

空洞を有する地盤の杭基礎の支持力特性と崩壊機構の評価

室蘭工業大学院 学生会員 ○宮永 圭吾
室蘭工業大学院 正会員 川村 志麻
(国研)海上・港湾・航空技術研究所 正会員 松村 聡
基礎地盤コンサルタンツ Nguyen Thi Thao Van

1. はじめに

地盤内の空洞の存在が、多くの地盤災害または地盤の支持力低下を引き起こしていることが報告されている。本研究では、空洞を有する風化岩地盤を、石膏を用いて疑似的に再現し、一連の支持力載荷実験を行った。特に、空洞の位置を変化させた条件での単杭の支持力特性を明らかにした。得られた結果より、杭先端と空洞の位置の変化による支持力特性の変化と、崩壊のメカニズムを明らかにした。加えて、個別要素法（DEM）を用いて、得られた結果の妥当性を検証した。

2. 半断面杭を用いた模型試験

既往の研究¹⁾では、模型地盤内に空洞を模擬的に再現し、その空洞の位置が支持力低下に及ぼす影響を定量的に評価した。本研究では、杭の載荷過程において、どのような崩壊機構のもとで支持力が減少するのかを視覚的に評価するために、模型土槽の亚克力面を利用し、半断面の杭を用いた載荷試験を行った。

本研究で用いた模型杭は、直径 20 mm、長さ 320 mm のアルミニウム合金製の半円柱杭である。模型地盤内に 230 mm 根入れした状態になるように設置した。また、クラックの発達の仕方を可視化するため、空洞が杭に対して鉛直方向に存在するように空洞の位置を変化させて実験を行った。空洞を有する模型地盤は、所定の位置に半円柱の模型杭とスチレンボードで作成した空洞（長径 80 mm と 120 mm）を模型土槽表面の亚克力面に固定し、その後、石膏を流し込み、所定の時間養生して作製している。詳細は既報¹⁾に詳しい。試験における実験条件を表-1 に示す。

3. 試験結果と考察

図-1 は、半断面の杭を

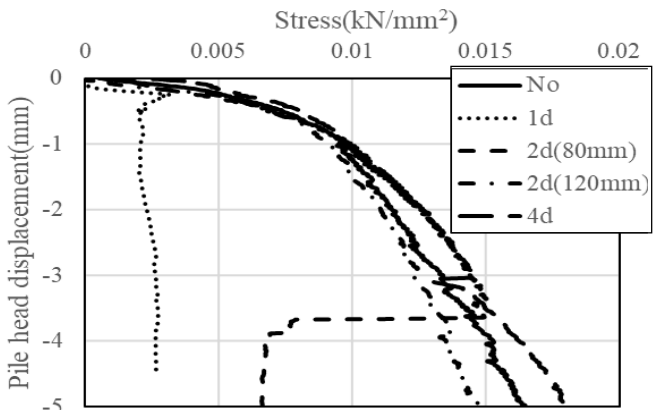


図-1 実験の応力-杭頭変位曲線

用いた各試験ケースの応力-杭頭変位関係を示したものである。空洞なし（No：Case1）と 4d（Case4）のケースでは、既往の研究¹⁾と同様、応力の減少が確認できず、クラックも発生しなかった。一方、2d のケースでは、支持力動員後に急減した。これは、杭の底部の支持地盤にクラックが発生したことにより、支持地盤が崩壊したためと考えられる。また、空洞の長径を 80 mm から 120mm に変えたときの結果を比較すると、最大荷載応力に差はあるものの、杭頭変位はほぼ同程度であることがわかる。このことは、崩壊は空洞の長径（幅）の変化にあまり影響を受けず、空洞との位置（深さ）に強く影響を受けることを示している。

図-2 は、長径 80 mm と 120 mm の杭頭変位がともに 4.0 mm 時のクラックの発生状況を示したものである。両者ともにクラックが杭先端部から空洞上端部に向かって発生していることがわかる。なお、両者の挙動に変化は認められない。また、破壊形態を見ると、空洞の長径（幅）の違いに関わらず、初めに杭の先端下部からクラックが発生し、その後、せん断破壊に至っていることがわかる。さらに杭の沈下が進むと、空洞の上部から上向きにクラックが発生し、写真-1 に示すような崩壊に至った。

表-1 試験ケース

Case	Z	空洞
1	0	なし
2	1d	半円柱
3	2d	
4	4d	
5	2d	半楕円柱

キーワード 杭基礎、空洞、先端支持力、模型実験、数値解析

〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1 室蘭工業大学大学院工学研究科 TEL 0143-46-5282

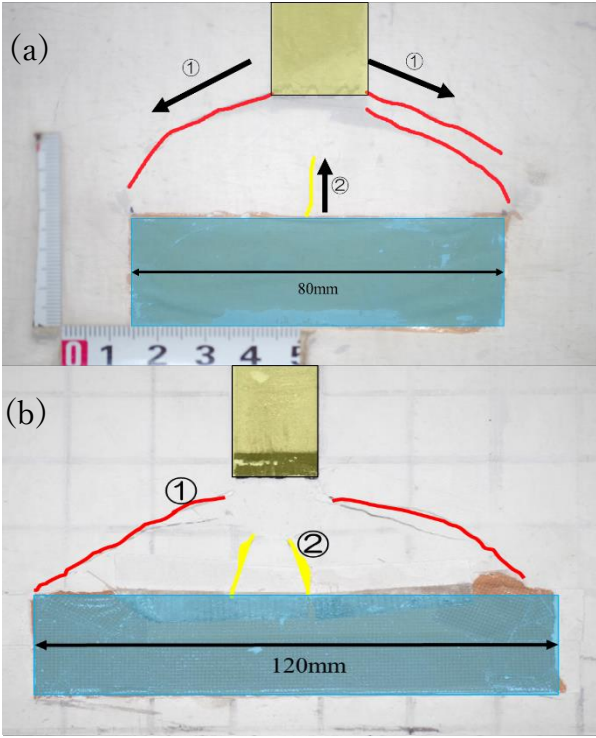


写真-1 模型実験によるクラックの発生の様子
(a)長径 80mm, (b) 120mm

表-2 解析パラメータ

Analysis parameters and element properties	Value
Ball particles	
R_{min} (mm)	0.67
R_{max} (mm)	1
Particle density (kg/m ³)	2500
Porosity	0.08
Friction coefficient between balls	0.5
Friction coefficient between balls and walls	0
Flat-joint contact model properties	
Effective modulus (Pa)	650×10^6
Normal-to-shear stiffness ratio	1.5
Contact tensile strength (Pa)	9.5×10^6
Contact cohesion (Pa)	3.8×10^6
Friction angle (deg.)	10

4. 個別要素法による検討

本研究では、個別要素法 (PFC 解析ソフト) を用いて、杭先端部と空洞周囲の破壊メカニズムの検証した。石膏の物性と接触モデルの各パラメータ (表-2) と手法については、既往の研究²⁾に詳しい。

図-2 は、幅 80mm の空洞に対する杭先端部から空洞までのクラック (赤線) の発生様子を示している。図より、解析においても、杭先端部から空洞端部に向けてクラックが進展し、その後、空洞中央上部から上方にクラックが発生していることが確認できる。このことは、前述の模型実験で得られた結果と同様であり (図-2)、解析値は実験値をよく表現している。

図-3 は、各実験条件における実験と個別要素法の、応力-杭頭変位曲線の比較である。実験と解析ともに、載荷直後に応力が急増し、その後緩やかに増加する類似の挙動を示す。一方、載荷の進行に伴い、解析での結果

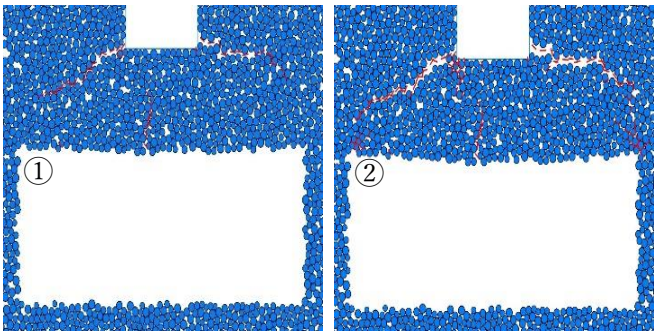


図-2 個別要素法によるクラック発生の様子：
杭頭変位：①1.2mm, ②2.0mm

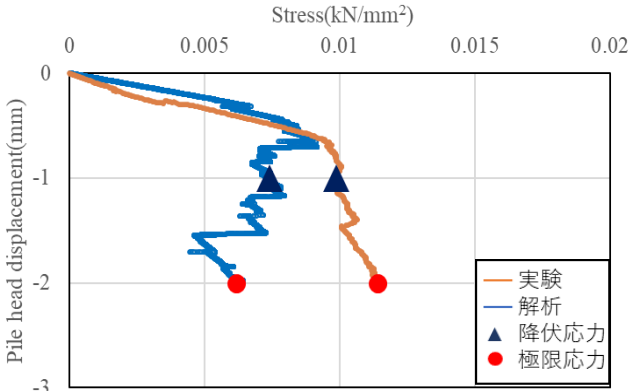


図-3 解析の応力-杭頭変位曲線

にばらつきが生じている。これは、解析では個々の粒子間の影響を強く受けていることが考えられる。一方、降伏応力と極限応力で評価すると、解析値と実験値では概ね類似の傾向を示している。

以上のことから、個別要素法解析はクラックの発生も含め、支持力をおおむね評価できることが示された。

5. 結論

一連の模型実験と解析より、以下の結論を得た。

- (1) 杭の支持力模型実験より、杭の支持地盤ではせん断破壊の後、空洞の上部からひび割れが発達し、崩壊に至る。
- (2) 模型実験を再現した個別要素解析では、クラックの発生状況、支持力ともに、解析値は実験値をよく表現した。

謝辞：本研究を実施するにあたり、室蘭工業大学 4 年前田勇真君の協力を得た。深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

1) 宮永ら：地盤内の空洞が杭基礎の支持力特性に及ぼす影響, 第 74 回土木学会年次学術講演会, III-11, 2019.
2) Nguyen Thi Thao Van ら：Model test and DEM investigations into effects of cavities on a single pile in weak rock, Geotechnique Letters, Vol.10, pp.1-11, 2020.