

地山補強材の打設角度検討のための有限要素解析

東京都市大学大学院 学生会員○渡田洋介
東京都市大学 正会員 伊藤和也 正会員 末政直晃
日鐵住金建材 正会員 副田尚輝 正会員 笠原 啓
日鐵住金建材 正会員 岩佐直人

1. はじめに

地山補強土工法とは自然斜面、切土のり面及び既設盛土などを対象に、地山内に補強材を構築し補強土構造体を形成する工法である。図-1に地山補強土工法の模式図を示す。この工法は経済性、施工性の観点からグラウンドアンカー工などと比べて、比較的小規模な崩壊斜面で適応される。しかし地山補強土工法を対策工として用いた場合、補強材の変形や移動土塊の挙動など未解明な点が多い。

本報告では、有限要素法（FEM）により既往の遠心模型実験を実大換算した斜面モデルを作成し、解析を行った。その結果を補強材配置と打設角度の観点から比較と考察を行った。

2. 既往の遠心模型実験¹⁾

補強材の打設角度を検討するために副田らによって遠心模型実験が行われている¹⁾。この実験では図-2に示すように土槽内に移動層深さ 5.0m、高さ 9.6m、勾配 50°の斜面を縮尺 1/40 でモデル化し、遠心加速度を 40G（40G において実規模を再現）まで上昇させ斜面の変形挙動を調べている。補強材の芯材は直径 60mm の棒鋼の曲げ剛性を再現できるように直径 2.0mm のアルミニウムを用いている。支圧板は正方形のアルミ板を用いている。移動層の模型地盤は豊浦砂と藤森粘土を重量比 2：1 で混合した試料を使用し、密度 1.6g/cm³ になるように体積－重量を調整している。表-1、図-3 に実施されている実験ケースを示す。図-3 のように補強材の配置は全て千鳥配置であり、CASE4 は補強材の頭部をワイヤーで固定したのり面工対策モデルである。この実験では移動層の変位（法肩水平変位、法尻水平変位、法肩鉛直変位、法尻鉛直変位）と補強材ひずみ及び支圧板の圧力をそれぞれ測定している。

3. 補強効果の高い打設角度の検討

地山補強土工法の設計・施工マニュアル²⁾では、地山補強材の補強効果は想定破壊すべり面に対する配置角度によっ

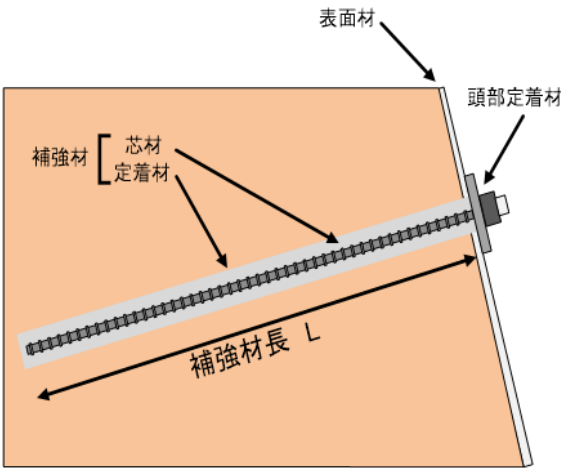


図-1 地山補強土工法

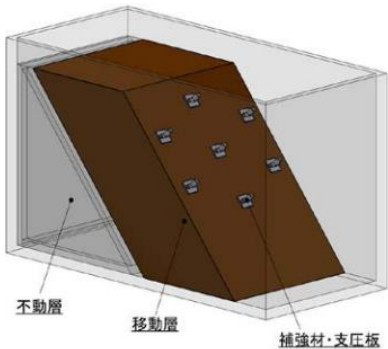


図-2 模型概要図¹⁾

表-1 実験ケース¹⁾

No.	補強材	打設 角度	支圧板 サイズ	ワイヤー
CASE1	無	-	-	-
CASE2	有	90°	17.5mm	無
CASE3	有	70°	17.5mm	無
CASE4	有	90°	12.5mm	有

キーワード 地山補強土工法，打設角度，有限要素法

連絡先 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 東京都市大学 地盤環境工学研究室 TEL. 03-5707-2202 E-mail: g1581718@tcu.ac.jp

て異なることが示されている。また引張補強材として最も補強効果が大きくなる時の角度 θ は内部摩擦角を ϕ としたとき、

$$\theta = 45^\circ - \frac{\phi}{2} \quad (1)$$

と示される。図-4 に想定破壊すべり面、 θ と水平面を示す。一般的には水平面より下向きに $10 \sim 30^\circ$ の範囲で設置すると補強効果が高いとされている。

(1)式をもとにして、遠心模型実験における補強効果の高い補強材の打設角度を検討した。まず ϕ の算出のため、遠心模型実験で使用した試料に定圧一面せん断試験を実施した。図-5 に定圧一面せん断試験の結果を示す。試験結果より $\phi=37.2^\circ$ と求まった。本検討では想定破壊すべり面を移動層と不動層の境界と考えた。この値を(1)式に代入すると、 $\theta=26.4^\circ$ と求まる。遠心模型実験では斜面のなす角度を打設角度としているため、 90° から θ を引いた値となる。最も補強効果の高い打設角度は 63.6° となる。遠心模型実験の場合、その値に近い打設角度 70° のケースが補強効果は高くなると考えられる。

4. 有限要素解析

4.1. 解析概要

遠心模型実験と(1)式で求めた打設角度の妥当性を検討するため有限要素法(FEM)による解析をした。本解析で用いた解析ソフトウェアは PLAXIS 3D 2013³⁾である。解析対象は遠心模型実験を実大換算したモデルを用いた。このモデルは遠心模型実験と同様に移動層深さ 5.0m、高さ 9.6m、勾配 50° 、奥行 8.0m の斜面である。図-1 にモデルの概略図を示す。このときの要素数は 27924、節点数は 41923 である。表-1 に解析パラメータを示す。移動層は遠心模型実験にて使用した試料について実施した。物理、力学試験の結果から Mohr-Coulomb モデルの各種パラメータを算出している。単位体積重量 γ_t は遠心模型実験の湿潤密度と同様にした。ヤング係数 E は一軸圧縮試験、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ は一面せん断試験によって求めている。なおダイレイタンシー角 ψ は文献値⁴⁾の式である

$$\psi = \phi - 30^\circ \quad (2)$$

より求めた。

ここで、定圧一面せん断試験で得られた c を用いたところ、補強なしのケースにて崩壊により解析が停止してしまった。そのため、今回は $c=15$ として解析を行った。

不動層（地山）については線形弾性モデルであり、解

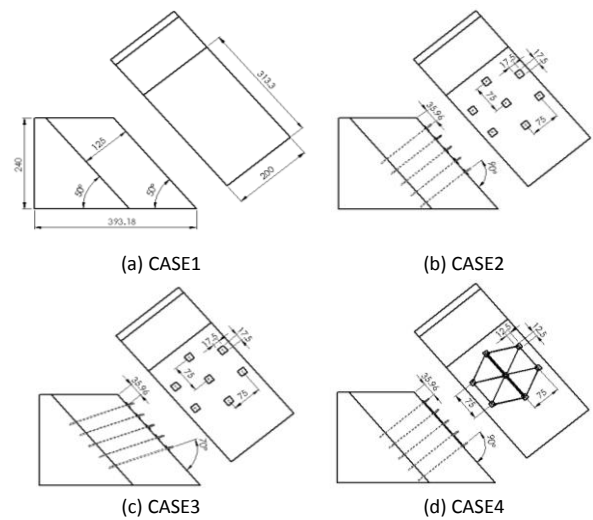


図-3 実験ケース¹⁾

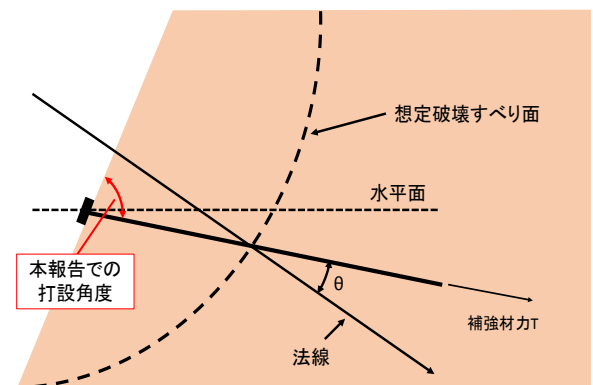


図-4 想定破壊すべり面、 θ 及び水平面²⁾

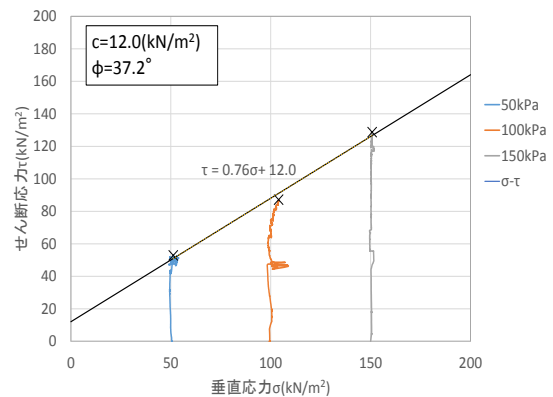


図-5 定圧一面せん断試験の結果

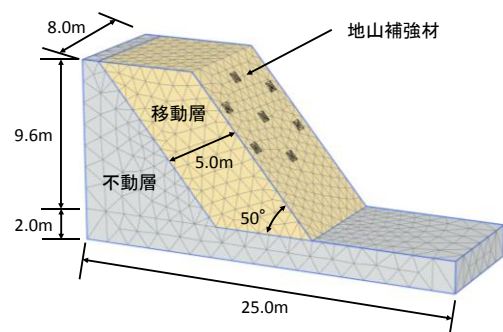


図-6 解析したモデル

析パラメータは岩盤を想定してヤング係数の高いものとした³⁾。補強材及び支圧板は遠心模型実験と同様にアルミニウムとしてモデル化を行った。補強材はビーム要素にて再現し、直径は0.06m、長さは5.5mとした。支圧板はシェル要素の正方形として再現し、1辺は0.7m、厚さは0.05mとした。なお補強材の配置間隔は遠心実験と同様に全ケース3.0mとした。表-2に解析ケース、図-7に補強材の配置を示す。解析は補強なしのケースと補強材の配置方法及び遠心実験と同様に打設角度を変更したケースで行った。なおケース1から3は配置方法が遠心模型実験に対応したものになっている。

4.2. 解析結果

4.2.1. 法肩の変位

遠心模型実験では斜面の水平・鉛直変位を計測している。ここでは遠心模型実験との比較を行うため、同じ個所の法肩中央の水平変位を抽出した。

図-8に打設角度と補強がない場合の法肩水平変位 u_{x0} と法肩水平変位 u_x の比 u_x/u_{x0} の関係を示す。打設角度 90° のとき u_x/u_{x0} は千鳥配置、正方形配置共に補強なしの場合と大きな変化はなく、 u_x の変形抑制効果が小さくなった。一方、打設角度 70° のときの u_x/u_{x0} を見ると、千鳥配置、正方形配置共に小さくなっており、約40%減少した。次に法肩中央の鉛直変位を抽出した。図-9に打設角度と補強がない場合の法肩鉛直変位 u_{z0} と法肩水平変位 u_z の比 u_z/u_{z0} の関係を示す。 u_z/u_{z0} は打設角度が小さくなるにつれて小さくなり、 u_z の変形抑制効果も u_x と同様であった。これらの u_x/u_{x0} 及び u_z/u_{z0} の傾向は遠心模型実験の結果においても同様だった。また u_x 、 u_z 共に、前項で補強効果の高い打設角度として示した 63.6° に近い打設角度 70° のときが最も変形抑制効果が大きくなった。なお千鳥配置のケースは補強材の打設本数が少ないが、 u_x/u_{x0} と u_z/u_{z0} の減少は打設本数が多い正方形配置と大きな差は見られなかった。

4.2.2. 補強材の曲げひずみと軸力

図-7に示した中段中列における補強材の曲げひずみと軸力を抽出した。

図-10に補強材の曲げひずみ ε と地表面からの距離 d を示す。図-4より u_x 、 u_z が小さかった打設角度 70° のときの ε が正方形配置、千鳥配置共に小さくなった。このことから法肩の変形である u_x 、 u_z が小さくなっているとき、移動層の土塊中にある補強材の動きも小さくなり、移動

表-2 解析パラメータ³⁾

	移動層	地山
単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	15.7	27.0
ヤング係数 E (kN/m ²)	500	310×10^5
ポアソン比 ν	0.45	0.10
粘着力 c (kN/m ²)	15.0	-
内部摩擦角 ϕ (°)	37.0	-
ダイレイタンス角 ψ (°)	7.0	-

表-3 解析ケース

ケース	配置方法	打設本数 (本)	打設角度 (°)
1	補強なし	-	-
2	千鳥配置	7	90
3			70
4	正方形配置	9	90
5			70

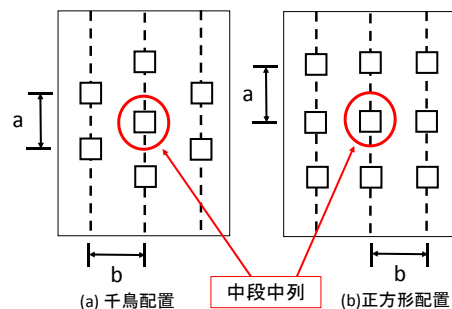


図-7 補強材の配置

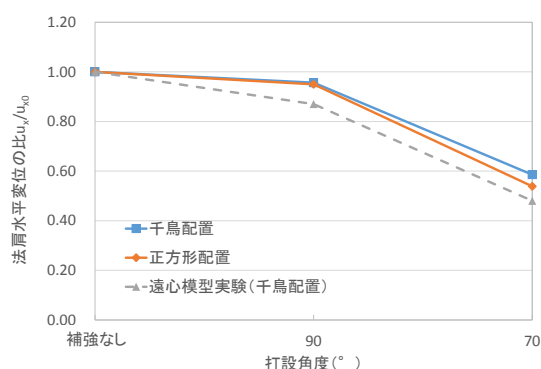


図-8 打設角度-法肩水平変位の比

層全体の土塊の変形抑制効果もあることが考えられる。

次に図-11 に補強材の軸力 N と地表面からの距離 d の関係を示す。図-11 より補強材の打設角度によって軸力 N の大きさが異なっていた。打設角度 90° では軸力 N が負になっており、補強材を圧縮する力が働いている。しかし打設角度 70° のとき軸力 N は常に正になり、補強材は常に引張の力が働いている。これは遠心模型実験の軸ひずみでも同様の傾向が見られた。図-12 に遠心模型実験の軸ひずみと d の関係を示す。遠心模型実験の軸ひずみも打設角度 70° のとき、 d が大きくなるにつれて正に大きくなり、引張の力が大きくなった。しかし打設角度 90° のときは d が大きくなるにつれて負に近付き、引張力が小さくなった。

以上のことから解析、遠心模型実験共に打設角度 70° の方が補強材は引張力が大きくなった。なお打設角度 70° は前項で補強効果の高い打設角度として示した 63.6° に近い。つまり補強効果の高い打設角度に近付くと、補強材の軸力及び軸ひずみが正の値を示し、補強材の引張抵抗力が強くなり、斜面の補強効果が発揮されるものと考えられる。

5. まとめ

既往の遠心模型実験を実大換算した斜面のモデル作成し、有限要素法による解析を行った。

遠心模型実験で用いた試料の内部摩擦角 φ を求め、それにもとづいて、補強効果の高い打設角度を算出した。

法肩の水平鉛直変位は補強効果の高い打設角度に近くなるほど、小さくなった。

法肩の変形が小さくなっているとき、移動層の土塊中にある補強材の動きも小さくなり、移動層の全体の土塊の変形抑制効果もあることが考えられる。

補強材の軸力、軸ひずみが正になると補強材の引張力により斜面の補強効果が見られる。また補強効果の高い打設角度に近くなると軸力、軸ひずみが正の値を示し、引張力が強くなる。

今後の展望として、補強材の打設角度の異なるケースを増やし、本報告で求めた補強効果の高い打設角度も踏まえた検討を行う。またせん断強度低減法による安全性解析も行う。

＜参考文献＞

1) 副田尚輝, 岩佐直人, 笠原啓, 伊藤和也: 補強材打設角度と頭部連結が斜面安定化に与える影響に関する遠心模型実験, 第 50 回地盤工学研究発表会, DVD-ROM, 2015. 2) 社団法人地盤工学会: 地山補強土工法 設計施工マニュアル, 2013. 3) PLAXIS 3D 2013 Tutorial Manual, pp.69-86. 4) 社団法人地盤工学会: 地盤技術者のための FEM シリーズ② 弾塑性有限要素法がわかる, 社団法人地盤工学会, pp.189-195, 2004.

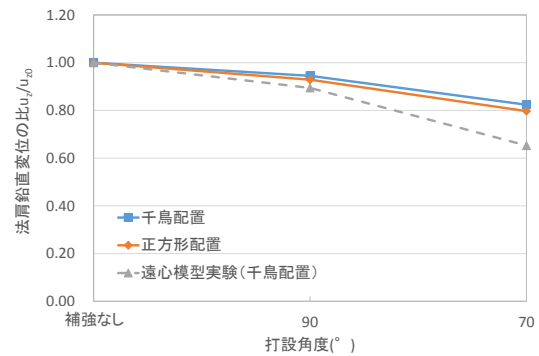


図-9 打設角度-法肩鉛直変位の比

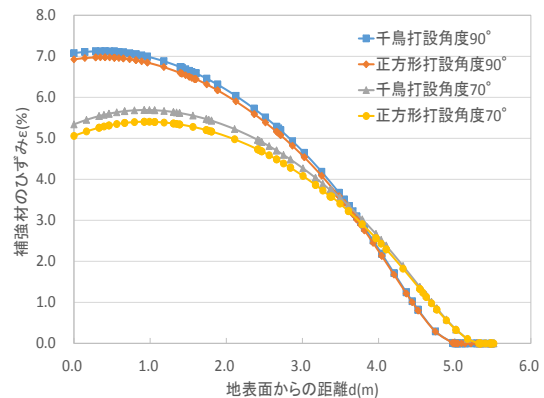


図-10 補強材の曲げひずみ-地表面からの距離

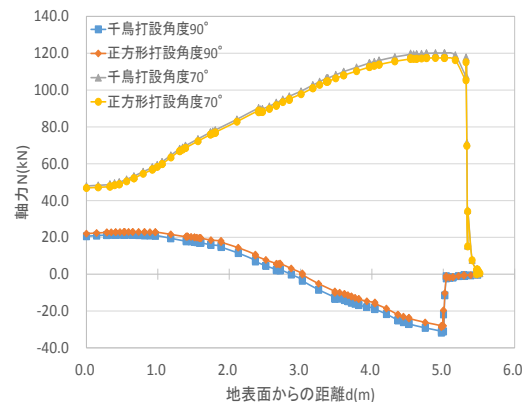


図-11 補強材の軸力-地表面からの距離

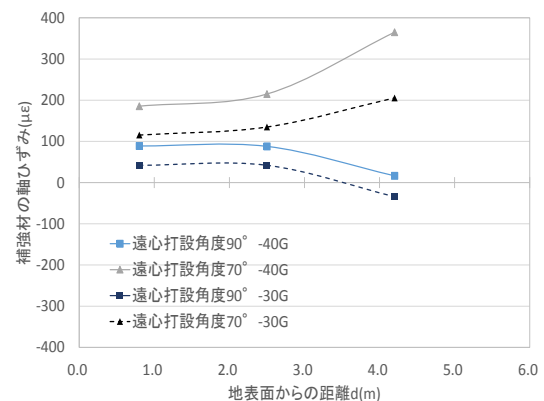


図-12 遠心模型実験の軸ひずみ-地表面からの距離¹⁾