

信頼性理論と構造最適化手法を用いた RC 橋脚—
場所打ち杭基礎系の地震時損傷配分に関する研究

東北大学 学生員 土井 充 東北大学 正会員 秋山 充良
東北大学 フェロー 鈴木 基行 鹿島建設 (株) 正会員 松中 亮治

1. まえがき

本研究では、橋脚基部の曲げ靱性で地震エネルギーを吸収し、杭基礎は降伏しない状態を橋梁システムの望ましい崩壊モードとして想定した。そこで、信頼性理論を用いた構造最適化手法を RC 橋脚—場所打ち杭基礎系に適用し、杭基礎—地盤間ばねが持つ不確定性の大きさなどを考慮した上で、設計上想定する崩壊モードが確実に生じるような RC 橋脚と場所打ち杭基礎間の最適な耐力格差を検討した。

2. RC 橋脚—杭基礎系の耐震設計

(1) 解析条件

解析対象は、連続鉄桁橋の中間 RC 橋脚とこれを支持する杭基礎であり、信頼性解析時に必要となる橋脚や杭の各応答値を算定するための動的解析モデルを図-1 に示した。杭は場所打ち杭 (杭径 = 1.2m, 杭配列 3 × 3) であり、支承条件は固定とした。杭基礎—地盤間ばねの値は、杭の載荷試験データなどの統計量をもとに設定した¹⁾。入力地震波は、道路橋示方書に規定されるタイプ II の II 種地盤用標準波形を用い、SHAKE により基盤波形を推定した。地盤モデルは、この基盤波形の応答解析から求められるフーチング底版位置の変位 (基盤面に対する相対変位) が 2cm ~ 14cm までの II 種地盤 18 モデルを用いた。

(2) 破壊確率の算定に用いる限界状態式の設定

RC 橋脚に対する安全性照査として、せん断破壊、変形性能および残留変位に対する限界状態式をそれぞれ式 (1) ~ (3) のように定義した。また、杭基礎に関しては、地震時の杭基礎への損傷配分を抑える目的から、道路橋示方書で定める杭基礎の降伏点を参考にして限界状態式を式 (4), (5) のように定義した。

$$g_1 = \alpha_1 V_C + \alpha_2 V_S - \alpha_3 V_{act} \quad (1)$$

$$g_2 = \alpha_4 \delta_u - \alpha_5 \delta \quad (2)$$

$$g_3 = \delta_{Ra} - C_R(\alpha_5 \delta - \delta_y) \quad (3)$$

$$g_4 = \alpha_6 \phi_{min} - \alpha_7 \phi_{act} \quad (4)$$

$$g_5 = R_u - \alpha_7 P_H \quad (5)$$

ここに、 V_C : 帯鉄筋以外が受け持つせん断耐力, V_S : トラス理論に基づく帯鉄筋が受け持つせん断耐力, V_{act} : 作用せん断力, δ_u : 終局変位, δ : 応答変位, δ_{Ra} : 許容残留変位, C_R : 残留変位比応答スペクトル, δ_y : 降伏変位, ϕ_{min} : 杭降伏時の曲率塑性率 (=1.0), ϕ_{act} : 杭最小曲率塑性率, R_u : 押し込み支持力上限値, P_H : 杭先端部押し込み力, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_4, \alpha_6$: 耐力算定式の持つばらつきを考慮する係数, α_3 : 作用せん断力の推定に伴うばらつきを考慮する係数, α_5 : 地震時応答変位を推定するための係数, α_7 : 杭基礎の解析モデル化に伴い含まれる不確定性を考慮するための補正係数。

各確率変数のパラメータ (平均値, 変動係数など) は、杭基礎—地盤間ばねの各抵抗特性のばらつきを考慮したモンテカルロ法などを用いて算出した¹⁾。

(3) 目的関数および制約条件の設定

RC 橋脚の保有水平耐力を等価重量で除した $k_{h_{pier}}$ と杭基礎の設計水平震度 $k_{h_{pile}}$ の比, 震度比 γ (=

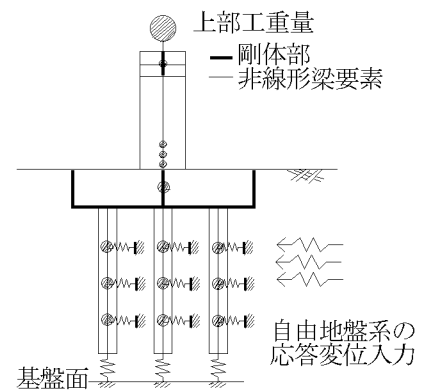


図-1 動的解析モデル

$k_{h_{pile}}/k_{h_{pier}}$ を定義し、場所打ち杭基礎に大きな非線形を生じさせないための γ の検討を行った。 γ の検討は、以下の最適化問題の中で行った。

$$\text{find } \{\gamma_i, i = 1 \sim n\} \quad (6)$$

$$\text{min. } W = \sum_{i=1}^n w \{(\beta_{sys}(\{\gamma_i, \mathbf{X}, \mathbf{Z}\}) - \beta_{pier}(\{\gamma_i, \mathbf{X}, \mathbf{Z}\}))^2 + (\gamma_i - 1.0)^2\} \quad (7)$$

$$\text{s.t. } \gamma^l \leq \gamma_i \leq \gamma^u \quad (8)$$

ここに、 γ_i : 各地盤モデル毎の震度比、 \mathbf{X} : 確率変数、 \mathbf{Z} : 確定値、 n : 地盤モデル数、 w : 重み係数 ($= 1/n$)、 β_{sys} : 橋梁システムの安全性指標 ($= -\Phi(-P_{f_{sys}})$)、 β_{pier} : RC 橋脚の安全性指標 ($= -\Phi(-P_{f_{pier}})$)、 γ^u, γ^l : 震度比の上下限值、 Φ : 標準正規分布の累積分布関数。

$P_{f_{pier}}$ とは、式(1)～(3)より計算される RC 橋脚－杭基礎系の破壊確率であり、 P_{fall} とは、式(1)～(5)より計算される RC 橋脚－杭基礎系の破壊確率である。なお、ここで言う破壊確率とは、考慮する複数の限界状態から構成される事象が生起する確率のことを指し、本研究では、著者らにより提案された構造系信頼性評価法²⁾を用いて算定した。目的関数は、場所打ち杭基礎に大きな非線形を生じさせないために、RC 橋脚－杭基礎系の破壊確率が、RC 橋脚の破壊確率で支配されるように定義した。目的関数の最小化を確率値により行っていることで、杭基礎－地盤間ばねなどが持つ各種不確定性の大きさの影響を考慮した γ の検討になっている。なお、各地盤モデル毎の RC 橋脚は、 $\beta_{pier} = 1.0$ となるように設計されている。目的関数の中の右辺第 2 項は、目的関数を小さくするために杭基礎耐力を大きくする、すなわち震度比 γ を大きくすることに対する制約を与えるもので、最適化手法を取り入れたキャリブレーションによる部分安全係数の決定³⁾などで用いられる項である。

(4) RC 橋脚－杭基礎系の耐力階層化

本研究で採用した地盤モデル ($n=18$) に対して、最適な震度比 $\gamma_i (i = 1 \sim 18)$ の探索結果を図-2 に示す。また図-2 には、地盤変位 7cm 以下の 8 つの地盤モデルに対して共通の γ_1 、7cm 以上の 8 つの地盤モデルに対して共通の γ_2 を用いたときの結果も併記している。各地盤モデルに対して γ_i を求めた場合と、地盤変位 7cm を境に 2 つの震度比のみで最適化した場合の目的関数値には、大きな差は見られない。従って、本計算例からは、地盤変位 7cm 以下に対して $\gamma_1 \approx 1.30$ 、7cm 以上に対して $\gamma_2 \approx 1.50$ として杭基礎設計水平震度を設定すれば良い結果となった。

現行の道路橋示方書の地震時保有水平耐力法における杭基礎の耐震設計では、地盤変位の影響が考慮されておらず、また杭基礎－地盤間ばねなどの不確定性の影響の評価も不十分であることが指摘されている¹⁾。ここで提示した震度比の検討は限られた地盤モデルを対象としているが、両者の影響を同時に考慮したものであり、杭基礎の降伏を防ぐためには、単に橋脚の保有水平耐力のみを考慮した杭基礎の設計荷重の設定では不十分であることを示唆している。

3. まとめ

橋脚の保有水平耐力の他に、地盤変位と各種不確定性の大きさの影響を考慮した上で杭基礎の設計水平震度は決定される必要がある。今後、より多くの地盤モデルを用いた解析を行い、震度比 γ の最適解を検討する予定である。

参考文献 1) 秋山充良, 松中亮治, 土井充, 鈴木基行: 鉄筋コンクリート橋梁システムに介在する不確定要因を考慮した場所打ち杭基礎の設計水平震度評価に関する研究, 土木学会論文集, No.641/V-46, pp.187-203, 2000. 2) 鈴木基行, 秋山充良, 山崎康紀: 構造系の信頼性評価法および RC 橋脚の耐震設計への適用に関する研究, 土木学会論文集, No.578/V-37, pp.71-87, 1997. 3) J.D.Sorensen, I.B.Kroon and M.H.Faber, Optimal reliability based code calibration, Structural Safety, 15, pp.197-208, 1994.

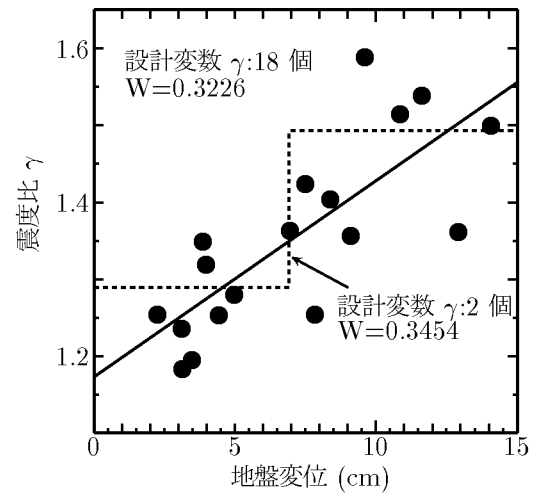


図-2 地盤変位と震度比の関係