

## 複合地盤杭の実用的設計法の検証

Verification of a practical design method for piles in composite ground

富澤 幸一\* 西川 純一\*\*

Kouichi TOMISAWA, Jun'ichi NISHIKAWA

軟弱地盤上に構造物を施工する場合、所要の地盤強度を確保するために載荷重工法、固結工法およびコンパクション工法等の地盤改良が実施される。このとき、地盤せん断強度は主として原地盤と改良体を改良率に従い合成したいわゆる複合地盤として評価される。同様の考え方により、基礎杭施工箇所の地盤において、地盤改良を行ってから杭を施工（以下これを複合地盤杭と称する）することが、杭設計諸元が水平抵抗で決まる現場条件では、建設コスト削減につながる合理的設計施工法と考えられる。

本報文では、一連の静的・動的解析および現場試験結果の検討を経て、複合地盤杭の水平抵抗を、改良強度に従い水平抵抗範囲として深さ  $1/\beta$  から受動土圧勾配  $\theta = 45^\circ + \phi/2$  の領域に設定した実用的現場設計法について述べた。

《キーワード：杭水平抵抗、地盤改良、水平地盤反力係数、有限要素法、動的解析》

During execution of construction works for structures on soft ground, soil improvement methods, such as surcharge, agglomeration and sand compaction methods, are implemented to ensure required foundation strength. In these methods, shear strength of the ground is designed as so-called composite ground, which is mainly composed of the original ground and improved columns according to the improvement ratio. From the same point of view, implementation of soil improvement in the ground where pile foundation is installed, is thought to be effective as a reasonable design method that can lead to the reduction of construction cost under the field condition where pile design specifications are determined by horizontal resistance.

This study discusses a practical field design method in which the range of horizontal resistance of piles in composite ground is set in a sphere of influence between the area of  $1/\beta$  in depth and passive earth pressure area  $\theta = 45^\circ + \phi/2$  according to improved foundation strength, based on the verification of a series of static and dynamic analyses and results of field validation tests.

《**Keywords** : horizontal resistance of pile, soil improvement, coefficient of horizontal subgrade reaction, finite element method, dynamic analysis》

## 1. はじめに

基礎構造物設計において、性能規定型の技術基準の導入に伴い耐震上の変形性能および構造耐力が求められてきている。その結果、特に外力に対し大きな変形が予測される軟弱地盤中の基礎構造物については、所要の性能を確保するため大規模基礎となる傾向にある。反面その一方で、社会資本整備に関して建設コスト削減のため合理的な構造物の設計施工法が強く求められている。

一般に、軟弱地盤に構造物を施工する際、上載荷重に対し地耐力が不足する場合は所要の地盤強度を確保するため、載荷重工法、固結工法およびコンパクション工法等による地盤改良が実施される。その際、盛土等の土構造物に対するすべり安定・沈下量の設計法では、地盤せん断強度を圧密増加後の地盤強度あるいは原地盤と改良体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。

しかしながら、改良地盤中に施工される杭基礎等の地中基礎構造物の設計では、水平抵抗の影響範囲を含め地盤改良後の常時・地震時の地盤反力特性が不明瞭であることや現場確認試験による検証がなされていないこと等の理由から、地盤改良前の原地盤強度のみを設計に反映しているのが一般的である。これらの考え方は、今後の建設コスト削減に向けた設計法としては必ずしも合理的ではなく、現場条件によっては構造物の地盤反力を過小評価する場合があると考えられる。

本研究では、軟弱地盤での構造物基礎杭をより合理的に設計することを目指し、現行の複合地盤設計の考え方に沿い、杭基礎についても改良地盤強度を杭水平地盤反力として反映する評価手法について検討した。これらの設計法に関する発想は従来から存在する<sup>1), 2), 3)</sup>ものの各機関の標準的な設計法には至っていない。そこで本報では、一連の静的・動的解析および現場実例における検証結果を精査し、今後の現場活用に向けた実用的現場設計法を提案する。

なお、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」と称する。

## 2. 複合地盤評価

現行の杭基礎設計法では、地盤反力をバネ評価することから、杭の水平抵抗は地盤変形係数  $E$  から算定される水平地盤反力係数  $K$  値により決定される。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  $C$  を変形係数の増加として捉える必要がある<sup>4)</sup>。

以下に代表的な地盤改良工法別の杭水平抵抗に関する複合地盤強度の評価法の考え方を整理した。

### 2-1 載荷盛土工法

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<sup>5)</sup>。

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

$C_0$  : 原地盤非排水強度 ( $\text{kN/m}^2$ )

$\Delta C$  : 圧密地盤せん断強度の増加量 ( $\text{kN/m}^2$ )

$m$  : 圧密に伴う強度増加率

$\Delta P$  : 地盤内増加応力 ( $\text{kN/m}^2$ )

$U$  : 圧密度 (%)

この考え方に基づき、圧密による地盤せん断強度の増加量  $\Delta C$  を改良地盤の変形係数増分  $\Delta E$  と同等と評価し、改良地盤全体の地盤変形係数  $E$  を求める。この際、圧密工法では、事前に室内圧密試験<sup>6)</sup>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  $E$  として設計値を照査する。

近年施工例の多い、強制圧密工法についても圧密後の地盤反力の評価手法は同様である。

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杭の静的な水平地盤反力係数  $K$  値は、地盤抵抗を線形として扱うことにより下式<sup>7)</sup>から決定する。

$$K = (\alpha E_0 / 30) \cdot (\sqrt{D/\beta} \cdot (1/30))^{-3/4}$$

$E_0$  : 複合地盤変形係数 ( $\text{N/m}^2$ )

$\alpha$  : 地盤反力推定係数

$D$  : 杭径 (m)

$\beta$  : 特性値 ( $\text{m}^{-1}$ )  $\beta = 4 \sqrt{KD/4EI}$

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。

なお、 $K$  値算定の際の杭特性値  $\beta$  は長さの逆数の次元をもち、その逆数である  $1/\beta$  については特性長と称する。

### 2-2 固結工法

深層混合処理工や生石灰パイル工の改良柱が施工された複合地盤の地盤変形係数  $E_0$  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<sup>5)</sup>。

$$E_o = E_p \cdot a_p + \alpha \cdot E(1 - a_p)$$

$E_p$ ：改良柱体変形係数(N/m<sup>2</sup>)

$E$ ：原地盤変形係数(N/m<sup>2</sup>)

$a_p$ ：地盤改良率(50%標準)

$\alpha$ ：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、原地盤が粘性土系地盤であれば  $E_p = 100q_u$  として算定する<sup>8)</sup>。

そして、上述の手法に従い、地盤変形係数  $E_o$  より複合地盤杭の水平地盤反力係数  $K$  値が算定される。

## 2-3 コンパクション工法

コンパクション改良地盤では、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<sup>5),9)</sup>ことが可能である。

$$K = K_s \cdot a_s + K_c \cdot (1 - a_s)$$

$K_s$ ：コンパクション杭  $K$  値(kN/m<sup>3</sup>)

$K_c$ ：コンパクション杭間原地盤  $K$  値(kN/m<sup>3</sup>)

$a_s$ ：コンパクション改良率

$K_s$ 、 $K_c$  については、標準貫入試験の  $N$  値または孔内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、サンドコンパクション工法であれば砂杭の  $N$  値は概ね10～15程度とされている。

以上、現行の地盤反力法に則った主要な地盤改良工法別の複合地盤杭の設計  $K$  値算定法の基本的な考え方を整理した。いずれの工法においても、地盤強度を増加地盤反力としての的確に反映することを目的としている。そのため、改良後の実地盤変形係数  $E_o$  については孔内水平載荷試験等を実施し設計値の妥当性を検証することが必要である。

## 3. 複合地盤杭設計

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、地盤バネとしての水平抵抗の影響範囲を設定する必要がある。

橋梁の杭基礎設計で上部工反力に相当する静的集中水平力が杭頭に作用した場合、杭周面に作用する土圧分布が変化し、たとえば図-1(a)のようになると考えられる。その深さ方向を含めた3次元的な分布形を正確に把握することは困難であるが、図-1(b)に示した杭の単位長さ当たりの合力  $p$  として代表させた場合、杭幅を  $B$  として杭の単位面積当たりに作用する平均地盤反力  $\bar{p}$  およびその支配方程式は曲げ剛性

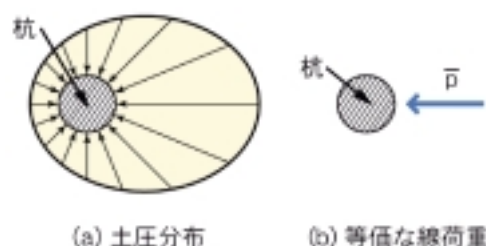


図-1 杭周囲の地盤反力

を  $EI$  として次式で表される<sup>10)</sup>。

$$p = \bar{p}/B \quad EI \cdot d^4y/dx^4 + B \cdot p = 0$$

杭の水平抵抗を理論的に求めようとするほとんどの手法において、これらの式が出発点となる。これらの方法は、地盤反力  $p$  の取扱いにより、極限地盤反力法、弾性地盤反力法、複合地盤反力法に大別されるが、許容応力度内の微小変形を対象とする現行杭基礎設計では、主に線形弾性地盤反力法が基本となる。

## 3-1 水平抵抗の影響範囲

水平力を受ける杭の挙動は、地表面付近の地盤の影響が大きくなる。

その水平抵抗は、地盤性状に応じた方程式により解析されることになるが、一般に深さ方向の影響範囲については、杭結合方式、杭長(有限長・無限長)、地盤構成(単層・多層)の違いにより変化するが、地盤抵抗が線形内では概ね平均的の評価として杭頭から特性長  $1/\beta$  程度までとされる<sup>7)</sup>。

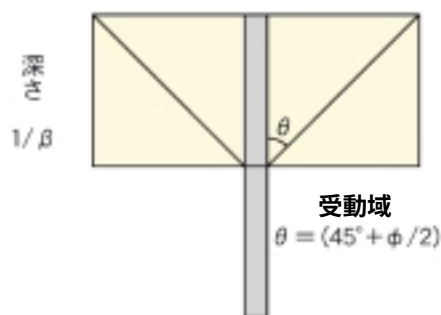


図-2 杭水平抵抗の影響範囲

また、杭前面の地盤抵抗については、最大地盤反力の発現を剛体基礎の極限地盤反力法設計と同様に、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、地盤が水平方向に圧縮され土圧が増大し極限平衡状態に至る、つまりその抵抗範囲は土の破壊角で表される受動土圧領域<sup>1)</sup>と考えることができる。

その結果、本報で扱う複合地盤杭の設計では、杭水平抵抗の影響範囲すなわち杭設計上必要な地盤改良域については、深さ $1/\beta$ の位置から受動土圧の作用勾配 $\theta = (45^\circ + \phi/2)$  ( $\phi$ : 土のせん断抵抗角 (度)) で立ち上げた範囲として設定することが妥当である。ただし、この際の影響域は、現行の橋梁変位法安定計算の軸方向と軸直角方向の照査と同様に、水平地盤反力を2次元の影響面積として設定する(図-2)。また、水平地盤反力係数K値およびせん断抵抗角 $\phi$ は改良後の地盤性状により変化することから、設計上の改良範囲設定は、安全側を考慮し原地盤強度より決定することとする(以下、この手法を設計理論と呼ぶ)。

### 3-2 現場試験における検証事例

現場試験における検証事例として、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現場水平載荷試験により確認した結果を報告する。

現場水平載荷試験を実施した試験杭は $\phi = 1200\text{mm}$ ,  $L = 12.5\text{m}$ の場所打ち杭で、改良率50%で施工された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 $1/\beta$ 深度までの孔内水平載荷試験結果および区間N値の重さ平均により、常時設計K値 $= 6.87\text{MN/m}^3$ としている。それに対し、改良柱

体側に杭を水平載荷した試験結果では、荷重～変位量の関係から得られた弾性床上の梁の理論<sup>7)</sup>に基づくChang式による逆算K値として、基準変位量において実測K値 $= 12.45\text{MN/m}^3$ が得られた。そのため、単純比較では、水平地盤反力は設計値に対し水平載荷試験による実測値は明らかに大きく約1.8倍( $12.45/6.87$ )の地盤反力を有したことになる。

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前項で設定した設計理論に従い、図-3の複合地盤検討図に示す杭地盤反力の影響範囲である深さ $1/\beta$ 位置から受動土圧の作用勾配 $\theta = (45^\circ + \phi/2)$ で立ち上げた面積を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 $= 15.01\text{MN/m}^3$ が確保可能という結果を得た。

実測値が若干小さくなった理由として、水平載荷試験で杭変位が徐々に増加していくに従い、試験杭と改良柱体の間の軟弱層が3次的に変形したためと想定される。ただし、全体的評価では、傾向として設計理論K値は実測K値と概ね同様といえる。

そのため、実地盤反力の発現に改良柱体が影響したとする説明が概ね可能であり、このことは同時に、杭基礎設計において改良された地盤を複合地盤として評価する必要性を示唆するものと考えられる。

### 3-3 静的FEM解析

複合地盤杭における水平抵抗領域および水平挙動に関する本設計理論の妥当性の検証を目的に、2次元平面ひずみによる静的FEM解析を試みた。

複合地盤杭FEM解析モデルは、1スパンの橋台基礎に複合地盤杭設計を検討している一般国道40号の軟弱地盤工区とした。

杭基礎の解析モデルは基盤に支持された橋台基礎の場所打ち杭(杭径 $\phi 1200\text{mm}$ , 杭長 $L = 11\text{m}$ )であり、解析上杭の奥行き幅4本を考慮した計算とした。また、地盤改良域は設計理論に従うものとし、改良体の配合強度は $q_u = 200\text{kN/m}^2$ 、改良率 $a_p = 78.5\%$ の接円の深層混合処理工を想定した。

地盤入力物性については、 $1/\beta$ 区間の上層は変形係数 $E_1 = 8000\text{kN/m}^2$ 程度の泥炭性軟弱地盤、それ以降の支持基盤までは $E_2 = 40000\text{kN/m}^2$ の砂質土系地盤とし、ポアソン比 $\nu$ 、粘着力 $C$ 、内部摩擦角 $\phi$ は、地盤種別に対応する一般的な物性値を入力した。

入力外力については、震度法レベルの地震時土圧・

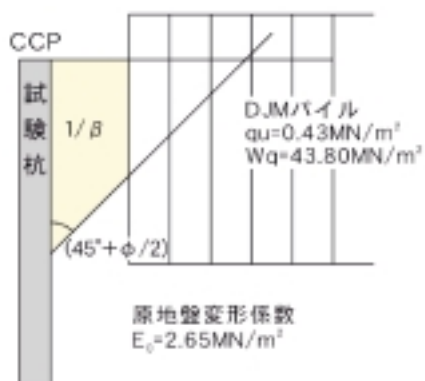
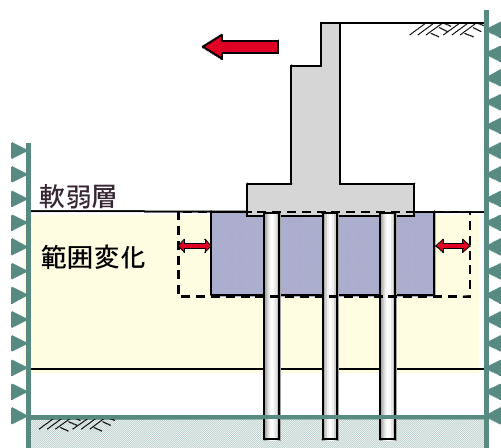
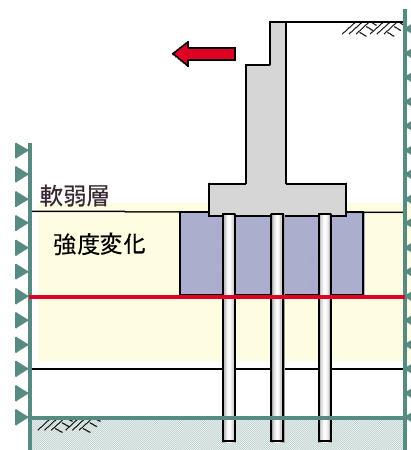


図-3 複合地盤検討図





図－４ 改良範囲の影響に関する FEM モデル図



図－５ 改良強度の影響に関する FEM 討モデル図

慣性力を考慮した静的地震時荷重である。

解析による検討項目は、複合地盤杭設計における①改良範囲の影響および②改良強度の影響とした。以下に、その検討の考え方および検証結果について示す。

### ①改良範囲の影響

複合地盤杭の地盤反力の影響範囲を検証するため、十分な大きさをもった解析領域に、杭周囲の改良体範囲を改良深さは $1/\beta$ に固定し、前面改良範囲を表－１に示した５ケースに変化させた静的 FEM 解析を実施した（図－４）。

表－１ 改良範囲変化 FEM 解析ケース

| ケース  | 前面改良範囲 | フーチング直下              |
|------|--------|----------------------|
| ケース１ |        |                      |
| ケース２ | 前面改良範囲 | $0.5 \times 1/\beta$ |
| ケース３ | 前面改良範囲 | $1/\beta$ （設計理論）     |
| ケース４ | 前面改良範囲 | $1.5 \times 1/\beta$ |
| ケース５ | 前面改良範囲 | $3.0 \times 1/\beta$ |

解析によって得られた、各ケースの改良範囲変化別の地盤内せん断応力 $\tau$ の結果を図－６に示した。

図によれば、地盤改良範囲を $1/\beta$ 以下としたケース１・２では、せん断応力 $\tau=60\sim 80\text{kN/m}^2$ 程度の大きな地盤内応力の発現が地盤改良域の外側に明らかであり、逆に地盤改良範囲を $1/\beta$ 以上としたケース３・４・５では、比較的大きな応力が改良域内に収束していることがわかる。この傾向は、他の圧縮応力等の解析でも $1/\beta$ を境界に同様である。

このことより、前項で示した現場試験検証とも合わせ、静的作用外力に対する複合地盤杭の挙動において、地盤反力の影響範囲つまり地盤改良施工範囲を深

さ $1/\beta$ 位置から受動土圧領域（ $\phi=0$ では前面改良範囲 $1/\beta$ ）とする設計理論の妥当性が概ね検証されたものと判断される。

### ②改良強度の影響

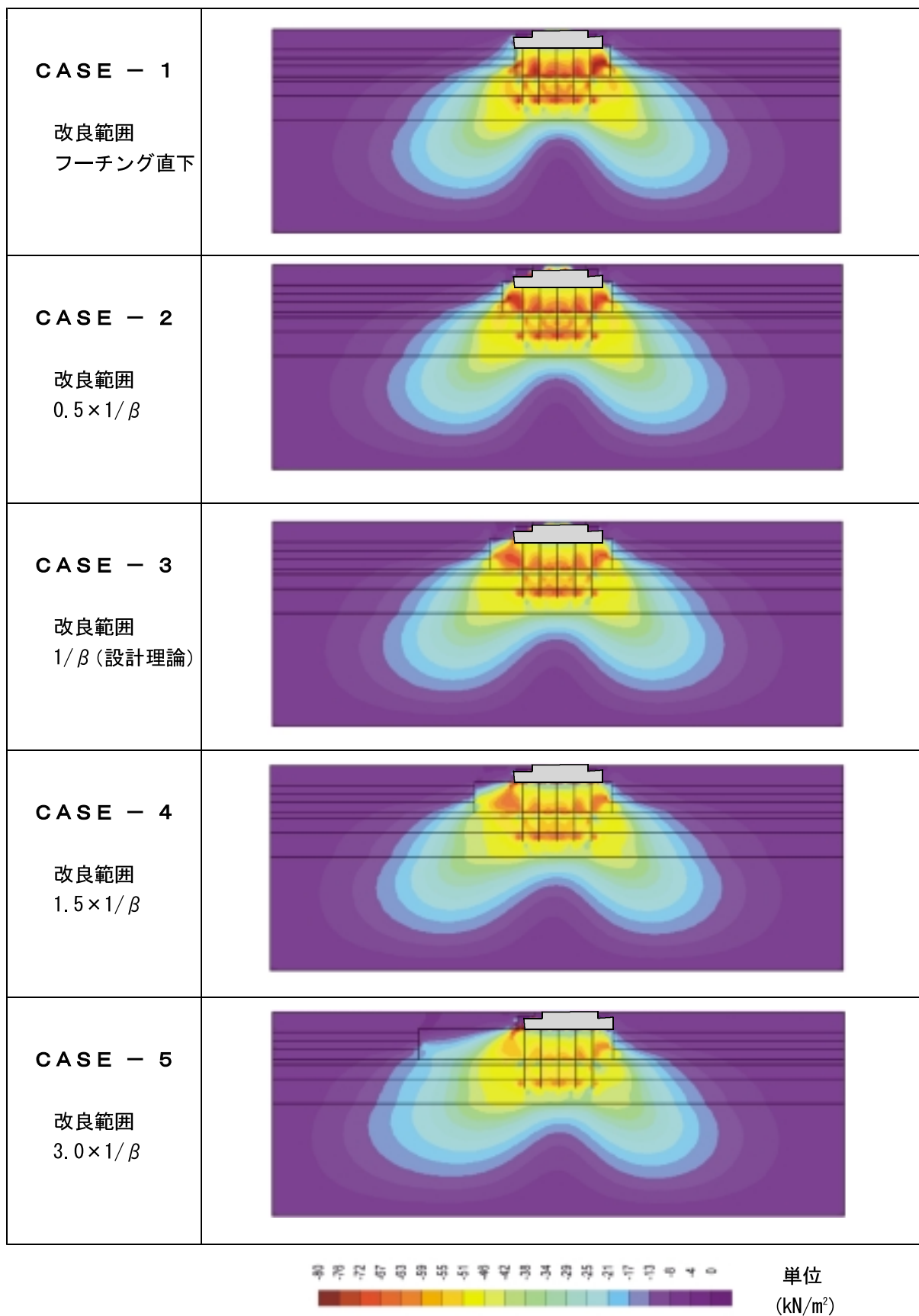
地盤改良強度の違いが杭体応力へ及ぼす影響、さらに複合地盤としての実挙動評価に関する静的 FEM 解析結果を示す。

地盤改良強度変化は、表－２に示すように標準配合強度 $q_u=200\text{kN/m}^2$ のケース１を基準に、その２・４・８倍と改良強度を変化させた４ケースとした。また、通常の FEM 解析では各要素が節点で結ばれているため改良体とその下の地盤が一体として変形してしまうことから、本手法では改良体の水平実挙動を見極めるため改良体下面に２重節点と粘性バネ要素からなる境界を設けた（図－５）。

なお、地盤改良域については、設計理論に従い、深さ方向および前面改良範囲とも $1/\beta$ に固定した。

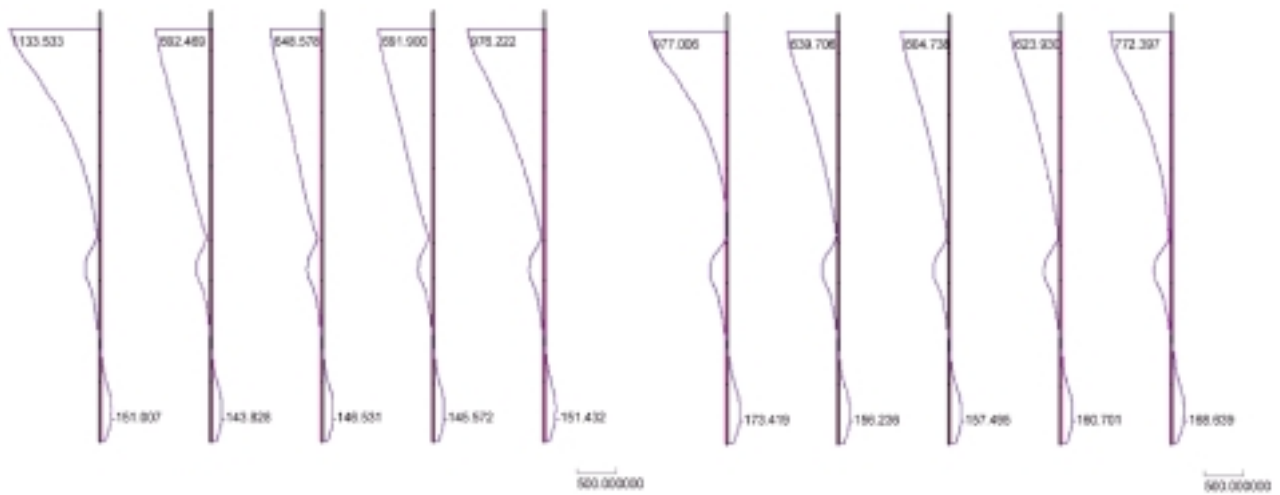
表－２ 強度変化 FEM 解析ケース

|      | 強度 $q_u$ (kN/m <sup>2</sup> ) | 強度比     |
|------|-------------------------------|---------|
| ケース１ | 200                           | 標準強度    |
| ケース２ | 400                           | 標準強度の２倍 |
| ケース３ | 800                           | 標準強度の４倍 |
| ケース４ | 1600                          | 標準強度の８倍 |



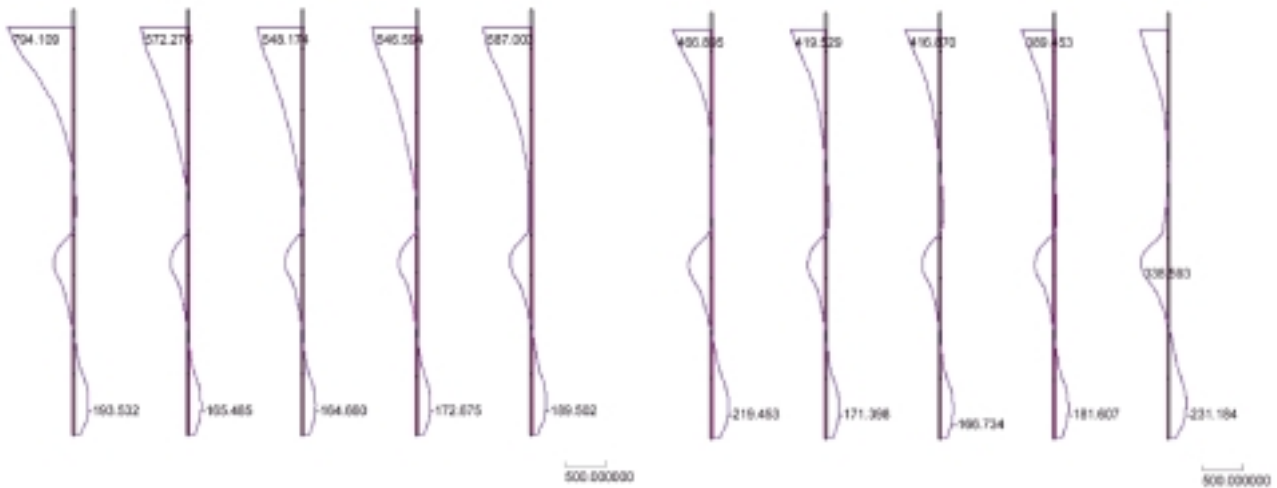
**図-6 2次元平面ひずみ FEM 解析図(改良範囲別のせん断応力  $\tau_{xy}$  の分布図)杭体に発生するせん断力**

### 杭体に発生するせん断力



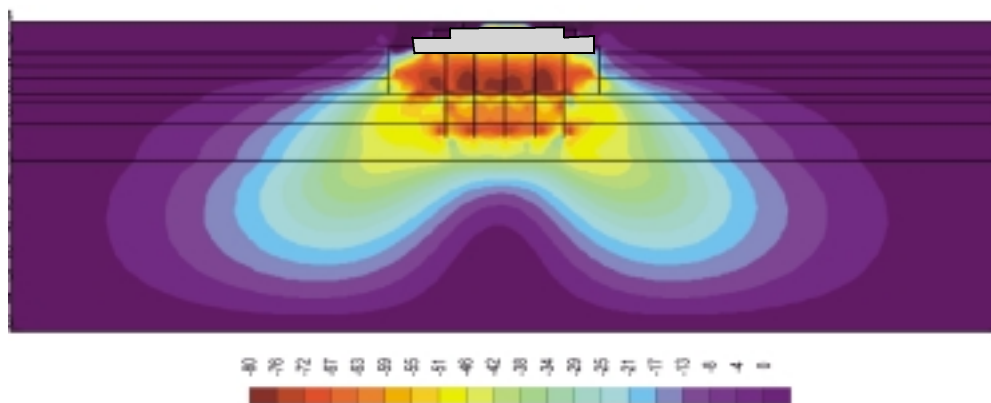
ケース 1 ( $q_u=200\text{kN/m}^2$ )

ケース 2 ( $q_u=400\text{kN/m}^2$ )



ケース 3 ( $q_u=800\text{kN/m}^2$ )

ケース 4 ( $q_u=1600\text{kN/m}^2$ )



改良強度 $400\text{kN/m}^2$ とした場合のせん断応力  $\tau_{xy}$  分布図 (ケース 2)

図-7 改良強度別の FEM せん断力図

解析結果を図-7に示した。図によれば、杭体に発現するせん断力  $S$  は、各杭体ともほぼ同等に作用荷重に対し杭頭および改良体下端で大きく発現していることが分かる。特に改良体下端のせん断力については、改良強度が大きくなるに従い増加の傾向を示す。

これは、改良強度を上げるにつれて改良体全体が地盤としてではなく、ともすればケーソン基礎等の剛集合体の挙動に徐々に近づいていくことを意味する。

ただし、本試算では、標準強度の8倍としたケース4でも改良体下端のせん断力  $S$  は杭頭程度であり、また図に示したケース2のせん断応力分布では、せん断応力  $\tau$   $60\text{kN/m}^2$  以上の高応力が剛体基礎のように外側に発散するのではなくあくまでも地盤改良体内に収束している。この結果を見る限り、一般的な配合強度で現場実施される地盤処理工法においては、静的作用荷重に対し改良部は複合地盤としての挙動評価が可能と考えられる。

## 4. 実用的橋梁設計

室蘭開発建設部管内日高自動車道において、他の現場に先駆け北海道開発局で初めて、平成14年度橋梁基礎施工に複合地盤杭設計法を現場採用した。

複合地盤杭を採用した橋梁基礎は、高規格道路内に建設された周辺地盤に地盤処理工法を必要とする軟弱地盤上の1スパンの箱式橋台である。

橋台基礎の場所打ち杭周辺の地盤改良工法は、設計理論に従い、設計許容杭変位および応力に対する水平抵抗を確保させるため、改良率は  $a_p=78.5\%$ 、改良体強度  $q_u=200\text{kN/m}^2$  の深層混合処理工（CDM）としている。また、地盤改良範囲については、軟弱地盤層に相当する深さ  $1/\beta$  位置から橋台周囲に受動土圧の作用勾配  $\theta=(45^\circ+\phi/2)$  とした。

### 4-1 建設コスト

本現場の複合地盤杭で設計された基礎形式を、従来設計による基礎形式と対比し図-8に示した。

図からも明らかなように、従来方式（場所打ち杭  $\phi=1000\text{mm}$ 、杭本数  $n=13\times 5$ ）の設計では、軟弱地盤に対する所要の杭水平抵抗を確保させるために基礎が非現実的な杭本数を要する大規模なものとなり、これに対し、複合地盤杭設計（場所打ち杭  $\phi=1200\text{mm}$ 、杭本数  $n=3\times 4$ ）では杭本数および橋台躯体を縮小化することが可能となる。

その結果、概算工事費ベースで地盤処理費を含めて

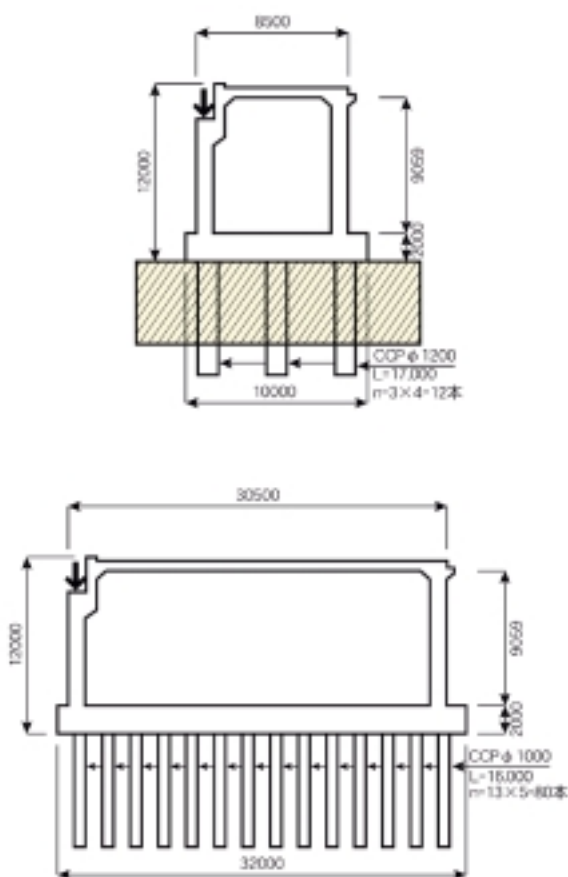


図-8 橋台基礎形式比較

も従来形式：複合地盤杭形式 = 1 : 0.45 の大幅なコスト削減効果が得られた。

軟弱地盤では杭基礎設計が水平抵抗で決定するケースが多いと考えられることから、現場条件によっては複合地盤杭設計の採用が非常に有利と考えられる。

### 4-2 現場水平載荷試験

本現場では複合地盤杭設計時で設定した水平地盤反力係数  $K$  値の現場確認を目的に、CDM 改良体の一軸圧縮試験および現場杭水平載荷試験を実施している。

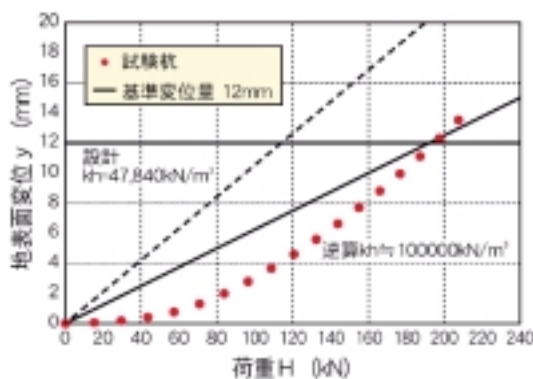
その結果、CDM 供試体の材令28日強度  $q_u$  は深さ方向の平均値で、当初設計値の約2倍である  $q_u'=408\text{kN/m}^2$  が得られた。そのため、現場において設計上確保可能と考えられる複合地盤杭の水平地盤反力係数  $K$  値は、複合地盤評価2-1の項で示した考え方に従い、以下の手法で算定される。

$$\text{改良体変形係数 } E=100q_u'$$

$$\text{複合地盤変形係数 } E_o=a_p \cdot E$$

$$K=0.33903(\alpha E_o)^{1.10345} \times D^{-0.310345} \times (EI)^{-0.10345} \quad \sim 12)$$





図－９ 水平荷重 H と杭地表面変位 y

K：杭水平地盤反力係数(kN/m³)

$\alpha$ ：地盤反力推定係数(常時  $\alpha=4$ )

D：杭径(m)

EI：杭曲げ剛性(kN/m²)

設計理論に従った試算の結果、現設計  $K=47839.8$  kN/m²に対し2倍以上となる  $K'=107000$  kN/m²の現場設定が可能と考えられた。

現場杭水平載荷試験の結果より得られた水平荷重 H と杭地表面変位 y の関係を図－９に示した。なお、水平載荷試験方式は、地盤工学会基準「杭の水平載荷試験方法・同解説<sup>13)</sup>」に準拠した、多サイクル方式の杭許容変位量12mm（杭径の1%）までの静的水平載荷とし、載荷重は油圧ジャッキ加力による荷重制御法としている。

図－９によれば、水平荷重 H に対する杭地表面変位 y はひずみ依存による非線形性より2次的な曲線関係を示している。現設計法と対比するための逆算 K 値は、以下に示した弾性地盤反力法である Chang 基本式から算定した。

$$y = ((1 + \beta h)^3 + 0.5)H / 3EI \beta^3$$

h：水平荷重の載荷高さ(m)

繰り返し計算の結果、図中に波線で示した設計 K 値に対し、実線表示した逆算 K 100000 kN/m³が得られた。この結果は、改良体強度から算定した K' に合致するものである。

このことから本現場の橋台基礎の安定性の確保が確認されたと同時に、複合地盤におけるせん断強度の増加を地盤反力の設定と同等とする本設計理論の妥当性および複合地盤杭設計の有用性についても検証されたものと考えられる。そのため、複合地盤杭を採用した現場では、本現場で実施したと同様に、現位置試験に

より複合地盤杭の設計地盤反力の直接的検証を行うことが望ましいと考える。

## 6. 動的挙動解析

複合地盤杭工法でもっとも懸念されるのは、複合地盤の地震時実挙動でありその動きが杭体に及ぼす影響である。そのため、本項では最後に、ここまでの複合地盤杭の設計理論に関する静的検証の妥当性を踏まえ、複合地盤杭における2次元動的FEM解析（2D－FLASH）による検証を実施した。

解析モデルは、3－3項の静的FEM解析と同様の物性モデルを設定した。ただし、改良範囲については深度方向に1/β位置とするが、複合地盤が良質な層に達している場合（図－10）と複合地盤下層に周辺地盤と同じ軟弱な層がある場合（図－11）の2ケースの動的解析を実施した。

入力地震は、震度法レベルの地震を想定し100gal程度の地震波を基盤底面より入射した。また、地盤の非線形性はせん断弾性係数と減衰定数をひずみレベルに合わせて変化させ考慮している。その際の入力物性値である各地盤の動的せん断弾性係数  $G_D$  (kN/m²) は、現行耐震設計法<sup>14)</sup>に従い下式により算定した。

$$G_D = \gamma t \cdot V_s^2 / g$$

$$V_s = 0.8 \times 80N^{1/3} \quad \text{砂質土地盤}$$

$$V_s = 0.8 \times 100N^{1/3} \quad \text{粘性土地盤}$$

$$V_s : \text{せん断弾性波速度(m/s)}$$

$$\gamma t : \text{地盤単位体積重量(kN/m}^3\text{)}$$

$$g : \text{重力加速度(=9.8)(m/s}^2\text{)}$$

動的解析の結果得られた、複合地盤が良質層に接しているケース1および複合地盤の下に軟弱層が存在するケース2のフォーミング中央下と両端下の改良体せん断ひずみをそれぞれ図－12・図－13に示した。

その結果、ケース1では、複合地盤下面では大きなせん断変形の集中が見られず、静的解析で複合地盤評価したと同様に杭水平抵抗は複合地盤で受け持たれていることが分かる。これに対し、ケース2では、軟弱層で比較的大きくせん断変形し、ケース1に対し約10倍(ひずみ値  $\epsilon$  : -0.19 / -0.02)のせん断ひずみが発生している。

ただし、杭本体は複合地盤に対し大きな剛性を持つことから、本解析の地震動レベルでは杭体応力に問題はない試算結果となった。

2次元解析のみで複合地盤の地震挙動特性の全て見極めることが難しいが、これらの動的解析結果より、

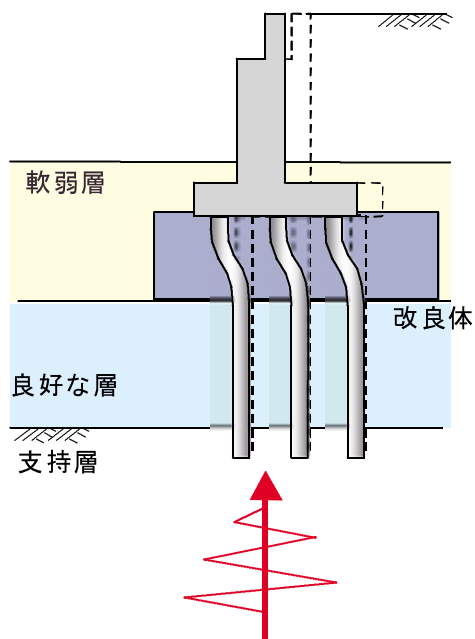


図-10 複合地盤下が良質層（ケース1）

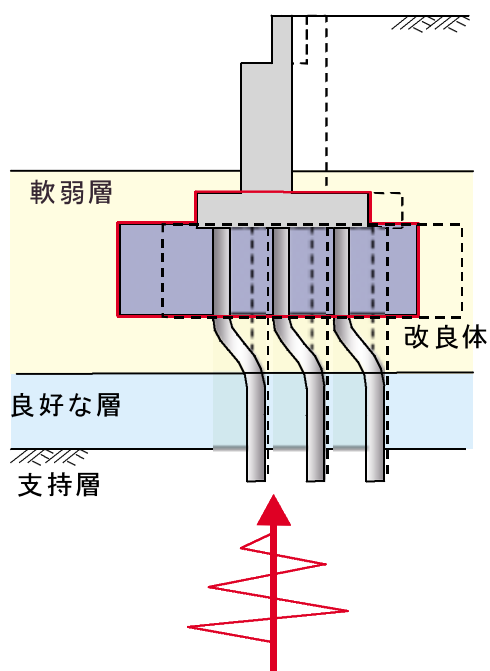


図-11複合地盤下が軟弱層（ケース2）

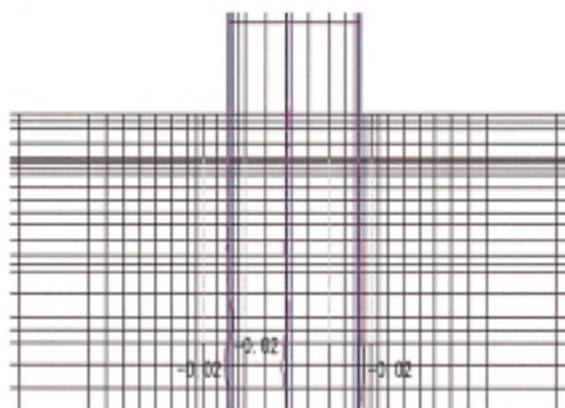


図-12 最大せん断ひずみ図-ケース1  
（複合地盤下が良質層）

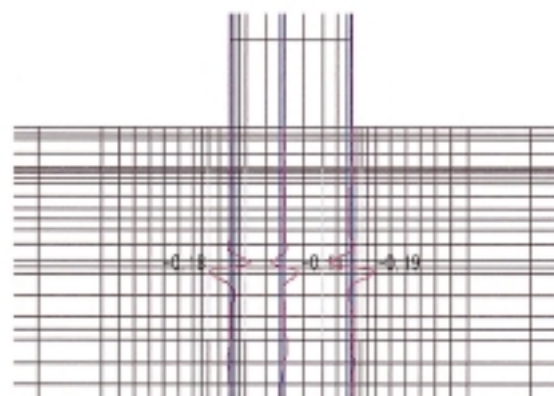


図-13 最大せん断ひずみ図-ケース2  
（複合地盤下が軟弱層）

複合地盤杭設計の地盤改良深さは $1/\beta$ を基本とするが軟弱層厚実施することが望ましく、比較的大きな強度をもつタイプⅠ・Ⅱのレベル2地震動に対する照査では、必要に応じて改良体と杭境界部で応力照査をする必要があると考えられる。

## 7. 結論

本報における一連の考察より、現場活用に向けた実用的複合地盤杭の設計法に関して、以下の結論が得られた。

- (1) 複合地盤強度は、地盤改良工法別の設計法に従い増加せん断強度を杭設計地盤反力として設定する

ことが可能である。

- (2) 複合地盤杭の水平抵抗は、現行の地盤工学理論に基づき、深さ $1/\beta$ 位置から受動土圧作用勾配の2次元領域 $\theta = (45 + \phi/2)$ とする設計理論により説明が可能である。
- (3) 現場試験検証および静的FEM解析より、複合地盤杭設計の地盤改良範囲の妥当性を含めた静的作用荷重に対する実挙動が明らかとなった。
- (4) 複合地盤杭の現場実用化により、軟弱地盤で杭基礎設計が水平抵抗で決定する現場条件では、建設コスト削減のための合理的設計が可能となる。
- (5) 複合地盤杭の設計法検証が、改良後の地盤強度試験および杭水平載荷試験の現場実施事例により確認された。
- (6) 動的挙動解析結果から、地盤改良深さは $1/\beta$ を基本とするが、複合地盤下層に軟弱地盤が挟在するケースでは地震動レベルに合わせた動的解析により、杭応力に対する詳細な検討を行うことが必要であると考えられる。

## 8. おわりに

本報での一連の検証により、実用的な複合地盤杭設計法に関する設計理論の整理は概ねできたものと考えており、建設コスト削減に向けた合理的設計法の意味からも、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、本手法は他機関を含め多くの施工実績を持たないことから、今後は地盤種類別の適用性や高次の動的モード変形が想定されるケースの橋梁基礎杭の地震時挙動等に関し、動的遠心力実験を実施し3次元解析を含めた検証をおこない明らかにしていく考えで

ある。

最後に現場試験実施に当たり御協力いただいた関係各位に深く感謝申し上げます。本成果が、今後の基礎杭設計法の一助となれば幸いである。

## 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，pp.1763－1765, 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，pp. 953－955, 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，pp.1815－1816, 1993.6
- 4) 富澤：複合地盤杭の新設計法，北海道開発土木研究所月報，No.583, pp.22－24, 2001.12
- 5) 独立行政法人北海道開発土木研究所，泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル，pp.65－117, 2002.3
- 6) 地盤工学会，土質試験の方法と解説第一回改訂版，pp.389－405, 2000.4
- 7) 日本道路協会，道路橋示方書・同解説IV下部構造編，pp.253－257, 2002.3.12
- 8) 土木研究センター，深層混合処理工法設計・施工マニュアル，pp.35－51, 1999.6
- 9) 村上・大場・竹村・日下部：SCP改良地盤中の杭の挙動，第37回地盤工学研究発表会論文集 pp.1085－1086, 2002.7
- 10) 地盤工学会，杭基礎の設計法とその解説，pp.14－21, 1989.1
- 11) 赤井浩一：土質力学，pp.124－149, 1997.3
- 12) 北海道開発技術センター，道路橋設計施工要領，pp.3－42, 2001.3
- 13) 地盤工学会，杭の水平載荷試験方法・同解説, 1993.10
- 14) 日本道路協会，道路橋示方書・同解説V耐震設計編，pp.48－107, 2002.3.7



冨澤 幸一\*

北海道開発土木研究所  
構造部  
土質基礎研究室  
研究員



西川 純一\*\*

北海道開発土木研究所  
構造部  
土質基礎研究室  
室長 理学博士