

土壤壓力及擋土牆的計算

A. B. 达尔科夫 B. И. 庫茲涅佐夫著

裘鼎福譯

1531
12

人民交通出版社

土壤壓力及擋土牆的計算

A. B. 達爾科夫 合 著
B. И. 庫茲涅佐夫
裘 鼎 福 譯

人民交通出版社

書号:15044-2013-京

土壤压力及擋土牆的計算

А.В.ДАРКОВ В.И.КУЗНЕЦОВ

ДАВЛЕНИЕ СЫПУЧИХ ТЕЛ И РАСЧЕТ
ПОДПОРНЫХ СТЕН

(“СТАТИКА СООРУЖЕНИЙ”Глава XIII)

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ТРАНСПОРТНОЕ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1951

本書根据蘇聯國家鐵道運輸出版社1951年莫斯科版本譯出

裘鼎福譯

人民交通出版社出版

(北京安定門外和平里)

新華書店發行

公私合营慈成印刷工厂印刷

1954年7月北京第一版 1956年6月北京第三次印刷

开本: 787×1092 毫米 印張: 2-3/4張

全書: 92,000字 印數: 7211—10720册

定价(10): 0.40元

(北京市書刊出版業營業許可証出字第〇〇六号)

本書是[建築物靜力學] (статика сооружений) 一書中的最後一章，專門敘述擋土牆的計算理論，並包含詳細的計算例題。

目 錄

一、導 言	1
二、土壤的物理特性	2
三、土壤的主動壓力	4
四、以圖解法求土壓力	8
✓ 五、解析法求土壓力	11
✓ 六、圖解說明解析法	22
七、在各種情況下求牆背上的壓力	27
八、土壤的被動壓力（抗力）	34
九、重力式擋土牆的計算	38
十、擋土牆的傾覆穩定性	38
十一、擋土牆的滑動穩定性	40
十二、擋土牆的強度	42
十三、擋土牆的計算例題	47
十四、板樁牆的計算	62
十五、深基礎支座的計算	74

一、導 言

擋土牆是一種用以抵擋土壤向下傾斜的結構物。本書的目的就是敘述這種結構物的計算理論。

擋土牆可應用於不同的建築地區並具有不同的構造。按照牆的高度與寬度的比例，可分為重力式、薄壁式和板樁式三種。

重力式擋土牆一般是由塊石或混凝土砌築，其每個橫斷面都具有相同的尺寸和靜重 Q ，此項靜重須足以支承牆背上的土壓力（圖 1）。

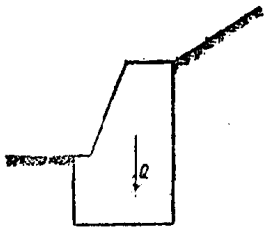


圖 1

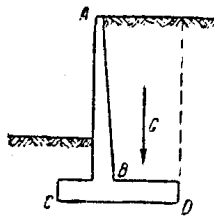


圖 2

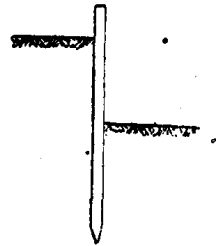


圖 3

薄壁式擋土牆一般都是鋼筋混凝土結構，是由幾個比較薄的板組成的。例如第二圖中即表示由垂直板 AB 和水平板 CD 所組成的薄壁式擋土牆。這種牆的靜重雖不大，但仍然能抵抗土壤的壓力，因為作用在水平板上的土壤重量 G 使得牆的重量增加很多。計算這種型式的擋土牆基本上與重力式擋土牆相同。

板樁式擋土牆是由打入土中的木板樁、鋼筋混凝土板樁、或金屬板樁所組成的。其高度相當大（若干公尺），而厚度却較小（若干公分），它們的重量很小，在計算時一般可不加考慮

(圖 3)。由於板樁打入土中的深度而產生的土壤反力阻止了這種牆的傾覆和移動。這種牆的計算方法與重力式擋土牆的計算方法是不同的。

爲了計算擋土牆斷面上的壓力，必須先求出牆的靜重和在其背面上的土壤壓力。土壤壓力的求法見下面第三節。

在牆背面上的填土壓力主要是依照土壤的物理性質，這種物理性質既不同於固體，亦不同於液體。它們的特性將在下節中敘述。

二、土壤的物理特性

爲了求擋土牆背面上的土壤壓力，必須先了解下述的有關土壤的物理性質。

1 單位體積重量 γ (噸/立方公尺)——一立方公尺土壤的重量 (以噸計)。這個數量的變化範圍是由乾砂的 1.6 噸/立方公尺到濕粘土的 1.9 噸/立方公尺。

2 空隙率 η (%)——土壤內空隙的體積與整個土壤所佔體積比值的百分數。對於搗實的砂子 $\eta=29\%$ ，對於鬆砂 $\eta=50\%$ ，對於乾粘土 η 值在 $25\%\sim 40\%$ 之間。

3 土壤在水中的單位體積重量 γ_0 (噸/立方公尺)——每一立方公尺土壤浸入水中時的重量。因爲土壤單位體積中包含有 $\eta\%$ 的空隙，所以當把它浸入水中時，損失的重量應該等於排除水的重量：

$$\left(1 - \frac{\eta}{100}\right) \gamma_s$$

其中 γ_s ——水的單位體積重量

於是

$$\gamma_0 = \gamma - \gamma_s \left(1 - \frac{\eta}{100} \right) \quad (1)$$

4 休止角 φ° ——土壤自然地堆積(不受任何限制),其表面與水平面間所成的最大角度(圖4)。這個角度表示土壤顆粒在表面上的摩擦力(不考慮顆粒間的粘着力)。

φ° 角的大小主要是按土壤的濕度而變:

乾砂.....	$\varphi = 30^\circ \sim 35^\circ$
潤濕砂.....	$\varphi = 40^\circ$
濕砂.....	$\varphi = 25^\circ$
乾粘土.....	$\varphi = 40^\circ \sim 45^\circ$
濕粘土.....	$\varphi = 20^\circ \sim 25^\circ$

5 內摩擦角
 P° ——土壤內部顆粒間的摩擦角。

求這個角度須藉助於圖5中所示的儀器。這個儀器是由

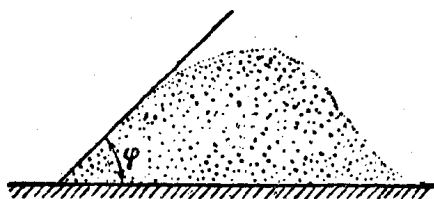


圖 4

兩塊齒狀的板組成,將土壤壓在兩板的中間。求出上面板剛

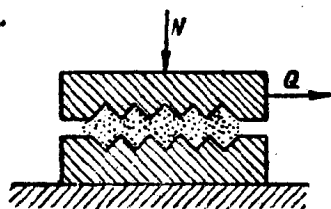


圖 5

發生移動的力 Q , 與壓在此板上的力 N 。得出它們之間的關係為:

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{Q}{N}.$$

從這裏即可求出 ρ 值。

按照技術規範①, 採用下列的 ρ 值:

① 標準軌距鐵路橋梁及涵洞的大修和新建設計技術規範(TVΠM-47)

細砂.....	$\rho = 20^{\circ} \sim 30^{\circ}$
中砂.....	$\rho = 30^{\circ} \sim 40^{\circ}$
粗砂礫砂卵石.....	$\rho = 40^{\circ} \sim 45^{\circ}$
砂質壤土.....	$\rho = 15^{\circ} \sim 30^{\circ}$
砂質粘土.....	$\rho = 10^{\circ} \sim 30^{\circ}$

對於砂性土壤可認為 ρ 值等於休止角 φ 即 $\rho = \varphi$ 。

6 土壤與牆面間的摩擦角 δ° 說明土壤與牆接觸面間的摩擦。這個角的值可由很小的值變到 $\delta = \rho$ （對於粗糙的表面）。在實際計算中常採用 $\delta = 0$ 。當 $\delta \neq 0$ 的情況時，所採用 δ 值為內摩擦角 ρ 的分數：

$$\delta = \frac{1}{2} \rho \sim \frac{3}{4} \rho$$

砂性土壤的粘着力很小，在計算擋土牆時可不加考慮。土壤可以承受同一符號的法向應力（壓力）和不超過內摩擦力的切應力。

以上所列舉的土壤特性確定了它的狀態是在液體和固體之間。也可以視為在摩擦力與壓力互相作用下的顆粒的組合。

三、土壤的主動壓力

土壤的主動壓力就是當土壤作用在擋土牆的背面上，使牆沿壓力作用方向有很小位移時之壓力。

作用在擋土牆 AB 面上的土壤主動壓力（圖6）。（牆在垂直於圖面的尺寸以後可以按1公尺來計算）應按庫倫氏方法來確定，這個方法是以下列的假定作為基礎的：

1 在壓力 E 的作用下，擋土牆沿力的作用方向有很小

的移動， AB 面移動到 A_1B_1 的位置。由於這種移動的結果使稜形體積 ABC 的土壤顆粒開始移動。組成該稜形體積的直線 BC 被稱為滑動線（滑動面或破壞面），圖形 ABC 稱為滑動稜體。庫倫氏方法的第一個假定就是認為該滑動面是一個平面（這個平面的軌跡就是直線 BC ）。這樣就簡化了最後公式的結論且無多大差誤。

滑動面與水平面所成的傾角 ϑ 大於休止角 φ 。但當 AB 面完全取消後 ϑ 角即等於 φ 角。

2 在滑動稜體內的土壤可視為楔形的整體，其靜重 G 在 AB 面及 BC 滑動面上產生壓力。

3 滑動稜體被認為是在接近滑動的情況下（極限平衡時）。這個假定才能確定壓力的方向，因為當滑動時摩擦力等於垂直分力與摩擦係數的乘積（第 7 圖）：

$$T = Nf = N \operatorname{tg} \alpha$$

同時合力 R 與 N 成 α 角，此 α 角即為摩擦角。然後求 AB 面上的土壓力 E （第 8 圖）。

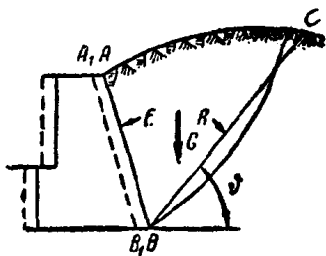


圖 6

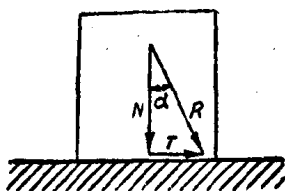


圖 7

以 G 表示滑動稜體重量，

則 $G = \text{面積 } ABC \times 1 \times \gamma$

力 G 分為兩分力 E 和 R ，力 E 是 AB 面上的垂直壓力和

摩擦力的合力。當滑動稜體 ABC 向下時，作用在 AB 面上的摩擦力也指向下方，因而力 E 與法線 U 向反時針方向偏一角度 δ 。同樣的力 R 與法線 V 偏一角度 ρ 。已知力 G 及力 E 和力 R 的方向，即可作力三角形 abc 。按適當的比例劃出向量 ab 等於重量 G ，並由 a 點作直線 ac 平行於 E ，自 b 點作直線 bc 平行於 R ，使相交於 c 點。

解三角形 abc 得出向量 $ac=E$ 。法線 V 和力 G 作用線的交角等於 ϑ （這兩角的兩邊相互垂直）。力 R 與力 G 的交角等於 $\vartheta - \rho$ 。於是

$$\angle abc = \vartheta - \rho.$$

同理找出力 E 作用線與力 G 作用線間的交角：

$$\angle cab = \psi = 90^\circ - \varepsilon - \delta.$$

角 acb 應該等於

$$\angle acb = 180^\circ - (\vartheta - \rho + \psi).$$

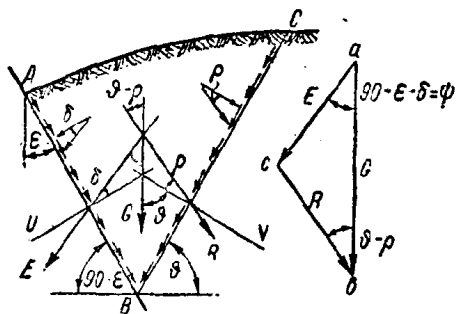


圖 8

寫出正弦方程式得：

$$\frac{E}{\sin(\vartheta - \rho)} = \frac{G}{\sin[180^\circ - (\vartheta - \rho + \psi)]}.$$

於是得出：

$$E = G \frac{\sin(\vartheta - \rho)}{\sin(\vartheta + \psi - \rho)} \quad (2)$$

按照這個公式仍然不能決定壓力 E ，因為在其中尚有未知角 ϑ ，此角 ϑ 是依滑動稜體重量 G 而改變。

當滑動面的傾斜角 ϑ 變化時，壓力 E 的數值亦應變化。 E 和 ϑ 的關係可由圖 9 曲線表示之。在 ϑ 等於某一個值 ϑ_0 時 ($\vartheta = \vartheta_0$)， E 值為最大值 $E_{\max}$ 。

當計算擋土牆時，土壤最大的土壓力即按照上述的假定理論來確定。

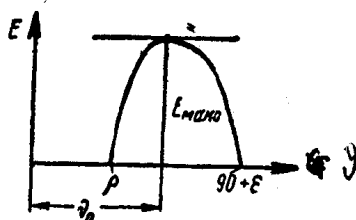


圖 9

如果在這種（最壞的）條件下，擋土牆的穩定和強度可以保證，則滑動面在任何其他位置時牆的穩定性和強度當亦能保證。角 ϑ_0 的值由下面的條件來求之：

$$\frac{dE}{d\vartheta} = 0. \quad (3)$$

這樣滑動面的方向是由牆背上的最大土壓力而確定的。

這個滑動面的方向與按庫倫公式所求出的最大壓力的算學值相符合，但這並不表示實際作用在牆上的壓力與計算的壓力相符。當牆建築在岩石基礎上沒有位移時，根據經驗證明土壓力將大大地超過由庫倫公式求出的壓力。

當土壤的表面是任意的形狀時，方程式 (3) 可用圖解法來求。當土壤表面是平面時，方程式 (3) 也可用解析法求出。首先用圖解法作為一般的法則求土壓力。

四、以圖解法求土壓力

求滑動面的方向和擋土牆 AB 面上的最大土壓力(圖6)。繪出類似第九圖所表示的壓力 E 隨滑動面的方向而變化的圖形(圖10)。按下列的方法選擇座標系。座標系原點在 B 點,一個座標軸順着 BD 方向另外一個座標軸 (BH) 與直線 AB 成 $\rho + \delta$ 角。以後 BH 軸稱為基線。

沿 BD 軸,按某一比例尺作出滑動稜體的重量,平行 BH 軸用同樣的比例尺作出 AB 面上的壓力 E 。任意繪一滑動面 BC_n 。滑動稜體的重量等於:

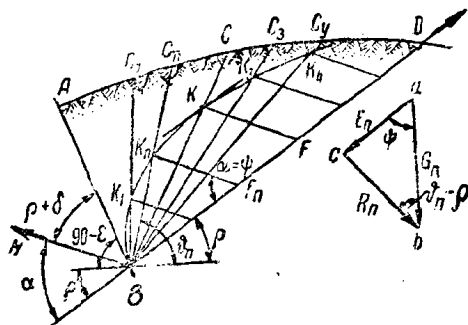


圖 10

$$G_n = \gamma \cdot \text{面積 } ABC_n$$

用比例尺的重量 G_n 繪於 BD 軸上得到 F_n 點。由 F_n 點作一直線平行於基線交 BC_n 線於 K_n 點,當滑動面與 BC_n 重合時,可證明以 G 的比例尺量出的 $F_n K_n$ 等於壓力 E_n 。

求出三角形 $BF_n K_n$ 內諸角:

$$\angle K_n B F_n = \vartheta_n - \rho;$$

$$\angle K_n F_n B = \alpha = (90^\circ - \varepsilon) + \rho - (\rho + \delta) = 90^\circ - \varepsilon - \delta = \psi$$

作力三角形(圖10)。在這個三角形裏向量 $ab=G_n=BF_n$;
向量 $ac=E_n$ 。

比較三角形 abc 和 K_nBK_n ,可知它們是彼此相等。於是

$$E_n = K_n F_n,$$

這即是以上需要證明的。

這樣,當已選定 BC_n 為滑動面的方向時,求 AB 面上的土壓力,必須按照比例尺在 BD 軸上劃出稜體 ABC_n 的重量(BF_n),從 F_n 點作一直線平行於基線 BH 與直線 BC_n 交於 K_n 點。按力 G_n 的比例尺來量 $K_n F_n$ 應該等於壓力 E_n 。

重複地繪出一系列的滑動面 BC_1, BC_2 等等,即可得到一系列的 K_1, K_2 等點(圖10)。用平滑曲線連接這些點,即得出 E 的變化圖。爲了求出最大的壓力,作直線與 BD 線平行且與曲線相切,得到切點 K 。從 K 點作直線平行於 BH 軸即得到 F 點。以 BD 軸上的比例尺量 KF ,即可得出 AB 面上的最大土壓力值。

直線 BKC 應該就是這個滑動面(較確切地說滑動面的軌跡)。當壓力達到最大值時,應符合方程式。

$$\frac{dE}{d\theta} = 0.$$

例題:用圖解法求 AB 面上的填土壓力(圖11)。已知 $\rho=40^\circ$, $\delta=5^\circ$, $\gamma=1.6$ 噸/立方公尺。

解:

- 1 確定座標軸 BD 和 BH 。
- 2 作出幾個滑動面。將直線 AC_5 分爲五等份,每份長度等於:

$$s = \frac{AC_5}{5} = 1.0 \text{ 公尺.}$$

點 $C_5, C_7, \dots, C_{10}$ 之間的距離亦爲1公尺。

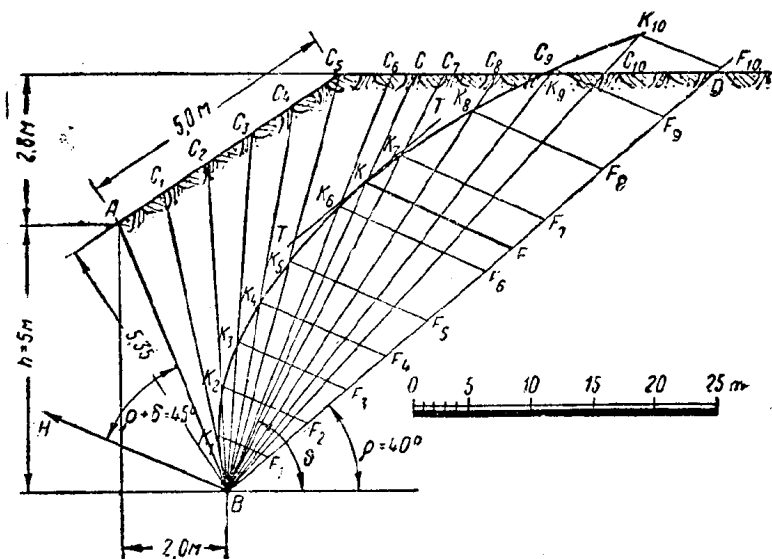


圖 11

3 計算滑動稜體 ABC_1 的重量:

$$G_1 = \frac{1}{2} \times 5.35 \times 1 \times 1.6 = 4.28 \text{ 噸.}$$

在 AC_1 長度內其餘的稜體 C_1BC_2, C_2BC_3 等都具有與 ABC_1 相等的重量。

稜體 C_6BC_7 的重量等於:

$$G_6 = \frac{1}{2} \times 7.8 \times 1 \times 1.6 = 6.24 \text{ 噸.}$$

稜體 $C_6BC_7, C_7BC_8, C_8BC_9$ 和 C_9BC_{10} 同樣等於 6.24 噸。

4 按圖中的比例尺沿 BD 軸劃出稜體重量 $G_1, G_2, \dots, G_{10}$

$BF_1 = G_1 = 4.28 \text{ 噸;}$	$BF_6 = G_6 = 27.64 \text{ 噸;}$
$BF_2 = G_2 = 8.56 \text{ 噸;}$	$BF_7 = G_7 = 33.88 \text{ 噸;}$
$BF_3 = G_3 = 12.84 \text{ 噸;}$	$BF_8 = G_8 = 40.12 \text{ 噸;}$
$BF_4 = G_4 = 17.12 \text{ 噸;}$	$BF_9 = G_9 = 46.3 \text{ 噸;}$
$BF_5 = G_5 = 21.4 \text{ 噸;}$	$BF_{10} = G_{10} = 52.60 \text{ 噸.}$

5 從已經得到的點 $F_1, F_2, \dots, F_{10}$ 作平行於基線 BH 的直線 $F_1K_1, F_2K_2, \dots, F_{10}K_{10}$

6 沿 $B, K_1, K_2, \dots, K_{10}$ 等點劃出 AB 面上的填土壓力變化曲線圖。

7 作直線 TT 與此曲線相切並與 BD 軸平行。

8 以直線 BKC 連接切點與 B 點，此直線即為滑動面的軌跡。

9 由 K 點作直線 KF 平行 BH ，按比例尺量出 KF 即等於 AB 面上的最大壓力：

$$E = KF = 13 \text{ 噸。}$$

五、解析法求土壓力

用解析法求擋土牆上最大土壓力，必須解方程式：

$$\frac{dE}{d\vartheta} = 0$$

並確定滑動面的方向，然後將已求得的 ϑ 值代入 (2) 式中，得出最大壓力 E 的數值。

先研究當土壤的表面是一平面，其上負荷均佈載重 q 噸/公尺。此時土壓力以 E_q 表示，滑動稜體重量及上面的均佈載重以 G_q 表示。

這樣按公式 (2) 即得出：

$$E_q = G_q \frac{\sin(\vartheta - \rho)}{\sin(\vartheta + \psi - \rho)} \quad (4)$$

滑動面的位置不用 ϑ 角表示，而用滑動面與座標軸 X 交點的座標距 x 表示之 (圖 12)。此座標軸 X 經過 A 點與水平線成 ρ 角。公式 (4) 中的壓力 E_g 可以用函數 x 和方程式 $\frac{dE_q}{d\vartheta} = 0$ 來表示。

代入方程式後得：

$$\frac{dE_q}{dx} = 0$$

解此方程式即得出數值 $x = x_0$ 。這個數值為最大壓力 E_g 時滑動面的位置。將 x_0 代入 E_q 公式中，即得到壓力的數值。按這個程序即可得出解析法的壓力公式。

a) 求 C 點的座標 x_c, y_c (圖13)。

以 A 點爲座標原點，與水平線成 ρ 角的 AD 直線作爲 X 軸 Y 軸與 AB 線重合。作直線 CF 平行於 AB 。那麼 $AF = x_c$ 及 $CF = y_c$ 。

研究已形成的三角形 $AF C$, 即可求 x_c 和 y_c 。

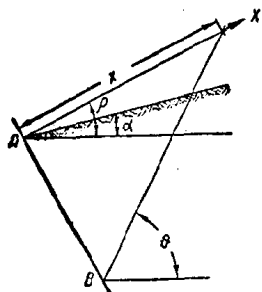
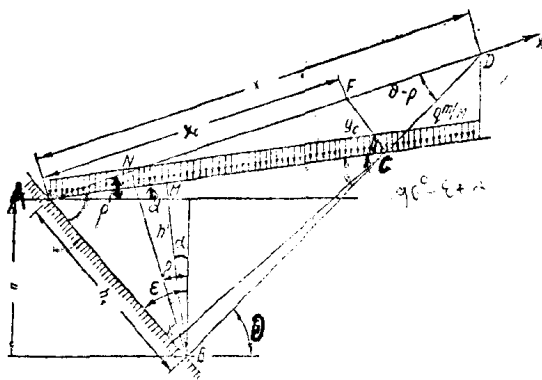


圖 13



13

此三角形的各角等於：

$$\angle CAF = \rho - \alpha;$$

$$\angle FCA = 90^\circ - \varepsilon + \alpha.$$

寫出正弦方程式：

$$\frac{y_c}{\sin(\rho - \alpha)} = \frac{x_c}{\sin(90^\circ - \varepsilon + \alpha)} \quad (5)$$

設

$$K_1 = \frac{\sin(\rho - \alpha)}{\cos(\varepsilon - \alpha)} \quad (6)$$

以 K_1 代入(5)式中，得出：

$$y_c = K_1 x_c \quad (7)$$

由 ADB 和 FDC 相似三角形得：

$$\frac{h_1}{y_c} = \frac{x}{x - x_c}$$

將(7)式中的 y_c 值代入，得：

$$x_c = \frac{h_1 x}{h_1 + K_1 x} \quad (8)$$

6) 求滑動稜體的重量和其上的荷載合力

設 G ——滑動稜體 ABC 的重量； Q ——在滑動稜體上的荷載合力。此時

$$G_q = G + Q$$

滑動稜體 ABC 的重量等於：

$$G = V_{ABC} \times \gamma,$$

滑動稜體體積：

$$V_{ABC} = \frac{1}{2} AB \times CK.$$

CK 等於 $AF(=x_c)$ 在垂直於 AB 線上的投影。

$$CK = x_c \sin(90^\circ - \varepsilon + \rho) = x_c \cos(\rho - \varepsilon).$$