

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

Analysis of stress at the interface between pavement and slab load considering lateral forces of wheel load

横山 広*, 関口 幹夫**, 谷口 義則***, 堀川 都志雄****

Hiroshi YOKOYAMA, Mikio SEKIGUCHI, Yoshinori TANIGUCHI, Toshio HORIKAWA

*シヨーバンド建設㈱ 北陸支店 (〒920-0362 石川県金沢市古府 1-140)

**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)

***極東工業㈱ 技術本部 (〒732-0052 広島市東区光町 2-6-31)

****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 on bond shear stress, one of the parameters representing the waterproof layer, and made an analytical study of centrifugal forces in curved sections and lateral forces due to braking forces. For calculation, a thick plate theory that provided for accurate stress calculation 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 in the case of centrifugal forces. Under braking loads, bond shearing stress increased further in winter similarly.

Key Words : slab deck of road bridge, waterproof material, thick plate theory, centrifugal force, braking force

キーワード：道路橋床版，防水層，厚板理論，遠心力，制動荷重

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、維持管理面においても容易でかつ費用対効果の高い床版開発を要請している。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、既往の研究で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報告されている³⁾。

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する。本解析では防水層の曲げ剛性や引張剛性は床版の剛性等の他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ないと仮定する。その条件の下、これらの接合面(=防水層)に作用する版厚方向の応力と水平面内に働くせん断応力の大きさや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るものとした。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力も考慮する必要がある。そこで以下のような場合を想定する。

- ①床版が曲線部に配置されている場合、舗装表面の水平方向に走行速度の二乗と速度に見合った曲率半径から求められる遠心力が、垂直方向の荷重と同時に作用する。この遠心力が接合面での鉛直応力や付着せん断応力にどの程度関与するのかを算定する。
- ②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。

以上の数値をもとに、舗装と床版界面に作用する直応力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⁴⁾との比較検討を行うこととする。

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⁵⁾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-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 q_1 と側壁部の最大値 q_2 との比 $q_1/q_2 = \alpha$ (図-2(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 $\alpha_{60} = 0.5$ を採用し、図に示されていない 80km/h では速度向上による影響を加味して $\alpha_{80} = 0.3$ を採用して解析を進めることとする。

また、床版各部に発生する応力は輪荷重直下が最大となり連行する荷重の影響は無視して差し支えないので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 $t_p = 75\text{mm}$ 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、輪荷重は実情と同じ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 次元弾性論による変位関数 f_3 (ガラーキネクトル) と ϕ_3 (プーシネスクの関数) 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、フーリエ級数展開した収束計算を行っている。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。

$$\Delta \Delta f_3 = 0, \quad \Delta \phi_3 = 0 \quad (1)$$

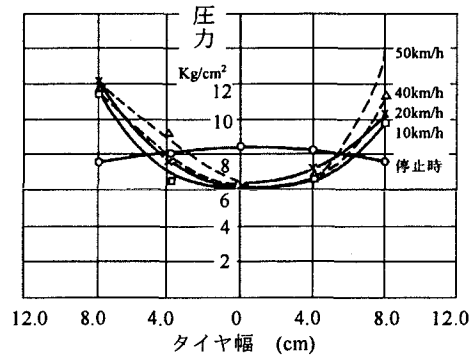
$$\begin{aligned} \Delta &= \partial^2 x + \partial^2 y + \partial^2 z \\ \partial^2 x &= \partial^2 / \partial x^2, \quad \partial^2 y = \partial^2 / \partial y^2, \quad \partial^2 z = \partial^2 / \partial z^2 \end{aligned}$$

変位関数 u, v, w と変位関数 f_3, ϕ_3 の関係は以下のよう示される。

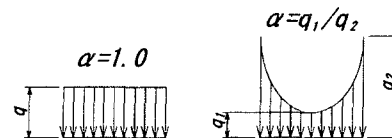
$$\begin{aligned} 2\mu u &= -\partial x \partial z f_3 + \partial y \phi_3 \\ 2\mu v &= -\partial y \partial z f_3 - \partial x \phi_3 \end{aligned}$$

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

ここに、 λ, μ : Lamé の定数



(a) 貞升による接地圧分布



(b) 接地圧分布のモデル

図-1 橋軸直角方向の輪荷重の接地圧分布

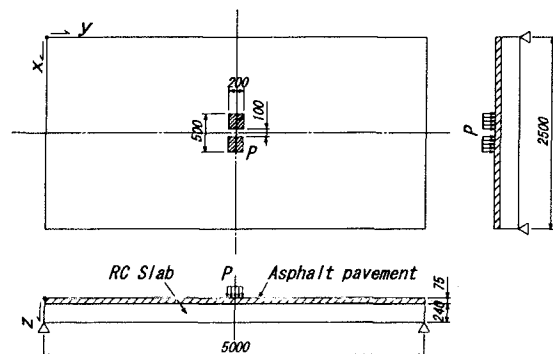


図-2 解析モデル (単位: mm)

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

2.3 水平力の算出方法

(1) 遠心力作用時

遠心力による水平力は曲線半径に依存し、式(2)で与えられる。本研究では水平力の作用形態として、図-2 に示す等分布荷重とした場合と、速度によってタイヤの側壁に偏った荷重分布となることを考慮した三角形分布の2種類を対象とした。なお、曲線半径は道路構造令に規定されている値を用いるものとし、遠心力による作用荷重が全て舗装と床版の界面に伝達されるものと仮定して計算を進める。

$$T = \frac{W}{g} \cdot \frac{v^2}{r} \quad (2)$$

ここに、

- T: 作用力
- W: 重量
- v: 速度
- r: 曲線半径



図-2 遠心力の導入形態

(2) 制動荷重作用時

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。本論文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⁶⁾。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。縦すべり摩擦係数の算出方法は、図-3の状態と与えられるエネルギー保存則から算出できる。

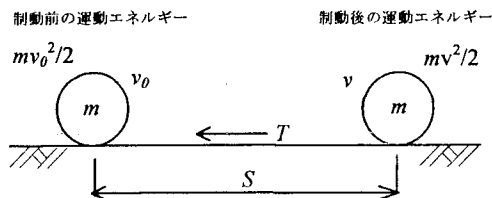


図-3 縦すべり摩擦係数の計算モデル

運動エネルギーと仕事量との関係は式(3)となり、その式を整理すれば縦すべり摩擦係数を算出する式(4)となる。

$$\frac{1}{2} m \cdot v_0^2 - T \cdot S = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (3)$$

ここに、

- S: 制動距離
- v₀: 初速
- v: 作用を受けた後の速度

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

ここに、

- β: 縦すべり摩擦係数

表-2 大型車両の縦すべり摩擦係数

走行速度 V ₀ =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	0.443

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とすることが適当であり、この値を用いて舗装と床版での界面の応力度を計算する。

3. 舗装と床版の界面に発生する応力

表-3に遠心力や制動力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。表-3の(a)と(b)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、(c)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。界面に発生する水平せん断応力は、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になると大きな応力値となっている。これらは、走行速度が大きくなるに従ってタイヤ側壁側に荷重分布が大きく偏ることによる影響であると考えられる。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。

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

速度 V (km/h)		σ_x (N/mm ²)					
水平力 無(0)		0		60		80	
		So	Seo	Seo/So	So	Seo/So	
ヤング係数	0.05	1.18	1.18	1	1.18	1	
	0.1	1.18	1.18	1	1.18	1	
	0.2	1.17	1.17	1	1.17	1	
	0.5	1.16	1.16	1	1.16	1	
	1	1.14	1.14	1	1.14	1	
	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) 橋軸方向のコンクリート応力

速度 V (km/h)		σ_y (N/mm ²)					
水平力 無(0)		0		60		80	
		So	Seo	Seo/So	So	Seo/So	
ヤング係数	0.05	1.01	1.01	1	1.01	1	
	0.1	1.01	1.01	1	1.01	1	
	0.2	1.01	1.01	1	1.01	1	
	0.5	0.996	0.996	1	0.995	1	
	1	0.978	0.977	1	0.977	1	
	1.5	0.961	0.96	1	0.959	1	
Ea	2	0.944	0.944	1	0.943	1	
(kN/mm ²)	2.5	0.929	0.929	1	0.928	1	

(c) 界面の鉛直応力

速度 V (km/h)		σ_z (N/mm ²)					
水平力 無(0)		0		60		80	
		So	Seo	Seo/So	So	Seo/So	
ヤング係数	0.05	-0.573	-0.485	0.85	-0.418	0.73	
	0.1	-0.573	-0.484	0.84	-0.418	0.73	
	0.2	-0.572	-0.484	0.85	-0.418	0.73	
	0.5	-0.57	-0.483	0.85	-0.417	0.73	
	1	-0.567	-0.48	0.85	-0.415	0.73	
	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	

(d) 界面の付着せん断応力

速度 V (km/h)		τ_{xz} (N/mm ²)					
水平力 無(0)		0		60		80	
		So	Seo	Seo/So	So	Seo/So	
ヤング係数	0.05	0.163	0.163	1	0.167	1.02	
	0.1	0.163	0.164	1	0.167	1.02	
	0.2	0.164	0.165	1	0.168	1.02	
	0.5	0.166	0.167	1	0.17	1.02	
	1	0.17	0.17	1	0.173	1.02	
	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	

4. 遠心力作用時の応力状態

輪荷重がカーブ区間を走行する際の遠心力を考慮した場合の応力状態を表-4 に示す。表-4 の(a), (b)でのコンクリート応力は水平力を考慮しない場合とほぼ同様であるが、(c)の舗装と床版界面の鉛直応力は小さくなっているが、付着せん断応力は大きくなっており、速度の大きさとヤング係数の変化にも影響を受けていることが判る。因みに、舗装のヤング係数が大きいほど付着せん断応力が大きくなっていることから、舗装のヤング係数が小さい夏季よりもヤング係数が大きくなる冬季の方が防水層にとっては厳しい環境条件になることが伺える。特にタイヤ側壁に偏った分布であることを考慮した三角形分布作用では等分布のそれよりも大きな値になっており、防水層を検討する際の応力分布では三角形分布の方が安全側の設定になることから、荷重設定には注意を要する。

表-4 遠心力作用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

速度 V (km/h)		σ_x (N/mm ²)								
水平力		無(N)	等分布(U60)		三角分布(T60)		倍率		80	
			(U60)	(T60)	U60/N	T60/N	(U80)	(T80)	U80/N	T80/N
ヤング係数	0.05	1.18	1.18	1.18	1	1	1.18	1.18	1	1
	0.1	1.18	1.18	1.18	1	1	1.18	1.18	1	1
	0.2	1.17	1.17	1.17	1	1	1.17	1.17	1	1
	0.5	1.16	1.16	1.16	1	1	1.16	1.16	1	1
	1	1.14	1.14	1.13	1	0.99	1.14	1.13	1	1
	1.5	1.11	1.12	1.11	1	1	1.11	1.11	1	1
Ea	2	1.09	1.1	1.09	1	1	1.09	1.09	1	1
(kN/mm ²)	2.5	1.08	1.08	1.07	1	0.99	1.08	1.07	1	1

(b) 橋軸方向のコンクリート応力

速度 V (km/h)		σ_y (N/mm ²)								
水平力		無(N)	等分布(U60)		三角分布(T60)		倍率		80	
			(U60)	(T60)	U60/N	T60/N	(U80)	(T80)	U80/N	T80/N
ヤング係数	0.05	1.01	1.01	1.01	1	1	1.01	1.01	1	1
	0.1	1.01	1.01	1.01	1	1	1.01	1.01	1	1
	0.2	1.01	1.01	1	1	0.99	1.01	1	1	0.99
	0.5	0.996	0.996	0.992	1	1	0.995	0.991	1	1
	1	0.978	0.977	0.974	1	1	0.976	0.973	1	1
	1.5	0.961	0.96	0.957	1	1	0.959	0.956	1	1
Ea	2	0.944	0.944	0.941	1	1	0.943	0.94	1	1
(kN/mm ²)	2.5	0.929	0.929	0.925	1	1	0.928	0.925	1	1

(c) 界面の鉛直応力

速度 V (km/h)		σ_z (N/mm ²)								
水平力		無(N)	等分布(U60)		三角分布(T60)		倍率		80	
			(U60)	(T60)	U60/N	T60/N	(U80)	(T80)	U80/N	T80/N
ヤング係数	0.05	-0.573	-0.486	-0.463	1	0.95	-0.419	-0.399	1	0.95
	0.1	-0.573	-0.486	-0.463	1	0.96	-0.419	-0.399	1	0.95
	0.2	-0.572	-0.485	-0.462	1	0.95	-0.419	-0.398	1	0.95
	0.5	-0.57	-0.484	-0.461	1	0.95	-0.418	-0.397	1	0.95
	1	-0.567	-0.482	-0.459	1	0.96	-0.416	-0.396	1	0.95
	1.5	-0.565	-0.48	-0.457	1	0.96	-0.415	-0.395	1	0.96
Ea	2	-0.562	-0.477	-0.455	1	0.96	-0.413	-0.393	1	0.95
(kN/mm ²)	2.5	-0.559	-0.476	-0.454	1	0.96	-0.412	-0.392	1	0.95

(d) 界面の付着せん断応力

速度 V (km/h)		τ_{xz} (N/mm ²)								
水平力		無(N)	等分布(U60)		三角分布(T60)		倍率		80	
			(U60)	(T60)	U60/N	T60/N	(U80)	(T80)	U80/N	T80/N
ヤング係数	0.05	0.163	0.185	0.192	1.13	1.18	0.186	0.193	1.11	1.16
	0.1	0.163	0.185	0.193	1.13	1.18	0.186	0.193	1.11	1.16
	0.2	0.164	0.186	0.193	1.13	1.17	0.187	0.193	1.11	1.15
	0.5	0.166	0.188	0.195	1.13	1.19	0.189	0.195	1.11	1.15
	1	0.17	0.191	0.198	1.12	1.16	0.192	0.198	1.11	1.14
	1.5	0.173	0.194	0.200	1.12	1.16	0.194	0.200	1.1	1.14
Ea	2	0.176	0.196	0.203	1.11	1.15	0.197	0.203	1.1	1.13
(kN/mm ²)	2.5	0.178	0.199	0.205	1.11	1.15	0.199	0.205	1.1	1.13

表-5 遠心力を受ける冬季の水平せん断応力

速度 V(km/h)		0	60				80			
水平力		無(N)	等分布(U60)	三角分布(T60)	倍率		等分布(U80)	三角分布(T80)	倍率	
			(U60)	(T60)	U60/N	T60/N	(U80)	(T80)	U80/N	T80/N
荷重位置	450	0.184	0.205	0.212	1.11	1.15	0.205	0.211	1.15	1.18
	650	0.18	0.200	0.207	1.11	1.15	0.201	0.207	1.12	1.18
	850	0.178	0.198	0.205	1.11	1.15	0.199	0.205	1.11	1.18
	1050	0.177	0.197	0.204	1.11	1.15	0.198	0.204	1.11	1.18
	1250	0.176	0.196	0.203	1.11	1.15	0.197	0.203	1.1	1.18

次に、舗装のヤング係数の設定を冬季を想定した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表-5 に示す。表における荷重位置は支持辺からの離れであり、支持辺に近い方が付着せん断力の値も大きくなっている。また、等分布載荷の支持辺付近と三角形分布載荷では防水層に要求されるせん断応力の規格値である $\tau_a=0.2\text{N/mm}^2$ を超過しており、環境条件を加味した計算結果によれば規格値の見直しが必要である。

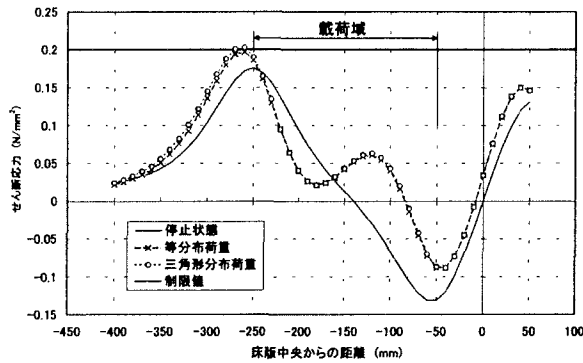


図-4 遠心力による付着せん断応力分布

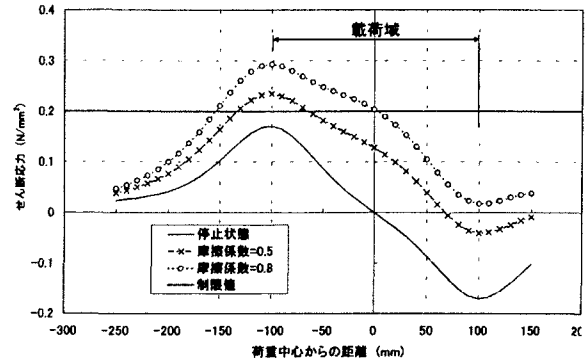


図-5 制動力作用時の付着せん断応力分布

表-6 制動力作用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

		σ_x (N/mm ²)								
速度 V (km/h)		60				80				
摩擦係数 μ	μ	σ_0	(a) 0.5	(b) 0.8	倍率		(a) 0.5	(b) 0.8	倍率	
					(a)/ σ_0	(b)/ σ_0			(a)/ σ_0	(b)/ σ_0
ヤング係数	0.05	1.15	1.19	1.22	1.03	1.08	1.2	1.22	1.05	1.06
	0.1	1.14	1.19	1.22	1.04	1.07	1.19	1.22	1.04	1.07
	0.2	1.14	1.19	1.22	1.04	1.07	1.19	1.22	1.04	1.07
	0.5	1.13	1.17	1.2	1.04	1.06	1.17	1.2	1.04	1.06
	1	1.1	1.15	1.18	1.05	1.07	1.15	1.18	1.05	1.07
E_a	1.5	1.08	1.13	1.15	1.05	1.06	1.13	1.15	1.05	1.06
	2	1.06	1.11	1.13	1.05	1.07	1.11	1.13	1.05	1.07
	2.5	1.04	1.09	1.11	1.05	1.07	1.09	1.11	1.05	1.07

(b) 橋軸方向のコンクリート応力

		σ_y (N/mm ²)								
速度 V (km/h)		60				80				
摩擦係数 μ	μ	σ_0	(a) 0.5	(b) 0.8	倍率		(a) 0.5	(b) 0.8	倍率	
					(a)/ σ_0	(b)/ σ_0			(a)/ σ_0	(b)/ σ_0
ヤング係数	0.05	0.918	1	1.05	1.09	1.15	1	1.05	1.09	1.15
	0.1	0.916	1	1.05	1.09	1.15	0.999	1.05	1.09	1.15
	0.2	0.912	0.995	1.05	1.09	1.15	0.995	1.05	1.09	1.15
	0.5	0.902	0.983	1.03	1.09	1.14	0.983	1.03	1.09	1.14
	1	0.885	0.964	1.01	1.09	1.14	0.963	1.01	1.09	1.14
E_a	1.5	0.869	0.946	0.993	1.09	1.14	0.945	0.992	1.09	1.14
	2	0.854	0.929	0.975	1.09	1.14	0.928	0.974	1.09	1.14
	2.5	0.839	0.913	0.957	1.09	1.14	0.912	0.957	1.09	1.14

(c) 界面の鉛直応力

		σ_z (N/mm ²)								
速度 V (km/h)		60				80				
摩擦係数 μ	μ	σ_0	(a) 0.5	(b) 0.8	倍率		(a) 0.5	(b) 0.8	倍率	
					(a)/ σ_0	(b)/ σ_0			(a)/ σ_0	(b)/ σ_0
ヤング係数	0.05	-0.291	-0.351	-0.414	1.42	1.68	-0.318	-0.38	1.49	1.78
	0.1	-0.291	-0.351	-0.413	1.43	1.68	-0.317	-0.38	1.49	1.78
	0.2	-0.291	-0.35	-0.413	1.42	1.68	-0.317	-0.379	1.49	1.78
	0.5	-0.29	-0.349	-0.411	1.42	1.67	-0.316	-0.378	1.48	1.78
	1	-0.288	-0.347	-0.408	1.42	1.67	-0.314	-0.375	1.48	1.77
E_a	1.5	-0.287	-0.344	-0.405	1.42	1.67	-0.312	-0.372	1.48	1.76
	2	-0.286	-0.342	-0.402	1.41	1.65	-0.31	-0.37	1.48	1.76
	2.5	-0.284	-0.34	-0.399	1.41	1.65	-0.308	-0.367	1.47	1.76

(d) 界面の付着せん断応力

		τ_{yz} (N/mm ²)								
速度 V (km/h)		60				80				
摩擦係数 μ	μ	σ_0	(a) 0.5	(b) 0.8	倍率		(a) 0.5	(b) 0.8	倍率	
					(a)/ σ_0	(b)/ σ_0			(a)/ σ_0	(b)/ σ_0
ヤング係数	0.05	0.163	0.249	0.312	1.73	2.17	0.235	0.296	1.82	2.31
	0.1	0.163	0.249	0.312	1.73	2.17	0.235	0.293	1.81	2.29
	0.2	0.163	0.249	0.312	1.73	2.17	0.235	0.297	1.81	2.28
	0.5	0.165	0.248	0.311	1.7	2.13	0.235	0.297	1.79	2.27
	1	0.167	0.249	0.31	1.68	2.09	0.235	0.295	1.75	2.2
E_a	1.5	0.169	0.249	0.309	1.66	2.06	0.235	0.294	1.73	2.16
	2	0.171	0.248	0.307	1.64	2.02	0.235	0.293	1.7	2.12
	2.5	0.173	0.249	0.306	1.62	1.99	0.235	0.292	1.68	2.09

図-4は冬季を想定した走行速度 $v=80\text{km/h}$ における界面の橋軸直角方向の付着せん断応力の分布を示したものである。図は計算モデルのダブルタイヤの片側範囲を対

象としており、荷重載荷中心からの距離 $l=260\text{mm}$ で付着せん断応力が最大になることが判る。この傾向はヤング係数の大小に関係なく、走行速度が $v=60\text{km/h}$ でも同様である。また等分布と三角形分布の応力分布はほぼ同じ値となっていることが判る。

5. 制動荷重作用時の応力状態

表-6は水平力として制動力を考慮した舗装と床版の界面の応力状態を示したものである。遠心力の場合とは異なり、表-6(a), (b)のコンクリート面における橋軸方向や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(c)の鉛直応力が直応力よりも大きい倍率となっている。(d)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である $\tau_a=0.2\text{N/mm}^2$ を超過していることから、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ことが判る。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が最も大きな値となっているが、一般道レベルの $v=60\text{km/h}$ 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-7は、舗装のヤング係数を冬季を想定した $E_a=2.0\text{kN/mm}^2$ 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。表によれば、全

ての位置で規格値を超過しているものの、作用位置による値の変化は殆どなく、局所的挙動であることが判る。このことは、荷重の作用位置に関係なくどの位置でも急

表一七 制動力による冬季の付着せん断応力

速度 V (km/h)		60						80			
摩擦係数 μ	0	倍率				倍率					
		(a) 0.5	(b) 0.8	(a)/0 ₀	(b)/0 ₀	(a) 0.5	(b) 0.8	(a)/0 ₀	(b)/0 ₀		
荷重位置	450	0.171	0.248	0.308	1.64	2.05	0.235	0.294	1.73	2.75	
	650	0.171	0.249	0.307	1.64	2.05	0.235	0.293	1.73	2.75	
	850	0.171	0.249	0.307	1.64	2.05	0.235	0.293	1.73	2.75	
	1050	0.171	0.249	0.307	1.64	2.05	0.235	0.293	1.73	2.75	
	1250	0.171	0.249	0.307	1.64	2.05	0.235	0.293	1.73	2.75	

制動による付着せん断応力は規格値を超過していることが判る。

図-5は冬季を想定した走行速度 $v=80\text{km/h}$ 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。

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によっ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遠心力や制動時の縦すべり摩擦係数を考慮した計算を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 1) 遠心力や制動力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 $v=60\text{km/h}$ では停止時と同じレベルであるが時速 $v=80\text{km/h}$ になると大きくなる。
- 2) 輪荷重がカーブ区間を走行する際の遠心力を考慮した場合の応力状態は、コンクリートの応力は水平力を考慮しない場合とほぼ同様であるが、舗装と床版界面の鉛直応力と付着せん断応力は大きくなる。また、速度の大きさとヤング係数の変化にも影響を受けており、夏季よりも冬期の方が防水層にとっては厳しい環境条件になる。
- 3) 遠心力作用時で冬季を想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は、支持辺に近い方が大きな値となっており等分布載荷の支持辺付近と三角形分布載荷では防水層に要求されるせん断応力の規格値を超過していることから、規格値の見直しが必要である。

- 4) 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や橋軸直角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。

- 5) 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り得ることが示された。
- 6) 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。

本研究における計算条件では、舗装と床版は完全に一体化して、界面応力が伝達すると仮定している。しかし実際の防水層工事では接着力低下をもたらす施工不良やブリスタリングによる浮き現象、および舗装転圧時での防水層の破損が発生して、一体化が認められないとの報告もある。このことを踏まえて、部分的に防水層が欠損して界面はく離する場合に対応する解析手法の開発と応力状態の把握が今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 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
- 3) 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) 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
- 5) 貞升文雄：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
- 6) 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