

中華民國第十四屆鋪面工程學術暨 2007 世界華人鋪面專家聯合學術 研討會論文集

(上冊)



主辦單位：中華鋪面工程學會、國立雲林科技大學
交通部、交通部國道新建工程局、交通部國道高速公路局
交通部公路總局、行政院公共工程委員會、內政部營建署
行政院國家科學委員會工程技術發展處工程科技推展中心
台灣區瀝青工業同業公會、國立中央大學

協辦單位：中國土木水利工程學會鋪面工程委員會
北美華人運輸協會
(North America Chinese Overseas Transportation Association)
高苑科技大學

執行單位：國立雲林科技大學營建工程系(所)
營建技術服務暨材料檢測中心

時間：中華民國九十六年九月十三、十四日(星期四、五)
地點：國立雲林科技大學 國際會議廳

接縫式混凝土鋪面高差預測模式之建立 - 以 LTPP 資料庫為例

Development of Faulting Prediction Models for Jointed Concrete Pavements Using LTPP Database

林佳慧¹、葛湘璋²、李英豪³

¹淡江大學土木工程學系 碩士

²淡江大學土木工程學系 兼任副教授、致理技術學院國貿系 副教授

³淡江大學土木工程學系 教授

摘要

本研究主要目的在利用美國長程鋪面績效(LTPP)資料庫對接縫式混凝土鋪面高差現有預測模式進行評估,並嘗試改善該預測模式。首先,在對鋪面高差進行資料探索分析時發現,高差資料之隨機誤差未必符合一般傳統迴歸要求常態分配的假設。因此,在不假設應變數為任何誤差分佈情形下,本研究採用概似估計法與泊松分配,配合廣義線性模式(GLM)與廣義相加模式(GAM)的迴歸分析方式,並配合 Box-Cox 次冪轉換法、視覺圖的技術、與系統化之統計與工程分析流程來構建預測模式。本研究最後並藉由統計檢定與相關參數的敏感度分析,以進一步檢查模式的適合度。建議未來亦可更進一步的分析與改進。

關鍵字: 美國長程鋪面績效研究(LTPP)、接縫式混凝土鋪面、高差、績效、預測模式

Abstract

The main objective of this study is to investigate the goodness of the fit and strive to develop improved faulting prediction models for jointed concrete pavements using the Long-Term Pavement Performance (LTPP) database. Exploratory data analysis (EDA) of the response variables indicated that the normality assumption with random errors and constant variance using conventional regression techniques might not be appropriate for prediction modeling. Therefore, without assuming the error distribution of the response variable, generalized linear model (GLM) and general additive model (GAM) along with quasi-likelihood estimation method and Poisson distribution were adopted in the subsequent analysis. Box-Cox power transformation and visual graphical techniques were frequently adopted during the prediction modeling process. By keeping only those parameters with significant effects and reasonable physical interpretations in the model, various tentative performance prediction models were developed. The goodness of the fit was further examined through various sensitivity analyses of pertinent explanatory parameters. The tentatively proposed models appeared to reasonably agree with the performance data, although further enhancements are possible and recommended.

Keywords : LTPP, Jointed Concrete Pavement, Faulting, Performance, Prediction Model

一、前言

高差為接縫式混凝土鋪面(JPCP)與接縫式鋼筋混凝土鋪面(JRCP)主要破壞型態之一,主要由版底的細粒料經水之沖刷,路床土壤受水膨脹及其承载力喪失等原因所造成。剛性鋪面若產生嚴重的高差,將會因其急動行為造成用路者之不適。此外,高差若處理不當未來還將會產生其他後續破壞,最後導致鋪面破壞而使鋪面績效降低。有鑑於此,本研究針對早期 LTPP 分析的 SHRP P-020 報告[1]及 AASHTO 1998 年設計手冊所建立的高差預測模式[2],分別再重新驗證分析,並與 AASHTO 2002 暫行手冊的預測模式[3]結果比較,以期找到影響破壞形成的重要參數,進而改善舊有模式而構建新預測模式[4]。

二、現有接縫高差預測模式之回顧

2.1 SHRP P-020 之預測模式

SHRP P-020 為應用 LTPP 資料庫中一般鋪面研究資料的早期分析計畫,其目的為藉由不同材料、不同載重、環境、路基土壤和養護工作下,執行鋪面結構設計和鋪面結構維修的調查,以增加鋪面壽命。此計畫發展出破壞和糙度指標的 10 個預測模式,並詳細紀錄預測模式的分析結果、可靠度分析以及說明變數所造成的影響,本研究採用的破壞預測模式如下[1]:

$$\begin{aligned}
 FAULTD = & CESAL^{0.25} * [0.0238 + 0.0006 * \left(\frac{JTSPACE}{10}\right)^2 + 0.0037 * \left(\frac{100}{KSTATIC}\right)^2 \\
 & + 0.0039 * \left(\frac{AGE}{10}\right)^2 - 0.0037 * EDGESUP - 0.0218 * DOWELDIA
 \end{aligned} \quad (1)$$

Statistics : N = 59, R² = 0.534, SEE = 0.028

$$\begin{aligned}
 FAULTND = & CESAL^{0.25} * [-0.07575 + 0.0251 * \sqrt{AGE} + 0.0013 \\
 & * \left(\frac{PRECIP}{10}\right)^2 + 0.0012 * \left(FI * \frac{PRECIP}{1000}\right) - 0.0378 * DRAIN]
 \end{aligned} \quad (2)$$

Statistics : N = 25, R² = 0.55, SEE = 0.047

其中, FAULTD 與 FAULTND 為有接縫鋼筋與無接縫鋼筋之平均橫向接縫高差(in), CESAL 為累積 18-kip 標準單軸軸重數(百萬), JTSPACE 為平均橫向接縫間距(ft), KSTATIC 為平均路基反力模數值(psi/in), AGE 為鋪面齡期(年), EDGESUP 為邊緣支撐, DEWELDIA 為縱縫筋的直徑(in), PRECIP 為年平均降雨量(in), FI 為年平均凍融指數(°F-days), DRAIN 為排水種類。

2.2 AASHTO 1998 年設計手冊之預測模式

1986 年後,美國 AASHTO 鋪面設計的觀念就從傳統的經驗設計,漸漸轉移到力學設計的分析流程,在其 1998 年設計手冊中加入對接縫式混凝土鋪面(JPCP)與接縫式鋼筋混凝土鋪面(JRCP)高差之預測模式,模式分為含縱縫筋模式與不含縱縫筋模式兩種,簡略說明如下:

$$\begin{aligned}
 FAULTD = & CESAL^{0.25} * [0.0628 - 0.0628 * C_d + 0.3673 * 10^{-8} * BSTRESS^2 \\
 & + 0.4116 * 10^{-5} * JTSPACE^2 + 0.7466 * 10^{-9} * FI^2 * PRECIP^{0.5} \\
 & - 0.009503 * BASE - 0.01917 * WIDENLANE + 0.0009217 * AGE]
 \end{aligned} \quad (3)$$

Statistics : N = 146, R² = 0.6, SEE = 0.022

$$\begin{aligned}
 FAULTND = & CESAL^{0.25} * [0.2347 - 0.1516 * C_d - 0.00025 * h_{PCC}^2 / JTSPACE^{0.25} \\
 & - 0.0115 * BASE + 0.7784 * 10^{-7} * FI^{1.5} * PRECIP^{0.25} \\
 & - 0.002478 * DAYS90^{0.5} - 0.0415 * WIDENLANE]
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Statistics: N = 131, R² = 0.45, SEE = 0.034

此二模式較前述之 P-020 預測模式多考慮了排水係數、底層型式、縱縫筋與混凝土間允許的支承應力以及車道加寬等參數。式中，C_d為 AASHTO 排水修正係數，BSTRESS 為封閉公式解之最大混凝土壓力(psi)，BASE 為混凝土版下之底層種類(0 為未處理底層，1 為處理底層)，WIDENLANE 為車道加寬(0 為不加寬，1 為加寬)。h_{PCC} 為混凝土版厚(in)，JTSPACE 為平均橫向接縫間距(ft)，FI 為年平均凍融指數(°F-days)，PRECIP 為年平均降雨量(in)，DAYS90 為溫度高於 90°F 的天數，其它相關參數之定義同上。在含縱縫筋高差預測模式中，並加入混凝土與縱縫筋之間介面所能傳遞之最大應力(BSTRESS)這個力學參數，其計算式如下[2]：

$$\begin{aligned}
 BSTRESS = & f_d * P * T * \left[\frac{K_d (2 + BETA * OPENING)}{4 * E_s * I * BETA^3} \right] \\
 BETA = & \sqrt[4]{\frac{K_d * DOWEL}{4 * E_s * I}}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

$$OPENING = 12 * CON * JTSPACE * \left(\frac{ALPHA * TRANGE}{2 + e} \right)$$

其中，f_d為分佈因子，f_d = 2 * 12 / (ℓ + 12)、P 為輪荷重(設為 9000 磅)、T 為荷重傳遞百分比(設為 0.45)、K_d為縱縫筋的支撐模數(設為 500,000psi/in)、BETA 為縱縫筋-混凝土版系統之相對勁度、OPENING 為平均橫向接縫開口(in)、E_s為縱縫筋的彈性模數(設為 2.9 * 10⁷psi)、I 為縱縫筋的慣性矩(in⁴)，I = 0.25π * (DOWEL/2)⁴。ℓ 為相對勁度半徑(in)，ℓ = [Eh³ / (12 * (1 - μ²)k)]^{0.25}、h 為混凝土版厚度(in)、μ 為混凝土柏松比、k 為路基反力模數(psi/in)、DOWEL 為縱縫筋直徑(in)、CON 為基層和版的摩擦因子、JtSPACE 為橫向接縫間距(ft)、ALPHA 為混凝土熱膨脹係數(0.000006/°F)、TRANGE 為年平均溫差(°F)、e 為混凝土版乾縮係數(0.00015)。大部分的參數都有定義的值，有些是要從資料庫擷取使用，有些則要額外處理，像 CON 則要依據底層型式決定，穩定處理底層為 0.65，骨材顆粒底層為 0.8。此外，模式中亦指出氣候環境條件與車道加寬亦會影響接縫高差，有車道加寬的鋪面所預測之高差會少於沒有車道加寬的相同鋪面。所用參數單位皆為英制，於後續參數分析時則改採公制單位。

2.3 AASHTO DG2002 暫行手冊之預測模式

由於 DG2002 暫行手冊是以力學-經驗原理為基礎，有許多鋪面結構之力學行為，導致預測模式的設計步驟很複雜，牽扯的變數很多，有些變數甚至還要利用相關軟體或技術去求取，如有限元素法、類神經網路等，造成此暫行手冊到目前還未推行。2002 的預測模式是使用損害增加的方法，在設計期間和接縫載重傳遞過程，需考慮許多因子的變化，包含材料特性、季節氣候條件、交通載重和路基支撐等，其所需資料處理均詳細紀錄於該暫行手冊中 [3]。

目前在預測接縫高差時，都未以力學程序考慮水分對鋪面版下材料的影響，若在預測結構反應時，考慮路基勁度的季節性變化就能說明此影響。除此之外，當鋪面版下的材料具有侵蝕能力時，需定義與材料相關的變數，如基、底層和路基的形式、級配、細粒料的百分比，以及

處理過或穩定的層形式。最後以力學原理為基礎，利用鋪面版下所提供的應力、撓度和能量來構建模式，將可得到較佳的模式，2002設計法就是依據此程序發展，其高差預測模式如下：

$$\begin{aligned}
 Fault_m &= \sum_{i=1}^m \Delta Fault_i \\
 \Delta Fault_i &= C_{34} * (FAULTMAX_{i-1} - Fault_{i-1})^2 * DE_i \\
 FAULTMAX_i &= FAULTMAX_0 + C_7 * \sum_{j=0}^m DE_j * \text{Log}(1 + C_5 * 5^{EROD})^{C_6} \\
 FAULTMAX_0 &= C_{12} * \delta_{curling} * \left[\text{Log}(1 + C_5 * 5^{EROD}) * \text{Log}\left(\frac{P_{200} * WetDays}{P_s}\right) \right]^{C_6}
 \end{aligned} \tag{6}$$

其中 $Fault_m$ 為此月份結束時的平均接縫高差值， $\Delta Fault_i$ 為每月累積增加的高差值， $FAULTMAX_i$ 為此月份結束的最大高差值， $FAULTMAX_0$ 為此月份開始的最大高差值， $EROD$ 為基、底層的侵蝕因子， DE_i 為每月累積的撓度能量差， $\delta_{curling}$ 為最大平均每個月由於翹曲所造成的角隅撓度， P_s 為路基上超載應力， P_{200} 為路基材料過 200 號篩的百分比， $WetDays$ 為年平均潮濕的天數， FR 為基層的凍融指數， C_1 至 C_7 為校正參數， $C_{12} = C_1 + C_2 * FR^{0.25}$ ， $C_{34} = C_3 + C_4 * FR^{0.25}$ 。

DG2002 的接縫高差模式是依據 PAVESPAC 3.0 模式所發展而來[5]，該模式以路基撓度的能量差(DE)來預測接縫高差，以反映整個鋪面的彈性與載重傳遞效率的水準。在彈性基礎上有載重版和無載重版撓度的能量差 $DE = (k\delta_L^2 - k\delta_{UL}^2)/2$ ，其中， k 為路基模數， δ_L 為有載重作用下版的角隅撓度， δ_{UL} 為無載重作用下版的角隅撓度。雖然 DG2002 的接縫高差模式是依據 PAVESPAC 3.0 模式所發展，但是還是有一些限制，像是 PAVESPAC 3.0 模式的交通量是使用等效單軸載重，而 DG2002 則是用軸重頻譜分佈、載重轉換效率、混凝土版特性、路基支撐條件等鋪面參數，PAVESPAC 3.0 模式是使用平均的值，而 DG2002 則是用損害增加的方法；PAVESPAC 3.0 模式忽略季節性和環境對高差影響，而 DG2002 則是利用 EICM 找出影響模式的因子，如隨季節變化的反力模數、混凝土版因溫度產生的翹曲和受濕度產生的翹曲等。

此外，2002 的設計手冊與 PAVESPAC 3.0 最大的不同點，在於 DG2002 有說明接縫處的破壞。DG2002 的接縫模式是以接縫勁度為特質，在平版的條件求得撓度的載重傳遞效率 ($LTE = \delta_{UL} / \delta_L * 100\%$)。若接縫傳遞載重的能力較差時，無載重版作用的撓度會少於有載重版作用下的撓度，其載重傳遞效率會趨近 0。若接縫傳遞載重的能力很好時，兩者的撓度會相同，其載重傳遞效率會趨近 100%。接縫撓度的載重傳遞效率需包含混凝土版的骨材互鎖、縱縫筋和底層、路基三者載重傳遞效率的總和，。其中骨材互鎖的傳遞效率 (LTE_{agg})， J_{agg} 為骨材互鎖勁度，此公式是利用骨材接縫的剪力容量、骨材互鎖損壞和骨材互鎖勁度，而剪力容量的決定則是依據接縫開口的大小，要考慮在臨界應力位置的混凝土版溫度、混凝土版的收縮應變和混凝土版中間深度的平均每日夜間溫度。縱縫筋的傳遞效率 (LTE_{dowel}) 是根據縱縫筋損壞和無因次的縱縫筋接縫勁度， J_0 為無因次的縱縫筋勁度[3, 6]。

$$\begin{aligned}
 LTE_{joint} &= 100 \left[1 - \left(1 - \frac{LTE_{dowel}}{100} \right) \left(1 - \frac{LTE_{agg}}{100} \right) \left(1 - \frac{LTE_{base}}{100} \right) \right] \\
 LTE_{agg} &= \frac{100}{1 + 1.2 * J_{agg}^{-0.849}}, LTE_{dowel} = \frac{100}{1 + 1.2 * J_d^{-0.849}}
 \end{aligned} \tag{7}$$

對於底層的載重傳遞來說，若鋪面無縱縫筋或接縫開口很大時，骨材互鎖的現象將不存在，但是接縫的載重傳遞效率並不會等於 0，因為有某些部分的載重會經由基、底層和路基層，從

有載重作用的版傳遞至無載重作用的版。設計程序中並依據底層型式，給予不同底層的載重傳遞效率百分比(LTE_{base})，粒料底層為 20%，瀝青處理或水泥處理底層為 30%，低強度混凝土底層為 40%，處理底層的載重傳遞效率會比粒料底層好。此外，在冰凍時，接縫的載重傳遞效率也會增加，對於 PCC 版中間深度溫度少於 32°F 的某些月份，基層的載重傳遞效率視為 90%。

在設計年限中，為了計算來自不同載重、接縫勁度和有效溫差的每月損害增加量，需要數千個撓度值，若利用有限元素法程式亦需要花費數個小時，因此可使用類神經網路技術。類神經網路是根據 ISLAB2000 程式所發展的，能計算相同結構（包含相同的相對勁度半徑、接縫間距、Korenev's 無因次的溫度梯度、交通分佈、正規化載重比值、橫向接縫載重轉換效率和路肩載重轉換效率）之軸重所產生之撓度，可提供更細部的分析以計算出每個月損害增加量總和。

三、資料擷取與初步分析

本研究採用美國長期鋪面績效 LTPP 資料庫中的 GPS3 和 GPS4 兩種鋪面型式相關資料，進行現有預測模式之評估與新的預測模式之構建，資料擷取的過程可應用 DataPave Online 程式來完成。雖然 DataPave Online 資料庫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顯複雜，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 Online 光碟裡之 Access 檔案格式，利用 Microsoft Access 程式進行資料的處理。Microsoft Access 程式為一具有多項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，以期能達到簡化資料，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。

資料擷取時，可先參考 DataPave Online 中資料編碼對資料之定義與描述，或 LTPP 資料庫的使用手冊，將各種參數從資料庫中找出，根據其模組進行分類，再以表格化的方式將各參數所在欄位詳細列出。使用 Access 程式進行資料篩選及分析，利用資料中皆有的相關路段編號和各州編號，與鋪面基本資料、交通資料、相關氣象站的氣候環境資料、鋪面破壞之監測資料，進行關聯性資料庫連結，完成後即可得到所需之資料。雖然在資料處理時，已將鋪面路段於養護和維修後的資料點刪除，但為了再次確保資料之正確性，本研究並利用 S-Plus 統計軟體的繪圖功能，將部份路段之接縫高差歷年調查資料呈現於圖 1 中，其上方標示各路段之編號、橫向接縫間距、縱縫筋直徑、鋪面建造日期、與年平均交通量等資料，以確保資料之正確性，必要時可將不合理的資料點刪除，以利後續分析研究。

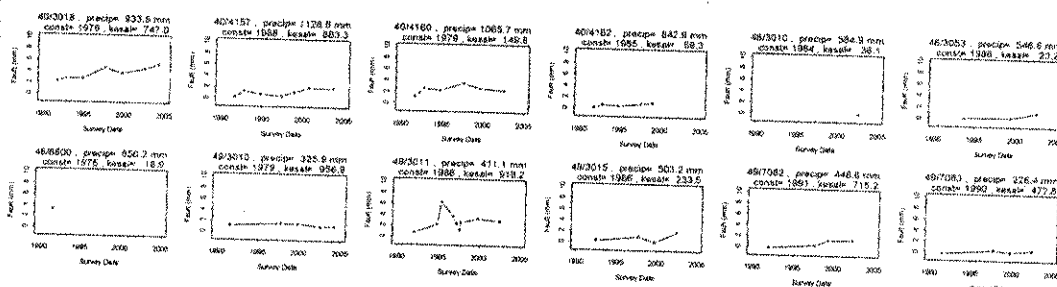


圖 1 部份不含縱縫筋模式之各路段歷年高差值

四、現有模式預測結果之比較

本研究在此將利用 LTPP 資料庫來探討前述績效預測模式[1, 2, 3]之適用性。經過前述資料初步分析後，僅保留維修前的資料點，首先比較 P-020 含縱縫筋與不含縱縫筋模式之預測值與現地調查值之差異，如圖 2、圖 3 所示。由此可知，該模式預測值並無法精確與現地調查值相符，且含縱縫筋模式的資料點分佈，雖然比不含縱縫筋模式較集中，可是當現地的高差值很大時，此預測模式都預測不到，最多只能預測到 5 公釐左右，因此有低估的情形。不含縱縫筋的模式，由於資料點較分散無法看出其趨勢，並且有少數的資料點預測值為負值。在評估現有之預測模式時，因為所需參數眾多且單位皆為英制，故於擷取資料時需謹慎選擇對參數，並注意單位轉換，但在後續分析與模式構建時則皆轉換為公制單位。研究中並分別檢視各參數對接縫高差的影響，以找出可能影響預測值的參數，以其改善模式之適用性。

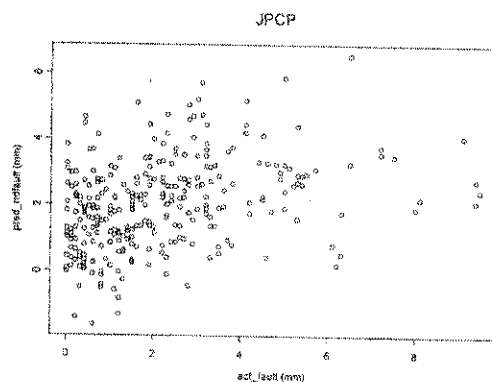
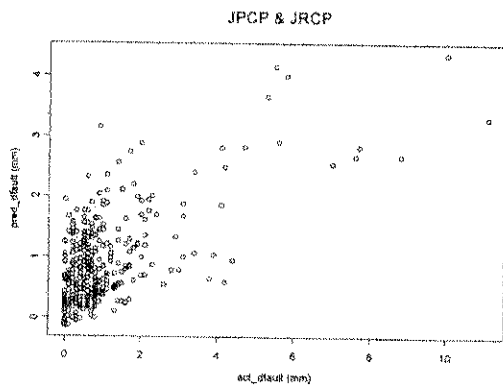


圖 2 P-020 含縱縫筋高差模式之預測結果 圖 3 P-020 不含縱縫筋高差模式之預測結果

再者，以 AASHTO 1998 [2]所建議之高差預測模式(公式 3 與公式 4)來預測 LTPP 接縫高差之現地量測值時，經排除少部份異常預測值後[4]，其分析結果如圖 4 與圖 5 所示。初步分析時亦發現，在含縱縫筋模式中，若其縱縫筋直徑小於 25.4 公釐，將導致縱縫筋與混凝土間允許的支承應力過大，造成模式預測的高差值過高，因此暫時將該資料點排除。圖 5 亦顯示出不含縱縫筋模式的預測值與現地高差值差異極大，尚有很大的改進空間。

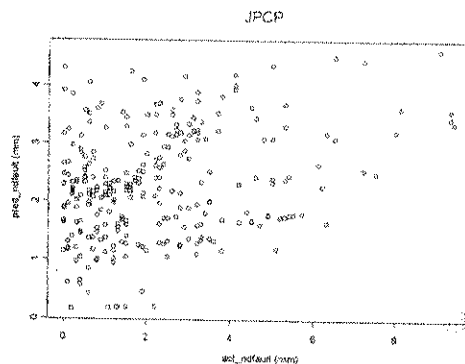
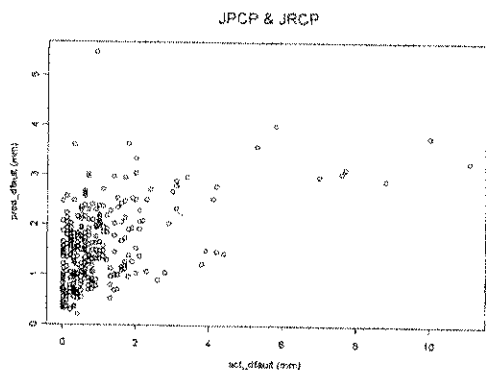


圖 4 AASHTO 1998 含縱縫筋高差模式之結果 圖 5 AASHTO 1998 不含縱縫筋高差模式之結果

由於 AASHTO DG2002 暫行手冊[3]所建議之高差預測之分析流程極為繁雜，因此必須透過 DG2002 軟體來完成分析與預測之工作。該軟體提供了設計參數之輸入介面、分析計算和績效預測的功能，當資料輸入完成後，就能對試驗路段執行損害分析，並同時得到 JPCP 鋪面橫向裂縫和接縫高差之預測結果，最後亦可將輸入和輸出摘要及結果圖表以 Excel 電子檔案的方式來輸出。該暫行手冊已不再支援或建議設計 JRCP 這種型式的鋪面，因此亦未提供 JRCP 鋪面之績效預測模式。本研究因此僅針對 JPCP 現有預測模式和程式所得結果比較。由於該軟體所需輸入之參數在資料庫中並不是一應俱全，有些參數收錄並不完整或只有數筆資料，經過篩選後可得到完整參數資料的路段只有 34 個路段（139 筆資料）。執行程式分析時，雖然已將全部資料輸入，但卻有某些路段無法執行分析，可能是軟體程式碼有誤。還有某些路段因缺少氣象站資料而無法分析。將上述原因排除後，選取與現有模式相同之路段，最後得到 23 個路段（98 筆資料），其預測結果如圖 6 所示。

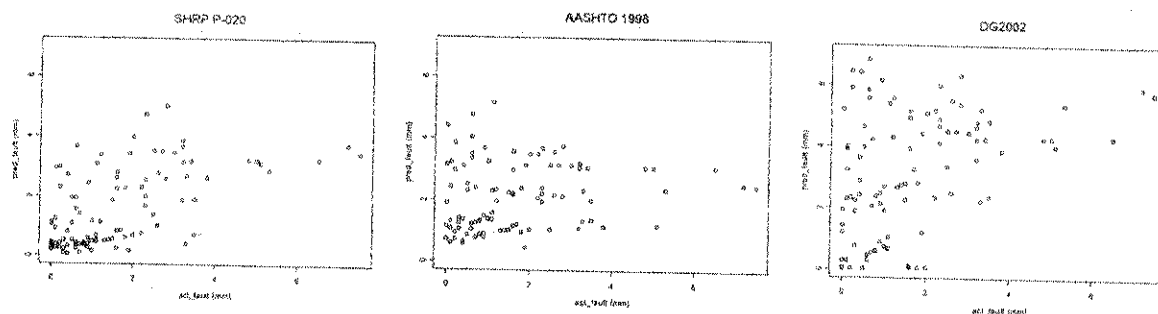


圖 6 各種高差模式之預測結果比較

雖然 DG2002 設計軟體可以免去許多繁瑣的計算，但軟體所需輸入的資料很多，將造成鋪面設計者使用上的不便。有些參數的值，雖然能適用過去的鋪面設計，但對於現在的鋪面設計卻不一定適用，甚至有些參數會因為本身的錯誤而使軟體無法分析，必須重新輸入符合參數範圍之新值。舉例來說，過去的鋪面設計也許能使用小於 25.4 公釐的縱縫筋，但在 DG2002 的程式中，縱縫筋的直徑要介於 25.4 至 44.45 公釐的範圍，若小於 25.4 公釐則必須以最小值 25.4 公釐來輸入，這樣程式才能繼續往下執行。另外，有的路段還會缺少所需輸入的參數資料，因此要利用 LTPP 提供的對照表以查表方式求得，如土壤分類指數，可依據材料種類將土壤分級。種種原因，使得在處理資料時要很小心，避免因找錯資料，而影響分析結果。此外，軟體中有某些參數在資料庫裡並沒有收錄，因此需採用程式給的設定值，亦可能影響其分析結果。鋪面層數較少時電腦分析時間也會較短，不包含資料輸入的時間，平均一個剛性鋪面試驗路段要 10 分鐘左右之分析時間，分析路段多時則相當不便。

五、構建績效預測模式

5.1 相關參數之選取與分析

選取構建模式之參數時，可參考過去文獻所提供之變數，接著將影響較不明顯、資料庫中資料不足的變數排除，例如車道加寬的資料很少，無法用於預測模式構建中。本研究初步選取之變數分別為鋪面齡期、年平均交通量、累積交通量、橫向接縫間距、路基反力模數、混凝土

版厚度、縱縫筋直徑、縱縫筋與混凝土間允許的支承應力、底層型式、土壤分類、排水、邊緣支撐、降雨量、冰凍指數、年平均溫差、超過32°C的天數、和凍融循環次數等。在進行迴歸分析前，可利用 S-Plus 的單變數分析、雙變數相關性分析、並矩陣圖方式將可能影響高差的相關參數呈現出來，除可初步看出哪些因子會影響裂縫破壞，並可檢視參數資料是否有無異常。

5.2 線性迴歸結果分析

在構建模式的過程中，變數的選擇固然重要，但資料顯示的物理意義與一般鋪面反應是否和預期相符更重要，本研究將篩選出的變數，利用統計軟體 S-Plus 進行線性迴歸分析，探討各參數對於橫向裂縫的相關性與影響，以統計方法配合鋪面專業知識判斷其對於模式之適用性。線性迴歸的初步結果顯示年平均交通量、累積交通量、橫向接縫間距、冰凍指數、邊緣支撐、排水、和年平均溫差為顯著影響高差之參數(P 值大於 0.05)。此外，有些參數之影響與預期之反應不同，例如混凝土厚度越大，結果卻顯示高差破壞越大，而縱縫筋與混凝土間允許的支承應力越大，結果卻顯示高差破壞越小，因此其適用性尚需更進一步之評估。研究中亦曾考慮鋪面型態與縱縫筋之影響，將資料分為含縱縫筋、不含縱縫筋、JPCP 和 JRCP 等四種狀況，再分別分析。雖然結果有較高的判定係數，但是有些變數的物理意義與一般預期反應相反，許多一般公認的重要因子如交通量、橫向接縫間距、和冰凍指數等均無法顯著影響高差之預測結果[4]。

5.3 含縱縫筋與不含縱縫筋高差預測模式之構建

本研究亦採用資料探索分析的方式來觀察資料分佈之情形，並且以單變量常態性檢定現地高差值是否近似常態分配，檢定結果 W 統計量為 0.7668，P 值為 0，因此可知資料分佈情形不是常態分配，所以並不適用一般簡單線性迴歸分析。因此，在不假設應變數為任何誤差分佈情形下，本研究採用概似估計法與泊松分配，配合廣義線性模式(GLM)與廣義相加模式(GAM)的迴歸分析方式，並配合 Box-Cox 次冪轉換法、視覺圖的技術、與系統化之統計與工程分析流程來構建預測模式。研究中利用 GAM 迴歸配合資料平滑的技術，反映各變數一般之趨勢而不需假設相關的函數型式，以推估最佳預測的某種解釋變數之函數。若當 Box-Cox 次冪轉換法之參數最大值落於 0 則對此變數取對數進行轉換，若落於-2 與+2 間則對變數取其對應之次冪轉換。

本研究在此將高差預測模式分為含縱縫筋及不含縱縫筋兩種，初步建議之模式如公式 8 與公式 9 所示，其預測結果與現地高差之關係如圖 7 與圖 8 所示。式中，age 為鋪面齡期(年)、kesalpyr 為年平均交通量(千)、bstress 為縱縫筋與混凝土間允許的支承應力(MPa)、precip 為降雨量(mm)、basetype 為底層型式(1 為處理底層，0 為顆粒狀底層)、stypc 為土壤分類(1 為粗顆粒，0 為細顆粒)、trange 為年平均溫差(°C)、jtspace 為橫向接縫間距(m)、kstatic 為路基反力模數(MPa/m)、和 fi 為凍融循環次數。

$$\begin{aligned}
 \text{FaultD} = \exp[& 1.98 + 0.84 * \sqrt{\text{age}} - 6.09 * \frac{1}{\sqrt{\text{kesalpyr}}} - 1.9 * \frac{1}{\sqrt{\text{bstress}}} \\
 & + 0.05 * \sqrt{\text{precip}} - 0.51 * \text{basetype} - 0.33 * \text{stypc} - 22.35 * \frac{1}{\text{trange}}] \quad (8)
 \end{aligned}$$

Statistics: N = 205, R² = 0.6039, SEE = 0.9122

$$\begin{aligned}
 \text{FaultND} = & \exp\left[1.77 - 3.13 * \frac{1}{\sqrt{\text{age}}} + 0.01 * \sqrt{\text{kesalpyr}} - 8.27 * \frac{1}{\text{jtspace}} \right. \\
 & \left. + 0.0004 * \text{precip} + 5.53 * \frac{1}{\sqrt{\text{kstatic}}} - 0.47 * \text{basetype} + 0.01 * \text{fl}\right] \quad (9)
 \end{aligned}$$

Statistics: N = 241, R² = 0.2127, SEE = 1.781

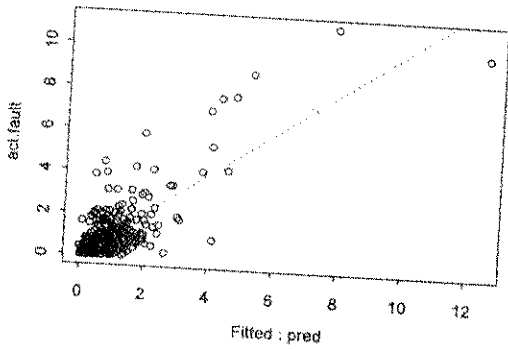


圖 7 含縱縫高差模式之預測結果

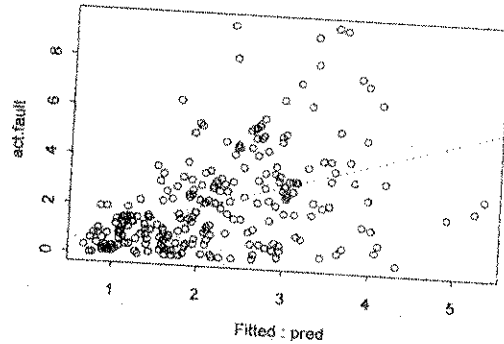


圖 8 不含縱縫高差模式之預測結果

5.4 預測模式之敏感度分析

為瞭解各因子對前述高差預測模式之影響，茲將鋪面齡期、年平均交通量、和年平均降雨量三個參數的敏感度分析結果展示於圖 9 與圖 10。圖中主要變數資料範圍取資料庫中之最小值到最大值，其他參數則取其平均數。當其他參數取平均後，鋪面齡期對高差有很大的影響，而降雨量和交通量則影響較小。若站在降雨量和交通量的角度時，可發現兩參數對高差皆成正向關係，當降雨量小時交通量對高差影響較大，反之則交通量對高差影響較小。

六、結論與建議

在現有模式預測結果中，發現過去之預測模式與 LTPP 資料庫的現地調查高差值有明顯之差異，尤其是不含縱縫筋之預測模式差異更大。進行模式構建時，由於資料呈現非常態分配情形，無法以一般線性迴歸方式進行分析，故本研究以廣義線性模式進行模式構建。研究中雖然發現許多影響高差破壞之因子，但是在模式構建時，有些許的參數卻沒有顯著影響，如邊緣支撐、排水，這可能是沒考慮參數間的相互影響，此部分可能為造成模式構建之困難。此外，不含縱縫筋模式較難構建，本研究在含縱縫筋模式中加入力學參數，雖然此參數不是非常有效，但尚符合統計假設檢定的要求。

七、誌謝

本研究承蒙行政院國科會專題研究計畫經費補助(編號 NSC94-2211-E-032-014 與 NSC95-2211-E-032-061)，特此誌謝。

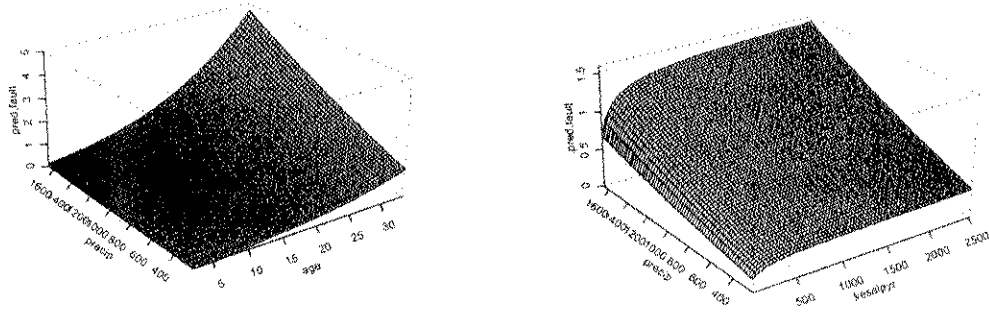


圖 9 含縱縫筋高差模式之敏感度分析

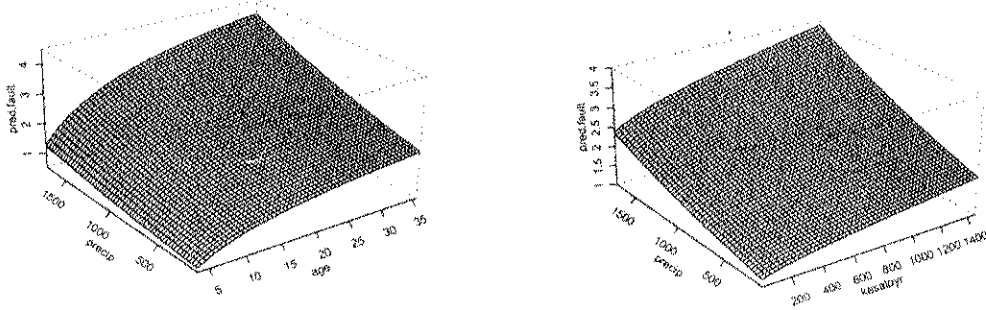


圖 10 不含縱縫筋高差模式之敏感度分析

八、參考文獻

- [1] Simpson, A.L., Rauhut, J.B., Jordahl, P.R., Owusu-Antwi, E., Darter, M.I., Ahmad, R., Pendleton, O.J., and Lee, Y.H., Early Analyses of LTPP General Pavement Studies Data, Volume 3-Sensitivity Analyses for Selected Pavement Distresses, Contract No. P-020, Report No. SHRP-P-393, Strategic Highway Research Program, Washington, D.C. (1993).
- [2] AASHTO, *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. (1998).
- [3] ARA, Inc. ERES Consultants Division. "Guide for Mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures," NCHRP 1-37A Report, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. (2004).
- [4] 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)。
- [5] FHWA, Improved Prediction Models for PCC Pavement Performance-Related Specifications, Volume I: Final Report, Publication No. FHWA-RD-00-130 (2000).
- [6] Khazanovich, L., Darter, M.I., and Yu, H.T., "Mechanistic-Empirical Model to Predict Transverse Joint Faulting," *Transportation Research Record 1896*, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp.34-45, 2004.