

# 港湾技研資料

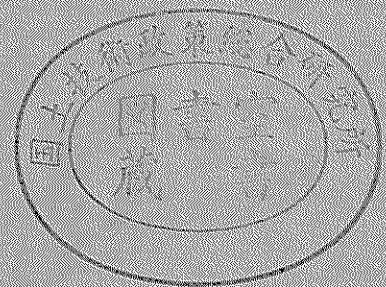
TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 710 June 1991

空港コンクリート舗装の目地・ひびわれ部の挙動  
—荷重伝達機能と版厚算定法への反映—

八 谷 好 高  
上 中 正 志

運輸省港湾技術研究所



# 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	3
2. 目地・ひびわれ部の荷重伝達機能の実態 .....	4
2. 1 荷重伝達機能の定量化 .....	4
2. 2 目地部での荷重伝達 .....	6
2. 3 ひびわれ部での荷重伝達 .....	9
3. 空港コンクリート舗装版厚設計への応用 .....	11
3. 1 現行設計法の概要 .....	11
3. 2 コンクリート舗装構造の設計要因の検討 .....	11
3. 3 空港コンクリート舗装の版厚算定法の検討 .....	14
3. 4 各設計法との比較 .....	14
4. 結論 .....	15
5. あとがき .....	15
参考文献 .....	16

# Load Transfer at Joints and Cracks in Airport Concrete Pavements - Its Application to Structural Design -

Yoshitaka Hachiya\*

Masashi Kaminaka\*\*

## Synopsis

Load is assumed to be fully transferred through joints in airport concrete pavements in the current structural design method in Japan. Load transfer is also expected enough at cracks in continuously reinforced concrete pavements (CRCP). This comes from the fact that some load transfer device is installed at joints and cracks in CRCP are tightly closed.

To verify this, the load transfer efficiency at joints and cracks in several airports has been measured by nondestructive testing apparatus such as Falling Weight Deflectometer. Repeated loading tests have been also conducted at cracks in CRCP to make sure the durability of the load transfer mechanism, namely aggregate interlocking.

The load transfer efficiency is not used directly in the design method as concrete slab thickness is decided based on the concrete stress in case of interior loading condition with suitable safety factor. To incorporate the survey result on the load transfer into the thickness calculation method, new design method has been developed. Both concrete stress caused by temperature changes and fatigue characteristics of concrete are taken into consideration in this method. Compared with the current design method, the new calculation method provides nearly the same slab thickness.

**Key Words :** Concrete Pavement, Joint, Crack, Load Transfer, Structural Design

---

\* Senior Research Engineer, Geotechnical Engineering Division

\*\* Member, Runways Laboratory, Geotechnical Engineering Division

# 空港コンクリート舗装の目地・ひびわれ部の挙動 —荷重伝達機能と版厚算定法への反映—

八谷好高\*

上中正志\*\*

## 要 旨

本資料は、従来より取り組んできた空港コンクリート舗装の目地・ひびわれ部の荷重伝達についての研究成果をまとめたものである。現行の空港コンクリート舗装の構造設計法では、目地や連続鉄筋コンクリート舗装（CRCP）のひびわれで十分な荷重伝達がなされているものとみなしている。これは、目地には何らかの荷重伝達装置が設けられていること、また、CRCPのひびわれではその幅が狭いため骨材のかみ合わせが期待できるということに基づいている。

この点について検証すべく、供用中の空港コンクリート舗装における目地とひびわれ部の荷重伝達機能を、FWD等の非破壊試験機により測定した。特に、ひびわれ部においては、航空機荷重の繰り返し載荷によって荷重伝達機能の低下することが懸念されたので、試験舗装に対する載荷試験を行って、その点について検証した。

荷重伝達機能に関して得られた成果をコンクリート版厚の算定法に取り込む方策についても検討した。これは、コンクリート版中央部に航空機の1脚が載った場合に生ずる応力を算定し、適切な安全率を考慮して版厚を決定するという現行の設計法では、この点を直接的には考慮できないからである。ここでは、温度変化によりコンクリート版に作用する応力、目地やひびわれ部での荷重応力、疲労破壊といった点について検討を加えて、新しい空港コンクリート舗装の版厚算定法について考察した。そして、この方法による版厚と、現行の版厚設計法や道路舗装の設計法によるものと比較検討を行っている。

キーワード：コンクリート舗装，目地，ひびわれ，荷重伝達機能，構造設計

## 1. まえがき

空港コンクリート舗装構造設計要領にその設計法が整備されている3種類の舗装、すなわち、無筋コンクリート（NC）舗装、連続鉄筋コンクリート（CRC）舗装、プレストレストコンクリート（PC）舗装では、いずれにおいても施工目地は必須のものとなっている<sup>1)</sup>。このほか、NC舗装では、コンクリートの乾燥収縮や温度変化によるひびわれの発生を防止するために、施工直角方向に収縮目地が設けられなければならない。また、CRC舗装では、このような収縮目地を設けない代わりに施工方向に連続して鉄筋を配置することにより、発生するひびわれの幅を小さなものとするようになっている。

目地には何らかの荷重伝達装置が設けられているこ

と、また、CRC舗装のひびわれではその幅が狭いため骨材のかみ合わせが期待できることから、現行のコンクリート版厚設計法においては目地やCRC舗装のひびわれで十分な荷重伝達がなされているものとしている。この点について検証すべく従来より取り組んできた目地・ひびわれ部の荷重伝達についての研究成果を今回まとめるに際し、それをコンクリート版厚の算定法に取り込む方策についても検討することとした。

わが国の空港コンクリート舗装構造設計法では、従来よりコンクリート版は無限の広がりを持ち、Winkler支承（ばね支承）上に置かれていると仮定している。そして、その中央部に航空機の1脚が載った場合にコンクリート版に生ずる応力を算定し、適切な安全率を考慮に入れてコンクリート版厚を決定するようになっている。

\* 土質部主任研究官

\*\* 土質部滑走路研究室研究員

この考え方は、現在の空港コンクリート舗装構造設計要領<sup>1)</sup>でも踏襲されている。この設計法では、温度変化によりコンクリート版に作用する応力や目地やひびわれ部での荷重応力、さらには、疲労破壊といった点については、具体的には算定しないで、安全率の中に含めてしまっている。

しかし、この手法は、元々、米国ポルトランドセメント協会 (Portland Cement Association, PCA) の提案した方法で、安全率の値の根拠に関する記述は見られない。そこで、まず、上記の3点について検討を加えたのち、新しい空港コンクリート舗装版厚算定法の考え方を示すことにした。この3点の検討課題のうち、目地・ひびわれ部の荷重伝達機能が荷重応力に及ぼす影響については、現地空港ならびに試験舗装において検討した。まず、供用中の空港コンクリート舗装における目地部やひびわれ部の荷重伝達機能は実際にどの程度期待できるのかを、非破壊試験機により測定した。特に、ひびわれ部においては、航空機荷重の繰返し載荷によって荷重伝達機能の低下することが懸念されたので、試験舗装に対する繰返し載荷試験を実施して、その点について検討した。しかし、目地・ひびわれ部の荷重伝達機能以外の項目については、現状では、既往の研究成果に基づくものとせざるを得なかった。

上記の成果を取り込んだコンクリート版厚算定法を示してから、現行の版厚設計法や道路舗装の設計法によるものとの比較検討を行っている。具体的には、設計対象航空機を B-747-400、設計反復作用回数20,000回として所要版厚を算定している。

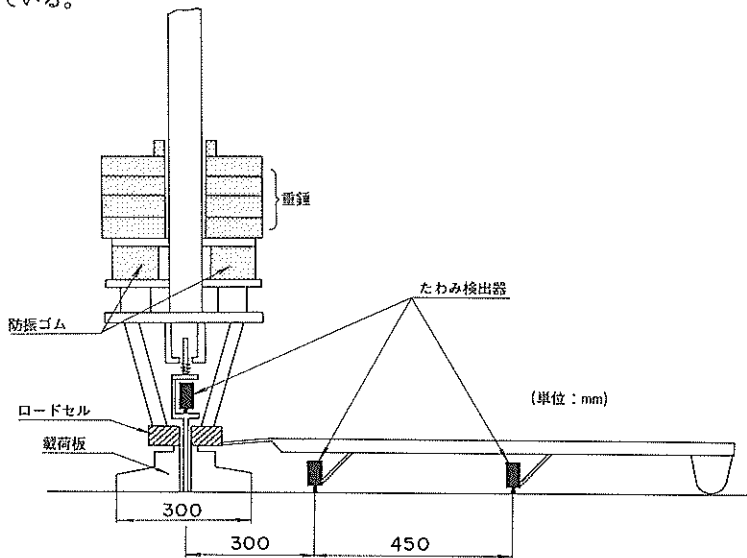


図-2 (a) FWD の模式図(5 tf FWD)

## 2. 目地・ひびわれ部の荷重伝達機能の実態

### 2.1 荷重伝達機能の定量化

目地の荷重伝達機能は、(1)式で算出される  $E_{ff}$  で定量化される<sup>2)</sup>。

$$E_{ff} = \frac{d_w}{(d_l + d_u)/2} \times 100 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $d_l$ 、 $d_u$ は、図-1に示すように、設計荷重に近い大きさの荷重を目地近傍に載荷したときの、それぞれ、目地近傍の載荷側、非載荷側のたわみである。

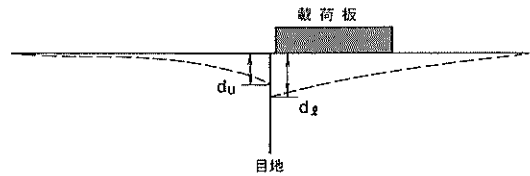


図-1 目地部での載荷試験

この図からわかるように、 $E_{ff}$  を求めるためには大がかりな載荷試験装置が必要なので、供用中の空港コンクリート舗装で  $E_{ff}$  を測定することは実際的ではない。このような供用中の舗装の力学特性を調査するために、衝撃荷重を舗装に与えてそれにより生ずるたわみを測定する試験機であるフォーリングウェイトデフレクトメーター (Falling Weight Deflectometer, FWD) が導入されている。

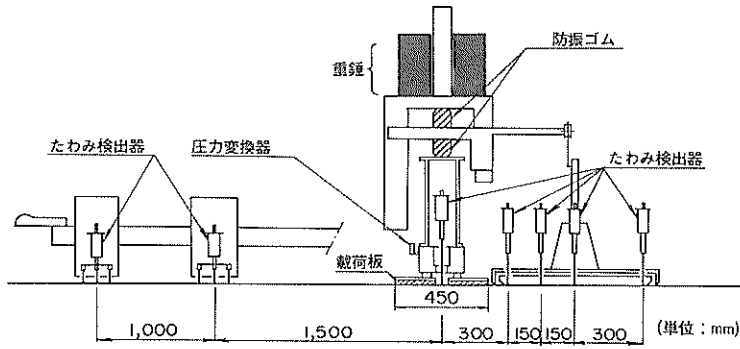


図-2 (b) FWDの模式図(20 tf FWD)

港湾技術研究所の所有するFWDは、図-2に示すように、荷重の大きさの異なるものが2種類あり(5 tfと20 tf)、前者による空港コンクリート舗装の非破壊評価法を提案しているところである<sup>3)</sup>。この方法では、目地の荷重伝達機能を調べるために、図-3に示すようなたわみ測定を実施し、(2)式により  $E_{ff}'$  を計算することとしている。そして、 $E_{ff}$  と  $E_{ff}'$  は、有限要素法を用いた解析から、非常に相関性のよいことがわかっている。

$$E_{ff} = \frac{d_2}{(d_1 + d_2)/2} \times 100 \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $d_1$ 、 $d_2$ は、FWDにより得られる、目地から15cm離れた載荷側、非載荷側のたわみである。

5 tfのFWDによるコンクリート版厚の大きい空港舗装でのたわみ測定の経験から、これにより得られるたわみは、たわみセンサーの精度からみて、やや小さすぎると考えられていた。その後、その4倍の荷重の大きさである20 tfのFWDが新たに開発されたので、これを導入して、アスファルト舗装を含めた空港舗装の非破壊調査法を開発すべく研究を行っているところである。

この衝撃荷重20 tfのFWDは、5 tfのFWDとは載荷板の大きさやたわみセンサーの位置が異なっているので、これを用いて(2)式による  $E_{ff}'$  を算定するためのたわみは得られない。ただし、目地からの距離が等しい

(22.5cm) 載荷側と非載荷側のたわみは、図-4に示すようにFWDを設置して、載荷側のたわみ( $d_1$ )と非載荷側のたわみ( $d_3$ )として得られる。

このような測定を可能とするためには、載荷板を目地に接するように設置しなければならないが、実際の測定状況を考慮すると、それは不可能に近い。そこで、5 tfのFWDで  $E_{ff}'$  と  $E_{ff}$  の相関性を調べたときと同様に、数値解析により20 tfのFWDを使用して目地・ひびわれの荷重伝達機能を調査する場合について考察することにする。この数値解析法は、コンクリート舗装をWinkler支承(ばね支承)上の平板とみなして、有限要素解析をするものであり、スリップバー目地やかぎ型目地を有するコンクリート舗装の構造解析への適用性が確かめられている<sup>2)</sup>。

これによって、目地近傍ならびにFWD測定に相当する任意点の載荷側、非載荷側のたわみが得られ、(1)、(2)式により  $E_{ff}$  と  $E_{ff}'$  が求められる(ただし、 $E_{ff}'$  を求めるためのたわみは目地から22.5cm離れた点のものである)。まず、載荷板を目地に接した状態で設置してたわみ測定を行う場合を想定して解析した。図-5にはその  $E_{ff}'$  と  $E_{ff}$  の関係を示した。プロットしたデータは、厚さ45cm、弾性係数が350,000kgf/cm<sup>2</sup>、ポアソン比0.15のコンクリート版が、支持力係数7 kgf/cm<sup>2</sup>と15kgf/cm<sup>2</sup>の

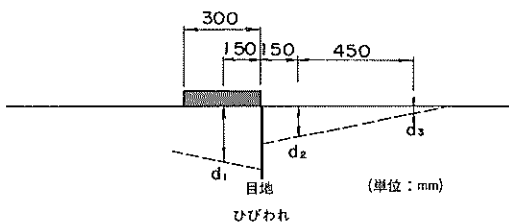


図-3 5 tf FWDによる目地部でのたわみ測定

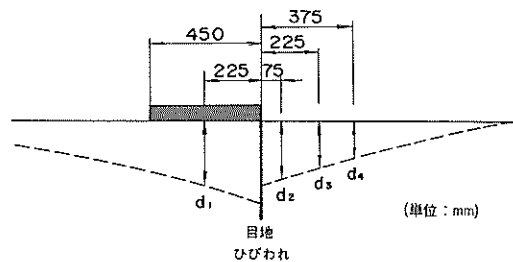


図-4 20 tf FWDによる目地部でのたわみ測定

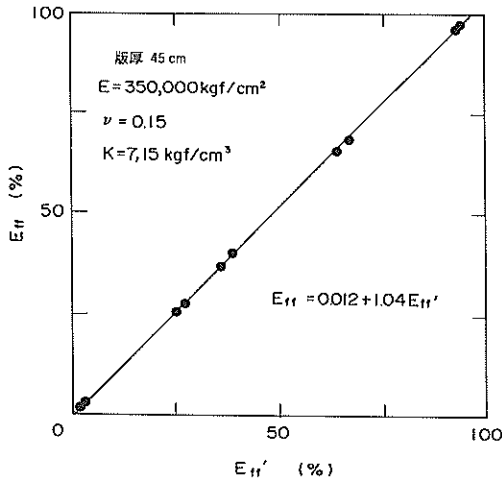


図-5 20 tf FWD による  $E_{ff}'$  と  $E_{ff}$

路盤上にある場合のものであるが、路盤支持力係数の違いによらず、 $E_{ff}'$  と  $E_{ff}$  の関係は一本の直線で表すことができる。したがって、20 tf の FWD で得られる  $E_{ff}'$  も、5 tf の FWD の場合と同様に、 $E_{ff}$  と同一であるとみなしていいことがわかった。

次に、載荷板を目地に接した状態では設置できない場合を考えてみた。ここでは、載荷板が目地から最も目地に遠い場合、すなわち第2たわみセンサーが目地直上に設置される場合までを取り上げた。図-6 にはその結果を示してあるが、 $E_{ff}'$  と  $E_{ff}$  の差は最大で4%程度であり、 $E_{ff}$  が小さい場合では、その差はさらに低下する。舗装の構造評価ではその後のかさ上げ厚の設計まで一体として考えるので、 $E_{ff}$  の推定精度がこの程度でも実際上はあまり問題とはならないものと思われる。このことから、FWD により目地・ひびわれ部でたわみ測定を行う場合には、目地やひびわれが載荷板の端部と第2たわみセンサーの間にあるように FWD を設置できればよい

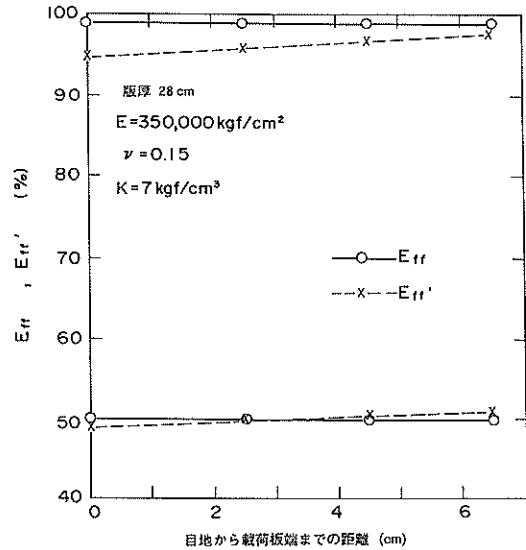


図-6 載荷板の位置が  $E_{ff}'$  に及ぼす影響

ものと結論づけられる。

## 2. 2 目地部での荷重伝達

供用中の空港コンクリート舗装の目地部における荷重伝達機能を測定して、その実態を調べてみた。測定を実施したのは、福岡空港の誘導路と東京国際空港のエプロンのコンクリート舗装、東京国際空港沖合展開事業地区内の試験舗装である。福岡空港では写真-1 に示すダイナフレクトを使用した（写真-2）。

ダイナフレクトは、FWD と異なり、幅 5 cm、直径 30 cm の 2 つの鉄輪を介して 8 Hz、450 kgf の振動荷重を舗装に加えて、それによるたわみを 5 点で測定する舗装非破壊試験機である（図-7）。ダイナフレクトによる目地・ひびわれ部での測定方法は、目地から 15 cm 離れた位置に鉄輪を設置して、目地から 15 cm 離れた点での載荷側と非



写真-1 ダイナフレクト



写真-2 20 tf FWD によるたわみ測定状況

載荷側のたわみ( $d_1$ ,  $d_2$ )を測定するというものであり、 $Eff'$ は(2)式により算定できる。図-8はその測定結果であるが、目地部の $Eff'$ はほとんど90%以上と良好であった。また、ひびわれ部についても荷重伝達機能を調べたが、目地部と同程度の $Eff'$ が得られた。

東京国際空港では、図-9に示すエプロンのスポットおよびライン整備ビル前面での測定を実施した。舗装構造および施工年度は図-10に示すとおりである。目地構造としては詳細なデータが得られていないが、スリッパ目地であると思われる。図-11は、その測定結果であるが、目地部ではほぼ90%以上の良好な $Eff'$ が得られ

た。これに比べると、ひびわれ部、特にライン整備ビル前(No.1)では $Eff'$ の若干小さい箇所が見られた。この区域は施工が昭和37年度で、コンクリート版も28cmと比較的薄いため、荷重伝達機能は航空機の繰返し走行の影響により低下したとも考えられる。

東京国際空港内の試験舗装では、図-12に示すNC舗装の目地部とローラー転圧コンクリート(RCC)舗装の目地部で測定を実施した。なお、NC舗装とRCC舗装の版厚はともに38cmで、目地構造としては、NC舗装はスリッパ目地を設けた目地で、RCC舗装はのこみぞ目地である。ここでいうRCC舗装ののこみぞ目地は、舗装

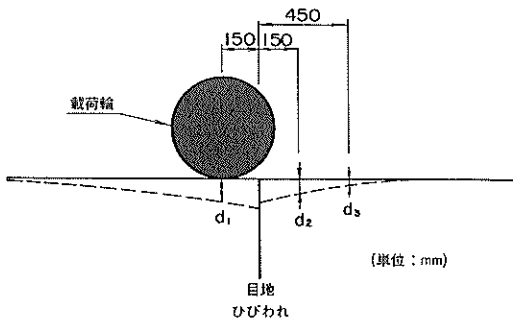


図-7 ダイナフレクトによるたわみ測定法

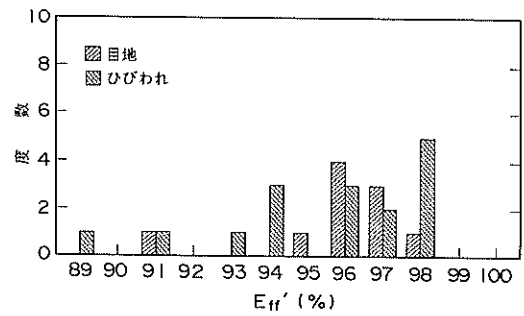


図-8 福岡空港コンクリート舗装での $Eff'$

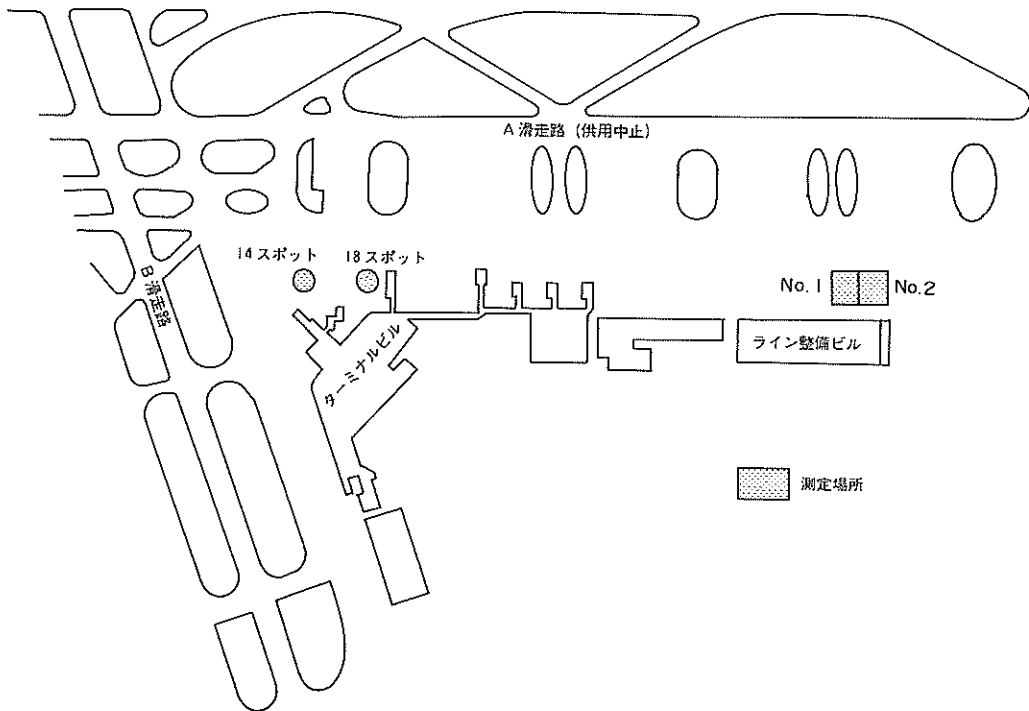


図-9 東京国際空港でのたわみ測定区域



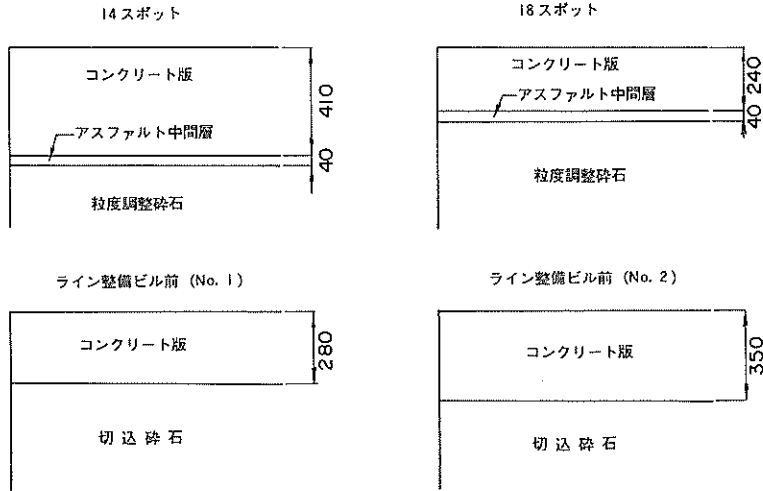


図-10 たわみ測定区域の舗装構造と施工年度

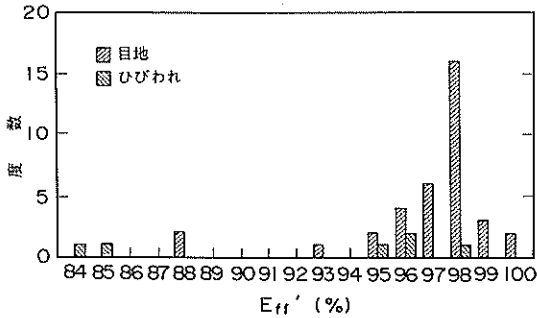


図-11 東京国際空港コンクリート舗装での  $Eff'$

版表面にカッターを入れて、コンクリートのひびわれをその位置に誘導するもので、スリッパやタイバーは設けない。したがって、ひびわれと同じ構造である。

図-13は、その測定結果であるが、NC舗装の目地部についてはほかの空港舗装で得られた結果と同様に、荷重伝達機能が良好なものであることが確認された。以上のことから、調査数は必ずしも多いとはいえないが、供用中の空港コンクリート舗装の目地部は、良好な荷重伝達機能を有しているものと考えられた。

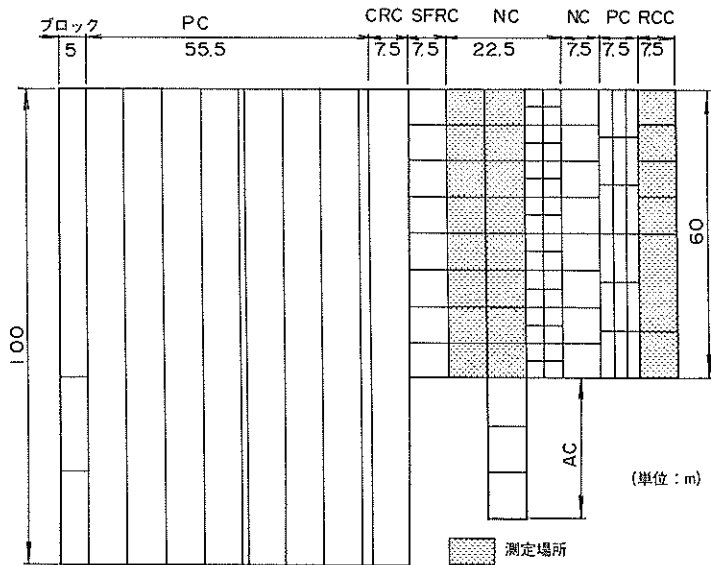


図-12 東京国際空港沖合展開事業地区内の試験舗装

### 2. 3 ひびわれ部での荷重伝達

原型載荷槽に、図-14に示す版厚35cmのCRC舗装を製作し、そのひびわれ部で繰返し載荷試験を実施した。幅の狭いひびわれを複数発生させ、個々のひびわれ幅を小さく抑える構造のCRC舗装を製作すべく、舗装の端部を鉄筋により原型載荷槽の側壁に固定しようとした。しかし、この定着アンカーが期待どおりの挙動を示さなかったことにより、舗装版に発生する引張応力がひびわれ発生応力に至らず、ひびわれの自然発生が期待できない状況となった。

このため、静的破砕剤により強制的にひびわれを発生させた。静的破砕剤とは、珪酸塩と酸化カルシウムを主体とする無機化合物と、その他の有機化合物との粉末状の混合物で、この粉末を水で練り混ぜると膨張反応が生じ、最終的には初期の2倍の体積になる。このときの膨張圧を利用してコンクリートにひびわれを発生させるものである。

これにより発生したひびわれの幅は、図-15に示すように0.38mm, 0.5mm, 1.0mmで、それぞれのひびわれ位置で載荷試験を行った。この試験は、写真-3に示すよう

に、ひびわれを挟んで設置した2個の載荷板により繰返し交番載荷（1秒載荷，1秒除荷）をするものである。載荷重は50tfとしたが、これはB-747型航空機の脚荷重により舗装版に生ずる最大曲げ応力と同じ大きさの応力をもたらす単輪荷重（載荷板直径50cm）である。繰返し載荷回数は25,000回とし、試験前と試験中の0, 500, 1,000, 3,000, 5,000回と、それ以降は5,000回ごとに、ひびわれ部の荷重伝達機能を算定した。そのときには、(1)式で定義される荷重伝達率  $Eff$  を用いた。

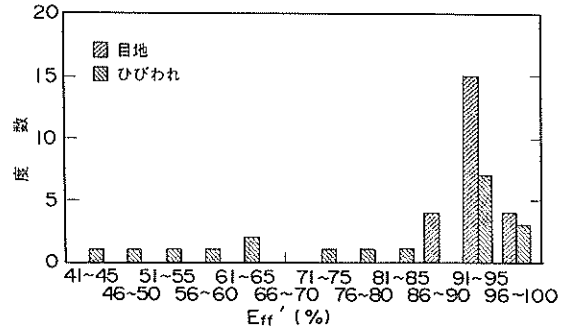


図-13 東京国際空港試験舗装での  $Eff$

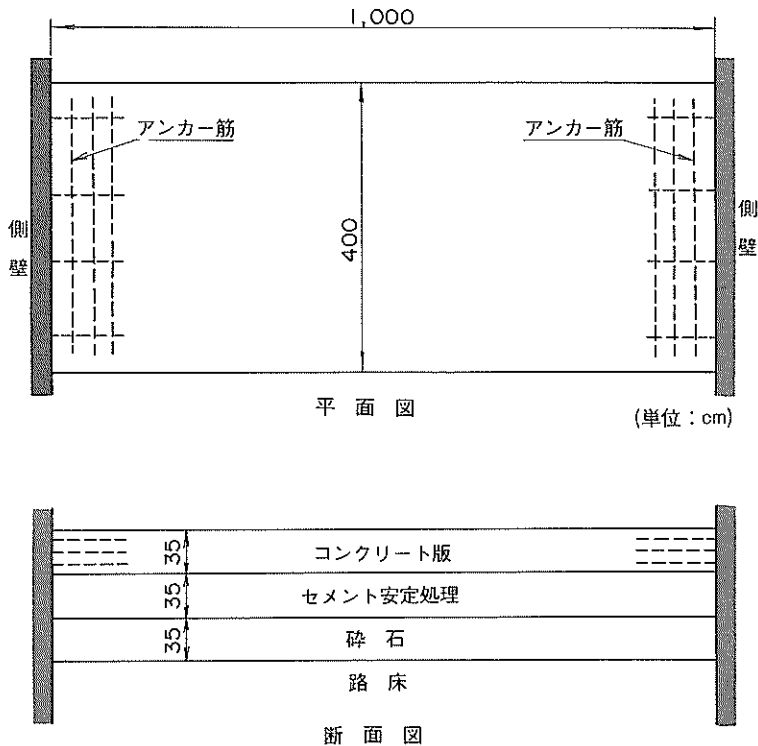


図-14 CRC舗装の試験舗装

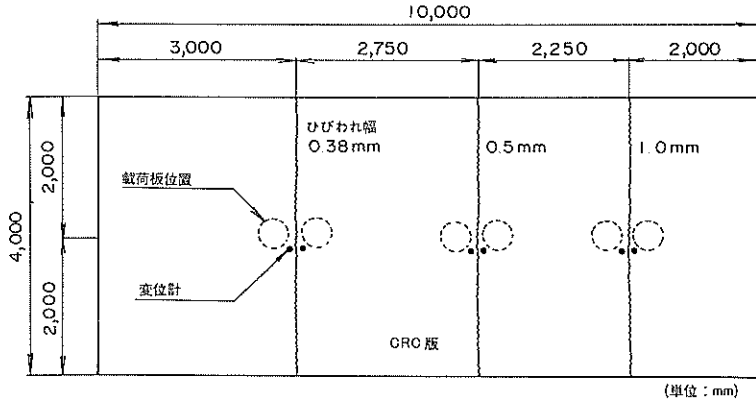


図-15 ひびわれの発生状況

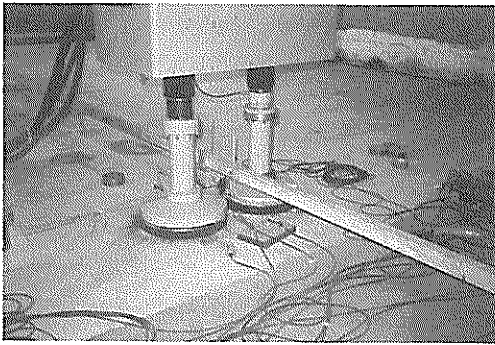


写真-3 載荷試験の状況

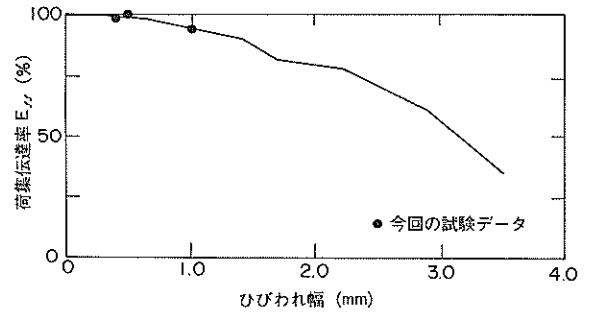


図-16 ひびわれ部での  $E_{ff}$

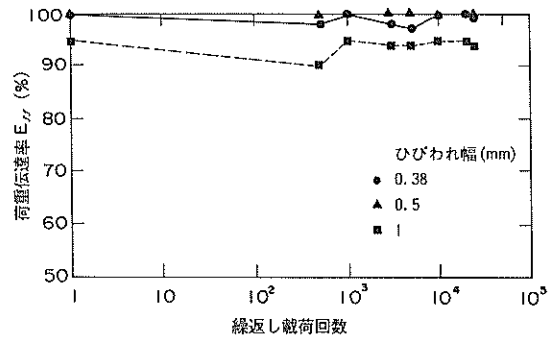


図-17 繰返し載荷にともなう  $E_{ff}$  の変化

図-16は、NC 舗装のひびわれ部（実際にはのこみぞ目地であるがひびわれと同様のものと考えられる）で、すでに得られているひびわれ幅と  $E_{ff}$  の関係図<sup>2)</sup>に、今回の試験におけるデータ（図中の●で示す）を加えたものである。目地部のデータは、支持力係数  $7 \text{ kgf/cm}^2$  の路盤上に、幅  $4.25 \text{ m}$ 、長さ  $4.25 \text{ m}$ 、厚さ  $27 \text{ cm}$  のコンクリート版を4枚打設して、種類の異なる目地を4種類作製した試験舗装に対する試験の結果である。したがって、同一条件の結果ではないが、両者はよく一致しているとみなしてもよいものと思われる。これによると、幅  $1 \text{ mm}$  程度のひびわれ部でも  $E_{ff}$  が  $90\%$  以上と、荷重伝達機能は良好なようである。図-17は繰返し載荷による  $E_{ff}$  の推移であるが、ひびわれ部では、ひびわれ幅によらず、 $25,000$  回の繰返し載荷後も当初の  $E_{ff}$  を保っていることが認められる。

供用中の空港コンクリート舗装のひびわれ部においては、全体として、荷重伝達機能は十分満足できるものであることがわかった。しかし、ひびわれは骨材のかみ合わせによる荷重伝達を期待している構造であるので、ひびわれ幅を小さくできないときには、荷重伝達がほとんど

どなされない危険性があると考えられる。現に、図-13に示した試験舗装においては、荷重伝達率機能がかなり低下しているもののあることがわかった。

ひびわれ幅をある程度に抑えられるならば、荷重伝達が十分期待でき、しかも、繰返し載荷による荷重伝達機能の低下についても考慮する必要がないことがわかった。CRC 舗装の現行の設計法では、ひびわれ部での荷重伝達が期待できるように、ひびわれ幅を十分小さく制御できるようになっている。

### 3. 空港コンクリート舗装版厚設計への応用

#### 3.1 現行設計法の概要

コンクリート版には、交通荷重だけでなく温度変化や湿度変化など、種々の原因によって応力が生ずる。それらは次のようなものである。

- ① 荷重応力
- ② 温度応力
- ③ 湿度変化による応力
- ④ コンクリートの性質に基因して生じる応力
- ⑤ その他の応力

コンクリート版は、いうまでもなく、これらの応力に対してひびわれが生じたりすることのないよう、十分安全でなければならない。これらのなかでは、①と②が最も大きいものであるが、現行設計法では、これらをすべて考慮することは煩雑であるということもあってか、前述のように、荷重による曲げ応力に注目してコンクリート版厚を設計するようになっている。

この荷重による曲げ応力の計算には、コンクリート舗装を Winkler 支承上の板と考えている Westergaard 公式（中央部載荷公式）が用いられている。そして、荷重応力以外のものに対しては、荷重応力に適切な安全率を乗ずることで対処している。この安全率は、表-1<sup>1)</sup>に示すように、交通量（反復作用回数）に応じて3種類の安全率を用いることになっている。支持力係数  $7 \text{ kgf/cm}^2$

表-1 交通量と安全率

設計反復作用回数の区分		
M	N	O
1.7	2.0	2.2

表-2 所要コンクリート版厚

設計荷重の区別	設計反復作用回数の区分		
	M	N	O
LA-1	37	42	45
LA-12	32	46	39
LA-2	30	34	36
LA-3	27	30	32

(単位: cm)

の路盤で NC 舗装を設計する場合を例にとると、B-747-400で代表される大型航空機（荷重区分 LA-1）に対しては、表-2に示すような版厚が必要とされる。

#### 3.2 コンクリート舗装構造の設計要因の検討

##### (1) 荷重伝達率とコンクリート版のひずみ

コンクリート舗装の目地・ひびわれ部の荷重伝達機能を版厚設計に取り入れる場合には、前述のように目地・ひびわれ部での荷重応力を考えなければならない。この荷重伝達機能は、目地・ひびわれ部の片方の版に加えられた荷重が、その目地・ひびわれをとおして、どの程度もう一方の版に伝達されるかを表すものであるから、厳密に言えば、たわみではなく、コンクリート版の応力（ひずみ）を用いて定量化されるべきものであろう。しかし、2. で述べたように、測定の容易さを考慮して、たわみを用いて(1)式、(2)式により荷重伝達機能を定量化することにした。本節では、このたわみから算定されるコンクリート舗装の目地・ひびわれ部における荷重伝達率と目地・ひびわれ部近傍のコンクリート版の応力（ひずみ）について検討する。

まず、目地部の荷重伝達率とコンクリート版ひずみの関係を示そう。図-18は、前述のように、目地幅が荷重伝達率に及ぼす影響を調べるために用いた試験舗装から得られたデータである。この場合のコンクリート版のひずみは目地に沿った方向の目地近傍のもので、コンクリート舗装の設計法の多くで使用されているひずみに対

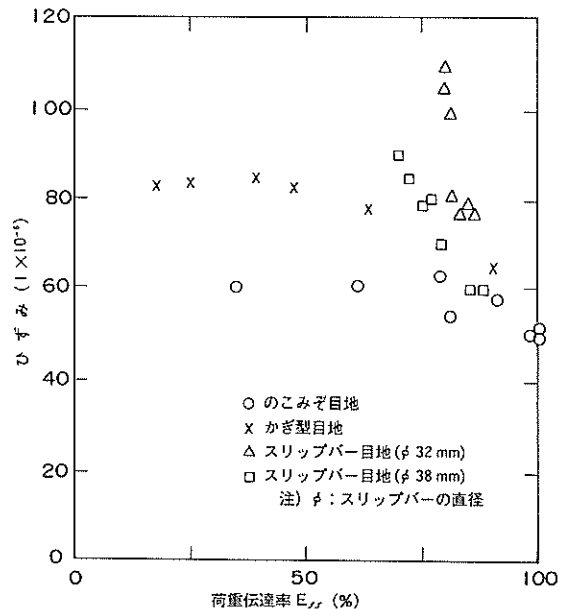


図-18 目地部の  $E_{ff}$  とコンクリート版ひずみ

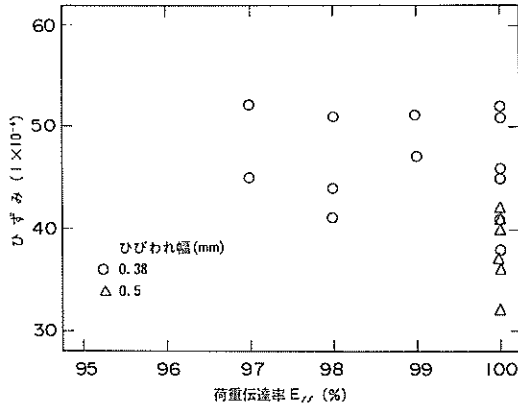


図-19 ひびわれ部の Eff とコンクリート版ひずみ

応している。この図から、荷重伝達率が大きくなるにつれてひずみも減少していることがわかる。また、その減少の割合は、荷重伝達機能の良好な範囲、すなわち、Eff が70%以上となっている範囲で、比較的大きくなっていることがわかる。

次に、ひびわれ部でのデータを図-19に示す。これは、2. 3で述べた連続鉄筋コンクリート舗装における試験結果から得られたものである。前掲の目地部の場合には、目地幅を変えることによって種々の荷重伝達率のデータが得られたが、ひびわれの場合には、3種類のひびわれ幅に対する繰返し載荷試験時のデータであるため、結果として得られた荷重伝達率の範囲は狭いものとなっている。そのため、たわみによる荷重伝達率とコンクリート版のひずみの関係として、明確なものは得られていない。しかし、ここで得られたようなひびわれ幅が比較的小さい範囲では、ひびわれ部の荷重伝達機能は繰返し載荷に対しても良好さを維持できることが、コンクリート版のひずみからみても確認できた。

以上のように、コンクリート舗装の目地・ひびわれ部においては、荷重伝達率が大きくなるほどコンクリート版のひずみが小さくなることが確認された。この点について、数値解析により求めてみることにしよう。ここでも、前述の Winkler 支承上の平板の有限要素解析を用いて、航空機として B-747 を選び、支持力係数  $7 \text{ kgf/cm}^2$  の路盤上のコンクリート版の厚さと応力の関係を調べてみた。図-20はその結果<sup>2)</sup>であるが、図-18や19に示した実測値の傾向とよく合致していることがわかる。2. 3で示したように、供用中のコンクリート舗装の目地部やひびわれ部では、荷重伝達率は90%以上得られていることが観察された。この程度の荷重伝達率が確保されて

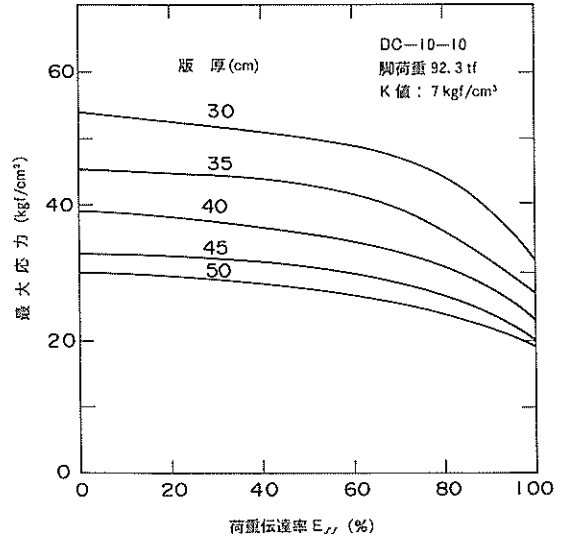


図-20 数値解析による Eff とコンクリート版ひずみ

いれば、この図から、コンクリート版の曲げ応力も縁部載荷の場合 (Eff = 0) の75%程度に減少することがわかる。この値は、近年改訂された米国連邦航空局のコンクリート舗装設計法でも採用されているものでもある。このようなこともあって、今回検討するコンクリート舗装構造の設計法では、目地部・ひびわれ部での荷重伝達率を90%程度と見込むことにする。

#### (2) 温度応力

コンクリート版に生ずる応力として、荷重によるもの以外に考慮すべきものは、温度変化によるものであろう。いうまでもなく、この応力は、温度変化が生じたとき、自重や路盤との摩擦によって、コンクリート版が自由に変形できないことに起因するもので、以下の3種類に分類できる。

- ①温度変化によって生ずる水平方向の圧縮または引張応力
- ②コンクリート舗装版の上下面の温度差によって生ずるそり拘束応力
- ③コンクリート舗装版内の温度分布の不均一によって生じる内部応力

このうち、最も影響の大きなものが②であるとされ、わが国の道路舗装では、次式によりその大きさ(③も含めて)を算定している<sup>9)</sup>。

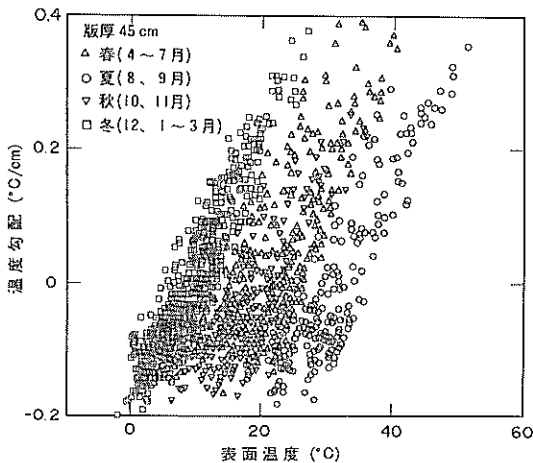
$$\sigma_t = 0.35 \cdot C_r \cdot \alpha \cdot E \cdot \theta' \dots \dots \dots (3)$$

表一三 そり拘束係数<sup>4)</sup>

収縮目地間隔(m)		5.0	6.0	7.5	8.0	10.0	12.5	15.0
拘束係数 $C_r$	温度差が正の場合	0.85	0.91	0.95	0.95	0.96	0.97	0.98
	温度差が負の場合	0.40	0.55	0.73	0.78	0.90	0.93	0.95

ここに、 $\sigma_t$  : そり拘束応力(kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $C_r$  : そり拘束係数(表一三)  
 $\alpha$  : コンクリート版の膨張係数  
 (1×10<sup>-5</sup>/°C)  
 $E$  : コンクリート版の弾性係数(kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $\theta$  : コンクリート版の上下面温度差(°C)

わが国の空港コンクリート舗装は、道路舗装に比べて、コンクリート版が厚く、平面的にも大きいことから、この算定式の適用性については詳細な検討が必要であろう。しかし、その点については現在までのところ検討されていないので、今回は(3)式を用いて温度応力を算定することとした。



図一21 コンクリート版の表面温度と深さ方向温度勾配

表一四 コンクリート版の上下面での温度差<sup>5)</sup>

	正の温度差 (°C)	負の温度差 (°C)
PC 舗装(18cm)	9.4	-2.9
CRC舗装(38cm)	14.1	-6.3
NC 舗装(38cm)	13.9	-7.6
NC 舗装(43cm)	14.7	-8.6
RCC舗装(38cm)	17.0	-8.1

図一21<sup>3)</sup>には、野比実験場に建設した厚さ45cmのコンクリート試験舗装の表面温度と、コンクリート版の深さ方向の温度分布を直線とみなした場合の温度勾配の3年間の測定データを示してある。これによると、温度勾配の最大値は、正、負のそれぞれで、ほぼ0.4°C/cm、-0.2°C/cmであることが認められる。

また、表一四<sup>5)</sup>は、東京国際空港内の試験舗装で得られたコンクリート版の表面と底面の温度差を示したものである。このうち版厚の最も小さいPC舗装を除いて、ここで対象としている版厚のものを考えれば、コンクリート版表面と底面の最大温度差は15°C、-10°C程度(それぞれ、正、負の場合)とみなしてよいものと考えられた。

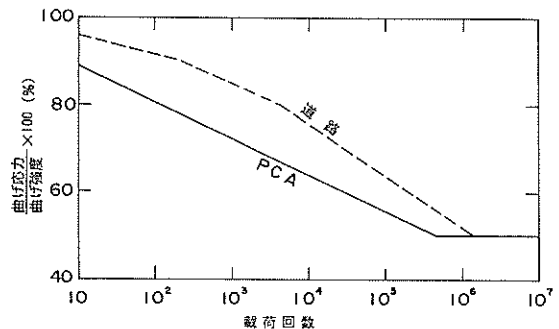
以上に示した温度データを用いて、コンクリートの弾性係数を350,000kgf/cm<sup>2</sup>、収縮目地間隔を7.5mとした場合の温度応力を計算すると、温度勾配が正、負の場合で、それぞれ、21kgf/cm<sup>2</sup>、-8kgf/cm<sup>2</sup>程度(コンクリート版底面)となった。

(3) 疲労破壊

舗装は交通荷重が繰返して載荷するものであるから、構造設計においても舗装を構成する材料の疲労性状を考慮しなければならない。コンクリート舗装では、一般に、コンクリート版の疲労性状のみが考慮されている。

図一22は、PCAが設計に際し考慮している疲労曲線<sup>6)</sup>とわが国の道路舗装設計法で用いられている疲労曲線<sup>4)</sup>を示したものである。両者を比較すると、明らかに道路舗装設計法の疲労曲線の方が疲労強度は大きく、10%以上の差がでていところもある。また、PCAの疲労曲線では、曲げ強度の50%の応力が生ずるような荷重を繰返し与えても、コンクリートは破壊しないとみなしている。

このコンクリートの疲労性状に関しては、(2)で述べた温度応力の場合と同様に、わが国の空港舗装に用いら



図一22 コンクリートの疲労曲線

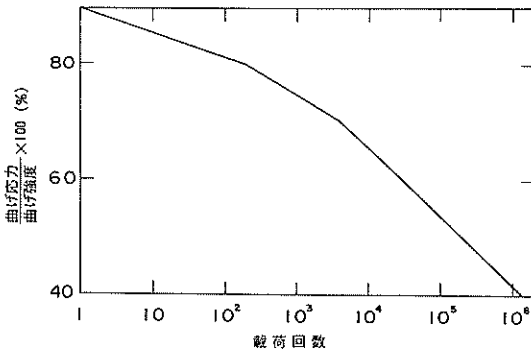


図-23 修正したコンクリートの疲労曲線

れるような材質のものに関するデータは見受けられない。そこで、ここでは、前掲の疲労曲線を用いることとするが、わが国の空港舗装に使用する材料を考慮すれば、PCAの疲労曲線よりもわが国の道路舗装のものを採用したほうが適切であろうと判断した。

3. 3 空港コンクリート舗装の版厚算定法の検討  
本節では、3. 2で述べた要因を取り込んで、空港コンクリート舗装の版厚算定法について検討する。

まず、荷重によりコンクリート版に発生する応力については、目地部載荷のものを使用することとし、目地部の荷重伝達率を90%とみなした。具体的には、前述の有限要素法により応力を計算している。

二つ目の温度応力については、(3)式によりそり拘束応力と内部応力を併せたものが算定可能であり、路盤との摩擦応力も算定可能であるとの報告もある<sup>7)</sup>。しかし、荷重応力と組み合わせた応力状態に対する検討、特に疲労問題に対するものはまだ確立されてはいないと思われる。そこで、ここでは、この温度応力の値そのものをコンクリート版厚の算定法に直接取り入れることはせず、荷重応力に対する疲労曲線を修正することによって、温度応力の影響を考慮することにした。

最後のコンクリートの疲労強度としては、前述のように、わが国の道路舗装の設計法で採用されているものを使用することとする。これに、上述の温度応力を勘案して、疲労曲線の縦軸の値(コンクリートの曲げ強度に対する応力の比)を10%減少させたものを用いることとした。これは、温度応力(ここでは、その大きさを正負の最大温度応力の平均値の5kgf/cm<sup>2</sup>とみなしている)を永久応力と考えて、荷重による疲労曲線を修正している(図-23)<sup>8)</sup>。

このようにして得られたコンクリート舗装の版厚設計曲線は図-24のようになる。これは、設計対象航空機がB-747-400、路盤支持力係数が7kgf/cm<sup>2</sup>、コンクリートの

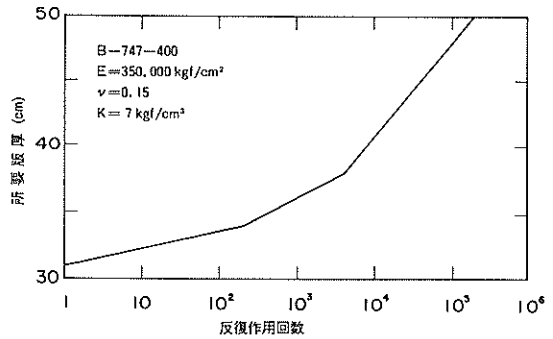


図-24 LA-1 に対する設計曲線

弾性係数、ポアソン比が350,000kgf/cm<sup>2</sup>、0.15の条件でのものである。

この図を用いて実際にコンクリート版厚を計算してみよう。設計反復作用回数は、設計期間中に想定される交通量を用いて、舗装の横断方向の走行分布を考慮に入れて算出されなければならない。しかし、ここでは、横断方向の走行分布を考慮しないで、設計反復作用回数としては交通量そのものを考えた。これは、航空機が、エプロンのスポットなどでほぼ同一の位置を通行する状態を想定したものである。図-25は、図-24から求められた所要コンクリート版厚と設計期間との関係である。なお、年間反復作用回数として、設計年数10年の場合の設計反復作用回数(20,000, 40,000, 100,000回)を考えている。

### 3. 4 各設計法との比較

本節では、現行の空港コンクリート舗装設計法と、道路のコンクリート舗装設計法によりコンクリート版厚を試算し、ここで示したコンクリート版厚算定法によるものとの比較をする。なお、設計条件は原則として以下のものとした。

- ① 対象航空機荷重：B-747-400
- ② 路盤の支持力係数：7 kgf/cm<sup>2</sup>
- ③ コンクリートの曲げ強度：50kgf/cm<sup>2</sup>
- ④ コンクリートの弾性係数：350,000kgf/cm<sup>2</sup>
- ⑤ コンクリートのポアソン比：0.15
- ⑥ 収縮目地間隔：7.5m

#### (1) 現行の空港コンクリート舗装設計法

現行設計法は、前述のように、反復作用回数に対応する安全率を使用してコンクリートの許容曲げ強度を求め、その値に対応するコンクリート版厚を設計曲線から算出するものである。今回の設計条件に相当する安全率は2.0であるので、B-747-400に対するコンクリート版厚と曲げ強度の関係から、所要版厚が42cmと求められる。

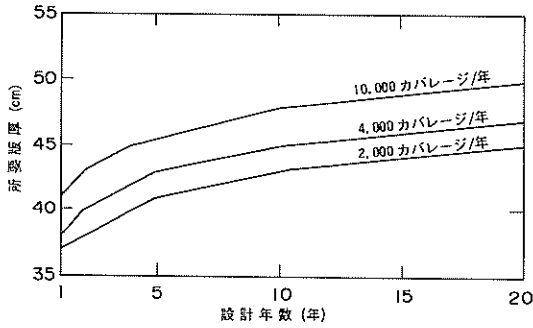


図-25 設計期間とコンクリート版厚

## (2) 道路コンクリート舗装設計法

この設計法は、舗装版縦縁部の輪荷重による曲げ応力と温度応力を計算し、疲労を考慮して版厚設計を行うものである。荷重応力の算定にあたっては、セメントコンクリート舗装設計要綱に掲載されている計算式を用いたが、輪荷重は等価単輪荷重を用いている。また、温度応力についても同要綱によったが、空港コンクリート舗装の場合に近いものとするために、版厚が最も大きい条件下のものを採用した。

この設計法では、次に、それぞれの温度応力の場合の交通荷重の繰返し回数を求めることになっている。空港舗装の使用時間（ほぼ5時から23時の間）を考慮して、温度差正負の比率を9：1とし、各温度状態の場合の疲労抵抗を計算・合計して疲労抵抗合計値を求める。これが1.0となったときが求める版厚である。計算の結果、所要版厚は50cmとなった。

## (3) 各設計法の比較

今回まとめたコンクリート版厚算定法によって、上記の条件で所要版厚を算定すると43cmとなった。

このことから、コンクリート版が最も厚く算定されたのは道路舗装設計法による場合で、次に、今回の版厚算定法、現行空港舗装設計法の順となっていることがわかった。今回の版厚算定法と道路舗装設計法とでは、設計への温度応力の取り込み方が著しく異なっていることが、両者の間の大きな差をもたらしたものと考えられる。また、ここで示した設計法と現行設計法との版厚の差は2cm程度と、非常に近い結果が得られることもわかった。今回は荷重応力に主眼をおいた検討であるので、この点だけから今回の版厚算定法の妥当性を導き出すことはできない。今後のさらなる検討が必要であろう。

## 4. 結論

供用中の空港のコンクリート舗装の目地部・ひびわれ

部の荷重伝達機能について、FWDを用いて評価するとともに、試験舗装によりひびわれ部の荷重伝達について検討した。その結果の応用として、コンクリート版厚の算定法について考察した。得られた知見は以下のようにまとめられる。

- ① 20tfのFWDを使用して、コンクリート舗装の目地部・ひびわれ部の荷重伝達機能を定量化する方法を示した。
- ② 供用中の空港コンクリート舗装の目地部では、そのほとんどで、90%以上の荷重伝達機能が確保できていることがわかった。
- ③ ひびわれ部でも、ひびわれ幅をおよそ1mm以下に抑えられるならば、荷重伝達機能は良好なものであることが認められた。また、耐久性についても十分であることがわかった。
- ④ 目地部・ひびわれ部の荷重応力に及ぼす荷重伝達率の影響を定量化して、これを取り込んだコンクリート版厚算定法を検討した。この中では、温度応力、疲労といった点についても考慮している。
- ⑤ ④の版厚算定法と、現行の空港コンクリート舗装設計法、道路舗装の設計法とで得られるコンクリート版厚を比較検討したところ、最も厚いのは、道路舗装設計法、そして、今回の方法、現行設計法の順となった。

## 5. あとがき

本資料では、空港コンクリート舗装の目地部・ひびわれ部での荷重伝達機能についての一連の研究をまとめた。現地調査と試験舗装による調査で得られた荷重伝達機能に関する成果を、空港コンクリート舗装の版厚設計に反映させる方策としては、3.に述べた方向があろう。しかし、現行のわが国の空港コンクリート舗装構造設計法を合理化するためには、今後のさらなる研究が不可欠であるとともに、各地の空港での現地調査が必要とならう。

今後、航空機の大型化や運航便数の増加によって、空港にコンクリート舗装が使用される機会がさらに増加するものと思われる。そのようなコンクリート舗装の構造設計法を合理的なものとするためには、温度応力の算定、温度荷重作用下での疲労問題、設計反復作用回数の取り込み方等、今後も検討を重ね、今回示したものを設計法へと高めなければならない。

コンクリート舗装の構造設計では、版厚の算定だけに重点がおかれ、路盤以下はコンクリート版を支持する能力だけ、すなわち路盤支持力係数という変形係数だけが



注目されている感がある。しかし、交通荷重の極めて大きい空港舗装については、荷重の繰返し載荷にともなう路盤以下の材料特性の変化についても検討する必要がある。

20 tFWDの導入に関しては第二港湾建設局東京空港工事事務所のご支援をいただいた。また、東京国際空港、福岡空港での現地調査では、東京航空局東京空港事務所、第二港湾建設局東京空港工事事務所ならびに横浜調査設計事務所、第四港湾建設局博多港工事事務所にご協力いただいた。さらに、試験舗装（CRC舗装）に関する成果は、新東京国際空港公団から委託された試験の結果である。また、FWDによるたわみ測定ならびに載荷試験時には、土質部滑走路研究室の皆様にご協力いただいた。各位に対して深く感謝いたします。

(1991年3月30日受付)

#### 参考文献

- 1) 運輸省航空局：空港コンクリート舗装構造設計要領，航空振興財団，121p.，1990.
- 2) 福手 勤，八谷好高，山崎英男：コンクリート舗装の目地部における荷重伝達機能，港湾技術研究所報告，第21巻，第2号，pp.207-236，1982.
- 3) 八谷好高，佐藤勝久，田中孝士：コンクリート舗装構造の非破壊評価法の開発—フォーリングウエイトデフレクトメーターによる，港湾技術研究所報告，第26巻，第2号，pp.465-492，1987.
- 4) 日本道路協会：セメントコンクリート舗装要綱，275p.，1984.
- 5) 運輸省第二港湾建設局：東京国際空港エプロン舗装設計手法調査報告書，1990.
- 6) Packard, R.G. : Design of Concrete Airport Pavement, EB050. 03P, Portland Cement Association, 61p. , 1973.
- 7) 岩間 滋：コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究，土木学会論文集，第111号，pp.16-46，1964.
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編），200p.，1986.

港湾技研資料 No. 710

1991・6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1991) by P.H.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a  
maching language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複  
写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。