

火山灰地盤における杭基礎の新設計法 —現場試験に基づく杭の鉛直支持力評価—

土木研究所寒地土木研究所 寒地地盤チーム ○富澤幸一
西本 聡
北海道大学大学院 工学研究科 三浦清一

北海道の表土の総面積の約40%は火山灰土に覆われている。しかしながら、火山灰土はあくまでも特殊土として扱われ、火山灰地盤に施工する杭基礎の明確な設計法は存在しない。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（押込み試験・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6現場、打込み鋼管杭8現場の計14現場である。本報では、それらの成果から得られた一連の知見より、周面摩擦力の低減設定を含めて、実務者のための北海道の火山灰地盤における杭基礎の新たな設計法をガイドラインとして策定した。

キーワード：火山灰、杭、載荷試験、支持力、周面摩擦力

1. はじめに

現行設計法^{1),2),3)}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および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砕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^{4),5)}。つまり、拘束圧で粒子破砕した火山灰土ではせん断強度の低下が懸念されている。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などが報告されている^{6),7)}。この際、北海道の火山灰土は多様であるが、他の特殊土である関東ローム⁸⁾や九州シラス⁹⁾とは詳細の性質は異なると考えられる。

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、実務者のための北海道の火山灰地盤における杭基礎の新たな設計法をガイドラインとして策定した^{10),11)}。以下に、その根拠となる試験成果概要を示す。

なお、火山灰の学術上の定義は多様¹²⁾であるが、ここでは、火山灰・スコリア・軽石とそれらから構成される堆積物を火山灰土と総称し、それを主体に構成される地盤を火山灰地盤と称する。

2. 北海道の火山灰土と現場試験概要

北海道の噴出源である火山群は、主に道南・道央・道東の3地域に集中しており、その噴出物は噴火の形式により、主として降下火砕堆積物（fa）と火砕流堆積物（fi）に大別される¹³⁾。このうち、降下火砕堆積物は大気中に噴き上げた噴出物が空中から落下し地表面に堆積する。そのため、空中運搬時に概ね粒径が淘汰されている。これに対して、火砕流堆積物は乱流状態で地表面に沿って流れながら堆積するもので、高熱をもって流出するため溶結の影響を受けているのが特徴である。北海道の火山灰土の分布¹⁴⁾と杭の鉛直載荷試験を実施した現場箇所を図-1に併せて示した。

鉛直載荷試験を実施した杭の諸元とその現場の火山灰土の区分を表-1、表-2に示した。対象現場の火山灰土の火山灰区分や溶結の有無の判定は、杭基礎の設計で用いられた地質調査報告書によった。その結果、今回対象とした火山灰土は、概ね粗粒火山灰土に分類される。ただし、同一現場の柱状内でも降下火砕堆積物（fa）と火砕流堆積物（fi）が混在している場合もある。

3. 杭の鉛直載荷試験法

CCPの鉛直載荷試験法は、地盤工学会基準¹⁵⁾に準拠し、周辺杭および載荷桁を反力とする油圧ジャッキ加力による押込み試験とした（写真-1）。載荷方式は、段階載荷方式とし、計画最大荷重は各現場で杭設計極限支持力とした。試験杭は橋台中央位置の杭を用い、杭軸力を

降下火砕堆積物		火砕流堆積物	
駒ヶ岳	Ko	元村溶結凝灰岩	
渡島大島	Os	駒ヶ岳軽石流堆積物	
乙部層	a	濁川軽石流堆積物	
太櫓層	b	喜茂別溶結凝灰岩	
銭亀川層	Z-M	洞爺火砕流堆積物	
羊蹄山	Yo	クッタラ軽石流堆積物	
恵庭岳	En	樽前軽石流堆積物	
樽前山	Ta	支笏軽石流堆積物	
支笏	Spfa	十勝溶結凝灰岩	
有珠山	Us	層雲峡・安足間川溶結凝灰岩	
十勝岳	To	無加溶結凝灰岩	
摩周	Ma	阿寒軽石流堆積物	
雄阿寒岳	Oa	クッチャロ軽石流堆積物	
雌阿寒岳	Me	摩周軽石流堆積物	
利尻山	Ri	音根別溶結凝灰岩	

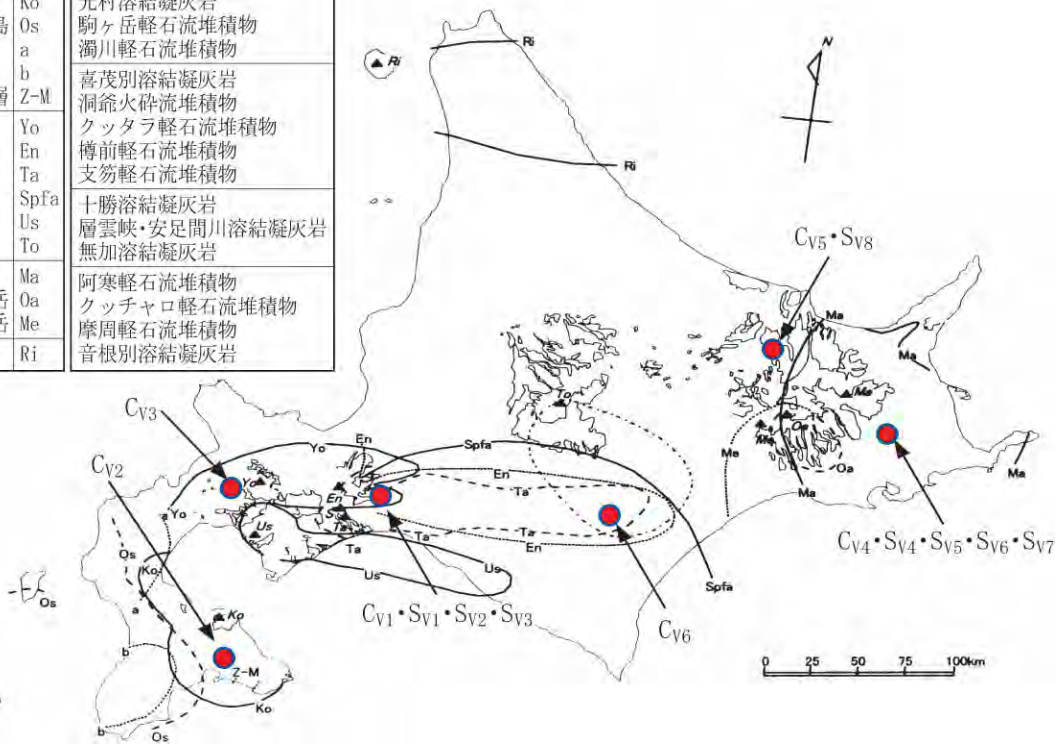


図-1 北海道の火山灰土の分布と現場試験調査工の位置

表-1 鉛直載荷試験を実施した CCP 諸元と火山灰土区分

記号	現場名	杭諸元	火山灰土区分
C _{v1}	鉄北橋 (千歳市)	φ1200mm L=18.4m	支笏軽石流堆積物 Spfl
C _{v2}	ランプ橋 (函館市)	φ1200mm L=15.0m	駒ヶ岳降下堆積物 Ko (熱郭軽石堆積物混合)
C _{v3}	白井川跨道橋 (黒松内町)	φ1000mm L=12.4m	洞爺火砕流堆積物 Toya
C _{v4}	西風連橋 (別海町)	φ1000mm L=15.5m	摩周降下火砕物 Ma・ クッチャロ軽石流堆積物 Kcfl
C _{v5}	美女橋 (美幌町)	φ1200mm L=21.4m	クッチャロ軽石流堆積物 Kcfl
C _{v6}	愛国基線橋 (帯広市)	φ1200mm L=25.4m	支笏・恵庭降下堆積物 Spfa,En (fl 混在)

表-2 鉛直載荷試験を実施した SPP 諸元と火山灰土区分

記号	現場名	杭諸元	火山灰土区分
S _{v1}	寿橋 (千歳市)	φ800mm L=22.9m	支笏軽石流堆積物 Spfl (fa 一部混在)
S _{v2}	オルイカ橋 A1 橋台 (千歳市)	φ800mm L=37.4m	支笏軽石流堆積物 Spfl・ 支笏降下堆積物 Spfa
S _{v3}	オルイカ橋 A2 橋台 (千歳市)	φ800mm L=36.9m	支笏軽石流堆積物 Spfl・ 支笏降下堆積物 Spfa
S _{v4}	紅葉橋 (別海町)	φ800mm L=32.4m	摩周降下火砕物 Ma・ク ッチャロ軽石流堆積物 Kcfl
S _{v5}	時雨橋 (別海町)	φ800mm L=19.4m	クッチャロ軽石流堆積物 Kcfl
S _{v6}	紅葉橋側道 (別海町)	φ800mm L=28.9m	摩周降下火砕物 Ma・ク ッチャロ軽石流堆積物 Kcfl
S _{v7}	時雨橋側道 (別海町)	φ800mm L=19.4m	クッチャロ軽石流堆積物 Kcfl
S _{v8}	女満別空港橋 (女満別町)	φ600mm L=19.4m	クッチャロ軽石流堆積物 Kcfl (fa 一部混在)

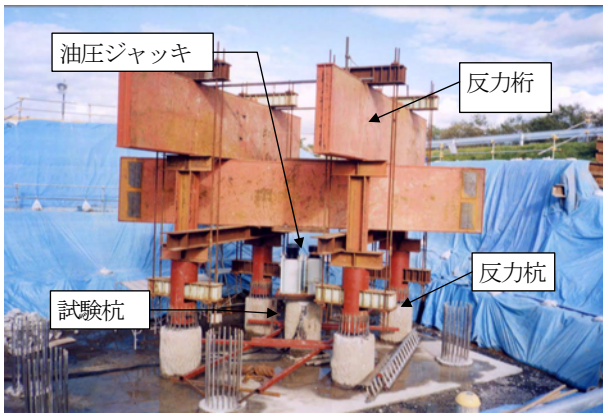


写真-1 CCP 押込み試験状況



写真-2 SPP 衝撃载荷試験状況

確認するため杭体内の鉄筋に一定間隔で鉄筋計・ひずみ計を設置した。試験杭と反力杭の中心間隔は、実杭を用いた現場試験のため $2.5D$ (D : 杭径) である。なお、押込み試験は、コンクリートの強度発現および杭施工後の周面摩擦力の回復を考慮し CCP 打設から 4 週間後に実施した。CCP は全てオールケーシング工法により施工した。

SPP の鉛直载荷試験法は、杭の衝撃载荷試験¹⁵⁾により実施した。衝撃载荷試験は、鉛直に設置された 1 本の試験杭に打撃用のハンマを用いて軸方向衝撃力を作用させ、杭頭で得られる動ひずみ・加速度の計測値から動的抵抗力を算定する試験である(写真-2)。この試験法は、杭打設と同時に進行ことができ深さ方向のひずみゲージ設置が不要なため、静的な杭の押込み試験に比べ試験に要する装置・時間・費用を縮小することが可能な手法である。試験システムは波動理論に基づく解析による。杭に軸方向の衝撃荷重が作用した際の応力波の伝搬は式(1)で示す一次元波動方程式で表される。

$$\delta^2 u(x, t) / \delta t^2 = V_c^2 \cdot \delta^2 u(x, t) / \delta x^2 \quad (1)$$

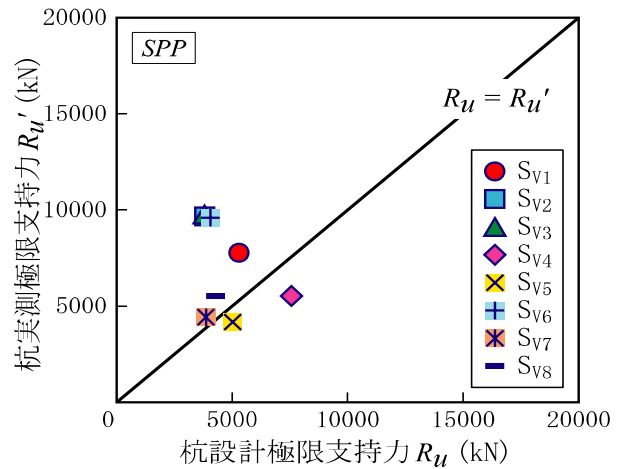
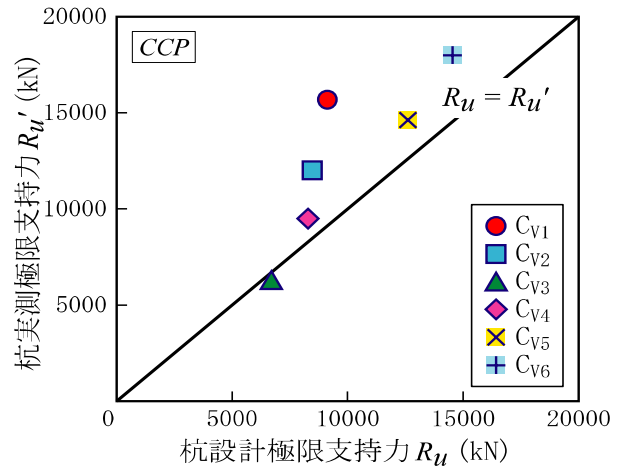


図-2 CCP・SPP の杭極限支持力

ここに、 V_c : 応力波伝搬速度 (m/s)、 u : 変位 (m)、 x : 深さ位置(m)、 t : 時間(ms)である。すなわち、一次元波動理論の一般解を用いて、打撃による入力波とそれが杭体を 1 往復する反射波との和が地盤抵抗と釣り合うものとし、全抵抗 R (= 静的抵抗力 R_s + 動的抵抗力 R_d) を算定する。杭極限支持力に相当する静的抵抗成分は全抵抗のうち動的抵抗成分を排除して算定する。この際、地盤条件・杭諸元の変化を考慮し抵抗成分をダッシュポットでモデル化した特性曲線を用いた波形マッチング解析を行う。また、衝撃载荷試験は打止め時および一定時間放置後など経時的に計測したが、検討に用いた実測杭支持力は杭打止め時から 2 日後の計測値とした。

以下に、鉛直载荷試験で得られた杭極限支持力、先端支持力、周面摩擦力の試験結果を検討した。

4. 火山灰地盤の杭極限支持力

CCP 6 現場および SPP 8 現場の鉛直载荷試験の結果から得た実測極限支持力 R_u' を設計極限支持力 R_u と対比して図-2 に示す。この際、各現場の杭の設計極限支持力

は、杭先端支持力度 q_d を道路橋の設計法¹⁾に従い、支持層が火山灰地盤であっても砂質土に準拠し、CCPで $q_d = 3000 \text{ kN/m}^2$ 、SPPで支持層への換算根入れ比（根入れ長/杭径 $\sim q_d/N$ 値関係図）より設定した。杭設計周面摩擦力度 f は、区間 N 値より CCPで $f = 5N$ ($\leq 200 \text{ kN/m}^2$) および SPPで $f = 2N$ ($\leq 100 \text{ kN/m}^2$) として算定している¹⁾。その結果、図示したように CCP と SPP の実測極限支持力 R_u' は総じて設計極限支持力 R_u を上回る結果となった。

実測極限支持力 R_u' が設計極限支持力 R_u を下回るものが数点あるが、これは、後述する周面摩擦力の低下によるものと考えられる。

杭の極限支持力 R_u は、杭先端極限支持力 R_p と杭最大周面摩擦力 R_f の合力として表され、道路橋の設計法¹⁾では式 (2) により算定される。

$$R_u = R_p + R_f = q_d \cdot A + U \cdot L \cdot f \quad (2)$$

ここに、 q_d ：杭先端極限支持力度 (kN/m^2)、 A ：杭先端面積 (m^2)、 U ：杭周長 (m)、 L ：層厚 (m)、 f ：層厚 L の最大周面摩擦力度 (kN/m^2) である。

そこで、 R_u を R_p と R_f に分離した検討を行った。

5. 火山灰地盤の杭先端極限支持力

鉛直載荷試験で得られた杭先端実測極限支持力 R_p' と杭先端設計極限支持力 R_p の関係を杭種別に示す (図-3)。杭先端実測極限支持力 R_p' は杭種に関係なく概ね設計値相当あるいは設計値を上回った。

この結果、CCP では平均値評価で実測先端支持力度 $q_d' \approx 3600 \text{ kN/m}^2$ (設計先端支持力度¹⁾は $q_d = 3000 \text{ kN/m}^2$) を発揮した。また SPP でも実測先端支持力度 q_d' は設計先端支持力度 q_d をほぼ確保している。このことから、火山灰地盤において杭先端部では支持層への換算根入れ深さに応じた先端閉塞効果¹⁾を発揮するものと考えられる。

これは、杭先端直下の火山灰土は一定のせん断強度を保ったためと推測される。このため、火山灰土の杭先端支持力の設定は、従来の設計法である砂質土に準じて概ね問題ないと判断される。

6. 火山灰地盤の杭周面極限摩擦力

杭周面極限摩擦力は、式 (2) で示すように土層別に設定した杭周面摩擦力度 f の合計により算定される。検討の結果、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区間がありバラツキを示した。

そのため、ここでは火山灰土の堆積様式の違いに着

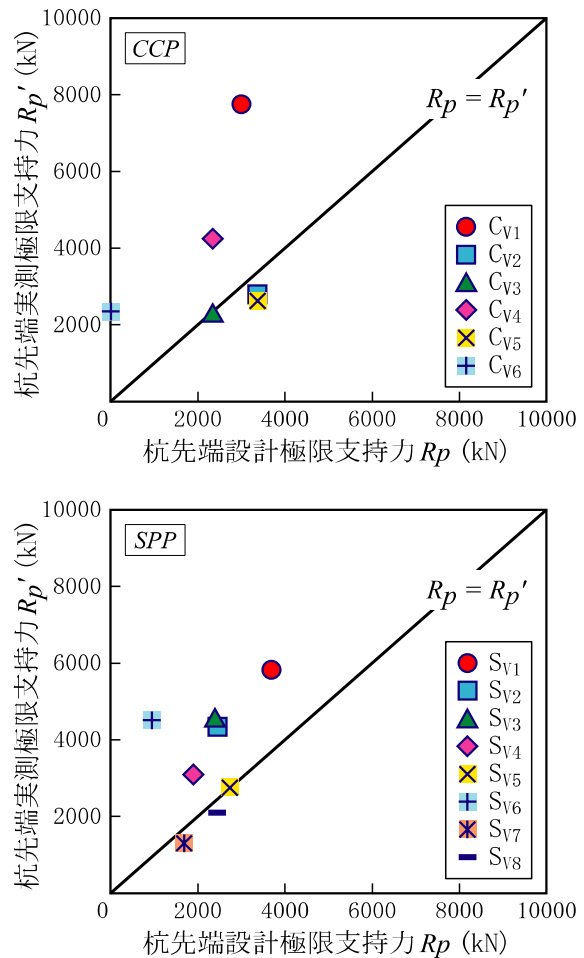


図-3 CCP・SPPの杭先端極限支持力

目し、杭実測周面極限摩擦力を降下火砕堆積物 (fa) と火砕流堆積物 (fi) に区分し N 値との関係で整理した。ただし、同一現場においても降下火砕堆積物 (fa) と火砕流堆積物 (fi) が互層となっている場合もある。図-4、図-5 にその結果を杭種別に示す。図には砂質土に準じた設計値を実線で示した。現行の設計値 (CCP 設計値; $f = 5N$ 、SPP 設計値; $f = 2N$) は、集積した実測データの平均値により設定されている。

図-4 より降下火砕堆積物 (fa) では杭周面摩擦力度 f の発現は比較的大きく、設計値と同程度の摩擦力を確保している。一部設計値を下回るものもあるが、同一柱状の平均値評価では支持力上は問題ない。

ただし、図-5 に示す火砕流堆積物 (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¹⁾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

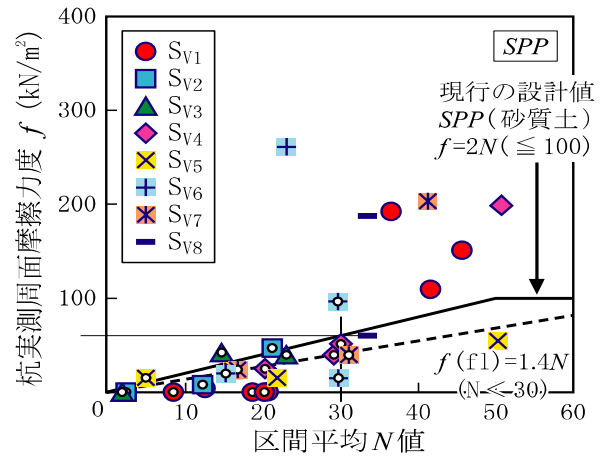
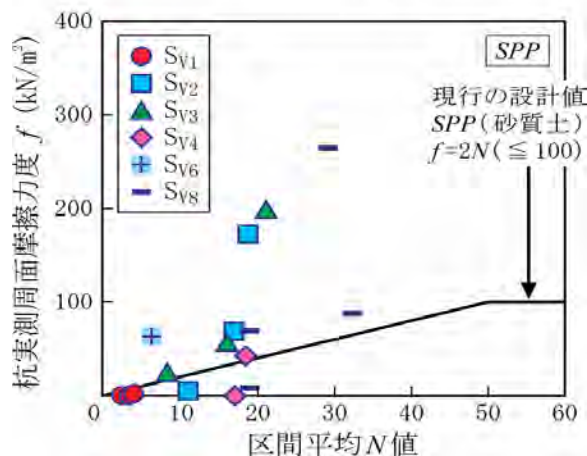
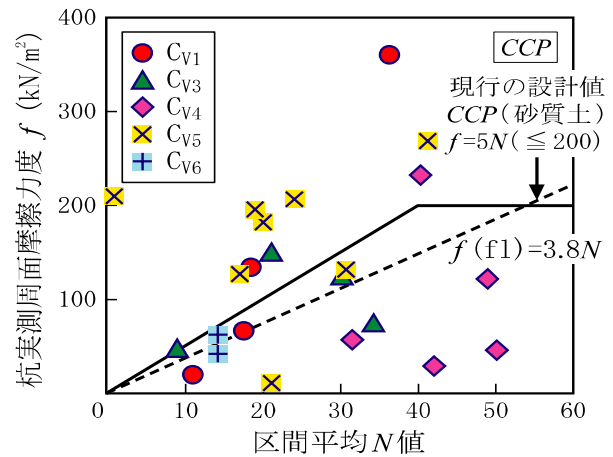
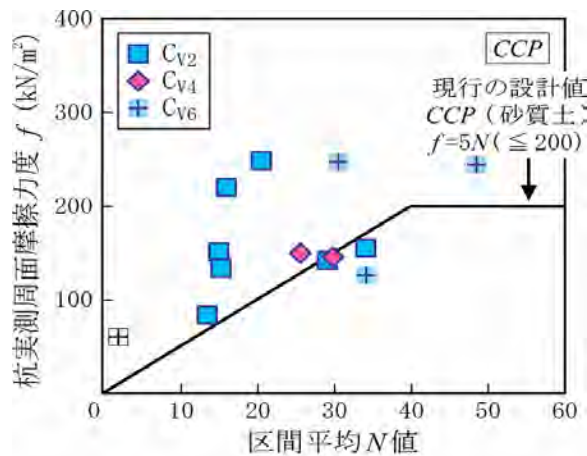


図4 降下火砕堆積物(fa)の区間N値と杭実測周面極限摩擦力度 f

図5 火砕流堆積物(fi)の区間N値と杭実測周面極限摩擦力度 f (○印N値30未満)

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ものがあるため¹⁰⁾、破砕が生じている可能性もある。

これらの試験成果より、今後の実務に向けた、北海道の火山灰地盤における杭基礎の新たな鉛直支持力の設定法を以下に整理した。本検討に当たりデータ数は十分にあり、新設計法の本提案は現行設計法の考え方を逸脱するものではないと判断する。

なお本編では特に示さないが、杭周面摩擦力 f と電気式コーン貫入試験による q_i 値との一定の相関性が確認されており、 N 値に変わる火山灰土の調査法として有効と考えられる。

7. 火山灰地盤における杭の設計要領

一連の現場載荷試験成果から得られた知見を整理し、北海道の火山灰地盤における杭基礎の新設計法を以下に

策定した。

設計法の方針

火山灰地盤の杭基礎の設計法に当っては、従来に構造物基礎の設計と同様に、杭の要求性能（終局限界・損傷限界・使用限界）や照査指標（安全率・ NF 照査・液状化判定）および設計モデル（静的変位法・震度法・地震時保有耐力照査法）を明確化し、道路橋示方書を主体とする現行設計法に準拠することを基本方針とする。

鉛直支持力の設定法

- 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_i 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_u については砂質土に準拠し、道路橋示方書の設定法より場所打ち杭は $q_u=3000\text{kN/m}^2$ 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碎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。)
- 4)火山灰地盤の杭基礎の安全性・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。

水平抵抗の評価法

火山灰地盤の杭基礎の水平抵抗は、杭変位 y や杭幅 B_H の変化により砂質土とはメカニズムの詳細が異なる。ただし、数件の水平載荷試験結果では基準変位量 (杭径 1% 相当の杭変位量) 相当の微小変形では概ね設計値を確保した。そのため、水平地盤反力は、現時点では従来どおりの設定法とし、弾性地盤反力法に基づき設計する。(本報ではその試験成果は省略した。)

なお、本報のみで全ての現場試験成果を示すことが出来ていないため、策定した新設計法を導くに至る詳細のデータと解析結果は、参考文献 10),11)を参照されたい。

8. あとがき

従来の安全率設計法に対し、性能規定設計法においては地盤特性をよりの確に把握することが不可欠となる。また、兵庫県南部地震を契機に基礎には所要の耐震性能 (安全性・供用性・修復性) ¹⁾ の確保が求められている。つまり、構造物基礎の設計施工において、所要の要求性能を確保させるために、地盤性状を正規に反映した対応が重要となる。例えば、既設の火山灰地盤中の杭基礎は従来の砂質土相当で設計されているが、安全率 (道路橋常時=3、地震時=2) で救われ目立った変状をしていない可能性はある。ただし、それは性能規定において真に正しい設計法とは言えない。

そのため、今後は北海道においては、液状化など地震時を含めた基礎の十分な安全性を確保するため、本報に記した新設計法を参考に火山灰地盤の杭支持力を設定することが妥当と考える。

ただし、火山灰地盤における杭基礎の今後の実設計に当たっては、関係機関との十分な協議を踏まえ、運用することを原則とする。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、pp.173-326、2001.
- 3) 鉄道総合研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説、基礎構造物・抗土圧構造物、pp.201-264、2000.
- 4) 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.
- 5) 八木一善、三浦清一：破砕性火山灰地盤の力学特性の評価、土木学会論文集、No.757/III-66、pp.221-234、2004.
- 6) 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.
- 7) 長谷川健一、平野稔、日下部祐基：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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 富澤幸一、三浦清一：火山灰土における橋梁基礎杭の鉛直支持機構の検討、第 50 回地盤工学シンポジウム論文集、pp.303-310、2005.
- 11) 富澤幸一、三浦清一：火山灰地盤における杭基礎の支持力特性に関する検討、土木学会論文集 C、Vol.63、No.1、pp.125-139、2007.
- 12) 町田洋、新井房夫：火山灰アトラス、東京大学出版社、pp.6-162、1992.
- 13) 地盤工学会北海道支部 北海道火山灰土の性質と利用に関する研究委員会：実務者のための火山灰土、pp.1-14、2004.
- 14) 北海道火山灰命名委員会：北海道の火山灰、pp.1-2、1982.
- 15) 地盤工学会：地盤工学会基準 杭の鉛直載荷試験方法・同解説 第一回改訂版、pp.19-59、2002.
- 16) 土質工学会：日本の特殊土、pp.203-261、1974.