

防衛大学校 学生員 ○三浦 明夫 正員 石川 信隆
正員 香月 智

1. 緒言 近年、許容応力度設計法から限界状態設計法に移行しつつあるが、その安全照査式は一般に応力レベル（断面力を含む）で定義されており、変形に関する安全照査式を検討した研究は意外に少ない。そこで本研究は、変形の使用限界および終局限界を基準とした限界状態設計法を確立するため、ここでは、まず外力のみにばらつきの影響を考慮した変形に関する使用限界の安全性指標を求める信頼性解析法を提示し、これを用いて特に鋼製枠砂防構造物の変形に関する使用限界の安全性照査を行ったものである。

2. 解析基本式

マトリックス弾性解析により、外変位（節点変位） $\mathbf{u}$ は次式によって求められる。

$$\mathbf{u} = (\mathbf{c}^T \mathbf{k} \mathbf{c})^{-1} \mathbf{F} \quad (1)$$

ただし、 $\mathbf{u}$ ：節点変位ベクトル、 $\mathbf{c}$ ：変形適合マトリックス、

$\mathbf{c}^T$ ：つり合いマトリックス、 $\mathbf{F}$ ：外力ベクトル、

$\mathbf{k}$ ：剛性マトリックス、

ここで性能関数 Z を変形により定義すれば次式のように表わされる。

$$Z = \mathbf{u}_{\text{ALLOW}} - \mathbf{u} \quad (2)$$

ここに、 $\mathbf{u}_{\text{ALLOW}}$ ：許容変位ベクトルであり、本解析では確定量

とする。 Z の平均値 $\bar{Z}$ と分散 σ_{Zi}^2 は、FOSM法を用い、荷重を無相関とすれば次のようになる。

$$\bar{Z} = \mathbf{u}_{\text{ALLOW}} - \bar{\mathbf{u}} \quad (3)$$

$$\sigma_{Zi}^2 = \sum_{j=1}^n \sigma_{Fj}^2 \left(\frac{\partial u_i}{\partial F_j} \right)^2 = \sum_{j=1}^n \{ \sigma_{Fj} a_{ij} \}^2 \quad (4)$$

ここに、 $\bar{\mathbf{u}}$ ：平均節点変位ベクトル、 σ_{Fj} ：外力 F_j の分散

a_{ij} ： $(\mathbf{c}^T \mathbf{k} \mathbf{c})^{-1}$ の i 行 j 列目の要素

$\frac{\partial u_i}{\partial F_j} \bigg|_{F_j} : \frac{\partial u_i}{\partial F_j}$ に F_j の値を代入することを意味する。

よって、安全性指標 β_i は次式のように求められる。

$$\beta_i = \frac{\bar{Z}_i}{\sigma_{Zi}} = \frac{u_{i, \text{ALLOW}} - \bar{u}_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \{ \sigma_{Fj} a_{ij} \}^2}} \quad (5)$$

3. 鋼製枠砂防構造物への適用

鋼製枠砂防構造物は各種の構造形式があるが、一般に枠組を重ねその内部に中詰材として砂礫を充填する構造物である。図-1に5層の鋼製枠砂防構造物の側面模式図を示す。

(1) 荷重 鋼製砂防構造物設計便覧²⁾では、砂防ダ

ムの高さにより設計荷重を3段階に区分しているが、ここでは、設計荷重Ⅰ（図-2）（水圧+中詰材の土圧）と設計荷重Ⅱ（図-3）（浮力考慮の中詰材の土圧+堆砂圧+水圧）について検討した。ここで、中詰材の水平方向の土圧 P_0 はランキンの土圧式により次式により求められる。

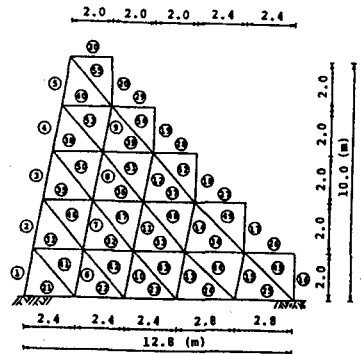


図-1 鋼製砂防構造物の一例
(○内の番号は部材番号)

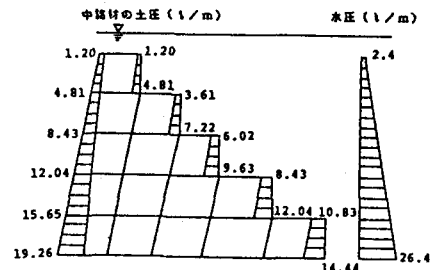


図-2 設計荷重Ⅰ

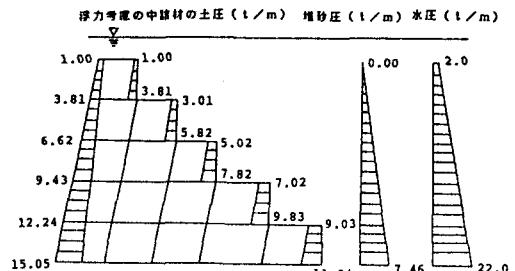


図-3 設計荷重Ⅱ

$$P_0 = (1 - \sin \phi_1) (r h + q) \lambda \quad (6)$$

ただし、 r ：中詰材の単位体積重量、 h ：中詰材圧が作用する深さ、 q ：地表載荷荷重、 λ ：載荷幅、 ϕ_1 ：中詰材の内部摩擦角、また堆砂の水平方向の土圧 P_s は、次式により求められる²⁾。

$$P_s = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi_2}{2} \right) \cdot r_s \cdot h \cdot \lambda \quad (7)$$

ただし、 ϕ_2 ：堆砂の内部摩擦角、 r_s ：堆砂の単位体積重量。

式(6)、(7)において単位体積重量を確定量とし、内部摩擦角 ϕ_1 、 ϕ_2 を確率変量とすると、これらの統計量から全体の荷重 P への統計量の変換については、式(6)、(7)を ϕ_1 、 ϕ_2 の平均値に関してテイラー展開し線形近似化して求めることができる。例えば、設計荷重Ⅱの場合、上流側の荷重は浮力考慮の中詰材の土圧と堆砂圧と水圧であるので次式のように求められる。

$$\bar{P} = (1 - \sin \phi_1) (r h + q) \lambda + \tan^2 \left(45 - \frac{\phi_2}{2} \right) \cdot r_s \cdot h \cdot \lambda + P_w \quad (11)$$

$$\sigma_P = \{(-\cos \phi_1)(r h + q) \lambda\}^2 \sigma_{\phi_1}^2 + \{r_s h \lambda \tan \left(45 - \frac{\phi_2}{2} \right) \sec^2 \left(45 - \frac{\phi_2}{2} \right)\}^2 \sigma_{\phi_2}^2 \quad (12)$$

ただし、 P_w ：水圧

また設計荷重Ⅰについても同様に求められる。ところで、荷重は不等分布荷重であるが、等価な節点荷重に換算して計算した。使用中詰材の内部摩擦角 ϕ_1 のデータ³⁾は泥岩で、また堆砂の内部摩擦角 ϕ_2 のデータ⁴⁾は飽和度70%以上の砂であり、度数分布表をそれぞれ図-4および5に示す。

(2) 計算結果 図-6に設計荷重Ⅰ・Ⅱについて、安全性指標と許容変位との関係を示す。一定の許容変位に対して設計荷重Ⅰの方が設計荷重Ⅱに比し安全性指標が小さくなっている。これは、中詰材(泥岩)の内部摩擦角 ϕ_1 の変動係数(0.46)が堆砂の内部摩擦角 ϕ_2 の変動係数(0.19)に比し大きいと思われる。また $\beta = 3 \sim 5$ の値に対応する許容変位の値は、高さ H の0.12~0.16%である。設計便覧²⁾には、この種鋼製砂防ダムの許容変位について明確に示されていないが、本例では、許容安全性指標を $\beta_0 = 3$ とし、許容変位を高さ H の0.12%以上とすると $\beta \geq \beta_0$ となるので変形の使用限界に関して安全となることが認められる。

4. 結言

(1) 外力のみにばらつきの影響を考慮した変形の使用限界を基準とする信頼性解析法を開発した。

(2) 中詰材(泥岩)の内部摩擦角 ϕ_1 の変動係数が大きいので、変形の安全性に与える影響が大きいことが認められた。

(3) 本計算例では、許容変位を高さ H の0.12%以上とすると $\beta \geq 3$ となるので変形の使用限界に関して安全となることが認められた。

なお、変形の終局限界に関しては、弾塑性信頼性解析を開発することによって検討する予定である。

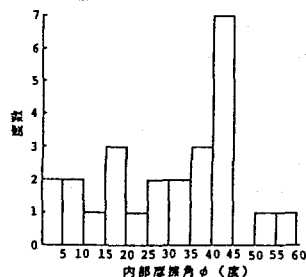


図-4 泥岩の内部摩擦角の度数分布

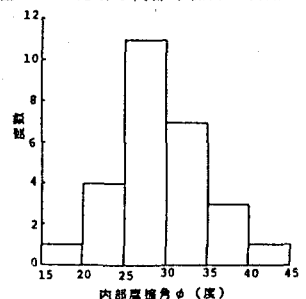


図-5 砂の内部摩擦角の度数分布

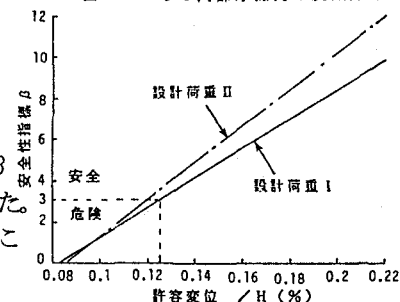


図-6 安全性指標と許容変位の関係

参考文献 1) DAN, M. FRANGOPOL, RACHID, NAKIB, RELIABILITY ANALYSIS OF DEFLECTION-DRIFT LIMITED STRUCTURES, ICAP 5, MAY 27, 1987 2) 砂防・地すべり技術センター, 鋼製枠砂防構造物設計便覧, 昭和62年版 3) 伊藤洋, 地盤のデータの二次処理(統計的処理手法と実際), 土質のデータのばらつきと設計, 土質工学会, P34~41, 昭和63年9月1日

4) 堀内孝英・川村国夫, 信頼性設計のための土質の統計的性質, 土と基礎, VOL25, No.11, PP11~18, 1977