

パイプを併用した鉄筋挿入工の小型模型実験

SMALL MODEL TEST ON REINFORCING BAT INSERTION WORK WITH A CIRCULAR PIPE

藤原 覚太¹
Kakuta FUJIWARA

¹ 東海大学建築都市学部土木工学科 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4丁目1番1号)
E-mail: fujiwara.kakuta.s@tokai.ac.jp

Key Words: slope failure, model test, insertion work, pipe, estimation formula, rain fall

1. はじめに

地震や豪雨による斜面崩壊を防ぐために、簡単で低コストの斜面補強方法の開発が課題となっている。図-1には、既存の2つの工法（左と中央）と本論文で提案する新しい方法（右）を示す。既存の工法の一つ目である鉄筋挿入工は、芯材の引張力を利用して複数の芯材と圧力板を土と一体化させ、斜面の安定性を高める方法である^{1), 2)}。芯材の間隔（以下、「隙間」と呼ぶ）を狭くすることで、土が隙間を通過するのを防ぎ、対策の効果を高めることが考えられる。二つ目の既存の工法である抑止杭工法では、

鋼やコンクリートの杭を斜面下に設置し、杭の剛性を利用して斜面の滑りを抑制する^{3)~6)}。ここでは、杭径を大きくすることで剛性が高まり、隙間が小さくなり、対策の効果が向上する。しかし、施工および材料のコストも増加する。

これらの方法は斜面崩壊に対して有効であり、広く適用されているが、著者は両者のメリットを併せ持つ、図-1（右）に示すようにパイプを併用した鉄筋挿入工を提案する。このパイプは芯材の見かけの直径を増加させ、隙間を減少させることで、土が隙間を通過するのを防ぐことが期待される。パイプは単に芯材の周りに配置されており、固定のためにグ

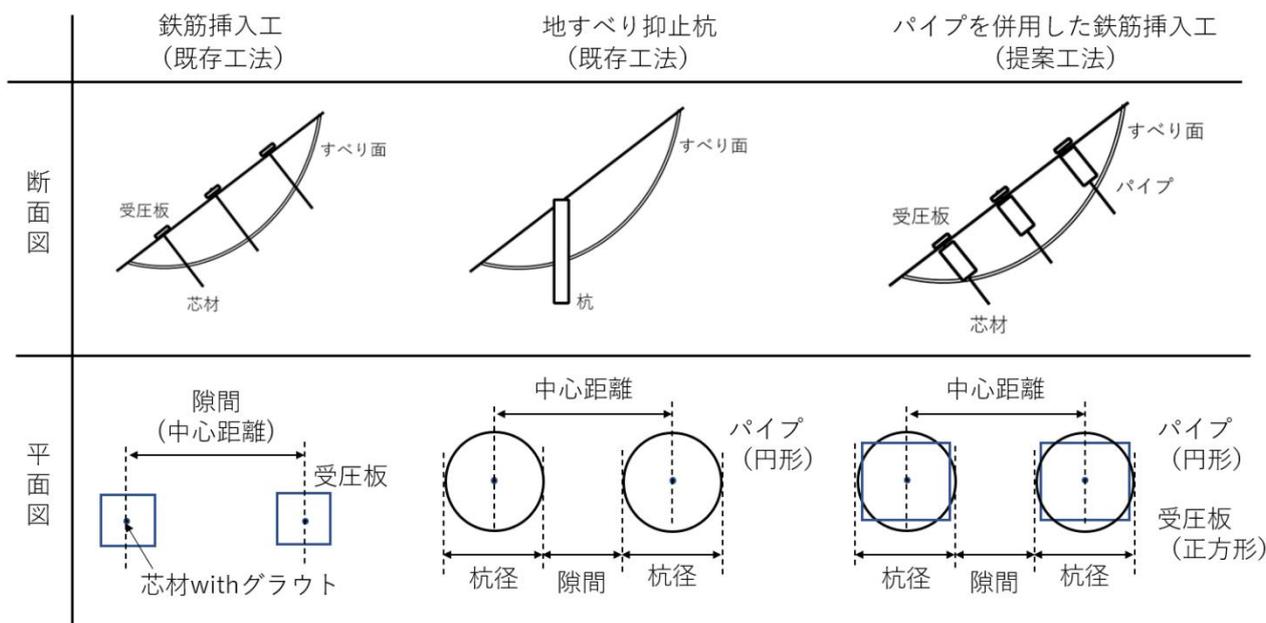


図-1 既存工法と提案工法

ラウトやその他の材料は使用していない。また、不動層に埋め込まれておらず、芯材などの構造部材に接続されていない。これにより、施工が簡便になることが期待される。

著者は、本工法について研究を進めており、パイプを併用することで、斜面崩壊を防ぐ機能が高まることを確認している⁷⁾。パイプの径が大きいほど、対策効果が高まることも把握している。一方で、土砂が本工法に作用するときの力学機構や、降雨に対する対策効果という点では、不明なところが多い。そこで本研究では、力学機構の解明を通じた崩壊時の荷重推定式の提案、および降雨に対する対策効果を確認するため、小型斜面の模型を用いて実験を実施した。なお図-1は施工イメージ図であり、模型実験は、提案工法の基本的な性能を確認するため、条件を簡易化した構造にて実施した。

2. 室内物性試験

模型実験ではケイ砂7号(含水比15%)を使用した。本章では、ケイ砂7号に対する室内物性試験(一面せん断試験・粒度分布試験・透水試験・土粒子密度試験)の結果について記載する。

定圧条件における、一面せん断試験(含水比15%)を実施した結果、粘着力 15 kN/m^2 と内部摩擦角 33° が得られた。ただし試験時の土の初期密度は、のちの模型実験時と一致していない。粒度分布試験の結果として、50%粒径 0.12 mm 、均等係数 2.1 が得られた。変水位透水試験を実施することで透水係数 $7.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 、土粒子密度試験により土粒子密度 2.63 g/cm^3 が得られた。

3. 模型実験（傾斜実験）

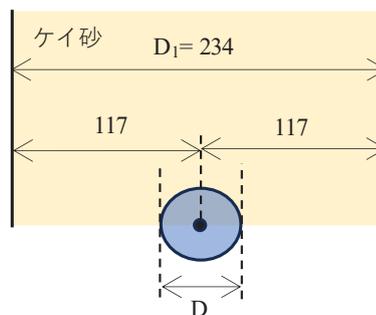
パイプを併用した鉄筋挿入工について、斜面崩壊に対する対策効果を確認するため、小型模型を使い、徐々に斜面角度を上げる傾斜実験を実施した。

(1) 実験条件

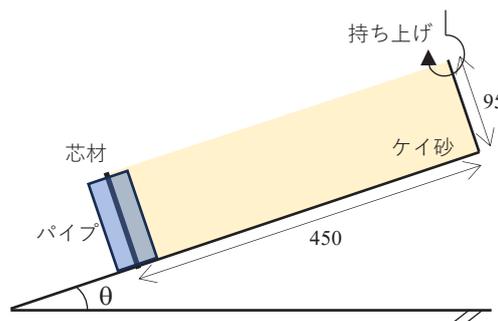
a) 装置と材料

図-2に、模型実験の断面図と平面図を示す。実際のスケールの約1/10を想定し、ステンレス鋼の箱を使用した。箱の底部および内側にはビニールシートを使用し、摩擦を減少させた。砂箱の長さ、高さ、幅はそれぞれ 450 mm 、 95 mm 、 234 mm とした。

地盤材料は前章に記載のケイ砂7号を使用した。芯材には、長さ 100 mm 、厚さ 3 mm 、幅 5 mm のス



(a) 平面図



(b) 断面図

図-2 模型実験寸法図 (単位は mm)

表-1 実験ケース

ケース	対策工	パイプ径	D/D ₁
1	無対策	なし	0.00
2	芯材のみ	なし (芯材幅 5 mm)	0.02
3	芯材とパイプ	10.0 mm	0.04
4		20.0 mm	0.09
5		30.0 mm	0.13
6		41.5 mm	0.18
7		60.0 mm	0.26

テンレス鋼棒を使用した。パイプはアクリル製で、実験ケースに応じて複数の径を使用した(後述)。

b) 実験手順

芯材を箱の底に固定し、アクリルパイプを芯材の周りに据え置いた。施工の容易さを考慮し、パイプはどの部分にも固定していない。次に、湿潤密度が 1.03 g/cm^3 、含水比 15% となるようにケイ砂を箱に入れた。砂を密に詰めると、側壁に拘束され斜面を滑りにくくなるため、非常に緩い状態である。斜面下端は、芯材とアクリルパイプの中心と同じ位置に垂直な壁を作製した。すなわち本実験条件では、対策工(芯材とパイプ)の下流側の砂、すなわち受働領域は、考慮されていない。また力学機構を簡易化するため受圧板は無い条件とし、パイプの内部には

周囲の砂の密度と同程度になるよう砂を詰めた。最後に、箱の上側を持ち上げて斜面崩壊を発生させた。主となるすべり面はステンレス箱の底面であり、垂直に設置された1本の対策工が、どのように挙動するかを確認する基本的な実験である。また砂の密度が非常に小さいため、ステンレス箱側面との摩擦は無視できると仮定し、ステンレス箱側面を線対称中心とみなせると想定した。つまり芯材からステンレス箱側面までの距離の2倍が、中心距離に相当する。

計測項目として、芯材の下端から 20 mm、40 mm、60 mm、80 mm の位置での両面(斜面上下側)にひずみゲージを貼りつけた。斜面角度 10° 上げたのち、一旦静止させた状態で、ひずみを計測した。両面のひずみの差分を2で割った値を曲げひずみとする。

c) 実験ケース

実験ケースを表-1 に示す。ケース 1 は無対策で、ケース 2 は土槽幅方向の中央に、芯材のみを1本設置した。ケース 3 から 7 では、芯材の周りにそれぞれ異なる直径(D=10~60 mm)のパイプを配置した。表-1 には、対策幅 D と箱幅 D₁ の比率(D/D₁)も併記した。ケース 2 ではパイプがないため、対策幅 D は芯材幅の 5mm とした。

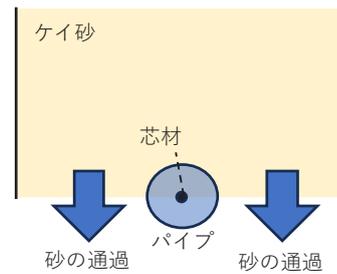
(2) 実験結果

a) 崩壊角度

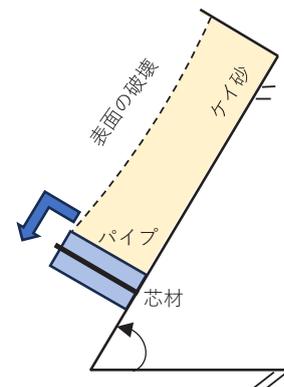
すべてのケースにおいて、傾斜角度が 45° では、斜面は崩壊しなかった。砂とステンレス箱との摩擦により、斜面は静止していたものと考えられる。

ケース 1 では、傾斜角度が 46° になった時、斜面全体が下方に向かい滑り落ちた。ケース 2 では、傾斜角度が 46° を超えると、芯材と側壁の間(隙間)内の砂が部分的に滑り始めた。傾斜角度 53° の時、砂は隙間を通過し(図-3 (a))、斜面全体は崩壊した。ケース 3 では、ケース 2 と同様に、傾斜角度 46° を超えると、隙間の土が部分的に滑り落ち、傾斜角度 60° の時、斜面全体は崩壊した。傾斜角度は増大しており、アクリルパイプを据え置くだけで、斜面崩壊に対して効果的であることが確認できた。

ケース 4 では、傾斜角度 65° において砂が隙間を通過し、斜面は崩壊した。パイプのサイズが大きいほど、砂が隙間を通過しにくくなり、斜面崩壊に対して効果的であった。ここで同時に、本ケースは傾斜角度が大きいと、表面の砂も崩れて落ちる現象が観察された(図-3 (b))。ケース 4 は、この2つの崩壊モード(砂のすり抜け・表面の崩壊)が同時に観察される結果であった。



(a) 砂のすり抜け



(b) 表面の破壊

図-3 斜面崩壊モード

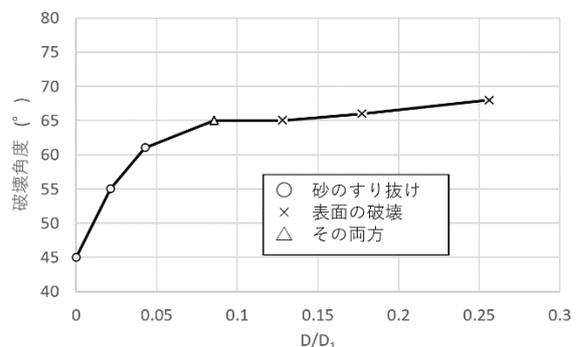


図-4 崩壊時の斜面角度

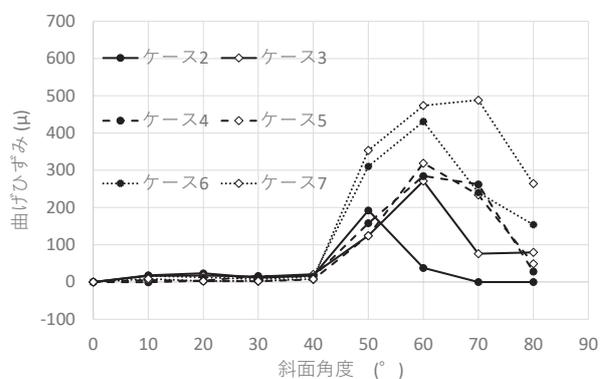


図-5 芯材の曲げひずみの計測結果 (下端から 20mm)

ケース 5, 6, 7 では、それぞれ傾斜角度 65° , 66° , 68° において、表面の砂が崩れて落ちた。一方で、砂が隙間を通過することは無かった。本実験の性質上、パイプのサイズが大きくなるにつれて、崩壊に必要な傾斜角度が大きくなるため、表面の破壊が卓越する結果であった。以上の結果を図-4 に整理した。

b) 芯材の曲げひずみ

ケース 2 ~ 7 について、芯材の下端から材軸方向に 20 mm の位置での曲げひずみを、斜面角度 10° ごとに計測した結果を、図-5 に示す。曲げひずみは 40° まで徐々にわずかに増加した。この角度では、斜面はステンレス箱底面との摩擦により静止しており、対策工にほとんど負荷がかかっていない。

その後、斜面角度 40° から 50° の範囲で、各ケースで曲げひずみが急激に増加した。ケース 1 の結果より、斜面角度 46° 以上では、斜面は滑り落ちようとするため、対策工に負荷がかかるものと考えられる。

以降も、斜面角度が大きくなるにつれ、曲げひずみは増加した。パイプのサイズが大きいくほど、隙間を通過する砂が少なくなり、より多くの砂が対策工の背後に保持されるため、曲げひずみも大きくなった。大きなパイプは隙間を小さくするため、斜面崩壊に対して効果的である一方、芯材にかかる負担も大きい。

ケース 2, 3, 4 について、最大角度到達時における曲げひずみの深度分布を図-6 に示す。それぞれ傾斜角度は 50° , 60° , 60° である。いずれも下端に近づくにつれ曲げひずみが大きくなった。最大角度に達した後、すべてのケースで曲げひずみは減少した。砂のすり抜けと表面の崩壊、あるいはその両方により、対策工背面の砂が滑り落ち、対策工に作用する荷重が小さくなった。

c) 芯材に作用する荷重の推定式

Ito らにより、斜面内の杭間に作用する側方荷重の理論的推定式が提案されている⁸⁾。砂が塑性化したという仮定のもと、杭間を砂が通過しない最大側方

$$p(z) = cD_1 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{(N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1)} \left[\frac{1}{N_\phi \tan \phi} \left\{ \exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} N_\phi \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) - 2N_\phi^{1/2} \tan \phi - 1 \right\} + \frac{2 \tan \phi + 2N_\phi^{1/2} + N_\phi^{-1/2}}{N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1} \right] - c \left\{ D_1 \frac{2 \tan \phi + 2N_\phi^{1/2} + N_\phi^{-1/2}}{N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1} - 2D_2 N_\phi^{-1/2} \right\} - \frac{\gamma z}{N_\phi} \left\{ D_1 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{(N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1)} \exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} N_\phi \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) - D_2 \right\} \quad (1)$$

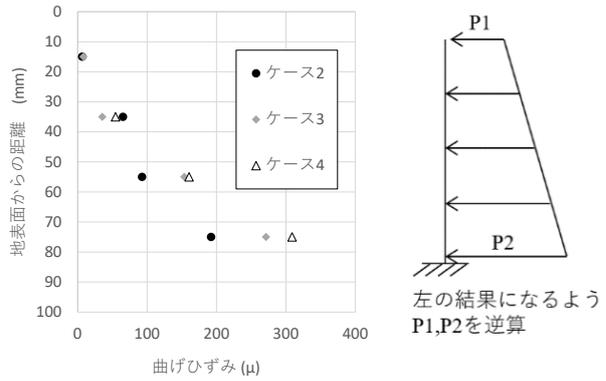


図-6 曲げひずみの深度分布

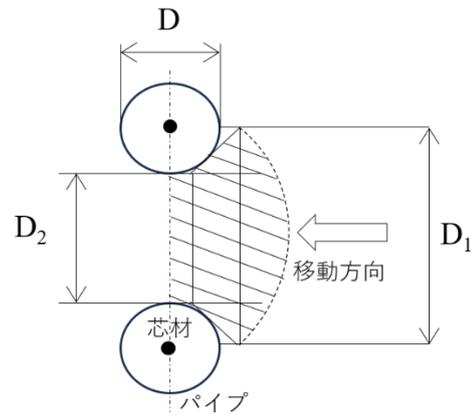


図-7 式(1)に関する説明図

—●— ケース2(推定式) —●— ケース3(推定式) —×— ケース4(推定式)
 ……△… ケース2(実験値) ……●… ケース3(実験値) ……×… ケース4(実験値)

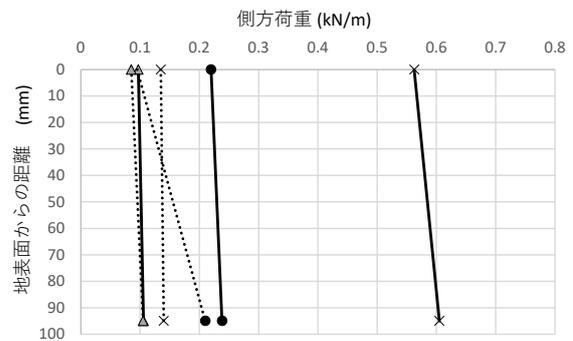


図-8 芯材に作用する側方荷重 (推定式と実験値の比較)

荷重は、式(1)を使用して計算できる（式について図-7を参照）。ここで、 $p(z)$:単位深さあたりの杭1本に作用する側方荷重、 $N(\phi)$:流動値($=\tan^2(\pi/4+\phi/2)$)、 γ :土の単位体積重量、 z :地表面からの深さ、 D :杭の直径、 D_1 :杭中心間の距離(対称性を考慮して234mm)、 D_2 :隙間の距離、 c :粘着力、 ϕ :内部摩擦角、である。粘着力と内部摩擦角はそれぞれ2章の物性試験で得られた値(15 kN/m²と33°)を使用した。

一方、図-6に示す、実験結果から得られた最大曲げひずみからも、最大側方荷重を逆算することができる。パイプに作用する荷重は台形荷重とし、すべて芯材に伝達されるという片持ち梁のモデルを仮定することで算定した。推定式から得られた側方荷重と実験から得られた側方荷重の比較を図-8に示す。式(1)から得られた側方荷重は、ケース2,3で実験結果と近い値となった。パイプに作用する荷重がそのまま芯材に作用すると仮定しても、芯材の曲げひずみを概ね推定することができた。一方で、ケース4では、理論値と実験結果の間に大きな差異が生じた。ケース5~7では、さらに大きな差異が生じたため省略した。ケース4~7では、表面の破壊の影響が大きく、式(1)の適用範囲外であるためと考えられる。

なお、2章で記載の通り、入力値の c, ϕ は、模型実験と異なる密度での一面せん断試験結果のため、(1)式への適用性については今後検討が必要である。

4. 模型実験（散水実験）

降雨時における本工法の対策効果を確認するため、同じ模型に対して散水実験を実施した⁹⁾。

(1) 実験条件

実験ケースは前章と同じケース1~7である。実験図を図-9に示す。前章同様に、まず対策工を固定した状態で砂試料を均等に敷き詰め、前章と同じ条件の地盤・対策工を持つ模型を作製した。その後、本実験では、ステンレス箱を傾斜角45°に固定した。これは前章の実験より、ケース1における斜面崩壊が発生する直前の角度である。降雨にはジョウロを固定して、毎秒約50 mlにて散水し、斜面崩壊するまでの時間を計測した。本実験条件では対策工より下部に土がなく、斜面全体を散水すると下部(垂直壁)からの崩れが目立つため、斜面上部を散水した。ミスト状の雨水に比べると水粒サイズは比較的大きく、表面の洗堀の影響が大きい条件といえる。

(2) 実験結果

ケース1では、降雨開始直後から地表面を侵食するように水が流れた(図-10(a))。その後、降雨が土中に浸透し、斜面土の重量が重くなることで、斜面下方への力が、ステンレス箱底面の摩擦抵抗を上回り、斜面の大部分は滑り落ちた。このとき、降雨開始後26秒であった(図-10(b))。

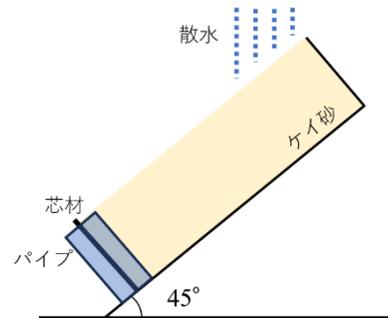


図-9 散水実験の図



(a) ケース1 (崩壊前) (b) ケース1 (崩壊後) (c) ケース7 (侵食時)

図-10 散水実験の状況

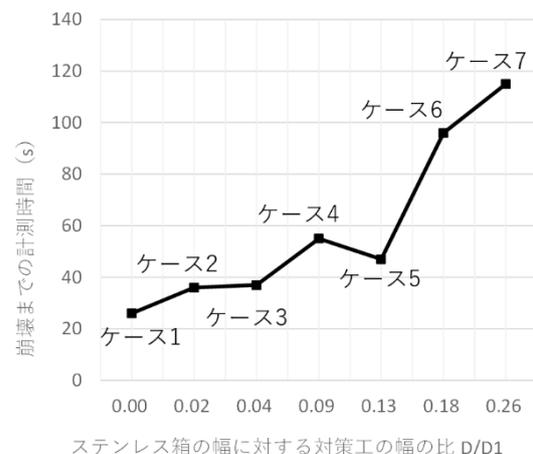


図-11 崩壊までの計測時間

芯材のみ(ケース2)では、降雨開始直後は、無対策と同様に地表面をえぐるように水が流れたものの、最終崩壊に至る時間は37秒であり、ケース1に比べ、長くなる結果となった。芯材による斜面崩壊対策効果が機能したものと考えられる。

芯材にパイプを併用した構造(ケース3~7)では、降雨開始直後は、無対策と同様に地表面を侵食するように水が流れ、その後、パイプの間を通り抜けるミズミチが発達した。ここで例として、ケース7の状況を図-10(c)に示す。パイプがあることで、隙間の破壊が局所的に進行する結果であった。パイプ径が大きいほど(隙間が小さいほど)、隙間を流れる水の流速が大きく、破壊の進行は早かった。一方で、パイプ径が大きいほど、破壊は局所的となり、斜面全体でみると斜面は安定を保っていた。この局所破壊は、深度方向に進む一方、幅方向へ広がりはいきなり小さいことも観察された。

図-11に各ケースにおける、斜面が完全に崩壊するまでの時間を示す。パイプ径が大きいほど、最終崩壊に至る時間は、長くなる傾向にあった。パイプ径が大きいほど斜面の安定が保たれる結果であった。一方で、先に述べた局所破壊は無視できず、本工法では、局所的な侵食破壊と、斜面全体とみたときの破壊を分離して議論する必要があると考えられる。

5. 結論

パイプを併用した鉄筋挿入工を提案し、対策効果を確認するため、徐々に斜面角度を上げる傾斜実験および、降雨に見立てて散水する散水実験を実施した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 傾斜実験により、パイプを併用することで、より高い斜面角度に対しても、斜面が安定する結果となった。
- 2) パイプ径が大きいほど、より高い斜面角度に対しても、斜面が安定化した。一方で、芯材への負荷は大きくなる結果となった。
- 3) 本実験では、パイプ径が小さいと、土のすり抜けが観察され、パイプ径が大きいと、すり抜けは発生せず、表面の土が破壊することが観察された。
- 4) パイプに作用する側方荷重はすべて芯材に伝達される仮定のもと、既往の荷重推定式は、実験結果から逆算される側方荷重に近い結果となった。これは、パイプ径が小さい場合の、土のすり抜けが発生する直前の、最大荷重に対する議論である。
- 5) 荷重推定式に使用した粘着力と内部摩擦角については、異なる密度での砂に対する一面せん断試験

の結果であり、これらの諸元の適用性については今後の課題とする。

6) 降雨実験により、パイプを併用することで、斜面の崩壊を遅らせるという結果が得られた。一方で、パイプ間の隙間を流れる水による局所的な破壊が顕著になったため、斜面全体の崩壊と、局所的な崩壊の両視点から今後議論が必要である。

謝辞: 本研究は、日鉄建材株式会社様および日特建設株式会社様の研究寄付により実施されました。ここに深い謝意を示します。また、実験の実施にあたり、東海大学職員の竹内義晴氏、また王利超君をはじめとする研究室の学生に多大な協力を頂きました。ここに深い謝意を示します。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路土工一切土工・斜面安定工指針，2022
- 2) 川波敏博，西條健吾，竹本将，中田幸男：鉄筋挿入工の盛土のり面への適用事例，地盤工学ジャーナル，Volume 15, No. 3, June, pp. 136-145, 2017.
- 3) Chengtang, W., Hao, W., Weimin, Q., Shuan, W., Huan, T., Kun, F. : Behavior of pile-anchor reinforced landslides under varying water level, rainfall, and thrust load, Engineering Geology, Volume 325, pp.1-25, 2023.
- 4) Sujia, L., Fangyue, L, Ga, Zhang. : Centrifuge model tests on pile-reinforced slopes subjected to drawdown, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 12, pp.1290-1300, 2020.
- 5) Xinli, H., Dongzi, L., Lifei, N., Chang, L., Xuan, W., Ru, F. : Development of soil-pile interaction and failure mechanism in a pile reinforced landslide, Engineering Geology, Volume 294, pp.1-12, 2021.
- 6) Fei, C., Keizo, U. : Numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles, Journal of Soil and foundations, Volume 40, No.1, pp.73-84, 2000.
- 7) 藤原覚太：パイプを併用した鉄筋挿入工に関する研究，第63回地盤工学シンポジウム，2-2.5, 2022.
- 8) Tomio, Ito., Tamotsu, Matsui. : Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles, Journal of Soils and Foundations, Vol. 15, No. 4, pp. 43-59, 1975
- 9) 王利超，藤原覚太：降雨時におけるパイプを併用した鉄筋挿入工に関する実験，令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会，2024（投稿中）

(2024.5.31 受付)