

戦-68 北海道の特殊土地盤における基礎構造物の設計法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：寒地地盤チーム

研究担当者：富澤幸一、福島宏文、江川拓也

【要旨】

北海道に広く分布する泥炭および火山灰土は一般的土質分類の砂質土・粘性土と力学特性が異なるため、これらの特殊土の物性を適正に評価した基礎構造物の設計施工法を確立し、建設コストの有効活用を図る必要がある。そこで、泥炭性軟弱地盤に施工する杭基礎の周辺に地盤改良（固結工法・載荷重工法・サンドコンパクションパイル工法）による複合地盤を形成し、増加した改良強度を杭の設計法に合理的に反映する複合地盤杭基礎を研究開発した。複合地盤杭基礎の設計法の妥当性を確認する目的で実杭規模の水平載荷試験等を実施し、大規模地震動に対する耐震性能が大きく向上することが検証されたため、これらを踏まえた北海道における複合地盤杭基礎の設計施工法に関するガイドラインを策定した。また、北海道内の火山灰土に施工された杭基礎で実施した多数の鉛直載荷試験成果を整理し、破砕性の特殊土に対する杭の鉛直支持力設定法を要領化した。さらに、火山灰土に施工された杭基礎の水平抵抗特性について検証した。また、基礎の性能規定設計法に基づく北海道の特殊土地盤に対し、パイルドラフト設計法を適用した覆道・擁壁・カルバートなどの簡易構造物における基礎の合理的設計手法を検討した。

キーワード：特殊土、杭、地盤改良、載荷試験、耐震性能、パイルドラフト

1. はじめに

北海道には泥炭・火山灰の特殊土が広く分布する。泥炭性軟弱地盤に杭を設計した場合、許容水平変位量を確保するために多くの杭本数を必要とし基礎が大規模化する。そこで、軟弱地盤を克服する基礎の一工法として、杭周辺に地盤改良（固結工法・載荷重工法・サンドコンパクションパイル工法）複合地盤を形成し、増加した改良強度を杭の水平抵抗および周面抵抗力として合理的に反映する複合地盤杭基礎を研究開発した。複合地盤杭基礎の設計法を工学的根拠から設定し、その妥当性を実杭の載荷試験により確認した。また、同工法では地震時における杭および複合地盤の耐震性すなわち健全性が課題となるが、大規模地震動に対する耐震性能を遠心力模型実験ならびに実杭規模の水平載荷実験および動的非線形有限要素法で検証した。その結果、同工法を現場条件に応じて活用することで10～45%の大きな建設コスト縮減が可能であり、杭の耐震性も向上することが明らかとなった。本研究ではこれらを踏まえ設計要件などを整理し、北海道における複合地盤杭基礎の設計施工法に関するガイドラインを策定した。

また、北海道内の火山灰土に施工された杭基礎で実施

した多数の鉛直載荷試験成果を整理し、杭種および火山灰種別の検討から、特に破砕性を呈する火山灰土において杭周面摩擦抵抗力の低減設定の必要性など特殊土に対する杭の支持力設定法を要領化した。さらに、火山灰土に施工された杭基礎の水平抵抗特性について検証した。

また、特殊土に対し、パイルドラフト設計法を適用した覆道・擁壁・カルバートなどの簡易構造物における基礎挙動を有限要素法および遠心力模型実験で検討し、合理的設計法確立のための基礎資料を得た。

2. 泥炭性軟弱地盤に施工する複合地盤杭基礎

2.1 基本設計法

杭周辺の複合地盤の改良領域は、土の極限状態の釣り合いを考慮することで受働破壊の範囲が設定される¹⁾。つまり、必要な地盤改良領域を杭の水平抵抗の影響範囲とすれば、杭特性長 $1/\beta$ の深さから受働すべり面の勾配 $\theta = (45^\circ + \phi/2)$ (ϕ :土のせん断抵抗角)で立ち上げた逆円錐形を含む3次元の四角形を杭周辺に設定する。これは、モール・クーロンの破壊基準や極限地盤反力法²⁾を工学的根拠とする。

また、弾性地盤反力法⁴⁾では複合地盤中の杭の水平地

盤反力係数 k は、複合地盤の変形係数 E から(1)式より算定される。

$$k = \frac{1}{0.3} \alpha E \cdot \left(\frac{\sqrt{D/\beta}}{0.3} \right)^{-3/4} \quad \dots (1)$$

ここに、 k ：杭の水平地盤反力係数(kN/m^3)、 E ：複合地盤の変形係数(kN/m^2)、 α ：水平地盤反力推定に用いる係数、 D ：杭径(m)、 β ：杭特性値(m^4) $\beta = \sqrt[4]{(kD)/4E_y I}$ 、 $E_y I$ ：杭の曲げ剛性($\text{kN} \cdot \text{m}^2$)である。

以下に、代表的な地盤改良工法別の地盤改良により増加した地盤の変形係数地盤 E の算定法を示す。

2. 1. 1 固結工法

固結工法で改良柱を施工し複合地盤を形成した場合、複合地盤のせん断強度 C は原地盤強度と改良柱の強度を改良率に従い合成した(2)式⁵⁾で算定される。

$$C = C_p \cdot a_p + \alpha_s \cdot C_o (1 - a_p) \quad \dots (2)$$

$$C_p = q_{up}/2, \quad C_o = q_{wo}/2, \quad a_p = A_p/A$$

ここに、 C ：複合地盤のせん断強度(kN/m^2)、 C_p ：改良柱のせん断強度(kN/m^2)、 C_o ：原地盤のせん断強度(kN/m^2)、 α_s ：破壊ひずみ低減率、 a_p ：地盤改良率、 q_{up} ：改良柱体一軸圧縮強度(kN/m^2)、 q_{wo} ：原地盤一軸圧縮強度(kN/m^2)、 A_p ：改良柱体断面積(m^2)、 A ：改良柱体一本当りの分布面積(m^2)、 α_s ： q_{up} の破壊ひずみに対する q_{wo} の強度低減率(1/2~1/3)である。

改良柱のせん断強度 C_p は、(2)式に示すように改良柱の一軸圧縮強度 q_{up} と $C_p = q_{up}/2$ の関係にある。また、改良柱の一軸圧縮強度 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には $E_p = 100q_{up}$ の関係式など、改良する原地盤の性状別に比例的な関係を示すことが知られている⁶⁾。つまり、複合地盤の変形係数 E はせん断強度 C の比と同等と考えることができる。そのため設計法では、改良柱体のせん断強度 C_p と一軸圧縮強度 q_{up} 、一軸圧縮強さ q_{up} と変形係数 E_p の関係に基づき、複合地盤の変形係数 E を下式で示すように改良率 a_p に従った複合地盤のせん断強度 C と同様に扱う。その結果、複合地盤の変形係数 E は、改良率 a_p 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(3)式で算定される。

$$E = E_p \cdot a_p + \alpha_s \cdot E_o (1 - a_p) \quad \dots (3)$$

ここに、 E ：複合地盤の変形係数(kN/m^2)、 E_p ：改良柱体の変形係数(kN/m^2)、 E_o ：原地盤の変形係数(kN/m^2)、 a_p ：複合地盤の改良率である。

2. 1. 2 載荷重工法

プレロード工法や近年施工例が多い真空圧密工法などの載荷重工法では、圧密後の地盤せん断強度 C は(4)式⁵⁾により算定される。

$$C = C_o + \Delta C = C_o + m \cdot \Delta P \cdot U \quad \dots (4)$$

ここに、 C ：圧密地盤のせん断強度(kN/m^2)、 C_o ：原地盤非排水強度(kN/m^2)、 ΔC ：圧密による増加地盤せん断強度(kN/m^2)、 m ：強度増加率、 ΔP ：地盤内増加応力(kN/m^2)、 U ：圧密度 (%) である。この考え方にに基づき、圧密による ΔC を地盤改良により増加した変形係数 ΔE と同等比と評価すれば、改良地盤全体の地盤変形係数 E の算定が可能となる。つまり、(4)式を E の算定式に変換する。

ただし、設計値は強度増加率の設定などにより大きく変化するため、同工区内で試験施工などを実施し、孔内水平載荷試験で設計値を照査することが望ましい。

2. 1. 3 サンドコンパクションパイル工法

サンドコンパクションパイル工法による地盤改良では、複合地盤中の杭の水平方向地盤反力係数 k を砂杭間の地盤の増加変形係数のみから設定する方法など様々な手法があるが、(5)式⁶⁾を用いた場合、砂杭の改良率 a_s に従い直接的に算定することができる。

$$k = k_s \cdot a_s + k_c \cdot (1 - a_s) \quad \dots (5)$$

ここに、 k ：複合地盤の杭の水平方向地盤反力係数(kN/m^3)、 k_s ：砂杭の k 値(kN/m^3)、 k_c ：砂杭間の原地盤 k 値(kN/m^3)である。 $k_s \cdot k_c$ は、標準貫入試験の N 値または孔内水平載荷試験による地盤変形係数 E から算定する。サンドコンパクションパイル工法による砂杭の N 値は概ね 10~15 程度とされている。サンドコンパクションパイル工法では砂杭のみでなく、砂杭を造成することで未改良の原地盤についてもせん断強度の増加が期待される。

上記手法により、地盤改良工法別の増加した地盤変形係数 E を杭の水平地盤反力として反映することで、改良地盤中の杭の水平抵抗の設計が可能となる。

この成果を踏まえ、複合地盤杭基礎を実現場に採用させ設計法を指導した。

2. 2 耐震性の評価

2. 2. 1 実験による検証

複合地盤杭基礎の耐震性を遠心力模型実験ならびに実杭規模の水平載荷実験で検証した。遠心力模型実験は、1/50 の縮小模型を 50G の遠心加速度場における複合地盤杭の動的加振実験とした。模型杭は外径 10mm・厚さ 0.2mm・杭長 400mm のスチール製パイプとした。原地盤は、泥炭地盤を想定して乾燥重量比 1:1 のPEATモスとカオリン粘土の混合材料で、初期含水比 300%の飽和地盤を作成した。加振実験では、レベル 2 相当の高レベル大規模地震動⁷⁾を想定し実物換算最大振幅約 800gal の正弦波を入力波形とした。

レベル 2 相当の高レベル地震動による加振後の杭周辺の複合地盤の状況を写真-1 に示した。写真および解体後

の検証により、大規模加振に対し杭の特殊変形や改良柱体の損傷はなく健全であることが確認された。

また、レベル2相当の水平変位量を正負方向へ繰り返し与えた実杭規模の水平載荷実験結果からも、杭ならびに複合地盤に大きな損傷はなく健全であることが確認された。このことから、高レベル地震動に対し杭および改良柱体は概ね問題なく、地震後も同工法では所要の地盤反力が発揮されるものとする。



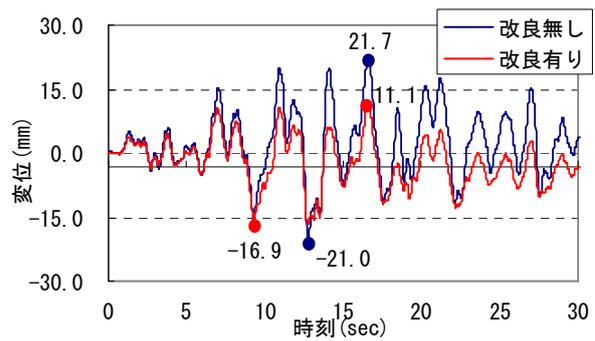
写真-1 地震動加振後の改良柱体

2. 2. 2 数値解析による検証

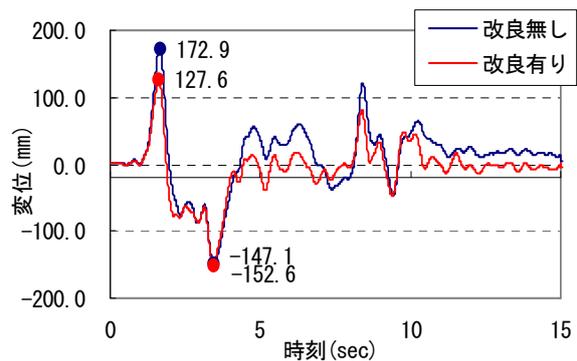
複合地盤が静的設計法と同様に、地震時に杭に対し反力体の効果を発揮するかを見極めるため、実現場をモデルに、レベル1地震動とレベル2地震動を用いた2次元動的的非線形有限要素法解析を実施した。検討モデルは現行耐震設計法⁸⁾を実施した現場とした。解析モデルでは杭と地盤の両者に非線形性を考慮した構成則を用いた。全応力解析とし、地盤要素の偏差応力-偏差ひずみ関係に対し履歴減衰則を適用した。入力地震動として時刻歴加速度波形のうち、レベル1およびレベル2の2種類の地震動を用いた。

解析の結果得られた、複合地盤による地盤改良無し・有りのレベル1・レベル2の地震動における、フーチングの水平変位の時刻歴解析値に注目した(図-1)。その結果、レベル1地震動で地盤改良無しの前面側最大変位21.7mmが改良後は5割の11.1mmまで減少した。また、レベル2地震動で地盤改良無しの橋台前面側最大変位172.9mmに対し、改良後は7割程度の127.6mmに減少している。

以上の2次元動的的非線形有限要素法解析の結果、複合地盤を杭周辺に施すことで、静的設計法と同様に、複合地盤無しの場合に対し地震時の杭変位、杭ひずみが抑制され耐震性能が大きく向上することが検証された⁹⁾。



水平変位の時刻歴応答 (レベル1地震動)



水平変位の時刻歴応答 (レベル2地震動)

図-1 フーチング水平変位の時刻歴応答

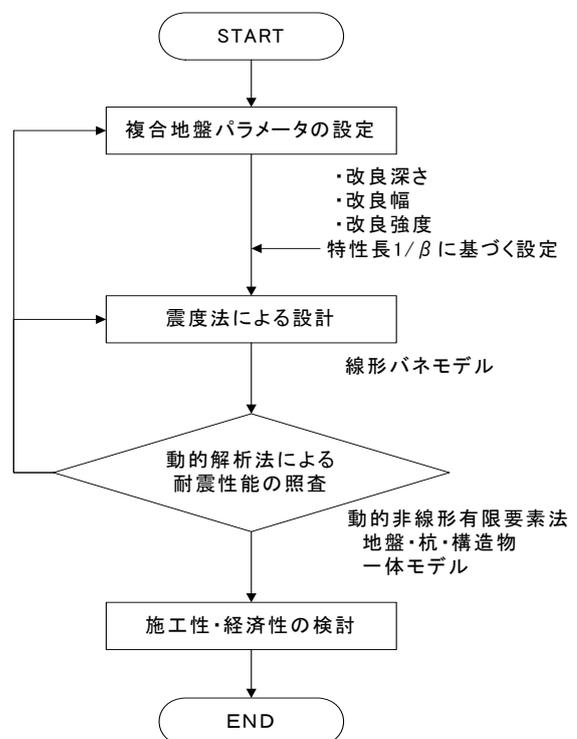


図-2 複合地盤における杭の耐震照査フロー

2.3 耐震照査フロー

一連の考察より、複合地盤杭基礎の耐震性能の検証法として図-2に示す耐震照査フローを提案した。すなわち、複合地盤のパラメータは $1/\beta$ を基準とするものの、杭の耐震性能については、震度法、地震時水平保有耐力照査法⁸⁾の静的解析のみでなく、必要に応じて動的解析法を主体とし詳細に照査することとする。本フローに従った設計を行うことで、同工法における杭の耐震照査法が成立する。

2.4 設計施工ガイドライン

上述の一連の研究成果を反映し、土木研究所 寒地土木研究所より技術検討委員会の協議および関係機関への意見照会を経て、平成22年4月に設計施工法に関するガイドラインを策定した(写真-2)。



写真-2 北海道における複合地盤杭基礎の設計施工法に関するガイドライン

この「北海道における複合地盤杭基礎の設計施工法に関するガイドライン」¹⁰⁾の概要は以下である。複合地盤内の杭は、現行の杭基礎設計法^{4),5),6),8)}を踏襲し、常時では線形バネモデル、地震時ではレベル1地震動に対し震度法およびレベル2地震動に対し地震時保有水平耐力法で照査することになる。ただし、改良範囲が提案設計法から逸脱する場合や複合地盤が良質な地盤に接するように施工されていない場合には、動的非線形有限要素法解析により、杭の耐震性を検証することとした。

一方、複合地盤の健全性を確保するため、通常の滑動・転倒以外に、常時の地盤反力の応答値が複合地盤の受働土圧を確保させることや地震時に従来の杭許容変位量よりも精度を上げた抑制値を設定することとした。また、

施工時のカルテ作成についても義務づけることとした。

その結果、複合地盤杭基礎のガイドラインにおいて、設計法成立のための照査指標は概ね以下とした。

- 1) 複合地盤杭基礎の基本設計法において、固化改良体の改良諸元を工学的根拠に基づき、改良深さは杭特性長 $1/\beta$ を基本とし、一軸圧縮強さ q_u については $q_u=200\sim 500\text{kN/m}^2$ を適用範囲の基準値とする。
- 2) 複合地盤杭基礎において、固化改良体の損傷の限界状態は杭径2.5%程度の杭変形内と想定されるが、固化改良体の健全性を確保させるための内的安定として、水平地盤反力度照査を実施する。
- 3) 複合地盤杭基礎において、固化改良体の反力効果を持続させ外的安定を確保させるために、常時・暴風時およびレベル1地震時の杭の許容水平変位量を自然地盤の杭径1% (あるいは15mm) に対して、杭径0.5%に低減設定する。

3. 火山灰地盤に施工する杭基礎設計法

3.1 鉛直支持力設定法

現行設計法においては、火山灰地盤中の杭基礎の支持力は、火山灰土が砂に近い密度やせん断抵抗を有することから、一般に砂質土地盤に準拠して設計されている。しかし、火山灰土はその物性によっては破碎性の性質を示すなど、その種類により砂質土と細部の力学特性が異なることが明らかとなってきた^{11),12),13)}。つまり、拘束圧により粒子破碎した火山灰土ではせん断強度の低下が懸念される。その結果、実現場においても、杭施工に伴い支持力が低下し、打止め判定が困難となる事例などが報告されている^{14),15)}。

一方、構造物基礎の性能規定化に伴い、地盤性状を正規に反映した設計法が強く求められてきている。そこで、火山灰地盤における杭基礎の鉛直支持機構の検証を目的に、北海道内の火山灰地盤に施工された道路橋基礎杭において鉛直載荷試験(押し込み試験および衝撃載荷試験)を実施し、杭種別・火山灰土の種類別の検討を行った。場所打ち杭(Cast-in Place Concrete Pile 以下、CCP) 6現場、打込み鋼管杭(Steel Pipe Pile 以下、SPP) 8現場の計14現場である。本報では、一連の知見より、実務者のための火山灰地盤における杭の評価法を策定した。

鉛直載荷試験の結果、杭の極限支持力は、杭種に関係なく、設計値と同等もしくはそれを上回る発現を示した。また、杭先端支持力についても設計値を確保し、その結果、設計は砂質土相当での設定は問題ないと考えられた。

ただし、杭周面極限摩擦力の発現は各現場で一様ではなく、同一現場においても設計値を上回る区間や下回る

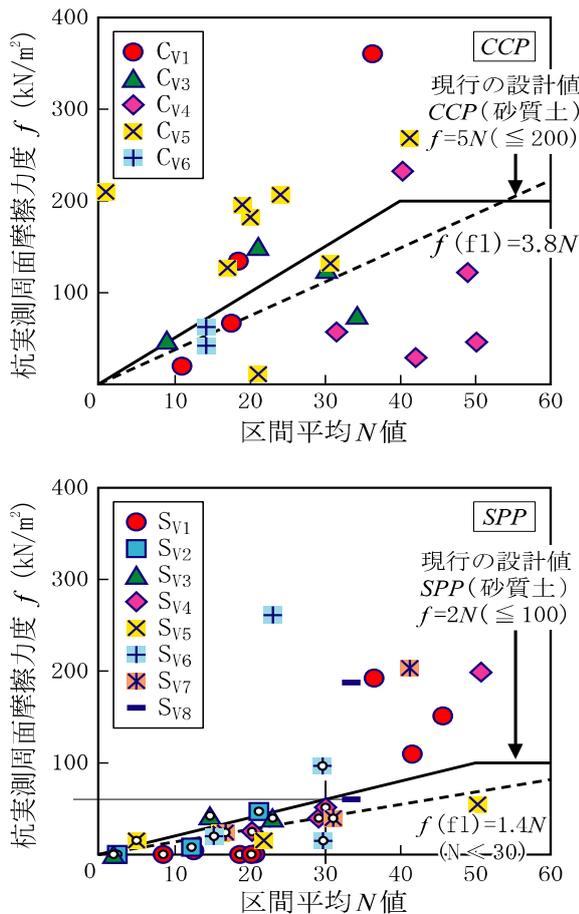


図-3 火砕流堆積物 (fi) における区間平均 N 値と杭実測周面極限摩擦力度 f (○印 N 値 30 未満)

区間がありバラツキを示した。特に、図-3 に示したように、火砕流堆積物 (fi) では、杭周面摩擦力度 f は設計値を下回るものも多い。特に CCP では N 値が大きい場合に実測値が低下する傾向を示し、SPP では N 値 30 未満で低下傾向が顕著に表れている。現行設計法¹⁶⁾と同じように平均値で評価すれば、バラツキはあるものの、CCP および N 値 30 未満の SPP において図中の破線で示す関係式が得られる。それらは、設計値に対してそれぞれ CCP で約 25%、 N 値 30 未満の SPP で約 30% の減少である。火砕流堆積物 (fi) の CCP および N 値 30 未満の SPP で杭周面摩擦力度 f が低下する要因は、杭施工に伴い杭周辺の火山灰土が乱され、側圧が低下するためと推論される。また、火砕流堆積物 (fi) は生成の段階で溶結の影響を受けている^{17),18)}ものがあるため、破砕が生じている可能性もある。

そのため、今後、北海道の火山灰地盤における杭の支持力設計法は、以下とすることが妥当と考えられる。

1) 所要の現場地盤調査および土質試験 (物理試験・力学試験) から、火山灰土の物性の詳細を確認する。その

際、地質図幅や既往資料を参考に火山灰土であることの判定を行い、同時に降下火砕堆積物 (fa) および火砕流堆積物 (fi) の区分を明確化する。現場調査法として、標準貫入試験 (N 値) のみでなく、杭周面摩擦力の相関性を考慮した電気式コーン貫入試験 (q_t 値) の活用も有効である。

2) 北海道の火山灰地盤における杭基礎の鉛直支持力は、従来どおり先端支持力と周面摩擦力の合力とするが、杭先端極限支持力度 q_d については砂質土に準拠し、道路橋示方書設定法より場所打ち杭は $q_d=3000\text{kN/m}^2$ とし、打込み鋼管杭は支持層への換算根入れ深さに応じた設定とする。

3) 北海道の火山灰地盤の杭基礎の周面摩擦力度 f は、降下火砕堆積物では砂質土相当とする。ただし、火砕流堆積物では砂質土に対し場所打ち杭で 25%、 N 値 30 未満の打込み鋼管杭で 30% の低減設定とする。火砕流堆積物で杭摩擦が低下する要因は、杭施工に伴い杭周辺の火山灰土で粒子破砕を生じ側圧が小さくなるためと考えられることから、施工時には地盤の乱れに留意する必要がある。

(なお、現行の道路橋示方書では砂質土における杭最大周面摩擦力度 f は、場所打ち杭で $f=5N$ ・打込み鋼管杭で $f=2N$ (N : N 値) である¹⁶⁾。)

4) 火山灰地盤の杭基礎の安全性や鉛直支持機構が不明な場合は、必要に応じて鉛直載荷試験を実施し支持力を検証することが望ましい。また、近傍の載荷試験データの活用も有用である。

3. 2 水平抵抗特性

火砕流堆積物で杭実測周面摩擦力度 f の低下傾向が認められたことから、次に、火山灰地盤に施工された杭基礎の水平抵抗特性について検証した。ここでは、実杭の水平載荷試験から得られた杭水平変位量の増加に伴う水平地盤反力の変化に注目した。CCP と SPP の各杭変位レベルにおける水平地盤反力係数 k と基準水平地盤反力係数 k_0 の比を図-5 に整理した。基準水平地盤反力係数 k_0 は杭地表面変位量 $y=10\text{mm}$ に対する水平地盤反力係数である。既往の研究成果^{19),20)}では、砂質土系地盤で杭変位量 y と水平地盤反力係数が $k/k_0 = y^{-0.5}$ の関係を示すことが広く知られている。

図-4 から、CCP は杭地表面変位量 $y=5\text{mm}$ 以下では水平地盤反力が比較的小さいが、杭変位の増加とともに上昇し $y=5\text{mm}$ 以上で $k/k_0 = y^{-0.5}$ の勾配に一致する。これは、実測の杭変位量が 10mm 以下のため、図中に参考として示した基準水平地盤反力係数 k_0 を $y=5\text{mm}$ として算定した場合でもその傾向は同様である。そのため、火山

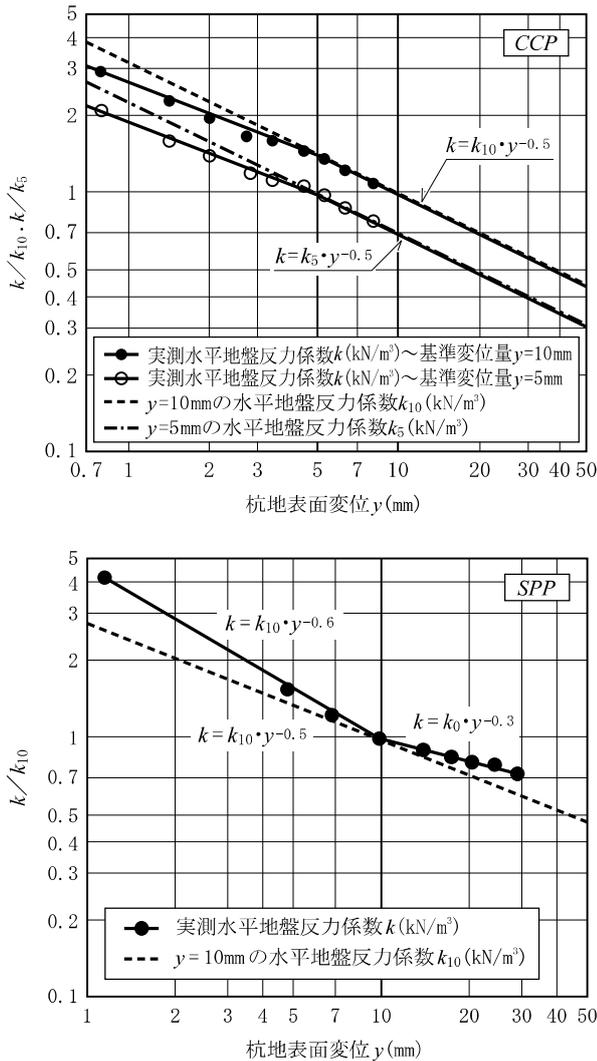


図-4 杭実測地表面変位 y と実測水平地盤反力係数 k / 基準水平地盤反力係数 k_0

灰地盤の CCP は、杭変位量が増加し杭周辺土の水平地盤反力が徐々に大きくなることで、砂質土相当の杭水平抵抗が確保されたものと考えられる。

これに対して SPP は、 $y = 0 \sim 10\text{mm}$ までは $k/k_0 = y^{-0.6}$ の関係で水平地盤反力は小さいが、 $y = 10\text{mm}$ 以上では $k/k_0 = y^{-0.3}$ の関係を示し比較的大きな水平地盤反力が発揮されている。これは、杭周面摩擦力度 f と同様に、火山灰土の水平地盤反力は、杭施工に伴う杭周辺の火山灰土の乱れから当初低下傾向にあるが、杭変形が徐々に大きくなるに従い所要の水平地盤反力が確保されるためと推察される。

ただし、火山灰質地盤の杭基礎の水平抵抗は、杭変位 y や杭幅 B_H の変化および火山灰質に種別でメカニズムの詳細が異なると考えられ、数件の別現場の火山灰質地盤

における杭水平載荷試験結果では、設計値の確保が難しいものもあった。そのため、設計水平地盤反力は、今後、安全側の設定や現場載荷試験の実施検証をすることが望ましいと考えられる。

4. 簡易構造物の合理的設計法

パイルドラフトを含めた異種基礎は、地盤-構造物挙動が複雑であり、地震時を含め非常に高度な解析が必要となる²¹⁾。ただし、構造物形式や地盤反力特性を考慮し必要十分な基礎構造を選定できるため、基礎の規模を縮小し建設コスト削減が可能となる。

このため、地震時を含めた荷重状態が比較的明確である土木構造物の擁壁構造を対象とし、杭が2列の場合および片側に1列の場合のパイルドラフト異種基礎構造の適応性について3次元有限要素法解析および遠心力模型実験で検討し、設計法確立のための成果²²⁾を得た。載荷重とラフト鉛直変位 δ の関係を図-5に示す。図によれば、杭が2列の場合と片側1列のみの場合で、 $\delta = 0.25\text{m}$ 以降の荷重-変位関係に大きな差異はなく、パイルドラフト基礎の支持機構として、杭とラフトが一体となって抵抗し、片側1列のみの杭でも同等の支持力を発揮していることが想定される。 $\delta = 0.35\text{m}$ における杭およびラフトの反力分布を図-6に示す。杭とラフトの荷重分担は、杭が片側1列のみの場合はラフトの受け持ち分が大きいことがわかる。また、杭が無い側の土圧分布が大きく発現し、これは片側の杭反力と均衡を

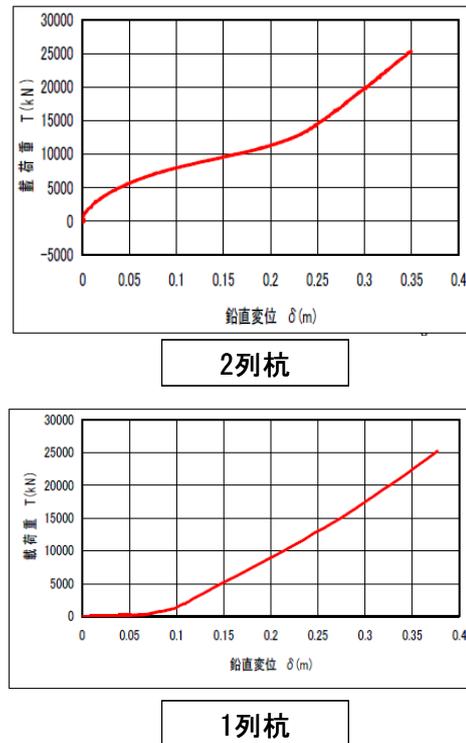


図-5 載荷重とラフト鉛直変位

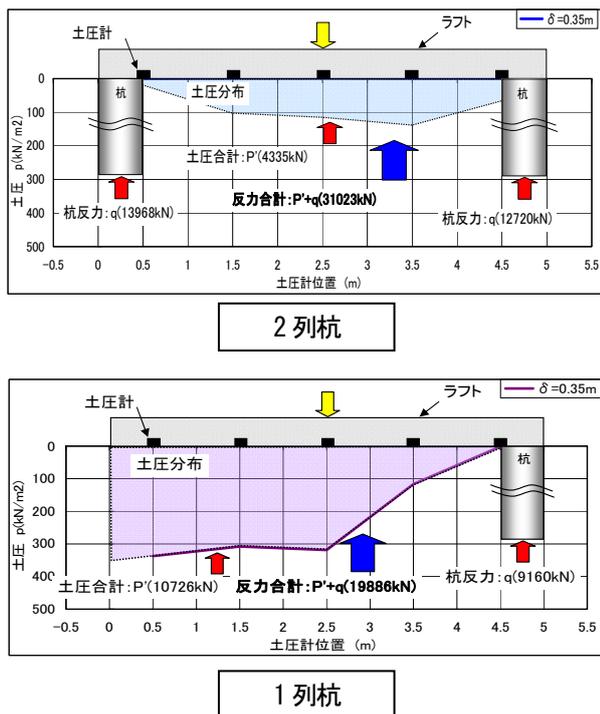


図-6 杭反力およびラフト反力分布

保つためと考えられる。

5. まとめ

本研究において、北海道の特殊土地盤における基礎構造物の設計法について検討した。その結果を要約すると以下の通りである。

- 1) 軟弱地盤を克服する基礎の一工法として、杭周辺に複合地盤を形成し、増加したせん断強度を杭の水平抵抗として反映する複合地盤杭基礎を研究開発した。同工法を現場条件に応じて活用することで10~45%の大きな建設コスト縮減が可能である。同工法の設計法は工学的に設定される。また、同工法において、杭周辺の地盤改良は一般的な工法の全てを対象とすることが可能である。
- 2) 複合地盤杭基礎の遠心力模型実験ならびに実杭規模の水平載荷実験の結果、大規模地震動に対して杭および複合地盤が健全であり実務上問題ないと考えられた。
- 3) 複合地盤杭基礎は震度法および地震時保有水平耐力照査法の耐震設計法より構造上問題ないことが検証された。また、動的非線形有限要素法解析の結果、複合地盤を杭周辺に施すことで静的設計法と同様に、複合地盤無しの場合に対し地震時の杭変位、杭ひずみが抑制され耐震性が大きく向上すること

が確認された。

- 4) 複合地盤杭基礎の耐震性能の検証法として動的応答解析を主体とする耐震照査フローを提案した。これらを踏まえ、施工カルテの作成も義務化することで「北海道における複合地盤杭基礎の設計施工法に関するガイドライン」¹⁰⁾を策定した。
- 5) 火山灰地盤の杭の支持力設計法に関し、一連の現場載荷試験の精査より、特に破碎性を呈する火砕流堆積物において杭周面摩擦抵抗力の低減設定の必要性など、実務者のための火山灰地盤における杭の評価法を策定した。
- 6) 火山灰地盤に施工された杭基礎の水平抵抗特性は、水平地盤反力係数 k は微小変形では小さいが、杭変位量 y が大きくなるに従い増加し、CCP で $k/k_0 = y^{-0.5}$ 、SPP で $k/k_0 = y^{-0.3}$ の関係が得られた。火山灰質地盤の杭基礎の水平抵抗は、杭変位 y や杭幅 B_H の変化および火山灰質に種別でメカニズムの詳細が異なると考えられ、今後、安全側の設定や現場載荷試験の実施検証をすることが望ましいと考えられる。
- 7) パイルドラフト異種基礎構造の3次元有限要素法解析および遠心力模型実験より、擁壁の杭を片側1列置した場合、2列に杭を配置した場合とほぼ同等の変位抑制および支持効果が確認され、今後の簡易構造物の実用化に向けた成果が得られた。

参考文献

- 1) 赤井浩一：土質力学, pp.124-149,1997.
- 2) Broms, B. B. : Lateral resistance of piles in cohesive soils, *Proc., ASCE*, Vol. 90, SM(3), pp.27-63, 1964.
- 3) Reese, L. C., Cox, W. R. and Koop, F. D. : Analysis of laterally loaded pile in sand, *Proc., Offshore Technology Conference*, Houston, TX, OTC2080, 1974.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編, pp.348-465, 2002.
- 5) 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.71-129, 2002.
- 6) 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, pp.48-148, 1999.
- 7) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計, pp.43-48, 1993.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編, pp.48-118, 2002.
- 9) 富澤幸一, 三浦清一, 渡辺忠朋：複合地盤の改良範囲および改良強度が杭の地震時挙動に及ぼす影響, 土木学会論文集C, Vol.164, No.1, pp.127-143, 2008.

- 10)土木研究所(寒地土木研究所)：北海道における複合地盤杭基礎の設計施工法に関するガイドライン, pp.1-189, 2010.
- 11)三浦清一, 八木一善：火山灰質粒状体の圧密・せん断による粒子破碎とその評価, 土木学会論文集, No.561/III-36, pp.257-269, 1997.
- 12)飯竹重光：関東ロームのコンシステンシー特性について, 土木学会論文集, 第277号, pp.85-93, 1978.
- 13)高田誠, 北村良介, 北田貴光：二次しらす地盤の力学特性の評価, 土木学会論文集, No.561/III-38, pp.237-244, 1997.
- 14)赤井公昭, 辻本有一, 佐久間彰三, 半澤武志：支笏火山灰層における鋼管杭の支持力機構, 土と基礎, Vol.314, No.1442, pp.41-46, 1984.
- 15)長谷川健一, 平野稔, 日下部佑基：火山灰地盤における打込み鋼管杭の支持力特性について, 第21回日本道路会議, 橋梁部門, pp.852-853, 1995.
- 16)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, pp.348-432, 2002.
- 17)土質工学会：日本の特殊土, pp.203-261, 1974.
- 18)若松幹男, 近藤努：北海道の土質 北海道の火山灰質土, 土と基礎, Vol.37, No.9, pp.24-29, 1989.
- 19)久保浩一：杭の横抵抗の新しい計算法, 港湾技術研究所報告, Vol.2, No.3, 37p., 1964.
- 20)今井常雄：地盤の横方向 K 値の研究(3)―設計に用いる K 値―, 土と基礎, Vol.17, No.574, pp.13-18, 1968.
- 21)木村亮, 長谷川雅：模型急速載荷試験による群杭およびパイルド・ラフトの鉛直支持力特性の検討, 土木学会論文集III No.778, pp.29-39, 2004.
- 22)富澤幸一, 青地知也, 三浦清一：パイルドラフト併用基礎の支持機構の解析(1・2), 第42回地盤工学研究発表会講演集, pp.1293-1296, 2007.