

六、剛性鋪面之厚度設計法之建立

E 剛性鋪面之厚度設計法之建立

E.1 PCA厚度設計法之發展過程

資料來源：

Portland Cement Association, "Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements," Skokie, Illinois, 1984.

PCA厚度設計法之回顧

Fatigue Equation Recommended by PCA (Packard and Tayabji, 1985)

$$\log N_f = 11.737 - 12.077 * (f_{eq} / S_c)^{3.268} \quad \text{for } f_{eq} / S_c \geq 0.55$$

$$N_f = \frac{4.2577}{f_{eq} / S_c > 0.4325} \quad \text{for } 0.45 < f_{eq} / S_c < 0.55$$

$$N_f = \text{Unlimited} \quad \text{for } f_{eq} / S_c \leq 0.45$$

Equivalent Stress Calculations

1. J-SLAB F.E. analysis, $E = 4 \text{ Mpsi}$, $\mu = 0.15$, $L = 180 \text{ in.}$, $W = 144 \text{ in.}$
2. SA: 18-kip single axle load (dual wheels), $P = 4,500 \text{ lbs}$, load area = $7 * 10 \text{ in.}^2$ (or $a = 4.72 \text{ in.}$), $s = 12 \text{ in.}$, $D = 72 \text{ in.}$
3. TA: 36-kip tandem axle load (dual wheels), $t = 50 \text{ in.}$ and same remaining configurations
4. WS: a tied concrete shoulder (WS) was present, $AGG = 25000 \text{ psi}$.

$$f_{eq} = \frac{6 * M_e}{h^2} * f_1 * f_2 * f_3 * f_4$$

$$M_e = \begin{cases} -1600 + 2525 * \log(\cdot) + 24.42 * \cdot + 0.204 * \cdot^2 & \text{for SA/NS} \\ 3029 - 2966.8 * \log(\cdot) + 133.69 * \cdot - 0.0632 * \cdot^2 & \text{for TA/NS} \\ (-970.4 + 1202.6 * \log(\cdot) + 53.587 * \cdot) * (0.8742 + 0.01088 * k^{0.447}) & \text{for SA/WS} \\ (2005.4 - 1980.9 * \log(\cdot) + 99.008 * \cdot) * (0.8742 + 0.01088 * k^{0.447}) & \text{for TA/WS} \end{cases}$$

$$f_1 = \begin{cases} (24/SAL)^{0.06} * (SAL/18) & \text{for SA} \\ (48/TAL)^{0.06} * (TAL/36) & \text{for TA} \end{cases}$$

$$f_2 = \begin{cases} 0.892 + h/85.71 - h^2 / 3000 & \text{for NS} \\ 1 & \text{for WS} \end{cases}$$

$$f_3 = 0.894 \quad \text{for 6\% Truck at the Slab Edge}$$

$$f_4 = 1 / [1.235 * (1 - CV)]$$

Where:

σ_{eq} = equivalent stress, [FL⁻²];

f_1 = adjustment factor for the effect of axle loads and contact areas;

f_2 = adjustment factor for a slab with no concrete shoulder based on the results of MATS computer program;

f_3 = adjustment factor to account for the effect of truck placement on the edge stress (PCA recommended a 6% truck encroachment, $f_3=0.894$);

f_4 = adjustment factor to account for the increase in concrete strength with age after the 28th day, along with a reduction in concrete strength by one coefficient of variation (CV); (PCA used CV=15%, $f_4=0.953$); and

SAL, TAL = actual single axle or tandem axle load, kips [F].

Design Procedures

1. Section 12.2.3 (Huang, p. 614): Design Tables and Fatigue damage
2. Equivalent Stress (Table 12.6 & Table 12.7)
3. Figure 12.12 Stress Ratio vs. Allowable load Repetitions
4. Table 12.11 (Erosion Factors)
5. Figure 12.14 Erosion Factors vs. Allowable load Repetitions
6. Figure 12.15 Worksheet for Sample Problem

Single Axle		Tandem Axle	
Load, kips	Axles / 1000 Trucks	Load, kips	Axles / 1000 Trucks
30	0.58	52	1.96
28	1.35	48	3.94
26	2.77	44	11.48
24	5.92	40	34.27
22	9.83	36	81.42
20	21.67	32	85.54
18	28.24	28	152.23
16	38.83	24	90.52
14	53.94	20	112.81
12	168.85	16	124.69

參考資料：

1. Huang, Y. H., *Pavement Analysis and Design*, 1993. (Chapter 12)
2. 周義華，*運輸工程*，1993。(第十章)

PCA厚度設計法之發展過程

1. **Warping & curling are excluded.**
2. **Edge stress (load only)**
3. **Truck load placement:**
 - (a) **Considering edge loading only and placing 6% of the total load repetitions at pavement edge**
 - (b) **Or use total number of repetitions for design but reduce edge stress to obtain same fatigue.**
4. **6% truck encroachment adjustment factor=0.894**

E.4 Modified PCA Stress Analysis and Thickness Design Procedures

資料來源：

Lee, Y. H., J.. H. Bair, C. T. Lee, S. T. Yen, Y. M. Lee, "Modified PCA Stress Analysis and Thickness Design Procedures," Presented at the 76th Annual Meeting of the Transportation Research Board and Accepted for Publication in the Future Transportation Research Record, 1997.

Demo. Of TKUPAV program

HW#5 :

Validate your ILLI-SLAB stress analysis results using TKUPAV program (edge stress & interior stress).

E.2 FAA厚度設計法之簡介

資料來源：

周義華，運殊工程，鼎漢國際工程顧問股份有限公司，第二版，中華民國八十二年八月。

Federal Aviation Administration, "Airport Pavement Design and Evaluation," FAA Advisory Circular AC 150/5320-6C, 1978.

傳統 FAA 剛性鋪面厚度設計法之簡介

FAA 剛性鋪面厚度設計法之基本設計程序為首先在機場所有各種不同飛機型態中配合其年起飛次數，選出需最大鋪面厚度之飛機型態者為其設計機型。當設計機型決定後，將依輪軸之轉換因子將不同飛機之輪軸型態轉換為設計機型之輪軸型態，並依此算出各種機型依照設計機型之輪軸型態所轉換之年起飛次數。再根據 Westergaard 邊緣應力、混凝土之撓曲強度、路基反力模數、飛機全重、每年離地飛機數量、各種飛機載重型式、及不同之設計曲線(如單輪、雙輪、雙軸軸重之飛機及廣體客機等)，以決定所需之最小鋪面厚度。

FAA 厚度設計法之主要理念乃是採用 Westergaard 公式分析邊緣載重所形成之臨界應力情形，並假設飛機重量之分佈係以全重之 95% 由主降落輪承受，另外 5% 則由鼻輪所承受。FAA 厚度設計法並考慮接縫應力傳遞之效應，將邊緣載重之應力折減 25%，以較符合實際剛性鋪

面有接縫之情況。再利用各種飛機輪軸型式之轉換因子表(表一)，將飛機之起飛次數轉換為與設計機型相同之輪軸型式之起飛次數。根據各種機型之輪軸型式算出主降落輪之單輪輪重，並依下列公式計算各種機型相對於設計機型之等額起飛次數當量：

$$\log R_1 = \log R_2 \times \left(\frac{W_2}{W_1}\right)^{\frac{1}{2}}$$

其中， R_1 為各種機型相對於設計機型之等額起飛次數當量， R_2 為各種機型根據設計機型之輪軸型態所轉換之年起飛次數， W_1 為設計機型之輪重， W_2 為任一種機型之輪重。再將上述各種機型相對於設計機型之等額起飛次數當量累加後即可得到總等額起飛次數。

To Convert From	To	Multiply Departures By
single wheel	dual wheel	0.8
single wheel	dual tandem	0.5
dual wheel	dual tandem	0.6
double dual tandem	dual tandem	1.0
dual tandem	single wheel	2.0
dual tandem	dual wheel	1.7
dual wheel	single wheel	1.3
double dual tandem	dual wheel	1.7

表一 各種飛機輪軸型式之轉換因子表

FAA 厚度設計法並利用混凝土疲勞損壞與 Pass-to-Coverage (P/C) Ratio 之觀念，將飛機之年起飛次數乘上 20 年之設計年限再除以 P/C Ratio，以估算出該飛機在設計年限壓過鋪面邊緣之當量次數。表二為各種飛機輪重型式之 P/C Ratio 表：

Design Curve	Pass-to-Coverage Ratio
single wheel	5.18
dual wheel	3.48
dual tandem	3.68
B-747	3.70
DC 10-10	3.64
DC 10-30	3.38
L-1011	3.62

表二 各種飛機輪重型式之 P/C Ratio 表

FAA 厚度設計法再根據不同之混凝土撓曲強度與路基係數求得可承受 5000 次 coverages 之鋪面厚度定義為 100% 之基本厚度。其中，混凝土之容許應力是以撓曲強度除以 1.3(安全因素)求得。當鋪面實際承受超過或低於 5000 次 coverages 時，只要找出在該 coverages 其對應曲線所需基本厚度之百分比再乘以基本厚度之值即為所需之設計厚度。

設計要素

FAA 剛性鋪面厚度設計法，係根據撓曲強度、路基係數、飛機全重及每年離地飛機數量做為設計曲線圖之設計要素，其說明如下：

1. 混凝土之撓曲強度。
2. 路基反力係數。
3. 最大之離地飛機全重：由於落地飛機之全重平均約為離地飛機之 75%，故以最大離地飛機全重為準。
4. 每年離地飛機數量：各型飛機輪重之累加效應。

另外，尚須考慮之因素還包括：

1. 載重：假設最大離地飛機全重之 95% 由主降落輪承受，而另外 5% 則由鼻輪承受。
2. 降落輪之型態與幾何形狀：分為以下幾種：
 - a. 單輪之飛機：無特別之假設。
 - b. 雙輪之飛機：輕型飛機，輪胎至中心線約 20 英吋；重型飛機，輪胎至中心線約 34 英吋。
 - c. 雙輪雙軸之飛機：輕型飛機，雙輪間距約 20 英吋，雙軸間距約 45 英吋；重型飛機，雙輪間距約 30 英吋，雙軸間距約 55 英吋。

- d. 廣體客機：廣體客機 B-747、DC-10 及 L-1011 等，由於其飛機全重與機輪之型態與前三者有極大不同，故有特別之設計曲線。
3. 交通量：根據過去之資料及飛機之型態，可預測出各種飛機型態之年起飛次數，以設計鋪面厚度。

設計程序

1. 決定設計機型：在所有之飛機型態中，配合其年起飛次數，而能產生最大鋪面厚度之飛機型態者即為設計機型。因此設計機型不全是最重之飛機型態。
2. 將各種飛機之起飛次數轉換為與設計機型相同之輪軸型式之起飛次數：當設計機型決定後，再利用各種飛機輪軸型式之轉換因子表(表一)，將各種飛機之起飛次數轉換為與設計機型相同之輪軸型式之起飛次數。
3. 根據各種機型之輪軸型態算出主降落輪單獨輪重。
4. 計算各種機型之等額起飛次數當量：根據各種機型之主降落輪單獨輪重，並依下列公式計算各種機型相對於設計機型之等額起飛次數當量：

$$\log R_1 = \log R_2 \times \left(\frac{W_2}{W_1}\right)^{\frac{1}{2}}$$

5. 累加等額起飛次數當量並決定鋪面設計厚度：將上述各種機型相對於設計機型之等額起飛次數當量累加後，可得總等額起飛次數，再查圖即可得到該設計機型之鋪面設計厚度。

FAA 設計曲線與查圖方法：主要分為單輪、雙輪、雙軸及廣體客機之設計曲線。以圖 3-15 之雙輪設計曲線為例，其查圖之方法為：

- a. 已知一撓曲強度。
- b. 作水平線對應至已知之路基係數 k 。
- c. 再作垂直線對應至該飛機之荷重。
- d. 作水平線對應至該飛機之年起飛次數，即可得到其設計厚度。

設計實例

假設某一機場之混凝土撓曲強度為 820 psi，路基係數為 100 pci，且鋪面預計承受如下表之飛機起降：

Aircraft	Gear Type	Forecast Annual Departures	Maximum Takeoff Weight lbs. (kg)
727-100	dual	3,760	160,000 (72600)
727-200	dual	9,080	190,500 (86500)
707-320B	dual tandem	3,050	327,000 (148500)
DC-9-30	dual	5,800	108,000 (49000)
CV-880	dual tandem	400	184,500 (83948)
737-200	dual	2,650	115,500 (52440)
L-1011-100	dual tandem	1,710	450,000 (204120)
747-100	double dual tandem	85	700,000 (317800)

1. 首先要決定設計機型。在此例中，由於 727-200 所造成之鋪面設計厚度最大，故以 727-200 為設計機型。
2. 利用輪軸轉換因子將各種不同之機型轉換成設計機型之年起飛次數。如： $3050 \times 1.7 = 5185$ 。

3. 依據各種不同機型之輪軸型態，算出其主降落之單獨輪重。如：160000*0.95*0.5*0.5=38000 lbs。
4. 依據當量轉換公式，計算各種機型之等額起飛次數當量，如：

$$\log R_1 = \log 3760 \times \left(\frac{38}{45.24}\right)^2 \quad R_1 = 1891$$

Aircraft	Dual Gear Departures	Wheel Load lbs. (kg)	Wheel load of Design Aircraft lbs. (kg)	Equivalent Annual Departures Design Aircraft
727-100	3,760	38,000 (17240)	45,240 (20520)	1,891
727-200	9,080	45,240 (20520)	45,240 (20520)	9,080
707-320B	5,185	38,830 (17610)	45,240 (20520)	2,764
DC-9-30	5,800	25,650 (11630)	45,240 (20520)	682
CV-880	680	21,910 (9940)	45,240 (20520)	94
737-200	2,650	27,430 (12440)	45,240 (20520)	463
747-100	145	35,625 * (16160)	45,240 (20520)	83
L-1011-100	2,907	35,625 * (16160)	45,240 (20520)	1184

Total 16,241

註：* 為了等額年起飛次數當量之計算，廣體飛機之輪重將以 300,000 pound 之飛機輪重代替。

5. 將上述各種機型之等額起飛次數當量累加後，即可得到總等額起飛次數當量 16,241 次，再將其查圖 3-15，即可得到以 727-200 之鋪面設計厚度為 16.7 inch。

此外，FAA 亦有其它相關之規定，如：

1. 非臨界區域之厚度可為臨界區域厚度之 80%，但總厚度不可少於 15cm。而所謂臨界區域(Critical Area)，係指跑道-滑行道系統中承受最大密集壓力之區域，包括跑道端部、所有滑行道及停機坪。
2. 除了某些不需基層之地區外，剛性鋪面至少應有 10cm 之基層。
3. 縱向接縫之間距在面版厚度為 25cm 以下時為 3.8m，面版厚度在 25cm 以上時，間距可為 3.8~7.6m。

周義華「運輸工程」之資料

柔性鋪面厚度設計(圖 23-3)：統一土壤分類法(表 23-4)、CBR 值、k 值、圖 23-5

E.3 FAA厚度設計法之發展過程

資料來源：

Federal Aviation Administration, "Airport Pavement Design and Evaluation," FAA Advisory Circular AC 150/5320-6C, 1978.

設計理念

FAA 剛性鋪面厚度設計法之設計理念大致為：

1. 就剛性鋪面而言，乃是採用 Westergaard 之公式分析邊緣載重所形成之應力情形。
2. 飛機全重之分佈係以全重之 95% 由主降落輪承受，另外 5% 則由鼻輪所承受。
3. 由於 Westergaard 公式係考慮無限版長之情況，而就真實之狀況而言，載重之傳遞必須透過接縫，因此，邊緣載重之應力須折減 25%。(各飛機輪軸型式與胎壓(Tables 1 ~ 3)、臨界軸重位置(Figure 1))
4. 利用疲勞之觀念，將機場之起飛次數轉換為 coverages。亦即將飛機之年起飛次數，乘上 20 年之設計年限，再除以 P/C Ratio，即可得到該飛機之 coverages，其計算公式如下：

$$\text{coverage} = \frac{\text{Annual Departures} \times 20}{5.18}$$

以下表之 single wheel 為例，其 P/C Ratio 為 5.18，

代表當單輪之飛機壓過鋪面 5.18 次時，才相當於 1 次之邊緣荷重。如此，即可根據機場之起飛次數，求得其相當之 coverages。 (Table 4)

Design Curve	Pass-to-Coverage Ratio
single wheel	5.18
dual wheel	3.48
dual tandem	3.68
B-747	3.70
DC 10-10	3.64
DC 10-30	3.38
L-1011	3.62

5. 當鋪面承受 5000 次 coverages 時之鋪面厚度被視為是 100% 之設計厚度。因此，當鋪面所承受之飛離次數依據疲勞之觀念求得 coverage 後，即可查圖 2 求得所對應之設計厚度。(Figure 2)
6. 由於 5000 次 coverages 之鋪面厚度乃根據不同之混凝土撓曲強度與路基係數求得。因此，對於 5000 次 coverages 之混凝土容許應力應將撓曲強度除以 1.3(安全因素)求得。

討論與後續相關研究

在詳加探究 PCA 與 FAA 剛性鋪面厚度設計法後發現二者之基本設計理念極為一致，美國聯邦飛航總署(FAA)傳統的剛性鋪面厚度設計法亦是以 Westergaard 所發展之「版理論」為基礎。唯因傳統之 FAA 厚度設計法其發展過程年代久遠，在 1995 年七月最新出版之機場鋪面設計與評估手冊(AC 150/5320-6D)其基本設計理念仍如同 1978 年之相同手冊(AC 150/5320-6C)一樣，其中存在有許多問題及困難尚待解決，如：

1. 釐清各種輪軸轉換因子之基本假設與發展過程。
2. 研究原基本厚度與 COVERAGES 設計曲線之理論根據、假設與試驗條件，以便未來改進與發展。
3. 依不同飛機輪軸形式而選用之各種厚度設計圖間之相關性為何？
4. 版之臨界應力與重複載重次數有何關係？各種機型之等額起飛次數當量之轉換公式其基本假設為何？
5. 基本厚度所根據之原始假設條件不清，造成分析改進之困擾。
6. 針對新一代波音 B-777 飛機，其設計曲線該如何修正等問題。

因此針對新一代波音 B-777 飛機，自 1995 年 10 月起，FAA 在目前最新之設計手冊(AC 150/5320-16)中乃以全新之設計理念，毋論是剛性或柔性機場鋪面均採用「多層線性彈性理論」並提供 LEDFAA 電腦程式以專供設計可容納波音 B-777 飛機場鋪面厚度之用。而同時以「版理論」為基礎的設計手冊(AC 150/5320-6D)亦適用於其它不容納波音 B-777 飛機場之鋪面厚度設計。唯此項措施之施行不僅在學術界甚至在工程界之實際應用，亦造成極大之爭議與困擾，因此有深入探討之迫切需求。

參考資料：

1. Federal Aviation Administration, "Airport Pavement Design and Evaluation," Advisory Circular, AC 150/5320-6C, 1978.
2. Federal Aviation Administration, "Airport Pavement Design and Evaluation," Advisory Circular, AC 150/5320-6D, July 1995.
3. Federal Aviation Administration, "Airport Pavement Design and Evaluation," Advisory Circular, AC 150/5320-16, October 1995.