

淡江大學土木工程學系碩士班

接縫式混凝土鋪面參數分析與驗證

論文口試簡報

指導教授：李英豪

研究生：吳圻達

中華民國九十一年十二月二十八號

1

簡報綱要

- 簡介
- 理論分析
- 鋪面特性分析與模式構建
- 自動化分析程式與資料庫構建
- 結論與建議

2

現有鋪面分析問題

- 二維分析不足
- 三維分析太複雜
- 網格切割並無可以遵循依據
- 計算結果正確與否

3

二維與三維分析比較

- 二維分析
 - 模式簡單
 - 分析時間短
 - 假設較多，無法模擬真實鋪面
- 三維分析
 - 模式複雜，且不易構建
 - 分析時間長
 - 可以更真實模擬鋪面

4

研究內容與範圍

- 單一版塊
- 緊密液體基礎
- 三個荷重區域(中央、邊緣、角隅)
- ABAQUS與ILLI-SLAB
- 建立應力與撓度資料庫

5

Westergaard理論解

- 中央撓度

$$\Delta_i = \frac{P}{8k\ell^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{a}{2\ell}\right) - 0.673 \right] \left(\frac{a}{\ell}\right)^2 \right\}$$

- 中央應力

$$\sigma_{iold} = \frac{3(1+\nu)P}{2\pi h^2} \left(\ln\frac{\ell}{b} + 0.6159 \right)$$

$$b = \begin{cases} a & \text{if } a \geq 1.724h \\ \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h & \text{if } a < 1.724h \end{cases}$$

$$\sigma_{iordinary} = \frac{3(1+\nu)P}{2\pi h^2} \left(\ln\frac{2\ell}{a} + 0.5 - \gamma \right) + \frac{3(1+\nu)P}{64h^2} \left(\frac{a}{\ell}\right)^2$$

6

Westergaard理論解(一)

- 邊緣撓度

$$\Delta_e = \frac{\sqrt{2+1.2\nu}P}{\sqrt{Eh^3k}} \left[1 - \frac{(0.76+0.4\nu)a}{\ell} \right]$$

- 邊緣應力

$$\sigma_e = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left[\ln\left(\frac{Eh^3}{100ka^4}\right) + 1.84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{1-\nu}{2} + \frac{1.18(1+2\nu)a}{\ell} \right]$$

7

Westergaard理論解(二)

- 角隅撓度

$$\Delta_c = \frac{P}{k\ell^2} \left[1.1 - 0.88 \left(\frac{a\sqrt{2}}{\ell}\right) \right]$$

- 角隅應力

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{a\sqrt{2}}{\ell}\right)^{0.6} \right]$$

8

有限元素程式

- 二維有限元素程式
 - ILLI-SLAB, KENSLAB, JSLAB, WESLIQUID, FEACONS
- 三維有限元素程式
 - ABAQUS, NIKE3D, DYNA3D, INGRID, EverFE

9

基礎假設(溫式基礎)

- 路基土壤視為一線性彈簧，每一彈簧之變形為各自獨立，路基反力假設僅產生垂直方向，並與垂直變位成正比
- 優點：
 - 只考慮路基反力模數K，避免複雜的數學推導
 - 角隅或邊緣荷重，可得到比彈性固體基礎更佳的結果，其主要原因為彈性固體基礎在考慮介面之連結，路基土壤的剪應力過大，而在溫氏基礎的假設情況下將發生衝孔破壞

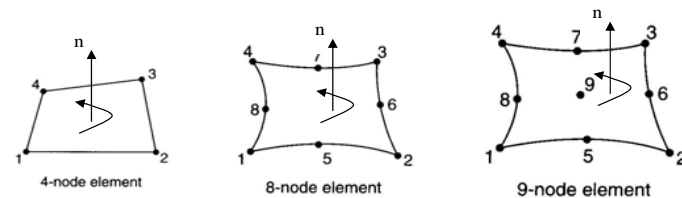
10

基礎假設(彈性固體)

- 假設路基土壤為線彈性、等向性與均質的土壤，在柔性鋪面分析上較常採用
- 基礎假設差異
 - 彈性固體比溫氏基礎可更真實模擬路基力學行為
 - 考慮到鄰近元素的剪力的交互影響
 - 撓度同時受到節點力與鄰近節點撓度影響

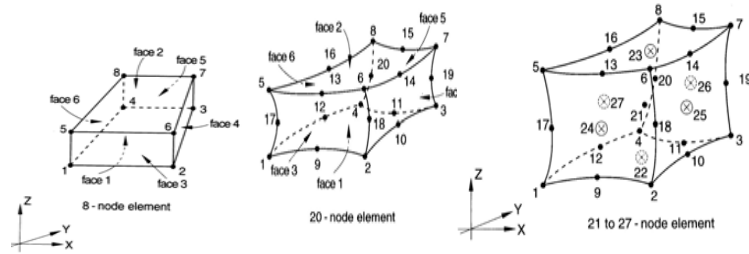
11

元素介紹(三維版殼元素)



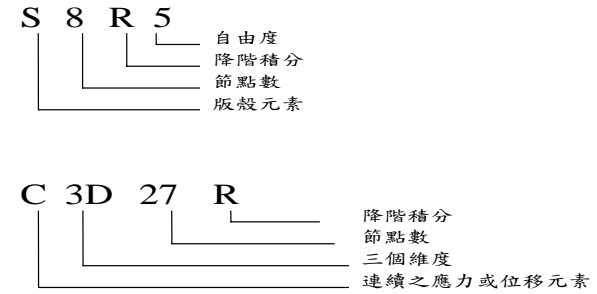
12

元素介紹(固體元素)



13

元素命名方式



14

版殼元素與固體元素特性

名稱	ILLI-SLAB	ABAQUS 3-D SHELL ELEMENTS					
	RPB12	S4	S4R	S4R5	S8R	S8R5	S9R5
維度	二維	三維					
節點數	4	4	4	4	8	8	9
自由度	3	6	6	5	6	5	5
降階積分	否	否	是	是	是	是	是
積分點數	4	4	1	1	4	4	4
使用限制	薄版	一般狀況	一般狀況	薄版	厚版	薄版	薄版

名稱	ABAQUS 3-D SOLID ELEMENT					
	C3D8	C3D8R	C3D20	C3D20R	C3D27	C3D27R
節點數	8	8	20	20	27	27
降階積分	否	是	否	是	否	是
積分點數	4	1	27	8	27	14

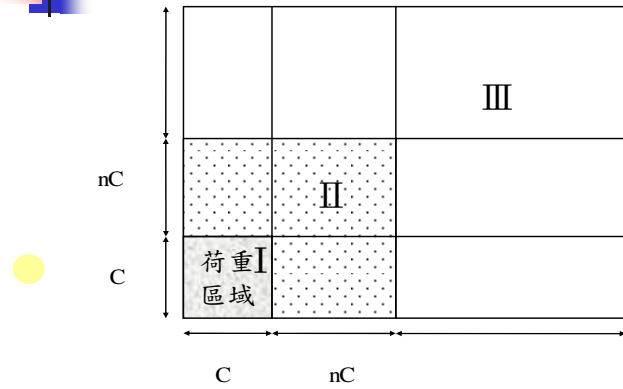
15

網格切割原則

- 判定結構對稱性與否
- 荷重區域網格切割
- 決定相同網格切割密度之長度
- 決定網格切割密度

16

切割區域示意圖



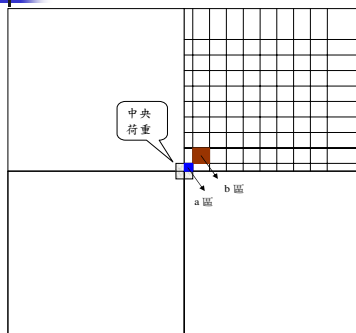
17

切割方式

- TYPE I
 - 荷重區域或荷重鄰近區域不為正方形
- TYPE II
 - 荷重區域或荷重鄰近區域都為正方形

18

中央荷重網格切割



a區元素數目：

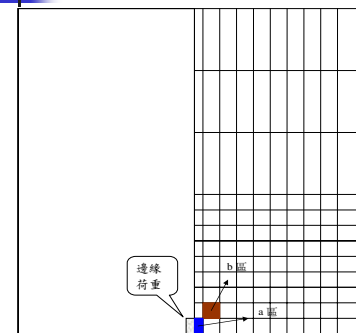
$$\begin{cases} \left(\frac{N+1}{2}\right)^2 & \text{if } N = \text{ODD} \\ (N)^2 & \text{if } N = \text{EVEN} \end{cases}$$

b區元素數目

$$N^2$$

19

邊緣荷重網格切割



a區元素數目：

$$\begin{cases} \left(\frac{N+1}{2}\right)(N) & \text{if } N = \text{ODD} \\ (N)^2 & \text{if } N = \text{EVEN} \end{cases}$$

b區元素數目

$$N^2$$

20

網格切割收斂性分析

■ 鋪面參數

$$a/\ell=0.1$$

$$L/\ell=7$$

$$W/\ell=7$$

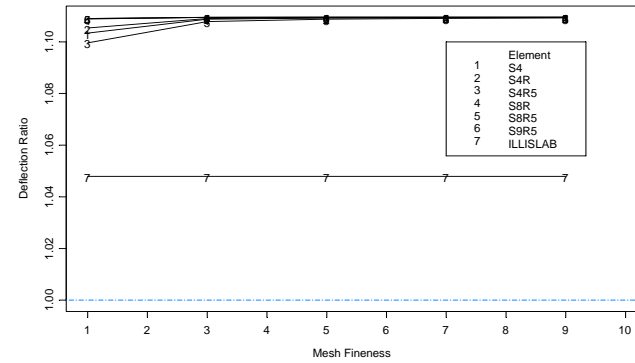
$$h/a=3$$

版長 $L=197$ in.
 版寬 $W=197$ in.
 混凝土彈性模數 $E=1,200,000$ psi
 版厚 $h=8.5$ in.
 基底層反力模數值 $k=100$ pci
 方形載重區域之邊長 $C=5$ in.
 胎壓 $p=90$ psi
 波生比 $\nu=0.15$
 輪載重 $P=2,250$ lbs

- 網格切割：水平向1~10，厚度切割1~4層
 密度(I)區=(II)區,(8*C)

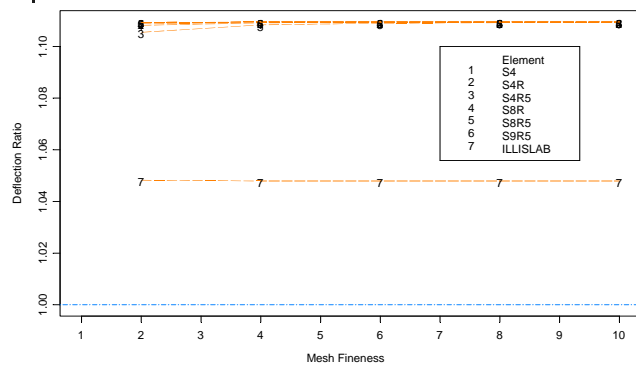
21

中央荷重(撓度)



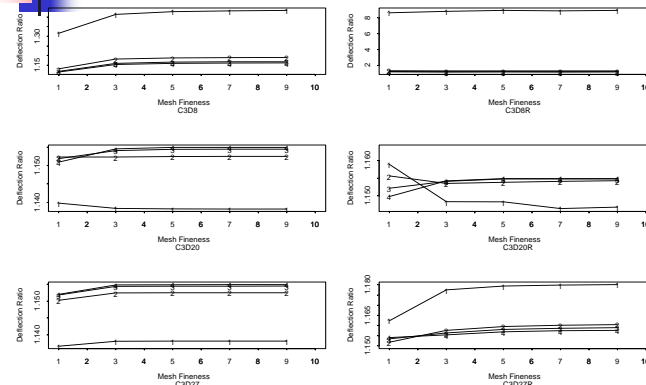
22

中央荷重(撓度)



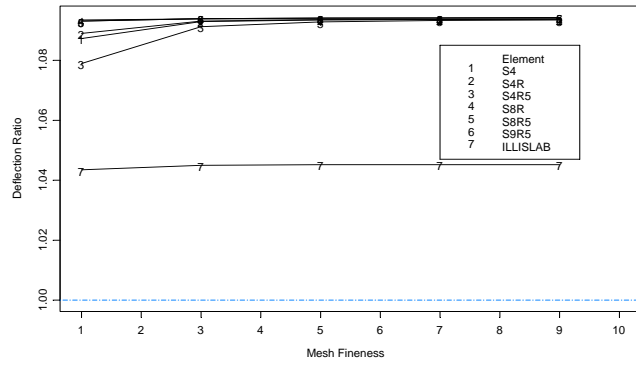
23

中央荷重(撓度)



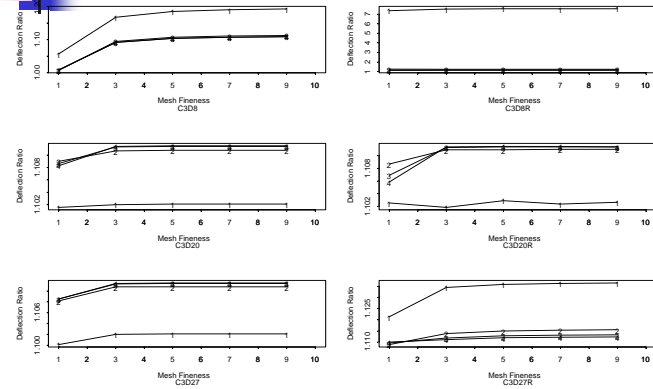
24

邊緣荷重(撓度)



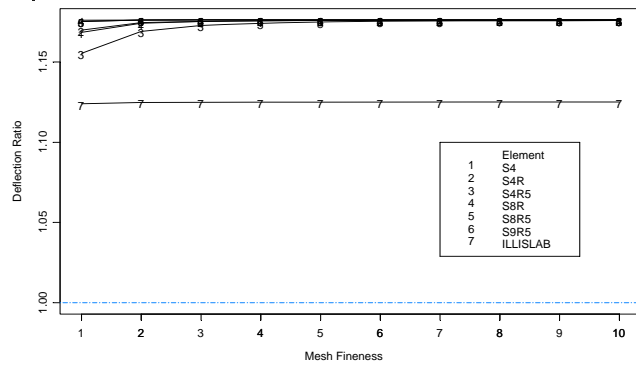
25

邊緣荷重(撓度)



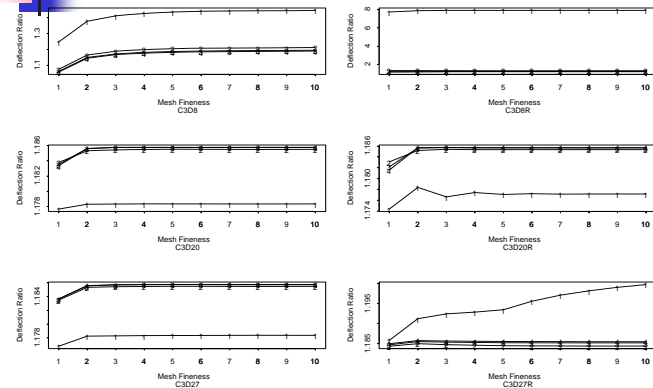
26

角隅荷重(撓度)



27

角隅荷重(撓度)



28

撓度收斂性結論

- 固體元素>三維版殼元素>ILLI-SLAB>理論解
- S8R與S8R5、S9R5撓度值相近
S9R5=S8R5
- 網格切割較粗，S4R5<S4<S4R

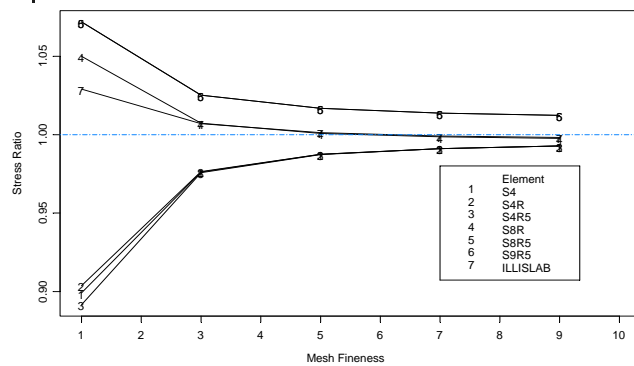
29

撓度收斂性結論(一)

- 切割層數為1層不考慮。水平向切割為3 C3D20、C3D27、C3D20R元素隨著切割層數增加而撓度值增加；C3D8、C3D8R元素隨著切割層數增加而撓度值減少
- 水平向切割為3及厚度切3層，使用C3D20或是C3D27元素可以得到很好之收斂值

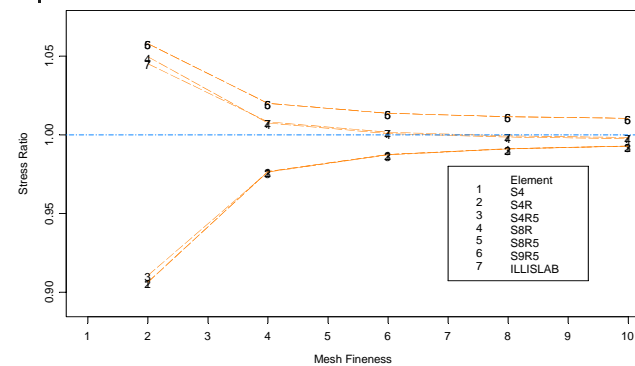
30

中央荷重(應力)



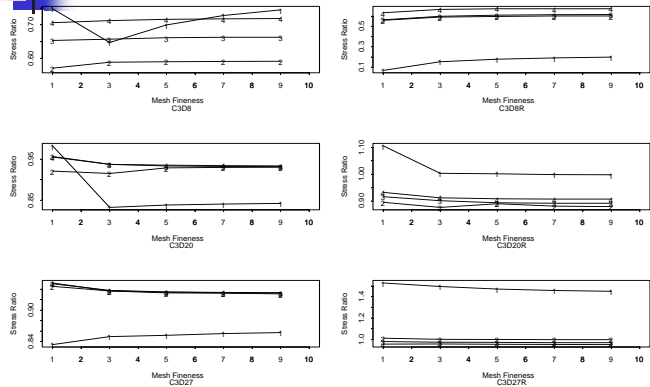
31

中央荷重(應力)



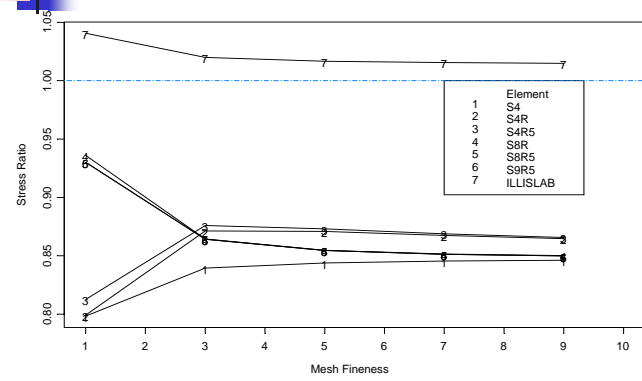
32

中央荷重(應力)



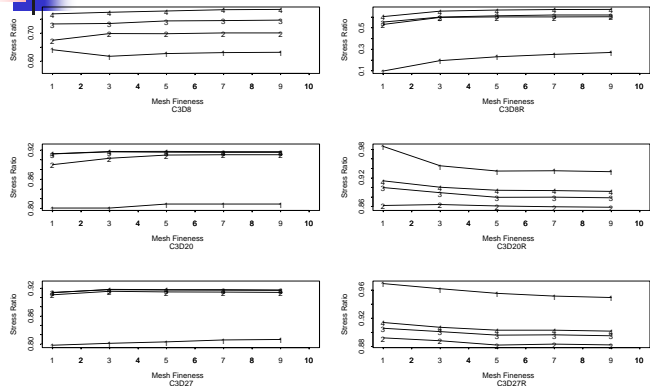
33

邊緣荷重(應力)



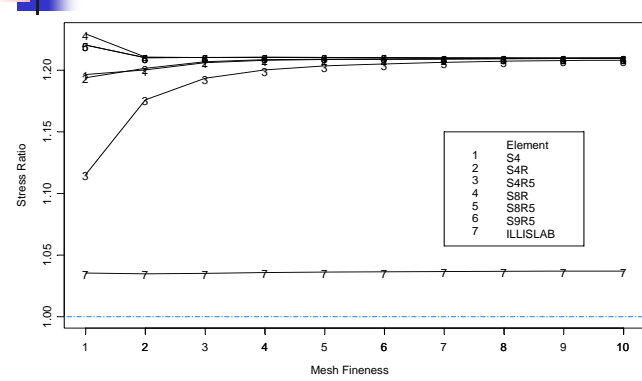
34

邊緣荷重(應力)



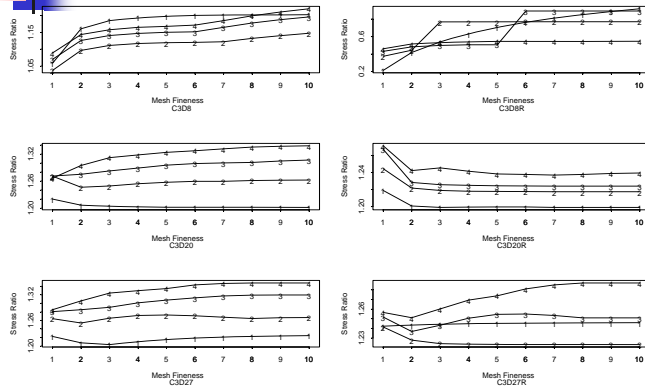
35

角隅荷重(應力)



36

角隅荷重(應力)



37

應力收斂性結論

- 8點元素及9點元素隨著網格密，應力值由大減小，且 $S8R5=S9R5$
- 4點元素應力值隨著網格較密應力值由小增加而收斂
- C3D20及C3D27，切割層數增加應力增加
- 中央、邊緣荷重，水平向切割為3及層數為3層時，選用C3D20及C3D27元素很好收斂，而角隅荷重切3層時收斂情況較差

38

不同版厚與荷重大小之收斂性

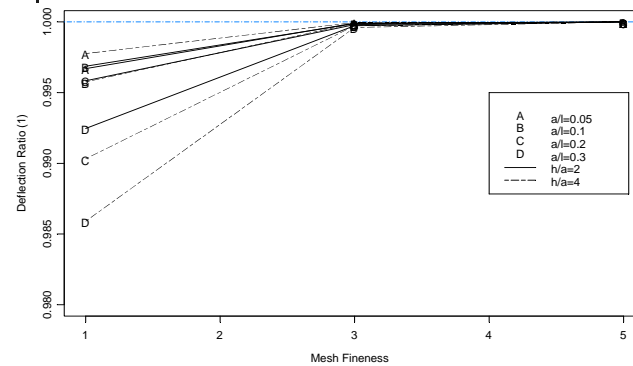
- 選用元素C3D27
- 切割方式
 - 固定水平向為3，不同切割層數
 - 固定切割層數為3層，不同水平向切割
- 使用參數

a/l	h/a	C	h	E	k
		in.	in.	psi	pci
0.05	2	10	11.284	1.99E+08	150
0.1	2	15	16.926	2.48E+07	200
0.2	2	5	5.642	1.03E+06	400
0.3	2	7.5	8.463	3.83E+05	500
0.05	4	5	11.284	3.31E+07	400
0.1	4	10	22.568	6.20E+06	600
0.2	4	6	13.541	5.82E+04	150
0.3	4	7	15.797	1.16E+04	130

註：L/l=7, W/l=7, p=90psi

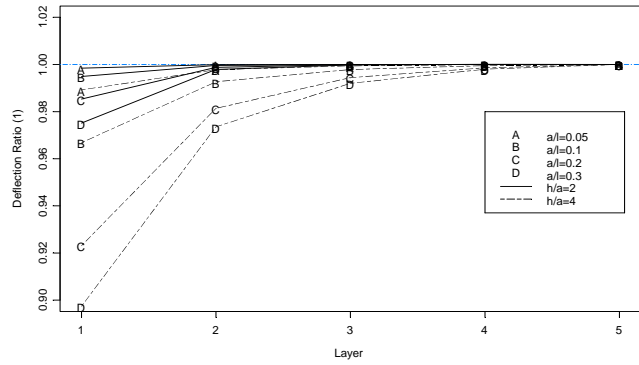
39

中央荷重(撓度)



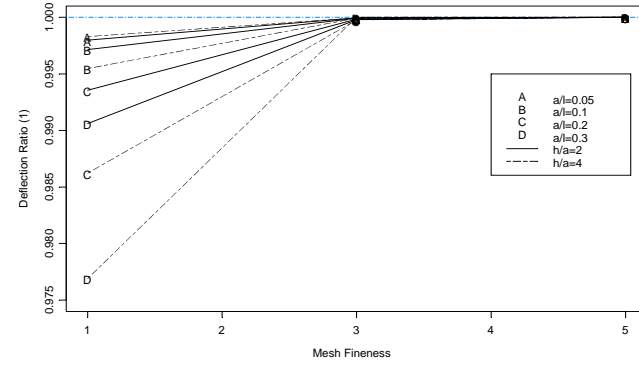
40

中央荷重(撓度)



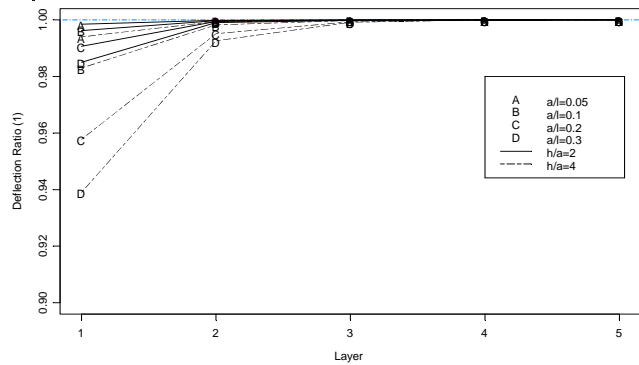
41

邊緣荷重(撓度)



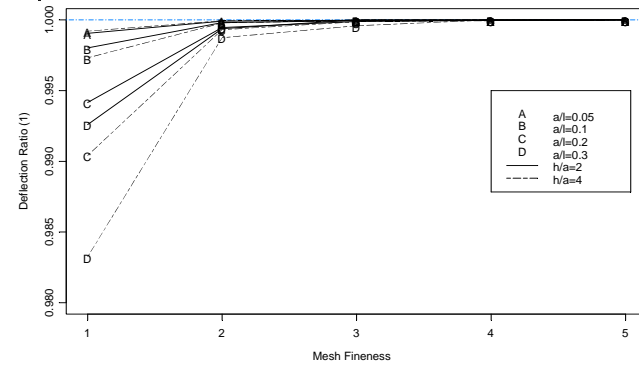
42

邊緣荷重(撓度)



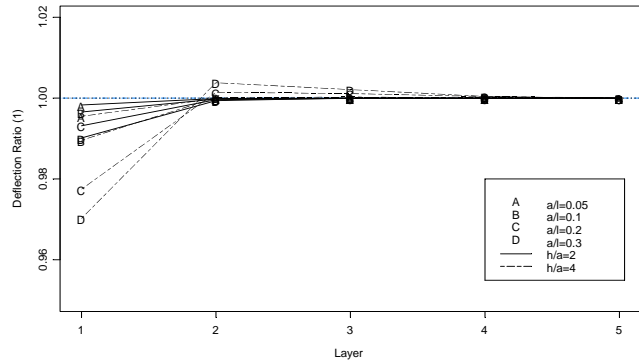
43

角隅荷重(撓度)



44

角隅荷重(撓度)



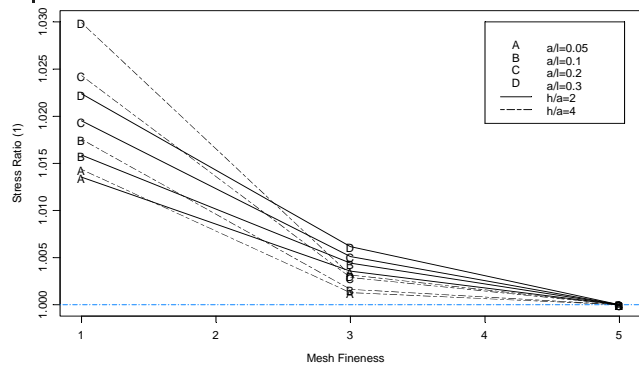
45

綜合討論

- 以上分析中，撓度收斂特性完全相同。水平向切割愈密撓度愈大而收斂；切割層數增加撓度會增加而收斂。
- h/a 較小且 a/l 較小情況下，撓度收斂比 h/a 大且 a/l 大撓度收斂佳。
- 水平方向切割為3及切割3層時可得到很好之撓度收斂

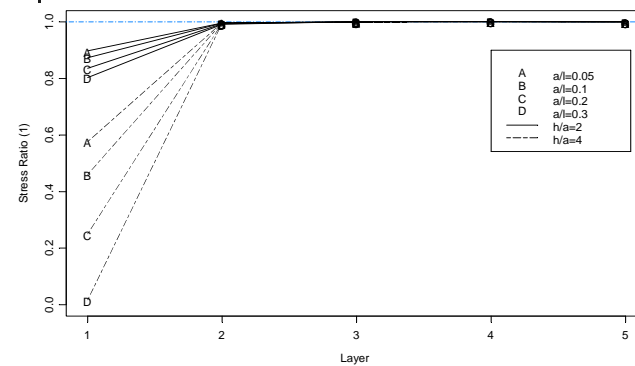
46

中央荷重(應力)



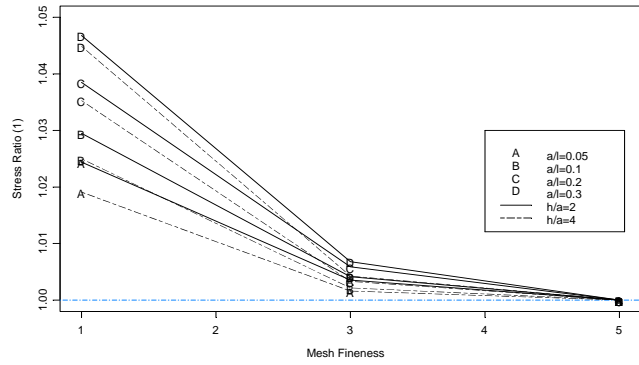
47

中央荷重(應力)



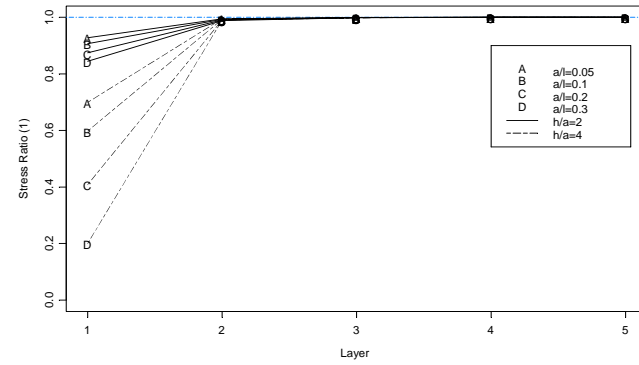
48

邊緣荷重(應力)



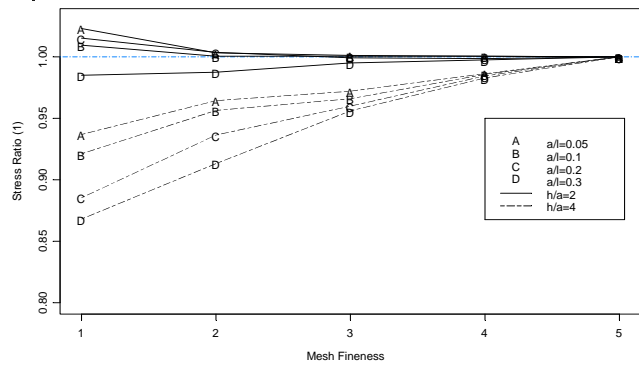
49

邊緣荷重(應力)



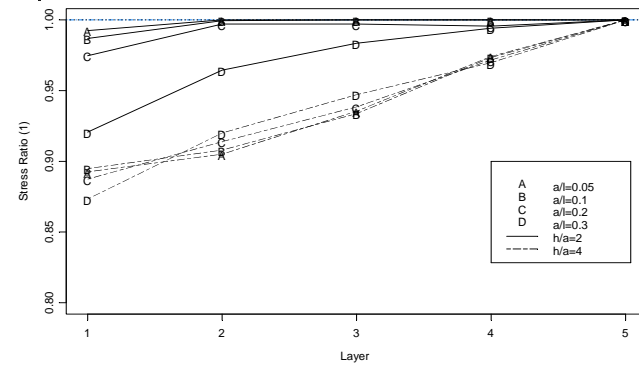
50

角隅荷重(應力)



51

角隅荷重(應力)



52

綜合討論

- 中央及邊緣應力收斂完全相同。水平向切割愈密應力愈小而收斂；切割層數增加應力值增加而收斂
- 中央荷重及邊緣荷重在 h/a 較小且 a/l 較小情況下，應力之收斂比 h/a 較大且 a/l 較大佳
- 中央及邊緣在水平方向切割為3及切割3層時可得很好應力收斂值

53

綜合討論(一)

- 切割層數應力變化 $>$ 水平網格切割密度
- 角隅荷重應力受到厚度方向之剪應力影響，因此在 (h/a) 較大收斂較不易達成
- 角隅荷重下，在 (h/a) 較大時固體元素計算應力時會是理論解之數倍，因為此時Westergaard理論解應力較小

54

切割區域決定

- 收斂性分析是取 $(8 * C)$

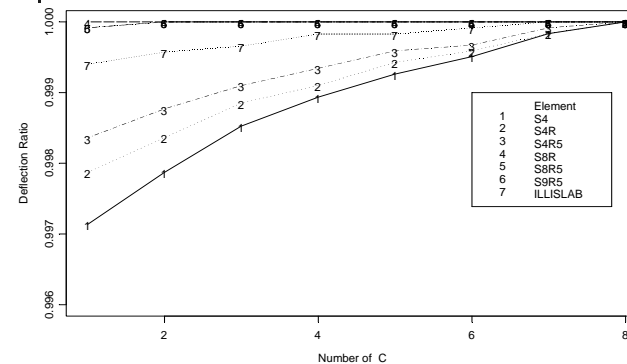
nC	ILLI-SLAB	ABAQUS 3-D SHELL							ABAQUS 3-D SOLIDS			
	RPB12	S4	S4R	S4R5	S8R	S8R5	S9R5	C3D20	C3D20R	C3D27	C3D27R	
8	11.693	12.229	12.231	12.210	12.239	12.240	12.240	12.435	12.435	12.435	12.441	
7	11.693	12.227	12.229	12.209	12.239	12.240	12.240	12.435	12.435	12.435	12.441	
6	11.692	12.223	12.226	12.206	12.239	12.240	12.240	12.435	12.435	12.435	12.441	
5	11.691	12.220	12.224	12.205	12.239	12.240	12.240	12.435	12.435	12.435	12.441	
4	11.691	12.216	12.220	12.202	12.239	12.240	12.240	12.435	12.435	12.435	12.441	
3	11.689	12.211	12.217	12.199	12.239	12.240	12.240	12.435	12.435	12.435	12.441	
2	11.688	12.203	12.211	12.195	12.239	12.240	12.240	12.435	12.435	12.435	12.440	
1	11.686	12.194	12.205	12.190	12.239	12.239	12.239	12.434	12.435	12.435	12.439	

註： $a/l=0.1, h/a=3, L/l=7, W/l=7$

單位：0.001in

55

切割區域決定(一)



56

切割區域決定(二)

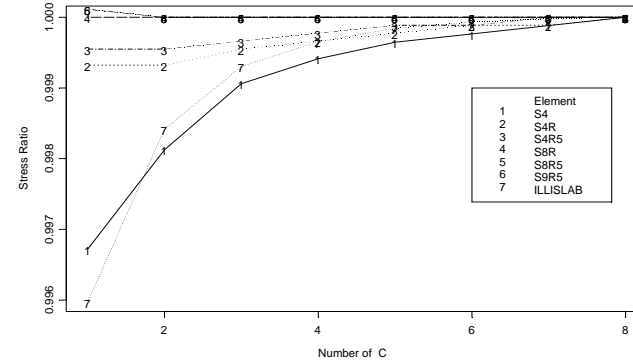
nC	ILLI-SLAB	ABAQUS 3-D SHELL						ABAQUS 3-D SOLIDS			
	RPB12	S4	S4R	S4R5	S8R	S8R5	S9R5	C3D20	C3D20R	C3D27	C3D27R
8	103.72	85.38	88.61	89.08	87.91	87.89	87.89	93.19	90.38	93.24	91.63
7	103.72	85.37	88.60	89.08	87.91	87.89	87.89	93.19	90.38	93.24	91.63
6	103.72	85.36	88.60	89.07	87.91	87.89	87.89	93.19	90.38	93.24	91.63
5	103.71	85.35	88.59	89.07	87.91	87.89	87.89	93.19	90.38	93.24	91.63
4	103.69	85.33	88.58	89.06	87.91	87.89	87.89	93.19	90.38	93.24	91.63
3	103.65	85.30	88.57	89.05	87.91	87.89	87.89	93.19	90.38	93.24	91.63
2	103.56	85.22	88.55	89.04	87.91	87.89	87.89	93.19	90.38	93.25	91.63
1	103.31	85.10	88.55	89.04	87.91	87.90	87.90	93.20	90.38	93.25	91.64

註：a/l=0.1, h/a=3, L/l=7, W/l=7

單位：psi

57

切割區域決定(三)



58

基礎模式比較

撓度

a/l	ILLI-SLAB		ABAQUS (S4R5)	
	FOUNDATION	SPRING	FOUNDATION	SPRING
0.1	137.7	137.5	120.4	120.4
0.2	629.8	629.4	587.4	587.2
0.3	1454.3	1452.8	1391.0	1390.0
0.4	2543.9	2539.4	2460.0	2458.0
0.5	3825.9	3815.2	3721.0	3716.0

p=90 psi, k=100 pci, a=6 in, E=4000000 psi, 單位：0.001in
L/l=7, W/l=7

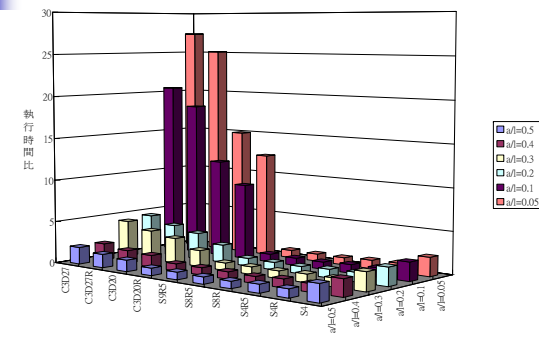
應力

a/l	ILLI-SLAB		ABAQUS (S4R5)	
	FOUNDATION	SPRING	FOUNDATION	SPRING
0.1	11.583	11.578	12.099	12.101
0.2	42.886	42.840	43.926	43.884
0.3	89.094	88.953	90.507	90.373
0.4	145.964	145.658	147.600	147.300
0.5	209.902	209.350	211.600	211.100

p=90 psi, k=100 pci, a=6 in, E=4000000 psi, 單位：psi
L/l=7, W/l=7

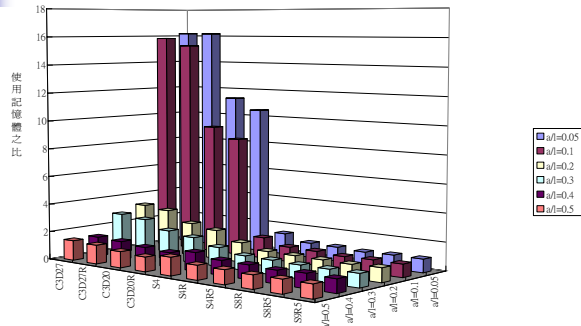
59

執行時間比較



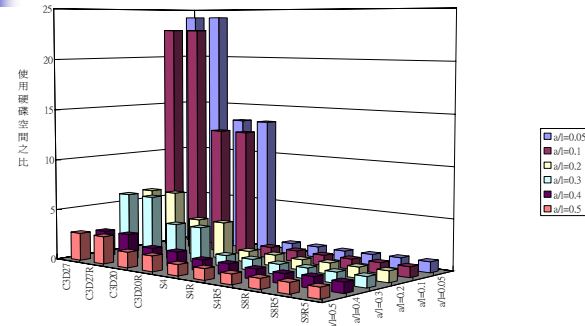
60

記憶體比較



61

硬碟使用空間比較



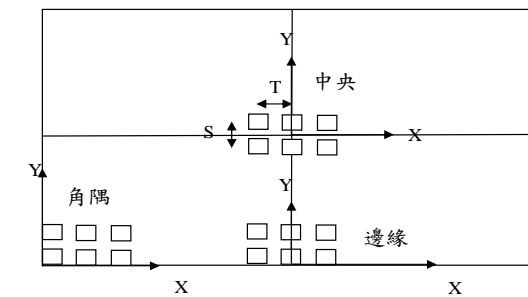
62

網格切割與元素建議

- 8點元素無法得到20點或27點之值
- 固體元素：切割很密時，有降階積分比無降階積分應力小1%
- 網格切割粗時，20點比27點小2%
- 水平向網格切割3，厚度切割3層即可
- 20點元素為27點60%時間

63

自動化程式構建



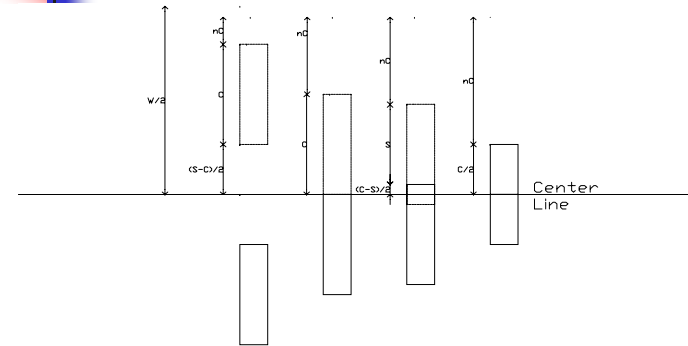
64

切割模式之原則(雙輪)

- 雙輪分開，即 $S > C$
- 雙輪相接，即 $S = C$
- 雙輪部份重疊，即 $0 < S < C$
- 雙輪重合，即 $S = 0$

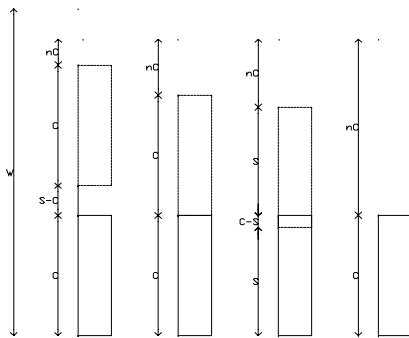
65

雙輪型式(對稱)



66

雙輪型式(不對稱)



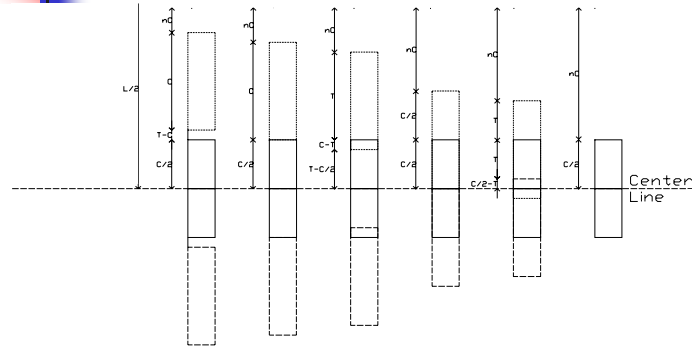
67

切割模式之原則(三軸)

- 三軸分開，即 $T > C$
- 三軸相接，即 $T = C$
- 第一軸與第二軸重疊，但不與第三軸重疊，即 $C/2 < T < C$
- 第一軸與第三軸相接，即 $T = C/2$
- 第一軸、第二軸及第三軸都較互重疊，即 $0 < T < C/2$
- 三軸完全重合

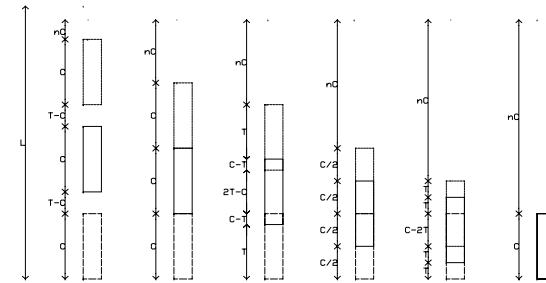
68

三軸型式(對稱)



69

三軸型式(不對稱)



70

元素切割長度原則

- 原則
 - 決定元素最大切割長度
 - 以切割長度除以最大切割長度且無條件進位得到元素數目
 - 切割長度除以元素數目得之元素切割長度

71

ABAQUS程式批次分析

- 修改環境變數
 - `run_mode = BACKGROUND` 改為 `run_mode = INTERACTIVE`
- 執行程式
 - `C:\ABAQUS\6.2-1\exec\launcher.exe job= "輸入檔名"`
- 增加虛擬記憶體
 - 我的電腦->內容->進階->效能(設定)->進階->虛擬記憶體

72

控制參數選擇

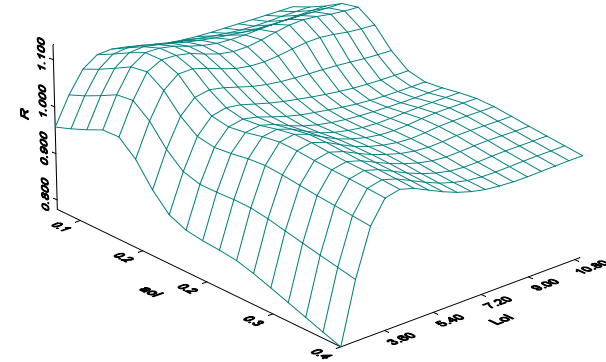
$$\frac{\sigma h^2}{P} = f\left(\frac{a}{l}, \frac{L}{l}, \frac{W}{l}\right)$$

$$\frac{\delta k l^2}{P} = f\left(\frac{a}{l}, \frac{L}{l}, \frac{W}{l}\right)$$

C	a	h	E	k	a/l
in.	in.	in.	psi	pci	
10	5.642	26.69	5	50	0.05
10	5.642	20.93	5	50	0.06
10	5.642	17.04	5	50	0.07
10	5.642	14.26	5	50	0.08
10	5.642	12.19	5	50	0.09
10	5.642	10.59	5	50	0.1
10	5.642	4.20	5	50	0.2
10	5.642	2.45	5	50	0.3
10	5.642	1.67	5	50	0.4

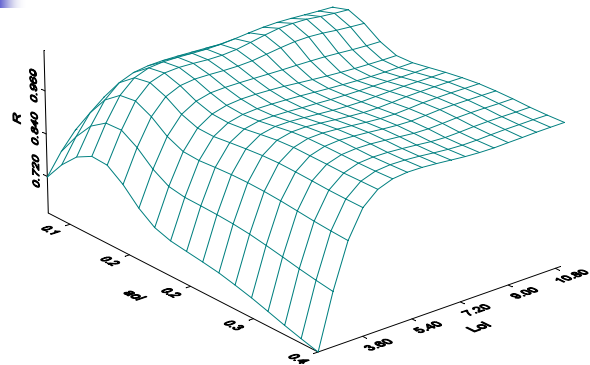
73

中央應力圖



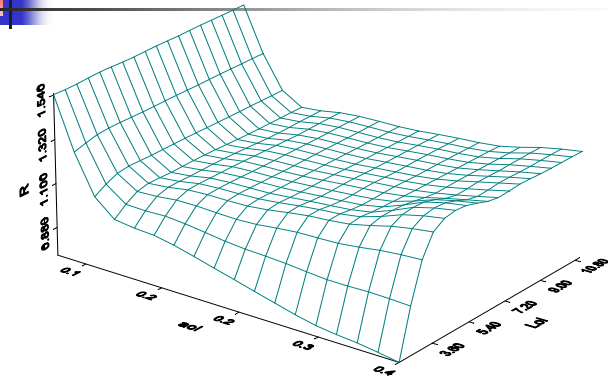
74

邊緣應力



75

角隅應力



76

額外控制參數選擇

- 先前研究
- 基礎工程
- 鋪面應力分析與設計
- 固定荷重半徑下，h/a增加代表厚度增加，應力值會減少；固定荷重半徑下，a/h增加代表厚度減少，應力值會增加，所以本研究採用h/a參數

$$\Delta p = q_0 \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{B}{2Z} \right)^2 \right]^{3/2}} \right\}$$

77

控制參數驗證

$$\frac{\sigma h^2}{P} = f\left(\frac{a}{l}, \frac{L}{l}, \frac{W}{l}, \frac{h}{a}\right)$$

$$\frac{\delta k l^2}{P} = f\left(\frac{a}{l}, \frac{L}{l}, \frac{W}{l}, \frac{h}{a}\right)$$

ho	ao	Lo	C	a	h	l	L	E	K	p	LOAD	應力	撓度	sh ² /P	δk ² /P
1.0	0.3	7	5	2.821	2.821	9.403	65.822	2	489.578	70	1750	406.4	-1.47E-02	1.84808	0.36277
1.0	0.3	7	7.5	4.231	4.231	14.105	98.733	1.5	244.789	90	5062.5	522.6	-3.77E-02	1.84795	0.36283
1.0	0.3	7	7.5	4.231	4.231	14.105	98.733	2	326.385	80	4500	464.5	-2.51E-02	1.84782	0.36281
1.0	0.3	7	10	5.642	5.642	18.806	131.644	3.5	428.381	100	10000	580.5	-2.39E-02	1.84786	0.36276
1.0	0.3	7	10	5.642	5.642	18.806	131.644	4.5	550.775	150	15000	870.8	-2.79E-02	1.84796	0.36275
1.0	0.3	7	12.5	7.052	7.052	23.508	164.555	3	293.747	130	20312.5	754.8	-4.54E-02	1.84796	0.36280
1.0	0.3	7	12.5	7.052	7.052	23.508	164.555	4	391.662	60	9375	348.4	-1.57E-02	1.84813	0.36279
1.0	0.3	7	15	8.463	8.463	28.209	197.466	2	163.193	120	27000	696.6	-7.54E-02	1.84786	0.36275
1.0	0.3	7	15	8.463	8.463	28.209	197.466	6	489.578	90	20250	522.5	-1.89E-02	1.84803	0.36274
1.0	0.3	7	15	8.463	8.463	28.209	197.466	4	326.385	100	22500	580.6	-3.14E-02	1.84818	0.36275

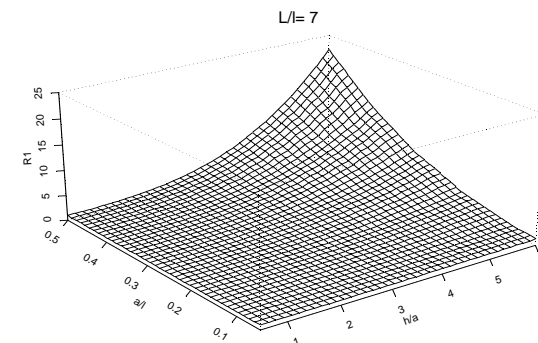
78

資料庫構建

- L/l : 2、3、4、5、6、7
- W/l : 2、3、4、5、6、7
- a/l : 0.05、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5
- h/a : 0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5、5.5、6

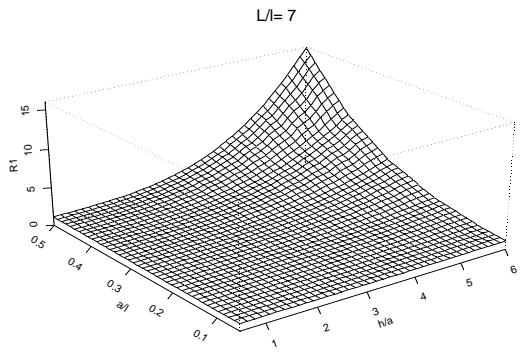
79

中央撓度



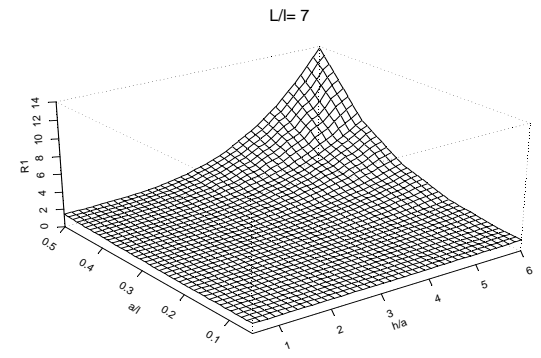
80

邊緣撓度



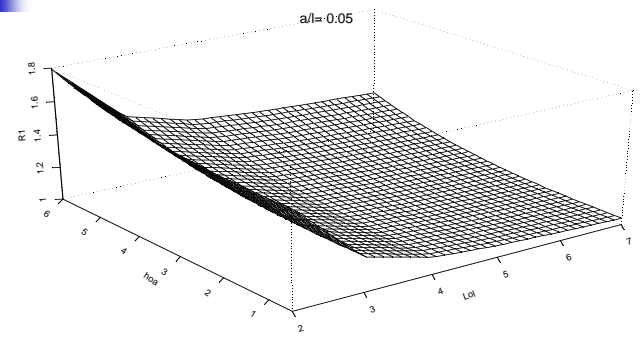
81

角隅撓度



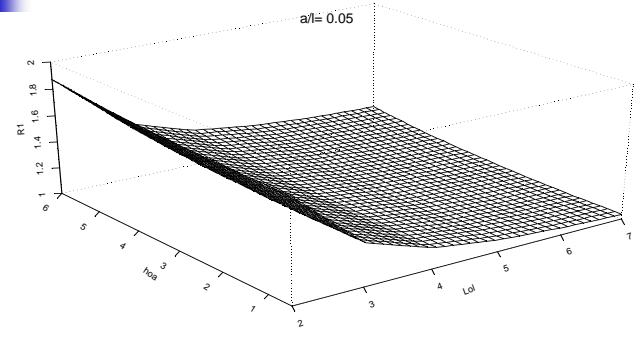
82

中央撓度



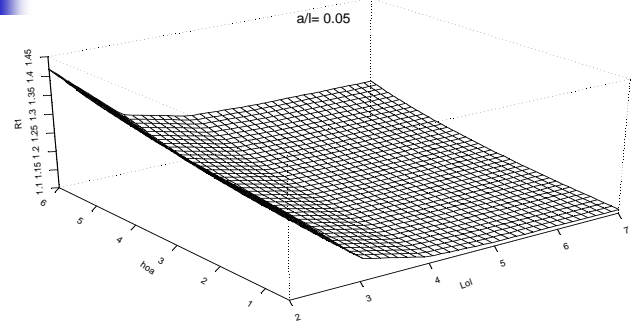
83

邊緣撓度



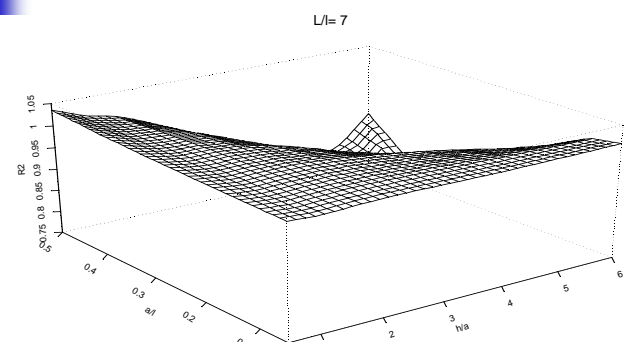
84

角隅撓度



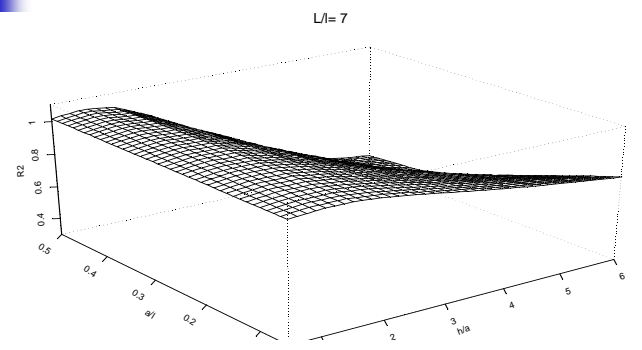
85

中央應力



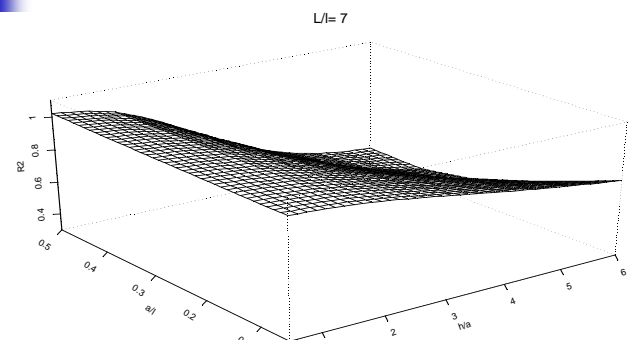
86

中央應力



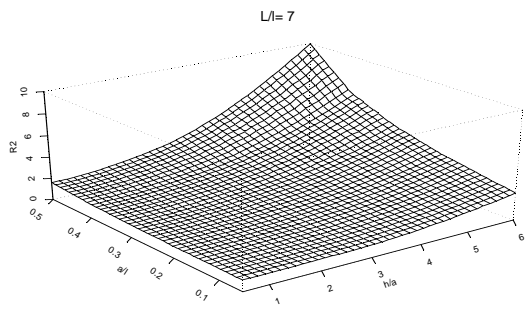
87

邊緣應力



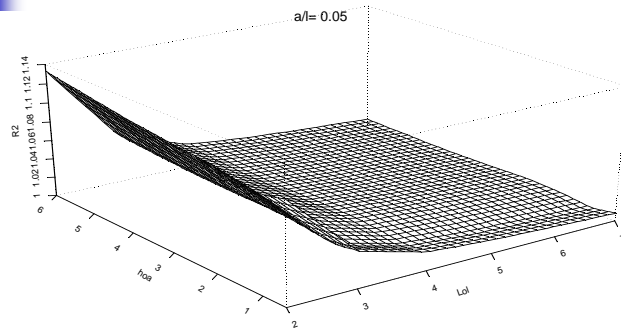
88

角隅應力



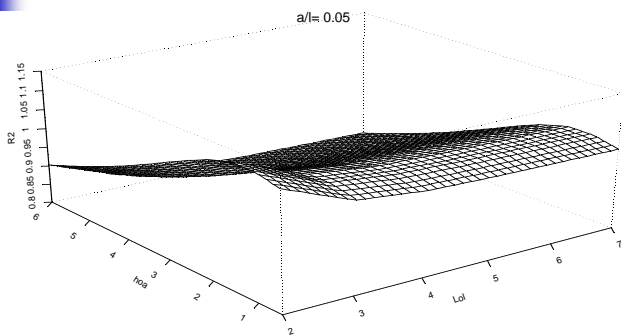
89

中央應力



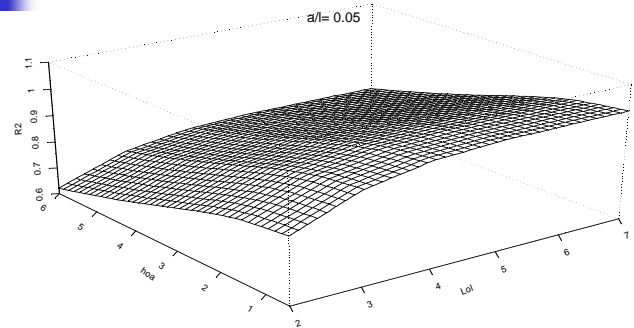
90

中央應力



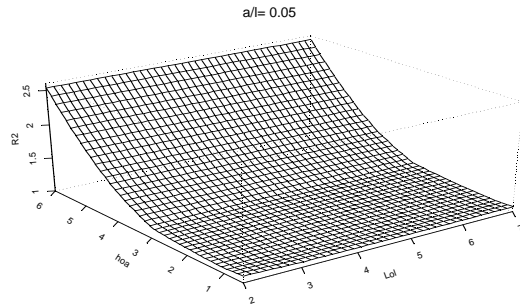
91

邊緣應力



92

角隅應力



93

三維力學反應計算

■ 撓度

$$R1 = \frac{\Delta_{3-D \text{ FEM}}}{\Delta_W} = f\left(\frac{a}{l}, \frac{L}{l}, \frac{W}{l}, \frac{h}{a}\right)$$

$$\Delta_{3-D \text{ FEM}} = \Delta_W \times R1$$

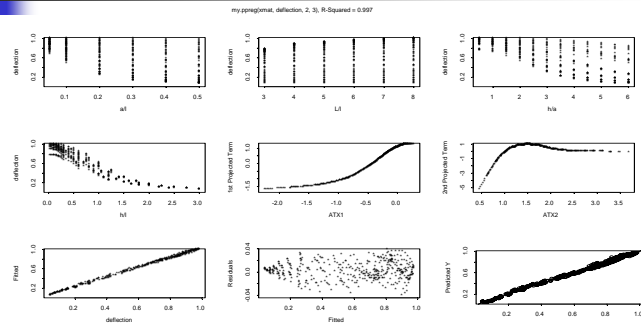
■ 應力

$$R2 = \frac{\sigma_{3-D \text{ FEM}}}{\sigma_W} = f\left(\frac{a}{l}, \frac{L}{l}, \frac{W}{l}, \frac{h}{a}\right)$$

$$\sigma_{3-D \text{ FEM}} = \sigma_W \times R2$$

94

撓度投影圖



95

最大撓度值計算

■ $L/l = W/l$

$$\frac{1}{R1} = 0.57628 + 0.29988 \Phi_1 + 0.03984 \Phi_2$$

$$\Phi_1 = \begin{cases} 1.15062 + 3.59112(A1) + 1.41207(A1)^2 + 0.16542(A1)^3 & \text{if } (A1) \leq 0 \\ 1.00125 + 1.81296(A1) - 2.35892(A1)^2 - 6.28127(A1)^3 & \text{if } (A1) > 0 \end{cases}$$

$$\Phi_2 = \begin{cases} -14.76436 + 25.89010(A2) - 13.77861(A2)^2 + 2.28462(A2)^3 & \text{if } (A2) \leq 2 \\ 9.85184 - 9.96245(A2) + 3.28991(A2)^2 - 0.36233(A2)^3 & \text{if } (A2) > 2 \end{cases}$$

$$A1 = 0.57228x1 + 0.02624x2 - 0.02631x3 - 0.81921x4$$

$$A2 = -0.64426x1 + 0.18742x2 + 0.04724x3 + 0.73998x4$$

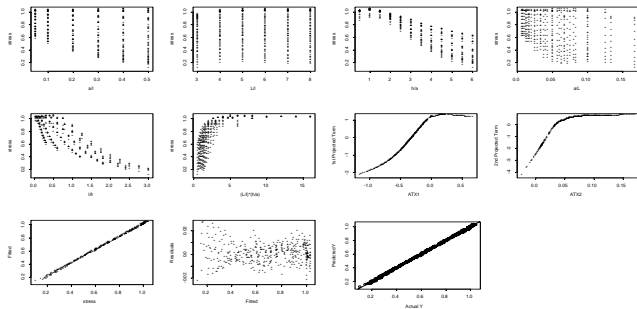
$$X = [x1, x2, x3, x4] = \left[\frac{a}{l}, \frac{L}{l}, \frac{W}{l}, \frac{h}{a} \right]$$

■ 限制

$$0.05 < \frac{a}{l} < 0.5, 0.5 < \frac{L}{a} < 6, 3 < \frac{L}{l} < 7$$

96

應力投影圖



97

應力計算

■ $L/\ell = W/\ell$

$$R2 = 0.69149 + 0.259 \Phi_1 + 0.03318 \Phi_2$$

$$\Phi_1 = \begin{cases} 1.578 + 6.013(A1) + 2.673(A1)^2 + 0.208(A1)^3 & \text{if } (A1) \leq -0.25 \\ 1.076 + 1.812(A1) - 5.796(A1)^2 + 4.942(A1)^3 & \text{if } (A1) > -0.25 \end{cases}$$

$$\Phi_2 = \begin{cases} -2.649 + 78.163(A2) + 381.681(A2)^2 - 15547.789 (A2)^3 & \text{if } (A2) \leq 0.05 \\ -0.927 + 39.165(A2) - 321.743(A2)^2 - 877.365(A2)^3 & \text{if } (A2) > 0.05 \end{cases}$$

$$A1 = 0.36539x1 - 0.01440x2 - 0.04566x3 + 0.85799x4 - 0.35545x5 + 0.04123x6$$

$$A2 = 0.23203x1 + 0.01107x2 - 0.00427x3 - 0.97246x4 + 0.01825x5 - 0.00230x6$$

$$X = [x1, x2, x3, x4, x5, x6] = \left[\frac{a}{\ell}, \frac{L}{\ell}, \frac{h}{a}, \frac{a}{\ell}, \frac{L}{\ell}, \frac{h}{a} \right]$$

■ 限制

$$0.05 < \frac{a}{\ell} < 0.5, 0.5 < \frac{h}{a} < 6, 3 < \frac{L}{\ell} < 7$$

98

臨界應力計算

$$\sigma_e = (\sigma_w * R_G * R2 * R_S * R_0 * R_M + R_T * \sigma_c)$$

σ_w : Westergaard 理論邊緣應力 ;

R_G : 不同輪軸轉換因子 ;

R_S : 混凝土路肩 ;

R_0 : 外車道加寬情況效應 ;

R_M : 多層版效應 ;

R_T : 溫差載重加上白天之溫差效應之影響 ;

σ_c : Westergaard 除以 Bradbury

有限尺寸版之邊緣溫差應力

99

結論

- 比較二維與三維差異
- 以往學者應用有限元素分析結果
- 將ILLI-SLAB之分析元素個數擴充

100

結論(一)

- 版殼元素會隨著網格切割愈密撓度值愈大而收斂
- 固體元素會隨著水平向網格切割愈密而撓度值愈大，C3D20、C3D20R、C3D27 切割層數增加撓度值愈大而收斂；C3D8、C3D8R、C3D27R切割層數增加撓度值減少而收斂

101

結論(二)

- 4點元素隨著網格切割愈密，應力值增加而收斂，所求得應力較為接近
- 8點元素及9點元素隨著切割愈密應力值減少而收斂，且S9R5=S8R5
- C3D20、C3D20R、C3D27 會隨著切割層數增加而應力值增加

102

結論(三)

- Ioannides建議 $2a/h < 0.8$ ，此為單一特例，本研究發現平面元素不受此因素影響，即使在固體元素中亦不是以此界定網格切割
- 版殼元素在水平向網格切割3，固體元素水平向網格切割3及切割層數為3層時即可以得到很好收斂值，且以不同版厚驗證之。

103

結論(四)

- 影響力學反應分析：切割層數>荷重區域切割>(II)區切割密度
- 選用元素一建議採用C3D20或C3D27元素，選用有降階積分元素C3D20R與C3D27R會有2%應力差距
- ABAQUS程式所提供FOUNDATION參數可以分析緊密液體

104

結論(五)

- 元素選用上應以收斂性作為優先考量，且使用不同元素在網格切割較密情況下，相同假設之元素應得到相同之結果
- 本研究以C3D27元素在水平向切割3，垂直向切3層進行資料庫構建

105

結論(六)

- 本研究提供元素切割長度原則，可以分析不同荷重大小及輪軸型式
- 本研究提供系統化網格切割方式，未來使用者可以遵循此切割方式達到較佳網格切割與最佳之計算結果

106

結論(七)

- 影響ILLI-SLAB分析鋪面版之無因次參數為 a/l 、 L/l 、 W/l ，而使用三維版殼元素及固體元素分析時，除了以上3個無因次參數外，還有 h/a 參數
- 本研究提供一自動化分析程序，分析中央、邊緣、角隅荷重位置，選用元素為三維殼元素、固體元素及ILLI-SLAB，並可決定切割密度與切割長度

107

結論(八)

- ABAQUS固體元素計算之撓度值都比Westergaard理論解大
- 研究中可以得到徑向距離撓度進行鋪面回算

108



建議

- 角隅應力收斂分析
- 二維修正因子修正三維鋪面適用性驗證
- 統計迴歸分析資料庫
- 彈性基礎
- 不同輪軸型式之力學反應
- 線性溫差與非線性溫差


109



建議(一)

- 回算分析之徑向距離
- 角隅撓度進行侵蝕分析
- 改善使用者介面
- 分析柔性鋪面
- 多層版分析

110



報告結束

謝謝指教

111