

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 機場鋪面平坦度評估指標研擬

計畫類別： 個別型計畫

計畫編號： NSC93-2211-E-002-050-

執行期間： 93 年 08 月 01 日至 94 年 09 月 30 日

執行單位： 國立臺灣大學土木工程學系暨研究所

計畫主持人： 周家蓓

報告類型： 精簡報告

報告附件： 出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式： 本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 11 月 10 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 機場鋪面平坦度評估指標研擬

計畫編號：93-2211-E-002-050

執行期限：93.8～94.9

主持人：周家蓓 國立台灣大學土木工程學研究所

### 一、中文摘要

有鑑於鋪面平坦度之重要性，近年來公路鋪面研究領域已有諸多平坦度相關研究完成，然於機場鋪面研究領域則少有研究進行。由於機場鋪面之平坦度值高低直接影響航機於其上滑行時之行駛品質及安全性。平坦度不佳之鋪面將導致航機通過時產生過大之震動，致使機師無法正確判讀儀表各項讀值，不利於飛航安全；且亦會引致之額外垂直動態荷重，經多次重覆影響之後，將使該區域產生永久性之鋪面損壞，因而減少鋪面之服務壽年。

機場鋪面平坦度評估之重點在於利用廣為接受之指標值，明確反映航機所承受之行駛品質。本研究主要目的即為對影響航機乘客舒適性最大之機場鋪面共振波長範圍進行分析、探討目前各種平坦度評估指標於機場鋪面平坦度評估之適用程度，最後進而發展機場鋪面專用之平坦度評估指標。

**關鍵詞：**機場鋪面、鋪面管理、鋪面平坦度、鋪面糙度

### Abstract

Due to the importance of pavement smoothness, many pavement smoothness researches on highway pavement area have been conducted. However, only limited researches have been done in airport pavement area. The smoothness of airport

pavement directly affects the ride quality and safety of the aircrafts taxiing on it. A pavement with poor smoothness will induce an excess vibration on aircrafts while passing it and causes the pilots not be able to recognize the readings from inside the cockpit. It has a negative effect on flight safety. A pavement with poor smoothness will also bring extra vertical loadings. And with repeated passes, it will result in permanent pavement distress and reduces the remaining life of pavement.

The points of airport pavement smoothness evaluation will be the use of wide-accepted index values to reflect the ride quality that the aircrafts experience. The main objectives of this research are to analyze the range of resonant wavelength of airport pavement which will seriously affect the passengers comfort, to assess the suitability of difference smoothness indices on airport pavement, and develop the smoothness evaluation index for airport pavement as the final results.

Keywords: airport pavement, pavement management, pavement smoothness, pavement roughness

### 二、緣由與目的

近年來公路鋪面研究領域已有諸多平坦度相關研究完成，然於機場鋪面研究領域則少有研究進行。由於機場鋪面之平

坦度值高低直接影響航機於其上滑行時之行駛品質及安全性。平坦度不佳之鋪面將導致航機通過時產生過大之震動，致使機師無法正確判讀儀表各項讀值，不利於飛航安全；且亦會引致之額外垂直動態荷重，經多次重覆影響之後，將使該區域產生永久性之鋪面損壞，因而減少鋪面之服務壽年。

此外平坦度不佳之機場跑道鋪面，對航機本身亦有不良之影響，根據波音公司之研究，飛機於起降狀態下，垂直加速度  $0.55g$  時之飛機耗損為  $0.35g$  時之 1000 倍，長久累積之後將增加飛機之疲勞損壞。而當飛機因緊急狀況而需放棄起飛 (abort to take-off) 時，平坦度不佳之跑道鋪面亦將增加飛機所需之煞停距離而導致危險發生。

除對鋪面及航機之影響外，平坦度不佳之跑道鋪面亦容易嚴重影響機師以及飛行旅客之舒適度；此種抱怨多屬立即之反應，然此時機場當局往往缺乏經費以進行立即性整修。

根據以上背景可知，機場跑道鋪面之平坦度檢測工作為一項十分重要之工作。藉由檢測作業之進行，機場管理當局將可完全掌握跑道鋪面之平坦度狀態，其結果將可協助養護單位預先安排養護計畫以及進行即時性小型養護工作，此舉將有助於跑道鋪面壽命之延長、航機結構損傷降低，以及減少機師與乘客之抱怨。

為確實掌握鋪面平坦度之狀況，採用適當之指標進行評估為一必要之工作。於公路鋪面領域，隨著檢測設備之發展，各式評估指標乃因應而生。早期有以加州平坦儀為檢測儀器之縱剖面指標 (Profile Index, PI)；後有適用於反應式平坦儀 (response type road roughness measuring systems, RTRRMSs) 之梅式指標 (Mayer's

Index, MI)；近期則有可適用於目前廣泛使用之慣性式平坦儀 (inertia profiler)，且廣為學術界與實務界廣泛接受之國際糙度指標 (International Roughness Index, IRI)。

但於機場鋪面領域，目前仍未有符合航機操作原理之鋪面平坦度評估指標，故若欲評估機場鋪面平坦度之良莠，只好仍引用專為公路鋪面而發展之國際糙度指標進行評估。

機場鋪面平坦度評估之重點在於利用廣為接受之統一性指標值，明確反映道面使用運具所承受之行駛品質。但因航機之運動行為及結構迥異於公路車輛，國際糙度指標於機場鋪面之適用性仍有待進一步確認。本研究主要目的即為對影響航機乘客舒適性最大之機場鋪面共振波長範圍進行分析、探討目前各種平坦度評估指標於機場鋪面平坦度評估之適用程度，最後進而發展機場鋪面專用平坦度評估指標。

### 三、結果與討論

本研究採用現已廣為各國鋪面產、官、學界廣泛使用之 APRas 軟體進行模擬分析。針對 747-200、747-400、737-200、737-800，以及 MD-11 等五種機型於 10 種不同速度下之 APRas 模擬結果顯示不論為垂直向加速度值或相對鋪面荷重，各機型於各滑行速度下均會於某特定波數時出現峰值，此峰值發生之波數即代表航機在該種鋪面剖面波數會產生共振(resonance)現象，此一波數之倒數即為本研究所欲探討項目之一之共振波長 (resonant wave length)。

以實務角度觀之，若鋪面剖面波形是由此一共振波長所主控，即表示航機將產生較劇烈之垂直向加速度變化與較大之鋪面荷重峰值，加速度之劇烈變化將造成乘客之不舒適感，較大之鋪面荷重峰值則會

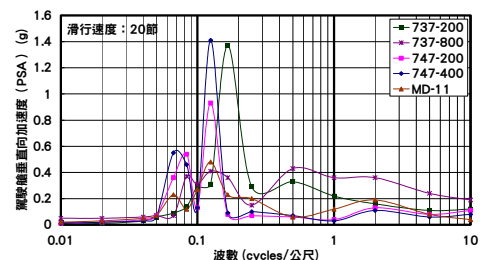
致使鋪面提早損壞；更甚者，垂直向加速度變化所導致之劇烈震盪將導致機師無法清楚判讀儀表讀數，甚會導致航機結構之疲勞損壞。鋪面剖面之波長屬於鋪面之表面特徵，將輪軌跡處剖面線視為一波形分析而得，而與鋪面之結構無關。本研究重點之一即在於分析此一使航機產生共振現象之共振波長所在範圍，機場鋪面於施工及維護時需盡可能避免之。

各種機型之共振發生波數均有隨滑行速度升高而逐漸降低之趨勢。波數降低即代表波長升高，故此一趨勢表示大波長剖面對於高速滑行之航機易產生較不利之影響。此一現象與車輛減速丘所獲致之大寬度減速丘，對高速通過車輛之減速抑制效果較佳之結論可互相印證[101, 102]，顯示大波長剖面同樣對於高速之航機與公路車輛影響較大。

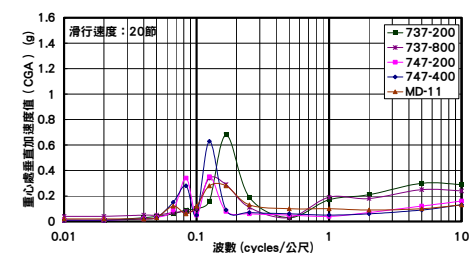
若將不同航機之 PSA、CGA、相對 MGPL，與相對 NGPL 反應進行比較則可發現，於低速時廣體之 747-200 型，以及 747-400 型航機，其於鋪面各種剖面波長所引起之垂直向加速度與相對鋪面荷重值均較窄體之 737-200 與 737-800 型航機略為大；但於中高速以後，窄體 737-200 與 737-800 航機之值則較 747-200 與 747-400 型航機為高；MD-11 型航機之值則介於兩者之間。

進一步探討各速度下之共振波數發生位置可知，在一般航機所常見之滑行速度 10~20 節 (18~36 公里/小時) 範圍內，其主要發生波數約介於 0.1~0.3 cycles/公尺間，換算為波長約等於 3.3~10 公尺間，因此對於一般機場之滑行道與停機坪，需特別注意避免鋪面剖面出現該波長範圍之波形；而速度高於 20 節時 (多數為航機處於起飛加速或降落減速狀態)，其影響波數範圍則介於 0.02~0.1 cycles/公尺間，相對

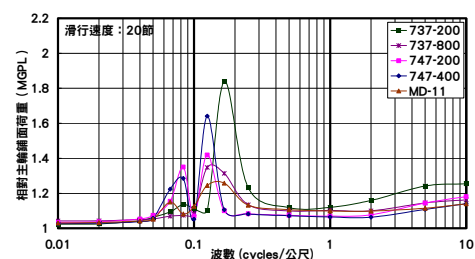
應之波長即為 10~50 公尺間，此則為機場跑道需特別避免之波長範圍。此一共振波長範圍雖廣，但因跑道上各區位通行之航機速度差異大 (於風向穩定情況下，跑道若採同一端點起降時，起飛時航機速度較低之跑道區位恰為降落時速度較高區位)，故均需避免之。



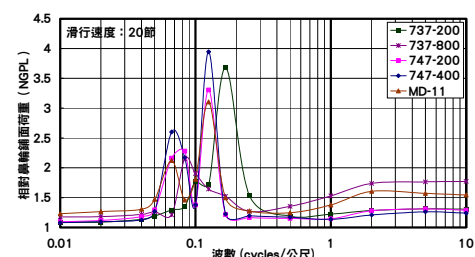
圖一 航機 PSA 與鋪面剖面波數之關係 (滑行速度：20 節)



圖二 航機 CGA 與鋪面剖面波數之關係 (滑行速度：20 節)



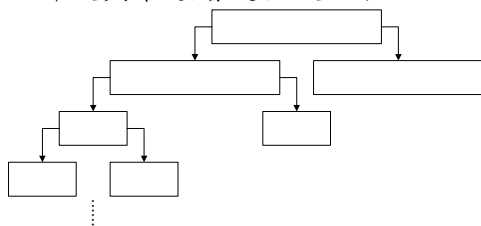
圖三 航機相對 MGPL 與鋪面剖面波數之關係 (滑行速度：20 節)



圖四 航機相對 NGPL 與鋪面剖面波數之關係 (滑行速度：20 節)

鋪面剖面本即屬不規律之波形，且區域平坦度分析較整體平坦度更具實用價值，故可同時獲得空間軸資訊之採用小波理論，較無法獲得此資訊之傳統傅立葉轉換更為適合用於進行鋪面剖面波形解構分析。本研究以小波理論作為指標構建之基礎方法論。

透過小波理論分析法之使用，鋪面剖面資料可層層解構為不同波長之波形組合，其結構如圖五所示。本研究以小波理論分析法中之離散小波轉換 (Discrete Wavelet Transform, DWT) (亦即「多解析度分析」(Multi-Resolution Analysis, MRA) 或「快速小波轉換」(Fast Wavelet Transform, FWT))，原始剖面資料可首先解構為一細部波 (D1) 與一近似波 (A1)，此兩波之組合即為原始之鋪面剖面。解構而得之近似波則又可進一步再解構為一波長為 D1 波長二分之一之第二層細部波 (D2)，與對應之近似波 (A2)。此一解構流程可反覆進行，原始鋪面剖面則為所有細部波與最底層近似波之和。



圖五 小波分析結構示意圖

透過此一分析程序之進行，機場鋪面剖面即可解構為一多種不同波長波形之組合。由於鋪面剖面波長與航機垂直向加速度與荷重反應具有非常明確之關係，經進一步分析，本研究可獲得不同速度下，鋪面剖面波長與航機垂直向加速度和荷重反應之關係，此所得之關係即可用於建立剖面波長、航機速度，以及垂直向反應三變數間之權重係數矩陣，此一矩陣可用於反應不同鋪面剖面波長對於航機垂直向反應之影響性。將依照小波理論解構所得之不同波長範圍之波形，經由此一矩陣之係數予以加權計算，並進行反相波形重組後，所得之新組合波即可反應航機之動態反應特性，此一波形之振幅即為本研究最終所

欲求得之機場鋪面糙度指標 (PRIA)。

本研究以 Daub3 函數作為 PRIA 指標所使用之小波函數，由於機場跑道鋪面與滑行道鋪面之航機慣行速度有所差異，本研究分別針對跑道與滑行道研擬專用之 PRIA 指標，訂名為 PRIA-R 與 PRIA-T，如式 (1) 與式 (2) 所示。其經驗證可明確得知本研究所發展之指標，對於航機垂直向反應影響較鉅之鋪面剖面波長範圍，的確亦具有較高之輸出值，顯示本研究所發展之評估指標確實可用於機場鋪面平坦度狀況之評估。

$$PRIA-R = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^8 C_{R,n} D_n \quad (1)$$

$$PRIA-T = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^8 C_{T,n} D_n \quad (2)$$

其中，

PRIA-R：機場跑道鋪面糙度指標，  
單位：公尺/公里 (m/km)

PRIA-T：機場滑行道鋪面糙度指標，單位：公尺/公里  
(m/km)

$L$ ：PRIA 計算平均長度，單位：公里 (km)

$D_n$ ：第  $n$  層細部波，單位：公尺 (m)

$n$ ：細部波層級

$C_{R,n}$ ：PRIA-R 第  $n$  層細部波總和權重係數 (速度範圍：10~100 節)

$C_{T,n}$ ：PRIA-T 第  $n$  層細部波總和權重係數 (速度範圍：10~20 節)

為便利此一指標之計算工作，本研究並以 Visual Basic 為程式語言，發展一自動化指標分析程式，定名為：機場鋪面糙度評估軟體 (Pavement Roughness Evaluation Software for Airports, PRESA)。

#### 四、參考文獻

- 1- “Standard Terminology Relating to Traveled Surface Characteristics,” ASTM E867-95a, ASTM International, 1995.

- 2- Janoff, M. S., J. B. Nick, and P. S. Davit Ketron, "Pavement Roughness and Rideability," NCHRP Report 275, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., 1985.
- 3- Gillespie, T. D., M. W. Sayers, and L. Segel, "Calibration of Response-Type Road Roughness Measuring Systems," NCHRP Report 228, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., 1980.
- 4- Richards, L. G., and I. D. Jacobson, "Ride Quality Evaluation I: Questionnaire Studies of Airline Passenger Comfort," *Ergonomics*, Vol.18, No.2, pp. 129 – 150, 1975.
- 5- Jacobson, I. D., and L. G. Richards, "Ride Quality Evaluation II: Modeling of Airline Passenger Comfort," *Ergonomics*, Vol.19, No.1, pp. 1 – 10, 1976.
- 6- Richards, L. G., and I. D. Jacobson, "Ride Quality Evaluation III: Questionnaire Results of a Second Flight Programme," *Ergonomics*, Vol.20, No.5, pp. 499 – 515, 1977.
- 7- Jacobson, I. D., and L. G. Richards, "Ride Quality Evaluation II: Modeling of Subjective Reaction to Aircraft Motion," *Ergonomics*, Vol.21, No.7, pp. 521 – 529, 1978.
- 8- Richards, L. G., I. D. Jacobson, and R. D. Pepler, "Ride-Quality Models for Diverse Transportation Systems," *Transportation Research Record* 774, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., 1980.
- 9- Jacobson, I. D., A. R. Kuhlthau, and L. G. Richards, "Passenger Ride Quality in Transport Aircraft," *Journal of Aircraft*, Vol.15, pp 724 – 730, 1978.
- 10- Houbolt, J. C., "Runway Roughness Studies in the Aeronautical Field," *Journal of the Air Transport Division, ASCE*, Vol. 87, No. AT1, pp. 1 – 17, 1961.
- 11- Thompson, W. E., "Measurement and Power Spectra of Runway Roughness at Airports in countries of the North Atlantic Treaty Organization," Technical Note 4303, National Advisory Committee for Aeronautics, 1958.
- 12- Hsueh, T. M., and J. Penzien, "Dynamic Response of Airplanes in Ground Operation," *Transportation Engineering Journal of ASCE*, Vol.100, TE 3, American Society of Civil Engineers, pp. 743 – 756, 1974.
- 13- O'Massey, R. C., "Aircraft Pavement Loading: Static and Dynamic," *Transportation Research Board Special Report* 175, pp 75 – 83, 1978.
- 14- Morris, G. J., and Hall, A. W., "Recent Studies of Runway Roughness," *NASA SP-83*, 1965.
- 15- Hall, A. W., P. A. Hunter, and G. J. Morris, "Status of Research on Runway Roughness," *NASA SP-270*, 1971.
- 16- Lee, H. R., and Scheffel, J. L., "Runway Roughness Effect on New Aircraft Types," *Journal of the Aero-Space Transport Division, ASCE*, Vol. 94, No. AT1, pp 1 – 17, 1968.
- 17- Gerardi, T. G., "Aircraft Dynamic Response to Pavement Unevenness,"

- Air Force Flight Dynamics Laboratory, OH, U.S.A., 1976.
- 18- Gerardi, T. G., "Digital Simulation of Flexible Aircraft Response to Symmetrical and Asymmetrical Runway Roughness," Shock and Vibration Bulletin, n47, 1977.
  - 19- Gerardi, A. G., "Dynamic Response of Aircraft to Pavement Unevenness," Transportation Research Board Special Report 175, pp 91 – 96, 1978.
  - 20- Evaluation of Pavement Roughness – Aircraft Computer Simulations, <http://www.tc.gc.ca/CivilAviation/Aerodrome/Technical/Pavement/evaluation/smoothness/computersimulations.htm>, Transport Canada, 2003.
  - 21- McCullough, B. F., D. C. Steitle, "Criteria Development to Evaluate Runway Roughness," Transportation Engineering Journal, Vol.101, TE 2, pp. 345 – 363, 1975.
  - 22- Sonnenburg, P. N., "Analysis of Airport Roughness Criteria," Transportation Research Board Special Report 175, pp 96 – 97, 1978.
  - 23- Nassirpour, F., S. G. Kapoor, and S. M. Wu, "Runway Roughness Characterization by DDS Approach," Transportation Engineering Journal of ASCE, Vol.104, TE 2, American Society of Civil Engineers, pp. 213 – 226, 1978.
  - 24- DeBord, K. J., "Runway Roughness Measurement, Quantification, and Application – the Boeing Method," Boeing Report D6–81746, Boeing Company, Chicago, IL, U.S.A., 1995.
  - 25- "Proposed Canadian Aerodrome Standards and Advisory Material," Ontario, Canada, 2003.
  - 26- "Standards for Specifying Construction of Airports," FAA Advisory Circular, AC150/5370–10A (Chg. 13), Washington, DC, U.S.A., 2001.
  - 27- "International Standards and Recommended Practices, Aerodromes," International Civil Aviation Organization, Annex 14, Quebec, Canada, 1983.
  - 28- "Runway Roughness Criteria," Boeing Coordination Sheet, 707–PD–131, Boeing Company, 1968.
  - 29- Richmond, L. D., N. W. Brueske, K. J. DeBord, et al, "Aircraft Dynamic Loads from Substandard Landing Sites," Technical Report, AFFDL–TR–67–145, Boeing Company, 1968.
  - 30- "Runway Roughness Levels for Fatigue Life Study," Boeing Coordination Sheet, 737–LD–326, Boeing Company, 1973.
  - 31- "Fatigue Loads as a Function of Runway Roughness," Boeing Coordination Sheet, 737–LD–327, Boeing Company, 1974.
  - 32- "Model 737 Landing Gear Fatigue Life versus Runway Roughness," Boeing coordination Sheet, S–707/727/737–LG–49, Boeing Company, 1974
  - 33- "Effects of Operating the 737 on Rough Runways," Boeing Coordination Sheet, S–707/727/737–LG–53, Boeing Company, 1975.
  - 34- Endo, K., K. Himeno, A. Kawamura, Y. Hachiya, and K. Matsui, "Evaluations of Longitudinal Runway Profile and

- Ride Quality Using Wavelet Analysis and Brain Wave,” 2003 Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington, DC, U.S.A., 2003.
- 35- Gerardi, M., and T. Gerardi, “Aircraft Ride Quality Assessment of a New Pavement (Case History),” 1999 FAA Technology Transfer Conference, Atlantic City, NJ, USA, 1999.
  - 36- Gerardi, M., and D. Van Vleet, “Airfield Pavement Optimized for Smoothness through Long Wavelength Event Analysis during Construction Phase,” Second International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Auburn, Alabama, U.S.A., 2001.
  - 37- Gerardi, A. G., and W. G. Johnson, “Dynamic Loading of Airfield Pavements Caused by Aircraft Operations on Rough Runways,” 23rd International Air Transportation Conference, Crystal City, VA, U.S.A., 1994.
  - 38- Horonjeff, R., and F. X. McKelvey, Planning and Design of Airports, Fourth Edition, McGraw-Hill, Inc., New York, NY, U.S.A., 1994.
  - 39- Liu, W., and T. F. Fwa, “Characterizing Road Roughness by Wavelet Transform,” 2004 Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington, DC, U.S.A., 2004.
  - 40- Ksaibati el al., “Pavement Roughness Data Collection and Utilization,” Transportation Research Record 1655, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., 1999.
  - 41- Hayhoe, G. F., Airport Pavement Roughness Criteria, Federal Aviation Administration, 1999.
  - 42- Hachiya, Y., J. Yin, O. Takahashi, Y. Tsubokawa, M. Murozono, and H. Abe, Aircraft Response Based Airport Pavement Roughness Evaluation, Technical Note, No.0954, Port and Harbour Research Institute, Japan, 2000.
  - 43- Daubechies, I., Ten Lecturers on Wavelet, CBM, SAIM, 1994.
  - 44- Abry, P., Ondelettes et turbulence. Multirésolutions, algorithmes de décomposition, invariance d’échelles, Diderot Editeur, Paris, 1997.
  - 45- Press, W. H., S. A. Teukolsky, and B. P. Flannery, Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing, Second Edition, Press Syndicate of the University of Cambridge, New York, NY, U.S.A., 1992.