

私立淡江大學土木工程研究所碩士論文口試
接縫式混凝土鋪面之應力分析
Stress Analysis of Jointed Concrete Pavements



口試學生:李英明

研究緣起

- 剛性鋪面在國內的重要性日益顯現
 - 結構性強,耐用,經濟等優點
 - 高交通量
- 目前國內無本土化的設計方法



研究目的與範圍內容

- 整體了解鋪面版在各種情況的應力反應
 - 分析輪軸載重組合,外車道加寬,混凝土路肩與雙層版在中央,邊緣與角隅的應力反應
 - 分析有限尺寸版受載重與溫差作用時,在角隅與中央的應力反應
- 分析之結果期望成為理論綜合經驗設計法的一部分



研究方法

- 分析結構反應
- 與Westergaard結果進行比較
- 選定調整因子
- 建立資料庫
- 以PPR建立預估方程組
- 驗證

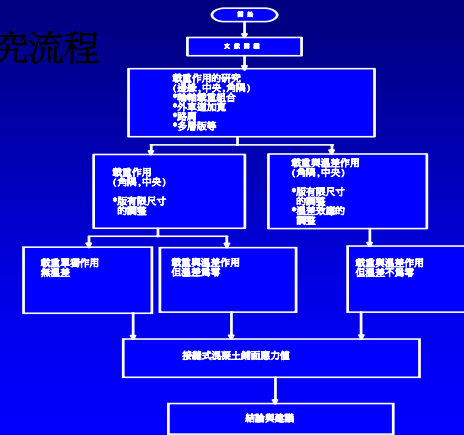


研究流程

- 對JPCP各種情況之分析
 - 輪軸載重組合
 - 外車道加寬
 - 混凝土路肩
 - 雙層版
- 版有限尺寸與溫差作用
- 找出JPCP的鋪面應力值



研究流程



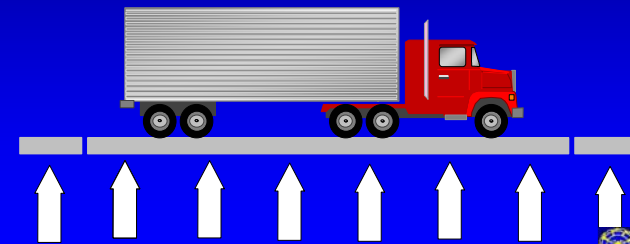
論文之組織架構

- 第一章:問題描述、研究主題與研究方法
- 第二章:理論公式與相關公式回顧
- 第三章:分析輪軸載重組合、外車道加寬、路肩與雙層版
- 第四章:針對角隅應力進行研究
- 第五章:針對中央應力進行研究
- 第六章:對接縫式混凝土鋪面應力分析成果作結論並建議未來的研究方向



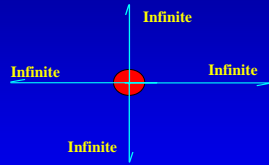
鋪面版應力產生的因素

交通載重
氣候因素
基底層的影響



剛性鋪面應力之理論公式

Westergaard中央應力公式 相對勁度半徑 l

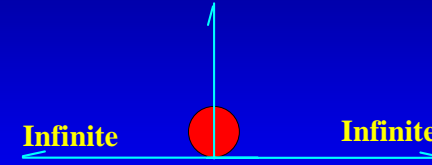


$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)k}}$$

$$\sigma_w = \frac{3}{2\pi}(1+\mu)\frac{P}{h^2}\left[\left\{\ln\frac{2l}{a}\right\}-\gamma+0.5+\frac{\pi}{32}\left(\frac{a}{l}\right)^2\right]$$

剛性鋪面應力之理論公式(續)

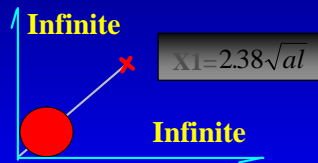
Westergaard邊緣應力公式



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

剛性鋪面應力之理論公式(續)

Westergaard角隅應力公式



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

剛性鋪面應力之理論公式(續)

Westergaard溫差應力公式

◦ 無限版長,有限寬度版

$$\sigma_y = \sigma_0\left\{1-\frac{2\cos\lambda\cosh\lambda}{\sin 2\lambda\sinh 2\lambda}\left[(\tan\lambda+\tanh\lambda)\cos\left(\frac{y}{l\sqrt{2}}\right)\cosh\left(\frac{y}{l\sqrt{2}}\right)+(\tan\lambda-\tanh\lambda)\sin\left(\frac{y}{l\sqrt{2}}\right)\sinh\left(\frac{y}{l\sqrt{2}}\right)\right]\right\}$$

$$\sigma_x = \sigma_0 + \mu(\sigma_y - \sigma_0)$$

$$\sigma_0 = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\mu)}$$

有限元素法程式

- ILLI-SLAB
- KENSLAB
- JSLAB
- WESLIQUID
- FEACONS



ILLI-SLAB程式

- 從1977年起在伊利諾大學發展
 - ORIGINALLY DEVELOPED BY A. M. TABATABAIE 1977
 - REVISED BY K.Y. WONG 1980
 - EXPANDED AND REVISED BY A. M. IOANNIDES 1981-85
 - EXPANDED BY G. T. KOROVESIS 1986-89
 - ADAPTED TO ANSI-77 FORTRAN BY J.E.CONROYD 1984
- 本分析使用1989年三月的版本



ILLI-SLAB可分析模擬:

- 單一或多個鋪面版
- 雙層版的黏結情況
- 應力傳遞情況
- 溫差效應
- 路肩
- 可模擬路基支承喪失的情況



ILLI-SLAB的執行:

- 工作站
 - 本系Indigo工作站
 - 執行速度快
 - 可處理網格較多的計算
- PC可執行的ILLI-SLAB程式
 - 對批次化執行結果的判斷與輸出
 - 方便



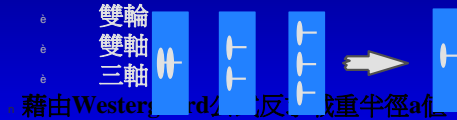
因次分析方法

- 減少實驗的參數
- 降低分析的複雜性
- 省時,經濟與效率



等值單輪載重區域半徑(ESAR)

將多種輪軸載重組合形式轉換成單輪載重



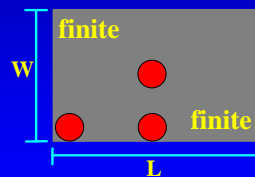
$$\frac{\sigma h^2}{P} = f\left(\frac{a}{l}\right)$$



控制參數

- 車輪載重單獨作用

ILLI-SLAB Model



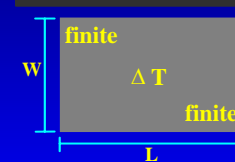
$$\frac{\sigma h^2}{P}, \frac{\delta k l^2}{P}, \frac{q l^2}{P} = f\left(\frac{a}{l}, \frac{L}{l}, \frac{W}{l}\right)$$



控制參數(續)

- 受溫差單獨作用

ILLI-SLAB Model



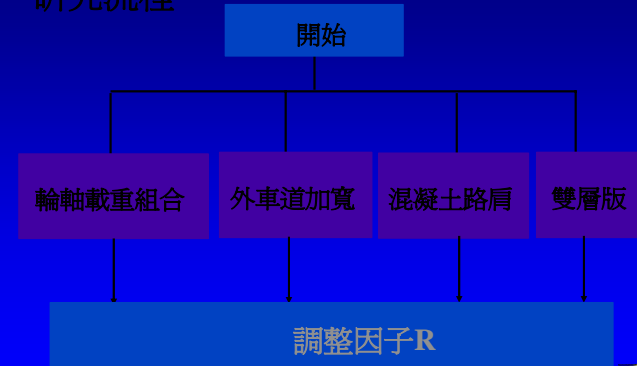
$$\frac{\sigma}{E}, \frac{\delta h}{l^2}, \frac{q h}{k l^2} = f\left(\alpha \Delta T, \frac{L}{l}, \frac{W}{l}, \frac{\gamma h^2}{k l^2}\right)$$



接縫式混凝土鋪面版之應力分析



研究流程



調整流程

輪軸載重組合	aeq	$s/a, t/a$
版之有限尺寸	R	$a/l, W/l, L/l$
外車道加寬	R	Do/l
路肩	R	AGG/kl
雙層版	R	$(heft/h1)^2$
溫差	R	ΔT



ILLI-SLAB輸入檔

輸入之參數

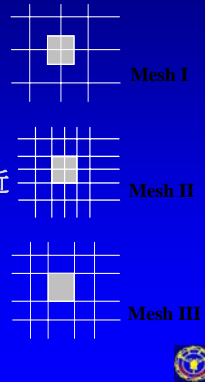
- 載重, P
- 彈性模數, E
- 波生比, μ
- 基底層反力模數, k
- 溫度膨脹係數, α
- 溫差, ΔT
- 相對勁度半徑, l



ILLI-SLAB輸入檔

結點之切割

- 結點與載重區域的關係
- 記憶體
- 結果之精確性
- Mesh I 較保守
- Mesh II 與Westergaard最相近
- Mesh III 較低估



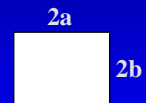
ILLI-SLAB輸入檔

- 載重區域內應有結點
- 預期會發生最大反應的區域內應有結點佈設
- 形狀比值($2b/2a$) <5
- 尺寸與厚度比值($2a/h$) <0.8

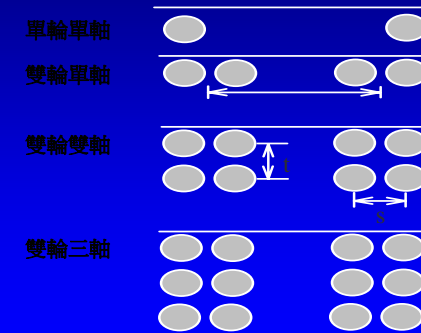
ILLI-SLAB輸入檔(續)

本研究之網格切割方式

- 5"x10,10"x10,20" after
- $\Phi_{min}=0.47$
- $\alpha_{max}=0.5$

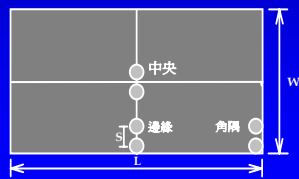


輪軸載重組合對應力的影響



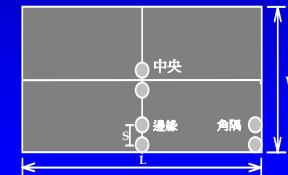
雙輪載重

- $a/l=0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.45$
- $s/a=0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20$

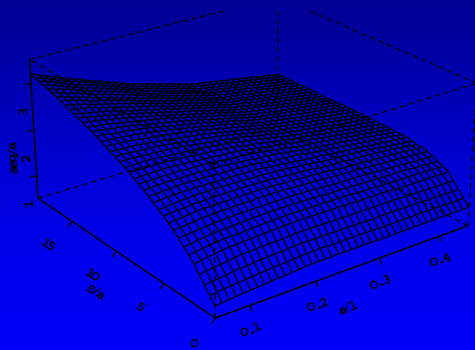


當輪間距逐漸增加

- 邊緣, 中央與角隅情況
 - 另一輪會逐漸失去影響
 - 若 s/a 夠大, 可以只考慮邊緣一輪的載重

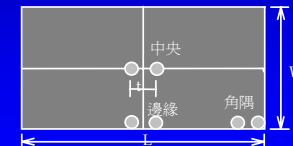


雙輪邊緣之 $a/l, s/a$ 與 aeq/a



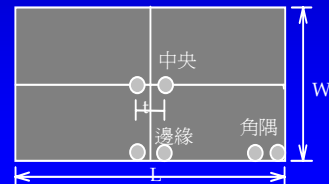
雙軸載重

- $a/l=0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.45$
- $t/a=0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20$

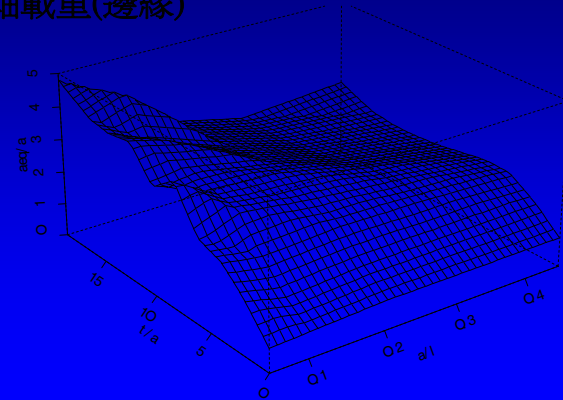


當軸距逐漸增加

- 中央與角隅情況
 - 與雙輪情況相同
 - 座標轉90度
- 邊緣情況時
 - 應力值的反應

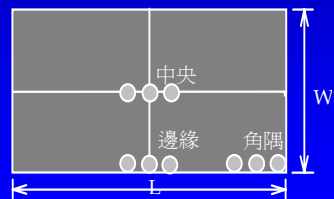


雙軸載重(邊緣)



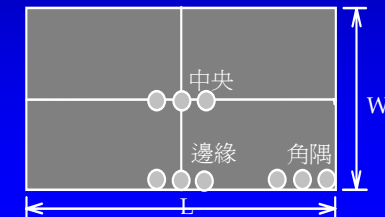
三軸載重

- $a/l=0.05, 0.1, 0.2, 0.3$
- $t/a=0.2, 4, 6, 8, 10, 12$

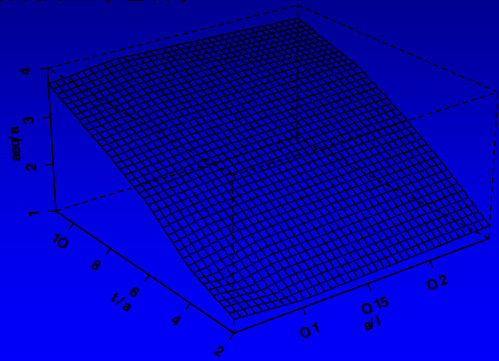


當軸距逐漸增加

- t 增加 → 減少
- a/l 對應力值影響不大

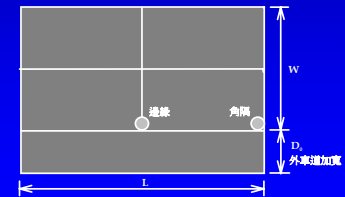


三軸載重(邊緣)



外車道加寬

$a/l=0.05,0.1,0.2,0.3,0.45$
 $D_0/l=0,2,4,6,8,10,12,14,16,18,20$

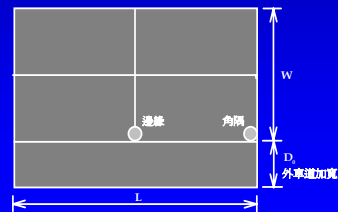


當車道逐漸加寬

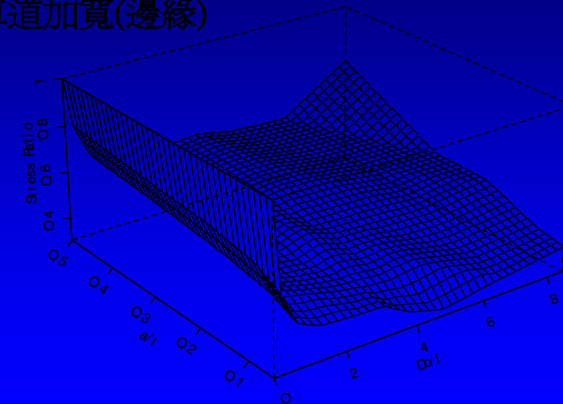
只考慮邊緣與角隅情況

中央無影響

邊緣 中央
 角隅 邊緣

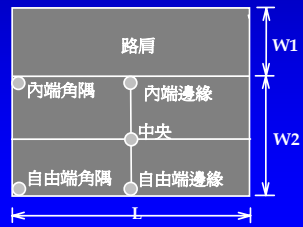


外車道加寬(邊緣)



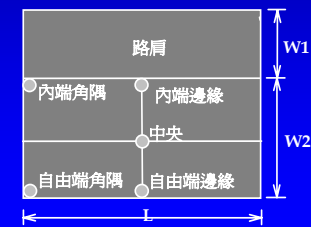
混凝土路肩

- $a/l=0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5$
- $AGG/k_l=0, 5, 50, 500, 5000, 10000, 20000, 30000, 50000$

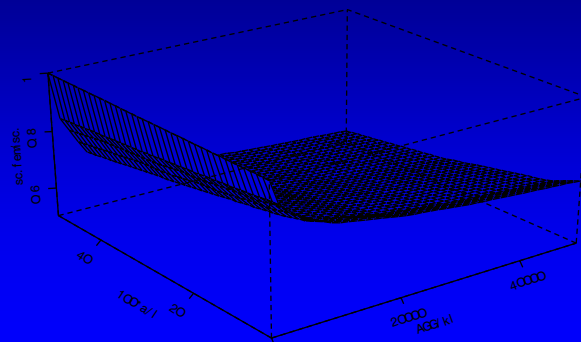


當AGG逐漸增加...

- 骨材互鎖因子AGG
- 版寬
- 當AGG加大
- 內端邊緣
- 內端角隅

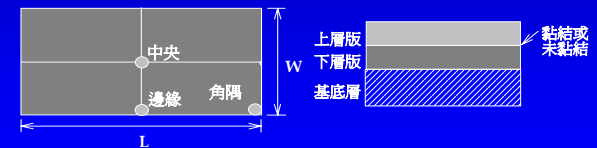


混凝土路肩(內側邊緣)



雙層版

- $a/l=0.05, 0.1, 0.2, 0.3$
- $(h_{eff}/h_1)^2=1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0$



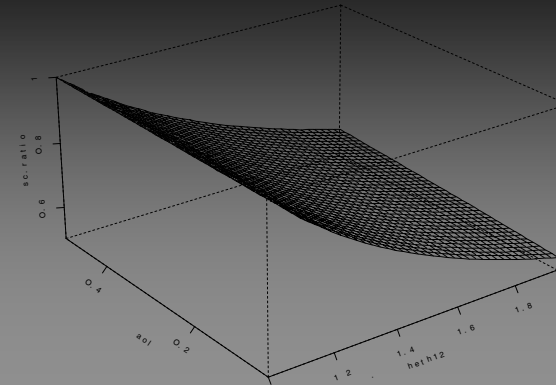
雙層版(黏結)

公式

$$hefft = \left[h_1^2 + h_2^2 \frac{E_2 h_2}{E_1 h_1} \right]^{0.5}$$

中央,邊緣與角隅情況類似,可採相同之應力折減方式

雙層版(黏結,邊緣)



雙層版(未黏結)

- 利用轉換剖面觀念,調整中性軸
- 可成爲未黏結情況
- 中央,邊緣與角隅情況類似,可採相同之應力折減方式

本段小結

輪軸載重組合

雙輪
雙軸
三軸

利用ESAR求 a_{eq}

- 外車道加寬(DoI)
- 路肩(AGG/kl)
- 雙層版 $(hefft/h1)^2$

應力折減

建立角隅應力預估方程式

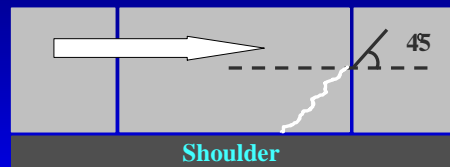


目標

- 決定角隅受載重與溫差作用產生的應力
- 與前述研究結果相結合,進行對版有限尺寸與溫差作用的調整



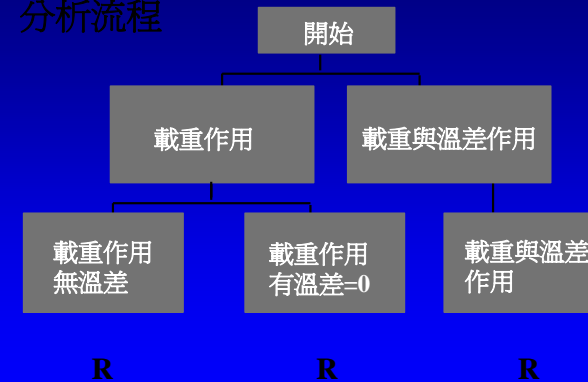
角隅破裂



- 載重作用
- 負溫差作用
- 複合作用



分析流程



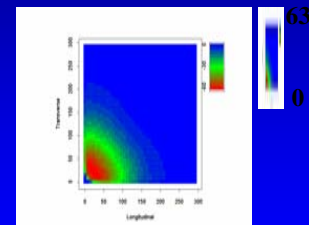
角隅的應力反應

- 載重
- 溫差
- 載重溫差複合
- 大尺寸與小尺寸



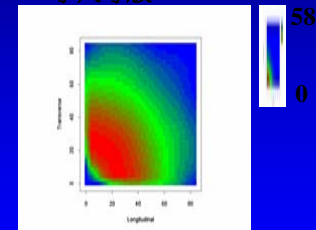
載重單獨作用(無溫差)

大尺寸版



$L/l=7$

小尺寸版

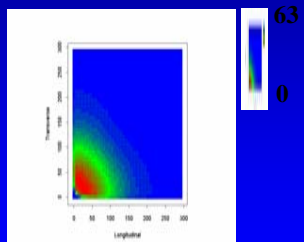


$L/l=2$



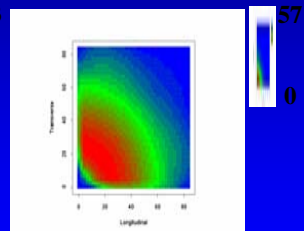
載重單獨作用(具溫差=0)

大尺寸版



$L/l=7$

小尺寸版

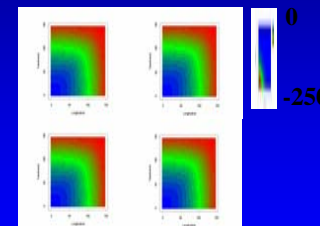


$L/l=2$

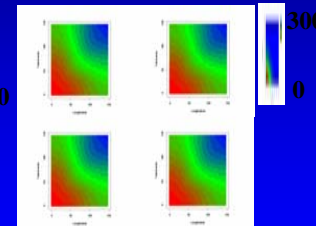


溫差單獨作用

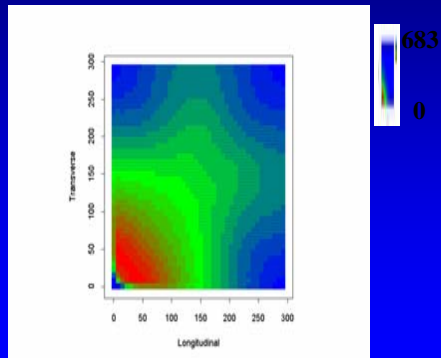
正溫差



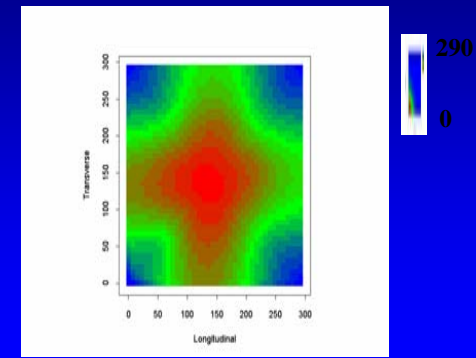
負溫差



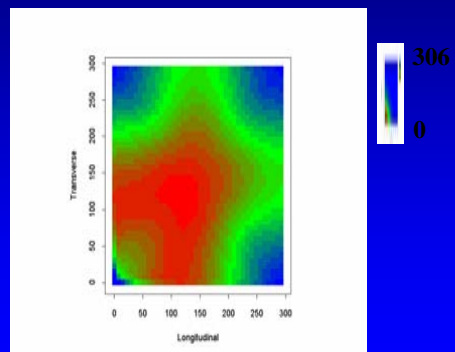
大載重加小溫差



小載重加大溫差

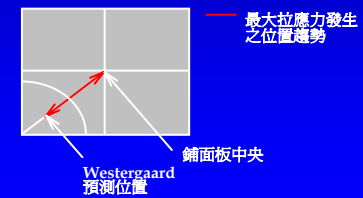


等量載重與溫差作用



最大角隅應力大小與位置之趨勢

- 疊加方式過於保守
- 位置趨勢位於Westergaard位置與中央之間



載重單獨作用(無溫差)預估模式

Factor F.E. runs

a/l: 0.05,0.1,0.2,0.3
 L/l: 2,3,4,5,6,7
 W/l: 2,3,4,5,6,7 (L/l >= W/l)
 Total of 84 runs
 $\sigma_i = R1 \times \sigma_w$

$$R_i = f\left(\frac{a}{l}, \frac{W}{l}, \frac{L}{l}\right)$$

Statistics

N=84, $R^2=0.980$,
 SEE=0.0081, CV=0.79%

Limits

$0.05 < a/l < 0.3$
 $2 < L/l < 7$
 $W/l \leq L/l$



載重單獨作用(溫差=0)預估模式

Factor F.E. runs

a/l: 0.05,0.1,0.2,0.3
 L/l: 2,3,4,5,7,9,11,13,15
 (L/l = W/l)
 Total of 108 runs
 $\Delta T=0$
 $\sigma_i = R2 \times \sigma_w$

a/l	(DG,DP)
0.05	(1,2) (10,30) (7,130)
0.10	(4,30) (7,70) (4,130)
0.20	(4,2) (7,30) (10,70)
0.30	(1,2) (10,70),1,130)



載重單獨作用(溫差=0)預估模式

Statistics

N=108,
 $R^2=0.96$,
 SEE=0.0096

Limits

$0.05 < a/l < 0.3$
 $2 < L/l < 15$
 $W/l = L/l$
 $1 \leq DG < 10$
 $2 \leq DP \leq 130$



載重與溫差複合作用預估模式

Factor F.E. runs

a/l: 0.05,0.1,0.2,0.3
 L/l: 2,3,4,5,7,9,11,13,15
 (L/l = W/l)
 Total of 432 runs
 $\sigma_i = \sigma_{L,\Delta T=0} + R3 \times \sigma_0$

a/l	(DG,DP)
0.05	(1,2) (10,30) (7,130)
0.10	(4,30) (7,70) (4,130)
0.20	(4,2) (7,30) (10,70)
0.30	(1,2) (10,70),1,130)



載重與溫差複合作用預估模式

Statistics

$N=432$,

$R^2=0.95$,

$SEE=0.09$

Limits

$0.05 < a/l < 0.3$

$2 \leq L/l \leq 15$

$W/l = L/l$

$1 < DG < 10$

$2 < DP < 130$

$5.5 < ADT < 22$



模式驗證

- 載重單獨作用
 - 無溫差
 - 具溫差為零
- 載重與溫差複合作用



本段小結

- 發展對角隅應力的預估模式
- 對鋪面版受載重與溫度作用的應力反應的分析
- 驗證控制因子
- 對應力值的預估良好



建立中央應力預估方程式

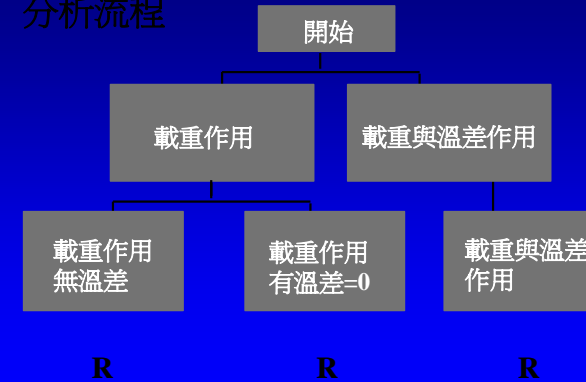


目標

決定中央受載重與溫差作用產生的應力
與前述研究結果相結合,進行對版有限尺寸與溫差作用的調整



分析流程



中央應力分析

應力發生的位置在版的中央
固定較好處理
最大拉應力發生於版底端
載重加上正溫差作用會引起應力值的增加
資料庫的建立方式與角隅相似
調整因子R的變動範圍很小



載重單獨作用(無溫差)預估模式

Factor F.E. runs

a/l: 0.05, 0.1, 0.2, 0.3
L/l: 2, 3, 4, 5, 6, 7
W/l: 2, 3, 4, 5, 6, 7 (L/l >= W/l)
Total of 84 runs
 $\sigma = R_1 \times \sigma_w$

$$R_1 = f\left(\frac{a}{l}, \frac{W}{l}, \frac{L}{l}\right)$$

Statistics

N=84, $R^2=0.968$,
SEE=0.00121

Limits

$0.05 < a/l < 0.3$
 $2 < L/l < 7$
 $W/l \leq L/l$



載重單獨作用(溫差=0)預估模式

Factor F.E. runs

a/l: 0.05,0.1,0.2,0.3
 L/l: 2,3,4,5,7,9,11,13,15
 (L/l=W/l)
 Total of 108 runs
 $\Delta T=0$
 $\sigma = R2 \times \sigma_w$

Statistics

N=108,
 $R^2=0.97$,
 SEE=0.008

Limits

$0.05 < a/l < 0.3$
 $2 < L/l < 15$
 $W/l = L/l$
 $1 < DG < 10$
 $2 < DP < 130$



載重與溫差複合作用預估模式

Factor F.E. runs

a/l: 0.05,0.1,0.2,0.3
 L/l: 2,3,4,5,7,9,11,13,15
 (L/l=W/l)
 Total of 432 runs
 $\sigma = \sigma_{(\Delta T=0)} + R3 \times \sigma_o$

Statistics

N=432,
 $R^2=0.978$,
 SEE=0.06

Limits

$0.05 < a/l < 0.3$
 $2 < L/l < 15$
 $W/l = L/l$
 $1 < DG < 10$
 $2 < DP < 130$
 $5.5 < ADT < 22$



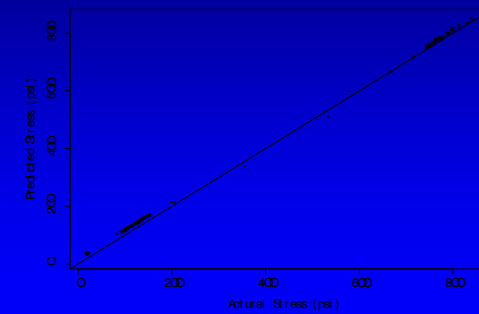
模式驗證

- 載重單獨作用
 - 無溫差
 - 具溫差為零
- 載重與溫差複合作用



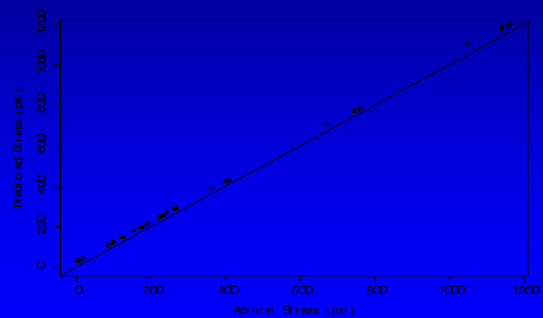
模式驗證

- 載重單獨作用(無溫差)



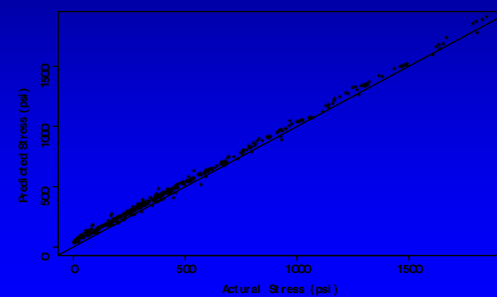
模式驗證

- 載重單獨作用(具溫差為零)



模式驗證

- 載重與溫差復合作用

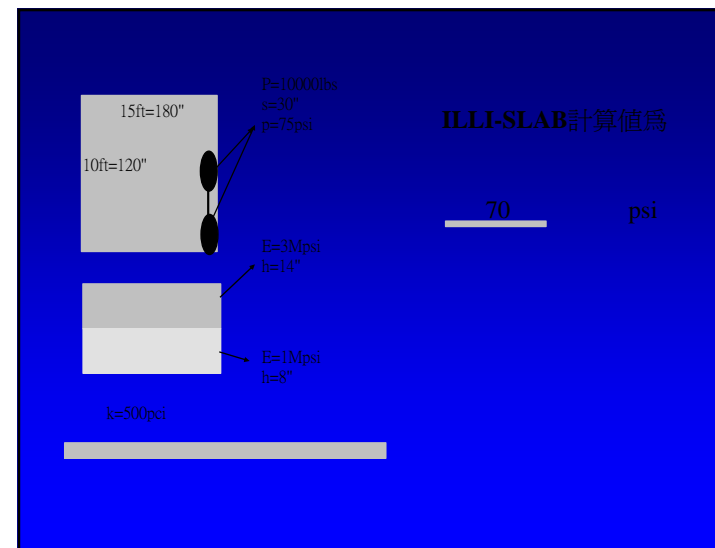
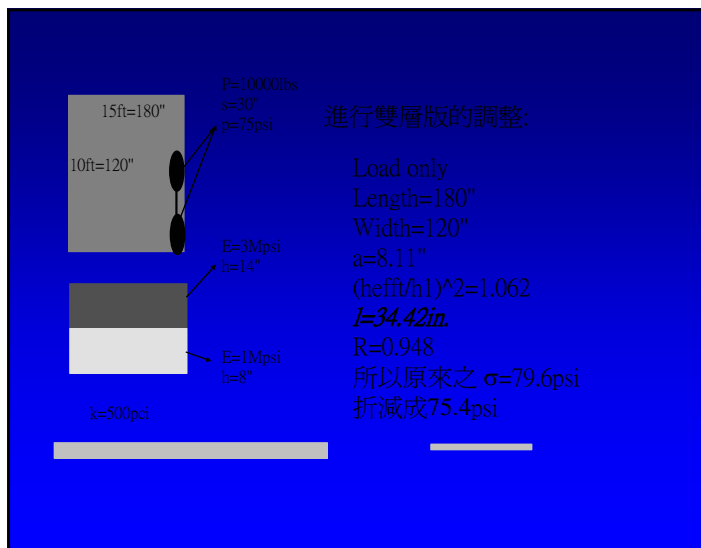
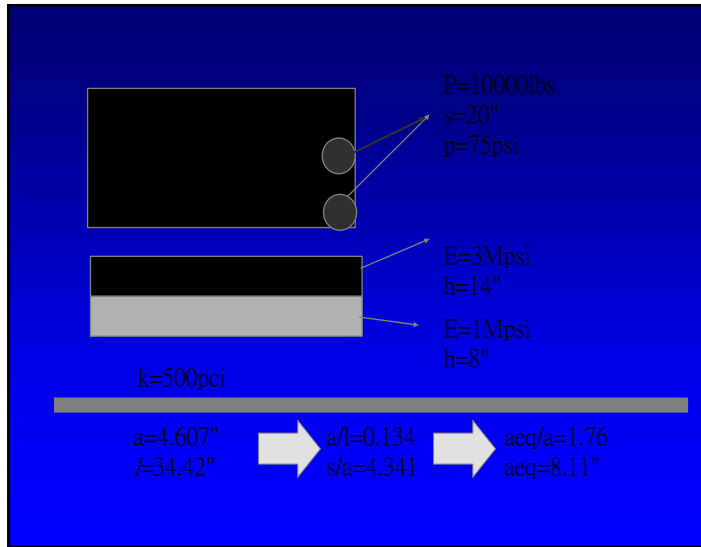


本段小結

- 發展對中央應力的預估模式
- 驗證控制因子
- 對應力值的預估良好



數值案例



結論與建議

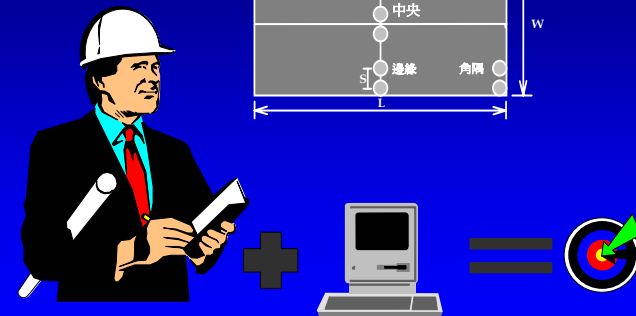
結論

- 對JRCF各種狀況之研究
 - 利用等值載重區域半徑觀念可將多種輪軸載重組合簡化成爲單一載重形式
 - 外車道加寬的應力折減
 - 混凝土路肩的應力折減
 - 雙層版的應力

結論

- 角隅應力
- 中央應力

結論



建議

- 對R值的再研究
- 對ILLI-SLAB計算值與本土現地資料的研究
- 角隅最大拉應力位置的確認
- 具溫差時的調整因子
- 利用已發現的控制因子進行對鋪面應力行為的模擬
- 對Westergaard公式的重新推導

感謝師恩

謝謝老師的辛勤教導



請老師指教,謝謝!



口試學生
李英明
淡江大學土木工程研究所