

# 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： NSC85-2211-E-032-010

執行期限： 84/08/01~85/07/31

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、投影追逐迴歸分析。)

本研究計畫對影響混凝土(剛性)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。厚度設計之考量乃在避免如橫向、縱向、及角隅裂縫等混凝土鋪面之主要破壞型態。因此，本計畫首先必需對混凝土鋪面在受到上述載重型態下可能產生最大之內部、邊界、及角隅撓曲應力，做通盤性的探討。以期能對長久以來國內、外剛性鋪面設計人員所喜用之波特蘭水泥協會(PCA)與美國聯邦飛航總署(FAA)等設計方法提出具體的修正建議。

本計畫採用美國伊利諾大學所發展之有限元素法程式(ILLI-SLAB)，運用因次分析並配合實驗設計之原理，慎選所欲預先執行之不同鋪面組合，並進而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。而使用該有限元素法程式計算求得之臨界撓曲應力，亦將與國內剛性路面試驗路段現有之監測及相關研究資料作比較，以更有效驗證該程式對應力預估之可靠性。

本計畫並配合最新之統計迴歸方法，建立各臨界該應力之預估模式，以便利各應力之快

速計算。本計畫亦建立一非常容易使用的個人電腦程式(TKUPAV)，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。以期將所得之研究成果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。

## 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).)

This research project first conducted com-prehensive and in-depth investigations on the primary components for concrete (rigid) pavement thickness design. These include gear configuration, single axle, tandem axle, tridem axle, multiple wheels, wheel spacing, total wheel load, tire pressure, thermal curling due to a linear temperature differential, widened outer lane, and tied concrete shoulder, etc. The development of the thickness design procedure is distress prevention oriented. The distresses considered are transverse, longitudinal cracking, and corner

breaks. Thus, a complete treatment of the interior, edge, and corner stresses of concrete pavements under the aforementioned loading conditions has to be conducted. Concise modification recommendations of the most widely-adopted PCA and FAA design procedures were provided.

The ILLI-SLAB finite element program, developed over the past 15 years at the University of Illinois was used for the analysis. With the incorporation of the principles of dimensional analysis and experimental design, a series of finite element factorial runs over a wide range of pavement designs was carefully selected and conducted. Consequently, stress adjustment curves of the concrete pavement slab were developed to help researchers and engineers have better understanding of the stress occurrence. The resulting finite element stress was compared to some field-monitored data from the rigid pavement test sections of the Taiwan's Second Freeway to more effectively validate the program's applicability for stress estimation.

A modern statistical regression technique was utilized to develop various stress predictive models for different situations for rapid stress computation in a later time. The research findings were incorporated into a user-friendly computer program (TKUPAV) to facilitate automatic stress calculations. Together with Miner's cumulative fatigue damage hypothesis and some existing fatigue testing results of laboratory concrete beams, a new mechanistic-based thickness design procedure of jointed concrete pavements was developed. This computer program will not only instantly perform critical stress calculations, but it may also be utilized for various structural analyses and designs of rigid pavements. It is expected that the research findings will be efficiently and widely applied in many more practical pavement problems. Furthermore, the successful completion of this project will also promote mutual understandings and idea exchanges of both our pavement academic and engineering communities.

## 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。

並期望本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快速、方便、精確而簡易。

本計畫將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，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。

此外，為比較本研究之預估應力值與實際道路現地監測應力值之異同，本計畫亦從事北二高的剛性鋪面道路試驗之現地試驗資料與 ILLI-SLAB 程式分析值之相互驗證工作。

本計畫以上述之應力分析方式修改 PCA 剛性鋪面厚度設計法。PCA 設計法並未將溫差所產生的翹曲應力考慮在其中，而翹曲應力對剛性鋪面所造成的影響也不容忽視，因此本研究則以 PCA 剛性鋪面厚度設計法之程序，將翹曲與載重所產生之複合應力一併考慮，而建立新的應力分析方法與厚度設計法。

### 3.2 研究成果

本計畫完成了混凝土鋪面之中央、邊界、及角隅等臨界應力之新的分析方式。此種分析方式考慮輪間距、軸間距、外車道加寬、混凝土路肩與多層版等因素造成混凝土鋪面的應力折減影響，並考慮溫差與載重複合作用時之應

力調整。具體的研究成果綜合歸納如下：

1. 以因次分析的原理並引進應力調整因子之概念，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並之找出真正控制因子。以所發現的控制因子做一系列的有限元素分析，完成資料庫建立。
2. 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。並完成在單層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。
3. 在驗證 ILLI-SLAB 應力分析程式與國內北二高剛性路面道路試驗的應力監測值時，由良好的驗證結果確立 ILLI-SLAB 預估之正確性。因本研究所建立之預估模式之資料庫是由 ILLI-SLAB 所建立，因此由驗證工作也確立預估模式的適用性。
4. 以此應力分析之電腦程式為藍本，配合 Miner's 累加疲勞破壞之假設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，以協助工程從業人員從事各種不同剛性鋪面結構之分析與設計工作。並根據各項因素，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。
5. 完成一非常容易使用的個人電腦程式 (TKUPAV 程式) 的編輯。將各階段之研究成果彙整，研究成果自動化，便於混凝土鋪面各臨界應力之快速運算。

## 四、結論與建議

### 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。以往利用等值載重區域半徑(ESAR)的觀念，Salsilli 的研究求得之等值載重半徑則較難推斷範圍。而本研究所

應用之調整因子的觀念不同於載重區域半徑，乃是調整因子 R 值之範圍較易推斷是否正確。而本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。

對於控制參數的指認與驗證方面，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與角隅應力的情況。控制參數經驗證後，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。

本研究利用投影追逐迴歸分析法所建立分析與建立預估方程式組，將可方便預估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邊緣、中央、角隅應力分析以及各種載重組成與環境因素對混凝土鋪面應力的影響。利用上述載重組成與環境因素的各項調整因子預估模式便可以對 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，對於有限版長或是有溫差作用的鋪面版，則可利用本研究所建立之影響因子進行調整。

因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。

在應力驗證的步驟中，本研究取用北二高剛性路面道路試驗的應力監測值與 ILLI-SLAB 應力分析程式所分析的應力值做比較與驗證。由研究的驗證結果相當吻合的結果來看，可知 ILLI-SLAB 應力分析程式對於模擬實地鋪面版的應力反應的能力相當的良好，顯示此程式相當適合於進行剛性鋪面版的應力分析。

但誠如本研究所述，像這類以有限元素法來分析鋪面版的應力程式使用上並不容易，適用性並不高。而本計劃所做的研究正是以 ILLI-SLAB 程式所建立的資料庫以新的迴歸技術來建立應力調整因子，藉這些調整因子便能與 Westergaard 的公式解相結合，達到快速求解的目的。也因為此驗證工作的完成，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。

## 4.2 建議

1. 對於接縫式混凝土鋪面中調整因子(R 值)目前已建立載重單獨作用、溫差複合作用的情況以及各種輪軸組成與鋪面環境的 R 值。若對於有溫差作用的其他情況加以調整，則應力的預測將更加準確。
2. 在國內可以先試行採用已經發現的控制因子，並利用於鋪面現地反應的模擬。
3. 本研究所採用之投影追逐迴歸分析法使用上頗具複雜，若要達到最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，或以由資料庫中以內插直接求解的方式。
4. 對於 Westergaard 公式中的圓形荷重假設，若能重新推導使之成為方形荷重區域則對鋪面應力的了解與預估將更有益。
5. 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，目前載重與溫差的複合作用的預估模式是以單層版的資料所建立，若能在多層版的狀況加以考慮並配合現地資料的驗證將是未來研究的方向。
6. 對於所建立的厚度設計方法若適當的加以修改，並配合 FAA 的設計考量，未來將可應用在飛機場跑道的厚度設計。

## 五、參考文獻

1. Bradbury, R. D., Reinforced Concrete Pavements, Published by the Wire Reinforcement Institute, Washington, D. C., 1938.
2. Friedman, J. H. and W. Stuetzle, "Projection Pursuit Regression," Journal of the American Statistical Association, Vol. 76, 1981, pp. 817-823.
3. Highway Research Board, "The AASHO Road Test," Report 5, Pavement Research, Special Report 61E, Publication No. 954, Washington, D.C, 1962.
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. 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.
6. Lee, Y. H., "Development of Pavement Prediction Models," Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1993.
7. Lee, Y. H., M. I. Darter, "Loading and Curling Stress Models for Concrete Pavement Design," Transportation Research Record 1449, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1994, pp. 101-113.
8. Lee, Y. H., M. I. Darter, "New Predictive Modeling Techniques for Pavements," Transportation Research Record 1449, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1994, pp. 234-245.
9. 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.
10. 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,
11. 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。