

地盤構造物の信頼性解析法の開発 その1：直接基礎

岐阜大学 学生会員(現 JR 東海建設) 勝野勇二
 岐阜大学 正会員 大竹 雄
 岐阜大学 正正員 本城勇介
 岐阜大学 学生会員 間瀬将成

1. 目的

本研究は、地盤構造物の実務的な信頼性解析法の開発を目的としている。実構造物の設計例題を通して具体的な設計方法を提示し、さらに、不確実性に関する考察を通じて橋梁基礎設計における課題を明確にする。

対象とする構造物は、橋梁の直接基礎、杭基礎、そして仮設土留め設計である。その1では、著者らが提案している信頼性解析方法の概要と直接基礎の具体的な計算方法と結果を示す。

2. 信頼性解析方法

2.1 解析方法の概要

地盤構造物の信頼性設計に考慮すべき不確実性は、(1)地盤パラメータの「空間的ばらつき」(2)地盤パラメータ値を決定することに起因する「統計的推定誤差」、(3)設計に必要な地盤パラメータに変換するときの「変換誤差」、(4)設計計算モデルの「モデル化誤差」、が主要な要因と考えられる。

上記(1)、(2)については、本城・大竹・加藤(2012)¹⁾が提案している地盤パラメータの空間的なばらつきとこれに伴う統計的推定誤差を評価する理論を用いる。この理論は、不均質な連続体である地盤を定常確率場として単純化・理想化した上で、この確率場より得られた限られた数の標本(地盤調査)より、確率場の任意地点の局所平均値を推定する問題として定式化したものである。地盤パラメータの空間的ばらつきが構造物の性能が与える影響は、その構造物に影響を与える地盤の範囲に応じた局所平均により評価するとし、局所平均値の推定は、調査位置と構造物建設位置を特定しない「一般推定」とこれを特定する「局所推定」に分けて定式化されている点が特徴的である。

(3)、(4)については、多くの試験データを収集して統計的な分析から不確実性を評価した既往の研究(例えば²⁾³⁾があり、これらの成果を活用して信頼性解析を行う。

2.2 地盤パラメータの空間的ばらつきと統計的推定誤差評価理論の概要

(1)基本仮定

地盤パラメータは、トレンド成分とランダム成分の和として表され、ランダム成分は(弱)定常確率場によって記述される。ここで確率場は、次式により記述される。

$$Z(X) = \mu_z(X) + \varepsilon(X) \quad (1)$$

ここに、 Z は定常確率場、 X は空間座標、 μ_z は確定値であるトレンド成分、 ε はランダム成分であり、平均0、分散 σ_z^2 、自己相関関数 $\rho_z(\Delta X|\theta)$ である。なお θ は自己相関距離で、正規確率場であると仮定し、 $\varepsilon(x) \sim N(0, \sigma_z^2, \theta)$ と表す。

(2)局所平均と分散関数

地盤構造物の設計で重要なのは、個々の点の地盤パラメータではなく、ある面積や体積についての平均(局

所平均)であると主張した Vanmarcke⁴⁾の考え方に基づいて、局所平均の推定問題として捉えている。1次元確率場で、座標 x を中心とする長さ V についての局所平均は(2)式となり、分散関数 Γ を用いるとその分散は(3)式で求められる。 Γ は最大1.0で V が大きいかほど小さくなる関数である。局所平均の分散は元の分散よりも低減することを示している。

$$Z_V(x) = 1/V \int_{x-\frac{V}{2}}^{x+\frac{V}{2}} Z(u) du \quad (2)$$

$$\sigma_{z_v}^2 = E \left[\left\{ 1/V \int_0^V Z(x) dx - \mu_z \right\}^2 \right] = \sigma_z^2 \Gamma^2(V) \quad (3)$$

(3)局所平均の平均推定分散

以上の考えから、局所平均 Z_V を推定する問題を考える。局所平均の平均推定分散は、(4)式のように表現される。ここで、(4)式の第1項は(3)式に等しく、すなわち空間的ばらつきの効果を意味する。そして、第2項、第3項の合計が統計的推定誤差を意味する。

$$\sigma_{z_v}^2 = \sigma_z^2 \left\{ \Gamma^2(V/\theta) + \Lambda^2(n, L_N, \nu) - 2 \sum_{i=1}^n v_i \gamma_V(Z_V(x_{est}), Z(x_i)) \right\} \quad (4)$$

ここで、「一般推定」は、局所平均の期待値は母平均となるので、確率場の母平均の推定問題となる。すなわち、観測値の重み v_i はいずれも等しく $1/n$ 、第3項は0と仮定され、一般推定の統計的推定誤差を表す一般推定分散関数 Λ_G は以下のように定義される。ここで、 L_N は側線長 L を θ で正規化した値である。

$$\Lambda_G^2 = \Lambda(n, L_N, 1/n) \quad (5)$$

「局所推定」では、第3項が重要な役割を担う。この項は、いわゆるKrigingによる内挿効果であり、観測値の重み v_i はBlock Krigingの手順に従って求められる。局所推定の統計的推定誤差を表す局所推定分散関数 Λ_L は第2項、第3項の和で表現される((6)式)。

$$\Lambda_L^2 = \Lambda^2(n, L_N, \nu) - 2 \sum_{i=1}^n v_i \gamma_V(Z_V(x_{est}), Z(x_i)) \quad (6)$$

ここでは、紙面の都合上、導出過程の大部分を省略している。詳細は、文献1)を参照されたい。

3. 直接基礎の設計例

3.1 対象施設

図1に示す泥岩(m_u)上に設置された直接基礎を研究対象とした。基礎幅は、鉛直支持力の照査で決定され、9.4mとなっている。地盤調査データとしては、周辺に標準貫入試験(N値)が2箇所あり

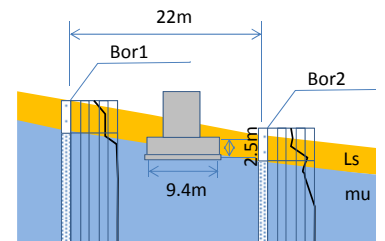


図1 設計条件

り、調査間隔は22mで、その中間地点に基礎が計画された。この地盤情報が設計用パラメータ設定の基礎資料となる。

3.2 不確実性の定量化

(1)空間的ばらつき

N 値に基づいて空間的ばらつきをモデル化する. 図 2 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. ランダム成分は, 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は調査間隔の半分で鉛直方向 0.5m, 水平方向 11m で仮定した.

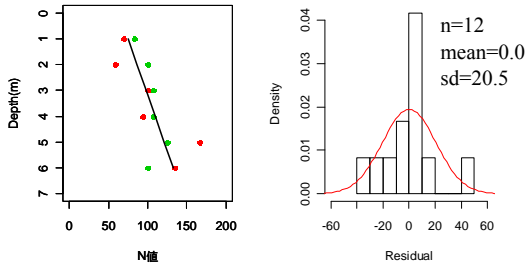


図 2 N 値の深度分布と残差のヒストグラム

(2)空間的ばらつきの低減と統計的推定誤差

局所平均の大きさは大竹・本城⁵⁾の方法に従い, Prandtl 型の支持力すべり線の範囲から設定した. これにより計算される空間的ばらつきの低減を表す分散関数 Γ と統計的推定誤差を表す一般 Λ_G 及び局所 Λ_L 推定分散関数を表 2 に示す. 具体的な計算方法については文献 1)を参照されたい.

表 1 分散関数と推定分散関数

推定方法	$V_x(m)$	$V_z(m)$	Γ	Λ_G or Λ_L
一般	13	11	0.059	0.114
局所			0.059	0.022

図 3 は, 一般推定と局所推定による評価結果を空間的に表現したものである. 一般推定の結果は, 位置関係を考慮しない, つまり, どの地点においても同一の値が得られる. 局所推定の結果は, 調査地点付近で統計的推定誤差が小さく, 基礎設置地点では 0 である.

図 4 は, 一般的なケースを想定して, ボーリング本数 $n=1$ の場合を想定して計算した. ここでは, 基礎設置位置直下での調査を想定しており, 基礎設置位置から離れるにつれて急激に統計的推定誤差が大きくなる傾向が読み取れる. 十分離れると一般推定の結果に漸近していく.

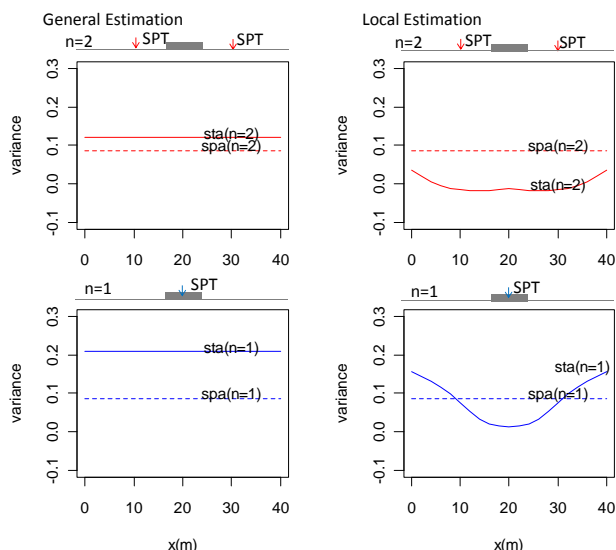


図 3 空間的ばらつきと統計的推定誤差

位置関係の効果は, これまで設計に取り入れることは少なかった. しかし, 本来このことは設計に考慮されるべきで, これは設計された構造物の信頼度に大きな影響を与える. 必要な地盤調査の数や位置の最適化もこの議論から導くことが可能となると考えられる.

(3)変換誤差と設計モデル化誤差

N 値に基づく変換式²⁾を用いて設計用地盤パラメータに変換した. 変換に係る誤差を表 3 に示す.

- 1)N 値から粘着力 c への変換式
 $c = 0.165 N^{0.606} (\text{kgf/cm}^2) [\times 98.1 \text{kN/m}^2]$
- 2)N 値から内部摩擦角 ϕ への変換式
 $\phi = 0.888 \log N + 19.3 (\text{°})$

道示に示されている直接基礎の極限鉛直支持力算定式(7)を用いて信頼性解析を行う.

$$Q_u = A_e (a_k c N_c S_c + \kappa q N_q S_q + 1/2 \gamma_1 \beta B_c N_\gamma S_\gamma) \quad (7)$$

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 の寸法効果である. Khono³⁾は, 平板載荷試験が実施された現場の事例を収集し, 設計値と比較することにより, この式の誤差を定量化している(表 3).

表 3 変換誤差と設計モデル化誤差

基本変数	n	bias	COV	分布	種類
$\phi(\text{°})$	45	1.0	0.489	正規	変換
$c(\text{kN/m}^2)$	44	1.0	2.91	対数正規	変換
$Q_u(\text{kN})$	6	0.814	0.25	対数正規	モデル化

2.2 信頼性解析結果と考察

以上の準備を踏まえて, モンテカルロシミュレーション(MCS)により信頼性解析を行った. 得られた当該基礎の信頼性は, 信頼性指標 β で常時 1.8 程度, 地震時で 0.8 程度となった. AASHTO では, 2.0~3.5 が目標信頼性として設定されているが, これに対して, やや小さい値を示した. 図 4 は, 各不確実性の寄与度を整理したものである. N 値から地盤パラメータへの変換誤差が信頼性に与える影響が極めて大きいことが示された. 岩盤の強度は亀裂や種別により変化することから, 大きな枠組みで岩種をグルーピングして整理された既往の変換式を用いると構造物の信頼性を大きく低下させることが示された. これより, 岩盤については, 平板載荷試験や岩盤の一軸圧縮試験などを現場で実施し, 適切に岩盤強度を設定することがこの種の設計では非常に重要であることが示された.

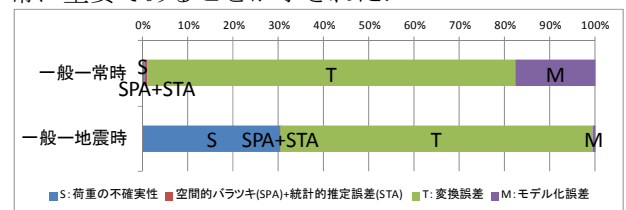


図 4 各不確実性の寄与度

参考文献

- 1) 本城他: 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 (c), Vol. 68, No. 1, 41-55, 2002
- 2) 中日本高速道路: 設計要領第 2 集, 2007.
- 3) Khono et al.: An evaluation of the reliability of vertically loaded shallow foundations and grouped-pile foundations, Procs of The Second, IS-gifu, pp.177-184, 2009.
- 4) Vanmarke: Probabilistic Modeling Soil Profiles, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 103(GT11), 1227-1246
- 5) 大竹・本城: 局所平均を用いた地盤パラメータの空間的ばらつきの簡易評価理論の検証, 土木学会論文集(c) (投稿中)