

剛塑性有限要素解析による局所洗堀後地盤の極限支持力の検討

金沢大学 正会員 ○山栗 祐樹 小林 俊一
 中央大学 正会員 西岡 英俊
 中央大学大学院 学生会員 佐々木 優奈 平野 萌果

1. はじめに

近年、集中豪雨や台風災害によって、河川橋脚基礎周囲の地盤が流出する洗堀被害が増加している。これまで著者らは、河川橋脚基礎が沈下・傾斜の被害を受けた中規模災害に着目し、再供用に必要とされる残存支持力の発現メカニズムについて検討を進めてきた。またアルミ棒積層体を用いた模型実験を実施し、局所洗堀被害の程度や粒度分布の違いが残存支持力に及ぼす影響を明らかにしてきた¹⁾。本稿では、剛塑性有限要素法²⁾を用いて、著者らの模型実験の再現解析を行い、剛塑性有限要素解析の適用性を検討した結果について報告する。

2. 剛塑性有限要素法の概要

剛塑性有限要素法 (RPFEM)²⁾は、剛塑性境界値問題を解く数値解析手法である。地盤工学では、支持力問題や斜面の安定問題、土圧問題に適用されている。材料を剛完全塑性体と仮定するため途中変形を知ることはできないが、地盤の終局限界状態（崩壊荷重と破壊形態）を直接求めることができる。

本研究では、地盤の破壊規準に Drucker-Prager モデルを用いる。必要な材料パラメータはせん断強度 k と摩擦係数 α' で、それぞれ Mohr-Coulomb モデルの粘着力 c と内部摩擦角 ϕ に換算できる。本研究では k, α' を平面ひずみ条件で c, ϕ に換算した。

3. 局所洗堀後地盤の支持力解析

3.1 アルミ棒積層体を用いた模型実験の概要

アルミ棒積層体を用いた直接基礎の模型実験¹⁾を参照する。模型実験装置の概要を図-1に示す。模型地盤は、長さ 150 mm のアルミ棒を幅 640 mm、高さ 250 mm で積み上げたアルミ棒積層体である。アルミ棒の直径は 1.5 mm、2.0 mm および 3.0 mm を重量比 1:1:1 で混合したものである。模型地盤の単位体積重量と安息角はそれぞれ、 $\gamma = 21.71 \text{ kN/m}^3$ 、 $\phi_r = 32^\circ$ である。基礎模型は、厚さ 10 mm、幅 100 mm、

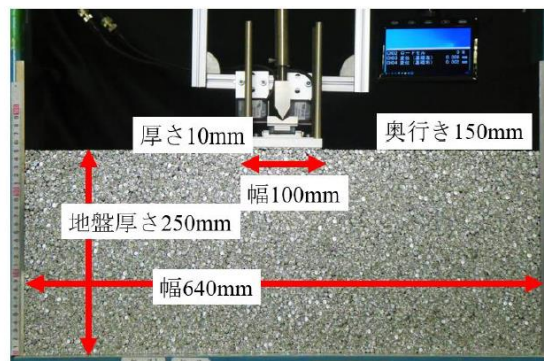
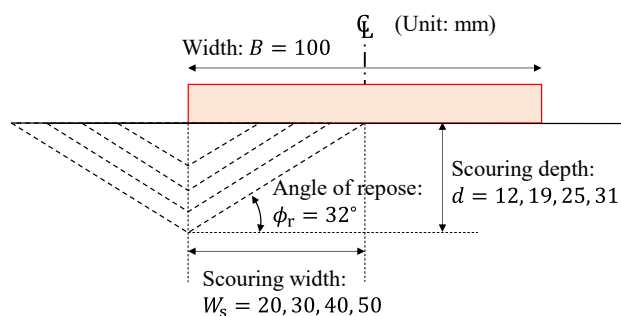
図-1 模型実験装置の概要¹⁾

図-2 局所洗堀の範囲

奥行き 150 mm の剛板で、鉛直ジャッキ（スクリージャッキ）により変位制御で基礎中央を鉛直に載荷する。載荷装置と基礎模型の結合部は、鉛直載荷に伴う基礎の回転と滑動を許容する構造となっている。また、基礎底面は、あらかじめアルミ棒を接着して凹凸形状として、摩擦抵抗を確保している。

局所洗堀状態は、図-2に示すように上流側を想定した基礎端部直下に最大洗堀深さ（局所洗堀深さ d ）を生じた状態となるように二等辺三角形の範囲のアルミ棒を抜き取ることで模擬している。局所洗堀幅 W_s と局所洗堀深さ d の関係は $\tan \phi_r = d/W_s$ である。局所洗堀深さは $d = 12, 19, 25, 32 \text{ mm}$ の計 4 ケースで、各ケースを 3 回ずつ実施している。

3.2 解析条件

本研究で用いた 3 次元の有限要素メッシュ（局所洗堀深さ $d = 12 \text{ mm}$ ）を図-3に示す。奥行き方向は 1 要素で、長さは 0.15 m である。剛な基礎・摩擦あ

りの条件となるように、地盤と基礎が接する節点の変位速度に対して制約条件²⁾を与え、平面ひずみ条件で3次元解析を実施した。荷重条件については、集中荷重を基礎中央に载荷し、地盤の自重を考慮した。また载荷条件として、ピン結合+スライダと剛結合の2通りを検討した。

材料パラメータは、洗堀被害なしの地盤の極限支持力について、模型実験結果とRPFEMによる計算結果がほぼ一致するように設定した。具体的には、内部摩擦角 $\phi = 20.0^\circ$ 、地盤の単位体積重量 $\gamma = 21.71 \text{ kN/m}^3$ とした。粘着力は計算を安定させるために $c = 0.5 \text{ kPa}$ とした。

3.3 解析結果

極限支持力と洗堀深さの関係を図-4に、破壊形態を図-5に示す。紙面の都合上、剛結合の破壊形態は割愛する。図-5中の黒枠は基礎の位置を示す。

図-4より、洗堀深さが大きくなると極限支持力が減少する傾向が確認できる。载荷条件の違いに関しては、ピン結合+スライダよりも剛結合の方が極限支持力は大きいことが分かる。またRPFEMで得られた極限支持力は、模型実験結果よりも小さい。

図-5より、洗堀被害を受けていない方に、円弧状のすべり領域が出現することが分かる。また洗堀深さが大きくなるとすべり領域が小さくなり、発揮されるせん断抵抗が低減する。このため、洗堀深さが大きくなるにつれて極限支持力が減少したと理解できる。なお剛結合では、洗堀被害を受けた方とその反対側にすべり領域が出現した。一方模型実験では、基礎の回転に伴う基礎全幅と地盤の接触が確認されている。本検討ではこの接触を考慮していないため、基礎の接地圧が模型実験よりも小さくなり、極限支持力は控えめに算出されたと考えられる。

4. おわりに

本研究では、局所洗堀深被害を受けた河川橋脚基礎の残存支持力の発現メカニズムを解明するために、剛塑性有限要素解析の適用性を検証した。具体的には、アルミ棒積層体を用いた直接基礎の模型実験¹⁾の再現解析を実施した。その結果、洗堀深さが大きくなると極限支持力は減少すること、载荷条件の違いによって異なる破壊形態が出現することを確認した。またRPFEMによる模型実験の再現解析

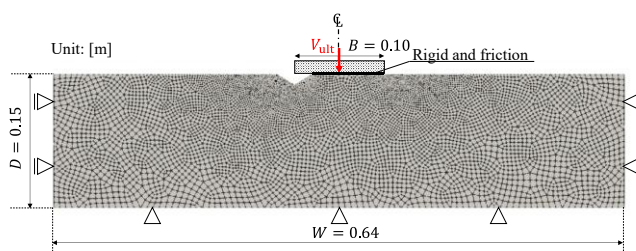


図-3 解析モデルの例 (局所洗堀深さ $d = 12 \text{ mm}$)

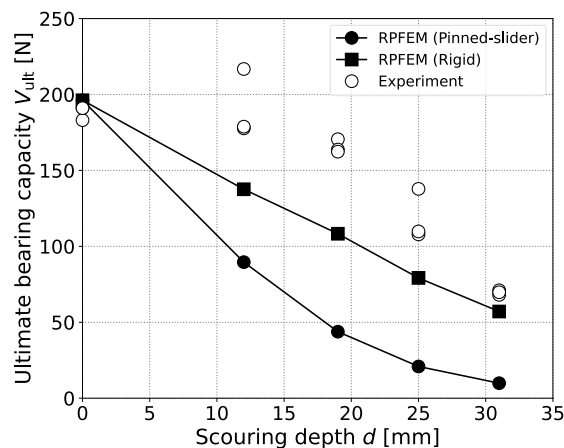


図-4 極限支持力と洗堀深さの関係

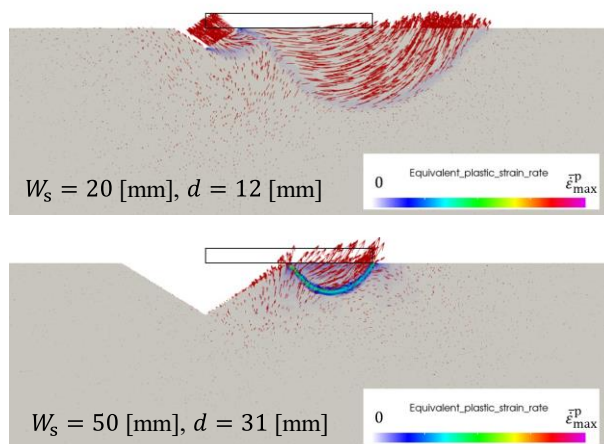


図-5 相当塑性ひずみ速度の分布および変位速度場 (ピン結合+スライダ)

の再現性を高めるためには、基礎の回転に伴う基礎全幅と地盤の接触を考慮する必要があると考えられる。

謝辞

本研究の一部はJSPS 科研費 JP20K04687 の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 平野ら: 第 57 回地盤工学研究発表会講演概要, 20-6-1-04, 2022.
- 2) 山栗ら: 土木学会論文集 A2 (応用力学), 77 巻, 2 号, p. I_193-I_204, 2021.