

滑走路PC舗装の新工法とその試算設計

遠 藤 千 次 郎*

1. PC 舗装のあらまし

滑走路にPC舗装を採用したのは、1947年フランスのOrly飛行場が最初で、試験の結果PC舗装は床版の底面にひびわれが生じても載荷能力が十分認められ経済的であるところから、ヨーロッパやアメリカなどに盛んに採用され、道路舗装を含め各種の施工方法で普及している。

わが国においては、飛行場の滑走路にPC舗装を採用した事例はない。ただ大阪国際空港のエプロンの一部に、2400m²のPC舗装が施工された報告がある⁵⁾。

道路舗装への応用については、千葉県姉ヶ崎地区、名神高速道路多賀サービスエリアの変速車線、北九州市裏門司地区などに実施されている⁵⁾。

飛行場の今後の趨勢は、ジェット飛行機の大型化により、総装備重量300tとも報ぜられ、したがって、滑走路も長大となり、高強度の構造が要求されるであろう。

PC舗装は下層路盤の上に構築され、路盤の支持力と一体となり、載荷荷重を支持する構造体であるから、適当な設計は従来のコンクリート舗装における目地の持つ欠点を、目地間隔を大きく取って軽減し、またプレストレスを導入するので、強度は増加し、弾性に富む薄版の構造となしうる。

それゆえ各国とも状況に応じ、両端にアバットを構築し、PC鋼材を使用せず中間に作動目地を適当に設け、フラットジャッキなどにて、プレストレスを導入するexternal prestressing、または構築したアバット間にPC鋼材をあらかじめ緊張して置き、コンクリートを打設し、硬化後適当の長さに切断してプレストレスを導入するプレテンション工法、ならびに普通施工されるポストテンション工法で、プレストレスを導入する、internal prestressing などにて実施されている。

しかし路盤との摩擦係数、温湿度の変化にともなう伸縮度、バックリングなどの条件について、経済性を考えたときおのおの一長一短あり、決定的施工法がない現状と思う。

2. PC 舗装の新工法

滑走路のような長大の舗装をポストテンション方式に

* 住友建設株式会社PC部長代理

て築造する場合、舗装版と路盤間の摩擦抵抗で導入力が削減される。抵抗を消す種々の工夫が施されても、なおかつその量がかかり大きいため、各種の工法が工夫されているのであるが、1枚のPC版長は70m位に制限されるのが多い。

ストレス導入について新工法は上述のexternal prestressing と internal prestressing とを勘案し、おのおの特長を併用したポストテンション工法である。

写真-1(a) 特殊定着具(分解)

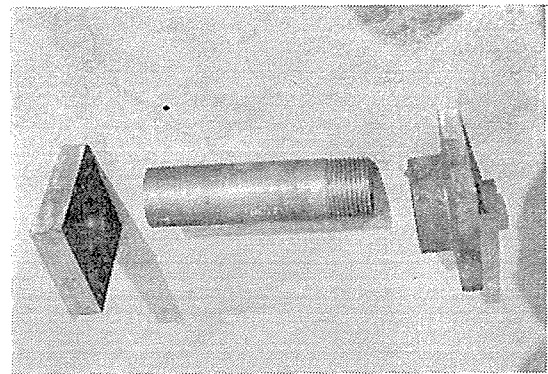
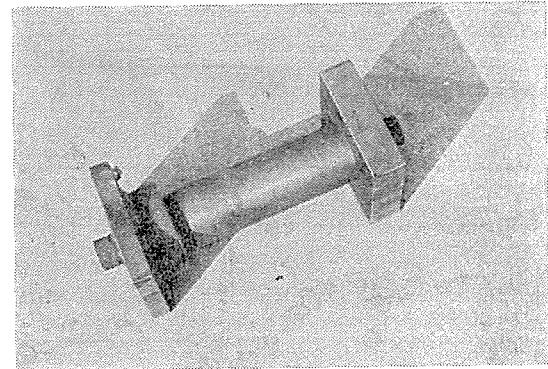


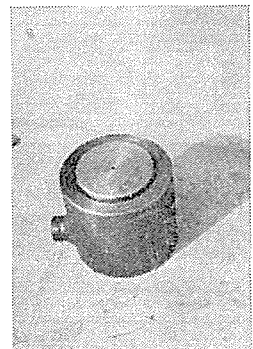
写真-1(b) 特殊定着具(組立)



すなわちPC版長($l=300\sim 400$ m)を70m位に分割して、作動目地を設け(図-3参照)、この作動目地内に、写真-1のような特殊定着具を装備する。この定着具は、中心にPC鋼材を緩く貫通したカップラーで、作動目地対面のプレストレス応力を支える伸縮自由の構造である。

舗装版にプレストレスを導入

写真-2 作動目地用フラットジャッキ



する操作は、版長 300~400 m の版端に、ストロークの長い緊張ジャッキを用意し、作動目地には特殊定着具のまわりに写真-2 のようなフラットジャッキをそう入する。

そして第1段階で、作動目地内のフラットジャッキだけ動かし路盤との摩擦力を消すだけの圧縮力を加える。

この操作は、路盤摩擦をアバットと考えた external prestressing である。

第2段階で両端の緊張ジャッキと作動目地内のフラットジャッキを同時に操作し必要量のプレストレスを導入し、この状態でフラットジャッキの圧縮力をカップラーのねじをまわし、これに完全に移行させ(図-9 参照)、両端はアンカープレートに定着してから各ジャッキを取りはずし、ポストテンション工法による intrnal prestressing は終る。

第2段階のストレス導入にはシーズ摩擦を加味する。

すなわちフラットジャッキの圧縮力を緊張ジャッキの緊張力にシーズ摩擦力を加えたものとする。

第3段階で作動目地に膨張性のコンクリートを充てんし、グラウトを版全体に行なって、300~400 m の1枚のPC版は完成する。

完成したPC舗装版のプレストレス応力分布は、版端

に低く中央に向かって、路盤およびシーズ摩擦力だけ順次高くなる(図-1 参照)。

この工法を要約すれば、舗装版のストレス導入時に路盤の摩擦抵抗力をたくみに利用し、特殊定着具を通じ舗装版にプレストレスを導入したことである。

この工法を PMP 工法 (prestressed into a middle piece) と称する。

旧来のポストテンション工法にくらべて、1枚のPC版長を長くできるとともに、路盤摩擦抵抗の損失量-を逆に有利の+にただけPC鋼材量を節約しうることになり、有形無形の利得がある。

滑走路のような長大な舗装は、この版を連続し、その接続箇所に伸縮目地を設けて構築するのであるが、その伸縮量や構造などは不明の点が多く、今後の調査研究の課題であると思う。

3. PMP 工法による滑走路 PC 舗装の試算設計

2. の考え方より、つぎのような滑走路と飛行機荷重を想定し、滑走路構築の目安として試算設計を試みる。

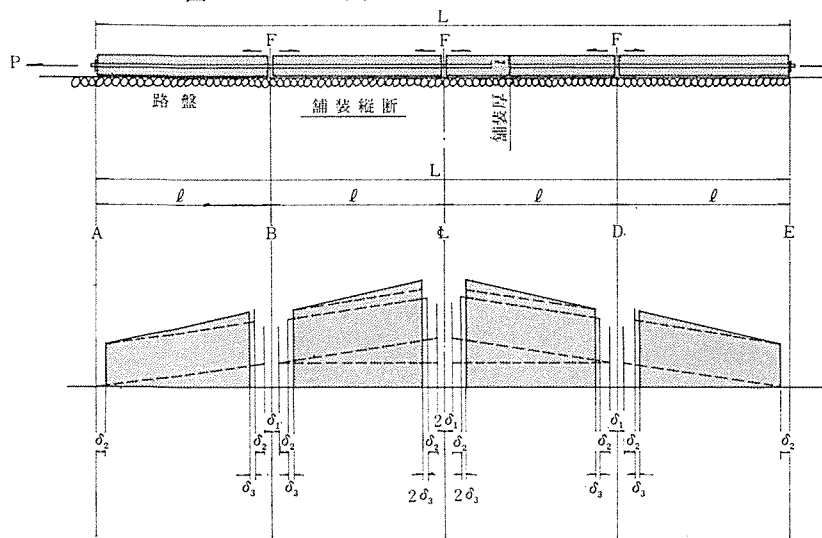
(1) 設計条件の仮定

- ① 飛行場滑走路：規模 長さ $L=3770$ m
幅員 $B=60$ m
- ② 飛行機装備全荷重：150 t, 輪荷重 20 t, 接地半径 21.5 cm
- ③ 路盤支持力係数：
 $K_{75}=5.0$ kg/cm³
- ④ 路盤摩擦係数：1.0
- ⑤ PC 舗装版1枚の大きさ：
長さ $l=288.4$ m
幅 $B=60.0$ m
厚さ $t=20.0$ cm
- 290 m ごとに伸縮目地を設け、まくら PC 版にて版端を補強する(図-2~6 参照)。
- ⑥ PC 版応力計算：Westergaard の修正中央載荷公式を採用する。
- ⑦ プレストレス導入：縦、横方向とも PMP 工法ポストテンション方式

(2) 細部設計条件

- ① コンクリート：

図-1 PMP 工法によるプレストレスの特長



舗装版内部応力図
路盤摩擦係数 1.0

- δ_1 : l 区間の摩擦抵抗による B 点の移動量
- δ_2 : 緊張力 P による各区間の移動量
- δ_3 : シーズ摩擦抵抗による l 区間の B 点の移動量

図-2 全体平面 (滑走路を図のごとく分割して分割点に伸縮目地を設ける)

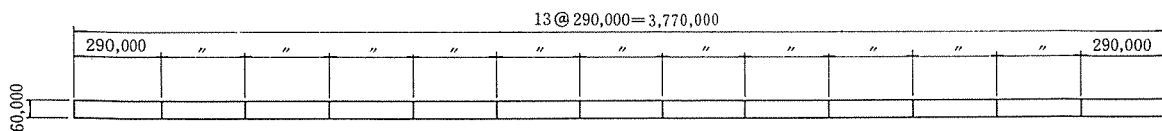


図-3 PC版1枚の平面 (伸縮目地間に図のごとく作動目地を設け1枚のPC版とする)

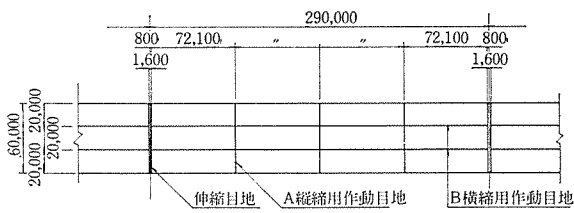
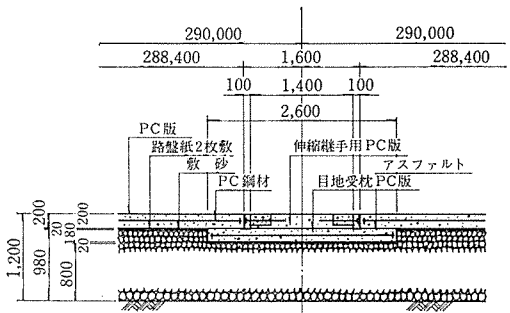


図-4 伸縮目地構造

断面図



平面図

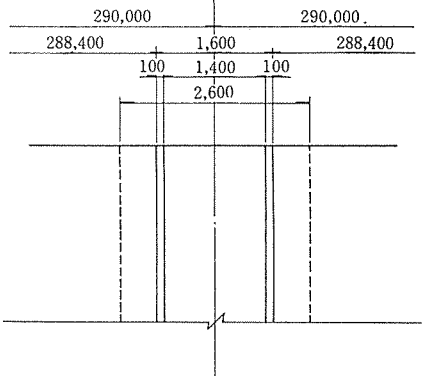
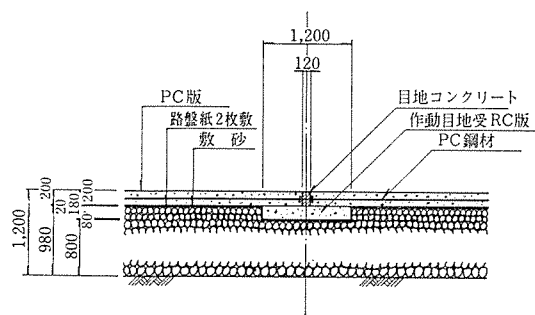


図-5 作動目地構造

断面図



平面図

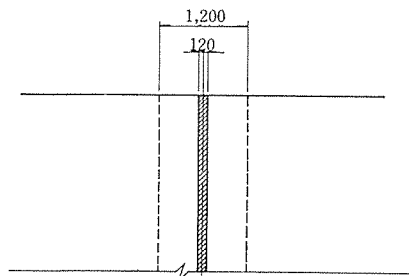


図-6 伸縮継手図

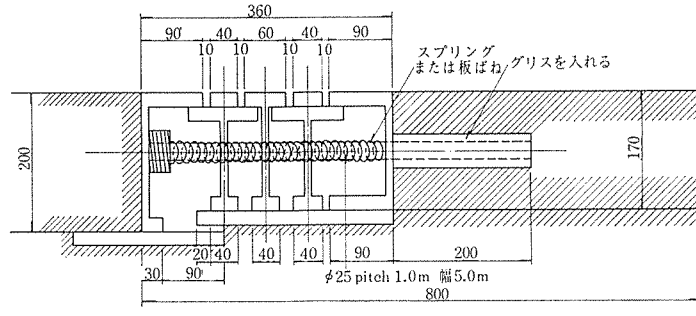
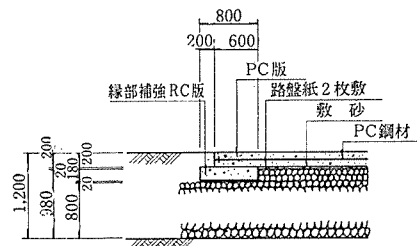


図-7 PC版縁部構造



圧縮強度	$\sigma_{28} = 400 \text{ kg/cm}^2$
曲げ引張強度	$\sigma_c' = 50 \text{ kg/cm}^2$
許容圧縮強度	$\sigma_{ca} = 200 \text{ kg/cm}^2$
許容曲げ引張強度	$\sigma_{ca}' = 30 \text{ kg/cm}^2$
弾性係数	$E_c = 350\,000 \text{ kg/cm}^2$
ポアソン比	$\nu = 1/6$

② PC鋼材:

7本よりPCストランド	$\phi = 15.2 \text{ mm}$
標準断面積	$A_p = 138.7 \text{ mm}^2$
引張り荷重	$P_u = 23\,100 \text{ kg}$
降伏点荷重	$P_y = 19\,700 \text{ kg}$
導入作業時	$P_{pt} = 17\,000 \text{ kg}$
設計荷重時	$P_{pa} = 14\,700 \text{ kg}$
弾性係数	$E_p = 2\,000\,000 \text{ kg/cm}^2$

(3) 滑走路舗装の全体計画

工事施工量を勘案して、図-2,3のように縦方向に

13枚のPC版とし、横方向は分割しない。そして13枚のPC版をおのおの作動目地にて12個に区画する。1区画のコンクリート量は、 $72.0 \text{ m} \times 20 \times 0.2 = 288 \text{ m}^3$ となり1日の作業量とし連続打設とする。

PC版間は緊張作業のスペース1.6mを隔て、この間に伸縮目地を工夫し(図-4,6参照)、この部分をPCまくら版にて、版端の弱点を補強する。作動目地の下部にも用心のため、まくらコンクリートを置く。縁部も同

様にする (図-7 参照)。

(4) 活荷重による PC 版の応力計算

飛行機荷重による応力計算に採用する Westergaard の修正公式

$$\sigma_i = 0.0547 \frac{P}{h^2} \left[\left(\frac{b}{l} \right)^2 - 10.186 \log_e \frac{b}{l} + 3.714 \right]$$

σ_i : 舗装版中央載荷の下面最大応力

P : 飛行機輪荷重 20 000 kg

h : 舗装版厚 20 cm

$$l: \text{剛比半径} = \sqrt{\frac{3 E_c h^3}{35 K_{75}}} = 83.3 \text{ cm}$$

$$b: \text{等価半径} = \sqrt{1.6 a^2 + b^2} - 0.675 h = 20.26 \text{ cm}$$

a : 接地半径 21.50 cm

E_c : コンクリートの弾性係数 350 000 kg/cm²

u : コンクリートのポアソン比 1/6

K_{75} : 路盤支持力係数 5.0 kg/cm³

上記の数値を代入して舗装版中央載荷の下面最大応力

$$\sigma_i = 0.0547 \frac{P}{20^2} \left[\left(\frac{20.26}{83.3} \right)^2 - 10.186 \log_e \frac{20.26}{83.3} + 3.714 \right] = 0.00249 P = 49.8 \text{ kg/cm}^2$$

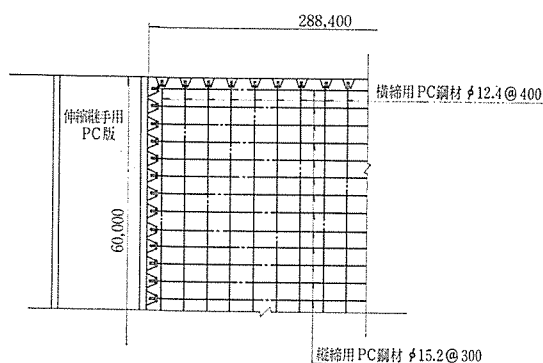
となる。

(5) PC 舗装版の予備試算

縦方向の応力を考える。PC スtrand より線 $\phi 15.2 \text{ mm}$ を 30 cm 間隔に配置したとする。PC 線を中心に幅 30 cm の舗装版のストレス導入は、PC 鋼線の有効緊張力を 80% と仮定するとストレス応力は $17.000 \times 0.8 / 30 \times 20 = 22.7 \text{ kg/cm}^2$ となる。

飛行機荷重と合計すると $-49.8 + 22.7 = -27.1 \text{ kg/cm}^2 > -30 \text{ kg/cm}^2$ O.K よって 図-8 のようにストランド鋼線を配置して試算設計を進める。

図-8 PC 鋼材配置図



(6) PMP 工法にて計算する

a) 路盤摩擦によるプレストレスの導入 スtrand 鋼線を中心とした、版幅 30 cm 当たりの 1 区画の路

盤摩擦抵抗力 $F_i = 72.1 \times 0.3 \times 0.2 \times 2.4 \times 1.0 = 10.38 \text{ t}$

この摩擦抵抗力を作用目地のフラット ジャッキ だけにて版にストレスを導入すると (図-1 参照)

位置	圧縮力	応力度
A, E 点	0.	0.
B, D	10.38 t	10.38/20 × 30 = 17.3 kg/cm ²
Ⓛ	20.76 t	34.6 kg/cm ²

b) PC より線によるストレスの導入 より線とシー-スの摩擦係数を 0.004/m とし、より線長 72.1 m に対する摩擦力は $72.1 \times 0.004 \times 17.0 \text{ t} = 4.9 \text{ t}$ となる。

ゆえに緊張力とフラット ジャッキの圧縮力をつぎのようにする。

位置	緊張ジャッキ	フラットジャッキ	応力
A, E	17.0 t	0	28.3 kg/cm ²
B, D	0	17.0 + 4.9 = 21.9 t	36.5
Ⓛ	0	21.9 + 4.9 = 26.8 t	44.7

c) A+B (ストレス導入の合計) 版端 28.3 B, D 点 53.8, 版中心 79.3 kg/cm² となる。

d) 各種導入損失

① 緊張時定着損失 版端定着損失 5.0%
 作用目地損失 15.0%と仮定す
 版端 28.3 × 0.05 = 1.4 B, D 53.8 × 0.15 = 10.8
 版中心 79.3 × 0.15 = 11.9 kg/cm²

② PC 鋼材のリラクセーション 5.0% = 1.4 kg/cm²

③ コンクリートの乾燥収縮およびクリープ損失

$$\sigma_{p\varphi} = \frac{\frac{E_p}{E_c} \varphi \sigma_{cp} + E_p \varepsilon_s}{1 + \frac{E_p}{E_c} \left(\frac{\sigma_{cpt}}{\sigma_{pt}} \left(1 + \frac{\varphi}{2} \right) \right)}, \varphi = 2.0$$

B, D 点

$$\sigma_{cp} = 52.8 \text{ kg/cm}^2$$

$$\varepsilon_s = 15 \times 10^{-5}$$

$$\sigma_{cpt} = \frac{17\ 000}{600} = 28.3 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{pt} = \frac{17\ 000 \times 0.95}{1.39} = 10\ 720 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_c = 350\ 000 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_p = 2\ 000\ 000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{p\varphi} = \frac{614.4 + 300}{1 + 0.029} = 890 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{損失力} = 1.39 \times 890 = 1.240 \text{ kg}$$

$$\text{損失応力} = 2.1 \text{ kg/cm}^2$$

同様にして版中央 損失応力 = 2.7 kg/cm²

④ 温度変化に対する応力度

両端にアバットを築造し作用目地にて、ストレスを導入する。external prestressing では温度変化によるストレスの変化は重要な項目である。

これに比べ PMP 工法は両端がフリーであるのでそれほどでない。

温度変化によってPC版は伸縮するであろうが、路盤もまたこの伸縮に順応して塑性的変形を起こし、その挙動は不明である。

文献には長さ 100~400 m の鉄筋コンクリートの目地なし滑走路についての経験によると、版の端約 40 m 区間だけが温度変化に応じて動いているだけ³⁾と、また短いPC版についても応力の変化は少ないようである¹⁾ので、一応PC版の温度変化による応力変化は0であると仮定する。

⑤ 損失応力合計

位置	定着損失	レラクセーション	クリープ	合計
版端	5.7	1.4	0	7.4
B,D	10.8	"	2.1	12.9
中央	15.9	"	2.7	18.6

5) 飛行機荷重との合計

版端	$-49.8 + 28.3 - 7.4 = -28.9$	$> -30.0 \text{ kg/cm}^2$
B,D	$-49.8 + 53.8 - 12.9 = -8.9$	"
中央	$-49.8 + 79.3 - 18.6 = +10.9$	"

許容引張応力度 -30 kg/cm^2 であるから、版端を除いてかなりの余裕がある。

版端は飛行機荷重による応力度も増加するであろうが、PCより線は版厚中心より下側に配置してあることと、PCまくらコンクリートおよび鉄筋などにて補強するなどして、安全を確める必要がある。

6) 破壊安全率 PC版の破壊をPC版下面のひびわれとする。

輪荷重 20 t に対し各点の下面応力は

版端	-28.9	ひびわれ余裕	$50.0 - 28.9 = 21.1 \text{ kg/cm}^2$
B,D	-8.9	"	$50.0 - 8.9 = 41.1$
中央	+10.9	"	$50.0 + 10.9 = 60.9$

ひびわれ余裕の輪荷重は

$$20 \times \frac{21.1}{28.9} = 14.0 \text{ t} \quad 20 \times \frac{41.1}{8.9} = 92.0 \text{ t}$$

$$20 \times \frac{60.9}{10.9} = 120 \text{ t}$$

ゆえに破壊安全率は

$$(20 + 14.0) / 20 = 1.7 \quad (20 + 92) / 20 = 5.6$$

$$(20 + 120) / 20 = 7.0$$

普通のようにPC版の破壊をPC版上面のひびわれとするならば相当の余裕があると考えられる。

7) 横方向へのプレストレスの導入 横方向へのプレストレスを導入する計算の根拠は余り見あたらない。

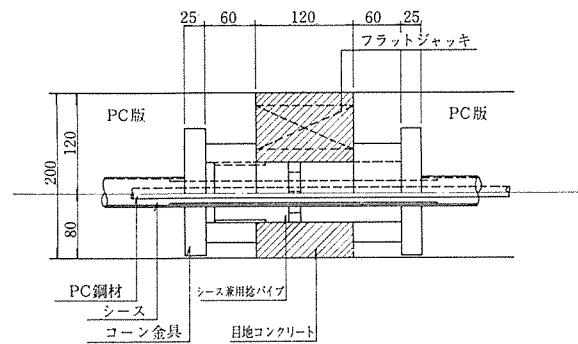
それゆえ縦方向同様 PMP 工法にて幅 60 m の中間に作動目地 2 か所を設け、プレストレスを適当に導入す

ること、縦方向へのストレス導入と同様にしたのである(図-10 参照)。

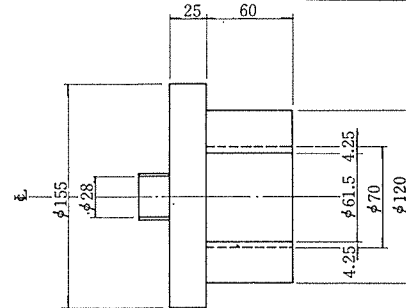
8) 特殊定着具の計算 B点の作動目地のみについて行なう。

ストレス導入時におけるB点の定着具の受け持つ圧縮力の合計は 32.3 t であるから、図-9 のように設計し、コンクリートの支圧応力およびねじ部円筒の金物の圧縮度を検討する。

図-9 縦縮め用特殊定着装置



コーン詳細図



シース兼用捻パイプ詳細図

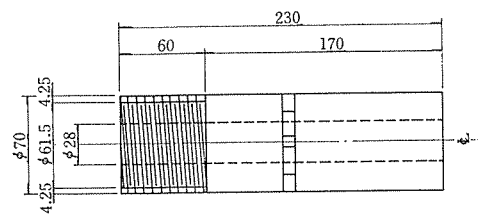
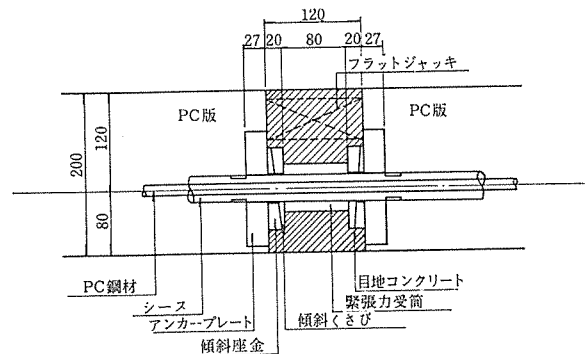


図-10 横縮め用特殊定着装置図 (中心ずれのとき)



報 告

$$\begin{aligned} \text{コンクリートの支圧面積} &= \phi 155 \text{ mm } \phi - \phi 28 \text{ mm} \\ &= 18180 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{圧縮応力} &= 32300 \div 181.8 = 178.0 \text{ kg/cm}^2 \\ &< 180.0 \text{ kg/cm}^2 \text{ O.K.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ねじ部円筒の支圧面積} &= \phi 70.0 \text{ mm } - \phi 28 \text{ mm} \\ &= 3232 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{圧縮応力} &= 32300 \div 32.3 = 1000 \text{ kg/cm}^2 \\ &< 1.200 \text{ kg/cm}^2 \text{ O.K.} \end{aligned}$$

4. む す び

滑走路舗装はジェット飛行機の大型化にともない、ますます高強度の長大な構造が要求される情勢にかんがみ筆者は上述のような工法を考案しその試算設計を試みたのである。

試算について考察するに問題の路盤摩擦抵抗を有利に利用して、特殊定着具を通じ、プレストレスを導入するので、舗装の目地の欠点をごく少なくしたこと、そのうえ旧工法にくらべストレス応力度が版全体に平均に分布させると、摩擦損失だけ鋼材の節約になるなど、有形無形の経済的工法であると信ずる。

この工法は実施例がなく目下実験中でその成果を載せ

得なかった。

試算中疑問の点、不明の点を筆者が勝手に仮定し、設計図を作製したが、疑問の点を調査研究のうえ、再度試算をくりかえすことにより、よりよい設計ができると思われる。

最後にPC舗装発展のために浅学非才を顧みず拙文を執筆したが、先輩諸氏のご批判叱正を戴ければ幸甚であります。

参 考 文 献

- 1) 福田 正：プレストレストコンクリート舗装に関する実験的研究(1)(2)建設省土木研究所報告
- 2) 猪股俊司：プレストレストコンクリートの設計及施工
- 3) 日本道路協会：セメントコンクリート舗装要綱
- 4) 土木学会：PC舗装の設計方法に関する調査研究、空港舗装研究委員会コンクリート舗装部会
- 5) PC技術協会誌：
千葉県姉崎地区PC舗装について Vol. 8, No. 4
名神高速道路PC試験舗装工事報告 Vol. 6 No. 5
北九州市裏門司地区のPC舗装について, Vol. 9 No. 4
空港エプロンのPC舗装 Vol. 7 No. 6
ヨーロッパにおけるPC滑走路およびPC試験舗装見学記, Vol. 2 No. 3.

1968.11.4・受付

PC長大橋梁に豊富な経験



阪神高速道路月見山第1工区高架橋

KK オリエンタルコンクリート株式会社

東京都千代田区五番町5番地 TEL (261)1171(代)