c ：路堤填料之凝聚力

ϕ ：路堤填料之抗剪角

γ ：路堤填料之單位重

臨界高度H_T ，係利用圖6求取之，圖中

$$H_T = N_T \frac{S_{uu}}{\gamma_E}$$

式中 H_T ：臨界高度

S_{uu} ：基礎表面之不排水強度

γ_E ：路堤填料單位重

N_T ：臨界高度係數，查圖6得之

若裂縫深度大於路堤高度，應假設裂縫深度穿過整個路堤高度，但不進入基礎土層內；一般裂縫可能出現在路堤任何部份內，故分析穩定問題時，係假設每一個可能破壞滑動面，相交於某一裂縫深度；而裂縫深度內垂直部份，抗剪強度爲零，且屬於破壞滑動面之範圍部份。

(2) 長期情況

使用有效應力分析法；路堤填料與基礎土壤皆進行排水式（CD或CS）三軸或直剪試驗，或壓密不排水（CU）三軸試驗兼測孔水壓力，求取土壤强度參數；路堤填料試驗試體應與現地填土之含水量與密度相同，基礎土壤應爲不擾亂試驗試體。

運用流網或其他滲流分析法求取孔水壓力變化；坡面之內外孔水壓力皆應考慮之。

(3) 急速洩降情況；或當斜坡承受某一荷重壓密作用時，若快速地改變荷重作用，填土材料無充份時間排水之情況：

使用總應力分析法；路堤填料與基礎土壤皆進行壓密不排水（CU）三軸試驗，求取土壤强度參數；其他有關試驗之解釋與分析步驟，與位於堅實土層或岩石上之路堤情況相同。

(D) 開挖斜坡

穩定性決定於開挖材料之强度（c，ϕ與$\overline{c}$，$\overline{\phi}$）、開挖料單位重、斜坡高度、斜坡傾角與孔水壓力、開挖斜坡之臨界破壞機制，若爲均質凝聚性土壤，爲深層破壞滑動面；若爲均質無凝聚性土壤，則爲淺層表面滑動；若爲非均質土壤之臨界破壞面，可能爲深層或淺層滑動，依斜坡內土層分佈與强度特性而定。凝聚性土壤之斜坡開挖，長期性穩定程度要低於短期性穩定情況；此因開挖土層四週土壤，由於壓力減輕而膨脹，將隨時間而減弱其强度；因此穩定性分析，應依據不同之孔水壓力情況而決定：

(1)短期或施工完畢情況：

根據開挖材料不同性質，諸如排水甚易之砂土或礫石，或爲排水甚慢之凝聚性土壤，考慮情形與填土料於分析短期或施工完畢情況之步驟相同。

(2)長期情況：

使用有效應力分析法；土壤强度參數係以開挖土層不擾亂試體，進行排水式（CD或CS）三軸或直剪試驗，或壓密不排水式（CU）三軸試驗兼測孔水壓力求取之。

運用流網或其他滲流分析法，求取孔水壓力變化；斜坡內外之孔水壓力皆應在分析中考慮之。

(3)急速洩降情況，或當斜坡承受某一荷重壓密作用時，若快速地改變荷重作用，開挖斜坡無充份時間排水之情況：

使用總應力分析法；土壤强度參數係以開挖土層之不擾亂試體，進行壓密不排水（CU）式三軸試驗求取之；其他有關試驗之解釋與分析步驟，與位於堅實土層或岩石上之路堤情況相同。

(E) 自然斜坡

自然斜坡若以人工方法加以邊坡處理，分析步驟應依據不同之孔水壓力分析而考慮；若填土座落於自然斜坡上，則分析方法與先前所有填土斜坡情況相同；若於自然斜坡上開挖，則與先前之開挖斜坡情況相同。

若自然斜坡在某種相同情況下，已屹立數年之久，表示在該長期壓密作用下，孔水壓力已達平衡狀態，可用有效應力分析法，强度參數係以自然斜坡不擾亂試體，進行排水式（CD或CS）三軸或直剪試驗，或壓密不排水（CU）三軸試驗兼測孔水壓力求取之，孔水壓力可利用現地觀測法或運用流網，或其他滲流分析法得其變化關係，斜坡內外之孔水壓力皆應在分析中考慮。

自然斜坡土壤，若爲微裂硬粘土（Stiff Fissured Clay）或風化性粘土，應採用$\overline{c}_{cu}=0$分析，若爲高靈敏性粘土，$\overline{\phi}$值應考慮試驗值之一半設計之。

自然邊坡破壞，一般可能由於坡頂荷重加載增加或坡趾抵抗力減少，孔水壓力增加，造成無

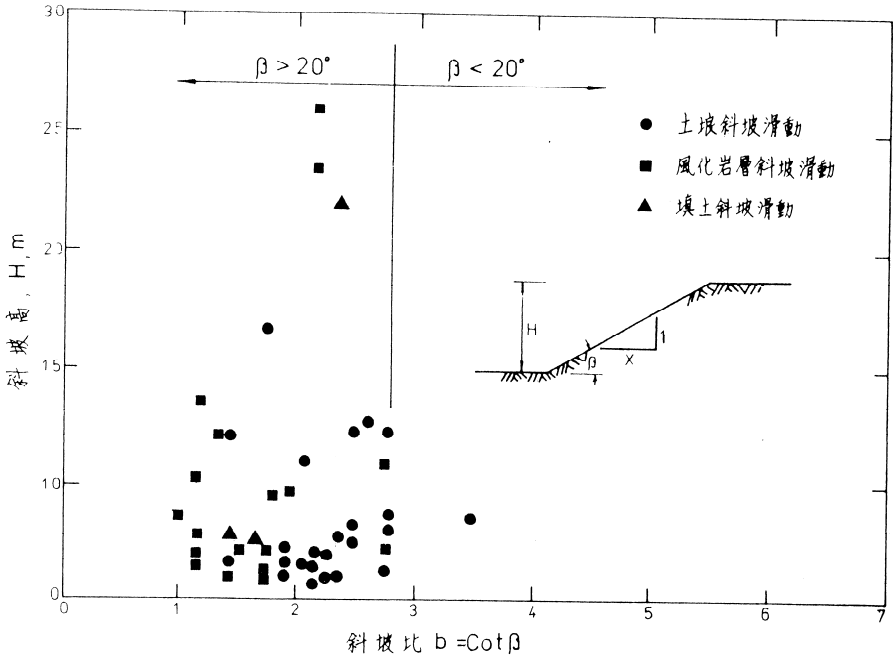

圖 7　範例—野外觀測資料分析邊坡穩定之方法

，皆顯示以往邊坡曾有不穩定現象發生。

依據觀測所得資料，繪製現地邊坡圖形（圖 7），圖中係將某一特殊地質系統層面所有現地斜坡資料（包培穩定與非穩定斜坡）以邊坡傾角 β 與斜坡高度 H 表示座標點，繪於圖中，若邊坡破壞個案數目甚多時，祇須將不穩定斜坡資料填入，若數量不足，則可將穩定斜坡資料亦繪入圖內，根據所有繪入資料，再配合經驗判斷，可決定某一區域內，相同地質系統層面之穩定性斜坡坡面，例如圖 7 中資料顯示，該區域內幾乎所有邊坡破壞之斜坡傾角，皆大於 20 度，如此可針對該區域內可能計劃中之斜坡設計，預估該斜坡之穩定性程度。

七　地質調查與現地勘測內容

詳細之地質調查與現地勘測資料，對於某一斜坡計劃分析，或已破壞滑動之斜坡修護工作，皆十分重要，地質調查與現地勘測常相輔而行，一般重大計劃，應會同經驗豐富之地質師聯合查勘，所有查勘調查資料，皆應記錄在比例尺較大之地形圖上，包括地形變化、滲出位置、現存滑動陡坡、樹木或植物之異常情形、鄰近斜坡情況、將來鑽探器具之難易接近程度等，另有關其他注意事項與內容，可參閱筆者之「坡地開發之地質調查、鑽探與試驗」（現代營建第一期，民國 69 年 1 月號）。

斜坡分析之鑽孔數目與深度，應提供設計所須之充份資料，一般大口徑鑽孔較小口徑者為佳，尤其在已知滑動區域內，可藉大口徑之鑽孔，檢視該滑動面可能位置，此外經由切斷面中剪力或擦痕區域，可顯示過去曾移動之明證，鑽探深度應低於坡趾深度，若可能當鑽至堅實土層或岩盤位置。

為獲得地下水位資料，鑽孔應裝置有孔套管，並以礫石回填之，以觀測地下水位之長期變化，水位計（Piezometers）亦應設置，以記錄孔水壓力變化情形。

根據地質調查、現地勘測鑽探與試驗資料，可繪製該地區地質與地層剖面圖，做為進一步穩定分析設計之用。

若考慮坡頂加載荷重、浸沒、滲出與張力裂縫之影響，各修正係數值示於圖 9 與圖 10 。

茲將其步驟略述如下：

(1)查圖 8 求臨界破壞圓弧之圓心座標（ X_0 , Y_0 ），若斜坡傾角 $\beta > 53°$ ，臨界圓通過坡趾，稱爲坡趾破壞（Toe Circle Failure ），若 $\beta < 53°$ ，臨界圓切於底下之堅實土層或岩盤，稱爲坡底破壞（Base Circle Failure ）或中點圓破壞（Mid-Point Circle Failure ），若坡趾與堅硬層極近時，臨界圓將穿過坡面，稱爲坡面破壞（Slope Circle Failure ）。

(2)計算該臨界破壞圓弧面上之凝聚力 c 平均值，若爲層狀土壤，利用加權平均法（Weighted Average Method ）求取平均值，加權因素（Weighting Factor ）爲各個土層對於臨界圓弧所圍成之圓心角度。

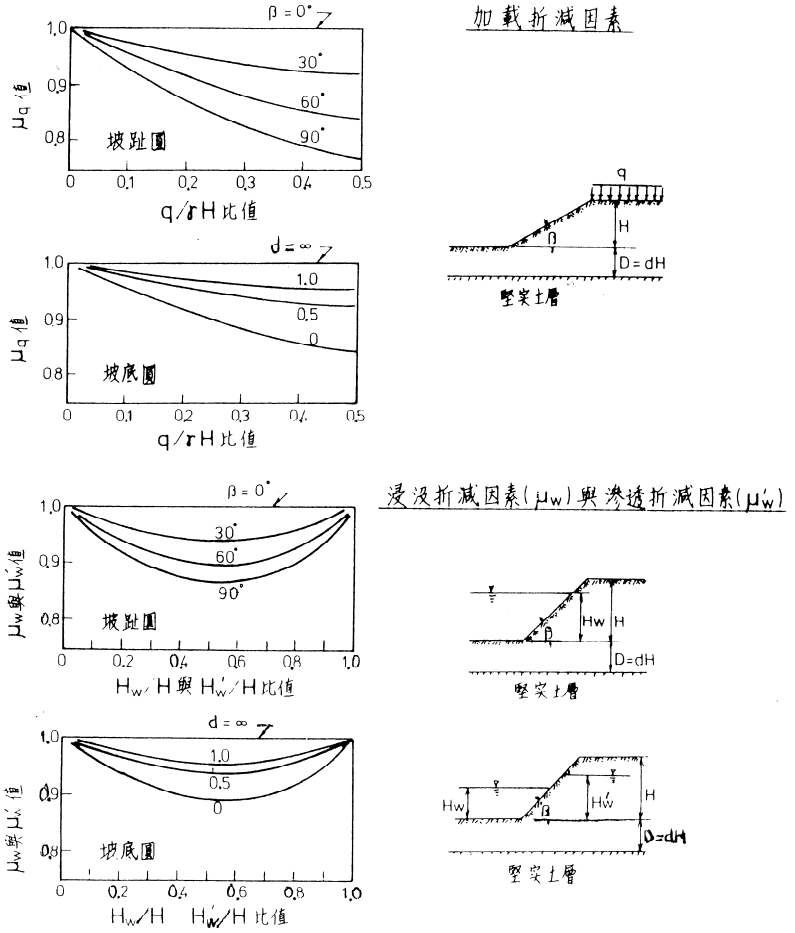

圖 9 一般性土壤（ $\phi = 0$ 與 $\phi > 0$ ）穩定分析圖表法之折減係數 μ_q , μ_w 與 μ'_w（取自 JANBU, 1968 ）

期採有效應力分析，有關上述之詳細說明，可參考本文前述之部份。

大體言之，塑性平衡理論中之材料性質特性，一般以極限平衡狀態方程式表示最爲方便，故當土壤之極限平衡狀態存在時，剪應力 τ 之表示方法爲

$$\tau = \frac{\tau_f}{F.S.}$$

式中 τ_f ：土壤之抗剪强度

F.S. ：安全因數

由於土壤之抗剪强度 τ_f ，通常以庫倫方程式表示之，故

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

或 $$\tau_f = \overline{c} + \overline{\sigma} \tan \overline{\phi}$$

因此剪應力 τ 可改寫爲

$$\tau = \frac{c}{F.S.} + \sigma \frac{\tan \phi}{F.S.}$$

或 $$\tau = \frac{\overline{c}}{F.S.} + \overline{\sigma} \frac{\tan \overline{\phi}}{F.S.}$$

故極限平衡法之基本假設，破壞滑動面需滿足於庫倫破壞準則之要求，且破壞面可能爲平面、圓弧面、對數螺線面或其他不規則平面。本文考慮平面、圓弧面、對數螺線、不規則形狀與楔形不規則平面之破壞滑動面；若僅考慮整個破壞土體爲單一自由體（ Free Body ）分析，一般有 Culmann 方法（ Culmann , 1866 ; Taylor , 1948）、摩擦圓方法（ Taylor , 1948 ）等。若將破壞土體切成若干垂直小片（ Slice ），而考慮每一小片之平衡狀態時，一般有瑞典圓分析法（ Swedish Circle Method ）（ Fellenius, 1927 ）、Bishop 修正分析法（Bishop's Modified Method ）（ 1955 ）、Lowe & Karafiath 分析法（ 1960 ）、Bishop & Morgenstern 分析法（ 1960 ）、Morgenstern 分析法（ 1963 ）、Morgenstern & Price 分析法（ 1965 ）、Spencer 分析法（ 1967 ）、Hunter & Schuster 分析法（ 1968 , 1971 ）、Janbu 分析法（ 1973 ）等。若破壞面可看成由二至三個滑動平面組成，則可考慮楔形破壞分析（ Lambe & Whitman , 1969 ; Sultan & Seed , 1967 ）。

茲將各種常用之極限平衡分析方法略述如下：

(I) 土壤邊坡之總應力分析（ $\phi = 0$ ）

㈠均質等向性（ Homogeneous Isotropic ）土層

(1) Culmann 分析法

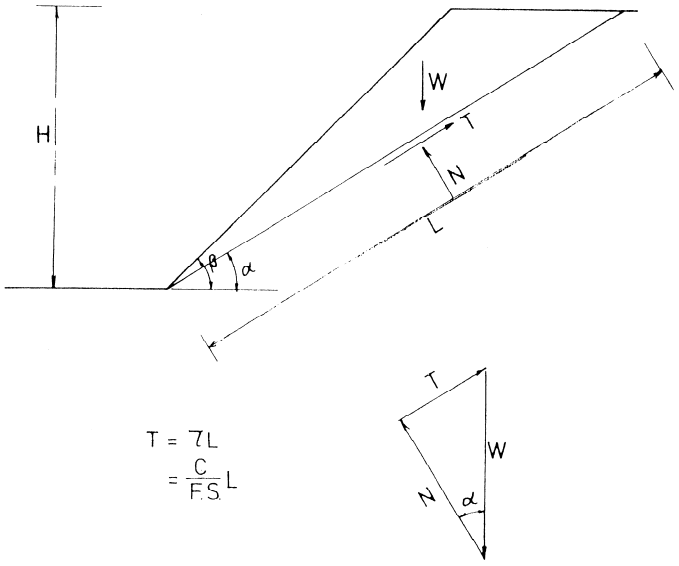

圖 29　平面破壞土體之平衡條件

取作用於單位體上 $\sigma_n \Delta \ell$ 與 $\sigma_n \tan \phi \Delta \ell$ 之向量和，其方向與破壞面法線之夾角爲 ϕ，且與圓弧中心O爲圓心、半徑 r Sin ϕ 之圓相切，該圓稱爲摩擦圓（Friction Circle）。因此可假定所有力 $\sigma_n \Delta \ell$ 與 $\sigma_n \tan \phi \Delta \ell$ 之合力R，亦切於該摩擦圓，且通過 c 與W及 P_w 之合力S之交點，其大小及方向可由力多邊形求出，故

$$(F.S.)_c = \frac{c\overline{AD}}{C}$$

若 $\phi = 0$ 或 $(F.S.)_c = (F.S.)_\phi$，則安全因數僅等於 $(F.S.)_c$。若 $\phi \neq 0$，則安全因數可用逐步漸近法（Successive Approximations）求取之，即先假設某一適當（F.S.）ϕ 值，則摩擦圓半徑爲 r Sin ψ，$\psi = \tan^{-1}$（$\tan \phi$／（F.S.）ϕ），再求取 $(F.S.)_c$，若（F.S.）$\phi \neq (F.S.)_c$，則再重新假設（F.S.）ϕ 值，直至兩者相等爲止。

上述三種方法顯示，若所有破壞面幾何形狀相似，則經由摩擦圓方法求取之力多邊形皆相似，故 C／W爲常數，亦即 c／(F.S.)γH爲常數，一般稱之爲Taylor 穩定數N；且N＝c／γH係由斜坡傾角 β 與深度因數 D 與抗剪角 ϕ 決定之

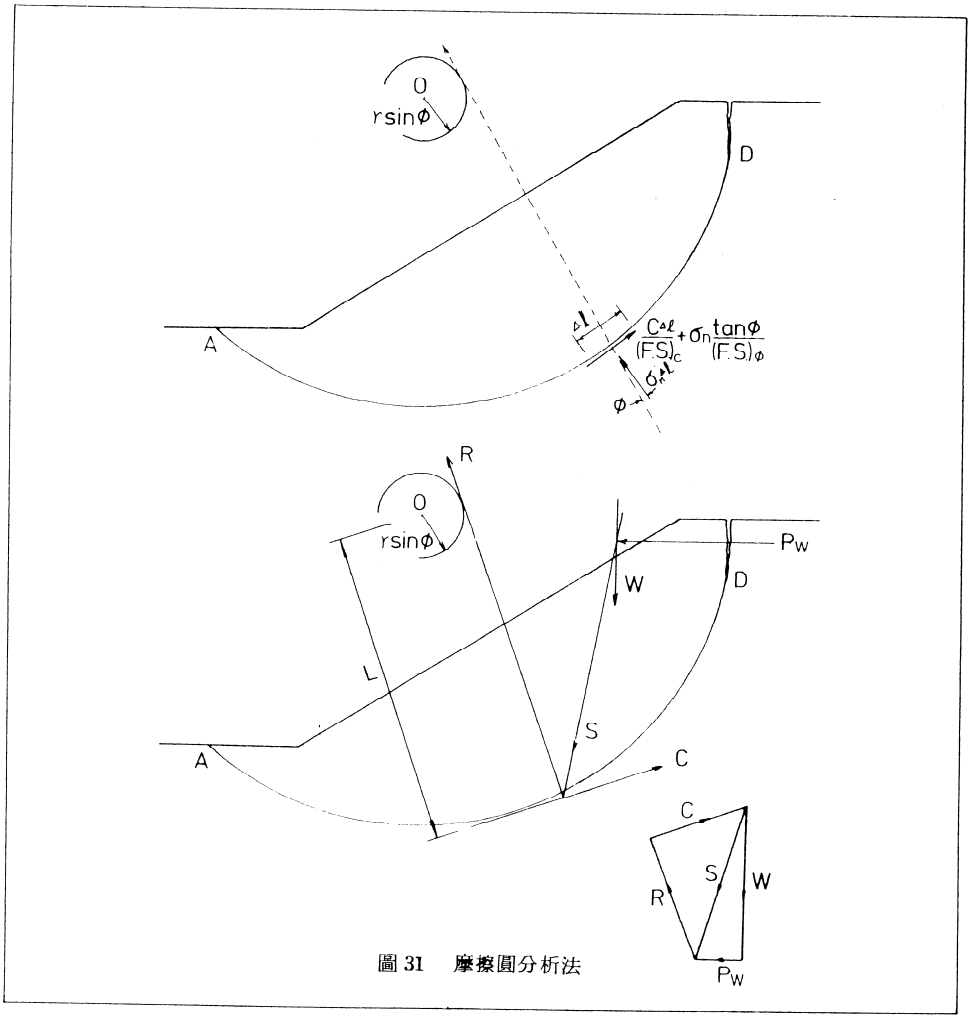

圖 31　摩擦圓分析法

〔範 例〕 TAYLOR 穩定分析圖表法

某一土壤（$C = 1.17\ t/m^2$，$\phi = 10°$）進行開挖，若土壤單位重 $\gamma = 1.92\ t/m^3$，且開挖斜坡傾角 β 預定為 $60°$，求安全因數為 1.5 時最大容許開挖深度？

(1) 根據 $\phi = 10°$，$\beta = 60°$，查圖 33 得

$N_0 = 0.14$

(2) $N_0 = C/\gamma H$

$\therefore H_c = C/\gamma N_0 = 1.17/(1.92)(0.14) = 4.35m$

(3) 最大容許開挖深度

$H = H_c/F.S.$

$= 4.35/1.5 = 2.9m$

圖 34　範例—TAYLOR 穩定分析圖表法

（圖 32 與圖 33 ）。茲列舉運用 Taylor 圖表求取容許開挖深度，容許開挖斜坡傾角與安全因數之範例於圖 34 與圖 35 。

圖 32 中斜坡傾角 $\beta \geq 53°$ 時，不受深度因數 D（Depth Factor ）之影響，$\beta < 53°$ 時，則因 D 值之不同而有不同之破壞（坡趾、坡面或坡底）。有關破壞圓心之求法，可參考圖 8（$\phi = 0$ ）與圖 11（$\phi > 0$ ）之方法求取之。

斜坡臨界高度（Critical Height of Slope ）H_c 之求法，係爲

$$H_c = N_s \frac{c}{\gamma}$$

因此安全因數

$$F.S._c = \frac{H_c}{H}$$

式中　H_c ：臨界坡高

　　H ：實際坡高

㈡非均質等向性（Nonhomogeneous Isotropic ）土層

若土層強度係隨深度成線形增加，則正常壓密性粘土不排水強度 S_u 值與有效覆土壓力 $\overline{P_0}$ 之比值，可以

$$\frac{c}{\overline{P_0}} = 0.11 + 0.0037\ (P.I.)$$

OM。

⑥重複步驟①至⑤數次（惟其破壞圓每次均切於第一次計算之同一層次高度，僅圓心位置左右水平移動），直至臨界破壞圓（最低之F.S.值）取得為止。

⑦重複求取其他層次高度之臨界破壞圓，以求取整個斜坡破壞土體最可能臨界破壞面位置。

茲列舉上述分析方法之範例示於圖39。

(2)破壞土體之一般切片力矩平衡法（Fellinius，1927）

①選擇某一適當破壞面。

②劃分破壞土體為數個垂直切片（Vertical Slices），切片劃分係儘量使切片底端整個座落於單一土層內。若為徒手計算，則一般8至12個切片即已足夠，若使用電子計算機計算，可增至30個切片。若邊坡外有水層時，應劃分該水層為一個或數個切片，並考慮該水層重量，但不具有強度。

③計算每一垂直切片重量，若垂直切片跨越不祇一個層次時，則計算該垂直切片內包含之各不同土層重量，再總和計算該切片總重量，通常可製作表格較便利計算之。

④決定每一切片底端之長度（$\Delta\ell$），切片寬度(b)，底端中心位置距圓心之傾角（α），位於切片底端之抗剪強度（c，ϕ）與孔水壓力(u)，若進行總應力分析法，則採u＝0；將所有數據填入表格中，計算所須之資料數據值。

⑤計算該破壞圓弧之安全因數F.S.

若$\phi=0$

$$F.S.=\frac{\Sigma S_{ui}\,\Delta\ell_i}{\Sigma W_i \sin\alpha_i}\ ,\ S_{ui}=c_i$$

若$\phi\neq 0$

$$F.S.=\frac{\Sigma\,(W_i\cos\alpha_i-u\,\Delta\ell)\tan\phi+\Sigma\,c_i\,\Delta\ell_i}{\Sigma W_i \sin\alpha_i}$$

⑥重複步驟①至⑤數次（惟其破壞圓每次均切於第一次計算之同一層次高度，僅圓心位置左右水平移動），直至臨界破壞圓（最低之F.S.值）取得為止。

⑦重複求取其他層次高度之臨界破壞圓，求取整個斜坡破壞土體最可能臨界破壞圓位置。

茲列舉上述分析方法之範例示於圖40至圖42。

〔範例〕一般切片力矩平衡法

層次	γ(t/m³)	C(t/m²)	φ(度)
A	1.76	0.29	35
B	1.68	0.49	30
C	1.76	3.66	5

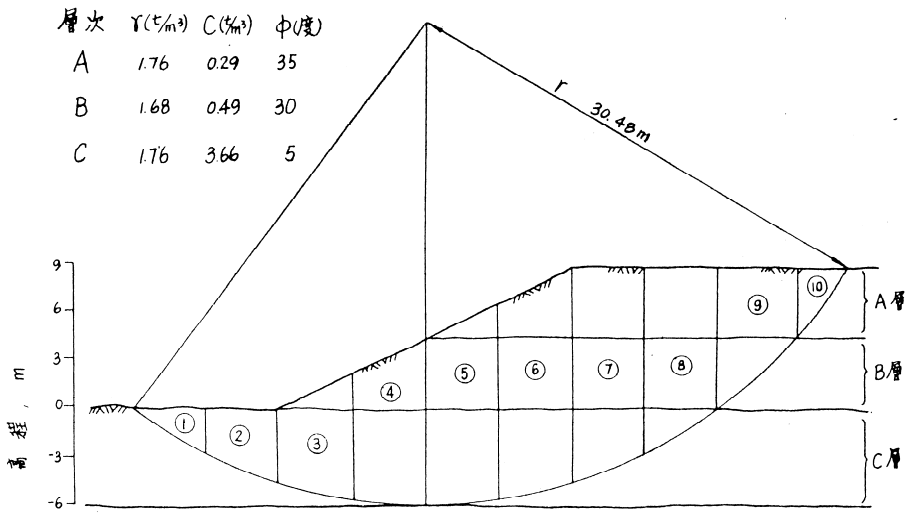

圖40　範例一一般切片力矩平衡法