

# 壁體의 變位와 土壓分布와의 關係에 對한 研究\*1

—非粘性土의 地表面이 傾斜질 경우—

曹 熙 料\*2

## A Study on the Effects of Lateral Displacement of Retaining Wall on the Distribution of Lateral Earth Pressure\*1

—In the Case of Sloping Noncohesive Backfills—

Hi-doo Cho\*2

This study was performed for the purpose of determining the effects of distribution of the lateral earth pressure in the case of sloping backfills of being consisted of the idealized cohesionless fragmental masses. The displacements were classified as eight types by DUBROVA (by patterns). B type among these has its turning point at the top of the wall, moves outwardly and is significant to gravitational structure because of its foundation elasticity which causes displacement.

Therefore, it might be surely acknowledged that the resultant, formula;  $E=1/2 \cdot \gamma H^2 \frac{\sin(u-\epsilon)\cos(\alpha+\epsilon)}{\cos(u+\alpha)} \cdot \cot(u+\rho) (t/m^3)$ , is appropriate for applying it to the designing of the sand-catch dams. The results obtained are as follows:

1. Lateral earth pressure is proportional to the square of the wall heights.
2. The coefficient(K) is directly proportional to the sloping of backfill surface and inversely proportional to the displacement.
3. The distribution of the pressure looks like parabola, curve of second order (Fig. 5, b).
4. The distribution of the pressure strength looks like that of hydrostatic pressure (Fig. 5, c).

COULOMB 과 RANKINE 의 土壓論에 基礎하여 重力式構造物이나 deflection 性構造物에 흔히 發生한 B 型變位에 대하여 研究考察함으로써 式  $E=1/2 H^2 \frac{\sin(u-\epsilon)\cos(\alpha+\epsilon)}{\cos(u+\alpha)} \cdot \cot(u+\rho)$ 을 얻었는데 이식은 土壓再分配를 考慮한 式이므로 實用度가 높으리라 생각되며 本式에 依하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 土壓은 壁高의 自乘에 直比例한다.
2. 土壓은 地表의 傾斜度에 正比例하며 壁體의 變位에 反比例한다.
3. 土壓線圖는 二次拋物線으로 分布한다(그림 5의 b).
4. 土壓強度는 靜水壓의 分布를 한다 (그림 5의 c).

\*1. The Asia Foundation 의 Fellowship 에 依한 研究임. Received January 21, 1973.

\*. 全南大學校 農科大學, College of Agriculture, Chon-nam National University.

## 序 言

## 研究史

土壓理論은 COULOMB의 土楔論<sup>(1,9)</sup>이나 RANKINE의 塑性理論<sup>(1)</sup>에 立脚한 土壓論이 提唱된 以來 많은 理論的 및 實驗的研究가 거듭되어 왔으나 現在까지 擁壁에 作用하는 土壓에 대하여 充分하고 確實한 根據를 갖인 理論은 없으며 實用的으로 古代 COULOMB이나 RANKINE의 土壓論이 適用되고 있다.

擁壁 橋台脚 등 構造物은 橫方向의 土壓을 받으며 이 橫壓은 構造物의 安定이나 強度에 影響을 미치고 있으므로 構造物과 이에 作用하는 土壓과는 絶對的인 相關關係가 있다.<sup>(3)</sup> 따라서 本論에서는 擁壁이 變位함에 따른 土壓再分配問題 즉 變位에 따른 土壓分布가 어떻게 變化하는가를 考察하였으며, 砂防 dam은 溪床勾配緩和, 流出土砂의 調節, 山脚의 固定등의 目的으로 築設되나 結果的으로 流域에서 流出되는 土砂를 貯砂하게 되며 또 堆砂는 上流側에 向하여 自然傾斜角(實際로는 流水에 依하여 그 以下)으로 堆積함으로서 本論에서는 非粘質土의 地表가 傾斜를 이룰 경우에 대하여 考察한다.

擁壁에 作用하는 土壓을 究明함에는 壁背面의 形狀, 表面狀態, 壁의 變位 및 土砂의 物理的狀態 등 많은 因子가 關聯됨으로 塑性理論이나 彈性理論만으로는 充分히 解決할 수 없는 어려운 문제이다. 本研究에서는 實用上 現地에서 適用할 수 있는 一般式의 誘導에 主目的을 두었으므로 影響력이 크지 않는 因子의 關與를 避하고 一般的으로 絶對的 影響力을 갖인 因子인 土의 內部摩擦角, 地表面의 傾斜度, 壁體의 變位, failure line 이 이루는 角 등의 因子만 參與시켰다. 土의 間隙性, 密度, 壓縮性, 透水性, 容積重 등은 標準狀態 즉 理想非粘質土塊에서 考察하였다. 따라서 本論의 非粘質土는 淸淨, 純粹한 粘着性이 없는 乾砂를 말한다. 乾砂가 아닌 飽水砂도 乾砂와 內部摩擦角이 같으므로 實用上으로는 乾砂에만 限하지 않는다.

壁體의 變位の 形態에는 DUBROVA<sup>(5)</sup>의 分類에 依하면 8型인데 이중 重力式構造物이나 deflection 性構造物에 많이 일어나는 B型變位<sup>(4,5)</sup>에 대하여 研究考察한다. 砂은 dam은 一般的으로 重力式 dam이 많으며 重力式壁防主動土壓分布에 重大한 影響을 주는 變形을 받으며 基底部의 土 즉 地盤은 彈性을 갖이고 있음으로 (地盤이 岩質土일 경우도) 彈性에 依하여 基底部에 滑動이 일어나게 된다.<sup>(3)</sup> 그러므로 B型變位 즉 上部固定 下部移動形態인 B型變位(主動土壓)에 대하여 研究考察한 結果 實用性이 있는 式을 얻었다.

擁壁에 關한 經驗的 計算法을 1687年에 Вошапу이 最初로 發表한 후 1726年에 Ку.Те는 摩擦力이 土壓에 큰 影響을 준다고 發表하였고<sup>(2)</sup> 1773年에 COULOMB이 理論的 定立과 土壓公式의 提案을 하였으며 土楔論에 基礎를 두고 摩擦力뿐만 아니라 粘着力도 考慮하여 研究하였다.<sup>(6)</sup> RANKINE은 1856年에 塑性理論에 立脚한 共役應力<sup>1,3,8)</sup>의 見地에서 壁背面에 作用하는 土壓을 求하고 1877年에는 非粘質土內의 應力 및 failure line의 方向에 對한 簡單한 解法을 發表하였다.

土壓에 關한 圖解法을 1840年에 PANCELET가 創案한 以來 1880年에 Штрещеп는 直線 failure line 대신 折線 failure line을 提唱하였고 1932年에 KREY에 依하여 詳細히 研究되었으며 KHAN과 共同으로 主應力의 値와 方向을 求하였다.<sup>(4)</sup> 1886年에 CULMANN은 地表面이 曲面을 이루는 一般의인 경우에 있어서 最大土壓을 求하는 圖解法을 求하였고 1950年에 ГолкШЕВНУ는 土의 塑性理論에 基礎하여 非粘質土의 壓力을 圖解的으로 解析하였으며 1939年에 Сокоповский는 土의 限界釣合의 一般理論을 研究하였다.<sup>(3)</sup>

實驗的 研究로는 1882年에 후울해이델, 1906年의 MÜLLER, 30年代의 TERZAGHI와 KREY를 들 수 있으며<sup>(3)</sup> 1971年에 岸岡 孝, 原 敏男, 竹內美次의 土壓分布에 對한 研究發表를 들 수 있다.<sup>(5)</sup>

以上의 土壓論에 關한 研究 概觀에서 알 수 있는바 土壓論의 實際的인 矛盾을 正正發表한 것들이나 이들 研究는 COULOMB系에 屬하거나 RANKINE系에 屬하고 兩者의 理論을 綜合하여 새로운 연구를 한 것이다. 그러나 本論에서 研究考察한 非粘質土의 地表面이 斜傾 角 傾斜 角의 土壓分布에 對하여 發表된 바는 아직 없다.

## 研究 方法

## I. 條 件

1. 變位는 B型變位이다.
2. 地表의 傾斜角은  $0 < \rho'$  다 ( $\rho'$ 는 息角).
3. 壁體의 背面은 平滑하다.
4. 地表面은 屈曲이 없는 直線形이다.
5. 土砂는 粘性이 없고 淸淨, 純粹한 均質의 乾燥砂粒으로서 半無制限土이다.

## II. 前 提

1. Failure line은 直線이다.
2. 砂粒은 擁壁의 變位에 따라 運動을 開始한다.
3. 內部摩擦角  $\rho$ 는 乾砂와 飽水砂가 같다.

4. 土壓의 作用方向은 水平이다.
5. 反力  $R$  은 failure line 의 法線에  $\rho$  만큼 傾斜한다.
6. 三力 즉 反力  $R$ , 土壓  $E$ , 崩壞 prism  $G$  는 鈞合하여 示力三角形을 이룬다.
7. Failure line 의 角  $\mu = 45^\circ - \frac{\rho}{2}$  이다.

III. 展 開

Backfills 인 砂粒은 擁壁의 變位와 同時에 運動이 開始된다. 壁體가 移動함으로써 壁과 backfills 와의 사이

에 形成된 空隙을 메꾸기 위하여 崩壞 prism 의 範圍內에서 砂粒은 轉位한다. 砂粒의 轉位와 關聯된 自轉方向은 counterclockwise (그림 1의 (a), (b))이므로 上位에 있는 砂粒은 下位の 砂粒의 運動을 摩擦力에 依하여 妨害한다. (4)

砂粒의 運動狀態는 自轉에 依하여 轉位하면서 連鎖的으로 일어나므로 帶條域狀態로 考察한다(그림 2). A型 變位에 있어서는 帶條域은 等滑落이 일어나나 B型變位에 있어서는 等滑落이 생기지 않는다. 帶條域의 運動은 failure line 에 平行하게 일어나며 轉位順序는 上方로부터 漸次下方에 이르나 最初의 第1帶條域은 壁에 依하여 轉位에 妨害를 받으므로 原形이 變形되어 移動하며 第2帶條域부터 漸次 壁의 移動에 따라 空隙을 메꾸기 위하여 壁쪽으로 移動한다(그림 2). 이와 같이 壁體의 變位에 依하여 帶條域이 移動함으로써  $ABB'$ 의 三角形의 空隙을 메꾸면서 동시에 地表面에 變化가 일어난다. 즉  $\alpha$ 의 傾斜를 하고 있는 地表  $AC$ 는  $AB$ 壁이  $AB'$ 와 같이 變位함으로써  $ADC$ 와 같이 凹形의 表面이 된다. 여기서  $CD$ 線은 息角  $\rho'$ 의 傾斜를 이루면서 崩落하며 failure line 도  $BC$ 線에서  $B'D$ 線으로 變位한다. 變位の 程度에 따라서  $B'$ 점이 결정되며  $D$ 점도 결정된다. 地表面의 崩落面積  $\triangle ADC$ 는 變位에 依하여 메꾸어진 面積  $\triangle ABB'$ 와 같다. 그림 2에 있어

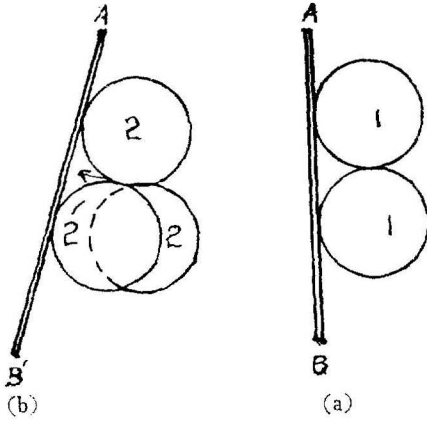


그림 1. 土粒의 轉位圖

Fig. 1. Transference of soil grains

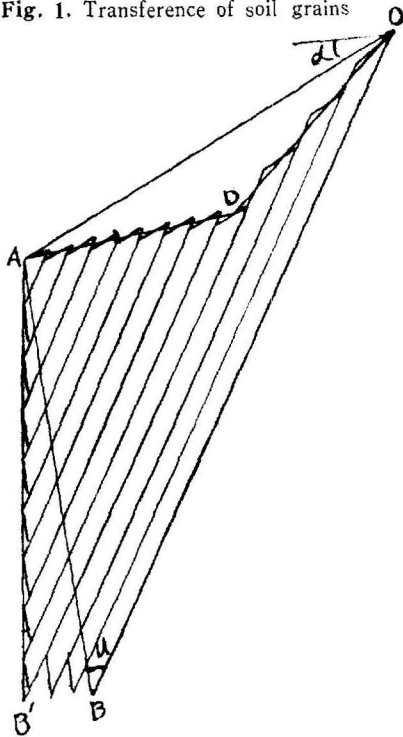


그림 2. 滑落面의 變位圖

Fig. 2. Transition of failure line

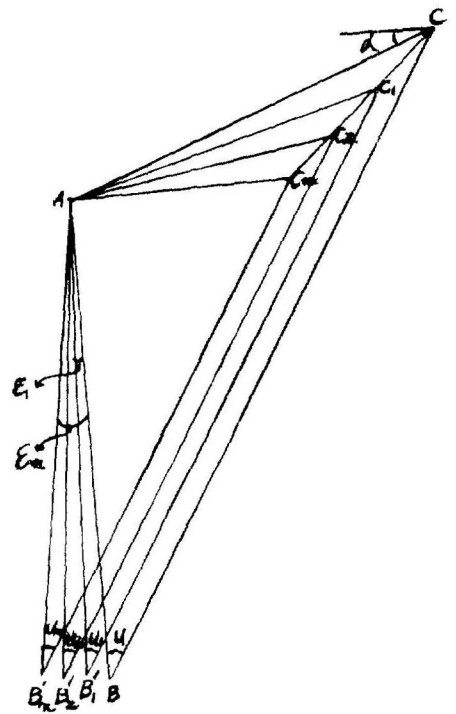


그림 3. 壁體의 變位圖

Fig. 3. Displacement of retaining wall

서 D 點은 帶條域狀態로 觀察하였을 때 鈍部이나 實際로 砂粒은 微細하므로 D 點은 銳利하다. 따라서 崩落面은 三角形을 이룬다.

또 failure line 의 角  $u=45^\circ-\frac{\rho}{2}$  는 壁體의 變位에 依하여 變化하지 않는다. 그림 3 에서 變位에 依한 Failure line 의 移動, 表面崩落面積, 崩壞 prism 의 變化 등을 圖示한다.

Failure line BC 는 壁이  $\overline{AB}'_1$  로 變位하면  $\overline{B}'_1C_1$  으로 變位하며  $\overline{AB}'_n$  로 變位하면  $\overline{B}'_nC_n$  로 變位한다.  $\overline{ACC}_n$  는  $\overline{AB}$  가  $\overline{AB}'_n$  로 變位할 때 생기는 地表의 崩落面이며  $\overline{CC}_n$  는 自然傾斜角을 이룬다. 이와 같이 變位の 程度에 따라서 failure line 도 變位하므로 崩壞 prism 도 變位에 따라 變化한다.  $\overline{AB}$  와 같이 垂直일 때는  $\triangle ABC$ ,  $\overline{AB}'_1$  일 때는  $\triangle AB'_1C_1$ ,  $\overline{AB}'_n$  일 때는  $\triangle AB'_nC_n$  로 變化한다.

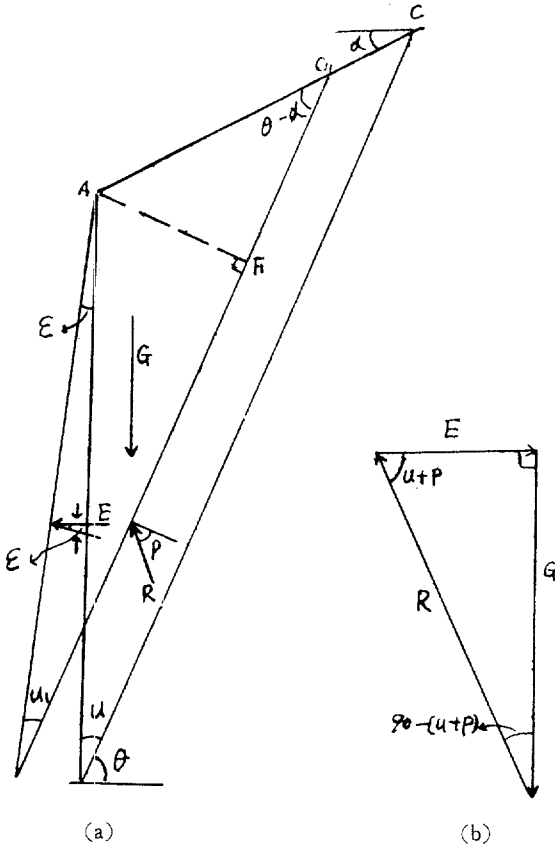


그림 4. 土壓作用圖

Fig. 4. Acting phenomenon of earth pressure

- $\alpha$  : 地表의 傾斜角
- $\epsilon$  : 壁體의 變位角
- $\rho$  : 土砂內部摩擦角

結果 및 考察

前章에서 擁壁의 變位에 따라서 failure line 도 變位하며 結果의으로 崩壞 prism 의 面積에 變化가 있음을 證明하였다. 壁體의 移動量이 壁高의 1/5,000~1/10,000 程度라도 土壓에 影響을 미치며 큰 것은 1/50~1/100 인 경우도 있으므로<sup>(4)</sup> 土壓計算에 있어서 壁體의 變位를 前提로 한 土壓再分配問題를 考慮함은 重要하다.

그림 4 의 a 는 擁壁이  $\overline{AB}$  에서  $\overline{AB}'$  로 變位할 때 failure line 은  $\overline{BC}$  에서  $\overline{B}'C'$  로 移動하였으며 崩壞 prism 도  $\triangle ABC$  에서  $\triangle AB'C'$  로 變化하였고  $u$  도  $u_1$  으로 變化하였음을 나타냈다. 그러나  $u_1$  은  $u-\epsilon$  이므로 垂直과의 이루는 角은  $45^\circ-\frac{\rho}{2}$  이다. G 는 崩壞 prism 의 重量이며 R 은 反力으로 failure line  $\overline{B}'C'$  의 法線에서  $\rho$  (內部摩擦角) 만큼 傾斜한다. 橫壓 E 의 作用方向은 水平이며  $\overline{AB}'$  의 法線에  $\epsilon$  만큼 傾斜하여 作用한다. 土壓의 作用方向은 backfills 와 壁體사이의 摩擦角  $\delta$  로 求하며 非粘質土의 物理的狀態, 壁面의 粗度, 壁體의 移動量, 地表荷重의 存在, 含水量의 變化 등 많은 因子가 相互關聯하나 가장 確實한 角은 實驗의으로 求한다.<sup>(3)</sup> 또 安定上 餘裕를 두어  $\delta=0$  로 할 수 있으며 砂質土內에서는 水分이나 粘土의 含有量이 增加하면  $\delta$  角은 減少한다. 그러나 理論的으로  $0<\delta<\rho$  의 範圍內에서 變化하여야 하며 零以下일 수는 없다.<sup>(3)</sup> 여기서  $\epsilon$  의 角을 作用方向으로 한 것은 壁體가 土의 外側으로 傾斜하므로  $\delta$  가 零以下가 되지 않도록  $\epsilon$  의 傾角으로 作用함으로써 安定上 利點이 있기 때문이다.

三力, G, R, E 는 釣合을 이루어 그림 4 의 b 와 같이 示力三角形을 이루며 이 三力은 正弦의 法則에 依하여  $\overline{AB}'/\sin(\theta-\alpha)=\overline{B}'C'/\sin(90+\alpha+\epsilon)=\overline{AC}'/\sin u_1$  이 되므로  $\overline{B}'C'=\frac{\overline{AB}'}{\sin(\theta-\alpha)} \cdot \sin(90+\alpha+\epsilon)$  가 되며

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho; \text{土의 內部摩擦角} \\ u; 45^\circ-\frac{\rho}{2} \\ \epsilon; \text{壁體의 變位角} \\ \theta; \text{地表와 failure line 이 이루는 角} \\ u_1; \text{變位後 壁과 failure line 이 이루는 角} \end{array} \right.$$

또  $\overline{AB}'=\overline{AB}=H$  이므로

$$\overline{B}'C'=H \cdot \cos(\alpha+\epsilon)/\sin(\theta-\alpha) = H \cdot \cos(\alpha+\epsilon)/\cos(u+\alpha) \dots \dots \dots (1)$$

$$\overline{AF}=H \cdot \sin u_1 \dots \dots \dots (2)$$

$\triangle AB'C'=1/2 \cdot (\overline{AF} \cdot \overline{B}'C')$  이므로

式 (1)과 (2)에서

$$\triangle AB'C' = 1/2 \cdot H^2 \frac{\cos(\alpha+\epsilon)\sin u_1}{\cos(u+\alpha)} \dots\dots\dots (3)$$

$G = \gamma \cdot \triangle AB'C'$  이므로

$$G = 1/2 \cdot \gamma H^2 \frac{\cos(\alpha+\epsilon)\sin(u-\epsilon)}{\cos(u+\alpha)} \dots\dots\dots (4)$$

또  $E = G \cdot \cos(u+\rho) / \sin(u+\rho)$

$$\therefore E = G \cdot \cot(u+\rho) \dots\dots\dots (5)$$

따라서 式(4)와 (5)에서

$$E = 1/2 \cdot \gamma H^2 \frac{\sin(u-\epsilon)\cos(\alpha+\epsilon)}{\cos(u+\alpha)} \cdot \cot(u+\rho) \quad (t/m^3) \dots\dots\dots (6)$$

또  $\frac{\sin(u-\epsilon)\cos(\alpha+\epsilon)}{\cos(u+\alpha)} \cdot \cot(u+\rho) = K$  로 하여

(6)式을 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$E = 1/2 \cdot \gamma H^2 \cdot K \dots\dots\dots (6')$$

$\rho = 30^\circ$ ,  $\alpha$  및  $\epsilon$ 를 變數로하여 土壓係數  $K$ 를 求하여 보면 表 1과 같다.

表 1의  $K$ 值로 式(6')에 依하여  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\epsilon = 5^\circ$ ,  $H = 10m$ ,  $\gamma = 2.0(t/m^3)$ 로 하여 土壓線圖를 求하여 보니 그림 5의 (b)와 같고 強度圖(Ph圖)는 그림 5의 (c)와 같다( $Ph = \gamma h \cdot K$ 에 依함). 여기서 土壓은 二次拋物線으로 分布하며 強度는 靜水壓의으로 分布함을 알 수 있다.

表 1.  $K$  值  
Tab. 1. Coefficient,  $K$

$\alpha \backslash \epsilon$	5°	10°	15°	20°	25°	30°
1°	0.3398	0.3587	0.3806	0.4065	0.4386	0.4800
2°	0.3285	0.3461	0.3674	0.3909	0.4210	0.4598
3°	0.3169	0.3334	0.3526	0.3746	0.4039	0.4398
4°	0.3054	0.3206	0.3384	0.3597	0.3860	0.4196
5°	0.2933	0.3076	0.3243	0.3440	0.3684	0.4000
6°	0.2814	0.2948	0.3100	0.3283	0.3509	0.3800
7°	0.2693	0.2816	0.2959	0.3127	0.3350	0.3602
8°	0.2573	0.2685	0.2816	0.2970	0.3162	0.3408
9°	0.2451	0.2555	0.2673	0.2816	0.2992	0.3216
10°	0.2328	0.2423	0.2531	0.2660	0.2821	0.3026
11°	0.2206	0.2291	0.2389	0.2508	0.2652	0.2838
12°	0.2083	0.2160	0.2249	0.2354	0.2484	0.2652
13°	0.1960	0.2009	0.2109	0.2203	0.2319	0.2470
14°	0.1837	0.1898	0.1969	0.2052	0.2157	0.2288
15°	0.1714	0.1769	0.1830	0.1929	0.1996	0.2114

註 1)  $u = 45^\circ - \frac{\rho}{2}$

2)  $\rho = 30^\circ$

結 論

最終式 (6)의  $E = 1/2 \cdot \gamma H^2 \frac{\sin(u-\epsilon)\cos(\alpha+\epsilon)}{\cos(u+\alpha)} \cdot \cot(u+\rho)$ 는 實用上 利用度가 높으리라 생각되며 土壓은 壁高의 自乘에 直比例함을 알 수 있다. 따라서 土壓係數  $K$ 에 의하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

1.  $K$ 는 地表의 傾斜度가 크면 크다(表 1). 즉 土壓은 地表의 傾斜度에 正比例한다.
2.  $K$ 는 壁體의 變位度가 크면 작아진다(表 1). 즉 土壓은 擁壁의 變位度에 反比例한다.

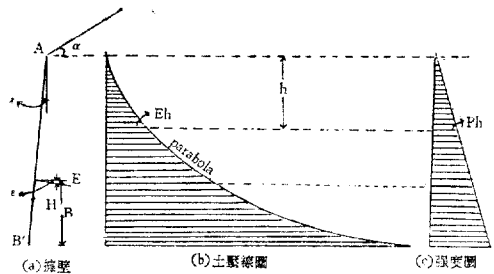


그림 5. 土壓分布圖

Fig. 5. Distribution of earth pressure

3. 土壓線圖는 二次拋物線으로 分布한다(그림 5 b).
4. 土壓強度圖는 靜水壓의 分布를 한다(그림 5 c).

## 謝 辭

本研究를 指導하여 주신 全北大學校 朴炳益 博士님과 財政後援을 하여준 The Asia Foundation 에 깊은 感謝를 드리며 諸般便宜를 提供하여 주신 全北大學當局에 敬意를 表하는 바입니다.

## 引 用 文 獻

1. DIMITRI P. KRYNINE, 1947. Soil Mechanics, 290—334 McGRAW-HILL BOOK Co. Inc.
2. 赤井浩一. 1967. 靜・動土壓. 1—98 産業圖書.
4. 原田千三譯編. 1965. 土壓計算新法. 1 | 72 産業圖書.
5. 岸岡 孝, 原 敏男, 竹內美次. 1971. 日林誌 53(1) : 5—12.
6. 姜父默, 朴春洙. 1971. “土質力學.” 201—260. 螢雪出版社.