看板・標識のための杭基礎の載荷試験と非線形応答関数解析

豊橋技術科学大学　学生会員　○高木翔太，澤木達也，　正会員　三浦均也，松田達也
㈱サインファースト　非会員　栗田和博，㈱藤本組　非会員　鈴木祥哲

1.　はじめに

看板・交通標識における杭基礎の設計では，Changの公式を用いて杭長を決定していた。しかし，この方法では地盤の層構造を考慮することができないといった課題がある。そこで著者らは重複反射法による杭基礎の設計方法[(1)]を提案した。さらに，地盤反力の非線形性を考慮した新たな設計方法[(2)]の開発を行い，より経済的な杭の設計が可能となった。本研究では新たに開発した非線形解析による杭基礎の設計の妥当性を検証するため，看板を対象とした実物大試験体による載荷試験を実施した。本稿では，実験結果を示すとともに，解析結果との比較について示す。

2.　試験概要と設計概要

載荷試験は静岡県磐田市遊家地内にて実物大試験体を施工した。解析に用いる当該地の地盤条件を得るため，スウェーデン式サウンディング試験よりN値を算定し，図1のように地盤をモデル化した。そして，直立式：縦 4.0m 横 5.5m（図1左），片持ち式：縦 1.2m 横 4.0m（図1右）の看板を仮定して杭基礎を設計した。載荷は写真1のように反力杭を建込み，溶接棒を介して鉛直方向にチェーンブロックを用いて繰り返し荷重を与えた。荷重の載荷位置は，直立式では支柱天端，片持ち式では梁先端である。

2.1　直立式試験体

地域から決まる基準風速は 32m/s，これより杭頭にかかる荷重は水平荷重 Q=26.1kN，モーメント M=198.8kNm と計算し，杭（BCR295 角形鋼管：辺長 D=550mm，肉厚 t=19.0mm，杭長 L=5.5m）と決定した。このとき，杭頭変位は δ=0.99cm（非線形解析），δ=1.27cm（線形解析）である。

2.2　片持ち式試験体

基準風速 32m/s より杭頭にかかる荷重は Q=6.1kN，M=41.2kNm と計算し，杭（BCR295 角形鋼管 D=400mm，t=12.0mm L=4.0m）と決定した。このとき，杭頭変位は δ=0.22cm（非線形解析），δ=0.52cm（線形解析）である。

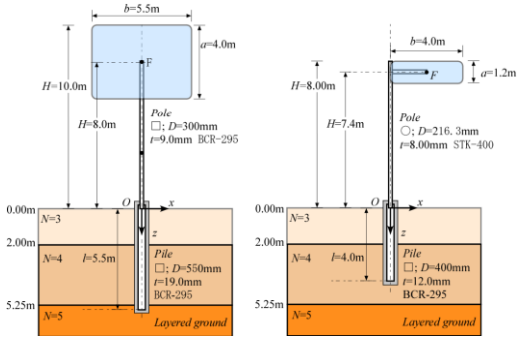

図1　地盤条件と試験体の仕様（左：直立式，右：片持ち式）

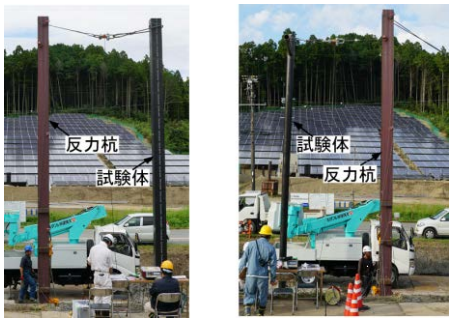

写真1　載荷試験の様子（左：直立式，右：片持ち式）

3.　試験結果

3.1　直立式試験体

縦軸を水平荷重，横軸を杭頭変位で実験結果および解析値をプロットしたグラフを図2に示す。まず線形解析で δ=1.00cm となる荷重（Q=19.8kN）で杭頭変位を比較すると，実験値 δ=0.13cm，解析値 δ=0.63cm（非線形解析）となり，実験値は解析値の約 20%であった。また，実験時の最大荷重 Q=29.8kN では，実験値 δ=0.24cm，解析値 δ=1.34cm（非線形解析），δ=1.50cm（線形解析）となった。

3.2　片持ち式試験体

実験での水平荷重と杭頭変位の関係を図3に示す。片持ち式では杭頭に捩じりが加わるため，捩じりモーメントTによる地盤と地盤改良体の周面摩擦を考慮する必要がある。よって，Tに対して安全率3（T/T_u=1/3，T_u；T に対する極限値）となる荷重で比較した。T/T_u=1/3 となる水平荷重は Q=6.6kN で，実験値は杭頭変位 δ=0.13cm，杭頭回転角 θ=0.003rad，解析値 δ=0.28cm（非線形解析），δ=0.61cm（線形解析）となった。実験値の杭頭変位は解析値（非線形解析）の約 50%であった。

4. 試験考察

実験値と解析値を比べ，非線形解析による設計が十分に安全側の設計がなされていることを確認した。ここで実験値を説明するため，以下の 4 項目について考慮し，解析を行った。

(1)支柱-杭の結合部（杭天端から 1.5m）が支柱と杭の 2 重構造であることを考慮し，この結合部に支柱の剛性を加えて解析を行った。解析結果を図２，３に示す。支柱の断面 2 次モーメント I は杭の 7%ほどで，考慮しても杭頭変位に変化はほとんど見られなかった。

(2)杭と地盤改良体が一体となって挙動していると考え，地盤改良体の曲げ剛性を杭全体に加え解析を行った。しかし，地盤改良体の曲げ剛性は杭の 1%程度で杭頭変位に変化は見られなかった。

(3)杭と地盤改良体が一体と考え，外径を改良体径に変更した。解析結果を図２，３に示す。改良体径を考慮することで杭頭変位を抑えられたが，実験値を説明するには不十分である。

(4)地盤改良体の q_u から N 値を換算し，この N 値を用いて均質地盤と仮定し解析を行った。施工時に採取した供試体（φ5cm×10cm）の材齢 1 日の q_u=458.0kN/m^2 を用いて，以下の式より N 値 37 と求めた。

$$q_u = 12.5N \quad q_u(\mathrm{kN/m^2})：一軸圧縮試験強度 \qquad (1)$$

解析結果を図２，３に示す。地盤改良体の q_u より求めた N 値を用いることで，杭頭変位を抑えることができたが，実験値の約半分の変位と計算され，実験値を説明するには不十分である。

5. まとめ

著者らは地盤反力の非線形性を考慮した看板・交通標識に対する杭基礎の設計方法を新たに開発した。本研究ではこの設計方法の妥当性の検証のため，実物大試験体に対して載荷試験を行った。試験終了後，直立式では地盤が塑性変形している様子も見られず，杭頭変位も実験値は解析値の約半分以下に抑えられていた。また，捩じりに対しても弾性域内での挙動であり，非線形解析による杭基礎の設計は十分安全側であることを確認した。そして，実験値を説明するため 4 つの項目について検討したが，すべて実験値を説明するには不十分であった。特に地盤改良体が杭の挙動に大きな影響があると考えられ，今回の載荷試験結果を説明するには，地盤改良体が及ぼす影響をさらに検討していく必要がある。今後は杭と地盤改良体の相互作用について実験を行い検証していく予定である。

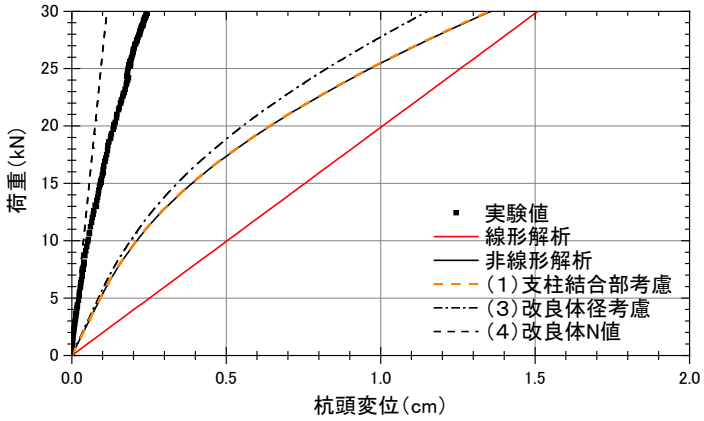

図２　実験結果および解析結果（直立式）

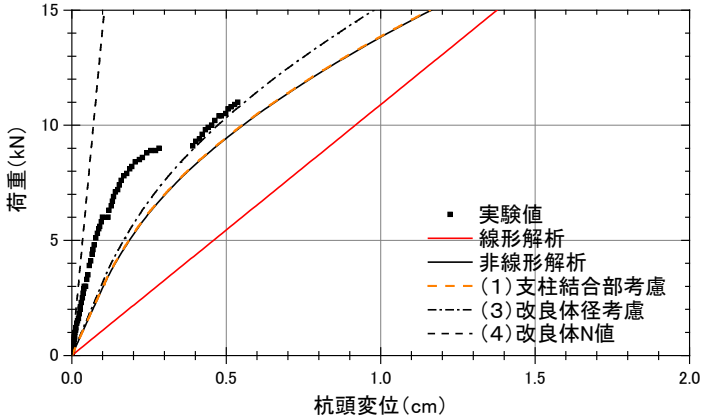

図３　実験結果および解析結果（片持ち式）

6. 参考文献

1) 三浦均也，松田達也，羽柴慶太，KEODUANGCHITH (2014)；風荷重を受ける看板・交通標識を支持する杭基礎の重複反射法を用いた設計法, 第 23 回調査･設計･施工技術報告会, 地盤工学会中部支部

2) 三浦均也，松田達也，吉野貴仁，高木翔太(2016)；横荷重を受ける杭の応答関数を用いた非線形解析手法，平成 27 年度中部支部研究発表会，土木学会中部支部

3) 三浦均也，高木翔太，ケオドゥンチット・ソムチット，松田達也 (2014)；水平荷重を受ける支柱 - 杭一体構造の設計・施工法とその載荷試験，第 59 回地盤工学シンポジウム，地盤工学会

4) 建築基礎構造設計指針 6.6 節；日本建築学会 (2001), pp. 262-296.

5) 道路標識設置基準・同解説；日本道路協会 (1987)