

地盤定数の推定精度が RC 橋脚・杭基礎系の地震時損傷確率に及ぼす影響

東北大学大学院 学生会員 ○松崎 裕, Dang Tuan Hai

仙台市

佐々木博道

東北大学大学院 正会員 秋山充良

東北大学大学院 フェロー

鈴木基行

1. はじめに

構造物の設計に際して用いる各種地盤定数については、標準貫入試験によって得られる N 値から推定することが実務設計では広く行われているものの、その推定に伴うばらつきは大きく、 N 値を用いることには賛否両論がある。しかしながら、耐震設計に介在する様々な不確実性を考慮した場合に、どの程度まで地盤定数を精緻に推定すべきなのかについてはほとんど検討されていない。そこで、本研究では、RC 橋脚・場所打ち杭基礎系を対象として、地震動評価に係わる不確実性を地震ハザード曲線、構造物の応答評価に係わる不確実性をフラジリティカーブとして表現した上で、地盤定数の推定精度が RC 橋脚・杭基礎系の地震時損傷確率に及ぼす影響について基礎的検討を行った。

2. 解析対象橋梁および解析対象地盤

解析対象橋梁は、単柱式 RC 橋脚と 3 本×3 本の正方配列の杭基礎で構成される。橋脚および杭基礎の諸元をそれぞれ表-1 および表-2 に示す。また、解析対象地盤の地盤条件を表-3 に示す。

3. 解析モデル

3.1 概説

本研究では、参考文献 1) の研究を参考に、動的相互作用の影響を Sway-Rocking(SR)モデルにより考慮する。Sway バネと Rocking バネの骨格曲線は、材料強度、耐力算定式、そして表-4 に示す地盤定数のばらつきを考慮した上で、2 次元のラーメン構造でモデル化した杭基礎・地盤系に対して、橋脚躯体基部から基礎に伝達される作用力を漸増させることで得られる水平荷重(モーメント)－水平変位(回転角)関係に整合するように Hardin-Drnevich モデルの定数を決定した。履歴曲線は Masing 則に従うとした。SR モデルを用いた動的解析により算定されるフラジリティカーブと、地震ハザード曲線を用いた耐震信頼性評価に基づき、橋脚および杭基礎に降伏を超過する応答が生じる確率(損傷確率)を算定する。

3.2 地盤定数の推定方法

N 値に基づいて地盤定数(粘着力 c と内部摩擦角 ϕ) を推定する推定法 1 と、より推定精度を向上させた推定法 2 とで RC 橋脚・杭基礎系の地震時損傷確率を算定し、比較する。

推定法 1 は、砂質土の内部摩擦角については有効上載圧を考慮しない道路橋示方書²⁾の算定式を用い、粘性土の粘着力については、参考文献 3) により、次式で評価した。

$$\phi = 15 + \sqrt{15N} \quad (1)$$

$$c = 49(0.4 + N/20) \quad (2)$$

表-1 上部構造および橋脚の諸元

橋脚が支持する上部構造の質量(ton)		633.0
橋脚	橋脚高さ(m)	10.0
	コンクリート圧縮強度(N/mm ²)	28.2
	鉄筋降伏強度(N/mm ²)	354
	軸方向鉄筋比(%)	1.31
	横拘束筋体積比(%)	0.53

表-2 杭基礎の諸元

杭径(m)		1.5
コンクリート圧縮強度(N/mm ²)		23.5
鉄筋降伏強度(N/mm ²)		354
軸方向鉄筋比(%)		0.44
横拘束筋体積比(%)		0.39

表-3 解析対象地盤の地盤条件

	種類	層厚(m)	平均 N 値	単位体積重量(kN/m ³)
第 1 層	粘性土	2.5	5	16.7
第 2 層	砂質土	4.0	10	16.7
第 3 層	粘性土	3.5	5	16.7
第 4 層	砂質土	3.5	15	18.6
第 5 層	砂質土	1.4	50	18.6

表-4 地盤定数の推定に関する統計量

	平均値	変動係数
平均 N 値	—	0.132
砂の内部摩擦角：式(1)	1.169	0.126
粘土の粘着力：式(2)	0.986	0.489
砂の内部摩擦角：式(3)	1.077	0.074
粘土の粘着力 c	1.000	0.300

Key Words : 耐震信頼性, RC 橋脚・杭基礎系, 地震ハザード曲線, フラジリティカーブ, 損傷確率, N 値
連絡先 : 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 TEL : 022(795)7449 FAX : 022(795)7448

推定法 2 は、砂質土の内部摩擦角については有効上載圧を考慮した算定式⁴⁾を用い、粘性土の粘着力については、一軸圧縮試験によって得られる粘着力の変動係数 δ_c が 0.2~0.4 程度⁵⁾であることから、本研究では $\delta_c=0.3$ とした。

$$\phi = 4.8 \ln \{170 N / (\sigma'_v + 70)\} + 21 \quad (3)$$

3.3 荷重漸増解析における杭基礎—地盤間バネのばらつき

杭基礎—地盤間バネのばらつきは、参考文献 6)と同様に設定した。なお、杭軸直角方向の抵抗特性のうち、水平地盤反力度の上限値は受働土圧強度から決定されるが、粘着力と内部摩擦角のばらつきは、クーロンの土圧式によってこの受働土圧強度を算定する際に反映される。

3.4 動的解析モデル

SR モデルにより、橋梁は 2 質点 3 自由度系でモデル化される。RC 橋脚には部材モデル(履歴則: Takeda 型モデル)を使用した。減衰モデルは、減衰定数を橋脚は 5%, Sway バネと Rocking バネは 10%とした Rayleigh 減衰とした。なお、減衰のモデル化に伴うばらつきは考慮していない。

3.5 地震時損傷確率の算定法

地震ハザード曲線 $p_0(\alpha)$ 、およびフラジリティカーブ $Fr(\alpha)$ を用いて、損傷確率 pf を次式によって算定する。

$$pf = \int_0^{\infty} \left(-\frac{dp_0}{d\alpha} \right) Fr(\alpha) d\alpha \quad (4)$$

ここで、地震ハザード曲線は、J-SHIS⁷⁾で公開されている仙台市における評価期間 30 年、平均ケースの工学的基盤におけるものを用いた。また、フラジリティカーブは、工学的基盤において任意の最大速度を有する地震波群を用いたモンテカルロ・シミュレーション(MCS)より得られる条件付損傷確率を基に対数正規分布の累積分布関数で近似して作成する。ここで、条件付損傷確率は、耐力項 R (橋脚の降伏変位、杭基礎の降伏変位または降伏回転角であり、杭基礎の降伏の定義は道路橋示方書に従っている)と作用項 S (動的解析より得られる橋脚と杭基礎の最大応答値)の差として定義される限界状態関数 $g=R-S$ において、 $g<0$ となる回数を算定した上で、試行回数で除すことによって算定する。作用項 S は澤田ら⁸⁾の手法によって作成した工学的基盤における模擬地震波を等価線形解析によって地表面の地震波に変換して SR モデルに入力することにより算定する。

4. 解析結果

図-1 に算定されたフラジリティカーブを示し、これと地震ハザード曲線から式(4)で算定される橋脚と杭基礎の 30 年損傷確率を表-5 に示す。表-2 に対し、杭の軸方向鉄筋比を 1 割程度増減させた場合の結果も併記している。地盤定数の推定法 2 は、推定法 1 に比べて 4 割程度も推定に際しての変動係数が低減されているにも関わらず、推定精度向上による杭基礎の損傷確率の変化は、杭の軸方向鉄筋比をわずかに 0.1%程度増加させることによる損傷確率の低減分と同程度に過ぎず、地盤定数の推定精度向上が地震時損傷確率へ及ぼす影響は小さい。

5. まとめ

本研究で解析対象とした橋脚・杭基礎系の耐震信頼性は、地震動評価に係わる時間的・空間的なばらつきに支配されており、そのばらつきの損傷確率に与える感度が非常に大きい。地震ハザードの評価結果から生起確率付模擬地震波群を作成する方法など、解決すべき課題も多いが、提示した耐震信頼性の評価手法に基づけば、コンクリート構造物・地盤系の耐震設計に必要な地盤定数の推定精度などを議論できる。

参考文献

- 1) 矢部正明：地震時保有耐力法による橋脚・杭基礎系の耐震設計に関する研究，東京工業大学学位論文，1999。
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002。
- 3) 大崎順彦：建築構造講座「基礎構造」，コロナ社，1961。
- 4) 福井次郎ほか：三軸圧縮試験による砂の内部摩擦角と標準貫入試験 N 値との関係，土木研究所資料，第 3849 号，2002。
- 5) 松尾稔：地盤工学—信頼性設計の理念と実際—，技報堂出版，1984。
- 6) 秋山充良ほか：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。
- 7) 防災科学技術研究所：地震ハザードステーション J-SHIS，<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>。
- 8) 澤田勉ほか：最大地動の距離減衰式に基づく工学的基盤地震動のシミュレーション手法，土木学会論文集，No.682/I-56，pp.311-322，2001。

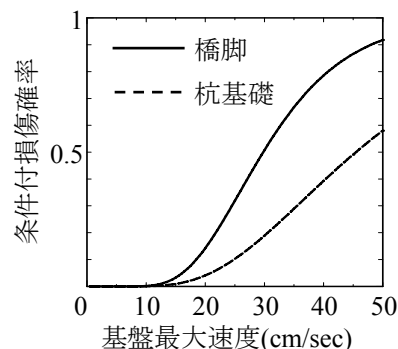


図-1 フラジリティカーブ

表-5 橋脚および杭の 30 年損傷確率

杭の軸方向鉄筋比(%)	地盤定数の推定法	橋脚	杭
0.35	推定法 1	0.14	0.080
	推定法 2	0.16	0.063
0.44	推定法 1	0.14	0.052
	推定法 2	0.17	0.051