

◆ 報 文 ◆

模型実験の再現によるアンカー工弾塑性3次元FEM解析モデルの検討

田中 尚* 石井靖雄** 藤澤和範*** 森下 淳****

1. はじめに

地すべり対策の抑止工の一つとしてアンカー工が用いられるが、その配置やプレストレスなどの決定方法については理論的な根拠が必ずしも明らかではなく、地すべり活動の程度や地形・地質、施工上の制約および経済性などから技術者が経験的に判断している。アンカー工による抑止効果の作用を明らかにし、その評価が可能となれば上記の課題について合理的に設定できると考えられる。

近年、コンピュータの演算処理能力の著しい向上を背景に有限要素法解析（以下、FEM解析という）が多く分野で用いられるようになってきており、アンカー工に関する研究にも適用されつつある。FEM解析がアンカー工に関する研究に用いられるようになった初期では、2次元でのFEM解析にとどまり、アンカーは軸剛性のみ考慮可能な棒要素¹⁾を用いたモデルや、アンカーに作用する荷重を地表面に働く力²⁾としてモデル化する事例が見られる。近年では、FEM解析モデルを3次元に発展させて解析を行った研究³⁾もあるが、アンカーの抑止効果について解析したものは少ない。

そこで筆者らは、アンカー工による抑止効果の適切な評価と配置の決定方法を検討することを目的として、アンカー工の挙動を表現できる弾塑性3次元FEM解析モデルの構築を行った。本稿では、アンカー工を模式的に再現した室内における模型実験について弾塑性3次元FEM解析モデルを構築し、実験で計測されたアンカー荷重値や土圧値とFEM解析で再現された解析値を比較してFEM解析に用いる各種パラメータの設定について検討した結果を報告する。

2. アンカー模型実験

2.1 模型実験の概要

アンカーを模式的に再現した模型実験は、独立行政法人土木研究所所有の大型一面せん断試験装置を用いて実施した⁴⁾。同装置は全体の大きさが幅1.5m×長さ2.0m×高さ1.3mあり、高さ1.0mの上部せん断箱と高さ0.3mの下部せん断箱からなる。せん断および荷重載荷は油圧ジャッキで行い、上部せん断箱に最大3,000kNのせん断荷重と最大1,600kNの鉛直荷重を載荷することが可能である。また、せん断変位は最大300mmまで与えることが可能である。

図-1に、アンカーを模式的に再現した模型実験装置を示す。不動層は下部せん断箱にコンクリートを詰めた上に厚さ19mmの鉄板を溶接固定したものとした。そして、鉄板の上にすべり面に作用する土圧を計測する土圧計を設置し、砂を厚さ25mmで敷き均して間詰めを行った。さらに、その上にすべり面として厚さ20mmでベントナイトを敷き均し、その上に移動層としてシルト質砂（最大粒径2mm、砂分78%—シルト分10%—粘土分12%、含水比20%程度）を20cmずつ5層に分けて木製ランマを使って締固めて作成した。ベントナイト層は、せん断変位によってすべり面となるように上部せん断箱と下部せん断箱の境界に位置している。アンカーは両端をネジ切り加工し

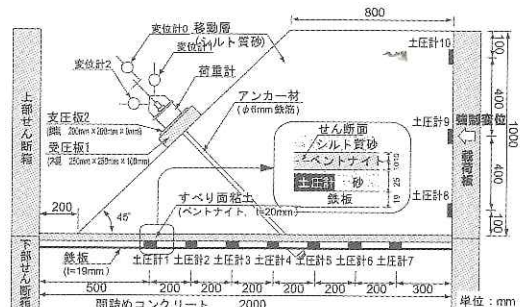


図-1 模型実験装置の概要

た直径6mmの鉄筋を用い、一段配置した。定着部は下部せん断箱に溶接した鉄板にネジで固定し、アンカー頭部は木製(250mm×250mm×厚さ100mm)および鋼製(200mm×200mm×厚さ9mm)の支圧板を配してネジで固定した。この時、アンカーにプレストレス $P_r = 3.38 \times 10^{-3} \text{MN}$ を与えた。強制変位は上部せん断箱の載荷板を1mm/minで等速変位させて与えた。

計測項目は、載荷板による強制変位、アンカー頭部荷重(支圧板上部に設置)、すべり面に作用する土圧(7箇所)、載荷板に作用する土圧(3箇所)である。

2.2 模型実験の結果

図-2に模型実験によって得られた強制変位とアンカー頭部荷重および土圧の関係を示す。なお、アンカー頭部荷重はFEM解析結果と比較できるように、式(1)を用いて応力に変換した。また、各グラフにおいて、Y軸のマイナス側が圧縮、プラス側が引張である。

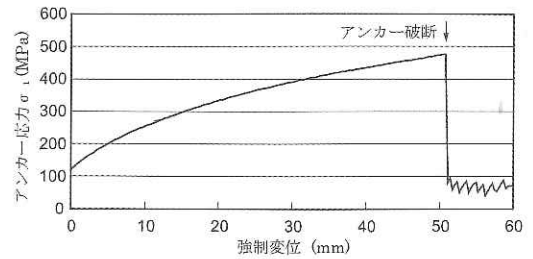
$$\sigma_1 = P/A \quad \dots \text{式(1)}$$

σ_1 : 応力 (Pa)

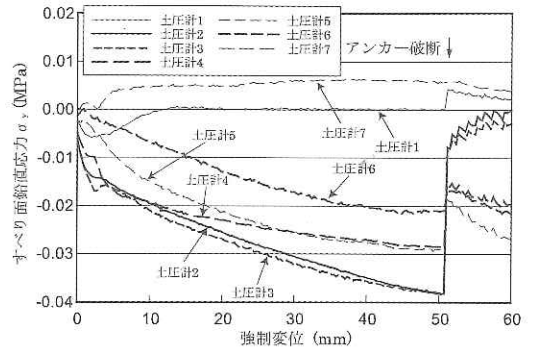
P : 頭部荷重 (N)

A : アンカー断面積 (m^2)

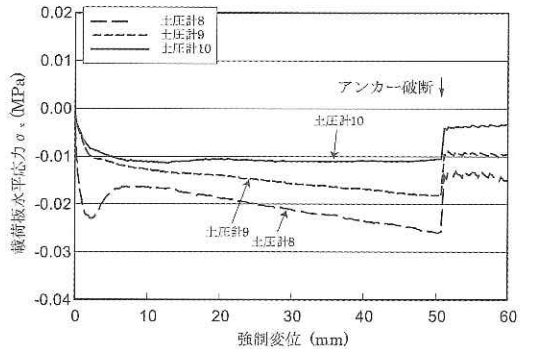
アンカー応力は、強制変位を与えることでプレストレス($P_r = 3.38 \times 10^{-3} \text{MN}$, 応力値 $\sigma_{1r} = 120 \text{MPa}$)から徐々に増加し、変位が約50mmに達した時点でアンカーが破断して一気に低下した(図-2a)。図-2b)に示したすべり面に作用する土圧は、すべり面端部の計測箇所(移動層のり尻端の土圧計1と載荷板側端の土圧計7)を除いて強制変位の増加に伴って土圧が増加し、アンカーの破断によって一気に低下した。土圧の増加量は計測位置によって異なり、アンカー頭部との距離が近いほど増加量が多い傾向にある。すなわち、土圧計2および土圧計3が大きい値を示し、アンカー頭部からの距離が遠い土圧計6は小さい値を示す。図-2c)に示した載荷板に作用する土圧は、すべり面に作用する土圧と同様に強制変位の増加に伴って増加し、アンカーの破断によって一気に低下した。土圧の上昇パターンは、強制変位2~3mmまでの荷重増加速度が大きく、5mm以降では漸増した。ただし、土圧計10については、強制変位5mm以降はほぼ一定の値を示した。アンカー破断時の最終的な土圧の大きさは、載荷板下部ほど大きく、土圧計8が最大値を示す。なお、土圧



a) 強制変位-アンカー応力



b) 強制変位-すべり面土圧



c) 強制変位-載荷板土圧

図-2 アンカー模型実験の結果

計8の強制変位2~3mmでピークが発生した原因については不明である。

3. アンカーFEM解析

3.1 解析条件

3.1.1 解析モデル

実験模型は奥行きがありアンカーを中心に左右対称であることから、解析モデルはアンカーを中心とする実験模型の幅1/2の領域についてモデル化した(図-3)。アンカー、支圧板、移動層、載荷板およびすべり面はソリッド要素(要素数14,827)とし、アンカーは六面体要素からなる八角形断面で表現した。アンカーのモデル化につい

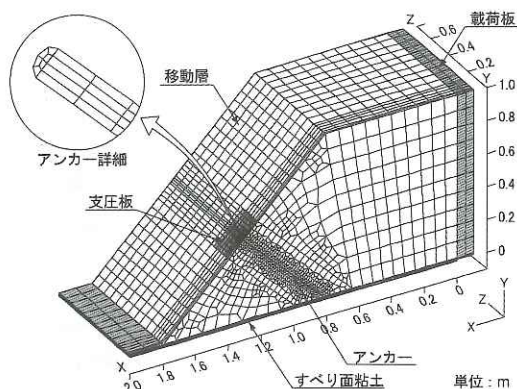


図-3 要素分割図

ては、棒要素を用いる方法もあるが、アンカーと土要素との不連続性を表現するため、それを非線形ばねで表現できるソリッド要素でモデル化した。

支圧板および載荷板が移動層に接する面については、引張力が作用すれば剥離現象を、せん断強度以上のせん断力が作用すればすべり現象を表現できるジョイント要素とした。アンカーと移動層の接する面については、自由長として両者間に摩擦抵抗が生じないものとして扱い、圧縮力のみを伝達し、せん断方向にすべりを発生させる非線形ばねを用いてモデル化した。

3.1.2 物性値

各要素に与えた物性値を表-1に示す。載荷板、

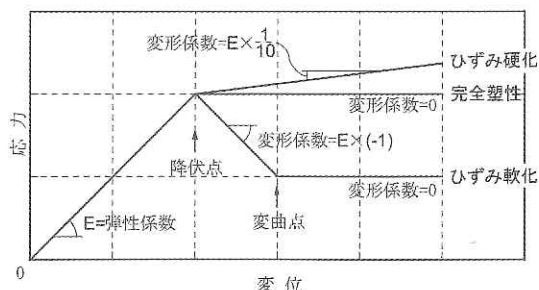


図-4 塑性特性の模式的な応力-ひずみ関係

表-1 ソリッド要素の弾性特性

部 材	単位体積重量 γ (MN/m ³)	弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	粘着力 c (MPa)	内部摩擦角 ϕ (°)
載荷板	0.0770	2.0×10^5	0.30	1.22×10^2	0
支圧板	0.0770	2.0×10^5	0.30	1.22×10^2	0
アンカー (鉄筋)	0.0770	2.0×10^5	0.30	1.42×10^2	0
移動層 (シルト質砂)	0.0155	感度解析結果: 4.0×10^0 (土質試験結果: 1.4×10^0)	0.33	1.20×10^{-2}	30
すべり面 (ベントナイト)	0.0142	5.0×10^{-1}	0.33	7.00×10^{-3}	5

支圧板、アンカーは一般値として道路橋示方書⁵⁾より“鋼”の値を設定した。移動層のシルト質砂とすべり面粘土のベントナイトについては、同じ材料を用いて行った土の密度試験と一面せん断試験の結果より設定した。なお、移動層の弾性係数については「3.2.2 移動層の弾性係数 (E) パラメータ解析」で述べるように、感度解析により最もよく模型実験結果を再現できる値を設定した。移動層とすべり面粘土の塑性特性については、一面せん断試験の結果から設定することができなかったため、完全塑性、ひずみ硬化およびひずみ軟化について、弾性係数を基に図-4に示すように設定した。完全塑性は、降伏後の変形係数をゼロとする。ひずみ硬化は、降伏後の変形係数を弾性領域の弾性係数の1/10倍とする。ひずみ軟化は、降伏後の変形係数を弾性領域の弾性係数の-1倍とし、変曲点のひずみは降伏ひずみの1/2としてその後の変形係数はゼロとした。なお、「3.2感度解析」では完全塑性を用いて解析を行った。

3.1.3 外力条件

解析モデルに作用させる外力は、自重、アンカーのプレストレスおよび強制変位である。自重は、全要素に鉛直下向きに作用させる。プレストレスは模型実験と同じ $Pr = 3.38 \times 10^{-3} \text{MN}$ とし、FEM解析上では式 (2) に示す線膨張係数 (α) を用いて擬似的に温度変化を与えて緊張力を発生させた。値については「3.2.1 温度変化パラメータ解析」で述べるように、温度変化を変えた感度解析を行い設定した。強制変位は、載荷板要素の端部接点を水平方向 (X軸プラス方向) に変位させる。このとき変位量は0.5mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm, 2.5mm, 5.0mm, 10mm, 以降100mmまでは10mm刻みとした16ステップで与えた。

3.2 感度解析

3.2.1 アンカーの温度変化量 (Δt) パラメータ解析
アンカーにプレストレス $Pr = 3.38 \times 10^{-3} \text{MN}$

を導入するため、アンカー要素に線膨張係数を $\alpha = 0.177 (1/^\circ\text{C})$ として温度変化量 $\Delta t = -3.38 \times 10^{-3}^\circ\text{C}$ を与える。この時、アンカーが縮小して引張力が発生するが、移動層の表面では支圧板を介して応力が伝達して沈下が生じ、引張力が低下する。そのため、引張り力の低下分を補うためにさらに温は $P_r = 3.38 \times 10^{-3}\text{MN}$, $E = 2.0 \times 10^5\text{MPa}$, $A = \pi \times (0.006/2)^2 = 2.83 \times 10^{-5}\text{m}^2$ であり、 $\Delta t = -3.38 \times 10^{-3}^\circ\text{C}$ とすると、式 (2) より線膨張係数は $\alpha = 0.177 (1/^\circ\text{C})$ となる。

$$\alpha = P_r / \Delta t EA \quad \dots \text{式 (2)}$$

- ここに、 α : 線膨張係数 ($1/^\circ\text{C}$)
- P_r : プレストレス (N)
- Δt : 温度変化量 ($^\circ\text{C}$)
- E : 弾性係数 (Pa)
- A : 断面積 (m^2)

ここで、アンカー緊張力は応力として式 (1) より求められ、プレストレス $P_r = 3.38 \times 10^{-3}\text{MN}$ に相当する応力は式 (3) より 120MPa となる。

$$\sigma = 3.38 \times 10^{-3} / \{\pi \times (0.006/2)^2\} \quad \dots \text{式 (3)}$$

$$= 120\text{MPa}$$

ここでは温度変化量 (Δt) をパラメータとして感度解析を行い、移動層表面の沈下を考慮して所定のプレストレスを与えるための温度変化量 (Δt) を求めた。なお、求める温度変化量 (Δt) は移動層の弾性係数 (E) に応じて変化することが予測されるため、「3.2.2 移動層の弾性係数 (E) パラメータ解析」の各ケースも考慮して実施した。

移動層の弾性係数 (E) を変化させた4ケースについて、プレストレスを発揮させるために必要な温度変化量 (Δt) について解析した結果を表-2に示す。アンカー応力を目標とする $\sigma_1 = 120\text{MPa}$ を得るためには、いずれのケースにおいても当初に計算した温度変化量 ($\Delta t = -3.38 \times 10^{-3}^\circ\text{C}$) よりも大きな値が必要なが示された。当初に計算した温度変化量 ($\Delta t = -3.38 \times 10^{-3}^\circ\text{C}$) では、アンカー応力はほぼゼロであった。

移動層の弾性係数 (E) との関係については、弾性係数 (E) が大きいほど当初に計算した温度変化量 ($\Delta t = -3.38 \times 10^{-3}^\circ\text{C}$) に近く、弾性係数 (E) が小さくなるほど大きな温度変化量 (Δt) が必要であることが示された。

3.2.2 移動層の弾性係数 (E) パラメータ解析

土要素の大部分を占める移動層の弾性係数 (E) は、その値の大小によって再現解析の結果に影響

表-2 温度変化パラメータ解析の結果

Case	移動層 弾性係数 E (MPa)	発揮された アンカー応力 σ_1 (MPa)	温度変化 Δt ($^\circ\text{C}$)	当初温度変化量 $\Delta t = -3.38 \times 10^{-3}^\circ\text{C}$ に対する比
1	1.4	122	-0.0523	15.47
2	4.0	122	-0.0229	6.78
3	7.0	123	-0.0160	4.73
4	14.0	121	-0.0111	3.28

を与えると考えられる。模型実験と土質試験の状態が必ずしも同一ではない場合が考えられるため、土質試験結果より設定された弾性係数 (E) およびその値を10倍の範囲内で変化させた感度解析を実施し、模型実験の弾性変形領域におけるアンカー応力の変化を表現できる弾性係数 (E) を試行錯誤により求めた。なお、解析ステップは、自重解析、アンカープレストレスの付加、2.5mmまでの強制変位 (土圧の実験結果から弾性変形領域と判断した範囲、5ステップ) の7ステップとし、解析ケースは、前述した表-2に示す4ケースとした。

解析結果を図-5に示す。解析の結果、アンカー応力増分 ($\Delta \sigma_1$) は実験値と同様に強制変位を与えるとアンカー応力は直線的に増加し、弾性係数 (E) が大きいほどアンカー応力の増加が大きい。土質試験結果より設定された弾性係数 $E = 1.4\text{MPa}$ では、強制変位2.5mmにおけるアンカー応力値が実験値の半分程度となっており再現できていない。感度解析結果より、移動層の弾性係数を $E = 4.0\text{MPa}$ とすると最もモデルの再現性が良いことが分かった。なお、この時に与えた温度変化は表-2に示すケース2の $\Delta t = -2.29 \times 10^{-2}$ である。

3.3 再現解析

3.3.1 再現解析の実施

前述の感度解析の結果より温度変化 ($\Delta t = -2.29 \times 10^{-2}^\circ\text{C}$)、移動層の弾性係数 ($E = 4.0\text{MPa}$) を設定し、アンカー模型実験の再現解析を

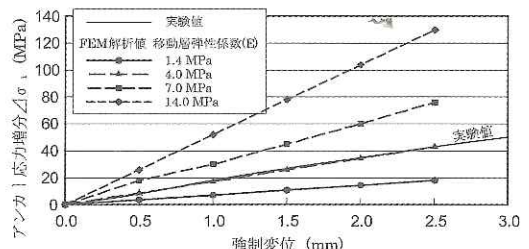


図-5 移動層弾性係数 (E) とアンカー応力

実施した。解析ステップは、自重解析、アンカープレストレスの付加、強制変位（100mmまで16ステップ）の18ステップで実施した。

3.3.2 再現解析の結果

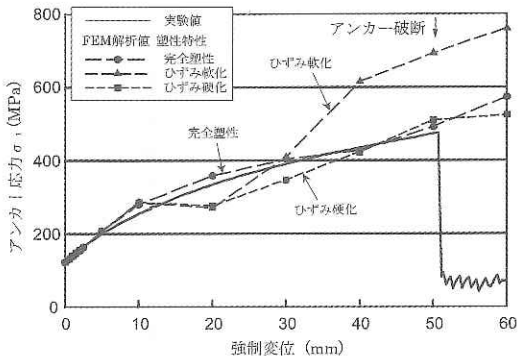
図-6および表-3に再現解析の結果を示す。図-6a)の強制変位とアンカー応力の関係については、移動層の塑性特性を完全塑性、ひずみ硬化およびひずみ軟化とした3ケースについてそれぞれの結果を併記した。図-6a)より本モデルでは移動層の塑性特性を完全塑性とした場合が最も実験値を再現できており、アンカーが破断する強制変位50mmまで類似した応力変化を示している。このため、図-6b), c)については解析値として塑性特性を完全塑性としたケースについて示している。なお解析値が、アンカーが破断した応力以上に上昇しているのは、アンカー要素に破断現象を表現

するための物性特性を与えていないためである。また、強制変位20mm時のひずみ硬化およびひずみ軟化のアンカー応力の減少については、現時点ではこの原因を特定するには至っていない。

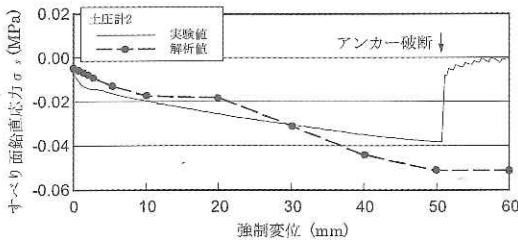
強制変位とすべり面に作用する土圧の関係について、すべり面土圧を計測した7つの土圧計の中で最もよく再現された土圧計2のデータを図-6b)に示す。すべり面に作用する土圧は、強制変位が約30mmを超えると垂直応力の解析値は実験値よりも大きな圧縮値を示し、強制変位50mmの段階で実験値に対して134%となる。全体としては実験値と類似した応力増加傾向を示し、強制変位によるすべり面に作用する土圧を概ね再現できている。

強制変位と載荷板土圧の関係について、載荷板土圧を計測した3つの土圧計の中で最もよく再現された土圧計10のデータを図-6c)に示す。載荷板の水平応力は、強制変位が10mm程度までの初期段階に大きく増加し、その後ほぼ一定な値で推移する状態を概ね表現できている。

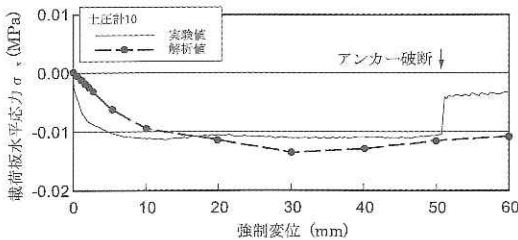
しかしながら、以上のように模型実験結果を再現できたものばかりではなく、表-3に示すように土圧計によっては十分に再現できないものもあった。とくにすべり面土圧の土圧計1と土圧計7および載荷板土圧の土圧計8と土圧計9については、実験値と解析値の乖離が認められる。土圧計1と土圧計7については、すべり面の端部であり模型実験では他の土圧計とは異なった傾向の計測値となり（ゼロもしくは引張状態を示した）、解析モデルと応力条件が局所的に異なっていたと推察される。土圧計8と土圧計9については、FEM解析



a) 強制変位-アンカー応力



b) 強制変位-すべり面土圧



c) 強制変位-載荷板土圧

図-6 再現解析の結果

表-3 実験値と解析結果の比較

対象	計測器	実験値※1 (MPa)	解析値※1 (MPa)	比率※2 (%)
アンカー	ロードセル	474.0	491.6	104
	土圧計1	0.0000	-0.0284	-
すべり面	土圧計2	-0.0382	-0.0514	134
	土圧計3	-0.0381	-0.0224	59
	土圧計4	-0.0285	-0.0235	82
	土圧計5	-0.0290	-0.0181	62
	土圧計6	-0.0211	-0.0253	120
	土圧計7	0.0059	0.0175	299
	土圧計8	-0.0269	-0.1046	403
移動層	土圧計9	-0.0181	-0.0387	213
	土圧計10	-0.0106	-0.0115	108

※1: 強制変位50mmにおける値、※2: 実験値に対する比率

値は載荷面の下側（すべり面側）に設置されている土圧計ほど実験値に対する比率が大きくなる傾向を示している。このことから、載荷面土圧の発生に係わるFEM解析モデルのパラメータ設定等が十分でなかったことによって応力条件が異なっていたことが推察される。

4. まとめ

筆者らはアンカー工による抑止効果の適切な評価と配置の決定方法を提案することを目的として、アンカー工の挙動を表現できる弾塑性3次元FEM解析モデルの構築を行った。本研究では、アンカーを模式的に再現した室内における模型実験を再現するための弾塑性3次元FEM解析モデルの構築を試みた。その結果、強制変位によるアンカーの緊張力変化やすべり面および載荷板に作用する土圧について、概ね再現できるモデルを構築することができた。

ここに、本再現解析における解析モデルおよび各種パラメータの設定について得られた知見をまとめるとともに、今後検討すべき事項について考察を行った。

(1) FEM解析におけるモデル設定

- ・解析モデルは、アンカーを中心に実験モデルの幅1/2の領域をモデル化することで、アンカー応力と一部の土圧計の計測結果を再現できた。
- ・アンカー、支圧板、移動層、すべり面はソリッド要素とし、アンカーは六面体要素からなる八角形断面でアンカー応力を表現できた。
- ・支圧板および載荷板が移動層と接する面は、ジョイント要素にすることですべり現象を表現できた。
- ・アンカーが移動層と接する面は、非線形ばねを用いてモデル化することでせん断方向にすべりを発生させる状態を表現できた。

- (2) アンカー緊張力の発生方法
 - ・FEM解析上ではアンカー要素に線膨張係数を用いて擬似的に温度変化を与えて緊張力を発生させることができた。
- (3) 今後検討すべき事項
 - ・塑性特性などの各種パラメータの設定について、表-3に示すように土圧については解析値と実験値では大きな差が見られるものがある結果となったことから、パラメータの設定手法について、設定順序や感度解析の組合せなど更に詳細な検討が必要と考える。

今後は、アンカー定着部の応力状態などの再現性向上を図りながら実際の地すべり地において施工されたアンカー工のモデル解析を行い、3次元でのアンカー工の抑止効果の評価や配置計画の検討を進めて行く予定である。

参考文献

- 1) 藤田壽雄：有限要素法による地すべりの安定計算と対策工の決定、地すべり、Vol.27, No.4, pp19-26, 1990
- 2) 中村浩之、星野和彦、奥田公也：アンカー工における最適な初期緊張力の設定、地すべり、Vol.29, No.1, pp.16-23, 1992
- 3) 蔡飛、鶴飼恵三：アンカー工による斜面の補強効果一極限平衡法と弾塑性FEMとの比較、地すべり学会誌、Vol.40, No.4, pp.8-14, 2003
- 4) 建設省土木研究所砂防部地すべり研究室：湛水地すべり地におけるアンカー工の設計に関する調査、土木研究資料、第3244号、平成6年3月
- 5) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説I 共通編IV下部工編、平成14年3月

田中 尚*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム交流研究員
Hisashi TANAKA

石井靖雄**



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム主任研究員
Yasuo ISHII

藤澤和範***



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム
Kazunori FUJISAWA

森下 淳****



近畿地方整備局河川部建設専門官（元 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム研究員）
Atsushi MORISHITA