

撓度試驗數據處理與柔性路面結構指標 之結合應用

張德文 張記恩
淡江大學土木工程學系

摘要

本文針對非破壞性撓度試驗之穩態撓度與衝擊撓度試驗，以動態應力分析為基礎，建立符合台灣地區柔性鋪面狀況之撓度指標評估表，供鋪面定性評估使用。該表除能概括一般由經驗與統計架構而設立之撓度指標法則外，其對鋪面各層材料狀況的掌握將更為確實。由分析實驗顯示，撓度指標法可有效地監控道路加鋪之結構改善，並說明結構體的弱層；若忽略岩盤及各層厚度之影響，其評估結果將與動力回算相似，兩者結合運用將使撓度試驗法應用性更為落實。

關鍵詞：鋪面試驗，撓度指標，數據演繹，動力分析，回算

Study on Data Interpretation and Structural Index of Flexible Pavement

Der-Wen Chang and Chi-En Chang

*Department of Civil Engineering
Tamkang University, Tamsui, Taiwan 25137, R.O.C.*

Abstract

Based on dynamic analysis of steady-state and impulsive nondestructive deflection tests on pavement, new deflection indexes representing for the qualitative structural capacity of flexible pavements in Taiwan are suggested in this study. As the result of statistics analysis, the newly developed indexes are more generalized than the conventional ones. Layer conditions can be verified more accurately by using this method. By comparing with the dynamic backcalculations on experimental deflections, rehabilitation efficiency of the overlay construction is revealed; the weak layer of the structure is effectively shown. Neglecting the influences from bedrock and layer thickness, similar pavement conditions can be interpreted by dynamic backcalculation and this method. Incorporation of both methods shall make deflection tests more applicable in engineering practice.

Keywords: pavement testing, deflection index, data interpretation, dynamic analysis, backcalculation

一、前言

非破壞性撓度試驗法為調查鋪面結構強度之主要現場施測工具，常見的試驗儀器包括道路評審儀 (Road Rater)、動力撓度儀 (Dynaflect) 以及落重撓度儀 (Falling Weight Deflectometer, FWD)。為瞭解鋪面結構特性，試驗數據的演繹方式可分為 1. 應力分析和 2. 撓度指標法兩種。前者以力學分析與數學模式為基礎，對鋪面結構進行定量分析，優點為精確，但演繹方式相對地複雜；後者則以經驗公式及統計理論對鋪面結構進行定性研判，其優點為快速、簡便，但僅能提供定性資料，無法精細地指出鋪面各層結構強弱程度，撓度法之相關介紹可見 [1、2、3]。以應力分析為主的數據演繹可分為靜態和動態回算，Chang 等人 [4、5] 曾根據波動力學理論建立撓度試驗的動力回算程式以更準確地處理試驗數據。而就撓度指標法而言，一般均以撓度值或其相關物理量大小做為代表鋪面成層強弱的指標值，指標大致可區分為七類 [6、7]，分列如表 1。其中各類指標以撓度值類、曲率類和面積類使用較為廣泛，其相關研究方向大致說明如后。美國猶他州公路主管機構 [8] 曾使用 DMD (第一接收器撓度值)、SCI (面層曲率指標) 和

BCI (基層曲率指標) 等三項穩態指標，建立定性評估鋪面強度之基礎，其門檻指標值即為研判鋪面強度之準則 (如表 2 所示)。美國伊利諾州公路局 [9] 則以梯形面積指標 AREA 配合量測之撓度值，求取全厚度瀝青鋪面 (或剛性鋪面) 之結構和路基之楊氏係數。另 Noureldin [10]、Gustav [11] 等人曾運用撓度指標評估現存鋪面整體之有效結構數 (SN) 和路基土壤回彈模數 (MR) 值。國內林志棟 [1]、賴森榮和侯羿等人 [12] 則以動力撓度儀、道路評審儀為基礎，建立類似判斷準則。另賴登明 [7] 曾運用統計分析選取評估鋪面上、下層及整體結構之最顯著撓度指標，藉顯著撓度指標的變化監控鋪面結構強度的改變趨勢，並依此建構特定鋪面結構之鋪面診斷模式。周家蓓與陳又菁 [2] 則分別以靜態回算分析及撓度指標法為主發展鋪面養護維修策略之訂定程序與評估重點。由於過去所分析之撓度指標多為穩態撓度指標，且其係根據經驗和統計方法而建立，缺乏具體而微的理論基礎。鑑於此，本研究擬以動態應力分析為基礎，配合統計理論改善傳統撓度指標法則，並建立穩態和衝擊式撓度試驗指標評估表，供台灣地區公路柔性鋪面評估使用。

表 1 撓度指標值之分類與定義 (整理自 [6、7])

類別	指標名稱及定義
撓度值類	$W_i, i=1\sim7$ (各接收器之最大撓度值，其中 W_1 亦稱為 MD)
曲率類	道路評審儀或動力撓度儀 $SCI\ 1=W_1-W_2$ $SCI\ 2=W_2-W_3$ $BCI\ 1=W_3-W_4$ $BCI\ 2=W_4-W_5$ 落重撓度儀 (等間距排列接收器) $SCI\ 1=W_1-W_2$ $SCI\ 2=W_2-W_3$ $SCI\ 3=W_3-W_4$ $BCI\ 1=W_4-W_5$ $BCI\ 2=W_5-W_6$ $BCI\ 3=W_6-W_7$ 落重撓度儀 (不等間距排列接收器) $SCI\ 1=W_1-W_2$ $SCI\ 2=W_2-W_3$ $BCI\ 1=W_3-W_4$ $BCI\ 2=W_4-W_5$
面積類	$AREA = \left[1 + 2 \left(\frac{W_2}{W_1} \right) + 2 \left(\frac{W_3}{W_1} \right) + \left(\frac{W_4}{W_1} \right) \right]$ $ASP = \sum W_i, i=1\sim5, SP=ASP / (5 \times W_1)$
形狀因子類	$F2=(W_1-W_3)/W_2, F3=(W_2-W_4)/W_3,$ $F4=(W_3-W_5)/W_4$
倒數類	$A_i=1/W_i \quad (i=1\sim7)$
斜率類	$S3=W_1-W_3, S4=W_1-W_4, S5=W_1-W_5,$ $TS_j=(W_1-W_j)/dl_j, (j=2\sim5),$ 其中 dl_j 為第一接收器與第 j 接收器之間距
綜合類	$SD=SCI/W_1, BD=BCI\ 3/W_5,$ $WW1=(W_2 \times W_2)/W_1, QR_j=dl_j/W_1$

表 2 撓度指標評估鋪面強度之準則 (摘自 Baladi and Synder [8])

DMD	SCI	BCI	Structural condition
>1.25	>0.48	>0.11	PAVEMENT AND SUBGRADE WEAK
		<0.11	SUBGRADE STRONG, PAVEMENT WEAK
	<0.48	>0.11	SUBGRADE WEAK, PAVEMENT MARGINAL
<1.25	>0.48	<0.11	PAVEMENT WEAK, DMD OK
	<0.48	>0.11	SUBGRADE WEAK, DMD OK
		<0.11	PAVEMENT AND SUBGRADE STRONG

指標單位：mil/kip，1 mil = 0.001 inch，1 inch=2.54 cm，1 kip=1000 lbs=4.448 kN

二、撓度資料庫建立

為模擬國內一般公路柔性鋪面四層結構於穩態、衝擊力撓度試驗下之撓度值，研究將以下設定，運用格林柔度方程式數值解模擬鋪面成層系統在試驗動力作用下的應力波傳遞情形[13、14]，並求取穩態、衝擊撓度試驗中地表接收器的最大位移振幅和撓度盤。其中，撓度值的計算將暫不考慮溫度以及路基飽和度所造成的影響。有關格林柔度方程式計算之說明請見[5、15]。

1. 鋪面結構資料

研究所討論之柔性鋪面結構分為：1. 北二高含地瀝青處理底層之四層柔性鋪面結構。2. 中山高含地瀝青處理底層之四層柔性鋪面結構。3. 一般省道含碎石級配底層之四層柔性鋪面結構。經參考路面設計資料[16、17]，標準鋪面結構參數如表 3 所示。為考慮施工品質、交通荷重及環境等因素所導致的材料模數變化，本研究假設鋪面各層模數變化比率為 50% ~ 110%，在此範圍運用分層比例隨機抽樣法(Stratified Random Sampling)[18]，抽選每層材料用於分析之六個模數值樣本(如表 4)，故單一鋪面四層結構可得 1296 組模數組合。

表 3 柔性鋪面四層結構資料表

北部地區第二高速公路				
層級	厚度 (m)	原始模數值 (kPa)	柏松比	單位重 (kN/m ³)
瀝青混凝土面層	0.12	2413250	0.35	21.22
地瀝青處理底層	0.2	2068500	0.35	21.22
碎石級配基層	0.3	172375	0.40	19.65
路基土壤	假設為半無限空間	55160	0.45	18.86
國道中山高速公路				
層級	厚度 (m)	原始模數值 (kPa)	柏松比	單位重 (kN/m ³)
瀝青混凝土面層	0.1	2413250	0.35	21.22
地瀝青處理底層	0.2	2068500	0.35	21.22
碎石級配基層	0.2	172375	0.40	19.65
路基土壤	假設為半無限空間	27580	0.45	18.86
省道、市區道路系統				
層級	厚度 (m)	原始模數值 (kPa)	柏松比	單位重 (kN/m ³)
瀝青混凝土面層	0.15	2413250	0.35	21.22
碎石級配底層	0.3	172375	0.35	19.65
礫石級配基層	0.3	137900	0.40	19.65
路基土壤	假設為半無限空間	27580	0.45	18.86

表 4 鋪面各層模數之隨機模數百分比參數與本研究使用之樣本數據

鋪面	隨機模數百分比(%)				研究使用之樣本數據(kPa)			
	面層	底層	基層	路床	面層	底層	基層	路床
北	103	99	108	110	2485648	2047815	186165	60676
	93	91	97	90	2244323	1882335	167203	49644
二	79	86	86	86	1906468	1778910	148242	47437
	75	79	74	81	1309938	1634115	127557	44679
高	69	69	69	67	1665142	1427265	118939	36957
	64	63	50	52	1544480	1303155	86187	28683
中	103	99	108	110	2485648	2047815	186165	30338
	93	91	97	90	2244323	1882335	167203	24822
山	79	86	86	86	1906468	1778910	148242	16823
	75	79	74	81	1309938	1634115	127557	22340
高	69	69	69	67	1665142	1427265	118939	18479
	64	63	50	52	1544480	1303155	86187	14341
省	103	99	108	110	2485648	186165	148932	30338
	93	91	97	90	2244323	167203	133763	24822
道	79	86	86	86	1906468	148242	118594	16823
	75	79	74	81	1309938	127557	102046	22340
道	69	69	69	67	1665142	118939	95151	18479
	64	63	50	52	1544480	86187	68950	14341

2. 試驗相關參數設定

本研究以國內常使用之非破壞性撓度試驗儀器為分析對象，1. 道路評審儀 2000 型。2. 落重撓度儀

Dynatest 8000 型。施測儀器之相關數據如表 5 所示。施測動載重乃以道路評審儀 11 kN (2400 lb) 、FWD 40 kN (9000 lb) 為設定值。

表 5 施測儀器模擬資料表

試驗	道路評審儀	落重撓度儀
動載重範圍	1 ~ 25kN (200 ~ 5,500 lbf)	7 ~ 120 kN (1,500 ~ 27,000 lbf)
振頻範圍	單一振頻，可調範圍 6 ~ 60 多頻集中於 0 ~ 100 Hz	
施測之動載重	11 kN (2400 lbf)	40 kN (9000 lbf)
荷重平版直徑	45.7cm (18.0 inch)	30 cm (11.8 inch)
接收器	5 個	7 個
接收器位置	0,30,61,91,122 cm	0,30,60,90,120,150,180 cm(等間距) 0,20,30,60,90,120,150 cm(不等間距)

示於表 7，討論如下：

三、傳統撓度指標相關性

為使撓度指標能有效地詮釋鋪面強度的變化，研究首先針對鋪面強度訂定衡量標準。除檢視鋪面整體結構強度外，另將鋪面分為 1、由瀝青混凝土(AC)、瀝青處理底層(BTB)所組成之上層結構，2、由碎石級配基層(GSB)或碎石級配底層(GB)組成之中層結構，以及 3、由路基土壤構成之下層結構，三層級示於表 6。其中除鋪面下層路基土壤以回彈模數 MR 值為評估標準外，其餘均以 AASHTO[19]建議之結構數(SN)代表結構的強弱。結構數計算公式之層係數 a_i 則根據 Van Til 等人[20]所建議之模數、層係數轉換圖 (normograph)，配合各材料之彈性模數 E 值而求得，相關內容可見張記恩[21]。

為瞭解傳統 MD、SCI、BCI 撓度指標之詮釋能力，研究首將各道路 1296 組鋪面以正算建立傳統撓度指標，運用統計分析理論，計算各撓度指標與鋪面結構強度之皮爾遜積差相關係數 (Pearson Product-Moment Correlation Coefficient)；藉此瞭解穩態、衝擊式撓度指標與鋪面整體數(SN)、BTB 鋪面上層結構數(SNup)、GSB 或 GB 鋪面中層結構數(SNmid)及下層結構強度 (MR)之關連性。相關係數範圍將介於-1.0~1.0 之間，其絕對值愈接近 1.0 者表兩者之關連性愈高，正負符號則代表相對變異的同向性或逆向性。分析所得道路評審儀和落重撓度儀試驗之穩態撓度指標與各型鋪面結構強度相關結果

表 6 各類型鋪面成層結構強度分析表

北部地區第二高速公路		
層 級	分析結構層級	結構層級強度計算方式
瀝青混凝土面層	鋪面結構上層	$SN_{up} = a_1 m_1 h_1 + a_2 m_2 h_2$
地瀝青處理底層		
碎石級配基層	鋪面結構中層	$SN_{mid} = a_3 m_3 h_3$
路基土壤	鋪面結構下層	M_R
國道中山高速公路		
層 級	分析結構層級	結構層級強度計算方式
瀝青混凝土面層	鋪面結構上層	$SN_{up} = a_1 m_1 h_1 + a_2 m_2 h_2$
地瀝青處理底層		
碎石級配基層	鋪面結構中層	$SN_{mid} = a_3 m_3 h_3$
路基土壤	鋪面結構下層	M_R
省道		
層 級	分析結構層級	結構層級強度計算方式
瀝青混凝土面層	鋪面結構上層	$SN_{up} = a_1 m_1 h_1$
碎石級配底層		
碎石級配基層	鋪面結構中層	$SN_{mid} = a_2 m_2 h_2 + a_3 m_3 h_3$
路基土壤	鋪面結構下層	M_R

註：排水係數 m_i 均為 1.0

鋪面整體結構強度 $SN_{total} = a_1 m_1 h_1 + a_2 m_2 h_2 + a_3 m_3 h_3$

1. 穩態撓度指標

三類鋪面中 MD 指標於評估鋪面整體強度效果極佳，相關係數(r)可達-0.95~-0.97 之間，對鋪面上層結構強度相關性亦佳。SCI 指標於詮釋各式鋪面上層結構強度之效果亦佳，相關係數可達-0.90~-0.94 之間。BCI 撓度指標對於路基土壤強度變化之詮釋不佳，相關係數僅介於-0.44~-0.64 之間；其詮釋能力甚至遠低於詮釋路面之整體結構數 ($r = -0.75 \sim -0.86$)、上層結構數 ($r = -0.40 \sim -0.54$)與基層結構數 ($r = -0.52 \sim -0.78$)之能力。

2. 衝擊式撓度指標

MD 指標僅於省道鋪面結構中擁有詮釋鋪面整體結構強度之能力 ($r = -0.92$)，而在具瀝青處理底層之北二高、中山高鋪面結構中，鋪面整體強度 SN 與 MD 指標相關性均不佳 ($r = -0.72 \sim -0.75$)。SCI 指標可有效地詮釋不同鋪面上層結構強度，相關係數均可達-0.88~-0.95 之間；在具瀝青處理底層之北二高、中山高鋪面結構中，因瀝青材料層厚度大，其相關係數絕對值可達 0.92 以上。BCI 指標用於不同鋪面路基土壤之效果均甚佳，相關係數亦可達-0.88~-0.95 之間。

表 7 各類型鋪面結構強度與穩態、衝擊試驗傳統撓度指標之相關係數值

鋪面	指標	穩態撓度				衝擊撓度			
		SN	SNup	SNmid	M _R	SN	SNup	SNmid	M _R
北二高	MD	-0.97	-0.72	-0.68	-0.14	-0.75	-0.60	-0.49	-0.62
	SCI	-0.78	-0.90	-0.31	0.30	-0.70	-0.92	-0.19	0.31
	BCI	-0.86	-0.40	-0.77	-0.48	-0.26	-0.11	-0.25	-0.92
中山高	MD	-0.95	-0.83	-0.51	-0.20	-0.72	-0.64	-0.38	-0.66
	SCI	-0.86	-0.93	-0.27	0.21	-0.83	-0.95	-0.21	0.20
	BCI	-0.75	-0.54	-0.52	-0.64	-0.23	-0.16	-0.17	-0.95
省道	MD	-0.97	-0.82	-0.57	-0.02	-0.92	-0.81	-0.51	-0.29
	SCI	-0.73	-0.94	-0.14	0.16	-0.60	-0.88	-0.02	0.27
	BCI	-0.86	-0.41	-0.78	-0.44	-0.41	-0.15	-0.41	-0.88

四、顯著撓度指標之建立

由上述分析得知 MD、SCI 與 BCI 撓度指標於不同試驗之詮釋能力將不同，為找尋更有效地詮釋鋪面結構強度之顯著 (significant) 撓度指標，本研究遂對其餘各類撓度指標進行相關性分析[21]。由於研究初期所彙集之落重撓度儀實驗大致採用 0,20,30,46,66,90,120 cm 不等間距排列接收器，且報表僅列出前五個撓度值，故本研究除就國外常見之等間距排列法進行分析外，亦針對不等間距排列之衝擊撓度資料進行分析。觀察結果如下：

- (1). 穩態撓度指標：仍以 MD 及 SCI 撓度指標最能代表鋪面整體和上層結構強度之變化；下層級路基結構則無顯著撓度指標與之對應。
- (2). 衝擊撓度指標(等間距接收器)：對鋪面結構強度而言，曲率類指標 SCI2 為最顯著撓度指標。就上層結構而言，曲率類指標 SCI1 (針對高速公路鋪面)與斜率類指標 S3 (針對省道鋪面)則為顯著指標，W7 為詮釋路基土壤強度 (MR 值)之最佳撓度指標。鋪面基層強度無相關性高之指標可供使用。
- (3). 衝擊撓度指標(不等間距接收器)：與等接收器間距分析結果類似，曲率類指標 BCI 2 為代表鋪面結構強度之最顯著撓度指標。常用曲率類指標 SCI1 與 W5 可用於評估上層結構及路基土壤強度，而鋪面基層強度則無相關性高之指標供其使用。

鑑於以上觀察，研究另採用統計分析之所有可能迴歸法 (All Possible Regression)，建立由撓度值 W_i (i=1~5 for RR 或 i=1~7 for FWD)組合而成的組合式撓度指標(SW)[21]，以評估傳統撓度指標無法詮釋之鋪面結構層。其分析方法係根據所有可能迴歸模式組合而成的撓度指標，運用 Rp2、MSEp、Mallow's Cp 三項判定準則，以求取最佳的複迴歸模式，說明詳見張記恩[21]。以代表北二高基層強度之

穩態組合式撓度指標為例，在所有可能之迴歸模式組合中，選取個別參數組合並繪製其所對應 Rp2、MSEp、Mallow's Cp 比較圖 (如圖 1)，由圖中最高 Rp2 值和最低 MSEp 值和、Mallow's Cp 值可判讀由最少數目撓度值組合而成的模式即為最佳組合模式。圖 1 顯示由撓度值 W₁、W₂、W₅ 組合而成之迴歸模式即為最佳模式，故 SW125 即為代表基層強度變化之最佳撓度指標，其數學式表示如下：

$$SW125 = 1.63 + 7.15W_1 - 14.63W_2 + 13.63W_5 \quad (1)$$

同理，用於詮釋北二高路基結構強度之穩態動力撓度指標將為 SW 34。

$$SW34 = 29.90 + 75.24W_3 - 116.5W_4 \quad (2)$$

經上述分析，研究針對三類鋪面結構建議代表其各層結構之最佳穩態、衝擊撓度指標，如表 8 所示，各項組合指標說明詳見[21]。

表 8 顯著撓度指標與結構特性的相關性

鋪面	指標相關性	穩態撓度結構特性				等間距衝擊撓度結構特性				不等間距衝擊撓度結構特性			
		SN	SNup	SNmid	M _R	SN	SNup	SNmid	M _R	SN	SNup	SNmid	M _R
北二高	對應指標	W1	SCI	SW125	SW34	SCI 2	SCI	SW127	W7	BCI 1	SCI	SW145	W5
	相關係數	-0.969	-0.898	0.991	0.993	-0.967	-0.923	0.982	-0.972	-0.989	-0.880	0.989	-0.931
中山高	對應指標	W1	SCI	SW123	SW24	SCI 2	SCI	SW125	W7	BCI 1	SCI	SW1245	W5
	相關係數	-0.954	-0.932	0.981	0.982	-0.972	-0.953	0.976	-0.958	-0.972	-0.955	0.980	-0.921
省道	對應指標	W1	SCI	SW1234	SW34	SCI 2	S3	SW247	W7	N/A			
	相關係數	-0.966	-0.940	0.983	0.952	-0.938	-0.931	0.957	-0.880				

五、新型撓度指標評估表

當顯著撓度指標選定後，研究隨即運用指標排序及樹狀分配方式建構撓度指標評估表。其方法首先運針對代表整體鋪面結構強度的撓度指標，對各道路 1296 組鋪面狀況進行排序，依據指標大小排序之中位數值(median)將數據分成"整體結構強度佳"與"整體結構強度差"兩組；同理，在各組中再利用代表鋪面上層結構強度之撓度指標，針對兩組數據分別進行排序並取各自之中位數，並將兩組數據再分別定義"上層結構佳"與"上層結構差"之次群組數據。依此原則再對鋪面中層結構撓度指標、路基強度撓度指標進行相同的排序與分割，最終可得到依鋪面各層結構強弱分類而成的樹狀結構分支，分別定義為鋪面狀況 1~16。代表中位數之撓度指標值，即視為撓度指標評估表中之門檻值。該流程請參考圖 2。撓度指標之中位數選定和將其視為門檻值對結構強度排序的強、弱定義當有一定程度衝擊，但由於以結構強度排序訂定中位數或門檻值將引發評估困擾，故在此暫用此法定義，相關討論可見論文[4]。北二高、中山高、省道三類柔性鋪面之正規化撓度指標評估表，可依據撓度實驗儀器的不同，分為穩態撓度試驗、等間距衝擊式撓度試驗以及漸增間距衝擊式撓度試驗，其中中山高一例示於表 9~11。大體而言，單一次群組各層撓度指標可具體地反映該層材料模數的衰減性，但就整體之 16 組鋪面狀況而言，所對應之材料模數高低將稍現不規則變化，該現象說明鋪面各層模數的消長與互動性俱會影響其表面撓度值的高低。

六、鋪面厚度與岩盤影響

為瞭解岩盤(有限之路基厚度)、鋪面厚度對撓度指標所產生影響，研究遂進行指標之敏感度分析。以下以北二高鋪面結構為例，探討穩態、衝擊式撓度指標受岩盤深度、鋪面厚度改變之影響。

1. 岩盤深度之影響

假設標準鋪面下岩盤大致位於 2.3、3.1、4.6、6.1、7.6、9.1 m 深度處，可繪製岩盤深度與撓度指標比值(具岩盤結構之撓度指標/半無限空間之撓度指標)關係圖。討論如下：

- (1). 穩態撓度指標：由圖 3a 知岩盤深度改變對鋪面結構以及上層強度之 W1 (或 MD)、SCI 指標並不構成明顯的影響，而評估基層、路床強度之 W125、SW34 指標則隨岩盤深度變小而漸趨減少。

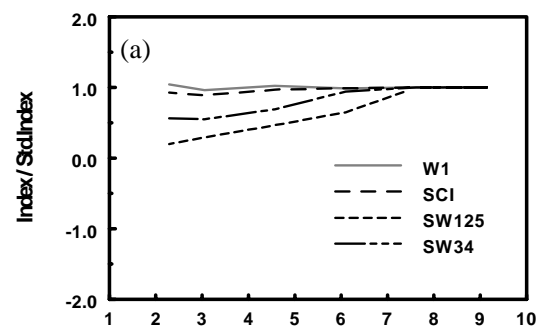


表9 中山高鋪面正規化穩態撓度指標評估表

MD	SCI	SW123	SW24	鋪面狀況
<1.30	<0.18	>0.49	>1.39	1.路面各層與路基結構強
			≤1.39	2.路面各層結構均強但路基差
		≤0.49	>1.38	3.路面結構強但基層弱
			≤1.38	4.路面結構強但基層弱且路基差
	≥0.18	>0.472	>1.48	5.路面結構佳但上部結構稍弱
			≤1.48	6.路面結構佳但上部結構稍弱且路基弱
		≤0.472	>1.46	7.路面結構佳但上部結構稍弱且基層弱
			≤1.46	8.路面整體結構稍弱但上部結構尚可
≥1.30	<0.21	>0.40	>1.13	9.路面整體結構稍弱且面層結構弱
			≤1.13	10.路面結構稍弱且路基強度差
		≤0.40	>1.32	11.路面結構稍弱且基層強度差
			≤1.32	12.路面結構稍弱且基層與路基強度差
	≥0.21	>0.41	>1.47	13.路面結構弱且上層強度較差
			≤1.47	14.路面結構弱且上層強度較差、路基弱
		≤0.41	>1.44	15.路面結構弱且上層較差、基層強度差
			≤1.44	16.路面整體強度差

註：正規化為意指1 kip 力作用下之撓度指標

$$MD = W_1 \quad ; \quad SCI = W_1 - W_2 \quad ; \quad SW123 = 0.996 + 13.29W_1 - 32.02W_2 + 20.97W_3 \quad ; \quad SW24 = 18.25 + 14.83W_2 - 34.45W_4$$

表10 中山高鋪面正規化衝擊撓度指標評估表(等接受器間距)

SCI2	SCI	SW125	W7	鋪面狀況
<0.26	<0.28	>0.13	<0.53	1.路面各層與路基結構強
			≥0.53	2.路面各層結構均強但路基差
		≤0.13	<0.54	3.路面結構強但基層弱
			≥0.54	4.路面結構強但基層弱且路基差
	≥0.28	>0.14	<0.53	5.路面結構佳但上部結構稍弱
			≥0.53	6.路面結構佳但上部結構稍弱且路基弱
		≤0.14	<0.53	7.路面結構佳但上部結構稍弱且基層弱
			≥0.53	8.路面整體結構稍弱但上部結構尚可
≥0.26	<0.33	>0.11	<0.58	9.路面整體結構稍弱且面層結構弱
			≥0.58	10.路面結構稍弱且路基強度差
		≤0.11	<0.56	11.路面結構稍弱且基層強度差
			≥0.56	12.路面結構稍弱且基層與路基強度差
	≥0.33	>0.11	<0.55	13.路面結構弱且上層強度較差
			≥0.55	14.路面結構弱且上層強度較差、路基弱
		≤0.11	<0.56	15.路面結構弱且上層較差、基層強度差
			≥0.56	16.路面整體強度差

註：正規化為意指1 kip 力作用下之撓度指標

$$SCI\ 2 = W_2 - W_3 \quad ; \quad SCI = W_1 - W_2 \quad ; \quad SW125 = 1.66 + 1.28W_1 - 2.45W_2 + 1.61W_5$$

表 11 中山高鋪面正規化衝擊撓度指標評估表(不等接受器間距)

BCI 1	SCI	SW1245	W5	鋪面狀況
<0.26	<0.18	>0.13	<0.96	1.路面各層與路基結構強
			≥0.96	2.路面各層結構均強但路基差
		≤0.13	<0.98	3.路面結構強但基層弱
			≥0.98	4.路面結構強但基層弱且路基差
	≥0.18	>0.13	<0.98	5.路面結構佳但上部結構稍弱
			≥0.98	6.路面結構佳但上部結構稍弱且路基弱
		≤0.13	<0.99	7.路面結構佳但上部結構稍弱且基層弱
			≥0.99	8.路面整體結構稍弱但上部結構尚可
≥0.26	<0.21	>0.11	<1.02	9.路面整體結構稍弱且面層結構弱
			≥1.02	10.路面結構稍弱且路基強度差
		<0.11	<1.04	11.路面結構稍弱且基層強度差
			≥1.04	12.路面結構稍弱且基層與路基強度差
	≥0.21	>0.11	<1.01	13.路面結構弱且上層強度較差
			≥1.01	14.路面結構弱且上層強度較差、路基弱
		≤0.11	<1.06	15.路面結構弱且上層較差、基層強度差
			≥1.06	16.路面整體強度差

註：正規化為意指1 kip 力作用下之撓度指標

$BCI\ 1 = W3 - W4$; $SCI = W1 - W2$; $SW1245 = 1.88 + 1.46W_1 - 1.57W_2 - 2.59W_4 + 2.99W_5$

(2). 衝擊撓度指標：由圖 3b 知就等間距接收器而言，代表鋪面結構以及上層強度之 SCI 2、SCI 指標影響不明顯。而代表基層、路床強度撓度之 W127、W7 指標則於岩盤深度小於 6.1 公尺時，隨岩盤愈淺而有漸減的趨勢。由圖 3c 可知不等間距接收器狀況下，除 SW145 指標於岩盤深度小於 5 公尺時有±3%之些微變動外，岩盤深度對其餘撓度指標均不造成明顯的影響。

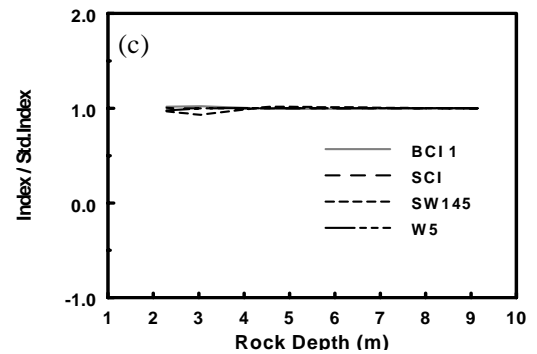
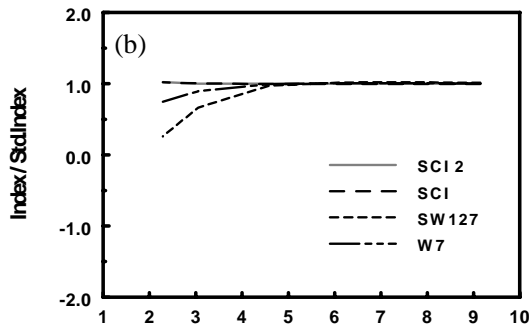


圖 3 北二高岩盤深度對各式撓度指標評估值之影響

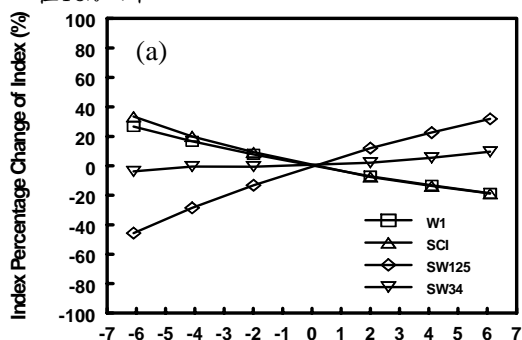
- (a) 穩態撓度
- (b) 等間距衝擊撓度
- (c) 不等間距衝擊撓度

由上述討論可知，反應鋪面深層之撓度指標將因岩盤接近地表而產生較明顯的變化，其原因為鋪面系統於動力作用下所產生的動態放大效應或反放大效應所造成結果。根據分析得知，北二高鋪面岩盤深度若大於 8 公尺，中山高、省道鋪面岩盤深度若大於 6 公尺，則不影響穩態撓度指標；衝擊撓度指標則相當地穩定，岩盤深度達 5 公尺以上即不影響撓度指標。FWD 實驗採不等(漸增)間距方式排列接收器更可減低岩盤之影響。

2. 鋪面厚度之影響

為瞭解各鋪面層厚度變化對撓度指標的影響，研究對北二高柔性路面之面層、底層與基層施以±10%、±20%、±30%的厚度變化，並繪製各層厚度變化對撓度指標值影響百分比圖，本研究僅就各鋪面底層影響討論如下：

- (1). 穩態撓度指標：由圖4a知以瀝青處理底層厚度對撓度指標的影響最大，當厚度改變至±30%（約±6.1 cm）時，SW125指標改變量可達-46%，其餘撓度指標亦有-18% ~ +33%的變化。至於面層厚度改變對各撓度指標的影響僅有-23%，而基層厚度所造成的撓度指標影響均在13%以下。



- (2). 衝擊撓度指標：由圖4b知就等間距接收器而言，瀝青處理底層厚度對撓度指標影響甚鉅，其SCI2、SW127的影響可達40%以上。面層厚度改變對各撓度指標的最大影響僅有-23%，而基層厚度影響亦均在15%以下。圖4c則表示各層厚度變化對不等間距接收器撓度指標之影響，結果顯示瀝青處理底層厚度影響依然最為顯著，當底層厚度改變至±30%（約±6.1 cm）時，SW145的最大差值可達+49%及-64%。面層厚度改變對各撓度指標的最大偏差僅約-35%，基層厚度所造成的撓度指標差異亦於13%以下。

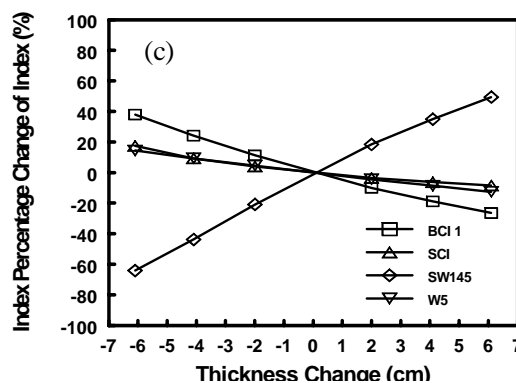
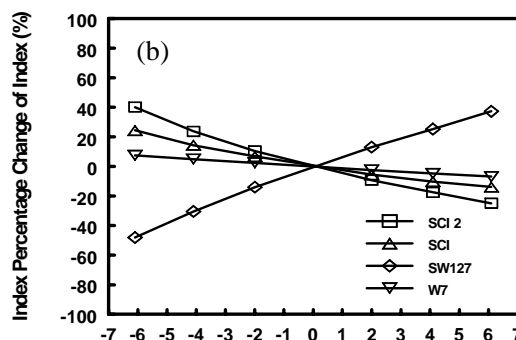
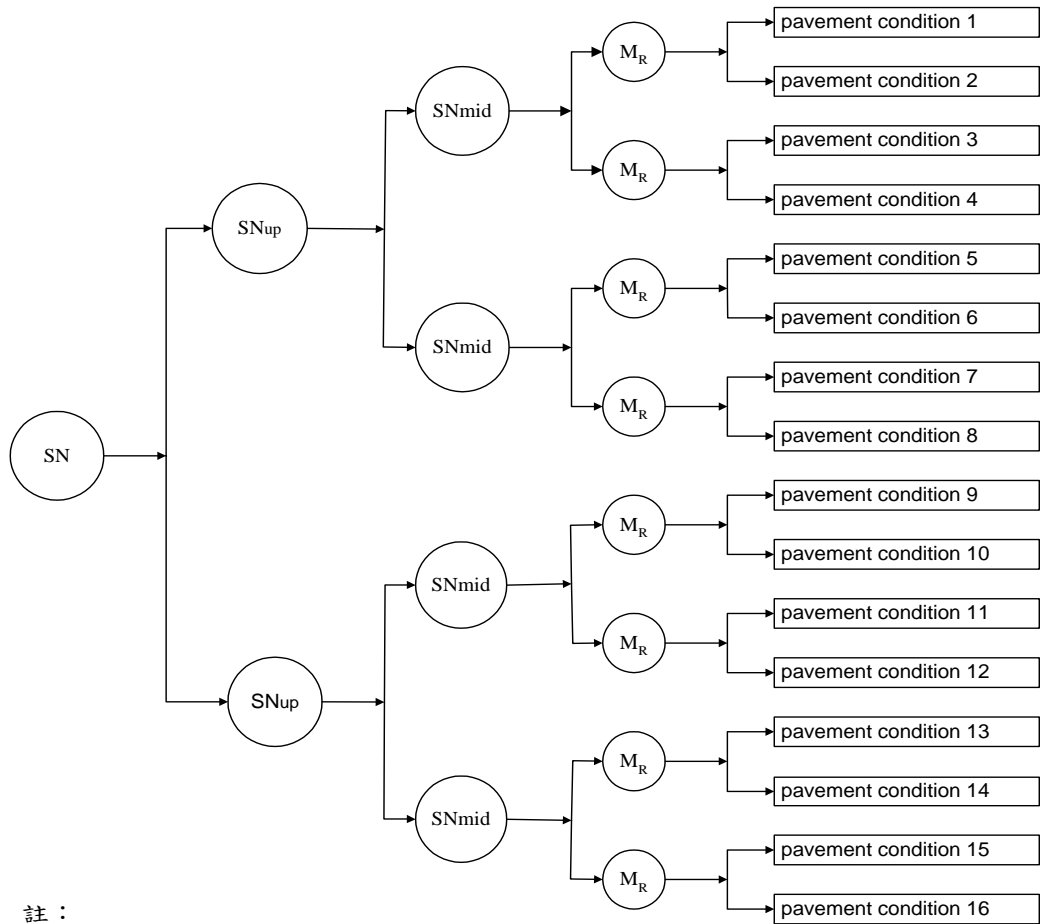


圖 4 北二高底層厚度改變對各式撓度指標之影響
(a)穩態撓度(b)等間距撓度
(c)不等間距撓度

綜合相關分析結果得知，組合式撓度指標對鋪面厚度改變甚為敏感，然其增減趨勢亦十分穩定。無論穩態撓度指標或衝擊撓度指標，北二高、中山高瀝青處理底層和省道瀝青面層厚度改變對撓度指標影響均較大。分析者需對結構體各層厚度確實掌握以避免誤判。



註：

- SN : 運用評估SN的顯著指標，對整體鋪面結構進行排序，並運用中位數分割。
- SNup : 運用評估SNup的顯著指標，對上部鋪面結構進行排序，並運用中位數分割。
- SNmid : 運用評估SNmid的顯著指標，對中層鋪面結構進行排序，並運用中位數分割。
- MR : 運用評估MR的顯著指標，對路基土壤結構進行排序，並運用中位數分割。

圖 2 撓度指標排序與分割流程

七、實例分析與應用

為瞭解穩態、衝擊式撓度指標評估表之可信度，研究另以兩組案例驗證之。1.依據中山高速公路加鋪

前後所測得之穩態撓度試驗數據，檢視撓度指標評估結果。2.運用中山高速公路衝擊撓度實驗數據[22]，配合動態回算程式 DBFWD[15]回算鋪面成層結構強度，以驗證撓度指標與回算結果之一致性。

1. 穩態撓度指標評估

(27k+500~34k+800) 南下、北上車道於民國七十四年六月加鋪前後所測得之部份穩態撓度值(如表 12 所示) 進行評估研究, 其撓度指標與對應評估結果如表 13 所示。分析討論如下:

(1). 北上車道: 經指標分析得加鋪前鋪面狀況為"路面結構弱且上層較差、基層強度差", 由加鋪前之 MD、SCI 以及 SW123 的變化趨勢, 可知鋪面上部與基層結構強度減弱乃為鋪面整體結構強度減弱之主因。而由七十四年七月加鋪後之撓度指標可知, 雖然 SCI 指標略為降低顯示上部結

構得到改善, 但由於 SW123 亦低於撓度指標評估表之中位值, 故鋪面強度未如預期般理想, 因此結果為"路面結構佳但上部結構稍弱且基層弱"。此分析結果與 賴登明觀察[7]相同。

(2). 南下車道: 同前所述, 南下車道於加鋪維修前, MD、SCI 及 SW123 指標值均顯示鋪面強度衰減, 鋪面狀況亦由七十二之"路面結構佳但上部結構稍弱且基層弱", 至七十四年的"路面結構弱且上層較差、基層強度差", 但經加鋪維修後, SCI 指標減低得知鋪面上層結構明顯改善, 鋪面結構遂成為"路面結構強但基層弱"狀況。此亦與 賴登明[7]觀察所判定結果相同。

表12 中山高速公路北區泰山~三重段正規化穩態撓度實驗值

北上車道		單位: mils/kip				
施測日期	W1	W2	W3	W4	W5	
72.12.15(加鋪前)	1.44	1.11	1.11	0.46	0.31	
74.05.02(加鋪前)	1.92	1.44	1.44	0.57	0.38	
74.07.03(加鋪後)	1.26	1.02	0.66	0.45	0.32	
南下車道		單位: mils/kip				
施測日期	W1	W2	W3	W4	W5	
72.12.15(加鋪前)	1.15	0.93	0.62	0.39	0.26	
73.04.17(加鋪前)	1.35	1.11	0.68	0.43	0.28	
74.07.03(加鋪後)	0.89	0.69	0.46	0.31	0.22	

表 13 中山高速公路北區泰山~三重段穩態撓度指標與鋪面評估結果

北上車道					
施測日期	MD	SCI	SW123	SW24	鋪面狀況
72.12.15	1.44	0.33	-0.25	8.22	路面結構弱且上層較差、基層強度差
74.05.02	1.92	0.48	-1.29	9.33	路面結構弱且上層較差、基層強度差
74.07.03	1.26	0.24	-1.65	7.23	路面結構佳但上部結構稍弱且基層弱
南下車道					
施測日期	MD	SCI	SW123	SW24	鋪面狀況
72.12.15	1.15	0.22	-1.07	7.96	路面結構佳但上部結構稍弱且基層弱
73.04.17	1.35	0.24	-2.92	9.25	路面結構弱且上層較差、基層強度差
74.07.03	0.89	0.20	-0.20	7.16	路面結構強但基層弱

2. 衝擊撓度指標評估

由於衝擊式撓度之落重撓度實驗儀於民國八十四年底方引進使用, 尚無加鋪前後之施測資料可供分析。故研究採用民國八十五年九月上旬於中山高速公路內湖工務段南下 5k+000 至 6k+200 測得之衝擊撓度資料(如表 14) 進行分析。首先以考慮溫度較估 [12]、正規化之撓度檔案資料[22]計算撓度指標 BCI 1、SCI、SW1245 及 W5, 再依據本研究所建議之撓度指標評估表求得鋪面結構之概略趨勢; 同時假設現地無岩盤影響, 並忽略路基土壤飽和度變

化影響, 經動態回算程式 DBFWD 回算鋪面成層之模數值, 可得撓度指標定性分析結果與回算之定量分析結果比較於下:

- (1). 由表 15 可知, 將四組鋪面撓度資料代入研究所建構之中山高速公路不等間距之衝擊撓度指標評估表中, 可得南下 4k+200、4k+600 鋪面狀況屬"鋪面結構弱, 且上層強度較差", 而南下 4k+400、4k+800 之鋪面狀況則為"路面結構佳但上部結構稍弱"。
- (2). 四組撓度資料經動態回算[15]所求得之鋪面成層模數值, 與其對應之鋪面結構數 SN、SNup、SNmid 及路基強度 M_R 、以及與設定中山高速公

路標準鋪面結 4k+600 測點之鋪面結構數 SN 確實低於其餘測點，而指標顯示四個測點鋪面上部結構強度不理想。當結構強度為狀況 13 時，上層結構強度較差；而當結構強度為狀況 5 時，上

層結構強度稍弱。至於基層結構強度均與標準鋪面基層結構強度接近，路基結構則可能由於岩盤或路基土壤飽和度影響，較標準值高出甚多。大致而言，回算分析結果與撓度指標所見略同。

表 15 中山高內湖工務段衝擊撓度指標評估結果

測點	撓度指標(mils/kip)				鋪面狀況				
	BCII	SCI	SWI245	W5					
S4k+200	0.29	0.95	1.311	0.36	狀況13. 鋪面結構弱且上層強度較差				
S4k+400	0.17	0.77	1.132	0.14	狀況5. 路面結構佳但上部結構稍弱				
S4k+600	0.31	0.50	0.517	0.29	狀況13. 鋪面結構弱且上層強度較差				
S4k+800	0.19	0.36	0.501	0.34	狀況5. 路面結構佳但上部結構稍弱				
動態回算程式DBFWD回算結果 (各層模數單位: Mpa)					回算結構強度與設定 標準強度比值				
測點	撓度RMS 誤差					SN	SNup	Snmid	MR
	面層	底層	基層	路基	撓度RMS 誤差				
S4k+200	1791	1747	195	167	12.3%	0.76	0.65	1.08	6.07
S4k+400	1764	1257	201	234	6.1%	0.87	0.80	1.09	8.48
S4k+600	1429	838	167	163	8.6%	0.73	0.64	0.98	5.91
S4k+800	2215	1054	189	234	9.5%	0.85	0.79	1.06	8.48

八、結論與建議

本研究旨在建構具動態理論架構且適合國內鋪面結構之穩態、衝擊式撓度指標評估表，除評估傳統撓度指標外，並建議新型組合式撓度指標以求更為精確的評估。其結論與建議條列如下：

- (1). 傳統穩態撓度指標對鋪面中下層結構之評估效果不佳，衝擊撓度指標則對於鋪面中層結構強度的掌握不佳，上述現象均肇因於成層厚度及勁度的相對關係。衝擊撓度實驗之施測頻率範圍包含較低頻率，對於下層路基土壤強度具有較佳判定成果。
- (2). 傳統上常用於評估鋪面整體結構強度之面積類指標，除 ASP 擁有極佳的詮釋能力外，其他指標如 AREA、SP 值，並不具有詮釋鋪面結構強度的能力，此現象與賴登明[7]觀察論點相同。
- (3). 研究顯示等間距接收器狀況之 SCI 2、SCI 3、BCI 1、BCI 2 等衝擊式撓度指標可有效地詮釋高速公路鋪面整體結構的強度，故建議對於含地瀝青處理底層之四層鋪面結構，可利用距荷重中心 90 cm 範圍內之衝擊曲率類撓度指標詮釋其整體結構強度變化。
- (4). 北二高鋪面岩盤深度若大於 8 公尺，中山高、省道鋪面岩盤深度若大於 6 公尺，則不影響穩態撓度指標值的設立。衝擊撓度指標則相當穩定，若岩盤深度達 5 公尺以上即無影響。此外若 FWD 實驗採不等(漸增)間距安置接受器，岩盤影響更可予以忽略。
- (5). 組合撓度指標對鋪面厚度改變甚為敏感，然其增減趨勢亦十分穩定。此外，北二高、中山高之瀝

青處理底層和省道瀝青面層厚度改變對穩態動力撓度指標或衝擊式撓度指標的影響均較大。建立撓度指標評估表前應確實掌握結構剖面，以求得較精確的評估結果。

- (6). 因目前國道高速公路局採用之撓度分析報表僅取距離荷重中心最近的五個撓度值，雖然 W5 仍可詮釋路基土壤強度之變化，但就理論分析而言，W5 相關係數($r=0.88$)仍遠低於 W7 的相關係數($r=0.97$)，故為發揮 FWD 撓度盤能有效評估鋪面深層強度變化的優點，研究建議撓度分析中能完全納入七個量測撓度值，在避免誤差的合理範圍內，量測距荷重源較遠之撓度值，以提昇撓度指標評估鋪面深層強度變化的能力。

致謝

本文承行政院國科會專題研究計畫補助 (NSC86-2211-E032-008)，並由石俊雄君協助修訂製版，謹此一併致謝

參考文獻

1. AASHTO, "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures," American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. (1993).
2. Baladi, G.Y. and Synder M.B., "Evaluation on Existing Pavements," Highway Pavement Training Course, Vol. I. Part II, Block 4, Prepared for FHWA, pp. 4-203 (1987).
3. Chang, D.W., Chang, C.L., "Dynamic Interpretation

- for Impulsive Deflection Test on Flexible Pavement”, The Chinese Journal of Mechanics, Vol. 14, No. 2A, pp. 91-100 (1998).
4. Chang, D.W., “Dynamic Characteristics of Deflection Tests for Pavements,” Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering, Vol. 9, No. 3, pp. 427-438 (1997).
 5. Gustav, T.R., “Determining Pavement Structural Number from FWD Testing,” Transportation Research Record, TRR, Vol. 1448, pp. 61-68 (1994).
 6. Kausel, E., “An Explicit Solution for the Green Functions for Dynamic Loads in Layered Media,” Research Report R81-13, M.I.T (1981).
 7. Noureldin, A.S., “New Scenario for Backcalculation of Layer Moduli of Flexible Pavement,” Transportation Research Record, TRR, Vol. 1384, pp. 23-28 (1993).
 8. Roesset, J.M. and Shao, K.Y., “Dynamic Interpretation of Dynaflect and Falling Weight Deflectometer Tests,” Transportation Research Record, TRR, Vol. 1002, pp. 7-16 (1985).
 9. Thompson, M.R., “ILLI-SLAB Based NDT Analysis Procedures” Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, ASTM STP 1026, Bush A.J. and Baladi, G.Y. Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 487-501 (1989).
 10. Thompson, R.M. and Hoffman M.S., “Concepts for Developing an NDT-Based Design Procedure for Determining Asphalt Concrete Overlay Thickness,” Transportation Research Record, TRR, Vol. 930, pp. 12-18 (1983).
 11. Van Til, C.J., McCullough, B.F., Vallerga, B.A., and Hicks, R.G., "Evaluation of AASHO Iterim Guides for Design of Pavement Structures," NCHRP Report 128 (1972).
 12. 林志棟, 「利用動力撓度儀觀測路面撓度以評估路面結構強度之研究」, 研究報告, 台灣省交通處公路局材料試驗所, 臺北 (1980)。
 13. 周家蓓、陳又菁, 「鋪面撓度值在養護整修策略上之應用」, 中華民國第七屆鋪面工程學術研討會論文集, 第 181-191 頁. (1993)。
 14. 康裕明、林長雄、王弘偉, 「落體測位儀的使用現況與發展」, 中華民國第八屆鋪面工程學術研討會論文集, 第 643--652 頁. (1995)。
 15. 張德文、張記恩、石俊雄, 「傳統撓度指標法則於柔性鋪面之應用」, 中國土木水利工程學刊, 第十卷, 第三期, 第 91-98 頁 (1998)。
 16. 賴登明, 「以穩態撓度指標評估路面強度之研究」, 博士論文, 國立台灣大學土木工程學研究所, 臺北 (1992)。
 17. 張嘉麟, 「動態反算於衝擊性撓度法之應用研究」, 碩士論文, 淡江大學土木工程研究所, 臺北 (1996)。
 18. 侯羿、賴森榮, 「台灣區高速公路路面養護管理系統期終綜合報告」, 財團法人台灣營建研究中心, 臺北 (1988)。
 19. 胡光復, 「道路評審儀動靜態分析之比較研究」, 碩士論文, 淡江大學土木工程研究所, 臺北 (1994)。
 20. 顏月珠, 現代統計學, 三民書局, 臺北(1993)。
 21. 張記恩, 「撓度試驗數據處理與路面結構指標之結合應用」, 碩士論文, 淡江大學土木工程研究所, 臺北 (1997)。
 22. 交通部台灣區國道高速公路局, 「路面 FWD 測試報告」, 國道高速公路局北區工程處內湖公務段, 臺北 (1996)。

Manuscript Received: Jan. 5, 1998

Revision Received: July 22, 1998

and Accepted: Sep. 15, 1998