

建立新的接縫式混凝土鋪面應力分析與厚度設計方法

李英豪¹ 白建華² 李朝聰² 顏少棠²

¹淡江大學土木系副教授

²淡江大學土木系碩士班研究生

摘要

本研究主要目的在於發展新的接縫式混凝土鋪面應力分析與厚度設計流程。本文將根據 Westergaard 的邊緣應力公式及各種輪軸載重型式與環境情況下之應力調整預估模式為基礎，提出對美國波特蘭水泥協會(PCA)的剛性鋪面厚度設計法之當量應力分析與厚度設計流程之修正建議，並將建立一套非常容易使用的視窗個人電腦程式(TKUPAV)來做厚度設計。本研究並利用 EXCEL 試算表與 TKUPAV 程式對此新的計算流程詳加驗證，證實可產生與 PCA 之當量應力與疲勞損壞非常相近之結果。研究並指出在剛性鋪面厚度設計時必須考慮載重合併白天溫差之翹曲應力影響之必要性。

一、PCA 厚度設計法之回顧

近年來國內剛性鋪面之鋪設有日益增加之趨勢，如隧道內、高速公路收費站前後、北二高龍潭路段等鋪面及機場跑道設施等，因此有需要對剛性鋪面的厚度設計法作一番更深入之探討。本研究主要以美國波特蘭水泥協會(PCA)所發展出的剛性鋪面厚度設計法為基礎，修正並使其當量應力與疲勞分析之適用性範圍更寬廣，進而研究發展出一套新的接縫式混凝土鋪面厚度設計法[1]。

1.1 簡述 PCA 厚度設計法

PCA 厚度設計法[2]係國內、外目前最常用以力學為基礎之剛性鋪面厚度設計法，主要是根據 J-SLAB 有限元素法程式分析之結果[3]，並依混凝土之抗彎強度(或破裂模數)、基層與路基土壤之合成支承勁度、交通量之軸重軸次分佈、不同載重傳遞方式、有無設置混凝土路肩、設計年限、及荷重安全因素等各種相關因子[4]，並以 PCAPAV 個人電腦程式以便於決定鋪面版所需之最小厚度值。

1.2 當量應力之計算

在 PCA 厚度設計法中，當量應力之決定係利用 J-SLAB 有限元素程式分析在標準單軸荷重(SA)或雙軸荷重(TA)下，不同版厚與路基反力模數狀況下產生之最大邊緣彎曲應力，並配合如下所述之數個調整因子修正而得。其基本輸入資料為：混凝土彈性模數 $E=4$ Mpsi、波森比 $\mu=0.15$ 、版長 $L=180$ in.、版寬 $W=144$ in.。標準單軸重=18 kips(雙輪單軸)、每一輪重=4,500 lbs、單輪接觸面積=7*10 in.²(荷重半徑 $a=4.72$ in.)、雙輪間距 $s=12$ in.、軸寬(雙輪中心之距離) $D=72$ in.。標準雙軸重=36 kips(雙輪雙軸)、雙軸軸距 $t=50$ in.，其他均與標準單軸重相同。PCA 並假設若版為有混凝土路肩(WS)之情

況，其骨材互鎖因子 AGG=25,000 psi；若版為無混凝土路肩(NS)之情況，PCA 建議應依 MATS 電腦程式[5]分析之結果加以修正。其相關公式如下：[6]

$$f_{eq} = \frac{6 * M_e}{h^2} * f_1 * f_2 * f_3 * f_4 \quad (E.1)$$

$$M_e = \begin{cases} -1600 + 2525 * \log(\cdot) + 24.42 * \cdot + 0.204 * \cdot^2 & \text{for SA/NS} \\ 3029 - 2966.8 * \log(\cdot) + 133.69 * \cdot - 0.0632 * \cdot^2 & \text{for TA/NS} \\ (-970.4 + 1202.6 * \log(\cdot) + 53.587 * \cdot) * (0.8742 + 0.01088 * k^{0.447}) & \text{for SA/WS} \\ (2005.4 - 1980.9 * \log(\cdot) + 99.008 * \cdot) * (0.8742 + 0.01088 * k^{0.447}) & \text{for TA/WS} \end{cases}$$

$$f_1 = \begin{cases} (24/SAL)^{0.06} * (SAL/18) & \text{for SA} \\ (48/TAL)^{0.06} * (TAL/36) & \text{for TA} \end{cases}, f_2 = \begin{cases} 0.892 + h/85.71 - h^2/3000 & \text{for NS} \\ 1 & \text{for WS} \end{cases}$$

$$f_3 = 0.894 \text{ for 6\% Truck at the Slab Edge}, f_4 = 1/[1.235 * (1 - CV)]$$

σ_{eq} = 當量應力, [FL⁻²]。(括號中之 L 為長度的單位, F 為力的單位。)

f_1 = 輪軸種類之調整因子。

f_2 = 混凝土路肩調整因子, 依 MATS 電腦程式分析結果而得。

f_3 = 重車載重集中分佈於邊緣之應力調整因子(PCA 建議採用 6%, $f_3=0.894$)。

重車分佈於邊緣, %	1	2	3	4	5	6	7
應力調整因子	0.825	0.855	0.87	0.88	0.89	0.894	0.901

f_4 = 考慮混凝土材料之變異性與因材齡而增加之強度之影響；材料變異係數(CV)一般取為 15%, $f_4=0.953$ 。

SAL, TAL = 實際單軸重與雙軸重, kips [F]。

1.3 疲勞分析

PCA 疲勞分析之概念主要在避免鋪面版因應力疲勞而產生裂縫。PCA 並因此採用 Miner's 累積疲勞破壞之假設, 在 PCAPAV 程式中讓使用者選取版厚之初始值, 利用不同軸重下當量應力與混凝土破裂模數之比值(應力比, σ/S_c), 再根據應力比與重覆軸次之關係求出最大容許重複載重次數, 將實際載重次數除以容許載重次數即得到一個疲勞損壞百分比, 並將各軸重產生之損壞百分比累加, 其結果不得超過 100% 之限制值, 並以迭代的方式協助使用者決定混凝土鋪面版所需之最小厚度。其中, 最大容許重複載重次數(N_f)係依下列公式決定[4]：

$$\log N_f = \begin{cases} 16.61 - 17.61 * (\sigma / S_c) & \text{for } 0.55 \leq \sigma / S_c \\ \left(\frac{4.2577}{\sigma / S_c - 0.4325} \right)^{3.268} & \text{for } 0.45 \leq \sigma / S_c < 0.55 \\ \infty \text{ (Infinite)} & \text{for } \sigma / S_c < 0.45 \end{cases} \quad (E.2)$$

PCA 厚度設計流程乃將每一種軸重之預測軸數除以 N_f 而得到該軸重之疲勞損壞比, 累積各軸重之損壞比即以 100% 為設計限制, 並利用迭代的方式以決定所需之最小版厚。經利用 Microsoft EXCEL 軟體將前述當量應力(E.1)與疲勞公式(E.2)經試算表驗證後與 PCAPAV 電腦程式計算相比較, 證實其流程結果完全相符無誤。

二、溫差與濕差應力之影響

分析混凝土鋪面版之所受之應力除載重外, 是否應考慮溫差撓曲(Curling)與濕差翹

曲(Warping)之影響，長久以來一直是頗為值得爭議的問題。溫差撓曲是由於鋪面版之上下溫度不同，版因熱脹冷縮與自重之效應，導致版頂部與底部產生額外之壓應力與拉應力。在白天時，因版頂溫度較版底高，版頂部產生壓應力、底部並產生拉應力；在夜間時，則恰好相反。濕差翹曲是由於混凝土版上下濕度不同，一般情況下，版底部濕度較頂部為高，因此將使版底部產生壓應力；若在下雨過後版表面因濕度較高，版底將會產生拉應力。

在 PCA 厚度設計法中，雖曾提及溫差撓曲與濕差翹曲之效應，然因顧及大多數之重型車輛一般均在夜間行駛，夜間溫差應力反而有折減輪荷重應力之效用，而白天溫差所額外產生應力變化之次數與日夜全部載重次數相較頗為懸殊，因此在其疲勞分析中不考慮溫差撓曲之影響。再者，由於濕度梯度(濕差)主要受版表面及周遭環境之濕度、版內之游離水、與基層與路基土壤之含水量等因素影響，實際濕度量測與估算極為困難，因此 PCA 設計法亦不考慮濕差翹曲之影響。[4]

相反地，其他相關文獻亦指出鋪面版之厚度設計必需考慮到溫差撓曲之效應，因為溫差應力可能非常大，當與輪荷重應力同時作用時，極少次的重複載重即將導致鋪面版產生裂縫。Darter 與 Berenbarg [7]在美國 AASHO 道路試驗結束 16 年後重新調查沒有加交通荷重之路段，結果顯示大部份的長版(40 英尺)產生了裂縫，而所有短的版(15 英尺)皆沒有產生裂縫，因此推測其主要原因即在長版有較大之溫差應力。Darter 與 Berenbarg 在零維修設計的考量下，亦建議剛性鋪面在疲勞分析中必須加入溫差應力之影響。在最新完成的美國國家公路合作研究計劃(NCHRP 1-26) [8]報告中，亦提供詳盡的說明並明確地指出相同的建議。

三、修正PCA應力分析與厚度設計流程

由於 PCA 厚度設計法之當量應力計算係基於假設多個可能影響應力值大小之重要變數為定值以簡化計算之過程，如固定之混凝土彈性模數、版長、版寬、單輪荷重之接觸面積、雙輪間距、雙軸軸距、骨材互鎖因子等，因此不論鋪面為長版或短版、其接縫應力傳遞效率的好壞、輪軸間距的大小、或環境之溫差變化，其所設計出的版厚均相同，此與版之實際情況不盡相符。基於以上的考量，本研究將以修正 PCA 設計法中疲勞分析之當量應力計算過程，並藉由新加入對溫差作用之考慮，以建立一新的接縫式混凝土鋪面厚度設計方法。本厚度設計法主要是以 Westergaard 的邊緣應力為主體，根據 ILLI-SLAB 有限元素法程式之應力分析，配合投影追逐迴歸法為各不同影響因子與當地之環境特性所建立之應力修正預估模式，再加上原 PCA 設計法中之疲勞分析，藉以滿足設計者之實際要求，進而設計出鋪面版所需之最小厚度。本研究並發展出一套以圖形介面為主、親和力高、且非常容易使用之 TKUPAV 視窗軟體程式(中文版與英文版)，以便於實際鋪面厚度設計之用。

3.1 ILLI-SLAB 有限元素法程式

本研究將利用美國伊利諾大學香檳校區所發展出之有限元素法程式(ILLI-SLAB) [9]，以分析剛性鋪面版的應力行為，其中並假設路基土壤為與 Westergaard 假設相同之均質溫氏基礎。本研究除了將該程式在系上之工作站順利編譯完成外，並利用 Microsoft FORTRAN PowerStation [10] 成功地將該程式在 PC 上編譯完成，如此使得後續研究更加方便、可靠。

3.2 力學控制變數之辨識

由相關研究得知，對於鋪面版尺寸的效應、不同輪軸載重組合、外車道加寬、路

肩與雙層鋪面版等情況可以下式表示：[1, 11]

$$\frac{th^2}{P}, \frac{uk}{P}, \frac{q}{P} = f\left(\frac{a}{L}, \frac{L}{W}, \frac{W}{s}, \frac{s}{t}, \frac{t}{D_0}, \frac{AGG}{k}, \left(\frac{h_{eff}}{h_1}\right)^2\right) \quad (E.3)$$

$$\frac{t}{E}, \frac{uh}{k}, \frac{qh}{k} = f\left(\frac{a}{L}, r\Delta T, \frac{L}{W}, \frac{W}{kh^2}, \frac{Ph}{k^4}\right) \quad (E.4)$$

其相關變數之定義如下： $\gamma = (E \cdot h^3 / (12 \cdot (1 - \mu^2) \cdot K))^{0.25}$ 為混凝土版與基底層材料的相對勁度半徑, [L]; E=混凝土彈性模數, [FL⁻²]; h=版厚度, [L]; k=路基土壤反力模數, [FL⁻³]; μ =波生比; L, W = 版之有限長度與寬度, [L]; P=輪軸載重, [F]; γ =混凝土版單位重, [FL⁻³]; a=車輪荷重半徑, [L]; t=軸距, [L]; s=輪間距, [L]; AGG=骨材互鎖因子, [FL⁻²]; D₀=外車道加寬之寬度, [L]; α =混凝土版膨脹係數, [T⁻¹]; ΔT =版頂部與底部之溫差, [T]; C=溫差效應之係數; D_p=P*h/(k* γ^4); D_v= γ *h²/(k* γ^2); h_{eff}=未黏結雙層版轉為單一版之有效厚度, [L]; h₁與 h₂分別為上與下混凝土版之厚度, [L]; E₁與 E₂分別為上版與下版之混凝土破裂模數, [FL⁻²]; 括號中之 L 為長度的單位, F 為力的單位, T 為溫度之單位。

3.3 預估模式之建立

本研究擬採用李英豪與 Darter [12]所建議兩階段迴歸分析的方式, 利用 Friedman 和 Stuetzle [13]的投影追逐迴歸方法(Projection Pursuit Regression, PPR), 以建立各應力修正之預估模式, 以便利各應力之快速計算。經由投影追逐迴歸的輔助, 本法可以將多維空間上之回應表面轉換為數個二維平均投影曲線的和, 並利用 S-PLUS 統計套裝軟體[14]以分段線性迴歸之方式, 求得符合投影曲線的預估方程式組。

3.4 修正後當量應力之計算

本厚度設計法在考慮混凝土材料之特性、版的有限尺寸、各不同輪軸組合、及當地環境特性(如溫差效應)等因素均可能影響應力之大小, 因此建議可將 PCA 之當量應力計算公式修正如下：[1, 15, 16]

$$f_{eq} = (f_w * R_1 * R_2 * R_3 * R_4 * R_5 + R_T * f_c) * f_3 * f_4 \quad (E.5)$$

$$f_w = \frac{3(1 + \nu)P}{f(3 + \nu)h^2} \left[\log_e \frac{Eh^3}{100ka^4} + 1.84 - \frac{4}{3} \nu + \frac{1 - \nu}{2} + 1.18(1 + 2\nu) \frac{a}{h} \right]$$

$$f_c = \begin{cases} \frac{CEr\Delta T}{2} & \text{if } \frac{Er\Delta T}{2} > \frac{2 \cos \beta \cosh \beta}{\sin 2\beta \sinh 2\beta} \tan \beta < \tanh \beta \\ \frac{Er\Delta T}{2} & \text{if } \frac{Er\Delta T}{2} < \frac{2 \cos \beta \cosh \beta}{\sin 2\beta \sinh 2\beta} \tan \beta < \tanh \beta \end{cases}, \quad \beta = \frac{W}{h\sqrt{8}}$$

σ_{eq} = 本設計法所建議之當量應力計算值, [FL⁻²];

σ_w = Westgaard 無限版長之邊緣單輪荷重應力, [FL⁻²];

σ_c = Westergaard/Bradbury 有限尺寸版之邊緣溫差應力, [FL⁻²];

r = 混凝土版之溫度傳導係數, [T⁻¹]

R₁ = 不同輪軸(雙輪單軸、單輪雙軸、單輪三軸)之合併調整因子, 依據疊加之原則, R₁可以直接相乘的方式求得;

R₂ = 有限版長與版寬之調整因子;

R₃ = 有混凝土路肩之調整因子;

R₄ = 外車道加寬情況效應之調整因子;

R₅ = 多層版效應之調整因子;

R_T = 載重加上白天之溫差效應之影響;

W = 版長或版寬;

如果是未黏結之雙層版， h_{eff} =未黏結雙層版轉換為單層版之有效厚度，[L]； α =將下層版轉換為與上層版彈性模數 E_1 值相同的等值版，其中性軸的位置距離下層版中心線的距離，[L]； β =從上層版中線到中性軸的距離，[L]； h_{1f} 、 h_{2f} = 將黏結雙層版轉換成兩個勁度相同的未黏結版時，其上層與下層的厚度，[L]。

$$r = \frac{(1/2)h_1(h_1 + h_2)}{h_1 + h_2(E_1/E_2)}, \quad s = (1/2)(h_1 + h_2) - r$$

$$h_{1f} = \sqrt[3]{(h_1^3 + 12h_1s^2)} \quad h_{2f} = \sqrt[3]{(h_2^3 + 12h_2s^2)}$$

各應力修正調整因子之預估模式與其使用之限制均詳列於表 1 中，其詳細之構建過程請參閱文獻[1]。

3.3 修正後厚度設計之步驟

本厚度設計法採用與 PCA 設計法之疲勞分析一致的設計理念，其主要考量仍在限制不同軸重之最終累加疲勞損壞比小於 100%。雖然在美國國家公路合作研究計劃 (NCHRP 1-26) 報告中建議加入溫差效應之考慮時，必須將交通荷重資料區分為無溫差、有日間溫差、與有夜間溫差複合效應等三部份分別考慮，然而基於溫差資料不易取得等現實條件之考量，本厚度設計法擬以較保守的方式，僅將交通荷重資料分為無溫差、與有日間溫差複合效應等二部份，分別計算其疲勞損壞百分比。茲將本厚度設計法之主要分析步驟簡述如下：

1. 資料輸入：假設一鋪面版之厚度，並輸入各相關之設計條件、材料特性、交通荷重、與環境因子(溫差)等。
2. 軸重軸次(n_i)：計算出在設計期間內，預估之軸重軸次資料。
3. 計算當量應力(σ_{eq})：利用前節所述步驟，計算各軸重之當量應力。
4. 計算應力比(σ_{eq}/S_C)：由當量應力與混凝土破裂模數(S_C)計算而得。
5. 最大容許重複載重次數(N_i)：依疲勞公式計算不同應力比下之 N_i 值。
6. 求得各軸重之疲勞損壞比(n_i/N_i)。
7. 檢查累加之疲勞損壞比是否 $\sum (n_i/N_i) < 100\%$ 。
8. 必要時修改版之厚度，並重複上述步驟，以求得符合設計條件之最小厚度。

四、TKUPAV視窗軟體程式之建立

本研究並利用 Visual Basic 軟體程式[17]來開發出一套人機介面極佳之個人視窗電腦程式(TKUPAV)，以協助使用者從事鋪面應力分析與厚度設計之用，其輸入視窗介面之圖例可見圖一。它能让使用者在畫面中使用最少步驟但完成最多的工作，就如使用 Windows 的環境，完全以圖形畫面及按鈕來引導使用者。

五、TKUPAV程式之驗證

茲利用以下實例驗證上述當量應力之計算與厚度設計流程。

今擬設計建造一條四線公路，有縱縫筋、路基路床合成 k 值=130 pci、無混凝土路肩、混凝土破裂模數=650 psi、設計年限=20 年、荷重安全係數=1.2、車道分佈=81%、方向分佈=50%、重車比例=19%、材料變異=15%、交通年成長率=4%、其軸重分佈、輪軸型態資料、及其它相關數據如下：[4]

單軸	雙軸
----	----

軸重 kips	軸數/1000 輛卡車	軸重 kips	軸數/1000 輛卡車
30	0.58	52	1.96
28	1.35	48	3.94
26	2.77	44	11.48
24	5.92	40	34.27
22	9.83	36	81.42
20	21.67	32	85.54
18	28.24	28	152.23
16	38.83	24	90.52
14	53.94	20	1152.91
12	168.85	16	124.69

輪荷重半徑 $a=4.72$ in., 軸距 $t=50$ in., 輪距 $s=12$ in., 軸寬 $D=72$ in., 版寬 $W=144$ in., 版長 $L=180$ in., 骨材互鎖因子 $AGG=25000$ psi, 混凝土彈性模數 $E=4E+06$ psi, 波生比 $\mu=0.15$ 。

5.1 當量應力計算結果之比較

如表 2 所示，在無混凝土路肩之情況下，茲比較 PCAPAV 與 TKUPAV 之當量應力計算欄(A)與欄(B)，兩者應力之比值(B/A)在單軸與雙軸荷重下均極接近 1.0。文獻[7]中並驗證出在有混凝土路肩之情況下，其當量應力亦非常接近。因此得以驗證 TKUPAV 與 PCAPAV 之當量應力計算流程極為相符。

5.2 單獨載重下之疲勞分析

假設鋪面設計厚度 $h=9.5$ in.，茲比較在此兩種不同計算流程之疲勞分析於表 2。根據已知條件可求得： $f_1=38.73$ in.， $f_2=0.973$ ， $f_3=0.894$ ， $f_4=0.953$ 。另依表 1 之各應力修正預估模式可求得下列合併調整因子：雙輪單軸 $R_1=0.398$ ，雙輪雙軸 $R_1=0.180$ ，版尺寸效應 $R_2=0.992$ 。其中必須注意另一側雙輪之效應(以軸寬表示)亦已被一併考慮在上述調整因子中。由表 2 得知：根據 TKUPAV 厚度設計法之疲勞分析各軸重之累積損壞比=71.4%與 PCA 厚度設計法所計算出累積疲勞損壞比=63.4%，其結果甚為接近。文獻[7]中並驗證出在有混凝土路肩之情況下，兩種設計法所計算出之累積疲勞損壞比亦非常接近。因此得以驗證 TKUPAV 與 PCA 在單獨載重下之疲勞分析極為相符。

5.3 考慮載重與溫差翹曲應力之疲勞分析

現在若假設在設計厚度 $h=9.5$ in.及與前例相同條件下，但亦假設另有一小部份(10%)的輪荷重與日間溫差複合作用，其相關參數為： $\gamma=0.087$ pci， $\alpha=5.5E-06$ /°F， $\Delta T=20$ °F。因此， $\alpha\Delta T=0.00011$ ， $W/f_1=3.873$ ， $L/f_1=4.648$ ， $a/f_1=0.1219$ ， $DG=4.0274$ ， $\lambda=1.370$ 與 $\sigma_c=88.5$ psi。由表 3 得知：90%的單獨輪荷重作用所造成之累積損壞比=64.2%；而僅僅只有 10%的輪荷重與溫差複合作用下之累積損壞比卻已高達 138.84%。在此狀況下，必須將原設計厚度增加 1/2 英吋，以使總累積損壞比由 203.0%降為 41.3%，以符合疲勞分析之要求。由於載重複合溫差效應可能對路面之損害影響非常大，因此本研究並建議混凝土鋪面厚度設計亦須考慮溫差效應所引起額外的疲勞損壞。

六、結論與建議

本研究主要在於發展新的接縫式混凝土鋪面應力分析與厚度設計流程。在修正 PCA 之當量應力計算與疲勞分析後，業經一連串 EXCEL 試算表實例驗證後，證實本研究所建議的應力分析與厚度設計法與 PCA 之方法非常接近，並據此發展出一套視窗版本之 TKUPAV 程式，進而提高剛性鋪面實際分析設計之實用性。

TKUPAV 程式並強化了 PCA 厚度設計法對考慮不同輪軸組成、有限版尺寸、版溫差效應之適用性，使應力預估能盡量配合鋪面實際情況而提高其準確性，亦可提高其工程之實用價值。此外，本研究亦指出載重複合日間溫差效應可能對路面之損害影響極大，因此建議混凝土鋪面厚度設計亦必須考慮溫差效應所引起額外的疲勞損壞。本文中並忽略載重複合夜間溫差對鋪面疲勞損壞之折減效應，必要時亦可參考文獻[7]做必要的修正。

七、誌謝

本計畫承蒙行政院國家科學委員會 NSC85-2211-E-032-010 經費贊助，特此致謝。

八、參考文獻

1. 李英豪、李英明、顏少棠、白建華、李朝聰，「建立新的接縫式混凝土鋪面應力分析與厚度設計方法」，期末報告，專題研究計畫編號 NSC85-2211-E032-010，行政院國家科學委員會，中華民國八十五年七月。
2. Portland Cement Association, "The Design for Concrete Highway and Street Pavements," PCA, Skokie, Illinois, 1984.
3. Tayabji, S. D., and B. E. Colley, "Analysis of Jointed Concrete Pavement," Report No. FHWA-RD-86-041, Federal Highway Administration, 1986.
4. Huang, Y. H., Pavement Analysis and Design, Prentice-Hall, Inc., 1993.
5. Portland Cement Association, "MATS -User's Manual," Computer Software MC012, PCA, Skokie, Illinois, 1990.
6. Ioannides, A. M., R. A. Salsilli, I. Vinding, and R. G. Packard, "Super-Singles: Implications for Design," Proceedings of the Third International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, "Heavy Vehicles and Roads - Technology, Safety and Policy" Edited by D. Cebon and C. G. B. Mitchell, University of Cambridge, UK, 1992.
7. Darter, M. I., and E. J. Barenberg, "Design of Zero-Maintenance Plain Jointed Concrete Pavement," Report No. FHWA-RD-77-111, Federal Highway Administration, 1977.
8. NCHRP, "Calibrated Mechanistic Structural Analysis Procedures for Pavement," NCHRP 1-26, Vol. 1, Final Report; Vol. 2, Appendices, University of Illinois, 1990.
9. Korovesis, G. T., "Analysis of Slab-on-Grade Pavement Systems Subjected to Wheel and Temperature Loadings," Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1990.
10. Microsoft, "Microsoft FORTRAN PowerStation Professional Development System," User's and Reference Manuals, Microsoft Taiwan Corp., 1994.
11. Lee, Y. H., and M. I. Darter, "Loading and Curling Stress Models for Concrete Pavement Design," Transportation Research Record 1449, Washington, D.C., 1994, pp. 101-113.
12. Lee, Y. H., and M. I. Darter, "New Predictive Modeling Techniques for Pavements," Transportation Research Record 1449, Washington, D.C., 1994, pp. 234-245.
13. Friedman, J. H. and W. Stuetzle, "Projection Pursuit Regression," Journal of the American Statistical Association, Vol. 76, 1981, pp. 817-823.

14. Statistical Sciences, Inc., S-PLUS for Windows: User's and Reference Manuals, Ver. 3.3, Seattle, Washington, 1995.
15. Westergaard, H. M., "New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields," American Society of Civil Engineering, Transactions, Vol. 113, 1948, pp. 425-444,
16. Bradbury, R. D., Reinforced Concrete Pavements, Wire Reinforcement Institute, Washington, D. C., 1938.
17. Microsoft, "Microsoft Visual Basic," Programmer's Guide and Language Reference, Ver. 4.0, Microsoft Taiwan Corp., 1995.



圖1 TKUPAV 視窗程式介面之圖例