

橋梁結構構材補強設計與評估及補強 審查要點

主講人：蔡益超教授
國立台灣大學土木系教授

1

內容

- ◆前言
- ◆橋柱耐震補強
- ◆橋梁耐震能力評估及補強審查要點
- ◆結論

2

一、前言

1.1 橋梁耐震能力評估與補強之意義

1.2 既有橋梁應達到的耐震性能目標

1.3 為達到耐震性能目標所需補強之韌性容量 $R_{補}$

3

1.2 既有橋梁應達到的耐震性能目標

表1 一般橋梁（公路橋梁耐震設計規範 I = 1.0）之性能目標

地震等級	採用之設計規範版本		
	84及89年版	49及76年版	49年版以前
中度地震	PL3	PL3	PL3
設計地震	PL2	PL1	PL0

表2 重要橋梁（公路橋梁耐震設計規範 I = 1.2）之性能目標

地震等級	採用之設計規範版本		
	84及89年版	49及76年版	49年版以前
中度地震	PL3	PL3	PL3
設計地震	PL2	PL1	PL1

4

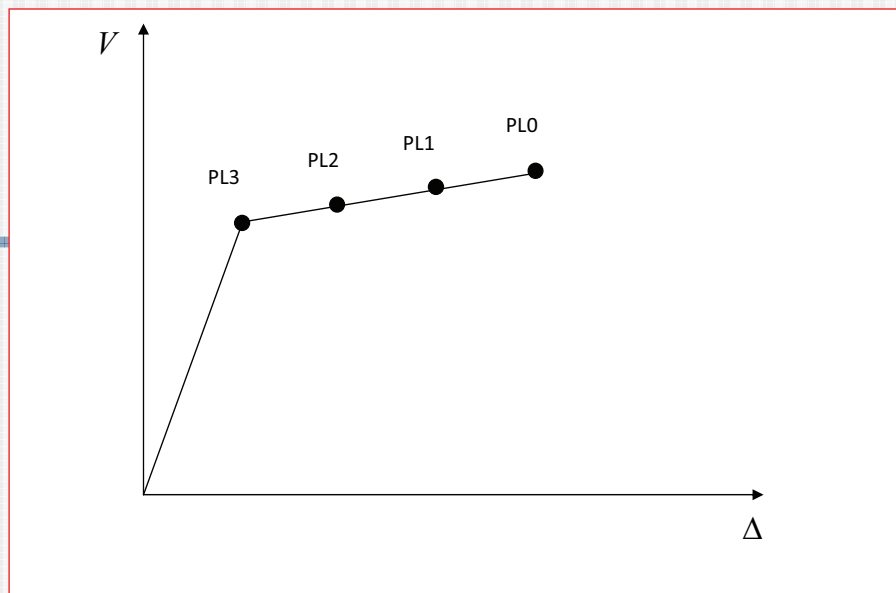


圖1 各種橋梁耐震性能水準對應之結構反應狀態

設計地震： $0.4S_{DS}$
 中度地震： $0.4S_{DS}/3.25$

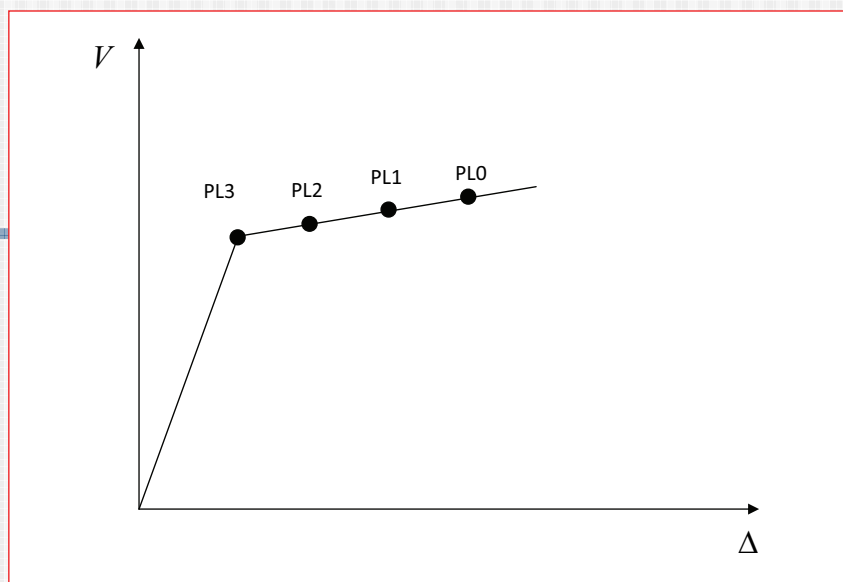


圖1 各種橋梁耐震性能水準對應之結構反應狀態

台北盆地

1.3 為達到耐震性能目標所需補強之韌性容量 $R_{補}$

詳評後已知 A_y

$$\text{求 } \frac{A_{475}}{A_y}$$

令結構系統地震力折減係數

$$F_u = \frac{A_{475}}{A_y}, \text{ 求 } R_{PL2}$$

$$R_{PL2} = 1 + (R_{補} - 1) \times \frac{1}{3}$$

$$R_{PL2} = 1 + (R_{補} - 1) \times \frac{1}{4} \quad (\text{台北盆地})$$

$$R_{補} = 3(R_{PL2} - \frac{2}{3})$$

$$R_{補} = 4(R_{PL2} - \frac{3}{4}) \quad (\text{台北盆地})$$

$$F_u = \begin{cases} R_a & ; T \geq T_0^D \\ \sqrt{2R_a - 1} + (R_a - \sqrt{2R_a - 1}) \times \frac{T - 0.6T_0^D}{0.4T_0^D} & ; 0.6T_0^D \leq T \leq T_0^D \\ \sqrt{2R_a - 1} & ; 0.2T_0^D \leq T \leq 0.6T_0^D \\ \sqrt{2R_a - 1} + (\sqrt{2R_a - 1} - 1) \times \frac{T - 0.2T_0^D}{0.2T_0^D} & ; T \leq 0.2T_0^D \end{cases}$$

7

二、橋柱耐震補強

2.1 鋼板包覆韌性補強

2.2 包覆纖維複合材料韌性補強

2.3 鋼板包覆剪力補強

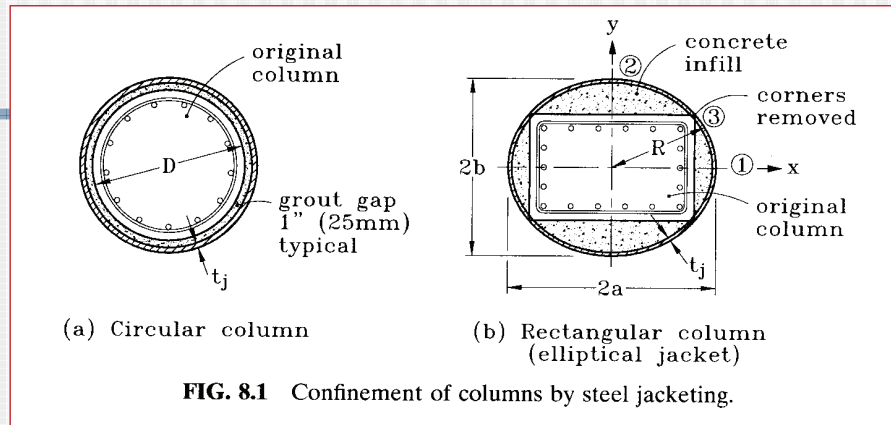
2.4 包覆纖維複合材料剪力補強

2.5 鋼板包覆進行柱底搭接補強

2.6 包覆纖維複合材料柱底搭接補強

8

2.1 鋼板包覆韌性補強



- 彎成兩個半圓，工地銲垂直縫，**gap=2.5至4.0 cm**，填無收縮水泥砂漿。
- 柱底留**5cm**，不會變壓力筋，提高彎矩強度，對支承或基礎不利。
- 提供**confinement**，剪力強度及**bond strength**

9

韌性比達 $R_{補}$ 時，柱底之曲率 ϕ_m 及 ϵ_{cu} 為若干

$$\Delta_p = (R_{補} - 1)\Delta_y$$

$$\theta_p = \frac{\Delta_p}{(L - 0.5L_p)}$$

$$\phi_p = \frac{\theta_p}{L_p}$$

$$\phi_m = \phi_p + \phi_y$$

$$\epsilon_{cu} = \phi_m c$$

$$L_p = 0.08L + 0.0022d_b f_y$$

根據 Mander 圍束混凝土應力應變曲線，混凝土極限應變 ε_{cu} 可計算如下：

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4\rho_s f_{yj} \varepsilon_{su}}{f'_{cc}} \quad (11)$$

其中， ρ_s 為包覆鋼板體積比，等於 $\frac{4t_j}{D}$ ，而 f'_{cc} 可求之如下：

$$f'_{cc} = f'_c \left(2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_l}{f'_c}} - \frac{2 f_l}{f'_c} - 1.254 \right) \quad (12)$$

式中， f'_c 為無圍束混凝土抗壓強度、 f_l 為包覆鋼板產生之圍束應力，等於 $\frac{2t_j f_{yj}}{D}$ 。如將此圍束應力代回(12)式，則：

$$f'_{cc} = f'_c \left(2.254 \sqrt{1 + \frac{15.88 t_j f_{yj}}{D f'_c}} - \frac{4 t_j f_{yj}}{D f'_c} - 1.254 \right) \quad (13)$$

將 ρ_s 等於 $\frac{4t_j}{D}$ 代回(11)式，則：

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{5.6 t_j f_{yj} \varepsilon_{su}}{D f'_{cc}} \quad (14)$$

11

所須包覆鋼板之厚度 t_j 可求得如下式：

$$t_j \geq \frac{(\varepsilon_{cu} - 0.004) D f'_{cc}}{5.6 f_{yj} \varepsilon_{su}}$$

(15)

式中：

t_j ：包覆鋼板之厚度；cm。

ε_{cu} ：地震時柱底斷面混凝土受壓最外緣預期之壓應變。

D ：包覆鋼板之直徑；cm。

f'_{cc} ：受鋼板圍束混凝土之最大抗壓強度； kgf/cm^2 。

f_{yj} ：包覆鋼板之降伏強度； kgf/cm^2 。

ε_{su} ：包覆鋼板抗拉強度對應之應變。

12

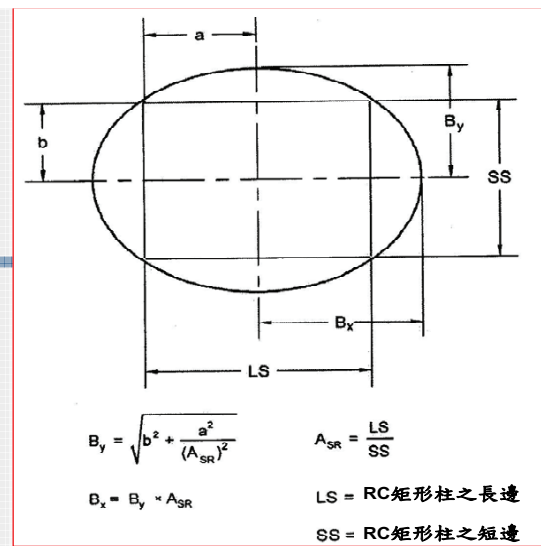
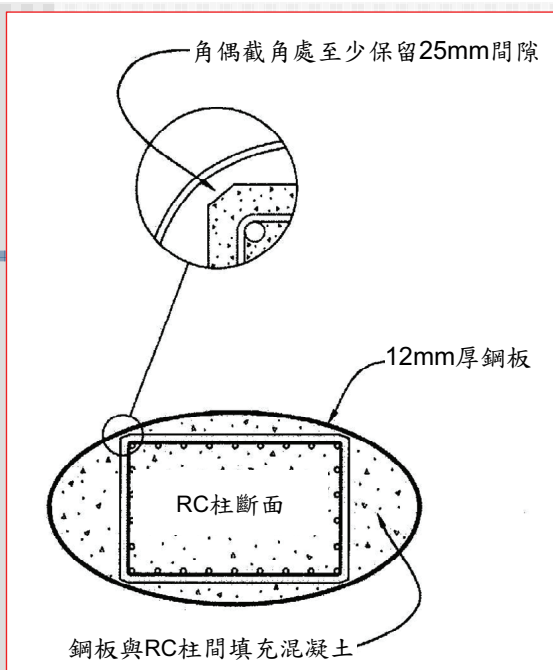
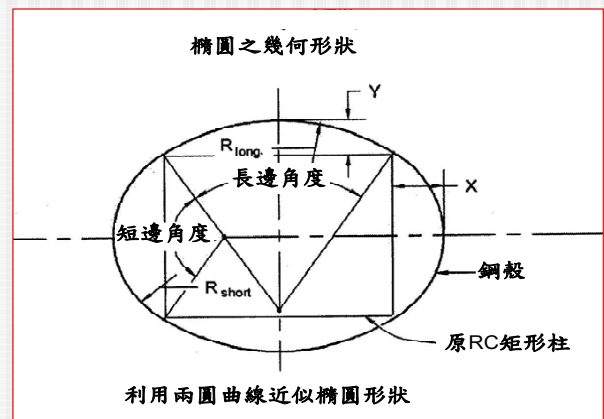


圖2 矩形柱典型鋼板包覆補強示意圖

$$r_1 = \frac{B_y^2}{B_x}, \quad r_3 = \frac{B_x^2}{B_y}, \quad r_2 = \frac{r_1 + r_3}{2}$$

$$r_x = \frac{(r_1 + r_2)}{2}, \quad r_y = \frac{(r_3 + r_2)}{2}$$



2.2 包覆纖維複合材料韌性補強

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{2.5 \rho_s f_{du} \varepsilon_{du}}{f'_{cc}} \quad (20)$$

所須包覆纖維複合材料貼布之厚度 t_j 如下式：

$$t_j \geq \frac{0.1(\varepsilon_{cu} - 0.004) D f'_{cc}}{f_{du} \varepsilon_{du}} \quad (21)$$

式中：

t_j ：包覆纖維複合材料貼布之厚度；cm。

ε_{cu} ：地震時柱底斷面混凝土受壓最外緣預期之壓應變。

D ：包覆纖維複合材料貼布之直徑；cm。

f'_{cc} ：受纖維複合材料貼布圍束混凝土之最大抗壓強度； kgf/cm^2 。

f_{du} ：包覆纖維複合材料貼布之設計拉力強度； kgf/cm^2 。

ε_{du} ：包覆纖維複合材料貼布之設計拉力應變。

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4 \rho_s f_{yj} \varepsilon_{su}}{f'_{cc}}$$

$$t_j \geq \frac{(\varepsilon_{cu} - 0.004) D f'_{cc}}{5.6 f_{yj} \varepsilon_{su}}$$

2.3 鋼板包覆剪力補強

圓柱所須包覆鋼板之厚度 t_j 如下式：

$$t_j \geq \frac{\frac{V_0}{\phi_s} - (V_c + V_s)}{0.5\pi f_{yj} D \cot \theta} = \frac{V_{sj}}{1.57 f_{yj} D \cot \theta} \quad (22)$$

式中：

ϕ_s ：剪力強度折減因數。

V_0 ：地震時柱底斷面預期之剪力需求。

V_c ：地震時柱底斷面混凝土之剪力計算強度。

V_s ：柱底斷面剪力筋之剪力計算強度。

V_{sj} ：包覆鋼板之所需剪力計算強度。

f_{yj} ：包覆鋼板之降伏強度； kgf/cm^2 。

D ：包覆鋼板之直徑； cm 。

θ ：剪力裂縫與柱縱向間之夾角。

15

$$V_c = 0.53 \left[\frac{R_{\max} - R}{R_{\max} - 1} + \frac{N}{140A_g} \right] \sqrt{f'_c} A_e \quad (\text{N 為軸壓力時}) \quad (23)$$

$$V_c = 0.53 \left[\frac{R_{\max} - R}{R_{\max} - 1} + \frac{N}{35A_g} \right] \sqrt{f'_c} A_e \quad (\text{N 為軸拉力時}) \quad (24)$$

其中：

$R_{\max}$ ：橋柱韌性容量，可取為 $R_{\text{補}}$ 。

R ：橋柱設計地震下韌性比，譬如可取為 R_{PL2} 。

N ：軸力，壓力時取正值，拉力時取負值； kgf 。

A_g ：柱之全斷面積； cm^2 。

f'_c ：混凝土抗壓強度； kgf/cm^2 。

A_e ：有效剪力面積，可取為 $0.8A_g$ ； cm^2 。

16

V_s 為柱底斷面剪力筋之剪力計算強度，依下式計算：

$$V_s = \frac{\pi A_h f_{yh} D \cot \theta}{2 a} \quad (25)$$

式中：

A_h ：圓柱螺箍筋斷面積； cm^2 。

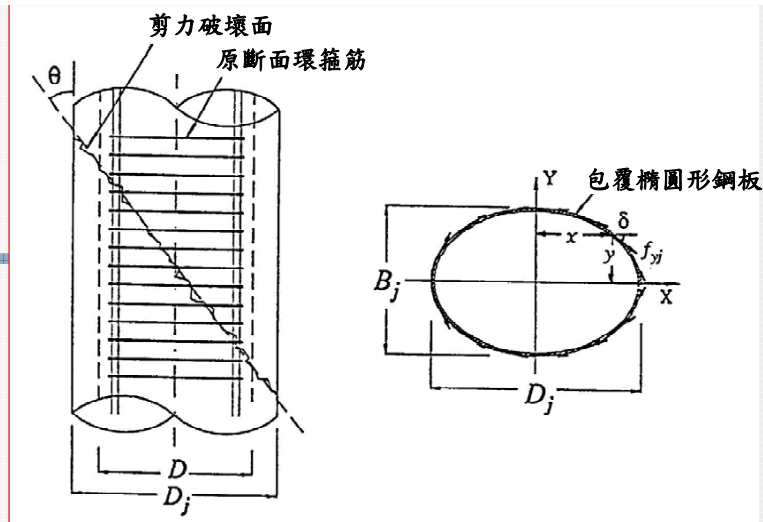
f_{yh} ：螺箍筋降伏強度； kgf/cm^2 。

D ：圓柱之直徑； cm 。

a ：螺箍筋之間距； cm 。

V_{sj} 為包覆鋼板之所需剪力計算強度，圓形斷面可計算如下：

$$V_{sj} = \frac{\pi}{2} t_j f_{yj} D \cot \theta \quad (26)$$



橢圓鋼板在強軸與弱軸之剪力計算強度 V_{sj} 可參照圖 5 計算如下：

下：

$$V_{sj} = \begin{cases} 2f_{yj}t_jD_j \left[1 - \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \frac{B_j}{D_j} \right] \cot \theta & \text{(強軸)} \\ 2f_{yj}t_jB_j \left[1 - \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \frac{D_j}{B_j} \right] \cot \theta & \text{(弱軸)} \end{cases} \quad (27)$$

其中， t_j 為包覆鋼板厚度， f_{yj} 為包覆鋼板之降伏強度， D_j 、 B_j 分別為橢圓長軸與短軸的長度，因 V_{sj} 已知，故 t_j 可求得。

2.4 包覆纖維複合材料剪力補強

圓形柱包覆纖維複合材料提供之剪力計算強度 V_{sj} 可計算如下：

$$V_{sj} = \frac{\pi}{2} t_j f_j D \cot \theta \quad (30)$$

矩形柱包覆纖維複合材料貼片提供之剪力計算強度 V_{sj} 可計算如下：

$$V_{sj} = \begin{cases} 2f_j t_j D_j \left[1 - \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \frac{B_j}{D_j} \right] \cot \theta \text{ (強軸)} \\ 2f_j t_j B_j \left[1 - \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \frac{D_j}{B_j} \right] \cot \theta \text{ (弱軸)} \end{cases} \quad (31)$$

其中， f_j 為所包覆纖維複合材料貼片之應力，應取 $0.004E_j$ ，其中

E_j 為纖維複合材料貼片之彈性模數。

19

2.5 鋼板包覆進行柱底搭接補強

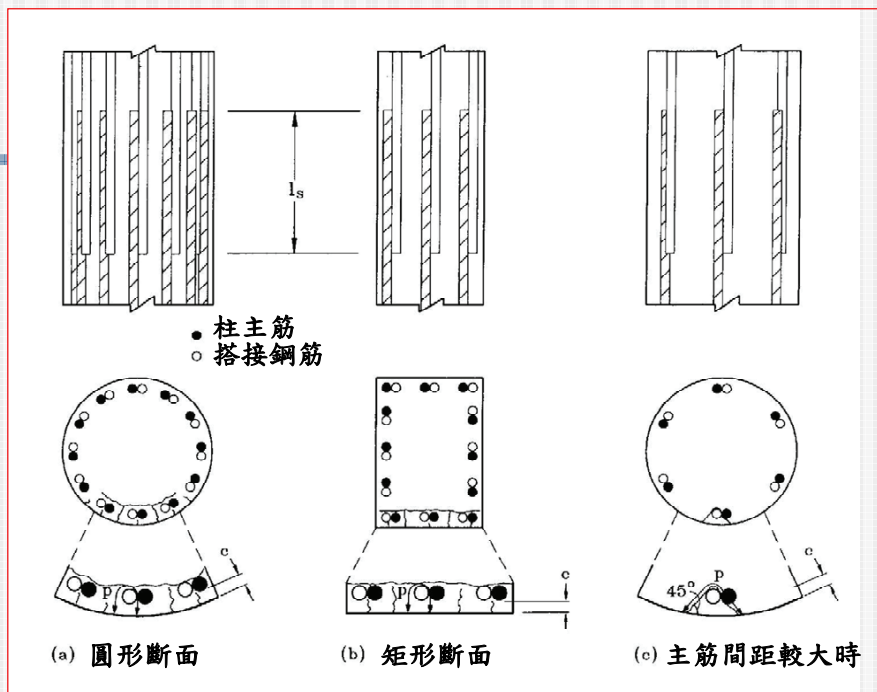


圖6 柱搭接鋼筋混凝土之劈裂

$$p = \frac{\pi D'}{2n} + 2(d_b + c) \leq 2\sqrt{2}(d_b + c)$$

20

鋼板補強時

圍束應力 f_l

$$f_l = \frac{2t_j f_{sj}}{D}$$

$$A_b f_s = f_l \mu p l_s$$

$$f_{sj} = 0.0015 E_s$$

$$\mu = 1.4 \quad f_s = 1.7 f_{yl}$$

$$t_j = \frac{0.605 A_b f_{yl} D}{p l_s f_{sj}}$$

$$p = \frac{\pi D'}{2n} + 2(d_b + c) \leq 2\sqrt{2}(d_b + c)$$

A_b ：單根圓柱主筋之斷面積； cm^2 。

f_{yl} ：主筋之規定降伏強度； kgf/cm^2 。

D ：包覆鋼板之直徑； cm 。

p ：搭接鋼筋發生劈裂後，一根鋼筋之外環繞裂縫之周長； cm 。

l_s ：柱底搭接鋼筋之搭接長度； cm 。

f_{sj} ：包覆鋼板之應力，為 $0.0015 E_s \leq f_{sj}$ ； kgf/cm^2 。

2.6 包覆纖維複合材料進行柱底搭接補強

所須包覆纖維複合材料貼片之厚度 t_j 如下式：

$$t_j = \frac{0.605 A_b f_{yl} D}{p l_s f_j} \quad (37)$$

式中：

A_b ：單根圓柱主筋之斷面積； cm^2 。

f_{yl} ：主筋之規定降伏強度； kgf/cm^2 。

D ：包覆纖維複合材料貼片之直徑； cm 。

p ：搭接鋼筋發生劈裂後，一根鋼筋之外環繞裂縫之周長； cm 。

l_s ：柱底搭接鋼筋之搭接長度； cm 。

f_j ：包覆纖維複合材料貼片之應力，為 $0.0015 E_j \leq f_{du}$ ； kgf/cm^2 。

三、橋梁耐震能力評估及補強審查要點

3.1 耐震能力評估及補強審查之目的

3.2 橋梁耐震能力評估及補強期中審查表

3.3 橋梁耐震能力評估及補強期末審查表

23

3.1 耐震能力評估及補強審查之目的

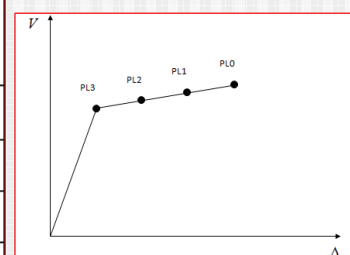
- 橋梁主管機關管控分析與設計品質
- 透過審查會議與填寫審查表來完成
- 國家地震工程研究中心執行審查示範作業

24

3.2 橋梁耐震能力評估及補強期中審查表

期中審查表

4. 詳細評估結果	基礎裸露： ☐ 有 ☐ 無					
	土壤液化： ☐ 有 ☐ 無					
	行車方向					
	δ_y (cm)	PGA_y	δ_u (cm)	PGA_u	μ	V_u/W
	↺	↺	↺	↺	↺	↺
	垂直行車方向					
	δ_y (cm)	PGA_y	δ_u (cm)	PGA_u	μ	V_u/W
	↺	↺	↺	↺	↺	↺
PGA_y 、 PGA_u ：降伏與極限地表加速度，單位為 g 。 δ_y ：降伏位移、 δ_u ：極限位移 μ ：橋柱位移韌性 = δ_u / δ_y V_u/W ：極限點所對應之基底剪力與重量比						



25

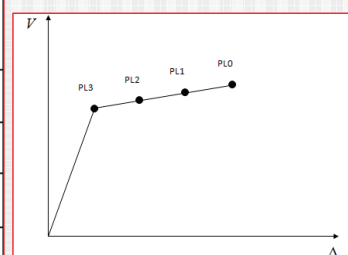
3. 耐震需求 (地表加速度)	3(a) 設計地震需求 = $0.4 \times S_{DS} =$ _____ g 3(b) 中度地震需求 = $0.4 \times S_{DS} / 3.25 =$ _____ g
5. 耐震容量 (地表加速度)	5(a) PL _____ 對應之地表加速度： _____ g 5(b) PL _____ 對應之地表加速度： _____ g
6. 耐震容量需求比	6(a) 設計地震等級對應之需求比(C/D) = $5(a) / 3(a) =$ _____ ☐ 合格 ($C/D \geq 1$) ☐ 不合格 ($C/D < 1$)
	6(b) 中度地震等級對應之需求比(C/D) = $5(b) / 3(b) =$ _____ ☐ 合格 ($C/D \geq 1$) ☐ 不合格 ($C/D < 1$)

26

3.3 橋梁耐震能力評估及補強期末審查表

期末審查表

7. 詳細評估結果	基礎裸露： ☐ 有 ☐ 無					
	土壤液化： ☐ 有 ☐ 無					
	行車方向					
	δ_y (cm)	PGA_y	δ_u (cm)	PGA_u	μ	V_u/W
	垂直行車方向					
	δ_y (cm)	PGA_y	δ_u (cm)	PGA_u	μ	V_u/W
	PGA_y 、 PGA_u ：降伏與極限地表加速度，單位為 g 。 δ_y ：降伏位移、 δ_u ：極限位移 μ ：橋柱位移韌性= δ_u / δ_y V_u/W ：極限點所對應之基底剪力與重量比					



27

5. 耐震需求 (地表加速度)	(5a) 設計地震等級： $0.4 \times S_{DS} =$ _____ g (5b) 中度地震等級： $0.4 \times S_{DS} / 3.25 =$ _____ g
8. 補強後耐震容量 (地表加速度)	(8a) PL _____ 對應之地表加速度： _____ g (8b) PL _____ 對應之地表加速度： _____ g
9. 耐震容量需求比	設計地震等級： $(8a/5a) =$ _____ 中度地震等級： $(8b/5b) =$ _____
10. 耐震能力判定	☐ 合格 (耐震容量 > 耐震需求) ☐ 不合格 (耐震容量 > 耐震需求)
6. 補強前耐震容量 (地表加速度)	PL _____ 對應之地表加速度： _____ g PL _____ 對應之地表加速度： _____ g

28

五、補強設計內容檢討

1. 構材補強設計

☐ 支承：☐ 修復支承、☐ 更換支承

☐ 帽梁：☐ 擴大斷面（長度：_____m、寬度：_____m）

☐ 橋柱：☐ 鋼板包覆（厚度：_____mm）

☐ 混凝土包覆（厚度：_____cm）

☐ 纖維複合材料包覆（層數：_____層）

☐ 基礎：☐ 擴大斷面（長度：_____m、寬度：_____m）

☐ 增設基樁（樁數：_____、樁徑：_____m）

☐ 其他：_____

補強設計計算書審查意見：

↵

↵

↵

↵

↵

四、結論

本文首先在 1.2 節討論耐震詳細評估後判定耐震性能是否符合標準的方法，如果耐震能力不足而須補強時，在 1.3 節說明補強後為達到規定的標準，補強需要達到的韌性容量 $R_{補}$ 應如何計算。第二節主要提出橋柱的補強方法，使補強後能達成上述預定的韌性容量。其他構材如帽梁、帽梁與橋柱接頭、基礎與橋台的補強，請詳見參考文獻 1。

第三節說明橋梁耐震能力評估及補強期中與期末審查表之內容，希望透過審查作業，可管控橋梁耐震能力評估分析與補強設計之品質。所提出的審查表如有考慮不周之處，尚祈各方先進惠為指教。