

接縫式混凝土鋪面之角隅應力分析

李英明
淡江大學
土木工程研究所
碩士

李英豪
淡江大學
土木工程系
副教授

摘要

本研究以有限元素法程式ILLI-SLAB分析接縫式混凝土鋪面版角隅的應力行為，運用因次分析與實驗設計原理考慮Westergaard所提角隅位置受尺寸效應、各種輪軸載重、外車道加寬、混凝土路肩與雙層版等因素影響時其角隅應力的反應，並配合最新的統計迴歸方法建立預估模式。運用預估模式可以快速準確的完成接縫式混凝土鋪面版角隅應力的計算，更可藉此從事接縫式混凝土鋪面版的分析設計與運用。文末提出案例驗證，說明運用修正因子R值修正Westergaard公式的步驟並初步驗證結果的準確性。

一、前言

分析鋪面各種狀況下的結構反應是建立鋪面設計方法最基本與重要的環節，國內使用剛性鋪面日益普遍，本土化剛性鋪面設計方法的研究亦逐漸重要，對於鋪面版中應力反應的了解實在有其必要性。因此本研究針對接縫式混凝土鋪面角隅應力反應進行研究，期望對國內未來剛性鋪面版的設計與分析方面提供兼顧理論與實用便利性的成果。

以往剛性鋪面設計方法主要依照Westergaard的中央、邊緣或角隅公式而來，但是鋪面實際的環境與Westergaard所假設的無限或半無限版長與路基完全支承的情況有所不同。另外，鋪面上的輪軸載重組合情況並非只是Westergaard假設的單一的輪載重情況，若再加上外車道加寬、混凝土路肩、多層版等情況，則鋪面的應力反應將會脫離Westergaard假設越來越遠，因此Westergaard的鋪面應力公式必須修正才能處理接縫式混凝土鋪面版的各種現實情況。雖然以有限元素法程式能夠求解接縫式混凝土鋪面版的應力，然而受到需要高速運算與記憶體龐大的電腦與訓練有素的人員等等因素限制了求解的正確與便利性，如何突破上述限制而能以快速而有效的方式準確的計算出鋪面的應力反應便成為一個極待解決的問題。

為了解接縫式混凝土鋪面版角隅在各種情況下的應力行為，本研究以因次分析與實驗設計的方法執行一系列有限元素法剛性鋪面ILLI-SLAB程式，考慮Westergaard提出的角隅位置受各種輪軸載重、外車道加寬、路肩與雙層版等影響時其應力的反應，首先進行鋪面結構反應分析作定性的分析，而後運用因次分析方法採用控制因子建立資料庫並以投影追逐迴歸分析法找出修正因子。分析的目標是建立各種情況下接縫式剛性鋪面版角隅應力修正因子的預估方程式組，進而運用修正因子R快速準確的求得接縫式剛性鋪面版角隅應力。

二、鋪面版應力分析研究的發展

Westergaard[9]對於剛性鋪面版受角隅圓形荷重版頂端最大拉應力發展下列公式：

$$f_c = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{\sqrt{2}a}{l} \right)^{0.6} \right] \quad (E.1)$$

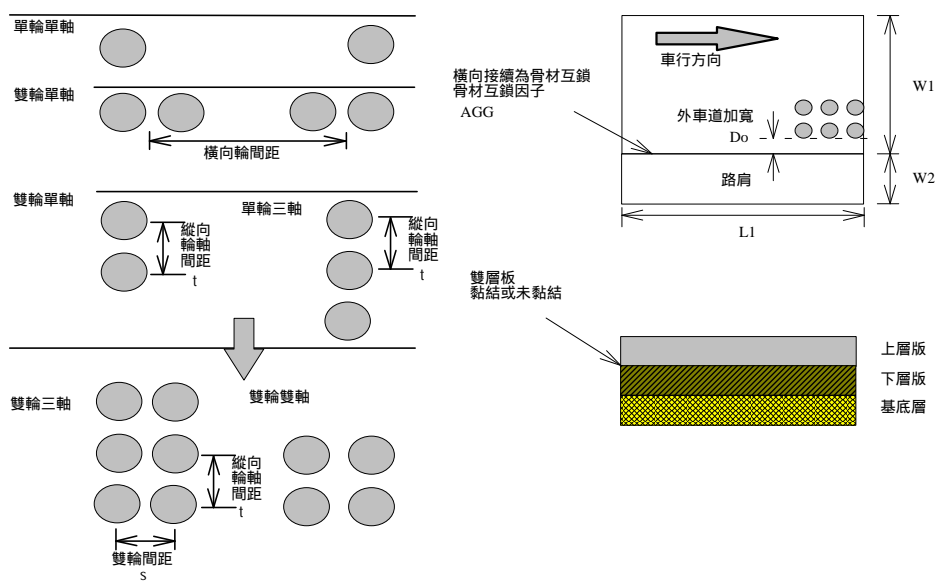
其中 σ_c ：角隅版頂部的最大拉應力,[FL⁻²]；P：載重,[F]；h：鋪面版厚度,[L]；a：載重區域半徑,[L]；l：鋪面版與基底層的相對勁度半徑， $l = ((Eh^3)/(12(1-\mu^2)k))^{0.25}$, [L]；E：鋪面版彈性模數，[FL⁻²]； μ ：波松比；k：基底層反力模數,[FL⁻³]；其中[F]與[L]分別代表力與長度的單位。其最大拉應力位置發生在版角隅對角線上距離角隅端 $x_1 = 2.38\sqrt{al}$ 之頂部位置。

在現實的環境中，接縫式混凝土鋪面如車道與路肩是由許多單一的混凝土版接續而成，版與版間的接續可能是骨材互鎖、綴縫筋、繫筋或其他的形式所構成；而車輪載重也有雙輪、雙輪雙軸或雙輪三軸等許多的輪軸載重組合形式；此外，外車道加寬也使得車輪載重施加於鋪面的位置改變而不再是處於Westergaard所提出臨界位置。多層版亦會影響鋪面版的應力反應[圖一]。

以往的研究發現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[6,7]：

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

其中：L：有限版長，[L]；W：有限版寬，[L]；s：雙輪載重組合輪間距，[L]；t：雙軸載重組合軸間距，[L]；D₀：外車道加寬寬度，[L]；AGG：骨材互鎖效應因子，[FL⁻²]；h_{eff}：上層版的有效厚度，[L]；h₁：上層版原來厚度，[L]。



圖一 接縫式混凝土鋪面版之各種情況

經由這個關係，對於邊界條件相同的版而言，便可利用重疊原理將鋪面版分析的問題劃分成一系列較小而單純的分析。對於各個情況的修正因子以可分別建立，用來計算出各種狀況作用之下鋪面版中的結構反應。

本研究針對鋪面環境中的尺寸效應、輪軸載重組合、外車道加寬、路肩與多層版等情況作用時的角隅應力進行分析ILLI-SLAB程式輸入檔中均只考慮載重情況，亦即不具線性溫差的情況。輪軸載重組合將考慮雙輪、雙軸與三軸等情況，考慮其版頂端最大拉應力發生的位置與大小，將各種不同的輪軸載重組合與單一輪載重比較其應力反應；外車道加寬、混凝土路肩與多層版則考慮各應力位置的應力折減效應。ILLI-SLAB程式所得的拉應力值採用版頂端最大次要主應力(Minor Principal Stress)。

三、版的尺寸效應

分析版的尺寸效應時，採用以下的因次化參數來執行ILLI-SLAB程式：

$$a/l : 0.05, 0.1, 0.2, 0.3$$

$$L/l : 2, 3, 4, 5, 6, 7$$

$$W/l : 2, 3, 4, 5, 6, 7 \quad (L/l \geq W/l)$$

$L/l, W/l$ 等於7的狀況可確保鋪面版以達Westergaard所假設的無限版長的情況。此外因為只選擇 $L/l \geq W/l$ 的情況，所以在本資料庫內總共執行了84個ILLI-SLAB程式。上述之資料庫預期可涵蓋載重單獨作用狀況的各種情況。調整因子R是以ILLI-SLAB的計算值與Westergaard的公式相除而得。由投影追逐迴歸(PPR)分析求得修正因子預估模式為：

$$R = \frac{f_i}{f_c} = 1.030 + 0.030\Phi_1 + 0.045\Phi_2$$

$$\Phi_1 = 92.145 - 149.276(A1) + 59.747(A1)^2$$

$$\Phi_2 = \begin{cases} -6.034 + 23.128(A2) - 22.022(A2)^2 & \text{if } A2 \leq 0.6 \\ -0.117 + 0.375(A2) & \text{if } 0.6 < A2 \end{cases}$$

$$A1 = 0.8272x1 - 0.1219x2 + 0.0002x3 + 0.5485x4$$

$$A2 = -0.9034x1 + 0.2973x2 - 0.0118x3 - 0.3088x4$$

$$X1 = [x1, x2, x3, x4] = \left[\frac{a}{l}, \frac{L}{l} + \frac{W}{l}, \frac{L}{l} \times \frac{W}{l}, \sqrt{\frac{L}{l}} + \sqrt{\frac{W}{l}} \right] \quad (E.3)$$

統計參數: $N=84, R^2=0.98, SEE=0.0081$

限制: $0.05 \leq a/l \leq 0.3, 2 \leq L/l \leq 7, W/l \leq L/l$

其中 N: 資料點的數量, R^2 : 決定係數, SEE: 估計值的標準差。

四、輪軸載重組合的修正

輪軸載重組合修正方式是將多個輪載重分析為單一輪載重的效應，修正因子R定義為： $R = \sigma_s / \sigma_{s=0}$ 或 $R = \sigma_t / \sigma_{t=0}$ ，其中 σ_s, σ_t ：分別為多輪或多軸時版中產生的最大應力值；

$\sigma_{s=0}, \sigma_{t=0}$ ：為多輪或多軸，輪間距 $s=0$ 或軸間距 $t=0$ 時版中產生的最大應力值。

執行系列的ILLI-SLAB程式時，版的尺寸設定為無限版長的情況[4]，輸入檔中之 L/l 與 W/l 假設為10，以確定當輪間距 s 或軸間距 t 增加時輪軸所處位置之版仍為無限版長的情況。分析時考慮的參數有 $a/l, s/l$ 或 t/l ，其中 $a/l: 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ ， s/l 或 t/l 的配置為0至4，間隔為0.2。網格的切割參照Ioannides[4]對網格切割的建議。各種輪軸載重組合的型式繁多，本研究以雙輪單軸、單輪雙軸與單輪三軸進行研究，將這些調整因子進行整合可以求得更多的輪軸載重組合型式，整合的案例可參照案例驗證所說明的方式進行。

4.1 雙輪單軸

研究結果發現，角隅情況的 R 值可能會小於 0.5，若以設計的考慮可將 R 值的下限定為 0.5，則當 s/l 逐漸增加至 1.5 時，即可成為單一輪載重(載重 P)的情形[圖二]。作用於版角隅的情況，最大拉應力發生於距版角隅距離 x' 頂端的位置，距離 x' 與 Westergaard 所提出之單一載重情況時 $x' = 2.38\sqrt{al}$ 有相同的趨勢。由投影追逐迴歸(PPR)分析求得修正因子預估模式為：

$$\begin{aligned}
 R &= 0.56937 + 0.14868\Phi_1 + 0.01293\Phi_2 \\
 \Phi_1 &= \begin{cases} -0.725 - 0.101(A1) - 0.005(A1)^2 & \text{if } A1 \leq -1.5 \\ 2.666 + 5.325(A1) + 2.126(A1)^2 & \text{if } A1 > -1.5 \end{cases} \\
 \Phi_2 &= \begin{cases} 4.774 + 24.80(A2) + 8.164(A2)^2 & \text{if } A2 \leq -0.2 \\ 1.677 + 18.755(A2) + 152.467(A2)^2 + 476.47(A2)^3 & \text{if } A2 > -0.2 \end{cases} \\
 A1 &= -0.84511x_1 + 0.23246x_2 + 0.4814x_3 \\
 A2 &= -0.05916x_1 - 0.95205x_2 + 0.30016x_3 \\
 X &= [x_1, x_2, x_3] = \left[\frac{s}{l}, \frac{a}{l}, \frac{s \times a}{l^2} \right]
 \end{aligned} \tag{E.4}$$

Statistics : $N=104$, $R^2=0.999$, $SEE=0.052$

Limits : $0.05 \leq (a/l) \leq 0.4$, $0 \leq (s/l) \leq 4$

4.2 單輪雙軸

研究結果發現，對於 x 方向與 y 方向均無限或半無限延伸的版而言，角隅載重狀況下的單輪雙軸載重情況可以利用雙輪單軸載重的預估方程式來求單輪雙軸的 R 值。

4.3 單輪三軸

研究結果發現，角隅單輪三軸載重當 t/l 達1.7時， R 值可趨於 $1/3$ ，即版頂端最大拉應力反應成為與單一輪載重時相同的情形，由圖三可看出此一趨勢。角隅載重情況之版頂端最大拉應力位置變化不定，本節所採取的是其最大拉應力，對於位置因素將另外考慮。由投影追逐迴歸(PPR)分析求得修正因子預估模式為：

圖二 雙輪單軸角隅應力R值變化的趨勢

圖三 單輪三軸角隅應力R值變化的趨勢

$$\begin{aligned}
 R &= 0.37078 + 0.0937\Phi_1 + 0.00783\Phi_2 \\
 \Phi_1 &= \begin{cases} -0.672 - 0.13(A1) - 0.018(A1)^2 & \text{if } A1 \leq -1.5 \\ 5.525 + 9.250(A1) - 3.539(A1)^2 & \text{if } A1 > -1.5 \end{cases} \\
 \Phi_2 &= \begin{cases} 3.243 + 20.908(A2) - 0.57(A2)^2 & \text{if } A2 \leq -0.12 \\ -0.041 - 40.342(A2) - 557.341(A2)^2 - 2158.514(A2)^3 & \text{if } A2 > -0.12 \end{cases} \\
 A1 &= -0.87293x1 - 0.00077x2 + 0.48781x3 - 0.00466x4 \\
 A2 &= -0.05628x1 - 0.94019x2 + 0.33596x3 + 0.00114x4 \\
 X &= [x1, x2, x3, x4] = \left[\frac{t}{l}, \frac{a}{l}, \frac{t \times a}{l^2}, \frac{t}{a} \right]
 \end{aligned} \tag{E.5}$$

Statistics : N= 94 , R²=0.997, SEE=0.0005

Limits : 0.05 ≤ (a / l) ≤ 0.4 , 0 ≤ (t / l) ≤ 4

4.4 輪間距或軸間距對應力的影響

綜合研究結果發現，當輪間距s或軸間距t增加至4l，則修正因子將會降低至1/2（兩個輪載重的情況）或1/3（三個輪載重的情況）。顯示當輪間距s或軸間距t增加，達到Ioannides[4]所提鋪面版角隅載重情況的尺寸達無限（Infinite）版長情況4l時，則可以只考慮成為單一輪載重(載重P)的情況。另外若以設計的觀點將雙輪單軸最大拉應力的下限定為單一輪軸作用時的所生的應力，由於雙輪單軸與單輪雙軸之角隅其最大拉應力會降低至比單一輪軸作用時更小，則當輪間距s或軸間距t大於1.7l時，其餘輪軸的影響可以不予考慮。比較上述兩點，當輪間距s或軸間距t超過1.7l時其餘的輪載重可不必考慮。

五、外車道加寬的修正

定義外車道加寬之應力修正因子 $R=\sigma_D/\sigma_{D=0}$ ，其中 σ_D 為有外車道加寬時的應力值， $\sigma_{D=0}$ 為沒有外車道加寬時的應力值。角隅採版頂端最大拉應力。當 D_0/l 逐漸增加會使得載重位置的情況越來越像邊緣載重的情形，因此當 D_0 逐漸增加時，版頂端最大拉應力將會逐漸減小。執行系列的ILLI-SLAB程式時，版的尺寸設定為無限版長的情況[4]，考慮的參數有 $a/l, D_0/l$ ，其中 $a/l:0.05,0.1,0.2,0.3,0.4$ ， D_0/l 的配置為0至4，間隔為0.2。由投影追逐迴歸(PPR)分析求得修正因子預估模式為：

$$\begin{aligned}
 R &= 0.44796 + 0.1816\Phi_1 + 0.0303\Phi_2 \\
 \Phi_1 &= \begin{cases} 0.154 + 0.479(A1) + 0.093(A1)^2 + 0.008(A1)^3 & \text{if } A1 \leq -2 \\ 3.188 + 5.816(A1) + 3.422(A1)^2 + 0.724(A1)^3 & \text{if } A1 > -2 \end{cases} \\
 \Phi_2 &= \begin{cases} -4.32 - 67.954(A2) - 377.181(A2)^2 - 830.382(A2)^3 & \text{if } A2 \leq -0.08 \\ -0.246 + 9.347(A2) - 12.849(A2)^2 + 10.038(A2)^3 & \text{if } A2 > -0.08 \end{cases} \\
 A1 &= -0.92986.x1 - 0.15137.x2 + 0.33837.x3 - 0.01617.x4 \\
 A2 &= -0.14180.x1 - 0.49491.x2 + 0.85729.x3 + 0.0039.x4 \\
 X &= [x1, x2, x3, x4] = \left[\frac{D_0}{l}, \frac{a}{l}, \frac{D_0 \times a}{l^2}, \frac{D_0}{a} \right]
 \end{aligned}
 \tag{E.6}$$

Statistics : N= 99 , $R^2=0.998$, SEE=0.0071

Limits : $0.05 \leq (a/l) \leq 0.4$, $0 \leq (D_0/l) \leq 3$

六、混凝土路肩的修正

Ioannides[4]與Korovesis[5]提出在分析路肩對應力的影響時所採用的控制參數是 $AGG/k/l$ ，其中 AGG 是骨材互鎖因子（Aggregate Interlock Factor）， k 是基底層反力模數， l 是相對勁度半徑。本節執行一系列的ILLI-SLAB程式，以因次化分析研究具有混凝土路肩之版其載重對版應力的影響，考慮下列參數：

a/l : 0.05,0.1,0.2,0.3,0.4

$AGG/k/l$: 0.5,50,500,1000,5000,10000,20000,30000,50000

對於評估鋪面版接縫無因次化的參數 $AGG/k/l$ ，建議可以使用Ioannides[4]與Korovesis[5]所提出利用落體側位儀（Falling Weight Deflectometer；FWD）量測出之應力傳遞效率（Load Transfer Efficiency；LTE）的函數來表示。定義混凝土路肩之應力修正因子 $R=\sigma_{AGG}/\sigma_{AGG=0}$ ，其中 σ_{AGG} 為有混凝土路肩時的應力值， $\sigma_{AGG=0}$ 為沒有混凝土路肩時的應力值。由投影追逐迴歸(PPR)分析求得修正因子預估模式為：

$$\begin{aligned}
 R &= 0.75432 + 0.19105\Phi_1 + 0.02522\Phi_2 \\
 \Phi_1 &= \begin{cases} -1.447 & \text{if } A1 \leq -6000 \\ 1.189 + 0.006(A1) & \text{if } A1 > -6000 \end{cases}
 \end{aligned}$$

$$\Phi_2 = \begin{cases} -0.665 - 0.010(A2) & \text{if } A2 \leq 5 \\ -0.613 - 0.010(A2) + 0.001(A2)^2 & \text{if } A2 > 5 \end{cases}$$

$$A1 = -0.0065x1 + 0.29113x2 - 0.95666x3$$

$$A2 = -0.00168x1 + 0.99997x2 + 0.00803x3$$

$$X = [x1, x2, x3] = \left[\frac{AGG}{kl}, \frac{100 \times a}{l}, \frac{AGG \times a}{l^2} \right] \quad (E.7)$$

Statistics : N=45 , R²=0.988, SEE=0.0213 ;
Limits : 0.05 ≤ (a / l) ≤ 0.4 , 5 ≤ (AGG / kl) ≤ 50000

七、雙層版的修正

鋪面在建造時由於結構上的考慮會在鋪面版與基底層之間設計一層其強度介於基底層與鋪面版之間。此層材料具有應力折減的效果。在進行雙層版之應力分析時，必須將鋪面版與基底層的黏結情況分成兩種狀況：完全黏結與未黏結。對於未黏結情況的版可將雙層版表示成為單一版，其有效厚度為：

$$hefft = \left[h_1^2 + h_2^2 \left(\frac{E_2 h_2}{E_1 h_1} \right) \right]^{0.5} \quad (E.8)$$

因此在分析未黏結情況時採用(hefft/h1)²為無因次化的控制因子。h1為上層版的厚度。分析時執行一系列的ILLI-SLAB程式，以因次化分析研究雙層版其載重對版應力的影響，對於邊緣、中央與角隅狀況分別考慮下列參數：

$$a/l: \quad 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$$

$$(hefft/h1)^2: 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0$$

對於應力的折減定義為多層版時上層版的應力除以多層版時但下層版厚度為零時其上層版的應力，以R來表示。由投影追逐迴歸(PPR)分析求得修正因子預估模式為：

$$R = 0.72692 + 0.14272\Phi_1 + 0.00933\Phi_2$$

$$\Phi_1 = \begin{cases} 3.31765 + 2.4036(A1) & \text{if } A1 \leq -1.4 \\ 5.72684 + 4.10244(A1) & \text{if } A1 > -1.4 \end{cases}$$

$$\Phi_2 = \begin{cases} 14.535 - 20.351(A2) + 5.986(A2)^2 & \text{if } A2 \leq 1.2 \\ 1.619 - 8.367(A2) + 4.877(A2)^2 & \text{if } A2 > 1.2 \end{cases}$$

$$A1 = 0.11914x1 - 0.99288x2$$

$$A2 = 0.65518x1 + 0.75547x2$$

$$X = [x1, x2] = \left[\frac{a}{l}, \left(\frac{hefft}{h1} \right)^2 \right] \quad (E.9)$$

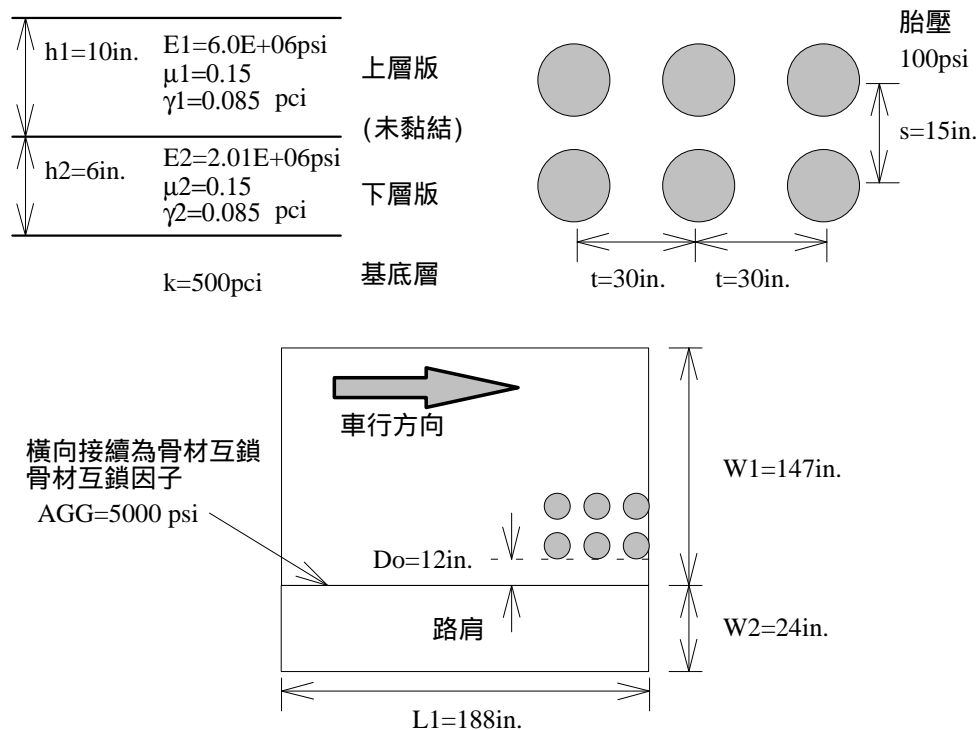
Statistics : $N=55$, $R^2=0.998$, $SEE=0.0066$

Limits : $0.05 \leq (a / l) \leq 0.4$, $1 \leq (h_{eff} / h_1)^2 \leq 2$

黏結的情況則利用變換剖面 (Transformed Section) 的觀念將雙層版轉換成為單一版。轉換的方式可參考Tabatabaie的公式[8,1]。

八、案例驗證

假設一未黏結 (unbonded) 之接縫式雙層混凝土鋪面版 (如下圖四所示) , 版尺寸為 188 英吋 x 147 英吋 , 上下層厚度 (h_1, h_2) 各為 10 英吋與 6 英吋 , 上下層彈性模數 (E_1, E_2) 各為 $6.00E+06$ psi 與 $2.01E+06$ psi , 波生比 (μ_1, μ_2) 均為 0.15 , 混凝土版單位重 (γ_1, γ_2) 均為 0.085pci , 基底層反力模數 (k) 為 500pci 。版與版間之橫向接續, 其骨材互鎖因子 (Aggregate Interlock Factor) 為 5000psi 。受一組三輪雙軸 (即 6 個輪載重) 之載重 , 每一輪載重區域均為 7.5 英吋 x 10 英吋 , 即載重區域半徑 (a) 為 4.88 英吋 , 輪間距 (s) 為 15 英吋、軸間距 (t) 為 30 英吋 , 胎壓為 100psi 。外車道加寬之寬度為 12 英吋。 (其中 , 1 英吋 = 2.54 公分 , 1 psi = 0.07 kg/cm² , 1 pci = 0.028 kg/cm³ , 1 kip = 1000 磅 = 454 公斤) 。



圖四 案例一狀況示意圖

以下即為角隅版頂端最大拉應力的求解步驟，各計算細節可參閱下表：

1. 對尺寸效應的修正：以公式(E.3)對於有限尺寸版求得修正因子R值=1.03。

- 輪軸載重組合的修正：將雙輪三軸分解成為雙輪單軸與單輪三軸的組合，分別由公式(E.4)與公式(E.5)求得雙輪單軸與單輪三軸的修正因子R值為0.72與0.415。將兩者所得之R值相乘，即為雙輪三軸的修正因子，R值等於0.30。
- 外車道加寬的修正：由公式(E.6)求得修正因子R值等於0.67。
- 混凝土路肩的修正：由公式(E.7)求修正因子R值等於0.97。
- 雙層版的修正：對於未黏結的雙層版，先由公式求得其等效的厚度之後，再求得其等效的相對勁度半徑後找出雙層版未黏結情況的 $a/l=0.149$ ， $(hefft/h1)^2=1.07$ ，由公式(E.9)求得修正因子R值等於0.94。
- 對Westergaard理論公式的修正：雙輪三軸是由六個輪載重組合而成，其輪軸總載重為45kips，假設此六個輪載重重合成為單一輪載重的情況，則其應力為Westergaard公式所求得之解再乘以版尺寸效應的修正因子即可，然而，對於本案例所述具有輪軸組合、外車道加寬、混凝土路肩與雙層版未黏結情況，則第1~5項的修正因子必須加以考慮。Westergaard的公式解為810psi，各種情況之整體修正R值為 $1.03*0.30*0.67*0.97*0.94=0.188$ ，故角隅版頂端最大拉應力為 $810*0.188=153psi$ ，以ILLI-SLAB求得之最大拉應力值為145psi，顯示預測的結果與ILLI-SLAB程式解之間十分相近。

雙輪單軸	單輪三軸	外車道加寬	混凝土路肩	雙層版未黏結	版尺寸	結果							
a	4.88	a	4.88	a	4.88	AGG	5000	a/l	0.149	L	188	P	7500lbs
l	31.8	t	30	l	31.8	k	500	(hefft/h1)^2	1.07236	W	135	h	10in.
s	15	t/l	0.943396	Do	12	l	31.8	A1	-1.04697	l	31.8	a/l	0.153459
a/l	0.153459	a/l	0.153459	Do/l	0.377358	a	4.88	A2	0.907758	L/l	5.91195	N	6
s/l	0.471698	t*a/l^2	0.144773	a/l	0.153459	AGG/k/l	0.314465	Φ1	1.431696	W/l	4.245283	Wester.stress	810.psi
s*a/l^2	0.072386	t/a	6.147541	Do*a/l^2	0.057909	100*a/l	15.34591	Φ2	0.993832	a/l	0.153459	Rtotal	0.188
A1	-0.32812	A1	-0.78166	Do/a	2.459016	AGG*a/l^2*k	0.048258	R	0.94	(W/l)+(L/l)	10.15723	Max Str	153psi
A2	-0.15228	A2	-0.14173	A1	-0.39382	A1	4.419445			(W/l)*(L/l)	25.0979		
Φ1	1.1573	Φ1	0.456936	A2	-0.07022	A2	15.34531			(W/l)^0.5+(L/l)^0.5	4.491859		
Φ2	0.674	Φ2	0.26828	Φ1	1.384056	Φ1	1.215517			A1	1.35713		
R	0.72	R	0.415	Φ2	-0.96921	Φ2	-0.53097			A2	1.197869		
				R	0.66987	R	0.97			Φ1	-0.39981		
										Φ2	0.332201		
										R	1.03		

*表中單位 L、W、h、a、l、s、t、Do:英吋、k:pci、AGG:psi。

九、結論與建議

- 對於有限尺寸版長的鋪面版，尺寸效應須加以修正。
- 本研究考慮多輪軸情況版中的角隅應力反應並建立修正因子，以單一載重將多種輪軸載重簡化。本研究之R值具有一定的範圍（N個輪:1~1/N）。對於多種輪軸載重簡化成為單一載重的研究發現當輪間距s或軸間距t與相對勁度半徑的比值(即s/l或t/l)超過1.7l，則版中最大拉應力的反應可以視為單一輪載重的情況。
- 對於外車道加寬採用的控制參數(Do/l)：研究發現角隅情況時最大拉應力的位置不定，當外車道加寬超過3t時，建議直接將鋪面版的載重視為邊緣載重情況，若未超過3t時則可依預估方程式組求得R值乘以無外車道加寬時的角隅應力加以計算。
- 對於路肩採用控制因子AGG/k/l：研究發現當AGG/k/l=0時，可以將版視為單一的版，當AGG/k/l非常大時，則相互接續的版可連結成為一個比原來之版大的版。這樣的情況將使版底端產生拉應力(如邊緣載重的情況)，版頂端拉應力會逐漸減少。

5. 對於雙層版的情況黏結時可以將上下層版換算成為有效版厚度，再利用R值預估模式求得修正因子。
6. 上述各項的修正因子預估模式均已建立，因此利用上述各項修正因子便可以對Westergaard的公式進行接縫式混凝土鋪面角隅應力的修正。
7. 本研究是理論的分析，國內因為剛性鋪面的建造歷史較短，鋪面現地的反應資料值較少，若能對國內現地的資料與本研究所提的預估模式加以驗證或進行現地實驗分析，對建立適合國內環境使用的本土化鋪面應力反應預估模式是相當有利的。
8. 對於接縫式混凝土鋪面中各項修正因子R值目前使用載重單獨作用的情況加以建立，對於有溫差作用的情況，溫差作用對修正因子R值的影響因加以考慮。
9. 此外，對於縱縫筋的應力傳遞效率與不同的基底層模式對於應力亦會有影響，因此若能加以考慮並配合現地資料的驗證將是未來研究的方向。

致謝

本計劃承蒙行政院國家科學委員會NSC84-2211-E-032-022經費贊助，特此致謝。

參考文獻

1. 李英明，「接縫式混凝土鋪面之應力分析」，碩士論文，淡江大學土木工程研究所運輸工程組，淡水，台北，民國八十四年六月(1995)。
2. Friedman, J. H. and W. Stuetzle, "Projection Pursuit Regression," *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 76, 1981, pp. 817-823.
3. Ioannides, A. M., "Analysis of Slabs-on-Grade for a Variety of Loading and Support Conditions," Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1984.
4. Ioannides, A. M., M. R. Thompson and E. J. Barenberg, "Westergaard Solutions Reconsidered," *Transportation Research Record 1043*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., pp. 13-23, 1985.
5. Korovesis, G. T., "Analysis of Slab-on-Grade Pavement Systems Subjected to Wheel and Temperature Loadings," Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1990.
6. Lee, Y. H., "Development of Pavement Prediction Models," Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1993.
7. Salsilli-Murua, R. A., "Calibrated Mechanistic Design Procedure for Jointed Plain Concrete Pavements," Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1991.
8. Tabatabaie-Raissi, A. M., "Structural Analysis of Concrete Pavement Joints," Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1978.
9. Westergaard, H. M., "Computation of Stresses in Concrete Roads," *Proceeding of the Fifth Annual Meeting*, Vol. 5, Part I, Highway Research Board, National Research Council, 1925 (Published in 1926), pp. 90-112.