

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 鋪面績效預測模式之構建與應用(1)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2211-E-032-016-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：淡江大學土木工程學系

計畫主持人：李英豪

共同主持人：葛湘璋

計畫參與人員：莊凱驛、吳佩樺、林佳慧、葉逸軒

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 12 月 5 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫  成果報告  期中進度報告

(計畫名稱)

鋪面績效預測模式之構建與應用(1/3)

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 93-2211-E-032-016-

執行期間：九十三年八月一日至九十四年七月三十一日

計畫主持人：李英豪

共同主持人：葛湘瑋

計畫參與人員：莊凱驛、吳佩樺、林佳慧、葉逸軒

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告  完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、  
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年  二年後可公開查詢

執行單位：淡江大學土木工程學系

中華民國九十四年七月三十一日

# 鋪面績效預測模式之構建與應用(1/3)

## Development and Applications of Pavement Performance Prediction Models

計畫編號：NSC 93-2211-E-032-016

執行期限：93年8月1日至94年7月31日

主持人：李英豪 淡江大學土木工程學系教授

共同主持人：葛湘璋 致理技術學院國際貿易系副教授

### 中文摘要

鋪面績效預測模式在鋪面設計、鋪面評估與維修、與鋪面管理系統扮演著極為重要的角色。鋪面績效資料屬於多層次資料的一種，分析此類的資料通常採用多層次線性模式/線性混合模式(HLMs/ LMEs)。因為資料的結構具有層級性，多層次模式的資料探索分析、統計模式的建立及模式評估比標準複迴歸複雜。因此，極需研擬如何利用上述方法以改善系統化的統計與工程分析方法來構建鋪面績效預測模式。計畫主持人擬以三年三期的方式，利用美國長期鋪面績效資料庫 LTPP DataPave Online (<http://www.datapave.com>)從事「鋪面績效預測模式的構建與應用」研究，第一期主要研究內容包括：

1. 鋪面標準損壞調查手冊之研擬。
2. 美國長期鋪面績效資料庫之本土化應用。
3. 研擬系統化的統計與工程分析方法：探討傳統迴歸方法(線性與非線性迴歸)、當代迴歸技術、與線性混合模式之適用性與應用。
4. 探討鋪面動態分段在地理資訊系統之應用。

此外，本研究將於計畫最後以實際案例分析，驗證研究成果的正確性與適用性，並建立回饋機制，以期此一鋪面管理系統能成為適合於國內使用的決策輔助工具。

**關鍵詞：**鋪面、績效、預測、維修、管理、地理資訊系統、多層次資料、多層次線性模式/線性混合模式

### Abstract

Improved performance predictive models are greatly needed for use in various pavement applications including design, evaluation, rehabilitation, and network management. Pavement performance data is a very common example of multilevel data. Hierarchical linear models/linear mixed-effects (HLMs/ LMEs) models are often utilized to analyze multilevel data. Because of the hierarchy of data structure, the exploratory analysis, statistical modeling, and examination of model-fit of multilevel data are more complicated than those of standard multiple regressions. Thus, it is very crucial to investigate its possible applications to the existing systematic statistical and engineering approach for the development of pavement performance prediction models. The entire project consists of three phases (I, II, and III) to be completed within three years to conduct "development and applications of pavement performance prediction models," using the well-known Long-Term Pavement Performance (LTPP) database (LTPP DataPave Online) (<http://www.datapave.com>). The major tasks include:

1. Prepare standard pavement distress identification manuals for domestic use.
2. Domestic applications of the LTPP database.
3. Revise the proposed the systematic statistical and engineering approach including conventional regression techniques (linear and nonlinear), modern regression techniques,

and linear mixed-effects models.

#### 4. Investigate the application of concept of dynamic segmentation in GIS.

The completion of this study will, hopefully, provide a sound basis for future development and integration of our domestic network pavement databases and network optimization analysis so as to assure the best use of our limited resources.

**Keywords :** Pavement, Performance, Prediction, Evaluation, Management, Geographic Information System (GIS), Multilevel Data, HLMs/LMEs Models (Hierarchical linear models, Linear Mixed-Effects Models).

## 一、前言

雖然國內對於鋪面管理系統相關之研究已有相當之歷史，自民國七十二年，台灣區國道高速公路局便率先執行鋪面養護管理的研究工作，其後各公路主管單位如交通部運輸研究所、台灣區國道新建工程局、台北市政府工務局養護工程處與交通部公路局等，皆針對鋪面管理系統架構、鋪面養護策略與鋪面管理系統程式的訂定與構建等進行一系列的研究。然而，吾人在國內目前的鋪面管理系統架構中可發現，不僅對於鋪面損壞的定義缺少一致性的標準，在資料庫的建立方面，常因主管單位、人員操作或是記錄方式不同而使得資料庫之構建、登錄與管理難以落實。尤其國內鋪面管理系統對於路段資料的劃分是以「固定長度路段」的方式來進行，如此將會在龐大的路網產生數量極驚人的資料庫，工作人員若要將這些資料完整的從定義、調查、蒐集、判讀到資料庫構建與登錄就已是非常繁重的工作，更遑論要將資料庫定時的加以更新與管理。

此外，國內對於鋪面養護與維修的需求，已初步地建議針對鋪面「現況」擬定需要維護的優先順序與維修策略。然而，由於國內缺少較為完整的鋪面績效資料庫與績效預測模式，因此對於鋪面的管理工作僅限於「現況分析」，並無法做「未來狀況的預測」。換言之，沒有本土化的績效預測模式，便無法預測未來的維修效益，更無法以「成本效益」的角度將有限的預算經費做最佳化的分配。可靠的績效預測模式可以說是全方位鋪面管理系統的核心所在。

## 二、研究目的

雖然鋪面績效預測模式在鋪面設計、鋪面評估與維修、與鋪面管理系統扮演著極為重要的角色，然而若是要待國內構建本土化且非常完整的鋪面績效資料庫後再建立本土化的績效預測模式，則不僅須耗資甚鉅、不符合投資效益、且緩不濟急。為有效解決構建本土化績效預測模式的困難與問題，因此，計畫主持人擬以三年三期的方式，利用美國長程鋪面績效資料庫 LTPP DataPave Online (<http://www.datapave.com>)從事「鋪面績效預測模式的構建與應用」研究，第一期主要的研究內容包括：

1. 鋪面標準損壞調查手冊之研擬。
2. 美國長期鋪面績效資料庫之本土化應用。
3. 研擬系統化的統計與工程分析方法：探討傳統迴歸方法(線性與非線性迴歸)、當代迴歸技術、與線性混合模式之適用性與應用。
4. 探討鋪面動態分段在地理資訊系統之應用。

## 三、研究方法

### 3.1 國內外相關研究之文獻蒐集與整理

本研究首先針對國內外現有的相關研究做全面性的文獻蒐集、整理與比較，其中包括鋪面管理系統之整合、鋪面標準損壞分類與評分、傳統迴歸方法與當代新式統計方法、地理資

訊系統在鋪面管理的應用、專家系統在鋪面管理的應用、鋪面績效的原理與應用、鋪面績效預測模式之建立、美國長程鋪面績效(LTPP)相關研究與重要試驗路段之資料。此外，在研究中亦將蒐集的文獻加以整合，深入了解國內、外實務單位應用的特點與差異，判斷可直接引進可能性或需經過本土化修正方可應用在我國的相關研究成果。

### 3.2 鋪面標準損壞調查手冊之研擬

國內在鋪面養護管理作業上，對於鋪面破壞調查之工作尚未有統一的標準。交通部頒佈的公路養護手冊亦早已不符實際需求，以此龐大資料庫架構所衍生出來的鋪面養護管理系統，不管是未來在網際網路(WWW)的應用、相容性養護策略的採用、與模糊理論的應用等工作，均會造成鋪面主管單位龐大的負擔。因此，建議應考慮國內環境的特性，研擬一套適合我國使用的鋪面標準損壞調查手冊。本研究因此參考國內外之相關研究資料，如：美國正進行的長期鋪面績效研究 (SHRP/LTPP)「鋪面調查手冊」、美國聯邦公路總署 (FHWA)之「鋪面維修技術」訓練教材、與國內交通技術標準規範之「公路養護手冊」，對各種接縫式混凝土鋪面與瀝青混凝土鋪面損壞形態的分類、破壞程度的定義與說明示意圖彙編而成一「鋪面標準損壞調查手冊」，以作為後續研究之準則。

### 3.3 美國長期鋪面績效資料庫之擷取與應用

美國長程鋪面績效研究計畫(Long Term Pavement Performance, 簡稱 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。LTPP 研究計畫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。

本研究將建立一系列鋪面預測模式，首先需仰賴美國長期鋪面績效 LTPP 資料庫中的相關資料，資料擷取的過程可應用 DataPave 程式來完成，由於 DataPave 是以關聯性資料庫的方式來儲存，其資料範圍相當廣泛。因此，在進行資料擷取之前必須確認所需之鋪面資料是以何種型態蒐錄於資料庫中。雖然 DataPave 程式已將資料依其特性分門別類製成表單，但在同一鋪面特性的資料列舉方式僅是以路段 (Sections) 做區分，而並未將各路段之資料調查時間、鋪面特性的進階分類再做更完善之整理。因此，在資料之使用上仍極為複雜，必須再次整理才可明確又方便的使用。針對此點，本研究以 DataPave 程式所擷取匯出之 Access 之檔案格式，利用 Microsoft Access 程式進行資料的處理。研究中將已分門別類的資料分別處理，並依照其特性決定資料之處理方式，以其能達到簡化資料，又符合該路段每一種鋪面特性，如此在應用此資料時可清晰的找出每一路段的資料值而不致產生混淆。

在進行 LTPP 資料分析時，首先必須考慮其資料之簡化並找出其資料間之關連性，以減少研究人員在處理資料上之困難。儘管如此，由於 LTPP 資料數極為龐大，資料需要重複篩選、擷取、再分析、尋找散失的資料、與可能登錄的錯誤等工作所需的人力、時間、與資源相當可觀。而 Microsoft Access 程式為一具有強大功能的資料庫管理系統的程式，應用此程式可配合內建的諸多功能，例如資料表之構建、記錄、篩選、排序、關聯性資料庫聯結與 SQL 語法的應用等，將 LTPP 的資料進行進一步之分析與篩選，以達到因應進階資料篩選的目的。因此本研究利用 Microsoft Access 程式進行資料之初步篩選與處理，根據資料之特性將其對應至 DataPave 程式中資料之定義，進行資料之篩選與判斷，最後再經由其關聯性資料庫之功能找出各筆資料間所互相對應之欄位，將其進行整合，最後即可得到所需之資料庫。

### 3.4 探討美國長程鋪面績效資料庫之特性與適用限制

美國長期鋪面績效 LTPP 資料庫中的相關資料範圍相當廣泛，然而在某些限制下使得某

些路段對於鋪面的資料未能完整的蒐集，而且在長達將近二十年計畫期間某些路段經由一再的維修與養護、加鋪或重建等作業，在鋪面的特性上亦產生相當的變化與原始建造的資料已產生極大的差異。因此本研究在使用該資料庫進行分析時首先將對於擷取的相關鋪面的建造與養護的歷史進行詳盡的了解，以確定由資料庫中擷取鋪面資料的特性是否與欲分析的目的吻合，若所鋪面特性已產生極大的差異則必須透過其他方式加以修正或更深入的探討資料的適用應。此外，對於未能完整蒐錄的鋪面資料可過比對其他鋪面的方式加以模擬，或用 LTPP 所提供的對照表以查表方式求得相當的鋪面資料特性。

根據國人過去在鋪面管理的實務經驗中可知，國人往往過度重視對資料的蒐集，並投入絕大部分可用的人力、時間、與資源，然而卻忽略資料分析的重要性。資料蒐集的主要目的在資料分析，雖然 LTPP 資料庫極為龐大，若是透過適當的資料重複篩選、擷取、再分析，並與過去和現在的相關預估模式比較與驗證，相信必可以最少的研究經費、最符合投資效益的方式，獲得最多的研究成果。未來亦可與國內有限的鋪面績效資料互相驗證，建立適用於國內鋪面維修與管理的績效預測模式，以供後續鋪面維修管理之用。

### 3.5 探討傳統迴歸方法、當代迴歸技術、與線性混合模式之適用性與應用

本計畫擬採用計畫主持人過去曾建立的系統化的統計與工程分析程序(Systematic Statistical and Engineering Approach)、可靠的資料分析流程、與詳盡的逐步分析步驟及準則，來構建鋪面預估模式。該系統化的分析方法建議應將工程專業知識、專家經驗、經驗法則、統計資料分析與迴歸技術整合在同一個分析架構下，並可在分析過程中預先偵測出並排除可能因含有錯誤的資料而導致各種問題。在文獻回顧中，我們亦曾深入執行並探討 AASHO 道路試驗資料的重新分析、過去鋪面績效預測模式的構建與應用、現有鋪面績效預測模式的類別、系統化的統計與工程分析方法、美國長程鋪面績效研究與資料庫的取得、AASHTO 高差預估模式之分析與驗證—以 LTPP 資料庫為例、與多層線性模式/線性混合模式(HLMs/LMEs)與視覺圖方法之簡介。

由於鋪面績效資料庫屬於多層次資料的一種，並非完全不相關、其變異數也非固定。本計畫執行初期必須首先 HLMs/LMEs 及目前的視覺圖方法做全面性的文獻收集、整理、與探討，並研擬如何結合電腦科技與統計觀念來發展/整合/組織一套有系統的視覺圖方法及準則來分析多層次資料。視覺圖的方法包括傳統的統計圖，如直方圖、盒鬚圖、枝葉圖、殘差圖等在統計實務上的應用情形，同時也包括如何使用這些視覺圖來了解資料的原型、提出假設、及評估模式等。本研究希望能提供所提出的視覺圖技巧在多層次資料分析的適切性，提供研究者在 HLMs/LMEs 資料探索分析、模式建立、及模式評估一個完整的分析方法。本研究並將探討傳統迴歸方法、當代迴歸技術、與線性混合模式之適用性與應用，以作為後續發展或驗證本土化鋪面績效預測模式之參考。

### 3.6 探討鋪面動態分段在地理資訊系統的應用

現階段利用地理資訊系統(簡稱 GIS)所建立的鋪面管理系統(PMS)，在歐美各國運輸部門已是一項相當成熟的技術。此種應用 GIS 的方法亦是目前實務單位積極發展的方向。在鋪面管理方面，國內公路主管機關大多採用全方位的管理模式，不但沒有明確「路網層級」與「個案層級」之分隔，路段的定義係採用固定長度路段(20 公尺或 100 公尺)，有的甚至採用個別版塊來管理，而且尚未引進抽樣的觀念，所需輸入之資料數量相當龐大，不僅在路網層級的管理效率不彰，亦影響全球定位系統(GPS)與地理資訊系統(GIS)在此方面之應用績效。再者，不僅如此，國內有的鋪面管理系統為配合現有地理資訊系統之架構與限制，建議公路主管單位作全面性鋪面非破壞性撓度調查，或者將結構性指標、功能性指標、與數十種鋪面損壞型態與嚴重程度混用，對於路網層級的鋪面管理將有不利的影響。因此，建議鋪面管理宜由路網層級的養護管理著手，適當採用「均質路段」與抽樣的觀念。

本研究單位在數年來已完成許多可與鋪面管理系統相關的應用程式雛形，其中包括以資料庫連結的方式撰寫資料表自動彙整功能，並可以提供以動態分段記錄方式的彙整表單與資料查詢的「路網動態分段資料庫」(Network Dynamic Segmentation Database)簡稱【NETDSD】的資料庫架構雛型，本程式並可以本單位自行開發的簡易地理資訊系統藉由圖形顯示的導引管理或分析鋪面路網的資料庫。雖然所建立的雛型架構尚未稱完備，然而其中的 NETDSD 將針對動態分段進行自動化的切割與安排，因此對於動態分段最為困然的步驟已提供一個有效率的解決方式。

本計畫將延續 NETDSD 的研究成果建立一套針對「路網階層」的資料庫管理與地理圖形展示系統，研究中擬針對「路網階層」的資料庫需求分析，以「均質路段」的觀念探討路網資料庫所應搜錄的資料，並考慮資料蒐集時：明確性、可量測性、可完成性、相關性、及時性等原則，並以抽樣調查的觀念，來完成資料庫架構的建立。本研究亦利用動態分段的記錄方式將所需之資料以排序的方式彙整得出彙整表，克服關連式資料庫軟體不足之處，提供一個彙整鋪面資料的方法。研究中將使用 Microsoft Access 的關聯性資料庫以 Visual Basic 程式將其與地理資訊系統軟體更進一步結合。本計畫擬採購一套美國 ESRI 公司發展的整合圖形資料庫及屬性資料多功能之地理資訊系統 Arc/Info 程式，以建立一套以 NETDSD 為基礎而更為完善的 GIS 鋪面管理系統，系統構建時將鋪面等級以不同的顏色區分，而達到將養護維修作業計畫自動化，可提供完善不同屬性地圖的展示，使其可作為管理與模式化資料的工具而可分析資料並支援道路維修養護等計畫的決策，以成為提供鋪面管理的有效工具。

#### 四、AASHO 道路試驗資料的重新分析

AASHO 道路試驗是美國曾經在 1958 到 1960 年間在伊利諾州 Ottawa 市附近執行一個大規模的高速公路研究計畫，在鋪面績效分析的歷史上佔有極重要的角色。在道路試驗時，研究中發現柔性鋪面在春天融雪時較冬天結冰時有較高的損壞率，然而剛性鋪面的損壞率則較不受季節變化的影響。因此，必須利用季節性調整因子來修正交通荷重以建立一個較佳的柔性鋪面設計公式；對於剛性鋪面設計公式而言則不需要季節性調整因子來修正交通荷重。原始的 AASHO 剛性鋪面設計公式如下所示：

$$\log W = \log \rho + \frac{\log\left(\frac{4.5 - PSI}{4.5 - 1.5}\right)}{\beta}$$

$$\beta = 1.0 + \frac{3.63(L_1 + L_2)^{5.2}}{(D + 1)^{8.46} L_2^{3.52}} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{10^{5.85} (D + 1)^{7.35} L_2^{3.28}}{(L_1 + L_2)^{4.62}}$$

其中，W = 各種不同輪軸荷重的次數；PSI = 現況服務能力指標(0-5)； $\rho, \beta$  = 鋪面厚度、強度、輪軸荷重型態的函數；D = 鋪面版的厚度，in.； $L_1$  = 輪軸荷重，kips； $L_2$  = 單軸荷重為 1、雙軸荷重為 2。根據道路試驗的報告(1962, p.155)，上述迴歸公式的最後統計結果為：判定係數( $R^2$ ) = 0.16，估計值的標準誤差(SEE) = 不清楚，資料點(N) = 371。須額外注意的是在第二迴圈第一車道的道路試驗資料因為分析結果非常差，因此被完全排除在上述公式之外。(注意：1 in. = 2.54 cm, 1 kip = 4.45 N)

這公式也是用來建立著名的軸重當量因子(LEFs)以將各種不同輪軸荷重轉化為 18,000 磅單軸軸重當量數(或軸重軸次)(ESALs)的依據。若是將  $L_1 = 18$  與  $L_2 = 1$  代入上述公式，並以 ESAL 取代 W，即可得到一個簡化的公式代表  $\log(ESAL)$  是版厚(D)與鋪面服務能力評分(PSR)的函數。這種 ESAL 的概念自此被全美國與全世界鋪面界所採用，儘管非常多的研究者仍時

常爭辯該概念必須立即重新修正。對於某一個特定的鋪面路段，鋪面工程師一般係想要採用上述公式來預測所需的累加軸重當量數以達到某個特定的鋪面狀況。將上述公式重新編排後，工程師也常用它來預測在某個特定的鋪面厚度與交通荷重下的鋪面狀況。

然而，我們必須指出迴歸模式的應用與數學公式的應用是截然不同的。數學公式可以經過不同的轉換仍然不會喪失其一般性；相反地，經過轉換或重新編排過的統計迴歸公式將未必與原來的公式有同樣的預測精度。筆者曾經取得建立 AASHO 剛性鋪面設計公式之原始資料，受限於現地試驗的特性，某些較弱的鋪面路段在兩年試驗完成期間前已完全破壞，因此被摒除在試驗之外；但是有某些路段在整個試驗期間都抱持非常好的鋪面狀況。為了確保每個路段最少會有五個績效資料，因此利用移動平均的技術將道路試驗的資料以下列兩種方式來登錄：(1)每隔 11, 22, 33, 44, 55 個指標日的資料(1 index day = 2 weeks)、或(2)PSI 值降低到 3.5, 3.0, 2.5, 2.0, 1.5 時的資料，AASHO 原始剛性鋪面設計公式係採用第二組資料建立而得的。利用與上述公式相同的迴歸係數與資料庫來預測工程師最想知道的  $\log(W)$ ,  $W$ , and  $PSI$  的數值時，其最終統計迴歸結果為：

1. 預測  $\log(W)$  :  $R^2 = 0.659$ ,  $SEE = 0.136$ ,  $N = 371$

2. 預測  $W$  :  $R^2 = 0.498$ ,  $SEE = 201.6$ ,  $N = 371$

3. 預測  $PSI$  :  $R^2 = 0.031$ ,  $SEE = 0.701$ ,  $N = 315$

從上述分析中，雖然發現預測  $\log(W)$  之判定係數  $R^2$  與道路試驗的報告有明顯的不同，但我們相信這很有可能僅是打字錯誤而已。圖一顯示的是原始 AASHO 道路試驗剛性鋪面設計公式的預測結果，很顯然地雖然預測  $\log(W)$  的趨勢尚稱合理。但是，若利用同樣的公式來預測交通荷重的次數( $W$ )時則發現實際試驗資料與預測的結果如扇形的方式向外發散，代表當  $W$  增加時估計誤差的變異數也會增加，明顯違反了統計迴歸的假設。一般而言，利用上述公式來預測達到某個特定的鋪面狀況所需的  $W$  值被嚴重地高估了。圖一亦顯示若利用上述迴歸係數來預測  $PSI$  時，其預測結果將極為不穩定，其判定係數將降至  $R^2 = 0.031$ ，值得注意的是在分析中，由於某些資料將導致預測的  $PSI$  值為負值必須加以剔除，因此僅有 315 筆資料點。

同樣地，筆者亦取得建立 AASHO 柔性鋪面設計公式之原始資料，並將資料代入如下所示的柔性鋪面設計公式。其中， $W$  = 各種不同輪軸荷重的次數； $PSI$  = 現況服務能力指標 (0-5)； $\rho, \beta$  = 鋪面厚度、強度、輪軸荷重型態的函數； $SN$  = 柔性鋪面的結構數； $L_1$  = 輪軸荷重，kips； $L_2$  = 單軸荷重為 1、雙軸荷重為 2； $D_1, D_2, D_3$  為柔性鋪面面層、底層、與基層的厚度，in.。根據道路試驗的報告(1962)，上述迴歸公式的最後統計結果為：判定係數( $R^2$ ) = 0.70，估計值的標準誤差( $SEE$ ) = 0.31，資料點( $N$ ) = 1171，變異係數=15%。須額外注意的是在第二迴圈第一車道的道路試驗資料因為分析結果非常差，因此被完全排除在上述公式之外。(注意：1 in. = 2.54 cm, 1 kip = 4.45 N)

$$\log W = \log \rho + \frac{\log\left(\frac{4.2 - PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{\beta}$$

$$\beta = 0.4 + \frac{0.081(L_1 + L_2)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} L_2^{3.23}} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{10^{5.93} (SN + 1)^{9.36} L_2^{4.33}}{(L_1 + L_2)^{4.79}}$$

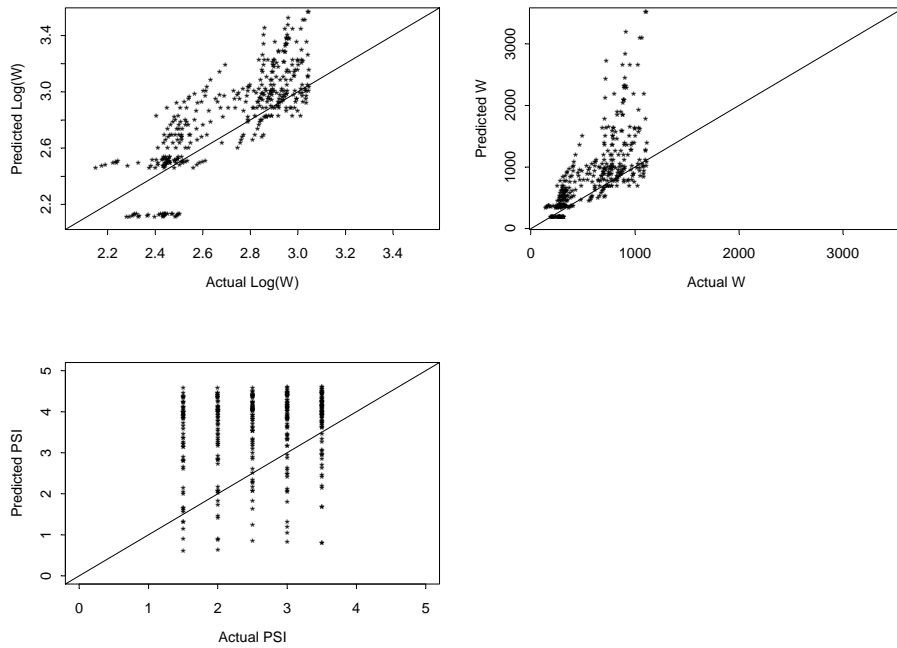
$$SN = 0.44D_1 + 0.14D_2 + 0.11D_3$$

當我們利用與上述柔性鋪面設計公式相同的迴歸係數與資料庫來預測工程師最想知道的  $\log(W)$ ,  $W$ , and  $PSI$  的數值時，其最終統計迴歸結果為：

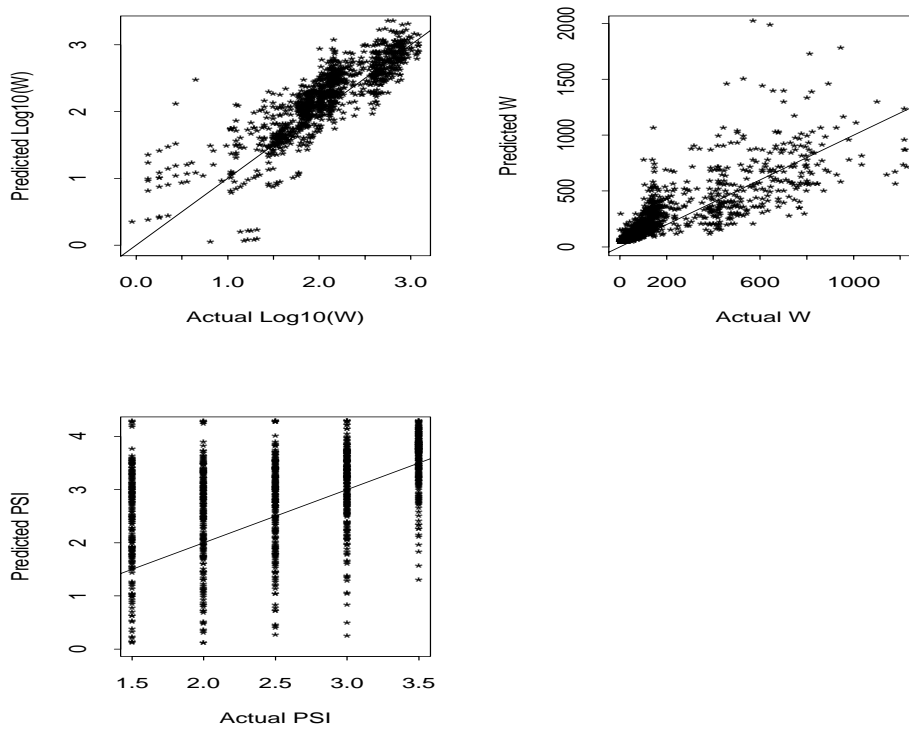
1. 預測  $\log(W)$  :  $R^2 = 0.729$ ,  $SEE = 0.285$ ,  $N = 1171$



2. 預測 W :  $R^2 = 0.615$ , SEE = 155.3, N = 1171
3. 預測 PSI :  $R^2 = 0.212$ , SEE = 0.622, N = 1083



圖一 AASHO 道路試驗：剛性鋪面設計公式的預測結果



圖二 AASHO 道路試驗：柔性鋪面設計公式的預測結果

從上述分析中，雖然發現預測  $\log(W)$  之判定係數  $R^2$  與道路試驗的報告有些許差異，但我們相信這很有可能僅是計算的誤差。圖二顯示的是原始 AASHO 道路試驗柔性鋪面設計公式

的預測結果，很顯然地雖然預測  $\log(W)$  的趨勢尚稱合理。但是，若利用同樣的公式來預測交通荷重的次數( $W$ )時則發現實際試驗資料與預測的結果也會如扇形的方式向外發散，代表當  $W$  增加時估計誤差的變異數也會增加，明顯違反了統計迴歸的假設。圖二亦顯示若利用上述迴歸係數來預測 PSI 時，其預測結果將極為不穩定，其判定係數將降至  $R^2 = 0.212$ ，在分析中因某些資料使預測的 PSI 值為負值而被刪除，因此僅有 1083 筆資料點。

因此，我們必須再一次的強調，AASHO 道路試驗所建立的柔性鋪面與剛性鋪面設計公式雖然可以合理的預測  $\log(W)$ ，卻不見得可以確保對  $W$  與 PSI 的預測精度。統計迴歸模式必須被嚴格限制在同樣的變數形式下才可以使用，若是想要預測經過重新編排後或轉換過的新變數時，則必須要重新再作進一步的統計迴歸分析。很不幸地，在分析 AASHO 現地道路試驗資料、與軸重當量因子或 ESAL 概念的原始發展過程中，亦隱含了非常高的變異性。這次分析亦指出利用將軸重當量因子設定為某個特定值的方式並沒有辦法完全適用在後續的鋪面設計上。在利用美國長程鋪面績效(LTPP)資料庫來建立或驗證各種鋪面設計與績效預測模式時，若是僅要對於 AASHO 原始的模式做任何的修正，而無法同時完全捨棄或進一步的分析 ESAL 概念時，其成效將會是非常值得商榷的。

## 五、LTPP 柔性鋪面試驗室與回算之彈性模數比較

在鋪面管理系統中，對於道路鋪面的養護維修工作，如需瞭解鋪面狀況，則需定期對於現有道路的鋪面進行結構性評估。鋪面結構的強度，大多是以鋪面各層材料之彈性模數(Elastic Modulus)來表示。以往為了求得鋪面的結構強度，必須在鋪面上直接鑽心取樣，再回試驗室中求得應力與應變關係，來決定鋪面各層的彈性模數(Elastic Modulus)。鑑於此種鑽心取樣的方式會對於鋪面的結構造成破壞而影響其結構強度，因此近年來非破壞性試驗(Non-Destructive Testing)即被廣泛的使用。非破壞性試驗為量測鋪面表面撓度值以反映鋪面結構狀況，其量測速度快且不會破壞現有鋪面結構。表示鋪面結構強度的彈性模數值無法由量測的表面撓度直接計算求得，因此，一般是以回算的方式回算出鋪面各層材料的彈性模數。

本研究以美國公路長程鋪面績效計畫 LTPP 所蒐集之資料庫 DataPave 為基本架構，擷取該資料庫中柔性鋪面彈性模數之相關資料，針對資料庫中試驗室與動態回算結果之彈性模數進行探討。並藉由 Microsoft ACCESS 程式中關連性資料庫之功能將資料匯整成分析時所需之資料庫型態，以便於分析與比較。接著，再以 LTPP 之資料進行驗證與比較，並探討試驗室、回算結果及配合土壤分類指數所得彈性模數之差異。

### 5.1 LTPP 相關資料之擷取

DataPave 資料庫的主要架構分為三層，第一層為模組(IMS Module)、第二層為表單(Table)、第三層為單元(Data Elements)。資料庫亦將收集之資料分為十個大項：氣候(Climatic)、全體資料描述(General)、基本資料(Inventory)、養護(Maintenance)、監測資料(Monitoring)、維修(Rehabilitation)、季節性監測資料(SMP)、特殊鋪面的全體資料描述(SPS)、材料試驗(Testing)、交通(Traffic)。

本研究對於試驗室及回算的的彈性模數來探討，因此將在 DataPave online Release 18.0 擷取所有欲取得之參數。此資料庫包含了柔性及剛性鋪面的相關數據，本研究只對柔性鋪面進行探討，因此在 LTPP 資料庫中之管理模組(Administration)中，擷取關於柔性鋪面 GPS-1 與 GPS-2 之試驗路段。

首先針對試驗室的相關參數進行擷取，在資料庫中，試驗路段的試驗室之彈性模數位於試驗模組(Testing)中，其面層與底層、基層及路基之彈性模數分別儲存於二個表單中。在面層資料裡，資料庫提供了各路段鋪面溫度為 5、25 及 40°C 的資料，在此

方面，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、基層之彈性模數及路基之回彈模數，編號 1 的為路基，以此類推即可取得各層之彈性模數。

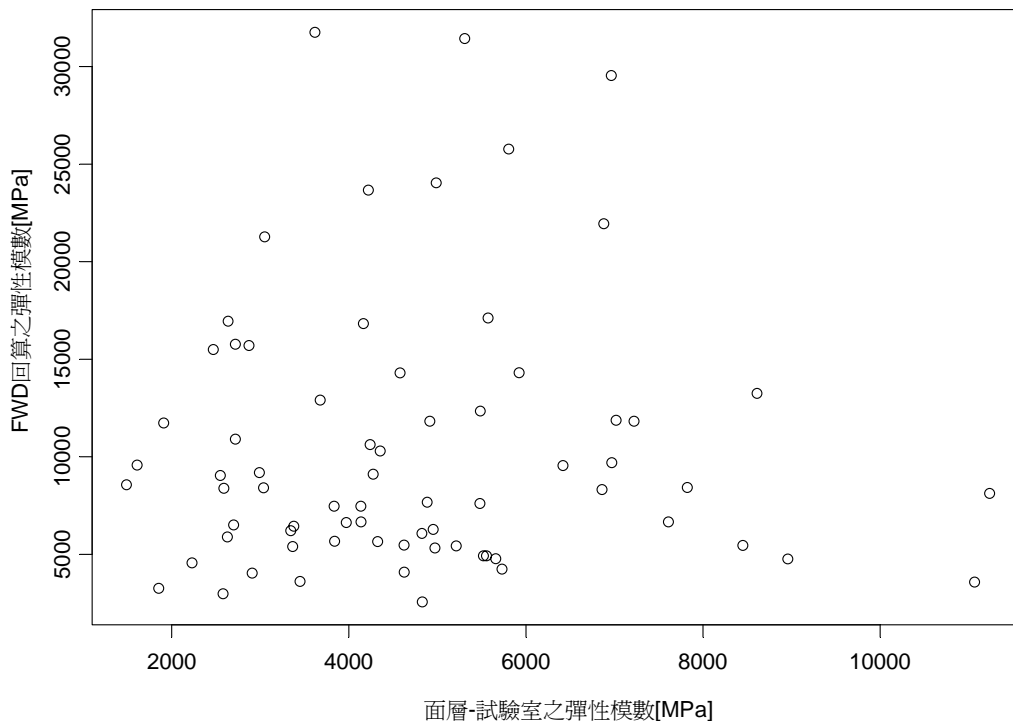
接著對於回算值的相關參數進行擷取，在資料庫中，試驗路段的回算結果之彈性模數位於監測模組(Monitoring)中，各層的彈性模數均位於同一表單中。在此表單內，以鋪面回算層數編號來取得不同層之彈性模數。值得注意的是在 LTPP 使用手冊中指出，此層數編號的順序和試驗室之鋪面層數編號相反。

## 5.2 資料篩選與匯整

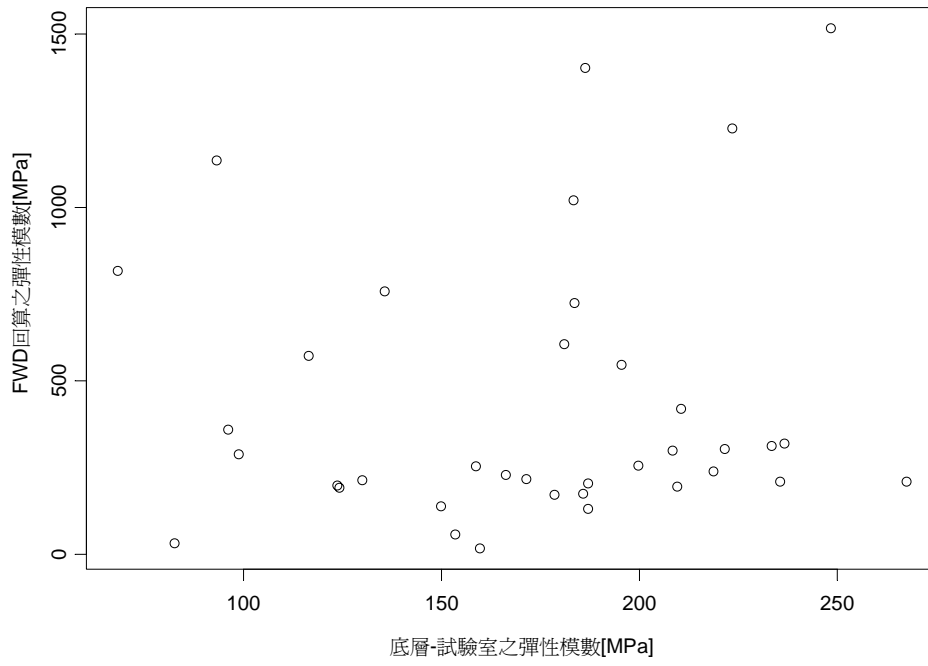
雖然 DataPave 程式已經將資料分門別類製成不同表單，但在同一鋪面特性的資料僅是以路段做區分，因此本研究以 DataPave 程式所擷取匯出之 Access 之檔案格式，利用 Microsoft Access 程式對眾多資料進行整理。在進行 LTPP 資料分析時，必須將資料簡化並找出資料間之關聯性，否則其資料數會過於龐大而導致在處理上之困難。Access 程式為一具有多功能資料庫管理系統之程式，應用此程式可配合內建的諸多功能，將 LTPP 的資料進一步之分析與篩選，以達到研究人員所需之資料庫。因此，本研究利用 Access 程式進行資料之初步篩選與處理，在各資料表單中，以柔性鋪面 GPS-1 與 GPS-2 之試驗路段，將試驗室與回算的彈性模數匯整，以進行分析比較。

## 5.3 分析結果與比較

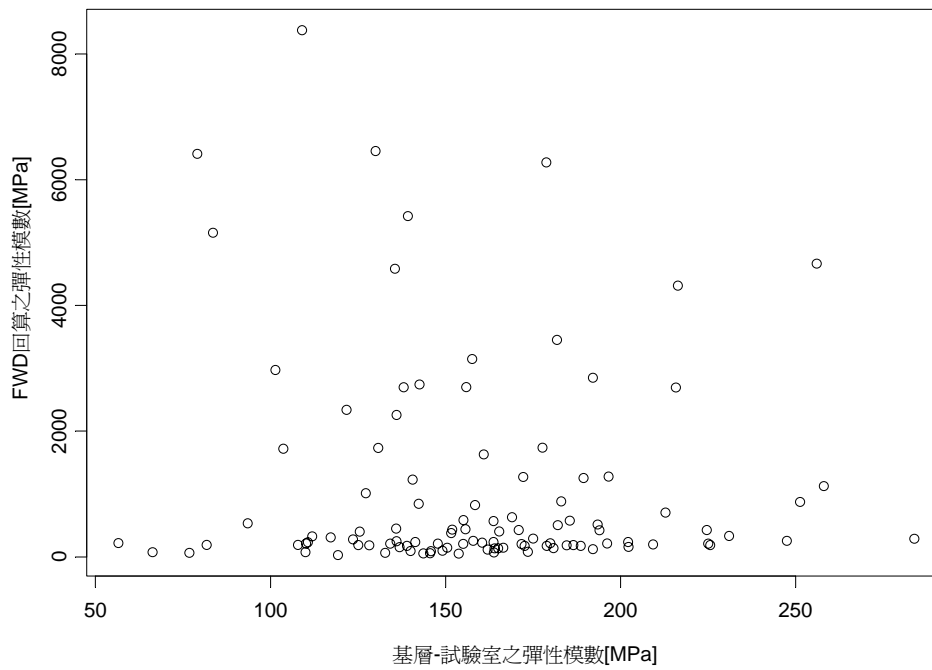
本研究利用資料庫蒐集試驗室與回算的彈性模數進行繪圖比較後，由圖三~圖六中發現各層回算的結果皆高於試驗室所得之彈性模數。在 AASHTO 的報告中指出實施落重撓度儀試驗，在路基產生的撓度為最大，因此回算的路基回彈模數需折減 3~4 倍，才會與試驗室的彈性模數相近。



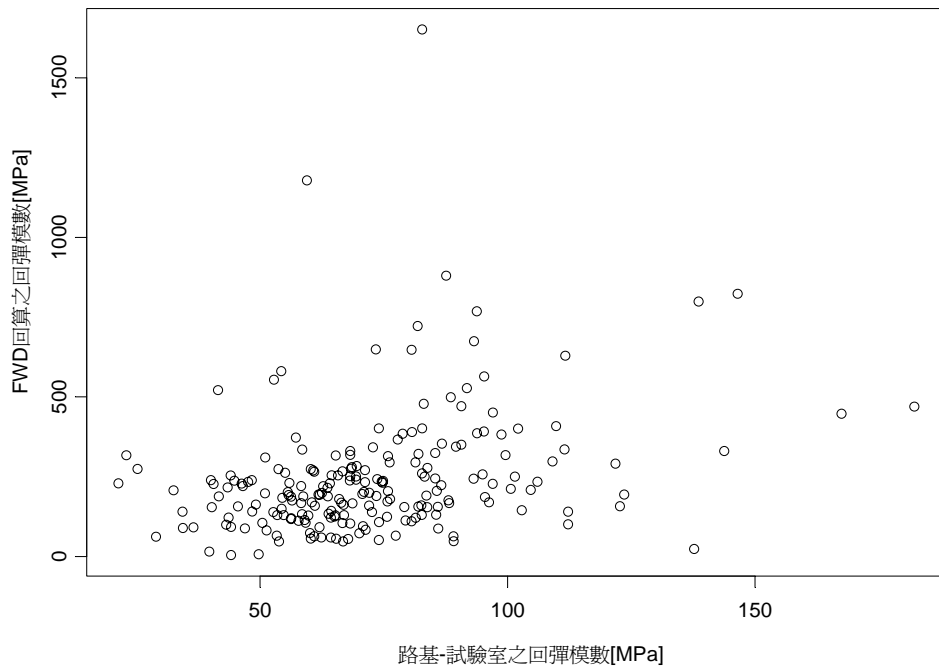
圖三 面層之試驗室與回算值比較



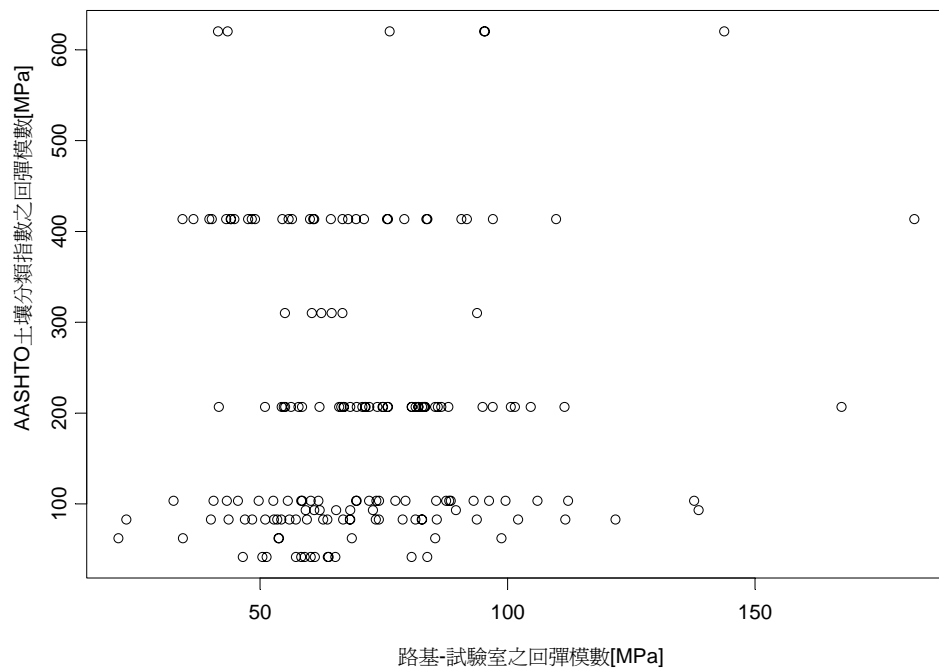
圖四 底層之試驗室與回算值比較



圖五 基層之試驗室與回算值比較



圖六 路基之試驗室與回算值比較



圖七 試驗路段AASHTO土壤分類指數與試驗室MR值比較

依 LTPP 資料庫所得之彈性模數，得知鋪面各層回算之彈性模數皆高於試驗室所得之彈性模數，有的路段甚至回算部分高於試驗室之彈性模數。在本研究中，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。研究結果顯示回算部分均高於試驗室所得之彈性模數。

接下來針對這幾個路段的相關資料探討後，發現其氣候溫度大約都在 6~15°C 左右，氣候條件多為潮濕且不冰凍。LTPP 把其試驗區域分成四大區域，分別是北大西洋區、北中區、南區、西區，雖然這幾個路段的地理位置亦有位於其他三大區域內，但大部分皆位於美國北中部。可能因以上幾點原因，在回算的部分 E 值會產生高估。

另外，在 AAAHTO 設計手冊中，建議可根據標準土壤試驗，如 CBR 值和其他工程性質的相互關係，藉此得到回彈模數的設計數值。因此本研究亦擷取位於基本資料 (Inventory) 中，試驗路段之路基 AASHTO 土壤分類指數，配合 DataPave 程式對應土壤分類指數所建議之 CBR 值，在經由下列轉換公式，可求得路基回彈模數：

$$M_R = 1500(\text{CBR}) \quad (3)$$

其中， $M_R$  為路基回彈模數 (psi)；CBR 為土壤之加州承載比試驗假設值。由圖七的結果顯示，使用土壤分類指數與試驗室所求得之路基回彈模數，兩者間之差異較回算之結果小。

## 六、結論與建議

本研究主要目的在利用美國長程鋪面績效資料庫從事「鋪面績效預測模式的構建與應用」研究，第一期主要進行之研究工作包括：鋪面標準損壞調查手冊之研擬、美國長期鋪面績效資料庫之本土化應用、研擬系統化的統計與工程分析方法、探討傳統迴歸方法、當代迴歸技術與線性混合模式之適用性與應用、與探討鋪面動態分段在地理資訊系統之應用。

研究中亦發現，在分析 AASHO 現地道路試驗資料、與軸重當量因子或 ESAL 概念的原始發展過程中，亦隱含了非常高的變異性。這次分析亦指出利用將軸重當量因子設定為某個特定值的方式並沒有辦法完全適用在後續的鋪面設計上。在利用美國長程鋪面績效 (LTPP) 資料庫來建立或驗證各種鋪面設計與績效預測模式時，若是僅要對於 AASHO 原始模式做任何的修正，而無法同時完全捨棄或進一步的分析 ESAL 概念時，其成效將會是非常值得商榷的。

此外，本研究亦應用 ACCESS 程式的關連性資料庫連結功能將 DataPave 程式中所搜錄的 LTPP 計畫資料庫中的眾多資料以自動化分析程序以及系統化之資料結構將所欲分析之資料分門別類的擷取，以便進行兩者彈性模數之比較。研究結果顯示，以 LTPP 計畫所蒐集之資料，在面層、底層、基層及路基中，回算的結果均高於試驗室所得之值。LTPP 計畫所應用的回算程式 MODCOMP4 以多層彈性理論為基礎，應用現有的回算方法，產生的結果對於每層的彈性模數均為高估，可能因使用動態撓度值配合以靜態理論為基礎之程式所得彈性模數所造成。在 LTPP 彈性模數回算的研究報告中指出，MODCOMP4 程式的非線性模數對於過去的解沒有明顯的改善，因此仍須更進一步的研究。

## 七、參考文獻

1. 劉耀斌、吳忻達、顏少棠、李英豪 (2002). 「AASHTO 高差預估模式之分析與驗證—以 LTPP 資料庫為例」，第三屆鋪面工程師生研究成果聯合發表會論文集，中央大學，中壢市，中華民國九十一年七月十日，第 245~252 頁。
2. AASHTO (1998). *Supplement to the AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*.
3. FHWA (2003). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program*. Publication No. FHWA-RD-03-031, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

4. Ioannides, A. M., Y.-H. Lee, and M. I. Darter (1990). "Control of Faulting Trough Joint Load Transfer Design," *Transportation Research Record 1286*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 49-56.
5. Ker, H.S. (2002). *Application of regression spline in multilevel longitudinal modeling*. Ph.D. dissertation, University of Illinois, Urbana, Illinois.
6. Ker, H.S, Wardrop, J. & Anderson, C. (2003). Application of linear mixed-effects models in longitudinal data: A case study. *Proceedings, Hawaii International Conference on Education*, January 7-10.
7. Lee, Y. H. (1993). *Development of Pavement Prediction Models*, Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana.
8. Lee, Y. H., and M. I. Darter (1995). "Development of Performance Prediction Models for Illinois Continuously Reinforced Concrete Pavements," *Transportation Research Record 1505*, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1995, pp.75-84.EI
9. Lee, Y. H., A. Mohseni, and M. I. Darter (1991). *Pavement Model Enhancements for the Highway Performance Monitoring System (HPMS)*, Final Report, Illinois Department of Transportation and Federal Highway Administration.
10. Hall, K. T., M. I. Darter, S. H. Carpenter, and J. M. Connor (1989). *Concrete Pavement Evaluation and Rehabilitation System - Rehabilitation of Concrete Pavements*, Volume 3, Federal Highway Administration Report No. FHWA/RD-88/073.
11. Huang, Y. H. (1993). *Pavement Analysis and Design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
12. Pinheiro, J. C., & Bates, D. M. (1995). *Model building for nonlinear mixed-effects models*. Technical Report 91, Department of Biostatistics, University of Wisconsin-Madison.
13. Pinheiro, J. C. & Bates, D. M (2000). *Mixed-effects models in S and S-Plus*. New York: Springer-Verlag.
14. Simpson, A. L., J. B. Rauhut, P. R. Jordahl, E. Owusu-Antwi, M. I. Darter, R. Ahmad, O. J. Pendleton, Y. H. Lee (1993). *Early Analyses of LTPP General Pavement Studies data*, Volume 3 - Sensitivity Analyses for Selected Pavement Distresses, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
15. Strategic Highway Research Program (1993). *Long-Term Pavement Performance Information Management System Data Users Guide*, Report No. FHWA-RD-93-094, Federal Highway Administration.
16. SHRP (1993). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Project*, SHRP-P-338, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
17. Strategic Highway Research Program (2002). *Back-Calculation of Layer Parameters for LTPP Test Sections, Volume II, Layered Elastic Analysis for Flexible and Rigid Pavements*, Publication No. FHWA-RD-01-113, Federal Highway Administration.
18. Strategic Highway Research Program (2004). *Long-Term Pavement Performance Information Management System - Pavement Performance Database User Reference Guide*, Publication No. FHWA-RD-03-088, Federal Highway Administration.
19. Venables, W. N. & Ripley, B. D. (1999). *Modern applied statistics with S-Plus* (3rd ed.). New York: Springer-Verlag.
20. Verbeke, G., & Molenberghs, G. (2000). *Linear mixed models for longitudinal data*. New York: Springer-Verlag.
21. Weisberg, S. (1985). *Applied linear regression* (2nd ed.). NY: John Wiley & Sons.