

# 建立新的接縫式混凝土鋪面應力分析及厚度設計方法

李英豪 李英明 顏少棠 白建華 李朝聰  
淡江大學土木工程學系

計畫編號： NSC85-2211-E-032-008

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、北二高龍潭路段及機場跑道、滑行道、與停機坪等設施之鋪面，因此有需要對剛性鋪面厚度設計作更進一步的探討。本文將以美國波特蘭水泥協會(PCA)所發展出的厚度設計法為基礎，研究對其當量應力分析與厚度設計流程提出修正之建議，進而發展出一套新的接縫式混凝土鋪面應力分析與厚度設計法，以推廣其適用範圍。本研究並將建立一套非常容易使用的 TKUPAV 視窗軟體程式以供實際應力分析與厚度設計之用。

## 一、PCA設計法之回顧

PCA 厚度設計法係國內、外目前最常用以力學為基礎之剛性鋪面厚度設計法。該設計法主要是根據 J-SLAB 有限元素程式分析之結果，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，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。

### 1.1 當量應力之計算

PCA 厚度設計法的原始發展過程係利用 J-SLAB 有限元素程式分析在不同版厚與路基反力模數狀況下，標準單軸荷重(SA)或雙軸荷重(TA)所產生之最大邊緣彎曲應力。此設計法並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流程，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.。標準雙輪單軸重=18 kips、每一輪重=4,500 lbs、單輪接觸面積=7\*10 in.<sup>2</sup>(荷重半徑  $a=4.72$  in.)、雙輪間距  $s=12$  in.、雙輪中心距或軸寬  $D=72$  in.。標準雙輪雙軸重=36 kips、雙軸軸距  $t=50$  in.，其他均與標準單軸重相同。

PCA 設計法並假設在有混凝土路肩(WS)之情況

其骨材互鎖因子  $AGG=25,000$  psi。若無混凝土路肩(NS)，PCA 建議應依 MATS 電腦程式分析之結果加以修正。PCA 設計法並配合應用數個調整因子對最大邊緣應力之修正，計算出混凝土版之當量應力，其相關公式如下：

$$f_{eq} = \frac{6 * M_e * f_1 * f_2 * f_3 * f_4}{h^2}$$
$$M_e = \begin{cases} -1600 + 2525 * \log(\cdot) + 24.42 * \cdot + 0.204 * \cdot^2 & SA / NS \\ 3029 - 2966.8 * \log(\cdot) + 133.69 * \cdot - 0.0632 * \cdot^2 & TA / NS \\ [-970.4 + 1202.6 * \log(\cdot) + 53.587 * \cdot] * [0.8742 + 0.01088 * k^{0.447}] & SA / WS \\ [2005.4 - 1980.9 * \log(\cdot) + 99.008 * \cdot] * [0.8742 + 0.01088 * k^{0.447}] & TA / WS \end{cases}$$
$$f_1 = \begin{cases} (24 / SAL)^{0.06} * (SAL / 18) & SA \\ (48 / TAL)^{0.06} * (TAL / 36) & TA \end{cases}$$
$$f_2 = \begin{cases} 0.892 + h / 85.71 - h^2 / 3000 & NS \\ 1 & WS \end{cases}$$
$$f_3 = 0.894 \text{ for } 6\% \text{ truck at edge}$$
$$f_4 = 1 / [1.235 * (1 - CV)]$$

其中， $\sigma_{eq}$  = 當量應力，psi； $h$  = 版厚度，in.； $\cdot$  =  $(E * h^3 / (12 * (1 - \mu^2) * K))^{0.25}$  為混凝土版與基底層材料的相對勁度半徑，in.； $k$  = 路基土壤反力模數，pci； $f_1$  = 輪軸種類之調整因子； $f_2$  = 混凝土路肩調整因子； $f_3$  = 重車載重集中分佈於邊緣

之應力調整因子(PCA 建議採用  $f_3=0.894$ )； $f_4$ =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。

## 1.2 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 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  $SR=\sigma_{eq}/S_c$ )，再依下列應力比與重覆軸次之關係求出最大容許重複載重次數 ( $N_f$ )：

$$\begin{cases} \log N_f = 11.737 - 12.077SR & SR \geq 0.55 \\ N_f = \left( \frac{4.2577}{SR - 0.4325} \right)^{3.268} & (0.45 < SR) \\ N_f = \text{Unlimited} & SR \leq 0.45 \end{cases}$$

其中： $SR = f_{eq} / S_c$

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，並利用迭代的方式以決定所需之最小版厚。

本研究並利用試算表驗證前述當量應力與疲勞分析之公式，經與 PCAPAV 電腦程式計算比較後，證實其流程與結果完全相符無誤。

## 二、修正PCA應力分析與厚度設計流程

當採用傳統 PCA 設計法之當量應力計算時，將發現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。唯此與版之實際情況不盡相符，因此，本研究將以 Westergaard 的邊緣應力為主體，根據 ILLI-SLAB 有限元素程式之應力分析並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建立應力修正之預估模式。再加上原 PCA 設計法中之疲勞分析，藉以滿足設計者之實際需求，進而決定鋪面版所需之厚度。

### 2.1 修正後當量應力計算

在同時考量可能影響混凝土應力大小之因素，如混凝土材料之特性、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，本研究建議可將 PCA 當量應力計算公式修正如下：

$$f_{eq} = [f_w * R_1 * R_2 * R_3 * R_4 * R_5 + R_T * f_c] * f_3 * f_4$$

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

$$f_c = \frac{CEr\Delta T}{2}$$

$$C = 1 - \frac{2 \cos \lambda \cosh \lambda}{\sin 2\lambda \sinh 2\lambda} (\tan \lambda + \tanh \lambda)$$

$$\lambda = \frac{B}{\sqrt[3]{8}}$$

其中， $\sigma_{eq}$  = 修正之當

量應力值， $[FL^{-2}]$ ； $\sigma_w$  = Westgaard 無限版長之邊緣單輪荷重應力， $[FL^{-2}]$ ； $\sigma_c$  = 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， $[T^{-1}]$ ； $R_1$  = 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， $R_1$  可以直接相乘的方式求得； $R_2$  = 有限版長與版寬之調整因子； $R_3$  = 有混凝土路肩之調整因子； $R_4$  = 外車道加寬情況效應之調整因子； $R_5$  = 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。其它相關變數之定義為：} = 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， $[FL^{-3}]$ ； $P$  = 輪軸載重， $[F]$ ； $a$  = 車輪荷重半徑， $[L]$ ； $\alpha$  = 混凝土版膨脹係數， $[T^{-1}]$ ； $\Delta T$  = 版頂部與底部之溫差， $[T]$ ； $C$  = 溫差效應之係數； $B$  = 版長或版寬， $[L]$ 。括號中之 $[L]$ 、 $[F]$ 、 $[T]$ 為長度、力、與溫度的單位。

### 2.2 修正後厚度設計步驟

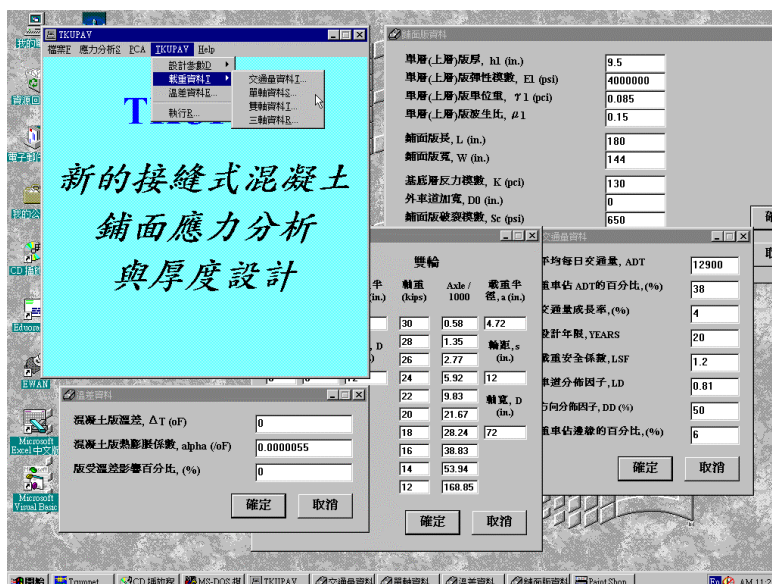
本研究將採用與 PCA 設計法之疲勞分析一致的設計理念，其主要考量仍在限制不同軸重之最終累加疲勞損壞比小於 100%。雖然在美國國家公路合作研究計劃(NCHRP 1-26)報告中建議加入溫差效應之考慮時，必須將交通荷重資料區分為無溫

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. 假設版之厚度並輸入各相關設計條件、材料特性、交通荷重與環境因子(溫差)等資料。
2. 計算設計期間內預估軸重軸次( $n_i$ )。
3. 計算當量應力( $\sigma_{eq}$ )。
4. 計算應力比( $\sigma_{eq}/S_c$ )。
5. 依疲勞公式計算不同應力比下之最大容許重複載重次數( $N_i$ )。
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超過 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。

### 三、TKUPAV 程式建立

本研究並利用 Visual Basic 4.0 軟體程式開發出一套以圖形介面為主、親和力極高且非常容易使用之 TKUPAV 視窗軟體程式。該程式除了提供剛性鋪面厚度設計所需之中、英文圖文介面外，亦一併克服以往 PCAPAV 程式僅能適用於英制單位之問



圖一 TKUPAV 視窗程式介面之圖例

題，使用者可任選公制、或英制單位。此外，TKUPAV 程式亦提供版之邊緣、中央、與角隅之應力分析，以協助實務設計校核與未來研究改進之用。圖一為 TKUPAV 程式輸入視窗介面之圖例。

### 四、TKUPAV 程式驗證

本研究除了利用試算表驗證 PCA 原當量應力與疲勞分析之公式與 PCAPAV 程式計算完全相符外，並利用數個實例驗證本研究建議修正 PCA 之當量應力計算與疲勞分析流程之適用性。業經一連串試算表與 TKUPAV 程式對此新的計算流程詳加驗證後，證實可產生與 PCA 之當量應力與疲勞損壞非常相近之結果，並驗證出程式之正確性。

此外，本研究並指出

載重複合白天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須考慮溫差效應所引起額外的疲勞損壞。

### 五、結論與建議

本研究主要在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，並據此發展出一套視窗版本之 TKUPAV 軟體程式。此程式主要功能在擴展 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。此外，該程式亦提供一親和力極高之中、英文圖文介面，以提高鋪面實際分析設計之實用性。

TKUPAV 軟體程式除

## 【專題計畫成果報導】

了厚度設計外，亦可協助分析剛性鋪面版之邊緣、中央、與角隅應力，以做為實務設計校核與未來研究改進之用。此程式亦同時適用於公制與英制單位。

### 作者簡介

---

#### 李英豪

淡江大學土木工程系副教授  
美國伊利諾大學土木工程博士  
專長：鋪面分析設計、鋪面管理系統、鋪面評估維修

---

#### 李英明

淡江大學土木工程系碩士

---

#### 顏少棠 白建華 李朝聰

淡江大學土木工程系碩士班

