

FEM 解析に基づくコンクリート舗装版の横目地縁部応力式

STRESS EQUATION OF EXPANSION JOINT EDGE
OF CONCRETE PAVEMENT SLAB BASED ON FEM ANALYSIS

小松 誠司*・武山 泰**・福田 正***

By Seiji KOMATSU, Yasushi TAKEYAMA and Tadashi FUKUDA

The authors developed a stress equation of expansion joint edge of concrete pavement slab based on stress analysis by finite element method (FEM). In this FEM analysis, concrete pavement and its expansion joint were expressed by means of a thin plate-Winkler foundation model and a shear spring model respectively. The elastic constant of the shear spring model was determined experimentally by loading test at a full scale concrete pavement. Multi-regression analysis was applied to the results of the FEM numerical calculation, and consequently, a stress equation was obtained. After the comparison between the calculated results of the equation and experimental results, it was proved that the equation was valid and practical.

Keywords: concrete pavement, expansion joint edge, stress equation, FEM analysis

1. はじめに

現在、わが国ではコンクリート舗装版の応力計算に岩間による応力式が広く用いられている^{1),2)}。これは、コンクリート舗装版の縦目地縁部における応力式である。しかし、最近の著者らの研究によれば、コンクリート版の破損の多くはその縦目地縁部よりもむしろ横目地縁部からのひびわれが多い³⁾。

すなわち、コンクリート舗装の設計においては、コンクリート版の横目地縁部、特に収縮目地縁部と比較して構造的な弱点になる膨張目地縁部での最大曲げ応力を求める計算式が必要である。従来、このような応力式は力学的、あるいは実験的に求められているが、ここでは、まず横目地縁部構造を FEM モデル化し、その数値計算結果に重回帰分析を適用して実用的な応力式を求めた。

2. FEM 解析

(1) FEM モデル

FEM 解析に際して、コンクリート版を平板(薄板)、

* 学生会員 東北大学大学院工学研究科前期課程在学
(〒980 仙台市荒巻字青葉)

** 正会員 工修 東北大学助手 工学部土木工学科(同上)

*** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科(同上)

路盤層以下を Winkler 支承で表現した。横目地構造の FEM モデルに関しては、せん断ばねモデル^{4),5)}、棒モデル⁶⁾、修正棒モデル⁷⁾などがあるが、本研究では取扱いが容易なせん断ばねモデルを用いることにした。すなわち、横目地縁部に載荷された場合のコンクリート版両端部のたわみ差は、このせん断ばねモデルによれば、横目地構造固有のせん断ばね定数 G によって力学的に表現される⁸⁾。

図-1 は本研究の FEM 解析に用いたコンクリート版の要素分割で、横方向に 15 分割、縦方向に 7 分割としている。また応力計算を行う載荷重近傍では、20 cm × 20 cm の正方形要素とした。また、コンクリート版の載

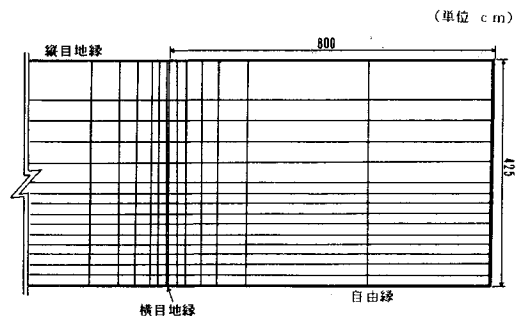


図-1 有限要素法解析の要素分割

(単位: cm)

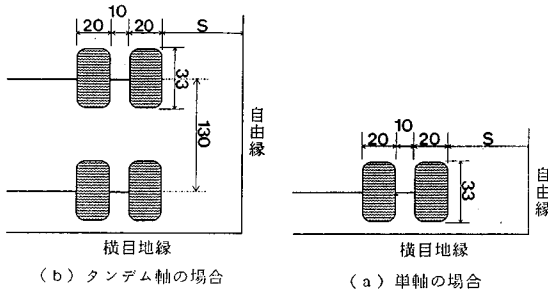


図-2 荷重および載荷状態

表-1 常磐道における載荷実験の諸数値

項目	諸数値
ヤング係数	300000 (kgf/cm ²)
ポアソン比	0.15
版厚	28 (cm)
路盤支持力係数	72 (kgf/cm ²)
荷重載荷位置	10, 50, 100 (cm)

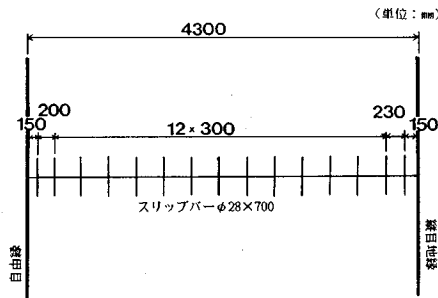


図-3 スリッパ配置図

荷は大型車の後軸荷重によるものとし、単軸の場合とタンデム軸の場合について、それぞれタイヤ接地面が横目地に接する位置とした(図-2)。コンクリート版周辺の境界条件は、解析対象の横目地をせん断ばねモデルとして隣接版の影響を考慮し、他の三辺については隣接版と絶縁された自由縁構造と仮定した。

(2) せん断ばね定数

常磐自動車道に施工されたコンクリート舗装において、膨張目地に関する載荷実験が行われた⁹⁾。舗装構造は表-1に示すとおりで、路盤はセメント安定処理材料であり、その支持力係数 (K_{rs}) は 72 kgf/cm² であった。膨張目地におけるスリッパの配置は図-3のとおりである。

載荷には単軸荷重 16 t、タンデム軸荷重 10 t が用いられ、横目地に沿った種々の載荷位置における応力が測定

表-2 常磐道における載荷実験結果

載荷に用いた軸荷重形式	載荷位置 S (cm)	横目地縁部の応力 (kgf/cm ²)	せん断ばね定数 G (kgf/cm ²)
単軸: 16 t	50	5.4	1.1 × 10 ⁶
単軸: 16 t	100	6.3	1.1 × 10 ⁶
タンデム軸: 10 t	10	1.8	9.1 × 10 ⁶

されている。しかし、ひずみゲージの不調などにより、全般に測定値のばらつきが大きく、実際に利用したデータは表-2の載荷の場合であった。

載荷実験による応力測定値をもとに、FEM 解析によって得られるせん断ばね定数と横目地縁部の応力との関係から、表-2のようにせん断ばね定数を求めた。

これによれば、せん断ばね定数は軸荷重形式によって異なる値となった。しかし、利用したデータ数に制約があり、せん断ばね定数の性質を明確に決めることができない。そこで、本研究の FEM 解析におけるせん断ばね定数は横目地構造に固有であると仮定し、その平均値 $G = 3.7 \times 10^6$ kgf/cm² を用いた。なお、ばね定数値がコンクリート版の応力値に及ぼす影響はそれほど大きくないことを確認している。

3. 重回帰分析

コンクリート舗装版の応力式の説明変数として、軸荷重 L 、版厚 H 、コンクリートのヤング係数 E 、ポアソン比 ν 、路盤支持力係数 K_{rs} 、載荷位置として車輪外縁とコンクリート版縦自由縁までの距離 S (図-2) の 6 変数であるが、軸荷重と応力は 1 次線形の関係と仮定しているため、実質的には 5 変数が分析の対象となる。なお、既往の応力式においては、載荷重の接地半径を変数に含めているが、本研究では実用上図-2に示したような一定値に設定した。車軸形式については、単軸とタンデム軸とを個別に応力式として表現することにした。

応力式の関数形は次のように仮定した。

$$\sigma = \frac{L}{10} (\alpha_1 E^{\beta_1} + \alpha_2 \nu^{\beta_2} + \alpha_3 H^{\beta_3} + \alpha_4 K_{rs}^{\beta_4} + \alpha_5 S^{\beta_5} + C) \dots (1)$$

ここで、 α, β, C は未定係数である。 β 値は該当する説明変数とその目的変数である応力との関数形を示すもので、これは次のように決定した。ある説明変数に対する β を決定する場合、その説明変数については表-3に示す対象とした数値の範囲内で数値を変動させ、その他の説明変数は標準値に固定して FEM の数値解を求める。次にこれらの数値解に対して重回帰分析を行い、 β 値を決定する。実際のコンクリート舗装の事例などを参考に解析の対象とする数値を表-3のように設定した。

このようにしてすべての β 値を決定した後に、表-3

表一三 重回帰分析の対象とした説明変量の数値

説明変量	記号	対象とした数値	標準値
ヤング係数	E	250000, 300000, 350000 (kgf/cm ²)	300000
ポアソン比	ν	0.20, 0.30	0.25
版厚	H	20, 25, 30 (cm)	25
路盤支持力係数	K ₇₅	10, 50, 100 (kgf/cm ³)	50
荷重載荷位置	S	50, 100 (cm)	50

表一四 各説明変量の標準偏回帰係数

説明変量	式番号	
	式(2)	式(3)
ヤング係数	0.097	0.104
ポアソン比	0.069	0.046
版厚	0.778	0.699
路盤支持力係数	0.456	0.539
荷重載荷位置	0.350	0.372

の全説明変量に対する FEM 数値解, すなわち, 108 組のデータに対して重回帰分析を適用した. このようにして α 値および C 値を決定し, 次の応力式を得た.

単軸の場合

$$\sigma = \frac{L}{10} (0.208 E^{0.276} + 14.6 \nu^{0.0672} + 433 H^{-1.17} + 12.3 K_{75}^{-0.191} + 4.30 S^{0.231} - 39.5) \dots \dots \dots (2)$$

タンデム軸の場合

$$\sigma = \frac{L}{10} (0.152 E^{0.276} + 6.65 \nu^{0.0672} + 267 H^{-1.17} + 9.97 K_{75}^{-0.191} + 3.13 S^{0.231} - 25.2) \dots \dots \dots (3)$$

一般に重回帰分析における説明変量の目的変量に与える影響力は, 各変量を標準化した場合の標準偏回帰係数で知ることができる. 表一四に式(2), 式(3)を求める際に用いたデータに基づく各変量の標準偏回帰係数を示す. これによれば, コンクリート版の応力に対する各説明変量の影響力は, 版厚, 路盤支持力係数, 載荷位置の順序であり, コンクリートのヤング係数, ポアソン比の影響力は小さいことがわかる.

4. 応力式の検証

(1) FEM 数値解との比較

式(2), 式(3)は FEM 数値解のデータによる回帰式であるから, 両式による応力値は対象としたデータ領域において, どの程度の精度を保証するものか検討する必要がある. そこで, 標準偏回帰係数が特に大きい版厚, 路盤支持力係数に関して, 式(2), 式(3)による応力値と FEM 解析による応力値を比較してみると, 表一五のようになる. ここで, 他の説明変量の値は標準


表一五 FEM 数値解との比較

(a) 単軸荷重の場合 (単位: kgf/cm²)

H (cm)	20	23	25	28	30
K (kgf/cm ³)					
10	12.3 / 12.1	10.0 / 10.1	8.8 / 9.1	7.4 / 7.9	6.6 / 7.2
30	10.9 / 10.6	8.9 / 8.6	7.9 / 7.6	6.7 / 6.4	6.0 / 5.7
50	10.2 / 10.0	8.4 / 8.0	7.4 / 7.0	6.3 / 5.8	5.7 / 5.1
80	9.4 / 9.5	7.8 / 7.5	7.0 / 6.5	6.0 / 5.3	5.4 / 4.6
100	9.0 / 9.3	7.5 / 7.3	6.7 / 6.3	5.8 / 5.1	5.3 / 4.4

(b) タンデム軸の場合 (単位: kgf/cm²)

H (cm)	20	23	25	28	30
K (kgf/cm ³)					
10	8.1 / 8.0	6.6 / 6.8	5.8 / 6.1	4.9 / 5.4	4.4 / 4.9
30	7.0 / 6.8	5.7 / 5.5	5.1 / 4.9	4.3 / 4.1	3.9 / 3.7
50	6.4 / 6.3	5.3 / 5.1	4.8 / 4.4	4.1 / 3.7	3.7 / 3.2
80	5.8 / 5.9	4.9 / 4.7	4.4 / 4.0	3.8 / 3.3	3.5 / 2.8
100	5.6 / 5.7	4.7 / 4.5	4.3 / 3.8	3.7 / 3.1	3.4 / 2.7

凡例  σ*: FEM 数値解, σ: 応力式による数値解

表一六 比較に用いた載荷実験の諸数値

載荷実験名	E (kgf/cm ²)	ν	H (cm)	K ₇₅ (kgf/cm ³)
岩間による載荷実験	320000	0.27	20, 25	2.6
AASHO 道路試験	360000	0.27	12.7~31.8	10.0*

* CBR 値 = 34.7% から推定した。

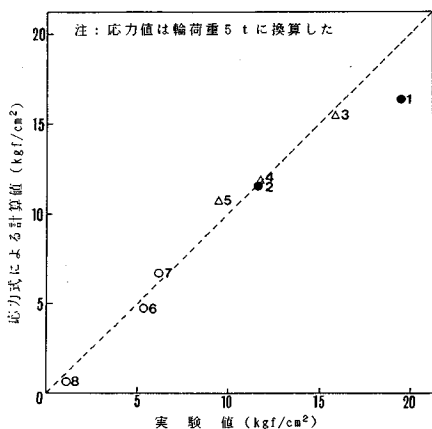
値を使用した. これによれば, 実用的に式(2), 式(3)の値は FEM 数値解にほぼ等しいといえる.

(2) 載荷実験との比較

岩間による載荷実験⁹⁾, AASHO 道路試験¹⁰⁾, および常磐自動車道における載荷試験⁹⁾の結果によって式(2)および式(3)の検証を行う.

岩間による載荷実験では, スリップバーの直径は 25 mm であったが, その配置は常磐自動車道の場合と同様に 30 cm 間隔である. 応力計算に必要な諸数値は表一六に示すとおりである. この載荷実験は直径 30 cm の円形板により行われたので, 図一四の計算値は式(2)の L を輪荷重に換算して求めた. なお, 目地部のせん断ばね定数は G = 3.7 × 10⁶ kgf/cm² を用いた.

常磐自動車道の場合の舗装構造, および載荷実験の方法については 2. で述べたとおりである. せん断ばね定数決定の際には, 単軸荷重とタンデム軸荷重の場合で定



記号	載荷実験名および条件
●1	岩間による載荷実験 ⁽²⁾ : 版厚20cm
●2	” : 版厚25cm
Δ3	AASHO道路試験 ⁽¹⁰⁾ : 版厚20cm
Δ4	” : 版厚25cm
Δ5	” : 版厚30cm
○6	常磐道における載荷実験 ⁽⁹⁾ : 単軸・S=50cm
○7	” : 単軸・S=100cm
○8	” : タンデム軸・S=10cm

図—4 載荷実験の実験値と応力式による計算値

数値に差があったが、式(2)、式(3)による計算値と実験値はよく一致した。

Hudson⁽¹¹⁾は、AASHO道路試験⁽¹⁰⁾における載荷実験結果からスリッパを有するコンクリート版の応力値を次式で表わしている。

$$\sigma = 211 L_0 / (10^{0.00317} H^{1.28}) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 σ : コンクリート版の応力 (psi)
 L_0 : 単軸荷重 (kip)
 T : コンクリート版の上面と下面の温度差 (°F)
 H : コンクリート版の厚さ (inch)

AASHO道路試験における横目地に用いられたスリッパの直径は、版厚の約1/8、長さ46cmでその配置は30cm間隔である。載荷実験は $T = -5 \sim 10^\circ\text{C}$ において行われているが、式(4)の計算では $T = 10^\circ\text{C}$ とし、版厚 $H = 20, 25, 30\text{ cm}$ の場合のコンクリート版の応力を求め、これを実験値とした。また、式(2)による計算値では、載荷位置を $S = 150\text{ cm}$ と仮定した。

式(2)、式(3)による計算値と、載荷実験に基づ

く実験値を比較した図—4によれば、版厚が薄い場合に両者の数値間に若干の差が認められるが、全般的にはよく一致している。

5. むすび

従来のコンクリート舗装版の応力式の多くは Westergaard 式のような力学式である。この場合の応力式は、力学理論に基づくものであり、力学的な意味をもっている。しかし、ここで提案した応力式は説明変量に関して統計的に帰納された回帰式であり、力学的な意味はない。しかし、提案した応力式はFEM解析に基づいており、舗装構造、交通条件などの変化に対して容易に修正することが可能である。

謝 辞：本研究を行うにあたり、FEM解析については石川高専 西沢辰男講師の協力を得た。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) セメントコンクリート舗装要綱, 日本道路協会, 1984年.
- 2) 岩間 滋: コンクリート舗装の構造設計に関する研究, 建設省土木研究所, 1963年.
- 3) Fukuda, T., Koyanagawa, M. and Murai, S.: Condition survey of concrete pavements and its evaluation, Proc. of Third International Conference on Concrete Pavement Design, pp.55~65, 1985.
- 4) Hung, Y.H. and Wang, S.T.: Finite analysis of concrete slabs and its implication of rigid pavement design, Bull. of Highway Research Record, No.466, pp.55~69, 1973.
- 5) 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.87~96, 1982年.
- 6) Tabatabaie, A.M. and Barenberg, E.J.: Finite element analysis of jointed or cracked concrete pavements, Bull. of Transportation Research Record, No.671, pp.11~17, 1978.
- 7) 西沢辰男・福田 正・松野三郎: 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年.
- 8) 小松誠司: 有限要素法によるコンクリート舗装構造の解析モデルに関する研究, 東北大学修士論文, 1989年.
- 9) 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実験, 土木学会第43回年次学術講演会講演概要集, 第5部, 1988年.
- 10) AASHO道路試験(再版), セメント協会, 1973年.
- 11) Hudson, W.R.: Comparison of concrete pavement load-stress at AASHO road test with previous work, Transportation Research Record, No.44, 1963.