

十四、剛性路面厚度設計 (AASHTO設計法、回顧PCA設計法)

參考資料：周義華，「運輸工程」，第十章

參考資料：「公路工程」補充講義 Section E.3

◎PCA設計法回顧

※當量應力之計算

1. 在 PCA 厚度設計法中，當量應力之決定係利用 J-SLAB 有限元素程式分析在標準單軸荷重 (SA)或雙軸荷重(TA)下，不同版厚與路基反力模數狀況下產生之最大邊緣彎曲應力，並配合如下所述之數個調整因子修正而得。
2. 其基本輸入資料為：混凝土彈性模數 $E=4$ Mpsi、波森比 $\mu=0.15$ 、版長 $L=180$ in.、版寬 $W=144$ in.。標準單軸重=18 kips(雙輪單軸)、每一輪重=4,500 lbs、單輪接觸面積=7*10 in.²(荷重半徑 $a=4.72$ in.)、雙輪間距 $s=12$ in.、軸寬(雙輪中心之距離) $D=72$ in.。標準雙軸重=36 kips (雙輪雙軸)、雙軸軸距 $t=50$ in.，其他均與標準單軸重相同。
3. PCA 並假設若版為有混凝土路肩(WS)情況，其骨材互鎖因子 $AGG=25,000$ psi；若版為無混凝土路肩(NS)情況，PCA 建議應依 MATS 電腦程式分析結果修正。相關公式如下：

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

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

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

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

$$f_3 = 0.894 \text{ for 6\% Truck at the Slab Edge}, \quad f_4 = 1 / [1.235 * (1 - CV)]$$

σ_{eq} = 當量應力, $[FL^{-2}]$ 。

$\ell = [Eh^3 / (12 * (1 - \mu^2) * k)]^{0.25}$, 相對勁度半徑[L]

f_1 = 輪軸種類之調整因子。

f_2 = 混凝土路肩調整因子，依 MATS 電腦程式分析結果而得。

f_3 = 重車載重集中分佈於邊緣之應力調整因子 (PCA 建議採用 6%, $f_3=0.894$)。

重車分佈於邊緣，%	1	2	3	4	5	6	7
應力調整因子	0.825	0.855	0.87	0.88	0.89	0.894	0.901

f_4 = 考慮混凝土材料之變異性與因材齡而增加之強度之影響；材料變異係數(CV)一般取為 15%， $f_4=0.953$ 。

SAL, TAL = 實際單軸重與雙軸重, kips [F]。

(括號中之 L 為長度的單位，F 為力的單位。)

※疲勞分析

1. PCA 疲勞分析之概念主要在避免鋪面版因應力疲勞而產生裂縫。
2. PCA 並採用 Miner's 累積疲勞破壞之假設，在 PCAPAV 程式中讓使用者選取版厚初始值，利用不同軸重下當量應力與混凝土破裂模數之比值(應力比， σ/S_c)，再根據應力比與重覆軸次之關係求出最大容許重複載重次數(N_f)：

$$\begin{cases} \log N_f = 11.737 - 12.077 * (\sigma_{eq} / S_c) & \text{for } \sigma_{eq} / S_c \geq 0.55 \\ N_f = \left(\frac{4.2577}{\sigma_{eq} / S_c - 0.4325} \right)^{3.268} & \text{for } 0.45 < \sigma_{eq} / S_c < 0.55 \\ N_f = \text{Unlimited} & \text{for } \sigma_{eq} / S_c \leq 0.45 \end{cases}$$

3. 將實際載重次數除以容許載重次數即得到一個疲勞損壞百分比，並將各軸重產生之損壞百分比累加，其結果不得超過 100%之限制值，並以迭代的方式協助使用者決定混凝土鋪面版所需之最小厚度。
4. 經利用 Microsoft EXCEL 軟體將前述當量應力與疲勞公式經試算表驗證後與 PCAPAV 電腦程式計算相比較，證實其流程結果完全相符無誤。

◎AASHTO 剛性路面厚度設計法

※Equivalent Axle Load Factor (EALF) or Load Equivalency Factor (LEF) (剛性鋪面)

$$LEF = EALF = \frac{W_{t18}}{W_{tx}}$$

$$\log\left(\frac{W_{tx}}{W_{t18}}\right) = 4.62\log(18+1) - 4.62\log(L_x + L_2) + 3.28\log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}}$$

$$G_t = \log\left(\frac{4.5 - p_t}{4.5 - 1.5}\right)$$

$$\beta_x = 1.0 + \frac{3.63(L_x + L_2)^{5.20}}{(D+1)^{8.46} L_2^{3.52}}$$

(參考資料：Huang's "Pavement Analysis and Design", pp. 300 - 301)

※ESAL Concept (標準軸重軸次)

18-Kip ESAL, 18仟磅單軸軸重當量數

※ESAL Calculation

$$ESAL = 365 * (ADT) * (\%TRK) * (DD) * (LD) * (TF) * \frac{(1+g)^n - 1}{g}$$

注意：相同之交通量，在不同之鋪面結構(柔性與剛性)或強度(SN or D)下，其計算之ESAL值不同(剛性鋪面ESAL值約為柔性鋪面之1.5倍)

◎AASHTO 剛性路面厚度設計主要參數

1. 鋪面服務效用(Pavement Serviceability)

現在服務效用指數

(Present Serviceability Index, 0~5)

起始服務效用指數(P_0)

(柔性 $P_0=4.2$, 剛性 $P_0=4.5$)

期末服務效用指數(P_t)

(主要 $P_t=2.5$, 次要 $P_t=2.0$)

$$\Delta PSI = P_0 - P_t$$

2. 時間限制

績效期間、分析期間(設計年限)

3. 交通量(W_{18})

分析期間之累加其期望載重，以 18 仟磅
(8,165 kg)單軸軸重當量表示

軸重當量因子(LEF)表：依軸重、軸數、
 P_t 、鋪面厚度 D 而定(Table 6.7)

LEF(Load Equivalency Factor)=(No. of 18-kip
axle to cause ΔPSI)/(No. of x-kip axle to cause
the same ΔPSI)

$$W_{18} = 365 * ADT * T\% * D\% * LD\% * TF * ((1+g)^n - 1) / g$$

Note: TF=卡車因子(ESAL/Trk)

4. 路基反力模數, k (圓鈹載重試驗)

75cm (30 in.) 直徑圓鈹

5. 路基支承喪失係數(Loss of Subgrade Support, LS) → 有效路基反力模數

6. 混凝土抗彎強度或破裂模數(S_c , Modulus of Rupture)

15cm*15cm*75cm 混凝土樑(3-point load)

6. 混凝土彈性模數(E_c)
7. 載重傳遞係數(Load Transfer Coefficient, J)
9. 排水係數(C_d)
10. 可靠性 (Reliability) : 城際高速公路 80~99.9% , 都市高速公路 85~99.9% , 次要公路 50~80% 。標準偏差 $S_0=0.35\sim 0.45$
11. 鋪面設計厚度值

※圖解法(Figure 4-2.9)

Figure 12.17(a) and 12.17(b)

(Huang's Text Book pp. 635-636)

TABLE 6.7 EQUIVALENT AXLE LOAD FACTORS FOR RIGID PAVEMENTS WITH
 $D = 9$ IN. AND $p_t = 2.5$

Axle load (kips)	Equivalent axle load factor			Axle load (kips)	Equivalent axle load factor		
	Single axles	Tandem axles	Tridem axles		Single axles	Tandem axles	Tridem axles
2	0.0002	0.0001	0.0001	48	56.8	7.73	2.49
4	0.002	0.0005	0.0003	50	67.8	9.07	2.94
6	0.01	0.002	0.001	52		10.6	3.44
8	0.032	0.005	0.002	54		12.3	4.00
10	0.082	0.013	0.005	56		14.2	4.63
12	0.176	0.026	0.009	58		16.3	5.32
14	0.341	0.048	0.017	60		18.7	6.08
16	0.604	0.082	0.028	62		21.4	6.91
18	1.00	0.133	0.044	64		24.4	7.82
20	1.57	0.206	0.067	66		27.6	8.83
22	2.34	0.308	0.099	68		31.3	9.9
24	3.36	0.444	0.141	70		35.3	11.1
26	4.67	0.622	0.195	72		39.8	12.4
28	6.29	0.850	0.265	74		44.7	13.8
30	8.28	1.14	0.354	76		50.1	15.4
32	10.7	1.49	0.463	78		56.1	17.1
34	13.6	1.92	0.596	80		62.5	18.9
36	17.1	2.43	0.757	82		69.6	20.9
38	21.3	3.03	0.948	84		77.3	23.1
40	26.3	3.74	1.17	86		86.0	25.4
42	32.2	4.55	1.44	88		95.0	27.9
44	39.2	5.48	1.74	90		105.0	30.7
46	47.3	6.53	2.09				

Note. 1 kip = 4.45 kN, 1 in. = 25.4 mm.

Source. After AASHTO (1986).

【例題】

一、簡答與名詞解釋：

- (a) 剛性鋪面底層之主要功用
- (b) 混凝土版內加設鋼筋之主要功用
- (c) 混凝土版頂面與底面若受日間溫差之影響，其扭曲應力何者為拉力
- (d) 路基反力模數

二、假設國道中山高速公路於民國58至64年興建初期設計某一段四車道柔性路面，路基土壤回彈模數為5000psi、阻力值 $R=20$ ，其基本交通調查及分類資料為：初期平均每日交通量AADT=21,000輛/日，重型車輛佔全交通量之25%，方向分佈因素 $D=60\%$ ，車道分佈因素 $LD=80\%$ ，平均每年之交通成長率為5%（以複成長計算）。預期之軸重分佈與平均每1,000輛重型車之各軸重數如下表所示：

表一 預期之軸重分佈表(軸數/1000輛大型車)

單軸軸重，仟磅	軸數/1000輛貨車	雙軸軸重，仟磅	軸數/1000輛貨車
10	860	20	150
14	240	24	400
18	220	28	450
22	190	32	800
26	60	36	258

- (a) 請估算出未來二十年內在設計車道上累計之8,170公斤(18,000磅)單軸軸重當量之總數。
- (b) 請依此利用美國瀝青協會(AI)1991年版之設計圖表查得全厚度瀝青混凝土所需之厚度。
- (c) 請您將此18-Kip「單軸」軸重當量數換算成以「單輪」5000磅(2270公斤)為基準之輪荷重當量。
- (d) 請您據此並依當時中山高速公路所採用美國加州設計法之相關公式與厚度折算，推算出在路基土壤以上全部鋪瀝青混凝土所需之厚度，並與(b)之結果相比較。

三、承上題相同之基本交通調查及分類資料，路基土壤之反力模數 $k=150pci$ ，假設混凝土版之設計厚度=10in.，無混凝土路肩，試

依美國波特蘭水泥協會 (PCA) 之厚度設計法，查出單軸與雙軸之當量應力，並以手算的方式驗算其值。

四、承上題相同之基本交通調查及分類資料，路基土壤之反力模數 $k = 200 \text{ pci}$ ，混凝土之破裂模數 $MR = 650 \text{ psi}$ ，載重安全係數 $LSF = 1.2$ ，混凝土版之設計年限為二十年。試利用波特蘭水泥協會 (PCA) 之厚度設計法，推算混凝土試算厚度為 9 英吋時之疲勞係數，此厚度是否可滿足上述設計條件？

五、假設國道中山高速公路於興建初期設計某一段四車道柔性路面，假設路基土壤回彈模數為 5000 psi ，其基本交通資料為：初期平均每日交通量 $AADT = 12,000$ 輛/日，重型車輛佔全交通量之 22%，方向分佈因素 $D = 60\%$ ，車道分佈因素 $LD = 80\%$ ，平均每年之交通成長率為 4% (以複成長計算)。設計年限為 20 年，期末服務效用指數為 2.5，預期之軸重分佈如下表所示：(Note: $1 \text{ psi} = 6.89 \text{ kPa}$)

單軸軸重，仟磅	軸數/1000 輛貨車	雙軸軸重，仟磅	軸數/1000 輛貨車
10	720	20	450
14	280	24	300
18	200	28	150
22	130	32	70
26	100	36	30

- 請暫時假設 $SN = 5$ ，先求出卡車因子 (Truck Factor, TF)，再估算出分析期間在設計車道上之累加期望 8,170 公斤 (18,000 磅) 單軸載重當量之總數 (ESALs)。
- 假設年平均大氣溫度為 15.5°C ，請依此利用美國瀝青協會 1991 年版之設計圖表查得全厚度瀝青混凝土所需之厚度。
- 請您將此 18-Kip 「單軸」軸重當量數換算成以「單輪」5000 磅 (2270 公斤) 為基準之輪荷重當量。
- 請您據此並依當時中山高速公路所採用美國加州設計法之相關公式與厚度折算，推算出在路基土壤以上全部鋪瀝青混凝土所需之厚度。假設路基材料在試驗室試驗結果如下表所示：

含水量 (%)	擠水壓力 (kg/cm^2)	膨脹壓力 (kg/cm^2)	R-值
16	8	0.07	12
13	21	0.09	18

10	34	0.15	26
----	----	------	----

- (e) 假設可靠性水準為95%，總標準偏差為0.45，基層材料之彈性模數值為15,000 psi，底層材料之彈性模數值為30,000 psi，瀝青面層之彈性模數值為400,000 psi。請再依1993年版之AASHTO柔性鋪面厚度設計法決定所需之SN值與各層之厚度，並與前述設計結果比較。

六、承上題相同之基本交通調查資料，路基土壤之反力模數 $k=100\text{pci}$ ，混凝土之破裂模數 $MR=650\text{ psi}$ ，載重安全係數 $LSF=1.2$ ，混凝土版之設計年限為二十年。假設無混凝土路肩，試依美國波特蘭水泥協會之厚度設計法，推算混凝土試算厚度為8.5英吋時之累積疲勞百分比，此厚度是否可滿足上述設計條件？該如何修正？