

捷運及鐵路工程地下結構物

設計地震力之研析

許書銘*

摘要

本文目的在說明捷運及鐵路工程地下結構物耐震規範中設計地震力，包括台北捷運、高雄捷運、桃園機場捷運、高雄地鐵等計畫的設計規範，並說明學術界與工程界在處理土壤與結構互制效應不同的看法。希望藉由本文的研析，工程師可以了解到各種設計規範關於地下結構物設計地震力的理念和來源，以及規範之間的合理性和差異性，以利於後續設計使用。

關鍵字：地下結構物、耐震規範、設計地震力、強制變位

一、前言

筆者參與國內捷運工程建設已有多年時間，包括台北捷運、高雄捷運及桃園機場捷運等工程的規劃設計、規範修訂及施工中服務。近年來亦參與高雄市區鐵路地下化工程，在修訂設計準則過程中，發現鐵路工程關於地下結構物耐震設計的內容大部分來自捷運工程，只是引用的數值略有不同。至於這些數值的來源為何，大小是否合理，要如何使用，尤其是會影響結構安全和土建造價的設計地震力，往往是業主和工程師最為關心的問題。由於國內尚未訂定完整的地下結構物設計規範，目前捷運局或鐵工局所使用的設計規範，有些內容截取自國外文獻，有些內容則為國內學術單位的研究成果；另一方面，制定規範屬於較上游的位階，對於工程師而言，通常較為陌生，有鑑於此，筆者認為有必要將該部分的設計理念，以及規範之間的合理性和差異性作一說

明，以利於工程師後續設計使用。

二、地震波及地震力之來源

地震發生時所釋放之能量，藉由土壤為介質，產生波動傳到地表，當波經過土壤時，土壤將因時間、位置不同而有不同的變形，地下之線形結構物（例如隧道）亦隨著土壤波動而變形。根據田堯彰和羅俊雄（民國 85 年）之研究報告顯示，對隧道影響最大的是：(a)引起隧道橫向斷面剪力變形之鉛直剪力波；以及(b)引起撓曲與軸向變形之 45 度入射水平剪力波。其中又以前者影響較大，該剪力變形可依地盤類別不同分兩種情況分析之。

(一) 不考慮土壤與結構互制效應

第一類地盤與第二類地盤，相對於隧道結構而言，較為堅硬，隧道將隨土壤變形而變形，可

* 中興工程顧問公司軌道工程一部工程師

忽略土壤與結構互制作用，強制隧道橫向剪力變形 γ 為地震自由場之土壤水平變形，亦即結構體與自由場土壤發生一致之變形。 γ 之大小可由非線性程式或公式 $\gamma = V_{\max}/C_s$ ，式中， V_{\max} 為地震之最大地表速度， C_s 為土壤剪力波速。 V_{\max} (m/sec) 得以公式 $V_{\max} = \alpha \cdot A$ 估算，式中， A 為地震之最大地表加速度(g)， α 值可依下列地盤分類決定之：

1. 第一類地盤(堅實地盤)， $\alpha = 0.9$ ；
2. 第二類地盤(普通地盤)， $\alpha = 1.2$ ；
3. 第三類地盤(軟弱地盤)， $\alpha = 1.5$ ；
4. 台北盆地區域， $\alpha = 2.0$ 。

地盤之分類，除台北盆地區域外，其餘依工址地層週期 TG 決定之。TG $\leq 0.2\text{sec}$ 者為第一類地盤(堅實地盤)； $0.2\text{sec} < TG \leq 0.6\text{sec}$ 者為第二類地盤(普通地盤)； $0.6\text{sec} < TG$ 者為第三類地盤(軟弱地盤)。

(二) 考慮土壤與結構互制效應

第三類地盤與台北盆地區域，相對於隧道結構而言較為軟弱，隧道可抵抗部分土壤變形，故需考慮土壤與結構互制作用，隧道橫向剪力變形 γ 之大小取決於結構體與土壤之相對剛度值，其數值可採用：(a)擬靜態土壤與結構分析，或是(b)動態土壤與結構分析求得。

根據前述觀念，堅硬土壤如第一類與第二類地盤，隧道變形將與自由場土壤變形一致；然而軟弱土壤如第三類地盤與台北盆地，隧道可抵抗部分土壤變形，此時需考慮土壤與結構互制作用，才不會過於保守。換言之，學術界認為只有在軟弱土壤時，才需考慮土壤與結構互制作用，在這種情況下隧道橫向剪力變形通常會等於或小於自由場土壤變形。

工程實務的作法則與學術界不太相同。由於捷運及鐵路工程地下結構物在強震下，尚缺乏確切之實測紀錄，因此對於地震力之處理，不管在

堅硬或軟弱土壤，均需考慮土壤與結構互制作用。根據各顧問公司的分析結果顯示，隧道橫向剪力變形有大於、也有小於自由場土壤變形，端視土層狀況和結構勁度之條件分析決定之。

三、耐震規範之設計地震力

研擬耐震規範之設計地震力，需考慮工址附近潛在震源區與活動斷層的地震潛勢可能引致之地震危害，進行地震危害度分析及相關耐震設計參數評估，做為結構物與附屬設備耐震之設計依據。所謂地震危害度分析是評估選定區域在未來某一定期間內，因地震而引致的地表震動程度，視評估對象一般以最大地表加速度 PGA 或其他足以反映地表震動的地震參數，例如 PGV、PGD、長週期加速度反應譜、短週期加速度反應譜等參數來表示。

結構物可以根據其重要性或基於損壞控制的考量，決定其結構壽命期間所要承受的地震風險，例如先決定幾個適當的超越機率，或將之轉換成回歸期，再由地震危害度曲線決定其設計地震。一般建築物採用 475 年回歸期設計地震，並需檢核在 2500 年回歸期地震作用下結構不可倒塌的性能；而捷運系統基於考量較高的耐震性能，採用 950 年回歸期之設計地震進行設計。

以台北捷運而言，耐震設計之考量主要針對結構物強度和使用性兩方面。在結構物強度需求：最大設計地震情況下，結構行為允許進入非彈性範圍，而結構本身具有之韌性能力應超越其韌性需求，亦即應具有足夠韌性來吸收塑性變形，且不喪失其承載靜定載重之能力，確保不發生脆性破壞且不形成破壞機構。在使用性需求：一般設計地震情況下，結構行為仍然在彈性範圍內，使捷運系統設施仍保持其運作功能。

此外，台北捷運設計初期進行過台北地區附近地震危害度分析，但是研究範圍並未包括台北

地區以外都會區，而且該研究距今已十餘年，在此期間台灣地區曾發生數次災害性地震，因此各都會區捷運工程在設計初期，亦做了若干地震危害度補充資料。本文將台北捷運、高雄捷運、桃園機場捷運、高雄地鐵等計畫，設計地震力相關條文摘錄整理如下，以進一步了解之間的合理性和差異性。

(一) 台北捷運

台北捷運系統承受地震應考量下列設計參數：

1. 最大設計地震水平地表加速度為 0.23g。
2. 一般設計地震水平地表加速度為 0.14g。
3. 自由場土壤水平剪力變形 γ ， $\gamma = V_{max}/C_s$ ，式中，最大水平地表速度 V_{max} (cm/sec) 依地盤分類如下：

(1) 第一類地盤（堅實地盤），

$$V_{max} = 30.77 \text{ cm/sec.}$$

(2) 第二類地盤（普通地盤），

$$V_{max} = 30.97 \text{ cm/sec.}$$

(3) 第三類地盤（軟弱地盤），

$$V_{max} = 53.6 \text{ cm/sec.}$$

台北捷運最初由 Penzien 等外籍顧問參照南加州捷運系統的設計規範而制定，設計初期最大設計地震水平地表加速度為 0.18g，一般設計地震水平地表加速度為 0.11g，但經過 921 地震後，已經將該兩項設計地震水平地表加速度予以調高。

(二) 高雄捷運

高雄捷運系統應考慮 A 類與 B 類兩種地震：

1. A 類地震即一般設計地震水平地表加速度為 0.14g。
2. B 類地震即最大設計地震水平地表加速度為 0.23g。

3. 有效剪力波速 (C_{se}) 於 A 類地震可採用 $C_{se}=1.0 C_s$ ，於 B 類地震可採用 $C_{se}=0.8 C_s$ 。

4. 自由場土壤水平剪力變形 γ ， $\gamma = I \cdot V_{max}/C_{se}$ ，式中，I 為用途係數，採用 1.2；正規化至 1g 之最大水平地表速度 V_{max} (cm/sec) 依地盤分類如下：

(1) 第一類地盤（堅實地盤），

$$V_{max} = 95.36 \text{ cm/sec.}$$

(2) 第二類地盤（普通地盤），

$$V_{max} = 85.09 \text{ cm/sec.}$$

(3) 第三類地盤（軟弱地盤），

$$V_{max} = 135.02 \text{ cm/sec.}$$

高雄捷運的地震危害度分析係根據羅俊雄（民國 85 年）之研究報告，與台北捷運相同，初期最大設計地震水平地表加速度為 0.18g，一般設計地震水平地表加速度為 0.11g，921 地震後亦已經將該兩項設計地震水平地表加速度予以調高。另外，最大水平地表速度在普通地盤時比在堅實地盤時小，是值得商榷的地方。

(三) 桃園機場捷運

桃園機場捷運系統承受地震應考量下列設計參數：

1. 台北盆地內最大設計地震水平地表加速度為 0.24g，台北盆地外為 0.2g。
2. 一般設計地震水平地表加速度為 0.14g。
3. 自由場土壤水平剪力變形 γ ， $\gamma = I \cdot V_{max}/C_{se}$ ，式中，I 為用途係數，採用 1.2；最大水平地表速度 V_{max} (cm/sec) 依地區分類如下：

(1) 台北盆地內

$$V_{max} = 47.0 \text{ cm/sec.}$$

(2) 台北盆地外（台北地區）

$$V_{max} = 30.0 \text{ cm/sec.}$$

(3) 台北盆地外（桃園地區）

$$V_{max} = 36.0 \text{ cm/sec.}$$

桃園機場捷運的地震危害度分析係根據簡文郁（民國 95 年）之研究報告，其中建議台北盆地內機場捷運線之設計 PGV，由 PGA 或 EPA 計算，其關係式如下式：

$$PGV = 9.5 \cdot \ln(PGA) - 16.0; \quad PGA \leq 161 \text{ cm/sec}^2 \\ = 0.2 \cdot PGA; \quad PGA > 161 \text{ cm/sec}^2$$

而台北盆地外機場捷運線之設計 PGV，由 PGA 或 EPA 採用線性關係計算， $PGV = \beta \cdot PGA$ ，式中， β 值可以保守採用 $\beta = 0.153$ ，PGV 單位為 m/sec，PGA 單位為 m/sec²。舉例而言，台北盆地內 $V_{max} = 0.2 \cdot 0.24 \cdot 9.8 = 0.470 \text{ m/sec}$ ，台北盆地內 $V_{max} = 0.153 \cdot 0.2 \cdot 9.8 = 0.300 \text{ m/sec}$ ，台北盆地外（桃園地區） $V_{max} = 0.153 \cdot 0.24 \cdot 9.8 = 0.360 \text{ m/sec}$ 。

（四）高雄地鐵

高雄地鐵系統承受地震應考量下列設計參數：

- 最大設計地震水平地表加速度為 0.23g。
- 一般設計地震水平地表加速度為 0.15g。
- 自由場土壤水平剪力變形 γ ， $\gamma = V_{max}/C_s$ ，式中，最大水平地表速度 V_{max} (cm/sec)依地盤分類如下：
 - (1)第一類地盤（堅實地盤）， $V_{max} = 24.9 \text{ cm/sec}$ 。
 - (2)第二類地盤（普通地盤）， $V_{max} = 33.2 \text{ cm/sec}$ 。
 - (3)第三類地盤（軟弱地盤）， $V_{max} = 41.4 \text{ cm/sec}$ 。

上述數值係參考田堯彰和羅俊雄（民國 85 年）之研究報告（關係式詳第二章），以及台北捷運和高雄捷運的耐震規範而制定，需要注意的是 V_{max} 已經隱含用途係數 I，I 採用 1.2，此外，一般設計地震水平地表加速度由 0.14g 調高為 0.15g。舉例而言，第一類地盤（堅實地盤），

$V_{max} = 0.9 \cdot 0.23 \cdot 1.2 = 0.249 \text{ m/sec}$ ，第二類地盤（普通地盤）， $V_{max} = 1.2 \cdot 0.23 \cdot 1.2 = 0.332 \text{ m/sec}$ ，第三類地盤（軟弱地盤）， $V_{max} = 1.5 \cdot 0.23 \cdot 1.2 = 0.414 \text{ m/sec}$ 。

（五）設計地震力比較

綜合比較台北捷運、高雄捷運、桃園機場捷運、高雄地鐵等計畫的設計規範，雖然條文內容接近，但是程度上略有差異；其中除了台北捷運外，其他三者均有考慮到用途係數，其原因應該是台北捷運制定較早，而後三者制定較晚，因此得以配合近年建築物和公路橋梁的耐震設計規範而修訂。另外，高雄捷運考慮到有效剪力波速的效應，算是較為詳細。

將上述各設計規範的設計參數代入式 $\gamma = I \cdot V_{max}/C_s$ (令 $C_s=1$)，得到的數值如表 1 所示，該數值大小可視為自由場土壤的最大水平地表速度，由於令 $C_s=1$ ，因此物理意義可代表各設計規範之自由場土壤最大水平剪力變形，亦可代表最大設計地震力，此設計參數涵蓋最大設計地震水平地表速度、用途係數及有效剪力波速的效應。比較表 1 的數值，以軟弱地盤而言，台北區域（包括桃園）的地震力略高於高雄地區。此外，高雄捷運在普通地盤的地震力略顯突兀，其他數值則均在可接受和可設計的範圍內。

表 1 各計畫的設計規範之自由場土壤最大水平剪力變形 (令 $C_s=1$)

$\gamma = I \cdot V_{max}/C_s$	台北捷運	高雄捷運	桃園機場捷運	高雄地鐵
第一類地盤 (堅實地盤)	30.77	32.90	----	24.90
第二類地盤 (普通地盤)	30.97	29.36	36	33.20
第三類地盤 (軟弱地盤)	53.60	46.58	56.40	41.40

四、結論

地震工程應用上在決定結構耐震設計地震時，為方便與地震危害度曲線之表示法結合，通常以某回歸期設計地震來表達對該結構物耐震設計的可靠度，例如一般建築物採用 475 年回歸期設計地震力，但是其真實意涵並無該結構物必須能抵抗未來 475 年內可能發生的最大地震的意思；而是在結構物壽命期間（50 年）內發生比設計地震大的地震的機率小於 10 %，如此小的機率可以確保結構耐震設計的可靠度指標與其他荷載條件（例如靜載加活載）的設計可靠度相當。對於重要結構物，考慮對其失敗的風險承受度較低而必須提高其可靠度要求，可以藉由以下幾種方式之一來達成，不必重複考慮：

1. 將設計地震力以一個用途係數來提高其設計地震力。
2. 採用較低超越機率的設計地震，例如將結構物壽命期間（50 年）內發生設計地震的機率降低為 5 %，相當於提高設計地震至 950 年。
3. 改變或增加載重組合的地震力係數。

原則上耐震規範朝此方向來修訂。目前國內地上建築物和公路橋梁已有完整的耐震設計規範，地下結構物由於土壤變因多，結構行為複雜，設計成果和實驗資料回饋有限，因此官方尚未訂定完整的耐震設計規範，盼藉由本文之研析可以給予工程界一點助益。

誌謝

筆者在參與修訂捷運及鐵路工程的設計規範期間，承蒙國家地震工程研究中心簡文郁博士，台北市政府捷運工程局陳俊宏課長、黃怡超工程

司，交通部高速鐵路工程局陳永毅副組長、吳國華主任工程司，交通部鐵路改建工程局王武俊組長、鄒廷祿簡派工程司，中興工程顧問公司林世勳經理、張景順工程師、林冠成工程師、陳啟川工程師、黃志誠工程師，提供諸多寶貴意見及建議，謹此表達萬分謝意。

參考文獻

- 台北市政府捷運工程局（民國 87 年）台北都會區捷運系統工程土木工程設計手冊（CEDM），中文版第十版
高雄市政府捷運工程局（民國 90 年）高雄都會區大眾捷運系統紅橘線路網土木工程設計規範
交通部高速鐵路工程局（民國 95 年）中正國際機場聯外捷運系統土建、車站及其他機電設備設計規範
交通部鐵路改建工程局（民國 96 年）高雄市區鐵路地下化計畫土木結構設計準則
羅俊雄（民國 82 年）高雄都會區捷運系統設計地震之研究，國家地震工程研究中心
田堯彰、羅俊雄（民國 85 年）電信與運輸系統之耐震安全評估與補強準則，國家地震工程研究中心
簡文郁（民國 95 年）高鐵局機場捷運線設計地震研究，國家地震工程研究中心
吳承林、許書銘、林冠成、陳冠州（民國 90 年）台北都會區捷運系統地下結構物分析及設計之自動化，中國工程師學會會刊，第 74 卷，第 5 期
許書銘、袁葆宇、涂進德（民國 90 年）台北捷運工程新莊線 192 標明挖覆蓋地下結構設計之探討，中國工程師學會會刊，第 74 卷，第 7 期
許書銘、袁葆宇、涂進德（民國 91 年）捷運工程地下車站結構二維模式與三維模式分析之探討，中國工程師學會會刊，第 75 卷，第 5 期
許書銘（民國 92 年）台北捷運系統地下結構耐震設計之探討，中國工程師學會會刊，第 76 卷，第 6 期
許書銘、黃怡超（民國 94 年）捷運工程地下結構版牆系統之耐震設計，捷運技術半年刊，第 33 期
許書銘、張景順、林世勳、陳俊宏（民國 95 年）地下結構物強制變位設計方法之改進，中興工程，第 90 期
許書銘、廖迪發、林世勳、陳俊宏（民國 96 年）連續壁與捷運地下車站之結構互制作用探討，中興工程，第 94 期