

複合地盤杭の合理的設計法の現場活用について

富澤 幸一

正会員 北海道開発土木研究所 構造部 土質基礎研究室（〒062-8602 札幌市豊平区平岸一条三丁目）

複合地盤杭は、杭施工箇所に深層混合処理工法による複合地盤を形成し、地盤改良によって増加したせん断強度を杭の水平抵抗として考慮し設計・施工する新技術工法である。軟弱地盤など杭の諸元が水平抵抗で決定する現場条件では合理的工法となる。本論文では、建設コスト縮減を目指して複合地盤杭設計法を現場で採用した施工事例を紹介し、土木建設の実務者の立場から本工法の今後の有効活用の手法について検討した。複合地盤杭設計法は工学的な考察から設定し提案したが、その妥当性は、現場の杭水平載荷試験により検証した。

キーワード：杭の水平抵抗，地盤改良，載荷試験，建設コスト

1. はじめに

改良地盤に施工される杭基礎などの地中基礎構造物は、水平抵抗の影響範囲を含め地盤改良後の静的および動的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た事例が少ないなどの理由から、地盤改良前の未改良の原地盤強度を用いて設計が行われていることが多い。

このような設計は、盛土のすべり安定性や沈下量対策で地盤改良を実施した場合に改良後の強度で検討するのとは大きく異なる。地盤性状が改善されているにも関わらず実際とは異なる性状で杭の設計を行うため不合理であり、地盤反力を過小評価することになる。

本研究は、実用設計施工法として、地盤改良により大きな強度が期待できる深層混合処理工法¹⁾を用いて杭周辺の一定範囲に複合地盤を形成し、そこに設置される杭基礎に、増加した地盤強度を採用する工法について検討した。以下、複合地盤中に施工する杭を複合地盤杭²⁾と呼ぶ。複合地盤杭工法は、現場条件により建設コスト縮減が可能となる合理的設計施工法である。

本論文では、今回提案する設計手法に従い複合地盤杭工法を現場で採用し、建設コストの有効活用をした施工事例を紹介する。その際、土木建設の実務者の立場から、複合地盤杭工法の有用性と今後の活用法について検討した。なお、提案する複合地盤杭工法の妥当性は、現場における杭水平載荷試験により検証した。

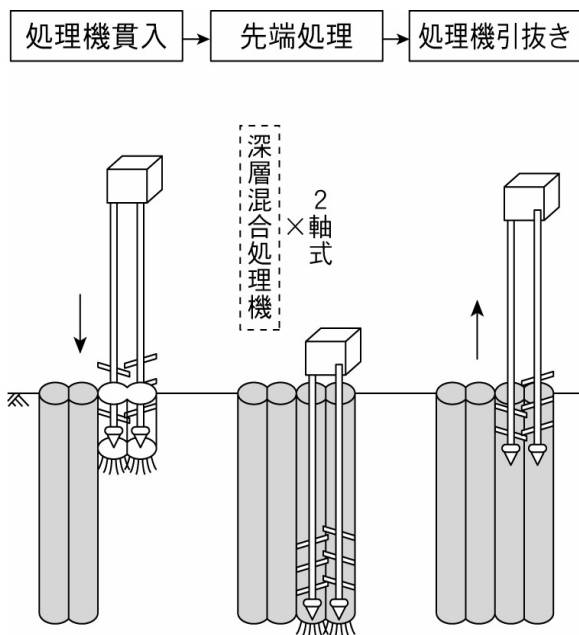
2. 深層混合処理工法と複合地盤杭の有用性

深層混合処理工法は、我が国で開発された代表的な軟弱地盤工法であり、1960年代から汎用工法として普及した。この工法は、セメントなどの改良材を地中に供給し、原地盤の軟弱土と改良材を強制的に混合し、これらを適度に固化させることをねらった工法である。

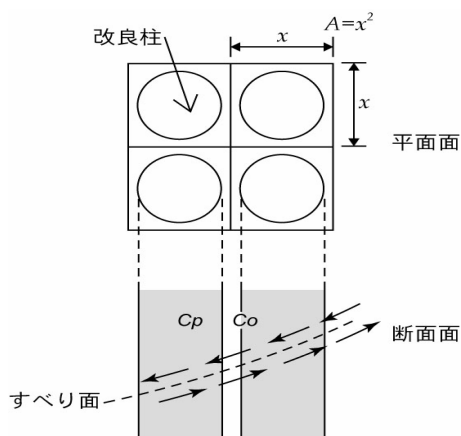
深層混合処理工法は、施工手法別に機械式攪拌式と高圧噴射式に分類される。機械攪拌式には、スラリー状のセメント系改良材と軟弱地盤を攪拌混合して改良体を地中に造成するスラリー系と、粉粒体の改良材を軟弱地盤と直接攪拌混合して改良体を造成する粉体系がある。一方、高圧噴射方式は高圧の空気、水およびグラウト材で原地盤を粉碎し、切削部分にセメント系改良材を充填あるいは改良材と切削土の一部を混合する方法である。

深層混合処理工法の一般的な施工手順¹⁾を図-1に示す。施工では、改良柱の設計強度や原地盤の性状に応じて、改良材の配合・攪拌混合（羽根切り）・改良率 ap などが設定される。

深層混合処理工法は盛土のすべり安定や沈下防止、液状化対策などに幅広く用いられており、改良地盤のせん断強度の設定手法などその設計法や工学的な原理は概ね確立されている。しかし、深層混合処理工法を橋梁基礎へ適用する設計法は確立に至っていない。改良体の品質管理や強度のばらつきなどを考えた場合には、改良体そのものを橋梁基礎杭に代用することは困難という理由による。そこで、杭と改



図－１ 深層混合処理工法の標準的施工手順

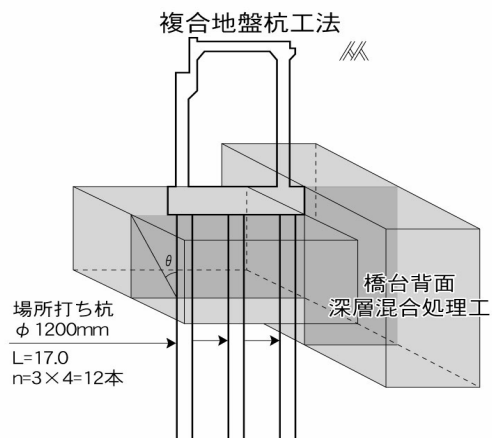
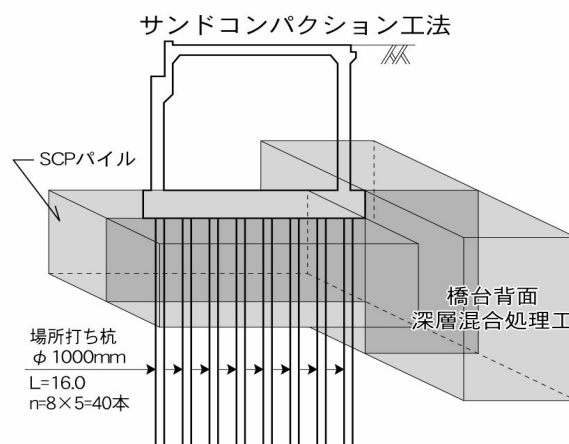
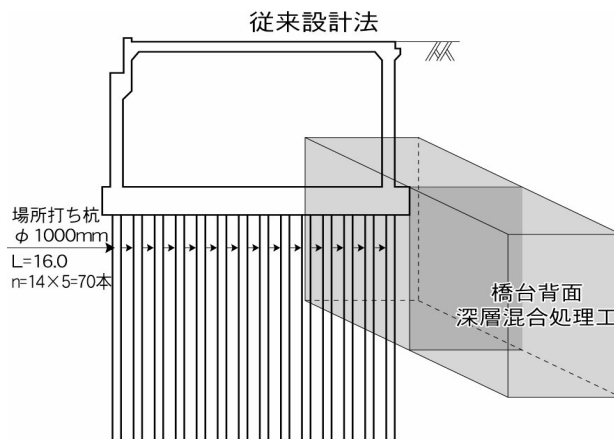


図－２ 複合地盤の説明図

良体を併用する複合地盤杭工法の合理的手法を検討した。この際、改良柱の施工により形成された複合体をあくまでも地盤として扱うことにおいて、せん断特性は最も重要な力学特性となる。また、複合地盤の改良率 ap は、図－２に示すように改良柱と原地盤の面積比つまり ap =改良体断面積 A_p /改良柱体一本当たりの分担面積 A の考え方にに基づき設定される。

複合地盤杭工法を現場採用し、建設コストの有効活用をした施工事例を示す。複合地盤杭工法を採用した橋梁は、北海道室蘭管内の高規格道路に建設された軟弱地盤上の1スパンの箱式橋台である。

現場で採用した複合地盤杭工法の基礎形式を、同



図－３ 従来工法・サンドコンパクション工法・複合地盤杭工法の基礎形式の比較

一設計条件の従来工法の形式と対比し図-3に示した。従来設計法では、軟弱地盤に対する杭の水平抵抗を確保させるため、橋台背面に盛土軽減などの特殊工法を施さない限り、非現実的な杭本数 $n=14 \times 5=70$ 本を必要とし大規模となる。これに対し、複合地盤杭工法では、杭周辺の一定範囲の地盤改良により杭の水平抵抗が確保されるため、杭本数を $n=3 \times 4=12$ 本（場所打ち杭 杭径1200mm, 杭長 $L=17.0\text{m}$ ）と少なくし橋台躯体を小さくすることが可能となる。図-3には、サンドコンパクション工法によって杭周辺を地盤改良する方法も検討し示したが、大幅に杭本数を減らす結果とはならなかった。その結果、当現場では、建設コストが従来設計形式：複合地盤杭工法形式=2.2:1となり、約45%の大幅な建設コスト削減効果が得られた。

軟弱地盤中の杭基礎設計では杭の諸元が水平抵抗で決定するケースが多い。現場条件によっては本工法により建設コスト削減が可能であり、複合地盤杭工法の採用が有用と考えられる。特に、耐震上高次な変形が小さいと想定される橋台基礎で、背面の深層混合処理工と連動して杭施工箇所に複合地盤を形成できる現場条件では有利となる。複合地盤杭工法では、改良柱の強度は標準値 $q_{up}=200 \sim 500 \text{ kN/m}^2$ とするが、改良率 ap は設計した杭の平均的な水平地盤反力度を確保するため $ap=78.5\%$ 以上の接円とすることが望ましい。また、杭周面摩擦力については、複合地盤と杭の付着力 τ や側圧係数 K_0 が現時点では不明瞭のため設計で反映していない。

社会資本整備に関わる建設コストの有効活用としてより合理的な基礎構造物の設計施工法の確立が求められている。今後、土木建設の実務者は、現場条件に配慮した実務に努める必要があると考える。

以下に、提案する複合地盤杭工法の基本的な設計法の考え方を整理した。

3. 複合地盤杭工法の設計法の考え方

(1) 杭の水平抵抗の影響範囲

複合地盤杭の水平抵抗を適切に評価するためには、杭の水平抵抗の影響範囲を実態に近い形で評価する必要がある。

杭の水平抵抗については、水平地盤反力度の最大値を地盤反力度設計と同様に、作用力に対し釣り合い状態にある抵抗として扱えば、地盤が水平方向に圧縮され水平土圧が増大して極限平衡状態を保つと考えられる。そのため、基礎に水平力が作用した場合の前面水平抵抗の範囲は、土の破壊角で表わされ

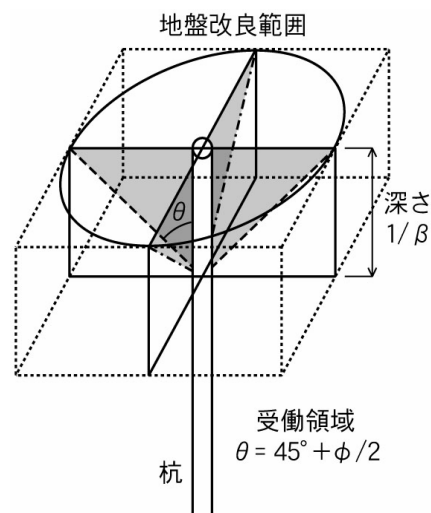


図-4 複合地盤杭の水平抵抗の3次元影響範囲

る受働土圧の領域³⁾を設定することができる。

同様な手法として、地盤種類別の杭の極限水平抵抗を地盤定数に従い三角形型の土くさびの釣り合いから求める方法も報告されている⁴⁾。このように、杭頭に水平作用力を受けた軟弱地盤中の半無限長杭の線形域の水平挙動は、特性長 $1/\beta$ (Characteristics length) から前面の受働土圧領域内の地盤性状に支配されることが知られている⁵⁾。

そのため、ここでは、複合地盤杭設計法の前面地盤の水平抵抗の影響範囲は、深さ $1/\beta$ から受働土圧⁵⁾の作用勾配 $\theta=(45^\circ + \phi/2)$ (ϕ : 土のせん断抵抗角) で立ち上げた領域とした。さらに、平面的な影響範囲は、前面の水平地盤反力度と同様に作用力の方向から $\theta=(45^\circ + \phi/2)$ の扇状の領域と仮定した。その際にせん断抵抗角 ϕ は、深層混合処理工法の配合強度や改良される地盤の物性により異なるため、改良範囲の設定は地盤改良前の原地盤のせん断抵抗より決定する。一般には、軟弱地盤ではせん断抵抗角 $\phi \approx 0$ として扱われることになる。それらを合成すれば、複合地盤杭の水平地盤反力度は杭を中心にして3次元のなくさび領域が設定させる。つまり、この領域に深層混合処理工法による複合地盤を形成することで、増加した複合地盤のせん断強度を見込んだ杭の設計が可能となる。ただし、実際の深層混合処理工法の施工では改良柱を逆円錐形に施工することは困難である。そのため、地盤改良の施工範囲については、すべり安定性や沈下対策の施工法と同様に改良柱を同じ長さに統一し、図-4に示す杭軸と杭軸直角の2方向で合成した3次元の四方位とする設計手法を提案した。

(2) 複合地盤杭の水平地盤反力度の算出法

複合地盤杭工法の設計では、地盤改良により増加した複合地盤のせん断強さ C の効果を設定する必要がある。その際、複合地盤の地盤変形係数 E_c の増加を設計で評価することが重要となる。

深層混合処理工の改良柱が施工された複合地盤のせん断強さ C は、一般に原地盤強度と改良柱強度を改良率に従い合成した(1)式で表される¹⁾(図-2)。

$$C = C_p \cdot ap + \alpha s \cdot Co (1 - ap) \quad (1)$$

$$C_p = q_{up}/2, Co = q_{uo}/2, ap = A_p/A$$

ここに、 C ：複合地盤の平均せん断強さ(kN/m²)、 C_p ：改良柱のせん断強さ(kN/m²)、 Co ：原地盤のせん断強さ(kN/m²)、 αs ：破壊ひずみ低減率、 ap ：地盤改良率、 q_{up} ：改良柱体の一軸圧縮強さ(kN/m²)、 q_{uo} ：原地盤の一軸圧縮強さ(kN/m²)、 A_p ：改良柱体の断面積(m²)、 A ：改良柱体一本当りの分布面積(m²)である。このうち αs は改良柱体 q_{up} の破壊ひずみに対する原地盤 q_{uo} の強度低減率であり、通常1/2～1/3程度とされる。

改良柱のせん断強さ C_p は、(1)式に示すように改良柱の一軸圧縮強さ q_{up} と $C_p = q_{up}/2$ の関係にある。また、一軸圧縮強さ q_{up} と変形係数 E_p は、例えばセメント系固化材で粘性土地盤を改良した場合は $E_p = 100q_{up}$ ¹⁾ の提案式など比例関係となることが知られている。その結果、複合地盤の変形係数 E_c は、せん断強さ C の強度比と同等と考えることができる。

そのため、複合地盤杭工法では、改良柱体のせん断強さ C_p ・一軸圧縮強さ q_{up} ・変形係数 E_p の関係に基づいて、複合地盤の変形係数 E_c を(2)式で示すように、改良率 ap に従った複合地盤のせん断強さ C と同様に扱うこととした。

$$E_c = E_p \cdot ap + \alpha s \cdot E_o (1 - ap) \quad (2)$$

ここに、 E_c ：複合地盤の変形係数(kN/m²)、 E_p ：改良柱体の変形係数(kN/m²)、 E_o ：原地盤の変形係数(kN/m²)である。その結果、複合地盤の変形係数 E_c は、改良率 ap で合成した改良柱体の変形係数 E_p と原地盤の変形係数 E_o の和として算定される。複合地盤の変形係数 E_c を(2)式で設定することにより、未改良の原地盤の変形係数 E_o を用いるよりも、より実態に近い杭の水平地盤反力度を用いて杭を設計することができる。

杭の水平抵抗は地盤の変形係数から算定される水平方向地盤反力係数 k 値により決定される。そのため、求められた複合地盤の変形係数 E_c より改良地

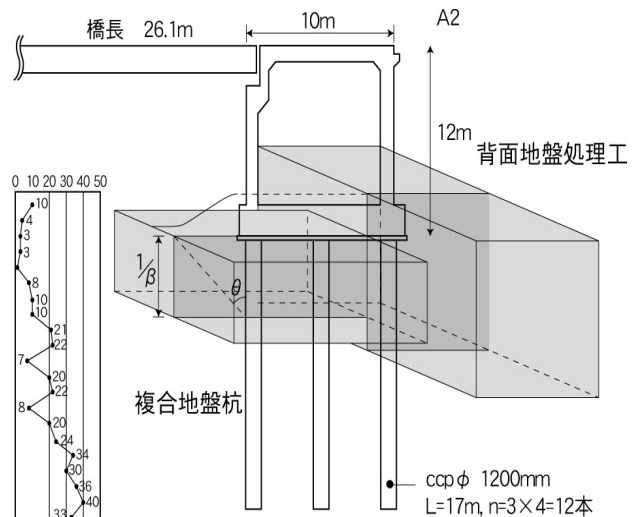


図-5 複合地盤杭工法を採用した現場橋台図

盤中に施工された杭の静的な水平方向地盤反力係数 k 値は、地盤抵抗を等価な線形として扱うことにより(3)式⁵⁾によって与えられる。

$$k = (\alpha \cdot E_c / 0.3) \cdot [\sqrt{(D/\beta)} \cdot (1/0.3)]^{-3/4} \quad (3)$$

ここに、 k ：複合地盤杭の水平方向地盤反力係数(kN/m³)、 E_c ：複合地盤変形係数(kN/m²)、 α ：地盤反力推定係数、 D ：杭径(m)、 β ：特性値 $^4\sqrt{(kD)/4EI}$ (m⁻¹)、 E ：杭のヤング係数(kN/m²)、 I ：杭の断面二次モーメント(m⁴)である。なお、水平方向地盤反力係数 k 値から算定される $1/\beta$ は、変位の大きさにより変化するため、現行設計法と同様に杭径1%の基準変位量に対する値とする。

4. 現場水平載荷試験による設計法の検証

複合地盤杭工法の水平地盤反力度の設定方法とその影響範囲の妥当性を、現場確認試験により検証した事例を示す。試験現場は、先に施工事例で紹介した北海道室蘭管内の箱式橋台基礎である。図-5に現場橋梁図(A2橋台)を示す。

橋台背面にはすべり安定・側方流動対策として CDM 工法¹⁾ (スラリー系機械攪拌工法)による深層混合処理工法が施されている。複合地盤杭工法の橋台場所打ち杭周辺の地盤改良も、改良柱体の設計一軸圧縮強さ $q_{up} = 200\text{kN/m}^2$ 、改良率 $ap = 78.5\%$ の橋台背面部の施工と同様の CDM 工法としている。

表－1 杭の水平方向地盤反力係数

	水平方向地盤 反力係数 (MN/m ³)	比 率
原地盤設計値 k_0	9.3	0.2
複合地盤設計値 k	47.8	1
複合地盤実測値 k_i	107.0	2.2



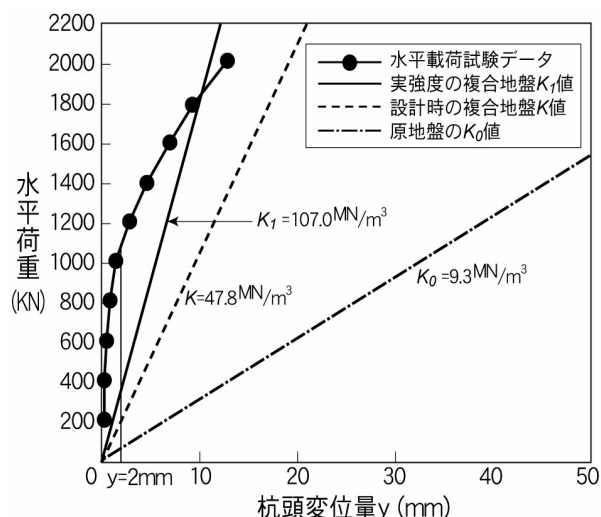
写真－1 深層混合処理工法の施工状況

CDM 工法の実施状況を写真－1 に示す。

地盤改良は、提案手法の図－4 に従い液状化対象層を含む軟弱地盤全層に相当する深さ $1/\beta=3.65\text{m}$ から、杭周囲に受働土圧の作用勾配 $\theta=(45^\circ+\phi/2)$ で決められる四方体の範囲とした。橋台の杭施工箇所の改良体下面は $N=10$ 程度の砂層地盤と接する。

複合地盤杭の水平地盤反力係数 k 値の直接的検証を目的に、A2 橋台で杭の水平載荷試験を実施した。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⁶⁾」に準拠した多サイクル方式による荷重制御法とした。載荷方法は、試験杭と反力杭の間に油圧ジャッキを設置し、杭頭変位量が杭径 1%程度まで一方向に静的に載荷した。試験杭には曲げ応力測定のため深さ方向に鉄筋計とひずみ計を設置した。

試験で確認した水平方向地盤反力係数の原地盤設計値 k_0 、複合地盤設計値 k 、複合地盤実測値 k_i を表－1 に示す。橋台の複合地盤設計値 k は、提案した



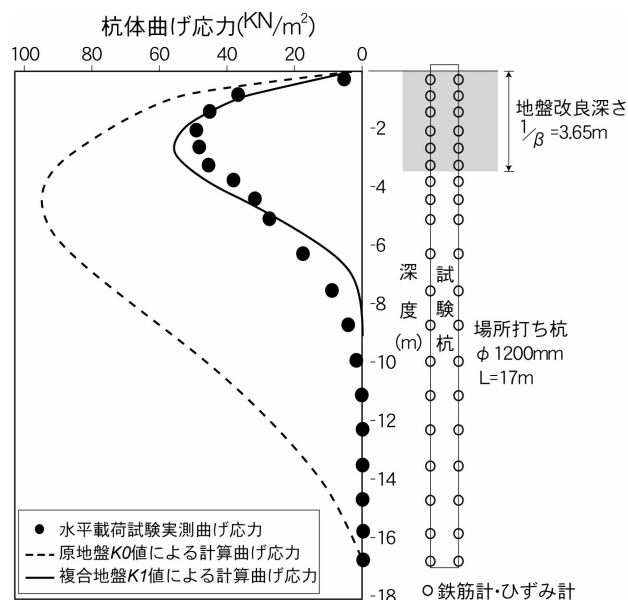
図－6 水平荷重 H と杭頭変位量 y の関係

(2)式と(3)式より、地盤改良前の $N=5$ 以下の原地盤設計値 $k_0=9.3\text{MN/m}^3$ に対し 5 倍の $k=47.8\text{MN/m}^3$ と設定した。

設計で設定した複合地盤強度の現場確認のため、CDM 改良柱固結後のコアボーリングによる一軸圧縮試験を実施した。その結果、橋台の CDM 供試体の材令 28 日の一軸圧縮強さは深さ $1/\beta$ の 4 点の平均値で $q_{up}'=408\text{kN/m}^2$ が得られた。この値は設計一軸圧縮強さ $q_{up}=200\text{kN/m}^2$ の 2 倍である。一般に、深層混合処理工では改良柱の一軸圧縮強さの実測値が設計値を上回ることが多いのは、当初設計値が室内配合試験値の 3 倍程度とするなど比較的安全側に設定されるためである。その結果、改良柱の一軸圧縮強さ q_{up}' から求められる複合地盤実測値 k_i は複合地盤設計値 $k=47.8\text{MN/m}^3$ 対し $k_i=107.0\text{MN/m}^3$ と設定される。この関係は改良柱の一軸圧縮強さの実測値と設計値の比と同等である。

現場杭水平載荷試験の結果得られた水平荷重 H と杭頭変位量 y の関係を図－6 に示す。実測された $H\sim y$ の関係には、ひずみ依存による非線形性が表れている。図－6 には、地盤改良前の原地盤設計値 k_0 値、複合地盤設計値 k および改良体の実際の一軸圧縮強さから求めた複合地盤実測値 k_i を用いて(4)式で示す線形弾性地盤反力法⁵⁾により算定した $H\sim y$ の関係を合わせて示す。

$$y = [e^{\beta x} (C1 \cos \beta x + C2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C3 \cos \beta x + C4 \sin \beta x)] / 2EI \beta^3 \quad (4)$$



図－7 水平載荷試験の杭曲げ応力分布

ここに、 $C1, C2, C3, C4$ ：積分定数、 x ：深さ位置(m)を表す。

水平載荷試験より得られた $H \sim y$ 関係は、杭頭変位量が約 2mm の範囲までは非常に大きな剛性を示し、この区間における実測値 $k_2=2700 \sim 7500 \text{ MN/m}^3$ となり、原地盤実測値 $k_0=9.3 \text{ MN/m}^3$ や複合地盤設計値 $k=47.8 \text{ MN/m}^3$ よりも大きな値が得られている。杭頭変位量 y がさらに増え続けると $H \sim y$ 関係には顕著な非線形性を示し、杭経 1%の基準変位量 12mm に相当する水平方向地盤反力係数 k_2 は複合地盤実測値 $k_f=107.0 \text{ MN/m}^3$ に合致する。

現場杭水平載荷試験で計算値 k_2 が実測値 k_f に合致した水平載荷重 $H_{max}=1800 \text{ kN}$ の実測杭曲げ応力を、原地盤設計値 k_0 と複合地盤実測値 k_f の地盤反力を用いて線形弾性地盤反力法で算定した計算曲げ応力と合わせて図－7 に示す。実測曲げ応力は弾力的な分布状態を示し、その最大値は許容値以下で $1/\beta$ の複合地盤内の深さ 2m 位置にある。複合地盤杭の実測値 k_f を用いた計算曲げ応力は、実測値に対して最大値に若干の差はあるが実務上容認できるものと考えられ、原地盤設計値 k_0 からの算定値とは異なり曲げ応力分布はほぼ合致した。

その結果、複合地盤杭工法の提案した設計法の妥当性が概ね検証されたものと考ええる。

5. まとめ

本論文では、建設コストの有効活用のための新技術として、杭と複合地盤を合理的に併用する複合地盤杭工法を提案した。検討の結果、以下の知見が得られた。

- (1) 深層混合処理工により形成した複合地盤に杭を施工し増加した改良強度を水平抵抗として反映する複合地盤杭工法は、現場条件によっては建設コスト縮減が可能な有用な手法と考えられる。
- (2) 実橋を対象とした現場の杭水平載荷試験結果より、杭の水平地盤反力度を複合地盤の増加せん断強度 C から設定し、水平抵抗の影響範囲を深さ $1/\beta$ から受働土圧の作用勾配 $\theta=(45^\circ+\phi/2)$ で立ち上げた領域とする提案設計法の妥当性が概ね実証的に検証された。

基礎構造物の設計法は性能規定基準の導入に伴い、今回の複合地盤杭工法と同様な新技術・新工法が広く提案されていくことが考えられる。

本論文では、建設コストの有効活用の一例として、土木の実務者の立場から複合地盤杭工法の設計法と採用事例を紹介した。今後、提案される多くの新手法に対しても、一定の実検証をおこない建設工事へ有効活用していくことが重要と考える。

参考文献

- 1) (財) 土木研究センター：陸上工事における深層混合処理工法 設計・施工マニュアル、1999。
- 2) 富澤幸一・西川純一：改良地盤中に施工した複合地盤杭の実用設計法、第5回地盤改良シンポジウム2002.11。
- 3) 赤井浩一：土質力学、pp.124-149、1997。
- 4) 例えば、Snitoko.N.K：静・動土圧－解析と計算一、pp.258-262、1967。
- 5) (社) 日本道路協会：道路橋示方書 IV下部構造編、2002。
- 6) (社) 地盤工学会：杭の水平載荷試験方法・同解説、1993。