

武蔵工業大学工学部土木工学科助教授 工学博士 星谷勝 同学科学生 ○亀井熱一郎 横溝文行

1、序文

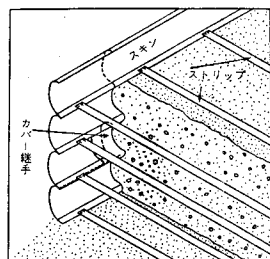
従来の構造物設計法は構造物を構成する各要素ごとに応力状態を計算し、その値が許容応力に対し経験的に定められた安全率等を下回るように各要素の形状を決め、これを総合して構造物を設計する為に、構造物全体としての安全性は経験的に言えるだけで数学的に検討することができない。又作用荷重、材料強度等各種設計資料は実験観測の繰返しによって得られたもので、本来は統計的バラツキを持った確率変数である。しかるに従来の設計法ではこれらを確定量として取扱って統計的バラツキによる不確定性を安全率の増減によりカバーしているが、これはかなり不確実な仮定と思われる。現在では応力解析法に関しては非常に高度な理論が開発されているが、与えられる設計資料が上記のように不確実では高度な解析手法により多くの有効数字が得られる解析結果の信頼性には疑問がある。

巨大で又重要性も高く、経済的にも高価な構造物が次々と建設される現在、予測不能な設計条件下で、全体として高度の信頼性を有する構造物を設計施工する必要があると思われる。

本設計は上記の不合理性を改善しようとする試みの1つで、確率論を導入して構造物の安全性を数的に評価し、又設計資料を確率変数として取扱おうとする考え方に基づいた設計法で、その対象として補強土による擁壁を取りあげた。

2、補強土

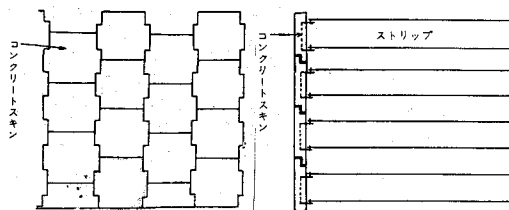
補強土とは天然の粒状体である土と、その土中に埋設した引張力に耐えるストリップ（補強材）との集合体よりなる新しい建設材料である。粘着性のない粒状土は、自重又は外力の増加により横方向の歪が増大し、静止状態から主働状態に至って崩壊する。ここで水平方向にストリップを埋設するとストリップが充分接近しているならば、土とストリップの間の摩擦力に依り横方向の歪は無視できるほど小さくなり、ストリップの破壊が生じない限り土体内部の応力状態は、殆んど変化しない。こうして粘着力のない土はストリップの方向にストリップの引張強度に応じた粘着力を得たことになり、荷重条件に対応して任意の方向にストリップを適正に配置すれば、補強度は粘着力を有する一体化した固体のように挙動し、外力と自重を共に支持し得る構造体を形成するというのがその原理である。



〔図－1〕

この工法はフランス人アンリー・ヴィダール氏によって発明、開発され

、氏は1966年にこの工法の論文(1)を発表し、数年前よりヨーロッパに於いて実用化して後、アメリカ、カナダに普及し、鉄筋コンクリートに次ぐ発明という評価も受けている。我国にも数年前に補強土又は強化土という名で紹介されたがフランス語ではTerre Armée、英語ではReinforce



〔図－2〕

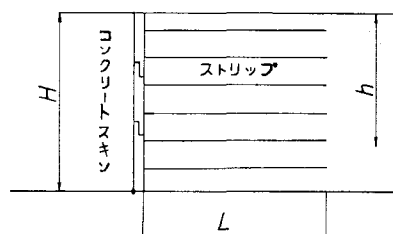
reced earthと呼ばれ、特許の関係上我国に於て、現時点では施工の実績はないがその画期的有用性は前々から大学、建設省、国鉄、道路公団、各建設業者の研究所等の関係者より着目され、又理論的検討のみならず試験的検討も行なわれ、国鉄技術研究所や建設省東北地建仙台技術研究所に依る現場試験施工(2)等に依り、その効果が確認され実用化が待たれている。

一般に使用されている補強土の形状は、水平方向にストリップを埋設した層を重ねたもので、側面が垂直又は急勾配である場合は側面にフレキシブルなスキン(表皮)を備えているが、側面の傾斜がゆるやかで内部的な強化を行なうのが目的の場合にはスキンは必要でない。従来のスキンは〔図-1〕に示すように鋼、アルミニウム等金属スキンであったが、最近では〔図-2〕に示すようなフレキシブルジョイントを持つプレキャストコンクリートスキンも実用化されている。

3、補強土擁壁の構造及び安定理論

A、擁壁の構造

本研究で対象とする補強土擁壁の構造モデルを〔図-3〕に示す。水平方向にストリップを埋設した層を重ね盛土側面の崩壊を防ぐためにコンクリートスキンを備えている。



(図-3)

B、擁壁の安定理論

補強土擁壁の崩壊形式は室内模型試験(3)に依り、以下の3通りに分けられる。

- (i) 壁体そのものは殆んど変形せず、壁体を含んだまま全体として崩壊する型
- (ii) ストリップは破壊せず、ストリップと土の間に滑りを生じて壁体が崩壊する型
- (iii) ストリップが破壊して壁体が崩壊する型

(i)の型に対しては擁壁を剛体と考え、従来の擁壁と同様に以下の項目に示すように壁体の外部的安定の検討となるが、補強土擁壁は全体がフレキシブルな構造物である為、コンクリート等剛体の擁壁と異なり、地盤のかなりの不等沈下にも耐えられ又特別な基礎工事は簡単ですむか又は必要ないことも考慮する。

- a、転倒に対する安定の検討
- b、滑動に対する安定の検討
- c、基礎地盤の支持力に対する検討

これより壁体の形状が決定する。

(ii)(iii)の型に対しては壁体内部での応力状態を検討する内部的安定の検討となり以下の項目について検討する。

- d、ストリップと土の摩擦に対する検討
- e、ストリップの破壊に対する検討
- f、スキンの厚さの検討

これより各ストリップの断面積と設置密度、即ち使用するストリップの幅、厚さ、本数が決定する。

ここでスキンの厚さは応力計算で求めたものに腐食による減少を考慮して決める。腐食による減少量はアメリカ、ニューヨーク州で行なわれた調査(4)により求められた式を使用する。

以上に述べた検討を以下で行なう。

(1) 壁体の外部的安定の検討

a 転倒に対する安定

地震時土圧

$$E_h = \frac{1}{2} r H^2 K_a$$

壁体の重量

$$W = r H L \quad (\text{t/m})$$

r: 土の単位重量 (t/m^3)

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi - \theta_0 - \theta)}{\cos \theta_0 \cdot \cos \theta \cdot \cos(\delta + \theta + \theta_0) \left\{ 1 + \frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \delta - \theta_0)}{\cos(\theta - \delta) \cos(\delta + \theta - \theta_0)} \right\}^2}$$

ϕ : 土の内部摩擦角 δ : 地表面と水平面とのなす角 θ : 壁背面と鉛直面とのなす角

$$\theta_0: \tan^{-1} k_h$$

k_h : 設計水平震度

δ : 壁背面と土との間の壁面摩擦角

A 点における回転モーメント

抵抗モーメント

$$M_r = \frac{H}{3} E_h + \frac{H}{2} W K_h \quad (\text{t} \cdot \text{m/m})$$

$$M_0 = \frac{L}{2} W (1 - K_v) \quad (\text{t} \cdot \text{m/m})$$

K_v : 設計鉛直震度

$$K_v = \frac{1}{2} K_h$$

従って安全率は

$$SF = \frac{M_0}{M_r} = \frac{3L^2(1-K_v)}{H^2 K_a + 3HLK_h}$$

b 滑動に対する安定

水平力 $S_h = W K_h + E_h \quad (\text{t/m})$

摩擦力

$$R_h = W(1 - K_v) \tan \phi \quad (\text{t/m})$$

従って安全率は

$$SF = \frac{R_h}{S_h} = \frac{2L(1-K_v) \tan \phi}{2LK_h + HK_a}$$

c 基礎地盤の支持力に対する安定

偏心量 $e = \frac{HE_h}{3W(1-K_v)}$

地盤反力

$$P = \frac{W(1+K_v)}{B-2e} \quad (\text{t/m}^2)$$

ここで許容支持力を Q_f とすると安定率は

$$SF = \frac{Q_f}{P} = \frac{Q_f \{ 3(1-K_v)L^3 - K_a H^3 \}}{3(1-K_v)rHL}$$

(Ⅲ) 壁体の内部的安定の検討

d ストリップと土の摩擦に対する検討

深度 $h(\text{m})$

におけるスキンに加わる地震時土圧は $P_a = A_c r h K_a \quad (\text{t})$

A_c : スキン面積

ストリップ 1 本に働らく引張力は

$$T = \frac{P_a}{n} \quad (\text{t})$$

n : スキン 1 個当りのストリップ本数

ストリップと土との間の摩擦力は $Q = 2S r h (1 - K_v) \tan \phi' \quad (\text{t})$

S : ストリップの片面の表面積 ϕ' : ストリップと土との摩擦角

従って安全率は

$$SF = \frac{Q}{T} = \frac{2nS(1-K_v) \tan \phi'}{A_c K_a}$$

e ストリップの破壊に対する検討

ストリップの破壊強度 $S_y = \sigma_y A_s \quad (\text{t})$

σ_y : ストリップの許容引張応力度

A_s : 1 本の断面積

従って安全率は

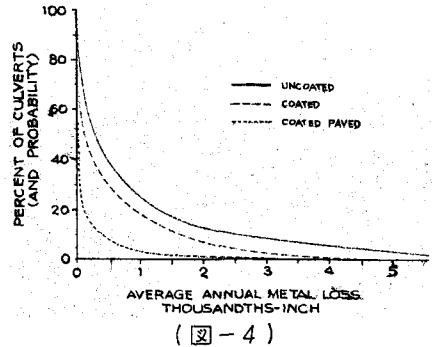
$$SF = \frac{S_y}{T} = \frac{n \sigma_y A_s}{A_c r h K_a}$$

f 腐食によるストリップ厚の減少

腐食による鋼の減少は〔図-4〕に示される。メッキを施した鋼の単位年当りの腐食厚は実線で示されているので、確率15%（その腐食に達する鋼の百分率）とする

$$M = 2.54 \times 0.0017X$$

X: 経過年数



4. 確率論的設計法

A. 設計原理

a 設計指針、以下の順序で設計を進める。

(i) 設計条件として、土の単位重量 r を確定量、設計震度 K_h, K_v 、地耐力 Q_f 、土の内部摩擦角 ϕ 、土とストリップの摩擦角 ϕ' 、ストリップの破断応力度 σ_y を確率変数として与える。設計震度 K_h のパラメーター X_1 の単位量当りの擁壁建設費用 C_1 、 Q_f 、 ϕ 、 ϕ' 、 σ_y のパラメーター X_2, X_3, X_4, X_5 の各々の逆数の単位量当りの擁壁建設費用 C_i と破壊した時の費用 B との比 D_i ($i = 1 \sim 5$) を与える。

(ii) (i) で与えた D_i から各々の設計条件による最適の破壊確率 P_{fi} ($i = 1 \sim 5$) を求める。

(iii) (i) で与えた設計条件の平均値と標準偏差と (ii) で求めた P_{fi} から確定量となる設計パラメーター X_i ($i = 1 \sim 5$) を求める。

(iv) (ii) で求めた設計パラメーターを利用従来の手法で安全率 $S.F. \geq 1$ として計算して擁壁の形状を決定する。

(v) (iv) で定まった擁壁に対し、シミュレーション法理論を用いて各種不安定の起こる確率を算出し

(iii) で求めた P_{fi} より小さいことを確かめる。

b 設計パラメーターの決定

設計条件を以下の記号で示す

水平震度	$K_h = X_1$	水平震度パラメーター	$= X_1^*$
地耐力	$Q_f = X_2$	地耐力パラメーター	$= X_2^*$
土の内部摩擦角	$\phi = X_3$	土の内部摩擦角パラメーター	$= X_3^*$
土とストリップの摩擦角	$\phi' = X_4$	土とストリップの摩擦角パラメーター	$= X_4^*$
ストリップの破断応力度	$\sigma_y = X_5$	ストリップの破断応力度パラメーター	$= X_5^*$

各設計条件 ($X_1 \sim X_5$) は互に統計的に独立とすれば、擁壁全体の信頼性 P_s は

$$P_s = P_{s1} \cdot P_{s2} \cdot P_{s3} \cdot P_{s4} \cdot P_{s5} = P(X_1 < X_1^*) P(X_2 > X_2^*) P(X_3 > X_3^*) P(X_4 > X_4^*) P(X_5 > X_5^*) \\ = (1 - P_{f1}) (1 - P_{f2}) (1 - P_{f3}) (1 - P_{f4}) (1 - P_{f5})$$

従って擁壁全体の破壊の確率 P_f は $P_f = 1 - P_s = P_{f1} + P_{f2} + P_{f3} + P_{f4} + P_{f5}$

$$\therefore P_f \approx (X_1 > X_1^*) + P(X_2 < X_2^*) + P(X_3 < X_3^*) + P(X_4 < X_4^*) + P(X_5 < X_5^*)$$

ここで P_{si} は設計条件 X_i に対する信頼性であり、 P_{fi} は設計条件 X_i に対する破壊の確率である。

(i) 古典的信頼性理論に基づく場合

これは与えられた設計条件 X_i の確率密度関数の分布形状がわかっていて、且つ本来の統計量以外
は全て決定論的に定まるという仮定に基づいている。

○ X_i が正規分布の場合

$$X_i = N(\bar{X}_i, \sigma_{X_i}) \quad \bar{X}_i : \text{平均値} \quad \sigma_{X_i} : \text{標準偏差}$$

$$P_{f1} = P(X_1 > X_1^*) = P\left(\frac{X_1 - \bar{X}_1}{\sigma_{X_1}} > \frac{X_1^* - \bar{X}_1}{\sigma_{X_1}}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{X_1^* - \bar{X}_1}{\sigma_{X_1}}\right)$$

$$\therefore \Phi\left(\frac{X_1^* - \bar{X}_1}{\sigma_{X_1}}\right) = 1 - P_{f1} \quad \text{ここで } \Phi \text{ は } N(0, 1) \text{ の確率分布関数である。}$$

$$\therefore X_1^* = \bar{X}_1 + \sigma_{X_1} K_{f1} \quad K_{f1} = \Phi^{-1}(1 - P_{f1})$$

$$X_i : i=2 \sim 5 \text{ に対して} \quad P_{fi} = P(X_i < X_i^*) = P\left(\frac{X_i - \bar{X}_i}{\sigma_{X_i}} < \frac{X_i^* - \bar{X}_i}{\sigma_{X_i}}\right)$$

$$\therefore X_i^* = \bar{X}_i + \sigma_{X_i} K'_{fi} \quad K'_{fi} = \Phi^{-1}(P_{fi})$$

○ X_i が対数正規分布の場合

$$X_i = Ln(\bar{X}_i, \sigma_{X_i})$$

$$P_{f1} = P(X_1 > X_1^*) = P(\ln X_1 > \ln X_1^*) = P\left(\frac{\ln X_1 - \ln \bar{X}_1}{\sigma_{\ln X_1}} > \frac{\ln X_1^* - \ln \bar{X}_1}{\sigma_{\ln X_1}}\right)$$

$$\therefore \ln X_1^* = \ln \bar{X}_1 + \sigma_{\ln X_1} K_{f1} = \ln \bar{X}_1 - \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{\sigma_{X_1}^2}{\bar{X}_1^2}\right) + \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma_{X_1}^2}{\bar{X}_1^2}\right)} K_{f1}$$

$$\text{従って変動係数 } \sigma_{X_1} = \frac{\sigma_{X_1}}{\bar{X}_1} \text{ が十分小さければ} \quad \ln X_1^* = \ln \bar{X}_1 + \frac{\sigma_{X_1}}{\bar{X}_1} K_{f1}$$

$$\therefore X_1^* = \bar{X}_1 \exp\left(\frac{\sigma_{X_1}}{\bar{X}_1} K_{f1}\right) \quad K_{f1} = \Phi^{-1}(1 - P_{f1})$$

$$X_i : i = 2 \sim 5 \text{ に対しては} \quad P_{fi} = P(X_i < X_i^*) = P\left(\frac{\ln X_i - \ln \bar{X}_i}{\sigma_{\ln X_i}} > \frac{\ln X_i^* - \ln \bar{X}_i}{\sigma_{\ln X_i}}\right)$$

$$\therefore P_{fi} = 1 - \Phi\left(\frac{\ln X_i^* - \ln \bar{X}_i}{\sigma_{\ln X_i}}\right)$$

$$\text{よって変動係数 } \sigma_{X_i} \text{ が十分小さければ} \quad X_i^* = \bar{X}_i \exp\left(-\frac{\sigma_{X_i}}{\bar{X}_i} K_{fi}\right) \quad K_{fi} = \Phi^{-1}(1 - P_{fi})$$

(ii) 拡張された信頼性理論に基づく場合

(i) では確率変数 の確率密度関数の形状を定めて計算を行なったが、実際の は実験で求められるため、一般に確率密度関数の形は不明で中央値と標準偏差ぐらいしか判明しない。従って確率密度関数の形状の違いによる影響を小さくすることが必要となる。ここでは主観的不確定量(実際の施工、設計等に含まれる不可避的不明量)を確率変数として扱い、これを考慮することにより確率密度関数による影響を小さくする方法(5)を用いる。

$$\text{擁壁全体の破壊の確率は} \quad P_f \cong \sum_{i=1}^5 P_{fi}$$

$$\text{ここで} \quad P_{f1} = P(X_1^* < N_1 X_1) \quad \dots\dots\dots (4-1)$$

$$P_{fi} = P(X_i^* > \frac{X_i}{N_i}) \quad i = 2 \sim 5 \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

但し N_i Judgement Factor で平均値 $\bar{N}_i = 1.0$ の確率変数とする。

ここで Ang の考え方(6)に従って(4-1),(4-2)式を次式で近似する。

$$P_{f1} = P(X_1^* < Y_1 X_1) P(N_1 > h_1 Y_1) = P_{Of1} \cdot P_{Sf1} \quad (4-4)$$

$$P_{fi} = P(X_i^* < \frac{X_i}{Y_i}) P(N_i > h_i Y_i) = P_{Ofi} \cdot P_{Sfi} \quad i = 2 \sim 5 \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

ここで P_{Ofi} は破壊の客観的確率で、 P_{Sfi} は主観的確率である。

(4-3、4)式を用いれば X_i, N_i の確率密度関数の形による最終的な設計パラメータ $\bar{X}_i^*$ への影響は無視できる程度に小さくなる。なお設計上 $h_i \cong 0.85$ とできる。従って以下に於いて X_i, N_i の確率密度関数を対数正規分布として X_i^* の決定式を導く。

まず P_{sfi} を与えた場合の $\gamma_i, i=1 \sim 5$ の決定法を導く。

$$P_{sfi} = P(N_i > h_i \gamma_i) = P\left(\frac{\ln N_i - \overline{\ln N_i}}{\sigma \ln N_i} > \frac{\ln h_i \gamma_i - \overline{\ln N_i}}{\sigma \ln N_i}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln h_i \gamma_i - \overline{\ln N_i}}{\sigma \ln N_i}\right)$$

$$\therefore \ln h_i \gamma_i = \overline{\ln N_i} + \sigma \ln N_i \Phi^{-1}(1 - P_{sfi}) = \overline{\ln N_i} - \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{\sigma_{N_i}^2}{\bar{N}_i^2}\right) + \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma_{N_i}^2}{\bar{N}_i^2}\right)} \Phi^{-1}(1 - P_{sfi})$$

$$\therefore \ln(h_i \gamma_i \sqrt{1 + \frac{\sigma_{N_i}^2}{\bar{N}_i^2}}) = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma_{N_i}^2}{\bar{N}_i^2}\right)} \Phi^{-1}(1 - P_{sfi})$$

$$\text{ここで } N_i \text{ の変動係数を } \delta_{ni} \text{ とすれば } \gamma_i = \frac{1}{h_i \sqrt{1 + \delta_{ni}^2}} \exp\left\{\sqrt{\ln\left(1 + \delta_{ni}^2\right)} \Phi^{-1}(1 - P_{sfi})\right\}$$

$$\text{従って } \delta_{ni} \text{ が小さい場合 } (\delta_{ni} < 0.30) \text{ には } \gamma_i = \frac{1}{0.85} \exp\left\{\delta_{ni} \Phi^{-1}(1 - P_{sfi})\right\} \quad i=1 \sim 5 \quad (4-5)$$

$$\text{さて (4-3) 式より } P(X_1^* < \gamma_1 X_1) = P_{of1}$$

$$\therefore P\left(\frac{X_1^*}{\gamma_1} < X_1\right) = P\left(\frac{\ln \frac{X_1^*}{\gamma_1} - \overline{\ln X_1}}{\sigma \ln x_1} < \frac{\ln X_1 - \overline{\ln X_1}}{\sigma \ln x_1}\right) = P_{of1}$$

$$\therefore 1 - \Phi\left(\frac{\ln \frac{X_1^*}{\gamma_1} - \overline{\ln X_1}}{\sigma \ln x_1}\right) = P_{of1}$$

$$\therefore \ln \frac{X_1^*}{\gamma_1} = \overline{\ln X_1} + \sigma \ln x_1 \Phi^{-1}(1 - P_{of}) = \overline{\ln X_1} - \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{\sigma_{X_1}^2}{\bar{X}_1^2}\right) + \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma_{X_1}^2}{\bar{X}_1^2}\right)} \Phi^{-1}(1 - P_{of1})$$

$$\text{従って } X_1 \text{ の変動係数 } \delta_{x1} = \frac{\sigma_{x1}}{\bar{X}_1} \text{ が小さい場合 } \ln \frac{X_1^*}{\gamma_1} \cong \overline{\ln X_1} + \delta_{x1} \Phi^{-1}(1 - P_{of1})$$

$$\therefore \ln \frac{X_1^*}{\gamma_1 \bar{X}_1} = \delta_{x1} \Phi^{-1}(1 - P_{of1}) \quad \therefore X_1^* \cong \gamma_1 \bar{X}_1 \exp\{\delta_{x1} \Phi^{-1}(1 - P_{of1})\} \quad (4-6)$$

又 (4-4) 式より

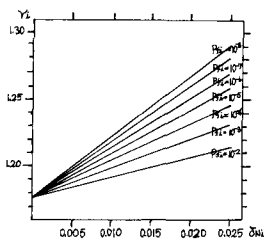
$$P(X_1^* > \frac{X_i}{\gamma_i}) = P_{ofi} \quad \therefore P(\gamma_i X_1^* > X_i) = P\left(\frac{-\ln \gamma_i X_1^* + \overline{\ln X_i}}{\sigma \ln x_i} < \frac{\ln X_i - \overline{\ln X_i}}{\sigma \ln x_i}\right) = P_{ofi}$$

$$\therefore -\ln \gamma_i X_1^* = -\overline{\ln X_i} + \sigma \ln x_i \Phi^{-1}(1 - P_{ofi}) = -\overline{\ln X_i} + \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{\sigma_{X_i}^2}{\bar{X}_i^2}\right) + \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma_{X_i}^2}{\bar{X}_i^2}\right)} \Phi^{-1}(1 - P_{ofi})$$

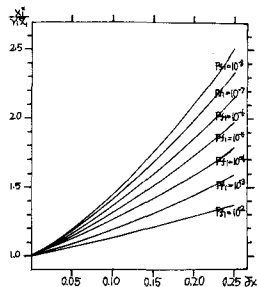
$$\text{従って } \delta_{xi} = \frac{\sigma_{xi}}{\bar{X}_i} \text{ が小さい場合 } -\ln \gamma_i X_1^* = -\overline{\ln X_i} + \delta_{xi} \Phi^{-1}(1 - P_{ofi})$$

$$\therefore X_1^* \cong \frac{\bar{X}_i}{\gamma_i} \exp\{-\delta_{xi} \Phi^{-1}(1 - P_{ofi})\} \quad i=2 \sim 5 \quad (4-7)$$

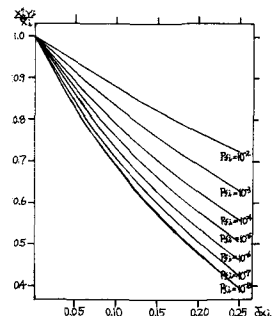
以上から P_{sfi}, P_{ofi} を P_{fi} の関数として表わし (4-5) 式による $P_{fi}, \delta_{ni}, \gamma_i$ のグラフより $\gamma_i (i=1 \sim 5)$ を (4-6) 式による $P_{fi}, \delta_{x1}, X_1^*$ のグラフより X_1^* を (4-7) 式による $P_{fi}, \delta_{ni}, X_i^*$ のグラフより $X_i^* (i=2 \sim 5)$ を求める。例として $P_{sfi} = P_{ofi} = \sqrt{P_{fi}} \quad (i=1 \sim 5)$ とすると γ_i は [グラフ 1], X_1^* は [グラフ 2], $X_i^* (i=2 \sim 5)$ は [グラフ 3] から求められる。



[グラフ 1]



[グラフ 2]



[グラフ 3]

c 建設費及び維持、修費費用を考慮した最適設計確率

擁壁の設計において、破壊の確率が減少するに従って、設計荷重は増加し内部抵抗力（許容応力）は減少する。従って擁壁の建設費は設計荷重に正比例し、内部抵抗力に反比例すると仮定し、各設計荷重、内部抵抗力は互いに独立とすれば建設費は破壊確率の関数として表わすことができる。

設計荷重に対しては、建設費 = $C_1 W(P_f)$

ここで $W(P_f)$ は設計荷重、 C_1 は単位設計荷重当りの建設費、 P_f は破壊の確率

内部抵抗力に対しては、建設費 = $\frac{C_2}{R(P_f)}$

ここで $R(P_f)$ は内部抵抗力、 C_2 は $\frac{1}{R(P_f)}$ の単位量当りの建設費、 P_f は破壊の確率

又擁壁が破壊してかかる費用の期待値は、破壊確率の増加関数として次のようにあらわされる。

予想破壊費用 = BP_f ここで B は擁壁が破壊した時にかかる費用

擁壁の建設費、維持修費等を合計した総費用において、上記2つ以外の要素は比較的影響が少いものとする、総費用 TC は次式であらわされる。 TC = 建設費 + 予想破壊費用

従って設計荷重に対しては $TC = C_1 W(P_f) + BP_f$ (4-8)

内部抵抗力に対しては $TC = \frac{C_2}{R(P_f)} + BP_f$ (4-9)

従って(4-8-9)式を最少とするような P_f が、最も経済的な設計確率となる。ここで(4-12)式を擁壁設計の5つのパラメーターに適用すると、 X_1^* は荷重 $X_2^* \sim X_5^*$ は内部抵抗力であるから、パラメーター X_1^* による総費用 TC_1 は次のようになる。

$$TC_1 = C_1 X_1^* + BP_{f1} = C_1 (X_1^* + D_1 P_{f1}) \quad D_1 = \frac{B}{C_1} \quad (4-10)$$

$$TC_i = \frac{C_i}{X_i^*} + BP_{fi} = C_i \left(\frac{1}{X_i^*} + D_i P_{fi} \right) \quad D_i = \frac{B}{C_i} \quad i=2 \sim 5 \quad (4-11)$$

擁壁の建設費は $C_1 X_1^*$, $\frac{C_i}{X_i^*}$ ($i=2 \sim 5$) の最大のものとなり、予想破壊費用は各予想破壊費用の和となる為、総費用 TC は次式であらわされる。

$$TC = (C_1 X_1^*, \frac{C_i}{X_i^*} (i=2 \sim 5))_{\text{Max}} + \sum_{i=1}^5 BP_{fi}$$

ここで $(C_1 X_1^*, \frac{C_i}{X_i^*} (i=2 \sim 5))_{\text{Max}}$ は $C_1 X_1^*$, $\frac{C_i}{X_i^*}$ ($i=2 \sim 5$) のうちで最大のもの。

P_{f1} の最適値は(4-10)式を最少に、 P_{fi} ($i=2 \sim 5$) の最適値は(4-11)式を最少とする値となり擁壁全体の設計確率 P_f は $P_f = \sum_{i=1}^5 P_{fi}$ となる。

例として、 $P_{sfi} = P_{ofi} = \sqrt{P_{fi}}$ ($i=1 \sim 5$) とすると、(4-6)式と(4-10)式より

$$TC_1 = C_1 \left[\gamma_1 \bar{X}_1 \exp \left\{ \delta_{x1} \Phi^{-1}(1 - P_{of1}) \right\} + D_1 P_{f1} \right] = C_1 \left[0.85 \bar{X}_1 \exp \left\{ (\delta_{N1} + \delta_{x1}) \Phi^{-1}(1 - \sqrt{P_{f1}}) \right\} + D_1 P_{f1} \right] \quad (4-12)$$

(4-7)式と(4-11)式より

$$TC_i = C_i \left[\gamma_i \bar{X}_i^{-1} \exp \left\{ \delta_{x_i} \Phi^{-1}(1 - P_{ofi}) \right\} + D_i P_{fi} \right] = C_i \left[(0.85 \bar{X}_i)^{-1} \exp \left\{ (\delta_{Ni} + \delta_{x_i}) \Phi^{-1}(1 - \sqrt{P_{fi}}) \right\} + D_i P_{fi} \right] \quad (i=2 \sim 5) \quad (4-13)$$

B 設計例

a 設計条件

(i) 許容応力

擁壁に使用する土は砂で、ストリップは亜鉛メッキ鋼 (SS41) である。

水平震度 $k_h(X_1) = \text{LN}(0.1, 0.025)$ 変動係数 $\delta_{X_1} = 0.25$ 確定論では $k_h = 0.20$

地耐力 $q_f(X_2) = \text{LN}(26 \frac{t}{m^2}, 1.3 \frac{t}{m^2})$ 変動係数 $\delta_{X_2} = 0.05$ 確定論では $q_f = 20 \frac{t}{m^2}$

土の内部摩擦角 $\phi(X_3) = \text{LN}(45^\circ, 2.25^\circ)$ 変動係数 $\delta_{X_3} = 0.05$ 確定論では $\phi = 35^\circ$

土とストリップの摩擦角 $\delta' (X_4) = \text{LN}(15, 0.75)$ 変動係数 $\delta_{X_4} = 0.05$ 確定論では $\delta' = 12^\circ$

ストリップの引張破断応力 $\sigma_y (X_5) = \text{LN}(41 \text{ kg/mm}^2, 2.05 \text{ kg/mm}^2)$ $\delta_{X_5} = 0.05$ $\sigma_y = 14 \text{ kg/mm}$

(ii) Judgement Factor $N = \text{LN}(1.0, 0.01)$ $\delta_N = 0.01$

(iii) 単位建設費

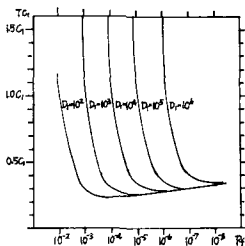
単位 X_1 当りの擁壁建設費 C_1 、単位 $\frac{1}{X_i}$ 当りの擁壁建設費 C_i ($i = 2 \sim 5$)、擁壁が破壊した時にかかる費用 B , $\frac{B}{C_i} = D_i$ ($i = 1 \sim 5$) とする。 $D_i (i = 1 \sim 3) = 10^8$ $D_i (i = 4, 5) = 10^4$

b 最適破壊確率の決定

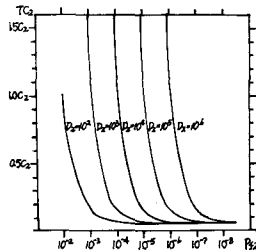
(4-12式) による TC_1 と P_{f1} の [グラフ 4] より $P_{f1} = 10^{-5}$

(4-13式) による TC_i と P_{fi} の [グラフ 5, 6, 7, 8] より $P_{f2} = 10^{-4}$, $P_{f3} = 10^{-7}$, $P_{f4} = 10^{-7}$, $P_{f5} = 10^{-8}$

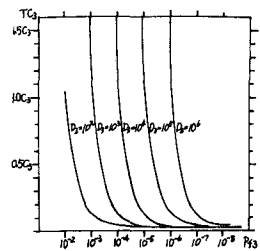
従って $P_f = \sum_{i=1}^5 P_{fi} = 1.121 \times 10^{-5}$



[グラフ 4]



[グラフ 5]



[グラフ 6]

C 設計パラメーターの決定

b の結果と [グラフ 1, 2, 3] より

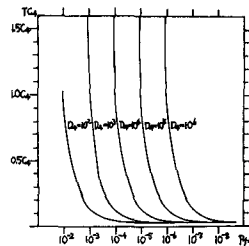
$$X_1^* = 0.234$$

$$X_2^* = 18.883 \text{ t/m}^2$$

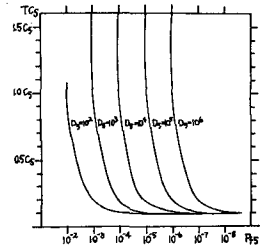
$$X_3^* = 32^\circ 7'$$

$$X_4^* = 10^\circ 42'$$

$$X_5^* = 28.849 \text{ t/m}^2$$



[グラフ 7]



[グラフ 8]

d 擁壁の設計

(i) 設計パラメーターによる設計

○ 転倒に対して

$$\theta_0 = \tan^{-1} 0.234 = 13^\circ 10' \quad K_B = 0.483 \quad SF \geq 1 \quad H \leq 1.724L$$

○ 滑動に対して

$$SF \geq 1 \text{ より} \quad H \leq 1.323L$$

○ 基礎地盤支持力に対して

$$SF \geq 1 \text{ より} \quad H \leq \frac{-0.838L + \sqrt{0.702244L^2 + 50.68896}}{3.04} L$$

○ ストリップの滑りに対して

スキンに規格品のコンクリートスキンを使用すると、スキン面積 $A_C = 1 \text{ m}^2$ 、ストリップ定着間隔 50 cm 、ストリップ幅 6 cm となる。

$$S F \geq 1 \text{ より } L \geq 6.029 \text{ m}$$

○ ストリップの破断に対して

上記の結果より $L = 6.10 \text{ m}$ 、 $H = 7.0 \text{ m}$ とすると $S F \geq 1$ より、ストリップ厚 t は、最下部でも $\geq 0.830 \text{ mm}$ となる。

耐用年数を 35 年とすると腐食による減少厚 M は、 $M = 0.30230 \text{ mm}$ となる。

従ってストリップ厚 t を 4 mm とする。

結果をまとめると

高さ $H = 7.0 \text{ m}$ 、幅 $L = 6.1 \text{ m}$ 、スキン表面積 $A_C = 1 \text{ m}^2$ 、ストリップの幅は 6 cm

厚さ 4 mm の亜鉛メッキ鋼である。

(ii) 従来の設計との比較 (i) で設計した値で安全率を調べる)

許容応力は確定論での値を用いる。

○ 転倒に対しては $S F \geq 2.205$

○ 滑動に対しては $S F \geq 1.454$

○ 基礎地盤支持力に対しては $S F \geq 1.225$

○ ストリップの滑りに対しては $S F \geq 1.377$

○ ストリップの破断に対しては $S F \geq 0.678$

e シミュレーション

モンテカルロ、シミュレーションにより設計した擁壁の破壊の確率を計算した。設計破壊確率は 1.121×10^{-5} であるが、モンテカルロ、シミュレーションではシミュレーションの回数が 2000 回以上になると、結果はほぼ一致することが判明している為(7)、シミュレーションの回数は 3000 回とした。その結果、5種類の破壊モードの生ずる確率は、各々 $0.00000E+0.0$ を得た。

5、終わりに

○ 現行設計方法の非合理性を解消する為に、信頼性理論を導入し構造物全体の破壊の確率を決定し設計資料を統計量として取り扱った設計方法を提示した。設計例として取り上げた構造物は他の構造物に比べより不確定な要素を包含しているので、その安全性の合理的な評価は確率論的手法によってのみ可能と考える。

○ 信頼性理論は現在、古典的理論から現実に応用できるように拡張された理論が研究されつつある。本論では設計資料を統計量として取り扱い、構造物全体の信頼性を数値的に確定し、現行の設計法をなるべく変えないという立場で研究した為、Ang の考え方に従ったが、Ang の方法では設計方法を大きく変えなければならないために、設計パラメーターを導き、これを現行設計方法の設計資料と同様に取り扱った。

○ 設計例で取り上げた補強土工法はその適用範囲が広く、現場作業は既製品の組立てで済む為に、構造物の精度は高くなり、工費が安く施工期間は短い。しかし欧米で開発施工されている工法の為

、使用できる土は現在のところ粘性のない砂質土だけである為、わが国では現場の土をそのまま使用できるところはまれであろうが、今後の研究により粘性土が使用できるようになれば非常に有望な工法と考える。

参考文献

- (1) H. VIDAL — La terre armée, Annales de l'I.T.B.T.P. (juillet-août 1966)
- (2) ○ 東北地方建設局 仙台技術事務所 — 擁壁のプレハブ化による試験施工報告書 昭和45年度
○ 国鉄鉄道技術研究所 上沢弘、毛受貞久、安田祐作 — 第3回土質工学研究発表会
昭和43年度発表講演集 補強土 (LA TERRE ARMÉE) 工法の基礎実験
- (3) LABORATOIRE CENTRAL DESPONTSET CHAUSSEES ———
reinforced earth
- (4) John E HAVILAND PETER J. BELLAIR and VINCENT D MORRELL,
Bureau of Physical Research, New York, State Department of Transportation
——— Durability of Corrugated Metal Culverts
- (5) 星谷勝 — 構造物の信頼性確率論的設計法
昭和47年9月 第585回・工経連講座 新しい土木構造物の設計法
- (6) Alfredo H. S. Ang, Ph.D. ——— CRITICAL ANALYSIS OF RELIABILITY
Bruce R. Ellingwood, M.S. PRINCIPLES RELATIVE TO DESIGN
- (7) 星谷勝 — 不静定構造物の安全性のモンテカルロ推定法 土木学会論文報告集
NO. 205、1972—9