

港 湾 技 研 資 料

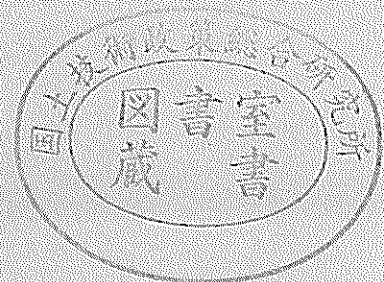
TECHNICAL NOTE OF
PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 50 June 1968

無筋コンクリート舗装の設計方法に関する調査研究
——空港舗装に関する調査研究（第2報）——

赤 塚 雄 三
飯 島 尚

運輸省港湾技術研究所



無筋コンクリート舗装の設計方法に関する調査研究

——空港舗装に関する研究（第2報）——

目 次

要 旨

1. ま え が き	3
2. 諸外国の空港コンクリート舗装設計基準	4
2.1 米国連邦航空庁の方法（FAA 法）	4
2.2 米国ポルトランド・セメント協会の方法（PCA 法）	4
2.3 米国陸軍工兵隊の方法（CE 法）	6
2.4 フランスの方法	6
2.5 LCN法（Load Classification Number System）	6
2.6 コンクリート舗装における等価単車輪荷重の求め方	6
3. 空港コンクリート舗装設計方法の比較検討	6
3.1 共通点と相違点	6
3.2 版厚の試算例	7
3.3 我が国の道路舗装設計方法との比較	8
4. 各方法による目地構造の比較	10
4.1 目地の配置および構造	10
4.2 構造詳細	10
4.3 目地の補強法	11
5. 考察および結論	12
5.1 概 要	12
5.2 版厚設計法	12
5.3 目地構造	12
参 考 文 献	12
付 録：諸外国の空港コンクリート舗装設計基準	15

Investigation on Concrete Pavement Design for Airport
—Studies on Airport Pavements (Second Report)—

Yuzo Akatsuka*

Takashi Iijima**

Synopsis

A comparison study was made on the design methods of plain concrete pavements for airport published from five organizations, Portland Cement Association in U. S. A., U. S. Federal Aviation Agency, U. S. Corps of Engineers, French Ministry of Transportation, and English Ministry of Public Building and Works. They were evaluated in view of the basic concept employed in the design method for highway concrete pavement in Japan. The thickness design charts for pavement slab in any of these methods are derived from the influence charts developed by Pickett and Ray based on the Westergaard's formula for airport pavements analysis. No substantial difference was found among these methods except the difference in loading conditions and structures of joints. The authors conclude the PCA method of design may be preferably adopted to standardize the design method in a system consistent with that of highway concrete pavement conventionally used in Japan, although some modification is considered necessary for joints and joint layout. The five design methods studied are summarized and presented in an appendix.

* Dr. Eng., Chief, Materials Laboratory, Structures Division, Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport.

** Researcher, Pavements Laboratory, Road Division, Public Works Research Institute, Ministry of Construction.

無筋コンクリート舗装の設計方法に関する調査研究

——空港舗装に関する調査研究（第2報）——

赤塚雄三*
飯島尚**

要 旨

諸外国の空港舗装における無筋コンクリート舗装の設計方法を比較検討し、我が国の道路舗装設計方法における基本方式を基にして評価することを試みた。舗装版厚の設計に因してはいずれも Westergaard によって開発された載荷公式を用いているが、載荷位置の評価によって中央載荷公式を用いるものと縁部載荷公式を用いるものに分かれている。また、いずれも Pickett と Ray の影響図を基にした設計曲線を提示しているが、対象航空機の諸元の取り方、図表のパラメーター、コンクリートの定数、等の諸点で微妙な相違を示している。これらの各種設計方法を我が国の道路舗装設計方法の基本公式を基にして評価した結果、それぞれの設計方法で考慮している載荷位置に着目する限りでは実質的な矛盾がないことが実証された。従って、無筋コンクリート舗装設計方法の標準化を考慮する場合には、従来より用いられている P C A 法を道路舗装設計方法とできるだけ矛盾の少ない形に修正するのが最も適当と思われる。

1. ま え が き

我が国の既設空港コンクリート舗装は一部の試験舗装を除くと無筋コンクリート舗装のみと云ってよく、かつその大部分は P C A 法^{注)}によって設計されている。このような意味では、例えば、米国の空港舗装はその実施機関によって F A A 法^{注)}、P C A 法、C E 法^{注)}、と云った各種の設計方法で行なわれて統一性を欠いているが、我が国ではこのような事態は生ずるには至っていない。

注) P C A 法 : Portland Cement Association の方法の略

F A A 法 : Federal Aviation Agency の方法の略
C E 法 : Corps of Engineers の方法の略

しかし、我が国における P C A 法の応用は他の設計方法との精細な比較検討の結果に基づいたものではなく、また P C A 法が標準設計方法として採用されている訳でもない。一方、近年における空港舗装の質的向上と量的拡大に対する要求は遠からず連続鉄筋コンクリート舗装ないしプレストレストコンクリート舗装の導入をもたらすものと予想されている。このような背景の下で、空港舗装技術の急速な開発を計るためには各種の設計方法を

比較検討し、道路舗装設計方法ともできるだけ矛盾の少ない形で空港設計方法を合理的に体系づけることが必要と思われる。

上述の観点から、空港コンクリート舗装設計方法の標準化に必要な資料を提出することを目的として、主要な諸外国の無筋コンクリート舗装設計方法について比較検討した。すなわち、米国、英国、フランスの現行空港舗装設計方法に関する文献資料を収集調査すると共に、我が国の道路舗装設計方法の基本的な考え方に基づいてこれを評価することを試みた。

本調査研究は空港コンクリート舗装の設計方法に関する一連の調査研究の一環として実施したもので、

① 空港における P C 舗装の文献調査、

② 鉄筋コンクリート舗装の設計方法に関する調査研究、

③ プレストレストコンクリート舗装の設計方法に関する調査研究、

④ 嵩上げ舗装の設計方法に関する調査研究、

等と併わせることにより、空港コンクリート舗装の設計

* 構造部 材料施工研究室長、工博

** 建設省 土木研究所 道路部 舗装研究室研究員

表—1

方法の総合的な評価と合理的な体系化に有用な資料を提出することを意図したものである。

本調査研究は、土木学会空港舗装研究委員会（委員長 東京大学教授 国分正胤博士）が新東京国際空港公団の依頼により昭和42年度に実施した「新東京国際空港の舗装に関する研究」の一部を成すものであって、同委員会コンクリート舗装部会の委員各位、特に、設計分科会主査の任に当たられた建設省土木研究所ダム部長 伊東茂富博士より終始適切な助言を頂いた。また、資料の整理については新東京国際空港公団工務部近藤功一氏に協力して頂いた。本研究の発表を快諾された学会および公団の関係各位ならびに御指導御協力賜った上記の各位に厚く御礼申上げる。

なお本報告書の作成に当っては、赤塚が1、2章および付録の起草と全編の調整を担当し、飯島が3、4および5章の起草を担当したことを付記する。

2. 諸外国の空港コンクリート舗装設計基準

空港コンクリート舗装の設計は、世界各国各機関において種々の方法で行なわれているが、版厚の設計に関してはほとんどの方法が、Westergaardの理論公式に基づくものである。本章においては、次に挙げる各設計方法について、その概要を説明し、最後にこれらの方法で共通の問題とも言える等価単車輪荷重について、付け加える。

- (1) 米国連邦航空庁の方法 (FAA法)
- (2) 米国ポルトランドセメント協会の方法 (PCA法)
- (3) 米国陸軍工兵隊の方法 (CE法)
- (4) フランス法
- (5) LCN法 (Load Classification Number System)

なお、詳細については付録「諸外国の空港コンクリート舗装設計基準」を参照されたい。

2.1. 米国連邦航空庁の方法 (FAA法)

米国連邦航空庁におけるコンクリート舗装の設計は、Westergaardの中央載荷公式に基づく影響図表を利用して作成された設計図表から航空機の総重量に対して版厚を決定するものである。また、この方法では、土の分類に基づいて経験的に得られた図表を利用して、路盤厚も同時に決定することができる。安全率は1.75（標準区域）、1.4（標準外区域）である。

2.2. 米国ポルトランドセメント協会の方法 (PCA法)

	FAA法
設計公式 ① 設計公式 (2) 修正図表	① Westergaard 中央載荷公式 ② Pickett, Rayの影響図表により得られた設計図を用いる。
図表の限界	航空機総重量に対して検討を行なう。 複々車輪の $\frac{182\text{ t}}{(400 \times 10^3\text{ lb})}$ 航空機重量 複車輪の $\frac{91\text{ t}}{(200 \times 10^3\text{ lb})}$ " " 單車輪の $\frac{45\text{ t}}{(100 \times 10^3\text{ lb})}$ " " 路盤厚も同時に決定できる。
図表のパラメーター	① 路床土の分類 ② 航空機重量 ③ 車輪形式
路盤の支持力*	$\phi=76.2\text{ cm (30'')}$ の平板 載荷試験 $K=8.3\text{ kg/cm}^3$
コンクリート版	$E=281,000\text{ kg/cm}^2$ $\mu=0.15$ $\sigma_{28}=49.2\text{ kg/cm}^2$ σ 作用応力 $=28.1\text{ kg/cm}^2$
安全率	① エプロン、誘導路、滑走路末端 1.75 ② 滑走路中央部 1.40

* 運輸省では概ね $K=5.5\sim 7.0\text{ kg/cm}^3$ を採用して

主要な空港コンクリート舗装設計方法一覧

PCA 法	CE 法	フランス法	LCN 法
① Westergaard 中央載荷公式 ② Pickett, Ray の影響図表より得られた設計図表を用いる。	① Westergaard 縁部載荷公式 ② Pickett, Ray の影響図表より得られた設計図表を用いる。	① Westergaard 中央載荷公式 ② Pickett, Ray の影響図表より得られた設計図表を用いる。	① Westergaard 中央載荷公式および隅角部載荷公式 ② Teller, Sutherland の経験公式および LCN
航空機主脚荷重に対して設計を行なう。 複々車輪— $\frac{91\text{ t}}{(200 \times 10^3\text{ lb})}$ 複車輪— $\frac{5607\text{ t}}{(125 \times 10^3\text{ lb})}$ 単車輪— $\frac{45.4\text{ t}}{(100 \times 10^3\text{ lb})}$ 軍用機 (High Tire Pressure) に対する設計図表あり	輪荷重…単車輪配置 脚荷重…多車輪配置 複々車輪— $\frac{159\text{ t}}{(350 \times 10^3\text{ lb})}$ 複車輪— $\frac{68.2\text{ t}}{(150 \times 10^3\text{ lb})}$ 単車輪— $\frac{13.6\text{ t}}{(30 \times 10^3\text{ lb})}$	単車輪にて設計する。 多車輪の場合は等価単車輪荷重を求める。 単車輪— $\frac{50\text{ t}}{(110 \times 10^3\text{ lb})}$	航空機の標準 LCN (単車輪荷重とタイヤ圧より LCN を求める) 多車輪の場合は、等価単車輪荷重を求める。 単車輪— $\frac{45.5\text{ t}}{(100 \times 10^3\text{ lb})}$
① 路盤支持力 ② コンクリート許容曲げ応力 ③ 脚荷重	① 路盤支持力 ② コンクリート許容曲げ応力 ③ 脚荷重	① 路盤支持力 ② コンクリート許容曲げ応力 ③ 脚荷重	① タイヤ圧 ② ESWL ③ コンクリート許容曲げ応力
$\phi=76.2\text{ cm}$ の平板載荷試験 $K = \frac{0.127\text{ cm 沈下の荷重}}{0.127\text{ cm}}$ 範囲 $K=1.4 \sim 13.9\text{ kg/cm}^3$	$\phi=76.2\text{ cm}$ の平板載荷試験 $K_{u'} = \frac{0.703\text{ kg/cm}^3}{\text{平均沈下量}}$ $K_{u'}$ の修正 ① 粘性土等の修正 ② 板の撓みの修正 ③ 飽和条件の修正 範囲 $K=0.7 \sim 13.9\text{ kg/cm}^3$	$\phi=76.2\text{ cm}$ の平板載荷試験 範囲 $K=2 \sim 15\text{ kg/cm}^3$	$\phi=54\text{ cm}$ の平板載荷試験
$E=281,000\text{ kg/cm}^2$ $\mu=0.15$ $\sigma_{28} \times (1.1 \sim 1.14)$	$E=281,000\text{ kg/cm}^2$ $\mu=0.15$ σ_{90}	$E=306,000\text{ kg/cm}^2$ $\mu=0.15$	$E=352,000\text{ kg/cm}^2$ $\mu=0.15$
① エブロン, 誘導路, 滑走路末端 $1.70 \sim 2.00$ ② 滑走路中央部 $1.2 \sim 1.50$	設計図表に含まれている。	1.80	10,000 回の繰返し荷重に対して 1.5 40,000 回の繰返し荷重に対して 1.8

いる。

米国ポルトランドセメント協会の方法における舗装版厚の設計は、Westergaardの中央載荷公式に対する影響図表に基づいて、航空機の主脚の車輪配置形式ごとに作製された設計図表を用いて行なうものである。安全率は、1.7~2.0（エプロン、誘導路、滑走路端部など）、および1.25~1.5（滑走路中央部）である。

2.3. 米国陸軍工兵隊の方法（CE法）

米国陸軍工兵隊の方法におけるコンクリート舗装の設計は、Westergaardの縁部載荷公式に基づいて、目地の荷重伝達能力、繰返し荷重、温度応力などの影響を考慮して作製した設計図表により行なうものである。また飛行場における舗装を、実際に受ける荷重と交通量の条件に対して、幾つかの交通域に分け、それぞれに対して必要な厚さを求めるようにしている。

2.4. フランス法

フランス法によるコンクリート舗装の設計は、Westergaardの中央載荷公式に基づく影響図表を利用して作製した許容荷重を求める図表を、繰返し使用することにより舗装厚を決定しようとするもので、タイヤ圧や交通量の影響を考慮するように工夫されている。安全率は1.8である。

2.5. LCN法

LCN法における舗装厚の設計は、既設舗装の評価方法として発展してきた、LCN (Load Classification Number) をパラメーターとして、Westergaardの理論公式に基づいて作製された設計図表により行なうものである。載荷公式は、版にスリッパを使用していないときは隅角部載荷公式を、スリッパを使用しているときは、中央載荷公式を用いる。安全率は、10,000回の荷重繰返しに対して1.5、40,000回に対して1.8である。

2.6. 等価単車輪荷重（ESWL）の求め方

多車輪荷重のコンクリート舗装に対するESWLとはその多車輪荷重がコンクリート版中に生じさせると同じ最大応力を生じさせるような単車輪荷重で、かつ多車輪荷重と等しいタイヤ圧を有するものである。

ESWLを求めるには、Westergaardの中央載荷公式に基づく計算図表を用いて行なう。

3. 空港コンクリート舗装の設計方法結比較検討

3.1. 共通点と相違点

2.で述べた諸外国の設計方法の共通点と相違点を表1に示す。

1) 設計公式

各方法とも基本となる公式は、Westergaardの理論式であり、FAA法、PCA法およびフランス法はWestergaardの中央載荷公式を用いており、CE法は縁部載荷公式、LCN法は、中央載荷公式と隅角部公式によっている。また、各方法とも公式を直接使用するのは煩雑になるので、これらの公式より導かれたPickettとRayによる影響図を基にして求めた簡単な設計図表を利用している。FAA法、PCA法およびCE法では設計図より直接舗装厚を読みとれるが、フランス法およびLCN法では繰返し計算を必要とする。しかし、本質的には同じ理論公式に基づいているとすることができる。またフランス法の基本的な考え方はPCA法に類似しているが、設計図表の適用の仕方（特に車輪形式等について）にやや限定される点がある。LCN法は英国が独自に開発した実験式とWestergaardの理論式を組み合わせ使用するものであるが、本来舗装強度の評価を目的として得られた設計公式であり、新設舗装の設計に用いるには異論もある。

2) 設計図表

従来の方では車輪荷重によって設計したが、改訂されたFAA法では、航空機の総重量によって設計する。

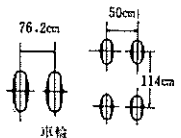
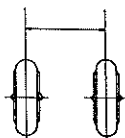
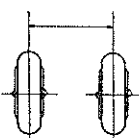
PCA法とCE法では、航空機の脚荷重によって設計し、単車輪荷重、複車輪荷重および複々車輪荷重の場合のそれぞれについて図表が作製されている。

フランス法とLCN法では航空機の脚荷重によって設計するが、多車輪の場合は等価単車輪荷重に換算して計算する。

3) 路床、路盤

FAA法では、路床と路盤をそれぞれ材料や排水などの条件によって分類し、図表から直ちに路盤厚が得られる。この場合、路盤表面での支持力係数は $K_{75}=8.3\text{kg/cm}^2$ (300lb/in^2) になるものとしている。他の方法はいずれも路盤支持力の違いによってコンクリート版厚が変化するように作製された設計図表を用いる。したがって、現地での支持力の相違に適應した設計を前提していると云えるが、FAA法では路盤の支持力が限定され、また、これらの路床や路盤材料も我国とはかなり異なる点もあり、これをそのまま適用することには異論が

表—2 版厚の試算例

設計条件		FAA 法	P C A 法	C E 法
航空機		① 航空機重量 45.4 t (100,000 lb) 136.2 t (300,000 lb) 45.4 t の時 複輪 136.2 t の時 複々輪 	① 航空機重量 45.5 t (100,000 lb) 136.2 t (300,000 lb) 76.2cm (45.4 t のとき) 94.0cm (136.2 t のとき) 	① 航空機重量 45.4 t (100,000 lb) 136.2 t (300,000 lb) 76.2cm (45.4 t のとき) 94.0cm (136.2 t のとき) 
路盤の支持力		② $K=8.3 \text{ kg/cm}^3$ (300 lb/in ³)	② $K=8.3 \text{ kg/cm}^3$ (300 lb/in ³)	② $K=8.3 \text{ kg/cm}^3$ (300 lb/in ³)
コンクリート		③ $E=281,000 \text{ kg/cm}^2$ (4000,000 Psi) $\mu=0.15$	③ $E=281,000 \text{ kg/cm}^2$ (4000,000 Psi) $\mu=0.15$	③ $E=281,000 \text{ kg/cm}^2$ (4000,000 Psi) $\mu=0.15$
計算に用いたコンクリート強度		$\sigma_{28}=49.2 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma_{28}=49.2 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma_{28}=49.2 \text{ kg/cm}^2$
コンクリート版厚	航空機重量 45.4 t の場合 (100.00 lb)	① エプロン, 誘導路, 滑走路末端 $h=23.6\text{cm}(9.3'')$ ② 滑走路中央 $h=23.6\text{cm} \times 0.8$ $=18.8\text{cm}(7.4'')$	① エプロン, 誘導路, 滑走路末端 $h=19.6\text{cm}(7.7'')$ ② 滑走路中央 $h=15.2\text{cm}(6'')$	① 滑走路末端 $h=20.1\text{cm}(7.9'')$ ② エプロン, 誘導路 $h=17.8\text{cm}(7'')$ ③ 滑走路中央 $h=15.2\text{cm}(6'')$
	航空機重量 136.2 t の場合 (300.00 lb)	① エプロン, 誘導路, 滑走路末端 $h=29.0\text{cm}(11.4'')$ ② 滑走路中央 $h=23.1\text{cm}(9.1'')$	① エプロン, 誘導路, 滑走路末端 $h=36.4\text{cm}(14.4'')$ ② 滑走路中央 $h=29.2\text{cm}(11.5'')$	① 滑走路末端 $h=43.0\text{cm}(16.9'')$ ② エプロン, 誘導路 $h=38.4\text{cm}(15.1'')$ ③ 滑走路中央 $h=31.5\text{cm}(12.4'')$

多い。

4) コンクリートの性質

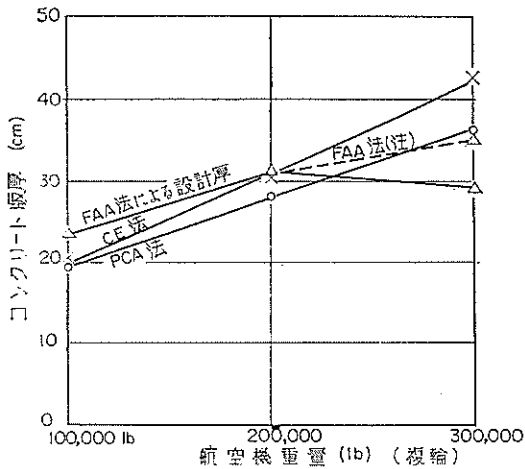
FAA法, PCA法およびCE法では $E=281,000\text{kg/cm}^2$, $\mu=0.15$ とし, フランス法では $E=306,000\text{kg/cm}^2$, $\mu=0.15$ また LCN法では $E=552,000\text{kg/cm}^2$, $\mu=0.15$ としている。しかし, E と μ の違いによるコンクリート舗装厚の差は数%以内であり, 本質的な問題とはならない。

3.2. 版厚の試算例

前節で述べたように, フランス法とLCN法は設計方

法としては体系化が不十分の点があり, また基本的にはPCA法ないしCE法と大差ない結果を与える。そこで, 本節では比較的相違点の多いFAA法, PCA法およびCE法の3方法を選び, 版厚の比較を試みた。表—2に版厚の試算例を示す。

条件を同一にするために, 航空機重量が45.4 t (100,000 lb), 90.8 t (200,000 lb), 136.2 t (300,000 lb) の3種について考える。路盤の支持力, コンクリートの弾性係数Eおよびポアソン比 μ は同一とする。また設計応力については, FAA法で作用応力を $\sigma=28.1\text{kg/cm}^2$ を想定しているのので, 他の方法の場合もこれに合わせ



図一 各種設計方法によるコンクリート版厚の相異

(注) F A A法では 航空機総重量が 200,000lb 以上の場合複車輪についての図がなく、外挿して考えた場合の版厚である。

た。すなわち設計条件としては表一に示す通りである。

ここで F A A法の設計図表では 300,000 lb 以上の航空機重量の場合、車輪形式を複々車輪として考えている反面、P C A法と C E法では複車輪として考えているために厳密には同一条件とは云いがたい。また P C A法と C E法の設計方法について、航空機総重量が 300,000 lb の場合の脚荷重を求める式として、

$$\text{脚荷重} = \frac{0.90 \times \text{航空機総重量}}{\text{脚数}}$$

を用いた。

求めた版厚と航空機重量との関係を示すと図一の通りである。これによれば、航空機重量が小さい場合は C E法と P C A法による版厚はほぼ等しく、F A A法ではやや厚くなる。反対に、航空機重量が大きい場合には C E法、P C A法、F A A法の順に薄くなる。ここで注意しなければならないのは、F A A法では航空機重量は 200,000 lb 以上の場合には、複々車輪を想定しているが、P C A法と C E法では複車輪を考えている。このため単車輪当りの荷重は F A A法では相対的に小さくなり、したがって版厚が薄く計算されるのは当然である。今 F A A法の設計図表において複車輪をもった 300,000 lb の航空機があるものと仮定して計算すると、版厚は 35.6 cm となり、図一で点線で示したように P C A法の場合の版厚 36.8 cm とほぼ等しい。

このように F A A法では、複車輪の限界重量として

200,000 lb を想定しているが、この方法で設計した舗装版に 200,000 lb 以上の複車輪配置の航空機が乗ることも現実には考えられる。このような場合の設計に複車輪用の設計曲線を外挿法によって利用することは適当とはいいがたい。

3.3. 我が国の道路舗装設計方法との比較

1) 我が国のコンクリート道路舗装の考え方

我が国ではコンクリート道路舗装の版厚を設計する場合には交通量によって、20, 23, 25 cm の3種のいずれかを選び、路盤の支持力は $K_{80} \geq 15 \text{ kg/cm}^2$ ($K_{75} \doteq 7 \text{ kg/cm}^2$) になるように設計している。ただし、路盤の支持力が特に大きい場合とか交通量が特に大きい場合には、Westergaard の縁部公式を実験的に修正した Teller と Sutherland の式を更に実験に基づいて修正した岩間の式(1)によって設計している。これは、車輪の走行位置による縁部応力の減少、交通走行頻度と交通量、車線幅および車線数、路肩の条件、更に温度応力の組合わせを考慮して応力を算出し、コンクリートの疲労抵抗を考慮することによって最終的に版厚を決定する方法である。この方法による施工例の供用実績と岩間によるコンクリート舗装の実験結果はこの実験式が最も妥当であることを示している。現場における調査結果もコンクリート版の縁部が弱点であることを示し、本式の妥当性を実証している。岩間によればコンクリート版の荷重応力は次式によって求められる。

$$\sigma = (1 + 0.54\mu) \times C \times \frac{P}{h^2} (\log l - 0.75 \log a - 0.18) \dots\dots\dots(1)$$

ここで

σ : コンクリート版縁部の裏面側に生ずる引張応力 (kg/cm²)

μ : コンクリートのポアソン比

P : 輪荷重 (kg)

C : 係数、自由縁について 2.12
縦目地部について 1.59

h : コンクリート版厚 (cm)

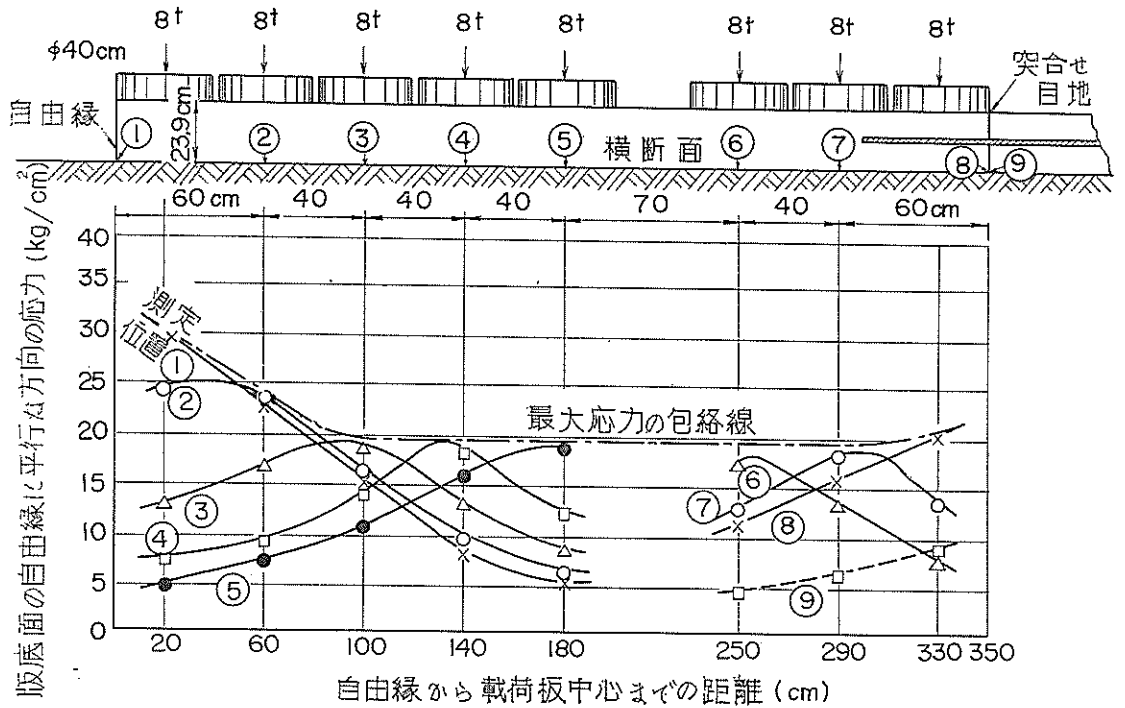
$$l : \text{剛比半径} = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)K_{75}}}$$

E : コンクリートの弾性係数 (kg/cm²)

K_{75} : 路盤の支持力係数 (kg/cm²)

$$a : \text{接地半径} \quad a = 12 + \frac{P}{1,000}$$

また、載荷荷重が 5 t と 8 t の場合のそれぞれの版厚のコンクリートに対する実験結果の一例を図二に示す。これらの実験から求めたそれぞれの載荷位置に対す



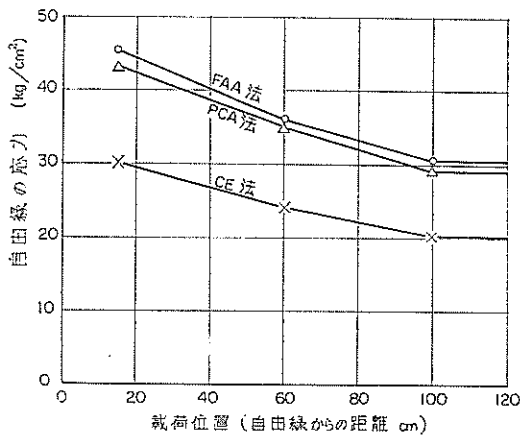
図—2 コンクリート版自由縁部、中央部および突合せ目地縁部における載荷位置と応力の関係

表—3 載荷位置による応力の減少

自由縁からの距離(cm)	15cm	60cm	100cm	120cm以上
応力 kg/cm ²	30	24	20	20
その点の応力 / 自由縁応力	20/30 = 1.00	24/30 = 0.80	20/30 = 0.67	20/30 = 0.67

表—4 版厚および応力度試算の一例

設計方法 条件	設計方法 (注)			
	FAA法	(FAA法)	PCA法	CE法
版厚 (cm)	29.0	35.6	36.8	38.4
弾性係数 (kg/cm ²)	280,000	280,000	280,000	280,000
ポアソン比	0.15	0.15	0.15	0.15
作用応力 (kg/cm ²)	28.0	28.0	28.0	28.0
路盤支持力 (kg/cm ²)	8.3	8.3	8.3	8.3
航空機総重量 (ton)	136.2	136.2	136.2	136.2
車輪形式	複々車輪	複車輪	複車輪	複車輪
車輪間隔 (cm)	50	94	94	94
等価単車輪荷重 (ton)	29.1	49.1	50.1	45.4
剛比半径 (cm)	91.4	106.8	109.5	123.4
自由縁応力 (kg/cm ²)	45.2	45.2	43.6	30.1
目地部応力 (kg/cm ²)	33.9	33.9	32.7	22.6



図—3 載荷位置と応力の関係

(注) FAA法では航空機総重量が200,000 lb 以上の場合すべて複々車輪で考えている。現実には200,000 lb 以上の航空機で複輪のものも考えられることからFAA法の設計曲線のうち、複車輪の曲線を外挿して考え、300,000 lb に相当する版厚を求め、それについての計算結果である。

る応力の減少率を平均すると表一3の通りである。

2) 道路舗装との比較

前節で得られた版厚について、岩間の式を適用して自由縁応力および目地部応力を算出して比較すると表一4の通りである。更に、このようにして求めた応力のそれぞれについて自由縁より内側に載荷した場合の応力を表一3の減少率を用いて計算すると図一3に示したようであった。すなわち、作用応力28.0 kg/cm²との比を求めると表一5の通りである。

表一5 計算応力と作用応力との比 (%)

	FAA法	PCA法	CE法
版の自由縁ぎりぎりに載荷したとき	161	155	107
版のほぼ中央部に載荷したとき	108	104	72
版の縦目地部に載荷したとき	121	117	81

岩間の式は、縁部公式に基づいており、同じ縁部公式に基づいているCE法と比較した場合、両者は当然等しくならなければならない。上述の計算では僅か7%の違いであり、設計条件の取り方や図表の適用の仕方を考えるとほぼ等しいとしてよいであろう。また、FAA法とPCA法は中央部載荷公式に基づいて設計しており、岩間の式の値とは違うのは当然である。しかし、岩間の実験によれば、版の中央部の応力は自由縁の応力の約67% (表一3) であり、したがってFAA法やPCA法の計算結果に0.67%を乗じたものが、版中央部応力と考えられる。図一3において、版のほぼ中央と考えられる自由縁から120cm以上離れた点でのFAA法とPCA法の応力は、それぞれ、作用応力28.0 kg/cm²と比較して、30.3 kg/cm²と29.2 kg/cm²であって、それぞれ約8%と4%の相違である。この相違はCE法の場合と同じく図表の適用の仕方や条件の取り方などによるものと考えてよく、応力はほぼ等しいといえる。更に岩間によれば縦目地部の応力は自由縁部の応力の約75%であり、その値は表一4の下欄に示す通りである。これによればFAA法とPCA法ではそれぞれ33.9と32.7 kg/cm²となり縁部応力を基としたCE法の応力30.1 kg/cm²とほぼ等しい。以上のことより、それぞれの設計方法によって求めた応力は、その方法で考えている載荷位置に着目すれば我国の道路舗装で用いている式を適用して求めた値とほぼ等しいと云える。

4. 各方法による目地構造の比較

4.1. 目地の配置および構造

目地の配置および構造の詳細が比較的よく体系づけられているのはPCA法 (図一A.16~A.23参照) FAA法 (表一A.3~A.5および図一A.6~A.9参照) などであるが、両者の間には本質的な違いは見られない。表一6にその概要を示す。

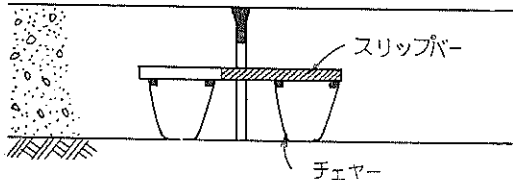
4.2. 構造詳細

1) 目地構造の基本的な考え方

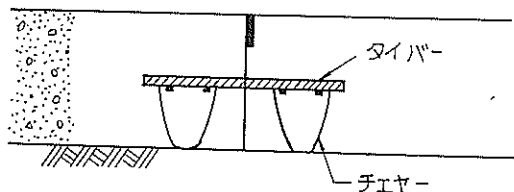
目地はコンクリート版の連続性を何らかの意味で切断するものである。また目地は応力を安全な限度内に保持して不規則なひびわれを防止するために設置するものであり、普通のコンクリート舗装では必ず設けるものである。

道路舗装では縦目地間隔を2.75m~4.50mとし、突合わせ目地ないしめくら目地を用いる。横膨張目地間隔は、施工時期が温暖な場合60m~120m、寒冷な場合30m~60m、横収縮目地は10m以内としており、曲型的な目地構造を図示すると図一4, 5のようである。

目地構造の設計における基本的な考え方は次の通りである。



図一4 膨張目地の一般的構造



図一5 突合せ目地の一般的構造

(1) 膨張目地のスリップバー

$$P_b = \frac{2d^3 \cdot \sigma_{sa}}{r + 8.8t} \dots\dots\dots(2)$$

$$P_c = \frac{dr^2 \cdot \sigma_{ca}}{12.5(r + 1.5t)} \dots\dots\dots(3)$$

P_b : バーの曲げ強さで伝達できる荷重 (kg)

d : バーの直径 (cm)

表—6 目 地 の 設 計

設計方法		F A A 法	P C A 法
縦 方 向 目 地	目地間隔	版厚 10 in 以下の場合, 12.5 ft 以内 版厚 10 in 以上の場合, 最大 25 ft まで可能*	版厚 12 in 以下の場合, 12.5 ft 以内 版厚 12 in 以上の場合, 25 ft まで可能*
	伸縮目地	異なる舗装の交差部分では伸縮目地が望ましい。	異なる舗装の交差部分では伸縮目地が望ましい。
	収縮目地	版厚 10 in 以下で, 車線巾12.5 ft 以上の場合には収縮目地を用いる。	版厚 12 in 以下の場合, 12.5 ft まで 版厚 12 in 以上の場合, 25 ft まで
	施工目地	必要に応じて施す。	荷重伝達のためキイ型とし, 必要に応じて施す。
横 方 向 目 地	目地間隔	無筋の場合 15 ft~25 ft	版厚 12 in 以下, 15~25 ft 版厚 12 in 以上, 20~25 ft
	伸縮目地	普通には不要, 1,500 ft 以上には必要	省略してもよい。
	収縮目地	無筋の場合, 20 ft 以内 鉄筋入りの場合, 75 ft までとする。 すべての誘導路, エプロン, 滑走路末端にはスリップバーを入れる。	花崗岩 25 ft 石灰岩 20 〃 硬石灰砕石 20 〃 石灰質砂利 20 〃 珪質砂利 15 〃 3/4 in 以下の砂利 15 〃

* 施工機械は最大舗設幅はほぼ 25 ft である。

σ_{sa} : バーの許容引張応力度 (kg/cm²)

r : バーの埋込み長さ cm (全長—t)

t : 膨張目地間隔 (cm)

Pc : コンクリートの支圧強さで伝達できる荷重 (kg)

σ_{ca} : コンクリートの許容支圧応力度 (kg/cm²)

(2), (3)式のうち小さい方の値をもって1本のスリップバーの荷重伝達能力とする。

版の長さ寸法は各設計方法によって異なる。

(ii) 突合わせ目地

突合わせ目地には目地が開かないようにするためにタイバーを用いることが多い。タイバーは、次式で与えられる全摩擦力に抵抗できるように設計する。

$$F=24 BLh f \dots\dots\dots(4)$$

F : コンクリート版一枚に働く全摩擦力 (kg)

B : コンクリート版の幅 (m)

h : コンクリート版厚 (cm)

L : 版の長さ (m)

f : 摩擦係数 (1.0~2.0, 普通 1.5)

版の許容引張応力度 σ_{sa} から必要全断面積は次式で計算できる。

$$A_s = \frac{F}{\sigma_{sa}} \dots\dots\dots(5)$$

版の許容付着応力度から必要なタイバーの長さは(6)式で計算する。

$$\frac{r}{2} = \frac{F}{N U \tau} \dots\dots\dots(6)$$

r : 必要長さ (cm)

N : コンクリート版1枚当たりのタイバーの本数

U : タイバー一本の周長 (cm)

τ : タイバーの許容引張応力度 (kg/cm²)

4.3. 目地の補強法

めくら目地においては、骨材の噛み合わせによって荷重の伝達を計るが、突合わせ目地においては、特殊な荷重伝達装置を挿入して補強するとか、スリップバーを挿入するとかして十分な荷重の伝達を計っている。また、噛み合わせ目地構造とした例も少なくない。しかし、施工性、強度、舗設の確実さなどの観点から我国の道路舗装では噛み合わせ目地を廢し、外国でも、例えばCE法ではこれを避けるように指導しているのが現状であり、噛み合わせ目地は避けるのが望ましい。

5. 考察および結論

5.1. 概 要

2 から 3. にわたり諸外国の設計方法について述べた。本報告で紹介した国以外の各国における設計方法を見ると、英国系の国では LCN 法、フランス系ではフランス法、その他の大部分の国では PCA 法や CE 法などを適用している。しかし、2. でも述べたようにそれらの設計方法の間に本質的な差がなく、Westergaard が開発した公式を基にしており、その理論公式の上に、その国での条件、例えば航空機荷重の軽重、土質条件、コンクリートの強度などを考慮して設計図表を作成しているのが現状である。

これはまた、設計荷重の取り方、図表の適用の仕方などの影響を考慮して評価する場合には、我国の道路舗装における基本的な考え方ないし供用実績とも矛盾しないことが実証された。このことは、換言すれば、我国の道路舗装における設計方法を空港舗装にも拡張して差支えないことを示唆するものと云えよう。

5.2. 版厚設計方法

前節でも述べたように設計方法そのもの間には本質的な差がない。しかし、個々の設計方法を適用する場合にそれぞれの図表により適用制限がある。航空機荷重、車輪荷重、車輪配置などについて考え見ると、たとえば、PCA 法、CE 法、LCN 法では多くの条件を満足させる図表が比較的整っている。FAA 法では、路盤の支持力、路床土の分類が我が国の実情と異なる。また、現在の我が国の空港建設の際に用いる路盤支持力の設計値は、 $K_{75} = 5.5 \text{ kg/cm}^3$ 程度であって、例えば FAA 法を適用するものとするれば支持力を 8.3 kg/cm^3 に規定して作られた同法の設計図表は修正を必要とする。

我が国の道路舗装設計公式を用いて求めた応力度と比較すると中央部載荷公式に基づく FAA 法と PCA 法による値はほぼ等しく、これは載荷位置の差を考慮すると道路舗装の公式による値とはほぼ一致し、また CE 法は縁部公式に基づいており道路舗装の公式による値と大体一致した。したがって設計公式そのものには本質的な差がないと判断してよいであろう。問題は版の設計を中央部で考えるか縁部で考えるかの相違だけである。岩間の実験によれば、版中央部応力は自由縁部応力の約 65~70% であり、また縦目地部の応力は自由縁部応力の 75% である。すなわち、縦目地部の応力は、版中央の応力と比較して 7~15% 大きい。仮に中央部公式で設計した版と縁部公式で設計した版に、同一荷重が載った場合の応力が

同じになるように版厚を調整するものとするれば、換言すれば、縦目地部の応力が 7~15% 小さくなるように版厚を増すものとするれば、中央部公式による設計版厚を 4~8% 増せばよい。

航空機重量が大きい場合 (例えば 300,000 lb) には、CE 法による設計版厚は PCA 法による値と比較して 17% 程度大きくなる。更に一般の民間空港舗装では航空機荷重がその自由縁に載ることは通常の条件下ではあり得ないことなどを考慮すると縁部載荷公式を基本とする CE 法は我が国の空港舗装設計方法の標準化の対象としては不相当と判断してよい。FAA 法は、対象航空機の車輪配置や設計曲線の求め方に無理があること、路床土質や路盤材料の分類が我が国の実情とは必ずしも一致しないこと、等から本方法も標準化の対象としては不相当と判断してよいであろう。また、PCA 法に関しては従来より我が国では空港舗装の設計に本方法が用いられており特に不都合な点は報告されていないこと、航空機荷重の載荷条件の差を考慮すれば道路舗装の設計方法と基本的な矛盾はないこと、などを考慮すると空港舗装の標準化の対象としては比較した各種設計方法の中では最も相当と云える。

ただし、上述は目地における荷重伝達能力が十分に大きいことを前提としたものであって、めくら目地にはタイバーを挿入し、突合わせ目地はスリップバーで補強するのが原則であり、これらの処置を講じない場合には CE 法によるのがより合理的であろう。

5.3. 目地構造

目地の構造について、構造細目の指針が整っているものとしては、例えば FAA 法と PCA 法が挙げられるが、両者の間に本質的な差はない。ただし、我が国の道路舗装設計方法における目地と比較すると、横収縮目地間隔の取り方が PCA 法と道路舗装設計方法とはほぼ同じである。したがって、版厚の設計を PCA 法によるものとするれば、目地構造も PCA 法に準ずるのが合理的であろう。また、噛合わせ目地は避けるのが適当である。

参 考 文 献

1. 運輸省港湾技術研究所, “米国およびカナダにおける空港土木の現況、視察報告, pp. 1-52, 付表および付図 pp. 1-144, 1967年1月。
2. 竹下春見, 岩間滋, “道路舗装の設計, 東京, オーム社, 254pp., 1960年6月。
3. 岩間 滋, “コンクリート舗装の構造設計に関する

- 実験的研究(1), 土木研究所報告, 109 号の 1, pp. 1
~37, 1960年 7 月。
4. 岩間 滋, ミコンクリート舗装の構造設計に関する
実験的研究(2), 土木研究所報告, 112 号の 1, pp. 1
~97, 1961年 7 月。
 5. 岩間 滋, ミコンクリート舗装の構造設計に関する
実験的研究(3), 土木研究所報告, 117 号の 1, pp. 1
~124, 1961年 12 月。
 6. Guthrie Stewart Cooper, "The Influence of
Multiple-Wheel Undercarriages on the Design
and Evaluation of Airfield Pavements," Proc.,
Institution of Civil Engineers, Vol. 1, No. 2 June
1952, pp. 419-460.
 7. John Allister Loe, "Dowel-Bar Joints for Air-
field Pavements," Proc., Institution of Civil En-
gineers, Vol. 1, No. 3, Oct. 1952, pp. 612-661.
 8. Robert Horonjeff and John Hugh Jones, "The
Effect of Traffic upon Runway Pavement Cross-
Section," Proc., ASCE, Vol. 81, 1955, pp. 720-1
to 720-15.
 9. William Van Breemen and E. A. Finney, "Design
and Construction of Joints in Concrete," Thomas
B. Pringle, "Structural Design of Joints for Air-
port Pavements," ACI. Journal, Proc., Vol. 46,
June 1950, pp. 789-819.
 10. R. W. Smith and R. Horonjeff, "Longitudinal
Distribution of Wheel Loads on a Runway,"
Proc., ASCE, No. AT4, October 1959, pp. 1-14.
 11. Gayle McFadden, "Airfield Pavement Design of
the Corps the Engineers," Proc., ASCE, Vol. 80,
July, 1954, pp. 458-1, 458-17.
 12. Frank M. Mellinger and James P. Sale, "The
Design of Non-Rigid Overlays for Concrete
Airfield Pavements," Proc., ASCE, No. AT-2,
May 1956, pp. 979-1~979-24.
 13. Gayle McFadden, "The Effect of Jet Aircraft
on Airport Pavements; Investigations Conduct-
ed by the Corpt of Engineers," Proc., ASCE,
Vol. 79, No. 316, October 1953, pp. 316-1~316
-8.
 14. Frank M. Mellinger, R. G. Ahlvin, and P. F.
Carlton, "Pavement Design for Commercial Jet
Aircraft," Proc., ASCE, No. AT-2 May 1959,
pp. 29-43.
 15. R. R. Philippe, and Frank M. Mellinger, "Struc-
tural Behavior of Heavy-Duty-Concrete Airfield
Pavements," Proc., Highway Research Board,
Vol. 31, 1952, pp. 87-100.
 16. "Military Airfields, a Symposium," Proc., ASCE,
No. 2247, January 1944, pp. 669-696.
 17. "A Comparison of Design Methods for Airfield
Pavements," Proc., ASCE, Vol. 78, December,
1952, Separate No. 163, pp. 1-37.
 18. Douglas Hornsby Carrack and Douglas Gordon
Robertson, "The Effects of Jet Aircraft on Air-
field Pavements, and Associated Problems,"
Proc., the Institution of Civil Engineers, Part
II February 1954, pp. 1-29.
 19. Herman L. Gaines, Major, "Traffic Testing of
Overlays on Rigid Airfield Pavements," Proc.,
Highway Research Board, Vol. 25, 1945, pp. 85-
95.
 20. Henry P. Carothers, "Rigid and Stiff Airport
Pavement," Proc., ASCE, No. AT-1, May 1964,
pp. 17-39.
 21. Philip P. Brown, Ralph F. Reuss, and E. S.
Barber, "Rigid and Stiff Airport Pavement,"
Proc., ASCE, Vol. 91, No. AT-1, April 1965,
pp. 67-70.
 22. Frank M. Mellinger, James P. Sale and Thurman
R. Wathen, "Heavy Wheel Load Traffic on Con-
crete Airfield Pavements," Proc., Highway Re-
search Board, Vol. 36, 1957, pp. 175-189.
 23. Warren L. Lawton, "Static Load Contact Pres-
sure Under Airplane Tires," Proc., Highway
Research Board, Vol. 36, 1957, pp. 233-239.
 24. E. J. Yoder, "Pumping of Highway and Airfield
Pavements," Proc., Highway Research Board,
Vol. 36, 1957, pp. 388-432.

(1968年 3 月 30 日 受 付)

付 録

諸外国の空港コンクリート舗装設計基準

付録 諸外国の空港コンクリート舗装設計基準

目 次

1. 米国連邦航空庁 (Federal Aviation Agency) の方法	17
1.1. 等価単車輪荷重を用いる在来の設計方法の概要	17
1.2. 航空機総重量を用いる現行の設計方法：路盤厚	19
1.3. 航空機総重量を用いる現行の設計方法：版厚	24
1.4. ま と め	24
2. 米国ポルトランドセメント協会 (Portland Cement Association) の方法	31
2.1. 路 盤	31
2.2. コンクリートの特性	31
2.3. 舗装版の決定	32
2.4. ま と め	38
3. 米国陸軍工兵隊 (Corps of Engineers) の方法	45
3.1. 路盤支持力係数	45
3.2. コンクリートの特性	47
3.3. 舗装版厚の決定	47
3.4. 設計曲線の根拠	58
3.5. ま と め	62
4. フランス (France) の方法	62
4.1. 概 要	62
4.2. 既設舗装の評価	62
4.3. 舗装厚の設計	68
5. LCN 法 (Load Classification Number System)	68
5.1. 概 設	68
5.2. 既設舗装の評価	75
5.3. 舗装厚の設計	76
5.4. ま と め	79
6. コンクリート舗装における等価車輪荷重の求め方	79
6.1. 等価単車輪荷重の意義	79
6.2. 等価単車輪荷重の求め方	79
参 考 文 献	81

1. 米国連邦航空庁 (Federal Aviation Agency) の方法^{1,2)}

1.1. 等価単車輪荷重を用いる在来の設計方法の概要
 在来のF A Aの方法による舗装厚設計図表は、単車輪荷重に基づくもので、多車輪の場合にはこれに相当する単車輪荷重に直す必要がある。この単車輪を多車輪荷重の等価単車輪荷重 (Equivalent Single Wheel Load : E. S. W. L.) という。

多車輪荷重の剛性舗装に対する等価単車輪荷重とは、

その多車輪荷重がコンクリートに生じさせる最大応力と等しい最大応力をコンクリート中に生じさせるような単車輪荷重で、かつ多車輪荷重と等しいタイヤ圧を有するものである。この等価単車輪荷重を求める計算は Westergaardの中央載荷公式に基づいて作成した図一A. 1(複車輪の場合)、図一A. 2(複々車輪の場合)を利用して行なう。すなわち、剛半径 l 、車輪の接地面積 A 、および車輪間隔 S と S_1 がわかれば、これらの図を用いて総脚荷重と等価単車輪荷重の比が得られ、この比を総脚荷重に乗じて等価単車輪荷重を求めることができる。

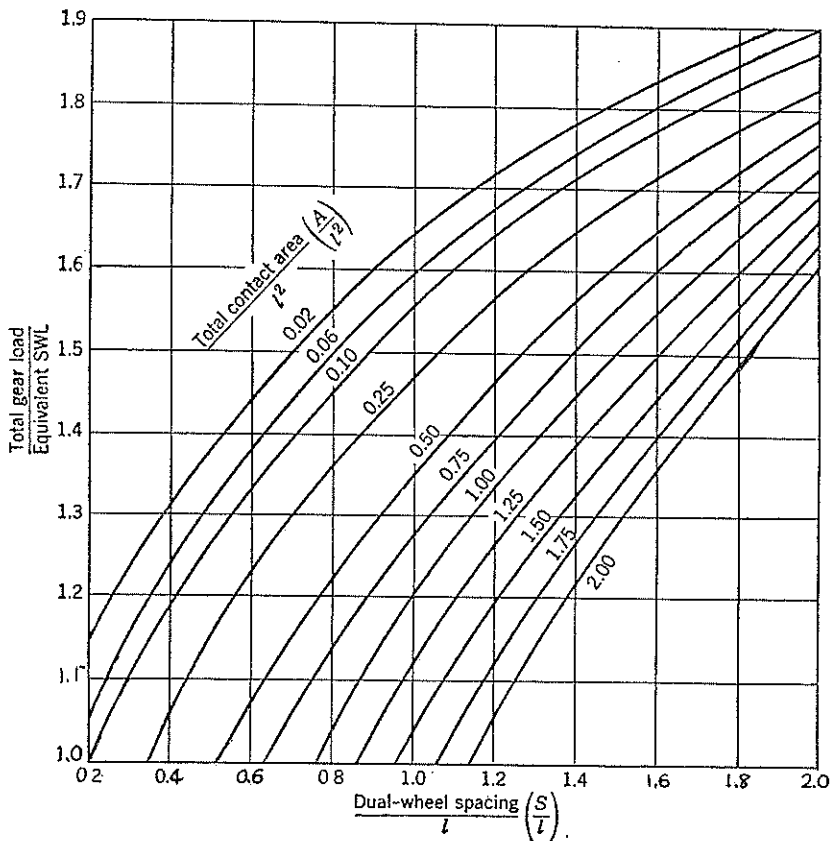


Chart for determination of equivalent single-wheel load for rigid pavements and dual-wheel gear.

図一A. 1 剛性舗装における等価単車輪荷重の決定図表：複車輪の場合 (旧F A A法)

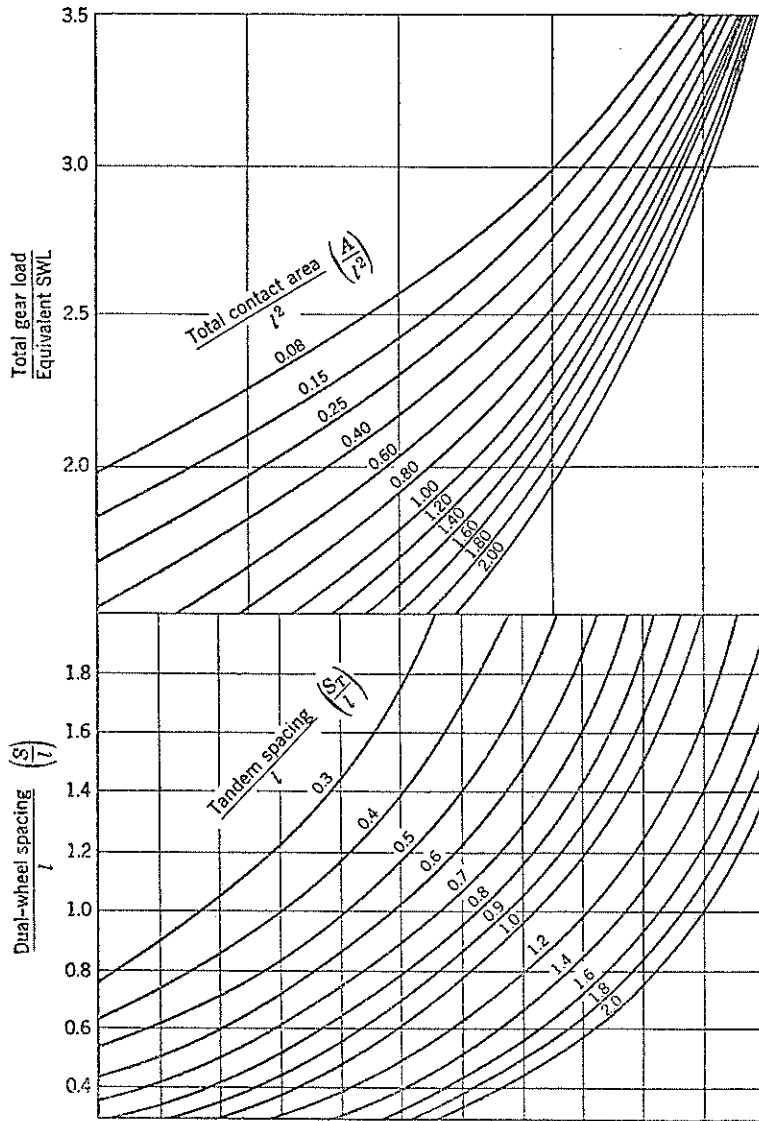
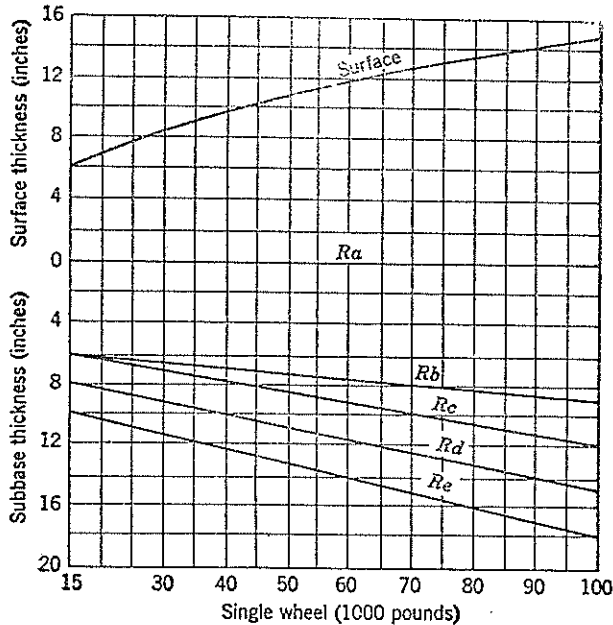


Chart for determination of equivalent single-wheel load for rigid pavements and dual-tandem gear.

図一A.2 剛性舗装における等価単車輪荷重の決定図表：複々車輪の場合（旧F A A法）¹¹

以上の要領で求めた単車輪荷重を使用して図一A.3に示す設計表から版厚と路盤厚を決定する。ここでは版厚は単車輪荷重だけで決まるが、路盤厚は単車輪荷重だけでなく、路床の格付けによっても変化する。路床土の種類と路床の格付けについては、現行法と同様であるので次節で詳述する。



Rigid-pavement design curves, taxiways, runway ends. Reduce the thickness of concrete 20 per cent for runway interiors, no change in subbase thickness.

図一A.3 誘導路および滑走路端部の剛性舗装設計曲線 (旧FAA法)¹⁾

図一A.3の設計図表は、数多くの既設飛行場を調査し、その土質、排水、凍害、載荷状態を比較検討して得た純経験的なものといわれている。

従来のFAA法では以上のような要領で舗装厚を設計したしたのであるが

- (i) E.S.W.L.の考え方が技術者の誤解を受け易く、誤用されることが多かった。
- (ii) E.S.W.L.による応力と実際の車輪配置の荷重による応力は必ずしも等しくないことがわかった。

ことなどの理由により、1964年6月の改訂版では、E.S.W.L.の代りに航空機総重量を使用するように改正された。同時に、現在使用中の航空機についての調査結果に基づいて、前輪荷重を従来の総重量に対する10%から5%に下げている。現行法については、1.2.および1.3.で詳述する。

1.2. 航空機総重量を用いる現行の設計方法：路盤厚
路盤厚は路床土を分類し、更に排水や凍害条件により路床を格付けし、経験的に得た設計図表を用いて、版厚設計の際に仮定した一定の支持力が得られるよう設計する。

(1) 路床土の分類

路床土の次に示す試験(i), (ii) および(iii)の結果により表一A.1のように分類する。

(i) フルイ分け試験

- ① フルイNo.10に残るもの(重量)(2mmフルイ)
- ② フルイNo.10を通過し、No.60に残るもの(0.25mmフルイ)
- ③ フルイNo.60を通過し、No.270に残るもの(0.053mmフルイ)
- ④ フルイNo.270を通過するもの

(ii) 液性限界

(iii) 塑性限界

表一A.1の分類による各グループの路床土の性状は次の通りである。

(iv) 分類した各路床土の性状

E-1 粒度が良く粗い粒状土で、排水不良の状態でも安定であり、凍害を受けない。このグループの土は、ほとんどあるいは全然細粒分を含まない粒度のよい砂や砂利である。

E-2 E-1と似ているが粗砂が少なくシルトや粘土を多く含む。排水不良の場合不安定となり、ある程度の凍害を受ける。

E-3.4 粒度の悪い細粒の砂質粘土を含む。良質のバインダーを有する細粒非粘着性砂または砂質粘土タイプから成っている。排水・凍害条件の悪い状態では、E-2より不安定である。

E-5 シルトおよび砂を5~45%含んだ粒度不良の粒状土である。またシルトおよび砂を45%以下、塑性指数10以上のすべての土を含む。塑性指数が15以上の土は、55%以上の砂を含んでいても細粒土と分類する。このグループの土は凍害を受け易い。

E-6 塑性指数が零に近いシルトあるいは砂質シルトである。この土はもろく、含水量の低い乾燥した状態では全く安定である。湿ったときは安定性を失ない海绵状になる。そのため含水量を適切に調整しなければ締め固めるこ

表—A. 1 空港舗装のための土質分類 (F A A 法)²⁾

Soil group	Mechanical analysis				Liquid limit	Plasticity index	
	Material retained on No. 10 sieve—percent ¹	Material finer than No. 10 sieve—percent					
		Coarse sand, passing No. 10 : retained on No. 60	Fine sand, passing No. 60 : retained on No. 270	Combined silt and clay; passing No. 270			
Granular	E-1	0-45	40—	60—	15—	25—	6—
	E-2	0-45	15+	85—	25—	25—	6—
	E-3	0-45	.....	.....	25—	25—	6—
	E-4	0-45	.....	.....	35—	35—	10—
	E-5	0-45	.....	.....	45—	40—	15—
Fine grained	E-6	0-55	.....	.....	45+	40—	10—
	E-7	0-55	.....	.....	45+	50—	10-30
	E-8	0-55	.....	.....	45+	60—	15-40
	E-9	0-55	.....	.....	45+	40+	30—
	E-10	0-55	.....	.....	45+	70—	20-50
	E-11	0-55	.....	.....	45+	80—	30+
	E-12	0-55	.....	.....	45+	80+	.....
	E-13	Muck and peat—field examination					

1 If percentage of material retained on the No. 10 sieve exceeds that shown, the classification may be raised, provided such material is sound and fairly well graded.

とは困難である。このグループの土の毛管上昇は速い。他のグループの土より凍害を受け易い。

E-7 シルト質粘土, 砂質粘土, 粘土質砂, 粘土質シルトである。乾燥するともろいが堅固であり, 湿ると塑性を有する。適当な含水量で締め固めると, 強く密実となる。含水量の変化は体積変化を起し易い, 土内の毛管力は強いが上昇速度は比較的遅い。凍害はE-6程ではない。

E-8 E-7 に似ているが, 高い液性限界のため, 高い圧縮性, 膨張および収縮, 含水量によっては安定性が悪いことを示している。

E-9 雲母および珪藻分を含むシルトおよび粘土である。非常に弾性的で締め固めは困難である。乾燥, 湿潤いずれの場合にも安定悪く凍害を受ける。

E-10 乾燥したとき固い土塊となり湿ると非常に

塑性的になるシルト質粘土および粘土からなる。圧縮性が大きく膨張収縮性を有し, 非常に弾性的で凍害を受ける。このグループの土は, E-7, E-8 より更に締め固めが困難で, 密実で安定な盛土を行なうには, 注意深い含水量の調整を必要とする。

E-11 E-10 に似ているがより大きな液性限界を有している。このグループには, 液性限界が70~80で, 塑性指数が30以上の総ての土が含まれる。

E-12 塑性指数には関係なく, 液性限界が80以上の総ての土を含む。これは水分が存在すると非常に不安定になる塑性的な粘土が, または多量の雲母, 珪藻または有機物を含む非常に弾性的な土である。その不安定の原因が何であろうとその修正には非常に困難を伴うであろう。

E-13 現場における調査によって判明する堆積物

や泥炭のような有機質の湿地土である。自然状態で、非常に低い密度と非常に高い含水量を持っていることに特徴がある。

(2) 路床の格付け

(1)で分類された土の性質に排水および凍害条件の良否を考慮して路床の格付けを行なう。排水条件の判定には、現場の気象条件と地形、地層の構成と各層の性質、地下水位の高さなどの知識を必要としており、排水不良とは、

(i) 土の性質により生ずる不適当な排水状態

(ii) 地下水位面からの毛管上昇

(iii) 平地のような地形的な様相

などの条件により路床が不安定になることである。また、排水良好とは

(i) 路床内に水が集って海綿状になることのないよ

うな地盤内の排水状態

(ii) 地下水の高さが上方からの浸透または下方からの毛管上昇により土の飽和を生じないような地位にあること。

(iii) 表面水が速かに移動するような地形であること。

などの状態である。

凍害については、凍上深度が凍害なしの条件で試験的に設計した予定舗装厚より大きな場合に厳しい凍害とし、小さい場合には凍害なしとする。FAAの設計法においては、剛性舗装は著るしい絶縁性を有することを理由にして、凍上深度はコンクリート版の厚さの1/2程度減少させることができるとしている。

以上の排水と凍害条件により、表一A.2のように路床を格付する。

表一A.2 剛性舗装のための路床の格付け (FAA法)²⁾

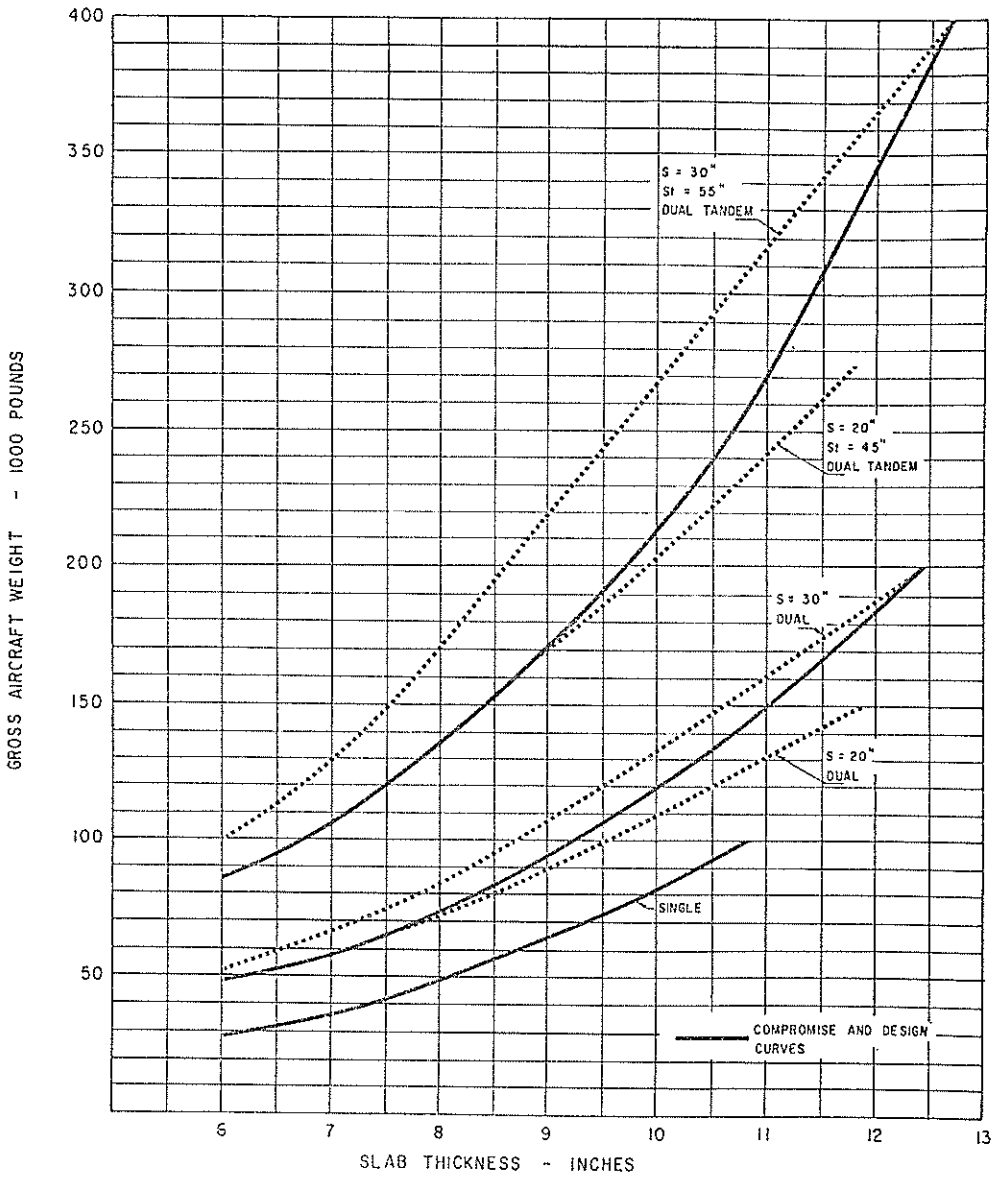
FAA RIGID-PAVEMENT SUBGRADE CLASSIFICATION

Soil Group	Subgrade Class			
	Good Drainage		Poor Drainage	
	No Frost	Severe Frost	No Frost	Severe Frost
E-1	Ra	Ra	Ra	Ra
E-2	Ra	Ra	Ra	Ra
E-3	Ra	Ra	Ra	Ra
E-4	Ra	Ra	Rb	Rb
E-5	Ra	Rb	Rb	Rb
E-6	Rb	Rb	Rb	Rc
E-7	Rb	Rb	Rb	Rc
E-8	Rb	Rc	Rc	Rd
E-9	Rc	Rc	Rc	Rd
E-10	Rc	Rc	Rc	Rd
E-11	Rd	Rd	Rd	Re
E-12	Rd	Re	Re	Re
E-13	Not suitable for subgrade			

(3) 路盤厚の算定

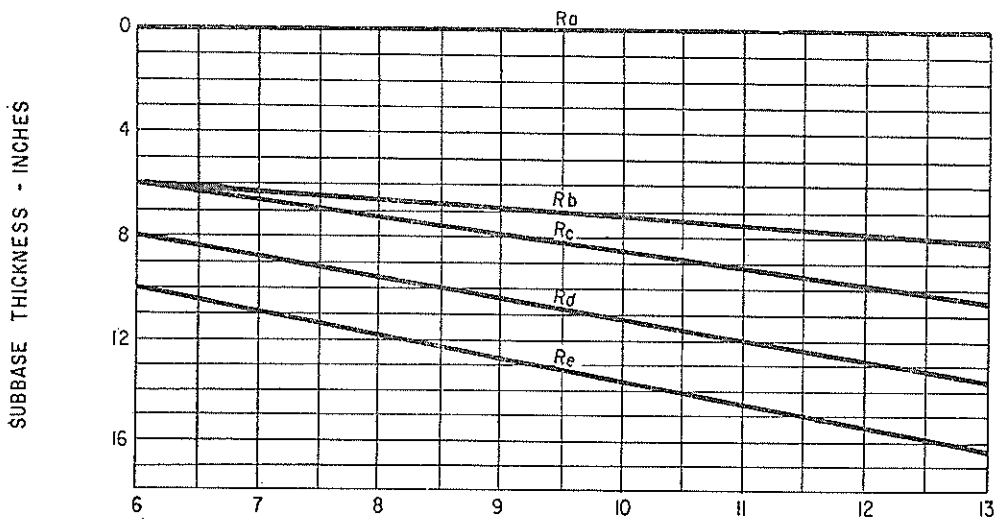
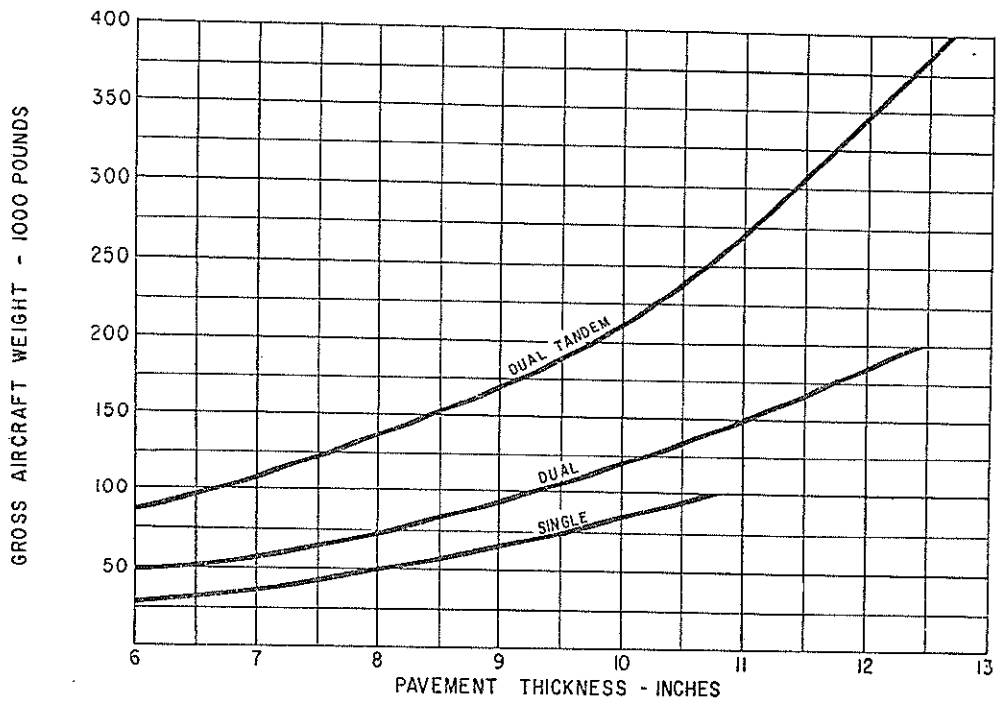
路盤厚は(2)の方法で求めた路床の格付けに応じて、図一A.5を用いて求める。本図は既設の飛行場における土質、排水、凍害、載荷状態などの地域的な特徴を比較検討して、路床の格付けをパラメーターとして得

た版厚と路盤厚の経験的な関係を示しており、路盤の支持力係数が版厚設計の際に条件とする $K_{75} = 8.3 \text{ kg/cm}^3$ ($K = 300 \text{ lb/in.}^3$) となるような路盤厚を与えるものである。算定手順については、次節で述べる。



DEVELOPMENT OF RIGID PAVEMENT CURVES

図一A.4 剛性舗装設計曲線の誘導 (F A A法)²⁾



DESIGN CURVES: RIGID PAVEMENT, CRITICAL AREA

図一A.5 剛性舗装設計曲線：標準区域の場合 (F A A法)²⁾

1.3. 航空機総重量を用いる現行の設計方法：版厚

(i) 設計図表

コンクリート版厚の設計には、Westergaard の中央載荷の公式に基づいた Pickett と Ray の影響図表から得られた設計図を用いる。影響図表を使用するために仮定した航空機の車輪配置と諸定数は次の通りである。

(i) 単車輪航空機

(ii) 複車輪航空機……軽いもの $S=50\text{cm}(20\text{ in.})$,
重いもの $S=75\text{cm}(30\text{ in.})$

(iii) 複々車輪航空機……軽いもの $S=50\text{cm}(20\text{ in.})$,
 $S_T=114\text{cm}(45\text{ in.})$
重いもの $S=75\text{cm}(30\text{ in.})$,
 $S_T=140\text{cm}(55\text{ in.})$

ここで S ；複車輪の中心線間隔， S_T ；複車輪の軸間隔

(iv) 諸定数

路盤の支持力係数

$$K_{75}=8.3\text{kg/cm}^3(K=300\text{ lb/in}^3)$$
$$\sigma_{ba}=28\text{kg/cm}^2(s=400\text{ psi})$$

車輪タイヤ圧

$$p=11\text{kg/cm}^2(p=150\text{ psi})$$

コンクリートの弾性係数

$$E=280,000\text{kg/cm}^2(E=4,000,000\text{ psi})$$

コンクリートのポアソン比 $\mu=0.15$

図一A.4はこれらの仮定を基にして Pickett と Ray の影響図表を用いて求めた航空機総重量と版厚との関係である。本図で、点線は図示の車輪配置の航空機のそれぞれに対するもので、中間の車輪配置に対するものとして複車輪と複々車輪の場合に実線が与えられている。この実線は二点線を結んだもので、総重量が同一の場合には車輪配置間隔の狭いもの程設計版厚が厚くなるように工夫されており、この実線を以て、版厚の設計曲線とし図一A.5に用いている。

図一A.5を用いて剛性舗装厚を決定するには、上側の図の縦軸に設計で対象とする航空機の総重量をとり、水平に線を引き、その航空機の車輪配置を示す設計曲線との交点から垂線を下し、これと横軸との交点

が求める版厚である。更にこの垂直線を下側の図に延長して、路床の格付けを示す曲線との交点から水平に線を引き、縦軸との交点が求める路盤厚である。

(2) 舗装区域と安全率

FAA法では、飛行場の舗装を二つの区域に分け、舗装厚を加減することを原則としている。二つの区域は次の通りである。

イ) 標準区域 (Critical area) エプロン、誘導路および滑走路末端部：緩速で走行する航空機荷重が静的に作用する箇所

ロ) 標準外区域 (Non-critical Area) 滑走路中央部：高速で走行するため揚力が働き、舗装に作用する航空機荷重が減少する箇所

(1)の設計図表は、標準区域に対するもので、標準外区域に対しては得られた値の80%を用いる。ただし、最小厚は15cm (6 in) である。路盤厚については標準外区域においても減ずることはしない。

コンクリートの設計基準曲げ強度 $\sigma_{ba}=49\text{kg/cm}^2$ (800 psi) で標準区域における許容曲げ応力度 $\sigma_{ba}=28\text{kg/cm}^2$ (400 psi) であるから、安全率は

$$S.F.=49/28=1.75$$

また、標準外区域ではその80%であるから、安全率は

$$S.F.=1.75 \times 0.8=1.4$$

となる。

1.4 ま. と め

FAA法によるコンクリート舗装の設計は、Westergaard の中央載荷公式に基づく影響図表を利用して作製された設計図表を用いて航空機総重量に対して必要な版厚を決定し、また、既設の飛行場における土質、排水、凍害、載荷状態の地域的な特徴を比較検討して純経験的に得た図表を使用して路盤厚を決定するものである。すなわち、版厚は路盤面の支持力が一定であると仮定して作用荷重に対して設計し、路盤厚はその支持力が仮定に用いた一定の値になるよう設計するのが本方法の原則である。

なお、表一A.3～A.5および図一A.9～A.9は目地の配置および構造の細目を取纏めたものである。

表—A.3 目地の型式と用途 (F A A 法)

JOINT TYPES:DESCRIPTION AND USE

TYPE	DESCRIPTION	LONGITUDINAL	TRANSVERSE
A	Doweled expansion joint.		Use near intersections to isolate them.
B	Thickened edge expansion joint.	Use at intersections where dowels are not suitable and where pavements abut structures.	Provide thickened edge (or keyway) where pavement enlargement is likely.
C or D	Keyed or doweled construction joint.	Use for all construction joints except where Type E is used.	Use Type D where paving operations are delayed or stopped.
E	Hinged construction joint.	Use for all construction joints of the taxiways and for all other construction joints that are 25' or less from the pavement edge.	
F	Doweled contraction joint.		Use for all contraction joints in critical areas, for all reinforced pavement areas, and for the first two joints on each side of expansion joints.
G	Hinged contraction joint.	Use for all contraction joints of the taxiway and for all other contraction joints placed 25' or less from the pavement edge.	
H	Dummy contraction joint.	Use for all other contraction joints in pavement.	Use for all remaining contraction joints in nonreinforced pavements.

表—A.4 目地の配置間隔 (F A A 法)

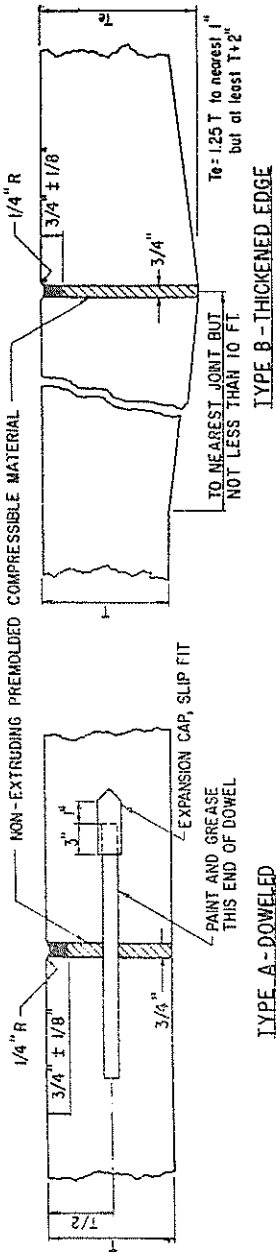
JOINT SPACING

Slab Thickness inches	PLAIN CONCRETE		REINFORCED CONCRETE	
	Longitudinal	Transverse	Longitudinal	Transverse
10 or less	12. 5' Max.	15'—20'	12. 5' Max.	45'—75'
Over 10	25. 0' Max.	20,—25'	25. 0' Max.	45'—75'

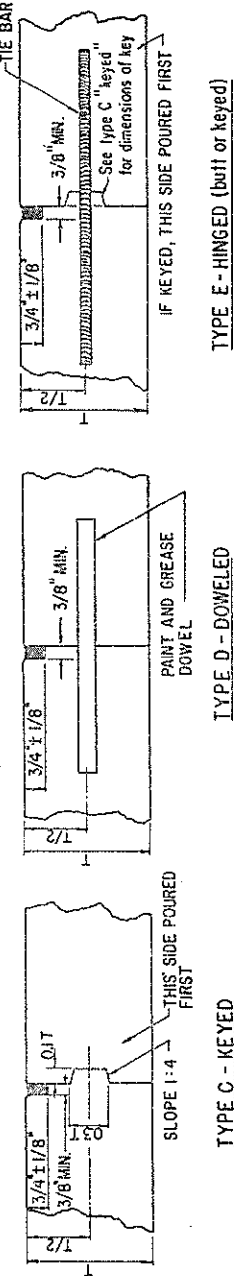
表一A.5 スリップバーの寸法と配置間隔 (F A A法)
 DIMENSIONS AND SPACING OF STEEL DOWELS

Thicness of Slab (inchs)	DOWEL		
	Diameter (inches)	Length (inches)	Spacing (inches)
6—7	3/4	18	12
8—10	1	18	12
11—12	1½	18	12

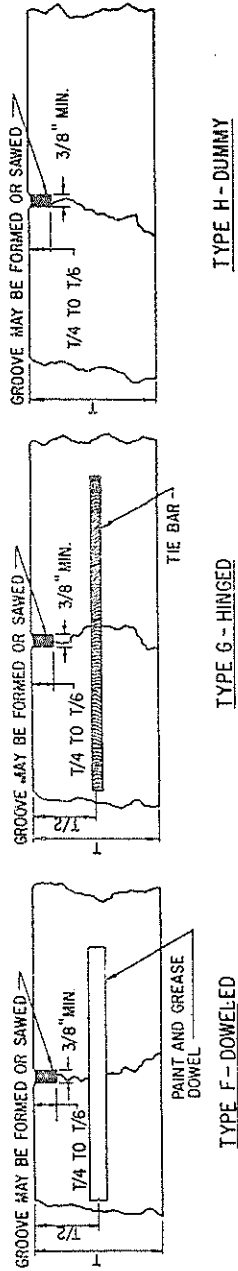
EXPANSION JOINTS



CONSTRUCTION JOINTS



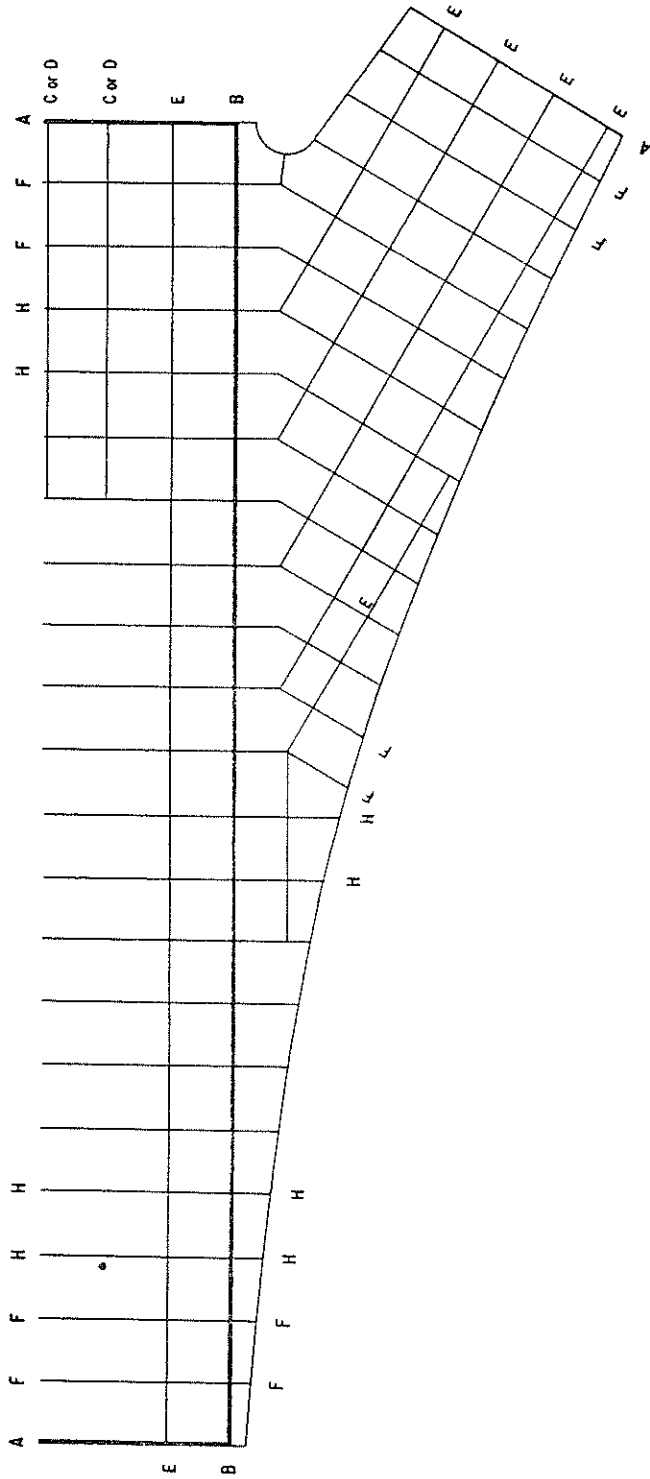
CONTRACTION JOINTS



NOTE
1. BLACK SHADED AREA IS JOINT SEALER.

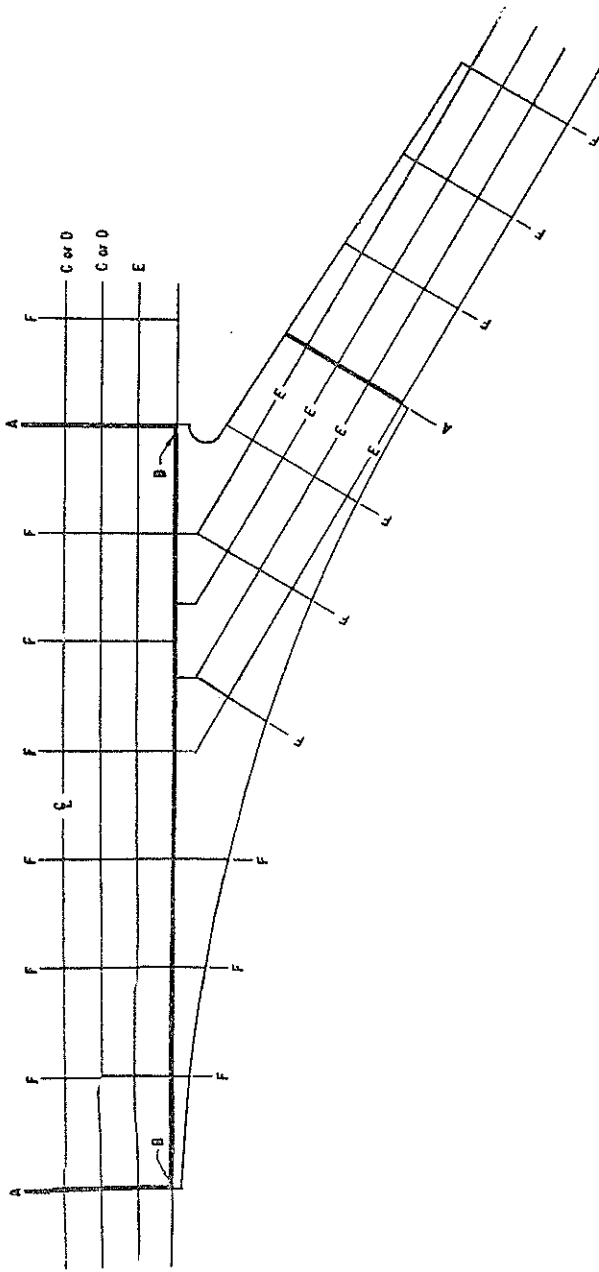
DETAILS OF JOINTS IN RIGID PAVEMENTS

図一A.6 剛性舗装の目地構造詳細 (F・A法)



ARRANGEMENT OF JOINTS AT INTERSECTION OF RUNWAY AND TAXIWAY (NONREINFORCED)

図一A.7 滑走路と誘導路の交差部の目地配置；無筋コンクリートの場合，表一A.3参照（F.A.A.法）



ARRANGEMENT OF JOINTS AT INTERSECTION OF RUNWAY AND TAXIWAY (REINFORCED)

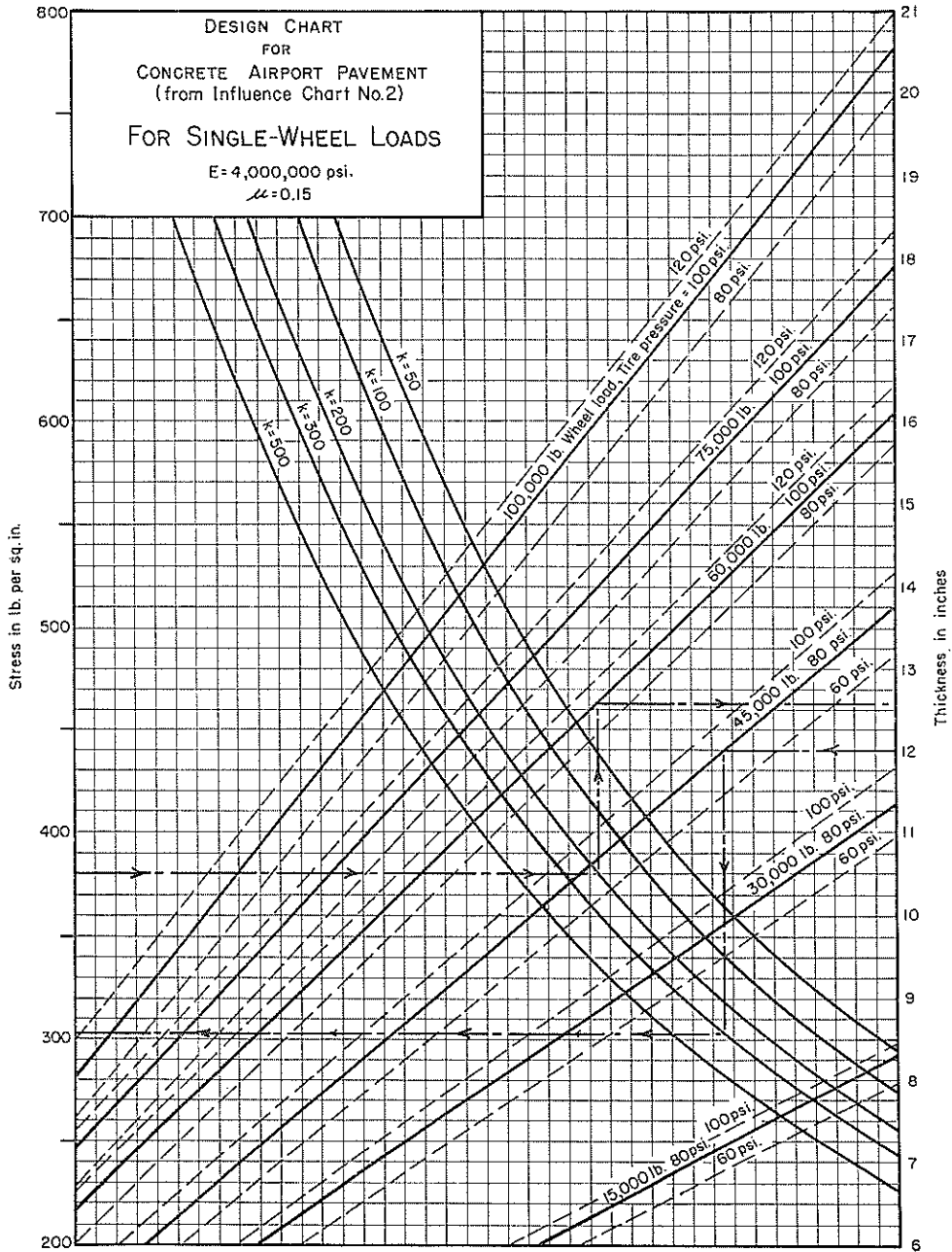
図一A.8 滑走路と誘導路の交差部の目地配置；鉄筋コンクリートの場合，表一A.3参照（F.A.A法）

2.3. 舗装版厚の決定

(1) 設計図表

舗装厚は、Westergaard の中央載荷公式に基づく影響図表から航空機の主脚車輪配置形式ごとに作られた設計図表を用いて決定する。これらの設計図表は、図一A.11、図一A.12、図一A.13 に示した通りで、それぞれ、単車輪、複車輪、複々車輪に対するものであ

る。現在就航中の民間航空機の大部分は、以上三つの車輪型式の内のどれかであって、これらの設計図表を作る際に考慮した実用航空機の諸元を、表一A.6に示す。表一A.7はその後の実用航空機の諸元である。これらの設計図表には、広範囲に亘る車輪荷重について作られており、路盤のK値と車輪荷重およびタイヤ圧をパラメーターとして、コンクリート版の作用応力と



図一A.11 単車輪荷重に対する舗装厚設計図表 (PCA法)⁸⁾

版厚の関係が与えられている。

また、図一A.14、図一A.15は特殊な高圧タイヤの軍用ジェット機用の設計図表である。

設計図表の作製に用いた航空機のタイヤ接地面積は、

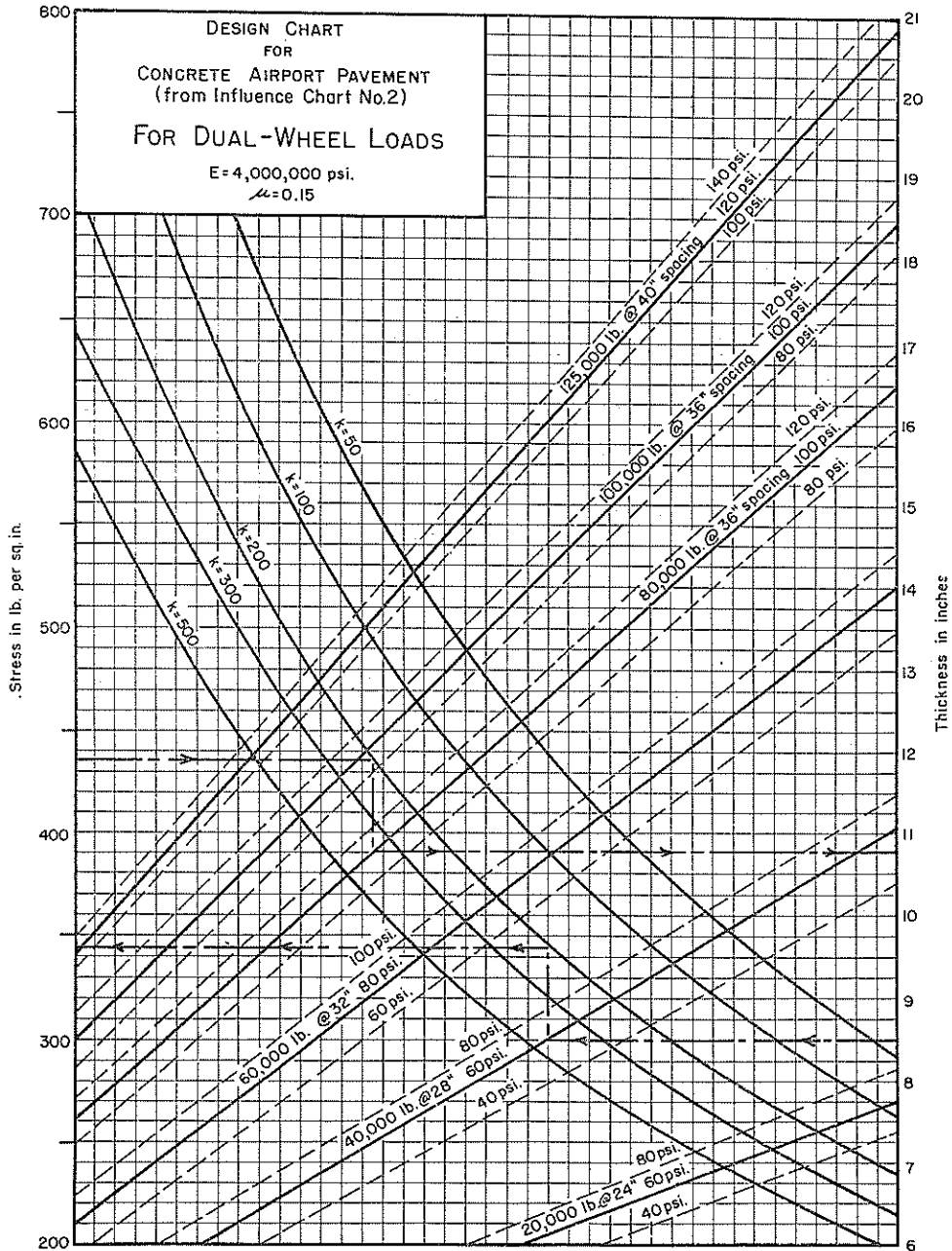
- (i) タイヤにかかる荷重をタイヤ圧で除したもの
- (ii) 形は、長方形の両端に半円を取付けたもので幅

は長さの $\frac{6}{10}$

と仮定している。

舗装厚は次の順序で、設計図表を用いて決定する。

- (i) コンクリートの曲げ強度を[適当な安全率で除し、コンクリートの作用応力を決定する。
- (ii) 路盤の支持力係数 K 値を決定する。
- (iii) 設計対象航空機の脚形式、脚荷重およびタイヤ



図一A.12 複車輪荷重に対する舗装厚設計図表 (PCA法)³⁾

圧を知る。

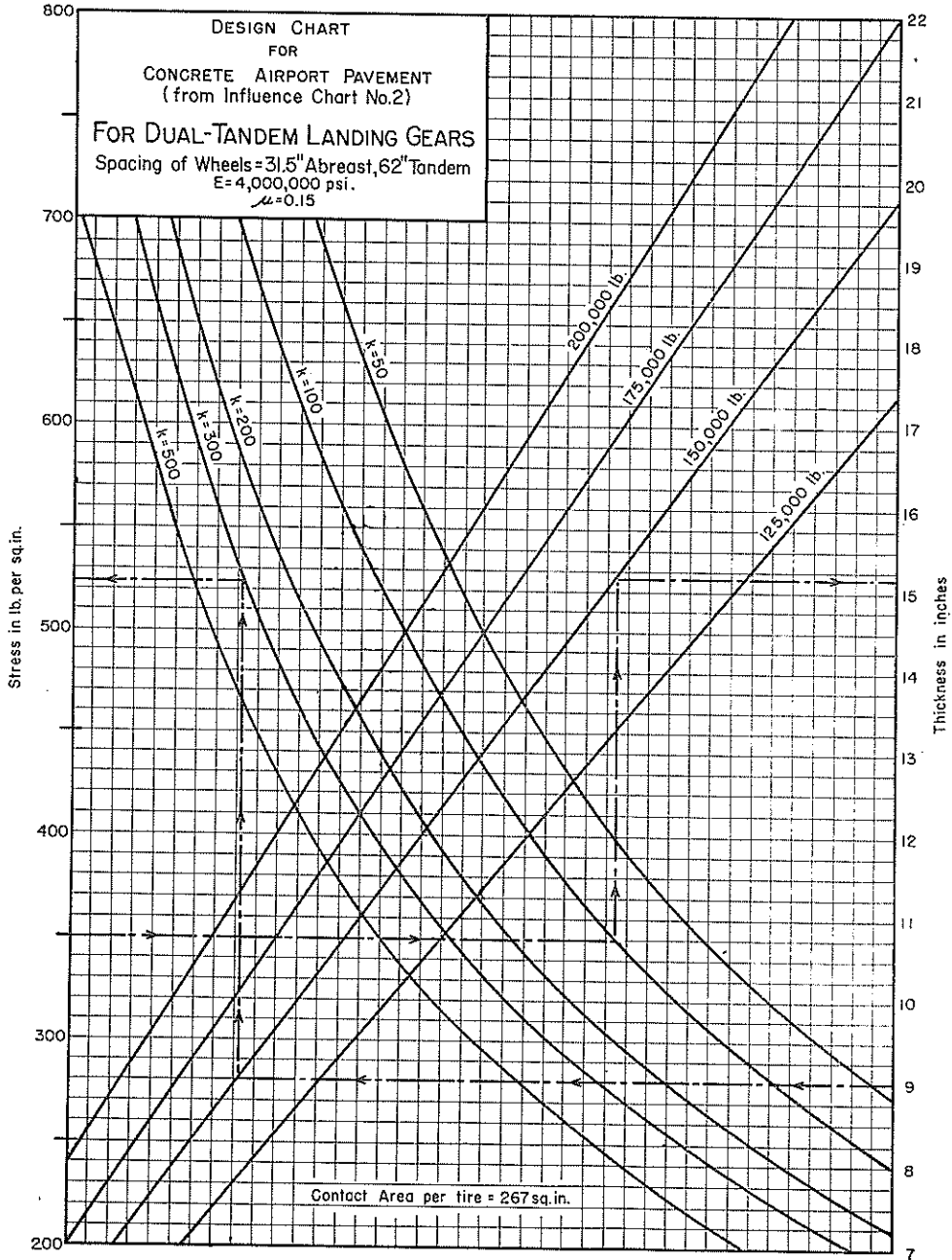
- (iv) 該当する設計図表の左軸に(i)の作用応力を取り、これから右に水平線を引き、(ii)のK値の曲線との交点から上または下に垂線を引き、(iii)の車輪荷重およびタイヤ圧の曲線との交点を求める。その交点から右に水平に進み右軸と交った点から舗装厚を読みとる。

(2) 安全率

PCA法では、次のような区域ごとの安全率を使用している。

- (i) エプロン, 誘導路, ハードスタンド, 滑走路末端部, 格納庫の床 1.7~2.0
- (ii) 滑走路中央部 1.25~1.5

滑走路中央部分については、揚力を受けた航空機が



図一.A.13 複々車輪荷重に対する舗装厚設計図表 (PCA法)⁹⁾

表-A.7 航空機の諸元：補遺 (P.C.A.)³⁾

SUPPLEMENTAL AIRCRAFT DATA (As an addendum to R 147, Design of Concrete Airport Pavement, dated 1955, March 1960)

		Main Landing Gear									
		Plane									
Manufacturer	Model Designation	Dimensions			Type of Gear	Dual Spacing	Tandem Spacing	Load (Each Gear)	Tire Pressure	Contact Area Per Tire	Total Gross Load
		Wing Span	Overall Length	Wing							
Boeing	B52 (Stratofortress)	185'	152'9"	185'	Twin Twin	37 in.	99 in.	125,650 R lb. 99,600 F	241 R psi 241 F	295 R sq. in. 245 R	462,200 lb.
Douglas	B66 C (Destroyer)	72'6"	75'2"	72'6"	Single	—	—	34,400	115	367	83,000
Lockheed	C130 B (Hercules)	132'7"	97'9"	132'7"	Single Tandem	—	60	57,000	58	490	135,000
Convair	C131 B (Samaritan)	105'4"	79'2"	105'4"	Dual	21.6	—	23,320	69	152	52,300
Douglas	C133 (Cargomaster)	179'8"	157'6"	179'8"	Dual Tandem	30.5	76.5	71,070	93	400 R	300,000
Boeing	K C133 (Stratotanker)	130'10"	136'3"	130'10"	Dual Tandem	36	60	134,000	134	250	250,000
Lockheed	1649 A (Starliner)	150'	116'2"	150'	Dual	30	—	74,050	137	270	156,000
Bristol	Britannia 300	142'4"	124'3"	142'4"	Dual Tandem	20.2 F 29.8 R	48	82,620	135	153	160,000
Lockheed	188 (Electra)	99'	104'6"	99'	Dual	26	—	53,600	149	180	116,000
Boeing	707-320	130'10"	144'6"	130'10"	Dual Tandem	34	56	136,000	145	235	296,000
Douglas	D C-8	139'9"	150'6"	139'9"	Dual Tandem	30	55	135,200	133	254	287,500
Convair	880	120'	129'4"	120'	Dual Tandem	21.5	45	95,200	132	180	184,500

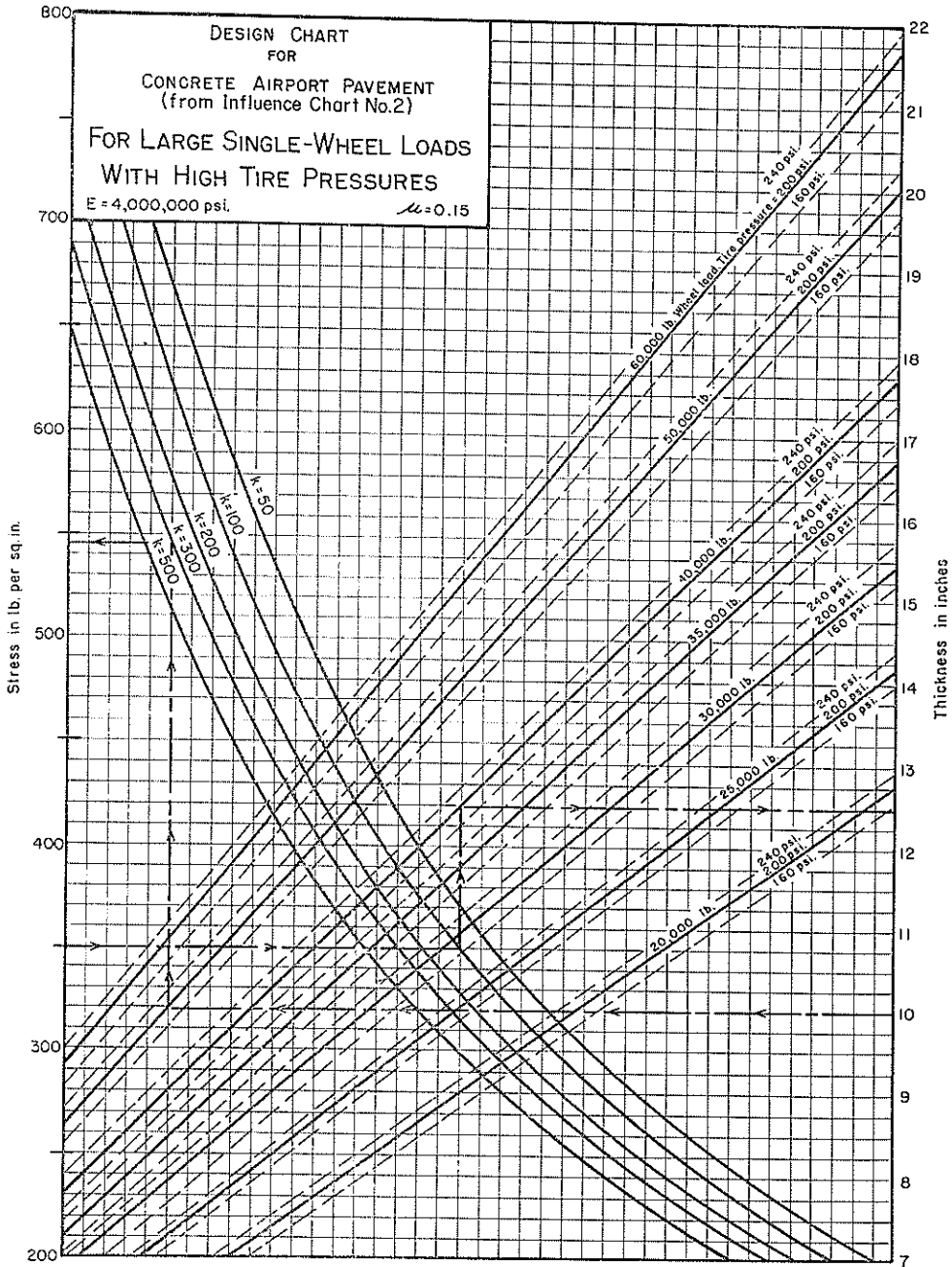
高速で通行すること。荷重の分布は広範囲に亘り、ある一つの地点についての荷重の繰り返し回数は少ないことなどによって、安全率を小さくしている

(3) 既設舗装の評価

版厚、コンクリートの曲げ強度および路盤のK値が既知の場合、舗装厚決定に用いるこれらの設計図表を

既設舗装の荷重支持能力を評価するのに利用できる。すなわち、与えられた安全率によって許容荷重を、また与えられた荷重によって安全率を決定できる。これは次の要領で行なう。

(i) コンクリートの曲げ強度を与えられた安全率で割って作用応力を出し、設計図表の左軸から水平



図一A.14 高圧タイヤの大型車輪荷重に対する舗装厚設計図表 (PCA法)³⁾

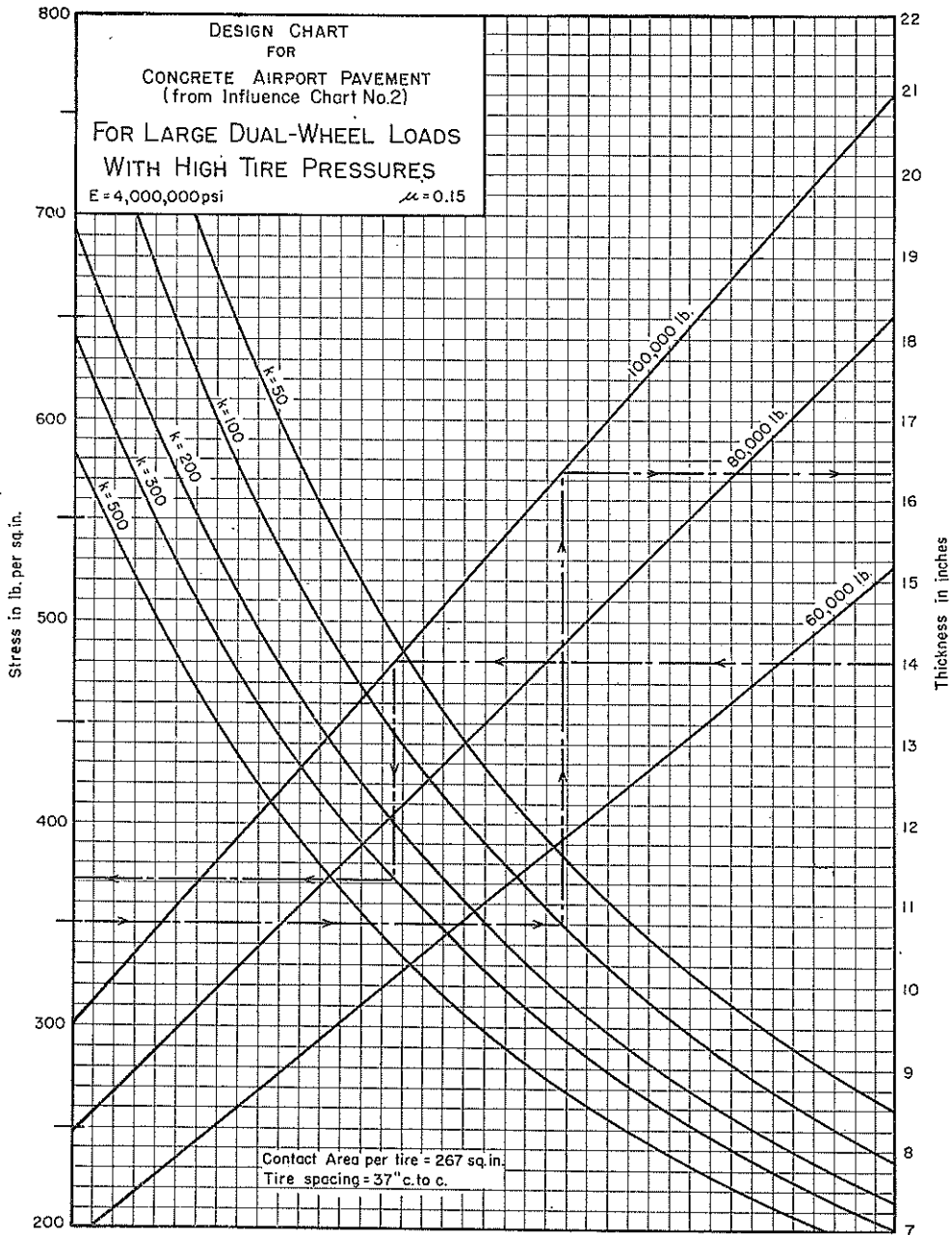
線を引いて、既知の K 値を示す曲線と交差させる。この交点を通る垂直線と右軸の舗装厚からの水平線との交点が、この舗装の許容航空機車輪荷重である。

(ii) (1)の舗装厚の決定とは逆の道筋を通して、舗装厚、与えられた車輪荷重、K 値を使用して作用応力を出す。コンクリートの曲げ強度との比である

安全率が(2)の範囲にあるかどうかを検討する。

2.4. ま と め

PCA法によるコンクリート舗装厚の設計は、Westergaard の中央載荷公式から、Pickett と Ray が作った影響図表に基づいて、航空機の主脚の車輪配置形式ごとに作った設計図表を用いて行なうものである。中央載荷



図一A.15 高圧タイヤの大型複車輪荷重に対する舗装厚設計図表 (PCA)⁹⁾

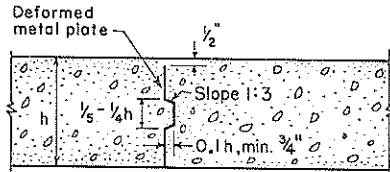
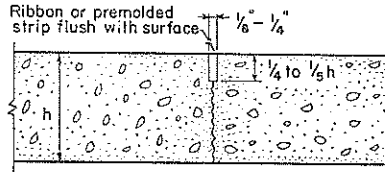
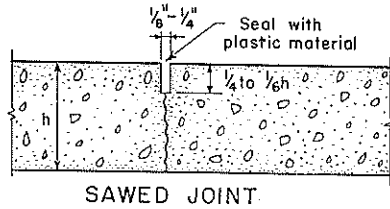
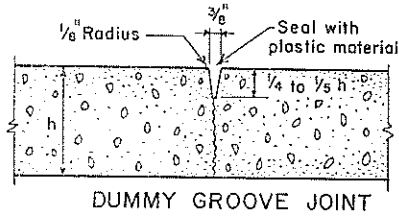
の条件は、総ての内部目地が十分な荷重伝達機能を有しているという仮定のもとに使われており、云い換えれば、本設計方法を用いる場合には、内部目地のすべてを、十分な荷重伝達能力をもつような構造のものにする

必要がある。

なお、図一A.16～A.23は本設計方法における目地の配置および構造細目ならびにタイパーおよびスリップバ一の設計図表を取纏めて示したものである。

LONGITUDINAL CENTER JOINTS

(Used in the center of all construction lanes over 12.5' wide when the pavement is less than 12" thick)



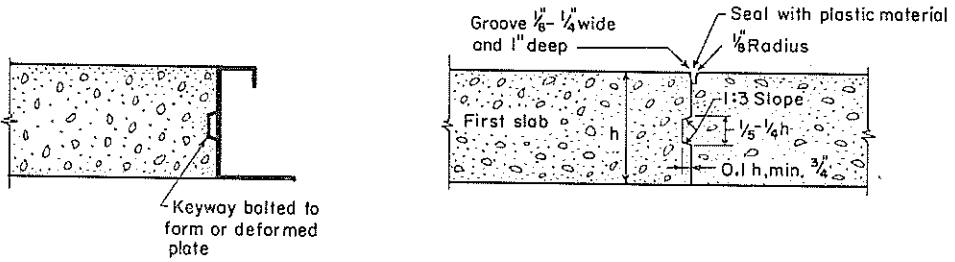
RIBBON OR PREMOLDED STRIP JOINT

DEFORMED METAL PLATE

Note: Deformed steel tiebars should be used across any of these joint types at a depth of $h/2$

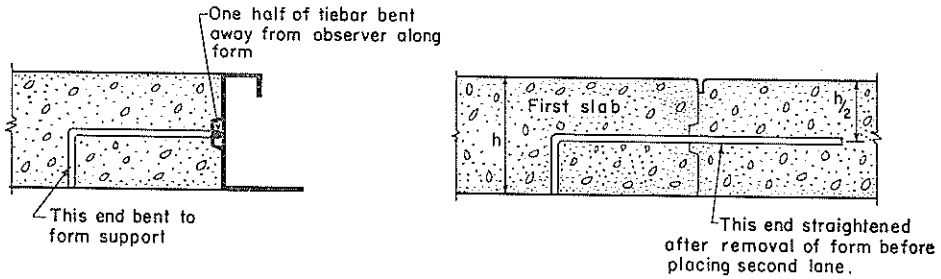
図一A.16 縦目地（版中央部）の構造（PCA法）

LONGITUDINAL CONSTRUCTION JOINTS



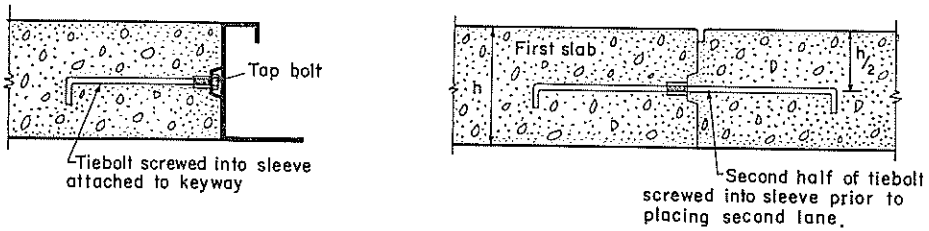
Groove and seal should be omitted in areas of severe jet blast.

UNTIED KEYED JOINT



All details and dimensions the same as untied joint above.

KEYED JOINT WITH TIEBAR



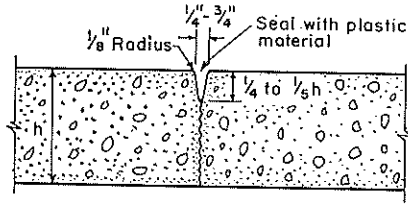
All details and dimensions the same as untied joint above.

KEYED JOINT WITH TIEBOLT

Note: Tiebars or tiebolts are used only at certain locations

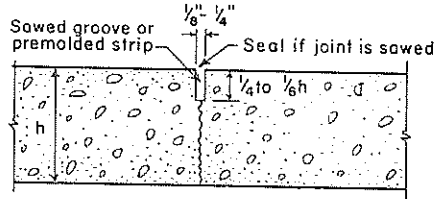
図-A.17 縦施工目地の構造 (PCA法)

TRANSVERSE JOINTS



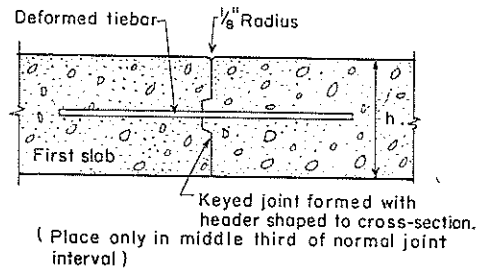
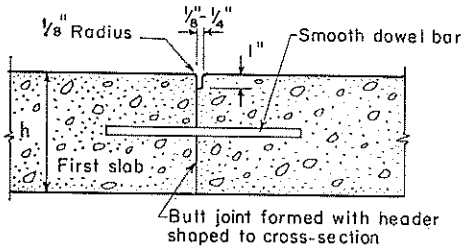
DUMMY GROOVE

Smooth dowel bars are used at contraction joints as outlined in text and Fig.13.

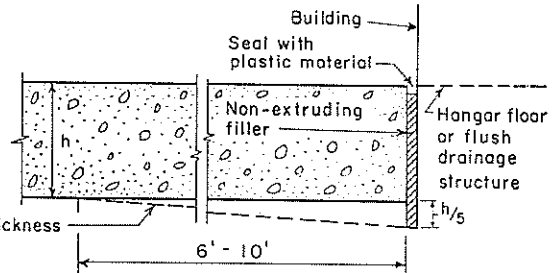
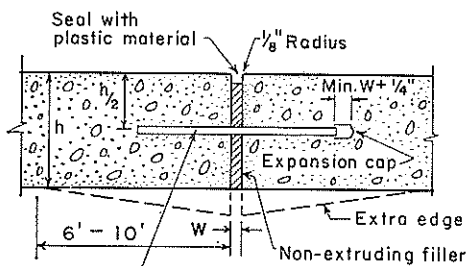


SAWED OR PREFORMED STRIP

CONTRACTION JOINTS



CONSTRUCTION JOINTS



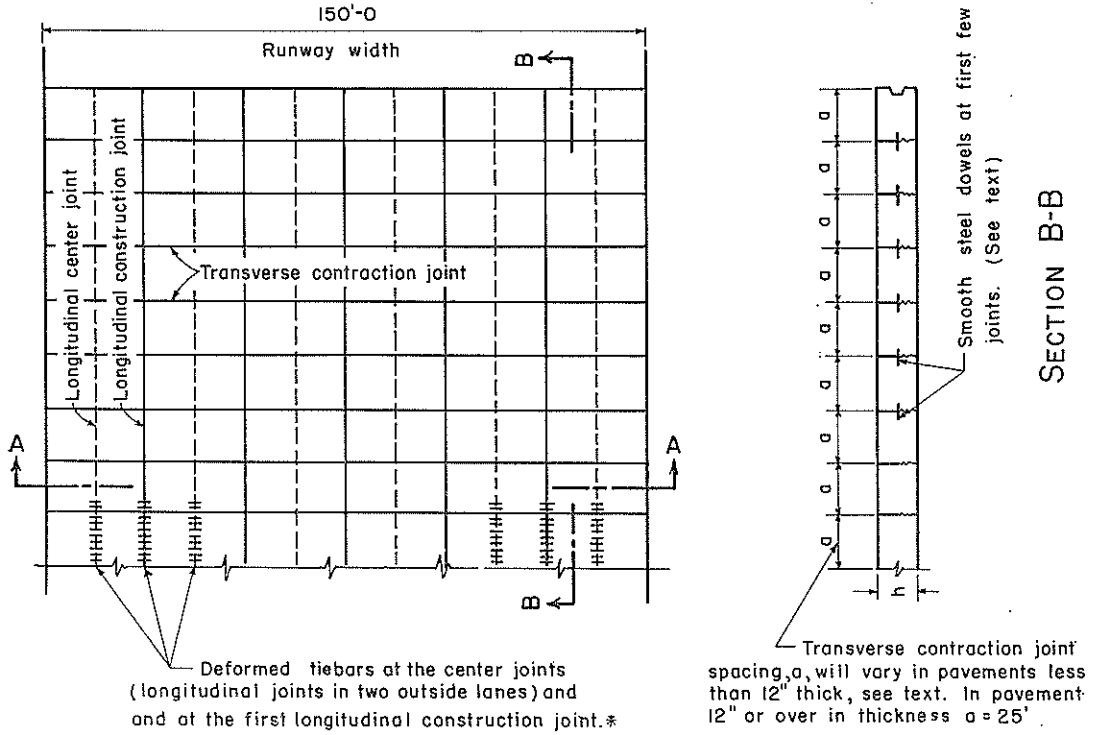
Smooth dowel bar to be painted and greased to prevent bond with concrete.

(Edge thickening used only at undoweled joints and abutting hangar floors at doorways, old pavement or flush structures permitting wheel loads to cross edge.)

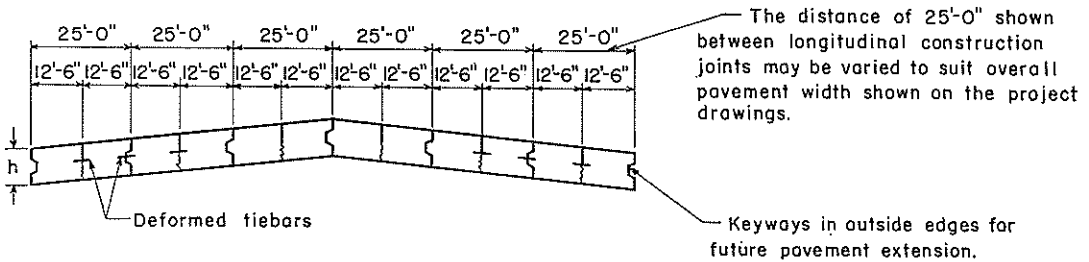
EXPANSION JOINTS

図-A.18 横目地の構造 (PCA法)

JOINTING PLAN FOR AIRPORT PAVEMENT



PLAN

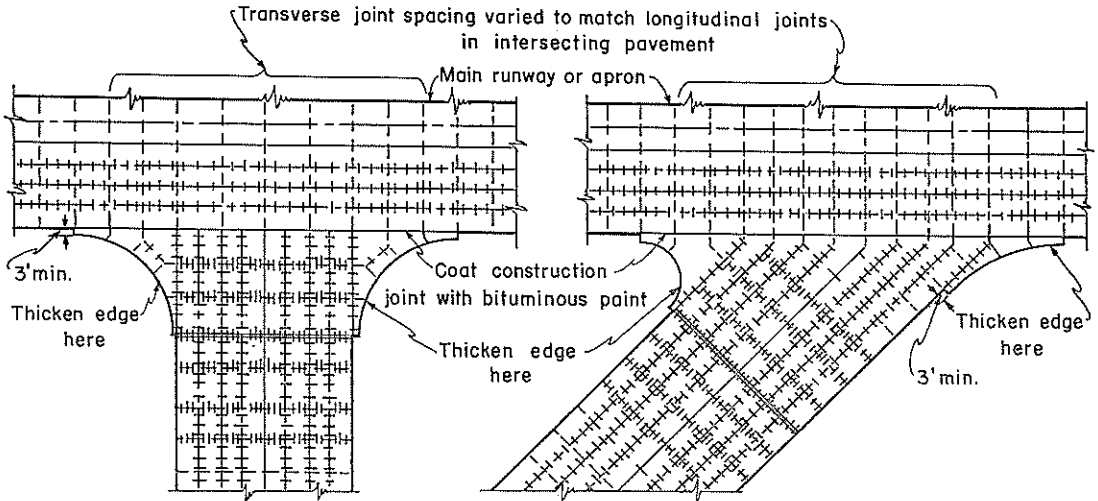


SECTION A-A

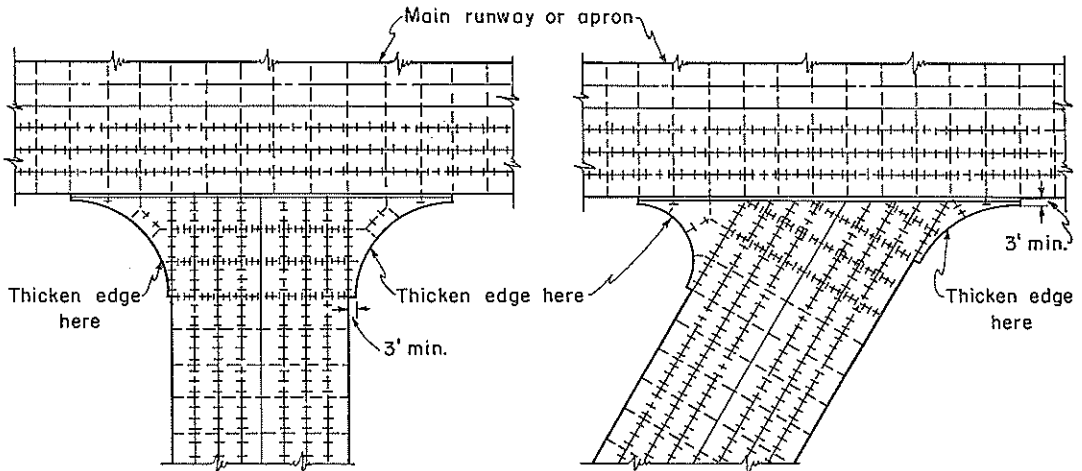
In pavements 12" thick or over the longitudinal center joints may be omitted.

図一A.19 空港舗装における目地配置 (PCA法)

TYPICAL PLANS FOR JOINTING AT INTERSECTIONS OF RUNWAYS, TAXIWAYS AND APRONS



LAYOUTS EMPLOYING UNTIED KEYED CONSTRUCTION JOINT AT INTERSECTION



LAYOUTS EMPLOYING UNDOWELED THICKENED-EDGE EXPANSION JOINT AT INTERSECTION

LEGEND

<p>———— Keyed longit. construction joint.</p> <p>+++++ " " " " with tiebars.</p> <p>----- Longitudinal center joint.</p> <p>+++++ " " " " with tiebars.</p>	<p>----- Transverse contraction joint.</p> <p>+++++ " " " " with dowels.</p> <p>##### Transverse expansion joint with dowels.</p> <p>===== Thickened-edge " " at intersection.</p>
---	--

図一A.20 滑走路、誘導路、エプロンの交差部における典型的な目地配置 (PCA法)

DESIGN CHART FOR TIEBARS

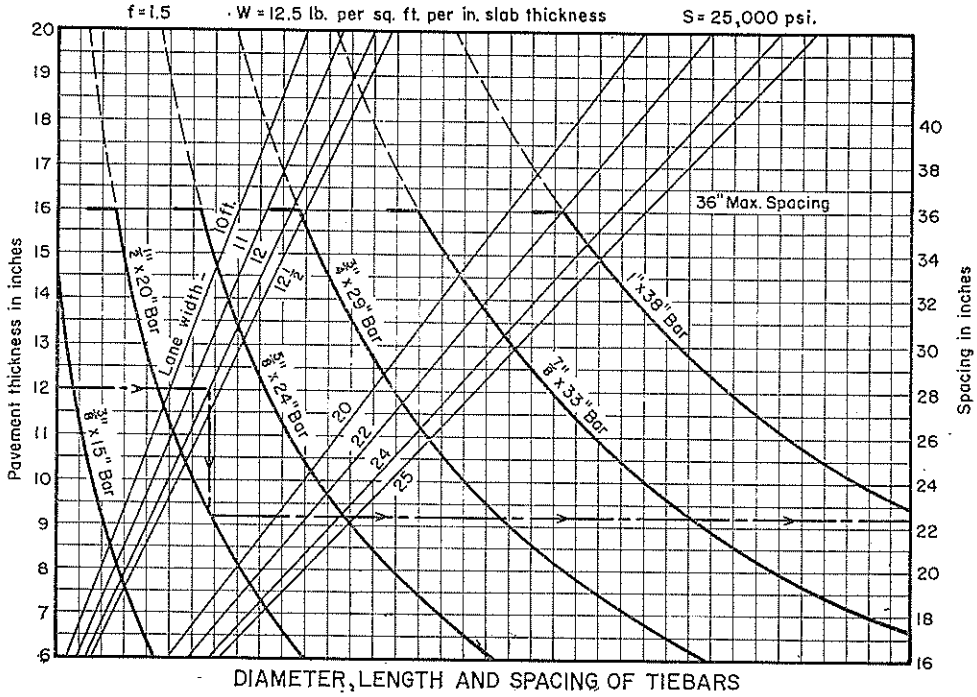
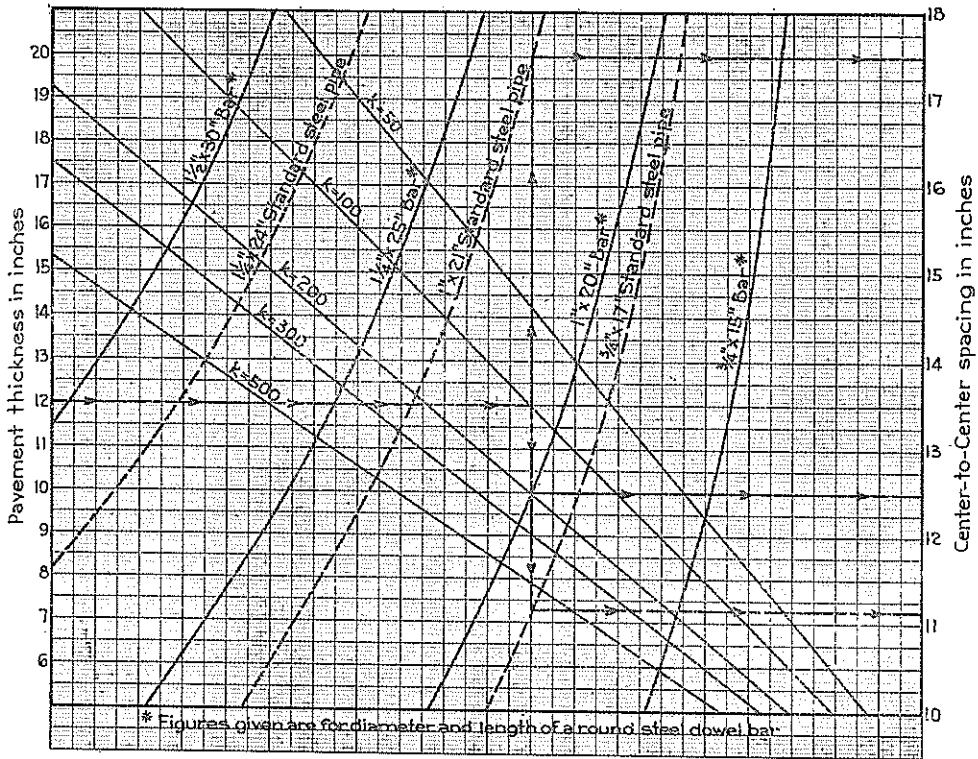
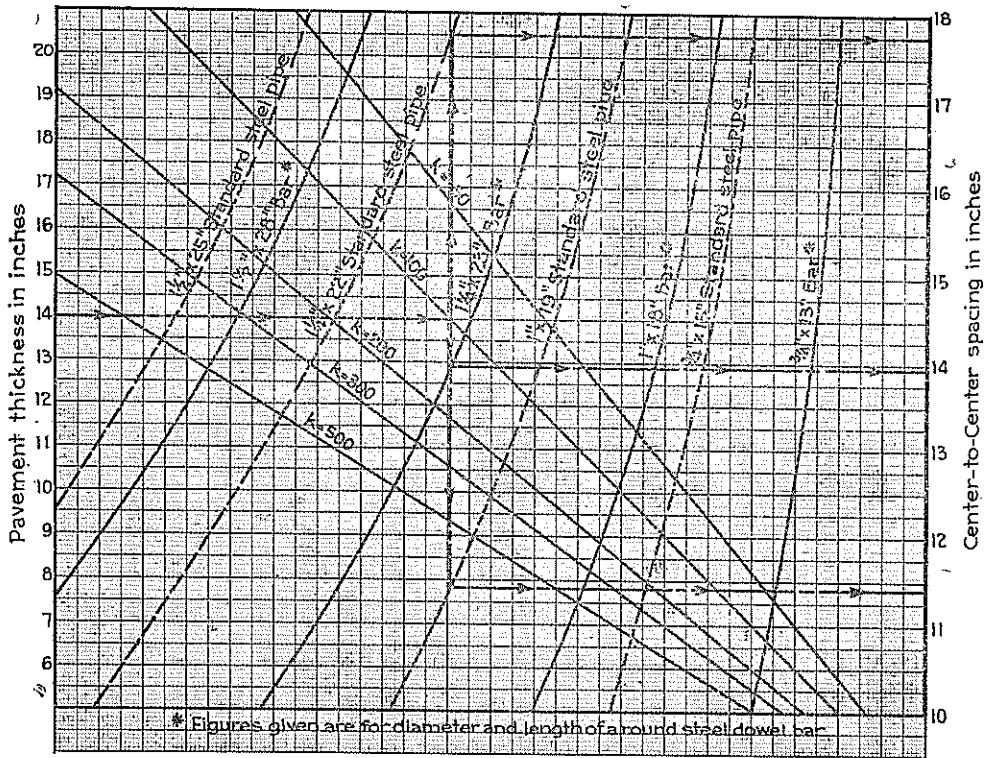


図-A.21 タイバー設計図表 (PCA法)



DESIGN CHART FOR DOWELS For use at Contraction and Construction joints

図-A.22 収縮および施工目地用スリッパー設計図表 (PCA法)



DESIGN CHART FOR DOWELS For use at Expansion Joints

図一A.23 膨張目地用設計図表 (PCA法)

3. 米国陸軍工兵隊 (Corps of Engineers) の方法

3.1. 路盤支持力係数

路盤支持力係数の測定方法および結果の修正方法は他の設計方法 (FAA法, PCA法など) の場合とほぼ同様であるが本方法で詳述する。

(1) 測定方法

(i) 試験場所の準備

支持力試験を行なうとする路盤面には、載荷板が部分的な点支持とならないよう砂あるいは焼石こう混合物を敷く必要がある。この層の厚さは点支持を避けるに必要な範囲で最小とする。

(ii) 載荷装置

荷重は水圧ジャッキを使用して、直径 75cm (30 in)、厚さ 25mm (1 in) の円形鉄製板に作用させる。実際には、載荷板の重さを減らすため鉄板の代わりにアルミニウム合金板を使う。この時には 25 mm 厚の鉄板と同じ剛度を得るため 4.0mm (1/8

in) 厚とする。75cm (30 in) 板の中心に載荷し、載荷板の剛度を増す目的で、直径 60cm (24 in)、45cm (18 in) の板を 75cm 板の上に重ね、その上から載荷する。

(iii) 載荷反力

ジャッキの反力はトラック、トレーラー、アンカーした棒などに支持され、その支持位置は載荷板中心から、240cm (8 ft) 以上離す。粒状土のときは反力は少なくとも 11 ton (25,000 ld) 必要であり、粘性土では 4.5 ton (10,000 ld) で十分である。試験荷重は偏心を避けるため、荷重とジャッキの間、あるいはジャッキと最上板 (45cm) の間に、球座を挿入して載荷する。

(iv) ダイアルゲージ

載荷による沈下量は、120° に等分した線上で 75cm 載荷板の縁から 6 mm (1/4 in) 以内に据えつけた少なくとも三つのダイアルゲージを用いて測定する。ゲージは載荷装置とは独立とし、また、ゲージは 1/400mm (0.0001 in) の精度のものが望ましいが時間を記録するならば 1/40mm (0.001

in) の精度のもので良い。

(v) 載荷方法

載荷装置と載荷板は、舗装設計厚が 38cm (15 in) 未満のとき(軽荷重舗装)には320kg (707 lb) (0.07kg/cm²=1 psi), 38cm (15 in) 以上のとき(重荷重舗装)には 620kg (1,414 lb) (0.14kg/cm²=2 psi) の荷重をかけて落着かせ、そのままダイヤルゲージの読みを零として、その荷重を除かず新たに 3,200kg (7,070 lb) (0.7kg/cm²=10 psi) の荷重をかける。この0.7kg/cm² (10 psi) の荷重を取り去る前にダイヤルゲージにより、載荷板の縁の平均沈下量を読み取り次式から Ku' 値を計算する。

$$Ku' = \frac{0.7 \text{ kg/cm}^2}{\text{平均沈下量 (cm)}}$$

$$(Ku' = \frac{10 \text{ psi}}{\text{平均沈下量 (in)}}$$

次に路盤の種類との Ku' 値によって次のように処置する。

- ① 粘性土で Ku' < 5.5kg/cm² (Ku' < 200 psi) のとき荷重を取り除く。ある種の粘土では時間一沈下の関係曲線を描く必要があり、一般に 0.005mm (0.002 in/min) もしくは 0.002 in/10min) 以下の沈下率になるまで、荷重をかけたままにして安全な沈下を起こさせる。
- ② 粒状土あるいは Ku' > 5.5kg/cm² (Ku' > 200 psi) の粘性土においては更に 1,600kg (3,535 lb) (0.35 kg/cm²=5 psi) づつ荷重を増してゆき、9,600kg (21,210 lb) (2.1kg/cm²=30 psi) まで載荷する。このとき荷重一沈下曲線を記録する。各荷重は、少なくとも16mm以上載荷を続け、2.1kg/cm² (30 psi) は 0.0025mm/min (0.0001 in/min) もしくは 0.001 in/10 min) 以下の沈下率になるまで載荷を続ける。

(2) 測定結果の修正

(i) 荷重一沈下曲線の修正

前節の (1)(v)① の場合、すなわち、粘性土で Ku' < 5.5kg/cm² (Ku' < 200 psi) のときには 0.7 kg/cm² (10 psi) に対する実測沈下量で計算し、荷重一沈下曲線を修正する必要はない。(v)②の粒状土あるいは Ku' > 5.5kg/cm² (Ku' > 200 psi) の粘性土の場合には荷重一沈下曲線を直線に修正する必要がある。一般にこの曲線は、0.7~2.1kg/cm² (10~30 psi) の間は、ほぼ直線であり、原点を通る直線に平行になるよう修正直線を引く。この直線上で0.7kg/cm² (10 psi) に対する沈下量を

計算に用い Ku' とする。

(ii) 載荷板のたわみに対する修正

載荷されたとき、載荷板にはかなりのたわみを生ずる。たわみは縁よりも中心付近の方が大きいので縁で測定する沈下量は小さく、従って Ku' は実際より大きく計算される。前節(1)(v)で計算し(2)で修正した Ku' を用いて、図-A.24 から載荷板のたわみについて修正した Ku が得られる。Ku' < 3.9kg/cm² (Ku' < 100 psi) のときは、載荷板のたわみによる修正は無視し Ku = Ku' とする。

(iii) 飽和条件に対する修正

飽和条件に対する修正は、不攪乱試料を用いた現場含水比および飽和状態の供試体による圧密試験の結果により行なう。本荷重をかける前に現場試験と同じ荷重をかけて供試体を安定させる。次に各状態について上記のように行なう。

① 現場含水比供試体の場合

上記安定化荷重を垂直変位が安定するまでかけ続け、ダイヤルゲージの読みを零として続けて 0.7 kg/cm² (10 psi) の荷重をかける。この荷重は垂直変位が停止するまでかけ、総沈下量を記録する。

② 飽和供試体の場合

安定化荷重をかけた状態で浸水し飽和させる。垂直変位が安定後零の読みとり、0.7kg/cm² (10 psi) をかけ総沈下量を記録する。この場合、ある種の土においては飽和したとき膨張し試料の押し出しを生ずる。このため載荷されたとき、圧密されるよりもむしろ絞り出されることになり正確な結果が出ない。この状態を避けるため、膨張性の土あるいは膨張されると思われる土のときは、試料を容器一ぱいに入れず膨張のための余地を約 1.6mm (1/16 in) 程度とって試験を行なう。この場合には①の現場含水比のものも同じ量で試験を行なう。

以上の結果により飽和に対して次式を用いて修正する。

$$K = \frac{d}{ds} \times Ku$$

ここで

K : 飽和に対して修正した値で設計に使用する K 値。

Ku : 板のたわみについて修正し、飽和に対して修正してない値。

d : 現場含水比で 0.7kg/cm² (10 psi) に対する供試体の変形。

ds : 飽和状態で 0.7kg/cm² (10 psi) に

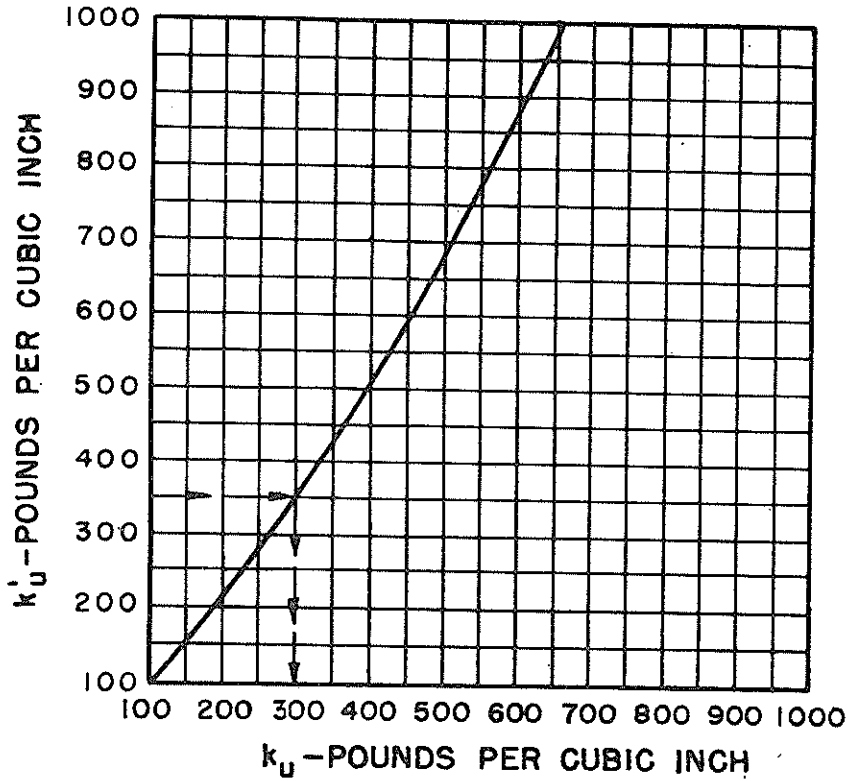


CHART FOR CORRECTION OF K_u FOR BENDING OF THE PLATE

図一A.24 載荷板の撓みについての K_u の修正図表 (CE法)

対する供試体の変形。

ただし

$$d/d_s \leq 1.0$$

3.2. コンクリートの特性

(1) 諸性質

コンクリートの弾性的性質を示す弾性係数 E とポアソン比 μ は、本設計方法における設計図表の作製に当って、 $E=280,000\text{kg/cm}^2 (4 \times 10^6 \text{psi})$ 、 $\mu=0.20$ と仮定している。

また、3～7%の空気量を含んだAEコンクリートはワーカビリティが改善され、分離が少なく、コンクリートのブリージングも少なく、舗装の耐久性を大いに改善する。しかし、AEコンクリートでは曲げ強度にかなりの減少をきたす恐れがあり、設計の際の曲げ強度の選定に考慮する必要がある。

(2) 曲げ強度

本設計方法のコンクリート曲げ強度は90日強度である。強度試験の供試体の寸法は一辺 $15\text{cm} (6 \text{in})$ の正

方形断面で $45\text{cm} (18 \text{in})$ のスパンで試験するに十分な長さのものとする。粒径 $50\text{mm} (2 \text{in})$ 以上の骨材が混合しているときは、供試体作製前に、コンクリートを $50\text{mm} (2 \text{in})$ 網フレイを用いて湿式フレイ分けするものとする。

3.3. 舗装版厚の決定

(1) 版厚の決定

コンクリート舗装版の厚さは図一A.25～A.31の設計図表を用いて脚荷重に対して設計する。

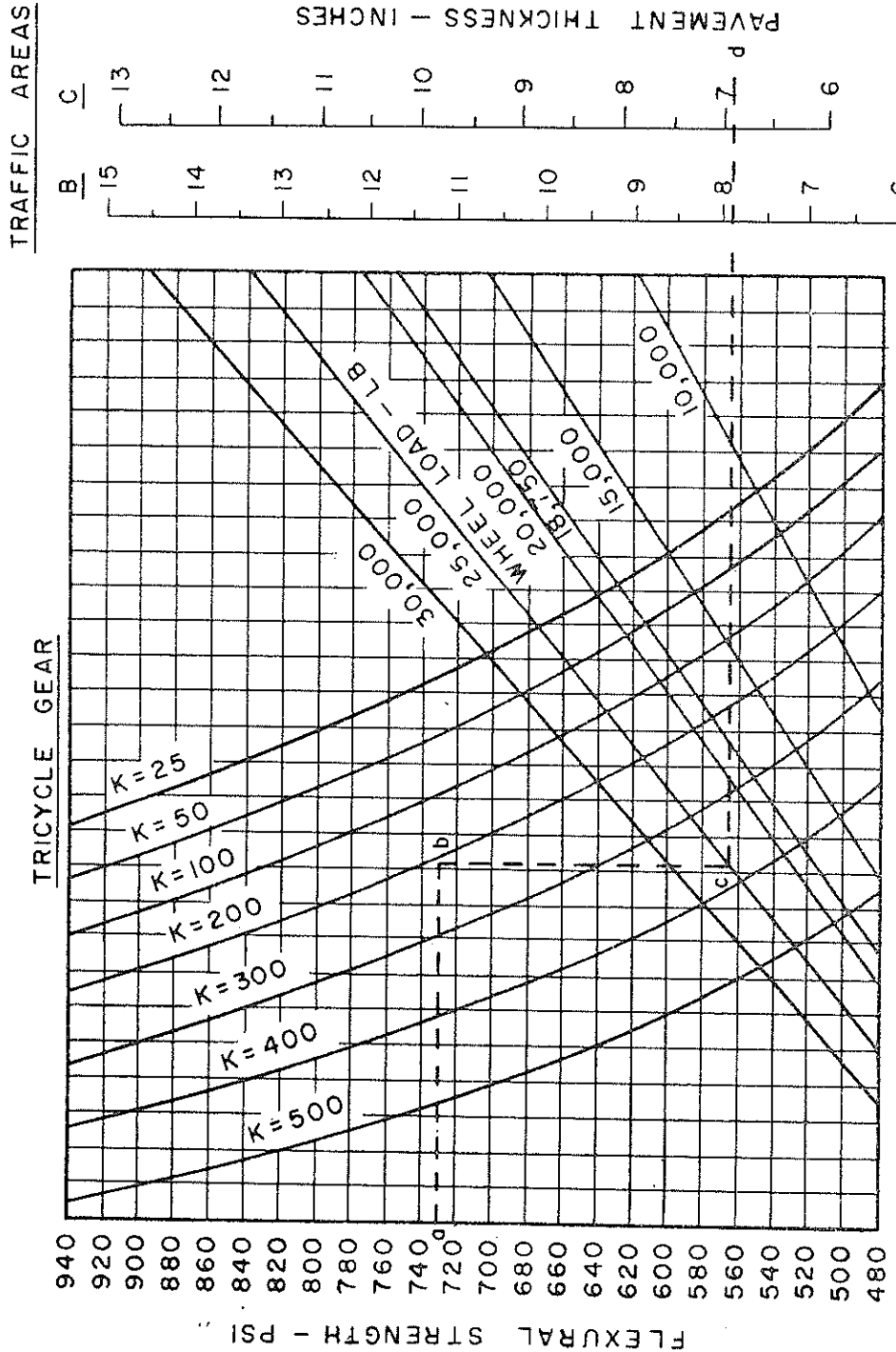
(i) 設計図表の使用

路盤支持力係数とコンクリートの曲げ強度を設計図表に挿入して必要厚を決定する。各車輪形式についての詳細な方法は次節に詳述する。安全率は設計図表に含まれており、設計図表を用いる場合にはコンクリート曲げ破壊強度を直接使用する。版厚の最小値は $15\text{cm} (6 \text{in})$ である。これらの設計図表から得られた厚さが $6 \text{mm} (1/4 \text{in})$ 以上の端数を持つときは切り上げて整数値とする。

(ii) 種々の脚荷重に対する設計図表

図一A.25～A.29の設計図表は三輪車式脚配置 (tricycle-type landing gears) の航空機に対するもので、主脚荷重は航空機総重量の45%と仮定している。

図一A.30～A.31は自転車式脚配置 (bicycle-type landing gears) の多車輪航空機に対するもので、航空機総重量の48%が前脚に、52%が後脚に分布すると仮定している。

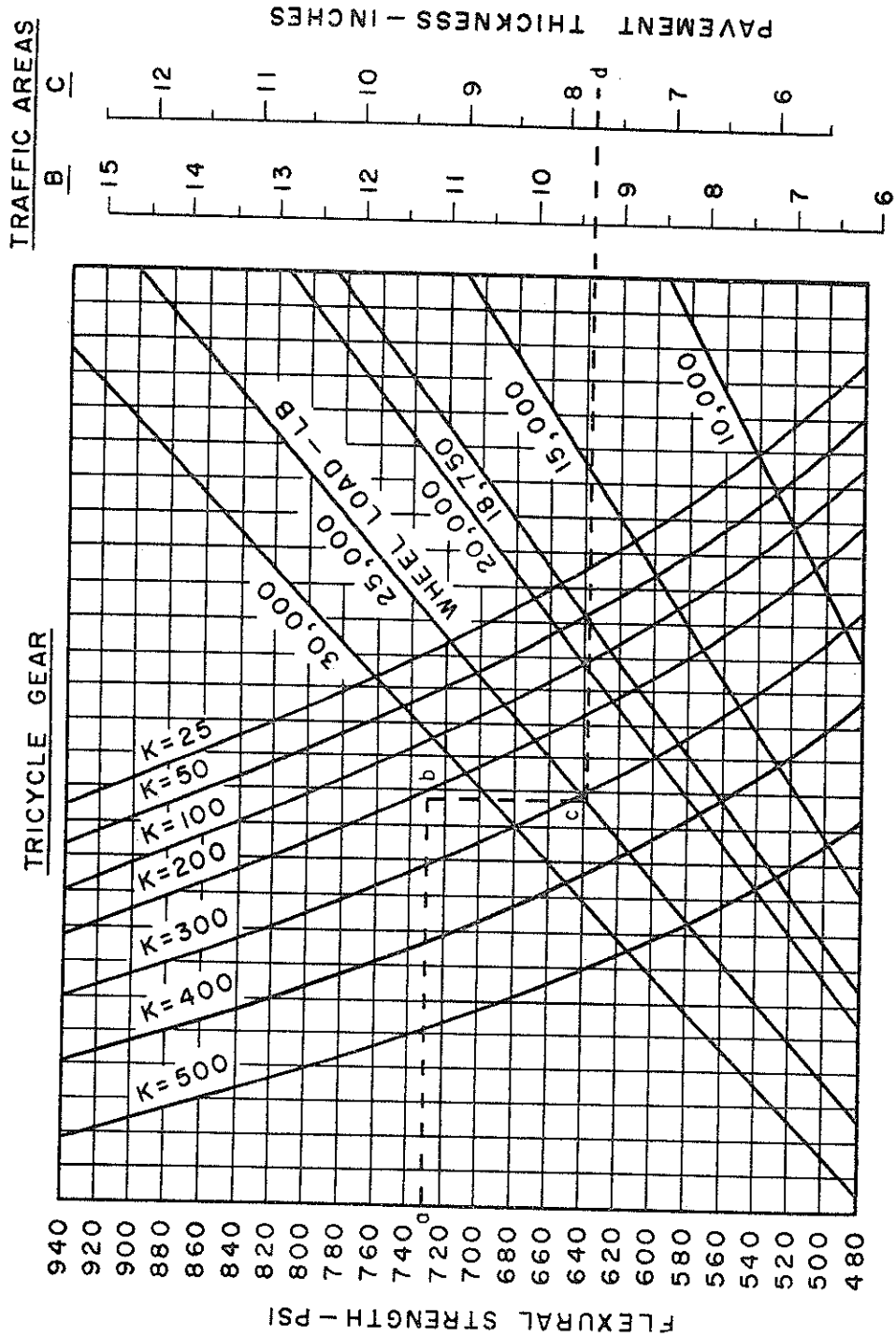


DESIGN CURVES FOR CONCRETE AIRFIELD PAVEMENTS: SINGLE WHEEL-100 PSI INFLATION PRESSURE

図一A.25 タイヤ圧7kg/cm²の単車輪荷重に対する舗装厚設計曲線 (CE法)

これらの設計図表は次節で詳述するように、Westergaard の縁部載荷公式を使用し、目地の荷重伝達を 25% と仮定して作製したものである。また、5000回の荷重の繰り返し (coverage), そりおよび

温度応力などの影響を考慮して、設計係数1.30を用いて割増しをしている。すなわち、作用輪荷重をPとして、 $0.75P \times 1.30 = 0.98P$ を縁部公式に使用する。



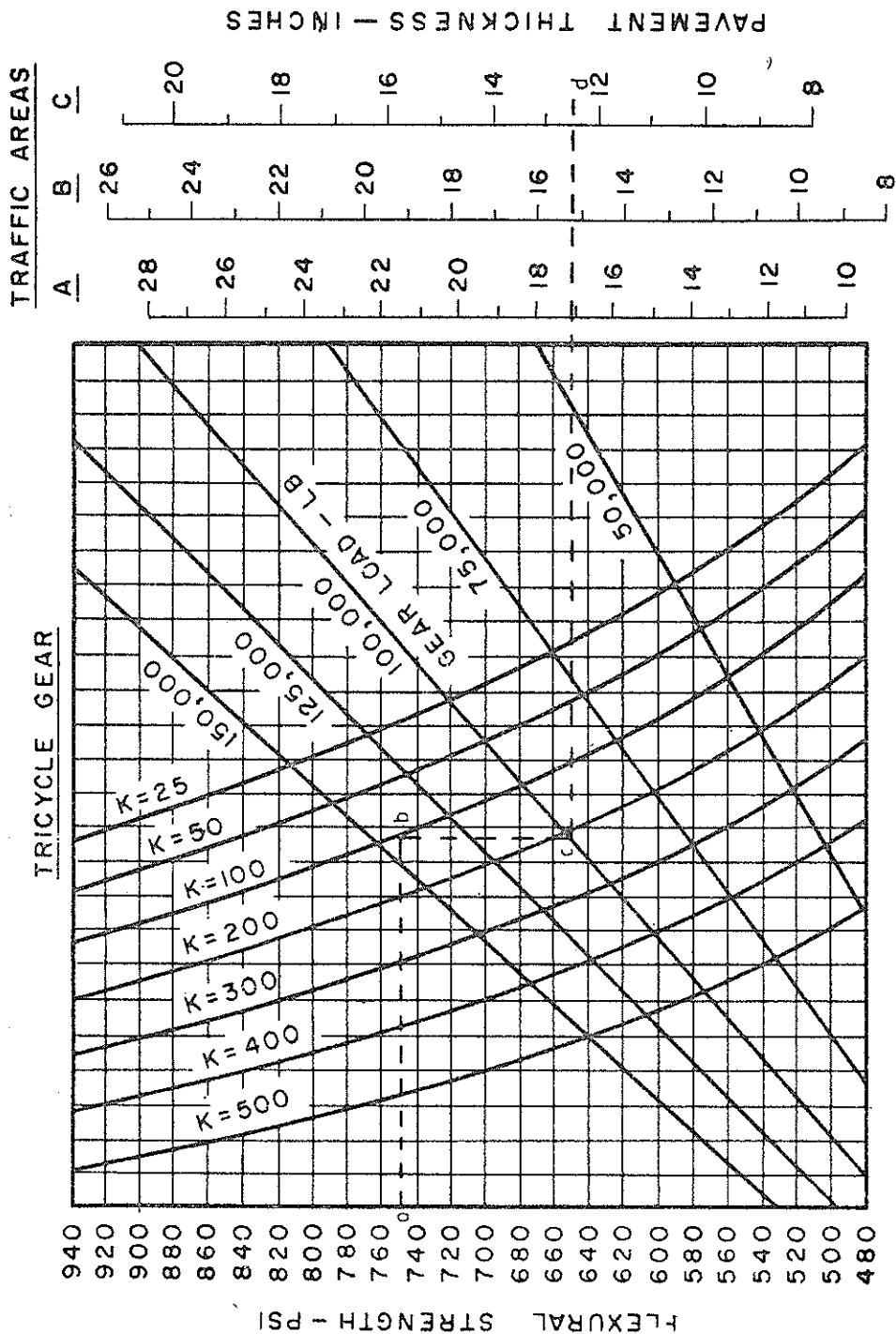
DESIGN CURVES FOR CONCRETE AIRFIELD PAVEMENTS: SINGLE WHEEL 100 SQ IN. CONTACT AREA

図一A.26 接地面積 64.5cm² の単車輪荷重に対する舗装厚設計曲線 (C.B.法)⁴⁾

(2) 交通域 (traffic area) の区分

各舗装区域について必要な舗装厚を決定するためには、各舗装が受ける実際の荷重と交通量について考慮すべきである。飛行場における荷重と交通量について

は、陸軍工兵隊や空軍によってかなり明らかにされており、普通に供用されている飛行場ではその使用状況によって、4つの交通域 (A, B, C, D) に分けて必要な舗装厚を決めている。各区域に対して必要な舗



DESIGN CURVES FOR CONCRETE AIRFIELD PAVEMENTS: TWIN WHEELS SPACED 37" C. TO C.

(267 SQ IN CONTACT AREA EACH WHEEL)

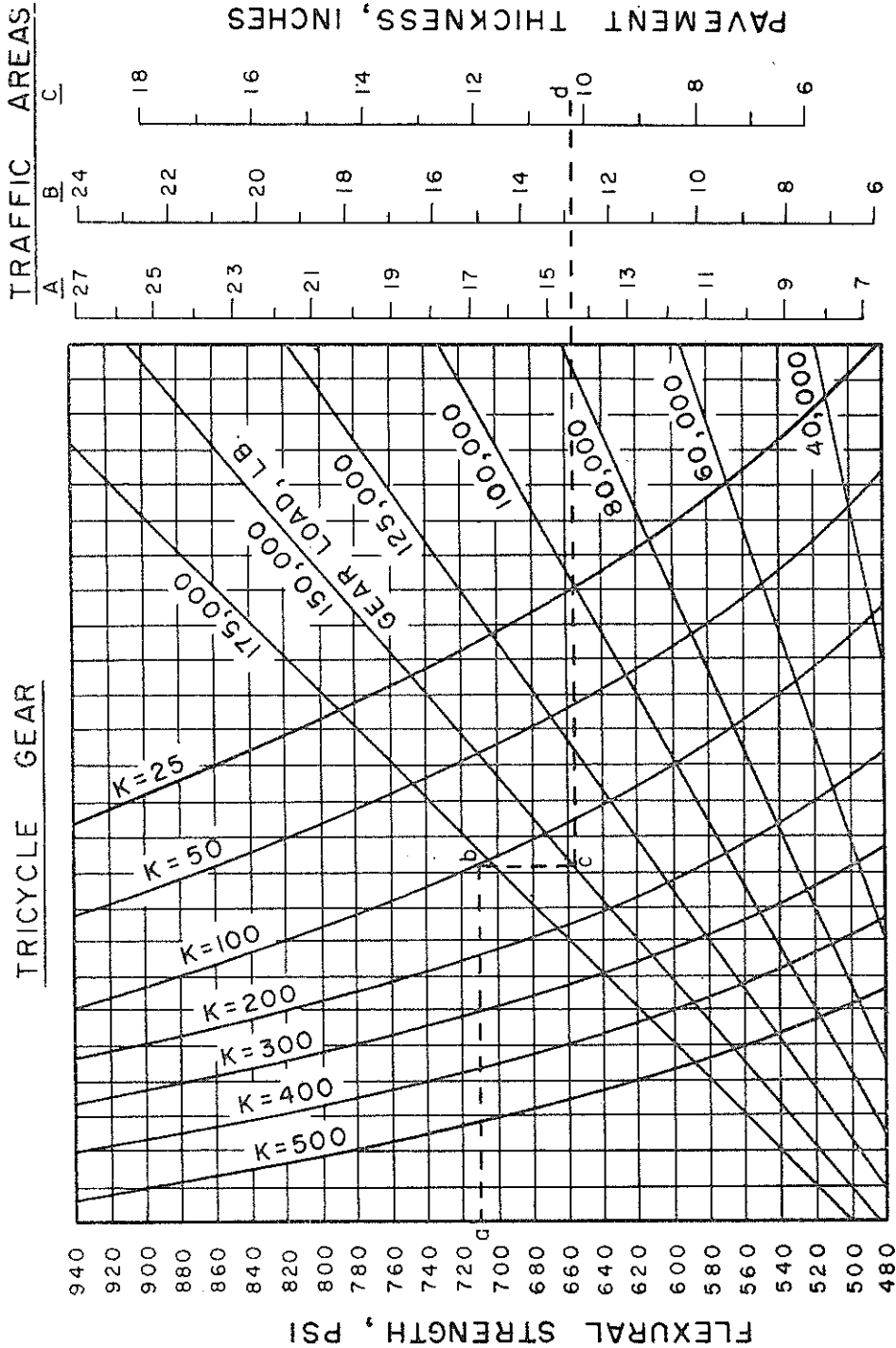
図一A-27 三輪車式脚配置複車輪荷重に対する舗装厚設計曲線 (C工法)

装厚は図一A. 25～A. 31の設計図表にそれぞれ示されており、各区域の舗装原間の関係は、おおよそ次のとおりである。

$$t_A = 1.125t_B, \quad t_C = 0.9t_B$$

ここで、 t_A , t_B , t_C はそれぞれ、A, B, C交通域に対する所要舗装厚である。

各交通域の区分は次のとおりであって、その詳細は図一A. 23～A. 34に示した通りである。



DESIGN CURVES FOR CONCRETE AIRFIELD PAVEMENTS: TWIN-TANDEM WHEELS SPACED 36" x 60" C. C. (260 SQ IN. CONTACT AREA EACH WHEEL)

図一A. 28 三輪車式脚配置複々車輪荷重に対する舗装厚設計曲線 (C E E法)

(i) A型交通域

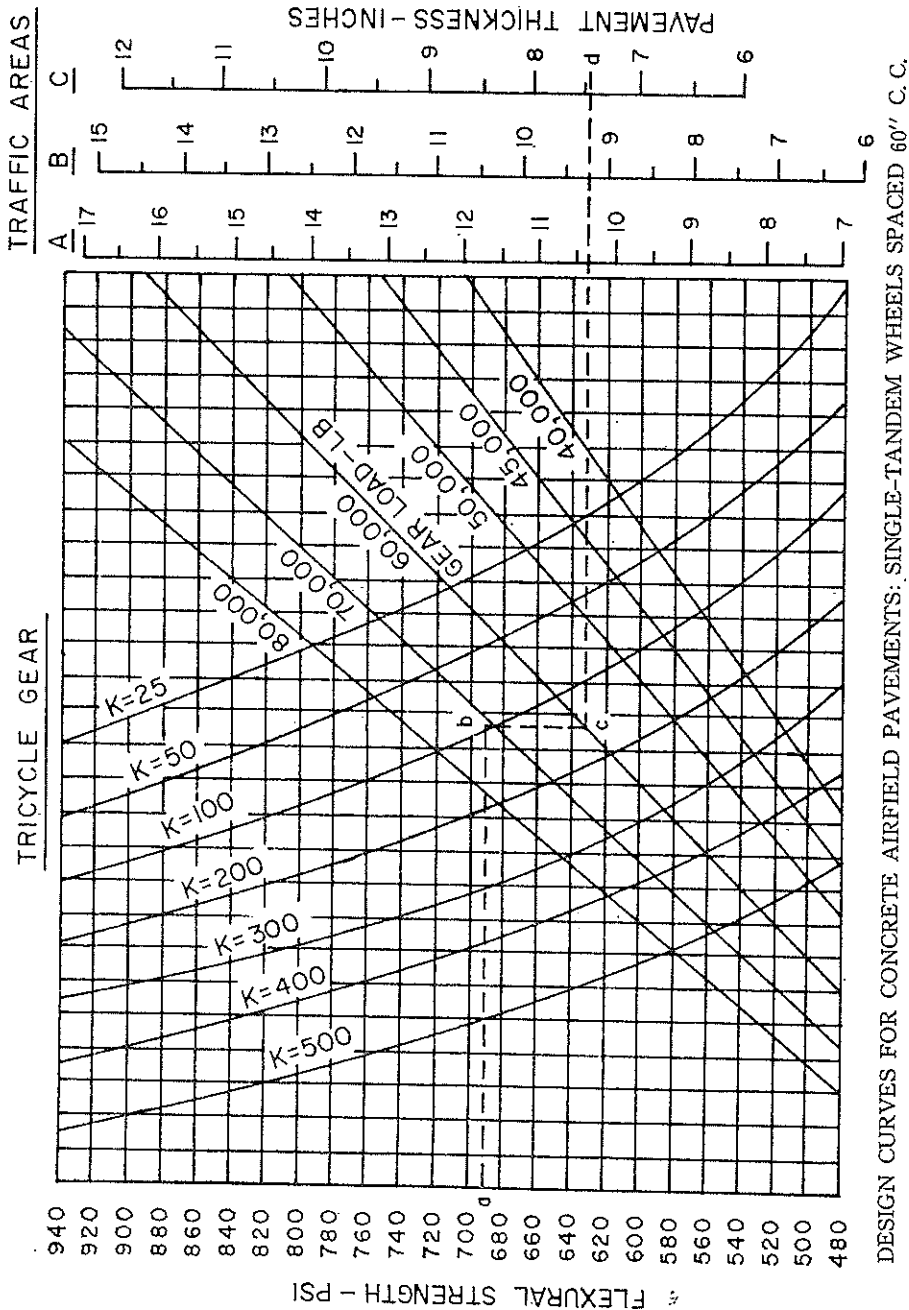
A型交通域と考えられる地域は次のとおりであり、交通が集中し (channelized traffic) 設計荷重一ぱいの重多車輪爆撃機や貨物輸送機の作用する舗装区域である。

① 主誘導路あるいはその一部 (平行および接続誘導路)

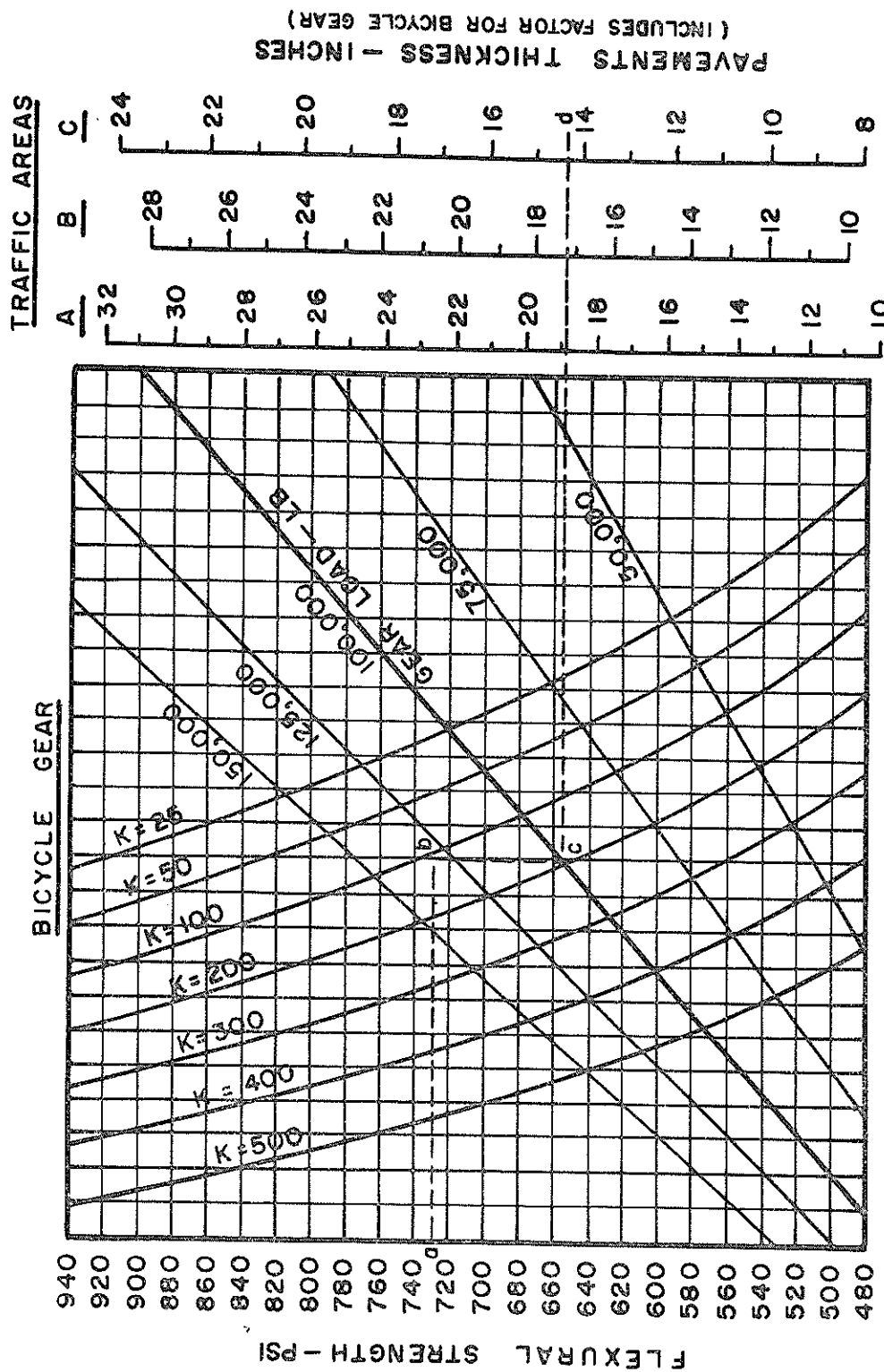
② エプロン上の通過誘導路あるいはその一部

③ 滑走路端部の 150m(500 ft)

これらの舗装に対する所要厚は多車輪に対する図一A. 27~A. 31のA欄を用いて決める。単車輪荷重に対する図一A. 25~A. 26 にはA欄を設けてないが、これらの航空機では交通の集中は生じないと考えられるからである。



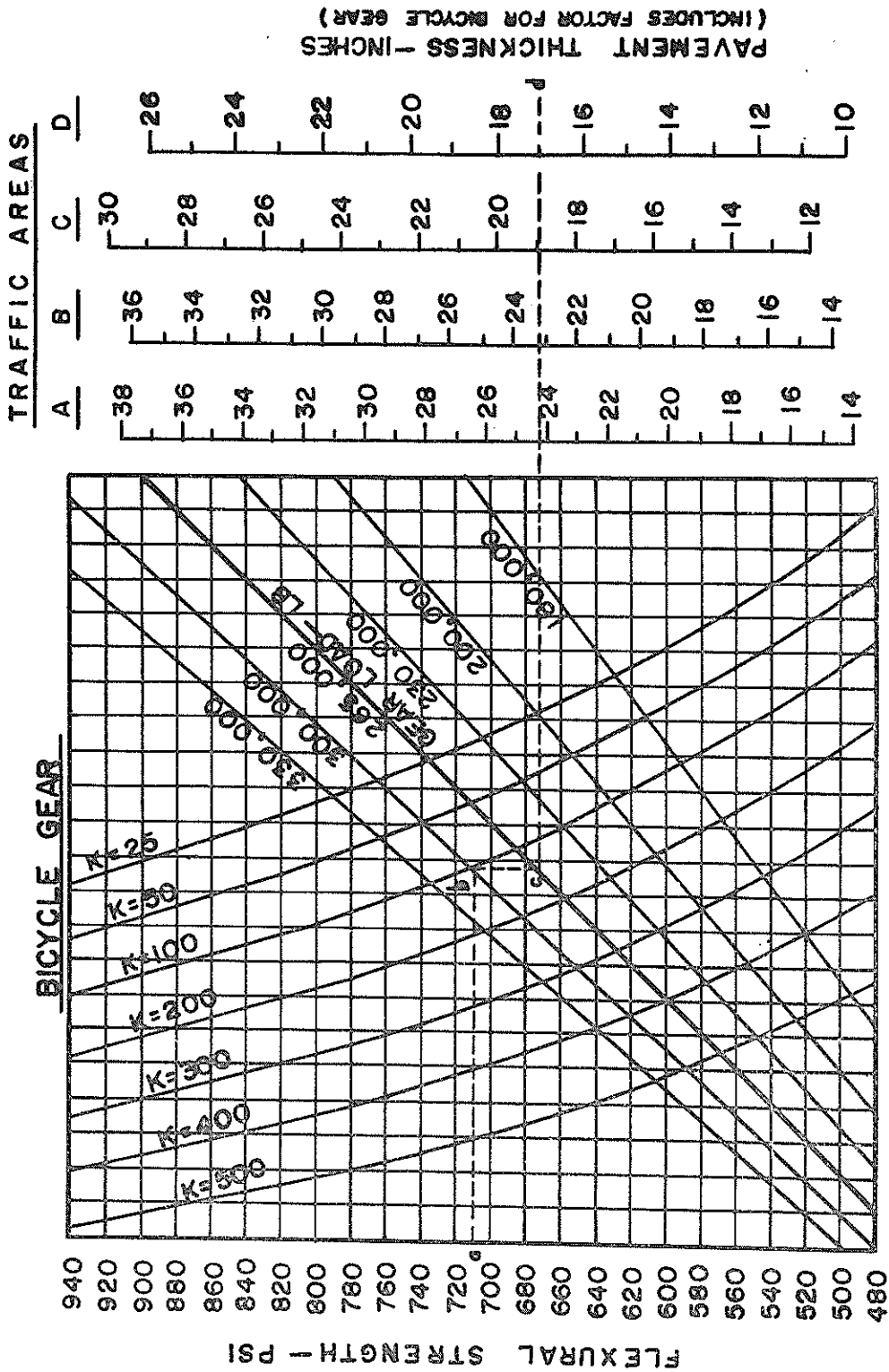
図一A. 29 三輪車式脚配置単々車輪荷重に対する舗装厚設計曲線 (C E 法)⁴⁾



DESIGN CURVES FOR CONCRETE AIRFIELD PAVEMENTS: TWIN WHEELS 37³/₁₆" C. TO C.

(267 SQ IN. CONTACT AREA EACH WHEEL)

図一A.30 自転車式脚配置複車輪荷重に対する舗装厚設計曲線 (C.B法)⁴⁾



DESIGN CURVES FOR CONCRETE AIRFIELD PAVEMENTS: TWIN-TWIN WHEELS SPACED 37" x 62" x 37"
(267 SQ IN. CONTACT AREA EACH WHEEL)

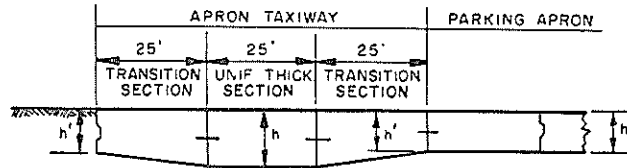
図一A.31 自転車式脚配置複々車輪荷重に対する舗装厚設計曲線 (C.B法)¹⁾

以上のように、交通の集中は主誘導路の長い直線区間と滑走路端の 150m (500 ft) に生じ、短い接続誘導路、誘導路の曲線部と交差部には明白な集中化 (channelization) は生じないが、これらは総て A 型

交通域として設計される。

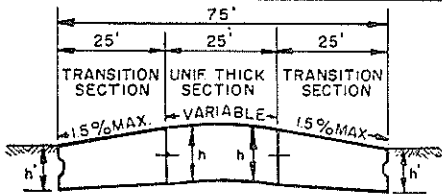
主誘導路の長い直線区間における交通の集中化は一般に重荷重の自転車式脚配置の航空機に対するもので、誘導路の中央部分に限られる。従って中央部

TYPICAL CROSS SECTION HEAVY LOAD DESIGN



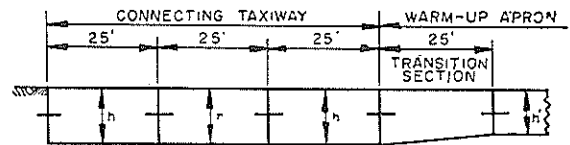
SECTION A-A

APRON TAXIWAY ALONG APRON FRONT EDGE



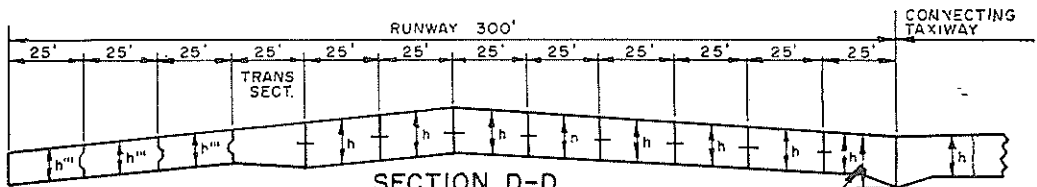
SECTION B-B

PRIMARY TAXIWAY
LONG STRAIGHT SECTIONS



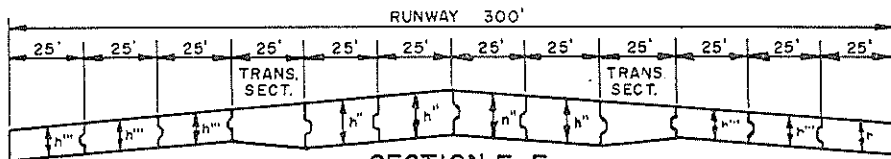
SECTION C-C

CONNECTING TAXIWAY



SECTION D-D

FIRST 500-FOOT RUNWAY END



SECTION E-E

RUNWAY INTERIOR

- NOTES: 1. FOR LOCATION OF SECTIONS SEE FIGURE 10
 2. h DETERMINED FROM COLUMN A OF DESIGN CURVES
 3. h' DETERMINED FROM COLUMN B OF DESIGN CURVES
 4. h'' DETERMINED FROM COLUMN C OF DESIGN CURVES
 5. h''' DETERMINED FROM COLUMN D OF DESIGN CURVES

図一A.32 重荷重に対する典型的な舗装断面 (C E法)⁴⁾

分の6~7.5m(20~25ft)のみをA型交通域として設計する。これに隣接する区域は、転移区域(transition lanes)であって、A型交通域厚からB型交通域厚に漸減する厚さとする(図一A.32参照)。

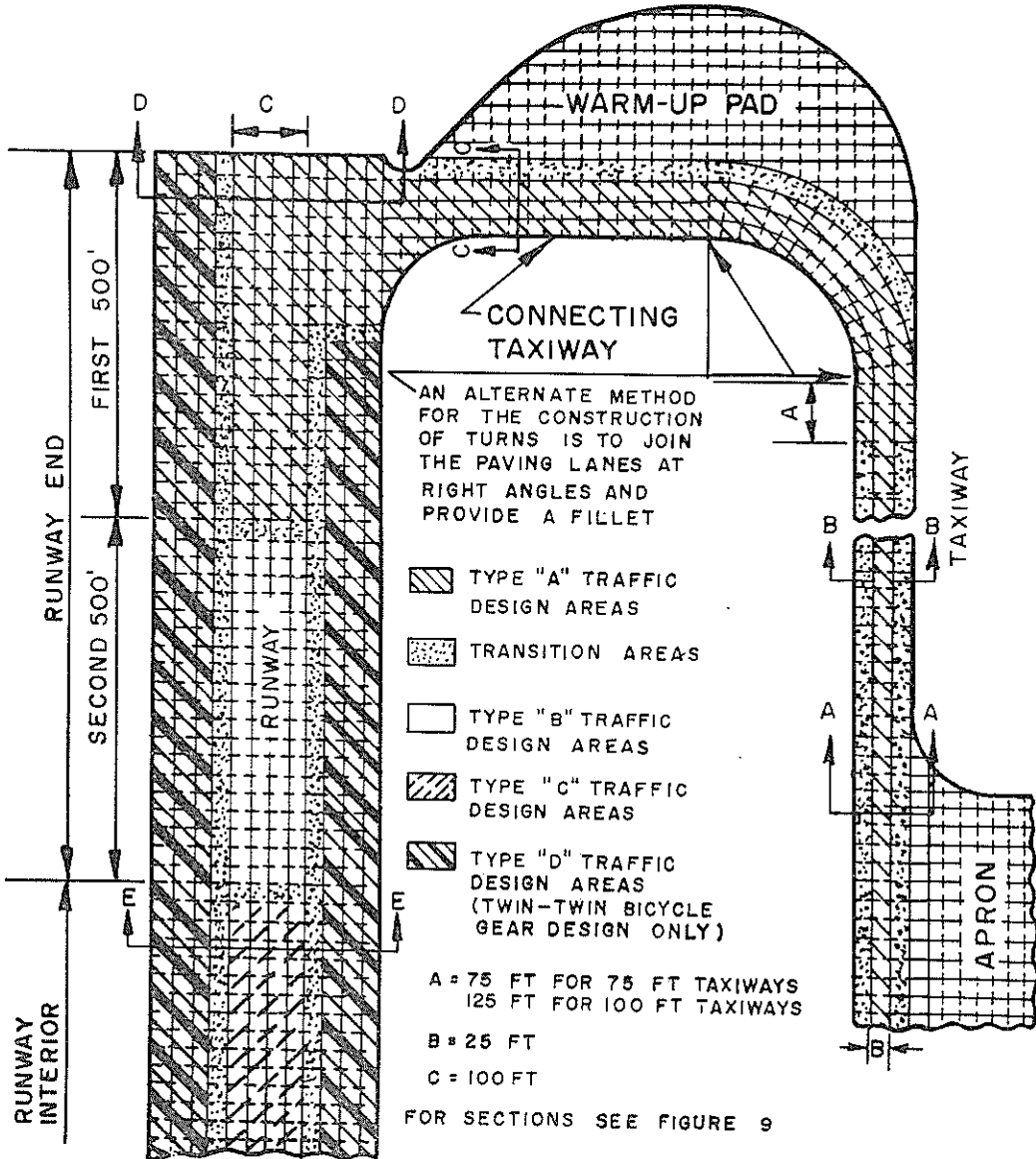
滑走路端150m(500ft)では、交通の集中は中央の30m(100ft)幅(通常4車線 $7.5 \times 4 = 30\text{m}$)と接続誘導路からの進入区域に生ずると思われる。進

入区域は接続誘導路の幅と誘導路隅角部(fillets)の和である(図一A.33参照)。滑走路端150m(500ft)の残りの部分はBあるいはC型交通域として設計する。

A型交通域の誘導路の設計では施工目地が中心線と重ならないようにする。

(ii) B型交通域

RIGID AIRFIELD PAVEMENTS

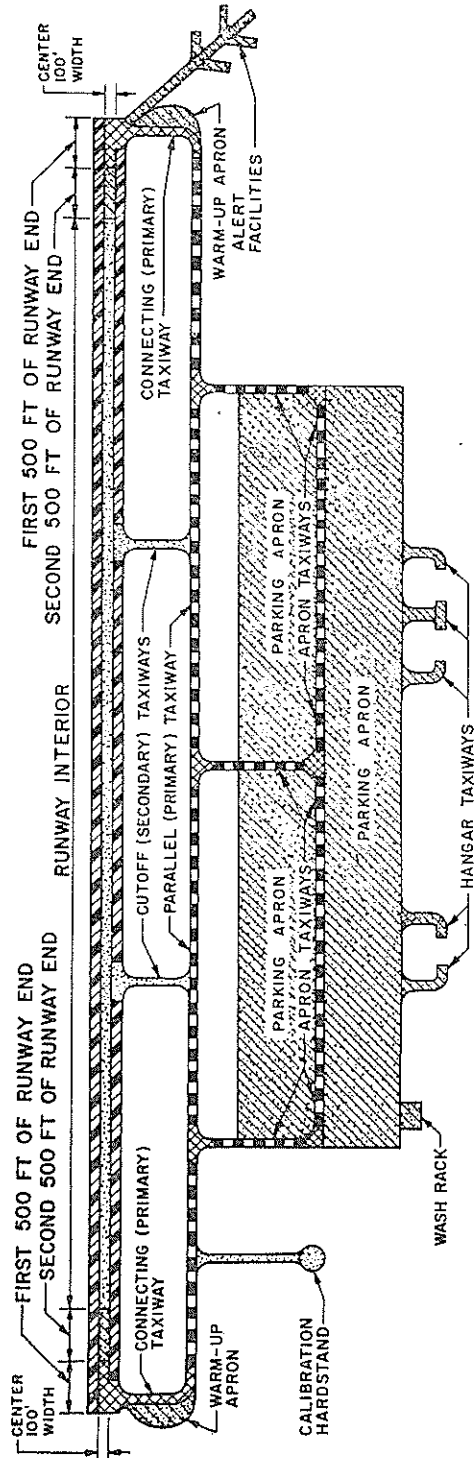


TYPICAL LAYOUT OF TRAFFIC AREAS HEAVY LOAD PAVEMENTS


図一A.33 重舗装における典型的な交通域区分 (C E法)⁴⁾


B型交通域は設計荷重は受けるが、交通が舗装の全幅に分布している所で特定個所への応力の繰り返しはA型交通域より低い。B型交通域にお


ける舗装厚は図一A. 25～A. 31のB欄を用いて決定する。B型交通域と考えられる地域は次のとおりである。




LEGEND TO TRAFFIC AREA TYPES AND THICKNESS DETERMINATION

- 

TYPE "A" TRAFFIC AREAS - LONG STRAIGHT SECTIONS OF PRIMARY TAXIWAYS AND APRON TAXIWAYS. CENTER PAVING LANE UNIFORM THICKNESS AS DETERMINED FROM COLUMN "A" OF DESIGN CURVES. ADJACENT LANES ARE TRANSITION SECTIONS TAPERING FROM "A" THICKNESS TO TYPE "B", "C" OR "D" THICKNESS AS DETERMINED FROM COLUMNS "B", "C" OR "D" OF DESIGN CURVES. (SEE FIGURES 9 AND 10)
- 

TYPE "B" TRAFFIC AREAS - PORTION OF SECOND 500 FT OF RUNWAY ENDS, APRONS, WARM-UP APRONS, SPECIAL ALERT FACILITIES, WASH RACK, HANGAR TAXIWAYS, ETC. THICKNESS DETERMINED FROM COLUMN "B" OF DESIGN CURVES (SEE FIGURES 9 AND 10)
- 

TYPE "C" TRAFFIC AREAS - CENTER 100 FT WIDTH OF RUNWAY INTERIORS, SECONDARY TAXIWAYS, CALIBRATION HARDSTANDS, ETC. THICKNESS DETERMINED FROM COLUMN "C" OF DESIGN CURVES. (SEE FIGURES 9 AND 10)
- 

TYPE "D" TRAFFIC AREAS - OUTSIDE 100 FT EDGES OF RUNWAYS EXCEPT AT APPROACH AREAS FROM TAXIWAYS. THICKNESS DETERMINED FROM COLUMN "D" OF DESIGN CURVES. (SEE FIGURES 9 AND 10)

HEAVY LOAD DESIGN PAVEMENTS TYPICAL AIRFIELD LAYOUT SHOWING TRAFFIC AREAS

図一A. 34 重舗装における典型的な交通区分 (C/D法)⁴⁾

① 単車輪の場合……滑走路の末端300m(1,000 ft)の内部以外の総ての部分。

② 多車輪の場合

(i) 滑走路端部 150m(500 ft) とこれに続く150m……自転車式脚配置の複々車輪以外の総ての多車輪荷重に対して。

(ii) 滑走路端部の第二の 150m の中央 30m幅……自転車式脚配置の複々車輪に対して。

(iii) 主誘導路の長い直線部分の一部

(iv) エプロン (駐車場, サービス, 整備, 待機各区域)

(v) ハンガー床版, ハンガー入口エプロン

(iii) C型交通域

C型交通域は交通量が小さいが, 航空機の作用重量が一般に設計重量より小さいと考えられる所である。C型交通域における舗装厚は図—A. 25~A. 31のC欄を用いて決定する。C型交通域と考えられる舗装区域は次のとおりである。

① 単車輪の場合……滑走路中央部 (端部の 300m (1,000 ft) 以外)

② 多車輪の場合

(i) 二次的誘導路, 振動の生じる駐機場

(ii) 滑走路中央部の全幅 (滑走路端部 300m を除く部分)……自転車式脚配置の複々車輪以外の多車輪荷重に対して。

(iii) 滑走中央部の 30m幅 (滑走路端部 300m を除く部分)……自転車式脚配置の複々車輪に対して。

(iv) D型交通域

D型交通域は交通量が極端に小さく, 航空機の作用重量が設計重量よりかなり小さいと考えられる場所である。D型と考えられる舗装は自転車式脚配置の複々車輪航空機に対する滑走路の縁部のみであって, これは, 図—A. 31 のD欄を用いて決定する。図—A. 25~A. 30にはD欄はないが, これはこのような型の荷重に対してはD型交通域は使われないからである。D型交通域は滑走路の中央30m幅を除いた全長にわたる外縁部である。

3.4. 設計曲線の根拠

(1) 概 説

飛行場における剛性舗装の構造設計は版を形成しているコンクリート版を支えている土や版を分離させている目地材料などの特性に基づくものである。最も重要なのは, コンクリート版の曲げ強度と自然の土ある

いは安定処理した土のいずれかの永久変形に対する土の抵抗である。コンクリート版は車輪荷重や温度変化による応力に抵抗しなければならない。ある脚荷重による応力は曲げモーメントによって生ずる版のたわみ曲率半径の大きさによって決まり, これは版の厚さやコンクリートと土の構造的な性質によって変化する。コンクリートの弾性的性質を表わすものは弾性係数Eとポアソン比 μ である。土の性質は路盤支持力係数Kで示される。版厚は曲げモーメントに著しい影響をおよぼす。これらの変数のあるものは陸軍工兵隊によって研究され, かなりの確かさをもって推定することができるが, 残りについては十分に知られてなく工学的な判断を必要とする。路盤の塑性的性質の影響については, 前述の荷重と温度に関する種々の条件の中でも最も不明の点の多い要素である。

(2) 脚 荷 重

滑走路あるいは誘導路上への荷重の分布は舗装の構造的な諸性質よりもとらえどころのないものである。交通が集中し易い所では, 路盤の不均等なたわみを生ずるだけでなく, 土が復元する時間を置かず相次いで載荷される。交通が舗装の幅により広く分布しているときは, 土は復元する時間が与えられその初期状態を維持するであろう。交通分布の問題は飛行場舗装設計における不確定な要素であり, 地域的な供用状態によって明らかな荷重超過あるいは過大設計をもたらす。

オハイオ州, ヴァンダリアにおける飛行試験や多くの飛行場の舗装の供用実績により, 普通の着陸の際に生ずる衝撃応力は危険なものではなく, 設計では無視しうることが判明した。これは, 滑走路中心付近の交通はより広く分散し, 航空機は離着陸に際しかなりの時間相当の浮力を受けており, 更に脚荷重はある特定の地点を高速で通過するため, 路盤の支持力は急速に消失することはないこと, などにより説明できる。

誘導路, エプロン, 待機区域, 方向転換区域に作用する低速走行, あるいは静止振動荷重によって生ずるコンクリート中の応力は滑走路上の高速荷重より危険側なことが分っている。設計は対象脚荷重に適合すると共に, 合応力が試験あるいは供用実績から得られた制限を起えないように舗装を選定しなければならない。

(3) 温度 応 力

温度応力は版の上下の温度差によって生ずるコンクリートの性質によって生ずる。このそり応力はコンクリートの温度や含水量の季節的な変化によって

夏と秋に大きい。版の単位厚さ当りの平均温度差は厚い版の方が薄い版の場合より小さい。温度応力は薄版では3~6m(10~20ft)、厚版では7.5m(25ft)間隔に収縮目地を設けることにより、かなり緩和できる。厚い舗装では重い脚荷重が目地付近の版の縁に載ったとき版の傾斜を少なくするのに十分な重量を有している。

(4) 土の塑性

路盤を形成している土の決定的な性質は塑性である。上述のように、土の性質はコンクリートの弾性と結びついてコンクリートの曲げ応力に著しい影響をおよぼし、土の塑性が支配的な場合には目地の部分での荷重直下の最大たわみの点に永久変形を生ずる。これは版の支持状態を不均衡にし、特に目地部の支持力を減少させ明らかに致命的なひびわれやポンピングを引き起こす傾向がある。更に、もし縁部に重車輪荷重が載って版が傾くと、その荷重が除かれたとき版の自重あるいは次の車輪荷重が反対側の縁部に載ることにより最初の位置に戻ろうとする。しかし、路盤中の塑性土は部分的に変形した状態にある。したがって、垂直たわみと版の傾斜は共に路盤の破壊をもたらす。それ故、可能な限り塑性の小さい路盤材料を使うことが重要である。永久変形については目地部のたわみを少なくすることによりかなり緩和できる。目地の荷重伝達装置は、この点で有用である。実際には舗装版は適当な目地装置を有しているが、初期の応力は適当に制限されるにしても、変形が蓄積されてついにはポンピングを生ずるに至る場合もあり得る。

(5) 理論的解析

模型試験、本格的な野外試験および版の作用の理論的解析を用いた広汎な研究の結果、最も危険な応力が剛性舗装中に生ずるのは車輪荷重が自由縁に接して載ったときであることが判明した。飛行場舗装においては交通量のごく一部のみが版の自由縁に作用する。従って、設計応力は車輪荷重が隣接版との間の目地に接する条件に基づくものであり、目地は荷重の一部を隣接版に伝達する能力を有していると仮定している。

無筋コンクリート舗装中の応力とたわみ決定に適用しうる最適の理論は Westergaard^{(9), (10), (11)} および Pickett^{(9), (11)} によって展開されたものである。この陸軍工兵隊の設計方法における図一A. 25~A. 31の設計図表は縁部載荷による応力の Westergaard 解析に基づくものである。

縁あるいは目地に接した任意のタイヤ形による応力を計算する Westergaard の方程式は、参考文献の(7)

の(54)式として次式が与えられている。

$$\sigma_e = \frac{12(1+\mu)P}{\pi(3+\mu)h^2} \left[K + 0.8659 - \frac{\mu}{4} - B_1 + \frac{1-\mu}{4} S + B_2 \frac{\bar{y}}{l} \right]$$

ここで、

P : 車輪荷重 (lb)

h : 舗装厚 (in)

μ : コンクリートのポアソン比

\bar{y} : 縁からタイヤ跡中心までの距離 (in)

l : 剛比半径 (in)

$$B_1 = 0.9627, \quad B_2 = 0.4131 \quad \mu = 0.20 \text{ のとき}$$

$$K = \log \frac{2l}{a+b} + \frac{a-b}{2(a+b)}$$

$$S = \frac{2ab}{(a+b)^2} - \frac{a-b}{a+b}$$

2a : タイヤ跡の長軸長 (in)

2b : タイヤ跡の短軸長 (in)

図一A. 25~A. 31の設計曲線は、タイヤ跡を楕円と仮定した場合に対するもので、このとき上式は次のようになる。(参考文献(7)の式(12))

$$\sigma_e = \frac{3(1+\mu)P}{\pi(3+\mu)h^2} \left[\log \frac{Eh^3}{100K \left(\frac{a+b}{2} \right)^4} + 1.84 - \frac{4}{3}\mu + 2(1-\mu) \frac{ab}{(a+b)^2} + 1.18(1+2\mu) \frac{b}{l} \right]$$

ここで

K : 路盤支持力係数

Westergaard の式の図式解法である Pickett と Ray によって展開された影響図表⁽⁹⁾を用いて、同様の応力を求め得る。

Westergaard の縁部載荷公式から計算された応力は自由縁あるいは荷重伝達能力のない目地に対するものである。実際の飛行場舗装の設計および施工では、目地部での荷重伝達はタイヤや噛み合わせ目地によって行なわれている。舗装目地における荷重伝達機構の研究は剛性舗装研究室 (Rigid Pavement Laboratories) によって行なわれ、これは故 Westergaard の指示に従って実施された Skarlatos⁽¹²⁾ の数学的解析に基づいている。この研究の結果、荷重伝達による応力緩和に対する基本的な限界は目地材料の剪断強度よりむしろ弾性であることが明らかになった。現在普通で使用されている目地構造の場合には、目地部の舗装の限界応力は同じ荷重による自由縁部の応力の約75%であ

ることが確められた。従って、設計図表の作製に当っては荷重の25%が隣接版に伝達されると仮定している。

用いた理論は一回の荷重の作用に基づく応力を与えるものである。ところが、本設計方法における設計図表は荷重伝達の要素のほか、温度応力、衝撃、自転車式脚配置の航空機によって生ずる偏心載荷、荷重の繰り返しによるコンクリートの疲労などの影響を補償するための要素をも含んでいる。これらの要素は将来の研究や発展を考えて荷重条件を簡単に修正できるようにするために別個に考慮されている。

(6) コンクリート舗装版の構造設計の手法

コンクリート版厚を決定するに必要な詳細な事項は次の(a)~(g)である。

- (a) 車輪荷重あるいは脚荷重
- (b) 脚の車輪間隔 (多車輪の場合)
- (c) タイヤ接地面積あるいはタイヤ圧
- (d) コンクリートの曲げ強度
- (e) コンクリートの弾性係数, E
- (f) コンクリートのポアソン比, μ
- (g) 路床あるいは路盤の支持力係数, K

在来の車輪荷重、路盤とコンクリートが典型的な性質の場合の設計厚は、図一A.25~A.31から直接得られる。コンクリートのEと μ は広範囲に変化することではなく、設計厚に大きな影響を与えないので、設計図表では $E=280,000\text{kg/cm}^2(4 \times 10^6 \text{ psi})$, $\mu=0.20$ と仮定している。これらは陸軍工兵隊によって建設された数多くの舗装の試験に基づいて決定された典型的な値である。以上の条件を仮定すると次の各項目(a)~(d)が分かれば設計図表を利用できる。

- (a) 荷重
 - a 一輪荷重……単車輪配置のとき
 - b 一脚荷重と車輪間隔……多車輪配置のとき
- (b) タイヤ圧 psi あるいは接地面積 in^2
- (c) コンクリートの90日曲げ強度 psi
- (d) 路盤支持力係数 K lb/in^3

以上のデータを使って各交通域毎の舗装厚を次のように決定する。

(i) 単車輪の場合

単車輪に対しては二つの図表(図一A.25, A.26)を利用できる。図一A.25はタイヤ圧 $7\text{kg/cm}^2(100 \text{ psi})$ に対するもので、図一A.26は、接地面積 $645 \text{ cm}^2(100 \text{ in}^2)$ に対するものである。単車輪荷重に対する舗装厚は、次例のようにして決定する。

条件 (a) 車輪荷重……11.4 ton(25,000 lb)

(b) コンクリートの90日曲げ強度……51 $\text{kg/cm}^2(730 \text{ psi})$

(c) 路盤支持力係数, K…………… 5.5 $\text{kg/cm}^3(200 \text{ pci})$

設計が、タイヤ圧 $7\text{kg/cm}^2(100 \text{ psi})$ に対する場合には図一A.25を用いる。コンクリートの曲げ強度 $51\text{kg/cm}^2(730 \text{ psi})$ を示すa点から出発し、点線に沿って水平にb ($K=200 \text{ pci}$) に進み、次に垂直にc (車輪荷重=25,000 lb) に、最後に舗装厚を示す二つの欄を横切って水平にdに進む。B欄からB型交通域に対して20cm(8 in), C欄からC型交通域に対して18cm(7 in)が必要厚として決定される。

設計がタイヤ接地面積 $645\text{cm}^2(100 \text{ in}^2)$ に対する場合には、図一A.26を使う。上と同様の手順によってC, B各交通域に対する舗装厚はそれぞれ25cm(10 in), 20cm(8 in)である。

(ii) 複車輪の場合……自転車式脚配置

図一A.30は、B-47のような自転車式脚配置の複車輪航空機に対するもので、この図表の利用例を同図に示す。条件は曲げ強度 $51\text{kg/cm}^2(730 \text{ psi})$, 脚荷重(2輪) $45.4 \text{ ton}(100,000 \text{ lb})$, $K=2.8\text{kg/cm}^3(K=100 \text{ lb/in}^3)$ である。その結果、A, B, C各交通域に対して、それぞれ48cm(19 in), 43cm(17 in), 38cm(15 in)が求まる。

(iii) 複々車輪の場合……自転車式脚配置

図一A.31はB-52のような自転車式脚配置の複々車輪航空機に対するものである。同図に曲げ強度 $50\text{kg/cm}^2(710 \text{ psi})$, $K=2.8\text{kg/cm}^3(K=100 \text{ lb/in}^3)$ 脚荷重 $120 \text{ ton}(265,000 \text{ lb})$ に対する例を示す。A, B, C, D各交通域に対して、それぞれ61cm(24 in), 58cm(23 in), 48cm(19 in), 43cm(17 in)である。

以上の例における数値は6 mm($1/4 \text{ in}$)以上の端数は切り上げた値である。

(iv) 三輪車式脚配置の多車輪の場合

図一A.27~A.29は三輪車式脚配置の多車輪に対するものであって、図一A.27は車輪間隔94cm(37 in), 各タイヤ接地面積 $1720\text{cm}^2(267 \text{ in}^2)$ の複車輪、図一A.28は車輪間隔91cm(36 in), 軸間隔152cm(60 in), 各タイヤの接地面積 $1680\text{cm}^2(260 \text{ in}^2)$ の複々車輪、図一A.29は車輪間隔152cm(60 in), 各タイヤの接地面積 $2580\text{cm}^2(400 \text{ in}^2)$ の単々車輪(single-tandem Wheels)に対するものである。これらの図表も前述の例と同じ方法によって舗装設計に使用される。

(7) 実物大舗装の調査結果の概要

過去15年の間(注、1958年現在)、陸軍工兵隊は重車輪荷重の剛性飛行場舗装に対する影響を調査するため広範な実物大現場試験を行なった。これらの試験結果は設計図表の作成に適用された理論解析の証明と補足に使用された。

(i) Godman Field, Fort Knox, Kentucky, 1942⁹⁹

車輪間隔76×102cm(30×40in)の四輪で18.2ton(40,000lb)を載荷したA-3型ターナッブルによる載荷試験の結果、13cm(5in)舗装においては初期段階で著しいひびわれを生じ、続く11.8ton(26,000lb)の車輪荷重の通過で急速に破壊した。

(ii) Northern Field, Camp Forest Airfield, Tullahoma, Tenn., 1942¹⁰⁰

前記と同じターナッブルは、車輪荷重が12.3ton(27,000lb)から18.2ton(40,000lb)に徐々に増加するとき10,000回の走行で、20cm(8in)舗装に完全破壊を引き起こした。

(iii) Marietta, Ga., 1944¹¹¹

静止あるいは低速走行する各種の荷重を積んだB-29軍用航空機と、これに相当する静的載荷板による20cm(8in)舗装に対する載荷試験の結果、Westergaardの内部載荷の場合の理論的版曲率に近似した曲率でたわみを生じ、理論応力を証明した。

(iv) Wright Field Dayton, Ohio, 1941-42¹²³

特に建設された15cm(6in)、20cm(8in)、25cm(10in)厚の版における静的な内部載荷により理論とほとんど一致する版のたわみ曲率を生じた。これらの版のうち、幾つかは破壊の兆候を示さずに理論荷重以上の荷重に耐えたが、他の条件下で理論値に近い動車輪荷重が作用するときには破壊に到るような初期のひびわれが生じていたかも知れないことを示す証拠は認められた。コンクリートの弾性係数E、ポアソン比 μ 、タイヤ跡の大きさ、路盤支持力係数Kの値は実験室および現場での測定から評価された。

(v) Vandalia Airport and Wright Field, Dayton, Ohio, 1943¹²³

着陸時の状況を再現するため、載荷した航空機車輪を種々の高さから落下させた場合衝撃によるコンクリート中の応力は走行ないし静止車輪荷重による応力より大きいことはなかった。

(vi) Lockbourne No. 1 Tests, Columbus, Ohio, 1944-45¹³⁹

15cm(6in)、20cm(8in)、25cm(10in)厚の40の舗装版をターナッブルの動荷重により試験した。

15cm版は16.8ton(37,000lb)の車輪荷重により急速に破壊し、他の版も繰り返し載荷が300回に達する前に破壊した。27.2ton(60,000lb)の車輪荷重による破壊はより急速であった。

20cm(8in)版の上部にSR-4線ひずみ計を挿入し載荷板を用い、16.8ton(37,000lb)を静的に内部載荷した54シリーズのひずみ測定の結果、コンクリート中の平均応力は35.1kg/cm²(530psi)であった。同じ条件で計算した理論応力は35.0kg/cm²(528psi)である。

20cm(8in)版の上部にSR-4線ひずみ計を挿入して行なった19シリーズのひずみ測定の結果、自由縁に接する16.8ton(37,000lb)の静的版荷重により、縁部で平均応力40.0kg/cm²(572psi)を記録した。理論応力は58.2kg/cm²(831psi)である。これらの版は6×6m(20×20ft)であり、全体としての版の傾斜は縁部載荷のときに観察した。載荷縁付近で観察したたわみと変形は版のたわみのみの理論値のはよ2倍であり、反対縁の浮き上がりが認められた。載荷の初期においては版の傾斜は縁部におけるコンクリート中の危険側の応力を緩和させる可能性があり、測定応力と縁部載荷公式からの計算応力との差は明らかに版の傾斜によるものである。しかしながら、荷重が繰り返して作用する場合の版の傾斜は路盤土の過度の沈下と縁部の支持力消失の原因となる。

(vii) Lockbourne No. 2 Experimental Mat, Columbus, Ohio¹⁴⁰

38cm(15in)、46cm(18in)、51cm(20in)、61cm(24in)の無筋コンクリート版、30cm(12in)、36cm(14in)、41cm(16in)の鉄筋コンクリート版、全厚56cm(22in)、61cm(24in)の嵩上げ舗装版の試験舗装を、自然の塑性シルト質粘土の路床、特に安定処理した路床、および石灰砕石、砂、および砂利の各路盤の上に建設した。これら試験舗装の目地は在来型のものと同様のものとの両者である。これら試験舗装は、68ton(150,000lb)載荷のB-36航空機の280cm(110in)のタイヤを1個取り付けた特別試験車を約6.4Km/hr(4miles/hr)の速度で走行させて試験した。走行試験から得られた資料は、ひびわれの状態、舗装破壊の写真、51cm(20in)無筋コンクリート版のひずみ測定、静止および走行車輪荷重による舗装のたわみ、舗装の永久たわみ、目地部での舗装の水平変位、舗装と路盤の温度、および降雨量と外気温の気象記録である。51cm(20in)以下の

総ての無筋コンクリート版は68 ton(150,000 lb) 単車輪荷重の走行により破壊した。重鉄筋 30cm(12 in) 版と軽鉄筋36cm(14 in) 版は試験荷重に対して不十分であった。嵩上げ層との間に瀝青プライムあるいは付着破断層を設けないコンクリートの嵩上げ舗装はこれを入れたものより優れている。石灰碎石は38cm(15 in) 無筋コンクリート版の下に使われたとき路盤材料として砂や砂利より優れていた。試験した荷重伝達装置のうちで、実験的に用いた各種の構造形状のものは在来の丸鋼のスリップバーより特に優れている点も認められなかった。スリップバーを用いた施工目地の性能は、断面不足の設計および適切な断面の設計のいずれの場合にもこれに相当する断面の噛み合わせ目地の性能より優れていた。自由膨張目地は弱点であって初期破壊の原因であった。51cm(20 in) 厚版の上下から38mm(1½ in) の点に埋設したカールソン型ひずみ計を用いたひずみ測定の結果、測定ひずみは理論ひずみに比例し、理論解析による予測値とはほぼ同じであった。測定ひずみの大きさは、使用したEと μ の値および測定位置にもよるが、理論ひずみの50~90%であった。

(viii) Kockbourne No. 2 Moditication, Columbus, Ohio¹⁵⁾

自然路盤上に7.5×7.5m(25×25 ft)の大きさの30cm(12 in), 38cm(15 in), 51cm(20 in) 厚の無筋コンクリート版を作り、68 ton(150,000 lb)の複々車輪のB-36脚の試験車を約6.4Km/hr(4 miles/hr)で走行させて試験した。得られた資料は、完全なひびわれの発生状況、交通荷重、単および複車輪荷重下の舗装版の種々の位置と目地部での動車輪荷重によるひずみおよびたわみ、永久たわみ、目地部の水平変位、静止車輪荷重によるたわみ、舗装と路盤の温度、および降雨量の外温の記録である。総ての30cm(12 in) 舗装は、繰り返し載荷が170回になる前にひびわれが生じた。30cm 舗装においては繰り返し載荷1,359回で走行を中止した。38cm 舗装では繰り返し載荷1,500回で1個のひびわれが生じたが、これは繰り返し載荷2,204回で走行を停止するまで進行しなかった。51cm 舗装ではひびわれは見られなかった。ひずみは理論解析で予測せるように生ずることが認められたが、静弾性係数よりも動弾性係数を計算に用いたときの方がひずみの実測値と理論値の間によりよい相関関係が認められた。単車輪による応力に比べて複々車輪による応力は版の内部で平均41%, 目地部で平均32%減少した。複々車

輪によるたわみは、荷重22.7 ton(50,000 lb), 45.4 ton(100,000 lb), 68 ton(150,000 lb)のそれぞれに対し、1:2:3の割合にあり、荷重に比例することが分かった。

3.5. ま と め

米国陸軍工兵隊の方法による剛性舗装の設計は、Westergaardの縁部載荷公式に基づいて、目地の荷重伝達能力、繰り返し荷重、温度応力などを考慮して作製した設計図表を用いて行なう。すなわち、数多くの試験舗装の結果から、目地の荷重伝達を25%と仮定し、荷重の繰り返し、そりおよび温度応力などの影響を設計係数1.30をもって考慮している。また、飛行場の舗装区域を、実際に受ける荷重と交通量の条件に対して幾つかの交通域に分け、そのそれぞれに対して必要な舗装厚を求めている。

4. フランス (France) の方法

4.1. 概 要

本報告で紹介するフランスにおける空港の剛性舗装設計方法は入手した既設舗装の評価方法についての文献¹⁹⁾から纏めたもので、直接的な設計方法とは異なり必ずしも正確でないかも知れない。これは、Westergaardの中央載荷公式に基くPickettとRayの影響図表を利用して作った舗装の許容荷重を求める図表を繰り返し使用することにより、舗装厚を決定しようとするものであり、従って、本法は本来既設舗装の評価に使用するものと云い得る。

ここに示した図表は、標準的な車輪配置の航空機に対するものであるから、設計対象航空機の手車輪配置がこれらと著しく異なっている場合には、PickettとRayの影響図表から直接計算しなければならない。

以下、4.1., 4.3. にこれらの図表による既設舗装の評価方法と舗装厚の設計方法について述べる。

4.2. 既設舗装の評価

(1) 単車輪の場合

対象航空機が単車輪の場合には図一A.35を使用して許容単車輪荷重を求める。舗装版厚 h , 平板載荷試験による路盤支持力係数 k , コンクリートの許容曲げ強度 n を同図に挿入すると許容単車輪荷重が求まる。この値は多車輪の場合にも許容等価単車輪荷重として舗装の評価に利用しうるものである。コンクリートの許容曲げ強度は完全率1.8で曲げ破壊強度を除いて得

る。この図表は中央載荷公式に基いて作られ、従って、目地は十分な荷重伝達機能を有すると仮定しており、有効な機能のない場合には曲げ強度を30%減少させなければならない。

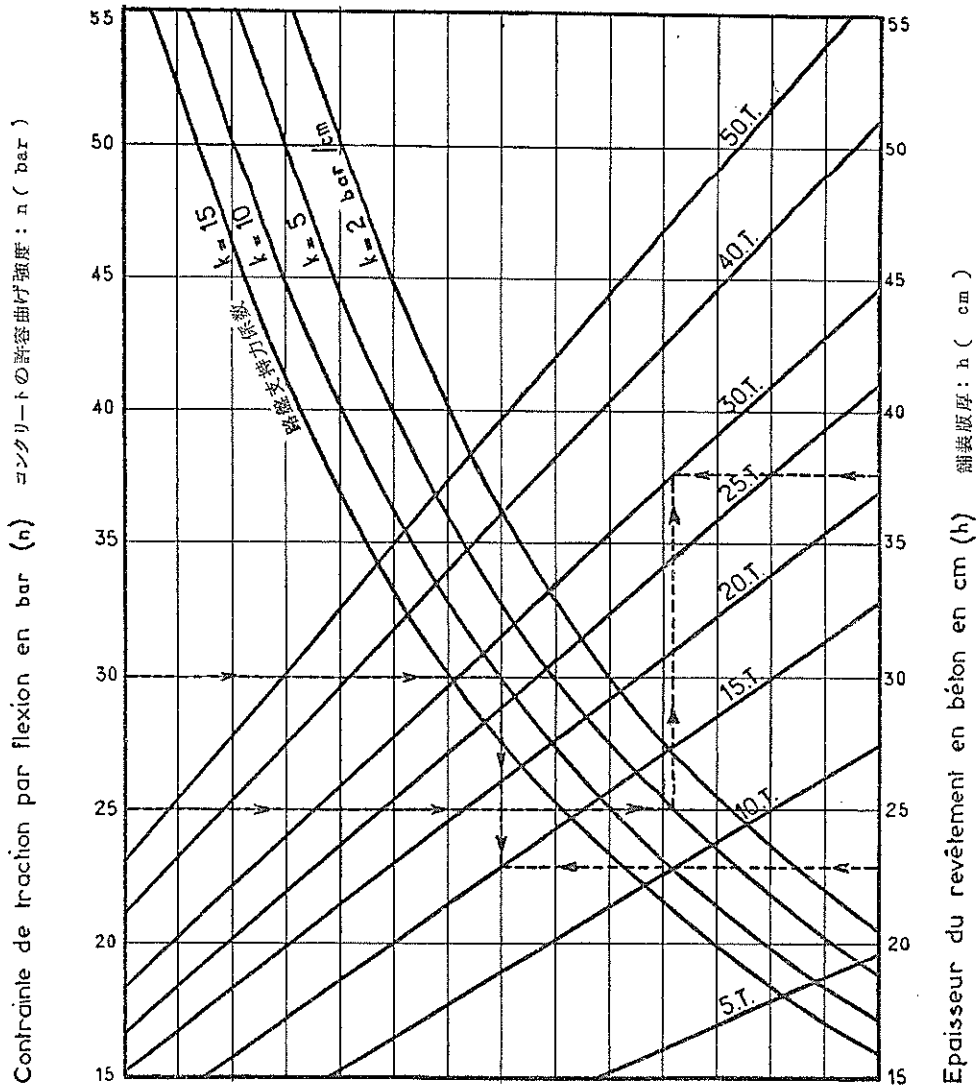
(2) 多車輪の場合

多車輪航空機で車輪配置が図一A.37 (複車輪)、図一A.38 (複々車輪) に近似しているときは、これらの図を使用して許容脚荷重を求める。これらの図は剛比半径 l がパラメーターとして与えられており、コンクリートの弾性係数を E 、ポアソン比を μ 、版厚を

h 、路盤支持力係数を k 、とすると、 l は

$$l = \sqrt[4]{\frac{E h^3}{12(1-\mu^2)k}}$$

で考えられる。図一A.36は $E=300,000$ bars ($306,000$ kg/cm² = 4.35×10^6 psi), $\mu=0.15$ と仮定して、版厚 h と路盤支持力係数 k から l を求める図である。すなわち、図一A.35 で求めた許容単車輪荷重とこの剛比半径 l を図一A.37あるいは図一A.38に使用して、多車輪の許容脚荷重と許容単車輪荷重の比を求め、これから許容脚荷重を計算する。航空機総重量の90%が主

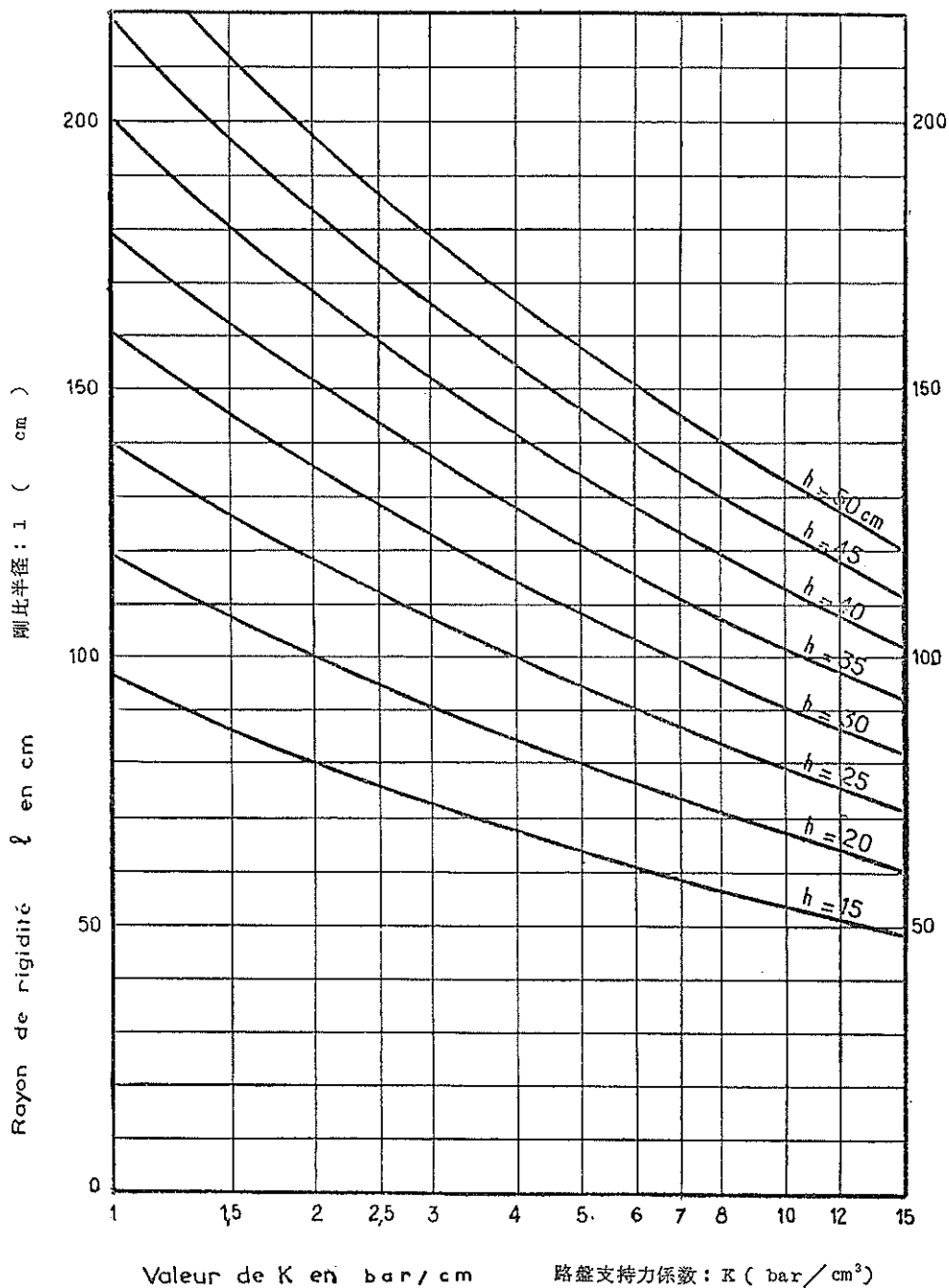


ABAQUE DE CALCUL D'UNE CHAUSSEE RIGIDE
CAS DE L'ATTERISSEUR A ROUE SIMPLE

図一A.35 単車輪荷重に対する設計図表 (フランス法)¹⁹⁾

脚にかゝると仮定すると、二輪の場合には今求めた許容脚荷重を2.2倍することにより、許容航空機総重量を求めることができる。

(3) タイヤ圧の影響舗装面に対するタイヤ圧の影響はタイヤ圧が7~13 bars(7.14~13.26kg/cm²)の範囲にあるときは比較的小さい。本方法の設計図表はこの平

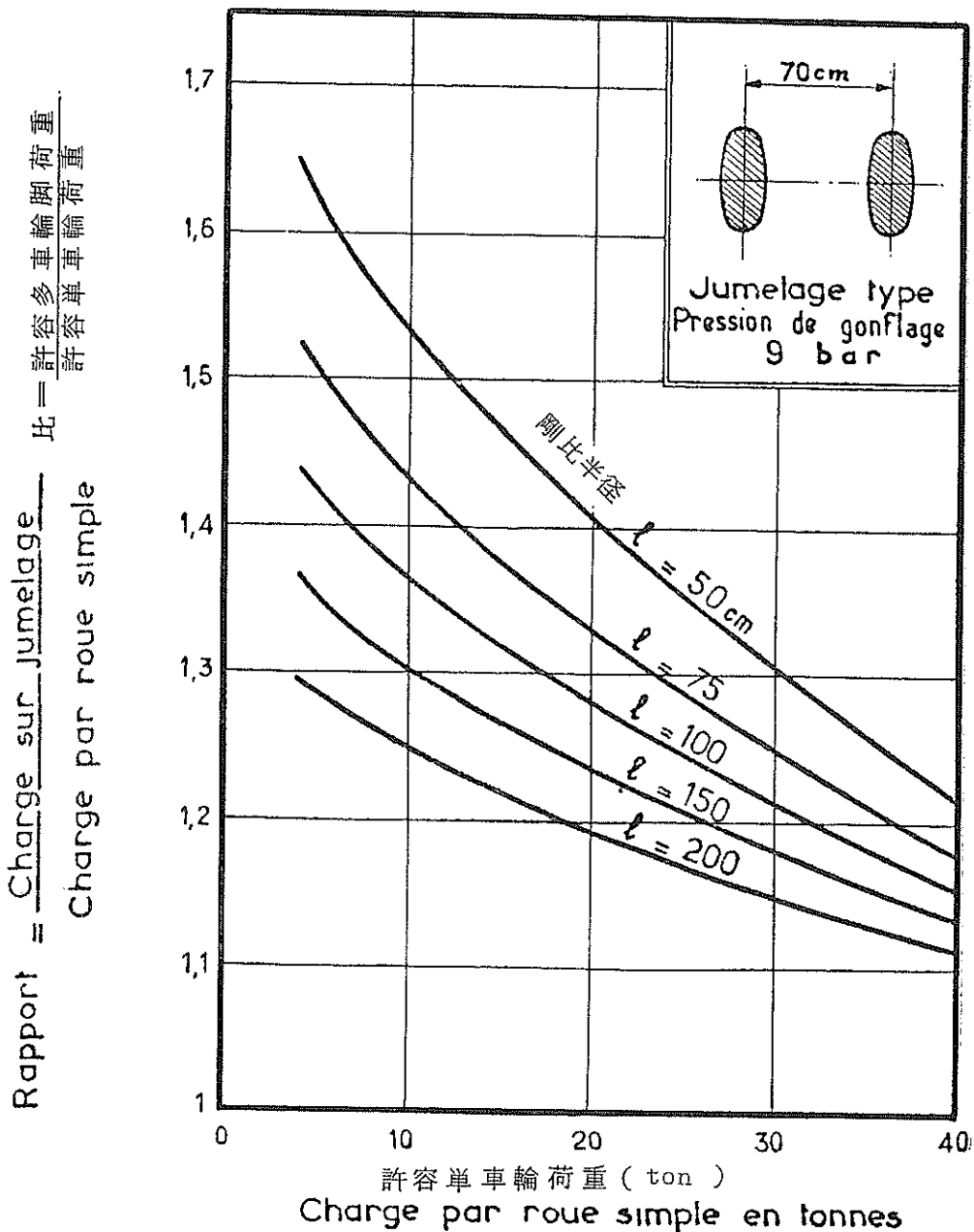


ABAQUE DE CALCUL DU RAYON DE RIGIDITE RELATIVE EN FONCTION DU MODULE DE REACTION ET DE L'EPAISSEUR DU REVETEMENT EN BETON DE CIMENT

図一A.36 路盤支持力係数と版厚に対応する相対剛比半径 (フランス法)¹⁹⁾

均圧力である 9 bars (9.18 kg/cm² = 130 psi) の場合について作製したものであり、タイヤ圧が高くなった場合には、前記方法で求められた許容荷重にタイヤ圧による影響を加える必要がある。

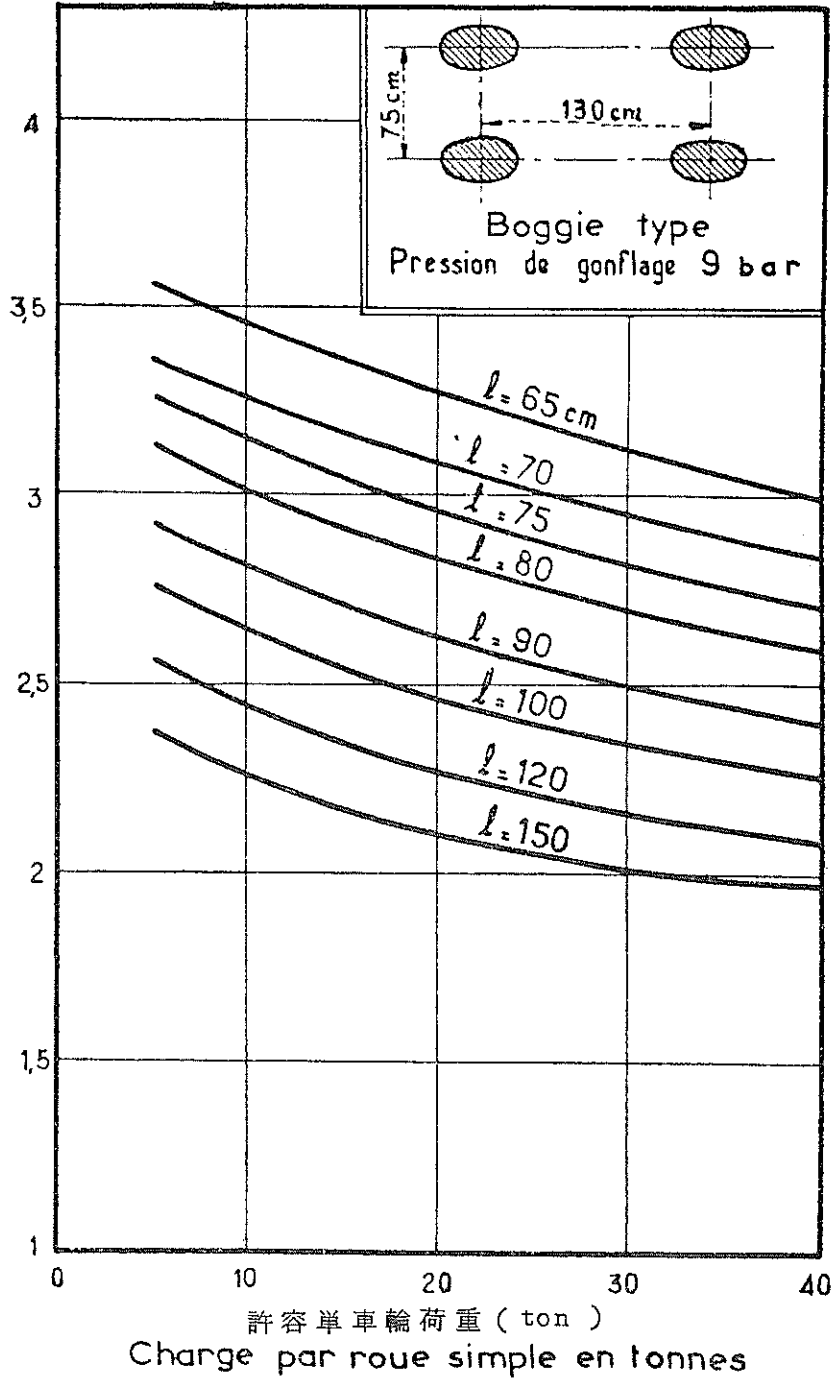
表-A. 8は、高タイヤ圧の場合の許容荷重の減少率を示している。すなわち、(2)で求めた許容荷重より本表に示した割合だけ減少した荷重 (例えば、q = 18, k = 2 の場合、14% だけ減少) を以て許容荷重とする。



CHARGE ADMISSIBLE SUR UN JUMELAGE TYPE EN FONCTION DE LA CHARGE ADMISSIBLE PAR ROUE SIMPLE CHAUSSEE RIGIDE

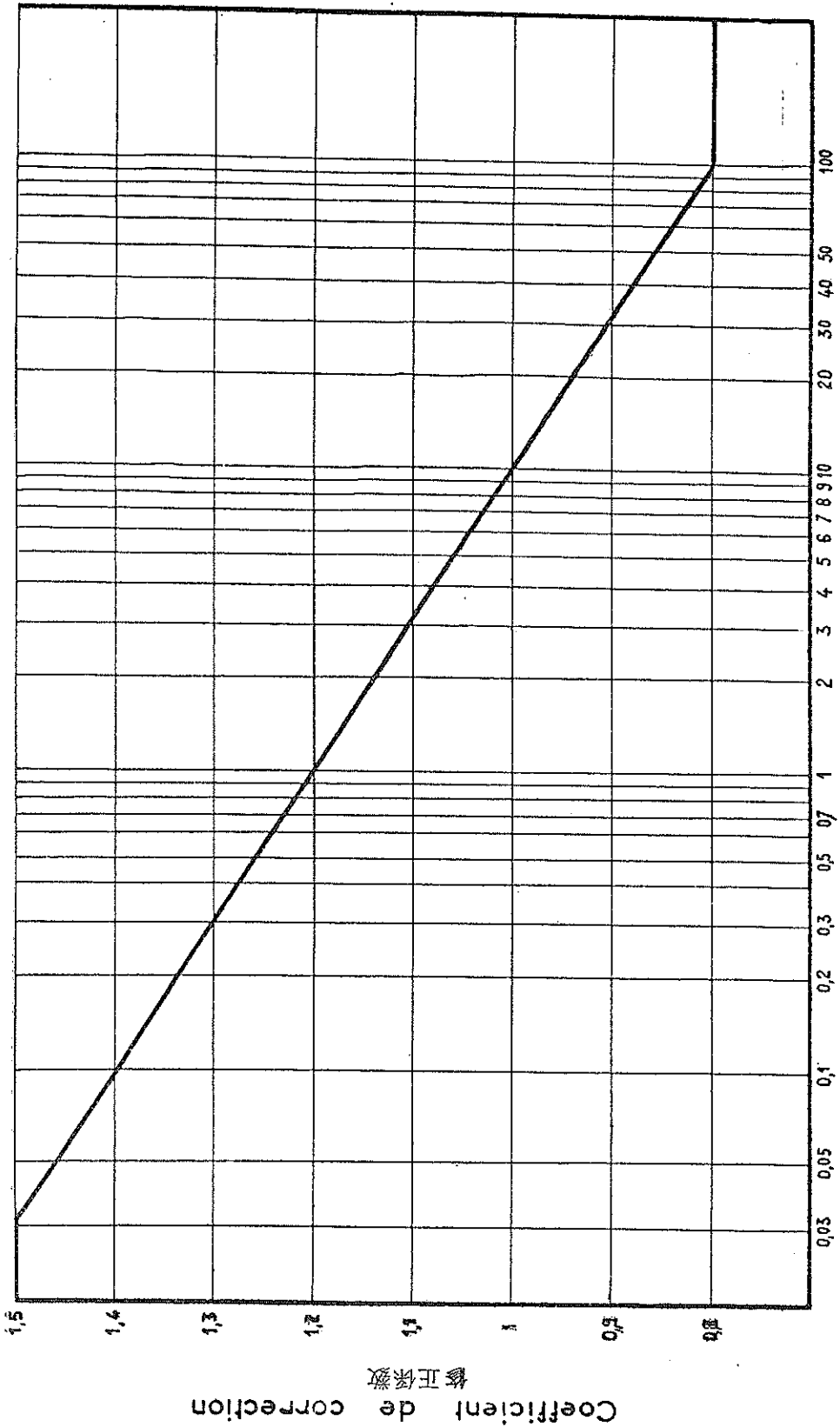
図-A. 37 許容単車輪荷重に対する許容複車輪荷重 (フランス法)¹⁰⁾

Rapport = $\frac{\text{Charge sur boggie}}{\text{Charge par roue simple}}$
 比 = $\frac{\text{許容多車輪脚荷重}}{\text{許容單車輪荷重}}$



CHARGE ADMISSIBLE SUR UN BOGGIE TYPE EN FONCTION
 DE LA CHARGE ADMISSIBLE PAR ROUE SIMPLE CHAUSSEE RIGIDE

図一A. 38 許容單車輪荷重に対する許容複々車輪荷重 (フランス法)¹⁹⁾



Moyenne du nombre de mouvements quotidiens 1日の運航回数

INFLUENCE DE L'INTENSITE DU TRAFIC SUR LA CHARGE ADMISSIBLE

図一A.39 運航回数に対する修正係数(フランス法)⁽¹⁰⁾

Coefficient de correction
修正係数

表—A.8 許容荷重の減少率(%) (フランス法)¹⁹⁾

k (bars/cm)	q (bars)						
	9	12	15	18	21	24	27
2	省略 (10以下)		11	14	17.5	19	21
5			12.5	16	20	21	23.5
10			14	18	22	23.5	26
15			15.5	20	24	26	28

(4) 交通量の影響

本法における設計図表は、交通量が1日10回（少なくとも計算荷重の80%以上のもの）で10年の耐用年数を前提としたものである。この仮定は大体繰り直し載荷5,000回に相当する。実際の交通量がこの仮定と著しく異なる場合には、タイヤ圧の影響に対すると同様に許容荷重を増減してこれに対処している。

数多くの試験の結果、許容荷重と交通量の対数との間に直線関係を仮定することが可能となった。図—A.39 は一日の運行回数と許容荷重の修正係数の関係を示しており、これにより、交通量が変化した場合の許容荷重の増減を計る。修正係数の最大値は1.5であって、非常用飛行場においても設計図表から得られた許容荷重の1.5倍以上の許容荷重にすることはできない。

4.3 舗装厚の設計

(1) 単車輪の場合

単車輪の場合には図—A.35 を利用して直接舗装厚を決定する。すなわち、コンクリートの曲げ強度 n 、路盤支持力係数 k 、単車輪荷重を使って図—A.35 から舗装厚を求める。コンクリートの曲げ強度に関する安全率は1.8である。

(2) 多車輪の場合

多車輪の場合にも適当な方法で等価単車輪荷重が求められた場合、あるいは多車輪配置が図—A.37, A.38に示すものと著しくかけ離れている場合には適当な方法で等価単車輪荷重を求めて、図—A.35 を使用して単車輪の場合と同様に舗装厚を決定する。

車輪配置が図—A.37, A.38に示すものに近似している場合には、舗装版厚 h を仮定して、図—A.35 と図—A.37あるいは図—A.38 および図—A.36 を繰り返し使用することにより舗装版厚を決定する。これは次のようにする。

- (i) コンクリートの曲げ強度、路盤支持力係数 k に、舗装版厚 h を仮定して図—A.35 より許容単車輪荷重を求める。
- (ii) (i)の許容単車輪荷重と多車輪の脚荷重を使用して図—A.37あるいは図—A.38より対応する剛比半径 l を求める。
- (iii) (ii)の剛比半径と路盤支持力係数 k を使用して図—A.36より、 h_2 を求める。
- (iv) h_2 と h_1 を比較して両者が近似するまで以上の操作を繰り返す。

5. LCN法 (Load Classification Number System)

5.1. 概 説

LCN 法 (Load Classification Number System)²⁰⁾ は英国において開発され、航空機荷重と舗装強度の評価方法の一つとして発展してきたものである。

数多くの載荷試験の結果、接地面積と舗装の破壊荷重との間には図—A.40(a)(b) に示したような関係があり、接地面積が $1,300 \sim 4,500 \text{cm}^2 (200 \sim 700 \text{in}^2)$ の範囲で近似的に次式が成立することが分かった。

$$\frac{W_1}{W_2} = \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^{0.44}$$

ここで、 W_1, W_2 は接地面積がそれぞれ A_1, A_2 の場合の破壊荷重である。図—A.40では、破壊荷重は LCN 法が開発された当時の重航空機の代表的な荷重として、直径 $66 \text{cm} (26 \text{in})$ 接地面積 $3,419 \text{cm}^2 (530 \text{in}^2)$ に対する破壊荷重を100としてパーセントで示してある。

次に、航空機に対する舗装の容量を示す基準として標準の LCN 曲線が定められたが、これは当時の主な航空機の車輪荷重と接地面積の関係を考慮に入れて適当に選ばれた表—A.9の諸点を結んだものである。

標準 LCN 曲線を、図—A.41(a)(b) に示す。

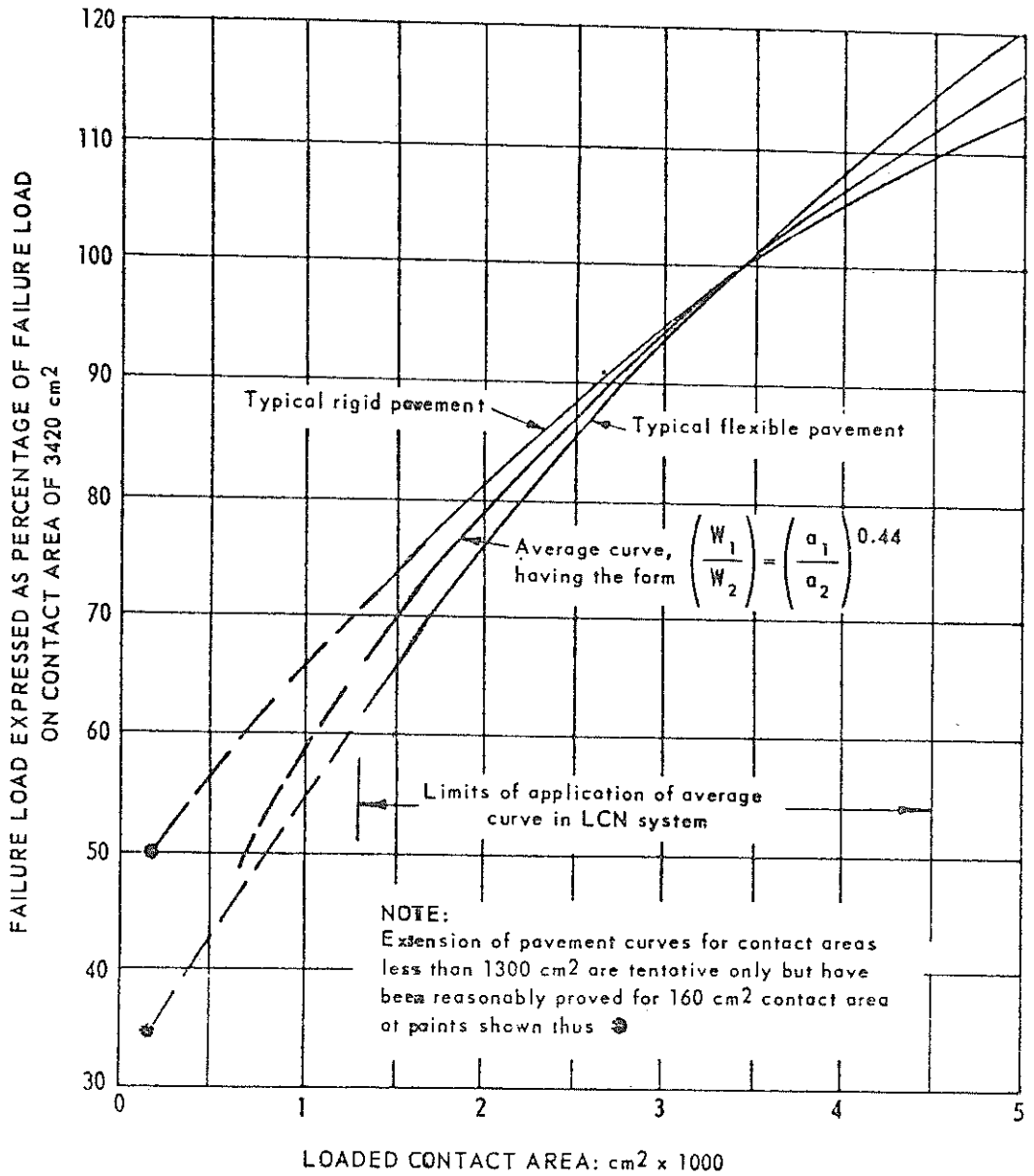
図—A.41 の標準 LCN 曲線と次式

$$\frac{W_1}{W_2} = \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^{0.44}$$

から単車輪荷重とタイヤ圧（あるいはタイヤ接地面積）の任意の組合せに対する LCN を求める 図—A.42 (a), (b) が作られている。これは次のようにして求められたものである。

- (i) タイヤ接地面積を示す直線は次の関係式から求まる。

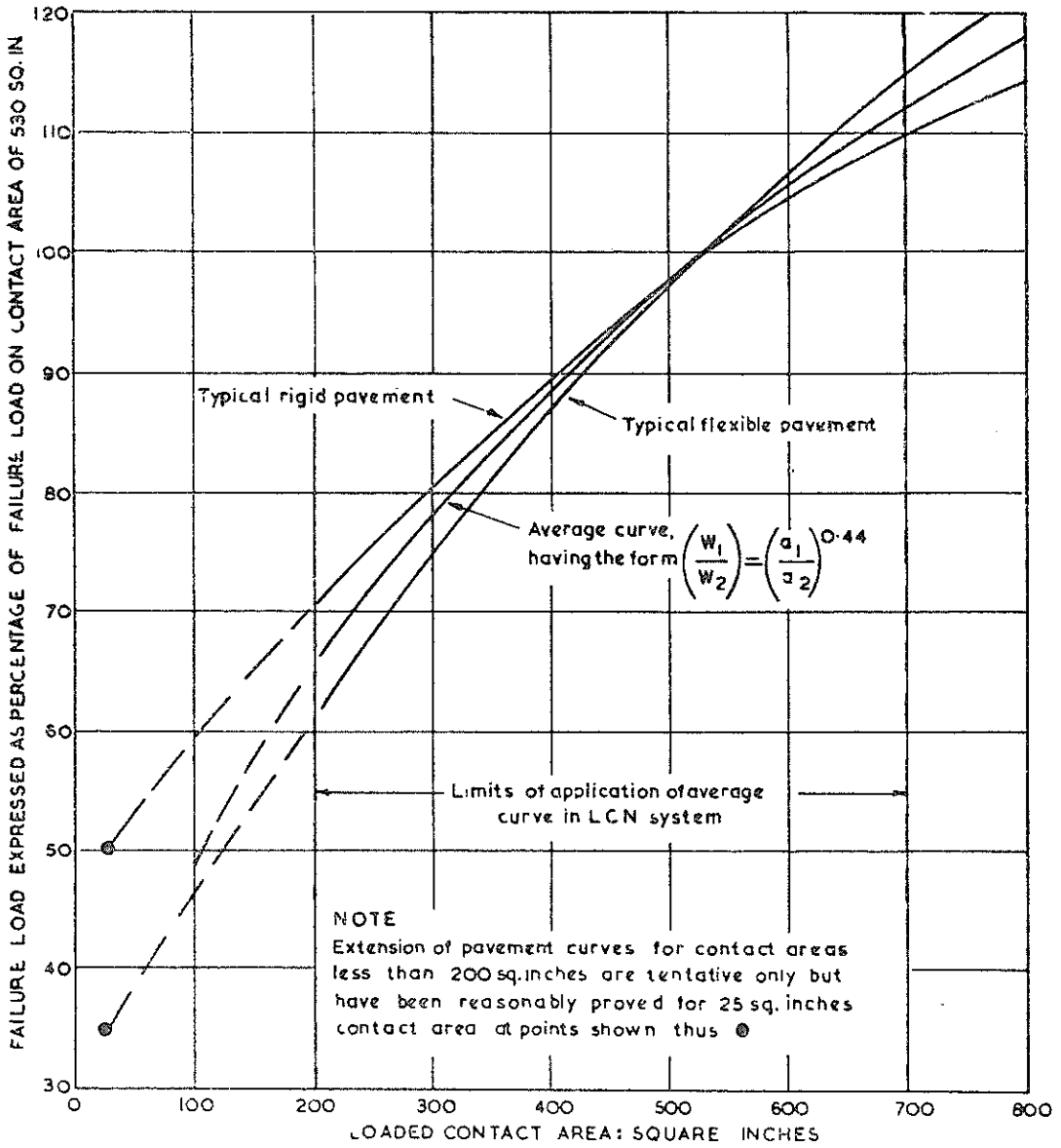
$$\text{接地面積} = \frac{\text{車輪荷重}}{\text{タイヤ圧}}$$



A - METRIC UNITS

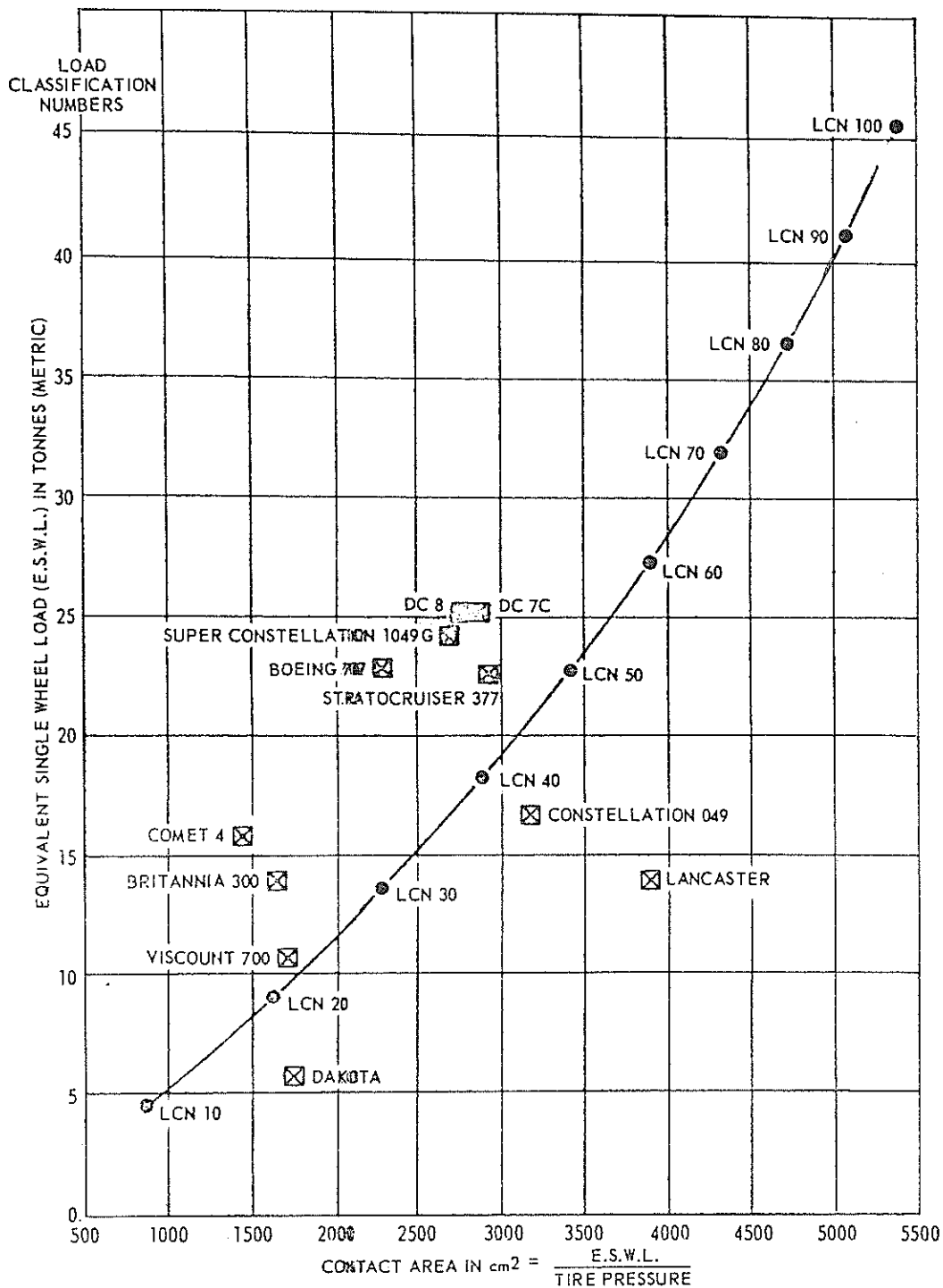
FAILURE LOAD CONTACT AREA RELATIONSHIP CURVES FOR TYPICAL PAVEMENTS

図一A. 40(a) 破壊荷重と接地面積との関係 (LCN法)²⁰



B-ENGLISH UNITS
FAILURE LOAD CONTACT AREA RELATIONSHIP
CURVES FOR TYPICAL PAVEMENTS

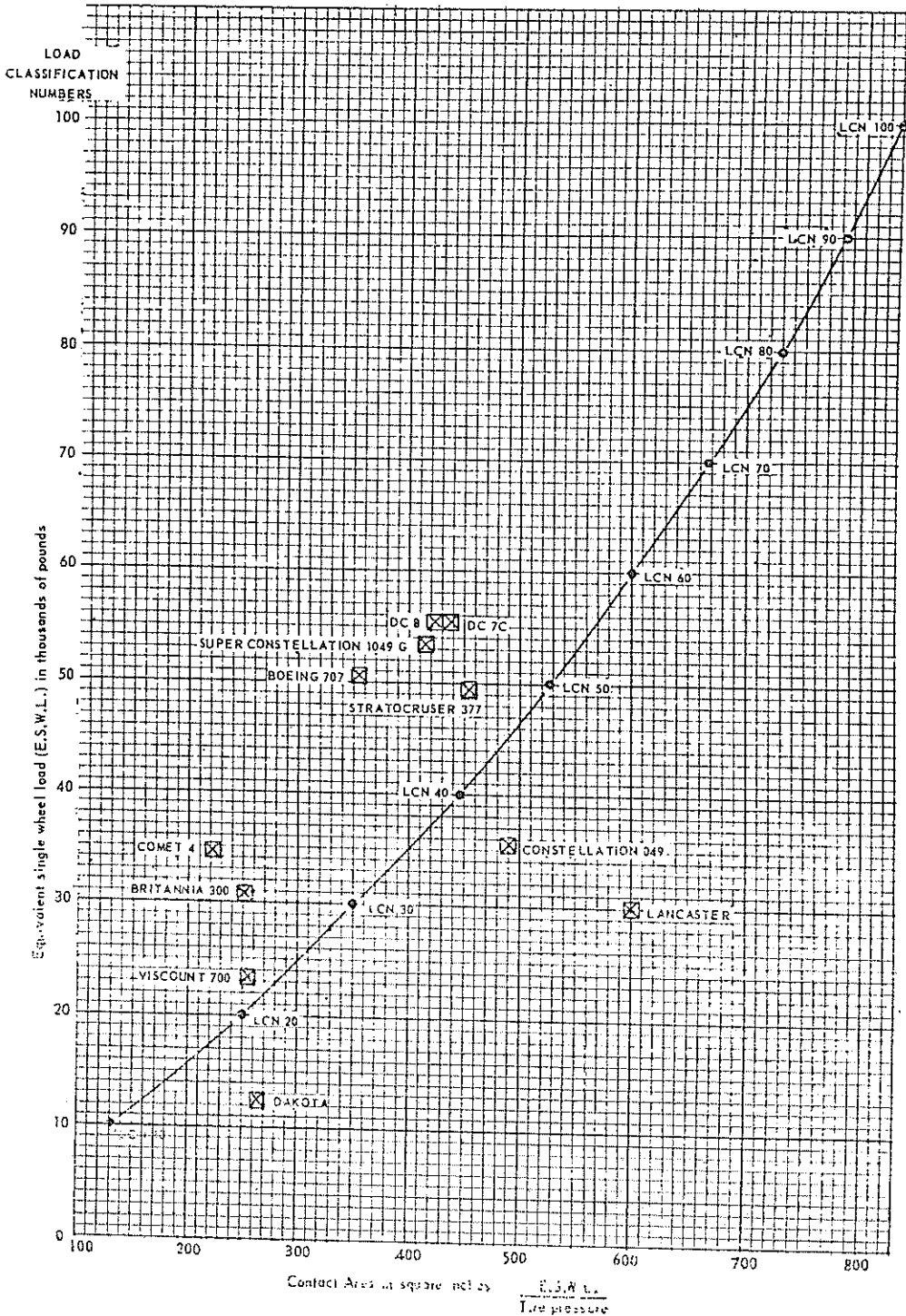
図一A.40(b) 破壊荷重と接地面積との関係 (LCN法)²⁰⁾



A - METRIC UNITS

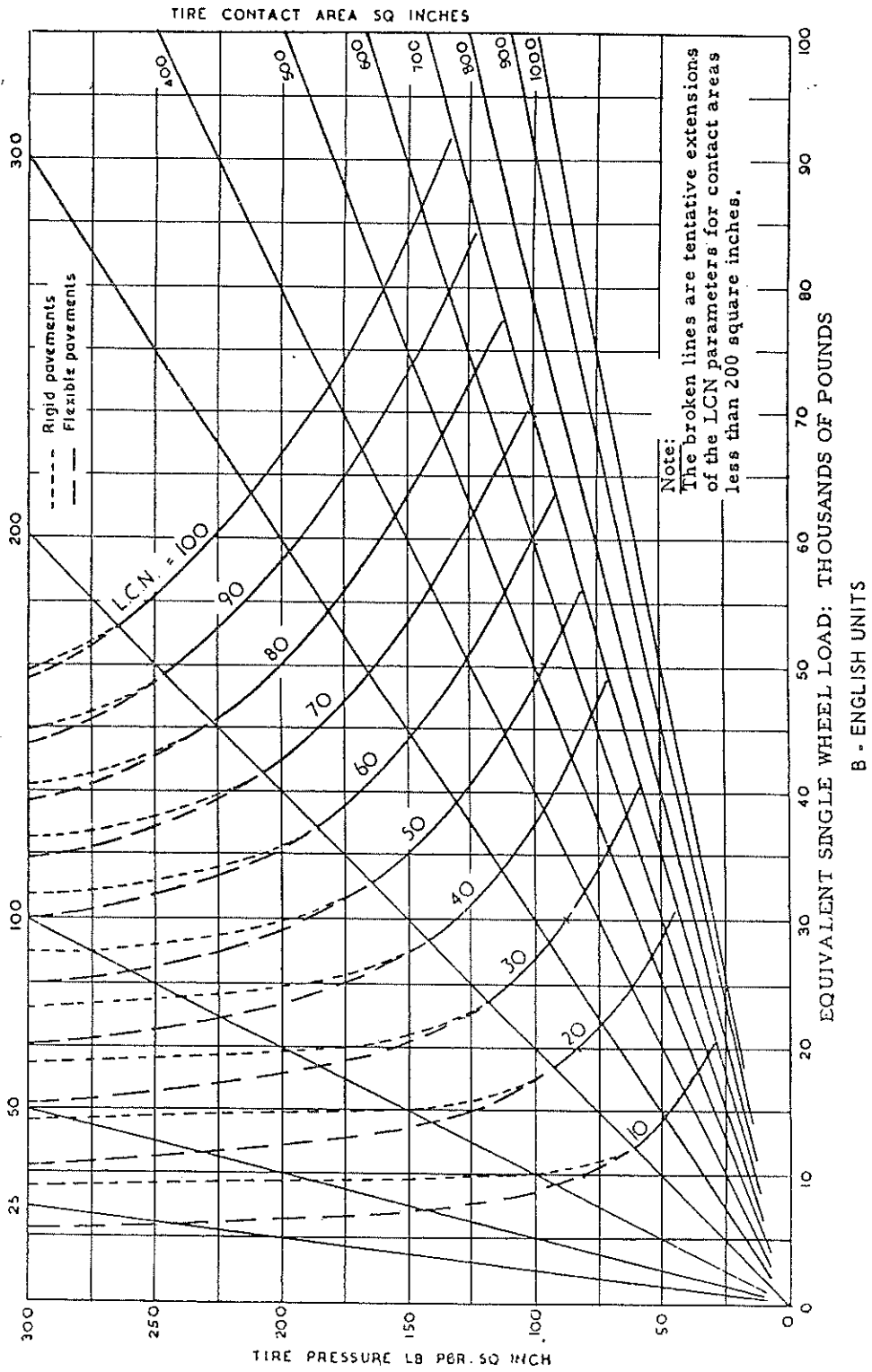
STANDARD LOAD CLASSIFICATION CURVE

圖一A. 41(a) 標準LCN曲線²⁰⁾



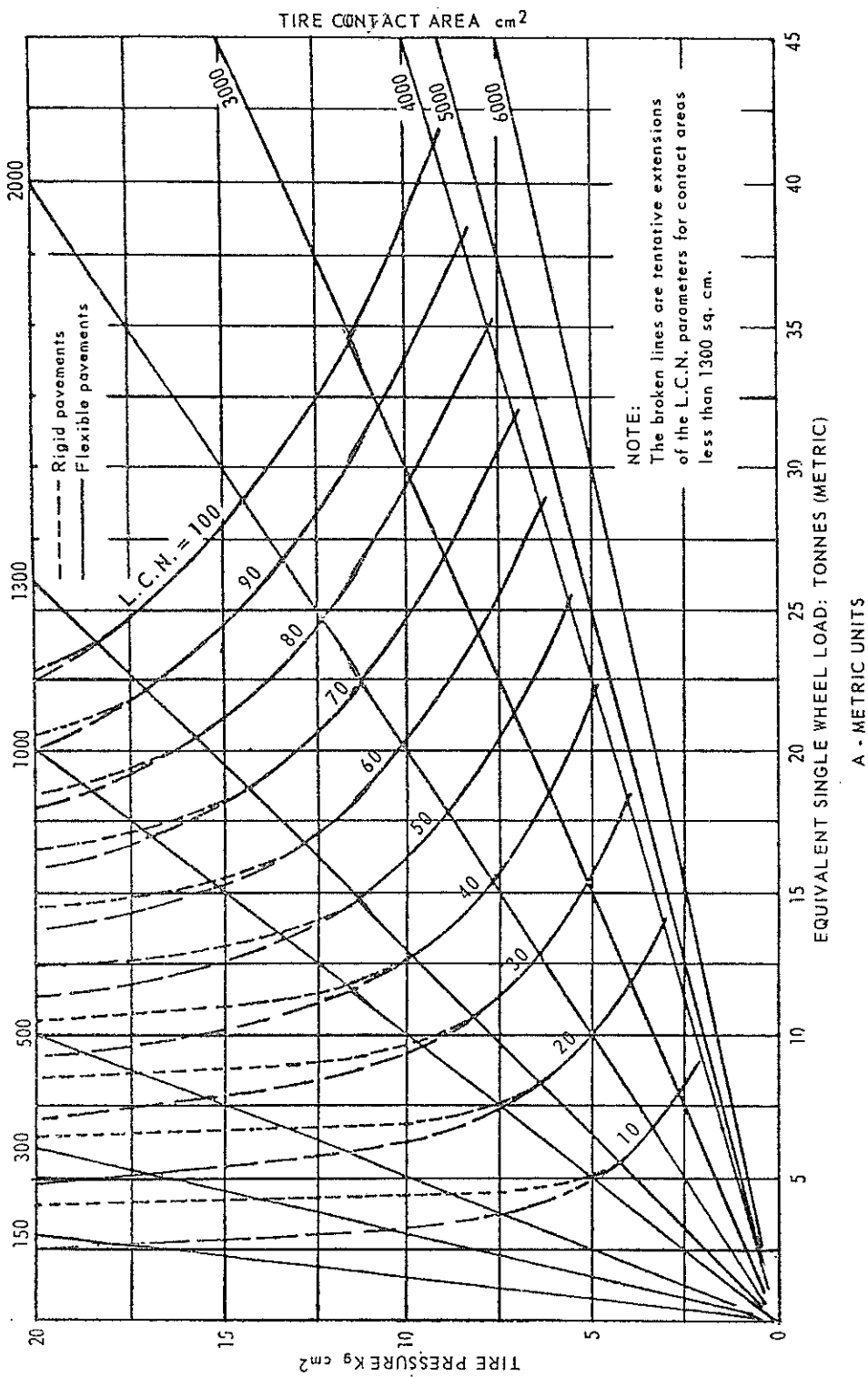
D - ENGLISH UNITS
 STANDARD LOAD CLASSIFICATION CURVE

圖一A. 41(b) 標準LCN曲線²⁰⁾



LOAD CLASSIFICATION NUMBERS IN TERMS OF LOAD, TIRE PRESSURE AND CONTACT AREA, FOR RIGID AND FLEXIBLE PAVEMENTS

圖-A.42(a) LCN曲線²⁰



LOAD CLASSIFICATION NUMBERS IN TERMS OF LOAD, TIRE PRESSURE AND CONTACT AREA, FOR RIGID AND FLEXIBLE PAVEMENTS

图-A.42(b) LCN曲线²⁰⁾

表一A.9 標準 L. C. N. 値²⁰⁾

車輪荷重		タイヤ圧		接地面積		L. C. N
×1000lb	ton	psi	kg/cm ²	m ²	cm ²	
100	45.4	120	8.44	833	5,379	100
90	40.8	115	8.09	783	5,043	90
80	36.3	110	7.74	727	4,690	80
70	31.8	105	7.38	667	4,332	70
60	27.2	100	7.03	600	3,869	60
50	22.7	95	6.68	526	3,398	50
40	18.1	90	6.33	444	2,859	49
30	13.6	85	5.98	353	2,274	30
20	9.1	80	5.62	250	1,619	20
10	4.5	75	5.27	133	854	10

(ii) 各 L. C. N. 線上の一点は標準 L. C. N. 曲線より直接得られる。

(iii) 各 L. C. N. 線は(ii)の点を通り、関係式

$$\frac{W_1}{W_2} = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^{0.44}$$

を満足するように描く。

(iv) 点線の部分は小さい接地面積の載荷試験の結果により、1,300cm²(200 in²) 以下の接地面積の場合にも適応しうるように L. C. N. 線を仮に延長したものである。

以下、5.2., 5.3. に L. C. N. を使用した既設舗装の評価方法および舗装厚の設計方法について述べる。

5.2. 既設舗装の評価

(1) 航空機の L. C. N

航空機の L. C. N. は、航空機の単車輪脚荷重とタイヤ圧から図一A.42 を用いて求める。多車輪航空機の場合には、問題となっている舗装の版厚を使って適当な方法で等価単車輪荷重を求め同じ図を使って L. C. N. を求める。

(2) 舗装の L. C. N

剛性舗装の L. C. N. は舗装表面上で平板載荷試験を行なって求める。使用する載荷板の大きさは民間空港の場合 1,651cm²(256 in²) の接地面積をもつ φ 45.7cm (18 in) のものとし、載荷による平板とその近辺の舗装面のたわみを測定する。ダイヤル・ゲージは 0.025 mm(0.001 in) の精度のもので、載荷地点から十分離れた点で支持した片梁あるいはブリッジ上に設置す

る。

(i) 試験箇所

無筋でスリップバーを用いない版の最も弱い箇所は膨強目地の部分における自由隅角部である。このような舗装の場合には版の隅角部で試験する。一方、荷重伝達装置を有している目地の場合には版の隅角部と中央の2箇所で行なう。

(ii) 試験方法

載荷板を舗装面に十分接触させるため、版上に細砂か焼石こうを薄く敷く。ダイヤル・ゲージは1個を版の隅の端に設置し、少なくとも3個を載荷板から6.4cm離して、隅角の二等分線上に23cm(9 in) 間隔に取り付ける。ゲージの下にはガラスの小片をおいて引っかかりのないようにする。

載荷板を安定させるため、最初に約2,300kg(5,000 lb) を載荷し一旦除去する。試験荷重は約2,300kg(5,000 lb) づつ連続的に加え、各荷重ごとにたわみを測定する。載荷は、コンクリート版が少なくとも5 mm(0.2 in) たわむまで続ける。普通、この時までにはコンクリート版にはひびわれが生じている。荷重-たわみ曲線はひびわれが生じた点で勾配に急変を示しており、ひびわれの生じた位置は外側に配置したダイヤル・ゲージの動きから判明する。

(iii) 試験の回数

載荷試験は試験のバラッキを正して平均強度を出すため何回か行なう。試験回数は試験結果のバラッキの程度によるが、少なくとも20回は必要である。

(iv) L. C. N. の算出

以上の試験の結果から平均破壊荷重を計算し、完全率1.5を使って安全作用荷重を決定する。この安全作用荷重を等価単車輪荷重として載荷板面積1,651cm²(256 in²) を使って図一A.42 を用いてを求める。

(3) 判定法

以上の結果に基づいて、ある航空機が問題となっている舗装に離着陸しうかどうかの判定は英国では次の要領で行なっている。

(i) 問題となっている舗装に対する航空機の L. C. N. がその舗装の L. C. N. の 1.1 倍以下のときは使用を無制限に許可する。

(ii) 航空機の L. C. N. が舗装の L. C. N. の 1.1~1.25 倍の間にあるときは、約3,000回まで運航を許可する。

(iii) 航空機の L. C. N. が舗装の L. C. N. の 1.25~1.5 倍の間にあるときは、約300回までの運航を許可する。

この場合、運航は数ヶ月の期間に分散していなければならぬ。コンクリート舗装には幾つかのひびわれが生ずる。

(iv) 航空機のLCNが舗装のLCNの1.5~2.0倍の間にあるときは、使用を著しく制限し、英国では舗装を検査し、得た資料を入念に検討したのち許可する。

(v) 航空機のLCNが舗装のLCNの2倍以上のときは、緊急時のみ使用を許可する。

5.3. 舗装厚の設計

(1) 設計図表

LCN法を利用した剛性舗装厚の設計は図一A.43あるいは図一A.44の設計曲線を使って行なう。

英国における剛性舗装の多くのものは無筋でスリッパを使用していない版である。このような弱い箇所は理論的にも実際的にも版の隅角部であり、そこでWestergaardの隅角載荷公式を修正したTellerとSutherlandによる経験公式に基づいて設計する。修正公式は次のとおりである。

$$\sigma_e = \frac{3W}{h^2} \left[1 - \left(\frac{r\sqrt{2}}{l} \right)^{1.2} \right]$$

σ_e : 版隅角部の曲げ応力 (kg/cm², psi)

W : 作用荷重 (kg, lb)

h : 版厚 (cm, in)

$l = \sqrt{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)k}}$: 剛比半径 (cm, in)

r : 接地半径 (円と仮定) (cm, in)

k : 路盤支持力係数 (kg/cm², psi/in)

E : コンクリートの弾性係数 (kg/cm², psi)

μ : コンクリートのポアソン比

上式においてはWとrの間に直接的な関係はない。そこで設計にLCN法を導入するため、総ての計算をr=15cm(6in)に対して行なう。すなわち、図一A.43に示す設計曲線は次のようにして作製されたものである。

(i) LCNと接地面積、タイヤ圧、等価単車輪荷重の間の関係を示す図一A.42から各LCNに対して接地半径15cm(6in)(接地面積706cm²=113in²)に対する等価単車輪荷重を求める。これは5.1に示した接地面積と舗装の破壊荷重の関係を示す式

$$\frac{W_1}{W_2} = \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^{0.44}$$

に標準LCN値を示す表の数値(A₁, W₁)を代入し、A₂に706cm²(113in²)を代入して計算すること

ができる。

(ii) (i)で求めた車輪荷重Wとr=15cm(6in)を前記の修正隅角公式に代入し、

路盤支持力係数 k = 1.38kg/cm²(50pci)

コンクリートのポアソン比 $\mu = 0.15$

コンクリートの弾性係数 E = 350,000kg/cm²
(5 × 10⁶psi)

と仮定して舗装版厚 h = 20~60cm(8~24in)に対する曲げ応力を、各LCNに対する車輪荷重ごとに計算する。

(iii) 同様の計算を路盤支持力係数 k = 8.3kg/cm²(300pci), 27.7kg/cm²(1,000pci)に対しても行なう。

(iv) 以上の三種の計算結果を図一A.43とした。

以上に述べたものは無筋でスリッパを用いてない版の場合であるが、現在、設計・施工されているものはほとんどスリッパを使用している。図一A.44はこのような場合の設計図表であるが、次に示すWestergaardの中央載荷公式に基いて上記と同様の方法で作製したものである。

$$\sigma_1 = \frac{0.275W}{h^2} (1 + \mu) \log_{10} \left\{ \frac{Eh^3}{kb^4} \right\}$$

σ_1 : 版中央部の曲げ応力

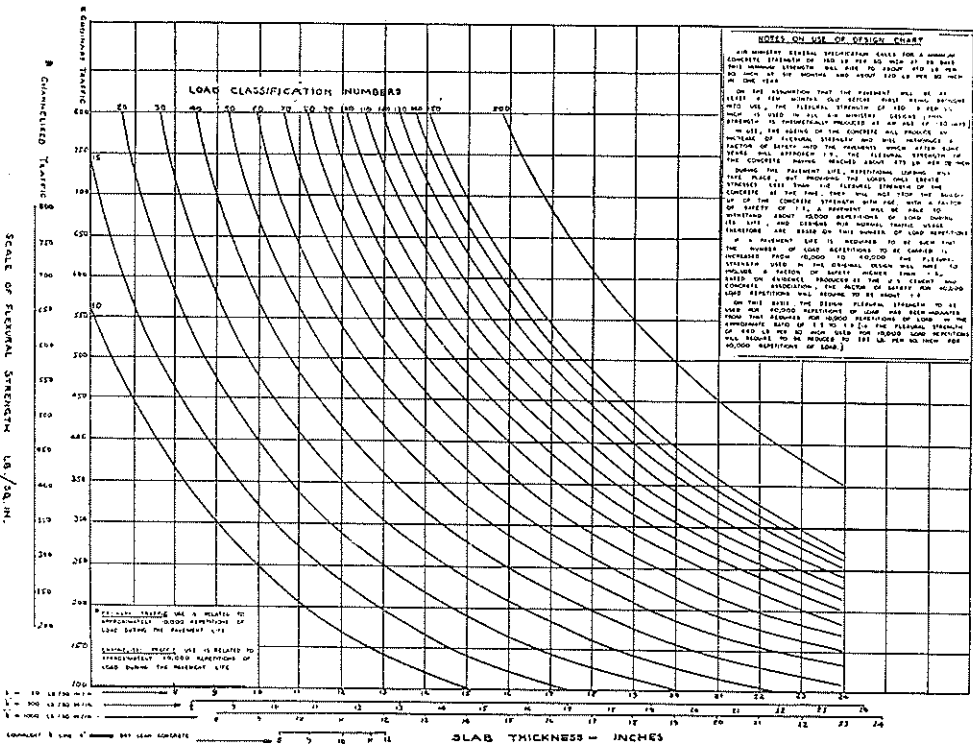
$b \sqrt{1.6r^2 + h^2} - 0.675h$ r < 1.724h のとき

b = r r > 1.724h のとき

図一A.43, A.44においては、計算に使用した k = 1.38, 8.3, 27.7kg/cm²をそれぞれ1.5, 10, 30kg/cm²と丸めて表示してある。また、英国空軍省は耐用年数中の載荷繰り返し回数10,000回に対するコンクリートの曲げ強度の安全率を1.5、英国セメントおよびコンクリート協会は同様に40,000回に対して1.8を推奨しており、図一A.43, A.44においてはこれらの安全率を使用している。

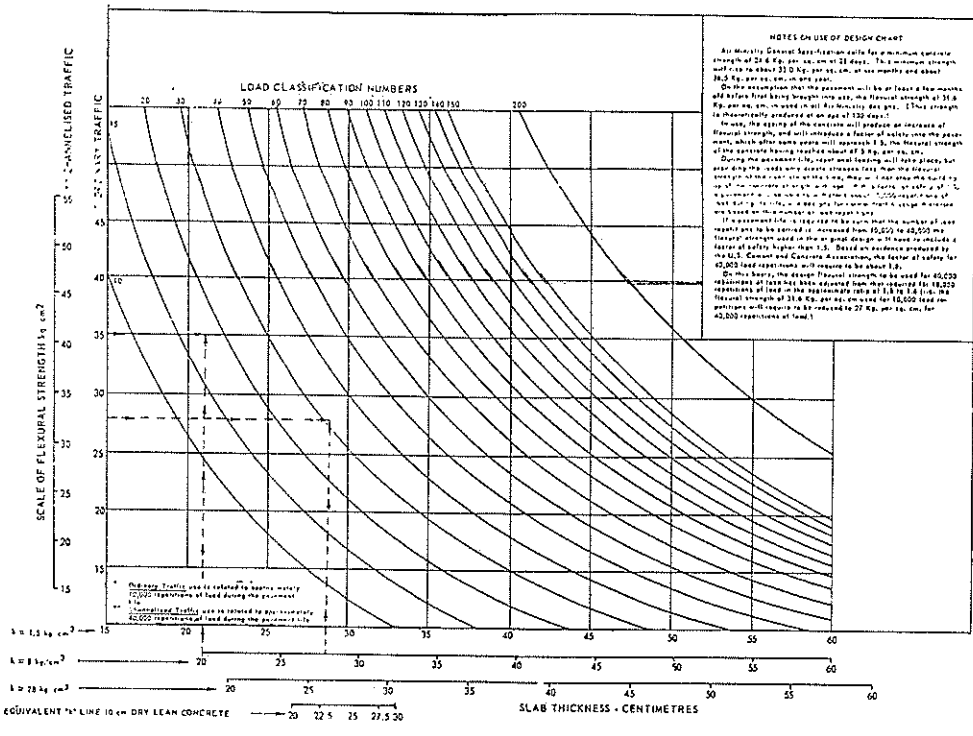
(2) 版厚の決定

舗装版厚は設計対象航空機のLCNが分ると、図一A.43あるいは図一A.44から路盤支持力係数 k = 1.5, 10, 30kg/cm²(50, 300, 1,000pci)の場合には、直接求めることができる。ところが、航空機のLCNについては5.2の(1)で記したように、単車輪航空機の場合には図一A.42から求めることができるが、多車輪の場合には、何らかの方法で等価単車輪荷重を求めなければならない。また、等価単車輪荷重を求めるには剛比半径 l が必要であり、lの算定には舗装版厚 h が必要である。従って、舗装版厚の設計には h を仮定して計算を進める次のような試行錯誤の方法を取

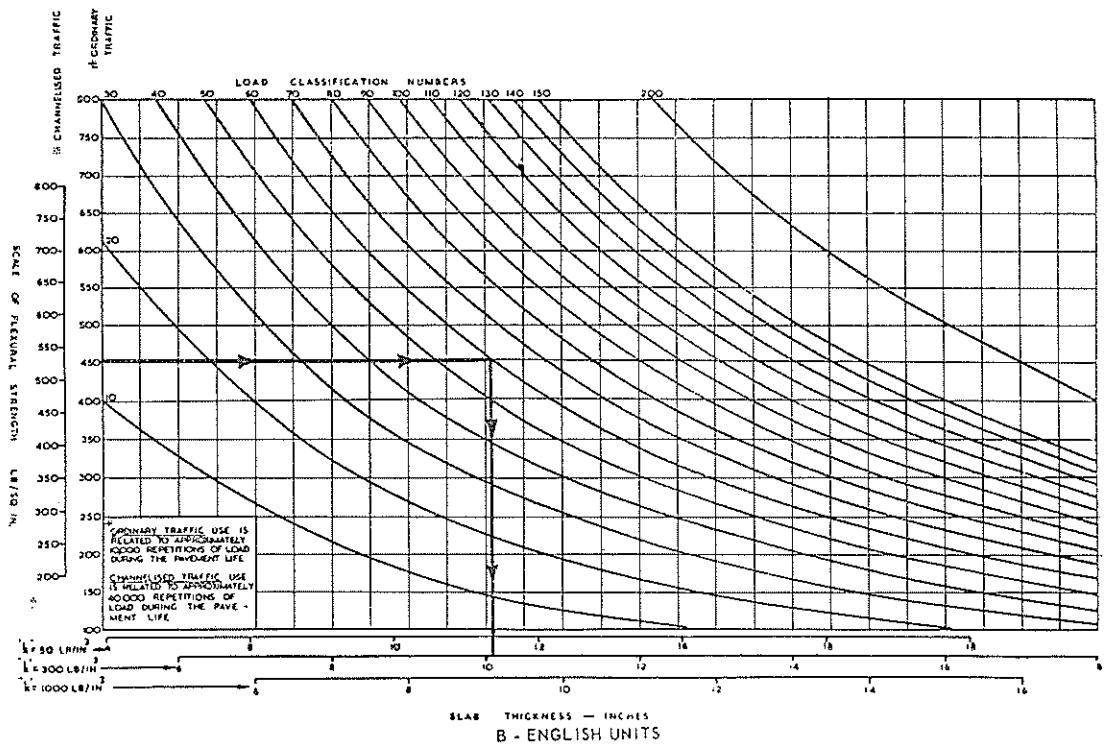
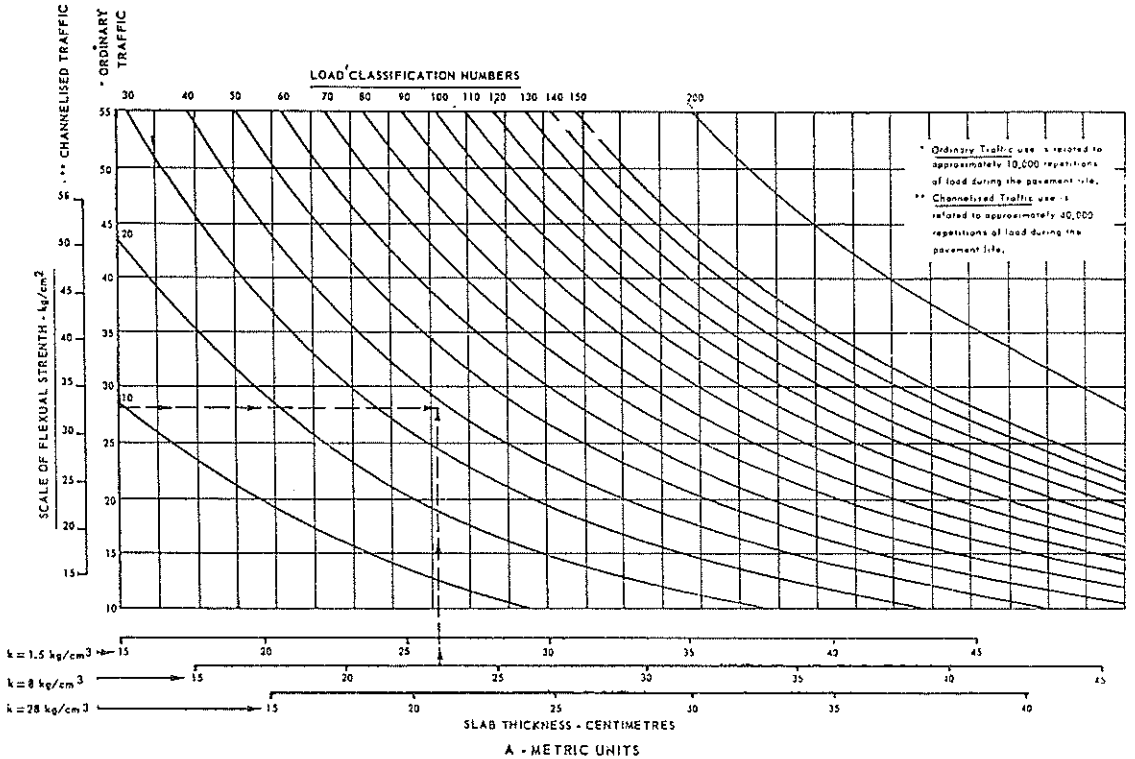


B - ENGLISH UNITS
 DESIGN CHART FOR RIGID PAVEMENTS - SINGLE SLAB CONCRETE

図一A. 43(a) 剛性舗装設計：隅角載荷公式の場合 (LCN法)²⁰⁾



図一A. 43(b) 剛性舗装設計図表：隅角載荷公式の場合 (LCN法)²⁰⁾



DESIGN CHART FOR FULLY DOWELLED RIGID PAVEMENTS

図一A.44 剛性舗装設計図表：中央載荷公式の場合（LCN法）²⁰⁾

らなければならない。

(i) 舗装版厚 h_1 を仮定し剛比半径 l を計算する。このとき図—A. 43あるいは図—A. 44と同じ条件とする。

$$E = 350,000 \text{ kg/cm}^2 (5 \times 10^6 \text{ psi})$$

$$\mu = 0.15$$

$$k = 1.5, 10, 30 \text{ kg/cm}^3 (50, 300, 1,000 \text{ pci})$$

(ii) l を使用して、適当な方法で等価単車輪荷重を求め。

(iii) 図—A. 42 より航空機の LCN を求める。

(iv) 図—A. 43 あるいは図—A. 44 より、舗装版厚 h_2 を求める。

(v) h_2 と h_1 を比較し、近似するまで、以上の操作を繰り返す。

5.4. ま と め

LCN 法における舗装厚の設計は、既設舗装の評価方法として発展してきた LCN をパラメーターとして Westergaard の理論公式に基いて作製された設計図表を用いて行なうものである。載荷公式は版にスリップバーを使用していないときには隅角部載荷公式であり、スリップバーを使用するときは中央載荷公式である。

6. コンクリート舗装における等価単車輪荷重の求め方

6.1. 等価単車輪荷重の意義

1脚が2個以上の車輪をもつ脚形式においては、同一の脚荷重で車輪1個の場合と比較して舗装におよぼす影響が小さくなる。等価単車輪荷重 (Equivalent Single Wheel Load; E. S. W. L.) とは複数車輪の脚荷重を舗装におよぼす影響が等しくなるように換算した単車輪荷重である。

複数車輪荷重のコンクリート舗装に対する等価単車輪荷重とは、その複数車輪荷重がコンクリート版中に生じさせる最大応力と等しい最大応力をコンクリート版中に生じさせるような単車輪荷重で、複数車輪荷重と等しいタイヤ圧を有するものである。

6.2. 等価単車輪荷重の求め方

現在、コンクリート舗装に対する等価単車輪荷重を求める方法は Westergaard の中央載荷公式に基づいて、米国連邦航空庁と英国において開発作製された図表によるものである。1.1. で触れたように、この方法で求めた等価単車輪荷重による応力と実際の車輪配置の荷重によ

る応力とは必ずしも等しくないという批判が出ているが、現在使用しうる方法はこれだけであるのでこれについて説明する。

(1) 等価単車輪荷重を求めるための図表とその使用方法
等価単車輪荷重は1.1. で述べたように、図—A. 1 (複車輪の場合)、図—A. 2 (複々車輪の場合) を使用して求める。

舗装厚 h 、コンクリートの弾性係数とポアソン比 E と μ 、路盤支持力係数 k などの舗装に関する変数を集約した剛比半径 l と、航空機に関する変数すなわち脚荷重 P 、総接地面積 A 、車輪間隔 S 、(S_T) を知るにより、図—A.1 もしくは S.2 に示されている S/l 、(S_T/l)、 A/l^2 を計算して、これらの図から機械的に脚荷重と等価単車輪荷重の比が求められる。脚荷重をこの比で割ることにより等価単車輪荷重が得られる。

(2) 理解的解析

図—A.1, A.2に示す等価単車輪荷重を求める図表の理論的作製根拠を以下に述べる。

図表の作製はコンクリートのポアソン比 $\mu=0.15$ として Bradbury によって書き直された Westergaard の中央載荷公式に基づいている²¹⁾。Bradbury の修正公式は次のとおりである。

$$\sigma_1 = 0.31625 \frac{P}{h^2} \left[4 \log_{10} \left(\frac{l}{b} \right) + 1.0693 \right] \dots\dots\dots(1)$$

σ_1 : 荷重 P の軸下、版底の最大引張り応力

P : 作用荷重

h : 版厚

$$l : \text{剛比半径} = \sqrt[4]{\frac{E h^3}{12(1-\mu^2)k}}$$

E : コンクリートの弾性係数

μ : コンクリートのポアソン比

k : 路盤支持力係数

$$b = \sqrt{1.6 a^2 + h^2} - 0.675 h \dots\dots\dots(2)$$

$a < 1.724 h$ のとき

$$b = a \dots\dots\dots(3)$$

$a > 1.724 h$ のとき

a : 載荷面積を円と仮定して、その半径

式(1)を

$$\sigma_1 = \frac{C P}{h^2}, \quad C = 0.31625 \left[4 \log_{10} \left(\frac{l}{b} \right) + 1.0693 \right] \dots\dots\dots(4)$$

とすると、 C は l/b によって決定される応力係数である。 l/b の種々の値に対する C の値については E. F. Kelley によって表が作られている²²⁾。ここで計算を簡単にするために式(3)の $b = a$ と仮定する。この仮定

による誤差は小さく計算は非常に簡単になる。従って係数Cは l/a に関係することになる。

式(4)を書き直して、

$$C = \frac{\sigma_i h^2}{P} \dots\dots\dots(5)$$

$$\sigma_i = \frac{M}{\left(\frac{h^2}{6}\right)}$$

M : 曲げモーメント

$h^2/6$: 版の単位長さ当りの断面係数

であるから

$$C = \frac{M h^2}{P \frac{h^2}{6}} \dots\dots\dots(6)$$

従って、

$$\frac{M}{P} = \frac{C}{6} \dots\dots\dots(7)$$

となる。

複車輪の場合、複々車輪の場合、共に同様の方法で図表を作製しうるので、ここでは複車輪の場合についてその作製手順を述べる。

複車輪の荷重 P_1 、等価単車輪荷重 P_2 、複車輪の総接地面積 A_1 、車輪間隔 S 、剛比半径 l として、 A_1/l^2 、 S/l の値から P_1/P_2 を値る手順は次のようにする。

A_1/l^2 の値から a_1 を各車輪の接地面積の半径とすると、 $A_1=2\pi a_1^2$ であるから、相対する l/a_1 の値が求められる。 l/a_1 を使って Kelley の表から (あるいは計算して) C の概略の値が得られ、式(7)から相対する $M_1/0.5P_1$ の値が求められる。ここで M_1 は考えている最初の車輪の下の曲げモーメントを示し、荷重は一つの車輪の荷重、すなわち脚荷重の半分 $0.5P_1$ である。

る。

Westergaard は、集中荷重による荷重の作用点から任意の距離における M/P の値を求める曲線を与えている。²³⁾ この曲線を与えられる値は、 l の関数で表わした距離に対する接線方向および半径方向の値で、常に前者が大きい。既に得られた最初の車輪下の $M_1/0.5P_1$ の値は半径方向のもので、これは総ての方向に等しい値である。従って、二番目の車輪に対する接線方向の値 $M_2/0.5P_1$ を加えて最初の車輪の下における総 $M/0.5P$ を求める。すなわち、Westergaard の図表から S/l の値に対する接線方向の M/P を読みとり $M_2/0.5P$ とする。

タイヤ圧 P は計算の途中で消去されるものであるから任意の値を仮定してよい。これを 100 と仮定し、これに A_1/l^2 を乗ずると相対する P_1/l^2 の値が得られる。この値の半分 $0.5P_1/l^2$ に前に求めた $M/0.5P_1$ を乗ずると相対する M/l^2 が得られる。

同じ任意のタイヤ圧 100 で、同じ M/l^2 を生ずる等価単車輪荷重 P_2 は、Kelley の表や式(1)を使って今の計算を逆に行なうことにより求めることができる。 P_2/l^2 として計算される。

全荷重と等価単車輪荷重の比 P_1/P_2 は以上によって求められた P_1/l^2 を P_2/l^2 で割ることにより求められる。

以上の手順を簡単にまとめて表示すると表—A.10 のようである。

以上のように A/l^2 と S/l の任意の組合わせについて、 P_1/P_2 を計算することにより図—A.1 に示す図表が得られる。 A/l^2 と S/l の実際的な変動範囲は $0.02 \leq A/l^2 \leq 2.00$ 、 $0.25 \leq S/l \leq 1.75$ である。

表—A.10 複車輪の場合の等価単車輪荷重の計算図表作製手順

	式	説 明	求 め 方	例	
①	$\frac{A_1}{l^2}$	(総接地面積) $\div l^2$	データから	0.400	1.00
②	$\frac{1}{a_1}$	$1 \div$ (一輪の接地半径)	$\frac{1}{\sqrt{\frac{①}{2\pi}}}$	3.95	2.51
③	C	—————	②と Kelley の表	1.093	0.845
④	$\frac{M_1}{0.5P_1}$	(最初の車輪荷重によるその曲げモーメント) \div (最初の車輪荷重)	$\frac{③}{6}$	0.182	0.141

⑤	$\frac{P_1}{l^2}$	(全荷重) $\div l^2$	$100 \times \text{①}$	40.0	100.0
⑥	$\frac{S}{l}$	(車輪間隔) $\div l$	データから	0.75	1.25
⑦	$\frac{M_2}{0.5P_1}$	(第二の車輪荷重による最初の荷重下の曲げモーメント) \div (第二の車輪荷重)	Westergaard の図表	0.075	0.038
⑧	$\frac{M}{0.5P_1}$	(総車輪荷重による一車輪荷重の曲げモーメント) \div (一車輪荷重)	④+⑦	0.257	0.179
⑨	$\frac{M}{l^2}$	(総車輪荷重による総曲げモーメント) $\div l^2$	$0.5 \times \text{⑤} \times \text{⑧}$	5.14	8.95
⑩	$\frac{P_2}{l^2}$	(等価單車輪荷重) $\div l^2$	逆計算	31.8	72.5
⑪	$\frac{P_1}{P_2}$	(全荷重) \div (等価單車輪荷重)	$\frac{\text{⑤}}{\text{⑩}}$	1.26	1.38

参 考 文 献

- 1 "Airport Paving," Civil Aeronautics Administration, U.S. Department of Commerce, pp. 1-56, October 1956
- 2 "Airport Paving," Federal Aviation Agency, U. S. A., pp. 1-71, A1-3, June 1964
- 3 "Design of Concrete Airport Pavement," Portland Cement Association, U. S. A., pp. 1-47, 1955, Supplements, March 1960
- 4 "Rigid Airfield Pavements: Airfield other than Army," Technical Manual TM 5-824-3, Department of the U. S. Army, pp. 1-83, February 1958
- 5 H. M. Westergaard, "Analysis of Stresses in Concrete Pavements due to Variations of Temperature," Proceedings, Highway Research Board, 1926
- 6 H. M. Westergaard, "Stress Concentrations in Plates Loaded over Small Areas," Transactions, A. S. C. E., Vol. 108, 1943
- 7 H. M. Westergaard, "New Formulas for Stresses and Deflections in Concrete Airfields," Transactions, A. S. C. E., Vol. 113, pp. 425-444, 1948
- 8 Gerald Pickett and G. K. Ray, "Influence Charts for Concrete Pavements," Proceedings, A. S. C. E., Vol. 76, Separate No. 12, 1950
- 9 "Report on Service Behavior Tests on Apron Pavement at Godman Field, Fort Knox, Kentucky," War Department, Corps of Engineers, September 1942
- 10 "Final Report: Service Behavior Tests on Completed Concrete Pavements at Camp Forrest Airfield, Tullahoma, Tennessee," War Department, Corps of Engineers, October 1942
- 11 "Certain Requirements for Flexible Pavement Design for B-29 Planes," U. S. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., August 1945
- 12 "Final Report: Investigation of Concrete Pavements on Different Subgrades," War Department, Corps of Engineers, U. S. Army, Ohio Division Laboratories, Mariemont, Ohio, January 1946
- 13 "Lockbourne No. 1 Test Track: Final Report," War Department, Corps of Engineers U. S. Army, Ohio River Division Laboratories, Mariemont, Ohio, March 1946
- 14 "Final Report: Lockbourne No. 2, Experimental Mat," Corps of Engineers," U. S. Army, May 1950
- 15 "Final Report: Lockbourne No. 2, Modification,"

Corps of Engineers, U. S. Army, June 1950

- 16 "Design of Concrete Airport Pavement," Portland Cement Association, 1950
- 17 Gerald Pickett, et al, "Deflections, Moments, and Reactive Pressures for Concrete Pavements," Kansas State College, Engineering Experiment Station, Bulletin No. 65, Manhattan, Kansas, October 1951
- 18 M. S. Skarlatos, "Deflections and Stresses in Concrete Pavements of Airfields with Continuous Elastic Joints: Slabs of Finite Width (Supplementary Report of Rigid Pavement Investigation Program) Rigid Pavement Laboratory, Ohio River Division Laboratories, Mariemont, June 1949
- 19 "Exposant la methode francaise de determination de la resistance des chaussees d'aerodromes," Ministère de L'équipement, Francaise, pp. 1-23, Decembre 1966 (Reply to the Questionnaire on Airport Pavement Design Method raised by Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Japan)
- 20 "Aerodrome Manual: Part 2, Aerodrome Physical Characteristics," International Civil Aviation Organization, 1965 Edition, pp. 2-81 to 2-160
- 21 R. D. Bradbury, "Reinforced Concrete Pavements," Wire Reinforcement Institute, Washington, D. C., p. 31, 1938
- 22 E. F. Kelley, "Application of the Results of Research to the Structural Design of Pavements," Public Roads, Vol. 20, 1939
- 23 H. M. Westergaard, "Computation of Stress in Concrete Roads," Proceedings, 5th Annual Meetings, H. R. B., Vol. 5, 1926
- 24 Guthrie Stewart Cooper, "The Influence of Multiple-Wheel Undercarriages on the Design and Evaluation of Airfield Pavements," Proceedings, Institution of Civil Engineers, Vol. 1, No. 2, pp. 419-460, June 1952

港 湾 技 研 資 料 No. 50

1968年6月

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 ヨシダ印刷株式会社亀戸工場