



橋梁耐震能力評估及補強講習會

含沉箱基礎液化分析之橋梁耐震能力評估

蘇進國、陳彥豪、粘晉銘、黃炳勳、鄭明源



國家地震工程研究中心
National Center for Research on Earthquake Engineering

CECI



台灣世曦工程顧問股份有限公司
CECI Engineering Consultants, Inc., Taiwan



Contents

Case Study

1

基礎底版固接之簡支預力I型梁橋耐震能力評估

● 單柱式橋墩耐震能力評估流程之簡介

2

含沉箱基礎與土壤彈簧之簡支預力I型梁橋耐震能力評估

● 沉箱基礎之土壤彈簧模擬方式

3

沉箱基礎發生液化之耐震能力評估

● 液化評估與分析

Case 1- 基礎底版固接之簡支預力I型梁橋耐震能力評估

1. 懸臂式橋墩：

跨徑 30m，橋面淨寬 9m，柱高 9m

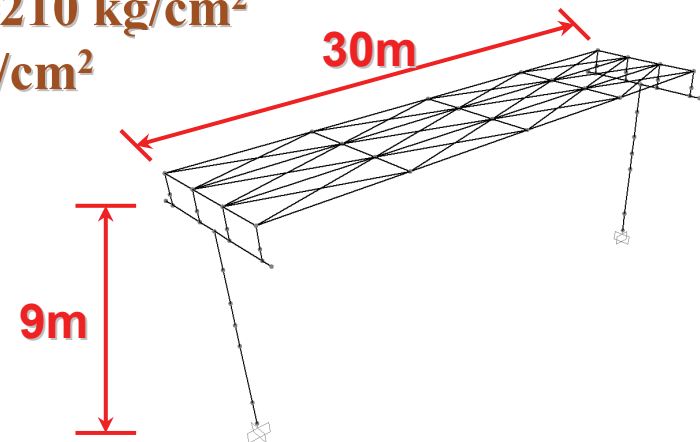
2. 預力混凝土(預力I型梁)：

混凝土28天圓柱試體壓縮強度 $f_c' = 350 \text{ kg/cm}^2$

3. 鋼筋混凝土(橋墩與沉箱)：

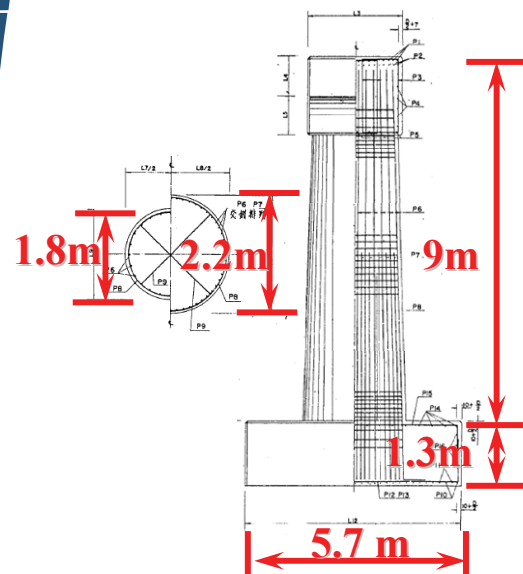
混凝土28天圓柱試體壓縮強度 $f_c' = 210 \text{ kg/cm}^2$

竹節鋼筋之容許應力為 $f_s = 1400 \text{ kg/cm}^2$

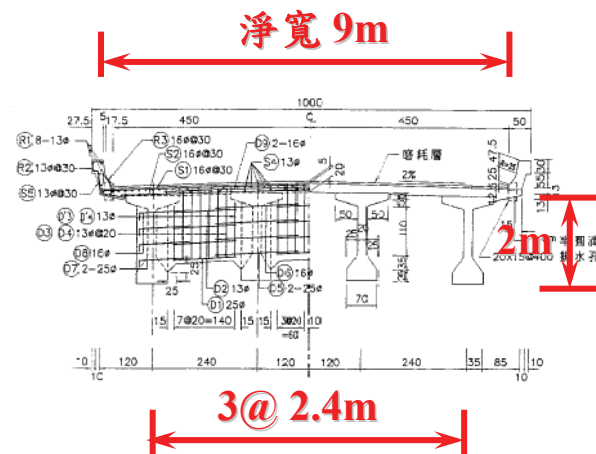


Case 1- 基礎底版固接之簡支預力I型梁橋耐震能力評估

Cross section and Sap2000 Model

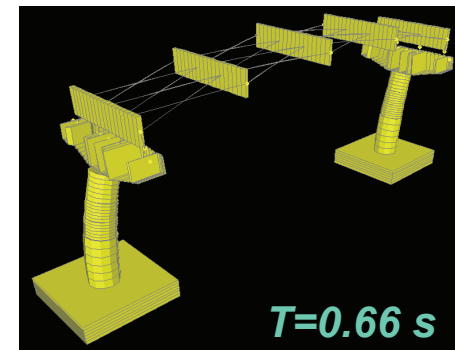
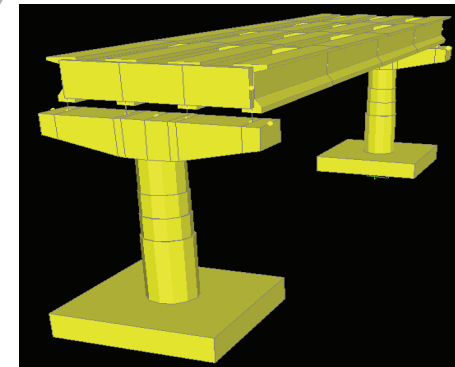


Pier



Superstructure

基礎固接



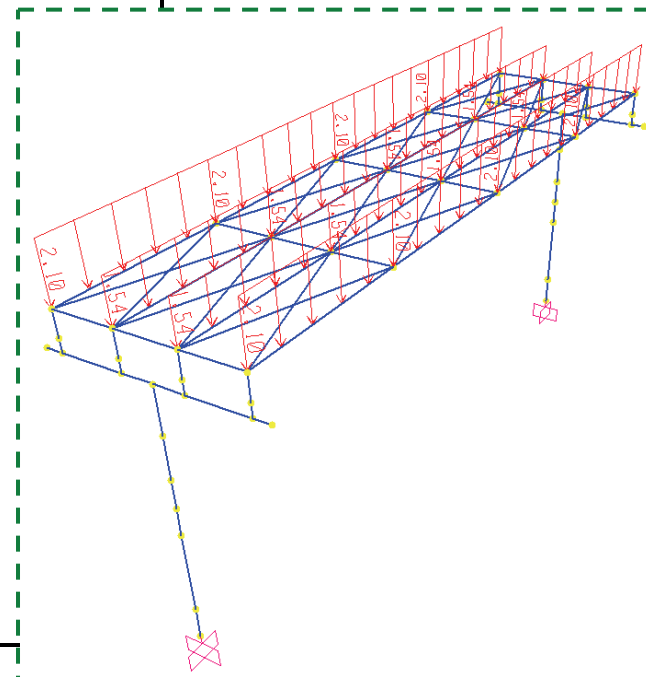
Case 1- 基礎底版固接之簡支預力I型梁橋耐震能力評估

Loading data

一、載重計算

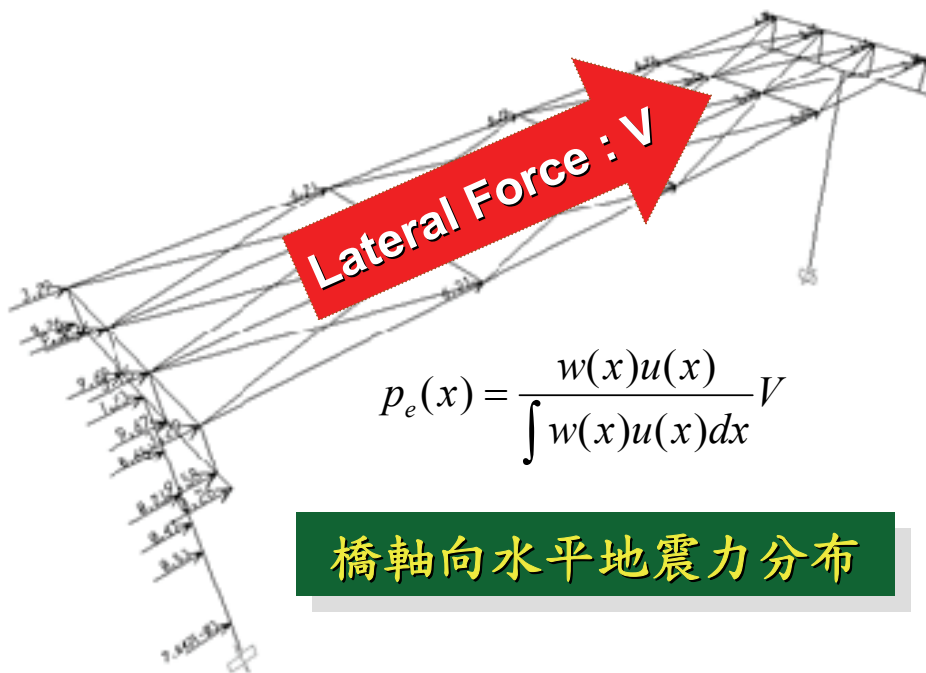
1. Dead Load

(1) Superimpose	(SAP中之DL2)	Unit : T/M
AC面層	$9 \times 0.05 \times 2.4$	= 1.08
橋面版	$9.6 \times 0.2 \times 2.4$	= 4.61
欄杆(單邊)	0.6	= 0.60
公共設施重量	0.4	= 0.40
(2) 主梁	(SAP以自重計算-屬DL1)	
預力I型梁		
(3) 中隔梁	(SAP以自重計算-屬DL1)	
斷面積=1.68m $\times$ 0.3m		
(4) 端隔梁	(SAP以自重計算-屬DL1)	
斷面積=1.68m $\times$ 0.2m		
(5) 橋墩	(SAP以自重計算-屬DL1)	
直徑1.8m~2.2m之圓形漸變實心斷面		
(6) 基礎	(SAP以自重計算-屬DL1)	
斷面積=5.7m $\times$ 5.7m		
(7) 沉箱	(SAP以自重計算-屬DL1)	
內腔為直徑6.7m, 厚0.8m之圓形中空斷面		
底座為直徑7m之實心圓形斷面		
(8) 鄰跨載重	(SAP中之NDL)	
左跨	200 ton	
右跨	180 ton	

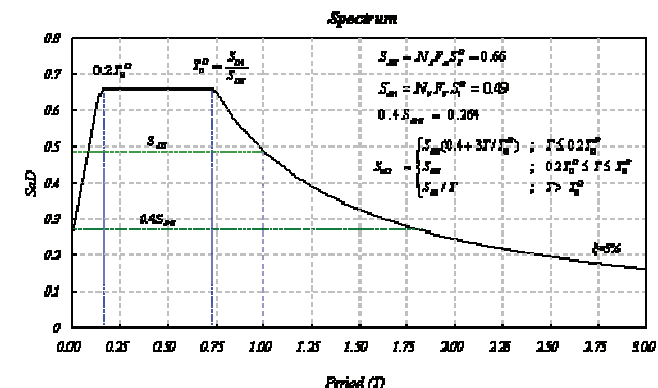


Case 1- 基礎底版固接之簡支預力I型梁橋耐震能力評估

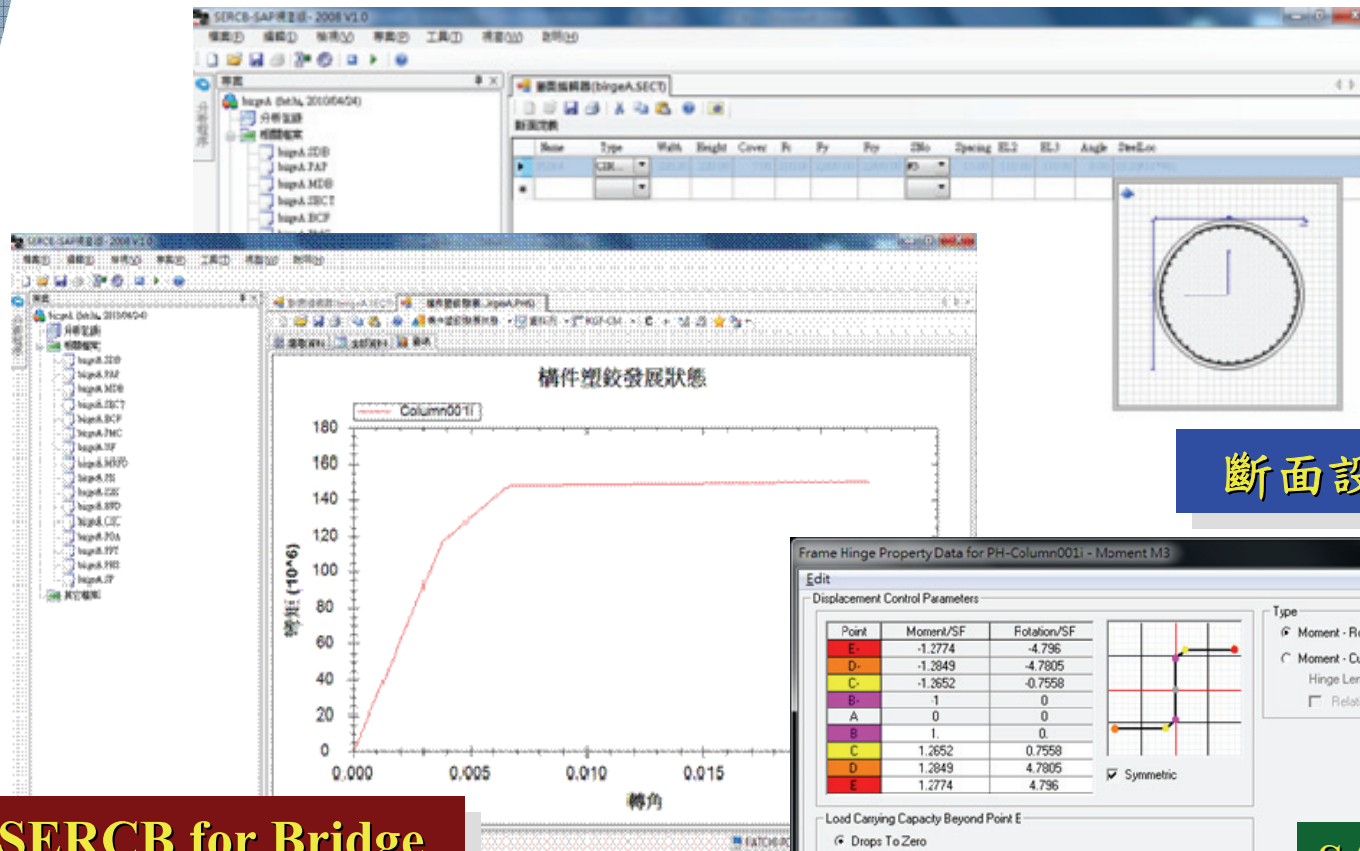
$$V = \text{Max} \left\{ V_D, V_M, V_{\min} \right\} \begin{cases} V_D = \frac{I}{1.2\alpha_y} \left(\frac{S_{aD}}{F_{uD}} \right)_m W \geq \frac{I}{1.2\alpha_y} \left(\frac{0.4S_{DS}}{F_{uD}} \right)_m W & \text{設計地震} \\ V_M = \frac{I}{1.2\alpha_y} \left(\frac{S_{aM}}{F_{uM}} \right)_m W \geq \frac{I}{1.2\alpha_y} \left(\frac{0.4S_{MS}}{F_{uM}} \right)_m W & \text{最大考量地震} \\ V_{\min} = \frac{IS_{aD}}{3.25\alpha_y} W \geq \frac{0.4IS_{DS}}{3.25\alpha_y} W & \text{總橫力下限值} \end{cases}$$



橋軸向水平地震力分布



Case 1- 基礎底版固接之簡支預力I型梁橋耐震能力評估



**SERCB for Bridge
塑鉸計算**

Frame Hinge Property Data for PH-Column001 - Moment M3

Edit

Displacement Control Parameters

Point	Moment/SF	Rotation/SF
E	-1.2774	-4.796
D	-1.2849	-4.7805
C	-1.2652	-0.7558
B	1	0
A	0	0
B	1	0
C	1.2652	0.7558
D	1.2849	4.7805
E	1.2774	4.796

Type

☒ Moment - Rotation

☐ Moment - Curvature

Hinge Length

☐ Relative Length

☒ Symmetric

Load Carrying Capacity Beyond Point E

☒ Drops To Zero

☐ Is Extrapolated

Scaling for Moment and Rotation

☐ Use Yield Moment Moment SF 1.172E+08

☐ Use Yield Rotation Rotation SF 3.809E-03

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)

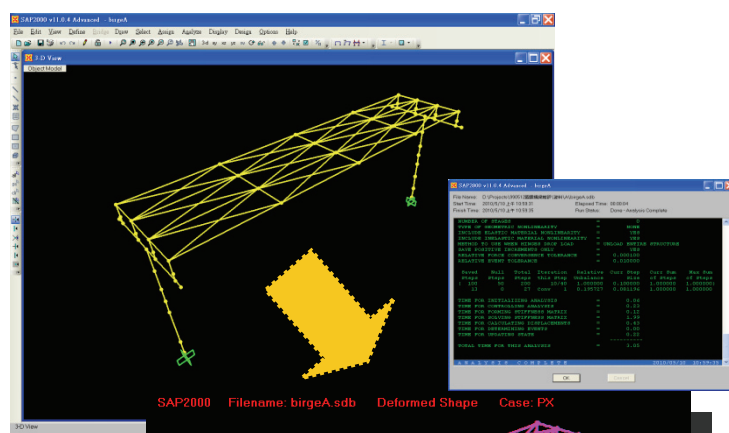
	Positive	Negative
Immediate Occupancy	2	
Life Safety	4	
Collapse Prevention	6	

☐ Show Acceptance Criteria on Plot

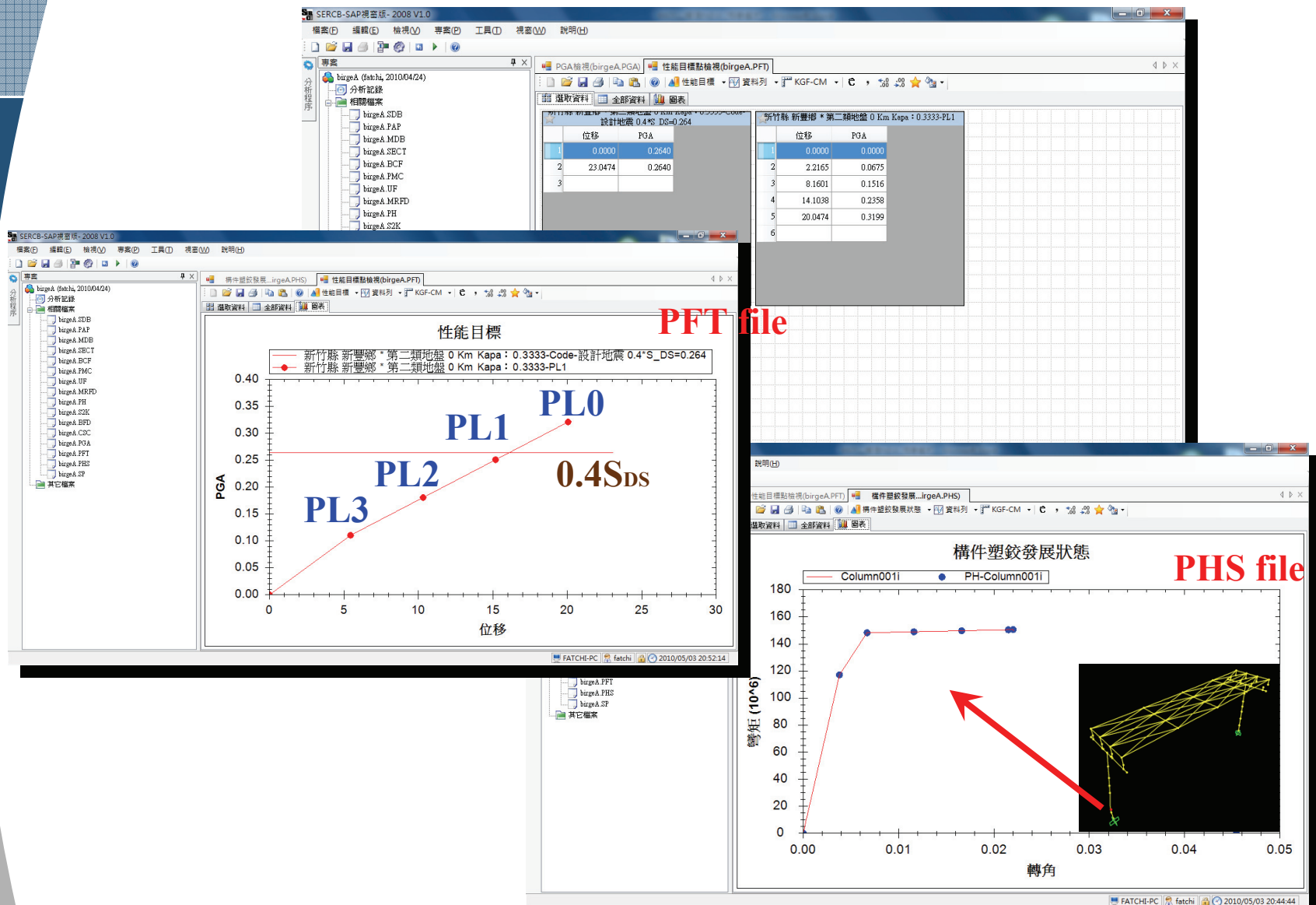
OK Cancel

**SAP2000 Hinge
Property**

Case 1- 基礎底版固接之簡支預力I型梁橋耐震能力評估



Case 1- 基礎底版固接之簡支預力I型梁橋耐震能力評估

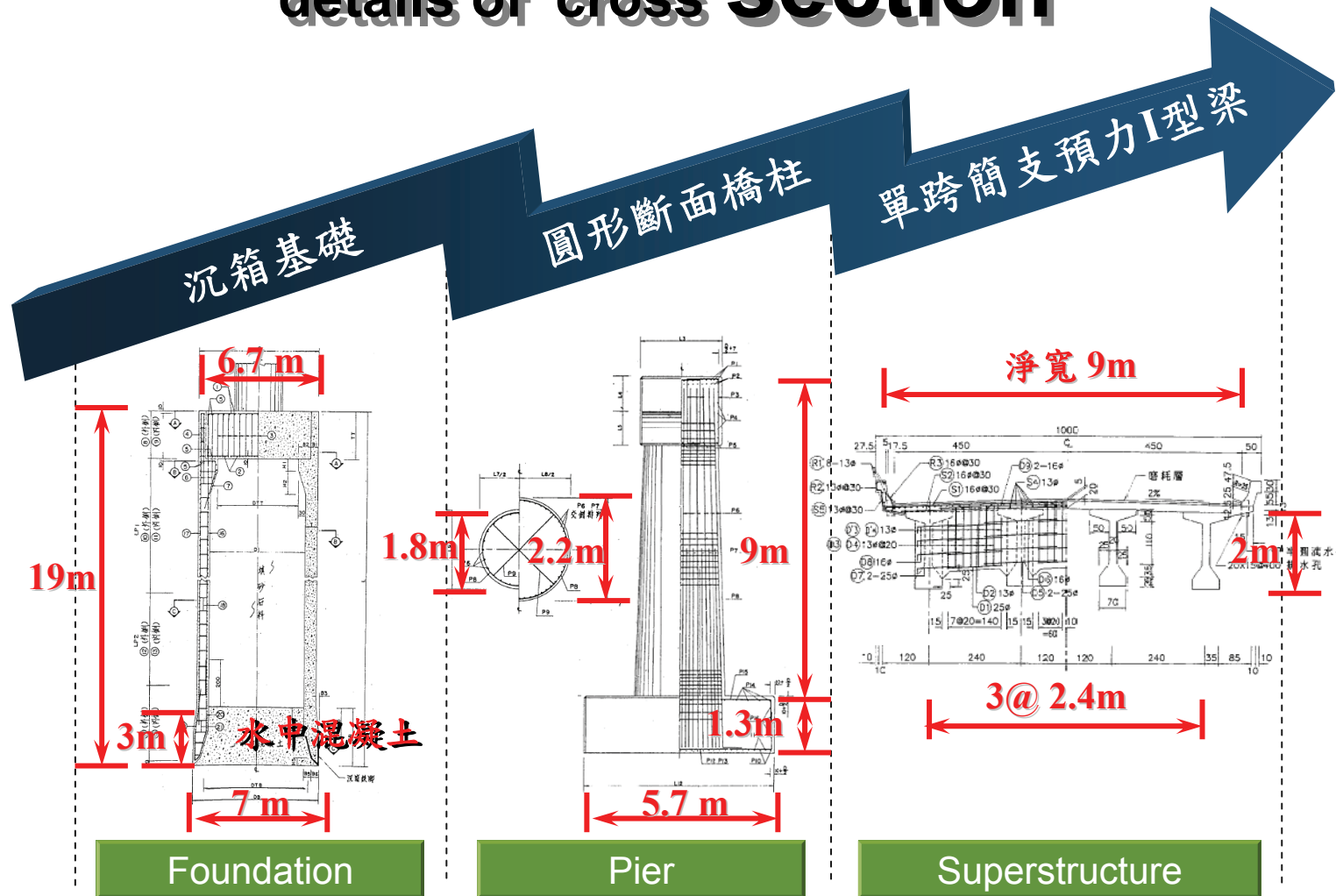


PFT file

PHS file

Case 2- 含沉箱基礎與土壤彈簧之簡支預力I型梁橋耐震能力評估

details of cross section

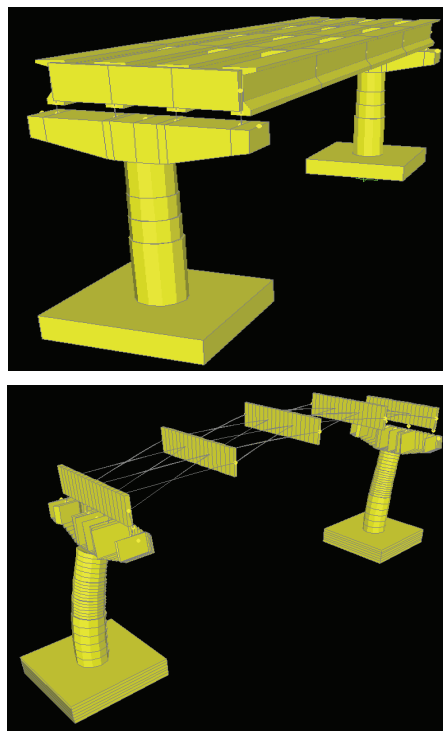




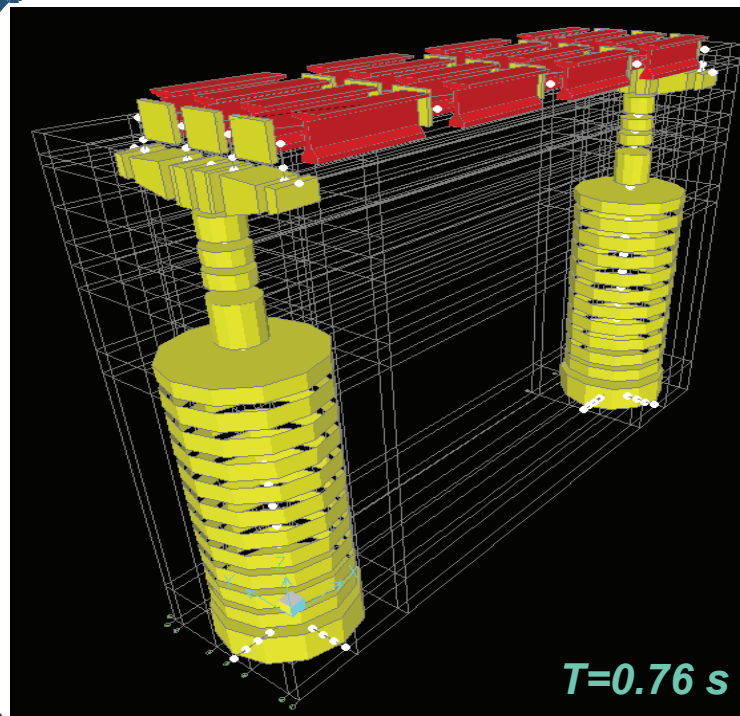
Case 2- 含沉箱基礎與土壤彈簧之簡支預力I型梁橋耐震能力評估

Analytical Model of Bridge

基礎固接



沉箱基礎



基礎彈簧模擬方式 (1/2)

交通部公路總局，公路橋梁耐震評估及補強準則之研究，九十八年十二月。
(國家地震工程研究中心之研究報告)

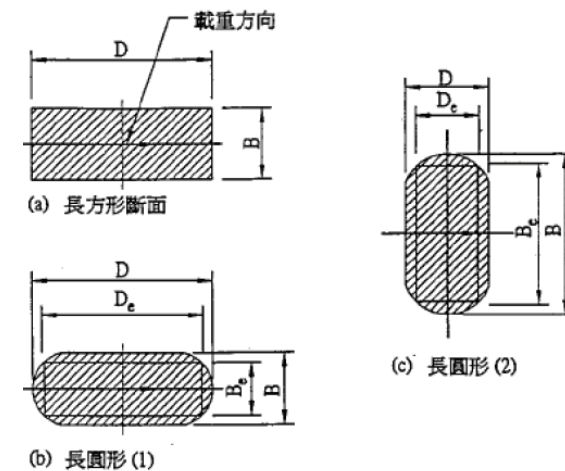
表C4-3 變形模數 E_0 與 α 值

變形模數 E_0 推估方法	地震時地盤反力係數推估用係數 α
直徑 30 公分平鈹載重試驗循環加壓-解壓曲線求得之變形模數之 1/2	2
由孔內側向載重試驗求取變形模數	8
利用單壓或三軸試驗應力-應變曲線求取變形模數	8
利用標準貫入試驗 N 值推估變形模數 $E_0 = 25N$	2

垂直向與水平向之地盤反力係數基準值 (kgf/cm³)

$$\begin{cases} k_{V0} = \frac{1}{30} \alpha E_0 \\ k_{H0} = \frac{1}{30} \alpha E_0 \end{cases}$$

圖C4-24 基礎之有效寬度 B_e 與 D_e



(a) 長方形斷面： $B_e = B$ ， $D_e = D$

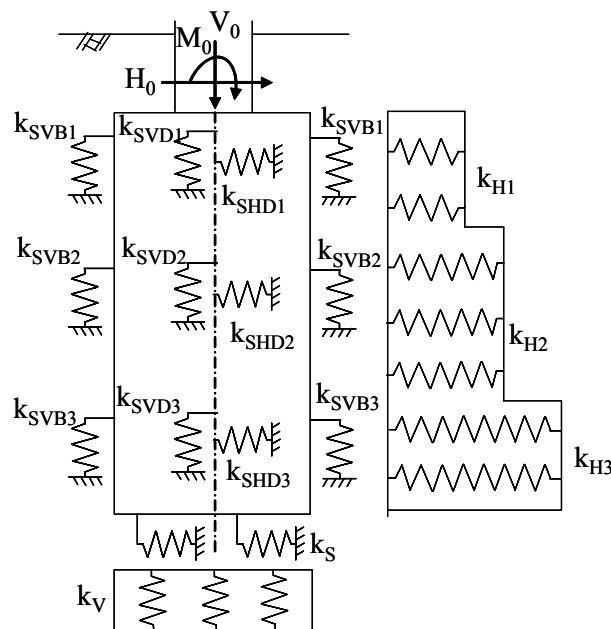
(b) 長圓形(1)： $B_e = 0.8B$ ， $D_e = D - 0.2B$

(c) 長圓形(2)： $B_e = B - 0.2D$ ， $D_e = 0.8D$

(d) 圓形斷面： $B_e = 0.8B$ ， $D_e = 0.8D$

基礎彈簧模擬方式 (2/2)

為評估沉箱受力後斷面力與變位得依據**彈性基礎之有限梁理論**進行分析，其結構分析模型如圖C4-23所示，沉箱係以彈性梁模擬，沉箱周圍及底面之地層則均視之為彈簧。(交通部公路總局，公路橋梁耐震評估及補強準則之研究，九十八年十二月，國家地震工程研究中心之研究報告。)



圖C4-23 沉箱基礎之分析模式

位置	方向	地盤反力係數
沉箱 底面	垂直	$k_V = k_{V0} (B_V / 30)^{-3/4}$ $B_V = \sqrt{A_V}$
	水平	$k_S = 0.3k_V$ $k_{V0} = \frac{1}{30} \alpha E_0$
沉箱正 前方	水平	$k_H = \alpha_k k_{H0} (B_H / 30)^{-3/4}$ $k_{H0} = \frac{1}{30} \alpha E_0$
	垂直	$k_{SVB} = 0.3k_H$ $B_H = B_e (\leq \sqrt{B_e \cdot L_e})$
沉箱 側面	水平	$k_{SHD} = 0.6 \alpha_k k_{H0} (D_H / 30)^{-3/4}$
	垂直	$k_{SVD} = 0.3k_{SHD}$

表C4-2 沉箱地盤反力係數

線性分析之基礎彈簧模擬

對於線性分析，基礎之勁度得以簡化之單點等值彈簧模擬。

$$K_y = B_e (\frac{1}{2} k_{H1} L_1 + k_{H2} L_2 + k_{H3} L_3) + k_S A_v$$

$$K_z = k_v A_v$$

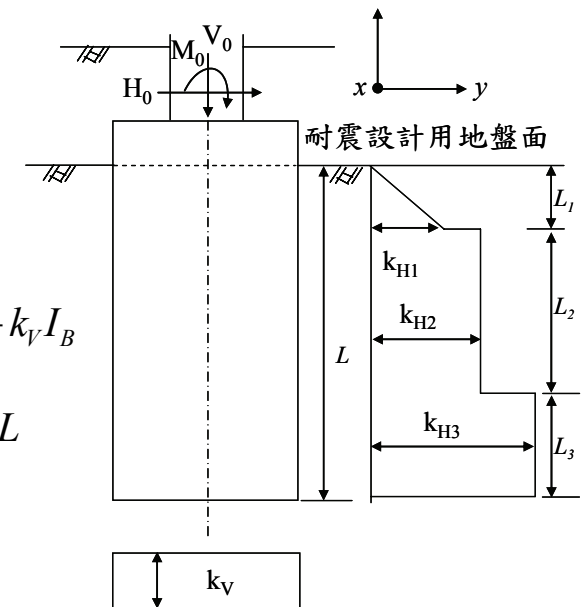
$$K_{\theta x} = B_e \left[\frac{1}{4} k_{H1} L_1^3 + \frac{1}{3} k_{H2} L_2^3 + \frac{1}{3} k_{H3} L_3^3 + k_{H2} (L_1^2 + L_2^2) L_1 L_2 \right. \\ \left. + k_{H3} (L_1 + L_2 + L_3) (L_1 + L_2) L_3 \right] + k_S A_v L^2 + k_v I_B$$

$$K_{y\theta x} = -B_e \left[\frac{1}{3} k_{H1} L_1^2 + k_{H2} L_2 (L_1 + \frac{1}{2} L_2) + k_{H3} L_3 (L_1 + L_2 + \frac{1}{2} L_3) \right] - k_S A_v L$$

L ：沉箱於耐震設計用地盤面下之深度

L_1, L_2, L_3 ：土層厚度

k_{H1}, k_{H2}, k_{H3} ：各土層之水平向地盤反力係數



圖C4-25 沉箱基礎示意圖

非線性分析之基礎彈簧模擬

[建築技術規則建築構造編基礎構造設計規範]

公路橋梁設計規範 Chap. 5

不同深度之被動土壓力 p_{Ep} 及被動土壓上限值 p_{Hu}

$$\sigma_{PE} = \sigma'_z K_{PE} + 2c\sqrt{K_{PE}}$$

$$K_{EP} = \frac{\cos^2 \phi}{\cos \delta \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi - \delta) \sin(\phi + \alpha)}{\cos \delta \cos \alpha}} \right]^2} + \begin{matrix} p_{Ep} = \gamma \cdot x \cdot K_{EP} + 2c\sqrt{K_{EP}} + q'K_{EP} \\ \alpha_p = 1.0 + 0.5(x/Be) \leq 3.0 \end{matrix} \overset{0}{=} p_{Hu} = \alpha_p p_{Ep}$$

p_{Ep} : 深度 x 處之地震時被動土壓力, (tonf/m²)

K_{EP} : 被動土壓力係數

γ : 土壤單位重, (tonf/m³)

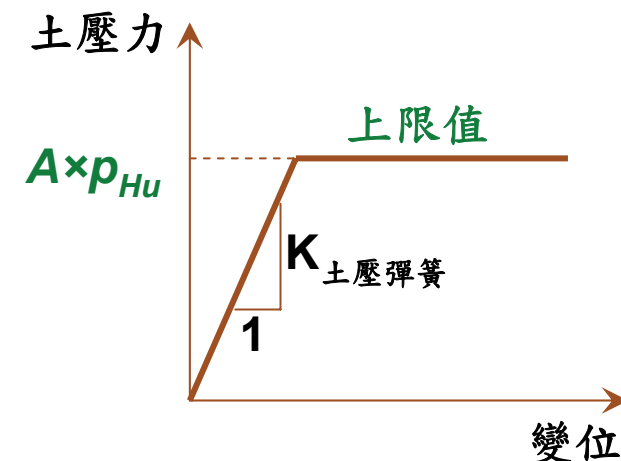
c : 土壤凝聚力, (tonf/m²)

ϕ : 土壤摩擦角, (deg)

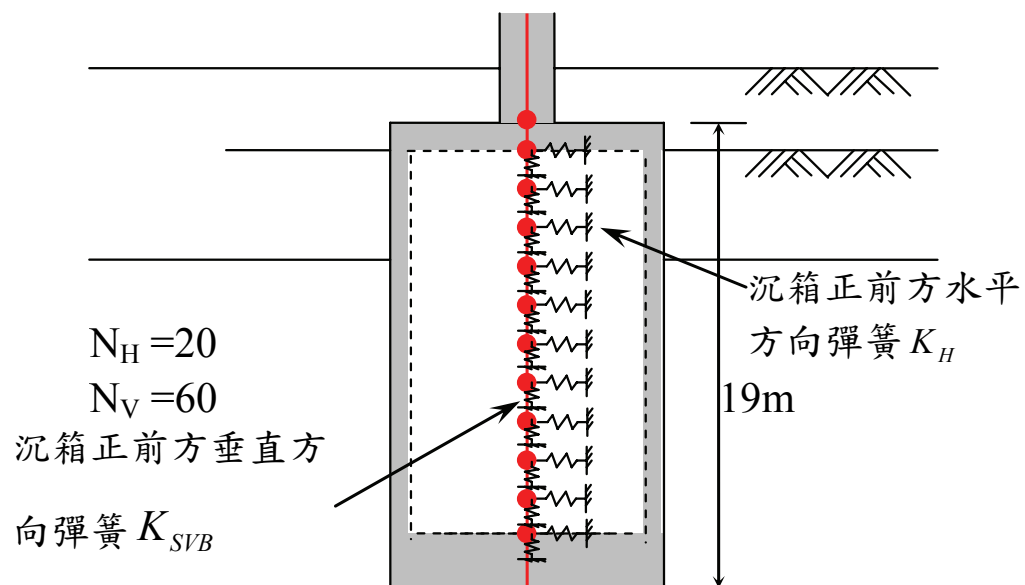
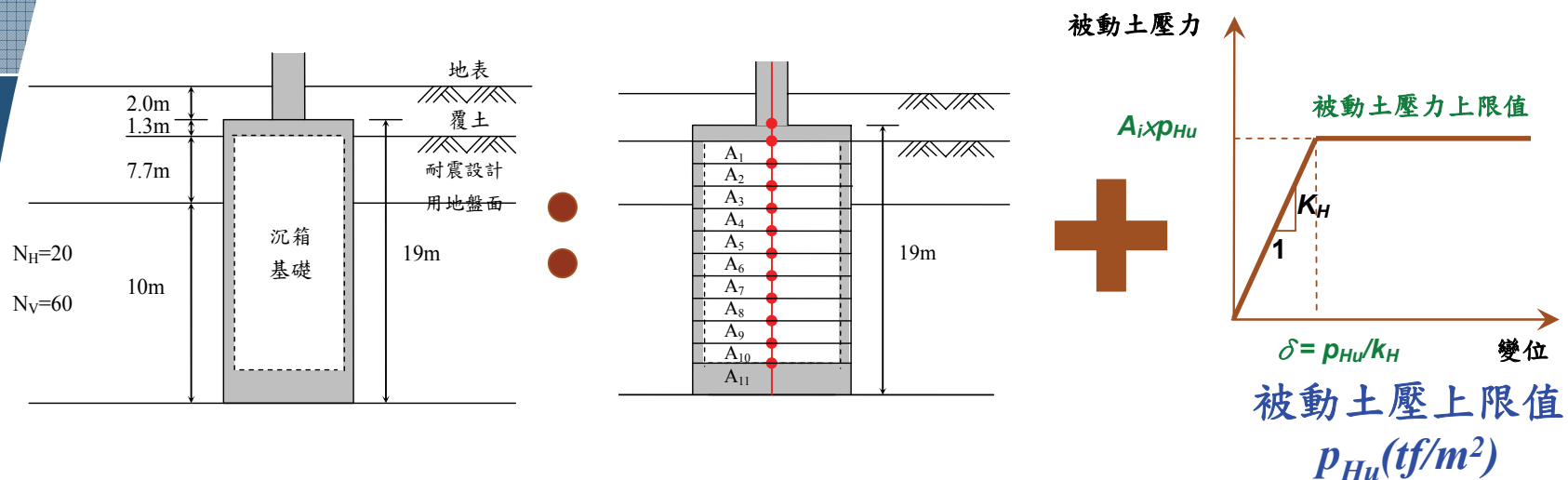
α : 地表面與水平面之夾角, (deg)

δ : 橋台背面與土壤間之摩擦角, 直接取為 $-\phi/6$ (deg)

x : 土壓力 p_{Ep} 作用於牆面之深度, (m)

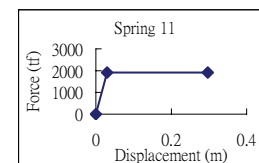
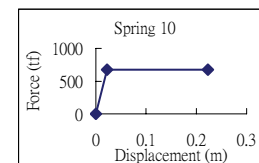
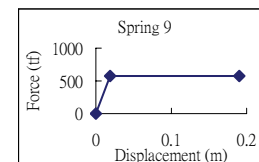
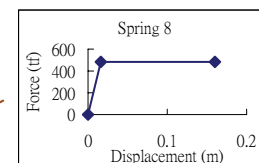
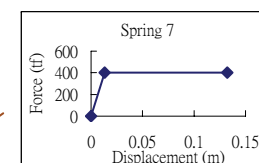
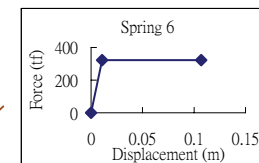
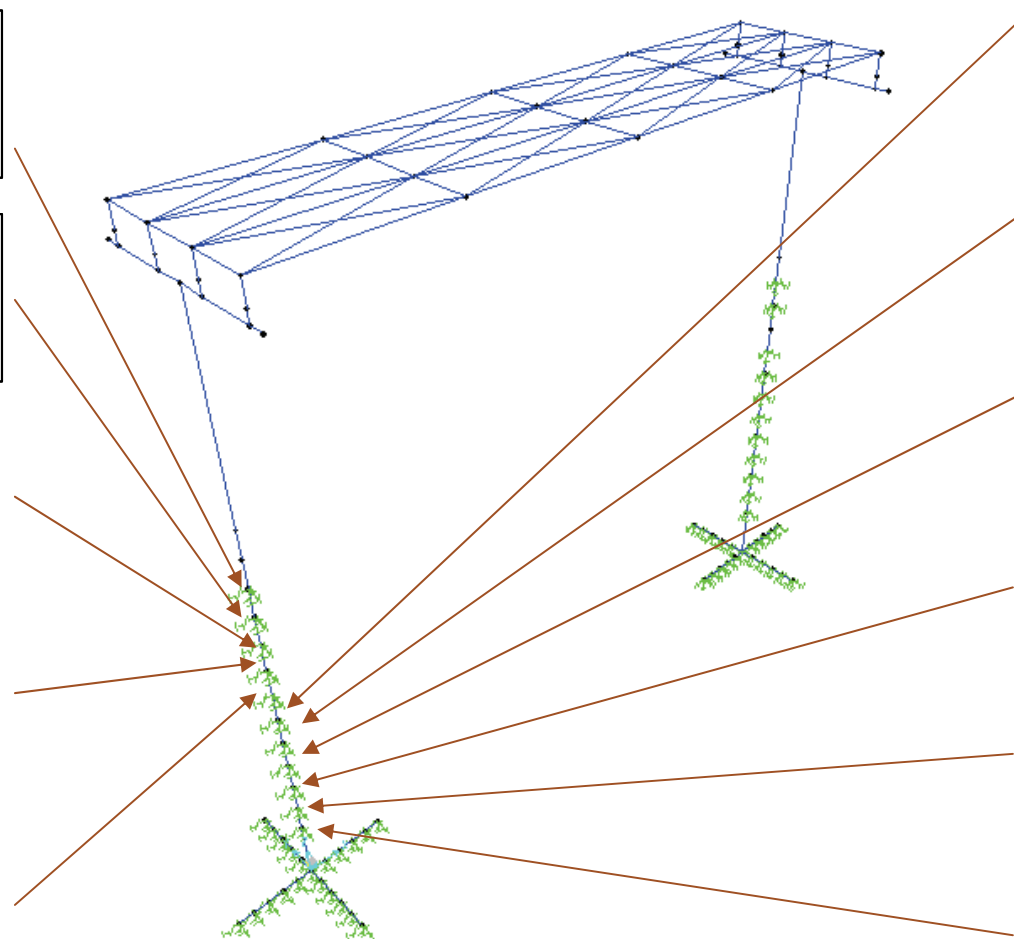
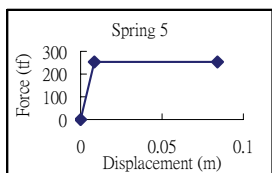
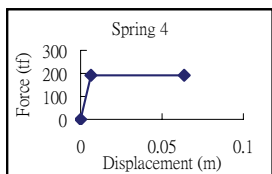
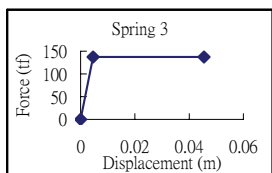
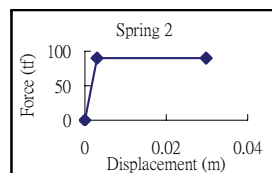
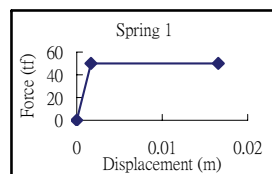


沉箱正前方水平與垂直方向彈簧





沉箱正前方水平與垂直方向彈簧



非線性分析之基礎彈簧模擬

[建築技術規則建築構造編基礎構造設計規範]

沉箱基礎之垂直極限支承力 q_u (tf/m²)

$$q_u = \alpha c N_c + \gamma_2 D_f N_q + 0.5 \beta \gamma_1 B N_r$$

c = 基礎底面下土壤之凝聚力 (tf/m²)

γ_1 = 基礎底面下土壤之有效單位重 (tf/m³)

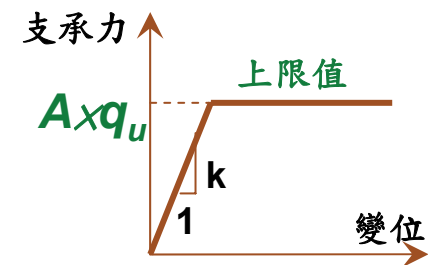
γ_2 = 基礎底面以上土壤之平均有效單位重 (tf/m³)

B = 基礎寬度

D_f = 基礎之有效埋置深度

α 、 β = 基礎底面形狀影響因素

N_c 、 N_q 、 N_r = 支承力因素



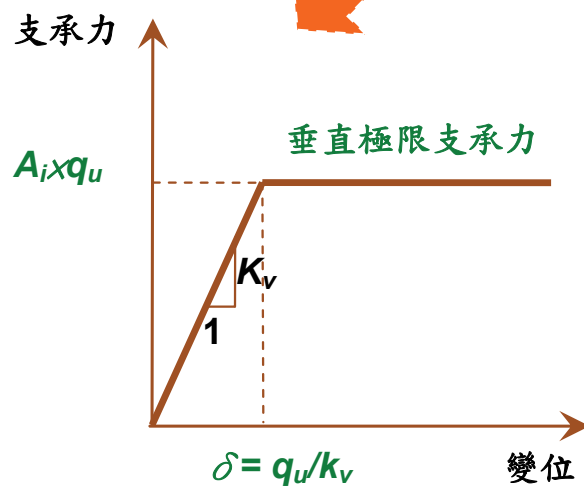
支承力因素

ϕ	N_c	N_q	N_r
0	5.14	1	0
5	6.49	1.6	0.1
10	8.34	2.5	0.4
15	10.97	3.9	1.2
20	14.83	6.4	2.9
25	20.71	10.7	6.8
26	22.25	11.8	7.9
28	25.79	14.7	10.9
30	30.13	18.4	15.1
32	35.47	23.2	20.8
34	42.14	29.4	28.7
36	50.55	37.7	40
38	61.31	48.9	56.1
40以上	75.25	64.1	79.4

基礎底面之形狀影響因素

基礎底面 形狀因素	條形	正方形 或圓形	矩形或 長圓形
α	1	1.3	$1+0.3B/D$
β	1	0.6	$1-0.4B/D$

註: B 為沉箱基礎之寬度(m), D 為沉箱基礎之長度(m)。



非線性分析之基礎彈簧模擬

[建築技術規則建築構造編基礎構造設計規範]

沉箱底面摩擦阻力所提供之最大摩擦力

$$R_f = N \cdot \tan \delta + AC_a$$

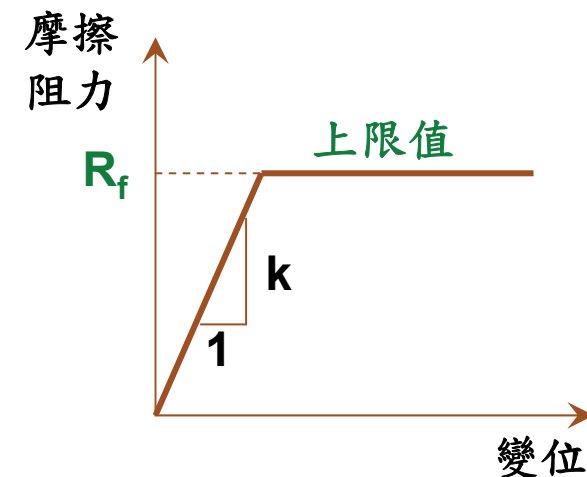
R_f 為基礎版底面之摩擦阻力(tf)

N 為作用於基礎版面之有效鉛直載重(tf)

δ 為基礎版與地面間之摩擦角(deg)

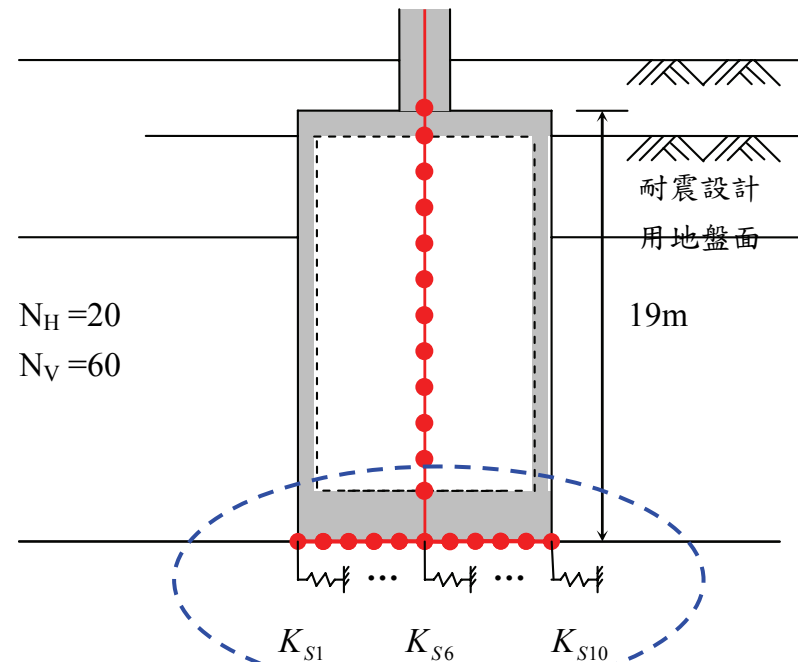
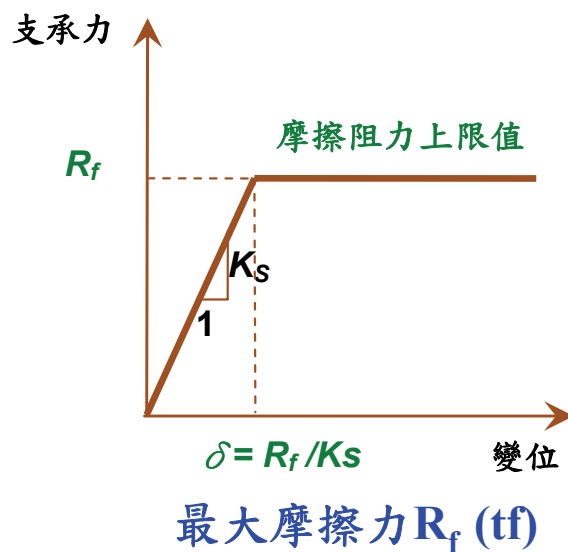
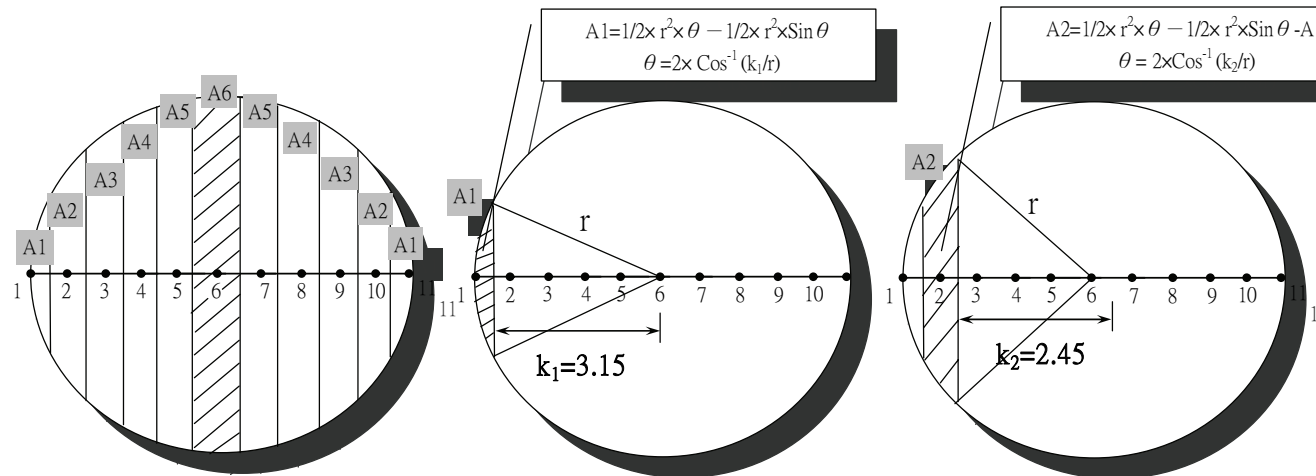
A 為基礎版底面之有效接觸面積(m²)

C_a 為基礎版底面與地層之有效附著力(t/m²)

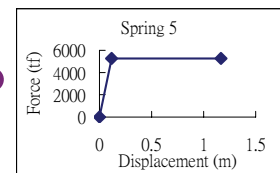
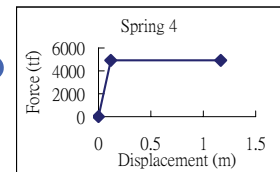
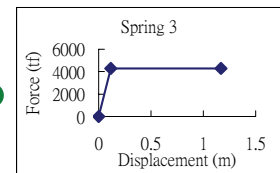
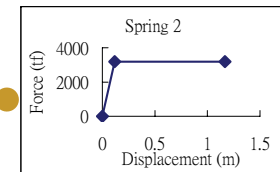
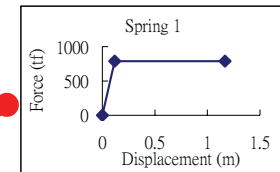
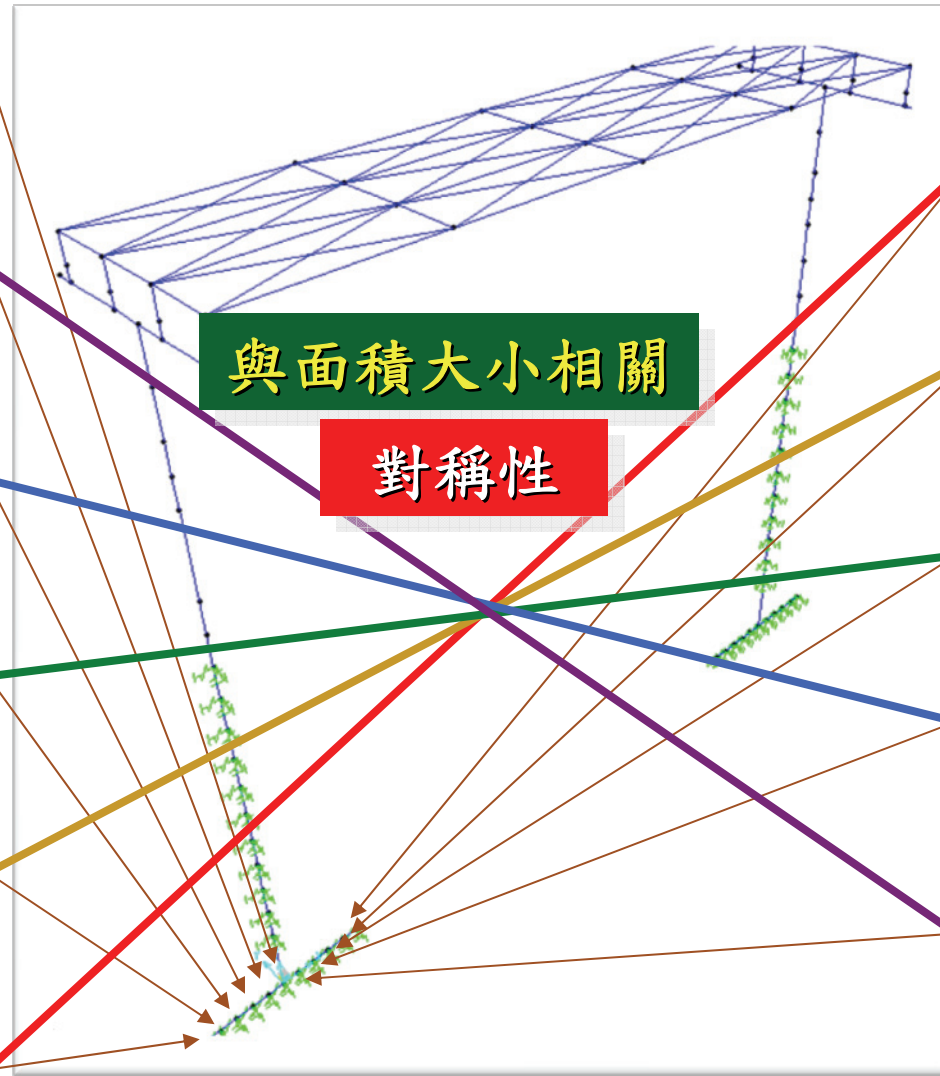
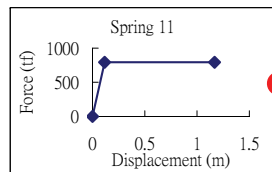
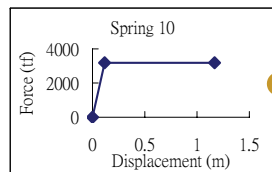
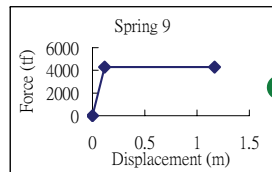
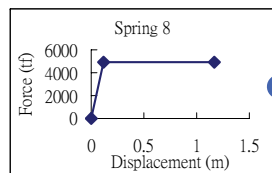
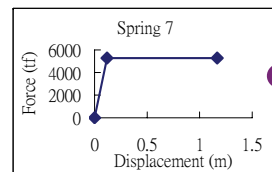
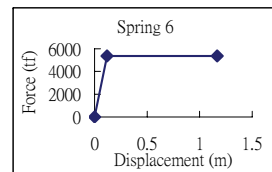


底面接觸條件	界面摩擦角 δ	附著力 C_a
1.土壤與混凝土	$\delta = 2/3 \varphi$	$C_a = 0$
2.土壤與混凝土間敷設碎石之情形	$\delta = \varphi \leq 30^\circ$	$C_a = 0$
3.岩層與混凝土	$\delta = 30^\circ$	$C_a = 0$

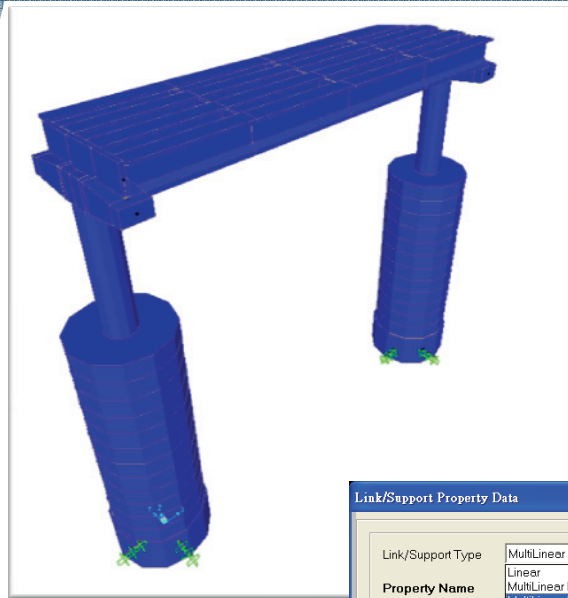
沉箱底面水平方向彈簧



沉箱底面垂直方向彈簧



Case 2- 含沉箱基礎與土壤彈簧之簡支預力I型梁橋耐震能力評估



土壤彈簧模擬方式

- Link Element

- MultiLinear Elastic

Link/Support Property Data

Link/Support Type: MultiLinear Elastic

Property Name: MultiLinear Elastic

Property Notes: Damper, Gap, Hook, Plastic (Wen), Rubber Isolator

Total Mass and Weight: Mass: 0, Weight: 0

Factors For Line, Area and Solid Springs: Property is Defined for This Length In a Line Spring, Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties
U1	☒	☒	Modify/Show for U1...
U2	☒	☒	Modify/Show for U2...
U3	☒	☒	Modify/Show for U3...
R1	☐	☐	Modify/Show for R1...
R2	☐	☐	Modify/Show for R2...
R3	☐	☐	Modify/Show for R3...

Fix All Clear All

Link/Support Directional Properties

Edit

Identification

Property Name: p1

Direction: U2

Type: MultiLinear Elastic

NonLinear: Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness: 30222.349

Effective Damping: 0.

Shear Deformation Location

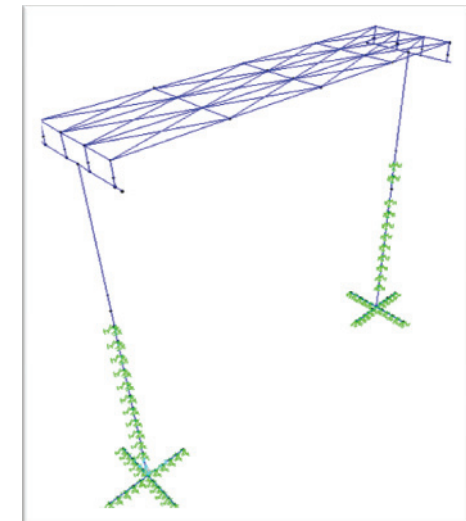
Distance from End-J: 0.

Multi-Linear Force-Deformation Definition

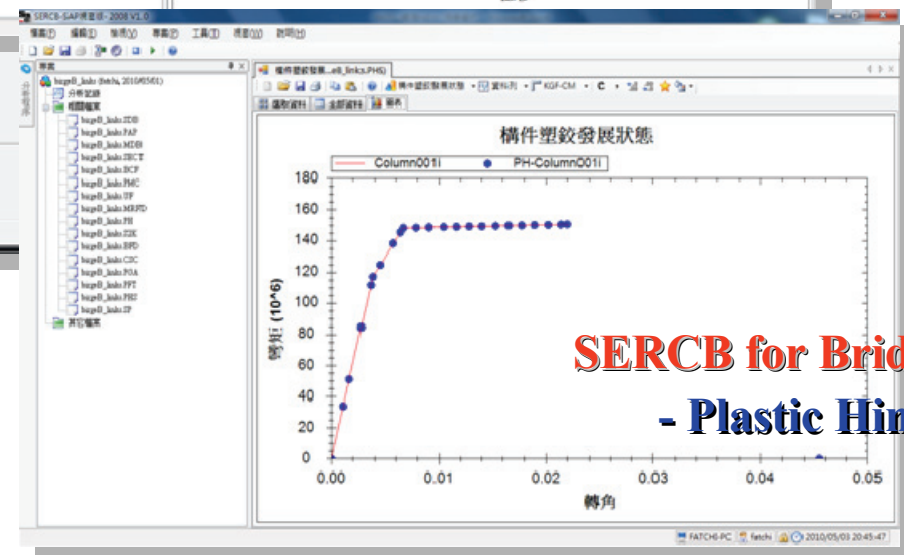
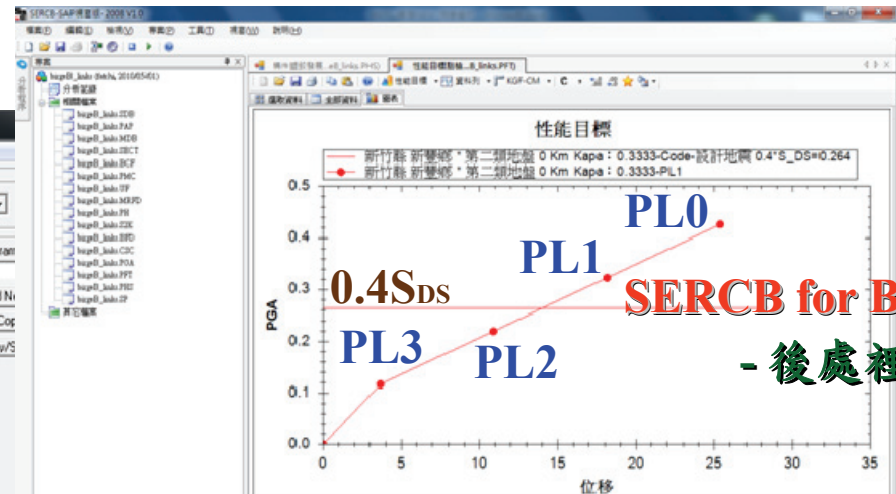
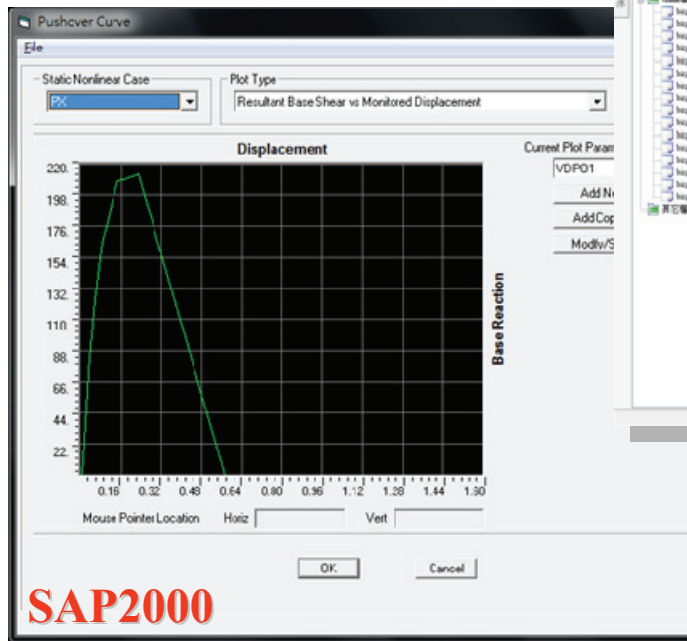
	Displ	Force
1	-1.000E-07	-1.000E-08
2	-1.000E-08	-1.000E-08
3	0.	0.
4	1.656E-03	50.06
5	0.0166	50.06

Order Rows Delete Row Add Row 6

OK Cancel

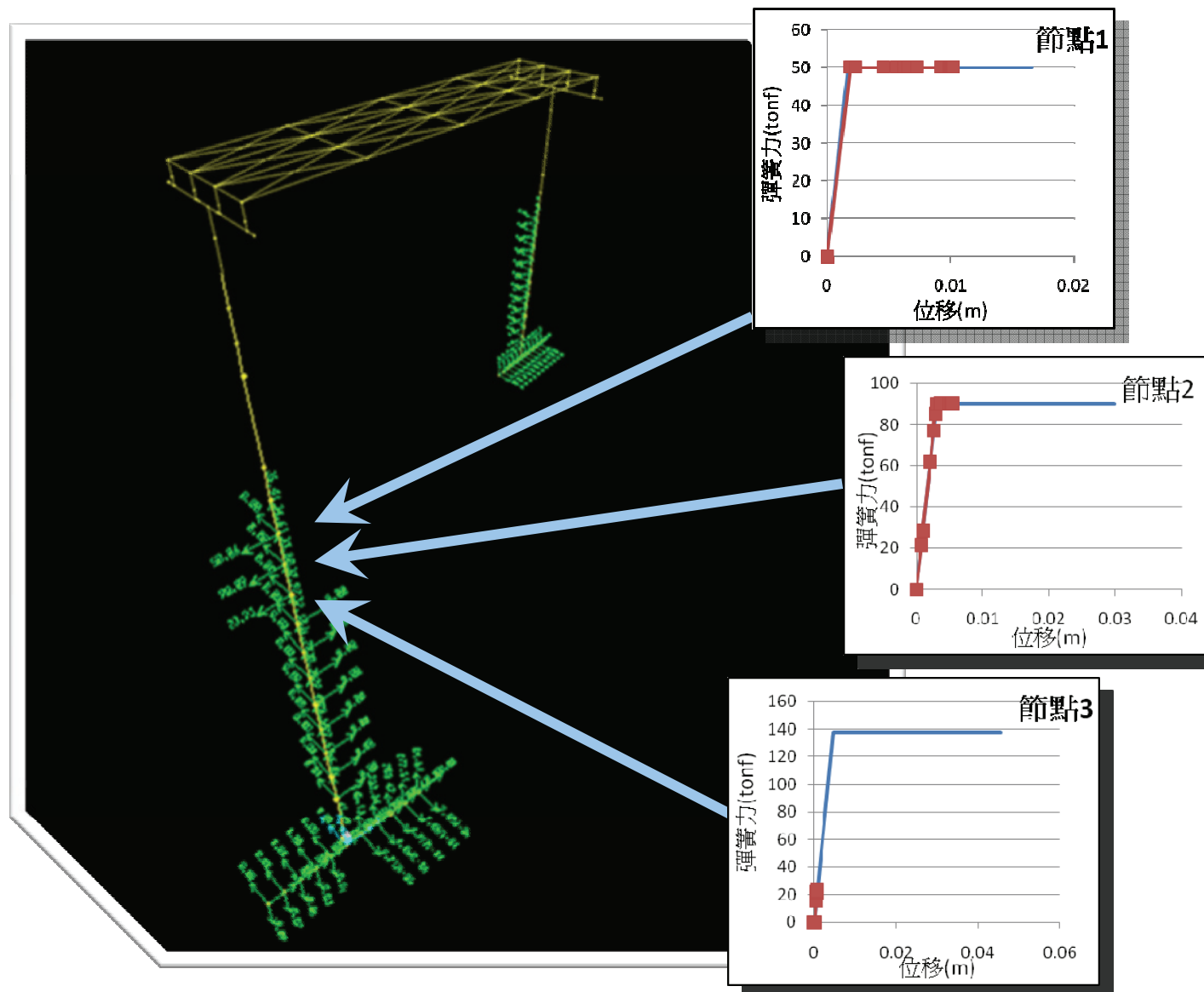


Case 2- 含沉箱基礎與土壤彈簧之簡支預力I型梁橋耐震能力評估



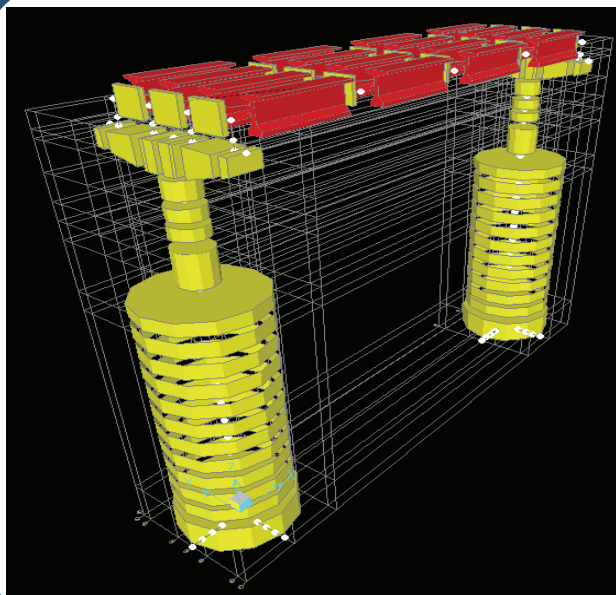


Case 2- 含沉箱基礎與土壤彈簧之簡支預力I型梁橋耐震能力評估



Case 3- 沉箱基礎發生液化之耐震能力評估

沉箱基礎

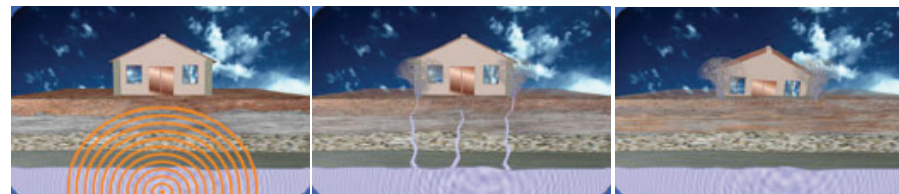


土壤液化



資料來源：公共電視-自然公園

web.pts.org.tw/~web02/nature/content.htm

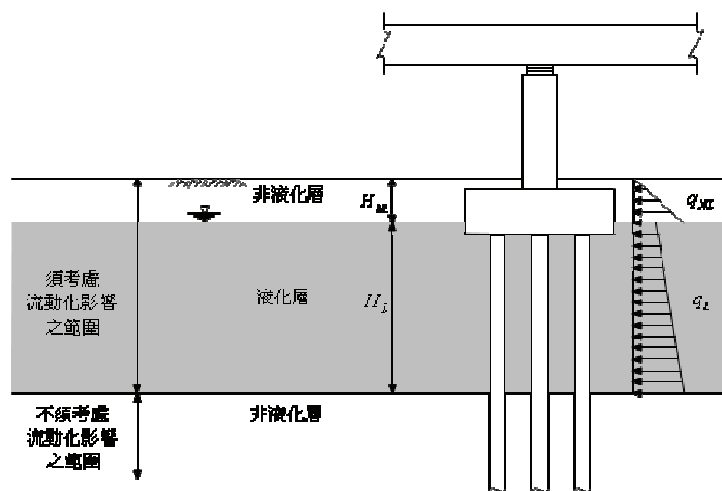


土壤液化係指原本可以支撐地表結構物的堅實土壤，由於外力的作用(如地震)，變成像液體一樣可以流動的現象。土壤一但發生液化，上面的結構物就會因為突然之間失去支撐力，而產生傾斜、下陷的現象，甚至還會伴隨著噴砂以及地表龜裂。

液化分析(1/2)

公路橋梁耐震設計規範

1. 規範規定在地震地表加速度 $A=(0.4S_{DS})g$ 下須檢核液化。
2. 液化發生時須降低基面，並以折減後之土壤參數求算基礎等值勁度，重新分析檢核其安全性。
3. 地盤產生液化的過程及結構物之反應均很複雜，故應同時考量液化與不液化二種狀況，並取較為嚴格的分析結果作為設計之依據。



依據公路橋梁耐震設計規範之規定，判定可能產生液化之土壤，應將其土壤參數乘以折減係數 D_E 。其中 $D_E=0$ 之土層即為耐震設計用土壤參數為零之土層。

表 8-1 土壤參數之折減係數 D_E

F_L 之範圍	距地表面之深度 x (m)	土壤抵抗液化強度與有效覆土壓力之比值 R_s	
		$R_s \leq 0.3$	$R_s > 0.3$
$F_L \leq \frac{1}{3}$	$0 \leq x \leq 10$	0	1/6
	$10 < x \leq 20$	1/3	1/3
$\frac{1}{3} < F_L \leq \frac{2}{3}$	$0 \leq x \leq 10$	1/3	2/3
	$10 < x \leq 20$	2/3	2/3
$\frac{2}{3} < F_L \leq 1$	$0 \leq x \leq 10$	2/3	1
	$10 < x \leq 20$	1	1

液化分析(2/2)

交通部公路總局，公路橋梁耐震評估及補強準則之研究，九十八年十二月

4.5.7 液化

對於地震時可能產生液化現象之沖積飽和砂土層應進行
液化潛能判定及土壤參數之折減。

1. 日本道路協會1996年版之『道路橋示方書・V耐震設計編』

- a. 應進行液化潛能判定之砂土層
- b. 液化之判定
- c. 地震時工址土壤抵抗液化強度與有效覆土壓力之比值，可以反覆三軸試驗之剪力強度比 R 計算代表之。

2. Seed et al. 簡易經驗法

3. Tokimatsu與Yoshimi簡易經驗法

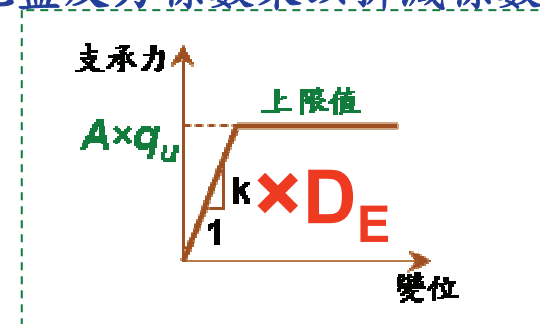
4. CPT- qc 液化評估法

Seed	Tokimatsu & Yoshimi	CPT- qc 法
抗液化安全係數	抗液化安全係數	抗液化安全係數
$F_L = \frac{(\frac{\tau}{\sigma_0})_R}{(\frac{\tau}{\sigma_0})_L}$	$F_L = \frac{(\frac{\tau}{\sigma_0})_R}{(\frac{\tau}{\sigma_0})_L}$	$F_L = \frac{q_{c1}}{(q_{c1})_{cr}}$

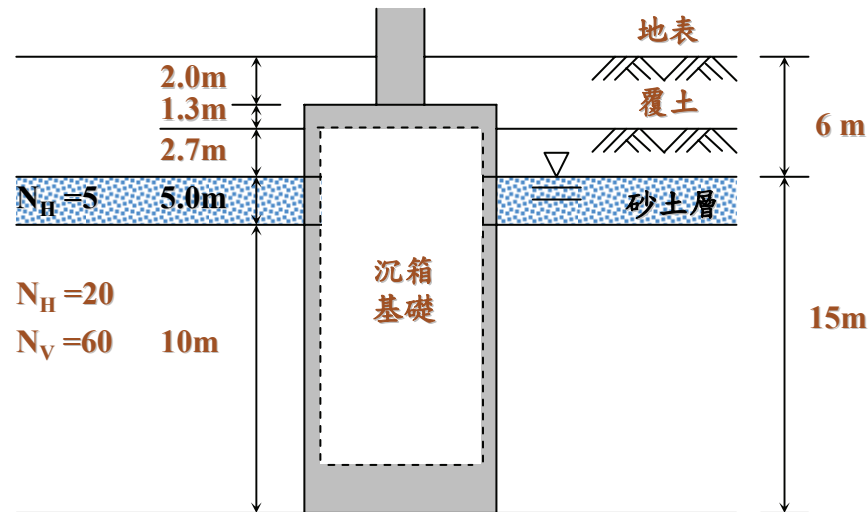
液化潛能判定

F_L 值小於1.0時，即判定該土層可能液化

土壤參數之折減
地盤反力係數乘以折減係數 D_E

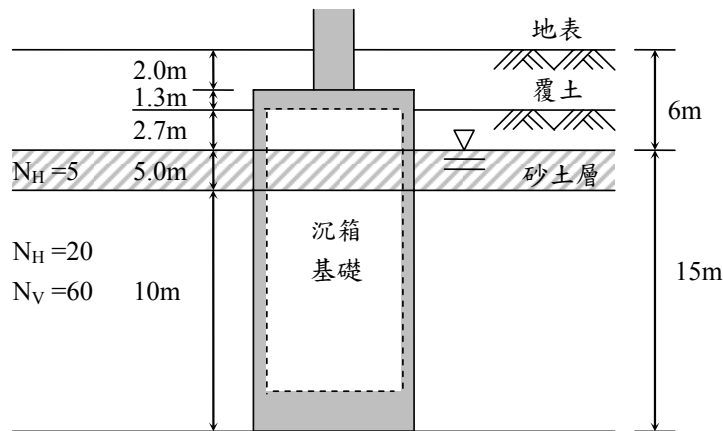


沉箱基礎之液化評估



假設橋梁工址地下水位位於地表下6m深處，而地下水位以下5m係為飽和砂土層，其細料含量 $FC=20\%$ ，通過率為50%之粒徑 $D_{50}=9$ mm，且通過率為10%之粒徑 $D_{10}=0.8$ mm，經砂土層液化潛能判定方式確認，屬於地震時可能產生液化現象之案例。今再假設由現地實驗求得地下水位面上方、下方之土壤單位體積重與下方之土壤有效單位體積重 $\gamma_{t1}=1.9$ 、 $\gamma_{t2}=1.8$ 和 $\gamma'_{t2}=1.7$ tonf/m³，將砂土層分成五層(每層1m)計算有效覆土壓力和總覆土壓力，並同時假設發生大地震時之水平地表加速度係數 $k_h=0.25$ 。

沉箱基礎之液化評估



土壤參數之折減係數 D_E

F_L 之範圍	距地表面之深度 x (m)	土壤抵抗液化強度與有效覆土壓力之比值 R_s	
		$R_s \leq 0.3$	$R_s > 0.3$
$F_L \leq \frac{1}{3}$	$0 \leq x \leq 10$	0	1/6
	$10 < x \leq 20$	1/3	1/3
$\frac{1}{3} < F_L \leq \frac{2}{3}$	$0 \leq x \leq 10$	1/3	2/3
	$10 < x \leq 20$	2/3	2/3
$\frac{2}{3} < F_L \leq 1$	$0 \leq x \leq 10$	2/3	1
	$10 < x \leq 20$	1	1

$x=7m$

$R_s =$	0.161	→
$r_d =$	0.895	
$L_s =$	0.22546	
$F_L =$	0.71221	→
$D_E =$	0.66667	←

$x=8m$

$R_s =$	0.155	→
$r_d =$	0.88	
$L_s =$	0.22297	
$F_L =$	0.6944	→
$D_E =$	0.66667	←

$x=9m$

$R_s =$	0.150	→
$r_d =$	0.865	
$L_s =$	0.220182	
$F_L =$	0.6801	→
$D_E =$	0.66667	←

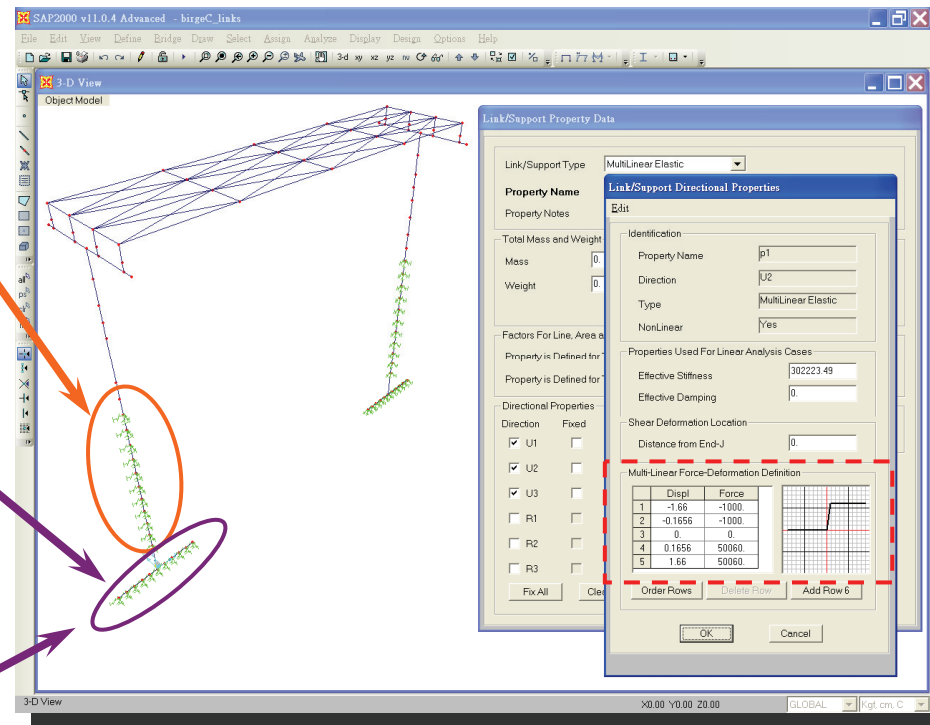
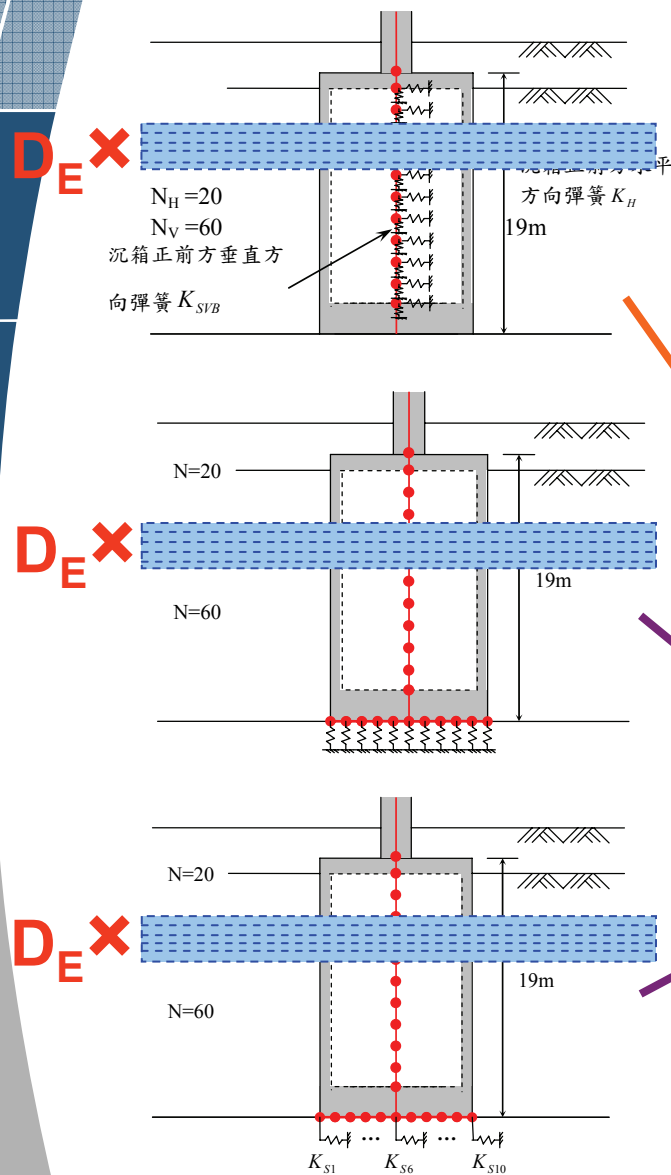
$x=10m$

$R_s =$	0.145	→
$r_d =$	0.85	
$L_s =$	0.21717	
$F_L =$	0.66862	→
$D_E =$	0.66667	←

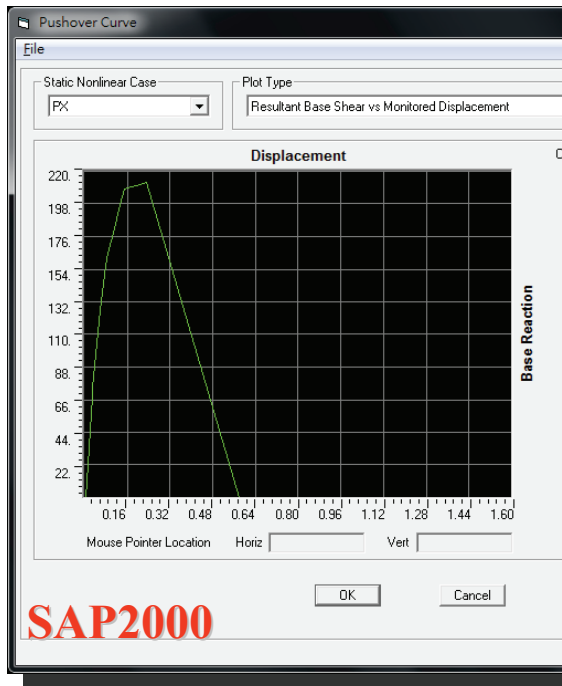
$x=11m$

$R_s =$	0.141	→
$r_d =$	0.835	
$L_s =$	0.21399	
$F_L =$	0.65944	→
$D_E =$	0.66667	←

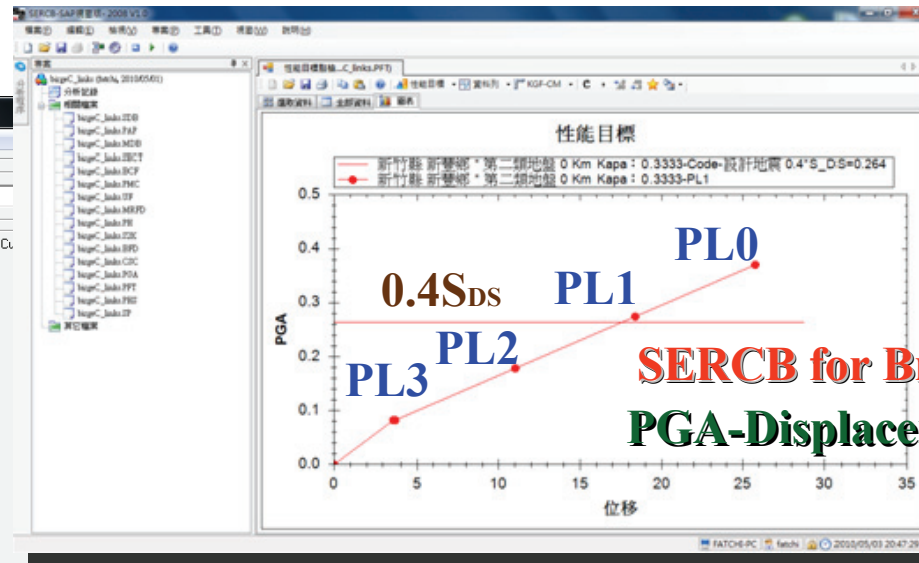
Case 3- 沉箱基礎發生液化之耐震能力評估



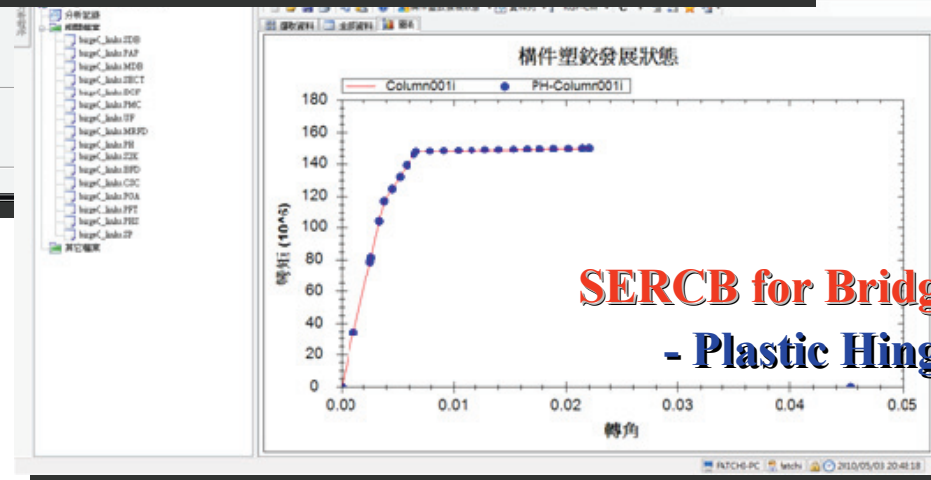
Case 3- 沉箱基礎發生液化之耐震能力評估



SAP2000

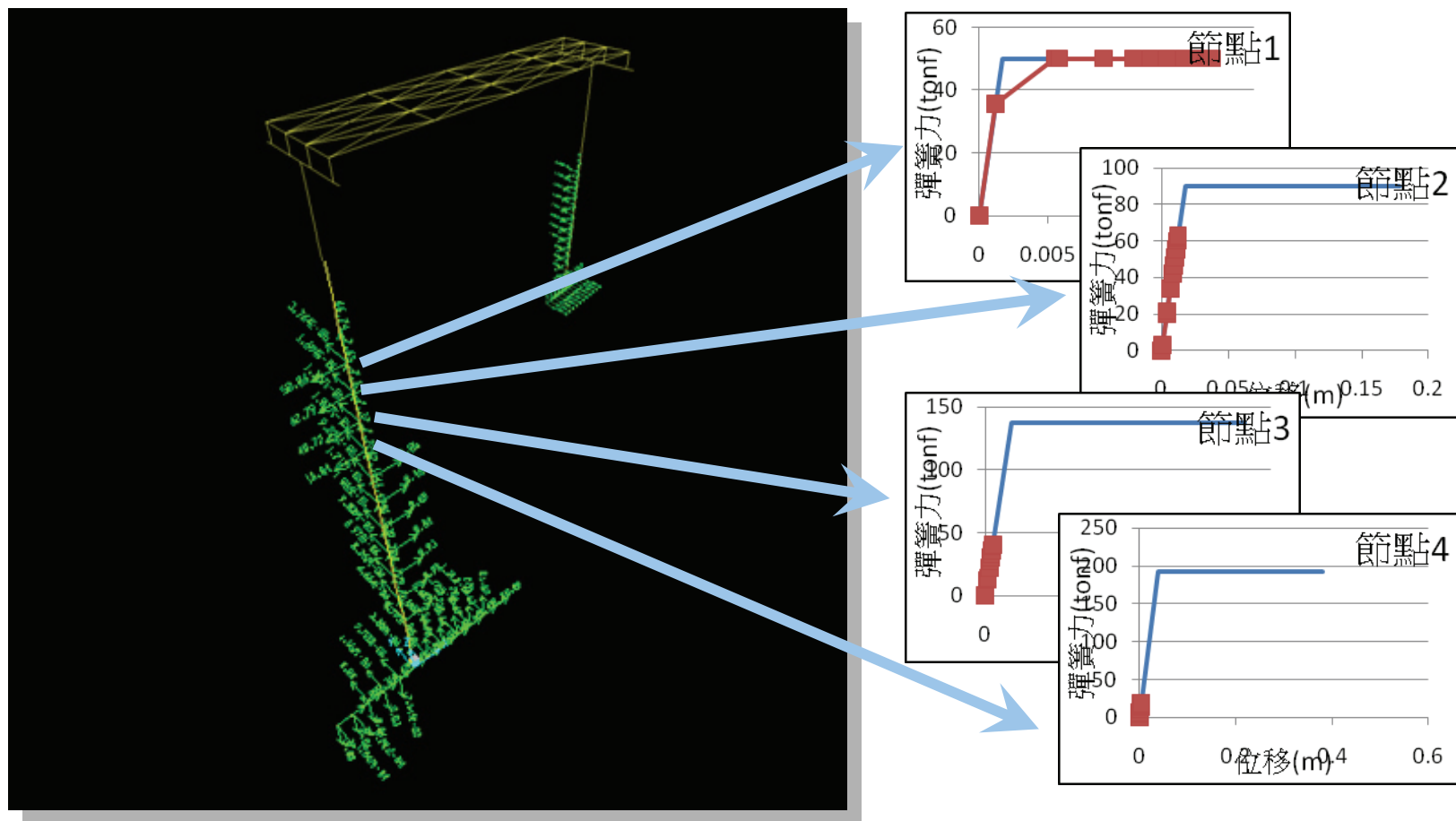


**SERCB for Bridge
PGA-Displacement**



**SERCB for Bridge
- Plastic Hinge**

Case 3- 沉箱基礎發生液化之耐震能力評估

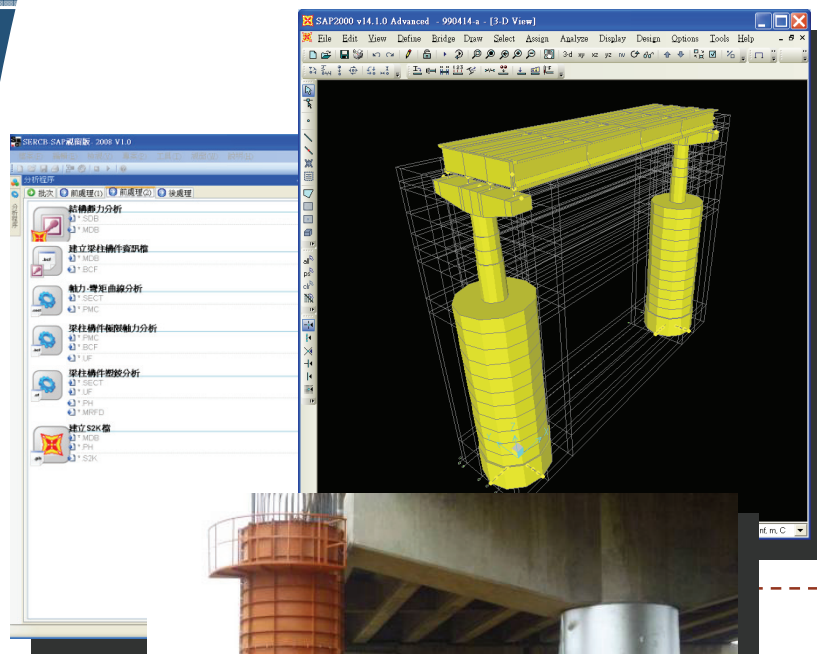


公路橋梁設計規範 Chap 5.9

表5.12 基礎容許水平變位

基礎型式	基準	常時載重	極限載重
沈箱	頂端垂直軸側向變位	不大於沈箱寬度之1%，且以50mm為限	不落橋
基樁	長期設計基盤面	10mm	不落橋

結論



單柱式橋墩耐震能力評估流程

沉箱基礎之土壤彈簧模擬方式

液化評估與分析

補強案例





Thank You !



國家地震工程研究中心
National Center for Research on Earthquake Engineering

CECI



台灣世暉工程顧問股份有限公司
CECI Engineering Consultants, Inc., Taiwan