

橋梁基礎の信頼性設計に関する研究

○岐阜大学 学生会員 勝野勇二
岐阜大学 正会員 本城勇介
岐阜大学 正会員 大竹 雄

1. 背景と目的

本研究では、現存する橋梁基礎(直接基礎)を設計例題として、実際の地盤調査データの統計分析と地盤パラメータの設定から性能評価のための超過確率の推定までの一連の方法、手順を提案することを最終目的としている。

2. 研究の流れ

2.1 対象構造物(現存する構造物)

- (1)上部工形式：鋼 3 径間連続非合成 I 桁橋
- (2)下部工形式：逆 T 字式橋台
- (3)基礎形式：直接基礎
- (4)基礎地盤：風化泥岩
- (5)地盤調査：標準貫入試験 2 地点、孔内水平載荷試験 1 箇所、三軸試験 1 箇所
- (6)構造決定要因

表 1 は、現行設計による照査結果である。本研究では、応答比率が最大である L1 地震時の鉛直支持力について信頼性設計の適用を検討する。

表 1 既設計の照査結果

		許容値	外力	応答比率
常時	鉛直力(kN)	68503	29542	0.43
	水平力(kN)	17381	5267	0.30
地震時	鉛直力(kN)	31066	28700	0.92
	水平力(kN)	15686	130725	0.83

2.2 不確実性分析

不確実性を以下の 5 つに分類し、定量化を行う。

- (1)計測誤差：調査や試験に含まれる計測誤差。
- (2)空間的バラツキ：地盤パラメータを計測した時に経験される、空間的ばらつき。このばらつきは、信頼性設計では、便宜的に確率場としてモデル化する。
- (3)統計的推定誤差：当てはめた確率場の統計量や、指定された個々の点における地盤パラメータの値を、限られた地盤調査(サンプル)から推定する時の誤差。
- (4)変換誤差：地盤調査の結果に基づき、設計で直接使用する地盤パラメータに変換する時の誤差。
- (5)設計モデル誤差：設計計算に採用されたモデルが、現実に現象を再現する精度にかかわる誤差。

2.3 信頼性評価

図 2 に信頼性評価の流れと各不確実性の関連を示す。それぞれの不確実性を確率分布でモデル化し M.C.S(モンテ・カルロ・シミュレーション)により信頼性を評価するものである。得られた結果と従来設計との比較、不確実性要因の寄与度分析から、従来設計における課題を示す。

3. 不確実性分析

3.1 空間的バラツキ

標準貫入試験(N 値)に基づいて空間的バラツキをモデル化する。図 3 は、N 値の深度分布を重ねて示したものである。1 次関数をトレンド関数とした。図 4 は、ランダム成分(トレンド関数の残差)の深度分布とヒストグラムを示している。残差は、正規分布でモデル化でき、平均 0.0、標準偏差 20.5 であった。さらに、ランダム成分の自己相関構造をモデル化するため、自己相関分析を行った(図 5, 図 6)。水平、鉛直ともに、最小調査間隔よりも短いことが確認された。ここでは、調査間隔を自己相関距離として仮定することにした ($\theta z=1\text{m}$ 、 $\theta x=22\text{m}$)。

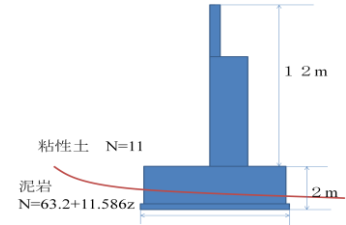


図 1 設計対象構造物

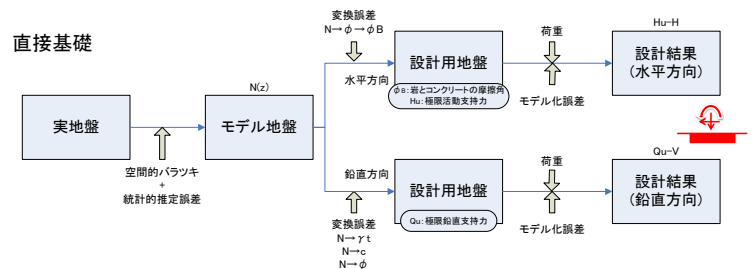


図 2 直接基礎の設計フロー

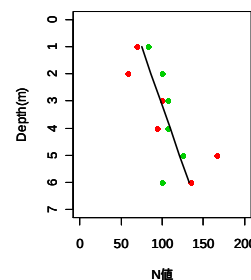


図 3 N 値の深度分布

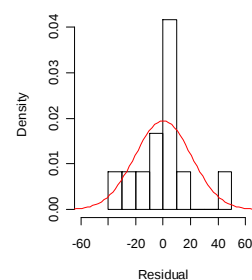


図 4 残差と深度分布のヒストグラム

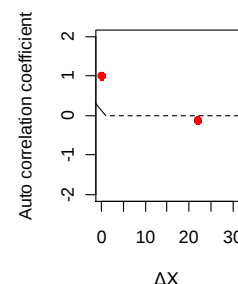


図 5 水平自己相関距離

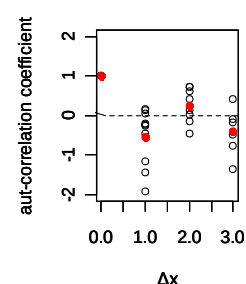


図 6 鉛直自己相関距離

表 2 N 値の地盤パラメータ

層名	n	トレンド成分 N(z)	ランダム成分 $\varepsilon(z)$			
			σ	θ_x	θ_z	分布
風化泥岩	12	63.2+11.586z	20.5	1	22	正規

3.2 空間的バラツキの低減と統計的推定誤差

本城・大竹・加藤の研究¹⁾に基づいて、空間的バラツキの低減および統計的推定誤差の定量化を行う。構造物の性能を支配する局所平均は、鉛直方向は、基礎の底面から $V_z=1.5B(m)$ の深度、水平方向は基礎幅が $V_x=3B(m)$ と仮定して設定した。以上を踏まえ、Vanmarke(1997)の分散関数(式(1))より空間的バラツキの低減率は以下のように計算される。

$$\Gamma=(\theta/V)^2(2(V/\theta-1+\exp(-V/\theta))) \quad (1)$$

$$\Gamma_x=0.68, \Gamma_z=0.13, \Gamma_x \times \Gamma_z=0.09$$

次に、統計的推定誤差は、本城・大竹・加藤 2010^{※)}の一般推定分散関数を用いる。紙面上詳述は割愛するが、測線長 L (地盤調査領域)、自己相関距離 θ 、データ数 n で決定される。地盤パラメータの不確実性は、両者の和として評価され以下の通りとなる。

$$\sigma_{zv} = 20.5 \times (0.09 + 0.54) = 12.9$$

3.2 変換誤差(換算 N 値からの変換)

以下に示す標準貫入試験の換算 N 値に基づく変換式²⁾を用いる。

(1) 換算 N 値から単位体積重量 γ への変換式

$$\gamma_t = 1.173 + 0.4 \log N \text{ [tf/m}^3 \text{]} \quad [\times 9.807 \text{ kN/m}^3]$$

(2) 換算 N 値から粘着力 c への変換式

$$c = 0.165 N^{0.606} \text{ (kgf/cm}^2 \text{)} \quad [\times 98.1 \text{ kN/m}^2]$$

(3) 換算 N 値から内部摩擦角 ϕ への変換式

$$\phi = 0.888 \log N + 19.3 \text{ (}^\circ \text{)}$$

表 3 は変換式の回帰精度を示したものである。この誤差を変換誤差として信頼性解析に取込んだ。

表 3 変換誤差の不確実性

基本変数	記号	n	COV	分布
単位体積重量 (kN/m ³)	γ_t	208	0.10	正規
内部摩擦角 (°)	ϕ	45	0.489	正規
粘着力 (kN/m ²)	c	44	2.91	対数正規

※COV は N=100 の場合の値を示す

3.3 設計モデル誤差

道路橋示方書³⁾に示されている直接基礎の極限鉛直支持力算定式を用いて MCS を行う。

$$Q_u = A_e (\alpha k c N_c S_c + k q N_q S_q + 1/2 \gamma l \beta B e N_\gamma S_\gamma) \quad (2)$$

ここに、 A_e = 基礎の有効面積、 B_e = 基礎の有効幅、 κ 及び $\beta = N_q$ と N_γ の形状係数、 q = 基礎底面深度における有効土被り圧、 D_f = 根入れ深さ(m)、 S_q 及び $S_\gamma = N_q$ と N_γ の寸法効果、Kohno et al.⁴⁾は、上式で計算された支持力と、平板載荷試験の結果を比較し、この式が偏差 0.814、変動係数 0.254 の不確実性を有することを示した。

表 4 モデル誤差の不確実性

基本変数	偏差	COV	分布
極限鉛直支持力 ²⁾	0.814	0.254	対数正規

4. 信頼性評価

100 万回の MCS の結果に基づき破壊確率を推定した。信頼性解析の結果は図 7 に示されている。表 5 は、各不確実性要因の寄与度を算定した結果である。ここで β_{-i} は、不確実性要因 i の影響を除いた時に期待される β を示している。

以上より、現行道示に基づいて設計された当該直接基礎の信頼性指標 β は 1 程度であることが分かった。また、本研究の対象構造物の性能照査においては、せん断強度定数 (c , ϕ) の変換誤差の影響や支持力公式の設計モデル誤差が支配的であり、地盤調査により直接的にせん断強度を推定することや設計式の改善の重要性が指摘できる。せん断強度については ϕ の変換誤差の寄与度が大きい。表 4 に示したように変換誤差自体は c の方が圧倒的に大きい、支持力の信頼度への寄与度は ϕ の方が大きいことも興味深い点である。このような結果は、設計者、管理者に有益な情報を提供するであろう。

表 5 不確実性の寄与度

不確実性	β 及び β_{-i}	寄与度 (%)
全不確実性	0.906	100
統計的推定誤差	0.918	2.5
空間的バラツキ	0.909	0.6
変換誤差	γ_t	0.906
	c	1.061
	ϕ	1.340
モデル誤差	1.300	51.4

5. 今後の課題と展望

本研究では、実際の地盤データの統計解析に基づいて、現存する直接基礎を例題に信頼性解析方法の手順と結果を示した。今後は、直接基礎の滑動問題や杭基礎構造物にも展開する予定である。

参考文献

- 1) 本城勇介, 大竹雄, 加藤栄和: 地盤パラメータ局所平均の空間的ばらつきと統計的推定誤差の簡易評価理論, 土木学会論文集 (地圏工学), 印刷中
- 2) 中日本高速道路: 設計要領第 2 集, 2007.
- 3) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編, IV 下部構造編 2002.
- 4) Kohno, T., Nakaura, T., Shirato, M. and Nakatani, S.: An evaluation of the reliability of vertically loaded shallow foundations and grouped-pile foundations, Procs of The Second International Symposium on Geotechnical Risk and Safety, Japan, pp.177-184, 2009.

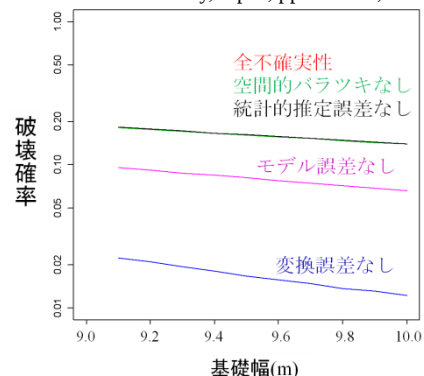


図 7 基礎幅と破壊確率