土構造物・地盤の性能設計
Peformance -based disign for geotechnical structures and grounds

西村伸一
NISHIMURA Shin-ichi

1．はじめに　土・基礎構造物について，性能設計の導入が検討され始めて久しい[1)]．各基準が整備されつつあり，農業農村工学分野においてもその導入が急がれているところである[2)]．一般的な導入の流れの中で，性能規定には，限界状態設計法の概念が用いられている．また，性能照査法もそれに基づいているが，とくに，レベル I 信頼性設計法と分類される方法が導入されている．限界状態設計法や信頼性設計法の基礎概念は，コンクリートや，他の構造物の場合と同様であるが，地盤および土構造物の特殊性は，その物性が空間的に変動しているという点にある．本報告では，その取り扱いを重点的に解説する．

2．信頼性設計法　一般に，構造物の限界状態を規定する関数を性能関数と呼び，式 (1) のように定義される．

$$g(x_1,x_2,\cdots,x_n)=R(x_1,x_2,\cdots,x_n)-Q(x_1,x_2,\cdots,x_n) \quad (1)$$

R：抵抗力 , Q：荷重，$x_1, x_2,..., x_n$：抵抗力・荷重に影響する n 個の不確定なパラメータ（ここでは，$N(\mu_{xi}, \sigma_{xi})$ にしたがう正規確率変数とする）．R と Q が正規分布であると仮定すると，性能関数 g も正規分布となる．一般に，$g<0$ の状態は構造物が破壊することを表す．また，限界状態設計法に照らし合わせると，$g=0$ が使用限界状態もしくは終局限界状態を表すと考えることができる．関数 g の平均と分散を μ_g, σ_g と定義すると，破壊確率 P_f は式 (2)-(4) で定義される．

$$P_f=P(g<0)=P(\mu_g+\sigma_g s<0)=\Phi(-\beta)=1-\Phi(\beta) \quad (2) \qquad s=(g-\mu_g)/\sigma_g \quad (3) \qquad \beta=\mu_g/\sigma_g \quad (4)$$

P：確率，s：$N(0,1)$ の正規標準変数，Φ：標準正規分布関数，β：信頼性指標

破壊確率と信頼性指標の間には 1 対 1 の関係があり，β の値が大きくなるほど破壊確率が小さくなる．したがって，限界状態設計法では破壊確率ではなく，信頼性指標 β について議論されることが多い．この様な方法は，レベル II の信頼性設計法と分類されている．さらに，抵抗力に関わる任意の設計パラメータ x が正規分布にしたがうとき，設定された目標信頼性指標 β_t から，部分安全係数 ρ が式 (5) によって導かれ，パラメータの設計値 x_d が式 (6) によって決定される．

$$\rho=1/(1-V\alpha\beta_t) \quad (5) \qquad x_d=x_k/\rho \quad (6)$$

x_k：パラメータの特性値（通常 $x_k=\mu_x$），x_d：パラメータの設計値，V：パラメータの変動係数，α：パラメータの感度，β_t：目標信頼性指標

このような部分安全係数を用いた設計は，レベル I 信頼性設計と呼ばれ，現行の限界状態設計法で用いられている．一般に，関数 R や Q は，パラメータ x に関して，非線形であるため，性能関数を線形近似する手法がとられ，これを FORM（First-Order Reliability Method) と呼ぶ．

地盤の支持力問題において，地盤強度である，粘着力 c，内部摩擦係数 $\tan\phi$ および地盤の単位堆積重量 γ を確率パラメータとした場合，性能関数は式 (7) で与えられる．これに対して，地盤定数の平均値（特性値）と部分安全係数をそれぞれ，$\mu_c, \mu_{\tan\phi}, \mu_\gamma, \rho_c, \rho_{\tan\phi}, \rho_\gamma$ とすると性能照査が式 (8) を用いて実施される．この部分安全係数の決定例が，村上らによって示されている[2)]．

$$g_{q_u}=q_u(c,\tan\phi,\gamma)-q_{\max} \quad (7)$$

$q_{\max}$: 地盤にかかる最大荷重

$$q_u(\mu_c/\rho_c, \mu_{\tan\phi}/\rho_{\tan\phi}, \mu_\gamma/\rho_\gamma)-q_{\max}\geq 0 \quad (8)$$

3．地盤パラメータの空間分布　一般に，地盤パラメータのばらつきの程度は，そのサンプル値の標準偏差 σ_x や変動係数 V を用いて評価する．しかし，実際の地盤パラメータのばらつきは，空間的な変動性によると考えられる．とくに，一軸圧縮強や N 値の様に空間的な変動性が大きい

岡山大学　Okayama University　キーワード：土構造物，性能設計，信頼性設計

場合，この特性を考慮する必要がり，自己共分散関数で表現できる．例えば，図 -1 のような深度 z 方向の非排水強度 c_u の分布を考えると，Δz 間隔に対する自己相関係数が式 (9) によって得られる．ただし，ここでは，自己共分散関数を分散で除して無次元化した関数 r を自己相関関数と呼んでいる．

$$r(\Delta z) = \frac{1}{(n-2)\sigma_{c_u}^2}\sum_i^n \left\{c_u(z_i) - \mu_{c_u}\right\}\left\{c_u(z_i + \Delta z) - \mu_{c_u}\right\} \quad (9)$$

σ_{cu}：非排水強度の標準偏差　μ_{cu}：非排水強度の平均値　n：サンプル数

この値から，自己相関関数を求めた例が図 -2 に示される．図中でも採用されているように，最も単純な自己相関関数として，式 (10) の指数関数が良く用いられる．ここで，l_z は深度方向の相関距離であり，図の例では，l_z=0.73 m と求められている．

$$r(\Delta z) = \exp(-\Delta z / l_z) \quad (10)$$

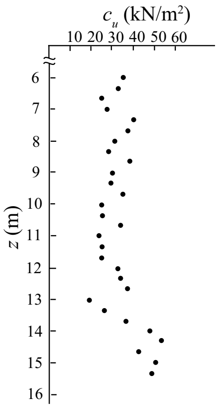

図 -1　非排水強度の空間分布の例[3)]
An example for distribution of undrained shear strength with depth

圧密沈下解析や円弧すべり解析を考えた場合，重要なのはサンプリング点における地盤の圧縮性や強度ではなく，ある体積や面積についての積分値である．言い方を変えると，軟弱層やすべり円弧における空間平均の圧縮性やせん断強度が重要である．任意の地盤パラメータ x を任意の区間 T（簡単のために一次元問題を考える）で平均化したパラメータ x_T を定義したとき，この分散は式 (11) のようになる。ここで，$\Gamma(T)$ は，分散低減関数[4)] と呼ばれるが，式 (12) で与えられる．

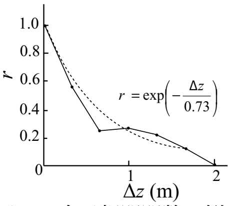

図 -2　自己相関関数の例（非排水強度）[3)]
An example of auto-correlation function

$$\sigma_T^2 = \Gamma(T)^2 \sigma_x^2 \quad (11) \qquad \Gamma(T)^2 = \frac{1}{T^2}\int_T\int_T r(z_1 - z_2)dz_1 dz_2 \quad (12)$$

$\Gamma(T)^2 \le 1$ であるので，$\sigma_T^2 \le \sigma_x^2$ となり，x_T の分散はサンプルの分散より低減される。したがって，沈下解析や円弧すべり解析では，パラメータの標準偏差として，サンプル標準偏差 σ_x ではなく，σ_T を用いるのがより適切である．T は，軟弱地盤の沈下問題であれば軟弱層厚，円弧すべり解析であれば円弧の長さを意味する．図 -3 に沈下問題の例を示す．m_v 法によって沈下を計算する場合，沈下量 S_f は次式で与えられる．$S_f = \int_0^H m_v(z)\Delta p dz$ (13) H: 軟弱層厚　Δp: 上載荷重

沈下量 S_f 分散 は式 (14) のようになる．ただし，式中では m_v のサンプルの平均値 と分散 $\sigma_{m_v}^2$ が深度に依存しないものとしている．

$$\sigma_{S_f}^2 = \sigma_{m_v}^2 H^2 \Delta p^2 \frac{1}{H^2}\int_0^H\int_0^H r(|z_1 - z_2|)dz_1 dz_2 = \sigma_{m_v}^2 \Gamma(H)^2 H^2 \Delta p^2 \quad (14)$$

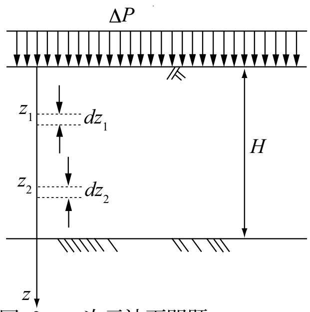

図 -3　一次元沈下問題
One-dimensional settlement problem

この式からも，解析に用いるべき m_v の分散値は，$\sigma_{m_v}^2$ ではなく，$\sigma_{m_v}^2\Gamma(H)^2$ であることが分かる。

4．まとめおよび考察

現在受け入れられている性能設計では，FORM が多用され，部分安全係数を用いたレベル I 信頼性解析が，性能照査で採用されている．一方，地盤問題の特色である空間分布を性能照査に取り入れようとすると，性能関数のパラメータ数が膨大になり，FORM の定式化が困難になる．これはレベル I 信頼性設計法の一つの限界を示しており，将来的には，レベル II, レベル III 信頼性設計法が検討されるべきである．

引用文献　1) 地盤工学会基準 JGS4001: 性能設計概念に基づいた基礎構造物に関する設計原則，地盤工学会 (2004)
2) 村上　章・西村伸一・鈴木　誠・森　充広・倉田高士・藤村達也：開水路基礎の支持力照査における部分安全係数の算定，農業農村工学会論文集，第 259 号，pp.71-78 (2009)
3) 地盤工学会：土質基礎の信頼設計 (1985)
4) Vanmarcke, E. H.: *Ransom Fields - Analysis and Synthesis -* , MIT Press (1984)