

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

落重式撓度儀標準檢測程序之建立 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 95-2221-E-002-390-
執行期間：95年08月01日至96年07月31日
執行單位：國立臺灣大學土木工程學系暨研究所

計畫主持人：周家蓓

計畫參與人員：博士班研究生-兼任助理：李美慧
碩士班研究生-兼任助理：高銓鴻、歐陽睿

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 96 年 12 月 05 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

落重式撓度儀標準檢測程序之建立

計畫編號：NSC95-2221-E-002-390

執行期限：95/8/1~96/7/31

主持人：周家蓓 國立台灣大學土木工程學研究所

一、中文摘要

為使龐大公路系統與機場鋪面績效能維持在既定的水準之上，非破壞性撓度檢測已成為快速評估鋪面承載能力之養護管理技術，其檢測結果可作為實施養護之生命週期鑑定基礎，以妥善運用有限的資金與資源，進而選定合適的養護策略。本研究重點以探討撓度檢測之施測技術為主，包括荷重大小、感測器位置、溫度校估、及荷重傳遞效率檢測與計算方式。研究對象基本上以剛柔性鋪面並重，但有關溫度校估反算值之部分，則因剛性鋪面 E 值受溫度影響甚微，故此部份著重於柔性鋪面之分析。本研究採用 Carl Bro PRI 2100 重型落重式撓度儀（HWD）於臺灣大學椰林大道剛性鋪面及水源校區實驗道路等處進行剛柔性鋪面撓度試驗。將不同鋪面組合及荷重下之撓度資料，透過反算與有限元素分析，探討不同鋪面結構較適合之檢測荷重範圍，並依據鋪面結構組成發展合適之撓度感測器佈設方式。此外，將蒐集整年度撓度與溫度資料，嘗試建立適用不同環境狀況之撓度和面層 E 值之溫度校估方程式。本研究亦將針對十二種不同之接縫荷重傳遞效率（LTE）計算方式進行比較。期望能透過本研究之成果，建立落重撓度試驗之標準程序以獲得正確之數據，提昇鋪面結構強度反算之準確度。

關鍵詞：落重式撓度儀 FWD、感測器佈設、檢測荷重、溫度校估、接縫荷重傳遞效率

Abstract

Non-destructive deflection measurement has been used widely for evaluating the highway and airport pavement networks for years. It provides reliable data for the inspection of pavement bearing capacity in order to analyze the appropriate maintenance strategies for best pavement performance and minimum life cycle cost. Different from most of the research works that were focused on applying the deflection data, the major objective of this research is to develop the standard measurement procedure for data collection, including studies of loading ranges, sensor layout, temperature calibration, and sensor arrangement for measuring load transfer efficiency. Heavy Weight Deflectometer Carl Bro PRI 2100 will be adopted for this research works. Test sites of rigid and flexible pavement include experimental pavement sections of National Taiwan University. Various loading and sensor layouts will be given to different structural composition. By applying the back-calculation programs as well as finite element programs, the suitable loading ranges and sensor layout will be investigated and presented for various conditions. Temperature calibration equations will be established through year round data collection on the experiment pavement section. In addition, twelve different types of

load transfer efficiency testing and calculation methods will be evaluated and the most proper method(s) will be suggested. It is anticipated that the research findings will provide standard measuring procedures for deflection data collection in order to obtain repeatable as well as reliable data for further analysis.

Keywords : Falling (Heavy) Weight Deflector, loading ranges, sensor layout, temperature calibration, load transfer efficiency

二、緣由與目的

道面完工後，由於承受交通荷重與環境因素作用，強度將逐漸減弱，道面破壞現象將隨之產生。於此情況下，藉由撓度值之量測將可確實且直接掌握道面強度之變化；撓度值為道面於承受某荷重情況下之垂直變形，故其可充分反應道面之結構行為，一旦撓度值提高，表示道面承載力降低，極可能增加道面損壞機率。非破壞試驗(nondestructive test, NDT)檢測道面承載能力之方法，由於具有快速(相較於鑽心試體)、不破壞道面結構、可模擬現地道面狀況等優點，近年來已逐漸取代破壞性試驗方法，成為檢測方法之主流。

非破壞性落重撓度實驗之儀器發展雖已成熟，但其試驗進行方法與資料之後續分析仍為一有待加強之重要課題。本研究之重點著重於建立一套試驗進行之標準程序與方法，包括荷重範圍、感測器擺放位置、溫度校估及荷重傳遞效率之實驗步驟及計算方法。本研究以衝擊式落重撓度儀(Falling Weight Deflectometer, FWD)為實驗儀器針對剛性鋪面版塊進行非破壞性撓度試驗，期望達成以下目的：

- (1) 針對不同形式與組成之鋪面進行試驗，探討不同鋪面結構之落重撓度標準檢測荷重範圍。
- (2) 評估現行落重撓度儀感測器擺放方式之優劣，並配合不同鋪面形式發展合適之感測器擺放方式。
- (3) 觀察不同環境因素下，衝擊式落重撓度儀所量得之撓度值變化情形，透過反算強度等資料分析，以發展撓度和E 值之溫度校估方程式。
- (4) 經由落重撓度接縫試驗，瞭解溫度變化與有無設置縱縫筋等變因，對荷重傳遞效率 (Load Transfer Efficiency, LTE)之影響，並評估現行各種 LTE 計算方式之優劣。

三、實驗設計及研究方法

3.1 不同鋪面型式之試驗落重範圍建議

剛、柔性鋪面之實驗道路多級荷重撓度試驗，分別於民國95年2月13日與2月17日以Carl Bro PRI 2100重型落重撓度儀進行實驗；試驗以落重撓度儀於台灣大學椰林大道及實驗道路版塊PCC-40A、PCC-25A、AC-25B以及AC-40B各版塊中央進行，分別施加14種荷重大小，於剛性鋪面上施加荷重約為25~250 kN (6~55 kips)，柔性鋪面之施加荷重範圍則約為25~170kN (6~38kips)。實驗時鋪面表面溫為20~22℃，且撓度感測器位置為0、20、30、60、90、120、150、180、210 cm處。所得之撓度資料分別以撓度盤分析、動力與靜力反算分析以及有效反應深度三種不同方式以界定合適之落重範圍。

3.2 撓度檢測之感應器擺放位置

本研究係以康乃爾大學所研發的MODCOMP 程式模擬剛性與柔性鋪面受落重撓度儀之檢測後所產生之撓度值，並使用MODULUS 軟體反算。主要模擬面層厚

度為 40cm 且基層厚度為 20cm 時，剛、柔性鋪面在路基強度分別為 60MPa 以及 120MPa 時，鋪面表面受 100kN 且直徑為 30 公分之圓盤載重，沿表面縱向方向撓度產生之分佈情況。將 MODCOMP 模擬之撓度值中擷取距離荷重處不同距離遠之撓度值，共組成 13 種不同之感測器擺放方式，為配合 MODULUS 反算限制，感測器組合每次擺放均以 7 個為主；組合方式中考慮了感測器擺放之便利性，兩兩感測器間之距離最小為 20cm；此種方式亦可避免文獻中所敘述之感測器擺放位置接近，而造成接收之撓度資料過於相似，使其反算結果不佳。而所得之撓度模擬資料將以 MODULUS 反算各感測器擺放組合，以期求得不同擺放組合下之反算結果差異性。

表一 模擬之感測器擺放方式

編號	與荷重處距離 (cm)
1	0、20、40、60、80、100、120
2	0、30、60、90、120、150、180
3	0、40、80、120、160、200、240
4	0、20、50、90、130、160、180
5	0、40、70、90、110、140、180
6	0、20、60、120、180、220、240
7	0、60、100、120、140、180、240
8	0、30、70、120、170、210、240
9	0、50、90、120、150、190、240
10	0、50、70、90、110、130、180
11	0、80、100、120、140、160、240
12	0、20、40、90、140、160、180
13	0、20、40、120、200、220、240

3.3 溫度校估方程式之建立

本研究使用了美國長期鋪面監測系統 LTPP 所收集的柔性鋪面資料來進行分析。而在道路的選擇方面，為了將研究經驗應用在台灣之鋪面上，所選擇的路段皆為在 LTPP 分類中不會結凍的路段，以符合台灣的氣候型態。LTPP 的 FWD 撓度資料之感應器擺放間隔為從落重中心算起 0mm、152mm、203mm、305mm、457mm、610mm、914mm。中層溫度量測方式為利

用現地鑽孔所量測而得不同深度之溫度經過內插而得。反算軟體之程式為 MODCOMP。為了了解不同厚度瀝青鋪面模數值與中層溫度之關係，本研究共比較了十三個不同的 LTPP 路段，路段之厚度範圍從 1.6in 到 11.1in，所有相關數據皆從 LTPP 資料庫的 MON_DEFL_FLX_BAKCAL_POINT 表格中取得。最後利用各路段之反算瀝青模數對數值 $\text{Log}(E)$ 與鋪面中層溫度 T 值建立線性迴歸式，再將標準溫度 25°C 帶入變數 T 可求得 25°C 時不同鋪面結構路段的標準反算模數值，如式一。

$$\text{Log}(E) = AT + B \quad (\text{式一})$$

其中，

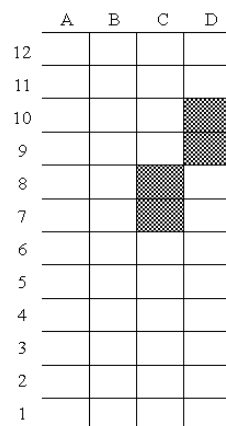
E = 反算模數值，MPa

T = 中層溫度， $^{\circ}\text{C}$

A 、 B 為常數項

3.4 接縫傳遞效益檢測方式與計算方法

本研究以台灣大學椰林大道之剛性版塊為主，於 2006 年 7 月 8 號凌晨進行實驗。此次實驗共分為四種不同檢測區域，編號與位置如圖一所示。



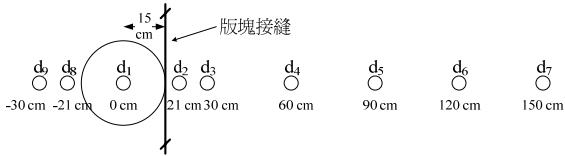
圖一 椰林大道版塊之編號與位置

進行荷重傳遞效率實驗中分別於版中央、接縫處以及角隅處施加荷重為 40kN、60kN、80kN 以及 100kN 以比較不同施加荷重下，是否對於荷重傳遞效率有所影響。另外，為了評估各種不同荷重傳遞效率計算方式之優劣性，其試驗方式共

有 A、B 與 C 三種不同類型之荷重傳遞效率擺放方式，其中 A 與 B 類型又有 4 種計算方式，而 C 類型有 4 種計算方式，共計 12 種計算流程，如下所示。

A. 接縫位於落重盤邊緣

此方式為將落重盤與接縫或裂縫貼齊，主要針對 d_3 與 d_1 或 d_3 與 d_9 之關係加以計算。



$$A-1. \quad LTE_{\Delta} = \frac{d_3}{d_1} \cdot 100\%$$

$$A-2. \quad LTE_{\Delta} = \frac{d_3}{d_1} \cdot B \cdot 100\%$$

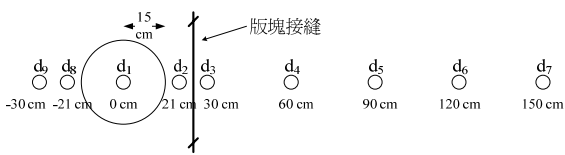
其中 B 為版中央試驗時所得之 d_1/d_3

$$A-3. \quad LTE_{\Delta} = \frac{d_3}{d_1} \cdot \frac{d_1}{d_9} \cdot 100\% = \frac{d_3}{d_9} \cdot 100\%$$

$$A-4. \quad LTE_{\Delta} = \frac{2 \cdot d_3}{d_1 + d_3} \cdot 100\%$$

B. 接縫距落重盤中心 25.5cm

此方式為將接縫或裂縫位於 d_2 與 d_3 中間，並主要針對 d_2 與 d_3 之撓度值以計算 LTE。



$$B-1. \quad LTE_{\Delta} = \frac{d_3}{d_2} \cdot 100\%$$

$$B-2. \quad LTE_{\Delta} = \frac{d_3}{d_2} \cdot B \cdot 100\%$$

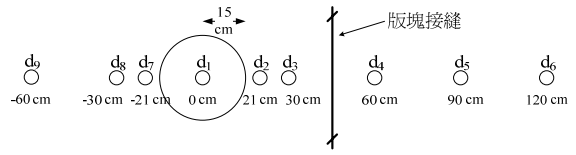
其中 B 為版中央試驗時所得之 d_1/d_3

$$B-3. \quad LTE_{\Delta} = \frac{d_3}{d_2} \cdot \frac{d_8}{d_9} \cdot 100\%$$

$$B-4. \quad LTE_{\Delta} = \frac{2 \cdot d_3}{d_2 + d_3} \cdot 100\%$$

C. 接縫距落重盤中心 45cm

此方式為將接縫或裂縫位於 d_3 與 d_4 中間，並針對 d_3 與 d_4 以計算 LTE。



$$C-1. \quad LTE_{\Delta} = \frac{d_4}{d_3} \cdot 100\%$$

$$C-2. \quad LTE_{\Delta} = \frac{d_4}{d_3} \cdot B \cdot 100\%$$

其中 B 為版中央試驗時所得 d_1/d_3

$$C-3. \quad LTE_{\Delta} = \frac{d_4}{d_3} \cdot \frac{d_8}{d_9} \cdot 100\%$$

$$C-4. \quad LTE_{\Delta} = \frac{2 \cdot d_4}{d_3 + d_4} \cdot 100\%$$

四、實驗結果分析

4.1 不同鋪面型式之試驗落重範圍建議

在剛性鋪面中，不論混凝土版塊是 25 cm (PCC-25A) 或 40 cm 厚 (PCC-40A) 之剛性鋪面，鋪面撓度皆隨荷重增加。為比較兩種不同剛性鋪面結構受落重撓度儀荷重下產生之撓度差異，將實驗道路多重荷重撓度試驗結果正規化至荷重為 45 kN 下之撓度或以荷重處撓度為 1 之方式；則 PCC-25A 之撓度較大，但愈外側之撓度直兩者相差愈小；PCC-40A 在小於 81 kN (18 kips) 荷重作用下之撓度盤有相當大之變異性，且正規化撓度隨著荷重增加而減小。在大荷重部份中，其正規化撓度盤型態相似、變異較小，且隨荷重逐漸增加，撓度亦增加。整體而言，PCC-25A 於小荷重之正規化撓度盤變異性較 PCC-40A 小，且較薄之剛性版塊其建議檢測荷重應較厚版塊低。在反算分析中，PCC-40A 在動力反算所得面層彈性模數，於不同荷重下之變異性不大，只隨荷重增加而略微降低；靜力反算則在小檢測荷重相對較為敏感。在路

基模數反算中，小荷重系統配置之動力與靜力反算值不穩定。PCC-25A 部份，則與 PCC-40A 情況相似，只於荷重為 240kN 處之靜力反算結果略有低估。在有效反應深度分析中，因撓度隨深度而遞減，若以將荷重處之表面撓度乘以撓度感測器之系統誤差 2%，並加上隨機誤差 2 μ m 作為有效深度之門檻值，故當此計算之有效深度值愈大，表示穿透鋪面愈深，則可檢測到鋪面較深層之結構狀況。在荷重施加較大時，其檢測深度均可超過 5m，反之在小檢測荷重時，其檢測深度則不足 3m。

在柔性鋪面中，以撓度盤分析可知 AC-40B 在小於 69kN (18 kips) 荷重作用下之撓度盤中，部份檢測荷重有較大之變異性；在大荷重部份，其撓度盤分佈情況相似且變異性小。AC-25B 僅在荷重 26 kN 時有較大變異，故整體變異性較 AC-40B 小。接著利用靜力反算分析可比較不同荷重下所反算之模數變異性，在 AC-40B 面層與路基反算結果中大荷重較小荷重穩定且變異性小。在 AC-25B 中，當荷重為 63 ~ 132 kN 時面層反算模數則有較良好一致性；在路基部份，則在荷重 63 kN ~ 153 kN 時，其反算結果變異性低。

4.2 撓度檢測之感測器擺放位置

在剛性鋪面中，路基較弱時，靜力反算結果均為高估之情況，其中又以感測器等間距 20cm 之擺放方式誤差為最大，而不同的撓度感測器擺放位置對於路基模數反算結果上並無太大明顯之差異性。路基土壤強度較強時，面層反算模式之誤差相較路基土壤較弱之鋪面型態來的小。在路基反算部份，當強度較強時，感測器擺放較遠處，對於路基土壤模數之反算精確度相較其他方式來的差。為了更進一步分析不同感測器擺放位置對於面層與路基模數反算之誤差有何影響，因此將感測器擺放

位置分為最遠感測器距離 180cm 與 240cm、中間密兩旁疏、中間疏兩旁密以及等間距五種類型加以探討。當路基土壤強度較弱時，若將感測器擺放成等間距之方式以進行檢測並反算分析時，對於面層模數之誤差則為最大，而將感測器擺放為中間較疏兩旁較密之型態，則對於面層模數反算則為最佳；在路基反算模數部份，則以中間密兩旁疏之擺放方式其誤差最小。總體而言，除等間距之方式較不合適外，中間密或疏之反算誤差相差不大。在最遠之感測器擺放位置比較中，可發現不論為 180cm 或 240cm，對於面層模數或路基模數之反算精確度並無明顯之影響，若以應力區觀念來觀察，可視為在距荷重處 180cm 遠之後，感測器所量測之撓度大多由路基所提供之。在路基強度較強時，面層模數反算之誤差相較於路基模數反算之誤差來的大，其中誤差最小者為感測器擺放為中間疏兩旁密之方式，而等間距之方式則為誤差最大者。在路基部份，各種擺設方式之誤差均相差不大。因此，綜合面層與路基反算結果可知，中間疏兩旁密之擺放方式為最佳，而等間距之擺法其誤差為三種方式中最大。在最遠之感測器距離則可發現當距離遠至 240cm 時，面層與路基反算模數之誤差均稍有增加。另外，通常進行鋪面撓度檢測時，除針對強度檢測外，除了該檢測版塊外，仍有其他檢測目的，如荷重傳遞效率，其感測器擺放位置之考量亦不可被忽略。

在柔性鋪面方面，柔性鋪面在路基強度較弱時，其面層與路基模數之反算結果可知，當感測器擺放位置為 0、20、60、120、180、220、240cm 或 0、80、100、120、140、160、240cm 與 0、20、40、120、200、220、240cm 時，其面層模數反算雖低估，卻在各種不同擺放位置中之誤差為最小。在路

基反算模數中，亦以上述三種擺放位置之誤差較低；而當擺放方式為 20cm 之等間距，則誤差稍大於其他方式。大致上在路基強度較弱時，感測器擺放位置對於各層反算模數並無太大之差異。柔性鋪面在路基強度較強時，擺放位置為 0、20、50、90、130、160、180cm 之路基模數因反算值過低，而造成面層在反算時有補償層之效應產生，進而使其誤差過大。此外，當 0、60、100、120、140、180、240cm 之擺放方式時，其誤差亦較其他方式來的大。在路基反算模數中，13 種擺放位置之差異性亦無明顯差異性，但當路基強度較大時，其面層或路基之反算誤差較路基強度較小時來的小。其主要因柔性鋪面受力方式不像剛性鋪面大多由面層所承受，而是以各層間之膠結程度為主共同分擔力；因此，當路基強度大時，所能承受之力較大，致使撓度變異性較小，才使其反算誤差較小。接著將感測器分為三種類型以及兩種最遠感測器擺放位置進行探討，藉以找出柔性鋪面之較佳擺設方式；此部份之分析法與剛性鋪面相同，將分為強、弱路基加以詳加探討。在路基強度較弱時，採用等間距之感測器擺放方式其誤差不論在面層或路基模數反算上均較大，而其他兩種擺放方式則無明顯差異性；在路基強度較強時，可發現三種擺放方式則無明顯優劣，但卻以等間距之方式稍佳。而最遠感測器擺放距離在柔性鋪面上，對於反算精確度有較大之影響性；在路基強度較弱時，感測器最遠距離至 240cm 時，其誤差遠小於最遠距離至 180cm，尤其以面層誤差相差最多；在路基強度較強時，距離之遠近對於精確度則無太大之影響。本研究認為在路基強度較弱時，各層對撓度反應較大，此時若將最遠感測器擺放位置放置較遠處，則各感測器相距較遠，所獲得之撓度

反應亦不相近，進而對整體鋪面結構之模數反算有所幫助。綜合上述分析，在柔性鋪面之檢測上雖等間距擺放感測器之方式對於路基土壤較強時誤差最小，但在路基強度較弱時，則表現不佳，使其穩定性不好，因此仍較建議向兩側集中或中間密兩旁疏之擺放方式，但最遠之感測器建議放置 240cm 處為較佳。

4.3 溫度校估方程式之建立

比較不同鋪面結構之反算瀝青模數對數值與鋪面中層溫度值建立線性迴歸式如表二，可發現反算瀝青模數的對數值與中層溫度迴歸式之斜率大多集中在-0.02 至 -0.03 之間，斜率在此代表改變一單位的中層溫度對於反算瀝青模數值之影響，若討論面層厚度與迴歸式斜率之關係，可發現到厚度漸減時，斜率的絕對值會漸漸下降，這代表著溫度對反算模數值的影響會隨著厚度而減少。其兩者迴歸式之 R-square 值有略為下降的趨勢，這代表著鋪面的厚度越薄，反算瀝青模數與中層溫度的相關性越低。此外，面層在 25°C 的模數值代表各試驗路段在標準溫度 25°C 下之瀝青強度，對照代表 0°C 下瀝青強度的迴歸式截距值，可以明顯的看出兩者具有良好的相關性。最後探討表二中 R-square 值與斜率值之關係，在 R-square 較高的路段，斜率值皆集中在-0.025 上下，換句話說，當柔性鋪面面層與反算瀝青模數呈現高度相關性時，反算瀝青模數對數值與中層溫度迴歸式之斜率約為-0.025，此數字即為中層溫度改變一度對於反算模數對數值之影響性。

表二 各實驗路段詳細資料

路位	48-1068	13-1031	4-1024	13-1005
溫度範圍(°C)	0.5~45.9	1.7~47	8.6~37.6	5.7~41.1
AC 厚(inch)	11.1	11.1	10.8	7.7
25°C 模數值	3217.36	1948.05	2109.6	7237.69
斜率	-0.0243	-0.0257	-0.0284	-0.0243
截距	4.115	3.9321	4.0342	4.4671
R-square	0.9148	0.8821	0.832	0.9371
樣本數	2448	1429	1156	1354
時間範圍	93/11/2~97/6/12	95/4/3~96/10/17	95/7/17~96/8/14	95/3/24~96/10/13
路位	48-1060	4-0114	35-1112	48-1077
溫度範圍(°C)	7.3~45.4	9.2~50.8	3.6~48.5	1.9~51.7
AC 厚(inch)	7.5	6.8	6.3	5.2
25°C 模數值	11155.78	5897.94	7121.97	6129
斜率 A	-0.0205	-0.0211	-0.0274	-0.021
截距 B	4.56	4.2982	4.5376	4.2933
R-square	0.7642	0.9331	0.9145	0.7958
樣本數	3330	1126	1942	3718
時間範圍	93/12/1~97/6/28	94/2/16~96/8/13	94/3/22~97/6/24	93/9/8~97/6/10
路位	4-0113	48-1122	28-1802	48-3739
溫度範圍(°C)	8.9~51.2	7.2~52.2	9.9~49.3	15.9~53.3
AC 厚(inch)	4.5	3.4	3.2	1.8
25°C 模數值	6683.44	4440.17	8693.61	23115.32
斜率	-0.0183	-0.0262	-0.012	-0.0017
截距	4.2825	4.3024	4.2392	4.4064
R-square	0.7745	0.5857	0.7821	0.0041
樣本數	1078	2505	1269	954
時間範圍	94/2/17~96/8/14	93/11/23~97/6/30	95/9/7~97/2/24	93/12/7~94/9/8
路位	37-1028	註： 1. 回歸式： $\text{Log} E = AT + B$ 其中， $E = \text{反車模數值，MPa}$ $T = \text{中層溫度，}^{\circ}\text{C}$ 2. 25°C 模數值單位為 MPa		
溫度範圍(°C)	6.6~48.1			
AC 厚(inch)	1.6			
25°C 模數值	1570.00			
斜率	-0.0182			
截距	3.6509			
R-square	0.1172			
樣本數	852			
時間範圍	95/5/18~96/9/26			

4.4 接縫傳遞效益檢測方式與計算方法

本實驗主要為椰林大道中四塊剛性版塊，探討 12 種不同 LTE 之計算方式以及不同荷重大小對於 LTE 之影響。分析結果可知荷重大小對於荷重傳遞效率之影響並不大，因此，將各荷重所計算之 LTE 結果取其平均並分別繪圖，可知版塊在橫向接縫中各種計算方式在圖二中 7C 與 10D 板塊之結果，其變化趨勢相似，其中 A-3 之計算方式均大於 100% 為較不合理；因為在理論上不論再理想之傳力效果，包括並無任何接縫或接縫在內，均不可能達 100%。因此 A-3 之計算方式是較為不合裡之情況。其原因推測可能為 d_3 與 d_9 雖在落重處兩旁等距離之位置，但兩者距離接縫處之距離並不相等，而此差異性是否為計算結果超過 100% 之原因仍有待探討。A-1 與

C-1 之計算方式則為全部計算方法中較為保守，即計算值較低。而角隅之 LTE 結果，與橫向接縫之結果相去不遠，A-3 計算之結果仍為全部計算方式中最高且較不合理，另外，C-3 在部份計算方法下亦大於 100%。而 A-1、C-1 與 C-4 之計算結果偏低，屬於較保守之計算方式。最後探討裂縫對於 LTE 之影響。圖二中 9D 版塊之裂縫對於 LTE 之影響較大，可預期未來裂縫會因為載重重複施加之情況下較其他版塊破壞來的快速。而 A-3 之計算方式與前述兩種施測載重情況相同，為全部 LTE 計算方法中最高亦較不合理。而 A-1、C-1 與 C-4 三種計算方式則相對來說為較低之結果，其中又以 C-1 最為保守。因此，綜合上述之分析可知，在不同檢測區塊中，12 種計算方法之分佈情況均為相同，而其中以 A-3 之計算方式是最不合理，而 C-1 之方式則為最保守之情況。接著比較施測之方向性對於 LTE 是否有所影響，即接近端與遠離端之 LTE 是否有所差異性。分析後得知各種不同之計算方法均相差不大且互有大小，故從此部份數據分析中可知 LTE 應該並無方向性。

五、結論

在不同鋪面型式之試驗落重範圍建議方面，綜合上述研究結果可知，剛、柔性鋪面之建議荷重範圍如下表三所示。

表三 FWD 檢測荷重建議

鋪面形式	面層厚度 cm (in.)	FWD 荷重 kN (kip)	荷重衝擊 時間 msec
剛性	25 (10)	70~220 (16~50)	≥ 25
	40 (16)	130~250 (30~55)	
柔性	25 (10)	63~132 (14~30)	≥ 25
	40 (16)	66~165 (15~36)	

在撓度檢測之感測器擺放位置方面，綜合上述之分析，本研究將 13 種不同感測器擺放方式中，面層與路基模數反算之絕對誤差總和相加取其最小者，其結果如表四所示。若在落重撓度儀有足夠空間時，本研究建議將最遠感測器距離為 240cm。而現地實際檢測時，則需考慮其他檢測項目後，再另行確定感測器擺放方式，以避免不時更換感測器位置，而造成感測器移動位置上之距離誤差。

表四 感測器建議擺放位置

鋪面形式	路基型態	感測器擺放位置
剛性鋪面	弱路基	0、20、40、90、140、160、180
		0、80、100、120、140、160、240
	強路基	0、20、50、90、130、160、180
		0、30、70、120、170、210、240
柔性鋪面	弱路基	0、20、50、90、130、160、180
		0、80、100、120、140、160、240
	強路基	0、40、70、90、110、140、180
		0、30、70、120、170、210、240

在溫度校估方程式之建立方面，台灣的道路主要分為高速公路及一般道路兩種。在台灣柔性鋪面鋪築於高速公路一般的厚度約為 10 英吋左右，而柔性鋪面鋪築一般道路厚度約為 8 英吋。根據 LTPP 實驗道路之研究，柔性鋪面面層厚度越厚，反算模數與溫度的相關性就越強。就台灣的國道與一般道路的厚度而言，溫度和柔性鋪面的相關性是非常高的。根據 LTPP 資料庫數據分析的結果，發現若反算鋪面模數對數值與鋪面中層溫度回歸式的 R-square 值較高時，其斜率會接近-0.025，故可以利用該斜率建立溫度校估式如下式二。

$$F = 10^{-0.025 \times (Tr - Tm)} \quad (式二)$$

其中，

F =溫度校估係數

Tr =擬效估標準中層溫度

Tm =量測得到的中層溫度

將在量測到之中層溫度 Tm 下之反算瀝青

模數與溫度校估係數 F 相乘，即可將中層溫度 Tm 下反算瀝青模數校正為標準中層溫度 Tr 下之瀝青模數。若欲進行溫度校估則可以考慮使用式二之溫度校估係數來進行溫度校估。

最後在鋪面接縫傳遞效益檢測方式與計算方法方面，本研究總共研究 3 種不同感測器與接縫、角隅、版中央以及裂縫之相互位置，且每種不同方式共有 4 種計算方法，總計 12 種。其中，因試驗在凌晨進行，故溫度變化不大，在本研究中不另行探討溫度對 LTE 之影響，並忽略其影響性。在 12 種不同方法中，C-1 之計算方法所得之 LTE 值最為保守，其次為 A-1 與 C-4。而 A-3 之計算方式則為最不合理之情況。其他方式則大多呈現相同之數值與趨勢。接著將接近端與遠離端相互比較，則發現兩者並無明顯之差異性；因椰林大道面層底部設有鋼絲網，所計算求得之 LTE 均較高，數據之判讀趨勢變化較小，應於後續實驗收集更為完整之資料，或配合 FEM 之分析進行比較。

七、參考文獻

1. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 1993.
2. Bennett, D. L., "Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements", FAA Advisory Circular, AC No. 150/5370-11A, Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation, 2004.
3. "LTPP Manual for Falling Weight Deflectometer Measurements: Operational Field Guidelines, Version 3.1", US Federal Highway Administration, 2000.
4. Khazanovich, L., Tayabji, S. D., and Darter, M. I., "Backcalculation of Layer Parameters for LTPP Test Sections,

- Volume I: Slab on Elastic Solid and Slab on Dense-Liquid Foundation Analysis of Rigid Pavements”, Publication No. FHWA-RD-00-086, Federal Highways Administration, McLean, VA, 2001.
5. Hall, K. T., Darter, M. I., Hoerner, T. E., and Khazanovich, L., “LTPP Data Analysis-Phase I: Validation of Guidelines for k-Value Selection and Concrete Pavement Performance Prediction”, Technical Report FHWA-RD-96-198, Federal Highway Administration, 1997.
 6. Khazanovich, L., Mcpeak, T. J., and Tayabji, S. D., “LTPP Rigid Pavement FWD Deflection Analysis and Backcalculation Procedure”, Nondestructive Testing of Pavement and Backcalculation of Moduli: Third Volume, ASTM STP 1375, American Society for Testing and Materials, pp. 246-266, 2000.
 7. “Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device”, ASTM D 4694-96 (Reapproved 2003), ASTM International, 2003.
 8. “Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements”, ASTM D 4695-03, ASTM International, 2003.
 9. Sebaaly, P. E., Bemanian, S., and Lani, S., “Nevada's Approach to the Backcalculation Process”, Nondestructive Testing of Pavement and Backcalculation of Moduli: Third Volume, ASTM STP 1375, American Society for Testing and Materials, pp. 59-71, 2000.
 10. Dong, M., and Hayhoe, G. F., “Analysis of Falling Weight Deflectometer Tests at Denver International Airport”, Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference, 2002.
 11. Garg, N., and Marsey, W. H., “Comparison between Falling Weight Deflectometer and Static Deflection Measurements on Flexible Pavements at the National Airport Pavement Test Facility (NAPTF)”, 2002 Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference, 2002.
 12. Guo, E. H., and Marsey, W., “Verification of Curling in PCC Slabs at FAA National Airport Pavement Test Facility”, Advancing Airfield Pavements: Proceedings of the 2001 Airfield Pavement Specialty Conference, August 5-8, 2001, Chicago, Illinois, 2001.
 13. Chang, D.-W., Chang, C.-L., “Dynamic Interpretation for Impulsive Deflection Test on Flexible Pavements”, Chinese Journal of Mechanics, Series A, Vol. 14, No. 2, pp. 91-100, 1998.
 14. Park, H. M., Kim, Y. R., Park, S. W., “Assessment of Pavement Layer Condition with Use of Multiload-Level Falling Weight Deflectometer Deflections”, Transportation Research Record, No. 1905, Transportation Research Board of National Research Council, Washington, D.C., pp. 107-116, 2005.
 15. Kim, Y. R., and Park, H., “Use of Falling Weight Deflectometer Multi-Load Data for Pavement Strength Estimation”, Report No. FHWA/NC/2002-006, North Carolina Department of Transportation, 2002.
 16. Li, S., and White, T. D., “Falling-Weight Deflectometer Sensor Location in the Backcalculation of Concrete Pavement Moduli”, Journal of Testing and Evaluation, ASTM, Vol. 28, No. 3, pp. 166-175, 2000.
 17. “LTPP Manual for Falling Weight Deflectometer Measurements: Operational Field Guidelines, Version 3.1”, US Federal Highway Administration, 2000.
 18. Carl Bro Group FWD Educational Training Course, 2005.
 19. Rufino, D., Roesler, J., and Barenberg, E. J., “Evaluation of Different Methods and

- Models for Backcalculating Concrete Pavement Properties Based on Denver International Airport Data”, 2002 Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference, 2002.
20. Stubstad, R. N., Irwin, L. H., Lukanen, E. O., and Clevenson, M. L., “It's 10 o'clock: Do You Know Where Your Sensors Are?”, Transportation Research Record, No. 1716, Transportation Research Board of National Research Council, Washington, D.C., pp. 10-19, 2000.
 21. Dong-yeob park, Neeraj Buch, and Karim Chatti, “Effective Layer Temperature Prediction Model and Temperature Correction via Falling Weight Deflectometer Deflections”, Transportation Research Record. N.1764, 2001, p.97-111.
 22. R. Kenneth wolfe, Brian W. Randolph, Member, ASCE, and David C. Colony, “Standardized Elastic Moduli of Pavement Layer for Overlay Design”, Vol. 121. no. 2. March/April. 1995.
 23. Erland O. Lukanen, Richard Stubstad, and Robert Briggs, “Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement”, LTPP June 2000.
 24. JIA-RUEY CHANG, JYH-DONG LIN, WEI-CHEN and DAR-HAO CHEN, “Evaluating the structural Strength of Flexible Pavement in Taiwan Using the Falling Weight Deflectometer, The International Journal of Pavement Engineering, 2002 VOL.3 pp.131-141
 25. Lev Khazanovich and Alex Gotlif, “Evaluation of joint and Crack Load Transfer Final Report”, LTPP October 2003
 26. YU T. CHOU, “Estimating Load Transfer From Measured Joint Efficiency in Concrete Pavements”
 27. Antonio Nanni, Denis A. Ludwig, and James E. Shoenberger, “Physico-Mechanical Properties and Load Transfer Efficiency of RCC Pavement”, ACI materials journal, title no. 93-M40, technical paper, 1996
 28. Dulce Rufino, Jeffery Roesler and Ernest, “Effect of Pavement Temperature on Concrete Pavement Joint Responses”, 2004 FAA worldwide airport technology transfer conference
 29. University of Arkansas, “Structural Design of Portland Cement Concrete Overlays for Pavement”

參加 2007 TRB 年會會議報告

報告人：周家蓓

台灣大學土木工程學系教授

民國九十六年八月十五日

一、參加會議經過

本人於九十六年元月十六日出發，先前往德州參訪德州大學奧斯汀分校，後前往美國華府參加 87 屆 TRB 年會。此次同時帶領台灣大學土木工程所博、碩士生共八人與會，本人及研究生於此次會議中共發表三篇論文，會議及參訪收穫均甚豐碩。

二、TRB 開會心得

今年是 TRB 第 87 屆，會場仍於傳統之三家旅館 Marriott, Omni Shoreham, 及 Hilton 一起舉行，參加人數來自世界各國的交通菁英超過八千人齊聚一堂。論文宣讀或展示之課題方向甚廣，均於大會所製作之論文光碟片中。本次會議本人及研究生共發表三篇文章，其中一篇為上台發表，另兩篇則分配在海報張貼區，並與與會人員討論研究相關內容，收穫甚鉅，相關內容分述如下：

1. 論文發表篇名：Strain Analysis of Airfield Jointed Concrete Pavement for Replaced Slabs

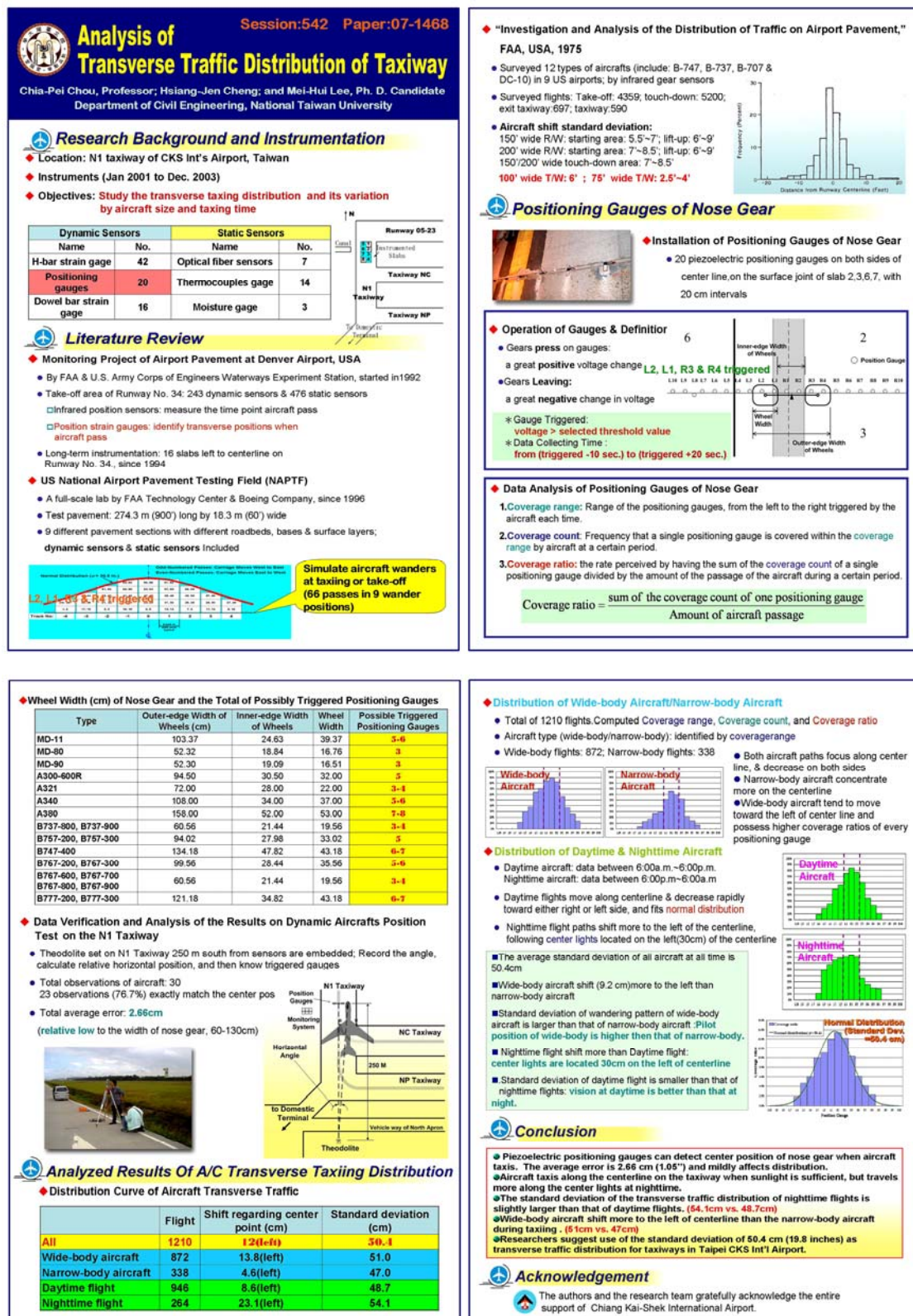
論文編號：07-1448

論文摘要：

台灣大學於 2002 年初中正機場北場部分版塊翻修之際，在 N1 滑行道部分翻修版塊中放置多種監測儀器，期望藉由監測資料瞭解剛性版塊內部因各項環境因素或航機載重引起之變化情形。此篇文章主要著重在版塊應變資料之分析。

應變資料可分為動態以及靜態資料兩種，經由動態資料的分析可以清楚辨識航機的主輪配置形式。而靜態之長期應變資料顯示，Y 方向應變量之變化幅度皆較 X 方向要大，並且與大氣溫度之變化趨勢相反；若以每日的應變資料觀察得知，版頂之應變變化幅度較版底為大。因而推論每日之應變變化不僅受版頂及版底之不同束制情形影響，更受到版頂及版底的溫差以及季節性之溫度變化影響；而長期之應變變化則與 X 方向及 Y 方向之不同束制情形較有關連性。

2. 海報發表篇名：Analysis of Transverse Traffic Distribution of Taxiway 論文編號：04-1468



Analyzed Results Of A/C Transverse Taxiing Distribution

Distribution Curve of Aircraft Transverse Traffic

	Flight	Shift regarding center point (cm)	Standard deviation (cm)
All	1210	1.2(left)	50.4
Wide-body aircraft	872	13.8(left)	51.0
Narrow-body aircraft	338	4.6(left)	47.0
Daytime flight	946	8.6(left)	48.7
Nighttime flight	264	23.1(left)	54.1

3. 海報發表篇名: Methodology of Applying Heavy Weight Deflectometer for the Calculation of Runway Pavement Classification Number

論文編號: 07-1558

Session : 542

Methodology of Applying Heavy Weight Deflectometer

Chia-Pei Chou, Professor; Shih-Ying Wang, Ph. D.

Paper : 07-1558

Department of Civil Engineering,

ACN-PCN Method

- ✦ Aircraft Classification Number (ACN) : relative effect of an aircraft
- ✦ Pavement Classification Number (PCN) : bearing strength of a pavement

PCN Code Format

PCN Value	Pavement Type	Subgrade Category	Allowable Tire Pressure	Method used
A number	R=Rigid F=Flexible	A = High B = Medium C = Low D = Ultra low	W = No limit X = To 217 psi Y = To 145 psi Z = To 73 psi	T = Technical U = Using aircraft

The Calculation Methods of PCN

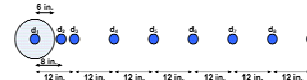
- ✦ U method
 - Adopt the highest ACN value in the mixed traffic as the PCN value
- ✦ T method
 - ICAO method : use the relationships between load, deflection, and repetition
 - Cumulative damage method : use fatigue model and Miner's hypothesis
 - Boeing method : reverse the design concept of the Portland Cement Association (PCA) as the basis of evaluation
- ✦ Comparison of U Method and T Method
 - U Method : more simple but less precise
 - T Method : more complicated but more precise

Objective

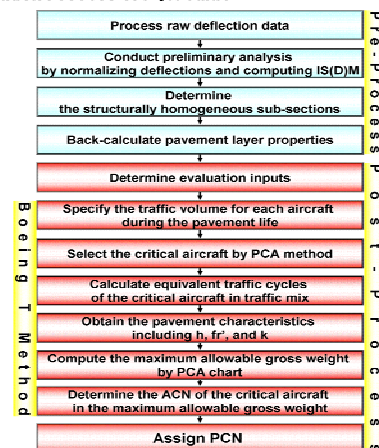
- ✦ Establish a modified T method to determine PCNs by applying the Heavy Weight Deflectometer (HWD) field data
- Pre-process: determine pavement homogeneous sub-sections and pavement material properties
- Post-process: determine PCN by the Boeing T method and by considering the variation of pavement structure

HWD Test

- ✦ Test plan and sampling locations are network level scales based on the suggestions of FAA AC 150/5370-11A and ASTM D 4695-03



Calculation Process of PCN value



for the Calculation of Runway Pavement Classification Number

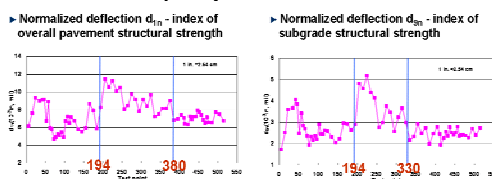
Candidate; and Chen-Yu Tsai, Ph. D. Candidate

National Taiwan University



Pre-Process of HWD Data

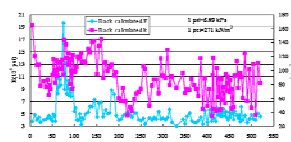
- ✦ Determine the Structurally Homogeneous Sub-sections



- Thickness variation : 16 in. between test points 64 and 480, 16 in. for the rest of the runway
- Six sub-sections with five partition points at test points 64, 194, 330, 380, and 480 are obtained

- ✦ Back-calculation of Pavement Layer Properties

- Tool : DBFWD is selected



Process of HWD Data

- ✦ Determine evaluation inputs - average values are selected
- ✦ Determining the Critical Aircraft and Equivalent Traffic Cycles
 - Critical aircraft - B777-300
 - Equivalent traffic cycles for one year - 33,385

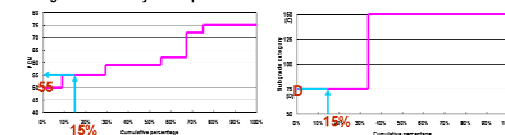
Assign PCN

- ✦ Calculate PCN values of Sub-sections

Pave. Life (yrs)	PCN							
	Sub-sec. 1	Sub-sec. 2	Sub-sec. 3	Sub-sec. 4	Sub-sec. 5	Sub-sec. 6	Sub-sec. 7	Sub-sec. 8
20	54 RDWT	61 RDWT	50 RDWT	42 RDWT	48 RDWT	51 RDWT		
15	57 RDWT	65 RDWT	52 RDWT	44 RDWT	49 RDWT	53 RDWT		
10	59 RDWT	69 RDWT	54 RDWT	46 RDWT	50 RDWT	55 RDWT		
5	62 RDWT	75 RDWT	59 RDWT	48 RDWT	55 RDWT	72 RDWT		
3	69 RDWT	79 RDWT	62 RDWT	52 RDWT	58 RDWT	76 RDWT		
1	76 RDWT	88 RDWT	71 RDWT	59 RDWT	65 RDWT	84 RDWT		

Post-Process of PCN Selection

- ✦ Select the pave. life category
- ✦ Using 85% reliability concept



55 RDWT is selected

Conclusion

- ✦ A modified T method is developed
- ✦ Not only the calculation theory of PCN but also the variation of pavement structure is considered
- ✦ An integrated PCN value is determined in order to achieve an 85% reliability

Acknowledgement

The authors and the research team gratefully acknowledge the entire support of

三、攜回資料名稱及內容

- 1.會議所有發表論文 CD 檔一片。
- 2.展覽廠商所提供之研究報告與相關設備說明資料。