

杭相対剛性および地盤修復性に関する基礎的実験

土木研究所寒地土木研究所 正会員 ○富澤 幸一
北海道大学名誉教授 フェロー会員 三浦 清一

1. はじめに

杭の力学挙動は地盤との相対剛性で決定することは周知の事実である^{例え¹⁾}。つまり杭に鉛直・水平荷重が作用した際、杭周辺地盤は反力を発揮するが増加荷重により逐次塑性変形し抵抗力が消失する。そのため現行の一般的な水平地盤反力法は、杭の許容変位や基準変位（弾性挙動）を定めて微小変形を許容することで経験的に成立する。

ただし、杭の地震時挙動・補強対策や今後の性能規定設計法の考察のためには、古典的課題ではあるが杭挙動に伴う地盤の変形特性と修復機能の検討は必須と考える。そのため本報では課題の概略を抽出し、組杭および単杭の大規模な静的・動的変形によりもたらされた塑性変形した地盤の破壊形態・修復性を基礎的モデル実験から確認した。

2. 杭と地盤の相対剛性

杭頭に静的荷重が作用した場合の杭水平抵抗（変形、応力、地盤反力等）を、地盤を3次元連続体として解析することは非常に困難である。そのため現行設計法では杭を弾性床梁、地盤をウィンクラーばねとして簡便に置き換える手法が一般的である。これは一般に慣性力を受ける杭は地盤抵抗が受働土圧に達する前に降伏することが多いことや杭に許容変位量や基準変位量を設定することで杭基礎が線形内挙動するため地盤の塑性化を考慮しなくて済む合理性がある。

ただし、ウィンクラー地盤では杭幅前面 B のみが反力となるとされており、特に砂質土地盤では扇状に広がった α は無視しがたく地盤の影響領域を十分に考慮しているとは言いがたい（図-1）。また静的プッシュオーバーの微小変形であっても、地盤の塑性化は避けられない。つまり杭作用荷重で前面地盤は隆起（最大 $4\sim 5B$ ）し、背面は粘性土系地盤ではかい離が生じ、砂質土系地盤でも一般に崩落し見た目ギャップはなくなるが反力体としての初期剛性を確保し続けるかは不明瞭と考えられる²⁾（図-2）。また、地盤強度の修復性は杭の鉛直支持力（特に摩擦抵抗）でも同様であり、「地盤工学会杭の载荷試験法・同解説」によれば杭施工約2週間後の試験実施を義務付けているが、地盤種別ではせん断の強度回復に $60\sim 80$ 日を要する場合もあるとされる³⁾。

つまり、杭の鉛直および水平挙動で自然地盤（特に粘性土系）が変形した際にダイレイタンス等により一定の回復は見込めるが、一方で鋭敏比・シキソトロピーという地盤変形に伴うせん断強度低下の概念もあり、今後の基礎の性能規定化の確立においては、地盤の変形特性やバラツキの評価は必須と考えられる。

さらに杭基礎の耐震設計法は、保有水平耐力（変形性能）で代表される静的解析が主流であるが、これは地盤を静止土圧状態と解釈し慣性力荷重が漸増変化しても地盤変形はしないと仮定するが、実地震時の非線形応答を考えた場合には杭および地盤剛性は少なからず変化するためにその仮定が成り立たない場合もあると考えられる。

つまり、これまでの杭基礎の簡便な耐震設計法は特に不具合はなく経験則として問題ないとされてきたが、大規模地震時の杭基礎全体の力学挙動や求める要求性能に応じた既設基礎の補強対策技術を検討する際には、常時挙動と同様に、地震においても杭・地盤の相対剛性すなわち応答変形や地盤修復性の議論は不可欠と判断される。特に地震時の液化化・流動化による杭周辺の地盤残留変位は、その後の基礎挙動に大きく影響すると考えられる。

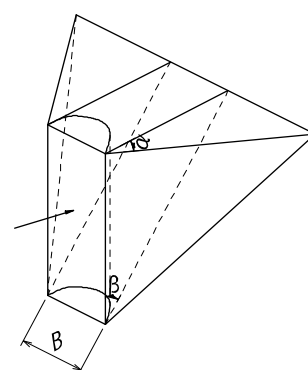


図-1 杭地盤反力領域

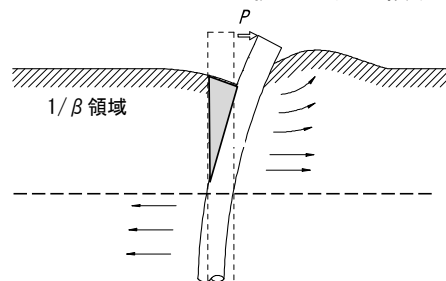


図-2 杭と地盤相対変形モデル

キーワード 杭, 水平地盤反力, 相対剛性, 塑性変形

062-8602 北海道札幌市平岸1条3丁目1番34号 TEL 011-841-1709(365) FAX 011-841-7333

3. 軟弱地盤中の杭挙動と地盤塑性化・修復性

杭・地盤の相互作用および相対剛性を実験より、特に地盤変形性能つまり損傷状況に注目し確認した。まず動的加振実験結果を示す⁴⁾。実験ではせん断土槽(幅 1200mm×奥行 800mm×高さ 1000mm, せん断枠 15 段)内に、4 本組杭(鋼管:杭長 $L=1000\text{mm}$, 直径 $D=27.2\text{mm}$, 肉厚 $t=2.8\text{mm}$)周辺に杭特性長の $1/\beta$ 相当の上部層深さ 200mm を代表的軟弱地盤である泥炭性軟弱地盤, 中間層深さ 600mm を砂地盤, 下部層深さ 200mm を固定地盤として造成した。実験地震波はレベル 2 地震動としプレート境界型の大規模地震である 2011 年東北地方太平洋沖地震動(タイプ I 新晩翠橋周辺地震動 Max692gal 240sec)(図-3)を大型振動台テーブル基盤から一方向に直接入射した。その結果杭は概ね降伏程度に留まったが、杭周辺地盤は修復が不可能なほど損壊しているのが見て取れる(写真-1)。この様な状況下で余震が来た場合には、杭基礎の水平抵抗さらには橋梁機能の確保が継続出来ないことが大いに懸念される。

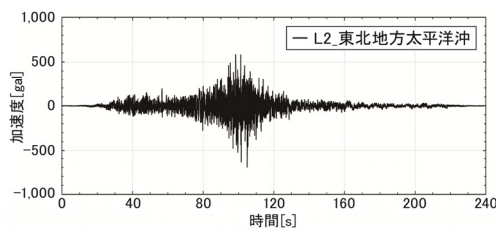


図-3 タイプ I 入力地震動



写真-1 杭周辺地盤の損壊状況

次に、同様の実験条件で単杭を静的に 50mm (杭径の 5 倍) までプッシュオーバーした後に、杭周辺地盤に生じたギャップを水と砂で十分に締固め修復した後に、再載荷した実験結果を示す。通常、変状した自然地盤を補修することはまれであり、今回薬液注入工などを用いていないため仮修復と考えている。再載荷実験は数時間の放置後に実施したが、50mm 程度の杭応答変位は大中規模地震では十分に有り得る変形と解釈される。

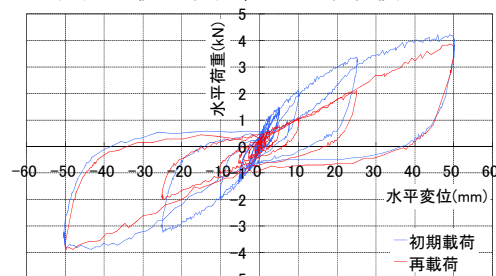


図-4 水平荷重～杭変位(初期・再載荷)



写真-2 地盤再造成後の試験状況

図-4 より青で示した初期載荷に対して、赤で示した再載荷線は杭周辺部を埋め戻し締固めしたにも関わらず水平地盤反力が明らかに低下傾向を示した。ただし、赤の再載荷線は交番載荷時では初期カーブを概ねなぞっている。しかしながら、徐荷時また写真-2 より、地盤修復後の再載荷において杭周辺埋め戻し材の反力効果が十分に発揮されず、最終的には杭周辺地盤が大きく隆起した状態となっていることが分かる。

以上より、杭基礎の常時および耐震設計法の実施で構造物としての健全性を確保させることは可能であるが、塑性変形した地盤の修復性は不明確と考える。現行設計を否定する意図ではなく、周辺地盤との相対剛性で決定する杭挙動を地盤の修復性の観点から考察し議論を深めていくことは、今後の被災軽減等においては必要条件と考える。

参考文献

- 1) Wei Dong Guo and Mark F. Randolph : Vertically Loaded Piles in Non-Homogeneous Media, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.21, PP.507-532, 1997.
- 2) 富永晃司, 辻 定利, 大岩健次郎, 中井正一: 杭前面地盤の変位の実測と考察, 杭の水平載荷試験法に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.21-26, 1979.
- 3) 藤田圭一, 上田勝基: クイ打込み後の経過日数と支持力について, クイの鉛直載荷試験法の諸問題に関するシンポジウム論文集, pp.49-52, 1970.
- 4) 富澤幸一, 木村 亮: 既設杭の軟弱地盤および液状化地盤における耐震補強技術, 第 59 回地盤工学シンポジウム論文集, CD-ROM, 2014.