

3次元FEMに基づいたコンクリート舗装 横目地におけるダウエルバーモデル

西澤辰男

正会員 工博 石川工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒 929-0392 河北郡津幡町北中条)

コンクリート舗装におけるダウエルバーを使用した横目地の荷重伝達機能をモデル化するために、3次元有限要素法に基づいたダウエルバーモデルを開発した。ダウエルバーを目地の間とコンクリートに埋め込まれた部分に分け、それぞれを梁要素とコンクリートとダウエルバーの相互作用を表現した局部変形要素でモデル化する。モデルの妥当性を、室内実験および実舗装における実験の結果と解析結果の比較によって検証した。さらに、横目地の設計という観点から、ダウエルバーの形状、配置間隔の影響について、本モデルに基づいた数値シミュレーションによって検討を加えた。

Key Words : concrete pavement, transverse joint, dowel bar, three dimensional finite element method

1. はじめに

コンクリート舗装の横目地は不連続面となるため、構造的な弱点となりやすい。そこで、横目地の荷重伝達を確保するための構造的な補強として、ダウエルバーが用いられる¹⁾。横目地の設計においては、ダウエルバーの形状や配置間隔はほぼ経験的に定められている。しかしながら、コンクリート舗装の実態調査によれば重交通道路舗装においては横目地からの縦ひび割れが多く、横目地がクリティカルな場所となっている²⁾。また、現場調査によれば、ダウエルバーが切断されている場合があり³⁾、現在の構造が必ずしも適切ではない可能性がある。したがって、合理的な力学モデルに基づいた横目地の設計法が必要であり、そのための解析法の開発が急務である。

横目地を持つコンクリート舗装の構造解析モデルには平板有限要素法が用いられている。コンクリート版は平板要素で、路盤以下はばねや多層弾性モデルで表現されているが、目地モデルは中でも非常に重要である。Tabatabaieら⁴⁾は目地の開きの部分のダウエルバーを梁要素でモデル化した。しかし、目地幅が狭い場合、剛性を高く評価してしまうという欠点を有している。一方、Huangら⁵⁾は、ダウエルバーの機能をダウエルバーと周辺のコンクリートとの相互作用によるせん断伝達と考え、せん断ばねでモデル化した。このモデルは取り扱いやすく、JSLAB⁶⁾、ILLI-SLAB⁷⁾や福手ら⁸⁾の有限要素プログラムに採用されている。ただし、このモデルではダウエルバーの曲げ作用による伝達機能を無視していることになる。著者ら^{9),10),11)}

は目地の開きの部分を梁要素で、コンクリート版に埋め込まれた部分の変形を局部変形要素でモデル化した修正モデルを提案した。このモデルは、ダウエルバーと周辺のコンクリートとの相互作用によるせん断伝達と、ダウエルバーの曲げ作用の両者を考慮できるモデルである。このモデルの実用性はGuoら¹²⁾によっても確認され、ISLAB2000¹³⁾にも取り入れられている。

近年の数値解析法の発展は目覚しく、パソコンの高性能化と相まって、大規模な数値解析が比較的手軽に行えるようになってきている。このような中で、アメリカ合衆国議会会計監査局(GAO)は、同国運輸省に対して舗装設計の構造解析を3次元有限要素法(3DFEM)によって行うことを提言している¹⁴⁾。それを受けて、舗装工学における3DFEMに関するシンポジウムが開催されるようになり、この分野における3DFEMの有用性、将来性が認識された^{15),16),17)}。3DFEMを用いれば、平板モデルでは扱うことが難しい路盤や路床の変形も計算することが可能である。また汎用性にも優れ、コンクリート舗装、アスファルト舗装だけでなく、コンポジット系舗装も同様のモデルによって解析することができる。わが国においても3DFEMに基づいた舗装用の構造解析モデルが開発されている^{18),19)}。

3DFEMをコンクリート舗装の構造解析に適用する際には、やはり目地の取り扱いが重要である。3DFEMに基づいたダウエルバーのモデルもいくつか提案されている。Shoukryら²⁰⁾は、ダウエルバーそのものをソリッド要素で表現するモデルを開発した。商用のパッケージを駆使して構築したモデルは、非常に大規模な計算を要し、コスト、時間とともに実務レベルでは現実

的ではない。Davidら²¹⁾は、ソリッド要素に梁要素を埋め込むというアイデアを定式化したモデルを開発した。このモデルによれば、比較的小さな要素分割で、コンクリートとダウエルバーの相互作用や、ダウエルバーとコンクリートの隙間の影響を考慮することができる。しかしながら、このモデルもダウエルバーの要素分割が必要であり、要素数の増加は免れない。

本研究で開発したモデルは、2DFEMで著者ら¹⁰⁾が提案したモデルを3DFEMに拡張したものである。埋め込まれたダウエルバーとコンクリートとの相互作用は、弾性支承上の梁の厳密解で表現し、局部変形要素として定式化している。そのため、ダウエルバー自体を要素分割する必要はなく、要素数が節約できる。さらに、ダウエルバー要素をコンクリート版のソリッド要素の節点とは無関係な位置に設定できるように、内部節点の考え方を導入した。このことによって、要素分割の自由度が増し、データ作成作業が軽減される。

本論文では、まずダウエルバーとコンクリート版の相互作用を表現する局部変形要素の定式化について述べる。本モデルの妥当性について、実物大の載荷実験結果との比較によって検証する。最後に、本モデルを用いて、ダウエルバーの効果について検討する。

2. 構造モデル

(1) 3DFEMによるコンクリート舗装構造モデル

3DFEMによるコンクリート舗装の構造モデルを図-1に示す。基本的には舗装全体を多層構造としている。コンクリート版、路盤および路床はソリッド要素に、コンクリート版と路盤の境界面や目地は後述する境界面要素に分割される。ダウエルバーは目地の境界面要素の一部として取り扱われる。

各層は有限の広がりを持ち、その端部の断面では広がり方向の変位はその方向に固定されている。たとえば $x-z$ 平面上の断面では y 方向の変位 v が固定されている。底面の変位はすべて固定である。ただし、このような境界条件は最も面積の大きな層に対して適用される。すなわち、図-1のように表層が路盤以下の層よりも広がり小さい場合には、端部でのすべての変位は自由としている。

荷重は表層表面に作用する等分布面荷重とし、 x, y, z 方向の荷重を取り扱う。温度応力については、各層で z 方向の温度分布を直線分布として取り扱う。

(2) ソリッド要素

本モデルにおいては図-2に示すような8節点6面体要素を採用した。要素内の任意の変位は、各節点の変

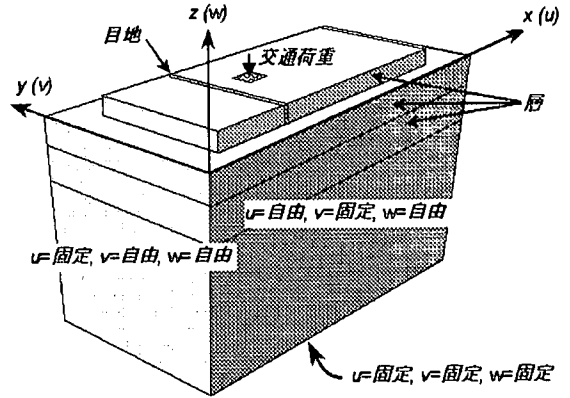


図-1 舗装構造モデルと境界条件

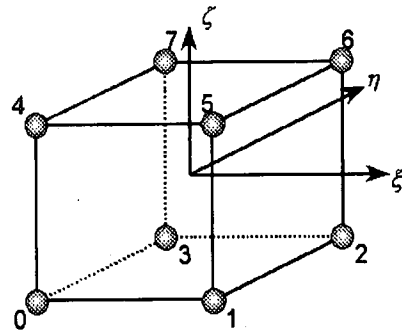


図-2 8節点6面体要素

位から以下のように計算できる²²⁾。

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \sum_{i=0}^7 \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、

$$\begin{aligned} u, v, w &= \text{要素内の } x, y, z \text{ 方向の変位} \\ u_i, v_i, w_i &= i \text{ 節点の } x, y, z \text{ 方向の変位} \\ N_i &= \frac{1}{8}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(1 + \zeta_i \zeta) \end{aligned}$$

N_i は形状関数と呼ばれている。この形状関数の形から明らかなように、変位は要素内で1次関数となる。

(3) 境界面要素¹⁸⁾

コンクリート版と路盤の接着状況や、目地やひび割れの荷重伝達機能を考慮するために、汎用境界面要素を開発した。図-3に示すような2枚の面が接している状態を考える。境界面要素では、面0から面1へ、変

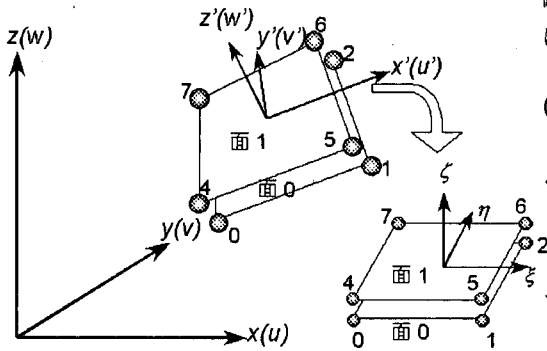


図-3 境界面要素

位差に比例した力が伝達されるとする。すなわち、

$$\begin{Bmatrix} \Delta f'_x \\ \Delta f'_y \\ \Delta f'_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k'_x & 0 & 0 \\ 0 & k'_y & 0 \\ 0 & 0 & k'_z \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta u' \\ \Delta v' \\ \Delta w' \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\{\Delta f'\} = [k']\{\Delta d'\}$$

ここに、

- u', v', w' = 面内の任意の点における x', y', z' 方向の変位
- u'_i, v'_i, w'_i = i 節点の x', y', z' 方向の変位
- k'_x, k'_y, k'_z = x', y', z' 方向のばね係数

である。一方、 Δ は面 0 と面 1 の諸量の差であることを表す。以上の式を用い、この要素に仮想仕事の原理を適用し、通常 FEM の定式化を行って境界面要素の剛性マトリックスを得る。

(4) ばね係数

コンクリート舗装では、コンクリート版と路盤との接着を防ぐための処置を施す。したがって、コンクリート版と路盤とは分離していると考えられ、温度差によるそり変形の際に、コンクリート版は路盤から浮き上がる。この現象を考慮するために、ばね定数を以下のような変形の関数とした。

$$k = \begin{cases} k & \Delta u < 0 \\ k(\cos(\frac{\Delta u \pi}{\Delta_0}) + 1.0)/2 & 0 < \Delta u < \Delta_0 \\ 0 & \Delta_0 < \Delta u \end{cases} \quad (3)$$

ばね係数の値を急激に変化させると、数値計算上の不具合が生ずるため、遷移領域 Δ_0 を設けている。 Δ_0 の値は経験的に 0.0001mm 程度とした。

また、目地やひび割れにおける噛み合わせ効果もこのばね係数によって表現する。その場合、面内の変位

差に作用するばね係数 k'_x と k'_y は、ひび割れ部における噛み合わせによるせん断伝達やねじりモーメント伝達に関係し、 k'_z は曲げモーメント伝達に寄与する。

(5) 非線形解析法

以上より、3DFEM における全体剛性方程式は以下のようなになる。

$$(\mathbf{K}_s + \mathbf{K}_j) \cdot \mathbf{d} = \mathbf{f}_p + \mathbf{f}_v + \mathbf{f}_t \quad (4)$$

ここに、

- \mathbf{K}_s : 6 面体要素の剛性マトリックス
- \mathbf{K}_j : 境界面要素の剛性マトリックス
- \mathbf{d} : 節点変位ベクトル
- \mathbf{f}_p : 表面荷重ベクトル
- \mathbf{f}_v : 自重ベクトル
- \mathbf{f}_t : 温度荷重ベクトル

である。コンクリート版のそり変形を扱う場合には、路盤面からの浮き上がりを考慮しなければならない。その場合、式 (3) のように、境界面要素の剛性は変位の関数になるため、式 (4) は非線形な方程式となる。そこで、式 (4) を Newton-Raphson 法を用いて解くこととした。 $(i-1)$ 段階の変位ベクトル \mathbf{d}^{i-1} を既知とし、全体剛性方程式の残差

$$\Delta \phi = \mathbf{f}_s + \mathbf{f}_v + \mathbf{f}_t - (\mathbf{K}_s + \mathbf{K}_j) \cdot \mathbf{d}^{i-1} \quad (5)$$

を計算する。次に、次式によって変位ベクトルの修正項 $\Delta \mathbf{d}^{i-1}$ を計算する。

$$\Delta \phi = (\mathbf{K}_s + \mathbf{K}_j) \cdot \Delta \mathbf{d}^{i-1} \quad (6)$$

この修正項を既知の変位ベクトルに加えて再び残差を計算し、残差のノルムが十分小さい値になるまでこのプロセスを繰り返す。

3. ダウエルバーモデル

(1) 基本的な考え方

図-4 は横目地におけるダウエルバーのモデル化の概念を示している。ダウエルバーは境界面要素の一部として取り扱われ、その変位の表現には式 (1) に示す要素内座標系が用いられる。ダウエルバーは横目地を挟み、境界面要素の面を共有する 2 つのソリッド要素の中に埋め込まれている。ダウエルバーの目地幅の部分は 3D の梁要素で表現され、梁要素の両端部が 2 つのソリッド要素 (P, Q) と結合する。結合する場所は、必ずしもソリッド要素の節点ではなく、内部の任意の場所と結合しているとする。この場所を内部節点として定義す

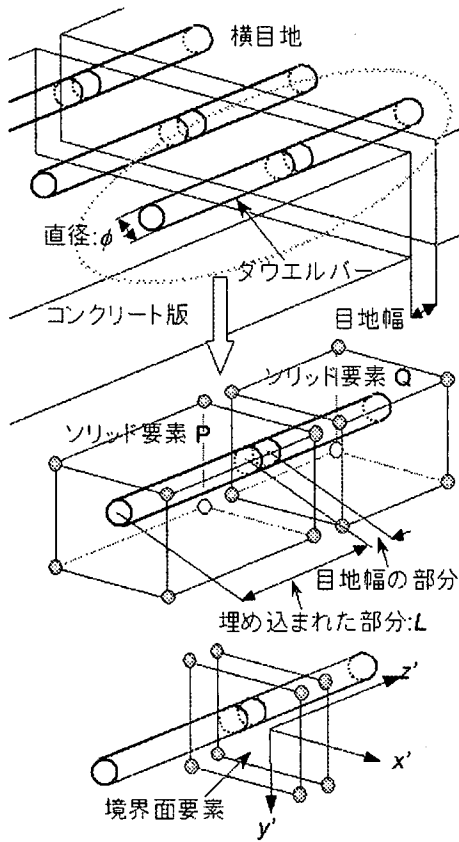


図-4 ダウエルバーのモデル化

る。図-5 に示すように、これらの内部節点を、 p と q としよう。内部節点は、ソリッド要素の表面である必要はない。たとえば、ダウエルバーとコンクリートに隙間が生じた場合には、内部節点をソリッド要素の内側に設定することによって、そのような状況を表現できる。あるソリッド要素 P の内部節点 p における変位は、ソリッド要素 P の節点変位と、内部節点 p の位置座標から、形状関数により以下のように表される。

$$\begin{Bmatrix} u' \\ v' \\ w' \\ \theta_{x'} \\ \theta_{y'} \\ \theta_{z'} \end{Bmatrix}_p = \sum_{i=0}^7 \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \\ 0 & -\frac{\partial N_i}{\partial z'} & 0 \\ \frac{\partial N_i}{\partial z'} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_p \cdot \begin{Bmatrix} u'_i \\ v'_i \\ w'_i \end{Bmatrix}_P \quad (7)$$

$$\{d_p\} = [N_p] \cdot \{d^P\}$$

ここに、

$\theta_{x'}, \theta_{y'}, \theta_{z'}$ = x', y', z' 軸に関する回転角

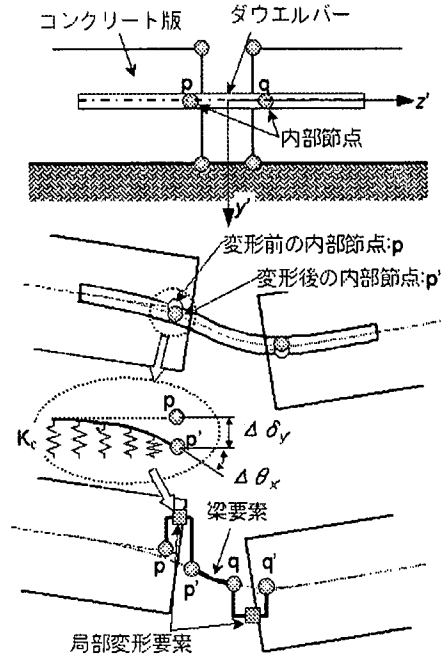


図-5 ダウエルバーとコンクリートの相互作用

である。下添え字の p は内部節点、上添え字の P はその内部節点の所属する要素の値であることを示す。

一方、この内部節点は、コンクリート版の変形後、移動するが、ダウエルバーと周囲のコンクリートの相互作用による局部変形によって、ソリッド要素内の相対位置からややずれることになる。そのずれた内部節点を p' とする。節点 p と p' の間に局部変形要素を挿入し、この要素によってダウエルバーと周囲のコンクリートの相互作用による局部変形を表現する。その相互作用を弾性支承上の梁の厳密解で表現すると、以下のようになる。 $y' - z'$ 平面内では、

$$\begin{Bmatrix} \Delta v' \\ \Delta \theta_{x'} \end{Bmatrix} = a_0 \begin{bmatrix} a_1 & -a_2 \\ -a_2 & a_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta f_{y'} \\ \Delta m_{x'} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

ここに、

$$a_0 = \frac{2\beta^2}{k(S^2 - s^2)}$$

$$a_1 = \frac{1}{\beta}(SC - sc)$$

$$a_2 = (S^2 + s^2)$$

$$a_3 = 2\beta(SC + sc)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{K_c \phi}{4E_s I_s}}$$

K_c = ダウエルバーとコンクリートの相互作用を表すばね係数

ϕ = ダウエルバーの直径

$E_s I_s$ = ダウエルバーの x' 軸に関する曲げ剛性

$$\begin{aligned}
s &= \sin(\beta L) \\
c &= \cos(\beta L) \\
S &= \sinh(\beta L) \\
C &= \cosh(\beta L) \\
L &= \text{コンクリートに埋め込まれたダウエル} \\
&\quad \text{バーの長さ}
\end{aligned}$$

$f_{y'}$ = y' 方向の力

$m_{x'}$ = x' 軸周りのモーメント

である。

z' - x' 平面内では、

$$\begin{Bmatrix} \Delta u' \\ \Delta \theta_{y'} \end{Bmatrix} = a_0 \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_2 & a_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta f_{x'} \\ \Delta m_{y'} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

ここに、

$f_{y'}$ = x' 方向の力

$m_{y'}$ = y' 軸周りのモーメント

である。

式(8)および式(9)を、力について解いてまとめると以下のようになる。

$$\{\Delta f\} = [A^P] \cdot \{\Delta d\} \quad (10)$$

ここに、

$$\begin{aligned}
\{\Delta f\} &= \{f_p\} - \{f_{p'}\} \\
\{\Delta d\} &= \{d_p\} - \{d_{p'}\} \\
\{f\} &= \{f_{x'} \ f_{y'} \ f_{z'} \ m_{x'} \ m_{y'} \ m_{z'}\}^t \\
\{d\} &= \{u' \ v' \ w' \ \theta_{x'} \ \theta_{y'} \ \theta_{z'}\}^t
\end{aligned}$$

である。また、 $[A^P]$ は6行6列の対称マトリックスとなり、その0以外の成分は以下のようになる。

$$\begin{aligned}
A_{00}^P &= A_{11}^P = a_4 a_3 \\
A_{33}^P &= A_{44}^P = a_4 a_1 \\
A_{04}^P &= -A_{13}^P = -a_4 a_2 \\
a_4 &= \frac{2\beta^2 E_s J_s}{C^2 + c^2}
\end{aligned}$$

仮想仕事の原理より、 p - p' 節点間の局部変形要素に対する以下の剛性方程式を得る。

$$\begin{Bmatrix} f_p \\ f_{p'} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A^P & -A^P \\ -A^P & A^P \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d_p \\ d_{p'} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

他方の q - q' 節点間についても同様のことがいえるので、

$$\begin{Bmatrix} f_q \\ f_{q'} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A^Q & -A^Q \\ -A^Q & A^Q \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d_q \\ d_{q'} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

となる。ここで、添え字 q はソリッド要素 Q に埋め込まれた節点に対応する。また、 p' - q' 節点間には、3Dの梁要素を挿入する²³⁾。すなわち、

$$\begin{Bmatrix} f_{p'} \\ f_{q'} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{00} & S_{01} \\ S_{10} & S_{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d_{p'} \\ d_{q'} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

以上より、ダウエルバー全体として以下のような剛性方程式が得られる。

$$\begin{Bmatrix} f_p \\ f_{p'} \\ f_{q'} \\ f_q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A^P & -A^P & 0 & 0 \\ -A^P & A^P + S_{00} & S_{01} & 0 \\ 0 & S_{10} & A^Q + S_{11} & -A^Q \\ 0 & 0 & -A^Q & A^Q \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d_p \\ d_{p'} \\ d_{q'} \\ d_q \end{Bmatrix} \quad (14)$$

となる。ここで、

$$\begin{Bmatrix} f_{p'} \\ f_{q'} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (15)$$

より、ソリッド要素の内部節点についての剛性マトリックスが得られる。

$$\begin{Bmatrix} f_p \\ f_q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{00}^d & K_{01}^d \\ K_{10}^d & K_{11}^d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_p \\ d_q \end{Bmatrix} \quad (16)$$

ここに、

$$\begin{bmatrix} K_{00}^d & K_{01}^d \\ K_{10}^d & K_{11}^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^P & 0 \\ 0 & A^Q \end{bmatrix} \cdot \left[\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A^P + S_{00} & S_{01} \\ A^P & 0 \end{bmatrix} \right]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} A^P & 0 \\ 0 & A^Q \end{bmatrix} \quad (17)$$

また、 $[I]$ は単位マトリックスである。一方、目地幅が非常に小さい場合には、目地の開きの部分の梁要素を取り去り、2つの局部変形要素を直接結合する。このような場合のダウエルバーの剛性マトリックスは以下のようになる。

$$\begin{bmatrix} K_{00}^d & K_{01}^d \\ K_{10}^d & K_{11}^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^P & 0 \\ 0 & A^Q \end{bmatrix} \cdot \left[\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A^P B A^P & A^P B A^Q \\ A^Q B A^P & A^Q B A^Q \end{bmatrix} \right]^{-1} \quad (18)$$

ここに、

$$[B] = [A^P + A^Q]^{-1}$$

式(17)や式(18)は、式(7)の関係より、内部節点が属するソリッド要素の剛性方程式に変換される。すなわち、

$$\begin{Bmatrix} f^P \\ f^Q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p & 0 \\ 0 & N_q \end{bmatrix}^t \cdot \begin{bmatrix} K_{00}^d & K_{01}^d \\ K_{10}^d & K_{11}^d \end{bmatrix} \quad (19)$$

ここに、

f^P, f^Q = それぞれ p 節点、 q 節点が属するソリッド要素の節点力ベクトル

d^P, d^Q = それぞれ p 節点、 q 節点が属するソリッド要素の変位ベクトル

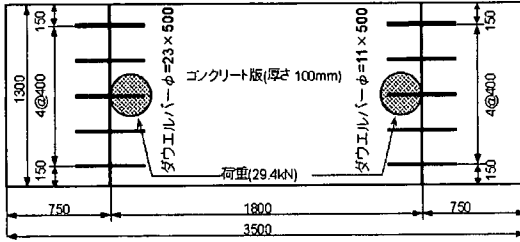


図-6 模型実験概要

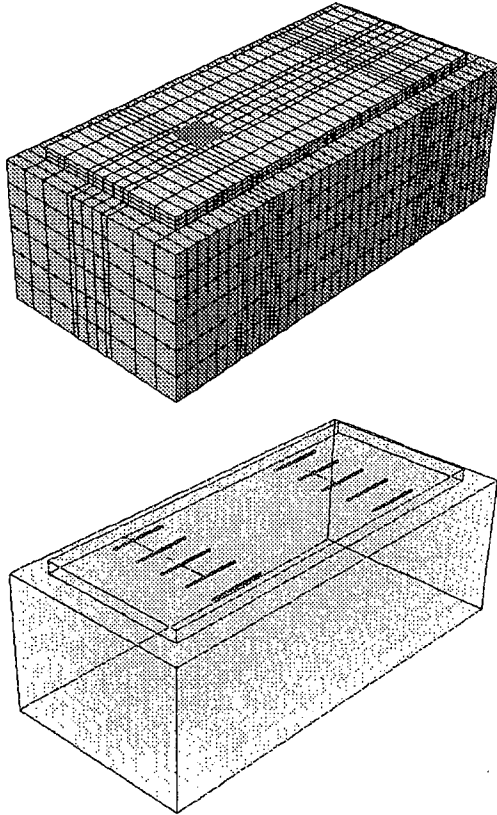


図-7 模型実験の解析用の要素分割およびダウエルバーの配置

である。

以上は境界面要素の座標系で定式化されているので、これを境界面要素の座標変換マトリックスを用いて、全体座標系に変換する。

4. ダウエルバーモデルの検証

(1) 模型舗装による実験

ダウエルバーの挙動を調べるために、室内土槽に図-6に示すようなコンクリート版の模型を作製した。ダウエルバーにひずみゲージを貼り、目地縁部に荷重を作

表-1 模型実験に対する計算条件

項目	数値
コンクリートの弾性係数	24000 MPa
コンクリートのポアソン比	0.2
コンクリート版の厚さ	100 mm
地盤の弾性係数	50 MPa
地盤のポアソン比	0.35
地盤の厚さ	1200 mm
ダウエルバーの直径	11, 23 mm
ダウエルバーの長さ	500 mm
ダウエルバーの弾性係数	210000 MPa
ダウエルバーのポアソン比	0.3
ダウエルバーとコンクリートとの相互作用 K_c	100 GN/m ³ ~ 400 GN/m ³

用させて、ダウエルバーに生ずるひずみを計測した。この模型実験について FEM 解析を行い、実測値と計算値を比較した。解析に用いた要素分割およびダウエルバーの配置を図-7に示す。計算条件は表-1に示すとおりである。29.4kNの荷重を30cm×30cmの面に等分布荷重として作用させた。また、コンクリート版内の温度勾配は0とした。

図-8は、荷重直下のダウエルバーにおけるバー上面の曲げひずみ分布である。黒丸は実測値、線は FEM による計算値である。ダウエルバーの直径が11mmと細い場合、せん断伝達が卓越するため、載荷側と非載荷側のひずみ分布はほぼ逆対称の形になる。直径が23mmと太くなると、曲げ作用が大きくなり、載荷側のひずみが大きくなる。計算値は、 K_c によって異なる。すなわち、 K_c の値が大きくなるにつれ、周囲のコンクリートによる拘束が強くなるので、ひずみの最大値は大きくなる。 K_c の値については、81GN/m³から405GN/m³の範囲にあるといわれている²⁴⁾。この場合、100GN/m³から400GN/m³の範囲で計算を行ったが、この中では100GN/m³の値が実測値と良い対応を示している。点線は、 $K_c = 100\text{GN/m}^3$ 、路盤K値 = 108MN/m³の条件で、平板 FEM により計算したひずみ分布である¹⁰⁾が、3DFEM とほぼ同様のひずみ分布となる。

(2) 実舗装における荷重実験²⁵⁾

新設のコンクリート舗装において、実施された荷重試験の結果を用いてモデルの検証を行う。このコンクリート舗装の断面を図-9に示す。上層路盤は15cmのセメント安定処理で、その上に28cmのコンクリート版が施工されている。横目地の構造を図-10に示す。ダウエルバーの効果を調べるために、2種類の直径のダウエルバーを、2種類の配置間隔で組み合わせて、図-10

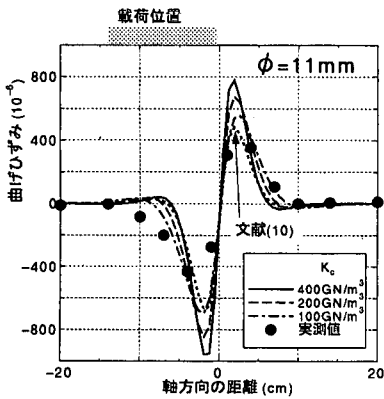
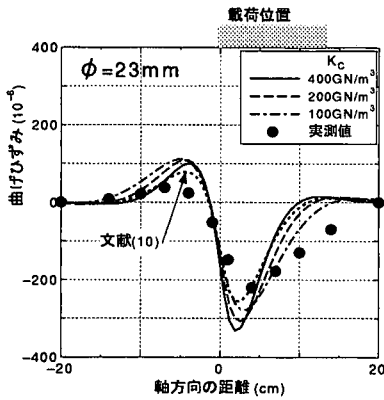


図-8 ダウエルバー内の曲げひずみ分布

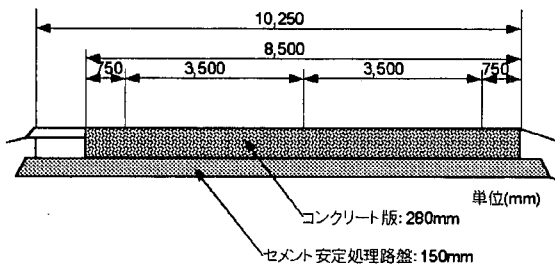


図-9 実舗装断面

に示すように Type1 から Type4 まで計 4 種類の横目地の構造を準備した。ダウエルバー内の曲げひずみ分布を調べるために、版端から 3 本目と 4 本目のダウエルバーには、中心付近に 3cm 間隔で軸方向に 7 箇所、それぞれ上下計 14 枚のひずみゲージを貼り、曲げひずみを測定した。また、横目地縁部に沿って、コンクリート版表面にひずみゲージを 10cm 間隔で貼った。荷重には、タンデム軸 (軸重 98kN) の大型トラックを用いた。版端から車輪最外端部までの距離が 1m 離る位置で、膨張目地縁部に後軸を近づけて、ダウエルバーとコンク

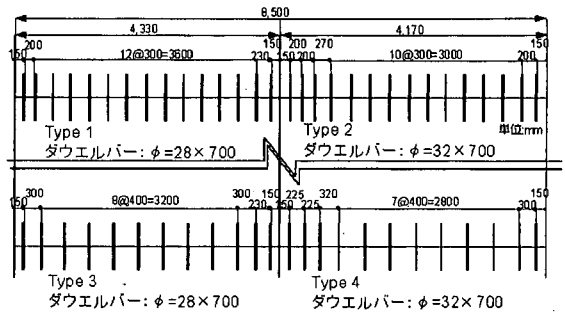


図-10 横目地におけるダウエルバーの配置

表-2 実舗装における載荷実験に対する計算条件

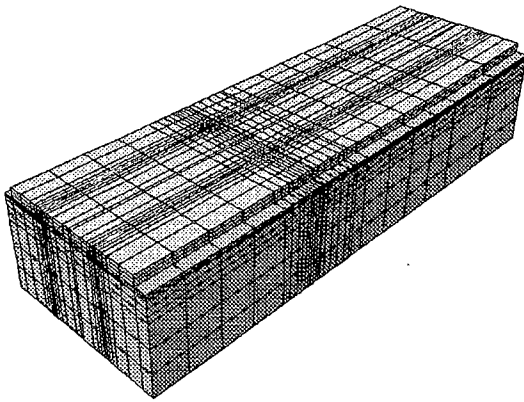
項目	数値
コンクリートの弾性係数	30000 MPa
コンクリートのポアソン比	0.15
コンクリート版の厚さ	280 mm
路盤の弾性係数	1000 MPa
路盤のポアソン比	0.35
路盤の厚さ	150 mm
路床の弾性係数	30 MPa
路床のポアソン比	0.45
路床の厚さ	2600 mm
ダウエルバーの直径	28, 32 mm
ダウエルバーの長さ	700 mm
ダウエルバーの弾性係数	210000 MPa
ダウエルバーのポアソン比	0.3
K_c	400 GN/m ³

リート版のひずみを計測した。

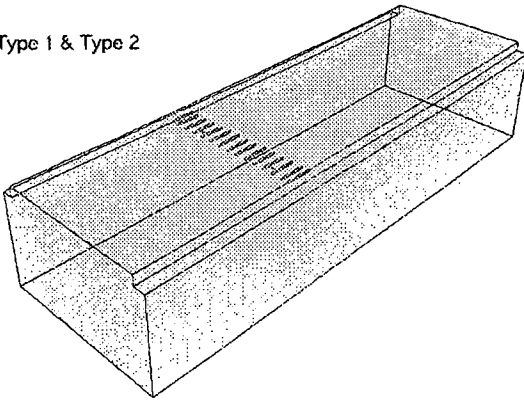
実舗装に対する FEM 解析で用いた諸数値を表-2 に示す。これらの値は、室内試験および現場の路盤支持力試験の結果から決定したものである。図-11 は解析に用いた要素分割およびダウエルバーの配置である。コンクリート版の幅は 4.3m、載荷側のコンクリート版の長さは 10m、非載荷側のコンクリート版の長さは 5m とした。また、コンクリート版内の温度勾配は 0 とした。

図-12 にダウエルバーの曲げひずみ分布を示す。実験におけるダウエルバーのひずみ計測では、ゲージの破損が著しく、値も不安定なものが多かった。比較的信頼度の高い値をプロットしてある。全体として、計算値は実測値を上回っているが、計算値と実測値の対応は満足できるものである。

図-13 は横目地に沿ったコンクリート版表面ひずみ分布である。荷重直下に大きな曲げひずみを生じていることが分かる。全体として、FEM による計算値は実



Type 1 & Type 2



Type 3 & Type 4

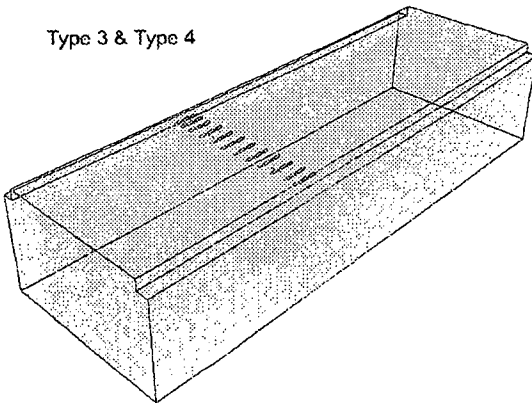


図-11 実舗装解析用の要素分割およびダウエルバーの配置

測値を上回っているが、傾向はよく捉えている。このように、本モデルに基づいたFEM解析はダウエルバーを含めた実際のコンクリート舗装横目地の挙動を良く表現しているといえる。

5. 横目地の構造と挙動

本章では、3DFEMによる計算によって、ダウエルバーの形状や間隔、路盤の剛性が、ダウエルバーの挙動

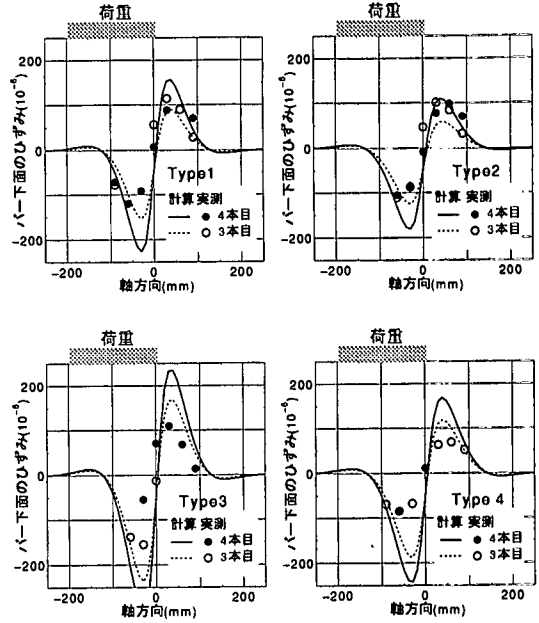


図-12 実舗装におけるダウエルバーのひずみ

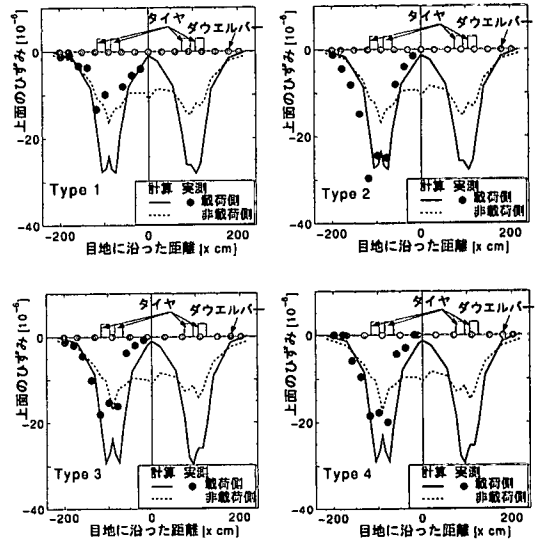


図-13 実舗装におけるコンクリート版のひずみ

やコンクリート版の応力にどのような影響があるか調べ、横目地の設計において必要な情報を得ることにする。目地構造は第4章(2)の実舗装解析におけるType3を基本とし、ダウエルバーの長さ、 K_c の値、目地幅、路盤の弾性係数を表-3に示すように変化させて計算を行った。なお、ここでいう目地幅とは、内部節点間の距離である。この計算結果と、第4章における実舗装の解析結果から、ダウエルバーとコンクリート版の応力に及ぼす、ダウエルバーの形状、配置間隔、路盤の影響について検討する。

表-3 ダウエルバーの影響を調べるために変化したパラメータ

項目	数値
路盤の弾性係数	500, 1000, 10000 MPa
目地幅	20, 40, 60 mm
ダウエルバーの長さ	500, 700 mm
K_c	100, 200, 400 GN/m ³

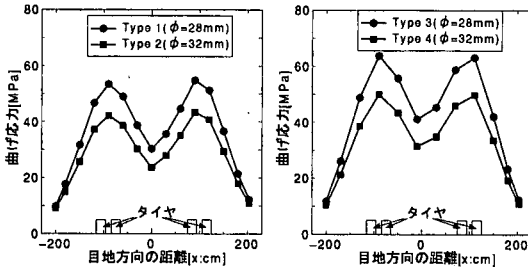


図-14 目地に沿ったダウエルバーの曲げ応力分布

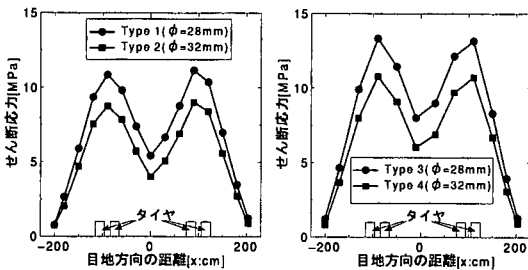


図-15 目地に沿ったダウエルバーのせん断応力分布

(1) ダウエルバーの応力

図-14は各ダウエルバーに生ずる最大曲げ応力を取り出し、目地縁方向の分布として、Typeごとに表したものである。当然のことながら、荷重直下のダウエルバーに大きな応力が生ずる。ダウエルバーの直径を28mmから32mmに増加させると、応力は約20%減少する。一方、ダウエルバーの間隔を400mmから300mmにせばめ、ダウエルバーの配置を密にしても、応力の減少は約10%程度である。このことから、ダウエルバーの配置を密にするよりも、直径を太くしたほうが、ダウエルバーに対する負担軽減効果が高いといえる。

図-15は各ダウエルバーに生ずる最大せん断応力を取り出し、目地縁方向の分布として、Typeごとに表したものである。基本的な傾向は曲げ応力と同様であり、ダウエルバーの配置間隔より、ダウエルバーの直径の影響のほうが大きい。

図-16はダウエルバーの曲げ応力に及ぼす K_c の影響を示している。a)は荷重直下のダウエルバー内の曲げ応力分布であり、b)は各ダウエルバー内の最大曲げ応力を目地縁方向に沿って示したものである。 K_c が大きくなると、ダウエルバー内の応力分布の範囲は小さく

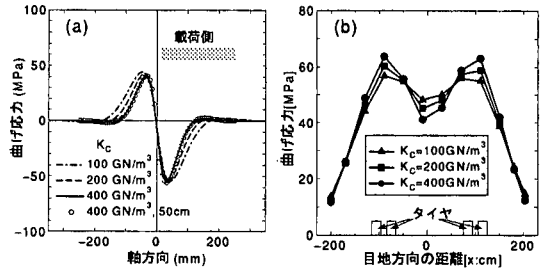


図-16 ダウエルバーの曲げ応力に及ぼす K_c の影響。a) ダウエルバー内の応力分布、b) 目地に沿った応力分布。

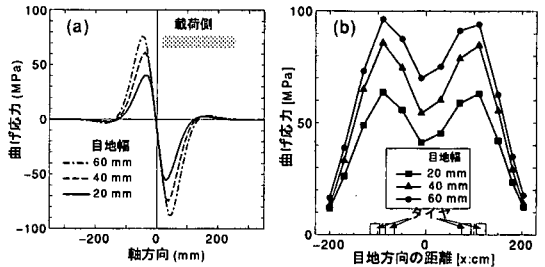


図-17 ダウエルバーの曲げ応力に及ぼす目地幅の影響。a) ダウエルバー内の応力分布、b) 目地に沿った応力分布。

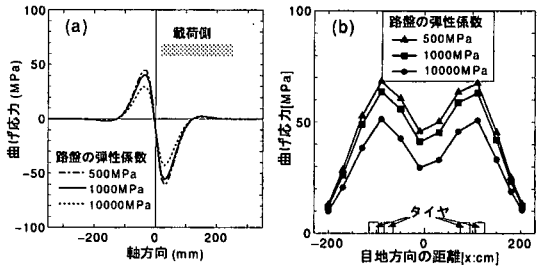


図-18 ダウエルバーの曲げ応力に及ぼす路盤弾性係数の影響。a) ダウエルバー内の応力分布、b) 目地に沿った応力分布。

なり、最大値はわずかに増加する。図中の丸印は、 $K_c=400 \text{ GN/m}^3$ としてダウエルバーの長さを500mmにした場合であるが、700mmの場合とほとんど同じである。現在のダウエルバーの長さは700mmを標準としているが、これより短いものでも現在の機能を確保できるといえる。各ダウエルバーの分担をみると、 K_c が小さい場合は全体に負担を分散させているが、 K_c が大きくなると荷重直下のダウエルバーの負担が増大する。

図-17は、目地幅の影響を示している。目地幅が広がると、ダウエルバーの応力はかなり増加する。一般に膨張目地の目地幅は20mmから25mm程度である。もし、ダウエルバーの周辺のコンクリートが劣化して、その部分のコンクリートの支持が失われると、目地幅が広がったことと同様の効果をもたらす。そのような場合には、ダウエルバーの負担がさらに増大することになる。

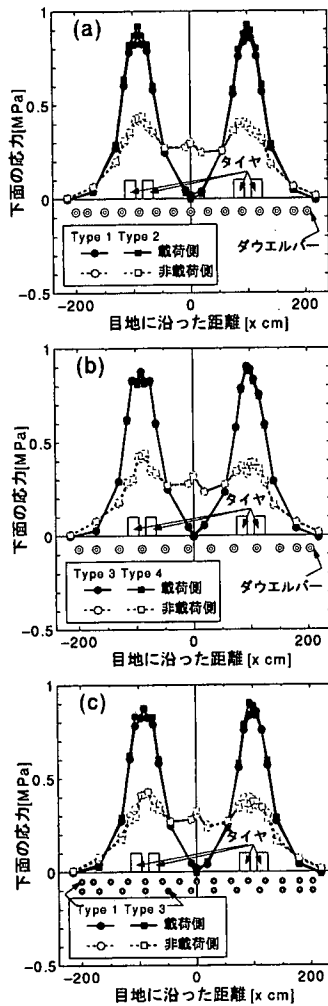


図-19 コンクリート版の応力分布。a), b) ダウエルバーの直径の影響, c) ダウエルバーの配置間隔の影響

図-18は、路盤の弾性係数の影響を示している。路盤の支持は、ダウエルバーの曲げ応力に相当の影響を及ぼすことが分かる。路盤弾性係数 500MPa は粒状路盤に相当し、10000MPa はリーコンクリート路盤に相当する。そのような路盤の強化によって、ダウエルバーの応力は約 30%程度軽減することができる。したがって、路盤の強化はコンクリート版のみならず、ダウエルバーの負担を軽減する良い手段といえる。

(2) コンクリート版の応力

ここでは、コンクリート版の応力に着目して議論を進める。図-19は、コンクリート版下面の曲げ応力の目地に沿った分布を示している。載荷側と非載荷側の分布を、ダウエルバーの配置間隔ごとにまとめている。当然のことながら、載荷側の荷重直下に最大の応力が

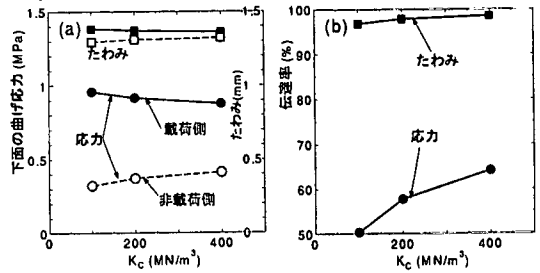


図-20 コンクリートの曲げ応力やたわみに及ぼす K_c の影響。a) 応力とたわみ, b) 応力とたわみの伝達率

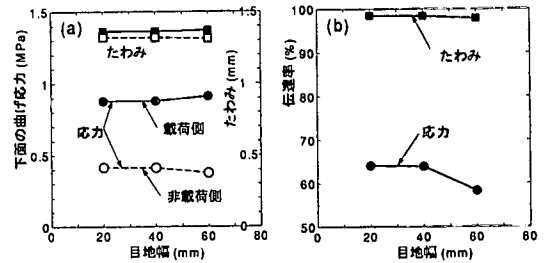


図-21 コンクリートの曲げ応力やたわみに及ぼす目地幅の影響。a) 応力とたわみ, b) 応力とたわみの伝達率

生ずるが、非載荷側では荷重直下のみならず、荷重の間にも少なからぬ応力が生ずる。これはダウエルバーによって、荷重が分散されて非載荷側に伝達されるためである。図-19(a), (b)より、ダウエルバーの直径を 28mm から 32mm に増加してもコンクリート版の応力にはほとんど影響がない。図-19(c)より、ダウエルバーの配置間隔を 400mm から 300mm にせばめて、ダウエルバーを密に配置してもコンクリート版の応力に及ぼす影響はきわめてわずかであることが分かる。載荷側におけるダウエルバーの位置の応力はやや小さく、非載荷側ではやや大きくなり、ダウエルバーによる局所的な荷重伝達効果が現れている。

図-20は、コンクリートの最大曲げ応力や伝達率に及ぼす、 K_c の影響である。伝達率とは、載荷側のコンクリート版の応答（応力やたわみ）と非載荷側のその比であり、以下のように定義した。

$$eff = \frac{2s_2}{s_1 + s_2} \times 100 \quad (20)$$

ここに、

$$eff = \text{伝達率 (\%)} \\ s_1, s_2 = \text{それぞれ載荷側の応答値と非載荷側の応答値}$$

である。

応力については、 K_c が増加すると、荷重伝達が増加してその結果載荷側の応力は減少し、非載荷側の応力は増加する。一方、たわみへの影響はわずかである。 K_c が増加しても、たわみの伝達率の増加はわずかであるが、応力の伝達率はかなり高くなる。

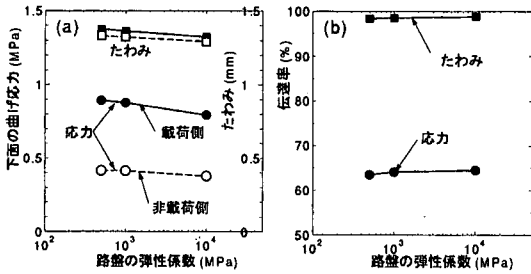


図-22 コンクリートの曲げ応力やたわみに及ぼす路盤弾性係数の影響。a) 応力とたわみ、b) 応力とたわみの伝達率

図-21 は、目地幅の影響を見たものである。目地幅が 40mm までは、コンクリート版の応力やたわみに及ぼす影響はわずかである。目地幅が 60mm になると、載荷側の応力はやや増加し、非載荷側のそれは減少するため、応力の伝達率はやや減少する。ダウエルバーがない場合には、目地幅がわずかに増加しても急激にたわみの伝達率が減少するといわれている²⁶⁾。したがって、目地幅の影響が少ないということは、ダウエルバーの有効性を示しているといつてよい。

図-22 は、路盤の弾性係数の影響を示している。路盤の弾性係数を増加すると、コンクリート版の応力やたわみは、載荷側、非載荷側ともに減少する。両方も減少するため、伝達率にはほとんど影響がない。このようなことから、路盤の強化は、ダウエルバーのみならず、コンクリート版全体の応力減少をもたらす、舗装全体の構造強化法として非常に有効であるといえる。

6. まとめ

本研究においては、コンクリート舗装横目地のダウエルバーの解析のために、3次元有限要素法に基づいた力学モデルを開発した。ダウエルバーを目地幅の部分と、コンクリートに埋め込まれた部分に分け、それぞれ梁要素と局部変形要素で表現する。局部変形要素は、弾性支承上の梁の厳密解に基づいて定式化している。モデルの特徴をまとめると以下ようになる。

1. ダウエルバー自体の曲げ作用とせん断作用ならびにコンクリートとの相互作用を考慮することができる。
2. ダウエルバー内部の変形や応力を計算できる。
3. ダウエルバー自体を要素分割する必要がなく、節点数の節約になる。
4. ダウエルバーの位置と要素分割は独立に設定できる。

モデルの妥当性は、模型実験と実舗装での荷重試験結果と、計算結果との比較により実証した。

開発したモデルを用いて、横目地のダウエルバーならびにコンクリート版の応力を計算した結果以下のことが分かった。

1. ダウエルバーと周辺のコンクリートとの相互作用を表すばね係数 K_c が増加すると、ダウエルバー内の応力が増加するが、コンクリート版の応力やたわみへの影響はわずかである。
2. ダウエルバーの直径を増加させ、その配置間隔をせばめると、ダウエルバーの応力は減少するが、コンクリート版の応力にはほとんど影響しない。
3. 目地幅が広くなると、ダウエルバーの応力は増加するが、コンクリート版の応力やたわみにはそれほど影響ない。
4. 路盤の強化はダウエルバーおよびコンクリート版の全体の応力減少につながる。

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，丸善，1981。
- 2) Fukuda, T., Koyanagawa, M., and Murai, S.: Condition Survey of Concrete Pavements and Its Evaluation, *Proceedings of 3rd International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation*, Purdue University, pp.519-523, 1985.
- 3) 飯島尚，窪田一夫：矢板バイパスにおける試験舗装の供用性の評価，土木学会論文集，第 388 号/V-4，pp.65-74，1980。
- 4) Tabatabaie, A.M., and Barenberg, E.J.: Finite Element Analysis of Jointed or Cracked Concrete Pavements, *Transportation Research Record 671*, Transportation Research Board, pp.11-17, 1978.
- 5) Huang, Y.H., and Chou, Y.T.: Discussion on Finite Element Analysis of Jointed or Cracked Pavements, *Transportation Research Record 671*, Transportation Research Board, pp.17-18, 1978.
- 6) Tayabji, S.D., and Colley, B.E.: Analysis of Jointed Concrete Pavements, *FHWA-RD-86-041*, Turner-Fairbank Highway Res. Ctr., McLean, Va., 1986.
- 7) Ioannides, A.M.: Analysis of Slab-on-grade for a Variety of Loading and Support Conditions, PhD thesis, University of Illinois, Urbana, Ill., 1984.
- 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) 西澤辰男，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。
- 10) 西澤辰男：コンクリート舗装横目地におけるスリップバーの力学モデル，土木学会論文集，第 420 号/V-13，pp.211-218，1990。
- 11) Nishizawa, T., Fukuda, T., and Matsuno, S.: A Refined Model of Dowel Joints for Concrete Pavement Using FEM, *Proceedings of 4th International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation*, Purdue University, pp. 735-745, 1989.
- 12) Guo, H., Sherwood, J.S., and Snyder, M.B.: Component Dowel-Bar Model for Load Transfer Systems in PCC Pavements, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 3, pp.289-298, 1995.
- 13) Khazanovich, L., Yu, H.T., and Beckemeyer, C.: Ap-

- plication of ILSAB2000 for Forensic Studies, *Proceedings of 2nd International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design, and Research*, Charleston, West Virginia, pp.433-450, 2000.
- 14) United States General Accounting Office: *Transportation Infrastructure, Highway Pavement Design Guide Is Outdated, Report to the Secretary of Transportation*, GAO/RCED-98-9, 1997.
 - 15) *Proceedings of National Symposium on 3D Finite Element Modelling for Pavement Analysis, Design, and Research*, Charlestone, West Virginia, 1998.
 - 16) 西澤辰男, 笠原篤: 舗装の構造解析および設計に対する3次元有限要素モデルに関するシンポジウム, 舗装, Vol.34, No.4, pp.28-30, 1999.
 - 17) *Proceedings of 2nd International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design, and Research*, Charlestone, West Virginia, 2000.
 - 18) 西澤辰男: 舗装構造解析用3次元有限要素法パッケージ, 2000 (<http://www.plan.civil.tohoku.ac.jp/pave/hoso-ml/download.html>)
 - 19) 西澤辰男: 3次元FEMに基づいたコンクリート舗装構造解析パッケージの開発, 土木学会舗装工学論文集, Vol.5, 2000.
 - 20) Shoukry, S.N., and William, G.: 3D FEM Analysis of Load Transfer Efficiency, *Proceedings of National Symposium on 3D Finite Element Modeling for Pavement Analysis, Design, and Research*, Charleston, West Virginia, pp.40-50, 1998.
 - 21) Davids, W.G., and Mahoney, J.P.: Experimental Verification of Rigid Pavement Joint Load Transfer Modeling with EverFE, *Transportation Research Record 1684*, Transportation Research Board, pp.81-89, 1998.
 - 22) O.C. ツィエンキーヴィッツ, 吉識雅夫, 山田嘉昭監訳: マトリックス有限要素法, 培風館, 1996.
 - 23) Przemienieki, J.K.: *Theory of Matrix Structural Analysis*, McCraw-Hill, Inc., p.79, 1968.
 - 24) Yorder, E.J., and Witzczak, M.W.: *Principle of Pavement Design*, Second Edition, Jhon Wiley and Sons, Inc., New York, p.99, 1975.
 - 25) 小松誠司, 西澤辰男, 金田一夫: 常磐自動車道コンクリート舗装における載荷実験, 土木学会第43回年次学術講演会概要集, 第5部, pp.108-109, 1988.
 - 26) Committee on Concrete Roads: *Load Transfer at Transverse Joints and Design of Concrete Pavements, Report and Appendices of Subcommittee No.1*, 1979.

(2000.12.8 受付)

MECHANICAL MODEL FOR DOWEL BAR IN TRANSVERSE JOINT OF CONCRETE PAVEMENT BASED ON 3 DIMENSIONAL FINITE ELEMENT METHOD

Tatsuo NISHIZAWA

In order to represent the load transfer at the transverse joint with dowel bar in concrete pavement, a mechanical model of dowel bar was developed. In the model, a dowel bar is divided into a part between concrete slabs and a part embedded in concrete. These parts are modeled with a beam element and a local displacement element, respectively. The local displacement element represents the interaction between the dowel bar and the surrounding concrete. The model was verified by comparing strains measured in the experiment with computed strains. Furthermore, the effects of dowel configuration and spacing on the concrete stresses were investigated.