

走行する車輪荷重による鋼床版の応力波形の解析

ANALYSIS OF STRESS WAVES OF ORTHOTROPIC BRIDGE DECK UNDER WHEEL LOADING

葦澤 憲吉*

by Noriyoshi NIRASAWA

The steel orthotropic decks with trapezoidal stiffeners are analyzed by the folded plate theory under double-wheel loading, and the local bending of deck plates are studied precisely. As the analytical results obtained for many cases of the load position, the stress waves of orthotropic bridge deck are presented for running-through wheel load. And the characteristics of the stress wave became clear according to the considerations of the wave-form.

1. まえがき

鋼床版は直交2方向に片面補剛された構造的な直交異方性板である。幅員方向には横リブ、橋軸方向にはU形の縦リブが配置されるが、その配置間隔は一般に密な縦リブに比べて横リブの方がかなり疎であり、またリブ1本あたりの剛性も縦リブに比べて横リブの方がかなり大きい。したがって鋼床版構造の力学的機能は、(1)横リブの変形を考慮してその一部として協力して働く合成作用と、(2)横リブが変形しないものとしてそれらの間の部分で荷重を直接担う床版作用の、2つに区別される。この報告では(2)の床版作用に関して、車輪荷重作用時の床版の局所曲げについて解析的に検討を行う。

鋼床版の解析理論には、直交異方性板理論¹⁾、格子桁理論、有限帯板解析理論²⁾、折板解析理論などがよく知られているが、このうち直交異方性板理論、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、折板解析理論は構造を板要素の集まりとして取り扱うものである。折板理論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³⁾と弾性板理論の厳密解を用いる方法⁴⁾に分けられるが、鋼床版の局所変形を精確に求めるために、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。

鋼床版上の局所応力については走行載荷実験などが行われているが⁵⁾溶接部や舗装の疲労問題においては応力値だけでなく、車輪荷重の移動にともなう局所応力の変動性状(応力波形)についても検討する必要がある。この報告は折板理論解析によって車輪荷重が鋼床版上を走り抜けるときに生じる応力波形を明らかにして、考察を加えたものである。

* 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)

2. 鋼床版の解析理論：折板構造解析理論

(1) 折板構造

折板理論は、折板構造を橋軸方向と平行な切断線で多数の矩形の板要素に分割し、接合線上で応力と変位の連続条件を十分に満たしながら、板要素の内部応力や変形を板の弾性解析と同じ精度で求めるものである。したがって、立体的に構成された板構造の応力や変形を厳密に求めることができる。

いま図1のような箱桁を対象とする場合には、図のように10枚の軸方向に細長い板要素に切断される。

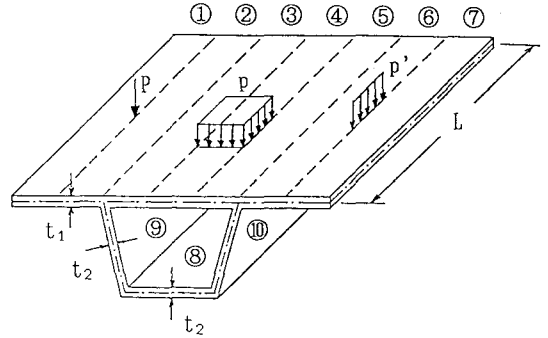


図1．折板理論における板要素分割

(2) 変位の適合条件と応力の釣合条件

板要素に分けられた矩形板が、両端辺で面内的にも面外的にも単純支持されているならば、この矩形板の変位は面内変形と曲げ変形の2つの基礎方程式からそれぞれ4つの積分定数を含むフーリエ級数解で与えられる。この解を用いると、矩形板の接合辺に沿って分布している軸方向力、接線力、せん断力、曲げモーメントと、それに対応する変位と回転角がフーリエ級数で表され、各々の級数項ごとに、4つの境界力の係数と4つの境界変位の係数がマトリックス式で結び付けられる（板の剛性方程式）。さらに荷重も軸方向にフーリエ級数に展開することによって、構造全体の接合辺における4つの変位の適合条件および4つの応力の釣合条件（図2）を満たす全体の剛性マトリックスを各級数項ごとに作ることができる。この箱桁の場合では40×40のマトリックスである。

この全体剛性方程式を解くことによって各板要素の境界変位のフーリエ係数が順次得られ、それより内部応力などが求められる。

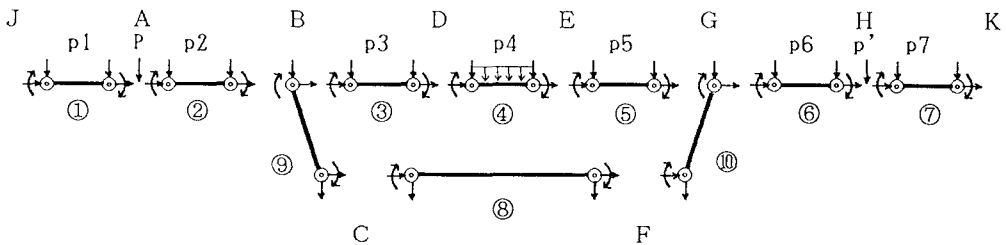


図2．接合辺において満たされる変位の適合条件と応力の釣合条件

3. 鋼床版に生じる局所応力

(1) 解析された鋼床版構造および車面複輪荷重

折板理論を用いて解析の対象とした鋼床版構造を図3に示す。鋼床版の橋軸方向スパンは横リブ間隔とし

$L=2500\text{mm}$ 、床版の板厚は $t=12\text{mm}$ で、主桁のウェブと下フランジの寸法は図に示すとおりである。縦リブ⁶⁾については JSS 300x220x6 (リブ1とする)を $b=300\text{mm}$ 間隔に配置した場合と JSS 320x240x6 (リブ2とする)を $b=320\text{mm}$ 間隔に配置した場合を考える。

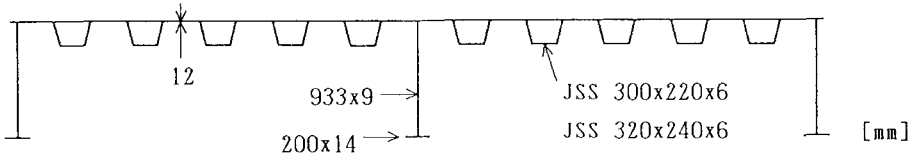


図3. 鋼床版構造

車輪荷重は重車両の後輪を考え、図4に示すように分布幅200mm×分布長200mmの部分分布面荷重が間隔100mmで作用する複輪荷重とし、車輪全体で $P=8tf$ (78.4kN)である。

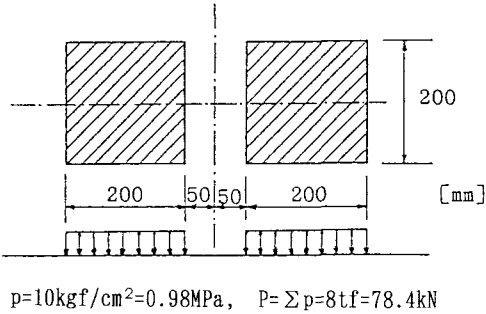


図4. 車輪荷重

折板理論解析で用いた境界の条件は、橋軸方向には横リブ位置において単純支持とした。幅員方向の解析範囲については、車輪荷重の作用位置によって2つの場合に分けた。すなわち鋼床版の局所変形は①荷重が主桁の近傍に作用する場合と、②主桁から離れて中間部に作用する場合では異なるので、①の場合については主桁を含みリブがその両側にある範囲を解析対象とし、②の場合についてはリブが横に連続している範囲を解析対象とした。それらの鋼床版断面を図5に示す。車輪荷重から幅員方向にある程度以上離れている位置の支持条件は、その荷重近傍に生じる局所応力の解析値に影響を与えないから、境界が十分に離れていさえすれば固定でも単純支持でもかまわないが、この解析では固定条件を与えた。

この鋼床版構造を折板理論で解析するときは、図1で示したように、床版とリブ、主桁ウェブ、下フランジなどの接合部やリブの隅角部が分割位置になるとともに、図5の床版上で ∇ で示すように車輪荷重分布の端の位置でも分割されることになるので、解析時の全体のマトリックスの大きさは①の場合では 68×68 、②の場合では 100×100 である。

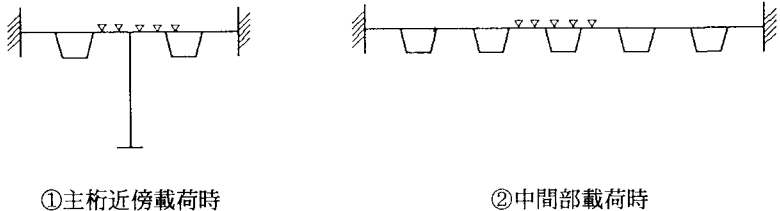


図5. 解析した鋼床版断面と板要素分割位置

(2) 床版に生じる局所曲げモーメント

折板理論解析により各々の板要素について種々の応力と変形が得られるが、その解析結果のうちで鋼床版の局所応力として曲げモーメントに注目する。複輪荷重作用時に荷重作用位置近傍の床版には、幅員方向の

曲げモーメント M_x と橋軸方向の曲げモーメント M_y を生じるが、一般にその分布形状はほぼ似ており、値の大きさは $M_x > M_y$ である。(両方向の曲げモーメントの大きさを比べると主桁上の位置における値では、この解析の場合 M_y は M_x の約30%であった。)したがって M_x に注目し、その一般的な幅員方向の分布状態を示すと図6のようである。

床版の幅員方向の局所曲げは、車輪荷重と主桁またはリブ位置との相対的な位置関係によって大きさが変わるが、正の曲げ、負の曲げともに、複輪荷重がその主桁またはリブ接合部を挟むように載るときに最大となる⁷⁾。そのとき、 M_x の負の最大値は荷重に挟まれた主桁の位置またはリブの位置に生じ、 M_x の正の最大値は車輪荷重直下の位置(リブまたは主桁とリブの間)に生じる。

車輪荷重がスパン中央で主桁を挟むように作用するとき、図6のように、主桁上に生じる M_x の負の極値を M_{x0} 、主桁とリブの間で生じる正の極値を M_{xm} とする。いま、主桁とリブとの間隔 bo を150mmから450mmまで50mmきざみに変えて解析し、それぞれの場合の M_x 分布を求め、それらの極値 M_{x0} 、 M_{xm} をグラフに表すと図7のようになる。これより次のことが明らかである。

1) $bo=150\text{mm}$ から450mmのいずれの場合においても、主桁上の位置に生じる負の局所曲げモーメントの極値 M_{x0} は、正の局所曲げモーメントの極値 M_{xm} よりも大きな値である。

2) M_{x0} の大きさは、間隔 bo が広がるにつれて大きな値となっていく。

またこれとは別に、図5②のような断面で車輪荷重が中間部に作用する場合について解

析した結果でも、リブ接合部に生じる負の M_x の極値の大きさは、リブ間に生じる M_x の正の極値より大きい値となった。

以上から、車輪荷重作用時の床版に生じる局所曲げについては、(1)2方向の曲げを比べると、橋軸方向よりも幅員方向の曲げが支配的であり、(2)その曲げが大きくなるのは、車輪荷重位置が主桁またはリブを複輪で挟むように載るときであって、(3)そのときに最大の曲げが複輪に挟まれた主桁上またはリブ上において生じ、それは負の曲げである、ということがわかる。

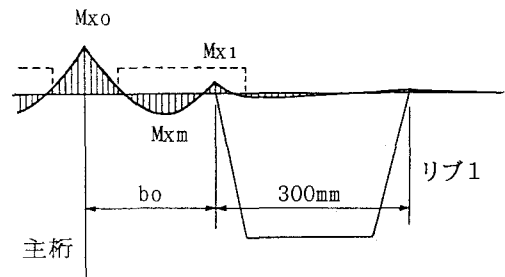


図6．主桁近傍載荷時の床版における M_x 分布

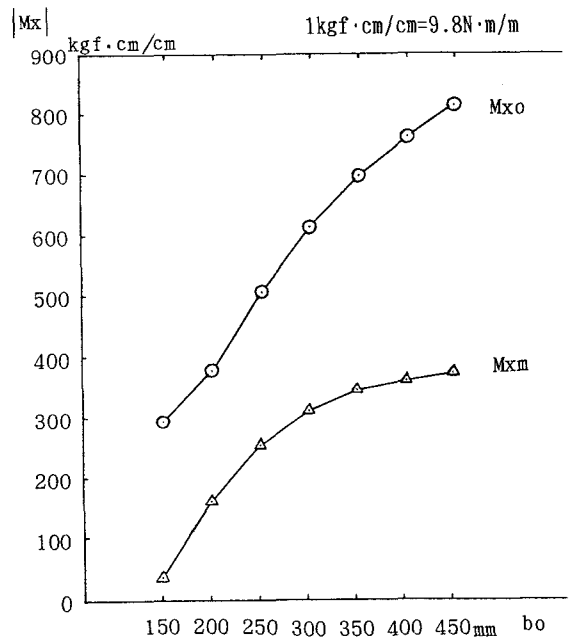


図7． M_x の極値と間隔 bo との関係

4. 走行荷重作用時の局所応力波形

車輪荷重が鋼床版上を橋軸方向に走り抜ける時の、床版の局所曲げモーメント M_x の変動を明らかにするために、車輪荷重位置を橋軸方向に動かして解析を行った。走行荷重の位置は図8のように、主桁近傍①と中間部②を考えて、ともに主桁またはリブを挟んで作用させ、橋軸方向に $L/16$ ずつ位置を変えて解析した。それぞれの場合について、①の場合は主桁上、②の場合はリブ上の負の曲げモーメントのスパン中央での極値 M_{xo} を求めて、橋軸方向の荷重位置 d を横軸として描いたグラフを図9に示す。

この図9は、走行する車輪荷重による M_{xo} の変動波形である。主桁を挟む荷重の場合①では、隣接するリブとの間隔 bo によって M_{xo} の値が変わるので、 $bo=150, 200, 250, 300\text{mm}$ の各々の場合について解析し、それぞれの変動波形を描いてある。中間部においてリブを挟む荷重の場合②では、リブは幅員方向に等間隔 $b=320\text{mm}$ (一定)の配置である。

この図9から、走行荷重による M_{xo} の変動波形の形状について次のような特徴があることがわかる。

- 1) 変動波形は中央においてピークを持つ bell shape wave の形状をしている。
- 2) ①の主桁を挟む荷重の場合、間隔 bo が広がるほど、bell shape の始めの裾の傾きが緩やかであるが、スパン中央に近づくにしたがってピークが鋭く立ち上がる形状となる。
- 3) ②の中間部でリブを挟む荷重の場合、bell shape の始めは下に向かい、その後で上方にピークを持つ形状になり、①の場合とは異なる波形である。

ここで①と②の波形の違いは、①の場合では主桁上の M_{xo} の変動は常に負の曲げの領域内にある(片振り)のに対して、②の場合ではリブ上の M_{xo} は、正の曲げと負の曲げの両領域にまたがる(両振り)変動であるということの意味している。(②の場合の両振りの変動の最小値と最大値との比(k)は、 $k=-0.1$

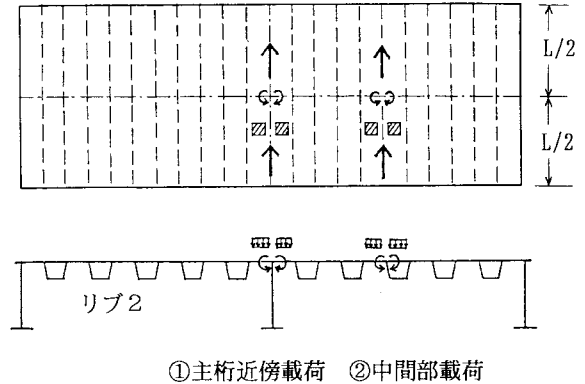


図8. 走行荷重の作用位置

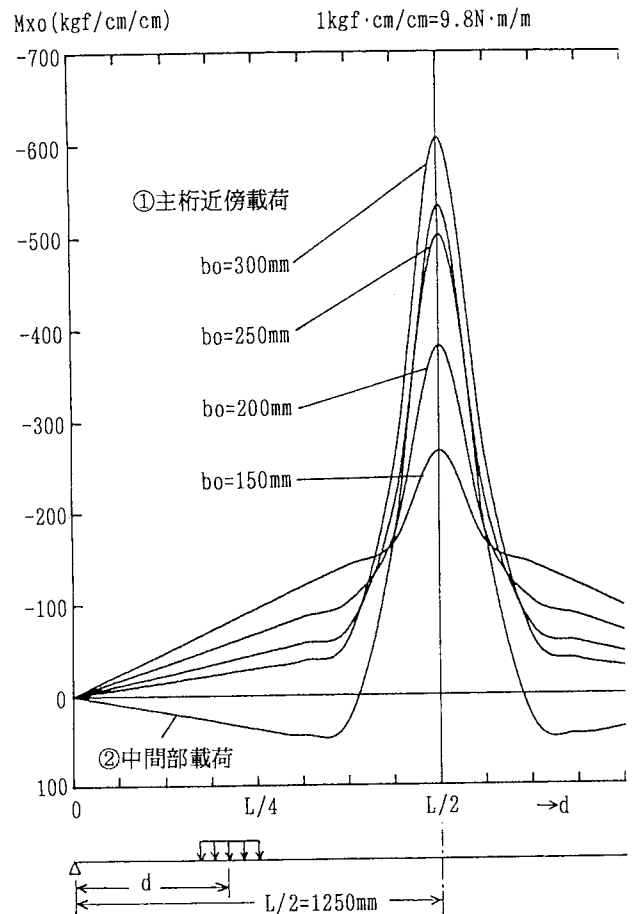


図9. 走行荷重による M_{xo} の波形：挟み荷重

程度である。)

この M_{x0} の両振り変動は、中間部のリブ上だけの特徴ではなく、①の载荷の場合について主桁に隣接するリブ上の M_x の極値 M_{x1} (図6)を解析し変動波形を描いたら、同じように両振り変動となった。したがって、走行車輪荷重による鋼床版の局所曲げモーメント M_{x0} の変動波形は、主桁上では片振りであるが、リブ上においては両振りの波形となるようである。

5. 応力波形に関する考察

(1) 主桁の剛性の影響

走行車輪荷重による M_{x0} の変動波形に及ぼす主桁の剛性の影響を調べるために、

- 1) 剛性を強めた場合：主桁の剛性 $=\infty$ とした場合
- 2) 剛性を弱めた場合：主桁のウェブ高を $1/2$ にした場合

の2ケースについて解析を行い検討したが、ともに M_{x0} のピーク値において1%程度の微少な変化があったに過ぎなかった。

(2) 幅員方向の荷重作用位置による影響

これまで M_{x0} が最大になる载荷条件を考えて、

①②の場合ともに主桁、リブを複輪が挟む状態で作用させて解析を行い、応力波形を図9のように求めたが、複輪が挟まない状態(主桁上やリブ上に荷重が直接載る場合)についても解析を行い、 M_{x0} の変動波形を求めた。

荷重の作用位置は、図8の荷重位置を幅員方向に150mm移動させて、車輪荷重の一方が主桁上またはリブ上に直接作用する位置とした。(それらを①'②'とする)

このような主桁上、リブ上に直接車輪が載る状態で荷重が走り抜ける時の変動波形を解析結果をもとに描いたグラフを図10に示す。①'の場合では $b_0=300\text{mm}$ の時では、複輪の一方が主桁の上に乗るともう一方が隣接するリブ上に乗るので、その両方の M_{x0} の変動波形を描いた。②'の場合では一方の荷重が直接載っているリブの位置での M_{x0} の変動波形である。

図10を図9と比較すると、形状は同じようにbell shapeであり、ただピークが小さくなっているだけであることがわかる。また図9の場合と同じように、主桁上の M_{x0} の変動波形は片振り、リブ上の M_{x0} の変動波形は両振りであることも確認できる。

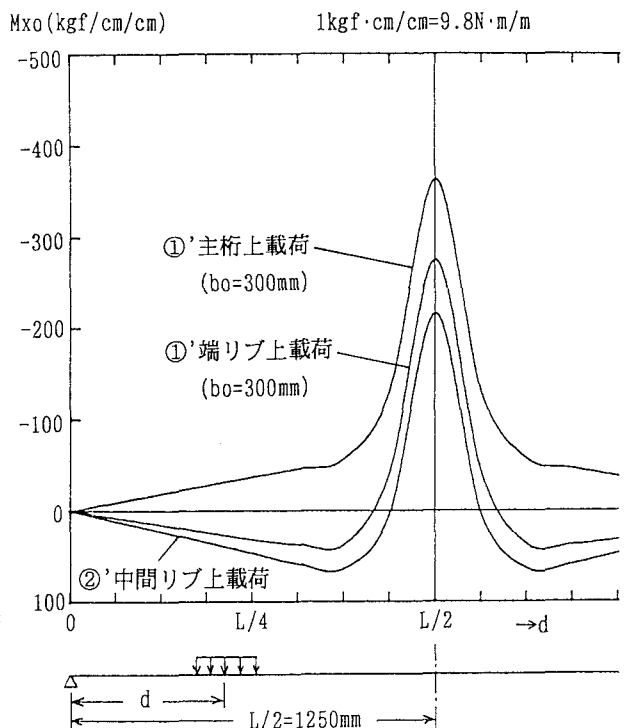


図10. 走行荷重による M_{x0} の波形
：主桁上またはリブ上载荷

すなわち車輪荷重が幅員方向に少し位置を変えたときは、主桁やリブを挟み込む場合より小さな応力値となるが、変動波形の形状の特性には変化がないことがわかる。

(3) 応力波形の分解

荷重作用時の鋼床版の幅員方向の曲げについて考えると、鋼床版の補剛の構造特性から、主桁と主桁との間の広い領域にわたる全体曲げと、リブ間隔範囲の領域での局所曲げに分けることができる。このような大きなうねりの全体曲げと細かい波の局所曲げを合成したものが実際の鋼床版の変形である。

さらにこの2種の曲げの応力波形を考えると、広い範囲にひろがる全体曲げの応力波形の形状はスパン全域にわたるのに対して、狭い領域に生じる局所曲げの応力波形の形状は狭い範囲で強いピークを持つことになる。

このときの床版の幅員方向の曲げの向きについて考えると、全体曲げにおいては、負の曲げが生じるのは剛性の大きな主桁上のみで、他の領域の剛性の小さなリブ上などでは正の曲げが生じる。それに対して局所曲げでは、主桁上やリブ上においては、同じような強い負の曲げが生じる。したがって、主桁上では全体曲げと局所曲げの合成はともに負の曲げの和になるのに対して、リブ上では全体曲げが正、局所曲げが負と逆の曲げとなりその合成は差引計算となる。

以上の考察から、図9と図10における bell shape の応力波形を、2つの波形に分解して考えてみることができるように思われる。たとえば、図11に示すように三角波形とピーク波形の2つに分解してみると、これから、三角波が負の場合と正の場合のそれぞれによって片振り波形と両振り波形の違いとなることがわかる。このようなことから、局所曲げモーメント M_{xo} の変動波形の片振りと両振りの違いは、構造的には、主桁の剛性とリブの剛性の強さの違いに因るものと考えられる。

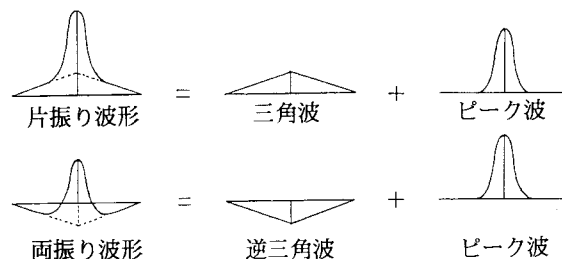


図11．応力波形の分解

6. まとめ

折板理論を用いて鋼床版構造を解析し、床版に生じる局所曲げについて次のことを明らかにした。

- 1) 鋼床版では橋軸方向よりも幅員方向の曲げが支配的である。
- 2) その曲げが大きくなるのは主桁またはリブを複輪荷重が挟むように載るときである。
- 3) そのとき挟まれた主桁上またはリブ上において最大で負の曲げが生じる。

また走行荷重作用時の局所応力波形について解析し次のことを示した。

- 4) 変動波形は bell shape wave の形状をしている。
- 5) 主桁上では、bell shape の形状は主桁とリブの間隔 b_0 によるが、波形は片振りである。
- 6) リブ上では、bell shape の波形は両振りである。

さらに応力波形に関する検討、考察を行い次のことを明らかにした。

- 7) 主桁の剛性の影響は微小である。
- 8) 車輪荷重が幅員方向に位置を変えたときは、主桁やリブを挟む場合よりは、小さな応力値となるが変動波形の形状の特性は変わらない。
- 9) 応力波形の片振りと両振りの違いは、鋼床版の幅員方向の曲げを全体曲げと局所曲げに分けることによって説明でき、構造的には、主桁とリブの剛性の強さの違いに因るものと考えられる。

参考文献

- 1) 直交異方性鋼床版橋設計便覧，土木研究所資料，399，1968.7
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 芳村仁・荏澤憲吉：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
- 5) 福井幸夫・沢井広之：鋼床版の変形特性に関する調査，橋梁と基礎，78-6，1978.6
- 6) 日本鋼構造協会規格 JSS：鋼床版用U形鋼 II 08-1983
- 7) 荏澤憲吉・芳村仁：鋼床版舗装の局所曲げと内部応力，構造工学論文集，Vol.33A，1987.3

(1991年9月30日受付)