

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

提升產業技術及人才培育研究計畫－機場鋪面強度評估自動化分析程式之建立與應用

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 96-2622-E-032-006-CC3

執行期間：九十六年十一月一日至九十七年十月三十一日

計畫主持人：李英豪

共同主持人：葛湘璋

計畫參與人員：劉耀斌、林鉅幃、李彥志、黃思齊、莊侃諾、  
黃自強、李家瑋、林世泰

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

合作廠商：杜風工程顧問有限公司

中華民國九十八年一月三十一日

## 摘要

國際民航組織(International Civil Aviation Organization, ICAO)所公佈之航機分類指數與鋪面分類指數(ACN/PCN)方法已成為世界各國表示機場鋪面強度之通用標準。本研究將首先介紹該法之定義、瞭解其特性、可能之應用範圍、以及現有利用非破壞撓度檢測方法來計算 ACN/PCN 數值時可能產生之問題。雖然，在美國 FAA 的 AC 150/5370-11A 手冊中明確地建議，工程師再選定一個評估與設計之輸入參數時，必須同時考量平均數與標準差。很多現有的鋪面評估與設計流程仍舊僅考慮採用平均數於分析過程中。

在 FAA 規範建議中亦指出假設資料為常態分配時，可以利用「平均值減去一個標準差」(或者為一般所謂的 85%信賴水準)做為選定一個較為保守之輸入參數，以做為後續評估與設計之依據(AC 150/5320-6)。然而，本研究發現國內外工程應用時，仍舊缺乏抽樣與統計區間估計方法應用之觀念，工程師亦常常分不清楚母體與樣本之差異。FAA 所建議之分析流程並非建立在可靠的統計原理上，尤其是當母體資料分佈常常是未知的情形。因此，本計畫將建議採用統計學中「機率分配」、「抽樣方法」、「信賴區間」以及「中央極限定理」等觀念，以及美國 ASTM 在 1998 年已採用之統計分析流程，並研擬一個可靠的設計與評估流程，以滿足一致性與可重覆性之基本要求。

本研究主要工作內容包括：(1)相關文獻蒐集與回顧；(2)機場鋪面厚度設計程式之修正與應用；(3)鋪面回算程式之分析與應用；(4)現有機場鋪面評估方法之探討；(5)抽樣觀念與統計區間估計方法之應用；(6)ACN/PCN 計算流程之探討與修正；與(7)ACN/PCN 自動化計算程式之建立。本研究最後並將驗證研究成果的正確性與適用性，以期將此成果應用在未來鋪面分析與管理之工作上，使我國有限經費做最有效之利用。

關鍵字: 非破壞性檢測、ACN/PCN、鋪面評估、機場、剛性鋪面、回算。

## Abstract

The Aircraft Classification Number / Pavement Classification Number (AC/PCN) method has been adopted by the International Civil Aviation Organization (ICAO) as the standard for reporting the airfield pavement bearing strength. The objective of this study is to illustrate its definitions, characteristics, possible applications, and potential problems in arriving at a consistent and repeatable value based on the results of nondestructive testing. Although it has been clearly recommended that the engineer should simultaneously consider the mean and standard deviation in the selection of an evaluation or design input value, many evaluation and design procedures currently only use the mean value in the analysis (AC 150/5370-11A).

For a more conservative evaluation and design approach, the mean value minus one standard deviation (or the so-called 85% confidence level) may be used for obtaining evaluation or design inputs in general (AC 150/5320-6). Nevertheless, it was found that this proposed procedure is not based on sound statistical principles especially when its probability distribution function is probably unknown. Consequently, the concepts of random sampling, central limit theorem, and confidence intervals for hypothesis testing adopted by ASTM (1998) were proposed for establishing the evaluation or design inputs to derive a more consistent and repeatable PCN value in this study.

The major tasks include: (1) literature review of existing airport pavement evaluation techniques; (2) implementation and application of TKUAPAV airfield pavement design program; (3) reivew of the analysis and applications of existing pavement backcalculation programs; (4) investigation of existing airport pavement evaluation techniques; (5) application of the concepts of sampling and estimation of confidence intervals; (6) development of a proposed revision to the existing ACN/PCN calculation procedure; and (7) implementation of the proposed ACN/PCN procedure. The completion of this study will, hopefully, provide a sound basis for future pavement analysis and management activities so as to assure the best use of our limited resources.

Keywords: Nondestructive Testing, ACN/PCN, Pavement Evaluation, Airport, Rigid Pavements, Backcalculation.

# 目錄

摘要.....	II
ABSTRACT .....	III
目錄.....	IV
表目錄.....	VI
圖目錄.....	VII
第一章 緒論.....	1
1.1 研究緣起.....	1
1.2 研究內容與步驟.....	1
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 ACN/PCN 方法簡介.....	4
第三章 機場鋪面厚度設計程式之修正與應用.....	6
3.1 FAA 傳統機場剛性鋪面厚度設計法.....	6
3.2 LEDFAA 厚度設計程式.....	7
3.3 TKUAPAV 厚度設計程式簡介.....	8
3.4 FEDFAA 剛性鋪面設計程式簡介.....	10
3.5 各種因子對機場剛性鋪面厚度設計之影響.....	11
3.5.1 美國陸軍工兵團現地試驗資料再分析.....	11
3.5.2 疲勞破壞模式之修正.....	14
3.5.3 小結.....	16
3.6 三維有限元素之邊緣應力預測公式.....	16
3.7 機場鋪面厚度設計程式之修正.....	17
第四章 鋪面回算程式之分析與應用.....	19
4.1 鋪面系統之回算原理及限制.....	19
4.2 AASHTO 對現有柔性鋪面結構評估之回算方式.....	20
4.3 AASHTO 對現有剛性鋪面結構評估之回算方式.....	21
4.4 LTPP 柔性鋪面回算資料庫之結果分析.....	23
4.4.1 相關資料之擷取.....	23
4.4.2 柔性鋪面回算結果比較.....	25
4.5 LTPP 剛性鋪面回算資料庫之結果分析.....	28
4.6 路基回彈模數與路基反力模數之關係.....	31
4.7 鋪面回算程式之分析與應用建議.....	33
4.8 有限版尺寸對 LTPP 剛性鋪面回算之影響.....	34

4.8.1 AASHTO 建議之剛性鋪面回算流程.....	34
4.8.2 LTPP 剛性鋪面回算與有限版尺寸之考量.....	36
<b>第五章 ACN/PCN 計算流程之探討與修正.....</b>	<b>40</b>
5.1 現有機場鋪面評估方法之探討 .....	40
5.1.1 機場鋪面評估機制.....	40
5.1.2 ACN/PCN 分析程序說明.....	41
5.1.3 航機輪軸型式新編碼方式.....	46
5.1.4 現有機場鋪面評估方法之探討與建議.....	49
5.2 抽樣觀念與統計區間估計方法之應用 .....	49
5.3 ACN/PCN 計算流程之修正建議.....	51
5.4 案例分析 .....	54
<b>第六章 ACN/PCN 自動化計算程式之建立.....</b>	<b>58</b>
6.1 現行 ACP/PCN 計算流程範例說明 .....	58
6.2 ACN/PCN 自動化計算程式之建立 .....	59
<b>第七章 結論與建議.....</b>	<b>62</b>
<b>參考文獻.....</b>	<b>64</b>

## 表目錄

表 2-1 ACN/PCN 法之組成要素【6, 7】 .....	4
表 2-2 道基分類標準【6, 7】 .....	4
表 3-1 FAA 剛性鋪面厚度設計方法比較 .....	10
表 3-2 美國陸軍工兵團現地試驗之相關資料 .....	12
表 3-3 試驗區域的平均氣候資料 .....	14
表 3-4 邊緣應力修正因子總表 .....	15
表 3-5 CO、CI、CF 與 <i>EDF</i> 的迴歸關係式 .....	16
表 4-1 DATAPAVE 各層編碼之對應表 .....	23
表 4-2 柔性鋪面路基回彈模數回算(AASHTO 法)與試驗值之比較 .....	27
表 5-1 P/TC 數值對應表 .....	43
表 5-2 FAA 落重式撓度試驗建議頻率【1】 .....	44
表 5-3 PCN 計算結果表【2, 3】 .....	46
表 5-4 各航機輪軸型式編號表 .....	48
表 5-5 不同分段方法評估彈性模數之結果 .....	50
表 5-6 預期之混合交通量 .....	54
表 5-7 關鍵機型評估結果表 .....	54
表 5-8 輪軸轉換因子表 .....	55
表 5-9 等額交通量評估結果表 .....	56
表 5-10 PCN 評估結果表 .....	57
表 6-1 機場剛性鋪面交通量資料範例 .....	58

## 圖目錄

圖 3-1 機場刚性鋪面設計各種種疲勞曲線之比較 .....	7
圖 3-2 LEDFAA 設計流程示意圖 .....	8
圖 3-3 TKUAPAV 程式應用之示意圖 .....	9
圖 3-4 FEDFAA 設計流程示意圖 .....	10
圖 3-5 擷取現地試驗區域附近氣候資料的示意圖 .....	13
圖 4-1 回算與試驗室路基回彈模數的比較【27】 .....	21
圖 4-2 LTPP 柔性鋪面面層彈性模數回算值與試驗值之比較 .....	25
圖 4-3 LTPP 柔性鋪面底層彈性模數回算值與試驗值之比較 .....	26
圖 4-4 LTPP 柔性鋪面基層彈性模數回算值與試驗值之比較 .....	26
圖 4-5 LTPP 柔性鋪面路基彈性模數回算值與試驗值之比較 .....	27
圖 4-6 LTPP 刚性鋪面面層彈性模數回算值與試驗值之比較(緊密液體) .....	28
圖 4-7 LTPP 刚性鋪面基層彈性模數回算值與試驗值之比較(緊密液體) .....	29
圖 4-8 LTPP 刚性鋪面路基反力模數回算值與試驗值之比較(緊密液體) .....	29
圖 4-9 LTPP 刚性鋪面面層彈性模數回算值與試驗值之比較(彈性固體) .....	30
圖 4-10 LTPP 刚性鋪面基層彈性模數回算值與試驗值之比較(彈性固體) .....	30
圖 4-11 LTPP 刚性鋪面路基回彈模數回算值與試驗值之比較(彈性固體) .....	31
圖 4-12 不同版厚下路基回彈模數與路基反力模數之關係【31】 .....	32
圖 4-13 回算之路基回彈模數與路基反力模數之比較 .....	33
圖 4-14 BAKFAA 回算程式之分析案例示意圖 .....	34
圖 4-15 未做有限版尺寸修正之回算結果比較(依版長區分) .....	37
圖 4-16 有限版尺寸修正後之回算結果比較(依版長區分) .....	38
圖 4-17 未做有限版尺寸修正之回算結果比較(依 $L/\ell$ 區分) .....	39
圖 4-18 有限版尺寸修正後之回算結果比較(依 $L/\ell$ 區分) .....	39
圖 5-1 落重式撓度儀檢測示意圖 .....	40
圖 5-2 利用 ISM 進行鋪面分區示意圖【1】 .....	41
圖 5-3 ACN/PCN 分析程序與計算流程圖 .....	42
圖 5-4 滑行道佈設示意圖 .....	43
圖 5-5 複合 K 值之轉換圖【32】 .....	44
圖 5-6 COMFAA 程式之分析示意圖 .....	45
圖 5-7 柔性鋪面 PCN 值決定示意圖【34】 .....	45
圖 5-8 輪軸編碼示意圖 .....	47
圖 5-9 輪軸代碼示意圖 .....	47
圖 5-10 回算結果不同分段結果評估示意圖 .....	49
圖 5-11 不同分段評估回算結果示意圖 .....	50
圖 5-12 樣本平均數之信賴區間示意圖【39, 40】 .....	52
圖 5-13 非破壞性檢測流程之建議修正圖 .....	53
圖 6-1 新增之 PCN 計算流程首頁 .....	61

圖 6-2 採用與 R805FAA 程式相同之輸入方式.....	61
圖 6-3 自動化 PCN 計算結果輸出圖例.....	61

# 第一章 緒論

## 1.1 研究緣起

國際民航組織(International Civil Aviation Organization, ICAO)於 1981 年所公佈之 ACN-PCN 方法已成為世界各國表示機場鋪面強度之通用標準。ICAO 將航機分類指數(Aircraft Classification Number, ACN)定義為在不同路基強度下，航機對機場鋪面所造成之相對影響值。而鋪面分類指數(Pavement Classification Number, PCN)則是指在不需任何起降限制條件下，機場鋪面所能提供之承載強度數值。根據 ICAO 之要求，各國際機場管理單位需將跑道之 PCN 值登錄於飛航公告(Aeronautical Information Publication, AIP)上，以便航空公司進一步評估該航線使用機型之參考。一般而言，當航機之 ACN 值大於機場鋪面之 PCN 值時，將不允許該航機在此機場起降，必要時需限制航機之重量後，才允許該航機在此機場起降。

由於非破壞性撓度檢測技術(Nondestructive Deflection Testing, NDT)擁有量測快速且不會破壞鋪面等優點，美國聯邦航空總署(Federal Aviation Administration, FAA)於 2004 年提出之 AC 150/5370-11A【1】亦將此一試驗方法納入其規範考量中。常用之方法為利用非破壞性檢測進行鋪面之現況評估，再藉由鋪面回算軟體來估算鋪面之結構強度以及計算其 PCN 值。FAA 並針對所量測而得之數據提出分析以及評估方法之建議。

近年來航空運輸發展快速，大眾對於航空運輸之需求日漸增大，因此飛機製造業者為應付高負載之航空旅客需求，相繼研發出運能更大、航程更遠之新一代飛機。如波音公司於 1997 年發展之 B777 客機，以及空中巴士公司所發展之 A380 客機，其大荷重以及特殊之輪軸型式，使得舊有機場跑道承載能力受到極大的考驗。並且隨著政府可能於未來開放與大陸三通，估計未來國內各機場之交通量將大幅增加。然而舊有鋪面是否需要升級？如何針對現有跑道進行評估？其評估之依據以及代表值為何？等問題都是機場單位迫切需要得知之問題。有鑑於此，國內機場單位為評估新航機以及未來交通量增加之衝擊，擬於近期廣泛的對國內各機場進行評估，以了解現有鋪面之承載力，用以做為後續營運管理、維修養護、或加鋪設計之參考。

## 1.2 研究內容與步驟

鋪面評估之重點在於將鋪面狀況以量化的指標值來表示，並在分析過程中達到具有一致性與可重複性之要求。然而一直以來 PCN 值卻無一標準之計算程序，雖有許多軟體可直接計算其 PCN 值，但其適當性一直以來難以評估，並且不同之分析方法會使 PCN 值相差 2 倍以上【2, 3】，造成工程師無所適從之狀況。再者，由於非破壞性檢測之評估結果往往受到環境以及施測位置之影響，回算結果之正確性與適用性亦是極為值得深入研究的課題。若無一系統化的評估流程，將因不同的評估結果影響到後續鋪面維修策略之擬定。因此如何有效的對

鋪面進行評估以及得到一具代表性之鋪面結果極為重要。

有鑑於此，本計畫乃以抽樣與統計區間估計方法應用之觀念為基礎，研擬一個可靠的評估流程，並滿足一致性與可重覆性之基本要求。本研究將針對 ACN/PCN 評估方法以及 AC 150/5370-11A 之建議進行探討，以了解主要影響 PCN 值計算差異之原因。並希望配合抽樣與統計分析方法之應用，與適當之撓度與回算結果校正，透過所建議之系統化的現地非破壞性檢測與 PCN 評估流程，在容許誤差範圍下，可得到足以代表機場跑道 PCN 之可靠結果。並將研究成果彙整並建立一個自動化分析程式，以供機場鋪面之後續分析與應用。

本研究之簡要研究流程如圖 1-1 所示，主要研究內容與步驟如下：

1. 相關文獻蒐集與回顧。
2. 機場鋪面厚度設計程式之修正與應用。
3. 鋪面回算程式之分析與應用。
4. 現有機場鋪面評估方法之探討。
5. 抽樣觀念與統計區間估計方法之應用。
6. ACN/PCN 計算流程之探討與修正。
7. ACN/PCN 自動化計算程式之建立。

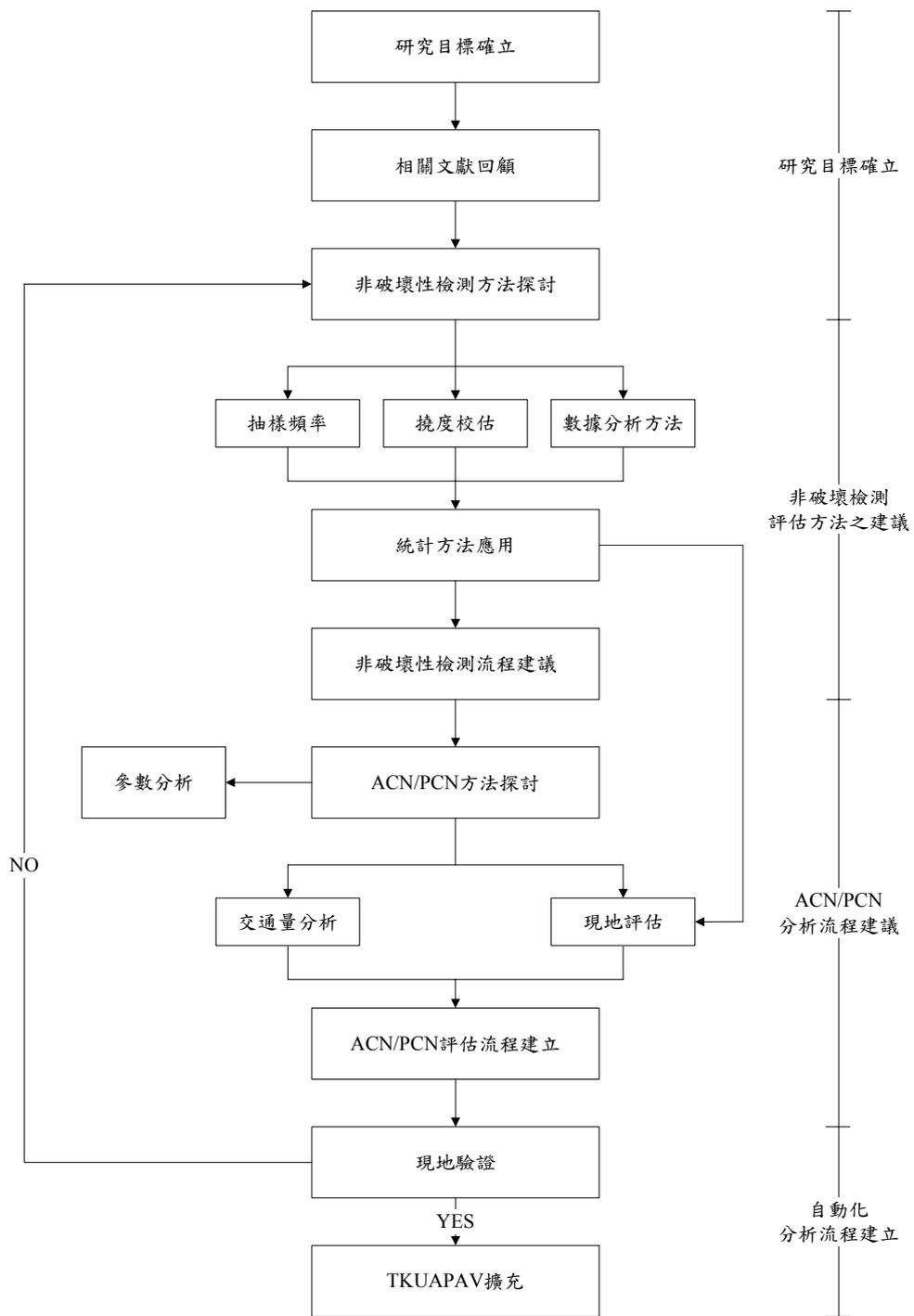


圖 1-1 研究流程圖

## 第二章 文獻回顧

本研究將先行蒐集國內外機場及公路單位之非破壞性檢測文獻，並將於後續章節中簡要說明 ACN/PCN、與機場鋪面力學分析等相關內容。研究中亦將深入探討國內外研究現況與問題，了解非破壞性檢測評估以及 ACN/PCN 評估的特點與差異，希望藉由適當地修正以建立適用於我國機場鋪面強度評估之分析程序。

### 2.1 ACN /PCN 方法簡介

航機分類指數(ACN)為在不同路基強度下，航機對機場鋪面所造成之相對影響值，而鋪面分類指數(PCN)則是指在不需限制起降條件下，機場鋪面所能提供之承載強度數值【4, 5】。ACN/PCN 之組成含有五項要素，其中包含 ACN/PCN 值、道面型式、道基分類、胎壓及所使用之評估方法，如表 2-1 所示【6, 7】。由於各地道基強度變化範圍大，ICAO 將道基依強度分類為四類(如表 2-2)。另一方面，為避免過高的胎壓將損傷道面表面，此法亦對胎壓有所規範。一般而言，可以不限在剛性道面上航機之胎壓。並且依評估方式不同，可分為使用航機法(Using Aircraft)與技術評估法(Technical Evaluation)。使用航機法係經驗法的一種，主要係將目前使用該道面之機型組合中擁有最大 ACN 值之航機訂定為關鍵航機(Critical Airplane)，再將該航機之 ACN 值設為該道面之 PCN 值。由於經驗法之決定過程較為粗略，因此 ICAO 建議使用技術評估法為佳。

表 2-1 ACN/PCN 法之組成要素【6, 7】

ACN/PCN 數值	道面型式	道基分類	胎 壓	評估方法
數值	R—剛性	A—高強度	W—無限制	T—技術評估法
		B—中強度	X—限制 1.5MPa	
	F—柔性	C—低強度	Y—限制 1.0MPa	U—使用航機法
		D—極低強度	Z—限制 0.5MPa	

表 2-2 道基分類標準【6, 7】

道基分類	鋪面型式	
	剛性鋪面	柔性鋪面
	k-value pci (MN/m <sup>3</sup> )	CBR (%)
A	k ≥ 442 (k ≥ 120)	CBR ≥ 13
B	221 < k < 442 (60 < k < 120)	8 < CBR < 13
C	92 < k ≤ 221 (25 < k ≤ 60)	4 < CBR ≤ 8
D	k ≤ 92 (k ≤ 25)	CBR ≤ 4

ACN 值之計算以標準胎壓 1.25MPa，於特定道基分類下，所得推導單輪載

重(Derived Single Wheel Load, 簡稱 DSWL)之二倍數值(以千公斤為單位), 可以表示為公式(2-1), 其中 DSWL 為推導單輪重(kg)。

$$ACN = 2 \times \frac{DSWL}{1000} = \frac{DSWL}{500} \quad (2-1)$$

推導單輪載重 DSWL, 有別於等值單輪載重(Equivalent Single Wheel Load, 簡稱 ESWL); 推導單輪載重概念的引入, 係利用參考厚度(Reference Thickness)概念, 將航機主起落架與道面間的相互作用轉換成相對單輪載重, 這種轉換使得 ACN/PCN 方法得以成功實現以力量代替道面厚度的目標, 進而排除因機場道面結構變化複雜而難有共同比較基準的缺點【4, 5, 8】。

由於 ICAO 在剛性道面方面利用美國波特蘭水泥協會(Portland Cement Association, 簡稱 PCA)之剛性機場道面設計法, 透過溫氏緊密液體基礎假設之剛性模型(Westergaard Model), 參考厚度係指在特定道基強度下, 所欲評估 ACN 之航機造成版中央底工作應力 2.75MPa 時, 所需之剛性版塊厚度; 柔性道面則是以透過傳統由美國軍方 Waterway Experimental Station 所發展 CBR 設計法, 利用 Boussinesq 彈性理論考量複輪效應, 對航機於特定道基強度, 在有效通行量 10000 覆蓋次數(Coverages)時所得之設計厚度, 柔性道面之推導單輪載重與參考厚度的關係可由下式表示(式 2-2)。其中  $t$  為參考厚度;  $DSWL$  為推導單輪重;  $p_s$  表標準胎壓(1.25Mpa);  $CBR$  表加州承載比。

$$t = \sqrt{\frac{DSWL}{0.5695CBR} - \frac{DSWL}{32.035p_s}} \quad (2-2)$$

目前世界各國依據 ICAO 之規定訂立機場鋪面允許載重規範, 當 PCN 值小於 ACN 值時, 道面將有超載的現象, 惟遇特殊或緊急情況時, 適度之超載無法避免。特別需要注意的是, 過量的超載將會縮短鋪面使用壽年。因此 ICAO 提供下列準則作為決定航機超載時的容許作業範圍【4, 5, 6, 7】。其中規定: 對於柔性道面而言, 偶有 ACN 值超過 PCN 登錄值 10% 以內之飛機移動, 應不致損及道面。對於剛性或複合道面而言, 其剛性道面層為其主要結構者, 偶有 ACN 值超過 PCN 值 5% 以內之飛機運行者, 應不致損及道面。以年計, 超載飛機之移動量, 不宜超過年度飛機總移動量之 5%。

## 第三章 機場鋪面厚度設計程式之修正與應用

### 3.1 FAA 傳統機場剛性鋪面厚度設計法

FAA 傳統機場剛性鋪面厚度設計法以 Westergaard 的邊緣應力公式為基礎，配合由 Pickett & Ray【9】所建立之影響圖所計算的調整因子建立其應力模式(公式 3-1)，在分析邊緣應力時需考慮版間的力傳遞效應將應力折減 25%。其中， $\sigma_e$  為使用 Westergaard 無限版長理論之邊緣應力、P 為荷重、h 代表版厚、 $\ell$  代表相對勁度半徑由混凝土彈性模數 E、混凝土版厚 h、基底層土壤反力模數 k、與柏松比  $\mu$  組成，RC0、RC1 與 RC2 為應用 Pickett and Ray 的影響圖所計算獲得的係數。式中 DF 稱為設計因子，為混凝土抗彎強度  $S_c$  與混凝土版容許拉應力 ( $0.75\sigma_e$ ) 的比值。R805FAA 程式係採用此應力分析方式。

$$\sigma_e = \frac{P}{h^2} [RC0 + RC1 \times \ln(\ell) + RC2 \times (\ln(\ell))^2]$$

$$DF = \frac{S_c}{0.75\sigma_e} \tag{3-1}$$

$$\ell = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)k}}$$

FAA 以通過涵蓋比(Pass to Coverages Ratio; P/C)將飛機通過鋪面的次數轉換成涵蓋次數(Coverages)。根據 FAA 定義，涵蓋次數為飛機輪重以常態分配通過鋪面時對鋪面造成最大應力的作用位置，此位置並擁有最大的飛機輪軸通過機率。應用通過涵蓋比 P/C 可由機場各種機型之起飛次數計算該其通過涵蓋次數。

FAA 厚度設計法根據美國陸軍工兵團的鋪面試驗結果，建立混凝土版的疲勞關係曲線【10】。此疲勞曲線以涵蓋次數(Coverages)與厚度百分比(RH)表示，當設計因子 DF 為 1.3 時，可容許鋪面在基本厚度下承受 5,000 次的涵蓋次數，並以此來決定預估交通量下所需的鋪面厚度(公式 3-2 與 3-3)。計畫主持人曾以不同的抗彎強度、版厚、路基強度等因素來探討該疲勞曲線的關係，並發現此疲勞關係並不唯一(如圖 3-1(a)所示)。

$$\sigma_e = \frac{S_c}{1.3 * 0.75}$$

$$h_1 = \left[ (RC0 + RC1 \times \ln(\ell) + RC2 \times (\ln(\ell))^2) \times \left( \frac{P}{\sigma_e} \right) \right]^{0.5} \tag{3-2}$$

$$RH = \begin{cases} 1 + 0.15603 * (\log(C) - 3.69897) & \text{if } C > 5000 \\ 1 + 0.07058 * (\log(C) - 3.69897) & \text{if } C < 5000 \end{cases} \tag{3-3}$$

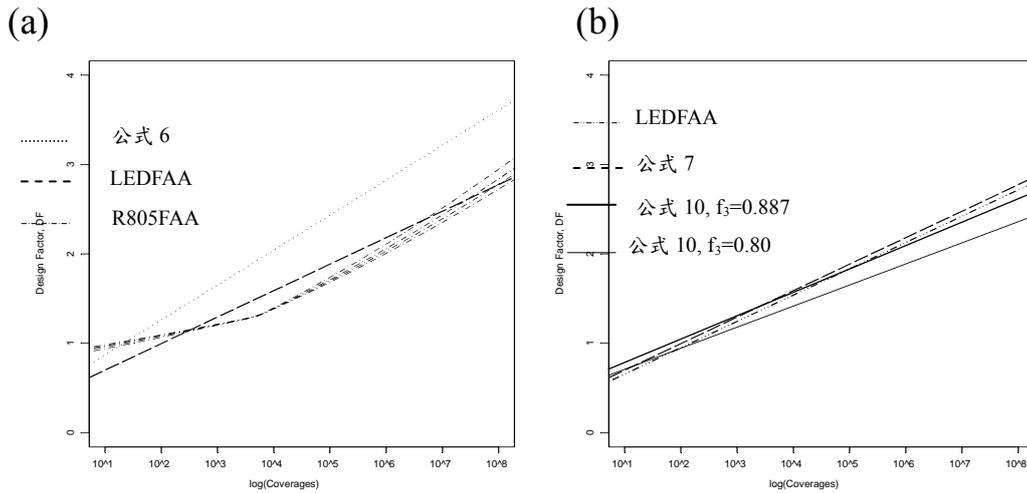


圖 3-1 機場剛性鋪面設計各種種疲勞曲線之比較

### 3.2 LEDFAA 厚度設計程式

Rollings 與 Witczak 於 1990 年【11】發展出鋪面結構狀況指標 SCI 的觀念來表示鋪面受損程度。該研究定義鋪面由開始破壞至完全破壞其 SCI 值由 100 降至 0，其所對應的容許涵蓋次數分別以 CO 與 CF 表示。Rollings 與 Witczak 根據 SCI 的觀念並利用美國陸軍工兵團現地試驗資料，發展出以多層線彈性理論為基礎的疲勞模式。公式 3-4 的疲勞模式中 C 表示涵蓋次數，DF 為設計因子，而 C80 表示 SCI 由 100 降至 80 所對應的涵蓋次數。其中 DF 為混凝土抗彎強度  $Sc$  除以鋪面多層線性彈性理論的臨界張應力  $\sigma_i$ 。

$$SCI = \frac{DF - 0.2967 - (0.3881 + 0.000039 * SCI) \log(C)}{0.002269} \quad (3-4)$$

$$DF = 0.4782 + 0.3912 * \log(C80)$$

Gucbilmez 與 Yuce (1995)【12】亦以相同的美國陸軍工兵團試驗資料重新分析，並以 Westergaard 所提出的邊緣應力為基礎建立以版理論為基礎的疲勞公式。公式 3-5 中 DF 為混凝土抗彎強度  $Sc$  除以版理論的臨界張應力  $(0.75 \sigma_c)$ 。

$$SCI = \frac{100 * \log(C) - 320.61558DF + 56.4417}{0.20903DF - 0.99336} \quad (3-5)$$

$$DF = 0.40289 + 0.29644 * \log(C80)$$

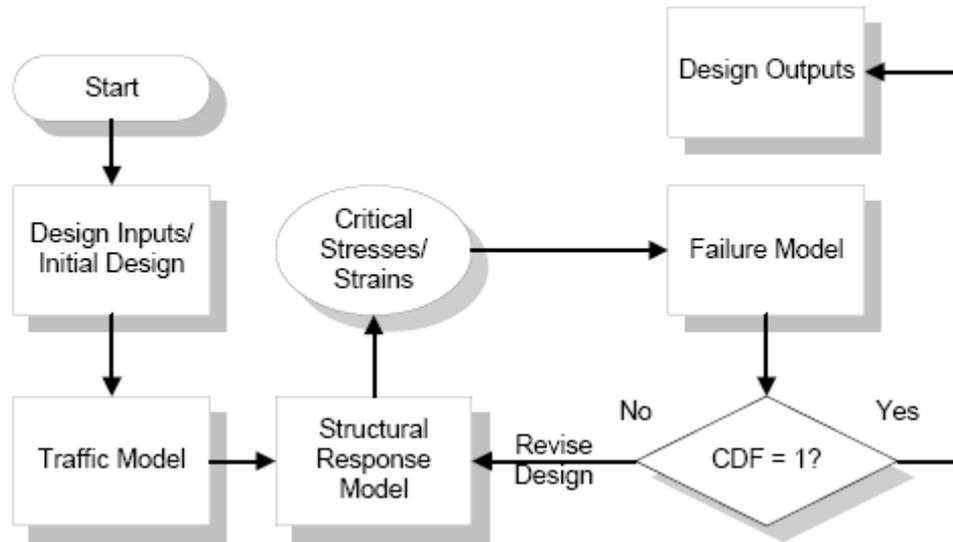


圖 3-2 LEDFAA 設計流程示意圖

而隨著波音公司推出新的 B-777 航機後，其特殊的輪軸型式(雙輪三軸)，使得以往 AC 150/5320-6D 已不足以使用，因此 FAA 於 1995 年再針對 B-777 此一機型特別提出 AC 150/5320-16 以及 LEDFAA 設計方法(圖 3-2)，其設計方法於剛性鋪面上捨棄以往採用版理論之觀念，而改採多層彈性理論計算鋪面版中央荷重之應力，為與舊設計方法相呼應因此採用等值應力之轉換方式。需特殊注意的是，若其設計機型中無 B-777 則建議改採用傳統版理論之設計準則。LEDFAA 設計程序中所使用的疲勞破壞關係，是以 Rollings 與 Witzczak 所發展的多層線性彈性理論疲勞公式，然而在使用上 LEDFAA 以調整係數 0.753 對設計因子進行調整，其調整後的公式如公式 3-6 所示。

$$DF = 0.753 * (0.4782 + 0.3912 * \log(C80)) \quad (3-6)$$

### 3.3 TKUAPAV 厚度設計程式簡介

計畫主持人曾深入探討美國聯邦飛航總署(FAA)傳統的厚度設計法與新的 LEDFAA 設計法之間的差異【13, 14, 15】。並利用累積疲勞損壞因子的概念，以解決傳統方法中對不同機型與起飛次數轉換的問題與困難。重新評估飛機通過涵蓋比值(P/C)的原始發展觀念，比較傳統 FAA 與新的 LEDFAA 的疲勞破壞曲線之關係，並利用當量應力因子的觀念，以建立新的疲勞破壞曲線與新式機場剛性鋪面厚度設計程式(TKUAPAV)。TKUAPAV 厚度設計程序所使用的應力模式以 Westergaard 所導出之剛性鋪面邊緣應力理論公式為基礎，配合無因次應力預估模式針對不同的機型、輪軸組成與其他影響鋪面應力之因素，將臨界邊緣應力進行調整。其分析方式如公式 3-7 所示，其中， $\sigma_{we}$  為 Westergaard 應用剛性鋪面邊緣應力公式所計算的拉應力。 $R_1$ 、 $R_2$  至  $R_5$  為版尺寸、輪軸組成、環境因素等特性相關的調整因子【13】。

$$\sigma_e = \sigma_{we} * R_1 * R_2 * R_3 * R_4 * R_5$$

$$\sigma_{we} = \frac{3(1+\mu)P}{\pi(3+\mu)h^2} \left[ \ln \frac{Eh^3}{100ka^4} + 1.84 - \frac{4}{3}\mu + \frac{1-\mu}{2} + 1.18(1+2\mu) \frac{a}{\ell} \right] \quad (3-7)$$

本研究根據 FAA 對涵蓋次數比值(P/C)的假設，配合無因次應力預估模式的折減因子，應用等值破壞的觀念發展出當量應力因子  $f_3$ 【14, 15】，藉著此一當量應力因子的應用將使涵蓋次數的定義更加嚴謹。研究中應用 Gucbilmez 與 Yuce 的觀念，配合上述之  $f_3$  因子，發展出可針對不同輪軸型態進行調整的的疲勞模式(公式 3-8)。式中的等值設計因子 EDF 為 Sc 與  $(0.75 * f_3 * \sigma_e)$  的比值。

$$SCI = \frac{100 * \log(C) - 324.044(EDF) + 119.799}{0.184217(EDF) - 1.00098}$$

$$EDF = 0.5900 + 0.2952 * \log(C80)$$

$$DF = f_3 * [0.5900 + 0.2952 * \log(C80)] \quad (3-8)$$

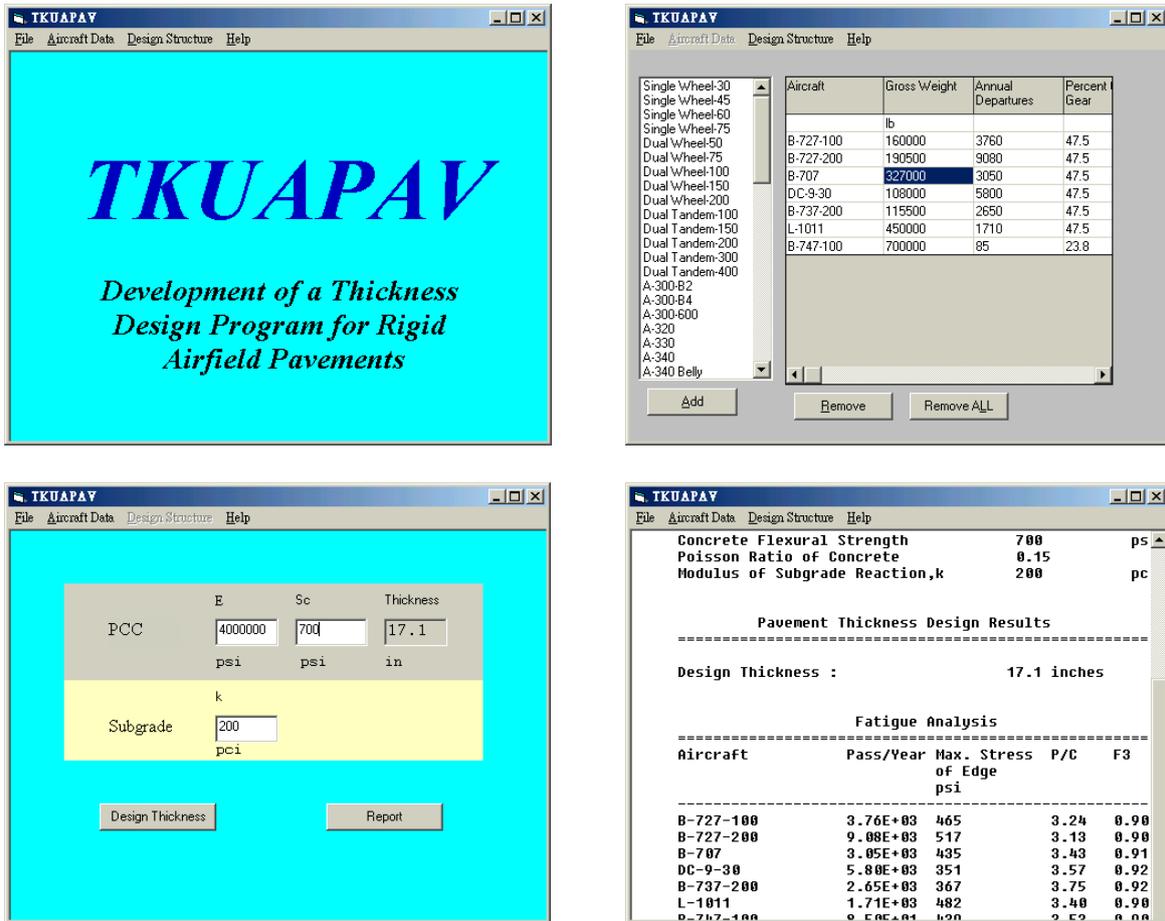


圖 3-3 TKUAPAV 程式應用之示意圖

各種應用在機場剛性鋪面設計的疲勞曲線之比較，由圖 3-1(b)所示。雖然各種曲線所使用的應力分析方式不同，但其疲勞模式在經由調整因子修正後結果大致吻合。圖 3-3 顯示 TKUAPAV 程式應用之示意圖。

### 3.4 FEDFAA 剛性鋪面設計程式簡介

隨著三維有限元素法被廣泛的應用在鋪面分析，自 2003 年開始 FAA 發表之新設計方法 FEDFAA 在剛性鋪面之設計上大膽採用三維有限元素法設計流程如圖 3-4 所示。表 3-1 顯示 FAA 剛性鋪面厚度設計方法所採用之理論與分析模組之差異。

表 3-1 FAA 剛性鋪面厚度設計方法比較  
應力計算

	採用理論	荷重	分析模組
傳統 FAA	版理論	邊緣荷重	Westergaard 理論解
LEDFAA	多層彈性	中央等值荷重	JUILA
FEDFAA	三維有限元素法	邊緣荷重	Nike3D

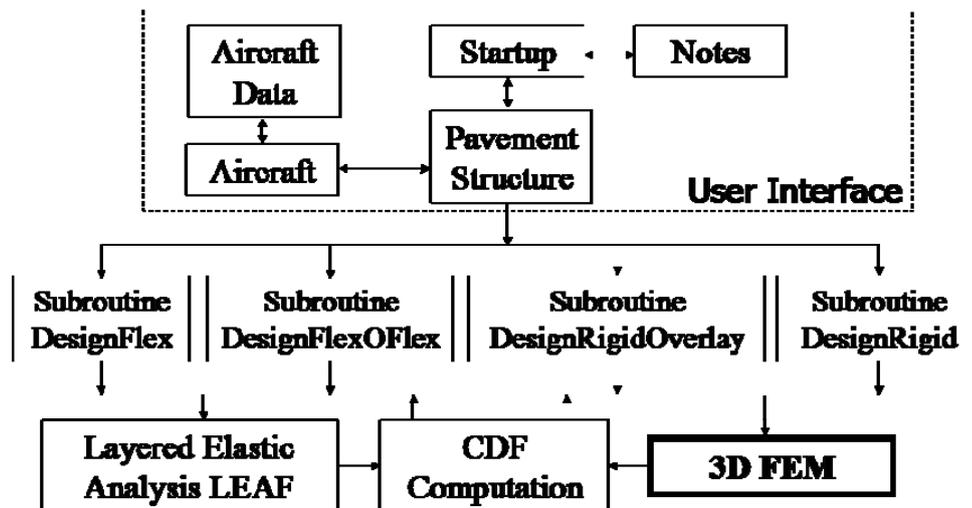


圖 3-4 FEDFAA 設計流程示意圖

FEDFAA 在應力分析方面不再與 LEDFAA 一樣採用中央荷重之方式，而改採與以往舊法相同之邊緣應力做為設計之依據。然而，在其分析過程之中，僅考量到無限版尺寸之效應，並未考量到有限版尺寸效應之問題。在網格切割方面，則是採用固定之方式進行，並未針對網格切割之收斂性進行分析與探討。並且三維有限元素法與二維有限元素法之最主要差異乃在，假設面層為一可壓縮之材料，若未對面層厚度之網格進行適當之切割將會造成其應力與應變數值有極大之變異性，且若未對其進行切割亦將損失原先採用三維有限元素法之意義【16, 17】。

在 FAA 設計方法中，一般建議混凝土之抗彎強度與彈性模數有下列之關係，

式中，MR 代表混凝土抗彎強度(psi)； $E_{pcc}$  為混凝土彈性模數(psi)。然而，在 FEDFAA 設計程式中，混凝土鋪面版之彈性模數係設定為 4,000,000 psi，但卻允許混凝土之抗彎強度值在 500~800 psi 間變化，以簡化分析流程。在實際鋪面設計時，針對抗彎強度不同之混凝土並不適合採用同一固定之彈性模數值來設計。

$$MR = 43.5 \left( \frac{E_{pcc}}{10^6} \right) + 488.5 \quad (3-9)$$

且就有限元素法而言，其材料之力學性質對於所求得之應力與應變有極大之影響，而在其設計方法中採用「設計因子」此一參數，根據其定義以及計算流程可發現，其應力為利用三維有限元素法計算得之，而面層之彈性模數對於應力有極大之影響，然在 FEDFAA 中將面層彈性模數視為固定值，因此其應力計算模式中可說僅考量鋪面厚度所造成之影響以及基底層所造成之影響，並未完整考量到混凝土版之力學特性，鑑於上述之問題，未來可針對此一設計方法繼續進行驗證與分析。

### 3.5 各種因子對機場剛性鋪面厚度設計之影響

美國聯邦飛航總署所發展的機場剛性鋪面厚度設計程序，主要以 1943~1973 年間美國陸軍工兵團(U.S. Army Corps of Engineers)所進行的道路試驗之試驗結果【10】，而發展的載重-疲勞破壞模式為其設計依據。然而，該模式之建立僅考慮交通載重、鋪面材料與疲勞破壞間的關係，而未將其他相關之重要因素加以考慮。因此，本研究主要以 FAA 厚度設計程序為基礎，深入探討鋪面版有限尺寸、溫度與溼度等環境因子對於機場剛性鋪面厚度設計的影響。

本研究由相關文獻中取得美國陸軍工兵團現地試驗的詳細資料，諸如路段之所在區域、鋪面類型、厚度與尺寸、斷面結構、使用材料、與試驗所得之詳細數據等，重新加以彙整與分析。研究中並以 TKUAPAV 機場剛性鋪面厚度設計程式為基礎，以其應力分析模式與厚度設計程序，針對該試驗資料重新計算。

由於美國陸軍工兵團現地試驗資料中，並未提供試驗地區之氣候資料。因此，本研究以美國公路長期鋪面績效(LTPP)計畫所蒐集之資料庫 Data Pave 為架構，針對現地試驗所在區域之氣象站，擷取歷年之氣象資料。接著，以所獲得之資料配合 1998 年 AASHTO 所提供之預估公式計算有效溫差(Effective Temperature Differential)。

最後，將研究中所探討之鋪面類型、厚度、使用材料、鋪面版有限尺寸、溫度與溼度等影響因子加以彙整，並應用 TKUAPAV 程式的應力預測模式，重新計算美國陸軍工兵團試驗路段之應力。並由此結果修正 FAA 原有之疲勞破壞模式，並加入考慮溫度與溼度等之影響，以改進機場剛性鋪面厚度設計程序。

#### 3.5.1 美國陸軍工兵團現地試驗資料再分析

本研究由文獻【11, 12, 18】中，整理出美國陸軍工兵團現地試驗的詳細資料。

在 1943 ~ 1973 年間美國陸軍工兵團在 Ohio 州之 Lockbourne 空軍基地、Sharonville、與 Mississippi 州的 Waterways Experiment Station 三個試驗地區，包含 8 個試驗種類 17 個路段的試驗。本研究針對 Guclblmez 與 Yuce 【12】所整合的 36 筆試驗資料，更進一步的進行資料蒐集，以確定當初進行試驗之鋪面型態、鋪面尺寸之長 L、寬 W、荷重 P、輪軸荷重半徑 a、鋪面頂層厚度  $h_1$ 、第二層厚度  $h_2$ 、路床反力模數 k、混凝土強度  $S_c$ 、與及鋪面剖面等條件。在經過資料蒐集與整合後，試驗資料如表 3-2 所示。

表 3-2 美國陸軍工兵團現地試驗之相關資料

Item	P (kN)	a (cm)	W (m)	L (m)	$S_c$ (MPa)	$h_1$ (cm)	$E_1$ (GPa)	$h_2$ (cm)	$E_2$ (GPa)	k (MN/m <sup>3</sup> )
A1.60	164.7	36.20	6.10	6.10	5.37	14.5	26.2	0.0	0.000	40.5
B2.66L	89.0	28.19	6.10	6.10	5.10	14.0	26.2	0.0	0.000	20.3
B1.66L	164.7	36.20	6.10	6.10	5.37	14.0	26.2	0.0	0.000	20.3
C2.66S	89.0	28.19	6.10	6.10	5.10	14.0	26.2	15.2	0.041	18.9
C1.66S	164.7	36.20	6.10	6.10	5.37	14.0	26.2	15.2	0.041	18.9
D1.66	164.7	36.20	6.10	6.10	5.37	14.0	26.2	15.2	0.069	16.2
E2.66M	89.0	28.19	6.10	6.10	5.10	14.6	26.2	15.2	0.124	19.2
E1.66M	164.7	36.20	6.10	6.10	5.37	14.6	26.2	15.2	0.124	19.2
F1.80	164.7	36.20	6.10	6.10	5.37	19.7	26.2	0.0	0.000	14.0
K2.100	267.0*	46.46	6.10	6.10	5.06	24.0	26.2	0.0	0.000	24.3
N1.86	164.7	36.20	6.10	6.10	5.37	20.3	26.2	15.2	0.069	16.2
N2.86	267.0	46.46	6.10	6.10	5.06	20.3	26.2	15.2	0.069	16.2
O1.106	164.7	36.20	6.10	6.10	5.37	24.0	26.2	15.2	0.069	16.2
O2.106	267.0	46.46	6.10	6.10	5.06	24.0	26.2	15.2	0.069	16.2
P1.812	164.7	36.20	6.10	6.10	5.37	19.3	26.2	30.5	0.103	11.6
P2.812	267.0	46.46	6.10	6.10	5.06	19.3	26.2	30.5	0.103	11.6
Q1.102	164.7	36.20	6.10	6.10	5.37	24.0	26.2	30.5	0.103	13.5
Q2.102	267.0	46.46	6.10	6.10	5.06	24.0	26.2	30.5	0.103	13.5
U1.60	164.7	36.20	6.10	6.10	5.37	14.8	26.2	0.0	0.000	55.9
E-6	667.5	54.74	7.62	7.62	4.82	51.5	27.6	0.0	0.000	26.2
M-1	667.5	47.09	7.62	7.62	5.00	30.5	28.4	0.0	0.000	14.9
M-2	667.5	47.09	7.62	7.62	5.00	38.1	28.4	0.0	0.000	14.9
-	267.0	36.93	3.05	7.62	5.51	15.2	27.6	0.0	0.000	16.7
59	445.0	27.71	7.62	15.24	5.03	40.6	29.6	0.0	0.000	12.7
60	445.0	27.71	7.62	15.24	5.03	30.5	29.6	0.0	0.000	90.5
61	445.0	27.71	7.62	15.24	5.03	35.6	29.6	0.0	0.000	81.0
62	445.0	27.71	7.62	15.24	5.03	40.6	29.6	0.0	0.000	97.2
72	1446.3	49.96	15.24	15.24	5.51	71.1	28.9	0.0	0.000	18.9
73	1446.3	49.96	15.24	15.24	5.51	61.0	28.9	0.0	0.000	18.9
1-C5	1602.0	83.79	7.62	7.62	5.00	25.4	41.3	0.0	0.000	13.5
2-DT	738.7	41.22	7.62	7.62	4.82	30.5	41.3	0.0	0.000	18.9
3-DT	738.7	41.22	7.62	7.62	4.55	35.6	41.3	0.0	0.000	20.0
2-C5	1602.0	83.79	7.62	7.62	5.03	27.9	41.3	0.0	0.000	27.0
4-DT	738.7	41.22	7.62	7.62	5.93	25.4	41.3	15.2	1.723	22.2
3-200	890.0	46.84	7.62	7.62	6.20	38.1	41.3	15.2	1.378	22.2
4-200	890.0	46.84	7.62	7.62	5.99	38.1	41.3	15.2	1.378	22.2

美國陸軍工兵團的試驗中並未蒐集試驗當時的氣候狀況，本研究為了克服此一問題，因而採用的 LTPP 所建立的 Data Pave 資料庫所蒐集到的氣候資料，以

作為計算應力調整的依據。而 Data Pave 蒐集到的氣候資料非常龐大幾乎涵蓋北美區域，因此必須進行資料擷取與整合，才能獲得所需要的資料。本研究首先根據美國陸軍工兵團的試驗報告對於試驗地點的描述，在地圖中確認該三個試驗地區的所在區域。接著，根據地圖所選定的區域中，由 Data Pave 程式中以地圖模式，選取上述三個區域附近的 LTPP 試驗路段，其地理位置與所選擇之試驗路段(SHRP ID)如圖 3-5(a)~(c)所示。

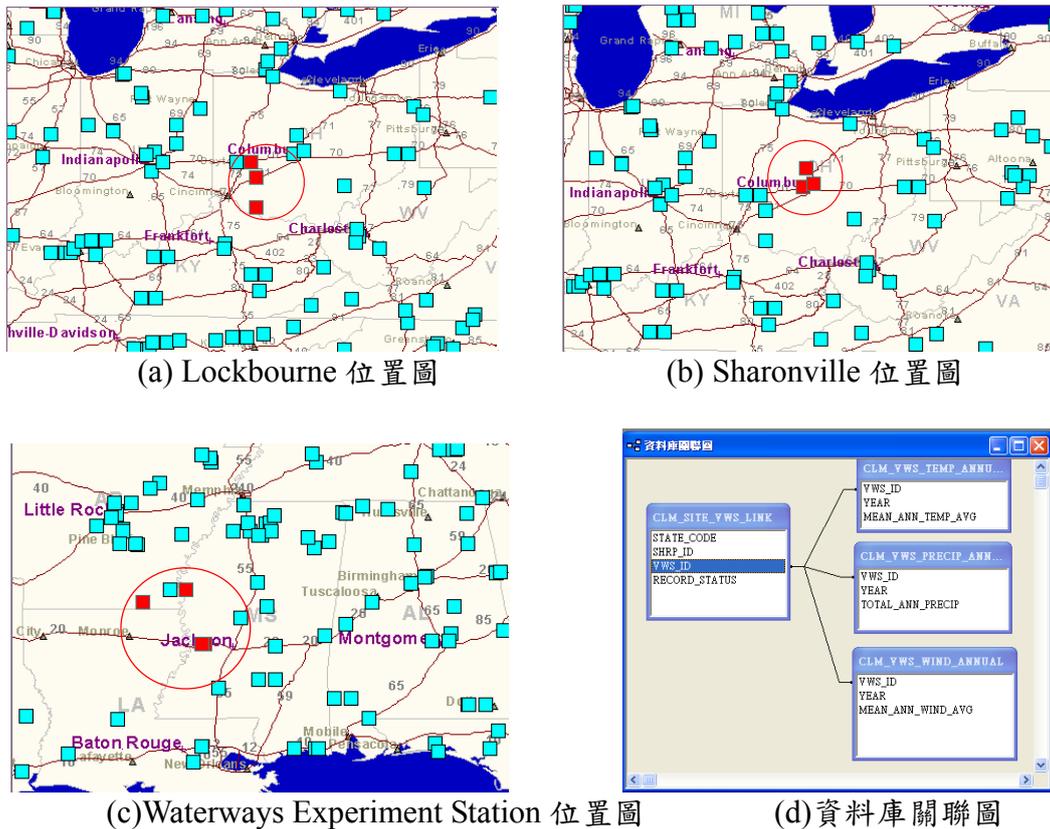


圖 3-5 擷取現地試驗區域附近氣候資料的示意圖

本研究在確認美國陸軍工兵團現地實驗在 LTPP 試驗的相關位置後，經由 Data Pave 之搜尋功能進行資料擷取，最後將路段(SHRP ID)資料建立成 ACCESS 檔案格式之資料表。接著，研究中將 Data Pave 中所有的氣象站資料加以搜尋，在透過資料整合的作業後，將試驗路段周圍的氣象站資料建立另一個資料表。並由 Data Pave 的資料庫中將相關氣象站的編號(VWS ID)、氣象蒐集年份(Year)、每年度總降雨量(TOTAL\_ANN\_PRECIP)、每年度平均氣溫(MEAN\_ANN\_TEMP\_AVG)、與每年度平均風速(MEAN\_ANN\_WIND\_AVG)分別建立不同的資料表。最後，本研究應用 ACCESS 的資料庫關聯圖將資料表加以聯結，如圖 3-5(d)所示，以此建立試驗路段與氣候資料間的關聯性資料庫，並以 ACCESS 提供之查詢功能建立每年度在相關氣象站所蒐集之氣候資料。

本研究在獲得三個試驗地區內，所有可由 Data Pave 資料庫中獲得的氣象站資料後，將三個地區內所有氣象站的歷年資料加以平均，以其平均值代表試驗

區域的年平均溫度、年降雨量、與年平均風速，其結果如表 3-3 所示。

表 3-3 試驗區域的平均氣候資料

Zone	PRECIP (mm)	TEMP (°C)	WIND (m/s)
Lockbourne	983.0	11.3	3.21
Sharonville	1066.2	11.2	4.05
Waterways Experiment Station	1441.9	17.6	3.08

### 3.5.2 疲勞破壞模式之修正

本研究將試驗資料整理後，可應用表 3-2 之參數，針對 Gucbilmez 與 Yuce 所整合的 36 筆試驗資料，應用公式 3-10 重新計算每筆資料所對應的鋪面應力值。

$$\sigma_e = \sigma_{we} * R_1 * R_2 * R_5 + R_T * \sigma_c \quad (3-10)$$

其中  $R_1$  調整因子可由當量應力因子  $f_3$  考量。有限尺寸調整因子  $R_2$  可由表 3-4 中的版長、版寬調整因子所  $R_L$ 、 $R_W$  計算。多層版調整因子  $R_5$ ，則在假設為未黏結底層之結構型式下計算。最後計算由荷重所產生的應力  $\sigma_L = \sigma_{we} * R_2 * R_5$ 。

關於公式中的溫度翹曲應力  $\sigma_c$ ，可使用 Westergaard 所提出的翹曲應力公式計算，而調整因子  $R_T$  可用 Lee 所發展的預估模式計算，以上兩個參數皆必須輸入鋪面版頂與版底的溫度差異。然而，美國陸軍工兵團試驗資料並未蒐錄試驗當時的溫度差異，因此，本研究應用 AASHTO 的有效溫差來取代。

AASHTO 於 1998 年發表的鋪面結構設計補充【19】中提出以下的有效溫差公式。其中，TD 為鋪面的有效正溫差(°F)，h 為鋪面厚度(inch)，WIND 為年平均風速(mph)，TEMP 為年平均氣溫(°F)，PREC 為年降雨量(inch)。

$$TD = 0.962 - \frac{52.181}{h} + 0.341 * WIND + 0.184 * TEMP - 0.00836 * PREC \quad (3-11)$$

本研究經由 LTPP 氣候資料之擷取之作業，獲得表 3-3 中 Lockbourne、Sharonville、與 Waterways Experiment Station 三個試驗地區的年平均溫度、年降雨量、與年平均風速後，將現地試驗資料中的鋪面厚度代入公式中，可得到各鋪面的有效正溫差 TD，應用此溫差可計算出 36 個試驗所得對應的溫度翹曲應力  $\sigma_c$  與調整因子  $R_T$ 。最後，結合荷重所產生的應力  $\sigma_L$  與  $\sigma_c * R_T$ ，可得到鋪面上的邊緣應力  $\sigma_e$ ，其分析結果如表 3-4 所示。

表 3-4 邊緣應力修正因子總表

Item	Zone	R <sub>w</sub>	R <sub>L</sub>	R <sub>s</sub>	σ <sub>L</sub> (MPa)	TD(°C)	σ <sub>c</sub> (MPa)	R <sub>T</sub>	σ <sub>c</sub> (MPa)	f <sub>3</sub>
A1.60	1	1.000	1.000	1.000	8.57	1.99	0.27	1.107	8.87	0.808
B2.66L	1	1.000	1.000	1.000	7.34	1.79	0.24	1.075	7.61	0.826
B1.66L	1	1.000	1.000	1.000	10.64	1.79	0.24	1.075	10.91	0.796
C2.66S	1	1.000	1.000	0.998	7.45	1.79	0.24	1.077	7.72	0.826
C1.66S	1	1.000	1.000	0.998	10.85	1.79	0.24	1.077	11.12	0.795
D1.66	1	1.000	1.000	0.997	11.35	1.79	0.24	1.074	11.62	0.796
E2.66M	1	1.000	1.000	0.996	6.99	2.02	0.27	1.087	7.29	0.835
E1.66M	1	1.000	1.000	0.996	10.26	2.02	0.27	1.087	10.57	0.805
F1.80	1	1.000	0.999	1.000	7.53	3.32	0.45	0.990	7.98	0.834
K2.100	1	1.000	0.998	1.000	8.29	3.99	0.54	0.994	8.83	0.825
N1.86	1	1.000	0.999	0.999	7.00	3.44	0.46	1.006	7.47	0.840
N2.86	1	1.000	0.999	0.999	9.35	3.44	0.46	1.006	9.82	0.809
O1.106	1	1.000	0.992	0.999	5.44	3.99	0.54	0.909	5.94	0.862
O2.106	1	1.000	0.992	0.999	7.37	3.99	0.54	0.909	7.86	0.830
P1.812	1	1.000	0.997	0.987	7.94	3.23	0.44	0.953	8.36	0.835
P2.812	1	1.000	0.997	0.988	10.66	3.23	0.44	0.953	11.09	0.806
Q1.102	1	1.000	0.989	0.993	5.58	3.99	0.54	0.863	6.05	0.865
Q2.102	1	1.000	0.988	0.994	7.58	3.99	0.54	0.870	8.05	0.833
U1.60	1	1.000	1.000	1.000	7.49	2.09	0.28	1.131	7.81	0.819
E-6	1	1.000	0.964	1.000	4.54	5.63	0.80	0.863	5.24	0.872
M-1	1	0.999	0.997	1.000	6.10	4.64	0.68	0.760	6.63	0.873
M-2	1	1.000	0.987	1.000	4.51	5.13	0.75	0.633	4.98	0.892
-	1	1.000	1.000	1.000	12.27	2.23	0.32	1.067	12.61	0.810
59	2	1.000	1.000	1.000	5.60	5.58	0.85	1.008	6.46	0.887
60	2	1.000	1.000	1.000	5.98	4.97	0.76	1.142	6.85	0.856
61	2	0.999	1.000	1.000	4.93	5.32	0.81	1.129	5.85	0.873
62	2	0.999	1.000	1.000	3.94	5.58	0.85	1.113	4.89	0.888
72	2	0.999	1.000	1.000	4.00	6.35	0.95	0.895	4.86	0.912
73	2	0.998	1.000	1.000	4.98	6.18	0.92	0.747	5.67	0.901
1-C5	3	0.999	0.998	1.000	7.48	5.19	1.11	0.790	8.36	0.835
2-DT	3	0.999	0.996	1.000	6.90	5.68	1.21	0.722	7.78	0.873
3-DT	3	0.999	0.990	1.000	5.54	6.02	1.28	0.642	6.37	0.883
2-C5	3	0.999	1.000	1.000	5.65	5.46	1.16	0.907	6.71	0.834
4-DT	3	0.999	1.000	0.992	8.41	5.19	1.11	0.897	9.41	0.864
3-200	3	0.999	0.987	0.998	5.67	6.16	1.31	0.638	6.52	0.892
4-200	3	0.999	0.987	0.998	5.67	6.16	1.31	0.638	6.52	0.891

本研究經由上述章節的應力調整，以表 3-4 所整合的參數計算 Corps of Engineers 試驗的 36 筆鋪面應力 σ<sub>c</sub> 後，再求得等值設計因子 EDF = Sc / (0.75 \* σ<sub>c</sub> \* f<sub>3</sub>)。接著，研究中以上述 36 筆現地試驗資料所蒐集的相關涵蓋次數 CO、CI、CF，對應所計算的等值設計因子 EDF 進行迴歸分析，而求得表四的各種疲勞模式。最後，本研究經由整合後，可得到修正的疲勞破壞模式，如公式 3-12 所示。

$$SCI = \frac{100 * \log(C) - 372.439(EDF) + 131.099}{0.3291(EDF) - 1.1373}$$

$$EDF = 0.5569 + 0.2508 * \log(C_{80})$$

$$DF = f_3 * [0.5569 + 0.2508 * \log(C_{80})]$$
(3-12)

表 3-5 CO、CI、CF 與 EDF 的迴歸關係式

各種疲勞模式	SEE	R <sup>2</sup>	資料數
EDF = 0.6040 + 0.2467*log(CO)	0.115	0.742	24
EDF = 0.5082 + 0.2493*log(CI)	0.113	0.788	36
EDF = 0.3520 + 0.2685*log(CF)	0.118	0.730	24

### 3.5.3 小結

本研究以新的應力分析方式，考慮該現地試驗的鋪面有限尺寸、多層版結構、與各種機型載重的輪軸型式之影響，進而計算當時試驗較為符合實際行況的鋪面臨界應力值。而經由研究發現，由於機場鋪面設計之尺寸較一般公路為大，試驗中的鋪面幾乎皆可達到剛性鋪面無限版長的假設，因此鋪面有限尺寸的影響不大。而試驗資料中，許多鋪面結構採用兩層或兩層以上的設計方式。然而，在有限的資訊下，本研究將其假設為未黏結基底層的設計方式，經由分析後可得知，此種未黏結的設計方法對於應力的折減效果並不顯著。

而當初試驗的資料蒐集並不考慮氣候之影響，因此，並無法針對氣候因子對鋪面應力的影響。有鑑於此，本研究由當初試驗區域的相關位置，利用 LTPP 計畫中在試驗區域附近的氣象站所蒐錄之歷年氣象資料，估算該實驗區域的平均氣溫、年降雨量與風速。研究中將所得之結果，代入 AASHTO 於 1998 年所發行的補充鋪面結構設計手冊中的有效溫差公式，以此有效溫差作為考慮氣候影響鋪面應力之依據。

本研究將有限尺寸、多層版結構、溫差翹曲、與機型載重的輪軸型式加以考慮，模擬當時試驗可能之鋪面臨界應力，並由此計算每筆資料所對應之等值設計因子。接著，比照 FAA 針對設計因子與容許的涵蓋次數建立疲勞破壞模式的方法，修正疲勞破壞模式，以改進機場剛性鋪面厚度設計程序。

### 3.6 三維有限元素之邊緣應力預測公式

計畫主持人【16, 17】曾利用緊密液體基礎下的三維有限元素模型，分析了一系列單一版塊的單輪邊緣荷重問題、並分別建立無因次的邊緣應力與撓度之資料庫，所採用的無因次參數範圍為：正規化版長( $L/\ell$ )=3~8 (step by 1)、正規化荷重半徑( $a/\ell$ )=0.05, 0.1~0.5 (step by 0.1)、及版厚與荷重半徑比值( $h/a$ )=0.5~6 (step by 0.5)。由於有限版寬對於邊緣荷重的影響較小，因此將正規化版寬( $W/\ell$ )選定為與正規化版長( $L/\ell$ )相同。這些範圍包含了各種高速公路和機場剛性鋪面絕大多數可能的範圍。

其中，撓度比值與應力比值定義為三維有限元素之結果與 Westergaard 理論

解之比值。由於所產生的撓度比值均大於 1.0，它的倒數或是修正因子(R)的範圍將會是介於 0 與 1 之間。值得一提的是，當版的厚度相對較厚(較大的 h/a)或荷重半徑相對較大(較大的 a/l)時，所得到的撓度比值將較高。同樣地，所產生的應力比值範圍介於 0.25 與 1.03 之間。有鑑於目前現有的厚度設計法之臨界應力計算與都是以二維有限元素程式為主，計畫主持人因此將所構建之資料庫以投影追逐迴歸分析法【20, 21】，建立出以下的邊緣應力修正因子(R<sub>3D</sub>)：

$$R_{3D} = \frac{\sigma_{3DFEM}}{\sigma_{we}} = f\left(\frac{a}{l}, \frac{L}{l}, \frac{h}{a}\right) \quad (3-13)$$

$$R_{3D} = 0.69149 + 0.259 \Phi_1 + 0.03318 \Phi_2$$

$$\Phi_1 = \begin{cases} 1.578 + 6.013(A1) + 2.673(A1)^2 + 0.208(A1)^3 & \text{if } (A1) \leq -0.25 \\ 1.076 + 1.812(A1) - 5.796(A1)^2 + 4.942(A1)^3 & \text{if } (A1) > -0.25 \end{cases}$$

$$\Phi_2 = \begin{cases} -2.649 + 78.163(A2) + 381.681(A2)^2 - 15547.789(A2)^3 & \text{if } (A2) \leq 0.05 \\ -0.927 + 39.165(A2) - 321.743(A2)^2 - 877.365(A2)^3 & \text{if } (A2) > 0.05 \end{cases} \quad (3-14)$$

$$A1 = 0.36539x1 - 0.01440x2 - 0.04566x3 + 0.85799x4 - 0.35545x5 + 0.04123x6$$

$$A2 = 0.23203x1 + 0.01107x2 - 0.00427x3 - 0.97246x4 + 0.01825x5 - 0.00230x6$$

$$X = [x1, x2, x3, x4, x5, x6] = \left[ \frac{a}{l}, \frac{L}{l}, \frac{h}{a}, \frac{a}{l} / \frac{L}{l}, \frac{a}{l} \times \frac{h}{a}, \frac{L}{l} / \frac{h}{a} \right]$$

其中，限制式為  $0.05 \leq a/l \leq 0.5, 0.5 \leq h/a \leq 6.0, 3 \leq L/l \leq 8, W/l = L/l$ ；迴歸式之統計結果為  $N=432, R^2=0.9988, SEE=0.008745$ ； $\sigma_w$  為 Westergaard 之理論解應力；三維有限元素的修正因子(R<sub>3D</sub>)；N 為資料的個數；R<sup>2</sup> 是判定係數；SEE 是標準誤差。

然而，接縫式混凝土鋪面版之力學行為極為複雜，不同輪軸荷重、有限版長與版寬、混凝土路肩、外車道加寬情況效應、多層版效應、載重加上溫差效應等因素均有可能影響版之臨界應力。由於應力修正因子為一比例關係，因此暫時大膽地將三維有限元素分析修正因子與現有二維有限元素分析的成果【13】相結合，以估算版的臨界應力，建議的臨界應力預估模式如下：

$$\sigma_e = (\sigma_{we} * R_{3D} * R_G * R_S * R_O * R_M + R_T * \sigma_c) \quad (3-15)$$

其中， $\sigma_c$  為 Westergaard / Bradbury 有限尺寸版之邊緣溫差應力；現有二維有限元素分析的修正因子因子包括：不同輪軸轉換因子(R<sub>G</sub>)、混凝土路肩修正因子(R<sub>S</sub>)、外車道加寬情況效應因子(R<sub>O</sub>)、多層版效應修正因子(R<sub>M</sub>)、與載重加上溫差效應之影響因子(R<sub>T</sub>)等。在後續研究上，建議需要對上述的應力修正模式做後續的驗證，以協助建立更簡易之三維有限元素鋪面厚度設計程序。

### 3.7 機場鋪面厚度設計程式之修正

鑒於 FAA 新的鋪面厚度設計方法擬廣泛的採用三維有限元素分析，自 2003 年開始發表之新設計方法 FEDFAA 在剛性鋪面之設計上大膽採用三維有限元素

法設計流程。然而，在其分析過程之中，僅考量到無限版尺寸之效應，並未考量到有限版尺寸效應之問題。在網格切割方面，則是採用固定之方式進行，並未針對網格切割之收斂性進行分析與探討。並且三維有限元素法與二維有限元素法之最主要差異乃在，假設面層為一可壓縮之材料，若未對面層厚度之網格進行適當之切割將會造成其應力與應變數值有極大之變異性，且若未對其進行切割亦將損失原先採用三維有限元素法之意義【16】。

在 FEDFAA 設計程式中，混凝土鋪面版之彈性模數係設定為 4,000,000 psi，但卻允許混凝土之抗彎強度值在 500~800 psi 間變化，以簡化分析流程。在實際鋪面設計時，針對抗彎強度不同之混凝土，並不適合採用同一固定之彈性模數值來設計。且就有限元素法而言，其材料之力學性質對於所求得之應力與應變有極大之影響，而在其設計方法中採用「設計因子」此一參數，根據其定義以及計算流程可發現，其應力為利用三維有限元素法計算得之，而面層之彈性模數對於應力有極大之影響，然在 FEDFAA 中將面層彈性模數視為固定值，因此其應力計算模式中可說僅考量鋪面厚度所造成之影響以及基底層所造成之影響，並未完整考量到混凝土版之力學特性。

由於接縫式混凝土鋪面版之力學行為極為複雜，不同輪軸荷重、有限版長與版寬、混凝土路肩、外車道加寬情況效應、多層版效應、載重加上溫差效應等因素均有可能影響版之臨界應力。由於應力修正因子為一比例關係，因此計畫主持人曾建議將三維有限元素分析修正因子與現有二維有限元素分析的成果【13】相結合，以估算版的臨界應力，建議的臨界應力預估模式。因此，本研究乃在此階段擴充計畫主持人過去在三維有限元素分析之研究成果【16, 17】，未來亦可針對上述的應力修正模式繼續進行驗證與分析，並與現有 TKUAPAV 程式相整合，以建立更簡易之鋪面厚度設計程序。研究中亦可將此研究成果與 FAA 現有鋪面設計程式(包括 LEDFAA 與 FEDFAA)之分析結果相比較，以驗證程式之可靠性與適用性。

## 第四章 鋪面回算程式之分析與應用

### 4.1 鋪面系統之回算原理及限制

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【22】。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、ELSDDEF、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【23】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，計畫主持人曾經指導過多位碩士班研究生從事剛性鋪面回算之相關研究課題。研究成果中包括：李朝聰【24】與白建華【25】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【26】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。

## 4.2 AASHTO 對現有柔性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【27】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：

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：

$$M_R = \left( \frac{0.24P}{d_r r} \right) \quad (4-1)$$

$$r \geq 0.7a_e$$

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)； $a_e$  為路床與鋪面之間應力分佈半徑(in)，可以下列公式來決定：

$$a_e = \sqrt{a^2 + \left( D \times \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2} \quad (4-2)$$

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：

$$d_0 = 1.5Pa \left[ \frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left[ (D/a) * \left( \sqrt[3]{E_p / M_R} \right) \right]^2}} + \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (D/a)^2}}}{E_p} \right] \quad (4-3)$$

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(4-1)來估算  $M_R$ ，再根據公式(4-3)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 4-1 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 【27】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。

$$M_R = C \left( \frac{0.24P}{d_r r} \right) \quad (4-4)$$

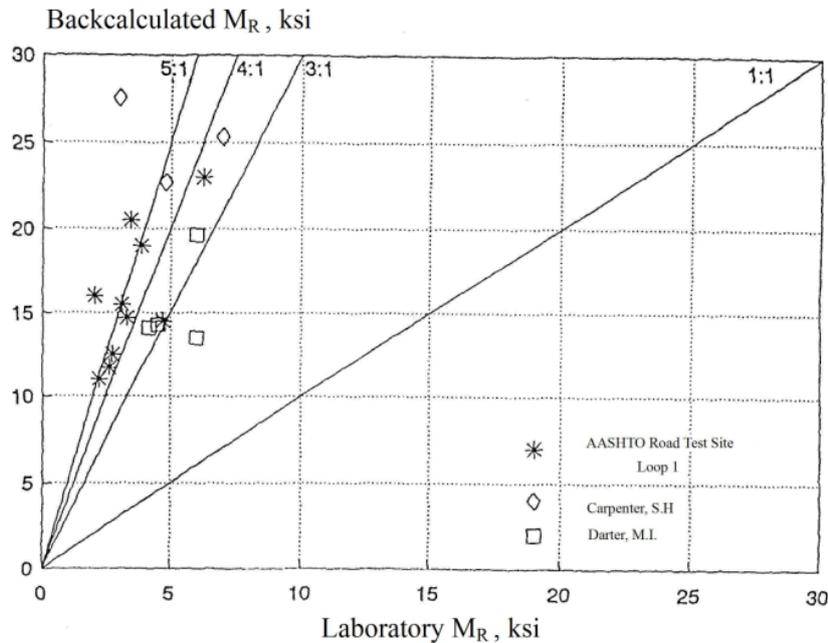


圖 4-1 回算與試驗室路基回彈模數的比較【27】

### 4.3 AASHTO 對現有剛性鋪面結構評估之回算方式

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【22】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：

$$l_k = \left[ \frac{\ln \left( \frac{36 - AREA}{1812.279133} \right)}{-2.559340} \right]^{4.387009}, \quad l_e = \left[ \frac{\ln \left( \frac{36 - AREA}{4521.676303} \right)}{-3.645555} \right]^{5.334281} \quad (4-5)$$

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 4-6 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 內部撓度公之重新排序(如公式 4-7 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。

$$k = \left( \frac{P}{8d_0\ell_k^2} \right) \left\{ 1 + \left( \frac{1}{2\pi} \right) \left[ \ln \left( \frac{a}{2\ell_k} \right) + \gamma - 1.25 \right] \left( \frac{a}{\ell_k} \right)^2 \right\} \quad (4-6)$$

$$E_s = \left[ \frac{2P(1-\mu_s^2)}{d_0\ell_e} \right] \left[ 0.19245 - 0.0272 \left( \frac{a}{\ell_e} \right)^2 + 0.0199 \left( \frac{a}{\ell_e} \right)^2 \ln \left( \frac{a}{\ell_e} \right) \right] \quad (4-7)$$

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， $\ell_k$ 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)， $\mu_s$ 為土壤柏松比， $\ell_e$ 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【27】。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【19】，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>)。該回算流程中，除了改變撓度感應器之數量與位置外，並加入對版有限尺寸之考量。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：

$$AREA_7 = 4 + 6 \left( \frac{d_8}{d_0} \right) + 5 \left( \frac{d_{12}}{d_0} \right) + 6 \left( \frac{d_{18}}{d_0} \right) + 9 \left( \frac{d_{24}}{d_0} \right) + 18 \left( \frac{d_{36}}{d_0} \right) + 12 \left( \frac{d_{60}}{d_0} \right) \quad (4-8)$$

$$AREA_5 = 3 + 6 \left( \frac{d_{18}}{d_0} \right) + 9 \left( \frac{d_{24}}{d_0} \right) + 18 \left( \frac{d_{36}}{d_0} \right) + 12 \left( \frac{d_{60}}{d_0} \right) \quad (4-9)$$

$$\ell_k = \left[ \frac{\ln \left( \frac{60 - AREA_7}{289.708} \right)}{-0.698} \right]^{2.566} \quad (4-10)$$

$$\ell_k = \left[ \frac{\ln \left( \frac{48 - AREA_5}{158.40} \right)}{-0.476} \right]^{2.220} \quad (4-11)$$

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 4-8 與 4-10 是用來對一般混凝土鋪面之回算；公式 4-9 與 4-11 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【19】。

## 4.4 LTPP 柔性鋪面回算資料庫之結果分析

本研究利用國際間公認之美國長程鋪面績效資料庫(LTPP)，並擷取柔性鋪面(GPS-1 與 GPS-2)資料庫中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。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。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為分析之依據。

### 4.4.1 相關資料之擷取

本節將對試驗室及回算的彈性模數進行探討，並從美國長期鋪面績效 LTPP 資料庫中擷取所需之參數，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，因此在資料庫中之管理模組中，只擷取關於柔性鋪面 GPS-1 與 GPS-2 之試驗路段。

#### 1. 厚度：

鋪面厚度資料於基本(Inventory)與試驗(Testing)資料模組中，由於資料庫於各路段圖示是以試驗資料之厚度為主，因此本研究之厚度亦此為主。在鋪面厚度的表單內，將鋪面各層型態以編號方式加以區別如，如表 4-1 所示，代碼 3 為面層、4 為聯結層、5 為底層、6 為基層、7 為路基。因面層與聯結層所使用的材料型態類似，故將此兩層的鋪面厚度併為面層厚度，原始單位為 in。

表 4-1 DataPave 各層編碼之對應表

編碼	說明
1	Overlay
2	Seal Coat
3	Original Surface Layer
4	AC Layer Below Surface (Binder Course)
5	Base Layer
6	Subbase Layer
7	Subgrade
8	Interlayer
9	Friction Course
10	Surface Treatment
11	Embankment Layer

## 2. 養護維修資料：

由於本研究只針對維修前的資料進行績效模式之分析，需將有養護或維修後的資料排除。在建造(construction)次數編碼中，1 是代表此路段是第一次建造的資料，若路段有刨除再重新鋪築，建造次數會依序往上遞增，所以建造編碼 2 以上，皆表示鋪面為維修或是養護過後的資料。

## 3. 彈性模數：

首先針對試驗室的相關參數進行擷取，在資料庫中，試驗室的彈性模數可由 TST\_AC07\_V2\_MR\_SUM、TST\_UG07\_SS07\_WKSHT\_SUM 這兩個表單配合 TST\_L05B 以及 INV\_LAYER 得到面層底層基層和路基的彈性模數。在面層資料中，資料庫提供了各個路段的鋪面溫度分別為 5、25 及 40°C 的資料，本研究將選擇基準溫度設定為 25°C (77°F) 時所獲得之彈性模數。而底層、基層及路基之資料，在以往的研究中係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，以編號 1 視為路基，以此類推即可取得各層之彈性模數。然而，此種分類方法仍有缺陷，假設一個鋪面只有三層分別為面層、底層、路基，若按照上述的分層方法，此時會誤將底層之彈性模數歸類置基層，將路基彈性模數歸類於基層等。因此本研究將加入 TST\_L05B 及 INV\_LAYER 這兩個表單來加以輔助。TST\_L05B 此表單可將層細分為 AC(Asphalt concrete layer)、GB (Base)、GS(Subbase)、SS(Subgrade)；INV\_LAYER 可將層細分為 A(HMAC layer)、B(Base/Subbase layer)、G(Subgrade)，透過這兩個表單的輔助可以鋪面層分的更細，以免除上述之錯誤。

接著是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中，各層的彈性模數均位於 MON\_DEFL\_FLX\_BAKCAL\_SECT 此表單中。以鋪面回算層數編號來取得不同層之彈性模數。值得注意的是在績效資料庫使用手冊[FHWA, 2004]中指出，此層數編號的順序和試驗室之鋪面層數編號為相反的，因此可知回算層數編號為 1 的是指面層，以此類推即可取得各層之彈性模數。在擷取回算值資料時也會發生上述擷取試驗室資料所產生的錯誤，因此本次研究加入 MON\_DEFL\_FLX\_BAKCAL\_LAYER 此表單加以輔助分層，此表單亦可將鋪面層細分為 AC(Asphalt concrete layer)、GB (Base)、GS(Subbase)、SS(Subgrade)，透過這表單也可免除上述之錯誤發生。

## 4. 撓度盤資料：

根據 AASHTO 鋪面加鋪厚度設計方法得知，可藉著撓度值試驗來回算出路基回彈模數(MR)，此表單為 MON\_DEFL\_FLX\_BAKCAL\_BASIN，表單內有七個距離載重中心不同距離的感應器所測得的撓度值。

最後，利用 Access 程式進行資料之初步篩選與處理於資料表單中，以柔性鋪面試驗路段名稱與編號，將試驗室與回算之彈性模數匯整成一個資料庫。如此即可繪圖進行比較與分析。

#### 4.4.2 柔性鋪面回算結果比較

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【28】。

本研究依 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，如圖 4-2 ~ 圖 4-5 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 2.5 倍、底層 3.7 倍、基層 3.2 倍、路基 3.3 倍。其中，路基彈性模數應修正之比值約與 1993 年 AASHTO 之修正建議大致相符。

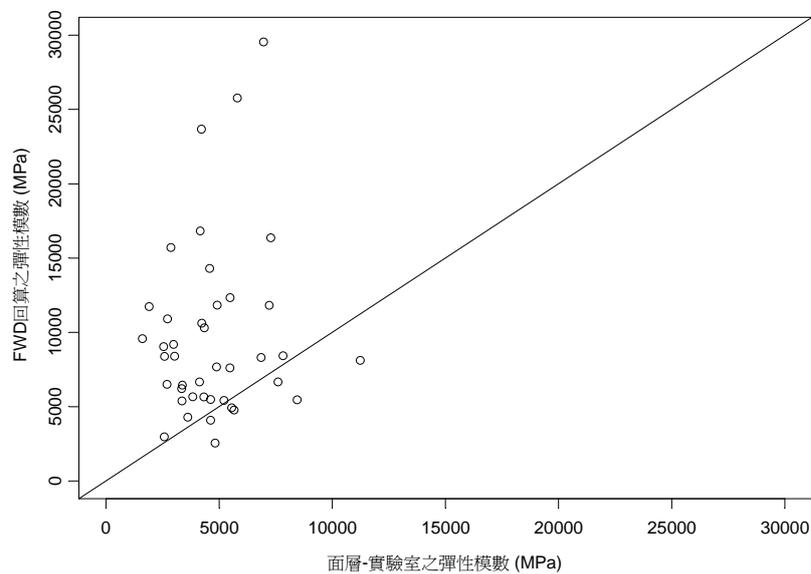


圖 4-2 LTPP 柔性鋪面面層彈性模數回算值與試驗值之比較

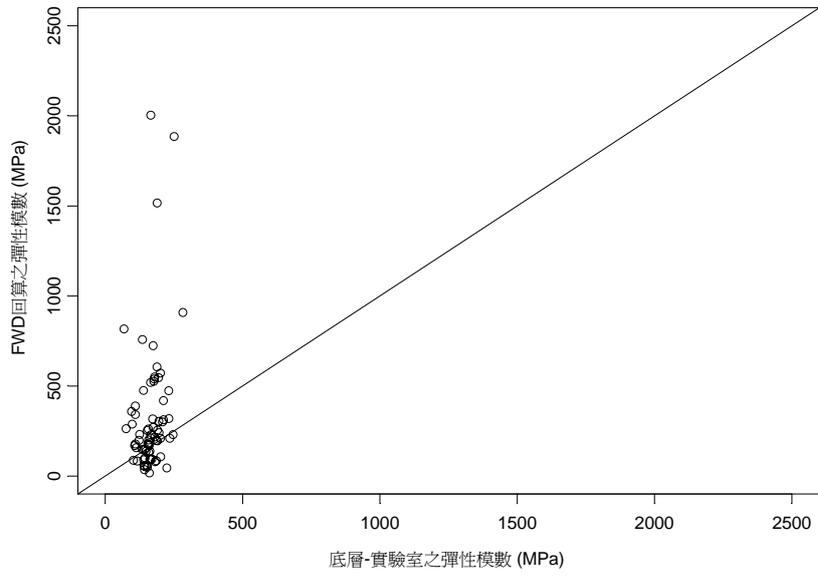


圖 4-3 LTPP 柔性鋪面底層彈性模數回算值與試驗值之比較

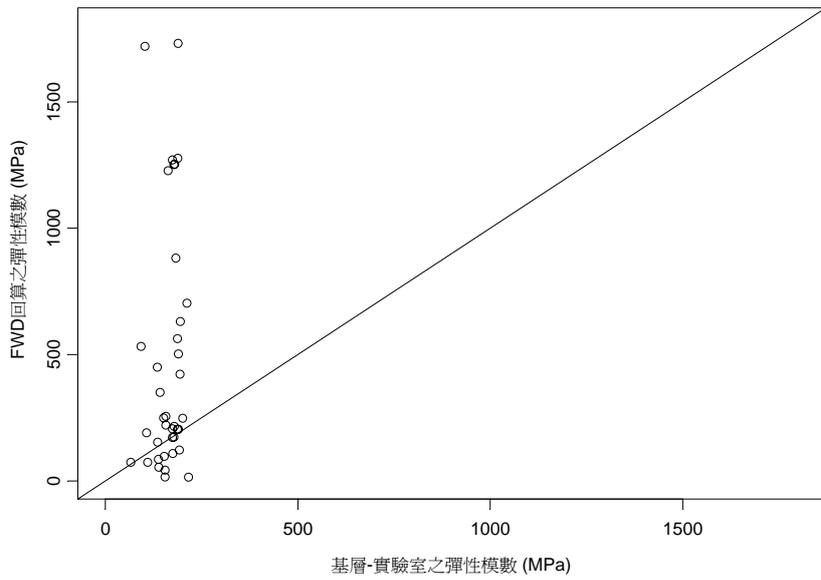


圖 4-4 LTPP 柔性鋪面基層彈性模數回算值與試驗值之比較

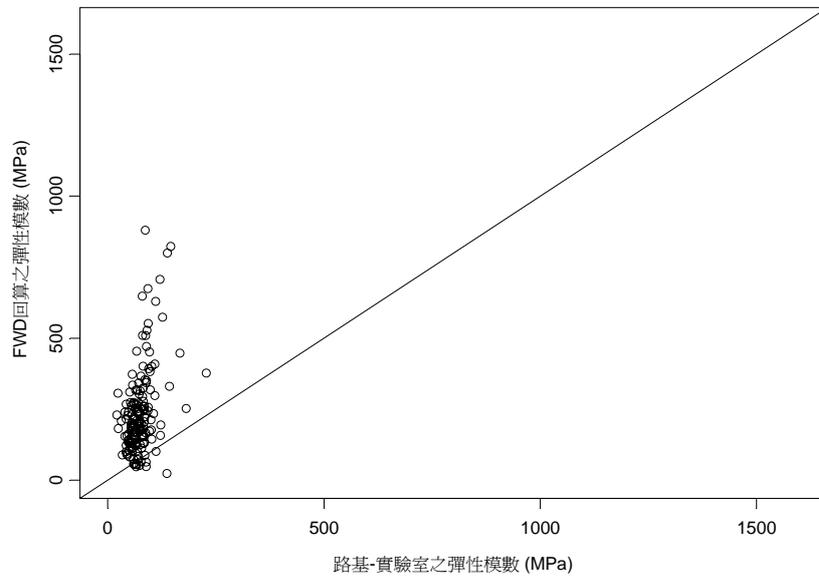


圖 4-5 LTPP 柔性鋪面路基彈性模數回算值與試驗值之比較

根據 AASHTO 鋪面加鋪厚度設計方法中，鋪面回算撓度試驗是藉著使用七個撓度感應器在距離載重中心 0、8、12、24、36 和 60 (in) 的變位資料，利用不同的墜落高度所撞擊路面造成的衝擊載重產生不同的重量落錘(40、53.3、71.1 kN) 與鋪面面層變形的關係。利用公式 4-4 計算得到以下之結果如表 4-2 所示，此結果為使用 9000(規範建議使用值)磅荷重作用下的撓度值回算分析：

表 4-2 柔性鋪面路基回彈模數回算(AASHTO 法)與試驗值之比較

P=9000	e.lab	e.back	d8	d12	D18	d24	d36	d60
平均 MR (MPa)	75	238	318	254	218	206	208	239
倍數	1	3.2	4.2	3.4	2.9	2.7	2.8	3.2

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，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。

## 4.5 LTPP 剛性鋪面回算資料庫之結果分析

同樣地，本研究亦利用國際間公認之美國長程鋪面績效資料庫(LTPP)，並擷取剛性鋪面(GPS-3 與 GPS-4)試驗路段的試驗室與利用 FWD 非破壞試驗回算出動態彈性模數之資料。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。在剛性鋪面各表單中，主要分為兩種基礎的資料：以緊密液體為基礎的有面層、基層彈性模數和路基反力模數；以彈性固體為基礎的有面層、基層和路基彈性模數。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，以瞭解現行鋪面回算方法之正確性與適用性。

圖 4-6~ 圖 4-8 為剛性鋪面在緊密液體基礎上之動態回算值與試驗室結果之比較。圖 4-9~ 圖 4-11 為剛性鋪面在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。

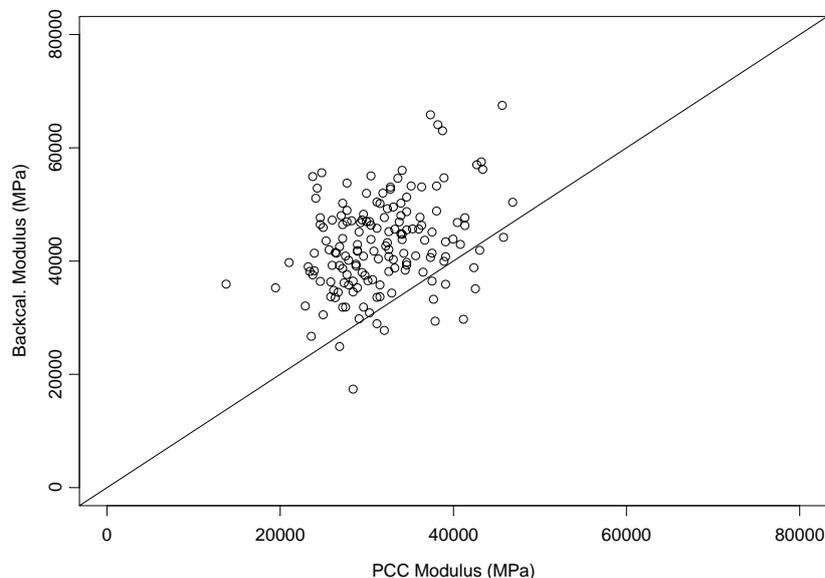


圖 4-6 LTPP 剛性鋪面面層彈性模數回算值與試驗值之比較(緊密液體)

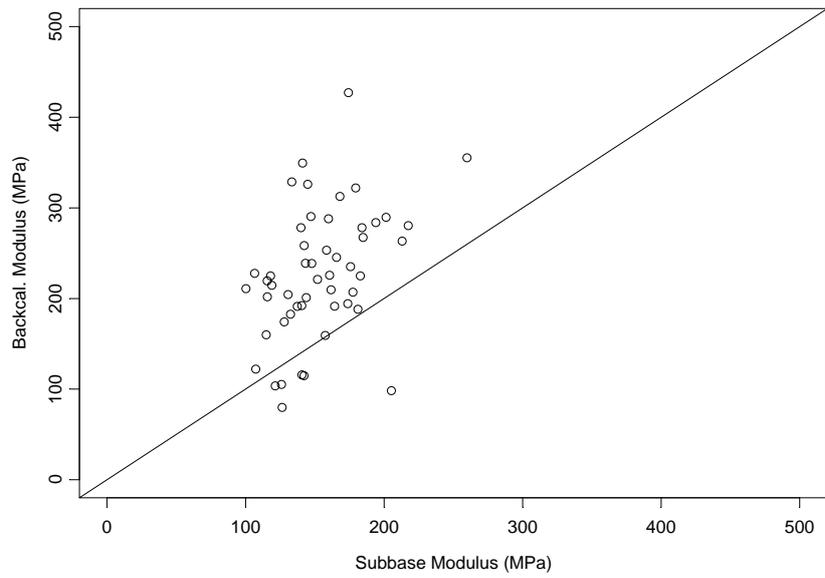


圖 4-7 LTPP 剛性鋪面基層彈性模數回算值與試驗值之比較(緊密液體)

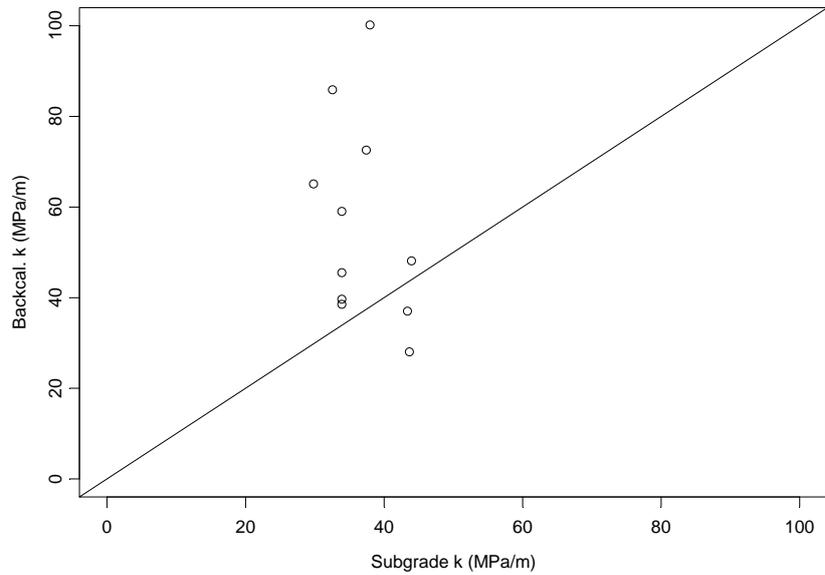


圖 4-8 LTPP 剛性鋪面路基反力模數回算值與試驗值之比較(緊密液體)

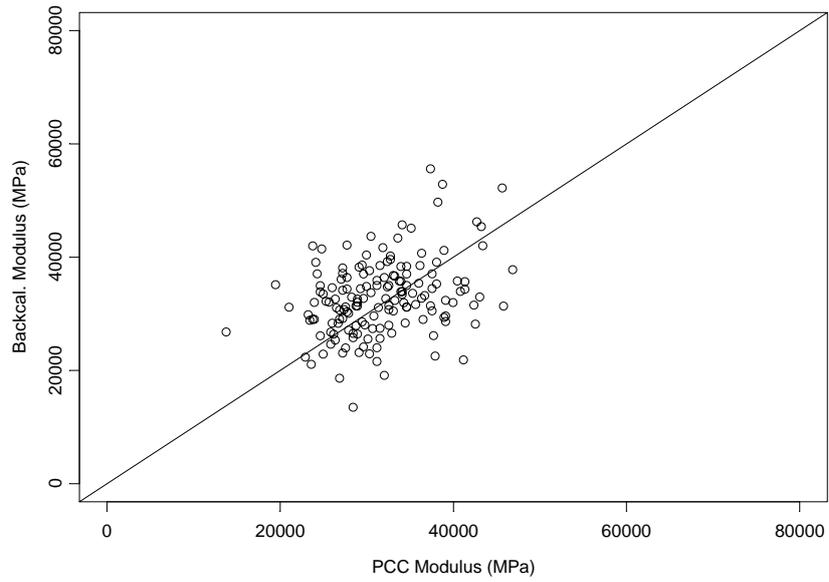


圖 4-9 LTPP 剛性鋪面面層彈性模數回算值與試驗值之比較(彈性固體)

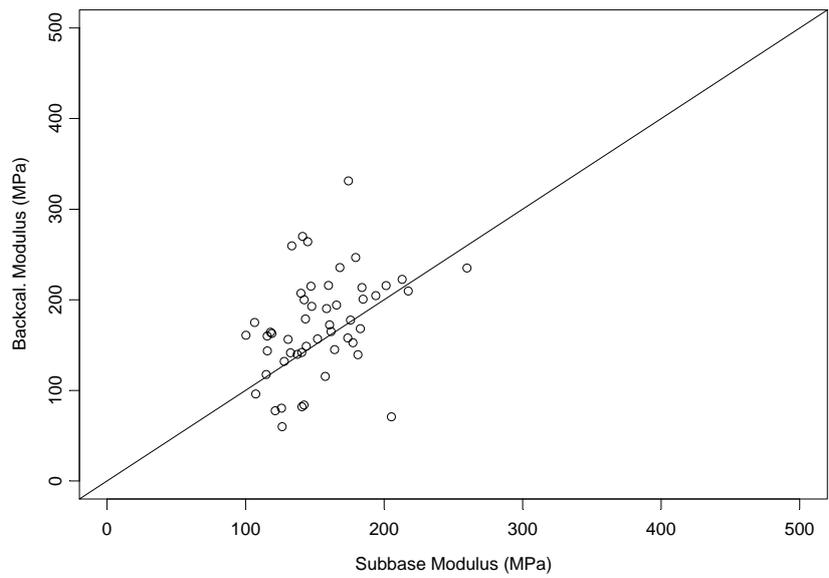


圖 4-10 LTPP 剛性鋪面基層彈性模數回算值與試驗值之比較(彈性固體)

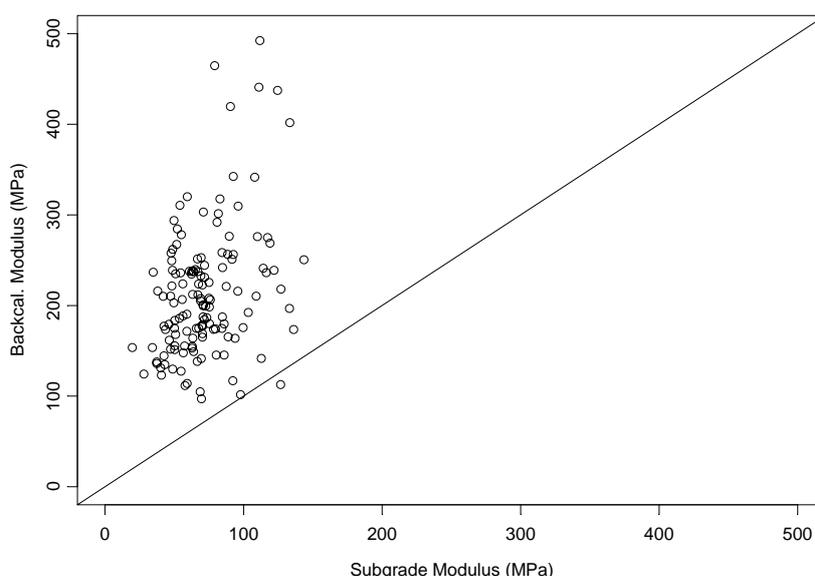


圖 4-11 LTPP 剛性鋪面路基回彈模數回算值與試驗值之比較(彈性固體)

根據結果顯示，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【29】。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【30】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。

#### 4.6 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【30】。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。

$$k = 0.296E_s \quad (4-12)$$

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

然而，Barenberg【31】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。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 4-12 顯示不同版厚下路基回彈模數與路基反力模數之關係。

$$E_s^{4/3} = 283.7 * h * k \quad (4-13)$$

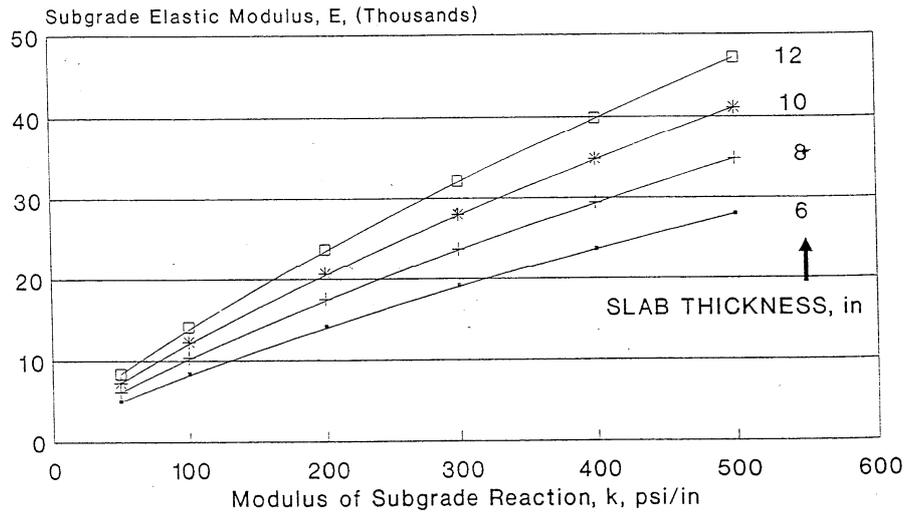


圖 4-12 不同版厚下路基回彈模數與路基反力模數之關係【31】

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，並據此利用迴歸的方式建立如下之關係式。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。將路基回彈模數與路基反力模數一起比較時，亦明確顯示出其關係的確會受版厚之影響，如圖 4-13 所示。

$$E_s = 0.9015(k * h)^{3/4} \quad (4-14)$$

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

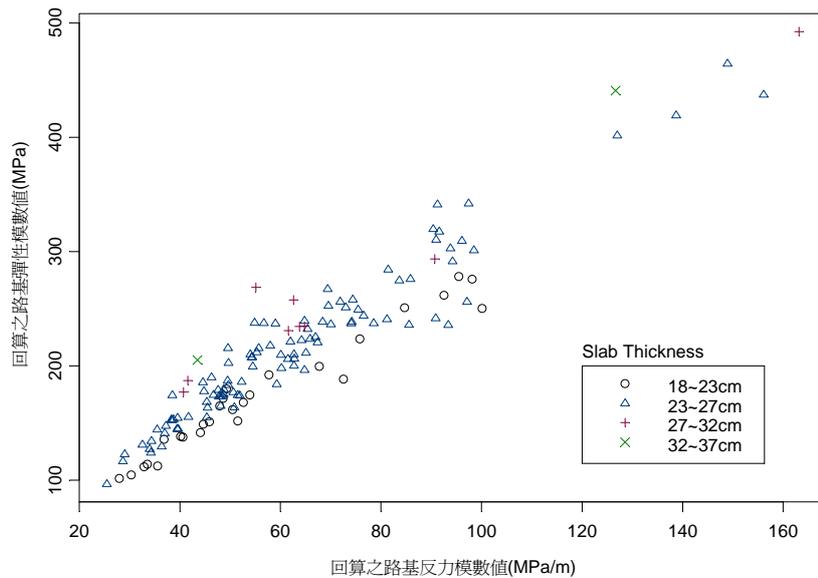


圖 4-13 回算之路基回彈模數與路基反力模數之比較

#### 4.7 鋪面回算程式之分析與應用建議

一般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。雖然可以用來做為鋪面回算的軟體程式很多，但因影響鋪面撓度量測結果之因素非常多，由於各回算程式的分析方式及基本假設不盡相同，因此必須適當的選用並瞭解其應用上之限制，才能使回算結果更加可靠。

有鑑於此，在現行的美國州公路暨運輸官員司協會【27】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。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。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 建議應乘上一折減係數值  $C=0.33$ ，以作為設計之路基回彈模數。AASHTO 對現有剛性鋪面結構之評估，係利用版理論的封閉型公式(緊密液體或彈性固體基礎)來進行回算，該回算方法主要是根據 Hall【22】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。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【27】。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。

在國際公認最具可靠性之 LTPP 資料庫中的柔性鋪面回算之彈性模數值，係採用以多層彈性理論為基礎之 MODCOMP4 回算程式而得。而剛性鋪面的非破壞撓度資料則是在無限版長之中央荷重假設條件下，採用 ERESBACK2.2 回算程式來回算各層之彈性模數值與路基反力模數值。然而，依 LTPP 資料庫所得之試驗室與回算的各層彈性模數比較結果顯示各層回算所得之彈性模數皆高於試

驗室之彈性模數值，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。

此外，美國聯邦飛航總署(FAA)亦建議以多層彈性理論為基礎所發展的 BAKFAA 回算程式(如圖 4-14 所示)來進行回算。該程式係以多層彈性理論程式 LEAF 為反算核心，配合迭代法之應用，以使程式求得之理論撓度與實測撓度之差值均方為最小。該程式以 Microsoft Visual Basic 6.0 編譯而成，可自 FAA 網站下載其程式碼(<http://www.airporttech.tc.faa.gov/naptf/download/index1.asp>)。程式執行時，使用者可以將某幾層材料之彈性模數值固定，再反算其餘各層之彈性模數值。此外，程式中所加附之多層彈性理論分析程式 LEAF，亦可被單獨用來計算在不同機輪組合型態下之鋪面結構反應。

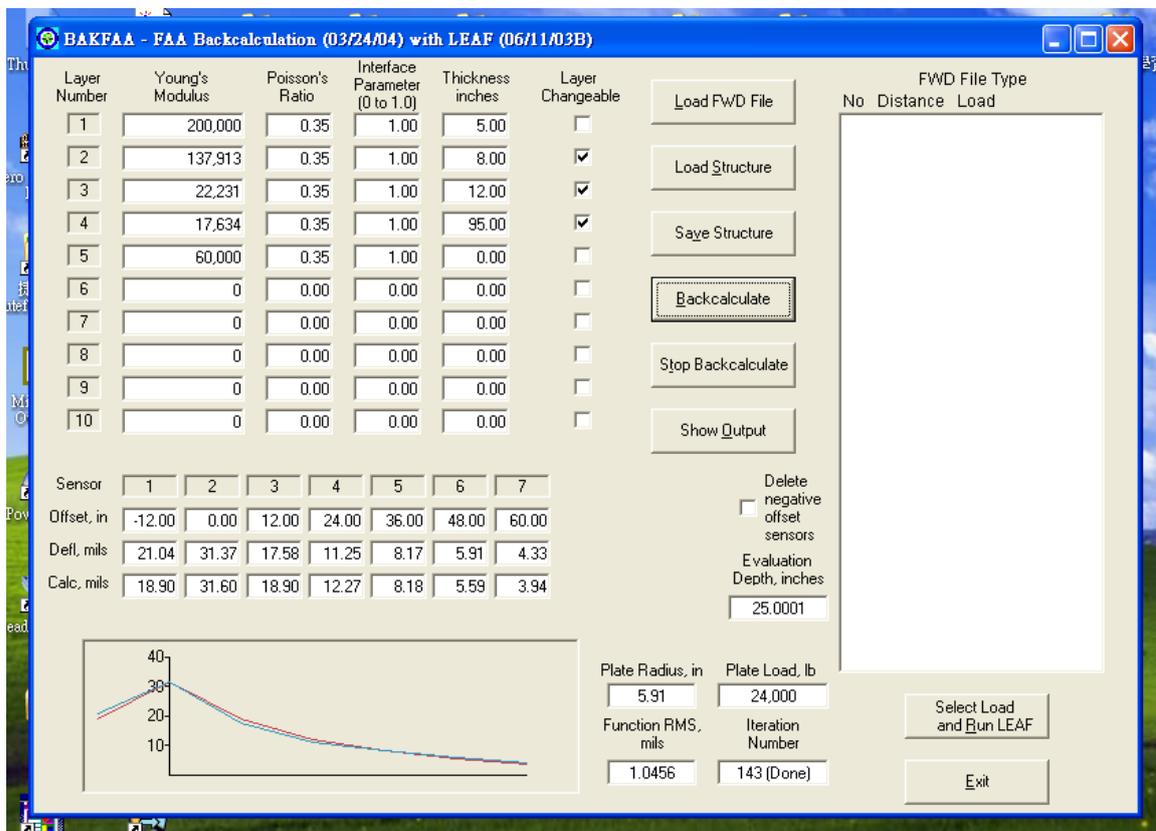


圖 4-14 BAKFAA 回算程式之分析案例示意圖

## 4.8 有限版尺寸對 LTPP 剛性鋪面回算之影響

### 4.8.1 AASHTO 建議之剛性鋪面回算流程

根據 AASHTO 在 1998 年的輔助設計手冊【19】所建議之回算流程述，除了前述之公式(4-8)~(4-11)外，針對無限版尺寸之一般混凝土鋪面(bare concrete pavement)，先以公式 4-15 估算出路基反力模數之初估值  $k_{est}$ ，其中，P 為荷重(lbs)、 $d_0$  為荷重盤中心點之最大撓度， $l_{est}$  為前一步驟所估算出來之相對勁度半徑(in.)、與  $d_0^*$  為依公式 4-16 所計算出之荷重盤中心點之無因次撓度。

$$k_{est} = \frac{P * d_0^*}{d_0 (\ell_{est})^2} \quad (4-15)$$

$$d_0^* = 0.1245e^{[-0.14707e^{(-0.07565\ell_{est})}]} \quad (4-16)$$

若是針對無限版尺寸之複合鋪面(composite pavement)，則先以公式 4-17 估算出路基反力模數之起始值  $k_{est}$ ，其中， $d_{12}$  為距荷重盤中心 12 英吋之撓度， $\ell_{est}$  為前一步驟所估算出來之相對勁度半徑(in.)、與  $d_{12}^*$  為依公式 4-18 所計算出距荷重盤中心 12 英吋之無因次撓度。

$$k_{est} = \frac{P * d_{12}^*}{d_{12} (\ell_{est})^2} \quad (4-17)$$

$$d_{12}^* = 0.12188e^{[-0.79432e^{(-0.07074\ell_{est})}]} \quad (4-18)$$

此外，針對有限版尺寸之一般混凝土鋪面與複合鋪面，在該手冊中亦建議應利用下列公式 4-19 與 4-20 來修正其  $d_0$  與相對勁度半徑( $\ell$ )之初估值：

$$AF_{d_0} = 1 - 1.15085e^{-0.71878\left(\frac{L}{\ell_{est}}\right)^{0.80151}} \quad (4-19)$$

$$AF_{\ell} = 1 - 0.89434e^{-0.61662\left(\frac{L}{\ell_{est}}\right)^{1.04831}} \quad (4-20)$$

其中，若是有限版長( $L_l$ )小於或等於二倍版寬( $L_w$ )， $L$  則以  $L = \sqrt{L_l L_w}$  來計算；若是有限版長大於二倍版寬， $L$  則以  $L = \sqrt{2} \times L_l$  來計算，簡列公式如下：

$$\text{if } L_l \leq 2 \times L_w, \quad L = \sqrt{L_l L_w} \quad (4-21)$$

$$\text{if } L_l > 2 \times L_w, \quad L = \sqrt{2} \times L_l \quad (4-22)$$

再者，針對有限版尺寸之一般混凝土鋪面與複合鋪面，在該手冊中亦建議應利用下列公式 4-23 來修正其路基反力模數之初估值：

$$k = \frac{k_{est}}{AF_{\ell}^2 * AF_{d_0}} \quad (4-23)$$

在 AASHTO 於 1998 的輔助設計手冊中，將一般鋪面回算的感應器位置改變為距離載重中心 0, 8, 12, 18, 24, 36, 60 英吋，而複合鋪面改為距離載重位置 12, 18, 24, 36, 60 英吋，將各位置的撓度值代入公式中求得 AREA 值，再利用公式計算假設無限版塊的相對勁度半徑與路基反力模數，計算  $d_0$  和  $\ell$  的調整因子後即可求出調整為有限版塊的動態路基反力模數，將回算出的動態路基反

力模數乘以 1/2 以估算有效的靜態路基反力模數值【19】。

#### 4.8.2 LTPP 剛性鋪面回算與有限版尺寸之考量

為更進一步了解前述回算結果之變異情形，本研究亦嘗試擷取 LTPP 非破壞性撓度試驗回算結果之資料與試驗室資料，並深入分析鋪面版有限的尺寸、與荷重傳遞效應，可能對剛性鋪面回算結果之影響。本研究亦在此深入瞭解回算程式之原理與探討其對於現地資料回算之適用性。

本研究在此僅先擷取 JPCP(GPS-3)之剛性鋪面試驗路段，為簡化鋪面在加鋪或重建之後的鋪面特性，因此只選取未重建或重建前的資料。其中，試驗室的路基彈性模數可由 TST\_UG07\_WKSHT\_SUM 表單中獲得。回算的路基彈性模數與路基反力模數的統計資料均位於 MON\_DEFL\_RGD\_BAKCAL\_SECT 表單中，表單中又分為兩種基礎，路基反力模數以緊密液態為基礎，路基彈性模數是以彈性固態為基礎，各層模數都有平均值、最大值、最小值以及標準誤差值，本研究是採用平均值。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匯整成一個資料庫，並考慮一般鋪面資料中的接縫間距，利用統計軟體分析接縫間距對於回算與試驗結果的影響，進行繪圖比較與分析。

##### 1. 一般資料擷取

LTPP 的回算方式是以無限版塊為基礎，因此在回算參數中並沒有關於版塊尺寸的資料，為能夠了解版塊尺寸對於回算結果的影響，因此必須從一般鋪面資料中取得，在表單 INV\_GENERAL 與 INV\_PCC\_JOINT 分別登錄了車道寬度與接縫間距，LTPP 提供的接縫間距為 11.5 到 30(ft)，為避免擷取到錯誤之 JPCP 資料，因此僅篩選出接縫間距 20ft 以下(含 20ft)的資料。INV\_AGE 表單中登錄了鋪面的建造日期與開放交通日期，可提供鋪面的年齡對於回算結果的影響。在一般性資料中還提供了現地的路基彈性模數，在表單 INV\_SUBGRADE 與 INV\_UNBOUND 中皆有提供此模數，但這兩項表單中的資料大多為重複，且 INV\_SUBGRADE 能提供的資料筆數較多，因此對於現地路基彈性模數的資料擷取僅使用這項表單。

##### 2. 回算資料擷取

LTPP 對於剛性鋪面的回算資料提供了四項表單，分別是撓度盤資料 MON\_DEFL\_RGD\_BAKCAL\_BASIN、回算過程中使用參數 MON\_DEFL\_RGD\_BAKCAL\_LAYER、各路段位置的回算資料 MON\_DEFL\_RGD\_BAKCAL\_POINT、以及從各路段位置篩選過允許誤差的回算統計資料 MON\_DEFL\_RGD\_BAKCAL\_SECT，在撓度盤的篩選以有通過允許誤差的資料為主。

##### 3. 試驗資料擷取

試驗室的路基彈性模數可透過 TST\_UG07\_SS77\_WKSHT\_SUM 表單中取得，這項表單中提供了各路段的路基與底層(或基層)的彈性模數，須依靠表單中的 LAYER\_TYPE 加以區別，才能剔除路基以外的參數資料。且因試驗室的資料筆數眾多，因此在資料篩選後根據不同的試驗時間，將路基彈性模數加以平均，整理成便於比較的現地資料。

LTPP 資料庫中提供上萬筆的現地撓度盤資料，為能有效的篩選適用的撓度盤資料，利用資料庫中僅選擇允許統計分析標準的撓度盤，AREA 回算時建議採用荷重 40KN，因此本研究也將此落錘高度設定為篩選條件，挑選出撓度盤資料。本研究並利用 AASHTO 於 1998 年提供的回算公式，並配合一般資料的接縫間距與車道寬度資料來做回算。回算過程中，同時考慮未做有限版尺寸修正、與須做有限版尺寸修正等兩種方式。本研究再將此回算結果依版長區分與現地路基反力模數資料相比對，發現其與 LTPP 所提供的回算結果極為相似，如圖如圖 4-15、圖 4-16 所示。此外，為瞭解回算之特性，本研究再將前述回算結果依正規化版長( $L/l$ )來區分，並與現地路基反力模數資料相比對，如圖如圖 4-17、圖 4-18 所示。

雖然單看版塊長度時較短的版塊資料點位較高，但以正規化版長( $L/l$ )做分析時並沒有很明顯的區別，在做過有限版尺寸修正之後反而更差，因此，AASHTO 建議的有限版尺寸修正對於現地可能並不適用。推究其成因可能是因有限版尺寸之效應必須同時配合版塊間的荷重傳遞效應，當版塊互鎖的情況良好時，有限版尺寸與無限版尺寸之結構反應有可能相近似。當再次查閱 LTPP 回算報告時發現在該報告中亦不採用版尺寸修正之公式【30】。

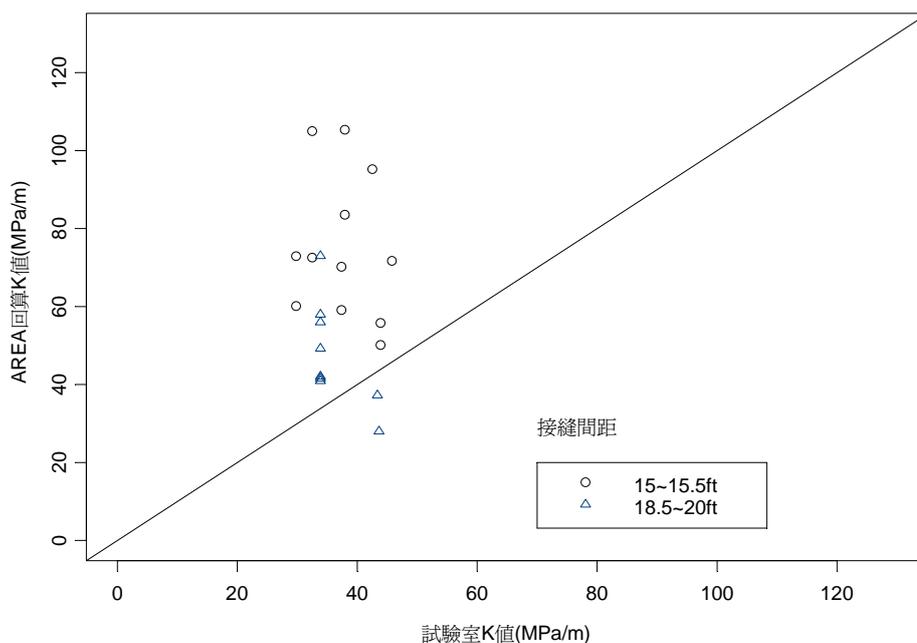
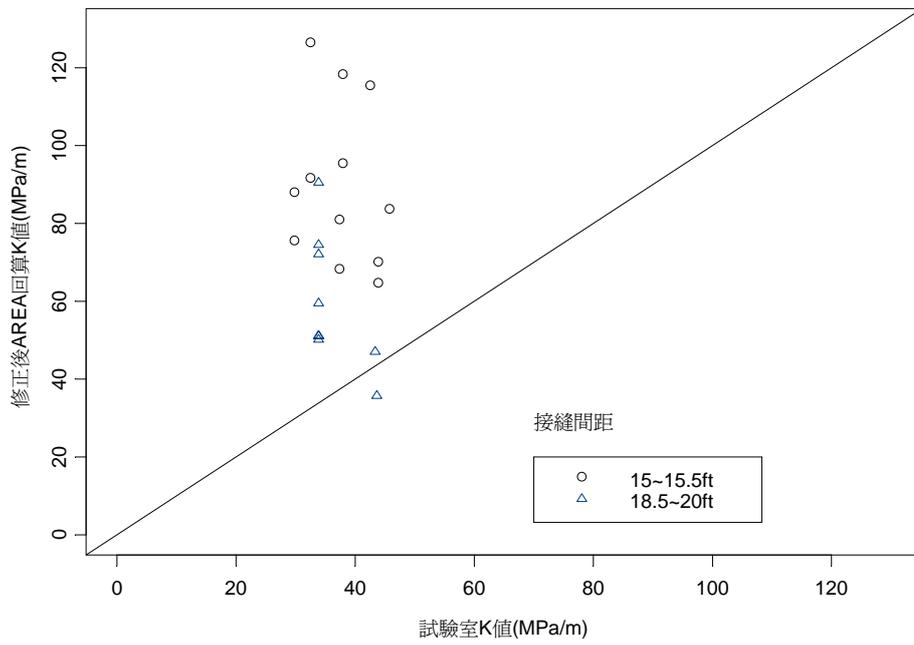


圖 4-15 未做有限版尺寸修正之回算結果比較(依版長區分)



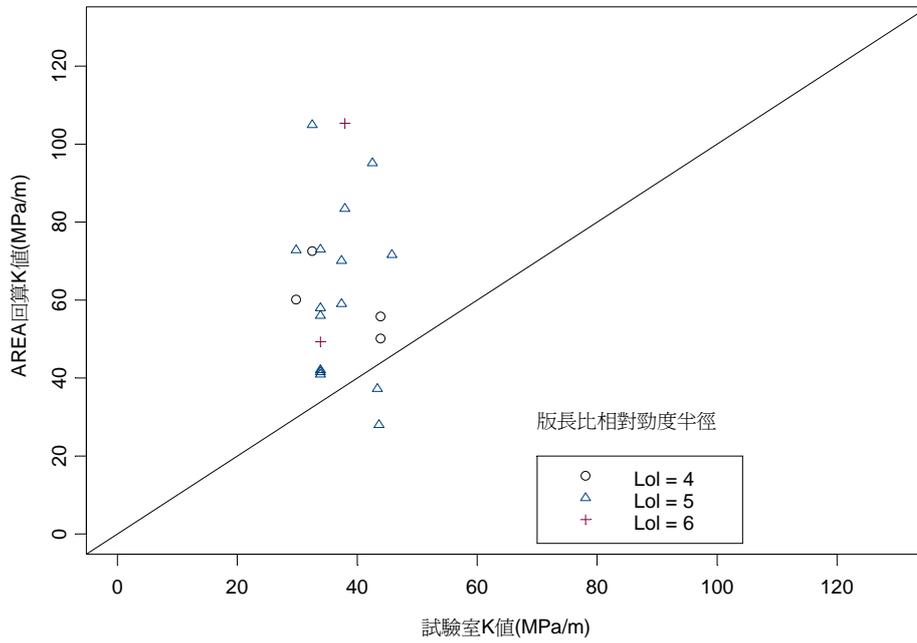


圖 4-17 未做有限版尺寸修正之回算結果比較(依  $L/l$  區分)

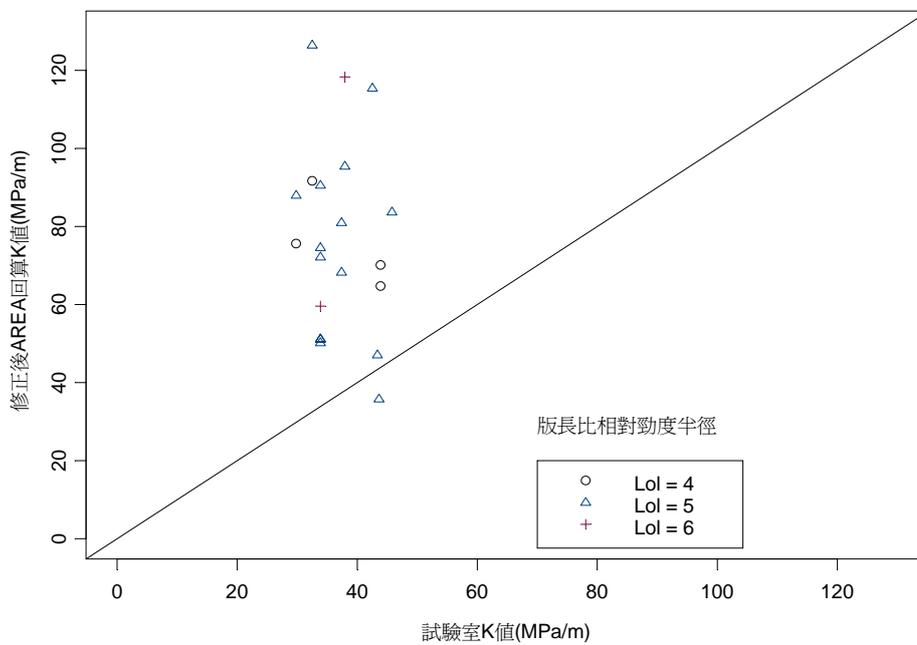


圖 4-18 有限版尺寸修正後之回算結果比較(依  $L/l$  區分)

## 第五章 ACN/PCN 計算流程之探討與修正

### 5.1 現有機場鋪面評估方法之探討

#### 5.1.1 機場鋪面評估機制

FAA 在 2004 年所提出之 AC 150/5370-11A 「機場道面非破壞檢測評估」規範中【1】，建議以非破壞檢測方法評估 PCN 之準則。利用力學衝擊式的非破壞檢測設備，即所謂的落重式撓度儀(Falling Weight Deflectometer, 簡稱 FWD)，係針對機場道面特性，藉由模擬航機機輪的載重，給予道面衝擊能量，並藉由所裝備的地音探測器(Geophone)量測撓度盤，其所提供的數據除作為各項道面評估參數外，更可藉由回算分析求取道面結構各層楊氏模數，如圖 5-1 所示。在 FAA AC 150/5370-11A 中建議利用衝擊勁度模數(Impulse Stiffness Modulus, ISM)進行其版塊之評估其公式(如公式 5-1 所示)。其中  $ISM$  表衝擊勁度模數； $L$  表荷重(kips)； $D_0$ =第一點撓度值(in)。而在其中亦建議角隅荷重位置所得之撓度值進行其耐久性評估，其評估主要利用下列公式 5-2，其中  $ISM_{ratio}$ ：衝擊勁度模數比； $ISM_{slab\_center}$ ：版中央荷重衝擊勁度模數； $ISM_{slab\_corner}$ ：版角隅荷重衝擊勁度模數； $ISM_{slab\_joint}$ ：版接縫荷重衝擊勁度模數。

$$ISM = \left( \frac{L}{d_0} \right) \quad (5-1)$$

$$ISM_{ratio} = \left( \frac{ISM_{slab\_center}}{ISM_{slab\_corner}} \right) \quad or \quad \left( \frac{ISM_{slab\_center}}{ISM_{slab\_joint}} \right) \quad (5-2)$$

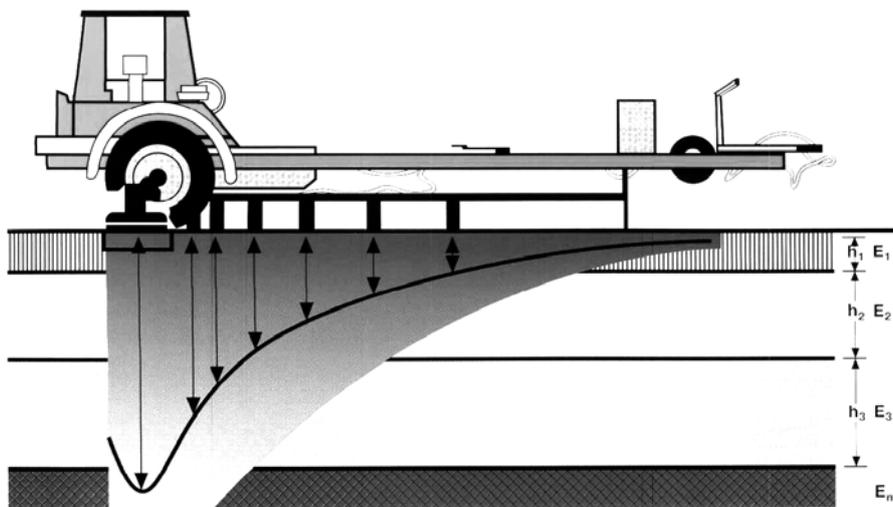


圖 5-1 落重式撓度儀檢測示意圖

當其 *ISMratio*(衝擊勁度模數比)大於 3 時，其版塊可能有耐久性之問題，若介於 1.5 至 3 時其版塊之耐久性尚可，當其小於 1.5 時則表示耐久性佳。此一方法即為簡單，可使工程師快速評估其鋪面之狀況，且在進行鋪面結構更細部評估時，可利用此一指標快速針對整個機場鋪面系統進行分區以更快得到機場鋪面之強度反應，以利未來維修以及養護優先順序之排程，其示意圖如圖 5-2 所示。

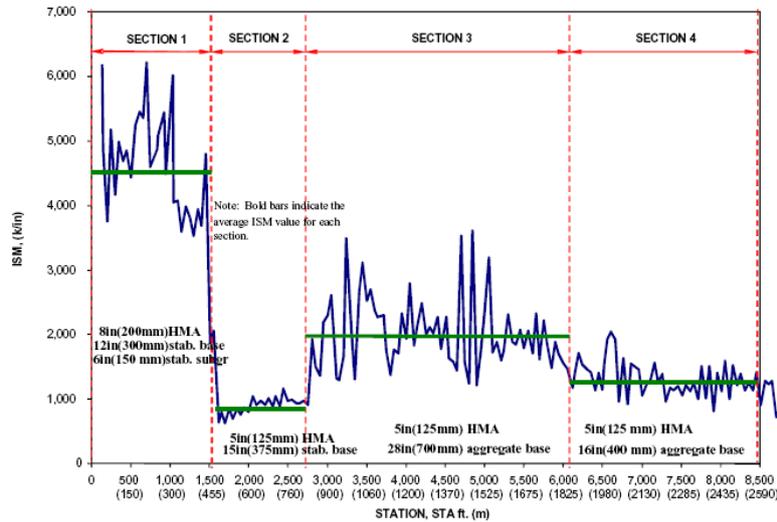


圖 5-2 利用 ISM 進行鋪面分區示意圖【1】

在 FAA 規範建議【1, 32】中提及「鋪面各點回算彈性模數後之平均值、標準差以及變異係數可用於鋪面設計以及評估之依據；可利用平均值減去一個標準差做為鋪面設計以及評估之用，但其資料必需呈常態分配並且需剔除異常值；若未剔除異常值則採用小於全段 85% 機率下之資料做為鋪面參數，但資料必須為常態分配，且資料必需根據量測結果之特性進行分段以利於藉由利用此一指標快速針對整個機場鋪面系統進行分區(圖 5-2)，以利後續相關分析」。此一評估法廣為國內外機場鋪面評估所使用【4, 5, 8, 33】。

### 5.1.2 ACN/PCN 分析程序說明

根據 FAA 規範，ACN/PCN 分析程序與計算流程如圖 5-3 所示。在 FAA 評估流程中，可大致將 ACN/PCN 計算流程分為：(a)交通量評估；(b)鋪面結構狀況評估；與(c) 計算 ACN/PCN 值等三大步驟。茲將此評估程序與應注意事項分述如下：

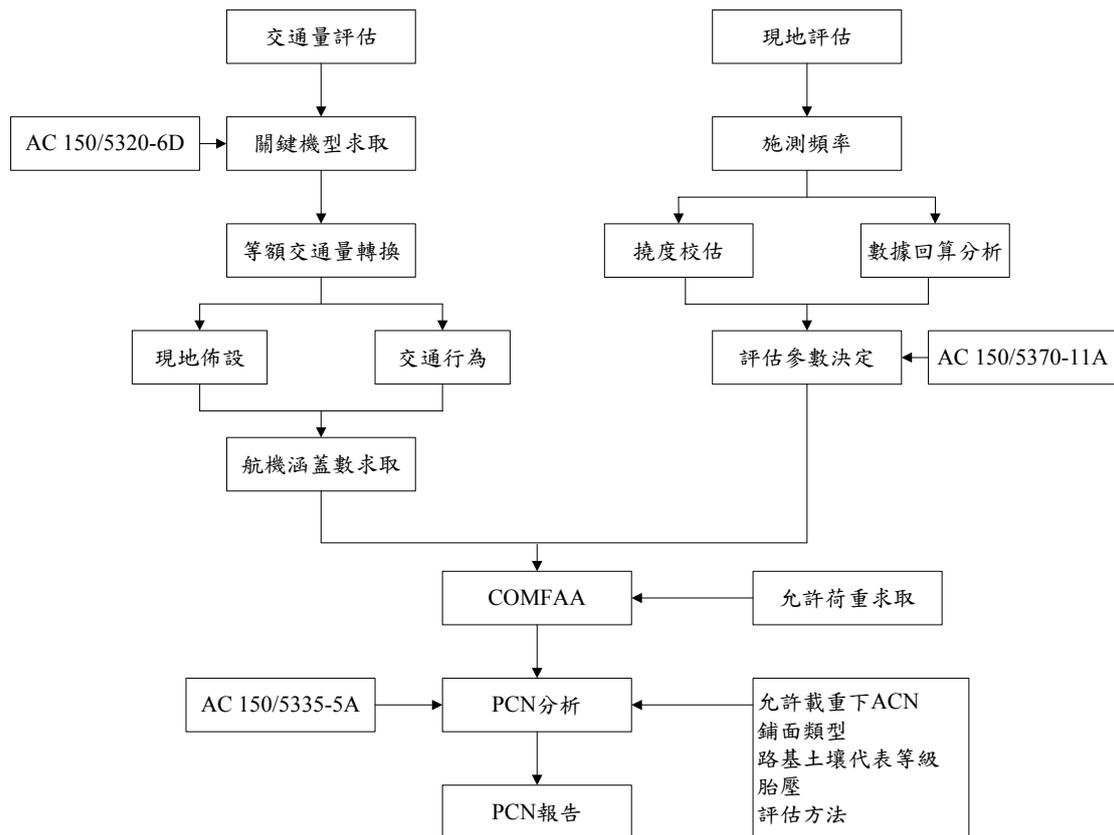


圖 5-3 ACN/PCN 分析程序與計算流程圖

### (a) 交通量評估

在航機交通量分析上，FAA 於 AC 150/5335-5A 【7】 中建議，可根據 AC 150/5320-6D 【32】 中之「等額交通量」之計算方法，先將各機型進行評估，找出影響最大之航機做為上述關鍵機型，爾後將所有機型之交通量轉換為關鍵機型之交通量，再根據其關鍵機型之通過涵蓋比(pass-coverage ratio)轉換成航機對鋪面造成最大影響之交通次數。接著再根據機場不同的佈設方法以及航機的交通行為進行交通量的修正，其稱之為通過-交通循環比(pass-traffic cycles ratio, P/TC)。以圖 5-4(a)為例，並且其需要至停機坪加油，因此下降時荷重已大幅減輕，並且其由於有二滑行道因此在一次交通循環中僅會有一次大荷重(起飛時加滿油之狀況)壓過鋪面，故其 P/TC = 1。若其不需至停機坪加油，表示其在下降時荷重未有大幅度減輕因此降落以及起飛均需計算，故其 P/TC = 2。以圖 5-4(b)為例，若航機需至停機坪加油，由於僅有一條中央滑行道，因此航機加滿油後至停機坪移動到跑道準備起飛，需要繞行跑道，因此會有兩次大荷重壓過鋪面，故 P/TC = 2。若航機不需加油因此必須增加計算下降時對鋪面之影響，故故 P/TC = 3。其整理如同表 5-1 所示。最後即可根據關鍵機型之涵蓋數、航機起降行為以及設計年限等資料配合現地評估結果求出現地之 PCN 值。

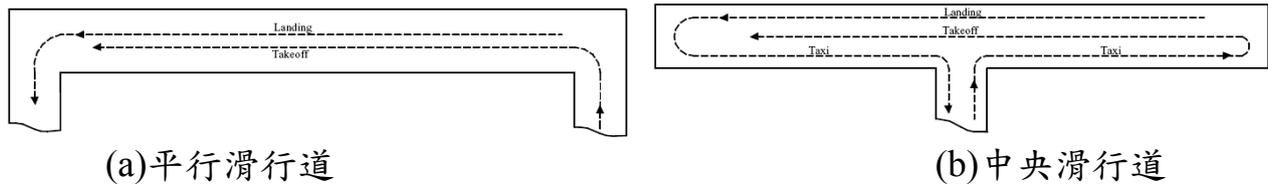


圖 5-4 滑行道佈設示意圖

表 5-1 P/TC 數值對應表

滑行道形式	航機是否需要加油	P/TC
平行滑行道	是	1
	否	2
中央滑行道	是	2
	否	3

### (b) 鋪面結構狀況評估

在鋪面狀況評估方面，FAA 建議可參考 AC 150/5370-11A 之評估方法進行現地評估，其落重式撓度試驗建議之頻率如表 5-2 所示。在其規範中建議可利用 ISM 進行鋪面分段，並且考量使用「回算平均數減去一個標準差」做為鋪面設計與評估參數。而由於其現地鋪面結構狀況之評估亦考量到鋪面回算等問題，根據 AASHTO 1993 年出版之鋪面設計準則【27, 19】中提及，當軸壓減去圍壓小於 6 psi 時，所得之回彈模數值並不穩定，在軸壓減去圍壓大於 6 psi 時所測得之結果較大。而在現地 FWD 施測時，均是在軸壓減去圍壓小於 6 psi 之狀況下，因此依照 AASHTO 之建議，剛性鋪面回算所得之路基反力模數應乘上 1/2 之校正係數，柔性鋪面則需乘上 0.33 做為校正係數。因此在進行鋪面回算時需特別注意並且給予適當之校正，如此才可得到較可靠之評估結果。

由於 ACN/PCN 評估方法在剛性鋪面係以 Westergaard 理論解做為出發點，在其理論解中僅為二層鋪面系統，但在進行 PCN 現地評估時，若在鋪面版下尚有混凝土穩定處理基層或是級配層，可根據在 FAA 規範【32, 34】中相關的建議，將雙層版利用材料力學之方式轉換成單層版，若鋪面版下方為級配層時則需將其轉換成底層與路基之複合 K 值，其轉換方式如圖 5-5 所示。

此外，文獻中亦指出鋪面版之尺寸、溫度、相鄰版塊荷重傳遞、濕度、動態或靜態回算方法等，對於回算之評估之結果皆有極大之影響【35, 36, 37】。非破壞撓度試驗數據主要是反應鋪面結構及路基土壤的現況，然而對於進行施測路段的外在環境變化(氣候、溫度、路基飽和等)以及路段本身的結構組合(層數、厚度)之不同。以溫度效應為例，在以往研究中【36】建立柔性鋪面之試驗斷面，收集連續一年(跨越春、夏、秋、冬四季)之撓度資料，以建立撓度校正模式及便於後續之分析。溫差及相鄰版塊荷重傳遞效應亦會直接影響到剛性鋪面回算之結果【24, 25, 26】。在正溫差時會產生版中央喪失支承之狀況造成撓度偏大之狀況，造成評估結果低估之狀況，而若為負溫差時角隅則產生翹曲之狀況，此時

若進行耐久性評估亦會有低估之狀況。因此一個正確的校正方法極為重要。在進行整體鋪面狀況評估時，若不針對其撓度值進行校估至一標準模式，即無法可靠的評估其鋪面狀況。

表 5-2 FAA 落重式撓度試驗建議頻率【1】

鋪面型式	檢測位置	個案層級		路網層級	
		距中心線(m)	間距(m)	距中心線(m)	間距(m)
剛性鋪面	版中央	3	30		
		9	30~60	3	60-120
		20	120		
	縱向接縫	3	30		
		9	30~60	3	120
		20	120		
	橫向接縫	6	60		
		12	120	--	--
		18	120		
	角隅	6	60		
		12	120	--	--
		18	120		
柔性鋪面	中心線	3	30		
		9	30~60	3	60-120
		20	120		

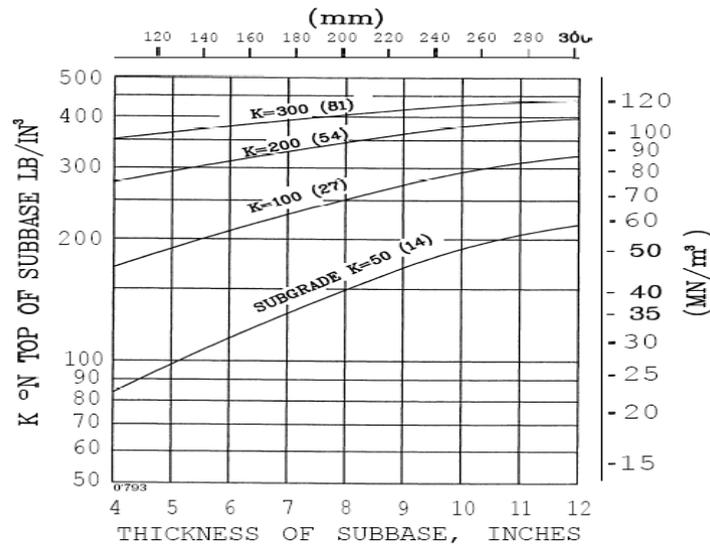


圖 5-5 複合 k 值之轉換圖【32】

**(c) 計算 ACN/PCN 值**

在求得關鍵機型以及鋪面代表參數後，可利用 COMFAA 或是 ICAO 本身所附之圖表進行 PCN 值之評估【7】。COMFAA 係由美國 FAA 根據 1997 年

ACNComp 程式進一步修正發展，以 ICAO Annex 14 中 ACN 之定義及方法，分析計算剛性及柔性道面 ACN 值，並內建有 60 餘種預設航機資料供使用，或由使用者自行定義機型相關參數，其中包含航機重量、主起落架機輪數量及位置、胎壓、主起落架承重百分比等相關航機相關參數；該軟體除可做為 ACN/PCN 計算之用外，亦提供厚度計算的功能，如圖 5-6 所示。

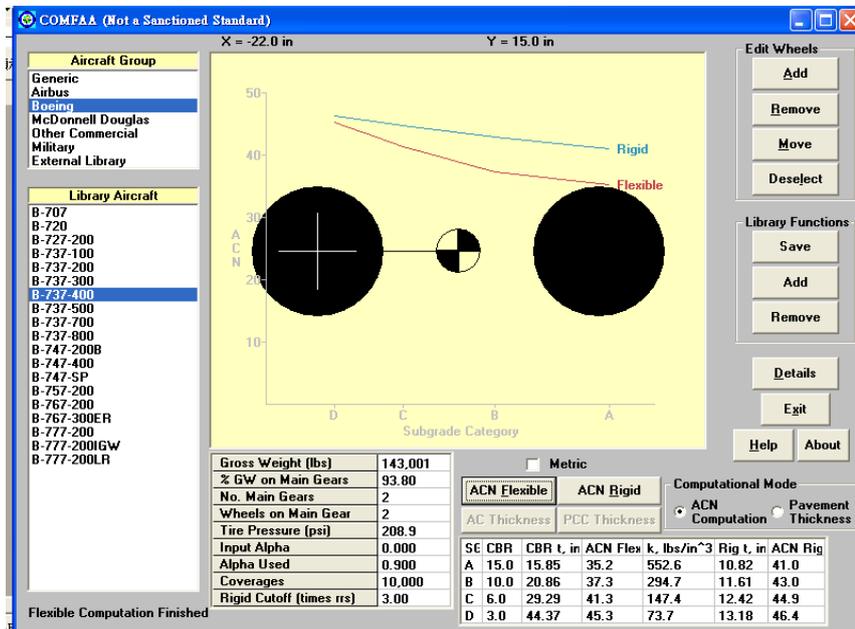


圖 5-6 COMFAA 程式之分析示意圖

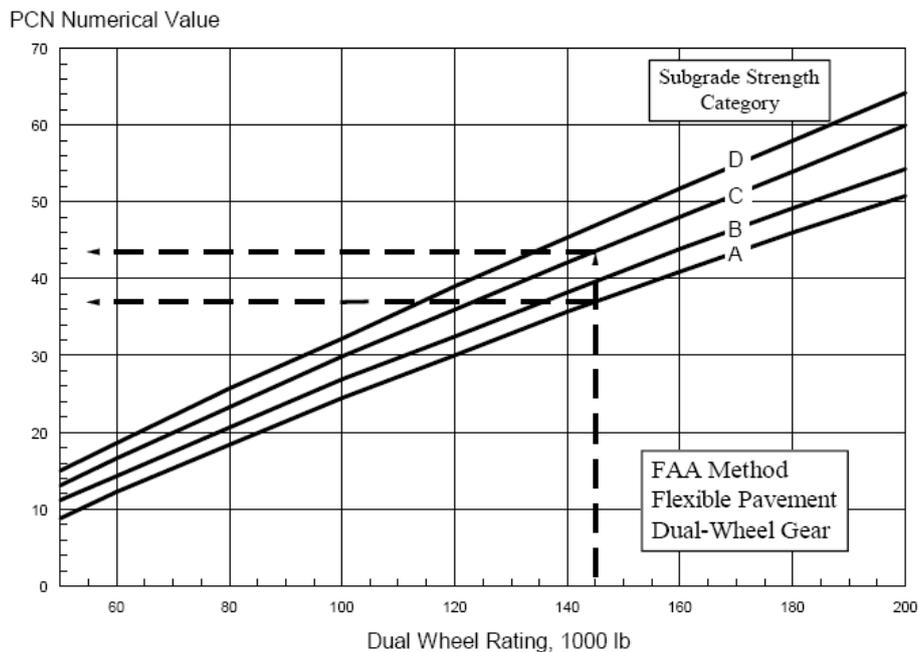


圖 5-7 柔性鋪面 PCN 值決定示意圖【34】

根據其 PCN 值之決定方法(圖 5-7)【6, 7, 34】可發現，PCN 值為一相對之數值，當路基土壤分級較差時，PCN 值則相對變高，因此若單一僅考量到 PCN 之

數值而未考慮道基之影響，僅是更改道基土壤之編碼使其 PCN 值變高，將會造成原先評估之航機之 PCN 值亦隨之變高，原先可起落之航機將變成無法起降，因此單獨評估 PCN 數值或是其任何代碼並無意義，一個完整的 PCN 評估報告，應包含完整的鋪面狀況、道基分級、胎壓以及評估方法，如此才可完整評估跑道。

雖然 FAA 150/5335-5A 中已有建議之流程與方法，下表 5-3 為國外在相同鋪面上利用不同方法對 PCN 評估之結果，由其結果中可發現，即使是相同之鋪面在不同的評估方法下亦會有所差異，以柔性鋪面之評估而言，在相同的鋪面結構其最大差異至 200% 以上。因此本研究未來將針對其原因以及評估流程進行相關探討，以了解其真正原因所在。

表 5-3 PCN 計算結果表【2, 3】

Method	PCN value	Code
<b>Flexible Pavement</b>		
-CBR method S-77-1	55	
-PCASE-CBR	78	
-PCASE-LEA	69	FBWT
-Shell 85%	86	
-Barker et. Al	56	
-U.S. Corps of Engineers	64	
-APSDS-MWHGL-data	43	
<b>Rigid Pavement</b>		
-PCA-PDILB	77	
-PCASE-Westergaard	75	
-PCASE-LEA	79	RCWT
-UEC	78	
-Domemichini	66	
-Corps of Engineers	81	
-Vencon 1992	71	

### 5.1.3 航機輪軸型式新編碼方式

隨著波音公司推出 B-777 航機後，其特殊的輪軸型式(雙輪三軸)以及大荷重(60 萬磅以上)對於鋪面所造成之效應一直為相關研究領域所探討，且隨著空中巴士公司推出 A 380-800 型客機，其腹輪與 B-777 之主輪相同採用雙輪三軸之型式，且重量高達百萬磅以上，FAA 為方便未來各種不同輪軸型式之航機發展以及統一其輪軸型式之代碼，因此 FAA 於 2005 年推出 AC 5300-7 此一準則，先行針對各不同輪軸型式進行編號，以利未來工程師以及相關研究人員可快速得知各航機之輪軸型式，進行後續之相關評估與分析。其主要定義方法為將各航機之輪軸分為主輪(main wheel)以及腹輪(body wheel ; belly wheel)，並將各不同類型之輪軸型式給予編號以及代碼，根據其定義之編碼方式針對各不同航機之輪

軸型式進行編碼，其編碼方式如圖 5-8 所示，各碼所代表意義如圖 5-9 所示。根據 AC 5300-7 之編碼方式針對國內各常見機型之編碼結果如表 5-4 所示。

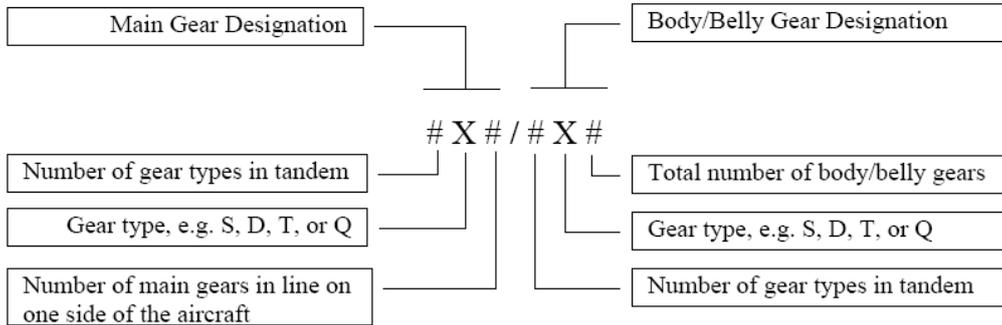


圖 5-8 輪軸編碼示意圖

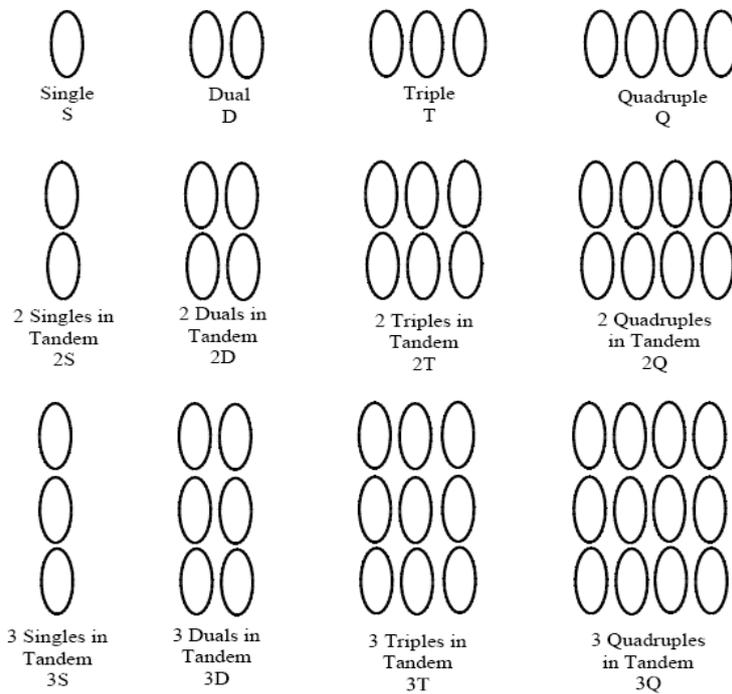
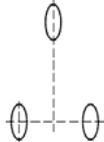
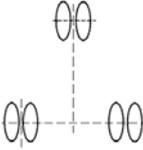
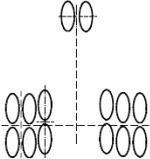
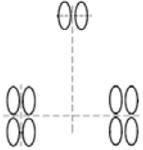
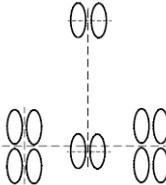
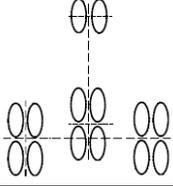
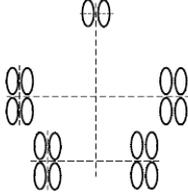
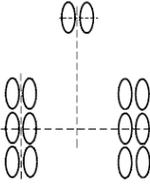
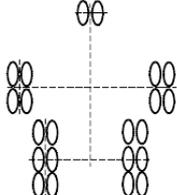


圖 5-9 輪軸代碼示意圖

表 5-4 各航機輪軸型式編號表

輪軸型式	主輪編碼	腹輪編碼	完整編碼	代表機型
	S	--	S	F-14、F15
	D	--	D	B-737
	2T	--	2T	Boeing C-17
	2D	--	2D	B-757
	2D	D1	2D/D1	DC-10
	2D	D2	2D/D2	A340-600
	2D	2D2	2D/2D2	B-747
	3D	--	3D	B-777
	2D	3D2	2D/3D2	A380

### 5.1.4 現有機場鋪面評估方法之探討與建議

根據 ACN/PCN 發展歷程可知，PCN 值主要用途為「協助航空公司進行航機排班以及機場營運之用」。因此機場所需之 PCN 值應為其機場跑道之代表值，但因所使用的分析模式及考量的影響因子與機場道面分析設計相關而常遭到誤用，且 ACN/PCN 並非設計方法，其目的亦不在取代機場鋪面評估。根據國際之經驗，僅需 5~10 年或是當跑道面臨重大翻修以及加鋪時需重新評估外，不需每年重新評估機場之 PCN 值變化。本研究在此階段亦探討其發展過程及評估流程，以便於後續自動化分析程式之建立。深入探究其發展之基本原理與計算過程，將有助於瞭解並研擬有效解決 ACN/PCN 法在國際應用上爭議之方案。

### 5.2 抽樣觀念與統計區間估計方法之應用

在提出本產學合作計畫構想之前，計畫主持人等【38】曾提出國內外工程應用時，仍舊缺乏抽樣與統計區間估計方法應用之觀念，工程師亦常常分不清楚母體與樣本之差異。以 FAA 在 AC 150 5370-11A【1】中建議可採用平均數減去一個標準差做為鋪面非破壞性檢測評估之依據為例，計畫主持人曾以實例探討該 NDT 評估流程可能產生之問題，並提供具體之修正建議。以圖 5-10 之 NDT 回算結果資料為例，若未將其進行分區單單採用其所有資料之「平均值減去一個標準差」做為跑道評估參數時，將容易受到極值以及偏態資料之影響，因此無法完整的表示出鋪面之結構狀況。若根據不同鋪面結構狀況將其分為五段，將會得到五個不同鋪面結構狀況下的平均值以及標準差，然而此時僅是比較不同的鋪面結構所造成的反應，並非為跑道之評估狀況，並且在各段中亦會受到其極值之影響。

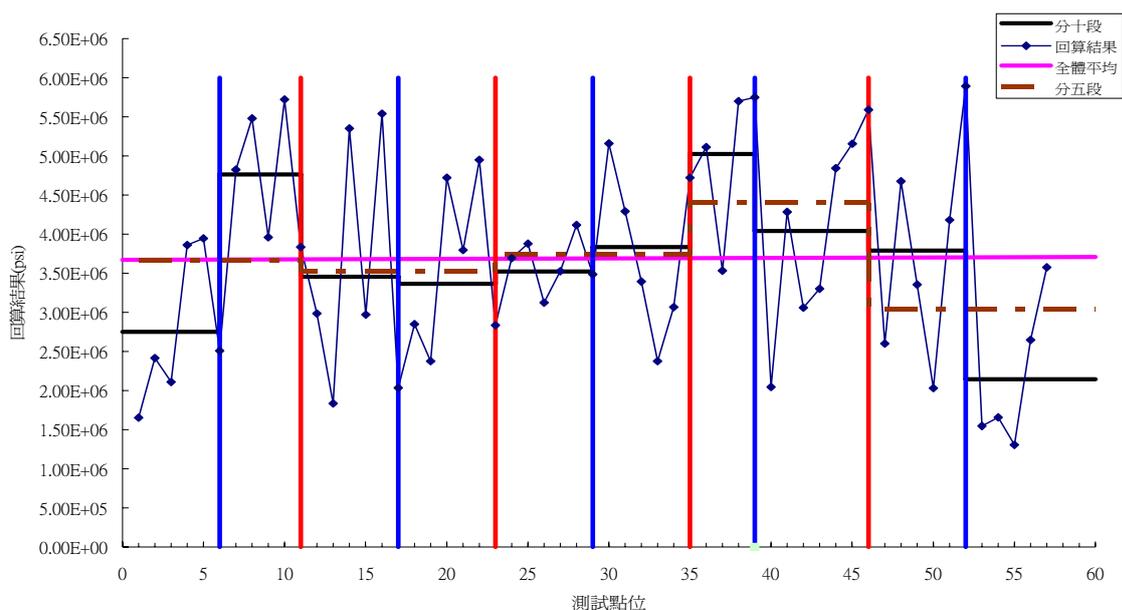


圖 5-10 回算結果不同分段結果評估示意圖

若再根據其回算或是 ISM 之評估結果將各不同鋪面結構狀況再進行細分，將會得到更多分段之平均值以及標準差，並且亦可能因工程師對資料主觀判斷不同而有不同之分段結果【1, 33】，在不同的分段下將會得到不同的平均數、變異係數。在分段愈多的狀況下，最後將會接近於採用逐點評估之方式，而跑道採用逐點評估，根據 FAA 之建議最後將是各點進行排序之後求得其第 15 個百分位數(涵蓋 85% 機率下之數值)做為評估參數。以圖 5-11 為例，不同的分段方法所得之評估結果皆不相同(如表 5-5 所示)，並且若採用此一方法進行現地代表值或是評估參數之求取，不同的工程師將會得到不同的評估結果，可能因此造成應用上之問題。

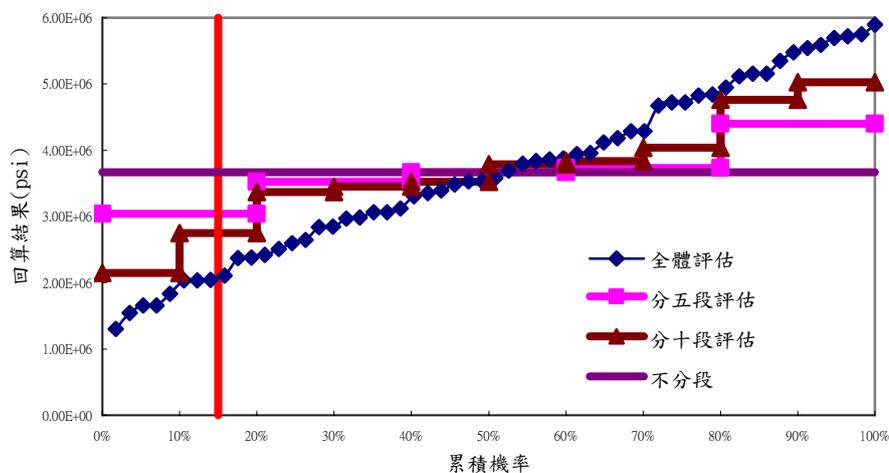


圖 5-11 不同分段評估回算結果示意圖

表 5-5 不同分段方法評估彈性模數之結果

分段方法	彈性模數(psi)	轉換 MR(psi)
全體平均	$3.67 \times 10^6$	648.15
分五段	$3.04 \times 10^6$	620.74
分十段	$2.75 \times 10^6$	608.13
各點評估	$2.22 \times 10^6$	585.07

雖然「抽樣調查」的觀念由來已久，但很可惜的是國內在鋪面管理實務上卻甚少採用，並且機場跑道之包含範圍極大，在未來鋪面管理實務上將難以負荷整體調查的需求，因此採用抽樣調查的方法實有其必要性與必然性。根據統計學的原理【39, 40】，抽樣調查是從研究的母體中隨機抽取一部份樣本來進行調查，並以樣本統計量來推論未知的母體參數。假設母體為常態分配而且母體變異數( $\sigma^2$ )已知，則根據下列公式 5-3 可求出以樣本平均數( $\bar{X}$ )來推估母體平均數( $\mu$ )的估計誤差( $e$ )。其中， $Z_{\alpha/2}$  為標準常態變數； $\sigma$  為母體標準差； $n$  為抽樣個數； $\alpha$  為錯誤的機率。

$$\bar{X} - \mu = Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq e \quad (5-3)$$

一般而言，道面路段劃分為樣本單位的個數是有限的，其樣本空間應視為有限母體，因此需將上式乘以 $\sqrt{N-n/N-1}$ 之修正因子。而且在常態母體、小樣本假設下( $n < 30$ )其機率分配應是自由度為 $n-1$ 的 $t$ 分配，表示為 $t_{n-1, \alpha/2}$ 。再者，因為在母體變異數常是未知的情形下，需以樣本標準差( $S$ )來代替母體標準差 $\sigma$ ，因此可以下列公式 5-4 來計算其估計誤差。其中， $e$ =可容許之誤差或估計誤差； $S$ =路段中樣本單位間的標準差； $N$ =路段中樣本單位之總數。

$$\bar{X} - \mu = t_{n-1, \alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \frac{\sqrt{N-n}}{\sqrt{N-1}} \leq e \quad (5-4)$$

將上述公式等號左右兩邊平方，在 95%信賴水準下常將 $t_{n-1, \alpha/2}$ 假設為“2”。再將所得公式重整，即可求得下列公式 5-5。

$$n = \frac{NS^2}{(e^2/4)(N-1) + S^2} \quad (5-5)$$

其中， $n$ 代表在有限母體、小樣本、母體為常態、而且母體變異數未知的情形下，當選定可容許誤差為 $e$ 時所需抽樣的個數。根據上述之方法根據 ASTM D5340 【40, 41】規定，以 PCI(Pavement Condition Index)評估為例，其 PCI 評估誤差在 $e = \pm 5$ 之內，亦即 95%信心水準下之結果。而在非破壞性檢測部份可由工程師自行決定所要求之容許誤差，配合 FAA 建議並利用上述公式 5-5 即可求得所需評估之樣本數，爾後根據決定之抽樣頻率以及個數進行鋪面檢測，如此將可得到一精確度以及代表性較高之檢測結果。

### 5.3 ACN/PCN 計算流程之修正建議

國內外工程應用時，仍舊缺乏抽樣與統計區間估計方法應用之觀念，工程師亦常常分不清楚母體與樣本之差異。以 FAA 在 AC 150 5370-11A 【1】中建議可採用平均數減去一個標準差做為鋪面非破壞性檢測評估之依據為例，計畫主持人曾以實例探討該 NDT 評估流程可能產生之問題，並提供具體之修正建議【38】。

因此，本研究採用統計學中「區間估計」之原理：「根據抽樣所得之平均值、標準差配合統計量建立一區間，使得此一區間在要求信心水準下可涵蓋母體之平均值」，其示意圖如圖 5-12 所示，計算公式如公式 5-6 所示【39, 40】。其中需以樣本標準差( $S$ )來代替母體標準差。其中( $\bar{X}$ )為樣本回算平均數， $t_{n-1, \alpha/2}$ 為機率分配應是自由度為 $n-1$ 的 $t$ 分配，表示 $S$ =路段中樣本單位間的標準差； $N$ =路段中樣本單位之總數； $n$ =抽樣個數。

$$\bar{X} \pm t_{n-1, \alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \frac{\sqrt{N-n}}{\sqrt{N-1}} \quad (5-6)$$

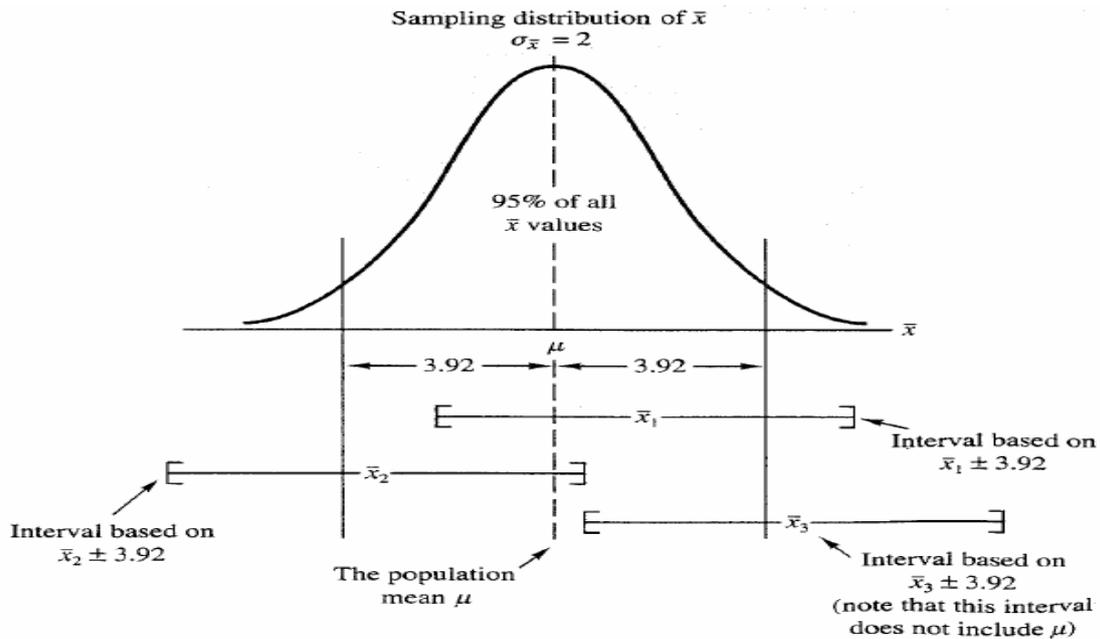


圖 5-12 樣本平均數之信賴區間示意圖【39, 40】

由於在不同位置之現地鋪面材料性質可能不一致，根據 FAA 之建議可將其細分成很多個均質路段來分析，但是這樣並無法有效解決隨機抽樣的問題。因此，本研究建議以下列公式來決定可靠的鋪面設計參數代表值。

$$\mu = \bar{X} - t_{n-1, \alpha} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (5-7)$$

其中， $t_{n-1, \alpha}$  為自由度為  $n-1$ 、單尾誤差為  $\alpha$  的  $t$  分配。一般若選定  $\alpha=0.05$  時，上列公式即可用來求得在 95% 信心水準下之設計參數代表值。

採用「抽樣」與樣本平均數「區間估計」觀念之優點在於，首先其考量到整體跑道之變異，而非利用人為決定分段之方式，因此不論分析者為何，在相同的資料以及信心水準下，其所得之結果皆為相同。且只要在相同鋪面跑道上施測，不論施測之位置、抽樣頻率為何，其區間在信心水準下皆可涵蓋到母體之平均值，再者配合上述抽樣樣本可將其誤差限定在一可容許之誤差範圍內，因此採用此一方法可得到有代表性之結果。並且若採用完整之跑道所得試驗結果，其亦可符合「中央極限定理」可使資料成常態分配，更有利於後續相關統計分析。

本研究在此階段透過抽樣觀念與統計區間估計方法之應用，針對非破壞性檢測流程提出具體修正建議，其研究流程圖如圖 5-13 所示。

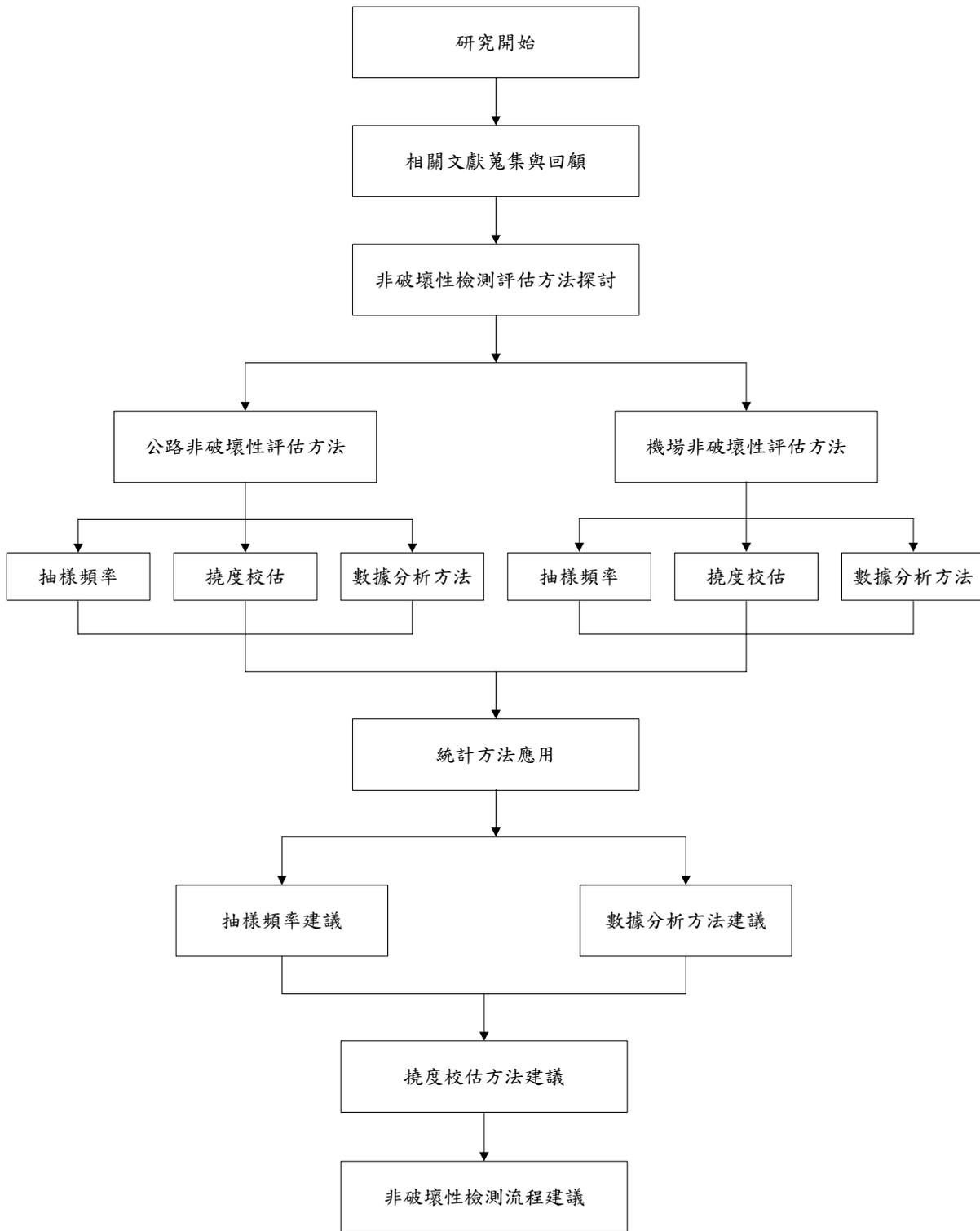


圖 5-13 非破壞性檢測流程之建議修正圖

## 5.4 案例分析

國外有學者曾經利用相同的鋪面資料，並利用國際間常用之各種 ACN/PCN 方法來評估該鋪面【2, 3】，其結果發現在不同的評估方法下產生之 PCN 評估結果亦會有顯著的差異。以柔性鋪面而言，最大的差異可以達到 200% 以上，如前述之表 5-3 所示。因此，本研究在此以一個案例研究來探討 ACN/PCN 之評估流程與可能影響之原因。假設有一機場剛性鋪面，版厚為 14 in，並且有 8 in 之級配底層，經現地評估後其有效路基土壤反力值(k 值)為 200 pci，假設混凝土之抗彎強度為 700 psi，其彈性模數值為 4,000,000 psi，柏松比為 0.15。預估在該機場混合交通量如表 5-6 所示，跑道佈設有平行滑行道。茲利用前述 FAA 建議之 PCN 評估流程，將分析結果分述如下：

表 5-6 預期之混合交通量

機型	載重	年交通量	P/C
B727-200	185,000	400	2.92
B737-300	130,000	6,000	3.79
A319-100	145,000	1,200	3.18
B747-400	820,000	3,000	3.46
B767-300ER	370,000	2,000	3.60
DC8-63	330,000	800	3.35
A300-B4	370,000	1,500	3.49
B777-200	600,000	300	4.25

### (a) 交通量分析

在交通量分析上，主要利用 AC 150/5320-6D 之等額交通量評估方法，其根據各不同機型之交通量以及其載重進行關鍵機型評估，在其評估過程可採用 COMFAA 內建之厚度設計模式，亦可採用 FAA 150/5320-6D 之圖表查詢而得，其評估結果如表 5-7 所示。

表 5-7 關鍵機型評估結果表

機型	載重(lbs)	年交通量	所需厚度(in)
B727-200	185,000	400	13.0
B737-300	130,000	6,000	13.2
A319-100	145,000	1,200	11.1
B747-400	820,000	3,000	14.1
B767-300ER	370,000	2,000	12.8
DC8-63	330,000	800	12.5
A300-B4	370,000	1,500	13.6
B777-200	600,000	300	11.5

根據此結果可得關鍵機型為 B747-400，因此以 B747-400 之輪軸組合為基準，進行各航機之等額交通量轉換，其輪軸轉換因子如表 5-8，等額交通量轉換公式如公式 5-8 所示。式中， $R_1$  為各種機型相對於設計機型之等額起飛次數當量； $R_2$  為各種機型根據設計機型之輪軸型態所轉換之年起飛次數； $W_1$  為設計機型之輪重； $W_2$  為任一機型之輪重。

表 5-8 輪軸轉換因子表

To Convert From	To	Multiply Departure By
S	D	0.8
S	2D	0.51
S	3D	0.33
D	S	1.25
D	2D	0.64
D	3D	0.41
2D	S	1.95
2D	D	1.56
2D	3D	0.64
3D	S	3.05
3D	D	2.44
3D	2D	1.56
2D/2D2	D	1.56
2D/2D2	2D	1.00

$$\log R_1 = \log R_2 \times \left( \frac{W_2}{W_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5-8)$$

轉換後之等額交通量如表 5-9 所示，由此可知轉換後該機場之交通量為每年 7,424 架 B-747-400 起降，B747-400 之通過涵蓋比為 3.46，並且由於其跑道佈設為平行滑行道型式，故此機場在 20 年設計年限下，真正受到最大荷重之 B747-400 架次為  $20 * 7424 \div 3.46 = 42,913$  架次。

表 5-9 等額交通量評估結果表

機型	年離場量	輪軸型式	R <sub>2</sub>	W <sub>2</sub> (lbs)	W <sub>1</sub> (lbs)	R <sub>1</sub>
B727-200	400	D	256	43,938	48,688	194
B737-300	6,000	D	3,840	30,875	48,688	716
A319-100	1,200	D	768	34,438	48,688	268
B747-400	3,000	2D/2D2	3,000	48,688	48,688	3,000
B767-300ER	2,000	2D	2,000	43,938	48,688	1,368
DC8-63	800	2D	800	39,188	48,688	403
A300-B4	1,500	2D	1,500	43,938	48,688	1,041
B777-200	300	3D	468	47,500	48,688	434
TOTAL						7,424

**(b) 現地鋪面特性評估**

PCN 評估剛性鋪面時，其主要考量為 Westergaard 理論解，因此其為雙層系統，若有級配底層時需進行轉換，根據圖 5-5 可得知，在 8in 之級配底層影響下，其「有效路基土壤」k 值為 200 pci。依據 AC 150/5370-11A 中之建議，以分段的方式對現地鋪面狀況評估。因此本研究利用圖 5-12 之回算結果進行評估，並利用公式 5-9 將鋪面彈性模數轉換為抗彎強度，式中，MR 為混凝土抗彎強度(psi)；E<sub>pcc</sub> 為混凝土之彈性模數(psi)。各不同分段方式所得之結果如圖 5-13 與表 5-5 所示。

$$MR = 43.5 \left( \frac{E_{pcc}}{10^6} \right) + 488.5 \quad (5-9)$$

**(c) 計算 PCN 值**

利用 COMFAA 進行 PCN 值之計算時，可利用已知交通與鋪面條件在其厚度設計模組中，決定關鍵機型之「允許荷重」。在各項條件固定下(鋪面厚度、航機涵蓋數、路基土壤強度)反覆試誤，可求得鋪面在該關鍵機型下之允許荷重。之後再利用 COMFAA 中之 ACN 計算模組，計算其 PCN 值，其評估結果如下表 10 所示。

表 5-10 PCN 評估結果表

編號	評估方法	$E_{pcc}$ 代表值 (psi)	MR 代表 值 (psi)	計算出之允許荷 重 (lbs)	PCN
I	全體平均	$3.67 \times 10^6$	648.1	700,000	55.0
II	全體平均- 1 Std.Dev.	$2.40 \times 10^6$	592.8	640,000	48.6
III	分五段(85%)	$3.04 \times 10^6$	620.7	671,000	51.9
IV	分十段(85%)	$2.75 \times 10^6$	608.1	656,000	50.3
V	各點評估(85%)	$2.05 \times 10^6$	585.1	632,000	47.8
VI	建議之 95% 信心水準公 式(5-7)	$3.33 \times 10^6$	585.1	684,000	53.3

(Note: 1lbs = 4.45 N, 1 psi = 6.89 kPa)

在實際現地評估時，不同的路基土壤與彈性模數條件亦會對 PCN 評估造成極大之影響。以目前之計算程序而言，即使是相同的數據，讓不同的工程師進行評估時，亦會產生很大的差異，造成後續分析與應用之問題。根據上述評估結果可發現，在不同之分段方式下，對同樣的鋪面路段資料將會得到不同之 PCN 值。在假設此鋪面其它條件均相同時，不同分段方式所得之 PCN 數值可從 47.8/R/C/W/T 至 55.0/R/C/W/T。

本研究擬以統計方法為出發點，研擬一個可靠的評估流程，並滿足一致性與可重覆性之基本要求。在該系統化之現地非破壞性檢測與 PCN 評估流程下，經由適當的撓度校正，配合抽樣以及統計分析方法，可得到在容許誤差範圍下足以代表機場跑道 PCN 評估之結果。以本個案為例，若採用 95% 信心水準下之公式(5-7)來決定鋪面各設計參數之代表值時，則其 PCN 數值為 53.3/R/C/W/T，不僅較可靠且較不易受隨機抽樣或不同分段方式之影響。

## 第六章 ACN/PCN 自動化計算程式之建立

雖然 COMFAA 程式中包含了厚度設計模組，但因該模組僅能針對單一機型進行厚度估算，使用者必須逐一輸入各機型之資料，估算各機型所需之鋪面厚度，亦無法自動判斷關鍵機型。並且，該程式在計算飛機之允許荷重時，亦要求使用者自行試誤，在使用上相當不便。因此，本研究在此將 COMFAA 之部分 ACN/PCN 計算模組與機場剛性鋪面厚度設計程式 R805FAA 整合。程式擴充過程中，並擬將交通量計算方式與最新的航機輪軸型式編碼方式併入程式中，除了改善現有程式之使用者介面，並可自動求得關鍵機型與 ACN/PCN 之計算，便於機場鋪面之後續分析與應用。

### 6.1 現行 ACP/PCN 計算流程範例說明

假設有一機場跑道鋪面，有效路基反力模數=200 pci，版厚=14 英吋，混凝土破壞模數=700 psi，混凝土彈性模數=4,000,000 psi，波松比=0.15，平行滑行道，起飛前有額外添加燃料，設計年限 20 年，交通量資料如表 6-1。其 PCN 計算之基本流程如下：

表 6-1 機場剛性鋪面交通量資料範例

機型	飛機全		**		年起飛次數	涵蓋次數
	重, lbs	胎壓(psi)	ACN (R/C)	P/C		
D-150	130,000	160	46.1	3.26	6,000	36,810
D-200	185,000	200	64.2	3.26	400	2,454
2D-400	400,000	200	82.8	3.15	400	2,540
B767-200	300,000	190	46.5	3.96	3,000	15,152
DC10-10	450,000	195	67.5	3.70	2,000	10,811
A300-B4	370,000	216	66.9	3.63	800	4,408
B747-SP	850,000	205	52.9	3.81	1,200	6,299

\*\* 剛性鋪面 P/C 在 95%荷重位於主輪軸時決定

#### (a) 決定關鍵機型

使用 COMFAA 2.0 程式，選擇剛性鋪面厚度設計模式，將有效路基反力模數=200 pci，混凝土破裂模數=700 psi，及表 6.1 之各機型的起飛全重、年起飛次數輸入，分別求出各機型所需厚度；進而決定關鍵機型為 B747-SP。事實上，還有其他參數已經假設：95%荷重位於飛機主輪軸，胎壓=205 psi，輪作用面積=210 in<sup>2</sup>。

#### (b) 涵蓋次數

有額外添加燃料，平行滑行道，故  $P/TC = 1$ ，而  $P/C = 3.81$ ，所以  $TC/C = 3.81$ 。其他機型的年起飛次數轉換成 B747-SP 的等額起飛次數，並加總可得等額總起飛次數為 11,373。故預估的設計機型總涵蓋次數(C)=11,373 × 20 年 ÷ 3.81=59,701。

### (c) 決定需要的飛機全重

使用 COMFAA 2.0 程式，選擇剛性鋪面厚度設計模式，選擇關鍵機型 B747-SP 並將有效路基反力模數=200 pci，混凝土破壞模數=700 psi，涵蓋次數=59,701 輸入，再反覆調整飛機全重直到關鍵機型設計厚度=14 英吋，此時可以得到最大容許全重=683,000 lbs。

### (d) 決定 PCN 值

使用 COMFAA 2.0 程式，選擇剛性 ACN 計算模式，將最大容許全重=683,000 lbs 輸入，求得 ACN 為 50.8/R/C，進而可知 PCN 為 51/R/C/W/T。

## 6.2 ACN/PCN 自動化計算程式之建立

雖然在 AC 150/5335-5A 中有指出 ACN/PCN 的計算流程，然而在執行分析時，其實暗藏許多使用者的不便，且容易因輸入錯誤，造成不正確的分析結果。茲簡要說明如下，並將設法解決此問題：

1. 在一開始決定關鍵機型時，必須分別使用 COMFAA 2.0 計算各機型厚度並記下，而後選擇各機型需要厚度中最大者作為關鍵機型。對於使用者來說既沒有良好的輸入介面，亦無法達到較直觀的輸入方式。
2. P/TC 的決定仰賴手動查表判別，且 TC/C 亦須手動計算。
3. 各機型年起飛次數在轉換成關鍵機型的等額起飛次數時，過程計算量龐大，且轉換後亦須分別記下，再進行加總。涵蓋次數的計算也是仰賴手動計算並分別記下。
4. 在決定最大容許全重時，需反覆操作 COMFAA 2.0 並憑直覺輸入飛機全重，過程耗時。
5. COMFAA 2.0 程式輸入介面不佳，沒有明顯提示使用者需輸入的資料。

由於 FAA 所公佈之剛性鋪面厚度設計試算表(MS Excel)R805FAA.xls 及 COMFAA 2.0 程式均有原始程式碼可供參考。R805FAA 採用圖形化介面且透過步驟順序提示使用者輸入所需資料，並使用 VBA(Visual Basic for Application)語言，操作時無須額外安裝。有鑑於此，本研究將嘗試整合該二程式，以發展出兼具高親和力輸入介面及自動化計算程式(R805FAA-PCN)。

然而，簡單的概念要付諸實行時往往會遇到許多實際的障礙。R805FAA 與 COMFAA 2.0 都是經過多年的發展所開發的產物，其程式碼歷經多人撰寫編修，

不免產生程式碼複雜的情況，再者本研究程式開發人員並非 FAA 體系出身，對於其程式碼的使用習慣不甚瞭解，因而在擷取各項變數時遭遇極大的困難。

透過 COMFAA 2.0 在計算 PCN 時，決定最大容許全重需要經過反覆的操作。在程式開發初期，程式開發人員雖然有能力使 COMFAA 2.0 自動執行此步驟，其反覆計算的過程卻對電腦硬體造成極大的負擔(至少需重複運算 30 次)，且過程仍需耗時 20 秒以上才能計算出 PCN，又容易導致電腦當機。幸好程式開發人員後來再利用如下之公式，利用已知的現地版厚與計算出來的版厚，來快速估算飛機之最大容許全重：

$$\text{新飛機全重} = \text{原飛機全重} \times (\text{現地版厚} \div \text{計算出來的版厚}) \quad (6-1)$$

經過 Visual Basic 語法 Do Loop 反覆計算之後，飛機全重會趨近於一個固定值，而程式開發人員設定當(現地版厚與計算出來的版厚之差值) $< 0.01$  時停止 Do Loop 運算。有趣的是雖然仍需經過反覆運算，運算次數卻大幅地減少，在一般情況下僅約少於 5 次即可。

此外，即使已大幅降低了當機的機率，程式開發人員卻發現當程式不正常結束時，已匯出的資料將導致下次程式開啟時資料讀取錯誤，進而產生錯誤的 PCN 值。因此，當匯出資料被成功讀取後，在程式中即予以刪除，以有效解決此問題。在程式開發方面，對於既有的程式運算模組僅予以採用，不更改其運算機制。所謂的整合並不是對於整個計算流程重新撰寫一套新的程式碼，而是在模組之間建立連結，以避免更改程式運算核心後所衍生必須重新驗證其正確性之問題。其他如在輸入資料時，未完整執行輸入流程或者未遵循輸入步驟而衍生的問題，進而加入防錯機制等措施，以順利完成 R805FAA-PCN 程式的開發。

針對 COMFAA 2.0 輸入介面不佳的問題，使用者在計算 PCN 時，所需資料將全數改在 R805FAA-PCN 程式中輸入。其方法是在原 R805FAA 增加表單讓使用者輸入所需資料，並自動匯出 COMFAA 2.0 計算 ACN 時所需之資料。而 COMFAA 2.0 也將自動匯入資料，進而進入自動化 PCN 計算流程，當得到 PCN 值後再匯出至 R805FAA-PCN 程式中顯示出來。

因此，R805FAA-PCN 利用 R805FAA 的厚度設計模組及輸入介面來決定關鍵機型並輸入需要的資料，再加上 COMFAA 2.0 的 ACN 計算模組，使用者除了可以有效避免複雜的計算，還擁有簡易的輸入介面；僅僅需要輸入所需資料，即可快速計算出 PCN 值。以 6.1 節之 PCN 計算範例為例，圖 6-1 所示為新增之 PCN 計算流程首頁圖例；圖 6-2 顯示採用與 R805FAA 程式相同之輸入方式並決定關鍵機型。圖 6-3 則為自動化 PCN 計算結果之輸出圖例。所求得之 PCN 值為 50.91/R/C/W/T，與先前利用 COMFAA 所估算出來之 50.8/R/C/W/T 極為相近。

## FAA Rigid Pavement Design AC 150/5320-6D

### Design Pavement Section

Enter Airport & Design Information (step 1)

Enter Subgrade Frost Information  
Subgrade k-value and  
Subbase Information (step 2)

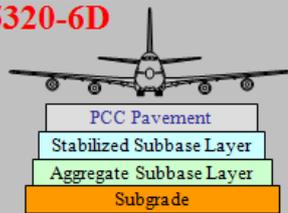
Concrete Properties (step 3)

Enter Aircraft Mix (steps 4-6)

Overlay Design (step 7)

Go To Design Summary (step 8)

Go To Calculate PCN (step 9)



To assure correct answers - complete each step in numerical order. If data is changed in any given step, complete each step below that step.

This software may be used as noted in Appendix 5 of AC 150/5320-6D, Airport Pavement Design and Evaluation.

圖 6-1 新增之 PCN 計算流程首頁

Step 4 ENTER AIRCRAFT DATA		Calculate thickness for each aircraft (step 5)		Accept Critical Aircraft (step 6) (Return)		Large Aircraft Design	
Enter up to 21 aircraft (in any order)		See right for Large Aircraft Optional design					
User's name for Aircraft (optional) e.g. Citation IV	Aircraft grouping Gear type AC 150/5320-6D	Default Weight	Max Takeoff weight MTOW	Annual Departures	Thickness Required for Each Individual Aircraft		
D-150	DUAL WH-150	130,000	6,000	12.69			
D-200	DUAL WH-200	185,000	400	13.54			
2D-400	DUAL TAN-400	400,000	400	14.69			
B767-200	BOEING 767	300,000	3,000	11.48			
DC10-10	DC 10-10	450,000	2,000	13.50			
A300-B4 STD	A-300 B-4 (corrected)	370,000	800	13.37			
B747-SP	747-SP	850,000	1,200	14.81	Recommended Critical Aircraft		
	None	0	0	0.00			

Gear Parallel to Joints (standard)  
 Gear Skew to Joints (optional)

圖 6-2 採用與 R805FAA 程式相同之輸入方式

	Slab thickness	14 in.	
	Improved k-value after all layers	200 psi	
	Design aircraft	B747-SP	
	PCN	50.91/R/C/W/T	

Print Summary Only

Return to Rigid Design

圖 6-3 自動化 PCN 計算結果輸出圖例

## 第七章 結論與建議

本研究首先介紹國際民航組織(International Civil Aviation Organization, ICAO)所公佈之航機分類指數與鋪面分類指數法(ACN/PCN)之定義、瞭解其特性、可能之應用範圍、以及現有利用非破壞撓度檢測方法來計算 ACN/PCN 數值時可能產生之問題。雖然，在美國 FAA 的 AC 150/5370-11A 手冊中明確地建議，工程師再選定一個評估與設計之輸入參數時，必須同時考量平均數與標準差。很多現有的鋪面評估與設計流程仍舊僅考慮採用平均數於分析過程中。

鑒於 FAA 新的鋪面厚度設計方法擬廣泛的採用三維有限元素分析，自 2003 年開始發表之新設計方法 FEDFAA 在剛性鋪面之設計上大膽採用三維有限元素法設計流程。然而，在其分析過程之中，僅考量到無限版尺寸之效應，並未考量到有限版尺寸效應之問題。在 FEDFAA 設計程式中，混凝土鋪面版之彈性模數係設定為 4,000,000 psi，但卻允許混凝土之抗彎強度值在 500~800 psi 間變化，以簡化分析流程。在實際鋪面設計時，針對抗彎強度不同之混凝土，並不適合採用同一固定之彈性模數值來設計。由於接縫式混凝土鋪面版之力學行為極為複雜，不同輪軸荷重、有限版長與版寬、混凝土路肩、外車道加寬情況效應、多層版效應、載重加上溫差效應等因素均有可能影響版之臨界應力。由於應力修正因子為一比例關係，因此本研究建議將三維有限元素分析修正因子與現有二維有限元素分析的成果相結合，以估算版的臨界應力。未來亦可針對此應力修正模式持續進行驗證與分析，並與現有 TKUAPAV 程式相整合，以建立更簡易之鋪面厚度設計程序。研究中亦可將此研究成果與 FAA 現有鋪面設計程式(包括 LEDFAA 與 FEDFAA)之分析結果相比較，以驗證程式之可靠性與適用性。

本研究亦利用美國長程鋪面績效資料庫(LTPP)並擷取柔性鋪面(GPS-1 與 GPS-2)與剛性鋪面(GPS-3)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。柔性鋪面試驗室與回算的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 2.5 倍、底層 3.7 倍、基層 3.2 倍、路基 3.3 倍。其中，路基彈性模數應修正之比值約與 1993 年 AASHTO 之修正建議大致相符。在剛性鋪面方面，根據結果顯示，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。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。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 回算報告的結果(1.312 倍)亦非常接近。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。

根據國外文獻可發現 ACN/PCN 計算結果，即使是在相同之鋪面狀況下，採用不同計算方法會得到不同之結果。在實際現地評估時，不同的路基土壤與彈性模數條件亦會對 PCN 評估造成極大之影響。以目前之計算程序而言，即使是相同的數據，讓不同的工程師進行評估時，亦會產生很大的差異，造成後續分析與應用之問題。本研究乃以案例說明依據現在 FAA 鋪面評估之建議，採用同樣的計算方式，對同樣的鋪面路段資料，在不同之分段方式下，將會得到不同之 PCN 值。在該案例中，假設此鋪面其它條件均相同時，不同分段方式所得之 PCN 數值可從 47.8/R/C/W/T 至 55.0/R/C/W/T。

本研究並以抽樣與統計方法為基礎，利用 FAA 建議之 PCN 評估流程，進行道面 PCN 之評估，以探討其評估差異之問題所在。研究中並研擬出一個可靠的系統化評估流程，在該評估流程下，經由適當的撓度與回算結果之校估，配合抽樣以及統計分析方法，並且可藉此方式減少抽樣與評估之誤差，可使工程師得到在容許誤差範圍下足以代表機場跑道 PCN 評估之結果。以本個案為例，若採用 95% 信心水準下之公式來決定鋪面各設計參數之代表值時，則其 PCN 數值為 53.3/R/C/W/T，不僅較可靠且較不易受隨機抽樣或不同分段方式之影響。

本研究並將 COMFAA 程式之部分 ACN/PCN 計算模組與機場剛性鋪面厚度設計程式 R805FAA 整合。程式擴充過程中，並將交通量計算方式與最新的航機輪軸型式編碼方式併入程式中，除了改善現有程式之使用者介面，並可自動求得關鍵機型與 ACN/PCN 之計算，便於機場鋪面之後續分析與應用。

## 參考文獻

1. FAA, "Use of Nondestructive Testing in The Evaluation of Airport Pavement," Advisory Circular 150/5370-11A, U.S. Federal Aviation Administration (2004)
2. Stet, M., and Beuving, E., "ICAO's ACN-PCN Method and Aircraft Interaction." Proceedings of ASCE conference. (1993).
3. Stet, M., and Verbeek, J., "The PCN Runway Strength Rating and Load Control System" 1st European Airport Pavement Workshop, CROW (2005).
4. 陳怡先、周家蓓,「機場道面結構強度評估與 PCN 值分析」, 中華道路季刊, 第四十五卷, 第二期, 第 79-90 頁(2006)。
5. 陳怡先,「道面落重撓度檢測分析實務與機場 PCN 分析」, 鋪面落重撓度儀檢測反算及應用研習會論文集, 台北, 第 6-1 至 6-13 頁(2007)。
6. ICAO, "Aerodrome Design Manual. Part3, Pavements." 2nd Edition, International Civil Aviation Organization (1983).
7. FAA, "Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength." Advisory Circular 150/5335-5A , U.S. Federal Aviation Administration (2006).
8. 林士群,「以落重式撓度儀 FWD 評估機場道面 PCN 值」, 中華道路季刊, 第四十五卷, 第一期, 第 87-96 頁(2006)。
9. Huang, Y. H., Pavement Analysis and Design, Prentice-Hall, Inc., New Jersey (1993).
10. Parker, F., Jr., W. R. Barker, R. C. Gunkel, and E. C. Odom. Development of a Structural Design Procedure for Rigid Airport Pavements, Report No. FAA-RD-77-81, WES-TR-GL-79-4, Government Document No. TD 4.509:77-81, USA (1979).
11. Rollings, R.S., and M. W. Witeczak. Structural Deterioration Model for Rigid Airfield Pavements. Journal of Transportation Engineering, ASCE, 116(4), pp. 479-491 (1990).
12. Gucbilmez, E., and R. Yuce, Mechanistic Evaluation of Rigid Airfield Pavements,

- Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 6, pp. 468-475 (1995).
13. Lee, Y. H. "TKUPAV: Stress Analysis and Thickness Design Program for Rigid Pavements," Journal of Transportation Engineering, Vol. 125, No. 4, July/August, ASCE, pp. 338-346 (1999).
  14. Lee, Y. H. "Mechanistic Reappraisal of the Current Design Methodology for Rigid Airfield Pavements," Transportation Research Record 1684, Journal of the Transportation Research Board, pp.90-100, November. (1999)
  15. 李英豪、顏少棠、鄭品恭、郭孟齊、張貴祿「機場剛性鋪面厚度設計程式之建立」，期末報告，國科會計畫編號 NSC87-2218-E-032-007，淡江大學，(1998)。
  16. Lee, Y. H., H. T. Wu, and S. T. Yen. "Parameter Studies and Verifications on Three-Dimensional Finite Element Analysis of Rigid Pavements," Canadian Journal of Civil Engineering, 31(5), pp. 782-796 (2004).
  17. 吳炘達、李英豪、顏少棠。「剛性鋪面三維有限元素參數分析與驗證」，中華民國第二十七屆全國力學會議，論文輯與光碟，成功大學，台南市，中華民國九十二年十二月十二日至十三日(2003)。
  18. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Comparative Performance of Structural Layers in Pavement Systems, Vol. 1, Design, Construction, and Behavior Under Traffic of Pavement Test Sections, 1974.
  19. 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).
  20. Lee, Y. H., and M. I. Darter, "New Predictive Modeling Techniques for Pavements," *Transportation Research Record* 1449, National Research Council, pp. 234-245 (1994).
  21. Friedman, J. H. and W. Stuetzle, "Projection Pursuit Regression," *Journal of the*

*American Statistical Association*, Vol. 76, pp. 817-823 (1981).

22. Hall, K. T., *Performance, Evaluation, and Rehabilitation of Asphalt-Overlaid Concrete Pavement*, Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, Illinois, 1991.
23. 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。
24. 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。
25. 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。
26. 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。
27. AASHTO, *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, Published by the American Association of State Highway and Transportation Officials (1993).
28. 吳佩樺，「柔性鋪面績效預測模式之建立」，碩士論文，淡江大學，淡水，台北，2006。
29. 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。
30. 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.
31. 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。
32. FAA, "Airport Pavement Design and Evaluation." Advisory Circular 150/5320-6D, U.S. Federal Aviation Administration (1995).
33. Chou, C.P., Wang, S.Y., and Tsai, C.Y., "Methodology of Applying Heavy Weight Deflectometer for the Calculation of Runway Pavement Classification Number,"

- CD-ROM, Presented at the 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., January 21~25 (2007).
34. Kenneth, J., and Debord, P.E., "Precise Methods for Estimating Pavement Classification Number," Boeing Commercial Airplane Group Airport Technology Organization Report D6-82203 (1998).
  35. 林佳慧、李英豪，「鋪面回算之方法與應用」，鋪面落重撓度儀檢測反算及應用研習會論文集，台北，第 2-1 至 2-15 頁(2007)。
  36. 鐘偉逞，「應用落重式撓度儀觀測路面結構強度之研究」，碩士論文，國立中央大學土木工程學系(2000)。
  37. 周家蓓、陳靖翔，「落重撓度儀施測荷重範圍及堅硬層對反算結果之影響」，鋪面落重撓度儀檢測反算及應用研習會論文集，台北，第 4-1 至 4-15 頁(2007)。
  38. 劉耀斌、林志棟、李英豪。“非破壞性檢測應用於機場鋪面強度評估與機場分類指數法之探討”，第八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，中華民國九十六年七月二十日，第 227-239 頁(2007)。(獲選為最佳論文第二名)
  39. 林惠玲、陳正倉，統計學—方法與應用，雙葉書廊(2001)。
  40. 李英豪、洪政乾、盧中強、顏少棠，「鋪面路網資料庫架構與維修管理策略最佳化芻議」，鋪面工程，中華鋪面工程學會會刊，第二卷第三期，第 20-38 頁(2004)。
  41. ASTM, "Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys" American Society of Testing and Materials, ASTM D 5340-98 (1998).