

鋪面落重撓度儀檢測、反算及應用研習會

鋪面回算方法與應用

主講人

淡江大學土木工程學系

李英豪 教授

林佳慧 碩士

中華民國九十六年二月九日



簡報大綱

- 前言
- 二層柔性鋪面系統回算之簡介
- 二層剛性鋪面系統回算之簡介
- 多層鋪面系統之回算及限制
- AASHTO對現有鋪面結構評估之回算方式
- LTPP鋪面回算結果之分析與討論
- 結論與建議

2

前言

- 在鋪面管理系統中，道路鋪面的養護維修工作，有賴於定期對現有道路鋪面之結構進行評估，藉以瞭解鋪面狀況。
- 鋪面結構強度大多是以各層材料的彈性模數表示過去—直接鑽孔取樣→1.費時費事、2.破壞鋪面現在—非破壞性撓度試驗(NDT)→回算

3

二層柔性鋪面系統回算之簡介(1/4)

- Boussinesq發展出以一個集中荷重作用在均質、等向的單層系統理論解公式。
- Ahlvin和Ulery據此發展出一個適用於圓形均佈荷重在任何徑向距離(r)、深度(z)、與柏松比(μ)的撓度方程式如下：

$$\Delta_z = \frac{Pa}{E_1} f\left(\frac{r}{a}, \frac{z}{a}, \mu\right)$$

→在已知之各項條件下，直接簡單反求 E_1 值。

4

二層柔性鋪面系統回算之簡介(2/4)

- Burmister藉由荷重函數之貝索函數展開，對於一個相當於集中荷重作用在第一層表面之分佈力的任意疊加荷重，可以得到二層彈性系統中第一層表面的撓度方程式。
- **二層彈性系統**在圓形均佈荷重作用下中心點之撓度方程式。依因次分析的原理，該撓度方程式可簡化為：

$$w_c = \frac{1.5pa}{E_2} F_w \left(\frac{a}{h}, \frac{E_2}{E_1} \right) = \frac{1.5pa}{E_2} F_w$$

5

二層柔性鋪面系統回算之簡介(3/4)

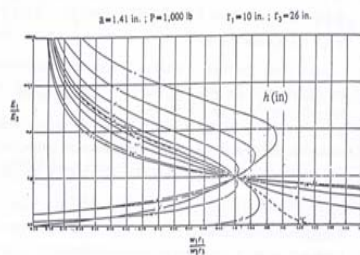
- Scriver於1973年針對動力撓度儀作用在鋪面—路基的二層彈性系統上，發展出一個封閉型的圖解回算法。
- 將路基以上的全部材料，假設統合成一種材料，而形成簡化的二層系統。兩層均假設為均值、等向性的線彈性材料，系統承受一垂直集中荷重P。(上層是 E_1 、 h ，下層是 E_2 、 $h=\infty$ ，兩層的柏松比皆為0.5)，其撓度方程式如下所示：

$$\frac{4\pi E_1}{3P} wr = \int_{x=0}^{\infty} V * J_0(x) dx = F \left(\frac{E_2}{E_1}, \frac{r}{h} \right)$$

6

二層柔性鋪面系統回算之簡介(4/4)

- Scriver針對動力撓度儀的配置，在荷重面積半徑 a 及感應器位置 r_1 、 r_3 固定的狀況下，建立彈性模數回算的資料庫與曲線圖。



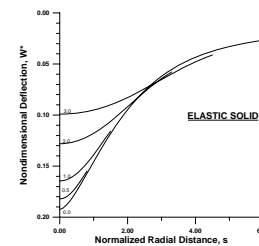
從量測之撓度值回算出彈性模數值的解 **可能不唯一**

- 唯一解
- 兩組解
- 無解

7

二層剛性鋪面系統回算之簡介(1/4)

- Losberg於1960年提出版的撓度方程式，並推導出基底層為彈性固體或緊密液態的理論公式（集中、均佈），最後提出無因次撓度公式與圖解。



$$w^* = \frac{wC\ell_c}{2P} = \frac{wD}{P\ell_c^2} = \frac{wE_s\ell_c}{2P(1-\mu_s^2)} = f \left(\frac{a}{\ell_c}, \frac{r}{\ell_c} \right)$$

$$w^* = \frac{wk\ell_k}{2P} = \frac{wD}{P\ell_k^2} = f \left(\frac{a}{\ell_k}, \frac{r}{\ell_k} \right)$$

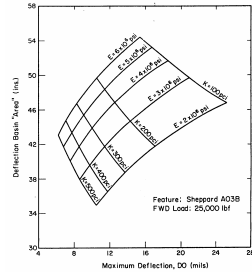
8

二層剛性鋪面系統回算之簡介(2/4)

- Hoffman和Thompson在1981年發展出撓度盤區域面積公式→回算二層系統之E值

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

- Foxworthy 依據不同之混凝土彈性模數、路基反力模數與版厚度，建立一系列最大撓度值與AREA之關係圖。內插圖解法→求E和k



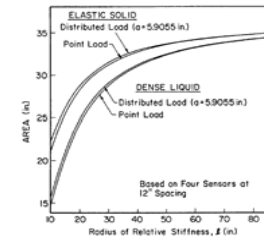
9

二層剛性鋪面系統回算之簡介(3/4)

- ILLI-BACK是伊利諾大學以版理論為基礎所發展出的閉合解的回算程式，可應用於緊密液體或彈性固體基礎上。

回算程序

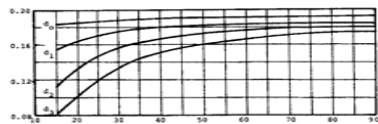
- 計算AREA值（同前述）
- 利用AREA值與相對勁度半徑的相關圖，查圖得l值。



10

二層剛性鋪面系統回算之簡介(4/4)

- 查圖得到四個標準化撓度值



- 將d_i代入下列公式求出一個平均的E_s和k值

$$E_s = \frac{2(1-\mu_s^2)Pd_i}{\ell_c w_i} \quad k = \frac{Pd_i}{\ell_i^2 w_i}$$

- 將E_s和k代入下列公式反算出E_c

$$\ell_c = \sqrt[3]{\frac{E_c h^3 (1-\mu_s^2)}{6(1-\mu_c)E_s}} \quad \ell_k = \sqrt[4]{\frac{E_c h^3}{12(1-\mu_c^2)k}}$$

11

多層鋪面系統之回算及限制(1/4)

多層鋪面系統之回算問題較為複雜，因此必須仰賴回算程式來進行，一般鋪面回算方式如下：

- 迭代法—係先假設一組模數值，再依此組數據計算出理論撓度值，並與現場撓度值相互比較，若誤差在容許範圍內，則該組模數即為所求，反之則修正模數值再重新計算。常見的迭代法回算程式有BISDEF、ELSDEF、CHEVDEF等。
- 資料庫處理法—先行將鋪面與路基的彈性模數值計算出一系列的表面撓度值，建立成一個大型的資料庫，再與理論撓度值內插比較，找出一組合適的彈性模數值，常見的有COMDEF、MODULUS等程式。
- 封閉型公式法—使用一系列的閉合解的圖表及公式，求出模數與鋪面撓度值的關係式，將實際的撓度值代入圖表後，查表求出答案。

12

多層鋪面系統之回算及限制(2/4)

柔性鋪面回算之問題與限制

- 回算程式中各層彈性模數值範圍的輸入與誤差範圍的設定，對回算結果的正確性影響甚大。
 - 設定過大，則回算結果較不理想，並使計算時間加長。
 - 設定過小，則可能得到設定範圍的邊界值而非所求之正確值。
 - 加上覆算次數之限制（或不足）以至無法收斂，則所得回算結果的正確性必然大受影響。
- 陳建桓曾經利用因次分析的觀念，將Scrivner所建議之二層鋪面系統之回算方式擴充，使其能適用於不同儀器、荷重面積之半徑及撓度量測位置。
 - 結果亦指出從量測撓度值回算出彈性模數值的解**可能不唯一**

13

多層鋪面系統之回算及限制(3/4)

剛性鋪面回算之問題與限制

- ILLI-BACK回算程式僅適用於無限尺寸版、中央荷重、與完全路基支承的假設基礎下，對於能更實際地模擬鋪面版有限的尺寸及可能因線性溫差而產生局部喪失路基支承之情形無法模擬。

14

多層鋪面系統之回算及限制(4/4)

- AREA公式的回算過程，完全限制了載重圓盤的半徑與四個撓度感應器的相對位置。
 - ▶ 白建華與李朝聰曾因此利用因次分析與修正撓度比(Modified Deflection Ratio)之觀念，並利用一系列的ILLI-SLAB有限元素程式分析，深入探討不同荷重位置、有限尺寸、與任意撓度感應器位置，對剛性鋪面回算結果之影響。
 - ▶ 許瑞升更進一步地探討荷重傳遞效應與溫度翹曲對剛性鋪面回算之影響。

15

AASHTO對現有鋪面結構評估之回算方式(1/6)

AASHTO之鋪面設計手冊中，對於現有柔性與剛性鋪面結構的評估，均建議暫時採用二層鋪面系統回算之方式。

柔性鋪面回算

在1993年AASHTO鋪面加鋪厚度設計法中，將路床以上之各層鋪面僅視為一結構層(厚度為鋪面各層之總厚度、有效回彈模數值為 E_p)。由於在距離荷重位置夠遠外之撓度值係僅受路基回彈模數高低之影響，故建議以下列公式來概估路基回彈模數：

$$M_R = \left(\frac{0.24P}{d_r r} \right)$$
$$r \geq 0.7a_c \quad a_c = \sqrt{a^2 + \left(D \times \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}$$

16

AASHTO對現有鋪面結構評估之回算方式(2/6)

依據多層彈性理論，在荷重盤中心所量得之最大撓度 d_0 (修正至68°F標準溫度) 為：

$$d_0 = 1.5Pa \left[\frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left[\frac{D/a}{\sqrt{E_p/M_R}} \right]^2}} + \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (D/a)^2}}}{E_p} \right]$$

▶ 此回算方式係假設已知有一荷重半徑 $a=5.9\text{in.}$ ，利用前述公式估算 M_R ，再根據 d_0 公式或以圖解方式，由已知鋪面各層總厚度(D)以及 $M_R d_0/P$ ，求得 E_p/M_R 之比值，最後再計算出路床以上鋪面有效回彈模數 (E_p) 之值。

17

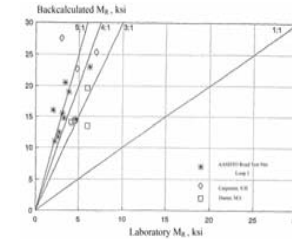
AASHTO對現有鋪面結構評估之回算方式(3/6)

- ▶ 設計手冊中亦指出回算出之動態路基回彈模數高於試驗室的靜態回彈模數值，如下圖。
- ▶ 為解決靜態與動態之差異，AASHTO建議路基回彈模數應乘上一折減係數 $C=0.33$ ，如下列公式。
- ▶ 手冊中並未討論對回算出之路床以上鋪面有效回彈模數值 (E_p) 做必要之修正。

$$M_R = C \left(\frac{0.24P}{d_r r} \right)$$



LTPP現地資料分析



18

AASHTO對現有鋪面結構評估之回算方式(4/6)

■ 剛性鋪面回算

- ▶ 在1993年AASHTO設計法中，係利用版理論的封閉型公式(緊密液體或彈性固體基礎)來達成剛性鋪面回算之目的。
- ▶ Hall【1991】利用FORTRAN之IMSL副程式庫，推導出AREA與相對勁度半徑之迴歸關係式。

$$\ell_k = \left[\frac{\ln \left(\frac{36 - AREA}{1812.279133} \right)}{-2.559340} \right]^{4.387009}, \quad \ell_e = \left[\frac{\ln \left(\frac{36 - AREA}{4521.676303} \right)}{-3.645555} \right]^{5.334281}$$

19

AASHTO對現有鋪面結構評估之回算方式(5/6)

▶ 回算之方式

- 由已知距離載重中心0, 12, 24, 36英寸處之撓度值，來計算AREA值。
- 由上列公式推算出其相對勁度半徑值 (ℓ_k 或 ℓ_e)。
- 利用Westergaard內部撓度公式之重新排序，即可由已知最大撓度值求解路基土壤之反力模數值(k)。

$$k = \left(\frac{P}{8a\ell_k^2} \right) \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2\pi} \right) \left[\ln \left(\frac{a}{2\ell_k} \right) + \gamma - 1.25 \right] \left(\frac{a}{\ell_k} \right)^2 \right\}$$

- 利用Losberg內部撓度公式之重新排序，即可由已知最大撓度值求解路基土壤之彈性模數值(E_s)。

$$E_s = \left[\frac{2P(1-\mu_s^2)}{a\ell_e} \right] \left[0.19245 - 0.0272 \left(\frac{a}{\ell_e} \right)^2 + 0.0199 \left(\frac{a}{\ell_e} \right)^3 \ln \left(\frac{a}{\ell_e} \right) \right]$$

- 混凝土版之彈性模數值(E_c)，可由版與路基土壤之相對勁度半徑公式直接求解而得。

20

AASHTO對現有鋪面結構評估之回算方式(6/6)

- AASHTO在1998年的輔助設計手冊中，提出對一般混凝土鋪面與複合鋪面之建議回算流程，並提供簡易之試算表以供分析使用（或<http://teg.ce.tku.edu.tw/lee/ftp/teg/desdet6.xls>）。
- 改變撓度感應器之數量與位置外，並加入對版之有限尺寸以之考量。

$$AREA_1 = 4 + 6\left(\frac{d_8}{d_0}\right) + 5\left(\frac{d_{12}}{d_0}\right) + 6\left(\frac{d_{18}}{d_0}\right) + 9\left(\frac{d_{24}}{d_0}\right) + 18\left(\frac{d_{30}}{d_0}\right) + 12\left(\frac{d_{60}}{d_0}\right)$$

$$AREA_1 = 3 + 6\left(\frac{d_{18}}{d_0}\right) + 9\left(\frac{d_{24}}{d_0}\right) + 18\left(\frac{d_{30}}{d_0}\right) + 12\left(\frac{d_{60}}{d_0}\right)$$

$$l_i = \left[\frac{\ln\left(\frac{60 - AREA_1}{289.708}\right)}{-0.698} \right]^{2.566} \quad l_i = \left[\frac{\ln\left(\frac{48 - AREA_1}{158.40}\right)}{-0.476} \right]^{2.220}$$

21

LTPP鋪面回算結果之分析與討論(1/10)

LTPP資料庫之資料擷取

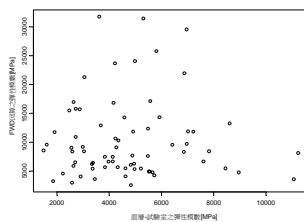
- 1987年開始，主要在蒐集北美洲現場鋪面二十年績效資料。
- 柔性鋪面(GPS-1與GPS-2)→面層、底層、基層和路基的彈性模數。
- 剛性鋪面(GPS-3與GPS-4)→緊密液體為基礎的有面層、基層彈性模數和路基反力模數，彈性固體為基礎的有面層、基層和路基彈性模數。

22

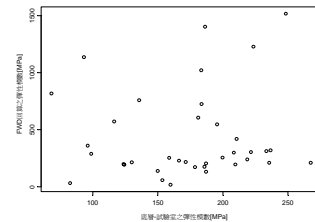
LTPP鋪面回算結果之分析與討論(2/10)

柔性鋪面回算結果分析

- 使用MODCOMP4程式回算柔性鋪面之彈性模數
- 程式適用於柔性與剛性鋪面（線性及非線性）。



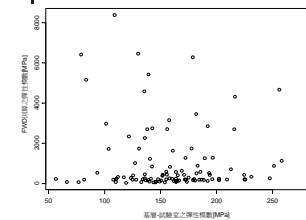
(a)面層



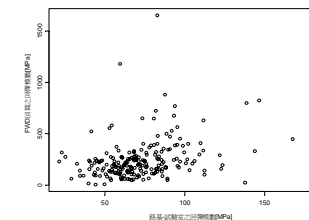
(b)底層

23

LTPP鋪面回算結果之分析與討論(3/10)



(c)基層



(d)路基

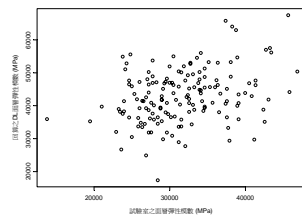
- 各層回算所得之動態彈性模數皆高於靜態試驗
- 各層的比值分別為：面層2.6倍、底層2.7倍、基層7.3倍、路基3.4倍（路基與1993年AASHTO之修正建議大致相符）。

24

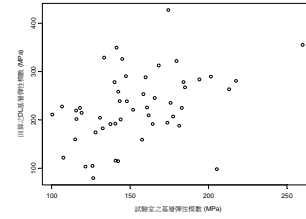
LTPP鋪面回算結果之分析與討論(4/10)

■ 剛性鋪面回算結果分析

- 撓度資料則是用ERESBACK2.2回算程式來處理
- **緊密液體**



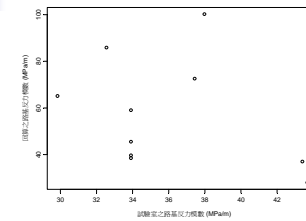
(a)面層



(b)基層

25

LTPP鋪面回算結果之分析與討論(5/10)



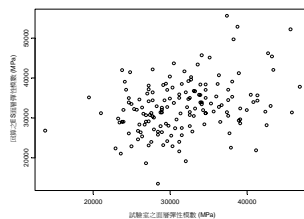
(c)路基

- 各層回算所得之動態彈性模數皆高於靜態試驗
- 各層的比值分別為：面層1.4倍、基層1.5倍、路基反力模數1.5倍（路基反力模數與1993年AASHTO之修正建議大致相符）

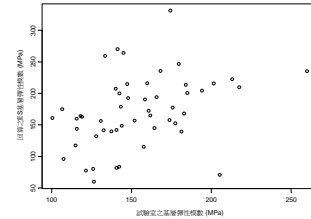
26

LTPP鋪面回算結果之分析與討論(6/10)

➢ 彈性固體



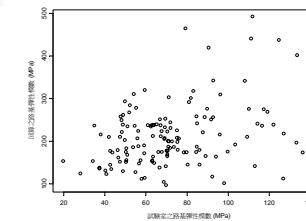
(a)面層



(b)基層

27

LTPP鋪面回算結果之分析與討論(7/10)



(c)路基

- 與緊密液體相同各層之動態彈性模數皆高於靜態試驗
- 各層的比值分別為：面層1.0倍、基層1.1倍、路基3.0倍

28

LTPP鋪面回算結果之分析與討論(8/10)

■ 路基回彈模數與路基反力模數之關係

- 根據LTPP資料分析結果(GPS和SPS)，路基反力模數與路基回彈模數關係如下：

$$k = 0.296E_s$$

Statistics : $R^2 = 0.872$, SEE = 9.37, N = 596

- Barenberg【2000】曾經利用彈性固體與緊密液體基礎的版理論公式，來分析當兩者的最大撓度相等時，路基回彈模數與路基反力模數之關係，如下列公式。

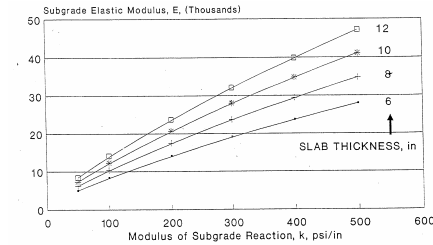
$$w_e = \frac{P\ell_e^2}{3\sqrt{3}D} = w_k = \frac{P\ell_k^2}{8D} \rightarrow 0.6495 * \ell_k^2 = \ell_e^2$$

29

LTPP鋪面回算結果之分析與討論(9/10)

- 假設 μ_s 為0.5， μ_c 為0.15， E_s 為4 Mpsi，再經必要之簡化程序，Barenberg推導出如下之關係，下圖顯示在不同版厚下之路基回彈模數與路基反力模數之關係。

$$E_s^{4/3} = 283.7 * h * k$$

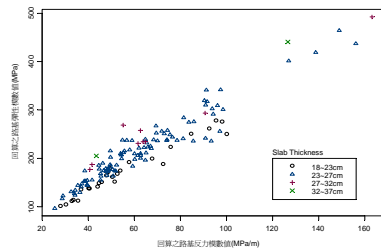


30

LTPP鋪面回算結果之分析與討論(10/10)

- 本研究利用LTPP資料庫，將回算之路基回彈模數與路基反力模數作比較，如下圖，並據此利用迴歸的方式建立如下之關係式： $E_s = 0.9015(k * h)^{3/4}$

Statistics : $R^2 = 0.9524$, SEE = 15.87, n = 138



31

結論與建議(1/2)

- 對於現有柔性與剛性鋪面結構的評估，均建議暫時採用二層鋪面系統回算之方式。如此，不僅簡單易用，其回算之結果亦較為可靠。
- AASHTO建議：柔性鋪面回算之路基的動態回彈模數約需折減1/3倍左右，剛性鋪面回算之路基的動態反力模數則需折減1/2倍左右，來估算靜態試驗值。

32

結論與建議(2/2)

- 柔性鋪面回算所得之動態面層、底層、與基層之彈性模數均高於靜態試驗之結果，且其變異性極大，亦顯示現有回算程式之限制與適用性問題。剛性鋪面變異性雖然較柔性鋪面回算之結果小，但亦有相當程度之變異性。
- 確立路基回彈模數與路基反力模數之關係的確會受版厚之影響，並建立一迴歸式以供後續分析研究之用。

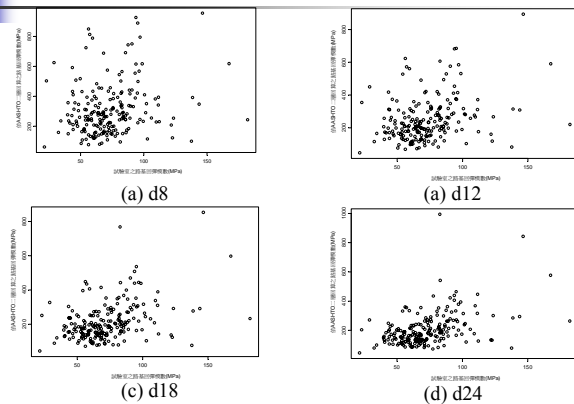
33

報告完畢

敬請指教

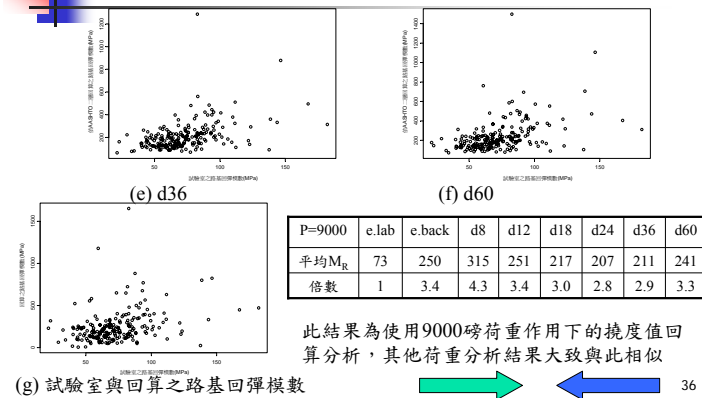
34

LTPP現地資料分析(1/2)



35

LTPP現地資料分析(2/2)



36