

I-10 舗装された鋼床版についての力学的考察

北海道大学工学部 正会員 ○ 荻澤孝吉

北海道大学工学部 正会員 茅沢 仁

1. まえがき

橋梁の床版には大別して、鉄筋コンクリート床版と鋼床版の2種類があるが、近年の橋梁の長大化に伴って、比較的軽量であることなどの理由から鋼床版が使用されることが多くなっている。特に本州四国連絡橋における吊橋などの長大橋梁では死荷重を軽減するために鋼床版を採用することにしてゐる。

鋼床版はデッキプレートである平坦な鋼板の下面(裏面)に橋軸方向に配置される縦リブおよびそれと直角方向に横リブを取りつけて橋剛された版であり、一般に縦リブと横リブは異なった断面形状と支間をもっている。特に縦リブにおいては、開断面リブと閉断面リブに分けられるが、ねじり抵抗が大きく荷重分配性が良く、閉断面版であるので防食上好ましく、また取付け溶接長が短くてすむなどの利点から、逆台形断面の開リブを使用する施工例が多い。

また、鋼床版の上面には、鋼床版の保護と通行車両に快適な走行性を提供する舗装が施される。この舗装とデッキプレートとは十分な付着をもつように設計施工されるので、舗装は鋼床版と一体となって変形する挙動を示す。よって実際の鋼床版の変形を考える際には舗装の影響を無視するわけにはいかず、舗装された鋼床版に発生する応力は未舗装の鋼床版の応力に比べてかなり小さな値を示し^{*}、たわみ量、変形形状なども著しく異なったものとなる。したがって鋼床版の挙動は、鋼の弾性力学とともに舗装体の力学をも組み込んだ形でとらえなければならぬ。

ところで、舗装体は一般にアスファルト混合物であり、その性質は粘弾性体である。そこで力学的な性状を、外的刺激に対する反応(レスポンス)としてとらえる必要がある。ゆえにアスファルト混合物では、

³³⁾ * S. A. H. Morris の実験のある結果によれば、動的載荷時の応力は、未舗装版の静的載荷時の応力の $1/10$ であった。

応力とひずみの関係においても、弾性係数などと呼ばれるような物質定数としてではなく、温度と時間の関数として表わされる係数(複素弾性率、スティフネス、変形係数)で関係づけることになる。また、アスファルト混合物の破壊には種々の型があり、鋼のように許容応力などの考え方を適用するわけにはいかない。

走行車両による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2つの立場がある。ひとつは、外力を動的に与えることであり、実験に適す方法である。ただし解析的には入力動的に入れる場合、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力の動的速度が変化することに対応させる)ことである。ここにおいて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。著者らは後者の立場に立って、これまで舗装された鋼床版上に走行する車両荷重によってアスファルト舗装体に生じる引張りひずみ³⁾、鋼床版内部の応力⁴⁾、および連続鋼床版の主桁近傍のひずみと応力⁵⁾について明らかにしてきたわけであるが、今回の報告においては、これまでの研究をもとに舗装された鋼床版の力学的な挙動について、アスファルト混合物の力学、鋼床版の構造特性を含めて全体的に考察しようとするものである。

2. アスファルト混合物の力学的性状

2.1 影響因子 アスファルト混合物は著しく複雑な性状をもつとされているが、その性状に影響を及ぼす因子として荻原らは(a)環境(b)構成材料(c)配合(d)施工にそれぞれ関するものというように分類している⁶⁾。このうち特に環境に関するものは、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となるものである。

2.2 変形係数 アスファルト混合物のような粘弾性体に振幅 G_0 、角波数 ω の正弦的に変化する応力を加えると、物体のひずみは δ だけ位相のおくれた正弦的变化を示し、それらは、

$G(t) = G_0 \sin \omega t$, $E(t) = E_0 \sin(\omega t - \delta)$, $\omega = 2\pi f$ と表わされる。ここで応力の最大値とひずみの最大値の比として複素弾性率 E^* が定義される。⁷⁾ また一方、van der Poel はアスファルト混合物の応力とひずみの関係を時間および温度の関数としてスティフネスという概念を導入した。それは次のように表わされる。

$S(t, T) = G/E$
この複素弾性率もスティフネスも広い意味で同じことなので、以後は変形係数という言葉を用いる。ここで変形係数とは（短時間および恒温領域では弾性係数となるが）単に応力とひずみの比と考えてよい。

この変形係数の大きさは内的因子としてアスファルト混合物の型、バインダー量などにも影響されるが、⁸⁾ ふう外的因子として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。⁹⁾ 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、ふう-15°C~60°C（最高気温+20°C）の範囲である。¹⁰⁾ 一方、載荷時間（ひずみ速度としてもとらえられる）は車両走行10~100 km/h に対して0.1~0.01秒であるといわれている。¹¹⁾ 変形係数の変動を示す例として、笠原らの実験結果をもとにして、温度をパラメータとした変形係数と車両走行速度の関係を図-1に示す。

ところで変形係数の具体的な値については現場実験¹²⁾ などもあるが、笠原らは種々の実験的研究によってアスファルト混合物の力学的性状について時間・温度換

算法則が適用可能であることを明らかにし、¹³⁾ 舗装体の温度と車両走行速度より載荷時間が知られるならば、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¹⁴⁾ として、その方法を提案している。

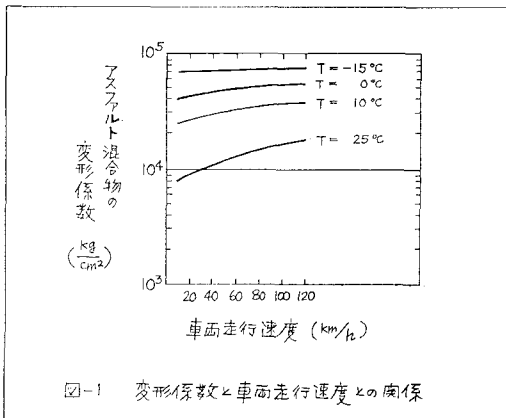
この方法を用いれば、鋼床版の解析をする際に必要な舗装の変形係数の変動領域を限定できることになる。

2.3 ポアソン比 アスファルト混合物の変形係数とならんで電磁波解析に必要とされるポアソン比については、G. Sayeghの研究がある。その振動実験によれば、 ν の大きさは0.1（高周波数、低温、小変形）から0.5（低周波数、高温、大变形）の範囲であると³⁾ いわれる。しかし、著者らの鋼床版構造の解析結果によるとポアソン比の数値的な変動は、構造全体の変形挙動にあまり影響を与えない。

3. アスファルト混合物の破壊

3.1 舗装のひびわれ 鋼床版上の橋面舗装にひびわれが発生すると浸入する水分がデブリフロートを腐食させるので、舗装そのものの不透水性とともにひびわれ防止は鋼床版の設計上重要な留意事項である。このひびわれを観察すると多くの場合、継リブと平行に発生し、その間隔はリブ間隔にほぼ等しく、¹⁵⁾ また最もひどいクラックは継ぎ目上で起っている。¹⁶⁾ また土研の試験舗装でも継リブ上にひびわれの発生が認められている。¹⁷⁾ 菅原によれば、実際の舗装に生じているきれつは多くの場合曲げ作用によって常温以下ではやはりひずみ速度で生じている²⁾ といわれる。このひびわれの問題を検討するには、舗装体の内部の応力およびひずみの解析とともにアスファルト混合物の破壊性状も考えなくてはならない。

3.2 破壊現象と破壊の型¹⁸⁾ アスファルト混合物の破壊現象は著者らの分類によれば、a. 大荷重が一回作用しただけで舗装が破壊する現象（曲げ）b. 車の加減速時に生ずるせん断力に基づく舗装の表層の水平方向へのずれまたはきれつ（せん断または引張）c. 外気温が急激に低下するとき舗装内部に生ずる温度応力により舗装が破壊する現象（引張）d. 舗装に長時間外力が加わり舗装が大きく変形してきれつを生じる現象（曲げクリープ）、の4種類であるといわれる。また、破壊の型（モード）は3つのタイプに分けられて、



2) きわめて小さな破壊ひずみしか示さない、せいぜい破壊領域での破壊(タイプI)

b) 強さが極大値をみせ、応力・ひずみ曲線で降伏現象らしきものがみられる転移領域における破壊(タイプII)

c) 流動を伴い、比較的大きな破壊ひずみと示す、流動を伴う破壊領域での破壊(タイプIII)^{18) 19)}

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寄与しているといわれ、繰返し載荷によってその力学的性状の変化として変形係数の低下が認められ、疲労により破壊強度は低下し、破断にいたるひずみ量も低下する²⁾ということも、鋼床版の舗装のひびわれを検討するとき考慮しなくてはならない。

3.3 破壊時の応力とひずみ アスファルト混合物の数多くの曲げ試験、引張試験、圧縮試験の結果から、森吉らは破壊の概念図として図-2を得た。¹⁸⁾これらの3つの曲線は、ひずみ速度およびバインダー性状の変化に伴って温度軸に平行に左右に移動するが、その形状に変化なく、移動量は各曲線とも同じで完全に対応関係にあるといわれる。

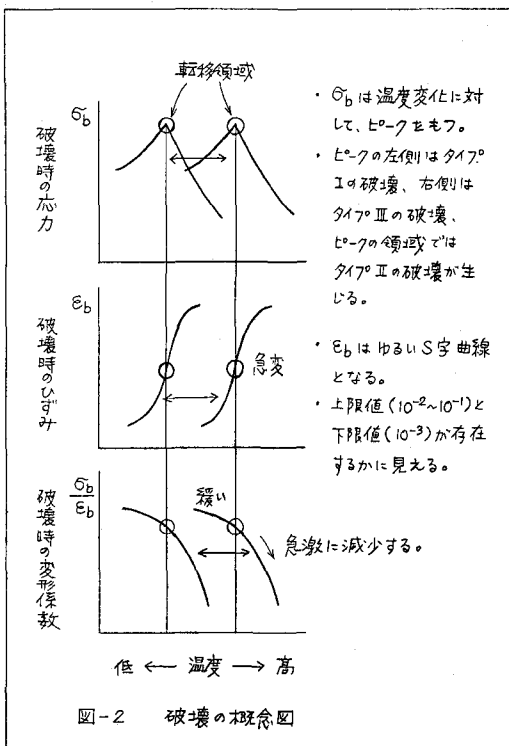


図-2 破壊の概念図

さらに上島らの研究²⁰⁾によれば、曲げ強度～破壊時のひずみの関係を表わす曲線の形は、ひずみ速度が変化しても、混合物の配合やバインダー性状が同一なら変化せず、ある破壊ひずみのとき曲げ強度は極大値を有することが認められる。その一例を図-3に示す。

4. 自動車荷重

鋼床版構造に発生する応力、ひずみを解析する際には作用外力としての自動車荷重を正確に評価することも重要である。一般に自動車荷重としては道路橋示才書の設計用の²¹⁾荷重を用いることが多いが、鋼床版の局所応力解析には不適当であり、できるだけ実際の輪荷重に近い接地面積と車輪間隔をもつ荷重を作用させる必要がある。輪荷重と接地面積についての秋山の研究²²⁾、JISの自動車用タイヤの規格、および実際の大型トラックと大型バスの構造を調査(総数46型式)²⁴⁾した結果、図-4に示すような自動車荷重を考えれば現状に近いことがわかった。

また、それと床版の解析に用いる際には荷重の分散効果は考慮しない方がよいと思われる。^{25) 26)}

5. 鋼床版の解析

鋼床版の解析理論には、直交異方性板理論、格子析理論、有限帯板解析理論(FSM)、折板理論などがよく知られている。このうち直交異方性板理論に基づくPelikan-Eplingerの方法による設計便宜および実用設計法が²⁷⁾土研より発表されており、設計に用いられている。しかし、この方法と格子析理論は鋼床版の局所的な変形挙動の解析に適しているとは言い難い。FSMは半解析的有限要素法の一つと考えられるものであり、また折板理論は構造主要素の集まりとして取扱うも

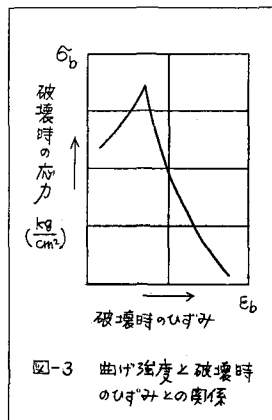


図-3 曲げ強度と破壊時のひずみとの関係

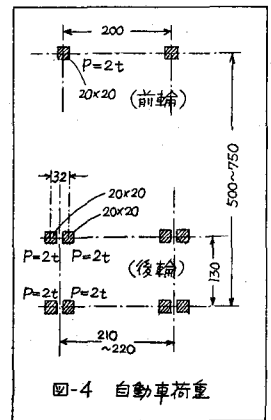


図-4 自動車荷重

のであって、その中でも板要素の変位と短軸方向に簡単な分布関数で近似する方法と弾性理論の厳密解を用いる方法に分けられる。著者らは後者の厳密な板理論を適用して、鋼床版の局所応力およびひずみが良好に求められることを明らかにしてきた。

鋼床版の現実の変形挙動は、アスファルト舗装体の力学的性状によって影響をうけるものであるから、舗装を無視した解析は実状と異なった結果となることに留意する必要がある。著者らはそこでアスファルト舗装体の力学的性状が変形係数で表わされるものと考え、デッキフロートの板要素を舗装と鋼の二層板として解析する方法により、舗装の力学を鋼床版の解析に組み込んだ³⁾。一オ、福井らはFSMを応用することにより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。

6. 舗装が鋼床版の挙動に与える影響

アスファルト舗装の変形係数が決まると鋼床版の変形や応力を解析することができる。図-5は通常の車面走行速度と温度の範囲内での変形係数のいろいろな値について、鋼床版のたわみ変形を計算したものである。舗装を無視した場合のたわみと著しく異なることが明らかで、変形係数の上昇に伴ってたわみ変形は減少する。また輪荷重近傍の様々な位置での応力の大きさは、変形係数の上昇に伴って急激に小さな値となることもわかっている(文献4)の図5参照)。一般に舗装があるときは、舗装のない場合の解析結果に比べて、応力と変形ともに減少する傾向を示す。

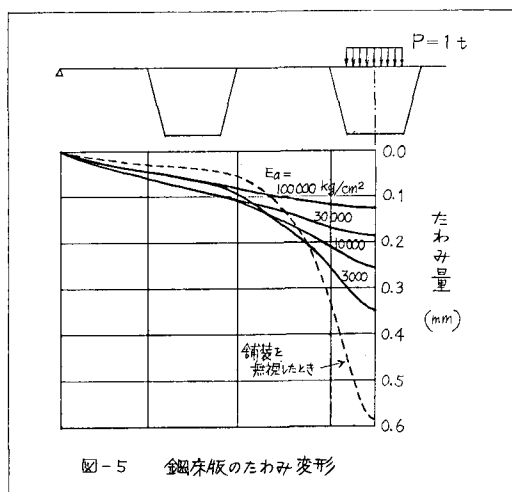


図-5 鋼床版のたわみ変形

7. 鋼床版舗装の破壊

7.1 舗装体のひずみ 鋼床版に車輪荷重が作用すると荷重位置近傍の縦リブ上の舗装体の表面に最大の引張りひずみが発生する³⁾。また連続鋼床版のときは中間縦主桁上の舗装体の表面にも引張りひずみが発生し、その大きさは縦リブ上のひずみ量より大きい。縦リブおよび中間縦主桁上の舗装の引張りひずみ量は、いずれも変形係数に著しく影響され、変形係数の下降に伴ってひずみ量は増大する傾向をもつ。

7.2 舗装とデッキフロートとの付着 舗装は鋼床版との間に十分な付着をもつように施工されるが、この付着が不十分であるとその間で滑りが起り、舗装の破壊が促進されることになろう。舗装とデッキフロートの間のせん断応力を解析した結果、最大2.5 kg/cm²(輪荷重1tあたり)のせん断応力が縦リブ上で生じることがわかった⁴⁾。

7.3 ひずみ波形 舗装体のある一点を想定し、その点の真上を走行する車輪によって生じる応力またはひずみは層構造解析により近似的なある波形をもつことが明らかにされており、それはBell Shaped Waveとなる¹¹⁾。ということが一般道路舗装の分野でいわれている。鋼床版の場合については、Price, Morris³²⁾の実験により鋼床版の応力において輪荷重通過時にピークが発生することが認められ、森らの実験³⁴⁾でも舗装のないときでも同様な結果が得られている。著者らは舗装された鋼床版の上を車輪荷重が通過する場合を想定して、輪荷重の作用位置を変えることにより、アスファルト舗装内部のひずみとデッキフロートの応力についてそれぞれ影響を調べたところ、それらがきれいなBell Shaped Waveを描くことを解析的に明らかにした^{3) 4)}。

解析的研究ではアスファルト混合物の応力とひずみの応答の位相おくれの項を入れることは難しいが、並原らの最近の実験的研究⁶⁾によれば、Bell Shaped Waveのひずみを混合物に与えることより得られる応力の応答波形は軸対称とはならず、また応力の最大値は時間とともに応力緩和によって小さくなる傾向を示すといわれる。

7.4 舗装の破壊 車輪荷重の通過により鋼床版の舗装は、圧縮領域から引張領域にまたがるBell Shaped Waveの応力またはひずみ波形をうけるが、その最大値

などは解析的に得られることになる。菅原によれば、²⁾破壊時のひずみのレベルは、脆性破壊、延性破壊、せん断性破壊、疲労破壊に対してそれぞれ、 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} 、 10^{-4} であって、耐久限度のひずみは 10^{-5} 以下であるといわれるから、これによって舗装体の破壊についての一応の判断はできよう。

さらに菅原⁶⁾は、アスファルト混合物の破壊特性は環境条件（温度およびひずみ速度）に非常に敏感なので、破壊に対する安全性の確認には他の土木材料のように強さまたは許容ひずみのみを用いることはできず、常に応力とひずみの双方を取り入れなければならないとして、具体的には、ひずみの最大値と応力の最大値を図-3 のような応力-ひずみ面にプロットしてその座標点が破壊包絡線の内側に位置するかどうかによって、破壊に対する安全性を検討できるのではないかと考えている。

7.5 鋼床版の構造 アスファルト舗装をひびわれなどの破壊から避けるためには、舗装体に大きなひずみや応力を生じさせないように、鋼床版の構造設計の面で配慮する必要がある。局所的な曲げ変形をおさえるために、中間継主桁と隣合う継リブとの間隔を狭くすることや、車輪荷重が中間継主桁近傍に載ることを避けるために、継主桁上に分離帯やレーンマークを設けることも一つの対策であろう。³¹⁾ また床版を主桁より外側に張出す場合、その張出し部に車輪荷重が作用しないように張出し長さを決めた方がよいと思われる。さらに、一般に施工される継リブ間隔と車面の複輪の間隔がほぼ等しい値（約32cm）となっていることも、局所変形を大きくしている原因の一つかもしれない。曲げ変形を一定にして舗装の厚さを小さくすると引張ひずみの値は小さくなるが、舗装厚の減少が剛性の低下をもたらす変形を大きくすることになるので、その効果は簡単に論じられない。また、デッキプレートとの板厚を12mmから14mmと厚くする程度では舗装に生じるひずみ量はあまり変化しないことがわかった。また舗装と鋼床版の間には、発生するせん断応力に抵抗できるだけの強度をもつ接着が必要である。

8. 鋼床版舗装の破壊に対する安全性の検討

鋼床版の舗装について、破壊に対する安全性を検討するには次のような手順によればよいと思われる。

(1) 舗装体の温度と、作用する車両の走行速度から載荷時間を推定する。

(2) マスターカーブを用いて温度と載荷時間から変形係数を求める。

(3) 舗装を、求めた変形係数をもつ弾性体と考えて鋼床版構造解析から、舗装内部の応力とひずみを求める。

(4) 応力-ひずみ面にプロットした座標点から破壊に対する安全性を検討する。

また、外力が不規則である場合ではどこにおける載荷時間を明確にすることは非常に困難であるので、そのときには、不規則波をフーリエ級数で正弦波に分解して各項の波形に対する応答を計算してから合成する方法⁶⁾も提案されているが、自動車荷重の場合などは上記の手順で十分であると思われる。

9. まとめ

アスファルト舗装された鋼床版構造の、走行車輪荷重の下での力学的挙動の解析については、一般の鋼構造の解析と異なり、鋼の弾性力学とアスファルト混合物の非弾性力学の双方を考えに入れなくてはならないことから、本報告ではアスファルト混合物の力学的性状について考慮し、橋面舗装のひびわれ現象の理解のためにアスファルト混合物の破壊について概括した。これより力学的性状は変形係数で表わされることが明らかである。

さらに作用外力としての自動車荷重の考え方を示し、また鋼床版構造解析手法についても概括した。

解析結果として舗装体の力学的性状が鋼床版の挙動に与える影響を示し考慮し、また舗装そのものが受けるひずみなどについても考慮した。

その結果、鋼床版の設計上留意すべき事項について述べ、最後に舗装の破壊に対する安全性について検討する解析手順を示した。

従来、鋼床版の解析および設計においては、鋼床版そのもののリブの形状、板厚および配置などの構造的な面に主眼がおかれ、舗装を軽視する傾向がなかった。一方、アスファルト混合物の材料力学分野の研究も複雑な土木構造物の構造的なメカニズムの中を通りぬけた応答を得ることにについては不得手とする面があった。今回の報告は舗装された鋼床版に関して両者の研究成果を結びつけて論じたものである。

これと同様、アスファルト混合物が構造物に付着している場合の解析・設計については、構造解析の専門家と材料学の専門家の共同研究または協力が、今後ますます必要となるものと思われる。

(参考文献)

- 1) 渡辺昇・大島久：鋼板版設計事例の全国調査と鋼板版の経済設計，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，第207号，P.73-81，1972.11.
- 3) 荏澤憲吉・芳村仁：鋪設体と考慮した閉ルツ鋼板版の局所応力について，土木学会北海道支部論文報告集，第33号，P.21-26，1977.2.
- 4) 荏澤憲吉・芳村仁・畠田大造：鋪設された鋼板版構造の局所応力について，土木学会第32回年次学術講演会講演概要集 I-40，1977.10.
- 5) 荏澤憲吉・芳村仁：鋪設された連続鋼板版の局所応力とひずみについて，土木学会第33回年次学術講演会講演概要集 I-70，1978.9.
- 6) 金原篤・菅原照雄：不規則なひずみ波形状を有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，第277号，1978.9.
- 7) 金原篤・上島正・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弾性率，土木学会論文報告集，第208号，1972.12.
- 8) 金原篤・菅原照雄：繰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，第235号，1975.3.
- 9) 坂倉忠三・中島昭雄・平野英作：ク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，P.393-395，1963.12.
- 10) 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，P.366-370，1963.
- 11) 金原篤・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鋪設構造の力学解析への利用，土木学会論文報告集，第254号，1976.10.
- 12) Vaswani, N.K.: Determining Moduli of Materials from Deflections, Proc. of ASCE, Vol.103, TE1, P.125-141, 1977.1.
- 13) 金原篤・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，第215号，P.75-83，1973.7.
- 14) Sayegh, G.: Viscoelastic Properties of Bituminous Mixtures, 2nd International Conf. on the St. Design of Art. Pavement, 1967.
- 15) Thul, H. and F.K. Reinitzhuber: Introductory report of Asphaltic Wearing Surfaces, IABSE, final report, 1968.
- 16) Fondriest, F.F.: American Experiences with Thick Pavements on Orthotropic Steel Bridges, IABSE, final report, 1968.
- 17) 窪田昭夫・小島逸平・加藤朝雄：橋面薄層鋪設に関する長浦試験鋪設，土木技術資料 20-7，P.44-49，1978.
- 18) 森吉昭博・上島正・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，第210号，P.57-64，1973.2.
- 19) 菅原照雄・上島正・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メカニズム，土木学会論文報告集，第234号，1975.2.
- 20) 上島正・森吉昭博・菅原照雄：アスファルト混合物の破壊時のひずみに関する研究，土木学会論文報告集，第221号，1974.1.
- 21) 道路橋示才書，日本道路協会，1972.3.
- 22) 秋山政敏：軸荷重と接地圧，接地半径の関係，土木学会論文報告集，第243号，P.81-90，1975.11.
- 23) 日本工業規格，JIS D 4202，自動車用タイヤの表示
- 24) モータファン，臨時増刊号，P.249-263，1975.4.
- 25) 岡田恵一郎・堀川邦彦雄：道路橋梁版の軸荷重直下の応力分布について，土木学会論文報告集，第273号，P.15-22，1978.5.
- 26) 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，I-127，1975.10.
- 27) 直支晃才性鋼板版設計便覧，土木研究所資料，第399号，1968.7.
- 28) 直支晃才性片理理論による鋼板版使用設計法，土木研究所報告，137号の1，1969.8. および同補遺，690号，1971.7.
- 29) 吉津泰行・大村裕：Finite Strip Method による鋼板版の解析，橋梁と基礎，78-11，P.26-29，1978.11. など
- 30) 大島久・能町純雄：析板構造解析による閉ルツ鋼板版の導性導熱の研究，土木学会論文報告集，第278号，1978.10. など
- 31) 橋本幸夫・沢村右之：鋼板版の変形特性に関する調査—橋面鋪装からみた鋼板版構造—，橋梁と基礎，78-6，P.21-29，1978.6.
- 32) Price, W.I.J.: Some thin Pavements in Great Britain, IABSE, final report, 1968.
- 33) Morris, S.A.H.: Stresses under dynamic wheel loading in a surfaced steel orthotropic deck ..., TRRL report 237
- 34) 森国夫・渡辺信夫・中村公信：走行荷重による鋼板版橋の動的挙動について，土木学会第30回年次学術講演会，I-257，1975.10
- 35) 森吉昭博・菅原照雄：流動半導体領域におけるアスファルト混合物のメカニズム破壊挙動について，土木学会論文報告集，第279号

この報告のとりまとめに際して、本学の道路工学研究室で得られた研究成果を使用させていただいた。計算は北大の大型計算機センターの FACOM 230-75 を使用した。