

## 接縫式混凝土鋪面回算程式之建立

李朝聰、李英豪  
淡江大學土木工程學系



## 簡報流程

- 緒論(研究目的、方法)
- 文獻回顧
- 回算流程之分析與驗證
- 撓度比資料庫與預估模式之建立
- TKUBAK回算程式之建立與驗證
- 結論與建議



## 研究目的

- 針對接縫式混凝土鋪面(彈性固體基礎模式)
- 改良傳統閉合解回算程式利用撓度盤面積 AREA回算之限制,以符合不同現場情況
- 回算流程之分析與驗證(不限FWD)
  - w 中央、邊緣、與角隅載重
  - w 無限版、與有限版之情況
- 改善回算之流程,並建立一非常容易使用的個人電腦程式,讓回算更快速、便捷



## 研究方法

- w 傳統回算方式之回顧(AREA)
  - w 理論公式推導與驗證(IMSL)
- w 控制參數之選定(因次分析方法)
- w 有限元素程式之分析與應用(ILLI-SLAB)
  - w 建立撓度比資料庫
- w 預估模式之構建(S-PLUS統計軟體之應用)
- w 修正回算流程,並利用Visual Basic 4.0軟體撰寫電腦程式(TKUBAK)



## 文獻回顧

- 影響鋪面撓度值的因素
  - w 載重因子(載重方式、作用位置)、鋪面因子(尺寸效應)、氣候因子(溫差效應)
- 非破壞性試驗方式及儀器
- 剛性鋪面撓度值基本理論公式
- 回算程式的分類及限制
- 其它相關研究



## 非破壞性試驗方式及儀器

- 靜力撓度試驗--彭柯曼樑
- 穩態動力撓度試驗
  - 動力撓度儀 (Dynaflect)
  - 路面評審儀 (Road Rater)
- 衝擊荷重撓度試驗--FWD
- 波傳遞試驗



## 剛性鋪面撓度之基本理論公式

$$w(r) = \frac{P}{fa} * \frac{2}{C} \int_0^{\infty} \frac{J_0(rr) * J_1(ra)}{r(1+r^3 * \gamma_e^3)} dr$$

$$w' = \frac{wC}{2P} = \frac{wD}{P\gamma_e^2} = f\left(\frac{a}{\gamma_e}, \gamma\right)$$

$$\gamma = \gamma_e = \sqrt[3]{\frac{Eh^3(1-\nu_e^2)}{6(1-\nu_e^2)E_s}} \quad \text{(Losberg, 1960)} \\ \text{(無限版長)}$$

$$C = \frac{E_s}{(1-\nu_e^2)}, D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu_e^2)}$$



## Losberg最大撓度公式

· 中央載重

$$u_e = \frac{2P}{C\gamma_e} \left[ 0.19245 - 0.0272 \left(\frac{a}{\gamma_e}\right)^2 + 0.0199 \left(\frac{a}{\gamma_e}\right)^2 \ln\left(\frac{a}{\gamma_e}\right) \right]$$

· 無邊緣與角隅之公式

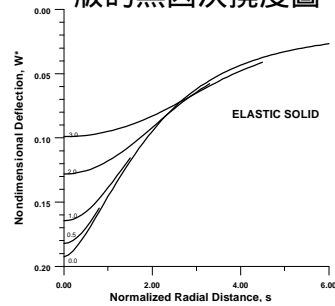


## Losberg撓度公式的驗證

- Losberg方程式中所含的貝索函數 $J_0(x)$ 及 $J_1(x)$ 在IMSL副程式庫中分別以BESJ<sub>0</sub>(X)及BESJ<sub>1</sub>(X)表示
- 積分式是以QDAGI(F, BOUND, ...)表示
- 利用前述的內定函數及副程式即可求解上述的無因次撓度方程式



## 版的無因次撓度圖



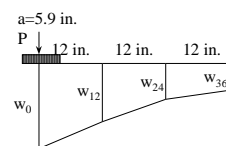
## 傳統回算程式與方法

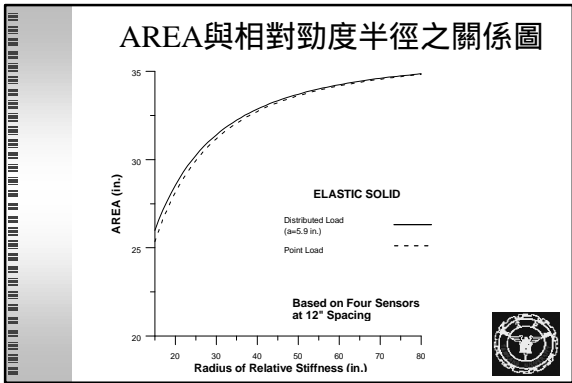
- 反覆計算法(迭代法)
  - w BISDEF, CHEVDEF, WESDEF, ELSDEF
- 資料庫處理法
  - w MODULUS, COMDEF
- 版理論法(閉合解法) <=<本研究
  - w AREA Concept (Hoffman, 1981)
  - w Foxworthy圖解法, ILLI-BACK程式
  - w Hall / PAS, Crovetti閉合解公式



## 撓度盤面積(AREA)的公式

$$AREA(in^2) = \frac{\text{面積}}{in^2} = 6 * \left[ 1 + 2 \left( \frac{W_{12}}{W_0} \right) + 2 \left( \frac{W_{24}}{W_0} \right) + \left( \frac{W_{36}}{W_0} \right) \right]$$





### ILLI-BACK回算程式

· Losberg 理論解公式

$$d_0 = \frac{w_0 D}{P \lambda_e^2} = f\left(\frac{a}{\lambda_e}\right) \quad d_i = \frac{w_i D}{P \lambda_e^2} = f_i(\lambda_e)$$

$$\frac{d_i}{d_0} = \frac{w_i}{w_0} = \frac{f_i(\lambda_e)}{f_0(\lambda_e)} = f(\lambda_e)$$

· 將所求出的四個 $d_i$ 值代入下式求解一個平均的 $E_s$ 值，再求出 $E_c$ 值

$$E_s = \frac{2(1 - \nu_s^2) P d_i}{\lambda_e w_i} \quad E_c = \frac{\lambda_e^3 \times 6(1 - \nu_s^2) \times E_s}{h^3(1 - \nu_s^2)}$$

### Hall/PAS閉合解回算公式

· 中央載重(無限版長)之迴歸公式(1991)

$$\lambda_e = \left[ \frac{\ln\left(\frac{36 - AREA}{4521.676303}\right)}{-3.645555} \right]^{5.334281}$$

· 代入下列公式求解 $E_s$ 值及 $E_c$ 值

$$E_s = \left[ \frac{2P(1 - \nu_s^2)}{d_0 \lambda_e} \right] \left[ 0.19245 - 0.0272 \left(\frac{a}{\lambda_e}\right)^2 + 0.0199 \left(\frac{a}{\lambda_e}\right) \ln\left(\frac{a}{\lambda_e}\right) \right]$$

$$E_c = \frac{\lambda_e^3 \times 6(1 - \nu_s^2) \times E_s}{h^3(1 - \nu_s^2)}$$

### Crovetti建議之無因次撓度公式

$$w^* = A_1 + A_2 \left(\frac{a}{\lambda_e}\right) + A_3 \left(\frac{a}{\lambda_e}\right)^2$$

載重位置	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
中央載重	0.193	-0.008	-0.028
邊緣載重	0.441	-1.022	1.175
角隅載重	0.7383	-1.036	0.577

(Crovetti, 1994)

- ### 傳統閉合解回算程式的限制
- 僅限於FWD儀器
    - w 載重圓盤的半徑a=5.9in.
    - w 四個撓度感應器的位置(0, 12, 24, 36 in.)
    - w 必須有上述四個撓度量測值，缺一不可
    - w 其他撓度量測值無法利用
  - 無限尺寸版與完全路基支承
  - 限於英制單位

### 控制參數的驗證

· ILLI-SLAB有限元素程式的應用

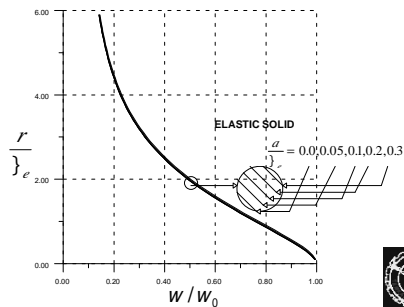
· 四個控制參數保持定值，其它的參數任意變化，則無因次撓度值會保持定值

$$d_i = \frac{w_i D}{P \lambda_e^2} = f\left(\frac{a}{\lambda_e}, \nu_s, W, T, \dots\right)$$

· 修正之無因次撓度比公式

$$w^* = \frac{d_i}{d_0} = f\left(\frac{a}{\lambda_e}, \nu_s, W, T, \dots\right)$$

### 無因次撓度比與控制參數的相關圖



### 撓度比資料庫與預估模式的建立

- 建立中央、邊緣、及角隅載重，無限版長、及有限版長情況的撓度比資料庫
- 利用投影追逐迴歸分析法，求出各撓度比預估方程式

$$w_{\text{無限版長}} / w_0 = f(a/\rho_e, r/\rho_e)$$

$$w_{\text{有限版長}} / w_0 = f(a/\rho_e, L/\rho_e, W/\rho_e, r/\rho_e)$$

### 建議之回算流程

- 取得現場撓度量測值
- 假設一相對勁度半徑起始值，並代入預估模式計算撓度比
- 比較現場與預估之撓度比，修正相對勁度半徑之值
- 並以迭代的方式，重覆步驟(2)~(3)，決定最終相對勁度半徑之值(收斂極快)
- 代入最大撓度公式，求解 $E_s, E_c$ 之值

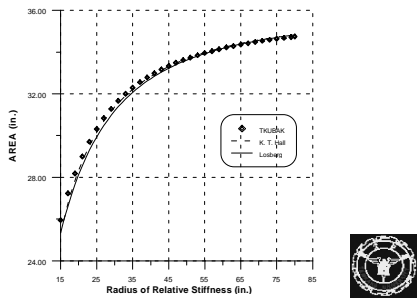
### TKUBAK回算程式的建立

- 利用Visual Basic 4.0程式編譯而成
- 主要功能包括：ILLI-BACK, Hall/PAS, TKUBAK等三大部份
- 含中英文圖形界面，適用於公英制單位
- 無因次撓度比公式不受AREA Concept之限制，因此可通用於FWD、Road Rater或其他自定規格的NDT儀器

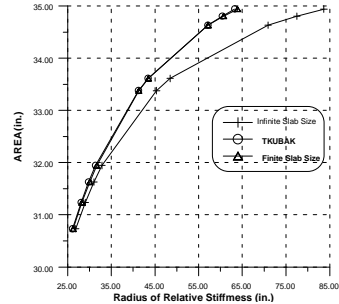
### TKUBAK回算程式圖例(一)

### TKUBAK回算程式圖例(二)

### TKUBAK回算程式的驗證(無限版長)



### TKUBAK回算程式的驗證(有限版長)



### 結論與建議(一)

- 本研究使用無因次控制參數，可免除因儀器的不同或AREA Concept的基本限制，因此可通用於FWD、Road Rater、或其他自定規格的NDT儀器
- 只需載重盤中央及其它任何一點的撓度值即可進行回算，因此可在同一NDT試驗同時回算出多組答案或取其平均值

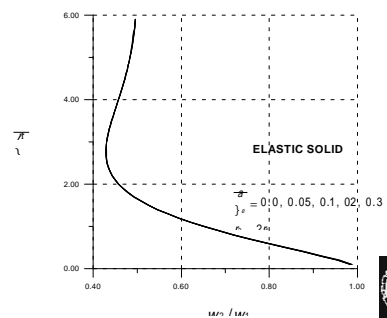
### 結論與建議(二)

- 可進而發現現場資料的誤差點，有效解決有時因鋪面結構的鬆散或量測儀器的故障，導致回算困難之難題
- AASHTO建議將回算而得之動態的 $E_s$ 值轉換為靜態的 $E_s$ 值，其調整因子不超過0.33
- 因溫差、多版、及多層的情況所造成的影響仍有待深入研究

### 結論與建議(三)

- 若將資料庫區分成數個，以減少分析時參數的個數，或利用資料庫比對的方式，當可再提高回算之精準性
- 研究發現當使用任二點之撓度比( $w_2/w_1$ )，其所對應之相對勁度半徑值可能不唯一
- 建議未來可就此方面加強探討，將其中的問題釐清後，或許可用作現場撓度值驗證指標

### 任二點之撓度比與其他參數之關係



## 致謝

本研究承蒙國科會專題計畫  
NSC85-2211-E032-010  
之經費贊助，特此致謝。



THANKS FOR YOUR  
ATTENTION!

敬請指教！

李朝聰、李英豪  
淡江大學土木工程學系

THANKS FOR YOUR ATTENTION

