

下面ひびわれを許すプレストレストコンクリート 版の空港舗装への適用性

APPLICABILITY OF CONCRETE SLABS WITH LIMITED PRESTRESS FOR AIRPORT PAVEMENTS

福手 勤*・佐藤勝久**・犬飼晴雄***

By Tsutomu FUKUTE, Katsuhisa SATO and Haruo INUKAI

1. ま え が き

空港のコンクリート舗装は、一般的には無筋コンクリート（以下 NC と略す）が用いられることが多い。しかしコンクリートは引張強度が小さいため、舗装版を NC で設計すると、設計航空機荷重の大きさによっては、50 cm 以上もの版厚が必要となる場合がある。

これに対し、プレストレストコンクリート（以下 PC と略す）を用いれば、NC の場合よりもかなり版厚を減少することができ、さらに横目地間隔を 100 m 以上にまで上げられる利点もある。空港における PC 舗装は、1947 年にパリの Orly 空港にて施工されて以来、欧米を中心にしばしば利用されている。

ところで NC 舗装と PC 舗装は、外力によって発生するコンクリート版下面の曲げ引張応力がその許容値を上回らないように、つまり、許容応力度法によって設計されるのが一般的であった。この許容応力としては、NC 舗装に対してはコンクリートの設計基準曲げ強度を安全率で除した値、また PC 舗装に対してはコンクリートの設計基準曲げ強度とプレストレス量を加え合わせた値が採用されている。つまり、版の下面にひびわれが発生しないように許容応力を設定し、それをもとに版を設計するものであった。

ところが PC 部材には、たとえ荷重によって引張縁に一時的にひびわれが発生しても、除荷とともにこのひびわれが閉じるという特徴がある（このような状態の PC 部材は一般に第三種 PC 部材とよばれる¹⁾）。そのため PC 舗装では、版下面のひびわれは、必ずしも致命

的なものとはならないといわれる²⁾。このことから、下面のひびわれ発生後も版が破壊したり、または破壊につながるような限界状態に至らなければよいとする考え方があり。もしこれが妥当であれば、従来の PC 舗装よりも経済的な PC 舗装を設計することができることになる。しかしこれまで、その挙動を詳細に検討した例がないことから、本研究では、PC 版下面でのひびわれの発生を許し、版表面のひびわれや PC 鋼材の降伏を限界状態とみなした設計法による PC 版の空港舗装への適用性を理論と実験から検討した。

本論文では、まず 2. においてひびわれ断面の挙動に関する理論について説明する。続いて 3. で試験舗装の設計、製作について、4. で載荷試験の結果と考察を加える。最後に 5. ではひびわれ断面の理論モデルを用いて、設計パラメーターの Sensitivity Analysis（感度分析）を行う。

2. 下面ひびわれ発生後の PC 版の理論解析とモデル化

PC 版の下面にひびわれが発生した後は、それまでコンクリートに作用していた引張力が PC 鋼材によって受け持たれるようになるため、PC 鋼材の引張ひずみが増加する。それと同時に、断面が平面を保持するために版表面の圧縮ひずみも増加することになる。

コンクリートの引張強度を無視した場合、ひびわれ発生後の断面に関して、平面保持の仮定、軸力のつり合い、曲げモーメントのつり合いから、式(1)～(3)が

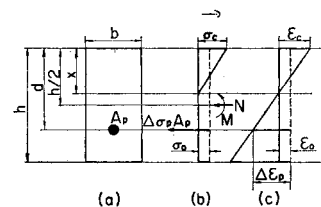


図1 下面ひびわれ発生後の断面のつり合い

* 正会員 工修 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所次長

** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所土質部滑走路研究室室長

*** ピーエスコンクリート(株)技術部

得られる (図-1 参照).

$$\frac{\sigma_c}{\Delta\sigma_p/n-\sigma_0} = \frac{x}{d-x} \dots\dots\dots(1)$$

$$N = \frac{\sigma_c b x}{2} - \Delta\sigma_p A_p = \sigma_0 h b \dots\dots\dots(2)$$

$$M = \frac{\sigma_c b x}{2} \left(\frac{h}{2} - \frac{x}{3} \right) + \Delta\sigma_p A_p \left(d - \frac{h}{2} \right) \dots\dots\dots(3)$$

ここに, N : PC 版の軸方向圧縮力 (プレストレス力)

M : 曲げモーメント

ϵ_0, σ_0 : N によるひずみと応力

ϵ_c, σ_c : 圧縮縁のコンクリートのひずみと応力

$\Delta\epsilon_p, \Delta\sigma_p$: PC 鋼材の増加ひずみと増加応力

h : 版厚

d : 上縁から鋼材までの距離

x : 上縁から中立軸までの距離

b : 断面幅

A_p : 鋼材断面積

n : 鋼材とコンクリートの弾性係数比 (E_p/E_c)

である. 式(1)~(3)は,

$$A_1 x^3 + A_2 x^2 + A_3 x + A_4 = 0 \dots\dots\dots(4)$$

$$\Delta\sigma_p = \frac{x^2 - 2hx + 2hd}{bx^2 + 2nA_p x - 2nA_p d} n b \sigma_0 \dots\dots\dots(5)$$

$$\sigma_c = x(\sigma_0 - \Delta\sigma_p/n) / (x-d) \dots\dots\dots(6)$$

のように整理されるので, これらを解くことによって中立軸の位置, 鋼材の増加応力, コンクリートの圧縮応力が得られることになる. ただし,

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= -2\sigma_0 b (bh + nA_p) \\ A_2 &= 3b \{ \sigma_0 (bh^2 + 2ndA_p) - 2M \} \\ A_3 &= 6nA_p \{ \sigma_0 bh (h - 2d) - 2M \} \\ A_4 &= -dA_3 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

である.

式(4)~(7)を解くためには曲げモーメント M が必要であるが, これは一定の外力のもとでもひびわれ深さの影響を受けるので, 曲げモーメントとひびわれ深さに関する解を得るには, 厳密には図-2 のフローチャートに示すような繰返し計算が必要となる.

なお, 図-2 のフローチャートのステップ(4)におけるひびわれ断面の図心位置に関する断面 2 次モーメントは, 次式で計算される.

$$I = bx \left(y_0 - \frac{x}{2} \right)^2 + \frac{bx^3}{12} + nA_p (d - y_0)^2 \dots\dots\dots(8)$$

ここに, y_0 は断面の図心位置で,

$$y_0 = (bx^2/2 + ndA_p) / (bx + nA_p) \dots\dots\dots(9)$$

で表わされる.

またステップ(2)における曲げモーメントの計算には,

- ① 図-3 のような Winkler 基礎上の同心円環状の変断面軸対称円板モデル (CIRC)

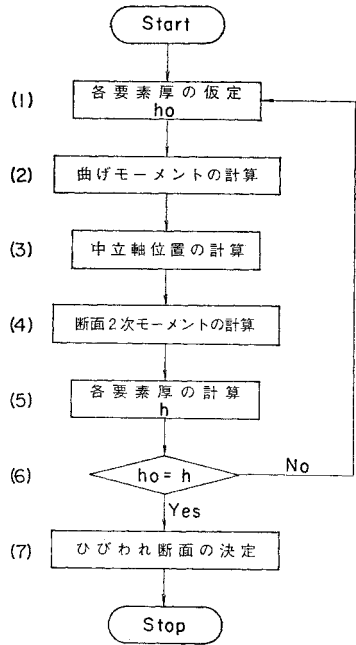


図-2 ひびわれ断面決定のためのフローチャート

- ② Winkler 基礎上の矩形要素を用いた有限要素法の変断面平板モデル (RECT)

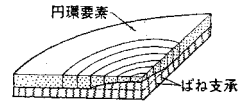


図-3 ひびわれ断面のモデル化

などが利用できる. この2つの方法を利用して, 図-2 のフローチャートに沿って得られた中央部載荷条件での計算例を図-4,5 に示す. たわみ分布, 曲げモーメント分布 (M_R は半径方向, M_T は接線方向の曲げモーメント), 有効断面厚ともに2つの方法による結果はよく一

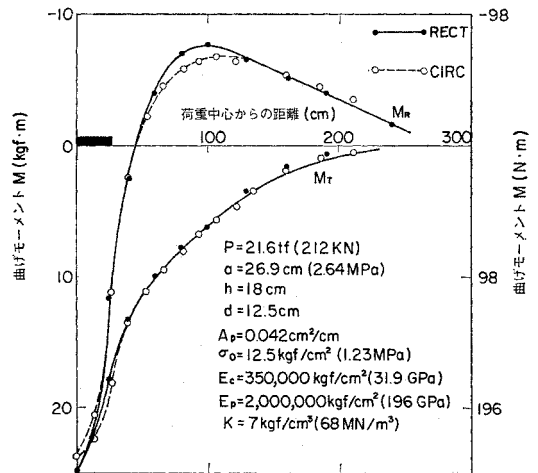


図-4 RECT と CIRC による結果の比較 (曲げモーメント)

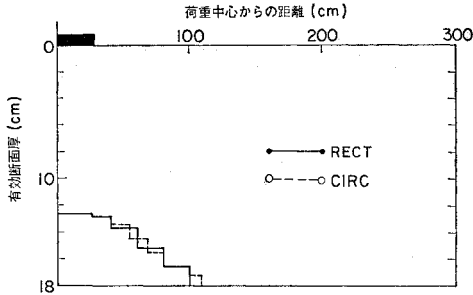


図-5 RECT と CIRC による結果の比較 (有効断面厚)

致していることがわかる。これらのことから両モデルはほぼ等価であると考えられるので、本論文では、モデルの使いやすさを考慮し、中央部載荷の解析には軸対称モデルである CIRC を、また縁部載荷の解析には矩形要素を用いた RECT を利用していくことにする。

3. 試験舗装の設計・製作

理論的には、2. で述べたような力学的な特徴をもつ PC 版を舗装に用いた場合の実際の挙動を知るために、現場打ち工法とプレキャスト版工法による2つの試験舗装を設計・製作した。

(1) 現場打ち PC 舗装³⁾

試験舗装の規模は、図-6 に示すように、縦方向長さ 24 m、幅 14 m、版厚 18 cm であり、路盤は直径 75 cm の載荷板による K 値が 3, 7, 10 kgf/cm² (29, 69, 98 MN/m²) の3種類のものを用意した。

設計荷重としては図-7 のような DC-8 型航空機の満載時主脚荷重 73.6 tf (721 kN) を採用した。

プレストレスは直径 17.8 mm の PC 鋼より線 (19 本より) を縦横とも 40 cm 間隔に配置し、ポストテンション方式によって導入した。コンクリートのクリープやシース摩擦などの種々の損失を差し引いた後の有効プレストレス量は 27.5 kgf/cm² (2.70 MPa) である。

表-1 の条件下での Westergaard の中央部載荷公式⁴⁾による曲げ応力 σ_i と、温度勾配に対し $\sigma_t=0.7$

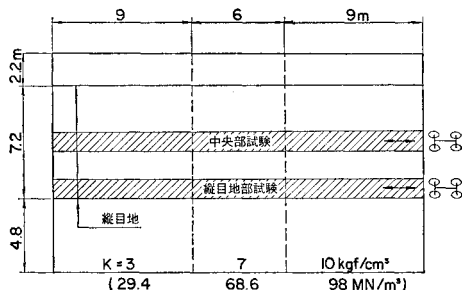


図-6 現場打ち PC 舗装の平面図

表-1 現場打ち PC 舗装の設計条件

路盤支持力係数 K	5 kgf/cm ² (49 MN/m ²)
コンクリートの弾性係数 E_c	325 000 kgf/cm ² (31.9 GPa)
コンクリートのポアソン比 ν	0.15
コンクリートの線膨張係数 α	$1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$
コンクリートの基準曲げ強度	45 kgf/cm ² (4.4 MPa)
コンクリートの許容曲げ圧縮応力	175 kgf/cm ² (17.2 MPa)
PC 鋼材の弾性係数 E_p	2 000 000 kgf/cm ² (196 GPa)
PC 鋼材の許容増加応力 $4\sigma_{pa}$	1 000 kgf/cm ² (98 MPa)
PC 鋼材の設置深さ d	11.9 cm
鋼材の断面積 A_p	0.052 cm ² /cm
版の温度勾配 λ	上昇時 0.7 [°] C/cm 下降時 0.35 [°] C/cm

$E_c \alpha \lambda h / (1 - \nu)$ で計算されるそり拘束応力 σ_t を有効プレストレスに重ね合わせると、版下面に 53 kgf/cm² (5.2 MPa) の曲げ引張応力が発生することになる。これはコンクリートの基準曲げ引張強度 45 kgf/cm² (4.4 MPa) を越えているため、1回の載荷で版下面にひびわれが発生することが予想される。そしてその後の PC 版は、2. に示したような挙動を示すものと考えられる。CIRC によって計算された中立軸深さ、鋼材の増加応力、コンクリート版上縁の圧縮応力は、それぞれ、6.9 cm, 766 kgf/cm² (75.1 MPa), 142 kgf/cm² (13.9 MPa) である。これらのうち応力に関しては、いずれも許容値を下回っており、破壊に対しては安全であるといえる。

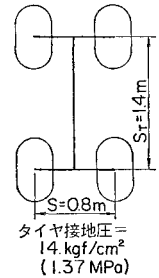


図-7 DC-8 型航空機の車輪配置

次に $4\sigma_p, \sigma_c$ 以外に表面ひびわれの発生に関する検討を Meyerhof の支持力公式⁵⁾を利用して行った。その結果、表面ひびわれ発生荷重 P_c は 137.4 tf (1.35 MN) で、設計荷重に対して 1.87 の安全率が確保されていることがわかった。なお Meyerhof の支持力公式は次のようである。

$$P_c = \left\{ \frac{4\pi}{1 - 4a/(3b')} + \frac{1.8(S + S_T)}{l - a/2} \right\} (M_r + M_r') \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 S, S_T : 複々車輪の横、縦中心間隔、 a : タイヤ接地半径、 l : 剛比半径、 $b' : 3.9l, M_r$: ひび割れ抵抗モーメント、 M_r' : 破壊抵抗モーメントである。

これらのことから、本試験舗装は DC-8 型航空機の繰返し走行に対して十分な安全性をもつように設計されたものと考えられる。

(2) PC プレキャスト版舗装⁶⁾

試験舗装は長さ 10 m、幅 2.3 m、厚さ 20 cm の工場生産された PC プレキャスト版 6 枚を、路盤支持力係数が 15 kgf/cm² (147 MN/m²) の路盤上に敷設すること

表-2 PC プレキャスト版舗装の設計条件

路盤支持力係数 K	15 kgf/cm ³ (147 MN/m ³)
コンクリートの弾性係数 E_c	350 000 kgf/cm ² (34.3 GPa)
コンクリートの基準曲げ強度	50 kgf/cm ² (4.9 MPa)
PC 鋼材の設置深さ d	16.5 cm
鋼材の断面積 A_p	0.138 cm ² /cm

他の条件は表-1 と同じ

によって施工された。設計荷重は (1) と同様に DC-8 型航空機の満載時主脚荷重である。各版のプレストレスは、長さ方向はプレテンション、幅員方向はポストテンション方式によって導入し、有効プレストレス量は両方向とも 29 kgf/cm² (2.84 MPa) である。また他の設計条件は表-2 に示すとおりである。

プレキャスト版舗装では版が結合される前の荷重は縁部載荷状態、結合後は中央部載荷に近い状態となるため、ここではこれらの 2 つの場合について検討を行った。まず Westergaard 公式によって縁部、中央部載荷状態に対応する曲げ応力を計算したところ、それぞれ 81.6 kgf/cm² (8.00 MPa)、46.6 kgf/cm² (4.57 MPa) であったことから、これらの値と有効プレストレス量 29 kgf/cm² (2.84 MPa) との差はそれぞれ 52.6 kgf/cm² (5.16 MPa)、17.6 kgf/cm² (1.73 MPa) となる。一方、ここで用いたコンクリートの設計基準曲げ強度は 50 kgf/cm² (4.90 MPa) であるので、縁部載荷つまり未結合の状態では、版下面にひびわれが発生する可能性がある。

次にひびわれ発生後の版の挙動を検討する。結合前に 1 枚のプレキャスト版の長手方向縁部に設計荷重が載荷されたときの x , $\Delta\sigma_p$, σ_c は RECT によって計算され、それぞれ 12.8 cm, 345 kgf/cm² (33.8 MPa), 98 kgf/cm² (9.6 MPa) となる。応力に関してはいずれも許容値を十分に下回っていることがわかる。さらに下面にひびわれが発生した後に版が結合された場合は、当然のことながら、その後の版の負担はかなり軽減されることになる。また下面にひびわれが発生する前に版が結合されれば、その後の載荷によるひびわれの発生はまず考えられず、版は全断面が有効に働くいわゆる第 II 種 PC 部材として挙動することになる。

4. 試験結果とその考察

載荷試験は今回の試験舗装の設計荷重である DC-8 型航空機の主脚を装備した写真-1 のような走行荷重車を用いて行った。

(1) 現場打ち PC 舗装

載荷試験は図-6 のように縦目地から十分離れた中央部レーンと縦目地に沿ったレーンにおいて実施した。

a) 静的載荷試験

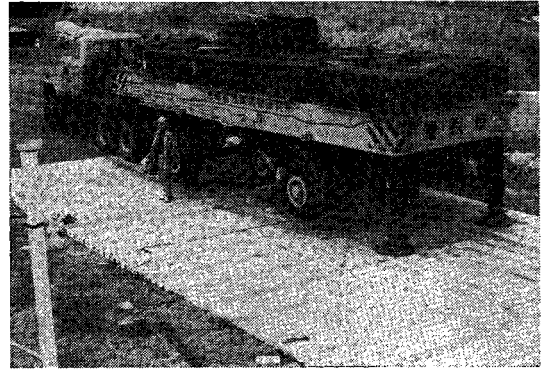


写真 1 走行荷重車

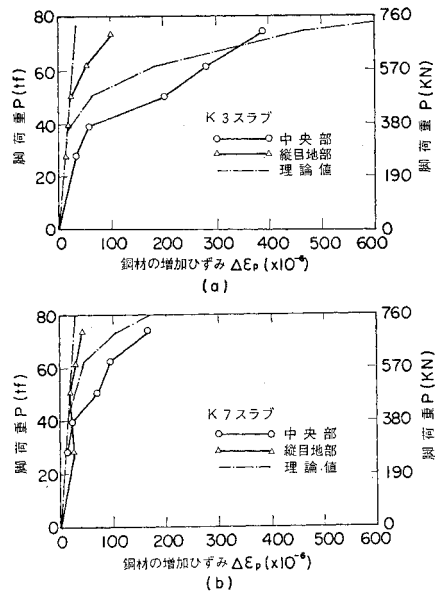


図-8 脚荷重と PC 鋼材の増加ひずみの関係

走行履歴を受ける前において、荷重の増加に伴う鋼材とコンクリート上面の増加ひずみの変化を示したものが図-8, 9 である。図中に K3 版とあるのは K 値が 3 kgf/cm³ (29.4 MN/m³) の路盤上の版を意味している。いずれも荷重の増加に伴ってひずみも増加するが、ある荷重以上ではひずみの増加率が大きくなり、下面にひびわれが発生したものと推定される挙動を示すようになる。そしてこの荷重～ひずみの関係は、同図中に併記した CIRC と全断面有効の仮定による 2 つの理論値によってその傾向が再現されている。また中央部レーンと縦目地部レーンでの測定値を比較すると、後者でのひずみの方が小さくなっている。これは、縦目地部での載荷の場合、載荷位置の近くに目地があるためひずみの増加がそこに集中し、ここに示した荷重直下のひずみはそれほど増加せず、したがって下面のひびわれも発生しにくくなっているためであろうと考えられる。このことから、縦方向施工目地は横方向プレストレスの効果により、下

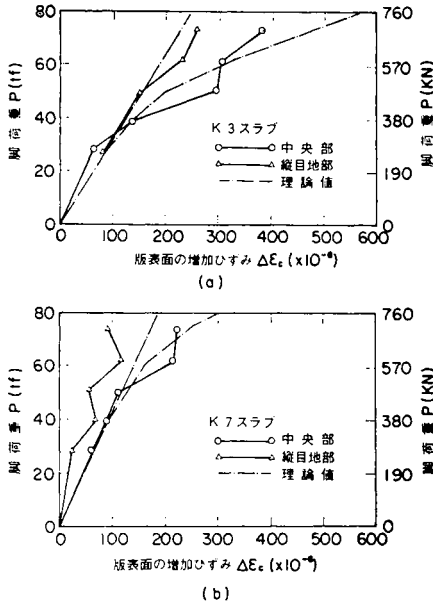


図-9 脚荷重と版表面の増加ひずみの関係

面ひびわれと同様の挙動を示していると思なすことができよう。

次に版表面での車輪直下幅員方向 (X 方向) の水平ひずみ分布の様子を図-10 に示す。いずれも荷重の増加とともにひずみも増加し、荷重が 73.6 tf (721 kN) のときは同図中に併記した理論値とよく一致している。また負の曲げモーメントによる最大引張りひずみは 100×10^{-6} 程度であり、コンクリートの曲げ引張破断ひずみと考えられる 200×10^{-6} の半分以下であることから、3. において Meyerhof の式を用いて検討したとおり、表面ひびわれに対しては十分に安全であると考えられる。

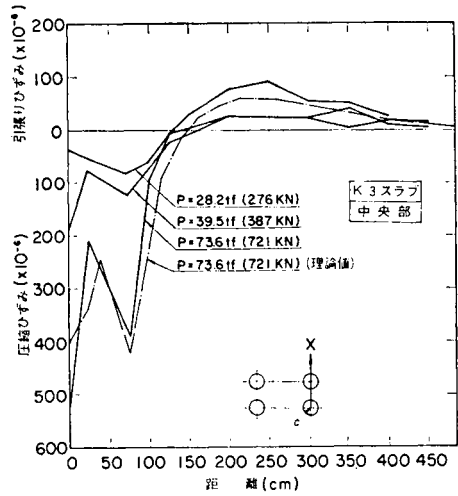


図-10 版表面の水平方向ひずみ分布

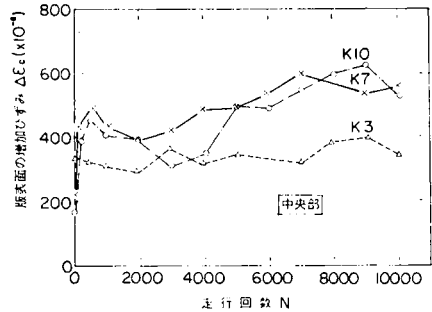


図-11 走行回数の増加に伴う版表面のひずみの変化

b) 走行試験

静的載荷試験に続いて、73.6 tf (721 kN) の脚荷重を用いて、中央部レーンで 10 000 回、縦目地部レーンで

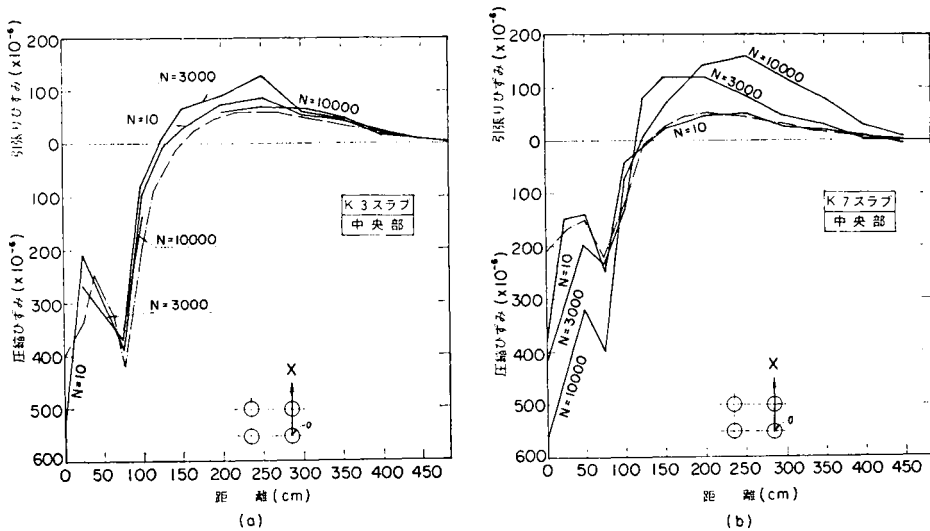


図-12 走行回数の増加に伴う版表面のひずみ分布の変化 (走行直角方向ひずみ)

5000回の集中走行試験（トラバースはなし）を行い、所定の走行回数ごとにひずみなどの測定を行った。

図-11は载荷による版表面の弾性圧縮ひずみの値を走行回数に対してプロットしたものである。この図から、K3版については走行期間中ひずみの変化はほとんどないが、K7版とK10版では徐々にひずみが増大していき、K3版よりも大きな値を示すようになることがわかる。

次に版表面での車輪直下幅員方向（X方向）の水平ひずみ分布の変化を図-12に示す。K3版では5000回の走行によるひずみ分布の変化はほとんど安定した挙動を示しているものの、K7版では車輪直下の圧縮ひずみのみならず、負の曲げモーメントによる引張ひずみも増加していることがわかる。

図-11, 12ではいずれも路盤支持力が小さいK3版の挙動が最も安定しており、一般に予想されるものと逆の結果を示している。この現象の原因の1つとして、路盤面の不等沈下起因する路盤と版の間の空隙が考えられる。つまり、K3版では弾性たわみは他の版に比較して大きいので、路盤の非回復性の塑性変形も大きいものと考えられるが、路面の様子ではその影響は版の幅員方向に遠くまで及び版にもそれに追従した永久たわみが認められたことから、版と路盤の間の空隙は小さくなっていったものと推定される。これに対し、K7版とK10版では路面の永久たわみはほとんど認められなかったことから、路盤の不等沈下は版との間の空隙として残り、载荷時には版の幅員方向のひずみが大きくなったものと思われる。ちなみに、K7版の車輪直下走行方向（Y方向）のひずみ分布の変化を示した図-13では、荷重直下のひずみはそれほど変化していない。これは荷重の走行方向には路盤はほぼ等しい塑性変化を起こし、不等沈下がほとんどないことによるものであろう。

これらのことからPC舗装においては、路盤の横断方

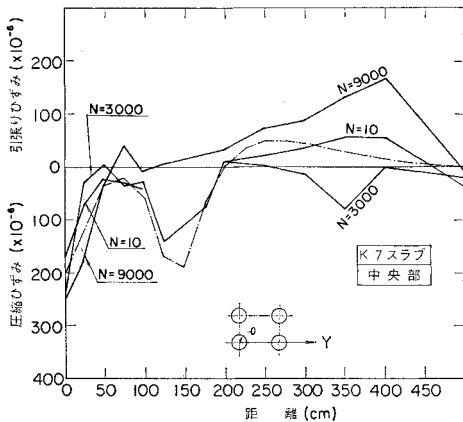


図-13 走行回数の増加に伴う版表面のひずみ分布の変化（走行方向ひずみ）

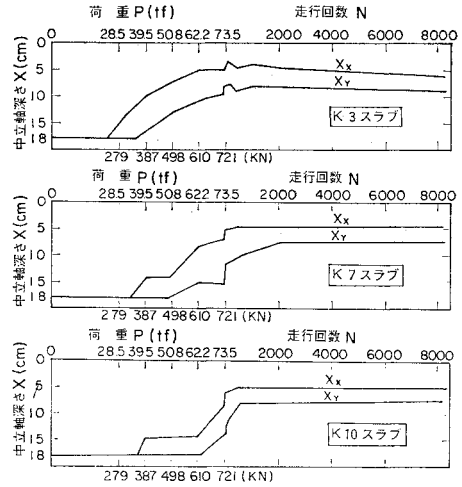


図-14 中立軸深さの変化

向の不等沈下を一つの限界状態として考えていくことの妥当性がうかがえる。しかしながら空港舗装では滑走路、誘導路での航空機の交通は舗装の横断方向に分散するのが大きな特徴である⁷⁾。さらに機種によって脚配置が異なるため、その結果として舗装上のタイヤの軌跡はエプロンにおいても横断方向にかなり幅広いものになる。このことから、今回のような集中走行によって発生した路盤の不等沈下は実際の空港舗装ではかなり軽減されるものと思われる。

次に版表面とPC鋼材のひずみから計算された車輪直下の中立軸の位置の変化を図-14に示す。同図には走行試験に先立つ静的载荷試験の結果も示されている。図-14より、処女载荷時に版の下面にひびわれが発生し、その後の荷重の増加に伴って中立軸は上側に移動するが、それに続く走行試験の間中はほぼ一定値を示していることがわかる。なお図中の添字 X は幅員方向、Y は走行方向を意味している。

すべての試験の終了後に版の一部を解体し、ひびわれの様子を観察した結果を写真-2, 3に示している。版の

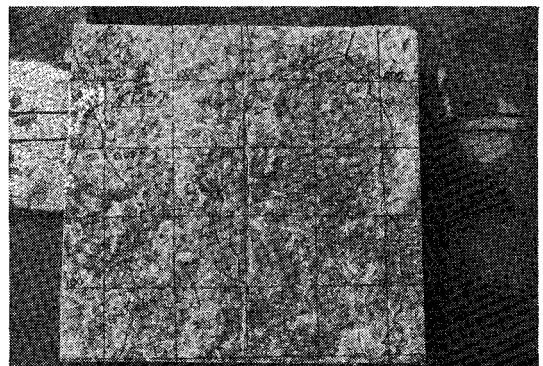


写真-2 版下面に分散したひびわれ

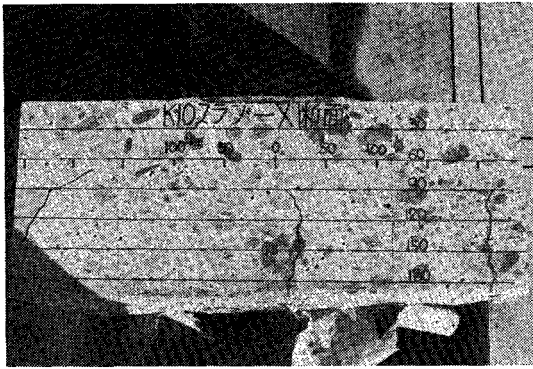


写真-3 版下面から上に向かって発生したひびわれ

底面には分散したひびわれが多く発生しており、それが版の深さ方向の中間部にまで進んでいるものの、表面にまでは達していないことがわかる。一般に第Ⅲ種 PC 部材では、ひびわれを分散させるために鉄筋で補強を行うが、PC 舗装では剛比半径が小さく 1 本のひびわれの影響はそれほど遠くには及ばないため、鉄筋による補強がなくても分散したひびわれが発生するのであろう。また 5000 回走行後の載荷時のひびわれ幅は、目地部の挙動から 0.1~0.2mm で、PC 鋼材の腐食に対しても大きな問題はないものと推定された。これらのことから、この舗装版は試験期間中はその設計どおり第Ⅲ種 PC 部材として有効に働いていたと判断される。

(2) PC プレキャスト版舗装

載荷試験はプレキャスト版の結合前後に行い、また結合後には目地部に沿った走行試験も実施した。

a) 静的載荷試験

図-15 は版の結合前に縦縁部で行った載荷試験の結果である。都合により載荷は 50.8 tf (498 kN) までしか行っていないので、版下面にはひびわれは発生していないものと推定される。測定値は図中に併記した縁部載荷公式による理論値にある程度対応していることから推察される。

次に、版をホーンジョイント⁹⁾によって結合した後と同じ箇所で行った載荷試験の結果を図-16 に示す。結合後は目地を横切っての荷重伝達が期待できることから、中央部載荷公式による理論値に近いひずみ分布を示すようになる。

さらに縦目地と横目地が交差する隅角部において、直径 30 cm の載荷板を通して、版が破壊するまで荷重を増加させる載荷試験を行った。図-17 はその結果である。荷重の増加に

伴って負の曲げモーメントが載荷点に近づきながら急増しており、第Ⅲ種 PC 部材に特有の塑性ヒンジの形成による曲げモーメントが再分配¹⁾の様子がよくうかがえる。

b) 走行試験

走行試験は 73.6 tf (721 kN) の荷重を用いて、ホーンジョイントによる縦目地部に沿って 5000 回走行することによって行った。その結果、ひずみの増加はほとんど認められず、版の挙動は走行期間中きわめて安定していた。これは、先の現場打ち舗装と比較して路盤支持力が 15 kgf/cm² (147 MN/m²) とかなり強固であったこと、版の下面にひびわれが発生していなかったことなどに起因するものと考えられる。

プレキャスト版に関する以上の試験結果より、版の結合前後における版の挙動は Westergaard 理論によってほぼ説明できるようである。そして、4. (1) の結果から判断して、版下面にひびわれが発生したとしても、版は第Ⅲ種 PC 部材として挙動し、その舗装は十分安全なものと考えられる。またホーンジョイントによる結合後は、現場打ち PC 舗装と比較して、版厚、有効プレスト

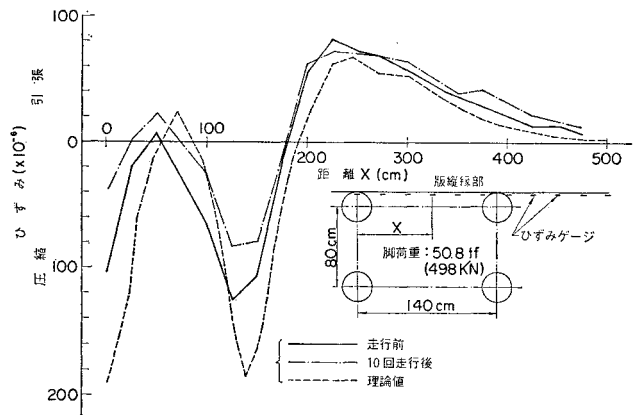


図-15 結合前の PC プレキャスト版縦縁部のひずみ分布

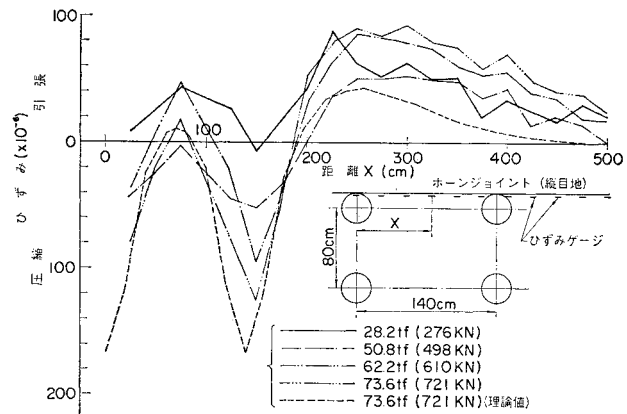
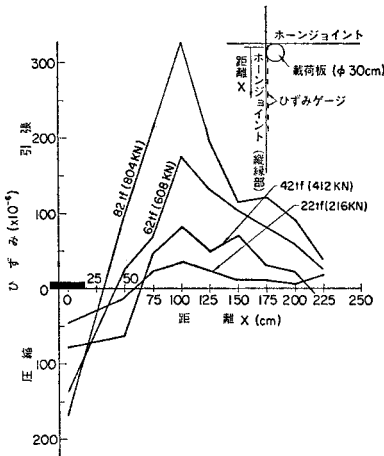


図-16 ホーンジョイントで結合後の PC プレキャスト版縦縁部のひずみ分布



図一17 PCプレキャスト版における曲げモーメントの再分配

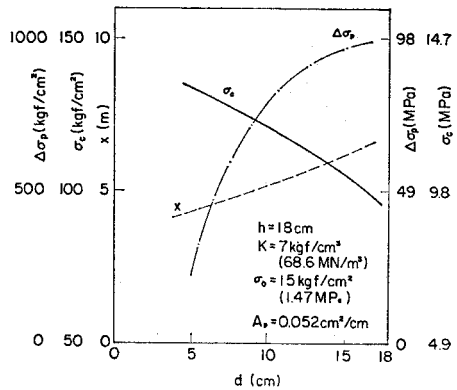
レス、路盤支持力にいずれも余裕がある本プレキャスト版舗装は、73.6tf (721kN) の荷重の 10 000 回程度の集中走行には問題はなく耐えられるものと推定される。

5. ひびわれ断面モデルの Sensitivity Analysis

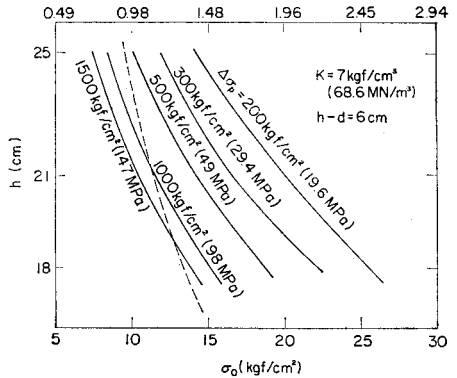
これまでの結果から、下面にひびわれが発生した PC 版の挙動の解析には、2. に示した理論が適用可能であることがわかった。そこでその理論に含まれるいくつかのパラメーターの値が版の挙動にどのような影響もっているかを CIRC を使った数値計算によって検討することにする。なお荷重条件としては、18.9tf (185kN) の大きさの荷重が半径 20cm の円に等分布しているものを採用した。

まず、版厚やプレストレス量などが一定で鋼材の深さ d のみが変わったときの版の挙動の変化を 図一18 に示す。同図から、鋼材の位置が深くなれば、鋼材の増加応力 $\Delta\sigma_p$ は大きくなるものの、それだけ版上面のコンクリートの圧縮応力 σ_c は小さくなり、また中立軸の位置 x は深くなることわかる。またこのことは、版の曲率半径が大きくなって下面ひびわれ幅が小さくなることを意味している。そしてこの結果は、鋼材が降伏しない限り、鋼材を版のできるだけ下部に配置する現行の PC 版の設計法が妥当であることを裏付けているといえる。

次に版下面からの鋼材の距離を一定 (6cm) にし、版厚 h とプレストレス量 σ_0 を変化させたときの PC 鋼材の増加応力の変化の様子を 図一19 に示す。この図から、 $\Delta\sigma_p$ が 1000 kgf/cm² (980 MPa) 付近では h や σ_0 のわずかな変化が $\Delta\sigma_p$ に大きな影響を及ぼしそうなことがわかる。たとえば、 $h=21$ cm のときに 11.5kgf/cm²



図一18 PC 鋼材の深さが PC 版の挙動に及ぼす影響



図一19 プレストレス量が PC 鋼材の増加応力に及ぼす影響

(1.13 MPa) の σ_0 が、1 kgf/cm² (98 MPa) だけ低下すると、 $\Delta\sigma_p$ は約 500 kgf/cm² (49 MPa) も増加する。このことから、有効プレストレス量を正確に導入することは非常に重要なことであるといえる。次に、施工の誤差でもし h が設計値と異なり、それに伴って σ_0 が変化したときの影響は次のようになる。まず h と σ_0 は、反比例するので、図一19 の破線のような関係を示す。 h が減少すると σ_0 は増加し、それを表わす点は破線に沿って右下に移動することになるが、これは 図一19 から判断して $\Delta\sigma_p$ が増大する方向であることがわかる。つまり、 h の減少に起因する σ_0 の増大は、版にとっては危険側の誤差であり、NC 舗装における版厚が薄くなる誤差と同様の意味をもつものである。

さらに路盤の支持力が変化した場合の影響を 図一20 に示す。予想されるとおり、 K 値の増加に伴って $\Delta\sigma_p$ 、 σ_c は減少し、中立軸の位置は下方に移動して版の負担は軽減される。NC 舗装の場合路盤の支持力係数が 5 kgf/cm² (49 MN/m²) から 15 kgf/cm² (147 MN/m²) に増加してもコンクリート版の曲げ応力は 10% 程度しか減少しないのに対し、図一20 では $\Delta\sigma_p$ 、 σ_0 とも半減している。このことは、図一8,9 に示した実測値によって

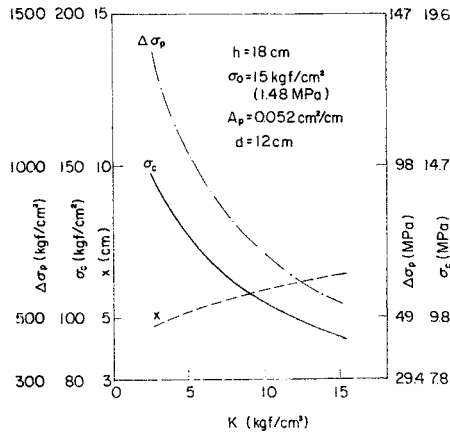


図-20 路盤支持力が PC 版の挙動に及ぼす影響

も裏付けられている。PC 舗装の場合、NC 舗装の場合よりも路盤支持力の値を考慮することが重要であると思われる。

6. 結 論

以上、版表面のひびわれと PC 鋼材の疲労を限界状態とみなした設計法による PC 版の空港舗装への適用性を理論と実験から検討してきた。その結果を要約すると以下ようになる。

(1) 下面にひびわれが発生した PC 版の力学的挙動は、平面保持の仮定、軸力のつり合い、曲げモーメントのつり合いを基本とする変断面の版モデルによってよく近似することができる。

(2) 現場打ち PC 舗装の場合、縦方向施工目地は、横方向プレストレスの効果によって塑性ヒンジを形成するため、変形がそこに集中して下面ひびわれのような挙動を示す。

(3) 現場打ち PC 舗装での一定走行レーン上の走行試験の結果、路盤と版との間に路盤の不等沈下に起因する空隙が発生した。路盤支持力が小さい場合には路盤の塑性変形は荷重の走行帯から離れた場所にまで及ぶため、コンクリート版は路盤の変形に追従し、空隙はかなり小さいようである。また、実際の空港では航空機の車輪の軌跡が舗装の走行線上に集中するのではなく、横断方向にある程度散らばるため、路盤の不等沈下はまず問題にならないと思われる。

(4) PC 版の中立軸の深さは、処女載荷時の荷重増加とともに上側に移動するが、その後の 10 000 回の走行試験期間中にはほぼ不変であった。また、すべての試験終了後に採取された PC 版には、予想どおり分散した下面ひびわれが多く確認された。

(5) PC プレキャスト版舗装は、結合前の単独版に

対しては縁部載荷状態、ホーンジョイントによる結合後には中央部載荷状態に比較的近い挙動を示した。そのため、もし結合前の PC プレキャスト版の下面にひびわれが発生した場合には、現場打ち PC 舗装と同様、変断面の版モデルによってその挙動を予測することができ、また結合後には 10 000 回以上の集中走行に問題なく耐え得るものと推定された。

(6) PC プレキャスト版舗装が破壊するまで荷重を増加させたところ、負の曲げモーメントが載荷点に近づきながら急増する。いわゆる塑性ヒンジの形成による曲げモーメントの再分配の現象が確認された。

(7) ひびわれ断面モデルの Sensitivity Analysis によれば、PC 鋼材の位置とプレストレス量の大きさが、PC 版の挙動に大きな影響を及ぼしそうなことがわかった。さらに、NC 舗装と異なり、路盤支持力も版の挙動に少なからぬ影響を及ぼすことが示された。

7. あとがき

本論文では下面における一時的なひびわれの発生を許した PC 版の空港舗装への適用性を検討した。試験舗装での測定結果と理論解析の結果を総合すれば、下面ひびわれは PC 舗装にとっては致命的なものではなく、版表面のひびわれや PC 鋼材の降伏を限界状態とみなす設計法の適用の十分な可能性が示されたといえよう。

最後に、本論文をとりまとめるにあたり、有益な議論をしていただいたピーエスコンクリート(株)技術部 原千里氏、および数値計算にあたってご協力いただいた運輸省港湾技術研究所 八谷好高氏に心より感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 猪股俊司：プレストレストコンクリートの設計・施工、技報堂出版、p. 287, 1979.
- 2) Rollings, R.S.: Corps of engineers design procedures for rigid airfield pavements, Proc. of 2nd International Conference on Concrete Pavement Design, pp. 185~198, 1981.
- 3) 福手 勤ほか：第三種設計法による PC スラブの空港舗装への適用性、港湾技術研究所報告、Vol. 18, No. 3, pp. 37~63, 1979.
- 4) 福手 勤：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、港湾技研資料、No. 262, p. 20, 1977.
- 5) Meyerhof, G.G.: Load-carrying capacity of concrete pavements, Proc. of ASCE, SM 3, Vol. 88, pp. 89~116, June 1962.
- 6) 佐藤勝久ほか：ホーンジョイントによる PC プレキャスト版舗装の開発、港湾技術研究所報告、Vol. 19, No. 4, pp. 101~128, 1980.
- 7) Witezak, M.W.: Prediction of equivalent damage repetitions from aircraft mixtures for full depth airfield pavements, Proc. of AAPT, Vol. 42, pp. 277~298, 1973.