

## コンクリート舗装版横目地におけるスリップバー の力学的モデル

### A MECHANICAL MODEL FOR DOWEL BAR OF TRANSVERSE JOINT OF CONCRETE PAVEMENT SLAB

西沢辰男\*

By Tatsuo NISHIZAWA

The dowel bars play an important role in load transfer at the transverse joint of concrete pavement. However they are often deteriorated by fatigue due to traffic load repetitions combined with corrosion of the bars and weakening of concrete around the bars. It is because mechanical behavior of the dowel bars is not well known and the dowel bars are not used most effectively. In this study, a mechanistic model of the dowel bar incorporated with FEM analysis is developed. Then, the model is verified by analyzing the experiments conducted for the research of the behavior of the dowel bar under the traffic load.

*Keywords* : concrete pavement, mechanical behavior, dowel bar, FEM model

#### 1. まえがき

コンクリート舗装においては、乾燥収縮や温度変化によるコンクリート版の体積変化をある程度許容して、版内に過度の拘束応力が生じないように横目地が設けられている。しかしながら、横目地は交通荷重に対しては構造的な弱点となり、コンクリート舗装の荷重分散能力を低下させる。このような構造上の弱点を補強するために、横目地には荷重伝達装置すなわちスリップバー(Dowel-bar)を配して荷重伝達を図り、コンクリート版の構造的な一体性を確保しようとしている。

わが国のスリップバーの設置基準はセメントコンクリート舗装要綱<sup>1)</sup>に定められている。スリップバーは、長さは70 cm、直径は膨張目地において28 mm、収縮目地において25 mmの丸鋼であり、コンクリート版の伸縮が可能のように剝離材として長さの半分にアスファルトを塗布している。配置間隔は基本的には40 cmであるが、版隅角部を補強する意味からそこではやや密に配置するとしている。アメリカ<sup>2),3)</sup>では一般にスリップバーの直径は25~32 mmの範囲で、版厚の1/8とされており、またその長さは40~50 cmでわが国よりも短い。配置間隔はほとんどが30 cm間隔でやや密になっている。

スリップバーは横目地の荷重伝達の主要な役割を果た

すが、コンクリート版の開削調査結果<sup>4)</sup>などによれば、横目地のスリップバーが切断されている場合が非常に多い。この原因としては、荷重応力による疲労に加えて雨水の浸入による腐食、周辺のコンクリートの劣化があり、これらが複合的に作用してスリップバーの破壊を加速させている。いったんスリップバーが破壊すると、コンクリート版の横目地縁部とその下の路盤に過大な応力が発生し、舗装の急激な破壊をもたらす。

スリップバーの破壊を防ぐために、スリップバーの形状を大きくしたり、配置間隔を密にするといった対策が考えられるが、過剰なスリップバーは経済面、施工面から問題が多い。したがって、スリップバーを効果的に使用するためには、交通荷重によるその力学的な挙動を把握しておくことが重要である。しかしながら、スリップバー自体に主眼をおいた研究は少なく<sup>5),6)</sup>、しかもそれらはかなり単純化されたモデルを用いているため、実際の交通荷重下における力学的挙動については多くの不明な点が残されている。したがって、設計段階においてスリップバーの破壊に対する十分な検討を行えないのが現状である。

本研究では、FEMを用い交通荷重によるスリップバーの挙動を予測するモデルを開発することにした。従来のコンクリート舗装のFEMモデル<sup>7)-9)</sup>においては、スリップバーの荷重伝達を考慮に入れたコンクリート版の挙動に重点がおかれており、それに関しては十分な精度

\* 正会員 工博 石川工業高等専門学校講師 土木工学科  
(〒929-03 石川県河北郡津幡町北中条)

での予測が可能である。しかしながら、スリップバー自体の挙動を解析するルーチンは開発されていない。

そこでまず、著者らが開発したコンクリート舗装の FEM モデル<sup>10),11)</sup>をスリップバー内の応力解析も行えるように拡張した。さらに、スリップバーの実際の挙動を把握するために、室内モデル実験や実際のコンクリート舗装での載荷実験<sup>12)</sup>を実施し、FEM モデルを用いてこれらの実験結果を解析してモデルの検証を行った。

### 2. コンクリート舗装の FEM モデル

本研究では、コンクリート版の構造条件を考慮した、平板有限要素法（以下平板 FEM）によるコンクリート舗装の構造解析法<sup>10),11)</sup>を採用している。すなわち、コンクリート版を平板理論に基づく平板要素に分割し、路盤はこれに作用する反力として取り扱う。またコンクリート版の目地は、その荷重伝達機能をモデル化した目地要素を平板要素に結合させて表現する。

この場合のコンクリート舗装の剛性方程式は次式で表現される。

$$\{f\} = [[K] + [J] + [H]] \cdot \{d\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\{f\}$ ：節点外力ベクトル

$[K]$ ：コンクリート版の剛性マトリックス

$[J]$ ：目地の剛性マトリックス

$[H]$ ：路盤の剛性マトリックス

$\{d\}$ ：節点変位ベクトル

$[K]$  は通常の長方形平板要素の剛性マトリックスである。 $[H]$  としては、路盤を一次元鉛直ばねに仮定する Winkler 路盤に基づいた対角マトリックスとした。 $[H]$  の対角成分は、節点を共有する要素の面積の和と路盤  $K$  値の積に比例する。 $[J]$  は目地の荷重伝達を表現するものであり、3. にその内容を示す。

### 3. 横目地の荷重伝達モデル

#### (1) 横目地の荷重伝達

横目地の荷重伝達機構は、次の 2 つの機能に分けて考えることができる<sup>13)</sup>。

a) コンクリート版側面の骨材のかみ合わせによる荷重伝達機能

b) スリップバーによる荷重伝達機能

a) は、グミー目地の場合である。コンクリートの収縮ひびわれによって発生したひびわれ面では、ひびわれ面での骨材のかみ合わせによる荷重伝達が期待できる。(以下かみ合わせ機能) しかし、この荷重伝達機能はひびわれ幅に大きく左右される。コンクリート版は硬化後、温度や含水量の変化に伴って体積変化を生じ、それによってひびわれ幅が変動するので荷重伝達機能も変化する。

b) はスリップバーによる荷重伝達機能である (以下ス

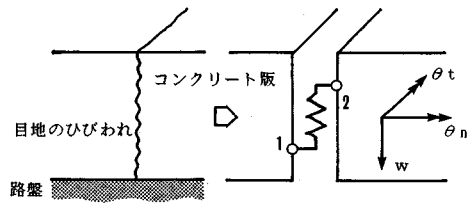


図-1 かみ合わせ機能のモデル化

リップバー機能)。すなわちスリップバーは、コンクリート版に作用する荷重の一部を、スリップバーの曲げ作用によって他方のコンクリート版に伝達する。この荷重伝達機能は目地幅に左右されず安定しているため、信頼性が高いと考えられている。

横目地におけるスリップバーの挙動を解析するためには、これら 2 つの機能を適切にモデル化しておく必要がある。本研究においては、これら 2 つの作用に対しそれぞれかみ合わせ要素とスリップバー要素を定式化した。

#### (2) かみ合わせ要素

かみ合わせ機能は主にせん断力の伝達のため、図-1 のようなせん断ばねモデルを用いた。節点 1 と 2 をもつ要素に対して、次のような剛性方程式となる。

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C & -C \\ -C & C \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

$$\{f_i\} = \langle f_{wi} \quad f_{\theta ni} \quad f_{\theta ti} \rangle^T \quad (i=1,2) \dots\dots\dots (3)$$

$$\{d_i\} = \langle w_i \quad \theta_{ni} \quad \theta_{ti} \rangle^T \quad (i=1,2) \dots\dots\dots (4)$$

$w_i, f_{wi}$ ：たわみおよび対応する鉛直力

$\theta_{ni}, f_{\theta ni}$ ：目地直角方向軸まわりの回転および対応するモーメント

$\theta_{ti}, f_{\theta ti}$ ：目地方向軸まわりの回転および対応するモーメント

$\langle \rangle$ ：行ベクトルを示す、 $T$ ：マトリックスの転置記号

$$C = \begin{bmatrix} xh & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

$h$ ：コンクリート版厚

$x$ ：かみ合わせ面における単位面積当たりのせん断ばね定数で、この定数をかみ合わせ係数とよぶかみ合わせ係数  $x$  とたわみの伝達率  $e_{ff}$  ( $= w_2/w_1 \times 100(\%)$ 、ここに  $w_2$  は非載荷側コンクリート版の最大たわみ、 $w_1$  は載荷側の最大たわみ) の関係は、平板 FEM による数値計算結果から次のような近似式で表現できることがわかった<sup>11)</sup>。

$$\log_{10} \frac{x}{K} = 0.55 \frac{e_{ff}^2 - 183e_{ff} + 3383}{e_{ff}^2 - 100e_{ff} - 749} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $\alpha$ ：かみ合わせ係数 (kgf/cm<sup>3</sup>)

$K$ ：路盤  $K$  値 (kgf/cm<sup>3</sup>)

$e_{ff}$ ：たわみの伝達率 (%)

一方、目地幅とたわみの伝達率とは以下の関係があるとされている<sup>14)</sup>。

$$e_{ff} = 100 - 25 \cdot B \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $B$  は目地幅 (mm) である。したがって、式 (6) と式 (7) から目地幅  $B$  とかみ合わせ係数  $\alpha$  の関係を得ることができる。

(3) スリッパ要素

図-2 はスリッパの変形状態を模式的に示したものである。スリッパ周囲のコンクリートの局所的な変形のために、スリッパとコンクリート版の変形は同一とはならない<sup>9)</sup>。このような変形状態をモデル化するため、図-3 に示すようなモデルを考案した。すなわち、スリッパの目地幅部分の棒要素とコンクリート版の平板要素の間に局部変形要素を挿入した。この要素はコンクリート版に埋め込まれたスリッパの変形を表わすものであり、周囲のコンクリートによって弾性的に支持されたはりでモデル化して剛性マトリクスを誘導した。局部変形要素ならびにこれを用いたスリッパ要素の定式化については著者らの先の論文<sup>11)</sup> に記述されているので、ここでは定式化の概略と結果のみを示すことにする。

平板要素から棒要素に伝達される断面力は、図-2 に示すようなコンクリート版とスリッパの変形差によって減少する。コンクリートの弾性支持を一次元のばねで表現すると、この減少量と変形差の関係は次式によって表わせる<sup>15)</sup>。

$$\begin{Bmatrix} \Delta w \\ \Delta \theta t \end{Bmatrix} = \frac{1}{2\beta^2 E_s I_s A_3} \begin{bmatrix} (SC - sc)/\beta & (S^2 + s^2) \\ (S^2 + s^2) & 2\beta(SC + sc) \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta f_w \\ \Delta f_{\theta t} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (8)$$

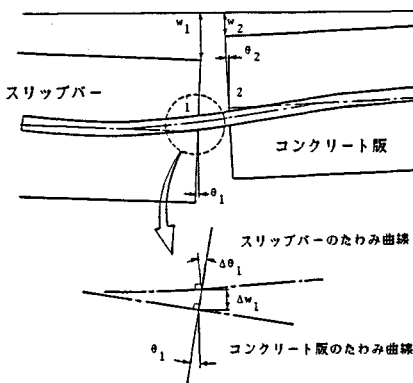


図-2 横目地におけるスリッパの挙動

ここに

$$\beta = \sqrt[3]{k\phi/4E_s I_s}, A_3 = (S^2 - s^2)$$

$$S = \sinh \beta l, C = \cosh \beta l, s = \sin \beta l, c = \cos \beta l$$

$E_s I_s$ ：スリッパの曲げ剛性

$l$ ：スリッパがコンクリートに埋め込まれた部分の長さ

$k$ ：コンクリートの支圧係数

$\phi$ ：スリッパの直径

$\Delta$ ：棒要素と平板要素の間の節点変位および節点力の差を示す

コンクリートの支圧係数  $k$  は、スリッパ周囲のコンクリートを表現する際のばねの定数であり、次式によって計算できる。

$$k = \frac{8.0(1-\mu)E}{(1+\mu)(1-2\mu)(h-\phi)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $E$ ：コンクリートの弾性係数

$\mu$ ：コンクリートのポアソン比

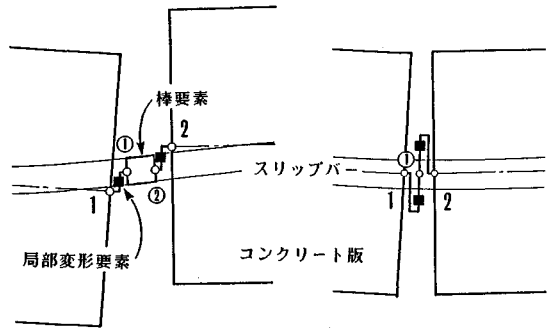
$h$ ：コンクリート版の版厚

なお、スリッパにはコンクリートとの付着を防ぐ目的で、片側にアスファルトを塗布してある。したがって、スリッパのねじりによる目地直角方向の回転成分  $f_{\theta n}$  の荷重伝達が行われないので、その成分に関する項は無視した。また、スリッパは版断面中央付近に設置されており、軸方向の変位は微小であるためこれも無視した。式 (8) を基本として仮想仕事の原理より局部変形要素の剛性マトリクスを導いた。

図-3 に示すように内部節点①、②において局部変形要素と棒要素を結合して全体の剛性方程式をたて、内部節点において外力がゼロという条件から内部節点を消去し、以下に示す剛性方程式を得た。

a) 目地幅が広い場合

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E & 0 \\ 0 & E \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} M_1 + K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & M_2 + K_{22} \end{bmatrix}^{-1}$$



(a) 目地幅が広い場合

(b) 目地幅が狭い場合

図-3 スリッパ機能のモデル化

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

式(10)中の記号はすべて部分ベクトル，部分マトリックスであり，それぞれ以下のような成分をもつ。

$$\{f_i\} = \langle f_{wi} \quad f_{\theta i} \rangle^T \quad (i=1, 2) \dots\dots\dots (11)$$

$$\{d_i\} = \langle w_i \quad \theta_{ii} \rangle^T \quad (i=1, 2) \dots\dots\dots (12)$$

[E]：2×2の単位マトリックス

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} = \frac{E_s I_s}{B}$$

$$\begin{bmatrix} 12/B^2 & -6/B & -12/B^2 & -6/B \\ & 4 & 6/B & 2 \\ & & 12/B^2 & 6/B \\ \text{sym.} & & & 4 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

$$[M_1] = \frac{2\beta^2 E_s I_s A_3}{S^2 C^2 - 2S^2 c^2 - s^2 c^2 - S^4 - s^4}$$

$$\begin{bmatrix} 2\beta(SC+sc) & -(S^2+s^2) \\ -(S^2+s^2) & (SC-sc)/\beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (14)$$

$$[M_2] = \frac{2\beta^2 E_s I_s A_3}{S^2 C^2 - 2S^2 c^2 - s^2 c^2 - S^4 - s^4}$$

$$\begin{bmatrix} 2\beta(SC+sc) & (S^2+s^2) \\ (S^2+s^2) & (SC-sc)/\beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (15)$$

b) 目地幅が狭い場合

この場合には棒要素を取り除き局部変形要素を結合して，以下の剛性方程式を得る。

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [E \ 0] \\ [0 \ E] \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} M^{-1}M_1 & M^{-1}M_2 \\ M^{-1}M_1 & M^{-1}M_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

ここに，

$$[M^{-1}] = \frac{1}{4\beta^2 E_s I_s A_3} \cdot \begin{bmatrix} (SC-sc)/\beta & 0 \\ 0 & 2\beta(SC+sc) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (17)$$

以上より，膨張目地のように目地幅が大きい場合は式(10)が，また収縮目地のように目地幅が小さい場合には式(16)がスリッパ機能を表現する剛性方程式となる。

繰り返し荷重が作用すると，スリッパとその周辺のコンクリートとの間に隙間ができ，これによってスリッパによる荷重伝達機能が低下するといった現象が生じる場合がある。このような場合には図-4に示すように考えて，式(13)の棒要素の長さを長くすることによって対応することができる。

実際に式(10)によって数値計算を行ってみたところ，目地幅が1mm以下になると棒要素の剛性が非常に大きくなり式(10)中の逆マトリックスの計算ができなくなってしまう。そこで本研究では，1mm以上の目地幅の場合に式(10)を適用することにした。本項で定式化した

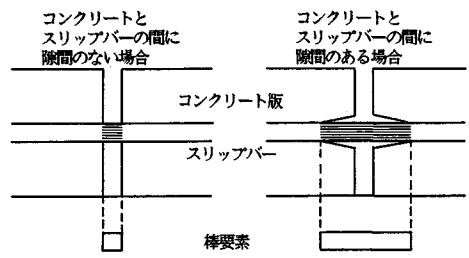


図-4 スリッパとコンクリートの隙間の考え方

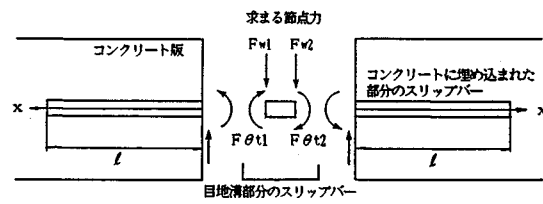


図-5 スリッパ内の応力計算モデル

スリッパモデルを，修正棒モデルとよぶことにする。

(4) スリッパの応力計算

平板FEMでは目地要素の節点力(断面力)が計算され，スリッパ内のひずみ分布は直接計算されない。しかしながら，スリッパは弾性ばねで支持されたはりとしてモデル化しているので，この断面力からスリッパ内のひずみ分布を計算することができる。すなわち図-5に示すように，スリッパの端部に断面力を作用させて以下の式によって曲げモーメントを求めらる<sup>15)</sup>。

$$M = -\frac{1}{(S^2-s^2)} \cdot \left[ \frac{F_w}{\beta} \{ S \cdot G_1(x, l-x) - s \cdot G_1(l-x, x) \} - F_{\theta} \{ S \cdot G_4(x, l-x) + S \cdot G_3(x, l-x) - s \cdot G_4(l-x, x) - s \cdot G_3(l-x, x) \} \right] \dots\dots (18)$$

ここに，

$$S = \sinh \beta l, \quad s = \sin \beta l$$

$$G_1(\xi, \eta) = \sin \beta \xi \cdot \sinh \beta \eta$$

$$G_3(\xi, \eta) = \sin \beta \xi \cdot \cosh \beta \eta$$

$$G_4(\xi, \eta) = \cos \beta \xi \cdot \sinh \beta \eta \dots\dots\dots (19)$$

4. 実験によるモデルの検証

(1) 室内模型実験

スリッパの挙動について調べるために，室内実験土槽に図-6に示すようなコンクリート版の模型を作製し，目地縁部に荷重を作用させてひずみゲージによりスリッパのひずみ分布を測定する実験を行った。さら

に、その実験の FEM 解析を行い、測定値と計算値を比較した。解析に用いた入力データは実測に基づいており、表-1 に示すとおりである。

図-7 は測定値と計算値の比較を示したものである。この図の横軸はスリッパ中央を原点とした長手方向であり、縦軸はスリッパの上側の引張を正としたひずみである。実測値(図中の黒丸印)から、スリッパは目地溝の部分を中心として、載荷側と非載荷側の部分では逆曲げの変形状態にあることがわかる。スリッパの直径が細いと中央に対し逆対称のひずみ分布を示すが、太くなると載荷側の曲げが卓越し、変曲点がかなり非載荷側に移動してくる。このようにスリッパの直径が太くなるにつれ、スリッパの荷重伝達機能において曲げ作用が無視できなくなることがわかる。

モデルの有用性をみるために、スリッパを棒要素に仮定した Tabatabaie らの棒モデル<sup>7)</sup>と Chou らのばねモデル<sup>8)</sup>による解析結果も同時に示した。スリッパの直径が細い場合においては、ばねモデルと修正棒モデルは逆曲げのひずみ分布状態を良く表現していることがわかる。棒モデルは目地幅が小さく剛性が過大に算定されているため、発生するひずみは実測値に比べきわめて大きい。スリッパの直径が太い場合においては、明らかにばねモデルによるひずみ分布は実測値と異なっている。一方修正棒モデルは、全体にわたって実測値のひずみ分布とよく一致している。

(2) 常磐自動車道路における載荷実験

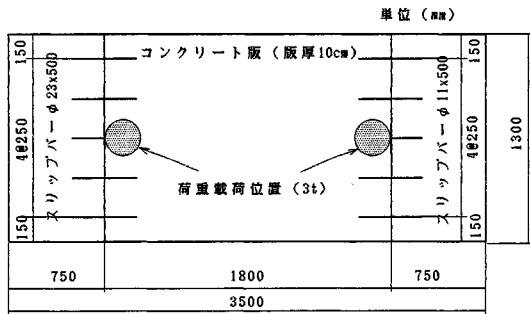


図-6 模型実験に用いたコンクリート版と横目地

表-1 模型実験の解析に用いた入力データ

コンクリート版厚	10 cm
コンクリートの弾性係数	$2.47 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
コンクリートのポアソン比	0.22
路盤 K 値	$11.1 \text{ kgf/cm}^2$
スリッパ形状	11x500, 23x500 mm
スリッパの弾性係数	$2.01 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
目地幅	10 mm

常磐自動車道のいわき市山田北のコンクリート舗装において載荷実験を行った<sup>12)</sup>。このコンクリート舗装の構造を図-8 に示す。上層路盤は 15 cm のセメント安定処理層、コンクリート版は版厚 28 cm、2 車線 8.5 m の一体施工である。横目地の構造は図-9 に示す 4 種類である。スリッパは長さ 700 mm、直径は 23 mm と 32 mm の 2 種類とし、配置間隔は 400 mm と 300 mm の 2 種類とした。これらを組み合わせて図に示すように Type I から Type IV の 4 種類を準備し、横目地の構造によるコンクリート版やスリッパの挙動の相違を観測した。

スリッパ内の曲げひずみ分布をみるために、版端から 3 本目と 4 本目のスリッパには、中心付近に 3 cm 間隔で長手方向に 7 か所、それぞれ上下計 14 枚のひずみゲージを貼った。ひずみゲージの防水とリード線の保護のために、ゲージの上に防水テープを巻いた。目地板との接触による損傷や目地からの浸水を防止する目的で、目地溝付近には特に嚴重に防水措置を施した。この防水措置のためにスリッパとコンクリートとの接触が部分的に失われてしまう可能性が生じたため、この影響についても検討を行うことにした。

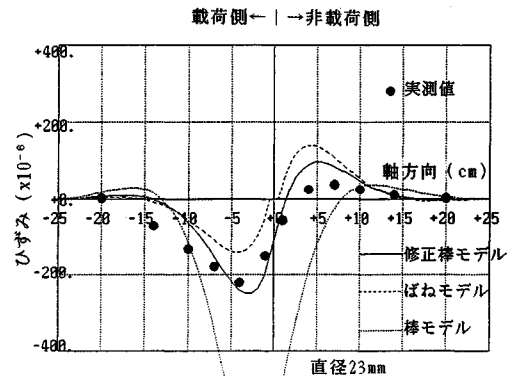
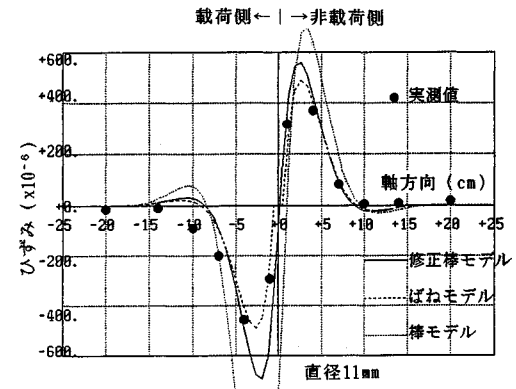


図-7 模型実験結果と FEM 解析結果の比較

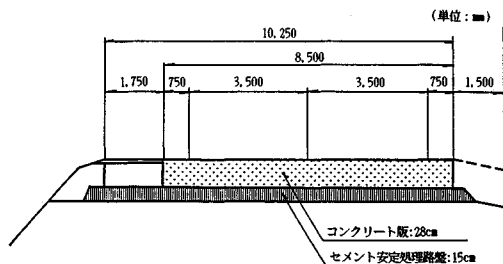


図-8 荷重試験を行ったコンクリート舗装の断面

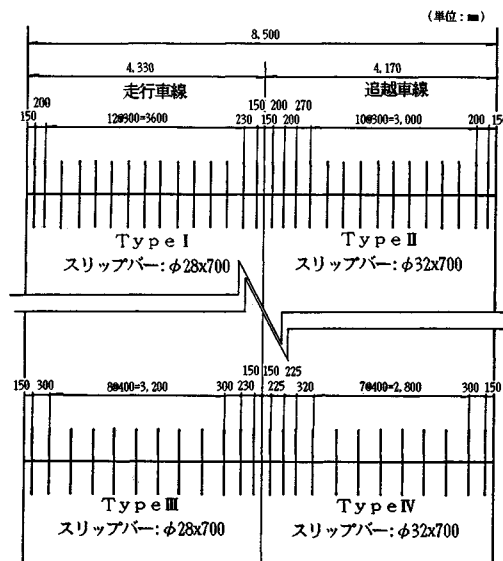


図-9 荷重試験を行ったコンクリート舗装の横目地

荷重実験の荷重には、後軸がシングルとタンデムの2種類の大型トラックを使用した。膨張目地縁部に後軸を近づけ、外側車輪をひずみゲージが貼られたスリッパの位置に作用させてそのひずみを測定した。このとき他車線の影響が現われないように、荷重はなるべく縦目地から離れた路肩あるいは中央帯側で行った。

解析に用いた入力データは、実測値に基づいて表-2のように定めた。他車線の影響は無視できるとして1車線ごとに解析を行った。

修正棒モデルを用いる際、目地幅についてはスリッパのひずみゲージの防水被覆の影響を考慮し、2 cmと6 cmの2種類を考慮した。2 cmは実際の目地幅であり、防水被覆を厳重に行った部分においてコンクリートとスリッパとの接触がないと仮定した場合が6 cmである。

図-10は、断面力から式(18)を用いて計算したスリッパのひずみ分布を、実測値とともに示したものであ

表-2 荷重実験の解析に用いた入力データ

コンクリート版厚	10 cm
コンクリートの弾性係数	$2.47 \times 10^5$ kgf/cm <sup>2</sup>
コンクリートのポアソン比	0.22
路盤K値	11.1 kgf/cm <sup>3</sup>
スリッパ形状	11x500, 23x500 mm
スリッパの弾性係数	$2.01 \times 10^6$ kgf/cm <sup>2</sup>
目地幅	10 mm

る。横軸はスリッパの中央を原点とした長手方向であり、縦軸はスリッパの上側のひずみである。実測値(図中の黒丸印)はスリッパ中央の原点を中心にして逆対称の分布をなしている。実際の車両は移動しているの、車輪が横目地を通過した後は荷重状態が逆になり、それに伴ってひずみ分布も逆になる。このような変化は車輪が横目地を通過する間に生じ、スリッパ版端部には大きな応力振幅が発生することになる。このような応力状態がスリッパの疲労を加速させていることが予想される。

計算値は目地幅が2 cmの場合を実線で、ひずみゲージの防水被覆を考慮した6 cmの場合を破線で示している。スリッパのひずみ分布は原点に対してほぼ逆対称であり、計算値はこれとよく一致している。また、目地幅が広がると、スリッパのひずみは増加することがわかる。先にも述べたように、車両が繰り返し通過することによって版端部のスリッパ周囲のコンクリートが劣化して、スリッパとの接触が失われることが知られている。これは目地幅が広がることと同じ効果をもたら、この計算結果によれば、スリッパの応力を増加させる原因となる。

図-11はスリッパ最大ひずみとスリッパ直径との関係の計算値である。実測値はゲージの破損などにより最大ひずみをとらえていない場合が多いため、計算値のみを示した。スリッパのひずみは間隔が広いほど、直径が細いほど大きくなることがわかる。この場合には特に直径の影響が大きく、このことから目地部分のスリッパの腐食による直径の減少が破損の大きな原因となることが推察される。

### 5. まとめ

スリッパは横目地の荷重伝達に重要な役割を果たしているにもかかわらず、その力学的挙動には不明な点が多く、効果的な使われ方をしているとはいいがたい。そこで本研究においては、コンクリート舗装用の平板FEM解析手法を拡張してスリッパの応力解析を可能にし、その力学的挙動に基づいた合理的な設計法の確立を目的とした。

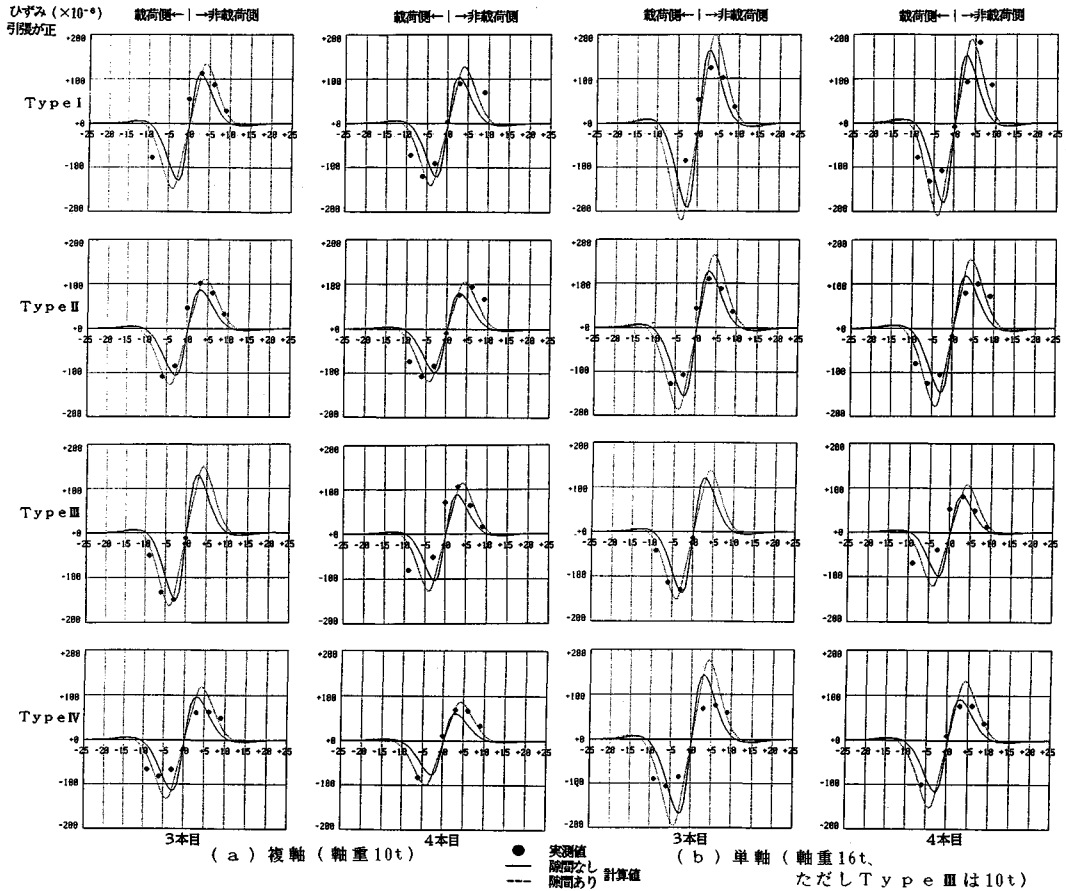


図-10 載荷実験結果とFEM解析結果の比較

まず、コンクリート版とスリップバーの複雑な相互作用を棒要素と局変形要素の組合せによって表現した修正棒モデルを開発し、FEMの定式化を行った。併せて、スリップバーの実際の挙動を調べるために、模型載荷実験と実物載荷実験を実施し、その結果を用いてモデルの検証を行った。

模型実験によれば、スリップバーの荷重伝達はスリップバーの径が小さい場合にはせん断伝達、径が大きくなるとそこに曲げの作用が加わってくることが明らかとなった。また、実際のコンクリート舗装における載荷実験によれば、スリップバーのひずみ分布は目地溝の部分であるスリップバー中心に関して逆対称の形をしており、車面の移動に伴いスリップバーは大きな応力振幅を受けることになる。これはスリップバーの疲労を考える際に、非常に重要な事柄である。

これらの実験結果と修正棒モデルに基づいたFEMによる解析結果はよく一致し、交通荷重下でのスリップバーの挙動を十分に予測できることを確認した。

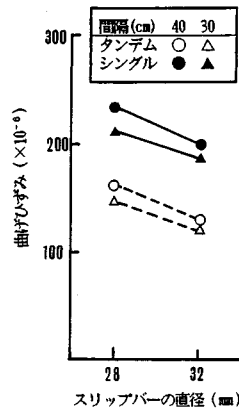


図-11 横目地 Type によるスリップバーの最大ひずみの比較

本モデルによって、コンクリート舗装横目地のスリップバーの応力解析が可能になった。今後さらに、交通荷重の繰り返しによるスリップバーの疲労挙動について検

討していきたい。

謝 辞：本論文をまとめるにあたり、東北大学工学部 福田 正教授には貴重なご助言を頂いた。実験にあたっては、日本道路公団仙台建設局の金田一夫氏（現在道路公団試験所）はじめ関係各位には大変便宜をはかって頂いた。また東北大学工学部道路工学研究室の職員、学生の多大な協力を得た。ここに記して厚く感謝する次第であります。

#### 参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：セメントコンクリート舗装要綱，1984.
- 2) American Association of State Highway and Transportation Officials: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1986.
- 3) 井上武美：米国のコンクリート舗装，道路とコンクリート，No. 48, pp.24~31, 1980.
- 4) 飯島 尚・窪田一夫：矢板バイパスにおけるコンクリート試験舗装の供用性の評価，土木学会論文集，第 366 号/V-4, pp.65~74, 1986.
- 5) Friberg, B.F.: Design of Dowels in Transverse Joints of Concrete Pavements, Proc. of ASCE, Vol. 64, pp. 1809~1830, 1938.
- 6) Teller, L.W. and Cashell, H.D.: Performance of Doweled Joints under Repetitive Loading, Public Roads, Vol. 30, No. 1, pp.1~24, 1958.
- 7) Tabatabaie, A.M. and Barenberg, E.J.: Finite Element Analysis of Jointed or Cracked Concrete Pavements, TRR, No. 671, pp.11~17, 1978.
- 8) Chou, Y.T. and Huang, Y.H.: A Computer Program for Slabs with Discontinuities on Layered Elastic Slabs, Proc. of 2nd International Conference on Concrete Pavement Design (ICCPD), pp.79~85, 1981.
- 9) 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，港湾技術研究報告，Vol. 21, No. 2, pp.207~236, 1982.
- 10) 西沢辰男・松野三朗：コンクリート舗装の構造解析における有限要素法の適用性について，土木学会論文報告集，第 338 号，pp.207~215, 1983.
- 11) 西沢辰男・福田 正・松野三朗：コンクリート舗装版の横目地における力学的挙動の解析，土木学会論文集，第 378 号/V-6, pp.185~193, 1987.
- 12) 小松誠司・西沢辰男・金田一夫：常磐自動車道コンクリート舗装における載荷試験，土木学会第 43 回年次学術講演会概要集，第 5 部，pp.108~109, 1988.
- 13) Yoder, E.J. and Witczak, W.H.: Principles of Pavement Design, 2nd ed., John Wiley and Sons Inc., New York, pp.94~96, 1975.
- 14) Committee on Concrete Roads: Load Transfer at Transverse Joints and Design of Concrete Pavements, Report and Appendices of Subcommittee No. 1, 1979.
- 15) 土木学会編：構造力学公式集，技報堂出版，1979.

(1990.2.19・受付)