

## 輪荷重の接地圧分布による影響について

### On effects by various distributions of contact pressures for wheel tire

谷口 義則\*, 堀川都志雄\*\*

Yoshinori TANIGUCHI, Toshio HORIKAWA

\* 大阪工業大学 工学部 都市デザイン工学科 研究員 (〒533-0002 大阪市旭区大宮 5-16-1)

\*\* 工博 大阪工業大学 工学部 都市デザイン工学科 教授 (〒533-0002 大阪市旭区大宮 5-16-1)

In this study several numerical values of deflection and some stresses in RC slab composite with asphalt pavement are obtained by thick plate theory under two uniform and parabolic distributions of contact pressures of wheel tire. Also shearing stresses parallel to and transversely normal stress perpendicular to contact surface between pavement and deck slab are rigorously calculated and shearing stresses near loaded area of wheel tire are in particularly compared in summer and winter season. Numerical values recommend individually by Japan express highway and Hanshin express highway are discussed about stresses acted on contact surface related to water-proof layer from mechanical viewpoint.

keyword : contact pressures, water-proof layer, thick plate theory

**1. 序論** 近年、公共事業における建設コストの削減と国際競争力の向上をめざして、設計概念をこれまでの仕様照査型設計から性能照査型設計へと転換が図られている。これにより構造物の設計に求められるのは与えられた条件に対して、確実に抵抗でき、かつ安全な構造物を作り出すことになる。極論をすれば、条件を満たせばどのような構造系でも可能であるといえる。一方、設計された構造物が要求性能を満たすことを実証する作業は、より重要性が増すことは明白である。

道路橋床版ではその疲労性能を検証する手法として輪荷重試験装置による疲労実験が有効であるという認識が高まっており、これまでに多くの実験が行われてきた。しかし、その実験手法および採取されたデータの処理等はそれぞれ独自に行われており、判定基準として確立されているものはないのが現状である。

現在、国内の輪荷重試験装置は自走式(図 1.1)とクランク式(図 1.2)の 2 つのタイプに大別される。自走式では空気入り、もしくはウレタンを充填したゴムタイヤにより直接試験体に載荷している。一方、クランク式では硬質ゴムの載荷板を介して鉄輪により載荷されている。このように載荷に用いられる載荷板の性質が試験装置により異なることから、試験体に作用する荷重値は同等であっても接地面内に作用する圧力分布形状には差が生じていることはよく知られている。

本研究では、床版の上面に敷設されるアスファルト舗装と床版が一体となって挙動する場合、輪荷重の接

地圧分布の違いにより生じるこれらの各層の変形や応力を局所的解析が可能な厚板理論を用いて、多層板の解析法により力学的に検討を行う。特に床版上面に作用する付着せん断応力や鉛直応力に着目する。

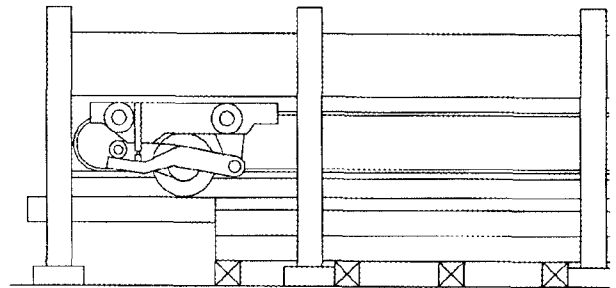


図 1.1 自走式輪荷重試験装置(大阪工業大学)

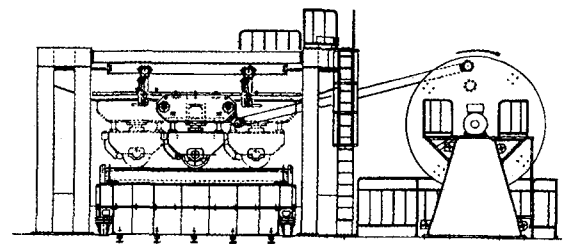
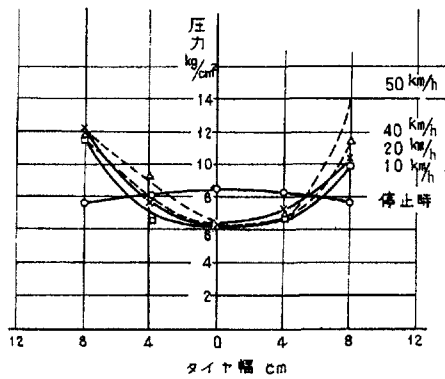
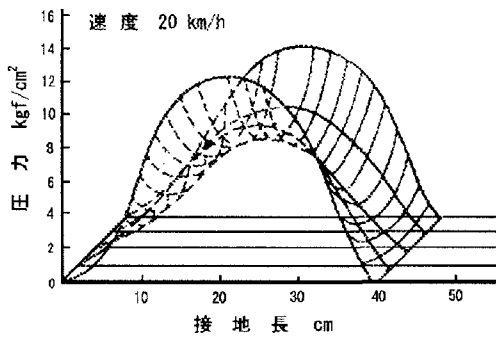


図 1.2 クランク式輪荷重試験装置(土木研究所)

**2. 接地圧分布の仮定** 輪荷重の接地圧分布に関する研究は非常に少なく、実際の車両および輪荷重試験機での接地圧分布に関する詳細は未だ解明されていない。



a) 橋軸直角方向



b) 橋軸方向

図 2.1 貞升による接地圧分布

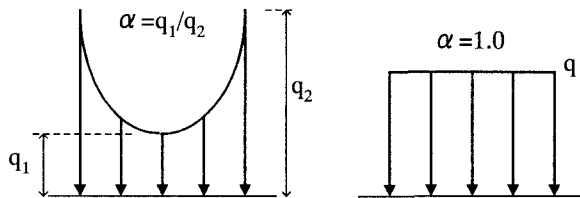


図 2.2 タイヤ幅方向の接地圧分布

昭和 44 年に発表された貞升の実験<sup>1)</sup>によれば後輪 1 輪片側のタイヤ幅方向（橋軸直角方向）の接地圧分布は図 2.1 a) のように示される。また、橋軸方向の接地圧分布を同図 b) に示す。

タイヤ幅方向の接地圧は停止時では接地面内でほぼ平均的に作用し、走行速度が増すに伴い、タイヤの側壁に向かって集中する。

本研究では、タイヤ幅方向（橋軸直角方向）の接地圧分布を図 2.2 のように、二次関数で表せるものとし、接地面の中央と端部との接地圧強度の大きさの比を  $\alpha$  と仮定している。また、橋軸方向の分布は幅 200mm の一様な形状としている。

輪荷重実験では前述の様に種々の載荷形式が用いられており、それぞれの性質から接地圧は次のように推測される。比較的柔な性質を持つ自走式の空気入りタイヤの接地圧は等分布状に作用していると推測されており、一方、鉄輪を用いるクランク式性質は剛な性状を示し、載荷板の端部で接地圧が大きくなると推測さ

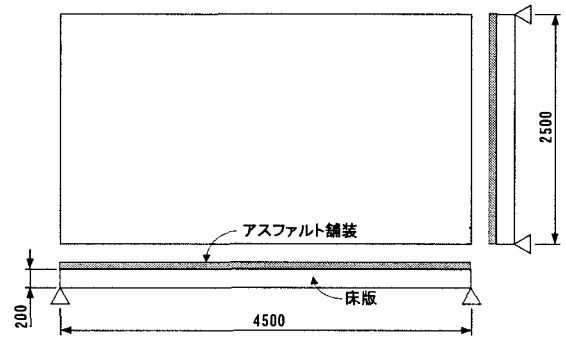


図 3.1 解析モデル

表 3.1 材料定数

	ヤング率(kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
アスファルト層(夏季)	0.2	0.4
アスファルト層(冬季)	10.0	0.4
RC床版	30.0	0.2

れている。すなわち、 $\alpha$  の値は自走式では 1.0 に近く、クランク式では 1.0 よりも小さくなる分布形状を有していると考えられる。

**3. 解析モデル** 解析に用いたモデルを図 3.1 に示す。床版厚 200mm のコンクリート床版上に舗装厚 75mm のアスファルト舗装を施し、完全合成した 2 層の板を考える。支持条件は辺長比 1:1.8 の一方向版の性状を表す全周単純支持とし、主桁間隔を 2.5m、橋軸方向長さを 4.5m とした。

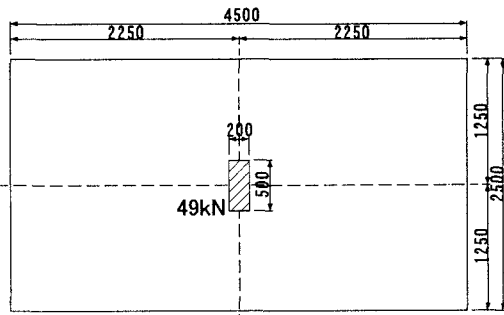
板を構成するそれぞれの材料定数を表 3.1 に示す。

アスファルトは感温性が高く外気温によって弾性係数が異なる性状を有している。アスファルト舗装要綱<sup>2)</sup>によれば弾性係数の範囲は約 0.2~10.0kN/mm<sup>2</sup>とされている。そこで夏季時にはその最小値 0.2kN/mm<sup>2</sup>とし、冬季では最大値の 10.0kN/mm<sup>2</sup>と設定した。また、ポアソン比は夏季時には大きくなることが予想されるが、本論文では冬季時と同一に仮定した。

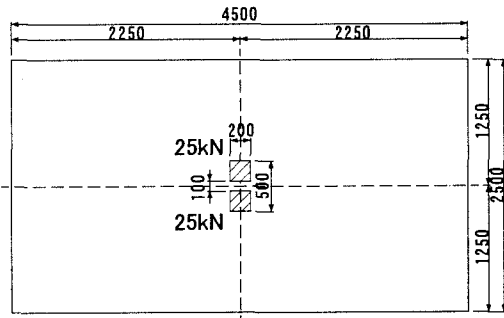
道路橋示方書<sup>3)</sup>（以下、道示と称する）の床版の設計では舗装部を介して外力が 45° の分散角度をもって作用するとの観点から、2つのタイヤを 1つにまとめ、輪荷重の載荷面を 200mm×500mm の長方形としている。一方、床版防水工の設計ではこのような外力の作用条件は明確ではなく、輪荷重の大きささえも確立していない。そこで、後輪 1 輪の輪荷重の接地面積と大きさを図 3.2 のように 3つのパターンを想定した。

道示の B 活荷重 98kN はタンデム車輛の前後の 2つを合算したものを想定しており、床版を設計する場合に簡素化された方式の方が簡便であるとの理由によってと推測される。しかし、アスファルト舗装や防水層のような局所的な荷重に支配される場合には、忠実に実際の輪荷重の取扱いをすることが望ましいと考えられる。

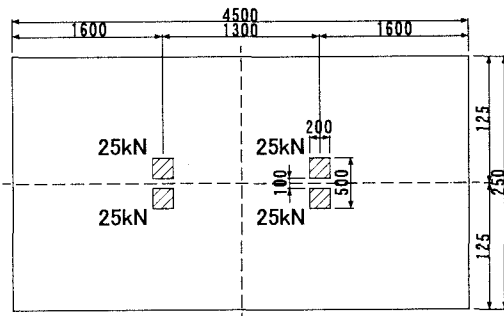
Case1 は床版の設計に用いられる 200mm×500mm の長方形の載荷面であり、Case2 はダブルタイヤを



a) Case1



b) Case2



c) Case3

図 3.2 载荷パターン

想定して 200mm×200mm の正方形の载荷面の間に 100mm の間隙を設けて配置した。さらに Case3 では大型車のタンデムタイヤを想定して橋軸方向に 1.3m の間隔を空け、2 軸のダブルタイヤが载荷される配置とした。

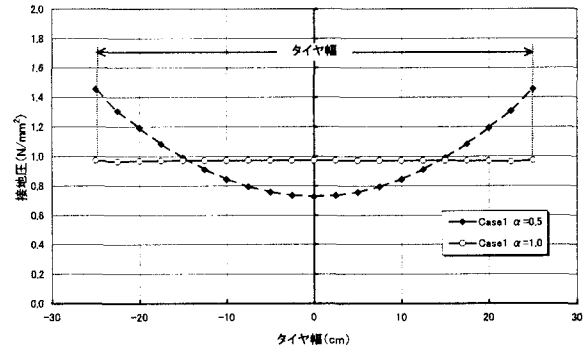
輪荷重の大きさは図の示すとおりである。

**4. 解析結果** ここでは接地圧分布の代表例として  $\alpha$  の値を 0.5 と 1.0 に設定した。貞升の実験を例に挙げると  $\alpha=1.0$  は停止状態となり、 $\alpha=0.5$  は速度 40～50km/h 時の走行中の状態に相当する。

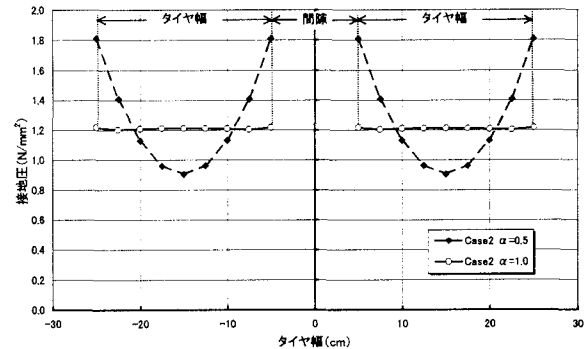
解析に用いた接地圧を図 4.1 に示す。

図より、解析に用いた  $\alpha=0.5$  の接地圧は Case1 で最大値は 1.46N/mm<sup>2</sup>、最小値は 0.73N/mm<sup>2</sup> となり、Case2 で最大値は 1.81N/mm<sup>2</sup>、最小値は 0.91N/mm<sup>2</sup> となる。 $\alpha=1.0$  (停止時) に対して、 $\alpha=0.5$  (走行時) の最大値はいずれの载荷パターンでも約 1.5 倍程度となる。

以上のモデルより得られた解析結果を表 4.1～4.3 に示す。



a) Case1



b) Case2 および Case3

図 4.1 本解析での接地圧分布

表 4.1 Case1 の解析結果

	Ea=0.2 kN/mm <sup>2</sup>		Ea=10.0 kN/mm <sup>2</sup>	
	$\alpha=1.00$	$\alpha=0.50$	$\alpha=1.00$	$\alpha=0.50$
$\delta_z$ (mm)	0.23	0.23	0.14	0.14
$\sigma_x$ (N/mm <sup>2</sup> )	1.76	1.70	1.25	1.20
$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	1.52	1.49	1.10	1.07
$\tau_{xz}$ (N/mm <sup>2</sup> )	-0.14	-0.16	-0.19	-0.21

表 4.2 Case2 の解析結果

	Ea=0.2 kN/mm <sup>2</sup>		Ea=10.0 kN/mm <sup>2</sup>	
	$\alpha=1.00$	$\alpha=0.50$	$\alpha=1.00$	$\alpha=0.50$
$\delta_z$ (mm)	0.23	0.23	0.14	0.14
$\sigma_x$ (N/mm <sup>2</sup> )	1.66	1.67	1.17	1.18
$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	1.47	1.47	1.06	1.06
$\tau_{xz}$ (N/mm <sup>2</sup> )	-0.16	-0.16	-0.22	-0.21

表 4.3 Case3 の解析結果

	Ea=0.2 kN/mm <sup>2</sup>		Ea=10.0 kN/mm <sup>2</sup>	
	$\alpha=1.00$	$\alpha=0.50$	$\alpha=1.00$	$\alpha=0.50$
$\delta_z$ (mm)	0.35	0.35	0.21	0.21
$\sigma_x$ (N/mm <sup>2</sup> )	2.13	2.14	1.50	1.50
$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	1.49	1.49	1.07	1.07
$\tau_{xz}$ (N/mm <sup>2</sup> )	-0.16	-0.16	-0.22	-0.22

計算結果の出力位置は床版の挙動を表すたわみ  $\delta_z$ 、直応力  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  を床版中央の下縁とし、床版と舗装部の付着に影響を及ぼすせん断応力  $\tau_{xz}$  は接地面の縁端部の床版とアスファルト舗装の界面位置である。いずれの値もそれぞれの値が最大値を示す位置である。

#### 4.1 接地圧分布による比較

Case1 の  $E_a=0.2\text{kN/mm}^2$ (夏季)では、たわみの場合には差は見られないが、直応力は  $\alpha=1.0$  に対して  $\alpha=0.5$  の値は  $\sigma_x$  で約 0.96 倍、 $\sigma_y$  で約 0.98 倍となる。

さらに、付着せん断応力  $\tau_{xz}$  では約 1.18 倍とその差はより顕著になっているこの傾向は  $E_a=10.0\text{kN/mm}^2$  (冬季)においても同様に見られ、 $\sigma_x$  で約 0.96 倍、 $\sigma_y$  で約 0.97 倍とアスファルトの弾性係数の増加に伴い、その差は若干、大きくなる傾向を示す。一方、付着せん断応力  $\tau_{xz}$  では約 1.10 倍に留まる。

しかし、同じ走行速度下で比較すると夏季のたわみや直応力は冬季よりも大きくなっているが付着せん断応力については約 1.3 倍程度にも達する。

Case2 および Case3 では、同じ季節においてはたわみ、直応力は  $\alpha$  の値が異なっても差はほとんど見られず、せん断応力に関してもその差は約 0.98~0.97 倍程度に留まっている。しかし、同じ走行速度下で比較すると Case1 と同様、付着せん断応力は約 1.3 倍となる。

#### 4.2 荷重パターンによる比較

たわみについては Case1 および Case2 のいずれの荷重パターンによっても差は見られない。直応力  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  について、Case1 に対する Case2 の比はそれぞれ約 0.94~0.98 倍、約 0.96~0.99 倍と Case1 による解析値が大きくなる傾向が見られ、このことは Case1 が床版に対して不利な荷重方法であり、設計では安全側の計算であると言える。

一方、せん断応力  $\tau_{xz}$  に関しては Case1 と Case2 の解析結果の比は約 1.00~1.21 倍となり、等分布の接地圧では Case2 の荷重パターンが不利な結果となっている。この結果、床版と舗装部の付着応力を計算するには Case2 のような荷重パターンによって、解析を行う必要があると思われる。

### 5. 床版防水層に作用するせん断応力の検討

コンクリート床版は既往の研究より床版上面からの雨水の浸入が床版の劣化を促進させているといわれており、床版の上面に防水工を施すことが一般的に行われている。

ここで、防水層の厚みが 2~3mm と薄いため床版と舗装部の界面に働く応力が防水層に働く応力とほぼ同等であると考え、接地圧分布の影響により防水層に働く応力にも差が生じると推察される。

前述の解析結果より Case2 の荷重パターンによる解析が付着性能に対し、もっとも厳しい条件であると言えることから、以下では Case2 による解析を採用する。

図 5.1 は  $E_a=0.2\text{kN/mm}^2$  のタイヤ幅方向のせん断応力の分布図である。等分布の分布状態である  $\alpha=1.0$  を基準に  $\alpha=0.5$  の値を見ると、分布形状が接地面のエッジ付近で急激に増加している。また、最大値は  $0.165\text{N/mm}^2$  といずれの  $\alpha$  に対してもほぼ同程度となり、その作用位置がわずかではあるが接地面の外に現

れていることが分かる。

輪荷重 ( $\alpha=0.5$ ) 直下の床版上面における付着せん断応力  $\tau_{xz}$  と  $\tau_{yz}$  の合ベクトルを図 5.2 に示す。

図 5.3 は弾性係数と接地圧分布の違いによる最大せん断応力の解析結果である。

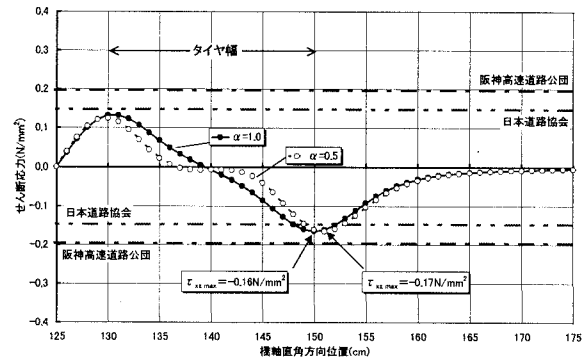


図 5.1 床版防水工に働くせん断応力 ( $E_a=0.2\text{kN/mm}^2$ )

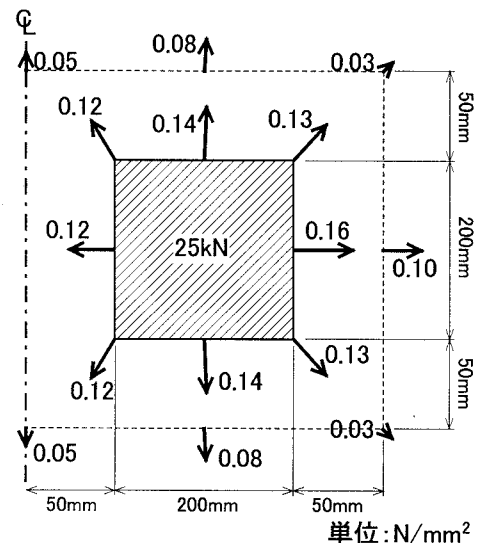


図 5.2 輪荷重直下の合せん断応力ベクトル

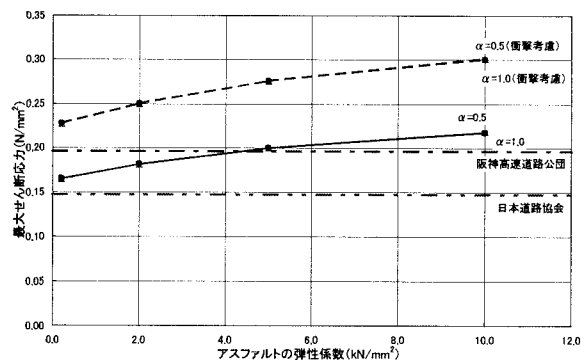


図 5.3 防水工に作用する最大せん断応力

最大せん断応力は約  $0.16\sim 0.22\text{N/mm}^2$  で推移しており、床版と同じ衝撃係数  $i=20/(50+1)$  を考慮すれば約  $0.22\sim 0.30\text{N/mm}^2$  にも昇ることが分かる。

阪神高速道路公団<sup>4)</sup>と日本道路協会<sup>5)</sup>では床版防水層に対する品質基準を設けており、図 5.1 および図 5.2

に示す値はいずれも試験温度 20℃で基準値はそれぞれ 0.20N/mm<sup>2</sup>と 0.15N/mm<sup>2</sup>である. 図によると衝撃係数を考慮した解析結果はいずれも基準値を超えており, さらに, 冬季時には表 4.2 で示した通り, 付着せん断応力は夏季時の約 1.3 倍にも及ぶことを考慮すればこの基準値を検討する必要があると考えられる.

**6. 床版防水層に作用する鉛直応力の検討** Case1および Case2 における床版防水層に作用する鉛直応力について論じる. 図 6.1 は日本道路公団が採用する防水性試験の試験方法である<sup>9)</sup>. この試験方法では図のような試験体をコンプレッサーにより 0.5N/mm<sup>2</sup>の水圧をかけて防水材の透水性を検証するものである.

以下, 防水性試験の加圧水圧 0.5N/mm<sup>2</sup>を床版防水層の基準値と考え, 本研究の解析結果と比較する.

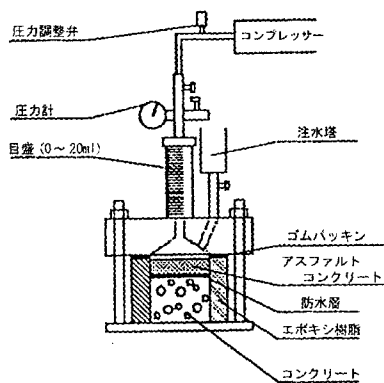
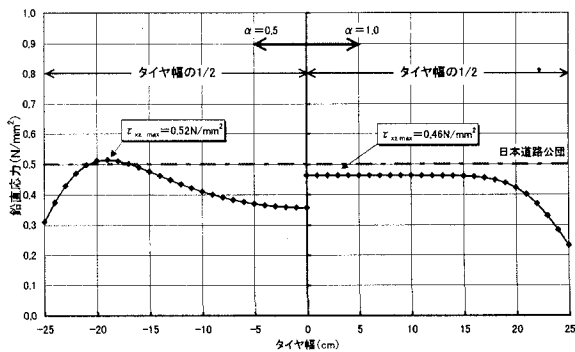
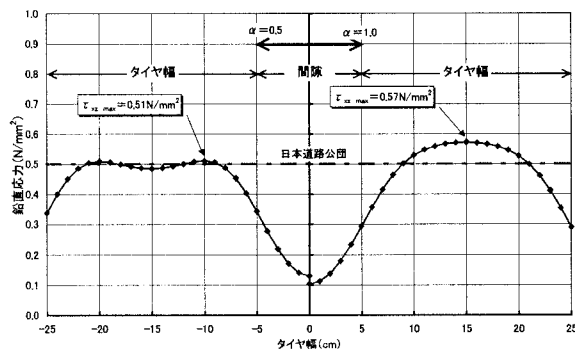


図 6.1 防水性試験方法 (日本道路公団)



a) Case1



b) Case2

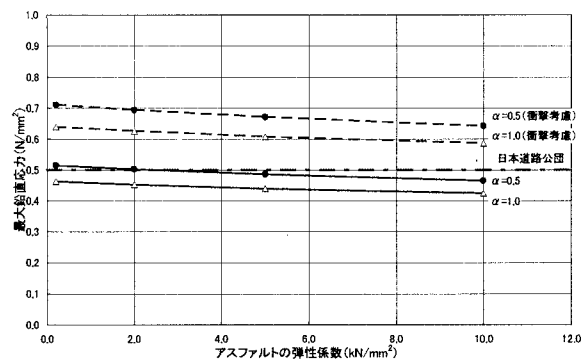
図 6.2 床版防水工に働く鉛直応力分布 ( $E_a=0.2\text{kN/mm}^2$ )

図 6.2 は  $E_a=0.2\text{kN/mm}^2$  (夏季) でのタイヤ幅方向の鉛直応力の分布図である.

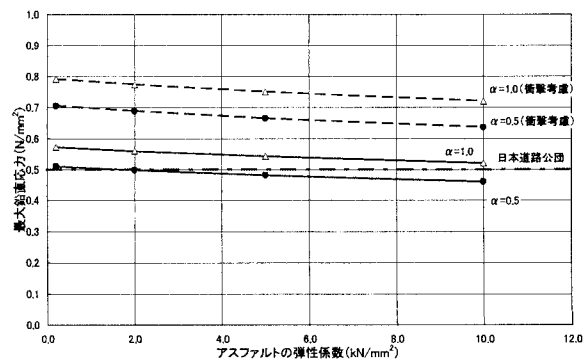
Case1 では  $\alpha=1.0$  が接地面内ではほぼ均等に応力が作用し, 接地面のほぼ中央で最大値 0.46N/mm<sup>2</sup> となるのに対して,  $\alpha=0.5$  では接地面端部から約 50mm 程度の位置で最大値 0.52N/mm<sup>2</sup> となり, 中央に向かって緩やかに減少する傾向が見られる.

一方, Case2 では  $\alpha=1.0$  は接地面中央に至るまで増加しているのに対し,  $\alpha=0.5$  では接地面内ではほぼ均等に応力が発生している. 最大値はそれぞれ 0.57N/mm<sup>2</sup> と 0.51N/mm<sup>2</sup> であった.

弾性係数と接地圧分布の違いによる最大鉛直応力の関係を図 6.3 に示す.



a) Case1



b) Case2

図 6.3 防水工に作用する最大鉛直応力

Case1 では  $\alpha=1.0$  時で 0.42~0.46N/mm<sup>2</sup>,  $\alpha=0.5$  時で 0.47~0.52N/mm<sup>2</sup> となり, 衝撃を考慮するとそれぞれ 0.59~0.64N/mm<sup>2</sup>, 0.64~0.71N/mm<sup>2</sup> で推移している. Case2 では  $\alpha=1.0$  時で 0.52~0.57N/mm<sup>2</sup>,  $\alpha=0.5$  時で 0.46~0.51N/mm<sup>2</sup> となり, 衝撃を考慮するとそれぞれ 0.72~0.79N/mm<sup>2</sup>, 0.64~0.71N/mm<sup>2</sup> にも達する. Case1 および Case2 のいずれの荷重パターンでもアスファルトの弾性係数の増加に対して, 鉛直応力が減少する傾向が見られる. すなわち, 外気温によってアスファルトの温度が上昇し, 弾性係数が減少する夏季に注意を要することが推察される.

また, Case1 では基準値内に収まるところも見られることから床版の設計に用いられる接地面により基準

値を算出したように思われる。しかし、Case2の解析結果のほとんどが基準値を上回る結果となり、衝撃を考慮すれば、いずれの条件でも防水層の破損の引き金になる状態であると言える。

Case1とCase2を比較すると $\alpha$ の値が減少するに伴い、Case1では最大鉛直応力が増加するのに対し、Case2では減少する傾向が見られ、輪荷重の接地圧分布と接地面積の関係を早急に把握することが必要である。

**8. まとめ** 以上のことをまとめると次のように示される。

- ① たわみ、直応力の解析結果では接地圧分布による差は微少な値に留まっており、床版に対しては接地圧分布の形状による影響を考慮する必要はないと考えられる。一方、付着せん断応力については他の解析値と比較してCase1の $\alpha=1.0$ は約20%程度の差が見られ、B活荷重と同様の载荷パターンで防水層の設計を行うことは危険であると判断できる。
- ② 防水層に作用するせん断応力は接地圧の分布形状により最大値が発生する位置が異なっているものの最大値に差はなかった。基準値と比較するとせん断応力の基準値に関して、試験温度20℃での基準値が衝撃係数を考慮した計算値を下回っている。
- ③ 鉛直応力に関しても防水性試験における加圧水圧と衝撃係数を考慮した計算値を比較した結果、大幅に下回っている。
- ④ 道路橋床版では平成12年に鋼橋床版の調査研究小委員会「道路橋床版の新技术と性能照査型設計」で、重交通が予想される路線では照査活荷重として150kNのタンデム輪荷重を考慮して照査することが提案されている。本論文では1輪当たり49kNとして解析を行っており、この提案に基づいて解析を行うと約3倍程度の応力が発生することになる。高規格化された床版に対し、同程度の性能を備えた防水層の基準が必要と思われる。

⑤ 床版と舗装部の界面の応力分布に着目すると、せん断応力および鉛直応力のいずれも接地圧分布の形状により最大値およびその作用位置が異なっているため、輪荷重試験において防水層など舗装下部に介在物を配置する走行実験や解析を行う場合、接地面および接地圧分布を調査し、十分に吟味する必要がある。

⑥ これまでに行った解析では、貞升の実験結果を参考に接地圧分布を仮定したものであり、貞升の実験報告がなされてからすでに30年の歳月を経ている。当時としてはタイヤの材質やトレッド形式など様々な要因が異なっている。また、タイヤメーカーでは自動車のタイヤは走行時でも接地圧が均一になるように開発が進められているようである。商業および産業用のタイヤまでそのような研究がなされているかは定かではないが、30年前と比較すれば性能の変化は十分に考えられる。そのため、実際の車両の接地圧分布を解明することが今後の課題である。

#### 参考文献

- 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
- 2) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱：平成11年1月
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説：平成8年12月
- 4) 阪神道路公団，日本材料学会：コンクリート床版防水工設計施工指針（案）・同解説：平成元年3月
- 5) 日本道路協会：道路橋鉄筋コンクリート床版防水層設計・施工資料：昭和62年1月
- 6) 日本道路公団：防水システム設計・施工マニュアル（案）：平成13年6月
- 7) 土木学会 鋼構造委員会 鋼橋床版の調査研究小委員会：道路橋床版の新技术と性能照査型設計：平成12年10月