

# 特殊土地盤における性能規定化に対応した地盤変形特性の調査手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地地盤チーム

研究担当者：林 宏親、富澤幸一、江川拓也

## 【要旨】

特殊土地盤（泥炭・火山灰）における構造物基礎の性能規定化に向け、現場地盤調査・試験方法の選定手法を検討し、地盤定数別の影響を試設計から明らかにした。基礎の性能規定設計法では安全率に代わる部分係数を設定する必要があるが、特殊土地盤の各種調査工の適用性及び信頼性を検討するため、水平載荷試験値を基準に  $N$  値、原位置せん断摩擦試験、孔内水平載荷試験による地盤変形特性から地盤反力を推定し、変動係数  $COV$  とバイアス  $\lambda$  の変化ばらつきによる杭変位や杭頭曲げモーメント等の関係を震度法設計で精査した。特殊土地盤においては詳細な地盤調査法評価が必要であると同時に、新たに原位置せん断摩擦試験の活用性を確認した。

キーワード：特殊土、性能規定、地盤定数、変動係数

## 1. はじめに

近年の国際化やコスト縮減の動向から、性能規定型設計への移行が進んでおり、新技術・新設計の多様化へ対応すべく照査手法の整備が行われている。特に長寿命化の観点からは、地盤の変形の影響が支配的になることから、新しい設計体系に対応した地盤変形特性の把握が重要となる。

しかしながら、現在の各種地盤定数の調査方法は従来の標準貫入試験等に依存しており、設計パラメータがばらつきの影響を大きく受けるのが現状であり、高度な設計体系に対応しているとは言い難い。そのため、原位置試験を中心とした信頼性の高い調査・試験方法の確立により、合理的・経済的な構造物設計の推進が期待される。特に、一般的な地盤条件とは特性が異なり、地盤変形特性が大きな問題となる特殊土（泥炭・火山灰）地盤において、構造物の長寿命化を念頭に置いた性能設計を実施するためには、新しい設計基準・照査方法の特殊土に対する適用性を十分に確認する必要がある。新設計・新工法に即した地盤・土質性状を把握し、適切な設計パラメータ（主に地盤変形特性）を推定するための原位置試験を中心とした調査手法の確立が望まれる。

本研究は、特殊土（泥炭・火山灰）地盤における、構造物の性能規定化に対応した、調査・試験方法の提案・適用性及び設計パラメータ推定方法を検討し、構造物の合理的かつ経済的な設計の推進と長寿命化に貢献することを目的とする。

## 2. 火山灰質地盤における静的水平地盤反力係数評価のための試験・調査方法に関する考察

構造物基礎の静的水平地盤反力係数  $k_H$  は、(1)式で示されるとおり、地盤の変形係数の影響が支配的であり、地盤の変形係数  $E_0$  は各種原位置試験により推定される。

$$k_H = \frac{1}{0.3} \alpha E_0 \cdot \left( \frac{\sqrt{D/\beta}}{0.3} \right)^{-3/4} \quad (1)$$

ここに、 $k_H$ ：基礎の水平地盤反力係数 (kN/m<sup>3</sup>)、 $\alpha$ ：地盤反力係数換算係数、 $E_0$ ：地盤の変形係数 (kN/m<sup>2</sup>)、 $\beta$ ：基礎の特性値 (m<sup>-1</sup>)  $\beta = \sqrt[4]{(k_H D)/4EI}$ 、 $D$ ：杭径 (m)、 $EI$ ：基礎の曲げ剛性 (kN・m<sup>2</sup>) である<sup>1),2)</sup>。

ここでは、過去に実施された火山灰質地盤における杭の静的水平載荷試験から得られた実測の静的水平地盤反力係数  $k_H$  と同地点で実施された各種原位置試験から推定された地盤の変形係数<sup>1)~4)</sup>により求めた静的水平地盤反力係数  $k_H$  を比較し、的確な杭の静的水平地盤反力係数を評価するための試験調査法の検討を行う(表1)。杭の水平載荷試験と対比した各種試験・調査方法は表1に示したが、千歳市の①は正負交番の正方向と②は一方向載荷の試験杭結果であり、①'は負方向と②'は反力杭の試験結果である。そのため、逆算  $k_H$  つまり  $\beta$  が正負交番と試験杭・反力杭で異なるため、(1)式の試算より各種原位置試験から求めた静的水平地盤反力係数  $k_H$

表1 杭の水平載荷試験による実測値と各種原位置試験から推定した杭の静的水平地盤反力係数  $k_H$

試験No. 試験箇所	杭諸元		1/ $\beta$ 区間 火山灰 種別	杭の水平載荷試験からの実測値		各種原位置試験から推定された変形係数 $E_0$ により求めた水平地盤反力係数 $k_H$ (kN/m <sup>3</sup> ) <sup>3)</sup> *				
	杭種 (施工方法)	杭径 $\phi$ (mm) 杭長 L (m)		杭特性長 1/ $\beta$ (m)	水平地盤反力係数 $k_H$ (kN/m <sup>3</sup> )	孔内水平 載荷試験	N値 ( $E_0=2,800N$ )	原位置せん断 摩擦試験 <sup>2)</sup>	PS検層	
①	千歳市	鋼管(打込)	$\phi 600, L=17.5$	Spfl	2.823	34,556	2,910	27,945	6,872	138,614
①'					2.860	32,812	2,896	27,808	6,838	137,939
②	千歳市	鋼管(打込)	$\phi 800, L=36.0$	Spfl	3.868	13,541	1,870	17,338	5,096	50,423
②'					3.823	12,504	1,878	17,415	5,119	50,645
③	白老町	鋼管(中掘)	$\phi 600, L=23.0$	Kifl	2.470	40,997	13,536	48,967	26,731	362,587
④	標茶町	鋼管(打込)	$\phi 800, L=21.0$	Keff	3.056	30,600	17,831	144,670	35,745	559,737

\* 地盤反力係数の推定式に用いる換算係数  $\alpha$ <sup>26)</sup>、<sup>27)</sup> による補正を行っていない

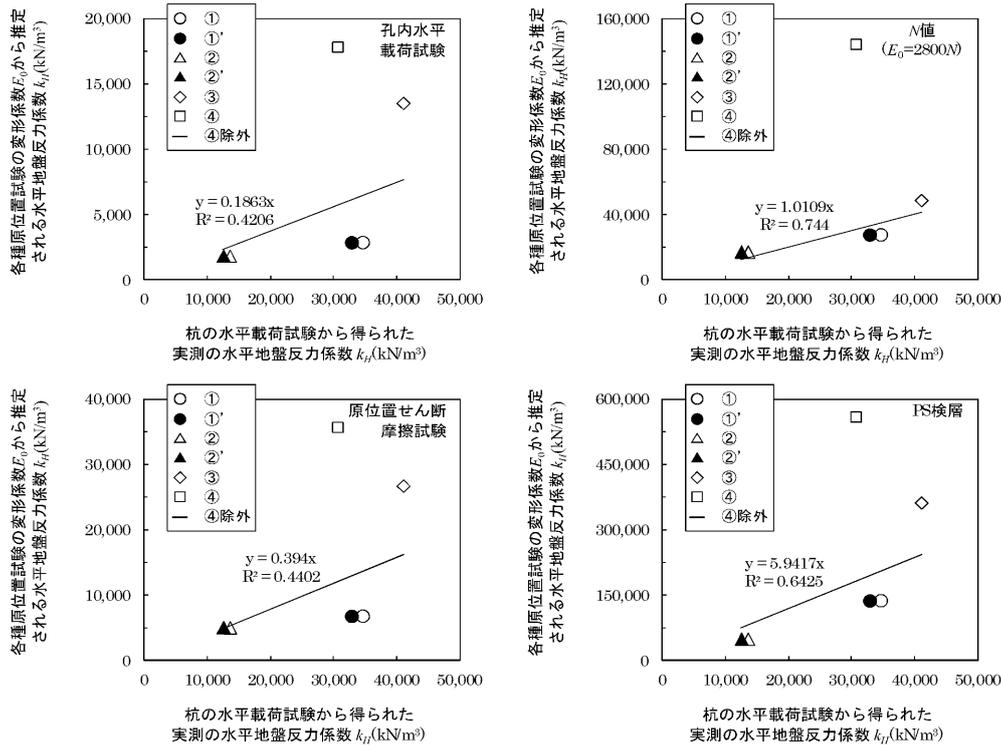


図1 杭の水平載荷試験による実測値と各種原位置試験から推定した杭の静的水平地盤反力係数  $k_H$  の関係

表2 杭実測値との関係から得られた火山灰質地盤における常時の地盤反力係数の換算係数  $\alpha$

変形係数 $E_0$ の推定方法	地盤反力係数の換算係数 $\alpha$	
	現行 <sup>26)</sup> 、 <sup>27)</sup> (地盤種別なし)	火山灰質地盤 ( )は実測値との 相関係数 ( $=\sqrt{R^2}$ )
孔内水平載荷試験で測定した変形係数	4	5.367 (0.648)
標準貫入試験のN値より $E_0=2,800N$ で推定した変形係数	1	0.989 (0.862)
原位置せん断摩擦試験で測定した変形係数	2	2.538 (0.663)
PS検層によるP波、S波より算定した変形係数	-	0.168 (0.801)

に違いが生じることになる。ただし、地盤反力係数算定時で換算係数  $\alpha$  による補正を行っていない。

図1に、特異な値を示した試験④を除外した関係式を合わせて示したが、今回の結果からは標準貫入試験 (SPT) によるN値ならびにPS検層による推定値との相関が高い傾向にある。各関係式より、火山灰質地盤における各種原位置試験から常時の地盤反力係数を求める際の換算係数  $\alpha$  として表2の関係が得られる<sup>3)-6)</sup>。

### 3. 火山灰質地盤における地盤反力係数の推定精度が杭基礎設計に与える影響

#### 3.1 概要

火山灰質地盤における杭基礎の信頼性設計手法確立のための基礎資料を作成することを目的として、

火山灰質地盤における杭基礎設計において設計条件推定値(地盤反力係数)のばらつきが、設計結果(杭体に生ずる曲げモーメント、せん断力、変位の分布、杭体応力度、構造諸元など)に与える影響を試設計により把握する。

### 3.2 試算モデル

試算に用いる試算モデルは、土木研究所の報告書「道路橋下部構造の部分係数設定法に関する研究」の試算モデルを踏襲する。杭種は鋼管杭とし、杭頭部の曲げモーメントが卓越する橋脚躯体を設定する。また、レベル1地震時に杭体に生じる応力度が許容応力度を満足し、かつ耐力にできるだけ余裕が生じない鋼管厚を設定する。さらに、支持力が基礎の決

表3 杭基礎試算の設計条件

上部工反力	死荷重 $R_D$ (kN)	7100
	L1地震時水平力 $H_{EQ}$ (kN)	1899
L1地震時設計水平震度(III種地盤)		0.30
地盤の変形係数 $E_b$	(kN/m <sup>2</sup> )	1,400
水平地盤反力係数(基本値) $k_H$	(kN/m <sup>3</sup> )	11,809
軸方向バネ定数 $k_v$	(kN/m)	262,954
杭体	降伏強度(SKK400) $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	235
	杭長 $L$ (m)	20
	杭径 $D$ (mm)	600
	板厚 $t$ (mm)	12
照査方向	橋軸方向	

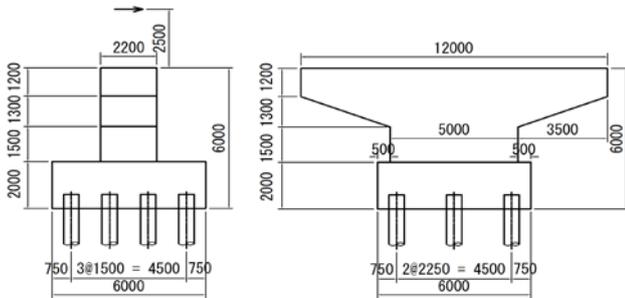


図2 試算対象基礎の形状図

定要因とならないよう、杭先端に  $N$  値 50 の支持層を 3m 程度設けるとともに、許容支持力と許容引抜き力を極限值(安全率  $n=1$ )とする。

以上を踏まえて設定した設計条件の一覧を表3に、試算対象基礎の形状図を図2に示す

### 3.3 変動係数と地盤反力係数のばらつき

変動係数は過去に実施された火山灰質地盤における杭の静的水平載荷試験から得られた実測の静的水平地盤反力係数と、同地点で実施された各種原位置試験から推定された地盤の変形係数  $E_0$ <sup>(7)~(9)</sup>により求めた水平地盤反力係数  $k_H$  から推定換算係数  $\alpha'$  を算出し、推定換算係数  $\alpha'$  のばらつきから変動係数 COV を算出する(表4)。さらに、設計条件に示した基本値の水平地盤反力係数  $k_H$  に対し、 $(1 \pm \text{COV})$  および  $(1 \pm \text{COV} \times 1.225)$  を乗じて、各種原位置試験からの推定によるばらつきの影響を受けた水平地盤反力係数  $k_H$  を設定する(表5)。実測値としている杭の水平載荷試験より水平地盤反力係数  $k_H$  を推定した

表5 試設計に用いた水平地盤反力係数  $k_H$

	変動係数 COV	$k_H$ に乗ずるばらつき	水平方向地盤反力係数 $k_H$ (kN/m <sup>3</sup> )	
			常時	地震時
基本値	0.000	1.000	5905	11809
杭の水平載荷試験	0.250	0.694	4096	8192
		0.750	4428	8857
		1.250	7381	14761
		1.306	7713	15426
孔内水平載荷試験	0.741	0.093	546	1093
		0.259	1530	3061
		1.741	10279	20557
		1.907	11263	22525
N値 ( $E_0=2,800$ )	0.370	0.547	3232	6464
		0.630	3723	7446
		1.370	8086	16172
		1.453	8577	17154
原位置せん断摩擦試験	0.625	0.235	1387	2773
		0.375	2216	4433
		1.625	9593	19185
		1.765	10422	20845

表4 水平地盤反力係数に与える変動係数 COV

試験No. 試験箇所	杭諸元		1/β区間 火山灰 種別	各種原位置試験から推定された変形係数 $E_0$ により求めた 水平地盤反力係数 $k_H$ (kN/m <sup>3</sup> ) および推定換算係数 $\alpha'$							
	杭種 (施工方法)	杭径 $\phi$ (mm) 杭長 $L$ (m)		杭の水平載荷試験 からの実測値(杭載荷)		孔内水平 載荷試験		N値 ( $E_0=2,800$ )		原位置せん断 摩擦試験	
				杭特性長 $l/\beta$ (m)	$k_H$ (kN/m <sup>3</sup> )	$k_H$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\alpha'$	$k_H$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\alpha'$	$k_H$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\alpha'$
① 千歳市	鋼管(打込)	$\phi 600, L=17.5$	Spfl	2.823	34,556	2,910	11.875	27,945	1.237	6,872	5.029
② 千歳市	鋼管(打込)	$\phi 800, L=36.0$	Spfl	3.868	13,541	1,870	7.241	17,338	0.781	5,096	2.657
③ 白老町	鋼管(中掘)	$\phi 600, L=23.0$	Ktfl	2.470	40,997	13,536	3.029	48,967	0.837	26,731	1.534
④ 標茶町	鋼管(打込)	$\phi 800, L=21.0$	Kcfl	3.056	30,600	17,831	1.716	144,670	0.212	35,745	0.856
				平均 $\mu$			5.965	0.767		2.519	
				分散 $\sigma^2$			15.808	0.134		2.513	
				標準偏差 $\sigma$			3.976	0.365		1.585	
				変動係数 COV			0.741	0.370		0.625	

表 6 試算結果一覧

	$k_H$ に乗ずるばらつき	$M_1$ (kN・m)	$M_2$ (kN・m)	$\sigma_c$ (N・mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (N・mm <sup>2</sup> )	$P_{max}$ (kN)	$P_{min}$ (kN)	$\delta_{fx}$ (mm)
基本値ケース	1.00	-251.20	120.52	203.02	113.65	2375.33	-562.41	14.96
杭の水平載荷試験	0.69	-297.25	124.12	220.60	131.23	2412.20	-599.29	18.93
	0.75	-287.19	123.23	216.76	127.39	2404.15	-591.23	18.00
	1.25	-224.30	119.03	192.77	103.40	2353.84	-540.92	12.99
	1.31	-219.10	118.81	190.78	101.41	2349.68	-536.76	12.64
	0.09	-614.14	171.63	341.51	252.14	2665.71	-852.80	74.17
孔内水平載荷試験	0.26	-436.94	140.25	273.90	184.53	2523.95	-711.03	36.46
	1.74	-185.99	117.87	178.15	88.78	2323.19	-510.27	10.58
	1.91	-175.72	117.78	174.23	84.86	2314.97	-502.06	10.00
N値(E0=2,800N)	0.55	-328.63	127.16	232.57	143.20	2437.30	-624.38	22.10
	0.63	-309.75	125.28	225.37	136.00	2422.20	-609.28	20.15
	1.37	-213.56	118.59	188.67	99.30	2345.25	-532.33	12.27
	1.45	-206.70	118.35	186.05	96.68	2339.76	-526.84	11.83
原位置せん断摩擦試験	0.23	-452.46	142.43	279.82	190.45	2536.37	-723.45	39.00
	0.38	-381.37	133.09	252.70	163.32	2479.49	-666.57	28.40
	1.62	-193.83	118.01	181.15	91.77	2329.46	-516.55	11.04
	1.77	-184.42	117.85	177.55	88.18	2321.93	-509.02	10.49

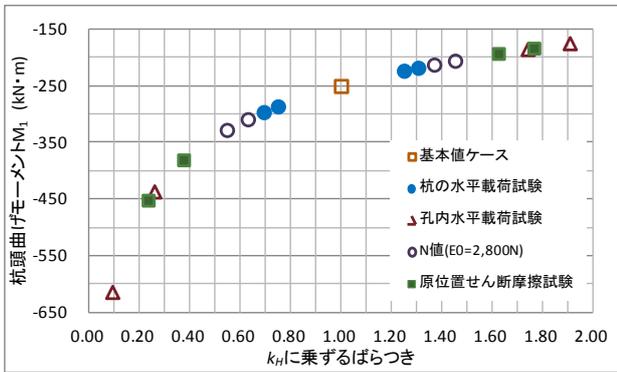


図 3 杭頭曲げモーメント  $M_1$  の分布

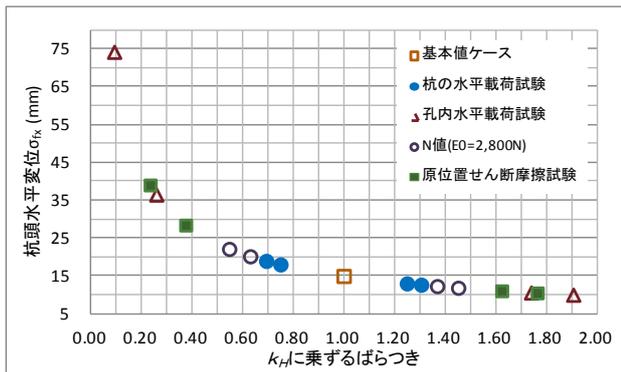


図 4 試算結果杭頭水平変位  $\delta_{fx}$  の分布

ケースに対してばらつきを与えているのは、地盤の変形係数から水平地盤反力係数  $k_H$  に換算する際のモデル誤差を 25% と仮定したためである。

なお、「道路橋下部構造の部分係数設計法に関する研究」において設定している砂質土及び粘性土にお

ける水平地盤反力係数  $k_H$  の推定誤差は、原位置試験（平板載荷試験、孔内水平載荷試験など）から推定される水平地盤反力係数  $k_H$  のばらつきを  $COV=0.45$ 、標準貫入試験  $N$  値から変形係数を推定する場合のばらつきを地層により  $COV=0.60\sim 1.00$  としている。

水平地盤反力係数  $k_H$  の推定方法によるばらつき度合いは、砂質土および粘性土、特殊土（泥炭、火山灰）のいずれにおいても原位置試験による推定の方が標準貫入試験  $N$  値による推定よりも小さいと考えられるが、本試算で使用した水平地盤反力係数  $k_H$  のばらつき度合いは逆となっており、標準貫入試験  $N$  値による推定のばらつきは比較的小さくなっている。（表 4）。これは、ばらつきの設定に使用した杭の静的水平載荷試験および各種原位置試験の試験箇所数が 4 箇所と少ないことに起因すると考えられ、本試算結果を考察する際には、設定された変動係数  $COV$  が不十分な標本数から推定されたものであることに留意しなければならない<sup>10)~11)</sup>。

### 3. 4 試算結果

基本ケース及び水平地盤反力係数  $k_H$  をばらつかせた 16 ケース、計 17 ケースについて試算を実施した。試算結果（杭頭曲げモーメント  $M_1$ (kN・m)、地中部曲げモーメント  $M_2$ (kN・m)、杭体曲げ圧縮応力度  $\sigma_c$ (N/mm<sup>2</sup>)、杭体曲げ引張り応力度  $\sigma_t$ (N/mm<sup>2</sup>)、最大押し込み力  $P_{max}$ (kN)、最大引抜き力  $P_{min}$ (kN)、杭頭水平変位  $\delta_{fx}$ (mm))の一覧を表 6 に示す。

変動係数  $COV$  により水平地盤反力係数  $k_H$  をばらつかせると杭頭部曲げモーメント  $M_1$  への影響が顕著に表れる(図 3)。それによって杭頭水平変位  $\delta_{fx}$  が

表 7 各試算結果の変動係数 COV およびバイアス  $\lambda$

	変動係数COV							バイアス $\lambda$						
	$M_1$	$M_2$	$\sigma_c$	$\sigma_t$	$P_{max}$	$P_{min}$	$\delta_{fx}$	$M_1$	$M_2$	$\sigma_c$	$\sigma_t$	$P_{max}$	$P_{min}$	$\delta_{fx}$
杭の水平載荷試験	0.127	0.018	0.060	0.107	0.011	0.045	0.171	1.018	1.005	1.009	1.016	1.002	1.007	1.036
孔内水平載荷試験	0.673	0.172	0.318	0.568	0.057	0.240	1.635	1.325	1.109	1.153	1.274	1.027	1.116	1.954
N値( $E_0=2,800N$ )	0.197	0.030	0.093	0.166	0.017	0.070	0.278	1.043	1.012	1.020	1.036	1.004	1.015	1.087
原位置せん断摩擦試験	0.424	0.081	0.200	0.357	0.036	0.151	0.747	1.165	1.049	1.078	1.139	1.014	1.059	1.389

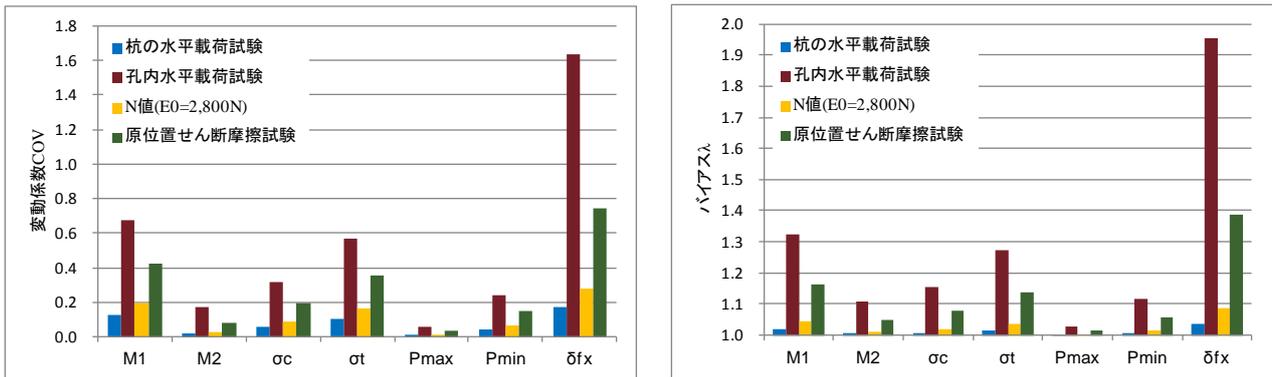


図 5 変動係数 COV およびバイアス  $\lambda$  変化による杭断面力

基本ケースに対して大きくなり(図 4)、水平地盤反力係数  $k_H$  のばらつきが最も大きい孔内水平載荷試験を想定したケースでは、基本ケースに対して最大で 4.96 倍にも及ぶ。杭体応力度は曲げ圧縮よりも曲げ引張りの方が大きく影響し、杭の押し込み力および引抜き力の影響は比較的小さくなっていることが分かる。各計算値における水平地盤反力係数  $k_H$  のばらつきの影響を変動係数 COV 及びバイアス  $\lambda$  で表わす(表 7・図 5)。

#### 4. まとめ

本研究では、火山灰質地盤における静的水平地盤反力係数評価のための試験・調査方法に関して考察し、さらに、その結果から算出したそれぞれの水平地盤反力係数  $k_H$  の推定精度が杭の設計に与える影響について考察した。

- 1) 過去に実施された火山灰質地盤における杭載荷試験から、原位置試験結果による水平地盤反力係数  $k_H$  の推定精度は標準貫入試験(SPT)による N 値ならびに PS 検層において高い傾向にあ

るといった評価になった。

- 2) 水平地盤反力係数  $k_H$  のばらつきによる杭基礎設計への影響は、杭頭曲げモーメント  $M_1$  において最も顕著に生じることから、杭頭水平変位  $\delta_{fx}$  が基本ケースに比較して非常に大きくなり、許容値を大幅に超過する可能性がある。
- 3) 試験・調査および試算から、火山灰質地盤における構造物基礎の耐震性能評価にあたり、水平地盤反力係数  $k_H$  を的確に評価することが重要であることが示唆された。水平地盤反力係数  $k_H$  の推定方法によるばらつきの評価が適切でない場合、過大または過少に部分係数を設定することになるため、少数の試験結果からは合理的な杭基礎の設計を確立することはできない。合理的・経済的かつ安全性が十分確保された性能設計を確立するためには特殊土(泥炭・火山灰)地盤の杭の原位置試験結果を蓄積し、各試験・調査方法の適用性や地盤変状特性の杭基礎設計への影響について適切に把握する必要がある。

## 参考文献

- 1) 福島宏文:直接基礎構造物における地盤定数推定の留意点, 寒地土木研究所月報 第731号, pp.30-35, 2014.2
- 2) 江川拓也, 山梨高裕, 福島宏文, 富澤幸一:火山灰質地盤の液状化時における杭の水平地盤反力に関する研究, 寒地土木研究所月報 第738号, pp.2-13, 2014.11
- 3) Fukushima H, Nishimoto S, Tomisawa K, Miura S: Estimation of Bearing Capacity by the Large Scale Plate Loading Test, The 4th International Geotechnical Symposium, CD-ROM, 2011.7
- 4) 福島宏文, 西本 聡, 富澤幸一, 三浦清一:平板載荷試験による地盤の支持力推定法に関する研究, 第46回地盤工学研究発表会, pp.1181-1182, 2011.7
- 5) 江川拓也, 西本 聡, 富澤幸一, 福島 宏文:深礎杭の周面抵抗力設計法の検証, 第29回日本道路会議, CD-ROM, 2011.11
- 6) 福島宏文, 西本 聡, 富澤幸一:直接基礎構造物の支持力照査方法について, 第29回日本道路会議, CD-ROM, 2011.11
- 7) 福島宏文, 西本 聡, 富澤幸一:原位置せん断摩擦試験による設計定数推定に関する考察, 第52回地盤工学会北海道支部技術報告会, pp.169-172, 2012.1
- 8) 福島宏文, 西本 聡, 富澤幸一, 三浦清一:原位置試験による地盤反力係数推定法に関する考察, 第47回地盤工学研究発表会, pp.119-120, 2012.7
- 9) 福島宏文, 西本 聡, 富澤幸一, 三浦清一:原位置試験による水平地盤反力係数推定に関する考察, 第53回地盤工学会北海道支部年次技術報告会, pp.153-156, 2013.1
- 10) 福島宏文, 西本 聡, 富澤幸一:原位置試験による水平地盤反力係数推定方法に関する考察, 第48回地盤工学研究発表会, pp.327-328, 2013.7
- 11) 福島宏文, 山梨高裕, 富澤幸一:原位置試験による地盤反力係数推定に関する考察, 第54回地盤工学会北海道支部技術報告会, pp.15-18, 2014.10

# STUDY ON INVESTIGATION METHODS OF GROUND DEFORMATION CHARACTERISTICS FOR PERFORMANCE-BASED DESIGN OF FOUNDATIONS IN PROBLEM SOIL

**Budgeted :** Grants for operating expenses  
General account

**Research Period :** FY2011-2015

**Research Team :** Cold-Region Construction  
Engineering Research  
Group  
(Geotechnical Research)

**Author :** HAYASHI Hirochika  
TOMISAWA Koichi  
EGAWA Takuya

**Abstract :** A selection way of ground investigation method is surveyed for performance-based design of foundations in peaty and volcanic ground. In order to survey applicability and reliability of various ground investigation for problem soil such as SPT, in situ shear friction test, down hole lateral loading test, influence of coefficient of variation and bias on subgrade reaction calculated based on the above-mentioned various test results on probed with Monte Carlo calculation using lateral loading test results as a benchmark.

**Keywords :** peat, volcanic soil, earthquake, pile foundation, reinforcement against earthquake