

調査法や施工法の精度・品質に応じた道路橋下部構造の信頼性評価技術に関する研究

研究予算：運営交付金（一般勘定）

研究期間：平 25～平 27

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：七澤利明、河野哲也、谷本俊輔

【要旨】

道路橋基礎や橋台の施工時・地震時に生じる不具合は、地盤調査や施工品質の精度・不足が要因となる例が少なくない。このため、これまでの道路橋示方書改定では調査や施工に関する規定の見直しや充実を行ってきたところ、こうした地盤調査の充実や高度化された施工管理方法の適用により、構造物の信頼性は向上するものの、一般には調査・施工の手間やコストの増加等が生じることとなる。一方で、信頼性の向上に見合った設計の合理化を行う手法がないことが課題となっている。

道路橋示方書の次期改定では、従来の許容応力度設計法から部分係数設計法へ転換を図る予定である。部分係数設計法の書式では、ばらつきの要因ごとに安全係数（部分係数）を設定することができ、調査法や施工法の信頼性に応じた部分係数の設定が可能となる。一方で、調査精度や施工品質に応じた信頼性の評価手法及び具体的な部分係数の設定手法についてはこれまで確立したものはない。このため、早期に評価・設定手法を検討・計算して基準に部分係数として反映することにより、調査精度や施工品質に応じた設計の合理化を可能とし、信頼性の高いインフラの整備に繋げていく必要がある。

平成 26 年度は、道路橋杭基礎の安定照査及び部材照査に用いる部分係数の設定を行うために、安定照査及び部材照査にかかわる部分係数の計算を行った。

キーワード：杭基礎、部材照査、地盤調査、地盤抵抗、

1. 試算対象基礎の試設計

現行の道路橋示方書に基づき、表-1.1 に示す 64 ケースの道路橋杭基礎の試設計を実施した。対象基礎は、各杭工法の杭の軸方向ばね定数 K_V のモデル誤差及び杭の極限支持力のモデル誤差に応じてグルーピングを行い、各杭工法における代表的な杭種を組み合わせ選定した。

試設計により決定した杭基礎諸元一覧を表-1.2 に示す。表右の曲げモーメント分布とは、現行設計法において杭体の曲げモーメントが以下のような性状になることを示している。

G-1：杭頭剛結とした場合の杭頭曲げモーメントが最大となる（図-1.1(a) 参照）

G-2：杭頭ヒンジとした場合の地中部曲げモーメントが最大となる（図-1.1(b) 参照）

G-3：杭頭剛結とした場合の地中部曲げモーメントが最大となる（図-1.1(c) 参照）

表-1.1 試設計対象基礎

K _V モデル誤差	平均値	鋼管ソイルセメント杭工法		回転杭工法	打撃工法	パイプロハ ンマ工法	中掘り杭工 法	プレボーリ ング杭工法	場所打ち杭 工法	部材耐力の ばらつき評価	ケース 数
		変動係数	代表値 (案)	変動係数	代表値 (案)	変動係数	代表値 (案)	変動係数	代表値 (案)		
グループ	平均値	1.00	1.03	0.99	0.97	0.97	0.98	1.14	1.14		
	変動係数	0.28	0.34	0.37	0.33	0.37	0.30	0.30	0.60		
	代表値	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.15		
極限支持力 モデル誤差	平均値	0.94	1.10	1.00		0.98	1.14	0.97	0.97		
	変動係数	0.13	0.17	0.29		0.27	0.27	0.21	0.21		
	代表値	1.00	1.10	1.00	1.00	1.10	1.00	1.00	1.00		
対応する杭種		鋼管ソイルセメント杭		鋼管杭				場所打ち杭			
鋼管ソイルセメント杭	橋脚	○									4
	橋台	○									4
	常時	○									4
鋼管杭	橋脚		○								4
	橋台		○								4
	常時		○								4
SC杭	橋脚					○					4
	橋台					○					4
	常時					○					4
PHC杭	橋脚					○					4
	橋台					○					4
	常時					○					4
場所打ち杭	橋脚							○			4
	橋台							○			4
	常時							○			4
杭頭反力及び 発生断面力の ばらつき評価	橋脚	□	□	□	□	□	□	□	□		
	橋台	□	□	□	□	□	□	□	□		
	常時	□	□	□	□	□	□	□	□		
○：地盤の硬数及び下部構造の高低を組み合わせた4ケースを実施 □：不確実性の評価											
Σ=64											

表-1.2 試設計により決定した杭基礎諸元一覧

■鋼管ソイルセメント杭工法

杭工法	杭種	下部構造形式	荷重ケース	試験対象基礎ケース名	地域区分	地盤種別	設計水平変位 k_h	主たる地盤の種類	平均N値	下部構造高さ(m)		杭径(ソイル径)(mm)	杭長(m)	板厚(mm)	種類	杭配置	杭列数LG(列)	杭列数TR(列)	杭本数(本)	地盤の変形係数 E_b (kN/m^2)	曲げモーメント分布	
										低	高											
鋼管ソイルセメント杭工法	鋼管ソイルセメント杭	橋脚	レベル1地震時	P-01-SPSC	A2	II	0.25	粘性土	軟	3	低	7.0	900	20.0	13	SKK400	整列	4	2	8	2100	G-1
				P-02-SPSC	A2	II	0.25	粘性土	軟	3	高	15.0	1200	20.0	11	SKK400	整列	4	2	8	2100	G-1
				P-03-SPSC	A2	II	0.25	砂質土	硬	12	低	7.0	1000	20.0	17	SKK400	整列	2	2	4	8400	G-3
				P-04-SPSC	A2	II	0.25	砂質土	硬	12	高	15.0	1400	20.0	20	SKK400	整列	2	2	4	8400	G-3
		A-01-SPSC	A2	II	0.25	粘性土	軟	4	低	8.0	800	20.0	18	SKK400	整列	3	4	12	2800	G-1		
		A-02-SPSC	A2	II	0.25	粘性土	軟	4	高	12.0	1100	20.0	17	SKK400	整列	3	5	15	2800	G-1		
		A-03-SPSC	A2	II	0.25	砂質土	硬	15	低	8.0	900	15.0	14	SKK490	整列	2	3	6	10500	G-2		
		A-04-SPSC	A2	II	0.25	砂質土	硬	15	高	12.0	1300	15.0	16	SKK490	整列	2	6	12	10500	G-3		
	鋼管ソイルセメント杭	橋台	レベル1地震時	A-05-SPSC	A2	II	0.25	粘性土	軟	4	低	8.0	1200	20.0	13	SKK400	整列	2	3	6	2800	G-1
				A-06-SPSC	A2	II	0.25	粘性土	軟	4	高	12.0	1400	20.0	15	SKK400	整列	2	4	8	2800	G-1
				A-07-SPSC	A2	II	0.25	砂質土	硬	20	低	8.0	800	20.0	18	SKK490	千鳥	3	3	5	14000	G-2
				A-08-SPSC	A2	II	0.25	砂質土	硬	20	高	12.0	1300	20.0	18	SKK490	千鳥	3	3	5	14000	G-3
			常時	A-05-SPSC	A2	II	0.25	粘性土	軟	4	低	8.0	1200	20.0	13	SKK400	整列	2	3	6	2800	G-1
				A-06-SPSC	A2	II	0.25	粘性土	軟	4	高	12.0	1400	20.0	15	SKK400	整列	2	4	8	2800	G-1
				A-07-SPSC	A2	II	0.25	砂質土	硬	20	低	8.0	800	20.0	18	SKK490	千鳥	3	3	5	14000	G-2
				A-08-SPSC	A2	II	0.25	砂質土	硬	20	高	12.0	1300	20.0	18	SKK490	千鳥	3	3	5	14000	G-3

■回転杭工法

杭工法	杭種	下部構造形式	荷重ケース	試験対象基礎ケース名	地域区分	地盤種別	設計水平変位 k_h	主たる地盤の種類	平均N値	下部構造高さ(m)		杭径(mm)	杭長(m)	板厚(mm)	種類	杭配置	杭列数LG(列)	杭列数TR(列)	杭本数(本)	地盤の変形係数 E_b (kN/m^2)	曲げモーメント分布	
										低	高											
回転杭工法	鋼管杭	橋脚	レベル1地震時	P-01-SPP(回)	A2	II	0.25	粘性土	軟	2	低	7.0	700	20.0	10	SKK400	千鳥	4	3	10	1400	G-1
				P-02-SPP(回)	A2	II	0.25	粘性土	軟	2	高	15.0	900	20.0	12	SKK400	千鳥	4	3	10	1400	G-2
				P-03-SPP(回)	A2	II	0.25	砂質土	硬	15	低	7.0	500	20.0	11	SKK400	整列	3	5	15	10500	G-3
				P-04-SPP(回)	A2	II	0.25	砂質土	硬	15	高	15.0	1000	20.0	18	SKK490	整列	2	3	6	10500	G-3
		橋台	常時	A-05-SPP(回)	A2	II	0.25	粘性土	軟	4	低	8.0	900	20.0	15	SKK400	整列	2	3	6	2800	G-1
				A-06-SPP(回)	A2	II	0.25	粘性土	軟	4	高	12.0	900	20.0	17	SKK400	整列	3	4	12	2800	G-1
				A-07-SPP(回)	A2	II	0.25	砂質土	硬	20	低	8.0	800	20.0	12	SKK490	千鳥	3	3	5	14000	G-2
				A-08-SPP(回)	A2	II	0.25	砂質土	硬	20	高	12.0	1200	20.0	16	SKK490	千鳥	3	3	5	14000	G-3

■打込み杭工法

杭工法	杭種	下部構造形式	荷重ケース	試験対象基礎ケース名	地域区分	地盤種別	設計水平変位 k_h	主たる地盤の種類	平均N値	下部構造高さ(m)		杭径(mm)	杭長(m)	板厚(mm)	種類	杭配置	杭列数LG(列)	杭列数TR(列)	杭本数(本)	地盤の変形係数 E_b (kN/m^2)	曲げモーメント分布	
										低	高											
打込み杭工法	鋼管杭	橋脚	レベル1地震時	P-01-SPP(打)	A2	II	0.25	粘性土	軟	2	低	7.0	800	20.0	9	SKK400	千鳥	4	3	10	1400	G-1
				P-02-SPP(打)	A2	II	0.25	粘性土	軟	2	高	15.0	1000	20.0	10	SKK400	整列	4	3	10	1400	G-1
				P-03-SPP(打)	A2	II	0.25	砂質土	硬	16	低	7.0	900	20.0	9	SKK400	整列	2	4	8	11200	G-3
				P-04-SPP(打)	A2	II	0.25	砂質土	硬	16	高	15.0	1200	20.0	12	SKK400	整列	2	4	8	11200	G-3
		橋台	常時	A-01-SPP(打)	A2	II	0.25	粘性土	軟	3	低	8.0	600	20.0	11	SKK400	整列	3	6	18	2100	G-1
				A-02-SPP(打)	A2	II	0.25	粘性土	軟	3	高	12.0	800	20.0	14	SKK400	整列	4	6	24	2100	G-1
				A-03-SPP(打)	A2	II	0.25	砂質土	硬	20	低	8.0	900	25.0	12	SKK400	整列	2	4	8	14000	G-3
				A-04-SPP(打)	A2	II	0.25	砂質土	硬	20	高	12.0	1200	25.0	15	SKK400	整列	2	5	10	14000	G-3

■中掘り杭工法

杭工法	杭種	下部構造形式	荷重ケース	試験対象基礎ケース名	地域区分	地盤種別	設計水平変位 k_h	主たる地盤の種類	平均N値	下部構造高さ(m)		杭径(mm)	杭長(m)	板厚(mm)	種類	杭配置	杭列数LG(列)	杭列数TR(列)	杭本数(本)	地盤の変形係数 E_b (kN/m^2)	曲げモーメント分布	
										低	高											
中掘り杭工法	P-HC杭	橋脚	レベル1地震時	P-01-PHC(中)	A2	II	0.25	粘性土	軟	2	低	7.0	700	20.0	100	C種	整列	4	3	10	1400	G-1
				P-02-PHC(中)	A2	II	0.25	粘性土	軟	2	高	15.0	900	20.0	120	B種	整列	4	3	10	1400	G-1
				P-03-PHC(中)	A2	II	0.25	砂質土	硬	13	低	7.0	500	20.0	80	B種	整列	4	5	20	9100	G-2
				P-04-PHC(中)	A2	II	0.25	砂質土	硬	13	高	15.0	700	20.0	100	B種	整列	4	5	20	9100	G-3
		橋台	常時	A-01-SC(中)	A2	II	0.25	粘性土	軟	4	低	8.0	1000	20.0	130/8	SKK400	千鳥	3	5	8	2800	G-1
				A-02-SC(中)	A2	II	0.25	粘性土	軟	4	高	12.0	1100	20.0	140/9	SKK400	千鳥	3	9	14	2800	G-2
				A-03-SC(中)	A2	II	0.25	砂質土	硬	20	低	8.0	800	20.0	110/9	SKK400	整列	2	4	8	14000	G-3
				A-04-SC(中)	A2	II	0.25	砂質土	硬	20	高	12.0	1100	20.0	140/14	SKK400	整列	2	4	8	14000	G-3
	橋台	常時	A-05-SC(中)	A2	II	0.25	粘性土	軟	3	低	8.0	600	20.0	90/6	SKK400	整列	3	6	18	2100	G-1	
			A-06-SC(中)	A2	II	0.25	粘性土	軟	3	高	12.0	1000	20.0	130/6	SKK400	整列	3	4	12	2100	G-1	
			A-07-SC(中)	A2	II	0.25	砂質土	硬	20	低	8.0	800	20.0	110/4.5	SKK400	千鳥	3	5	8	14000	G-3	
			A-08-SC(中)	A2	II	0.25	砂質土	硬	20	高	12.0	800	20.0	110/6	SKK400	千鳥	3	9	14	14000	G-3	

■プレローリング杭工法

杭工法	杭種	下部構造形式	荷重ケース	試験対象基礎ケース名	地域区分	地盤種別	設計水平変位 k_h	主たる地盤の種類	平均N値	下部構造高さ(m)		杭径(mm)	杭長(m)	厚さ(mm)	種別	杭配置	杭列数LG(列)	杭列数TR(列)	杭本数(本)	地盤の変形係数 E_b (kN/m^2)	曲げモーメント分布	
										低	高											
プレローリング杭工法	S-C杭	橋脚	レベル1地震時	P-01-SC(プ)	A2	II	0.25	粘性土	軟	2	低	7.0	800	20.0	110/6	SKK400	整列	4	2	8	1400	G-1
				P-02-SC(プ)	A2	II	0.25	粘性土	軟	2	高	15.0	1000	20.0	130/7	SKK400	整列	4	2	8	1400	G-1
				P-03-SC(プ)	A2	II	0.25	砂質土	硬	13	低	7.0	800	20.0	110/6	SKK400	整列	2	3	6	9100	G-3
				P-04-SC(プ)	A2	II	0.25	砂質土	硬	13	高	15.0	1100	20.0	140/11	SKK400	整列	2	3	6	9100	G-3
		橋台	常時	A-01-PHC(プ)	A2	II	0.25	粘性土	軟	4	低	8.0	1000	20.0	130	C種	千鳥	3	7	11	2800	G-1
				A-02-PHC(プ)	A2	II	0.25	粘性土	軟	4	高	12.0	1200	20.0	150	C種	整列	3	5	15	2800	G-1
				A-03-PHC(プ)	A2	II	0.25	砂質土	硬	18	低	8.0	1000	20.0	130	C種	整列	2	3	6	12600	G-3
				A-04-PHC(プ)	A2	II	0.25	砂質土	硬	18	高	12.0	1200	20.0	150	C種	整列	2	4	8	12600	G-3
	橋台	常時	A-05-PHC(プ)	A2	II	0.25	粘性土	軟	3	低	8.0	900	20.0	120	C種	整列	2	5	10	2100	G-1	
			A-06-PHC(プ)	A2	II	0.25	粘性土	軟	3	高	12.0	1100	20.0	140	C種	整列	3	4	12	2100	G-1	
			A-07-PHC(プ)	A2	II	0.25	砂質土	硬	18	低	8.0	1100	20.0	140	B種	千鳥	3	3	5	12600	G-2	
			A-08-PHC(プ)	A2	II	0.25	砂質土	硬	18	高	12.0	800	20.0	110	C種	千鳥	3	9	14	12600	G-3	

■場所打ち杭工法

杭工法	杭種	下部構造形式	荷重ケース	試験対象基礎ケース名	地域区分	地盤種別	設計水平変位 k_h	主たる地盤の種類	平均N値	下部構造高さ(m)	
-----	----	--------	-------	------------	------	------	--------------	----------	------	-----------	--

性要素のモデル誤差に関する確率モデルを表-1.3 に示す。杭の軸方向ばね定数 K_V (道床改定案) の不確実性要素のモデル誤差に関する確率モデルは、表-1.1 に示したとおりである。

なお、モンテカルロシミュレーション回数は 1000 回とした。

表-1.3 水平方向地盤反力係数 k_H のモデル誤差の確率モデル (対数正規分布)

検討ケース	平均	変動係数
Case-1	1.0	0.25
Case-2		0.45
Case-3		0.60
Case-4		0.70
Case-5		1.00
Case-6	4.0	1.00

水平方向地盤反力係数 k_H 及び杭の軸方向ばね定数 K_V の不確実性による杭体の曲げモーメントへの影響の例を図-1.1 に示す。

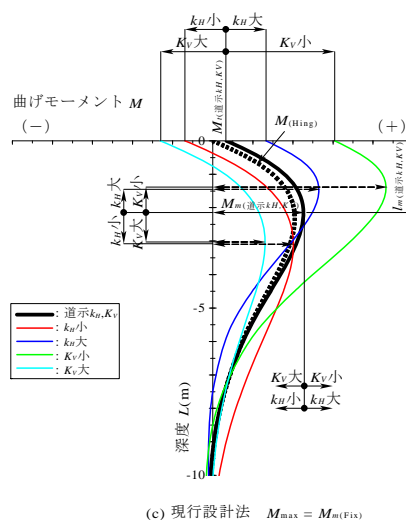


図-1.1 水平方向地盤反力係数及び杭の軸方向ばね定数の不確実性による杭体曲げモーメントへの影響の例

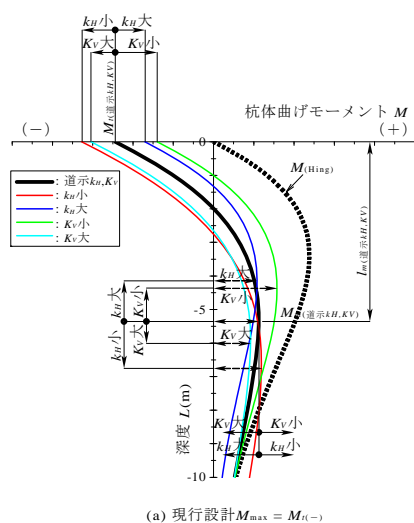
- b) 杭体の耐力に影響を与える不確実性要素
- ・杭のコンクリートの強度及びヤング係数
 - ・杭の鋼材の強度及びヤング係数
 - ・軸力

杭体の耐力の不確実性の評価にあたっては、a) の不確実性による軸力のばらつきの影響を同時に考慮する。なお PHC 杭のプレストレス量については、調査の結果、統計データがないことから確定値とした。

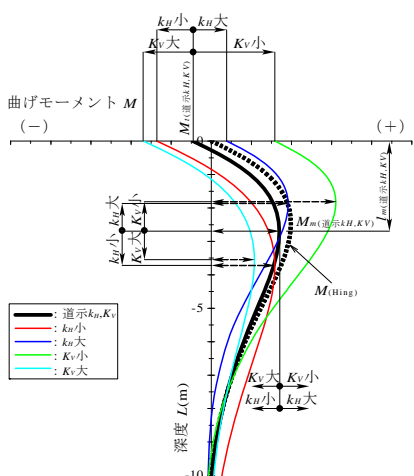
場所打ち杭、PHC 杭、SC 杭及び鋼管の材料等のばらつきに関する統計量は、既往の研究¹⁾を参考に、表-1.4~表-1.7 とした。

3. 部分係数の計算

モンテカルロシミュレーションから得られた応答値 (杭頭鉛直反力、杭頭水平変位、発生断面力) のばらつき及び抵抗値 (鉛直支持力、弾性限界変位、杭体の耐力) のばらつきに関する統計量を用いて、杭基礎の安定照査及び部材照査に関して目標信頼性指標 β_T を達成するために必要な部分係数を計算した。なお、目標信頼性指標 β_T はこれまで施工実績が多い杭工法 (打込み杭工法、中掘り杭工法、場所打ち杭工法) における試算対象基礎が有する Case-3 (N 値 5 以上の砂質土で標準貫入試験の N 値から変形係数を推定した場合) の信頼性指標 β を目安に設定した。



(a) 現行設計 $M_{max} = M_{(-)}$



(b) 現行設計 $M_{max} = M_{(Hing)}$

表-1.4 場所打ち杭の構造材料等(公称値に対する比)のばらつきに関する統計量(正規分布)

	特性値(公称値)	平均 μ	変動係数 COV
場所打ち杭のコンクリート強度 σ_{ck}	24 N/mm ²	1.4 ^{*1}	0.18 ^{*1}
コンクリートのヤング係数 E_c	2.5×10 ⁴ N/mm ²	コンクリート強度に依存 ^{*2}	
鉄筋の降伏点強度 σ_{sy}	345 N/mm ²	1.14 ^{*3}	0.04 ^{*3}
鉄筋のヤング係数 E_s	2.0×10 ⁵ N/mm ²	確定値 ^{*3}	確定値 ^{*3}
断面寸法, 鉄筋量及び位置	公称値	確定値	確定値

※1) (社) 日本基礎建設協会が収集した場所打ち杭のコア強度の調査データより, 下記のように設定した。

※2) コンクリートのヤング係数は, 道示・I 共通編, 表-3.3.3 に示されるコンクリートの強度とヤング係数の関係に基づき, コンクリート強度に応じて求める。

※3) コンクリート橋の部分係数の検討に用いている値に合わせた。

表-1.5 PHC 杭の構造材料等(公称値に対する比)のばらつきに関する統計量(正規分布)

	特性値(公称値)	平均 μ	変動係数 COV
PHC 杭のコンクリート強度 σ_{ck}	80 N/mm ²	1.18	0.03
コンクリートのヤング係数 E_c	4.0×10 ⁴ N/mm ²	確定値	確定値
PC 鋼材の降伏点強度 σ_{py}	1275 N/mm ²	1.03 ^{*1}	0.01 ^{*1}
PC 鋼材の引張強度 σ_{pu}	1420 N/mm ²	1.03 ^{*1}	0.01 ^{*1}
PC 鋼材のヤング係数 E_p	2.0×10 ⁵ N/mm ²	確定値	確定値
有効プレストレス σ_{ce}	公称値	確定値	確定値
断面寸法, PC 鋼材量及び位置	公称値	確定値	確定値

※1) コンクリート橋の部分係数の検討に用いている値に合わせた。降伏点強度は, 引張強度と独立したのではなく依存したものと考える。

表-1.6 SC 杭の構造材料等(公称値に対する比)のばらつきに関する統計量(正規分布)

	特性値(公称値)	平均 μ	変動係数 COV
鋼管の降伏点強度 σ_{sy}	(SKK400)235 N/mm ² (SKK490)315 N/mm ²	1.33	0.07
鋼管のヤング係数 E_s	2.0×10 ⁵ N/mm ²	確定値	確定値
鋼管径 D	公称値	確定値	確定値
厚さ t	公称値	確定値	確定値
コンクリート強度 σ_{ck}	80 N/mm ²	1.18	0.03
コンクリートのヤング係数 E_c	3.5×10 ⁴ N/mm ²	確定値	確定値

※) 部材の耐力算定にあたっては, 腐食代 1mm を考慮する。

表-1.7 鋼管の構造材料等(公称値に対する比)のばらつきに関する統計量(正規分布)

	特性値(公称値)	平均 μ	変動係数 COV
鋼管の降伏点強度 σ_{sy}	(SKK400)235 N/mm ² (SKK490)315 N/mm ²	1.33	0.07
鋼管のヤング係数 E_s	2.0×10 ⁵ N/mm ²	確定値	確定値
鋼管径 D	公称値	確定値	確定値
厚さ t	公称値	確定値	確定値

※) 部材の耐力算定にあたっては, 腐食代 1mm を考慮する。

1) 杭の鉛直支持力に対する部分係数

杭の鉛直支持力に対する照査式は、地盤抵抗の弾性限界点に対する照査として、照査式としては式(1.3.1)及び式(1.3.2)に示す通りとした。

常時：

$$P \leq \Phi R_{cy} \dots\dots\dots(1.3.1)$$

レベル1地震時：

$$P \leq \Phi R_{cy} \dots\dots\dots(1.3.2)$$

ここに、

P ：杭頭鉛直反力

R_{cy} ：降伏押し込み支持力で、ここでは $R_{cy}=0.63R_{cu}$ とする。

R_{cu} ：地盤から決まる極限支持力

各試算対象基礎が有する降伏押し込み支持力に対する信頼性指標 β は、モンテカルロシミュレーションから得られた杭頭最大鉛直反力のばらつきに関する統計量及び降伏押し込み支持力のばらつきに関する統計量より、表-1.3に示した水平方向地盤反力係数 k_H のばらつきに応じて、図-1.2および図-1.3のように得られた。なお、図-1.2、図-1.3はそれぞれ、「地盤の硬軟」及び「下部構造高さの高低」により区分して示したものであるが、これらの要因が結果に影響しないことが分かる。一方で、杭工法によっては有意な違いが生じており、杭の鉛直方向ばね定数が押し込み支持力の照査に大きな影響を与えていることが分かる。また、地盤調査法によっても有意な値が得られており、軟弱な地盤に対して k_H を N 値から求めた場合は信頼性指標が低い。

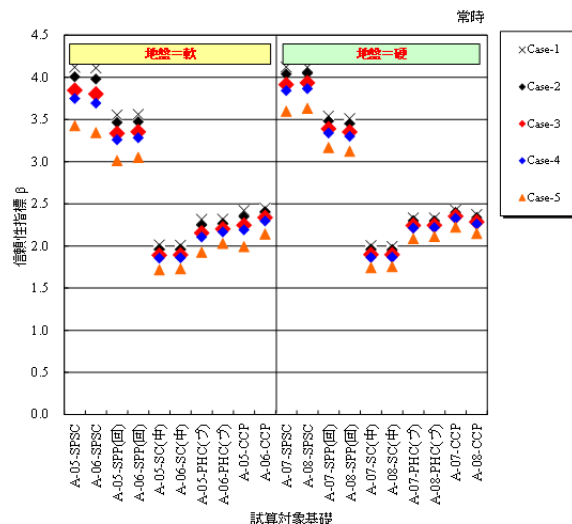


図-1.2 降伏押し込み支持力に対する信頼性指標 (地盤の硬軟で区分)

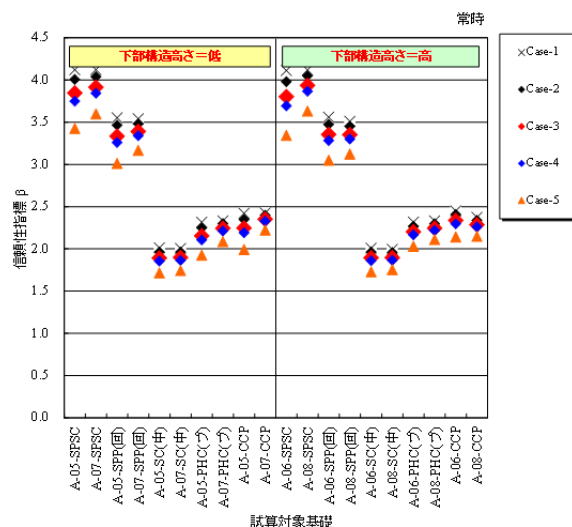
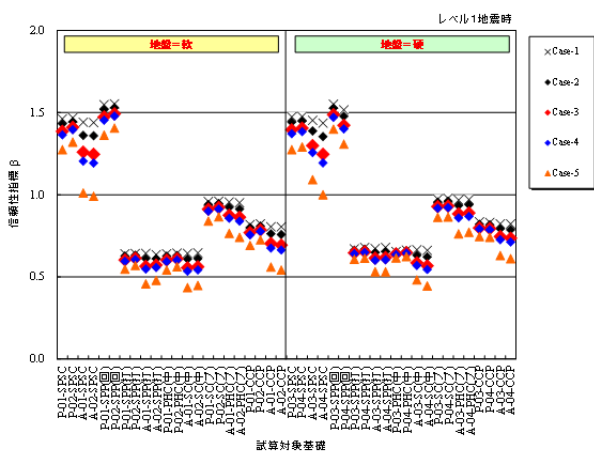
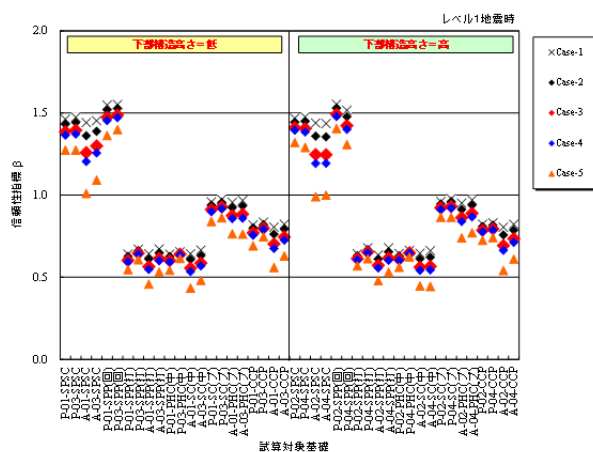


図-1.3 降伏押し込み支持力に対する信頼性指標 (下部構造高さの高低で区分)

これまで施工実績が多い杭工法（打込み杭工法，中掘り杭工法，場所打ち杭工法）の試算対象基礎が有する信頼性指標 β は，レベル1地震時においては0.6程度，常時においては2.0程度であったため，目標信頼性指標 β_T は次のように設定した。

レベル1地震時：目標信頼性指標 $\beta_T=0.6$
 常時：目標信頼性指標 $\beta_T=2.0$

設定した目標信頼性指標 β_T に基づき，全て支持力側に考慮した部分係数（抵抗係数 Φ ）を杭工法ごとに表1-8のように計算した。なお，前述の通り k_H の推定方法によって支持力評価の不確実性に違いがあり， N 値から推定した場合で，その N 値が5未満の場合にはばらつきが大きい。そのため，地盤の変形係数を標準貫入試験の N 値から推定した場合で，その N 値が5未満の場合には抵抗係数に0.95の補正係数を乗じる場合も合わせて示した。

表-1.8 降伏押込み支持力に対する抵抗係数 Φ の計算値

杭工法	レベル1地震時	常時
鋼管ソイルセメント杭工法	0.90 (0.855)	0.70 (0.665)
回転杭工法	0.95 (0.903)	0.70 (0.665)
打込み杭工法	0.80 (0.760)	0.50 (0.475)
中掘り杭工法	0.80 (0.760)	0.50 (0.475)
プレボーリング杭工法	0.85 (0.808)	0.55 (0.523)
場所打ち杭工法	0.80 (0.760)	0.55 (0.523)

※()内は抵抗係数 Φ に補正係数 0.95 を乗じた値を示す。

2) 杭の水平変位に対する部分係数

杭の水平変位に対する照査式は，地盤抵抗の弾性限界点に対する照査として，照査式としては式(1.3.3)に示す通りとした。

$$\Psi d \leq \Phi d_y \dots\dots\dots (1.3.3)$$

ここに，

- Ψ ：杭頭水平変位の設計値に乘じる部分係数
- d ：杭頭水平変位の設計値
- Φ ：地盤の弾性限界変位の特性値に乘じる部分係数
- d_y ：地盤の弾性限界変位の特性値で，杭径の5.5%とする。なお，鋼管ソイルセメント杭の場合にはソイルセメント柱径の5.5%とする。

検討に用いた地盤の弾性限界変位レベル（杭径に対する比）のばらつきに関する統計量は，次のとおりである。

- (1) 杭工法を区分しない場合（全杭工法）
 弾性限界変位レベルの平均値=0.055，変動係数=0.50
- (2) 非複合杭と複合杭（鋼管ソイルセメント杭，プレボーリング杭）を区分した場合
 【非複合杭】弾性限界変位レベルの平均値=0.060，
 変動係数=0.45
 【複合杭】弾性限界変位レベルの平均値=0.035，
 変動係数=0.40

各試算対象基礎が有する弾性限界変位に対する信頼性指標 β は，モンテカルロシミュレーションから得られた杭頭変位のばらつきに関する統計量及び弾性限界変位のばらつきに関する統計量より，表-1.3に示した水平方向地盤反力係数 k_H のばらつきに応じて，レベル1地震時については図-1.4（地盤の硬軟で区分）及び図-1.5（下部構造高さの高低で区分）のように得られ，常時については図-1.6（地盤の硬軟で区分）及び図-1.7（下部構造高さの高低で区分）のように得られた。

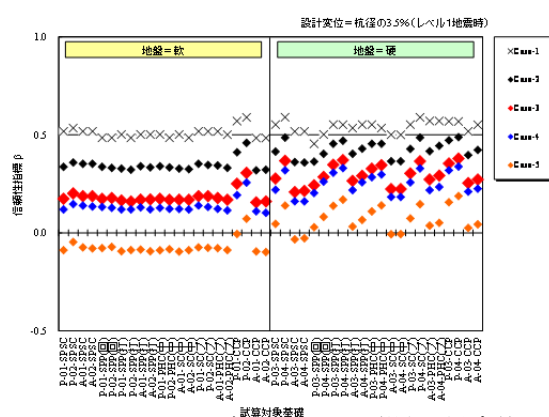
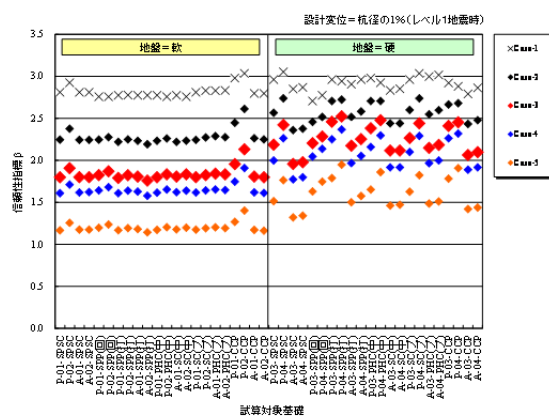


図-1.4 レベル1地震時における弾性限界変位に対する信頼性指標（地盤の硬軟で区分）

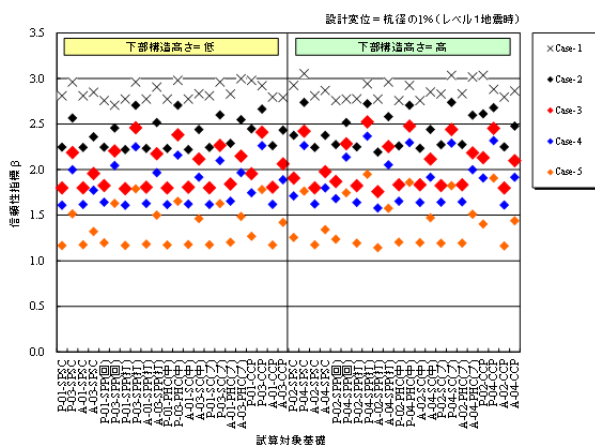


図-1.5 レベル1地震時における弾性限界変位に対する信頼性指標（下部構造高さの高低で区分）

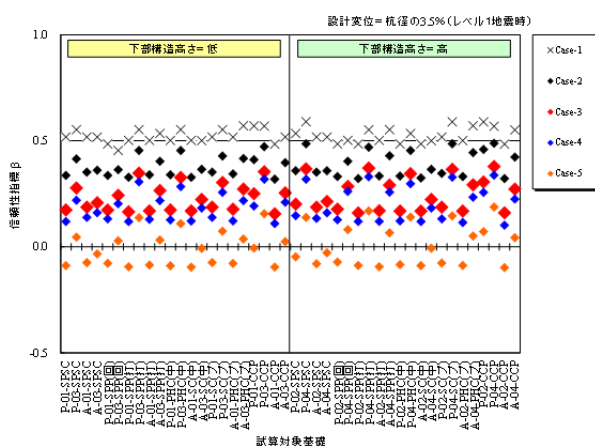


図-1.6 常時における弾性限界変位に対する信頼性指標（地盤の硬軟で区分）

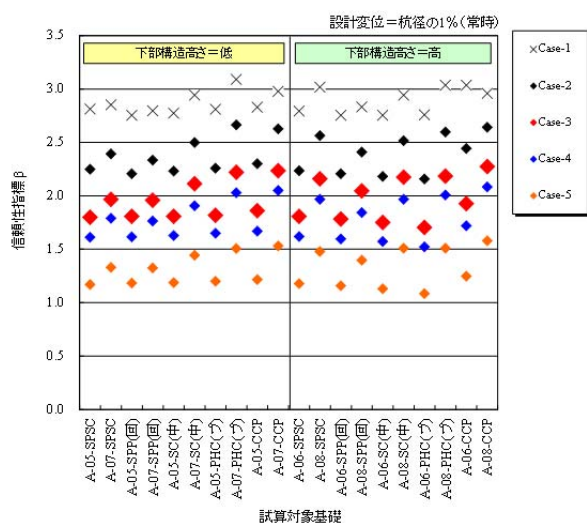


図-1.7 常時における弾性限界変位に対する信頼性指標（下部構造高さの高低で区分）

図-1.5、図-1.7に示したように、下部構造高さの高低による違いは大きくない一方で、図-1.4や図-1.6に示したように、地盤の硬軟によっては推定精度が異なり、地盤が硬いほど β が大きく、信頼性が高くなる。また、杭の工法によっても β に違いがあり、非複合杭の方が信頼性が高い。

以上の結果を踏まえ、目標信頼性指標を決定する。これまで施工実績が多い杭工法（打込み杭工法、中掘り杭工法、場所打ち杭工法）の試算対象基礎が有する信頼性指標 β は、荷重組合せによらず、変位レベルが杭径の3.5%の場合には0.25程度、変位レベルが杭径の1%の場合には2.0程度であったため、目標信頼性指標 β_T は次のように設定した。なお、部分係数を非複合杭と複合杭で区分して試算する場合においても、目標信頼性指標は同じとした。

変位の制限値=杭径の1% : 目標信頼性指標 $\beta_T=2.0$
 変位の制限値=杭径の3.5%: 目標信頼性指標 $\beta_T=0.5$

設定した目標信頼性指標 β_T に基づき、部分係数を表-1.9及び表-1.10のように計算した。

表-1.9 (杭工法を区分しない場合) 杭頭水平変位の照査に用いる部分係数の計算値

水平方向地盤反力係数又は地盤の変形係数の推定方法	杭頭変位の制限値 (永続作用が支配的な状況、または、変動作用のうち、地震の影響を考慮しない状況)		杭頭変位の制限値 (変動作用のうち地震の影響を考慮する状況)		
	応答変位側 Ψ	許容変位側 Φ	応答変位側 Ψ	許容変位側 Φ	
水平载荷試験	0.60	0.18	0.95	0.60	
孔内水平载荷試験又は室内試験	0.80		1.00		
SPT-N値のみ	(砂質土, N 値 ≥ 5)		1.00		1.15
	(粘性土, N 値 ≥ 5)		1.15		1.20
	(N 値 < 5)		1.85		1.50
目標信頼性指標 β_T	2.0		0.5		

表-1.10 (杭工法を区分する場合) 杭頭水平変位の照査に用いる部分係数の計算値

水平方向地盤反力係数又は地盤の変形係数の推定方法	杭頭変位の制限値 (永続作用が支配的な状況、または、変動作用のうち、地震の影響を考慮しない状況)		杭頭変位の制限値 (変動作用のうち地震の影響を考慮する状況)		
	応答変位側 Ψ	許容変位側 Φ	応答変位側 Ψ	許容変位側 Φ	
水平载荷試験	0.70	【非複合杭】 0.20 【複合杭】 0.15	0.80	【非複合杭】 0.60 【複合杭】 0.35	
孔内水平载荷試験又は室内試験	0.85		0.90		
SPT-N値のみ	(砂質土, N 値 ≥ 5)		1.15		1.00
	(粘性土, N 値 ≥ 5)		1.35		1.05
	(N 値 < 5)		2.20		1.30
目標信頼性指標 β_T	2.0		0.5		

3) 杭の部材照査に対する部分係数

杭の曲げモーメントに対する照査は、杭体の弾性限界点及び最大強度点に対する照査として、照査式は式(1.3.4)及び式(1.3.5)に示すとおりとした。

弾性限界点に対する照査：

$$\Psi_Y \cdot M \leq \Phi_Y \cdot M_Y \dots\dots\dots (1.3.4)$$

最大強度点に対する照査：

$$\Psi_U \cdot M \leq \Phi_U \cdot M_u \dots\dots\dots (1.3.5)$$

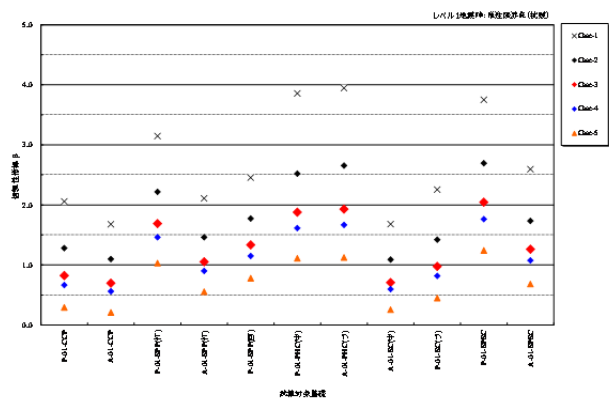
ここに、

- M ：発生曲げモーメントの計算値
- M_Y ：降伏曲げモーメントの計算値
- M_u ：終局曲げモーメント（鋼管の場合には、全塑性曲げモーメント）の計算値
- Ψ_Y ：弾性限界点に対する照査に用いる発生断面力のばらつきに関する部分係数
- Ψ_U ：最大強度点に対する照査に用いる発生断面力のばらつきに関する部分係数
- Φ_Y ：杭体の降伏曲げモーメントに対する抵抗係数
- Φ_U ：杭体の終局曲げモーメントに対する抵抗係数

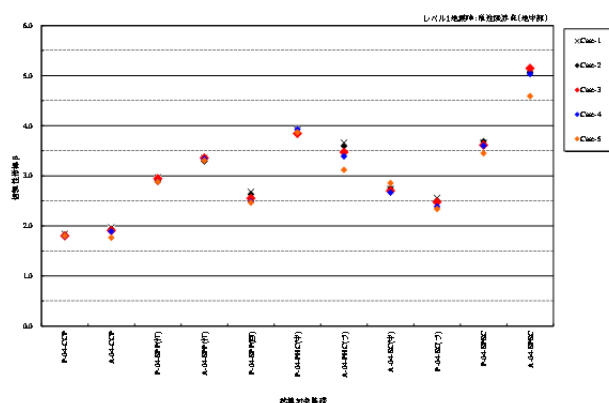
各試算対象基礎が有する部材耐力に対する信頼性指標 β は、モンテカルロシミュレーションから得られた杭頭又は地中部最大曲げモーメントのばらつきに関する統計量及び部材耐力のばらつきに関する統計量より、表-1.3 に示した水平方向地盤反力係数 k_H のばらつきに応じて、図-1.8 及び図-1.9 のように得られた。ここではレベル1地震時のみ示す。

図-1.8 及び図-1.9 に示すように、杭頭曲げモーメントは地盤調査法によって信頼性指標が異なる一方で、地中部曲げモーメントの信頼性指標は地盤調査法による違いが小さい。一方で、地中部曲げモーメントは杭工法の違いによって大きな違いが出る一方で、杭頭曲げモーメントは杭工法の違いによる影響は小さい。これは、地中部曲げモーメントが卓越するものは下部構造躯体の高さが高く、回転挙動が卓越するため、基礎に発生する曲げモーメントが杭の鉛直反力の影響を受けやすくなり、その結果、 K_v の不現実性の影響を強く受けた一方で、前面の水平方向の地盤抵抗の影響が小

さくなくなったことが要因である。一方、杭頭曲げモーメントが卓越する下部構造の躯体高さは低く、回転挙動が生じにくく、水平挙動が卓越したために、前面の水平方向の地盤抵抗の影響を受けやすくなって kH の不確実性に依存するようになった一方で、杭の鉛直反力の影響が小さかったことから K_v の不確実性が与える影響が小さく、杭工法の違いが小さかったものと考えられる。

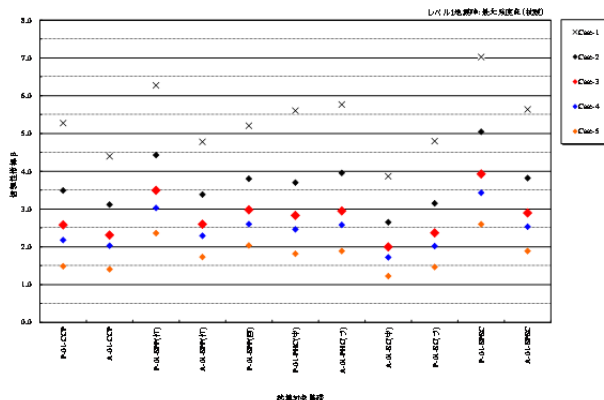


(a) 杭頭曲げモーメント

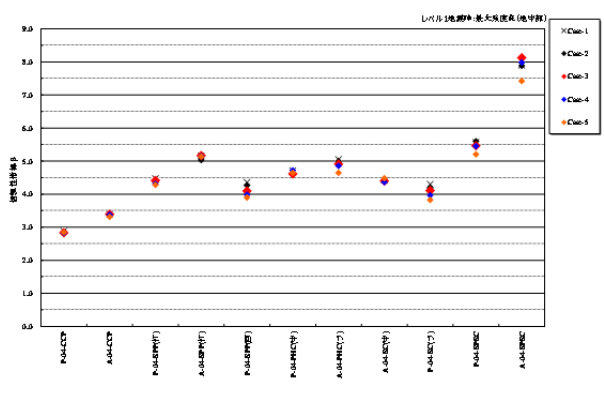


(b) 地中部曲げモーメント

図-1.8 レベル1地震時における弾性限界点に対する信頼性指標



(a) 杭頭曲げモーメント



(b) 地中部曲げモーメント

図-1.9 レベル1地震時における最大強度点に対する信頼性指標

これまで施工実績が多い打込み杭工法、中掘り杭工法及び場所打ち杭工法の試算対象基礎が有する信頼性指標 β より、目標信頼性指標 β_T は次のように設定した。

常時	レベル1地震時：弾性限界点に対する	目標信頼性指標 $\beta_T=1.4$
	：最大強度点に対する	目標信頼性指標 $\beta_T=2.6$
	レベル1地震時：弾性限界点に対する	目標信頼性指標 $\beta_T=2.4$
	：最大強度点に対する	目標信頼性指標 $\beta_T=3.5$

設定した目標信頼性指標 β_T に基づき、部分係数を杭種・杭工法ごとに表-1-11のように計算した。なお、部材耐力に考慮する部分係数 Φ は全て 1.0 とした。

表-1.11 部材照査に用いる部分係数の計算値

杭種	杭工法	地盤のばらつき区分	レベル1地震時					常時					
			断面力側の部分係数 Ψ				抵抗側の部分係数 Φ	断面力側の部分係数 Ψ				抵抗側の部分係数 Φ	
			弾性限界点		最大強度点			弾性限界点		最大強度点			
			正曲げ 【杭頭卓越】	負曲げ 【地中部卓越】	正曲げ 【杭頭卓越】	負曲げ 【地中部卓越】		正曲げ 【杭頭卓越】	負曲げ 【地中部卓越】	正曲げ 【杭頭卓越】	負曲げ 【地中部卓越】		
場所打ち杭	場所打ち杭工法	水平荷重試験	1.0	1.5	1.2	2.4	1.0	1.3	1.9	1.7	2.8	1.0	
		孔内水平荷重試験又は室内試験	1.2	1.5	1.5	2.4	1.0	1.6	1.9	2.0	2.8	1.0	
		SPT-N値のみ	(砂質土, N値 ≥ 5)	1.3	1.5	1.8	2.4	1.0	1.8	1.9	2.5	2.8	1.0
			(粘性土, N値 ≥ 5)	1.4	1.5	2.0	2.4	1.0	2.0	1.9	2.9	2.8	1.0
			(N値 < 5)	1.7	1.7	2.6	2.8	1.0	2.6	2.0	4.0	2.9	1.0
鋼管杭	全工法	水平荷重試験	0.8	1.0	1.1	1.6	1.0	1.1	1.3	1.4	1.7	1.0	
		孔内水平荷重試験又は室内試験	0.9	1.0	1.3	1.6	1.0	1.3	1.3	1.8	1.7	1.0	
		SPT-N値のみ	(砂質土, N値 ≥ 5)	1.0	1.0	1.6	1.6	1.0	1.6	1.3	2.4	1.7	1.0
			(粘性土, N値 ≥ 5)	1.1	1.0	1.8	1.6	1.0	1.8	1.3	2.8	1.7	1.0
			(N値 < 5)	1.3	1.3	2.3	2.0	1.0	2.3	1.3	3.9	1.8	1.0
PHC杭	プレボーリング杭 工法以外	水平荷重試験	1.2	1.7	1.4	2.5	1.0					1.0	
		孔内水平荷重試験又は室内試験	1.3	1.7	1.8	2.6	1.0					1.0	
		SPT-N値のみ	(砂質土, N値 ≥ 5)	1.5	1.7	2.1	2.6	1.0					1.0
			(粘性土, N値 ≥ 5)	1.6	1.7	2.4	2.6	1.0					1.0
			(N値 < 5)	1.9	2.3	3.1	4.0	1.0					1.0
	プレボーリング杭 工法	水平荷重試験	1.2	1.3	1.5	1.6	1.0	1.4	1.5	1.8	1.8	1.0	
		孔内水平荷重試験又は室内試験	1.4	1.3	1.8	1.6	1.0	1.8	1.5	2.4	1.8	1.0	
		SPT-N値のみ	(砂質土, N値 ≥ 5)	1.6	1.3	2.2	1.6	1.0	2.2	1.5	3.0	1.8	1.0
			(粘性土, N値 ≥ 5)	1.7	1.3	2.5	1.6	1.0	2.4	1.5	3.6	1.8	1.0
			(N値 < 5)	2.1	1.4	3.3	1.9	1.0	3.2	1.7	5.1	2.2	1.0
SC杭	プレボーリング杭 工法以外	水平荷重試験	0.9	1.1	1.2	1.5	1.0	1.2	1.4	1.4	1.8	1.0	
		孔内水平荷重試験又は室内試験	1.1	1.1	1.5	1.5	1.0	1.4	1.4	1.9	1.8	1.0	
		SPT-N値のみ	(砂質土, N値 ≥ 5)	1.2	1.1	1.8	1.5	1.0	1.7	1.4	2.4	1.8	1.0
			(粘性土, N値 ≥ 5)	1.3	1.1	2.1	1.5	1.0	1.9	1.4	2.9	1.9	1.0
			(N値 < 5)	1.6	1.8	2.7	3.3	1.0	2.5	1.5	4.1	2.0	1.0
	プレボーリング杭 工法	水平荷重試験	0.9	1.0	1.1	1.4	1.0					1.0	
		孔内水平荷重試験又は室内試験	1.1	1.0	1.4	1.5	1.0					1.0	
		SPT-N値のみ	(砂質土, N値 ≥ 5)	1.2	1.0	1.7	1.5	1.0					1.0
			(粘性土, N値 ≥ 5)	1.3	1.1	1.9	1.5	1.0					1.0
			(N値 < 5)	1.6	1.3	2.5	1.9	1.0					1.0
鋼管ソイルセメント杭	鋼管ソイルセメント杭工法	水平荷重試験	0.8	0.9	1.1	1.3	1.0	1.1	1.1	1.3	1.5	1.0	
		孔内水平荷重試験又は室内試験	0.9	0.9	1.3	1.3	1.0	1.2	1.1	1.6	1.5	1.0	
		SPT-N値のみ	(砂質土, N値 ≥ 5)	1.1	0.9	1.6	1.3	1.0	1.5	1.1	2.1	1.5	1.0
			(粘性土, N値 ≥ 5)	1.1	0.9	1.7	1.3	1.0	1.7	1.1	2.4	1.5	1.0
			(N値 < 5)	1.4	1.2	2.3	1.8	1.0	2.1	1.3	3.4	1.8	1.0

4. まとめ

道路橋杭基礎の鉛直支持の照査、水平方向の許容へ荷の照査、部材照査を対象とし、地盤調査法や杭工法、構造条件の違いを考慮した部分係数を計算した。その結果、設計計算モデルの不確実性の低い条件においては抵抗値を大きく、荷重を小さく評価できることとなり、設計の合理化が図られた。今後は、設計計算モデルの不確実性を小さくするように設計計算モデルの見直しを行うとともに、杭基礎以外の基礎形式についても同様の検討を進める予定である。なお、本文で示している内容は現在改定中のものであり、今後も適宜見直しの可能性があることに留意されたい。

■参考文献

- 1) 河野哲也, 中浦孝: 基礎構造物の性能設計 第17回 道路橋杭基礎の設計に用いる部分係数の設定例, 基礎工, Vol. 43, No. 2, 2015.

A STUDY ON RELIABILITY EVALUATION METHODS OF SUBSTRUCTURES DEPENDING ON THE ACCURACY OF GEOTECHNICAL SURVAY AND CONSTRUCTION QUALITY

Budged : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2013-2015

Research Team : Bridge and Structural Engineering
Research Group

Author : NANAZAWA Toshiaki

KOHNO Tetsuya

TANIMOTO Shunsuke

Abstract : Japanese highway design specifications of road bridges have been revised to do the geotechnical survey more sufficient and to apply the high quality construction management methods. This is because we have a lot of examples that it becomes the malfunction of the substructures of road bridges due to insufficient of geotechnical survey and construction quality. However, it is no way to be applied for the design of the structure even if surveyor or constructor would make an effort to do with high quality. The purpose of this study is to propose the verification method and setting up method of partial factors of the substructures, which depend on the accuracy of geotechnical survey and construction quality, based on reliability based method.

In FY2014, the estimation accuracy of bearing capacity, horizontal displacement, and bending moment of the pile foundations was investigated in the point of view of the difference of the estimation methods of skin friction in cohesive soil.

Key words : partial factor design method, pile foundation, bearing capacity, horizontal displacement, bending moment