

複合地盤杭の新設計法

土質基礎研究室 富澤幸一

1. 設計法の背景

軟弱地盤では、上載構造物荷重に対し支持力不足の場合、所要の地盤強度を確保するために地盤改良工法が実施される。その際、すべり安定・沈下量の設計法の検討では、地盤せん断強度を載荷重工法（プレロード・サーチャージ等）であれば圧密増加後の地盤強度として、さらに、深層混合処理工法（DJM・CDM等）及びサンドコンパクション工法では、原地盤と改良柱を改良率に従い合成したいわゆる複合地盤として評価する。

この複合地盤の考え方に沿い、改良地盤強度を杭基礎の水平地盤反力として合理的な評価ができないかを検討した。改良された地盤に施工した杭基礎をその設計法の考え方より、以下「複合地盤杭」と仮称する。

これらの設計法に関する発想は従来から存在している^{1),2),3)}が、杭の水平抵抗の影響範囲を含め地盤改良後の杭基礎の地盤反力特性が不明瞭であることを理由に、実用的な設計法には至っていない。そのため、現行設計法では、原地盤強度のみを反映しているのが一般的である。しかし、このような設計法では、現場条件によっては水平地盤反力を過小評価する可能性があると考えられ、建設コスト削減につながる合理的設計の確立のためには、複合地盤における杭基礎の水平抵抗に関する的確な評価が必要である。

2. 基本的設計法の考え方

現行杭設計法では、杭の水平抵抗は堆盤変形係数Eから算定される水平地盤反力係数K値により決定する。そのため、複合地盤杭の設計では、地盤改良後の地盤せん断強度を変形係数の増加として捉える必要がある。

ここでは、以下の代表的な軟弱地盤改良工法

深層混合処理工法

サンドコンパクション（SCP）工法

載荷重工法

に関する複合地盤杭の水平抵抗に関する基本的な設計法の考え方を整理提案する。

2-1. 深層混合処理工法

深層混合処理の改良柱が施工された複合地盤の地盤変形係数Eの増加を、地盤せん断強度Cの増加と同様に、改良率 a_p により合成した以下の式により算定可能とする⁴⁾。

$$\text{複合地盤変形係数 } E = E_p \cdot a_p + E_o(1-a_p)$$

E_p : 改良柱体変形係数(N/m³)

E_o : 原地盤変形係数(N/m³)

a_p : 地盤改良率 50%標準

: 破壊ひずみ低減率(1/2~1/3)

この際、改良柱体変形係数 E_p については、改良柱体の一軸圧縮強度 q_u より、原地盤が粘性土地盤であれば $E_p=100q_u$ として⁵⁾泥炭地盤では $E_p=103q_u^{0.99}$ として⁶⁾算定する。

さらに、求められた複合地盤変形係数Eより、改良地盤中に施工された複合地盤杭の静的な水平地盤反力係数K値は、下式⁷⁾により決定することになる。

$$\text{複合地盤K値 } K = (E/30) \cdot (D/\sqrt{EI}) \cdot (1/30)^{-3/4}$$

E:複合地盤変形係数(N/m²)

:地盤反力推定係数

D:杭径(m)

:特性値⁴ $KD/4EI$

ただし、この際、K値は右辺と左辺の両方にあるので、繰り返し計算を要する

2-2. サンドコンパクション（SCP）工法

SCP改良地盤では、複合地盤杭の水平地盤反力係数K値を以下の方法で、改良率 a_s に応じて直接的に算定する⁸⁾。

$$\text{複合地盤K値 } K = K_s \cdot a_s + K_c \cdot (1-a_s)$$

K_s :砂杭K値(kN/m³)

K_c :砂杭間原地盤K値(kN/m³)

a_s :SCP改良率

$K_s \cdot K_c$ については、標準貫入試験のN値または孔内1水平載荷試験から求められる地盤変形係数Eより算定する。この場合、SCP砂杭のN値は概ね10~15程度とされている。

3. 載荷重工法

プレロード・サーチャージ等の載荷重工法では、機械的な改良工法による複合地盤とはならないため、圧密地盤後の地盤強度を全体評価する必要がある。

圧密後の地盤せん断強度 C は、一般に下式で算定される⁴⁾。

$$C = C_0 + m \cdot P \cdot U$$

C_0 : 原地盤非排水強度 (kN/m^2)

C : 圧密による地盤せん断強度 (kN/m^2) の増加

m : 圧密の伴う強度増加率

P : 地盤内増加応力 (kN/m^2)

U : 圧密度 (%)

この考え方に基づき、圧密による地盤せん断強度増加 C を地盤改良された変形係数増分 E と同等と仮定し、改良地盤全体の地盤変形係数 E を求める。

そして、上述した手法に従い、地盤変形係数 E より杭の静的な水平地盤反力係数 K 値を算定する。

この際、圧密工法では、事前に室内圧密試験⁹⁾を実施して設計するため、 $\text{Log}e \sim \text{Log}P$ 曲線から算定される体積圧縮係数 mv より、 mv の逆数を地盤変形係数 E として設計値と対比する。

以上、現行設計法に基づき各地盤改良工法別に基本的な複合地盤における K 値の算定の考え方を整理した。いずれの工法においても、改良後の地盤変形係数 E について孔内水平載荷試験を実施して、設計値の妥当性を確認することが必要になる。

3. 事例検証

3-1. 現場試験

複合地盤における基礎杭の水平抵抗を適切に評価するためには、地盤バネとして水平抵抗の影響範囲をどのように把握するかが重要である。つまり、そのことにより地盤改良の施工範囲が決定されることになる。

ここでは、一つの現場試験事例として、橋台基礎杭に隣接して施工された深層混合処理工の改良柱 (DJM) が、杭の水平抵抗つまり地盤反力に及ぼす影響について水平載荷試験により検証した結果を紹介する。

現場水平載荷試験を実施した試験杭は $1200\text{mm} \cdot L=12.5\text{m}$ の場所打ちコンクリート杭であり、改良率 50% で施工された DJM 改良柱から試験杭端までの距離は 3.0m である。基礎杭の設計 K 値については、地表面からの水平抵抗に関与するとされる概ね $1/$ 深度⁵⁾ までの孔内水平載荷試験結果及び区間 N 値の重さ平均により、常時設計 E 値 $=6.87\text{MN}/\text{m}^3$ としている。それに対し、改良柱側に水平載荷した試験結果では、

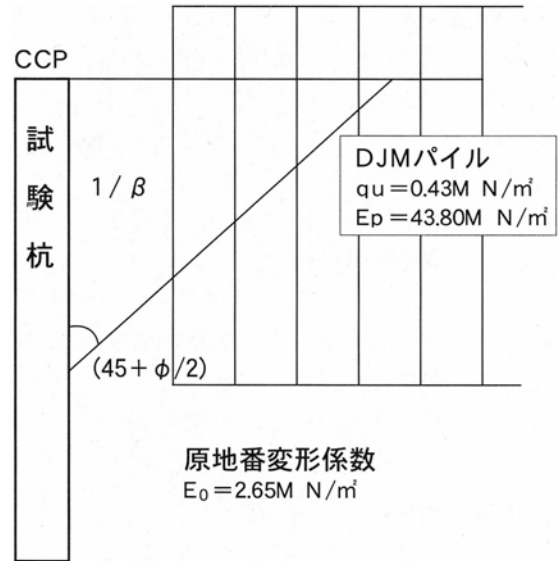


図-1 複合地盤検討図

荷重～変位量の関係から得られた弾性床土上の梁の理論に基づく逆算 K 値として基準変位量において実測 K 値 $12.45\text{MN}/\text{m}^3$ が得られた。そのため、単純比較では、地盤水平バネは設計値に対し載荷試験による実測値は約 1.8 倍 ($12.45/6.87$) の地盤反力を有したことになり、橋台背面に存在する DJM 改良柱が地盤反力に影響したものと考えられた。

解析の試算として、DJM 改良柱体の存在つまり複合地盤の影響を図-1 に示すように、基礎杭の影響範囲とされる $1/$ 位置から受動土圧の作用勾配 $= (45 + \phi/2)$ で立ち上げた影響面積を K 値の関与範囲と仮定した。試算の結果、地盤水平抵抗を原地盤 K 値と改良地盤部 K 値の 2 次元面積で合成することにより、複合地盤の設計理論 K 値 $= 15.01\text{MN}/\text{m}^3$ が確保可能という結果を得た。これは水平載荷試験結果から得られた実測 K 値 $= 12.45\text{MN}/\text{m}^3$ に対し概ね合致した結果である。

さらに、現場水平載荷試験結果に基づく地盤条件により、2次元平面歪みの FEM 解析を試みた。解析ケースは、全体を無処理地盤 (原地盤) としたケース-1 と現場条件と同様に杭から一定の離れた位置に地盤改良領域を設定したケース-2 である。水平載荷試験を想定して杭頭に単位荷重を作用させたのシュミレーションを実施した結果、ケース-1 の杭地表面変位量はケース-2 の約 2 倍という結果が得られた。つまり、Chang 式で設定に従い求めるべき地盤反力 P が杭変位量 y に比例すると考えれば、FEM 解析の結果は水平バネの影響範囲を $1/$ 区間の受動土圧 $= (45 + \phi/2)$ 領域とした理論と概ね一致したことになる¹⁾。

3-2. 建設コスト

橋梁橋台設計で従来形式と複合地盤杭として設計した建設コストの比較事例を示す(図-2)。この際の複合地盤は、改良率78.5%・改良強度 $q_u=200 \text{ kN/m}^2$ の深層混合処理工(DJM)としている。なお、改良範囲については、上項の設計法に従い、基礎杭の水平抵抗関与深さ $1/2$ 位置から受動土圧の作用勾配 $= (45 + \phi/2)$ としている。

その結果、複合地盤形式として杭本数をかなり減らすことが可能となり、概算工事費ベースで、従来形式：複合地盤形式 $= 2.5 : 1$ という大きな建設コスト削減

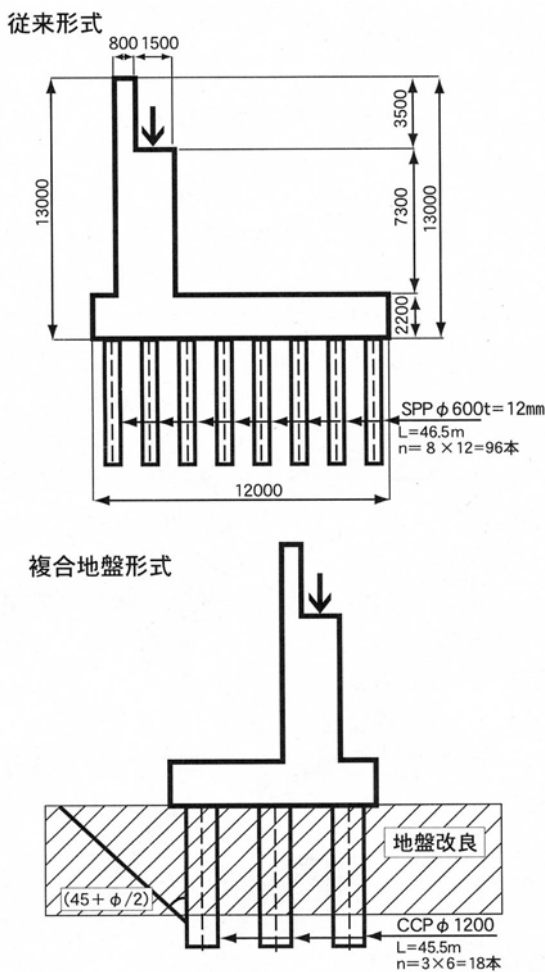


図-2 橋台基礎形式比較

減効果が得られた。軟弱地盤では、杭基礎設計は水平抵抗で決まるケースが多いと考えられることから、今後、現場条件によっては、複合地盤杭設計が有用と考えられる。

4. まとめ

複合地盤杭の設計法に関する理論上の整理は概ねできたものと考えており、建設コスト削減の意味からも今後現場条件に応じた複合地盤杭の設計活用が望まれるところである。

ただし、他機関を含め多くの施工実績を持たないことから、当面の設計施工に当たっては以下の留意点を考慮する必要がある。

改良後の複合地盤変形係数Eを現場孔内水平載荷試験により確認する。

複合地盤杭の水平地盤反力係数K値を現場杭水平載荷試験により検証する。

耐震設計上、高次の動的モード変形が想定される橋梁基礎での採用は避け、当面は擁壁基礎杭あるいは1スパン橋梁橋台で活用し動的挙動実績を検証していく。

(文責 富澤幸一)

参考文献

- 1). 富澤・西川：複合地盤中の基礎杭の水平抵抗評価 第35回地盤工学会研究発表会論文集2000.6
- 2). 田中・藤森・中瀬・日下部：複合地盤の水平抵抗に関する実験 第18回地盤工学研究発表会1983.6
- 3). 谷川・沢田・田中：複合地盤における杭の水平抵抗について 第28回地盤工学研究発表会1993.6
- 4). 泥炭性軟弱地盤対策工指針 (社)北海道開発技術センター 1988.10
- 5). 深層混合処理工法 設計・施工マニュアル：土木研究センター1999.6
- 6). 林・能登・島谷：北海道のセメント安定処理について 高有機物土に関するシンポジウム1989.1
- 7). 道路橋示方書・同解説IV下部構造編 日本道路協会1996.12
- 8). 軟弱地盤対策工法 - 調査・設計から施工まで - 地盤工学会1997.6
- 9). 土質試験の方法と解説 - 第一回改訂版 - 地盤工学会2000.4



富澤幸一
Kouichi TOMISAWA
北海道開発土木研究所
構造部 土質基礎研究室
研究員