

港湾技術資料

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

No. 521 June 1985

コンクリート舗装目地の荷重伝達特性に関する比較試験

八 谷 好 高
佐 藤 勝 久
田 中 孝 士

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. 試 験 舗 装	4
2.1 目地構造	4
2.2 試験舗装の製作	6
2.3 載荷試験	8
3. 目地の荷重伝達機能	10
3.1 荷重伝達機能の定量化	10
3.2 初期状態での目地の荷重伝達機能	10
3.3 繰り返し走行載荷が目地の荷重伝達機能に及ぼす影響	15
4. 目地構造の問題点	19
4.1 目地の荷重伝達機能がコンクリート舗装の力学的性状に及ぼす影響	19
4.2 目地部の応力集中	22
5. 結 論	24
6. あとがき	25
参考文献	25

Comparative Tests on Efficiency of Load Transfer at Joints in Concrete Pavements

Yoshitaka HACHIYA*
Katsuhisa SATO**
Takashi TANAKA*

Synopsis

A degree of load transfer at joints varies with joint openings caused by temperature changes and also with repetitive loadings. Two conventional joints and four improved joints have been investigated on such structural functions by loading tests on test pavements. These improved joints are keyed joints with dowel bars whose number is smaller than that in case of regular dowel bar joint, capped dowel bar joint which makes it possible for the slab to move along the joint, and improved keyed joint which has been precast and has elliptical configuration instead of angular key. As a result, the following conclusions have been obtained.

- (1) A validity of efficiency of load transfer at joints (E_{ff}), which is calculated using deflections adjacent to the joint, has been verified on the view of strains on the surface of concrete slab. E_{ff} decreases as the joint opening and/or the number of repetitive loadings increase, but their correlations vary at each joint structure.
- (2) In case of the joint where the load is supposed to be transferred by aggregate interlocks or key and key-way, the possibility of the joint faultings is high because of the stress concentration. The intensity of the stress caused in the concrete at the vicinity of the keyed joint increases to 80% of the maximum stress on the slab surface. The improved keyed joint can lessen the severity of the stress concentration.
- (3) The keyed joints with dowel bars are inadequate and the capped dowel bar joint has to be much more improved. The improved keyed joint is also required to be refined, because its E_{ff} has been decreased markedly by repetitive loadings. However, it is concluded that this type of joint has the greatest possibility for a rational joint structure.

* Member of Runways Laboratory, Soils Division
** Chief of Runways Laboratory, Soils Division

コンクリート舗装目地の荷重伝達特性に関する比較試験

八 谷 好 高 *

佐 藤 勝 久 **

田 中 孝 士 *

要 旨

コンクリート舗装の合理的な目地構造を研究開発する一環として、従来から用いられている目地構造およびそれらを改良したいくつかの目地構造の力学的性状、特に荷重伝達機能を調べるために、試験舗装を製作して載荷試験を実施した。この荷重伝達機能は、目地幅の変化や繰り返し載荷の影響を受けるので、その点について定量的に明らかにした。主要な結論を以下に示す。

- (1) 目地の荷重伝達機能は、目地をはさんだ二つの版のたわみを用いて算出される荷重伝達率により定量化できる。
- (2) 目地の荷重伝達機能は、目地幅が増加するにつれて、また繰り返し載荷回数が増加するにつれて低下するが、その程度は目地構造の違いにより異なる。
- (3) せん断力による荷重伝達を期待している目地（かぎ型目地等）では、凹凸部の応力集中による破壊の危険性が高く、従来型のかぎ型目地では、版下面の最大応力の80%もの応力が目地近傍で生ずる場合もあることがわかった。しかしこの応力集中は、かぎの形状を改良することにより、その程度を軽減できると考えられた。
- (4) かぎとスリップバーを併用した目地は、両者の機能がうまくかみ合わず、総合的に十分な機能を発揮できないことがわかった。また、キャップ付きスリップバー目地は、キャップとバーの間の遊びのため、荷重伝達機能の面で問題のあることがわかった。
- (5) 改良かぎ型目地は、目地幅の変化の影響をほとんど受けず、当初は非常に良好な荷重伝達機能を保持していたが、繰り返し載荷により著しい荷重伝達機能の低下を示し、まだ問題があることがわかった。しかし有限要素法による解析等からは、かぎの適正な寸法を選定することにより、改良かぎ型目地が合理的な目地構造となる可能性が大きいと考えられた。

1. ま え が き

Westergaard の公式によるまでもないが、路盤で支持された1枚のコンクリート版（以下では版とする）に荷重が載ったときに版下面に生ずる最大引張り応力は、版中央部よりも版縁部に載荷された場合のほうが著しく大きいことがわかっている¹⁾。空港コンクリート舗装の版縁部では何らかの荷重伝達装置によって隣接する版が相互に連結されているのが普通であるが、この装置が十分な機能を果たさなければ、目地部には版中央部に比べて非常に大きな応力が生ずることとなる。空港舗装は広大で面的な舗装であり、航空機が舗装の端部を通行する

可能性が小さく、また目地の荷重伝達機能が舗装の供用寿命中にわたってその良好さを保持できると考えられていたことから、わが国の空港コンクリート舗装の設計法²⁾では、版厚設計に際し中央部載荷公式を採用することとしている。

しかし、筆者らがすでに報告した研究結果³⁾では、温度変化等により目地が開くにつれてその荷重伝達機能が低下することから、版の載荷重に対する安全率が供用寿命中にわたって当初設定した値を必ずしも確保できていないという危険性のあることが指摘されている。また、代表的な目地の1つであるかぎ型目地には、目地部または目地に起因する版の破損が多いことから、その使用は

* 土質部 滑走路研究室

** 土質部 滑走路研究室長

避けるべきであるとする指摘⁴⁾もある。これらのほか、スリッパ目地には、コンクリート版の目地に沿った方向の動き(ずれ)を吸収できないことに起因するクラックが発生するという事例も報告されている⁵⁾。このようなことを始めとして、目地に関しては今後解決すべき種々の問題点が残されているため、筆者らは現在、以下の点に特に着目して合理的な目地構造の研究開発を進めている。

- ① 温度変化等による目地の開閉にかかわらず、設計寿命の期間中良好な荷重伝達機能を維持できること
- ② 目地に沿った方向の版の動き(ずれ)を吸収できること
- ③ 経済性に優れていること

この研究開発の中間報告にあたる本資料では、従来から用いられてきている目地構造ならびにそれらを改良したいいくつかの目地構造を設けた実物大の試験舗装を製作して載荷試験を実施した結果について報告する。まず、2.で試験舗装の製作と載荷試験の方法について記し、3.で試験結果をまとめる。そして、4.では目地構造に内在する問題点に考察を加えるとともに、今後の合理的な目地構造の研究開発の方策についても触れることとする。

2. 試験舗装

2.1 目地構造

コンクリート舗装に目地を設ける第一の目的はいうまでもなく、温度変化にともなってコンクリート版に発生する温度応力を減少させることである。この目地には通常、何らかの荷重伝達装置を設けているが、その機能すなわち目地をはさんで片方の版に載荷された荷重を反対側の版へ伝達する機能が、目地構造などによって異なることはすでに報告したとおりである³⁾。その中では、荷重伝達機能が目地部の版下面に生ずる最大引張り応力に大きな影響を及ぼすことが指摘されている。また同時に、この荷重伝達機能は目地部におけるもう1つの問題である版内部の応力集中の点(これは、角欠け、スポーリングといった目地部の破損をもたらす)にも影響を及ぼしていることが示されている。

目地では供用寿命中はもちろんのこと、場合によってはそれ以上の期間にわたって良好な荷重伝達機能が維持されなければならないが、この荷重伝達機能は自然環境、特に温度変化がもたらす目地幅の変化の影響を受けることがわかっている。また、骨材のかみ合わせやかぎのかみ合わせに荷重伝達を頼っている形式の目地では、荷重の繰り返し載荷によって徐々にその機能が低下していくということも指摘されている⁶⁾。

このようなことから、今回の試験では、目地の荷重伝達機能に影響を及ぼす要因として目地幅と繰り返し載荷の2つを取り上げて、実物大の試験舗装によりそれらを評価し、合理的な目地構造を見出すこととした。

空港コンクリート舗装の収縮目地、施工目地の一般的な構造はかぎ型、スリッパ付き突き合わせ型、スリッパ付きのこみぞ型の3種類に分類される(舗装の幅や自由端からの距離によってはスリッパに代わってタイバーが用いられる²⁾)。今回はこれらのなかから、かぎ型、スリッパ付き突き合わせ目地を試験舗装に設けた。

従来から用いられているものの改良型目地構造としてはまずこの両者の併用型を試験に供した。これは、かぎ型目地にスリッパを付加することにより、目地が開くと荷重伝達機能が低下するというかぎ型目地の欠点を改善しようとするものであり、経済性の観点から、スリッパの設置間隔は、標準的なスリッパ目地のものよりも広くしてある。

このほかかぎ型目地でかぎの形状を改良したもの(以下、改良かぎ型目地と呼ぶ)についてもその荷重伝達機能を評価した。かぎ型目地については、凹部、凸部ともその部分に骨材が十分にいきわたらない、あるいはコンクリートの締め固めを十分に行えないという危険性があり、実際の空港舗装での目地の破損例がかぎ型に多いことの1つの理由ともなっている。今回試作した改良かぎ型は、まず第一にこの点に注目し、部材のプレキャスト化を図って所定の強度を確保するとともに、かぎの形状をく形の両端に半円を付けたものとした(凹部と凸部の接触面を水平方向に50mmの長さで確保)。この改良により、従来の角ばりのあるかぎの形状では応力集中が著しいという点、ならびに目地が開くとかぎの凹部と凸部との間に隙間ができて荷重伝達機能が低下するという点の改善を図った。

これらの目地を設けた試験舗装の平面図ならびに断面図は図-1, 2に示すとおりである。この試験舗装には7区画、すなわち7種類の縦目地(施工目地)を設け、それらの力学的挙動を調べた。試験舗装の両端の区画(A, G区画)には膨張目地を介してすりつけ舗装を設けた。各区画の版厚は、A~E区画が45cm, F, G区画がそれぞれ38, 30cmとなっている。このうち、38, 30cmという厚さは設計荷重がLA-1, LA-3の場合の標準的なコンクリート版厚である。また、45cmは今回の載荷試験で使用した載荷装置(DC-8型脚, 90t)に対する所要版厚である(空港コンクリート舗装構造設計要領²⁾に準拠)。

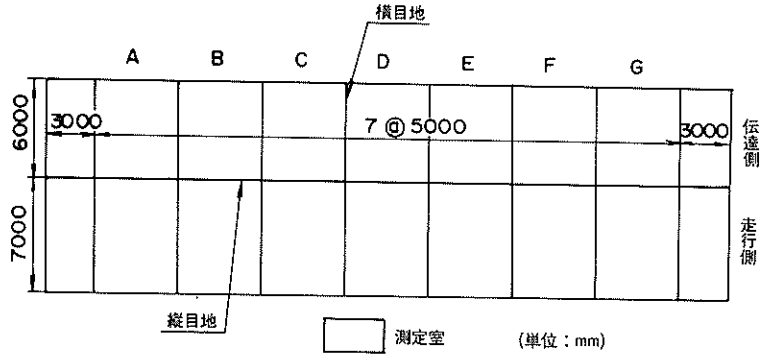


図-1 試験舗装 (平面図)

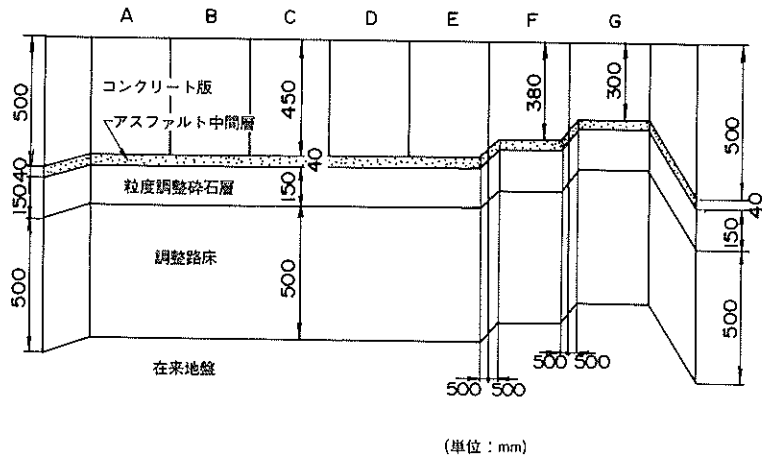


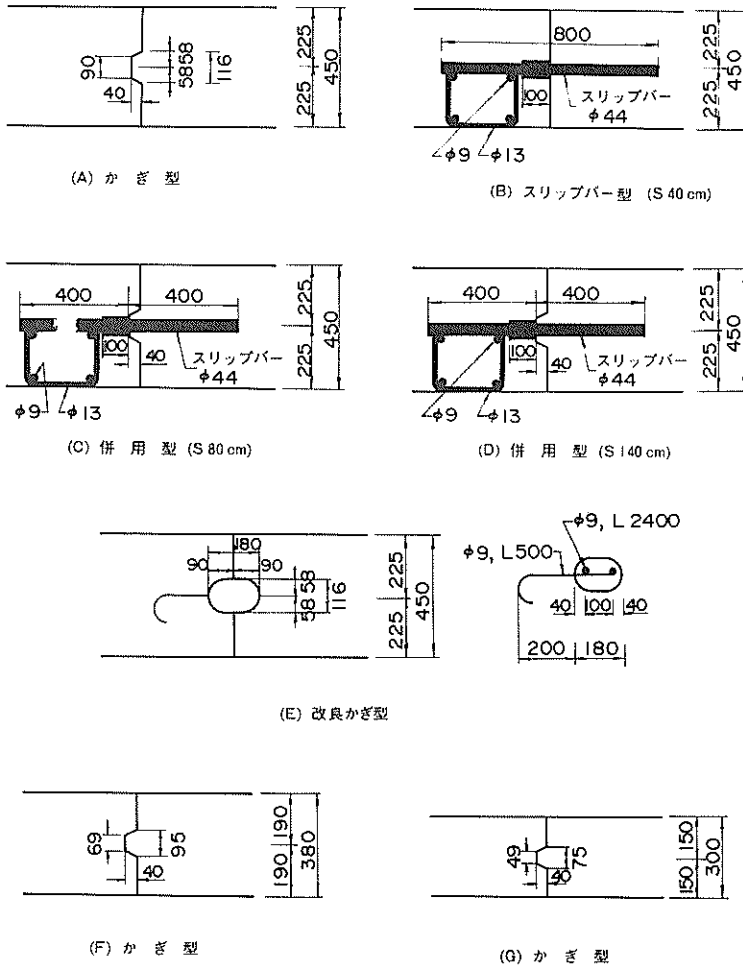
図-2 試験舗装 (断面図)

表-1 試験舗装の版厚と縦目地

この試験舗装の縦目地構造は表-1に示してある。その詳細図は図-3に示すとおりである。かぎ型目地(A, F, G区画)とスリップバー目地(B区画)は空港コンクリート舗装構造設計要領に基づいたものである。かぎとスリップバーを併用した目地(C, D区画)のかぎの形状はA区画のものと同じである。また、スリップバーの寸法はB区画のものと同じであるが、その設置間隔はB区画(40cm)に比べて広く、C, D区画は、それぞれ、80, 140cmとなっている。

このほか、連続鉄筋コンクリート舗装の端部のように温度変化による版の動きが著しい箇所の縦目地としては、目地に沿った方向の動きに対処できない従来型のスリップバーは適当でないとの指摘⁵⁾もあるため、今回の試験舗装では、各区画の横目地として図-4に示すようなキャップ付きのスリップバー目地を採用して、その実用性を調べた。

区画名	版厚(cm)	縦目地構造
A	45	かぎ型
B		スリップバー型 ($\phi 44$ mm, 400 mm 間隔)
C		かぎ+スリップバー型 ($\phi 44$ mm, 800 mm 間隔)
D		かぎ+スリップバー型 ($\phi 44$ mm, 1,400 mm 間隔)
E		改良かぎ型
F	38	かぎ型
G	30	かぎ型



(φ, L: 鉄筋の直径, 長さ, S: スリッパの設置間隔, 単位: mm)

図-3 目地構造 (縦目地)

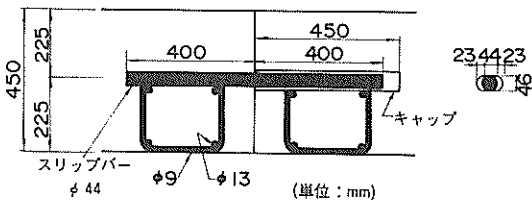


図-4 目地構造 (キャップ付きスリッパ)

2.2 試験舗装の製作

(1) 舗装の製作

試験舗装は当所野比実験場に製作された。工事は昭和57年度に実施され、コンクリート版の打設は昭和58年1月であった。

以下に試験舗装の製作状況の概要を示そう。野比実験

場の在来路床土は砂であり、その支持力係数 (K_{75}) が比較的大きな値を示したので、在来路床土と関東ロームを混合したもの (重量配合比は在来路床土: 関東ローム = 3:1である) を路床として、所定の支持力 ($K_{75} = 5 \text{ kgf/cm}^2$) となるように調整した。このような処理をした路床部分の厚さは 50 cm である。

この路床上に粒度調整碎石からなる 15 cm 厚の路盤を施工したが、その表面上での K_{75} は平均で 7.8 kgf/cm^2 であった。この粒度調整碎石路盤上に 4 cm 厚のアスファルト中間層を施工し、さらに伝達側の区画にビニールシートを敷いて、路盤以下の工事を終了した (このビニールシートは載荷試験時に目地が開きやすいように、すなわちコンクリート版が移動しやすいようにするためのものである)。

コンクリートは、まず走行側のE～G区画とG区画に隣接するすりつけ部を打設して、次に残りの走行側区画を打設した。そして約2週間経過後に伝達側の全区画のコンクリートを2日間で打設した（このときは、いわゆる間打ちであった）。このコンクリートの設計基準曲げ強度は材令4週間で50kgf/cm²であり、施工管理試験からその規定が満足されていることが確められた。その他に、現場発生した供試体についても載荷試験の時期に合わせて曲げ試験を実施した。そのときの曲げ強度は材令約9, 13箇月で、それぞれ、41, 47kgf/cm²であった。

(2) 計器の設置

図-5に土圧計、埋め込み型ひずみ計の設置位置ならびにひずみゲージを貼り付けたスリップバーの位置、後述の長周期振動計を設置するためコンクリート版に設け

たボックスの位置を示す。

土圧計は粒度調整砕石路盤面下10cmの位置に設置した。土圧計に関しては得られるデータの精度がその設置方法に大きく影響されることがわかっているので、設置面ならびにその周囲を十分に締め固めたうえ、設置面には細砂を敷く等、十分に注意して施工した。また、路盤の施工が完了した段階で、これら土圧計の検定をしてそれらの信頼性を高めた。

コンクリート版内に埋め込んだひずみ計は図-6に示すように、目地から10cm離れた地点に、水平に対して45度傾けて設置した。これは従来から指摘されている目地部の応力集中（特にかぎ型目地）の状態を把握する目的で設置した。コンクリート打設時にバイブレーターでひずみ計に損傷を与えないようその設置には十分注意した。

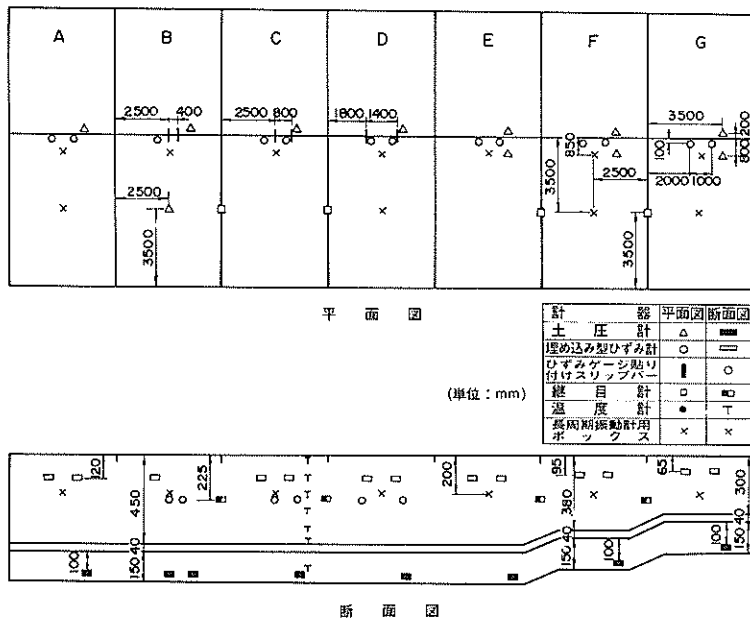


図-5 計器の設置位置

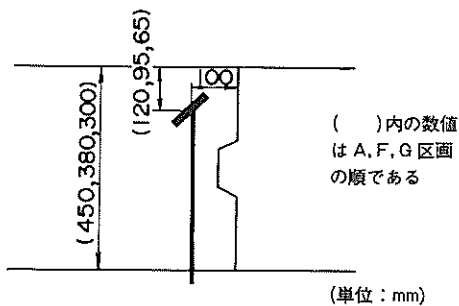


図-6 埋め込み型ひずみ計

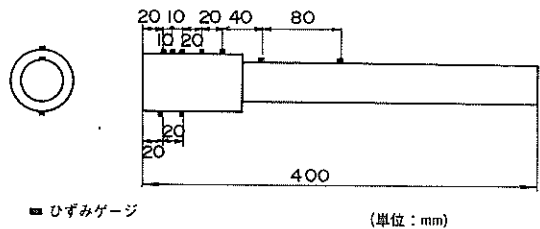
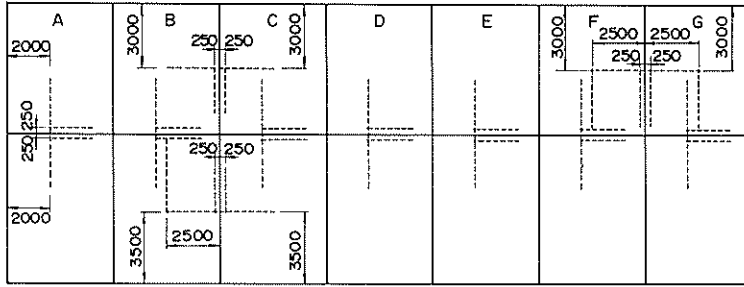


図-7 スリップバーに貼り付けたひずみゲージ



(単位：mm)

図-8 ひずみゲージの貼り付け位置

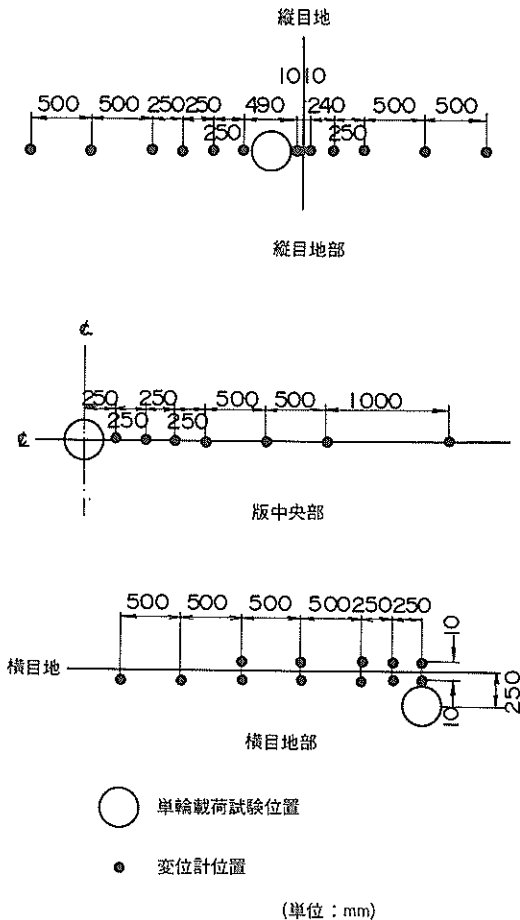


図-9 たわみの測定位置

スリップバーには、工場にてひずみゲージを貼り付けた(図-7)。これはスリップバーに加わる荷重が、区画によってどの程度違うかを調べるために設けた。

図-8にはコンクリート版に貼り付けたひずみゲージの位置を示してある。ゲージの設置は載荷試験を実施

する直前に行ったが、これは直接版厚の算定に結びつくデータを得るためのものであるため、貼り付け、保護に関して十分に注意した。

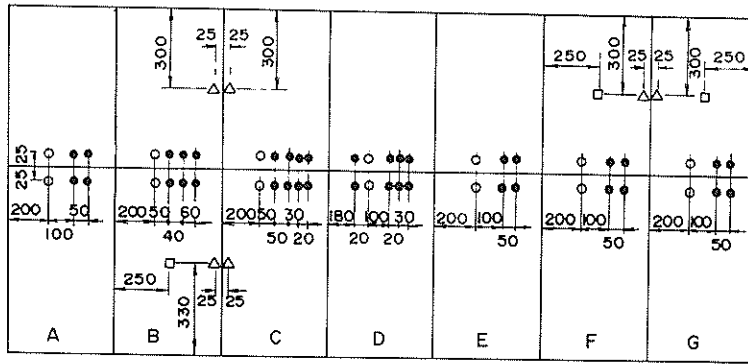
さらに、今回の試験では、脚荷重(60,90 tf)が舗装に加えられたときのたわみを計測するために長周期振動計を用いた。これは地盤をはじめ、建築・土木構造物の常時微動および地震時の振動性状を測定した実績が豊富で、測定周波数範囲は0.1~20 Hz、測定振幅は0.01~1,000 mmとなっている。今回の測定においてはトレーラーを約20 km/hの速度で牽引することにより周期3~5秒(振動数0.3~0.2 Hz)の荷重を与えた。またこの他に単輪載荷試験時のたわみ分布を計測するためにひずみゲージ式の変位計も使用した(この測定地点を図-9に示す)。

2.3 載荷試験

設計期間中にわたる目地の荷重伝達機能を評価するという今回の試験の目的を達成するために、2種類の載荷試験を実施した。1つは、後述の繰り返し走行履歴を与える前に実施したが、自然環境、特に温度変化の影響をみるためのもので、目地幅が荷重伝達機能に及ぼす影響を調べた(初期試験)。もう1つは、航空機等の荷重の繰り返しに及ぼす影響を調べるためのもので、繰り返し走行載荷による舗装の力学的挙動の変化を調べた(繰り返し走行試験)。

それぞれの試験は、目地近傍(縦目地：52箇所、横目地：6箇所)と版中央(3箇所)で荷重を加えたときの舗装の挙動を観測することにより行ったが、その試験位置を図-10に示す。

縦目地に関する試験としては、まず、目地幅を0から5 mmまで1 mmずつ変化させていき、そのたびごとに単輪載荷試験と脚載荷試験からなる初期試験を実施した。そして、初期試験終了後、目地幅を3 mmとして繰り返し走行試験を実施した(3 mmは、目地の開きが特定の



(単位：cm)

- 縦目地部 ○ (単輪・脚載荷)
- (脚載荷)
- 版中央部 □ (単輪・脚載荷)
- 横目地部 △ (単輪・脚載荷)

図-10 載荷試験の位置



写真-1 原型走行荷重車

箇所に片寄らないことを仮定した場合にこの試験舗装の構造で考える最大目地幅である)。この繰り返し走行載荷試験はDC-8型の載荷脚がシャーシの下に付いているトレーラー（原型走行荷重車、写真-1）を縦目地近傍（走行側）に沿って10,000回まで走行させることによるもので、所定の走行回数となったときに脚載荷試験を実施した。さらに、10,000回の走行が終了した時点で単輪載荷試験を実施して、繰り返し走行載荷が目地の荷重伝達機能に及ぼす影響を調べた。

横目地部ならびに版中央部での載荷試験（単輪と脚）としては、初期試験のみを実施した。横目地部においては、前述のようにキャップ付きスリッパを用いた目地の実用性を調べることが目的であるため、キャップ内のスリッパの位置を3種類（キャップの中心とスリッパの中心のずれが0, 3, 5mm）に変化させて載荷試験を行った。

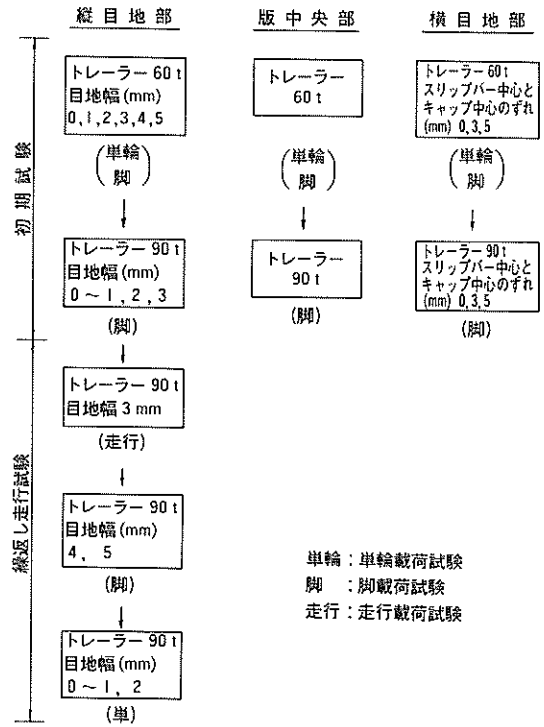


図-11 載荷試験のフローチャート

これらの載荷試験のフローチャートを示せば図-11のようになる。以下で、それぞれの項目について若干の説明をしよう。

(1) 目地幅の調整

前述のように、目地の荷重伝達機能を調べるためには目地幅を種々に変えて載荷試験を実施しなければなら

い。今回の試験舗装においては、各区画の縦目地を油圧ジャッキを用いて開閉することによりそれを実行した。

(2) 舗装の挙動の計測

舗装の挙動は、たわみ、コンクリート版のひずみ（表面と内部）、スリップバーのひずみ、路盤の垂直応力を計測することにより観察した。これらのうち脚載荷試験時のたわみ以外は、すべてデジタルひずみ測定器により測定した。

(3) 初期試験

初期試験としては単輪載荷試験と脚載荷試験の2種類を実施した。

単輪載荷試験では、試験地点に置いた厚さ1cmの硬質ゴム板の上に直径40cmの鋼板を敷き、その上に油圧ジャッキを載せて舗装に荷重を加えた。このときの反力としては60tのトレーラーを用いた。A～E区画については最大荷重が30tfまで5tfごとに舗装の挙動を計測した。また、F区画では最大20tfまで5tfごと、G区画では5、10、13tf時に計測を実施した。なお、この試験では主としてたわみとコンクリート版表面のひずみに注目したが、舗装のたわみは8mビームに取り付けた変位計により測定した。

脚載荷試験はトレーラーの重量を60、90tfの2種類として行った。目地部の載荷試験では、目地に近いほうのタイヤが目地をはさんで反対側の版に載らないように注意した。試験位置は、コンクリート版表面のひずみゲージ（目地に直角、水平の2方向に貼り付けた一連のゲージの中心線の交差点）、土圧計、ひずみゲージを貼り付けたスリップバーならびに埋め込み型ひずみゲージ上に1輪のタイヤが載る位置とし、それぞれの位置の試験ではコンクリート版のひずみ、路盤の垂直応力、スリップバーのひずみならびにコンクリート版内の目地近傍のひずみに注目した。また、この試験でも舗装のたわみを測定したが、それは前述のように長周期振動計によった。

(4) 繰り返し走行試験

繰り返し走行試験は当初、全区画10,000回の走行を予定していたが、F、G区画においてはクラックが発生したため、それらの区画については試験を途中で打ち切った。この繰り返し走行試験においては、所定の走行回数時（1,000、3,000、6,000、10,000回）に脚載荷試験を実施して舗装の挙動を調べた。さらに、10,000回終了時には単輪載荷試験も実施した。

3. 目地の荷重伝達機能

3.1 荷重伝達機能の定量化

温度応力の軽減という目的での目地の構造や収縮・膨張目地の配置等は、今までの実績からみてほぼ確立され

ているとみなすことができるので、目地の力学的評価としては荷重伝達機能の評価を第一に実施すべきであろう。この目地の荷重伝達機能は目地構造や目地幅の違いによって変化することが知られているが、それを定量的に扱うためにたわみを使用して次式のように表した。

$$E_{ff} = \frac{d_2}{(d_1 + d_2) / 2} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 E_{ff} は荷重伝達率、 d_1 、 d_2 はそれぞれ目地をはさんで載荷側と非載荷側の版の目地近傍でのたわみである。

目地構造が異なればその荷重伝達の型式も異なるわけであるが（たとえばきぎ型目地はせん断力のみを伝達するのに対して、スリップバー目地はせん断力の他にモーメントも一部伝達するといわれている）、それらの違いによらず、1つの指標（ E_{ff} ）で荷重伝達機能の優劣を表そうとしているのがこの式である。機能の定量化に際しては、版厚の算定に直接結びつくコンクリート版のひずみに注目すべきであろうが、これまでの経験ではたわみに比べてコンクリート版のひずみは載荷位置のずれ等に非常に敏感であり、測定値は分散の大きなものとなっていることもあって目地の荷重伝達機能の定量化に際してはたわみを用いることとした。

3.2 初期状態での目地の荷重伝達機能

本節では、まず、各区画の縦目地について、(1)単輪載荷試験、(2)脚載荷試験の順で試験結果の概要を述べることにする。そして今回横目地として用いたキャップ付きスリップバー目地について(3)として記す。なお、目地構造の力学的評価を行うためには版厚等、目地構造以外の条件が同一なことが望ましいので、主として版厚が45cmと同一なA～E区画の目地について述べることにする。

(1) 単輪載荷試験

単輪載荷試験の結果としてまずたわみを示そう。前述のようにこの測定は8mビームに取り付けた変位計によった。図-12にはA区画の縦目地に直角方向のたわみ分布を示してあるが、目地が開くにつれて載荷側のたわみが増加して非載荷側のたわみが減少していくことが認められる。このようなたわみ分布の違いは目地幅だけではなく目地構造が異なることによってもみられ、目地幅が4mm程度とほぼ同一であるにもかかわらずたわみ分布は大きく異なっている（図-13）。

それぞれの目地構造での最大たわみと目地幅の関係を示したのが図-14である。この最大たわみは目地近傍で測定したたわみと目地から最も離れた点（載荷側では225cm、非載荷側では150cm）のたわみとの差

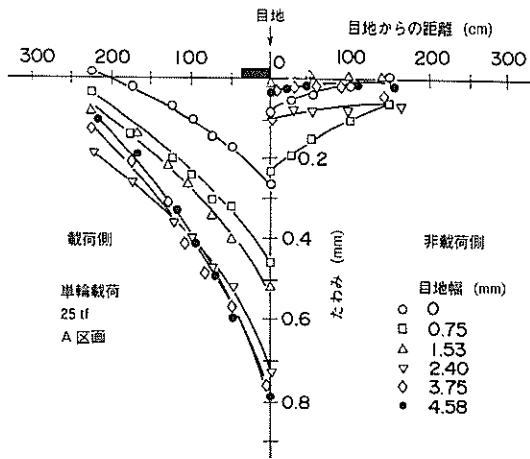


図-12 目地幅がたわみ分布に及ぼす影響

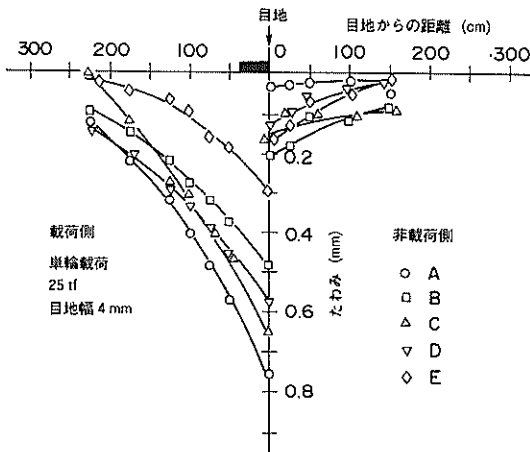
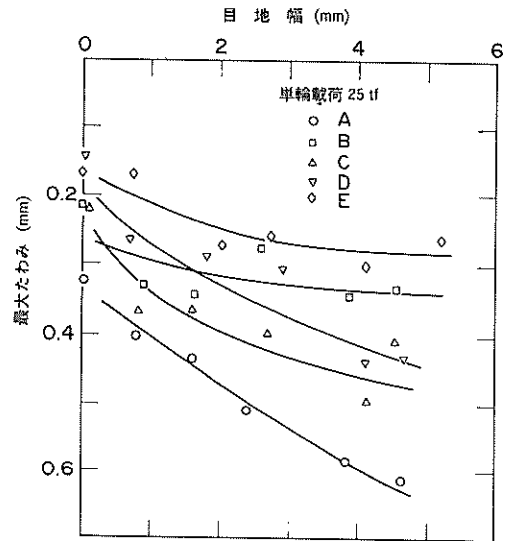
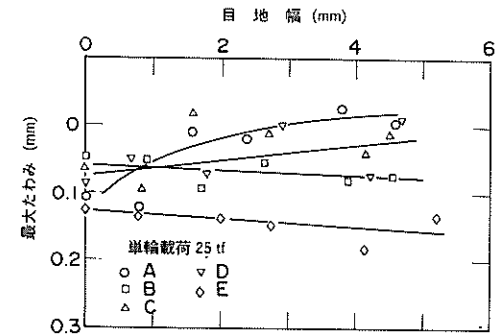


図-13 目地構造がたわみ分布に及ぼす影響



(a) 載荷側



(b) 非載荷側

図-14 目地幅が最大たわみに及ぼす影響

である。この図からA区画（かぎ型目地）のものに最も顕著に目地幅の影響がみられ、かぎ型目地では目地が開くにつれて荷重伝達は十分に行われなくなることが示されているものと考えられる。これに対して、E区画では目地幅が大きくなっても非載荷側のたわみはほとんど変化していないことがわかる。

このたわみを用いて(1)式により算出した荷重伝達率(E_{ff})を目地幅に対してプロットした図-15からは、全体的な傾向として目地幅の増加につれて E_{ff} が低下していくことが認められる。図-14から推測されるように、A区画ではこの傾向が顕著であるが、E区画では目地幅5mmでも E_{ff} は70%というようにあまり低下していない。また、スリッパ目地(B区画)では目地幅が変化しても E_{ff} はほぼ一定であるのに対し、かぎとスリ

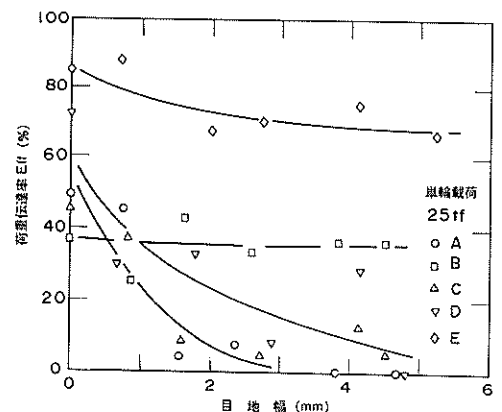
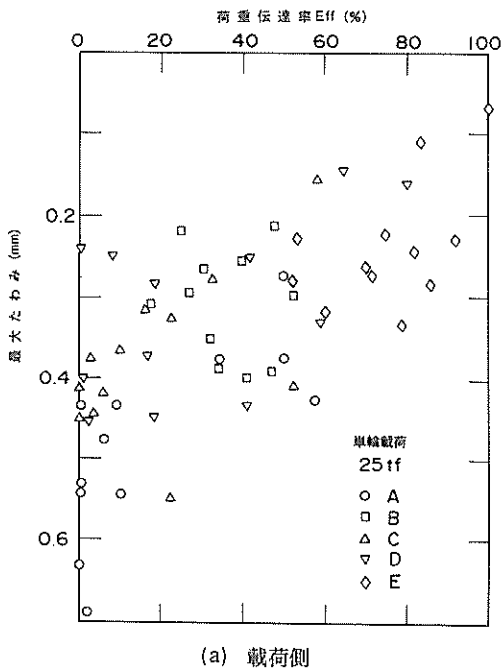


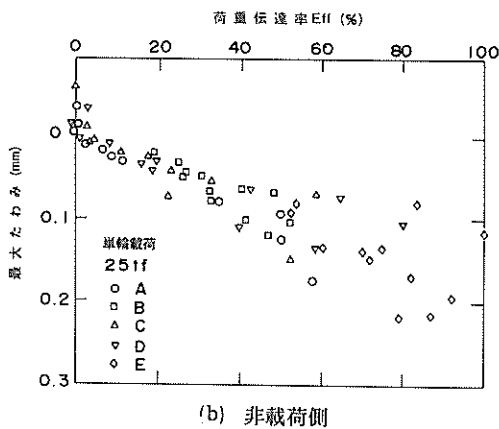
図-15 目地幅が荷重伝達率に及ぼす影響

スリッパを併用した目地（C, D区画）では目地幅の増加にともなう E_{ff} の低下が著しい。このことから、C, D区画のような目地は、目地があまり開かない間はかぎが主体となって荷重を伝達すること、目地が開くにつれてスリッパだけで荷重を伝達するようになるが、スリッパの設置間隔が広いために荷重伝達を十分に行えないということが推定できる。

図-16には E_{ff} と最大たわみの関係を示した。両者の関係は区画によらず1つの帯として表されることがわかる。特に非載荷側のものについては、1本の線といってもよく、たわみについては目地の荷重伝達機能をこの指標で



(a) 載荷側



(b) 非載荷側

図-16 荷重伝達率と最大たわみの関係

表すことの妥当性がうかがえる。

次にコンクリート版表面のひずみを示そう。目地近傍に荷重が載荷された場合、コンクリート版には目地に沿った方向に最大ひずみが生ずるので、ここではそれに注目する。図-17はB区画のひずみ分布を目地幅別に示したものであり、図-18は目地幅は1mmとほぼ同一な時点での各区画のひずみ分布である。たわみと同様に、目地幅や目地構造の違いがひずみ分布に影響を及ぼしていることがわかる。このうちの最大ひずみ（荷重直下のもの）と目地幅の関係を図-19に示した。たわみの場合ほどではないが、目地幅が大きくなるにつれて載荷側のひずみが増加し、非載荷側のひずみが減少していくことが認められる。また、目地が開くにつれてA区画の目地の荷重伝達機能が著しく低下すること、これに対してB, E区画の荷重伝達機能は目地幅が大きくなっても保持されていることが非載荷側の版のひずみからもわかる。

図-20はこの最大ひずみを E_{ff} に対してプロットしたものである。たわみに比べると分散が大きいが、非載荷側の版についてみると両者の関係は一つの帯として表されることがわかる。また載荷側の版についてみれば、

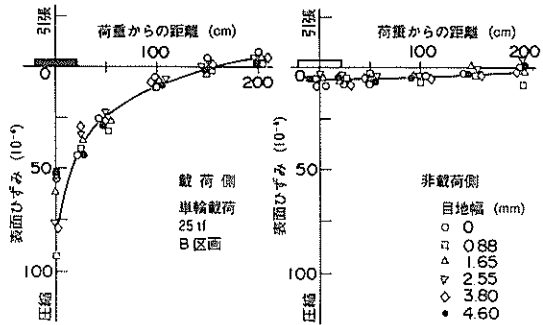


図-17 目地幅がひずみ分布に及ぼす影響

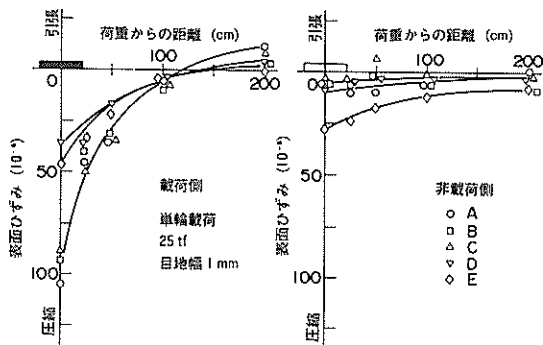
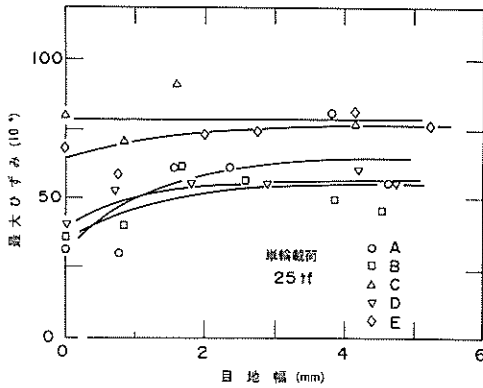
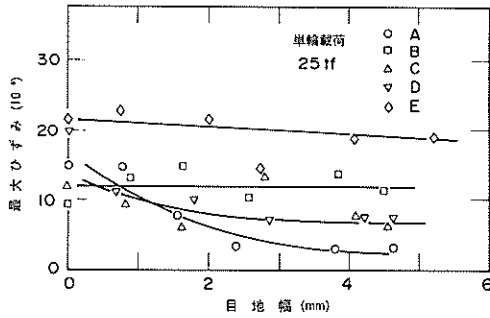


図-18 目地構造がひずみ分布に及ぼす影響



(a) 载荷側



(b) 非载荷側

図-19 目地幅が最大ひずみに及ぼす影響

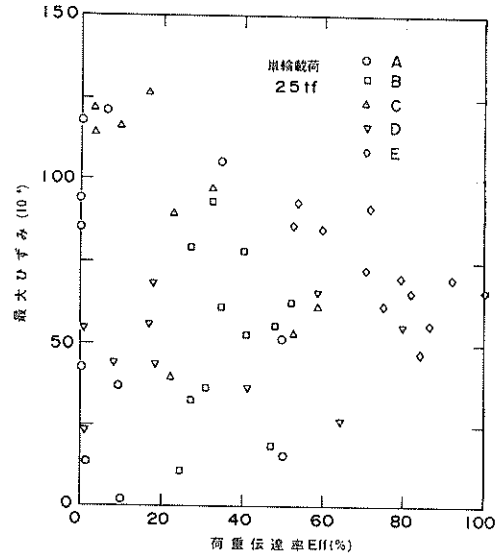
E_{ff} の増加につれてひずみの減少する傾向が区画ごとのデータから読み取れる。これらのことから、たわみを用いた指標である E_{ff} はコンクリート版のひずみ（応力）からみても目地の荷重伝達機能を定量化するものとして適切であることが認められる。

(2) 脚载荷試験

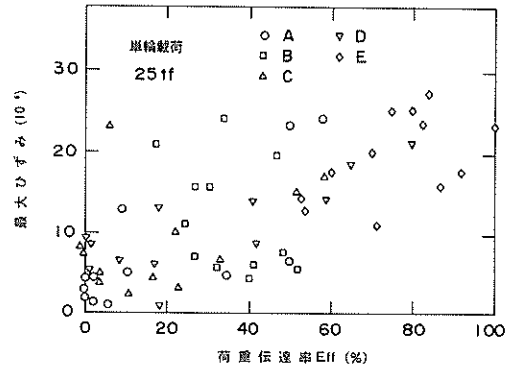
脚载荷試験の結果としてはたわみ、路盤の垂直応力、スリッパのひずみ、目地近傍のコンクリート版内部のひずみに注目した。

図-21 にはたわみと目地幅の関係を示した。この場合のたわみは、载荷側、非载荷側によらず縦目地から80 cm 離れた地点において長周期振動計により測定したものである。単輪载荷試験で得られたものと同様に、各区画とも目地が開くにつれて载荷側のたわみが増加していくことがわかる。また非载荷側のたわみをみれば、目地幅の増加につれて、A, C, D区画のものは減少するが、B, E区画ではほぼ一定かやや増加していくことが認められる。A, C, D区画のうちではA区画の目地の荷重伝達機能の低下が著しい。

図-22 には路盤の垂直応力を示す。これは縦目地か



(a) 载荷側

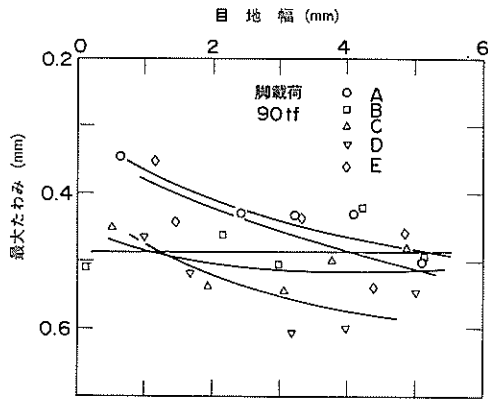


(b) 非载荷側

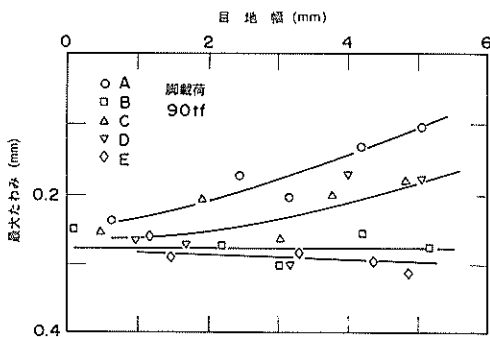
図-20 荷重伝達率と最大ひずみの関係

ら水平方向に 20 cm 離れていて粒度調整碎石路盤の表面から10cm 下方の値である。目地が開くにつれて载荷側の路盤垂直応力は全区画とも増加するが、非载荷側ではA, C, D区画とB, E区画とで測定値の傾向が若干異なっており、前者は目地幅の増加につれて応力が減少してくるのに対し、後者はほぼ一定となっていることがわかる。なかでも、E区画における载荷時と非载荷時での値の違いは他の区画に比較してそれほど大きくないことから、E区画の目地の荷重伝達機能が良好であることが土圧計のデータからも認められる。

スリッパを使用している目地は、B, C, D区画であるが、このうちのD区画のスリッパのひずみ分布を図-23 に示してある。目地が開くにつれてひずみが増加すること、すなわちスリッパに加わる荷重が増



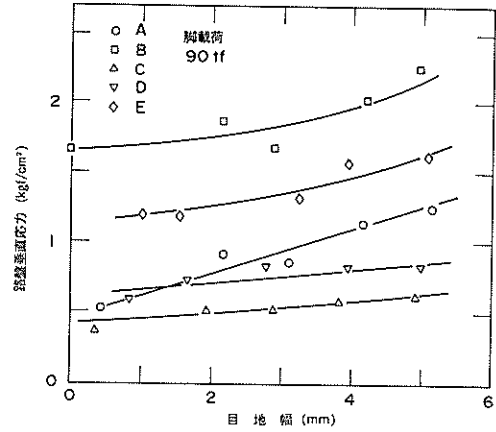
(a) 载荷側



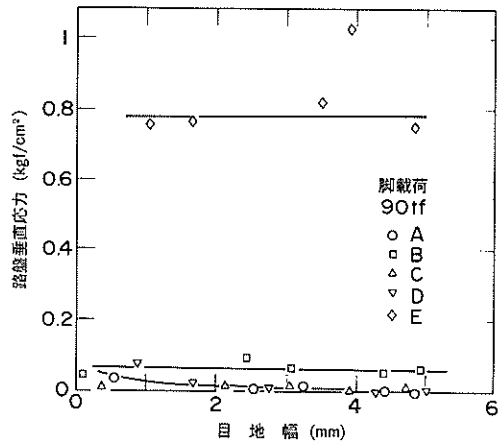
(b) 非载荷側

図-21 目地幅が最大たわみに及ぼす影響

加ることがわかる。このうちの最大ひずみをB, C, D区画で目地幅別に示したものが図-24であるが、区画によらず目地が開くにつれてスリッパーのひずみが増加することがわかる。また、この増加割合はB区画に比してC, D区画のほうが大きい。スリッパーをWinkler基礎上の無限長のはりとして仮定する解析手法⁷⁾によれば、目地幅が0から5mmまで開いてもスリッパーの最大ひずみは16%程度しか増加しないが、同じ目地幅でもスリッパーに加わる荷重が2倍、3倍、4倍になれば(荷重の12.5%を分担していたものが、25, 37.5, 50%を分担するようになるとすれば)、最大ひずみもそれにほぼ比例して、2, 3, 4倍程度となる。このことから、C, D区画においては目地幅の増加にともなうもの以上にスリッパーのひずみが増加していることが明らかであるので、これらの区画では目地が開くにつれてスリッパーに加わる荷重が増加すること、すなわちスリッパーの荷重分担率が増加することが計算により裏付けられた。このようにスリッパーのひずみからみても、併用型目地では目地が開くにつれてスリッ



(a) 载荷側



(b) 非载荷側

図-22 目地幅が路盤垂直応力に及ぼす影響

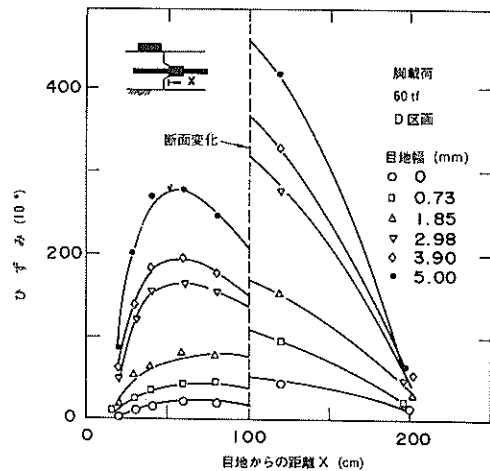


図-23 目地幅がスリッパーのひずみに及ぼす影響

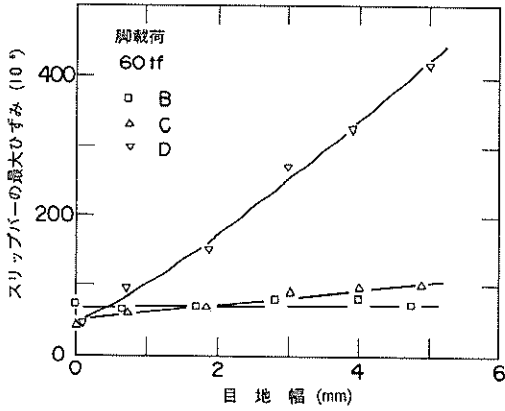


図-24 目地幅がスリッパの最大ひずみに及ぼす影響

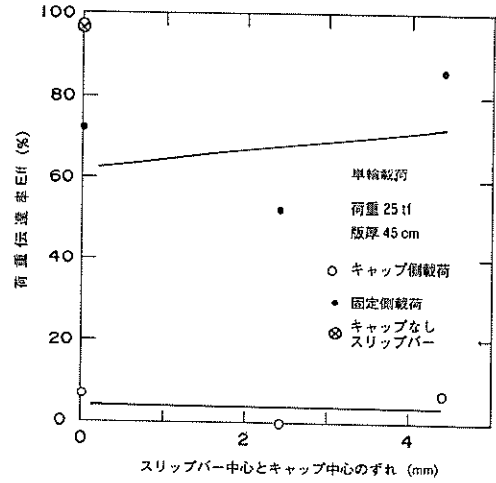
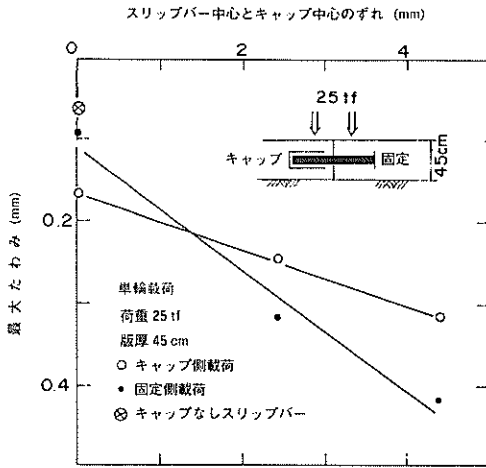
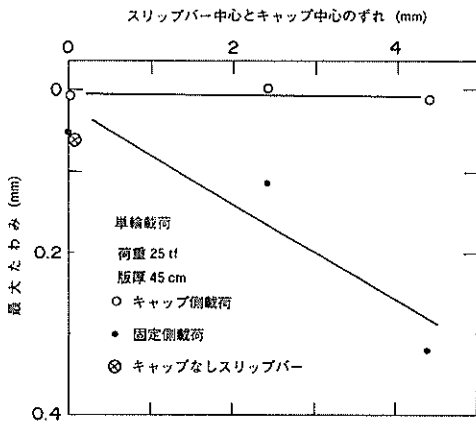


図-26 キャップ付きスリッパ目地の荷重伝達率



(a) 載荷側



(b) 非載荷側

図-25 キャップ付きスリッパ目地の最大たわみ

バーだけで荷重伝達の機能を果たすようになることがわかる。

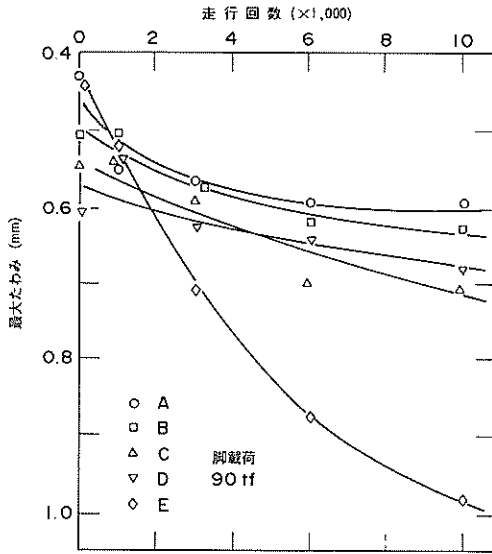
(3) キャップ付きスリッパ目地の荷重伝達機能

試験舗装の横目地（伝達側）に設けたキャップ付きスリッパは、意図したとおりに目地に沿った方向の版の移動を吸収できることがわかった（ただし、今回はスリッパ中心とキャップ中心のずれが 5 mm までの範囲で）。

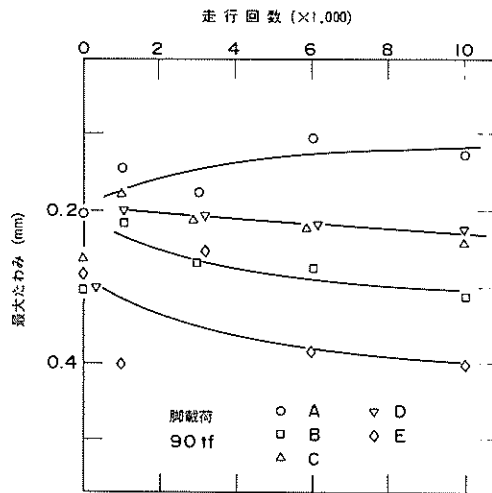
図-25 はスリッパ中心とキャップ中心のずれが舗装の最大たわみにおよぼす影響を示したものである。載荷側のたわみに比べ、非載荷側のたわみには、載荷位置すなわちキャップ側に載荷した場合と固定側に載荷した場合で顕著な違いがみられる。これはキャップの高さの寸法がスリッパの直径より 2 mm ほど大きく、しかもキャップ内で上下どちらかに片寄ってスリッパが設置されたためであると推定される。今回の試験では最大荷重（この目地部を自由縁部とみなした場合の破壊荷重）の 80% 程度の大きさの荷重を載荷したにもかかわらず、舗装の最大たわみは 1 mm 未満にすぎないので、スリッパがキャップ内のちょうど中間の高さに設置してあればまだしも、今回のような場合には目地での荷重伝達がほとんど期待できないということになる。それを示したのが図-26 である。固定側載荷が 80% 程度の E_{ff} を保っているのに対して、キャップ側載荷ではほとんど荷重を伝達していないことが読み取れる。

3.3 繰り返し走行載荷が目地の荷重伝達機能に及ぼす影響

繰り返し走行載荷試験としては全区画の縦目地幅を 3



(a) 載荷側

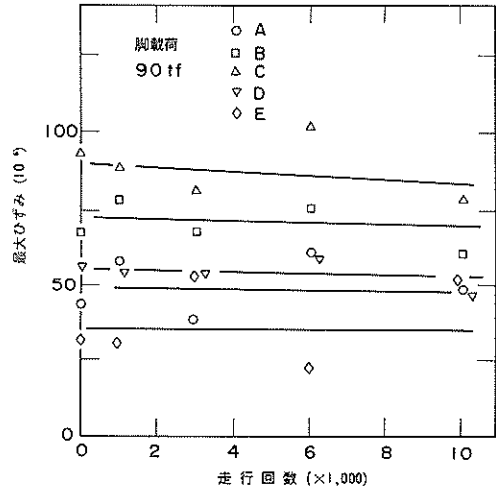


(b) 非載荷側

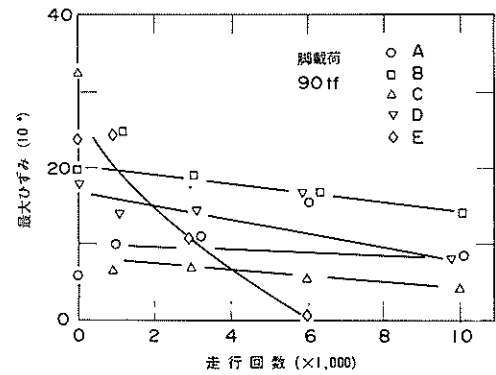
図-27 繰り返し走行載荷が最大たわみに及ぼす影響

mmとした上で重量90tfのトレーラーを縦目地に沿って(走行側)最大10,000回まで走行させた。F、G区画については、走行回数が10,000回となる前に目地部の破損がみられたので、それ以後の走行載荷は実施しなかった。測定機器による舗装の挙動の観測は走行回数1,000、3,000、6,000、10,000回の時点で実施した。

図-27は舗装のたわみの走行回数にともなう変化を示したものである。走行回数の増加につれて、各区画と



(a) 載荷側



(b) 非載荷側

図-28 繰り返し走行載荷が最大ひずみに及ぼす影響

も載荷側の版のたわみが増加していること、A区画以外では非載荷側のたわみも同様に増えていることが認められる。A区画では繰り返し走行載荷にともなって非載荷側のたわみが減少しており、目地の荷重伝達機能が低下してくることを明らかに示している。初期載荷試験では良好な荷重伝達機能を保持していたE区画で、走行回数の増加につれて載荷側のたわみが著しく増加することは注目値する。

繰り返し走行載荷がコンクリート版の最大ひずみに及ぼす影響を示したのが図-28である。載荷側のひずみには繰り返し走行にともなう変化はあまりみられないが、非載荷側については全体としてひずみが減少している。特にE区画では走行6,000回の時点でひずみはほとんど生じていないという程度にまで低下した。

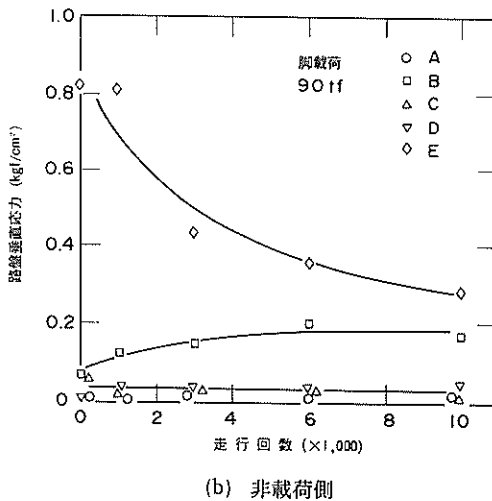
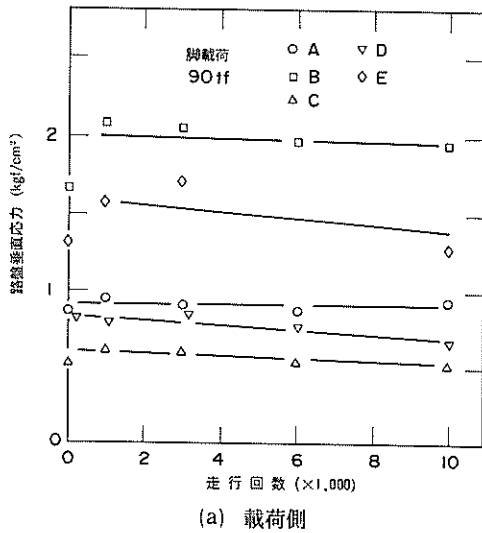


図-29 繰り返し走行載荷が路盤垂直応力に及ぼす影響

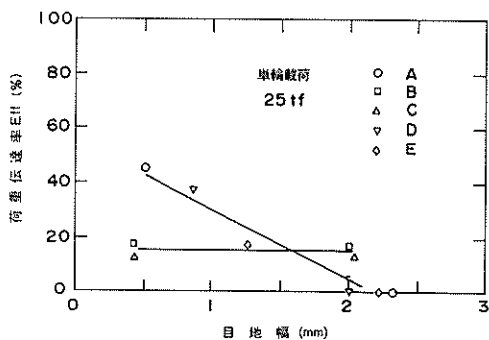


図-30 目地幅が荷重伝達率に及ぼす影響

図-29は路盤の垂直応力を示している。E区画を除けば、繰り返し走行載荷にともなう垂直応力の変化はほとんどないといえよう。E区画では非載荷側の垂直応力が著しく減少することがわかる。

この10,000回の繰り返し走行載荷終了時に単輪載荷試験を再び実施して、舗装の挙動を観察した。この試験で得られた目地の荷重伝達率と目地幅の関係を図-30に示す。3.2で述べた初期状態におけるものと比較すると、各区画とも走行載荷の影響で荷重伝達機能がかなり低下したことがわかる。なかでもE区画の機能の低下が著しく、繰り返し走行載荷前は目地幅が5mmとなっても E_{ff} は70%程度にまでしか低下しなかったが、載荷後は2mmの目地幅で $E_{ff}=0$ となっている。また、B区画もE区画ほどではないが、走行載荷前後で E_{ff} は40%から20%へと低下している。

かき型目地の改良型(E区画)はその構造上、目地の凹部あるいは凸部が何らかの形で破損しない限り、目地幅が増加してもある程度の荷重伝達機能を維持するはずであり、意図したとおり初期載荷試験ではこの機能が十分に維持できていた。しかし、その機能は、10,000回の繰り返し走行載荷試験中に徐々に低下してきたことがこれまでの検討により明らかである。これは繰り返し走行載荷によって目地が破壊されたことを意味しており、走行載荷終了後に採取したコアによっても確認された(図-31)。このコアで観察されたクラックは目地部の応力集中によってもたらされたものである。

以上は版厚が45cmと同一な区画の目地についての試験結果の検討であるが、本節で述べてきた繰り返し走行載荷が舗装の力学的挙動に及ぼす影響は版厚の薄いF、G区画で顕著に見られた。図-32にはコンクリート版内部(目地近傍)のひずみを示してある。F区画(G区画寄りの地点におけるデータ)では繰り返し走行載荷につれて版内のひずみが増加していき、走行6,000回では 110×10^{-6} のひずみが生じている。コンクリートの弾性係数を $350,000 \text{ kgf/cm}^2$ とすると、その応力は 38 kgf/cm^2 となる。この応力の値と今回使用したコンクリートの曲げ強度ならびに引張り強度を考慮すると、限界に近いような応力が版内部で生じていることがわかる(一般にコンクリートの引張り強度は圧縮強度の $1/10 \sim 1/13$ であるといわれており、今回実施した現場養生供試体の圧縮強度は材令9,13箇月で、それぞれ $450, 460 \text{ kgf/cm}^2$ である)。

図-33は繰り返し走行載荷中に版表面に現れてきたクラックの状況を示している。まず最初に版厚の最も薄いG区画の縦目地から20cmのところクラックが発生

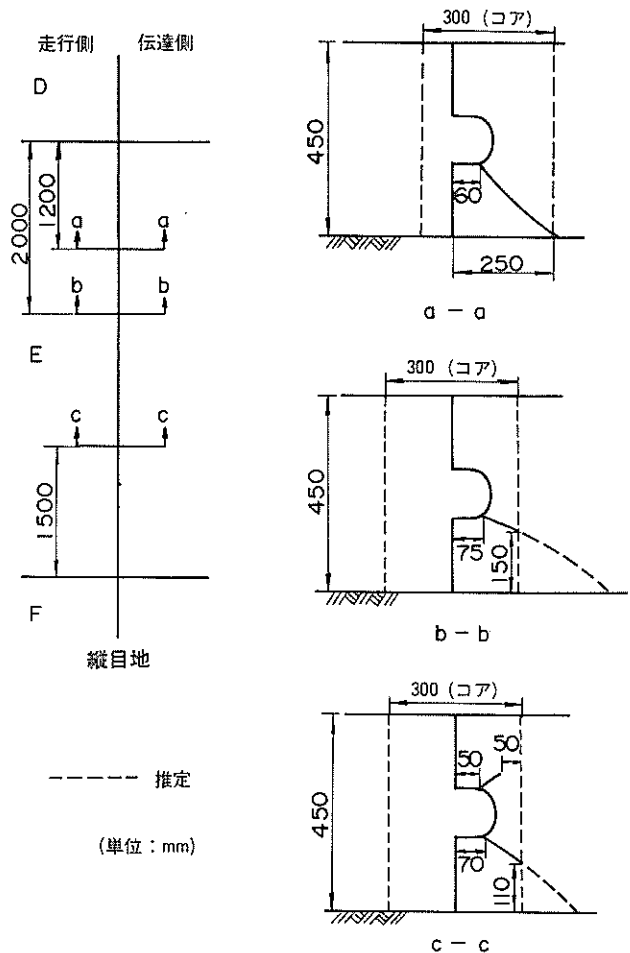


図-31 目地部のクラック

し、走行930回では縦目地延長のほぼ2/3にまでクラックが進行した。版厚が38cmであるF区画には走行2,500回で縦目地から20cmのところにクラックが発生し、それが徐々に進行した。そして、走行7,500回では隅角部でクラックの発生が認められた。このF区画におけるクラックの進行程度と図-32に示した埋め込み型ひずみ計のデータを勘案すると、両者は良い符合を示していることがわかる。

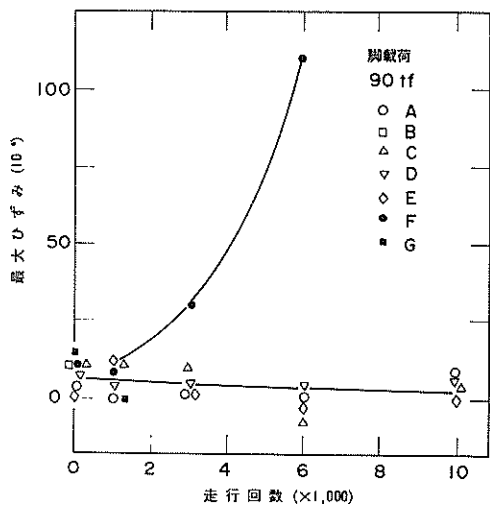


図-32 目地近傍のコンクリート版内部のひずみ

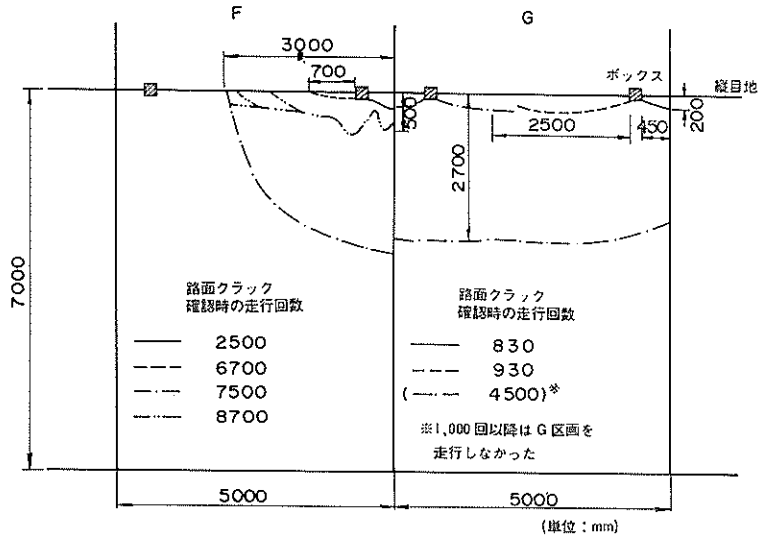


図-33 目地部のクラック

4. 目地構造の問題点

4.1 目地の荷重伝達機能がコンクリート舗装の力学的性状に及ぼす影響

3. の図-15 に示したように、目地幅は目地の荷重伝達機能に大きな影響を及ぼしている。また、脚荷重 90 tf を載荷したときに舗装に生ずるたわみや路盤の垂直応力（いずれも載荷側に対する非載荷側のものの比）からも目地幅が目地の荷重伝達機能に及ぼす影響が明らかである（図-34、35）。しかし、目地の荷重伝達機能の優劣を判断する場合に最も注目すべきものはこれらではなく、コンクリート版に生ずる応力であろう。それはこの応力の値が直ちに版厚の算定に結びつくからである。荷重条件が同一である場合、この応力は版中央部で最も小さく、次に荷重伝達装置を備えた版縁部すなわち目地部、そして最も大きいのが自由縁部に載荷されたときである。これら3種類の載荷位置の中では、いうまでもなく目地部に載荷された場合の応力が目地の荷重伝達機能に大きく影響される。したがって、目地の荷重伝達機能は、版の目地部に生ずる応力を最大（自由縁部）から最小（中央部）へどの程度近づけるかという観点から評価されなければならないことになる。

目地の荷重伝達機能の定量化に際しては版のひずみではなくたわみを用いることとしたが、3. で述べたようにこのたわみを用いた E_{ff} とひずみは良い対応を示すことがわかった。図-36 は 5, 10, 15, 20, 25 tf と 5 種類の荷重に対する E_{ff} とコンクリート版のひずみの比（非載荷側/載荷側）を示したものであるが、この図からも荷重の大きさや目地構造が異なっても E_{ff} とコン

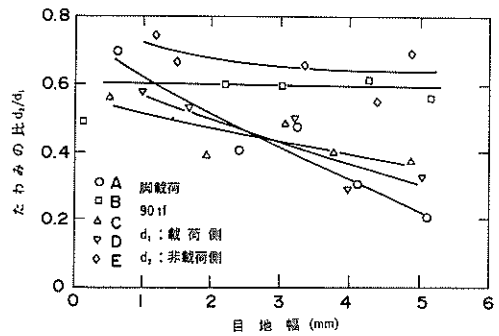


図-34 目地幅がたわみに及ぼす影響

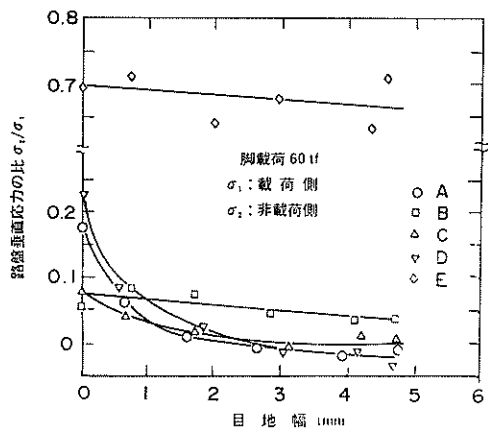


図-35 目地幅が路盤垂直応力に及ぼす影響

クリート版のひずみとはほぼ 1 : 1 の対応をしていることがわかり、この E_{ff} を用いて目地の荷重伝達機能を

定量化することの有意性が確認された。

次に、この目地の荷重伝達機能が所要コンクリート版厚に及ぼす影響を具体的にみてみよう。図-37は有限要素法を用いて算出したコンクリート版厚、 E_{ff} 、曲げ引張り応力の関係である³⁾。ここでの計算条件は、 K_{75} が 7 kgf/cm^3 、版の大きさは $7.5\text{ m} \times 7.5\text{ m}$ で、航空機荷重がLA-1に分類されるDC-10-10(脚荷重 92.3 tf)である。版厚が同一であっても、 E_{ff} の値によっては版に発生する応力に 20 kgf/cm^2 程度の違いが見られる。また、この計算手法では、目地を横切ってのモーメントの伝達を考慮していないため、中央部載荷と $E_{ff} = 100\%$ の場合の応力~版厚関係は一致していない。しかし、計算上だけでなく実際に施工された目地でも、この目地を横切ってのモーメントの伝達は期待できないこ

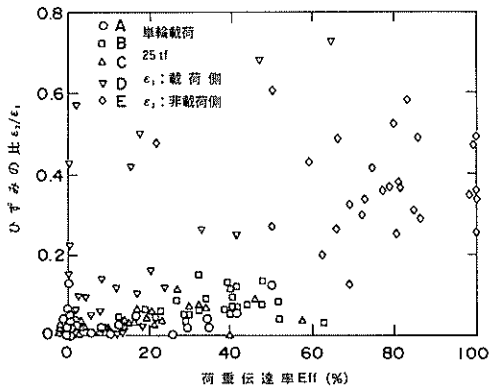


図-36 荷重伝達率とひずみの関係

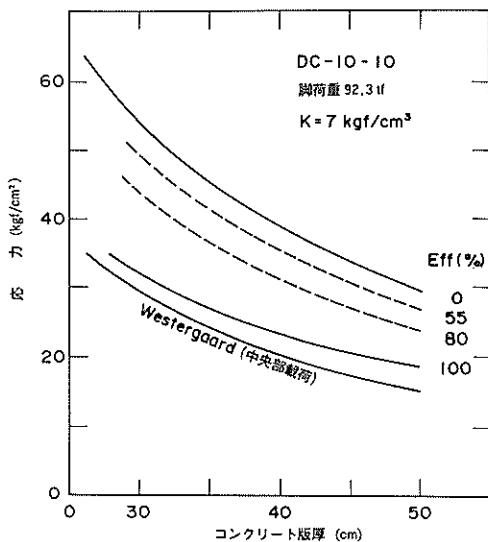


図-37 版厚と応力の関係³⁾

とが確かめられている³⁾ので、図-37に示した E_{ff} 、コンクリート版厚、曲げ引張り応力の関係が版厚算定の基礎資料として使用できるものと思われる。コンクリートの曲げ強度を 50 kgf/cm^2 、安全率を2.0として、図-37の関係から E_{ff} と所要版厚の関係を見い出せば図-38のようになる。荷重伝達率が0と100%では所要版厚に20cmもの違いが生ずることがわかる。

この図を今回の試験で得られた目地幅と荷重伝達率の関係(図-15)と結びつけることによって、図-39に示すような目地幅と所要版厚の関係が得られる(ただし、ここでは目地構造が同一型式であれば版厚が変化しても E_{ff} はその影響を受けないものとみなした)。図-38で見られるように E_{ff} が所要版厚に及ぼす影響は E_{ff} の大きい範囲で著しいが、それは目地幅の小さい範囲で目地幅が所要版厚に大きな影響を及ぼすこととして図-39で示されている。しかし、ここでも凹凸のかみ合わせ形式の目地構造とスリップバーを用いる形式の目地構造では、目地幅が所要版厚に及ぼす影響に大きな違いがみられる。

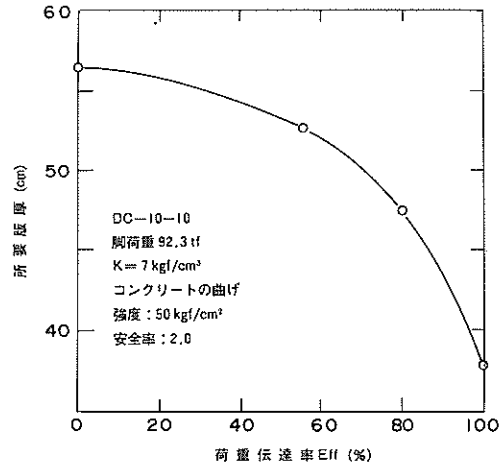


図-38 荷重伝達率と版厚の関係

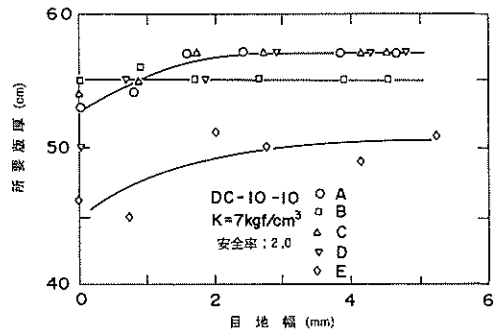


図-39 目地幅が版厚に及ぼす影響

すなわち前者には目地幅が増加するにつれて所要版厚も増加するという傾向がうかがえるのに対し、後者の場合の所要版厚は目地幅によらずほぼ一定となっている。さらにかぎとスリッパを併用した形式の目地では、スリッパの設置間隔が本来のスリッパ目地のものに比べ広がったため、目地幅が大きくなってある程度良好な荷重伝達を果たすというスリッパ目地本来の利点をもっていないこともわかる。このことから、C、D区画のようにスリッパの設置間隔を広くした、かぎとスリッパの併用型目地は、荷重伝達に関する限りあまり有効なものとはなっていないということができよう。

これまで述べてきたことより、目地幅、荷重伝達率、最大応力（所要版厚）の関係がかなり明らかになってきたが、あくまでも目地幅が変化することを仮定した上での議論である。それをより現実に近いものとするために、今回の試験ではコンクリート打設後の横目地幅の変化を計測しているのので、これを活用して詳細な検討をすることにしよう（図-40）。このデータは前後を膨張目地ではさまれた6箇所の収縮目地のうち4箇所で測定されたものである。これには日照による影響を除くために午後6時のデータを用いることとし、主として各月の1日のものについてプロットしてある。

4箇所のデータを平均したもので、打設後1、2年でそれぞれ0.7、1mmが最大目地幅であるが、個々のデータをみれば最大目地幅が2.5mm程度になっているものもある。さらに、打設後最初の夏季の目地幅とその1年後のものを比較すればわかるように、完全には元どおりの目地幅に戻らないものもある。これらの事実から、路盤と版との間の摩擦等、版の変形・移動を制御する因子の状態がすべての版にわたって必ずしも同一ではないこと等のために、冬季にいったん開いた目地は夏季になって温度が上昇しても完全には元に戻らないことや目地の開閉が特定の版に集中することが実際の舗装でもかなり多く起きているものと推定される。その上、空港舗装は道路舗装に比べ広大で面的であることから、これらが発生する可能性は非常に大きいと思われる。したがって、前述の目地幅が荷重伝達機能に及ぼす影響を考えれば、舗装が自然環境にさらされるにつれて、すなわち供用期間の経過につれて目地の荷重伝達機能が低下していくことは明らかであろう。

この自然環境の作用がもたらす目地幅の増大のほかに、目地部に対する繰り返し走行荷荷によっても目地の荷重伝達機能は低下することが報告されている⁹⁾。それは今回の試験でもみられ、今回の荷荷試験で得られた繰り返し走行

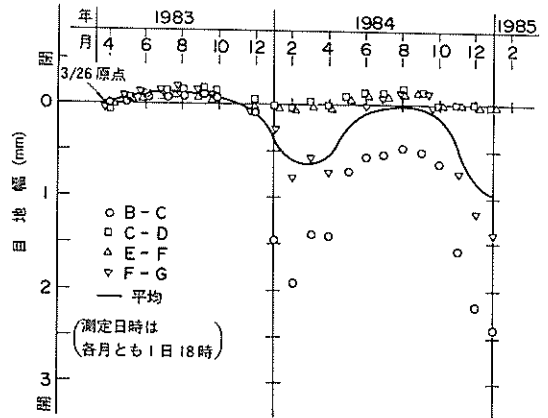


図-40 目地幅の測定結果

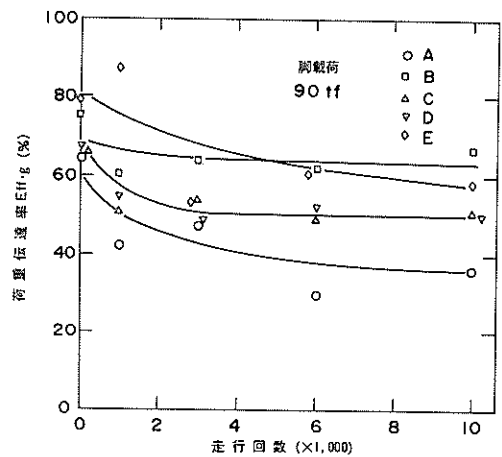


図-41 繰り返し走行荷荷が荷重伝達率に及ぼす影響

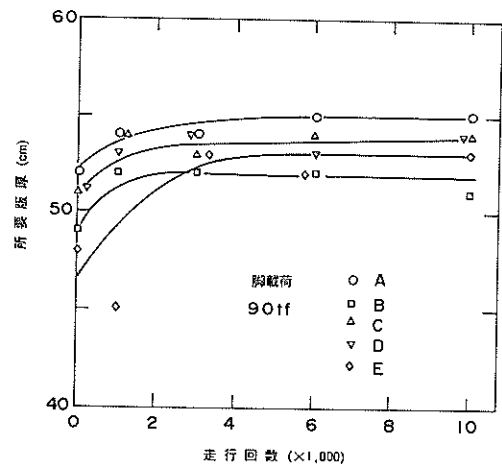


図-42 繰り返し走行荷荷が版厚に及ぼす影響

載荷回数と荷重伝達率(縦目地から80cm離れた点のたわみを使用して(1)式により算出)の関係は図-41に示したとおりである。この繰り返し走行載荷が版の力学的挙動に及ぼす影響を所要版厚の変化として捕えたのが図-42である(コンクリートの曲げ強度, 安全率は前述のとおり)。本来の荷重伝達率は単輪載荷試験によるものであるが, その E_{ff} と脚載荷試験のデータを用いた $E_{ff}(E_{ff} \cdot g)$ の間にみられた関係(図-43)を使用してこの図を表した。

この繰り返し走行載荷試験は目地幅を3mmと各区画同一なものとした上で開始した。その時点では初期試験の結果にみられたように, 荷重伝達機能は改良かぎ型目地が最も優れていて, その次にスリップバー目地, そしてかぎとスリップバーを併用した目地, かぎ型目地の順になっていたが, 繰り返し走行載荷により改良かぎ型目地とスリップバー目地の順位は逆転した。また繰り返し走行載荷の初期段階において, 急激な目地の荷重伝達機能の低下がすべての目地でみられた。このような荷重伝達機能の低下は, 疲労により路盤以下に永久変形が生ずることや, 目地部における骨材の分離, 角欠けの発生によって凸部と凹部の接合が不完全となることのほか, 応力集中部の疲労に起因するクラックの発生も原因であろう。

以上述べてきたように, コンクリート舗装の目地は, 自然環境の作用がもたらす目地幅の増加ならびに繰り返し載荷がもたらす目地部の疲労によって, 供用期間の経過につれて荷重伝達機能の低下が顕著になる。したがって, 厳しい自然環境の地域の空港で, 荷重条件が厳しい箇所にコンクリート舗装を使用する場合にはこれらのことを十分配慮する必要がある。

4.2 目地部の応力集中

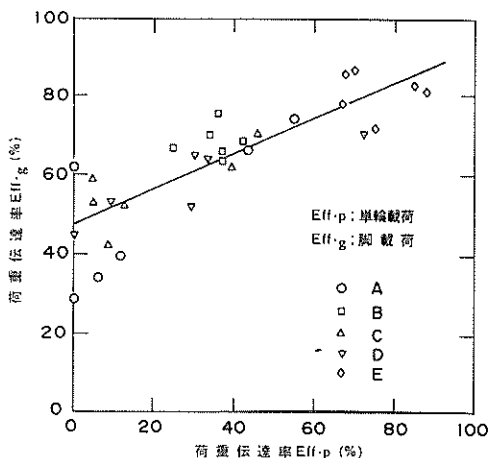


図-43 荷重伝達率の違い

目地部の応力集中を定性的に検討するには平面ひずみ条件による解析が実用上十分であることが示されている³⁾ので, 今回の試験舗装の解析においてもこの方法を踏襲することにした。この平面ひずみ状態での解析の対象となりうるのはA区画(かぎ型)とE区画(改良かぎ型)である(B~D区画はスリップバーを用いている)。図-44は実際の目地構造と解析モデルを対比したものであるが, かぎ型目地ではほぼ同一な形状にてモデル化できたものの, 改良かぎ型目地ではその特徴である「丸み」のモデル化がやや不十分であったかもしれない(要素の寸法をほぼ一定としたかったため)。

計算条件は次のとおりである。舗装として600cm(長さ)×45cm(厚さ)のコンクリート版($E = 350,000 \text{ kgf/cm}^2$, $\nu = 0.15$)が $K = 7 \text{ kgf/cm}^3$ の路盤(Winkler基礎)で支持されているものを考え, その上に等分布荷重(荷重強度 14 kgf/cm^2 , 載荷幅30cm)が目地から15,95cm離れた点(荷重中心までの距離)に加えられた場合を解析した(図-45)。ただし, ここでは1枚のコンクリート版のみを考慮しているので, 目地での荷重伝達をモデル化するに際しては, 荷重伝達率に応じた力をモデルの目地部(凸部あるいは凹部)に加えることによった(たとえば $E_{ff} = 100\%$ のとき, それに加わる

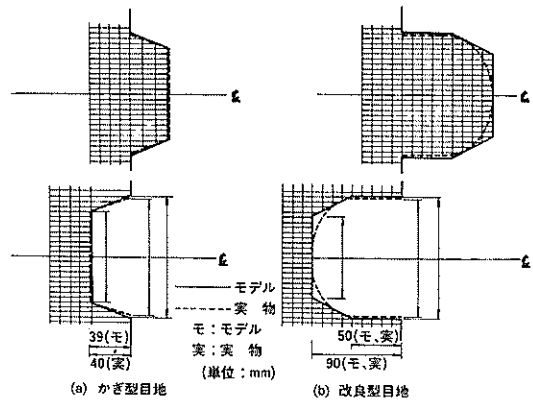


図-44 目地のモデル化

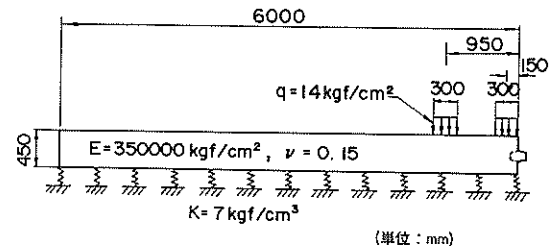


図-45 計算条件

力は 420 kgf/cm となる)。実際の目地部において考えられる種々の載荷形式としては目地部の凹・凸と載荷位置によって、以下に示す4種類の状態が考えられる(図-46)。

- ① 状態A：目地構造が凸の版でその上に載荷された場合
- ② 状態B：目地構造が凸の版で目地をはさんで反対側の版に載荷された場合
- ③ 状態C：目地構造が凹の版でその上に載荷された場合
- ④ 状態D：目地構造が凹の版で目地をはさんで反対側の版に載荷された場合

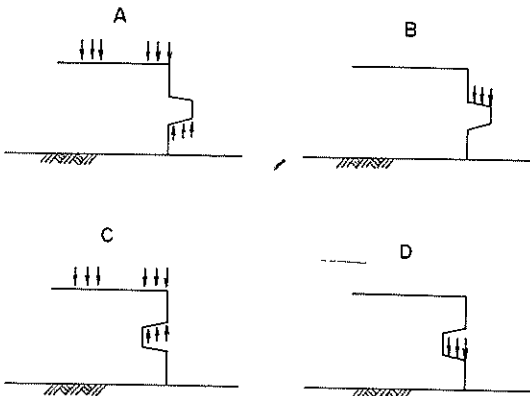
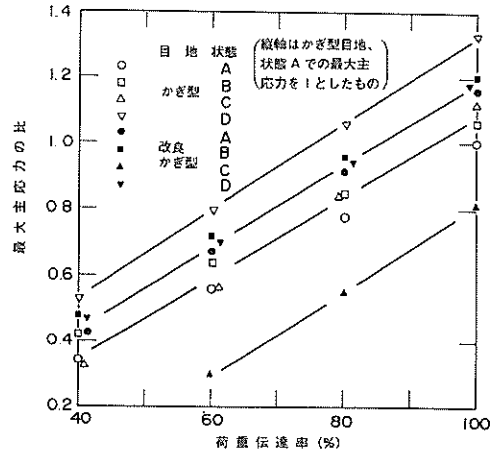


図-46 載荷状態

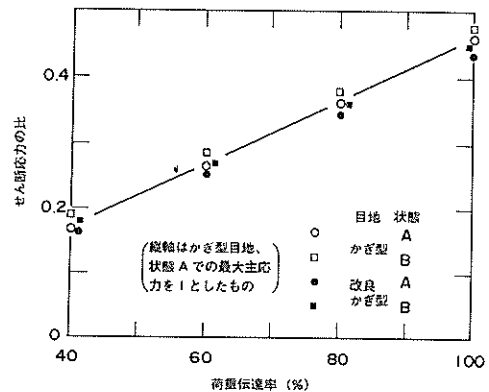
この二次元モデルでは応力の定性的な評価ができるだけであるので、たとえば版厚算定に使用する版下面の最大応力といったものとの比較ができたほうが好都合である。それには三次元有限要素法による解析が必要となる。この解析に用いたモデルは 500 cm (幅) \times 265 cm (長さ) \times 45 cm (厚さ) のコンクリート版が $K = 7 \text{ kgf/cm}^3$ の路盤(Winkler基礎)で支持されている筋装(目地構造は凸)にDC-8型の脚(脚荷重 84 tf)が載り、凸部には目地をはさんで反対側の版へ伝達される荷重の反力として 42 tf が上向きに加わるとしたものである(前述の状態A)。目地構造としては改良かぎ型を想定した。この解析結果としては、版下面に生ずる最大引張応力が 30.6 kgf/cm^2 (目地に平行な方向で、最大主応力とほぼ同じ大きさである)であること、また目地部の応力集中については、最大主応力が 21.8 kgf/cm^2 、凸部の破壊にとって問題となる方向の最大せん断応力は 15.1 kgf/cm^2 であることが示された。

三次元解析は計算機使用上の制約等の問題もあって、

この1ケースしか行っていないので、以下に示す解析結果は主として二次元平面ひずみ状態でのものに基づいている。まず図-47には、最大主応力と荷重伝達率の関係を示した。この図に示した応力は、かぎ型目地の状態A(荷重伝達率100%)の最大主応力に対する比をとったものである。応力と荷重伝達率の関係は直線で表されることから、荷重伝達機能が優れた目地ほど応力集中が著しく、しかもその程度は荷重伝達率に比例しているとみなすことができよう。また、かぎ型、改良かぎ型目地とも、凸部では状態B、凹部では状態Dと、凹、凸の違いによらず、目地をはさんで反対側の版に載荷された状態が目地部の応力集中に関して厳しいものとなっていることから、応力集中によるクラックがコンクリート版に発生する場合には、凸部あるいは凹部から下方へ向かって入る可能性が大きいことになる。



(a) 最大主応力



(b) 最大せん断応力

図-47 目地部の応力集中

また載荷位置の違い（凸部では状態A, B, 凹部では状態C, D）による応力の違いは凹部のほうが大きく、凸部の5%に対し、凹部では20,40%の違い（それぞれ、かぎ型, 改良かぎ型）となっている。この凹部について詳細にみることにしよう。図-47に示したように、かぎ型目地の状態Aの最大主応力を1とすれば、かぎ型目地の状態C, D, 改良かぎ型目地の状態C, Dのものは、それぞれ1.12, 1.33, 0.82, 1.18となっている。これに前述の三次元解析の結果を当てはめれば、上記の値はそれぞれ21.0, 25.0, 15.4, 22.2 kgf/cm²となる。版下面に生ずる最大応力が30.6 kgf/cm²であることを考えると、荷重伝達率が良好な場[^]のかぎ型目地では応力集中によって破壊する危険性が大きい、かぎの形状を改良することによりそれを軽減できることがわかる。

凸部に関しては、これまで述べてきた最大主応力により補える曲げ引張り破壊とせん断応力のみでみることでせん断破壊の両方を検討しなければならない。曲げ引張りによる破壊の危険性は改良かぎ型目地のほうがかぎ型目地よりも大きくなった。それは、かぎ型目地の状態A, Bで18.8, 19.9 kgf/cm²であったものが改良かぎ型目地で21.8, 22.6 kgf/cm²と応力が約15%増加したことからわかる。しかし、この応力の大きさは前述の凹部での応力集中（状態D）による破壊の危険性とほぼ同程度のものである。

次にせん断による破壊の可能性を調べよう。二次元解析の結果（図-47）にみられたせん断応力は、荷重伝達率100%の場合で目地構造や載荷形式によらず0.45（かぎ型目地（状態A）の最大主応力を1）とみなすことができ、しかも荷重伝達率の増減にともなうせん断応力の増減の程度は最大主応力の場合ほど顕著なものではないということがわかる。二次元と三次元解析ではその結果に違いがみられるが、このうちの厳しいほう（三次元解析）をとっても、その最大せん断応力は約15 kgf/cm²にすぎず、一般にコンクリートのせん断強度が引張り強度の約2.5倍といわれている（引張り強度は圧縮強度の1/10～1/13）ことを考えると、せん断による凸部破壊の危険性は極めて小さいということができよう。

3. で述べたが、試験舗装のB区画の目地部では本節で考察を加えた応力集中に起因するクラックがみられた。クラックがかぎ型ではなく改良かぎ型目地に入ったことは、その荷重伝達機能が良好すぎたことも原因であろう。しかし実物と解析モデルが違うこと、また繰り返し走行載荷開始時には荷重伝達率が70%程度であったことを考えれば、版下面の曲げ引張り応力に比べてかなり小さな応力しかこの「丸み」をおびた目地部には発生しなかつ

たであろうと思われる。それにもかかわらず、クラックが発生したことは目地の構造的な問題のほかにも、目地の凹部に骨材が行きわたらない、コンクリート打設時の締め固めが十分できない等、施工に問題があったことを示しているのかもしれない。したがって、今後このようなせん断力による荷重伝達を期待する目地構造の研究開発を進めていくにあたっては、施工方法についても十分に検討することが必要となろう。

5. 結 論

合理的な目地構造の研究開発の一環として実施した今回の試験舗装を解析した結果、以下のことが明らかにされた。

(1) 目地の荷重伝達機能が舗装の力学性状に及ぼす影響

① 目地の荷重伝達機能は本来、載荷重によりコンクリート版に生ずる応力（ひずみ）に注目して評価されるべきであろうが、実際の舗装で比較的測定の容易なたわみを用いて目地の荷重伝達機能を定量化化することの有意性が明らかにされた。また、目地構造や目地幅が異なっても1つの指標（ E_{ff} ）により目地の荷重伝達機能を表すことの妥当性が示された。

② 供用期間の経過につれて、自然環境の作用がもたらす目地幅の増加や繰り返し載荷等がもたらす疲労により、目地の荷重伝達機能が低下する。この低下の程度は目地構造の違いによって異なっていることが認められた。

③ 目地幅は荷重伝達機能に大きな影響を及ぼすが、スリップバー目地のように鉄筋による荷重の伝達を期待している目地構造と、かぎ型目地のように凹凸のかみ合わせによるせん断力の伝達にその機能をもたせている目地構造とでは、その程度が異なる。前者では目地幅によらずほぼ一定の荷重伝達機能を示すが、後者では目地幅の増加につれて荷重伝達機能が低下してくる。しかもこの機能の低下率（目地幅の変化に対する機能低下の割合）は、目地幅の小さい範囲で著しく大きい。

④ 目地近傍での繰り返し走行載荷により目地の荷重伝達機能は低下する。今回の試験結果では、全体的にみて、繰り返し走行載荷の初期においてそれが著しかった。この機能低下の原因は、凸部と凹部の接合面の破損等、舗装の疲労であろうと思われる。

(2) 目地部の応力集中

① せん断力による荷重伝達を期待する形式の目地では、目地近傍のコンクリート版内部の応力集中が目地の破壊原因となりうるということが認められた。しかも荷重伝達

機能が良好な場合ほどその危険性も大きいことが示された。

- ② せん断力による荷重伝達を期待する形式の目地では、凹部、凸部の違いによらず、目地をはさんで反対側の版に載荷された状態が目地部にとって厳しいものとなっている。また応力集中は凹部のほうで厳しく、有限要素法によるかぎ型目地の解析結果では、コンクリート版下面の最大応力の80%程度の大きさの応力が発生することがわかった。
- ③ かぎ型目地におけるかぎの形状を改良した目地は、従来のものに比べると、凹部に関してその効果が著しいが、凸部に関しては今回用いた形状では不利であることがわかった。しかし定量的にみれば凸部におけるクラック発生の危険性は凹部のものとほとんど変わることはなく、せん断による凸部破壊の危険性も極めて小さいことが認められた。

(3) 目地構造の適正化

- ① かぎとスリップバーを併用した目地は、目地幅が小さい間はかぎのかみあわせにより荷重を伝達するが、目地が開くにつれてスリップバーだけで荷重を伝達するようになる。したがって、今回の試験に用いたようにスリップバーの設置間隔を標準的なスリップバー目地のものよりも広くすることは避けるべきである。
- ② キャップ付きスリップバーは、意図したとおり目地に沿った方向の版の移動を吸収できるが、キャップとスリップバーの間に隙間があるため、荷重伝達機能の面では問題のあることがわかった。
- ③ 改良かぎ型目地は、目地幅の変化の影響をほとんど受けず、当初は非常に良好な荷重伝達機能を保持していたが、繰り返し載荷により著しい荷重伝達機能の低下を示し、まだ問題があることがわかった。しかし有限要素法による解析等からは、かぎの適正な寸法を選定することにより、改良かぎ型目地が合理的な目地構造となる可能性が大きいと考えられた。

6. あとがき

コンクリート舗装の最大の課題である目地について、従来からの構造およびそれらに含まれる問題の解決を目

指して改良を試みた構造のいくつかを試験舗装における載荷試験ならびに有限要素法による理論解析により検討した。その結果、従来からの目地構造の問題点が明確になり、また今回試作した目地構造、特に、かぎ型目地の形状を改良したものは、従来のかぎ型目地に比べ荷重伝達機能が優れていることが認められたので、今後詳細な検討をすることによってより合理的・実用的なものを見出しうるものと考えられる。

なお、本資料は昭和57～59年度にわたって新東京国際空港公団の委託を受けて実施した試験研究の一部をとりまとめたものである。このような機会を与えていただいたことに対し深く感謝いたします。また、試験ならびに解析の一部には昭和59年度研修生 福田啓志氏（日本空港コンサルタンツ 株）の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

（1985年3月27日受付）

参考文献

- 1) たとえば、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.262，20p，1977年。
- 2) 運輸省航空局：空港コンクリート舗装構造設計要領，105p，1977年。
- 3) 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年
- 4) Brown, P.P. and M. P. Jones: Navy Experience in Eliminating Keys from Construction Joints of Concrete Airfield Pavements, *Proc. of 1st International Conference on Concrete Pavement Design* pp. 223 - 228, 1977.
- 5) 土木学会空港舗装研究委員会：新東京国際空港の舗装に関する研究，258p，1985年。
- 6) Colley, B. E. and H. A. Humphrey: Aggregate Interlock at Joints in Concrete Pavements, *Highway Research Record*, No.189, pp.1 - 18, 1967.
- 7) Yorder, E. J. and M. W. Witzczak: Principles of Pavement Design, Second Edition, *John Wiley & Sons*, pp.81 - 126, 1975.

港湾技研資料 No. 521

1985・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 伊東印刷株式会社

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