

リダンダンシーの違いを考慮した 橋梁杭基礎の耐震設計法に関する基礎的研究

熊崎 達郎¹・七澤 利明²・河野 哲也³・秋山 充良⁴

¹学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

²修（工）（国研）土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

³正会員 博（工）（国研）土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 主任研究員（同上）

⁴正会員 博（工） 早稲田大学教授 創造理工学部社会環境工学科（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

1. はじめに

地震動の評価には、依然として非常に大きな不確実性が介在することは避けられず、橋梁構造が設計地震動以上の地震力を受け、損傷を受ける可能性はゼロではない。当然、設計時には様々な安全側の配慮がなされており、設計地震力を超える作用を受けても直ちに倒壊などの重大な被害が生じることはない。一方で、2011年東北地方太平洋沖地震の後、ある特定の地震動や津波に対して構造物の安全性を満足させることに加えて、それ以上の作用を受けたとしても過酷事故に至るような事態を回避する、「危機耐性（anti-catastrophe）」の性能を確保することが提案されている¹⁾。また、設計基準で規定する以上の荷重を受けて橋梁構造に機能低下が生じたときにも、道路や鉄道ネットワークが早期に復旧できる能力を有するように、「レジリエンス（resilience）」に配慮した構造設計の必要性も指摘されている²⁾。

危機耐性やレジリエンスを有する橋梁構造の設計法の開発は途上であり、今後も様々な観点から検討される必要があるが、両者に共通しているのは、安全性を確保するために設定された設計上の限界状態を超える応答が生じたとしても、即座に倒壊などの重大な事態に陥らないようにする配慮を求めていると言える。このような配慮の例は、リダンダンシーやロバスト性の確保であるが、従来、構造設計においてこれらが陽に考慮されることはなかった。このため、例えば静定構造の単柱式橋脚と不静定構造のラーメン橋脚であっても、設計地震動に対する安全性のみに着目すると両者は同じ信頼性を有している

と評価されることになる。しかし、本来は、倒壊につながる限界の状態に対しては、ラーメン橋脚の方が高い信頼性を有していると期待される。

本稿では、リダンダンシーに着目し、橋梁杭基礎を対象として、杭列数によって異なる降伏限界状態以降の余裕度の違いを陽に考慮した耐震設計法について、その基礎検討の結果を報告する。

2. リダンダンシーの違いを考慮した橋梁杭基礎の耐震設計法の概要

本研究では、上部工・RC橋脚・場所打ち杭基礎からなる橋梁を対象とする。リダンダンシーの違いは、橋軸方向の杭列数を2列、3列、そして4列と変化させることで表現する。本研究では、リダンダンシーの違いを考慮した耐震設計法の基礎検討として、式(1)を用いた杭基礎の設計式を検討する。杭基礎は、本来、RC橋脚よりも大きな保有水平耐力を与えることで降伏状態に達することを防いでいる。ここでは、杭基礎の降伏として「一列の杭の杭頭反力が押し込み支持力の上限值に達する」³⁾に着目し、杭体は弾性体を仮定する。この条件を満足する杭基礎に対して、本研究では、さらに式(1)の照査を満足させる。式(1)は、速やかな機能回復に支障となるような変形や損傷を生じさせず、地震後の供用性を確保するための照査式である。

$$\phi\theta_u \geq \theta_r \quad (1)$$

ここに、 ϕ ：リダンダンシーを考慮するための部分係数、 θ_u ：基礎天端の限界回転角（本検討では、道路橋示方書に定められる耐震設計上の供用性確保の

限界回転角0.02radを用いる), θ_r : レベル2地震動による基礎天端の最大応答回転角, である.

式(1)で用いる部分係数の算定フローを図-1に示す. 部分係数 ϕ は, θ_u を上回る回転角 θ_r が生じる確率が所定の値となるように信頼性設計のアプローチにて定める. このとき, 部分係数 ϕ は抵抗および作用の各確率変数の確率分布とそのパラメータの値により異なる^{4), 5)}. 本研究では, 動的解析により得られる基礎天端の最大応答回転角の確率密度関数が対数正規分布により概ね近似できたことから, 部分係数 ϕ をFORMによる次式から算定する.

$$\phi = \frac{\phi'}{\gamma} \quad (2)$$

$$\phi' = \frac{1}{\sqrt{1+V_R^2}} \exp(-\alpha_R \beta_T \zeta_R) \frac{\mu_R}{R_n} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1+V_S^2}} \exp(\alpha_S \beta_T \zeta_S) \frac{\mu_S}{S_n} \quad (4)$$

ここに, ϕ' , γ : 部分係数, β_T : 目標信頼性指標, V_R , V_S : 許容回転角と最大応答回転角の変動係数, R_n , S_n : 許容回転角と最大応答回転角の特性値, μ_R , μ_S : 許容回転角と最大応答回転角の平均値, ζ_R , ζ_S : 許容回転角と最大応答回転角の対数標準偏差, α_R , α_S : 感度係数, である.

3. 部分係数の算定例

(1) 解析条件

a) 解析対象橋梁

本研究では, 標準的な連続鉄桁橋の中間RC橋脚とこれを支持する杭基礎を解析対象橋梁とした. 杭は場所打ち杭であり, RC橋脚は, 道路橋示方書のレベル2地震動に対する規定を満足している. 支承条件は固定とした. 解析対象橋梁は, 図-2に示すように多質点骨組モデルによりモデル化した.

場所打ち杭基礎は, 選択した地盤モデルのもとで2列, 3列, そして4列の場合で試設計した. 杭列数に関係なく杭基礎の降伏震度がほぼ同じ値(0.66)となるように試設計しているため, 杭列数が少なくなるほど杭径が大きくなる(2列: 1.4m, 3列: 1.2m, 4列: 1.0m). 降伏震度が等しいため, 耐震設計上は, 杭列数に関わらず同じ耐震性を有した杭基礎と判定され, 経済性などの観点から最終的な杭列数が決定されることになる. 実際には, 前記したように, 2列杭と4列杭では, 降伏の限界状態(一列の杭の杭頭反力が押し込み支持力の上限值に到

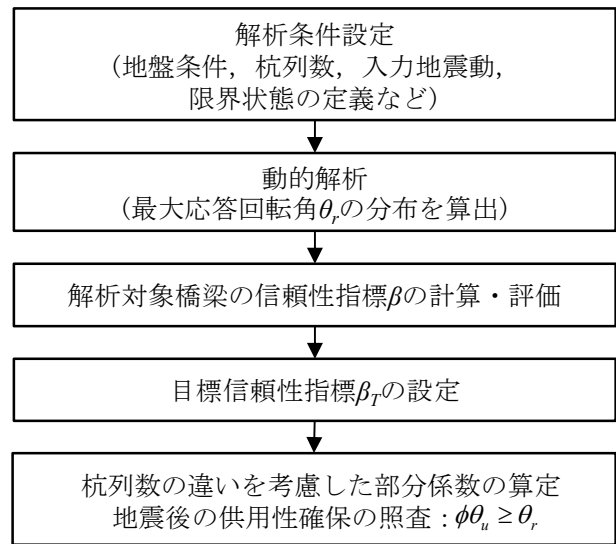


図-1 式(1)で用いる部分係数の算定フロー

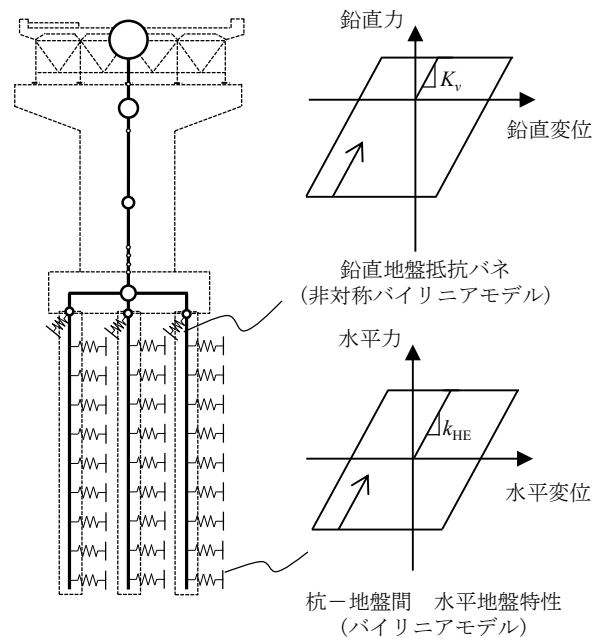


図-2 解析モデル(3列杭)

達)に達した後, $\theta_u = 0.02 \text{ rad}$ に到達するまでの余裕度は異なり, 降伏後は杭列数が多いほど杭基礎の回転角の増加は抑えることができる. そのため, θ_u に到達する確率は, 4列杭の杭基礎を持つ場合が最も小さくなると予想される.

b) 入力地震動

本研究で行う信頼性解析は, 地震動の生起確率は考慮せず, 道路橋示方書に規定されるレベル2地震動タイプIIの振幅を1.0倍, あるいは1.5倍させて使用した. 耐震信頼性解析では, 一般的に, 地震動の生起確率と距離減衰特性を踏まえた地震ハザード解析, および, 同じ地震動強度を持ちながらも位相特性の違いなどにより構造物の非線形応答が異なることを

表-1 モデル誤差に関する統計量

確率変数	備考	平均値	変動係数 COV
鉛直地盤ばね定数	場所打ち杭	1.14	0.60
水平地盤ばね定数	N値から推定 (砂質土N \geq 5)	1.00	0.60
	N値から推定 (粘性土N \geq 5)	1.00	0.70

表-2 信頼性指標 β の計算結果

杭列数	信頼性指標 β	
	タイプII	タイプII \times 1.5
2列杭	2.34	1.09
3列杭	3.18	2.18
4列杭	3.57	2.81

評価する地震 fragility 解析を実施し、ハザード曲線と fragility 曲線のコンボリューションにより年損傷確率などを算定する。以降で示す信頼性解析により得られるのは、道路橋示方書に示されるレベル2地震動が作用した条件下で算定される損傷確率（条件付損傷確率）である点に注意が必要である。

c) 不確定性の評価

本研究では、損傷確率をモンテカルロ・シミュレーション法（MCS）により算定する。橋梁全体系を対象に、そこに介在する種々の不確定性を考慮してMCSにより非線形時刻歴応答解析を繰り返して実施した既存研究に参考文献6)がある。杭基礎-地盤間ばねの算定式や鉄筋コンクリート部材の曲げやせん断耐力の算定式が有するモデル誤差を実測値や実験値との比較に基づき評価している。

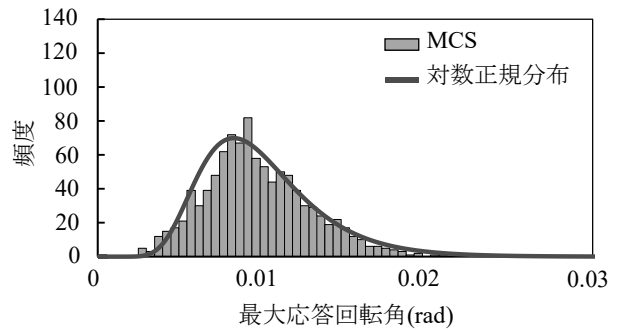
本研究でも、図-2の解析モデルを対象として、参考文献6)と同様の解析手順により損傷確率や応答値の確率密度関数を算定する。考慮した不確定性の一例として、杭基礎-地盤間ばねの鉛直方向および水平方向の抵抗特性の統計量を表-1に示す。MCSにおいて、これらの確率変数は表-1に示すパラメータを持つ対数正規分布に従うとした。

(2) 解析結果

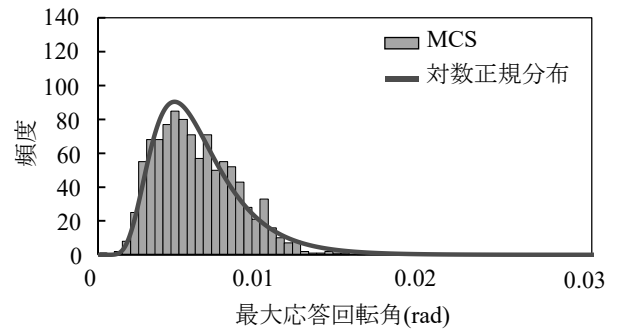
a) 信頼性指標 β の評価

MCSにおいて、動的解析により基礎天端位置における最大応答回転角の統計量を得ることで、式(5)により信頼性指標 β は計算される。

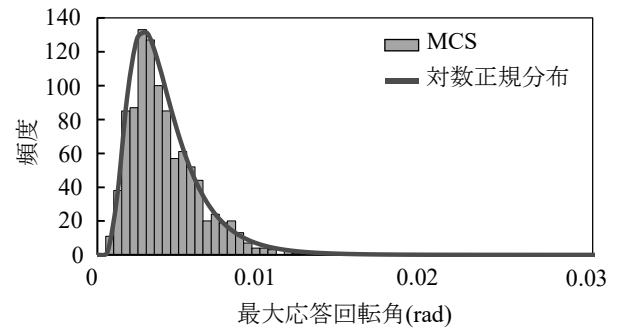
$$\beta = \frac{\lambda_R - \lambda_S}{\sqrt{\zeta_R^2 + \zeta_S^2}} \quad (5)$$



(a) 2列杭の場合



(b) 3列杭の場合



(c) 4列杭の場合

図-3 基礎天端における最大応答回転角の分布 (タイプII地震動)

ここに、 λ_R , λ_S : 許容回転角と最大応答回転角の対数平均, ζ_R , ζ_S : 許容回転角と最大応答回転角の対数標準偏差, である。

表-2に信頼性指標 β の算定結果を示し、図-3に動的解析で求められる杭基礎の基礎天端の最大応答回転角のヒストグラムを示す。レベル2地震動に対して、杭基礎の降伏が生じないように耐震設計されていることから、表-2に示されるように、 θ_u に到達する可能性は小さく（信頼性指標 β は大きく）、さらに、その可能性は杭列数が多い杭基礎ほど小さくなっている。杭基礎-地盤間ばねのばらつきなどにより、動的解析から得られる最大応答回転角はある分布を持つことになるが、そのばらつきは図-3に示されるように、2列杭が最も大きくなっており、このことが2列杭で β が小さくなっている理由である。

表-3 部分係数算定結果 (タイプII地震動)

杭列数	β_r	γ	ϕ
2列杭	2.00	0.90	1.12
3列杭	2.00	0.62	1.60
4列杭	2.00	0.47	2.12

表-4 部分係数算定結果 (タイプII地震動×1.5倍)

杭列数	β_r	γ	ϕ
2列杭	2.00	1.29	0.78
3列杭	2.00	0.94	1.06
4列杭	2.00	0.74	1.36

b) 部分係数の算定結果

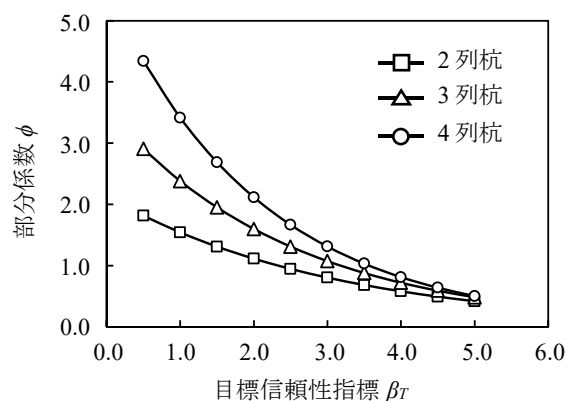
前述した手順に従い算出された部分係数を表-3および表-4に示す。表-3および表-4は、目標信頼性指標 β_r を2.0に設定し、それぞれレベル2地震動タイプIIの振幅を1.0倍および1.5倍としたときの結果である。表-2に示されるように、杭列数が小さいほど、同じ降伏震度を有する杭基礎であっても、 θ_u に到達する可能性は大きくなる。つまり、同じ信頼性指標 β_r を持つように設計することになると、杭列数が少ない杭基礎ほど設計が困難になる部分係数を用いて耐震設計しなければならない。現行の杭基礎の耐震設計は、杭基礎の降伏がレベル2地震動作用時に生じなければ、それを超えた後の θ_u に対する余力を考慮する必要はない。しかし今後、設計地震力以上の作用に対して、危機耐性やレジリエンスへの配慮を求めらるるのであれば、こうした杭列数の違いによる余剰耐力の違いを積極的に考慮すべきと考える。

図-4には、部分係数 ϕ と目標信頼性指標 β_r の関係を示す。目標信頼性指標 β_r は0.5~5.0に変化させた。目標信頼性指標 β_r が小さいほど各杭列数における部分係数 ϕ の大きさに差が生じる。

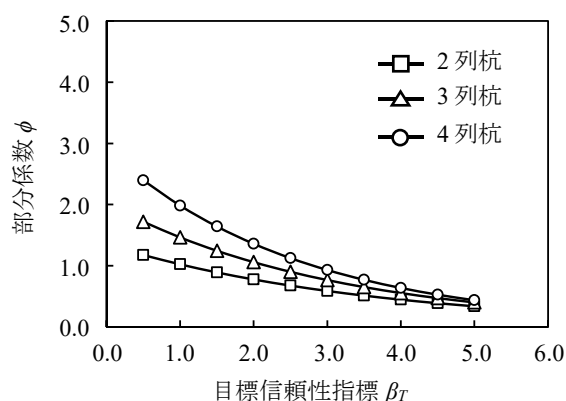
4. まとめ

本稿では、リダンダンシーの違いを考慮した杭基礎の耐震設計法に関する基礎検討例を信頼性解析のアプローチによって示した。少数杭列の橋梁杭基礎は、地盤抵抗特性のモデル誤差(ばらつき)の影響を受けやすいことを確認した。本研究に示した耐震設計式を用いることで、杭列数の違いによる降伏後の余剰耐力(供用性の確保に対する信頼性)の違いを反映することが可能である。

なお、本検討では、橋梁および地盤モデルも固定し、さらには、地震ハザードやフラジリティ解析を行わない極めて簡易な耐震信頼性解析を行っている。今後、信頼性解析を精緻化し、様々な条件下にある



(a) タイプII地震動の場合



(b) タイプII地震動×1.5倍の場合

図-4 部分係数 ϕ と目標信頼性指標 β_r の関係

橋梁構造を対象とすることで、リダンダンシーの違いを定量的に反映できる、汎用性のある耐震設計式と部分係数の提案を行いたい。

参考文献

- 1) 土木学会東日本大震災フォローアップ委員会原子力安全土木技術特定テーマ委員会：原子力発電所の耐震・耐津波性能のあるべき姿に関する提言（土木工学からの視点）
- 2) Akiyama, M. and Frangopol, D.M. Life-cycle design of bridges under multiple hazards: Earthquake, tsunami and continuous deterioration, *Proceedings of 11th International Conference of Structural Safety and Reliability*, New York, USA, 2013.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V・耐震設計編, 2012.
- 4) 星谷勝, 石井清：構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986.
- 5) 土木研究所資料：道路橋の耐震設計における部分係数設計法に関する研究, 2008.
- 6) Akiyama, M., Matsuzaki, H., Dan, H.T. and Suzuki, M.: Reliability-based capacity design for reinforced concrete bridge structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 8(12), 1096-1107, 2012.