

## 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

早稲田大学 学生会員 ○矢口昂史, 小川直也  
早稲田大学 正会員 秋山充良

## 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定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<sup>1)</sup>。また、設計基準力以上の地震や津波による作用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)」を考慮した構造設計の必要性も指摘されている<sup>2)</sup>。

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はあるが、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終局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、構造設計においてそ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について、設計地震動に対する安全性照査を満足した場合には、両者は同じ耐震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（本研究では、以降、崩壊限界状態と呼ぶ）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、この崩壊限界状態に対する余裕度の違いを陽に考慮した耐震設計法についての基礎検討を行った結果を報告する。

## 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、図-1に示す上部工・RC橋脚・場所打ち杭基礎からなる橋梁を対象とする。解析対象は、橋軸方向のみとする。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。杭列数に関係なく杭基礎の降伏震度がほぼ同じ値となるように試設計しているため、2列杭の杭基礎が最も耐力のある杭体を有している。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、設計上の終局限界状態と崩壊限界状態の差が異なり、4列杭は大きな不静定次数を有していることから、崩壊限界状態に至る可能性は小さくなっているはずである。本研究では、式(1)の部分係数フォーマットを用いることで、リダンダンシーの違いを考慮した杭基礎の耐震設計法を提案する。リダンダンシーの高い多列杭を用いるほど、少数杭列の場合よりも合理的な耐震設計が可能になる。

$$\alpha\phi_r\delta_u \geq \gamma_r S \quad (1)$$

ここに、 $\phi_r$ と $\gamma_r$ ：崩壊限界状態に到達する可能性をコントロールするための部分係数、 $\delta_u$ ：杭基礎の終局限界状態に相当する基礎底面位置の水平変位、 $S$ ：杭基礎の基礎底面における最大応答水平変位、 $\alpha$ ：杭基礎の崩壊限界状態に相

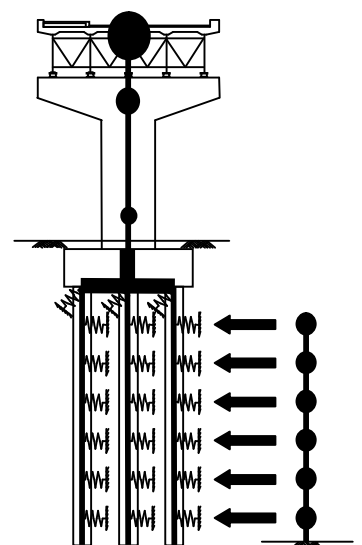


図-1 動的解析モデル

Key Words：リダンダンシー，杭基礎，耐震設計，限界状態

連絡先：〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学理工学部社会環境工学科 TEL：03 (5286) 2694

当する基礎底面位置の水平変位  $\delta_c$  と  $\delta_u$  の比 ( $=\delta_c/\delta_u$ ) を考慮する係数である。

なお、杭基礎の耐震設計の照査には、レベル1地震動に対するものなど、他にも多くの照査が必要になるが、ここでは、杭基礎の基礎底面位置の水平変位のみに着目している。その他の照査項目は今後の課題である。式(1)で用いる部分係数の算定フローを図-2に示す。図-2に示すように、崩壊限界状態に到達する確率が所定の値となるように部分係数  $\phi_r$  および  $\gamma_r$  を定めている。一方、 $\delta_u$  と  $\delta_c$  の比である  $\alpha$  を別途、プッシュオーバー解析により定量化し、最終的には、通常の耐震設計と同じく、 $\delta_c$  は用いずに終局限界状態に対する照査として  $\delta_u$  のみを用いる。

3. 部分係数の算定例

ここでは、式(1)で用いる部分係数を(a)~(e)の各条件にて試算した。(a)杭基礎-地盤間に設けるばねのモデル誤差を参考文献3)などを参考に考慮した。(b)杭列数の違いにより異なる橋梁の1次固有周期の範囲において、加速度応答スペクトルの値が概ね等しくなるタイプ2地震動を用いた。(c)  $\delta_u$  は道路橋示方書<sup>4)</sup>に記載されている許容塑性率の考え方に従い、杭基礎の降伏に相当する水平変位の4倍、また  $\delta_c$  は、 $\delta_u$  に到達したときに杭体に生じている曲率の値が2倍に達したときの基礎底面位置の変位と定義した。(d)崩壊限界状態に対して確保する目標信頼性指標は1.0とした。(e)崩壊限界状態に到達する確率が所定の値となるように部分係数  $\phi_r$  と  $\gamma_r$  を定める際は Monte Carlo 法と FORM を用いた<sup>5)</sup>。

上記の(a)~(e)の条件で、3列杭と4列杭の杭基礎から得られた終局変位  $\delta_u$ 、崩壊変位  $\delta_c$ 、および最大応答変位  $S$  の確率密度関数  $f(x)$  を図-3に示す。また、得られた部分係数の値を表-1にまとめて示す。 $\alpha\phi_r/\gamma_r$  の値に示されるように、杭列数が多いほど式(1)の照査を満足させるのは容易となる。

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示した。本検討では、地震ハザードを用いない条件付きの信頼性解析を行っており、また、崩壊限界状態に相当する杭基礎の水平変位も非常に簡易に算定しているなど、今後、解析モデルの精緻化が必要である。

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), 2013. 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) 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. 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V・耐震設計編, 2012. 5) 星谷勝, 石井清：構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986.

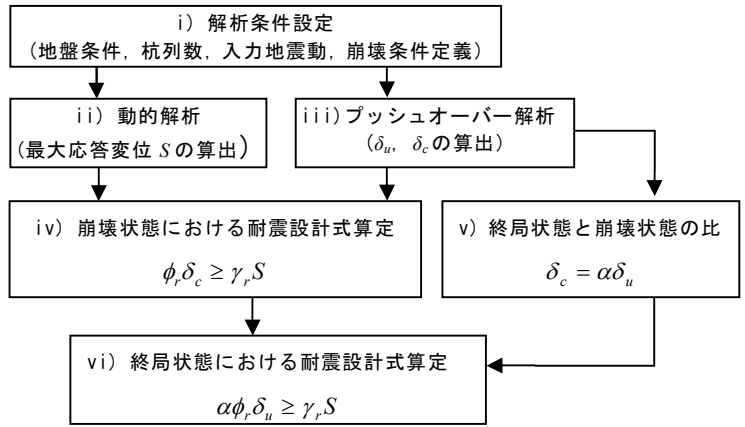


図-2 式(1)で用いる部分係数の算定フロー

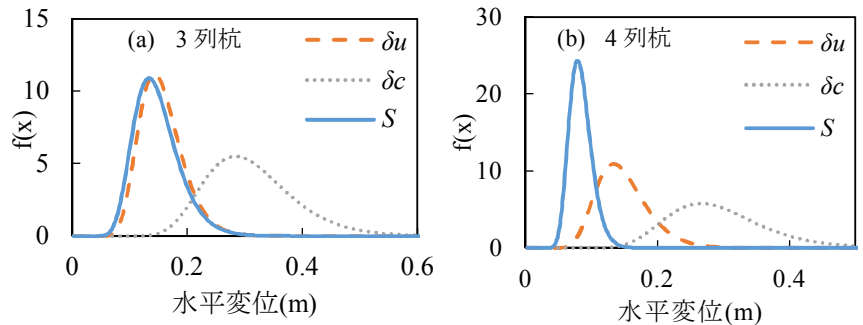


図-3 確率密度関数の比較(3列杭と4列杭の場合)

表-1 式(1)に用いる部分係数

	$\alpha$	$\phi_r$	$\gamma_r$	$\alpha\phi_r/\gamma_r$
2列杭	1.94	0.685	1.12	1.19
3列杭	1.99	0.754	1.11	1.35
4列杭	2.02	0.739	1.04	1.43