

特別講演 I

プレストレストコンクリート舗装

西林新蔵*

1 まえがき

プレストレスの原理をコンクリート舗装に適用したのは、1946年フランスのLuzancyにおける長さ24.9m、幅20mの道路が最初であり、以後わが国では京都大学における一連の研究、大阪市における本格的な試験舗装を経て、現在では、一般道路だけではなく飛行場の施設にもその技術が応用されるようになった。

筆者は京都大学の学部卒業研究でプレストレストコンクリート舗装に取り組み(「プレストレストコンクリート舗装に関する研究、昭和32年(卒論番号1510)」)、その後1958年大阪市において実施された長さ60m、40mの二面の本格的なPC舗装の設計、施工および種々の試験に直接タッチした。ここでは当時を振り返りながら、先ず、PC舗装の概要について述べ、続いて京都大学と大阪市で行った試験舗装におけるプレストレス導入応力と載荷試験の結果について述べることにする^{1), 2), 3), 4)}。

なお、本文は、筆者が鳥取大学で行った、定年退官に伴う連続講義の第1回目の講義の抄録である。

2 PC舗装の特徴

(1) ひび割れの減少

PC舗装では目地数を減らし、ひび割れの発生を防止ないしは抑制することができる。輪荷重の、またはそりによってひび割れが生じたとしても、輪荷重がなくなり、またはそりが減少すれば、ひび割れは再び閉塞する。また、プレストレスが与えられているため、たとえひび割れが生じた断面であっても、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) 経済的な舗装

目地数の減少と床版厚の縮小はそれだけで経済的となり、施工を容易にし、かつ乗り心地を快適にする。ひび割れの減少、ないし抑制は必然的に舗装の寿命の延長につながり、維持費の減少を可能にする。

(3) 発生応力の均一化

* 鳥取大学名誉教授

大阪産業大学工学部土木工学科 教授

床版厚を薄くすることができるので、床版の表裏面の温度差が小さくなり、これによる応力が減少でき、さらに外荷重による応力分布を均一にして、床版断面の抵抗力を十二分に発揮させることができる。

(4) 長舗装版の施工が可能

プレストレスの導入によってより長い舗装床版を造ることができるが、この際、路盤の拘束によって惹起される応力、つまり路盤摩擦応力は床版長と密接な関係があるので、PC舗装においてはこの路盤摩擦の影響は無視できない。

一方、

(5) 水平あるいは鉛直面の曲線部施工がやや困難、

(6) 一度施工した後は、舗装下にある埋設物の取り替えや修繕等の工事が困難

などの施工上の問題点もあるが、これらは技術の進展とともに次第に解決されてきている。

3 コンクリート舗装版に生ずる応力

(1) 温度変化および乾燥収縮に伴う応力

温度変化による床版の伸縮およびコンクリートの乾燥収縮による床版の縮みは、床版と地盤との摩擦によって拘束される。

いま、摩擦係数 λ が版全長にわたって一定とすると、床版端から x の距離にある断面に生ずる応力は、

$$\sigma_f = \lambda \cdot \rho \cdot x$$

ここに、 ρ : コンクリートの比重

いま、床版が一様な温度変化を受けた場合、路盤の摩擦による最大応力は、 $\rho = 2.4t/m^3$, $\lambda = 0.5$ とすると、床版長が 100, 200, 300m のときそれぞれ 6, 9, 12 kgf/cm² となる。

床版長が十分長いときは、床版端からある距離 x_B における版の膨張(あるいは収縮)が、これに抵抗する地盤摩擦による拘束と釣合う点がある。床版が Δt °C だけ温度変化を受けたとき、 x_B は、

$$\lambda \cdot \rho \cdot x_B = Ec \cdot \alpha \cdot \Delta t \quad \therefore x_B = Ec \alpha \Delta t / \lambda \rho$$

ここに、 Ec : コンクリートの弾性係数、 α : コンクリートの温度膨張係数

いま、 $Ec = 3 \times 10^5$ kgf/cm², $\Delta t = 20$ °C, $\alpha = 10 \times 10^{-6}$ /°C, $\rho = 2.4t/m^3$, $\lambda = 0.5$ とすると、 $x_B = 500$ m となる。したがって、床版長が 500m 以上になると、床版の中央部付近では変形が完全に拘束され、一定応力 $Ec \alpha \Delta t$ が生ずることになる。

(2) 床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床版のそりは、床版の自重によって拘束を受け、また床版の温度勾配の不均一によっても応力が生じる。床版幅が広くかつ床版長が十分に長い場合には、これら表裏面の温度差による床版の中心部の応力は、

$$\sigma_d = E_c \cdot \alpha \cdot \theta / 2(1 - \mu)$$

ここで、 θ : 温度差、 μ : ポアソン比

いま、 $E_c = 3 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\theta = 20^\circ\text{C}$ 、 $\alpha = 10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、 $\mu = 0.15$ とすると $\sigma_d = 35.3 \text{ kgf/cm}^2$ となる。

表面温度の方が高いときには裏面で、逆の場合は表面でそれぞれ引張り応力が生じる。収縮差の場合も同様で、それによる引張応力の大きさは温度差による場合とほぼ同程度である。

(3) 輪荷重による応力

1) 荷重が床版の隅角部にある場合

補強されない隅角部に対し

Arlington の半実験公式

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

Sheets の式

$$\sigma_f = \frac{2.4WC}{d^2}$$

2) 荷重が床版の中央部にある場合 (Westergard の式)

$$\sigma_f = 0.316 \frac{P}{d^2} \left(4 \log \frac{l}{b} + 1.069 \right)$$

3) 荷重が床版の縁にある場合 (Taller & Sutherland の修正式)

$$\sigma_l = 0.275(1 + \mu) \frac{P}{d^2} \left[\log_{10} \left(\frac{E_c d^3}{k b^4} \right) + \log_{10} \left(\frac{b}{1 - \mu^2} \right) - 1.0729 \right]$$

1)、2)、3)において

a : 荷重接触面積等価円の半径、 c : 衝撃を考慮した係数、
 d : 床版厚、 k : 路盤の支持力係数、 P : 輪荷重、
 W : Sheets の式における輪荷重(静荷重)、

$$b = \sqrt{1.6a^2 + d^3} - 0.675d$$

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

通常の場合は、2)の Westergard の式による応力が最も大きくなる。

4 プレストレスの導入による床版のひずみ分布

いま、図-1 に示すような半無限大床版に集中荷重 P が縁端に直角に作用する場合を考えると、Airy の応力関数は次式で与えられる。

$$F_1 = \frac{P}{d\pi} r \varphi \cos \varphi = \frac{P}{d\pi} x \tan^{-1} \frac{y}{x}$$

ここで、 d : 床版の厚さ

この場合、床版内の任意の点の応力度は、それぞれ

$$\sigma_x = -\frac{2P \sin \varphi}{d\pi r} \cos^2 \varphi = -\frac{2P}{d\pi} \frac{x^2 y}{(x^2 + y^2)^2}$$

$$\sigma_y = -\frac{2P \sin \varphi}{d\pi r} \sin^2 \varphi = -\frac{2P}{d\pi} \frac{y^3}{(x^2 + y^2)^2}$$

$$\tau_{xy} = -\frac{2P \sin \varphi}{d\pi r} \sin \varphi \cos \varphi = -\frac{2P}{d\pi} \frac{xy^2}{(x^2 + y^2)^2}$$

で与えられるから、各荷重による応力度を重畳すれば全応力度が求められる。

一方、Guyon は、はりの一端に集中荷重が作用した場合のはり内の応力分布を表示している。これら両者から得られた値をプレストレス導入応力の理論値とし、次式で求めたひずみの理論値と実測ひずみとを比較検討することにした。

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y)$$

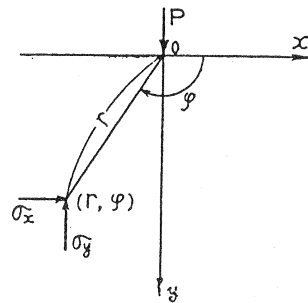
$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x)$$

ここで、 ε_x , ε_y : それぞれ横、縦方向のひずみ

σ_x , σ_y : それぞれ横、縦方向の応力

E : コンクリートの静弾性係数

図-1 床版端部の集中荷重



μ : コンクリートのポアソン比(0.15 と仮定)

5 路盤摩擦

PC舗装は、普通のコンクリート舗装に比して目地間隔が大きいのが特徴であるが、床版の一樣な温度変化あるいは乾燥収縮が路盤摩擦によって拘束される結果生じる引張応力は、床版が長いことによってかなり大きくなることが予想される。

今、幅に対して長さの長い床版を考え、床版に長さ変化が生じても床版中央では移動が全く生じないと仮定すると、床版中央から距離 x の点における摩擦抵抗応力は次式のようになる。

$$\sigma_x = F_x w \left(\frac{L}{2} - x \right)$$

ここに、 σ_x : 床版中央より x の点の摩擦抵抗応力、 $= wLF$

F_x : x 点と床版端間の平均摩擦係数

w : コンクリートの単位重量

L : 床版長

したがって床版中央における最大応力は、床版全体の平均摩擦係数を F とすると、

$$\sigma_x = \frac{wLF}{2}$$

となる。

一般に、床版中の任意の点における摩擦係数は、床版の滑動が始まるまでの小さい範囲内の移動に対しては、実験的に次式で与えられる⁵⁾。

$$F_n' = u\sqrt{a'}$$

ここに、 F_n' : 滑動が始まらないときの床版中の任意の点の摩擦係数

a' : 任意の点の移動量

u : 摩擦係数と移動量との関係によって定まる定数

床版にある温度差が生じたとき、床版中央から x だけ離れた点では、上式は次のようになる。

ここに、 e : コンクリートの温度膨張係数、

$$F_n' = u\sqrt{etx}$$

t : 温度変化

したがって、滑動が生じない間の床版全体の平均摩擦係数は次式となる。

$$F_u = \frac{2u}{3} \sqrt{\frac{etL}{2}}$$

また、床版長が大きく、中央から距離 x_w の点から先が滑動するときには、この点から床版端までの一定の滑り摩擦係数 F_s となって x_w は、

$$x_w = \frac{1}{et} \frac{F_s^2}{u^2}$$

で与えられ、床版長が $2x_w$ よりも大きいときの平均摩擦係数は次式で与えられる。

$$F_d = F_s \left(1 - \frac{2x_w}{3L} \right)$$

以上の式を PC 舗装床版のプレストレス導入時の損失応力の算定に適用するためには、温度変化によるひずみの代わりにプレストレスによるひずみを代入すればよいことになる。そこで、プレストレスの導入応力を p 、コンクリートの静弾性係数を E とすると、床版中央における最大損失応力は次式で示される。

$$\sigma_c = \frac{uwL}{3} \sqrt{\frac{pL}{2E}} \quad (L \leq 2x_w)$$

$$\sigma_c = \frac{F_s wL}{2} \sqrt{1 - \frac{2x_w}{3L}} \quad (L > 2x_w)$$

6 試験床版

(1) 試験床版の設計

1) 京都大学における試験床版

京都大学の構内で行った試験床版の寸法は $3 \times 12\text{m}$ 、厚さ 10cm で、動荷重は 2.5 トン(ただし衝撃を含む)、コンクリートの圧縮強度は 400kgf/cm^2 、曲げ強度は 70kgf/cm^2 (いずれも材齢 28 日)、 $\phi 17.4\text{mm}$ の PC 用鋼棒を用いることにして、緊張材本数を決定した。

必要なプレストレスの大きさを決定するために、動荷重と温度変化、収縮あるいは床版上下面の温度差の組み合わせによって床版内に生じる最大引張応力を求めた。Westergard 式から求めた床版の下面における最大引張応力、床版が様な温度変化を受けた場合の路盤摩擦による最大応力、および床上下面の温度差によるそり応力の合計 50kgf/cm^2 から許容曲げ応力 35kgf/cm^2 を差し引き、残りの引張応力 15kgf/cm^2 はプレストレスで受け持たせることとした。その結果、幅員 3m に対して $\phi 17.4\text{mm}$ の PC 鋼棒(有功 12.5t)4 本を使用することに決定した。

2) 大阪市における試験床版

大阪市における PC 舗装試験床版は、 $60 \times 5.47 \times 0.15\text{m}$ (縁端部 20cm)および $40 \times 10.94 \times 0.15\text{m}$ (縁端部 20cm)の2面であり、その平面図は図-2, 3に示す通りである。

図-2 PCケーブル、PC鋼棒およびカールソン型ひずみ計の配置図 (60m床版・大阪市)

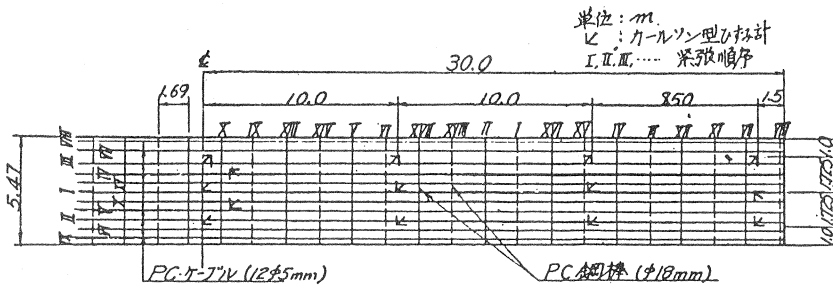
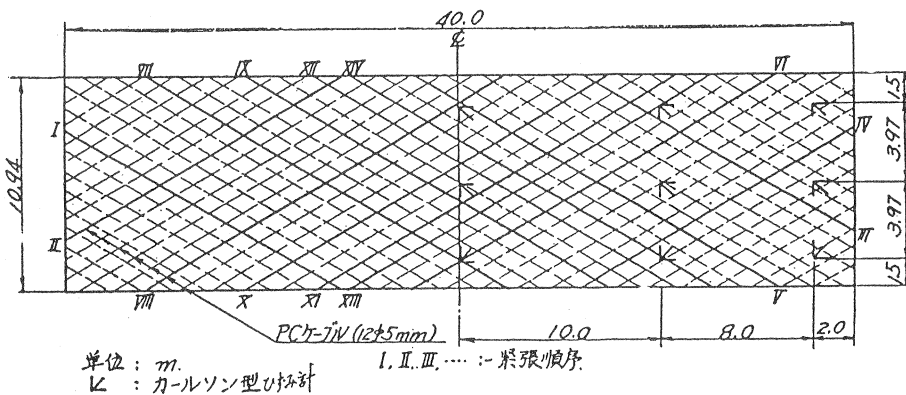


図-3 PCケーブル、PC鋼棒およびカールソン型ひずみ計の配置図 (40m床版・大阪市)



60m床版は直線部に施工され、縦方向には $12 \phi 5\text{mm}$ (フレシネーケーブル)11本、横方向には $\phi 18\text{mm}$ 36本が配置され、導入プレストレスの大きさは縦方向で 25.3kgf/cm^2 、横方向 5.7kgf/cm^2 である。

一方 40m床版は曲線半径 500m の曲線部に施工され、縦方向床版軸に約 30° の角度でフレシネーケーブルが斜交して配置され、導入プレストレスは縦方向で 26.7kgf/cm^2 、横方向で 8.4kgf/cm^2 である。

施工は、路盤摩擦をできるだけ軽減するため、路盤の上に約 2cm厚さの砂層を設けて路盤使を敷き、その上にコンクリートを打設した。

(2) プレストレスの導入による床版のひずみ分布

1) 京都大学における試験床版

プレストレスはコンクリートの材齢が4週に達したときに導入し、同時に床版に生ずるひずみを Huggenberger ひずみ計および電気抵抗線ひずみ計で測定した。測定は、PC 鋼棒1本を緊張したときと、4本全部を緊張したときの2回行い、得られた測定値を理論値と比較した。

検討結果の概要は以下の通りである。図-4、5に、PC鋼棒1本緊張した場合と4本全部緊張した場合の Guyon による理論的ひずみ分布⁶⁾と実測ひずみをそれぞれ示す。

PC鋼棒1本だけ緊張した場合、その線上では実測ひずみは理論値とほぼ一致しているが、その他の個所では実測値の方がやや大きい値となっている。床版長の中央部における圧縮応力は約 2.7kgf/cm^2 である。

PC鋼棒4本とも緊張した場合、実測縦ひずみは床版端から25cm離れた測点においては理論値とよく一致し、床版長の中央に近づくにしたがって実測値の方が大きい値を示す傾向が認められる。この場合の床版長中央部における圧縮応力は約 20kgf/cm^2 である。

全般的には縦方向にはほぼ所定のプレ

図-4 鋼棒1本のみ緊張した場合の縦方向ひずみ(実測値)(京都大学における試験床版)

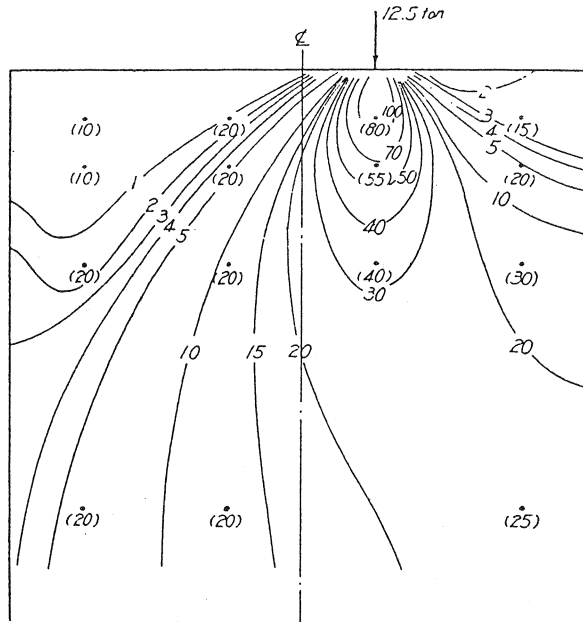
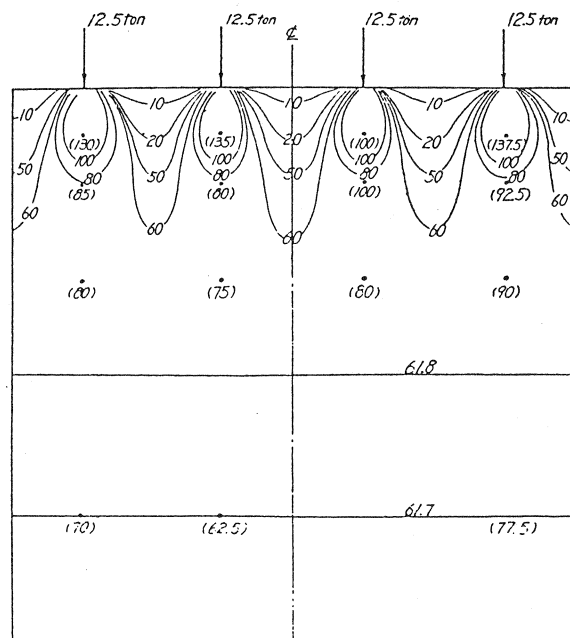


図-5 鋼棒4本とも緊張した場合の縦方向ひずみ(実測値)(京都大学における試験床版)



ストレスが導入されていることが確認され、さらに実測ひずみは Guyon が与えた値とよく一致している。

なお、横方向ひずみは、その絶対値が小さいため理論値との正確な比較はできない。

2) 大阪市における試験床版

プレストレスの導入は材齢 1 週で行い、PC ケーブルの緊張にはフレシネージャッキが、鋼棒の緊張にはシプレックスジャッキがそれぞれ使用され、緊張完了後直ちにグラウトが実施された。

プレストレス導入時における床版の波状性は、床版端に沿って 10cm 間隔に取付けたダイヤルゲージで測定したが、60m 床版の中央でごく僅かな変位(約 0.05mm)が生じたほかはほとんど変位は認められなかった。

プレストレスの導入による応力は、Huggenberger ひずみ計およびカールソン型ひずみ計で測定した。60m 床版では縦方向には最小 29.4kgf/cm²、最大 41.1kgf/cm²、横方向には最小 6.6kgf/cm²、最大 18.0kgf/cm² の応力が導入した。これらの値は、いずれも当初計算された導入応力よりもやや大きい値となっている。40m 床版では、床版端より 2m、10m および床版中央でそれぞれ縦方向 19.7kgf/cm²、19.5 kgf/cm²、21.5 kgf/cm²、横方向 4.3 kgf/cm²、5.7 kgf/cm²、9.4 kgf/cm² となり、縦方向においてはかなり均等に応力が導入されていることが確認されたが、当初計算した予定導入応力に比べると両方向とも若干小さい値となった。

(3) 路盤摩擦に対する検討

種々の路盤状態における路盤摩擦係数を実験的に求めるため、2 面のプレキャスト床版、80×80×8cm、80×40×8cm を用いて床版の移動量と摩擦力との関係を求めた。その結果を要約すると、

- 1) 一般に湿潤砂の方が乾燥砂よりも摩擦係数は小さい。
- 2) 路盤紙を敷くと摩擦係数は小さくなり、とくに湿潤砂においてその傾向が著しい。
- 3) 試験舗装床版程度の大きさでは、摩擦係数に及ぼす砂層の厚さ、砂の粒度、床版の大きさの影響はほとんど認められない。

この試験舗装床版では、 $p=16.7\text{kgf/cm}^2$ 、 $w=0.0022\text{kgf/cm}^2$ 、 $E=270000\text{kgf/cm}^2$ で、 $F_s=0.6$ として $u=2\sim 5$ の範囲で、床版長と最大摩擦損失応力および床版端の移動量との関係を求めた。その結果、床版長が短い場合は摩擦損失応力はあまり大きい値にはならないが、床版長が長くな

また、載荷点より 2.5m 離れた点では表面に引張、底面に圧縮ひずみが生じ、10m 離れた点ではほとんどひずみが生じていなかった。

7 PC 舗装の施工

PC 舗装の施工においては、路盤の摩擦をできるだけ小さくするための路盤の整地や床版コンクリートの打設は普通のコンクリート舗装の施工法と何ら変わるところはないが、プレストレスの導入作業にその特異性があるといえる。このプレストレスの導入方法を大別すると、

① 外部プレストレス方式

導入サイトに固定アバットを作り、これを反力台として、ジャッキを挿入して床版を押し付けることによってプレストレスを導入する方法

② 内部プレストレス方式

普通の PC 構造物と同様に床版に PC 鋼材を配置し、これを緊張することによってプレストレスを導入するもので、プレテンション方式とポストテンション方式とがある。

③ プレキャスト PC ロッド方式

④ プレキャスト PC 版方式

図-10 たわみ-距離曲線(60m床版、縁端部載荷、横断面)

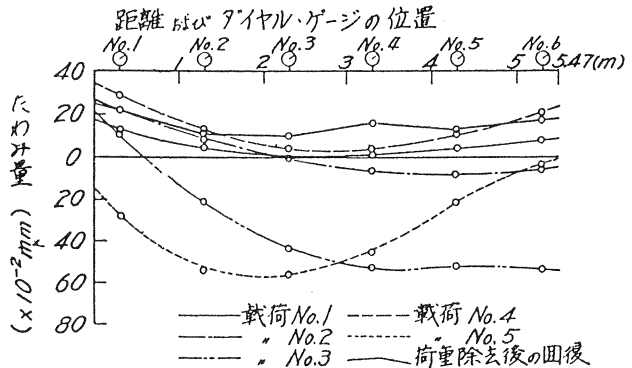


図-11 たわみ-距離曲線 (60m床版、縁端部載荷、床版側面)

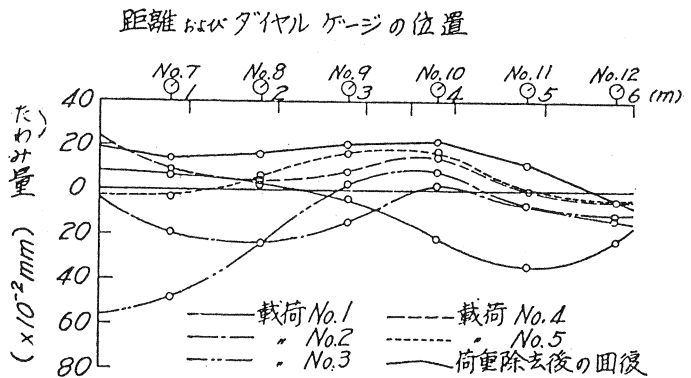
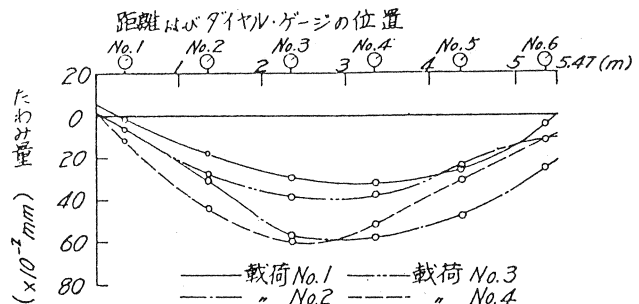


図-12 たわみ-距離曲線 (60m床版、中央部載荷、横断面)



8 結び

筆者が最初に行ったコンクリートに関する研究は、京都大学において卒業研究として取上げた(指導教授からテーマが与えられた)プレストレストコンクリート舗装であった。それ以降約40年間コンクリートに関する研究に従事してきたが、やはり最初に手掛けた研究には格別の思い出がある。とくに、最近、飛行場の誘導施設にPC舗装が重用されていることを聞くに及んで、40年前の研究が些かなりともこれに貢献していることは、研究者冥利に尽きる思いで一杯である。

PC舗装は、まえがきにおいて述べたような数々の利点を有し、さらにその当時では問題であった課題もほとんど解決されてきているが、今後は、造り放しのメンテナンスフリーの構造物を志向するのではなく、維持管理が手軽に行え、かつ長寿命化を可能にする方策を講じる事が肝要である。このためには、製造の段階で品質管理が、さらに施工の段階で施工管理が徹底的に行え、かつそれ以降の維持管理が容易に行えるプレキャストPC床版の普及が図られるべきであると考えられる。

最後に、プレストレストコンクリートは設計・施工、さらには長寿命を実現する上で無限の可能性を占める構造形態(今様の言葉では、高い性能(high performance)を有する構造形態)であると考えられる。この可能性を実現するためには、常に新しいアイデアを持ち、それを実際に何らかの形に作り上げんとする先駆者としての使命、あるいは一種の冒険心を持つことも必要になってくるであろう。

プレストレストコンクリートの設計・施工に従事されている技術者の皆様方の今後のさらなる発展を期待して本稿を閉じることとする。

参考文献

- 1) 西林新蔵：プレストレストコンクリート舗装に関する研究、京都大学工学部土木工学科卒業研究、No.1510、p.42、1957
- 2) 近藤泰夫他：プレストレストコンクリート舗装に関する実験的研究、土木学会論文集、No.49、pp.1~8、1957
- 3) 岡田清：PC舗装床版への応用、材料試験、Vol.8、No.69、pp.106~110、1959
- 4) Y. Kondo and et al：Construction of Prestressed Concrete Pavement Slabs in Osaka City, Memoirs of Faculty of Eng., Kyoto Univ., 21,1,1959
- 5) J.D. Lindsay：Design considerations for concrete pavement reinforcement for crack control, J.of ACI,1956
- 6) Y. Guyon：Prestressed concrete, P.515, 1953