

二、文獻回顧

LTPP計畫

- ◆ LTPP計畫於1985年開始規劃，主要蒐集北美洲現場鋪面二十年績效資料。
- ◆ LTPP的資料自1997年以來即以DataPave軟體光碟免費提供世界各國鋪面研究人員使用。
 - DataPave 3.0版
 - DataPave Online 線上資料庫
- ◆ 計畫分為
 - 一般鋪面研究(GPS)
 - GPS-1：底層為顆粒土壤之瀝青混凝土
 - GPS-2：經底層處理之瀝青混凝土
 - 特殊鋪面研究(SPS)
 - 季節性監測計畫(SMP)

7

模式發展背景

- ◆ 鋪面績效相關研究在1940到1960年代，美國公路研究局即進行Maryland Road Test、WASHO Road Test、AASHTO Road Test等大型的的道路試驗。
- ◆ 1958-1960年間在伊利諾州進行道路試驗AASHTO Road Test即為有史以來**構建純經驗的鋪面績效方式所做的最大型現地試驗**。依據此道路試驗的研究結果，推出鋪面結構設計準則。
- ◆ 經驗式最大的缺點在於只考慮了環境、材料、載重此些因素，無法全然反應**交通變化及材料發展**，故1962年於密西根大學舉辦的瀝青鋪面結構設計第一次國際會議後，鋪面設計漸漸從傳統的經驗式轉移到力學設計方法。

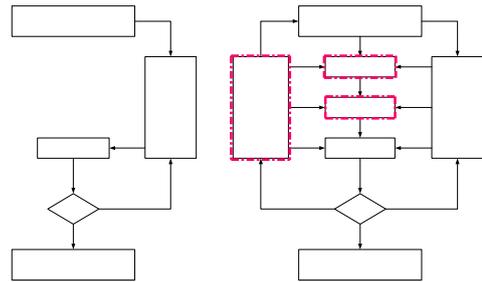
8

模式分析方法

- ◆ 分析柔性鋪面之破壞行為有兩個基本方法：
 - 方法一**
 - 利用統計方式找出鋪面條件，如材料性質、荷重、環境因素與破壞行為之間的相關性。
 - 純經驗法只考慮到環境因素、材料性質及交通荷重條件的影響。
 - 方法二**
 - 將**鋪面破壞力學行為與鋪面反應的變化**合併考量。
 - 此方法主要建立在以現存鋪面與改善設計可靠度之力學觀念下。

9

模式構建流程



10

現有預測模式

- ◆ SHRP P-020以純經驗法為主，針對柔性鋪面之**車轍、橫向裂縫、及糙度變化**三種破壞發展出一系列之績效預測模式。其應用LTPP資料庫中最初五年所蒐集之資料來構建模式，於報告書中顯示模式預測能力不錯。
- ◆ Ali、Tayabji、Torre等人亦利用LTPP績效資料庫對美國瀝青協會與殼牌石油公司發展之預測模式評估其適用性。報告結果顯示模式預測結果並不能非常準確的預估現地車轍值。

11

AASHTO 2002 新設計理念

- ◆ 2002年推出**鋪面結構設計暫行手冊**，對鋪面維修方法有更詳細的考量
- ◆ 以**力學-經驗法**為主要設計理念
- ◆ 以**軸重分佈頻譜(axle load spectra)**取代傳統ESAL計算方式，作為鋪面設計與分析之評估條件
- ◆ 其設計流程比一般流程更為繁雜（例：鋪面溫度資料）。



三、資料擷取與處理

所需參數資料

- ◆ 本研究相關資料：
 - ◆ 一般基本
 - ◆ 鋪面材料
 - ◆ 交通調查
 - ◆ 氣候環境
 - ◆ 現地破壞
 - ◆ 養護維修
 - ◆ BISAR程式所需相關資料
- ◆ 現有預測模式：10~15項
- ◆ DG2002程式：45~50項

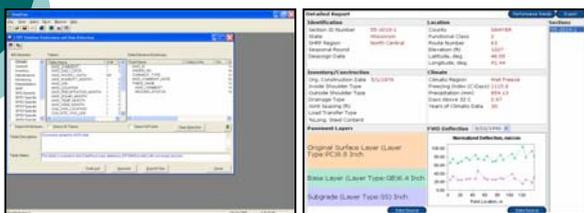
13

多層彈性理論-BISAR程式

- ◆ 一般柔性鋪面以多層彈性理論為設計理念。早期（1885年）將鋪面結構視為一均質半無限空間，於1943年發展出雙層系統的解，進而延伸至三層、多層系統。
- ◆ 多層彈性理論主要是將路面材料視為線彈性材料，並利用積分轉換程序來計算路面在輪荷重下之應力與應變。
- ◆ 本研究以鋪面軟體BISAR程式求取
 - 瀝青面層底部之水平拉應變
 - 路基土壤頂部之垂直壓應變

14

DataPave 程式



DataPave 3.0版

DataPave Online

15

Microsoft Access



將DataPave程式所擷取匯出之Access之檔案格式，利用Microsoft Access程式進行資料處理，預測模式之關聯性資料庫

15

四、研究成果

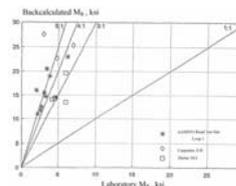
試驗室與回算彈性模數之探討

- ◆ 以往求得鋪面的結構強度，以鑽心取樣方式，但易對鋪面結構造成破壞。近年來以非破壞性試驗並使用回算方式求得E值。
- ◆ 針對LTPP資料庫中試驗室與動態回算結果之彈性模數，擷取相關資料進行繪圖驗證與比較。
- ◆ 探討試驗室、回算及土壤分類指數等三種方式所得結果。

17

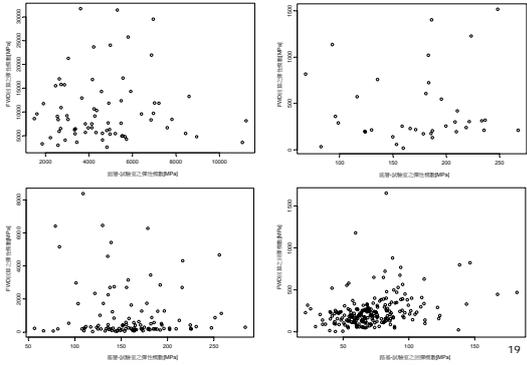
過去研究結果

- ◆ 除了建議路基回彈模數 M_R 值需折減，其他層數均沒有。
- ◆ 由AASHTO道路試驗與過去研究所得之路基回彈模數，回算結果與試驗室結果有所差異。
- ◆ AASHTO建議 M_R 值係數折減值 $C=0.33$ 。



18

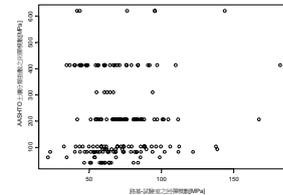
各層E值比較-試驗室 V.S. 回算



路基M_R值比較-試驗室 V.S. 土壤分類指數

- ◆ AASHTO設計手冊建議根據標準土壤試驗，如CBR值和其他工程性質的相互關係，經由下式轉換，求得路基回彈模數。
 $M_R = 1500(CBR)$

- ◆ 試驗室與AASHTO土壤分類指數比較如下圖。



分析結論

- ◆ 回算與試驗室E值比較結果
面層：2.6倍 底層：2.7倍
基層：7.3倍 路基：3.4倍
- ◆ 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結果均較高，可能因使用動態撓度值配合靜態理論為基礎之程式所求得彈性模數所造成。



車轍績效預測模式

- 純經驗法(P-020)
 $RutDepth = N^B 10^C$
 $B = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n$
 $C = c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n$

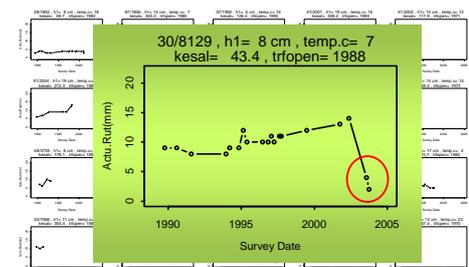
- 力學-經驗法
重複載重次數
 $N_d = k_4 (\epsilon_c)^{-k_5}$
破壞比值(Damage Ratio)
 $D_d = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_{di}} \leq 1.0$

疲勞裂縫績效預測模式

- 力學-經驗法
重複載重次數
 $N_f = k_1 (\epsilon_s)^{-k_2} |E|^{-k_3}$
破壞比值(Damage Ratio)
 $D_f = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_{fi}} \leq 1.0$
預測模式
 $\%FatigueCracking = \frac{0.021}{0.027 + e^{[-0.85^* D_f]}}$

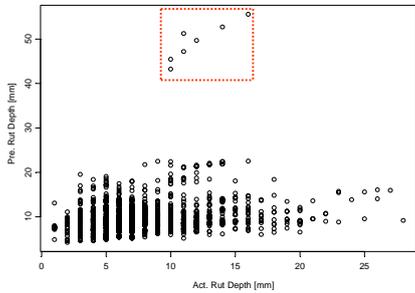
分析流程--資料初步分析

- ◆ 針對原始鋪面資料進行模式預測，需再次確保資料的正確性。



分析流程--預測模式結果

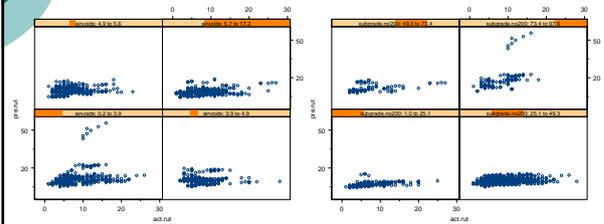
資料點：222路段，1172筆



分析流程--初步探討

空氣含量

路基土壤通過200號篩百分率

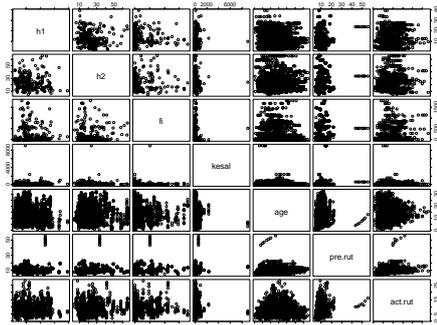


分析流程--初步探討結果

- ◆ 此7筆資料為同一路段調查值，瀝青面層的**空氣含量**大多介於3~9%之間，只有此路段為**0.2%**為極小值。
- ◆ 其他參數如路基土壤通過200號篩百分率、交通量等皆比一般資料為大。
- ◆ 將參數數值代入模式計算後，使得預測車轍深度**高達5公分**。
- ◆ 為了避免此一路段影響後續參數分析，因此將不合理的資料點排除。

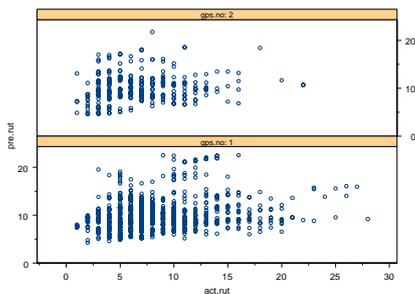
分析流程--相關影響因子

觀察變數間之相關性



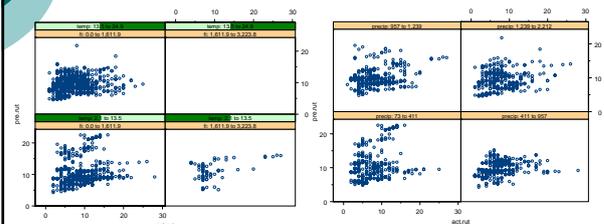
分析流程--模式參數分析

鋪面型態—GPS-2破壞比GPS-1少



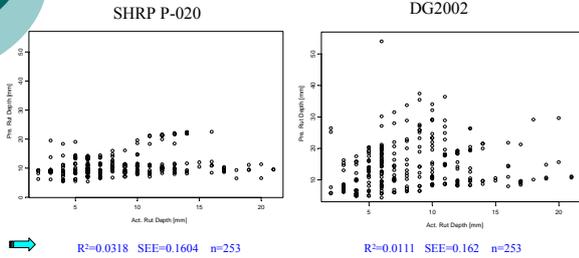
分析流程--模式參數分析(續)

冰凍指數與氣溫—氣溫較低、FI較高，現地破壞較小
 降雨量—降雨量較低時，現地破壞較小



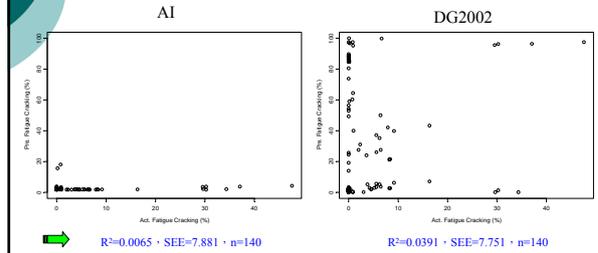
車轍模式與DG2002結果比較

SHRP P-020 與 DG2002
資料點：43路段，253筆



疲勞裂縫模式與DG2002結果比較 (續)

AI 與 DG2002
資料點：30路段，139筆



兩模式線性迴歸結果

◆車轍

	R ²	SEE	截距	斜率	P值	n
DG2002	0.0111	0.1621	0.3094	0.0567	0.0944	253
P-020	0.0318	0.1604	0.2621	0.1876	0.0044	253

◆疲勞裂縫

	R ²	SEE	截距	斜率	P值	n
DG2002	0.0391	7.751	1.990	0.0441	0.0192	140
AI	0.0065	7.881	2.3443	0.3467	0.3447	140

結論：現有模式與DG2002程式其預測結果皆不佳



車轍預測模式之建立

選取參數

◆ 參考AI、SHRP P-020與DG2002等模式，將各模式中影響較不明顯、資料庫中不易取得及資料不足的變數不列入考慮外，進而選取對於破壞產生影響較明顯及一般易造成破壞的因素。

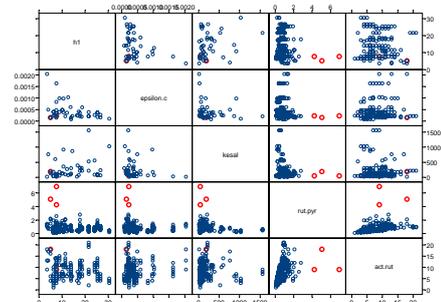
◆ 選取變數：

1. 鋪面使用年限(age)
2. 累積交通量(cesal)
3. 年平均交通量(kesal)
4. 面層厚度(h1)
5. 底層厚度(h2)
6. 路基回彈模數(e4)
7. 瀝青黏滯度(visco)
8. 冰凍指數(fi)
9. 年平均溫度(temp)
10. 路基頂部壓應變(epsilon.c)
11. 降雨量(precip)

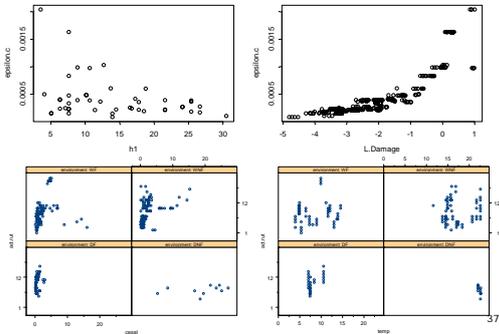
相關影響因子



參數分析 (續1)



參數分析(續2)



全區線性迴歸結果

Coefficients:	Value	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	13.4420	2.7023	4.9743	0.0000
age	0.0191	0.0574	0.3333	0.7392
cesal	0.8254	0.2251	3.2357	0.0014
kesal	-0.0127	0.0042	-3.0422	0.0026
h1	0.1385	0.0418	3.3162	0.0010
h2	0.0579	0.0193	3.0103	0.0029
e4	-0.0176	0.0103	-1.7189	0.0869
visco	0.0007	0.0007	0.9741	0.3310
fi	-0.0052	0.0011	-4.8267	0.0000
temp	-0.3344	0.0802	-4.1722	0.0000
L.Damage	0.1480	0.4436	0.3337	0.7389
epsilon.c	-504.9709	1264.4381	-0.3994	0.6900
precip	-0.0019	0.0009	-2.1050	0.0363

Residual standard error: 3.493 on 252 degrees of freedom
 Multiple R-Squared: 0.2245
 F-statistic: 6.08 on 12 and 252 degrees of freedom, the p-value is 2.388e-009

分區線性迴歸結果

變數 \ 分區	未分區	潮濕 冰凍	潮濕 不冰凍	潮濕	乾燥	冰凍	不冰凍
鋪面使用年限	---	正	---	正	---	正	---
累積交通量	正	---	正	正	---	---	---
年平均交通量	負*	---	負*	負*	負*	---	---
面層厚度	正*	正*	正*	正*	---	正*	正*
底層厚度	正*	正*	正*	正*	正*	正*	正*
路基回彈模數	---	---	---	負	負	---	---
避寒粘滯度	---	負	正*	正*	正*	負	正*
冰凍指數	負	---	---	負	負	---	---
年平均溫度	負*	---	負*	---	負*	---	---
破壞百分率	---	---	---	負*	正	正	---
壓應變	---	---	正	正	---	負*	正
降雨量	負*	---	負*	負*	---	---	---
資料筆數n	265	80	114	194	71	141	124
判定係數R²	0.2245	0.705	0.659	0.427	0.784	0.673	0.337

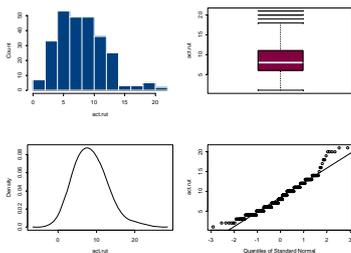
---: 較無顯著差異 正: 正相關 負: 負相關 *: 與預期成反比

廣義線性模型與單變量常態性檢定W

- 進行統計分析時，常需要假設資料服從某一機率分配的要求，由於絕大部分分析方式都是建立於常態分配的假設前提下，所以最常見的假設皆要求資料服從常態分配。
- 對於常態的假設，不論是單變量或是多變量的統計方法均甚為重要，Shapiro與Wilk提出的單變量常態性檢定W可檢定資料分配情形。
- 當資料非呈現常態分配時，理論上無法利用一般線性迴歸模式來分析這類型的資料。
- 廣義線性模型(GLM)不在侷限資料非常態型式，其假設條件較一般的迴歸模式來的寬鬆，如反應變數(Y)不再需要服從常態分配。

資料探索分析-車轍深度值

- 利用單變量常態性檢定W
- 檢定結果W統計量=0.9541、p值=0 →非常態分配



全區初步構建結果

- 應用GLM分析後，模式之判定係數R²為0.1235，殘餘標準差SEE為3.635，資料筆數n為265筆。
- 雖然判定係數比AI及DG2002的高，但是分析顯示某些參數對於車轍深度影響之趨勢與預期結果相反，如冰凍指數、年平均溫度、路基頂部之壓應變、降雨量。
- 本研究利用廣義累加模式(GAM)與Box and Cox Transformation轉換法進行分析。

全區模式 (續1)

$$\ln(Rut) = -1.106 + 0.142 * \sqrt{age} + 0.322 * \log(kesal) + 0.363 * \log(1 + fi) + 1.277 * \log(temp) + 0.078 * (\epsilonpsilon.c * 1000)^2$$

Statistics : R²=0.179 , SEE=1.209 , n=265

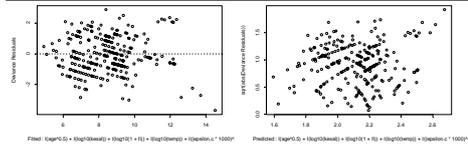
公式移項後：

$$Rut = \exp[-1.106 + 0.142 * \sqrt{age} + 0.322 * \log(kesal) + 0.363 * \log(1 + fi) + 1.277 * \log(temp) + 0.078 * (\epsilonpsilon.c * 1000)^2]$$

Statistics : R²=0.1702 , SEE=3.537 , n=265

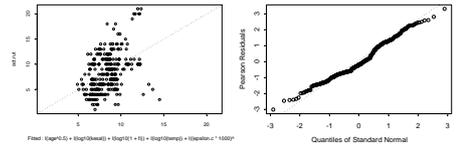
其中, age為鋪面使用年限(年), kesal為年平均交通量(千), fi為冰凍指數(degree-days), temp為年平均溫度(°C), epsilon.c為路基頂部之壓應變。

全區模式預測結果 (續2)



Fitted: $\ln(Rut) = -1.106 + 0.142 * \sqrt{age} + 0.322 * \log(kesal) + 0.363 * \log(1 + fi) + 1.277 * \log(temp) + 0.078 * (\epsilonpsilon.c * 1000)^2$

Predicted: $\ln(Rut) = -1.106 + 0.142 * \sqrt{age} + 0.322 * \log(kesal) + 0.363 * \log(1 + fi) + 1.277 * \log(temp) + 0.078 * (\epsilonpsilon.c * 1000)^2$



Fitted: $\ln(Rut) = -1.106 + 0.142 * \sqrt{age} + 0.322 * \log(kesal) + 0.363 * \log(1 + fi) + 1.277 * \log(temp) + 0.078 * (\epsilonpsilon.c * 1000)^2$

R²=0.1702 SEE=3.537 n=265

分區模式

- ◆ 依氣候條件分為四區, 由於乾燥與冰凍兩個區域的資料點較少, 無法以客觀的立場建構模式, 因此只針對潮濕與不冰凍兩區進行預測模式之建構。

潮濕地區

$$(Rut)_{wet} = \exp[-1.279 + 0.237 * \sqrt{age} + 0.598 * \log(kesal) + 0.192 * \log(1 + fi) + 0.753 * \log(temp) + 0.285 * (\epsilonpsilon.c * 1000)^2]$$

Statistics : R²=0.337 , SEE=3.403 , n=194

不冰凍地區

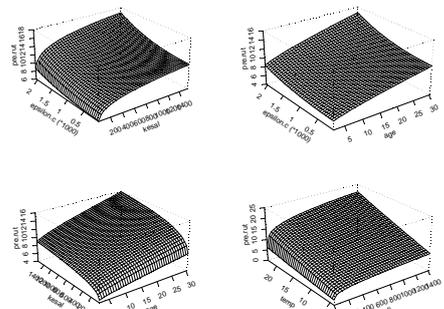
$$(Rut)_{nonfrozen} = \exp[0.319 + 0.062 * \sqrt{age} + 0.488 * \log(kesal) + 0.173 * \log(1 + fi) + 0.169 * \log(temp) + 0.236 * (\epsilonpsilon.c * 1000)^2]$$

Statistics : R²=0.281 , SEE=3.194 , n=124

模式敏感度分析

- ◆ 敏感度分析主要是用於主變量與因變量之分析, 在固定一個或幾個主變量的不同水準下, 分析其他因變量變化的情況。
- ◆ 由現有模式中發現, **壓應變、年平均交通量、鋪面使用年限**三個變數對於鋪面的影響較大, 其三者相互關係展現於圖中。

模式敏感度分析-全區



敏感度分析結果-全區

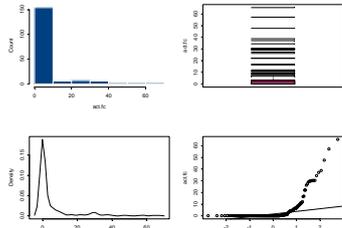
- ◆ 由圖觀察得知：
 - 年平均交通量-壓應變：壓應變的影響較明顯
 - 鋪面使用年限-壓應變：壓應變的影響性則較小
 - 鋪面使用年限對鋪面的影響較大
 - 年平均交通量-鋪面使用年限：年平均交通量小且鋪面使用年限較短時, 產生車轍深度亦較少。當兩者皆增加時, 對鋪面的影響性亦較大。
- ◆ 由此可知, 平均交通量與鋪面使用年限在全區對鋪面的影響比較明顯。



疲勞裂縫預測模式之建立

資料探索分析-疲勞裂縫值

- ◆ 利用單變量常態性檢定W
- ◆ 檢定結果W統計量=0.4841、p值=0 → 非常態分配



全區模式初步構建結果

全區模式

$$\ln(FC) = -7.455 + 0.121 * age + 0.00168 * kesal + 0.00269 * precip + 0.0473 * temp + 12319.5 * epsilon.t + 0.0133 * ft$$

Statistics : R²=0.447, SEE=2.882, n=176

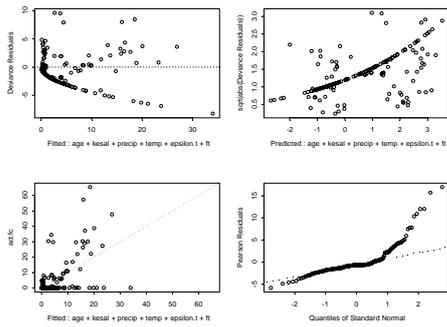
經轉換後之模式：

$$FC = \exp \left[-7.455 + 0.121 * age + 0.00168 * kesal + 0.00269 * precip + 0.0473 * temp + 12319.5 * epsilon.t + 0.0133 * ft \right]$$

Statistics : R²=0.3352, SEE=8.741, n=176

其中，age為鋪面使用年限(年)，kesal為年平均交通量(千)，precip為降雨量(mm)、temp為年平均溫度(°C)、epsilon.t為面層底部之水平拉應變、ft為凍融指數(cycle)。

全區模式初步預測結果 (續1)



全區模式

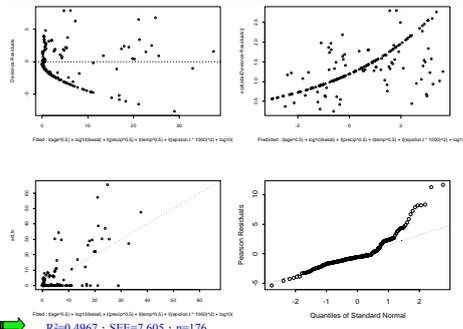
- ◆ 利用廣義累加模式(GAM)與Box and Cox Transformation轉換法進行分析。

經過轉換後疲勞裂縫績效預測模式如下：

$$FC = \exp \left[-18.08 + 0.943 * \sqrt{age} + 0.832 * \log(kesal) + 0.121 * \sqrt{precip} + 0.869 * \sqrt{temp} + 31.489 * (epsilon.t * 1000)^2 + 3.242 * \log(ft) \right]$$

Statistics : R²=0.4967, SEE=7.605, n=176

全區模式預測結果 (續)



R²=0.4967, SEE=7.605, n=176

分區模式結果

變數	第一次結果				第二次結果	
	潮濕 (wet)	乾燥 (dry)	冰凍 (freeze)	不冰凍 (non-freeze)	乾燥 (dry)	冰凍 (freeze)
鋪面使用年限	正	正	負*	正	正	刪除
年平均交通量	正	負*	負*	正	刪除	刪除
降雨量	正	正	正	正	正	正
年平均溫度	正	正	正	正	正	刪除
拉應變	正	---	正	正	正	正
凍融指數	正	正	負*	正	正	刪除
黏滯度						負
溫度間距						正

---: 較無顯著差異 正: 正相關 負: 負相關 *: 與預期成反比

分區模式

- ◆ 依氣候條件分為四區進行預測模式之建構。

潮濕地區

$$(FC)_{wet} = \exp \left[\begin{aligned} & -6.539 + 0.078 * age + 0.00187 * kesal + 0.000673 * precip \\ & + 0.0914 * temp + 15097 * epsilon_t + 0.0272 * ft \end{aligned} \right]$$

Statistics : R²=0.452 , SEE=3.137 , n=123

乾燥地區

$$(FC)_{dry} = \exp \left[\begin{aligned} & -48.411 + 0.119 * age + 0.025 * precip + 1.774 * temp \\ & + 2729 * epsilon_t + 0.0272 * ft \end{aligned} \right]$$

Statistics : R²=0.421 , SEE=1.117 , n=53

模式構建-分區模式

冰凍地區

$$(FC)_{freeze} = \exp[-5.944 + 0.00583 * precip + 41.768 * epsilon_t - 0.002 * visco + 0.4 * temp.range]$$

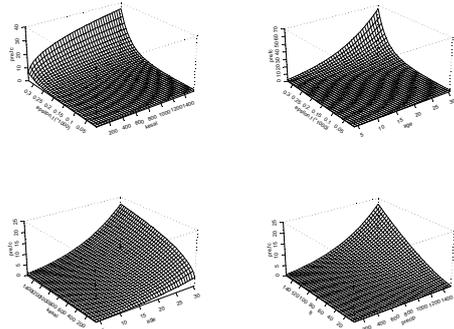
Statistics : R²=0.498 , SEE=1.624 , n=86

不冰凍地區

$$(FC)_{nonfreeze} = \exp[-7.87 + 0.102 * age + 0.00219 * kesal + 0.00102 * precip + 0.0472 * temp + 15172 * epsilon_t + 0.0476 * ft]$$

Statistics : R²=0.577 , SEE=2.99 , n=90

模式敏感度分析-全區



敏感度分析結果-全區

- ◆ 由圖觀察得知：
 - 年平均交通量-壓應變：拉應變的影響較明顯
 - 鋪面使用年限-壓應變：拉應變的影響性則較小
鋪面使用年限對鋪面的影響較大
 - 年平均交通量-鋪面使用年限：當年平均交通量小，鋪面使用年限增加，疲勞裂縫增加的趨勢較小。反之兩者皆增加時，則疲勞裂縫一定增加。



五、結論與建議

結論

- LTPP資料庫
 - 面層彈性模數試驗之路段數非常少
 - 參數欄位資料為空值，研究配合其他相關欄位填補缺值。
- LTPP計畫應用MODCOMP4程式進行回算，研究結果顯示程式回算結果較試驗室之彈性模數為高，可能因使用動態撓度值配合靜態理論為基礎所造成。
- 將現有預測模式進行評估與驗證後，預測結果有明顯之差異性，顯示**現有績效預測模式並不適用LTPP績效資料庫**。針對參數進行分析時，有些參數對鋪面之影響性並不明顯，此現象成為後續模式構建之困難處。

結論(續)

- AASHTO 2002以**力學-經驗法**為主要理念，但所需使用參數繁多較不易使用，其預測模式與現有模式比較後亦無良好之結果。
- 於模式構建過程中，由於相關因子於參數分析顯示出結果與一般鋪面反應不相符合，因此本研究將車轍及疲勞裂縫兩種模式除了構建全區模式外，亦將資料依氣候狀態分區進行分析。
- 以力學-經驗法為模式構建主要理念。對車轍與疲勞裂縫預測模式中，構建全區模式外亦依**氣候條件**分區，建構之模式比過去現有模式相較下，有得到改善。

結論(續)

- **車轍**模式主要影響變數
 - 鋪面結構：路基頂部之壓應變
 - 交通因子：鋪面使用年限、年平均交通量
 - 環境氣候：年平均溫度、冰凍指數
- **疲勞裂縫**模式主要影響變數
 - 鋪面結構：面層底部之拉應變
 - 交通因子：鋪面使用年限、年平均交通量
 - 環境因子：年平均溫度、年平均降雨量、凍融指數
- 應用統計方法進行模式構建時以**廣義線性模式**進行模式分析，並將構建完成之預測模式檢定其適合度及針對相關的參數進行敏感度分析。

61

建議

- 在資料擷取與處理過程複雜，且有些許參數於欄位中並無紀錄調查值，亦可配合其他相關變數以查圖表的方式彌補缺值的地方，使用者在此部分需特別注意。
- 過去研究中對於預測模式的構建流程均無詳細記錄，本研究詳細紀錄模式構建流程，並透過模式初步分析方式判別及刪除較無影響性的變數，再進一步對變數進行敏感度分析，可供後續研究參考及模式發展之依據。
- 對於疲勞裂縫模式構建的部分，後續研究可再次針對乾燥及冰凍兩區進行預測模式之建立。

62

建議(續)

- 可針對本研究所提供之模式做進一步之改善，未來亦可配合資料庫驗證模式之適用性。
- 本研究現有預測模式配合國外資料庫使用，但國外環境與我國有諸多不同，因此研究所建立之相關績效預測模式勢必與本土有一定程度上的差異。因此可以考慮建立專屬於台灣地區的鋪面資料庫，並逐步發展出本土化的預測模式。

63

報告完畢

敬請指教

