

干拓堤防의 安全에 關한 計算에 對하여

Stability Analysis of the sea-dike

目 次

1. 序 論
2. 安定計算에 必要한數值
 - (a) 土層柱狀圖
 - (b) 粘着力
 - (c) 其他
3. 安定計算에 使用되는 支持力과 其特徵
 - (a) Terzaghi 公式
 - (b) Prandtl 公式
4. 圖式解法과 其特徵
 - (a) 圓弧滑動法
 - (b) 摩擦圖法
 - (c) 分割法
 - (d) 積分法
5. 圓弧滑動的 計算例
 - (a) 平均法
 - (b) 分割法
 - (c) 積分法

1. 序 論

干拓工事に 從事하는 土木技術者로서는 干拓堤防의 安全은 干拓工事中 가장 重要한 工種이라 하겠다.

現在까지 너무나 土質調査에 對하여 等閑視했기 때문에 往往 失敗를 거듭해왔다. 次次 干拓事業은 深海締切로 土質條件이 不良한 軟弱地質上의 築造로 進出하여 耕地擴張을 하여야 할 國策인바 더구나 干拓工事に 從事하는 技術者로서는 波濤에 對한 諸性質把握은 勿論 土質工學에도 專心하여 設計에 反應시켜야할 段階에 놓여 있다.

이에 있어서 軟弱地盤處理라고하면 土木建築分野에서 取扱하기 困難한 問題로서 放置해왔다. 含水量이 많은 粘土에다 사람이 걸기에 힘든 泥土層의 바다에 對한 處理方法을 艱歲月을 두고

苦惱해왔다.

그러나 現在에와서는 多樣多種의 軟弱地盤處理工法에 研究를 거듭하여 왔고 新工法을 次次 實施하여 그의 解析과 理論을 發表하고 있다,

軟弱地盤의 土質을 正確히 把握한다는것은 이의 處理工法에 不可缺의 要素가 되는 것이며 軟弱地盤의 土質에도 여러種類가 있어 이점을 自然狀態로 採取하여 그의 壓縮強度를 調査한다고 하는것이 重要한 것이나 事實上 測定方法이 아직도 細密치 못하며 測定値가 眞인 一定値가 없다는 것이다. 特히 日本의 干拓事業工事は 우리나라 土質條件과 달리 거의가 軟弱地盤에다 築造를 하고 있는 實情이다.

波濤에對한 諸般性質把握은 勿論 軟弱地盤土質工學을 理解 못하고 日本의 干拓事業工事を 理解할 수 없을 程度로 土質工學에對한 研究가 大端하다. 한例로서 干拓事業埋立面積 50町步에 農林省職員이 約 50名程度 現地駐在監督을 하고 있으며 그事業所에는 거의 土質試驗室이 있고 그곳에서 그現場의 土質試驗을 하고 難點을 解決하여 工事を 推進하고 있으며 다시 難點이 있으면 農業土木試驗所에 依賴하여 指導를 받고 있는 實情이었다.

事實은 土質工學을 專攻한바는 아니나 日本에서 現在 干拓堤防의 安全에 對하여 計算하고 있는 方法을 概要나마 紹介하고자 한다.

地盤이 複雜하고 土質工學의 未發達로 堤防設計에 큰 困難을 주고 있는 이때 現在로서 認定되고 있는 安全計算法을 略述하고 그에對한 設計例를 一部提示하여 設計할때 多少라도 參考가 되면 多幸으로 생각된다.

支持力計算에 있어서 公式를 利用할때 假定の 項을 잘 吟味하며 使用하여야 할 것이다. 地盤內應力分布, 壓密度, 剪斷強度 沈下量 뿐 아니라 時間의 問題도 包含시켜 考慮하여야 하는故로

다음 몇가지를 記述한 것이며 그대로 使用할것이 아니라 土質工學에 經驗있는 專門家에 依賴하여 指導를 받아야 할 것이다.

2. 安定計算에 必要한 數值

現地의 土層形成은 複雜하고 區區하므로 “安全計算에 必要한 數值”는 實測을 原則으로 한다.

a. 土層柱狀圖

堤防敷地에 對하여 土層形成을 調査한 土層柱狀圖가 必要하다.

b. 粘着力

이것은 測定하는 方法에 따라 數值가 若干달라지며 測定하는 方法으로는 大概다음과 같다.

三軸壓縮試驗, 直接剪斷試驗, 單純壓縮試驗, 標準貫入試驗, 壓密緩速剪斷試驗, 壓密急速剪斷試驗, 非壓密急速剪斷試驗 등이 있다. 이들의 試驗은 實驗室內에서 하는 것과 現場에서 하는 것이 있는데 大部分은 前者에 依하여 實驗하고 있다.

c. 其他

흙의 粒度, 흙의 粒子比重, 흙의 比重, 間隙比含水比, 液性限界 液性比重, 塑性限界 塑性指數 및 諸指數間의 相關關係等을 調査해야 할 것이며 粘土에 對한 壓密特性을 調査할 必要가 있다.

3. 安定計算에 使用되는 支持力과 其特徵

(a) Terzaghi의 公式

帶狀 footing 下의 限界支持力을 求하는데 있어서 地盤의 破壞狀況을 두가지로 나누었다.

(1) 全般剪斷破壞

比較的 沈下가 적은데 不拘하고 破壞가 急激히 일어날때 (帶狀荷重)

限界支持力(q_{ult})은

$$q_{ult} = CN_c + rD_r N_s + \frac{1}{2} rBN_s$$

(2) 局部剪斷破壞

沈下가 클때 破壞도 이에따라 漸次的으로 일어날때 (帶狀荷重)

限界支持力(q_{ult})은

$$q_{ult} = \frac{2}{3} CN_c' + rD_r N_s' + \frac{1}{2} rBN_s'$$

C: 粘着力(t/m^2 또는 kg/cm^2)

q_{ult} : 限界支持力(t/m^2 또는 kg/cm^2)

r: 흙의 單位體積重量(t/m^3 또는 kg/cm^3)

D_r : 載荷面의 根入深(m 또는 cm)

B: 帶狀荷重인때의 荷重面의 幅(m 또는 cm)

$N_c, N_r, N_s, N_c', N_r', N_s'$: 支持力係數 또 圓形과 正方形의 footing 下의 限界支持力은 圓形荷重인때는(半徑을 R로 하면)

$$q_{ult} = 1.3CN_c + 0.6rRN_s + rD_r N_s$$

正方形荷重에 對하여는(載荷面의 一邊을 B라고 할때)

$$q_{ult} = 1.3CN_c + 0.4rBN_s + rD_r N_s$$

以上の 式에서 粘土일때 $\phi=0, D_r=0$ 라고하면

全般剪斷에 對하여 $q_{ult}=5.7C$

局部剪斷에 對하여 $q_{ult}=3.8C$

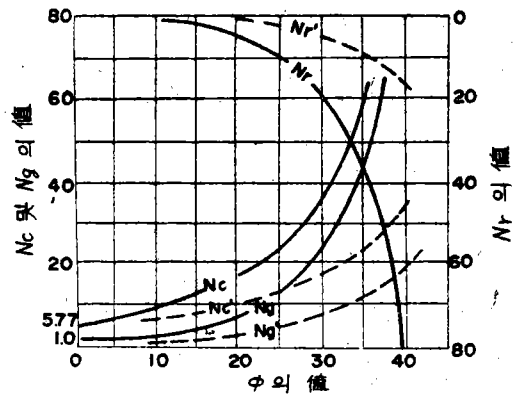
正方形荷重에 對하여 $q_{ult}=7.4C$

圓形荷重에 對하여 $q_{ult}=7.4C$

가 된다.

Terzaghi의 限界支持力의 式은 理論的이며 또 支持力係數는 다음 圖에서 簡易하게 求할 수 있다.

支持力係數를 求하는 圖



(b) Prandtl 公式

Prandtl에 依한 限界支持力의 式은 塑性理論에 基因한 最初의 것이며 基礎가 거칠지 않고 미끈할때에 適用된다.

地表面上에 있는 帶狀이 footing 下의 地盤의 限界支持力은

$$q_{ult} = \left\{ C \cot \phi + rB \tan \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \right\}$$

$$\{\tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \sum_{i=1}^n \phi - 1\}$$

地盤이 粘土일때 $\phi=0$ 인故로

$$q_{ult} = (\pi+2)C = 5.14C$$

로 되며 또 footing 이 地表面에서 D_f 의 깊이에 있을때 footing 의 底의 限界支持力은

$$q_{ult} = 5.14C + rD_f \text{ 가 된다.}$$

이式 以外에

$$\text{Fellenius: } q_{ult} = 5.52C$$

$$\text{Wilson: } q_{ult} = 5.52C(1+0.377 D_f/B)$$

$$\text{Tschobotarioff: } q_{ult} = 5.52C(1+0.38 D_f/B + 0.44 B/L)$$

L: 載荷面의 輿行長

어느 것이든지 粘土地盤上의 限界支持力은 大概 5~6 倍가 된다는 것을 알 수 있다.

4. 圖式解法과 其特徵

圖式解法에도 여러가지가 있으나 于先 圓弧滑動에 對하여 例示코져함. 이方法은 옛날부터 利用하는 方法이며 中心點을 假定하고 滑動點을 假定하여야 하는가답에 假定이 適切치 않으면 相當히 計算의 反復이 必要하게 된다.

第一回때 選定할 中心點의 位置는 土層圖에 따라 달라지나 軟弱地盤위에 防潮堤를 築造하여야 할때, 一般的으로 軟弱層이 깊을때 捨石部의 前方突出部垂直線 上方에서 盛土높이와의 交叉되는 곳을 定하고 이點의 左右上下方에 移動시켜 第二第三……의 作圖計算으로 安全率이 가장 작은點을 發見하여야 하고 軟弱層이 얕을때는 中心點이 더욱 上方에있으며 砂層等의 強層을 滑動面이 通하지 않는다.

그리고 滑動點에 普通堤防敷地가 20m 以上인 때는 敷布의 中心에서 滑動한다고해도 過히 틀림이 없다고 한다.

以上으로서 大體的인 概念을 記述했으나 圓弧滑動의 各種과 其特徵을 記述하고자 한다.

a. 平均法

이것은 저의 變化가 없는 層의 粘着力을 어느 한값으로 代表시켜 計算하는 方法이어서 어느 程度의 粗雜한 點이 있다.

그러나 災害가 일어나서 既往의 構造物이 破壞되어 地盤調査를 하는데 時間이 걸리고 早急

한 對策을 講究하여야 할때 滑動點과 隆起點 即 2點을 알 수 있는故로 이 두點을 連結한 線의 垂直二等分線위에 中心點을 假定하여 平均法으로서 求할 수 있는 簡便하고 便利한 方法이다.

b. 摩擦圖法

觀測한 C와 ϕ 를 利用하여야하는 關係로 調査法에 限界가있고 單純壓縮의 値로써는 計算을 못한다. 이에있어서 C와 ϕ 의 測定法에따라 値가 다르므로 어느것이 가장適合하느냐가 問題되며 念慮된다는 것이다.

c. 分割法

이것은 不均一層일때 圓弧滑動面이 通過하는 土層中 어느하나로 均一化된 土層으로 代表시키고 그위를 滑動하는 面을 分割하여 그들의 微小圓弧에 對하여 同一한 剪斷力을 가진것으로서 計算한다. 이方法은 平均法에 比하면 實際의 土層에 對하여 計算할 수 있는 利點이 있다.

d. 積分法

이것은 깊이에따라 均等히 變化하는 土層에 對하여 使用하는 方法이며 分割法과 平均法을 한 方法으로 綜合한 것으로 생각하면 된다.

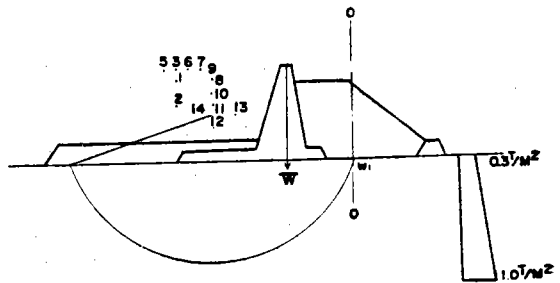
이 方法에는 數表가 있어 計算에 便利하다. 그러나 얕은곳의 砂層이 있거나 硬地盤이있을때는 使用할 수가 없다.

以上으로서 特徵을 記述했으나 平均法으로서 概算하고 分割法積分法으로서 再三 計算하는것이 좋을것이다. 이에 있어서 土層分布, 土質試驗이 무엇보다도 先行되어야 한다는 것을 잊어서는 안다.

5. 圓弧滑動의 計算例

$\phi=1^\circ$ C=0.3~1.0t/m² 로 한다.

a. 平均法 (圖-1)



- ① W_1 부터 滑動한다고 하고 中心을 R_1 로 할때
平均粘着을 0.8로 하면

$$\begin{aligned} & \text{(W} \times \text{arm長)} \\ \text{起動 Moment} &= 87.96 \times 9.5 = 835.62 \\ & \text{(0} \sim \text{0 軸부터 左側堤體의 重量 W)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{抵抗 Moment} &= C \times 2\pi R_1 \times \frac{8}{360} \times R_1 \\ &= 2C\pi \times \frac{Q}{360} \times R_1^2 \\ &= 2 \times 0.8 \times 3.14 \times \frac{130}{360} \times 16.5^2 \\ &= 5.024 \times \frac{130}{360} \times 16.5^2 = 493.922 \\ \therefore F &= \frac{493.922}{835.62} = 0.592 \end{aligned}$$

- ② W_1, R_2 로 하면

$$\begin{aligned} \text{起動 Moment} &= 835.62 \\ \text{抵抗 Moment} &= 5.024 \times \frac{144}{360} \times 15.8^2 = 501.977 \\ \therefore F &= \frac{501.677}{835.62} = 0.6004 \end{aligned}$$

- ③ W_1, R_3 로 하면

$$\begin{aligned} \text{起動 Moment} &= 835.62 \\ \text{抵抗 Moment} &= 5.024 \times \frac{124}{360} \times 17^2 = 493.134 \\ \therefore F &= \frac{493.134}{835.62} = 0.590 \end{aligned}$$

- ④ W_1, R_4 로 하면

$$\begin{aligned} \text{起動 Moment} &= 835.62 \\ \text{抵抗 Moment} &= 5.024 \times \frac{118}{360} \times 17.6^2 = 510.099 \\ \therefore F &= \frac{510.099}{835.62} = 0.6104 \end{aligned}$$

- ⑤ 故로 中心은 R_3 의 附近에 있는것을 推定할 수 있다. 이번에는 水平으로 移動하여 본다. W_1, R_5 로 하면

$$\begin{aligned} \text{起動 Moment} &= 87.96 \times 10.5 = 923.580 \\ \text{抵抗 Moment} &= 5.024 \times \frac{127}{360} \times 18^2 = 574.243 \\ \therefore F &= \frac{574.243}{923.580} = 0.622 \end{aligned}$$

- ⑥ W_1, R_6 로 하면

$$\text{起動 Moment} = 87.96 \times 8.5 = 747.66$$

$$\text{抵抗 Moment} = 5.024 \times \frac{120}{360} \times 16.2^2 = 439.499$$

$$\therefore F = \frac{439.499}{747.66} = 0.5878$$

- ⑦ W_1, R_7 로 하면

$$\text{起動 Moment} = 87.96 \times 7.5 = 659.70$$

$$\begin{aligned} \text{抵抗 Moment} &= 5.024 \times \frac{116.4}{360} \times 15.2^2 \\ &= 375.308 \end{aligned}$$

$$\therefore F = \frac{375.308}{659.70} = 0.5689$$

- ⑧ W_1, R_8 로 하면

$$\text{起動 Moment} = 87.96 \times 6.5 = 571.74$$

$$\begin{aligned} \text{抵抗 Moment} &= 5.024 \times \frac{127}{360} \times 13.5^2 \\ &= 323.0118 \end{aligned}$$

$$\therefore F = \frac{323.0118}{571.74} = 0.5649$$

- ⑨ W_1, R_9 로 하면

$$\text{起動 Moment} = 87.96 \times 6.5 = 571.74$$

$$\text{抵抗 Moment} = 5.024 \times \frac{120}{360} \times 13.9^2 = 323.56$$

$$\therefore F = \frac{323.56}{571.74} = 0.5659$$

- ⑩ W_1, R_{10} 로 하면

$$\text{起動 Moment} = 87.96 \times 6.5 = 571.74$$

$$\text{抵抗 Moment} = 5.024 \times \frac{136}{360} \times 13^2 = 320.75$$

$$\therefore F = \frac{320.75}{571.74} = 0.5610$$

- ⑪ W_1, R_{11} 로 하면

$$\text{起動 Moment} = 87.96 \times 6.5 = 571.74$$

$$\text{抵抗 Moment} = 5.024 \times \frac{144}{360} \times 12.6^2 = 319.044$$

$$\therefore F = \frac{319.044}{571.74} = 0.5580$$

- ⑫ W_1, R_{12} 로 하면

$$\text{起動 Moment} = 571.74$$

$$\text{抵抗 Moment} = 5.024 \times \frac{152}{360} \times 12.4^2 = 326.162$$

$$\therefore F = \frac{326.162}{571.74} = 0.5705$$

- ⑬ W_1, R_{13} 로 하면

$$\text{起動 Moment} = 87.96 \times 5.5 = 483.78$$

抵抗 Moment = $5.024 \times \frac{140}{360} \times 11.8^2 = 272.044$

$\therefore F = \frac{272.044}{483.78} = 0.5623$

⑭ $W_1 R_{11}$ 로하면

起動 Moment = $87.96 \times 7.5 = 659.70$

抵抗 Moment = $5.024 \times \frac{146}{360} \times 13.6^2 = 376.858$

$\therefore F = \frac{376.858}{659.70} = 0.5712$

以上 14 通의 計算에 依하여 臨界圓의 中心은 R_{11} 의 附近에 있는것을 알게 되었다.

여기에서 捨石을 臨界圓(11)보다 앞에 延長하고 두께 1.5m 로 했다면은 여기에서 다시 安全率을 計算할 必要가 있다.

R_{11} 의 點에 對하여 생각하면 設計安全率을 1.2 로하고 Moment 反對方向에 捨石을 한다고하면

$F = 1.2 = \frac{\text{抵抗 Moment}}{\text{起動 Moment}}$

이것에 數值를 代入하여보면 된다.

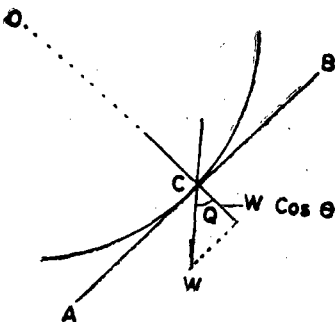
$1.2 = \frac{319.044}{571.74 - x}$

$\therefore 571.74 \times 1.2 - 1.2x = 319.044$

$\therefore x = 305.90$

그런故로 圖와같이 押捨石을 臨界圓보다 外側까지 늘이지 않으면 안된다. 이때에 安全率은 1.2 보다 커지고 臨界圓은 R_{11} 보다 若干移動되어야 하는데 R_{11} 에서 移動하지 않는다는것이 이方法에서 問題되는 點이다. 그러나 다시 計算해보는 것도 좋다. 이方法에 있어서 粘着力을 平均化한 값으로 代表했다는點이 問題點이며 어디까지나 이方法이 簡略한 方法이라 하겠다.

b. 分割法 (圖-2)



分割法을 說明하기 前에 다음 圖-2를 보면 斜面 AB 위를 滑動할때 W 인 荷重이 垂直上方에 作用하고 斜面에 對한 法線方向의 힘은 $W \cos \theta$ 가 된

다. 即地盤에 對하여 $W \cos \theta$ 인 힘으로 늘어 있다.

土柱가 橫方向 AB 面에 沿하여 剪斷되는 것이다.

故로 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ 에 있어서

$\sigma = W \cos \theta$ 라고 생각되며

$c =$ 剪斷力 σ 垂直應力 ϕ 摩擦角

$c =$ 粘着力

W 는 分割된 滑動面上의 重量이며 重心位置에서 垂直上方에 向하고 θ 는 W 가 滑動面을 끄는 點과 臨界圓의 中心을 連結한 線이 W 의 方向과 이루어지는 角이다.

分割法 (圖-3)

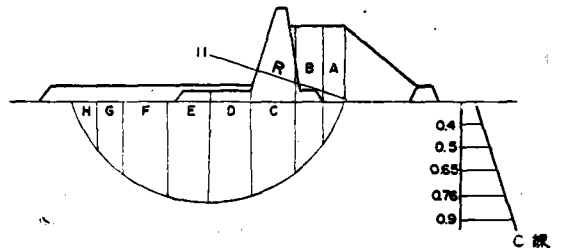


圖-3을 보면 地表面下 圓弧의 部分은 中心點에 對하여 左右均等이다.

抵抗 Moment 는 各分割의 圓弧部分을 L_i 라고 하면

$R \sum \tau_i L_i = R \sum (c_i + \sigma_i \tan \phi_i) L_i$

$= R \sum (c_i + W_i \cos \theta_i \tan \phi_i) L_i$

$\phi = 0$ 라면 $R \sum \tau_i L_i = R \sum c_i L_i$ 가되며 上載荷重의 項은 無關係가 된다.

이것에 依하여 計算하여보면

$R \sum L_i C_i = 12.6(4.6 \times 0.45 + 3.2 \times 0.65 + 4.6 + 0.76 \times 3.8 \times 1.9 + 3.8 \times 0.9 + 4.6 \times 0.76 + 0.32 \times 0.65 + 4.6 \times 0.45)$
 $= 271.863$

$\therefore F = \frac{271.863}{571.74} = 0.4755$

以上과 같이 操作을 反復하여 安全率이 最小

인 點을 求해야한다. 圖-3에서

捨石의 길이 12m, R=9m

捨石의 高 1.5m

捨石의 重量 1.9t

위와 같이 押捨石을 했다고하면 抵抗 Moment는 그대로 있고 起動 Moment는 減된다.

$$F = \frac{271.863}{571.74 - 12 \times 1.5 \times 1.9 \times 9} = \frac{271.863}{263.94} = 1.0294$$

이 方法은 分割法과 같이 不連續된 點을 없애고 積分하므로써 抵抗 Moment를 求하는 方法이며 抵抗 Moment 係數表를 利用하면 된다.

表에서 測點 10에서 安全率이 最小가되며 이 點에 있어서 Moment 不足分은

$$373.5 - 131.52 = 241.98 = 242' \text{m}$$

押捨石의 높이를 1.5m로할때 Moment 中心에서의 長이를 x라고하면

(表)

抵抗 Moment 係數表

Point No	R	Q	F	K	R ³	FkR ³	α	C ₀	R	$\frac{\alpha}{75.3} C_0 R^2$	M _r	M ₀	$\frac{M_r}{M_0}$
1	17.2	54.5	0.2621	0.07	5088.4	186.72	104	0.3	295.8	168.8	355.56	739.2	0.481
2	16.0	60.0	0.3428	0.07	4096.0	196.58	120	0.3	256.0	160.86	357.44	739.2	0.484
3	17.8	63.0	0.3922	0.07	5639.8	309.68	126	0.3	316.8	209.05	518.73	923.58	0.562
4	14.4	56.0	0.2829	0.07	2986.0	118.26	112	0.3	207.36	121.55	239.8	552.5	0.434
5	13.3	68.0	0.3922	0.07	2352.6	129.18	126	0.3	176.89	116.64	245.8	552.5	0.445
6	12.8	51.5	9.2285	0.07	2097.15	65.62	103	0.3	163.84	88.35	153.97	373.5	0.412
7	11.3	45.0	0.1522	0.07	1442.9	30.74	90	0.3	127.69	60.17	90.91	202.5	0.449
8	11.6	58.5	0.3195	0.07	1560.9	69.82	117	0.3	134.56	82.77	152.59	373.5	0.409
9	14.4	45.0	0.1522	0.07	2986.0	63.62	90	0.3	207.4	97.72	161.34	373.5	0.432
10	12.0	56.5	0.2901	0.07	1728.0	45.98	113	0.3	14.0	85.54	131.52	373.5	0.352
11	10.0	53.0	0.2424	0.07	1000.0	33.94	106	0.3	100.0	55.47	89.41	202.5	0.442
12	18.4	40.5	0.1123	0.07	6229.5	97.94	81	0.3	338.56	143.58	24.51	552.5	0.437
13	21.2	41.0	0.1165	0.07	9528.0	155.40	82	0.3	449.4	200.0	355.45	739.2	0.481
14	15.6	49.5	0.1998	0.07	3796.4	106.19	99	0.3	243.4	126.16	232.3	552.5	0.420
15	8.9	63.5	0.4008	0.07	704.97	39.56	127	0.3	79.21	52.66	92.22	202.5	0.434
16	10.8	68.0	0.4830	0.07	1259.70	85.18	136	0.3	116.64	83.04	168.22	373.5	0.450

$$1.5 \cdot x \cdot 1.9 \cdot \left(\frac{x}{2} + 5\right) = 242$$

$$\therefore x = 9m$$

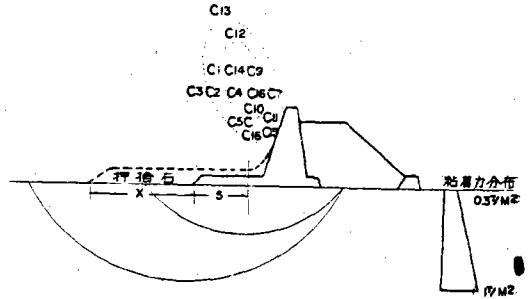
그런故로 圖-4와같이 捨方前方에서 길이 9m 높이 1.5m의 捨石을 하면된다.

以上으로서 圓弧滑動에 對한 圖式解法의 概要를 記述했으나 充分히 地質狀態를 考慮하여 適用함에 誤用하는 일이 없도록 하여야할 것이다.

c. 積分法

積分法 圖-4

C1 0.481	C6 0.412	C11 0.442
C2 0.484	C7 0.449	C12 0.437
C3 0.562	C8 0.409	C13 0.481
C4 0.434	C9 0.432	C14 0.421
C5 0.445	C10 0.352	C15 0.434
		C16 0.450



日本에서는 干拓堤防의 安全率은 現在 1.2~1.3을 標準으로 하고 있다. 前에 發刊한 設計基準(日本)에는 干拓堤防의 安全率을 5-6으로 表示했으나 現在와 같이 土質試驗의 精密度가 높은 日本에서는 不要하다는 것이다.

施工面에 있어서는 安全率이 높으면 施工에 對하여 安全할지라도 工費面에서는 不經濟的이다.

(筆者 農林部 盧 泰 來)