

鋼床版舗装の局所曲げと内部応力

BENDING AND STRESSES IN THE ASPHALT SURFACING ON ORTHOTROPIC BRIDGE DECK

韭澤憲吉* 芳村仁**

by Noriyoshi NIRASAWA and Jin YOSHIMURA

A discussion of the bending and stresses in the surfacing used on orthotropic bridge deck is extended in this paper, for cases where the asphalt mixtures may be considered as elastic. The surfaced steel orthotropic decks with trapezoidal stiffeners are analyzed by the folded plate theory under double-wheel loading in the wide range of stiffness of asphalt mixtures. As the analytical results obtained for many cases of the wheel loading, the tensile stresses and the curvatures of bending in the surfacings are presented and the shearing stresses in the boundary plane between asphalt surfacing and steel deck plate are shown.

1. まえがき

鋼床版は直交二方向にリブによって補剛された版であり、近年その軽量性から橋梁の床版に多用されている¹⁾。その上面には、鋼床版の保護と通行車両の快適な走行性を提供する舗装が施される。ところが、他の床版構造に比べて局所的な変形を生じやすいことから、舗装層にクラックや剝離が発生することが問題となっている。このような鋼床版の実際の変形挙動を明らかにするためには、鋼の弾性体力学とともに舗装体の力学をも組み込んだ解析が必要となる。

ところで、舗装体は一般にアスファルト混合物であって、その性質は粘弾性体である。そこでは力学的な性状を、外的刺激に対する反応（レスポンス）としてとらえなければならない²⁾。アスファルト混合物の性状に影響を及ぼす因子として笠原らは、それぞれ、環境、構成材料、配合、施工に関するものに分類しているが³⁾、このうち特に環境に関するものとは、温度と載荷時間であって構造解析において最も重要な因子である。アスファルト混合物の動的実験から、その応力とひずみの関係において複素弾性率が定義されるが⁴⁾、一方また同様な概念に対して時間と温度の関数でスティフネスという呼び方もある。ここでは単純に応力とひずみの比ということで変形係数という言葉を用いることにする。この変形係数の大きさは内的因子にも影響されるが⁵⁾、ふつう外的因子としての温度ならびに載荷時間によって著しく変動することが知られている⁶⁾。このうち、アスファルト舗装体の温度は気温と密接な関係があり、 $-15^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ で⁷⁾、載荷時間は車両走行 $10\sim 100\text{km/h}$ に対して $0.1\sim 0.01$ 秒であるといわれている⁸⁾。その変形係数の具体的な値については現場実験などもあるが⁹⁾、笠原らは実験的研究からアスファルト混合物の力学的性状については温度・時間換

* 工修 北海道大学助教授 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

** 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

算則が適用可能であることを明らかにし¹⁰⁾、舗装体の温度と車両速度が知られるならば、それに対応する変形係数がマスターカーブを用いて合理的に決定される方法を提案している⁸⁾。

変形係数と並んで解析に必要とされるポアソン比については、G.Sayeghの振動実験によれば、0.1～0.5の範囲であるといわれる¹¹⁾。しかし、著者らの解析によるとポアソン比の数値は局所変形の解析の結果にはあまり影響を与えない¹²⁾。

鋼床版舗装では、舗装そのものの不透水性とともにクラック防止は設計上重要な留意事項である。このクラックは多くの場合、縦リブと平行に発生し、その間隔はリブ間隔にほぼ等しく¹³⁾ また最もひどいクラックは主桁上で起こっているといわれる¹⁴⁾。土研の試験舗装でも縦リブ上にクラックの発生が認められている¹⁵⁾。菅原によると、実際の舗装に生じている亀裂は多くの場合曲げ作用によって常温以下で速いひずみ速度で起きているといわれる²⁾。アスファルト混合物の破壊現象については、森吉らは、曲げ、せん断、温度応力、曲げクリープの4種類に分類し、破壊の型も3つのタイプに分けられるとして、多くの実験研究から破壊の概念について述べている^{16,17)}。さらにアスファルト舗装の破壊の要因として材料の疲労がかなり関係し、繰返し載荷によってその力学的性状の変化が認められるといわれている⁵⁾。

走行車両が作用するときの舗装された鋼床版の挙動の解明は動的な応力解析になるわけであるが、この解析には大別して二つの立場がある。ひとつは外力を動的にあたえることであるが、解析的には入力をも動的に入れる場合、アスファルト舗装体の反応メカニズムを数式化することの困難さがある。これに対してもう一方の立場は、外力を静的に考えて動的荷重に対するアスファルト舗装体の反応を変形係数で代表させる（変形係数を変動させることにより外荷重の載荷時間が変化することに対応させる）ことである。これまですでに種々の環境条件における変形係数の値はアスファルト混合物の実験的研究の中で明らかにされてきている。この報告は後者の立場に立って、交通荷重の作用のもとで鋼床版舗装の内部に生じる局所的な応力と変形を解析的に明らかにしたものである。

2. 鋼床版の解析理論

鋼床版の解析理論には、直交異方性板理論^{18,19)}、格子桁理論、有限帯板解析理論²⁰⁾、折板解析理論などがよく知られている。ここで、直交異方性板理論と格子桁理論は鋼床版の局所的な変形挙動の解析には適していない。有限帯板解析理論は半解析的有限要素法のひとつと考えられるものであり、福井らはこの手法を応用することによって舗装が鋼床版の変形挙動に与える影響を求めることを試みている²¹⁾。また折板理論は構造を板要素の集りとして取り扱うものであって、そのなかでも板要素の変位を短軸方向に簡単な関数で近似する方法²²⁾と弾性板理論の厳密解を用いる方法に分けられる²³⁾。ここでは、後者の厳密な折板理論を適用して解析を行った。

走行する車両荷重のように載荷時間が短い場合では、アスファルト舗装体は弾性的な反応を示すので、その力学的性状が変形係数で表現されるものと考えて、デッキプレートと鋼のふたつの層からなる二層板として解析する方法により、舗装体の力学を鋼床版の解析に組み込んだ。

(1) 二層板

異なる弾性性質を持つ二つの層よりなる平板において、変形時の断面平面保持を仮定して、アスファルト層および鋼デッキプレート層の変形係数、ポアソン比をそれぞれ E_a, ν_a, E_s, ν_s とし、図1のように座標 x, y, z および変位 u, v, w を定義するとつりあい条件から次の基礎方程式が導かれる。

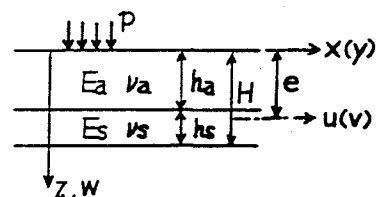


図1 二層板

$$D^* \nabla^4 w = p, \quad B \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{2}(B-B_v) \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{1}{2}(B+B_v) \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} = 0, \quad B \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{1}{2}(B-B_v) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1}{2}(B+B_v) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} = 0 \quad \dots(1)_{1,2,3}$$

ここで、

$$B = \frac{E_a h_a}{1-\nu_a^2} + \frac{E_s(H-h_a)}{1-\nu_s^2}, \quad C = \frac{E_a h_a^2}{2(1-\nu_a^2)} + \frac{E_s(H^2-h_a^2)}{2(1-\nu_s^2)}, \quad D = \frac{E_a h_a^3}{3(1-\nu_a^2)} + \frac{E_s(H^3-h_a^3)}{3(1-\nu_s^2)} \quad \dots(2)_{1-6}$$

$$B_v = \nu_a \frac{E_a h_a}{1-\nu_a^2} + \nu_s \frac{E_s(H-h_a)}{1-\nu_s^2}, \quad e = \frac{C}{B}, \quad D^* = D - \frac{C^2}{B} = D - eC$$

これらの基礎方程式の変位のフーリエ級数解は容易に求められ、鋼床版全体の折板解析に必要な二層板の剛性マトリックスが誘導されることになる。曲げ応力などは変位との関係式から簡単に得られるが、ここにはあとの参照のために、内部応力のつりあい条件式および上下表面における境界条件($z=0$ で $\sigma_z=0$, $\tau_{zx}=0$; $z=H$ で $\sigma_z=0$, $\tau_{zx}=0$) から得られる σ_z および τ_{zx} の表現式のみを次に示す。

$$\sigma_{za} = p \left\{ \frac{E_a}{D^*} \left(e \frac{z^2}{2} - \frac{z^3}{6} \right) - 1 \right\}, \quad \sigma_{zs} = p \frac{E_s}{D^*} \left\{ - (H-e) \frac{(H-z)^2}{2} + \frac{(H-z)^3}{6} \right\} \quad \dots(3)_{1,2}$$

$$\tau_{zxa} = \frac{E_a}{1-\nu_a^2} \left[\frac{\partial}{\partial x} (\nabla^2 w) \left(\frac{z^2}{2} - ez \right) - \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1-\nu_a}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{1+\nu_a}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right) z \right]$$

$$\tau_{zxs} = \frac{E_s}{1-\nu_s^2} \left[\frac{\partial}{\partial x} (\nabla^2 w) \left\{ \frac{(H-z)^2}{2} - (H-e)(H-z) \right\} + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1-\nu_s}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{1+\nu_s}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right) (H-z) \right] \quad \dots(4)_{1,2}$$

ここで、添字 a,sはそれぞれアスファルト層、鋼デッキプレート層の応力であることを示す。各層のそれぞれの応力の表現式は、互いの境界面で一致する。

(2) 折板解析理論

折板理論では、鋼床版を板要素に分割し、デッキプレートは二層板として、また閉リブや主桁の腹板と底板は単層板の剛性マトリックスを用いて、それらの接合線上において変位の適合と応力のつりあいの連続条件を満足させて解析が行われる(図2)。

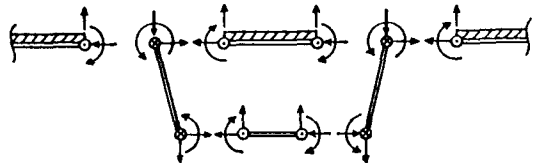


図2 折板理論解析における板要素の分割と接合
(一つの縦リブ断面の部分の例)

ここに、 $\odot \otimes$ は面内せん断力

3. 交通荷重による局所変形と局所応力

解析の対象とした鋼床版箱桁橋を図3に示す。12mm厚のデッキプレートの上に75mmの舗装が施工されている。横リブ間隔は2500mmであり、解析ではその間隔で単純支持されているものとした。主桁の剛性が床版に

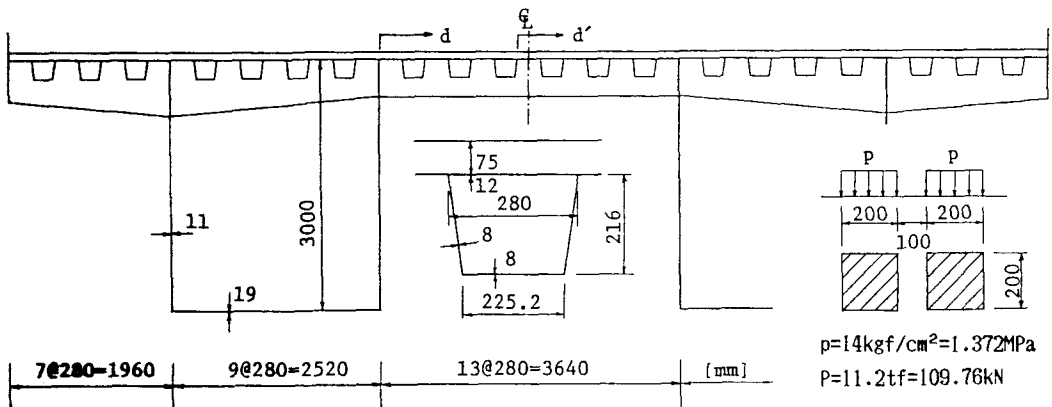


図3 鋼床版箱桁橋断面図と縦リブ詳細図および複輪荷重

比べてきわめて大きいので、ここでは幅員方向の支持条件としては主桁位置においてたわまないものとした。車輪荷重は道路橋示方書²⁴⁾のT-20の後輪荷重とし、衝撃係数 0.4を考慮した。ただしその載荷寸法には複輪を考慮して実状に合わせた^{25, 26)}。荷重の分散効果については考慮していない^{27, 28)}。解析では荷重の作用位置は橋軸方向には横リブ間隔の中央で、幅員方向には多くの位置について検討した。アスファルトの変形係数 E_a の領域については十分に広く考慮し、ポアソン比は0.35とした。鋼のヤング率は $E_s=2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ (205.8GPa)、ポアソン比は 0.3とした。

鋼床版に車輪荷重が作用するときには、一般に、荷重の近傍の主桁または縦リブの上の舗装は幅員方向に負(上に凸)の曲げ(局所変形)を受け、表面に引張応力(局所応力)を生じる。鋼床版舗装のクラック破壊がひずみによるものか、または応力によるものかは破壊の型の問題になるが、この負の曲げまたはこれによる引張応力の発生が原因であると思われる。したがってここでは、局所変形を表わす量として二層板としてのデッキプレートの幅員方向の曲げの曲率 $w'' = \partial^2 w / \partial x^2$ を採り、局所応力としてはアスファルト層の上面における曲げ応力度 $\sigma_x a$ をとって代表させることにする。さて、これらの量は、アスファルト層の変形係数など材料的な因子によって影響を受けるが、そのほかにも外力としての車輪荷重の分布形状や荷重の作用位置と主桁およびリブ接合部との相対的な位置関係なども関係してくることになる。ここではそのような鋼床版舗装の局所曲げと内部応力に影響を与える、車輪荷重の載荷寸法と鋼床版自体の構造的な因子について解析的に検討を行なった結果を示す。

(1) 局所変形と局所応力の分布領域

まず、車輪荷重の作用によって生じる局所的な変形の及んでいる範囲およびそれによる局所応力のひろがりの範囲を調べたところ、幅員方向には縦リブ間隔の 2-3倍程度の領域であった²⁹⁾。ところで、大型車両の後輪の左右両輪の内側間隔は1600mm程度であるので、この結果から、左右両輪が鋼床版上に載る場合でも両輪の局所変形は互いに重なり合わないことがわかる。したがって、局所的な解析においては、車両後輪の片側のみが作用する状態を検討するだけで十分であることになる。

(2) 車輪荷重の載荷寸法による違い

車輪荷重の載荷領域についてはできるだけ実状に合わせたが、示方書などでは500mm×200mmの矩形分布として、中央に無載荷領域ができるのを考慮していない。このような載荷領域の違いが局所変形に影響を与えるか否かを調べるために、同じ荷重量 ($P=11.2t=109.76\text{kN}$)のもとで比較を行った。荷重位置は荷重の中心がちょうど主桁上にある場合と、主桁間隔の中央部で縦リブ接合部の上に作用する場合の2ケースで、その結果を表1に示す。比較した解析値は舗装層の引張の最大曲げ応力と上に凸の最大曲率である。

この結果をみると、載荷寸法の違いにより局所変形の大きさに違いがあることがわかり、載荷寸法を示方書のようにとった場合は局所応力と局所変形がともに小さな値で得られてしまうことから、このような解析においてはできるだけ実状に合わせた載荷寸法を採用すべきであると言える。

$\frac{(\sigma_x a)_{\max}^+}{E_s}$ ($\times 10^{-6}$)	center position of double-wheel load			
	over the main-girder		midway between main-girders	
$\frac{E_a}{E_s}$				
0	0	0	0	0
1/21000	1.00	0.93	0.78	0.69
1/2100	6.86	6.35	4.90	4.24
1/210	18.48	16.77	7.43	4.94
1/21	26.70	14.65	3.75	3.36

$(w'')_{\max}^+$ ($\times 10^{-4}/\text{mm}$)	center position of double-wheel load			
	over the main-girder		midway between main-girders	
$\frac{E_a}{E_s}$				
0	2.395	2.229	1.898	1.697
1/21000	2.271	2.112	1.782	1.589
1/2100	1.565	1.448	1.134	0.987
1/210	0.428	0.388	0.189	0.134
1/21	0.070	0.038	0.013	0.012

表1 車輪荷重の載荷寸法の違いによる最大応力と最大曲率における比較

(3) 作用荷重位置と局所変形、局所応力

代表的な二つの解析結果の分布図を図4に示す。ひとつは、荷重の中心が主桁上にある場合であり、他のひとつは荷重中心が主桁から離れて中央部の縦リブ上にある場合である。これらの図を比べると、車輪荷重が作用するときの鋼床版舗装に生じる局所変形は、荷重位置によって影響されるようである。

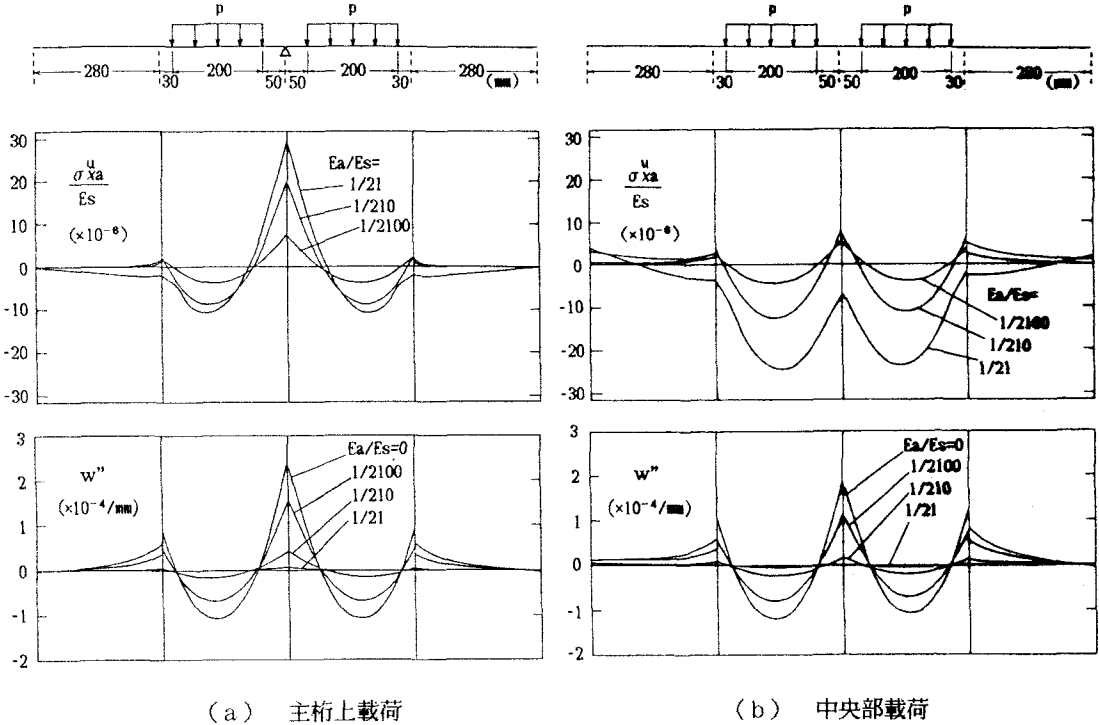


図4 車輪荷重作用時の曲げ応力と曲率（橋軸方向中央断面）

そこで、まず、主桁近傍および主桁間隔中央部の二つの領域を選び、そこで荷重中心が幅員方向に70mm間隔ごとに異なる位置に作用するそれぞれ9ケースの場合について解析を行った。その結果から得られた、アスファルト層の最大引張応力度および曲率の最大値と荷重中心の位置との関係を示すグラフが図5である。ここで d , d' はそれぞれ荷重中心の位置を表す。これより、荷重中心の位置について、それが主桁や縦リブの間にある場合よりも主桁または縦リブの位置と一致する場合において、鋼床版舗装の局所変形と局所応力は極値をもつことがわかる。

(4) 作用荷重の主桁との相対的位置関係

次に作用荷重と主桁との相対的位置関係による影響を調べるために、荷重中心を主桁または縦リブ位置に一致させながら、主桁上からひとつのリブ間隔（280mm）ごとに移動させて解析を行い、荷重中心直下に生じる舗装表面の曲げ応力（ σ_{xa} ）と曲率（ w'' ）の値をグラフに示すと図6のようになった。ここで、 d は荷重中心と主桁との距離である。これより、荷重位置について、車輪荷重が縦リブ上に作用するときよりも主桁上に作用するときの方が、鋼床版舗装に大きな局所変形と局所応力を生じることがわかる。

この結果と前節の結果より、鋼床版橋の橋面舗装においては、その中心が主桁と一致するように車輪荷重が作用する場合、すなわち、複輪で主桁をはさむように作用する場合に、その主桁上の鋼床版舗装に最大の局所変形と局所応力が生じることになる。

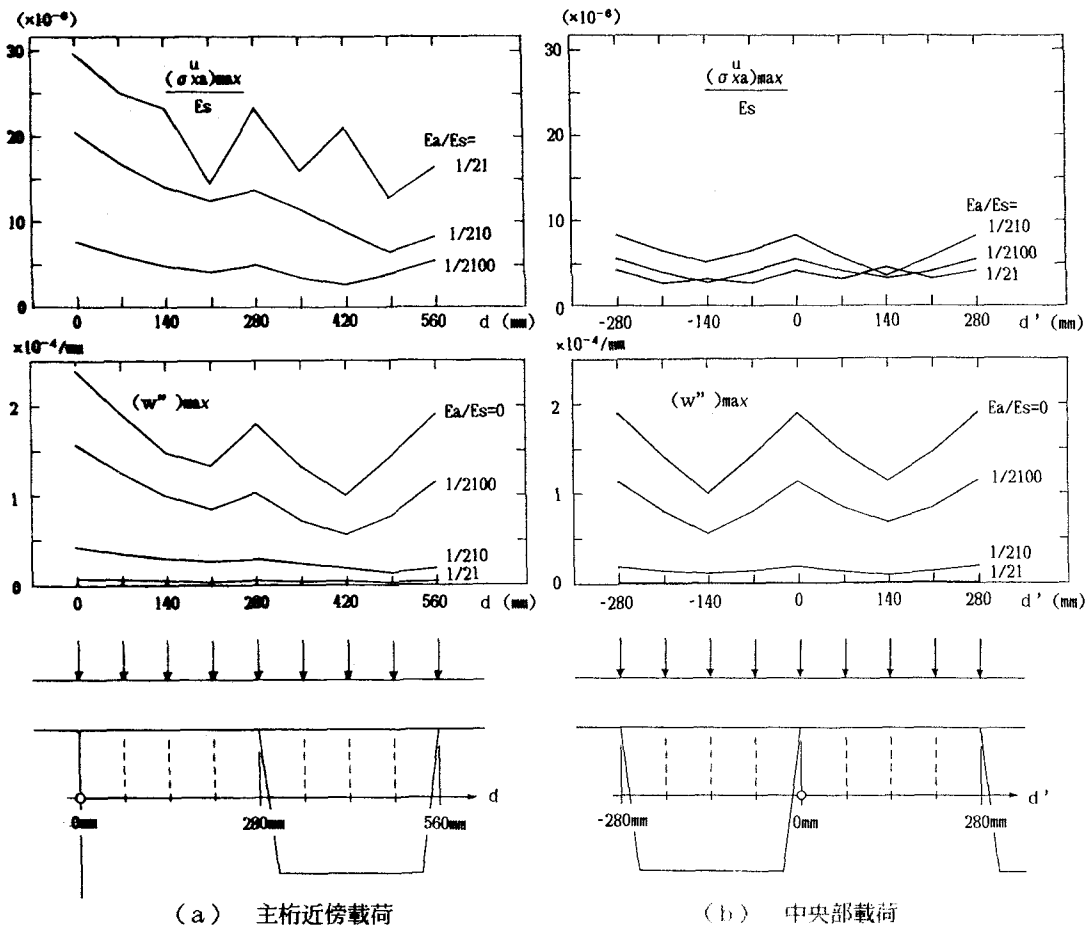


図5 それぞれの荷重位置の場合に生じる舗装層の最大引張応力度と曲率の最大値

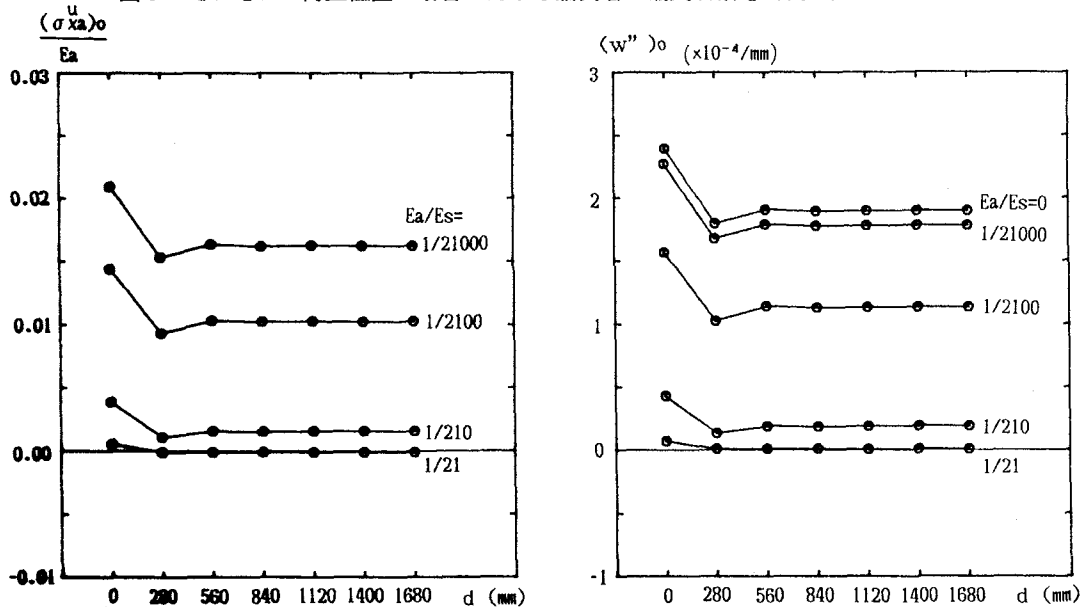


図6 車輪荷重直下が発生する応力、曲率と荷重作用位置との関係（主桁との相対的位置関係）

4. 主桁上における局所変形と局所応力

主桁上に作用する車輪荷重による主桁上の舗装層に生じる局所変形と局所応力は、主桁の剛性や主桁と隣接する縦リブとの間隔などによって影響を受ける。ここでは、それらの影響についての解析的な結果を示す。

解析の対象とした鋼床版と主桁の断面を図7に示す。舗装厚は80mmで、荷重は $P=8tf(78.4kN)$ で主桁をはさむような複輪荷重である。橋軸方向には、横リブ間隔2500mmのスパンで単純支持とした。主桁と縦リブの間隔は $b=150, 200, 250, 300mm$ の各場合を考えた。主桁については、前章の解析例と比べて曲げ剛性EIが小さいので主桁も変形するものとして解析し、さらに剛性EIが ∞ と考えられる場合の解析も行った。

主桁上に生じる舗装体の局所応力の解析結果として、主桁上の負の曲げによって生じるアスファルト層の上面の引張の最大曲げ応力度と変形係数の関係を表わしたグラフを図8に示す。これより、主桁の剛性によって主桁上に生じる局所応力の大きさが異なることがわかるとともに、局所応力とEaとの関係についても違いが認められる。すなわち、比較的たわみやすい主桁の場合は、変形係数が大きくなるに従って局所応力の大きさは上昇していくが、それが途中から下降していく。それに対して、主桁がたわみにくく剛な場合は下降の傾向は表われていない。次に、主桁と縦リブの間隔については、その広さによって生じる局所応力の大きさが違うことがわかる。その間隔が広がれば広がるほど、発生する局所応力は大きくなっていく。

5. 舗装体と鋼デッキプレートの二層の境界面に生じる応力

アスファルト舗装のクラックの問題とともに剝離現象もまた問題となっている。アスファルト舗装層は鋼デッキプレートとは十分な付着を持つように設計施工されるので、舗装は鋼床版と一体になって変形する。その変形のために境界面には応力が生じていることになる(図9)。

これらの応力の厚さ方向の一般式はすでに(3),(4)式に示してある。このうち、境界面に対する垂直断力 σ は(3)式より直接計算できる。その結果を表2に示す。境界面のせん断断力 τ については、舗装体内部の応力と同様に折板理論によって解析的に求めることになる。図7の鋼床版についての解析結果から τ の最大値を求めて各場合についてグラフに示したのが図10である。これより、舗装体の変形係数が大きくなると境界面には大きなせん断断力が生じる傾向がわかるが、主桁の剛性によってその τ の大きさには限度が

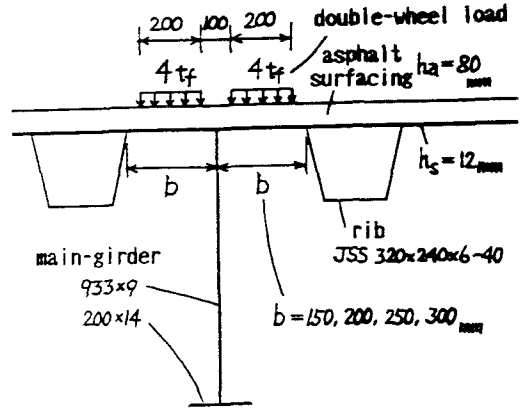


図7 主桁上の局所変形解析のための鋼床版と主桁の断面図

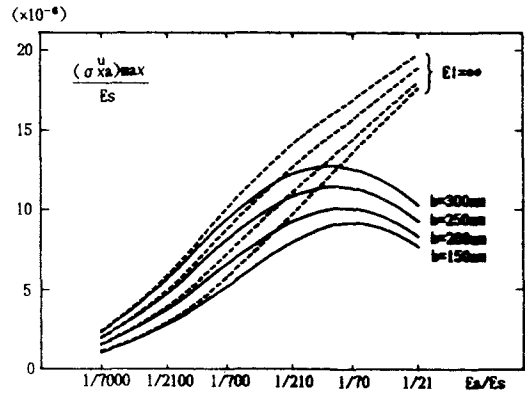


図8 主桁上に生じる舗装層の最大曲げ応力度

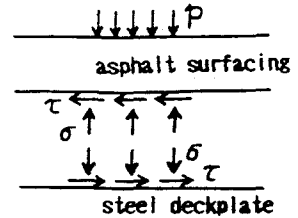


図9 境界面における応力

E_a/E_s	σ/p
(1/1)	(0.046)
1/21	0.113
1/70	0.144
1/210	0.214
1/700	0.387
1/2100	0.623
1/7000	0.840

表2 境界面の垂直断力
($h_a=80mm, h_s=12mm$ の場合)

あることがわかる。

この図10には $b=300\text{mm}$ の場合で複輪荷重の片方の中心が主桁位置に一致するような載り方の場合についても、非対称載荷として破線で記入してある。舗装体表面の引張応力度については非対称載荷の場合は小さな値を示すのであるが、境界面のせん断応力の場合では非対称載荷の方が対称載荷に比べて幾分か大きくなっている。

6. まとめ

鋼床版の橋面舗装が、走行する車両荷重の作用をうけるときの力学的挙動の検討を行い、舗装体内部に生じる局所的な変形と応力を解析的手法から明らかにした。

まず、アスファルト混合物の力学的性状について検討を加え、それが変形係数で表現されることから、舗装体の力学を解析的手法に組み込むことを示した。解析手法として折板理論を用いて、具体的な鋼床版構造に車輪荷重が作用する場合の局所変形の解析を行い、舗装層のクラック発生の問題に関して、車輪荷重が「どこに」作用したときに、鋼床版舗装の「どこに」最大の引張応力と最大の曲率が生じるのかを示した。それに関連して局所的な変形の生じる領域の範囲と車輪荷重の載荷寸法についても検討した。また、舗装体の剝離の問題に関して、アスファルト層と鋼デッキプレート層の間の境界面に生じる応力についても示した。そして、これらの変形量と応力度が、舗装の変形係数に関係するとともに主桁の剛性やリブとの間隔にも影響されることも示した。

鋼床版の橋面舗装の耐久性を保証するためには、アスファルト混合物の破壊に対する検討方法に関する研究とともに、鋼床版の構造設計段階において、例えば局所変形についてデッキプレートの曲率制限などの、なんらかの合理的な規定が必要となってくるものと考ええる。

謝辞： 査読者の貴重な意見に謝意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺昇・大島久：鋼床版設計実例の全国調査と鋼床版の経済設計，橋梁と基礎，76-9, 1976.9.
- 2) 菅原照雄：アスファルト混合物の力学的性状について：土木学会論文報告集，207, 1972.11
- 3) 笠原篤・菅原照雄：不規則なひずみ波形に対するアスファルト混合物の動的応答に関する研究，土木学会論文報告集，277, 1978.9
- 4) 笠原篤・上島壮・菅原照雄：共振法によるアスファルトおよびアスファルト混合物の動的粘弾性，土木学会論文報告集，208, 1972.12
- 5) 笠原篤・菅原照雄：繰り返し載荷過程におけるアスファルト混合物の動的性状の変化について，土木学会論文報告集，235, 1975.3
- 6) 板倉忠三・中島昭雄・平野英作：ゲースアスファルトの粘弾性状について，第7回道路会議論文集，1963
- 7) 藤井治芳：アスファルト混合物の感温性について，第7回道路会議論文集，1963
- 8) 笠原篤・岡川秀幸・菅原照雄：アスファルト混合物の動的性状とその舗装構造の力学解析への応用，土木学会論文報告集，254, 1976.10

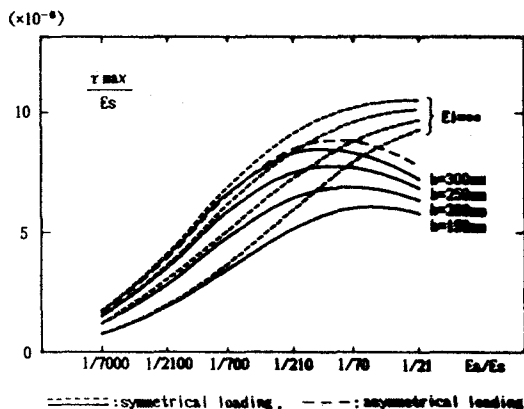


図10 二層の境界面で生じる最大せん断応力度

- 9) Vaswani, N.K.: Determining Moduli of Materials from Deformations, Proc. of ASCE, 103, TE1, 1977.1
- 10) 笠原篤・菅原照雄：アスファルト混合物の動的応答に関する研究，土木学会論文報告集，215, 1973.7
- 11) Sayegh, G.: Viscoelastic Properties of Bituminous Mixtures, 2nd International Conf. on the St. Design of Asf. Pavement, 1967
- 12) 葦澤憲吉・芳村仁：舗装体を考慮した閉リブ鋼床版の局所応力について：土木学会北海道支部論文報告集，33, 1977.2
- 13) Thul, H., Reinitzhuber, F.K.: Introductory Report of Asphaltic Wearing Surfaces, IABSE, final report, 1968
- 14) Fondriest, F.F.: American Experiences with Thick Pavements on Orthotropic Steel Bridges, IABSE final report, 1968
- 15) 窪田昭夫・小島逸平・加藤朝雄：橋面薄層舗装に関する長浦試験舗装，土木技術資料，20-7, 1978
- 16) 森吉昭博・上島壮・菅原照雄：アスファルト混合物の破壊強度に関する研究，土木学会論文報告集，210, 1973.2
- 17) 菅原照雄・上島壮・森吉昭博：アスファルト混合物の低温領域における破壊時のレオロジー，土木学会論文報告集，234, 1975.2
- 18) 直交異方性鋼床版橋設計便覧，土木研究所資料，399, 1968.7
- 19) 直交異方性版理論による鋼床版実用設計法，土木研究所報告，137-1, 1969.8および同補遺，690, 1971.7
- 20) 吉浪康行・大村裕：Finite Strip Methodによる鋼床版の解析，橋梁と基礎，78-11, 1978.11 など
- 21) 福井幸夫・沢井広之：鋼床版の変形特性に関する調査ー橋面舗装からみた鋼床版構造ー，橋梁と基礎，78-6, 1978.6
- 22) 大島俊之・能町純雄：折板構造解析による閉リブ鋼床版の弾性挙動の研究，土木学会論文報告集，278, 1978.10 など
- 23) 芳村仁・葦澤憲吉：折板理論解析による曲線桁橋の床版応力と有効幅について，土木学会論文報告集，233, 1975.1
- 24) 道路橋示方書，日本道路協会，1980.2
- 25) 秋山政敬：輪荷重と接地圧、接地半径の関係，土木学会論文報告集，243, 1975.11
- 26) 日本工業規格，JIS D 4202，自動車用タイヤの諸元
- 27) 園田恵一郎・堀川都志雄：道路橋床版の輪荷重直下の応力の算定について，土木学会論文報告集，273, 1978.5
- 28) 芳村仁・三上隆：二層板の載荷点近傍の応力性状について，土木学会第30回年次学術講演会講演概要集，1, 1975.10
- 29) 葦澤憲吉・芳村仁・床井明男：鋼床版箱桁橋の局所変形と局所応力の解析，土木学会北海道支部論文報告集，1982.2
- 30) 伊藤鉦一：DIN18809草案の概要と 2,3の規定の紹介，橋梁と基礎，86-10, 1986.10

(1986年10月17日受付)