

港 湾 技 研 資 料

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

No. 262

June, 1977

空港コンクリート舗装厚設計への電算プログラムの応用

福 手 勤

運輸省港湾技術研究所



空港コンクリート舗装厚設計への電算プログラムの応用

目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. Westergaard 載荷公式	4
3. 電算プログラムの概要	6
3.1 タイヤ接地形状	6
3.2 中央載荷の場合	6
3.3 縁部載荷の場合	7
3.4 プログラムの使用法	8
4. プログラムの応用	8
4.1 概 説	8
4.2 最大曲げ応力を与えるタイヤ位置の推定	8
4.3 中央載荷、縁部載荷によるコンクリートスラブ厚の違い	10
4.4 タイヤ間隔と曲げ応力の関係	11
4.5 コンクリートスラブの弾性係数の影響	11
4.6 コンクリートスラブのポアソン比の影響	12
4.7 たわみと曲げ応力の関係	15
5. あ と が き	15
参 考 文 献	16
付 録 Pickett と Ray による影響図	17

An Application of Computer Programs to the Design of Airport Concrete Pavements

Tsutomu FUKUTE *

Synopsis

The design of airport concrete pavements is based on Westergaard's formulas in many countries. These formulas are so complicated that the influence charts developed by Pickett and Ray have been used practically for pavement design. They, however, have a few restrictions. Furthermore, it is difficult to count exactly the blocks covered by the diagrams showing the tire imprints.

In this paper, to make up for these defects, Westergaard's formulas for deflections and bending moments in both interior and edge loading conditions, were computerized in place of Pickett and Ray's influence charts. In addition to the program description, some results of application studies are presented.

* Member of the Runways Laboratory, Soils Division

空港コンクリート舗装厚設計への電算プログラムの応用

福手 勤*

要 旨

現在、わが国を始めとして世界各地で採用されている空港コンクリート舗装設計法の基礎となっているのは、Westergaard の載荷公式であるが、この Westergaard の載荷公式は実際の設計に利用するためには複雑な形をしているため、Pickett と Ray によって作成された影響図が従来一般に利用されてきた。しかし影響図にもいくつかの制約があるほか、その使用にあたっては個人差や読み取り誤差が避けられない。

これらの欠点を補うために、Westergaard 公式のうち、中央載荷と縁部載荷状態のたわみと曲げモーメントを与える式について電算プログラム化を行ない、いくつかの応用例を示した。

1. ま え が き

現在、わが国をはじめ、米、フランス、イギリスなどの国々における空港コンクリート舗装のスラブ厚設計には、Westergaard の載荷公式がその基礎として用いられている。Westergaard の載荷公式は、コンクリート舗装を Winkler 基礎上の版として解析して得られている。Winkler 基礎は、バネを敷きつめた基礎と考えられるし、また重い液体から成っている基礎とも考えられるが、この Winkler 基礎上のコンクリート舗装システムの特長は、コンクリートスラブのたわみと地盤反力とが比例すると仮定されることである。

これに対し、路盤を弾性体とみなして解析することも考えられる。この問題に関しては、水平方向に無限に続く版に載荷した時（中央載荷）の解が Hogg³⁾ によって与えられている。しかし、版の縁部や隅角部に載荷された場合の解が得られていないため、路盤を弾性体とみなしてコンクリート舗装を設計することはあまりないようである。

また Westergaard の載荷公式も、そのまま空港のコンクリート舗装スラブ厚設計に用いるには不便な形をしているため、一般には付録の図-A.1 から図-A.4 に示すような Pickett と Ray⁴⁾ によって作成された影響図が用いられることが多い。これらの影響図の詳細な使用法はここではふれないが、航空機のタイヤプリントをある縮尺でトレーシングペーパーにトレースしたものを影響図に重ね、タイヤによって囲まれたブロック数を数えることによってコンクリートスラブの曲げモーメントやたわみが得られるものである。このトレ

ースの際の縮尺は路盤の K 値やスラブ厚によって変化されなければならない、またブロックの数を数えるのも結構手間のかかる仕事であり、読み取りなどに付随する誤差も避けることはできない。

一方米国のポルトランドセメント協会（以後 PCA と略す）では、電子計算機の発達に伴ない、Pickett と Ray による影響図のうちの中央載荷による曲げモーメントを与える影響図をコンピュータプログラム化している。当研究室でも PCA とは独立に中央載荷時の曲げモーメントを与えるプログラムを作成し、さらに中央載荷時のたわみ、および縁部載荷時の曲げモーメントとたわみの影響図をプログラム化した。

従来の影響図を用いる方法と比較して、電算プログラムを用いる方法には次のような利点がある。

- ①計算を迅速に行なうことができる。
- ②読み取り誤差や個人差が皆無になる。
- ③タイヤ間隔の広い大型航空機を対象とした計算では、トレースした図面が影響図からはみ出て計算ができなくなることがあるが、電算プログラムではこのような場合にも影響を受けない。
- ④現在一般に使用されている影響図では、コンクリートスラブのポアソン比として 0.15 が仮定されているためそれ以外の計算はできないが、電算プログラムではそのような制限はない。

本資料では、Westergaard 載荷公式とその電算プログラムの概要を示した後、プログラムを応用したいくつかの計算例にふれていくことにする。

* 土質部 滑走路研究室

2, Westergaard 載荷公式

Westergaard は1925年に、1つの円形等分布荷重が Winkler 基礎上のコンクリートスラブに載荷される場合の代表的な3種類の載荷状態(図-2.1)における最大曲げ応力を計算する公式を発表した。これらは隅角部載荷、中央載荷、縁部載荷の公式として一般によく知られているが、いずれも円形等分布荷重にしか適用できず、また隅角部や縁部載荷に対しては載荷位置も決められているため、複数の円形等分布荷重が載荷される空港舗装の設計にこれらの式を直接利用することはできない。

この欠点を補うために Westergaard は中央載荷と縁部載荷の状態に対して、座標原点に集中荷重が載荷された時の任意点のたわみを表わす次のような公式を1939年と1948年に発表した。

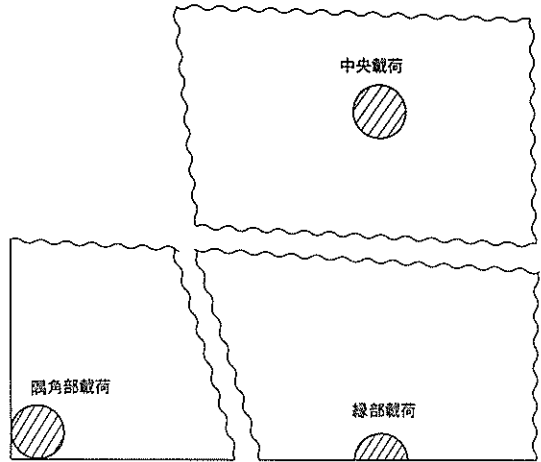


図-2.1 コンクリートスラブ上の3種類の載荷状態

中央載荷¹⁾

$$W_i(r) = \frac{P}{4\ell^2 K} \operatorname{Re} H_0^1\left(\sqrt{i} \frac{r}{\ell}\right) \dots\dots\dots (2.1)$$

縁部載荷²⁾

$$W_e(x, y) = \frac{2P}{\pi\ell^2 K} \int_0^\infty \frac{r \cos \frac{\alpha x}{\ell} \left[\cos \frac{\beta y}{\ell} + (1-\mu) \alpha^2 \sin \frac{\beta y}{\ell} \right] e^{-ry/\ell}}{1 + 4(1-\mu)\alpha^2 r^2 - (1-\mu)^2 \alpha^4} da \dots\dots\dots (2.2)$$

ここに

$W_e(r)$: 原点から r だけ離れた点におけるたわみ

P : 原点における集中荷重

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

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

h : コンクリートスラブ厚

K : 路盤支持力係数

Re : 実数部分

H_0^1 : 第1種0次のハンケル関数

i : 虚数単位 ($i^2 = -1$)

$W_e(x, y)$: 点 (x, y) におけるたわみ

α : 変数

$$\beta = \frac{\sqrt{1 + \alpha^4 - \alpha^2}}{2}$$

$$r = \frac{\sqrt{1 + \alpha^4 + \alpha^2}}{2}$$

である。

その後 Pickett と Pay⁴⁾ は、影響図を作成する過程でこれらの式に Maxwell の相反作用の定理を適用し、

さらに集中荷重を微小面積に働く等分布荷重と置き換えることによって次式を導いた。

中央載荷

$$W_i(\theta_2, \theta_1, P) = \frac{q}{K} \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2\pi} \right) \left[1 + \frac{\pi P}{2\ell} \operatorname{Im} \sqrt{i} H_1^1 \left(\frac{\sqrt{i} P}{\ell} \right) \right] \dots\dots\dots (2.3)$$

緑部 載荷

$$W_e(a, b) = \frac{2q}{\pi K} \int_0^{\infty} r^2 \frac{\left[SW \left(1 - \cos \frac{\beta b}{\ell} e^{-rb/\ell} \right) + TW \sin \frac{\beta b}{\ell} e^{-rb/\ell} \right] \sin \frac{\alpha a}{\ell}}{\alpha (\beta^2 + r^2) [1 + 4(1-\mu) \alpha^2 r^2 - (1-\mu)^2 \alpha^4]} d\alpha$$

$$= \frac{2q}{\pi K} \int_0^{\infty} F_w(\alpha) d\alpha \quad \dots \dots \dots (2.4)$$

ここに

- q : 等分布荷重
- Im : 虚数部分
- H₁ⁱ : 第1種1次のハンケル関数
- SW : 1 + 2(1-μ)α²β²
- TW : 2β² - (1-μ)α²

である。ここに式(2.3)は図-2.2(a)のように半径pと中心角θ₂およびθ₁で囲まれたくさび形に分布した等分布荷重による原点のたわみを表わし、また式(2.4)は図-2.2(b)のような長方形等分布荷重による原点のたわみを表わしている。

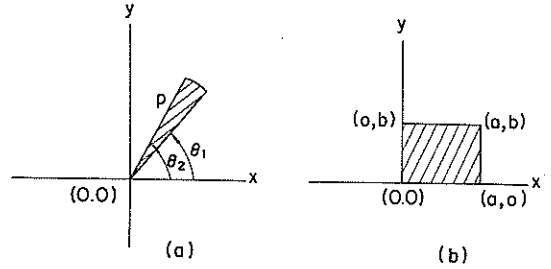


図-2.2 等分布荷重の分布形状
(a) 中央載荷 (b) 緑部載荷

いて同様な荷重条件の場合の座標原点におけるx軸方向の曲げモーメントを次のように表わした。

また同時にPickettとRayは式(2.3)、(2.4)を用

中央 載荷

$$M(\theta_2, \theta_1, p) = \frac{q\ell^2}{8} \operatorname{Re} \left[(1+\mu)(\theta_2 - \theta_1) \frac{p}{\ell} \sqrt{i} H_1^i \left(\frac{\sqrt{i} p}{\ell} \right) + (1-\mu) \times \right.$$

$$\left. (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) \left\{ \frac{\sqrt{i} p}{2\ell} H_1^i \left(\frac{\sqrt{i} p}{\ell} \right) + H_0^i \left(\frac{\sqrt{i} p}{\ell} \right) - 0.5 \right\} \right] \quad \dots \dots \dots (2.5)$$

緑部 載荷

$$M(a, b) = \frac{2q\ell^2}{\pi} \int_0^{\infty} r^2 \frac{\left[S \left(1 - \cos \frac{\beta b}{\ell} e^{-rb/\ell} \right) + T \sin \frac{\beta b}{\ell} e^{-rb/\ell} \right] \sin \frac{\alpha a}{\ell}}{\alpha (\beta^2 + r^2) [1 + 4(1-\mu) \alpha^2 r^2 - (1-\mu)^2 \alpha^4]} d\alpha$$

$$= \frac{2q\ell^2}{\pi} \int_0^{\infty} F_m(\alpha) d\alpha \quad \dots \dots \dots (2.6)$$

ここに

$$S = (1-\mu^2) \alpha^2 [1 + 2(1-\mu) \alpha^2 \beta^2]$$

$$T = (1-\mu^2) \alpha^2 [2\beta^2 - (1-\mu) \alpha^2]$$

である。

式(2.3)から式(2.6)に対して重ね合わせの法則

を用いることによって、任意の形状の等分布荷重が任意点に載荷された時の座標原点のたわみ、ならびに原点のx軸方向の曲げモーメントが得られることになる。

本資料で用いた電算プログラムは式(2.3)から式(2.6)をプログラム化したものである。

3. 電算プログラムの概要

3.1 タイヤ接地形状

航空機のタイヤ接地形状は、図-3.1の実線のような長方形と半円形の組み合わせた形を仮定するのが一般的であるが、本プログラムでは取り扱いを簡単にするために、それと同じ接地面積をもち、しかも長軸の長さを一致させた破線で表わされるようなだ円を仮定した。

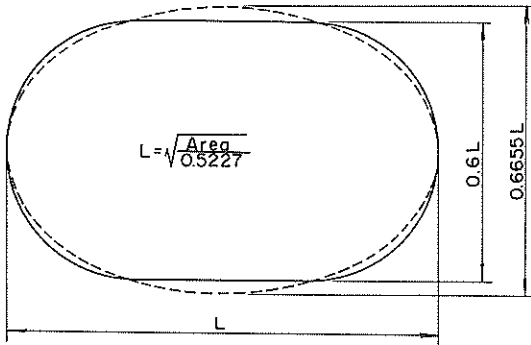


図-3.1 航空機タイヤの接地形状

3.2 中央載荷の場合

式(2.3)、(2.5)からわかるように中央載荷公式は極座標系で表わされているため、だ円全体にわたってこれらの式の値を計算するためには、原点を通る接線を媒介するのが便利である。そして1つのだ円が、原点を通る接線を何本持つかによってこのプログラムは次のような3つの部分に分かれる。

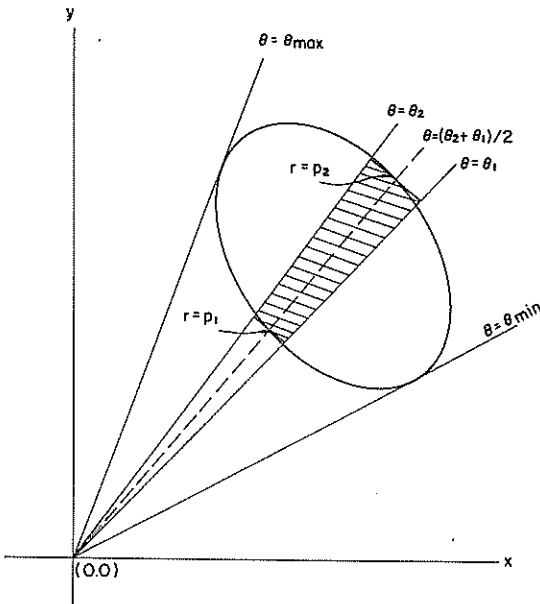


図-3.2 2本の接線を持つ場合のだ円分割(中央載荷)

① 2本の接線を持つ場合(原点がだ円の外にある場合、図-3.2)

2本の接線を $\theta = \theta_{max}$ 、 $\theta = \theta_{min}$ として、この2本の接線によってはさまれるだ円を細かく分割して得られる要素を考え、このうちの1つの要素をはさむ半径方向の2本の直線を $\theta = \theta_1$ 、 $\theta = \theta_2$ 、($\theta_2 > \theta_1$) とする。

さらに直線 $\theta = (\theta_2 + \theta_1) / 2$ とだ円との交点と原点との間の距離を $r = p_1$ 、 $r = p_2$ 、($p_2 > p_1$) とすると、 $\theta = \theta_1$ と $\theta = \theta_2$ によって切り取られるだ円の一部は直線 $\theta = \theta_2$ 、 θ_1 と円弧 $r = p_1$ 、 p_2 とによって囲まれたハッチングの部分で近似され、この部分の等分布荷重による原点のたわみは、式(2.3)に重ね合わせの法則を適用して

$$W_i = W_i(\theta_2, \theta_1, p_2) - W_i(\theta_2, \theta_1, p_1) \dots \dots (3.1)$$

で表わされる。このような操作を θ_{min} から θ_{max} まで繰り返して、それらをだ円全体にわたって加え合わせることで、だ円形等分布荷重による原点のたわみが得られることになる。また式(2.5)について同様な操作を行なうことによって曲げモーメントも得ることができる。

② 1本の接線を持つ場合(原点がだ円周上に含まれる場合、図-3.3)

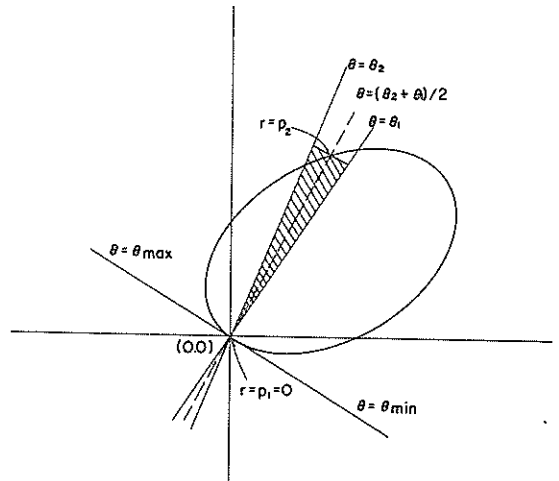


図-3.3 1本の接線を持つ場合のだ円分割(中央載荷)

この場合は、①において $\theta_{max} - \theta_{min}$ が 180° に等しくなった特別な場合と考えれば、①で説明した p_i が0ということになり、式(2.3)の定義がそのままあてはまることになる。つまり図-3.3のハッチングの部分の等分布荷重による原点のたわみは、式(2.3)を用いて $W_i = W_i(\theta_2, \theta_1, p_2) \dots \dots (3.2)$

で表わされる。またこの場合は $\theta_{max} - \theta_{min} (=180^\circ)$

を60等分、つまりだ円を中心角3°のくさび形要素に分割して計算を進めている。曲げモーメントも同様である。

③接線を持たない場合(原点がだ円の内部に含まれる場合、図-3.4)

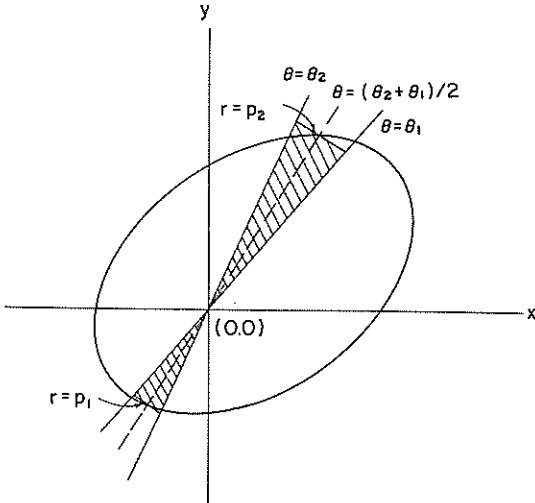


図-3.4 接線を持たない場合のだ円分割 (中央荷重)

この場合は、原点を通る2本の直線 $\theta = \theta_1, \theta_2$ とだ円によって2つのくさび形要素が形成され、この部分の等分布荷重による原点のたわみは同じく式(2.3)を用いて、

$$W_i = W_i(\theta_2, \theta_1, p_2) + W_i(\theta_2, \theta_1, p_1) \dots\dots (3.3)$$

と表わされる。この場合も②と同様に中心角が3°になるようにだ円を分割している。また曲げモーメントも同様な計算によって得られる。

以上のようにして個々のだ円形等分布荷重による座標原点のたわみと、原点におけるx軸方向の曲げモーメントが得られるので、それらをすべてのだ円にわたって加え合わせることによって対象航空機荷重によるたわみと曲げモーメントが得られることになる。

またさらに、得られた曲げモーメントから曲げ応力を計算するためには

$$\sigma_b = M \times \frac{6}{h^2} \dots\dots\dots (3.4)$$

を用いればよい。

3.3 縁部荷重の場合

縁部荷重状態におけるたわみ、曲げモーメントを求め式(2.4)、式(2.6)はx-y座標系で表わされて

いるため、これらの式を適用するためのだ円分割はx軸およびy軸に平行な直線によって行なうのが便利である。

図-3.5のようなだ円を分割するには、まずx軸に平行な2本の直線 $y = b_2, y = b_1, (b_2 > b_1, b_2 > 0, b_1 \geq 0)$ ではさまれる要素を考え、さらに $y = (b_2 + b_1) / 2$ とだ円との交点を通り、かつy軸に平行な2本の直線 $x = a_2, x = a_1, (a_2 > a_1)$ を考えると、これら4本の直線によって囲まれる長方形ができる。そしてこのような長方形をy軸方向に順次作成してゆけば、だ円は複数の長方形に分割され、また長方形で近似されたことになる。

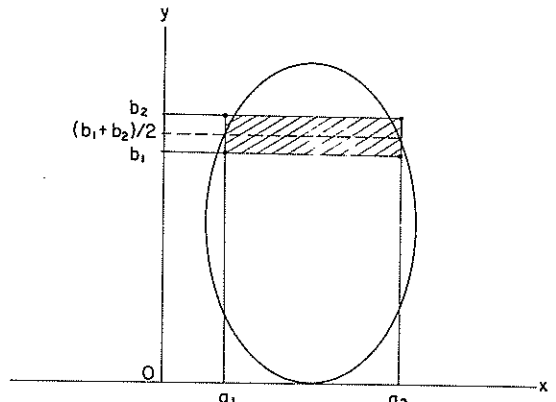


図-3.5 縁部荷重状態におけるだ円分割

図-3.5のハッチング部分に荷重された等分布荷重による座標原点のたわみは、式(2.4)に重ね合わせの法則を適用して、

$$W_e = W_e(a_2, b_2) - W_e(a_2, b_1) - W_e(a_1, b_2) + W_e(a_1, b_1) \dots\dots\dots (3.5)$$

で表わされることになる。

これらの計算をだ円全体にわたって行なえばよいことは中央荷重の場合と同様であり、曲げモーメントの計算も式(2.6)に対して全く同様の操作を行なえばよい。

次に、式(2.4)、(2.6)に含まれる無限積分を行なう手順について説明すると次の通りである。

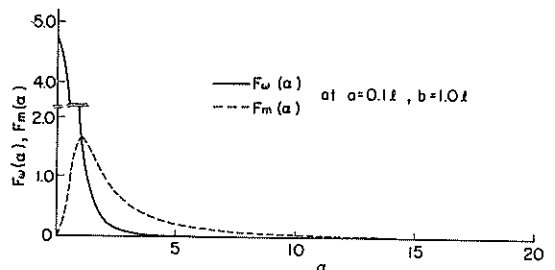


図-3.6 無限積分中の被積分関数の遁減

まず無限積分の積分範囲については、図-3.6の例を参考にして、たわみ、曲げモーメントのいずれに対してもほぼ収束する $\alpha=20$ まで行なうこととした。また積分の間隔は、図中の2本の曲線の形から、 α が0から2の間では0.1間隔、2から6の間では0.5間隔、6から20の間では1.0間隔とし、いずれの場合もシンプソンの $\frac{1}{3}$ 公式を用いて数値積分を行なった。

3.4 プログラムの使用法

プログラムを使用するときに必要なインプットデータは次のとおりである。

- (1) コンクリートの弾性係数、ポアソン比
- (2) タイヤ接地圧、接地面積
- (3) タイヤ個数、タイヤ位置 (x - y 座標)
- (4) 路盤の設計支持力係数
- (5) コンクリートスラブ厚
- (6) 脚回転角

また計算結果としては次のようなものを得ることができる。

- (1) 影響図を用いた時に得られるタイヤに囲まれたブロック数 (たわみ、曲げモーメント)
- (2) たわみ
- (3) 曲げモーメント
- (4) 曲げ応力

これらの計算結果は、まず各タイヤについて得られ、最終的にそれらの和が与えられる。

計算に要する時間 (CPU時間) は、TOSBAC 5600型電子計算機を用いて複々車輪1ケースあたり、中央載荷の場合で約1.6秒、縁部載荷の場合では約9秒ほどである。

4. プログラムの応用

4.1 概 説

3.で作成したプログラムを用いて、数種類の航空機に対して数値計算を試みた。

対象とした航空機は、空港舗装の設計荷重であるLA-1からLA-3の中から4種類を選び、その諸元は表-4.1に示す通りである。計算に用いた荷重は、いずれも各航空機の1脚あたりの荷重である。

さらに、今回の計算例にはコンクリートの弾性係数とポアソン比としては、特にことわりのない限りそれぞれ $350,000 \text{ kg/cm}^2$ 、0.15 を採用し、また路盤の K_{75} 値としては 7 kg/cm^2 を用いた。

4.2 最大曲げ応力を与えるタイヤ位置の推定

空港のコンクリート舗装スラブ厚を設計するには、注目した点の注目した方向に関するスラブの最大曲げ応力が、その点と方向に対しタイヤ群をどのような位置に置いた場合に生ずるかを覚えておく必要がある。そのために、座標軸に対してタイヤが図-4.1のように置かれた

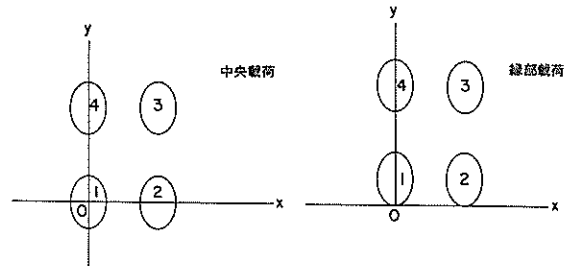


図-4.1 航空機タイヤの基本位置

時を「基本位置」とし、この位置からタイヤをどれだけ移動した時に、座標原点におけるx軸方向の曲げ応力が最も大きくなるかを検討した。その時のx方向、y方向の移動量と回転角は、中央載荷と縁部載荷に対してそれぞれ図-4.2のように定義した。

また複々車輪の脚を持つ航空機に対しては、図-4.1の

表-4.1 計算に使用した航空機の諸元

航空機の種類	B-747-200B	DC-8-63	B-727-200	DC-9-41
設計荷重の区分	LA-1	LA-1	LA-2	LA-3
満載時総重量 (t)	353.2	162.4	76.6	52.2
満載時脚荷重 (t)	82.5	78.1	35.9	24.4
車輪の配置形式	複々車輪	複々車輪	複車輪	複車輪
タイヤの横中心間隔 S (cm)	111.8	81.3	86.4	66.0
タイヤの縦中心間隔 St (cm)	147.3	139.7	-	-
タイヤ接地圧 p (kg/cm^2)	14.4	13.7	12.8	12.6
タイヤ接地面積 A (cm^2)	1,436	1,425	1,406	968

タイヤのうちNo1とNo2のみを考慮している。

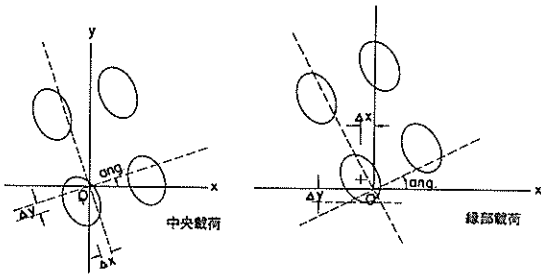


図-4.2 タイヤの移動量と回転角の定義

最大の曲げ応力を生ずるタイヤ位置、つまり「最大位置」を推定するために、スラブ厚 20, 30, 40, 50cmのコンクリート舗装に対し、タイヤをx方向、y方向に0.5cmずつ移動し、また回転角を5°ずつ変化させて計算を行なった。その結果、表-4.2のような「最大位置」が得られた。

同一の航空機でも舗装厚が違えば剛比半径も異なるため、それにつれて「最大位置」も変化するはずであるが、今回用いた0.5cm、5°の計算間隔ではその差はほとんど認められなかった。

図-4.3は、「最大位置」と「基本位置」の違いが曲

表-4.2 最大位置における移動量

航空機の種類		B-747-200B	DC-8-63	B-727-200	DC-9-41
中央載荷	ang (°)	30	25	90	90
	Δx (cm)	-2.5	-3.5	-8.0	-7.5
	Δy (cm)	-3.0	-3.5	0.0	0.0
縁部載荷	ang (°)	45	40	90	90
	Δx (cm)	-3.0	-4.0	0.0	0.0
	Δy (cm)	-2.0	-2.5	-1.0	-1.0

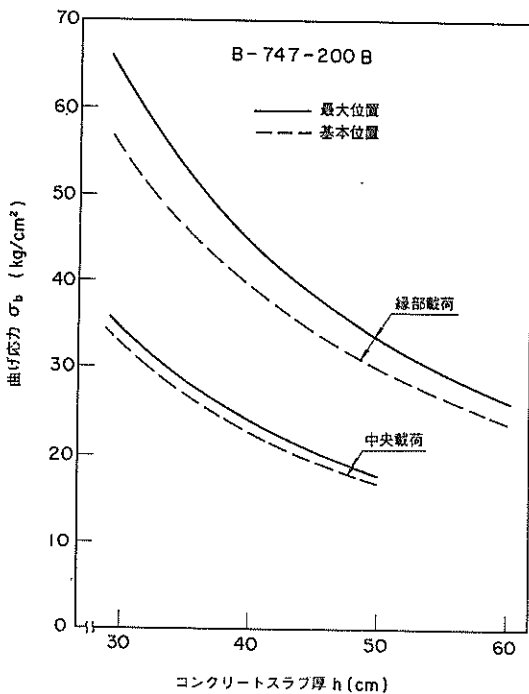


図-4.3 (1) タイヤの位置が曲げ応力におよぼす影響

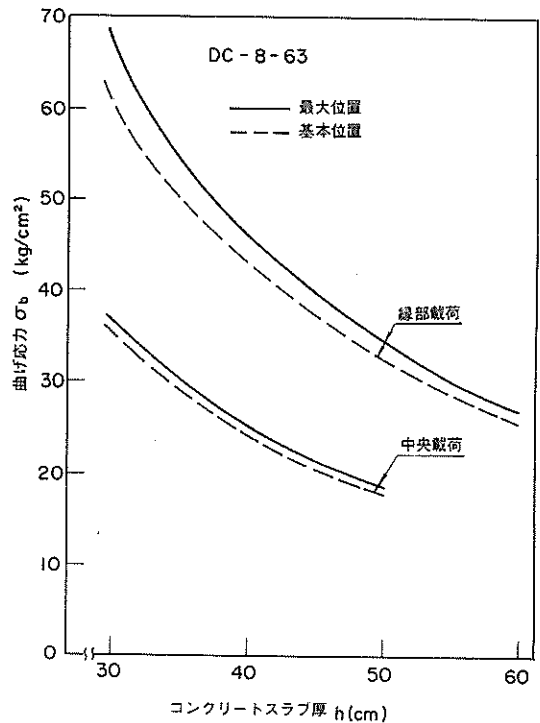


図-4.3 (2) タイヤの位置が曲げ応力におよぼす影響

げ応力におよぼす影響を調べたものである。2種類のタイヤ位置による応力の差は、複々車輪よりも複車輪において顕著であることがわかる。これは図-A.3、A.4の影響図を参考にすれば、複車輪ではタイヤ位置を「基本位置」から「最大位置」へ変化させることによって、No.1とNo.2のタイヤによる応力増加がそのまま全体の応力増加となるのに対し、複々車輪ではNo.4のタイヤによる応力が減少する傾向にあるので、脚全体による応

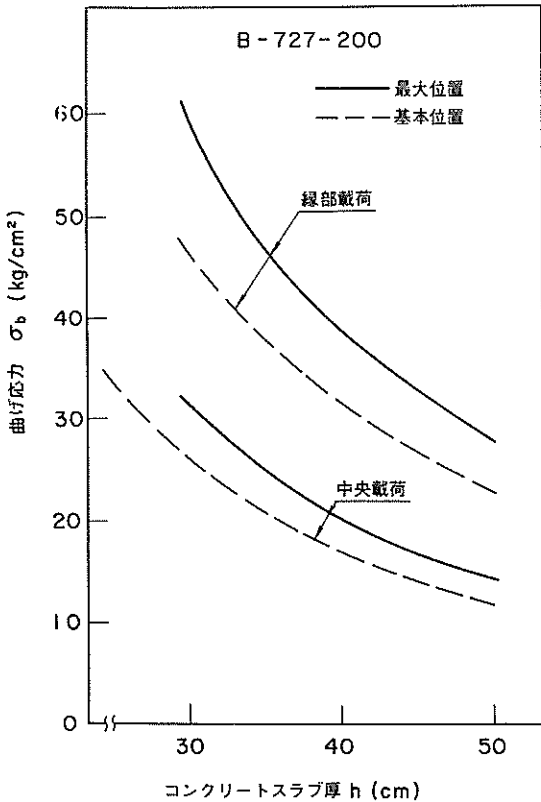


図-4.3(3) タイヤの位置が曲げ応力におよぼす影響

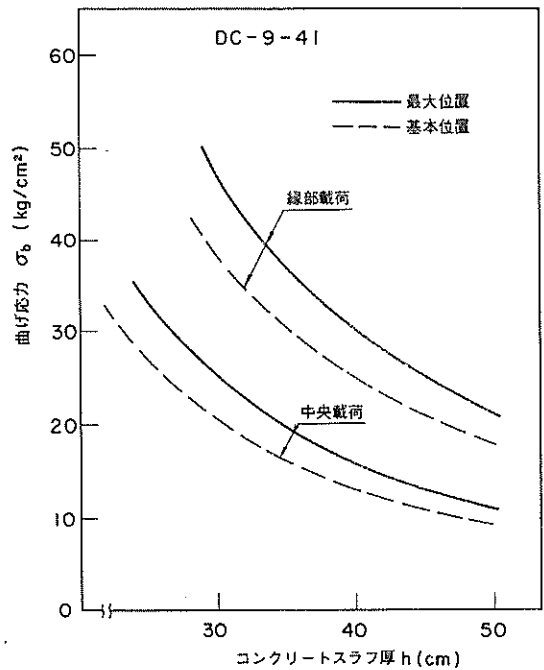


図-4.3(4) タイヤの位置が曲げ応力におよぼす影響

力増加は複車輪ほどではなくなるためである。また同じ複車輪でもDC-9よりもB-727の方が応力増加が大きい、これはNo.1とNo.2のタイヤ間隔が違うためである。

いずれにしても表-4.2の結果は、特に影響図を用いてコンクリートスラブ厚を設計する場合に、労力を軽減する1つの資料になるものと思われる。

4.3 中央載荷、縁部載荷によるコンクリートスラブ厚の違い

コンクリートの設計基準曲げ強度を $50 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 、安全

表-4.3 設計スラブ厚 (単位: cm)

航空機の種類	B-747-200B	DC-8-63	B-727-200	DC-9-41
中央載荷基本位置	3 2.5	3 4.6	2 7.4	2 3.4
縁部載荷基本位置	5 0.5	5 3.8	4 2.0	3 5.6
中央載荷最大位置	3 3.7	3 5.6	3 1.3	2 7.0
縁部載荷最大位置	5 4.5	5 6.0	4 8.2	4 0.5

率を 1.7 と仮定して、図-4.3 から得られる設計スラブ厚を示したものが表-4.3 である。

中央載荷と縁部載荷状態の「最大位置」におけるスラブ厚の違いはかなり大きく、LA-1 では 21 cm、LA-3 でも 14 cm ほどの差がある。これにくらべると、「基本位置」における両者の差はいくらか小さい。また載荷状態に関してみると、同じ縁部載荷でも、「最大位置」と「基本位置」におけるスラブ厚の差は、複々車輪よりも複車輪の場合の方が大きいこともわかる。

ところで、実際の空港においてコンクリートスラブ間の目地で完全に応力が伝達される限り、縁部載荷の状態が生じるのは、コンクリート舗装とアスファルト舗装の接合部や自由縁部の近くである。そして自由縁部を航空機が通過することはまずなく、コンクリート舗装とアスファルト舗装の接合部では、航空機がその境界を通過するパターンはほぼ一定しており、特にエプロンと誘導路の接合部では境界に対してほぼ直角に横切るのが一般的である。こうした点を考慮すると、表-4.2 の縁部載荷の「最大位置」という載荷状態は実際にはそれほど起こることはないため、それに依りて得られた表-4.3 のスラブ厚が必要となる場合もそれほどなく、普通は「基本位置」を対象とすればよいと思われる。しかし中央載荷状態では「最大位置」に対応する曲げモーメントの方向がいつも必ず存在するため、これを考慮する必要がある。

その結果、中央載荷と縁部載荷に対するスラブ厚の差は、LA-1 で 18 cm、LA-2 で 11 cm、LA-3 では 9 cm 程度となる。

4.4 タイヤ間隔と曲げ応力の関係

航空機の大型化に伴ない脚荷重も増大しているが、コンクリートスラブ中に生ずる応力をあまり大きくさせないために大型航空機のタイヤ間隔はかなり広がってきている。そこでタイヤの間隔によって、コンクリートスラブ中の曲げ応力がどのように増減するかを調べてみた。

計算の基準として縁部載荷された DC-8-63 を用い、タイヤの縦中心間隔と横中心間隔を少しずつ変化した時に 50 cm の厚さをもつコンクリートスラブ中に生じる最大曲げ応力がどのように変わるかを、応力比の形で図示したものが図-4.4 である。

ここでいう応力比とは、基準として採用した DC-8-63 のタイヤ間隔によって生ずる曲げ応力に対する、対象としているタイヤ間隔によって生ずる曲げ応力の比である。いずれの場合も、脚荷重や接地面積は DC-8-63 と同じ値を使用している。図中に示してある B-747 とか DC-10、L-1011 としるされた点は、DC-8 と同じ LA-1 に属するそれらの航空機のタイヤ間隔を示している。この図から、荷重条件が変わらず

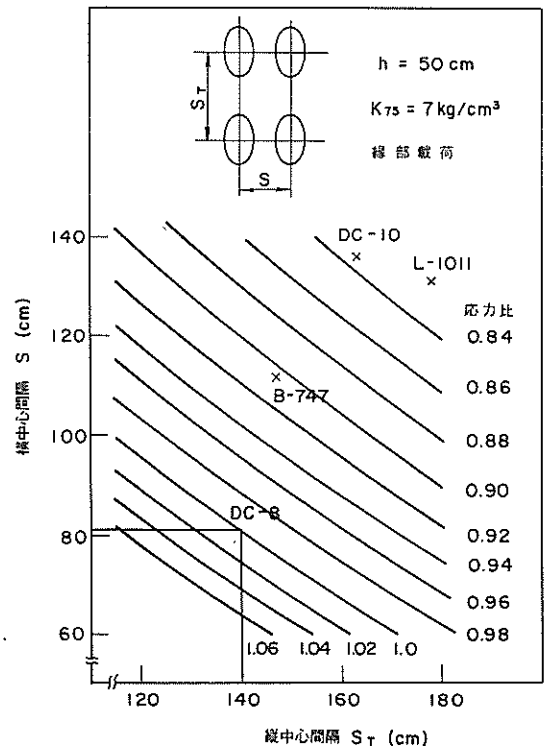


図-4.4 タイヤ間隔と応力比の関係

にタイヤの縦中心間隔が 20 cm 広くなれば曲げ応力は 4 % 程減少し、また横中心間隔が 20 cm 広くなれば 5 % 程減少することがわかる。この結果、DC-8-63 よりも脚荷重の大きな B-747 などでもタイヤの間隔が広いために実際にコンクリートスラブ中に生ずる応力は逆に小さくなり、LA-1 の中では、DC-8-63 が最も厳しい荷重条件となることがわかる。

4.5 コンクリートスラブの弾性係数の影響

設計に用いるコンクリートスラブの弾性係数の値は、その設計法によって異なっていて、PCA 法やわが国の旧設計法では $281,000 \text{ kg/cm}^2$ 、フランス法では $300,000 \text{ kg/cm}^2$ さらに LCN 法やわが国の新しい設計法では $350,000 \text{ kg/cm}^2$ を仮定している。そこで計算に用いるコンクリートの弾性係数の値が、曲げ応力やたわみ、設計スラブ厚にどのような影響を与えるかを検討してみた。なお荷重条件は DC-8-63 で、タイヤは「最大位置」である。

図-4.5 は曲げ応力に与える影響を調べたものであるが、弾性係数が $250,000 \text{ kg/cm}^2$ から $400,000 \text{ kg/cm}^2$ に増加すると、曲げ応力は中央載荷、縁部載荷の場合とも 11 ~ 13 % ほど直線的に増加する。

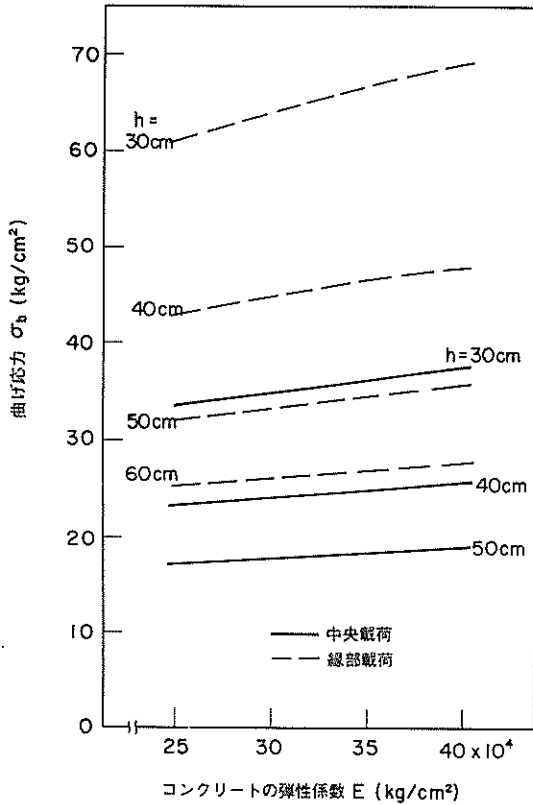


図-4.5 (1) コンクリートの弾性係数が曲げ応力におよぼす影響

その結果、図-4.6 からわかるように、必要スラブ厚も3~4cmほど増加することになり、大きな弾性係数を仮定して得られるスラブ厚は安全側にあることがわかる。

さらに、図-4.7 はたわみの変化を図示したものであるが、弾性係数の増加につれて、当然ではあるがたわみは減少している。

4.6 コンクリートスラブのポアソン比の影響

弾性係数と同様、コンクリートスラブのポアソン比も設計法によっていろいろの値が仮定されている。

たとえばPCA法やわが国の設計法では0.15、CE法では0.20を仮定し、さらにわが国の道路舗装を対象とした「セメントコンクリート舗装要綱」では0.25を採用しているようである。ちなみに一般のコンクリートの許容応力度付近におけるポアソン比は $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{7}$ (0.2~0.143)程度といわれている¹⁾。そこでポアソン比が計算結果に与える影響を検討してみた。ただし弾性係数は $350,000 \text{ kg/cm}^2$ とし、荷重条件はDC-8-63で、

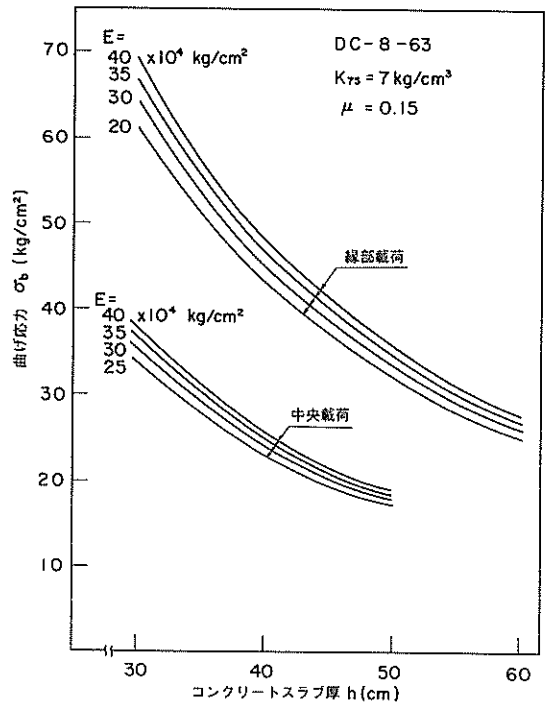


図-4.5 (2) コンクリートの弾性係数が曲げ応力におよぼす影響

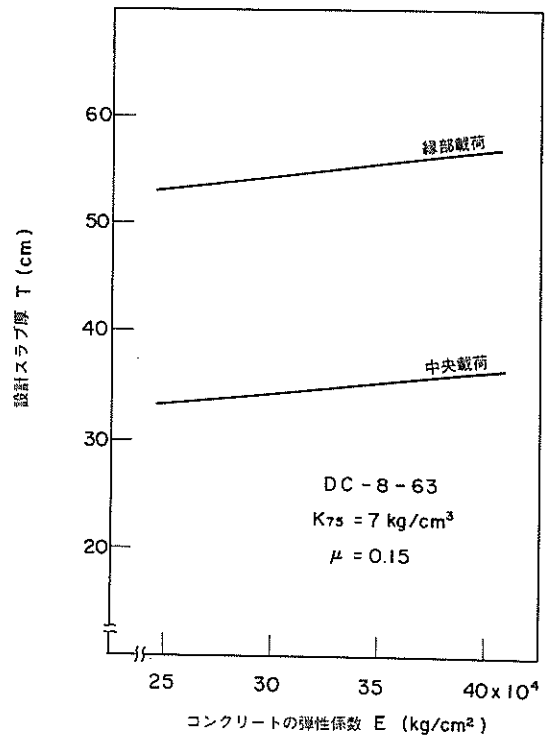


図-4.6 コンクリートの弾性係数が設計スラブ厚におよぼす影響

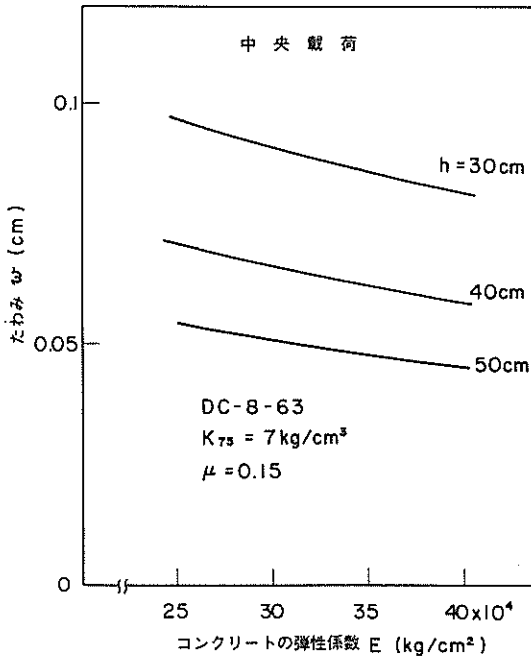


図-4.7(1) コンクリートの弾性係数がたわみにおよぼす影響

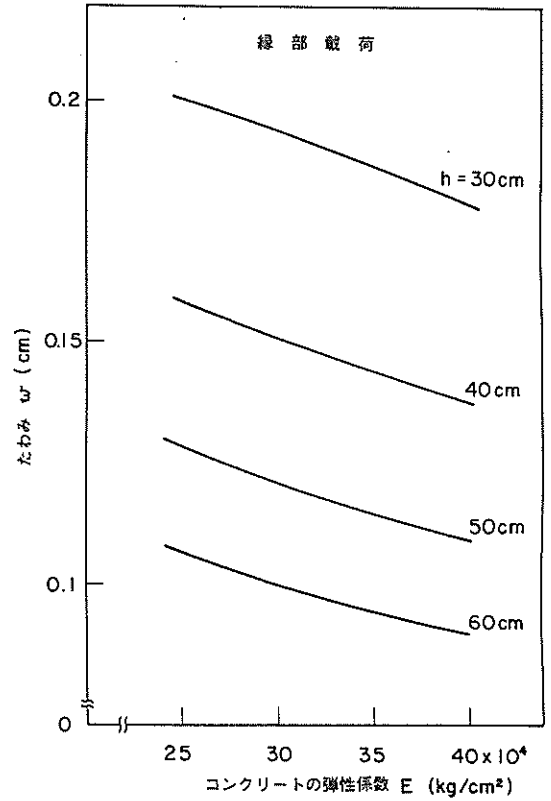


図-4.7(2) コンクリートの弾性係数がたわみにおよぼす影響

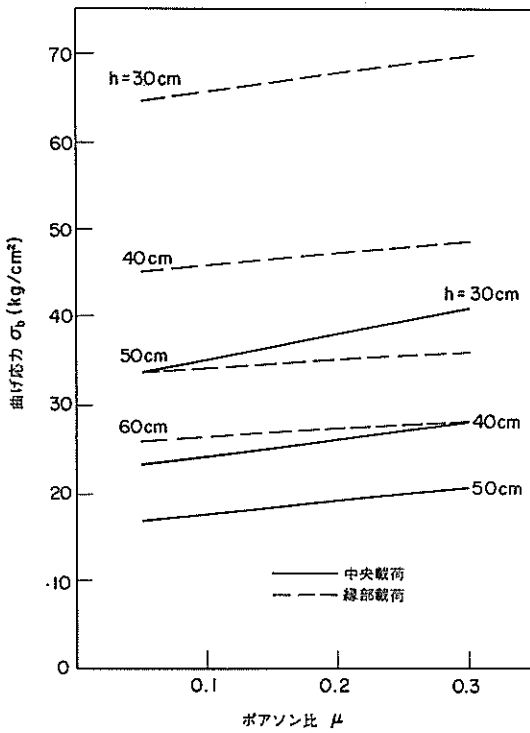


図-4.8(1) コンクリートのポアソン比が曲げ応力におよぼす影響

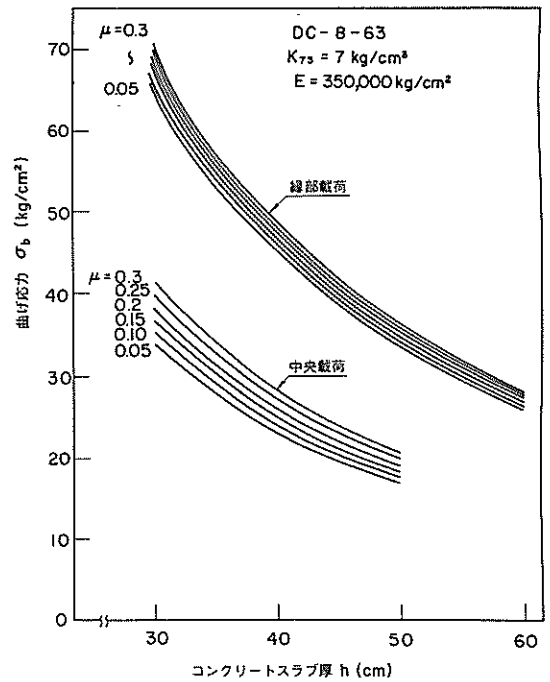


図-4.8(2) コンクリートのポアソン比が曲げ応力におよぼす影響

タイヤ位置は「最大位置」を用いている。

図-4.8は曲げ応力におよぼす影響を示したものである。この図からポアソン比が増加すれば曲げ応力も増加し、その増加割合は縁部荷重よりも中央荷重において著るしいことがわかる。さらに図-4.9から、ポアソン比が0.1増加することによって、必要スラブ厚も1.5～2.0cm程厚くなることがわかる。

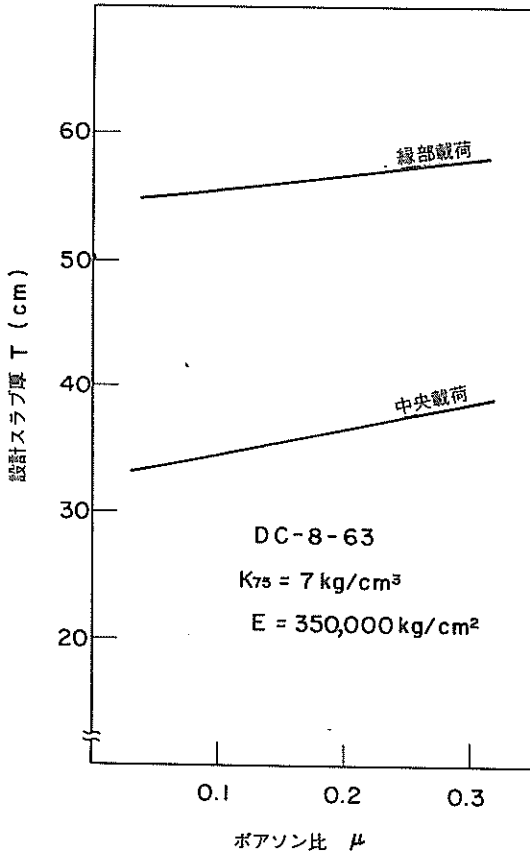
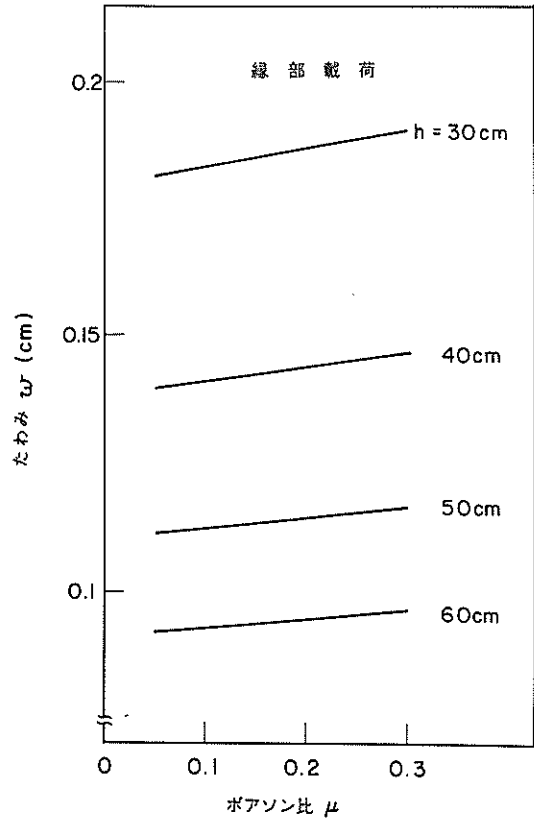
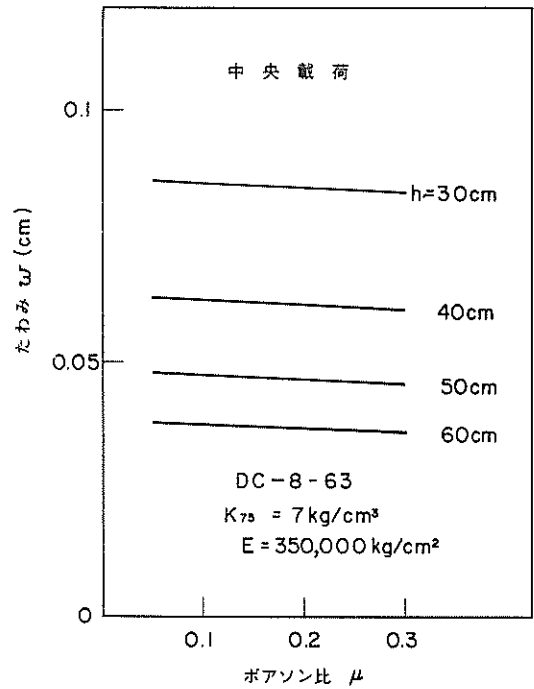


図-4.9 コンクリートのポアソン比が設計スラブ厚におよぼす影響

ポアソン比がたわみにおよぼす影響は、図-4.10に示されている通りで、中央荷重ではポアソン比の増加とともにたわみはわずかに減少しているが、縁部荷重では逆に増大している。

以上のことから、弾性係数にくらべて従来それほど重要視されてこなかったポアソン比も、設計スラブ厚に対してcmのオーダーの差を与える程度の影響を持つことが

図-4.10(1)(2) コンクリートのポアソン比がたわみにおよぼす影響 →



わかった。さらに、小さなポアソン比を仮定して得られるスラブ厚は危険側にあり、わが国の道路舗装には0.25を使用していることを考慮すれば、空港舗装においてもポアソン比に対して弾性係数と同様の注意を払ってゆくことが必要だと考えられる。

4.7 たわみと曲げ応力の関係

たわみと曲げ応力の関係を、DC-8-63とB-727-200に対して計算した結果が図-4.11である。

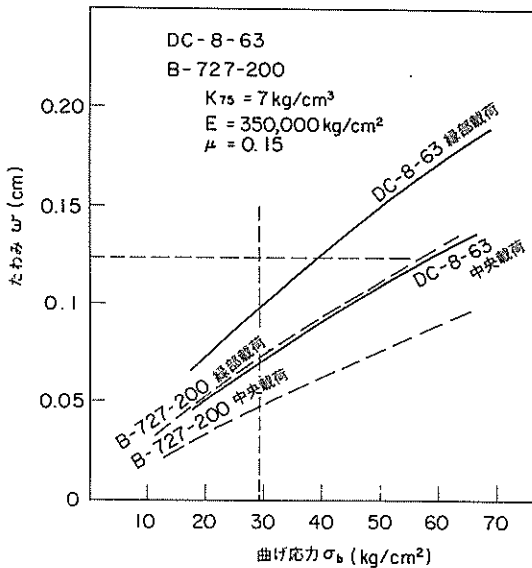


図-4.11 たわみと曲げ応力の関係

ここでいうたわみは、最大曲げ応力を生じる点におけるたわみである。この図から、たわみと曲げ応力の値はほぼ正比例の関係にあることがわかるが、同じ曲げ応力に対するたわみは、航空機別にはB-727よりもDC-8の方が大きく、また荷状態別には中央荷よりも縁部荷の場合の方が大きくなっている。

設計コンクリートスラブ厚を決定する時の曲げ応力 2.94 kg/cm^2 (=設計基準曲げ強度/安全率) に対応するたわみは、DC-8の縁部荷状態でも約1mmであり、他の場合はそれよりも小さい。また、平板荷試験の荷重強さ～沈下量曲線からK値を計算するには、沈下量が1.25mmの時の値を用いて計算するが、沈下量大きい時は沈下量が小さい時に比べて一般に小さなK値を与えることを考えると、現行の1.25mm沈下の時のK値を設計に用いるという設計法はほぼ妥当であるといえる。

5. あとがき

コンクリート舗装上の荷状態を大きく3つに区分すると、隅角部荷、中央荷、縁部荷に分けられるが、空港舗装を対象にする限り、中央荷と縁部荷の場合が重要である。そこでコンクリート舗装をWinkler基礎上の版として解析した時の厳密解であるWestergaard荷公式のうちの中央荷公式と縁部荷公式を、実際の使用に便利るように電算プログラム化した。

さらに、今までのPickettとRayによる影響図では不可能なコンクリートスラブのポアソン比を変化させた計算をも含めて、いくつかの計算例を示した。

Westergaardの中央荷公式の適用には、あらゆる水平方向に版が無限に続いているという仮定があることを忘れてはならない。つまり荷位置が版の縁部から十分離れている場合にのみ中央荷公式の適用が可能であり、荷位置が版の縁部に近づくに従って、生じる応力も縁部荷公式によって得られる値に近くなっていく。

Yangによれば、舗装が中央荷状態として挙動するためには、荷位置が、縁部から少なくとも5m(16.5フィート)離れていなくてはならず、その距離は舗装が厚くなるほど大きくなるとしている。だから、それよりも縁部に近い所での荷に対しては、縁部荷公式による計算結果を参考にしてスラブ厚を増加する必要がある。

さらに、影響図はもちろん、ここで使用したプログラムも、スラブ厚さやスラブ弾性係数、K値などが場所によって変化したり、2つのスラブの間の荷重伝達率を考慮しなければならないような舗装構造には直接利用することができない。この欠点を補うために、W. R. Hudson¹³⁾¹⁴⁾らによってDiscrete-Element¹⁵⁾解析が提案され、また最近では有限要素法も用いられるようになってきた。

これらの解析法によれば上に挙げた問題のほか、弾性基礎上の版の縁部荷といったようなまだ厳密解の得られていない問題に対しても適用ができることになり、非常に有用な方法だといえる。

今後、わが国の地方空港も次第にジェット化され、大型航空機が発着するようになれば、わだちばれなどの問題からエプロンなどにはコンクリート舗装を施工する機会が多くなることが推定される。コンクリートスラブ厚の設計にあたり、今回作成したプログラムが少しでも役に立てば筆者の望外のよろこびである。

謝 辞

本資料をとりまとめるにあたり、空港コンクリート舗装構造設計要領の改訂の委員でもある佐藤勝久滑走路研究室長には、改定作業中の最新の情報を提供していただいたのを始めとしていろいろな御指導をいただいた。

心から感謝申し上げる次第である。

また名古屋大学植下協教授には貴重な文献を提供していただいた。ここに深く感謝したい。

(1977年3月31日 受付)

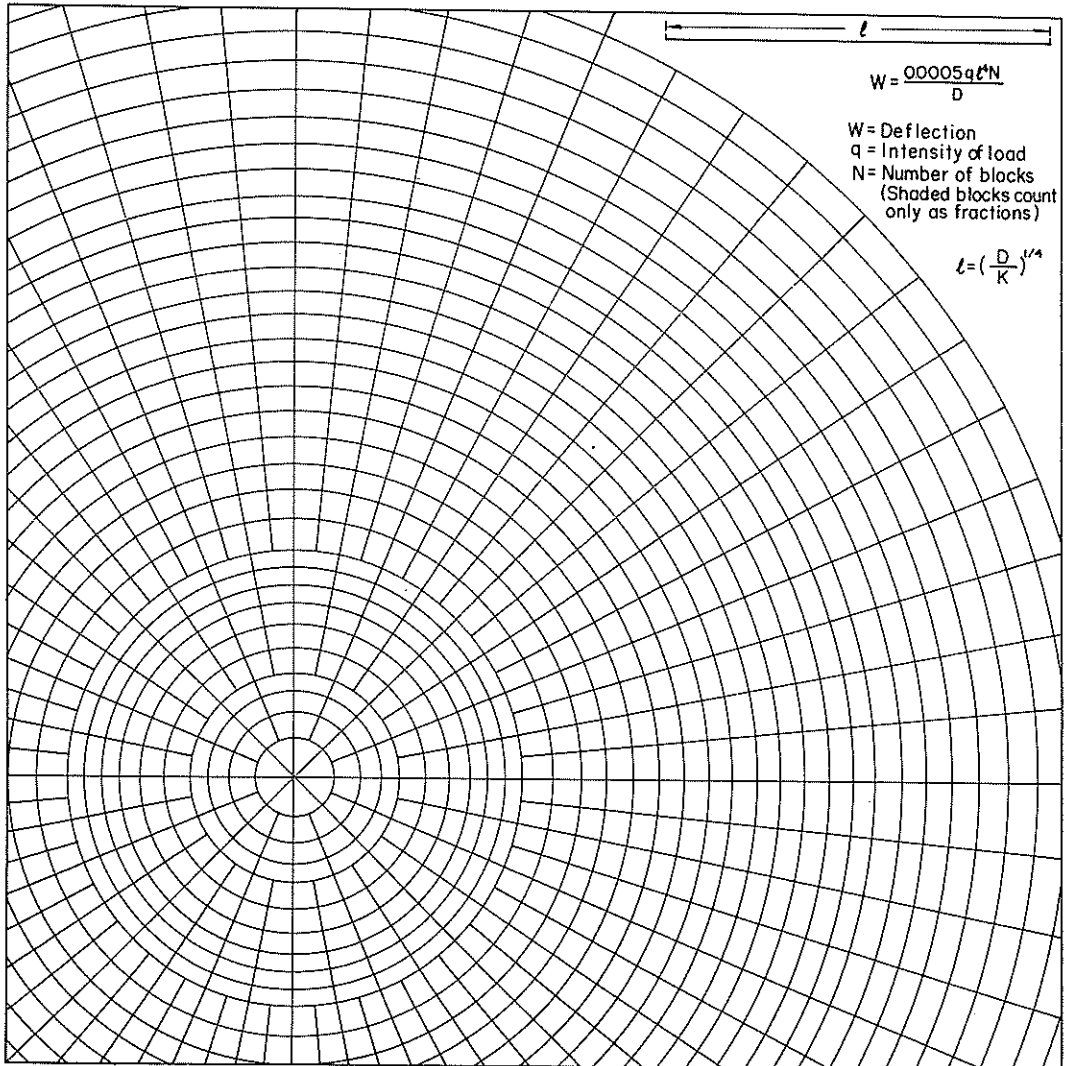
参 考 文 献

- 1) 運輸省航空局：空港コンクリート舗装構造設計要領，1971，148 pp.
- 2) 赤塚雄三，飯島尚：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）—，港湾技研資料，№50，1968年6月，80 pp.
- 3) Hogg, A., H. A. : Equilibrium of a Thin Plate, Symmetrically Loaded, Resting on a Elastic Foundation of Infinite Depth, Philosophical Magazine, Series 7, Vol. 25, 1938, pp. 576~582.
- 4) Pickett, G., G. K. Ray: Influence Charts for Concrete Pavements, ASCE Trans., Vol. 116, 1951, pp. 49~73.
- 5) Packard, R. G. : Computer Program for Airport Pavement Design, Special Report, Portland Cement Association, 1968, 18 pp.
- 6) Westergaard, H. M. : Computation of Stresses in Concrete Roads, HRB Proc., Vol. 5, 1925, pp. 90~112.
- 7) Westergaard, H. M. : Stresses in Concrete Runways of Airports, HRB Proc., Vol. 19, 1939, pp. 197~205.
- 8) Westergaard, H. M. : New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields, ASCE Trans., Vol. 113, 1948, pp. 425~444.
- 9) 運輸省航空局：空港コンクリート舗装構造設計要領（改訂版），1977，106 pp.
- 10) 日本道路協会：セメントコンクリート舗装要綱 丸善，1972年9月，pp. 201~209.
- 11) 村田二郎 他：土木材料Ⅱ〈コンクリート〉，共立出版，1974年，P. 101.
- 12) Yang, N. C. : Design of Functional Pavements, McGraw - Hill, 1972 p. 238.
- 13) Hudson, W. R., H. Matlock : Analysis of Discontinuous Orthotropic Pavement Slabs Subjected to Combined Loads, HRR, No. 131, 1966, pp. 1~48.
- 14) Treybig, H. J., W. R. Hudson, B. F. McCullough : Effect of Load Placement on Rigid Pavement Behavior, ASCE Proc., November, 1971, TE 4, pp. 681~702.
- 15) たとえば Huang, Y. H., S. T. Wang : Finite-Element Analysis of Concrete Slabs and Its Implications for Rigid Pavement Design, HRR, No. 466, 1973, pp. 55~69.

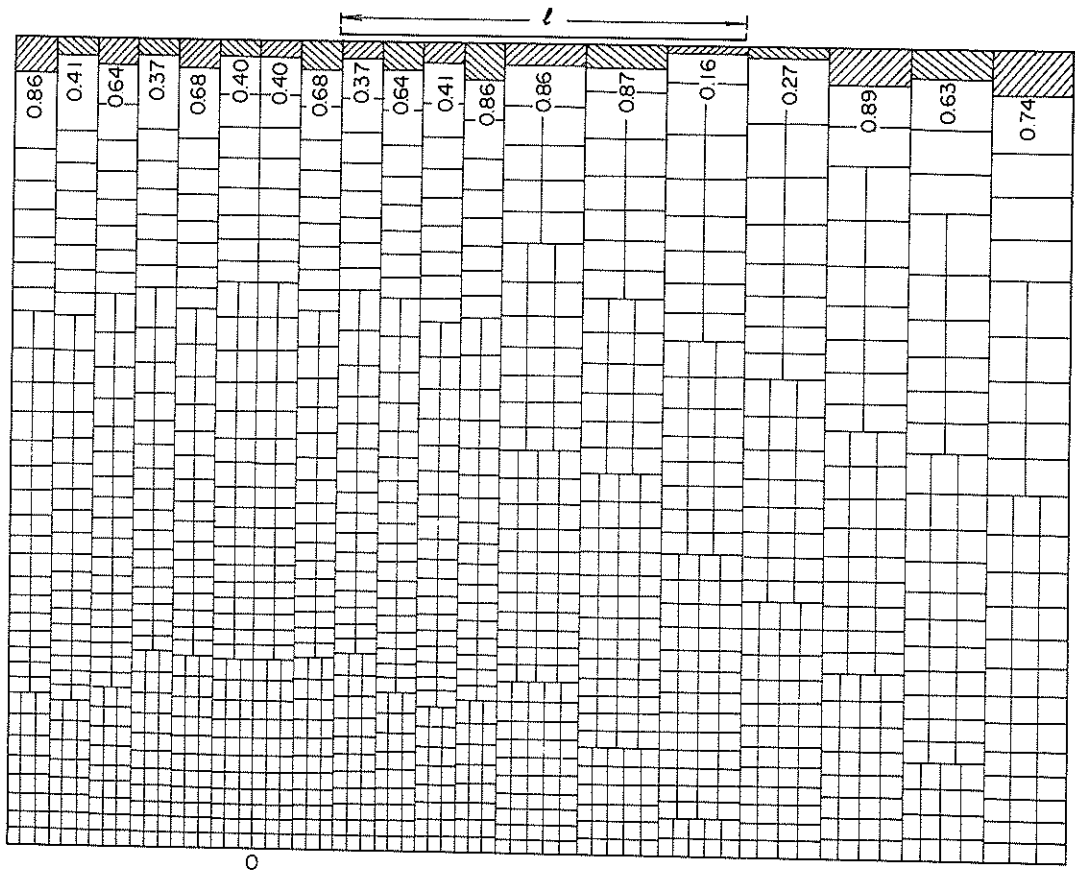
付 録

Pickett と Ray によって作成された影響図のうち、本資料に関係のある Winkler 基礎上の版の中央載荷状態と縁部載荷状態のたわみと曲げモーメントを表わすも

のは次の4枚である。これらの影響図の使用法は、原著 1) のほか、運輸省航空局発行の「空港コンクリート舗装構造設計要領」にくわしく説明されている。



図一A. 1 中央載荷によるたわみを表わす影響図



図一A. 2 縁部載荷によるたわみを表わす影響図

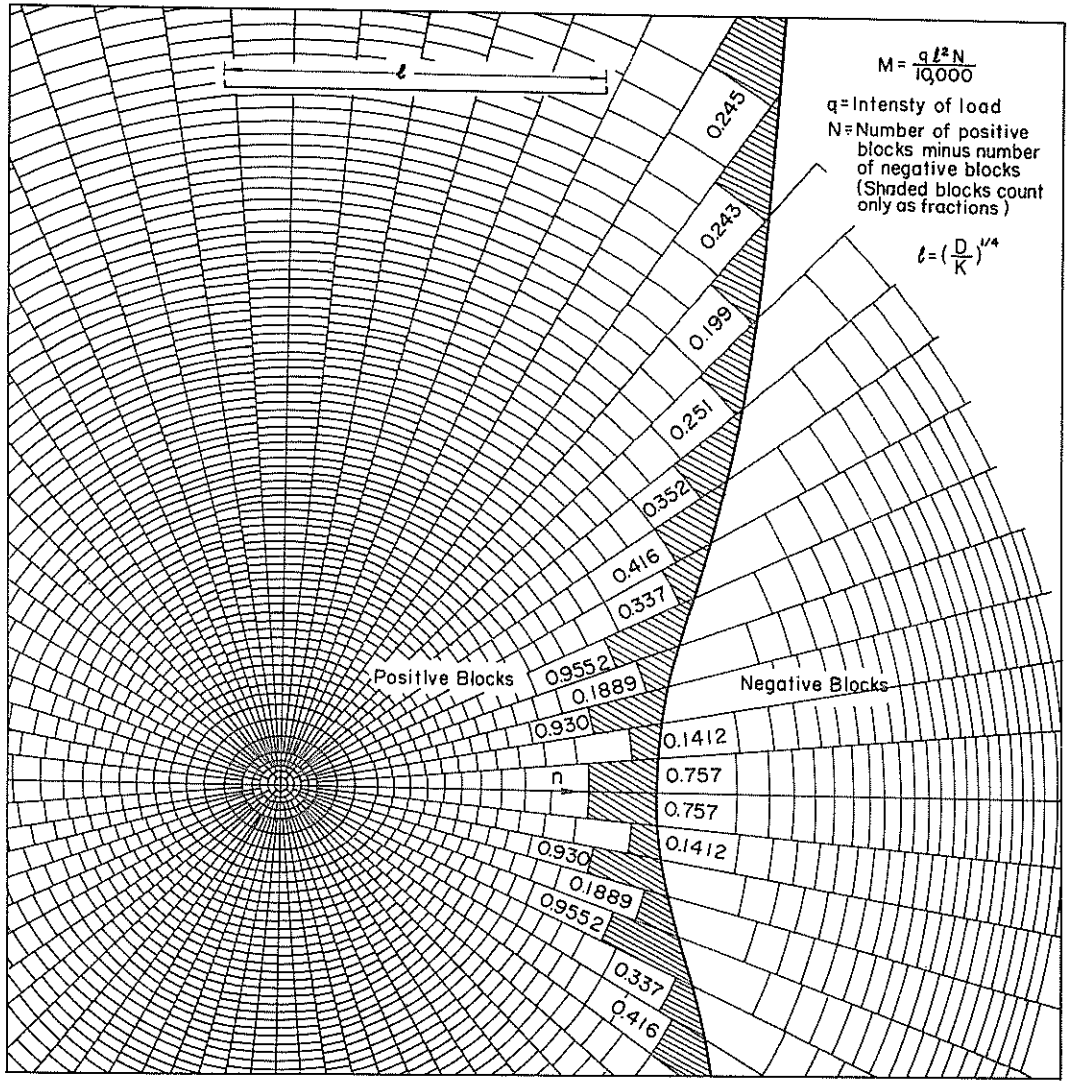


図-A . 3 中央載荷による曲げモーメントを表わす影響図

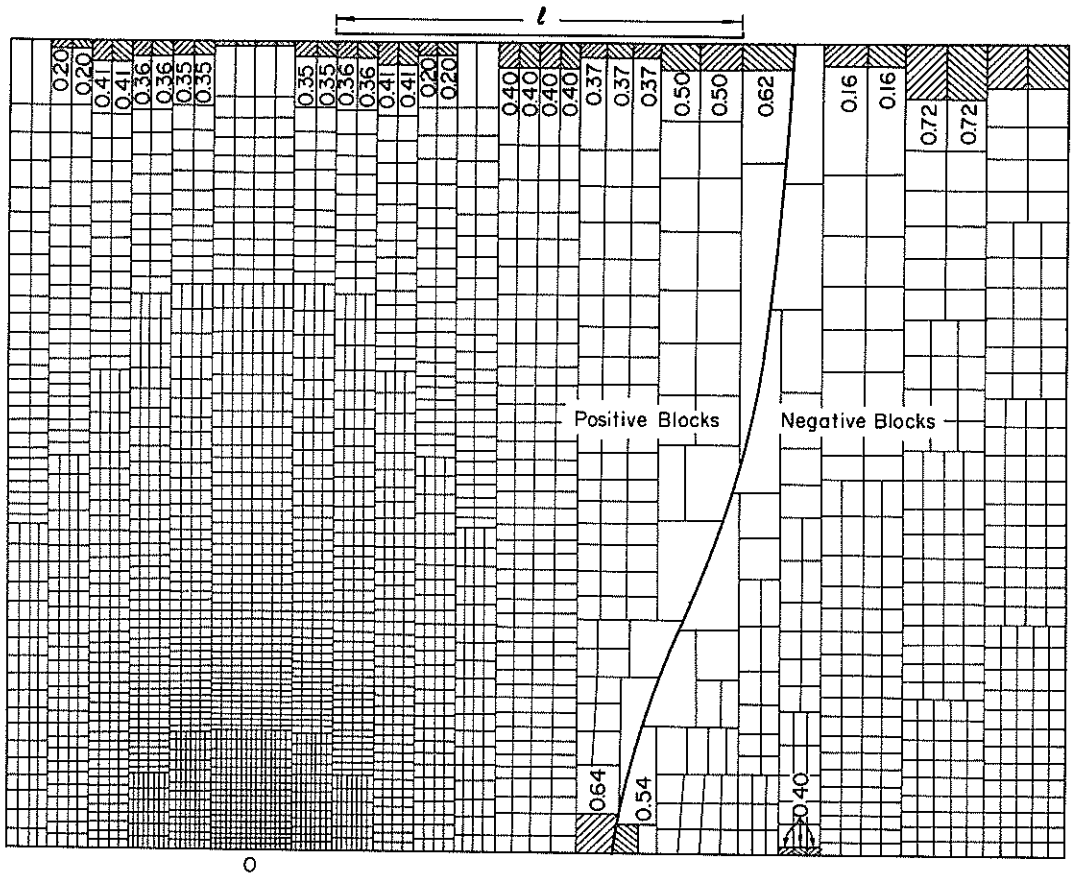


図-A.4 縁部載荷による曲げモーメントを表わす影響図

参考文献

1) Pickett, G., G. K. Ray: Influence Charts for Concrete Pavements, ASCE

Trans., Vol. 116, 1951, pp. 49~73.

港湾技研資料 No. 262

1977・6

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 (有)つばさ印刷技研

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.