

Ⅲ-A455

基礎構造物設計への部分係数導入のための一提案

清水建設(株)	正会員	○鈴木 誠
清水建設(株)	正会員	石井 清
建設省土木研究所	正会員	石田雅博
(株)建設技術研究所	正会員	松井謙二

1. はじめに

近年、構造物の設計法を性能規定で表現する動きがある。その中で、国際規格ISO2394¹⁾などに従って安全性余裕を定量的に評価する「確率論に基づく限界状態設計法」が必要となってきた。この設計法は信頼性設計法とも呼ばれ、種々の設計体系が示されているが、設計実務には世界的に信頼性設計水準Iと呼ばれる部分係数法が採用されている²⁾。しかし解析モデルが複雑な場合、破壊確率 P_f や信頼性指標 β を求めること、さらにそれらを基に部分係数を決定することは難しい。道路橋示方書では、平成8年度から大地震に対しての基礎の耐震設計にも地震時保有水平耐力法を導入しており、杭基礎では地盤抵抗や杭体の曲げ剛性の非線形性を考慮したラーメン構造としてモデル化している。このモデルでは限界状態を陽な形式で記述できないことから、比較的複雑な計算が必要となってきた。そこで本研究では、杭基礎における地震時保有水平耐力法による照査を対象として、現行の道路橋示方書に部分係数形式を取り入れるため、部分係数の設定について試算方法を示すことを目的とする。設定した部分係数の妥当性を検証するためには、数多くの基礎構造物に対して試算を実施する必要があるが、ここでは数例での試算方法のみを提示する。なお、検討に用いるモデルは、文献³⁾に記載されている場所打ち杭基礎と埋込みPHC杭基礎の2つのモデルを用い、目標信頼性指標 β_t を変化させたときの部分係数を検討した。

2. 検討フロー

種々の基礎を対象とした部分係数法では、荷重係数とそれに対する抵抗側の部分係数を決めることが必要となる。しかし、地震時保有水平耐力法における基礎設計では橋脚耐力が上限荷重となり、荷重係数という形で安全性余裕が導入されていないため、荷重係数は1.0として抵抗側の部分係数のコードキャリブレーションを試みる。すなわち、現行設計で考えている荷重を与え、抵抗側のみの不確定性を考慮したとき、部分係数形式で設計された構造物がどのような信頼性指標 β となっているかを算定し、目標信頼性指標 β_t に近くなるように部分係数を決定する。設計照査式を一般的に表現すると、次式のようになる。

$$g(f_{k1}/\gamma_{m1}, f_{k2}/\gamma_{m2}, \dots, \gamma_{f1}F_{k1}, \gamma_{f2}F_{k2}, \dots) \geq 0 \quad (1)$$

ここで、 f_{ki} :パラメータ i の抵抗要素の強度特性値、 γ_{mi} :パラメータ i の抵抗要素の部分係数、 F_{kj} :パラメータ j の荷重の代表値、 γ_{fj} :パラメータ j の荷重の部分係数である。一般的に n 個の代表となる構造要素を定義する。これらは荷重作用、構造寸法、材料、限界状態の形式の点から設計基準の適用範囲を十分にカバーするものが理想である。与えられた部分係数の組み合わせを用いて設計を行うが、目標値から多かれ少なかれ逸脱する。そこで、信頼性指標 β を用いて、全体の誤差二乗和 D は次式のように表現し、これを最小とするような部分係数を最良とする。

$$D = \sum_{k=1}^n \left[\beta_k(\gamma_{m1}, \gamma_{f1}) - \beta_t \right]^2 \quad (2)$$

ここで、 β_t :目標信頼性指標、 β_k :部分係数による設計の結果、得られた信頼性指標である。

3. 解析モデルと解析対象

解析モデルの概念は、非線形パネのついた杭ラーメン構造であり、杭頭部はフーチングをモデル化した剛なはりで結合されている。その中心に鉛直荷重 V を載荷させ、引き続き水平・曲げ荷重 H, M を逐次載荷するプッシュオーバー解析を行う⁴⁾。変動させるパラメータは、地盤反力特性を対象とし、杭の水平方向地盤反力係数 k_h 、水平地盤反力度の上限値を決める土のせん断強度パラメータ ϕ, c 、杭軸方向パネ定数 K_v と極限支持力 R_u である。水平地盤反力度の上限値はクーロンの地震時受働土圧をもとに算定する。 k_h, ϕ, c, K_v, R_u の変動係数は、それぞれ0.75, 0.15, 0.30, 0.65, 0.40とした⁵⁾。

解析対象は、文献³⁾に示す場所打ち杭基礎と埋込みPHC杭基礎とし、橋軸方向の地震時保有水平耐力法のみ照査に関してキャリブレーションを行う。載荷荷重は上部構造からの荷重、橋脚躯体が支持している上部構造部分と橋脚躯体の重量を一定とし、フーチングおよびその上の土自重を設計代替案から決定した。荷重は、鉛直荷重を最初に載荷し、水平・曲げ荷重を橋軸方向は水平震度0.68(橋脚耐力 $\times 1.1$)まで逐次増加させる。場所打ち杭基礎の設計代替

Keywords: 杭基礎、耐震設計法、部分係数、コードキャリブレーション

連絡先: 〒100-0011 東京都千代田区内幸町2-2-2 富国生命ビル 清水建設(株) TEL03-3508-8101 FAX03-3508-2196

案は、杭本数9本、10本、11本、12本、14本、16本としたTYPE 0～TYPE 5を想定した。また、埋込みPHC杭基礎の設計代替案も、杭本数25本、28本、30本、32本、36本としたTYPE 0～TYPE 4を想定した。

4. 設計代替案の安定性の確率論的評価

安定性の確率論的評価に、モンテカルロ法を適用し、試行回数1000回で破壊確率 P_f を評価する。降伏耐力の分布形は必ずしも正規分布にならないが、正規分布と仮定したときの、信頼性指標 β も計算する。なお杭の降伏耐力は、一列で極限支持力と全列で杭体降伏の2つの点の低い方で評価している。また以下の表では、「地盤」とは一列で杭反力が極限支持力に達するもの、「杭体」とは全列で杭体降伏するものを表している。

場所打ち杭基礎については、杭本数を増していくと破壊確率 P_f が小さくなり、信頼性指標 β が大きくなる。また、埋込みPHC杭基礎についても、杭本数を増していくと、場所打ち杭基礎と同様の傾向を示す。ただし、TYPE 0の橋軸方向で破壊確率 P_f が50%を超えており、文献に比べて若干計算誤差の違いがでてきたと考えられる。

表-1 場所打ち杭基礎の β_i

γ_{kh}	γ_c	γ_ϕ	γ_{Kv}	γ_{Ru}	TYPE	P_f	β
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0	0.377	0.32
1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	0	0.377	0.32
1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1	0.168	1.00
1.0	1.0	1.0	1.0	1.3	1	0.168	1.00
1.0	1.0	1.0	1.0	1.4	1	0.168	1.00
1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	2	0.150	1.06
1.0	1.0	1.0	1.0	1.6	4	0.028	1.94
1.0	1.0	1.0	1.0	1.7	4	0.028	1.94
1.0	1.0	1.0	1.0	1.8	4	0.028	1.94
1.0	1.0	1.0	1.0	1.9	4	0.028	1.94
1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	4	0.028	1.94
1.0	1.0	1.0	1.0	2.1	5	0.018	2.09

5. 部分係数の設定

感度解析の結果から、基礎の安定性に対する影響としては杭軸方向の極限支持力 R_u が大きいことがわかった。そこで、まず R_u の部分係数 γ_{Ru} を変化させた検討を行った。場所打ち杭基礎と埋込みPHC杭基礎の橋軸方向について断面が決定されるので、それらの結果を表-1と表-2に示す。場所打ち杭基礎では、TYPE 2とTYPE 3の差はほとんどない。埋込みPHC杭基礎では、TYPE 1とTYPE 2、TYPE 3とTYPE 4の差はほとんどない。このため、部分係数を0.1間隔で変化させたときには、選択されない設計代替案もあることがわかった。また、埋込みPHC杭基礎では部分係数を大きくすると、今回の設計代替案では設計できないことがわかった。

今回の検討では、部分係数 γ_{Ru} のみを対象とし、場所打ち杭基礎と埋込みPHC杭基礎の2例から、目的関数 D を算定する。このとき、目標信頼性指標 β を0.0から1.5まで変化させた結果を表-3に示す。 β_i が0.0から0.5までは $\gamma_{Ru}=1.0$ 、 β_i が1.0では $\gamma_{Ru}=1.2$ 、 β_i が1.5では $\gamma_{Ru}=1.6$ 、 β_i が1.7では $\gamma_{Ru}=1.8$ となった。この結果から、目標信頼性指標 β_i が設定できれば、部分係数を設定できることを示すことができた。

表-2 埋込みPHC杭基礎の β_i

γ_{kh}	γ_c	γ_ϕ	γ_{Kv}	γ_{Ru}	TYPE	P_f	β
1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0	0.529	-0.08
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1	0.225	0.75
1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1	0.225	0.75
1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1	0.225	0.75
1.0	1.0	1.0	1.0	1.3	1	0.225	0.75
1.0	1.0	1.0	1.0	1.4	3	0.091	1.33
1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	3	0.091	1.33
1.0	1.0	1.0	1.0	1.6	3	0.091	1.33
1.0	1.0	1.0	1.0	1.7	3	0.091	1.33
1.0	1.0	1.0	1.0	1.8	—		

6. おわりに

本研究では部分係数 γ_{Ru} のみを対象とし、任意の目標信頼性指標 β_i に対する部分係数の設定方法について試算例を示した。事例サンプルが2例と少ないため、部分係数の最適値が明確ではないが、サンプルを多くすると最適な部分係数が選択できることは示すことができた。また、目標信頼性指標 β_i の影響は大きいので、これらの設定は慎重に行うことが重要となる。今後は事例を増やしていく予定である。

参考文献

- ISO: ISO2394 General Principles on Reliability for Structures, 1998.
- CEN: ENV1991-1 Eurocode1, Basis of Design and Actions on Structures, Part1: Basis of Design, 1993.
- 日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, 1997.3.
- Fukui, J. Kimura, Y., Ishida, M. and Nakazawa, T.: Strength and Ductility Characteristics of Highway Bridge Foundations, Proc. 29th Joint Meeting of U.S.-Japan Panel on Wind and Seismic effects, UJNR, pp.567-582, 1997.5.
- 木村嘉富・福井次郎・阪野 彰・松井謙二・友永則雄: 地盤抵抗特性のばらつきが杭基礎の耐力へ及ぼす影響に関する試算, 土木学会第52回年次学術講演会, III-B17, pp.34-35, 1997.9.

表-3 目的関数 D

γ_{Ru}	β_{RC}	β_{PHC}	$\beta_i = 0.0$	$\beta_i = 0.5$	$\beta_i = 1.0$	$\beta_i = 1.5$
1.0	0.32	0.75	0.665	0.095	0.525	1.955
1.1	0.32	0.75	0.665	0.095	0.525	1.955
1.2	1.00	0.75	1.563	0.313	0.063	0.813
1.3	1.00	0.75	1.563	0.313	0.063	0.813
1.4	1.00	1.33	2.769	0.939	0.109	0.279
1.5	1.06	1.33	2.893	1.002	0.112	0.223
1.6	1.94	1.33	5.533	2.763	0.993	0.223
1.7	1.94	1.33	5.533	2.763	0.993	0.223