

信頼性理論に基づく橋脚の保有耐力を 考慮した杭基礎の設計水平震度算定

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 正会員 鈴木 基行

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、杭基礎には補強を必要とされる損傷が発生しない場合を橋梁システムの望ましい崩壊モード¹⁾として想定した。そこで、信頼性理論に基づき、橋脚－杭基礎系に生じると思われる各種限界状態とそこに介在する各種不確定性を考慮し、設計上想定する崩壊モードが確実に生じるように RC 橋脚と場所打ち杭基礎間に意図的な耐力の差を設け（耐力の階層化）、地震時に生じる損傷を適切に配分させることを試みた。

2. 橋脚－杭基礎系の解析モデル

(1) 解析方法

解析対象としたのは、5 径間連続鉄筋橋の中間 RC 橋脚とこれを支持する場所打ち杭基礎である。RC 橋脚は、平成 8 年道路橋示方書の規定²⁾を満足している。地盤モデルは II 種地盤 ($T_g = 0.39$) を想定した。上部構造および RC 橋脚は全ての解析において同一であるものとし、杭径および軸方向鉄筋量を変化させることで様々な降伏震度をもつ杭基礎を試設計した。そして、上部構造－RC 橋脚－杭基礎から構成される橋梁システムを対象に動的解析を実施し、各部材の地震時損傷を検討した。なお、入力地震動は道路橋示方書に規定されるタイプ II の II 種地盤用の標準波形 (TYPE-II-II-1) を用い、重複反射理論に基づいた解析プログラム SHAKE により地盤の基盤波形を推定した。

(2) 橋脚－杭基礎間の非線形応答の関係

杭基礎の降伏震度のみを変化させた橋梁システムの動的解析結果の一例を図-1に示す。本研究で用いた全ての解析モデルにおいて、杭基礎の降伏震度が、解析対象とした RC 橋脚の保有耐力に相当する震度である 0.65 付近を超えると杭の曲率塑性率の大幅な低減が見られ、逆に橋脚の塑性率は増加した。よって、確定的に見れば、道路橋示方書の杭基礎の耐震設計法は概ね妥当と考えられるが、地盤のもつ不確実性などを考えると、単に橋脚の保有耐力を上回る耐力を杭基礎に与えるのみでは杭基礎の安全性を確保できないと考えられる。そこで、信頼性理論を取り入れることで、不確定要因の影響を評価し、杭基礎を降伏状態に到達させないための設計水平震度を設定する。

3. 橋脚－杭基礎間の耐力階層化法

(1) 限界状態式の設定

橋脚－杭基礎間の限界状態を定義し、「耐力項」－「外力項」で表される限界状態式を式 (1) ～ (3) のように設定した。

- ・橋脚に対する安全性照査

$$g_1 = \alpha_1 M_u - M_{act} \dots\dots\dots (1)$$

- ・杭体に対する安全性照査

$$g_2 = \alpha_2 \phi_{min} - \phi_{act} \dots\dots\dots (2)$$

- ・押し込み支持力に対する安全性照査

$$g_3 = q_d A + U \sum L_i f_i - P_H \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 M_u : 曲げ耐力、 M_{act} : 作用曲げモーメント、 α_1, α_2 : 耐力算定式の持つばらつきを考慮するための補正係数、 ϕ_{min} : 杭降伏時の曲率塑性率 (= 1.0)、 ϕ_{act} : 杭曲率塑性率、 $q_d A$: 杭先端部の極限支持力、

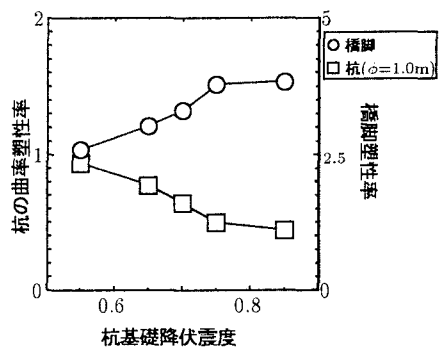


図-1 杭基礎の降伏震度による橋脚および杭の塑性率の変化

$U \sum L_i f_i$: 杭の周面摩擦力の総和, P_H : 杭頭反力

なお、限界状態式を構成する各確率変数の変動係数や分布形は表-1のように設定³⁾した。

(2) 耐力階層化法

式(1)～(3)に示す限界状態式から、それぞれの各限界状態式に対する安全性の余裕を表す安全性指標 β_1 , β_2 , β_3 を Rosenblatt 変換に基づき算出する。そして、生起することが望ましくない杭基礎の限界状態に対する安全性指標 β_2 , β_3 が式(4)を満足する時の杭の降伏震度を算出し、地震時の杭の損傷を防ぐための橋脚－杭基礎間の耐力の階層化を試みた。

$$\frac{\beta_1}{\beta_2} < 1 \text{ and } \frac{\beta_1}{\beta_3} < 1 \dots\dots\dots (4)$$

またその際には、3つの限界状態を同時に考慮した橋梁システムとしての安全性指標 β_{sys} も算定した³⁾。

4. 解析結果

各安全性指標を算定した解析結果を図-2に示す。

橋脚の安全性を表す安全性指標 β_1 の推移から、杭基礎の降伏震度に関わらず、橋脚はほぼ一定の安全性を保つといえる。また、杭体に対する安全性は、杭の降伏震度の増加に伴い比例的に上昇し、橋脚の保有水平耐力に相当する震度の1.23倍の降伏震度をもつ杭基礎を設計すれば、様々な不確定要因を考慮した上でも、杭体の地震時安全性が橋脚よりも高く確保できた。一方、杭の降伏震度が大きくなっても、押込み支持力に対する安全性は、杭の押込み支持力算定式のもつ精度の低さのためにあまり上昇しない。このため、橋梁システムの安全性を表す安全性指標 β_{sys} が押込み支持力に対する安全性に支配されることになった。

結果として、本研究で対象とした橋梁－杭基礎系および地盤モデルの組み合わせでは、式(4)を満足するために必要な杭基礎の降伏震度は1.05であり、これは橋脚の保有水平耐力に相当する震度の実に1.62倍となる。しかしながら、押込み支持力に対する安全性は、杭基礎の耐力よりもむしろ、杭径そのものに大きく依存するため、このように杭基礎の降伏震度を高く設定することによりその安全性を確保することは合理的とは言えず、別途検討する必要があると思われる。

5. 結論

(1) 杭基礎の降伏震度に着目して、橋脚および杭体間の地震時損傷配分を動的解析により検討した結果、両者の耐力の差により損傷配分が異なることが確認された。

(2) 信頼性理論に基づき、地震時の RC 橋脚－杭基礎系の安全性評価を行なった結果、橋脚の保有耐力に相当する震度の1.23倍の降伏震度をもつ杭基礎を設計すれば、杭体の地震時安全性は橋脚よりも高く確保できることが確認された。

(3) 押込み支持力に対する安全性は、支持力算定式の精度の低さから高く評価されず、押込み支持力に対する安全性を杭基礎の耐力に着目して確保することは、合理的でない設計を行なう可能性がある。

参考文献

1) 山田善一編著：耐震構造設計論，京都大学学術出版会，1997
2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996
3) 鈴木基行・秋山充良・山崎康紀：構造系の安全性評価法および 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.71～87，1997.11

表-1 各確率変数の分布形およびパラメータ

限界状態式での記号	確率分布形	平均値	変動係数(%)
α_1, α_2	正規分布	1.0	10%
M_u, ϕ_{min}	正規分布	設計値	8%
$q_d A$	正規分布	設計値	58%
$U \sum L_i f_i$	正規分布	設計値	41%
M_{act}, ϕ_{act}, P_H	正規分布	応答値	30%

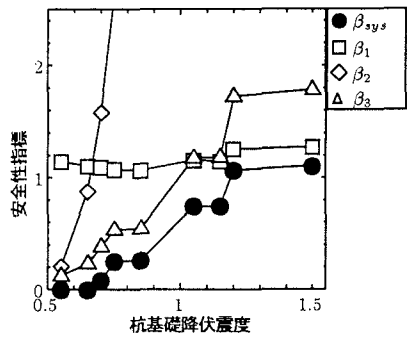


図-2 杭基礎の降伏震度と安全性指標の関係