

建立新的接縫式混凝土鋪面應力 分析及厚度設計方法

Development of New Stress Analysis and Thickness Design
Procedures for Jointed Concrete Pavements

計畫編號： NSC84-2211-E032-008 (第一期)

執行期限： 83/08/01~84/07/31

主持人：李英豪 淡江大學土木工程學系副教授

一、中文摘要(關鍵詞：混凝土(剛性)鋪面、應力分析、車輪載重、溫度翹曲、有限元素分析、因次分析、預估方程式組、投影追逐迴歸分析法。)

波特蘭混凝土以其高度剛性與優越的承載力逐漸成為我國鋪面建造時使用的材料，混凝土鋪面在我國鋪面工程界的重要性日益顯現。本研究的目標是考慮國內氣候與交通量急遽成長等鋪面的環境與特質，建立一個符合我國鋪面環境需求的剛性鋪面設計方法。因為分析鋪面各種狀況下的結構反應是發展剛性鋪面設計方法最基本與重要的環節，本研究將對接縫式混凝土鋪面應力反應進行研究。

本研究以有限元素法剛性鋪面分析程式ILLI-SLAB分析剛性鋪面版各臨界位置(邊緣、中央與角隅)受載重與溫差作用時產生的臨界應力，運用因次分析方法，審慎的選定並驗證各載重情況下的控制因子。執行ILLI-SLAB所得之應力結果將與Westergaard公式解互相比較建立調整因子，並以投影追逐迴歸分析法建立應力預估方程式組，本研究建立之調整因子的觀念將用以調整Westergaard公式解，迅速的求得剛性鋪面臨界位置的應力。

本計畫第一期的研究範圍與內容包括：

1. 分析有限尺寸單一版，在載重和線性溫差分別與複合作用下的中央應力並建立應

力預估方程式組。

2. 推廣前述的研究成果，分析輪軸載重組合、外車道加寬、路肩與雙層版等情況有限尺寸版的應力反應，分別針對鋪面在中央、邊緣與角隅等位置的應力反應進行研究評估，並建立應力反應預估方程式組。本研究的結果可為接縫式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，避免設計人員因為不熟悉輸入檔造成輸出結果不精確的問題，更可省去利用工作站電腦進行繁複計算的時間，讓鋪面應力的計算更加的快速、方便、精確而簡易。

英文摘要(Keywords: Concrete (Rigid) Pavements, Stress Analysis, Wheel Loading, Thermal Curling, Finite Element Analysis, Dimensional Analysis, Prediction Model, Projection Pursuit Regression(PPR).)

Recently, Portland cement concrete has gradually been recognized as an alternative pavement material in our highway pavement community due to its high rigidity and superior bearing capability as compared to asphalt concrete. The ultimate goal of this thesis research is to develop a new concrete pavement design procedure suitable for Taiwan's special climatic characteristics and dramatically increasing traffic loadings. Since analyzing the structural responses

of pavements under a variety of loading conditions is the most crucial component when developing a mechanistic-based design procedure, this study mainly focuses on the stress analysis of jointed concrete pavements.

The ILLI-SLAB finite element (F.E.) program was used to analyze the critical bending stresses of concrete pavements under various critical loading (edge, interior, and corner) and thermal curling conditions. Based on the principles of dimensional analysis, the dominating mechanistic variables were carefully identified and verified. The resulting ILLI-SLAB stresses were compared to theoretical Westergaard solutions to develop adjustment (multiplication) factors. A new regression technique (Projection Pursuit Regression) was utilized to develop prediction models to account for these theoretical differences and to instantly estimate the critical bending stresses of a jointed concrete pavement.

The scope of the Phase I of this study includes:

1. To analyze the interior stress of a finite slab subjected to the individual and combination effects of a single wheel load and a linear temperature differential, and also to develop stress prediction models.
2. To expand the findings to different gear configurations, a widened outer lane, a tied concrete shoulder, and a second bonded or unbonded layer. To investigate the structural response (stress) of each case located at the slab interior, edge, and corner. Prediction models for the critical bending stresses were also developed.

The research findings can be practically used for various design and analysis of jointed concrete pavements based on theoretical considerations. Not only can the use of these stress prediction models avoid the possibility of obtaining incorrect results due to the improper use of the F.E. model, but it can also reduce the complicated computation time significantly. Furthermore, the critical bending stresses can be conveniently, accurately, and the best of all --- instantly calculated through the use of these stress prediction models.

二、計畫緣由與目的

近年來，我國在公路鋪面的設計與建造上採用剛性鋪面已逐漸增加，如新建的北部第二高速公路龍潭收費站附近之剛性路面試驗路段，和木柵福德坑隧道之剛性鋪面等。面對此一趨勢與環境，剛性鋪面設計方法與剛性鋪面的相關研究便成為我國發展剛性鋪面非常重要的環節。因此，考慮國內的鋪面情況與環境特質，建立一個符合我國鋪面環境需求的剛性鋪面版設計方法實在有其必要性。

剛性鋪面在我國鋪面工程界的重要性日益顯現，然而，綜觀國內鋪面設計時最常用的混凝土鋪面厚度設計方法，如美國公路運輸員協會 (AASHTO) 設計法、波特蘭水泥協會 (PCA) 設計法、及美國聯邦飛航總署 (FAA) 設計法等，均是沿襲自國外既有的設計方法。其中 AASHTO 設計法為台灣地區剛性路面厚度設計之主要依據。該方法最原始係根據 1958 - 1960 年間道路試驗結果為純經驗設計法，雖經多次修正，仍有其不可避免的理論缺陷。

而以力學原理為基礎的 PCA 和 FAA 設計法為國內、外機場之剛性鋪面設計人員所喜用。該二法之主要設計理念乃在限制混凝土版面的疲勞破壞。因此，如何正確的估算混凝土版受到內部及邊界輪載重之最大拉應力，並配合未來預估之總荷重次數，以決定該版所需之厚度，乃是該二法之基本原理。雖然吾人均知，混凝土版內所受應力不僅只是與輪載重之大小有關，鋪面版有限的尺寸、及可能因線性溫差而產生溫度翹曲之影響等，均是非常重要的因素。由於對此結合應力之研究仍嫌不足，PCA 和 FAA 設計法目前仍僅考慮輪載重之影響，並有立即被修正之迫切需要。

因此，本研究計畫之主要目的乃在運用因次分析原理，來從事一系列的參數研究，以辨識控制鋪面結構反應之真正參數，並可依此配合實驗設計之原理，慎選所欲預先執行之不同鋪面組合的有限元素法分析。並針對影響鋪面厚度設計之主要因素，如載重型態中之軸重分配、單軸、雙軸、三軸、多重輪胎之間距、和輪胎承受之荷重與壓力、線性溫差產生之溫度翹曲、外車道加寬、與混凝土路肩等，從事詳盡且深入的研究。

進而根據各項因素，建立混凝土鋪面版之應力修正曲線，以使工程及研究人員對該應力

之產生有更深入之瞭解。本計畫並將配合最新之統計迴歸方法，建立該應力之預估模式，以便利各應力之快速計算。期望研究結果對國內未來接縫式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；在設計方法的本土化方面本研究的成果期望將來能作為計算應力結構反應的方法，成為接縫式混凝土鋪面設計方法中重要的一環。研究的結果可以避免設計人員因為不熟悉輸入檔造成輸出結果不精確的問題，更可省去利用工作站電腦進行繁複計算的時間，讓鋪面應力的計算更加的快速、方便、精確而簡易。

本計畫第二期亦擬建立一非常容易使用的個人電腦程式，以將各階段之研究成果彙整並自動化，並依此臨界撓曲應力分析為基礎，配合 Miner's 累加疲勞破壞假設 (Cumulated Fatigue Damage Hypothesis) 與現有混凝土樑之疲勞試驗結果，擴展成一個以力學為基礎的新接縫式混凝土鋪面厚度設計方法。該電腦程式不僅可以瞬間地完成混凝土鋪面各臨界應力之快速計算，更可藉此從事各種不同剛性鋪面結構之分析與設計。以便將之應用在更多實際的鋪面問題上，並進而促進國內學術界與工程界之交流。

三、研究方法及成果

3.1 研究方法

以往最常用且最直接的研究方法，乃是運用實驗設計之原理，預先執行一系列不同鋪面組合之有限元素分析。之後，再將所得出之應力直接以統計迴歸的方式來建立預估模式，以便利未來設計鋪面時，能非常迅速且精準地推估出該應力之用。然而，根據此分析方法所求得之應力預估模式，往往會受限於所預先選定執行的鋪面之組合現況，而使得該模式之實用性大減。

隨著近年來國外學術研究風氣之盛行，運用因次分析原理來從事分析的工作，已漸漸地再度為鋪面工程界所重視。因次分析原理之妥善運用將有助於辨識控制鋪面結構反應之真正參數，並可依此配合實驗設計之原理，慎選所

欲預先執行之不同鋪面組合的有限元素法分析。如此，前述方法所得之應力預估模式所受之限制及實用性大減等問題，必可迎刃而解。

為能整體的了解鋪面版在各種情況下的應力行為，本研究計畫擬採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) 分析剛性鋪面版的應力行為，分別考慮在 Westergaard 提出的三個臨界位置 (中央、邊緣與角隅) 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。研究首先針對單一有限尺寸鋪面版受載重與溫差作用時在臨界位置的應力進行分析。並運用上述之因次分析及實驗設計之原理，反覆地執行一系列不同鋪面組合之有限元素分析，對鋪面結構反應作定性的分析。

而後逐漸將單一版單一載重的情況推展至多種輪軸載重組合與多版的情況。對不同的輪軸載重組合情況，則利用等值載重區域半徑的觀念將多重輪軸載重轉換成為單輪載重。本研究考慮輪間距與軸間距增加對應力的影響，外車道加寬、混凝土路肩多層版等因素則以應力折減的觀念來處理。而後運用因次分析方法採用控制因子建立資料庫，再將所得出之應力值與 Westergaard 之理論解做比較，並以一調整因子 (兩者間之比值) 來代表二者間理論之差異。

最後，再以統計迴歸的方法來建立該調整因子之預估模式。此預估模式將可被運用在任任何以力學原理為基礎之設計方法中，代替繁複之有限元素分析，而成為推估該應力最迅速、精準、有效之利器。

3.2 研究成果

綜言之，本計畫第一期(本年度)主要之研究成果有：

1. 引進等軸半徑 (Equivalent Single Axle Radius, ESAR) 之概念，將各種複雜的多軸多輪之載重型態簡化至單軸單輪之載重問題。在僅受到輪載重之情形下，對混凝土鋪面內部、邊界、及角隅臨界撓曲應力，以及外車道加寬、與混凝土路肩等問題完成全盤性之研究。
2. 利用因次分析的原理，找出所有影響上述混凝土鋪面應力之真正控制因子，對該等應力之產生有更深入之瞭解 (如荷重尺寸

大小與相對勁度半徑之比值、鋪面長度與相對勁度半徑之比值、鋪面寬度與相對勁度半徑之比值、多軸多輪之軸距間距與相對勁度半徑之比值、及其它目前仍未知之因子等)。

3. 完成對混凝土鋪面受輪載重與版內溫度翹曲之雙重影響下的內部臨界撓曲應力之深入研究，並確認其真正控制因子(如荷重尺寸大小與相對勁度半徑之比值、鋪面長度寬度與相對勁度半徑之比值、熱膨脹係數與線性溫差之乘積、及其它目前仍未知之因子等)。
4. 以所發現的真正控制因子做一系列的有限元素分析，完成資料庫之建立。
5. 完成前述各種應力預估模式之建立，以確立其與各重要參數之真正關係。

四、結論與討論

4.1 結論

本研究是發展接縫式混凝土剛性鋪面設計方法中對鋪面應力的研究，可以成為理論綜合經驗鋪面設計法的一部份。

第三章中敘述對於因為載重單獨作用或與溫差複合作用而引起之接縫式混凝土鋪面版的中央應力分析。對於控制參數的驗證，發現了以往對於邊緣應力的研究中所提出的控制參數仍然適用於中央應力的情況，在載重單獨作用時為： $a/l, W/l, L/l$ ，加上溫差作用則控制因子成為六個： $a/l, W/l, L/l$ 與ADT, DG, DP。控制參數驗證之後，利用因次分析與實驗設計的方法建立資料庫，在不影響分析精確的原則下減少資料庫的複雜性以降低分析工作的困難性。分析與建立預估方程式組時，利用投影追逐迴歸分析法，並採用兩階段迴歸分析方法找到正確的函數型式及較符合的回應表面，求得預估方程式組。

這些預估方程式組採用的是無因次化的單位，如此便可打破以往許多鋪面相關計算公式皆是採用英制的限制，讓預估方程式組也能符合國內採用公制的習慣。對於載重單獨作用或與溫度複合作用的情況本研究均已提出了預

估方程式組，且經過驗證與ILLI-SLAB程式計算之結果亦能相符。

第四章中探討接縫式混凝土鋪面版各種情況下的應力反應，發現：

1. 以往利用等值載重區域半徑(ESAR)的觀念，將多種輪軸載重簡化成為等值載重區域半徑的單一載重情況，Salsilli以往曾作過一些對於邊緣情況的研究。本研究則是將邊緣、中央與角隅各種輪軸載重組合情況加以研究，考慮多輪軸情況版中的應力反應，當輪間距 s 與軸距 t 逐漸增加，比較當 $s=0$ 與 $t=0$ 載重產生之版中應力與具有輪間距 s 與軸距 t 的輪軸載重比較，建立修正因子，以單一載重將多種輪軸載重簡化。本研究與Salsilli研究最大的不同點在於本研究以 s/l 或 t/l 表示輪軸載重的型式，Salsilli的研究則是以 s/a 或 t/a 來表示。兩者的主要差別是本研究之 R 值具有一定的範圍(N 個輪： $1 \sim 1/N$)，Salsilli的研究求得之等值載重半徑則較難推斷範圍。本節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 或軸間距與相對勁度半徑的比值(即 s/l 或 t/l)超過表4-3所示的範圍，則版中最大拉應力的反應可以視為單一輪載重的情況，否則另外輪載重的影響必須列入考慮。
2. 於外車道加寬採用的控制參數(D_0/l)：原來邊緣載重的情況，當外車道加寬逐漸加大時，載重的現象會逐漸脫離邊緣而趨向於中央載重的情況。此一現象即是因為外車道加寬提供了一符合無限版長假設的寬度，則載重情況自然就變為中央情況了，此一符合無限版長的外車道加寬的寬度約為 $2l$ 。原為角隅載重情況因為外車道加寬會成為邊緣的情況，符合無限版長的外車道加寬的寬度約為 $3l$ 。邊緣與角隅具有外車道加寬的情形均利用折減因子來求具外車道加寬時的應力反應，在邊緣情況，此一應力折減較為單純，角隅則較複雜，除了角隅情況時最大拉應力的位置不定外，邊緣時考慮的是版底端的最大拉應力，然而在角隅時考慮的卻是版頂端的最大拉應力。因此，在角隅的情況將版頂端與底端的最大拉應力預估方程式組均列出，當外

車道加寬超過3/時，則建議直接將鋪面版的載重視為邊緣載重情況，若未超過3/時則版頂端的最大拉應力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。

3. 對於路肩採用控制因子 AGG/kl ：當 $AGG/kl=0$ 時，可以將版視為單一的版，當 AGG/kl 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。這樣的情況會使得邊緣的載重情況因為版的擴大而成為中央載重情況，而角隅載重情況則版底端拉應力將變成了邊緣載重的情況，版頂端拉應力會逐漸減少。
4. 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，建議在中央、邊緣與角隅情況使用相同的R值預估模式。

上述各項的調整因子預估模式均已建立，因此利用上述各項調整因子便可以對 Westergaard的公式進行調整。然而，這些調整後的應力值仍然是處於無限版長與載重單獨作用的情況之下，對於有限版長或是有溫差作用的鋪面版，則可利用第三章與先前之研究結果進行調整。

上述各章的研究提出許多應力調整因子，利用調整因子的觀念，研究的結果將可用於計算接縫式混凝土鋪面的應力問題，也可以逐漸發展成為理論綜合經驗的鋪面設計法中的一部份。

4.2 討論

1. 本研究是理論的分析，在美國許多研究驗證ILLI-SLAB程式解與現地資料的比較，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。
2. 對於接縫式混凝土鋪面中各項調整因子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，調整因子R值能將溫差加以考慮，應力的預測將更加準確。
3. 對於已經發現的控制因子可以加以利用進行對鋪面現地反應的模擬。
4. 投影追逐迴歸分析法使用上具有限制，若要達到更佳的準確性應該可從類神經網路或區域迴歸方法等方式著手使預測模式更準確。
5. 對於Westergaard公式中的圓形荷重假設若能重新加以推導使之成為方形荷重區域，則對鋪面中的應力的了解與預估將更加有益。
6. 對於綴縫筋的應力傳遞效率本研究為加以仔細的研究，這也是本研究未加以解決的問題，此外不同的基底層模式對於應力亦會有影響，因此對於不同基底層模式的應力反應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。

五、參考文獻

1. 顏聰,林炳森與蕭伯聰,剛性鋪面設計本土化研究,交通部台灣區國道興建工程局,書籍編號 026.
2. 朱照宏、姚祖康,"剛性鋪面設計方法的研究",中華民國第七屆鋪面工程學術研討會論文集,淡水,1993.
3. 蘇子建,接縫式混凝土路面力學行為之初步研究,國立中興大學土木工程研究所碩士論文,台中,1992.
4. 蔡攀鰲,公路工程學,國立成功大學土木工程系,台南,1992.
5. 賴森榮,台灣北部第二高速公路剛性路面設計和建造之特性,第五屆路面工程學術研討會論文集, pp. 11-44, 1991.
6. Becker, R. A., J. M. Chambers, and A. R. Wilks, The New S Language - A Programming Environment for Data Analysis and Graphics, The Wadsworth & Brooks/Cole Computer Science Series, AT&T Bell Laboratories, 1988.
7. Bradbury, R. D., Reinforced Concrete Pavements, Published by the Wire Reinforcement Institute, Washington, D. C., 1938.

8. Darter, M. I., "Report on the 1992 U.S. Tour of European Concrete Highways ," Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-SA-93-012, 1993.
9. Friedman, J. H. and W. Stuetzle, "Projection Pursuit Regression," Journal of the American Statistical Association, Vol. 76, 1981, pp. 817-823.
10. Heinrichs, K. W., M. J. Liu, M. I. Darter, S. H. Carpenter, and A. M. Ioannides, "Rigid Pavements Analysis and Design," Report No. FHWA-RD-88-068, Federal Highway Administration., 1989.
11. Highway Research Board, "The AASHO Road Test," Report 5, Pavement Research, Special Report 61E, Publication No. 954, Washington, D.C, 1962.
12. Hogg, A. H. A., "Equilibrium of a Thin Slab on an Elastic Foundation of Finite Depth," Philosophical Magazine and Journal of Science, London, Vol. XXXV., 1944.
13. Huang, Y. H., Pavement Analysis and Design, Prentice-Hall, Inc., 1993.
14. Ioannides, A. M., "Analysis of Slabs-on-Grade for a Variety of Loading and Support Conditions," Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1984.
15. 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.
16. Ioannides, A. M., and R. A. Salsilli-Murua, "Temperature Curling in Rigid Pavements: An Application of Dimensional Analysis," Transportation Research Record 1227, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1989.
17. Jamshid M. Armaghani, et. al., "Temperature Response of Concrete Pavements", Transportation Research Record 1121, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., pp. 23-33, 1987.
18. Jesus Larralde, W. F. Chen, "Estimation of Mechanical Deterioration of Highway Rigid Pavement," Journal of Transportation Engineering, Vol. 113, No. 2, ASCE, March 1987.
19. Korovesis, G. T., "Analysis of Slab-on-Grade Pavement Systems Subjected to Wheel and Temperature Loadings," Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1990.
20. Lee, Y. H., "Development of Pavement Prediction Models," Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1993.
21. Lee, Y. H., M. I. Darter, "Mechanistic Design Models of Loading and Curling in Concrete Pavements," Proceedings, ASCE, Specialty Conference: "Airport Pavements Innovations, Theory to Practice," Edited by J. W. Hall, Jr., Vicksburg, Mississippi, Sep 8-10, 1993, pp.1-15.
22. Lee, Y. H., M. I. Darter, "New Modeling Techniques for Pavement Predictions," Proceedings, The Seventh National Conference on Pavement Engineering, Tamkang University, Taipei, R.O.C., 1993, pp.297-309.
23. Majidzadeh, K., "Mechanistic Approach to Rigid Pavement Design," Resource International Inc., Columbus, Ohio, USA
24. Meyer, S.T., Data analysis for Scientists and Engineers, John-Wiley & Sons, Inc., New York, 1976.
25. Microsoft, "Microsoft FORTRAN PowerStation Professional Development System," User's and Reference Manuals, Microsoft (Taiwan) Corp., 1994.
26. Oglesby, C. H. and R. G. Hicks, Highway engineering, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1982, p.p.737--741.
27. Salsilli-Murua, R. A., "Calibrated Mechanistic Design Procedure for Jointed Plain Concrete Pavements," Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1991.
28. Sanders, D. H., R. J. Eng and A.F. Murph, Statistics--A Fresh Approach, McGraw-Hill Book Company, New York, 1985.
29. Sargious, M., Pavements and Surfacing for

- Highways and Airport, Applied Science Publishers Ltd., Essex, England, 1975.
30. Statistical Sciences, Inc., S-PLUS for Windows: User's manual, Vol. 1 and Vol. 2, Seattle, Washington, March 1993.
 31. Stock A. F., et. al., Concrete Pavement, Elsevier Applied Sciences Publisher Ltd., London, 1988.
 32. Tabatabaie-Raissi, A. M., "Structural Analysis of Concrete Pavement Joints," Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1978.
 33. Teller, L. W. and E. C. Sutherland, "The Structural Design of Concrete Pavements," Part 2 - Observed Effects of Variations in Temperature and Moisture on the Size, Shape, and Stress Resistance of Concrete Pavement Slabs, Public Roads, Vol. 16, No. 9, November 1935.
 34. Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., Theory of Elasticity, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, N.Y., 1970.
 35. Ullidtz, P., Pavement Analysis, Elsevier Science Publisher B.V., Amsterdam, 1987.
 36. Westergaard, H. M., "Analysis of Stresses in Concrete Pavements Due to Variations of Temperature," Proceedings of the Sixth Annual Meeting, Vol. 6, Highway Research Board, National Research Council, 1926, pp. 201-217. Also in Public Roads, Vol. 8, No. 3, May 1927.
 37. Westergaard, H. M., "Analytical Tools for Judging Results of Structural Tests of Concrete Pavements," Public Roads, Vol. 14, No. 10, December 1933, pp. 185-188.
 38. 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.
 39. Westergaard, H. M., "New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields," American Society of Civil Engineering (ASCE), Transactions, Vol. 113, 1948, pp. 425-444,
 40. Westergaard, H. M., "Stresses Concentrations in Plates Loaded over Small Areas," American Society of Civil Engineering (ASCE), Transactions, Vol. 108, 1943, pp. 831-886,
 41. White, F. M., Fluid Mechanics, 2nd Edition, McGraw-Hill, New York, N.Y., 1986.
 42. Yang, N. C., Design of Functional Pavements, McGraw-Hill Book Company, New York, 1972.
 43. Yoder, E. J. and M. W. Witzczak, Principles of Pavement Design, Second Edition, John-Wiley & Sons, Inc., New York, 1975.
 44. Zienkiewicz, O. C., The Finite Element Method, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, N.Y., 1977.
 45. 李英豪、李英明、陳建桓，「運用因次分析的方法對混凝土鋪面角隅應力之理論評估」，期末報告，專題研究計畫編號 NSC83-0410-E032-009，NSC84-2211-E032-022，行政院國家科學委員會，中華民國八十四年七月。

六、圖表

圖一 接縫式混凝土鋪面版之各種情況