

# 空港エプロンのPC舗装

林 鋼太郎\*  
 佐野 豪一\*\*  
 中野 守\*\*\*  
 前田 敏愛\*\*\*

## 1. ま え が き

PC舗装が飛行場に使用されたのは、1947年フランスのOrly飛行場の滑走路に始まっている。これに先立つ1945年、Freysinetはこのために実験を行なった結果、PC舗装は床版底面にひびわれを生じたのちも、十分荷重能力のあることが認められた。以後欧米においては年とともに飛行場への使用例が多くなってきた。

今回、運輸省が大阪国際空港の整備工事を実施するにあたり、エプロンの一部にPC舗装を試用し若干の試験を行なった。その目的とするところは、PC舗装が滑走路などに最適であるといわれながら工事費の点でなかなか採用しにくい。いかにすればもっと安くすることができるかを検討することにあつた。

以下これについて報告し、大方の御叱正を乞わんとするものである。

## 2. 設 計

PC舗装はプレストレスを導入する方法に internal pre-stressing と external pre-stressing の大別2つがあるといふことができる。前者はPC鋼材を使用する普通のPC工法であり、後者はこれを使用せず、アバットとジャッキを必要とする。

いずれも特徴があつて一長一短であるが、ひとくちにいって幅は普通で長さの長い滑走路のような場合には後者が有利である。また両者共通の利点として次の点をあげることができる。

1) めくら目地はまったく必要がない。いろいろな意味で盲点となる伸縮目地は極減または

なくすこともできる。

2) ひびわれは生じても舗装の全断面にはおよぶことなく、かつ荷重をのぞくとひびわれは閉じてしまう。すなわち、PC舗装は、ひびわれが生じたのちもプレストレスによってひびわれ断面に曲げモーメントおよびせん断力を伝達でき、連続性を失わず、耐久性がある。

3) 版厚が薄くて重荷重に耐える。またそりこう束応力が小さい。

今回は舗装範囲が、60×40m という小さいものであるので、前者によらざるを得なかつた。

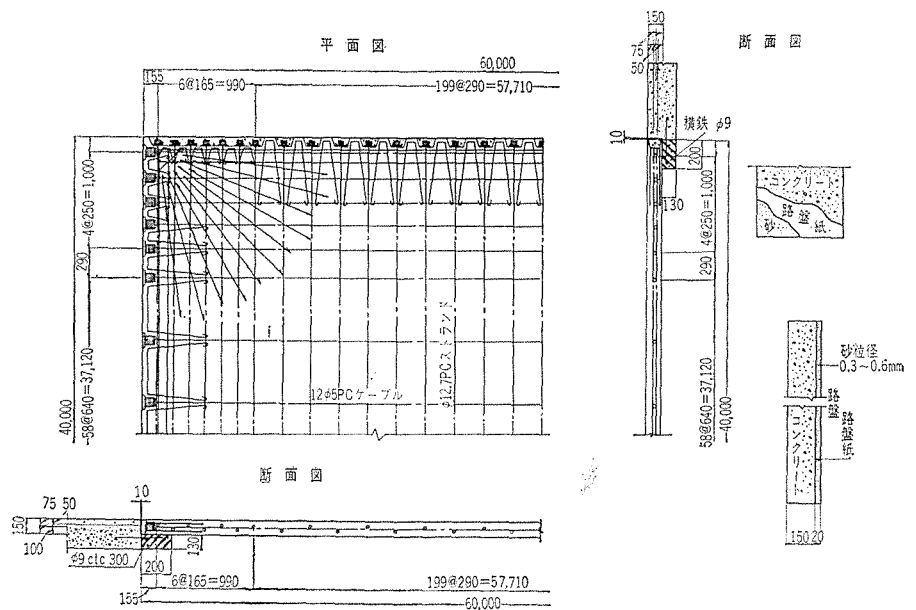
構造としては、十分転圧した路盤上に厚さ2cmに砂を敷き、路盤紙を敷き、その上に厚さ15cmのPC版を施工することとした。

版の設計には、縁部について検討する。普通縁部を厚くするが、PC舗装では緊張のさい収縮をこう束してはならないので、版厚を一定にした。そして縁部を厚さ13cmのコンクリートでささえるようにしたが、版とささえとの縁を切りすべりやすいようにした(図-1)。

荷重は、飛行機ボーイング727全備重量153000lbs

$$q: \text{タイヤ圧} = 150 \text{ lbs}/\square''$$

図-1 PC舗装設計図



\* 運輸省航空局建設課長  
 \*\* 同 飛行場課  
 \*\*\* 興和コンクリート株式会社

$E$ : コンクリートの弾性係数 = 5 120 000 lbs/□"  
 $\mu$ : コンクリートのポアソン比 = 1/6  
 $h$ : 床版の厚さ = 15 cm = 5.91 in  
 $K$ : 路盤の支持力係数 = 200 lbs/□"/in  
 $l$ : 剛比半径 (") =  $\sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)K}}$

を解いて  $l=25.907$  を得た。

これを Pickett & Ray の曲げモーメントの影響図により、版に生ずる最大曲げモーメントおよび曲げ応力度を求める。

$$M = \frac{ql^2N}{10\,000} = \frac{150 \times (25.91)^2 \times 600}{10\,000} = 6\,042 \text{ lbs-in}$$

$$\sigma_c = \frac{6M}{h^2} = \frac{6 \times 6\,042}{(5.91)^2} = 1\,037.7 \text{ lbs/in} = 73 \text{ kg/cm}^2$$

コンクリートの曲げ引張強度 = 50 kg/cm<sup>2</sup> とすると、  
 $\sigma_c = 73 - 50 = 23 \text{ kg/cm}^2$

これを prestressing によって持たせなければならない。このため舗装幅 40 m 間に 12-φ 5 mm ケーブル 69 本を使用する。

$$\sigma_p = \Sigma P/A = 31\,200 \text{ kg} \times 69/15 \times 4\,000 = 35.9 \text{ kg/cm}^2$$

1 ケーブルの緊張力は緑端において 31 200 kg、版中央において  $P/1 + \lambda x = 31\,200/1 + 0.007 \times 30 = 25\,780 \text{ kg}$  平均して 28 490 kg とする。

$$\lambda: \text{P C鋼材の長さ 1 m あたりの摩擦係数} = 0.007$$

$$x: \text{緊張端よりの距離} = \frac{l}{2} = 30 \text{ m}$$

したがって P C ケーブルの平均引張応力度は、

$$\sigma_s = P/A_p = 28\,490/2.357 = 12\,086 \text{ kg/cm}^2$$

緊張時のコンクリートの平均圧縮応力度は

$$\sigma_c = (23 + 35.9) \times \frac{1}{2} = 29.5 \text{ kg/cm}^2$$

クリープおよび乾燥収縮によるプレストレスの減少量を求める。

$$\frac{P_e}{P} = 1 - \frac{\frac{E_s}{E_c} \varphi \sigma_c + E_s \epsilon_s}{\sigma_s + \frac{E_s}{E_c} \sigma_c \left(1 + \frac{\varphi}{2}\right)}$$

ここで、

$P_e$ : コンクリートがクリープと乾燥収縮を起したのちの P C 鋼材の引張力 (kg)

$P$ : プレストレスを与えた直後の P C 鋼材の引張力 (kg)

$E_s$ : P C 鋼材のヤング係数 = 2 000 000 kg/cm<sup>2</sup>

$\varphi$ : コンクリートのクリープ係数 = 2

$\epsilon_s$ : コンクリートの乾燥および硬化による収縮ひずみ =  $13 \times 10^{-5}$

これを計算して、 $P_e/P = 1 - 0.047 = 0.953$   
 すなわち、クリープおよび乾燥収縮によるプレストレスの減少を考慮した緊張端の緊張力は、

$$P = P_e/0.953 = 31\,200/0.953 = 32\,739 \text{ kg}$$

レラクセーションを 2% とすると

$$P = 32\,739/1 - 0.02 = 33\,407 \text{ kg}$$

$$\therefore \sigma_s = 33\,407/2.357 = 14\,174 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_p = 33\,407 \times 69/15 \times 4\,000 = 38.4 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_c = (23 + 38.4)/2 = 30.7 \text{ kg/cm}^2$$

P C 舗装版に与えられたプレストレスは、路盤摩擦損失によって緊張端から遠ざかるにしたがって有効プレストレスは減少する。一般に路盤摩擦によるプレストレスの損失は次式で表わされる。

$$\epsilon_{f2} = \frac{W}{E} \int_0^x f(x) dx$$

ここに、

$\epsilon_{f2}$ : 路盤摩擦によるプレストレスの損失

$W$ : コンクリート単位重量 ( $2.4 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$ )

$E$ : コンクリートのヤング係数 (kg/cm<sup>2</sup>)

$x$ : 緊張端よりの距離 (cm)

$f(x)$ : 版の路盤に対する変位量に関する路盤摩擦係数

これを解くのに図解法を用いる。

1) 路盤摩擦係数を一定値 ( $f=1.2$ )。すべり摩擦係数に等しいと仮定し、プレストレス分布図を作る (図-2, 3)。

2) プレストレス分布図を幅 5 m に区分し、舗装版中心からそれぞれの区分線までの面積を計算して変位量を求め変位分布図をつくる。

3) 変位と路盤摩擦係数の関係図から、各区分点における路盤摩擦係数を求め、その分布図を作る。

4) 路盤摩擦係数分布を緊張端から各区分線までの面積を計算し、その値を  $W/E$  倍して摩擦損失量を求める。

5) 緊張端におけるプレストレス  $\Sigma P/EA$  から、各

図-2 路盤摩擦係数 (設計値)

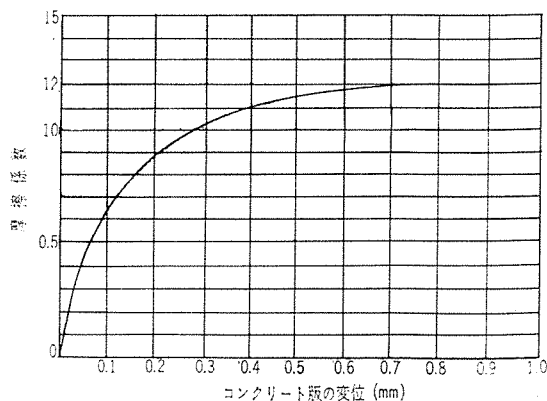


図-3 プレストレス分布の図解

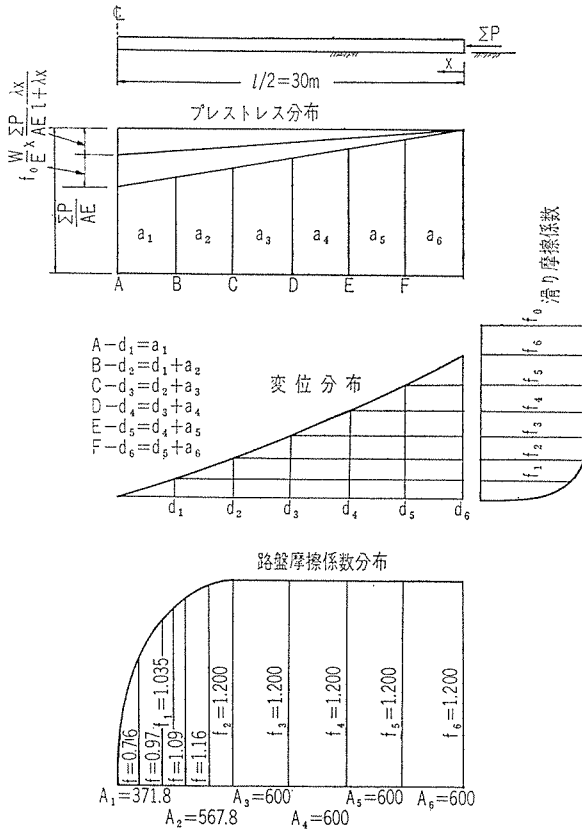
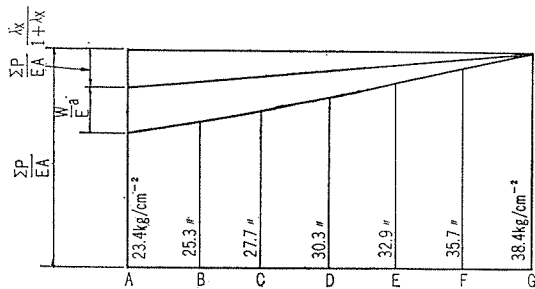


図-4 縦方向有効プレストレス分布図



区分線の損失量  $W/E^a$  を差し引いたものが有効プレストレスである (図-4)。

横方向は 60 m 間にストランド  $\phi 12.7$  mm 217 本使用し、縦方向のシース  $\phi 30$  mm の上下にシース  $\phi 20$  mm をもって配置した。

いま、 $\Sigma P = 12\,880 \text{ kg} \times 212 = 273\,056\,0 \text{ kg}$

$$\sigma_b = 273\,056\,0 / 15 \times 6\,000 = 30\,3 \text{ kg/cm}^2$$

緊張端において、1 ストランドの緊張力は 12 880 kg  
版中央においては、 $12\,880 / 1 + 0.007 \times 20 = 11\,300 \text{ kg}$   
平均して 12 090 kg となる。

平均引張応力度  $\sigma_s = 12\,090 / 0.987 = 12\,250 \text{ kg/cm}^2$

緊張時のコンクリートの平均圧縮応力度は、

$$\sigma_c = (23 + 30.3) / 2 = 26.7 \text{ kg/cm}^2$$

クリープおよび乾燥収縮によるプレストレスの減少量は、

$$\frac{P_e}{P} = 1 - \frac{\frac{2\,000\,000}{36\,000} \times 20 \times 26.7 + 2\,000\,000 \times 13 \times 10^{-5}}{12\,250 + \frac{2\,000\,000}{360\,000} \times 26.7 \times \left(1 + \frac{2}{2}\right)}$$

$$= 0.955$$

よって  $P = P_e / 0.955 = 12\,880 / 0.955 = 13\,487 \text{ kg}$   
ストランドのレラクセーションを 3% として、

$$P : P_e / 1 - 0.03 = 13\,487 / 0.97 = 13\,904 \text{ kg}$$

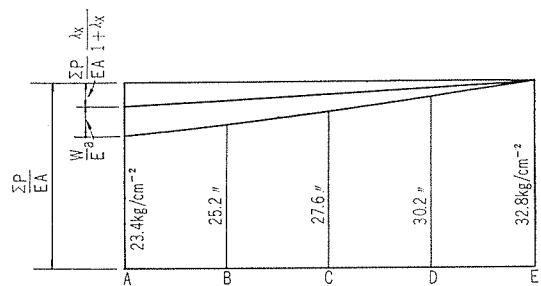
$$\therefore \sigma_s = 13\,904 / 0.987 = 14\,087 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_b = 13\,904 \times 212 / 15 \times 6\,000 = 32.8 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_c = (23 + 32.8) \times \frac{1}{2} = 27.9 \text{ kg/cm}^2$$

縦の場合同様にしてプレストレス分布図 (図-5) を得た。

図-5 横方向有効プレストレス分布図



### 3. 施 工

まず路盤の造成であるが、十分かつ均等に展圧を行ない、その上に施工する PC 版との間の摩擦こう束をでき

写真-1 シースの配置とコンクリート打設準備

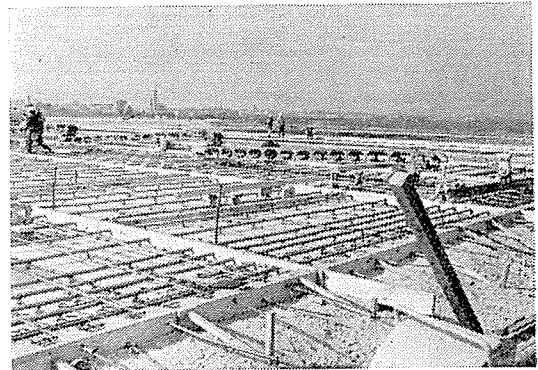
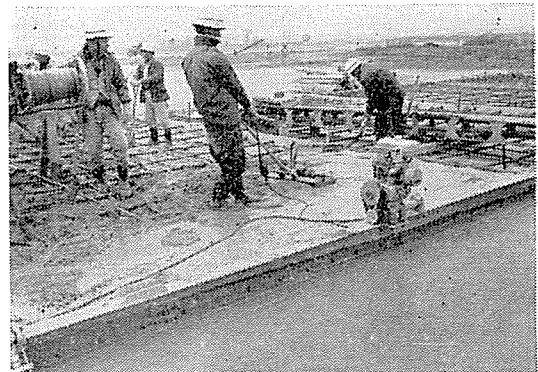


写真-2 コンクリート打設作業

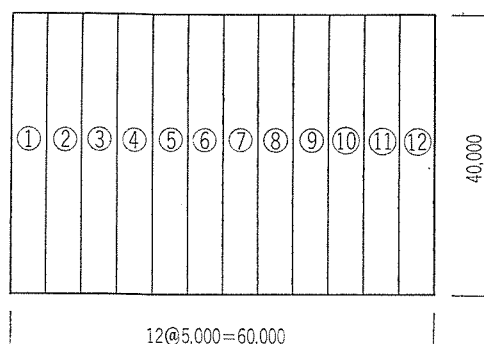


るだけ小さくする必要がある。

つぎにもっとも問題になるのはコンクリートの打設、続いて緊張の問題である（写真-1,2）。

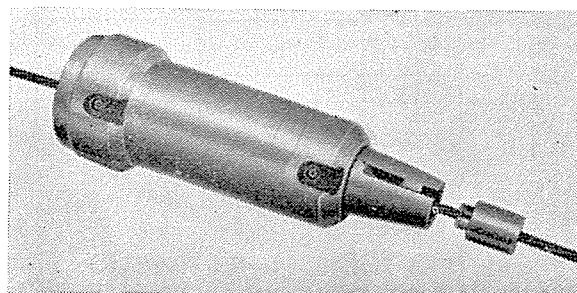
PC舗装は版が薄い上に、セメントの使用量が比較的多いので、打設順序、打継目地の扱いなど細心の注意が必要である。そのため全体を 40 m×5 m 12 個の block に区分すること 図-6 のようにし、これを示す順序にしたがって打設、仮緊張を行なった。仮緊張においては  $P/2 = 6440 \text{ kg}$  引張った。この緊張材はストランド  $\phi 12.7 \text{ mm}$  であって鋼製のコーンを使用しているため、あとはゆるめて再緊張を施すには便利であった。この際のコーンおよびジャッキは 写真-3 に示すとおりである。

図-6 コンクリート打設と仮緊張の順序



	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
打設順序	1	2	1	3	2	4	3	5	4	6	5	6
仮緊張日	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	8	8

写真-3 Stup 式 1 本引きジャッキ



つぎに縦緊張であるが、フレッシュナー ジャッキ D を使用して両引きする。これら一連の作業を順を追って列記するとつぎのとおりである。

- 1) コンクリート打設
- 2) 横方向仮緊張
- 3) 縦方向 1 本おきに本緊張
- 4) 第 1 次載荷試験
- 5) 縦方向残り全部本緊張
- 6) 横方向全ストランド本緊張
- 7) 縦横全シーズ内にグラウト実施
- 8) 第 2 次載荷試験

使用したコンクリートの標準配合はつぎのとおりであ

って、セメントは小野田の早強セメントを用いた。

標準配合

セメント	砂	砂 利	水	ポゾリス No 5
400 kg	663.4 kg	1 159.5 kg	146 kg	2.15 kg

テストピースによる圧縮強度は 3 日で  $350 \text{ kg/cm}^2$ 、7 日で  $440 \text{ kg/cm}^2$  程度であった。

また、グラウトには普通セメントを使用し配合はつぎのとおりであった。

セメント	水	ポゾリス No. 5	アルミ粉	フロー値
100 kg	40 kg	250 g	7 g	11'~13'

#### 4. 載荷試験

第 1 次として、版の縦横とも設計プレストレスの 1/2 量を与えた状態において載荷試験を行なった。その装置は 写真-4, 5 に示すとおりであって、柱の内り 4 m のフレーム上にインゴットを積重ねて荷重とした。これをジャッキを通じて版のうち④点に集中載荷するものである（図-7）。

版 ④、⑩ の位置の上下面にモールドゲージ（60 mm）を用意したが、測定の際 ジャッキのメータが故障して ④' を無駄にしてしまったのは残念の至りである。そしてもっぱらワイヤ ストレインゲージによらざるを得なかった。

荷重は 5 t ずつ載荷し 15 t におよんだ。結果は 図-

写真-4 インゴットを用いた載荷

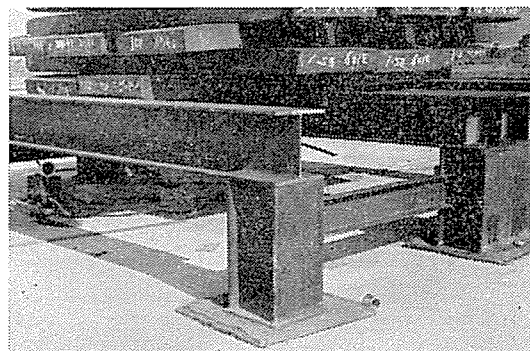
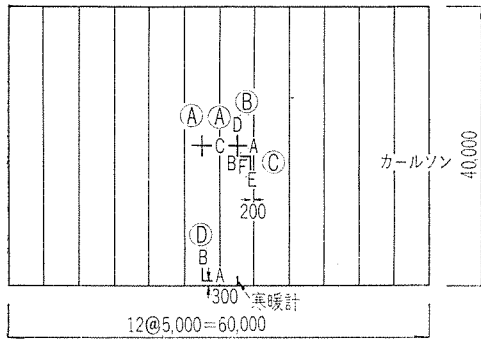


写真-5 載荷試験の状況



図-7 載荷試験の位置図



第1回試験は(A)

第2回試験は(B)(C)(D)

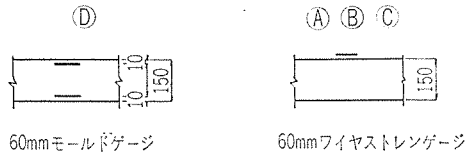


図-8 A 方向荷重 5t~15t

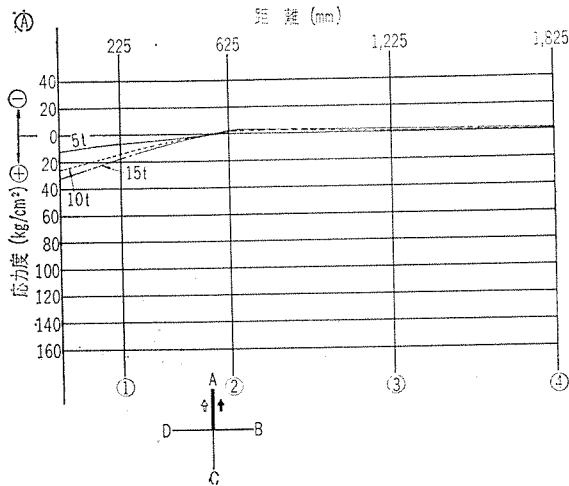
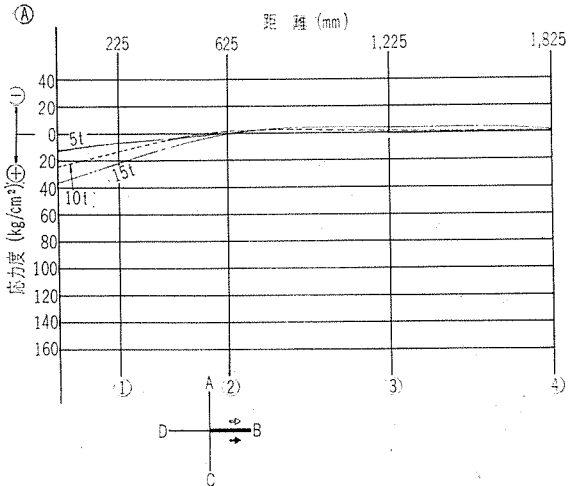


図-9 B 方向荷重 5t~15t



8,9 に示す。

第2次は、版完成後実施したが、装置と載荷方法などは前同様である。載荷点は(B), (C), (D) であってそれぞれ最高 70 t まで載荷した。

(B), (C), (D) の各載荷において、施工継手に直角・平行の両方向で、載荷点を離れるにしたがって、いかなるひずみを起すかを測定したが、この両方向においてもゲージの張り方を平行とシリーズの二とおりを行なった。また、(B), (C) は版の上面のみであるが、(D) においては下面についても測定した。これ等の結果を示すものが図-10 より 図-21 までである。

版に 70 t を集中載荷した場合、版上面における最大曲げ引張応力度はおおよそ 30 kg/cm<sup>2</sup>、コンクリートの曲げ引張強度を 50 kg/cm<sup>2</sup>、導入されたプレストレスを 23 kg/cm<sup>2</sup> として、

$$\text{ひびわれの安全率 } F.S. = 50 + 23/30 = 2.4 \text{ 倍}$$

実際の主軸荷重は  $69.4 \times 0.45 = 31.23 \text{ t}$ 、この設計荷重に対しては、

$$F.S. = 70/31.23 \times 2.4 = 5.4 \text{ 倍 となる。}$$

(B), (C), (D) の測定結果を見るに、床版上面における引

図-10 A 方向荷重 5t~70t

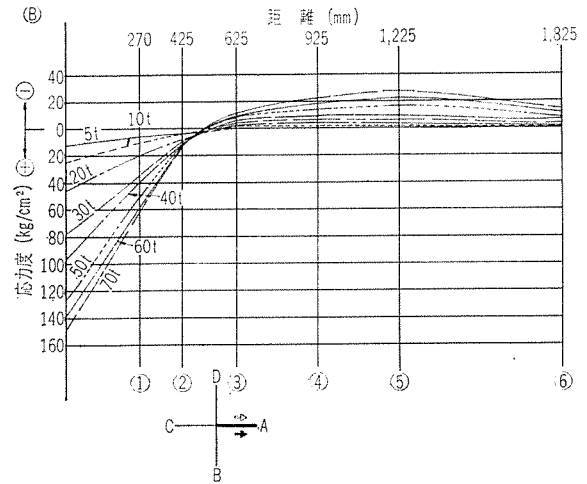


図-11 A 方向荷重 5t~70t (矢印位置)

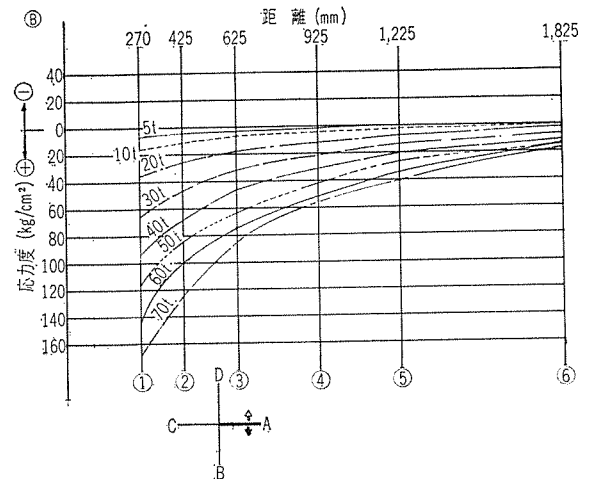


圖-12 B 方向荷重 5 t~70 t

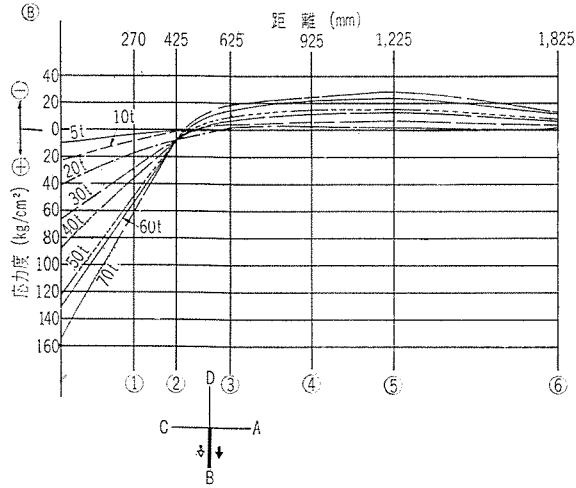


圖-15 F 方向荷重 5 t~70 t

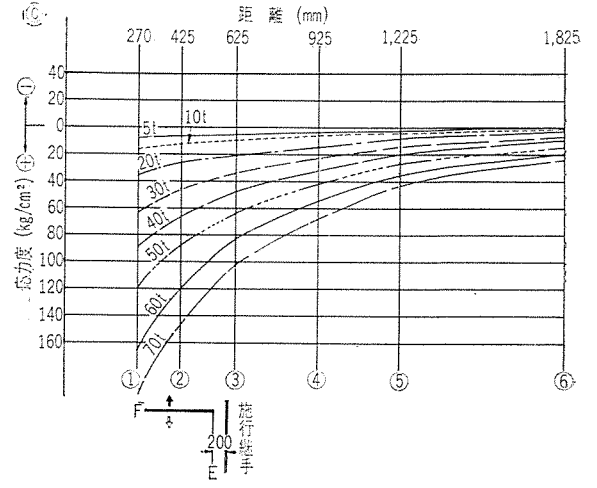


圖-13 B 方向荷重 5 t~70 t (矢印位置)

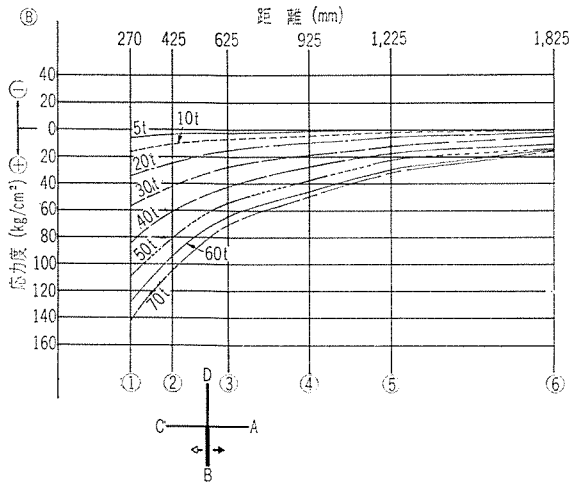


圖-16 E 方向荷重 5 t~70 t

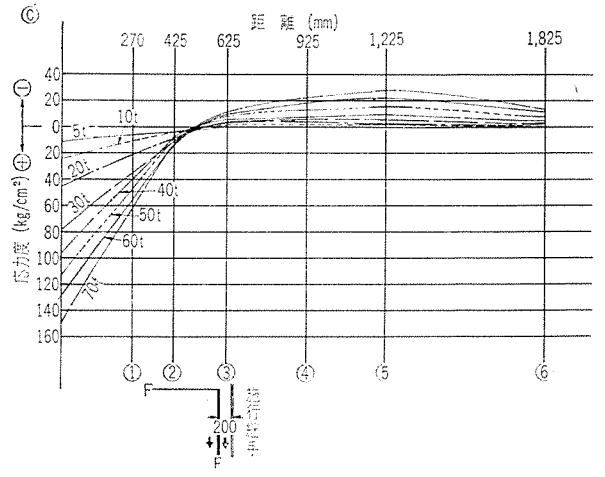


圖-14 F 方向荷重 5 t~70 t

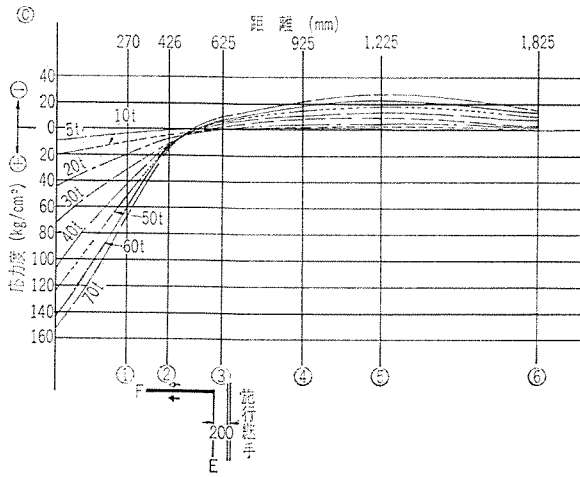


圖-17 E 方向荷重 5 t~70 t

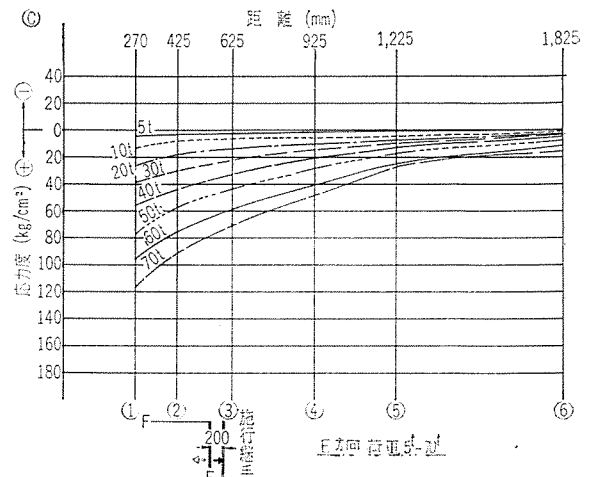


図-18 床版上面応力 A 方向 5t~70t

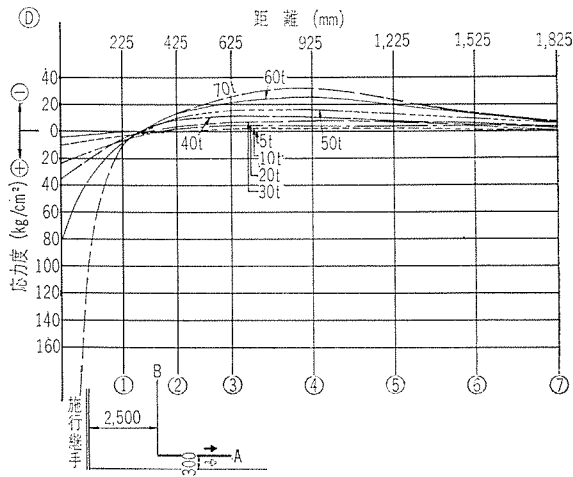


図-19 床版下面応力 A 方向荷重 5t~70t

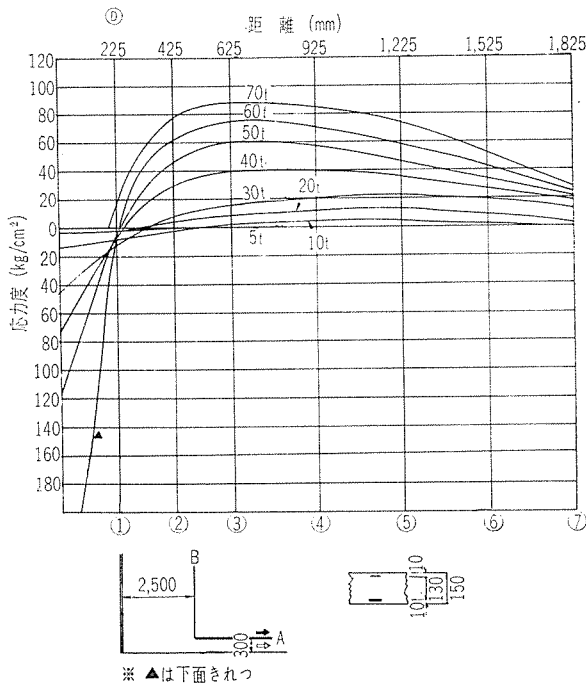


図-20 床版上面応力 B 方向荷重 5t~70t

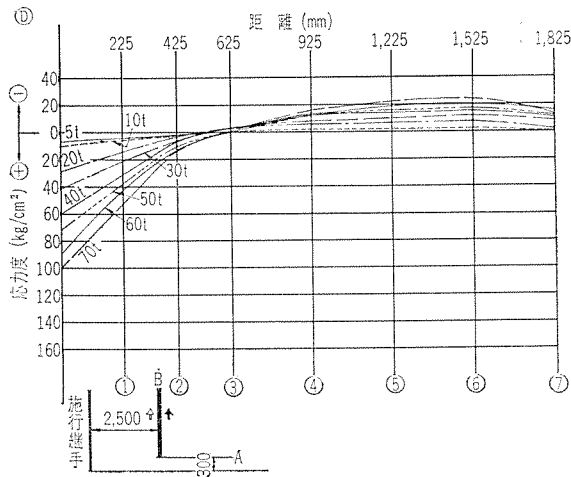
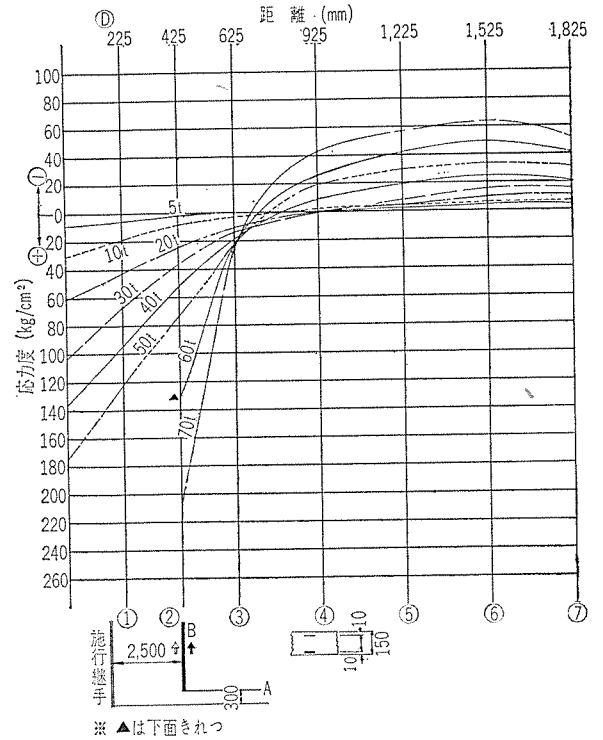


図-21 床版下面応力 B 方向荷重 5t~70t

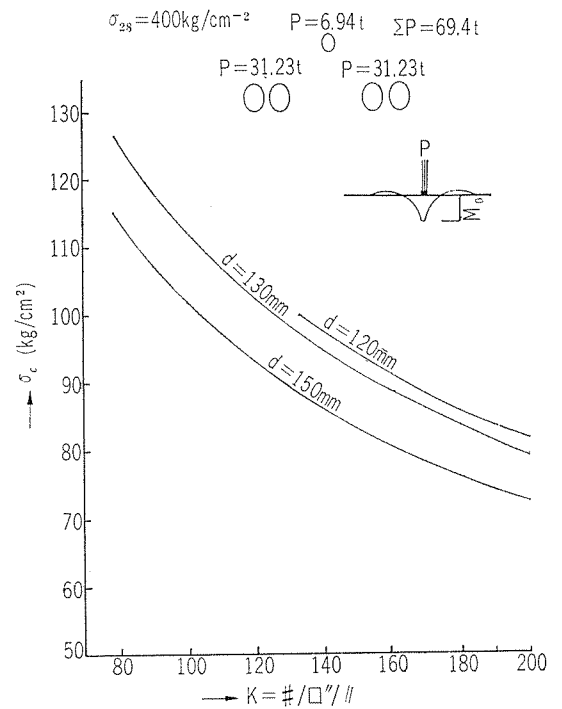


張応力度は、三者ともほとんど同様に  $30 \text{ kg/cm}^2$  であるのに対し、①においては縁端に平行方向の応力度が  $32 \text{ kg/cm}^2$  と大きくでている。

版縁部は、中央部に比し曲げモーメントは大きいのであるが、まくらコンクリートを施こし、緊張材を密に配置することによって、両者ほぼ等しい応力状態とすることができた。

下面にクラックが入ってから上面の応力は急激に増

図-22



大することなく Yield line を形成している。

負の最大曲げモーメントは載荷点よりほぼ 1.2m の位置に起こり、その値は載荷点下の正の最大曲げモーメントの約 1/5 である。

### 5. 結 び

この設計には  $K=200 \text{ lbs}/\square"/\text{in}$  を用いたが、これは無筋コンクリート舗装における路盤に等しく、PC舗装ではもっと小さい値の路盤となし得るのである。この場合版にはより大きな応力度が働らき、コンクリートの曲げ引張強度を一定とするとプレストレスを大きくするを要する。この間の関係を示したのが 図-22 である。

PC舗装については理論的な設計方法はないようであり、今回は在来の例にならって設計した。載荷試験の結果より見てプレストレスを 1/2 にすることは可能と考えられる。すなわちPC鋼材を 50% 近く節約できるので、試算して見ると  $1 \text{ m}^2$  あたり 20% 程度安価となる。

さらに規模の大きい工事においては external pre-stressing を併用することも可能であるし、また鋼材を使用するにしても pre-tensioning の方法を併用し（外国ではやっている）工費を節約することもできよう。

またコンクリートの打設などにおいても機械力の利用による節約が考えられる。

こうして幾多の利点を持つPC舗装の飛行場への利用は、その工費において普通コンクリート舗装とほとんど変わらないということがわかった。

終りに福田 正氏、岩間 滋氏、猪股俊司氏等に種々御教示を戴いた。また奥村組・FKKおよび八幡製鉄より御支援を賜ったことを付記して謝意を表する次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) 竹下春見・岩間 滋：道路舗装の設計
- 2) 岩間 滋・福田 正：コンクリート舗装の構造設計
- 3) Fritz Leonhardt: Prestressed Concrete Design and Construction 1965. 10. 28・受付

### 会 員 増 加 に つ い て お 願 い

会員の数はその協会活動に反映するもので、増加すればそれだけ多くの便益が保証されています。現在の会員数は創立当時に比較すると約 4 倍の 1300 名ですが、まだまだ開拓すべき分野が残されています。お知合いの方を一人でも余計ご紹介下さい。事務局へお申し出で下されば 入会申込書 はすぐお送りいたします。

## 水道管の革命!!



安くて強い

### “プレストレスコンクリート管”

特 長

1. 設計水圧に応じた合理的な管が製造出来る。
2. 同じ水圧または口径に対して鉄管類より遥かに安い。
3. 高圧に堪えて破壊することなく特殊な複元性がある。
4. 内面が平滑で永久に変化しない為流量が減少しない。

本 社 東京都中央区日本橋本石町3-6

電 話 (241) 2111 (代表)

工 場 横浜・名古屋・大阪・岩国

帝国ヒューム管株式会社

