

Seismic stability analysis of Earth structures
by Newmark-D method and non-linear Pseudo-Static FEM taking
into account strength reduction by seismic loading

SENPS

土構造物の円弧すべりと連続体変形に基づく地震時安定解析法

 株式会社 複合技術研究所
Integrated Geotechnology Institute Limited

〒160-0004
東京都新宿区四谷 1-23-6 協立四谷ビル 5F
TEL:03-5368-4101 FAX:03-5368-4105

 五大開発株式会社

〒921-8051
石川県金沢市黒田1丁目35番地
TEL:076-240-6588 FAX:076-240-6575

 株式会社 複合技術研究所
Integrated Geotechnology Institute Limited

 五大開発株式会社

SENPS

Seismic stability analysis of Earth structures
by Newmark-D method and non-linear Pseudo-Static FEM taking
into account strength reduction by seismic loading

SENPS(センプス)とは？

『ニューマーク-D法』 + 『非線形準静的FEM』

SENPSの解析手法は、レベル2地震動によって発生する土構造物の残留変形を、

- 地震時での飽和土の継続的な強度低下を考慮したニューマーク-D法によって円弧すべり変形を求め
- 同じ枠組みで算定した地震時での土の強度と剛性の継続的な低下を考慮した非線形準静的FEM解析を行い、自重と地震慣性力によって生じる連続体変形を求め

両者を合算することによって求めます。(図-1)

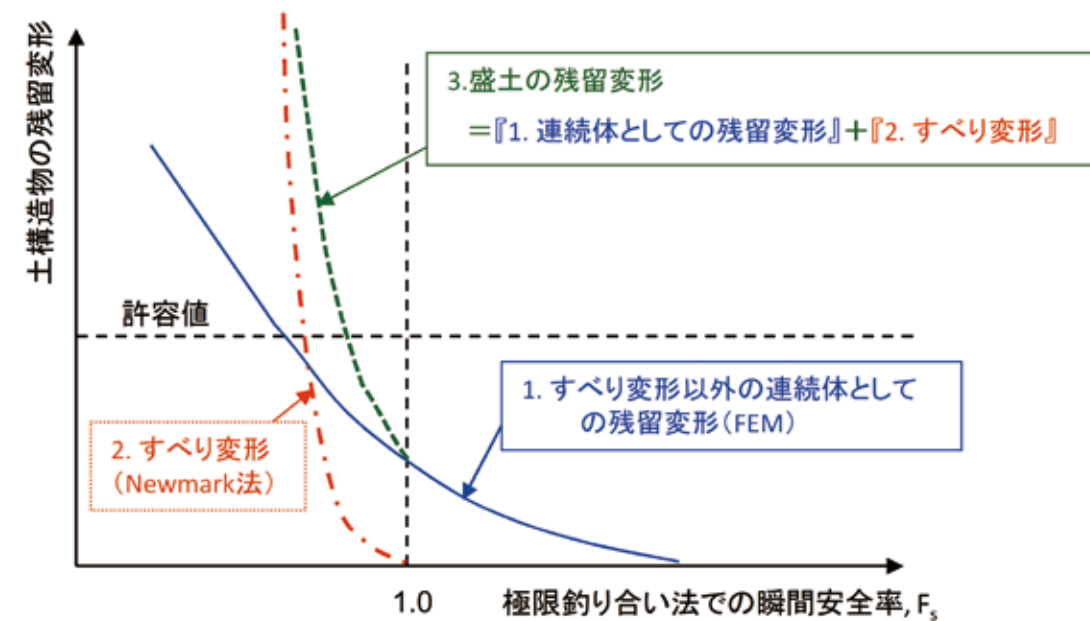


図-1 盛土・支持地盤の残留変形におけるすべり変形と連続体としての変形の関係

土構造物の地震によって生じる残留変形を求める方法としては、従来から地震荷重の全時刻歴によって低下した剛性を用いてFEM自重解析によって算定する方法があります。この方法では、地震終了後に自重だけによって生じる連続体としての変形を求めます。しかし、この方法は、一定程度以上締め固まった土構造物の地震時残留変形を過小評価する可能性があります。これは、最大の残留変形は地震中に生じる可能性が高くなるからです。

また、非常に薄いすべり層に変形が集中する「いわゆる円弧すべり変形」も生じる可能性があります。この変形は、連続体的変形の解析だけでは十分に把握できません。

一方、飽和土のピーク強度と剛性は地震中に継続的に低下します。締め固めが悪いほど、初期非排水強度と剛性は大幅に低くなるだけでなく地震中の低下率も格段に大きくなるため、締め固めが悪いほど残留変形は急速に増加します。逆に、良く締め固めるほど初期強度は高くなり地震中の強度低下も小さくなるため、残留変形は急速に小さい値になります。従って、締め固めが悪い場合から締め固めが良い場合まで一貫して取り扱える解析法が必要になります。

以上のことから、締め固めの影響を適切に考慮して、図-2に示すように、①従来から用いられている円弧すべり極限つり合い法に基づきますが地震荷重による飽和土の非排水強度の低下を考慮したニューマーク-D法によって求めた残留すべり変形と、②地震荷重による強度と剛性の低下を考慮した非線形準静的FEMで求めた連続体変形を一定の方法に基づいて足し合わせる方法は、近似的ではありますが、合理的であり実務的です。

なお、スライス法による円弧すべり安定解析に関しては、指針や教科書では多くの異なる安全率算定式が示されています。

ニューマーク-D法では、スライス間土圧と間隙水圧、水平地震力の作用位置、浸透力や浮力の影響位などについて最も合理的な方法を採用しています。

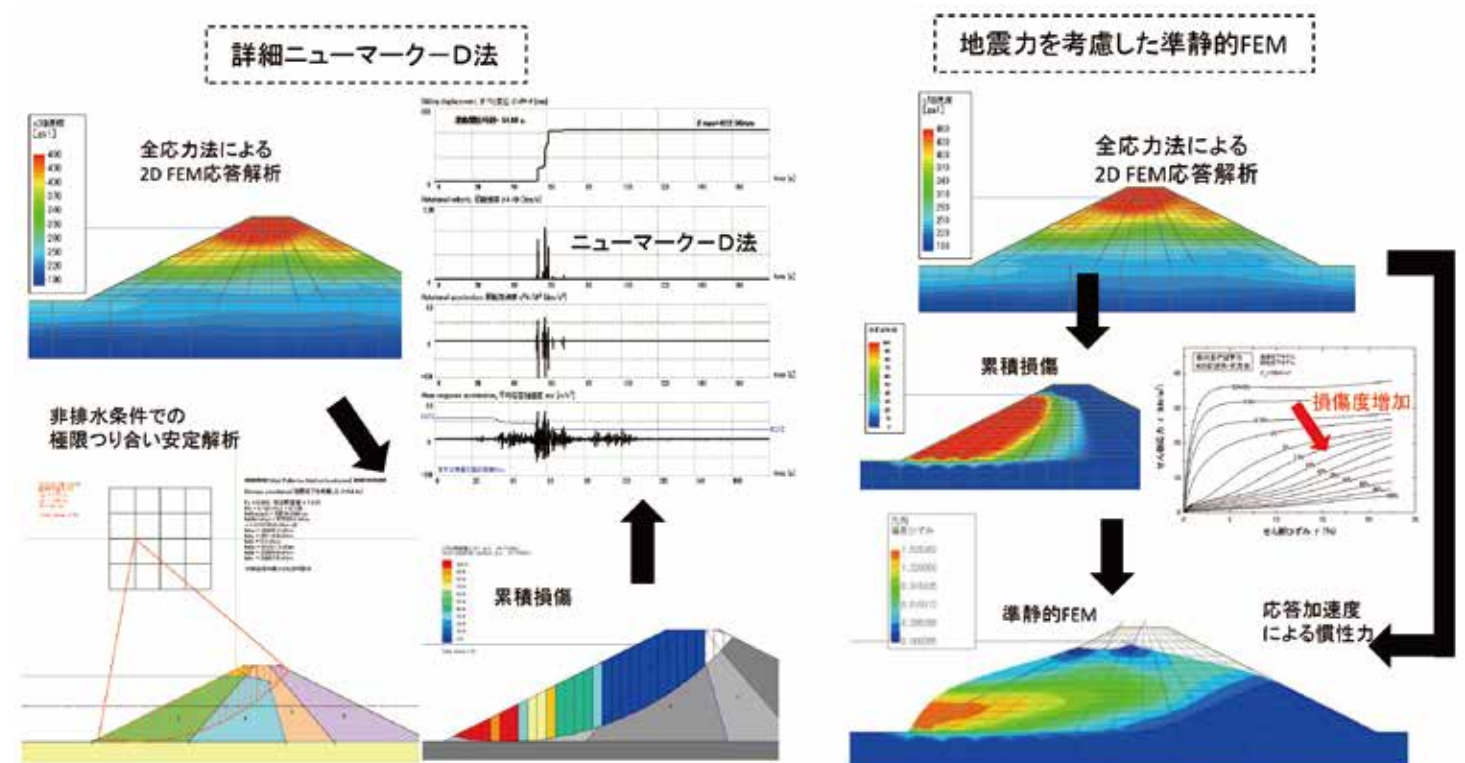


図-2 詳細ニューマーク-D法と非線形準静的FEMの概要

修正ニューマーク法

(累積損傷度理論による強度低下を考慮したすべり塑性解析)

ニューマーク-D法による 円弧すべり変位解析

ニューマーク法は、すべり土塊を剛体と仮定し、さらに、すべり面における応力～ひずみ関係が剛塑性と仮定して地震時のすべり土塊の変位量を計算する方法です。この方法は、厳密な方法ではありませんが、計算に必要なパラメータが少ないこと、結果の解釈が容易であること、あるいは、理論の簡明さに比べて妥当な結果が得られることなどから、盛土等の土構造物の耐震性能を照査する方法として有効な方法の一つです。ニューマーク法には、大きく分けて下記に示す5種類の方法があります。(表-1)

- (1) ニューマーク-O法 (Original)
- (2) ニューマーク-S法 (Strain)
- (3) ニューマーク-SO法
- (4) ニューマーク-D法 (Damage)
- (5) ニューマーク-SD法

図-3に示すように、従来の標準的なニューマーク-O法では地震中一定である排水せん断強度 τ_f (通常は残留強度)を用い、ニューマーク-S法では排水状態でのすべりに伴うひずみ軟化を考慮します。これに対して、ニューマーク-D法では、累積損傷度理論に基づいて非排水繰返しによる強度低下を考慮します。その際、飽和土の初期非排水強度は排水強度よりも締固めの程度に敏感に反応することと、地震中の強度低下も締固めに大きく影響されることを考慮します。

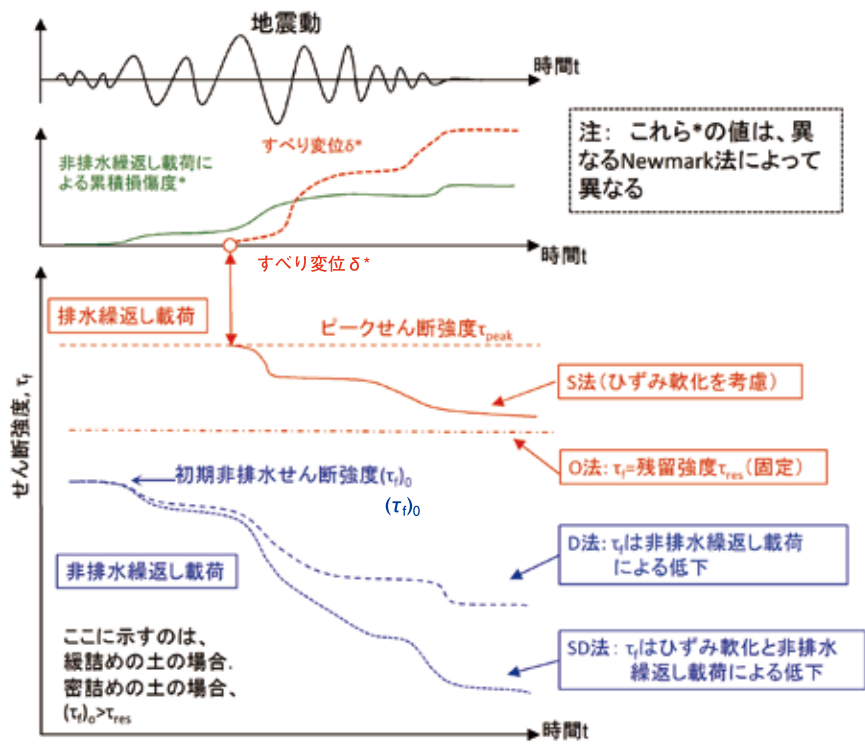


図-3 ニューマーク-D法の位置づけ

表-1 ニューマーク法の種類

種類		飽和・排水条件	せん断強度の取り扱い
ニューマーク-O法	Original	飽和/不飽和排水	残留せん断強度(一定)
ニューマーク-S法	Strain		すべり変位に伴うひずみ軟化を考慮
ニューマーク-SO法			ピーク／残留せん断強度(即時軟化)
ニューマーク-D法	Damage	飽和非排水	繰返し载荷による累積損傷による強度低下を考慮
ニューマーク-SD法			ひずみ軟化と累積損傷による強度低下を考慮

詳細及び簡易ニューマーク-D法

土構造物の大規模地震時の耐震性を適切に診断・評価するためには、締固めの良否の影響を強く受ける地震動による強度低下を考慮する必要があります。ニューマーク-D法は、従来の標準的なニューマーク法による滑動変位量の算定法に、非排水繰返し载荷による飽和土の非排水強度の継続的な低下特性を累積損傷度理論によって適切に評価して地震時のすべり変形を算定する手法です。

ニューマーク-D法には、

■ため池等の土構造物の地震時応答特性をFEM動的応答解析で求め、地震時の土の強度低下特性を室内での非排水繰返し試験によって求める詳細ニューマーク-D法

■詳細法を簡易化した簡易ニューマーク-D法の2種類があります。

図-4に詳細ニューマーク-D法の解析フローを示します。

簡易法では、

- 1) このフローでの①動的応答解析は実施せず、土構造物の応答特性は、応答分布モデルに基づいて推定するか、一次元等価線形化解析(SHAKE等)の結果を補正して2次元状態に適用し、
- 2) フローの③での室内試験は実施せず、強度低下特性は標準劣化モデルに基づき盛土の締固め度と物理特性から推定します。

表-2に、詳細と簡易ニューマーク-D法の比較を、また、表-3に適用上の一例をそれぞれ示します。

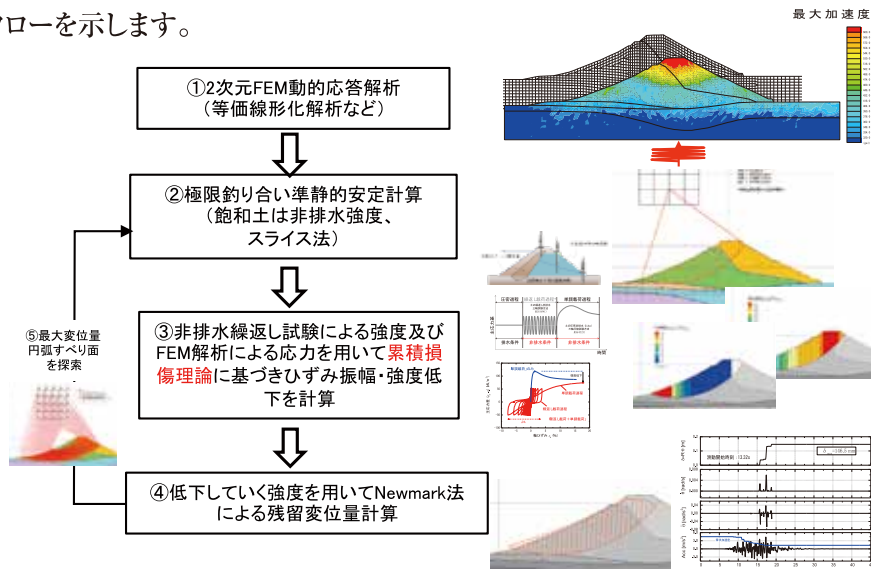


図-4 詳細ニューマーク-D法の解析フロー

表-2 詳細ニューマーク-D法と簡易ニューマーク-D法の比較

変形解析	内容	特徴
詳細Newmark-D法	ため池地点での地震波形の推定	KikNet,JSIS,地域防災会議等の地震波
	堤体強度の設定	地震時の非排水繰返し载荷による土の強度低下を考慮
	土質試験	非排水三軸圧縮試験 非排水繰返し载荷試験(土質2軸3本の試験)
	堤体内応力等の推定	地震応答解析(FEM動的応答解析)
	適用	重要度区分AA*のため池
簡易Newmark-D法	ため池地点での地震波形の推定	KikNet,JSIS,地域防災会議等の地震波
	堤体強度の設定	標準強度低下モデルを採用
	土質試験	非排水三軸圧縮試験
	堤体内応力等の推定	応答分布の設定
	適用	重要度区分AA*以外のため池

*重要度区分AAのため池とは
①警戒ため池のうち震度6弱以上の揺れが想定される区域にあるため池
②地域特性を考慮した都道府県独自の指標等に基づくため池を設定

表-3 詳細および簡易ニューマーク-D法の適用上の一例

堤高	堤体の状況	適用する手法	必要な調査・試験	備考
H≥10m		詳細ニューマーク-D法	・原位置試験(PS検層、密度検層、標準貫入試験等) ・コアサンプリング ・物理試験一式 ・締固め試験	
5m≤H<10m	堤体構造物が複雑な場合	詳細ニューマーク-D法	・詳細ニューマーク-D法適用に必要な試験一式	
	堤体構造が比較的単純な場合(たとえば、均一型等)	簡易ニューマーク-D法	・原位置試験(PS検層、密度検層、標準貫入試験等) ・コアサンプリング ・物理試験一式 ・圧密非排水試験	・堤体の地層構成、地質および標準劣化モデルに適用する締固め度を含む物性等を確認すること。
H<5m		簡易ニューマーク-D法	・原位置試験(PS検層、密度検層、標準貫入試験等) ・コアサンプリング ・物理試験一式 ・締固め試験	

詳細ニューマーク-D法に必要な 室内せん断試験例

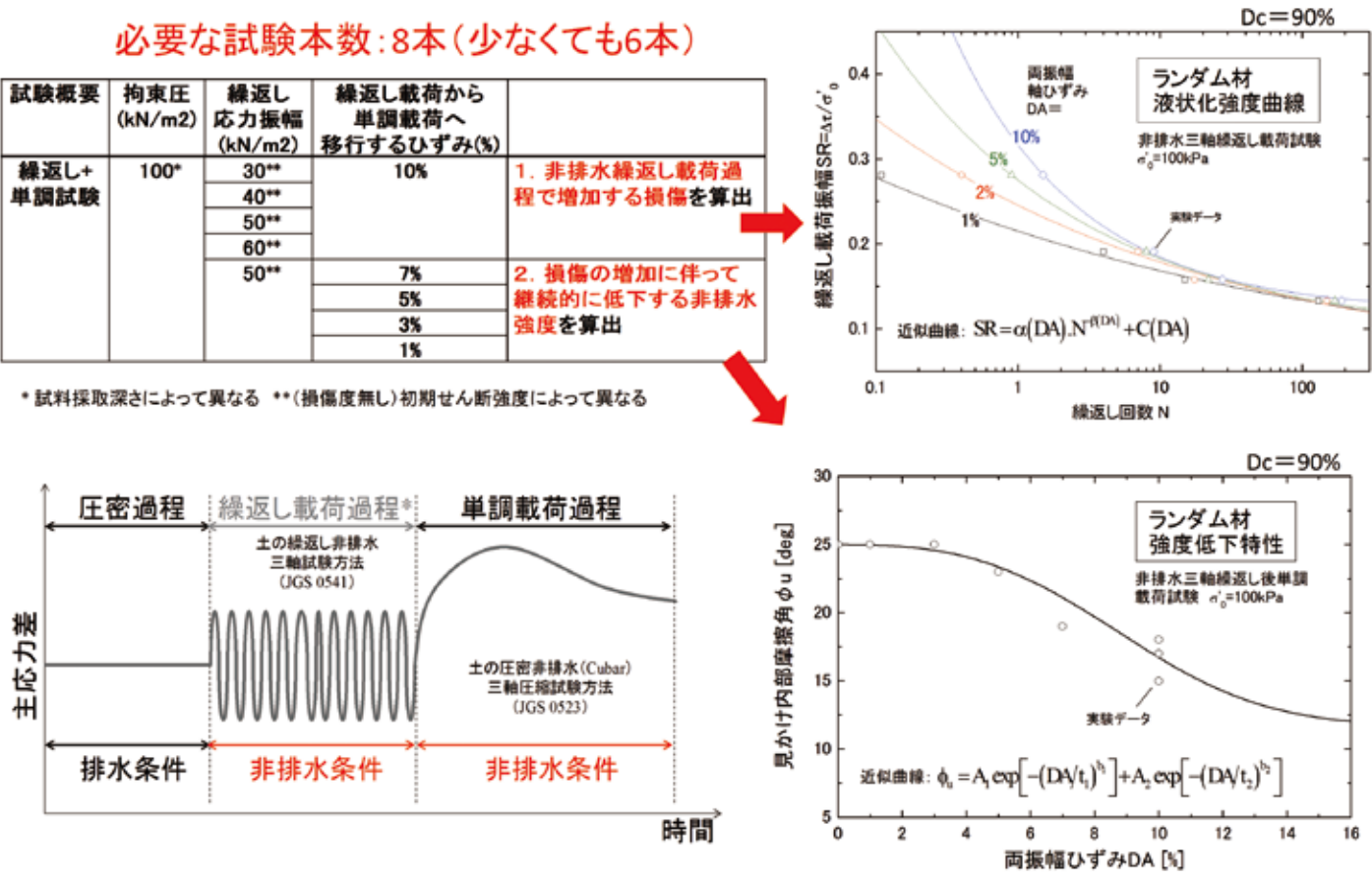


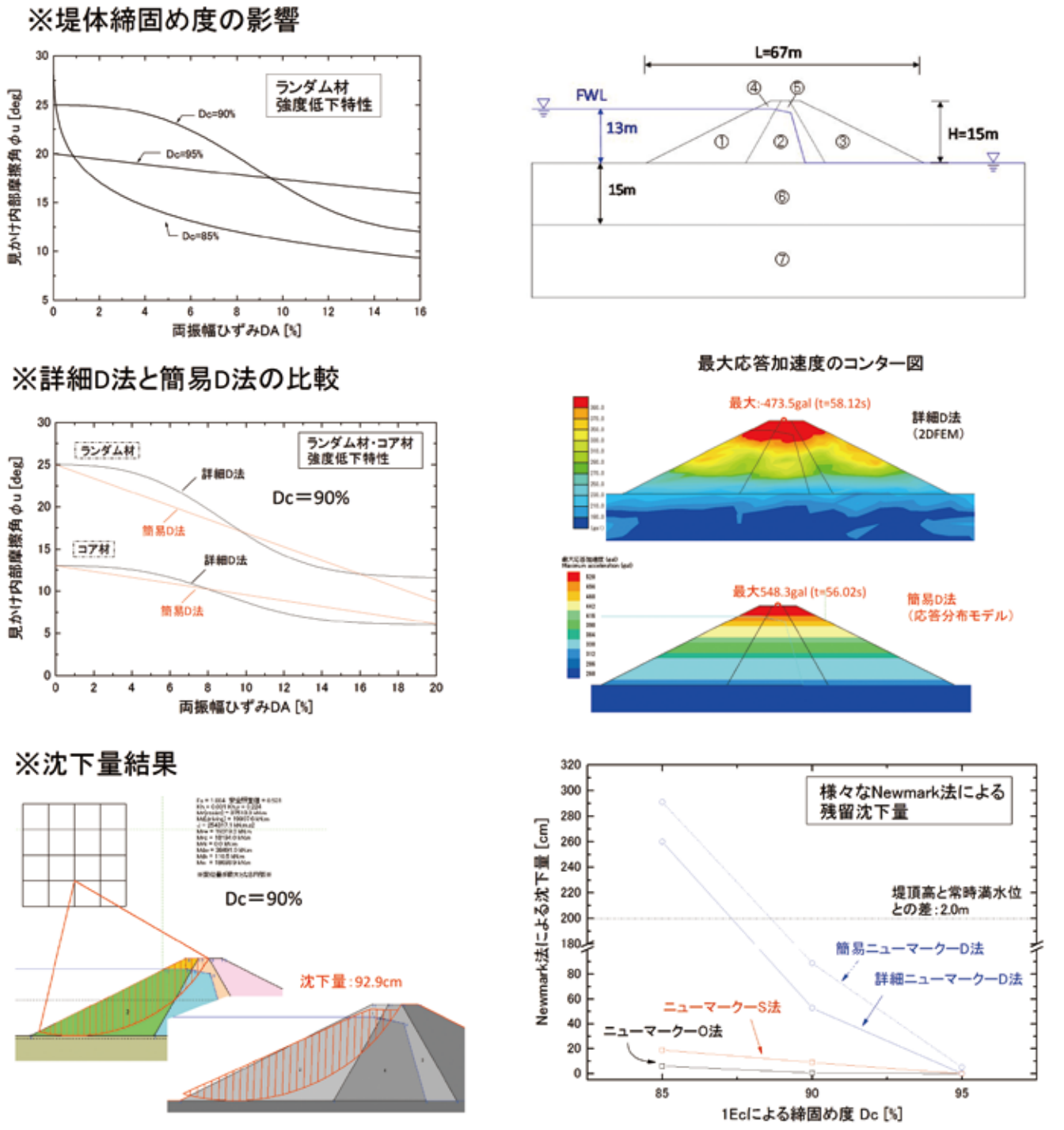
図-5 詳細ニューマーク-D法に必要な室内せん断試験の概略

詳細ニューマーク-D法に必要な室内せん断試験の概略および一覧をそれぞれ図-5、表-4に示します。詳細ニューマーク-D法に必要な室内せん断試験は、「純単調試験」と「繰返し+単調試験」の2種類に分けられます。

表-4 レベル2地震動に対する耐震性能の照査に必要な土質試験
(【ため池整備2.1.2地質調査及び土質試験】)

試験項目	試験規格	築堤材料	現況堤体	基礎地盤	備考
土粒子の密度試験	JIA A 1202	○	○	△	○ 必ず実施する。
粒度試験	JIA A 1204	○	○	△	
含水比試験	JIA A 1203	○	○	△	
液性限界・塑性限界試験	JIA A 1205	○	○	△	
現場密度の測定	JIA A 1214他	-	○	-	
突固めによる土の締固め試験	JIA A 1210	○	○	-	△ 必要に応じて実施する。
透水試験	JIA A 1218	○	○(現場)	△	
三軸圧縮試験	JGS 0524他	○	○	△	
圧密試験	JIA A 1217	△	△	△	
繰返し三軸試験	JGS 0542	△	△	△	
液状化試験	JGS 0541	△	△	△	
単調载荷試験	JGS 0523	△	△	△	

ニューマーク-D法解析結果の例



上に示す解析例の説明

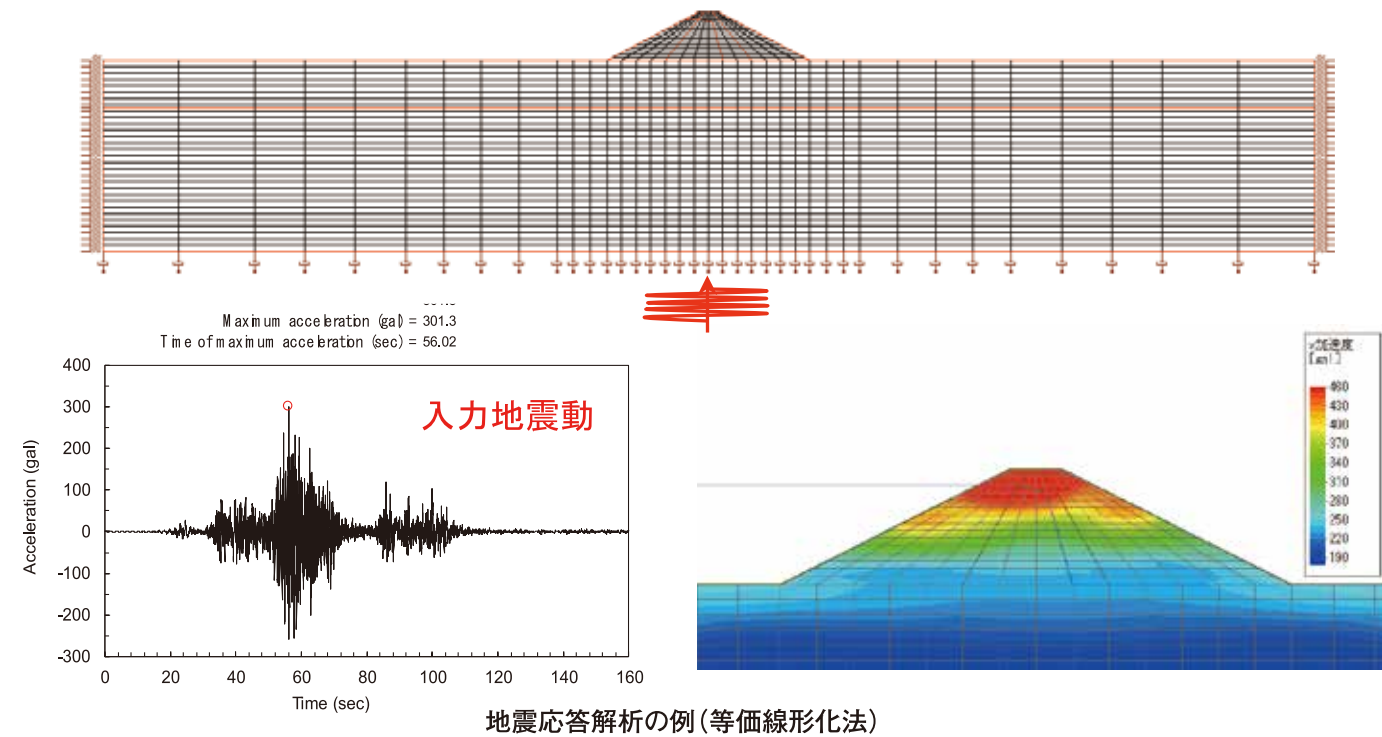
- 土構造物の主要な部分の締固め度が低く飽和している場合は、ニューマーク-OおよびS法で求められる残留沈下量は、地震中の非排水強度の低下を考慮したD法と比較するとかなり小さく、危険側の値となる。これは、締固め度が低くなると初期非排水強度が低くなり、非排水繰返し载荷による強度低下も大きくなるからである。
- ニューマーク-D法では、残留変形に対する締固めの影響が非常に大きいことを説明できている。
- 簡易ニューマーク-D法で求めた残留沈下量は、詳細法よりやや安全側の値を示す。

FEM-RDA

(時刻歴慣性力と地震時強度・剛性低下を考慮した自重劣化解析)

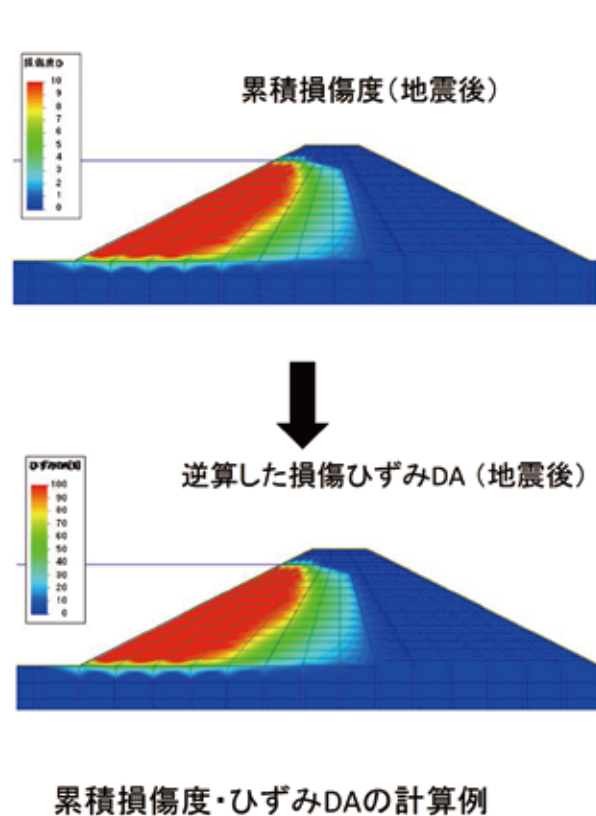
1

有限要素法で地震応答解析(等価線形法など)を行う。

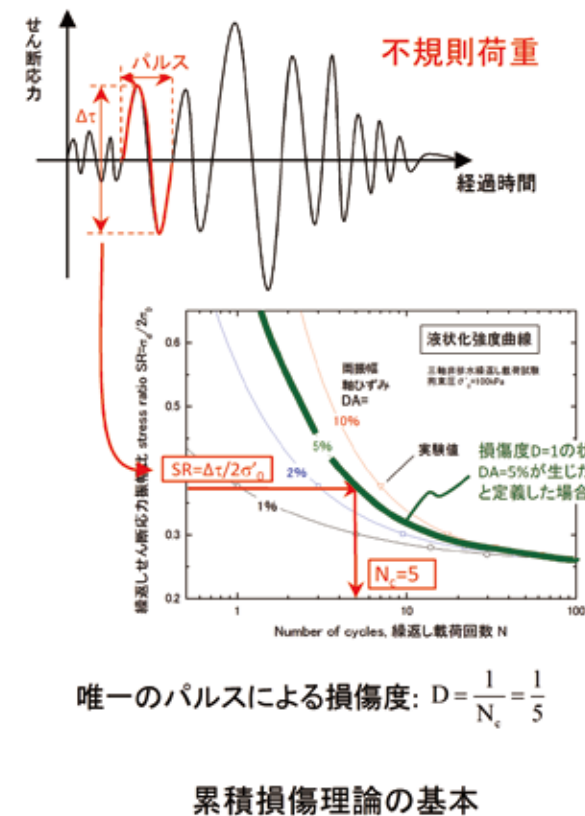


2

各要素ごとのひずみ両振幅DAの時刻歴を、ステップ①で算出した応答応力の時刻歴を用いて累積損傷理論によって求める。この方法は、Newmark-D法において、すべり土塊のスライスのひずみDAの時刻歴を求める方法と同じである。

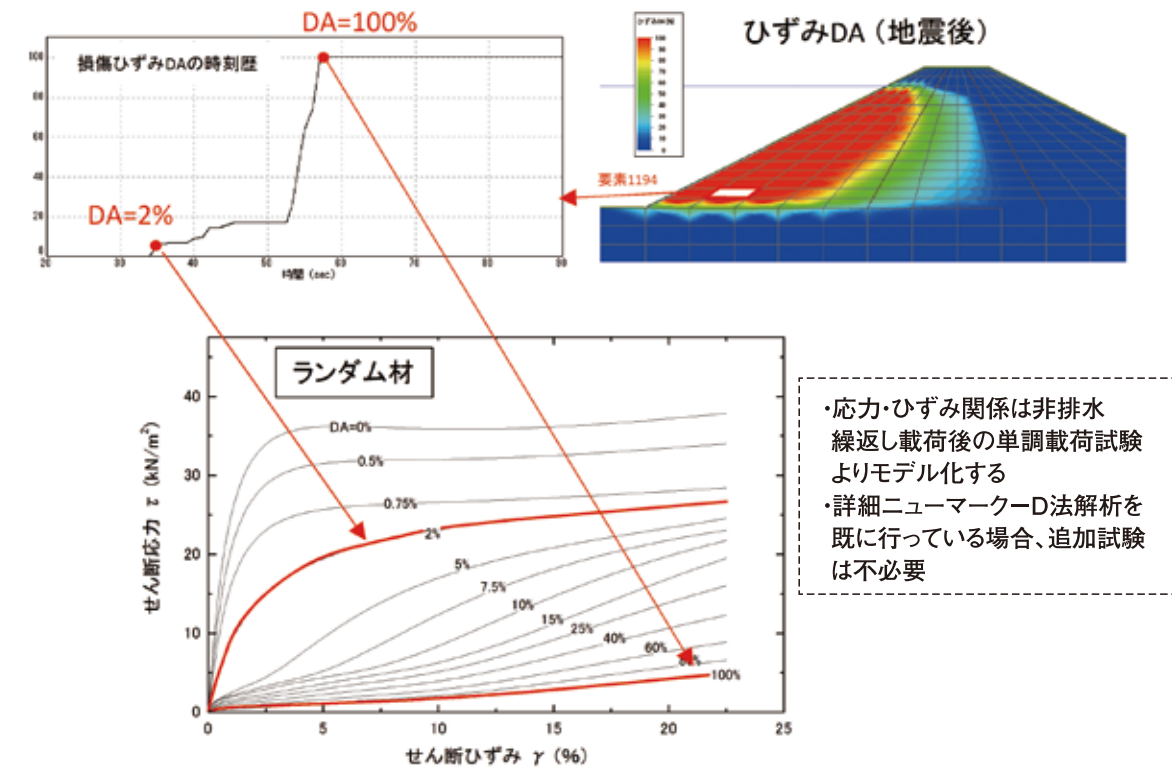


7



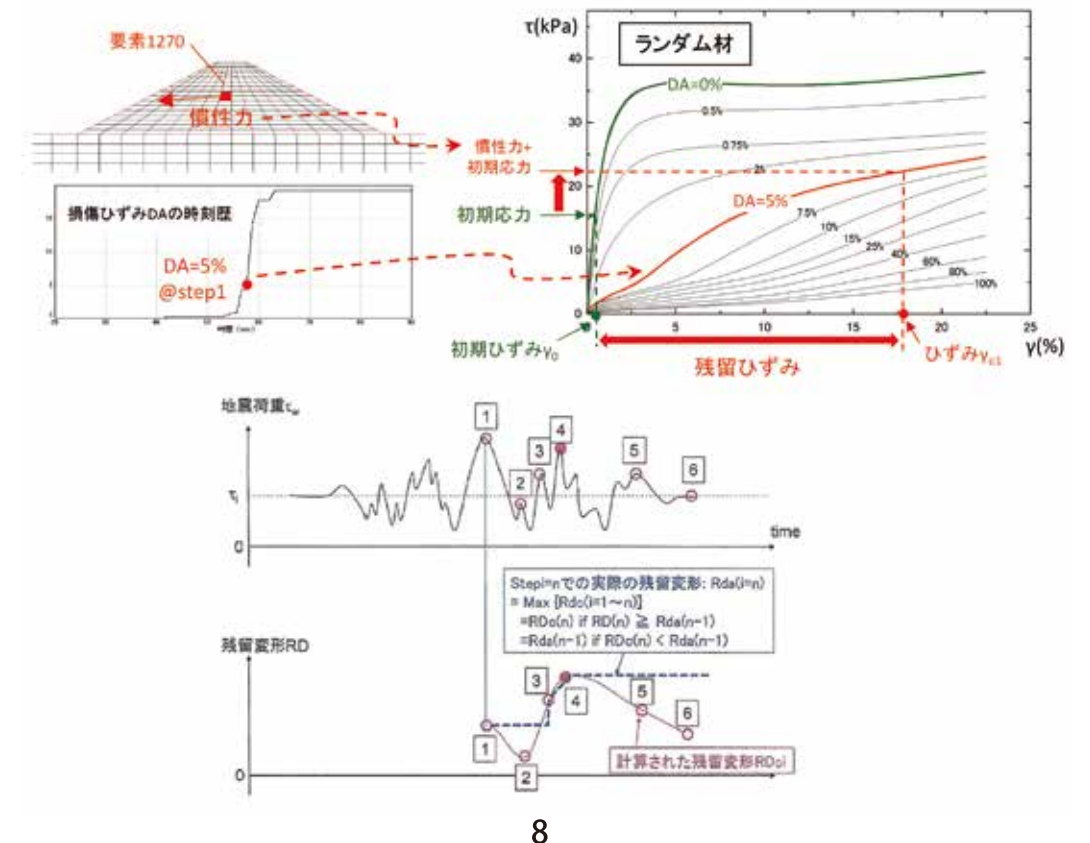
3

各要素ごとのそれぞれ設定した時刻での劣化した応力-ひずみ関係を、ステップ2で求めたその時刻におけるDAの値に応じて求める



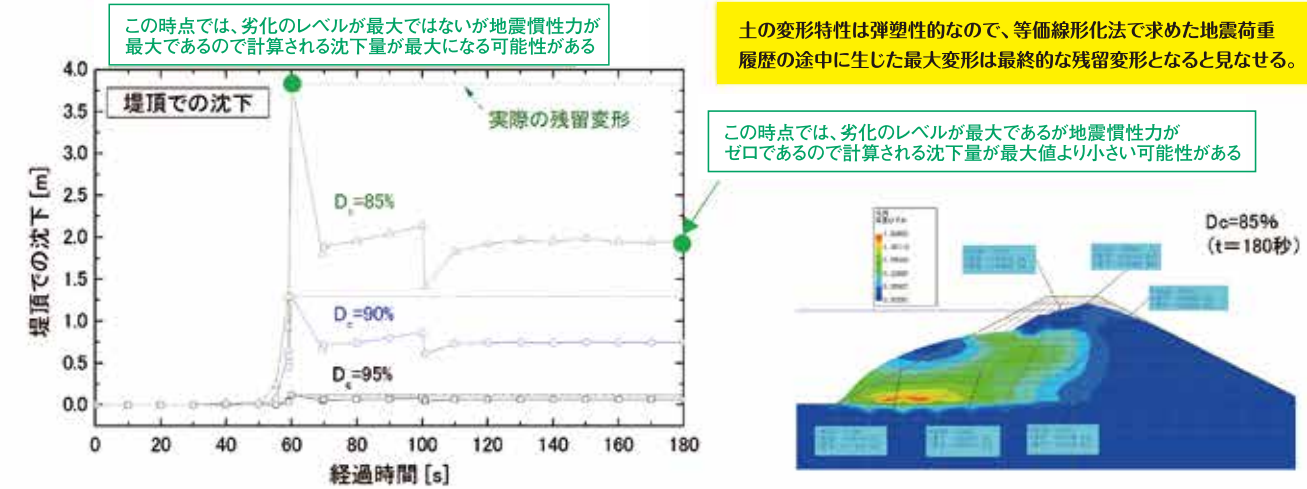
4

所定の地震動に対して、選定した複数の時刻ごとに、各要素での劣化した応力～ひずみ関係に基づいて自重およびステップ①で得られた応答加速度によって生じる慣性力を用いて、準静的非線形FEM解析を行う



8

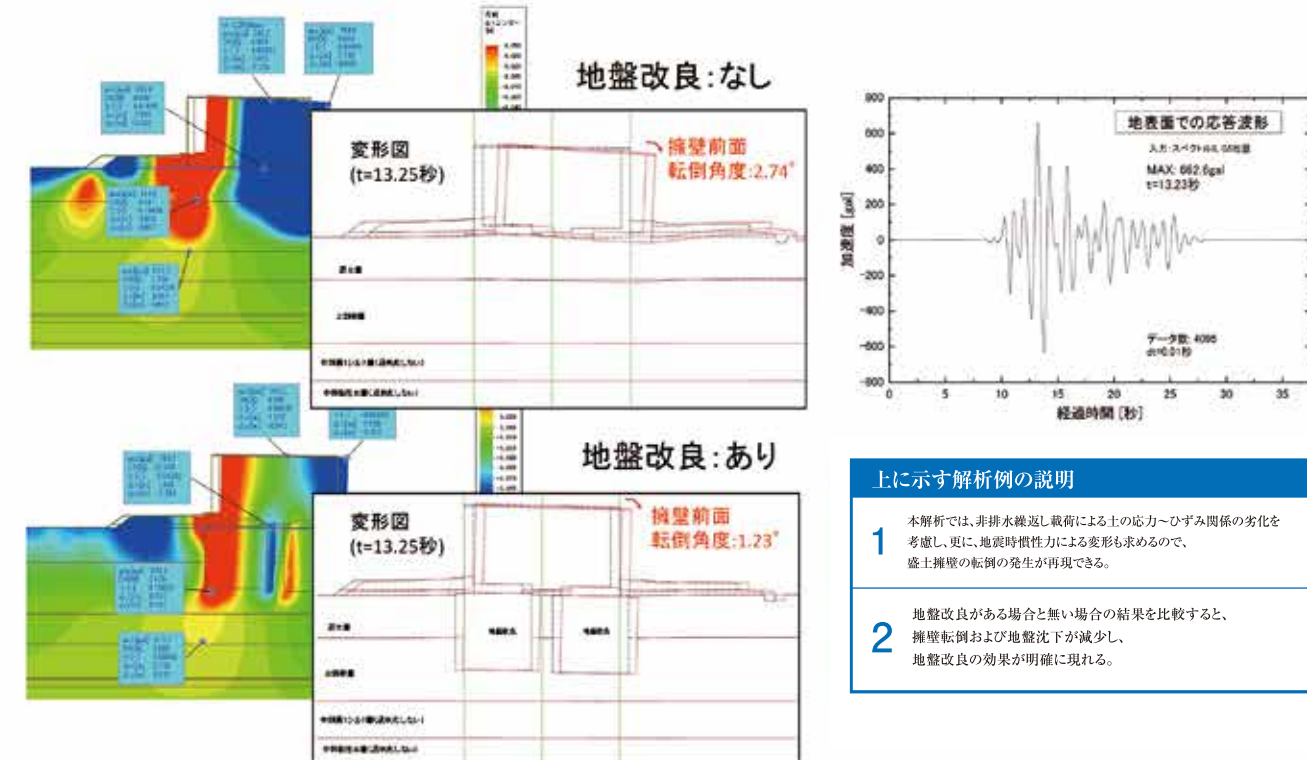
FEM-RDA解析例（その1:ため池）



上に示す解析例の説明

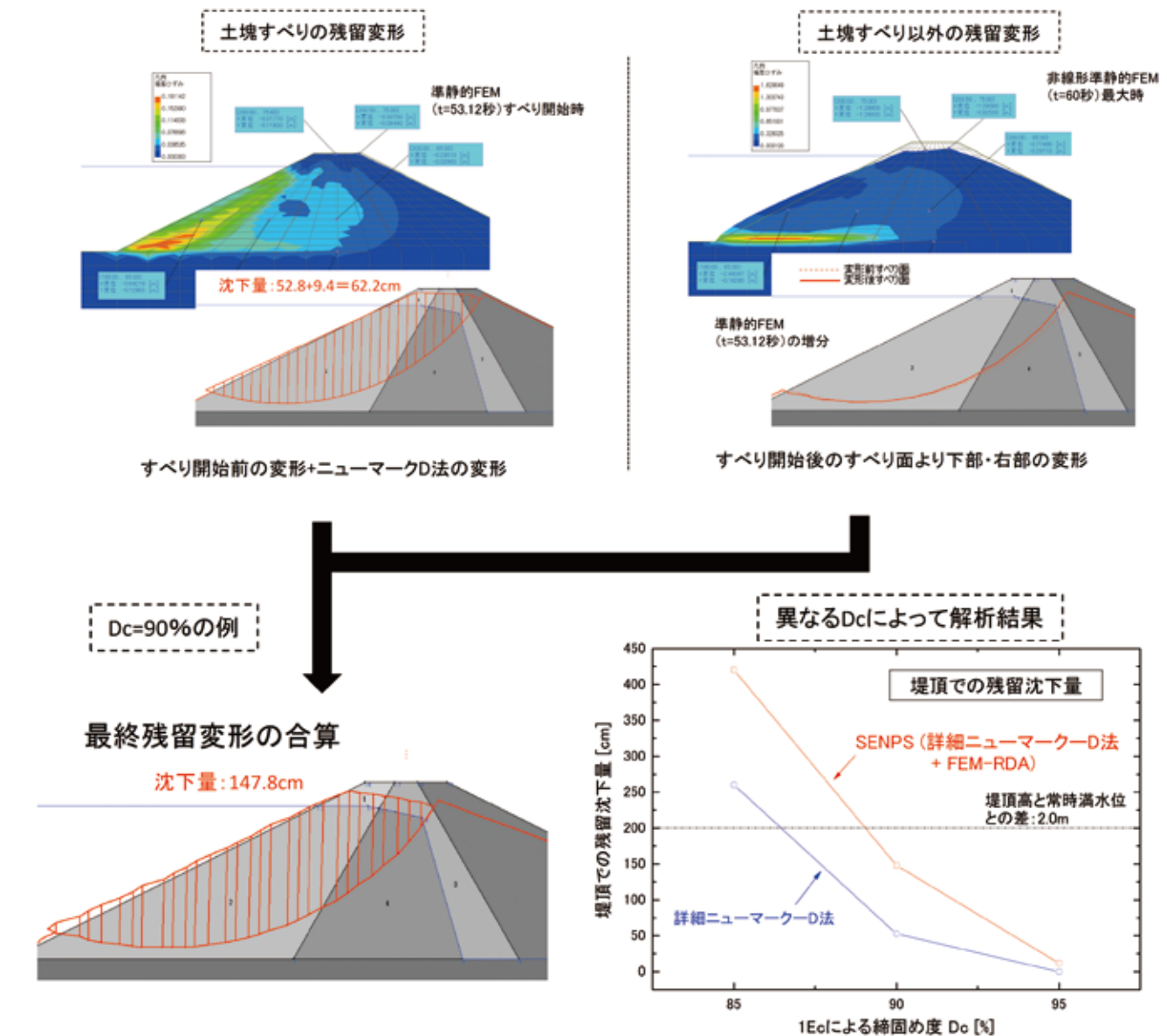
- FEM 計算に用いた堤体土の応力-ひずみ関係におけるひずみゼロの原点は、常に地震開始時である。また、この関係を用いて計算された各時点での残留変形は、その後回復しない。したがって、実際のすべりの発生を伴わない残留変形は、「その時点までにFEMで計算された残留変形の最大値」である。
- このFEM 解析例では、堤頂での残留沈下は、天端応答加速度の最大時付近で最大となり、締固め度 $D_c=85\%$ の場合、3.8mである
- 一方、応力-ひずみ関係が最も劣化している地震時終了時に慣性力ゼロでFEMで計算した堤頂での残留沈下は、締固め度 $D_c=85\%$ の場合、2.0mである。
- 2と3の結果より、堤頂の残留沈下量の算定法に与える慣性力の影響は大きいことが分かる。したがって、地震終了時だけの計算では、残留沈下量を過小評価する可能性がある

FEM-RDA解析例（その2:液状化地盤上道路盛土）



SENPS解析例

ニューマーク-D法(すべり変位)と非線形準静的FEMによる変形との足し合わせ



上に示す解析例の説明

- 準静的FEMによって求められた最大残留沈下には、ニューマーク法で評価されたすべり変形が一部含まれている。このため、本解析では、準静的FEMによって求められる残留変形を、「臨界すべり開始前の全領域の最大残留変形とすべり開始後のすべり面より下部の領域の残留変形の合計」としてから、ニューマーク-D 法で求めた最終残留すべり変形と合算して、盛土の残留変形を求めている。
- 締固め度 D_c が大きいほど、①初期非排水せん断強度・剛性が高くなり、②非排水繰返しせん断強度が高くなるために損傷度が低下し、③非排水せん断強度および剛性の低下率が小さくなる。この3重の効果によって、残留沈下の算定に与える締固め度 D_c の影響は非常に大きい。