

水平力を受ける組杭周辺の地盤挙動の観察

組杭 X線 CT 地盤変形

長岡技術科学大学 学生会員 ○梅沢 圭佑
 港湾空港技術研究所 国際会員 松村 聡
 港湾空港技術研究所 水谷 崇亮
 長岡技術科学大学 国際会員 大塚 悟
 東北地方整備局 及川 隆
 東北地方整備局 青木 伸之

1. はじめに

現行の港湾基準では、矢板式係船岸の控え工等に用いられる組杭の横抵抗評価手法として、軸力のみを考慮する設計法と、軸力と曲げ抵抗の両者を考慮する設計法の 2 つの方法が示されている¹⁾。しかし、組杭が横抵抗を発揮するメカニズムについての知見は十分ではなく、それぞれの設計法の特徴は明らかにされていない。

本研究では、効率的な控え工の設計に資するため、水平力を受ける組杭の力学挙動および杭一周辺地盤の相互作用を明らかにすることを目的として模型実験を実施した。本実験では、組杭水平載荷時の水平荷重-変位関係に及ぼす杭、地盤の諸条件による影響を把握することに加えて、特に周辺地盤の変形状況に着目し、X線 CT 装置による地盤変形の観察を試みた。

2. 試験方法

(1) 試験装置

写真-1(a)および(b)は、本研究で使用した X線 CT 装置および水平載荷試験の様子を示している。

本研究で使用した杭水平載荷模型土槽は図-1の通りである。本実験では、塩化ビニル素材の円柱型土槽を用いた。土槽内の寸法は内径 155 mm、高さ 280 mm であり、試験時地盤高さは底面より 250 mm とした。載荷および水平荷重計測には、ロードセルを内蔵した変位制御型載荷装置を用いた。また、載荷ロッドに取り付けられたターゲット板の変位をレーザー変位計で読み取ることで載荷点変位（以下、水平変位とする）を計測した。一方、模型組杭は 2 枚の亚克力製板状杭を杭頭治具により固定することで構成されている。図中、杭頭のテーバーピンを脱着すれば交角拘束条件を固定あるいは自由（ヒンジ結合）条件のいずれにも設定できる。なお、直杭に関する試験では、単杭用に作製された類似形状の杭頭治具を別途使用した。各試験では、地中部に位置する模型杭長さが 200 mm となるようにした。

(2) 試験方法

はじめに模型地盤の作製では、予め所定の模型杭を設置した土槽内に、空中落下法による乾燥砂の撒き出しを行った。用いた試料は、相馬珪砂 4 号（土粒子密度 2.644 g/cm³、最大間隙比 0.970、最小間隙比 0.634）である。本試験で作製した模型地盤の平均相対密度は 72.0 % である。模型地盤作製後、載荷装置および計測機器を取り付け、地盤を乱さないように模型土槽を X線 CT 装置内に設置する。その後、X線 CT 装置内において、杭の水平載荷試験および X線 CT 撮影を行った。水平載荷は、載荷速度を 1 mm/min として変位制御条件の下で行った。また、X線 CT 撮影を各試験の載荷前および水平変位 10 mm 発生時に行った。

表-1 は、本研究で実施した試験条件の一覧である。杭形式（直杭・組杭）、組杭交角条件（交角・拘束条件）および杭厚（杭剛性）による影響に着目して、各試験条件を設定した。



(a) X線 CT 装置外観



(b) X線 CT 装置内水平載荷試験
 写真-1 X線 CT 装置および杭水平載荷試験

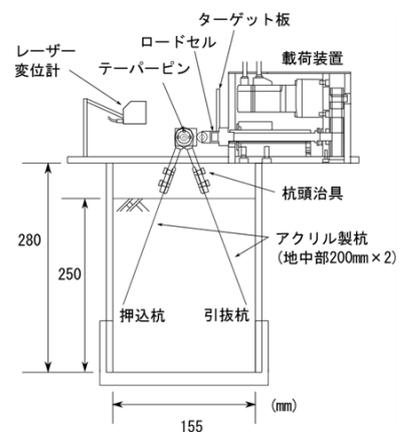


図-1 杭水平載荷模型土槽

Deformation of ground surrounding coupled piles subjected to horizontal load : K. UMEZAWA^a, S. MATSUMURA^b, T. MIZUTANI^b, S. OTSUKA^a, T. TANAKA^c and N. AOKI^c.

^a Nagaoka University of Technology, ^b Port and Airport Research Institute, ^c Tohoku Regional Bureau Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

3. 試験結果

(1) 水平荷重－水平変位関係

図-2は、全試験ケースの水平荷重－水平変位曲線を示している。杭形式の違いによる影響に着目すると、直杭形式と比較して、組杭形式ではいずれも高い横抵抗力が発揮されていることがわかる。このとき、交角の異なるCP001およびCP003の結果からわかるように、交角が大きいほど横抵抗力の増加が顕著になるようである。

さらに交角による影響を詳細に見ると、交角20度のケース（CP003）では、水平変位が10mmに至るまで横抵抗力が概ね単調増加するのに対して、交角30度のケース（CP001、CP002およびCP004）ではいずれも横抵抗力がピーク値を示した後、減少傾向に転じていることがわかる。これは引抜杭の引抜き現象による影響²⁾と考えられるが、本試験結果は、交角が大きいほど荷重初期で発揮される横抵抗力は大きいものの、変位が小さい段階で引抜き現象が発生し、横抵抗力が著しく減少することを示している。

また交角拘束条件の異なる2ケース（CP001およびCP002）では、横抵抗力がピーク値に達し引抜き現象が発生するまで、両ケースではほぼ同様の荷重変位関係を示す一方、引抜き後にはその傾向が明確に異なっている。すなわち、固定条件では横抵抗の減少が比較的緩やかであるのに対して、自由条件では著しい減少が見られ、水平変位10mm時には直杭のケース（SP001）と同程度にまで低下する。これは、交角拘束条件により引抜き後の横抵抗発揮メカニズムが異なるためと推察される。

(2) 水平載荷時の杭周辺地盤変形

図-3(a)～(f)は、全試験ケースの地表面付近でのX線水平断層画像を示している。ここでは、地盤変形領域が明確となるように、荷重前後2枚のX線断層画像について各同座標での輝度値の差を取ったものを示した。図中、画像の濃淡は地盤密度の高低を表し、白色に近づくにつれ地盤密度が高い。土槽中央付近に確認される長方形部分（組杭ケースでは2つ）には杭が存在する。水平載荷は図中の左（杭背面とする）から右方向（杭前面とする）へ行われた。図より、いずれのケースにおいても水平載荷による杭背面の主働域および前面の受動域が確認される。

また、組杭構造では2本の斜杭が同時に変位するために、等しい水平変位量であっても、直杭と比較してその地盤変形領域が広範囲に及ぶ。また交角の違いによる影響は、特に2本の斜杭に挟まれる部分に見られ、交角が大きいケース（CP001）では、小さいケース（CP003）に比べ斜杭間の地盤変形領域が大きいようである。これは押込杭の主働域と引抜杭の受動域がオーバーラップし、交角によりその範囲が異なることに起因すると推察されるが、さらに検討が必要である。

最後に、杭剛性が異なるケース（SP001とSP002またはCP001とCP004）を比較すると、いずれも高剛性杭の周辺地盤において、より大きな地盤変形領域が確認される。これは、地盤に対して相対的に剛性が高い杭では、深部よりたわみが発生し、それゆえ崩壊領域が大きくなるためであると考えられる。

4. まとめ

本研究では、組杭の横抵抗発揮メカニズムを杭水平載荷模型実験およびX線CT装置を用いた試験から明らかにした。試験結果より、杭形式、杭剛性および組杭交角条件の違いが横抵抗特性および杭周辺地盤の変形領域に影響を与えることを確認した。

【参考文献】1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（下），2009。2) 青木義典：水平力を受ける斜組グイの設計について，土と基礎，18-8(150)，pp.27-32，1970。

表-1 試験ケース一覧

ケース No.	相対密度 (%)	構造形式	交角固定	交角 (度)	杭厚 (mm)
SP001	72.1	直杭	-	-	2.6
SP002	70.7	直杭			1.3
CP001	73.4	組杭	固定	30	2.6
CP002	72.1	組杭	自由	30	2.6
CP003	67.8	組杭	固定	20	2.6
CP004	76.2	組杭	固定	30	1.3

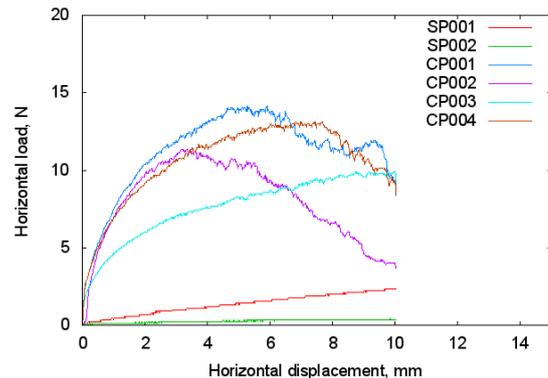


図-2 水平荷重－水平変位関係

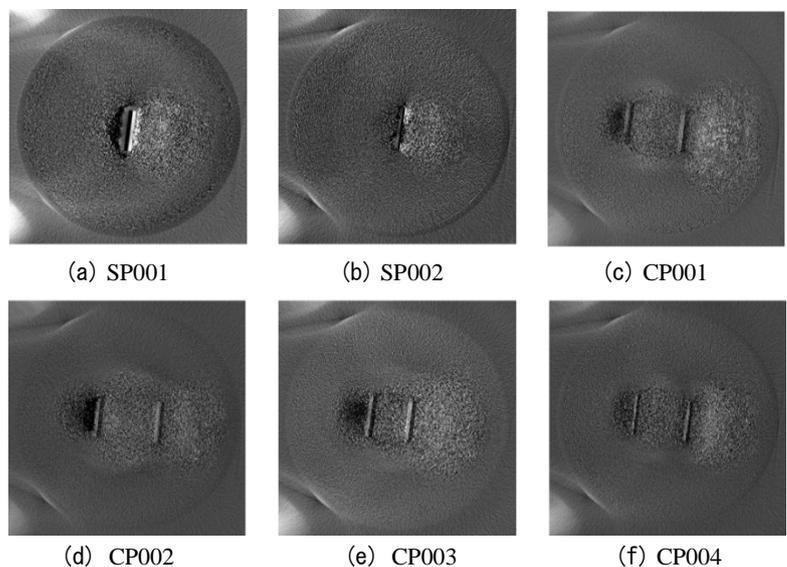


図-3 X線CT装置による地盤変形の観察