# 鋼床版舗装の表面縦ひび割れ発生に及ぼす タイヤ荷重の影響

### 小林隆志<sup>1</sup>·西澤辰男<sup>2</sup>·梶川康男<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科 (〒920-1192 金沢市角間町) <sup>2</sup>正会員 工博 石川工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒929-0392 河北郡津幡町北中条タ1) <sup>3</sup>正会員 工博 金沢大学大学院教授 自然科学研究科 (〒920-1192 金沢市角間町)

鋼床版舗装に生ずる表面縦ひび割れの発生を正確に予測するために、舗装に発生する表面ひずみや散逸 エネルギーに及ぼすタイヤ荷重の影響について調べた.鉛直圧力のみのタイヤ荷重とタイヤの剛性と路面 摩擦によって発生する水平圧力も考慮したタイヤ荷重の2種類を考慮した.SLPEによって予測された表面 ひずみ分布と実橋で測定されたひずみ分布を比較した結果、鉛直圧力のみのタイヤ荷重モデルが妥当であ ることがわかった、さらに、散逸エネルギー規準に基づく疲労解析の結果、鉛直タイヤ荷重モデルを用い た疲労度と縦ひび割れの発生延長とが正の関係にあることが判明した.

# *Key Words* : dissipated energy theory, longitudinal surface cracking, FEM analysis, fatigue failure, tire load

#### 1. はじめに

鋼床版舗装の表面縦ひび割れは、縦リブの配置間隔に 対応した間隔で橋軸方向に直線状に生ずる<sup>1)</sup>、主に車輪走 行位置付近に生ずることから、交通荷重の繰り返し作用 による疲労が原因であると予想される. このようなひび 割れは縦リブや主桁ウェブの直上ばかりでなく、その間 にも生ずることがあり、その発生原因は明らかではなか った23). これまで、表面縦ひび割れの発生状況が調査さ れている鋼床版舗装を例にとって散逸エネルギー規準に 基づいた疲労解析を実施してきた4). これらの結果から、 表面縦ひび割れの発生原因としては、縦リブウェブの引 張ひずみ、タイヤ直下の大きな散逸エネルギー、あるい はタイヤ端部に発生する引張ひずみなどがあることが明 らかになってきた.本研究では、これらの結果に基づい て表面縦ひび割れの発生予測を行うために、タイヤ荷重 モデルおよび散逸エネルギー疲労基準の妥当性を検証す ることを目的としている.

本論文ではまず,構造解析モデルの概要を示す.その のち,一つの鋼床版舗装を例にとって,タイヤ荷重モデ ルがひずみ応答に及ぼす影響を調べる.さらに,二つの 鋼床版舗装を例にとって,タイヤ荷重モデルの違いが散 逸エネルギー規準に基づいた疲労度に及ぼす影響を調べ るとともに,実際のひび割れ発生状況と比較し,タイヤ 荷重モデルの妥当性を検討した.

#### 2. 解析モデル

構造解析モデルとしては、図-1に示されるような帯板 要素(Strip element)と角柱要素(Prism element)を接着要素 (Link element)で結合したSLPE(Strip-Link-Prism Element)モ デル<sup>5)</sup>を用いる.帯板要素は、平板の曲げ変形をモデル化 した要素であり、デッキプレート、縦リブを含む鋼床版 全体の構造を細かく考慮することが可能である.また、 角柱要素は舗装を代表し、8節点の要素なので、厚さ方向 の変形を含む局部的な変形を表現することができる.接 着要素は、帯板要素と角柱要素を接合する役割を持ち、



図-1 SLPE モデル



図-2 示野橋の断面



図-3 荷重モデル

ちょうどデッキプレートと舗装の間に施される接着層の 機能をモデル化することになる.縦方向の変形は三角級 数に展開し、その項数は 60 とした. またそのスパンの 長さは横リブの間隔とし、その間で両端単純支持と仮定 した.

#### 3. ひずみ応答に及ぼす影響

#### (1) 計算条件

解析の対象とした鋼床版舗装は、平成2年9月に供用 を開始した石川県一般県道196号線示野橋である.橋長 140.7mの3径間連続箱桁橋で、厚さ12mmの鋼床版の上 に厚さ80mmの改質型アスファルト混合物を施工したも のである.横リブ間隔は3mである.その断面を図-2に示 す.この舗装においては縦ひび割れが多く発生したため、 打ち換え時に縦目地を施工した.縦目地の位置は図-2に 示すとおりである.その効果を見るために、打ち換え前 後で荷重車によるひずみ計測を行っている<sup>9</sup>.この舗装を 対象としてSLPEモデルによって解析を行った.解析の際 には表-1に示す材料条件を用いた.アスファルト混合物 の弾性係数は温度や載荷時間によって異なるため2種類 を想定している.また、タイヤ荷重モデルについては、 鉛直方向の圧力だけでなく図-3に示すような水平方向の 圧力を加えることによる影響も調べた.水平方向の圧力

#### 表-1 材料条件(示野橋)

部材	厚さ	弹性係数	ポアソン比	
	(mm)	(MPa)		
舗装	80	1000/5000	0.35	
床版	12	210000	0.3	
縦リブ	8	210000	0.3	
主桁	10	210000	0.3	

はJacobsらの研究<sup>7</sup>に従って、タイヤ端部では鉛直圧力と 等しい大きさとし、そこからタイヤ中央にかけて漸減し ていくものとした.荷重位置は図-2 に示される荷重位置 1 および荷重位置2 である.また、縦目地については、そ の部分の節点を分離してモデル化した.

#### (2) 解析結果

#### a)荷重位置1

荷重として鉛直方向の圧力のみを考えた場合の,荷重 位置付近の舗装表面における横断方向のひずみ分布を図 -4に示す. 左図は縦目地設置前,右図は縦目地設置後の ものである. 図中の●印は実測値を示している. 縦目地 設置前は,実測値,解析値ともに主桁ウェブ直上におい て大きな引張りひずみとなっている. また,基本的にタ イヤ直下は圧縮ひずみである. 解析値を見ると,弾性係 数が小さい場合にはひずみの値は大きくなっている. 実 測値と解析値は良い対応を示しており, SLPE モデルの有 効性を示しているといってよい.

荷重として鉛直方向と水平方向の圧力を考えた場合の、 荷重位置付近の舗装表面における横断方向のひずみ分布 を図-5に示す.鉛直方向の圧力のみを考えた場合と比べ て、タイヤ直下の圧縮ひずみやタイヤ端部の引張りひず みがかなり大きくなるが、主桁ウェブ直上の引張りひず



みには大きな変化は無いことがわかる.

#### b) 荷重位置 2

図-6 および図-7 は荷重位置2の場合のひずみ分布を示 している.縦目地設置前は、実測値、解析値ともに主桁 ウェブ直上において大きな引張りひずみとなっているこ とや、基本的にタイヤ直下は圧縮ひずみであることなど、 全体的な傾向としては荷重位置1の場合と同様であると いえる.

ただし荷重位置2では荷重位置1に比べ、右側車輪直 下の圧縮ひずみが小さくなっているなど、ひずみ分布自 体は異なっている.このことから荷重位置がひずみ挙動 に及ぼす影響は大きいといえる.

#### 4. 疲労応答に及ぼす影響

#### (1) 散逸エネルギー規準

図-8 は弾性体および粘弾性体における,荷重の載荷,除荷に伴う応力-ひずみ曲線の軌跡を示している.弾性体においては載荷,除荷の際に同じ軌跡を通るが,粘弾性では粘性の効果によって,載荷と除荷で異なる軌跡を通ることになる.この軌跡の面積は,載荷,除荷によって失われるエネルギー量を示しており散逸エネルギーと呼ばれている.

姫野らは、荷重の走行に伴うアスファルト混合物の粘 性による散逸エネルギーと、アスファルト混合物の疲労 破壊の関係を実験的に求め、両者の間に骨材の配合には 依存するが温度、速度、アスファルトによらないユニー クな関係があることを見出した<sup>8)</sup>. したがって、鋼床版舗 装の散逸エネルギーを算定することによって、疲労破壊 の可能性を評価することができる.本研究においては、 散逸エネルギーによる破壊までの載荷回数を次式によっ て計算する.

$$N_f = \left(\frac{1}{a_0} \pi \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \sin \phi\right)^{\frac{1}{a_{10}}} \tag{1}$$

ここに、 $N_f$ :破壊までの載荷回数、 $a_9$ =149000(密粒度の 場合)、 $a_{10}$ =-0.419(密粒度の場合)、 $\sigma_{ij}$ 、 $\varepsilon_{ij}$ :静的弾性解析 によって計算された応力、ひずみテンソル、 $\boldsymbol{\Phi}$ :位相角 であり, 姫野らの実験から

$$b = a_1 + a_1 \times \log Si + a_2 (\log Si)^2 \qquad (2)$$

ここに、 $a_3 = -40.043$ (密粒度の場合)、 $a_4 = 9.209$ (密粒度の 場合)、 $a_5 = -0.518$ (密粒度の場合)、 $S_i = \mathbb{P} \times \mathbb{P} \times \mathbb{P} \times \mathbb{P} \times \mathbb{P}$ の弾性係数(密粒度の場合、 $1.035 \times 10^8 \text{Pa} < S_i < 1.591 \times 10^{10} \text{Pa}$ )である.また、疲労度は次式によって計算する.

$$F_d = \sum \frac{n}{N_f} \tag{3}$$

ここに、 $F_d$ : 疲労度、n: 実際の載荷回数である. この計算の中で、 $\Sigma$ は軸重分布、荷重走行位置分布、温度分布を考慮して行う.

#### (2) 計算条件

対象とした鋼床版舗装は示野橋および,一般国道 298 号線幸魂大橋の外回り片側2車線の三径間連続鋼箱桁橋 部である.幸魂大橋の外回り車線は平成4年11月に供用 を開始し,内回り車線が完成するまでの5年4ヶ月間, 対面交通で暫定供用された.この鋼床版舗装では,交通 供用開始後数ヶ月ごとに路面調査が実施され,ひび割れ 状況が記録されている<sup>3</sup>.

幸魂大橋の断面を図-9 に示す.図に示すように、片側部分のみを解析の対象とした.厚さ 12mm の鋼床版の上に厚さ 75mm の改質型アスファルト混合物を施工したもので横リブ間隔は 2450mm である.解析の際には表-2 に示す材料条件を用いた.

アスファルト混合物の弾性係数は季節変動を考慮する ために、月ごとに異なるものを使用している. 算定方法



#### 表-2 材料条件(幸魂大橋)

図-9 幸魂大橋の断面



表-3 弾性係数の季節変化

	示野橋		幸魂大橋	
	舗装内部の	舗装表面の	舗装内部の	舗装表面の
Л	弾性係数	弾性係数	弾性係数	弹性係数
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
1月	11881	10109	9944	8792
2月	11881	10109	9735	8557
3月	9530	8327	8327	7095
4月	6727	5324	5881	4558
5月	4846	3568	4382	3081
6月	3771	2513	3543	2305
7月	2774	1576	2774	1576
8月	2530	1308	2447	1219
9月	3446	2215	3191	1989
10月	5155	3850	4678	3374
11月	7333	5921	6506	5122
12月	9530	8327	8603	7421

としてストレートアスファルトに対するShell法<sup>9</sup>を用いた.そのときの条件としては,載荷時間-0.024 秒(速度30km/h相当),軟化点65度,PI=1.5,アスファルト量(体積比)=12.5%,空隙率=3.9%,骨材容積率=87.0%とした. 舗装体温度はそれぞれの橋の所在地における各月の平均気温から秋山の式<sup>10)</sup>を用いて表面35mmまでの部分を推定した.それ以下の部分は気温と同じと仮定した.それらの温度に基づいて弾性係数を**表-3**のように算定した.

荷重位置は図-2 および図-9 に示す通りである.大型車 通過最頻位置を荷重位置1として,その位置から左右に 200mmずらした位置を荷重位置2,3とした.荷重は大型 車後軸98kNとし,その荷重をスパン中央に載荷した状態 を考える.また,荷重については,鉛直方向のタイヤ圧 だけでなく図-3に示すような水平方向の圧力を加えるこ とによる影響も調べた<sup>7</sup>. 表-4 軸重分布

お生まれいの	通過軸数		
♥━━━==================================	C 交通	D交通	
9.8~	9929	19995	
19.6~	1905	4386	
29.4~	1109	3603	
39.2~	613	1959	
49~	328	1009	
58.8~	192	659	
68.6~	94	365	
78.4~	38	162	
88.2~	17	72	
98~	8	37	
107.8~	6	28	
117.6~	3	7	
127.4~	1	2	

使用した軸重分布を表-4に示す<sup>11)</sup>. 示野橋はC交通, 幸 魂大橋はD交通と仮定した. また, 毎日同じ軸重が載荷す るものと仮定した. さらに, 荷重位置1には軸数の2分 の1が通過し, 荷重位置2, 3には4分の1が通過するも のと仮定した.

#### (3) 計算結果

図-10は1年間の交通量から計算された疲労度である. 左図は示野橋,右図は幸魂大橋のものである.荷重とし て鉛直方向の圧力のみを考えた場合の疲労度を実線,鉛 直方向と水平方向の圧力を考えた場合の疲労度を点線で 示している.疲労度は荷重位置付近で大きくなっている が,その他の場所ではほとんど発生していない.また疲 労度は縦リブや主桁ウェブ直上より,ウェブ間のほうが 大きくなっている.



水平方向の圧力を考えた場合の疲労度は1年で1.0を大 きく上回っている.実際には1年ではひび割れは発生し ていないため実状と異なる.

図-11 は荷重として鉛直方向の圧力のみを考えた場合 の,供用開始時期からひび割れ調査時期までの季節の温 度,交通量を考慮に入れて計算した疲労度の分布と,ひ び割れ延長率(%)とを比較したものである.左図の示野橋 は供用開始後9年経過した平成11年10月時点のもの, 右図の幸魂大橋は供用開始後4年経過した平成8年11月 時点のものである.ひび割れ延長率とは,調査区間に対 して縦ひび割れが発生している延長の割合である.ただ し,近い場所に平行して生じているひび割れはまとめて 1本として数えた.示野橋においては主桁ウェブ直上に 表面縦ひび割れが発生しているが,そこでの計算された 疲労度は小さい.それ以外の場所においては表面縦ひび 割れは荷重走行位置に発生しているため、疲労度が大き くなっている位置とほぼ対応している.

図-12 は荷重として鉛直方向と水平方向の圧力を考え た場合のものである.鉛直圧力のみの場合と比べて,疲 労度はかなり大きくなっている.やはり主桁ウェブ上で の疲労度は非常に小さく,この部分のひび割れ発生を説 明することはできない.

表面縦ひび割れの発生している位置の疲労度とひび割 れ延長率の関係をみたものが図-13である. 左図は鉛直方 向の圧力のみ,右図は水平方向の圧力も考慮した場合の ものである. ばらつきはやや大きいものの,ひび割れ延 長率と疲労度には正の関係があることがわかる. 特に水 平方向の圧力も考慮した場合のばらつきが大きくなって いる.



#### 5. まとめ

本研究においては、 SLPE による有限要素解析と散逸 エネルギー規準に基づいた疲労解析によって、鋼床版舗 装に及ぼすタイヤ荷重の影響について考察した. その結 果をまとめると次のとおりである.

- (1) 鋼床版舗装においては主桁ウェブ直上において大き な引張りひずみを生ずる.また,基本的にタイヤ直 下は圧縮ひずみである.
- (2) 荷重として水平圧力を考慮した場合のひずみは、鉛 直圧力のみを考えた場合と比べて、タイヤ直下の圧 縮ひずみやタイヤ端部の引張りひずみがかなり大き くなる.しかし、主桁ウェブ直上の引張りひずみは ほとんど変わらない.
- (3) 荷重として水平圧力を考慮した場合の疲労度は,鉛 直圧力のみの場合と比べてかなり大きく,その値は1 年以内に1.0を大きく上回る.
- (4) 散逸エネルギー規準に基づいた疲労度は荷重走行位 置のウェブ間において大きくなっており、ひび割れ 発生位置とほぼ対応している.
- (5) 散逸エネルギー規準に基づいた疲労度は主桁ウェブ 直上では小さく、実際のひび割れ発生状況と異なっ ている.この部分のひび割れは引張ひずみによる疲 労が原因であると考えられる.
- (6) 水平圧力を考慮した場合の疲労度とひび割れ延長率の関係は、鉛直圧力のみの場合と比べてばらつきが 大きくなる.
- (7) 荷重モデルとしては鉛直圧力のみのモデルが適切で あると結論できる.

謝辞:本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金の援助を受けた.また鋼床版舗装研究会での議論も有益であった.ここに記して謝意を表する.

#### 参考文献

- 1) 多田宏行:橋面舗装の設計と施工, 鹿島出版会. 1996.
- 内田喜太郎,松野三朗,西澤辰男:首都圏における鋼 床版舗装の破損状況,第23回日本道路会議一般論文 集(C),社団法人日本道路協会,pp.410-411,1999.
- 藤枝英男,中澤健,光谷修平:鋼床版上のアスファル ト舗装に関する調査一事例,第 23 回日本道路会議一 般論文集(C),社団法人日本道路協会,pp.412-413,1999.
- 西澤辰男,小林隆志:鋼床版舗装の構造解析のための モデル,アスファルト,第 216 号, pp.5-13, 平成 16 年 10 月.
- Nishizawa, T., et al.: Development of a new structural model with prism and strip elements for pavements on steel bridge decks, *The International Journal of Geomechanics*, Vol.2, No.3, pp.351-369, 2001.
- 6) 吉田篤司,谷口克也,高橋秀明:鋼床版舗装に発生す るひび割れについて,第8回北陸道路舗装会議技術報 文集,pp.79-82,2000.
- Jacobs, M.M.J., et al.: Cracking in Asphalt Concrete Pavements, *Proceedings, 7th International Conference on Asphalt Pavements*, Vol.1, pp.89-105, 1992.
- 8) 姫野賢治,渡辺隆,勝呂太:散逸エネルギ理論を用いたアスファルト混合物の疲労破壊規準,東京工業大学土木工学科研究報告,No.35,pp.51-72,1985年12月.
- 9) Yang, H.Huang.: *Pavement Analysis and Design*, Prentice-Hall, 1993.
- 秋山政敬:アスファルト舗装体内温度の推定に関する 研究,土木学会論文集,No.246,pp.105-115,1976年6 月.
- 11) 建設省土木研究所:土木研究所資料 第3321号 車両重量調査の解析(その4), 1995年2月.

### EFFECT OF TIRE LOAD MODEL ON LONGITUDINAL SURFACE CRACK OF PAVEMENTS ON STEEL BRIDGE DECKS

#### Takashi KOBAYASHI, Tatsuo NISHIZAWA and Yasuo KAJIKAWA

To develop a method to predict when and how longitudinal surface cracks (LSC) occur in pavements on steel bridge decks, the effect of tire load model on horizontal strains and dissipated energy on the pavement surface was investigated. Two types of tire loads were considered: the vertical pressure model and the vertical and horizontal pressure mode. The horizontal pressure is supposed to be generated by the stiffness of tire ribs and friction between the tire and pavement surface. Strain distributions computed with the tire load models in SLPE model were compared with the measured ones. It was found that computed strains with the vertical pressure model agree well with the measured ones. Also, the positive relationship between length of LSC observed in actual pavements on bridges and fatigue damage estimated based on the dissipated energy theory and vertical pressure model was obtained.