

# 疲労解析に基づいた鋼床版舗装の 表面縦ひび割れの発生予測

小林隆志<sup>1</sup>・西澤辰男<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 石川工業高等専門学校専攻科 環境建設工学専攻 (〒929-0392 河北郡津幡町北中条)

E-mail: sac0326@ishikawa-nct.ac.jp

<sup>2</sup>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)

鋼床版舗装においては、荷重の作用によって変形しやすい鋼床版に追従して、舗装体内に大きなひずみを生ずる。特に腹版や縦リブのウェブ直上で舗装表面に引張ひずみが生じ、これが原因で表面縦ひび割れが生ずる。本研究においては、有限要素法により、荷重位置、横げた間隔、および季節変動が舗装体のひずみに及ぼす影響について調べた。さらに、計算されたひずみから通常のアスファルト舗装で用いられている疲労曲線を用いて、舗装体内の疲労度を求め、表面縦ひび割れの発生位置やその時期について検討した。

**Key Words :** *pavement on steel bridge deck, longitudinal surface cracking, FEM analysis, fatigue analysis, pavement temperature*

## 1. はじめに

鋼床版は、デッキプレートと、それを裏から補強する縦リブ、横リブからなる橋梁の床版のことである。鋼床版の上はグースアスファルトや改質アスファルトによって舗装され、その上を交通車両が走行することになる。舗装は表層、基層の2層から成り厚さは60~80mm程度である。デッキプレートと舗装を一体化させ、また水の浸入を防ぐ目的で両者の間には接着層や防水層が設けられている。鋼床版舗装に交通荷重が作用すると、縦リブや腹板接合部には局所的な曲げ変形が生じ、それに追従している舗装にも大きな曲げひずみが生じることになる。その結果、比較的早期に表面縦ひび割れが発生する。

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腹版の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い<sup>2,3)</sup>。そこで、この原因を探るために、通常アスファルト舗装の疲労ひび割れの予測に用いられている疲労曲線を鋼床版舗装に適用することを試みる。

現在の設計法においては疲労解析において、舗装の引張ひずみを計算しなければならない<sup>4)</sup>。鋼床版舗装の挙動は鋼床版自体の構造や、荷重の位置によって微妙に変化するため、それらを合理的に考慮した解析が必要である。そこで本研究では、帯板要素と角柱要素を組み合わせた新しい構造モデルを開発し、このモデルにより舗装のひずみを計算することとした。

本論文ではまず、このモデルの概要を示す。そのうち、一つの鋼床版舗装を例にとって荷重位置、横げた間隔、季節変動による舗装の挙動を調べる。さらにその結果から疲労解析を行って、表面縦ひび割れの発生位置やその時期について検討する。

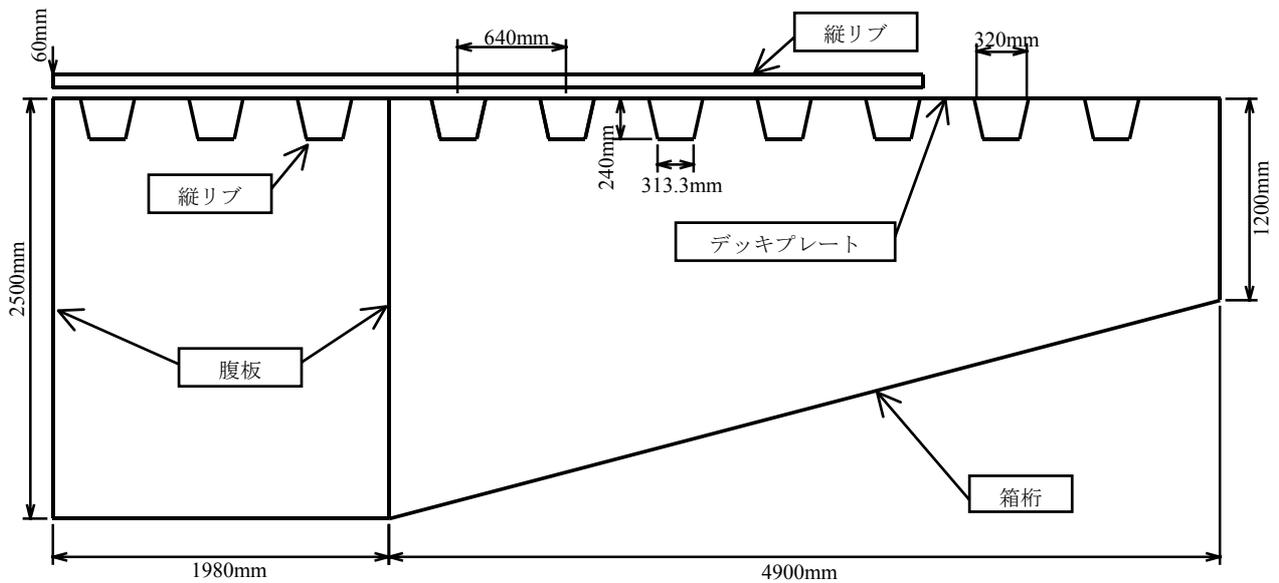


図-2 鋼床版の構造

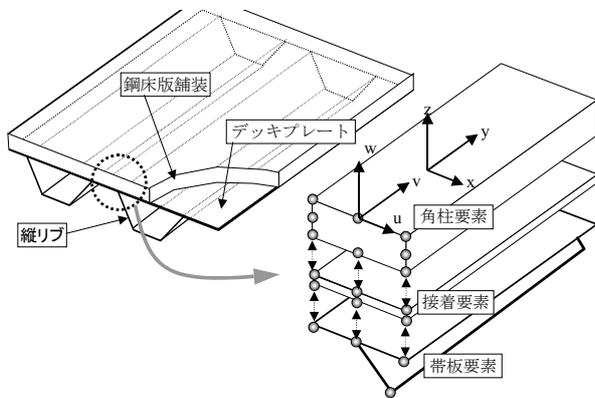


図-1 SLPE モデル

表-1 材料定数

| 部材  | 厚さ (mm) | 弾性係数(MPa) | ポアソン比 |
|-----|---------|-----------|-------|
| 舗装  | 60      | 温度による     | 0.35  |
| デッキ | 12      | 210000    | 0.3   |
| 腹板  | 10      | 210000    | 0.3   |
| 縦リブ | 6       | 210000    | 0.3   |

表-2 舗装の弾性係数

| 月   | 東海地方の平均気温 (°C) | 舗装表面の推定温度 (°C) | 舗装内部の弾性係数 (MPa) | 舗装表面の弾性係数 (MPa) |
|-----|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 1月  | 4.5            | 6.7            | 9566            | 8474            |
| 2月  | 6.8            | 9.4            | 8428            | 7294            |
| 3月  | 9.8            | 12.9           | 7104            | 5770            |
| 4月  | 17.2           | 21.9           | 4331            | 3129            |
| 5月  | 20.3           | 26.0           | 3499            | 2353            |
| 6月  | 22.4           | 29.0           | 3021            | 1924            |
| 7月  | 26.8           | 36.0           | 2231            | 1102            |
| 8月  | 28.5           | 39.0           | 1990            | 941             |
| 9月  | 24.7           | 32.5           | 2568            | 1465            |
| 10月 | 19.9           | 25.5           | 3598            | 2432            |
| 11月 | 12.1           | 15.6           | 6091            | 4808            |
| 12月 | 8.2            | 11.0           | 7807            | 6559            |

## 2. 構造解析

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所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、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桁の間隔とし、その間で両端単純支持と仮定した。

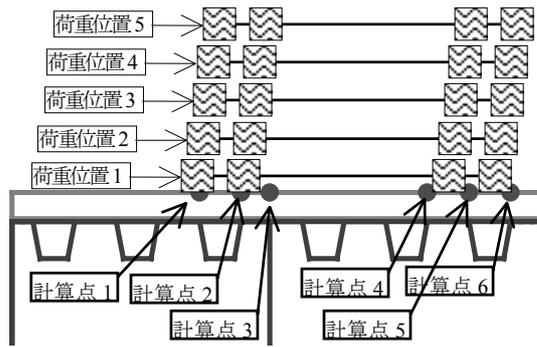


図-3 荷重位置

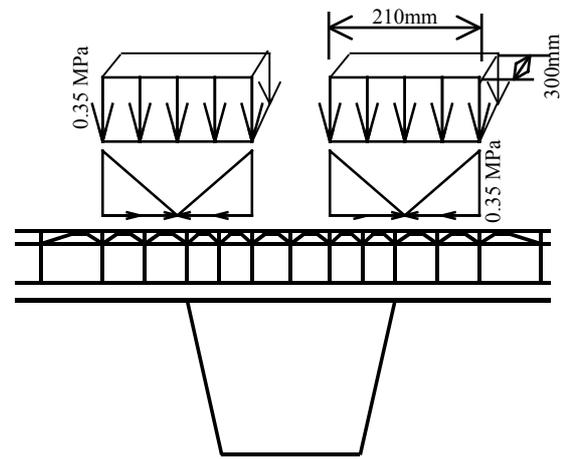


図-4 荷重モデル

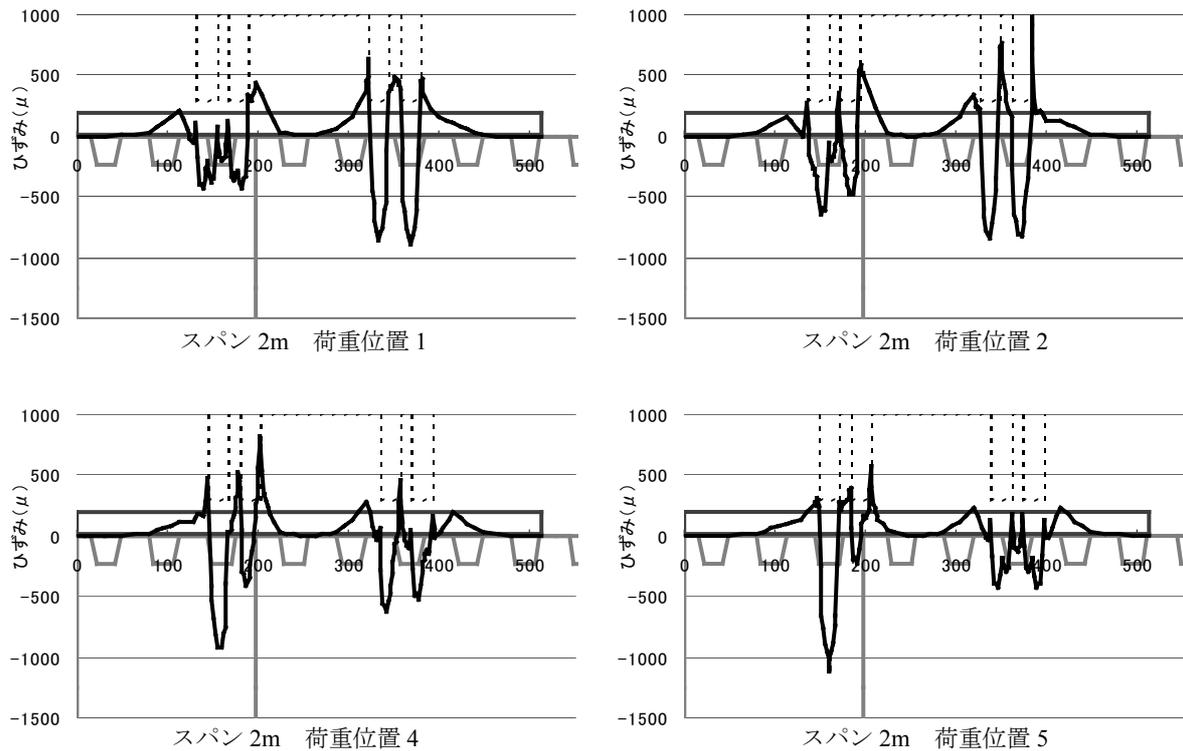


図-5 表面ひずみに及ぼす荷重位置の影響

### 3. 計算条件

計算例として用いた鋼床版の構造を図-2 に示す。この断面は斜張橋の箱げたの右半分を取り出したもので、厚さ 12mm の鋼床版の上に厚さ 60mm の改質型アスファルト混合物を施工している。舗装以外の弾性係数は一定とし、表-1 に示す値を用いた。アスファルト混合物の弾性係数は Shell 法<sup>6)</sup>により求めた。そのときの条件としては、載荷時間=0.036(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。また舗装体温度は東海地方の各月の平均気温から秋山の式<sup>7)</sup>を用いて表面

15mm 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-2 のように算定した。

荷重位置および計算点を図-3 に示す。荷重位置 1 は右側のタイヤが縦リブウェブの間に来るようにした位置であり、荷重位置 2 以降は荷重位置 1 から右側に 40mm ずつずらした位置である。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、荷重は図-4 に示すように鉛直方向の等分布荷重だけでなく、タイヤの剛性によって生ずる横断方向の荷重を三角分布荷重として作用させた<sup>8)</sup>。横げた間隔であるスパンは 2, 3, 4, 5m の 4 条件を考えた。

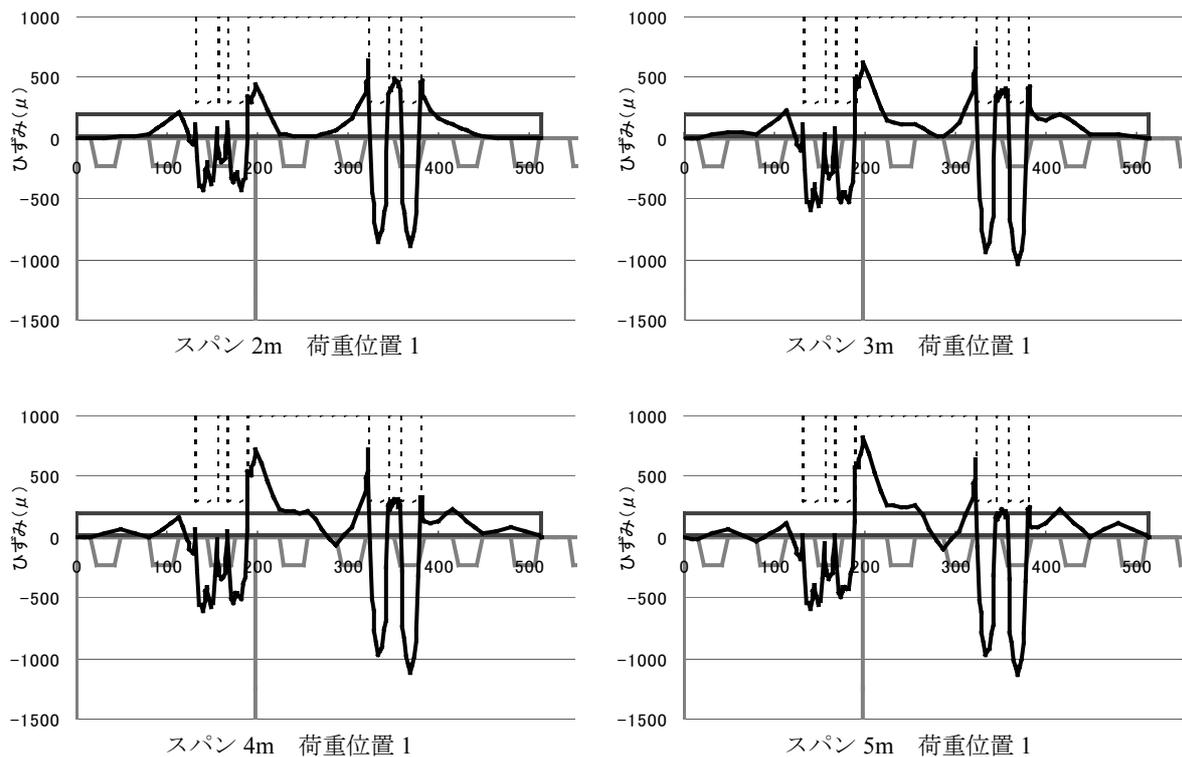


図-6 スパンの影響

#### 4. 計算結果

##### (1) 荷重位置の影響

8月に軸重98kNの荷重が作用したときのアスファルト舗装表面に発生する横断方向のひずみ分布を図-5に示す。いずれの荷重位置においてもタイヤ直下においては圧縮ひずみ、腹板や縦リブのウェブ直上やタイヤ端部においては引張ひずみが発生していることがわかる。荷重位置ごとに見ると腹板や縦リブのウェブ直上の引張ひずみは、タイヤの端部が近くなるにつれて大きくなる。特に、荷重位置4においては、腹板ウェブ直上にタイヤ端部が一致しており、そのときに腹板ウェブ直上に最大引張ひずみが生じている。

以上の解析より、いかなる荷重位置やスパンにおいても縦表面ひび割れの発生原因とされる表面の引張ひずみは、腹板や縦リブのウェブの上に生じ、それらの位置に表面縦ひび割れが発生する可能性を指摘できる。

##### (2) スパンの影響

荷重位置1における横断方向のひずみ分布を各スパンごとにまとめたものを図-6に示す。いずれも同じような形状をしているが、腹板ウェブ部における引張ひずみは、スパンが長くなるにつれて大きくなっている。逆に右側車輪のタイヤ付近における縦

表-3 軸重分布(1日あたり)

| 軸荷重 (kN) | 通過軸数  |
|----------|-------|
| 9.8~     | 19995 |
| 19.6~    | 4386  |
| 29.4~    | 3603  |
| 39.2~    | 1959  |
| 49~      | 1009  |
| 58.8~    | 659   |
| 68.6~    | 365   |
| 78.4~    | 162   |
| 88.2~    | 72    |
| 98~      | 37    |
| 107.8~   | 28    |
| 117.6~   | 7     |
| 127.4~   | 2     |

リブウェブ上の引張ひずみはスパンが長くなると小さくなる。タイヤ直下の圧縮ひずみはスパンの長さにはほとんど無関係である。

##### (3) 季節変動

表面縦ひび割れの発生する可能性のある計算点3(腹板ウェブ)、計算点5,6(右側車輪付近の縦リブウェブ)における季節ごとのひずみの変動を図-7に示す。いずれの場合においても夏季の弾性係数の小さいときに、圧縮ひずみ、引張ひずみともに大きく

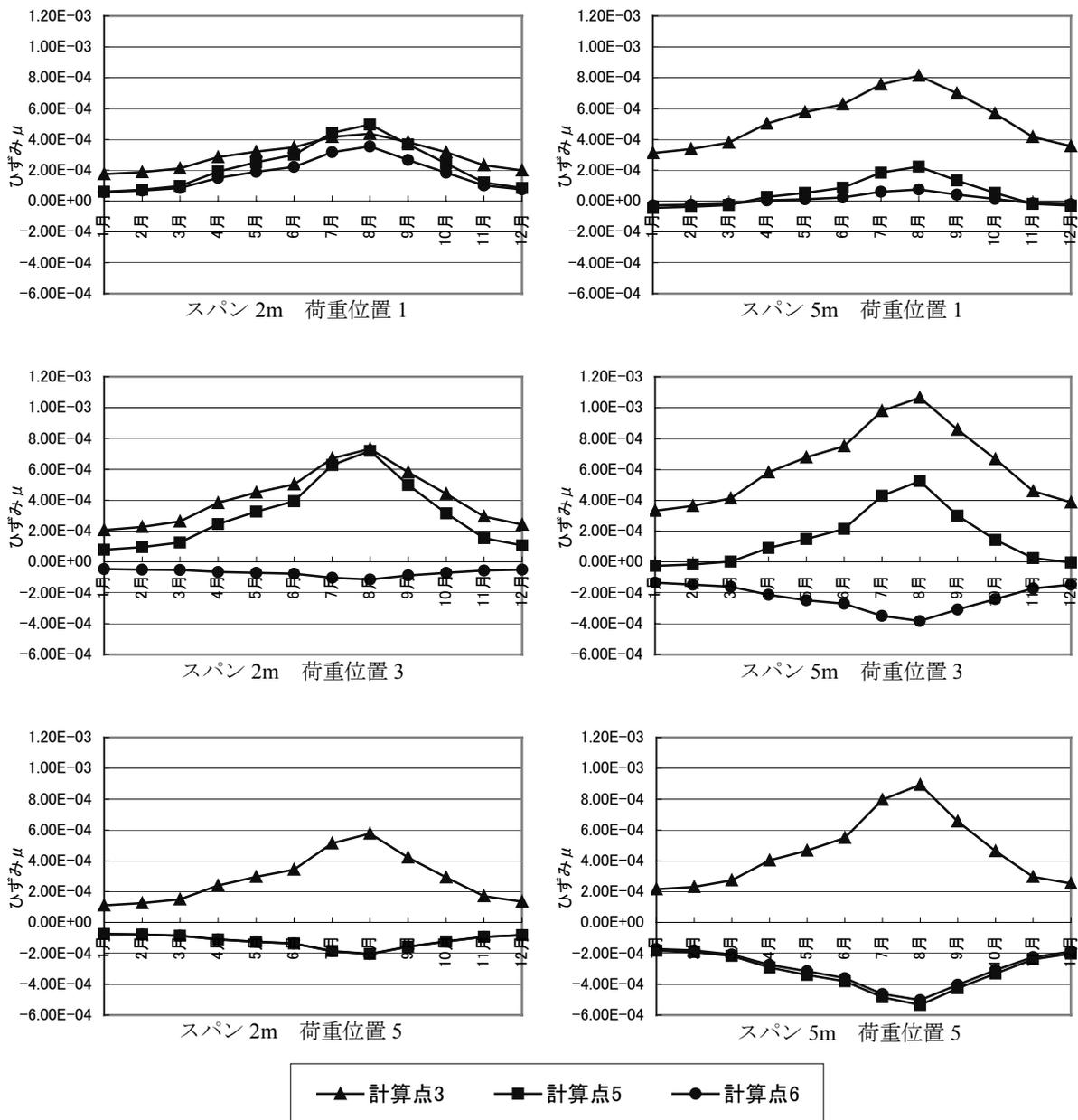


図-7 ひずみの季節変動

なっている。荷重位置 1 では着目している 3 つの点すべてで引張ひずみとなるが、荷重位置 5 では計算点 3 が引張ひずみで計算点 5 と 6 は圧縮ひずみとなる。スパン 2m では荷重位置 1 と 3 において夏季の引張ひずみは、着目している 3 点でほぼ同じであるが、スパン 5m では計算点 3 が他の計算点に比べてかなり大きな引張ひずみとなる。

## 5. 疲労解析

計算されたひずみに基づいて疲労度を計算する。今回計算に用いた荷重の 1 日の軸重分布を表-3 に示す。この軸重分布は C 交通相当のものである<sup>9)</sup>。毎日同じ軸重が載荷するものと仮定した。

疲労曲線は以下のものを用いた<sup>2)</sup>。

$$N_{fa} = S_A \left\{ 18.4(C)(6.617 \times 10^{-5} \varepsilon_t^{-3.291} \times E_A^{-0.854}) \right\} \quad (1)$$

ここに、

$N_{fa}$  = アスファルト混合物の破壊繰返し回数、

$S_A$  = 設定したひび割れ率による定数

(ひび割れ率 5% で 0.74)、

$\varepsilon_t$  = アスファルト層の引張ひずみ、

$E_A$  = アスファルト混合物の弾性係数(MPa)、

$C = 10^M$

$$M = 4.84 \left( \frac{V_b}{V_v + V_b} - 0.69 \right)$$

$V_b$  = アスファルト量(体積比)、

$V_v$  = 空隙率、

である。

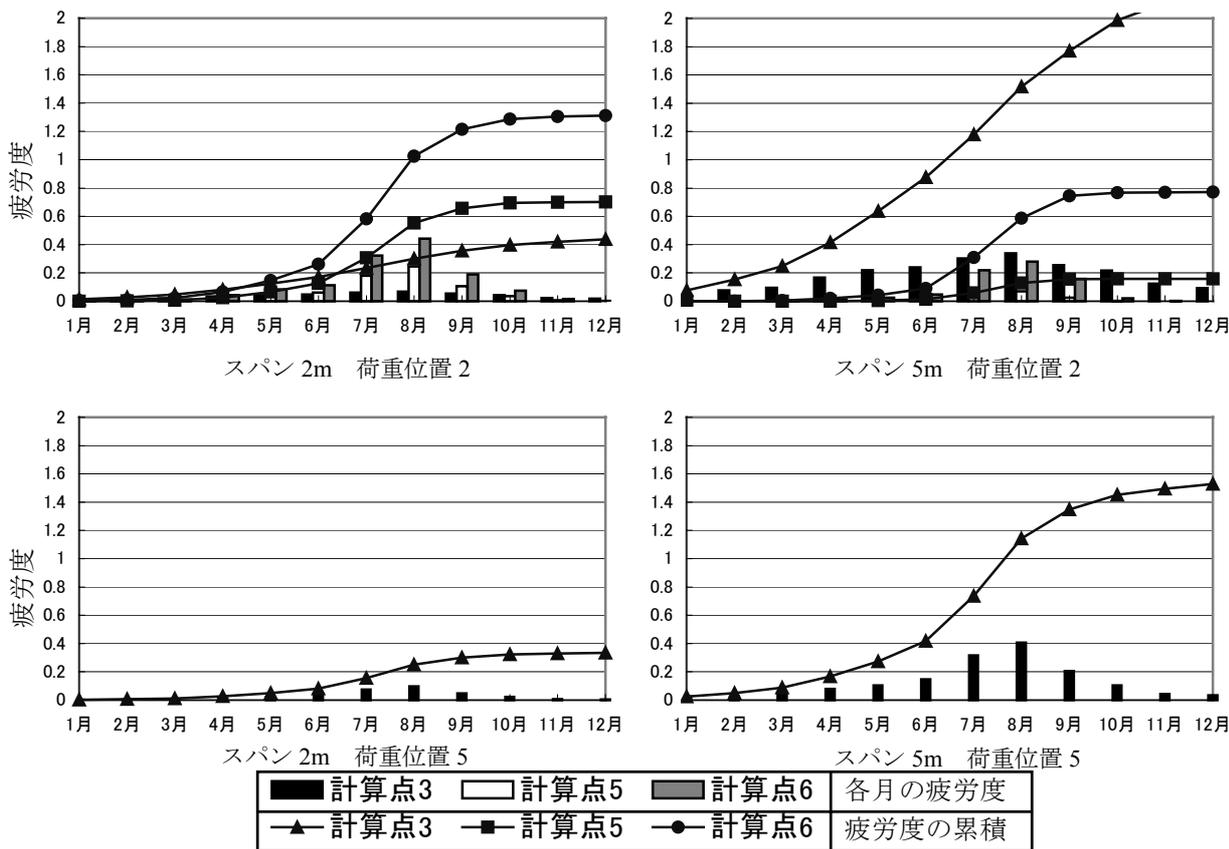


図-8 1年間にわたる疲労度の累積および各月の疲労度

疲労度は以下の式で算定した。

$$F_d = \sum_i \sum_j \frac{n_{ij}}{N_{ij}} \quad (2)$$

ここに、

$F_d$  = 疲労度、

$n_{ij}$  = 実際のひずみの繰り返し数、

$N_{ij}$  = 疲労破壊までの繰り返し数、

$i$  = 軸重分布のループ、

$j$  = 月別のループ、

である。この疲労度が 1.0 を超えたらひび割れが発生すると考える。

図-8 に年間の各月の疲労度を棒グラフで、また累積を折れ線グラフで表す。冬季の疲労の蓄積は小さいが夏季に急激に増加する傾向がある。荷重位置が同じでもスパンが 2m の場合は腹板ウェブ上である計算点 3 の疲労度より縦リブウェブ位置である計算点 5、6 の疲労度の方が大きい。逆にスパンが 5m になると計算点 5、6 の疲労度は減少し、計算点 3 の疲労度は増加している。荷重位置に関しては、計算点 3 は荷重位置が異なっても似たような傾向であるが、計算点 5、6 については荷重位置 2 のみで疲労が生じている。荷重位置 5 のように計算点 5、6 が荷重直下となり、引張ひずみが非常に小さくなる

か、圧縮ひずみになるので、疲労は生じず図には現れてこない。

図-9 はすべての荷重位置、計算点について 1 年間の疲労度をまとめたものである。疲労度が大きいのは計算点 3、5、6 である。計算点 3 はほとんどのケースにおいて 1.0 を超えており 1 年以内にひび割れが発生すると推定される。またその値はスパンが長いほど大きくなる。一方計算点 5、6 はスパンが長いと疲労度は比較的小さいが、スパンが短くなると疲労度は大きくなる。また、荷重位置による影響が大きい。

結果的に、ほとんどのケースの腹板ウェブ上および荷重位置 2 の計算点 6 において 1 年以内にひび割れが発生すると推定された。また、その他の計算点においても疲労度は 1.0 以下であるが比較的大きいものもある。交通条件が翌年も同じだとすると 1~2 年後にはこの部分からのひび割れも予想されることになる。

## 6. まとめ

本研究では、鋼床版舗装の表面から生ずる縦ひび割れの発生原因について FEM による構造解析と、疲労解析から考察した。これらの結果をまとめると

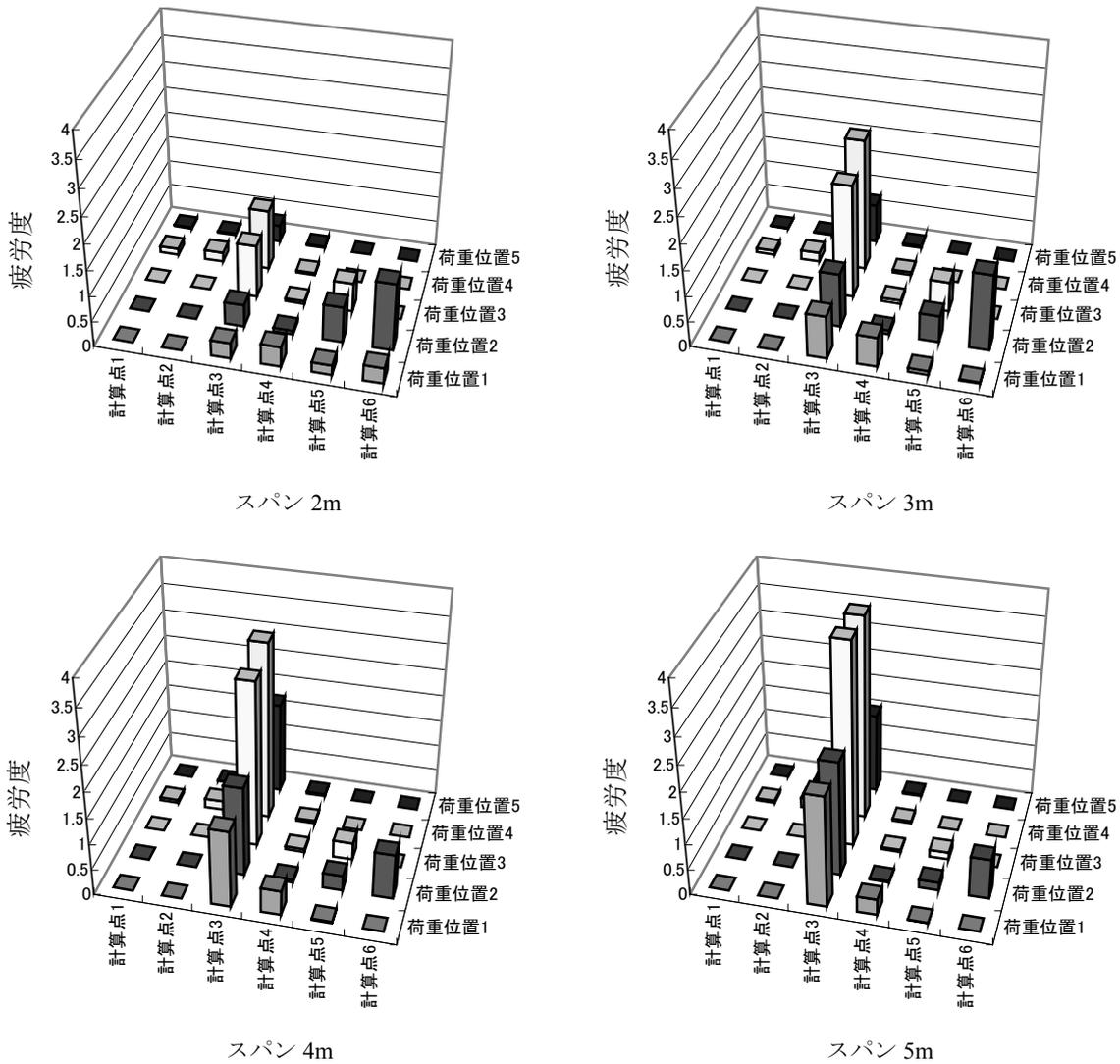


図-9 疲労度のまとめ

次のとおりである。

- (1) 腹板や縦リブのウェブ上の舗装表面には大きな引張ひずみが生ずるが、荷重直下のウェブ間は圧縮ひずみである。
- (2) ウェブ上舗装表面の引張ひずみは、タイヤの端部が近くなるにつれて大きくなり、特にタイヤ端部がウェブ上に一致したときに最大となる。
- (3) 腹板ウェブ上の引張ひずみは、スパンが長くなるにつれて大きくなる。逆にタイヤ付近の縦リブウェブ上の引張ひずみはスパンが長くなると小さくなる。
- (4) 弾性係数が小さいとき圧縮ひずみ、引張ひずみともに大きくなる。
- (5) 疲労度は夏季に急激に増加する。
- (6) 腹板ウェブ上の疲労度はスパンに関係なく1年で1.0を超えるが、縦リブウェブ上の疲労度はスパンの短いときに1.0を超え、これらの位置では縦表面ひび割れが早期に発生する可能性が

ある。

- (7) 本論文で示した範囲の弾性計算に基づいた疲労解析では、ウェブ間の縦表面ひび割れを説明することはできなかった。

本研究において残された課題としては以下のような事項が挙げられる。

- (1) 実舗装の観測によるひずみ解析および疲労解析結果の検証。
- (2) 鋼床版舗装体の温度の実態の把握。
- (3) 車輪走行位置分布の影響。

この3点については今後の研究課題としたい。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、鋼床版舗装研究会のメンバーである松野三朗氏、中央大学教授姫野賢治氏、佐藤道路技術研究所内田喜太郎氏、大成ロテック技術研究所野村健一郎氏、鹿島道路技術研究所東滋夫氏から貴重な助言を賜った。本研究の一部は日本学術振興会科学研究補助金(基盤研究(C)(1)、

研究代表者：西澤辰男)の助成を受けた。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.
- 2) 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，平成 11 年.
- 3) 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，平成 11 年.
- 4) 日本道路協会：舗装設計施工指針，2002.
- 5) 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,

2001.

- 6) Yang, H.Huang.: *Pavement Analysis and Design*, Prentice-Hall, 1993.
- 7) 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
- 8) Jacobs, M.M.J., et al.: Cracking in Asphalt Concrete Pavements, *Proceedings, 7th International Conference on Asphalt Pavements*, Vol.1, 1992.
- 9) 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)，平成 7 年 2 月.

## PREDICTION OF LONGITUDINAL SURFACE CRACKING IN THE PAVEMENTS ON STEEL BRIDGE DECKS

Takashi KOBAYASHI and Tatsuo NISHIZAWA

In pavements on steel bridge decks, large tensile strains occur at pavement surface above webs of the steel bridge decks that flexibly deform when subjected to traffic loads. These strains might cause the longitudinal surface cracks (LSC), which appear in wheel paths relatively early from the construction. In this study, the effects of axle load position, span length, stiffness of pavement on the strains were investigated utilizing the Strip-Link-Prism Element model. A fatigue curve was applied to the calculated strains to estimate the fatigue damage and the occurrence time and positions of the LSC were examined.