

# 表面遮水シート工法によるため池堤体の新設計法（その1）

ため池 シート工法 テーパー化

香川高等専門学校 国際 向谷光彦  
 同 上 客員教授 田中勝彦  
 同 上 小笠原一馬, 岡崎芳行

## 1. はじめに

全国に約21万箇所あるため池（堤高15m以上は、フィルダムという。）の改修において、災害の多発や宅地化の進展・老朽化の増加及び環境問題もあり、山林の伐採を伴う新規築堤用土（抱土・鋼土・さや土）の確保が困難になってきた。ため池数の分布では、上位5県（兵庫県・広島県・香川県・山口県・大阪府）で全体数の約50%をしめているが、集中化もあり、近年では必要土量の不足問題が深刻化してきている。特に、離島や島しょ部では、築堤用土の多い前刃金工法に代わる発生土量の少ない施工性の良い工法の要望が高い。また、工事用道路が長く狭隘な中山間地域のため池改修では、工事が天候に影響されにくく、大型転圧機械や大型運搬機械の必要がない代替工法の要望が高まってきている。

一方、わが国では昭和40年台後半から止水性が確実で工場において品質管理された施工性の良い各種シート材が、諸外国より輸入され一部の地域ではあるが採用されてきた。しかし、シートの種類は多種多様で物性が異なり、設計法や検査法もまちまちで現場技術者の経験に頼るところが多く、一部の現場では混乱もみられたため普及実績は十分でないのが現状である。

以上の経緯を踏まえ、前刃金工法に替わる代替工法の一つとして、表面遮水シート工法を取り上げた。本報告では第1報として、解析理論の概要、実際の現場への適用事例について述べる。そして、最後に今後の展開について提示する。

## 2. 理論解析の概要

ここで採用したのは、半無限長斜面の局所平行楔の釣り合いによるすべり解析方法（以下「局所平衡法」と呼ぶ。）である。この解析方法は、教科書レベルでよく知られている平易で理解しやすいものである。

これに対して、有限長斜面の受働及び主動楔の釣り合いによる滑り解析方法が Koerner & Daniel<sup>1)</sup>によって提示されており、以下「Koerner & Daniel 法」と呼ぶ。また、材料強度を考慮したり池底全体の土塊の重量を考慮した滑動モデル解析方法が材料メーカーの技術資料によって提示されている。Koerner & Daniel 法やメーカーの技術資料については、別報で比較検討する。

局所平衡法は、盛土工事中の大雨でない場合でも前法斜面がシート上面で滑ることがあり、これを解析するため最下端部の平行楔に平行水浸率（PSR）・背圧・粘着力・浸透力を考慮して、安全率算定のための簡易式を提案したものである。また、掘込み式及び盛土式ため池の両形式にも適用できるよう配慮した。なお、Koerner & Daniel 法との関係から、PSR；平行水浸率、HSR；水平水浸率としておいた。PSR=0とは地下水位が平行楔の底面にあることを表し、PSR=1とは地表面と水位が一致している。PSR>1とは、ため池部に十分貯水されていることを意味する。

斜面の安定で、最も危険な状態は  $0 < PSR < 1$  なので、この状態における安全率の一般式を提示する。

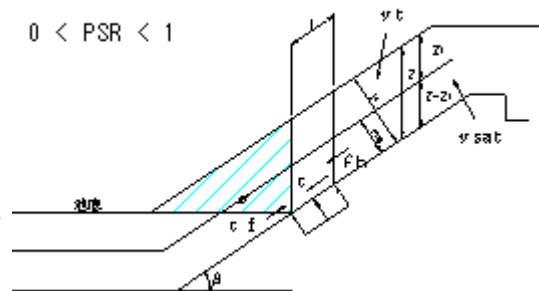


図 - 1 局所平衡法における斜面上土塊  
 (  $0 < PSR < 1$ , 浸透流あり )

$$F_s = \frac{\{ PSR \cdot \gamma_{sat} + (1 - PSR) \cdot \gamma \} \tan \phi + (c - \gamma_w \cdot h \cdot \tan \alpha) / (Z \cos^2 \alpha)}{\{ PSR \cdot \gamma_{sat} + (1 - PSR) \cdot \gamma \} \tan \phi} \quad \dots(1)$$

ここで、PSR (Parallel submergence ratio) =  $h_w / h$ , Z: 覆土厚,  $\gamma$ : 背圧係数...周辺地盤内の残留空気及び背圧によるシート背面の揚圧力に関連する係数。  $c / (\gamma_w \cdot h \cdot \tan \alpha)$  で、かつ  $< 0.5$  が望ましく、0 ~ 1 の値の範囲をとる。

：斜面勾配， $c$  ，  $\phi$  ：土の強度定数などである。  
 また，浸透力： $f_h = i_h \cdot \gamma_w \cdot V = \sin \alpha \cdot \gamma_w \cdot (Z - Z_1) \cdot \cos \alpha$  と表すことが出来る。

### 3．実施現場への適用例

簡単のため， $c = 0$ ， $\phi = 0$  で適用した事例について示す。

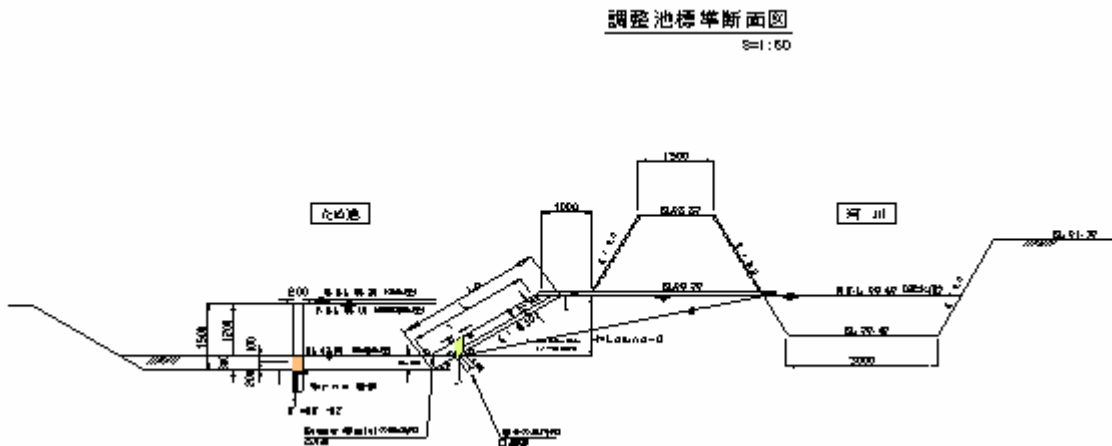


図 - 2 調整池の標準断面図

PSR = 0 のとき， $F_s = 1.019$ 。PSR = 0.5 (覆土層内の水位が半分) のとき， $F_s = 0.714$ 。PSR = 1.0 (覆土層内の水位が地表面と一致) のとき， $F_s = 0.483$ ，PSR > 1.0 (ため池の水位が満水に貯水) のとき， $F_s = 1.019$  に戻る。本調整池では，ため池内の貯水がなく，降雨によりため池の水位が上昇し，浸透流が高まった時に最も安全率が下がり，すべり事故を発生させたことが安全率の数値として説明されている。

### 4．まとめ

本報告では触れられなかったが，Koerner & Daniel 法を厳密解か有限斜面の解と解釈して，その関係についても検討してきた。これらの検討結果についてまとめると，以下ようになる。

局所平衡法による簡易解析結果  $F_s$  と Koerner & Daniel 法による厳密解  $F$  との関係は斜面長  $L(m)$  とすると，

$$F = F_s(1 + 1/L^{1.18})$$

となる。ここで  $F_s$  は，Koerner & Daniel 法による解  $F$  より斜面長  $L$  が 10m で 6.6% 小さくするので安全側の値を得る。 $F$  は  $L$  が長くなるほど  $F_s$  に収束していくことを示している。

覆土は PSR の上昇 (浸透力の増加) や背圧係数 の上昇で著しく安全率が下がり，1.0 を下回ると崩壊 (slope failure) する。満水 (静水中) になると，斜面に沿う浸透力がなくなり安全率が上昇するので 1.0 以上となり斜面はすべらない。この現象が，過去の工事の主なすべりの事故原因であると思われる。

最下端部が部分的に飽和する (PSR = 1.0) とすべり発生の可能性が高くなる。排水条件 (ドレーン) について設計上で注意を要することを示唆している。

覆土の安全率は，土の内部摩擦角 や材料の界面せん断抵抗力を極端に上げて急激に大きくなる。ある程度粘着力のある材料を使用した方が，安全率の上昇に効果大きい。概算では，堤高が低くても最低  $5kN/m^2$  以上は必要と思われる。従って，ランダム材 (旧堤流用土) でも砂質系の土は効果が期待できず，このような場合はセメント固化材を少し混ぜるといった方法で粘着力を発揮させると，安全率への寄与が大きい。また，材料の表面粗度  $\alpha = 35^\circ$  というものもあるようだが，転圧しても高々  $N$  値 = 10 ( $\alpha = 27^\circ$ ) 程度であるから，覆土内ですべり破壊を起こす場合が多く，コストの高い粗度の大きい材料の開発はあまり効果が期待できないようだ。

最も重要なことは，覆土 (盛土) の施工管理である。特に，シート界面の転圧は人力転圧とし丁寧に行わないと界面ですべり破壊を起こす。コスト的にも転圧が不要で，平滑管理がしやすく，かつ防草効果や空気抜き効果のあるソイルセメント等の適用を考慮すべきであろう。

経済的で施工性が良くても，設計理論が不安定では安心できる施設とはいえない。シート工法に関しては，現場技術者のための「ため池設計・施工マニュアル」がなく，現在は設計基準「ため池整備」に依存している。残念ながら参考資料<sup>2)</sup>の巻末にわずかに記述があるだけである。今日までの経験主義的な要素の多い設計から合理的・正確な設計ができるよう，今後も室内試験，現場試験を重ね，有意義な設計法の確立を目指すものとする。

参考文献 1) 廃棄物処分場の最終力バー：Koerner & Daniel 共著，勝見武・近藤三二共訳，技報堂出版。

2) ため池整備：(社)農業土木学会，平成 18 年 2 月

## 表面遮水シート工法によるため池堤体の新設計法 (その2)

田中勝彦<sup>1</sup> 向谷光彦<sup>2</sup> 山本陸登<sup>2</sup> 春本繁<sup>2</sup><sup>1</sup>鳴門測量設計(株) 設計部 <sup>2</sup>高松工業高等専門学校 建設環境工学科

## 1. はじめに

全国に約21万箇所あるため池(堤高15m以上は、フィルダムという。)の改修において、災害の多発や宅地化の進展・老朽化の増加及び環境問題もあり、山林の伐採を伴う新規築堤用土(抱土・鋼土・さや土)の確保が困難になってきた。ため池数の分布では、上位5県(兵庫県・広島県・香川県・山口県・大阪府)で全体数の約50%をしめているが、集中化もあり、近年では必要土量の不足問題が深刻化してきている。特に、離島や島しょ部では、築堤用土の多い前刃金工法に代わる発生土量の少ない施工性の良い工法の要望が高い。また、工事用道路が長く狭隘な中山間地域のため池改修では、工事が天候に影響されにくく、大型転圧機械や大型運搬機械の必要がない代替工法の要望が高まってきている。

一方、わが国では昭和40年台後半から止水性が確実に工場において品質管理された施工性の良い各種シート材が、諸外国より輸入され一部の地域ではあるが採用されてきた。しかし、シートの種類は多種多様で物性が異なり、設計法や検査法もまちまちで現場技術者の経験に頼るところが多く、一部の現場では混乱もみられたため普及実績は十分でないのが現状である。

以上の経緯を踏まえ、前刃金工法に替わる代替工法の一つとして、表面遮水シート工法を取り上げた。本報告では第2報として、既に報告<sup>1)</sup>した解析理論の概要、実際の現場への適用事例に加えて、材料メーカーによる設計手法との比較検討について述べる。そして、最後に今後の展開について提示する。

## 2. 理論解析の概要

ここで採用したのは、半無限長斜面の局所平行楔の釣り合いによるすべり解析方法(以下「局所平衡法」と呼ぶ。)である。この解析方法は、教科書レベルでよく知られている平易で理解しやすいものである。

これに対して、有限長斜面の受働及び主動楔の釣り合いによる滑り解析方法が Koerner & Daniel<sup>2)</sup>によって提示されており、以下「Koerner & Daniel法」と呼ぶ。また、材料強度を考慮した池底全体の土塊の重量を考慮した滑動モデル解析方法が材料メーカーの技術資料によって提示されている。

Koerner & Daniel法やメーカーの技術資料については、後述する。

局所平衡法は、盛土工事中の大雨でない場合でも前法斜面がシート上面で滑ることがあり、これを解析するため最下端部の平行楔に平行水浸率(PSR)・背圧・粘着力・浸透力を考慮して、安全率算定のための簡易式を提案したものである。また、掘込み式及び盛土式ため池の両形式にも適用できるよう配慮した。なお、Koerner & Daniel法との関係から、PSR; 平行水浸率、HSR; 水平水浸率としておいた。PSR=0とは地下水位が平行楔の底面にあることを表し、PSR=1とは地表面と水位が一致している。PSR>1とは、ため池部に十分貯水されていることを意味する。

斜面の安定で、最も危険な状態は  $0 < PSR < 1$  なので、この状態における安全率の一般式を提示

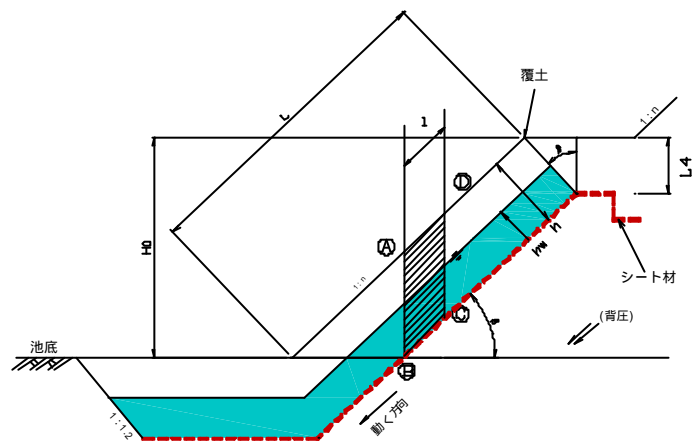


図 - 1 局所平衡法における斜面上土塊  
( $0 < PSR < 1$ , 浸透流あり)

する。

$$F_s = \frac{\{PSR \cdot \gamma_{sat} + (1 - PSR) \cdot \gamma_t\} \tan \phi + (c - \gamma_w \cdot h \cdot \tan \phi) / (Z \cdot \cos^2 \delta)}{\{PSR \cdot \gamma_{sat} + (1 - PSR) \cdot \gamma_t\} \cdot \tan \phi} \quad \dots(1)$$

ここで、PSR (Parallel submergence ratio)= $h_w / h$ 、Z:覆土厚、 $\delta$ :背圧係数...周辺地盤内の残留空気及び背圧によるシート背面の揚圧力に関連する係数。 $\delta = c / (\gamma_w \cdot h \cdot \tan \phi)$ で、かつ $\delta < 0.5$ が望ましく、0 ~ 1の値の範囲をとる。 $\phi$ :斜面勾配、 $c$ 、 $\gamma$ :土の強度定数などである。

また、浸透力： $f_h = i_h \cdot \gamma_w \cdot V = \sin \delta \cdot \gamma_w \cdot (Z - Z_1) \cdot \cos \delta$ と表すことができる。

### 3. 実施現場への適用例

簡単のため、 $c = 0$ 、 $\delta = 0$ で適用した事例について示す。

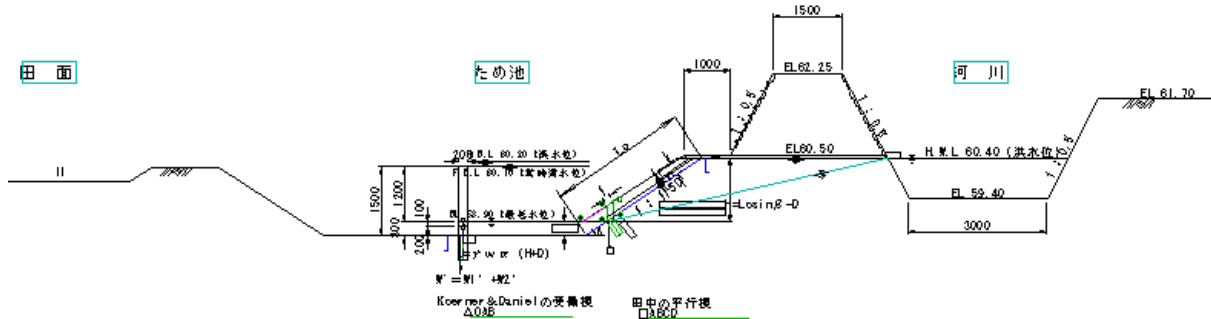


図 - 2 調整池の標準断面図

表 - 1 に計算過程を示す。PSR = 0 のとき、 $F_s = 1.019$ 。PSR = 0.5 (覆土層内の水位が半分) のとき、 $F_s = 0.714$ 。PSR = 1.0 (覆土層内の水位が地表面と一致) のとき、 $F_s = 0.483$ 、PSR > 1.0 (ため池の水位が満水に貯水) のとき、 $F_s = 1.019$  に戻る。本調整池では、ため池内の貯水がなく、降雨によりため池の水位が上昇し、浸透流が高まった時に最も安全率が下がり、すべり事故を発生させたことが安全率の数値として説明されている。

また、Koerner & Daniel 法を厳密解か有限斜面の解と解釈して、その関係についても検討している。これらの検討結果についてまとめると、以下のようになる。

局所平衡法による簡易解析の安全率  $F_s$  と Koerner & Daniel 法による厳密解の安全率  $F$  との関係は、斜面長  $L(m)$  とすると、図 - 2 より

$$F = F_s (1 + 1 / L^{1.18}) \quad \dots(2)$$

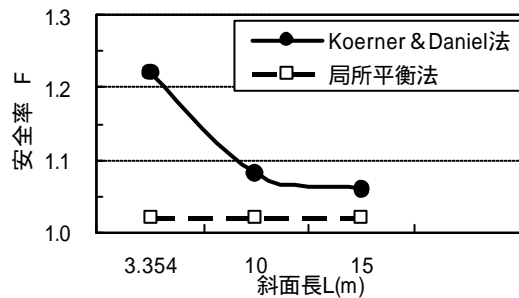


図 - 2 厳密解と提案法による斜面長 L と安全率の関係

なる近似曲線が考えられる。ここで  $F_s$  は、Koerner & Daniel 法による解  $F$  より斜面長  $L$  が 10 m で 6.6% 小さくなるので、安全側の値を得る。 $F$  は  $L$  が長くなるほど  $F_s$  に収束していくことを示している。

図 - 3 より、覆土は、PSR の上昇 (浸透力の増加) や背圧係数  $\delta$  の上昇で著しく安全率が下がり、1.0 を下回ると崩壊 (slope failure) する。満水 (静水中) になると、斜面に沿う浸透力がなくなり安全率が上昇するので 1.0 以上となり斜面はすべらない。この現象が、過去の工事

表 - 1 半無限長斜面における局所平衡法による解析 (総括表)

斜面内の浸透条件	概要図	半無限長斜面における局所平衡法による解析		
		安全率 $F_s$	一般モデル	すべり崩壊現場
浸透無し (静水中)		$F_s = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi}$ 粘着力 $c = 0$ 背圧係数 $= 0$ 浸透圧 $f_h$ (斜面水圧) $= 0$ (水は釣り合って浸透がないため浸透力はゼロ)	$F_s = 1.019$ $\text{斜面勾配} = \tan^{-1} \frac{1}{n}$ $= \tan^{-1} \frac{1}{2} = 26.565$	$F_s = 1.380$ $\text{斜面勾配} = \tan^{-1} \frac{1}{n}$ $= \tan^{-1} \frac{1}{1.5} = 33.690$ 粘着力 $c = 5 \text{ kN/m}^2 (= 0.50 \text{ t/m}^2)$ 背圧係数 $= 0.4$
浸透有り		$F_s = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi + \frac{c}{Z \cos^2 \phi}}$ 浸透圧 $f_h = ih \cdot w \cdot V = \sin \phi \cdot w \cdot Z \cos \phi$	$F_s = 0.483$ 覆土の内部摩擦角 $\phi' = 27^\circ$ $\text{sat} = 19 \text{ kN/m}^3 (= 1.9 \text{ t/m}^3)$ $\phi = 9 \text{ kN/m}^3 (= 0.9 \text{ t/m}^3)$ $t = 19 \text{ kN/m}^3 (= 1.9 \text{ t/m}^3 (w=31.45\%))$ $e = (w \cdot G_s - \text{sat}) / (\text{sat} - w) = 0.8333$ $G_s = s / w = 2.65$ $H = 1.5 \text{ m}$ $L = H / \sin \phi = 3.354 \text{ m}$ $L_0 = (H+D) / \sin \phi = 4.025 \text{ m}$	$F_s = 0.977$ 覆土の内部摩擦角 $\phi' = 27^\circ$ $\text{sat} = 19 \text{ kN/m}^3 (= 1.9 \text{ t/m}^3)$ $\phi = 9 \text{ kN/m}^3 (= 0.9 \text{ t/m}^3)$ $t = 19 \text{ kN/m}^3 (= 1.9 \text{ t/m}^3 (w=31.45\%))$ $e = (w \cdot G_s - \text{sat}) / (\text{sat} - w) = 0.8333$ $G_s = s / w = 2.65$ 事故発生
		$F_s = \frac{\text{PSR} \cdot \frac{1}{2} (1 - \text{PSR}) \cdot t \cdot \tan \phi'}{(\text{PSR} \cdot \text{sat} + (1 - \text{PSR}) \cdot t) \cdot \tan \phi}$ 浸透圧 $f_h = ih \cdot w \cdot V = \sin \phi \cdot w \cdot (Z - Z_1) \cdot \cos \phi$	$F_s = 0.714$ (PSR=0.5)	$F_s = 1.179$ (PSR=0.5)
		$F_s = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi}$ 浸透圧 $f_h$ (斜面水圧) $= 0$	$F_s = 1.019$ (PSR=0)	$F_s = 1.380$ 注意 (1) $e=0$ の覆土であると、これが空中であろうと水中であろうと安全率は同じである。但し約1.0。(概要図 と ) 降雨により覆土内でPSRが上昇してくると、浸透力により安全率は急激に低下する。(概要図 ) この時が最もすべりの危険度が高い。ところが満水では浸透力がゼロになりむしろ安全率は上昇する。これが過去の工事でのすべり事故の主な要因である。 (2) 左式で $\phi'$ を大きくするより、粘着力 $c$ を少し大きくするほうが安全率はあがる。( $c / 1 / \cos^2 \phi$ ) さらにさらの礫質土 ( $G_s = 0$ , $\phi' = 35^\circ$ ) では滑動の安全率を常時1.5、地震時1.2、工事中1.0 (PSR=1の時) 確保するのは難しい。 (3) 粘着力の効果は、 $Z$ が大きくなると小さくなる。( $c / 1 / Z$ )

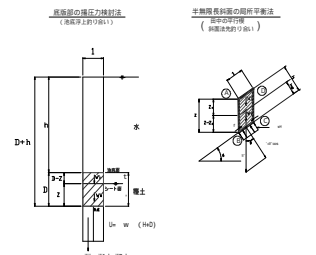
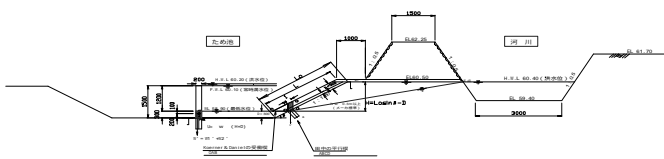
(1) 局所平衡法の安全率  $F_s$

$$F_s = \frac{\left[ \text{PSR} \cdot \frac{1}{2} (1 - \text{PSR}) \cdot t \right] \tan \phi' + \frac{c \cdot w \cdot H \cdot \tan \phi'}{Z \cdot \cos^2 \phi}}{(\text{PSR} \cdot \text{sat} + (1 - \text{PSR}) \cdot t) \tan \phi}$$

(2) Koerner & Daniel法の安全率  $F$

$$F = F_s \left[ 1 + \frac{1}{1.18} \right]$$

但し PSR ;  $hw/h$  ; 覆土厚 ;  $Z$  (m)  
 背圧係数 ; 周辺地盤内の残留空気及び背圧によるシート背面の揚圧力に関連する係数  
 $c / (w \cdot H \cdot \tan \phi')$  でかつ  $< 0.5$  が望ましい。 0 1  
 $L$  ; ジオメンブレンに沿って測定される斜面長(m)



中の主なすべりの事故原因であると思われる。

最下端部が部分的に飽和する (PRS = 1.0) とすべり発生の可能性が高くなる。排水条件 (ドレーン) について設計上で注意を要することを示唆している。

覆土の安全率は、土の内部摩擦角  $\phi$  や材料の界面せん断抵抗力を極端に上げても急激に大きくなる。ある程度粘着力のある材料を使用した方が、安全率の上昇に効果が大きい。概算では、堤高が低くても最低  $5\text{kN/m}^2$  以上は必要と思われる。従って、ランダム材 (旧堤流用土) でも砂質系の土は効果が期待できず、このような場合はセメント固化材を少し混ぜるといった方法で粘着力を発揮させると、安全率への寄与が大きい。また、材料の表面粗度  $\phi = 35^\circ$  というものもあるようだが、転圧しても高々  $N$  値 = 10 ( $\phi = 27^\circ$ ) 程度であるから、覆土内ですべり破壊を起こす場合が多く、コストの高い粗度の大きい材料の開発はあまり効果が期待できないようである。

最も重要なことは、覆土 (盛土) の施工管理である。特に、シート界面の転圧は人力転圧とし丁寧に行わないと界面ですべり破壊を起こす。コスト的にも転圧が不要で、平滑管理がしやすく、かつ防草効果や空気抜き効果のあるソイルセメント等の適用を考慮すべきであろう。

経済的で施工性が良くても、設計理論が不安定では安心できる施設とはいえない。シート工法に関しては、現場技術者のための「ため池設計・施工マニュアル」がなく、現在は設計基準「ため池整備」に依存しており、参考資料<sup>3)</sup>の巻末にわずかに記述があるだけである。今日までの経験主義的な要素の多い設計から合理的・正確な設計ができるよう、今後も室内試験、現場試験を重ね、有意義な設計法の確立を目指さなければならない。

#### 4. 他の設計手法との比較検討

ここでは、大きく分けてゴムシートメーカー系とベントナイトシート系の2種類の設計手法を取り上げ、提案法、厳密解法との比較を行った。表-2に表面遮水シート工法によるため池の各種設計法の比較を示す。

##### 有限長斜面による複合すべり面を用いた設計法

本手法は、ゴムシートのメーカー系に多い手法である。池底の地盤改良を行い、十分な受働土圧抵抗を見越して、それより上部のシート上に裁荷された斜面土塊とのすべり抵抗との比率を考えている。逆T擁壁等で見られる手法に近い。ただし、シート材料の引張強度等は特に考慮せず安全率を算定する。但し、ため池内部に水がなく、施工中に降雨等による浸透力が考慮できないので、特殊なケースのみ適用可能と思われる。

##### 半無限長斜面による合成層による補強を考慮した設計法

本手法は、ベントナイトシートのメーカー系に多い手法である。斜面上のすべり土塊の安定に、シート材料の引張強度を考慮して安全率を算定する。なお、ジオグリッドの開口部が大きく、覆土材はジオグリッドを貫通し、下に敷設されたジオメンブレン (シート) と接触する場合には適用可能である。但し、ため池内部に水がなく、施工中に降雨等による浸透力が考慮できないのは、ゴムシート系と同様である。ちなみに、同条件で厳密解によって解いてみると、安全率は1.26となる。

##### 相互比較による評価

表面遮水シート工法は、ため池無水時に豪雨が降った時 (落水時も同じ)、最も危険な状態となる (例えば  $\phi = 0$  の状態)。この時シート上面の覆土内に浸透力が発生し、安全率は1.0を下回る。これが降雨時にシート養生を必要とする理由である。ところが、満水になると覆土内に浸透力は発生しないので安全率はむしろ上昇する。すなわち無水時の浸透力がない安全率  $= \tan \phi / \tan \phi = 1.02$  (式で  $\text{PRS} = 0$ ) と同じ状態に戻る。それ以後は水圧が上昇するほど、完全不透シートではシート上流側から水圧がかかるので、上流側のすべろうとする堤体土塊を下流に押し返すことで、堤体すべりの安全率は上昇する。表面遮水シート工法では、安定計算上

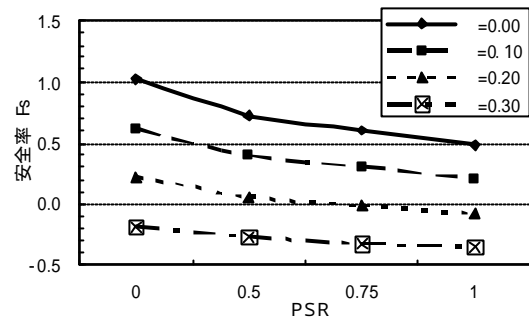
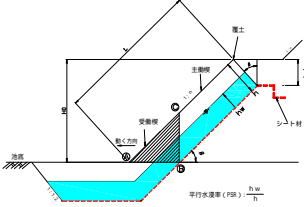
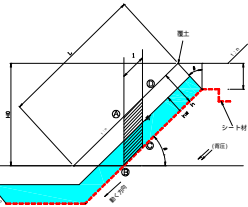
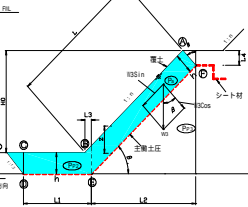
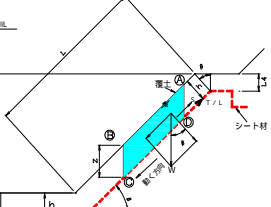


図-3 PSR (地下水位比) と提案法による安全率  $F_s$  の関係

表 - 2 表面遮水シート工法によるため池の各種設計法の比較

模式図	Koerner & Daniel法 (有限長斜面)	局所平衡法... 田中 向谷提案法 ] (半無限長斜面)	複合すべり面法 (有限長斜面)	合成層補強法 (半無限長斜面)	備考
				<p><b>モデル計算条件</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>背面水位差 H=0.00m</li> <li>小段高 H<sub>0</sub>=5.00m</li> <li>背圧係数 =0.0</li> <li>粘着力 c=0</li> <li>ジオグリッドと基礎の摩擦係数 <math>\mu = \tan 35^\circ = 0.700</math></li> <li>覆土の内部摩擦角 <math>= 27^\circ</math></li> <li>斜面の勾配 1:n=1.2.0 ( <math>= \tan^{-1} 1/2 = 26.565^\circ</math> )</li> <li>sat=19 kN/m<sup>3</sup> (=1.9t/? )</li> <li><math>\approx 9 \text{ kN/m}^3 (=0.9 \text{ t/? } )</math></li> <li>w=10 kN/m<sup>3</sup> (=1.0t/? )</li> <li>Sr=100% ( =1.445t/m<sup>3</sup> )</li> </ul> $e = \frac{w \cdot G_s - sat}{sat - w} = \frac{1.0 \times 2.65 - 1.9}{1.9 - 1.0} = 0.8333$ $Gs = \frac{s}{w} = 2.65$ $t = \frac{Gs + \frac{Sr}{1+e}}{1+e} \cdot w = \frac{2.65 + \frac{100}{100} \cdot 0.833}{1+0.8333} \times 10 = 19 \text{ (} \approx 1.9 \text{ t? )}$ <p>シート引張強度 T (=0.4t/m) = 4 kN/m</p> $\text{法長 } L = \frac{H_0}{\sin} = \frac{5.00}{\sin 26.565^\circ} = 11.18\text{m}$ <p>z=0.3m    h=0.3m    L1=1.0m    L4=0.5m</p>	
<p><b>概要</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>全シート材に適用可能な方法 (厳密解)</li> <li>ABCが上載覆土による主動力ですべるとする。覆土内の浸透圧を考慮する。但し、PSR=1で覆土内は飽和重量となり、最小安全率を示す。</li> <li>シート材料の強度は考慮する/考慮しないのいずれの場合も解析可能。</li> </ul>	<p><b>概要</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>全シート材に適用可能な方法 (簡易解)</li> <li>最下端の ABCDが単独で斜面上をすべるとする。覆土内は飽和重量とする。但し、PSR=1で覆土内は飽和重量となり、最小安全率を示す。</li> <li>シート材料の強度は考慮する/考慮しないのいずれの場合も解析可能。</li> <li>斜面長 L が長くすれば、厳密解に収束してゆく。</li> </ul>	<p><b>概要</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ゴムシートメカに多い方法 (簡易解)</li> <li>面 CD での受働土圧を含めて ABCDEF に作用す。摩擦力がすべり力より大きければよいとする。覆土内は水中重量とする。</li> <li>シート上面ですべるとし、シート材料の強度は考慮しないで設計する。</li> <li>ABCDEF が固相材で剛体に近い場合は適用可能な解法。</li> </ul>	<p><b>概要</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ベントサイトシートメカに多い方法 (簡易解)</li> <li>ABCDEF が単独で斜面上をすべるとする方法。覆土内は飽和重量とする。</li> <li>シート材料の強度を考慮して設計する。</li> <li>ジオグリッドの開口部が十分大きく、覆土材はジオグリッドを貫通し、下に敷設されたジオメムブレックスシートと接触する場合は適用可能。</li> </ul>		
<p><b>安全率</b></p> <p>斜面すべりでなく滑動の計算である。  Fs 1.5 (常時) H = 8m  Fs 1.2 (地震時) H &gt; 8m</p>	<p><b>安全率</b></p> <p>斜面すべりでなく滑動の計算である。  Fs 1.5 (常時) H = 8m  Fs 1.2 (地震時) H &gt; 8m</p>	<p><b>安全率</b></p> <p>斜面すべりでなく滑動の計算である。  Fs 1.5 (常時) H = 8m  Fs 1.2 (地震時) H &gt; 8m</p>	<p><b>安全率</b></p> <p>斜面すべりでなく滑動の計算である。  Fs 1.5 (常時) H = 8m  Fs 1.2 (地震時) H &gt; 8m</p>		
<p><b>計算式</b></p> <p>PSR=1.0  浸透力を考慮</p> $Fs = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ <p>ここに WA,Uh,NA,Wp,Uv  a=WA sin<sup>2</sup> 2tan - Uh cos<sup>2</sup> + Uh  b= -WA sin<sup>2</sup> 2tan + Uh sin<sup>2</sup> cos 2tan - NA cos<sup>2</sup> tan - (Wp - Uv) tan  c=NA sin<sup>2</sup> tan tan</p> <p>0.53</p>	<p><b>計算式</b></p> <p>PSR=1.0  浸透力を考慮</p> $Fs = \frac{SR \cdot \frac{1}{Z} \tan^2 (1-PSR) + (c' - wH \tan)}{(PSR \cdot sat + (1-PSR) \cdot t) \tan}$ $= \frac{\frac{1}{sat} \frac{1}{tan} \cdot \frac{Gs-1}{Gs+e} \cdot \frac{tan}{tan}}{c'=0$ <p>ここに c'=0  =0 (背圧なし)  =27° (&lt; 35°)  =tan<sup>-1</sup> 1/2=26.565°  Gs= s/ w = 2.65</p> <p>0.48</p>	<p><b>計算式</b></p> <p>覆土は飽和状態  浸透力は無視</p> $Fs = \frac{P_{P1} + P_{P2} + P_{P3}}{Pa}$ $P_{P1} = \frac{1}{2} \cdot h^2 \cdot \tan^2 (45^\circ + \frac{\theta}{2})$ $P_{P2} = W2 \cdot \tan \theta$ $P_{P3} = W3 \cdot \cos \theta \cdot \tan \theta$ $Pa = W3 \cdot \sin \theta$ <p>ここに P<sub>P1</sub> Rankinの受働土圧公式  W<sub>2</sub>, W<sub>3</sub>; 各ブロックの水中重量</p> <p>1.20</p>	<p><b>計算式</b></p> <p>覆土は飽和状態  浸透力は無視</p> $Fs = \frac{\frac{T}{L} + S}{Z \cdot sat \cdot \sin} = \frac{\frac{T}{L} + Z \cdot sat \cdot \cos \theta \cdot \tan \theta}{Z \cdot sat \cdot \sin}$ <p>ここに、 S= c + W cos θ tan θ  = 0 + (W cos θ) tan θ  = (Z sat cos θ) tan θ</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ジオグリッドとシートが合体してすべるとする場合は tan<sup>-1</sup> μ = tan<sup>-1</sup> 0.7 = 35°</li> <li>シートの直上面又は覆土内ですべるとする場合は = 27°</li> <li>シートの引張強度 T (=0.4t/m) = 4 kN/m</li> <li>1.16 ( = 27° T = 4kN/mの時 )</li> </ul>		
<p><b>計算結果</b></p> <p>0.53</p>	<p><b>計算結果</b></p> <p>0.48</p>	<p><b>計算結果</b></p> <p>1.20</p>	<p><b>計算結果</b></p> <p>1.16 ( = 27° T = 4kN/mの時 )</p>		
<p><b>注意</b></p> <p>ため池無水時 上記計算式  ため池有水時 上記は産廃式であり、ため池にそのままで適用できない。新計算式の一部算出完了</p>	<p><b>注意</b></p> <p>ため池無水時 上記計算式  ため池有水時 背圧も考慮できる PSR=0 テーパー化の改良未 (上記は等厚式)</p>	<p><b>注意</b></p> <p>ため池無水時 浸透力を考慮していないので適用不可  ため池有水時 滑動全体の全体が動くような剛体のケース (セメント固化等) のみ適用可</p>	<p><b>注意</b></p> <p>ため池無水時 浸透力を考慮していないので適用不可  ため池有水時 覆土内ですべるとする場合はシートの引張強度は考慮してはいいけない。</p>		
<p><b>適用</b></p> <p>詳細解であり常時及び地震時の解析は難解。</p>	<p><b>適用</b></p> <p>簡易式であり、詳細解より安全側の解が得られるので、実用的である。地震時の解析も容易である。</p>	<p><b>適用</b></p> <p>特殊なケースのみ適用する。</p>	<p><b>適用</b></p> <p>Koerner &amp; Daniel法を使って有限長斜面として解くと、F=(SF)=1.26 ( = 27° T=4 kN/mの時 ) である。</p>		
<p><b>評価</b></p> <p>表面遮水シート工法は、ため池無水時に豪雨が降った時(落水時と同じ)、最も危険な状態となる(例えば、この時シート上面の覆土内に浸透力が発生し、安全率は1.0を下回る。これが降雨時にシート養生を必要とする理由である。ところが、満水になると覆土内に浸透力は発生しないので安全率はむしろ上昇する。すなわち無水時の浸透力がない安全率Fs=tan θ/tan θ = 1.02 (式でPSR=0)と同じ状態に戻る。それ以後は水圧が上昇するほど、完全不透水シートではシート上流側から水圧がかかるので、上流側から水圧がかかるので、上流側の土塊を下流に押し返すことで、堤体すべりの安全率は上昇する。表面遮水シート工法では、安定計算上は水位が上がると堤体は安全になることとなる。この点は、洪水時に浸透線が上がり、危険となる前刃工金と大きく異なる点である。水中での覆土の滑動の安全性については、粘着力を考慮しなければ上記現場では安全率1.02であり必要安全率1.5を確保できないし、薄い覆土内では内部摩擦角より大きくすると安全率が上がるので(式)の c 1/cos<sup>2</sup> から明らかである。例えばセメント固化材の利用)、押入盛土(ランダム材)とは違い土質試験等をして適正な粘着力を考慮した設計を行うべきである。なお、小段下の前法勾配とシート下面の勾配を変えるテーパー化対策や段切を数箇所入れることで、安全率を上げる対策もある。これらについては、次報において詳細な解析法を検討する。</p>					

は水位が上がるほど堤体は安全になることになる。この点は、洪水時に浸潤線が上がり、危険となる前刃金工法と大きく異なる点である。水中での覆土の滑動の安全性については、粘着力を考慮しなければ上記現場では安全率 1.02 であり必要安全率 1.5 を確保できない。薄い覆土内では内部摩擦角より  $c$  を大きくすると安全率が上がるので（式の  $c = 1/\cos^2\beta$  から明らかである。例えばセメント固化材の利用）、押え盛土（ランダム材）とはいえ土質試験等をして適正な粘着力を考慮した設計を行うべきである。なお、小段下の前法勾配とシート下面の勾配を変えるテーパ化対策や段切を数箇所入れることで、安全率を上げる対策もある。これらについては、次報において詳細な解析法を検討する。

#### 参考文献

- 1) 表面遮水シート工法によるため池堤体の新設計法（その1）：田中勝彦，向谷光彦，（社）地盤工学会四国支部 平成 19 年度技術研究発表会，pp.87-88，2007．
- 2) 廃棄物処分場の最終カバー：Koerner & Daniel 共著，勝見武・近藤三二共訳，技報堂出版．
- 3) ため池整備：（社）農業土木学会，平成 18 年 2 月．



## 表面遮水シート工法によるため池堤体の新設計法（その3）

高松工業高等専門学校 正 向谷光彦，学 山本陸登，岡崎芳行  
鳴門測量設計(株)設計部 田中勝彦

### 1. はじめに

わが国では昭和40年台後半から止水性が確実に工場において品質管理された施工性の良い各種シート材が、諸外国より輸入され一部の地域ではあるが採用されてきた。しかし、シートの種類は多種多様で物性が異なり、設計法や検査法もまちまちで現場技術者の経験に頼るところが多く、一部の現場では混乱もみられたため普及実績は十分でないのが現状である。

以上の経緯を踏まえ、前刃金工法に替わる代替工法の一つとして、表面遮水シート工法を取り上げた。本報告では第3報として、降雨時のため池堤体内における浸潤線の予測、これを地下水位に換算して斜面の安定性を簡便に計算する手法について検討した。

### 2. 目的

本解析手法の検討に際して、次の2点について着目した。表面遮水シート工の覆土内の降雨時のすべり安全率を求める解析であるが、一般斜面にも適用できるように配慮すること。降雨時に現場斜面での判定が容易にできること。そして、ため池堤体の盛土中に雨水が浸透して、シート上で地下水面が上昇する場合の浸潤線を算定しようとするものである。そして、堤体斜面の表層すべり(滑動)に対する安定性を評価する。

### 3. 解析の前提条件

定式化を行う前提条件として、図-1を参照しながら、以下の項目を考慮した。土粒子の堆積方向と透水係数の相違が問題になるが、土粒子は水平に堆積したものとした。降雨は、斜面に打ちつけるものと想定することが最も危険な想定である。これによって、斜面に平行な流れと覆土に垂直な流れが発生する。水平方向の透水係数 $k_h$ が $k_v$ より大きいので、面①④と②③を通過する流量に貯留はないと仮定した。また、面①②と③④を通過する流量に貯留があると仮定した。この時の貯留係数を $(1 - 1/)$ とした。(流入1に対し流出 $1/$ となる。) 覆土の転圧は、タイヤローラーが多いので、透水係数 $k$ の異方性が発生する。通常、 $k_h/k_v = 2.0 \sim 3.0$  (2.5)程度。降雨の浸透速度 $v (=k_0 \cdot i_0)$ は裸地で $2 \sim 3 \text{ mm/hr}$ 、芝地で $5 \sim 6 \text{ mm/hr}$ 、

自然の植生地で $18 \text{ mm/hr}$ 程度である。(盛土で $10 \sim 300 \text{ mm/hr}$ 程度)浸透速度 $v$ は降雨強度 $r$ に比例するが、鉛直方向透水係数 $k_v'$ (飽和)とは異なる。流入量 $r$ は、まさ土26%、ローム質65%、有機質火山灰で92%で、残りが斜面を流下する。

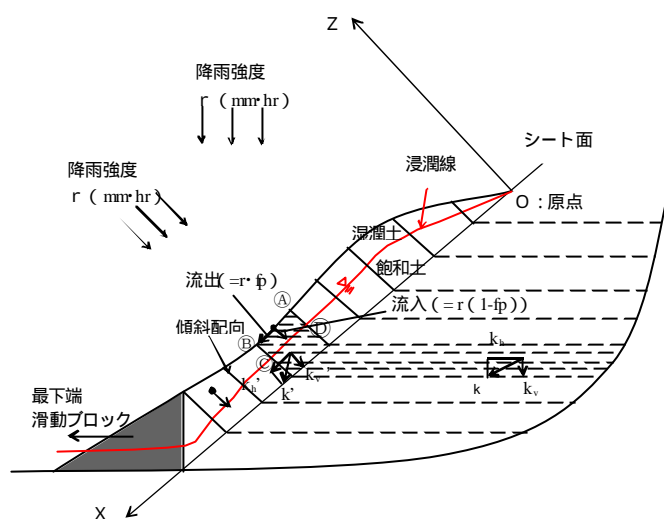


図-1 定常状態における堤体内浸潤線の形成

### 4. 理論式による浸潤線の誘導

図-2に示すように、座標原点：Oを法肩のシート部に設定する。降雨強度： $r$  (mm/hr)，流出率： $fp$ ，斜面： $i$ 割勾配，出口水位： $D$  (m)，入口水位： $Z_0$  (m)，斜面長： $L$  (m)，飽和透水係数： $k$  (cm/s)，浸透雨量： $q' = r \cdot (1 - fp)$  (cm/s)，覆土厚： $D_{max}$  (m)，間隙比： $e$ ，浸透速度： $v$  (cm/s)，動水勾配： $i_0 = v/k_0$ ，不飽和透水係数： $k_0$  (cm/s)とすると、定常状態における浸潤線が、以下の式で示される。

$$Z = \left\{ \begin{array}{cc} - (D^2 - Z_0^2) & 2 \cdot X_{max} \cdot (D^2 - Z_0^2) \\ X^2 + & X + Z_0^2 \end{array} \right\}^{\frac{1}{2}} \\ \left\{ \begin{array}{cc} (-L^2 + 2 \cdot X_{max} \cdot L) & (-L^2 + 2 \cdot X_{max} \cdot L) \end{array} \right\}$$

これより、定常状態では微小要素に出入りする水の量： $Q_{in} = Q_{out}$ より、 $= L \cdot q' / (k \cdot \tan \cdot D)$ が求まる。

また、雨水浸透によって地下水面は上昇するが、その形状は放物線に近く、斜面長中央部より少し法尻側

にピーク値：Xmax を有することになる。

$$X_{max} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \begin{array}{l} (D^2 - Z_0^2) \\ \tan \cdot D \end{array} \right\} + L$$

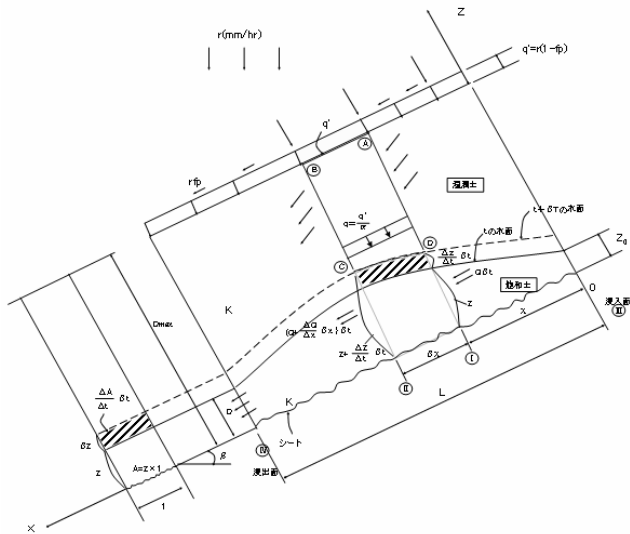


図 - 2 浸潤線定式化のための諸量

浸潤線の最大値を示す斜面長位置：Xmax は、浸出点の高さ：D，斜面傾斜角：θ，斜面長：Lにのみ関係していることが分かる。

### 5. 覆土内に貯留している浸透水の排水時間の推定

降雨がやんで、定常流の流速がゼロになる時間を T<sub>1</sub> とすると、覆土内に貯留している浸透水の排水時間に相当する。間隙率：n = e / (1+e) × 100(%), 出口水位：DはD~0まで変動するので、平均的にD/2であるとした。これより、排出時間：T<sub>1</sub>(s)は次式により求められる。

$$T_1 = \frac{n/100 \cdot \int_0^D Z \, dX}{k \cdot \tan \theta \cdot D/2} = \frac{2e \int_0^D Z \, dX}{(1+e) \cdot k \cdot \tan \theta \cdot D}$$

なお、浸透時間：T<sub>2</sub> = Dmax / v で求まる。

### 6. 浸潤線から平行水浸率(PSR)への換算

提案法による安定解析に持ち込むためには、2次曲線である浸潤線を平行水浸率：PSR(Parallel submergence ratio) = hw / h に換算する必要がある。これは、浸潤線下の面積を斜面長：Lで除して(Zmean)，さらに覆土厚：Dmaxで除して求められる。

$$PSR = \frac{Z_{mean}}{D_{max}} = \frac{\int_0^D Z \, dX / L}{D_{max}}$$

### 7. ケーススタディ

実事例や室内試験のデータとの照合ができないので、可能な範囲でパラメータを変動させたときに、どのような影響を及ぼすかを調べたのが表 - 1である。いくつかの係数は、表示のため10~10000倍して表示した。

表 - 1 ケーススタディ

No.	T <sub>1</sub> (hr)	10 × T <sub>2</sub> (hr)	10 <sup>4</sup> × k (cm/s)	10 × Sr (%)	Sr (%)	n (%)
1	78.3	30.8	50	26.7	93.0	44.4
2	78.3	32.3	50	33.3	89.8	44.4
3	78.3	33.1	50	40.0	86.6	44.4
4	78.3	33.9	50	46.7	83.2	44.4
5	80.9	34.7	50	53.3	80.3	45.9
6	83.4	34.7	50	60.0	78.0	47.4

No.	e	e × Sr (%)	10 <sup>4</sup> × k <sub>0</sub> (cm/s)	P S R	r (mm/h)	体積 含水率 (%)
1	0.80	74.4	45	0.528	20	41.3
2	0.80	71.9	43	0.528	25	39.9
3	0.80	69.3	42	0.528	30	38.5
4	0.80	66.6	41	0.528	35	36.9
5	0.85	68.3	40	0.528	40	36.9
6	0.90	70.2	40	0.528	45	37.0

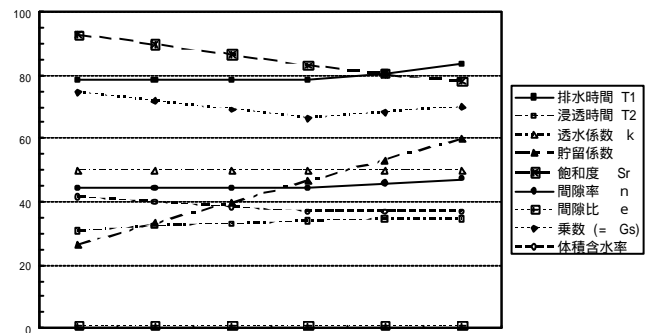


図 - 3 ケーススタディのまとめ

図 - 3 より、以下のことが分かってきた。排水時間：T<sub>1</sub>と降雨強度：rは比例する。覆土の浸透時間：T<sub>2</sub>と不飽和透水係数：k<sub>0</sub>は逆比例する。貯留係数：と排水時間：T<sub>1</sub>は比例する。浸透時間：T<sub>2</sub>と貯留係数：は比例する。降雨強度：rが上げれば覆土内では飽和度：Srを小さくしようとする。体積含水率：と排水時間：T<sub>1</sub>は逆比例する。

## 表面遮水シート工法によるため池堤体の新設計法（その４）

高松工業高等専門学校 国際 向谷光彦, 岡崎芳行  
高松工業高等専門学校専攻科 学 山本陸登  
鳴門測量設計(株)設計部 田中勝彦

### 1. はじめに

全国に約 21 万箇所あるため池（堤高 15m 以上は、フィルダムという。）の改修において、災害の多発や宅地化の進展・老朽化の増加及び環境問題もあり、山林の伐採を伴う新規築堤用土（抱土・鋼土・さや土）の確保が困難になってきた。ため池数の分布では、上位 5 県（兵庫県・広島県・香川県・山口県・大阪府）で全体数の約 50% をしめているが、集中化もあり、近年では必要土量の不足問題が深刻化してきている。特に、離島や島しょ部では、築堤用土の多い前刃金工法に代わる発生土量の少ない施工性の良い工法の要望が高い。また、工事用道路が長く狭隘な中山間地域のため池改修では、工事が天候に影響されにくく、大型転圧機械や大型運搬機械の必要がない代替工法の要望が高まってきている。

一方、わが国では昭和 40 年台後半から止水性が確実で工場において品質管理された施工性の良い各種シート材が、諸外国より輸入され一部の地域ではあるが採用されてきた。しかし、シートの種類は多種多様で物性が異なり、設計法や検査法もまちまちで現場技術者の経験に頼るところが多く、一部の現場では混乱もみられたため普及実績は十分でないのが現状である。

以上の経緯を踏まえ、前刃金工法に替わる代替工法の一つとして、表面遮水シート工法を取り上げた。本報告では第 4 報として、既に報告<sup>1)</sup>した解析理論の概要、実際の現場への適用事例に加えて、降雨時のため池堤体内における浸潤線の予測、これを地下水位に換算して斜面の安定性を簡便に計算する手法について検討した。そして、最後に今後の展開について提示する。

### 2. 理論解析の概要

ここで採用したのは、半無限長斜面の局所平行楔の釣り合いによるすべり解析方法（以下「局所平衡法」と呼ぶ。）である。この解析方法は、教科書レベルで知られている平易で理解しやすいものである。

これに対して、有限長斜面の受働及び主動楔の釣り合いによる滑り解析方法が Koerner&Daniel<sup>2)</sup>によって提示されており、以下「Koerner&Daniel 法」と呼ぶ。また、材料強度を考慮した池底全体の土塊の重量を考慮した滑動モデル解析方法が材料メーカーの技術資料によって提示されている。Koerner&Daniel 法については後述する。なお、メーカーの技術資料の詳細な比較については、別報を参照されたい<sup>3)</sup>。

局所平衡法は、盛土工事中の大雨でない場合でも前法斜面がシート上面で滑ることがあり、これを解析するため最下端部の平行楔に平行水浸率（PSR）・背圧・粘着力・浸透力を考慮して、安全率算定のための簡易式を提案したものである。また、掘込み式及び盛土式ため池の両形式にも適用できるように配慮した。なお、Koerner&Daniel 法との関係から、PSR；平行水浸率，HSR；水平水浸率としておいた。PSR=0 とは地下水位が平行楔の底面にあることを表し，PSR=1 とは地表面と水位が一致している。PSR>1 とは、ため池部に十分貯水されていることを意味する。

斜面の安定で、最も危険な状態は  $0 < \text{PSR} < 1$  なので、この状態における安全率の一般式を提示する。

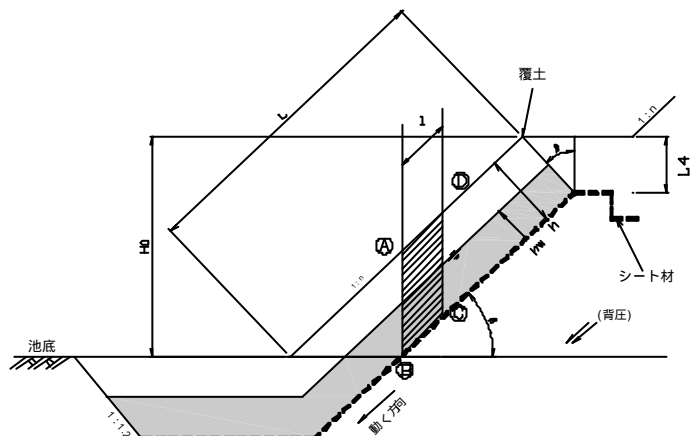


図 - 1 局所平衡法における斜面上土塊  
( $0 < \text{PSR} < 1$ , 浸透流あり)

$$F_s = \frac{\{PSR \cdot \gamma_{sat} + (1 - PSR) \cdot \gamma_t\} \tan \phi + (c - \gamma_w \cdot h \cdot \tan \phi) / (Z \cdot \cos^2 \alpha)}{\{PSR \cdot \gamma_{sat} + (1 - PSR) \cdot \gamma_t\} \cdot \tan \alpha} \quad \dots(1)$$

ここで、PSR (Parallel submergence ratio) =  $h_w / h$ 、Z: 覆土厚、 $\gamma_w$ : 背圧係数...周辺地盤内の残留空気及び背圧によるシート背面の揚圧力に関連する係数。 $c / (\gamma_w \cdot h \cdot \tan \alpha)$ で、かつ  $<0.5$  が望ましく、0 ~ 1の値の範囲をとる。 $\alpha$ : 斜面勾配、 $c$ 、 $\phi$ : 土の強度定数である。  
 また、浸透力:  $f_h = i_h \cdot \gamma_w \cdot V = \sin \alpha \cdot \gamma_w \cdot (Z - Z1) \cdot \cos \alpha$  と表すことが出来る。

3. 実施現場への適用例

簡単のため、 $c = 0$ 、 $\phi = 0$ で適用した事例について示す。

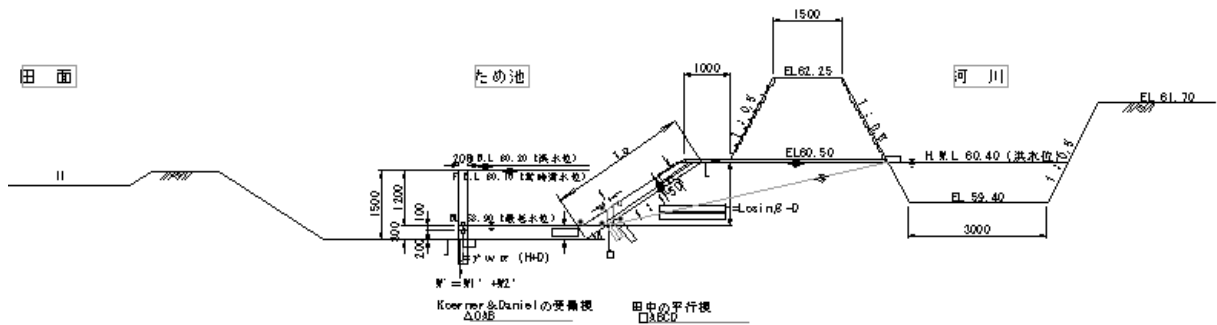


図 - 2 調整池の標準断面図

PSR = 0 のとき、 $F_s = 1.019$ 。PSR = 0.5 (覆土層内の水位が半分) のとき、 $F_s = 0.714$ 。PSR = 1.0 (覆土層内の水位が地表面と一致) のとき、 $F_s = 0.483$ 、PSR > 1.0 (ため池の水位が満水に貯水) のとき、 $F_s = 1.019$  に戻る。本調整池では、ため池内の貯水がなく、降雨によりため池の水位が上昇し、浸透流が高まった時に最も安全率が下がり、すべり事故を発生させたことが安全率の数値として説明されている。

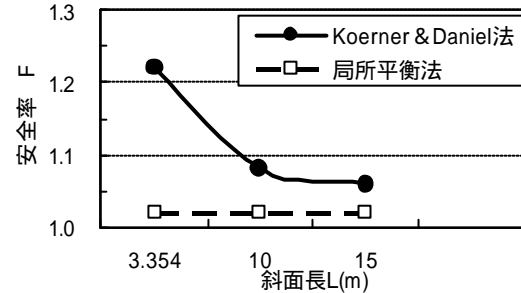


図 - 3 Koerner & Daniel 法と提案法による斜面長 L と安全率の関係

また、Koerner & Daniel 法を有限斜面の解と解釈して、その関係についても検討している。これらの検討結果についてまとめると、以下ようになる。

局所平衡法による簡易解析の安全率  $F_s$  と Koerner & Daniel 法による安全率 F との関係は、斜面長 L(m)とすると、図 - 3 より

$$F = F_s(1 + 1/L^{1.18}) \quad \dots(2)$$

なる近似曲線が考えられる。ここで  $F_s$  は、Koerner & Daniel 法による安全率 F より斜面長 L が 10 m で 6.6% 小さくするので、安全側の値を得る。F は L が長くなるほど  $F_s$  に収束していくことを示している。

図 - 4 より、覆土は、PSR の上昇 (浸透力の増加) や背圧係数  $\gamma_w$  の上昇で著しく安全率が下がり、1.0を下回ると崩壊 (slope failure)する。満水 (静水中) になると、斜面に沿う浸透力がなくなり安全率が上昇するので 1.0 以上となり斜面はすべらない。この現象が、過去の工事での主なすべりの事故原因であると思われる。

最下端部が部分的に飽和する (PSR = 1.0) とす

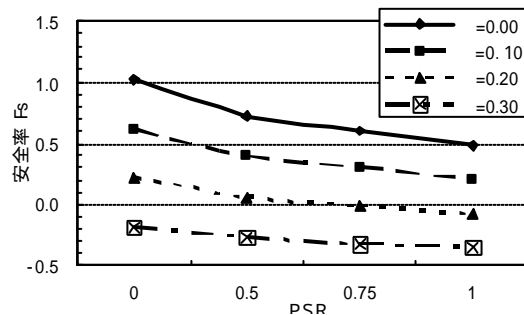


図 - 4 PSR (地下水水位比) と提案法による安全率 F\_s の関係  
 斜面長 L と安全率の関係

べり発生の可能性が高くなる。排水条件（ドレーン）について設計上で注意を要することを示唆している。

覆土の安全率は、土の内部摩擦角  $\phi$  や材料の界面せん断抵抗力を極端に上げて急激に大きくなる。ある程度粘着力のある材料を使用した方が、安全率の上昇に効果が大きい。概算では、堤高が低くても最低  $5\text{kN/m}^2$  以上は必要と思われる。従って、ランダム材（旧堤流用土）でも砂質系の土は効果が期待できず、このような場合はセメント固化材を少し混ぜるといった方法で粘着力を発揮させると、安全率への寄与が大きい。また、材料の表面粗度  $\alpha=35^\circ$  というものもあるようだが、転圧しても高々  $N$  値 = 10 ( $\phi=27^\circ$ ) 程度であるから、覆土内ですべり破壊を起こす場合が多く、コストの高い粗度の大きい材料の開発はあまり効果が期待できないようである。

最も重要なことは、覆土（盛土）の施工管理である。特に、シート界面の転圧は人力転圧とし丁寧に行わないと界面ですべり破壊を起こす。コスト的にも転圧が不要で、平滑管理がしやすく、かつ防草効果や空気抜き効果のあるソイルセメント等の適用を考慮すべきであろう。

経済的で施工性が良くても、設計理論が不安定では安心できる施設とはいえない。シート工法に関しては、現場技術者のための「ため池設計・施工マニュアル」がなく、現在は設計基準「ため池整備」に依存しており、参考資料<sup>4)</sup>の巻末にわずかに記述があるだけである。今日までの経験主義的な要素の多い設計から合理的・正確な設計ができるよう、今後も室内試験、現場試験を重ね、有意義な設計法の確立を目指さなければならない。

#### 4. 他の設計手法との比較検討

ここでは、大きく分けてゴムシートメーカー系とベントナイトシート系の2種類の設計手法を取り上げ、提案法、Koerner&Daniel 法との比較を行った。詳細な比較の表は、参考文献を参照されたい<sup>3)</sup>。以下には、表面遮水シート工法によるため池の各種設計法の比較結果のみを示す。

##### 有限長斜面による複合すべり面を用いた設計法

本手法は、ゴムシートのメーカー系に多い手法である。池底の地盤改良を行い、十分な受働土圧抵抗を見越して、それより上部のシート上に裁荷された斜面土塊とのすべり抵抗との比率を考えている。逆T擁壁等で見られる手法に近い。ただし、シート材料の引張強度等は特に考慮せず安全率を算定する。但し、ため池内部に水がなく、施工中に降雨等による浸透力が考慮できないので、特殊なケースのみ適用可能と思われる。

##### 半無限長斜面による合成層による補強を考慮した設計法

本手法は、ベントナイトシートのメーカー系に多い手法である。斜面上のすべり土塊の安定に、シート材料の引張強度を考慮して安全率を算定する。なお、ジオグリッドの開口部が大きく、覆土材はジオグリッドを貫通し、下に敷設されたジオメンブレン（シート）と接触する場合には適用可能である。但し、ため池内部に水がなく、施工中に降雨等による浸透力が考慮できないのは、ゴムシート系と同様である。ちなみに、同条件で Koerner&Daniel 法によって解いてみると、安全率は 1.26 となる。

##### 相互比較による評価

表面遮水シート工法は、ため池無水時に豪雨が降った時（落水時も同じ）、最も危険な状態となる（例えば  $\alpha=35^\circ$  の状態）。この時シート上面の覆土内に浸透力が発生し、安全率は 1.0 を下回る。これが降雨時にシート養生を必要とする理由である。ところが、満水になると覆土内に浸透力は発生しないので安全率はむしろ上昇する。すなわち無水時の浸透力がない安全率  $=\tan \alpha / \tan \beta = 1.02$ （式で  $\text{PSR}=0$ ）と同じ状態に戻る。それ以後は水圧が上昇するほど、完全不透水シートではシート上流側から水圧がかかるので、上流側のすべろうとする堤体土塊を下流に押し返すことで、堤体すべりの安全率は上昇する。表面遮水シート工法では、安定計算上は水位が上がるほど堤体は安全になることになる。この点は、洪水時に浸潤線が上がり、危険となる前刃金工法と大きく異なる点である。水中での覆土の滑動の安全性については、粘着力を考慮しなければ上記現場では安全率 1.02 であり必要安全率 1.5 を確保できない。薄い覆土内では内部摩擦角より  $c$  を大きくすると安全率が上がるので（式の  $c = 1/\cos^2 \beta$  から明らかである。例えばセメント固化材の利用）、押え盛土（ランダム材）とはいえず土質試験等をして適正な粘着力を考慮した設計を行うべきである。なお、小段下の前法勾配とシート下面の勾配を変えるテーパ化対策や段切を数箇所入れることで、安全率を上げる対策もある。

#### 5. 降雨時のため池堤体内における浸潤線の予測

本解析手法の検討に際して、次の2点について着目した。表面遮水シート工の覆土内の降雨時のすべり安全率を求める解析であるが、一般斜面にも適用できるよう配慮すること。降雨時に現

場斜面での判定が容易にできること。そして、ため池堤体の盛土中に雨水が浸透して、シート上で地下水面上昇する場合の浸潤線を算定しようとするものである。そして、堤体斜面の表層すべり（滑動）に対する安定性を評価する。

解析の前提条件

定式化を行う前提条件として、図 - 5 を参照しながら、以下の項目を考慮した。土粒子の堆積方向と透水係数の相違が問題になるが、土粒子は水平に堆積したものとした。降雨は、斜面に打ちつけるものと想定することが最も危険な想定である。これによって、斜面に平行な流れと覆土に垂直な流れが発生する。水平方向の透水係数  $k_h$  が  $k_v$  より大きいので、面(A①)と(B②)を通過する流量に貯留はないと仮定した。また、面(A③)と(C④)を通過する流量に貯留があると仮定した。この時の貯留係数を  $(1 - 1/)$  とした。(流入 1 に対し流出  $1/$  となる。)

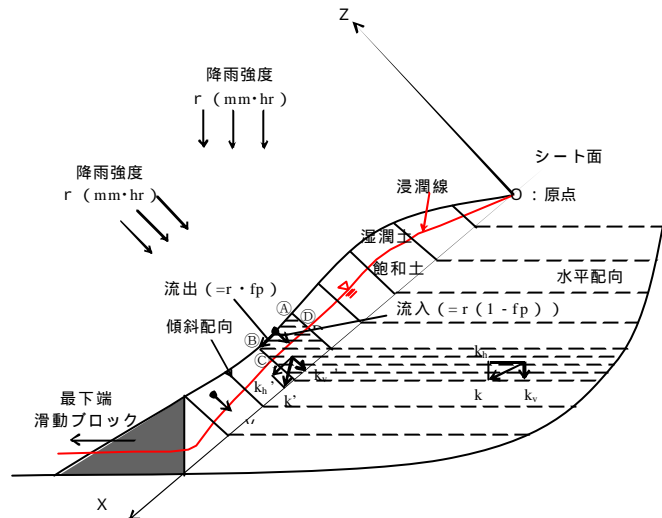


図 - 5 定常状態における堤体内浸潤線の形成

覆土の転圧は、タイヤローラーが多いので、透水係数  $k$  の異方性が発生する。通常、 $k_h/k_v = 20 \sim 30$  (25) 程度。降雨の浸透速度  $v (=k_0 \cdot i_0)$  は裸地で  $2 \sim 3 \text{ mm/hr}$ 、芝地で  $5 \sim 6 \text{ mm/hr}$ 、自然の植生地で  $18 \text{ mm/hr}$  程度である。(盛土で  $10 \sim 300 \text{ mm/hr}$  程度) 浸透速度  $v$  は降雨強度  $r$  に比例するが、鉛直方向透水係数  $k_v'$  (飽和)とは異なる。流入量  $r$  は、まさ土 26%、ローム質 65%、有機質火山灰で 92%で、残りが斜面を流下する。

理論式による浸潤線の誘導

図 - 6 に示すように、座標原点：Oを法肩のシート部に設定する。降雨強度： $r$  (mm/hr)，流出率： $f_p$ ，斜面： $i$  割勾配，出口水位： $D$  (m)，入口水位： $Z_0$  (m)，斜面長： $L$  (m)，飽和透水係数： $k$  (cm/s)，浸透雨量： $q' = r(1 - f_p)$  (cm/s)，覆土厚： $D_{max}$  (m)，間隙比： $e$ ，浸透速度： $v$  (cm/s)，動水勾配： $i_0 = v/k_0 - 1$ ，不飽和透水係数： $k_0$  (cm/s) とすると、定常状態における浸潤線が、以下の式で示される。

$$Z = \left\{ \begin{array}{l} - (D^2 - Z_0^2) \\ (-L^2 + 2 \cdot X_{max} \cdot L) \end{array} X^2 + \begin{array}{l} 2 \cdot X_{max} \cdot (D^2 - Z_0^2) \\ (-L^2 + 2 \cdot X_{max} \cdot L) \end{array} X + Z_0^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \dots (3)$$

これより、定常状態では微小要素に出入りする水の量： $Q_{in} = Q_{out}$  より、 $= L \cdot q' / (k \cdot \tan \cdot D)$  が求まる。

また、雨水浸透によって地下水面は上昇するが、その形状は放物線に近く、斜面長中央部より少し法尻側にピーク値： $X_{max}$  を有することになる。

$$X_{max} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \begin{array}{l} (D^2 - Z_0^2) \\ \tan \cdot D \end{array} + L \right\} \dots (4)$$

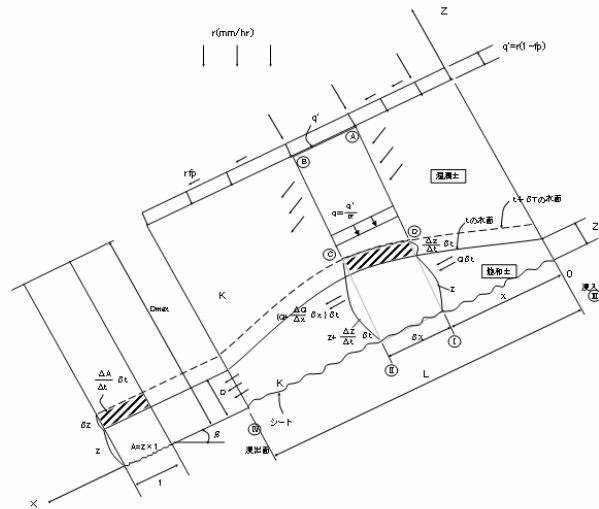


図 - 6 浸潤線定式化のための諸量

浸潤線の最大値を示す斜面長位置： $X_{max}$  は、浸出点の高さ： $D$ ，斜面傾斜角： $\theta$ ，斜面長： $L$  に関する関係式が導かれる。

覆土内に貯留している浸透水の排水時間の推定

降雨がやんで、定常流の流速がゼロになる時間を  $T_1$  とすると、覆土内に貯留している浸透水の排水時間に相当する。間隙率： $n = e / (1+e) \times 100(\%)$ ，出口水位： $D$  は  $D \sim 0$  まで変動するので、平均的に  $D/2$  であるとした。これより、排出時間： $T_1(s)$  は次式により求められる。

$$T_1 = \frac{n/100 \cdot \int_0^L Z dX}{k \cdot \tan \theta \cdot D/2} = \frac{2e \int_0^L Z dX}{(1+e) \cdot k \cdot \tan \theta \cdot D} \quad \dots(5)$$

なお、浸透時間： $T_2 = D_{max}/v$  で求まる。

浸潤線から平行水浸率(PSR)への換算

提案法による安定解析に持ち込むためには、2次曲線である浸潤線を平行水浸率：PSR(Parallel submergence ratio) =  $h_w / h$  に換算する必要がある。これは、浸潤線下の面積を斜面長： $L$  で除して ( $Z_{mean}$ )，さらに覆土厚： $D_{max}$  で除して求められる。

$$PSR = \frac{Z_{mean}}{D_{max}} = \frac{\int_0^L Z dX / L}{D_{max}} \quad \dots(6)$$

ケーススタディ

実事例や室内試験のデータとの照合ができないので、可能な範囲でパラメータを変動させたときに、どのような影響を及ぼすかを調べたのが表 - 1 である。いくつかの係数は、表示のため 10~10000 倍して表示した。

表 - 1 ケーススタディ

No.	$T_1$ (hr)	$10 \times T_2$ (hr)	$10^4 \times k$ (cm/s)	$10 \times Sr$ (%)	$Sr$ (%)	$n$ (%)	$e$	$10^4 \times Sr$ (%)	$10^4 \times k_0$ (cm/s)	P S R	$r$ (mm/h)	体積 含水 率 (%)
	78.3	30.8	50	26.7	93.0	44.4	0.80	74.4	45	0.528	20	41.3
	78.3	32.3	50	33.3	89.8	44.4	0.80	71.9	43	0.528	25	39.9
	78.3	33.1	50	40.0	86.6	44.4	0.80	69.3	42	0.528	30	38.5
	78.3	33.9	50	46.7	83.2	44.4	0.80	66.6	41	0.528	35	36.9
	80.9	34.7	50	53.3	80.3	45.9	0.85	68.3	40	0.528	40	36.9
	83.4	34.7	50	60.0	78.0	47.4	0.90	70.2	40	0.528	45	37.0

図 - 7 より, 以下のことが分かる。  
 排水時間:  $T_1$  と降雨強度:  $r$  は比例する。  
 覆土の浸透時間:  $T_2$  と不飽和透水係数:  $k_0$  は逆比例する。  
 貯留係数: と排水時間:  $T_1$  は比例する。  
 浸透時間:  $T_2$  と貯留係数: は比例する。  
 降雨強度:  $r$  が上がれば覆土内では飽和度:  $S_r$  を小さくしようとする。  
 体積含水率: と排水時間:  $T_1$  は逆比例する。

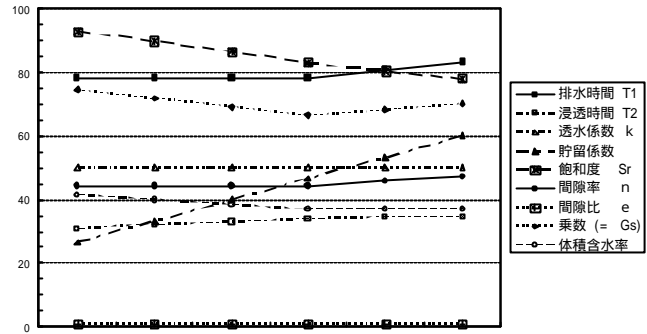


図 - 7 ケーススタディのまとめ

#### 参考文献

- 1) 表面遮水シート工法によるため池堤体の新設計法 (その1) : 田中勝彦, 向谷光彦, (社)地盤工学会四国支部 平成 19 年度技術研究発表会, pp.87-88, 2007.
- 2) 廃棄物処分場の最終カバー: Koerner & Daniel 共著, 勝見武・近藤三二共訳, 技報堂出版.
- 3) 表面遮水シート工法によるため池堤体の新設計法 (その2) : 向谷光彦, 田中勝彦, (社)土木学会四国支部 平成 20 年度自然災害フォーラム論文集, pp.55-60, 2008.
- 4) ため池整備: (社)農業土木学会, 平成 18 年 2 月.



# 表面遮水シート工法によるため池堤体の新設計法（その5）

ため池 シート工法 テーパー化

香川高等専門学校 国際 向谷光彦  
 同上 客員教授 田中勝彦  
 同上 岡崎芳行, 中島香織  
 同上 専攻科 小笠原一馬, 山本陸登

## 1. はじめに

全国に約21万箇所あるため池（堤高15m以上は、フィルダムという。）の改修において、災害の多発や宅地化の進展・老朽化の増加及び環境問題もあり、山林の伐採を伴う新規築堤用土（抱土・鋼土・さや土）の確保が困難になってきた。ため池数の分布では、上位5県（兵庫県・広島県・香川県・山口県・大阪府）で全体数の約50%をしめているが、集中化もあり、近年では必要土量の不足問題が深刻化してきている。特に、離島や島しょ部では、築堤用土の多い前刃金工法に代わる発生土量の少ない施工性の良い工法の要望が高い。また、工事用道路が長く狭隘な中山間地域のため池改修では、工事が天候に影響されにくく、大型転圧機械や大型運搬機械の必要がない代替工法の要望が高まってきている。

一方、わが国では昭和40年台後半から止水性が確実に工場において品質管理された施工性の良い各種シート材が、諸外国より輸入され一部の地域ではあるが採用されてきた。しかし、シートの種類は多種多様で物性が異なり、設計法や検査法もまちまちで現場技術者の経験に頼るところが多く、一部の現場では混乱もみられたため普及実績は十分でないのが現状である。

以上の経緯を踏まえ、前刃金工法に替わる代替工法の一つとして、表面遮水シート工法を取り上げてきた。本報告では第5報として、シート上の覆土に対してテーパ化された土塊の安定性検討と実際の現場への適用に関する工学的問題点について述べる。

## 2. テーパー化された覆土の安定性と定式化の概要

テーパ化された覆土において、浸透流がない場合の定式化は参考文献<sup>1)</sup>に見られるので、それを参照されたい。ここでは、斜面が最も危険な時、つまり覆土内に浸透流による浸潤面が形成されているときを考えた。右の図-1は、定式化のための概略図であり、参考文献に加筆したものである。定常状態における浸潤面の設定は、上に凸型の放物線を別途算出し、平滑化を行い、シート面に平行に設定したものである。これらの仮定により得られる斜面の安全率； $F_s$ は次式(1)で求められる。

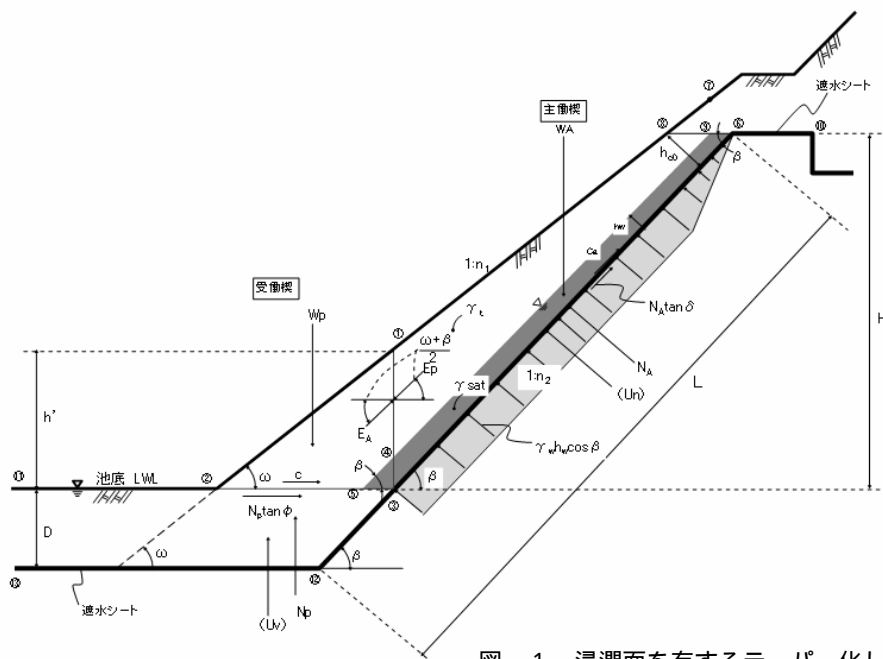


図-1 浸潤面を有するテーパ化した覆土に作用する力のつり合い

$$F_s = \{ -B + (B^2 - 4AC)^{1/2} \} / (2A) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

$$A = \cos\left(\frac{w+b}{2}\right) \cdot (W_A - N_A \cdot \cos b - U_n \cdot \cos b) + \sin\left(\frac{w+b}{2}\right) \cdot U_h$$

$$B = -\cos\left(\frac{w+b}{2}\right) \cdot (N_A \cdot \tan d + c_a) \cdot \sin b - \sin\left(\frac{w+b}{2}\right) \cdot \tan f \cdot (W_A - N_A \cdot \cos b)$$

$$- \sin\left(\frac{w+b}{2}\right) \cdot \left( c + W_p \cdot \tan f - \frac{g_w \cdot h_w^2}{2} \cdot \frac{\tan f}{\tan b} - U_n \cdot \cos b \cdot \tan f \right)$$

$$C = \sin\left(\frac{w+b}{2}\right) \cdot \tan f \cdot (N_A \cdot \tan d + c_a) \cdot \sin b$$

$$c = c' \left[ H \left( \frac{1}{\tan w} - \frac{1}{\tan b} \right) + \frac{h_{c0}}{\sin b} \right], c_a = c'_a \cdot \frac{H}{\sin b}$$

$W_A$ ; 主働楔の全重量 (kN/m),

$W_p$ ; 受働楔の全重量 (kN/m),

$N_A$ ; 主働楔の破壊面に垂直な有効力 (kN/m),

$N_p$ ; 受働楔の破壊面に垂直な有効力 (kN/m),

$t$ ; 覆土の湿潤重量 (kN/m<sup>3</sup>),

$U_n$ ; 斜面に垂直に作用する間隙水圧の合力 (kN/m),

$f$ ; 覆土の摩擦角 (°),  $w$ ; 水の単位体積重量 (=10 kN/m<sup>3</sup>),  $\alpha$ ; 覆土とシート間の接触面摩擦角 (°),

$\beta$ ; シート下の土の傾斜角 (°),

$E_A$ ; 受働楔から主働楔に作用する楔間力 (kN/m),

$$W_p = \frac{g_t \cdot h_w'^2}{2 \tan w} + \frac{(g_{sat} - g_t) \cdot h_w'^2}{\sin 2b}$$

$$N_A = W_A \cdot \cos b + U_h \sin b - U_n$$

$$W_A = \frac{2Hh_{c0} \cdot g_t + 2Hh_w(g_{sat} - g_t)}{2 \sin b} + \frac{(H^2 - h_w'^2) \cdot g_t}{2 \tan w}$$

$$- \frac{H^2 \cdot g_t}{2 \tan b} - \frac{(g_{sat} - g_t) \cdot h_w'^2}{\sin 2b}$$

$g_{sat}$ ; 覆土の飽和単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>),

$H$ ; 斜面先から測った斜面の鉛直高さ (m),

$U_v$ ; 受働楔に作用する鉛直方向の間隙水圧の合力 (kN/m),

$\alpha$ ; 覆土とシート間の接触面摩擦角 (°),

$\beta$ ; 仕上がった覆土の傾斜角 (°),

$E_p$ ; 主働楔から受働楔に作用する楔間力 (kN/m),

$D$ ; 底部における覆土の厚さ (m),  $c'$ ; 1m 当たりの受働楔の破壊面に沿った粘着力 (kN/m<sup>2</sup>),

$c'_a$ ; 1m 当たりの主働楔の覆土とシート間の付着力 (kN/m<sup>2</sup>),  $c$ ; 受働楔の破壊面に沿った粘着力 (kN/m),

$c_a$ ; 主働楔の覆土とシート間の付着力 (kN/m),

$h_w$ ; 覆土内の自由水面の斜面に垂直な高さ (m),

$h_{c0}$ ; 斜面頂における覆土の厚さ (m).

なお、必要安全率;  $F_s$  は、常時に 1.5、地震時に 1.2 が求められることを付記しておく<sup>2)</sup>。

### 3. ケーススタディ

例えば、右の図 - 2 のように  $H=8(m)$ ,  $c' = h_{c0} \times 10$  (kN/m<sup>2</sup>),  $\alpha=30^\circ$ ,  $\beta=25^\circ$ ,  $D=1(m)$ ,  $PSR = 0.1$ , (遮水シート下の法勾配;  $n_2$ ) = { (覆土の前法勾配;  $n_1$ ) - 0.5 } として、斜面頂部における覆土厚、遮水シート下の法勾配、および斜面の安全率の関係について検討したものを図 - 3 に示す。

ため池堤体では施工中に必要な安全率は常時で 1.5 なので、メーカーが推奨する斜面頂部の覆土厚さ 0.3m では常時安全率の 1.5 を確保できないことが分かった。覆土の仕上がり勾配である 1 :  $n_1$  において、最も急な 1:1.8 であっても法肩部の最低覆土厚は 0.55m 必要である。また、最も緩勾配の 1:3.0 でも 0.45m 程度は必要になった。

### 4. まとめ

本報告では触れられなかったが、非かんがい期に池の水位を落としながら堤体を改修する時には、底泥のしゅんせつも併せて施工されることがある。底泥と竹炭・ゼオライト等との浄化機能材による張りコンクリート化方策も今後の検討課題である。また、池の内部を仕切って水位を保持させながら改修する時には、安価で軽量の水質浄化も必要である。中山間地では 100V の電源確保に悩まされることもある。そこで、1 台の小型ポンプで逆転水車併用による揚水発電と太陽光発電をハイブリッドで連動させ、蓄電・節電・節水・浄化を行うシステム構築のため実証実験を進めている。

謝辞; 本研究の一部は、土木学会四国支部助成金を使用し

た。川本ポンプ(株)岩田靖徳島営業所長には技術的指導をいただいた。参考文献 1) 廃棄物処分場の最終カバー: Koerner & Daniel 共著, 勝見武・近藤三二共訳, 技報堂出版。 2) ため池整備: (社) 農業土木学会, 平成 18 年 2 月。

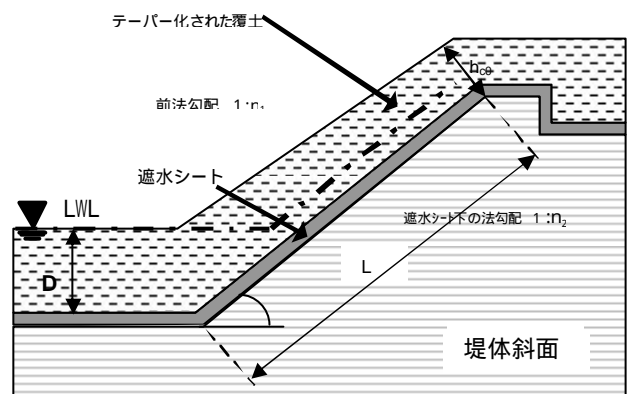


図 - 2 テーパー化覆土斜面の模式図

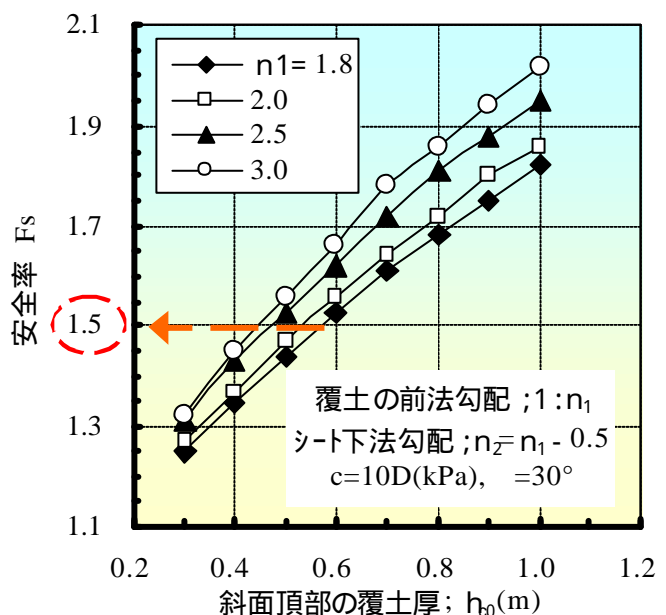


図 - 3 法肩部の覆土厚と堤体の安全率の関係