

水平力および鉛直力を受ける全周固定積層板の界面応力に関する数値解法について

On numerical method for interfacial stresses of multi layered plate with all clamped edges under various surface tractions

横山広^{*1}, 関口幹夫^{*2}, 堀川都志雄^{*3}
Hiroshi Yokoyama, Mikio Sekiguchi, Toshio Horikawa

^{*1} ショーボンド建設株式会社 中部支社 (〒920-0362, 石川県金沢市古府 1-140)

^{*2} 東京都土木技術センター 技術調査課 (〒136-0075, 東京都江東区新砂 1-9-15)

^{*3} 工博, 大阪工業大学 都市デザイン工学科 (〒535-0002, 大阪市旭区大宮 5-16-1)

It is thought likely that bridge decks supported by high-stiffness girders as in bridges with a small number of girders and concrete box girder bridges, which have increased in recent years, are in a state close to the state of a fully constrained plate. The authors developed a calculation method for obtaining three-dimensional solutions for stress and displacement and verified that the calculation method is sufficiently accurate. By using the calculation method, this paper focuses on interfacial stresses such as bond shear stress that occurs when a braking load acts on a laminated plate consisting of pavement, concrete and a steel bottom plate. The purpose of this study is to determine the performance requirements for waterproof layers that are essential for ensuring a long life of road bridge decks and contribute to the enhancement of the durability of bridge structures that are an important part of infrastructure.

Key words: slab deck of road bridge, all clamped edges, waterproof layer, multi layered plate

1. はじめに

近年, コスト縮減に対する要求の高まりを背景に少数主桁橋梁などの新しい橋りょう形式が出現し, その施工実績を伸ばしている. また, プレストレストコンクリート (以下, PC と称す) 構造の長大橋りょうでは箱桁形式が採用されることが多く, 複雑な線形を有する橋りょうも建設されている. それらの剛性の高い主桁に支持される床版は, その支持辺の境界条件は固定条件に近いものと推察される. 一方, 少数主桁に対応して疲労耐久性を向上させた構造として鋼・コンクリート合成床版の形式が数多く提供されており, PC 床版と同等の性能を有することから採用される事例も多い. 一般に道路橋床版には舗装が敷設されるので, その断面構成は積層板として処理する必要がある.

筆者らは従来より 3 次元弾性論による厚板理論を用いて変形や応力の厳密解を求め, 活荷重に対応する最適な床版厚さの検討を実施してきている¹⁾. ただしそれらは単純支持辺や, 厚板理論を拡張した混合法を用いた連続支持辺を有する積層板を対象としており, 前述の固定辺を有する床版では, 厚板理論の境界条件の適用範囲の限界から解析が困難な状況であった. そこで新たに固定辺を有する床版の解析手法を提案し, 古典解との比較でその有効性を確認した²⁾. その手法は単純支持桁の近傍に剛性の大きなダミー桁を配置することで擬似的に固定条件に近い状態を生み出す手法である. この方法によれば桁近傍を除けば 3 次元解の性質を保持しているため, 舗装を含めた積層板としての厳密解が得られることになり, 活荷重による初期ひび

割れの発生に関する問題や積層板各層のずれせん断応力の解析に威力を発揮することになる. 最近のパーソナルコンピュータの処理能力の高まりから, 有限要素法による解析の適用事例が増加している. しかしながら有限要素法では異種材料の接触界面のような局所的な応力計算には適用の限界があり, 全ての現象に関して万能であるかのような扱いは危険となる. よって解析対象や条件をよく吟味して適当な解析手法を選択することが重要となる.

維持管理に関しては, 高度成長時代に数多く建設されたストックを有効活用し将来にわたって供用するものとして点検・補修の必要性が叫ばれており, その中で重要視され始めているのが床版上面の防水層である. 昭和 40 年代に頻発した道路橋床版の陥没損傷が, 輪荷重走行試験によって広義の疲労損傷であることが解明され, その後の研究で疲労に対して水の影響が大きいということも明らかにされた. よって重交通を直接支持する床版の疲労耐久性を高めるためには, 防水層の存在が不可欠であり, 「床版+防水層+舗装」が三位一体となって輪荷重に抵抗する構造形式の研究も進められた³⁾. しかしながら, 防水層に関しての解析や評価手法は未だ確立されていないのが実情で, 高い防水性や遮塩性のような材料的必要性能の他に, アスファルト舗装を考慮した付着性能を明らかにする必要がある.

そこで本研究では, 固定辺を有する舗装とコンクリートからなる積層板の輪荷重近傍の応力状態を, 開発した 3 次元弾性論に基づく厚板理論を適用して, 防水層の付着に関する必要性能を検討する. 荷重条件としては鉛直荷重だけではなく, 接着界面に対して厳しい

条件となる制動荷重を想定した水平力も加味する．制動荷重を作用させる場合の縦すべり摩擦係数は、筆者らの既往の研究を基に設定するものとする⁴⁾．本研究で得られる界面応力値を防水層の必要性能として設定することは道路橋床版の疲労耐久性向上に寄与するものであり、既設・新設を問わず次世代に引き継ぐ社会資本ストックの延命化に寄与するものと考えている．

2. 解析手法と計算モデル

2.1 解析手法

厳密解を得るための3次元弾性論による厚板理論は Galerkin-vector f_3 と Boussinesq の変位関数 θ_3 から誘導される．変位関数の基礎式と、変位関数と各変位 u , v , w との関係式は次のように表される．

$$\Delta\Delta f_3 = 0, \quad \Delta\theta_3 = 0 \quad (1)$$

$$2\mu u = -\partial^2 f_3 / \partial x \partial z + \partial \theta_3 / \partial y,$$

$$2\mu v = -\partial^2 f_3 / \partial y \partial z - \partial \theta_3 / \partial x,$$

$$2\mu w = \mu / (\lambda + \mu) \partial^2 f_3 / \partial^2 z + (\lambda + 2\mu) / (\lambda + \mu) (\Delta - \partial^2 / \partial^2 z) f_3 \quad (2)$$

ここで、 λ , μ : ラメの常数,

Δ : 3次元ラプラスアン,

u , v , w : x , y , z 方向の変位,

変位関数を2重 Fourier 級数で展開すれば,

$$f_3 = \sum_m \sum_n (C_1 ch\gamma z + C_2 sh\gamma z + C_3 \gamma z ch\gamma z + C_4 \gamma z sh\gamma z) \sin \alpha_m x \sin \beta_n y' \\ \theta_3 = \sum_m \sum_n (C_5 ch\gamma z + C_6 sh\gamma z) \cos \alpha_m x \cos \beta_n y' \quad (3)$$

n 層からなる多層版に式(3)を適用する．版の全周を固定化する手法としては、図-1 に示すように相対する2辺の近傍に剛性の大きなダミー桁1と2を配置する．そして x 方向に調和解法を適用し、 $y = \eta_b^i$ ($i=1,2$) の位置でたわみが零となるように桁反力係数を決定する．次に桁3と桁4では選点法を用いて桁位置のたわみが零となるように反力値を決定し、全ての反力値を多層版に作用させて版内部でのたわみや曲げモーメントを計算すれば全周固定版における解が得られることになる．ここで選点法とは、任意の選点ブロックで変位が連続しているものとして伝達力を求め、それを接合している両面の表面力として作用させて厚板理論で解を求める手法である．

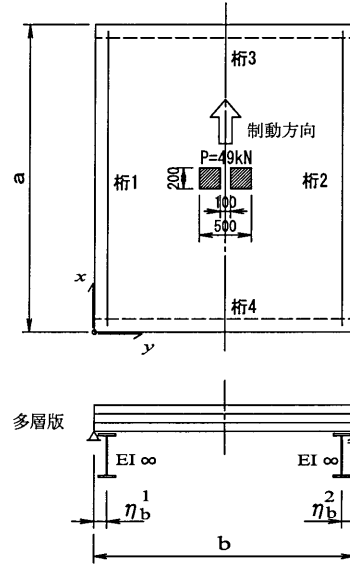


図-1 全周固定版とするためのモデル

表-1 モデルの物性値

種別	ヤング係数(N/mm ²)	ポアソン比
コンクリート	3.00×10^4	0.167
アスファルト舗装	2.00×10^3	0.4

2.2 作用させる水平荷重と計算モデル

筆者らの既往の研究では、道路橋床版の供用時に作用すると想定される水平荷重のうち遠心力と制動力とでは、制動力の方が舗装と床版の界面に与える影響が大きいことが判っている．制動力作用時の水平力はタイヤと路面の摩擦係数によって決定され、道路構造令ではその摩擦係数を縦すべり摩擦係数と定義している．一般的な乾燥路面での縦すべり摩擦係数は $\beta=0.8$ 程度と言われており、既往の研究における大型車の制動距離から得られる係数は計算で $\beta=0.5$ 程度であった．そこで本研究では、0.8 と 0.5 の2種類の縦すべり摩擦係数を用いて舗装と床版界面のずれせん断力による応力を評価する．なお、本研究ではそのずれによる応力を付着せん断応力と定義する．

解析を実施するモデルは図-1の辺長を $a=b=2.5\text{m}$ とし、床版厚さは $t_c=240\text{mm}$ でアスファルト舗装厚さは $t_p=75\text{mm}$ としており、表-1 に示す物性値を用いた．アスファルト舗装は温度によってヤング係数が変動することが知られているが、本研究では付着せん断応力に着目していることを念頭に置き、ヤング係数が大きくなる冬期を想定することとした．

3. 舗装と床版の界面の応力

3.1 制動荷重作用時

制動荷重を作用させる位置は版中央とその中央位置から x 軸方向に移動させた位置でも計算を行い、固定位置に近づいた場合の変化を確認する．図-2 は橋軸

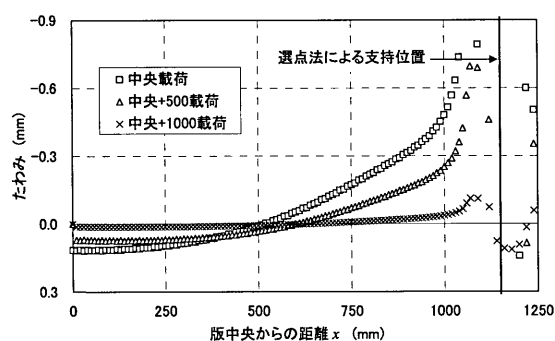
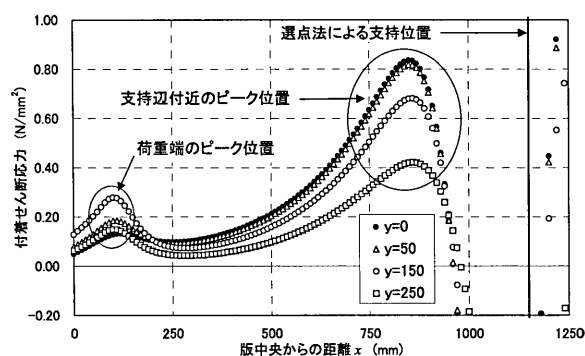


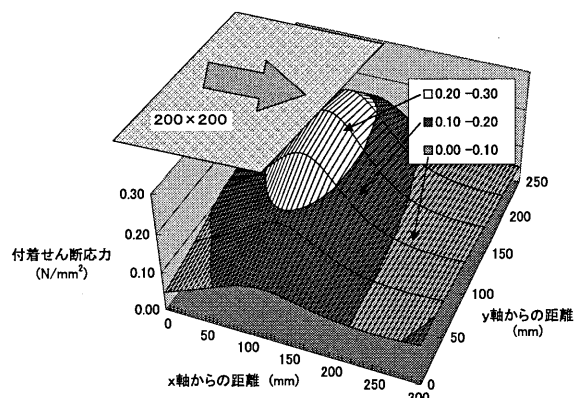
図-2 たわみの分布（橋軸方向）

方向の床版下縁における外荷重によるたわみを計算したもので、縦すべり摩擦係数は $\beta=0.8$ である。図によれば中央から荷重が離れるに従い中央たわみの値が小さくなり、支持辺付近では正負が逆転していることから、単純支持ではない固定辺の支持条件が反映されていることが判る。図には選点法による支持位置を示しているが、ダミー桁の幅を100mmと設定しているため、その付近は計算上の固定辺調整位置であり、精度が粗くなっている。図-3は縦すべり摩擦係数を $\beta=0.5$ として版中央に荷重を載荷した場合の付着せん断応力の分布である。図-3(a)の凡例に示しているy軸の位置は、 $y=0$ が版の中心線上で $y=150$ がダブルタイヤ片側の中心線上となる。よって、 $y=50$ と $y=150$ はそれぞれ版の中央とその反対側の荷重端となる。図によれば外荷重の進行方向端部には水平力による付着せん断応力のピークが認められること、荷重端よりも固定支持辺近傍で大きなピーク値が現れていることが判る。図-3(b)は外荷重作用位置周辺の応力分布を示したもので、ダブルタイヤの片側のものである。図の上方には荷重作用状態を模倣的に示している。図によれば荷重載荷位置の進行方向端部（エッジ部）の水平力作用方向で最大値となっていることと、その周囲で付着せん断応力が $\tau=0.20\text{N/mm}^2$ を超過していることが判る。道路橋床版の付着せん断応力に関しては、防水層としての必要性能を考慮した規格値として $\tau_a=0.20\text{N/mm}^2$ が推奨されており、それを考慮すれば部分的にはく離等の損傷の生じる危険性があると考えられる。他にも、貞升の研究⁵⁾によれば、タイヤの走行時の接地厚分布はタイヤ側壁に偏る傾向があると言われており、その際にはさらにタイヤ側壁部の応力値が大きくなることが推察される。図-4(a)は縦すべり摩擦係数が $\beta=0.8$ の場合の荷重作用位置から荷重作用位置近傍の付着せん断応力分布である。分布形状は $\beta=0.5$ と同様であるが応力のピーク値は大きく $\tau=0.33\text{N/mm}^2$ と約1.2倍となっている。ただし固定支持辺近傍のピーク値は $\beta=0.5$ の方が僅かに大きくなり、 $\beta=0.8$ の1.05倍という結果が得られた。これは、固定支持辺近傍では縦すべり摩擦係数の影響が小さく、外荷重による曲げ変形が付着せん断応力には支配的であるためと考えられる。

図-5は外荷重の作用位置を橋軸方向に移動させた

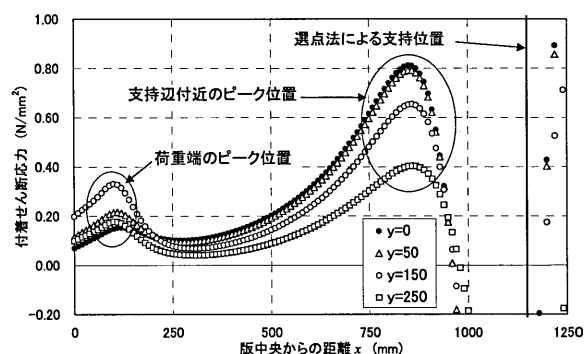


(a) 版中心から端部までの分布

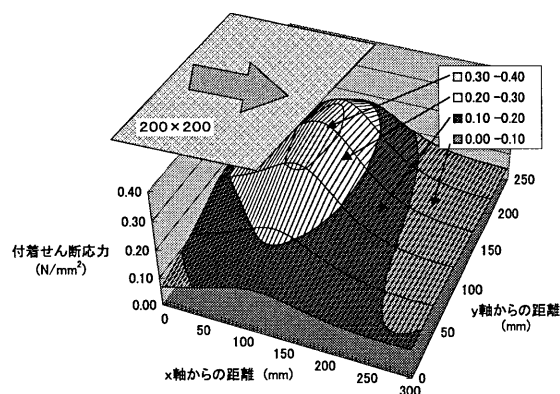


(b) 荷重端付近の分布状況（等高線図）

図-3 付着せん断応力分布（中央載荷， $\beta=0.5$ ）



(a) 版中心から端部までの分布



(b) 荷重端付近の分布状況（等高線図）

図-4 付着せん断応力分布（中央載荷， $\beta=0.8$ ）

場合の付着せん断応力の分布の変化を示したもので、外荷重端部のピーク値は固定支持辺に近づくとその値も大きくなる傾向が認められる。また、固定辺近傍に現れる二番目のピーク値は外荷重の位置の違いによってその値も変化しており、中央荷重の方が固定辺に近い荷重位置よりも大きくなるのが判る。これは、たわみ変形の大小の影響によるものであることが推察される。

なお、防水層の付着せん断応力の規格値は、コンクリートの引張り強度やせん断強度を基に決定されているものと考えられるが、圧縮強度で規定されているような安全率に関しては同様の概念で付着せん断応力に関しても適切に反映されているかどうかに関しては疑問が残る。一般的な荷重によってその規格値を超過するのであれば、危険側の設定であると言わざるを得ず、コンクリート表面の改質をも考慮して安全側となるような規格値の設定が望まれる。

3.2 橋軸直角方向の解析結果

図-1 のモデル形状における橋軸直角方向に着目した計算結果として、中央に荷重を載荷した場合の付着せん断応力の分布を図-6(a)に、荷重中心を中央から500mm 橋軸直角方向に移動させた場合の分布を図-6(b)に示す。橋軸直角方向であるため計算上は縦すべり摩擦係数を考慮していないがその他の条件は前節と同様である。図-6(a), (b)によれば付着せん断応力のピークは荷重の載荷位置の両端となっており、図-6(a)の最大値が $\tau = 0.16\text{N/mm}^2$ で図-6(b)では版中央側よりもダミー桁を配置した固定支持辺側が最大となり $\tau = 0.22\text{N/mm}^2$ と、荷重載荷位置が支持辺に移動すれば付着せん断応力も大きくなっていることが判る。そこで、荷重を版中央付近から支持辺側に50mm 毎に移動させた場合の荷重載荷位置端部のピーク値の変化を調べたものが図-7である。図-6で示されたとおり付着せん断応力は支持辺に向かって大きくなっているが、中央から300mm 程度の位置で値が小さくなり、規格値である $\tau_a = 0.20\text{N/mm}^2$ を超過する位置は支持辺から700mm 程度で、版中央と支持辺の中間点を越えた位置となっている。前述の通り橋軸直角方向の解析では水平力を加味していない。よって、床版の支持状態が固定辺または、剛な桁で支持される固定に近い支持条件では、桁近傍で付着せん断応力が規格値を超える可能性があるということになる。防水層の設計では現行の規格値では必要性能を満足しているとは言えず、前述の規格値に関する安全率の設定からも、より付着性能の高い防水層の開発が必要であることが理解できる。

4. 単純支持辺の解析結果との比較検討

計算モデルの形状を前述の固定支持と同様にした場合での載荷荷重を同一とする単純支持による解析結果

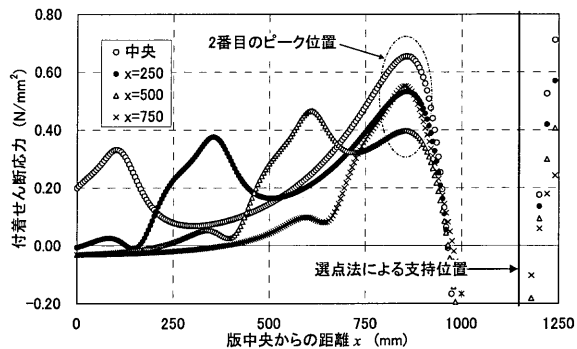
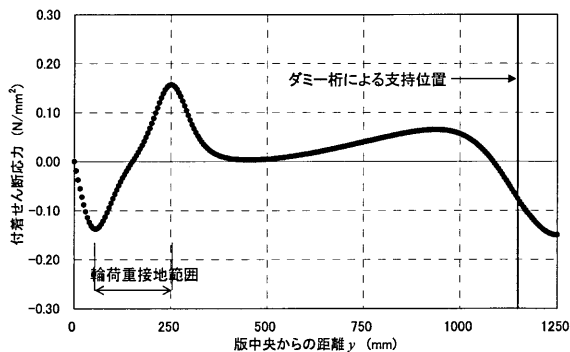
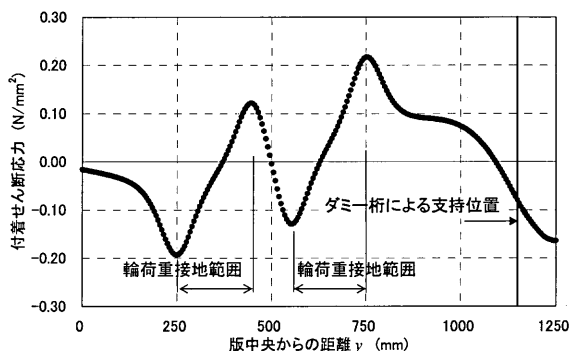


図-5 橋軸方向に荷重を移動させた場合の付着せん断応力の変化



(a) 中央載荷



(b) 中央+500mm (橋軸直角方向) 載荷

図-6 橋軸直角方向の付着せん断応力の分布

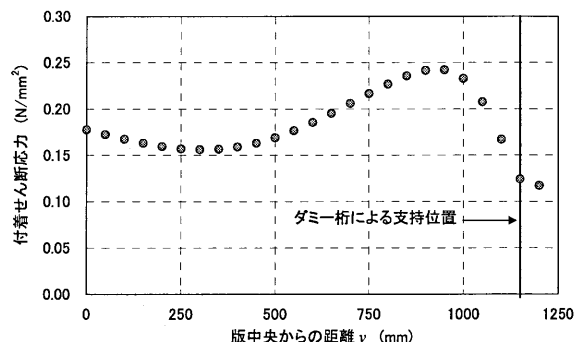
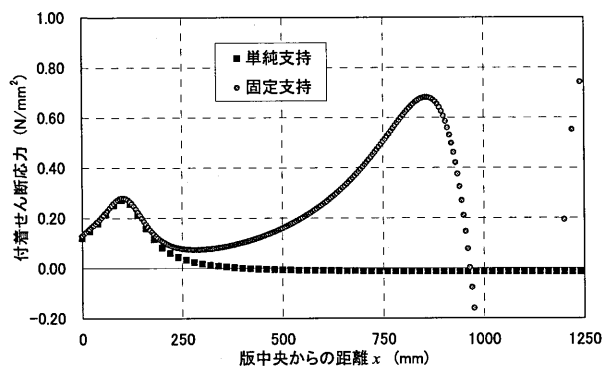
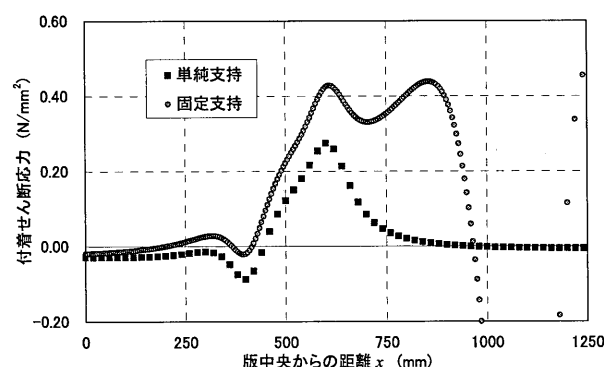


図-7 荷重移動に伴う付着せん断応力のピーク値の変化



(a) 中央載荷



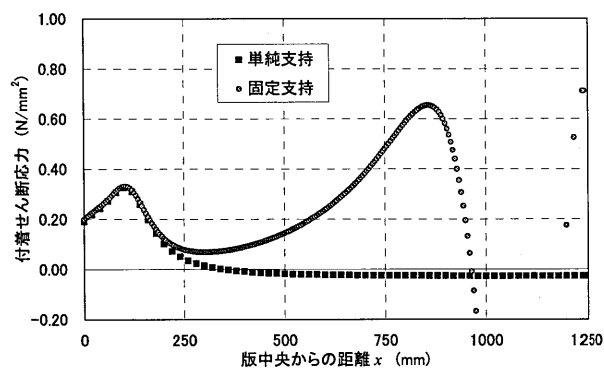
(b) 中央+500mm (橋軸方向) 載荷

図-8 支持条件の違いによる付着せん断応力度の比較
(縦すべり摩擦係数 $\beta=0.5$)

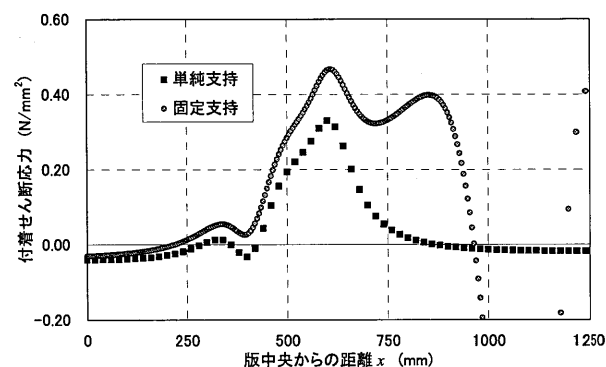
と、開発した固定支持の解析方法の結果とを比較しその妥当性を吟味する。ここで使用する単純支持の解析手法は、筆者らの既往の研究でその妥当性が確認されているものである。

図-8に縦すべり摩擦係数 $\beta=0.5$ とした場合の支持条件を固定支持と単純支持とした場合の付着せん断応力の計算結果の比較を示す。図-8(a)は版中央に荷重を載荷した場合のもので、荷重端部の付着せん断応力のピークは支持条件による差異はなくほぼ同等であるが、支持辺付近では分布形状が異なることが認められ、固定支持による影響が顕著である。図-8(b)は荷重載荷位置を橋軸方向に 500mm 移動させた場合の解析結果であり、荷重端のピークの発生位置は同じであるが応力レベルが異なっており、固定支持の方が大きい値を示している。図-9は縦すべり摩擦係数 $\beta=0.8$ とした場合の解析結果を示したものである。図-8と同様の分布形状となっているが、荷重端におけるピーク値は縦すべり摩擦係数の影響により $\beta=0.5$ よりも大きな値となっている。

図-10は橋軸直角方向の付着せん断応力の分布を示したもので、荷重の載荷位置は版中央から橋軸直角方向に 500mm 移動させた位置のものである。なお、橋軸直角方向への着目であり、縦すべり摩擦係数は考慮していない。また、単純支持の解析は付着せん断応



(a) 中央載荷



(b) 中央+500mm (橋軸方向) 載荷

図-9 支持条件の違いによる付着せん断応力度の比較
(縦すべり摩擦係数 $\beta=0.8$)

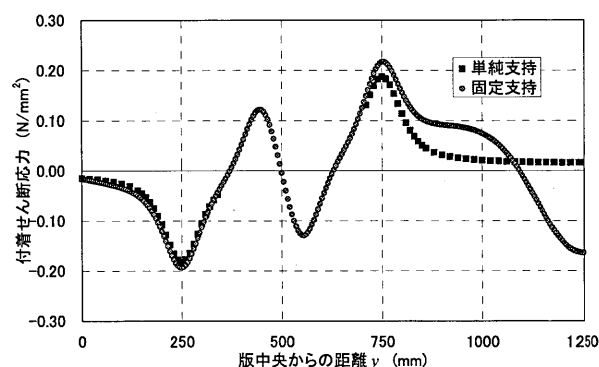


図-10 橋軸直角方向の付着せん断応力の比較

力のピーク値が大きくなる版中央側と支持辺側で行っている。図によれば版中央側の付着せん断応力の値は支持条件による差異はなくほぼ同等であるが支持辺付近の応力値は単純支持の方が小さめの値を示していることが判る。また、荷重載荷端部から支持辺近傍に至る応力分布形状も異なっている。

以上により、新たに開発した固定辺を扱うための手法は、支持条件の違いが適切に表現されていると判断され、信頼性の高い手法であると考えられる。なお、異種材料が積層される場合の界面の付着せん断応力に関しては、有限要素法の適用にも注意が必要であるこ

とが過去の研究で理解されており、本手法による解析結果による防水層の必要性能の設定が効果的であると考えている。

5. まとめ

本研究では固定辺を有する積層構造である道路橋床版を対象として、開発した厳密解を得るための解析手法を用いて、水平力を加味した場合の界面の付着せん断応力の解析を実施した。モデル形状は固定支持の特長が顕著となるように平面形状を $2.5 \times 2.5\text{m}$ の正方形とした。以下に得られた知見を列挙する。

- (1) 縦すべり摩擦係数を考慮した付着せん断応力の解析結果によれば、荷重端の他に固定支持辺近傍にもピーク値が出現し、その値は荷重端よりも固定支持辺近傍の方が大きくなる。
- (2) 荷重端で発生する付着せん断応力は、縦すべり摩擦係数の大小により応力値も変化するが、大型車を想定した $\beta=0.5$ でも荷重端近傍で制限値である $\tau_a=0.20\text{N/mm}^2$ を超過することが認められた。なお、支持辺近傍の応力値には縦すべり摩擦係数の影響は小さく、床版の曲げ変形による影響が大きいものと考えられる。
- (3) 橋軸直角方向の解析では、荷重位置が固定支持辺に近づくにつれて付着せん断応力の値も大きくなり、水平力を考慮しない状態でも固定辺近傍では制限値である $\tau_a=0.20\text{N/mm}^2$ を超過することが認められた。
- (4) 床版の支持条件を固定支持と単純支持とした場合の解析結果を比較した結果、中央載荷における荷重端近傍の応力分布はほぼ同等の傾向であるが、荷重が固定支持辺に移動すると分布形状が異なり、単純支持の方が小さめの応力レベルとなる。

- (5) 単純支持による解析結果との比較により、開発した固定辺を扱える手法は支持条件の違いが適切に表現されていると判断され、信頼性の高い手法であると考えられる

本研究では固定辺を有する積層板として、アスファルト舗装とコンクリート床版の付着せん断応力を対象として解析を実施した。今後は剛性の高い主桁に支持される合成床版を対象として、支持辺付近の底鋼板とコンクリートの界面に着目した解析を実施し、ずれ止めに必要な性能を明らかにする予定である。

参考文献

- 1) 横山広, 関口幹夫, 堀川都志雄: 主桁近傍の床版厚さに関する研究, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1353-1358, 2005.3.
- 2) 横山広, 安東祐樹, 関口幹夫, 堀川都志雄: 全周固定される多層版解析の一手法について, 構造工学論文集, Vol.54A 投稿中, 2008.3.
- 3) 財団法人災害科学研究所, 道路橋床版高機能防水システム研究委員会: 道路橋床版高機能防水システムの耐久性評価に関する研究, 平成 17 年 9 月
- 4) 横山広, 安東祐樹, 谷口義則, 関口幹夫, 堀川都志雄: 局部はく離を考慮した輪荷重下における舗装と床版界面の応力解析, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.980-987, 2007.3.
- 5) 貞升文槌: 自動車走行時におけるタイヤ接地圧, 土木技術資料, Vol.11 No.8, 昭和 44 年 8 月.