

杭相対剛性および地盤修復性に関する基礎的実験（その2：改良体挙動）

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

杭の目的および定義は荷重伝達である。そのため杭本体は構造物ではあるが、杭の支持機構は周辺体（主に地盤）との相対剛性に支配される^{例えば1)}。そのため現行の一般的な杭水平抵抗の設計法では、杭周辺体の反力効果が持続し、全体変形が過大とならない範囲に許容水平変位量を設定している。つまり、杭変位により周辺体の逐次塑性化は避けられないが、残留変位を微小内に収めるという前提で経験的に設計法を成立させている。

ただし、杭の大変形が想定される地震時挙動と補強対策の検討のためには、同時に塑性変状すると考えられる周辺体との相互作用の考察が重要となる。前報では古典的課題である自然地盤中の杭頭に繰返し水平荷重を作用させた際の地盤変形特性と破壊形態などを考察した²⁾。本報ではそれに引き続き、（杭周辺に改良体を併設する手法を杭基礎の耐震補強技術とする研究の一環として³⁾）低強度改良体を周辺地盤として扱った改良地盤中の杭反力特性と改良体損傷時の修復法などを基礎的な水平載荷モデル実験から検証した。

2. 杭と周辺体の相対剛性・相互作用

一般に慣性力を受ける杭の設計法では、反力体（通常は自然地盤）の3次元連続性の効果などの煩雑性を反映することは困難であるため、反力体を簡便なばねモデルとして扱うことは周知である。これは反力体が受働土圧に達する前に杭が降伏することが多いことや杭に一定の許容変位量を設定することで変形が線形挙動内となり、反力体の塑性化を考慮しなくて済む合理性があるためである。この手法は杭の微小変形のみを許容する現行の常時および小規模地震時の杭設計法の経験則において概ね問題はない。

ただし、大規模地震時では杭と反力体は非線形挙動を呈するため、特に以下の2点を注視し議論すべきと考える。それは杭基礎変形が橋梁全体の動的挙動に大きく影響することが必至のためである。

1. 杭の耐震設計法は、地震時保有水平耐力照査法で代表される静的解析が主流であるが、これは反力体（主に地盤）を静止状態と解釈し慣性力が漸増しても変形はしないと仮定する。ただし、実地震時の軟弱地盤では地盤はせん断変形するためその仮定が成り立たない場合もあると考えられる。つまり慣性力のみを杭頭に作用させる設計法では、杭体および反力体の剛性で地震時挙動が決定するため実挙動とは異なる可能性もある。
2. 杭の地震時挙動を静的プッシュオーバーで扱った場合、杭の変形に伴い周辺反力体の塑性化は避けられず残留変位が生じる。特に大規模地震では余震が懸念されるが、反力体（主に地盤）が修復し初期剛性を継続することは不明瞭と考えられる。また地震時の液化化や流動化による杭周辺体の残留変位は、その後の杭基礎の健全性に影響すると考えられる。

地震時保有水平耐力法は地盤の受働抵抗のみを反映した手法であるが、地盤のせん断変形を考慮した応答変位法について本報では特に議論しない。

ただし、例えば自然地盤（特に軟弱地盤）が変形した際にダイレイタンスーなどにより一定の回復は見込めるが、一方で鋭敏比やシキソトロピーのせん断強度低下の概念もあり、一度変形した地盤の回復性はその種別によっても不明瞭である。そのため、杭変形により塑性化した反力体（主に地盤）の修復性の考察は、杭耐震設計法における反力体との相対剛性すなわち応答変形の相互作用や性能規定設計法の確立に向けて不可欠と判断される。

以下に、単杭および組杭周辺の反力体を改良地盤とした動的加震実験の成果から、自然地盤（泥炭性軟弱地盤）と対比した杭挙動の荷重～変位関係と変形特性さらに修復方法・効果を示す。

キーワード 杭, 地盤改良, 水平抵抗, 相対剛性

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. 杭と自然地盤および改良地盤の相対剛性（単杭動的挙動）

杭と反力体の相互作用の検証とし、自然地盤および改良地盤中の単杭の動的加振実験結果を図-1 に示した。実験はせん断土槽（幅1200mm×奥行800mm、せん断枠15段）内の造成地盤深さ1mに鋼管杭（杭径 $D=101.6\text{mm}$ 、杭厚 $t=4.2\text{mm}$ 、長さ $L=1110\text{mm}$ ）を立込み、上層200mmを代表的軟弱地盤である泥炭性軟弱地盤と一軸圧縮強度 $q_u=300\text{kN/m}^2$ 相当の改良体とした際の杭挙動の対比である。基盤波は杭卓越振動数で目標変位となるsin波とした。図より、杭径25%と比較すると杭反力体を改良地盤とすることで自然地盤に対して、約3倍のエネルギー吸収されていることがわかる。

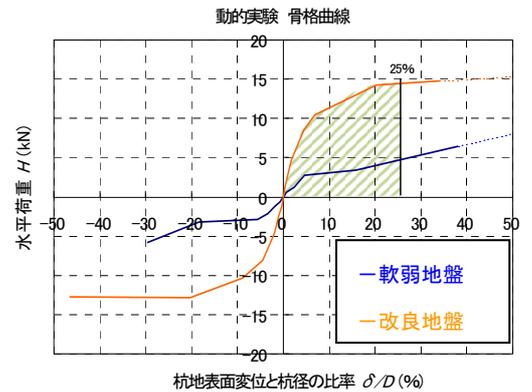


図-1 単杭の動的加振実験

3. 改良地盤の変形特性と修復手法（組杭挙動）

同種の加振実験で、自然地盤（泥炭性軟弱地盤）および改良地盤（ $q_u=300\text{kN/m}^2$ ）における4本組杭（鋼管：杭径 $D=27.2\text{mm}$ 、杭厚 $t=2.8\text{mm}$ 、杭長 $L=1000\text{mm}$ ）の変形特性と反力体損傷状況を確認した。入力波はレベル2地震動とし2011年東北地方太平洋沖地震動（タイプI Max692gal 240sec）（図-2）を基盤から一方向に直接入射した。

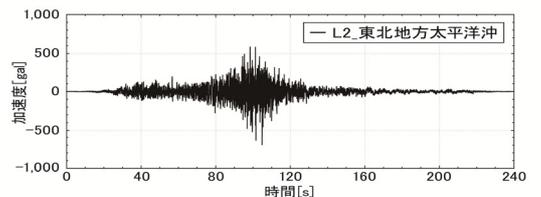


図-2 組杭実験のタイプI入力地震動

写真-1 に自然地盤（泥炭性軟弱地盤）の組杭加振実験後の状況を示した。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²⁾。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。それに対して、改良地盤（ $q_u=300\text{kN/m}^2$ ）の実験後の状況では写真-2 からわかるように最大応答変位が抑制され杭および改良体に損傷はなく健全であった。ただし、改良体の周辺地盤は脆弱地盤のため地表面周囲に溝状の隙間が生じた。しかし溝は改良体下まで貫通していない。実大規模ではこの隙間は既設杭基礎から約30m周囲の境界部に発生すると考えられるが、杭と改良体そのものは健全性を確保しているため、地震後の溝修復対応が可能と考えられる。

改良体はレベル2地震動加振で損壊しなかったため、改良体を人工的に切断しセメント固化剤で再接合し加振実験を行った（写真-3）。その結果、切断前と同様に杭ひずみは 2000μ 以下で改良体は損傷せず健全性を確保した。

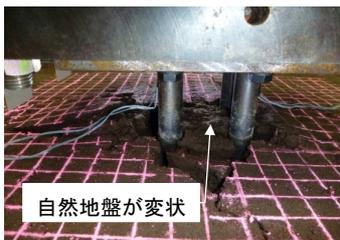


写真-1 杭周辺軟弱地盤の損壊

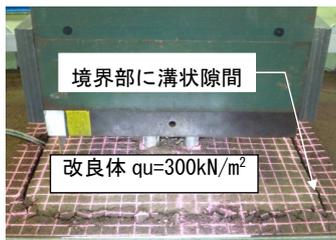


写真-2 杭周辺改良地盤の実験後



写真-3 改良体再接合後の実験

以上、大規模地震動に対して杭の周辺反力体（自然地盤や改良地盤の側面など）の塑性化は避けられず、例えば地震時保有水平耐力法のように静的な強制変位を作用させる設計法では反力体に許容塑性率の概念はない。ただし、杭基礎の長期健全性確保ためには、杭の周辺反力体の塑性後回復性や修復法の検討が必要と考えられる。

参考文献

- 1)Wei Dong Guo , M. 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)富澤幸一, 三浦清一：杭相対剛性および地盤修復性に関する基礎的実験, 第70回土木学会年次学術講演会論文集, III-421, pp.841-842, 2015.
- 3)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.