

淡江大學土木工程學系碩士班  
碩士論文簡報

指導教授：李英豪 博士  
研究生：許瑞升 撰

荷重傳遞效應與溫度翹曲對剛  
性鋪面回算影響之研究

The Effects of Load Transfer Efficiency and Temperature  
Curling on Rigid Pavement Backcalculation

一、緒論

- 當前剛性鋪面的需求
- 非破壞性檢測 (NDT)
- 回算工作的重點
- 荷重傳遞效應與溫度翹曲對剛性鋪面回算之影響
- 接縫式混凝土鋪面 (JPCP) 之溫氏基礎模式與彈性固體基礎模式

二、文獻回顧

- 影響鋪面撓度值的因素：鋪面因子、載重因子、環境因子
- 非破壞性試驗方式及儀器
  1. 靜力撓度試驗
  2. 穩態動力撓度試驗
  3. 衝擊動力撓度試驗
  4. 波傳遞動力試驗

## 剛性鋪面撓度值基本理論 文獻回顧

- Westergaard無限版理論
- Losberg無限版理論
- 有限元素理論
- 統計迴歸方法
- 多版之荷重傳遞  
骨材互鎖效應、綴縫筋荷重傳遞效應
- 溫差的影響

## 剛性鋪面回算程式之方法 文獻回顧

- 迭代法
- 資料庫處理法
- 閉合解法
- 有限元素應用程式

## 回算方法 文獻回顧

- 圖解法與AREA公式
$$AREA = \frac{A}{\delta_0} = \left( \frac{6}{\delta_0} \right) (\delta_0 + 2\delta_{12} + 2\delta_{24} + \delta_{36})$$
- Ioannides回算步驟與ILLI-BACK程式
- 封閉型解(Closed-Form Solution)
- Crovetti回算法
- 撓度比回算法與TKUBAK程式

## Ioannides主要回算步驟 文獻回顧

- 以現地量測撓度值求的AREA
- 以AREA- $l$ 的關係，求相對勁度半徑 $l$
- 以 $l$ 求無因次撓度值
- 帶入無因次撓度公式求 $k, E_s$ 
$$k = \frac{P \times \Delta_i}{l_k^2 \times \delta_i} \quad E_s = \frac{2(1 - \mu_s^2) \times P \times \Delta_i}{l_c \times \delta_i}$$
- 依基礎模式分別代入版彈性模數 $E_c$

## 回算限制

文獻回顧

- AREA面積指標的假設，避免回算過程中的遞迴工作，使回算成為閉合解
- AREA的基本假設，因而產生傳統回算之限制( $a = 5.9055 \text{ in}$ ,  $r = 12.0 \text{ in}$ 等)
- 撓度比回算法，可擺脫傳統回算法的限制，但因加入徑向距( $r$ )，必須使用遞迴試誤法，求解相對勁度半徑

## 回算限制

文獻回顧

- 以面積指標法建立的ILLI-BACK以被AASHTO所採用
- 撓度比回算法免除儀器問題，但有較複雜的遞迴試誤回算步驟
- 本研究將以Crovetti的修正因子概念為基礎，建立與線性溫差及荷重傳遞有關的修正因子

## 其他相關研究

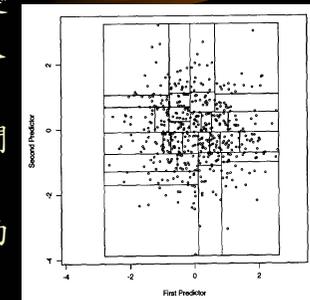
文獻回顧

- 因次分析原理之應用：『因次分析方法是使用壓縮的方式將影響反應的參數數目與複雜性降低的方法』
- 有限元素法ILLI-SLAB程式之應用
- 小區域迴歸法 (Locally-Weighted Regression, LOESS) 的應用

## LOESS kd-tree

文獻回顧

- 理念是：為一種將多變數迴歸面，找出最佳反應面的程序
- 可表現變數資料相互間細微的關係
- 建立一個類似資料庫的預測模式檔案



### 三、ILLI-SLAB程式編譯與驗證

- 有限元素法理論 - Kirchhoff 版理論
- ILLI-SLAB程式 - 美國伊利諾大學香檳校區所發展
- ILLI-SLAB其功能包含：單版或多版、荷重傳遞、線性溫差、黏結情況、支承喪失情形或是基礎侵蝕情況

### 程式之編譯

ILLI-SLAB程式

- 將ILLI-SLAB利用Microsoft FORTRAN PowerStation編譯成PC版本
- 編譯中，發現ILLI-SLAB程式碼有一些語法上的錯誤
  1. 副程式的回傳值未定義
  2. 無條件 GOTO 指令的語法錯誤

### 程式驗證

ILLI-SLAB程式

- 溫氏基礎 (Dense Liquid)
  - + 分析驗證表 (表3-2,3-3)，分析後確立程式之溫氏基礎模式未被更動
  - + 參數分析後得到，線性溫差在白天的影響較小，主要影響在夜間發生
  - + 自重的影響佔有舉足輕重的角色

### 程式驗證

ILLI-SLAB程式

- 彈性固體基礎 (Elastic Solid)
  - + 分析驗證表 (表3-4,3-5)，分析後得知彈性固體基礎的線性溫差有所變動
  - + 以溫氏基礎與彈性固體基礎之關係式，模擬彈性固體基礎的表現 (表3-6)
  - + 由驗證分析表得知修正後的結果，較為合理
  - + 在自重影響上，仍是重要關鍵

## 程式驗證

ILLI-SLAB程式

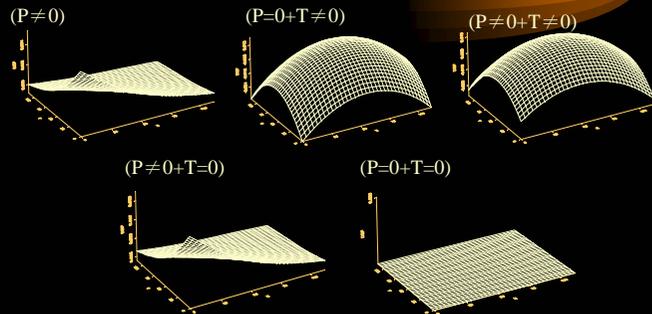
- ILLI-SALB程式中，尚有一些錯誤有待解決，如利用彈性固體基礎模式分析多版塊，一致的結果均為 Run - Time Error 的數學邏輯錯誤，情況如下：
  - + 母數為零
  - + 對負數開根號
- 找出問題的癥結，仍需一段時間，尚待解決

## 撓度變形圖

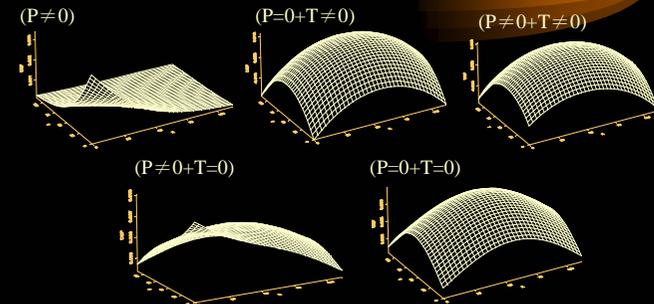
ILLI-SLAB程式

- 分為單版與多版分別討論
- 在單版的分析上，分為二種基礎模式，與參數分析驗證使用相同的資料，以便做較
- 在多版（二塊無限版）的分析上，在彈性固體基礎上，由於無法分析，故以溫氏基礎模式為主

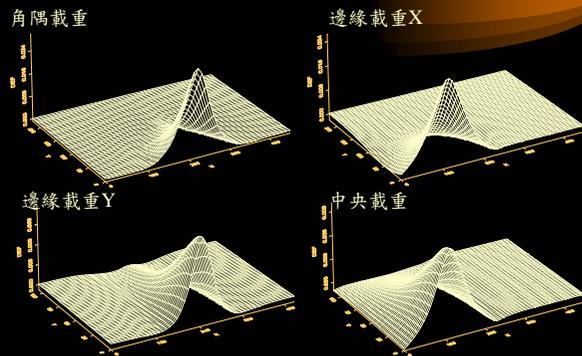
## 溫氏基礎（單版角隅載重）



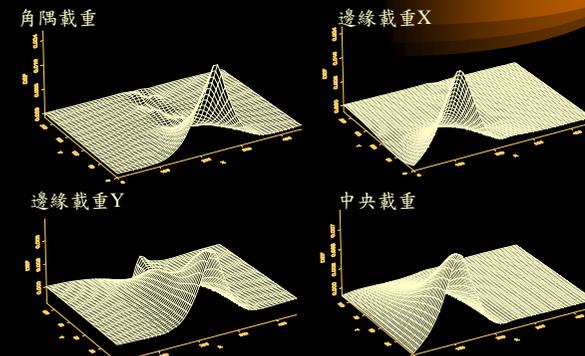
## 彈性固體基礎（單版角隅載重）



## 骨材互鎖效應 (多版)



## 綴縫筋荷重傳遞效應 (多版)



## 荷重傳遞效應

ILLI-SLAB程式

- 綴縫筋勁度矩陣並不正確，其在彎矩的勁度有誤(Hua Guo【9,10】)
- 綴縫筋與骨材互鎖之荷重傳遞效應在剪力傳遞行為，二種傳遞因子的表現是相同的
- ILLI-SLAB程式為2-D元素，與三維有限元素程式的運用的優缺點

## 四、參數分析

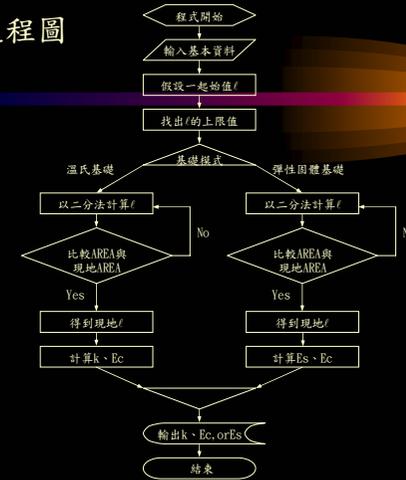
- 回算的二個主要步驟：
  - + 利用撓度與相對勁度半徑之關係
    - 求解相對勁度半徑
  - + 無因次撓度值公式的運用
    - 求解鋪面彈性模數
- 以修正因子的理念，修正相對勁度半徑與無因次撓度值

## 撓度理論公式

參數分析

- ILLI-BACK回算程式的理論基礎  
→ Losberg的撓度公式
- Losberg無限版撓度理論  
→ 貝索函數 (Bessel Function)
- IMSL副程式庫之Fortran PowerStation4.0幫助下，建立無限版回算程式『EK』

## 回算流程圖



## 網格切割

參數分析

- Ioannides【15】對於有限元素網格切割的建議

載重模式	最短邊長	
	求最大變位時所需的最短邊長 L	求最大應力時所需的最短邊長 L
中央	8.0l	3.5l
邊緣	8.0l	5.0l
角隅	5.0l	4.0l

## 荷重傳遞因子

參數分析

- Ioannides之ILLI-BACK無限版回算荷重傳遞因子
- 撓度傳遞因子LTE

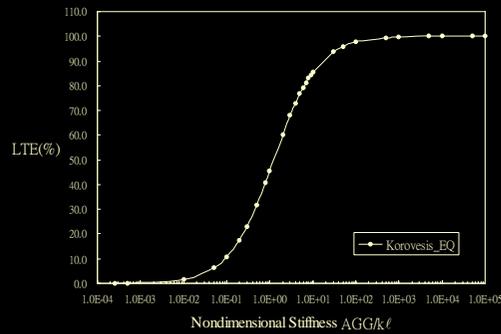
$$LTE_{\delta} = \frac{\delta_U}{\delta_L} \times 100\%$$

$\delta_U$  = 自由端之撓度值

$\delta_L$  = 荷重端之撓度值

## 荷重傳遞因子

參數分析



## 荷重傳遞因子

參數分析

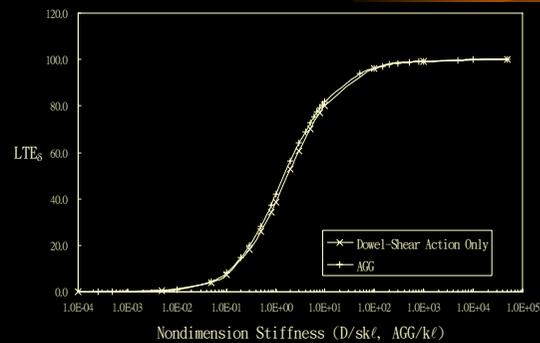
- Korovesis(1990)【2】由 ILLI-SLAB 分析結果迴歸所得的公式：

$$LTE_{\delta} = \frac{1}{0.01 + 0.012 \left( \frac{AGG}{k\ell_k} \right)^{-0.849}}$$

- 本研究運用 ILLI-SALB 程式分析結果，繪製荷重傳遞因子與撓度傳遞因子關係圖

## 荷重傳遞因子

參數分析



## 荷重傳遞因子

參數分析

- 荷重半徑的大小，並不影響相鄰版塊的荷重傳遞
- 確立綴縫筋與骨材互鎖之剪應力勁度矩陣為相同的
- 定義撓度傳遞比：

$$R_{LTE} = \frac{\delta_m}{\delta_s}$$

$\delta_m$  = 有限元素法求得之多版撓度值

$\delta_s$  = 有限元素法求得之單版撓度值

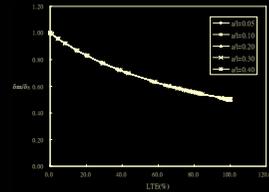
## 荷重傳遞因子

參數分析

- 由撓度傳遞比與撓度傳遞因子關係圖，得知單版與多版間之關係，與荷重位置無關，只與LTE有關

- 因此定義荷重修正因子為：

$$R_{LTE} = f(LTE_{\delta})$$



## 彈性固體基礎參數驗證

參數分析

- 在Lee與Darter的研究發現，溫氏基礎模式下，在考慮線性溫差時，在自重與荷重交互影響時，有二個無因次參數 $D_p$ 、 $D_y$ ，必須考慮
- 在彈性固體基礎模式下，並無定義線性溫差與自重影響因子，故本研究分析溫差效應的首要工作  
→定義 $D_p$ 、 $D_y$

## 彈性固體基礎參數驗證

參數分析

- 由前人與ILLI-SALB程式碼中，假設定義

$$D_y = \frac{\gamma h^2}{E_s \ell_e} \quad D_p = \frac{Ph}{E_s \ell_e^3}$$

- 在大膽假設後，小心求證假設的正確性，

$$D_y \text{ 時假設 } \frac{L}{\ell_e} = 8.0, \frac{W}{\ell_e} = 6.0, \alpha \Delta T = 1.1E-04, D_y = 3.0E-05$$

$$D_p \text{ 時假設 } \frac{L}{\ell_e} = 8.0, \frac{W}{\ell_e} = 6.0, \alpha \Delta T = 1.1E-04, D_y = 3.0E-05, D_p = 3.0E-05$$

## 彈性固體基礎參數驗證

參數分析

- $D_y$ 之驗證表

$\Delta T$	$\alpha$	h	E(10 <sup>9</sup> )	E <sub>s</sub>	L	W	$\ell_e$	$\gamma$	Deflection	$\delta h/l^2$
100	1.10E-05	5.66	5.0	5.50E+03	112.838	169.257	28.209	1.45E-01	0.041567	0.00030
100	1.10E-05	6.78	4.0	7.50E+03	112.838	169.257	28.209	1.39E-01	0.034853	0.00030
100	1.10E-05	15.53	3.0	8.50E+03	225.676	338.514	56.419	5.97E-02	0.061345	0.00030
100	1.10E-05	18.44	2.0	9.50E+03	225.676	338.514	56.419	4.73E-02	0.051360	0.00030
200	5.50E-06	5.66	5.0	5.50E+03	112.838	169.257	28.209	1.45E-01	0.041567	0.00030
200	5.50E-06	6.78	4.0	7.50E+03	112.838	169.257	28.209	1.39E-01	0.034853	0.00030
200	5.50E-06	15.53	3.0	8.50E+03	225.676	338.514	56.419	5.97E-02	0.061345	0.00030
200	5.50E-06	18.44	2.0	9.50E+03	225.676	338.514	56.419	4.73E-02	0.051360	0.00030
300	3.67E-06	5.66	5.0	5.50E+03	112.838	169.257	28.209	1.45E-01	0.041567	0.00030
300	3.67E-06	6.78	4.0	7.50E+03	112.838	169.257	28.209	1.39E-01	0.034869	0.00030
300	3.67E-06	15.53	3.0	8.50E+03	225.676	338.514	56.419	5.97E-02	0.061374	0.00030
300	3.67E-06	18.44	2.0	9.50E+03	225.676	338.514	56.419	4.73E-02	0.051384	0.00030
400	2.75E-06	5.66	5.0	5.50E+03	112.838	169.257	28.209	1.45E-01	0.041567	0.00030
400	2.75E-06	6.78	4.0	7.50E+03	112.838	169.257	28.209	1.39E-01	0.034853	0.00030
400	2.75E-06	15.53	3.0	8.50E+03	225.676	338.514	56.419	5.97E-02	0.061345	0.00030
400	2.75E-06	18.44	2.0	9.50E+03	225.676	338.514	56.419	4.73E-02	0.051360	0.00030

## 彈性固體基礎參數驗證

參數分析

### • Dp之驗證表

ΔT	α	h	E(10 <sup>9</sup> )	E <sub>s</sub>	L	W	ℓ <sub>c</sub>	γ	P	a	Deflection	δh/ℓ <sup>2</sup>
10.0	1.10E-05	5.66	5.0	5.50E+03	112.838	169.257	28.209	1.45E-01	654.08	2.821	0.044824	0.00032
10.0	1.10E-05	6.76	4.0	7.50E+03	112.838	169.257	28.209	1.39E-01	746.666	2.821	0.037579	0.00032
10.0	1.10E-05	15.53	3.0	8.50E+03	225.676	338.514	56.419	5.97E-02	2949.705	5.642	0.066164	0.00032
10.0	1.10E-05	18.44	2.0	9.50E+03	225.676	338.514	56.419	4.73E-02	2775.138	5.642	0.055417	0.00032
20.0	5.50E-06	5.66	5.0	5.50E+03	112.838	169.257	28.209	1.45E-01	654.08	2.821	0.044824	0.00032
20.0	5.50E-06	6.76	4.0	7.50E+03	112.838	169.257	28.209	1.39E-01	746.666	2.821	0.037579	0.00032
20.0	5.50E-06	15.53	3.0	8.50E+03	225.676	338.514	56.419	5.97E-02	2949.705	5.642	0.066164	0.00032
20.0	5.50E-06	18.44	2.0	9.50E+03	225.676	338.514	56.419	4.73E-02	2775.138	5.642	0.055417	0.00032
30.0	3.67E-06	5.66	5.0	5.50E+03	112.838	169.257	28.209	1.45E-01	654.08	2.821	0.044843	0.00032
30.0	3.67E-06	6.76	4.0	7.50E+03	112.838	169.257	28.209	1.39E-01	746.666	2.821	0.037595	0.00032
30.0	3.67E-06	15.53	3.0	8.50E+03	225.676	338.514	56.419	5.97E-02	2949.705	5.642	0.066193	0.00032
30.0	3.67E-06	18.44	2.0	9.50E+03	225.676	338.514	56.419	4.73E-02	2775.138	5.642	0.055440	0.00032
40.0	2.75E-06	5.66	5.0	5.50E+03	112.838	169.257	28.209	1.45E-01	654.08	2.821	0.044824	0.00032
40.0	2.75E-06	6.76	4.0	7.50E+03	112.838	169.257	28.209	1.39E-01	746.666	2.821	0.037579	0.00032
40.0	2.75E-06	15.53	3.0	8.50E+03	225.676	338.514	56.419	5.97E-02	2949.705	5.642	0.066164	0.00032
40.0	2.75E-06	18.44	2.0	9.50E+03	225.676	338.514	56.419	4.73E-02	2775.138	5.642	0.055417	0.00032

## 控制參數

參數分析

### • 版長效應的影響

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

### • 線性溫差效應影響

$$\frac{\delta h}{\ell_c^2} = f\left(\alpha \Delta T, \frac{L}{\ell_c}, \frac{W}{\ell_c}, \frac{\gamma h^2}{E_s \ell_c}\right)$$

## 線性溫差修正因子

參數分析

### • 因次分析公式

溫式基礎模式

$$R_T = \frac{\delta_i - \delta_{L_c}}{\delta_c} = f\left(\frac{a}{\ell_k}, \frac{L}{\ell_k}, \frac{W}{\ell_k}, \alpha \Delta T, \frac{\gamma h^2}{k \ell_k^2}, \frac{P h^2}{k \ell_k^4}\right)$$

彈性固體模式

$$R_T = \frac{\delta_i - \delta_{L_c}}{\delta_c} = f\left(\frac{a}{\ell_c}, \frac{L}{\ell_c}, \frac{W}{\ell_c}, \alpha \Delta T, \frac{\gamma h^2}{E_s \ell_c^3}, \frac{P h}{E_s \ell_c^3}\right)$$

$$\delta_L = \delta_W \times R_{LW} \times R_{LT}$$

## 線性溫差修正因子

參數分析

- 線性溫差撓度公式，在彈性固體基礎上，沒有找到理論公式，故以Westergaard的線性溫差撓度公式模擬

$$\delta_c = \frac{(1+\nu)\alpha \Delta T \ell_c^2}{h}$$

$$\delta_c = \frac{(1+\nu)\alpha \Delta T \ell_c^2}{h}$$

## 線性溫差修正因子

參數分析

- 迴歸分析的同時，發現線性溫差在很小的時候（趨近於零），撓度值並不為零，但理論公式解在趨近於零時，無法得到想要的迴歸精度  
→放棄建立線性溫差修正因子

## 線性溫差修正因子

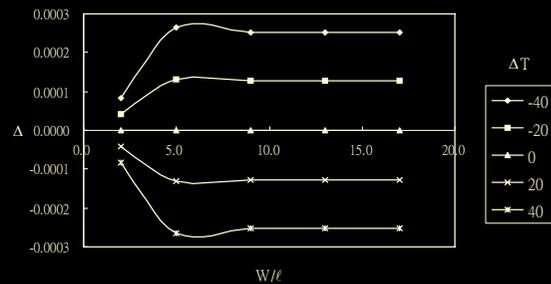
參數分析

- 主要的原因如下：
  - +理論公式的欠缺
  - +理論公式與有限元素法分析結果，大異其趣
  - +有限元素法在分析自重上，與理論解完全不同

## 線性溫差修正因子

參數分析

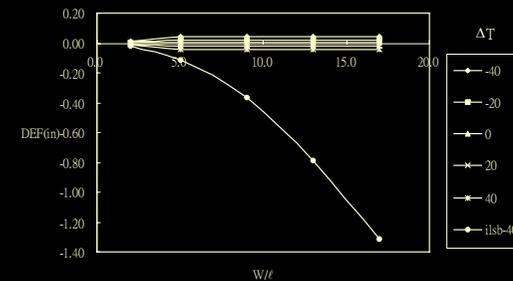
- Westergaard的邊緣線性溫差撓度公式 ( $a/l=0.05, L/l=17.0$ , 無自重)



## 線性溫差修正因子

參數分析

- ILLI-SLAB與Westergaard的邊緣線性溫差撓度公式 ( $a/l=0.05, L/l=17.0$ , 無自重)



## 五、模式建立

- 本研究採用小區域迴歸法 (LOESS)，作為建立模式的統計方法
- 利用修正因子的概念，建立修正公式
- 資料庫的建立，則依Ioannides的建議與第三、四章中的切割方式，建立統計迴歸資料庫

## 荷重傳遞修正因子

模式建立

- 建立由二塊相鄰的無限版資料庫，以探討分析荷重傳遞效應的影響
- 依因次分析公式：

$$R_{LTE} = \frac{\delta_m}{\delta_s} = f(LTE_\delta)$$

- 建立荷重傳遞修正因子

$$R_{LTE} = 0.00003178733 \times LTE_\delta^2 - 0.008069961 \times LTE_\delta + 0.992127$$

## 版尺寸修正因子

模式建立

- 依因次分析公式：

溫式基礎模式

$$R_{LW} = \frac{\sigma_i}{\sigma_w} = f\left(\frac{a}{\ell_k}, \frac{L}{\ell_k}, \frac{W}{\ell_k}\right)$$

彈性固體模式

$$R_{LW} = \frac{\sigma_i}{\sigma_{Crovetti}} = f\left(\frac{a}{\ell_e}, \frac{L}{\ell_e}, \frac{W}{\ell_e}\right)$$

$\sigma_w$  = Westergaard理論公式解(溫式基礎模式)

$\sigma_{Crovetti}$  = Crovetti公式解(彈性固體基礎模式)

$\sigma_i$  = 有限元素法撓度值

$R_{LW}$  = 版尺寸修正因子

## 荷重位置之修正

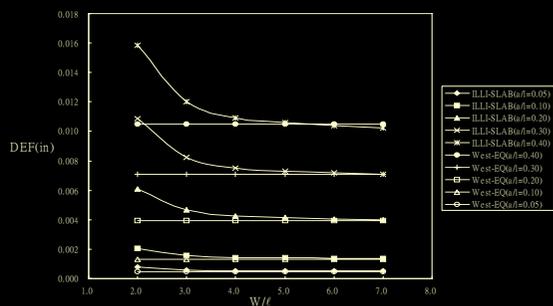
模式建立

- 由於AREA- $\ell$ 公式使以無限版中央載重，迴歸建立的，當欲將公式使用在角隅與邊緣載重時，將產生誤差，必須做修正
- 無限版尺寸修正成有限版，使得公式可運用於有限尺寸版之分析
- 資料庫的建立與版尺寸修正因子相同

## 荷重位置之修正

模式建立

中央載重(L/ℓ = 7.0)



## 1. 封閉型回算步驟之修正

模式建立

- 主要在修正有限版尺寸的運用
- 修正無因次撓度值的誤差，與相對勁度半徑

$$k = \frac{P \times \Delta_i}{\ell_k^2 \times \delta_i} \quad E_s = \frac{2(1 - \mu_s^2) \times P \times \Delta_i}{\ell_e \times \delta_i}$$

- 與Ioannides回算步驟不同在於無因次撓度與相對勁度半徑的修正

## 2. 撓度比回算步驟之修正

模式建立

- 撓度比回算法的優點在於只需二點撓度值，即可進行回算
- 修正因子的使用，主要是在無因次撓度值的修正，包括有限版尺寸與荷重傳遞效應的修正

$$k = \frac{P \times \Delta_i}{\ell_k^2 \times \delta_i} \quad E_s = \frac{2(1 - \mu_s^2) \times P \times \Delta_i}{\ell_e \times \delta_i}$$

## 六、模式的驗證與應用

- EK回算程式的驗證（無限版理論）
- 經由文獻中，得到ILLI-BACK回算程式的回算結果，可做為參考

基礎模式	模數	ILLI-BACK	EK
溫氏基礎	ℓ <sub>k</sub> (in)	37.18299	36.85009
	k (pci)	162.62589	163.60360
	Ec (psi)	4906460.00	4761549.00
彈性固體基礎	ℓ <sub>e</sub> (in)	27.84477	26.44278
	Es (psi)	19694.74609	20654.85000
	Ec (psi)	4207476.50	3779058.00

## 修正因子

模式驗證

1. 荷重傳遞修正因子  $\rightarrow R_{LT}$  (線性)
2. 版尺寸修正因子
  - 溫氏基礎模式  $R_L \times 3$  (LOESS)
  - 彈性固體基礎模式  $R_L \times 3$  (LOESS)
3. 荷重位置修正因子
  - 溫氏基礎模式  $R_{kl}$   $\times 3$  (LOESS)
  - 彈性固體基礎模式  $R_{el}$   $\times 3$  (LOESS)

## 正算分析之應用

模式應用

- 荷重傳遞因子之應用
  - $\rightarrow$  在不以有限元素法分析下，找出受荷重影響下的撓度變化
- 撓度修正因子之應用
  - $\rightarrow$  可運用於此，修正撓度因有限尺寸的變化，以求得有限版尺寸的撓度值

## 傳統封閉型回算法之修正

模式驗證

- 溫氏基礎模式 (角隅載重)

	$\delta_0$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$l_k$	$\Delta$	k	Error%
1	0.004540	0.004285	0.004024	0.003765	118.15	1.037795	199.80	0.10
2	0.011457	0.010238	0.008986	0.007776	60.21	0.977941	289.07	3.64
3	0.030701	0.024716	0.018649	0.013372	29.35	0.849587	404.11	-1.03
4	0.004706	0.004445	0.004178	0.003913	117.91	1.037668	202.36	-1.18
5	0.011884	0.010636	0.009356	0.008120	59.63	0.976740	297.20	0.93

- 彈性固體基礎模式 (角隅載重)

	$\delta_0$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$l_k$	$\Delta$	Es	Error%
1	0.051131	0.040996	0.029969	0.020439	16.54	0.442024	9771.31	-2.86
2	0.050944	0.039355	0.029969	0.020439	14.77	0.416393	10512.42	4.43
3	0.049100	0.039411	0.028930	0.020394	17.51	0.454569	9628.44	-1.35
4	0.048979	0.037929	0.025452	0.016027	14.01	0.404045	10790.74	1.90
5	0.047519	0.038196	0.028005	0.019680	17.55	0.455059	9519.49	-0.21

## 傳統封閉型回算法之修正

模式驗證

- 由以各回算分析表的結果，可得知撓度修正因子與相對勁度半徑修正因子的適用性
- 而誤差發生的原因上，主要的誤差在於相對勁度半徑修正因子上，其迴歸精度不夠精確是為影響回算精度的重要因素
- 在時間上限制，不能夠分析太多有限元素資料庫，以致迴歸的精度無法提升，亦是造成誤差的原因

## 撓度比回算法之修正

模式驗證

- 溫氏基礎模式（角隅載重）

角隅載重	$\delta/\delta_0$	$l_1$	West_EQ	k	Error%
$\delta_{11}/\delta_0$	0.900	63.50	1.018236	303.7507	-1.25
$\delta_{21}/\delta_0$	0.800	61.00	1.014885	327.8253	-9.28
$\delta_{31}/\delta_0$	0.658	66.23	1.021607	282.4467	5.85
SUM =			304.6742		-1.56

- 誤差的因素：仍是資料太少，導致有內差精度不足，再加上，每一次的修正，多多少少會引進一些誤差，亦是無差產生的因素

## 荷重傳遞效應

模式驗證

- 荷重傳遞效應在邊緣與角隅的影響最大，故建立荷重傳遞修正因子，以修正邊緣與角隅的誤差

邊緣載重	$\delta/\delta$	l	C_EQ	k	Error%
$\delta_{11}/\delta_0$	0.939	34.5	0.37056	364.518	27.09641
$\delta_{21}/\delta_0$	0.812	29.5	0.360316	484.7726	3.045485
$\delta_{31}/\delta_0$	0.669	29	0.359097	499.9363	0.012737
SUM =			449.7423		10.05154

- 誤差的因素：荷重傳遞對於 $l$ 的影響、撓度比回算模式的誤差與資料庫不足

## TKUBAK程式之擴增

模式應用

- TKUBAK程式為一回算程式之集合
- EK無限版回算程式將加入TKUBAK程式中，擴充回算能力
- 修正因子的理念，在驗證無誤後，將加入TKUBAK程式中
- LOESS程式碼，希望在有限的時間裡，使得回算不用在依靠其他統計軟體

## 結論

1

- 回算更接近真實現況的鋪面強度模數
- 傳統AREA與撓度比回算法的共同點，是在相對勁度半徑與撓度值間之關係，與無因次撓度公式
- ILLI-SLAB程式進行編譯時，修改程式中的一些錯誤，使得在分析彈性固體基礎模式下，可分析線性溫差的影響，並在參數敏感度分析後，驗證修改無誤

## 結論

2

- 骨材互鎖效應與綴縫筋二種剪力傳遞，在剪應力勁度矩陣使相同的，並由此定義無因次剪力傳遞因子
- 在傳統理論基礎上，以Losberg撓度理論公式，建立無限版回算程式EK
- 彈性固體基礎模式在線性溫差的影響下，本研究定義無因次參數 $D_p$ 、 $D_\gamma$

## 結論

3

- 在荷重傳遞因子的分析上，可看出撓度傳遞比與載重半徑比值也是沒有直接的關連，只與LTE有關
- 依撓度比與LTE的關係建立荷重修正因子
- 找出傳統封閉型與撓度比回算法中，無因次撓度公式的限制，是為誤差產生的主要步驟

## 結論

4

- 實例驗證回算流程，修正因子的理念，可運用於面積指標法與撓度比法，利用修正因子可使二種回算方式，更進一步符合現地情況
- 在荷重傳遞效應上，由於相對勁度半徑修正因子的不易建立，故在封閉型回算法仍無法運用

## 結論

5

- 以追逐投影迴歸法（PPR）建立撓度比回算法，有精度上的誤差，故本研究以LOESS建立修正因子
- 對於實務的影響，在有限版尺寸的修正上，已有較以往為佳的效果，運用於回算有限版尺寸，可有更接近真實的情形

## 結論

6

- 因此修正因子的理念，在溫差的分析上，現地情況與理論公式的差異，是無法建立線性溫差修正因子的原因
- 在使用上，可選擇傳統面積指標封閉解回算法，便於對於手算分析；在大量運算時，則可利用撓度比回算法（程式輔助）求解彈性模數

## 建議

1

- 在有限元素法程式ILLI-SLAB，仍有一些錯誤的地方有待改進，在綴縫筋的彎矩勁度矩陣，與彈性固體基礎模式下，分析多版時的錯誤，可作為往後研究改進的方向
- 在綴縫筋彎矩效應的影響，礙於程式的問題，無法作分析，在修正ILLI-SLAB程式後，可補足此部分的影響

## 建議

2

- 在線性溫差方面，由於理論公式的欠缺，均使用最大撓度值，此部分會影響線性溫差修正因子的精確度，往後可在線性溫差理論公式或是利用因次分析方法，建立線性溫差撓度公式，以期有更佳的精確度
- 對於修正因子的理念，在修正回算步驟時，每一次的修正動作，不可避免的，都將引進一些誤差

## 建議

3

- 在多版與線性溫差交互作用下的影響，仍有研究的空間，在此情況下，溫差效應受到相鄰版塊的束制，影響回算的份量，可作為往後研究的方向
- 本研究的之回算乃是靜態之回算法，卻運用動態非破壞性檢測的結果，因此必須要乘上一調整因子，建議依AASHTO調整因子修正

## 建議

4

- 在撓度比回算法上，由於PPR在迴歸一微小值時的精確度較低，影響回算精度，建議可運用LOESS迴歸法，重新建立模式，以提升回算的精確度
- 在荷重傳遞修正因子之相對勁度半徑修正上，有進一步研究的必要。

## 剛性鋪面回算方法的遠景

- 使用有限元素法回算剛性鋪面之回彈模數，可得最接近真實情況
- 優點：參數限制解除，利用有限元素法回算剛性鋪面模數值，只要有版長寬即可，儀器測量之荷重可放置在任何位置
- 缺點：以人工智慧切割元素為一大重要因素，與假設一起始值困難