した場合 ( $U_{bi}$ は浸透圧の影響を考慮した正しい間隙水圧)

$$[P'_i]_{Ub} = W_i \cdot \cos \alpha_i - U_{bi} = W_i \cdot \cos \alpha_i - W_{bi} \cdot \frac{\cos^2 \beta_i}{\cos \alpha_i}$$

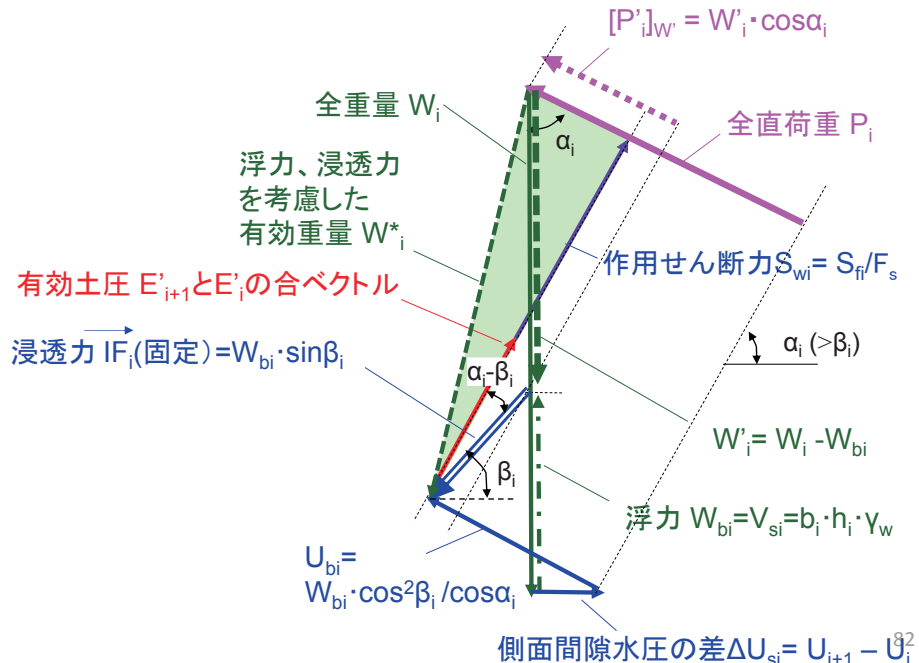
81

② 全てのスライスで $\alpha_i = \beta_i$ と仮定:

$$[F_{\text{global}}]_A = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + W'_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w}$$

Aはapproximatedの意味  
この式は、実用的な近似式

$$[P'_i]_{W'} = W'_i \cdot \cos \alpha_i = W_i \cdot \cos \alpha_i - W_{bi} \cdot \cos \alpha_i$$

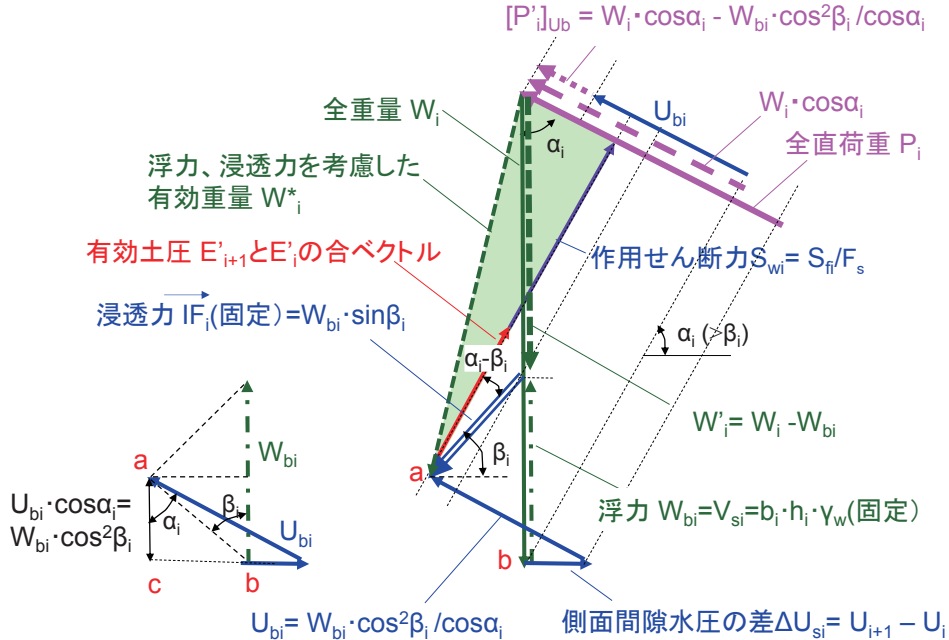




③  $\alpha_i \neq \beta_i$ の全てのスライスでも、スライスの鉛直側面での間隙水圧の差はゼロと仮定した場合

$$[F_{global}]_{Ub} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W_i \cdot \cos \alpha_i - U_{bi}) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w} \quad c \text{はcorrectの意味}$$

$$[P'_i]_{Ub} = W_i \cdot \cos \alpha_i - U_{bi} = W_i \cdot \cos \alpha_i - W_{bi} \cdot \frac{\cos^2 \beta_i}{\cos \alpha_i}$$



83

次の三つの仮定で得られる「 $\alpha_i \neq \beta_i$ の時の $P'_i/W_i$ の値の比較をする:

①  $\alpha_i \neq \beta_i$ のスライスでも妥当な仮定:

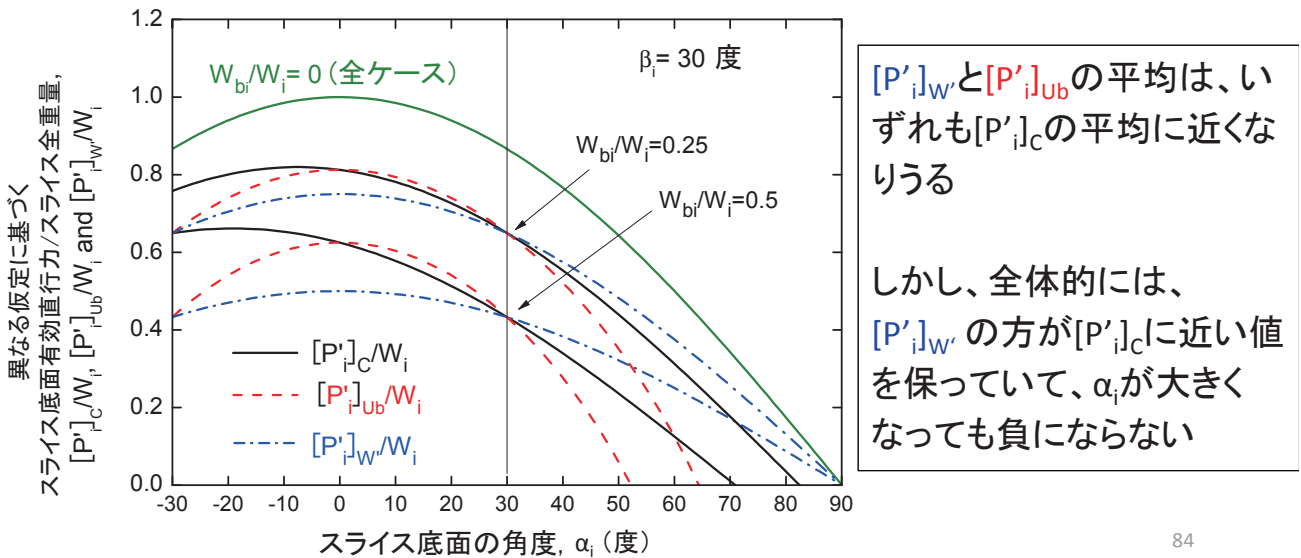
$$\frac{[P'_i]_c}{W_i} = \cos \alpha_i - \frac{W_{bi}}{W_i} \cdot \{\cos \alpha_i + \sin \beta_i \cdot \sin(\alpha_i - \beta_i)\}$$

② 全てのスライスで $\alpha_i = \beta_i$ と仮定:

$$\frac{[P'_i]_{W'}}{W_i} = \cos \alpha_i - \frac{W_{bi}}{W_i} \cdot \cos \alpha_i$$

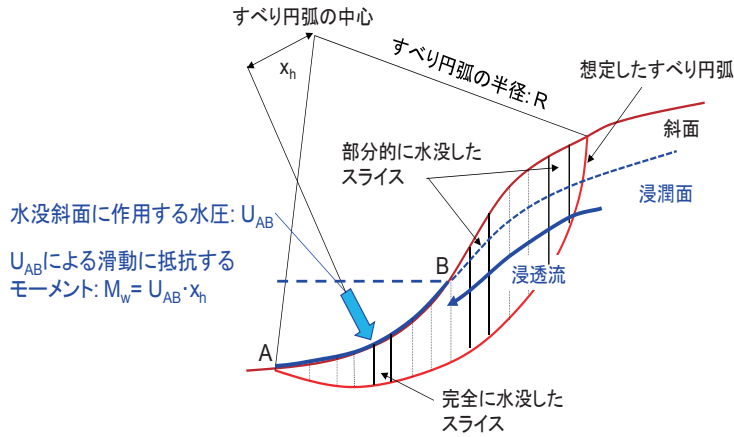
③  $\alpha_i \neq \beta_i$ の全てのスライスでも、スライスの鉛直側面の間隙水圧の差はゼロと仮定:

$$\frac{[P'_i]_{Ub}}{W_i} = \cos \alpha_i - \frac{U_{bi}}{W_i} = \cos \alpha_i - \frac{W_{bi}}{W_i} \cdot \frac{\cos^2 \beta_i}{\cos \alpha_i}$$



84

# 定常浸透流がある状態に対する修正Fellenius法での $F_{global}$ の正解は・・・



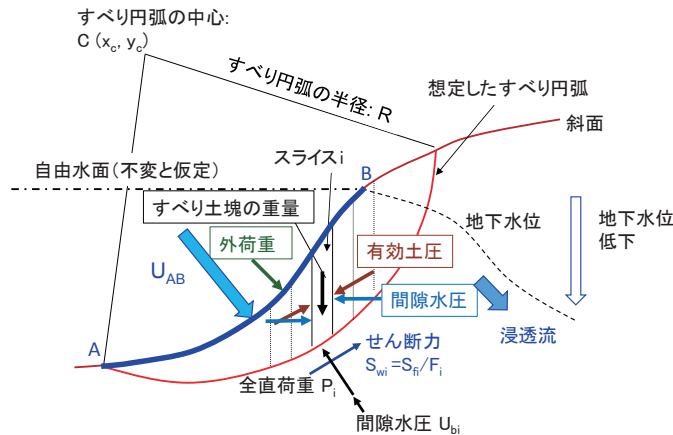
一般的条件で成り立つ式:

$$[F_{global}]_C = \frac{\sum [c'_i \cdot l_i + [W_i \cdot \cos \alpha_i - W_{bi} \cdot \{\cos \alpha_i + \sin \beta_i \cdot \sin(\alpha_i - \beta_i)\}]] \cdot \tan \phi'_i}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R}$$

実用的な近似式:  $F_{global} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + W'_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R}$

85

## ③深部に向かう浸透流が存在する斜面での常時の場合



全応力的表示 (実務で用いられている)

$$[M_d]_{direct} = R \cdot \sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + \sum (Q_i \cdot a_i) - M_w$$

$$= W_{total} \cdot x + \sum (Q_i \cdot a_i) - M_w$$

$$M_w = U_{AB} \cdot x_h$$

斜面深部で地下水位が低下すると、

- ・ $W_i$  若干減少  $\rightarrow M_d$  は若干減少
- ・ $U_{AB}$  が不変ならば  $M_w$  は不変

有効応力的表示

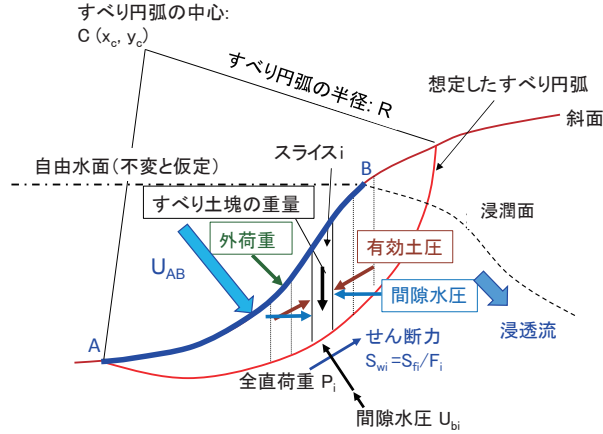
$$[M_d]_{direct} = \sum [R \cdot (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + IF_i \cdot z_i] + \sum (Q_i \cdot a_i)$$

$$= W'^*_{total} \cdot x^* + \sum (Q_i \cdot a_i)$$

斜面深部で地下水位が低下すると、

- ・ $W'_i$  若干増加  $\rightarrow M_d$  は若干増加
- ・ $IF_i \cdot z_i$  減少  $\rightarrow M_d$  は減少
- (通常、この影響の方が大きい)

## ③深部に向かう浸透流が存在する斜面での常時の場合



一般的条件で成り立つ式:

$$[F_{\text{global}}]_C = \frac{\sum [c'_i \cdot l_i + [W_i \cdot \cos \alpha_i - W_{bi} \cdot \{\cos \alpha_i + \sin \beta_i \cdot \sin(\alpha_i - \beta_i)\}] \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R}$$

実用的な近似式:

$$[F_{\text{global}}]_A = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + W'_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w}$$

何れも、斜面に沿って下方に浸透流がある場合の式と同じ形式  
ただし、 $W_i$ ,  $W'_i$ は浸潤面の位置の影響を受ける:

## 1. 藤沼ダムの事例

## 2. 円弧すべり安定解析法の理論的基礎と実施に当たっての留意事項

## 2-1. 混乱した現状

## 2-2. 円弧すべり安定解析の基礎

## 2-3. Fellenius法とは

## 2-4. 地下水位・浸潤面と自由水位の考慮

- ・浸透流がない場合
- ・定常浸透流がある場合

## 2-5. 地震力の取り扱い

## 2-6. 異なる設計指針等での排水状態での安全率の式の比較

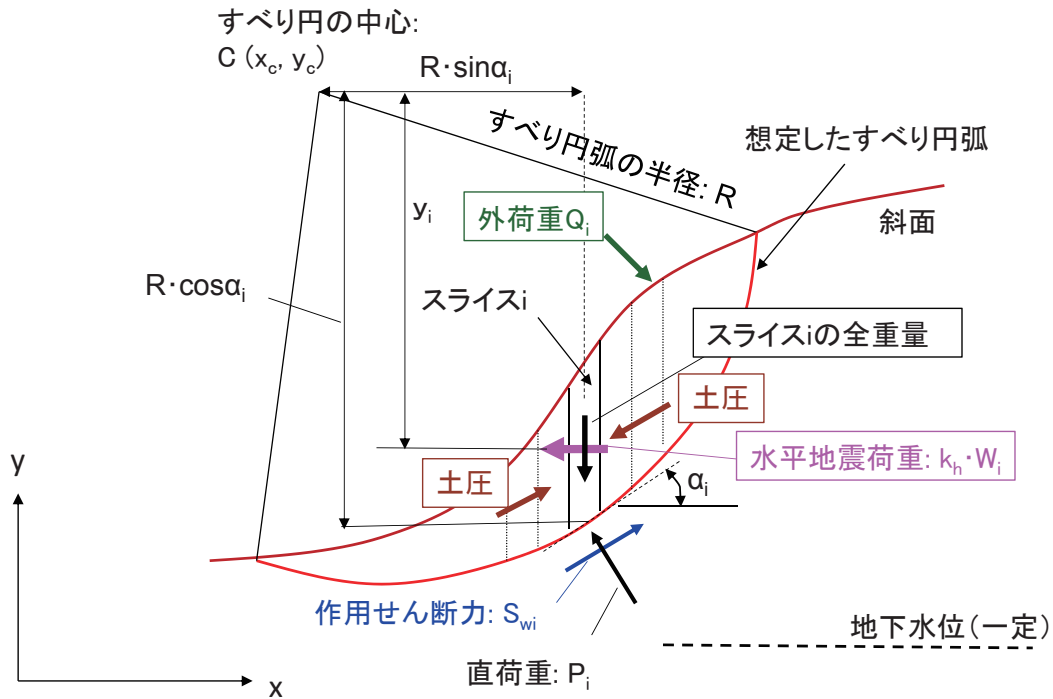
## 3. Newark-D法と劣化剛性FEMによる盛土の地震時残留変形解析

## 3-1. Newark法の経緯

## 3-2. 飽和土の非排水せん断強度の非排水繰返し载荷による劣化を考慮したNewark-D法による剛体すべり解析

## 3-3. 飽和土の非排水せん断剛性・強度の非排水繰返し载荷による劣化を考慮した準静的非線形FEMによる残留変形解析

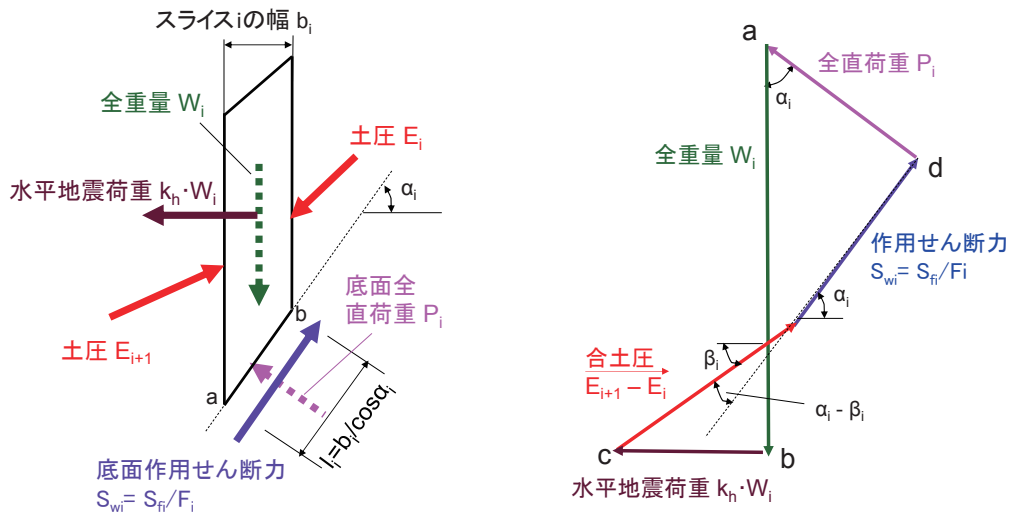
## スライス重心に作用する水平地震荷重の影響 (まず、斜面内に地下水位が無い場合で検討)



89

## 地下水位より上にあるすべり土塊に対する外向き地震荷重 $k_h$ の影響

それぞれのスライスの両側面での土圧の大きさ、作用方向と作用位置が、力・モーメントの釣り合い条件を満たしている場合



スライス間の土圧の大きさ・方向・位置に関係なく、  
力学的正解の滑動モーメントは次式で求めることができる。

$$[M_d]_{direct} = R \cdot \sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i)$$

一方、 $S_{wi}$ 方向の力の釣合から、

$$S_{wi} = W'_i \cdot \sin \alpha_i + k_h W_i \cdot \cos \alpha_i - \Delta E_i \cdot \cos(\alpha_i - \beta_i)$$

それぞれのスライスで力とモーメントの釣り合いが満たされている場合、 $M_d$ を元々の定義に従って $S_{wi}$ を用いて求めると、

$$[M_d]_{Sw} = R \cdot \sum(S_{wi})$$

$$= R \cdot \sum(W'_i \cdot \sin \alpha_i) + R \cdot k_h \cdot \sum(W_i \cdot \cos \alpha_i) - R \cdot \sum[\Delta E_i \cdot \cos(\alpha_i - \beta_i)]$$

それぞれのスライスで $S_{wi}$ が力とモーメントの釣り合いの条件を満たしていれば、

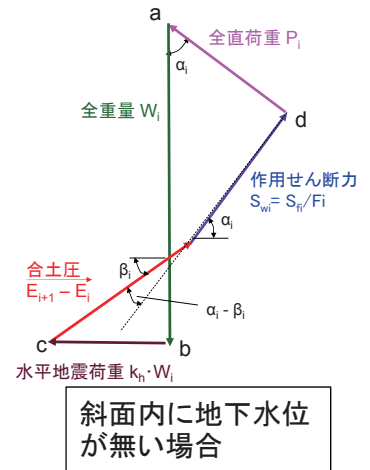
$$[M_d]_{Sw} = [M_d]_{direct} [= R \cdot \sum(W'_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum(W_i \cdot y_i)]$$

⇒ $[M_d]_{Sw}$ と $[M_d]_{direct}$ の式を比較すると、 $y_i > R \cdot \cos \alpha_i$ なので、

$$R \cdot \sum[\Delta E_i \cdot \cos(\alpha_i - \beta_i)] > 0$$

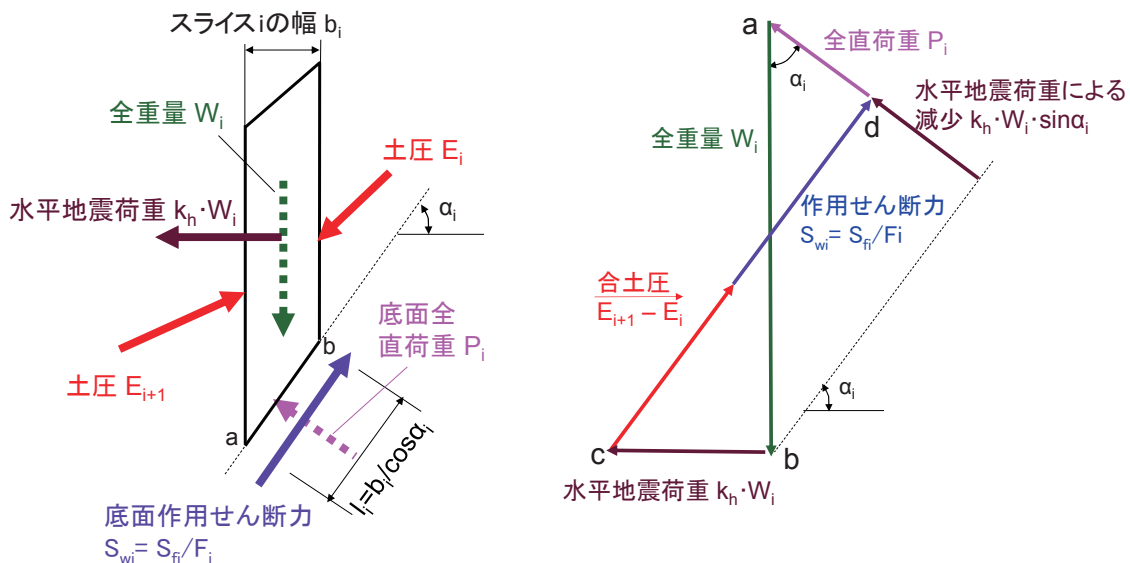
ただし、 $k_h=0$ の時は、 $[M_d]_{direct} = [M_d]_{Sw} = R \cdot \sum(W'_i \cdot \sin \alpha_i)$

つまり、 $R \cdot \sum[\Delta E_i \cdot \cos(\alpha_i - \beta_i)] = 0$



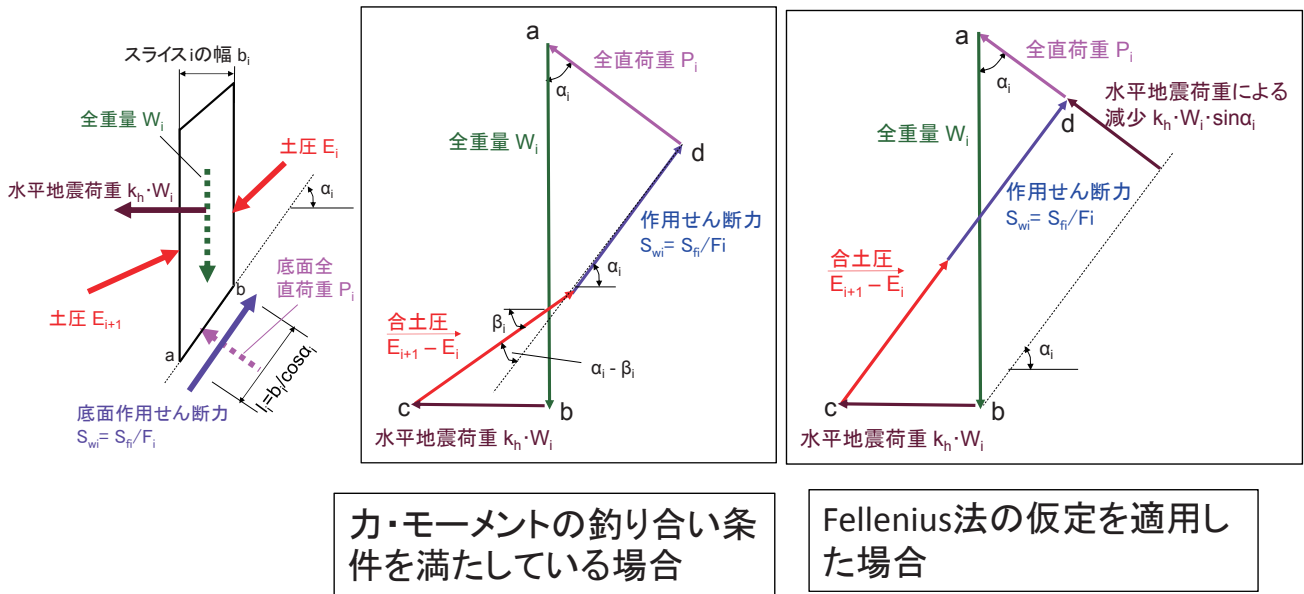
Fellenius法を適用した場合、地下水位より上にあるすべり土塊に対する外向き地震荷重 $k_h$ の影響

地震荷重が作用しても、スライスiの両側面での土圧の合ベクトルは、その作用方向はスライス底面に平行であると仮定している。この場合、力・モーメントの釣り合い条件を満たしていない





## 地下水位より上にあるすべり土塊に対する外向き地震荷重 $k_h$ の影響



スライス $i$ の両側面での土圧の合ベクトルの方向は、水平地震荷重が大きくなるほどスライス底面方向から水平方向にづれる  
 ⇒Fellenius法は、 $k_h$ が大きくなるほど $P_i$ を過小評価

力学的正解の滑動モーメントは、

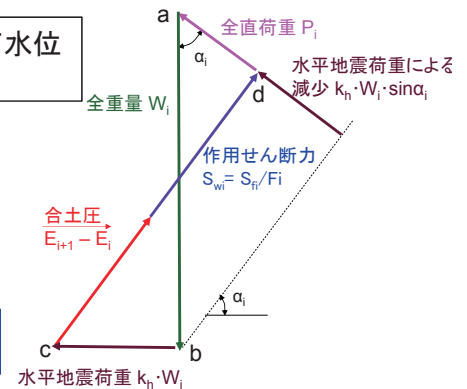
$$[M_d]_{direct} = R \cdot \sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i)$$

斜面内に地下水位が無い場合

Fellenius法を適用すると、 $S_{wi}$ 方向の力の釣合から

$$[M_d]_{Sw} = R \cdot \sum (S_{wi})$$

$$= R \cdot \sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + R \cdot k_h \cdot \sum (W_i \cdot \cos \alpha_i) - R \cdot \sum [\Delta E_i]$$



Fellenius法を適用する場合、 $S_{wi}$ は正解ではないので $[M_d]_{Sw} = R \cdot \sum (S_{wi})$ は正解ではなくなる。しかし、通常は転倒モーメントとして正解の $[M_d]_{direct}$ を用いている。

つまり、 $F_{global} = M_r/M_d$ において、

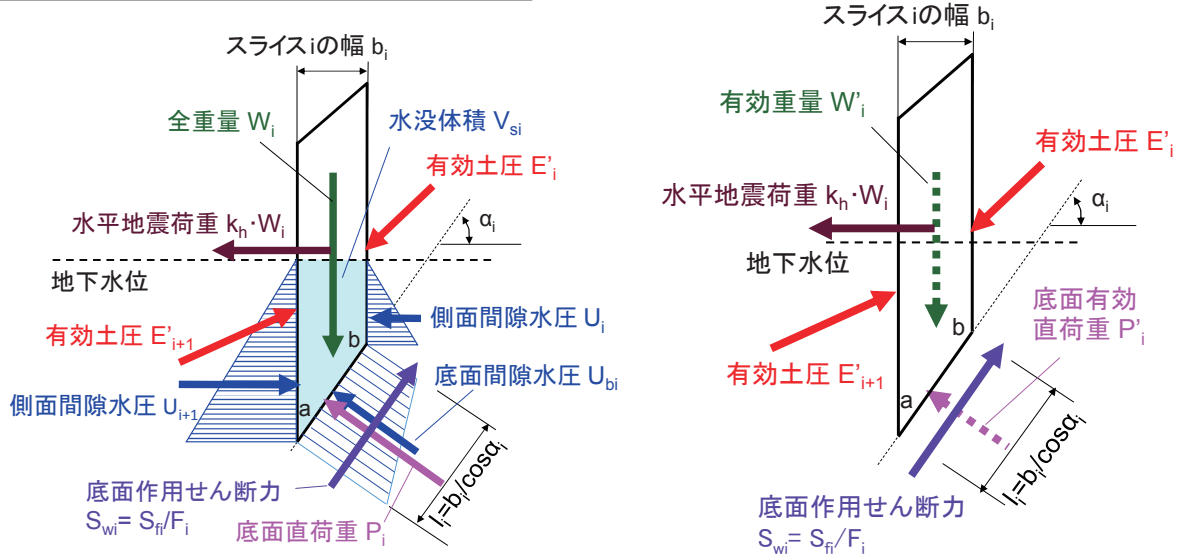
- ・ $M_d$ は正解の正しい $S_{wi}$ に基づいている $[M_d]_{direct}$ を用いているが、
- ・ $M_r$ は力の釣り合い条件を満たしていない $S_{wi}$ に基づいている。

水平地震荷重はスライス重心に作用しているので、Fellenius法としても解は:

$$F_{global} = \frac{R \cdot \sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W_i \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{R \cdot \sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i)}$$

地下水位があるが浸透流がない場合での $P'_i$ に対する外向き $k_h$ の影響

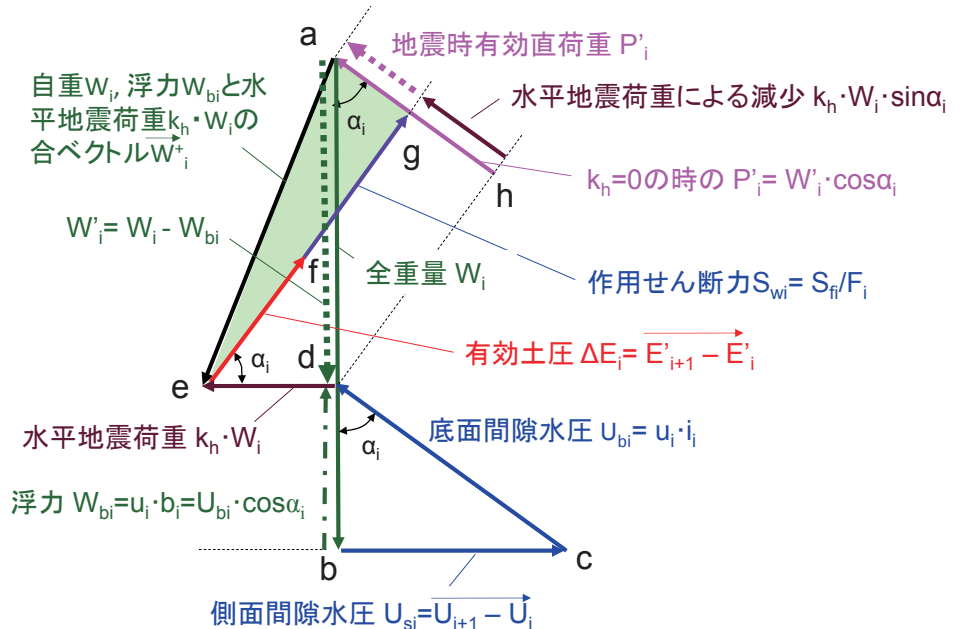
部分的に水没したスライス



95

排水状態で浸透流がない場合 (修正Fellenius法)

部分的に水没したスライス



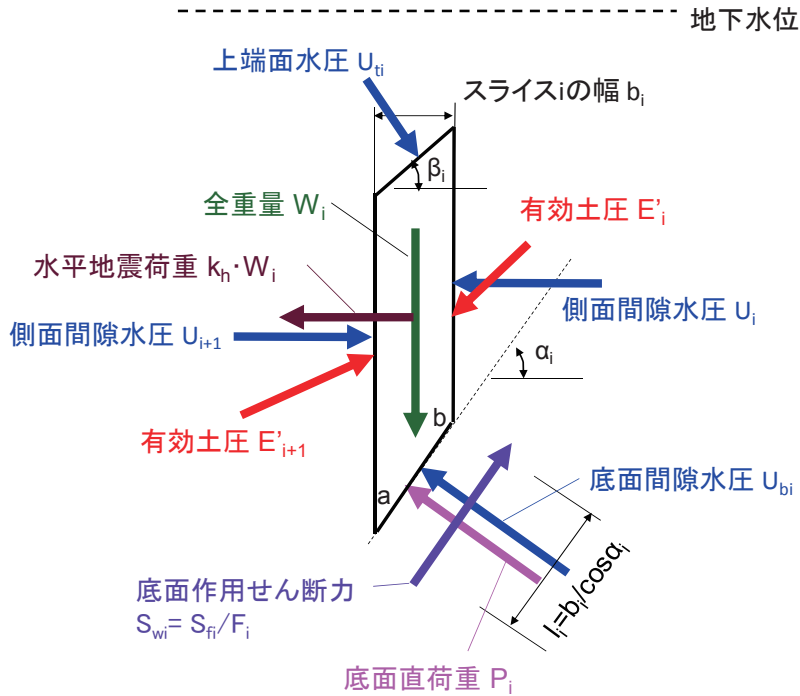
$$\begin{aligned}
 P'_i &= (W_i - U_{bi} \cdot \cos\alpha_i) \cdot \cos\alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin\alpha_i \\
 &= (W_i - W_{bi}) \cdot \cos\alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin\alpha_i \\
 &= W'_i \cdot \cos\alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin\alpha_i
 \end{aligned}$$

$P'_i$ は、 $-k_h \cdot W_i \cdot \sin\alpha_i$  によって減少

96

## 地下水位があるが浸透流がない場合での $P'_i$ に対する外向き $k_h$ の影響

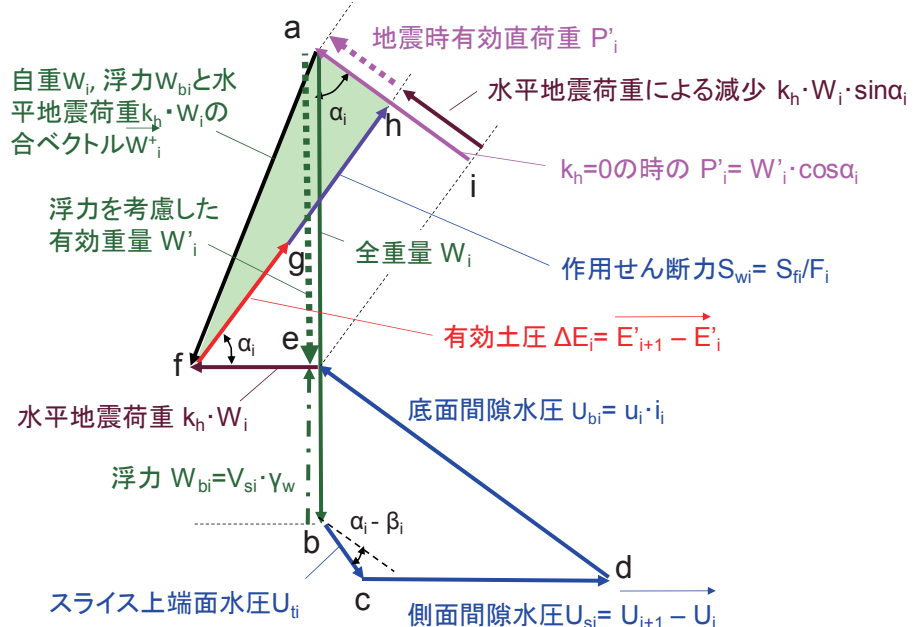
### 完全に水没したスライス



97

### 排水状態で浸透流がない場合 (修正Fellenius法)

#### 完全に水没したスライス



$$P'_i = (W_i - W_{bi}) \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i$$

$$= W_i \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i$$

$P'_i$ は、 $-k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i$  によって減少

この式は、水没していないスライス、部分的・完全に水没したスライスに対して共通

98

力学的正解の滑動モーメントは、

$$(1) [M_d]_{direct} = R \cdot \sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i) \\ = R \cdot \sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i)$$

⇒地下水位があり静水状態の斜面に対してFellenius法を適用した場合の正解は、

$$[F_{global}]_{direct} = \frac{R \cdot \sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W'_i \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{R \cdot \sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i)} \\ = \frac{R \cdot \sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W'_i \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{R \cdot \sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i)}$$

Newmark-S, D法

フィルダム(国土省)

- 建設省河川局開発課監修・財国土開発技術センター発行(1991): フィルダムの耐震設計指針(案)、平成3年6月、2.地震時安定性の検討、2.4安定計算、7~9頁式(2)~(6)

99

力学的正解の滑動モーメントは、

$$(1) [M_d]_{direct} = R \cdot \sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i)$$

力・モーメントの釣り合いを満たした $S_{wi}$ に基づくと、

$$(2) [M_d]_{Sw} = R \cdot \sum (S_{wi}) = R \cdot \sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + R \cdot k_h \cdot \sum (W_i \cdot \cos \alpha_i) - R \cdot \sum [\Delta E_i \cdot \cos(\alpha_i - \beta_i)]$$

修正Fellenius法では、

$$(2') [M_d]_{Sw} = R \cdot \sum (S_{wi}) = R \cdot \sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + R \cdot k_h \cdot \sum (W_i \cdot \cos \alpha_i) - R \cdot \sum [\Delta E_i]$$

ここで、(2), (2')式で  $R \cdot \sum [\Delta E_i \cdot \cos(\alpha_i - \beta_i)] = 0$ ,  $R \cdot \sum [\Delta E_i] = 0$  を仮定すると、

$$\Rightarrow (3) [M_d]_{Sw.app} = R \cdot \sum (S_{wi})_{app} = R \cdot \sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + R \cdot k_h \cdot \sum (W_i \cdot \cos \alpha_i)$$

常に、[(3)による $[M_d]_{Sw.app}$ ] > [(1)による $[M_d]_{direct}$ ]

(3)式に基づくと、修正Fellenius法では、

$$\Rightarrow [F_{global}]_{Sw.app} = \frac{R \cdot \sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W_i \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{R \cdot \sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + R \cdot k_h \cdot \sum (W_i \cdot \cos \alpha_i)}$$

$$[F_{global}]_{direct} = \frac{R \cdot \sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W'_i \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{R \cdot \sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i)}$$

よりも常に小さい安全率

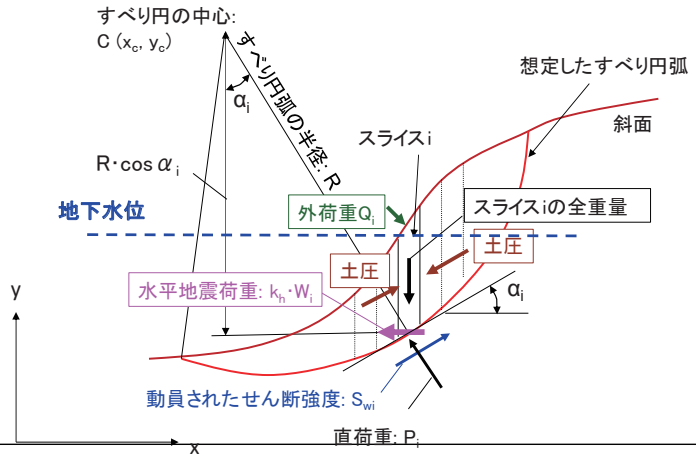
斜面内に地下水位が存在する静水の場合

$$[F_{global}]_{Sw.app} = \frac{R \cdot \sum [c'_i \cdot l_i + (W'_i \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{R \cdot \sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + R \cdot k_h \cdot \sum (W_i \cdot \cos \alpha_i)}$$

$$= \frac{\sum [c'_i \cdot l_i + (W'_i \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W_i \cdot \cos \alpha_i)}$$

この式は、「スライス底面に水平地震荷重が作用する」と仮定していることとなる

→フィルダムの実務設計で広く用いられているが、力学的に合理性がなく、常に $M_d$ を過大評価して $F_{global}$ を過小評価



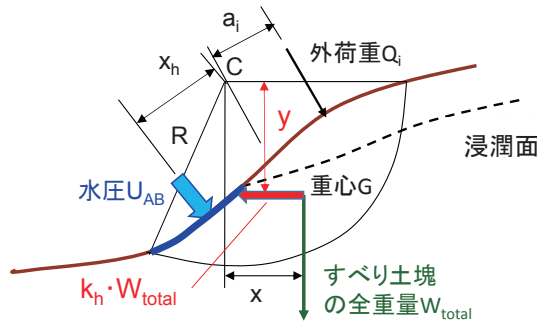
フィルダム(国土省、農林水産省)

- 社団法人日本河川協会編(2014): 改訂新版建設省河川砂防技術基準(案)同解説、設計編[1]: 建設省河川局監修、技報堂出版、平成26年3月3日(改訂版新刷版第16刷)、第2章ダム設計、6.3堤体の設計、6.3.1すべり破壊に対する安全性、224-228頁に示されている諸式、(注)第1刷は昭和60年(1985年)10月31日
- 農林水産省農村振興局(2003); 土地改良事業計画設計基準、設計「ダム」—技術書(フィルダム編、平成15年4月、第9章フィルダムの設計、II-102頁式(9.1.6-1)

101

## 斜面下方に向かう浸透流と水平地震荷重がある排水状態の斜面

全応力法的な表現での $M_d$



$$[M_d]_{direct} = R \cdot \sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i) + \sum (Q_i \cdot a_i)$$

$$= W_{total} \cdot x + k_h \cdot W_{total} \cdot y + \sum (Q_i \cdot a_i) - M_w$$

$$M_w = U_{AB} \cdot x_h$$

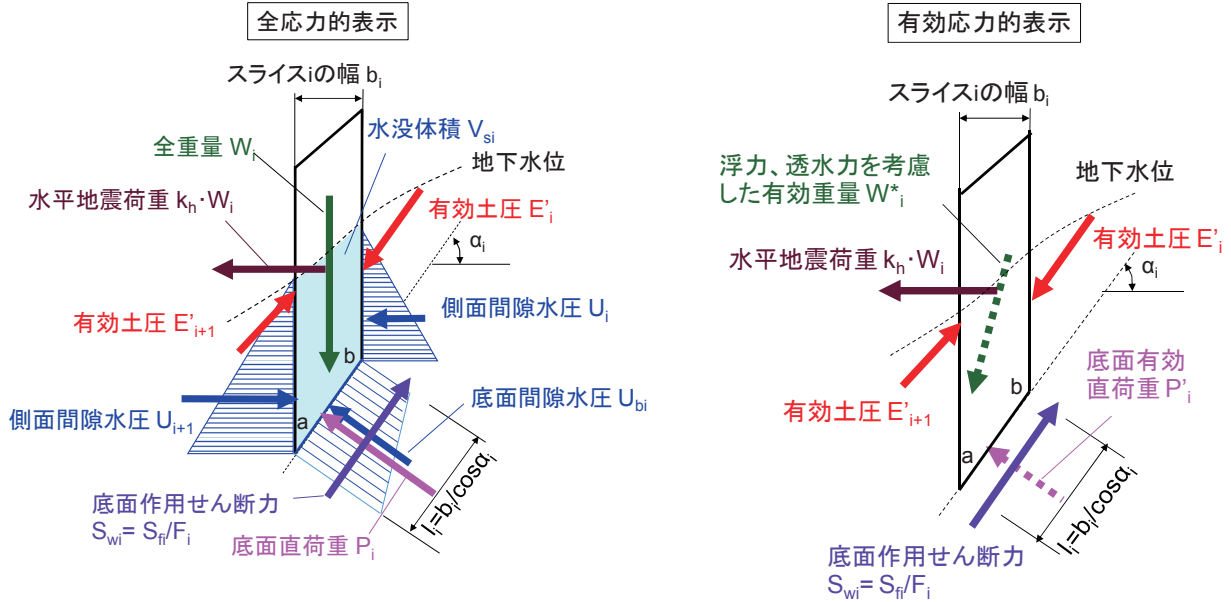
- 斜面下方に向かう浸透流がある状態で水平地震荷重を受けると $M_d$ は更に増加
- $U_{AB}$ が小さくなれば、 $M_d$ は更に増加

102



## 斜面下方に向かう浸透流と水平地震荷重がある排水状態の斜面

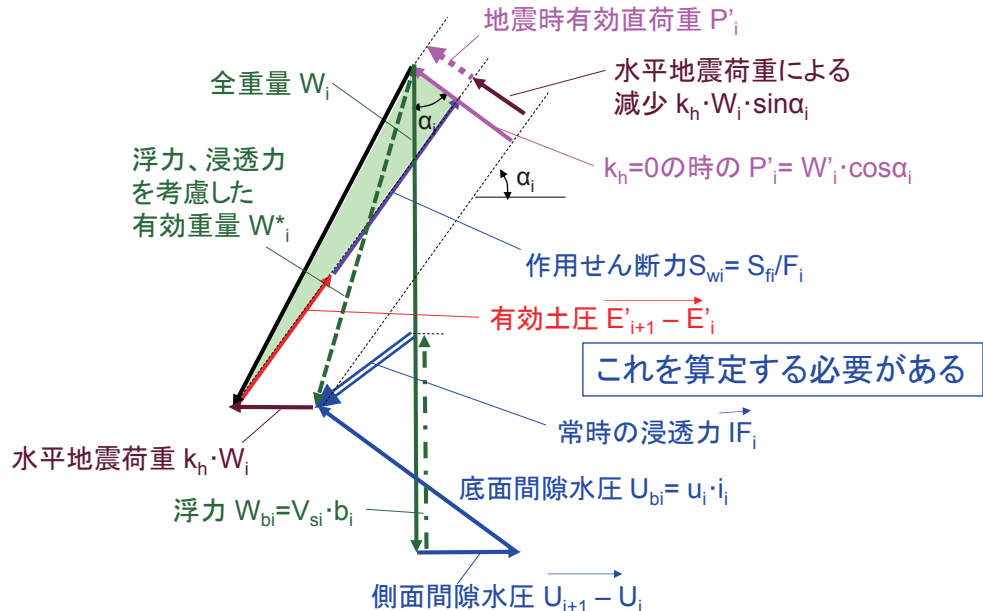
### $P'_i$ に対する外向き $k_h$ の影響



103

## 斜面下方に向かう浸透流と水平地震荷重がある排水状態の斜面

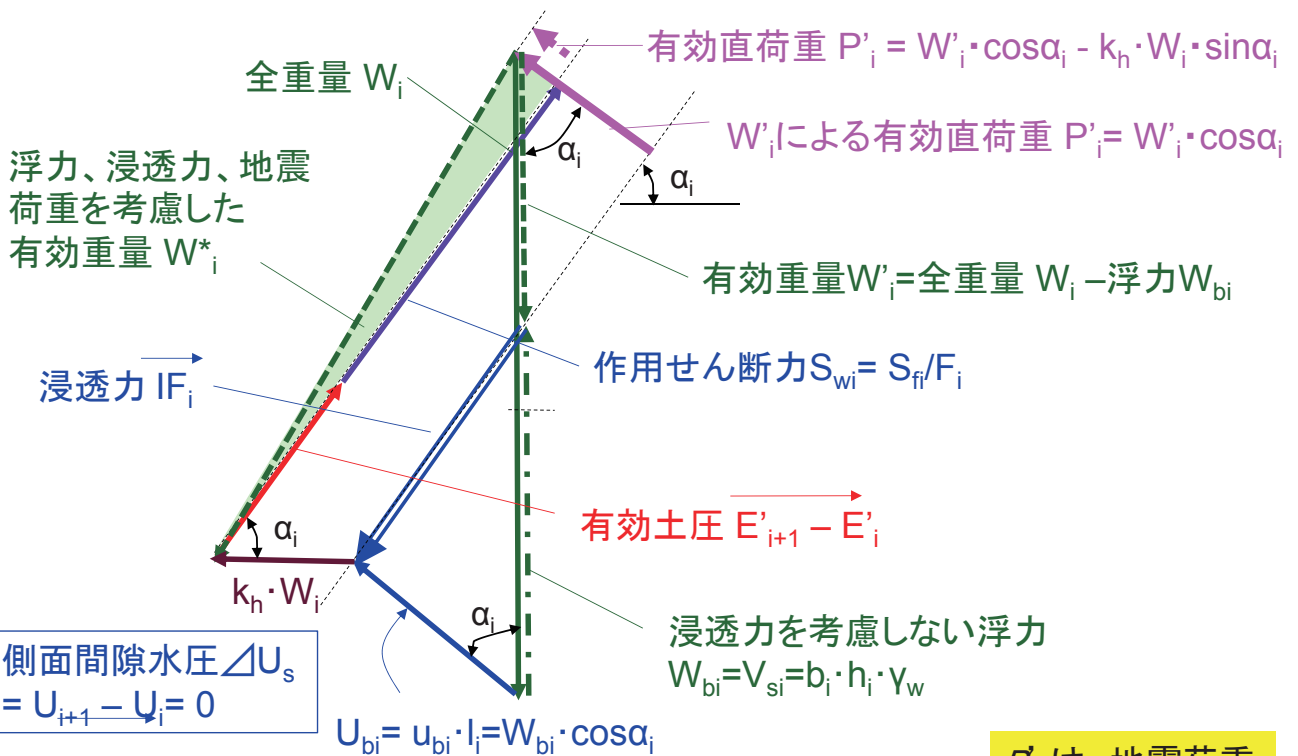
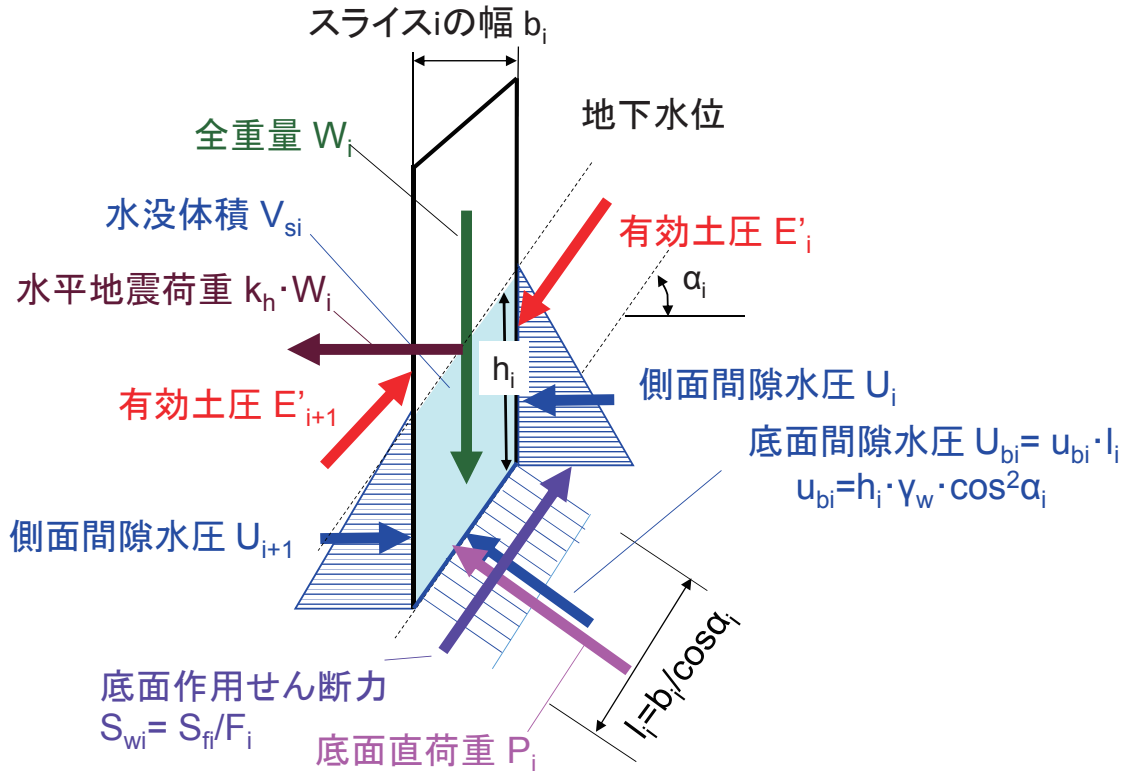
部分的に水没したスライス



- ・フィルダム上流斜面で貯水位が急低下した場合、
  - ・地下水位が、山間部の沢部の盛土で常に高い場合、豪雨で上昇した場合
    - $P'_i$ は、地震荷重に加えて浸透力によって二重に減少
    - $M_d$ は大きく増加している
- 地震時の安定性は著しく減少

104

長大斜面のように、浸透流の方向がスライス底面に平行な場合に水平地震荷重が加わった場合は……



側面間隙水圧  $\Delta U_s = U_{i+1} - U_i = 0$

$$[F_{global}]_{direct} = \frac{R \cdot \sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W'_i \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{R \cdot \sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i)}$$

$P'_i$  は、地震荷重に加えて浸透力によって二重に減少

この式は、通常の斜面での円弧すべりに対する実用的な近似式

## 次の実用的な近似式が斜面の耐震設計で用いられている

$$[F_{global}]_{direct} = \frac{R \cdot \sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W'_i \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{R \cdot \sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i)}$$

- 国土交通省鉄道局監修・鉄道総合技術研究所編(2007): 平成25年改編鉄道構造物等設計標準・同解説、土構造物、平成19年1月、(株)丸善出版、3章盛土、3.1.2盛土の性能照査法、66頁式(解3.1.1)
- (監修)建設省建設経済局民間宅地指導室(編集)宅地防災研究会(2000): 改訂版宅地防災マニュアルの解説[1]、平成12年5月10日4版、(株)ぎょうせい、VI.盛土、VI.3.盛土のり面の安定性の検討、宅造盛土、132頁式-②.
- (公益社団法人)日本道路協会(2010): 道路土工、盛土工指針(平成22年度版)、平成22年4月、第4章設計、4-3-4地震動の作用に対する盛土の安定性の照査、(2)、(3)地震動の作用に対する盛土の安定性の照査の方法、124頁式(解4-2)
- (公益社団法人)日本道路協会(2012): 道路土工、軟弱地盤対策工指針(平成24年度版)、平成24年8月、第5章軟弱地盤上の土工構造物の設計、5-6地震動の作用に対する安定性の照査、(2)地震時安定性照査の方法、2)地震動の作用に対する照査の方法、170頁式(解5-35)

この式では、

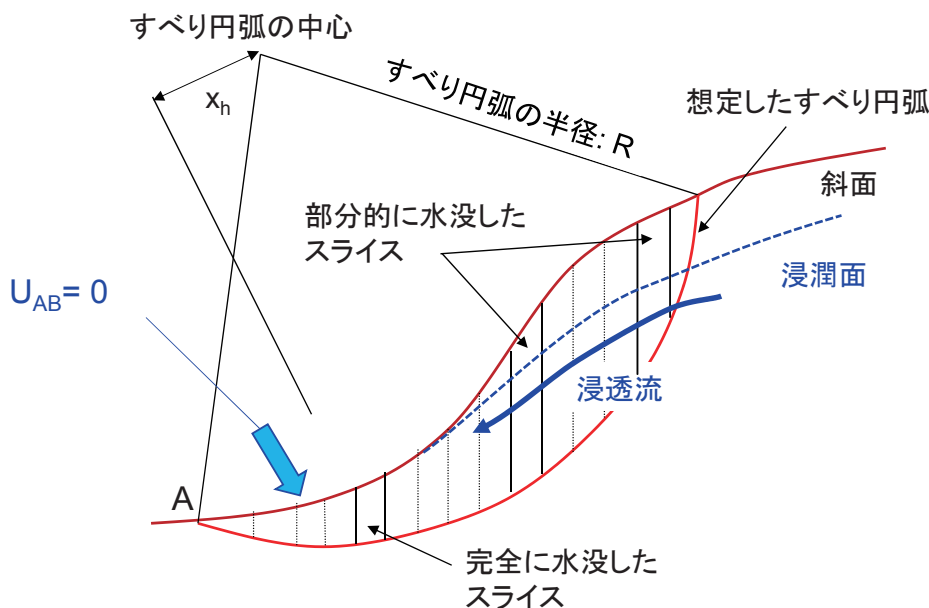
- ①水平地震荷重は正しくスライス重心に作用するとしているが、
- ② $M_w$ を $M_w=0$ として求めている。

このため、以下に示すようにこの式の適用にはいくつかの注意が必要である。

107

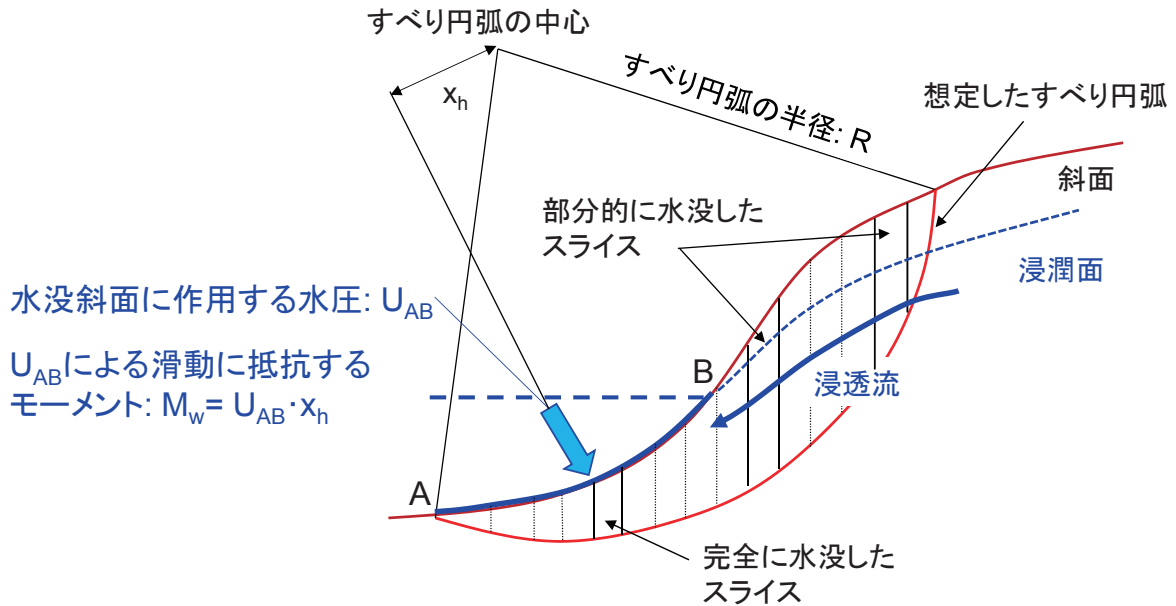
$$[F_{global}]_{direct} = \frac{R \cdot \sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W'_i \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{R \cdot \sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i)}$$

$M_w=0$ で浸透流のある斜面に対しては、  
浸潤面の位置を適切に設定すれば、実用的な近似式

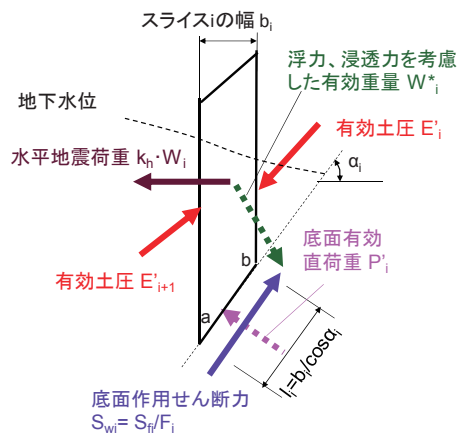
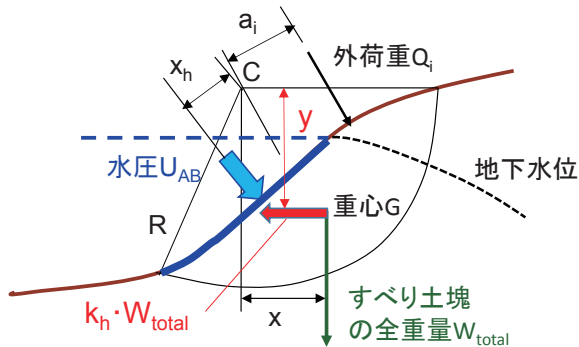


$$[F_{global}]_{direct} = \frac{R \cdot \sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W'_i \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{R \cdot \sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i)}$$

$M_w > 0$ で浸透流のある斜面の耐震性を過小評価する

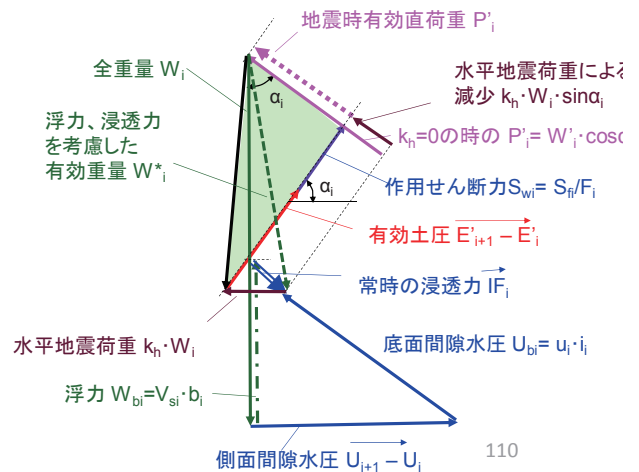


斜面深部に向かう浸透流と水平地震荷重がある排水状態の斜面



フィルダム上流斜面で下流に向かって浸潤面が低下している場合などで、 $U_{AB}$ が変わらない場合:

- $P'_i$ は、地震荷重で減少するが、浸透力によって増加
  - $M_d$ は、地震荷重によって増加するが、浸透流によって  $\gamma_t$ が減少した分だけ減少
- ⇒浸透流によって安全率は増加



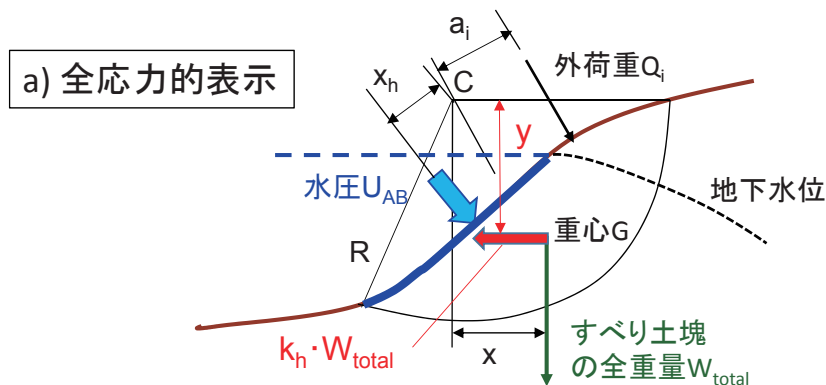
実用的な近似として:

- $M_r$ は浸透力によって増加する。  
無視⇒安全側（必要ならば考慮することはできる）

- $M_d$ は、浸潤面の位置を求めて次式(正解)を適用

$$[M_d]_{direct} = R \cdot \sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i) + \sum (Q_i \cdot a_i)$$

$$= W_{total} \cdot x + k_h \cdot W_{total} \cdot y + \sum (Q_i \cdot a_i) - U_{AB} \cdot x_h$$



111

## 地震時に飽和土が非排水状態の場合

- 1) 飽和した斜面は、粒径が小さく排水距離が長いほど、地震時に非排水条件あるいはそれに近い条件になりやすい。

その場合、排水条件と仮定して安定解析をすると、

- ・緩い土では $M_r$ を過大評価して危険側、密な土では $M_r$ を過小評価して安全側となり、全体としては締固めの影響を過小評価

- 2) 非排水条件で解析する場合での飽和土の非排水せん断強度 $s_{f,u}$ の算定法:

- ・全応力法で非排水繰返し载荷による低下を考慮(Newmark-D法):
- ・ $\Delta u$ 法:  $\tau_{f,u} = c' + (\sigma'_0 - \Delta u) \cdot \tan \phi'$  (正確な $\Delta u$ の推定が必要! 難しいが!)  
⇒締固まった盛土では $\Delta u$ を過大評価して安全率を過小評価する傾向  
従って、実務では地震荷重は加えない $\Delta u$ 法を適用されている

$\Delta u > 0$ と地震荷重を同時に考慮する方法でない、

⇒締め固まった盛土では、地震時に最小となる安全探索できない

Newmark法に適用できない (これらは後ほど説明)

112



1. 藤沼ダムの事例
2. 円弧すべり安定解析法の理論的基礎と実施に当たっての留意事項
  - 2-1. 混乱した現状
  - 2-2. 円弧すべり安定解析の基礎
  - 2-3. Fellenius法とは
  - 2-4. 地下水位・浸潤面と自由水位の考慮
    - ・浸透流がない場合
    - ・定常浸透流がある場合
  - 2-5. 地震力の取り扱い
  - 2-6. 異なる設計指針等での排水状態での安全率の式の比較
3. Newark-D法と劣化剛性FEMによる盛土の地震時残留変形解析
  - 3-1. Newmark法の経緯
  - 3-2. 飽和土の非排水せん断強度の非排水繰返し載荷による劣化を考慮したNewark-D法による剛体すべり解析
  - 3-3. 飽和土の非排水せん断剛性・強度の非排水繰返し載荷による劣化を考慮した準静的非線形FEMによる残留変形解析

113

## Fellenius法による排水状態に対する安定計算の各種指針等での式の比較

- 1.異なる仮定の総括
- 2.異なる式のまとめ
3. 解析条件
4. 安全率とNewmark法による剛体すべり変位の比較

114

## 1.異なる仮定の総括-1

青印が適切な設定・仮定 (PWP-a等の記号は次頁以降で表示)

1)  $P'_i$ を求める時のスライス側面での間隙水圧の作用方向:

- ・PWP-a: 水平(力学的に正しい)
- ・PWP-b: スライス側面での間隙水圧を無視、あるいは、スライス底面に平行(力学的に不合理で、斜面が急勾配になるほど安全側)

2) 滑動moment  $M_q$ を計算する時のスライスの自重と外水圧  $U_{AB}$ の考慮:

- ・W-a: 「有効重量  $W'_i$ を用いて浸透力を考慮する」方法と「全重量  $W_i$ を用いて  $U_{AB}$ を考慮する」方法。両者は同じ結果となり、力学的に正しい
- ・W-b: 「 $W_i$ を用いて  $U_{AB}$ を考慮しない」方法。
  - 1) 盛土内に地下水位がない場合は正解
  - 2) 地下水位は高い静水状態の場合は力学的に不合理で確実に安全側、完全水没斜面では過度に安全側
  - 3) 地下水位が高く斜面に向かう浸透流がある場合に対しては、実務的にほぼ妥当な近似式を定式化できる

115

## 1.異なる仮定の総括-2

3) 水平地震荷重の考慮とその作用位置:

- ・HSL-a: 水平地震力がスライス重心に作用
- ・HSL-b: 水平地震力はスライスの底面に作用(力学的に不合理、常に安全側)
- ・HSL-c: 非排水状態での飽和土での地震荷重による  $\Delta u$ は考慮するが地震力は考慮しない(地震動終了時が対象; 正確な  $\Delta u$ の推定が難しい)
- ・HSL-d: 耐震設計をせず常時の排水状態での検討( $\Delta u = 0, k_h = 0$ )

4) 飽和土の地震時の排水条件:

- ・US-a1: 非排水として、全応力法で非排水繰返し载荷による劣化を考慮
- ・US-a2: 非排水として、 $\Delta u$ 法によって非排水せん断強度を算定。正しい  $\Delta u$ を推定できれば、US-a1と同じ結果が得られる。しかし、実際にはこの方法で地震時と地震直後での非排水せん断強度を適切に推定することは難しい。
- ・US-b: 飽和土でも排水条件とする(緩い土では危険側、密な土では安全側)

(非排水せん断強度を用いる安定解析は、次章で扱う)

116

# Fellenius法による排水状態に対する安定計算の各種指針等での式の比較

## 1.異なる仮定の総括

## 2.異なる式のまとめ

## 3.解析条件

## 4.安全率とNewmark法による剛体すべり変位の比較

117

浸透流がない静水状態の斜面の常時(初期状態)での各種安全率の式

記号	スライス側面での間隙水圧作用方向	$M_d$ の計算での水没スライスの自重	$F_{global}$ の式
PWP-a/W-a Newmark-S & D	水平 (注1)	有効重量 $W'_i$ 全重量 $W_i$ - 浮力 $W_{bi}$ (注2)	$\frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + W'_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w}$
PWP-b/W-a	スライス底面に平行	有効重量 $W'_i$ 全重量 $W_i$ - 浮力 $W_{bi}$	$\frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W_i \cdot \cos \alpha_i - W_{bi} / \cos \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w}$ $\frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W_i \cdot \cos \alpha_i - U_{bi}) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w}$
PWP-a/W-b	水平	全重量 $W_i$	$\frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + W_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i)}$
PWP-b/W-b	スライス底面に平行	全重量 $W_i$	$\frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W_i \cdot \cos \alpha_i - W_{bi} / \cos \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i)}$ $\frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W_i \cdot \cos \alpha_i - U_{bi}) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i)}$

注1) 浸透流がある斜面では、 $P'_i$ に対する浸透力の影響を考慮する必要がある

注2)

浸透流がない斜面では、「有効重量 $W'$ を用いる方法」は「全重量 $W$ を用いて $M_w$ を考慮する方法」と等価  
浸透流がある斜面では、「 $W'$ を用いて浸透力を考慮する方法」は「 $W$ を用いて $M_w$ を考慮する方法」と等価

浸透流がない斜面(排水条件)の地震時での安全率の各種の式

	スライス側面での間隙水圧作用方向	M <sub>d</sub> の計算での水没スライスの自重	水平地震荷重の考慮とその作用位置	F <sub>global</sub> の式
PWP-a/W-a/HSL-a (注3) Newmark-O (完全塑性) Newmark-S (ひずみ軟化)	水平 (注1)	有効重量W' <sub>i</sub> = W <sub>i</sub> - W <sub>bi</sub> (注2)	スライスの重心	$\frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W'_i \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i / R)}$
PWP-a/W-b/HSL-a	水平	全重量W <sub>i</sub>	スライスの重心	$\frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W_i \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i / R)}$
PWP-b/W-b/HSL-a (注3)	スライス底面に平行	全重量W <sub>i</sub>	スライスの重心	$\frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + \{ (W_i \cdot \cos \alpha_i - W_{bi} / \cos \alpha_i) - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i \} \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i / R)}$ $\frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + \{ (W_i \cdot \cos \alpha_i - U_{bi}) - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i \} \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i / R)}$
PWP-a/W-a/HSL-b (注3)	平行	有効重量W' <sub>i</sub> = W <sub>i</sub> - W <sub>bi</sub>	スライスの底面	$\frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + (W'_i \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w + k_h \cdot \sum (W_i \cdot \cos \alpha_i)}$

注3): 地震時に飽和土が非排水状態になる場合にこれらの式を用いる場合は、これらの式の記号の末尾に/US-bを追加する

119

浸透流がない斜面(非排水条件)の地震時での安全率の各種の式

	スライス側面での間隙水圧作用方向	M <sub>d</sub> の計算での水没スライスの自重	水平地震荷重の考慮とその作用位置	F <sub>global</sub> の式
PWP-a/W-a/HSL-a /US-a1 Newmark-D	水平 (注1)	有効重量W' <sub>i</sub> = W <sub>i</sub> - W <sub>bi</sub> (注2)	スライスの重心	$\frac{\sum [\tau_{f,u}]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i / R)}$
PWP-a/W-b/HSL-c /US-a2	水平	全重量W <sub>i</sub>	地震荷重を考慮しない	$\frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + \{ [W_i - (U_{bi} + \Delta U_{bi}) \cdot \cos \alpha_i] \cdot \cos \alpha_i \} \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i)} \quad (注4)$
PWP-a/W-b/HSL-a /US-a2 Newmark法に適用するための式(河川土工指針から展開)	水平	全重量W <sub>i</sub>	スライスの重心	$\frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + \{ [W_i - (U_{bi} + \Delta U_{bi}) \cdot \cos \alpha_i] \cdot \cos \alpha_i \} \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i / R)} \quad (注4)$
PWP-a/W-a/HSL-a /US-a2 Newmark法に適用するための式	水平	有効重量W' <sub>i</sub>	スライスの重心	$\frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + \{ [W_i - (U_{bi} + \Delta U_{bi}) \cdot \cos \alpha_i] \cdot \cos \alpha_i \} \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i / R)}$

注4): この式は部分的に水没したスライスが対象であり、完全水没したスライスに対しては書き直す必要がある

120

# Fellenius法による排水状態に対する安定計算の各種指針等での式の比較

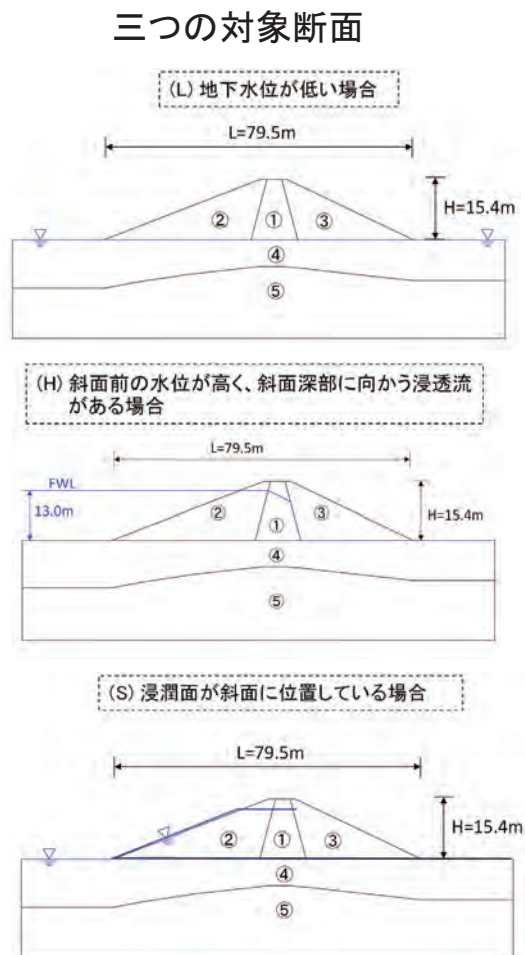
## 1.異なる仮定の総括

## 2.異なる式のまとめ

## 3.解析条件

## 4.安全率とNewmark法による剛体すべり量の比較

121



### 二つの物性値

$c=0, \phi > 0$ の堤体

地層番号	地層名	湿潤密度 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	飽和密度 $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\Phi'$ (deg)
①	コア	19.0	20.0	0	50
②③	ランダム	19.0	20.0	0	50
④	地盤(N値20)	21.0	21.0	37.5	31.5
⑤	地盤(N値50)	21.0	21.0	1000	31.5

$c > 0, \phi > 0$ の堤体

地層番号	地層名	湿潤密度 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	飽和密度 $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\Phi'$ (deg)
①	コア	19.0	20.0	20	30
②③	ランダム	19.0	20.0	20	30
④	地盤(N値20)	21.0	21.0	37.5	31.5
⑤	地盤(N値50)	21.0	21.0	1000	31.5



## 排水条件での安全率の検討

- 1) P' を求める時のスライス側面での間隙水圧の作用方向:
  - ・PWP-a: 水平(力学的に正しい)
  - ・PWP-b: 無視、あるいはスライス底面に平行(力学的に不合理)
- 2) 滑動moment  $M_w$  を計算する時のスライスの自重と外水圧  $U_{AB}$  の考慮:
  - ・W-a:  $W_i$  を用いて  $M_w$  を考慮。力学的に正しい
  - ・W-b: 「 $W_i$  を用いて  $M_w$  を考慮しない」方法。
- 3) 水平地震荷重の考慮とその作用位置:
  - ・HSL-a: 水平地震力がスライス重心に作用
  - ・HSL-b: 水平地震力はスライスの底面に作用(力学的に不合理、常に安全側)

PWP-a/W-a/HSL-a  
近年のフィルダム

$$F_{global} = \frac{\sum [c'_i \cdot l_i + (W_i' \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i / R)} \quad (32)$$

PWP-a/W-a/HSL-b  
フィルダムとため池堤体の  
の従来からの実務設計

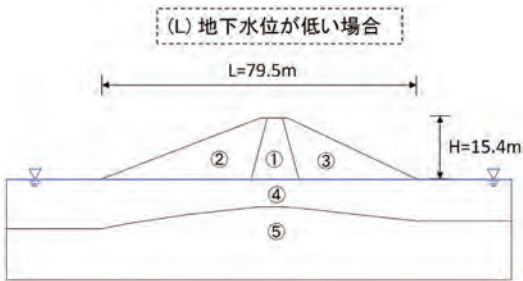
$$F_{global} = \frac{\sum [c'_i \cdot l_i + (W_i' \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R + k_h \cdot \sum (W_i \cdot \cos \alpha_i)} \quad (33)$$

PWP-a/W-b/HSL-a  
鉄道・宅造・道路盛土、河川堤防

$$F_{global} = \frac{\sum [c'_i \cdot l_i + (W_i' \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i / R)} \quad (34)$$

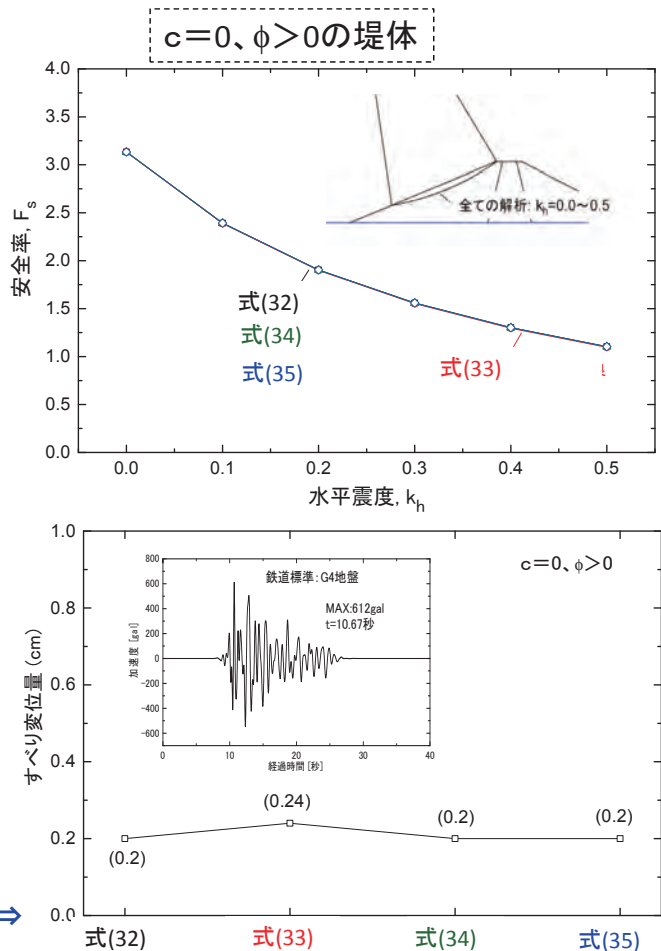
PWP-b( $U_{bi}$ は静水圧)  
/W-b/HSL-a 多くの教科書

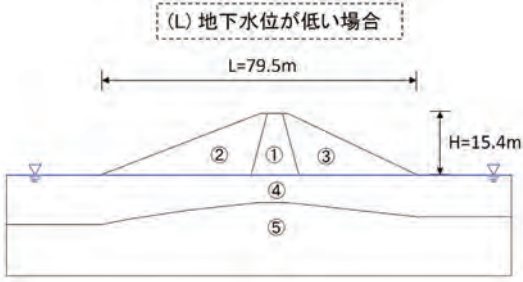
$$F_{global} = \frac{\sum [c'_i \cdot l_i + \{(W_i \cdot \cos \alpha_i - U_{bi}) - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i\} \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i / R)} \quad (35)$$



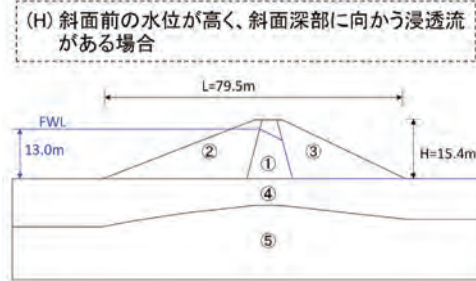
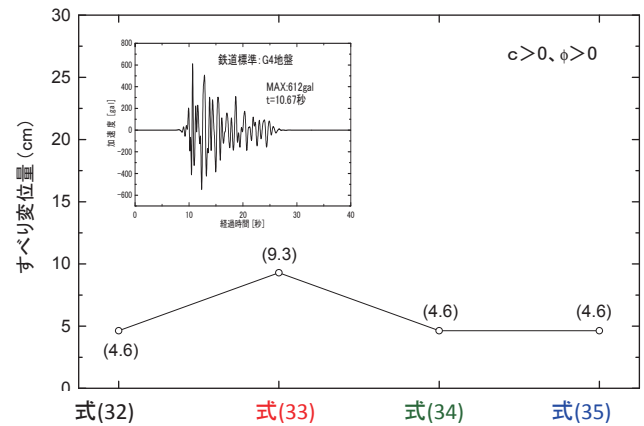
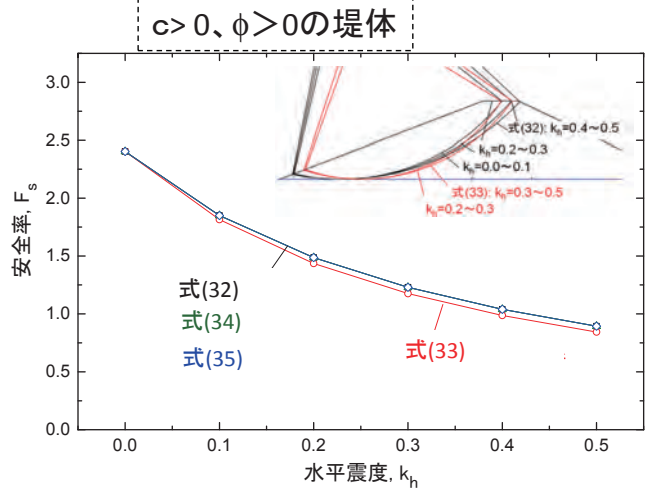
- 四つの式による臨界面は同一
- 間隙水圧と斜面に作用する水圧の影響がないので、 $k_h \cdot W_i$  を各スライスの重心に加えている式(32), (34), (35)による  $F_s$  は同一。
- 「 $k_h \cdot W_i$  を各スライスの底面に加えている式(33)による  $F_s$ 」と上記の  $F_s$  との差は、臨界面が浅く  $y_i/R$  が1.0に近いために非常に小さい。
- 式(33)によるすべり量は、他の三つの式よりも若干大きい。

Newmark-O法による剛体すべり変位⇒

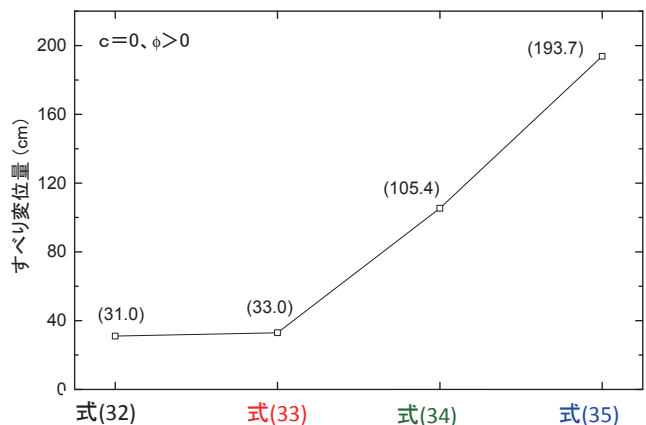
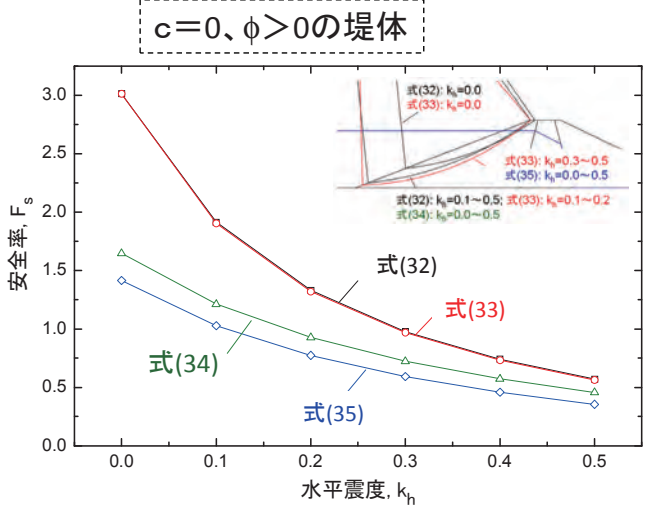




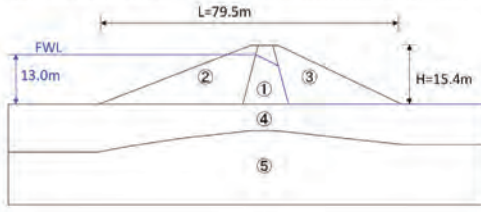
- 間隙水圧と斜面に作用する水圧の影響がないので、 $k_h \cdot W_i$ を各スライスの重心に加えている式(32), (34), (35)による $F_s$ は同一
- $y_i/R$ が1.0よりも若干小さくなるので、「 $k_h \cdot W_i$ を各スライスの底面に加えている式(33)による $F_s$ 」は上記の $F_s$ よりも若干小さくなる。
- 式(33)によるすべり量は、他の三つの式よりもかなり大きい。



- 最も合理的な式(32): 地下水位が低い場合よりも、 $k_h$ の増加による $F_s$ の低下が大きい。
- 「 $k_h \cdot W_i$ を各スライスの底面に加えている式(33)による $F_s$ 」と上記の $F_s$ との差は、臨界すべり円弧が浅く $y_i/R$ が1.0に近いために非常に小さい。
- $M_w$ を無視した式(34)による $F_s$ は式(32)による値から半減、すべり変位は急増(不合理な結果)。
- 式(35)による $F_s$ は更に小さくなり、すべり量は更に大きい(非常に不合理な結果)。

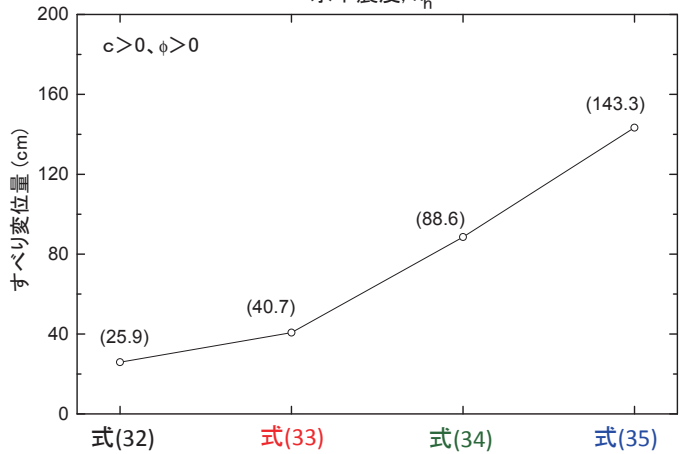
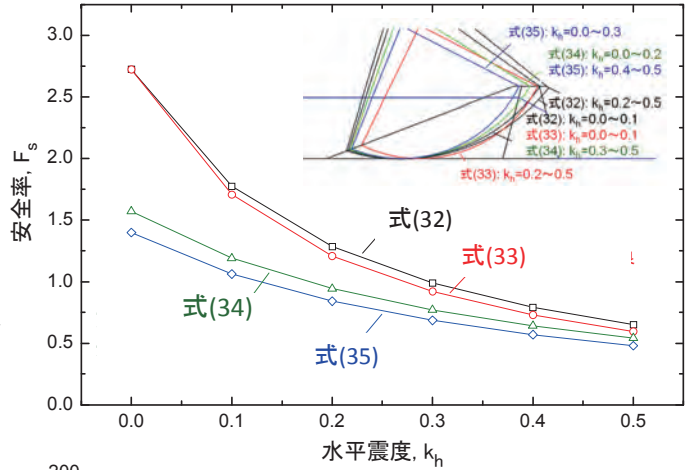


(H) 斜面前の水位が高く、斜面深部に向かう浸透流がある場合

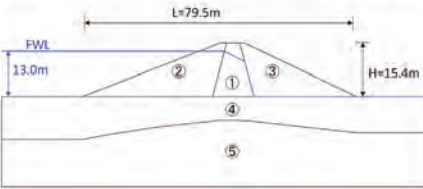


- 最も合理的な式(32): 地下水位が低い場合よりも、 $k_h$ の増加による $F_s$ の低下が大きい。
- $y_i/R$ が1.0よりも若干小さくなるので、「 $k_h \cdot W_i$ を各スライスの底面に加えている式(33)による $F_s$ 」は上記の $F_s$ よりも若干小さくなる。
- $M_w$ を無視した式(34)による $F_s$ は式(32)による値から半減、すべり変位は急増(不合理な結果)。
- 式(35)による $F_s$ は更に小さく、すべり量は更に大きい(非常に不合理な結果)。

$c > 0, \phi > 0$ の堤体



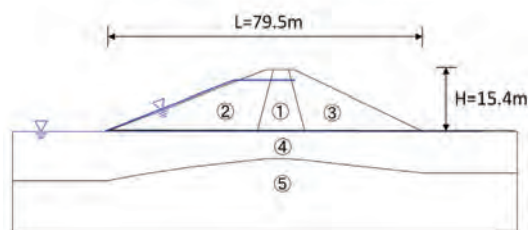
(H) 斜面前の水位が高く、斜面深部に向かう浸透流がある場合



$$F_{global} = \frac{\sum [c'_i \cdot l_i + (W'_i \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i / R)} \quad (32)$$

安全率は半減

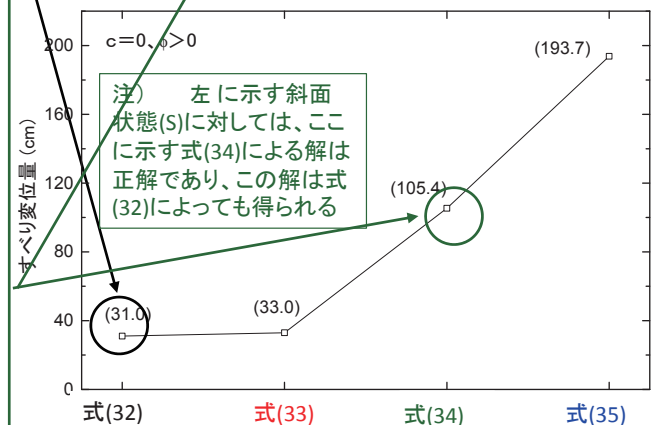
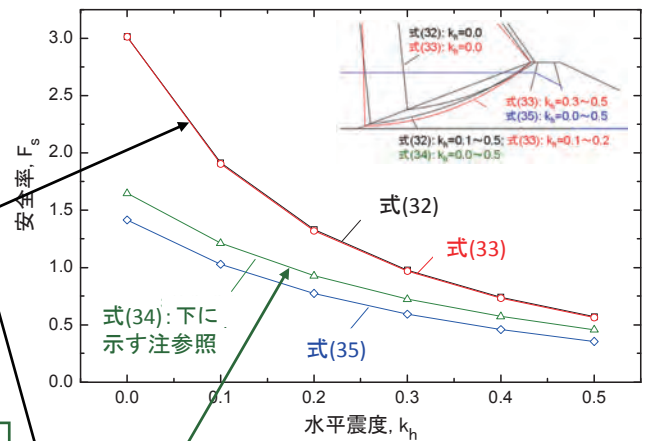
(S) 浸潤面が斜面に位置している場合

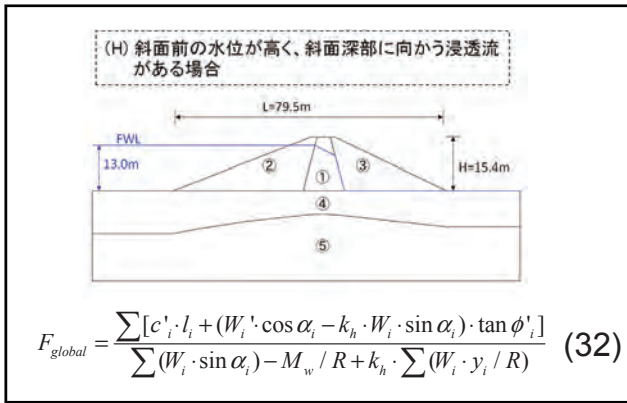


$$F_{global} = \frac{\sum [c'_i \cdot l_i + (W'_i \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i / R)} \quad (32)$$

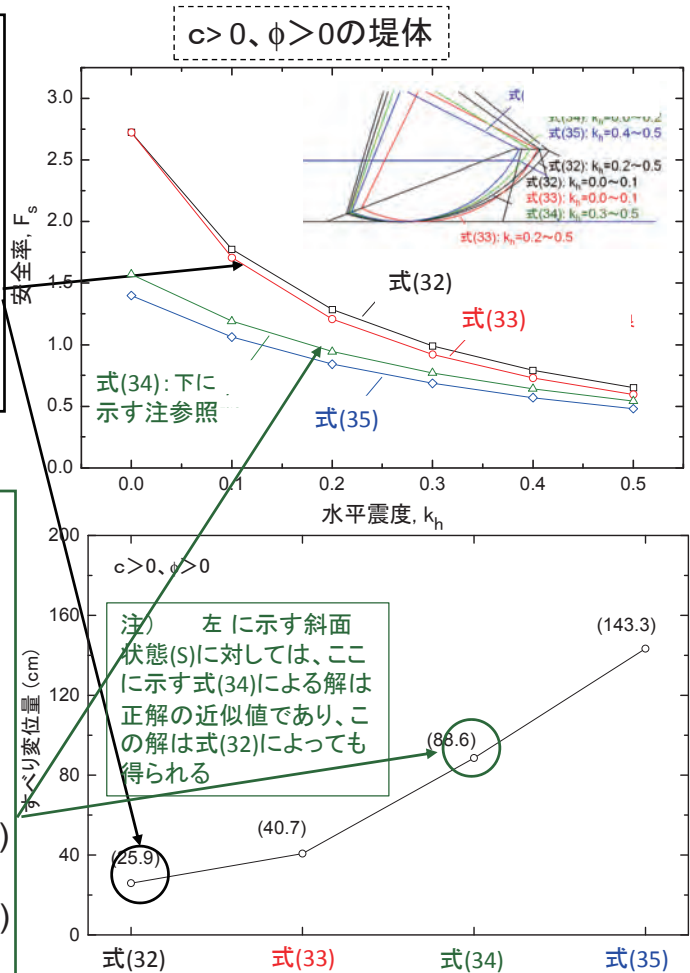
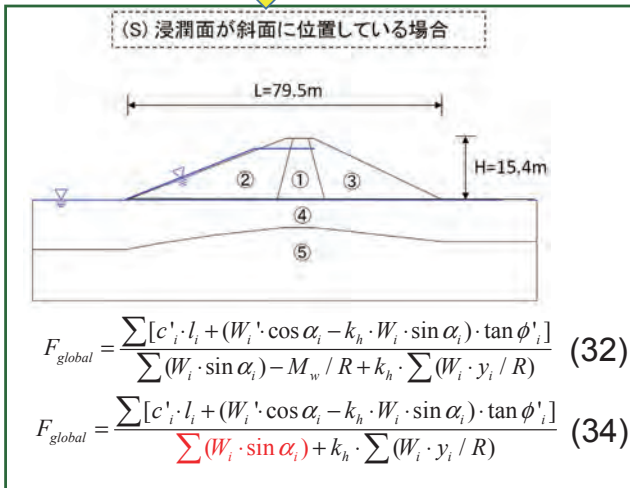
$$F_{global} = \frac{\sum [c'_i \cdot l_i + (W'_i \cdot \cos \alpha_i - k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i / R)} \quad (34)$$

$c = 0, \phi > 0$ の堤体





安全率は半減



注: それぞれの設計指針での安定解析法の妥当性は、

- ① 採用された仮定が適切かどうかを、同一条件で計算された安全率を比較するなどして検討するとともに、
- ② 以下の諸要因を適切に考慮しているか、総合的に検討する必要がある。

a) 土のせん断強度の決定法、

- ・ 締固め度の評価
- ・ 三軸試験、平面ひずみ圧縮試験、一面せん断試験
- ・ 異方性
- ・ 破壊の進行性、粒径効果
- ・ その他

b) 設計震度(あるいは設計入力地震動)

c) 許容最低安全率(あるいは許容最大変位)

②については、別途議論する必要がある。



現状では、

A) 従来の設計法:

- ①レベル1の設計地震動相当の低い $k_h$  +
- ②締固めた盛土では過小評価された排水せん断強度 +
- ③適切な(不合理さをできるだけ排除した)式による安定解析 +
- ④計算された $F_s$  > 設定された許容最低安全率

での判定と

B) 新しい設計法:

- ①レベル2の設計地震動 +
- ②実際の締固め度と排水条件等を考慮した現実的なせん断強度 +
- ③適切な(不合理さをできるだけ排除した)式による安定解析 +
- ④「Newmark法で計算した残留変形」プラス「非排水繰返し载荷による応力・ひずみ関係の劣化を考慮した準静的非線形FEMによる残留変形」の算定と、その値と許容残留変形の比較

での判定、

を組み合わせるが適切であろう。

131

## 1. 藤沼ダムの事例

## 2. 円弧すべり安定解析法の理論的基礎と実施に当たっての留意事項

### 2-1. 混乱した現状

### 2-2. 円弧すべり安定解析の基礎

### 2-3. Fellenius法とは

### 2-4. 地下水位・浸潤面と自由水位の考慮

- ・浸透流がない場合
- ・定常浸透流がある場合

### 2-5. 地震力の取り扱い

### 2-6. 異なる設計指針等での排水状態での安全率の式の比較

## 3. Newark-D法と劣化剛性FEMによる盛土の地震時残留変形解析

### 3-1. Newmark法の経緯

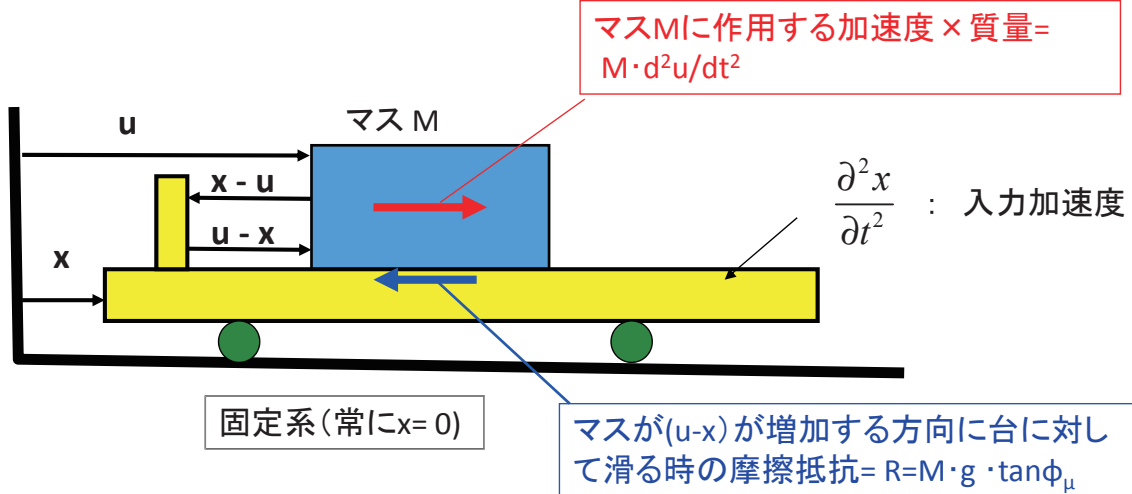
### 3-2. 飽和土の非排水せん断強度の非排水繰返し载荷による劣化を考慮したNewark-D法による剛体すべり解析

### 3-3. 飽和土の非排水せん断剛性・強度の非排水繰返し载荷による劣化を考慮した準静的非線形FEMによる残留変形解析

132



## Newmark法による剛体間のすべり



滑っていない状態での力の釣合い式:

$$R(= M \cdot g \cdot \tan \varphi_{\mu}) > M \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

滑り出した後の力の釣合い式:

$$R(= M \cdot g \cdot \tan \varphi_{\mu}) = M \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

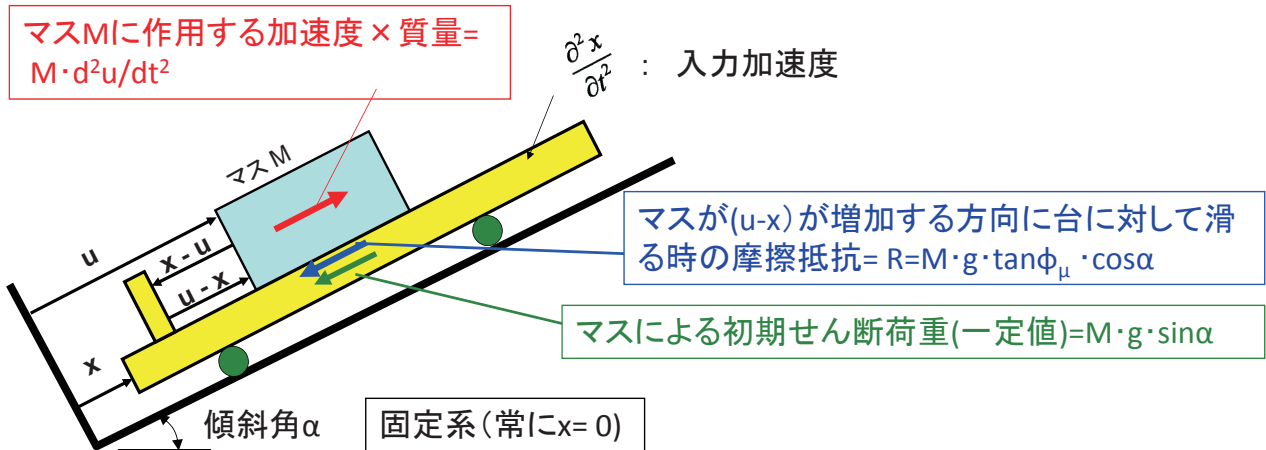
$$M \cdot g \cdot \tan \varphi_{\mu} + M \cdot \frac{\partial^2 (x-u)}{\partial t^2} = M \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$$

摩擦抵抗      すべりによる慣性抵抗      動的入力荷重

$$\tan \varphi_{\mu} \cdot g + \frac{\partial^2 (x-u)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$$

⇒すべり量(x-u)を求める

## Newmark法による斜面上の剛体間のすべり(円弧すべりに対応)



滑っていない状態での力の釣合い式:

$$R(= M \cdot g \cdot \tan \varphi_{\mu} \cdot \cos \alpha) > M \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + M \cdot g \cdot \sin \alpha$$

滑り出した後の力の釣合い式:

$$R(= M \cdot g \cdot \tan \varphi_{\mu} \cdot \cos \alpha) = M \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + M \cdot g \cdot \sin \alpha$$

$$M \cdot g \cdot \tan \varphi_{\mu} \cdot \cos \alpha + M \cdot \frac{\partial^2 (x-u)}{\partial t^2} = M \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + M \cdot g \cdot \sin \alpha$$

摩擦抵抗      すべりによる慣性抵抗      動的入力荷重と初期せん断荷重

$$\tan \varphi_{\mu} \cdot g \cdot \cos \alpha + \frac{\partial^2 (x-u)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + g \cdot \sin \alpha$$

⇒すべり量(x-u)を求める

**円弧すべりの場合の運動方程式:**

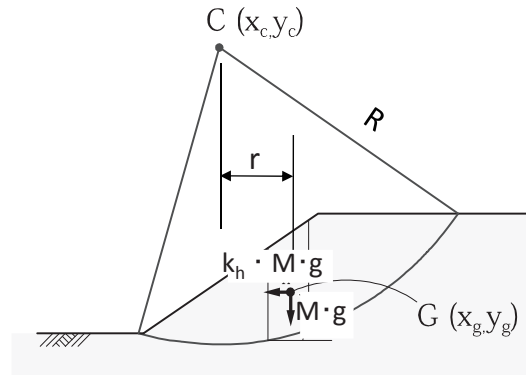
抵抗モーメント

$$M_r = \sum \{R \cdot (\tau_{fi} \cdot l_i)\}$$

$$\tau_{fi} = c_i + \sigma_{n,i} \cdot \tan \phi_i$$

滑動モーメント

$$M \cdot g \cdot r + M \cdot R_G \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

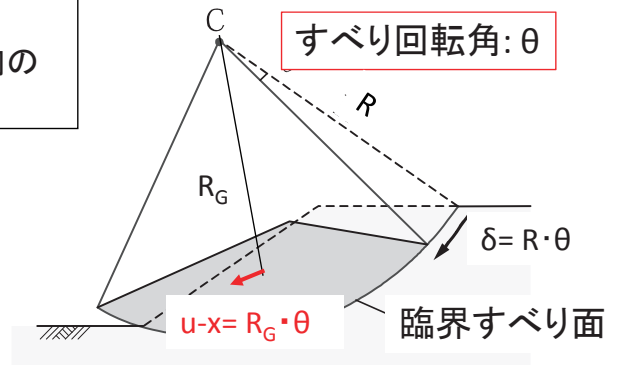


スライス法

uは、すべり土塊の重心での回転方向の変位  
 u-x = R<sub>G</sub> · θは、すべり土塊の重心での回転方向の  
 すべり土塊と周辺地盤との相対変位

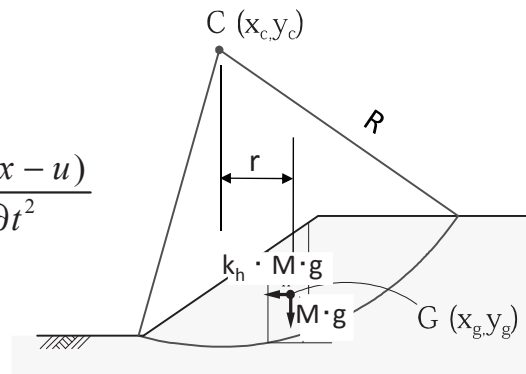
F<sub>s</sub> > 1.0で滑り出していない時:

$$M_r > M \cdot g \cdot r + M \cdot R_G \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$



F<sub>s</sub> = 1.0で滑り出した時:

$$\begin{aligned} M_r &= M \cdot g \cdot r + M \cdot R_G \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ &= M \cdot g \cdot r + M \cdot R_G \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - M \cdot R_G \cdot \frac{\partial^2 (x - u)}{\partial t^2} \\ &= M_d - M \cdot R_G \cdot \frac{\partial^2 (x - u)}{\partial t^2} \end{aligned}$$



スライス法

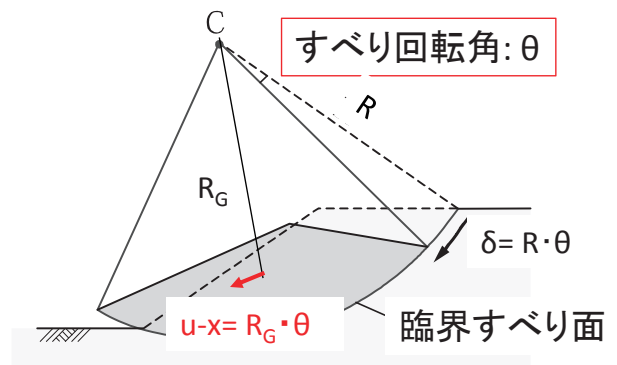
M<sub>d</sub>は、滑り土塊のマスMに作用する重力の加速度gと地震による入力加速度dx<sup>2</sup>/dt<sup>2</sup>によって生じる静的+動的滑動モーメント。

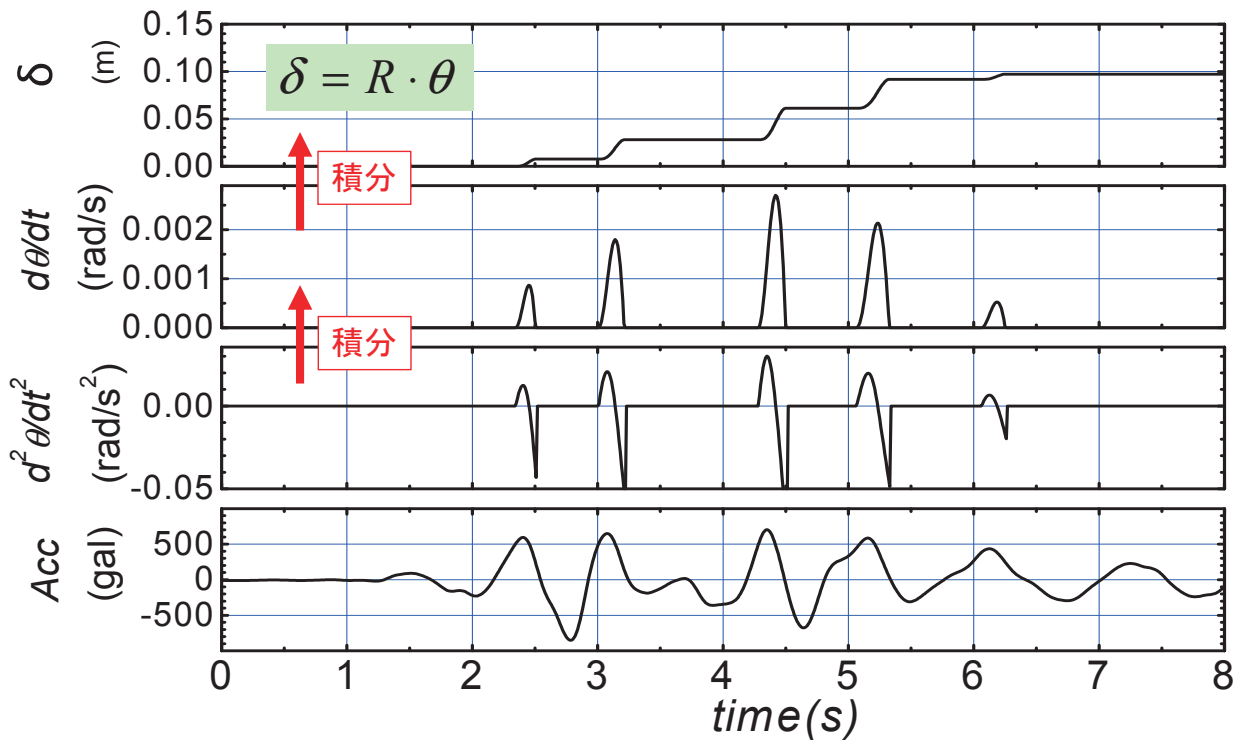
また、

$$M \cdot R_G \cdot \frac{\partial^2 (x - u)}{\partial t^2} = M \cdot (R_G)^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2}$$

であるので、

$$M_r + M \cdot (R_G)^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = M_d$$





$$M \cdot (R_G)^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = M_d - M_r$$

⇒すべり量 (x-u) = R · θを求める

$$\ddot{\theta} = \frac{M_d - M_r}{M \cdot (R_G)^2}$$

## Newmark法の経緯

### ①従来の実務での盛土の地震時のすべり安定解析:

レベル1設計地震動相当の水平震度 $k_h$  (例えば0.15)に対する極限つり合い法によるすべり安全率が所定の値 (例えば1.2) 以上であることを確認

### ②1995年兵庫県南部地震⇒レベル2設計地震動に対する安定解析の導入:

残留すべり変形が許容値以下ならば、計算された安全率 < 1.0 を許容  
同時に、土のせん断強度を現実的な値とする必要

従来:  $\phi_{res}$  程度 ⇒ 締固めが良ければ、 $\phi_{peak} + \phi_{res}$

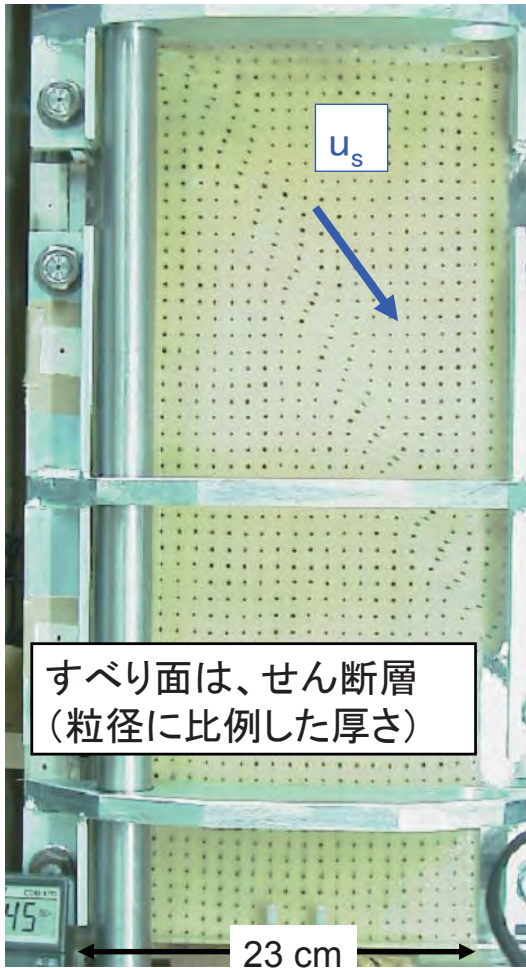
⇒排水条件でのひずみ軟化を考慮したNewmark-S法

### ③従来から課題であったが、2011年東日本大震災で重要な課題と再認識:

・非排水飽和条件の盛土・地盤: 良い締固め → 高い安定性。

一方、低い締固め → 非排水繰返し载荷による強度低下による流動すべり

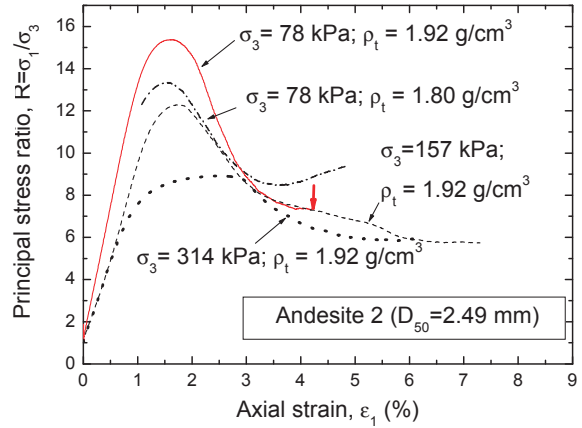
これらの現象を再現できて締固めの影響を鋭敏に反映できるように、Newmark法を改良する必要 ⇒ では、どのように？



平面ひずみ圧縮試験

- ・供試体側面の写真を多数撮影せん断層に沿ったすべり量 $u_s$ を測定

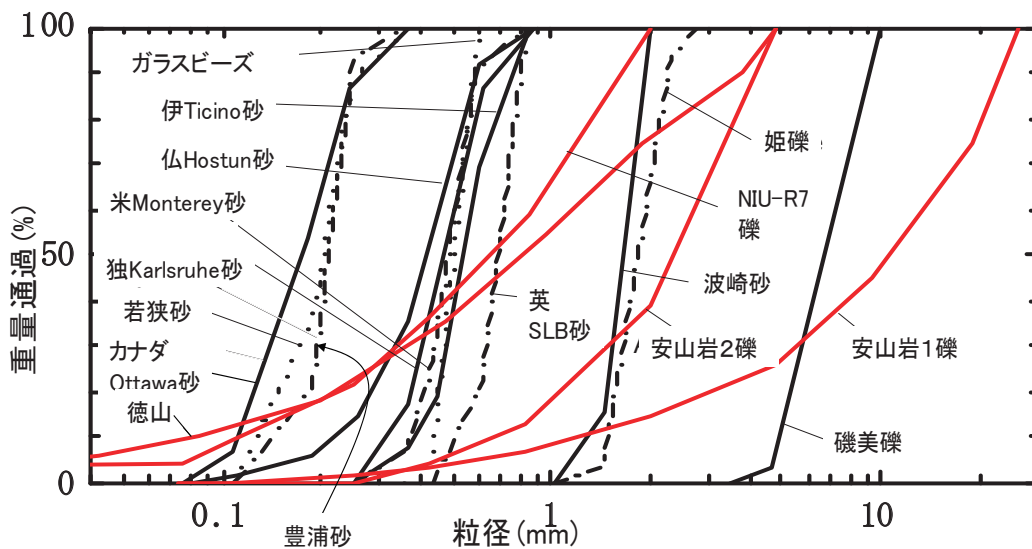
57 cm



安山岩

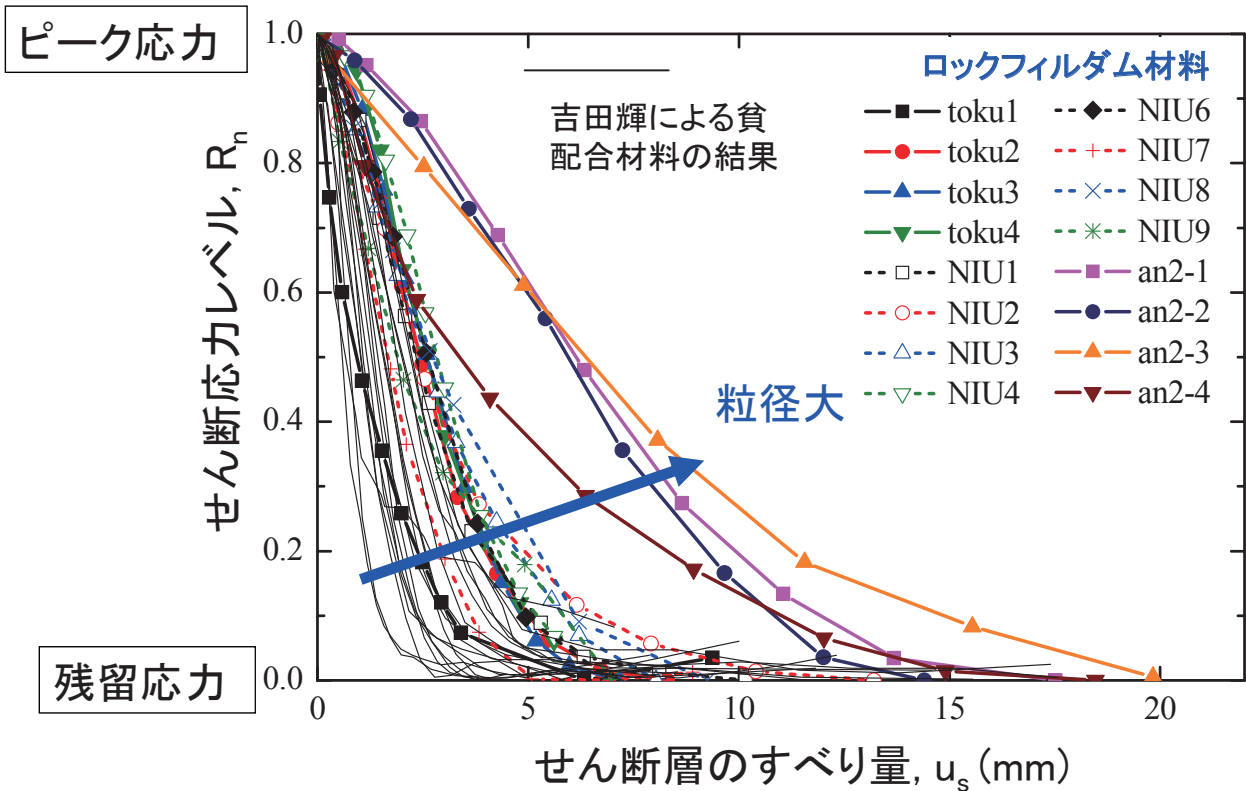
( $D_{50} = 2.49 \text{ mm}$  &  $U_c = 4.1$ ),  
at  $\epsilon_1 = 4.25 \%$ ,  $\sigma'_3 = 314 \text{ kPa}$

広い範囲の粒径 $D_{50}$ と均等係数 $U_c$ の砂礫の平面ひずみ圧縮試験



Yoshida, T. and Tatsuoka, F. (1997), "Deformation property of shear band in sand subjected to plane strain compression and its relation to particle characteristics", *Proc. 14<sup>th</sup> ICSMFE, Hamburg*, Vol. 1, pp.237-240.  
 Okuyama, Y., Yoshida, T., Tatsuoka, F., Koseki, J., Uchimura, T., Sato, N., and Oie, M. (2003): Shear banding characteristics of granular materials and particle size effects on the seismic stability of earth structures, *Proc. 3rd Int. Sym. on Deformation Characteristics of Geomaterials*, IS Lyon 03 (Di Benedetto et al. eds.), Balkema, September, 2003, pp.607-616.  
 龍岡文夫・菊池喜昭:基礎の設計—やさしい基礎知識第14回—:2.1.7砂礫のせん断強度、2.1.7.4 ひずみ軟化過程 (2003)、基礎工月3号、94-99頁

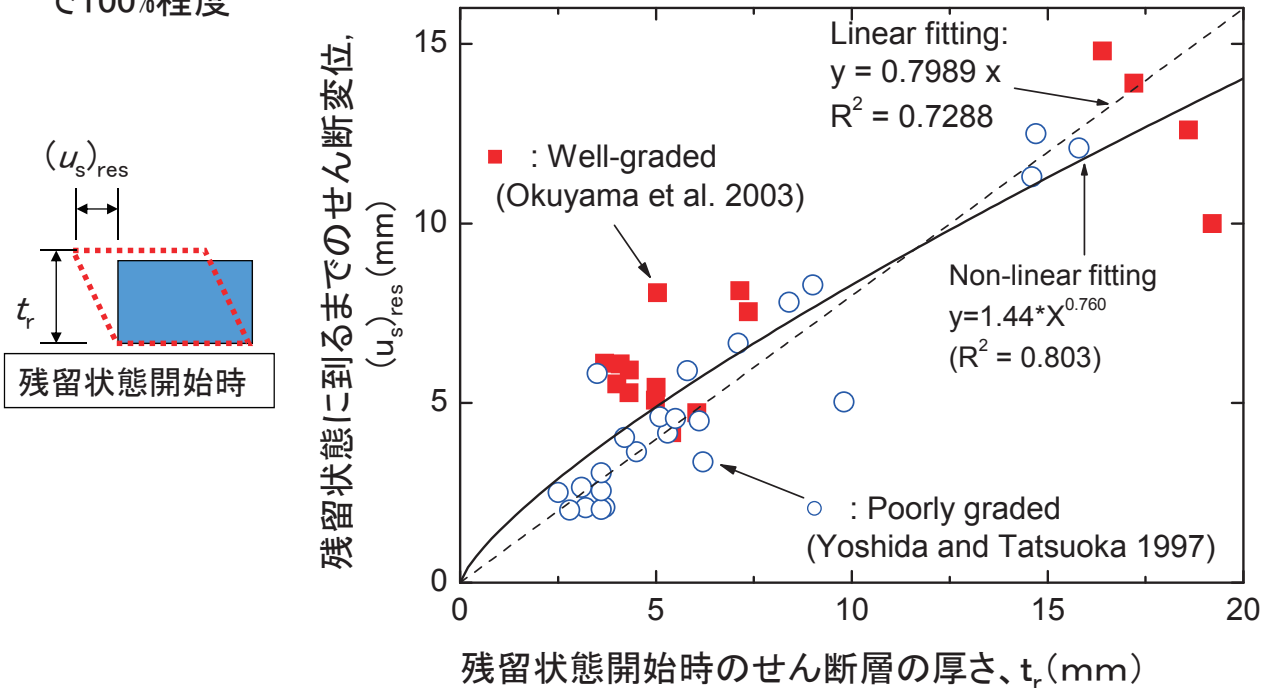
# 実験で得られた全ての $R_n - u_s$ 関係のまとめ



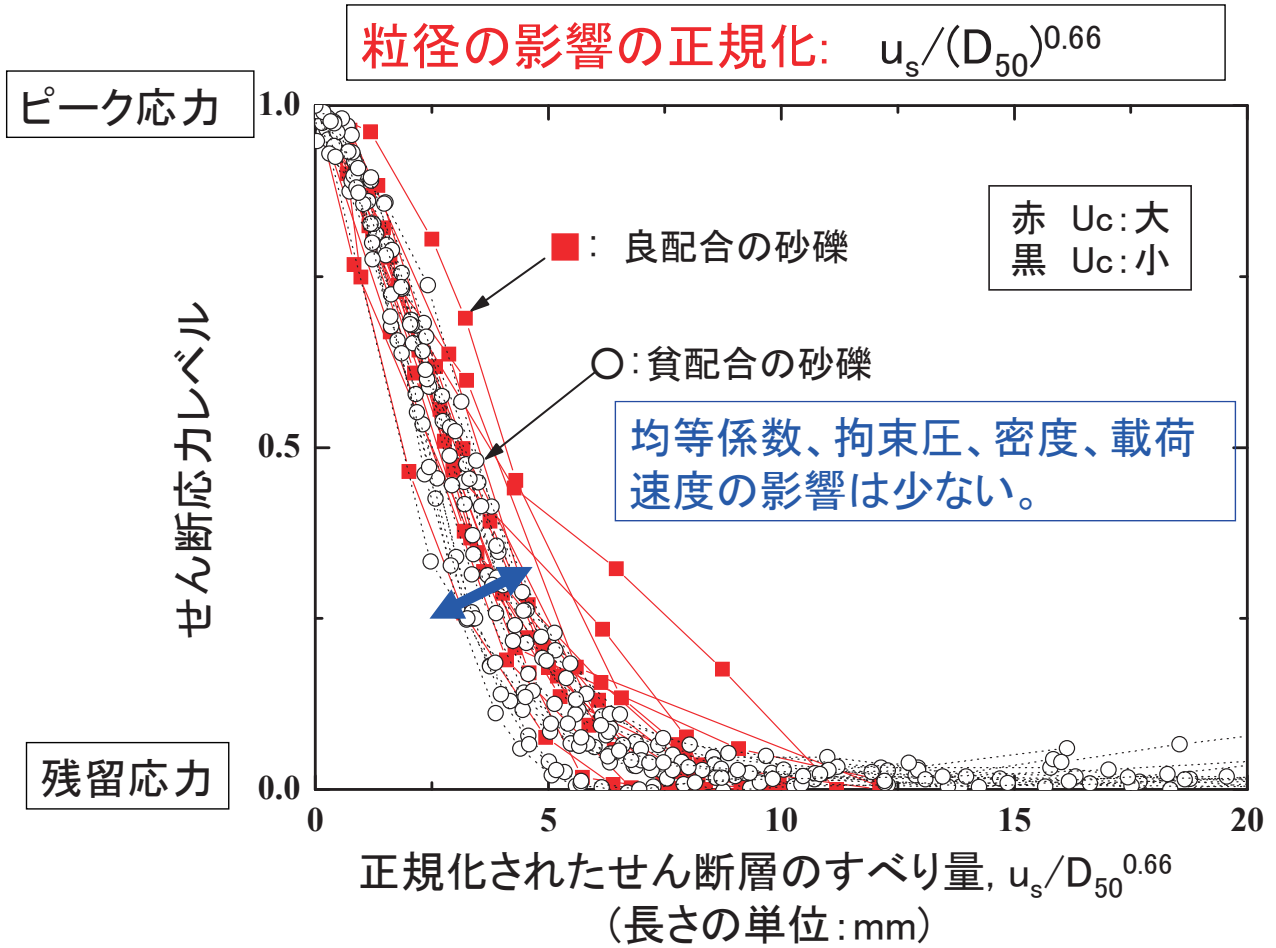
残留状態に至るまでのせん断変形  $(u_s)_{res}$  は粒径  $D_{50}$  の増加に伴って増加!

その理由は、

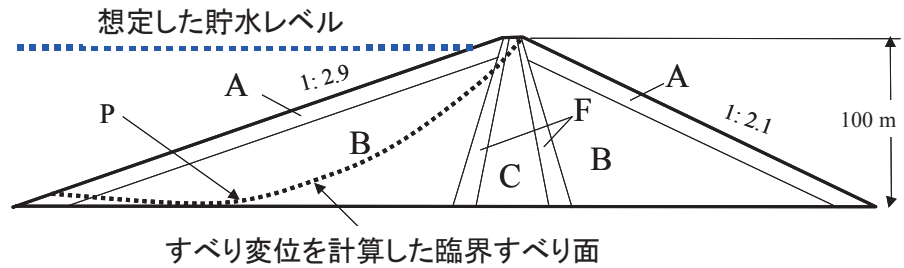
- ①  $t_r$  (残留状態開始時のせん断層の厚さ) は  $D_{50}$  にほぼ比例:
- ②  $(u_s)_{res} / t_r$  = 「残留状態開始時のせん断層内のせん断ひずみ」は  $t_r$  に依らないで100%程度







**計算例**



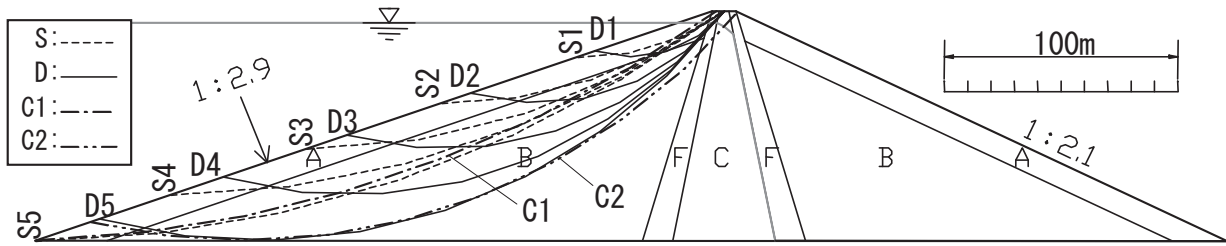
**想定したロックフィルダム**

従来の設計法として rock zones A & B と filter zone では  $\phi = \phi_{res} = 35^\circ$  を想定

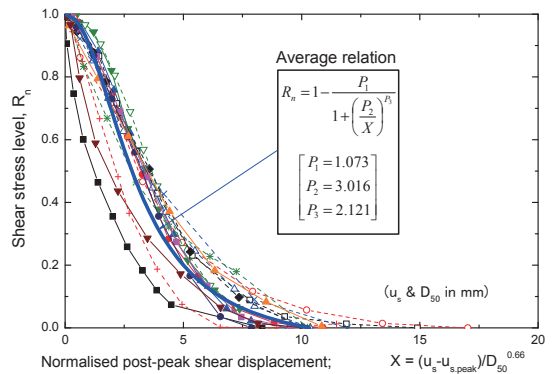
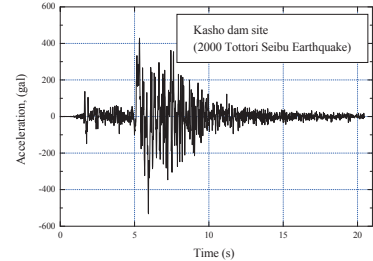
$$\phi(\text{peak}) = \phi'_{max} - \alpha \cdot \log(\sigma'_n / \sigma'_0) \quad , \quad \sigma'_0 = 29.4 \text{ kPa}$$

Zone name	$\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )		$\phi'_{max}$ (deg.)				$D_{50}$ (mm)		
	Moist	Saturated	( )内は $\alpha$ (度)				C	M	F
			No. 1	No. 2	No. 3	No. 4			
Rock A	2.13	2.34	62.1 (10.3)	55.3 (5.15)	48.6 (5.15)	41.8 (2.57)	200	60	20
Rock B	2.033	2.21	57.7 (6.88)	46.4 (4.59)	46.4 (4.59)	40.7 (2.29)			
Filter	2.06	2.23	46.5 (2.79)	40.8 (1.40)	40.8 (1.40)	37.9 (0.70)	80	25	10
Core	1.99	2.06	$\phi'_{max} = \phi'_{res} = 34.5 \text{ deg.}$						

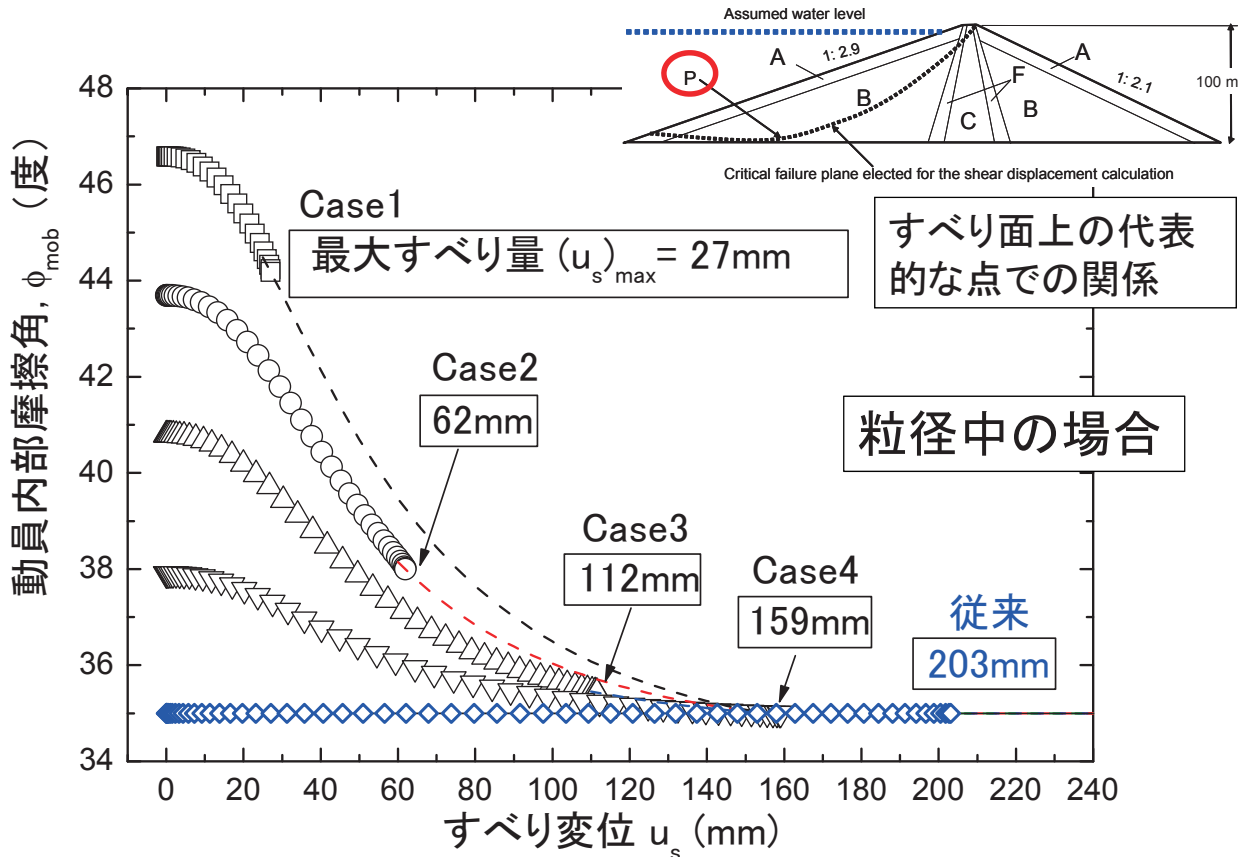
Case 1: 最も現実的な値



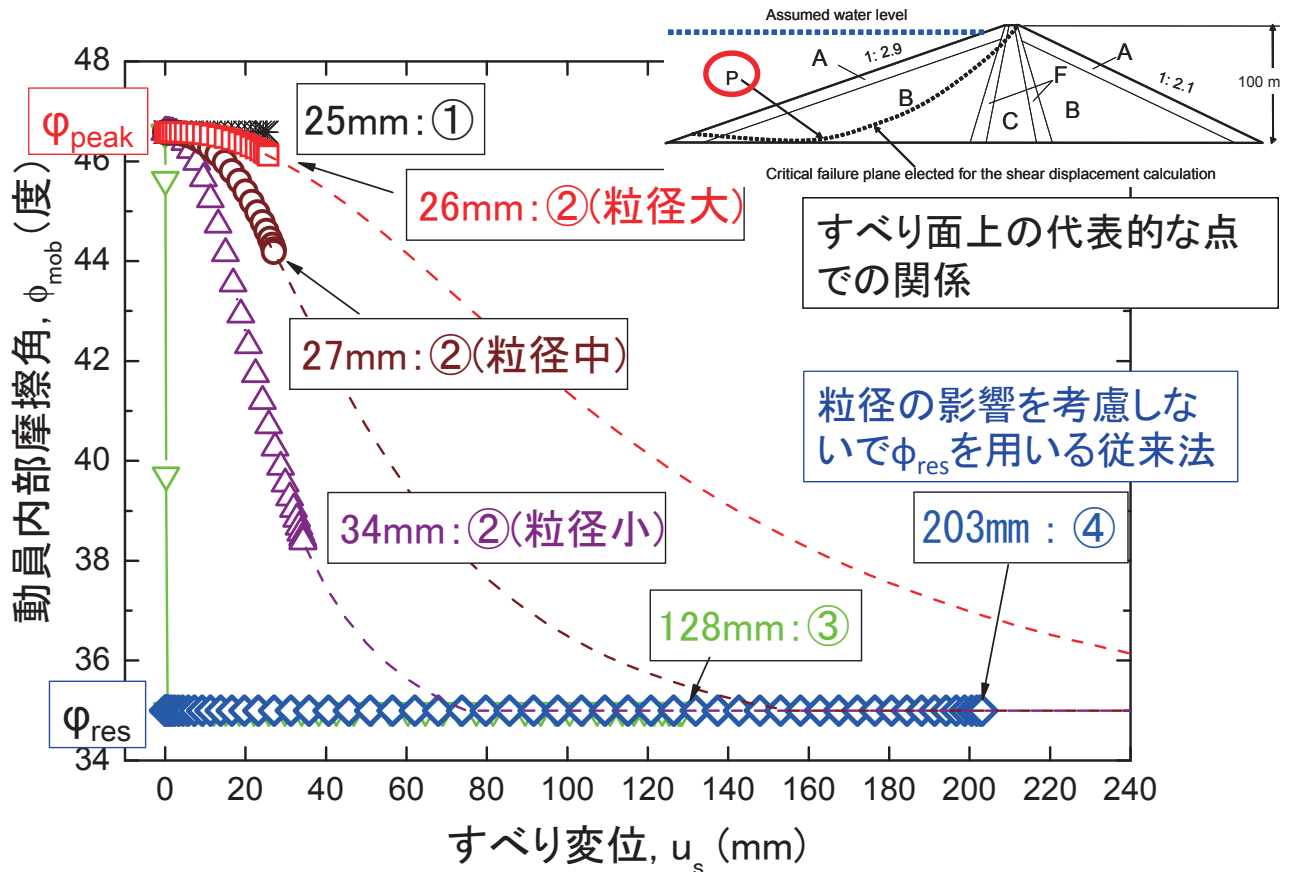
1. 地震応答解析(簡易法では、これを実施しないで、応答倍率= 1.0とする)
2. 等価線形化法による応答解析による入力地震動を用いて極限釣合安定解析
3. 初めて安全率が 1.0 になるすべり面を捜す(以降、このすべりはこの面に固定されると仮定する、ひずみ軟化体ならば合理的)
4. **修正Newmark法**により、**粒径により軟化速度が異なる応力レベル~すべり量関係**を用いてすべり面に沿ったすべり量を計算



## Newmark-S法によるすべり変位に対する締固め度の影響



## Newmark-S法によるすべり変位に対する粒径の影響



## Newmark法の経緯

## ①従来の実務での盛土の地震時のすべり安定解析:

レベル1設計地震動相当の水平震度 $k_h$ (例えば0.15)に対する極限つり合い法によるすべり安全率が所定の値(例えば1.2)以上であることを確認

## ②1995年兵庫県南部地震⇒レベル2設計地震動に対する安定解析の導入:

残留すべり変形が許容値以下ならば、計算された安全率  $< 1.0$  を許容  
同時に、土のせん断強度を現実的な値とする必要

従来:  $\phi_{res}$  程度 ⇒ 締固めが良ければ、 $\phi_{peak} + \phi_{res}$   
⇒排水条件でのひずみ軟化を考慮したNewmark-S法

## ③従来から課題であったが、2011年東日本大震災で重要な課題と再認識:

・非排水飽和条件の盛土・地盤: 良い締固め → 高い安定性。

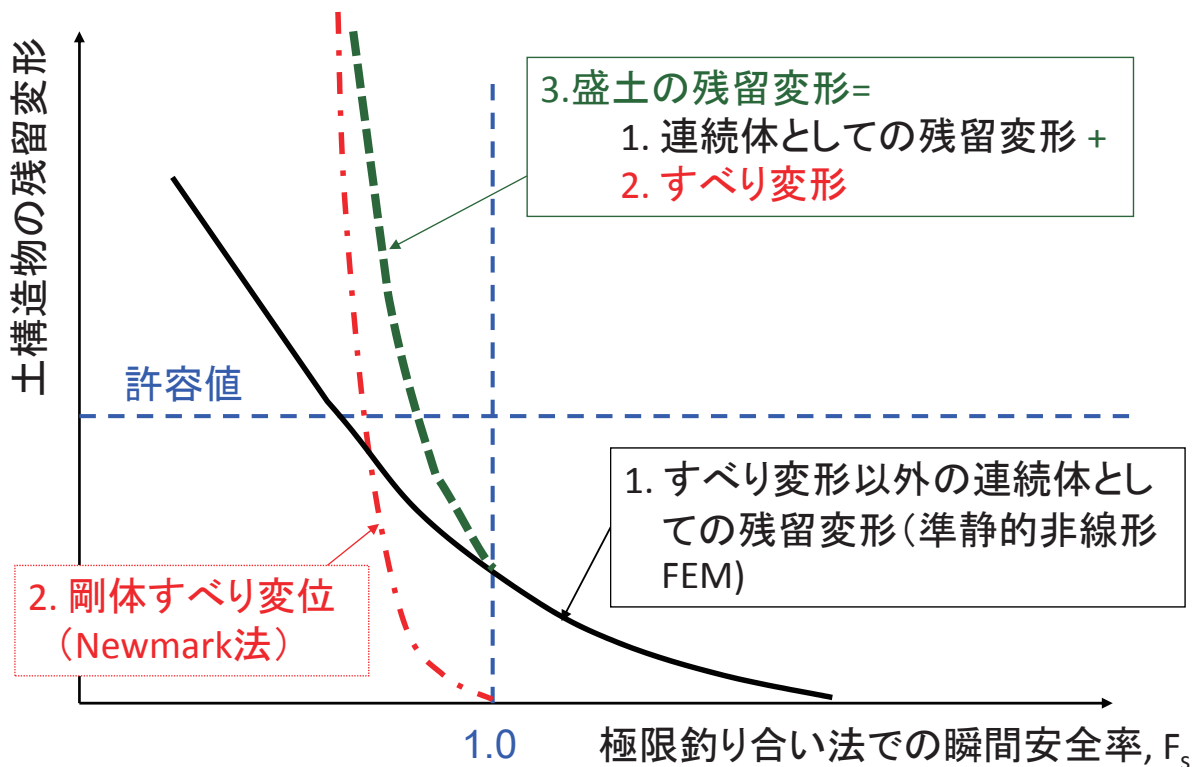
一方、低い締固め → 非排水繰返し载荷による強度低下による流動すべり

これらの現象を再現できて締固めの影響を鋭敏に反映できるように、  
Newmark法を改良する必要 ⇒ では、どのように？

1. 藤沼ダムの事例
2. 円弧すべり安定解析法の理論的基礎と実施に当たっての留意事項
  - 2-1. 混乱した現状
  - 2-2. 円弧すべり安定解析の基礎
  - 2-3. Fellenius法とは
  - 2-4. 地下水位・浸潤面と自由水位の考慮
    - ・浸透流がない場合
    - ・定常浸透流がある場合
  - 2-5. 地震力の取り扱い
  - 2-6. 異なる設計指針等での排水状態での安全率の式の比較
3. Newark-D法と劣化剛性FEMによる盛土の地震時残留変形解析
  - 3-1. Newmark法の経緯
  - 3-2. 飽和土の非排水せん断強度の非排水繰返し载荷による劣化を考慮したNewmark-D法による剛体すべり解析
  - 3-3. 飽和土の非排水せん断剛性・強度の非排水繰返し载荷による劣化を考慮した準静的非線形FEMによる残留変形解析

149

### 実務的な耐震診断：Newmark-D法とFEMの組み合わせ



飽和した領域を持つ盛土の地震時残留変位・変形 =

①すべり土塊と支持土塊は剛体であるとしたすべり

+

②剛体すべり以外の連続体的残留変形

151

飽和した領域を持つ盛土の地震時残留変位・変形 =

①すべり土塊と支持土塊は剛体であるとしたすべり  
(Newmark法による)

+

②剛体すべり以外の連続体的残留変形

152



## 地震時に飽和土が非排水状態の場合

- 1) 飽和した斜面は、粒径が小さく排水距離が長いほど、地震時に非排水条件あるいはそれに近い条件になりやすい。

その場合、排水条件と仮定して安定解析をすると、

・緩い土では $M_r$ を過大評価して危険側、密な土では $M_r$ を過小評価して安全側となり、全体としては締固めの影響を過小評価

- 2) 非排水条件で解析する場合での飽和土の非排水せん断強度 $s_{f,u}$ の算定法:

・  $\Delta u$ 法:  $\tau_{f,u} = c' + (\sigma'_0 - \Delta u) \cdot \tan\phi'$  (正確な $\Delta u$ の推定が必要！難しいが！)

⇒ 締固まった盛土では $\Delta u$ を過大評価して安全率を過小評価する傾向  
従って、実務では地震荷重は加えない $\Delta u$ 法を適用されている

$\Delta u > 0$ と地震荷重を同時に考慮する方法でないと、

⇒ 締め固まった盛土では、地震時に最小となる安全探索できない

Newmark法に適用できない

・ 全応力法で非排水繰返し载荷による低下を考慮(Newmark-D法)

153

## 地震時に飽和土が非排水状態の場合

- 1) 飽和した斜面は、粒径が小さく排水距離が長いほど、地震時に非排水条件あるいはそれに近い条件になりやすい。

その場合、排水条件と仮定して安定解析をすると、

・緩い土では $M_r$ を過大評価して危険側、密な土では $M_r$ を過小評価して安全側となり、全体としては締固めの影響を過小評価

- 2) 非排水条件で解析する場合での飽和土の非排水せん断強度 $s_{f,u}$ の算定法:

・  $\Delta u$ 法:  $\tau_{f,u} = c' + (\sigma'_0 - \Delta u) \cdot \tan\phi'$  (正確な $\Delta u$ の推定が必要！難しいが！)

⇒ 締固まった盛土では $\Delta u$ を過大評価して安全率を過小評価する傾向  
従って、実務では地震荷重は加えない $\Delta u$ 法を適用されている

$\Delta u > 0$ と地震荷重を同時に考慮する方法でないと、

⇒ 締め固まった盛土では、地震時に最小となる安全探索できない

Newmark法に適用できない

・ 全応力法で非排水繰返し载荷による低下を考慮(Newmark-D法)

154

$\Delta u$ 法； 道路盛土、河川堤防の設計指針で示されている式：

$$(a) \quad F_{global} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + \{ [W_i - (U_{bi} + \Delta U_{bi}) \cdot \cos \alpha_i] \cdot \cos \alpha_i \} \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i)}$$

- (監修)建設省建設経済局民間宅地指導室(編集)宅地防災研究会(2000): 改訂版宅地防災マニュアルの解説[1]、平成12年5月10日4版、(株)ぎょうせい、第VI章盛土、VI.3. 盛土のり面の安定性の検討、VI.盛土、VI.3.盛土のり面の安定性の検討、5. 地震時の安定性の検討認、124頁(式VI. 3-4)
- (財)国土技術研究センター(2012): 河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)、平成24年2月、第6章地震に対する堤防の構造検討101-117頁、107頁に示す
- (公益社団法人)日本道路協会(2012): 道路土工、軟弱地盤対策工指針(平成24年度版)、平成24年8月、第5章軟弱地盤上の土工構造物の設計、5-6地震動の作用に対する安定性の照査、(2)地震時安定性照査の方法、2)地震動の作用に対する照査の方法、172頁式(参5-10)

■ (a)式の分子は、案外複雑な内容を持つ：

$U_{bi}$ は浸透圧を考慮しない静水圧(浸透流がある場合でも)

$\Delta U_{bi}$ は、地震荷重による過剰間隙水圧

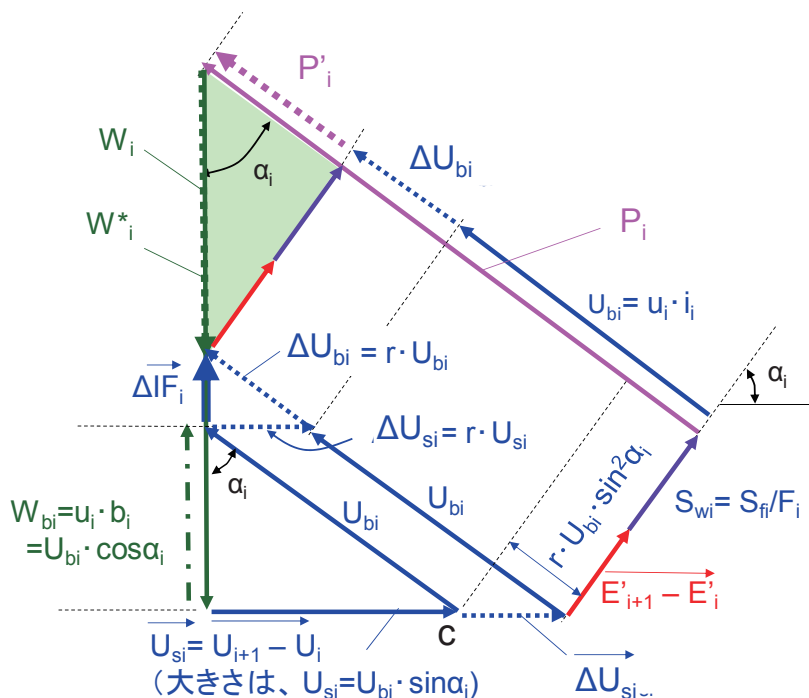
- ・静水圧と同様に水深に比例すると仮定(説明は次頁)
- ・この値を正しく算定するのは非常に難しい(後述)

この式は、部分的に水没しているスライスに適用できる。しかし、完全に水没したスライスに対しては、書き変える必要がある。

155

地震荷重による過剰間隙水圧 $\Delta U_{bi}$ は、常時の静水圧 $U_{bi}$ と同様に深さに比例すると仮定  $\Rightarrow \Delta U_{bi}$ は $U_{bi}$ に比例し  $\Delta U_{bi}/U_{bi} = r$ (定数)と仮定すると  
 $\Rightarrow$  地震時に上方に向かう浸透流が発生すると仮定していることになる。

$$P'_i = [W_i - (U_{bi} + \Delta U_{bi}) \cdot \cos \alpha_i] \cdot \cos \alpha_i = W_i \cdot \cos \alpha_i - (U_{bi} + \Delta U_{bi}) \cdot \cos^2 \alpha_i$$



156

Δu法； 道路盛土、河川堤防の設計指針で示されている式：

$$(a) \quad F_{global} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + \{ [W_i - (U_{bi} + \Delta U_{bi}) \cdot \cos \alpha_i] \cdot \cos \alpha_i \} \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i)}$$

- 分母に地震荷重 $k_h \cdot W_i$ が含まれていない。→地震終了直後の安全率を求めている  
 $\Delta U_{bi}$ が最大値となっている地震終了直後の安全率が地震中の値よりも必ず小さければ妥当(緩い飽和土が比較的小さい地震荷重によって液状化する場合)  
 ・しかし、一定程度以上締め固まった地盤・盛土に強い地震動が加わった場合は、地震中に $k_h$ と $\Delta u$ によって安全率が最小値となる可能性
- (a)式は地震荷重の項を含まないので、所定の地震動履歴全体に適用してNewmark法によってすべり計算を行うことはできない。  
 その計算できるように、上の式を修正すると・・・

$$F_{global} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + \{ [W_i - (U_{bi} + \Delta U_{bi}) \cdot \cos \alpha_i] \cdot \cos \alpha_i \} \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i / R)}$$

- 加えて、分母に $M_w$ が含まれていない問題がある(次頁)

157

Δu法； 道路盛土、河川堤防の設計指針で示されている式：

$$(a) \quad F_{global} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + \{ [W_i - (U_{bi} + \Delta U_{bi}) \cdot \cos \alpha_i] \cdot \cos \alpha_i \} \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i)}$$

- 分母： 全重量 $W_i$ を用いていて、 $M_w$ が含まれていない  
 →  $M_w = 0$ の斜面に対しては妥当な近似  
 $M_w > 0$ の斜面に対して適用すると、 $M_d$ を過大評価、安全率を過小評価

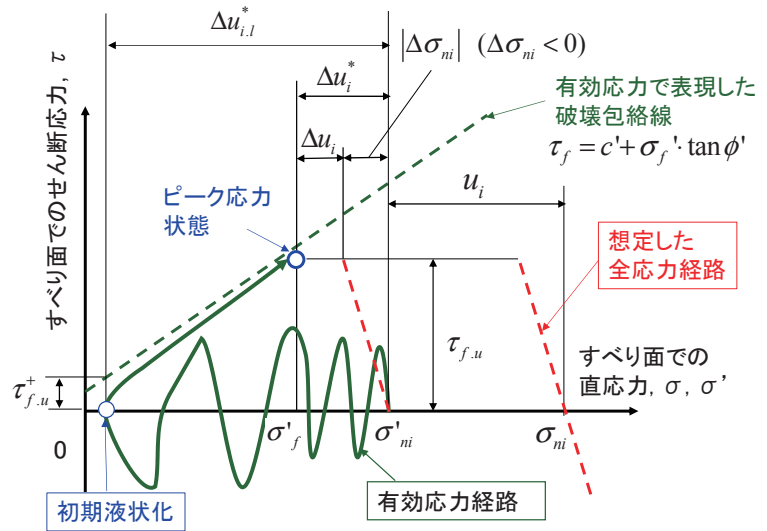
Δu法として、より合理的な式は、

$$F_{global} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + \{ [W_i - (U_{bi} + \Delta U_{bi}) \cdot \cos \alpha_i] \cdot \cos \alpha_i \} \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i / R)}$$

- まとめ： (a)式では、耐震性の
  - ① $M_w = 0$ としていることによる過小評価の可能性、
  - ② $k_h = 0$ としていることによる過大評価、
  - ③ $\Delta U_{bi}$ の過大評価による過小評価の可能性(次頁以降で説明)がある。

158

## 飽和土の非排水繰返し載荷



### 有効応力法 (いわゆる Δu法)

$$\tau_{f,u} = c' + \sigma'_f \cdot \tan \phi'$$

$$\sigma'_f = \sigma'_{ni} + \Delta\sigma_{ni} - \Delta u_i = \sigma'_{ni} - \Delta u_i^* = (\sigma_{ni} - u_i) - \Delta u_i^*$$

理論的に正しいが、円弧すべり安定計算に適用する場合は、以下に示す二つの問題①、②に注意する必要がある

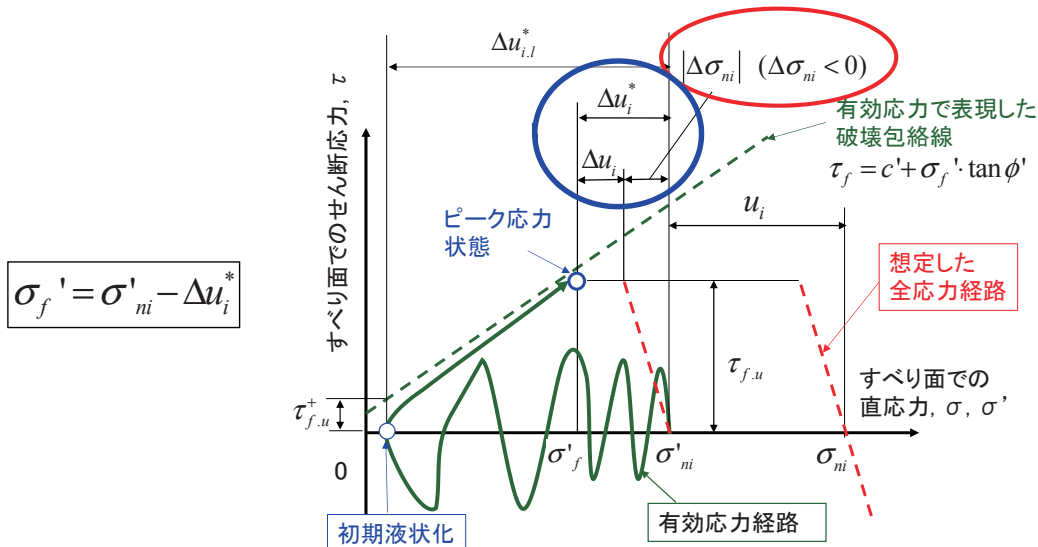
159

問題①: 地震荷重  $k_h$  と過剰間隙水圧  $\Delta u$  を同時に考慮する場合での課題

$$F_{global} = \frac{\sum [c'_{fi} \cdot l_i + \{W_i - (U_{bi} + \Delta U_{bi}) \cdot \cos \alpha_i\} \cdot \cos \alpha_i] \cdot \tan \phi'_i}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i / R)}$$

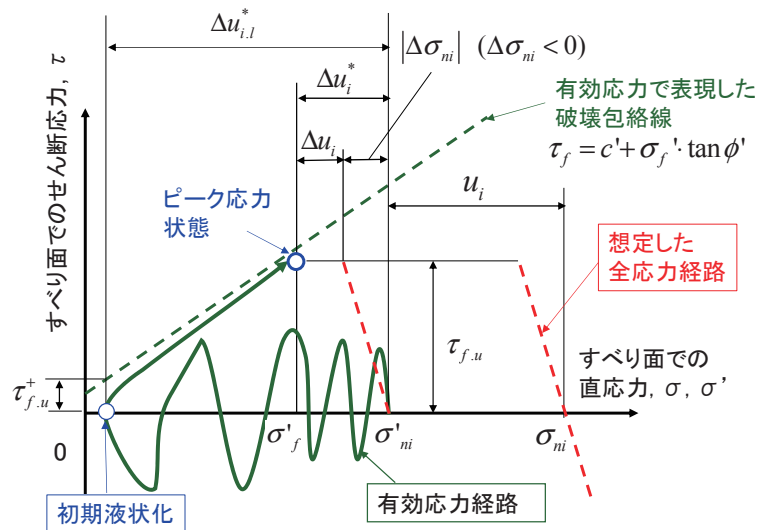
水平震度  $k_h$  によりスライス底面での拘束圧は減少:  $\Delta \sigma_{ni} = -k_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i / l_i$   
 しかし、上の式の分子ではこの影響を考慮していない

⇒  $\Delta u_i = \Delta u_i^*$  従って、 $\Delta U_{bi} = \Delta u_i^* \cdot l_i$  とする必要がある



160

## 飽和土の非排水繰返し載荷



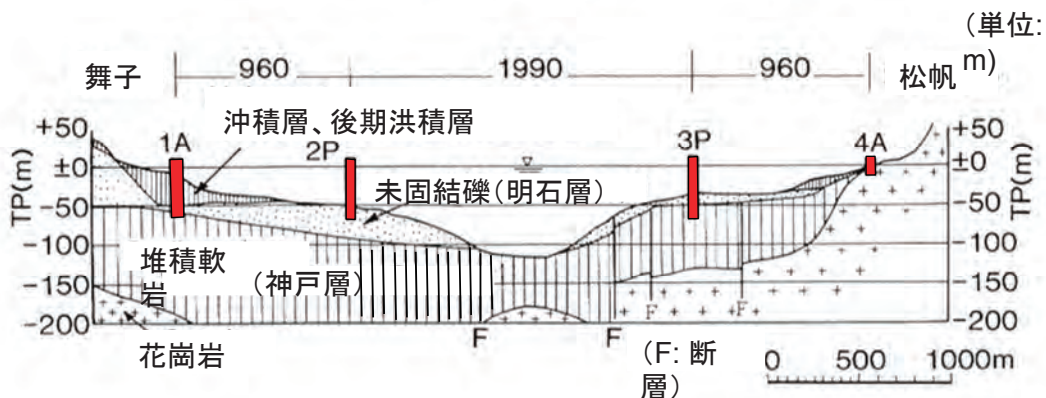
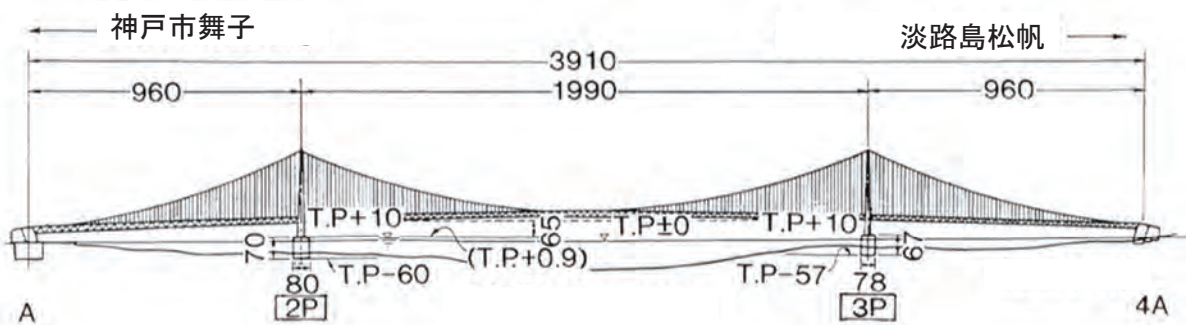
### 問題② [影響が大きい]:

非排水せん断強度 $\tau_{f,u}$ の発揮時における過剰間隙水圧 $\Delta u_i^*$ の値は、ある程度以上締め固まった土では、ダイレイタンスーによって、直前のせん断応力 $\tau = 0$ の状態での値 $\Delta u_{i,l}^*$ よりも大きく減少している

→  $\Delta u_i^*$ を「非排水繰返し三軸試験で測定された $\Delta u$ の時刻歴での上包絡線」から算定すると、「初期液状化時で $\tau = 0$ の時の過剰間隙水圧 $\Delta u_{i,l}^*$ 」になる

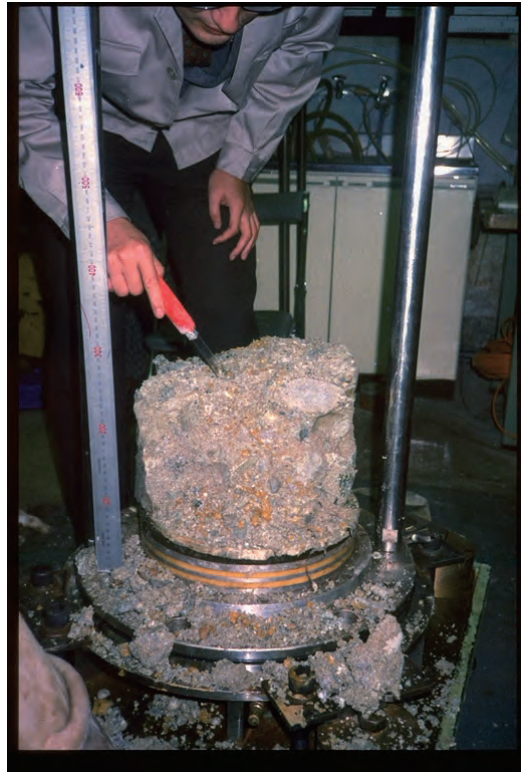
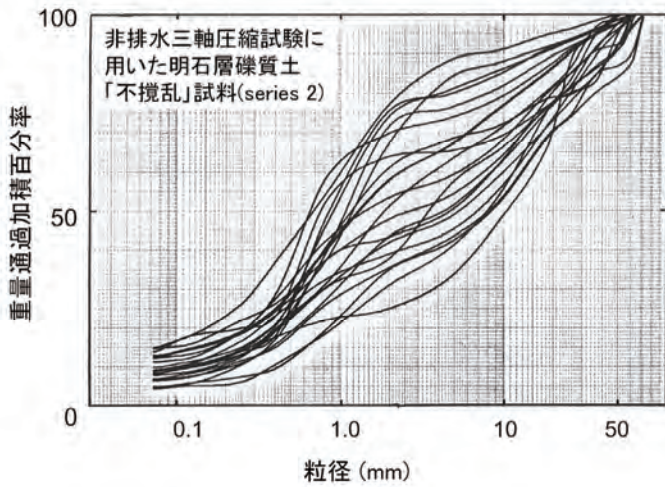
→  $\Delta u_i^* = \Delta u_{i,l}^*$ とした場合、非排水せん断強度 $= \tau_{f,u}^+$  (非常に小さくなり、締め固まった土の実際の値を著しく過小評価) (次頁以降、実例で説明) 161

## 明石海峡大橋の2Pの基礎地盤明石層の非排水三軸試験





## 明石海峡大橋2P基礎地盤の明石層(密な礫質土)の不攪乱試料の大型三軸試験(直径30 cm, 高さ60 cm)

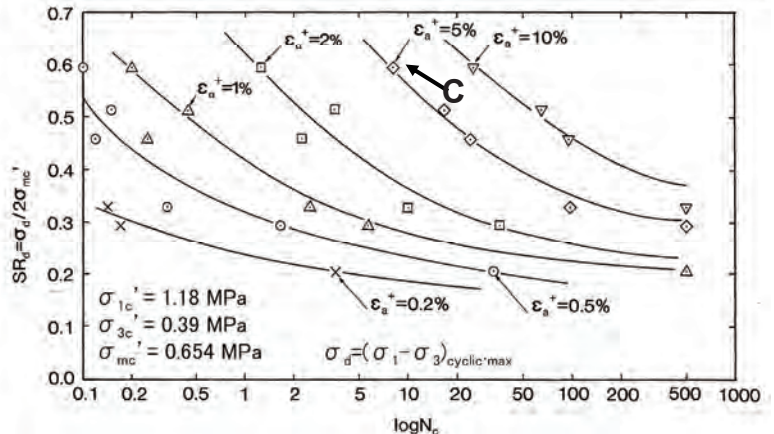
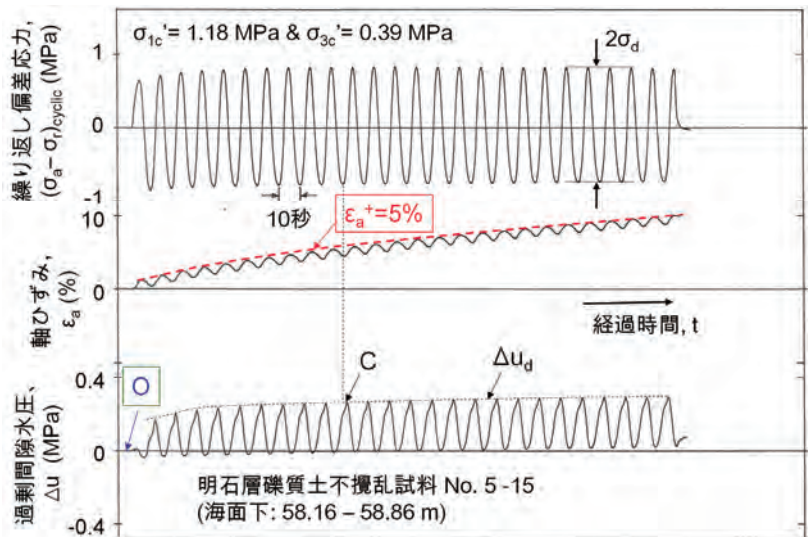


### 明石層礫質土の「不攪乱」試料の異方圧密供試体の非排水繰返し三軸試験

$\Delta u_i^*$ は、通常「 $\Delta u_d \sim t$ 関係の上方包絡線」から算定する

点O: 非排水繰返し载荷開始時  
 $\Delta u_i^* = \Delta u_d = 0$

点C:  $N_c = 10$ 終了後で軸ひずみは5%を超えている  
 $\Delta u_i^* = \Delta u_d$ は、かなり大きくなっている

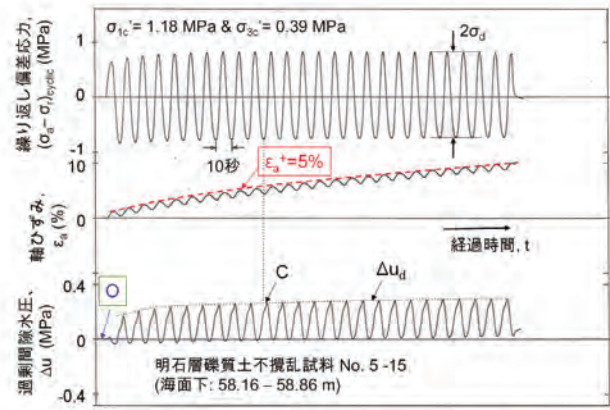


点O: 非排水繰返し载荷開始時

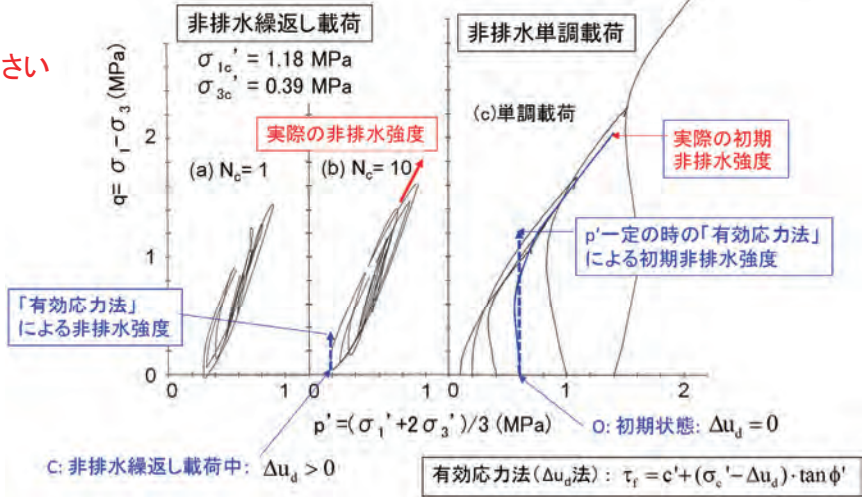
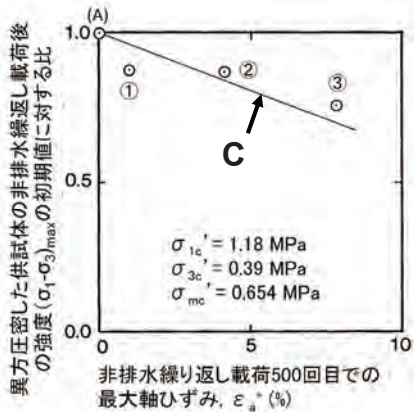
$$\Delta u_i^* = \Delta u_d = 0$$

点C: 点C:  $N_c=10$  終了後で軸ひずみは5%を超えている;  $\Delta u_i^* = \Delta u_d$  は、かなり大きくなっている

いずれの状態でも、密な土であるため、有効応力法 ( $\Delta u$  法) による非排水せん断強度は**実際の値**をかなり過小評価



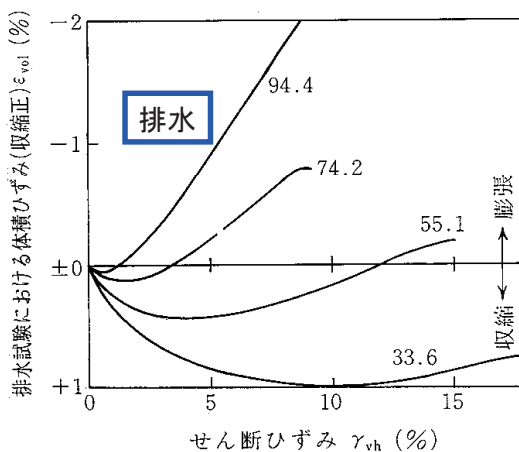
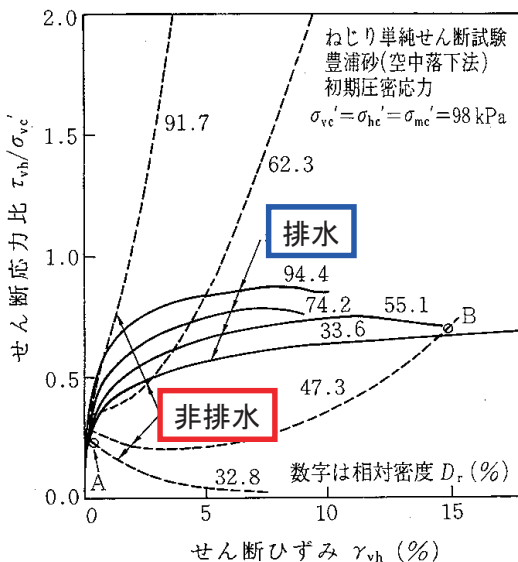
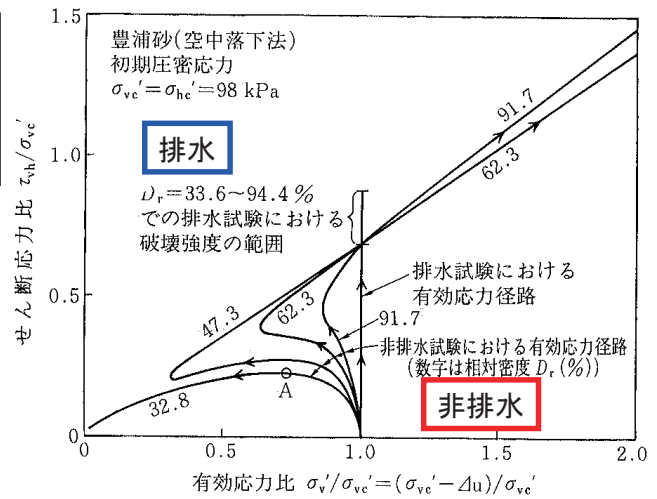
実際の、点Cでの強度低下率は小さい



等方圧縮された飽和豊浦砂の一定拘束圧での純せん断(ねじりせん断試験) **排水**と**非排水**

$p'$ 一定の排水せん断でも著しい体積変化! 密度により著しく異なる

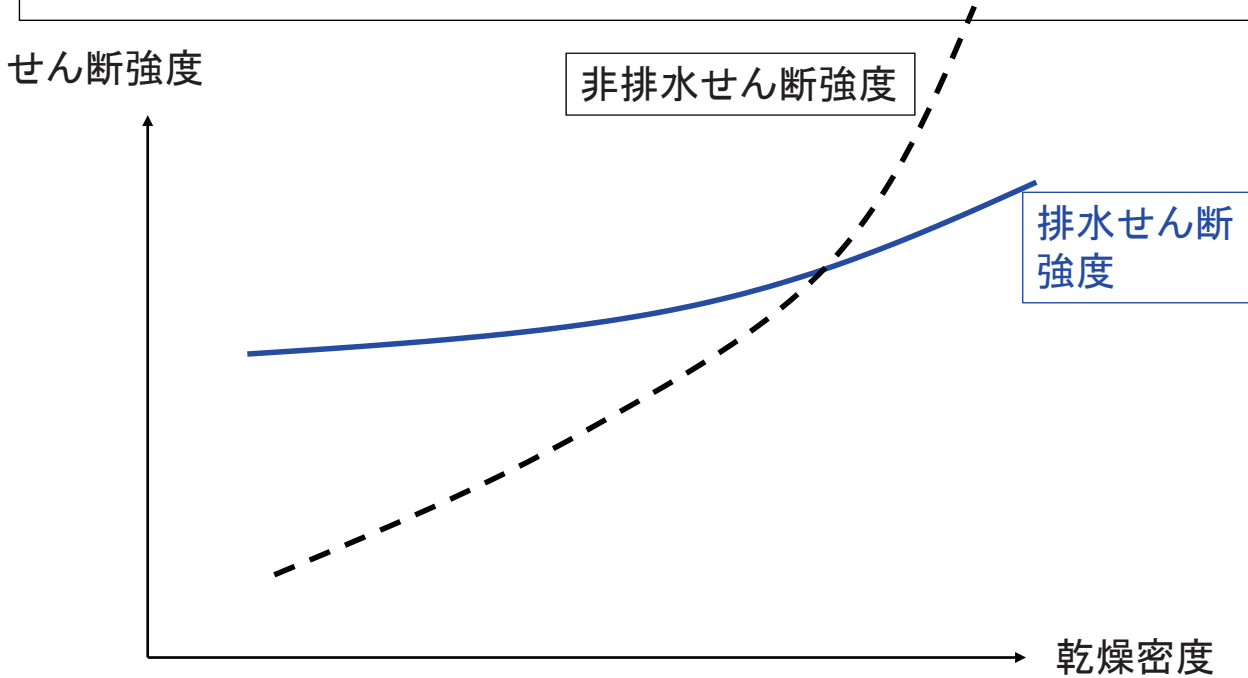
体積一定の非排水せん断では $p'$ が著しく変化⇒密度によって著しい強度差



龍岡文夫・毛利栄征(2015):地盤工学・技術ノート第22回, 盛土の地震時残留すべり計算②, 雑誌基礎工4月号

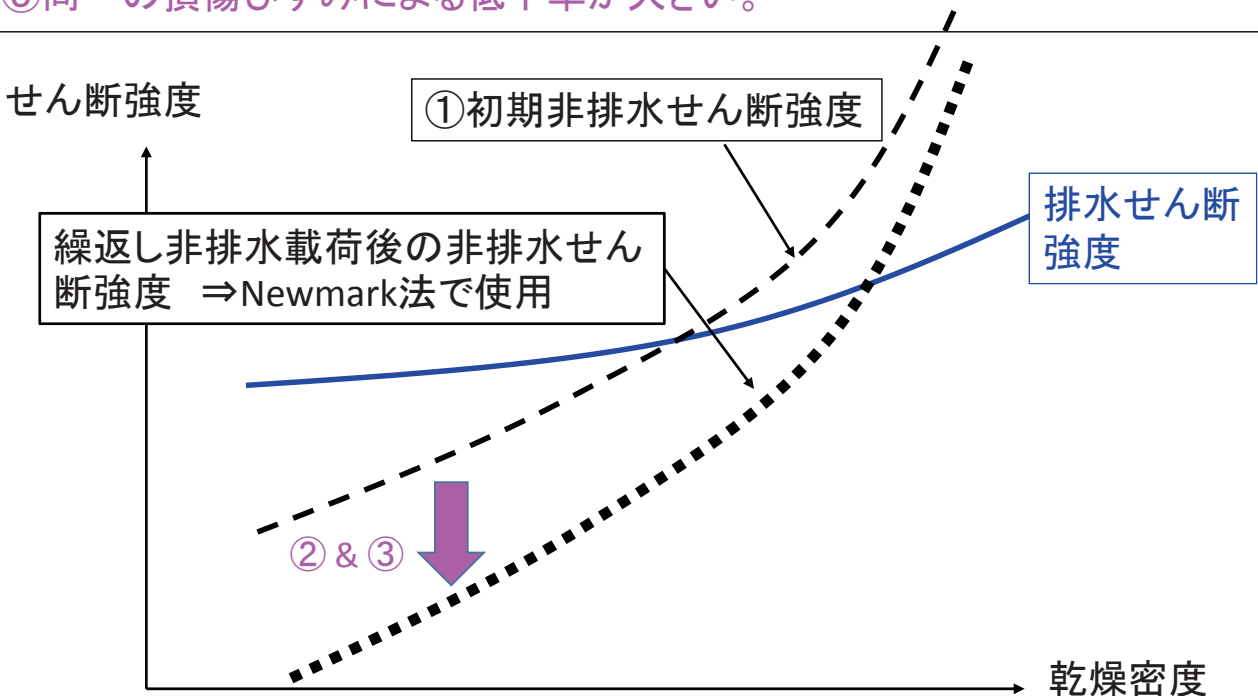


飽和土では、非排水せん断強度の方が排水強度よりも締固め効果ははるかに大きい  
 しかし、この事実は従来の設計では十分に考慮されていない場合が多い

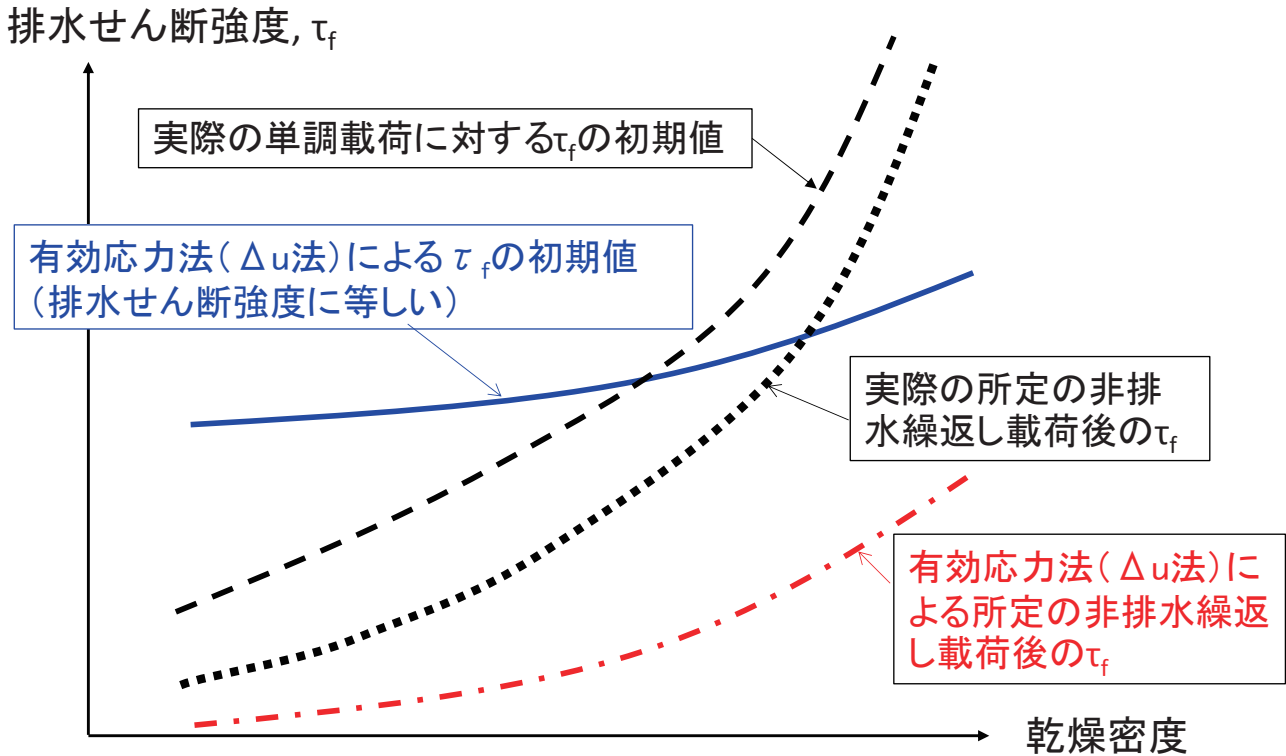


非排水繰返し载荷後の非排水せん断強度に対する締固めの三重の効果  
 緩詰めになるほど、

- ①初期非排水せん断強度は大きく低下、排水せん断強度よりも低くなる。
- ②非排水繰返し载荷で生じる損傷ひずみが大きくなり、
- ③同一の損傷ひずみによる低下率が大きい。



## 飽和土の有効応力法 ( $\Delta u$ 法) による非排水せん断強度と実際の値との関係の模式図



## 地震時に飽和土が非排水状態の場合

- 1) 飽和した斜面は、粒径が小さく排水距離が長いほど、地震時に非排水条件あるいはそれに近い条件になりやすい。

その場合、排水条件と仮定して安定解析をすると、

- ・緩い土では $M_r$ を過大評価して危険側、密な土では $M_r$ を過小評価して安全側となり、全体としては締固めの影響を過小評価

- 2) 非排水条件で解析する場合での飽和土の非排水せん断強度 $s_{f,u}$ の算定法:

- ・  $\Delta u$ 法:  $\tau_{f,u} = c' + (\sigma'_0 - \Delta u) \cdot \tan \phi'$  (正確な $\Delta u$ の推定が必要! 難しいが!)

⇒ 締固まった盛土では $\Delta u$ を過大評価して安全率を過小評価する傾向  
従って、実務では地震荷重は加えない $\Delta u$ 法を適用されている

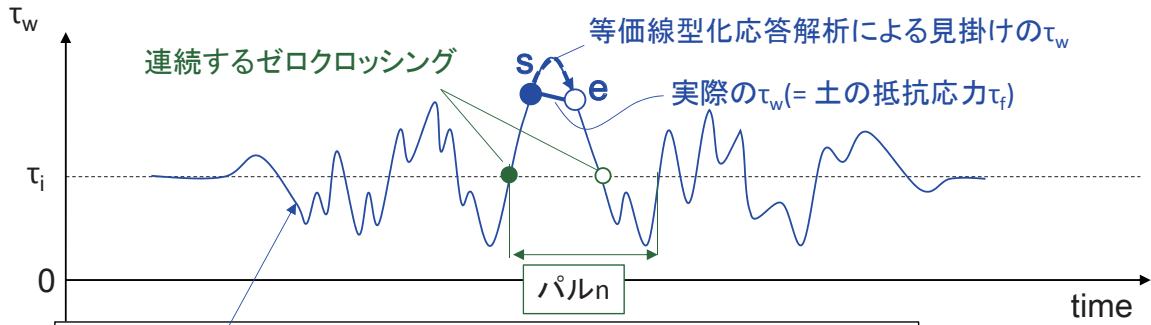
$\Delta u > 0$ と地震荷重を同時に考慮する方法でない、

⇒ 締め固まった盛土では、地震時に最小となる安全探索できない

Newmark法に適用できない

- ・ 全応力法で非排水繰返し载荷による低下を考慮 (Newmark-D法)

Newmark-D法で用いる「飽和土の非排水繰返し载荷で低下してゆく非排水せん断強度」の求め方

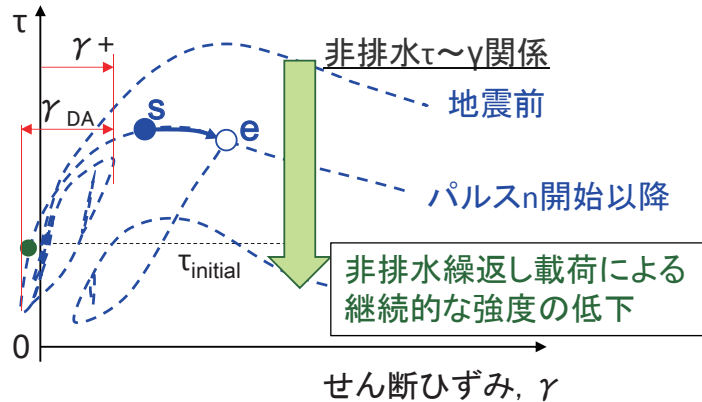


応答解析による作用せん断応力 $\tau_w$ の不規則な時刻歴

土の実際の $\tau \sim \gamma$ 関係

すべりが生じる全てのパルスに対してすべり  $s \rightarrow e$  を求め、積分する

龍岡文夫・毛利栄征・デュッティン、アントワン・矢崎澄雄・上野和弘(2015):地盤工学・技術ノート第26回, 盛土の地震時残留すべり計算⑥、雑誌基礎工8月号



全応力法で非排水繰返し载荷による低下を考慮(Newmark-D法):

$$F_{global} = \frac{\sum [\tau_{f.u.}]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) - M_w / R + k_h \cdot \sum (W_i \cdot y_i / R)}$$

$\tau_{f.u.}$  = 飽和土の地震時非排水せん断強度

全応力法では、初期有効応力状態の関数とした上で地震荷重による非排水繰返し载荷による劣化を考慮

$k_h \cdot W_i$  = (スライス*i*の平均応答水平加速度/ $g$ )  $\cdot W_i$ の時刻歴

$g$ は地球の加速度

⇒安全率の時刻歴を求める。

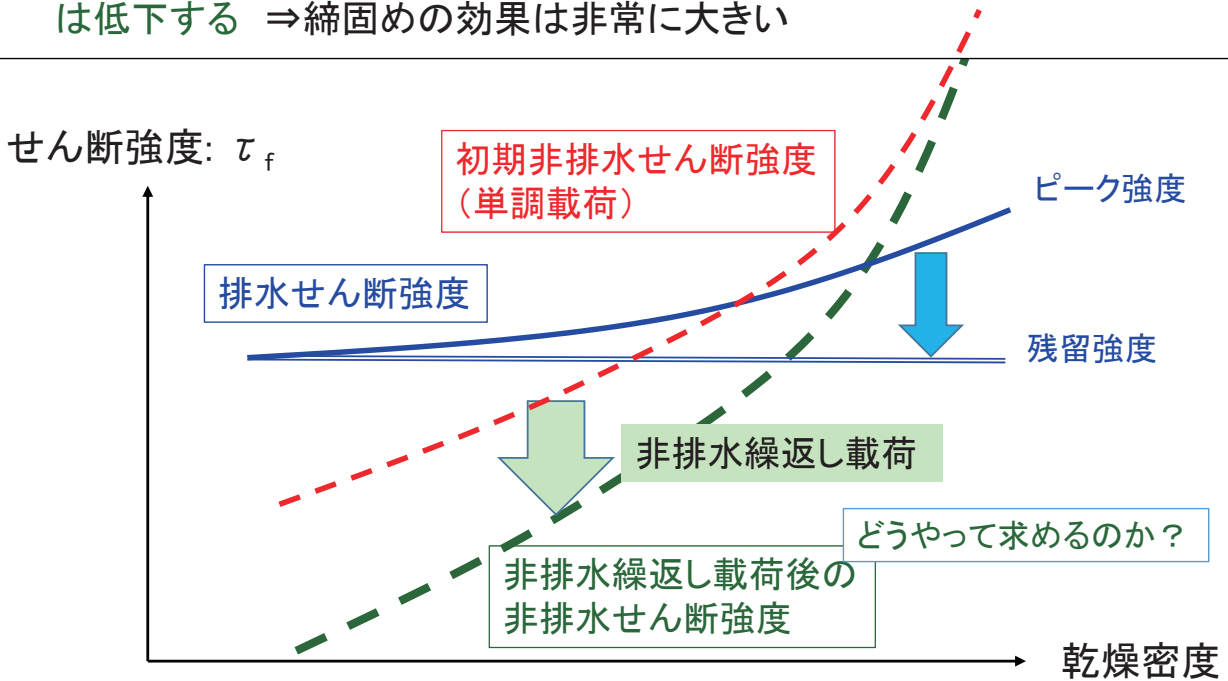
⇒残留すべり変位の時刻歴を求める。



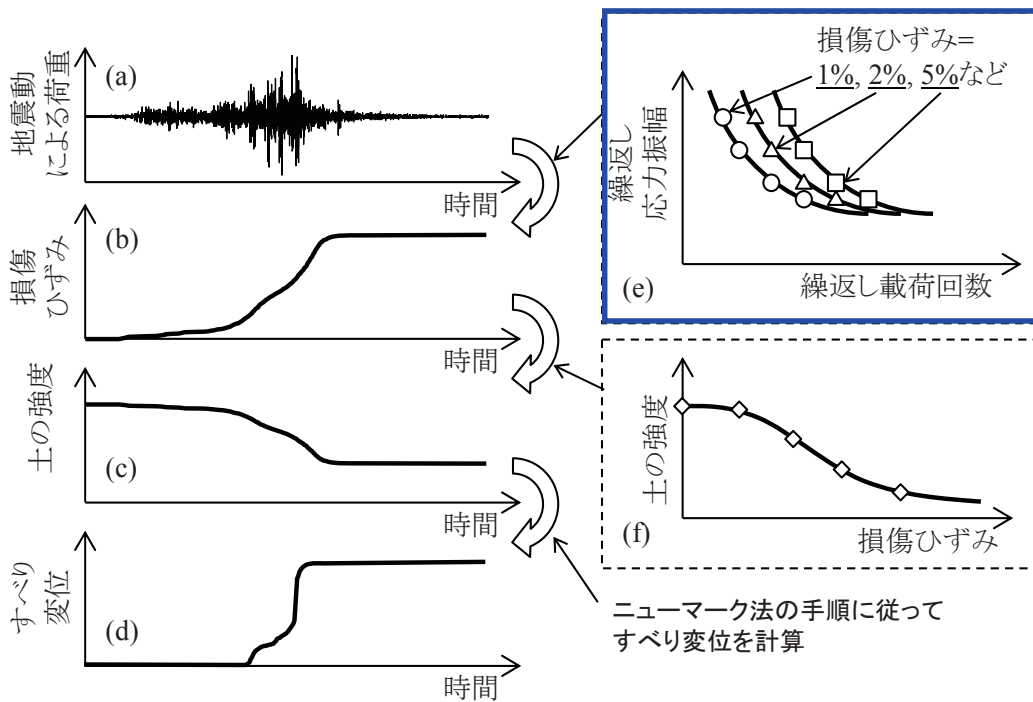
Newmark-D法での全応力法による土のせん断強度:

- 1)排水せん断強度は、ピーク値から残留強度に低下
- 2)非排水せん断強度は、非排水繰返し载荷で低下してゆく

- ・初期非排水強度
- ・非排水繰返し载荷でひずみが発生することによって、非排水せん断強度は低下する ⇒締固めの効果は非常に大きい

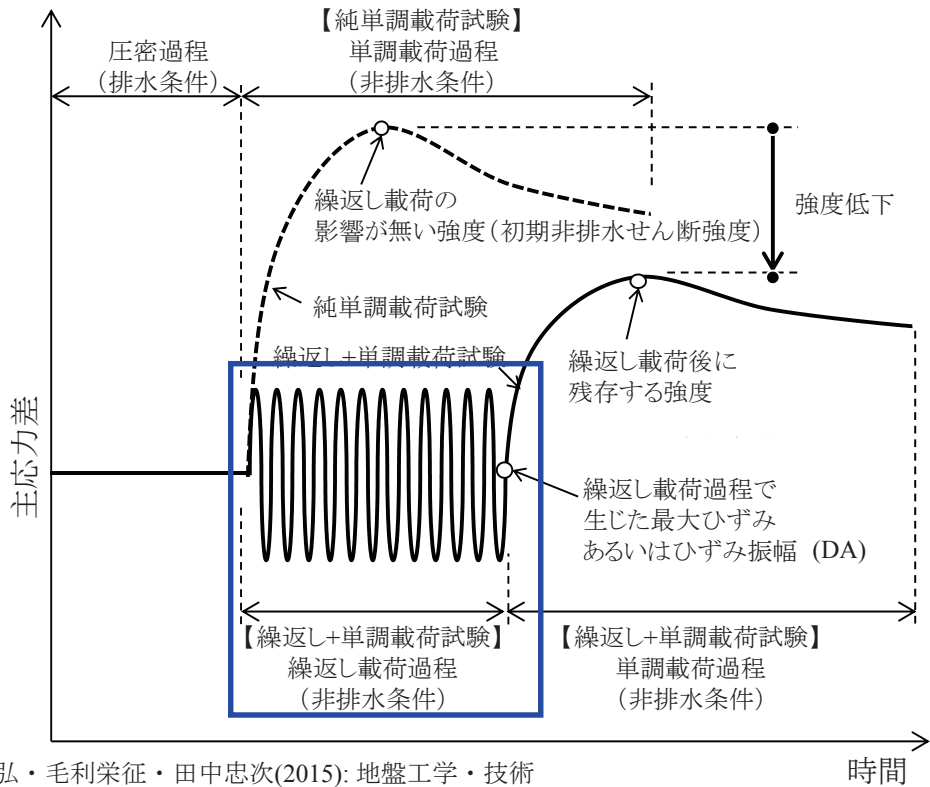


### 修正ニューマーク-D法によるすべり変位解析における室内せん断試験の役割



龍岡文夫・上野和弘・毛利栄征・田中忠次(2015): 地盤工学・技術ノート第27回, 盛土の地震時残留すべり計算⑦、雑誌基礎工9月号

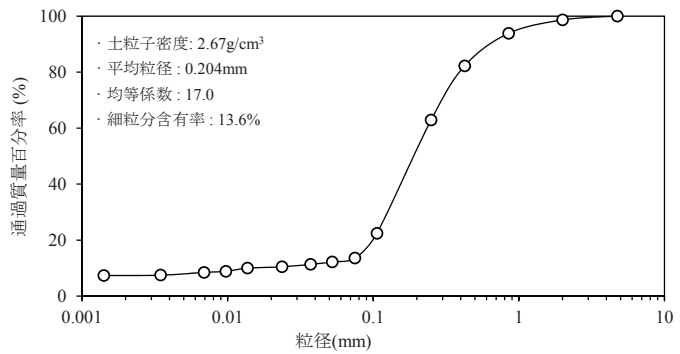
# 単調載荷試験および繰返し+単調載荷試験による非排水条件での応力～ひずみ関係の模式図



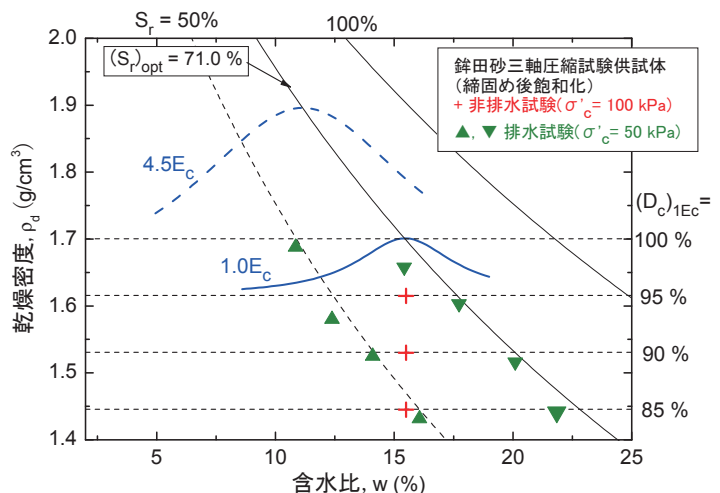
龍岡文夫・上野和弘・毛利栄征・田中忠次(2015): 地盤工学・技術ノート第27回, 盛土の地震時残留すべり計算⑦、雑誌基礎工9月号

## 銚田砂での実験例

### 粒度分布

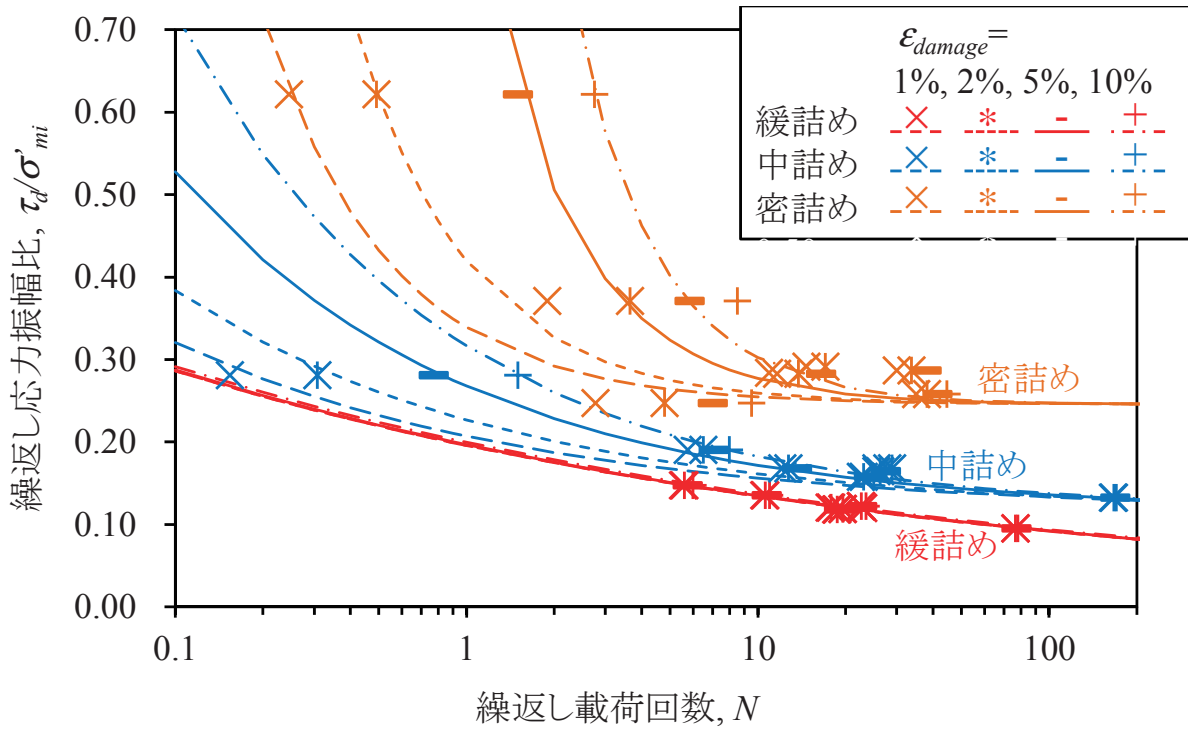


### 締固め曲線と三軸試験供試体の締固め状態

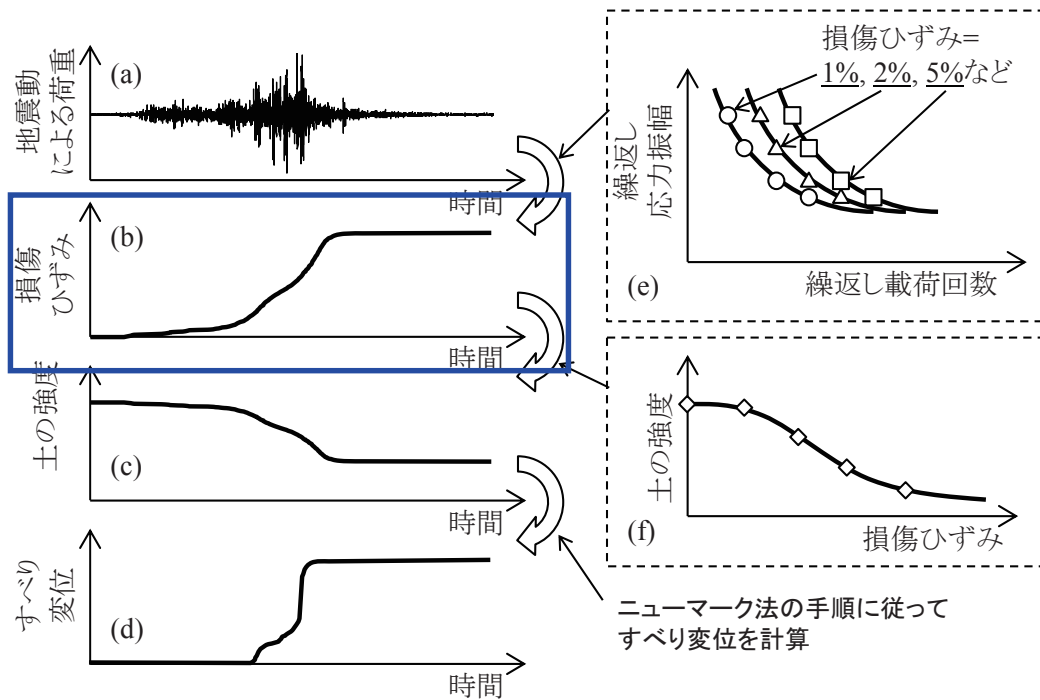


龍岡文夫・上野和弘・毛利栄征(2015): 地盤工学・技術ノート第27回, 盛土の地震時残留すべり計算⑦、雑誌基礎工9月号、79-82頁。

## 銕田砂の繰返し非排水強度特性 (緩詰め, 中詰め, 密詰め)



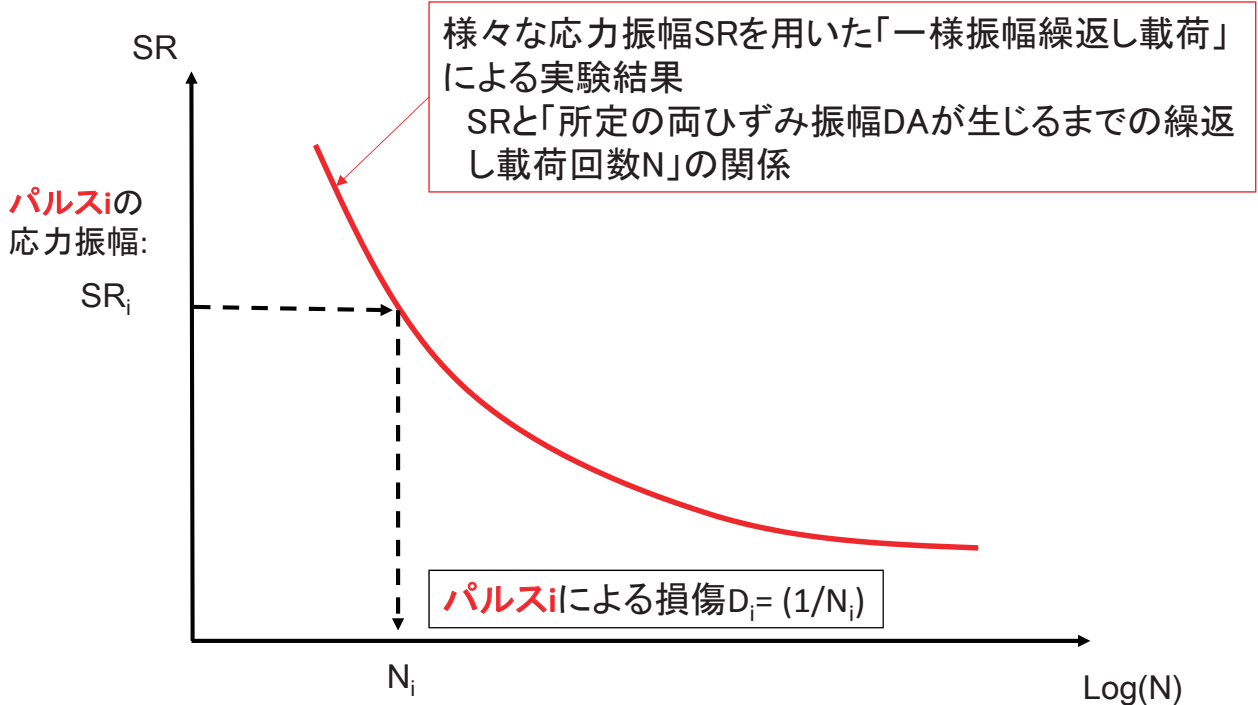
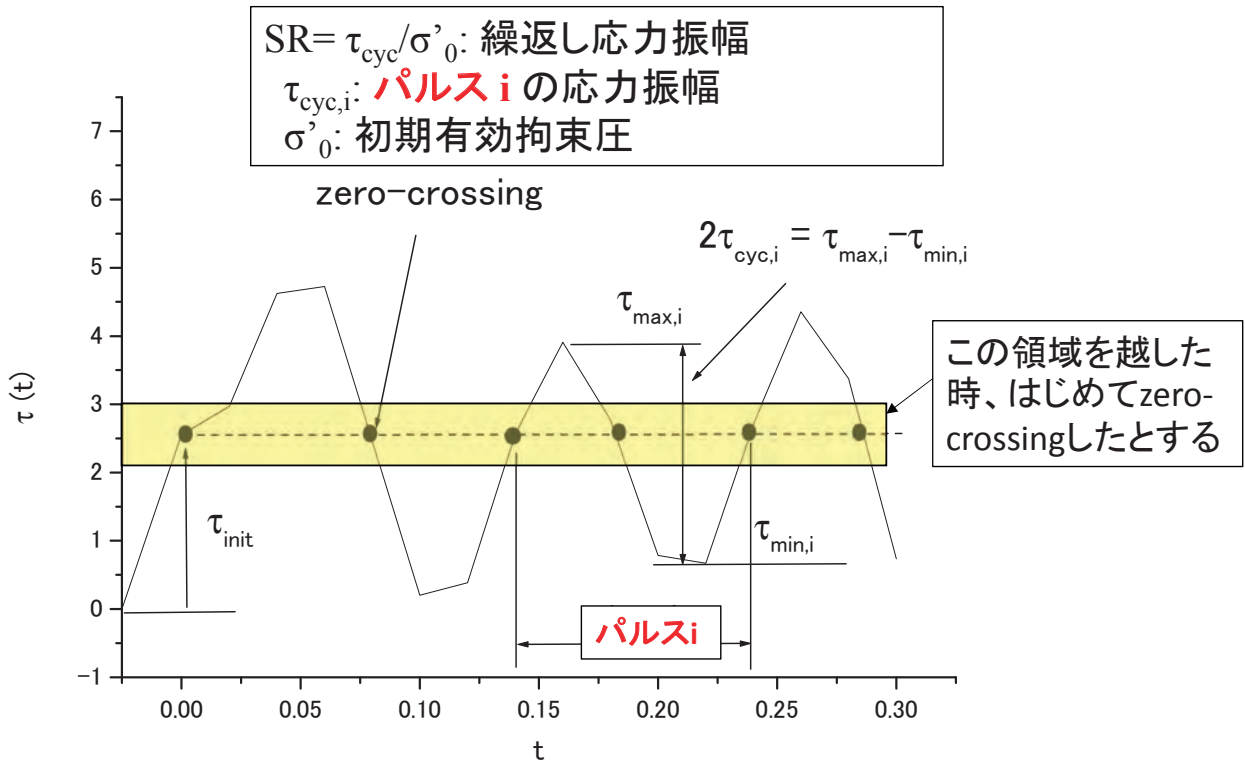
## 修正ニューマーク-D法によるすべり変位解析における 室内せん断試験の役割



龍岡文夫・上野和弘・毛利栄征・田中忠次(2015): 地盤工学・技術ノート第27回, 盛土の地震時残留すべり計算⑦、雑誌基礎工9月号

# 累積損傷度理論 (Cumulative damage theory)

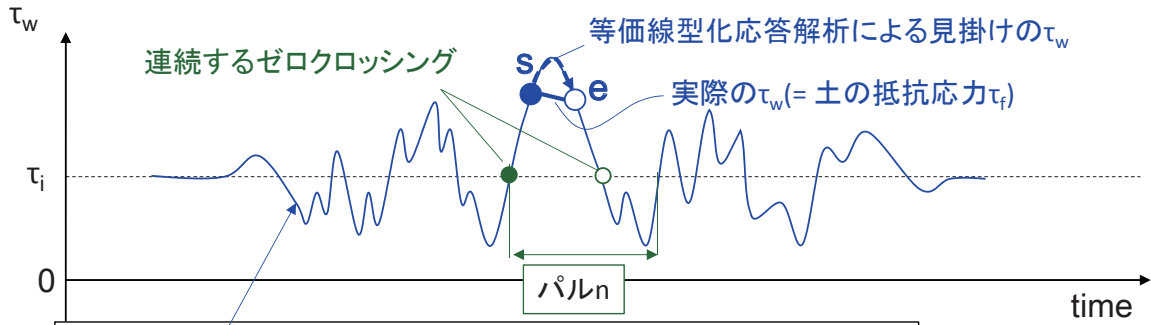
まず、不規則荷重をパルスの集合体に置き換える



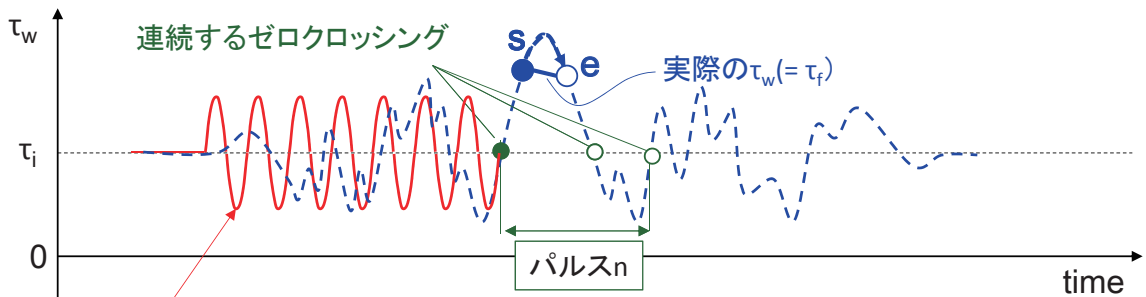
最初のパルスからパルスi=n終了点までに生じた全損傷を、 $D = \sum(1/N_i)$ とする  
 パルスnでDが1.0になればひずみDAが生じる、とする。

任意の不規則荷重を、同じDAを発生する等価な「振幅SR、繰返し荷重回数Nの規則荷重」の置き換えられる

# Newmark-D法で用いる「非排水繰返し载荷で低下してゆく飽和土の非排水せん断強度」の求め方

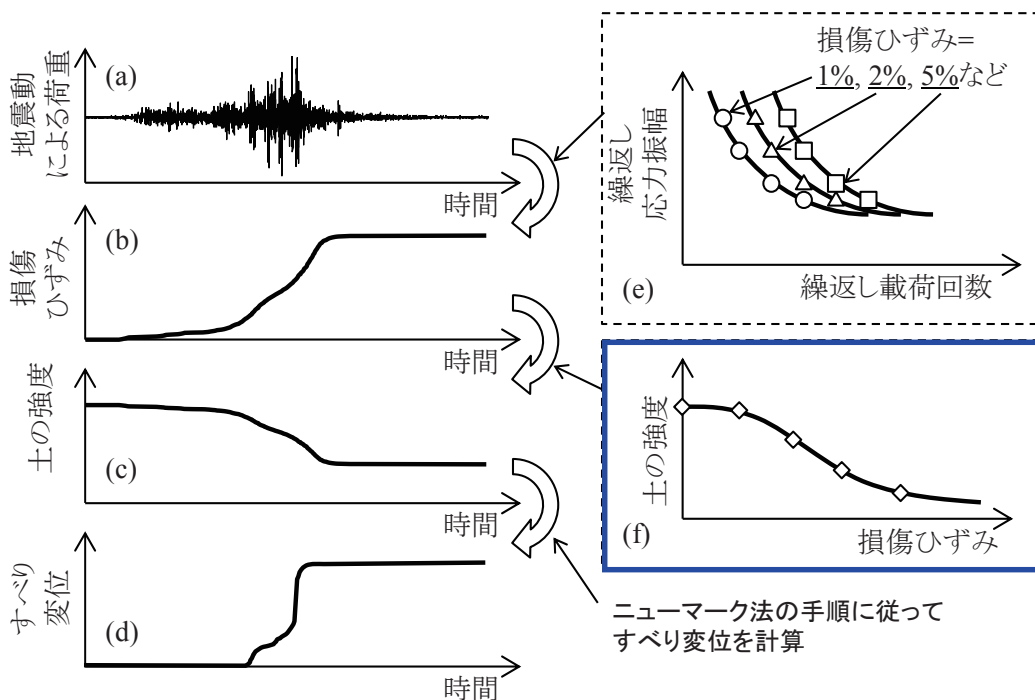


応答解析による作用せん断応力 $\tau_w$ の不規則な時刻歴



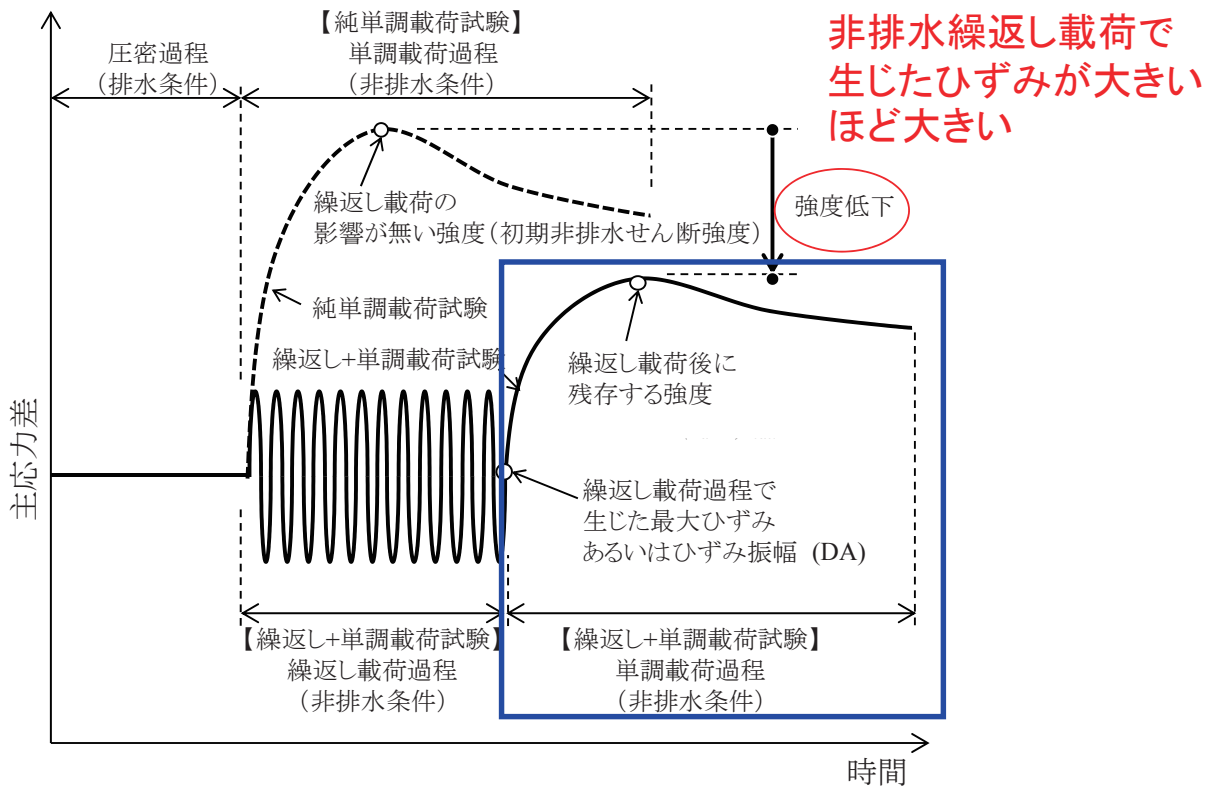
累積損傷度理論による「パルスnより前の不規則荷重」に等価な一様規則荷重

## 修正ニューマーク-D法によるすべり変位解析における室内せん断試験の役割

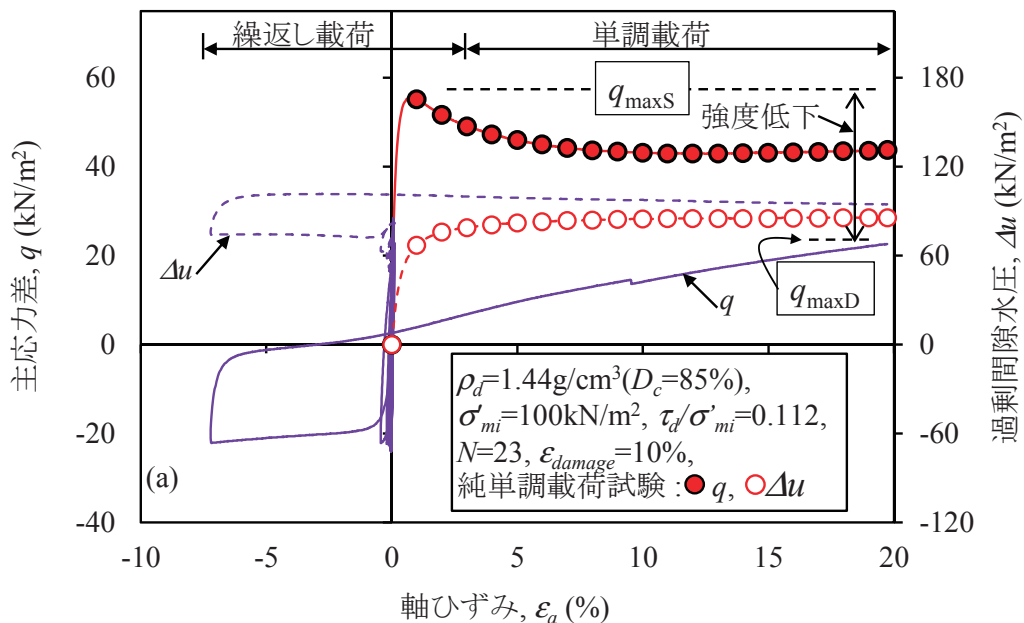




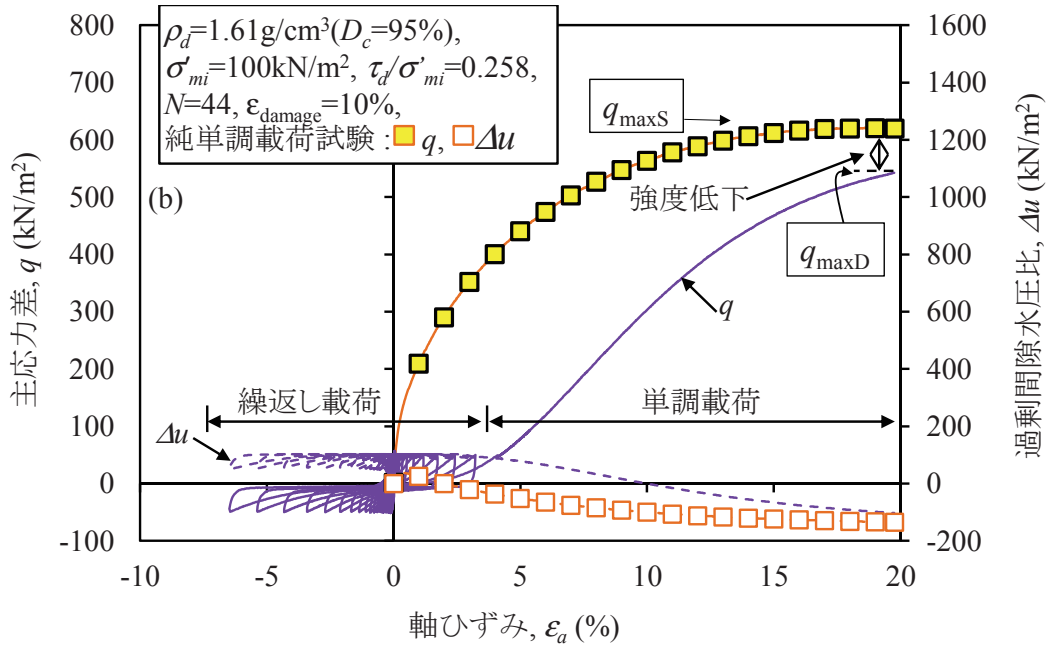
# 単調載荷試験および繰返し+単調載荷試験による非排水条件での応力～ひずみ関係の模式図



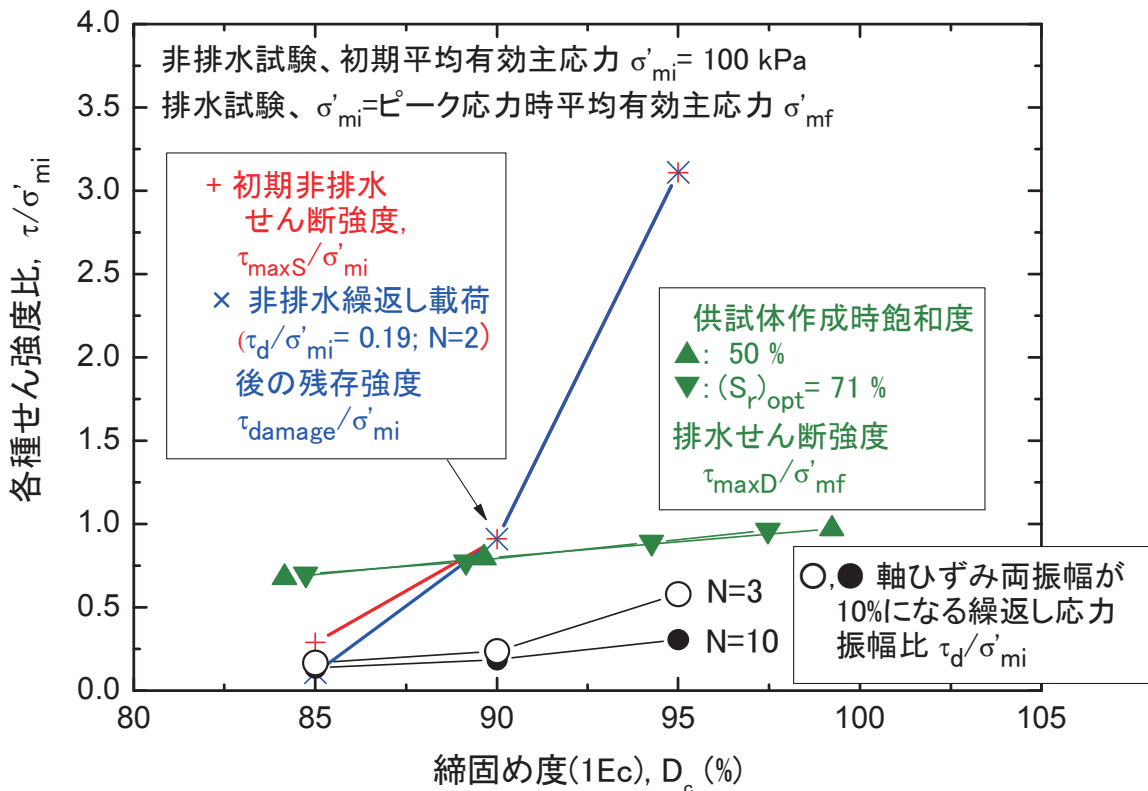
## 銚田砂の非排水繰返し載荷前後の主応力差～軸ひずみ関係 緩詰め ( $D_c = 85\%$ )



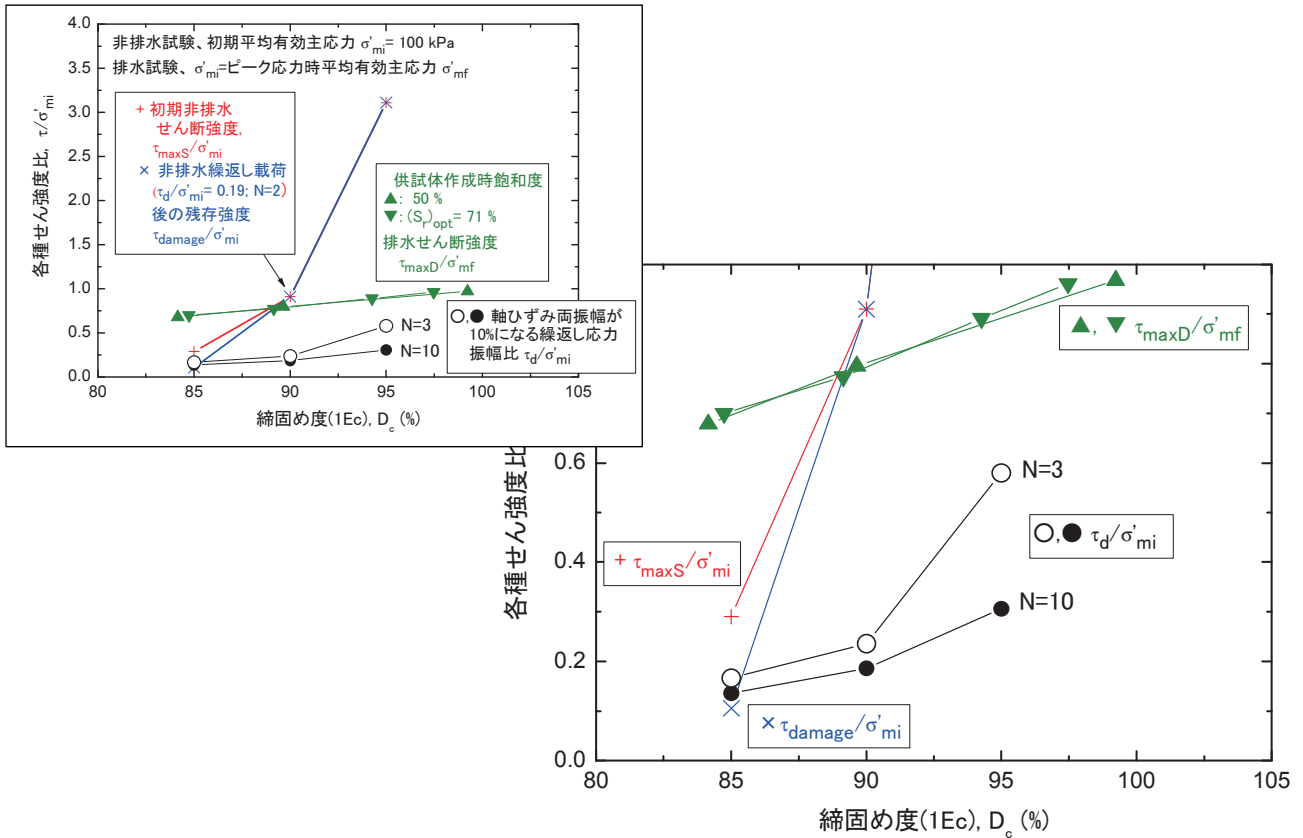
## 銻田砂の非排水繰返し载荷前後の主応力差～軸ひずみ関係 密詰め ( $D_c=95\%$ )



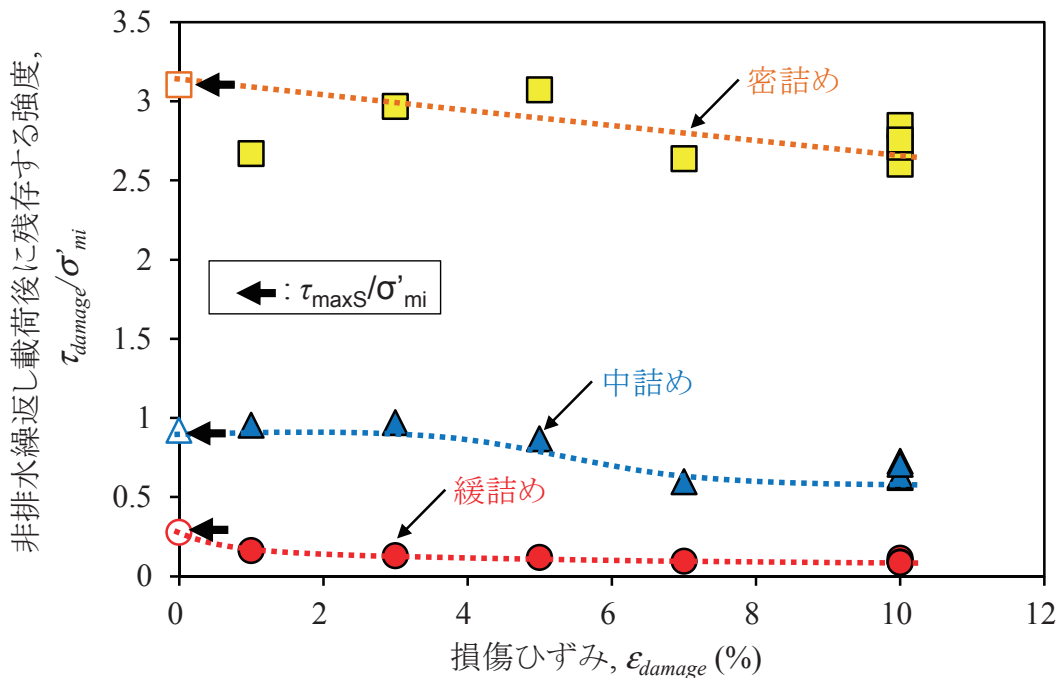
## 銻田砂の非排水繰返し強度、初期非排水せん断強度と非排水繰返し 载荷を受けた後の残存非排水せん断強度と締固め度の関係



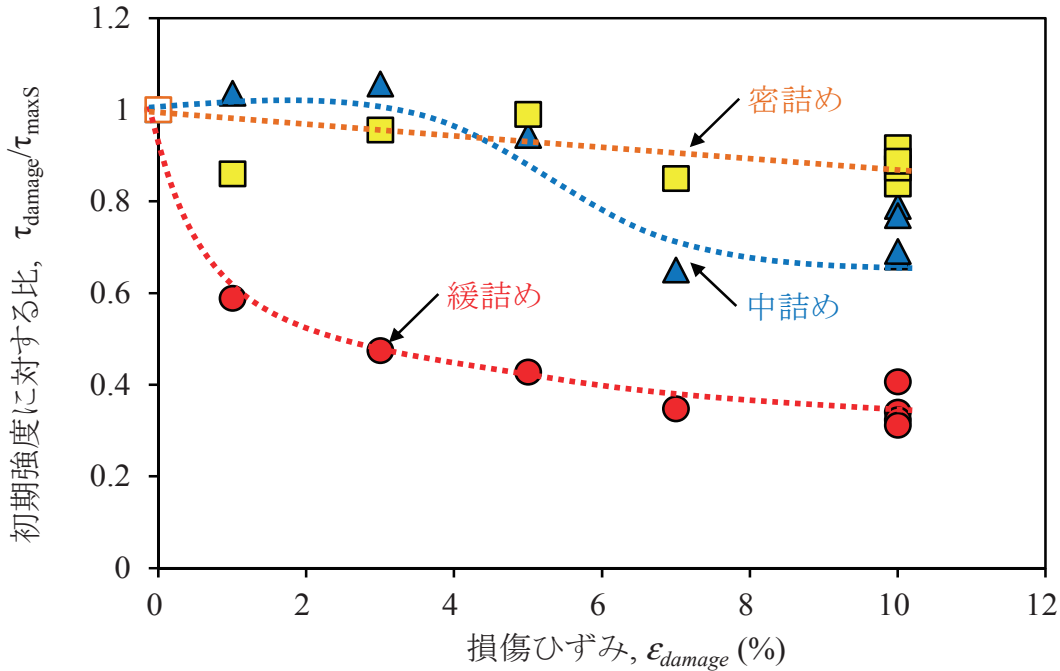
## 鉾田砂の非排水繰返し強度、初期非排水せん断強度と非排水繰返し 载荷を受けた後の残存非排水せん断強度と締固め度の関係



## 鉾田砂の非排水繰返し载荷による強度低下特性 (緩詰め, 中詰め, 密詰め)

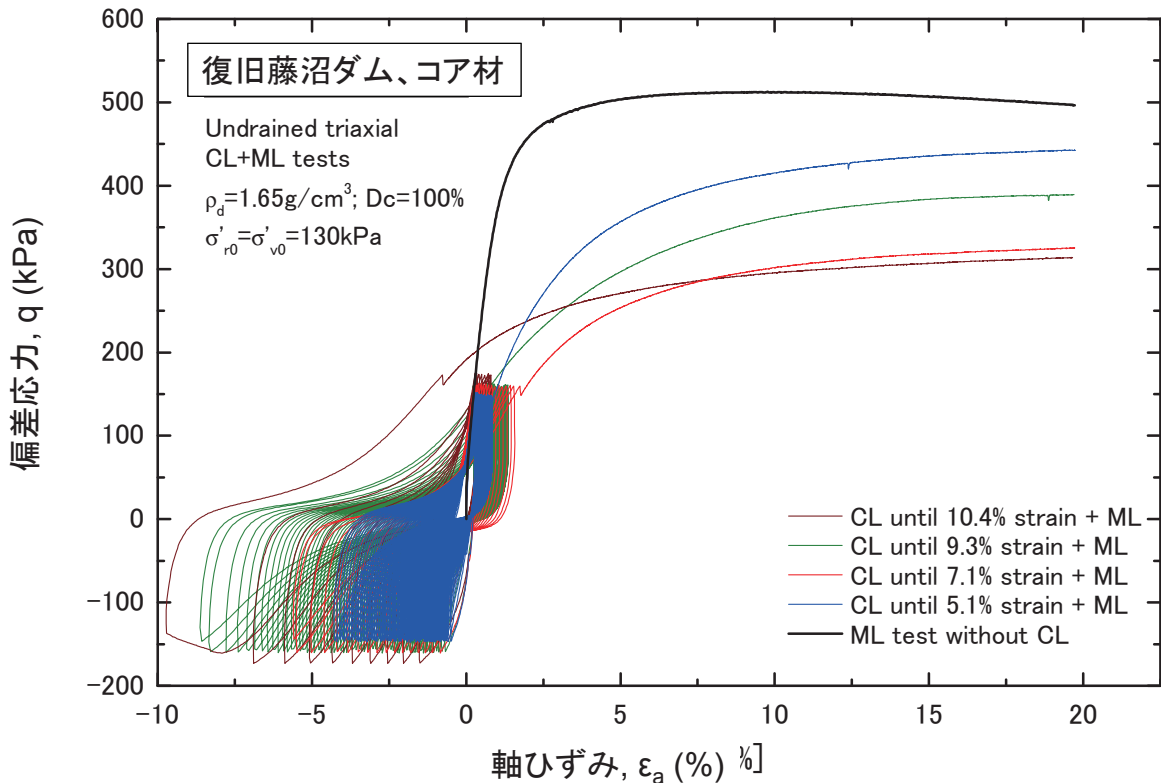


銚田砂の非排水繰返し载荷による強度低下特性  
 (緩詰め, 中詰め, 密詰め)  
 ■ 緩詰めでは、低下率が大きい

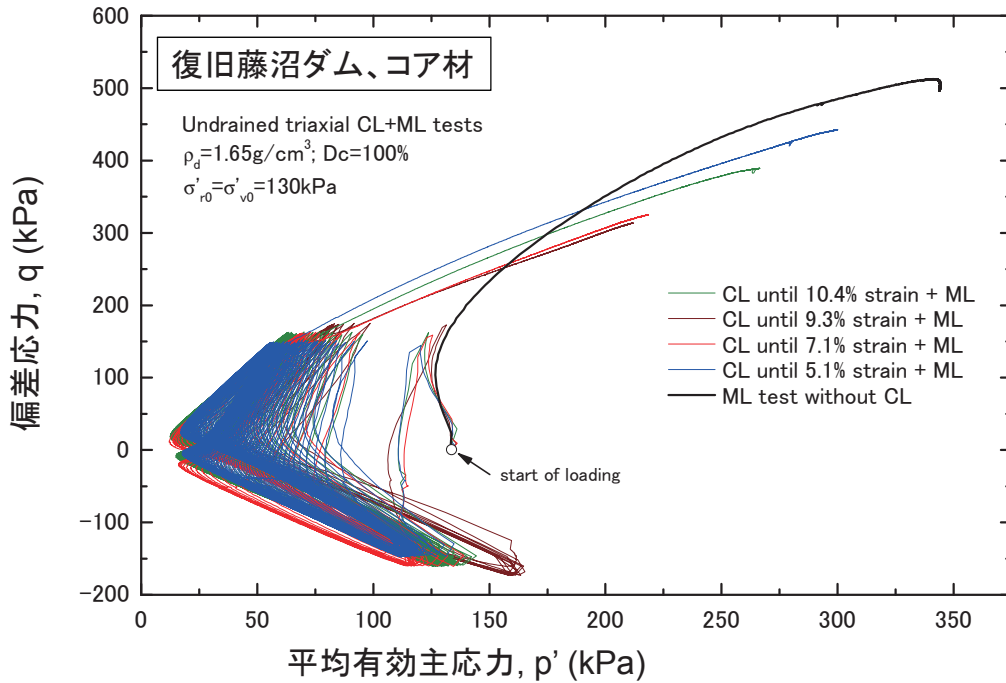


復旧した藤沼ダムでの実験例:

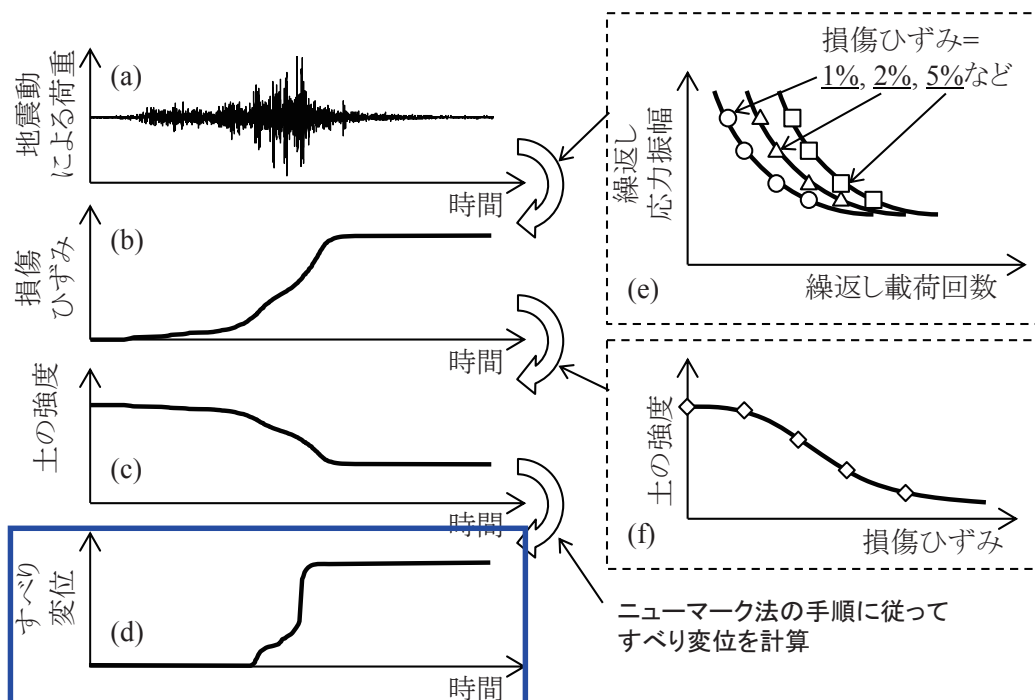
非排水繰返し载荷で発生したひずみが多いほど、引き続き単調载荷非排水载荷での強度は低下している



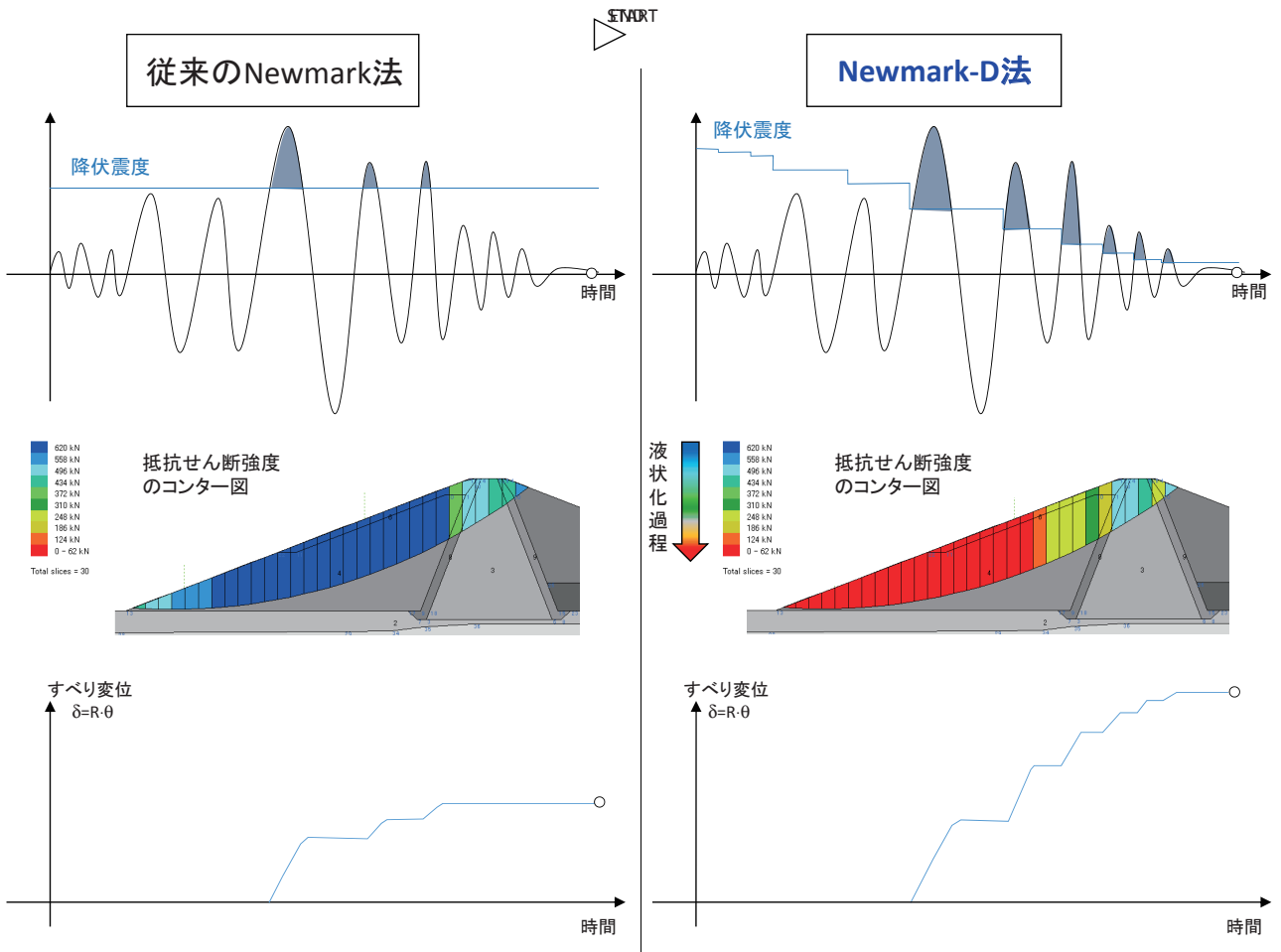
非排水繰返し载荷で発生したひずみが多いほど、ピーク応力状態での $p'$ は小さい  $\Rightarrow p'$ の初期値と間隙比だけでは、非排水繰返し载荷を受けたあとの非排水せん断強度は予測できない  $\Rightarrow$ これを説明する構成モデルは単純ではない(ここで説明する方法ではこの問題は回避)



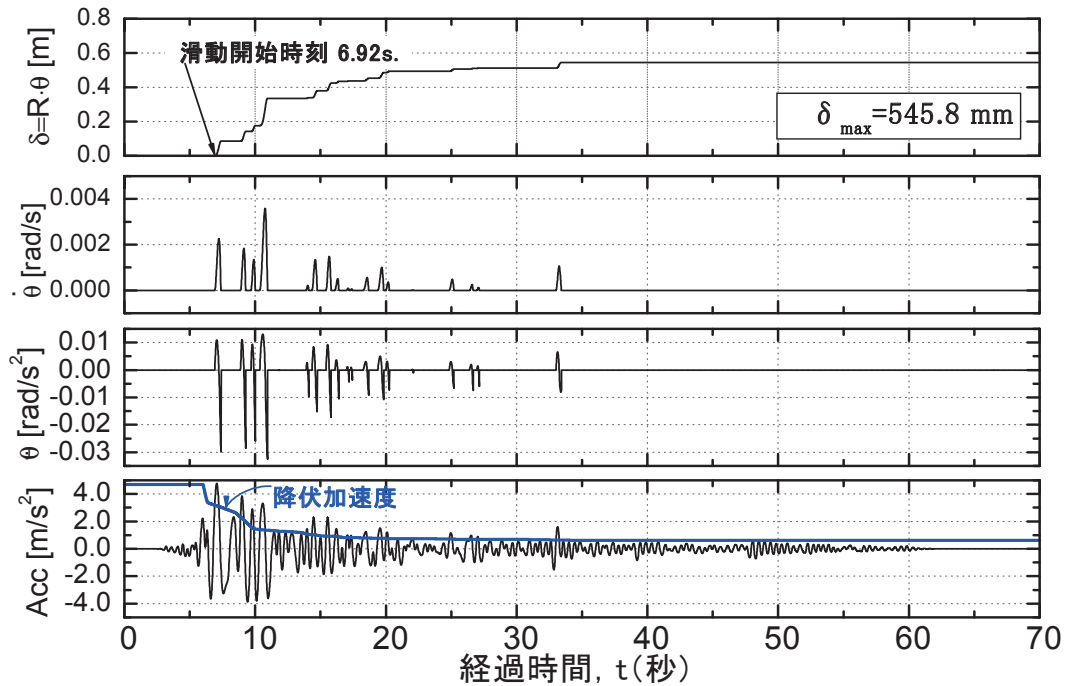
### 修正ニューマーク-D法によるすべり変位解析における室内せん断試験の役割





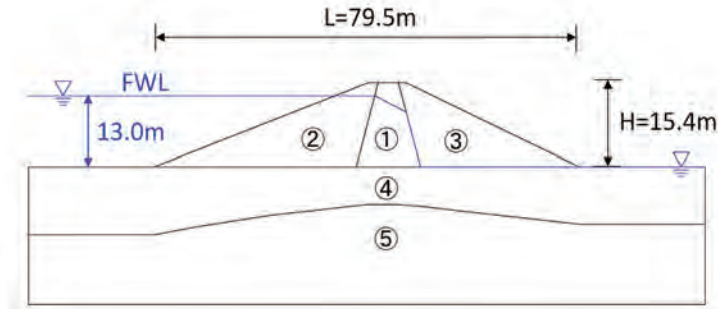


### 修正Newmarkによる藤沼ダム本堤のすべり計算



非排水繰返し载荷の影響を考慮することによって、はじめて藤沼ダムの崩壊が説明できる

## 解析事例での締固め度の影響の検討



⇒ 異なる締固め度  $D_c=85\%$ ;  $90\%$ ;  $95\%$  (標準プロクターによる)を想定

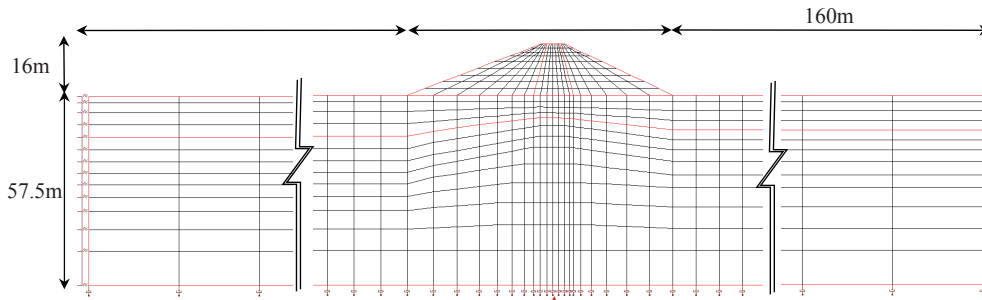
各強度試験に基づいて設定した解析に用いる土質特性

地層		単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )		排水せん断強度		非排水せん断強度	
No.名称	D <sub>c</sub>	湿潤 $\gamma_t$	飽和 $\gamma_{sat}$	c' (kPa)	$\phi'$ (度)	$c_{u0}$ (kPa)	$\phi_{u0}$ (度)
① コア	95%	18.5	19.6	15	22	30	20
②③ランダム		18.0	19.6	1	50	45	20
① コア	90%	18.0	19.1	12	19	18	13
②③ランダム		17.0	19.1	7	40	15	20
① コア	85%	16.5	18.5	10	15	15	10
②③ランダム		16.0	18.5	5	35	4	30
④ 地盤 N20		17.0	17.4	37	31.5	37	31.5

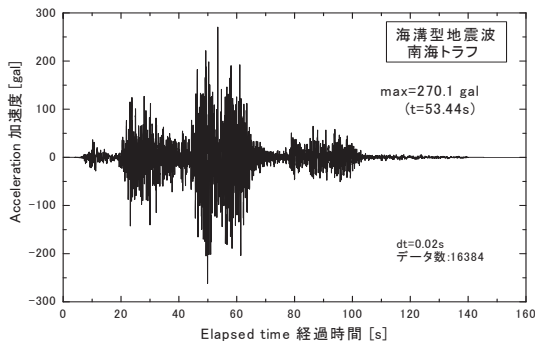
195

## 解析事例

⇒ 動的応答解析 (等価線形法)

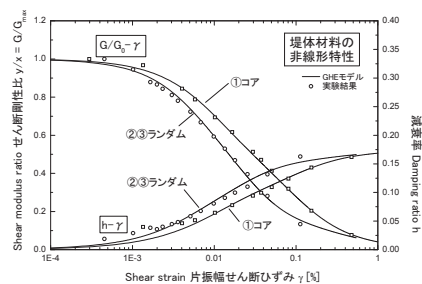


入力地震波



FEM応答解析に用いる物性値 D<sub>c</sub>=95%

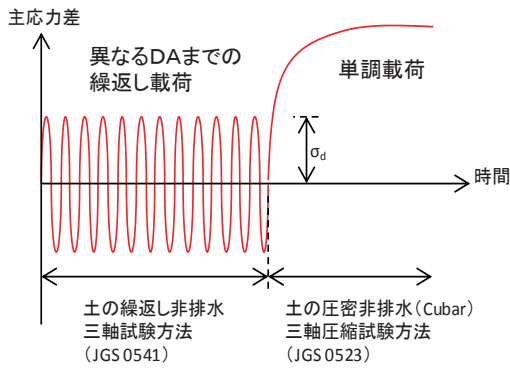
地層名	湿潤重量 $\gamma_i$ [kN/m <sup>3</sup> ]	初期せん断剛性 G <sub>0</sub> [MPa]	減衰係数 h [%]	ポアソン比 $\nu$
コア(飽和)	19.1	150.0	非線形特性参照	0.3
ランダム1(飽和)	19.1	300.0	非線形特性参照	0.3
ランダム2(不飽和)	17.0	300.0	非線形特性参照	0.3
基礎N20(飽和)	17.4	150.0	3.0	0.45
基礎N50(飽和)	17.4	370.0	3.0	0.45



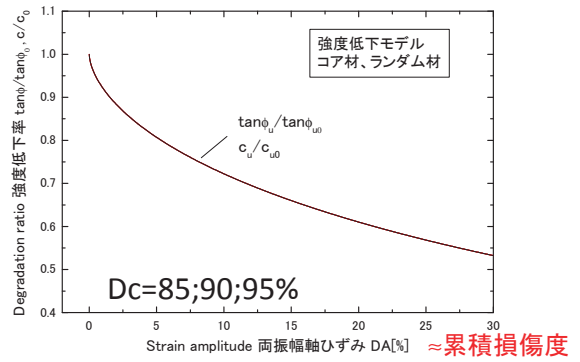
196

解析事例

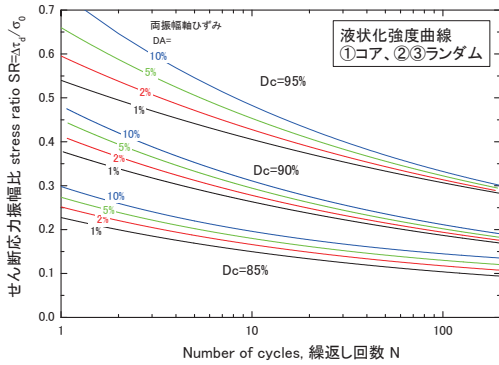
⇒ 非排水繰返し载荷試験から求めた物性値



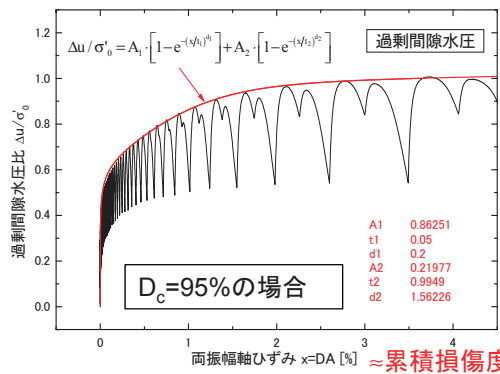
② Newmark-D法に用いる強度低下率



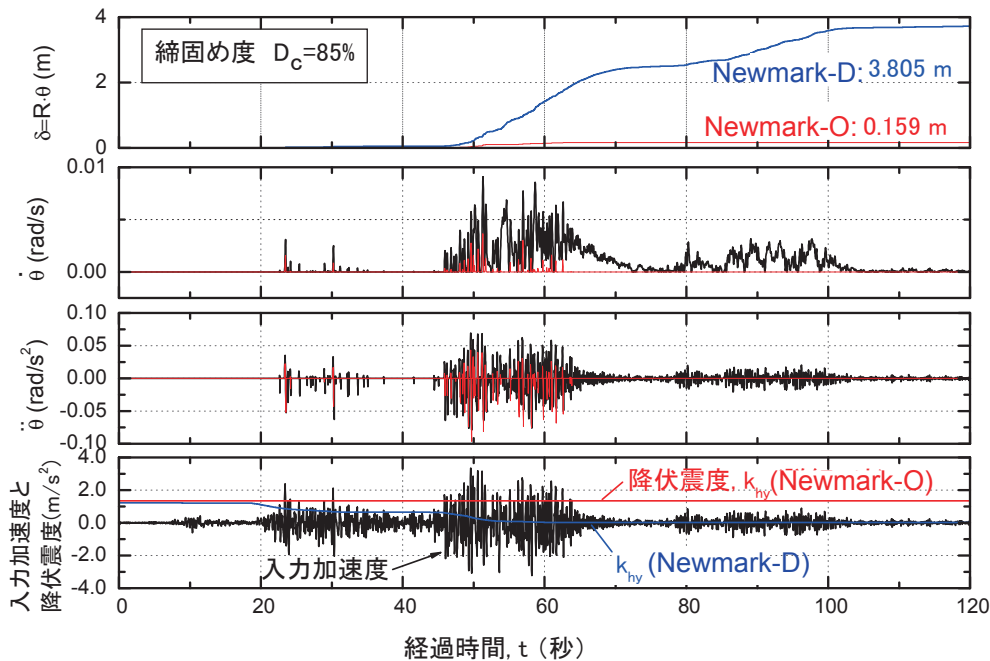
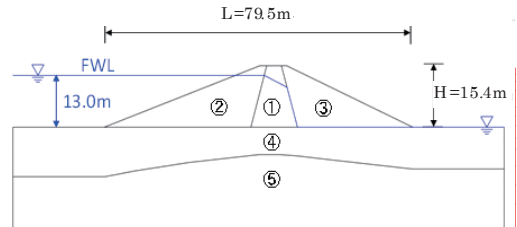
① 繰返し強度曲線



③ Δu法に用いる過剰間隙水圧比 (Δu=各サイクルでの最大値)



Newmark-O法: 一定の排水強度  
 Newmark-D法: 非排水繰返し载荷による強度低下を考慮した非排水強度



## 解析結果

## Newmark-O法

- ・排水強度を用いているため、締固め度が低いほど、すべり変位を著しく過小評価

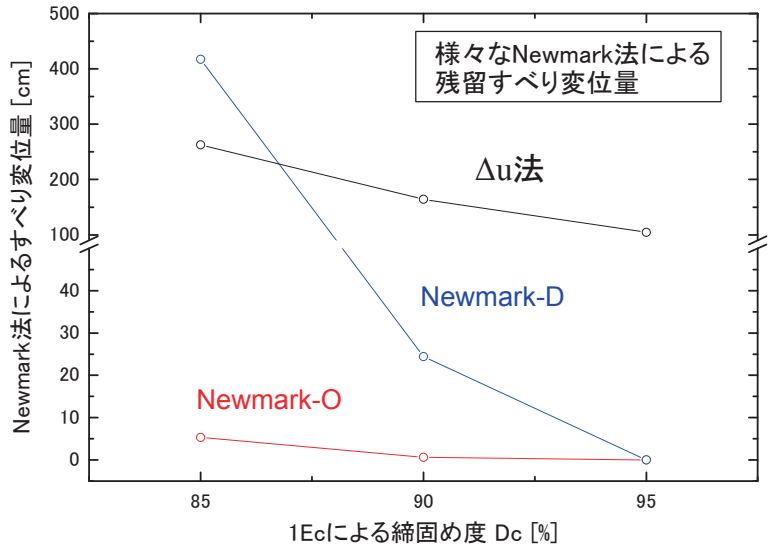
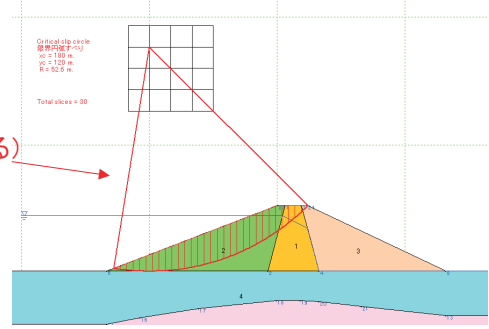
## Newmark-D:

- ・非排水せん断強度
- ・非排水繰返し载荷の影響は、締固め度が低下するほど大  
⇒締固めの効果を正に評価

有効応力法( $\Delta u$ 法)

- ・非排水せん断強度
- ・締固め度が高くなるほど、すべり変位を著しく過大評価  
⇒締固めの効果を評価できない  
(適切な耐震設計が困難になる)

変位量が最大となる円弧すべり  
(ケースによって異なる)



199

## 1. 藤沼ダムの事例

## 2. 円弧すべり安定解析法の理論的基礎と実施に当たっての留意事項

## 2-1. 混乱した現状

## 2-2. 円弧すべり安定解析の基礎

## 2-3. Fellenius法とは

## 2-4. 地下水位・浸潤面と自由水位の考慮

- ・浸透流がない場合
- ・定常浸透流がある場合

## 2-5. 地震力の取り扱い

## 2-6. 異なる設計指針等での排水状態での安全率の式の比較

## 3. Newark-D法と劣化剛性FEMによる盛土の地震時残留変形解析

## 3-1. Newmark法の経緯

3-2. 飽和土の非排水せん断強度の非排水繰返し载荷による劣化を考慮したNewmark-D法による剛体すべり解析

3-3. 飽和土の非排水せん断剛性・強度の非排水繰返し载荷による劣化を考慮した準静的非線形FEMによる残留変形解析

200

# 飽和した領域を持つ盛土の地震時残留変位・変形 =

①すべり土塊と支持土塊は剛体であるとしたすべり

+

②剛体すべり以外の連続体的残留変形  
(準静的\*非線形FEM解析による)

準静的FEM解析は、自重と地震荷重を考慮した静的FEM解析を意味する

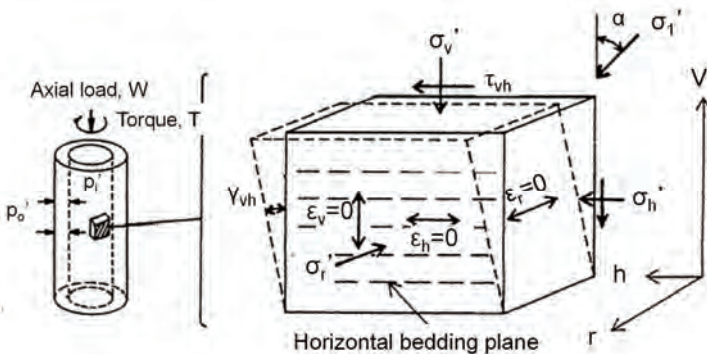
201

## 中空ねじりせん断試験による飽和豊浦砂の地震波による不規則繰返し荷重を用いた単純せん断条件での非排水繰返し載荷

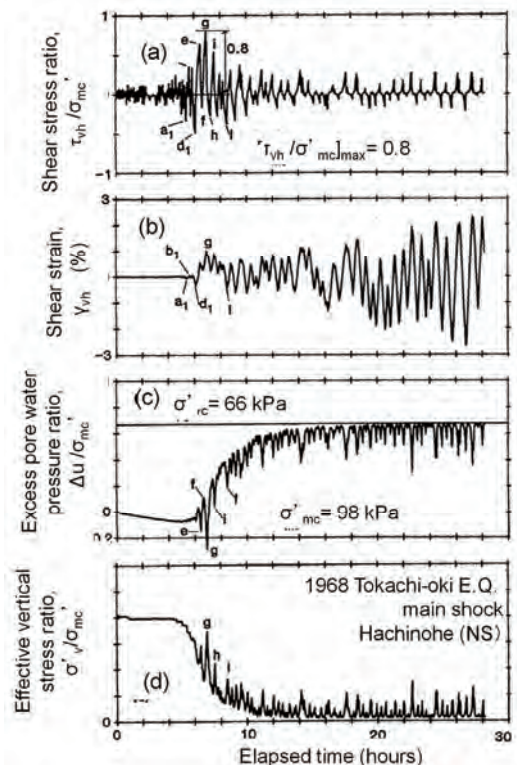
実際の地震動荷重： 応力制御

密詰め

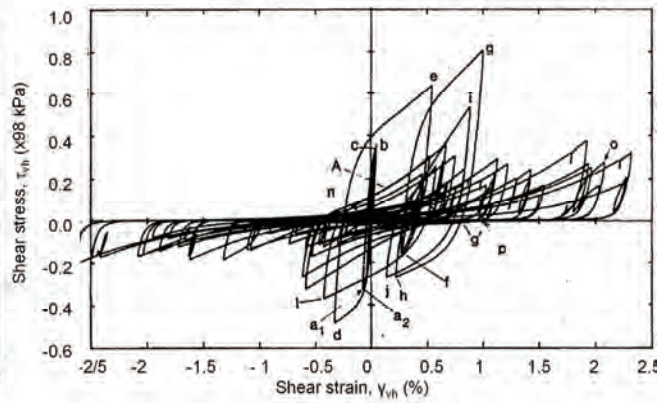
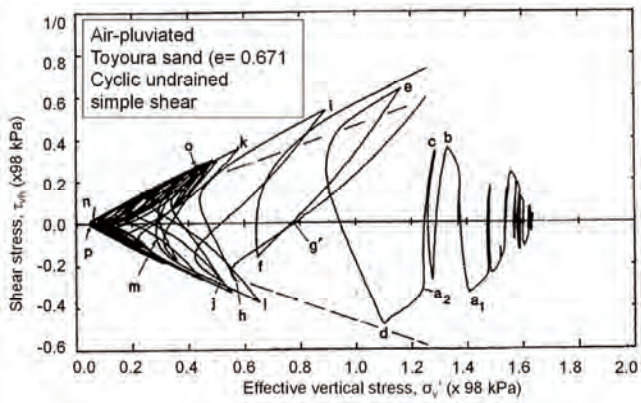
この実験： 測定精度を確保するために  
ひずみ速度一定



Pradhan, Tej B.S., Tatsuoka, F. and Sato, Y. (1988), "Undrained stress strain behavior of sand subjected to earthquake wave loading", *Proc. of the 9<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Vol.3, pp.267-272.

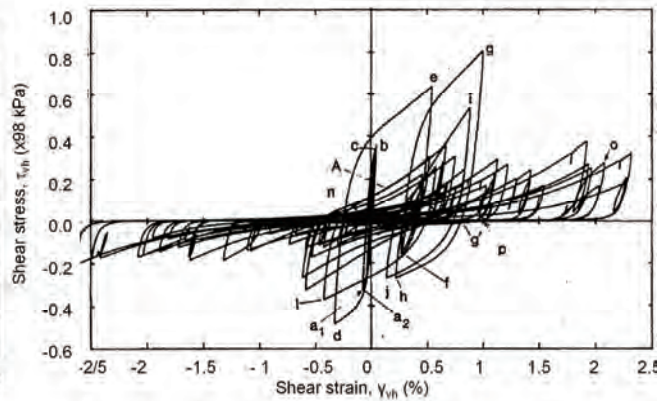
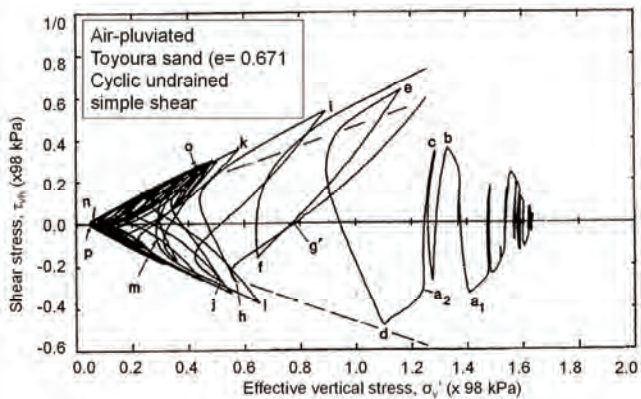




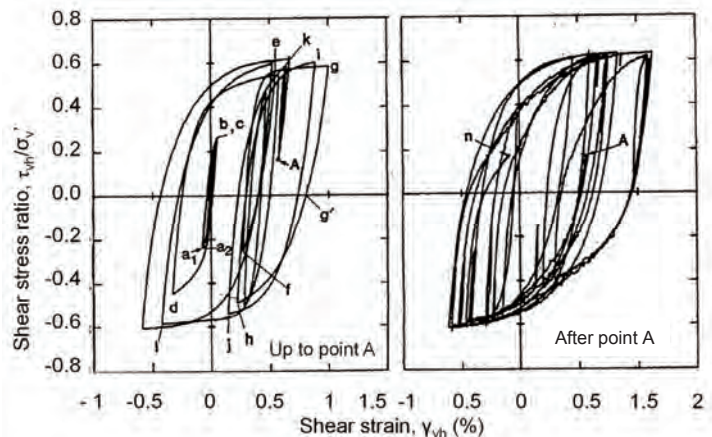


非常に複雑な  $\tau_{vh} - \gamma_{vh}$  関係！  
直接構成モデルで再現するのは困難

203



非常に複雑な  $\tau_{vh} - \gamma_{vh}$  関係！  
 $\Rightarrow \tau_{vh}/\sigma'_v - \gamma_{vh}$  関係は、非常に明快な弾塑性特性を示す  
 $\Rightarrow \tau_{vh}/\sigma'_v$  が従前の最大値を超えたら明確な降伏が開始し、現在のピーク応力状態でのひずみ  $\gamma_{vh}$  は、従前の繰返し载荷履歴に関係なくなる



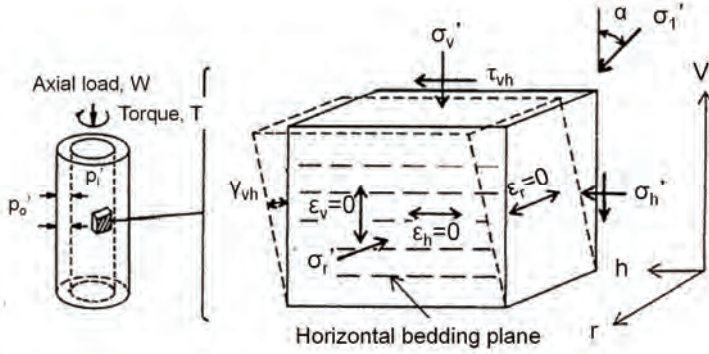
204

# 中空ねじりせん断試験による飽和豊浦砂の地震波による不規則繰返し荷重を用いた単純せん断条件での非排水繰返し載荷

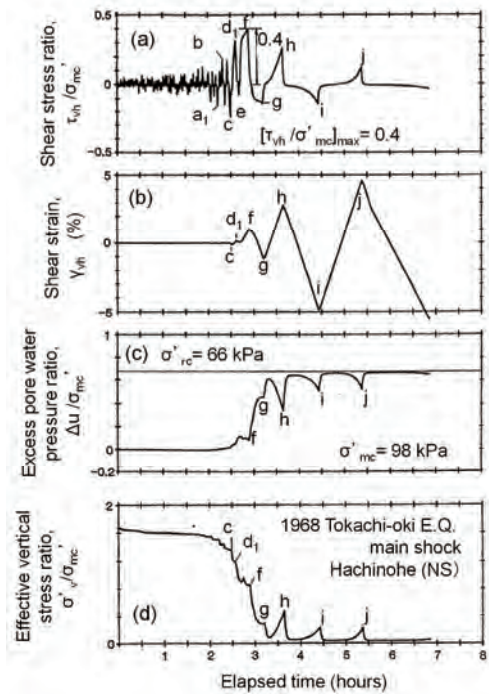
実際の地震動荷重： 応力制御

この実験： 測定精度を確保するために

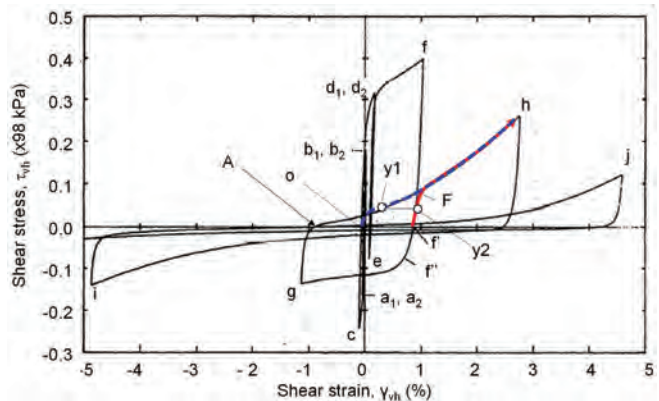
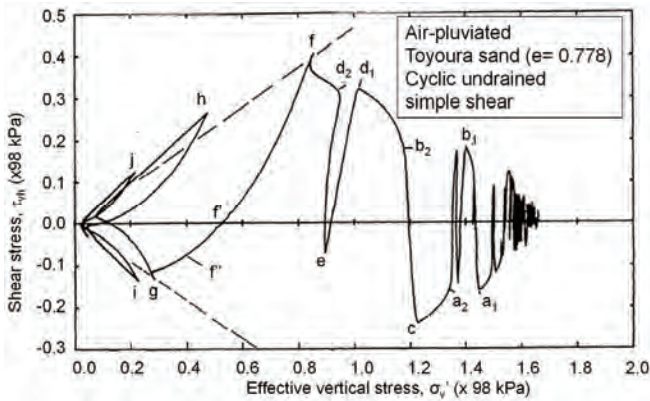
ひずみ速度一定



緩詰め

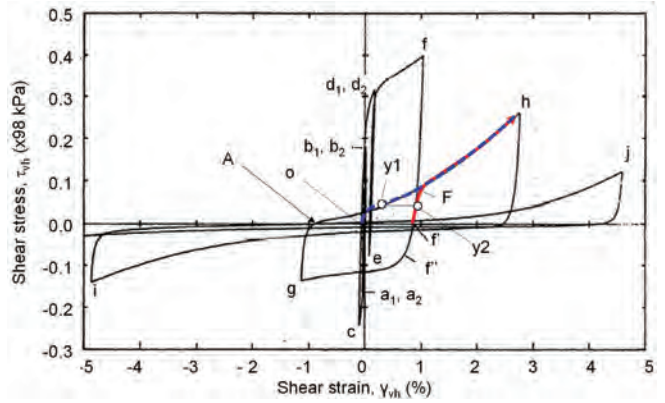
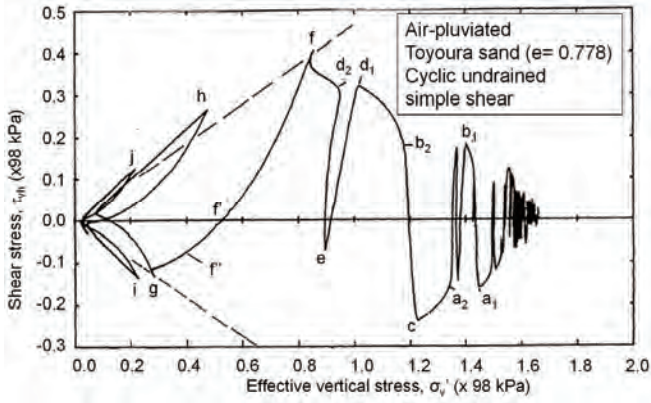


Pradhan, Tej B.S., Tatsuoka, F. and Sato, Y. (1988), "Undrained stress strain behavior of sand subjected to earthquake wave loading", *Proc. of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol.3, pp.267-272.



非常に複雑な  $\tau_{vh} - \gamma_{vh}$  関係！  
直接構成モデルで再現するのは困難

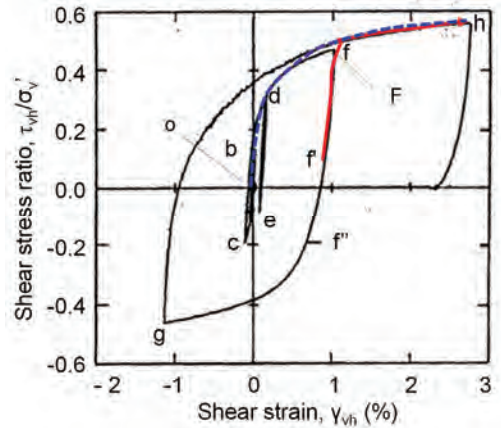




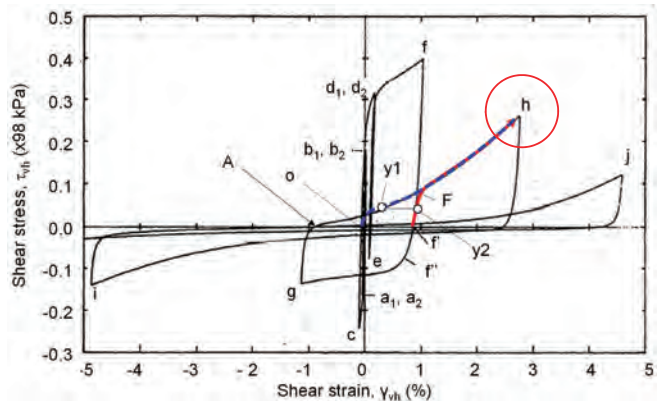
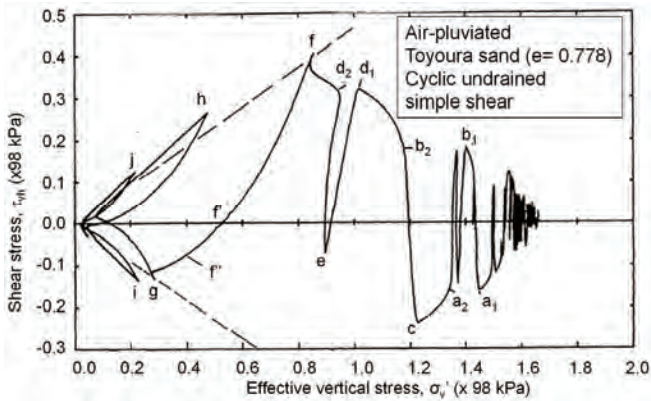
非常に複雑な  $\tau_{vh} - \gamma_{vh}$  関係！

⇒  $\tau_{vh}/\sigma'_v - \gamma_{vh}$  関係は、非常に明快な弾塑性特性を示す

⇒  $\tau_{vh}/\sigma'_v$  が従前の最大値を超えたら明確な降伏が開始し、現在のピーク応力状態 (例、point h) でのひずみ  $\gamma_{vh}$  は、降伏前の载荷履歴  $f' \rightarrow y2 \rightarrow F$ 、および、それまでの繰返し载荷履歴に関係なくなる

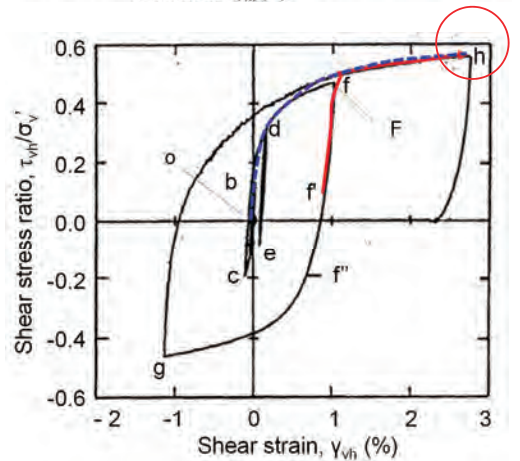


207

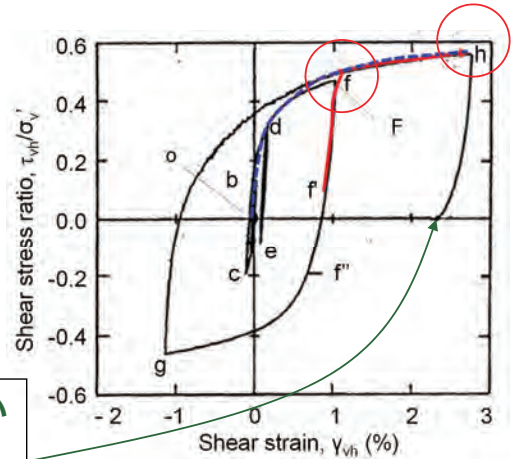
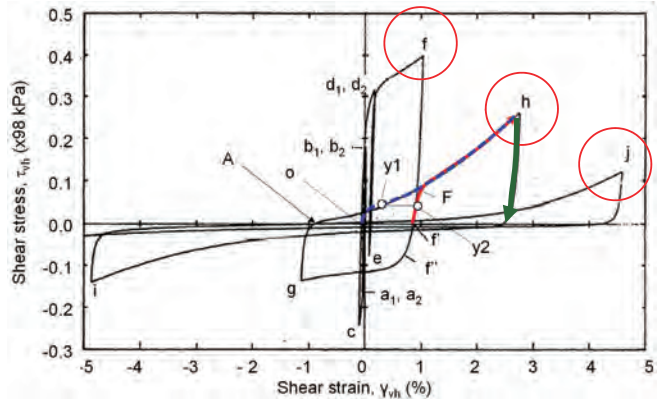
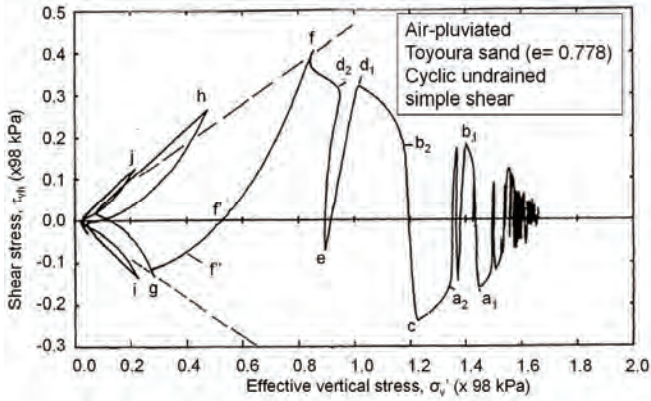


⇒ 現在 (例えば point h) のひずみ  $\gamma_{vh}$  は、降伏前の载荷履歴  $f' \rightarrow y2 \rightarrow F$ 、および、それまでの繰返し载荷履歴に関係なくなる

⇒ 現在 (例えば point h) のひずみ  $\gamma_{vh}$  は、原点からの単調载荷での  $\tau_{vh} - \gamma_{vh}$  関係  $o \rightarrow y1 \rightarrow F \rightarrow h$  に現在の  $\tau_{vh}$  の値を代入すれば求まる

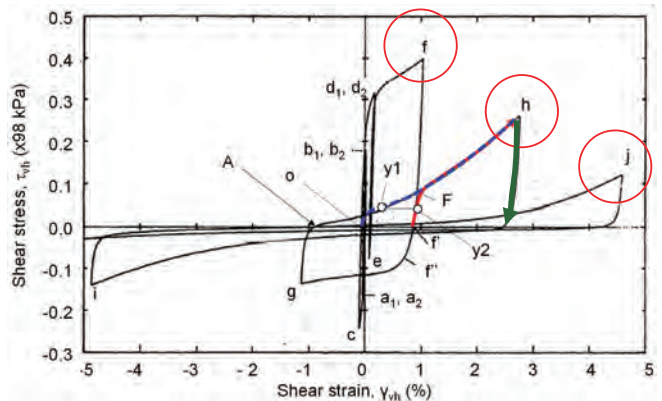
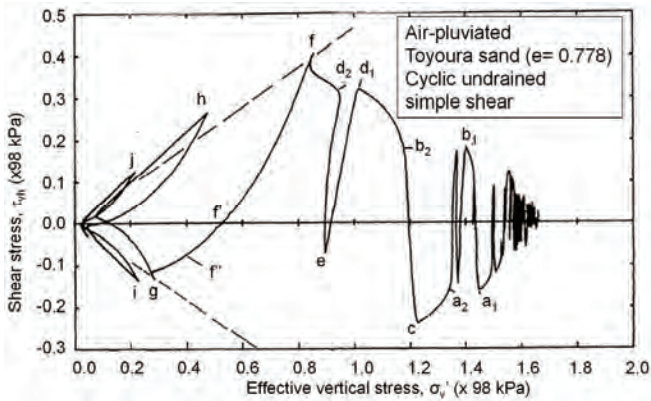


208

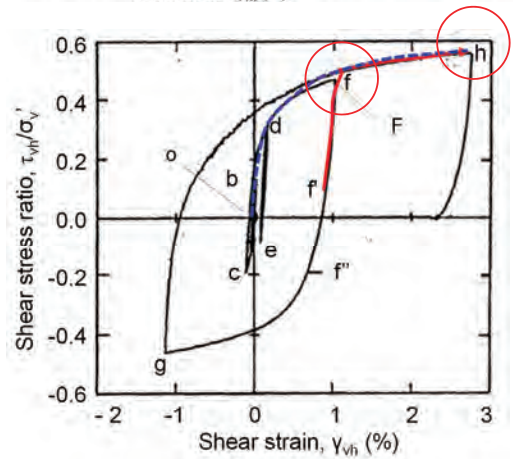


降伏後に発揮された $\tau_{vh}/\sigma'_v$  がピークになっている点でのひずみ $\gamma_{vh}$ は、除荷後の残留ひずみと見なして良い

209



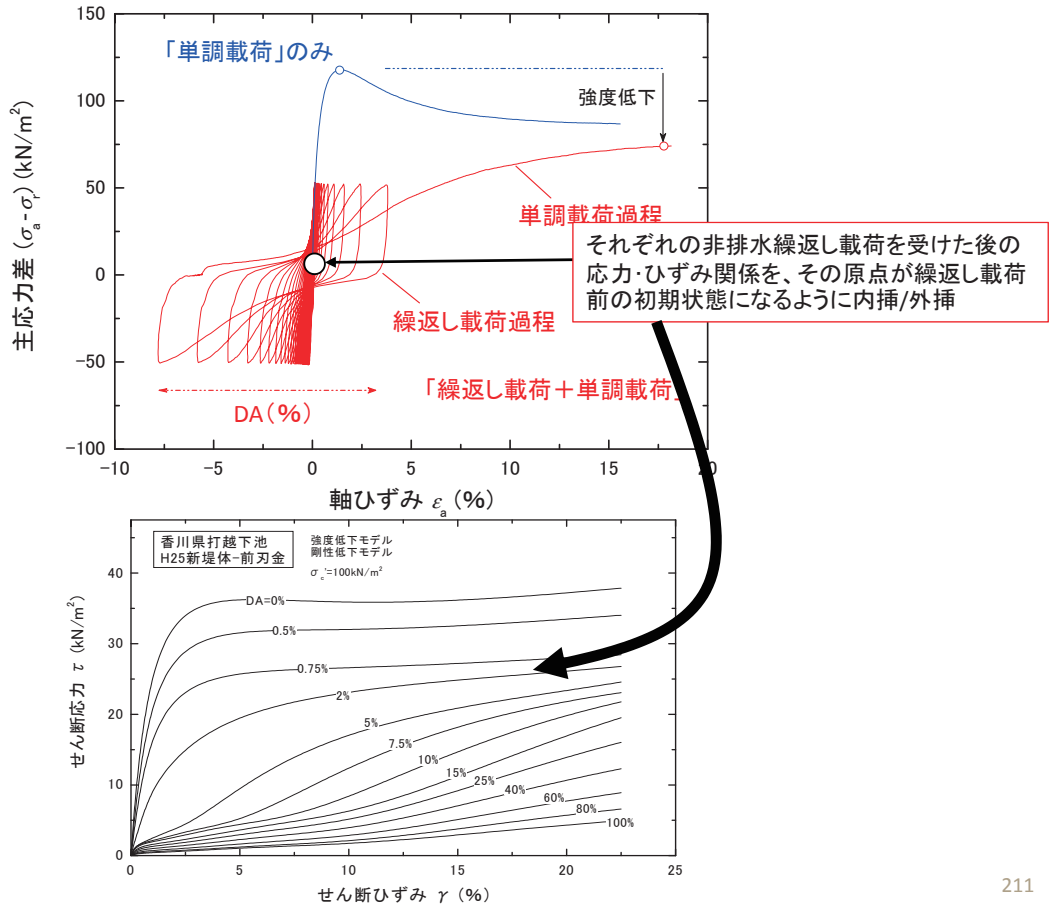
- 仮に、地震荷重によるせん断応力 $\tau_{vh}$ の時刻歴が求まっていれば、それぞれのピーク応力状態の土構造物の変形は、非排水繰返し载荷によって劣化してゆく「それぞれの原点oから単調载荷による $\tau_{vh} - \gamma_{vh}$ 関係」を用いた一連の準静的非線形FEM解析によって求まる
- 全応力法の非線形FEM解析で得られた $\tau_{vh}$ の時刻歴は、通常は設計では安全側：ある程度規模以上の土構造物の初期固有周期は、通常地震動の卓越固有周期よりも長いから



210



非排水繰返し载荷によって劣化してゆく応力～ひずみ関係を求めた例



211

劣化してゆく応力～ひずみ関係を用いるFEM解析と実挙動の関係

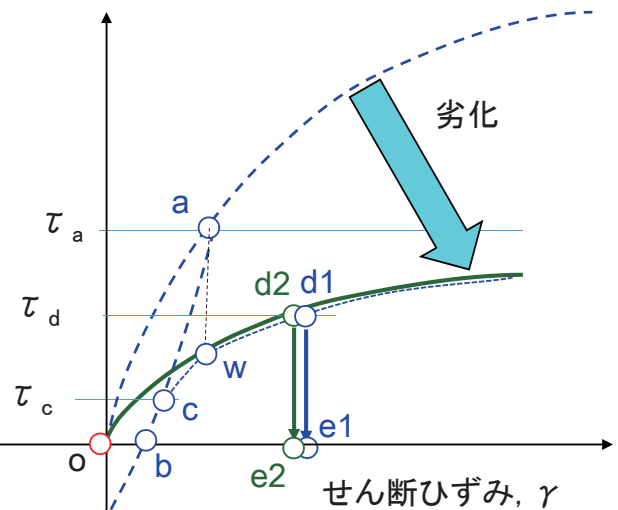
$\tau$  がゼロ  $\rightarrow \tau_a \rightarrow$  ゼロ  $\rightarrow \tau_c \rightarrow \tau_d \rightarrow$  ゼロと変化したとする。

実挙動:  $o \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow w \rightarrow d1 \rightarrow e1$   
劣化応力～ひずみ関係を用いた準静的非線形FEM:  $o \rightarrow w \rightarrow d2$

点d1とd2でひずみは同一になり、 $\tau$  がゼロになっても残留すると仮定

弾塑性体ならば、現在のd点でのひずみよりも小さいひずみレベルでの繰返し载荷  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow w$  の影響は消滅することから、この仮定は合理的

せん断応力,  $\tau$



注) 応力～ひずみ関係  $b \rightarrow w \rightarrow d1$  は、 $\gamma$  が点aでの値に達する点wで、劣化応力～ひずみ関係  $o \rightarrow w \rightarrow d2$  に復帰すると見なす。



劣化してゆく応力～ひずみ関係を用いるFEM解析と実挙動の関係

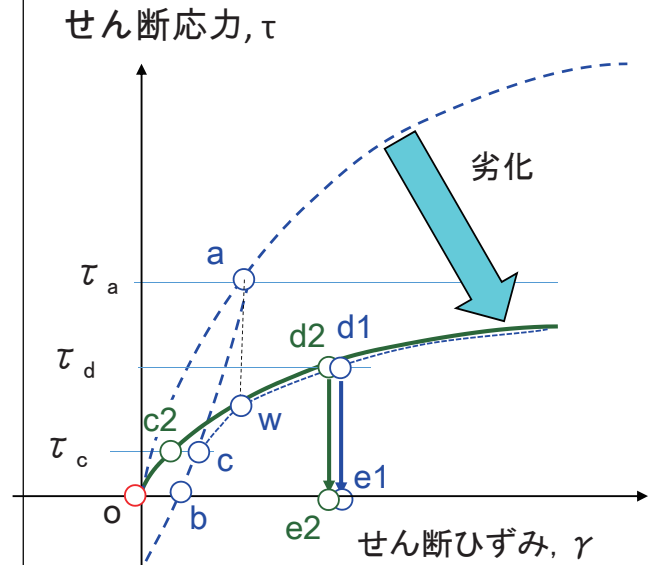
$\tau$  がゼロ  $\rightarrow \tau_a \rightarrow$  ゼロ  $\rightarrow \tau_c$  と変化したとする。

実挙動:  $o \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c$

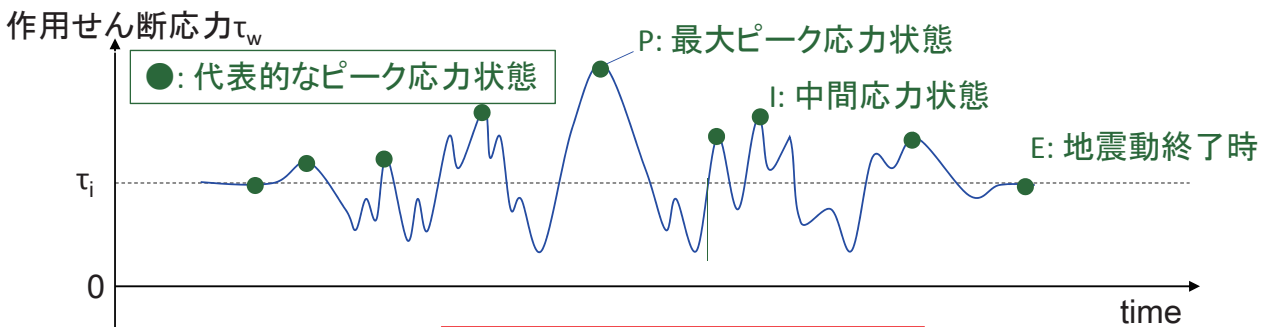
劣化応力～ひずみ関係を用いた準静的非線形FEM:  $o \rightarrow c2$

点c2でのひずみは、実際の点cでのひずみより小さい。

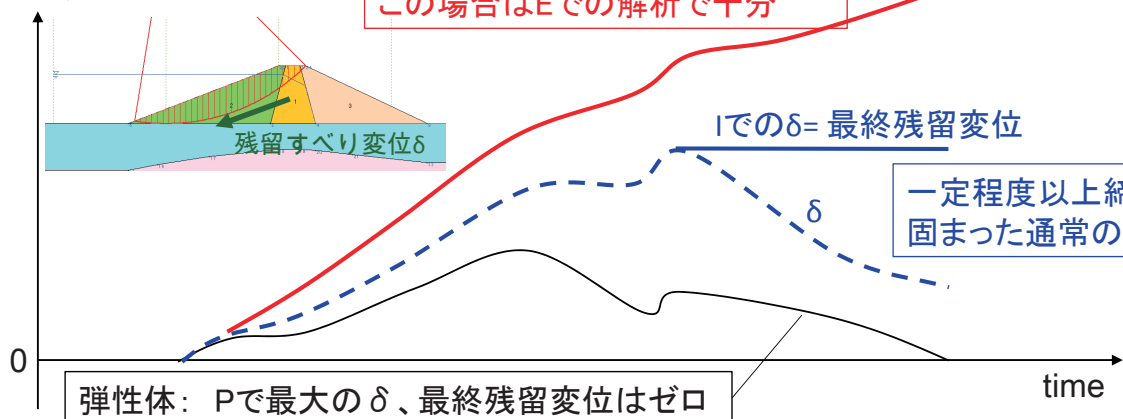
点c2でのひずみが点aでのひずみ(すなわち点wでのひずみ)よりも小さい場合は、その時の最大残留ひずみは点aでのひずみである。従って、準静的FEM解析による点c2での変形は意味を持たない。



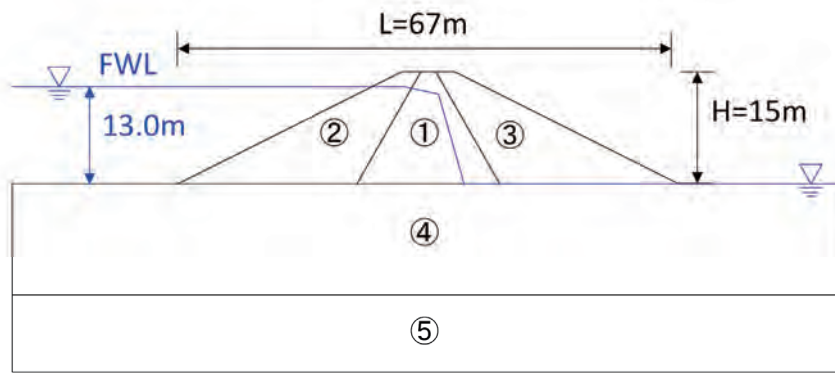
非排水繰返し载荷によって劣化してゆく応力～ひずみ関係を用いる準静的非線形FEM解析による残留変形



ピーク応力状態でのすべり変位  $\delta$



解析事例

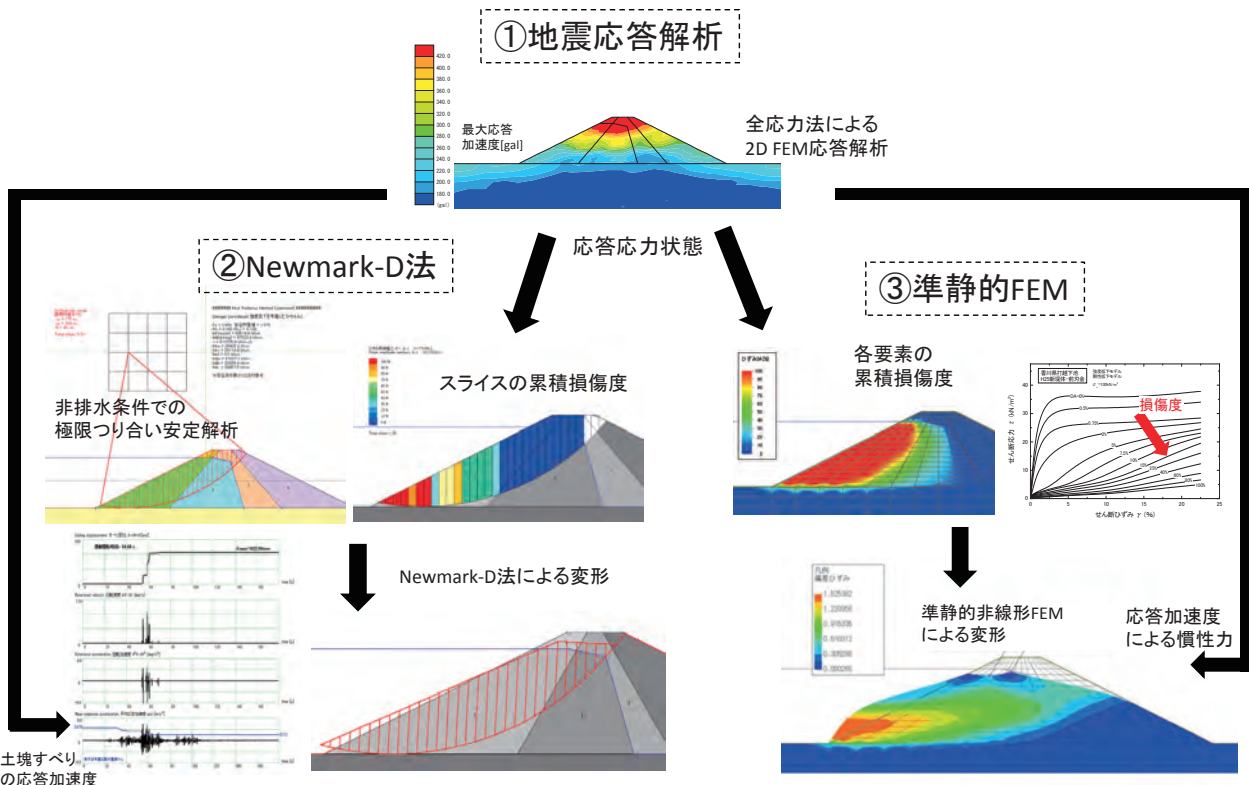


	地層	Dc (%)	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$C_{u0}$ (kPa)	$\Phi_{u0}$ (°)	$G_0$ (MPa)	Poisson v	間隙率 n
① ② ③	コア・ランダム	95	18.2	19.8	45	20	60	0.3	0.402
		90	17.2	19.2	15	25	52.5	0.3	0.433
		85	16.3	18.7	4	32	42.5	0.3	0.465
④	地盤 (N値20)	--	21.0	21.0	37	31.5	120	0.45	--
⑤	地盤 (N値50)	--	21.0	21.0	37	31.5	180	0.45	--

⇒ 単純化した新設ダムの例（断面は福島県藤沼ダム副堤、堤体材料は銚田砂\*）

\*上野ら(2014): 飽和度の非排水繰返し載荷による強度低下率に対する締固め度の影響、第49回地盤工学研究発表会、北九州、1395-1396、215  
龍岡ら(2015): 第27回盛土の地震時残留すべり計算⑦、基礎工2015.09、79-83

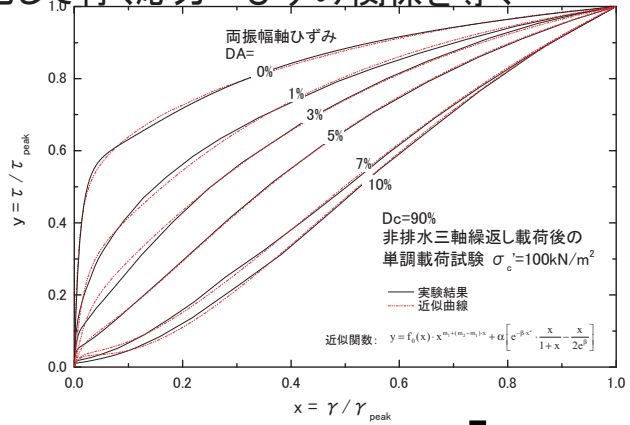
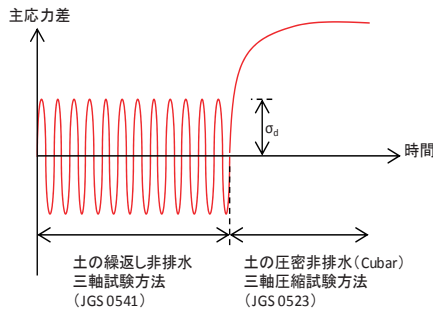
- ①地震応答解析（非線形性を考慮した等価線形法、地震中に劣化しない等価剛性）
- ②Newmark-D法解析（地震中に劣化するせん断強度に基づく）
- ③準静的非線形FEM解析（地震中に劣化する非線形応力～ひずみ関係に基づく）



③ 準静的非線形FEM:

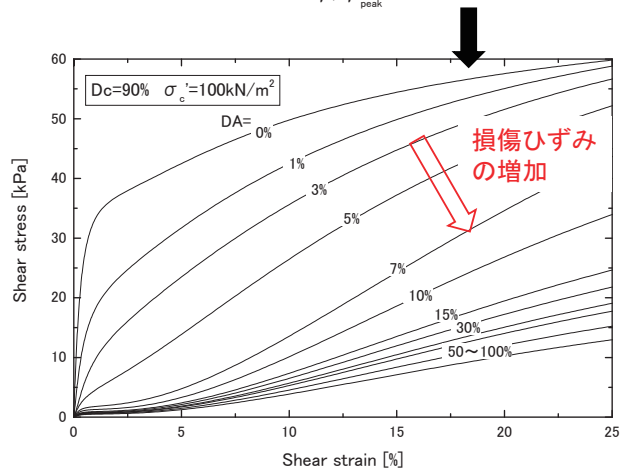
非排水繰返し载荷によって劣化して行く応力~ひずみ関係を導く

- ・非排水繰返し载荷後の非排水三軸圧縮 (Newmark法解析のために実施済)

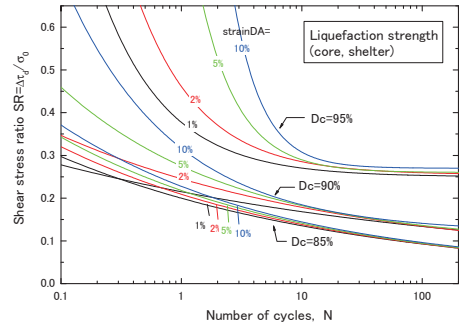
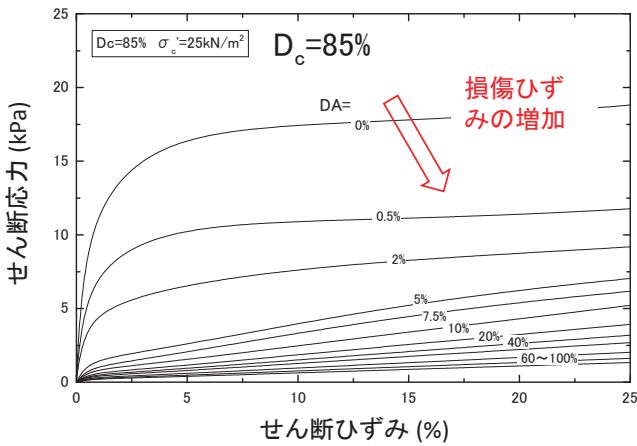


$$y = f_0(x) \cdot x^{m_1 + (m_2 - m_1) \cdot x} + a \left[ e^{-b \cdot x^c} \cdot \frac{x}{1+x} - \frac{x}{2e^b} \right]$$

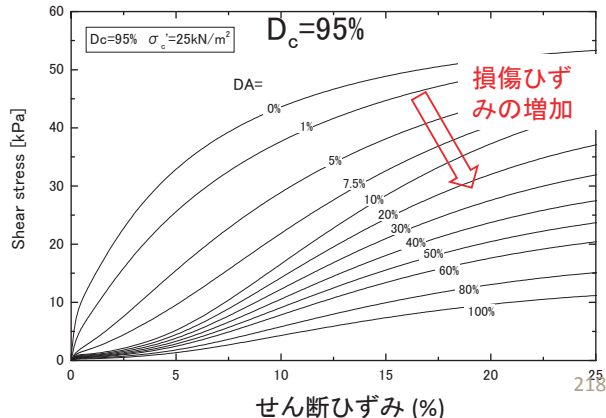
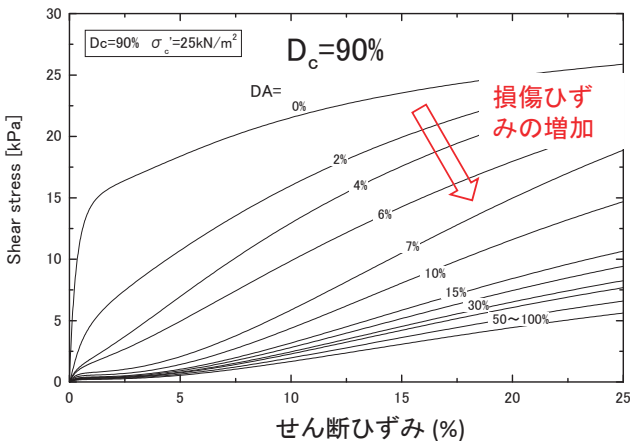
- ・  $y = \tau / \tau_{peak}$ ,  $x = \gamma / \gamma_{peak}$ : 正規化された応力とひずみ
- ・  $f_0(x)$ : 基本となる一般双曲線法による  $DA = 0$  の時の  $y - x$  関係
- ・  $\tau_{peak}$ : Newmark D法による値と同じ



異なる締固め度での劣化応力・ひずみ関係の例

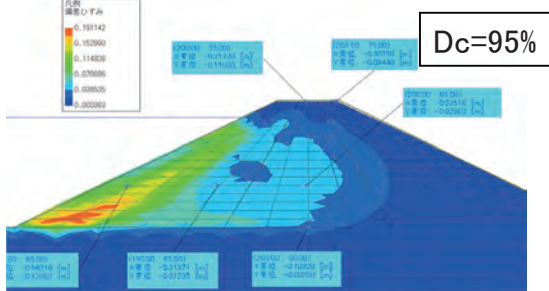
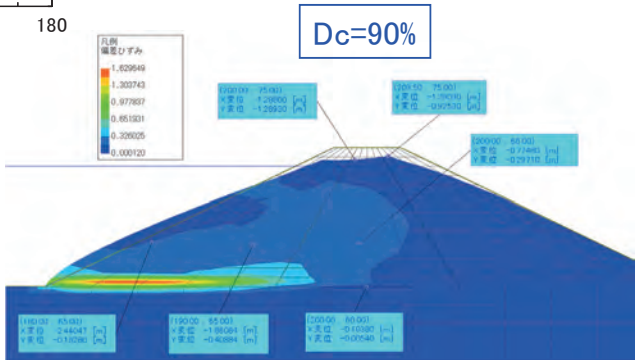
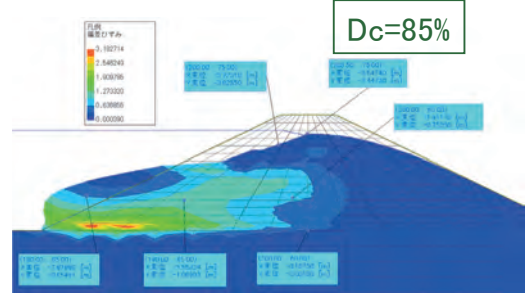
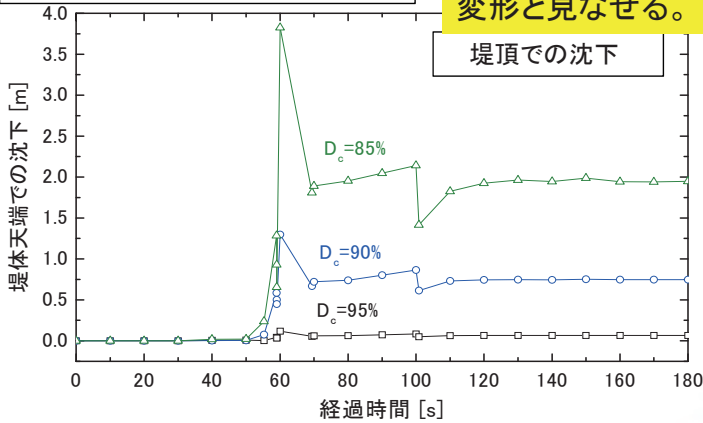


$D_c$  が大きいほど、初期非排水強度・剛性は大きく  $DA$  は小さいので、非排水繰返し载荷後も高い強度・剛性を維持



準静的非線形FEM:  
解析結果

土の変形特性は弾塑性的なので、等価線形化法で求めた地震荷重履歴の途中に生じた最大変形は最終的な残留変形と見なせる。



⇒ Newmark-D法と同様に締固め度が高くなると残留沈下が急速に減少

⇒ また、地震荷重による慣性力の残留変形に対する影響は大きく、無視できない

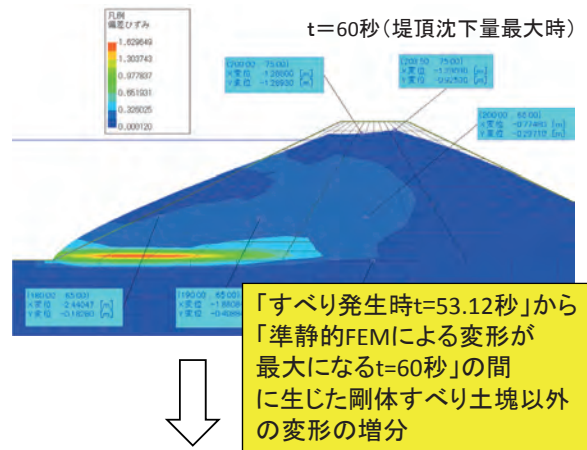
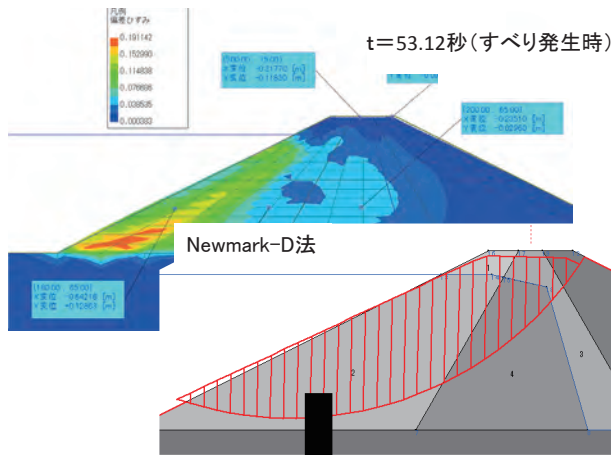
119

Dc=90%

剛体すべり変形とすべりを伴わない変形の合算

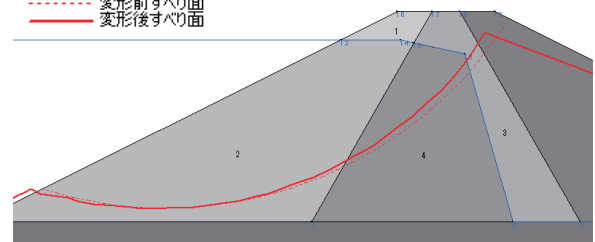
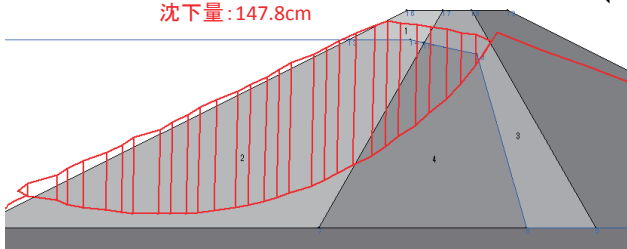
①剛体すべり(最終値): NewmarkD法 + すべり開始時までの全体での残留変形: 準静的FEM

②すべり発生後のすべり土塊を剛体とした最大残留変形: 準静的FEM



変形①と②の最終合算

沈下量: 147.8cm

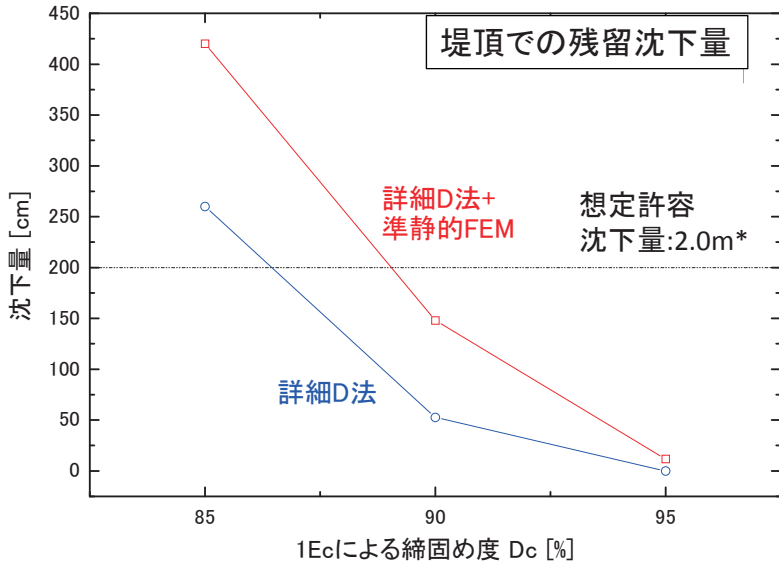
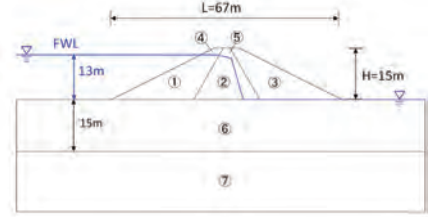


220

## 詳細ニューマークD法と準静的非線形FEMによる解析結果

同じ枠組み(累積損傷理論)で定式化した非排水繰返し  
し荷による剛性・強度の低下を考慮したNewmark-D  
法と準静的非線形FEMによる変位・変形の合算

● 締固めの影響は非常に大きい



\* 堤頂高さと常時満水位との差

Duttine et. al., (2016) : 非排水繰返し荷による土の剛性・強度の劣化を考慮したNewmark法と準静的FEMによる盛土の残留変形解析、第51回地盤工学研究発表会、岡山

### 藤沼ダムの解析

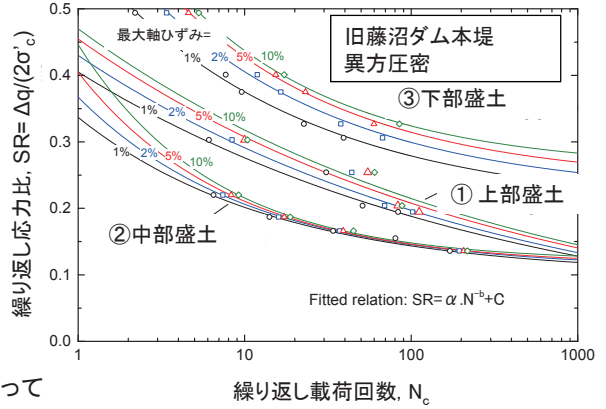
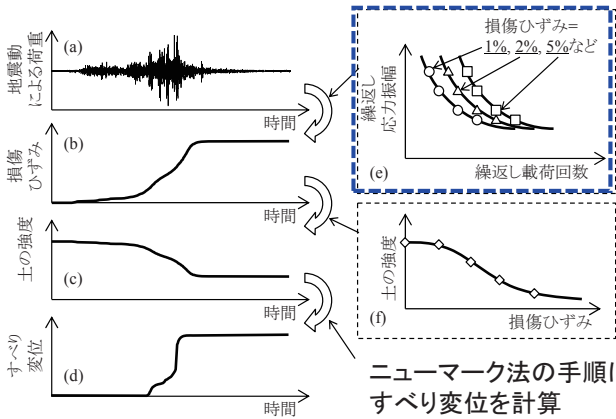
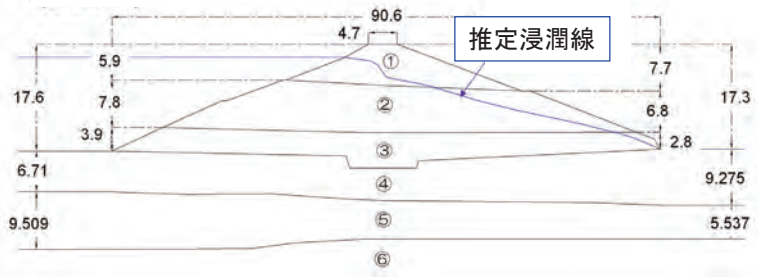
#### 崩壊した本堤の解析

#### 復旧のための設計段階の解析



# 旧藤沼ダム本堤の解析 Newmark-D法と 準静的非線形FEM

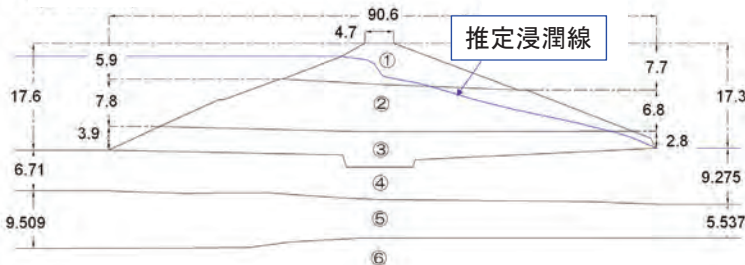
(単位: m)



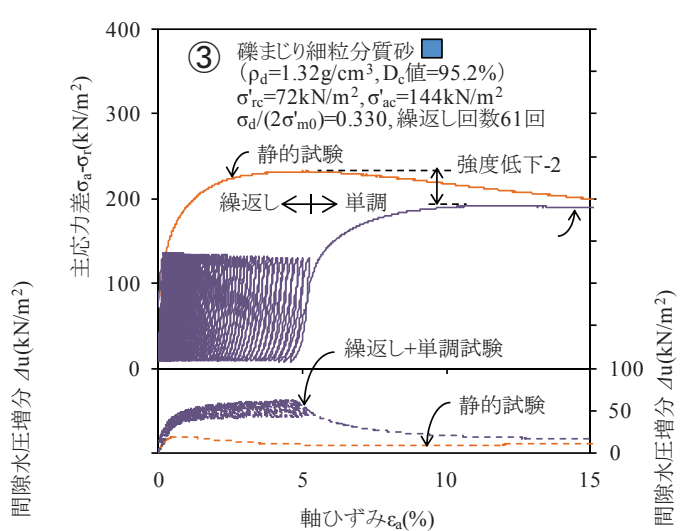
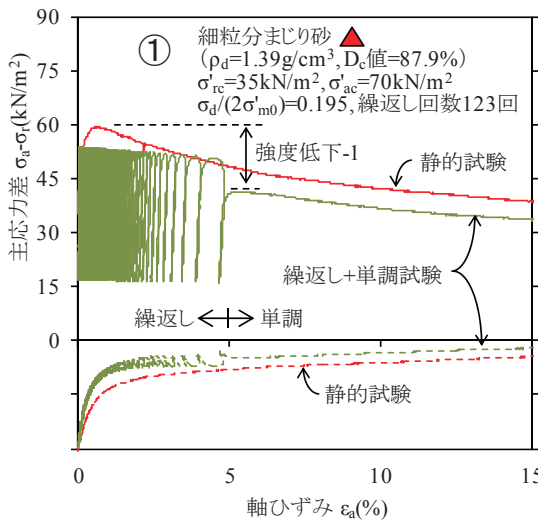
上野和広, 毛利栄征, 田中忠次, 龍岡文夫(2013): ため池堤体土の非排水繰返し荷の伴う強度低下特性, 第48回地盤工学研究発表会, 富山.  
上野和広, 毛利栄征, 田中忠次, 龍岡文夫(2014): 飽和土の非排水繰返し荷による強度低下に対する締固め度の影響, 第49回地盤工学研究発表会, 北九州.

223

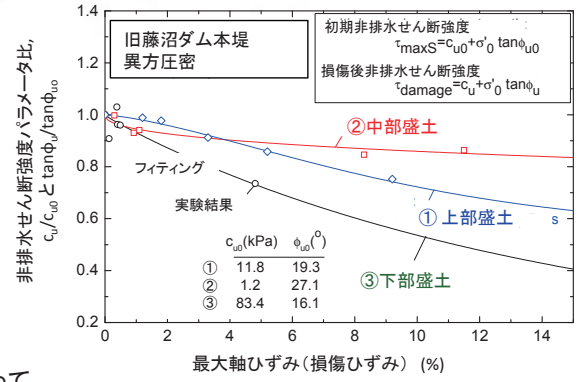
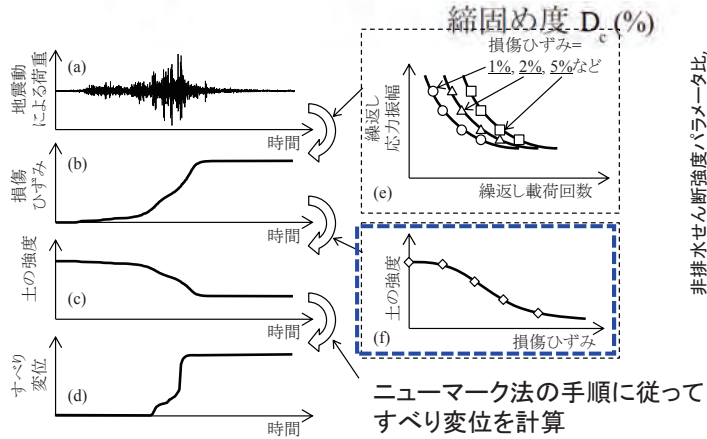
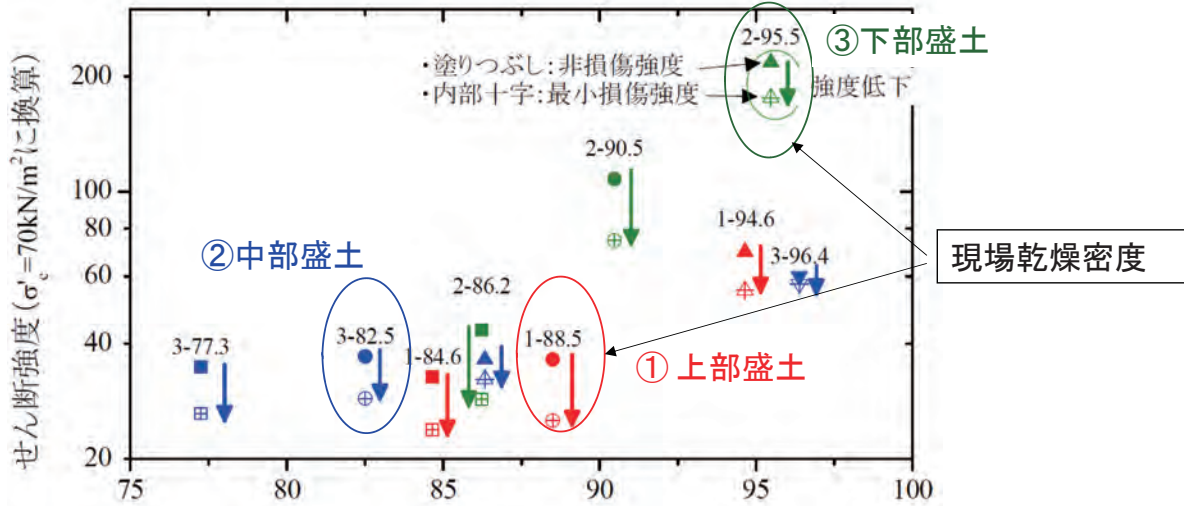
(単位: m)



## 非排水繰返し荷による非排水せん断強度の低下の実験例

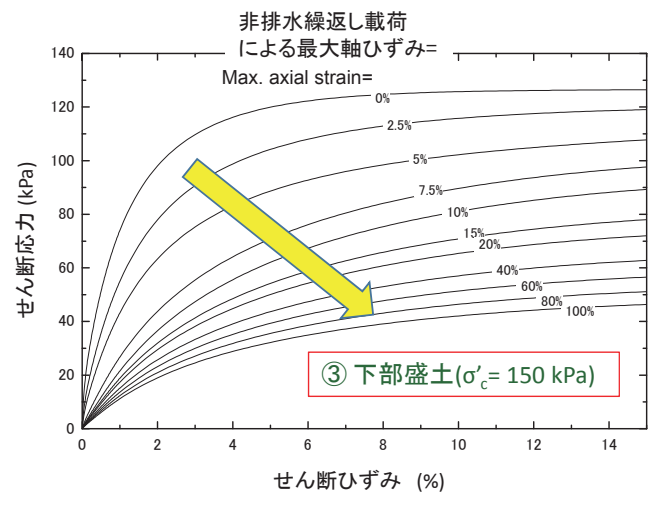
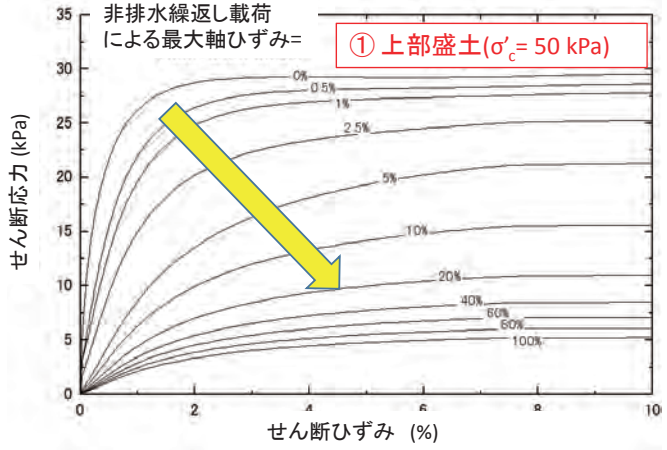


224

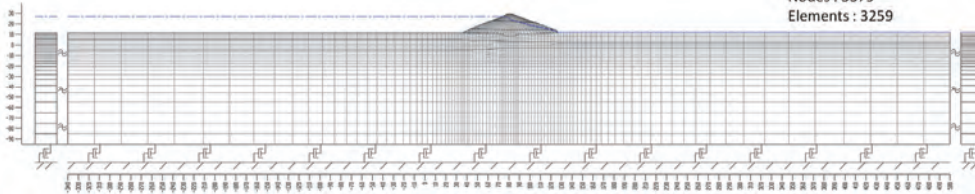
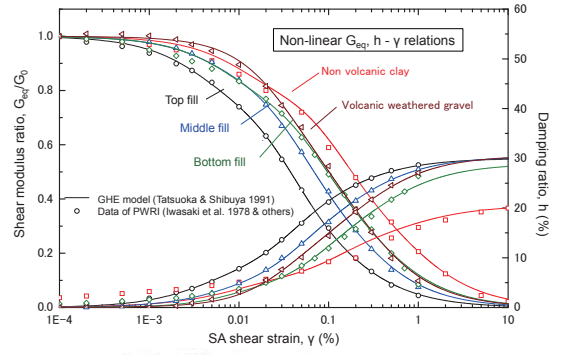
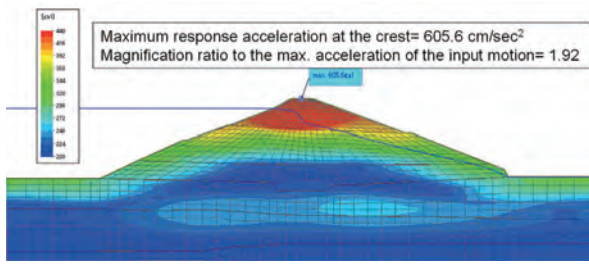


### 旧藤沼ダム堤体材料の非排水せん断強度:

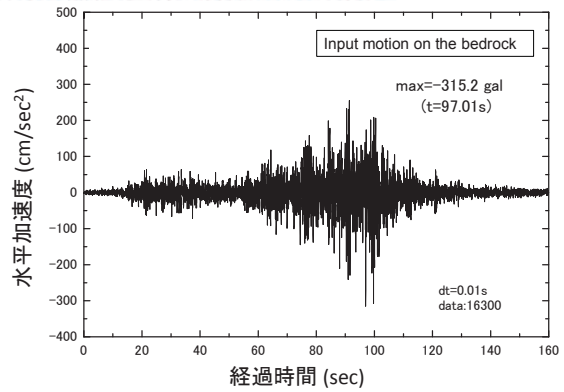
非排水繰返し載荷による劣化してゆく応力~ひずみ関係  
→ 準静的非線形FEMによる剛体すべり変位を含まない残留変形の算定に用いる



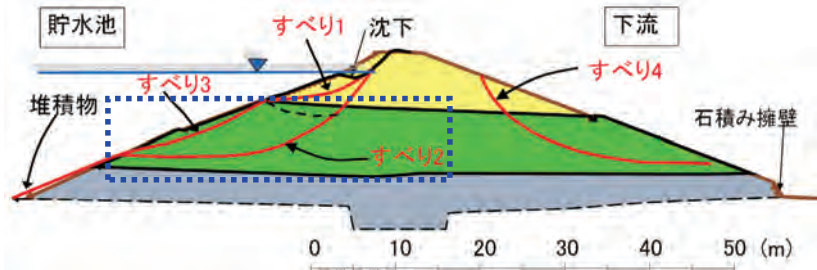
## 旧藤沼ダム等価線形FEM応答解析



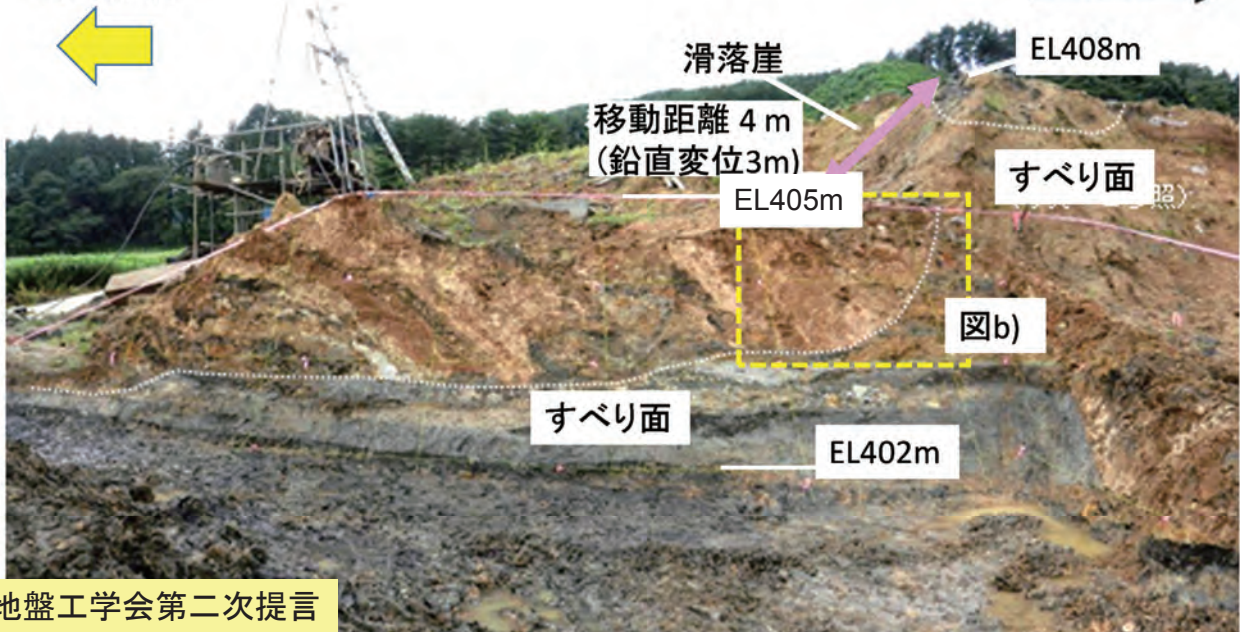
2011年東日本大震災時に藤沼ダム北東3 kmの長沼で観測された地表水平加速度記録を基盤入力に変換  
●レベル2設計地震動と見なす



## 明瞭な円弧すべり破壊



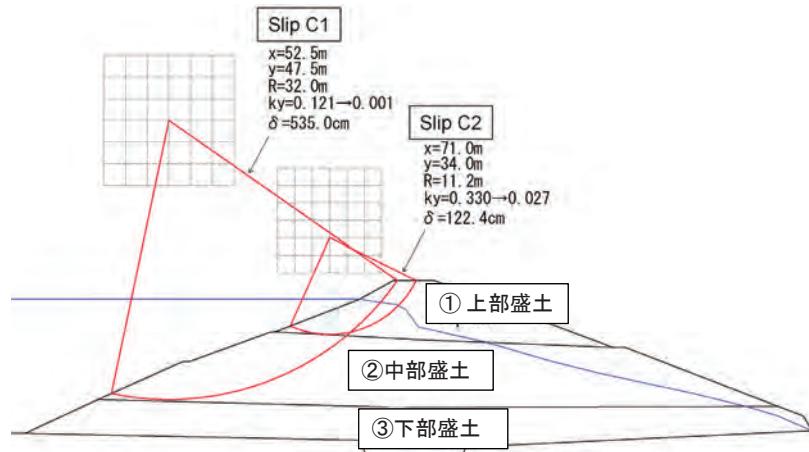
貯水池側



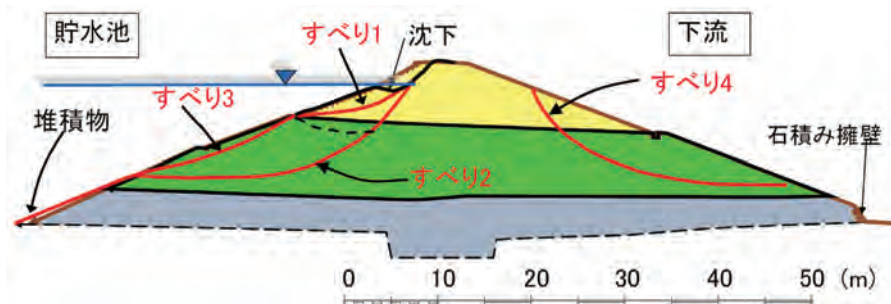
地盤工学会第二次提言



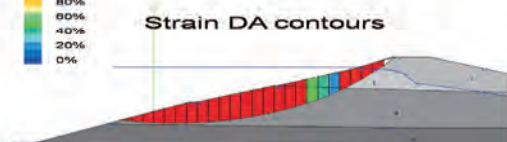
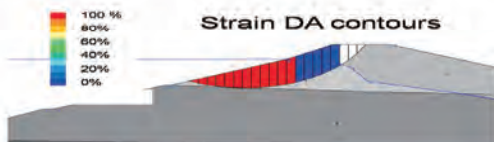
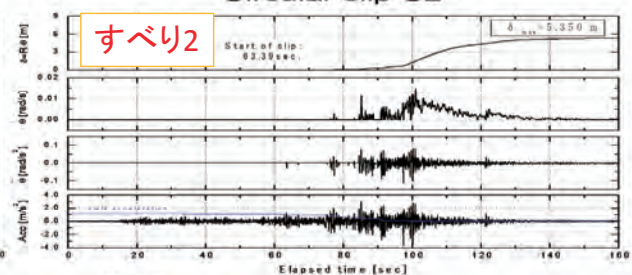
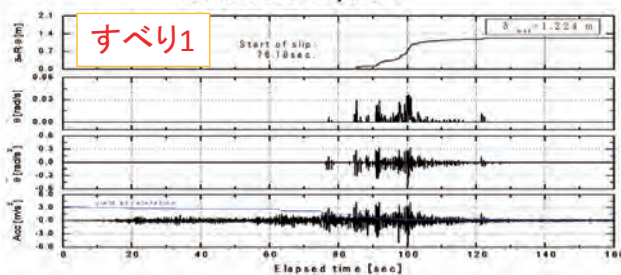
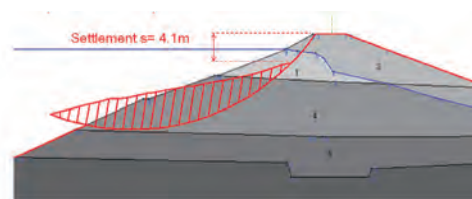
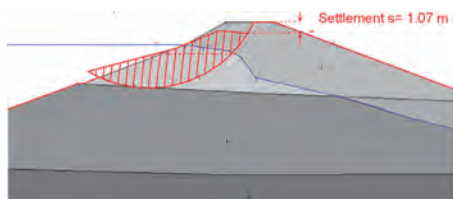
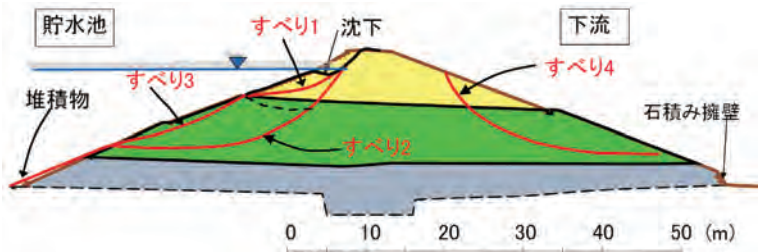
旧藤沼ダム本堤：等価線形FEM応答解析によって得られた地震時応力に基づく円弧滑り安定解析による二つの臨界すべり面 →実際のすべり面に類似



実際のすべり面

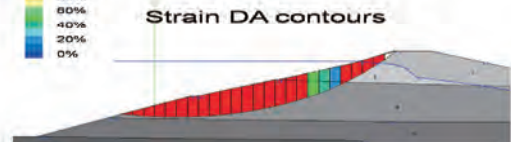
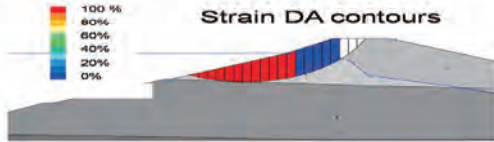
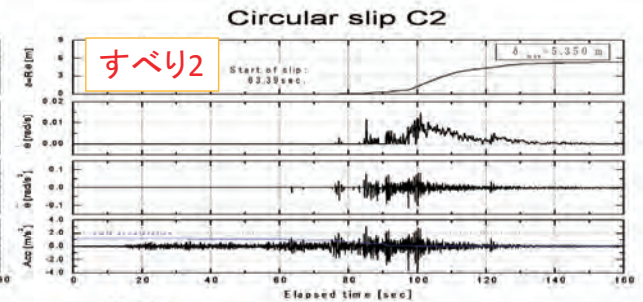
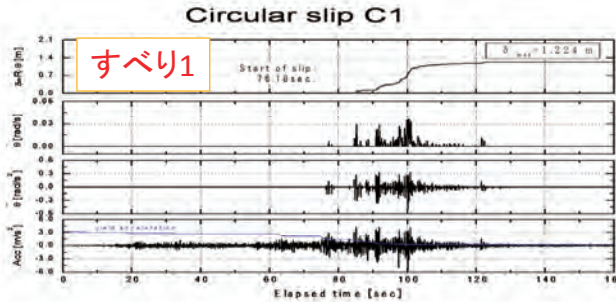
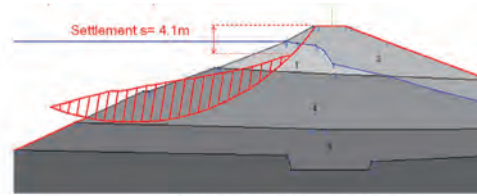
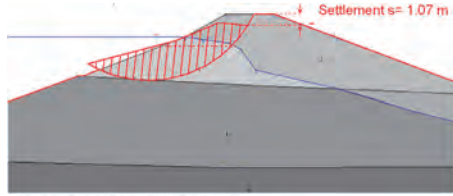
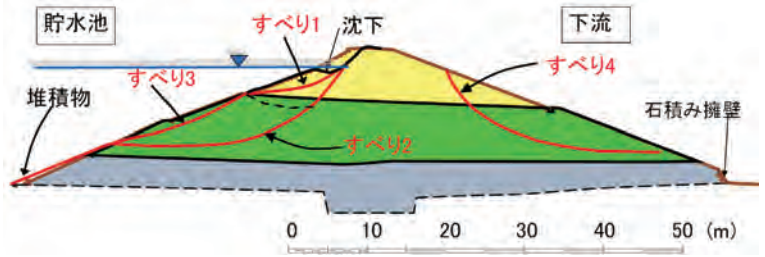


- 非排水繰返し载荷による劣化のために最大加速度時(t=97.01秒)の後ですべりは継続
- 最終的な天端沈下量 (5.35 m と 1.224 m): 非常に大きい

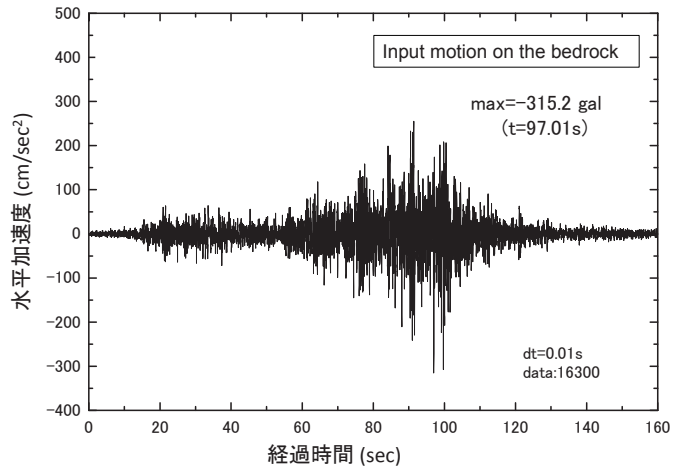
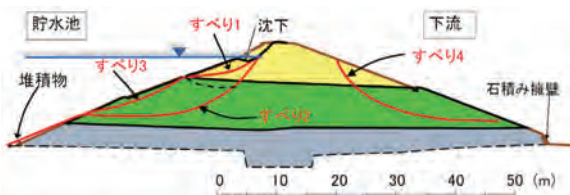


## Newmark-D法

非排水繰返し载荷の影響を考慮することによって、はじめて藤沼ダムの崩壊が説明できた

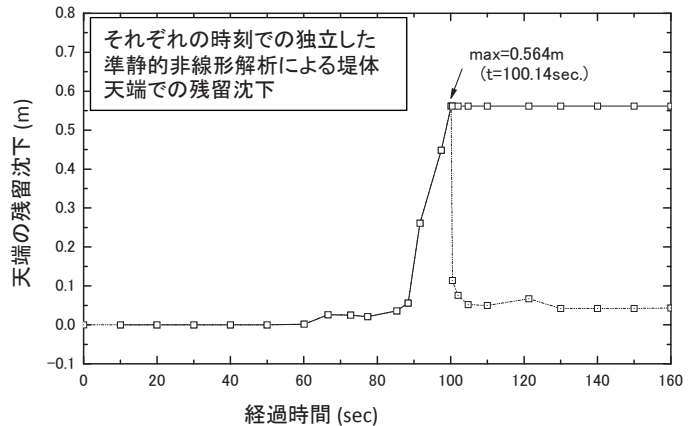


旧藤沼ダム本堤の非排水繰返し载荷による非排水強度・剛性の劣化を考慮した準静的非排水FEM



最大の残留変形(t= 100.14 s):

- 非排水繰返し载荷による非排水応力～ひずみ関係の劣化のために、最大加速度(t= 97.01 s)の後に生じる
- この最大残留変形から剛体すべりによる残留変形による分を差し引いてから、円弧すべりによる残留変形と合計する  
→最終的な残留変形



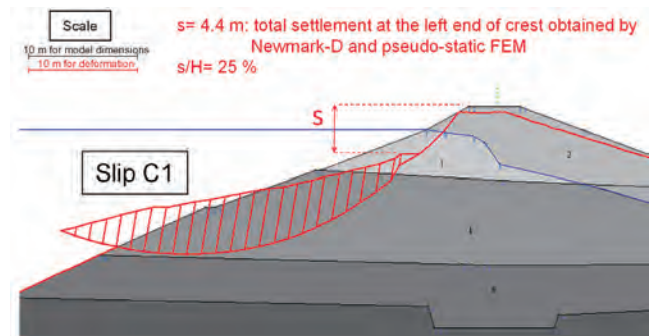
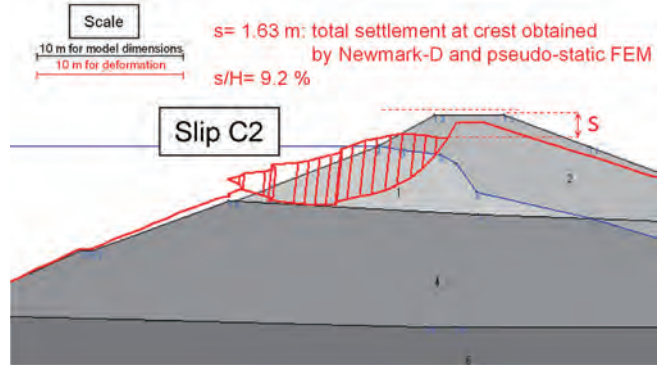


## 旧藤沼ダムの最終残留変形

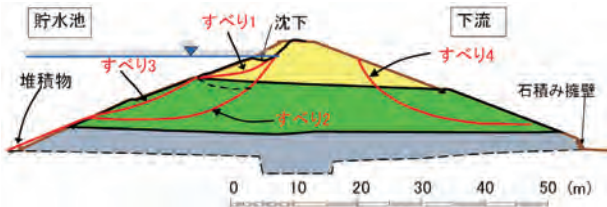
以下の二種類の残留変形の合計:

- 1) Newmark-D法による最終残留変形
- 2) 準静的非線形FEM解析による最終残留変形、以下の合計
  - 2a) 円弧すべりが開始するまでに堤体全体で生じた最大残留変形
  - 2b) 円弧すべりが開始した後にすべり面より下の領域で生じた最大残留変形

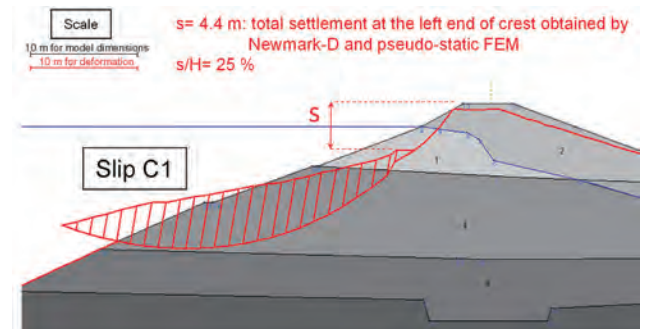
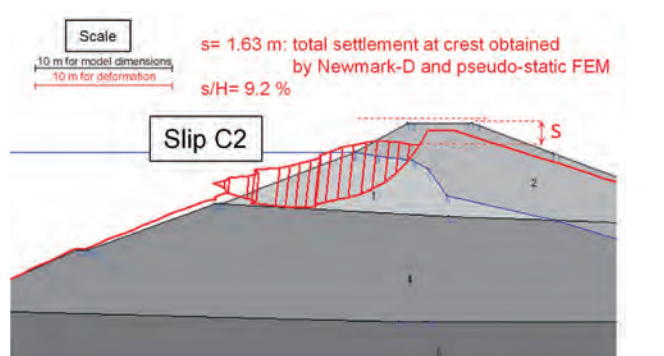
すべりC1とC2が独立に生じた場合



## 旧藤沼ダムの最終残留変形



すべりC1とC2が独立に生じた場合



実際には、すべりC1とC2の両方が生じた  
→残留天端沈下量は次の二者の合計

(**5.57 m**):

- すべりC1による”すべり変形と”C1が生じた場合のFEM解析による残留変形”の合計(= 4.4 m)
- すべりC2による残留変形 (= 1.07 m)

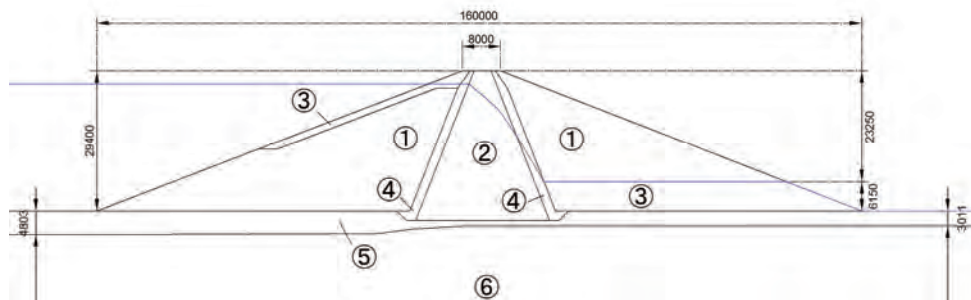
**5.57 m: 実際の流動的崩壊と整合**

## 藤沼ダムの解析

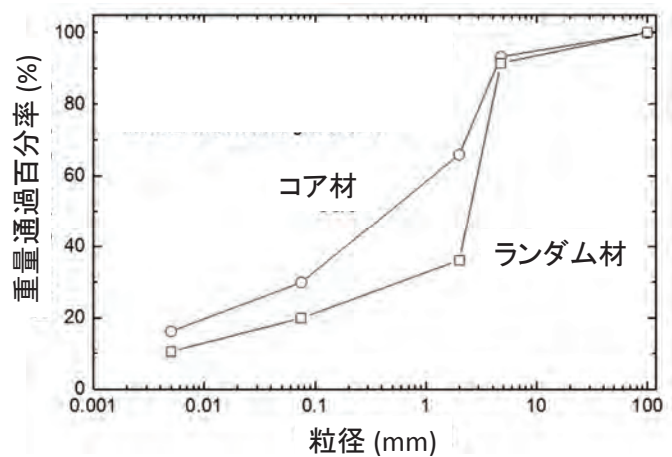
### 崩壊した本堤の解析

### 復旧のための設計段階の解析

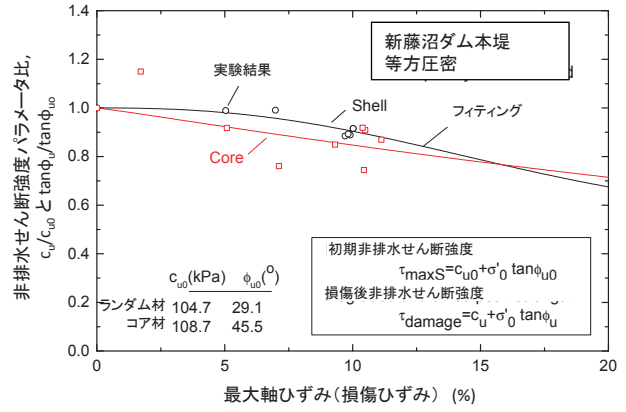
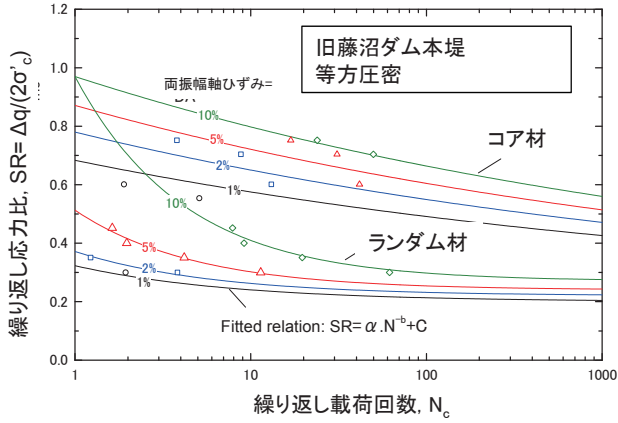
#### 新藤沼ダム本堤の解析：Newmark-D法



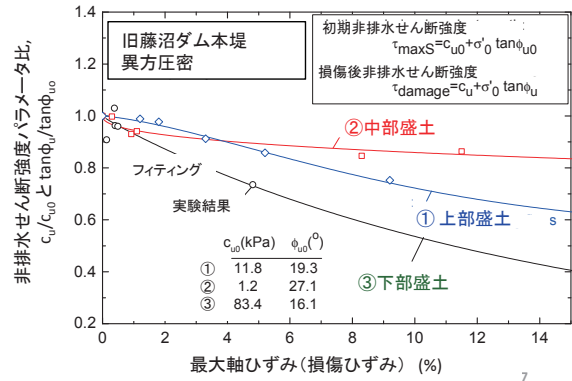
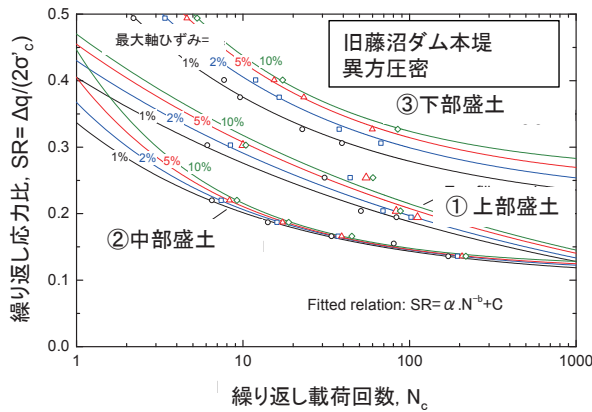
設計段階で想定した盛土材料  
(実際の工事での盛土材料は若干異なる)



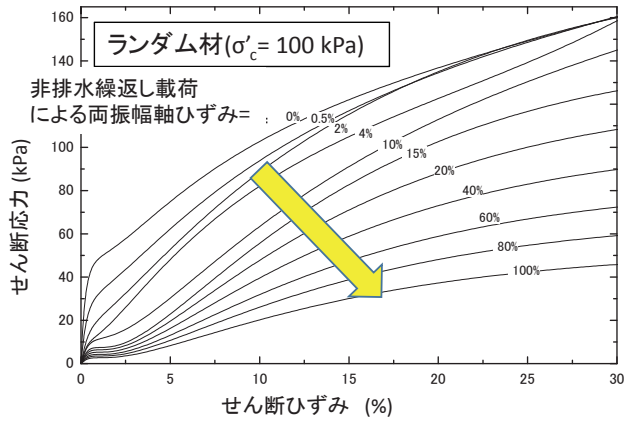
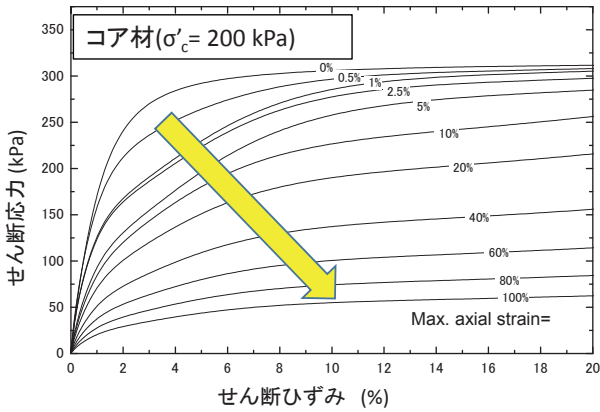
新藤沼ダム本堤：非排水繰返し強度大、非排水繰返し载荷による強度低下率小



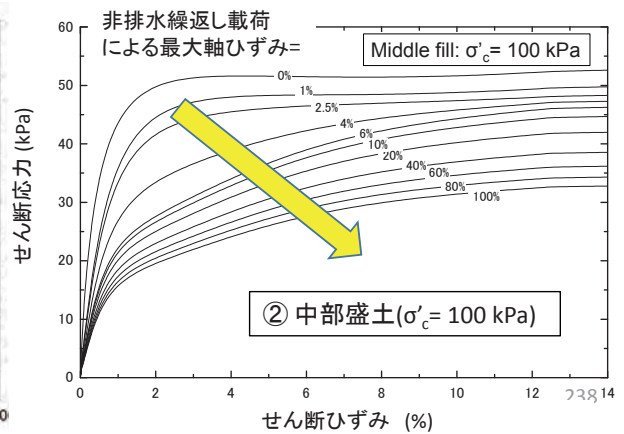
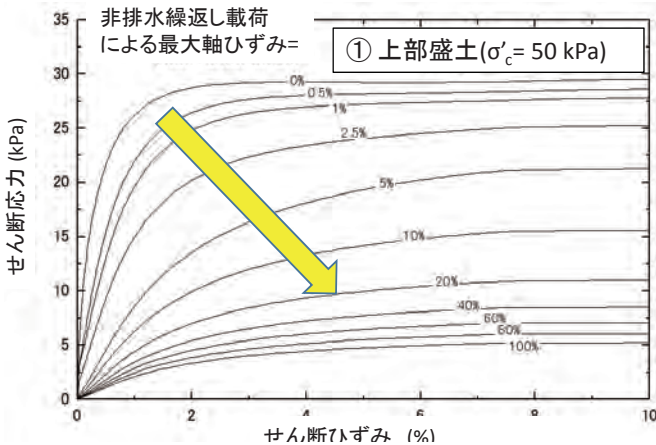
旧藤沼ダム本堤：非排水繰返し強度小、非排水繰返し载荷による強度低下率大



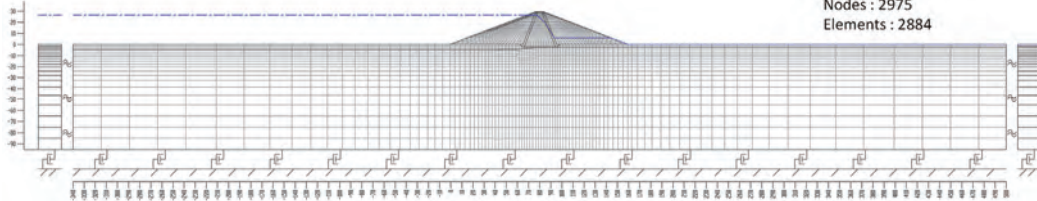
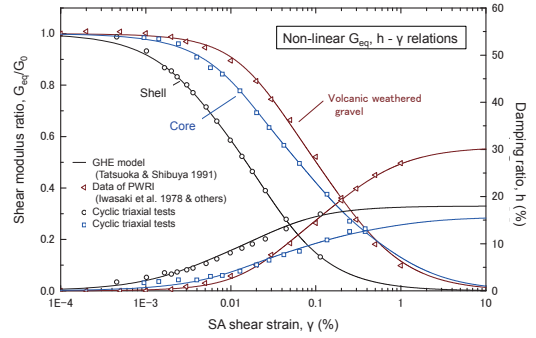
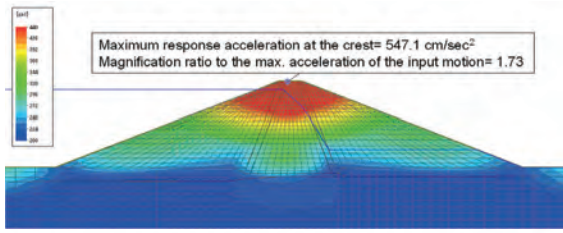
新藤沼ダム本堤：初期非排水せん断強度大



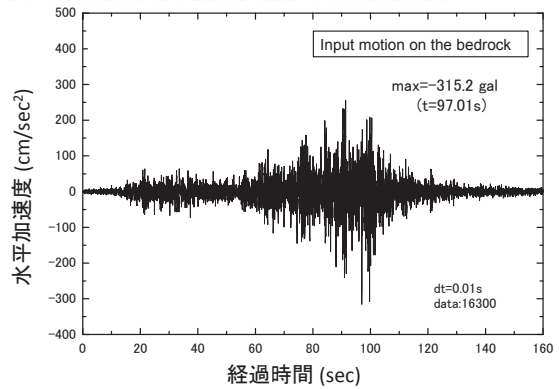
旧藤沼ダム本堤：初期非排水せん断強度小



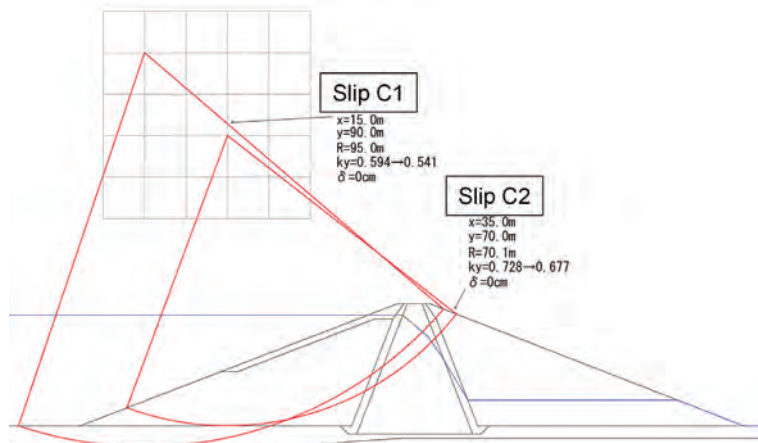
## 新藤沼ダム等価線形FEM応答解析



2011年東日本大震災時に藤沼ダム北東3 kmの長沼で観測された地表水平加速度記録を基盤入力に変換  
●レベル2設計地震動と見なす



新藤沼ダム本堤：等価線形FEM応答解析によって得られた地震時応力に基づく円弧滑り安定解析による二つの臨界すべり面

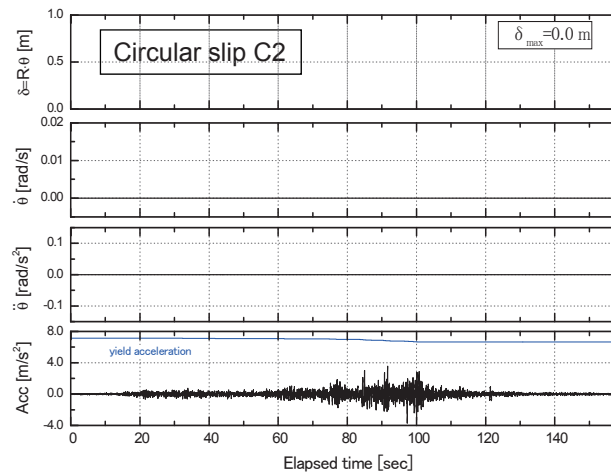
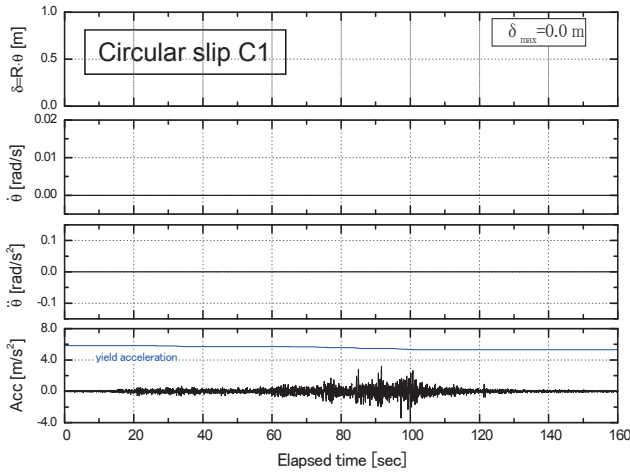
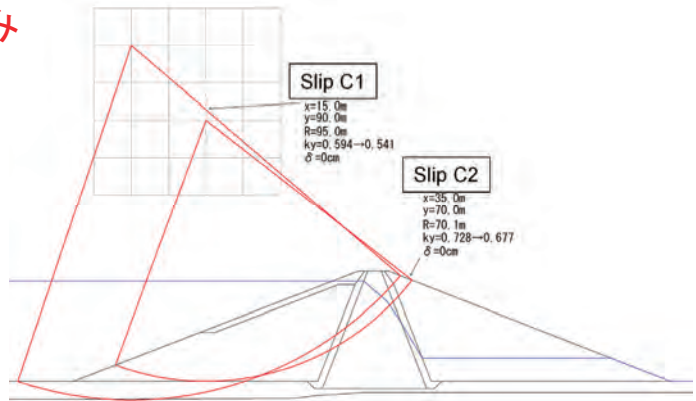


すべりC1: 降伏震度 $k_{hy}$ は初期値(0.594)から最終値 (0.541)に低下、  
しかし入力荷重よりも高い値を維持  
すべりC2: 降伏震度 $k_{hy}$ は初期値(0.728)から最終値 (0.677)に低下、  
しかし入力荷重よりも高い値を維持  
→ いずれのすべりも生じない

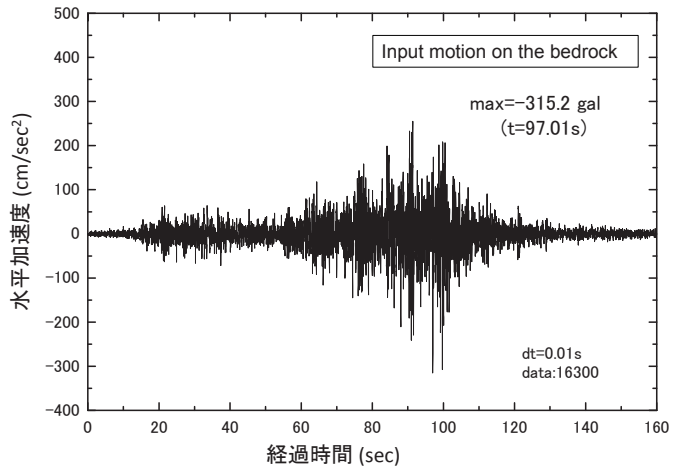


# Newmark-D法による残留ひずみ

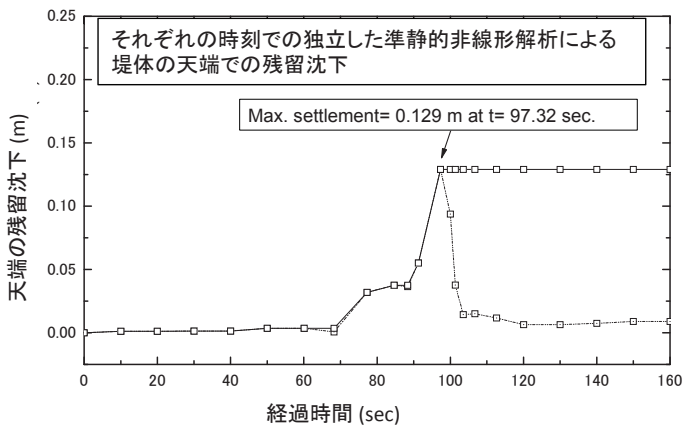
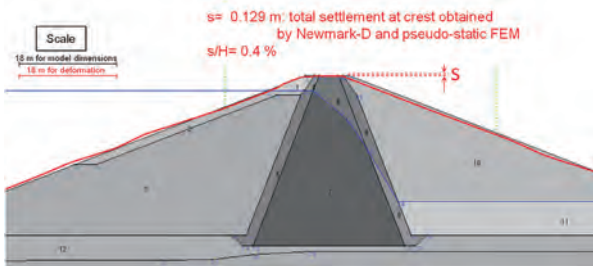
■ すべりは生じない



新藤沼ダム本堤の非排水繰返し載荷による非排水強度・剛性の劣化を考慮した準静的非排水FEM



堤体天端の残留沈下：  
十分に小さい





1. 藤沼ダムの事例
2. 円弧すべり安定解析法の理論的基礎と実施に当たっての留意事項
  - 2-1. 混乱した現状
  - 2-2. 円弧すべり安定解析の基礎
  - 2-3. Fellenius法とは
  - 2-4. 地下水位・浸潤面と自由水位の考慮
    - ・浸透流がない場合
    - ・定常浸透流がある場合
  - 2-5. 地震力の取り扱い
  - 2-6. 異なる設計指針等での排水状態での安全率の式の比較
3. Newark-D法と劣化剛性FEMによる盛土の地震時残留変形解析
  - 3-1. Newmark法の経緯
  - 3-2. 飽和土の非排水せん断強度の非排水繰返し載荷による劣化を考慮したNewark-D法による剛体すべり解析
  - 3-3. 飽和土の非排水せん断剛性・強度の非排水繰返し載荷による劣化を考慮した準静的非線形FEMによる残留変形解析

243

## 土構造物の実務的な安定解析における諸課題

斜面のスライス法による円弧すべり安定解析は、古典的な土質力学のテーマであり、今更議論の余地はないと通常考えられている。

しかし、実務では依然重要であるにも関わらず、設計指針類・教科書等で

- ①スライス間土圧、
  - ②スライスの上端面、鉛直境界面、底面に作用する間隙水圧、スライスに作用する浸透圧、斜面に作用する水圧、
  - ③地震力、
  - ④飽和土の排水条件、
  - ④非排水繰返し載荷への非排水強度の影響等
- の取り扱い法が異なる式が示されている。しかも、その相違の説明が十分ではない。

今回、これらの問題を修正Fellenius法の枠組みで統一的に説明をして、適切に対処する方法を提示した

## 土構造物の実務的な安定解析における諸課題(続き)

また、円弧すべり安定解析に基づくNewmark法による剛体すべり変位解析と準静的非線形FEM解析による連続体としての残留変形解析を説明した。実際の残留変位・変形は、両者による残留変位・変形を適宜合算して求める。

これらの方法は、地盤材料の変形・強度特性に関する特定の構成モデルに依拠しないで、できる限り一般的な力学の枠組みに従って構築されている。

飽和土では非排水繰返し载荷と締固めの影響を適切に考慮することが重要であることを説明した。

# 地盤変形・トンネル分野

## MIDAS CONSTRUCTION TECHNICAL DOCUMENT COLLECTION



株式会社マイダスイテジヤパン

〒101-0021 東京都千代田区外神田5-3-1 秋葉原OSビル7F

TEL 03-5817-0787 | FAX 03-5817-0784 | e-mail [g.support@midasit.com](mailto:g.support@midasit.com) | URL <http://jp.midasuser.com/geotech>

Copyright © Since 1989 MIDAS Information Technology Co., Ltd. All rights reserved.