

3. 環境或氣候特性

對混凝土鋪面影響最嚴重的環境因素乃為路床土壤的含水量。當路床土壤之含水量呈飽和狀態或淤水，使路床土壤懸浮於水中，則鋪面受頻繁的交通量碾壓時，路床土壤即由鋪面之接縫、裂縫或鋪面邊緣擠出，此即為唧水作用。路床經唧水作用屢次沖淘，其土壤逐漸喪失，使得鋪面下之空隙增大，路基之承載力大為減低，最後將導致角隅斷裂等鋪面破壞。

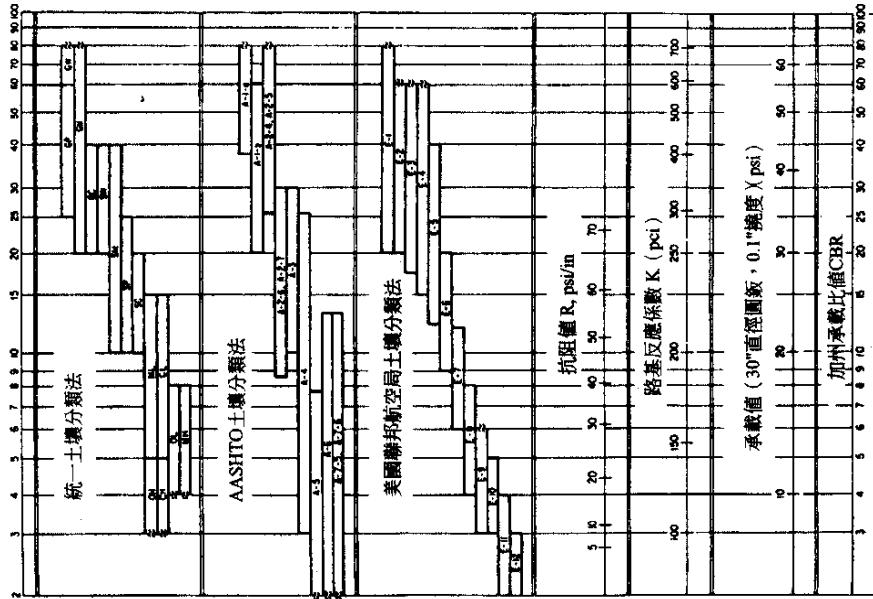


圖 12-9 各種土壤分類與土壤承載力之關係圖

為了有效防止唧水作用，可在路基上加鋪一層級配粒料之基層。此一基層之厚度約7.5~15 cm，粒料規格須符合 AASHTO M155 之規定，即最大粒徑不大於基層厚度之 1/3，通過 # 200 篩之細粒不超過 15%，最大塑性指數為 6，最大液性限度為 25。若在唧水作用特別嚴重之地區，則應減少伸縫 (Expansion Joint)，並將縮縫 (Contraction Joint) 予以適當填封。

12.4.2 PCA 剛性鋪面設計方法

1. 設計觀念

波特蘭水泥協會 (Portland Cement Association, PCA) 依據鋪面版行為理論、使用績效及相關試驗資料而發展出一套獨特的設計方法，此方法已成爲目前公路剛性鋪面厚度設計最常用的方法。

PCA 設計方法之基本觀念爲：欲使混凝土版具有良好的使用績效，且能耐久，則在設計時應滿足以下幾項要求：

- (1) 路基及基層須能均勻穩定地支撐混凝土版。
- (2) 爲防止唧水作用，須加鋪一層經處理或未處理之基層，兼可防止冰凍損害，控制路基體積之變化，提供長久之均勻承載力。
- (3) 接縫處須妥善設計，以使載重能均勻傳至鄰版，而使接縫不致成爲鋪面破壞之因素。
- (4) 鋪面須有足夠厚度，以維持設計期間內之載重應力於安全範圍之內。
- (5) 整體的設計目的在於求得符合設計要求之最小鋪面厚度，亦即最小年成本。

PCA 並提出以下之設計準則：

(1) 疲勞 (Fatigue)

混凝土鋪面像其他工程材料一樣，在承受重複載重下，雖然載重未達破裂模數，亦會發生破裂，此種現象稱為疲勞。根據相關研究，導致疲勞破壞的重複載重次數隨著應力比 (Stress Ratio) 之減少而增加。由於混凝土鋪面內的破壞應力主要來自彎曲應力，因此其應力比可以下式表示：

$$\text{應力比} = \frac{\text{彎曲應力}}{\text{破裂模數}} \quad (12-10)$$

研究結果又顯示，當應力比小於 0.55 時，重複應力可增強混凝土之抗疲強度，混凝土可承受無限次產生該應力之載重而不致破壞。PCA 基於保守的觀點，建議應力比採 0.50。

(2) 侵蝕 (Erosion)

設計時必須限制鋪面在接縫、角隅及邊緣之撓度，以控制基礎材料受唧水作用之沖淘，而防止因基礎支撐不均匀所產生之斷裂。

(3) 臨界軸重位置 (Critical Axle-Load Position)

據研究分析的結果，當重車車輪輻經鋪面的邊緣或兩接縫之中央位置時，會產生臨界應力；而當軸重施加於接縫上，且車輪壓在角隅時，鋪面角隅會產生臨界撓度。

然而在實際的情況下，僅有極少比率的重車靠鋪面外緣行駛，大部分的重車在行駛時外輪約在鋪面外緣以內 60 cm。PCA 設計方法假設 6% 的重車靠鋪面外緣行駛，最大應力及最大撓度即由此載重而產生，愈往鋪面內，應力及撓度愈小，但載重次數愈多。

PCA 分析軸重位置之分佈對混凝土疲勞的影響後，將其以當量應力 (Equivalent Stress) 表示，其數值可查表而得，如

表 12-6 所示：對路基受侵蝕而導致之撓度亦作類似的處理，如表 12-7 所示。

(4) 載重安全因素 (Load Safety Factor, LSF)

由於研究結果顯示，行駛中重車對鋪面所產生之應力，較靜止重車所產生者為低，因此 PCA 揚棄以往衝擊係數之觀念，而代之以載重安全因素，以因應未考慮之意外因素。此載重安全因素之建議值如下：

- 重車交通量高且車流為非干擾性之主要幹道，LSF = 1.2。
- 重車交通量中等之公路，LSF = 1.1。
- 重車交通量低之公路，LSF = 1.0。

2. 設計程序

PCA 混凝土鋪面厚度設計之步驟如下：

- (1) 準備一作業表，其格式如表 12-8 所示。
- (2) 決定公路等級、車道數、鋪面接縫及路肩之型式，並求出下列之資料後，填入表 12-8 上方之空格。
 - 路基或路基與基層之反應係數 (K)
 - 第 28 天或第 90 天之混凝土破裂模數 (MR)
 - 載重安全因數 (LSF)
 - 設計期間
- (3) 作交通量調查，包括軸重、各種軸重之數量，並預測未來之數值，然後將軸重分佈資料填入表 12-8 之第 1 欄，將預期軸重重複次數填入第 3 欄。
- (4) 將第 1 欄之軸重乘以載重安全因素之積填入第 2 欄。

表 12-6 當量應力表—無混凝土路肩（單軸/雙軸）

混凝土 版厚度 (in.)	路 基 — 基 層 之 K 值						
	50	100	150	200	300	500	700
4	825/679	726/585	671/542	634/516	584/486	523/457	484/443
4.5	699/586	616/500	571/460	540/435	498/406	448/378	417/363
5	602/516	531/436	493/399	467/376	432/349	390/321	363/307
5.5	526/461	464/387	431/353	409/331	379/305	343/278	320/264
6	465/416	411/348	382/316	362/296	336/271	304/246	285/232
6.5	417/380	367/317	341/286	324/267	300/244	273/220	256/207
7	375/349	331/290	307/262	292/244	271/222	246/199	231/186
7.5	340/323	300/268	279/241	265/224	246/203	224/181	210/169
8	311/300	274/249	255/223	242/208	225/188	205/167	192/155
8.5	285/281	252/232	234/208	222/193	206/174	188/154	177/143
9	264/264	232/218	216/195	205/181	190/163	174/144	163/133
9.5	245/248	215/205	200/183	190/170	176/153	161/134	151/124
10	228/235	200/193	186/173	177/160	164/144	150/126	141/117
10.5	213/222	187/183	174/164	165/151	153/136	140/119	132/110
11	200/211	175/174	163/155	154/143	144/129	131/113	123/104
11.5	188/201	165/165	153/148	145/136	135/122	123/107	116/98
12	177/192	155/158	144/141	137/130	127/116	116/102	109/93
12.5	168/183	147/151	136/135	129/124	120/111	109/97	103/89
13	159/176	139/144	129/129	122/119	113/106	103/93	97/85
13.5	152/168	132/138	122/123	116/114	107/102	98/89	92/81
14	144/162	125/133	116/118	110/109	102/98	93/85	88/78

(資料來源：PCA)

表 12-7 侵蝕因子表—有接縫鋼筋、無混凝土路肩（單軸/雙軸）

混凝土 版厚度 (in.)	路 基 — 基 層 之 K 值					
	50	100	200	300	500	700
4	3.74/3.83	3.73/3.79	3.72/3.75	3.71/3.73	3.70/3.70	3.68/3.67
4.5	3.59/3.70	3.57/3.65	3.56/3.61	3.55/3.58	3.54/3.55	3.52/3.53
5	3.45/3.58	3.43/3.52	3.42/3.48	3.41/3.45	3.40/3.42	3.38/3.40
5.5	3.33/3.47	3.31/3.41	3.29/3.36	3.28/3.33	3.27/3.30	3.26/3.28
6	3.22/3.38	3.19/3.31	3.18/3.26	3.17/3.23	3.15/3.20	3.14/3.17
6.5	3.11/3.29	3.09/3.22	3.07/3.16	3.06/3.13	3.05/3.10	3.03/3.07
7	3.02/3.21	2.99/3.14	2.97/3.08	2.96/3.05	2.95/3.01	2.94/2.98
7.5	2.93/3.14	2.91/3.06	2.88/3.00	2.87/2.97	2.86/2.93	2.84/2.90
8	2.85/3.07	2.82/2.99	2.80/2.93	2.79/2.89	2.77/2.85	2.76/2.82
8.5	2.77/3.01	2.74/2.93	2.72/2.86	2.71/2.82	2.69/2.78	2.68/2.75
9	2.70/2.96	2.67/2.87	2.65/2.80	2.63/2.76	2.62/2.71	2.61/2.68
9.5	2.63/2.90	2.60/2.81	2.58/2.74	2.56/2.70	2.55/2.65	2.54/2.62
10	2.56/2.85	2.54/2.76	2.51/2.68	2.50/2.64	2.48/2.59	2.47/2.56
10.5	2.50/2.81	2.47/2.71	2.45/2.63	2.44/2.59	2.42/2.54	2.41/2.51
11	2.44/2.76	2.42/2.67	2.39/2.58	2.38/2.54	2.36/2.49	2.35/2.45
11.5	2.38/2.72	2.36/2.62	2.33/2.54	2.32/2.49	2.30/2.44	2.29/2.40
12	2.33/2.68	2.30/2.58	2.28/2.49	2.26/2.44	2.25/2.39	2.23/2.36
12.5	2.28/2.64	2.25/2.54	2.23/2.45	2.21/2.40	2.19/2.35	2.18/2.31
13	2.23/2.61	2.20/2.50	2.18/2.41	2.16/2.36	2.14/2.30	2.13/2.27
13.5	2.18/2.57	2.15/2.47	2.13/2.37	2.11/2.32	2.09/2.26	2.08/2.23
14	2.13/2.54	2.11/2.43	2.08/2.34	2.07/2.29	2.05/2.23	2.03/2.19

(資料來源：PCA)

表 12-8 PCA 鋪面厚度計算表

Project Design 14 four-lane Interstate, rural

Trial thickness 9.5 in. Dowled joints: yes no
 Subbase-subgrade 130 pci Concrete shoulder: yes no
 Modulus of rupture 650 psi Design period 30 years
 Load safety factor, LSF 1.2 4 in. untreated subbase

Axle load, kips	Multiplied by LSF	Expected repetitions	Fatigue analysis		Erosion analysis	
			Allowable repetitions	Fatigue percent	Allowable repetitions	Damage percent
1	2	3	4	5	6	7

Single Axles

8. Equivalent stress 206 16. Erosion factor 2.59
 9. Stress ratio factor 0.317

30	36.0	4,310	27,000	23.3	1,500,000	0.4
20	33.6	14,620	77,000	19.1	2,200,000	0.7
26	31.2	30,160	230,000	13.1	3,500,000	0.9
24	28.8	64,540	1,200,000	5.4	5,900,000	1.1
22	26.4	104,900	Unlimited	0	11,000,000	1.0
20	24.0	235,800	"	0	23,000,000	1.0
18	21.6	507,200	"	0	64,000,000	0.5
16	19.2	422,500	"	0	Unlimited	0
14	16.8	526,900	"	"	"	0
12	14.4	1,837,000	"	"	"	0

Tandem Axles

11. Equivalent stress 192 13. Erosion factor 2.79
 12. Stress ratio factor 0.295

52	62.4	21,320	1,100,000	1.9	920,000	2.3
40	57.6	42,870	Unlimited	0	1,500,000	2.9
44	52.8	124,900	"	0	2,500,000	5.0
40	48.0	373,900	"	0	4,600,000	8.1
36	43.2	885,800	"	0	9,500,000	9.3
32	38.4	930,200	"	0	24,000,000	3.9
28	33.6	1,656,000	"	0	92,000,000	1.8
24	28.8	984,800	"	0	Unlimited	0
20	24.0	1,227,000	"	"	"	0
16	19.2	1,356,000	"	"	"	0
Total						38.9

資料來源：[PCA]

(5) 作疲勞分析。選擇試算厚度，再與 K 值由適當表格（如表 12-6）查出適當應力，填入第 8 項及第 11 項中。

(6) 將適當應力除以 MR 即得應力比，填入第 9 項及第 12 項中。

(7) 由圖 12-10 查得容許重複載重次數（Allowable Load Repetition），填入第 4 欄中。

(8) 將第 3 欄除以第 4 欄，再乘以 100，即得第 5 欄之值。將第 5 欄之值全部加總可得疲勞係數，列於該欄之底部。

(9) 作侵蝕分析。由適當表格（如表 12-7）查出侵蝕因子（Erosion Factor），填入第 10 及第 13 項。

(10) 由適當的圖（如圖 12-11）查得容許重複載重次數，填入第 6 欄中。

(11) 將第 3 欄除以第 6 欄，再乘以 100，即得第 7 欄之值。將第 7 欄之值全部加總可得侵蝕係數，列於該欄之底部。

(12) 若經上述之計算後，疲勞係數或侵蝕係數超過 100%，則表示假設之厚度不足，必須另選較大值試算；若低於 100% 甚多，則表示厚度太大，則可另試較小值。

以下引用 PCA 之一說明例，至於其他設計範例，請讀者參閱參考文獻 [12]。

公路等級與車道數：四車道州際公路
 接縫及肩型式：有接縫鋼筋、未經處理之基層、無混凝土路肩
 交通量資料：

設計期間 = 20 年
 現有平均每日交通量 (ADT) = 12,900
 交通量每年成長 4%
 平均每日重車交通量 (ADTT) = ADT 之 19%

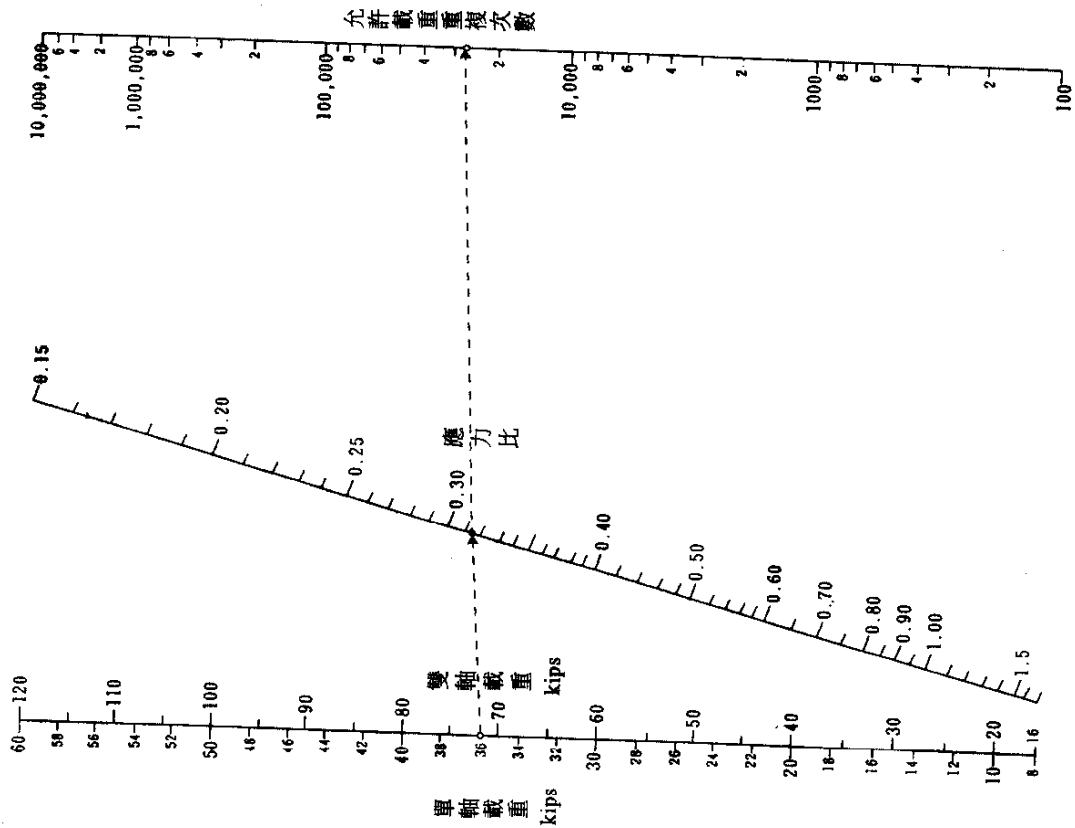


圖 12-10 疲勞分析，有或無混凝土路肩 (資料來源：PCA)

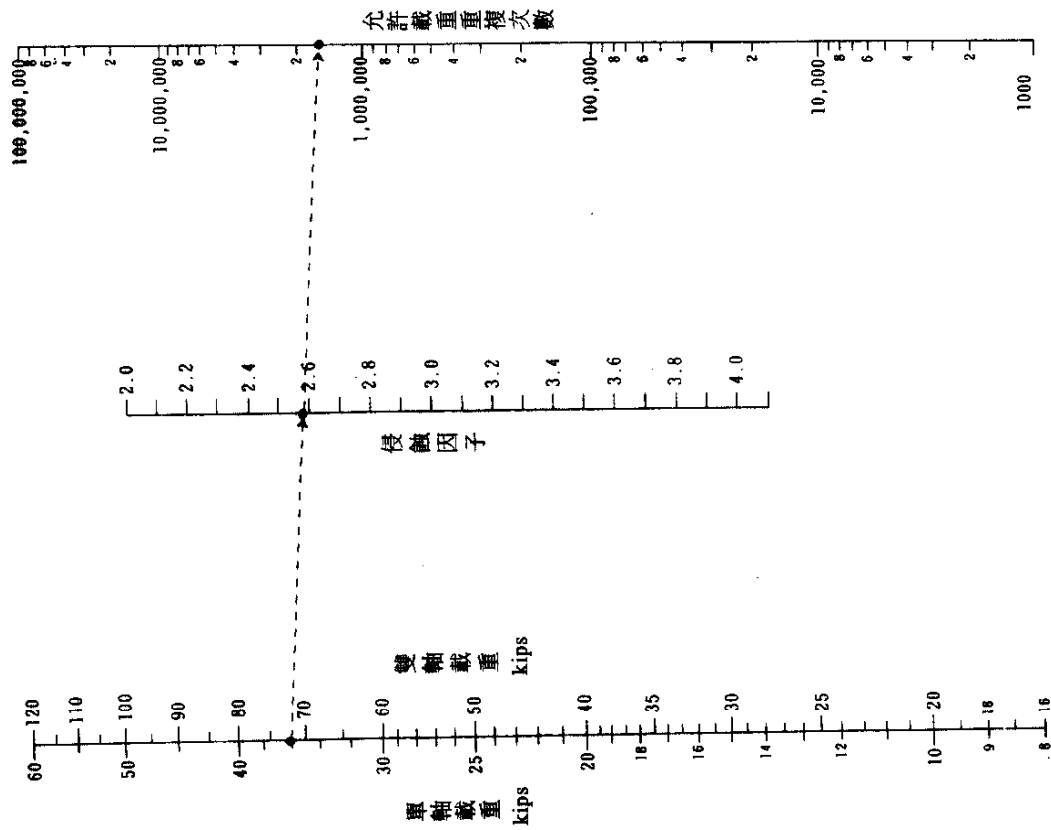


圖 12-11 侵蝕分析，有或無混凝土路肩 (資料來源：PCA)

材料性質：

黏土路基， $k = 100$ pci

使用 4 in. 厚未經處理基層

組合 K 值 = 130 pci

混凝土之破裂模數 $MR = 650$ psi

$LSF = 1.2$

[解]：交通量計算：

交通量每年成長 4%，設計期間為 20 年，因此 20 年中之平均每日交通量可用 20 年中間之 ADT 表示。第 10 年之 ADT 成長率為 $(1 + 4\%)^{10} = 1.48$ ，第 11 年之 ADT 成長率為 $(1 + 4\%)^{11} = 1.53$ ，因此 20 年中 ADT 之平均成長率為 1.5。

設計 ADT = $12,900 \times 1.5 = 19,350$

單一方向之設計 ADT = $19,350 / 2 = 9,675$

ADTT = $19,350 \times 0.19 = 3,680$

單一方向之 ADTT = $3,680 / 2 = 1,840$

假設由地區之交通特性資料查得，在上述交通量時，有 81% 之重車行駛於右線車道，則對一 20 年期間之鋪面，其單一方向行駛於右線車道之重車總數為：

$$1,840 \times 0.81 \times 365 \times 20 = 10,880,000$$

經由交通量調查，估計此重車總數之各種軸重次數，填入表 12-8 之第 3 欄。

其他分析作業皆以表 12-8 依前述之設計步驟進行，試算厚度 9.5 in. 之結果全列於表 12-8 中。其疲勞及侵蝕係數分別為 62.8% 及 38.9%，表示能滿足設計條件。但若試算 9 in.，則其疲勞係數高達 245%，因此設計結果取 9.5 in.。

參考文獻

1. 方恩緒、楊延英，「公路工程」，中國土木水利工程學會，民國七十八年七月五版。
2. 趙國華、洪如江等，「土力與基礎」，中國土木水利工程學會編行，民國六十七年一月初版。
3. 賴森榮、侯羿，「台灣區高速公路路面養護管理系統，期終綜合報告」，台灣營建研究中心，民國七十七年。
4. 賴森榮、侯羿，「台灣區高速公路路面養護管理系統，附錄第三集，路面分析系統」，台灣營建研究中心，民國七十七年。
5. 賴森榮、侯羿，「台灣區高速公路路面養護管理系統，附錄第四集，路面設計系統」，台灣營建研究中心，民國七十七年。
6. 「北二高剛性路面建造講習」，交通部台灣區國道新建工程局。
7. Wright, P.H., "Highway Engineering," 6th Ed., John Wiley, New York, 1996.
8. Yoder, E.J., "Principles of Pavement Design," 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1975.
9. "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures," American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1993.
10. "Annual Book of Standards: Bituminous Materials, Soils, Skid Resistance, Part 11," American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa.
11. "The AASHTO Road Test: Pavement Research," Special Report No. 61E, Highway Research Board, Washington, D.C., 1962.
12. "Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements," Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 1984.
13. "Thickness Design - Asphalt Pavements for Highways and Streets," Manual Series No. 1 (MS-1), The Asphalt Institute, 1981.
14. "Thickness Design of Highway and Street Pavements," Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 1990.