鋼管補強した既製コンクリート杭の原位置水平載荷実験

青島 一樹・石崎 定幸・真島 正人・岡 功一*1

Keywords: seismic reinforcement, reinforcement by steel pipe, lateral loading test, precast concrete pile, PHC-pile, pile head joint 耐震補強,鋼管補強,水平載荷試験,既製杭,PHC杭,杭頭接合部

1. はじめに

大型公共施設は、周辺地域の発展に応じて施設を増 設するため、着工から10年以上の期間を経て竣工す るケースが多い。このようなケースで杭基礎を採用し た場合、施工計画上、第一期工事で殆どの杭を打設し、 その後、上部構造を順次増設することがある。このた め、杭の打設から上部構造の着工までの期間に耐震設 計に関する基規準類が改訂され、上部構造の建設時に は杭が新基準の耐震性能を満足しないといった場合も ある。この場合、既設の杭の耐震補強等を実施し、杭 基礎の耐震性能を向上させる必要がある。しかし、既 設の杭の耐震補強に関する研究は少なく、特に補強し た杭の水平挙動を原位置実験によって確認した事例は 殆どない。

今回、既設の杭の上部に鋼管を被せた耐震補強杭¹⁾の 水平挙動と補強効果を把握する目的で、補強杭と未補 強杭の原位置水平載荷実験を実施した。本報では、実 験概要と実験結果について報告する。

2. 試験体の概要

2.1 敷地地盤と杭の概要

図 - 1 に地盤と杭の概要を示す。敷地地盤は、概ね G.L.-6 mまでがN値0~5のシルト層、G.L.-6m~8.6 mまでがN値5~10の粘土層、G.L.-8.6 m以深がN 値25以上の砂礫層である。補強の対象とした杭(以 後、既設杭と称す)は、砂礫層を支持層とした杭径 600mm、杭長11 mのPHC杭-B種である。

2.2 既設杭の補強方法

補強杭は、既設杭の上部から、直径1m、肉厚16mm、 長さ5mの鋼管(SKK400)を油圧ジャッキを用いて圧 入したもので、既設杭と鋼管の間に、杭頭から1mの 範囲でコンクリートを充填している。写真-1に鋼管 の圧入状況を示す。





写真-1 鋼管圧入状況 Reinforcement of pile

2.3 試験体

試験体は、未補強杭として1体、補強杭として2体を 新たに打設し、すべての杭頭部に基礎スラブ(W3.0 × D2.0 × H1.0 m)を設けた。基礎スラブ底面と地表面の 間には摩擦抵抗を低減するために、厚さ5 c mのスタイ ロホームを設置した。図-2に試験体の概要を、図-3に 杭頭接合部の仕様を示す。CASE-1は、未補強杭であり、 杭頭部を中詰め鉄筋コンクリートとする一般的な杭頭接 合方法²⁾を採用した。CASE-2とCASE-3はいずれも補強 杭であり、杭頭接合方法のみ異なる。CASE-2が鋼管の外 周部に補強鉄筋(38-D32)を溶接したのに対し、CASE-3は 既設杭と鋼管の間に充填したコンクリートに補強鉄筋 (40-D25)を定着した。補強鉄筋量は、CASE-3に比較して CASE-2 が 1.5 倍程度多い。

3. 加力方法と計測項目³⁾

3.1 加力方法

図 -4 に加力装置の概要を示す。水平加力は、できる だけ実構造物の杭基礎の水平挙動に近づけるために、長 期軸力(650kN)を導入し、基礎スラブの回転を拘束した 状態で行った。水平力は、試験杭から約5.5m離れた位



図 - 4 加力装置の概要 Test set-up 置にある隣接建物の地下躯体を反力として、2台の復動 油圧ジャッキによって正負交番で加えた。軸力は、隣接 躯体に6mピッチで設置した軸力用反力材(トラス材) から反力桁を介して、試験体に10台(加力方向2支 点)の油圧ジャッキを用いて導入した。この際、2支点 間の軸力比を調整することによって、基礎スラブの回転 を拘束している。また、トラス材と反力桁の接触面は、 テフロン材を用いた滑り支承とした。表-1に設計で想 定した各杭の水平力と実験における計画最大荷重を示 す。計画最大荷重は、レベル2地震時の水平力を参考 に、CASE-1が400kN、CASE-2,3が1600kNとした。載荷 パターンは、図-5に示すように、4段階の正負交番載 荷とした。また、計画最大荷重に達した時点で杭が降伏 していない場合は、降伏するまで載荷を続ける計画とし た。写真-1に実験状況を示す。

3.2 計測項目

主な計測項目は、水平荷重、鉛直荷重、水平変位、鉛 直変位、基礎スラブの傾斜、PHC杭と鋼管のひずみ、 および杭頭補強筋のひずみである。荷重の計測は、油圧 センサーにより行った。変位に関しては、隣接躯体に取 り付けた不動梁を基準とした絶対変位を変位計を用いて 測定した。基礎スラブの傾斜については、基礎スラブ中 央に傾斜計を設置したほか、基礎スラブの隅角部で測定 した鉛直変位の差から算定しており、基礎スラブの回転 制御にはこの値を用いた。PHC杭のひずみは深度方向 に 500 ~ 1500mm ピッチで 26 断面計測した。鋼管のひず みは 600 ~ 750mm のピッチで 7 断面計測した。

4. 実験結果

4.1 基礎スラブの挙動

図 -6 に各ケースの基礎の水平荷重と水平変位の関係 を示す。何れのケースも正方向加力時に剛性低下を生 じ、水平変位50mm 近傍で降伏に達した。図 -7 に基礎の 傾斜と水平変位の関係を示す。最大傾斜角は、CASE-1が 2.72 × 10⁻³rad、CASE-2が5.66 × 10⁻³rad、CASE-3が1.48 × 10⁻³radであり、最後に載荷した CASE-3 が最も精度よ く基礎スラブの回転を拘束することができた。図 -8 に 基礎の沈下と水平変位の関係を示す。同図には、軸力導 入前を初期値とした基礎スラブの隅角部と基礎中央(隅 角部の平均値)の沈下を示した。各ケースとも繰り返し 加力によって徐々に沈下が増大し、基礎中央の最大沈下 は1~6mm であった。また、水平変位の増大に伴い、基 礎が抜け上がる傾向にあり、特に CASE-3 では最大水平 変位時に基礎中央で8.3mm の抜け上がりが生じた。



Load steps

表 - 1	計画最大荷重	
	山田取八門王	

	Plans for maximum load					
ケース名	杭の仕様	設計での想定荷重(kN)		計画最大荷重		
		レベル1	レベル2	(kN)		
CASE1	既設杭	166	395	400		
CASE2	耐震補強杭	810	1533	1600		
CASE3	耐震補強杭	587	1264	1600		

4.2 杭の応力分布

(<u>1</u>) CASE-1 図 -9 に CASE-1 のひずみとモーメントの深 度方向分布を示す。モーメント分布は、ひずみ分布から 曲率分布を算定し、これに杭の曲げ剛性を乗じて求め た。なお、杭頭の中詰めコンクリート(1m)による剛 性増加は考慮していない。CASE-1のモーメントは、杭頭 近傍で最大値を示し、GL-4m付近で地中部最大モーメン トが生じた。モーメントの絶対量の推移は、荷重段階に 伴って増加しており、水平荷重が509kNを超えた段階で 杭頭が短期許容モーメントMaに達し、621kNで終局モー メント Mu に達した。なお、杭頭モーメントが Mu に達す るのとほぼ同時に杭頭補強筋が降伏した。

(2) CASE-2 図-10 に CASE-2 の鋼管と PHC 杭のモーメン ト分布を示す。鋼管のモーメントは杭頭において最大値 を示し、深さの増加とともに減少し先端近傍でほぼゼロ となる分布形状を示した。一方、PHC 杭のモーメントは 杭頭から1.4mと6.4mの位置で大きな値を示し、CASE-1(無補強杭)とは異なる分布形状となった。モーメン トの絶対量の推移は、水平荷重が1594kNを超えた段階 で、鋼管が杭頭部分で降伏モーメント My に達した。一 方、PHC 杭のモーメントは、水平荷重が1594kNの段階で 杭頭と地中部(GL-6.4mの位置)でMa に達し、その後、 地中部モーメントが急増し、1795kNの段階ででほぼ Mu に達した。なお、杭頭補強筋は1395kNの段階で降伏し た。

(3) CASE-3 図-11 に CASE-3 の鋼管と PHC 杭のモーメン ト分布を示す。鋼管のモーメントは杭頭で最大値を示 し、深さとともに減少している。ただし、モーメントの 絶対量は CASE-2 に比較して小さく、最大荷重に至って も My に達していない。また、PHC 杭のモーメントは、杭 頭から 1.4 mと 4.9 mの位置で大きな値を示し、CASE-2 に類似している。ただし、CASE-2 と比較すると地中部 モーメントが大きく、その発生深度も若干浅い。上述した CASE-2 と CASE-3 との差異は杭頭接合部の仕様に起因しているものと思われ、CASE-3の杭頭固定度(杭頭の回転拘束度)が CASE-2 に比較して小さいためと考えられる。モーメントの絶対量の推移は、水平荷重が1178kNの段階で PHC 杭の杭頭と地中部(杭頭から4.4~4.9 m)で Ma に達し、1440kNの段階で Mu に達した。また、ほぼ同時期に杭頭補強筋が降伏し、それ以降に PHC 杭の地中部モーメントが増大した。

4.3 耐震補強の効果

図-12に正方向加力時における基礎の水平荷重~水平 変位関係の包絡線を示す。図中の×印はPHC 杭の終局 モーメント Mu を、 印は鋼管の My を示す。表 -1 に各 ケースの My、Mu 時の水平荷重、および水平荷重と水平 変位の最大値を示す。PHC 杭が Mu に達した時の水平荷重 に着目すると、CASE-1(既設杭)が621kN、CASE-2が 1795kN、CASE-3が1440kN であり、鋼管補強によって杭 の水平耐力が2.3~2.9倍に向上したことが分かる。一



Settlement - lateral displacement relationship of pile-cap





方、CASE-2とCASE-3では、Mu時の水平荷重が約1.25倍 異なり、杭頭接合部の仕様が鋼管補強杭の水平耐力に大 きな影響を与えることが分かる。

5. まとめ

既設のPHC杭の頭部を鋼管で補強した杭の水平挙動と 補強効果を把握するために、3ケースの原位置水平載荷 実験を実施した。実験によって得られた知見を以下にま とめる。

(1)今回の耐震補強方法によって、杭の水平耐力が2.32.9倍に向上することが確認された。

(2) 未補強杭(CASE-1)のモーメントは、Chang 式で算 定される杭頭固定条件でのモーメント分布に近い形状を 示し、杭頭部近傍において破壊した。

(3)補強杭(CASE-2,3)のモーメントは、補強鋼管の 先端近傍(GL-5m近傍)で最大値となり、地中部におい て破壊した。

(4) 杭頭補強筋量が比較的多い CASE-2 の最大水平耐力 は、杭頭補強筋量が比較的少ない CASE-3 の約1.25 倍と なった。





図 -12 基礎の水平荷重 ~ 水平変位関係の包絡線 Skeleton curve of lateral load - lateral displacement

(5) CASE-2 と CASE-3 の応力状態を比較すると、CASE-3
の方が P H C 杭に発生する地中部モーメントが大きく、
最大モーメントの発生位置も浅い。

(6) CASE-2 と CASE-3 の破壊過程を比較すると、CASE-2
では補強鋼管が降伏した後にPHC杭が破壊したのに対し、CASE-3では補強鋼管が降伏することなく、PHC杭が破壊に至った。

(7)(4)~(6)より、杭頭接合部の仕様が、耐震補強 杭の最大耐力や破壊性状、応力分布に大きな影響を与え ることが判明した。

参考文献

- 石坂 功,大友常由,真島正人,石井善一:既製コンクリート ト杭頭部の鋼管による耐震補強効果,基礎工,pp77-88, 1999.4
- 2) 地盤工学会:「杭基礎の調査・設計から施工まで」, pp215 -220, 1993.5
- 3) 地盤工学会:「杭の水平載荷試験方法・同解説」, 1983.7