

プレストレスト コンクリート舗装の一考察

岡 田 清*

1. 緒 論

プレストレスの原理をコンクリート舗装に応用したのは、1946年フランスのLuzancyにおける長さ24.9m、20mの道路が最初であり¹⁾、以後欧米の各国で試験舗装が施工され、全長400mにおよぶものも出現している。わが国でも本年(1958年)2月、大阪市において長さ60m、40m二面の本格的なプレストレスト コンクリート舗装(以下PC舗装と略称する)の完成をみた。PC舗装は普通のコンクリート舗装と同じような特性をもつほかに、それ独特の利点、欠点を有しているが、他のPC構造に比して比較的未開発の分野であり、今後の研究成果に期待するところが多い。しかし現在までに行なわれた試験成績はきわめて良好であり、わが国でも高速自動車用の高級舗装、あるいは超大重量のジェット機用滑走路、誘導路等の建設には参考とすべき点が多い。本文においては現在までの研究、発展の経過の概略を述べ、PC舗装の将来性についてふれてみたい。

2. コンクリート舗装破壊の原因

普通コンクリート舗装を破壊に導く大きな要因は2つある。その1つは版に生ずる大きな引張応力によるキレツ発生、それに引続いて起こる版、路盤の全面的破壊であり、他の1つは弱所である目地の存在により誘起される舗装の破壊である。諸外国で広く施工されている鉄筋コンクリート床版では、その長さが30~50mくらいまでであれば、キレツが発生してもその全部が常に舗装版の破壊を招くとは限らないが、無筋コンクリート版ではキレツの発生は最後には版の破壊へと進行する。しかしいづれにしろキレツは好ましくなく、これを防止すべきであり、同様に目地もこれを全然なくすることはできなくても、できるだけその数を減らしうれば、コンクリート舗装の弱点は大いに改善されるであろう。

3. PC舗装の利点および欠点

PC舗装では目地数を減らし、キレツ発生を防止ないしは抑制することができる。目地数の減少はまたそれだけ経済的となり、施工を容易にし、かつ乗心地を快適にする。キレツの減少ないしは絶無は必然的に舗装の寿命の延長となり、維持費は減少する。そのほか版厚を薄く

できる。またそれにより版の表裏面の温度差を小にし、これによる応力を減少できる。外荷重による応力の分布を良好にし、版断面の抵抗力をフルに発揮させうる、等の利点がある。一方欠点としては一般に複雑な施工技術を要し、経験が浅いためその効果に不確実性がある。水平あるいは鉛直面の曲線部施工がやや困難であり、さらに一度施工したのちでは、舗装下にある埋設管の取換え、修繕等の工事が困難である、等をあげることができる。しかしながらこれらの欠点は新工法の出現には常にともなつてくる問題であつたり、あるいは総合的な企画設計によつて、ある程度克服できるものであつて致命的なものではない。

つぎに前述したPC舗装の二大利点について、もう少し考察してみよう。

(1) キレツの減少について

現在の施工方法では、舗装版にプレストレスを導入する以前に、コンクリートの収縮、版のソリあるいは施工時の移動荷重、等によつてキレツの発生するのを必らずしも防止できない。しかしいままでの経験によれば、これらの小さい初期キレツはプレストレスを導入すれば、たいてい閉じるもので、以後の版の耐荷能力を大して低減させるものではない。舗装後のキレツについても以下述べるような特徴がある。

(a) 輪荷重またはソリによつてたとえキレツが生じたとしても、輪荷重が去りまたはソリが減少すればキレツは再び閉じる。

(b) プレストレスが与えられているため、たとえキレツが入つた断面でも、曲げモーメントおよびせん断力をかなり有効に伝達することができる。

(2) 長舗装版をつくりうることに

プレストレスを導入することにより長い舗装版を作ることができるが、このさい路盤の拘束により誘起される応力の増大がとくに問題となる。後述するように輪荷重あるいは版のソリによる応力は、ある一定長以上の版では、版長に関係がないが、路盤摩擦応力は版長に密接な関係をもつ。したがつてPC舗装においては、この路盤摩擦の影響を無視できない。

4. コンクリート舗装版に生ずる応力

コンクリート舗装版に生ずる応力については、古くから多くの研究があり、種々な提案、公式が示されている。

* 正員 工博 京都大学教授、工学部土木工学教室

が、以下の3種の応力が生ずることについては異論がない。

(1) 温度変化および硬化収縮にともなう応力

温度変化による版の伸縮およびコンクリートの硬化収縮による版の縮みは、版と路盤との摩擦により拘束をうける。いま摩擦係数 λ が版全長にわたり一定と仮定すれば、版端から x の距離にある断面に生ずる応力は

$$\sigma_f = \pm \frac{\lambda h \rho x}{h} = \pm \lambda \rho x$$

(ρ : コンクリートの比重, h : 版厚)

$\rho = 2.4 \text{ t/m}^3$, $\lambda = 0.5, 1.0$ に対し σ_f は表-1のごとくである。

表-1 σ_f (kg/cm²)

| 版長 l | 100 m | 150 m | 200 m |
|-----------------|----------|----------|----------|
| $\lambda = 0.5$ | ± 6 | ± 9 | ± 12 |
| $\lambda = 1.0$ | ± 12 | ± 18 | ± 24 |

版長が十分長いときは、例えば $\Delta t^\circ\text{C}$ だけ版が温度変化をうけたとき、版端よりある距離 x_B における版の膨脹(あるいは収縮)が、これに対抗する路盤摩擦による拘束と釣り合う場合がある²⁾。すなわちその点では

$$\lambda \rho x_B = E_c \cdot \alpha \cdot \Delta t \quad \therefore x_B = \frac{E_c \alpha}{\lambda \rho} \Delta t$$

ここに E_c : コンクリートの弾性係数

α : コンクリートの温度膨脹係数

いま $E_c = 300\,000 \text{ kg/cm}^2$, $\Delta t = 20^\circ\text{C}$, $\alpha = 10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\rho = 2.4 \text{ t/m}^3$, $\lambda = 0.5$ とすると $x_B = 500 \text{ m}$ となる。したがって、この場合版長が 1000m 以上では、版の中央部近くは変形が完全に拘束され、一定応力 $E_c \alpha \Delta t$ を保持することになる。

λ の値については昔から多くの研究があるが、とくに PC 舗装に関連して英国の道路研究所では、さかんな研究を行なっており、 $\lambda = 1.5$ を用いるようすすめている³⁾。ACI の 325 委員会報告でも摩擦係数について新しい提案をしているが⁴⁾、これは上述のような場合はもちろん、プレストレスを導入するさいの摩擦応力を求めるにも便利な方法であり、これについての詳細は著者らの報告⁵⁾を参照されたい。

(2) 版の表裏面の温度差および収縮差による応力

表裏面の温度差あるいは収縮差による版のソリは版の自重によつて抑制をうけ、また版内の温度勾配の不均一性により応力を生ずる。温度差、収縮差は気候、版厚により異なるが、ドイツの Autobahn では版厚 22 cm に対し 18°C ⁶⁾、米国では日中では版厚 2.5 cm (1 in) については 1.7°C (3°F)、夜間では 0.6°C (1°F) の温度勾配があるという⁴⁾。わが国でも 20 cm 厚のとき 18°C が記録されている⁷⁾。版幅が広くかつ版長が十分の場合には、版の中心部においてはこれら表裏面の温度差による応力は

$$\sigma_d = \frac{E_c \alpha \theta}{2(1-\mu)} \quad (\theta: \text{温度差}, \mu: \text{ポアソン比})$$

で計算される。たとえば $E_c = 300\,000 \text{ kg/cm}^2$, $\alpha = 10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\theta = 18^\circ\text{C}$, $\mu = 0.15$ のとき $\sigma_d = 31.8 \text{ kg/cm}^2$ となる。表面温度の方が高いとき裏面では引張応力として生じ、逆の場合は表面の引張応力となる。収縮差も同様の効果を示す。これらは普通の場合 $25 \sim 35 \text{ kg/cm}^2$ の値となり、かなり大きいことは注目すべきである。

(3) 輪荷重による応力

輪荷重による曲げ応力については諸種の算式によりかなりの精度で推定できる。一例をあげると⁸⁾、

(a) 荷重が版の隅角部にある場合 (Arlington の半実験公式) 補強されない隅角部に対し

$$\sigma_l = \frac{4.2 P}{h^2} \left[1 - \frac{\sqrt{a/l}}{0.925 + 0.22 a/l} \right]$$

(b) 荷重が版の中央部にある場合 (Teller & Sutherland の修正式)

$$\sigma_l = 0.275 (1 + \mu) \frac{P}{h^2} \left[\log_{10} \left(\frac{E_c h^3}{k b^4} \right) - 0.4363 \right]$$

(c) 荷重が版の縁にある場合 (Teller & Sutherland の修正式)

$$\sigma_l = 0.529 (1 + 0.54 \mu) \frac{P}{h^2} \left[\log_{10} \left(\frac{E_c h^3}{k b^4} \right) + \log_{10} \left(\frac{b}{1 - \mu^2} \right) - 1.0792 \right]$$

ただし P : 輪荷重, h : 版厚, a : タイヤの接地面積に等しい円の半径, k : 路盤の支持力係数,

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

$$b = \sqrt{1.6 a^2 + h^2} - 0.675 h \quad (a < 1.724 h),$$

$$b = a \quad (a > 1.724 h)$$

以上らの算式によつて計算される応力は、普通の道路の場合、版長の中央で約 $20 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ 、版端および版縁で $30 \sim 35 \text{ kg/cm}^2$ である。なお超大量の航空機荷重による応力については、最近米国ではさかんな研究が行なわれている。

以上 (1), (2), (3) の3つの最大応力が同時に起こる場合はまれであるとしても、そのときには版には $50 \sim 70 \text{ kg/cm}^2$ の引張応力が起こり、普通コンクリートの場合にはその引張強度以上となり、版にキレツが入る公算はきわめて大きい。

5. 導入プレストレスの大きさ

コンクリート舗装版に生ずるキレツを完全に防止するには、前述の $50 \sim 70 \text{ kg/cm}^2$ の引張応力を全く打消すにたるプレストレスを導入すればよいといえる。一般的に言えば、前記応力は実際には圧縮、引張りの両方に生ずるから、圧縮、引張りに対し等しい安全率 1 をもたすとして、理論的に導入しうる最大のプレストレス $\sigma_{p \max}$

を求めると、

$$\sigma_{p\max} = \frac{1}{2}(\sigma_c' - \sigma_t')$$

ただし σ_c' ; σ_t' はコンクリートの圧縮および引張強度
しかし実際は引張りに対してはより大きい安全率をも
たすべきであるから、これを2にとると

$$\sigma_p = \frac{1}{3}(\sigma_c' - 2\sigma_t')$$

版には曲げ引張りが起こることが多いから、いま σ_t'
としては曲げ引張強度をとるとし、普通の場合として
 $\sigma_t' = \frac{1}{8}\sigma_c'$ と仮定すると

$$\sigma_p = \frac{1}{4}\sigma_c'$$

となる。したがって PC 用高級コンクリートとしては、
 $\sigma_c' = 350 \sim 400 \text{ kg/cm}^2$ を用いれば $\sigma_p = 90 \sim 100 \text{ kg/cm}^2$ 、
普通の道路用コンクリートとして $\sigma_c' = 280 \sim 300 \text{ kg/cm}^2$
を用いれば $\sigma_p = 70 \sim 75 \text{ kg/cm}^2$ が導入しうるプレスト
レスの限度である。

現在までの多くの実験によれば、上記値以下のプレ
ストレスを与えた場合でも、その効果はすこぶる満足す
べきものがあり、キレット防止に最も経済的なプレスト
レスの大きさについては十分な討議がなされていない。

いま版厚 h の舗版の単位幅について P なるプレ
ストレスを導入したとすれば、これによる応力は $\sigma_p = \frac{P}{h}$
となる。

したがって断面コンクリートは引張りに対し

$$R_t = \sigma_t' + \frac{P}{h} \dots\dots\dots (1)$$

なる抵抗強度を有する。版に生ずる前述の3種の引張
応力 σ_f , σ_d , σ_t の最大合応力は

$$\sigma_t = \sigma_f + \sigma_d + \sigma_t \dots\dots\dots (2)$$

引張破壊に対する安全率を S_t とすると

$$S_t = \frac{R_t}{\sigma_t} = \frac{\sigma_t' + P/h}{\sigma_f + \sigma_d + \sigma_t} \dots\dots\dots (3)$$

前に示したように σ_f は版長 l の関数であつて h の関
数でなく、 σ_d は Westergaard の公式では h に無関係
であるが、Thomlinson 等の研究⁹⁾によれば、ある限度
までは h の関数として表わしうる。 σ_t は h の関数で一
般には前述のように

$$\sigma_t(h) = \frac{A(h)}{h^2} \dots\dots\dots (4)$$

と表わしうる。

ここで S_t を h の関数としてこれを最大にする P を
求めると $\frac{dS_t}{dh} = 0$ より

$$\sigma_t \frac{dR_t}{dh} - R_t \frac{d\sigma_t}{dh} = 0$$

いま h の代りに $1/h$ の関数として書きなおすと

$$\sigma_t(1/h) \frac{dR_t}{d(1/h)} - R_t \frac{d\sigma_t}{d(1/h)} = 0$$

これに (1)~(4) 式を用いて

$$P \sigma_t = R_t \left[\frac{d\sigma_d}{d(1/h)} + 2\sigma_t h + \frac{1}{h^2} \frac{dA}{d(1/h)} \right]$$

さらにこれを変形して

$$\frac{\sigma_t}{S_t} = 2\sigma_t - \frac{1}{h} \frac{dA}{dh} - h \frac{d\sigma_d}{dh}$$

A , σ_d は、一般に h の増加とともに増大するから、
 $\frac{dA}{dh}$, $\frac{d\sigma_d}{dh}$ はともに正であり、 $\frac{\sigma_t}{S_t} < 2\sigma_t$ である。 A 、
 σ_d については h の関数としていま明確な値を与えるこ
とはできないが、 $A(h)$ は $l = \sqrt[4]{\frac{E_c h^3}{12(1-\mu^2)k}}$ に比例し
て増大し、 σ_d も h の一次関数で表わしうるとし、

$$A(h) = Bh^3/4, \sigma_d = Ch \quad [B, C: \text{常数}]$$

とすると

$$\frac{\sigma_p}{S_t} = 2\sigma_p - \sigma_d - \frac{3/4 \cdot B}{h^{3/4}} \dots\dots\dots (5)$$

となる。

以上は理論的な一考察であるが、ドイツでは⁹⁾ 従来の
経験より考へて、プレストレスの大きさは路盤摩擦によ
る応力と温度(収縮)差応力の一部とを打消すように選
べば十分であるとし、例えば良質の道路用コンクリート
では曲げ引張強度として $40 \sim 60 \text{ kg/cm}^2$ は期待できる
から、20 cm 厚、120 m 長の版で、路盤も均等良質なら
ば、 $20 \sim 25 \text{ kg/cm}^2$ のプレストレスを与えればよいとい
う。英国では⁹⁾ 独立床版型の場合では、路盤摩擦による
応力のため生ずるキレットは完全に防止するが、交通荷重、
ソリ応力によるキレットはある程度許してもよいとし、版
長方向の有効プレストレスとして $7 \sim 14 \text{ kg/cm}^2$ を確保
すればよいという。大阪市施工のものは版長方向に有効
約 25 kg/cm^2 のプレストレスを与えるよう設計された。
各種試験舗装における値については表-2を参照された
い。版の幅方向についてはプレストレスの必要性ある
はその大きさ等についてはまだ種々な意見があり、一定
していない。普通コンクリート版では、輪荷重のみによ
つて、版厚 18 cm くらいでは目地部に、版厚 15 cm 以
下では内部でも 20 kg/cm^2 以上の幅方向引張り応力が発
生すると思われる。これに反し幅方向のソリ応力は版幅
が $3.5 \sim 4 \text{ m}$ 、すなわち一車線幅以下では長さ方向ほど
には大とならないであろう¹⁰⁾。したがって版厚 15 cm
であれば、この場合は幅方向プレストレスは横目地付近
のみ与えておけばよい。縦目地なしで版幅が 8 m にも
なれば幅方向でもソリ応力は大となり、版厚 23 cm で
 30 kg/cm^2 くらいの合成応力は容易に生ずるから、横締
めは当然必要となる。しかしこれら横締めは版に生ずる
引張り応力を減らすというよりも、むしろプレストレス
により縦方向のキレットを閉じるようにするという考へで
行なわれるべきである。ドイツでは一車線幅のとき路盤
良好ならば横締めは不要であり、これ以上の幅、または
従来の狭い幅員を拡げ舗版の一部が、たわみやすい路盤
上にある場合は必要となり、この場合与えるべきプレ

表-2 現在までのプレストレスト コンクリート舗装

| 施工年月 | 施工場所 | 長さ (m) | 幅 (m) | 厚さ (cm) | プレストレストの大きさ | | プレストレスト導入方式 | 現状 |
|------|---------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|--|--------|
| | | | | | 縦方向 (kg/cm ²) | 横方向 (kg/cm ²) | | |
| 1946 | Luzancy (仏) | 20 24.9 | 6 | 縁 16 中央 20 | 21~17 21~17 | 21~17 21~17 | ケーブルを床版軸に対し 45° の斜方向に配置 | 不明 |
| 1947 | Orly 飛行場 (仏) | 420 | 60 | 16 | 33.5 | 33.5 | 横方向ケーブル, 三角形床版および両端アバットメント | 良 |
| 1949 | Esbly (仏) | 48.9 | 6 | 15 | 16 | 16 | ケーブルを床版軸に対し 45° の斜方向に配置 | 良 |
| 1949 | Chicago (米) | 44 | 29.2 | 7.6 | 49.2 | 45.7 | 縦方向鋼線, 横方向ストランド | 良 |
| 1950 | Crowley, Sussex (英) | 123 | 7.3 | 15 | 14 | 1.8 | ケーブルを床版軸に対して 18 ¹ / ₂ ° の斜方向 | 良 |
| 1950 | Caselle 飛行場 (伊) | 11.6 | 10.9 | 10 | 40 | 40 | ケーブルを床版軸に対し約 30° の斜方向, 一部鋼棒, 縦および横ケーブル直交 | 不良 |
| 1951 | St. Leonards (英) | 3×122=366 | 7.3 | 15 | 19.6 | 1.0 | 縦, 横ケーブル | 不良 |
| 1951 | Wexham Spring (英) | 33.5 39.6 38.8 | 3.0 3.0 3.5 | 15 15 15 | 13.3 6.3 7.8 | | 縦方向ケーブル | 良 |
| 1951 | London 飛行場 (英) | 108 | 36.6 | 16.5 | 38.5 | 38.5 | 横方向ケーブル, 三角形床版および両端アバットメント | 良 |
| 1951 | John Laing's Ltd (英) | 15×55=825 45.7×2=91.5 | 3.7 4.5 | 25.4 15.2 | 28.7 21.0 | | 縦ケーブル | 良 |
| 1951 | Shipol 飛行場 (和) | 41.5 | 41.5 | 14 | 48 | 48 | ケーブルを床版軸に対し約 30° の斜方向, 一部鋼棒, 縦および横ケーブル直交 | 良 |
| 1952 | Basildon (英) | 4×50.3=200 | 5.5 | 15.2 | 19.6 | | 縦ケーブル | 良 |
| 1952 | Woolwich (英) | 1020 | 5.5~7.3 | 15.2 | 19.6 | 2.0 | 斜ケーブル | 良 |
| 1953 | Orly 飛行場 (誘導路) (仏) | 430 | 25 | 18 | 77~33 | 18.0 | 縦: フラットジャッキ 横: ケーブル | 良 |
| 1953 | Bourg-Servas (仏) | 300 | 7.0 | 12 | 37.0 52.0 | 15(最終) | 縦: フラットジャッキ 横: 一部ケーブル | 不明 |
| 1953 | Airstation (米) | 152.5 | 3.66 | 18 | 21.0 | 一部 16.8 | 縦: ストランド 横: 一部ストランド, 一部鉄筋 | — |
| 1953 | Heidenheim (独) | 111 111 111 | 8.5 8.5 8.5 | 15 15 縁 20.4 中央 15 | 21.0 16.8 26.2 | 9.0 3.0 8.8 | 縦および横ケーブル | クレック発生 |
| 1954 | Port Talbot, S. Wales (英) | 5×91.5=458 30.5+122 +30.5 | 6.8 | 15 | 15.4~23.1 | 0~2.5 | ケーブルを床版軸に対し 30° の斜方向に配置 縦および斜ケーブルにシブ ジャッキ使用 | 良 |
| 1957 | Pittsburgh (米) | — | — | 12.7 | | | Leonhardt 方式採用 | — |
| 1956 | 山梨県大月市 (日) | 10.6 | 4.4 | 中央 12 縁 20 | 32 | | 床版軸に対して 45° 斜方向にケーブル | — |
| 1956 | 京大工学部構内 (日) | 12 | 3 | 10 | 16.7 | | 縦方向, 鋼棒 | — |
| 1957 | " | 12 | 2 | 15 | 16.7 | | " | — |
| 1958 | 大阪市 (日) | 60 40 | 6 11 | 15 15 | 25 25 | 6 8 | 縦ケーブル, 横鋼棒 ケーブルを床版軸に対し約 30° の斜方向, 一部鋼棒, 縦および横ケーブル直交 | — |

トレスの大きさは、荷重、版幅によつて異なるが、つぎの標準でよいという⁶⁾。

版幅 6 m 以下なら 8~10 kg/cm²
 " 6~12 m " 10~14 "
 " 12 m 以上 " 14~20 "

横締めを行なうときは施工がさらに複雑となる。

6. プレストレストの導入方法

舗版にプレストレストを導入する方法は大別してつぎの2つがある。

(1) 独立床版型 (2) 連続床版型

(1) は版が膨張目地によつて独立に分離されており、プレストレストは普通の PC 構造物と同様に鋼線、ケーブル、鋼棒等によつて導入されるものである。温度変化に応じ各版は比較的自由に膨張、収縮することができ、導入されたプレストレストは略盤摩擦、クリープ、収縮によるいくぶんかの減少はあるがほぼ一定値を保つ。(2) は版の両端に固定したアバットを造り、ジャッキが入る幅だけすき間を残して版を打設し、両アバットに対しジャッ

キで版を押しつけてプレストレストを導入し、そのままの状態ですき間を埋めてしまう方法である。この場合、版は膨張できないので導入された応力は一定値を保たず、温度(湿度)変化に応じ変化する。したがって夏期に版が膨張するときは、版に生ずる最大圧縮応力はコンクリート圧縮強度の 1/3 以上にも達し、版の座屈の危険性がある。逆にクリープが進行したり、冬期に版が収縮するときは、有効プレストレストは大きく減少し、このときでも最小残留応力は PC 舗装として有効な大きさだけあるように設計しておかねばならない。

また (2) の方法ではケーブル等を必要としないが、アバットの建設費がかさむ。しかしこれは版長に無関係であるから、版長が非常に長いときは経済的ともなる。アバットをなるべく小さくするため、弾性的アバットを用いる試みもあるが⁶⁾、これはプレストレストの減退が大きく実用はむづかしい。

なお立面曲線部に (2) の方法を用いる場合は、その曲率半径は約 1000 m 以上としないと座屈の危険性がある。平面曲線部ではジャッキの推力により版が曲線外へ

押しやられる傾向があるから、曲率半径 350 m 以下の場合には、この部分だけ (1) の独立床版型を用いるべきである。

これに反し (1) の方法は直線部はもちろんある程度の曲線部でも用いるし、版自身も弾性的に安定している。ケーブル等を使用するので、この点高価につくが、特殊な場合を除き、この方法が良好であろう。実際施工に当つては、図-1 に示すような方法がある。(a) は最も簡単であるが、一ケーブル長が長く、ケーブルの摩擦による緊張力の減少が大であり、またケーブルを緊張するためのすき間を版端に残しておかないと、連続してつぎの版が打設できない。この不利をさけるため (b), (c), (d) のような方法が試みられるのである¹¹⁾。大阪市施工のものは (a), (b) の方法が用いられ、とくに (b) では版端にもケーブル定着端を設けてあるが、これはケーブルの極端な曲線配置による摩擦減少をさけるためである。このほかフランスの Orly 飛行場の滑走路に用いられたような特殊な三角床版並列による連続床版型、あるいはジャッキによらずカサビ形を用いてプレストレスを与える方法等諸種の案⁹⁾があるが、詳細は文献によらねたい。

7. 導入されたプレストレスの分布

版に導入されたプレストレスの分布の理論的な解析は複雑である。英国で行なわれた $13.3 \times 3.3 \times 0.15$ m ($40' \times 10' \times 6''$) の試験版での実験によると⁹⁾、その結果は Guyon の表より得られる値とよく一致し、ケーブル1本の場合は版幅だけ対称に2本入れた場合は版幅の1/2だけ、3本入れた場合は、版幅の1/4だけ版端から内部に入つたところ以てはほぼ均一な応力分布を示したという。図-2

図-2 プレストレス導入によるヒズミ分布 (実験版 $40' \times 10' \times 6''$)

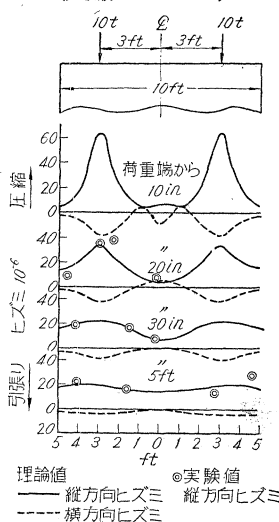
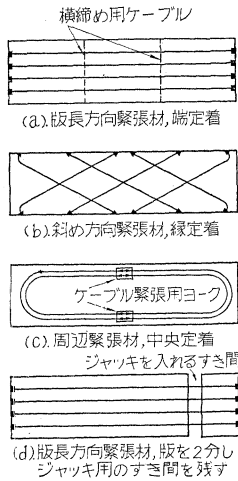


図-1 緊張材の配置



はその一例を示す。これを確かめるため光弾性実験も行なわれている。筆者らが $12 \times 3 \times 0.10$ m の試験版について行なつた実験でも⁹⁾、ほぼ同様のことが確認されている。ケーブルが斜交して配置された場合には、応力分布はさらに複雑となるが、定着端近くを除けば、かなり一様な応力の導入しうることは、大阪市の PC 舗装でも実測されている。

定着端付近ではケーブル緊張により発生する引張応力に対して適当な用心鉄筋を配置し、その範囲はケーブルにそい、少なくともケーブル配置間隔以上の距離にわたつて行なうのがよい。

8. PC 舗装の経済性およびその将来

前述の種々な利点のため PC 舗装が用いられようとしても、一般的にはこのほかに経済的考慮が加えられなければならないのは当然である。

いま下部構造としての路床、路盤の準備は普通コンクリート舗装の場合とくらべて、なんら特別の設計は必要でないと仮定し、舗装版の建設のみについて若干考察しよう。プレストレスを与えることによつて、同条件で設計される普通コンクリート版よりも版厚をへらすことができる。版厚 h 、コンクリートの曲げ引張強度 σ_b とすると、普通コンクリート版の断面抵抗モーメントは

$$R = Kh^2 \sigma_b \quad (K: \text{常数})$$

である。いま断面単位幅あたりにプレストレス P を導入して、版厚が $h' = \epsilon h$ ($0 < \epsilon < 1$) となつたとし、断面は同じ抵抗モーメントを有するとすると

$$R = Kh'^2 \sigma_b' = K \epsilon^2 h^2 \left(\sigma_b + \frac{P}{h'} \right) \dots \dots \dots (6)$$

上の2式より

$$\epsilon^2 \left(\sigma_b + \frac{P}{\epsilon h} \right) = \sigma_b \dots \dots \dots (7)$$

プレストレス P の単位長あたりの費用、すなわちケーブルを使用する際であれば、版の単位表面積あたりに設置され、緊張されているケーブルの費用を C_p 、単位プレストレス力を与えるために必要なケーブル単位長の価格を K_p とすると

$$C_p = K_p \cdot P$$

一方版厚の減少によつて版の単位表面積あたりに節約できたコンクリートの費用を C_c 、単位容積あたりのコンクリートの価格を K_{sc} とすると

$$C_c = K_{sc}(1 - \epsilon)h$$

したがつて

$$\frac{C_p}{C_c} = \frac{K_p \cdot P}{K_{sc} h (1 - \epsilon)}$$

式 (7) より

$$\frac{P}{\epsilon h} = \sigma_b \frac{(1 + \epsilon)(1 - \epsilon)}{\epsilon^2}$$

これを上式に代入して

$$\frac{C_p}{C_c} = \frac{K_p \cdot \sigma_b}{K_{sc}} \cdot \frac{1+\epsilon}{\epsilon}$$

ここで $\frac{K_{sc}}{\sigma_b} = K_c$ とすると、 K_c は単位引張力に対して抵抗するに必要なコンクリート断面積の単位長さあたりの費用である。したがって $\frac{K_p}{K_c} = \phi$ とおくと

$$\frac{C_p}{C_c} = \phi \frac{1+\epsilon}{\epsilon} \dots\dots\dots (7)$$

PC舗装が普通コンクリート舗装より経済的であるためには $C_p < C_c$ を要するから

$$\frac{C_p}{C_c} = \phi \frac{1+\epsilon}{\epsilon} < 1$$

しかるに $0 < \epsilon < 1$ であるから

$$\phi < \frac{1}{2}$$

であることを要する。

いま曲げ引張り強度 $\sigma_b = 30 \text{ kg/cm}^2$ のコンクリートを打設するとしてその価格を 6000 円/m^3 、鋼線としては使用応力 120 kg/mm^2 のものを用い、その設置、緊張作業をふくめた価格 200000 円/t とすると

$$K_c = \frac{K_{sc}}{\sigma_b} = \frac{6000 \text{ 円/m}^3}{300 \text{ t/m}^2} = 20 \text{ 円/tm}$$

$$K_p = \frac{200000 \text{ 円/t} \times 7.8 \text{ t/m}^3}{120000 \text{ t/m}^2} = 13 \text{ 円/tm}$$

$$\therefore \phi = \frac{13}{20} = 0.65 > \frac{1}{2}$$

となり、PC舗装は高価となる。普通コンクリートと経済的に競走するためには少なくとも $K_p = 10 \text{ 円/tm}$ とする必要がある。英国では鋼の使用応力は普通のPC構造におけるよりも高くとり、ほとんど降伏点近くまで高めていることもあるが¹²⁾、これは上記 K_p の値を小さくするためと、舗装においては例えば橋梁ほど高い安全率を必要としないと考えているためである。

なお上述の考察ではPC舗装断面の抵抗モーメントを式(6)で与えているが、普通コンクリート版と異なり、PC舗装断面の終局強度はこの値よりも大きい等の利点は無視されていることに注意しておかねばならない。

しかしながらPC版の所要厚さは、独立床版型では、実際には応力によるよりは、むしろケーブルに十分のかぶりを与えるという条件によつて支配され、ケーブルが交さる場合には最小約 15 cm 、一方向のみに配置されるときは $12 \sim 13 \text{ cm}$ を必要とする。また版の弾性タワミの増加についても注意しなければならない。例えば $h = 10 \text{ cm}$ 、 $k = 5.5 \text{ kg/cm}^3$ のとき、中心荷重として 4.5 t の輪重がのると応力は 35 kg/cm^2 程度で、プレストレスを導入して優にこれに対抗できるが、版は荷重下で路盤へ約 1.3 mm 沈下する。したがって、このようなタワミをくり返さうけると、路盤が永久変形を起こすおそれがあり、これを避けねばならない。

オーストラリアではジェット機の輪重 34 t に対し、発射火焰から保護するためにアスファルト滑走路の表面に 5 cm 厚のPC舗装を施工し、その成績は良好であるという。米国では 23.5 cm 厚の無筋コンクリート基礎版に 7.5 cm 厚のPC版を施工した倉庫が、 10 t の移動荷重に対し4年間毛状キレツもなく、最近では滑走路に対し 57 cm 厚のアスファルト、 25 cm のコンクリート基礎版の上に、それぞれ 18 cm 厚のPC舗装を行なつて、無筋コンクリート版のみの場合との比較研究も行なわれている。

鉄筋コンクリート舗装版では、縦鉄筋として $2.5 \sim 5 \text{ kg/m}^2$ 、連続版では 5 kg/m^2 、断面積でいえばそれぞれ $0.2 \sim 0.3\%$ 、 0.5% 程度が用いられるが、PC舗装では一般に $3 \sim 5 \text{ kg/m}^2$ の高級鋼が用いられている。従つて質は異なるが、ほぼ等量の鋼が用いられていることになる。しかし普通版の場合は $5 \sim 15 \text{ m}$ に収縮目地、 $20 \sim 100 \text{ m}$ に膨張目地を入れねばならないのにくらべ、PC版では独立型でも $60 \sim 200 \text{ m}$ は目地なしにすむ。したがって目地施工の費用は激減するから、施工技術の発展とともにPC舗装の施工費はより安価にならう。事実、英国では鉄筋コンクリート版の建設よりも安く見積られることもあるという⁹⁾。

ちなみに独立型のPC舗装における目地について一言すると、理論上からは版長に応じて相当に大きな目地幅を持たせる必要がある、その構造についても研究が行なわれているが、全長 140 m 近くの版でも、その膨張目地幅は版の両端で 32 mm もとつておけばよいといわれている¹²⁾。

米国での研究によれば一床版長としては $130 \sim 200 \text{ m}$ が経済的であるというが¹⁰⁾、これは国内の諸事情によつて相異なるであろう。

以上要するにPC舗装としてはキレツ発生の防止ないしは抑制、目地数の減少による舗装の改良、維持費の軽減に主眼が置かれるべきであり、舗装の寿命の延長とあいまつて、当初建設費の若干の増大は、容易に補償される可能性が多いと思われる。

10. 結 言

今回わが国で最大のPC舗装が大阪市に完成されたのを機会に、現在までに行なわれた内外のPC舗装に関する研究の概要を述べたが、本文ではその対象を主として道路舗装に限定し、一考案を試みた。しかし将来発展を予想される超大重量の航空機に対して、滑走路等にはPC舗装を用いることの必要性も増大するであろう。とくにアスファルトあるいは普通コンクリート基礎版の上にPC舗装を用いる方法が注目をあびることと思う。

PC舗装に関し現在最も必要なことは、さらに豊かな経験を積むことである。とくに施工機械、プレストレス

導入方法、施工方法等について多くの研究、経験が積み重ねなければならない。これらが進歩するときPC舗装は名実ともに従来舗装の一大改良となりうるであろう。

参考文献

- 1) H. Dollet & M. Robin: La dalle d'essai de Bourg-Servas, Extrait de La Ronte, 1953, および La route experimentale en beton precontraint de Bourg-Servas, Extrait de Travaux, Jan. 1954
- 2) B.F. Friberg: Frictional Resistance under Concrete Pavements and Restraint Stresses in Long Reinforced Slabs, Proc. H.R.B., Vol. 33, 1954, pp. 167-184
- 3) J.P. Scott: Prestressed Concrete Roads, Advanced Copy for discussion, session 1954-55, The Institute of Civil Engineers
- 4) J.D. Lindsay: Design Consideration for Concrete Pavement, Reinforcement for Crack Control Report of ACI Committee 325, J. ACI., Vol. 28, No. 4, 1956, pp. 337-362
- 5) 近藤泰夫・岡田 清・外 2名: プレストレスト コンクリート舗装に関する研究, 土木学会論文集 No. 49, 昭 31. 3, pp. 1-8
- 6) F. Leonhardt: Spannbeton für Praxis, Berlin 1955, pp. 395-408
- 7) 近藤泰夫・坂 静雄 編集: コンクリートハンドブック, 昭 32.10, p. 337
- 8) 例えば谷藤正三: コンクリート舗装の設計, 昭 31.8 pp. 116-135 参照
- 9) Thomlison: Temperature variations and consequent stresses produced by daily and seasonal temperature cycles in concrete slabs, Conc. & Censtr. Eng., June & July 1940, pp. 298-307, 352-360
- 10) B.F. Friberg: Pavement Research, Design and Prestressed Concrete, Proc. H.R.B., Vol. 34, 1955, pp. 65-84
- 11) P.B. Morice: Prestressed Concrete Pavements, Factors Involved in their Design and Construction, Roads and Road Construction, June 1953, pp. 164-68
- 12) A.J.W. McIntosh & J. Mercer: Construction of a prestressed concrete road at Crawley New Town, Proc. the Institution of Civil Engineers, Part II, Feb. 1952, pp. 220-234
- 13) F.M. Mellinger: Prestressed Concrete Airfield Pavements, Proc. World Conference on Prestressed Concrete, July 1957, A 24-1-10

日本工学会手帖(1959年版) 予約申込みについて

例年のとおり本年も発行しますから希望者は予約申込み願います。

| | | | |
|-----------|---------------------|-----------|---------------------|
| 1. 寸 法 | 15×9.5 cm | 4. 予約申込場所 | 土木学会または日本工学会 |
| 2. 定 価 | 170 円 (送料とも 180 円) | 5. 予約金支払日 | 昭和 33 年 11 月 30 日まで |
| 3. 予約申込期日 | 昭和 33 年 10 月 31 日まで | 6. 手帖発送期日 | 昭和 33 年 12 月 1 日より |

東京都千代田区神田佐久間町 1 の 11 社団法人 造船協会内 社団法人 日本工学会 振替口座 東京 5055 番 電話 神田 (25) 4358 番

橋梁工学の決定版!! 【全3巻】

新橋梁工学

小池啓吉・小池修二共著

本書は、永年実務面に携って来た著者が、全知識とその豊富な経験を傾けて、全く新しく書き改めたものである。理論だけに走らず、特に設計の実務的な応用面に重点を置き、多数の優れた設計例、付図、写真、資料を収めて徹底的にかつ詳細に解き明かしたものである。広く技術者学生諸彦の必読書として自信をもっておすすめする。なお、ひき続いて刊行する第2巻、第3巻では、単トラス橋・合成桁橋・不静定構造の一般的取扱、不静定構造物のアーチ・吊橋などを取り扱う。

特 色 1. 各種の新示方書に規定された事項を完全に守り、これによる設計計算の完璧を期した。2. 溶接工の新技術についても力を入れて解説した。3. 設計計算に必須の数値表、図表類を豊富に入れかつその用法を詳説した。4. 合成桁の実例をできるだけ多く収めた。5. 優れた設計例を豊富に取り入れ、詳細に図示解説した。

内 容 概 略 1. 総論 (橋梁の種類寸法, 荷重, 許容応力など) 2. 単桁橋 (応力・木桁橋とその構造・設計実例, リベット接合, 溶接, 圧延桁橋とその設計実例*

第1巻 単桁橋

絶賛発売中

〔A5判 極上製函入〕
540頁 附図12 価1000円

*プレートガーダーとその設計実例など

付録——道路構造令, 国有鉄道建設規程, 鋼鉄道橋設計示方書, 鋼道路橋設計示方書, 鋼道路橋製作示方書, 鉄筋コンクリート標準示方書, 溶接鋼道路橋示方書, その他6件。

実用解析学の決定版!!

工博 谷本勉之助著 (最新刊)

実用 数値計算法

(A5・p320・函入・¥550・¥50円)

多方面における数値計算法の各種の詳細と精密な方法を、例題を適所に設けて解き進めている。巻末には卓上計算機の能率的な使用方法を懇切に解説し、各方面での実際計算への活用を図つた。

森北出版株式会社

東京・神田・小川町3の10
振替東京34757 電(29)2616