

表 1 常見撓度調查儀器比較表 (摘自周家蓓[62])

荷重施加方式	常見類型	優點	缺點	國內外使用狀況
靜力撓度	彭科曼標 (<i>Benkelman Beam</i>)	<ul style="list-style-type: none"> 設備簡便、價格低 分析理論完備 	<ul style="list-style-type: none"> 移動性較差 (人工搬運) 施測參考點難定，準度較不穩定 無法獲得撓度曲線 人工施測、試驗緩慢 	國外使用歷史最久，國內亦有使用經驗
穩態撓度	道路評審儀 (<i>Road Rater</i>)	<ul style="list-style-type: none"> 施測不需參考點 移動性良好 (拖車搬運) 準度及重現性佳 操作簡易迅速 可得撓度曲線 	<ul style="list-style-type: none"> 部份機型有荷重上限 荷重形式不均勻 低荷重頻率之準度差 無法量測塑性變形 	國外使用普遍，國內已引進使用
	動力撓度儀 (<i>Dynaflect</i>)	<ul style="list-style-type: none"> 施測不需參考點 移動性良好 (拖車搬運) 準度及重現性佳 操作簡易迅速 可得撓度曲線 	<ul style="list-style-type: none"> 單一荷重及頻率，與現實不符 荷重形狀不均勻 低荷重頻率之準度差 無法量測塑性變形 	
衝擊式撓度	落重測位儀 (<i>FWD</i>)	<ul style="list-style-type: none"> 模擬移動荷重 荷重範圍大 使用範圍廣 試驗重現性佳 	<ul style="list-style-type: none"> 低頻率之準度不佳 無法量測塑性變形 	國外使用日廣，國內已引進使用，國人亦自行研發儀器
波傳遞式撓度	表面波頻譜法 (<i>SASW</i>)	<ul style="list-style-type: none"> 可直接測知各層動度 	<ul style="list-style-type: none"> 資料解讀分析不易 	國外正在發展中，國內尚未引進

表 2 動態非破壞性試驗之適用性 (摘自張德文和林明勳[47])

試驗儀器	特性及適用範圍
動力撓度儀 (<i>Dynaflect Test</i>)	<ul style="list-style-type: none"> 單一振頻 (8 Hz) 易造成明顯共振現象。 若共振現象不明顯，該法可適用於剛性、柔性路面 (剛性路面較優)。 預估值 (材料動度) 之誤差在容許範圍內。 不致產生非線性材料影響。
落重撓度儀 (<i>FWD Test</i>)	<ul style="list-style-type: none"> 代表重車對道路之影響，模擬路面材料在於臨界力作用下之性質。 非線性材料行為會干擾近震源 (<3 ft) 之地表撓度。 力集中於 0-60Hz，故路面層產生之動態影響較動力撓度儀為大。 當岩盤接近地表時 (≤ 15 ft)，由高振頻所形成的動態擴大效應 (共振現象) 使得預估值產生誤差。 若岩盤深度大於 15 ft 時，該法較適用在柔性路面，其預估值趨於偏高。而在剛性路面時，所形成的預估值 (材料動度) 遠高於實際值，此差異性甚於 <i>Dynaflect</i> 試驗。
道路評審儀 (<i>Road Rater</i>)	<ul style="list-style-type: none"> 同 <i>Dynaflect</i> 法屬穩態試驗。因其可改變頻率，故可以避免共振現象對試驗數據 (撓度值) 造成影響，而利於反算。 除適用於柔性、剛性路面的評估外，亦可作為探勘岩盤深度之用。 可改變輸入之力，做為現場材料對力一振頻的行為研究之用。
表面波頻譜法 (<i>SASW Method</i>)	<ul style="list-style-type: none"> 不產生非線性的材料現象 適用於勘測地表面層的材料動度，準確度高。 當成層間動度差異 (變化) 增加時，散射曲線之震盪現象擴大，面層厚度之判定不易。 採衝擊力方式，實驗時，由於振頻範圍偏高，不易探測具地表較深的材質。 實驗操作與數據收集尚未完全自動化。 現場接收器位置需變化以獲得完整的實驗散射曲線。

表 3 常用之非破壞性試驗儀器特性彙編一覽表 [12, 43, 63, 64]

荷重施加方式	儀器型式	靜載重 (磅)	動載重範圍 (磅)	荷重歷時 (0.001 秒)	載重驅動系統	載重傳遞方式	載重傳遞範圍	標準驅動振頻數	接收器數目	接收器位置 (與荷重中心之水平距離)
靜力撓度試驗	彭科曼標	18,000 磅 單軸卡車	—	—	負重單軸卡車	卡車車輪	—	—	—	—
穩態動力撓度試驗	動力撓度儀	2,100	1,000	—	相對旋轉飛輪	兩個 16" 直徑之鋼輪	8 Hz	8 Hz	5	固定於 0, 12, 24, 36, 48 英吋
	道路評審儀 400B 型	2,400	200-3,000	—	油壓驅動裝置	兩個 4" * 7" 之矩形墊片 相距 5"	6-60 Hz	25 Hz	4~5	一般固定於 0, 12, 24, 36, 48 英吋
	2000 型	3,500	200-5,500	—	同上	直徑 18" 或 12" 圓版	6-60 Hz	25 Hz	4~5	一般固定於 0, 12, 24, 36, 48 英吋
	2008 型	7,500	500-9,000	—	同上	直徑 18" 或 12" 圓版	5-80 Hz	25 Hz	4~5	一般固定於 0, 12, 24, 36, 48 英吋
	美國陸軍水路實驗站 振動儀 (WES 16-kip)	16,000	500-30,000	—	—	直徑 18" 圓版	5-100 Hz	15 Hz	4~5	可調式, 12-60、一般間距 12 英吋
衝擊動力撓度試驗	落重測位儀 (FWD)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Dynatest 8000 型	2,000	1,500-27,000	25-30	落重體	直徑 11.8" 或 17.7" 圓版	衝擊式	多頻	7(+2)	可調式, 8-96、一般間距 12 英吋
	Dynatest 800 型	2,000	6,500-19,000	25-30	落重體	直徑 11.8" 或 17.7" 圓版	衝擊式	多頻	7	可調式, 8-96、一般間距 12 英吋
	Dynatest HWD	—	10,000-55,000	25-30	落重體	直徑 11.8" 或 17.7" 圓版	衝擊式	多頻	7	可調式, 8-96、一般間距 12 英吋
	KUAB 150 型	2,000	2,700-33,700	56	兩個落重體	直徑 11.8" 圓版	衝擊式	多頻	至多 12	一般為 0, 8, 12, 18, 24, 36, 48, ... 英吋
	KUAB 50 型	2,000	2,700-11,300	56	兩個落重體	直徑 11.8" 圓版	衝擊式	多頻	至多 5	一般為 0-48 英吋
	KUAB 8833 型	1,600	3,100-33,700	56	兩個落重體	直徑 11.8" 圓版	衝擊式	多頻	7	一般為 0, 8, 12, 18, 24, 36, 48 英吋
	KUAB 8714 型	1,363	1,500-14,600	56	兩個落重體	直徑 11.8" 圓版	衝擊式	多頻	7	一般為 0, 8, 12, 18, 24, 36, 48 英吋
	Phoenix ML 10000 型	1,900	2,300-23,000	—	落重體	直徑 11.8" 圓版	衝擊式	多頻	3 或 6	一般為 0, 8, 3, 24, 36, 48, 58, 60 英吋

註: 1 lbf = 4.448 N ; 1 inch = 2.54 cm

表 4 應用非破壞性撓度法評估鋪面強度之方法比較表 (摘自胡光復[12])

	理論背景	優點	缺點
撓度指標法	以經驗公式及統計理論為分析方法	1.經由撓度值換算撓度指標進行路面強度診斷,可減少因反算而產生路面強度之運算誤差。	1.當指標值未達到臨界值或目標值時無法研判路面強度減弱之位置,即目前之研判規則無法提供早期預警之功能。 2.因試驗儀器之不同而需建立不同之準則。 3.經整修後路面結構變化,原先建立之指標和規則是否適用,值得商榷。 4.適用性及可靠度較差。
應力分析法	以動態或靜態模式為理論基礎,並建立於力學分析與數學模式上	1.由求得之彈性模數可完整的監測道路施工品質及記錄道路使用歷史,俾作為養護管理策略研擬之依據。 2.由監測而得之彈性模數可供新建路面結構厚度及養護策略擬定之依據。 3.能及時反映現場鋪面之力學行為(應力-應變關係),掌握養護時機。 4.良好之反算程式,可適用於不同之非破壞試驗儀器。 5.能提供較準確的評估資料。	1.演繹方式較複雜,以回算彈性模數評估路面強度可能產生精確度之憂慮。

表 5 常見撓度指標與定義 (摘自 Waheed et al.[65])

Parameter	Definition ^a
1.Maximum deflection	$MD = d_1$
2.Surface curvature index	$SCI = d_1 - d_2$
3.Base curvature index	$BCI = d_4 - d_5$
4.Spreadability	$SP = \left(\sum_{i=1}^n d_i / n \cdot d_1 \right) \times 100$
5.Area, in inches	$AREA = 6 \left[1 + 2 \left(\frac{d_2}{d_1} \right) + 2 \left(\frac{d_3}{d_1} \right) + \left(\frac{d_4}{d_1} \right) \right]$
6.Shape factors	$F_1 = (d_1 - d_3) / d_2$ $F_2 = (d_2 - d_4) / d_3$
7.Radlus of curvature	$R = r^2 / \left\{ 2 \cdot d_m \left[\left(\frac{d_m}{d_r} \right) - 1 \right] \right\}$ $r = 127 \text{ mm}$
8.Basin slope	$SLOP = d_1 - d_5$
9.Deflection ratio	$Qr = r / d_1$
10.Tangent slope	$TS = (d_m - d_x) / x$
11.Base damage inedx	$BDI = d_2 - d_3$
12.Slope deflection	$SD = \tan^{-1}(d_1 - d_3)$
13.Radius of influence	$RI = R^b / d_1$

^a d = deflection ;Subscripts 1,2,3,4,5= sensor locations; 1=center of load; m = maximum deflection; x = distance of tangent point form the point of maximum deflection.

^b R = distance from d_1 to where basin is tangent to horizontal.

表 6 運用撓度指標評估鋪面強度之準則 (摘自 Baladi and Synder[16])

DMD	SCI	BCI	路面結構狀況
>1.25	>0.48	>0.11	路面結構及路床強度較弱
		<0.11	路面結構強度較弱
	<0.48	>0.11	路床強度較弱
<1.25	>0.48	<0.11	路面結構強度較弱
	<0.48	>0.11	路床強度較弱
		<0.11	路面結構及路床強度較強

註：單位 0.001 inch ; 1 mils = 0.001 inch

表 7 以動力撓度儀測值評估鋪面強度之準則 (摘自林志棟[17])

DMD	SCI	BCI	路面結構狀況
>1.25	>0.25	>0.15	路面表層及下層結構弱
		<0.15	路面結構弱，面層是主因
	<0.25	>0.15	路面結構弱，下層是主因
<1.25	>0.25	<0.15	路面表層結構弱，不嚴重
	<0.25	>0.15	路面下層結構弱，需研究
		<0.15	路面下層及表層結構強

註：單位 0.001 inch ; 1 mils = 0.001 inch

表 8 使用道路評審儀測值評估鋪面強度之準則 (摘自賴森榮及侯昇[18])

DMD	SCI	BCI	路面結構狀況
>1.6	>0.35	>0.2	路面及下層結構弱
		<0.2	結構弱，面層是主因
	<0.35	>0.2	結構弱，下層是主因
<1.6	>0.35	<0.2	面層結構弱，但不嚴重
	<0.35	>0.2	下層結構弱，需研究
		<0.2	路面及下層結構強

註：單位 0.001 inch ; 1 mils = 0.001 inch

表 9 撓度指標值之分類與定義 (整理自賴登明[19])

類別	指標名稱及定義
撓度值類	$W_i, i=1\sim 7$ (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	$AREA = \left[1 + 2\left(\frac{W_2}{W_1}\right) + 2\left(\frac{W_3}{W_1}\right) + \left(\frac{W_4}{W_1}\right) \right]$ $ASP = \sum W_i, i=1\sim 5, SP=ASP / (5 \times W_1)$
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	$A_i = 1/W_i \quad (i=1\sim 7)$
斜率類	$S3=W_1-W_3, S4=W_1-W_4, S5=W_1-W_5,$ $TS_j=(W_1-W_j)/dl_j, (j=2\sim 5),$ 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 10 以多層彈性理論發展之常用程式 (摘自 Monismith[37])

Program	Number of layers (max.)	Number of loads	Continuity conditions at interface	Probabilistic considerations	Program source
BISAR	10	10	full continuity to frictionless	no	Shell International Petroleum Co., Ltd., London, England
Remarks:					<ul style="list-style-type: none"> • Comparatively long running time since complete set of stresses and strains provided for each point. • Considers horizontal as well as vertical loads.
CHEVRON	5	2	full continuity	no	Chevron Research Company
Remarks:					<ul style="list-style-type: none"> • Nonlinear response of granular materials accounted for in DAMA program of the Asphalt Institute which makes use of CHEVRON program.
ELSYM	10	100	full continuity to frictionless	no	University of California at Berkeley
Remarks:					<ul style="list-style-type: none"> • Short running time for particular point.
PDMAP	5	2	full continuity	yes	National Cooperative Highway Research Program (Project 1-10b)
Remarks:					<ul style="list-style-type: none"> • Running time is long for degrees of reliability other than 50-percent (the deterministic mode). • Iterative Process used to arrive at moduli for untreated granular materials.
VESYS	5	2	full continuity	yes	FHWA-US DOT
Remarks:					<ul style="list-style-type: none"> • Running time is long in probabilistic mode. • Program considers materials both as time independent (elastic) and time dependent (viscoelastic).
CHEVIT	5	12	full continuity	yes	U.S. Army CE Waterways Experiment Station
Remarks:					<ul style="list-style-type: none"> • Modification of CHEVRON program. • Includes provision for stress sensitivity of granular layers.
CIRCLY	5 +	10 +	full continuity to frictionless	no	MINCAB Systems, Canterbury, Australia (for Australian Road Research Board)
Remarks:					<ul style="list-style-type: none"> • Permits consideration of horizontal and vertical loads; in particular permits consideration of radially directed horizontal forces. • Can consider orthotropic material behavior. • Permits consideration of strain energy.

表 11 常用回算程式理論架構比較一覽表 (重編繪自 *Ullidtz and Coetzee*[4])

Program Name	Developed By	Forward Calculation Method	Forward Calculation Subroutine	Back-Calculation Method	Non-Linear Analysis	Rigid Layer Analysis	Layer Interface Analysis	Maximum Number of Layers	Seed Moduli	Range of Acceptable Modulus	Ability to Fix Modulus	Convergence Routine	Error Convergence Function
BISDEF	USACE-WES	Multi-Layer Elastic Theory	BISAR (Proprietary)	Iterative	No	Yes	Variable	Cannot Exceed No. of Deflec., Works Best For 3 Unknowns	Required	Required	Yes	Sum of Square of Absolute Error	Yes
BOUSDEF	ZHOU, et. al. OREGON STATE UNIV.	Odemark-Boussinesq	Odemark-Boussinesq	Iterative	Yes	Yes	Fixed (Rough)	5, Works Best for 3 Unknowns	Required	Required	Yes	Sum of Percent Error	Yes
CHEVDEF	USACE-WES	Multi-Layer Elastic Theory	CHEVRON	Iterative	No	Yes	Fixed (Rough)	Cannot Exceed No. of Deflec., Works Best For 3 Unknowns	Required	Required	Yes	Sum of Square of Absolute Error	Yes
ELMOD /ELCOM	P. ULLIDTZ DYNATEST	Odemark-Boussinesq	Odemark-Boussinesq	Iterative	Yes (Subgrade Only)	Yes (Variable)	Fixed (Rough)	Up to 4, Exclusive of Rigid Layer	None	No	Yes	Relative Error on 5 Sensors	No
ELSDEF	TEXAS A&M UNIV. USACE-WES	Multi-Layer Elastic Theory	ELSYM5	Iterative	No	Yes	Fixed (Rough)	Cannot Exceed No. of Deflec., Works Best For 3 Unknowns	Required	Required	Yes	Sum of Square of Absolute Error	Yes
EMOD	PCS/LAW	Multi-Layer Elastic Theory	CHEVRON	Iterative	Yes (Subgrade Only)	No	Fixed (Rough)	3	Required	Required	Yes	Sum of Relative Square Error	No
EVERCALC	J. MAHONEY, et. al.	Multi-Layer Elastic Theory	CHEVRON	Iterative	Yes	Yes	Fixed (Rough)	3 Exclusive of Rigid Layer	Required	Required	Yes	Sum of Absolute Error	No
FPEDDI	W. UDDIN	Multi-Layer Elastic Theory	BASINPT	Iterative	Yes	Yes (Variable)	Fixed (Rough)	Unknown	Program Generated	Unknown	Unknown	Unknown	No
ISSEM4	R. STUBSTAD	Multi-Layer Elastic Theory	ELSYM5	Iterative	Yes (Finite Cylinder Concept)	No	Fixed (Rough)	4	Required	Required	Yes	Relative Deflec. Error	No
MODCOMP ³	L. IRWIN, SZEBENYI	Multi-Layer Elastic Theory	CHEVRON	Iterative	Yes	Yes	Fixed (Rough)	2 to 15 layers, Max 5 Unknown Layers	Required	Required	Yes	Relative Deflec. Error at Sensors	No
MODULUS	TEXAS TRANS. INSTITUTE	Multi-Layer Elastic Theory	WESLEA	Data Base	No	Yes (Variable)	Fixed?	Up to 4 Unknown plus Stiff Layer	Required	Required	Yes	Sum of Relative Square Error	Yes
PADAL	S.F. BROWN et. al.	Multi-Layer Elastic Theory	UNKNOWN	Iterative	Yes (Subgrade Only)	Unknown	Fixed?	Unknown	Required	Unknown	Unknown	Sum of Relative Square Error	Unknown
WSDEF	USACE-WES	Multi-Layer Elastic Theory	WESLEA	Iterative	No	Yes	Variable	Up to 5 Layers	Required	Required	Yes	Sum of Square of Absolute Error	Yes
MICHBAK	MICHIGAN STATE	Multi-Layer Elastic Theory	CHEVRON	Iterative	No	Yes ¹	Fixed	Up to 4 Unknown plus Stiff Layer	Required	Optional	Yes	Sum of Relative Square Error	Yes

表 12 中山高鋪面穩態動力正規化撓度指標評估表 (摘自張記恩[3])

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
≥1.30	<0.21	>0.40	>1.13	9.路面整體結構稍弱
			≤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 kips 力作用下之撓度指標

$$\text{Max defl.} = W_1 \quad ; \quad \text{SCI} = W_1 - W_2 \quad ; \quad \text{SW123} = 0.996 + 13.29W_1 - 32.02W_2 + 20.97W_3$$

$$\text{SW24} = 18.25 + 14.83W_2 - 34.45W_4$$

表 13 中山高鋪面衝擊正規化撓度指標評估表(等接受器間距) (摘自張記恩[3])

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
≥0.26	<0.33	>0.11	<0.58	9.路面整體結構稍弱
			≥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 kips 力作用下之撓度指標

$$\text{SCI2} = W_2 - W_3 \quad ; \quad \text{SCI} = W_1 - W_2 \quad ; \quad \text{SW125} = 1.66 + 1.28W_1 - 2.45W_2 + 1.61W_3$$