

鋪面落重撓度儀檢測 反算及應用研習會

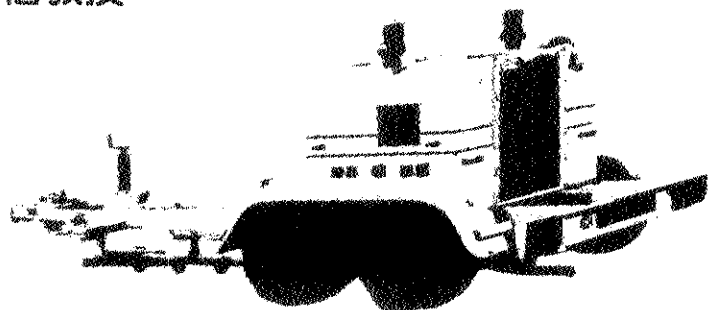
FWD研習會論文集

主辦單位：

中國土木水利學會鋪面工程委員會
國立台灣大學土木工程學系暨研究所

中華民國九十六年二月九日

主編：周家蓓教授



鋪面落重撓度儀檢測、反算及應用研習會

日期：2007年2月9日

地點：國立台灣大學土木工程學系系館

主辦單位：中國土木水利工程學會鋪面工程委員會
國立台灣大學土木工程學系研究所

協辦單位：財團法人中華鋪面工程學會
中國土木水利工程學會非破壞檢測委員會
中華民國道路協會
內政部營建署
交通部民用航空局
交通部台灣區國道高速公路局
交通部公路總局

合辦單位：林同棧工程顧問公司
財團法人中華工程顧問司
財團法人中興工程顧問社
亞新工程顧問公司
美商(木百)誠國際股份有限公司台灣分公司
儀衡工程科技股份有限公司
陸航科技工程顧問公司

工作小組：召集人：周家蓓

小組成員：李美慧、蔡鎮宇、高銓鴻
鄭羽哲、鄧智陽、歐陽睿

版權聲明

本研習會論文集之各論文內容著作權均為各主講人所有，如欲轉用任意部份或全部論文內容，須與各主講人聯絡並取得其同意後方可使用。

鋪面回算之方法與應用

林佳慧

淡江大學土木工程學系碩士

李英豪

淡江大學土木工程學系教授

【摘要】

本文主要目的在介紹柔性與剛性鋪面之回算原理，並指出各種回算程式之限制與應用時可能面臨的問題。文中並介紹 AASHTO 鋪面加鋪厚度設計法中對現有鋪面結構評估，建議暫時採用二層鋪面系統回算之方式，以及動態與靜態彈性模數之修正建議。最後，並擷取 LTPP 資料庫中柔性與剛性鋪面之動態彈性模數回算結果，除了將其與靜態試驗資料比對外，並探討現有鋪面回算方法之適用性與後續研究改進的方向。

關鍵字：柔性鋪面、剛性鋪面、回算、彈性模數、路基反力模數、LTPP。

一、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。一般鋪面結構的強度大多是以各層材料的彈性模數來表示，過去直接在鋪面上鑽心取樣，以求得現有鋪面結構的強度的方式不僅費時費事，亦會對鋪面結構造成破壞。因此，利用各種非破壞撓度試驗來從事現有鋪面之結構評估，已成為國際上鋪面評估的標準作業程序，而其成效則有賴於鋪面回算方法之有效與正確之應用。

二、二層柔性鋪面系統回算之簡介

根據 Boussinesq 以一個集中荷重作用在均質、等向的單層系統的理論解公式，Ahlvén 和 Ulery 【1962】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：

$$\Delta_z = \frac{Pa}{E_1} f\left(\frac{r}{a}, \frac{z}{a}, \mu\right) \quad (1)$$

其中， Δ_z 為在任一深度(z)的撓度值、 P 為均佈荷重重量、 a 為均佈荷重半徑、 E_1 為均質土壤之彈性模數。若是以一個單層的系統來看鋪面的回算問題時，則求解之問題極為簡單，僅只是在已知之各項條件下，反求公式(1)之 E_1 值。

藉由荷重函數之貝索函數(Bessel Function)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【Burmister, 1943】。Burmister再據此推導出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：

$$w_c = \frac{1.5pa}{E_2} F_w \left(\frac{a}{h}, \frac{E_2}{E_1} \right) = \frac{1.5pa}{E_2} F_w \quad (2)$$

其中， w_c = 荷重中心點下方的垂直撓度，[L]； p = 作用於鋪面表面的垂直均佈壓力，[FL⁻²]； a = 荷重半徑，[L]； h = 上層的厚度，[L]； E_1 = 上層的彈性模數，[FL⁻²]； E_2 = 下層的彈性模數，[FL⁻²]； F_w 為 a/h 和 E_2/E_1 的函數。

對於二層鋪面系統之回算問題時，Scrivner於1973年針對動力撓度儀作用在鋪面一路基的二層彈性系統上做進一步的研究，發展出一個封閉型的圖解回算法【Scrivner, 1973】。為了能由動力撓度儀所測得的表面撓度資料轉換成鋪面及路基的彈性模數，Scrivner乃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，上層之彈性模數為 E_1 、厚度為 h ，下層之彈性模數為 E_2 、厚度則為無限，並假設兩層的柏松比皆為0.5，其撓度方程式如下所示：

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

$$x = \frac{mr}{h}, \quad V = \frac{1 + 4Nme^{-2m} - N^2 e^{-4m}}{1 - 2N(1 + 2m^2)e^{-2m} + N^2 e^{-4m}}, \quad N = \frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2}$$

式中， w 為鋪面表面的垂直撓度，[L]； r 為徑向距離，[L]； z 為垂直方向深度，[L]； P 為作用於鋪面表面的垂直力，[F]； E_1 為上層的彈性模數，[FL⁻²]； E_2 為下層的彈性模數，[FL⁻²]； h 為面層厚度，[L]； $J_0(x)$ 為第一類的零階貝索函數； m 為參數； $V = m$ 和 N 的函數。

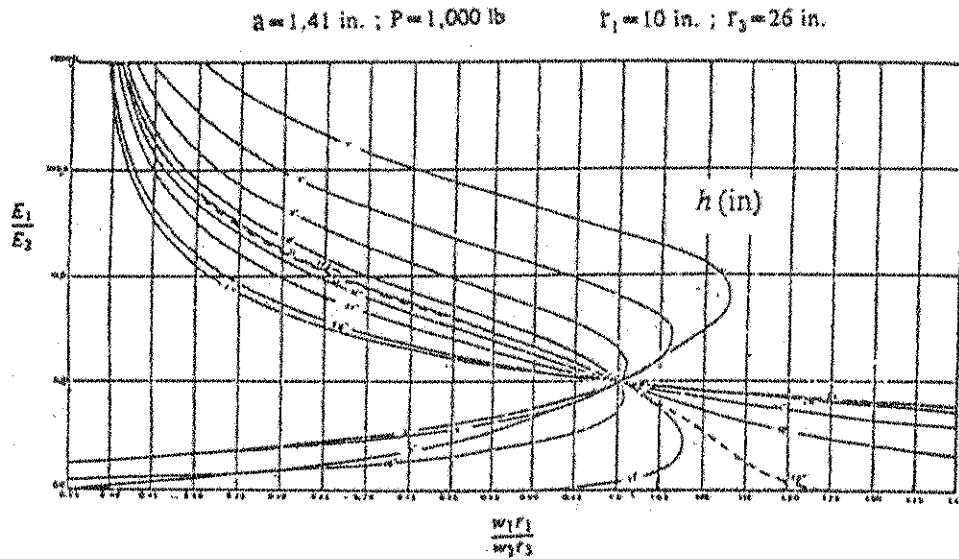
若假設距動力撓度儀荷重中心 r_1 、 r_3 處之鋪面表面撓度各為 w_1 、 w_3 ，將之代入上述的表面撓度方程式，並將所得的兩方程式相除可得公式(4)：

$$\frac{w_1 r_1}{w_3 r_3} = \frac{F_1 \left(\frac{E_2}{E_1}, \frac{r_1}{h} \right)}{F_3 \left(\frac{E_2}{E_1}, \frac{r_3}{h} \right)} = G \left(\frac{E_2}{E_1}, \frac{r_1}{h}, \frac{r_3}{h} \right) \quad (4)$$

其中， F_1 、 F_3 、 G 為 E_2/E_1 、 r_1/h 和 r_3/h 的函數。由回算程式的基本假設可知，當鋪面受到動力載重作用時，經由鋪面理論計算之撓度值與實際量測的撓度值相同時，存在唯一的一組彈性模數組合。若選定一非破壞撓度量測儀器(如動力撓度儀)，且 r_1 、 r_3 和面層厚度 h 為已知，由式中可知 $w_1 r_1 / w_3 r_3$ 僅是彈性模數比 E_2/E_1 的函數，可利用試誤法的收斂過程得到一個滿足前述方程式的解。再將所得 E_2/E_1 的值代入公式(3)中，可求解得 E_1 和 E_2 值。

由此亦可發現，對於一組實測撓度值會有無限多的彈性模數組合所計算的理論撓度值與實測撓度值的誤差在設定的誤差範圍內。以Scrivner的研究為例，

Scrivner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。如圖一之 $w_1 r_1 / w_3 r_3$ 對彈性模數比 E_1/E_2 的厚度曲線圖，Scrivner並以 $w_1 r_1 / w_3 r_3 = 1$ 及 $h = 11.2$ in. 為分區，將該圖分成四個部份討論。圖中可知，厚度大於11.2 in. 的兩個部份有唯一解；而厚度小於11.2 in. 的部份則是有兩組解或無解【Scrivner, 1973】。由此可知，從量測之撓度值回算出彈性模數值的解可能不唯一，但此項最基本的理論限制，卻往往被傳統的回算程式所忽略。



圖一 Scrivner 針對動力撓度儀所建立之鋪面厚度曲線圖【Scrivner, 1973】

三、二層剛性鋪面系統之回算簡介

Losberg 於 1960 年提出混凝土版受到載重時，版的撓度方程式，並依此推導出當假設混凝土版下基底層為彈性固體或緊密液體的理論公式。其中又分成集中載重及均佈載重兩種情況，最後並提出無因次撓度公式與圖解，如公式(5)至公式(8)與圖二所示【Losberg, 1960】。

$$w^* = \frac{wC\ell_c}{2P} = \frac{wD}{Pl_c^2} = \frac{wE_s\ell_c}{2P(1-\mu_s^2)} = f\left(\frac{a}{\ell_c}, \frac{r}{\ell_c}\right) \quad (5)$$

$$w^* = \frac{wk\ell_k}{2P} = \frac{wD}{Pl_k^2} = f\left(\frac{a}{\ell_k}, \frac{r}{\ell_k}\right) \quad (6)$$

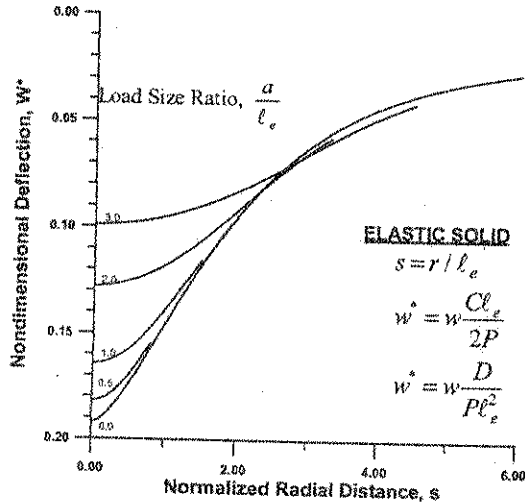
$$\ell_c = \sqrt[3]{\frac{E_c h^3 (1-\mu_s^2)}{6(1-\mu_c)E_s}}, \quad \ell_k = \sqrt[4]{\frac{E_c h^3}{12(1-\mu_c^2)k}} \quad (7)$$

$$C = \frac{E_s}{(1-\mu_s^2)}, \quad D = \frac{E_c h^3}{12(1-\mu_c^2)} \quad (8)$$

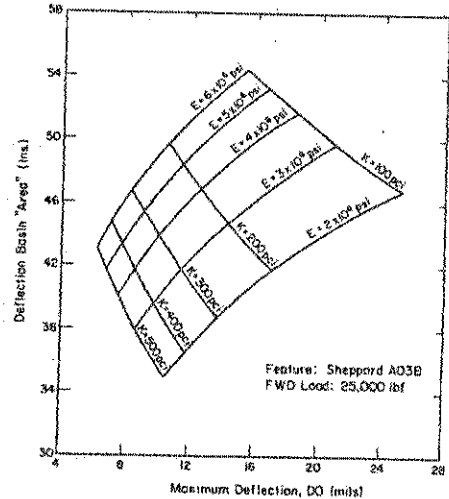
Hoffman 和 Thompson 在 1981 年發展出撓度盤區域面積 AREA 值，其主要理念在求得版受荷重作用下的撓度面積，以回算出二層混凝土鋪面系統之彈性模

數，如公式(9)【Hoffman & Thompson, 1981】，其中，AREA 之單位為 in。其後，Foxworthy 依據不同之混凝土彈性模數、路基反力模數與版厚度，利用有限元素法程式，建立一系列之最大撓度值與 AREA 之關係圖，如圖三【Foxworthy, 1985; NHI, 1998】，並利用內插圖解法反算出該系統之混凝土彈性模數與路基反力模數。內插圖解法因過程繁複、精確度不足，且不便於執行大量的回算運算為其缺點。

$$AREA = 6 * \left[1 + 2 \left(\frac{w_{12}}{w_0} \right) + 2 \left(\frac{w_{24}}{w_0} \right) + \left(\frac{w_{36}}{w_0} \right) \right] \quad (9)$$



圖二 版的無因次撓度解



圖三 最大撓度值與AREA之關係圖

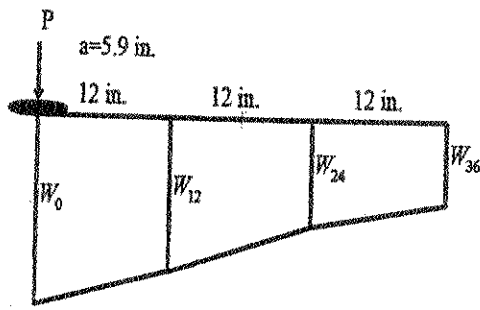
ILLI-BACK 是伊利諾大學以版理論為基礎所發展出的閉合解的回算程式，可應用於緊密液體或彈性固體基礎上【Huang, 2004】。此法是在固定的載重半徑(a=5.9 in.) 作用下，分別量測距離載重中心點0, 12, 24, 36 in. 的撓度值 w_i (如圖四)，然後代入公式(9)計算出撓度盤區域面積 AREA 值，再利用 AREA 值與相對勁度半徑的相關圖(如圖五)，查圖得 l 值，再查圖六得到四個標準化撓度值 d_i 值，代入公式(10)與公式(11)，求出一個平均的 E_s 和 k 值，最後使用公式(7)，反算出混凝土的彈性模數與路基反力模數。

$$E_s = \frac{2(1-\mu_s^2)Pd_i}{l_e w_i} \quad (10)$$

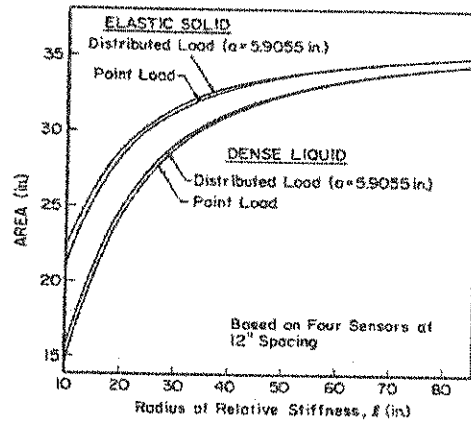
$$k = \frac{Pd_i}{l_k^2 w_i} \quad (11)$$

其中： w^* 為無因次撓度值， w 為撓度值[L]， C 為路基土壤常數[FL⁻²]， l_e 為彈性固體基礎的相對勁度半徑[L]， P 為載重量[F]， D 為版的撓曲勁度[FL]， E_s 為路基土壤彈性模數[FL⁻²]， μ_s 為土壤柏松比， k 為路基土壤反力模數[FL⁻³]， l_k 為緊密液體基礎的相對勁度半徑[L]， E_c 為鋪面版彈性模數[FL⁻²]， h 為鋪面版厚度[L]， μ_c 為鋪面版柏松比， w_0 為載重中心點下方最大撓度[L]， w_{12} ， w_{24} ， w_{36} 為距離載重中心 12, 24, 36 英吋處之撓度值[L]， d_i 為相對勁度半徑所對應之標準化撓度值

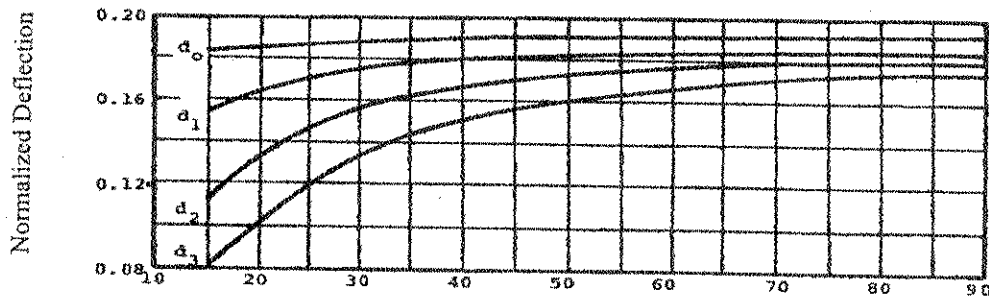
[L]。其中 L 為長度單位，F 為力的單位。



圖四 鋪面版受壓後變位示意圖



圖五 相對勁度半徑與AREA的關係



Relationship between normalized deflections and l (in.) for solid foundation

圖六 標準化撓度值與相對勁度半徑關係圖【Huang, 2004】

四、多層鋪面系統之回算及限制

對於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。回算程式的基本原理主要是利用鋪面理論（如多層彈性理論與版理論），由量測的面層撓度值來回算鋪面各層材料的彈性模數。一般鋪面回算的方式大致可分為迭代法、資料庫處理法、及封閉型公式法三種【Hall, 1991】。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，各以多層彈性理論的 BISAR、ELSYM5 和 CHEVRON 程式所發展而來。資料庫處理法則是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 等程式利用 CHEVRON、WESLEA 多層彈性程式來建立資料庫並進行回算。封閉型公式法是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。由於各個回算程式的分析處理方式及基本假

設皆不相同，因此必須適當的選用才能使回算更加準確。

以柔性鋪面而言，雖然可以使用的回算程式很多，但是回算結果之變異性亦大。因為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。若彈性模數值範圍設定過大，則回算結果較不理想，而且反覆運算次數可能會增加並使計算時間加長。但如果彈性模數值範圍設定過小，以致於真正的解不在其中，則可能得到設定範圍的邊界值而非所求之正確值。此外，再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。有鑑於此，陳建桓【1994】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。同樣地，其研究結果亦一指出從量測之撓度值回算出彈性模數值的解可能不唯一。因此，選擇適合的分析模式並減少對輸入值的猜測，將有助於得到較合理的回算結果。

對於剛性鋪面而言，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。再者，利用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。因此，白建華【1997】與李朝聰【1997】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【1999】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。儘管如此，利用非破壞性撓度試驗之現地資料來驗證鋪面回算之成果，仍是一個極具挑戰性的工作。

五、AASHTO 對現有鋪面結構評估之回算方式

有鑑於此，在現行的美國州公路暨運輸官員協會【AASHTO, 1993】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。茲將此回算方式與其對回算結果之修正建議，簡要說明如下：

5.1 柔性鋪面回算

在1993年AASHTO鋪面加鋪厚度設計法中，不管現有柔性鋪面之層數，其結構評估均採用二層系統的方式來回算，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，因此設計法中建議可以下列公式來概估路基回彈模數：

$$M_r = \left(\frac{0.24P}{d, r} \right) \quad (12)$$

$r \geq 0.7a_e$

其中： M_R 為回算之路基土壤回彈模數(psi)； P 為施加荷重(規範建議9,000 lbs)； d_r 為離荷重中心距離 r 所量得之撓度值(in)； r 為離荷重中心距離(in)； a_c 為路床與鋪面之間應力分佈半徑(in)，可以下列公式來決定：

$$a_c = \sqrt{a^2 + \left(D \times \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2} \quad (13)$$

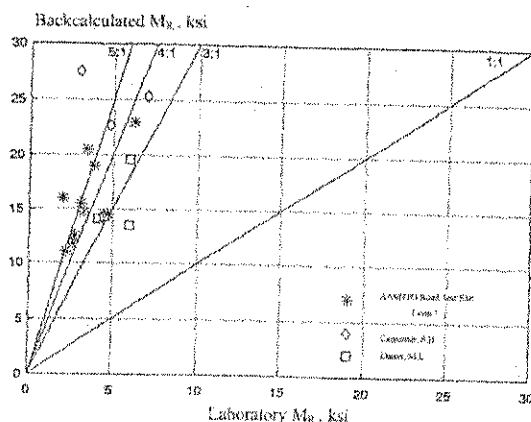
其中： a 為荷重盤半徑(in)； D 為鋪面各層總厚度(in)； E_p 為路床以上鋪面有效回彈模數值(psi)。依據多層彈性理論，在荷重盤中心所量得之最大撓度 d_0 (修正至68°F標準溫度)為：

$$d_0 = 1.5Pa \left[\frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left[(D/a) * (\sqrt[3]{E_p/M_R}) \right]^2}} + \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (D/a)^2}}}{E_p} \right] \quad (14)$$

此回算方式係假設已知有一荷重半徑 $a=5.9$ in.，首先利用公式(12)來估算 M_R ，再根據公式(14)或以圖解方式，由已知鋪面各層總厚度(D)以及 $M_R d_0/P$ ，來求得 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。

此外，在該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(如圖七所示)。為解決利用靜態的多層彈性理論公式來分析動態的NDT撓度試驗資料間之差異，AASHTO【1993】建議應乘上一折減係數值 $C=0.33$ ，如下列公式所示，以作為設計之路基回彈模數。由於無實際之其他試驗資料可供比較，因此，手冊中並未討論是否應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。

$$M_R = C \left(\frac{0.24P}{d_r r} \right) \quad (15)$$



圖七 回算與試驗室路基回彈模數的比較【AASHTO, 1993】

5.2 剛性鋪面回算

在1993年AASHTO設計法中，對於現有剛性鋪面結構評估係利用版理論的封閉型公式(緊密液體或彈性固體基礎)來達成回算之目的。該回算方法主要是根據Hall【1991】利用FORTRAN之IMSL副程式庫，對於該封閉型解(含多種特殊之貝索函數Bessel Functions)直接積分，並利用SAS統計軟體推導出AREA與相對勁度半徑之迴歸關係式，如下所示：

$$\ell_k = \left[\frac{\ln\left(\frac{36 - AREA}{1812.279133}\right)}{-2.559340} \right]^{4.387009}, \quad \ell_e = \left[\frac{\ln\left(\frac{36 - AREA}{4521.676303}\right)}{-3.645555} \right]^{5.334281} \quad (16)$$

其回算之方式，首先由已知距離載重中心0, 12, 24, 36英吋處之撓度值，來計算AREA值，再由上列公式推算出其相對勁度半徑值(ℓ_k 或 ℓ_e)。接著，再利用Westergaard內部撓度公式之重新排序(如公式(17)所示)，即可由已知最大撓度值求解路基土壤之反力模數值(k)。或者，利用Losberg內部撓度公式之重新排序(如公式(18)所示)，即可由已知最大撓度值求解路基土壤之彈性模數值(E_s)。混凝土版之彈性模數值(E_c)，也可由版與路基土壤之相對勁度半徑公式(7)直接求解而得。

$$k = \left(\frac{P}{8d_0\ell_k^2} \right) \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2\pi} \right) \left[\ln\left(\frac{a}{2\ell_k}\right) + \gamma - 1.25 \right] \left(\frac{a}{\ell_k} \right)^2 \right\} \quad (17)$$

$$E_s = \left[\frac{2P(1-\mu_s^2)}{d_0\ell_e} \right] \left[0.19245 - 0.0272 \left(\frac{a}{\ell_e} \right)^2 + 0.0199 \left(\frac{a}{\ell_e} \right)^2 \ln\left(\frac{a}{\ell_e}\right) \right] \quad (18)$$

其中： k 為路基土壤反力模數值， P 為為施加荷重(規範建議9000 lbs)， d_0 為， ℓ_k 為緊密液體基礎的相對勁度半徑(in)， a 為荷重盤半徑(in)， E_s 為路基土壤彈性模數(psi)， μ_s 為土壤柏松比， ℓ_e 為彈性固體基礎的相對勁度半徑(in)， d_0 為荷重盤中心所量得之最大撓度。此外，該設計手冊中亦指出將回算出之動態路基反力模數乘以1/2以估算有效的靜態路基反力模數值【AASHTO, 1993】。至於是否應對回算出之混凝土版之彈性模數值(E_c)做必要之修正，該手冊則並未討論。

再者，為擴充上述回算法之適用性，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/lce/ftp/teg/desdet6.xls>)。該回算流程中，除了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。茲將其對一般混凝土鋪面與複合鋪面回算之主要公式列舉如下：

$$AREA_7 = 4 + 6 \left(\frac{d_8}{d_0} \right) + 5 \left(\frac{d_{12}}{d_0} \right) + 6 \left(\frac{d_{18}}{d_0} \right) + 9 \left(\frac{d_{24}}{d_0} \right) + 18 \left(\frac{d_{36}}{d_0} \right) + 12 \left(\frac{d_{60}}{d_0} \right) \quad (19)$$

$$AREA_5 = 3 + 6 \left(\frac{d_{18}}{d_0} \right) + 9 \left(\frac{d_{24}}{d_0} \right) + 18 \left(\frac{d_{36}}{d_0} \right) + 12 \left(\frac{d_{60}}{d_0} \right) \quad (20)$$

$$l_k = \frac{\left[\ln \left(\frac{60 - AREA_7}{289.708} \right) \right]^{2.566}}{-0.698} \quad (21)$$

$$l_k = \frac{\left[\ln \left(\frac{48 - AREA_5}{158.40} \right) \right]^{2.220}}{-0.476} \quad (22)$$

其中： d_0 為載重中心點下方最大撓度， $d_8, d_{12}, d_{18}, d_{24}, d_{36}, d_{60}$ 為距離荷重中心 8, 12, 18, 24, 36, 60 英吋處之撓度值[L]；公式(19)與公式(21)是用來對一般混凝土鋪面之回算；公式(20)與公式(22)則是用來對複合鋪面之回算。其他詳細之內容與相關之回算過程請參閱手冊【AASHTO, 1998】。

六、LTPP 鋪面回算結果之分析與討論

本研究將利用國際間公認之美國長程鋪面績效資料庫(LTPP)，並擷取資料庫中柔性與剛性鋪面之動態彈性模數回算結果，除了將其與靜態試驗資料比對外，並探討現行鋪面回算方法之正確性與適用性。

6.1 LTPP 資料庫之資料擷取

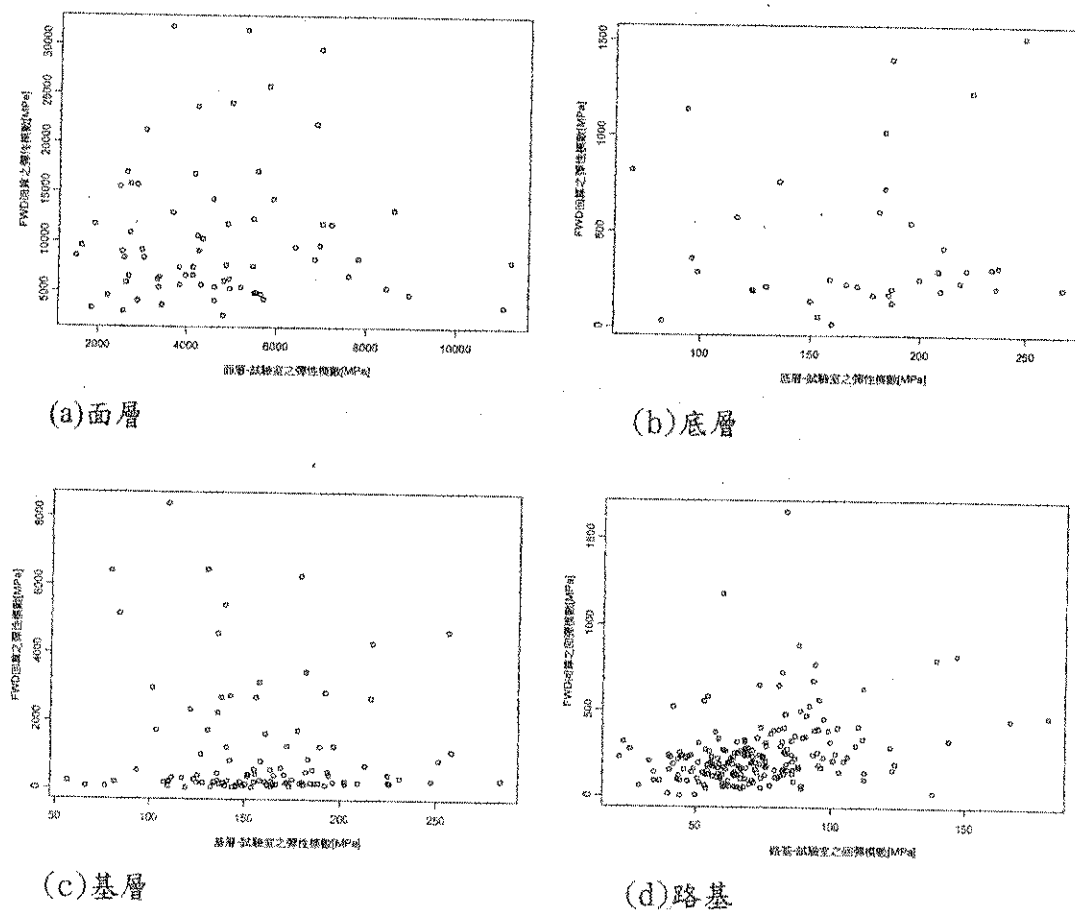
美國長程鋪面績效研究計畫(Long Term Pavement Performance, LTPP)，主要在蒐集北美洲現場鋪面二十年績效資料，以供全世界各國鋪面研究之用。主要目標在利用各種材料與在不同荷重、氣候環境、路基土壤、與養護技術下，研究各種新建與維修後鋪面結構設計之長期績效，以延長公路鋪面使用年限，因此建立了世上有史以來最大的鋪面績效資料庫。該資料庫包括 400 個表單與超過 6,000 個變數等鋪面基本資料、特殊建造、材料試驗、氣候與季節、交通、養護與維修、與監測資料(自動儀器、人工破壞調查、抗滑、縱橫向剖面、與非破壞性撓度試驗 FWD)。該資料庫的主要架構分為模組(IMS Modules)、表單(Tables)、與資料單元(Data Elements)等三個層級，讓使用者更加清楚地擷取所需之資料。其中，IMS 模組包括全體資料描述(General Information)、基本資料(Inventory)、材料試驗(Material Testing)、養護(Maintenance)、維修(Rehabilitation)、交通(Traffic)、監測(Monitoring)、環境(Environmental)、季節(Seasonal)等九大模組。

本研究在此首先擷取柔性鋪面(GPS-1 與 GPS-2)與剛性鋪面(GPS-3 與 GPS-4)試驗路段的試驗室與回算彈性模數之資料。在資料庫中，試驗室之彈性模數位於試驗模組中，可得到面層、底層、基層和路基的彈性模數。以柔性鋪面來說，在面層部分，資料庫提供了各路段鋪面溫度為 5、25 及 40°C 的資料，本研究選擇基準溫度設定為 25°C (77°F) 時所獲得之彈性模數。在底層、基層及路基資料中，以鋪面層數的編號來區分底層、基層、及路基之回彈模數，編號 1 的為路基，以此類推即可取得各層之彈性模數，剛性鋪面亦是如此。

回算的各層彈性模數均位於監測模組中，對於柔性鋪面來說，是以鋪面回算層數編號來取得不同層之彈性模數。值得注意的是，此層數編號的順序和試驗室之鋪面層數編號是相反的，也就是回算層數編號為1的是指面層，以此類推。對於剛性鋪面而言，在表單中又分為兩種基礎的彈性模數，以緊密液體為基礎的有面層、底層彈性模數和路基反力模數，以彈性固體為基礎的有面層、底層和路基彈性模數，且各層的彈性模數都有平均值、最大值、最小值以及標準誤差值，本研究是採用平均值。最後利用 Access 程式進行資料之初步篩選與處理，將試驗室與回算之彈性模數彙整成一個資料庫，如此即可進行分析比較。

6.2 柔性鋪面回算結果分析

LTPP 資料庫中的柔性鋪面回算之彈性模數，為使用 MODCOMP4 程式所回算出來。其被選用之主要原因為該回算程式可適用於柔性與剛性鋪面，並可在最接近材料特性下，同時在線性及非線性的情形中回算大量的撓度資料。線性回算的部分，可由 BACKSUM2 程式取得 MODCOMP4 的資料後，計算出最後的結果。該程式在非線性回算部分，則使用 MODCOMP4 配合 BAKSUMNL 與 BAKOUTNL 程式以得到非線性解【吳佩樺，2006】。

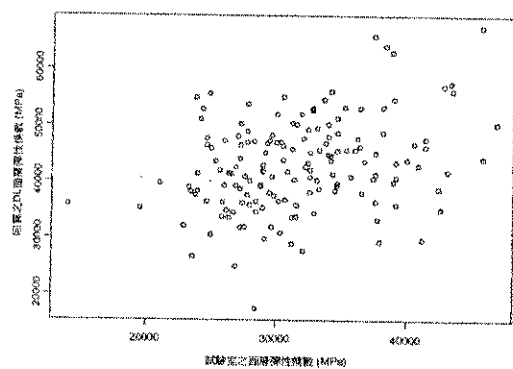


圖八 柔性鋪面各層彈性模數回算值與試驗室結果之比較

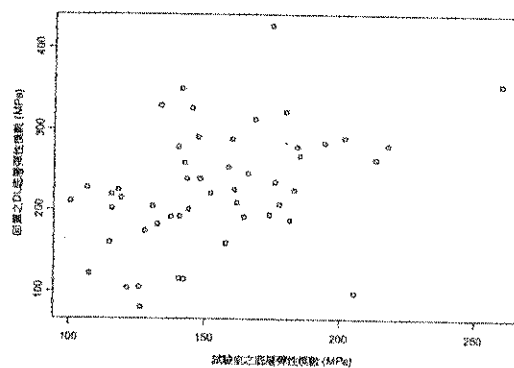
依 LTPP 資料庫所得之彈性模數，將試驗室與回算的各層彈性模數繪圖比較，圖八(a)至圖八(d)為柔性鋪面試驗室與回算的結果，其結果顯示各層回算所得之彈性模數皆高於試驗室。某些路段的回算值甚至遠高於試驗室之彈性模數，研究中把這幾個極端值剔除，並針對其他試驗路段的彈性模數研究兩者之間大約的比值，各層的比值分別為：面層 2.6 倍、底層 2.7 倍、基層 7.3 倍、路基 3.4 倍。因此，回算所得之動態路基回彈模數需折減 3 倍左右，才會與試驗室的靜態回彈模數相近【吳佩樺，2006】，此與 1993 年 AASHTO 之修正建議大致相符。但是亦應注意回算所得之動態面層、底層、與基層之彈性模數均高於靜態試驗之結果，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。

6.2 剛性鋪面回算結果分析

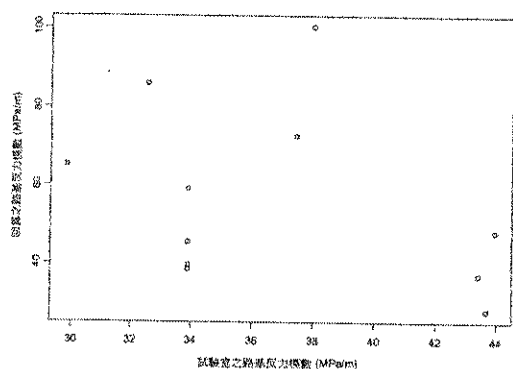
LTPP 裡的鋪面回算資料，就是利用 FWD 非破壞試驗，回算出面層、底層、路基的彈性模數以及路基的反力模數。剛性鋪面的回算方法是以版在緊密液體或彈性固體為基礎之版理論為依據。依據版在彈性固體上，對於線彈性、均質且等向材料的無限版之內部載重，且假設此載重為均佈載重，作用在一圓形面積上，不考慮溫度和水分翹曲。撓度資料則是用 ERESBACK2.2 回算程式來處理。



(a)面層

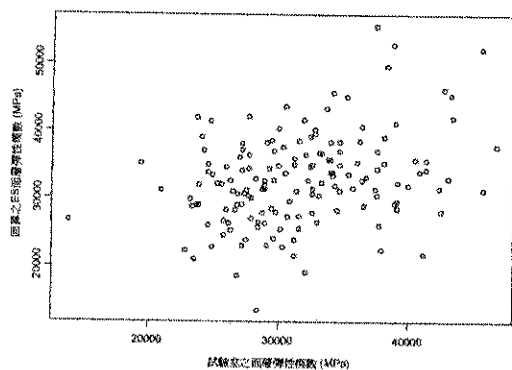


(b)基層

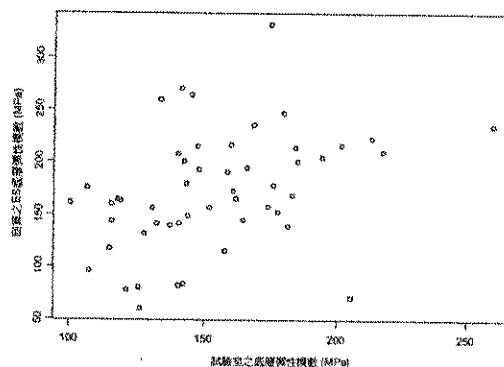


(c)路基

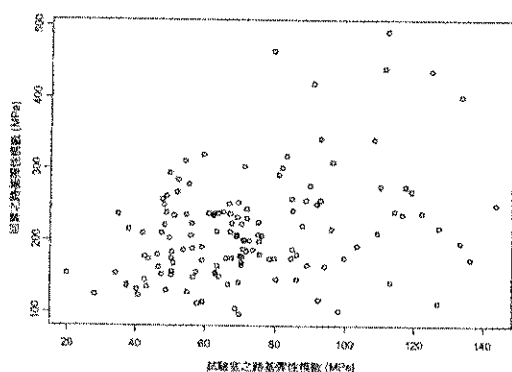
圖九 剛性鋪面(緊密液體基礎)之回算值與試驗室結果之比較



(a)面層



(b)基層



(c)路基

圖十 剛性鋪面(彈性固體基礎)之回算值與試驗室結果之比較

圖九(a)~圖九(c)與圖十(a)~圖十(c)各為剛性鋪面在緊密液體基礎及彈性固體基礎上之動態回算值與試驗室結果之比較，其結果顯示各層回算所得之動態彈性模數一般皆高於靜態試驗之結果，其中又以彈性固體基礎較接近試驗室之彈性模數。根據圖九之結果顯示，回算出之面層動態彈性模數約為試驗室之1.4倍、基層彈性模數約為試驗室之1.5倍、動態路基反力模數約為試驗室結果之1.5倍。再者，根據圖十之結果顯示，回算之面層動態彈性模數約為試驗室之1.0倍、基層彈性模數約為試驗室之1.1倍、路基回彈模數約為試驗室之3.0倍【林佳慧，2006】。此外，本研究亦發現根據緊密液體基礎的所回算出之面層彈性模數約為以彈性固體基礎的所回算結果的1.307倍，此與LTPP回算報告【FHWA, 2001】的結果(1.312倍)非常接近。

因此，回算所得之動態路基反力模數需折減1.5倍左右，才會與試驗室的靜態路基反力模數相近，此與1993年AASHTO將剛性路面回算的路基反力模數折減一半之建議大致相符。但是亦應注意回算所得之動態面層、基層、與路基之彈性模數，其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，因此亦顯示現有剛性鋪面回算程式之限制與適用情形。

6.3 路基回彈模數與路基反力模數之關係

在鋪面相關實務研究中，常常希望能建立路基回彈模數與路基反力模數之關係。根據 LTPP 一般鋪面研究(GPS)與特殊鋪面研究(SPS)之資料分析結果，路基反力模數與路基回彈模數關係如下【FHWA, 2001】：

$$k = 0.296E_s \quad (23)$$

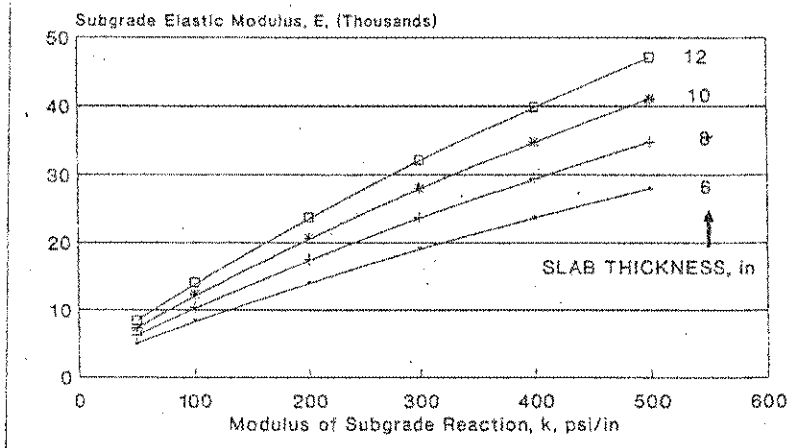
Statistics : $R^2 = 0.872$, $SEE = 9.37$, $N = 596$

其中： k 為路基土壤反力模數值，MPa/m； E_s 為路基土壤彈性模數，MPa； R^2 為判定係數；SEE 為估計之標準差； N 為資料數。本研究在初步分析時雖僅採用 GPS 的資料，雖然資料筆數較少，但所得之迴歸係數約為 0.293，與前述報告的結果(0.296)非常接近。

然而，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。當假設土壤的柏松比為 0.5，混凝土版的柏松比為 0.15，混凝土版的彈性模數為 4 Mpsi，再經必要之簡化程序，Barenberg 推導出如下之關係：

$$E_s^{4/3} = 283.7 * h * k \quad (24)$$

其中： E_s 為路基土壤彈性模數，psi； k 為路基土壤反力模數值，pci； h 為版厚，in。圖十一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。



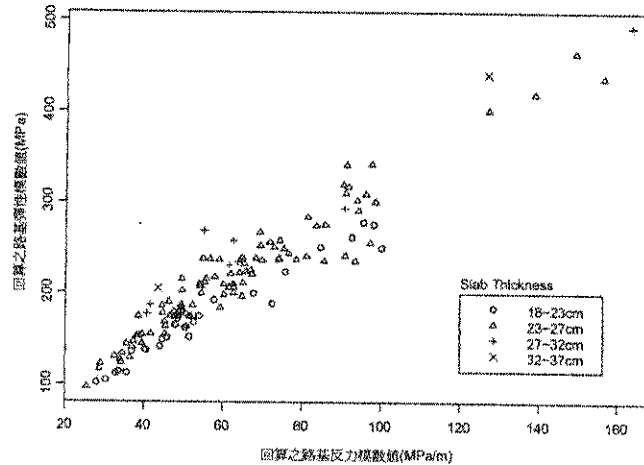
圖十一 不同版厚之路基回彈模數與路基反力模數之關係【Barenberg, 2000】

因此，本研究更進一步地利用 LTPP 資料庫，將回算之路基回彈模數與路基反力模數作比較，如圖十二所示。圖中亦明確顯示出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。本研究並據此利用迴歸的方式建立如下之關係式：

$$E_s = 0.9015(k * h)^{3/4} \quad (25)$$

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

其中： E_s 為路基土壤彈性模數，MPa； k 為路基土壤反力模數值，MPa/m； h 為版厚，cm； R^2 為判定係數；SEE 為估計之標準差； N 為資料數。



圖十二 回算之路基回彈模數與路基反力模數之比較

七、結論與建議

本研究首先介紹柔性鋪面與剛性鋪面之回算方法與其限制。接著，再介紹現行的 AASHTO 鋪面厚度設計手冊中，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。如此，不僅簡單易用，其回算之結果亦較為可靠。在 1993 年 AASHTO 設計手冊中亦同時建議：柔性鋪面回算所得之路基的動態回彈模數約需折減為 1/3 左右，剛性鋪面回算所得之路基的動態反力模數則需折減為 1/2 倍左右，來估算靜態試驗值，以作為後續分析設計之用。

最後，本研究並擷取 LTPP 資料庫中柔性與剛性鋪面之動態彈性模數回算結果，除了將其與靜態試驗資料比對外，並探討現行鋪面回算方法之適用性。文末並以現地回算之資料，驗證並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。

八、誌謝

本計畫承蒙行政院國家科學委員會專題研究計畫編號 NSC93-2211-E032-016 和 NSC94-2211-E032-014 之經費贊助，特此致謝。此外，本文有關柔性鋪面靜態與動態回算分析結果係擷取自吳佩樺之碩士論文，在此一併致上最深之謝意。

九、參考文獻

- 陳建桓，「由鋪面撓度值回算鋪面彈性模數的理論研究」，碩士論文，淡江大學土木工程學系，淡水，台北，1994。
- 李朝聰，「剛性鋪面回算程式之建立—彈性固體基礎模式」，碩士論文，淡江大學土木工程學系，淡水，台北，1997。
- 白建華，「剛性鋪面回算程式之建立—溫氏基礎基礎模式」，碩士論文，淡江大學土木工程學系，淡水，台北，1997。

- 許瑞升,「荷重傳遞效應與溫度翹曲對剛性鋪面回算影響之研究」,碩士論文,淡江大學土木工程學系,淡水,台北,1999。
- 吳佩樺,「柔性鋪面績效預測模式之建立」,碩士論文,淡江大學土木工程學系,淡水,台北,2006。
- 林佳慧,「應用LTPP資料庫於剛性鋪面績效預測模式之建立」,碩士論文,淡江大學土木工程學系,淡水,台北,2007。
- Ahlvin, R. G., and H. H. Ulery, "Tabulated Values for Determining the Complete Pattern of Stresses, Strains and Deflections Beneath a Uniform Circular Load on a Homogeneous Half Space," *Highway Research Board Bulletin 342*, 1962.
- AASHTO, *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, Published by the American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.
- AASHTO, *Supplement to the AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, Part II, - Rigid Pavement Design & Rigid Pavement Joint Design*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1998.
- ARA, Inc. ERES Consultants Division. "Guide for Mechanistic- Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures," NCHRP 1-37A Rep., Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2004.
- Barenberg, "Introduction to Concrete Pavement Design," 當代混凝土鋪面設計講習會論文集, 淡江大學土木工程學系, 中華民國八十九年五月三、四日, 2000。
- Burmister, D. M., "The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways", *Proceedings, Highway Research Board, Vol. 23*, pp. 126-144, 1943.
- FHWA, *Backcalculation of Layer Parameters for LTPP Test Sections- Slab on Elastic Solid and Slab on Dense-Liquid Foundation Analysis of Rigid Pavements*, Publication No. FHWA-RD-00-086, 2001.
- Hall, K. T., *Performance, Evaluation, and Rehabilitation of Asphalt-Overlaid Concrete Pavement*, Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, Illinois, 1991.
- Hoffman, M. S. and M. R. Thompson, *Mechanistic Interpretation of Nondestruction Pavement Testing Deflection, Civil Engineering Studies*. Transportation Engineering Series No. 32, Illinois Cooperative Highway and Transportation Research Series No. 190, University of Illinois at Urbana, IL, 1981.
- Huang, Y. H., *Pavement Analysis and Design*, Second Edition, Pearson Prentice Hall, NJ, 2004.
- NHI, *Techniques for Pavement Rehabilitation, A Training Course - Participant's Manual*, National Highway Institute (NHI), Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Final Edition, 1998.
- Losberg, A. *Structurally Reinforced Concrete Pavements*, Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1960.
- Scrivner, F. H., C. H. Michalak, and W. M. Moore, "Calculation of the Elastic Moduli of a Two-Layer Pavement System from Measured Surface Deflection", *Highway Research Record 431*, Highway Research Board, Washington, D.C. (1973).