

鋼床版舗装の表面縦ひび割れに関する研究

内田喜太郎¹・西澤辰男²・姫野賢治³・野村健一郎⁴

¹正会員 佐藤道路技術研究所 所長 (〒243-0211 厚木市三田 47-3)

²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)

³フェロー会員 工博 中央大学教授 工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

⁴正会員 博 (工) 大成ロテック技術研究所 (〒365-0027 鴻巣市大字上谷 1456)

首都圏に架かる 50 橋余りの鋼床版舗装の破損実態調査において、橋軸方向の縦ひび割れが縦リブウェブ接合部のみならず、ウェブの間にも発生している橋梁が数橋あることが認められた。本研究は、これらの現象を、実験室における繰返し曲げ試験および有限帯板法を通して力学的に解明することを目的としている。鋼床版舗装の力学的挙動については、鋼床版と一体的に解析できるように、有限帯板法 (FSM) を 2 層化しリンク要素で結合した 2 層有限帯板法を開発し、力学解析を行った。この解析によると、縦リブ接合部直上の縦ひび割れの発生に関しては説明が可能であるが、リブウェブ間の縦ひび割れの発生については説明できない。一方、繰返し曲げ試験からは、高温時において、圧縮ひずみのみでもひび割れが発生することが確認された。

Key Words : *pavement on plate deck, longitudinal cracking, finite strip method, overlaid element, strain prediction*

1. はじめに

わが国において、道路橋として鋼床版が最初に用いられたのは、昭和 29 年であり、以後 45 年間に本州四国連絡橋など世界に冠たる長大橋を架橋できるまでの技術開発が行なわれてきた。また、鋼床版の上に施工される舗装についても、その厚さや用いられる材料が、交通量の増加と車両の大型化に伴って改善されて今日に至っている¹⁾。

コンクリート床版の場合、床版の剛性が高いので、床版自体に大きなひび割れが生じない限り舗装にひび割れが生ずることはない。一方鋼床版の場合、床版の剛性が低いため、ひび割れなどの欠陥がなくても局所的に大きな曲げ変形を生じ、それによって舗装にひび割れを発生させることがある。特に、橋軸方向に発生する縦ひび割れが多いといわれている。この縦ひび割れは、比較的早期に車輪走行部に集中して、ある一定の間隔で平行に発生する特長がある。この間隔はほぼ縦リブの取り付け位置間隔に一致するため、縦ひび割れの発生は、舗装構造ばかりでなく、鋼床版の構造や交通荷重の作用位置に密接な関係があることが予想される²⁾。しかしながら、この縦ひび割れについての調査研究は進んでおらず、抜本的な対策が取られていないのが現状である。

そこで、本研究では、鋼床版舗装の縦ひび割れについて、まず現状を把握するために、いくつかの実橋について目視による破損実態調査を行った。その結果を踏まえ、鋼床版と舗装を同時に解析できるオーバ-

イ有限帯板法を用いてひずみ解析を行い、発生原因と思われる引張ひずみ位置を特定した。さらにひずみ解析結果に基づいて、鋼床版舗装を模擬した実験室における繰返し曲げ試験を実施し、ひび割れ発生原因について検討を行った。

2. 実橋における実態調査

この調査の目的は、鋼床版舗装の破損の実態を把握することにある。首都圏に架かる 50 の鋼床版道路橋を対象として、橋面舗装の破損と橋梁の構造形式およびリブ構造について、目視による外観調査を行った。本章においては、その調査について述べる³⁾。

(1) 路面の破損

調査対象橋梁は、一方向あたり、2 車線の橋が 29 橋と最も多く、これに次いで 3 車線が 15 橋、1 車線が 5 橋、4 車線が 1 橋となっている。これらの橋梁形式の内訳は、箱桁橋が 29 橋、単純鉸桁橋が 10 橋、斜張橋が 5 橋、その他が 6 橋であった。しかし、橋梁形式と舗装の破損には、関連性が無いと判断された。図-1 は、主観による路面の評価をまとめたものである。ここで示されるひび割れ破損の大半が縦ひび割れであり、このうちの 10% がランク B および C の要修繕と判断された。土木技術資料⁴⁾では、ひび割れ発生位置と橋梁構造との関連について、縦リブ直近、主桁ウェブ上、主桁直近の縦リブなどの位置が縦ひび割れに密接な関係にあると述べられている。

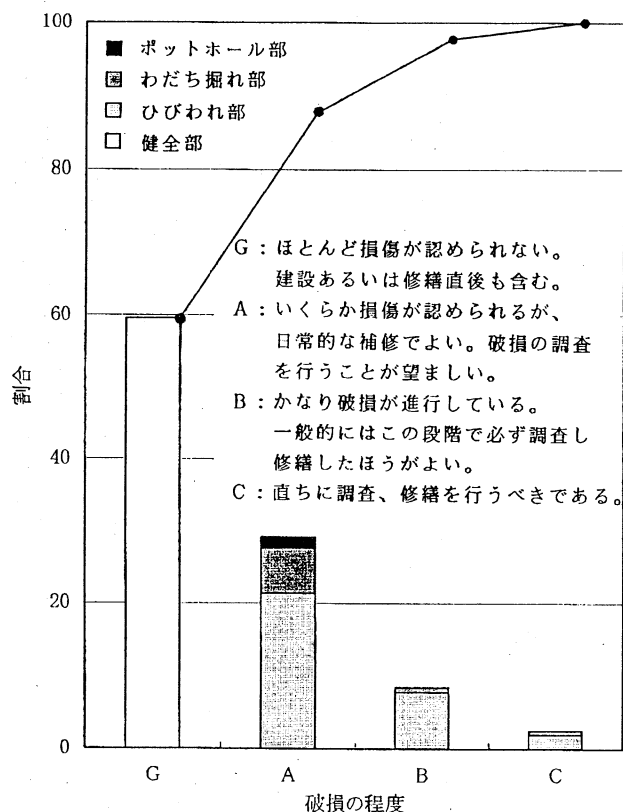


図-1 破損調査結果

(2) リブ構造

リブ構造の内訳は、開断面縦リブ (以下、開リブとよぶ) が 25 橋、閉断面縦リブ (以下、閉リブとよぶ) が 18 橋、不明が 7 橋であった。今回の調査では、開リブよりも閉リブのほうが、縦ひび割れの発生頻度が高いという結果であったが、舗装の補修履歴や使用した舗装材料および横リブとの関係が不明であるため、リブ構造と縦ひび割れの関連は必ずしも明確ではなかった。この点については、縦リブの剛性を含めたより詳細な調査が必要である。

(3) 縦ひび割れの発生例

目視によれば、舗装に発生した縦ひび割れは車輪走行部での発生がほとんどであり、ひび割れの本数が複数の場合はほぼ平行で等間隔に発生している。終局的には、約 15cm 間隔の平行な縦ひび割れからさらに亀甲状へと発達している。これらの数例を、図-2～図-4 に示す。調査は縦ひび割れの発生している舗装の代表横断面を側線とし、そこでのひび割れ本数をカウントした。図では側線部分のひび割れ状況のスケッチと、鋼床版の断面構造と側線における縦ひび割れの本数を合わせて示している。これらの図は、橋梁自体は異なるが、ひび割れの進展状況によって初期、中期、終期の代表的なものを示す。ここに、初期、中期、終期とは、ひび割れの発生状況による区分であり、それぞれ、輪

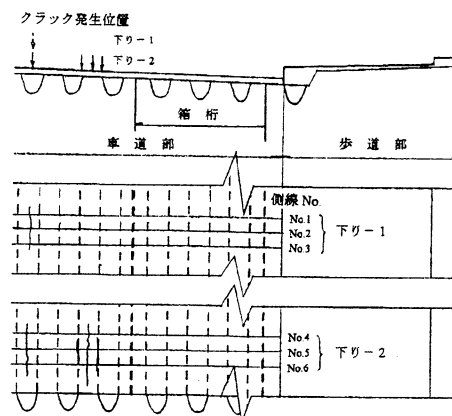


図-2 縦ひび割れ発生状況 (初期)

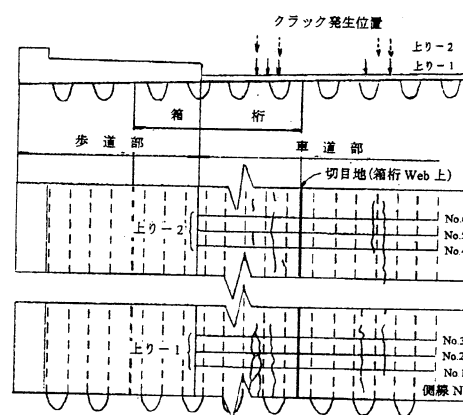


図-3 縦ひび割れ発生状況 (中期)

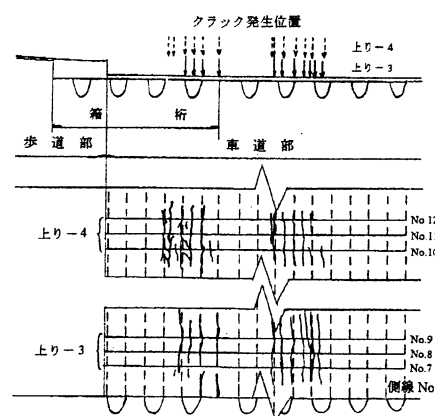


図-4 縦ひび割れ発生状況 (終期)

跡部に 3 本以下の縦ひび割れが局所的に発生した場合、輪跡部に 3 本～5 本の縦ひび割れが 10m 以上にわたって認められる場合、輪跡部の縦ひび割れが 15cm 程度の間隔となり亀甲状に発達して一定の区間連続的となった場合、に分類した。

図のリブの位置とひび割れ発生位置との関係から、縦ひび割れは、主げた腹板や縦リブ接合部のみならず、縦



写真-1 典型的な縦ひび割れ

リブウェブの間にも発生していることが明らかである。また、既設の鋼床版の構造では、主げたウェブとこれに隣接するリブウェブの間隔は 15cm~25cm、隣接するリブ同士の間隔および閉リブ用 U 形鋼の開口部の幅は 30cm~34cm が一般的に用いられている^{5),6)}。このことから、15cm 間隔に発生する縦ひび割れの何本かは、リブ間において発生していると考えることができる。

写真-1 は典型的な縦ひび割れの発生状況である。橋軸方向に一定の間隔で縦ひび割れが平行に連続して発生している様子がよくわかる。

(4) 調査のまとめ

以上の考察およびこれ以外に今回の調査によって明らかになったことをまとめると以下ようになる³⁾。

1. わだち掘れは少なく、ほとんどの破損が縦方向の線状ひび割れである。
2. 縦リブの種類、すなわち開リブと閉リブでは縦ひび割れの発生状況が異なる。
3. 箱桁腹板上の目地は有効に機能しているようである。
4. 縦ひび割れは縦リブの配置と車輪走行位置に関連している。
5. 縦リブ接合部のみならず、その間にも縦ひび割れが発生している個所もみられる。

3. 数値解析による検討

前章の調査結果から、縦ひび割れの発生原因を究明するためには、鋼床版の構造を合理的に反映した解析が必要であることがわかった。そこで本章においては、交通荷重が作用したときの鋼床版舗装の挙動について、オーバーレイ有限帯板法 (OFSM) 解析によって検討を行う。特に縦リブの位置とタイヤの位置との関係によって表面の横断方向のひずみがどのように変化するかについて調べることにした。

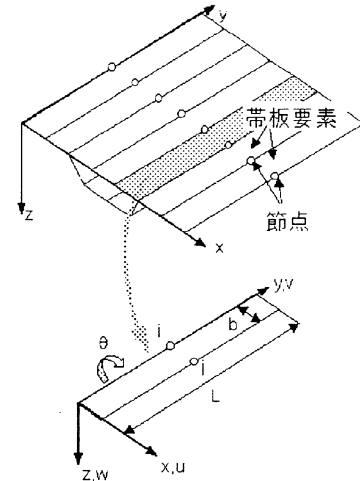


図-5 有限帯板要素モデル

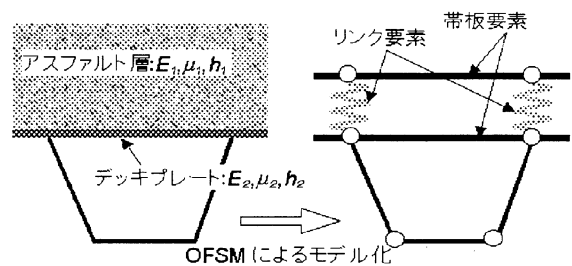


図-6 オーバーレイモデル

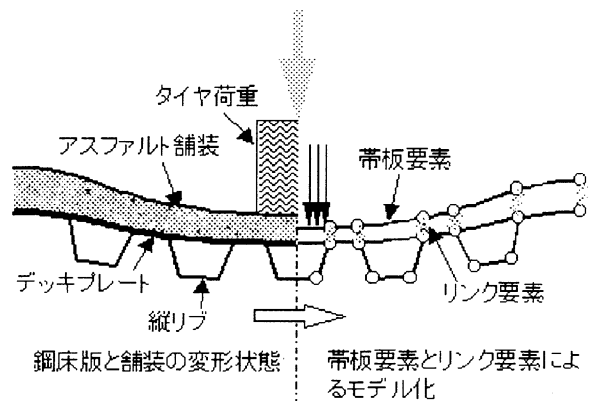


図-7 リンク要素の役割

(1) オーバーレイ有限帯板法⁷⁾

鋼床版舗装のひずみを解析するために、FSM とオーバーレイモデルを組み合わせた構造モデルを開発した。FSM は図-5 に示すように、橋軸方向の一様性を考慮し、板を帯板状の要素の集合体として解析を行う方法である^{8),9)}。この方法では、 x, z 平面の変形に対しては適当な変位関数を用い、 y 方向の変形は正弦関数の級数によって近似する。したがって要素分割は x, z 平面内の断面について行えばよく、 y 方向については級数の

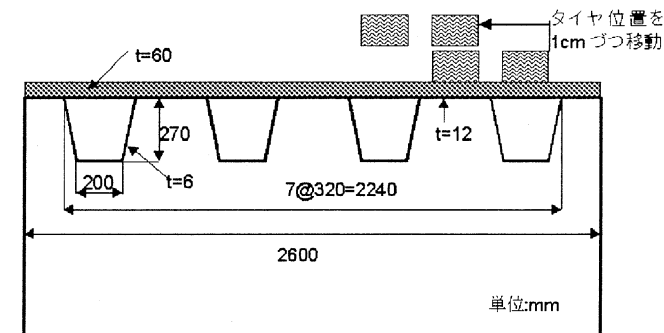


図-8 想定した鋼床版舗装

項数を増やすことによって所定の精度を得るのである。また荷重の大きさや作用位置も自由に設定できる。さらに、アスファルト層を表現した帯板要素を重ねてデッキプレートの上に組み合わせることによって、鋼床版内の応力のみならずアスファルト層内のひずみを同時に計算することが可能となる。

FSMにおいてデッキプレートとアスファルト層とを別々に考慮するために、図-6に示すように、アスファルト層とデッキプレートをそれぞれ分割し、両者をリンク要素で結合した。ただし、このままではそれぞれの層に中立面が形成されるので、アスファルト層とデッキプレートの合成構造の中立面が同一となるように、剛性増加分を各要素に加えることとした。層の境界面が結合されている場合、荷重を受けて平板が変形すると2層は一体化され中立面は1つだけが形成される。

オーバーレイ要素は、リンク要素によって結合されている。リンク要素はオーバーレイ要素とその下の帯板要素の力学的な相互作用を司るものであり、節点間の変形に対する線形ばねによってモデル化されている。特に、たわみに対するリンク要素の剛性 k_L はたわみに対するばね係数として表現され、Ioannidesらによって提案された式(1)を用いることにした¹⁰⁾。この式は、図-7に示すように、弾性係数の低いアスファルト層の厚さが荷重によって変化し、鋼床版とアスファルト層の中心面の変形が異なることを表現するために導出された。リンク要素の剛性は次式で表される。

$$k_L = \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2} \quad (1)$$

ここに、

$$k_i = \frac{2E_i(1-\mu_i)}{h_i(1-\mu_i-2\mu_i^2)}, (i=1,2) \quad (2)$$

その他の変形、すなわちxおよびy方向の変位とたわみ角に関するばね係数の値も、便宜的に式(1)と同じ値を用いた。ただし、鋼床版と舗装は接着材によって一

体化されていると考え、鋼床版と舗装のx、y方向のひずみが連続するように、高いx、y方向のばね係数値、式(1)の10倍の値を採用した⁷⁾。

(2) 想定した鋼床版舗装

計算において想定した鋼床版および舗装の構造を図-8に示す。鋼床版の弾性係数、ポアソン比および厚さはそれぞれ、 2.06×10^5 MPa、0.3、12 mmとし、舗装については、大きなひずみが発生するような小さい弾性係数を仮定し、それぞれ294 MPa、0.35、60 mmとした。縦リブの板厚は6 mmとした。荷重条件としては、大型車後軸の複輪を想定している。1つのタイヤは接地形状190 mm×235 mmの矩形、荷重強度0.8 MPaの等分布荷重とし、そのタイヤを2個220 mm間隔で配置した。タイヤの位置と縦リブ配置の相対的な関係が舗装のひずみ挙動にどのような影響があるか調べるために、図に示すように車輪位置を細かく変えた。すなわち、最初はタイヤが縦リブウェブの間に載るようにし、その位置から1 cmずつ横方向に移動させ、最後は再びタイヤがリブウェブの間に載るようにした。それぞれの荷重位置においてOFSMによる計算を行った。

(3) 解析結果

計算結果を図-9に示す。これらの計算結果より、

1. 縦リブウェブ直上の舗装表面に大きな引張ひずみが発生する、
2. リブ中間部には大きな圧縮ひずみが発生するものの、引張りひずみは生じない、
3. 表面ひずみは、タイヤがリブ中間部に作用した場合が最も大きく、リブ腹板直上に作用するときに最も小さい、

などのことが分かる。

図-10は、大きな引張ひずみの生ずるウェブ直上と、大きな圧縮ひずみの生ずるウェブ間の表面ひずみの、荷重の横方向の移動による変化を示したものである。ウェブ直上のひずみは常に引張状態にある。ウェブ間では圧縮であるが、荷重が遠ざかると小さな引張になる。しかし、引張ひずみの大きさは非常に小さい。

一方、舗装底面のひずみ分布を示した結果が図-11である。最も表面ひずみが大きくなる載荷状態の結果のみを示した。表面に比べひずみ量は圧縮、引張ともかなり小さく、ひび割れの発生の原因とは考えられない。

以上の解析結果より、縦リブウェブの縦ひび割れ発生は引張ひずみによって説明可能であるが、ウェブ中間部の発生原因は説明できない。したがって、ウェブ中間部の縦ひび割れについては引張ひずみ以外の原因が考えられる。

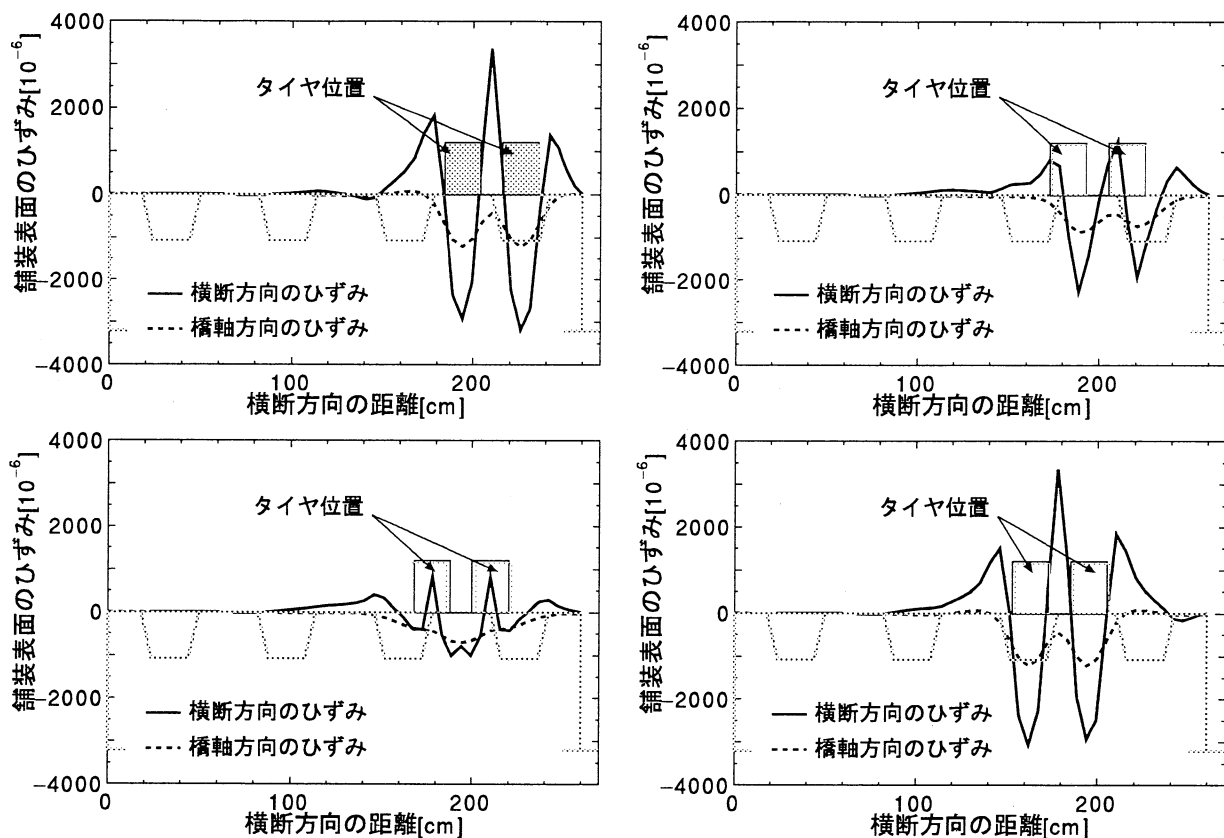


図-9 荷重移動によるひずみ分布の変化

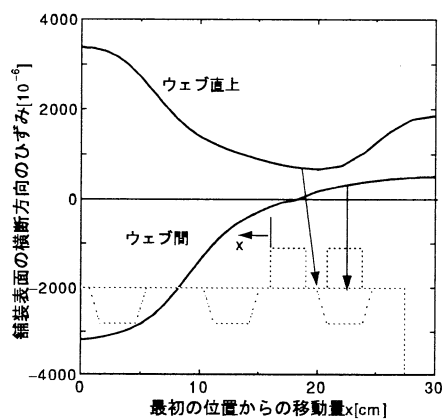


図-10 荷重の移動によるひずみ量の変化

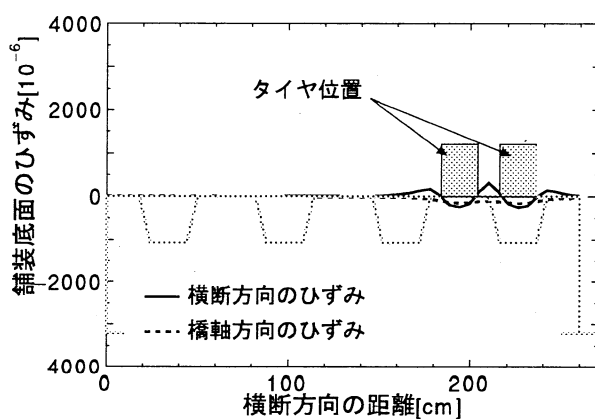


図-11 舗装底面におけるひずみ分布

4. 室内実験による検討

解析結果より、リブウェブ間には引張ひずみの発生はなく、この点からはウェブ間の縦ひび割れは説明できない。ただし、タイヤ直下では0.002程度の大きな圧縮ひずみが生じていることが判明した。そこで、大きな圧縮ひずみによるひび割れの可能性がないか、室内実験によって検討してみた。

(1) 装置および実験の概要

本装置は図-12に示すような、2点支持、2点载荷の片振り繰返し曲げ試験機である。アスファルト混合物の供試体は厚さ1~3cm×幅4cm×長さ30cmで、厚さ0.2cm×幅6.7cm×長さ60cmのアルミ板に貼り付けられている。図-13は供試体の様子である。载荷と支持はアルミ板に加わるようになっているため、アスファルト混合物に载荷点や支持点での塑性変形は生じない。さらに、アスファルト混合物に引張りひずみが生じないようにするために、アルミ板内部に中立軸がく

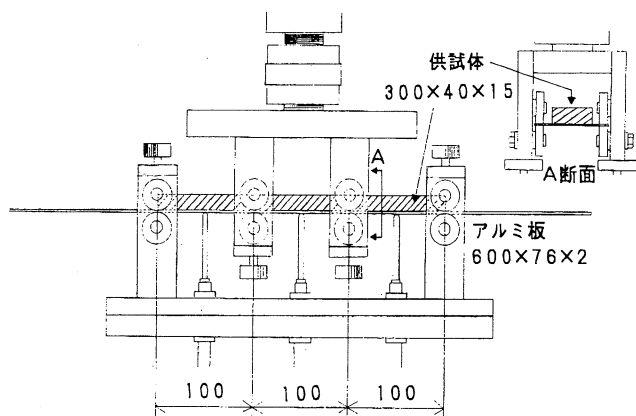


図-12 繰返し曲げ試験機

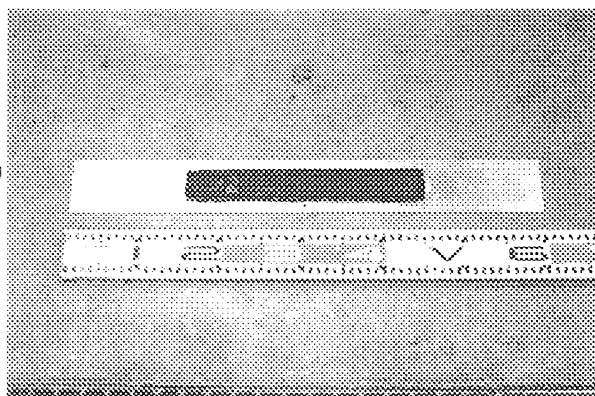


図-13 供試体

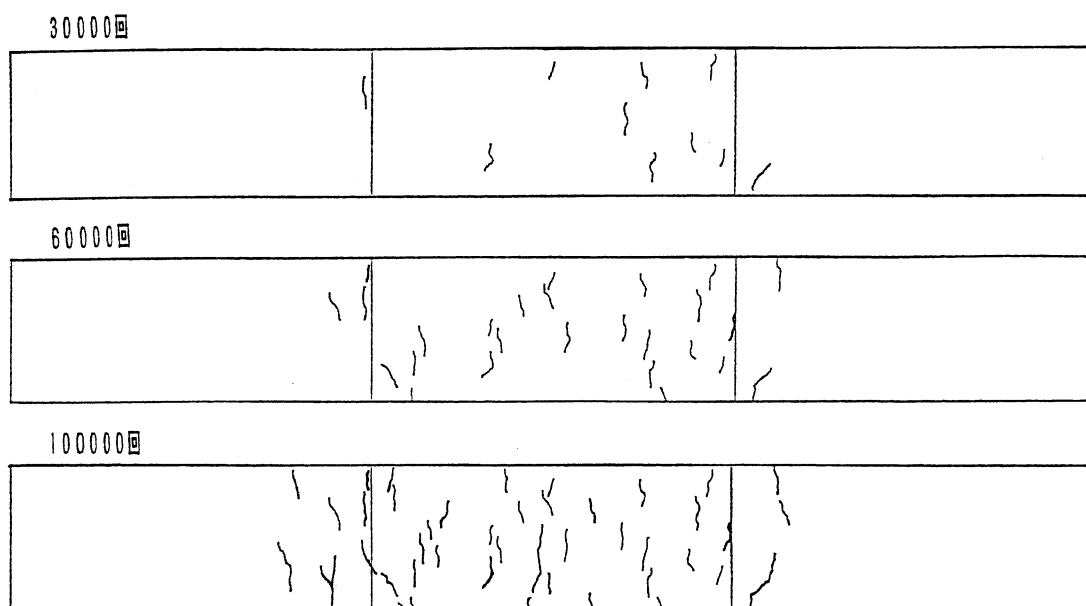


図 14 供試体表面のひび割れ発生状況

るようにアスファルト混合物の厚さを決定するとともに、下方への片振り方法をとっている。中立軸がアルミ板にあることを確認するために、供試体スパン中央のアスファルト表面およびアルミ板下面にひずみゲージを貼り、ひずみを計測した。

ここで用いたアスファルト混合物供試体は、密粒度混合物によってホイールトラッキング供試体を作製後、トラバースを加え、屋外に暴露したものを切断し用いている。

試験においては、試験温度 55℃、変位制御 (変位量 2mm)、周波数 8Hz で 10 万回までの繰返し载荷を行った。変位量 2mm は、図-9 の解析結果を参考に、アスファルト混合物供試体表面の圧縮ひずみが 0.0015~0.002 程度になるように設定した。

(2) 実験結果

図-14 に示した例は、試験温度 55℃、変位量 2mm、

周波数 8Hz の条件下において、10 万回までの繰返し試験の結果である。試験途中、1 万回ごとに顕微鏡によってひび割れ発生状況を観察し、それをスケッチしたものの 3 回分である。スパン中央部にひび割れが集中しており、繰返し回数の増加に伴いひび割れも増加している。供試体面に貼ったひずみゲージによる計測から中立面はアルミ板にあることを確認しており、明らかに、このひび割れの原因が繰返し圧縮ひずみによるものであることが分かる。

図-15 は、繰返し曲げの回数とひび割れ発生本数の関係を示す。供試体の暴露時間によらず、ひび割れ本数は繰返し数にほぼ比例して増加している。

これらの結果から、高温においては、圧縮ひずみのみでひび割れが発生する可能性があり、リップ間においても縦ひび割れが発生することを示唆している。

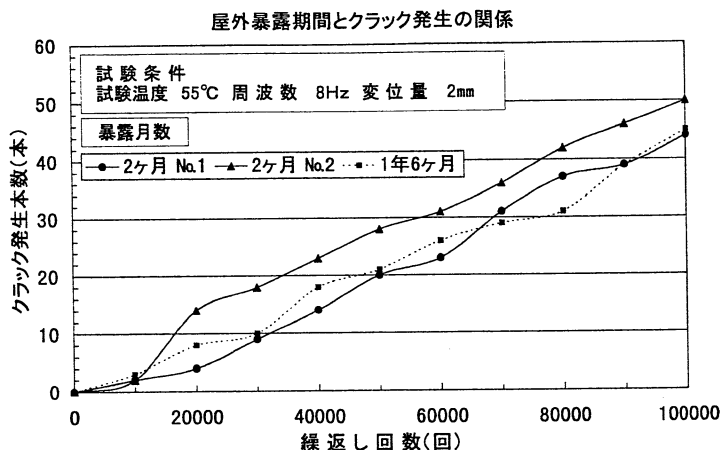


図-15 繰返し数によるひび割れ本数の増加

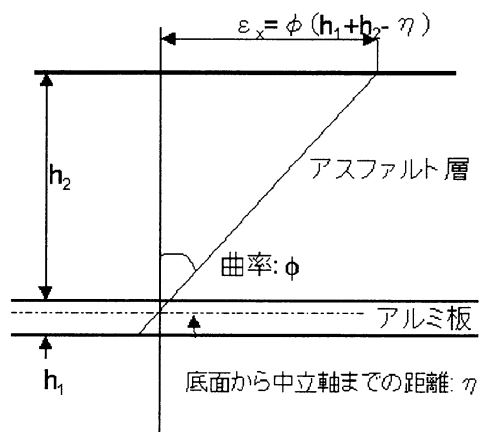


図-16 供試体内のひずみ分布

(3) 実験の理論的解釈

圧縮ひずみを作用させただけでなぜひび割れが発生するのかという疑問に対して、簡単な応力解析を行ってみた。本実験の供試体に対して、図-16のような単純なひずみ分布を仮定する。この場合変位制御による片振り繰返し载荷なので、アスファルト表面のひずみは以下のように計算できる。

$$\epsilon_x = \phi_0 (\sin(2\pi ft) + 1) \cdot (h_1 + h_2 - \eta) \quad (3)$$

ここに、

ϵ_x : アスファルト表面のひずみ

ϕ_0 : 曲率の振幅

f : 载荷振動数

h_1, h_2 : アルミ板とアスファルトの厚さ

η : アルミ底面から中立軸までの距離

さて、ここでアスファルト混合物の構成側を Kelvin モデルと仮定する。すると、次式のように応力は、弾

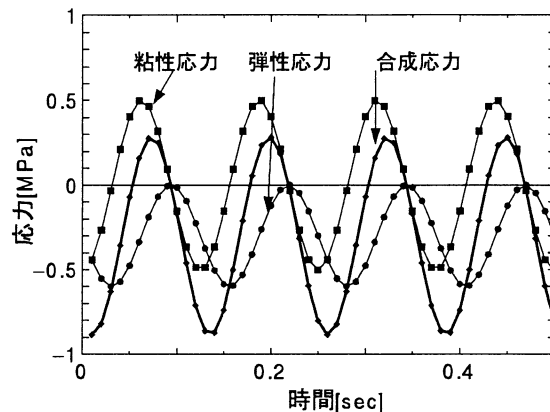


図-17 実験時のアスファルト表面の応力

性成分と粘性成分の和として表すことができる。

$$\sigma_x = E\epsilon_x + \gamma\dot{\epsilon}_x \quad (4)$$

ここに、

σ_x : アスファルト表面の応力

E : アスファルト混合物の弾性係数

γ : アスファルト混合物の粘性係数

式(3)を式(4)に代入すればアスファルト表面の応力を計算することができる。

実験に合わせて、次のような数値を用いて応力を計算した。 $f = 8\text{Hz}$, $\phi_0 = -0.000067$, $E = 295\text{ MPa}$, $\gamma = 9.8\text{ MPa}\cdot\text{sec}$, $\eta = 15.7\text{ mm}$ 。なお、 ϕ_0 は実験時に計測したアルミ底面およびアスファルト表面のひずみから算出した。

図-17は、計算によるアスファルト表面応力の時間変化である。弾性成分は圧縮ひずみによって圧縮応力となるが、粘性成分には引張が生ずる。そのため、粘性係数が高いと弾性成分と粘性成分の和である全体の応力も時間によっては引張になる。実験によって観測された微細なひび割れはこのような粘性成分と弾性成分の合成による引張応力が原因と考えられる。

以上のことから、縦リブのウェブ間のひび割れもこのようなアスファルト混合物の粘性的性質による引張応力が微細なひび割れを発生させたものと予想される。すなわち、鋼床版自体は弾性的な挙動を示すが、その上の舗装は特に高温時の場合粘性的な挙動を示し、たとえ圧縮ひずみであっても舗装には引張応力が生じているのである。このように、圧縮ひずみ領域のひび割れ発生については粘弾性理論による解析が必要である。

5. あとがき

本研究では、鋼床版舗装に特徴的な問題である表面縦ひび割れについて、実態調査、数値解析および室内実験によって、その発生原因について検討を行った。得られた結論をまとめると以下のとおりである。

1. 縦ひび割れは車輪走行部に一定の間隔でほぼ平行な直線状に発生する。
2. 縦ひび割れの発生間隔は、縦リブのウェブ間隔かその半分であり、縦ひび割れが、ウェブ直上ばかりでなく、その間にも生じている。
3. OFSM によるひずみ解析によれば、タイヤがウェブ間にあるとウェブ直上に大きな引張りひずみが発生するが、ウェブ間には圧縮ひずみしか生じない。
4. ウェブ直上にタイヤが載ると、アスファルトに発生するひずみは非常に小さくなる。
5. 圧縮ひずみのみを作用させるような繰り返し曲げ試験によれば、圧縮ひずみのみを与えてもアスファルト表面にひび割れが発生することが確認された。
6. ひび割れの発生本数は繰り返し回数の増加に伴って増加していく。
7. ひび割れの発生状況はアスファルト供試体の暴露時間によらない。
8. 簡単な粘弾性解析によれば、圧縮ひずみのみ作用させても、応力は引張になることがありうる。

このようなことから、鋼床版舗装の縦ひび割れの検討には、鋼床版の構造、荷重位置のみならず、舗装の粘弾性的挙動の把握が重要であることが分かる。また、ひび割れの予測にはアスファルト材料の破壊基準を確立することが必要不可欠であり、今後、本研究で開発した曲げ実験をさらに進めて行く予定である。

参考文献

- 1) 多田宏行：橋面舗装と設計施工，鹿島出版会，1996。
- 2) 佐々木道夫：橋面舗装と鋼床版，アスファルト，Vol. 38，No. 187，pp.44-53，1996。
- 3) 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の現況，第23回日本道路会議一般論文集(C)，日本道路協会，pp.410-411，1999。
- 4) 飯島 尚，小島逸平，岩崎尚義：鋼床版舗装の疲労曲線，土木技術資料 26-7，1984。
- 5) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，1994。
- 6) (社) 日本道路協会：鋼道路橋設計便覧，1996。
- 7) 西澤辰男，姫野賢治，佐藤亮一，佐藤育正：鋼床版舗装の構造解析法に関する研究，土木学会論文集，No.627/V-44，pp.103-112，1999。
- 8) Cheung, Y.K.: Folded Plate Structures by Finite Strip Method, Proc. of ASCE, Vol. 95, No. ST12, pp.2963-2979, 1969.
- 9) 草間晴幸，谷山健：有限帯板法，日刊工業新聞社，1994。
- 10) Ioannides, A.M. and Khazanovich, L.: Analytical and Numerical Methods for Multi-Layered Concrete Pavements, Proceeding, 3rd International Workshop on the Design and Evaluation of Concrete Pavements, C.R.O.W. Record 14, pp.113-121, 1994.

(1999.8.23 受付)

STUDY ON LONGITUDINAL SURFACE CRACK IN PAVEMENT ON STEEL PLATE DECK

Kitaro UCHIDA, Tatsuo NISHIZAWA, Kenji HIMENO, and Kenichiro NOMURA

A condition survey was conducted to investigate surface condition of pavement on steel plate deck of bridge. The results of the survey showed that main distress mode of the pavement are longitudinal cracks which occur at web of longitudinal rib as well as at the position between the webs. To make clear the causes of the crack, we performed strain analysis using overlaid FSM. The strain analysis indicated that, although large tensile strains appeared in the pavement at the web of rib, the strains between the webs were basically compressive. These results can not explain the cracks between the webs. Laboratory experiment modeling the pavement on plate deck was conducted and the results indicated the possibility of occurrence of the cracks by repetition of compressive strain.