

大地工程設計之誤差分析
**ERROR ANALYSIS IN GEOTECHNICAL
ENGINEERING DESIGN**

趙國祥，秦中天
G. S. Jow and C. T. Chin

原著載於
地工技術雜誌第43期
1993年,第70-80頁

*Reprinted from Sino-Geotechnics
No. 43, 1993, pp. 70-80*

大地工程設計之誤差分析

ERROR ANALYSIS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING DESIGN

ABSTRACT

Soil properties used in geotechnical engineering design always involve many implicit uncertainties. Today most of the geotechnical engineers make design using a fixed safety factor without taking the uncertainties into account. Therefore these designs may be unsafe or too conservative. The purpose of this paper is to identify the sources of uncertainty involved in soil parameters. An example showing various sources of field vane data uncertainties is given. Based on statistics and probability methods, the errors caused by these uncertainties can be quantified. Furthermore the uncertainty of the predicted behavior can be estimated through simplified method dealing with the error propagation of soil properties. This paper also introduces the relationship between failure probability and reliability index in order to aid designer, to choose a safety factor of which a balance between economy and safety concerns can be achieved.

大地工程設計之誤差分析

趙國祥*秦中天**

一、引言

大地工程師於進行分析設計時都會遇到若干隱含之不確定因素 (Uncertainty)，這些因素包括材料性質、荷重作用於土層之狀況以及運用之預測模式等。在傳統設計中，都是運用判斷與以往經驗選擇設計參數，並決定一個讓人接受之安全係數以進行保守的設計。可是，採用固定安全係數 (Fixed Safety Factor) 之方式從事分析設計却有以下之缺點 (Baecher, 1985)：

- (1) 由於並無直接處理這些不確定因素之變異量，而使每個設計用的估計量 (Estimate) 偏於保守，以致無法明確瞭解整個設計真正的“安全係數”；
- (2) 由於土壤性質、荷重等估計量趨向保守及主觀，無法使預測行為具反復性 (Repeatability)，從品質保證的觀點來講，是一種不佳的品質保證；
- (3) 因資料數量、品質之差異及使用設施之不同等因素，不確定因素之變異程度遂因位置之不同而變化，因此會造成不同程度之不利行為。

在基礎工程方面，對設計參數之決定通常是取其平均值作為設計依據，然因實際之土壤參數並非一個固定的常數，而是隨著地點、時間及空間分佈在改變。一般而言，任何土壤參數之真值 (True Value) 是

無法準確地經由試驗或理論公式得到，僅能應用包含許多伴隨誤差的量測值進行概略地估計。

基於上述理由，本文介紹在大地工程分析設計中可能之不確定因素，並予以定量化，再藉由一些簡單之統計方法，俾能對處理離散資料及考慮不確定因素時有所助益。文內並引用可靠性指數 (Reliability Index) 之觀念及與破壞機率之關係，以期在大地分析設計中之經濟及安全考量下尋求合理之平衡。

二、大地工程設計中隱含之不確定因素

在進行大地預測工作中之不確定因素可能包括多種型態，某些可以將之定量化，某些却不能，這些型態大略可區分成五類 (Baecher, 1985)：

1. 工址條件 (Site Condition)：即工址地質狀況，包括工址地層組成及構造。
2. 荷重情況 (Load Condition)：如土層單位重、荷重幾何變異性等。
3. 預測模式之不準確性 (Model Inaccuracy)：例如假設破壞型態之不準確性、數值解析運算之偏差等皆是。
4. 建造及品質管制 (Quality Control) 因素：偷工減料、未按圖施工所造成。

5.省略或疏忽造成之誤差 (Omission and Gross Errors) 。

上述不確定因素之種類，以前三者對分析設計最為重要，不幸地是，此三項不確定因素在某些情況下仍無法利用統計方法有效地將之定量化。例如在考量工址地質條件時，常應用歸納推論法 (Inductive Reasoning) 研判地層組成及構造，如此遂衍生出另一種主觀意識之誤差 (Ladd, 1983)。本文首先介紹不確定因素之估計，再將焦點置於一個特殊問題，利用現場十字片剪資料為例探討誤差之觀念，然後建立安全係數與破壞機率之關係，提供大地工程師一個合理方式以決定判斷設計用之安全係數值。

三、不確定因素之估計

3.1 不確定因素之描述

對土壤特性 (參數) 之誤差評估一般可利用下列兩數值加以表示：

- a. 最佳估計 (Best Estimate) 。
- b. 不確定因素之誤差量測 (Measure of Uncertainty) 。

平均值 (Average Value) 及標準偏差 (Standard Deviation) 通常被用來描述這兩個屬性 (Attribute)，但如所估計之參數超過一個時，此將凸顯出另一種屬性之重要性，此種屬性習慣上以相關係數 (Correlation Coefficient) 代表，用以表現不同參數間之關連性。

3.1.1 平均值 = “ 最佳估計 ”

一組量測值 $X = \{ X_1, X_2, \dots, X_n \}$

之平均值記為 m_x ，且定義如下：

$$m_x = \frac{1}{n} \sum x_i \quad (式一)$$

事實上，平均值乃為此組量測值沿 X 軸方向之重心，被視為量測值 X 之最佳單值估計 (Single-Value Estimate) 。

3.1.2 標準偏差 = “ 不確定因素之誤差 ”

量測值組合 x 之標準偏差可視為量測值相對於平均值之變動程度，利用下式表示：

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - m_x)^2} \quad (式二)$$

上式根號內數值 $n-1$ 為自由度 (Degree of Freedom)。由上式亦可得知，標準偏差乃為相對於平均值之慣性矩 (Moment of Inertia) 之方根，而在力學上處理慣性矩比其方根來得便利 (力學上定義的慣性矩，式二根號內係除以 n 而非 $n-1$)，因此在分析不確定因素之變量時，經常應用標準偏差 S_x 的平方代替 S_x ，標準偏差的平方稱為變異數 (Variance)。即：

$$V_x = S_x^2 \quad (式三)$$

而平均值及變異數一般被稱為不確定因素之一次矩 (First Moment) 及二次矩 (Second Moment)。當標準偏差利用平均值正規化後之數值稱為變動係數 (Coefficient of Variation) COV_x ：

$$COV_x = S_x / m_x \quad (式四)$$

3.1.3 相關係數 = “ 不確定因素間之關連性 ”

當處理兩個 (含) 以上土壤參數時，進行估計之不確定因素彼此間可能並非獨立的，例如考慮 Mohr-Coulomb 強度包絡線之 C 、 ϕ 參數估計，若莫耳圓之包絡線斜率 ϕ 估計太陡，則其截距 C 將會低估，反

之亦然。因此，相對於斜率及截距之不確定因素乃相互影響，而並非獨立的。

對成對參數資料 $(x, y) = \{ (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n) \}$ 之相關係數 $r_{x,y}$ ，定義如下：

$$r_{x,y} = \frac{1}{n-2} \sum \left(\frac{x_i - m_x}{S_x} \right) \left(\frac{y_i - m_y}{S_y} \right) \quad (\text{式五})$$

相關係數代表兩個參數 x 及 y 一起變動的程 度，其值變動範圍由 $+1$ 至 -1 。當 $r_{x,y} = +1$ 表示完全相關性 (Perfect Correlation)， x 與 y 顯示具正斜率之線性關係； $r_{x,y} = -1$ 則表示完全逆相關性 (Perfect Inverse Correlation)， X 及 Y 顯示具負斜率之線性關係，而 $r_{x,y} = 0$ 則表示 x 和 y 互相獨

立不相關。圖一顯示成對資料點離散情形與各種不同 $r_{x,y}$ 值之關係。

另一種表示 x 與 y 之絕對偏差稱之為共變數 (Covariance)，定義如下：

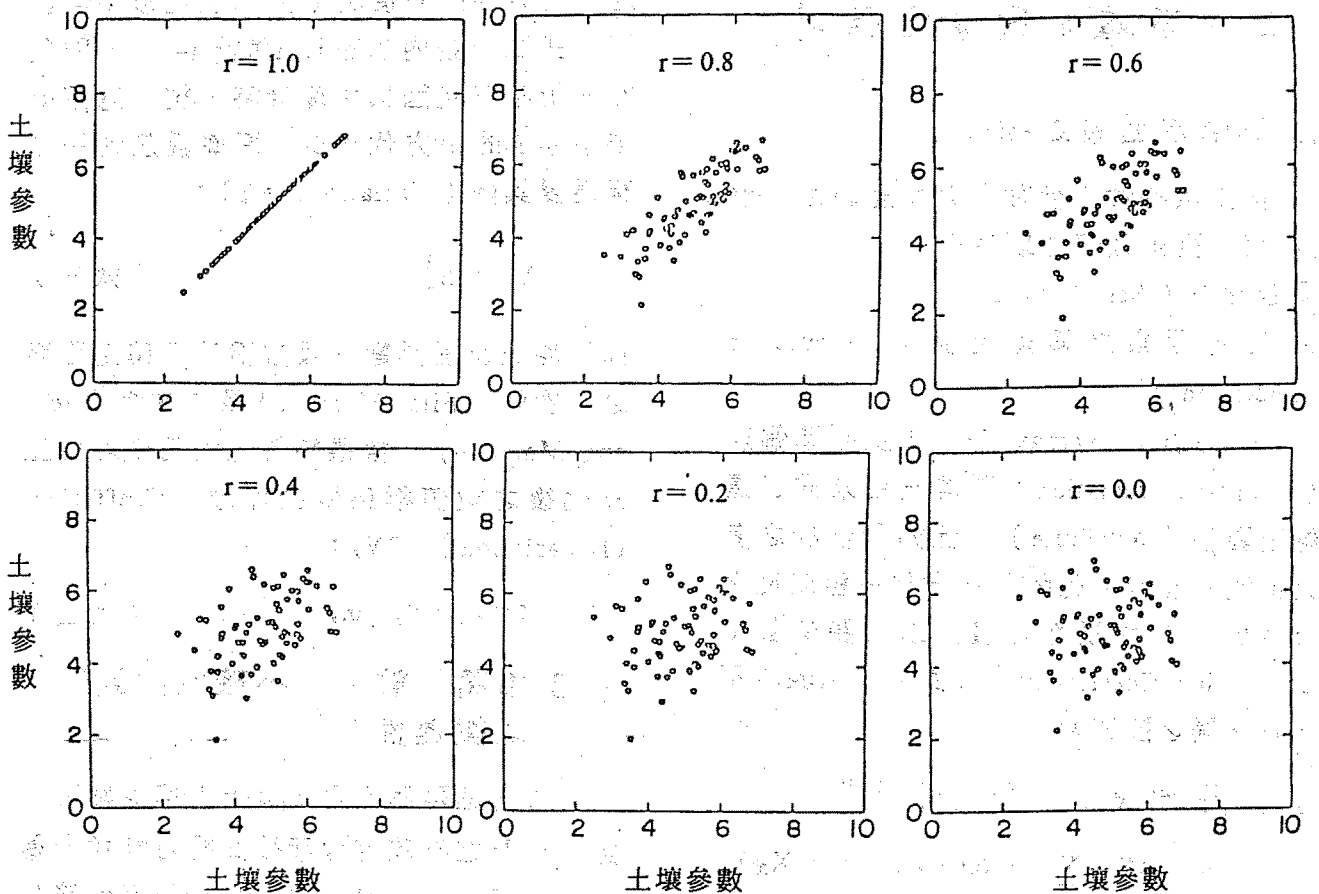
$$C_{x,y} = \frac{1}{n-2} \sum (x_i - m_x)(y_i - m_y) \quad (\text{式六})$$

由上述式五及式六之定義可知相關係數與共變數之關係：

$$r_{x,y} = C_{x,y} / S_x S_y \quad (\text{式七})$$

3.1.4 FOSM方法 (First-Order Second-Moment Method)

在進行大地工程分析時，各項工程性質都是一個隨機變數，若考慮每一個隨機變數的分佈特性，再來探討經由這些工程

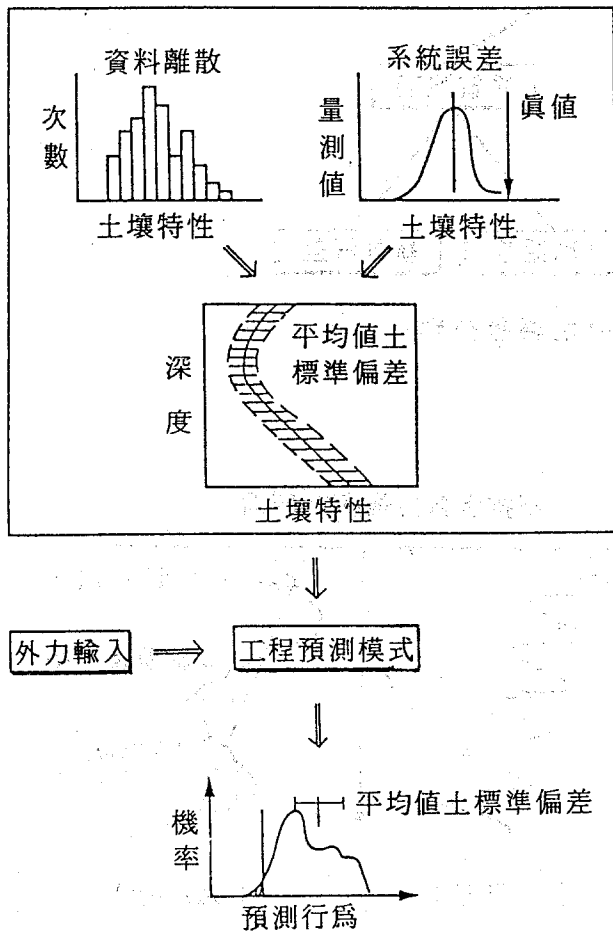


圖一 離散資料與各種不同相關係數值之對應關係

性質輸入分析模式後整體之安全係數，破壞機率和可靠性指數均將十分複雜。因此，有所謂FOSM方法，亦即在一個工程分析中，只須考慮各變數的平均值和變異數，經簡化後，就可用來推算經過推導後的安全係數變異性及可靠性指數。FOSM是一個非常有用的工具，使得大地工程師只需要一些基本機率的統計知識，就可用來進行分析各項誤差經由傳遞所產生結果的變異性(Whitman, 1980)。有關誤差傳遞情形示意於圖二。而本文之誤差分析內容即係採用FOSM方法加以探討，此外，如附錄A之範例也是應用FOSM方法，所以才能很簡單的推算可靠性指數。

3.2 不確定因素之估計

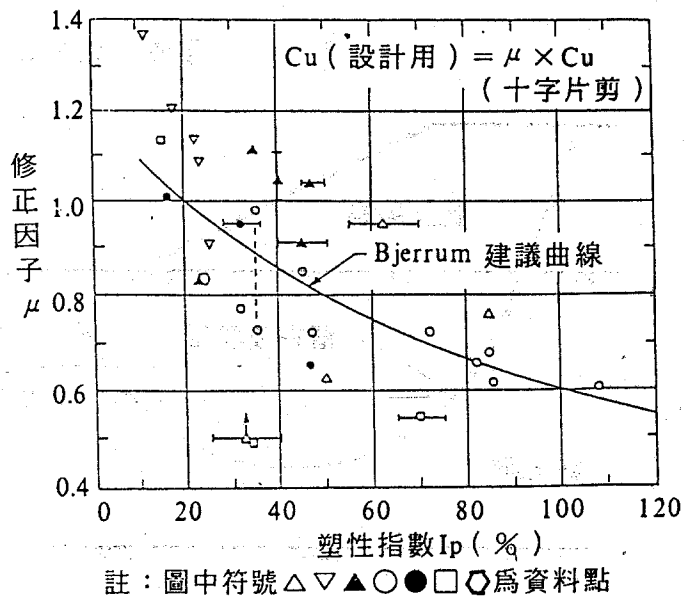
為了便於說明起見，本文選用在進行



圖二 誤差傳遞示意圖

穩定分析時，如何使用現場十字片剪資料以探討粘土不排水剪力強度之誤差來源，並將之定量估計之。當應用現場十字片剪量測所得之不排水剪力強度 C_u 值以進行設計時，一般需進行如圖三 Bjerrum $\mu - I_p$ 相關曲線之修正。如此大地工程師在設計時可能面臨下列四個誤差來源 (Baecher, 1985)：

1. 因土層內之空間變異性 (Spatial Variability) 所造成之資料離散 (Data Scatter)。
2. 因隨機試驗誤差 (Random Testing Error or Noise) 所造成之資料離散。
3. 因試驗數量有限所造成之統計誤差 (Statistical Error)。因此，這項因素又可稱為平均值的誤差 (Error in the Mean)。
4. 因量測偏差 (Measurement Bias) 所造成之誤差。以穩定性分析為例，過去的案例顯示直接量測到的十字片剪不排水剪力強度必須經過修正才能應用，如圖三中的 μ 值。



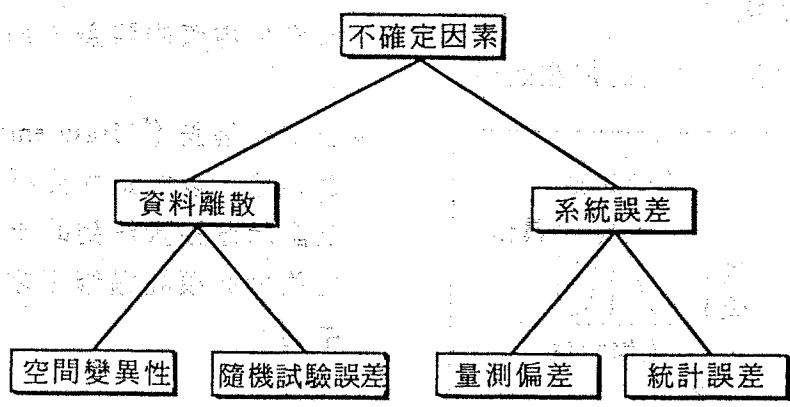
圖三 現場十字片剪修正因子與塑性指數之關係

前兩項因素皆造成離散性之資料，後兩項因素因不易由資料中直接察覺出來，故皆稱之為系統誤差 (Systematic Error) ，圖四顯示誤差分析中之誤差來源種類，以下即依上述之誤差來源逐一說明並估計之。

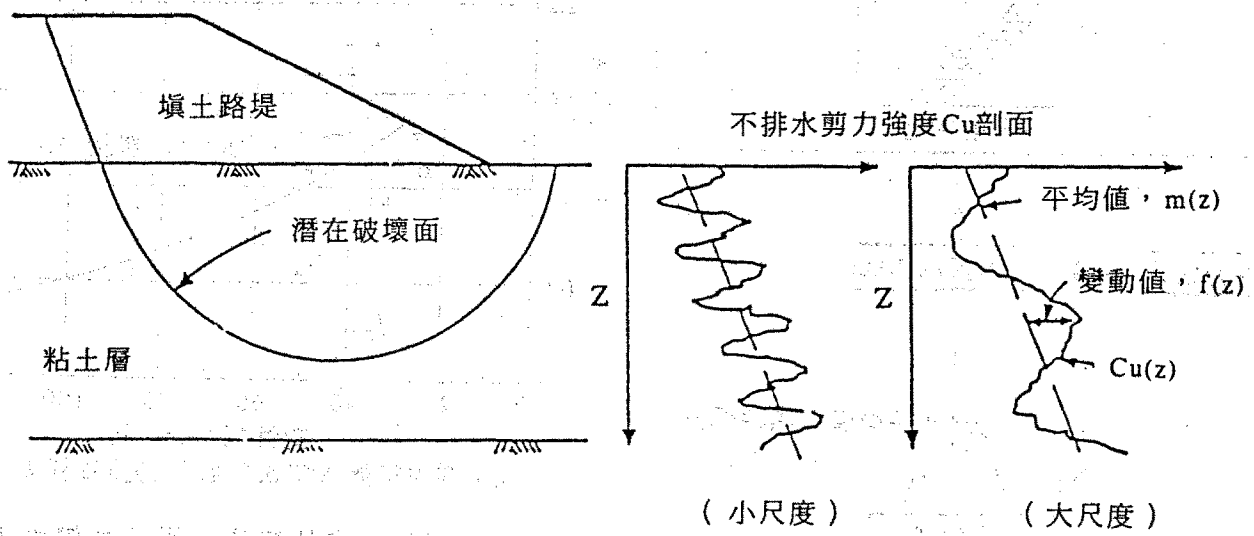
3.2.1 空間變異性

土壤參數在空間中之分佈乃具變化性 (位置及大小) ，此空間變異性反應出真正強度變化情況。茲以圖五說明空間變異性之重要，圖中假設一個潛在破壞面通過兩種不同強度情況之沉積粘土層，此兩粘土層之 C_u 平均值與深度之關係 $m(z)$ 具有相

同之趨勢。就左圖之 C_u 剖面而言，與破壞面之大小相比較，任一深度下之 C_u 值相對於平均值 $m(z)$ 之變動量 $f(z)$ ，僅發生在較小的深度區間，這小尺度之變動對穩定分析之影響不大，因 C_u 值之變異性可被平均消除掉；而在右圖之 C_u 剖面中，雖然與左圖一樣具相等大小之變動量 $f(z)$ ，但它發生在較大之深度區間，此大尺度之變動勢必對穩定分析造成極大影響，可能經由上部“軟弱”區在填土坡趾產生淺層破壞，抑或經由下部“軟弱”區於深層產生楔形破壞。同理， C_u 之空間變異性亦會發生在水平方向之差異。



圖四 大地工程中之誤差分類



圖五 垂直空間變異性示意圖

於圖五中，Cu在垂直方向之變異性可區分為兩部份，一為可決定的平均值 (Deterministic Mean)，另一則為隨機變數值 (Random Fluctuation)，即：

$$C_u(z) = m(z) + f(z) \quad (\text{式八})$$

上式 $m(z)$ 及 $f(z)$ 分別表示 $C_u(z)$ 在某一深度下之平均值及變動值。若 $C_u(z)$ 為一連續變數，且沉積粘土層是均質的，則在深度非常接近的兩個位置，其變動值 $f(z_i)$ 及 $f(z_j)$ 應相近，亦即當垂直離距 (Vertical Separation Distance) d 變成極小時 ($d = |z_i - z_j|$)， $f(z_i)$ 及 $f(z_j)$ 趨近相同。有關變動值 $f(z)$ 及平均值 $m(z)$ 間之空間相關性 (Spatial Association) 可利用所謂的“自共變數函數” (Autocovariance Function) 加以描述。若 i 表示量測位置， d 為離距，則自共變數函數 $C(d)$ 定義如下：

$$\begin{aligned} C(d) &= \frac{1}{n-1} \sum \{ f(z_i) \cdot f(z_j) \} \\ &= \frac{1}{n-1} \sum \{ [C_u(z_i) - m(z_i)] [C_u(z_j) - m(z_j)] \} \end{aligned} \quad (\text{式九})$$

對於某個現場十字片剪試驗而言，若其在深度 5m 內每 0.5m 施作一組試驗，則當離距 $d = 0.5\text{m}$ 時，將包含 9 組組合資料 (ie. $n = 9$)，此 9 組資料為 ($z_i = 0.5, z_j = 1.0$)，($z_i = 1.0, z_j = 1.5$)，... ..，($z_i = 4.5, z_j = 5.0$)；當離距 $d = 1.0\text{m}$ 時，包含 8 組組合資料，即 ($z_i = 0.5, z_j = 1.5$)，($z_i = 1.0, z_j = 2.0$)，... ..，($z_i = 4.0, z_j = 5.0$) 等，以此類推。我們對上述定義提出一個重要假設，即自共變數函數 $C(d)$ 僅為離距 d 之函數，其不隨深度 Z 之改變而變化。因此，就零離距之自共變數函數 $C(d = 0)$ 而言，自然等於 $C_u(z)$ 之變異數 $V[fv]$ ，為了便於應用起見，一般將自共變數函數除以變異數，此關係稱之為自相關

函數 (Autocorrelation Function)：

$$R(d) = \frac{C(d)}{V[fv]} \quad (\text{式十})$$

資料離散性乃因土層空間變異性及隨機試驗誤差所造成，由資料離散所產生之變異可合併表示如下 (Baecher, 1981)：

$$V[fv] = V[s] + V[r]$$

或 $COV^2[fv] = COV^2[s] + COV^2[r]$ (式十一)

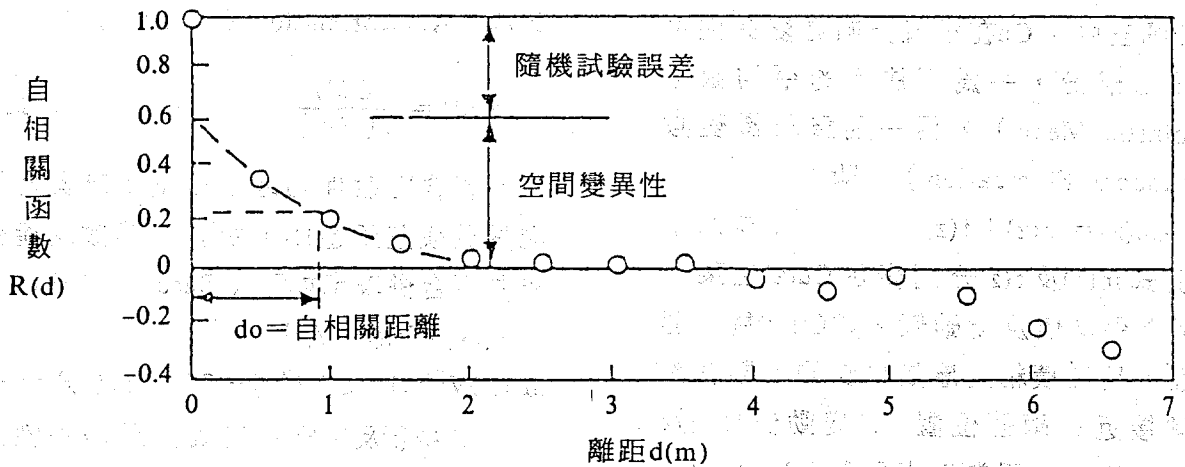
其中 $[s]$ 及 $[r]$ 分別代表空間變異性及隨機試驗誤差分量。本文在下節將舉例說明，並區分此兩個誤差來源在整個量測離散誤差所佔之比例及大小。

3.2.2 隨機試驗誤差

隨機試驗誤差乃假設每一組試驗是各自獨立的，其平均值為零且有一固定之變異數 $V[r]$ 。根據定義，相對於平均值之任一變動值乃為互相獨立，亦即當離距 $d = 0$ 時，自共變數函數 $C(d = 0)$ 相當於變異數 $V[r]$ ，而離距 $d \neq 0$ 時，其值為零。

茲舉一例說明：在 8m 厚之極靈敏粘土層內，每間隔 0.5m 進行一組現場十字片剪試驗，圖六為其離距 d 與自相關函數 $R(d)$ 之關係 ($COV[fv] = 20\%$)，將自相關函數外插至原點 ($d = 0$)，則全部資料離散引起之變異數與外插至原點求得之變異數之差異，即為因隨機試驗誤差引起之變異數估計量。經由圖六顯示可知，形成資料離散之結果，約 40% 乃因隨機試驗誤差之貢獻，約 60% 係由於空間變異性所引起。因全部量測值之 $COV[fv]$ 等於 20%，由式十一可求得 $COV[s]$ 約等於 15%。

為了進一步瞭解土壤參數相對於平均值之變動情形，在自相關分析中我們引入一個重要名詞—自相關距離 (Autocorrelation Distance) d_0 ，用以量測變動值相對於平均值之關連距離。在圖五中若某個量



圖六 現場十字片剪資料之垂直自相關分析

測值大於平均值，另一個量測值亦大於平均值時，此兩量測值即具關連性 (Association)；相反地，另一個量測值可能大於或小於平均值時，則不具關連性。自相關距離定義為空間變異性所造成之 $C(d)$ 值或 $R(d)$ 值降至原來 (在 $d=0$ 處) 之 $1/e$ 倍時之相對離距。圖五所顯示之結果，其自相關距離 d_0 約僅為 1m，因此可被視為類似圖五左側 C_u 剖面之小尺度變動。

3.2.3 統計誤差

在任一地區進行十字片剪試驗，其試驗數量必定有限，因此不排水剪力強度的平均值仍有可能高於或低於真正的平均值，而造成了平均值的誤差 (Error in the Mean)，這是一個統計上的不確定因素 (Statistical Uncertainty)，而且是系統性的，隨處皆會發生。統計誤差之大小定義為試驗數目之函數，即：

$$V[n] = V[f_v] / N$$

$$\text{或 } COV^2[n] = \frac{COV^2[f_v]}{N \cdot \mu^2} \quad (\text{式十二})$$

式中 μ = 現場十字片剪修正因子，詳見圖三。

3.2.4 量測偏差

因為過去經驗顯示，運用十字片剪強度直接進行分析時會造成偏差，因此使用 Bjerrum's $\mu - I_p$ 曲線對現場十字片剪試驗結果進行修正。不過，由圖三可看出修正曲線對圖中各個量測值仍有明顯之偏差，故對任一新場址之十字片剪試驗結果修正所得之不排水剪力強度 $\mu \times C_u$ ，仍僅是一個包含偏差 (Bias) 的結果 (縱使此結果比未修正值之偏差小)。而本文對此量測偏差所造成之誤差大小定義為 $V[\mu]$ 或 $COV[\mu]$ ，不過此誤差大小在進行穩定分析中仍隱含若干之未知數，例如在一般穩定性分析中僅考慮二向度，而忽略了三向度分析中之端面效應 (End Effect)。

3.3 討論

以上所述之目的，除了探討誤差的來源，進而可經由附錄 A 所介紹的方法消除部份的誤差，導引出使用十字片剪結果進行穩定分析時安全係數的變異性：

$$COV^2[FS] = COV^2[s] \cdot R + COV^2[f_v] / N + COV^2[\mu] \quad (\text{式十三})$$

式中可看出誤差的兩種來源，資料離

散及系統誤差對整體安全係數的影響。資料離散包括空間變異性 $COV^2[s]$ 和試驗誤差 $COV^2[r]$ 兩項，其中試驗誤差可被消掉，而折減因子 R 的討論見下節；系統誤差則包含了因試驗資料有限而引起之統計誤差 $COV^2[fv]$ 及存在於 Bjerrum's $\mu - Ip$ 修正曲線中隱含未知數所造成之偏差效應 $COV^2[\mu]$ 。

四、可靠性指數及破壞機率

假設某個載重條件作用於粘土層上，而抵抗破壞之能力完全取決於基礎下粘土層之不排水剪力強度，則現場十字片剪試驗量測值推算而得之不排水剪力強度誤差，將直接反應在計算所得之安全係數 FS 上。對於安全係數之變異性，Baecher 建議了如下之近似關係：

$$COV^2[FS] = COV^2[s] \cdot R + COV^2[fv]/N + COV^2[\mu] \quad (\text{式十四})$$

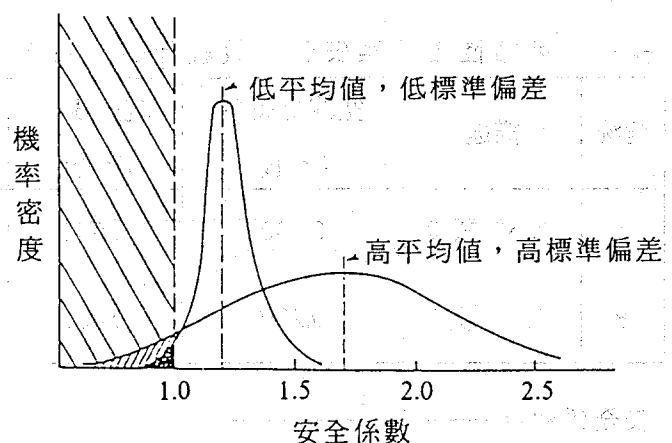
上式與式十三完全相同。以下將就因空間變異性所引起之誤差作進一步說明（式十四等號右邊第一項）。回顧圖五及圖六，就一極大破壞面而言（ $L/do \gg 0$ ， L ：破壞面長度， do ：自相關距離）， Cu 值因空間變異性所產生之誤差將被平均消除掉，因而不會內含至所求得之安全係數內，故當 L/do 趨近無限大，其折減因子（Reduction Factor） R 則趨近零；相反地，對一個所謂“點”破壞，其 $L/do = 0$ 且 $R = 1$ 。事實上，所謂之“點”破壞並不存在，本文僅是給定一個空間變動之影響界限，較合理之情況為 $L/do = 8$ ，其相對之 R 值折減至約 0.25。

可靠性指數（Reliability Index） β ，當應用至穩定分析中時可定義如下：

$$\beta = \frac{m[FS] - 1.0}{S[FS]} = \frac{m[FS] - 1.0}{COV[FS] \cdot m[FS]} \quad (\text{式十五})$$

其中 $m[FS]$ 為以現場平均強度計算而得之安全係數， $S[FS]$ 及 $COV[FS]$ 分別表示安全係數估計值之標準偏差及變動係數。由式十五可知，可靠性指數乃為安全係數 FS 之最佳估計（平均值）與其破壞限值（ $FS = 1.0$ ）間之差異指標，此差異乃以標準偏差之個數表示， β 值低其可靠性亦低，大地設計應用之一般典型 β 值範圍在 2 及 4 之間。而於進行大地工程設計時，設計者總希望達到最佳化設計（Optimized Design），可靠性指數 β 則可直接成為決定各方案良窳之指標，可靠性指數高者其破壞機率小。

可靠性指數 β 是一個有用之量測指標。在圖七中顯示預測安全係數所產生誤差之兩種可能分佈狀況：(i) 較高之平均安全係數值及其相對之高誤差；(ii) 較低之平均安全係數及其相對之低誤差，情況 (i) 雖比 (ii) 之平均安全係數高，但其却有較高之標準偏差，由圖中兩種情況之分佈曲線與 $FS < 1.0$ 所圍成之面積（破壞機率）可知，情況 (i) 雖有較高之平均安全係數值，但其破壞之可能性却比情況 (ii) 高。由以上說明得知，一般設計分析上極易受高安全係數之誤導，以為採用較高之安全係數即屬安全，其實不然。本文以上提及之可靠性指



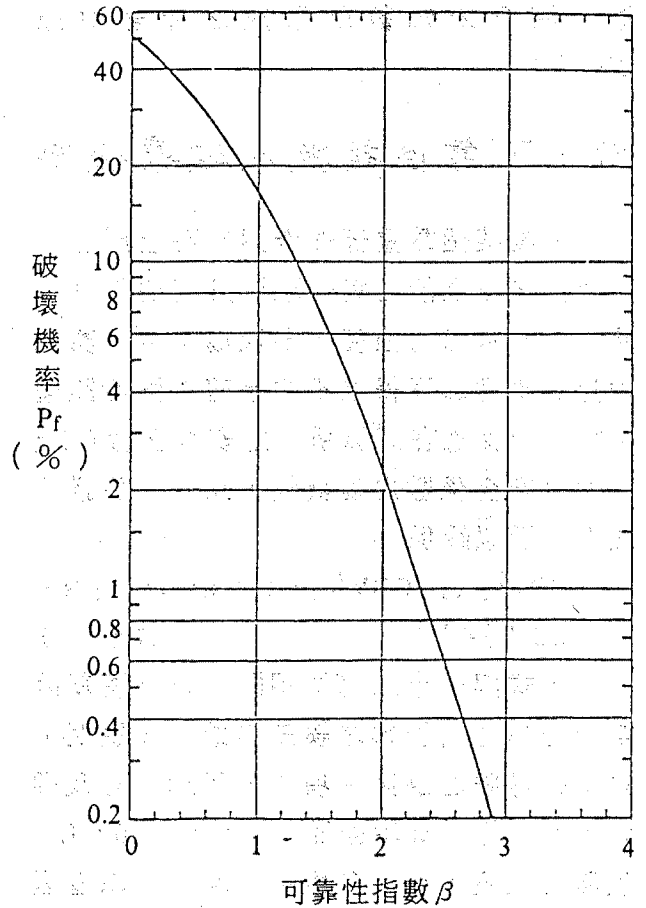
圖七 安全係數預測行為中之誤差分佈

數即融入誤差的觀念，讓讀者在安全係數之考量上有更深一層之認知。

破壞機率 (Probability of Failure) P_f ，顧名思義，即表示安全係數小於 1.0 之概率 (Likelihood)，欲將可靠性指數與破壞機率建立關係，須事先對其機率密度分佈 (Probability Density Distribution) 進行假設。圖八所顯示 β 與 P_f 之關係乃基於安全係數之誤差分佈為正常分佈 (Normal Distribution) 所建立，不同之分佈假設將有不同之對應關係，讀者可依此判斷設計用安全係數之一致性 (Consistency)，抑或對不同設計案例及不同程度之離散性資料比較其安全係數值。

表一列出兩種具不同程度之參數誤差情況 (參數乃以現場十字片剪試驗求得)，其有相同之現場量測值，但情況 A 因空間變異性造成之誤差僅為情況 B 之一半 (即資料離散大部份乃因隨機試驗誤差所造成)，且有較小之量測偏差 (即區域性之經驗已可建立比 Bjerrum 修正曲線更可靠之 μ 值)，而計算平均安全係數值之總誤差表示為 $Cov[FS]$ ，在情況 A 及 B 分別為 10% 與 20%，表一中亦顯示出達到破壞機率 10% (風險度高) 及 1% (可被接受) 所計算而得之設計用安全係數。就後者之安全度而言，情況 A 之設計安全係數 $FS =$

1.28，接近土堤施工之安全係數下限，而情況 B 顯然需一個較高之設計安全係數值 1.78。由以上關係可知，雖兩種情況具有相同之量測值，然因其參數誤差之不同，在安全係數設計值之考量上亦有所差異，



圖八 破壞機率與可靠性指數之關係 (假設安全係數之誤差為正常分佈)

表一 可靠性指數與安全係數設計值之關係

情況	描述	空間變異性 $Cov[s]$	統計誤差 $Cov[n]$	量測偏差 $Cov[\mu]$	FS之總誤差 $Cov[FS]$	安全係數設計值	
						$\beta = 1.25$ ($P_f \approx 10\%$)	$\beta = 2.3$ ($P_f \approx 1\%$)
A	"小" 誤差	0.100	0.063	0.050	0.095	1.13	1.28
B	"大" 誤差	0.200	0.063	0.150	0.191	1.31	1.78

$$*安全係數 = \frac{1}{(1 - \beta \cdot Cov[FS])}$$

誠如在 B 情況之安全係數設計值採用 1.31，其結果將比 A 情況採用 1.28 來得不安全一般。不過，應用可靠性指數於設計實務上仍存在某些問題：(1) 缺乏 β 與真實行為 (Actual Performance) 關係之實際案例；(2) 一般業主普遍無法接受破壞機率大於零之觀念；(3) 有關如何計算空間變異性、量測偏差等所引致之誤差，至今仍缺乏驗證方法。但由於可靠性指數應用之潛在利益因素，仍將繼續趨使研究者在此新領域之努力探討及推動，俾使國內大地工程設計更臻經濟和安全。

五、結論

近年來國內工程日趨複雜，規模日益龐大，對於大地工程中可估算風險 (Calculated Risk) 的研究實有進一步加強的必要。過去大地工程師不常利用到機率與統計的觀念，而純粹機率與統計的理論對許多大地工程師看來又太過抽象而難以應用，然而，近年來國外對於這方面已經逐漸做出了許多有系統的研究 (Whitman, 1980)，利用引用 FOSM 的概念，就可使大地工程師不需要精通機率與統計的理論，就能應用在實際工程上。

本文即利用簡單之機率分析方法，進行土壤參數之誤差分析，藉由系統之可能破壞模式，利用數學關係求出該破壞模式之破壞機率，引導讀者在大地設計中摻入破壞機率之觀念，作為決定基礎最佳設計之合理方法。

過去安全係數在傳統觀念上乃用一個數字來表示，此觀念並未計入資料來源之可靠度及其誤差大小，導致設計分析上產生過份保守或安全度不足之現象。應用本文提出之機率分析方法可很容易地解決此

問題，使大地工程師對問題有更深入的看法，而在面臨複雜問題時，對風險的評估及經濟效率的衡量都能有一套合理、系統化的處理。

最後，要特別強調的是本文重點是在導入機率的觀念於實際的工程應用上，了解了文中的基本觀念，即可將文中的舉例和說明，輕易的加以變化運用於實際的設計之中。例如，以十字片剪所做誤差分析的方法，同樣可以運用在以標準貫入試驗所進行的地質調查之中；再如附錄 B 中，雖是推估基腳承載力的可靠性指數，同樣的也可以依此概念加以推導而應用於基樁承載力可靠性指數的推算。尤其，本文所介紹的方法都十分簡單而有系統，雖對國內大地工程師略嫌陌生，但只要加以體會，必能運用於各項大地工程工作之中，使國內各項建設之決策分析更有依據，各項設計更為經濟安全。

參考文獻

- BAECHER, G.B.(1985), *Geotechnical Error Analysis, Lecture Notes of MIT Special Summer Course 1.60s, "Recent Developments in Measurement and Modeling of Clay Behavior for Foundation Design"*, August 5-9.
- LADD, C.C.(1983), "Geotechnical Exploration in Clay Deposits with Emphasis on Recent Advances in Laboratory and In Situ Testing and Analysis of Data Scatter", *土木水利*, 第十卷, 第三期, PP.3-35
- WHITMAN, R.V.(1984), "Evaluating Calculated Risk in Geotechnical Engineering", *ASCE J. of Geot. Engrg Div.*, Vol. III, No.2 pp.143-188.