

地盤調査法や施工法の違いを考慮した 道路橋杭基礎の部材照査に用いる部分係数の検討

西田秀明・七澤利明・河野哲也・北浦光章・鈴木慶吾

1. はじめに

道路橋に関する技術基準である道路橋示方書(以下、「道示」という。)では、次期改定での部分係数設計法の導入にむけた検討が鋭意進められている。具体的には、経験的に確立されてきた現行設計における安全率に代わり、様々な不確定要因を考慮した信頼性評価に基づく部分係数の検討がなされているところである。このような設計法の導入により、担保している性能に対する説明性の向上のほか、より信頼性の高い技術の導入促進なども期待される。

本文では、道路橋杭基礎における杭基礎の部材照査を対象とした、地盤調査法や杭の施工法の違いに応じた部分係数に関する検討について示す。

2. 杭基礎の部材照査における不確定性の要因と部分係数設定の考え方

現行の道示¹⁾における常時及びレベル1地震時に対する杭体の曲げ照査では、杭体に発生する応力度が許容応力度以下となるようにしている。これに対し、部分係数設計法における照査では、設計で考慮する状況に対してどのような状態に抑えることを意図しているかをより明確にするために、杭体の発生曲げモーメントが降伏曲げモーメント(M_Y)及び終局曲げモーメント(M_U)以下となるように照査を行う。

道路橋基礎に関する不確定性を有する要因には、荷重や材料のばらつきなどの大気中の部材と同様のものに加えて、地盤そのものや基礎本体と地盤との相互作用という基礎特有のものがある。このうち、地盤に関する不確定性は、設計に用いる地盤定数を導出するための調査法や施工方法によっても不確定性の程度が異なる。したがって、これらの違いを安全余裕の違いとして設計に反映することができれば、より信頼性の高い調査法や施工法の導入が促進されると考えられる。この安全余

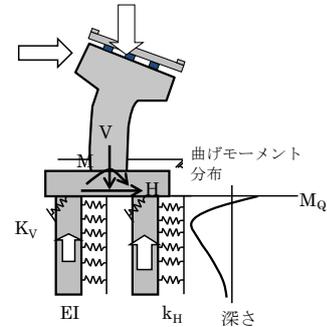


図-1 杭の部材照査に用いる解析モデルと曲げモーメント分布

裕度は現行設計においては許容応力度又は安全率として表され、一般に一つの値に様々な不確定要因の影響が包含されているが、部分係数設計法ではこれらを要因ごとに分けた部分係数として設けることができる。そこで本検討では、杭体の曲げ照査に影響を与える不確定性の要因と部分係数を次のように設定した。

不確定性の要因としては、杭体の曲げ照査に影響が大きいと考えられる水平方向地盤反力係数(k_H)の推定方法に応じた精度の違いや杭の軸方向ばね定数(K_V)のモデル誤差(載荷試験により得られた実測値と推定値との乖離)、材料の強度や剛性に関するばらつきを考慮した。ここで、水平方向地盤反力係数及び杭の軸方向ばね定数に関するばらつきは、図-1に示す解析モデルにより求める杭体の発生曲げモーメント(M_Q)に、また、材料の強度や剛性のばらつきは杭体の M_Y や M_U の評価に関係する。不確定性を有する要因にはこの他に死荷重や地震動などの荷重に伴うものがあるが、ここでは確定値として扱った。また、フーチングと杭体の結合度についても、別途行った検討により影響が小さいことが明らかになったことから確定値とした。

部分係数の設定方法に際しては、まず、現行道示の規定を満たす道路橋基礎が有する安全余裕度を、前述した不確定性の要因を考慮したうえで信頼性理論に基づいて評価した。ここで、 M_Q と、杭体の M_Y や M_U (ここでは、この2つを M_R と表

す) がそれぞれ対数正規分布に従う確率変数であると仮定すると、性能関数Gは式(1)のように表すことができ、生起確率変数は式(2)のようになる。

$$G = \ln(M_R) - \ln(M_Q) = \ln(M_R/M_Q) \quad \text{式(1)}$$

$$N(\mu_G, \sigma_G) = N\left(\mu_{\ln(R)} - \mu_{\ln(Q)}, \sqrt{\sigma_{\ln(R)}^2 + \sigma_{\ln(Q)}^2}\right) \quad \text{式(2)}$$

ここに、 μ 及び σ は平均値及び標準偏差を表す。この関係から、一次近似二次モーメント法を適用すると、照査における安全余裕度に相当する信頼性指標 β は式(3)で表される。

$$\beta = \mu_G / \sigma_G \quad \text{式(3)}$$

また、式(2)中の $\mu_{\ln(Q)}$ 、 $\sigma_{\ln(Q)}$ 、 $\mu_{\ln(R)}$ 、 $\sigma_{\ln(R)}$ は、それぞれ式(4)で求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \mu_{\ln(Q)} &= \ln(\mu_Q) - \frac{1}{2} \sigma_{\ln(Q)}^2 \\ \sigma_{\ln(Q)}^2 &= \ln\left(1 + \frac{\sigma_Q^2}{\mu_Q^2}\right) = \ln(1 + \text{COV}_Q^2) \\ \mu_{\ln(R)} &= \ln(\mu_R) - \frac{1}{2} \sigma_{\ln(R)}^2 \\ \sigma_{\ln(R)}^2 &= \ln\left(1 + \frac{\sigma_R^2}{\mu_R^2}\right) = \ln(1 + \text{COV}_R^2) \end{aligned} \right\} \quad \text{式(4)}$$

ここに、 μ_Q 、 σ_Q 、 COV_Q 及び μ_R 、 σ_R 、 COV_R はそれぞれ荷重Q及び抵抗Rのばらつきの平均値、標準偏差、変動係数(標準偏差を平均値で除したものである)。これらの関係と目標信頼性指標 β_T から部分係数 Ψ 及び Φ は式(5)より求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \Psi &= \frac{1}{\sqrt{1 + \text{COV}_Q^2}} \exp(\alpha_Q \cdot \beta_T \cdot \sigma_Q) \frac{\mu_Q}{Q_n} \\ \Phi &= \frac{1}{\sqrt{1 + \text{COV}_R^2}} \exp(-\alpha_R \cdot \beta_T \cdot \sigma_R) \frac{\mu_R}{R_n} \end{aligned} \right\} \quad \text{式(5)}$$

ここに、 α_Q 、 Q_n 及び α_R 、 R_n はそれぞれ荷重Q及び抵抗Rの感度係数(式(6))と特性値である。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_Q &= \sigma_{\ln(Q)} / \sigma_G \\ \alpha_R &= \sigma_{\ln(R)} / \sigma_G \end{aligned} \right\} \quad \text{式(6)}$$

以上のように、荷重側及び抵抗側のいずれにも不確実性を有することから一般に部分係数は照査式の両辺に考慮するが、後述する不確実性の要因を考慮して試算した結果、 k_H や K_V のばらつきに起因する M_Q に関する不確実性が材料特性のばらつきに起因する M_Y 、 M_U に関するものより大きいこと、地盤調査法や杭工法による違いを明確にす

ることにより精度の高い方法の採用を促し今後新たな調査方法や杭工法が開発された場合にも対応がしやすくなること、さらに実務的な取扱いがしやすいことを考慮して、式(7)のように荷重側(M_Q 側)に集約したものを式(8)のように杭種及び杭工法に関するものと地盤調査法に関するもの2つの部分係数に分割して設定することとした。

$$\Psi' = \Psi / \Phi = \Psi_1 \times \Psi_2 \quad \text{式(7)}$$

$$M_D = \Psi_1 \times \Psi_2 \times M_Q \quad \text{式(8)}$$

ここで、

M_Q : 図-1に示す解析モデルにより求める杭体の発生曲げモーメント

Ψ : 杭体の発生曲げモーメントの不確実性に対する安全余裕を考慮した部分係数

Φ : 杭体の抵抗側の曲げモーメントの不確実性に対する安全余裕を考慮した部分係数

M_D : 杭体の曲げモーメントの照査に用いる設計曲げモーメント (kN・m)

Ψ_1 : 杭種及び杭工法に関する違いを考慮するための部分係数

Ψ_2 : 地盤調査法の推定精度の違いを考慮するための部分係数

3. 杭基礎の部材照査における信頼性の評価と部分係数の検討

3.1 不確実性の要因毎の統計量

前節に示した不確実性の要因に対して本検討で考慮した統計量を示す。

k_H については、調査法や算出過程により異なることを考慮し表-1に示す統計量を用いた²⁾。なお、表中に示すバイアスとは、特性値に対する平均値の偏りを指す。 K_V については、基礎の平均的な挙動をより精度良く推定できるように見直しを行った推定式を検討に使い、これに対応する統計量を用いた(表-2)³⁾。

材料特性に関するばらつきについては確定値を除き正規分布に従うとして表-3のように与えた。

3.2 現行設計に基づく杭基礎が有する信頼性の評価

現行道示により設計された杭基礎が有する信頼性について、モデルとなる基礎を試設計したうえで評価した。現行設計での杭体の設計では、杭頭を剛結とした場合とヒンジとした場合に対してモーメント分布を出し、いずれか大きい方の曲げモーメントに基づいて設計している。しかし、実

表-1 水平方向地盤反力係数 k_H の推定に関する統計量

k_H の推定方法	パイアス	変動係数
水平載荷試験から推定した場合	1.00	0.25
地盤の変形係数を直接的に推定した場合	1.00	0.45
標準貫入試験のN値より推定した場合	N値 ≥ 5 の砂質土	1.00
	N値 ≥ 5 の粘性土	1.00
	N値 < 5 の土質	1.00

表-2 杭の軸方向ばね定数 K_v に関する統計量

杭工法	K_v の統計量		
	データ数	パイアス	変動係数
場所打ち杭工法	33	1.14	0.60
打込み杭(打撃工法)	29	0.99	0.37
打込み杭(パイプロハンマ工法)	4	0.97	0.33
中掘り杭工法	33	0.97	0.37
鋼管ソイルセメント杭工法	12	1.00	0.26
回転杭工法	20	1.03	0.34
プレボーリング杭工法	13	0.98	0.30

表-3 材料特性に関する統計量

(1)場所打ち杭

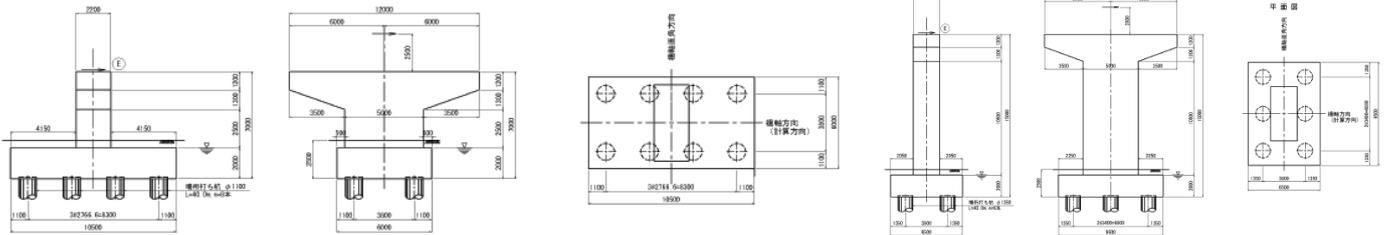
項目	特性値(N/mm ²)	パイアス	変動係数
コンクリート強度	24	1.40	0.18
コンクリートのヤング係数	2.5×10^4	コンクリート強度に依存	
鉄筋の降伏強度(SD345)	345	1.14	0.04
鉄筋のヤング係数	2.00×10^5	(一定)	

(2)PHC杭

項目	特性値(N/mm ²)	パイアス	変動係数
コンクリート強度	80	1.00	0.03
コンクリートのヤング係数	2.0×10^4	(一定)	
PC鋼材の降伏強度	1275	1.03	0.01
PC鋼材のヤング係数	2.00×10^5	(一定)	

(3)鋼管杭

項目	特性値(N/mm ²)	パイアス	変動係数
鋼管の降伏強度(SKK400)	235	1.33	0.07
鋼管のヤング係数	2.00×10^5	(一定)	



(a)杭頭部で曲げモーメントが最大となるケース

(b)地中部で曲げモーメントが最大となるケース

図-2 信頼性評価を行ったモデル基礎(場所打ち杭)

基礎の杭頭部はそもそも剛となるように設計していることなどの理由から、ここでは杭頭剛結とした場合の曲げモーメント分布のみ計算したうえで、現行と同等の安全余裕度を確保できるように部分係数を設定することとした。具体的には、現行設計を満たしつつ、杭頭剛結として曲げモーメントの最大値が(a)杭頭部で発生する場合と(b)地中部で発生する場合の基礎を試設計した。場所打ち杭の例を図-2に示す。

試設計したモデル基礎に対して各不確実要因を考慮して M_Q 並びに M_Y 、 M_U (鋼管杭の場合は全塑性モーメント)のばらつきを評価した。これらのばらつきは、3.1に示す各不確実性の要素について確率分布に基づく1000個の変数をモンテカルロ法によりそれぞれ作成し、これらを用いて1000個の M_Q 等の値を求め、その平均値、標準偏差を求めた。これらの平均値と標準偏差と式(1)~(4)の関係から信頼性指標 β を求められる。例と

表-4 現行設計による場所打ち杭が有する信頼性指標 β の評価結果(レベル1地震時)

k_H の推定方法	M_Y に対して		M_U に対して		
	正曲げ	負曲げ	正曲げ	負曲げ	
水平載荷試験から推定した場合	1.84	1.50	4.08	2.59	
地盤の変形係数を直接的に推定した場合	1.54	1.50	3.54	2.59	
標準貫入試験のN値より推定した場合	N値 ≥ 5 の砂質土	1.31	1.50	3.07	2.59
	N値 ≥ 5 の粘性土	1.20	1.50	2.85	2.59
	N値 < 5 の土質	0.86	1.50	2.27	2.59

して図-2の場所打ち杭のレベル1地震時に対する評価結果を表-4に示す。

3.3 目標信頼性指標と部分係数の設定

部分係数を設定するためには、目標信頼性指標 β_T を定める必要がある。本検討では、道路橋示方書下部構造編に当初より規定されている杭基礎(場所打ち杭、鋼管杭(打撃工法及び中掘り杭工

法)) が平均的に有する安全余裕度を確保できるように β_T を設定した。また、地盤調査法に関しては、砂質地盤における標準貫入試験結果を標準とした。3.2に示した信頼性指標の計算結果は杭工法や曲げモーメントが最大となる位置などによっても違うためばらつきを有するが、信頼性指標から評価した損傷確率も考慮して、レベル1地震時における β_T を M_Y に対しては1.8、 M_U に対しては3.1とそれぞれ設定した。

設定した β_T と式(5)より各杭工法及び地盤調査法に対して部分係数 Ψ 及び Φ を求めた後、式(6)及び式(7)の関係となるように部分係数 Ψ_1 及び Ψ_2 を求めた例として、レベル1地震時の荷重の組合せに対する杭体の曲げモーメントの照査に用いる部分係数を表-5及び表-6に示す。ここでは紙面の都合上、 M_Y に対する照査を行う際に用いる部分係数のみ示す。信頼性評価の結果では、場所打ち杭の信頼性が小さく鋼管杭や鋼管ソイルセメント杭が高い傾向や、水平載荷試験に基づく場合の信頼性が高く、逆に標準貫入試験の特にN値が5未満のような軟弱地盤に対する場合で低い傾向がみられた。本検討のように統一的に β_T を定め、杭種、杭工法、地盤調査法のそれぞれの信頼性に応じて部分係数を設定することで、同等の信頼性を確保されるとともに、精度の高い地盤調査法や施工法を用いた場合に従来よりも有利に設計できることとなる。

4. おわりに

本文では、杭の部材照査を対象に地盤調査法や施工法の違いを考慮した部分係数に関する研究の概要について示した。今後も次期道路橋示方書改

表-5 杭種及び杭工法に関する違いを考慮するための部分係数 ψ_1 (レベル1地震時)

杭工法	正曲げ	負曲げ
場所打ち杭工法	1.80	2.05
打撃工法(鋼管杭)	1.40	1.50
打撃工法(既製コンクリート杭)	1.60	1.75
中掘り杭工法(鋼管杭)	1.50	1.50
中掘り杭工法(既製コンクリート杭)	1.75	1.75
鋼管ソイルセメント杭工法	1.30	1.30
回転杭工法	1.45	1.45
プレボーリング杭工法	1.65	1.65

* 表中の「正曲げ」又は「負曲げ」とは曲げモーメントの符号を示しており、杭頭に外力として任意の向きの単位モーメントが作用したとき、杭体に生じる曲げモーメントが同一方向になるときを正とする。

表-6 地盤調査法の推定精度の違いを考慮するための部分係数 ψ_2 (レベル1地震時)

地盤調査	正曲げ	負曲げ
水平載荷試験	0.90	1.00
孔内水平載荷試験又は室内試験	0.95	1.00
標準貫入試験(砂質土主体)	1.00	1.00
標準貫入試験(粘性土主体)	1.05	1.00
標準貫入試験($N < 5$)	1.15	1.00

* 負曲げの時は $\psi_2=1.00$ *N:標準貫入試験によるN値

定における部分係数の提案に向けて、より多くの試設計等を通じてさらなる検討を進めていく予定である。

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、2012.3
- 2) M. Shirato, T. Kouno, T. Nakaura, and S. Nakatani: LRFD for the Structural Design of Piles in Grouped-pile Foundations, The 17th Southeast Asian Geotechnical Conference, 2010.5.
- 3) 七澤、北浦、西田、河野：推定精度を向上した杭の軸方向ばね定数の提案、第68回土木学会年次学術講演概要集、2013.9

西田 秀明



(独)土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 主任研究員
Hideaki NISHIDA

七澤 利明



(独)土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 上席研究員
Toshiaki NANAZAWA

河野 哲也



(独)土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 研究員
Tetsuya KOHNO

北浦 光章



三谷セキサン(株)
(前) (独)土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ交流研究員
Mitsuaki KITAURA

鈴木 慶吾



(独)土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 交流研究員
Keigo SUZUKI