

3D-FEMによる斜面全体のすべりに対する引張材フレームの 性能に関する基礎的研究

千田 知弘¹・岩佐 直人²・堀 謙吾³・副田 尚輝⁴・武田 卓大⁵
・増井 優哉⁶

¹正会員 博士（工学） 東北学院大学准教授 工学部環境建設工学科
（〒985-8537宮城県多賀城市中央1-13-1）

²正会員 学士（工学） 日鐵住金建材株式会社 土木事業部門 部長
（〒135-0042 東京都江東区木場2-17-12）

³正会員 学士（工学） 日鐵住金建材株式会社 商品開発センター土木商品開発部シニアマネージャー
（〒135-0042 東京都江東区木場2-17-12）

⁴修士（工学） 日鐵住金建材株式会社 土木商品事業部門防災・鉄構商品部
（〒135-0042 東京都江東区木場2-17-12）

⁵学士（工学） 前田建設工業株式会社 土木事業本部
（〒102-8151 東京都千代田区富士見2-10-2）

⁶東北学院大学 工学部環境建設工学科（〒985-8537宮城県多賀城市中央1-13-1）

1. はじめに

本研究は、ネット構造のジオグリッドをフレーム材として用い、斜面の安定化を図る工法に関する研究群の一つである^{1)~7)}。本研究開始時の背景として、近年では、施工直後から環境や景観に配慮した土木構造物のニーズが高まっており⁸⁾、その対象としてのり枠保護工、斜面安定化工への景観に関する対応が求められていた。景観性が特に求められる景勝地の場合、コンクリートが露出する一般的なコンクリートのり枠工は敬遠される傾向にあり、また、植生を用いたコンクリートのり枠工であっても、被覆面の全面緑化を達成するのに2~3年かかる場合がある。そこで、施工後即時全面緑化が可能な斜面安定化工の開発が進められるに至る。

構造詳細は次章で述べるが、本研究で提案する引張材フレームは、ネット構造のジオグリッドを斜面に対し格子状、またはトラス状に配置した後、各ジオグリッドの格点に長さ1mのアンカーを固定板を介して挿入・固定する非常に簡易な構造となっている。また、ネット構造のジオグリッドを用いるため、即時全面緑化が可能となっている。一方、すべり抵抗に関するメカニズムは一般的な斜面安定加工とは大きく異なり、円弧すべりやのり肩すべりをのり枠で押さえつけるのではなく、ネット構造のフレーム

材がすべり土塊を網のように捕捉し、それ以上すべりが進行するのを抑制するメカニズムとなっている。

詳細は各文献^{1)~7)}に譲るが、これまでの成果として、斜面内の局所的な円弧すべりやのり肩すべりを対象とした場合、十分な性能を有することが確認され、2017年度から福井県や北海道での施工に至っている。加えて、施工時の検証によって、低コスト、重機を必要としない簡易施工、施工期間の短縮が実現可能であるとともに、それらの効果が極めて高いことを確認した。現在日本においては、対策が必要とされる斜面の80%近くが未整備であるとも言われており、低コスト、簡易施工、施工期間の短縮によって、整備率の増加に貢献できる可能性がある。

上記成果を基に、斜面全体のすべりを対象とした安定性の評価もまた、平成28年度から進めており、初期研究¹⁾として3D-FEMを主体とした研究を行っている。地震では斜面全体のすべりが生じる可能性があり、同一構造で対応可能であることが確認されれば、地震時における斜面安定化に大きく寄与できると言える。

そこで本研究では、崩壊斜面の平均的な斜面角度40°の斜面を対象とし、地盤のゆるみ深さ、アンカーの長を変化させた3D-FEM解析を行い、斜面全体のすべりに対する、引張材フレームの性能評価を行った結果を報告する。

2. 対象モデル

対象とする斜面の横断面図にアンカーの配置を加えた図を図-1 に、引張材として機能するネット状のジオグリッドのフレーム材（以後、フレーム材）とアンカーの配置を示した正面図を図-2 に示す。本研究では斜面角度 40° の斜面を対象とし、斜面寸法は既報¹⁾に準じ、幅方向に連続する斜面の内、幅 5000mm 分を取りだしたモデルと仮定した上で、幅 5000mm、高さ 6500mm、斜面長 10112mm、のり肩長 4000mm とした。

フレーム材の寸法、配置に関しては、2017年度に福岡県や北海道で施工された実構造に準じるものとし、幅 260mm×厚さ 6mm、配置は 2000mm 間隔の格子状とした。アンカーに関してもまた実構造に準じ、D19 (SD345) を用いることとし、フレーム材の格点中央に挿入することとする。なお、施工時には、予め削孔径 50mm×アンカー長の先孔を開け、グラウトを充填した後アンカーを挿入する工程となる。また、アンカー上部には 300mm×300mm×厚さ 6mm の固定板が取り付けられており、フレーム材と各アンカーは固定板を介して一体化される。アンカー長は、実構造では 1000mm であるが、本研究ではアンカー長が斜面のすべり抵抗にどの程度寄与するのかを比較検討するため、地山のみ、アンカー長 1000mm と 2000mm を対象とする。

斜面全体のすべり挙動に関しては、既往の一般的なモデル化手法のように、すべり面を予め設定し、すべり土塊を変位させるのではなく、のり肩および斜面に 1000mm もしくは 2000mm の軟弱地盤層を基盤層の上部に設定し、軟弱地盤層の自重変形によってすべり挙動を近似する手法とした^{1),3)}。

3. FEM解析モデル

本解析では、汎用 FEM（有限要素法）解析ツール ANSYS（Ver15, ANSYS, Inc）を用いて弾性解析を行った。要素分割図を図-3 に、解析に用いた各材料を表-1 に示す。図-3 中に O で示したのり面下端中央位置に原点を取り、幅方向に x 軸、高さ方向

表-1 解析に使用した各材料定数

部材名	ヤング率(MPa)	ポアソン比	単位体積重量(kN/m ³)
基盤層	200	0.25	18.4
軟弱地盤層	0.4	0.25	18.4
アンカー	206000	0.3	79.0
固定板	206000	0.3	77.0
グラウト	10000	0.25	23.0
ネット材	350	0.3	2.04

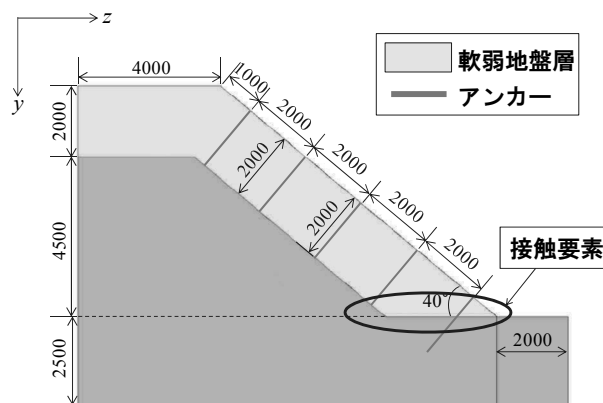


図-1 横断面図（単位：mm）

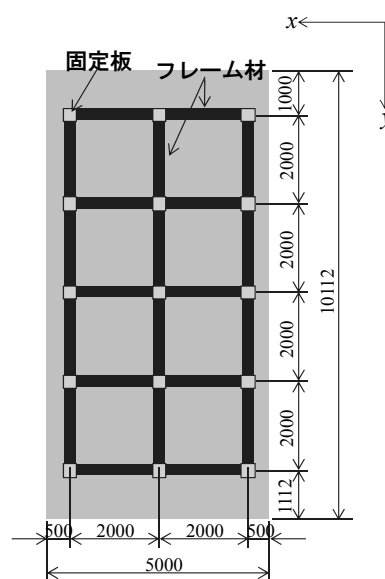


図-2 フレーム材とアンカーの配置（単位：mm）

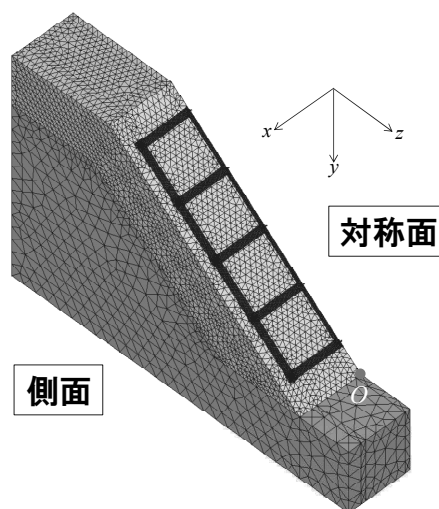


図-3 要素分割図

表-2 のり肩およびのり尻に生じる鉛直変位と水平変位（単位：mm）

軟弱地盤深さ	フレーム材	アンカー深さ	鉛直方向変位(のり肩)	水平方向変位(のり肩)	水平方向変位(のり尻)
1m	無	無	36.39	18.18	20.59
		1m	35.02	17.06	18.31
		2m	34.67	16.61	18.21
	有	1m	34.90	16.86	19.67
		2m	34.55	16.42	19.46
2m	無	無	134.56	67.80	81.33
		1m	134.03	67.30	53.18
		2m	124.15	65.63	52.36
	有	1m	132.18	63.95	58.64
		2m	122.64	63.03	58.59

に y 軸，水平方向に z 軸を取った．解析対象は， xy 面に対し左右に対象の構造を有するので， yz 面で 2 分割された左側を解析対象とする．要素サイズは変形量に応じて，50mm～500mm とした．载荷は，既報^{1), 3)}に準じて鉛直方向に 1G とした．軟弱地盤層のゆるみ挙動は，基盤層の 1/500 のヤング率を与える（表-1）ことで大変形が生じやすいモデルとし，さらに図-1 中に丸で示した軟弱地盤層下部に接触要素を用い，水平方向に若干のすべり挙動を与えた．接触解析には，固定板，フレーム材，軟弱地盤層 - 基盤層界面の全ての接触面に摩擦係数 0.1 を用いた．境界条件は側面および対称面の yz 平面上にある全ての節点の x 方向変位を拘束，基盤層底面に位置する全ての節点の y 方向変位を拘束，基盤層最前面と背面上に位置する全ての節点の z 方向変位を拘束した．解析モデルは，軟弱地盤層の深さ 1000mm，2000mm の 2 種類×アンカー長 1000mm，2000mm の 2 種類×フレーム材の有無の 2 種類，計 8 種類に加え，比較対象として軟弱地盤層深さ 1000mm，2000mm の無対策の解析の 2 種類を加えた合計 10 種類のモデルに対し解析を行った．

3. 結果と考察

(1) 変位分布

全てのモデルにおける，のり肩およびのり尻に生じる鉛直変位と水平変位を表-2 に示す．測定箇所は対称面上の斜面最上部と最下部の節点とした．

表-2 において，のり肩の変位を比較すると，アンカー長 1000mm よりも 2000mm の方が変位は減少し，同じアンカー長の場合，引張材フレームが取り付けられているモデルの方が変位は減少する．これは，鉛直変位，水平変位ともに共通した挙動であり，また，軟弱地盤深さが深いほど，変位の減少率は増加する．この挙動は，斜面角 10° ， 30° ， 50° で

も同様の傾向が見られる¹⁾．

一方，のり尻の水平変位を比較すると，のり肩同様，アンカー長1000mmよりも2000mmの方が，変位が減少することが見て取れるが，のり肩ではアンカーの長の違いによって最大で10%の変位減少が見られるのに対し，のり尻では最大でも約1%の変位減少しか見られない．また，同じ軟弱地盤深さ，アンカー長である場合，フレーム材有モデルの変位が大きくなる傾向が見られ，のり肩の挙動と異なっている．そこで，のり肩とのり尻とで挙動が異なる理由をコンター図で確認していくこととする．ただし，軟弱地盤深さ1000mmよりも2000mmのモデルの方が変位差が大きいのので，以後，軟弱地盤深さ2000mmのモデルのみを対象としていく．

対称面からみた地山のみ水平方向変位分布の側面図を図-4に，アンカー長2000mm・フレーム材有モデルの水平方向変位分布の側面図を図-5に，アンカー長2000mm・フレーム材無モデルの水平方向変位分布の側面図を図-6に，アンカー長1000mm・フレーム材有モデルの水平方向変位分布の側面図を図-7に，アンカー長1000mm・フレーム材無モデルの水平方向変位分布の側面図を図-8に示す．各図はコンターの値を合わせてある．なお，図-4においては，のり肩から斜面中央部にかけて変位が大きい範囲を丸で示した．

のり尻部の変位分布に関し，図-5～図-8を比較すると，斜面の一番下に挿入されたアンカー周辺の挙動を含め，図-5と図-7，図-6と図-8の水平変位分布と値が，アンカー長が異なるにもかかわらず，極めて近い挙動を示している．一方，のり尻部周辺の挙動を除けば，値こそ異なるものの，同じアンカー長のモデルどうしの挙動が一致する．

図-4で丸で示した範囲をアンカー長の違いで比較すると，アンカー長2000mmの場合（図-5，図-6），図-4で丸で示した水平変位の大きい範囲が拡大し，値も大きくなっているのに対し，アンカー長

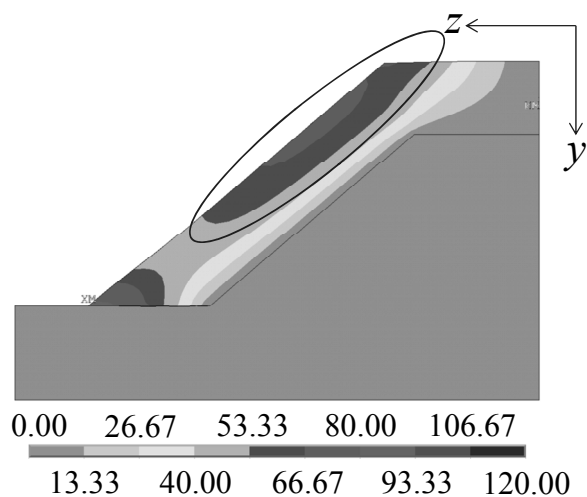


図-4 地山のための水平方向変位分布の側面図（単位：mm）

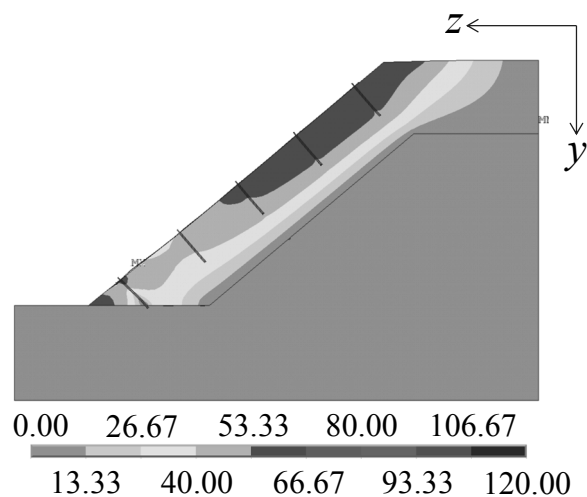


図-7 アンカー1000mm，フレーム材有モデルの対称面からみた水平方向変位分布の側面図（単位：mm）

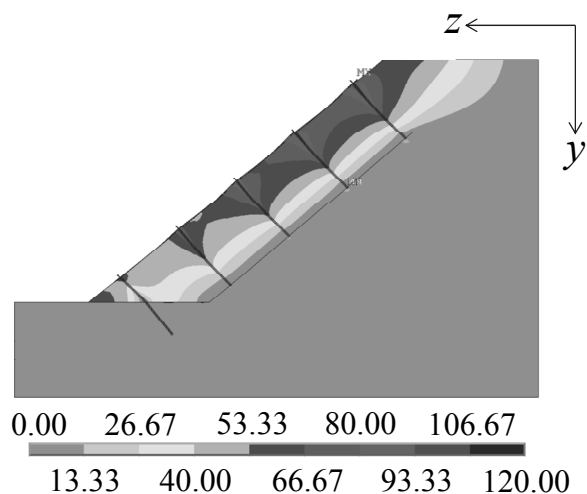


図-5 アンカー2000mm，フレーム材有モデルの対称面からみた水平方向変位分布の側面図（単位：mm）

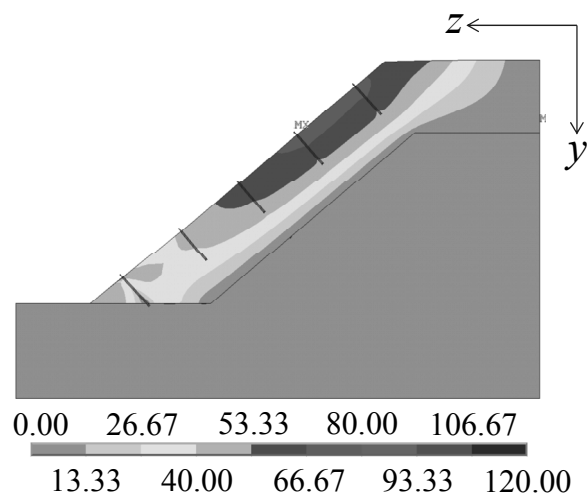


図-8 アンカー1000mm，フレーム材無モデルの対称面からみた水平方向変位分布の側面図（単位：mm）

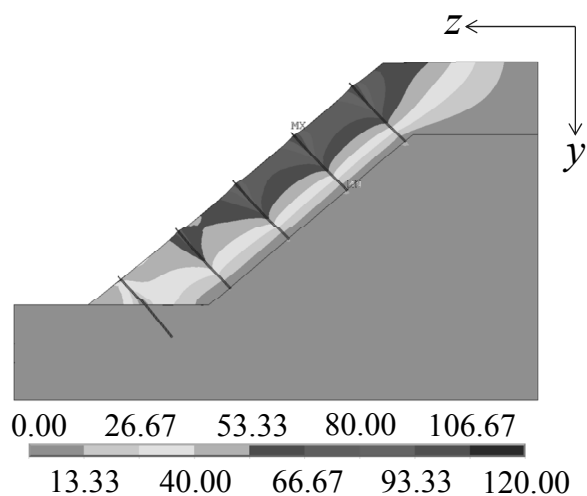


図-6 アンカー2000mm，フレーム材無モデルの対称面からみた水平方向変位分布の側面図（単位：mm）

1000mmの場合（図-7，図-8），水平変位の大きい範囲が縮小していることが分かる．アンカー長2000mmの場合，アンカー周辺の水平変位の値が大きくなっており，分布挙動を見てもアンカー周辺で変位分布が変わっていることから，アンカーの影響を受けていることは明らかである．この挙動はアンカー長1000mmでも若干見られるが，影響は小さい．斜面表面の変形形状を比較すると，アンカー長2000mmの場合，アンカー一部が盛り上がるように波状に変形しているのに対し，アンカー長1000mmの場合，図-4の地山のためのモデル同様，斜面はなだらかに変形している．この点からも，アンカー長の違いが，のり尻部周辺を除く斜面の変位分布に大きな差を生じさせることが分かる．

以上より，のり尻周辺を除く斜面の水平変位に関

しては、アンカー長の差が、変位挙動に大きな影響を及ぼすことが示されたが、のり尻周辺においては、アンカー長による差は見られず、フレーム材の有無によってのみ差が生じている可能性が示唆された。そこで、フレーム材が斜面の水平変位分布にどのような効果を与えているかを検討していく。

アンカー長2000mm，フレーム材有モデルの水平方向変位分布を示した正面図を-x方向に45°，y方向に45°回転させた図を図-9に，アンカー長2000mm，フレーム材無モデルの正面図を同様に回転させた図を図-10に示す。

両図を比較すると，フレーム材有モデルの方が全体的に斜面の変位が増加していることが分かる。フレーム材が軟弱地盤層の変位を拘束する場合，斜面とフレーム材の色が同じとなるが，図-9においては，丸で示した上から3列目の横方向のフレーム材周辺にしかそのような挙動は見られず，全体的にフレーム材の変位抑制効果が低いことが示唆される。地盤がゆるやかに変形する際，同様にフレーム材もゆるやかに変位するため，変位抑制効果が低くなる可能性が既報¹⁾で示されており，本解析結果も同じ傾向が示されたと推察される。なお，この挙動はシートベルトを素早く引いた場合とゆっくりと引いた場合の挙動に近い。表-2などでのり尻のフレーム材有モデルの水平変位の方が大きくなる直接的な理由として，フレーム材が変位抑制効果に寄与していないことに加え，軟弱地盤のヤング率に0.4MPaと著しく低い値を与えているため，固定板とフレーム材の重さが，変位の増加に直接的に影響したと推察される。

今後，本成果を基に，フレーム材の配置をトラス状にするなど，フレーム材が引張材として機能するよう再設計し，斜面全体のすべり挙動を効果的に抑制する方法を検討していく予定である。

(2) アンカーに生じる相当応力分布

下から1列目のアンカーに生じる相当応力分布の代表例として，軟弱地盤深さ2000mm，アンカー長2000mm，フレーム材有モデルの対称面側のアンカーに生じる相当応力分布を図-11に，上から2列目と3列目のアンカーに生じる相当応力分布の代表例として，軟弱地盤2000mm，アンカー長1000mm，フレーム材有モデルの対称面側のアンカーに生じる相当応力分布を図-12に示す。

下から1列目のアンカーに生じる相当応力に関しては，値の大きさは異なるものの，全てのモデルで図-11と同じ傾向を示し，基盤層と軟弱地盤層の界

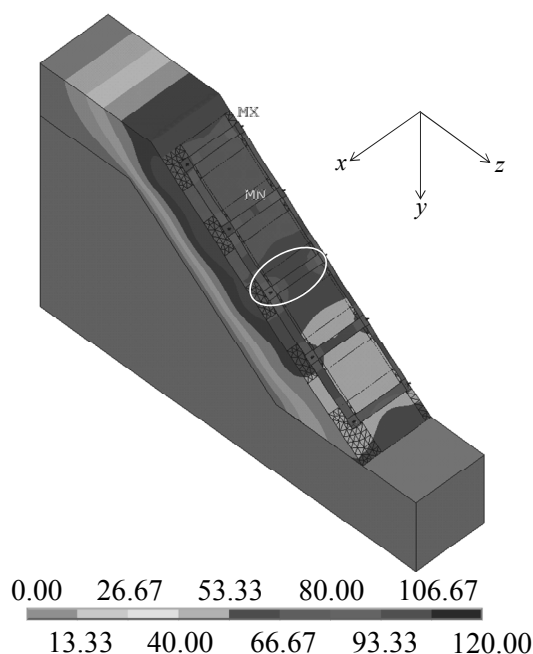


図-9 アンカー2000m，フレーム材有モデルの水平方向変位分布（単位：mm）

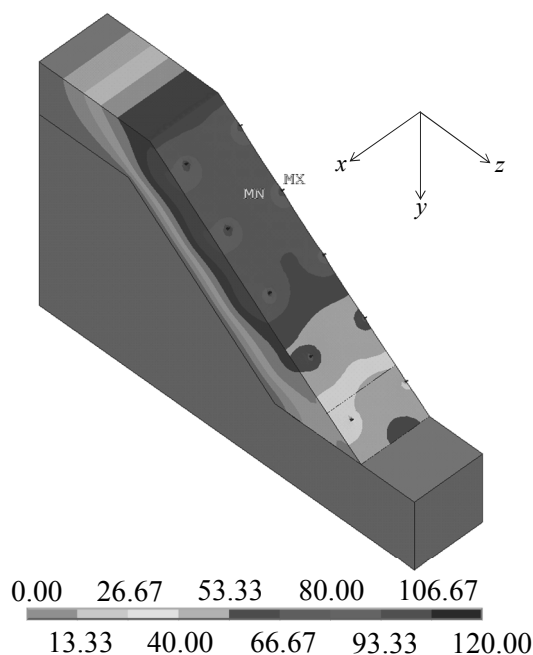


図-10 アンカー2000m，フレーム材無モデルの水平方向変位分布（単位：mm）

面で大きな相当応力が生じている。相当応力の成分の内，y方向応力が多く占めていることから，曲げによって生じる応力である。

一方，2列目から5列目のアンカーに生じる相当応力に関しても，全てのモデルで図-12と同じ傾向を示した。比較的高い相当応力が生じる位置は，変位のコンターが変化する箇所と概ね一致する。また，下から1列目同様，相当応力の成分の内，y方向応力

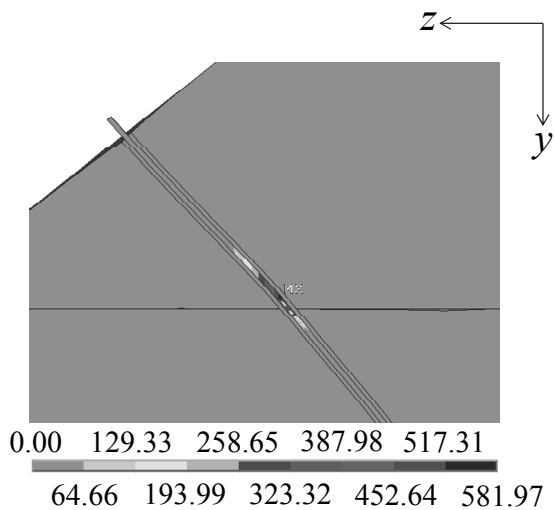


図-11 アンカー2000mm, フレーム材有モデルの上から2列目と3列目のアンカーに生じる相当応力分布 (単位: MP)

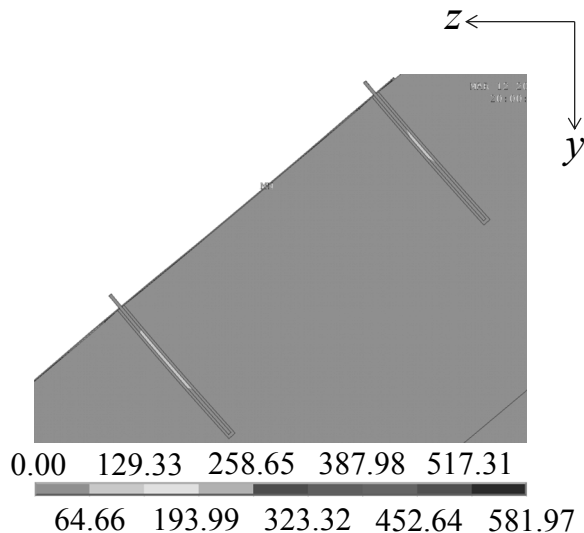


図-12 アンカー1000mm, フレーム材有モデルの上から2列目と3列目のアンカーに生じる相当応力分布 (単位: MP)

の値が多く占め、曲げを受けている。

下から1列目のアンカーに生じる相当応力と、2列目～5列目に生じる相当応力を比較すると、いずれのモデルも下から1列目のアンカーに極めて大きな相当応力が生じ、2列目から5列目のアンカーにはその半分以下の応力しか生じないことが示された。

以上より、下から1列目のアンカーに特に高い相当応力が生じていることから、表-2で示された変位抑制効果は、下から1列目のアンカーが大きく寄与していることが示された。下から2列目～5列目のアンカーに関しても、変位が小さくなる境界付近で高い相当応力が生じており、変位抑制効果を有するこ

とが示された。今後、アンカーの太さや長さを含め、より効果的に変位抑制効果を発揮するアンカーの設計を検討していく予定である。

4. まとめ

本研究では、地震などで生じ得る斜面全体のすべり挙動に対し、ネット状のジオグリッドを用いたフレーム材の効果を確認するとともに、アンカー長の違いがすべり抵抗に与える効果の違いをFEM解析によって比較し評価した。変位抑制効果に関しては、引張材フレームの効果に対し、アンカーの効果が極めて高く、特に下から1列目のアンカーの変位抑制効果が大きいことが示された。本成果を基に、効果的に機能するフレーム材の配置の検討やアンカーの太さ等の検討を引き続き行っていく予定である。

参考文献

- 1) 武田卓大, 千田知弘, 岩佐直人, 堀謙吾, 副田尚輝, 安富懸一, 渡辺浩: 3D-FEMを用いた引張材フレームの斜面安定効果に関する検討, 平成29年度土木学会西部支部研究発表会, DVD-ROM, 2018.
- 2) 千田知弘, 岩佐直人, 堀謙吾, 副田尚輝, 渡辺浩, 今井晴輝: 3D-FEMによる引張材フレーム材を用いた斜面安定対策工の性能評価, 平成29年度土木学会全国大会講演概要集, DVD-ROM, 2017.
- 3) 今井晴輝, 千田知弘, 渡辺浩, 岩佐直人, 堀謙吾, 副田尚輝, 安富懸一: 引張力で抵抗する斜面安定工の設計指針の策定に向けたFEM解析による背面すべりシミュレーション, 平成28年度土木学会西部支部研究発表会, DVD-ROM, 2017.
- 4) 千田知弘, 岩佐直人, 副田尚輝, 堀謙吾, 安富懸一, 入口元太: 引張材を用いたフレーム構造の斜面安定効果に関するFEM解析, 地盤工学研究発表会発表講演集, 51巻, DVD-ROM, 2016.
- 5) 千田知弘, 岩佐直人, 堀謙吾, 副田尚輝, 安富懸一, 渡辺浩, 入口元太: 3D-FEM解析による引張材を用いたフレーム構造の斜面安定効果の評価, 平成28年度土木学会西部支部研究発表会, DVD-ROM, 2016.
- 6) 高橋徳, 石川芳治, 千田知弘: ジオグリッドの斜面崩壊防止効果に関するFEM解析(1), 平成24年度土木学会全国大会, DVD-ROM, 2012.
- 7) 千田知弘, 石川芳治, 高橋徳: ジオグリッドの斜面崩壊防止効果に関するFEM解析(2), 平成24年度土木学会全国大会, DVD-ROM, 2012.
- 8) 例えば, 柴田久, 石橋知也: 目的別系譜図に見る景観研究の動向-98年から07年を対象として-, 景観・デザイン研究論文集, No.7, pp.121-132, 2009.