

捷運工程地下結構版牆系統之耐震設計 —以信義線及既有設計例研析

許書銘¹ 黃怡超²

摘 要

台灣位置處於歐亞板塊與菲律賓板塊碰撞的邊界，地震頻繁，大地震來臨時，不僅造成人民傷亡、財產損失，對國家經濟發展之阻礙及社會成本負擔之增加也有顯著影響。台灣地狹人稠，高樓建築物不勝枚舉，以一般結構物而言，現行耐震設計規範及施工技術已日漸成熟，然而捷運工程地下車站之結構系統為版牆系統，其耐震設計牽涉複雜的土壤與結構互制行為，其設計規範尚未完整，如何使分析程式推演出之數值與理論推導之解析值一致，使兩者數據更趨合理頗值得探討。本文內容旨在說明現行設計規範對一般結構物和地下結構物的耐震設計理念，以及經研究改進之地下結構物強制變位分析方法，作為日後規範修訂及結構設計之參考。

關鍵字：地下結構物、土壤與結構互制、強制變位、耐震設計

Seismic Design of the Underground Structure of Mass Rapid Transportation System

Shu-Ming Hsu¹ Yi-Chao Huang²

Abstract

Taiwan is located between the border of Eurasia Plate and Philippines Plate. Earthquake occurred frequently in this area and caused many disasters such as the people injured and the money lost in the past. Because of high density of population, there are many high-rise buildings in Taiwan cities. Taiwan government has edited the code of the building, but still has no the code about the underground structure until now. The performance of the underground structure is very complex that it involved the soil-structure interaction. In this paper, it discussed the difference between the building and the underground structure, and also suggests some methods for ductility design.

Keywords: Underground structure, Soil-structure interaction, Racking, Seismic design

1 中興工程顧問股份有限公司大眾運輸一部工程師

smsheu@mail.sinotech.com.tw

2 台北市政府捷運工程局土木建築設計處幫工程師

ychuang@trts.dorts.gov.tw

一、前言

地下結構物受制於四周土壤，受力行爲與地面結構物並不相同。當地下結構物承受地震時，結構體受制於四周土壤不容易由本身的質量產生動力，另一方面地下結構之版牆系統不容易產生不穩定狀態而導致崩塌，在國內外歷次強震考驗下，地下結構物僅幾個個案受損，其他皆未受損，因此目前之設計仍趨於保守。即便如此，由於捷運工程地下結構物（明挖覆蓋隧道和潛盾隧道）在強震下的行爲，尚未收集實測紀錄來驗證實際與分析之差異，因此對於結構設計之考量，仍採用傳統較保守的方法。地下結構物關於地震力的分析，包括強制變位法（Racking）、反應譜分析、歷時分析等方法，一般工程設計常採用強制變位法，其基本觀念爲：地震對結構體之剪變形效應，將使結構體發生符合土壤與結構互制之變形。

二、建築物之耐震設計

（一）建築物之設計地震力

台灣建築物的結構設計，主要根據內政部營建署頒佈之「建築物耐震設計規範」[1]，耐震設計之基本原則，係使建築物在中小度地震時保持在彈性限度內，設計地震時容許產生塑性變形，但韌性需求不得超過容許韌性容量，最大考量地震時則使用之韌性可以達規定之韌性容量。其中，中小度地震爲：回歸期約爲 30 年之地震，其 50 年超越機率約爲 80%；設計地震爲：回歸期爲 475 年之地震，其 50 年超越機率約爲 10%；最大考量地震爲：回歸期爲 2500 年之地震，其 50 年超越機率約爲 2%。

「建築物耐震設計規範」中使用公式 $V = \frac{S_{ad}I}{1.4\alpha_y F_u} W$ ，做爲建築物靜力分析時所施加的設計水平地震力，式中 S_{ad} 爲工址設計水平譜加速度係數，代表工址水平加速度係數與工址正規化水平加速度反應譜係數之乘積。由於建築物具有韌性，若將建築物設計成大地震時仍保持彈性，殊不經濟。因此大地震時容許建築物進入非彈性變形，可將彈性設計地震力予以降低，而其降低幅度端視韌性好壞而定，式中 $1.4\alpha_y F_u$ 即代表設計地震力之折減係數。

如圖 1 所示，建築物承受側力與其所產生的側位移，在外力不大時係線性，其後會變爲非線性，最後建築物在承受的側力 P_u ，側位移達 Δ_u 時，因韌性被用盡而崩塌。此非線性的關係可以彈塑性關係來理想化，亦即彈性一直維持到 P_u ，其後變爲完全塑性，韌性容量爲 Δ_u/Δ_y 。一般建築物的設計，不論採用工作應力法或極限設計法，在設計水平地震力 P_d 作用下，結構尚未開始降。當地震力增加一個倍數 α_y ，達後，第一個構材斷面才開始降伏，即 $\alpha_y = P_y/P_d$ 。由於建築物的靜不定度較高，在設計得頗均勻，各斷面降伏時機接近下，取保守的估計，外力須調升至 $1.4P_d$ 後，結構才達能承受的最大側力。建築物的韌性容量 R 與建築物的週期及所適用的反應譜有關，一般而言，週期短的建築物耐震能力不像長週期的建築物那麼有效。

（二）耐震設計細部考量

「建築物耐震設計規範」在訂定設計地震力時，已考慮建築物之韌性容量而將設計地震力折減，因此建築物應依「混凝土工程設計規範(土木 401-93)」[2]之韌性設計要求設計之。爲確保結構系統具有強柱弱梁的破壞機制及良好的韌性，對於構架內之梁、柱、梁柱接頭，包括混凝土和鋼筋的強度，縱向鋼筋和橫向鋼筋的配置，剪力強度的要求均有限制。

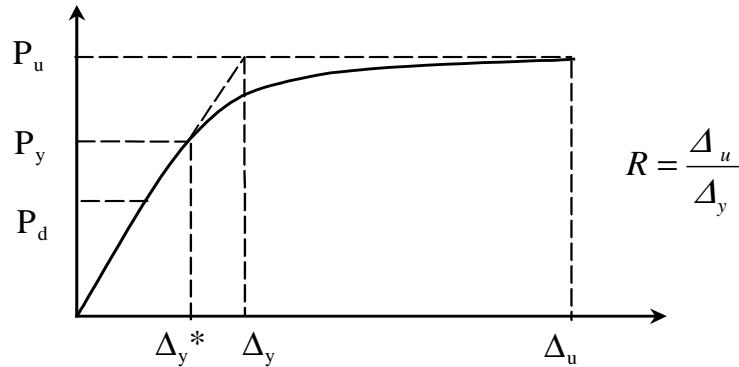


圖 1 結構物設計地震力、降伏地震力、極限地震力與韌性容量

以梁、柱而言，影響其斷面韌性主要參數有混凝土抗壓強度，鋼筋降伏強度，壓力鋼筋比，張力鋼筋比及閉合箍筋間距。其中材料強度和鋼筋用量的規定，目的在使梁、柱斷面有足夠的韌性；當混凝土保護層剝落後，核心混凝土受到箍筋的圍束，混凝土斷面仍然擁有相當高的強度，而且有足夠側向支撐防止鋼筋產生挫屈，因此規範規定閉合箍筋應設置於梁會發生塑鉸的區域，並且限制閉合箍筋的最大間距；此外避免塑鉸產生時，梁、柱不至於先發生脆性剪力破壞，因此規範規定梁、柱之設計剪力應採用塑鉸產生後引致之剪力。

三、地下結構物之耐震設計

(一) 地下結構物之彈性地震力

強制變位法為一種擬靜力分析方法 (Quasi-static)，其作法為：依據土層條件之不同，首先求得土壤的自由場角，將結構體及其周圍土壤以有限元素法模擬，然後在分析模式最外側施加土壤的自由場角之強制變位，以求得結構體在土壤與結構互制之變形，如圖 2 所示。

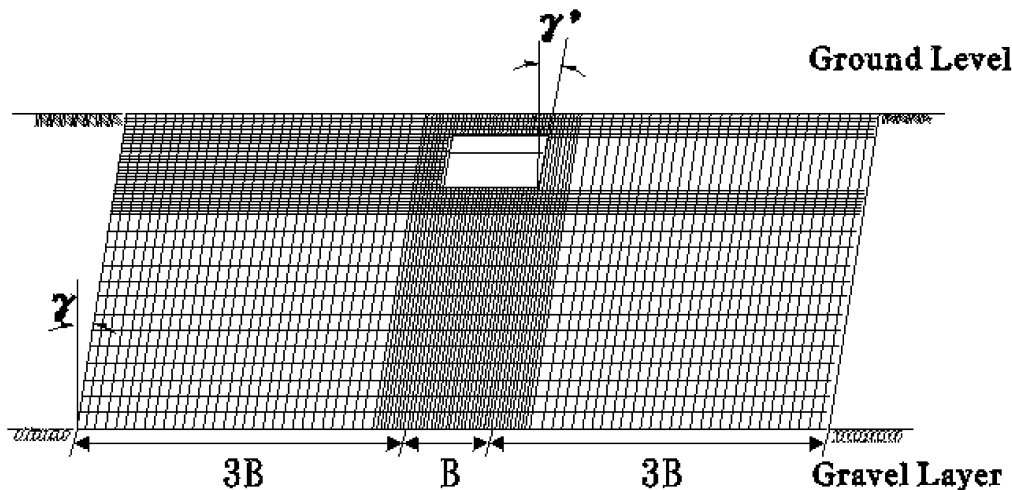
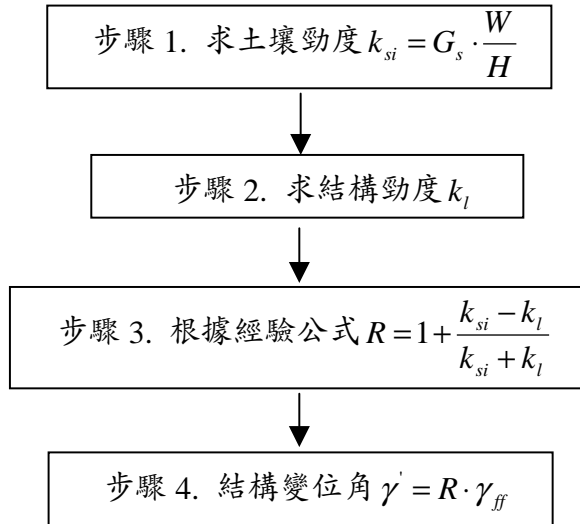


圖 2 自由場水平向土壤變形 r 及土壤與結構互制作用之水平向結構變形 r'

依據台北市政府捷運工程局頒佈之「土木工程設計手冊 (CEDM)」[3]，土壤與結構互制產生的水平向結構變形，由各細部設計顧問公司決定。現階段各顧問公司一般採用有限元素法，然而由於使用的電腦程式和假設條件不同，往往造成剪變形的分析結果有所差異，而這個差異也往往決定設計地震力的大小。因此如何建立一套合理的分析模式和設計流程，一直是個有待解決的課題。

目前中興工程顧問公司的研究[4]已經初步解決這方面的問題。該研究旨在建立一個簡單

且有效的方法，作為處理地下結構物強制變位的分析工具。該研究的設計方法係參考 Penzien 文獻[5]的理論推導，涵蓋 CEDM 規範、舊金山規範[6]和台灣高鐵規範[7]的設計精神，中央大學的耐震設計報告[8]以及中興工程顧問公司多年來從事捷運工程的設計成果[9,10,11]。該設計方法除了提供合理可靠的預測外，同時清楚地描述土壤與結構互制間的數學關係和物理意義，建立的經驗公式 R 可視為土壤與結構互制間變位角比值之理論解，並且可用來檢核有限元素法的分析成果，該方法之設計流程如圖 3 所示。由圖 3 經驗公式顯示：當 $k_{si} - k_l > 0$ 時，會得到 $R > 1$ 的數值，其物理意義表示當土壤勁度大於結構勁度時，土壤的自由場角大於結構的變位角；反之，當 $k_{si} - k_l < 0$ ，會得到 $R < 1$ 的數值，其物理意義表示當土壤勁度小於結構勁度時，土壤的自由場角小於結構的變位角。



圖中：
 G_s 為土壤剪力模數
 W 為結構物寬度
 H 為結構物深度
 R 為結構變位角 γ' 與土壤變位角 γ_{ff} 之比值

圖 3 地下結構物強制變位改進方法之設計流程圖

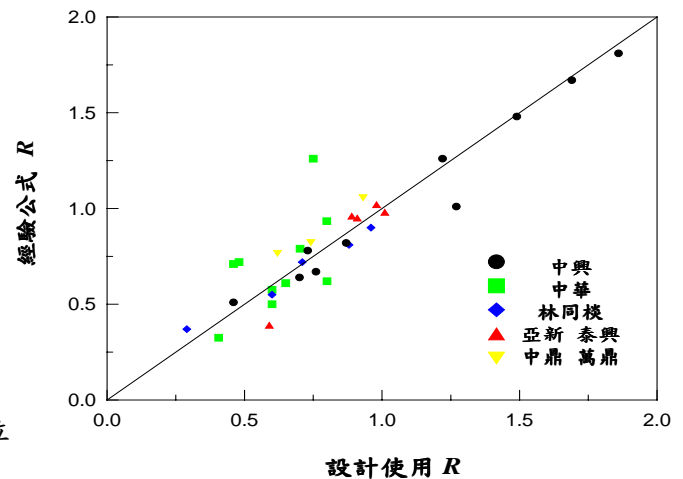


圖 4 各大工程顧問公司設計成果與經驗公式之比較

如圖 4 所示，為集合信義線設計顧問中興及亞新之設計例及近幾年台北捷運工程各設計標之中華、中鼎、萬鼎、泰興、林同棧等各大工程顧問公司有關地下車站設計使用之 R ，與經驗公式之 R 作一比較。由圖 4 顯示：使用經驗公式的結果，除了與中華的設計成果誤差較大外，其餘與各大工程顧問公司的設計成果均相當符合。整體而言，使用經驗公式有很好的預測結果，其誤差值約為 10%。

對照「建築物耐震設計規範」，地下結構物可以使用強制變位角，做為靜力分析時所施加的設計水平地震力，公式為 $\gamma' = R \cdot \gamma_{ff}$ ，式中 $\gamma_{ff} = V_{\max} / C_s$ ， V_{\max} 為地表運動之最大速度， C_s 為地震剪力波速。 γ_{ff} 代表工址自由場水平變位角，反應工址水平速度大小與工址地盤性質；而另一重要參數 R 則代表土壤與結構互制間的關係，採用經驗公式求得。換言之，該設計方法已經明確量化地下結構物的彈性地震力，接著僅需要考量結構本身的韌性容量和破壞機制，即能決定設計地震力之折減係數。

(二) 矩形構架之韌性容量

韌性的定義為結構物極限狀態與降伏狀態變位值的比值。對於單層建築結構，一般可以

非線性程式求得屋頂側向位移與側向作用力的關係圖（圖 1），利用該圖來計算結構物的系統韌性容量；亦即取最大側向力所對應的位移為極限側向位移，而降伏側向位移則取該圖彈性部分之切線與通過極限點水平線之交點所對應的位移，極限側向位移與降伏側向位移之比值則為此結構物的系統韌性容量。對於多層建築結構，目前則尚無明確定義。有鑒於此，美國應用技術會議 ATC 40[12]建議採用非線性程式進行靜力側推分析（Nonlinear static pushover analysis），其方法為首先建立結構分析模式，在構件可能發生塑鉸的位置設定塑鉸及數值；然後施加側向力，每當增加一側向力增量時，檢視構件是否降伏或減載，若有則更改結構勁度矩陣，再施加側向力增量，一直到結構物崩塌為止，並且在分析過程中繪製結構物屋頂側向位移與基底剪力的關係圖；最後藉由該圖求得結構物的系統韌性容量。

ATC 40 中並列表提供關於鋼筋混凝土構架發生塑鉸的數值，包括梁、柱、梁柱接頭、雙向版、版柱接頭及牆等構件。依據規範的精神，舉凡矩形構架，尤其是經過韌性設計的梁柱結構系統，其構件兩端有充分時機發展如上述的塑鉸。同理版牆結構系統應該也有類似的趨勢，不同的是地下車站為長條箱形結構，構件受力行為略有差異；此外地下車站其構架並沒有像梁柱結構系統，在縱向鋼筋、橫向鋼筋及剪力強度等方面做相同的要求限制，版牆結構系統構件很可能在混凝土保護層剝落後，未完全產生塑鉸前就發生其他的破壞模式，例如：壓鋼筋挫屈、張鋼筋斷裂、剪力筋斷裂、混凝土壓碎或是剪力破壞，因此對於 ATC 40 列表塑鉸的數值需做適度修正。

（三）矩形構架之破壞機制

CEDM 規範中地下結構物的設計原則，在一般設計地震作用下，結構構架上任一點皆不應超過其彈性限度；而在最大設計地震作用下，若結構構架之部份接頭產生塑性變形，則應檢視結構構架是否穩定，經檢視架構若有不穩定現象，則應檢討並視需要重行設計。此外結構物應確保各部位之韌性容量均大於該部位之韌性需求，且所產生之塑鉸及塑鉸組態不致形成足以導致結構坍塌之破壞機制。圖 5 所示為構架在最大地震力下產生塑鉸時可接受之結構型態。當構架狀況如圖 5-a 所示，於任一構件上最多僅產生二個塑鉸，由於此狀況並不會使構架形成崩塌機構，故此構架狀況是可接受的。當構件狀況如圖 5-b 所示，於構件上產生四個塑鉸，雖然此構架狀況於地面結構可能產生崩塌，但地下結構因其四周被土壤所束縛住，並無崩塌之虞，故此構架狀況亦是可接受的。換言之，CEDM 規範中敘述地下結構物的破壞機制是處在一種很理想的狀況，至於是否能產生像規範敘述的破壞機制，則應該在板、牆及版牆接頭等構件及破壞先後順序做進一步考量。

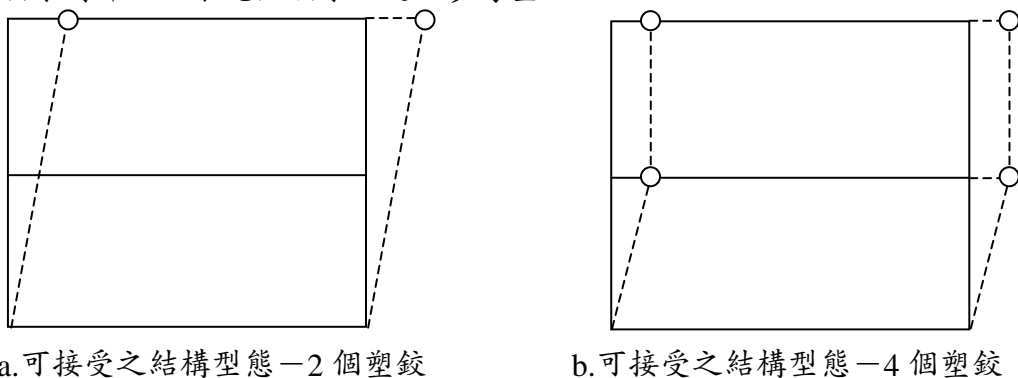


圖 5 在最大地震力下產生塑鉸時可接受之結構型態

四、結 論

台灣腹地不大，資源有限，展望未來國內捷運工程地下結構物仍占有相當大的比重，如

何因應隨時可能發生的大地震，一套完整合理的耐震設計規範和細部考量是非常重要的。現階段地下結構物的設計屬於彈性設計，傾向於安全和保守，台北捷運局已於後續路網中安裝監測系統，藉此蒐集實際之結構行為亦做為後續設計回饋之依據。然而地下結構物亦具有韌性，若將其設計成大地震時仍保持彈性，似乎不太經濟，對於是否進一步朝向彈-塑性設計，的確有討論的空間。一旦地下結構物採用韌性設計，將有可能大幅降低捷運工程土建部份的造價。目前國內建築物和鐵、公路橋樑已有完整的耐震設計規範，地下結構物由於牽涉複雜的土壤與結構互制行為，尚未有完整的設計規範，盼本文之探討能給予捷運工程一點助益。

參考文獻

1. 「建築物耐震設計規範」，內政部營建署，民國 94 年 7 月。
2. 「混凝土工程設計規範(土木 401-93)」，中國土木水利工程學會，民國 93 年。
3. 「土木工程設計手冊(CEDM)」，中文版第十一版，台北市政府捷運工程局，民國 91 年。
4. 許書銘、張景順、林世勳、陳俊宏，「地下結構物強制變位設計方法之改進」，中興工程，第 89 期，民國 94 年。
5. J. Penzien, "Seismically Induced Racking of Tunnel Linings", *Journal of Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Volume 29, 2000.
6. Bart Design Criteria, "San Francisco Bay Area Rapid Transit District", San Francisco, August, 1997.
7. Taiwan High Speed Rail Design Criteria, "Seismic Capacity and Performance Evaluation", Taiwan, January, 2004.
8. 國立中央大學，「土木工程設計手冊震度檢討」期末報告，民國 86 年 12 月。
9. 許書銘、袁葆宇、涂進德，「台北捷運工程新莊線 192 標明挖覆蓋地下結構設計之探討」，中工學會會刊，第 74 卷，第 7 期，民國 90 年 10 月。
10. 許書銘、袁葆宇、涂進德，「捷運工程地下車站結構二維模式與三維模式分析之探討」，中工學會會刊，第 75 卷，第 5 期，民國 91 年 10 月。
11. 許書銘，「台北捷運系統地下結構耐震設計之探討」，中工學會會刊，第 76 卷，第 6 期，民國 92 年 12 月。
12. Applied Technology Council, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete", ATC 40, Volume 1, 1996.