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

Analysis of stress at the interface between pavement and slab with local unbonded area

横山 広*, 安東 祐樹**, 谷口 義則***, 関口 幹夫****, 堀川 都志雄***** Hiroshi YOKOYAMA, Yuuki ANDOU, Yoshinori TANIGUCHI, Mikio SEKIGUCHI, Toshio HORIKAWA

*ショーボンド建設㈱ 北陸支店 (〒920-0362 石川県金沢市古府1-140) **ショーボンド建設㈱ 補修工学研究所 (〒305-0003 茨城県つくば市桜1-17) ***極東工業㈱ 技術本部 (〒732-0052 広島市東区光町2-6-31) ****東京都土木技術研究所 技術部 (〒136-0075 東京都江東区新砂1-9-15) ******工博 大阪工業大学 都市デザイン工学科 (〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮5-16-1)

As a way of improving the fatigue durability of slab, a waterproof layer is installed at the interface between asphalt pavement and concrete slab. This study focused about vertical and bond shearing stresses, as parameters representing mechanical properties of the waterproof layer, and made additionally an analytical study of horizontal forces due to braking forces. For calculation, a thick plate theory that is able to obtain accurate stress distributions at designated points was employed. As a result of the study, it was found that bond shearing stress exceeded the recommended value in winter when Young's modulus of pavement increased. Under braking loads, bond shearing stress increased further in winter similarly.

Key Words : slab deck of road bridge, waterproof material, thick plate theory, braking force, point matching method キーワード:道路橋床版,防水層,厚板理論,制動荷重,選点法

1. はじめに

走行自動車による輪荷重の繰り返し作用が鉄筋コンク リート床版の疲労現象を与え、床版に発生する貫通ひび 割れ間への雨水の侵入が、床版の劣化を促進させて疲労 寿命を著しく低下させていることは広く知られている. 平成5年の車両の規制緩和によって自動車荷重の大型化 が実施されて以来、特に舗装と床版との間に配置される 防水層の必要性が注目され、平成14年度の道路橋示方書 ¹⁾では防水層の設置を推奨する条項が成文化された.ま た経済的な効率化を狙った少数主桁橋の出現は、従来の 鉄筋コンクリート床版からより高い耐久性能をもつ鋼・ コンクリート合成床版やプレストレストコンクリート床 版への転向を余儀なくし、維持管理が容易であることに 加えて費用対効果も高い床版開発を要求している.これ らの床版上面には防水層の設置が図られ、防水層には高 い防水性能や遮塩性能も同時に要求されている.

このような点を踏まえ、「床版+防水層+舗装」が三位 一体として荷重に抵抗する構造形式の開発とその評価を 確立するために、平成15年に(財)災害科学研究所にお いて道路橋床版高機能防水システム研究委員会が設置さ れ,官庁・企業・大学から多くの参画者の下,従来の要 素試験の他に新たな要素試験法の提案,および実物大供 試体による検証試験が実施された²⁾.また,既往の研究 には有限要素解析を用いて防水層に発生する応力を算出 し,各種のパラメータ計算の結果から環境温度が低い場 合にせん断付着応力が大きくなるとの報告がある³⁾. これらの既往の研究は要求性能や耐久性に関しての検討 であるが,ブリスタリング等の部分損傷,もしくは部分 的な初期欠陥が供用中の防水層に及ぼす影響は検討され ていないのが実情である.

本論文においては、高速走行する大型車の接地圧はタ イヤの側壁近傍に大きく偏った分布となることを念頭に、 厳密な局所応力が計算できる厚板理論⁴⁾(thick plate theory)で構成される多層版の解析手法を舗装と床版か らなる構造系に適用し、その応力状態を把握することを 目的とする.また、防水層の部分的な接着不良を想定し た解析では調和解析法では表現できないので選点法⁵⁾ (collocation method)により、これらの応力状態を把握 するものとする.本解析では防水層の曲げ剛性や延び剛 性は床版全体の構造の特性値に比べてその影響が小さい ので,防水層の輪荷重に対する力学的寄与は少ないと仮 定し,舗装と床版との接合面(=防水層)に作用する版 厚方向の応力や水平面内に働くせん断応力の大きさと分 布形状に着目する.数値計算に用いる走行速度を停止時, 中速時(60km/h)および高速時(80km/h)の3ケースと して,既往の研究を基に接地圧分布を放物線形状に変化 させている.一般的な荷重条件では,後輪荷重(49kN) のみが2つのタイヤを介して舗装面に垂直な方向の力の みが作用すると規定されているが,実際の防水層に働く 応力をより忠実に算定するには舗装表面と平行な水平方 向に作用する制動荷重も考慮する必要があることから以 下のような場合を想定する.

- ①走行車両が急停止する場合、舗装表面には水平方向に制動荷重が作用し、接合面でのせん断応力に大きな値が発生することが予測される。制動荷重の大きさをエネルギー保存則や、文献から得られる摩擦係数を用いて推定する。また最大付着せん断応力の大きさとその発生する位置を推定する。
- ②舗装と床版界面に位置する防水層に施工不良等の初 期損傷を伴う部分的なはく離が存在する場合に、そ の接合面には局所的に大きな付着せん断応力が発生 するものと推測される。そこで部分的な防水層のは く離のモデル化を行い、それが付着せん断応力にど のような影響を及ぼすかを検討する。

以上の数値をもとに、舗装と床版界面に作用する直応 カと付着せん断応力について言及し、旧日本道路公団等 の規格値⁶⁾ との比較検討を行うこととする.なお、本研 究で採用している解析手法は、既往の研究により実験結 果と整合することが明らかになっているが⁴⁾、本研究に おける妥当性を検討するために有限要素法による同条件 のモデルとの計算結果とも比較している.

2. 解析手法

2.1 輪荷重の接地圧分布

走行車両の接地圧分布は走行速度によって、タイヤ側 壁部に偏った分布になることが貞升の研究⁷⁾によって明 らかにされており、それによる橋軸直角方向の接地圧分 布は図ー1(a)に示す通りである.図によれば走行速度が 増せばタイヤ側壁部の接地圧が大きくなり、中央部の最 小値 q1 と側壁部の最大値 q2 との比 q1/q2= α (図ー1(b)) は速度 50km/h で約 0.5 程度になることが読みとれる.そ こで本研究では、走行速度 60km/h では速度 50km/h と同 等であると仮定して α_{60} =0.5 を採用し、図に示されてい ない高速状態を考慮した 80km/h では速度向上による影 響を加味して α_{80} =0.3 と仮定して解析を進めることと する.



(a) 貞升による接地圧分布



図-1 橋軸直角方向の輪荷重の接地圧分布



表-1 材料定数

材料	ヤング係数(kN/mm ²)	ポアソン比
アスファルト舗装(夏季)	0.05	0.4
アスファルト舗装(冬季)	2.0	0.4
RC 床版	30.0	0.2

また、床版各部に発生する応力は輪荷重直下が最大と なる局部現象であるため、連行する荷重の影響は無視し て作用荷重にはダブルタイヤ1組のみを考慮する.

2.2 解析モデルと計算手法

解析モデルを図-2 に、計算に用いた物性値を表-1 に示す.モデルは周辺単純支持版(辺長比1:2)で床版 上には厚さ tp=75mm のアスファルト舗装を考慮してい る.アスファルトのヤング係数は表-1 の通り、夏季と 冬季で想定される一般的な値を設定している.また、輪 荷重は前述の通りダブルタイヤとしている.

本研究で採用した厚板理論とは、Kirchhoff-Love の仮 定から誘導される薄板理論とは異なり、3 次元弾性論に よる Galerkin-vector と Boussinesq の関数の Z 方向成分に 基づく厳密な理論であり、その基礎微分方程式は式(1) のように示される.実際の応力値の算定では、フーリエ 級数を用いて計算を行っている.

舗装と床版の界面に部分的な損傷,ここではポットホ ールに繋がるような小規模なはく離を想定するが,その ような状態は境界条件に制約のある調和解析法では表現 できないので選点法を採用するものとした.選点法とは 任意の領域内で物理量が分布する場合に,この物理量を 対象とする領域内で一様であると仮定し,かつ領域内の 中央に代表点を設けて連続すべき物理量を離散的な代表 点での物理量に置き換える計算手法である.

なお,本研究で計算に用いた荷重には衝撃を考慮して いない.よって,伸縮継手付近に段差が有る場合等には 本研究の値より大きな応力が発生することになる.

$$\Delta \Delta f_3 = 0, \quad \Delta \phi_3 = 0 \tag{1}$$

 $\Box \subseteq \mathcal{I} \subset \mathcal{I}$, $\Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$

変位関数 *u*, *v*, *w* と変位関数 *f*₃, φ₃の関係は以下のように示される.

$$2\mu u = -\partial^2 f_3 / \partial x \partial z + \partial \phi_3 / \partial y$$

$$2\mu v = -\partial^2 f_3 / \partial y \partial z - \partial \phi_3 / \partial x$$

$$2\mu w = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\partial^2 / \partial z^2 + \frac{\lambda + 2\mu}{\mu} \left(\partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 \right) \right] f_3$$

$$\Box \subseteq \mathbb{C}, \qquad \lambda, \quad \mu : \text{Lame } \mathcal{O} \not{\Xi} \not{\Sigma}$$

次に選点法について説明する. 図-3 に示す舗装と床 版の 2 層版において舗装と床版が点 *i*(*i*=1,*s*)で接合し ている場合,他の点*j*(*j*=1,*s*)での x, y, z 方向の伝達力 *Xj*, *Yj*, *Zj*(*j*=1,*s*)が接合面間に働き双方の板に作用す ることになる.

ここで点 (*xi*, *yi*) での舗装下面の変位は式(2)に示 すものとなる⁵⁾.

$$2\mu_{p}u_{i}^{p} = Pd_{x}^{p} + \sum_{j=1}^{s} (X_{j}a_{x}^{p} + Y_{j}b_{x}^{p} + Z_{j}c_{x}^{p})$$

$$2\mu_{p}v_{i}^{p} = Pd_{y}^{p} + \sum_{j=1}^{s} (X_{j}a_{y}^{p} + Y_{j}b_{y}^{p} + Z_{j}c_{y}^{p})$$

$$2\mu_{p}w_{i}^{p} = Pd_{z}^{p} + \sum_{j=1}^{s} (X_{j}a_{z}^{p} + Y_{j}b_{z}^{p} + Z_{j}c_{z}^{p})$$
(2)

同様にして、同じ位置における床版上面の変位は式(3) のように得られる⁵⁾.

$$2 \mu_{s} u_{i}^{s} = + \sum_{j=1}^{s} (X_{j} a_{x}^{s} + Y_{j} b_{x}^{s} + Z_{j} c_{x}^{s})$$

$$2 \mu_{s} v_{i}^{s} = + \sum_{j=1}^{s} (X_{j} a_{y}^{s} + Y_{j} b_{y}^{s} + Z_{j} c_{y}^{s})$$

$$2 \mu_{s} w_{i}^{s} = + \sum_{j=1}^{s} (X_{j} a_{z}^{s} + Y_{j} b_{z}^{s} + Z_{j} c_{z}^{s})$$
(3)



表-2 大型車両の縦すべり摩擦係数

走行速度 V₀= 60km/h										
減速速度 V (km/h)	50	40	30	20	0					
減速距離 (m)	9	18	25	28	32					
摩擦係数 (T/W)	0.481	0.437	0.425	0.45	0.44					



図-4 縦すべり摩擦係数の計算モデル

 $a_x^p \sim c_z^s$: 伝達力 X_j , Y_j , Z_j による各層の変位に関する影響係数

 $d_{r}^{p} \sim d_{r}^{p}$:荷重による変位の影響係数

$$\mu_p$$
, μ_s :各層のせん断弾性係数

ここに,

舗装と床版がn個の接合点で変位が連続しているとす れば伝達力に関する3×n元の連立方程式が得られる.こ の式を解いて伝達力を求め、その値を各層の上下面の表 面力として厚板理論を適用すれば板要素のたわみと応力 が求められる.なお、本研究では計算の都合上平面形状 での中央線で分割される1/4部分を抽出し、はく離領域 を橋軸方向50mm、橋軸直角方向を100mmの大きさとな るように調整して x, y の各方向を 15 分割して得られ る 225 の不均等ブロックで計算した(図-3).

2.3 制動荷重による水平力の算出

車両の制動時に作用する荷重は、タイヤと路面の摩 擦によってその大きさが決定されることになる.本研 究ではその摩擦係数を道路構造令に準じて縦すべり摩 擦係数と称する.縦すべり摩擦係数は,乾燥路面のも のが0.7~0.8の範囲で,湿潤路面では0.5~0.6の範囲 が一般的なようである⁸⁾.因みに道路構造令では乾燥 路面で0.6程度を採用しており,湿潤路面は0.3程度 である.ここで,大型車両における既往の制動距離に 関する公表数値から縦すべり摩擦係数を算出した値を 表-2に示す.縦すべり摩擦係数を算出した値を えこで,運動エネルギーと仕事量との関係から,その 式を整理すれば縦すべり摩擦係数を算出する式(4)が 得られる.

$$\beta = \frac{T}{W} = \frac{v_0^2 - v^2}{2 \cdot S \cdot g}$$
(4)

S:制動距離

- v₀:初速
- *v* : 終速

β:縦すべり摩擦係数

表-2 の大型車両の制動距離から算出した縦すべり 摩擦係数によれば、一般道路での走行速度を v=60km/h として減速した場合の値は 0.425~0.481 の範囲にある. よって、本研究で対象とする係数は乾燥路面の最大値 として想定される 0.8 に加え、一般道での通常の使用状 態を意識した走行速度 v=60km/h に対応する 0.5 として、 これらの値を用いて舗装と床版での界面の応力度を算出 する.

3. 舗装と床版の界面に発生する応力

表-3 に制動荷重を考慮しない停止時や走行時の舗装 と床版の界面に発生する応力を示す.ダブルタイヤ2組 の隣接する荷重の影響を考慮して橋軸直角方向の分布に 着目している.表-3の(a)によれば,静止状態と走行時 の応力には顕著な差はないものの,(b)の界面での鉛直応 力では走行時が停止時よりも小さい値になっている.(c) の界面に発生する付着せん断応力は,時速 v=60km/h では 停止時と同じレベルであるが時速 v=80km/h になると若 干大きな応力値となっている.これらは,タイヤ接地圧 の比である αの影響,即ち走行速度が大きくなるに従い にタイヤ側壁側に荷重分布が大きく偏ることによると考 えられる.水平力を考慮しない停止時や走行時の範囲で

表-3 走行時の舗装と床版界面の応力比較

(a) 橋軸直角方向のコンクリート応力

			σx (N/m	m²)		
速度 V	(km/h)	0	6	0	8	0
水平力	無(0)	S0	S60	S60/S0	S80	S80/S0
ħ	0.05	1.18	1.18	1	1.18	1
V.	0.1	1.18	1.18	1	1.18	1
ノバ	0.2	1.17	1.17	1	1.17	1
ノ反	0.5	1.16	1.16	1	1.16	1
い不満	1	1.14	1.14	1	1.14	1
30	1.5	1.11	1.11	1	1.12	1
Ea	2	1.09	1.09	1	1.1	1
(kN/mm^2)	2.5	1.08	1.08	1	1.08	1

(b) 界面の鉛直応力

	$\sigma z (N/mm^2)$									
速度 V	(km/h)	0	6	0	8	0				
水平力	無(0)	S0	S60	S60/S0	S80	S80/S0				
t	0.05	-0.573	-0.485	0.85	-0.418	0.73				
V.	0.1	-0.573	-0.484	0.84	-0.418	0.73				
ノバ	0.2	-0.572	-0.484	0.85	-0.418	0.73				
ノ反	0.5	-0.57	-0.483	0.85	-0.417	0.73				
い不満	1	-0.567	-0.48	0.85	-0.415	0.73				
蚁	1.5	-0.565	-0.478	0.84	-0.413	0.73				
Ea	2	-0.562	-0.476	0.85	-0.412	0.73				
(kN/mm^2)	2.5	-0.559	-0.474	0.85	-0.411	0.74				

(c) 界面の付着せん断応力

			τxz (N/m	m²)		
速度 V	(km/h)	0	6	0	8	0
水平力	無(0)	S0	S60	S60/S0	S80	S80/S0
t	0.05	0.163	0.163	1	0.167	1.02
V.	0.1	0.163	0.164	1	0.167	1.02
ノガ	0.2	0.164	0.165	1	0.168	1.02
·ソ 版	0.5	0.166	0.167	1	0.17	1.02
い不	1	0.17	0.17	1	0.173	1.02
蚁	1.5	0.173	0.173	1	0.176	1.02
Ea	2	0.176	0.176	1	0.179	1.02
(kN/mm^2)	2.5	0.178	0.179	1	0.181	1.02

は舗装のヤング係数の大小はほとんど影響していないこ とが判る.

4. 制動荷重作用時の応力状態

表-4 は水平力として制動荷重を考慮した場合の舗装 と床版の界面の応力状態を示したもので、着目している のは橋軸方向の分布である.表-4(a)の床版上面におけ る橋軸直角方向の直応力が停止状態よりも大きくなって おり、停止状態と比較したヤング係数別の応力では(b) の鉛直応力が直応力よりも大きい倍率となっている.(c) の付着せん断応力では停止状態との差がさらに顕著にな っており、ヤング係数の大小に関わらず付着せん断応力 の規格値⁶⁾である τa=0.2N/mm² を超過している.筆者 らの既往の研究によれば、荷重を三角形分布にした遠心 力作用時の計算結果では舗装のヤング係数が 1.5N/mm² を超えてから規格値を超過することが明らかになってい るので、制動荷重が遠心力による水平方向の荷重作用よ りも厳しい応力状態になるということになる⁹⁾.縦すべ り摩擦係数の大きさによる付着せん断応力の違いは、高

表-4 制動力作用時の舗装と床版界面の応力比較

(a)	橋軸方向のコンクリー	・ト応力
------------	------------	------

						σx (N/mm	n ²)					
速度 V	(km/h)	0		60					80			
庭 囡侅3	štr 11	0	0.	(a) 05	(h) 0.8	倍	率	0.	(a) 05	(h) 0.8	倍	率
/手]示 不3	κιμ	0	00	(a) 0.5	(0) 0.0	(a)/0 ₀	(b)/0 ₀	0	(a) 0.5	(0) 0.0	(a)/0 ₀	(b)/0 ₀
t	0.05	1.15	1.15	1.19	1.22	1.03	1.06	1.14	1.2	1.22	1.05	1.06
V.	0.1	1.14	1.14	1.19	1.22	1.04	1.07	1.14	1.19	1.22	1.04	1.07
ノバ	0.2	1.14	1.14	1.19	1.22	1.04	1.07	1.14	1.19	1.22	1.04	1.07
ر بر	0.5	1.13	1.13	1.17	1.2	1.04	1.06	1.13	1.17	1.2	1.04	1.06
いた数	1	1.1	1.1	1.15	1.18	1.05	1.07	1.1	1.15	1.18	1.05	1.07
30	1.5	1.08	1.08	1.13	1.15	1.05	1.06	1.08	1.13	1.15	1.05	1.06
Ea	2	1.06	1.06	1.11	1.13	1.05	1.07	1.06	1.11	1.13	1.05	1.07
(kN/mm^2)	2.5	1.04	1.04	1.09	1.11	1.05	1.07	1.04	1.09	1.11	1.05	1.07

(b) 界面の鉛直応力

						σz (N/m	m²)					
速度 V	(km/h)	0		60					80			
摩擦係	数 μ	0	00	(a) 0.5	(b) 0.8	倍 (a)/0 ₀	率 (b)/0 ₀	00	(a) 0.5	(b) 0.8	倍 (a)/0 ₀	率 (b)/0 ₀
Ц	0.05	-0.291	-0.247	-0.351	-0.414	1.42	1.68	-0.213	-0.318	-0.38	1.49	1.78
· · ·	0.1	-0.291	-0.246	-0.351	-0.413	1.43	1.68	-0.213	-0.317	-0.38	1.49	1.78
ノバ	0.2	-0.291	-0.246	-0.35	-0.413	1.42	1.68	-0.213	-0.317	-0.379	1.49	1.78
反	0.5	-0.29	-0.246	-0.349	-0.411	1.42	1.67	-0.212	-0.316	-0.378	1.48	1.78
いた	1	-0.288	-0.244	-0.347	-0.408	1.42	1.67	-0.212	-0.314	-0.375	1.48	1.77
蚁	1.5	-0.287	-0.243	-0.344	-0.405	1.42	1.67	-0.211	-0.312	-0.372	1.48	1.76
Ea	2	-0.286	-0.243	-0.342	-0.402	1.41	1.65	-0.21	-0.31	-0.37	1.48	1.76
(kN/mm^2)	2.5	-0.284	-0.242	-0.34	-0.399	1.4	1.65	-0.209	-0.308	-0.367	1.47	1.76

(c) 界面の付着せん断応力

τyz	(N/mm^2)
-----	------------

速度 V (km/h) 0 60						80							
庭物区	<u>кн</u>	0	0	0	(-) 0 E	(1-) 0.0	倍	率	0	(-) 0 E	(1-) 0.0	倍	率
摩捺係敛 μ		U	U ₀	(a) 0.5	(D) U.8	(a)/0 ₀	(b)/0 ₀	U ₀	(a) 0.5	(D) U.8	(a)/0 ₀	(b)/0 ₀	
4	0.05	0.163	0.144	0.249	0.312	1.73	2.17	0.129	0.235	0.298	1.82	2.31	
· ·	0.1	0.163	0.144	0.249	0.312	1.73	2.17	0.13	0.235	0.298	1.81	2.29	
ノバ	0.2	0.163	0.144	0.249	0.312	1.73	2.17	0.13	0.235	0.297	1.81	2.28	
ر ارد	0.5	0.165	0.146	0.249	0.311	1.7	2.13	0.131	0.235	0.297	1.79	2.27	
いた	1	0.167	0.148	0.249	0.31	1.68	2.09	0.134	0.235	0.295	1.75	2.2	
蚁	1.5	0.169	0.15	0.249	0.309	1.66	2.06	0.136	0.235	0.294	1.73	2.16	
Ea	2	0.171	0.152	0.249	0.307	1.64	2.02	0.138	0.235	0.293	1.7	2.12	
(kN/mm^2)	2.5	0.173	0.154	0.249	0.306	1.62	1.99	0.14	0.235	0.292	1.68	2.09	

表-5 制動力による冬季の付着せん断応力

速度	V (km/h)	0			60				80			
麻烟夜粉		0	0	(-) 0 E	(1-) 0.0	倍	率	0	(-) 0 E	(1) 00	倍	率
序标	摩捺除致 μ		00	(a) 0.5	0.0 (d)	(a)/0 ₀	(b)/0 ₀	00	(a) 0.5	(a) 0.5 (b) 0.8		(b)/0 ₀
莅	450	0.171	0.152	0.249	0.308	1.64	2.05	0.138	0.235	0.294	1.73	2.75
1円 舌	650	0.171	0.152	0.249	0.307	1.64	2.05	0.138	0.235	0.293	1.73	2.75
生	850	0.171	0.152	0.249	0.307	1.64	2.05	0.138	0.235	0.293	1.73	2.75
医	1050	0.171	0.152	0.249	0.307	1.64	2.05	0.138	0.235	0.293	1.73	2.75
旦	1250	0.171	0.152	0.249	0.307	1.64	2.05	0.138	0.235	0.293	1.73	2.75

速時からの急制動を考慮した係数 0.8 が最も大きな値と なっているが,一般道レベルの v=60km/h の係数 0.5 でも 規格値を超過していることは,応力超過は特殊な環境下 のみで生じるのではなく,通常の供用レベルでも起こり 得ることを示唆している.

表-5 は,舗装のヤング係数を冬季を想定した Ea=2.0kN/mm²に固定して,荷重位置を支持辺方向に移動 させた場合の付着せん断応力の値を示したものである. 表中の荷重位置は支持辺からの距離でL=1250mmが中央 である.表によれば,作用位置による値の変化は殆どな く,輪荷重の作用が局所的挙動であることが判る.また, 荷重の作用位置に関係なく,どの位置でも輪荷重の急制 動が作用すれば付着せん断応力が規格値を超過すること が判った.

図-5 は冬季を想定した走行速度 v=80km/h における 界面の橋軸方向の付着せん断応力の分布を示したもので



図-5 制動力作用時の付着せん断応力分布



図-6 FEM モデル図

	表-6	各計算	手法に	よる	たわる	みの比較
--	-----	-----	-----	----	-----	------

計算手法	厚板理論	選点法	FEM
たわみ(mm)	0.2417	0.2417	0.2360

ある. 図によれば応力値のピークは荷重幅 200mm の端 部に発生しており,その分布形状は同様であるが縦すべ り摩擦係数の大小に応じた応力状態となっている.荷重 端から離れた位置では応力値が急減し,150mm 離れた位 置(荷重中心より250mm)では縦すべり摩擦係数に関係 なく同等のレベルになることが判る.

5. 局部的なはく離が及ぼす影響

防水層の一部に施工不良や輪荷重の影響によりはく離 が生じた場合には、その直上の輪荷重作用によって局所 的に大きな付着せん断応力が作用し、小規模なはく離が 拡大することで舗装の損傷に繋がることが懸念される. 舗装の損傷は通行車両の走行性に影響することになり、 防水層の損傷は床版の疲労耐久性にも悪影響を及ぼす.

そこで選点法による計算モデルで一部に応力伝達を強 制的に遮断するような処理を施した計算を行って接着・ はく離境界部分の付着せん断応力を算出する.なお,選 点法の計算手法の妥当性を確認するために,はく離のな





図-9 床版上面の応力(橋軸直角方向)

いモデルでの調和解析法による値との比較,また計算結 果の妥当性を吟味するために,はく離を有する3次元ソ リッドモデルの有限要素法による計算値とも比較する (図-6).

表-6 に,はく離がない場合の調和解析法,選点法お よび有限要素法の各計算による床版中央下縁のたわみを 示す.厚板理論による厳密解と選点法による計算結果は 一致しているが,有限要素法による値は2.4%程度の誤差 となっている.

図-7 は、はく離のない付着応力の厳密解と選点法の 計算結果を示したもので、応力の分布形状とピークの位 置は両方の計算結果も同じであるが、選点法の値が厳密 解に対して 118%と大きな値となっている. この理由は 選点ブロックの大きさに起因するものと考えられる. し かしながら,後述する図-9 では厳密解とよく整合して いるので,付着せん断による差は全ての計算結果に表れ るものではなく,はく離問題の傾向を評価する際には十 分であると考えられる.

図-8 は鉛直応力の分布を示したもので,冬季と夏季の舗装のヤング係数の変化は鉛直応力には影響がないことと,有限要素法の結果にはばらつきのあることが読み 取れる.しかしながら,選点法の値にも荷重中心から 150mm 以遠で小さなピークが認められており今後の検 討による原因把握が必要である.FEM による計算で 100mm 付近に突出した値が現れているが,この原因は部 分的に付着を切った計算でも舗装の水平せん断力の分配 が残るためであると考えている.

図-9 は床版上縁の応力分布であるが、厚板理論によ る厳密解と選点法による計算結果はほぼ一致しているが 有限要素法の値は小さいレベルで推移している.本研究 では選点法の妥当性確認として FEM 解析を行ったが、 本計算結果からは、有限要素法を適用する際の留意点が 示されており、たわみ等の変位では精度が得られるが、 変位の微分形である曲げ応力のピーク値等の算出には限 界があることが判る.

図-10 は床版上面でのねじりによるせん断応力の分 布を示したものである. 選点法の値は冬季よりも夏季の 方が大きいことから,舗装のヤング係数が季節で変化す ることによる剛性への寄与の差が生じた結果であると推 察される. 図にははく離範囲を示しているが,ねじりに よるせん断応力がはく離の影響を受けていることが判る. 有限要素法の値は界面の応力と同様に選点法と比較して 小さな値で推移している.

図-11 は部分的なはく離を考慮した計算結果で, 選点 法の値ははく離領域で応力値が0付近まで低下し、付着 領域の近傍で増加する傾向となった、ピーク位置は接 着・はく離境界から10mm離れた位置となっており、そ の値は冬季の舗装のヤング係数が大きくなる場合で 0.464N/mm² であり、はく離のない選点法の計算結果 0.346 N/mm²の134%にまで大きくなっている. 選点法の 特性として選点ブロックの大きさが精度に影響を及ぼす ものの、比較的密なブロック分割による計算であること と付着の有無の他は条件を合わせているため計算結果の 比率は信頼できるものと考えている.また、荷重載荷範 囲の外側の接着・はく離境界でも規格値を超えている部 分があり,はく離範囲が走行方向に関係なく前後に広が る危険性が伺える. 舗装のヤング係数を変化させた冬季 と夏季の違いに着目すれば、ピークの位置で夏季の方が 冬季に対して 5%程度低下しているものの規格値を大き く超えていることが認められる.ここで、前述の付着せ ん断応力の計算結果から,表-4(c)の制動を考慮しない 付着せん断応力に着目し、134%まで応力値が増加してい







表-7 走行時の付着せん断応力(はく離考慮)

τ yz (N/mm ²)						
速度 V (km/h)		0	60	80		
水平力 無(0)		S0	S60	S80		
ヤング係数	0.05	0.218	0.193	0.173		
	0.1	0.218	0.193	0.174		
	0.2	0.218	0.193	0.174		
	0.5	0.221	0.196	0.176		
	1	0.224	0.198	0.180		
	1.5	0.226	0.201	0.182		
Ea	2	0.229	0.204	0.185		
(kN/mm²)	2.5	0.232	0.206	0.188		

るとすれば、制止時ではヤング係数に関係なく基準値を 超過し、走行時でも規格値を超過するかそれに匹敵する 付着せん断応力が発生していることが判る(**表**-7).よ って部分的なはく離は車両の影響によって拡大すること が推察され、床版の疲労耐久性の低下を招く舗装損傷に 繋がる危険性もある.

6. まとめ

本研究では、厳密な応力値を算出できる厚板理論を採 用して舗装と床版の界面、即ち防水層に発生する応力値 を吟味した.作用させた荷重は走行によるタイヤの接地 圧分布を考慮し、界面での応力状態を実環境にあわせる ものとして制動時の縦すべり摩擦係数を導入した算定を 行った.以下に本研究で得られた知見を示す.

- 制動荷重を考慮しない停止時や走行時の舗装と床版の界面に発生する応力値には顕著な差はないが、界面での鉛直応力では走行時が停止時よりも小さい値になる.界面に発生する水平せん断応力はタイヤ側壁側に偏った荷重分布となる影響で、時速 v=60km/hでは停止時と同じレベルであるが時速 v=80km/h になると大きくなる.
- 2) 制動力を考慮した舗装と床版の界面の応力状態は遠心力の場合とは異なり、コンクリート面における橋軸方向の直応力が停止状態よりも大きくなった.さらに、ヤング係数の大小に関係なく付着せん断応力が規格値を超過していることから、制動荷重の方が遠心力の作用よりも厳しい応力状態になる.
- 3) 制動力の伝達に関わる縦すべり摩擦係数の大きさに よる付着せん断応力の違いは、高速時からの急制動 を考慮した係数 0.8 が大きな値となっているが、一般 道レベルの係数 0.5 でも制限値を超過しており、通常 の供用レベルでも応力超過が起こり得ることが示さ れた。
- 4) 冬季での制動力作用時で荷重位置を支持辺方向に移動させた場合の付着せん断応力の値は、全ての位置で規格値を超過した。
- 5) 選点法は防水層のはく離問題の解析として十分な精度を有しており、調和解析法による厳密解と同等と認められた.それに対して有限要素法による結果は、床版下面のたわみではほぼ同等であったが床版上縁のコンクリート応力は厳密解よりも小さな値で推移した.選点法の妥当性確認として有限要素法による計算を行ったが計算内容に応じて適用には注意が必要であることが判った.
- 6) はく離による付着せん断応力の増加は、はく離のない場合よりも大きく134%となった.この増加分を制動を考慮しない付着せん断応力に反映させれば、制止時ではヤング係数に関係なく基準値を超過し、 走行時でも規格値に超過、もしくは匹敵する付着せん断応力が発生することが判った.

本研究によれば,防水層には通常の使用条件でも基準 値を上回る付着せん断応力が作用していることが明らか となった.このことは防水層の付着性能の見直しを要求 するものであり,防水層に対しての新たな視点からのア プローチの必要性も伺える.さらに,ブリスタリングや 施工不良等の防水層のはく離現象をモデル化した計算で は接着・はく離境界近傍に大きな付着せん断応力の発生 が認められる.よって施工の精度向上を含めた対応が必 要である.

参考文献

- 社団法人日本道路協会:道路橋示方書・同解説 I 共通 編, p.103, 平成 14 年 3 月
- 2) 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
- 高橋順,清水祥夫,宮本文穂:床版防水層の付着特性 に関する応力解析と性能評価に関する検討,土木学会 論文集,No.753/V-62, pp.51-64, 2004.2.
- 4) 堀川都志雄:直交異方性板の弾性理論とその応用に関する研究,大阪市立大学学位請求論文,昭和 59 年 5 月
- 5) 園田恵一郎, 堀川都志雄, 鬼頭宏明, 木曽収一郎: 鋼板・コンクリート合成床版のスタッドに働くせん断力 と押し抜きせん断力, 土木学会論文集第404号/I-11, 1984.4.
- 6) 日本道路公団試験研究所,試験研究推進委員会材料施 工研究会:材料施工資料(第4号)コンクリート床版 防水工,試験研究所技術資料第124号,平成6年3月
- (1) 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
- 4) 山崎俊一,山口泉,加賀美公彦:大型車の停止距離と 制動初速度の算出,自動車研究,第24巻第6号, pp.11-18,2002.6
- 9) 横山広,関口幹夫,谷口義則,堀川都志雄:水平力を 考慮した輪荷重下での舗装と床版界面の応力解析,第 5回道路橋床版シンポジウム講演論文集,pp.137-142, 2006.7.

(2006年9月11日受付)