

# 大地工程規範的新趨勢 - 可靠度設計

秦中天 陳皆儒 孫介文 王劍虹

亞新工程顧問股份有限公司

## 摘要

大地工程從地質調查、分析設計到施工階段，都遇到土層變異、參數選擇和分析模式不確定性(model uncertainty)的問題。這些工程問題不確定性之處理，傳統上期望以單一的安全係數(Factor of Safety, FS)來完全涵蓋，實質上，這些不確定因素並未能被直接評估及呈現。目前能處理工程問題不確定性之較佳的設計方法之一為可靠度設計(Reliability-Based Design, RBD)，而此也為近期大地工程設計規範之新趨勢。本文先討論傳統規範的設計概念來探討現行設計方法對安全及經濟效益掌握的弱點，進而在極限設計法(Limit State Design, LSD)的架構下，說明為何以可靠度為基礎的設計較佳較合理。透過了解各國目前在新設計規範上所做的努力，以認知這個新趨勢將對台灣大地工程界的衝擊，並思考所需的準備及未來需努力的發展方向。

**關鍵字：**大地工程、設計規範、可靠度設計、極限設計法。

## 一、前言

新設計觀念及規範的發展是近二十年來在大地工程領域常被討論到的課題。本文探討的是最近二十年來常被討論到的新設計觀念，即所謂的可靠度設計。嚴格來說，可靠度設計不是一個新的觀念，該說是一個不常被大地工程師所使用的設計方式。大地工程師們長久以來就都已深刻體認到其所面對的工程材料及工程分析模式有相當之不確定性[1-2]。然而在過去慣用的分析及設計的模式中，不確定性並沒有被合理的考量於分析之中。傳統的分析模式主要是定值性的(deterministic)，用工程判斷選取參數，對工程問題不確定性(uncertainty)的考量隱藏在用工程判斷與經驗訂定的安全係數中。能處理工程問題不確定性之較佳的設計方法之一為可靠度設計，其基本信念在於“絕對的(完全的)可靠度是不可能達到的目標”，但機率理論能提供一個嚴謹的架構，可明確的得知分析設計結果符合所要求安全的程度。

本文先探討傳統大地工程設計對安全及經濟效益掌握的弱點，然後在極限設計法的架構下，說明為何以可靠度為基礎的設計方式在安全及經濟效益兩方面之掌握較佳較為合理。另透過對大地工程設計方法及規範的演變過程與現今各國在新規範上所做的努力做一個完整回顧，以加強對大地工程發展可靠度設計必要性的認知。最後則在結論中思考台灣大地工程界因應這個趨勢所需做的準備及未來需努力的發展方向。

## 二、傳統大地工程設計之檢討

傳統大地工程在設計時之考量如載重與材料強度之變異性、設計公式的可能誤差、結構之原始功能變更、設計時未預料到之額外載重及現場狀況等種種因素，並考量這些因素對於所設計之系統功能的可能影響後，採用單一之安全係數而並非一一檢視每一因素對於設計的影響。傳統的設計方式冀望以一單一的安全係數能涵蓋所有的變異性，但是實際上，可能應該按設計參數及分析模式的不同，而需採用不同的安全係數。

以樁基礎之設計為例，目前傳統樁基礎設計（以『建築物基礎構造設計規範』為例）時之單樁容許垂直支承力其所採用之安全係數僅針對推估方法（樁載重試驗或支承力推估公式兩種）及載重狀況（平時或地震時兩種）之不同分別採用不同的安全係數。但對於不同之推估公式（經驗、半經驗或理論公式）、不同之土層（砂性土、黏性土或岩盤）或不同的參數取得方式（試驗室試驗：三軸強度試驗、單壓強度試驗；或現場試驗：現地直剪、平版載重、SPT-N 值，或關係式： $c, \phi$ 與液限及塑限的關係）並未因此而有不同的安全係數。此外對於設計參數的“把握程度”（可靠度）亦未將其納入設計的考量中。

傳統設計法之另一弱點，是實際之設計結果其安全係數不具唯一性。舉一簡單之設計例子來說明。若依照『建築物基礎構造設計規範』的規定，以支承力推估公式來設計承受軸向壓力之反循環樁，單樁承載力的安全係數應為 3。然而，設計時可能依工址狀況，對單樁實際可發揮之承載能力有不同之預期，而使得設計時採用之公式有所差異，進而造成設計承載力之實質安全係數並非唯一，而是有極大之變異性，如表 1 所示。

表 1 單樁承載力設計例

可能設計	設計公式	設計承載力 ( $Q_{cd}$ , ton)	“實際”FS ( $Q_c / Q_{cd}$ )
1	$(Q_{cs} + Q_{ct} - W) / 3$	61.8	3.0
2	$Q_{cs} / 3$	51.3	3.6
3	$(Q_{cs} - W) / 3$	48.7	3.8
4	$Q_{ct} / 3$	13.1	14.1
5	$(Q_{ct} - W) / 3$	10.5	17.7

$Q_{cs}$  = 樁身摩擦力 = 153.9 t;  $Q_{ct}$  = 樁底支承力 = 39.4 t;  $W$  = 樁重 = 7.06 t

$Q_c$  = 總受壓承載力 =  $Q_{cs} + Q_{ct} - W = 185.4$  t;  $Q_{cd}$  = 設計受壓承載力 (FS = 3)

所以傳統的設計方式以單一安全係數來確保結構物安全性或減低設計風險的方式，並無法區分分析模式及參數變異性的不確定因素，因此很容易造成過度保守或不安全的設計。有些學者[3]也認為，如依照規範規定使用單一安全係數，工程師將難以進行經驗分享或溝通，過去經驗無法有效利用，且額外的資訊或技術的進步也無法合理的降低安全係數。

## 三、可靠度分析

安全係數字面上的正面意涵是要用以確保結構物安全性，從另一方面詮釋則是為了減低設計的風險性。由上節的討論可知單一安全係數的傳統設計法對降低設計風險其所能達到目

的的程度是相當不一致的。過去數十年來結構安全性的課題之所以蓬勃發展，也是為了改善上述傳統設計法的弱點，並希望能對設計的風險性以量化的方法進行評估，進而使同一類構造物設計結果之風險標準趨於一致，而能合理達到此一目標的方法之一便是透過機率及可靠度理論分析。

Whitman[4]在其論文中提到，當我們可以量化不確定因素且了解分析模式的可能誤差時，則可靠度理論便能實際運用於分析中。所謂可靠度分析(reliability analysis)，Whitman[4]作了一個清楚而扼要的定義：「可靠度分析就是評估強度或承載能力(capacity)超過設計需求量(demand)的機率」。這個機率就是可靠度(reliability)，而與其直接相關的是「破壞機率」(probability of failure)，可以下式來表示：

$$\text{Probability of failure } (P_f) = 1 - \text{Reliability} \quad (1)$$

破壞機率的觀念可以清楚的以圖 1 來呈現。圖中兩條機率分佈曲線重疊之區域即為欲求取之破壞機率。理論上，圖 1 中的兩條機率分佈曲線建立出來後，則可靠度或是破壞機率的正解原則上可以求得，只是運算的過程是極其繁瑣複雜的。實務上，通常以隨機變數的平均值 (mean)及標準差(standard deviation)之簡化方法來進行可靠度分析，例如，一階二次矩法(First Order Second Moment, FOSM)。使用可靠度理論來進行分析與設計，在近期的大地工程文獻中已有些很好的案例，其中包含 Cherubini et al. [5]對鋼版樁及 Christian et al. [6]對土堤穩定問題所作之可靠度分析。

運用可靠度分析來作設計，基本上是以圖 1 的概念為主。即分析時將一個工程系統或結構體（如：樁基礎）所承受的外力，以一載重隨機變數(Q)來表示。構造物所能提供之承載，則另以一阻抗隨機變數(R)來表示。故破壞機率可以下式表示：

$$P_f = \text{Probability } (Q < R) \quad (2)$$

由於破壞機率的計算較繁複，因此常會以計算可靠度指數(reliability index,  $\beta$ )來替代。破壞機率與可靠度指數可以下式表示：

$$P_f = \Phi(\beta) \quad (3)$$

其中 $\Phi(\cdot)$ 代表機率分佈函數。可靠度指數的計算，在假設 Q 與 R 為獨立變數(independent)的情況下，只需變數之平均值及標準差便可求得，如下式：

$$\beta = (\mu_R - \mu_Q) / \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2} \quad (4)$$

其中 $\mu$ 、 $\sigma$ 分別代表變數之平均值及標準差。

工程師應該謹記，由於岩土參數具有變異性。因此分析計算時，參數之變異性會傳遞至安全係數，使得安全係數是一隨機變數(Random Variable)。可靠度指數及安全係數之關係可以下列簡式表示：

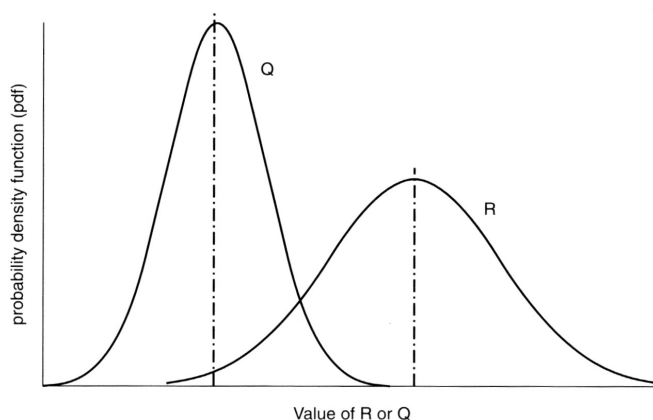


圖 1 常見的載重及阻抗機率分布 [7]

$$\beta = (\mu_{FS} - 1) / \sigma_{FS} = [1 - (1/\mu_{FS})] / COV_{FS} \quad (5)$$

其中  $\mu_{FS}$ 、 $\sigma_{FS}$  及  $COV_{FS}$  分別為安全係數之平均值、標準差及變異係數(Coefficient of Variation)。由上式可知，安全係數的  $COV$  會影響其所對應之破壞機率大小。因此，當數個設計均使用相同之安全係數時，每一個設計結果所控制之破壞機率實際上並不一定相等，而是與分析時參數之變異性(安全係數之變異主要來源為參數變異)有關，(例如：假設  $FS$  為 log-normal 分佈且平均值為 1.5，則當  $COV = 0.1$  時，則  $\beta \approx 3.33$  或  $P_f \approx 0.008$ ；而當  $COV = 0.15$  時，則  $\beta \approx 2.22$  或  $P_f \approx 0.07$ )，這也說明了傳統設計法之弱點。

#### 四、極限設計及可靠度設計觀念

可靠度設計總括而言應包括所有在設計的計算程序中使用或是隱含可靠度分析之方法。可靠度分析則可定義為使用機率理論，將設計問題中的變異性及風險的概念轉換成量化的數值以作系統的運算分析。在實際分析時，基本做法是將具不確定性的工程量或值(如載重、承载力、土壤參數等)以隨機變數來模擬。而設計的風險則以評估“破壞的機率”來決定之。需特別注意的是，可靠度分析及設計中所指的“破壞”並非一般工程上所指的坍塌狀況(collapse event)，而應是指性能上不佳或負向的表現(adverse performance)。對“破壞”較恰當的解釋應是設計結果不能滿足所設定極限狀況的要求。據此而論，可靠度設計應該在極限設計的架構下發展，才能將其精密的設計哲學和邏輯完整的呈現出來。

極限設計在結構工程領域已發展相當成熟了，而在大地工程的應用上則正處於積極發展與逐漸被採用的階段中。在大地工程設計的發展上，極限設計並不是新的觀念。如文獻上[3, 8, 9]均指向 1956 年 Hansen 在其丹麥大地工程學會(Danish Geotechnical Institute)的論文中所提出之概念，而 Hansen 的極限設計理念也早在 1966 年便正式納入了丹麥基礎設計的規範中了。Hansen 當年所堅持強調的是在基礎構造物的設計上需進行兩組獨立的考量及分析，一是應確保基礎的設計是安全且不致於發展至極限破壞，再者則是應檢核在實際工作應力狀況下基礎

的沉陷量大小。發展至今，極限設計已經是大地工程規範發展的主軸了如歐洲的 Eurocode 7 [10-11]、美國 AASHTO 的 LRFD 深基礎規範[12]、日本的 Geo-code 21 [13]及加拿大的 Canadian Foundation Engineering Manual [14].

Phoon et al. [3]強調完善的極限設計法應該符合三方面的基本要求：

1. 確認並定出(identify)所有的潛在破壞模式或是極限狀態(limit state)
2. 對每一個定出的極限狀態分別進行檢核
3. 驗證每一個極限狀態在此一設計下其發生之可能性不超過要求值

根據上述第三項基本要求，使用可靠度設計無疑的將是最具說服力的做法。因為一些抽象的設計哲學，可靠度設計可用量化的數值來計算而後進行驗證。相對的，極限設計法是使可靠度設計能更實質發揮強大功效的一個基礎，特別是上述第一項中對設計定出的所有極限狀態，提供極佳的參考基準。

在大地工程的極限設計法中，上述三項基本要求之重要性是相同的。第一項要求為定出大地工程問題之所有可能破壞模式，此項很容易被認為是一簡單的工作。然而實際上常是最需要縝密思考之項目，不僅要求熟知一個工程問題之基本力學行為，以便構造物在外力作用下，各方面之承載能力及變位狀況均能加以考量，另需對工程所在之環境狀況能有所掌握，使所擬定之極限狀態切乎實際。例如，以 Eurocode 7 [15]規範進行擋土結構物設計時，需研擬所有適切之極限狀態，而表 2 列出者即為該規範明訂最少應考量之項目。

表 3 比較幾個主要大地工程規範中，對樁基礎設計所要求需考量之極限狀態類別。在實際應用上，所有之極限狀態常被歸納於幾個主要類別狀態中，目的是使考量上能更清晰，並有助於釐清各類狀態中之主要控制極限狀態。而分類也使得在不同類之狀態下，設計參數及應考量之載重各應如何選取，以建立不同的和實際的規則（如，Eurocode 7）。由於大地工程問題之變異性大，因而是否有良好之工程經驗及判斷，是影響能否完整且合理的定出所有極限狀態之因素。

確定了設計應考慮之所有極限狀態後，便需分別檢核各項目均能滿足設計要求。而欲完成此一要求，所需要的是每個極限狀態都能有合理之分析模式來進行檢核。因此規範中因應極限設計之第二項要求，是要能選用合乎某一特定極限狀況物理現象的設計公式。即或實際可得者只有簡化之經驗式，但若能有足夠且具代表性之資料，經過嚴謹之可靠度率定(calibration)，於設計上之應用，其效用及精確性經常是足夠的。

極限設計法的第三項基本要求是確保設計結果能使每一個應考量之極限狀態發生之可能性不超過容許之機率。雖然極限設計法本身並沒有強制規定，這一項要求應用何種方式來達成，但正如前面曾提及，運用可靠度分析來達成此一設計要件是最直接且最具說服力的。以程序來講，可靠度設計的基本步驟可以簡述如下：

1. 選定設計應達到可靠度水準的目標(target reliability index,  $\beta_T$ )。
2. 選擇設計的分析模式，並先選擇一組嘗試之設計尺寸(trial dimension)，然後計算此設計可達到之可靠度水準。
3. 調整設計斷面，直到滿足可靠度水準的目標要求 (i.e.,  $\beta \approx \beta_T$ )。

表 2 Eurocode 7 所列之擋土結構物設計至少應考量之極限狀態

For all types of retaining structures
Loss of overall stability Failure of a structural element such as a wall, anchor, wale or strut or failure of the connection between such elements  Combined failure in ground and in structural element Movements of the retaining structure which cause collapse or affect the appearance or efficient use of the structure, nearby structures or services which rely on it Unacceptable leakage through or beneath the wall Unacceptable transport of soil grains through or beneath the wall Unacceptable change to the flow of groundwater
Additional requirements for gravity retaining structures
Bearing resistance of the soil below the base Failure by sliding at the base of the wall Failure by toppling of the wall
Additional requirements for embedded retaining structures
Failure by rotation or translation of the wall or parts thereof Failure by lack of vertical equilibrium of the wall

表 3 各規範中設計應考量之極限狀態類別比較

Code or Practice	Limit State Categories		
Eurocode 7	Ultimate		Serviceability
AASHTO LRFD Specification	Extreme event	Ultimate	Serviceability
Geo-Code 21	Ultimate	Repairability	Serviceability
Canadian Foundation Manual	Ultimate		Serviceability

## 五、設計規範

可靠度設計的概念，提供了一套合理、量化且明確的方式來進行工程設計。然而上述簡單的步驟可能包含了許多複雜的機率、統計及可靠度分析的運算。雖然方法較確實，但可能加重工程師的負擔，可靠度分析未能全面的被採用於工程設計上，此為原因之一。過去在結構物安全性課題上，偏重於發展以可靠度為基礎的設計規範，而其中最重要的發展就是以載重及阻抗設計法(Load and Resistance Factor Design, LRFD)為基礎之規範。LRFD 的優勢在於設計公式簡潔易用,其基本公式如下式：

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i Q_i \quad (6)$$

其中  $\phi$  為阻抗因子， $\gamma_i$  為載重因子， $R_n$  為標稱阻抗， $Q_i$  為標稱載重。

此式與傳統設計使用安全係數的基本公式相去不遠，然而所不同的是設計時需考量之參數變異性、分析模式之不確定性及結構物之安全性，可以很清楚的呈現於公式中。由於式(6)

中的載重及阻抗因子是事先經可靠度分析率定過的，因此繁複的可靠度計算於例行的設計階段就可以避免掉。對工程師而言，可以減掉些許負擔。但相對的，由於載重及阻抗因子是根據一預先選定的可靠度指數目標來率定，因此工程師仍會失掉無法自己研選設計可靠度水準目標的彈性。

## 六、各國大地工程新規範發展之現況

從傳統設計法到以可靠度為基礎之設計，是設計觀念與設計哲學(design philosophy)大轉變。實質上，是要從定值性的設計轉換成概率性的(probabilistic)設計；是對工程問題之不確定性，從隱性的(implicit)考量進化為顯性的(explicit)運算。關於設計方法之演進，大地工程領域要比結構工程來的晚。以致於在結構領域中，混凝土結構及鋼結構之設計都已有經過可靠度率定的規範，而大地工程規範之發展，目前仍處在由傳統之容許應力設計法(Working or Allowable Stress Design, WSD/ASD)轉變成極限阻抗設計法之過渡階段。

至於在大地工程新規範之發展，過去二十年來推動最不餘遺力者首推歐盟國家。其聯合研擬的 Eurocode 7 [15-17]是於 1981 年開始展開制定工作[10]。Eurocode 7 發展之主要目的為使眾多歐盟國家能有一套統一的設計規範，以促進會員國彼此間之合作，增加競爭力。同時也為提昇大地工程設計之方法，使其與結構設計間之配合能更相容。新規範主要是以極限設計法為主軸，因此對許多仍使用傳統安全係數設計法之歐盟會員國造成衝擊，進而迫使其進行設計邏輯之改善。Eurocode 7 規範文件已發佈執行。目前階段是會員國各自進行評估並擬定適合該國之特定條款，然後將進入一段 Eurocode 與各會員國既有規範並行之轉換期。最終目標是使歐盟國家統一採用此規範。[11, 18]

在美國方面，AASHTO 制定的公路橋樑標準規範是一套不斷更新的準則。此套規範自從 1931 年頒行第一版以來，平均每四年修訂一次。因此到 1996 年已發行到第 16 版。除了新版的發行不間斷外，設計觀念及方法的演進也可從此套規範之修訂中看出端倪。從 1931 至 1970 年間，此套標準規範採用的設計概念是 WSD。自 1970 年開始，為了在設計考量上能更實質的反應載重之變異性，使得名為“載重因素法”(Load Factor Design, LFD)的新設計觀念被引進於此標準規範中。1996 年版之規範事實上是 WSD 與 LFD 並存之規範。除此之外，AASHTO 於 80 年代組織了一個研究委員會，對其標準規範之設計概念及哲學進行整體的檢討，並參酌國外相關規範的發展方向後，於 1987 年確定另行發展一套全新的、以載重及阻抗設計法為基礎的新規範。此規範並已於 1994 年發行第一版[19]。到了 2004 年，此套 LRFD 的規範已經發行了第三版。

日本大地工程界觀察到了國際上設計規範的新發展，認知極限設計及可靠度設計是設計規範的新趨勢[13]。為能與歐美國家在設計觀念上有更好的契合，咸認為新規範的制定是必需的，因而在 1997 年成立了一個名為“Present and Future of Japanese Foundation Design and Soil Investigation in View of International Harmonization”的研究委員會，進行日本大地工程新規範之討論及研擬。到了 2002 年，一套以極限設計法為基礎並加入性能設計(performance design)觀念的新規範(JGS Foundation Design Guideline[20])草稿已大致擬妥。這套規範常被稱為 Geo-code 21。預計 2004 年將由日本地盤工學會發行正式版[13]。

除了歐、美、日這些國家跟地區外，新規範的發展與制定也在其他亞洲及大洋洲國家及地區中被熱烈討論著。包含：新加坡[21]、韓國[22]、澳洲[23]及香港與大陸[24]等。這些國家與地區主要也是看見國際化的規範趨勢，以及大地工程設計需與結構設計更加融合的發展，因而對重新檢討其既有之大地工程規範之必要性有所認知。其所得之共同結論是極限設計或載重及阻抗設計是新規範研擬的重點。

在這個新設計觀念及規範的發展進程中，目前尚需大地工程界共同努力的是將可靠度設計或機率理論更實質的融入規範與設計中。因為以 Phoon [25]的觀察，多數現有之大地工程的 LRFD，基本上只是將原本在 WSD 中的單一安全係數，合理的重新分配到載重與阻抗項目上。其所欠缺的是，蒐集足夠具代表性的資料，以嚴謹的機率及統計理論來對設計公式進行可靠度率定。而這也是許多學者共同的認知[12, 18, 26]。因此近期內，完整確實的大地工程資料蒐集及資料庫的建立是一極重要的課題。所有大地工程師都知道大地工程問題之變異性很大，因而所需之資料亦需夠廣泛，以便能對不確定因素做完整且正確的了解與處理。

## 七、結論

推動 RBD 不是一個學術上的興趣，而是一個工程實務上迫切的需要。台灣近年來推動很多重要的大型公共建設，在進行這些工程的時候如何選用適當的規範，就是重要的一個課題。如何讓工程建設能有更經濟可靠的設計，就必須探討是否要順應世界的潮流，採取一個新的架構來進行。對大地工程師來說，尤其在基礎設計如何與結構工程師配合，進行一套一致性的(consistent)設計，也是必須考慮的問題。這也正是推動 RBD 所考慮的兩個重要課題：一是”International harmonization”，一是”Harmonization between geotechnical engineering and structure engineering”，所以 RBD 目前不是一個強制的要求，但終將成為新世紀大地工程設計的主流。

對於大地工程這門學科來說，推動 RBD 的時候，會促使大地工程師正視大地工程本身具有不確定因素的問題。了解大地工程知識的限制，系統的解決問題，這也有助於大地工程技術的提升。至於推動上最大的困難，應該是大家對機率理論的了解。機率理論和可靠度分析向來不是大地工程的重點，因此造成一般工程師很難理解，更談不上應用了。另一個問題則是率定和最佳化(optimization)的問題。這方面則是需要更多的研究與支持。從國際間 RBD 快速發展的趨勢來看，台灣不僅應該做，而且有能力做。加強對機率理論和可靠度分析的訓練，推動案例的分析和整理，將會促使大地工程界全面的進步，對未來工程建設也有重大的幫助。

## 八、謝誌

承蒙蘇鼎鈞先生、姚大鈞博士協助準備文稿並提供寶貴意見，在此特別致謝。

## 九、參考文獻

1. Casagrande, A., “The Role of ‘Calculated Risk’ in Earthwork and Foundation Engineering”, *Journal of Soil Mechanics Division, ASCE*, 91(4), 1-40 (1965)。

2. Whitman, R.V., “Evaluating Calculated Risk in Geotechnical Engineering”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 110(2), 145-188 (1984)。
3. Phoon, K.K., Kulhawy, F.H., and Grigoriu, M.D., “Reliability-Based Design of Foundations for Transmission Line Structures”, *Report TR-105000*, Electric Power Research Institute, Palo Alto. (1995)。
4. Whitman, R.V., “Organizing and Evaluating Uncertainty in Geotechnical Engineering”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(7), 583-593 (2000)。
5. Cherubini, C., Garrasi, A., and Petrolla, C., “The Reliability of an Anchored Sheet-Pile Wall Embedded in Cohesionless Soil”, *Canadian Geotechnical Journal*, 29(3), 426-435 (1992)。
6. Christian, J.T., Ladd, C.C., and Baecher, G.B., Reliability Applied to Slope Stability Analysis”, *Journal of geotechnical Engineering*, ASCE, 120(12), 2180-2207 (1994)。
7. Baecher, G.B. and Christian, J.T., *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*, John Wiley and Sons, West Sussex, 605 p. (2003)。
8. Goble, G.G., “Geotechnical Related Development and Implementation of Load and Resistance Factor Design (LRFD) Methods”, *NCHRP Synthesis 276*, Transportation Research Board, Washington, 69 p. (1999)。
9. Ovensen, N.K., “Limit State Design – The Danish Experience”, *Proceedings, International Workshop on Foundation Design Codes and Soil Investigation in view of International Harmonization and Performance Based Design*, Tokyo, 107-116 (2002)。
10. Orr, T.L.L., “Eurocode 7 – A Code for Harmonized Geotechnical Design”, *Proceedings, International Workshop on Foundation Design Codes and Soil Investigation in view of International Harmonization and Performance Based Design*, Tokyo, 3-16 (2002)。
11. Frank, R., “Development and Future of Eurocode 7 – Geotechnical Design”, *Proceedings, International Workshop on Foundation Design Codes and Soil Investigation in view of International Harmonization and Performance Based Design*, Tokyo, 51-58 (2002)。
12. Paikowsky, S.G., “Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Deep Foundations”, *Proceedings, International Workshop on Foundation Design Codes and Soil Investigation in view of International Harmonization and Performance Based Design*, Tokyo, 59-94 (2002)。
13. Honjo, Y. and Kusakabe, O., “Proposal of a Comprehensive Foundation Design Code: Geo-Code 21 Ver. 2”, *Proceedings, International Workshop on Foundation Design Codes and Soil Investigation in view of International Harmonization and Performance Based Design*, Tokyo, 95-106 (2002)。
14. Canadian Geotechnical Society, *Canadian Foundation Engineering Manual*, 3<sup>rd</sup>. Ed., Richmond. (1992)。
15. ENV 1997-1:1994, *Eurocode 7: Geotechnical Design – Part 1: General Rules*, CEN, Brussels。
16. ENV 1997-2:1999, *Eurocode 7: Geotechnical Design – Part 2: Design Assisted by Laboratory Testing*, CEN, Brussels。
17. ENV 1997-3:1999, *Eurocode 7: Geotechnical Design – Part 3: Design Assisted by Field Testing*, CEN, Brussels。
18. DiMaggio, J.A., Sadd, T., Allen, T., Passe, P, Goble, G, Christopher, B.R., DiMillio A., Person, G, and Shike, T., “Geotechnical Engineering Practices in Canada and Europe”, *Report FHWA-PL-99-013*, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 73 p. (1999)。
19. Buckle, I.G., “AASHTO LRFD Limit State Design of Bridges with Emphasis on Seismic Performance”, *Proceedings, International Workshop on Foundation Design Codes and Soil Investigation in view of International Harmonization and Performance Based Design*, Tokyo, 17-30 (2002)。

20. Japanese Geotechnical Society, “The JGS Foundation Design Guideline, (Draft Ver. 2)”, *Proceedings, International Workshop on Foundation Design Codes and Soil Investigation in view of International Harmonization and Performance Based Design*, Tokyo, 399-458 (2002)。
21. Tan, T.S. and Phoon, K.K., “Current Status and Future Development of Geotechnical Design Codes in Singapore”, *Proceedings, 12<sup>th</sup> Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2, 1371-1378 (2003)。
22. Yoon, G.L., Chang, C.S., Jeong, S.S., Chae, K.S., and Koo, J.D., “Current Status and Future Development of Geotechnical Codes in South Korea”, *Proceedings, 12<sup>th</sup> Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2, 1379-1384 (2003)。
23. Lo, S.-C.R., “Some Limit State Design Experience in Australia”, *Proceedings, 12<sup>th</sup> Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2, 1347-1348 (2003)。
24. Zhang, L.M., “Limit State design Experiences in Hong Kong and Minland China”, *Proceedings, 12<sup>th</sup> Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2, 1351-1352 (2003)。
25. Phoon, K.K., “Towards Reliability-Based Design for Geotechnical Engineering”, *Special Lecture*, Korean Geotechnical Society, Seoul, 23 p. (2004)。
26. Green, R. and Becker, K., “National Report on Limit State Design in Geotechnical Engineering: Canada”, *Geotechnical News*, 19(3), 47-55 (2001)。

## ABSTRACT

Uncertainties are encountered in all the phases (site investigation, design, and construction stages) of a geotechnical project. Geotechnical engineering have recognized the inherent variability of the main materials (soils and rocks) of focus since the advent of soil mechanics. Traditionally in engineering design, the uncertainties were considered implicitly through use of a global factor of safety. This approach suffers a major drawback that the level of reduced risks is not consistent even the same factor of safety is used for a given type of structure. To overcome this drawback and to take the uncertainty into account in an explicit way, a rational approach is to incorporate probability theory and reliability analysis into analysis and design. This paper examined the shortcomings embedded in the traditional design approach, illustrated the superiority of reliability-based design (also limit state design), and explored the worldwide trend in development of new geotechnical design codes. These observations will help address the Taiwanese geotechnical community the impact of the new code format and the need for involvement in this subject area.

**Keywords:** geotechnical engineering, design code, reliability-based design, limit state design.