

地盤改良効果を考慮した橋梁の杭基礎設計

A Study of Design Piles take Grand Improvement Effect into Consideration

株式会社 開発工営社

独立行政法人 北海道開発土木研究所

旭川開発建設部 名寄道路建設事業所

○正員 青地 知也(Tomoya Aochi)

正員 富澤 幸一(Koichi Tomisawa)

菊地 康(Yasushi Kikuchi)

1. はじめに

従来、軟弱地盤上に位置する橋台は、橋台背面土圧や地震時における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く、このような場合は、一般的にEPSによる土圧軽減工法を併用して杭本数を減らす工法が用いられてきた。

今回、コスト縮減という観点から、下部工・杭基礎の規模縮小を図るべく、従来設計法に替わる方法として地盤改良による地盤強度の増加を見込んだ杭基礎設計（以下、複合地盤杭と仮称する）を実施した。

2. 複合地盤杭の設計法

図-1に示すように、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を目的として使用されており、地盤改良による水平抵抗増加や粘着力の増加については、その増加率および評価方法が不明瞭であることを理由に、設計に反映させていないのが一般的である。

これに対し、複合地盤杭とは、改良体と素地盤との複合地盤として扱うことによって水平抵抗や粘着力の増加を考慮し、設計に反映させた杭基礎のことである。

したがって、地盤改良効果を合理的に杭設計法に反映することにより杭本数および下部工の規模を縮小することができ、建設コストの縮減が可能である。

3. 複合地盤杭による対策工の検討

3.1 橋梁概要

当該橋梁は図-2に示すような橋長34.0mの単純PC合成桁橋であり、フォーメーションが高いことから橋台形式は箱式を採用している橋梁である。

周辺地盤は、図-3に示すように軟弱なシルト・砂礫層等からなり、深度8m程度までN値が5以下と低く、液状化を起こす土層でもある。

このような地盤では、杭の設計に用いる地盤反力係数・地盤反力度の上限値・最大周面摩擦力等の地盤定数は小さく、さらにこの値に液状化による低減係数を乗じて設計地盤定数とする²⁾ことから下部工・基礎工は大規模なものとなる。

このため地盤の水平抵抗・粘着力の増加を目的とし、当該地盤に最適な地盤改良工法を選定するとともに、地盤の液状化対策を行うことで地盤定数の低減を防止することとした。

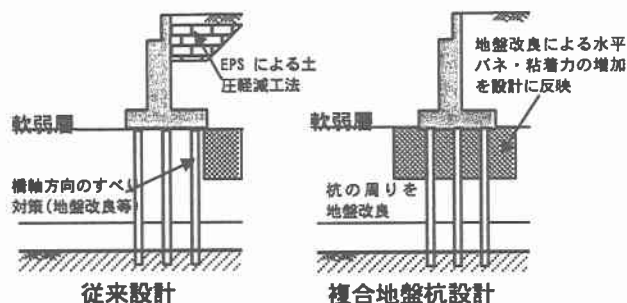


図-1 設計法概念図

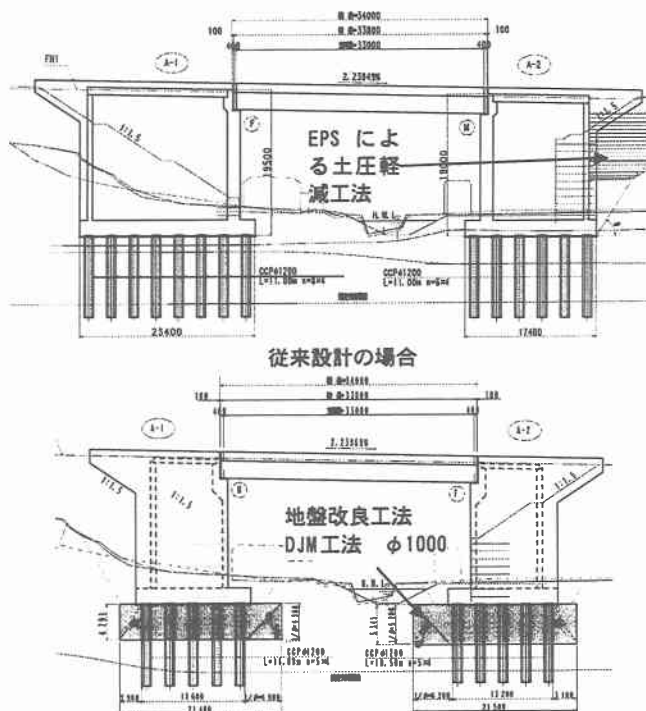


図-2 橋梁側面図

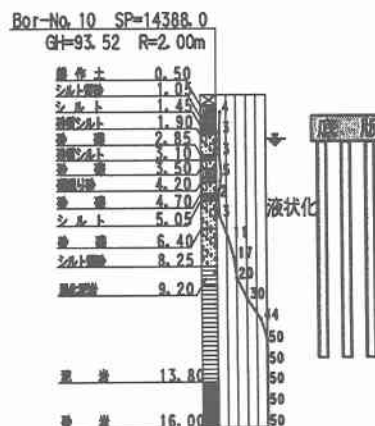
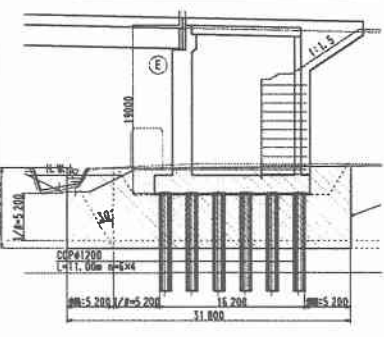
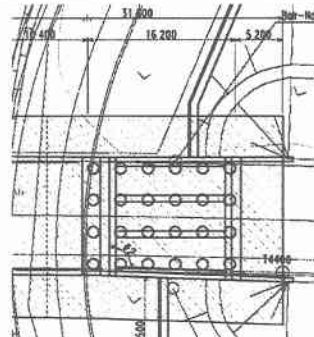
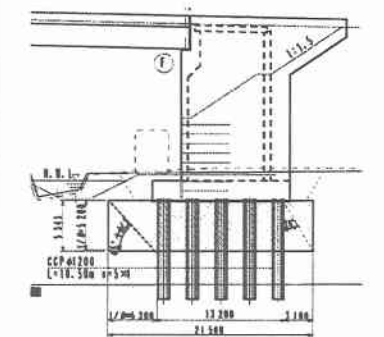
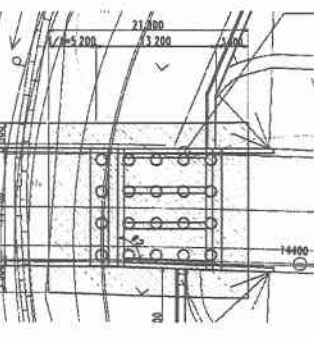


図-3 地質概要図

表-1 地盤改良工法比較検討結果一覧表 (A-2 橋台)

	側 面 図	平 面 図	備 考
サンドコンパクションパイル			・改良範囲：前面 10.4m 背面 5.2m 側面 5.2m ・改良深：5.2m ($1/\beta$) ・改良率：22.7% ・液状化無 ・増加を見込む地盤定数 地盤の水平抵抗 ・杭本数 $6 \times 4 = 24$ 本
固結工法 (DJM 工法)			・改良範囲：前面 5.2m 背面 3.5m 側面 3.5m ・改良深：5.2m ($1/\beta$) ・改良率：78.5% ・改良強度：200kN/m² ・液状化無 ・増加を見込む地盤定数 地盤の水平抵抗 杭の周面摩擦 ・杭本数 $5 \times 4 = 20$ 本
			工事比率 0.88
			工事比率 0.77

※SCP の場合、隣接する地盤の液状化に伴い改良地盤にも過剰間隙水圧が伝播し影響を及ぼす恐れがあるため、境界には余裕を設ける必要がある。このため、前面・側面・背面ともに $1/\beta$ (5.2m) の余裕を見込んだ。³⁾
 ※工事比率とは、従来設計である EPS による土圧軽減工法を用いた場合の工事費に対する比率である。

3.2 地盤改良工法の選定

表-1 当該地盤条件を満たす地盤改良工法としてサンドコンパクションパイル工法 (SCP) と固結工法の内最も一般的で経済性に優れる DJM 工法を選定し、この 2 工法を用いた複合地盤杭による杭基礎と従来設計である EPS による土圧軽減工法を用いた杭基礎との比較検討を行った。この結果、複合地盤杭による設計は地盤改良による各地盤定数の増加により杭本数が減り、下部工規模が小さくなることから EPS による土圧軽減工法よりも経済性に優れる結果となった。特に DJM 工法を用いた場合、SCP に比べ地盤改良費は高価になるものの、大きく杭本数を減らすことができ、総合的には SCP よりも経済的となることから、DJM による地盤改良工法を選定した。

3.3.改良率の決定

改良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 (改良率 78.5%) とした。また改良柱体の径および設計基準強度は DJM 工法の施工実績等を考慮し一般的に使用されている径 $\phi 1000$ mm (DJM 工法の標準値)、設計基準強度 $q_{dp} = 200 \text{ kN/m}^2$ とした。

3.4.改良範囲の決定

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、その水平抵抗の深さ方向の影響範囲は一般に杭結合方式、杭長、地盤構成の違いにより変化するが、地盤抵抗が線形範囲内では概ね平均的評価として杭頭から杭の特性長 $1/\beta$ 程度とされている。このことから、基本的な

考えとして杭の水平抵抗に支配的な杭頭から $1/\beta$ (5.2m) の範囲を深さ方向の改良範囲とすることとした。

ただし、当該箇所では改良範囲と良好な地層との間に軟弱な薄層が残るようになることから、安全側を考慮し良好な地層まで改良した。

また、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 $\theta = 45^\circ + \phi/2$ (ϕ : 土のせん断抵抗角度 ($^\circ$)) で表される受動土圧領域と考えられることから、深さ $1/\beta$ の位置から受動土圧の作用する範囲¹⁾を改良するものとした。($\phi = 0^\circ$ 、 $\theta = 45^\circ$ 前面改良域： $L = 5.2\text{m}$)

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、摩擦杭の荷重分の考え方から、基礎底面以下改良深度まで 30° で分散⁴⁾させた幅 (3.5m) を改良範囲とした。

3.5.設計に用いる地盤定数

DJM による地盤改良後の地盤定数は以下の値を用た。

なお、変形係数は改良体の一軸圧縮強度⁵⁾から素地盤との面積比率平均でもとめられるが、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。

- ・変形係数： $E = 100 q_{dp} \times \text{改良率} = 100 \times 200 \times 0.785 = 15700 \text{ kN/m}^2$
- ・粘着力： $c = 1/2 q_{dp} \times \text{改良率} = 200/2 \times 0.785 = 78.5 \text{ kN/m}^2$

4. 複合地盤杭における対策工規模の数値解析的検証

4.1. 着目点

(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）は一定範囲内のみであるため改良範囲が狭い場合、杭に作用する水平抵抗は改良体のバネ値（弾性係数）ではなく改良体周辺地盤の水平抵抗が支配的になると考えられるため、改良体の水平抵抗が支配的となる範囲を明確にする。

(2) 改良体の挙動

軟弱地盤上で一定範囲内の改良地盤中に杭基礎を設置した場合、改良体が地盤として杭の横抵抗となるのか、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を明確にする。

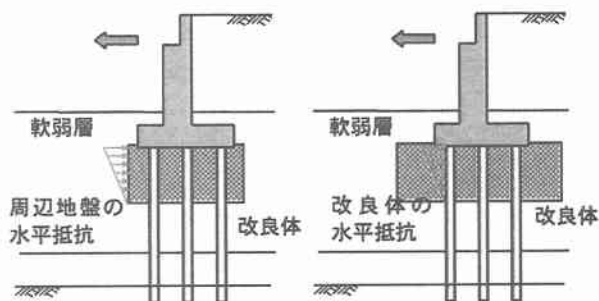
4.2. 解析手法

(1) 範囲決定のための手法（解析 1）

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 FEM 解析を行う。この結果を比較検討し、改良範囲による応力変化から最適な範囲を決定する。

(2) 杭体の挙動解析のための手法（解析 2）

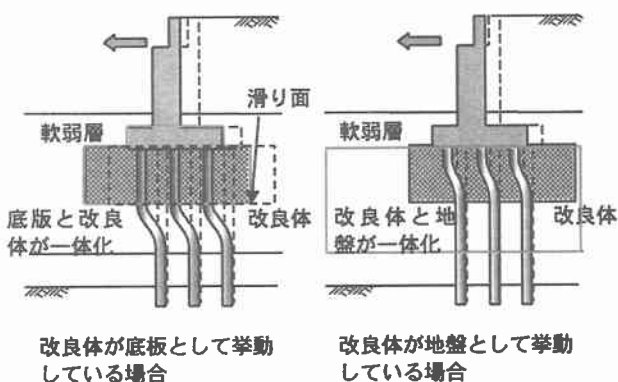
通常の FEM 解析では各要素が節点によって結ばれているため、必ず底版下面と改良体、改良体下面と軟弱層（素地盤）の変形は一体となり、目的とする改良体の挙動を解析するには不十分である。このため、底版下面と改良体および改良体下面と軟弱層との間に、滑り境界面（2 重節点と粘着バネ要素からなる境界）を設け、FEM 要素間のすべりを再現し、改良体の強度を変化させ改良体の挙動を明確にする。



改良範囲が不十分な場合

改良範囲が十分な場合

図-4 改良範囲と水平抵抗の関係



改良体が底版として挙動している場合

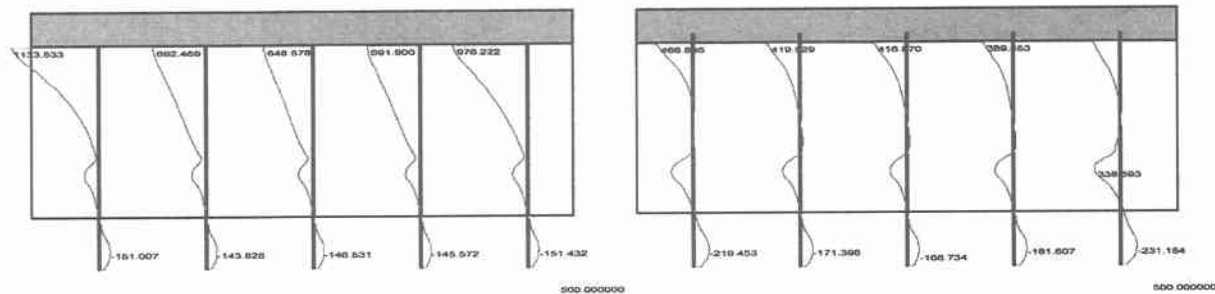
改良体が地盤として挙動している場合

図-5 改良強度と改良体

表-2 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 (σ_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-6 杭体のせん断力図 (kN)

4.3. 解析ケースおよび結果

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：5×4）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。

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。

(1) 解析1の検証結果

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していることから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。

(2) 解析2の検証結果

改良強度があまりに大きいと改良体が地盤として働かず、ケーソン基礎（非常に厚いフーチング）として挙動する可能性があるため、改良体の強度を変化させ杭体応力を比較した。このときの改良範囲は杭体前面から $1/\beta$ の範囲である。

図-6 は一般的に用いられている地盤改良強度⁶⁾ $q_{up} = 200\text{kN/m}^2$ 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であった。

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。

このことから一般的な改良強度においては複合地盤杭としての挙動を示し、地盤の水平抵抗が期待できることが明らかとなった。

5. まとめ

これらの解析・検討を行なった結果、明らかとなった事項を以下に述べる。

- ① 軟弱地盤上における橋梁のコスト縮減策として、北海道開発土木研究より提案された地盤改良による複合地盤杭の考えを導入した設計を行った。
- ② DJMの地盤改良による物性値から、杭基礎の設計に用いる設計定数を適切に導き出した。
- ③ FEM解析により複合地盤杭の挙動を明確にし改良範囲・改良強度が妥当であることを検証した。
- ④ この結果、従来設計と比べ橋台・杭基礎を小規模にでき、全体工事費において2割程度のコスト縮減が図られる。
- ⑤ 液状化の恐れがある地盤においては液状化防止と杭の横抵抗増加の両方を期待できることから、非常に有効であることが解った。

6. おわりに

今後、杭施工時に水平載荷試験等を実施し杭の水平抵抗の確認を行い、設計の妥当性を確認する予定である。

また、この他にもサンドコンパクションパイル工法や軟弱粘性土を対象とした真空圧密工法などの地盤改良による地盤の水平抵抗や粘着力を考慮した杭設計についても検討している。

今後、これらの設計法を進めていくことにより、コスト縮減に大きく寄与できるものと考えている。

参考文献

- 1) 富澤 幸一：複合地盤杭の新設計方法 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年12月
- 2) 道路橋示方書・同解説 V耐震編 社団法人道路協会 平成14年3月
- 3) 液状化対策の調査・設計から施工まで 土質工学会
- 4) 道路橋示方書・同解説 IV下部工編 社団法人道路協会 平成14年3月
- 5) DJM Q&A (DJM工法研究会)
- 6) DJM 技術マニュアル (DJM工法研究会)
- 7) 富澤 幸一：複合地盤杭の実用的設計法の検証：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年9月