

# 複合地盤杭による橋台基礎の設計

## A Design of Abutment Foundation for Pils in Composite Ground

### 概 要

一般に軟弱地盤上の橋台は、背面土圧や地震時の上部工慣性力に対して地盤の水平抵抗や支持力が不足するため、多数の杭本数を要する大規模な杭基礎になり易い。

従来、このような場合は EPS を用いて土圧を軽減し、杭本数を減らすという方法が多くとられてきたが、コスト縮減という観点から、これまでの設計法に替わる方法として地盤改良による地盤反力の増加を見込んだ杭基礎の設計例（以下、複合地盤杭と仮称する）について紹介する。

青地 知成<sup>1)</sup>

大熊 浩明<sup>2)</sup>



### 1. はじめに

従来、橋梁設計における地盤改良は、橋台橋軸方向のすべり対策や液状化防止等を目的として使用されており、地盤改良による水平抵抗の増加や粘着力の増加については、その増加率や評価方法が不明瞭であることを理由に杭基礎設計に反映させていないのが一般的である。

これに対し、種々の地盤改良によって改良された地盤を複合地盤として扱い、水平抵抗や粘着力の増加を考慮して設計した杭基礎のことを複合地盤杭<sup>1)</sup>と呼んでいる。このような地盤改良効果を合理的に反映させた複合地盤杭の基礎は、従来の考え方で設計された基礎に比べ杭本数および下部工の規模を縮小することができ、建設コストを大幅に縮減することが可能となる。

### 2. 複合地盤杭における地盤改良範囲の基本的条件

複合地盤杭として設計する場合の必要地盤改良範囲は、採用する地盤改良工法の種

類によらず下記の基本的条件によるものと考えている。

#### (1) 深度方向の地盤改良範囲

水平力を受ける杭は地表面付近の地盤の影響が支配的であり、水平抵抗の深さ方向の影響範囲は、杭結合方式、杭長、地盤構成の違い等により変化するが、地盤抵抗の線形範囲内では概ね杭頭から杭の特性長  $1/\beta$  程度の深さまでとされている<sup>1)</sup>。これより基本的な考えとして杭の水平抵抗に支配的な杭頭から  $1/\beta$  の範囲を深さ方向の改良範囲とする。

#### (2) 杭体前面の地盤改良範囲

杭体前面の水平抵抗の影響範囲は、最大地盤反力の発現を作用力に対する釣り合い状態にある極限抵抗として扱えば、土の破壊角  $\theta = 45^\circ + \phi/2$  ( $\phi$ : 土のせん断抵抗角度( $^\circ$ )) で表される受働土圧領域であると考えられることから、深さ  $1/\beta$  の位置から受働土圧の作用する範囲<sup>2)</sup>を改良するものとする。

#### (3) 橋台側面および背面の地盤改良範囲

橋台側面・背面については、杭の周面摩擦の増加を考慮するため、摩擦杭の荷重

1) 交通事業本部 交通第2部

TOMOYA AOCHI

2) 共通事業本部 地質部

(技術士補 建設部門)

HIROAKI OOKUMA

分散の考え方から、基礎底面以下改良深度まで  $30^\circ$  で分散させた幅を改良範囲とする<sup>3)</sup>。(図-1 参照)

### 3. 複合地盤杭における対策工規模の数値解析的検証

前述の複合地盤杭を設計する際の基本条件の設定においては、改良範囲の妥当性や改良体の挙動について何らかの検証をしておく必要がある。特に、DMMのように比較的大きな強度が得られる改良地盤中の杭基礎では、改良体が地盤の一種として杭の横抵抗となるのか、または、改良体と橋台底版が一体の挙動を示し、脚付ケーソン基礎に類似した挙動を示すのかは、複合地盤杭の設計において大きな問題となる。このため、FEMを用いた数値解析的検証を行った。

以下にその検証結果を紹介する。

#### (1) 改良範囲の妥当性の検証

改良範囲（平面的範囲・深さ範囲）の妥当性の検証（図-2 参照）は、解析モデルの前面改良範囲を変化させ、これに地震時土圧、地震時慣性力を作用させてFEM解析を行い、改良範囲が及ぼす応力変化から最適な改良範囲を決定した。

#### (2) 改良体の挙動推定

改良体の挙動推定のための解析では、底版下面と改良体および改良体下面と軟弱層との間に、滑り境界面（2重節点と粘着バネ要素からなる境界）を設けてFEM要素間のすべりを再現し、改良体強度を変化させながら改良体の挙動を推定した。

#### (3) 解析条件

- ・解析は2次元静的FEMモデルを用い、奥行きは杭1本当たり（杭配列  $5 \times 4$ ）の受持幅として計算をおこなった。
- ・滑り境界面の物性値は土のせん断抵抗角と粘着力からせん断強度、引張強度を求め入力した。

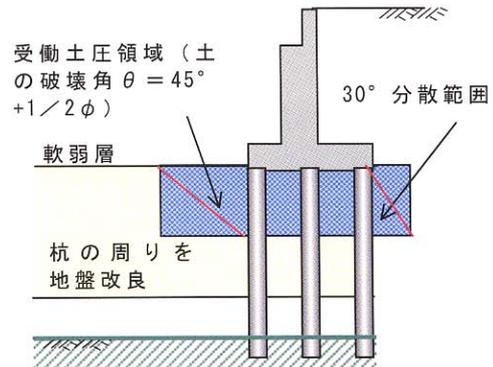


図-1 複合地盤杭における地盤改良範囲

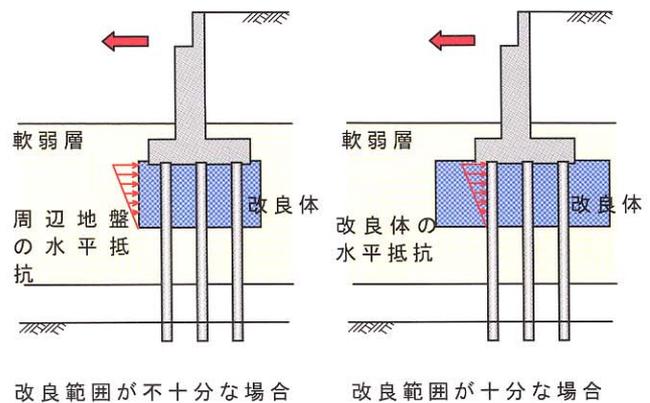


図-2 改良範囲と水平抵抗の関係

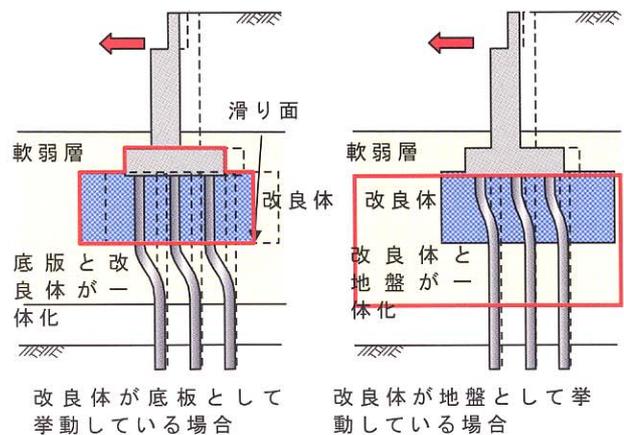


図-3 改良強度と改良体の挙動

- ・入力外力はレベルIの地震を想定し、橋台設計時の安定計算に用いる地震時の橋台フーチング下面中央の水平力成分をFEMでモデル化したフーチングの下面中央に同様に入力した。

(4) 解析結果

①改良範囲の検証

杭体前面改良範囲をフーチング前面（ケース①）、 $1/\beta$ （ケース②）、 $3 \times 1/\beta$ （ケース③）と変化させた結果、水平方向圧縮応力の集中が改良範囲  $1/\beta$  を境に改良体前面から杭体前面に移行する。これより、改良体の水平抵抗を見込むには  $1/\beta$  の範囲の改良が妥当であることが検証できた。（表-1参照）

②改良体の挙動検討

図-4 は一般的に用いられている改良杭の強度  $q_{up} = 200\text{kN/m}^2$  と、この強度の 8

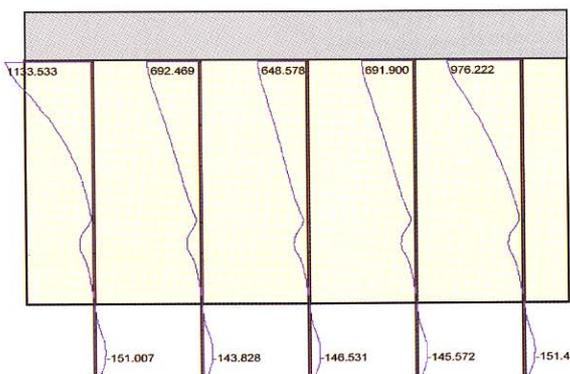
倍に当たる改良強度  $q_{up} = 1600\text{kN/m}^2$  の場合の杭体に発生するせん断力図である。いずれの改良強度においても改良体底面に設けた滑り境界面に剥離もしくは滑動等の変化はなく下方地盤と一体になるのが判る。

また、杭体のせん断力は改良強度を大きくすると改良体下面位置で増加していくが、 $q_{up} = 1600\text{kN/m}^2$  の場合においても杭頭の発生せん断力以下であることから一般的な改良強度においては改良体下面での応力集中が問題となることは無いと言える。

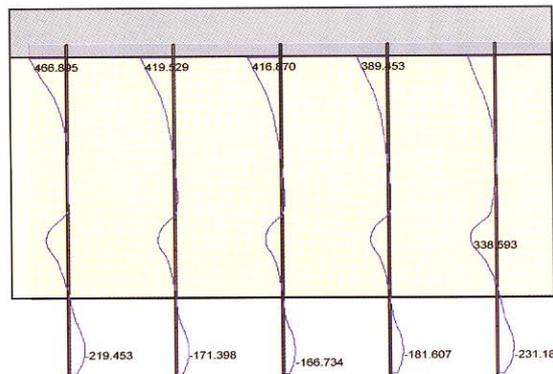
表-1 改良範囲の違いによる水平方向圧縮応力分布状況一覧表

	解析モデル図	水平方向圧縮応力図 ( $\sigma_x$ )	考 察
ケース①			・改良体前面下方に応力が集中（赤色部）しており、地盤の水平抵抗は改良体ではなく、素地盤が支配的である。
ケース②			・応力の集中は改良体前面下方から、杭頭部前面に移行している様子がわかる。このため地盤抵抗は杭頭部前面の改良体が支配的である。
ケース③			・応力の集中は完全に杭頭部前面に移行しており、改良体前面に発生する応力はほとんど無い。地盤の水平抵抗は改良体の値となる。

※改良範囲は杭前面のみを変化させた



改良強度  $q_{up} = 200\text{kN/m}^2$



改良強度  $q_{up} = 1600\text{kN/m}^2$

図-4 杭体のせん断力図 (kN)

#### 4. 複合地盤杭の設計例

##### 4.1 設計例 1 (深層混合処理工法 (DMM) による複合地盤杭の設)

本設計例は、周辺地盤の土層が軟弱なシルト・砂礫層等からなり、N 値が低く液状化が生じる可能性の高い地盤において、DMM によって水平抵抗および粘着力の増加と液状化対策を行うことによる地盤定数の低減防止を図り、杭基礎設計を行った例である。

計画橋梁の概要は以下のとおりである。

- ・ 橋梁形式；単純 PC 合成桁
- ・ 橋 長；34m
- ・ 橋台形式；箱式

また、地盤改良工法として採用した DMM の改良諸元は次のとおりである。

- ・ 採用工法；粉体噴射攪拌工法 (DJM)
- ・ 改良率； $\alpha = 78.5\%$  (地盤の水平抵抗の増

加を考慮するため、改良柱間に隙間が生じないように接円改良とした。)

- ・ 改良杭径； $\phi 1000$
- ・ 改良設計；杭の一軸圧縮強度  $q_{up} = 200 \text{ kN/m}^2$  強度
- ・ 改良後の複合；変形係数  $E = 100 q_{up} \cdot \alpha$   
地盤強度 粘着力  $C = q_{up} / 2 \cdot \alpha$

なお、地盤改良による複合地盤の変形係数および粘着力は、改良体の一軸圧縮強度<sup>4)</sup>から素地盤との面積比率平均で求められるのが一般的であるが、本例では、安全側を考慮し改良体のみの強度で地盤定数を決定した。

以上の諸元で地盤改良した場合の複合地盤杭の設計と、従来の考え方により EPS を用いて土圧軽減を行った杭基礎設計との比較では、およそ 2 割程度のコスト縮減を図ることが可能となった。

(表-2 参照)

表-2 従来の考え方による杭基礎設計と複合地盤杭による設計との比較 (設計例 1)

	側面図	平面図	備 考
従来の考え方による杭基礎設計			<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 杭種、杭径；CCP、<math>\phi 1200</math></li> <li>・ 杭 長；<math>L = 10.5 \text{ m}</math></li> <li>・ 杭 本 数；<math>6 \times 4 = 24</math> 本</li> <li>・ EPS 施工量；</li> <li>・ 液状化有り</li> </ul>
複合地盤杭による設計			<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 杭種、杭径；CCP、<math>\phi 1200</math></li> <li>・ 杭 長；<math>L = 10.5 \text{ m}</math></li> <li>・ 杭 本 数；<math>5 \times 4 = 20</math> 本</li> <li>・ 地盤改良；粉体噴射攪拌工法</li> <li>・ 改良範囲；前面 5.2m 背面、側面 3.5m</li> <li>・ 改良 深；<math>5.2 \text{ m} (1/\beta)</math></li> <li>・ 改良 率；78.5%</li> <li>・ 改良強度；<math>200 \text{ kN/m}^2</math></li> <li>・ 液状化無</li> </ul> <p>※EPS 不必要、杭 4 本減少</p>

#### 4.2 設計例 2 (真空圧密工法による複合地盤杭の設計)

本設計例は、シルト、粘土を主体とする軟弱地盤において、真空圧密工法<sup>5)</sup>によって水平抵抗および粘着力の増加を図り、杭基礎設計を行った例である。

計画橋梁の概要は以下のとおりである。

- ・ 橋梁形式：PC プレテン中空床版橋
- ・ 橋 長：19.68m
- ・ 橋台形式：逆T式

また、地盤改良工法として採用した真空圧密工法の改良諸元は次のとおりである。

- ・ 鉛直ドレン打設深度  
：5.5m ( $q_c \leq 10\text{kN/m}^2$  の軟弱層)
- ・ 鉛直ドレン打設ピッチ  
：0.7×0.7m

・ 負圧作用期間

：盛土施工時および盛土完了後 35 日

なお、改良後の地盤強度について、現時点では合理的な推定方法が確立されていないことから、本例の場合、架橋計画箇所近傍において試験盛土を行い、改良後の増加強度を把握した上で複合地盤杭の設計を行った。

上記試験盛土によって確認された地盤強度は、概ね、水平抵抗で初期の 1.3 倍、粘着力で初期の 1.5 倍であった。

以上の諸元で地盤改良した場合の複合地盤杭の設計と、従来の考え方により EPS を用いて土圧軽減を行った杭基礎設計との比較では、およそ 1 割程度のコスト削減を図ることが可能となった。

(表-3 参照)

表-3 従来の考え方による杭基礎設計と複合地盤杭による設計との比較 (設計例 2)

	側面図	平面図	備 考
従来の考え方による杭基礎設計			<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 杭種、杭径：CCP、φ 1200</li> <li>・ 杭 長：17.0m</li> <li>・ 杭 本 数：12 本</li> <li>・ EPS 施工量：400m<sup>3</sup></li> </ul>
複合地盤杭による設計			<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 杭種、杭径：CCP、φ 1200</li> <li>・ 杭 長：17.0m</li> <li>・ 杭 本 数：10 本</li> <li>・ 地盤改良：真空圧密工法</li> <li>・ 改良範囲：前面 5.9m 背面、側面 5.9m</li> <li>・ 鉛直ドレン打設長：5.5m</li> <li>・ 鉛直ドレン打設ピッチ：0.7×0.7</li> </ul> <p>※EPS 不必要、杭 2 本減少</p>

## 5. おわりに

軟弱地盤における橋台基礎の設計に関し、北海道開発土木研究所より提案された複合地盤杭の考え方による杭基礎設計の考え方および設計例を紹介した。この複合地盤杭による設計方法はコスト縮減に大きく寄与すると考えられるが、現時点ではこの考え方に基づく施工例が乏しく、全ての橋梁設計で採用されるまでには至っていない。当面は比較的小規模な単純桁の橋梁設計において実績を重ね、合理的な設計法の確立を図る必要があると考える。

本設計例が、今後の杭基礎設計の一助となれば幸いである。

## 参考文献

- 1) 独立行政法人北海道開発土木研究所：独立行政法人北海道開発土木研究所 月報 2001.12
- 2) 独立行政法人北海道開発土木研究所：独立行政法人北海道開発土木研究所 月報 2002.9
- 3) 社団法人道路協会：道路橋示方書・同解説 IV下部工編 2002.3
- 4) DJM Q&A (DJM 工法研究会)
- 5) N&H 強制圧密脱水工法技術資料 (真空圧密技術協会)