

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

ANALYSIS OF MECHANICAL BEHAVIOR OF CONCRETE PAVEMENTS AT TRANSVERSE JOINTS

西沢辰男*・福田正**・松野三朗***

By Tatsuo NISHIZAWA, Tadashi FUKUDA and Saburo MATUNO

In many cases, concrete pavements have been deteriorated by cracks at the slab edges along the transverse joints due to traffic loads. Thus the mechanical behavior of concrete slabs near the joints should be considered in the thickness design of concrete pavements. The mechanical behavior of concrete slabs can be analyzed by the plate FEM, when it incorporates joint models. Accordingly, it is necessary to develop joint models which represent the mechanism of load transfer across joint. In this study, the mechanism of joint is divided into two functions: (1) aggregate interlocking and (2) dowel action and bending action of the dowel bar. The numerical calculations are conducted using those joint models and compared with the experiment data obtained by Iwama.

Keywords: mechanical analysis, concrete pavement, transverse joint, plate FEM

1. まえがき

気象変化あるいはコンクリートの体積変化に伴う収縮ひびわれは、横目地を設けることによって防止できる。しかしながら、この横目地はコンクリート版の連続性を失わせ、交通荷重に対する構造的弱点になる。そこでコンクリート版の横目地には、その構造的補強としてスリップバーを配置し、ある程度の荷重伝達機能をもつようしている。しかしスリップバーによる補強には限度があり、過剰なスリップバーは逆に構造的欠陥になりやすい。横目地には常時車輪が車線内の限定された位置に集中することを考えると、横目地縁部は、版厚設計を考える際のクリティカルな応力状態にあると考えてよい¹⁾。本研究では、この横目地縁部における荷重伝達のメカニズムを力学的な観点から検討し、横目地縁部の応力状態に基づく、コンクリート舗装版の合理的な版厚設計法の確立を目的としている。

さて、横目地付近に荷重が作用したときのコンクリー

ト版の力学的挙動評価は、従来、Westergaard²⁾による平板理論の解に基づいて行われてきた。これによれば、コンクリート版の中央、縁部、隅角部に荷重が作用した場合に、コンクリート版に生ずる応力とたわみを計算することができる。その他にも、Pickett, Ray³⁾による応力影響図などがあり、設計、解析等に用いられている。これらの方法は、コンクリート舗装を有限な広がりをもつコンクリート版として考慮しているものの、目地部の構造的特徴を十分に表現しておらず、目地部周辺の力学的挙動を詳細に解析し得るものではない。

近年、構造解析に広く利用されている有限要素法(FEM)，特に平板FEMは、コンクリート版の不連続性を考慮に入れることができ、コンクリート舗装版の構造解析に有効な手段であることが明らかにされている。現在までに、平板FEMによるコンクリート舗装版の構造解析のためのコンピュータープログラムが数多く発表されている^{4)~12)}。本研究における横目地近傍の応力解析にも、この平板FEMを利用することにした。

横目地における荷重伝達は、コンクリート版側面の骨材かみ合わせとスリップバーの曲げ変形挙動が伴う複雑なメカニズムで、平板FEMにおいてこの目地部の挙動をモデル化するには工夫が必要である。Huangら⁴⁾は最初、目地部両側のモーメントあるいはせん断力の伝達

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

** 正会員 工博 東北大学教授 土木工学科
(〒980 仙台市荒巻字青葉)

*** 正会員 工博 佐藤道路(株)技術研究所所長
(〒243-02 神奈川県厚木市三田47-3)

比を規定し、これに対応するように目地部両側のコンクリート版を変形させる方法をとった。しかしこの方法は繰り返し計算を必要とし、計算が非常に煩雑になる。そこで次に、コンクリート版に埋め込まれたスリップバーと周辺のコンクリートとの相互作用を、一種のせん断ばねで置き換えたモデルを提案した。このせん断ばねモデルはその後一般的に用いられるようになり、たとえば福手ら³⁾の研究のように、コンクリート版側面のかみ合わせ機能にもこのモデルを適用している例が多い。しかし、このモデルはせん断伝達の機能のみであるため、スリップバーの挙動を完全に表現しているとはいえない。一方、Tabatabai⁴⁾は単純にスリップバーを一次元の棒モデルに仮定する方法をとった。この方法は確かにスリップバーの曲げ挙動を表現しているが、特に目地幅が小さい場合、棒の断面に比べそのスパン長が極端に短くなるために、要素の剛性が異常に大きくなるという欠点をもつている。

本研究ではこのようなことから、横目地の荷重伝達機能をコンクリート版側面の骨材かみ合わせ機能とスリップバーの機能に分け、前者に対してはせん断ばねモデルを、後者に対してはスリップバーとコンクリートの相互作用（いわゆるダウエル作用）およびスリップバーの曲げ変形を組み合わせたモデルを考案して適用した。

本論文では、まずコンクリート舗装版をFEM解析する際に必要な、コンクリート舗装構造とその横目地のモデル化について述べ、次にこれらのモデルを用いて横目地縁部のコンクリート版の力学的挙動を解析し、これを岩間の実験値¹³⁾と比較することにより、本研究の妥当性を検証することとした。

2. コンクリート舗装の有限要素モデル

(1) 平板モデル

本研究で採用した有限要素モデルは、平板の曲げ理論に基づく平板有限要素モデルである¹⁴⁾。取り扱いの容易さから、4節点12自由度の長方形平板有限要素を用いる(図-1)。それぞれの節点の自由度はz方向のたわみ、w、x軸まわりの回転 θ_x 、y軸まわりの回転 θ_y の3つ

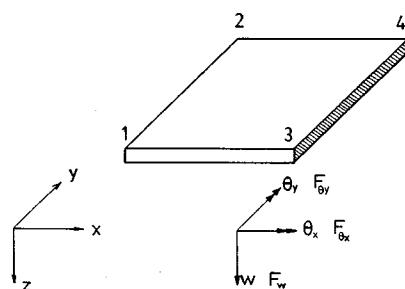


図-1 4 節点 12 自由度長方形平板要素

の節点変位であり、対応する節点力は鉛直力 F_w 、 x 軸まわりのモーメント F_{ex} 、 y 軸まわりのモーメント F_{ey} である。これらの節点力と節点変位は、以下の剛性方程式で関係づけられる。

ここに

$\{f\} = \{f_1 \ f_2 \ \dots \ f_n\}^T$: 節点外力ベクトル

$\mathbf{f}_i = [F_{wi} \ F_{exti} \ F_{eyi}]^T$: i 節点の節点力ベクトル

[K]：コンクリート版の剛性マトリックス

[J]：横目地の剛性マトリックス

[H]: 路盤の剛性マトリックス

$|d| = |d_1 \ d_2 \ \dots \ d_n|^T$: 節点変位ベクトル

$\mathbf{d}_i = \{w_i \ \theta_{xi} \ \theta_{yi}\}^T$: i 節点の節点変位ベクトル

なお右肩添字 T はマトリックスの転置記号である。

コンクリート版の剛性マトリックス $[K]$ は、一般に用いられている長方形平板有限要素の剛性マトリックスを適用した。路盤の剛性マトリックス $[H]$ 、横目地の剛性マトリックス $[J]$ は以下のとおりである。

(2) 路盤モデル

コンクリート舗装における路盤の支持機能に関しては、一般に路盤反力の鉛直成分のみを考慮し、これをばねで表現した Winkler モデルと、路盤を弾性固体層として取り扱った力学モデルがある。後者は路盤層の厳密な力学モデルといえるが、計算が繁雑であり、本研究では前者の Winkler モデルを採用することにした。

3. 横目地の機能

横目地の荷重伝達のメカニズムは、前述のように次の2つの機能に分けて考えることができる。

- a) コンクリート版側面の骨材かみ合わせ
 b) スリップバーの曲げ抵抗とダウエル作用

a) はスリップバーを用いないダミー目地, b) は膨張目地, a)とb)を組み合わせたものとしてはスリップバーを用いたダミー目地の荷重伝達機能である。

a) と b) はそれぞれ独立な機能であるが、本研究において用いる FEM では一種の目地要素として同一の取り扱いをする。そして、それぞれの機能はモデルごとの変位と断面力の関係式によって区別する。これらの目地要素の一般的な定式化は次のとおりである。

(1) 目地要素の定式化

横目地における荷重伝達を表わす力学モデルの最も簡単なものは、目地を挟むコンクリート版の変形差に比例した荷重が伝達されると仮定したモデルである。このことは図-2に示す横目地の任意点において、次のように表わすことができる。

二三

ここに

$$[\mathbf{J}_{ei}] = \int_0^{2\pi} [\mathbf{B}(t)]^T [\mathbf{T}_i] [\mathbf{B}(t)] dt \dots \quad (17 \cdot a)$$

$$[\mathbf{J}_{es}] = [\overline{\mathbf{B}(t_s)}]^T [\overline{\mathbf{T}_s}] [\overline{\mathbf{B}(t_s)}] \dots \quad (17\text{-b})$$

ここで $[J_{el}]$ のかみ合わせ機能は目地部のコンクリート版側面に一様に分布しているとすると、目地要素にわたっての積分が必要になる。一方、 $[J_{es}]$ はスリップバーによるものであり、スリップバーの曲げ機能はその位置 t_s に依存し積分の必要はない。ただしその影響は 4 つの節点に、マトリックス $[\bar{B}(t)]$ によって分担される。ここで、式 (17-a) によって表わされる目地要素をかみ合わせ要素、式 (17-b) によって表わされる要素をスリップバー要素とよぶことにする。

(2) かみ合わせ機能

コンクリート版側面の骨材かみ合わせによって、主にせん断力の伝達が期待される。そこで $[\bar{T}]$ の内容は次式により表現する。

ここに, h はコンクリート版厚, k^* は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ことにする.

(3) スリップバー機能

スリップバーの曲げ抵抗による効果をFEMで考慮する場合、一次元棒要素を用いる方法が考えられる。しかしながら、一般に横目地の目地幅はスリップバーの直径と同程度かそれよりも小さいので、特に目地幅が小さい場合にはこの棒要素は直径に比ベスパンが短く、このことが棒要素の剛性を過大に評価する結果となる。すなわち、式(17-b)の $[T_s]$ に棒要素の剛性マトリックスを直接用いるので、スリップバーとコンクリート版が目地部において完全に密着し、棒要素の変位と平板要素の変位が同一に仮定されてしまうためである。

しかし実際には、スリップバーとコンクリート版は、スリップバーの埋め込み部の剛性によって目地部においてミクロな変位差を生じている。図-4はこのような目地部のコンクリート版とスリップバーの変形状態を示したもので、コンクリート版のたわみとたわみ角、スリップバーのたわみとたわみ角は、図のような変位差を生じ、節点1および節点2において棒要素と平板要素の変位とは同一にならず節点力が不連続となる。

Tabatabaie, Friberg ら¹⁶⁾はこの変位差を Timoschenko による弾性床上のはりの解を用いて評価した。

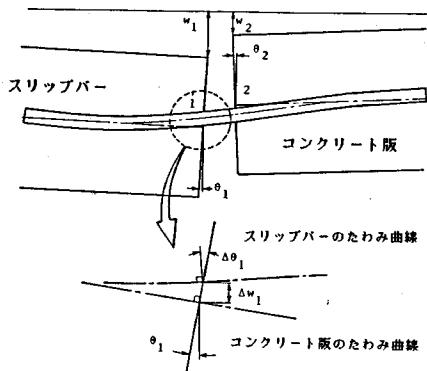


図-4 コンクリート版とスリップバーの変形状態

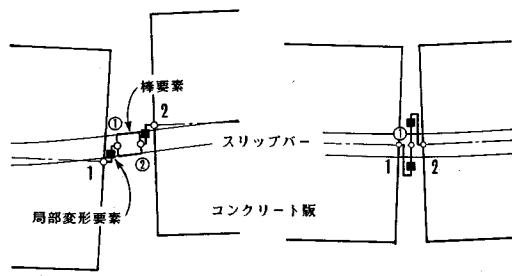


図-5 局部的なコンクリートの変形を考慮したスリップバーモデル

本研究でも基本的には同様の考え方を踏襲するが、その効果を次のようにモデル化する。すなわち、図-5に示すように内部節点①、②を設け、棒要素と平板要素との間にばね要素を挿入する。この要素は、スリップバーによるコンクリートの局部変形の効果を表現したもので、棒要素と平板要素との間の節点変位および節点力の差を表現する。本研究では、この要素を局部変形要素とよぶことにする。この局部変形要素の機能はコンクリートとスリップバーとの相互作用を表現したもので、これは弾性床上のはりの挙動に近似的に対応する。この場合のスリップバーの変位と断面力の関係は次のように表わされる¹⁷⁾。

$$\begin{Bmatrix} \Delta w \\ \Delta \theta_t \end{Bmatrix} = \frac{1}{2\beta^2 E I A_3} \begin{bmatrix} \frac{1}{\beta}(SC - sc) & -(S^2 + s^2) \\ -(S^2 + s^2) & 2\beta(SC + sc) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta f_w \\ \Delta f_{st} \end{Bmatrix}$$

.....(19)

二二六

$$\beta = \sqrt[4]{k/4EI}, \quad A_3 = (S^2 - s^2)$$

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

.....(20)

EI：スリップバーの曲げ剛性。

l: スリップバー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

ただし、 Δ は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。

変位法によって定式化を行うために、次式のように変形する。

$$\begin{cases} \Delta f_w \\ \Delta f_{\theta t} \end{cases} = \frac{2\beta^2 EI(S^2 - s^2)}{S^2 C^2 - 2S^2 s^2 - s^2 c^2} \begin{bmatrix} 2\beta(SC + sc) & S^2 + s^2 \\ S^2 + s^2 & \frac{1}{\beta}(SC - sc) \end{bmatrix} \begin{cases} \Delta w \\ \Delta \theta_t \end{cases} \quad (21)$$

あるいは

$$\{\Delta f\} = [\mathbf{M}] \{\Delta d\} \quad (22)$$

ここに

$$\{\Delta f\} = \{\Delta f_w \ \Delta f_{\theta t}\}^T$$

$$\{\Delta d\} = \{\Delta w \ \Delta \theta_t\}^T$$

$$[\mathbf{M}] = \frac{2\beta^2 EI(S^2 - s^2)}{S^2 C^2 - 2S^2 s^2 - s^2 c^2} \begin{bmatrix} 2\beta(SC + sc) & S^2 + s^2 \\ S^2 + s^2 & \frac{1}{\beta}(SC - sc) \end{bmatrix} \quad (23)$$

式(22)に基づいて、節点1と内部節点①をもつ局部変形要素の剛性方程式を仮想仕事の原理から次式のように誘導する。

$$\begin{cases} f_1 \\ f_{\textcircled{1}} \end{cases} = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & -\mathbf{M} \\ -\mathbf{M} & \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{cases} d_1 \\ d_{\textcircled{1}} \end{cases} \quad (24)$$

節点2、内部節点②の間の局部変形要素についても同様である。

内部節点①と内部節点②の間の棒要素の剛性方程式は一般に、次のように表わされる。

$$\begin{cases} f_{\textcircled{1}} \\ f_{\textcircled{2}} \end{cases} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{cases} d_{\textcircled{1}} \\ d_{\textcircled{2}} \end{cases} \quad (25)$$

ここに

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} = \frac{EI}{B} \begin{bmatrix} \frac{12}{B^2} & -\frac{6}{B} & -\frac{12}{B^2} & -\frac{6}{B} \\ -\frac{6}{B} & 4 & \frac{6}{B} & 2 \\ -\frac{12}{B^2} & \frac{6}{B} & \frac{12}{B^2} & \frac{6}{B} \\ -\frac{6}{B} & 2 & \frac{6}{B} & 4 \end{bmatrix} \quad (26)$$

B ：目地幅

以上より、これらを重ね合わせることによって目地部のスリップバーの剛性方程式を次のように得る。

$$\begin{cases} f_1 \\ f_{\textcircled{1}} \\ f_{\textcircled{2}} \\ f_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & -\mathbf{M} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{M} & \mathbf{M} + \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{21} & \mathbf{M} + \mathbf{K}_{22} & -\mathbf{M} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{M} & \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{cases} d_1 \\ d_{\textcircled{1}} \\ d_{\textcircled{2}} \\ d_2 \end{cases} \quad (27)$$

内部節点には外力が作用しないので、 $f_{\textcircled{1}} = f_{\textcircled{2}} = \mathbf{0}$ である。

すなわち、

$$\begin{cases} d_{\textcircled{1}} \\ d_{\textcircled{2}} \end{cases} = \left[\begin{array}{cc} \mathbf{M} + \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{M} + \mathbf{K}_{22} \end{array} \right]^{-1} \left[\begin{array}{c} \mathbf{M} \ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \ \mathbf{M} \end{array} \right] \begin{cases} d_1 \\ d_2 \end{cases} \quad (28)$$

したがって、式(27)は最終的に次式のようになる。

$$\begin{cases} f_1 \\ f_2 \end{cases} = \left[\begin{array}{cc} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M} \end{array} \right] \left[\begin{array}{cc} \mathbf{E} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} \end{array} \right] \left[\begin{array}{cc} \mathbf{M} + \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{M} + \mathbf{K}_{22} \end{array} \right]^{-1} \left[\begin{array}{c} \mathbf{M} \ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \ \mathbf{M} \end{array} \right] \begin{cases} d_1 \\ d_2 \end{cases} \quad (29)$$

さて、ダミー目地のように目地幅が小さい場合、スリップバーの目地幅における部分は短いので、剛性が非常に高い棒要素として作用する。その場合、 $[\mathbf{M}]$ の成分の値は $[\mathbf{K}_{ij}]$ に比べ非常に小さくなり、式(28)の逆マトリックスが計算できない場合がある。そこで図-5に示したように、この場合には棒要素を取り除き、局部変形要素のみのモデルとする。すなわち

$$\begin{cases} f_1 \\ f_{\textcircled{1}} \\ f_2 \end{cases} = \left[\begin{array}{ccc} \mathbf{M} & -\mathbf{M} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{M} & 2\mathbf{M} & -\mathbf{M} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{M} & \mathbf{M} \end{array} \right] \begin{cases} d_1 \\ d_{\textcircled{1}} \\ d_2 \end{cases} \quad (30)$$

内部節点①には外力が作用していないので

$$\begin{cases} f_1 \\ f_2 \end{cases} = \frac{1}{2} \left[\begin{array}{cc} \mathbf{M} & -\mathbf{M} \\ -\mathbf{M} & \mathbf{M} \end{array} \right] \begin{cases} d_1 \\ d_2 \end{cases} \quad (31)$$

である。

以上より、膨張目地のように目地幅が大きい場合は、式(29)が、またダミー目地のように目地幅が小さい場合には式(31)がスリップバーの機能を表わす剛性方程式となる。

実際に式(29)、式(31)によって数値計算を行ってみると、目地幅 1 mm 程度が式(29)を用いることでの最小値である。そこで 1 mm 以上の目地幅の場合に式(29)を適用することとした。

式(29)、(31)の 4×4 マトリックスに θ_n 、 $f_{\theta n}$ に対応する成分を加え、 6×6 のマトリックスに拡張したものが式(17-b)の $[\bar{T}_s]$ になる。

(4) コンクリートの支圧係数

局部変形要素の剛性マトリックスを誘導する際、Friberg と同様に、スリップバーはコンクリート版とスリップバーの変形差に比例する反力を受けると仮定した。

すなわち

$$p = k \Delta w \quad (32)$$

ここに、 p ：スリップバーがコンクリートより受ける力

Δw ：スリップバーとコンクリート版との相対変

形

k ：コンクリートの支圧係数

Yorder ら¹⁸⁾によればこの k の値は 8 300~41 500 kg/cm³ の間にあり、41 500 kg/cm³ の値が一般に適切である。

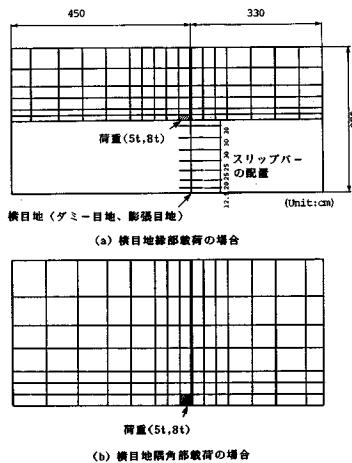
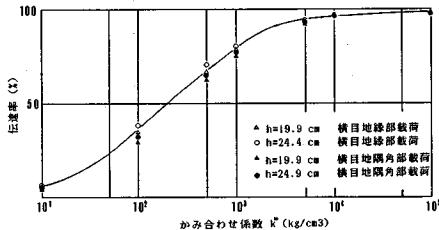


図-7 計算に用いた要素分割

図-8 かみ合わせ係数 k^* と伝達率の関係

直接含まれていないが、かみ合わせ係数 k^* で考慮されることになる。 k^* と目地幅との関係を物理モデルから解析的に求めることは難しいので、数値計算の結果を利用して求めることにした。

図-8 は、 k^* の値と次式で定義される目地両側のコンクリート版端部におけるたわみの伝達率との関係である。

$$e_{fr} = s_2 / s_1 \times 100 \quad (\%) \quad \dots \dots \dots (43)$$

ここに、 s_1 は載荷側の最大たわみ、 s_2 は非載荷側の最大たわみである。この図からわかるように、 k^* は 10~1 000 kg/cm³ の範囲において、伝達率に大きな影響を及ぼす。また、 k^* と伝達率の関係は版厚や荷重条件にはほとんど左右されず、次の一般的な関係が存在する。

$$\log_{10} k^* = \frac{e_{fr} - 85.19 e_{fr}^2 - 1784 e_{fr} - 13020}{50.12 e_{fr} (e_{fr} - 100)} \quad \dots \dots \dots (44)$$

一方、別の研究¹⁹⁾によれば、伝達率と目地幅の間には次式に示される線形関係が存在するとされている。

$$e_{fr} = 100 - 25 B \quad \dots \dots \dots (45)$$

ここに、 B は目地幅 (mm) である。したがって、式 (44) と式 (45) から目地幅と k^* との関係を得ることができる。

(3) ダミー目地の挙動

ダミー目地は主に収縮目地として用いられる。これは、

コンクリート版上面から版厚の 1/3~1/4 をカッターなどで切り込み、コンクリートの硬化後にこの位置にひびわれを誘発させる構造である。したがってこの場合、コンクリート版のひびわれ側面の骨材かみ合わせ機能を期待できる。ダミー目地には、スリップバーを用いないものと、スリップバーを用いて補強したものの 2 種類がある。スリップバーを用いないダミー目地の荷重伝達は、ひびわれ面におけるコンクリートのかみ合わせにより行われるので、その解析にあたってはかみ合わせ要素を用いればよい。一方、スリップバーを用いたダミー目地の荷重伝達は、かみ合わせ機能とスリップバーの機能が複合するため、解析にはかみ合わせ要素とスリップバー要素を用いる。

図-9 は、スリップバーを用いないダミー目地の縁部および隅角部に、荷重を載荷させた場合のコンクリート版のひずみ分布を示している。計算は目地幅を 0.05 mm~3 mm に変化させて行った。目地幅が広がるにつれ、載荷側のコンクリート版のひずみが増大し、非載荷側のひずみが減少していく状態が示されている。図中には実測値もプロットされている。実測値と計算値との比較から目地幅を推定すれば、実測時の目地幅は 0.6 mm 前後であることが推察される。

図-10 は、スリップバーを用いたダミー目地の解析結果であり、計算条件は図-9 と同様である。スリップバーを用いた場合、目地幅の影響がきわめて小さいことがわかる。なお実測値との対応についてみると、荷重が作用する版端部において計算値は実測値よりも若干大きい

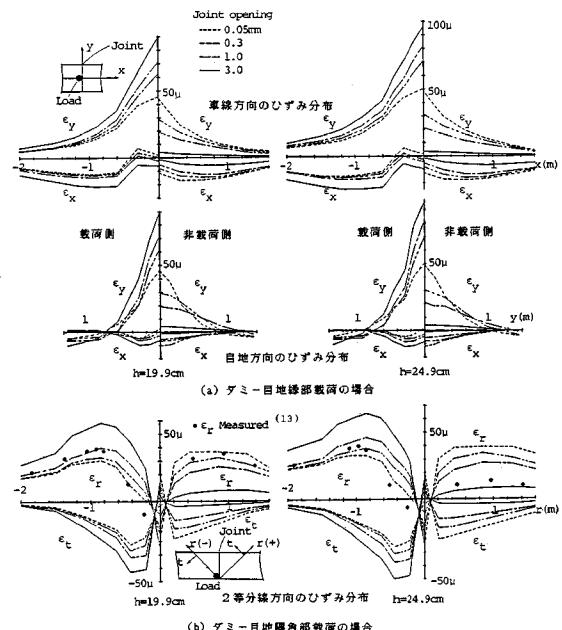


図-9 スリップバーを用いないダミー目地の挙動

い。これは数値計算による検討によれば、荷重作用面の相違によるものである。すなわち、実験においては荷重作用面は円形であるのに対し、計算では正方形に荷重を作用させているため、版端部では苛酷な荷重条件となつた。

図-11は、たわみと応力の伝達率に及ぼす目地幅の影響を検討したものである。図中の実線および破線は、過去のコンクリート舗装の実績¹⁹⁾に基づく、目地幅とたわみの伝達率の関係である。スリップバーを用いたダミー目地の関係は、(2)において目地幅とかみ合わせ係数の関係を求める際に使用したデータであるので、当然のことながら計算値と一致している。スリップバーを

用いたダミー目地の場合、目地幅の影響は非常に小さいことが従来からいわれておらず、このことは図中の破線で示されている。計算値は破線の値と近い値であるが、目地幅の影響については破線のそれより若干小さく、モデルのなかではスリップバーの役割が大きいことがうかがえる。またたわみの伝達に比べ応力の伝達はかなり小さく、モーメントの伝達は比較的小さいことを意味している。また版厚によって応力の伝達率が異なるが、これは版厚が異なっても同じ径のスリップバーを使用しているため、版厚24.9cmの方のスリップバーの機能が相対的に低くなるためであると考えられる。

(4) 膨張目地の挙動

膨張目地は、コンクリート版の膨張による版端の水平変位を吸収する目的で設けられるもので、広い目地幅が確保され、かみ合わせ機能は期待できないので、直径の大きいスリップバーによって補強されている。したがって、膨張目地の解析にはスリップバー要素のみを考えればよい。ただ膨張目地の場合、目地幅が広くなるためスリップバー要素における棒部分の影響が大きく現われ、スリップバー要素の剛性は小さくなる。

図-12は、膨張目地縁部および隅角部に荷重が載荷した場合のコンクリート版のひずみ分布を示している。解析は目地幅を10~30mmに変化させて行った。図から明らかなように、この範囲の目地幅であればひずみ分布はほとんど変化がないといってよい。実測値との比較に関していえば、計算値は実測値よりもやや小さいが、全体としてはよい一致を示している。

図-13は、たわみと応力の伝達率と目地幅の関係を

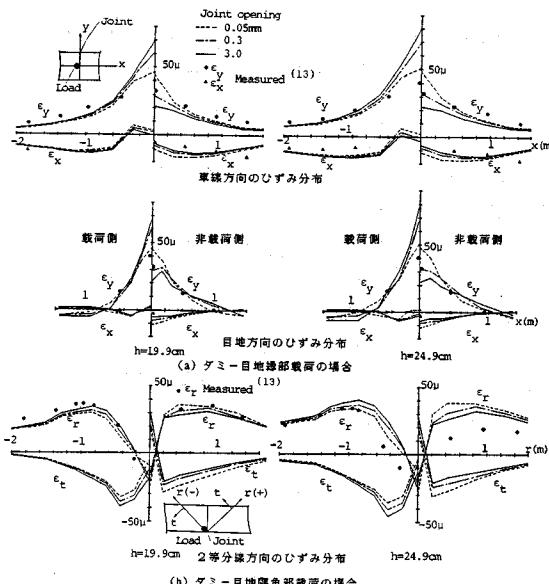


図-10 スリップバーを用いたダミー目地の挙動

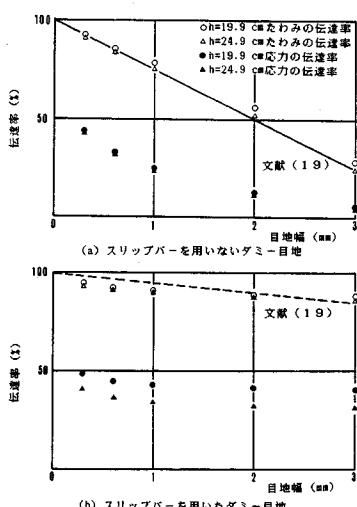


図-11 目地幅と伝達率の関係

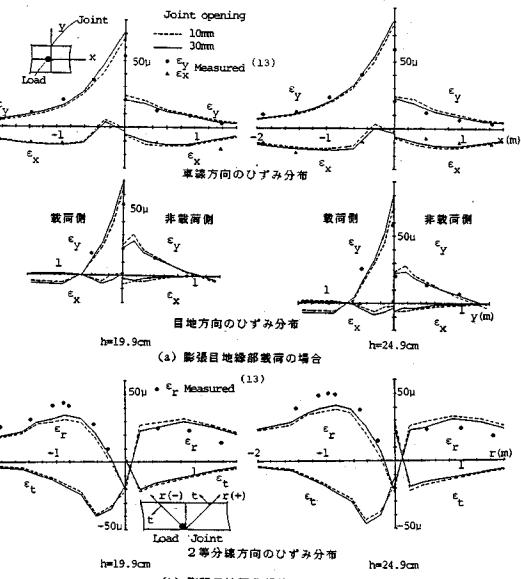


図-12 膨張目地の挙動

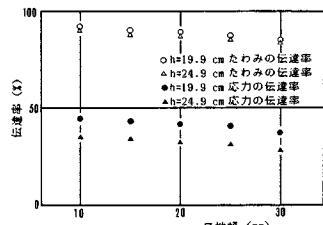


図-13 膨張目地の場合の目地幅と伝達率の関係

示している。伝達率にはわずかに目地幅の影響が現われている。特に目地幅30 mm付近になると応力の伝達率の低下の傾向がやや大きくなり、目地間のスリップバーの曲げ変形の影響が現われてきていることがうかがえる。この場合も応力の伝達率が版厚ごとに異なっている。

5. 結論

コンクリート舗装の構造的弱点である横目地周辺の力学的挙動を明らかにするために、平板FEM解析を行った。このために横目地に関しての新たな目地要素を定式化して数値計算を行い、既往の実験例と比較することによって本研究結果を検証した。得られた成果をまとめると以下のようになる。

(1) 横目地の荷重伝達機能を、コンクリート版側面の骨材かみ合わせ機能とスリップバーの曲げ作用の機能に分けて考えた。前者に対してはせん断ばねモデル要素を、後者に対してはコンクリートとスリップバーの相互作用を考慮に入れた、局部変形要素と棒要素を組み合わせた構造モデルを提案した。

(2) 平板FEMの中で、目地の荷重伝達機能を取り扱うための一般的な目地要素の定式化を行い、かみ合わせ機能とスリップバー機能に対してそれぞれかみ合わせ要素とスリップバー要素を導入した。

(3) かみ合わせ要素において、かみ合わせ機能を表わすパラメーターとして、かみ合わせ係数を導入し、数値計算からこのかみ合わせ係数と目地幅の関係を明らかにした。

(4) スリップバー要素において、スリップバーとコンクリートの相互作用を示すパラメーターである支圧係数の算定式を提案した。

(5) 数値計算の結果より、提案したモデルはダミー目地や膨張目地の荷重伝達機能を表現していることが明らかになった。

参考文献

- 1) Fukuda, T., Koyanagawa, M. and Murai, S. : Condition Survey of Concrete Pavements and Its Evaluation, Proc. of 3rd International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation (ICCPDR), pp. 519~523, 1985.

- 2) Westergaard, H. M. : Computation of Stresses in Concrete Roads, Proc. of HRB, Vol. 5, pp. 90~112, 1925.
- 3) Pickett, G. and Ray, G. K. : Influence Charts for Concrete Pavements, Trans. of ASCE, Vol. 116, pp. 49~73, 1951.
- 4) Huang, Y. H. and Wang, S. T. : Finite Element Analysis of Concrete Slabs and Its Implication for Rigid Pavement Design, HRR, Vol. 446, pp. 55~69, 1973.
- 5) Tabatabaei, A. M. and Barenberg, E. J. : Finite Element Analysis of Jointed or Cracked Concrete Pavements, TRR, No. 671, pp. 11~17, 1978.
- 6) Chou, Y. T. and Huang, Y. H. : A Computer Program for Slabs with Discontinuities on Layered Elastic Solids, Proc. of 2nd ICCPD, pp. 79~85, 1981.
- 7) Majidzadeh, K., Ilves, G. J. and McComb, R. : Mechanistic Design of Rigid Pavements, Proc. of 2nd ICCPD, pp. 87~96, 1981.
- 8) 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、Vol. 21, No. 2, pp. 207~236, 1982.
- 9) 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年10月。
- 10) Huang, Y. H. : A Computer Package for Structural Analysis of Concrete Pavements, Proc. of 3rd ICCPDR, pp. 295~307, 1985.
- 11) Ioannides, A. M., Thompson, M. R. and Barenberg, E. J. : Finite Element Analysis of Slabs-on-Grade Using a Variety of Support Models, Proc. of 3rd ICCPDR, pp. 309~324, 1985.
- 12) Majidzadeh, K., Ilves, G. J. and Skyut, H. : RISC-A Mechanistic Method of Rigid Pavement Design, Proc. of 3rd ICCPDR, pp. 325~339, 1985.
- 13) 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(3)，土木研究所報告，第117号，土木研究所，1964年。
- 14) 小堀為雄・吉田 博：有限要素法による構造解析プログラム、丸善、1980年。
- 15) 西沢辰男・田井伸治・松野三朗：コンクリートブロック舗装の力学性状に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第354号、pp. 137~145, 1985年2月。
- 16) Friberg, B. F. : Design of Dowels in Transverse Joints of Concrete Pavements, ASCE, Vol. 105, pp. 1809~1828, 1940.
- 17) 土木学会編：構造力学公式集、技報堂、1979年。
- 18) Yoder, E. J. and Witczak, M. W. : Principles of Pavement Design, 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, 1975.
- 19) Load Transfer at Transverse Joints and Design of Concrete Pavements, Report and Appendices of Subcommittee No. 1 Committee on Concrete Roads, 1979.

(1986.6.13・受付)