

第十一章 其他耐震相關規定

11.1 地震時極軟弱與可能液化地盤之耐震設計

11.1.1 通則

建築物工址位於下列二種土層時，應進行地震時之地盤穩定性評估，並據以折減其耐震設計用土壤參數值：

1. 極軟弱土層，在地震時可能導致其土壤強度大幅降低者。
2. 飽和砂土層，在地震時可能產生土壤液化或流動化者。

極軟弱土層弱化與砂土層液化之評估方法分別依 11.1.2 節與 11.1.3 節之規定辦理，建築物之耐震設計應考量地震時基礎地盤弱化與液化之影響。

解說：

極軟弱粘性土層及粉土層在地震作用下，將因承受反覆變形而造成剪力強度大幅降低，減少基礎的鉛直向承载力與水平向抵抗力。

疏鬆飽和砂質土層在地震作用下，將因土壤內的超額孔隙水壓增加，可能產生液化現象，導致建築物基礎鉛直向承载力與水平向抵抗力大幅降低，而發生沉陷、傾斜與水平位移。在水岸附近或傾斜地形處，因土壤液化作用地盤可能產生側向流動，建築物基礎會受到地盤流動化的作用。

因此建築物基礎之耐震設計應考慮基礎地盤受極軟弱土層弱化與砂土層液化的影響。建築物基礎地盤之土壤若發生液化，如果該建築物基礎設計未作適當的抗液化處理，可能造成建築物產生嚴重之沉陷或傾斜，譬如 1964 年日本新潟地震、1990 年菲律賓北呂宋地震、1995 年日本阪神地震、1999 年 921 集集大地震及 2016 年美濃地震均有此種建築物液化損壞案例。

11.1.2 耐震設計有關極軟弱土層之評估

距離地表面 3 公尺深度以內的粘土層或粉土層，由單軸壓縮試驗或現地試驗測定其單軸壓縮強度在 2 tf/m^2 以下之土層，即視為耐震設計上會弱化之極軟弱土層。

解說：

單軸壓縮強度在 2 tf/m^2 以下之粘土層或粉土層，在進行試驗時，其試體之成形都有困難，故在地震時，很難確保此類土層能提供之基礎承载力（文獻^[29]）。

11.1.3 砂土層之液化潛能評估

1. 應進行液化潛能評估之砂土層

沖積層之飽和砂土層，在地震時可能產生液化現象，應按第 2 項所述方法進行土壤液化潛能之評估。

2. 液化評估與檢核

土層液化與否，由抗液化安全係數 F_L 值決定之。 F_L 值小於 1.0 時，即判定該土層為液化土層。 F_L 依下式計算：

$$F_L = \frac{CRR}{CSR} \quad (11-1)$$

CRR ：土層之抗液化剪力強度比。

CSR ：地震引致土層之平均反覆剪應力比或尖峰剪應力比。

其中 CRR 與 CSR 之計算方法，可依據本條文之解說辦理。

3. 應分別檢核中小度地震(此時，一般工址與近斷層工址之地表水平加速度 $A = \frac{0.4S_{DS}}{4.2}g$ ，臺北盆地之地表加速度 $A = \frac{0.4S_{DS}}{3.5}g$)與設計地震(此時，地表加速度 $A = 0.4S_{DS}g$)。原則上僅針對用途係數 $I=1.5$ 之建築物，才須檢核最大考量地震(此時，地表加速度 $A = 0.4S_{MS}g$)作用時土壤發生液化之影響。

解說：

土壤液化潛能的評估須計算基地土壤之抗液化強度，要有詳細之地質鑽探與土壤試驗資料，以供推估土壤抗液化強度。依試驗方式，評估方法可分為室內試驗法與簡易評估法兩類，惟工程實務中常採用簡易評估法，如 SPT-N 法，CPT-qc 法及 V_s 法等。前兩類方法為工程上較常使用之方法，其中 SPT-N 簡易評估法有很多，但較常被採用者有 Seed et al.(1985), NCEER(2001), 日本道路協會(1996), Tokimatsu and Yoshimi(1983)等；而 CPT-qc 法則有 Robertson(2010), Olson(1997), Ku and Juang(2012)等。有關土壤液化的評估，上述方法均經長時間之發展與應用，原則上都具有可以參考應用之價值。

各種液化評估法都有其發展背景、基本資料庫、以及限制條件等，使用時應謹慎評估。長期以來，國內通常都採用 SPT-N 法，故以下列舉台、美、日三國代表性之方法，即雙曲線函數(Hyperbolic Function, HBF)液化評估法(黃俊鴻等人, 2012)、NCEER 法(Youd et al., 2001)、日本建築學會法(AIJ, 2001)與日本道路協會法(JRA, 1996)。

1. HBF 法(2012)

本方法主要係參考 Seed et al.(1985)發展簡易評估法之基本架構，利用地震時現地土壤發生液化與非液化之案例資料，用以界定土壤之抗液化強度。發展 HBF 評估法時所用之案例資料，除包含世界各國之案例三百多筆資料(Cetin, et al, 2000)外，更增加國內集集地震之案例三百多筆，迴歸分析時採用雙曲線函數(Hyperbolic Function, HBF)表示土壤之抗液化強度，故為一包含本土集集地震資料所發展出來之液化評估法(黃俊鴻等人, 2012)。其分析流程如圖 C11-1 所示。

a. 應進行液化潛能判定之砂土層

對於沖積層之飽和土層，符合以下條件時，應按第 b 項所述方法進行土壤液化潛能之評估。

- (1) 位於地表面下 20 公尺以內，且位於地下水位以下之飽和土層。
- (2) 塑性指數 I_p 小於 7 之土層。

b. 抗液化安全係數

液化潛能由抗液化安全係數 F_L 值決定之。 F_L 值小於 1.0 時，即判定該土層可能液化。

$$F_L = \frac{CRR}{CSR} \quad (C11-1)$$

其中，

F_L ：抗液化安全係數；

CRR ：土層之抗液化剪力強度比，見本節第 c 項；

CSR ：地震引致土層之平均反覆剪應力比，見本節第 d 項；

c. 土層之抗液化剪力強度比

土層之抗液化剪力強度比 CRR ，依下式計算：

$$CRR = CRR_{7.5} \times MSF \quad (C11-2)$$

$$CRR_{7.5} = 0.08 + \frac{0.0035 \times (N_1)_{60cs}}{1 - (N_1)_{60cs} / 39} \quad (C11-3)$$

$$MSF = \left(\frac{M_w}{7.5} \right)^{-1.8} \quad (C11-4)$$

$$(N_1)_{60cs} = K_s \times (N_1)_{60} \quad (C11-5)$$

$$(N_1)_{60} = C_N \times N_{60} \quad (C11-6)$$

$$C_N = \sqrt{\frac{P_a}{\sigma'_{v0}}} \leq 1.7 \quad (C11-7)$$

$$K_s = \begin{cases} 1.0 & FC \leq 10 \\ 1 + 0.07 \times \sqrt{FC - 10} & FC > 10 \end{cases} \quad (C11-8)$$

其中，

CRR ：土層之抗液化剪力強度比；

$CRR_{7.5}$ ：在地震矩規模 7.5 時土層之抗液化剪力強度比；

MSF ：規模修正因子；

M_w ：地震矩規模(見表 C11-1)；

N_{60} ：在鑽桿傳遞貫入能量比 60% 時，標準貫入試驗所得之 N 值；

P_a ：一大氣壓=9.8tf/m²；

$(N_1)_{60}$: 以有效覆土壓力 9.8 tf/m^2 等值換算求得之 N 值；
 $(N_1)_{60cs}$: 考慮土壤細料含量影響之修正 N 值；
 C_N : 有效覆土應力修正係數，宜以鑽探時水位計算有效覆土應力；
 K_s : 土壤細料影響之修正係數；
 FC : 土壤細粒含量(%), 為土壤在粒徑 $75\mu\text{m}$ 以下之通過重量百分率。

要計算上述之 N_{60} ，需有實際錘擊能量比之數據。對於有進行錘擊能量檢測之鑽孔，可依實際量測得到之錘擊能量比輸入計算；對於沒有進行錘擊能量檢測之鑽孔，依過去經驗顯示，原則上，自由落錘可採用 70% 能量比輸入，而拉索式落錘可採用 60% 能量比輸入。

d. 地震引致土層之平均反覆剪應力比

土壤受地震力作用所引致的平均反覆剪應力比 CSR ，依下式計算：

$$CSR = 0.65 \times \frac{A}{g} \times \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \times r_d \quad (C11-9)$$

$$r_d = \begin{cases} 1.0 - 0.01 z & z \leq 10\text{m} \\ 1.2 - 0.03 z & 10\text{m} < z \leq 20\text{m} \end{cases} \quad (C11-10)$$

$$\sigma_{v0} = \{ r_{t1} h_w + r_{t2} (z - h_w) \} \quad (C11-11)$$

$$\sigma'_{v0} = \{ r_{t1} h_w + r'_{t2} (z - h_w) \} \quad (C11-12)$$

其中，

A : 尖峰水平地表加速度(g)；
 g : 重力加速度；
 σ_{v0} : 垂直總覆土壓力 (tf/m^2)；
 σ'_{v0} : 垂直有效覆土壓力 (tf/m^2)；
 r_d : 地震時剪應力沿地層深度方向之折減係數；
 z : 評估土層距離地表面之深度 (m)；
 h_w : 地下水位之深度 (m)；
 r_{t1} : 地下水位面上方之土壤單位體積重 (tf/m^3)；
 r_{t2} : 地下水位面下方之土壤單位體積重 (tf/m^3)；
 r'_{t2} : 地下水位面下方之土壤有效單位體積重 (tf/m^3)。

2. NCEER 法(2001)

NCEER 法(2001)是源自於美國 H.B. Seed 教授所提出之簡易經驗法(1971,1979,1983,1985)，Seed 簡易經驗評估法早年蒐集世界上許多規模 $M \geq 7.5$ 大地震時發生液化及非液化情況之案例，估計地震時現地土壤所受之反覆剪應力比，及其與 SPT- N 值之關係，再根據液化及非液化案例之分布情形，選定區分發生液化與非液化案例之臨界曲線，將其視為土壤之抗液化強度。

針對於不同地震規模，則利用規模與振動作用周數之經驗關係，建立了不同地震規模之抗液化強度曲線，爾後亦加入考慮細料含量對抗液化強度之貢獻。如此，即可直接利用現地 SPT-N 值評估地層在不同地震規模作用下之液化潛能，在使用上甚為簡便。此法歷經多年之改進，於 1997 年美國 NCEER 研討會出版之論文集(Youd and Idriss,1997)中，將 Seed 簡易經驗評估法所需圖表，均進行回歸加以公式化，以便撰寫計算程式。該分析流程再經美國土壤液化專家於研討會中討論後，由 Youd 等人(2001)整理會議結論，提出 NCEER 法(2001)。

NCEER 法(2001)廣泛應用於歐美等國家，在我國早期亦採用 Seed (1985)之方法，為工程師較熟悉之液化評估方法。其分析流程如圖 C11-2 所示。

a. 抗液化安全係數

液化潛能由抗液化安全係數 F_L 值決定之。 F_L 值小於 1.0 時，即判定該土層可能液化。

$$F_L = \frac{CRR}{CSR} \quad (C11-13)$$

其中，

F_L ：抗液化安全係數；

CRR ：土層之抗液化剪力強度比，見本節第 b 項；

CSR ：地震引致土層之平均反覆剪應力比，見本節第 c 項；

b. 土層之抗液化剪力強度比

土層之抗液化剪力強度比 CRR ，依下式計算：

$$CRR = CRR_{7.5} \times MSF \quad (C11-14)$$

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - x} + \frac{x}{135} + \frac{50}{[10x + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (C11-15)$$

$$x = (N_1)_{60cs}$$

$$MSF = \left(\frac{M_w}{7.5} \right)^{-2.56} \quad (C11-16)$$

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (C11-17)$$

$$(N_1)_{60} = C_N \times N_{60} \quad (C11-18)$$

$$C_N = \sqrt{\frac{P_a}{\sigma'_{v0}}} \leq 1.7 \quad (C11-19)$$

$$\alpha = \begin{cases} 0 & \text{當 } FC \leq 5 \\ EXP[1.76 - (190 / FC^2)] & \text{當 } 5 < FC \leq 35 \\ 5.0 & \text{當 } 35 < FC \end{cases} \quad (C11-20)$$

$$\beta = \begin{cases} 1.0 & \text{當 } FC \leq 5 \\ \left[0.99 + (FC^{1.5} / 1000) \right] & \text{當 } 5 < FC \leq 35 \\ 1.2 & \text{當 } 35 < FC \end{cases} \quad (C11-21)$$

其中，

CRR ：土層之抗液化剪力強度比；

$CRR_{7.5}$ ：在地震矩規模 7.5 時土層之抗液化剪力強度比；

MSF ：規模修正因子；

M_w ：地震矩規模(見表 C11-1)；

N_{60} ：在鑽桿傳遞貫入能量比 60%時，標準貫入試驗所得之 N 值；

P_a ：一大氣壓=9.8tf/m²；

$(N_1)_{60}$ ：以有效覆土壓力 9.8 tf/m² 等值換算求得之 N 值；

$(N_1)_{60cs}$ ：考慮土壤細料含量影響之修正 N 值；

C_N ：有效覆土應力修正係數，宜以鑽探時水位計算有效覆土應力；

α 及 β ：土壤細料影響之修正係數；

FC ：土壤細粒含量(%), 為土壤在粒徑 75 μ m 以下之通過重量百分率。

c. 地震引致土層之平均反覆剪應力比

土壤受地震力作用所引致的平均反覆剪應力比 CSR ，依下式計算：

$$CSR = 0.65 \times \frac{A}{g} \times \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \times r_d \quad (C11-22)$$

$$r_d = \frac{(1 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5})}{(1 - 0.4177z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.00121z^2)} \quad (C11-23)$$

$$\sigma_{v0} = \{ r_{t1} h_w + r_{t2} (z - h_w) \} \quad (C11-24)$$

$$\sigma'_{v0} = \{ r_{t1} h_w + r'_{t2} (z - h_w) \} \quad (C11-25)$$

其中，

A ：尖峰水平地表加速度(g)；

g ：重力加速度；

σ_{v0} ：垂直總覆土壓力 (tf/m²)；

σ'_{v0} ：垂直有效覆土壓力 (tf/m²)；

r_d ：地震時剪應力沿地層深度方向之折減係數；

z ：評估土層距離地表面之深度 (m)；

h_w ：地下水位之深度 (m)；

r_{t1} ：地下水位面上方之土壤單位體積重 (tf/m³)；

r_{t2} ：地下水位面下方之土壤單位體積重 (tf/m³)；

r'_{t2} ：地下水位面下方之土壤有效單位體積重 (tf/m³)。

3. AIJ 法(2001)

此方法主要係根據東京工業大學 Tokimatsu 與 Yoshimi 教授所提出之方法

(1983)，略經修改後已被日本建築學會(Architecture Institute of Japan, AIJ, 2001)納為設計規範。Tokimatsu 與 Yoshimi(1983)方法係根據日本地震液化案例及綜合現地冰凍土樣之液化試驗結果發展而成，有關細料含量對抗液化強度方面之考量相當詳盡，細料影響之參數係採用土壤過 200# 篩之含量 FC(%)；此外，本法亦將地震規模 M 之影響直接併入地震引致地盤剪應力比之計算式。其分析流程如圖 C11-3 所示。

a. 應進行液化潛能判定之砂土層

對於沖積層之飽和土層，符合以下條件時，應按第 b 項所述方法進行土壤液化之評估。

- (1) 位於地表面下 20 公尺以內，細料含量 < 35% 之飽和沖積砂質土層。
- (2) 細料含量 > 35%，其黏土含量 < 15% 或塑性指數 $I_p < 15$ 之回填土層。

b. 抗液化安全係數

液化潛能由抗液化安全係數 F_L 值決定之。 F_L 值小於 1.0 時，即判定該土層可能液化。

$$F_L = \frac{CRR}{CSR} \quad (C11-26)$$

其中，

F_L ：抗液化安全係數；

CRR ：土層之抗液化剪力強度比，見本節第 c 項；

CSR ：地震引致土層之平均反覆剪應力比，見本節第 d 項；

c. 土層之抗液化剪力強度比

土層之抗液化剪力強度比 CRR ，依圖 C11-3 評估：

$$N_a = (N_1)_{72} + \Delta N_f \quad (C11-27)$$

$$(N_1)_{72} = C_N \times N_{72} \quad (C11-28)$$

$$C_N = \sqrt{\frac{P_a}{\sigma'_{v0}}} \leq 1.7 \quad (C11-29)$$

$$\Delta N_f = \begin{cases} 0 & \text{當 } FC \leq 5 \\ 1.2 \times (FC - 5) & \text{當 } 5 < FC \leq 10 \\ 6 + 0.2 \times (FC - 10) & \text{當 } 10 < FC \leq 20 \\ 8 + 0.1 \times (FC - 20) & \text{當 } 20 < FC \leq 50 \\ 11 & \text{當 } 50 < FC \end{cases} \quad (C11-30)$$

其中，

CRR ：土層之抗液化剪力強度比；

N_{72} ：在鑽桿傳遞貫入能量比 72% 時，標準貫入試驗所得之 N 值；

P_a ：一大氣壓 = 9.8 tf/m²；

$(N_1)_{72}$ ：以有效覆土壓力 9.8 tf/m^2 等值換算求得之 N 值；
 N_a ：考慮土壤細料含量影響之修正 N 值；
 C_N ：有效覆土應力修正係數，宜以鑽探時水位計算有效覆土應力；
 ΔN_f ：土壤細料影響之增加 N 值；
 FC ：土壤細粒含量(%)，為土壤在粒徑 $75\mu\text{m}$ 以下之通過重量百分率。

要計算上述之 N_{72} ，需有實際錘擊能量比之數據。對有進行錘擊能量檢測之鑽孔，可依實際量測到之錘擊能量比輸入計算；沒有進行錘擊能量檢測之鑽孔，依過去經驗顯示，原則上，自由落錘可採用 70% 能量比輸入，拉索式落錘可採用 60% 能量比輸入。

d. 地震引致土層之平均反覆剪應力比

土壤受地震力作用所引致的平均反覆剪應力比 CSR ，依下式計算：

$$CSR = 0.1(M_w - 1) \frac{A \sigma_{v0}}{g \sigma'_{v0}} r_d \quad (\text{C11-31})$$

$$r_d = 1 - 0.015z \quad (\text{C11-32})$$

$$\sigma_{v0} = \{ r_{t1} h_w + r_{t2} (z - h_w) \} \quad (\text{C11-33})$$

$$\sigma'_{v0} = \{ r_{t1} h_w + r'_{t2} (z - h_w) \} \quad (\text{C11-34})$$

其中，

M_w ：地震矩規模(見表 C11-1)；
 A ：尖峰水平地表加速度(g)；
 g ：重力加速度；
 σ_{v0} ：垂直總覆土壓力 (tf/m^2)；
 σ'_{v0} ：垂直有效覆土壓力 (tf/m^2)；
 r_d ：地震時剪應力沿地層深度方向之折減係數；
 z ：評估土層距離地表面之深度 (m)；
 h_w ：地下水位之深度 (m)；
 r_{t1} ：地下水位面上方之土壤單位體積重 (tf/m^3)；
 r_{t2} ：地下水位面下方之土壤單位體積重 (tf/m^3)；
 r'_{t2} ：地下水位面下方之土壤有效單位體積重 (tf/m^3)。

4. JRA 法(1996)

阪神地震後，日本道路協會將該次地震液化經驗與及因應震度大幅提高等因素檢討過去 JRA(1990)之土壤液化判定方法，包括重新探討需要進行液化評估之土壤種類，直下型近震及板塊型遠震之地震力，修訂抗液化強度的計算方法等。此方法稍微改善過去低估高 N 值土壤抗液化強度之缺點，在考慮細料對抗液化強度之影響，改以細料含量 $FC(\%)$ 為參數進行評估。其分析流程如圖 C11-4 所示。此法與上述其他方法最大的差異為不考慮地動延時的影響(即

地震規模的影響)，以及使用剪應力比之尖峰值計算安全係數，使用時須特別注意。

a. 應進行液化潛能判定之砂土層

符合以下所有三項條件的沖積層之飽和砂土層，在地震時可能液化現象，應按第 b 項所述方法進行土壤液化之判定。

- (1) 地表面下 20 公尺以內之飽和砂土層，且地下水位在地表面 10 公尺以內時。
- (2) 細粒土壤含有率 FC 在 35% 以下，或 FC 超過 35%，塑性指數 I_p 在 15 以下之土層。
- (3) 平均粒徑 D_{50} 在 10mm 以下，且有效粒徑 D_{10} 在 1mm 以下之土層

b. 抗液化安全係數

液化潛能由抗液化安全係數 F_L 值決定之。 F_L 值小於 1.0 時，即判定該土層可能液化。

$$F_L = \frac{CRR}{CSR} \quad (C11-35)$$

其中，

F_L ：抗液化安全係數；

CRR ：土層之抗液化剪力強度比，見本節第 c 項；

CSR ：地震引致土層之尖峰剪應力比，見本節第 d 項；

c. 土層之抗液化剪力強度比

土層之抗液化剪力強度比依下式評估：

$$CRR = \begin{cases} 0.0882\sqrt{N_a/1.7} & (N_a < 14) \\ 0.0882\sqrt{N_a/1.7} + 1.6 \times 10^{-6} \times (N_a - 14)^{4.5} & (14 \leq N_a) \end{cases} \quad (C11-36)$$

其中，

砂質土

$$N_a = C_1(N_1)_{72} + C_2 \quad (C11-37)$$

$$(N_1)_{72} = 17 \times \frac{N_{72}}{(\sigma'_{v0} + 7)} \quad (C11-38)$$

$$C_1 = \begin{cases} 1 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC + 40)/50 & (10\% \leq FC < 60\%) \\ FC/20 - 1 & (60\% \leq FC) \end{cases} \quad (C11-39)$$

$$C_2 = \begin{cases} 0 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC - 10)/18 & (10\% \leq FC) \end{cases} \quad (C11-40)$$

礫質土

$$N_a = \{1 - 0.36 \log_{10}(D_{50}/2)\}(N_1)_{72} \quad (C11-41)$$

其中，

CRR ：土層之抗液化剪力強度比。

N_{72} ：在鑽桿傳遞貫入能量比 72% 時，標準貫入試驗所得之 N 值；

$(N_1)_{72}$ ：以有效覆土壓力 9.8 tf/m^2 等值換算求得之 N 值；

σ'_{v0} ：垂直有效覆土壓力 (tf/m^2)，宜以鑽探時水位時之有效覆土應力；

N_a ：考慮土壤粒度影響之修正 N 值。

C_1, C_2 ：與細粒土壤含有率相關之 N 值修正係數。

要計算上述之 N_{72} ，需有實際錘擊能量比之數據。對有進行錘擊能量檢測之鑽孔，可依實際量測到之錘擊能量比輸入計算；沒有進行錘擊能量檢測之鑽孔，依過去經驗顯示，原則上，自由落錘可採用 70% 能量比輸入，拉索式落錘可採用 60% 能量比輸入。

d. 地震引致土層之尖峰剪應力比

土壤受地震力作用所引致的尖峰剪應力比 CSR ，依下式計算：

$$CSR = r_d \frac{A}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \quad (C11-42)$$

$$r_d = 1 - 0.015z \quad (C11-43)$$

$$\sigma_{v0} = \{ r_{t1} h_w + r_{t2} (z - h_w) \} \quad (C11-44)$$

$$\sigma'_{v0} = \{ r_{t1} h_w + r'_{t2} (z - h_w) \} \quad (C11-45)$$

其中，

A ：尖峰水平地表加速度(g)；

g ：重力加速度；

σ_{v0} ：垂直總覆土壓力 (tf/m^2)；

σ'_{v0} ：垂直有效覆土壓力 (tf/m^2)；

r_d ：地震時剪應力沿地層深度方向之折減係數；

z ：評估土層距離地表面之深度 (m)；

h_w ：地下水位之深度 (m)。

r_{t1} ：地下水位面上方之土壤單位體積重 (tf/m^3)；

r_{t2} ：地下水位面下方之土壤單位體積重 (tf/m^3)；

r'_{t2} ：地下水位面下方之土壤有效單位體積重 (tf/m^3)。

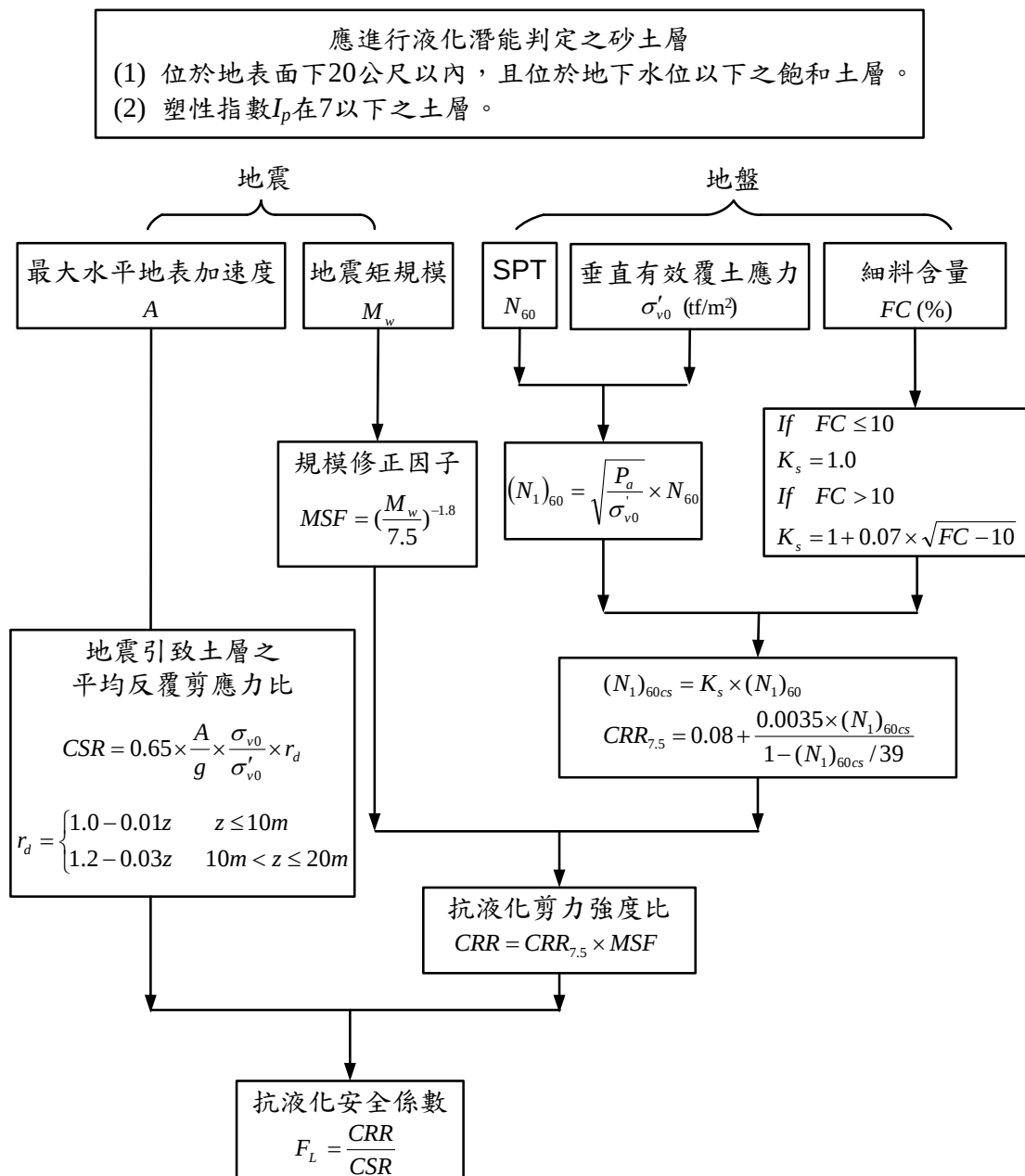


圖 C11-1 雙曲線函數(HBF)液化評估法之計算流程

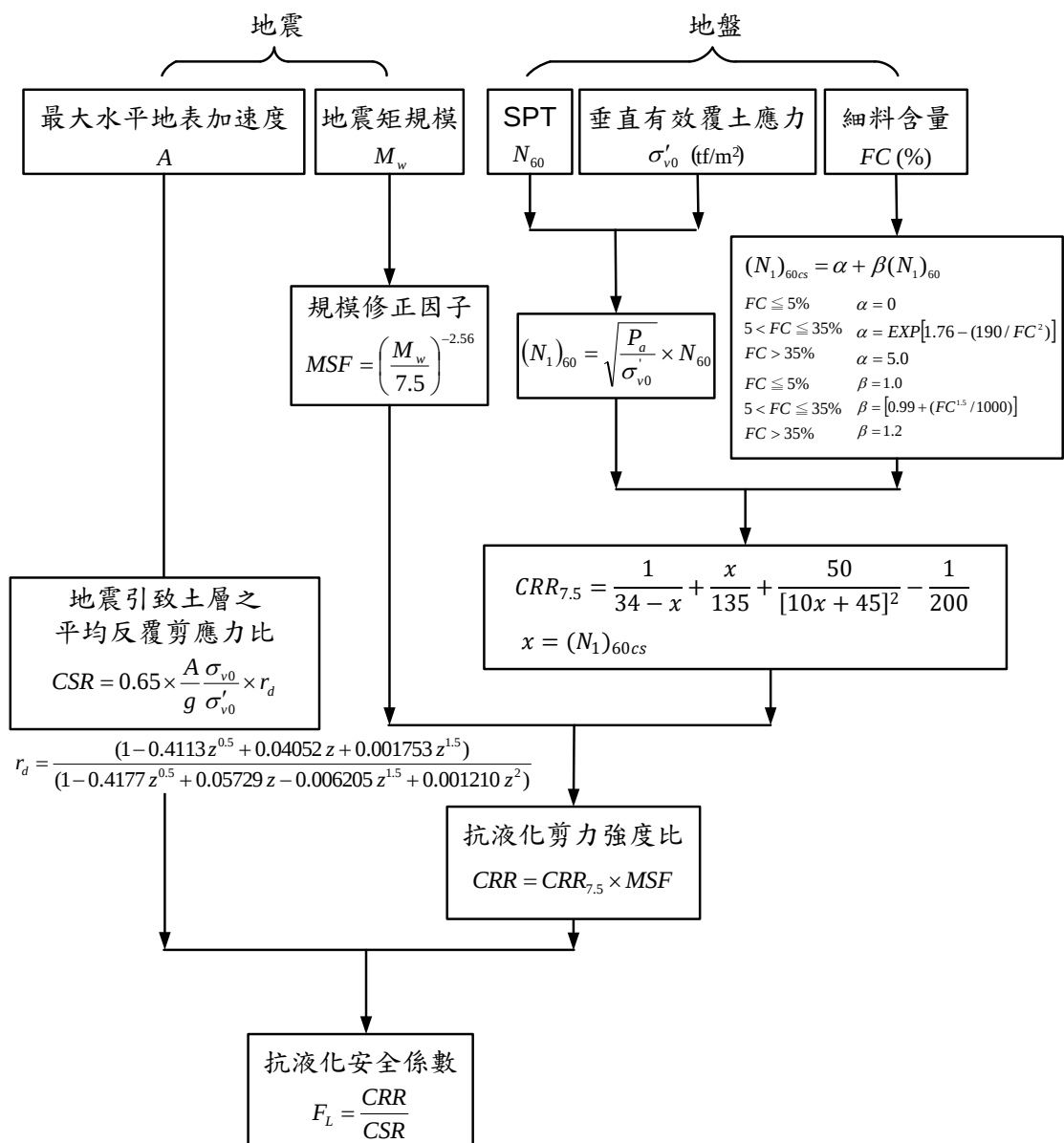
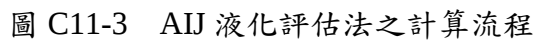


圖 C11-2 NCEER 液化評估法之計算流程

- (1) 位於地表面下20公尺以內，細料含量 $<35\%$ 之飽和沖積砂質土層。
- (2) 細料含量 $>35\%$ ，其黏土含量 $<15\%$ 或塑性指數 $I_p < 15$ 之回填土層。



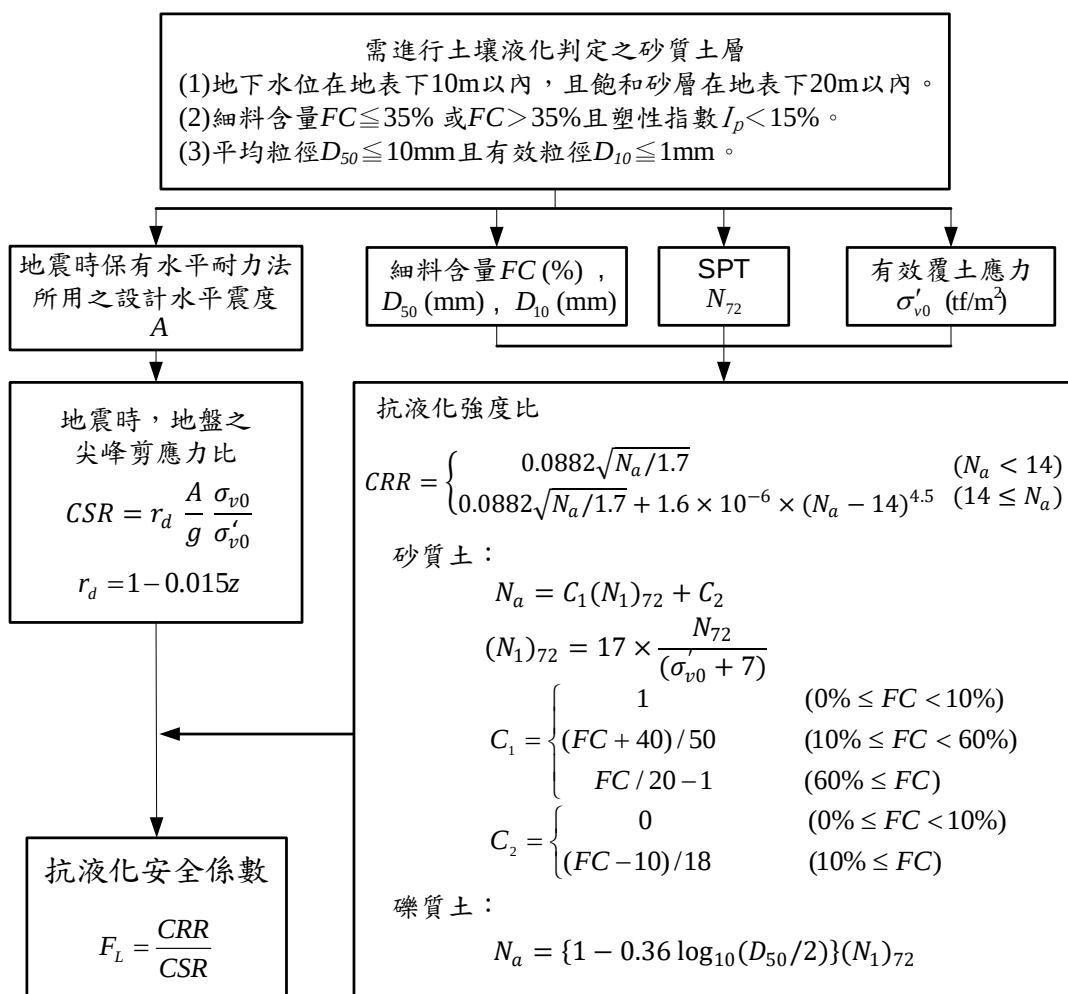


圖 C11-4 JRA 液化評估法之計算流程

在計算地震引致之平均反覆剪應力比或土壤抗液化強度比時，應考量地震規模的修正因子如式(C11-2)，也就是地震延時對土壤液化的影響，通常地震規模越大，其振動延時越長，就容易發生土壤液化。對應三級地震，土壤液化評估用之地震規模建議可參考附表 C11-1，此表係根據國家地震工程研究中心所進行地震危害度分析之結果，藉由參數拆解識別發生機率最大之地震所對應之地震規模，但為簡化起見，本表係以縣市為單位作分區，再綜合考慮歷史地震事件，地區土壤液化的可能性及其影響等因素所研訂。表 C11-1 之地震規模係根據發生機率之觀點所制定，並非該地區之最大地震規模，若為保守計，設計者亦可選取該地區之最大地震規模，藉以進行液化評估，惟不得小於表 C11-1 建議之規模。

表 C11-1 土壤液化潛能評估地震規模修正因子使用之地震規模 M_w 分區

縣、市	對應中小度地震之地震規模	對應設計地震之地震規模	對應最大考量地震之地震規模
基隆市、新北市、臺北市、宜蘭縣、花蓮縣、台東縣	7.1	7.3	7.5
桃園市、臺中市、彰化縣、南投縣、雲林縣、嘉義縣市、臺南市、高雄市	6.9	7.1	7.3
新竹縣市、苗栗縣、屏東縣	6.7	6.9	7.1
澎湖縣、金門地區、馬祖地區	6.5	6.7	6.9

- 由於液化潛能評估係在特定地震條件（中小度地震、設計地震及最大考量地震）下評估飽和砂土層發生液化之潛勢，潛勢並不會隨建築物重要性而不同，故條文中之地表水平加速度不須考量建築物之用途係數 I 值。

11.1.4 土壤參數折減之土層及其處理

- 依 11.1.2 節評估為極軟弱之粘土層或粉土層者，耐震設計時其土壤參數應視為零。
- 依 11.1.3 節評估可能液化之砂土層，應折減其耐震設計用土壤參數。
- 土壤參數在耐震設計上為零或經折減之土層，其全部重量仍應視為其下方土層之載重。

解說：

- 依據過去的經驗，地震時極軟弱粘土層及粉土層之剪力強度與承載能力並不可靠，故耐震設計時，將其土壤參數視為零。
- 液化土壤之參數折減

對於液化土層之參數折減，國內以往大都採用日本道路協會「道路橋示方書・同解說，V 耐震設計編」(1996)之折減係數進行設計，惟該規範對液化土層殘餘強度之折減程度不大，而美日與國內學者之研究與試驗室模擬試驗結果均顯示液化土壤之殘餘強度其實很小，因此本規範以下建議改採用日本建築學會「建築基礎構造設計指針」(1988, 2001)之液化折減參數進行設計，比較保守合宜。茲說明如下：

(a) 液化土壤之垂直阻抗

土壤液化發生後，由於液化土壤之剪力強度很小，因此埋置深度較淺之獨立基腳與地梁式基礎不宜配置於液化潛勢高之地基土壤上。建築物若採用較大型具地下室之筏式基礎、版式基礎、或具地下室與地下連續壁共構之基礎等，都具有較高之抗液化能力，局部土壤發生液化現象對大型基礎之影響通常較小，不致於發生嚴重災害，仍可採用，惟仍須審慎檢核建築物於土壤液化後與周圍地盤的相對沉陷量，以減少維生管線損害可能的影響。

對於樁基礎、沉箱等深基礎，若設置於液化土層中，土壤發生液化時，其周邊土層之摩擦強度將減為很小，無法提供有效之支承能力；因此，樁基礎與沉箱基礎必須貫穿上部液化土層，埋置一定長度於底部非液化土層，以確保其承載功能。

(b) 液化土壤之側向阻抗

關於液化土壤之側向阻抗，目前相關研究資料尚不充足。依據日本液化地區建築物災損之經驗，日本建築學會「建築基礎構造設計指針」(1988年)建議，對評估可能產生液化之土壤，應折減其耐震設計用之土壤參數。此處所指之土壤參數為土壤彈簧模式中之側向地盤反力係數(k_{hl})與側向地盤極限反力(p_{yl})，其折減方式分別如下兩式所示：

$$k_{hl} = \beta k_{h0} \cdot y_r^{-1/2} \quad (C11-35)$$

$$p_{yl} = \alpha p_{y0} \quad (C11-36)$$

其中，

k_{hl} ：土壤液化時之側向地盤反力係數(t/m^3)；

β ：地盤反力係數之折減係數；

k_{h0} ：土壤沒有液化時，在側向變位 1cm 下之側向地盤反力係數(t/m^3)；

y_r ：側向變位(cm)；

p_{yl} ：土壤液化時之地盤極限反力(t/m^2)；

α ：地盤極限反力之折減係數；

p_{y0} ：土壤沒有液化之地盤極限反力(t/m^2)；

在土壤沒有液化或軟化條件下，折減係數 $\alpha=\beta=1$ 。地震時土壤若發生液化，假設地盤反力係數與地盤極限反力的折減程度相同，則 $\alpha=\beta=D_E$ ，土壤參數折減示意如圖 C11-5 所示。參考日本建築學會(1988)建議之折減係數 D_E ，經調整修正後如表 C11-2 所示。

表 C11-2 之折減係數依據抗液化安全係數、土層深度與 N 值大小而變化。抗液化安全係數較低，表示液化程度較為嚴重，因此折減程度較大；考量深度在 10 公尺以下土層產生完全液化之案例很少，且其覆土壓力較大，土壤液化之弱化程度較低，故其折減程度較小；對於 N 值較大的土壤，因其較為緊密，雖然地震時會瞬時液化(有效應力為零)，但因剪動膨

脹效應，孔隙水壓又會降低，剪力強度又會恢復，因此在反覆剪應力作用下僅會發生累積變形，但不會完全喪失強度，因此其折減程度較小。

因為過去規範以抗液化安全係數之大小選擇折減係數的方式，在學理上有很大的爭議。 F_L 值小於 1.0 時，即發生液化，土層幾無阻抗， F_L 值再小，也是液化狀態。因此液化土層的變形程度主要跟土壤的剪脹特性以及液化狀態的持續時間有關。液化持續時間無法以簡易法評估，因此若以擬靜態分析方法進行耐震補強設計，應該主要與液化土層的緊密程度(剪脹特性不同)有關。依據 Ashford et al. (PEER Report 2011/04)整理前人對液化折減係數之試驗結果，繪成液化折減係數與乾淨砂土 $(N_1)_{60}$ 之關係如圖 C11-6 所示。其中，日本建築學會所建議液化折減係數曲線，仍然高於各國研究之試驗值，試驗所得之折減係數在 0.2 以下，大部分小於 0.1，甚至為 0，觀察圖中之折減係數 D_E 似乎隨 $(N_1)_{60}$ 有略為增加之趨勢，可以經驗公式表示其平均關係，此經驗公式亦可作為選擇設計折減係數之用。

3. 對土壤參數折減之液化土層，可不考慮其動態土壓與水壓作用；液化土壤仍有重力作用，其全部重量仍應視為其下方土層之載重。

表 C11-2 土壤參數之折減係數 D_E

F_L 之範圍	距地表面之深度 z (m)	$(N_1)_{60cs} \leq 5$	$5 < (N_1)_{60cs} \leq 10$	$10 < (N_1)_{60cs} \leq 20$	$20 < (N_1)_{60cs}$
$F_L \leq 0.5$	$0 \leq z \leq 10$	0	0	0.05	0.1
	$10 < z \leq 20$	0	0.05	0.1	0.2
$0.5 < F_L \leq 0.75$	$0 \leq z \leq 10$	0	0.05	0.1	0.2
	$10 < z \leq 20$	0.05	0.1	0.2	0.5
$0.75 < F_L \leq 1$	$0 \leq z \leq 10$	0.05	0.1	0.2	0.5
	$10 < z \leq 20$	0.1	0.2	0.5	1.0

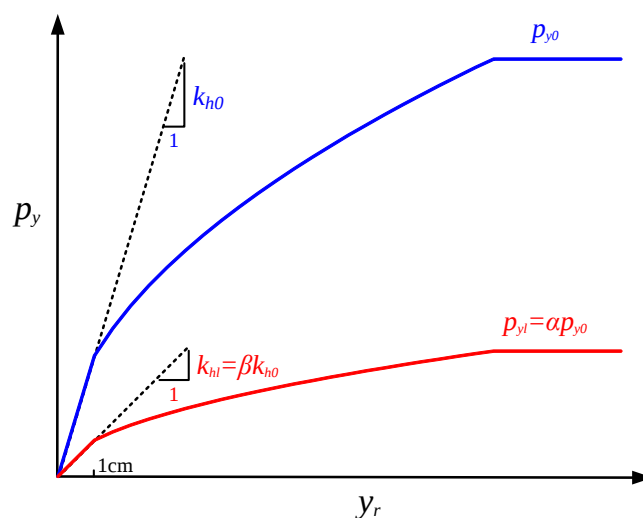


圖 C11-5 土壤參數折減示意圖

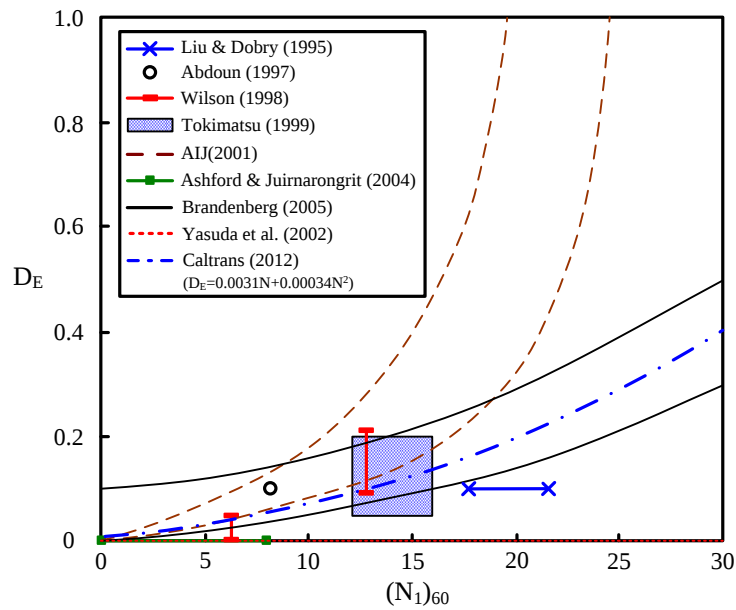


圖 C11-6 乾淨砂土液化折減係數與 $(N_1)_{60}$ 之關係 (修改自 Ashford et al., 2011)

11.1.5 經評估可能為極軟弱土層或土壤液化時之耐震設計

1. 依 11.1.2 節評估為極軟弱土層或依 11.1.3 節評估可能液化之砂土層者，應依 11.1.4 節之規定折減耐震設計用土壤參數。
2. 在中小度地震時，工址不得有液化之可能，即抗液化安全係數 F_L 值不得小於 1.0。在設計地震與最大考量地震時，容許發生土壤液化，但建築物應採用適當之基礎型式，並檢核液化影響之安全性與功能性，必要時得採用地盤改良之對策。
3. 進行耐震設計時，亦應同時考慮土層未產生液化或弱化之情況，並採用較為嚴格的結果作為耐震設計之依據。

解說：

1. 經評估為極軟弱土層或可能液化之砂土層者，應依 11.1.4 節之規定採用折減後之土壤參數進行耐震設計，以確保建築物受地震作用時之安全性與功能性。
2. 中小度地震的發生頻度很高，因此工址之基礎地盤不得發生液化，以免建築物經常遭遇土壤液化的危害。對於建築物設計年限中，很少發生之設計地震與最大考量地震，則容許發生土壤液化，以避免過於保守之耐震設計。惟須採用適當的基礎型式(如地下室筏式基礎、樁基礎與沉箱基礎等)，以滿足液化影響之安全性與功能性。如採用深基礎亦無法達到設計需求，必要時可採用較昂貴的地盤改良工法使地盤不會發生液化。
3. 建築物位於地盤有可能液化或弱化土層工址之耐震設計，應同時考慮當地盤有產生與未產生液化或弱化之兩種情況，進行耐震分析與設計，取較大的受力情況作為設計之依據。

11.2 施工中地震之考慮

施工中結構體之支撐及臨時結構物亦應考慮其耐震性，惟設計之回歸期可較短。此外，施工中遭遇較大地震後，應檢核建築物是否超過彈性限度。

解說：

建築物施工中所使用的支撐、假設工程等，亦應考慮其耐震性，惟因此些臨時結構物使用壽命較短，可依其使用壽命內超越機率仍為 10% 為準，求出設計地震的回歸期，並據以求得工址水平加速度係數來設計。

建築物各個施工階段若均要檢核耐震安全性，實在不堪其煩，也沒有必要。一般施工中的建築物，因載重有限，其耐震性應較無問題，因此採用事後檢核的方式，在遭遇較大地震後，依實際地震大小檢核並檢查結構體當時之反應是否在彈性限內，以使建築物完工後沒有任何損傷。如檢核後發現超過彈性限，應進行適當的補強措施。至於地震後施工中建築物安全性檢核之辦法由當地主管建築機關訂定之。

11.3 地震儀之裝置

主管建築機關得依地震測報主管機關或地震研究機構或建築研究機構之請，規定建築業主於建築物設計建造時，應配合留出適當空間，供地震測報主管機關或地震研究機構或建築研究機構設置地震記錄儀，並於建築物使用時保管之，地震後由地震測報主管機關或地震研究機構或建築研究機構收集紀錄存查。興建完成之建築物需要設置地震儀者，得依照前項規定辦理。

解說：

在適當的建築物上裝置地震儀，量測地震時建築物之反應及其地震輸入，並進行研究，往往對提昇建築物耐震分析與設計有極大的幫助。本節之規定除使今後在建築物上裝置地震儀有所根據外，並明示業主與地震儀裝置機關之責任關係。