

相臨版塊與溫度翹曲對剛性鋪面回算之影響

Adjacent Slabs and Temperature Curling Effects on Rigid Pavement Backcalculation

計畫編號：NSC89-2211-E-032-032

執行期限：89年8月1日至90年7月31日

主持人：李英豪 淡江大學土木工程學系教授

一、中文摘要

美國長程鋪面績效研究曾利用各種以多層彈性理論為基礎的回算程式，對一般鋪面研究的所有試驗路段作極為廣泛的回算與再回算分析，發現在分析剛性鋪面現地的撓度量測值時，其中絕大部份的困難極有可能肇因於溫差翹曲與路基喪失支承等因素。本研究主要目的在深入探討剛性鋪面在多版塊的狀態與實際的溫差效應下對鋪面的撓度與回算之影響。本研究主要以 ILLI-SALB 有限元素程式進行分析剛性鋪面於緊密液體基礎模式與彈性固體基礎模式下之結構反應。在分析相鄰版塊之荷重傳遞效應時，因 ILLI-SLAB 程式之綴縫筋之彎曲勁度矩陣有錯誤，所以本研究以剪力荷重傳遞來分析此效應。研究中並發現 ILLI-SALB 程式在彈性固體基礎模式下分析溫差時，程式中存在一些問題，研究中已進行修正與驗證。本研究亦運用因次分析之原理，辨識並驗證彈性固體基礎模式下的載重與溫差之無因次力學變數，以分析有限元素程式之結果並建立無因次撓度資料庫。本計畫並配合統計迴歸方法 - 小區域迴歸法，建立各撓度修正關係之預估模式，並建議包括 AREA 面積指標與修正撓度比回算法的新回算流程，以利各層彈性模數值之快速回算。本研究並以 Visual Basic 程式建立各相關分析之圖形介面，擴充原有的 TKUBAK 鋪面回算個人電腦程式之功能，以真正落實研究成果之整合與自動化，並可嘗試應用於實際之鋪面回算問題上。

關鍵詞：鋪面回算，非破壞性撓度試驗，溫度翹曲，有限元素分析，因次分析，預估模式，統計迴歸分析，小區域迴歸法。

Abstract

Extensive re-backcalculation analysis of the test

sections of the Long Term Pavement Performance (LTPP) general pavement studies indicated that extreme difficulties in interpreting in situ deflection measurements of rigid pavements has been encountered, probably due to the effects of temperature curling, moisture warping and loss of subgrade support. Thus, the effects of adjacent slabs and temperature curling on rigid pavement backcalculation will be investigated in this study. The ILLI-SLAB finite element program was used to analysis dense liquid and elastic solid foundation model. The effect of adjacent slabs will be treated as having shear load transfer only for both doweled and undoweled pavements due to the existing problems of dowel load transfer formulation of the ILLI-SLAB program. To allow the analysis of a curled slab resting on an elastic solid foundation, some proper corrections will have to be made and verified in the program code. Additional dimensionless variables will be identified and verified for the effects of loading plus curling for elastic solid foundation using the principles of dimensional analysis. Many series of finite element factorial runs over a wide range of pavement designs will be carefully selected and conducted. Prediction models for deflection adjustment factors at different pavement conditions will be developed using projection pursuit regression and local regression techniques to more accurately estimate actual pavement responses. Different backcalculation approaches will be proposed including the use of the most widely used AREA deflection basin concept and modified deflection ratio procedures. With the successful capability enhancements of the TKUBAK computer program, it is expected that the research findings will be efficiently and widely applied in many more practical pavement problems.

Keywords : Pavements Backcalculation, Nondestructive Deflection Testing, Thermal Curling, Finite Element Analysis, Dimensional Analysis, Prediction Model, Statistical Regression Analysis.

二、計畫緣由與目的

近年來鋪面非破壞性檢測與彈性模數回算一直是學術研究極為熱門的話題，各種相關回算流程與電腦程式亦相繼建立。目前技術較為成熟且廣為採用的鋪面回算程式，絕大多數均是以多層彈性理論為基礎且是基於無限長尺寸假設的柔性鋪面而設計。然而在剛性鋪面的分析方面，從最早根據 Westergaard 無限版長之理論求解開始，也由各個研究發展了許多回算程序，這些回算方式亦有眾多之使用上的限制。由於缺乏更為實際的剛性鋪面回算方法，美國長程鋪面績效研究(LTPP)於 1997 年曾利用各種以多層彈性理論為基礎的回算程式，對一般鋪面研究(General Pavement Study, GPS)的所有試驗路段作極為廣泛的回算與再回算(Re-Backcalculation)分析，然而回算結果並不是相當成功。尤其在處理剛性鋪面現地的撓度量測值時，發現其中絕大部份的困難極有可能肇因於溫差翹曲與路基喪失支承等因素。因此，對於能更實際地模擬鋪面版有限的尺寸、及可能因線性溫差而產生局部喪失路基支承之情形，則仍有待更進一步分析。

因此，本研究主要目的在於深入探討剛性鋪面在多版塊的狀態與實際的溫差效應下對鋪面的撓度與回算之影響，並以過去研究成果為基礎擴充現有回算程式之功能，以解決現有回算程式在實際工程應用上之限制與困難。

三、研究方法與過程

本計畫擬針對國內外現有剛性鋪面回算程式的一些明顯缺點，做理論的研究改進，並擬深入探討相鄰版塊與溫差效應之結構反應特性及對鋪面撓度量測與回算之影響，建立無因次剛性鋪面回算資料庫，利用最新的統計迴歸方法建立撓度修正回算模式，再與現有的接縫式混凝土鋪面回算程式(TKUBAK)做一全盤性之整合。

3.1 整合研究與修正回算程序

本研究首先探討剛性鋪面回算之方法，經由國內外相關之文獻蒐集與研究整合等工作，確立各種剛性鋪面回算方式所使用的理念、方法、步驟與其所建立的程式，並討論其優缺點與諸多限制。本計劃整合研究成果，對回算流程提出修正之建議，求得更適當且較佳之回算程序。

3.2 ILLISLAB程式之更新與驗證

美國伊利諾大學香檳校區所發展出之 ILLI-SLAB 有限元素法程式，其在分析鋪面結構上的能力甚佳，在許多相關的研究中被證實為分析剛性鋪面中最佳的有限元素法程式。本研究亦採用 ILLI-SLAB 有限元素法程式，作為建立回算模式的基礎。然而，ILLI-SLAB 程式由於需要大量記憶體與運算速度使得程式本身有諸多限制，因此本研究首先針對本程式進行再次之編譯，擴增程式本身之運算記憶體以增進研究工作的效率。

本研究在編譯過程中發現程式碼本身有一些語法上的錯誤，研究中已將其修正。再者，在研究過程中發現本程式進行彈性固體基礎模式的溫差分析時有誤，經本研究之修正並加以驗證，已確立重新編譯的程式可精確的分析在彈性固體基礎模式下的溫差反應。

3.3 影響溫差之無因次參數

根據以往之分析研究得知，在溫式基礎上之單一混凝土版受到單輪載重與溫差翹曲之複合作用時，其結構反應特性可以公式 1 表示，其中 σ 與 q 為版的彎曲應力與路基土壤之垂直應力、 δ 為版的面層撓度值、 α 為版的熱膨脹係數、 ΔT 為版頂與版底之溫差、 γ 為版的單位重、 k 為路床反力模數、 r 表示版的相對勁度半徑、 W 與 L 表示版的尺寸。公式 2、3 之無因次參數 D_p 與 D_x 分別代表載重效應與線性溫差複合作用的影響及自重與線性溫差複合作用的影響間的互制參數。

$$\frac{t}{E}, \frac{uh}{k^2}, \frac{qh}{k^2} = f\left(\frac{a}{h}, r\Delta T, \frac{L}{h}, \frac{W}{h}, \frac{\alpha h^2}{k^2}, \frac{Ph}{k^4}\right) \quad (1)$$

$$D_x = \frac{\alpha h^2}{k^2} \quad (2)$$

$$D_p = \frac{Ph}{k^4} = 12(1 - \nu^2) \frac{P}{Eh^2} \quad (3)$$

本研究以相同之觀念應用在彈性固體基礎的模式上，定義無因次 D_{pe} 、 D_{xe} 的控制參數(公式 4、5)。經過一系列的因次分析加以驗證，結果顯示此二個控制參數運用於彈性固體基礎模式對於線性溫差修正因子有著顯著的效果，此結論對於剛性鋪面的回算方式有重要的助益。因此，本研究建議分析彈性固體基礎模式下的線性溫差時，可應用公式 6 之定義。

$$D_{xe} = \frac{\alpha h^2}{E_s \delta_e} \quad (4)$$

$$D_{pe} = \frac{Ph}{E_s \delta_e^3} \quad (5)$$

$$\frac{t}{E_s \delta_e^2}, \frac{uh}{E_s \delta_e}, \frac{qh}{E_s \delta_e} = f\left(\frac{a}{\delta_e}, r\Delta T, \frac{L}{\delta_e}, \frac{W}{\delta_e}, \frac{\alpha h^2}{E_s \delta_e}, \frac{Ph}{E_s \delta_e^3}\right) \quad (6)$$

3.4 相鄰版荷重傳遞之分析

兩相鄰版塊由於荷重傳遞效應的關係使得應力與撓度有一定程度的折減，圖一為邊緣荷重下兩相鄰版之撓度反應示意圖。Korovesis 在其研究中以荷重傳遞因子 ($A_{eg}/k_l, D_{/sk}$) 建立撓度傳遞因子 LTE 的迴歸公式 7，其中 LTE 表示自由端撓度與荷重端撓度之比值。

本研究以此觀念為基礎，定義荷重傳遞之撓度修正因子 R_{LTE} ，並建立公式 8 之撓度修正模式。研究中以 ILLI-SLAB 程式建立一系列的分析撓度值，並以此資料庫建立 R_{LTE} 與 LTE 的迴歸公式 9，其結果如圖二所顯示其間有相當良好之關係。

$$LTE_u = \frac{1}{0.01 + 0.012 \left(\frac{AGG}{k}\right)^{-0.849}} \quad (7)$$

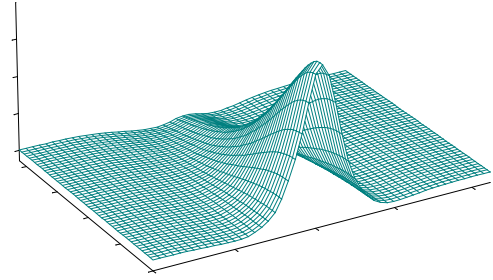
$$u_{LTE} = u \times R_{LTE} \quad (8)$$

$$R_{LTE} = \frac{u_m}{u_s} = f(LTE_u)$$

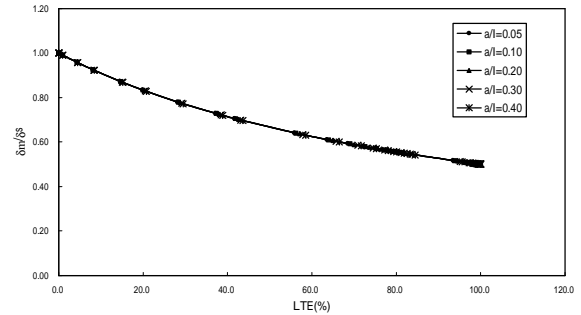
$$LTE_u = \frac{u_u}{u_l} \times 100\%$$

其中 δ 為理論解求得之撓度值、 δ_m 為有限元素法求得之多版撓度值、 δ_s 為有限元素法求得之單版撓度值、 δ_u 為自由端撓度值、 δ_l 為荷重端撓度值、 R_{LTE} 表示荷重傳遞之撓度修正因子。

$$R_{LTE} = 0.00003178733 \times LTE_u^2 - 0.008069961 \times LTE_u + 0.992127 \quad (9)$$



圖一、邊緣荷重下兩相鄰版之撓度示意圖



圖二、荷重傳遞修正因子關係圖

3.5 迴歸模式之建立

1. 鋪面撓度資料庫之建立

本研究以 MODULUS 程式資料庫回算之概念與因次分析原理，配合所辨識之無因次力學變數，慎選最佳之鋪面組合，執行一系列有限元素分析，並構建各種無因次鋪面撓度之資料庫，以做為鋪面回算之系統核心。本研究所建立的資料庫包含荷重傳遞修正因子，溫氏基礎模式與彈性固體基礎模式的中央、邊緣、角隅荷重之版尺寸修正因子，溫氏基礎模式與彈性固體基礎模式的荷重位置之修正因子以及線性溫差修正因子等模式之撓度資料。

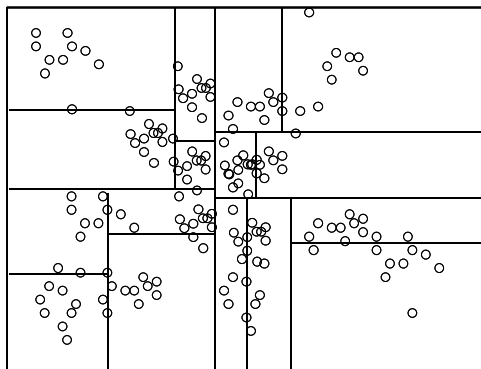
2. 小區域迴歸法(LOESS)之應用

本研究採用最新統計迴歸方法 - 小區域迴歸法 (Locally-Weighted Regression, LOESS) 來建立相關撓度修正因子，以確立模式最佳化之精確度。LOESS 為一種將多變數迴歸面找出最佳反應面的程序，其進行步驟乃將變數依權重區分為許多獨立的小區域如圖三所示，接著再對每一個區域做小區域平均 (Local Smoothing) 或是進行一次或二次線性迴歸，

因此每一個小區域均有其迴歸曲面，並將每一個小區域結合而成為一個模式，此模式即為此變數的迴歸值。

因此 LOESS 之迴歸程序並不建立類似一般之迴歸公式，而是建立一個類似資料庫的檔案，其預測的方式是給予模式一組輸入變數，預測程序會找出變數落在那一小區域內，再將此區域的小區域平均或是一次、二次線性迴歸值當作為預測值反應給預測程序。雖然此分析程序較為複雜，但因其可考慮到變數資料相互間最細微的關係，應用在諸多變數的複雜回算流程是最為佳的方式。

本計劃以 LOESS 之迴歸方式分析研究中所建立的鋪面撓度資料庫，將版尺寸修正因子、荷重位置之修正因子以及線性溫差修正因子等模式加以分析。分析結果顯示 LOESS 可解釋到微小量的變化，亦由分析結果得知此迴歸方式類似一資料庫，若要達到理想的精確度必須建立大量的資料，而這也是 LOESS 迴歸方式所使用的精神，若使用時能掌握此重點，分析也易達到最佳的精度。



圖三、LOESS 小區域分割示意圖

3.6 TKUBAK程式之擴增

本研究在早期已建立一剛性鋪面之回算程式 TKUBAK 之雛形，擴充 TKUBAK 程式為本計劃中的工作重點之一。首先，本研究以 Losberg 的撓度公式解為理論基礎，利用 Fortran 語言編譯類似 ILLI-BACK 程式之無限版回算程式 - EK，經分析與驗證之確認，證實 EK 程式已擁有 ILLI-BACK 程式之功能，研究中已將 EK 無限版回算程式擴增至 TKUBAK 程式中。再者，本計劃將研究成果、鋪面無因次撓度資料庫、無因次修正預估模式

整合與自動化融入 TKUBAK 程式中，以便將之應用在更多實際的鋪面回算問題上。未來更可將小區域迴歸法直接構建於程式中，使得回算分析不受迴歸程式之限制，以便於鋪面撓度預測與鋪面回算的快速運算。

四、結論與建議

4.1 結論

1. 本研究整合各種剛性鋪面回算方式，並討論其優缺點與諸多限制，針對回算流程提出修正之建議，求得更適當之回算程序。
2. 本研究發現 ILLISLAB 程式中有多處錯誤，研究中已將其修正並加以驗證，經修正後的程式已證實可精確地分析在彈性固體基礎模式下的溫差反應。
3. 本計劃在彈性固體基礎的模式上定義無因次 D_{pe} 、 D_{ve} 的控制參數。經因次分析之驗證，結果顯示此二個控制參數運用於彈性固體基礎模式對於線性溫差修正因子有著顯著的效果。
4. 關於相鄰版塊之荷重傳遞效應，本研究建立無因次調整因子 R_{LTE} 與撓度傳遞因子 LTE 之關係，其分析結果甚佳。
5. 本研究利用 MODULUS 程式資料庫回算之概念及因次分析之原理，配合無因次力學變數，執行一系列有限元素分析，構建各種無因次鋪面撓度之資料庫。再配合最新之統計迴歸方法小區域迴歸法與模式構建工具，建立各相關之撓度修正預估模式算。
6. 本研究以 Losberg 的撓度公式解為理論基礎，利用 Fortran 語言編譯無限版回算程式 - EK，經分析與驗證之確認，證實 EK 程式擁有良好之分析功能，研究並將其擴增至 TKUBAK 程式中。
7. 本計劃將研究成果、鋪面無因次撓度資料庫、無因次修正預估模式整合與自動化融入 TKUBAK 程式中，以擴增程式之功能。

4.2 建議

1. ILLI-SLAB 程式在綴縫筋的彎矩勁度矩陣，與彈性固體基礎模式下分析多版時仍有一些錯誤，在未來可作為往後研究改進的方向，或者朝向以三為有限元素分析方式進行更深入之研究。
2. 本研究目前將相鄰版與線性溫差之影響分

開考慮，而多版與線性溫差交互作用下的影響，仍有其值得探討之空間，在此情況下，溫差效應受到相鄰版塊的束制對回算之影響，可為往後研究的方向。

3. 本研究目前將 LOESS 迴歸程序與 TKUBAK 程式分開執行，本單位目前正積極克服技術上之問題，在未來可將 LOESS 迴歸程序併入 TKUBAK 程式中，以便於鋪面撓度預測與鋪面回算的快速運算。
4. 本研究中所應用之 LOESS 迴歸方式若欲達到良好之精度必須使用較為完整之資料庫，建議未來可使用相同之研究程序，建立更為完整之撓度資料庫，進行 LOESS 迴歸以達到更精確之分析。
5. 本研究之回算方式乃是靜態回算之理念，但目前運用之非破壞性檢測大部分為動態之檢測結果，回算結果將會高估。目前 AASHTO 設計手冊中建議以小於 0.33 之調整因子進行調整，未來應可針對此問題進行研究，發現兩者間之較精確之關係。

五、參考文獻

1. AASHTO Guide for "Design of Pavement Structures," Published by the American Association of State Highway and Transportation Officials 1993.
2. Croveti, J. A., "Design and Evaluation of Jointed Concrete Pavement Systems Incorporating Free Draining Base Layers," Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, Illinois, 1994.
3. Cleveland, Devlin, Grosse, Shyu, "Fortran Routines for Locally - Weighted Regression", 31 Aug. 1990. [ftp research.att.com]
4. Hall, K. T., "Performance, Evaluation, and Rehabilitation of Asphalt-Overlaid Concrete Pavements," Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, Illinois, 1991.
5. Ioannides, A.M. Y. H. Lee, and M. I. Darter, "Control of Faulting Through Joint Load Transfer Design," Transportation Research Record 1286, 1990, pp.49-56.
6. Ioannides, A. M., "Analysis of Slabs-on-Grade for a Variety of Loading and Support Conditions," Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana 1984.
7. Korovesis, G. T., "Analysis of Slab-on-Grade Pavement Systems Subjected to Wheel and Temperature Loadings," Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1990.
8. Losberg, A. "Structurally Reinforced Concrete Pavements," Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden (1960).
9. Lee. Y. H., Lee C. T., and Bair J. H. "Modified deflection ratio procedures for backcalculation of concrete pavements." ASCE June 1998, pp.480-495
10. Lee, Y. H., "Development of Pavement Prediction Models," Ph.D Thesis, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, Illinois, May 1993.
11. Westergaard, H. M. (1926). "Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis." Public Roads, 7(2), pp. 25-35. 2.
12. 陳建桓、李英豪，"由面層撓度值回算鋪面彈性模數的初步研究"，中華民國第八屆鋪面工程學術研討會論文輯(已接受)，台北國際會議中心，中原大學，中華民國八十四年十二月六日至八日。
13. 李英豪、李朝聰、白建華 (1997). "接縫式混凝土鋪面回算程式之建立" (Development of a Backcalculation Program for Jointed Concrete Pavements), 期末報告，國科會計畫編號 NSC86-2211-E-032-007，淡江大學，民國八十五年七月三十一日。
14. 張德文，"鋪面材料勁度與厚度對撓度法之影響評估"，第六屆路面工程學術研討會論文集，pp.457-480, 1991.
15. 周昭岐，"非破壞性鋪面檢測知現場初步評估"，碩士論文，淡江大學土木工程研究所運輸工程組，台北縣淡水 1994。
16. 林炳森、李泰明、吳元廷及鄒譽名，"路面評審儀應用於剛性鋪面回算法"，中華民國第八屆鋪面工程學術研討會論文輯，台北國際會議中心，中原大學 1995。