

# 複輪トラックタイヤ载荷によってアルミニウム床版に生じる板曲げ応力 Plate-Bending Stresses in Aluminum Decks Produced by Double Truck-Tire Loading

石川敏之\*<sup>1</sup>, 筒井将仁\*<sup>2</sup>, 大倉一郎\*<sup>2</sup>  
Toshiyuki Ishikawa, Masahito Tsutsui and Ichiro Okura

\*<sup>1</sup>名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)  
\*<sup>2</sup>大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

An aluminum deck with open and hollow sections has been developed. Plate-bending stresses are produced in the top plate of aluminum deck by truck-tire loading. In this paper, the plate-bending stresses are analyzed by the FEM for the double truck-tire loading and for the 500×200 mm rectangular area loading, which is specified in the Japanese Highway Bridge Specifications. It is shown that the plate-bending stresses for the latter loading is totally different from the ones for the former loading. The variable rectangular area loading is proposed as a contact shape which gives the plate-bending stresses close to the ones provided by the double truck-tire loading.

Key words: aluminum deck, double truck-tires loading, rectangular area loading, plate-bending stress, contact shape

## 1. 序論

損傷した鉄筋コンクリート床版を取替える場合、現行の道路橋示方書<sup>1)</sup>を適用すると床版が厚くなることにより死荷重が増加すること、ならびに設計荷重が変更されていることにより主桁の補強が必要になる場合がある<sup>2)</sup>。著者らは、床版そのものの重量を減らすことを目的として、図-1に示す開閉断面アルミニウム床版の開発を行っている<sup>3)-6)</sup>。アルミニウム床版を用いることにより、鉄筋コンクリート床版と比較して、床版重量を約 1/5 に減らすことができるので、従来よりも小型の架設重機で工事が行えるため、工事の道路占有面積を抑え、事業を早期に完了することができる。工場アルミニウム型材同士を摩擦攪拌接合で連結することによってアルミニウム床版パネルが製作されるので、接合部の品質が確保されているだけでなく、プレファブ化によって現場での作業が少なくなる利点がある。

著者らはこれまでに、単輪のトラックタイヤ载荷に対してアルミニウム床版の上板に生じる板曲げ応力の特性を実験および FEM 解析によって明らかにしている<sup>6)</sup>。本研究では、複輪トラックタイヤ载荷および道路橋示方書<sup>1)</sup>で規定される 500mm×200mm の長方形領域载荷に対してアルミニウム床版に生じる板曲げ応力の特性を FEM 解析により明らかにする。さらに複輪トラックタイヤ载荷によってアルミニウム床版に生じる板曲げ応力に、500mm×200mm の長方形領域载荷より近い値を与える、荷重の大きさによって接地長さが変動する長方形領域载荷を提案する。

## 2. 開閉断面アルミニウム床版

図-2に開閉断面アルミニウム床版の寸法緒元を示す<sup>5)</sup>。図には、トラックタイヤの载荷位置も示されている。鋼桁上フランジ上面に溶着された頭付きスタッドジョベルがアルミニウム床版の開閉断面内に挿入され、閉断面

内の、仕切板で囲まれた部分が無収縮モルタルによって充填されること(充填モルタルと呼ぶ)によって、アルミニウム床版と鋼桁が連結されている。アルミニウム床版と鋼桁の接触による異種金属接触腐食を避けるために、アルミニウム床版と鋼桁の間に台座モルタルが設けられている。

## 3. アルミニウム床版の FEM 解析

本章では、図-2に示される床版支間中央の開閉断面へのトラックタイヤ载荷によってアルミニウム床版に生じる板曲げ応力を FEM 解析によって再現する。

### 3.1 FEM 解析

FEM 解析には汎用有限要素解析プログラム MARC<sup>7)</sup>を使用した。アルミニウム床版の要素分割を図-3に示す。x 軸および y 軸に対して、それぞれ対称となる境界条件を設けた。アルミニウム床版が鋼桁に連結される位置で z 軸方向の変位を拘束し、アルミニウム床版と鋼桁の連結に用いられる充填モルタルを閉断面内に

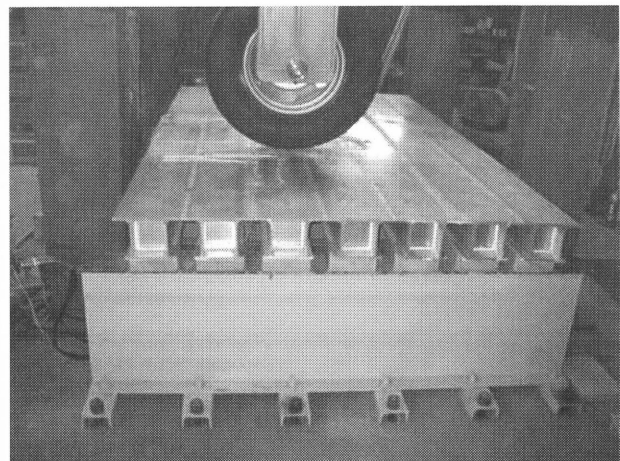


図-1 開閉断面アルミニウム床版

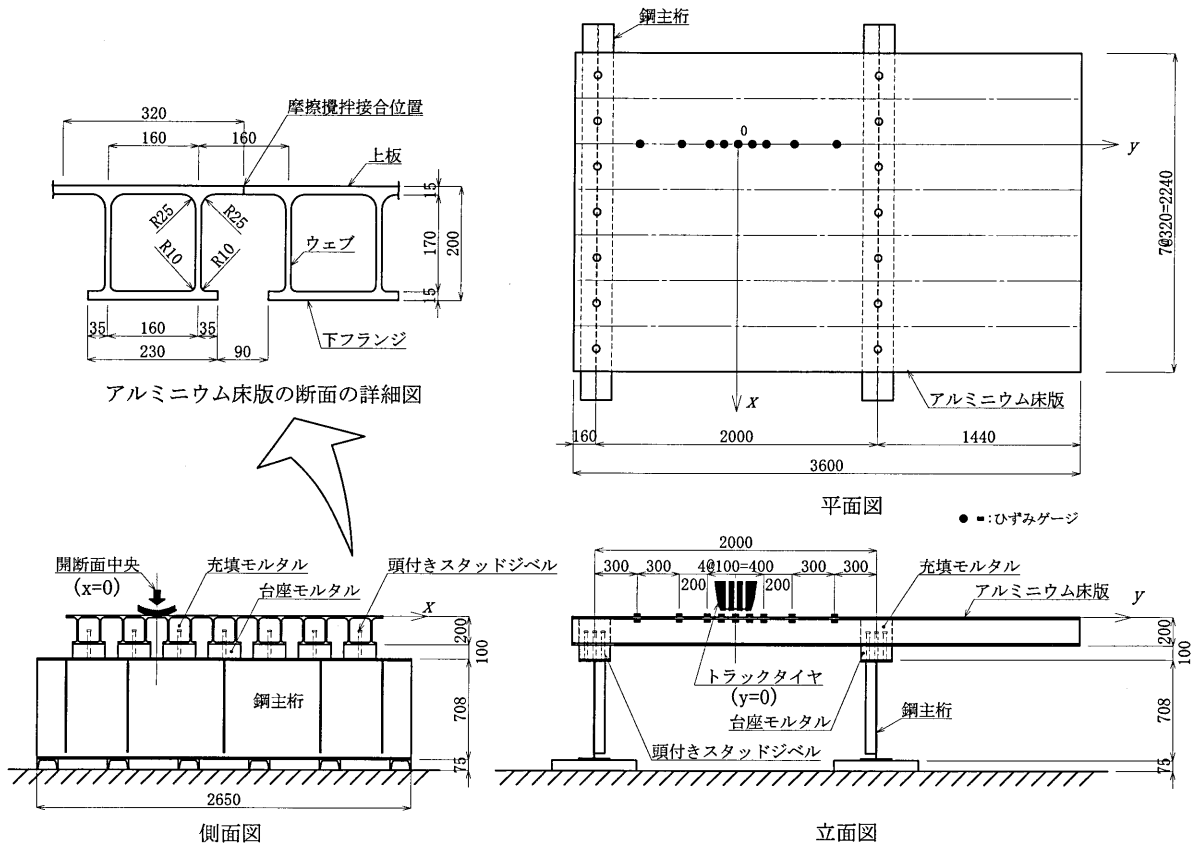


図-2 アルミニウム床版の寸法緒元と荷重の载荷位置

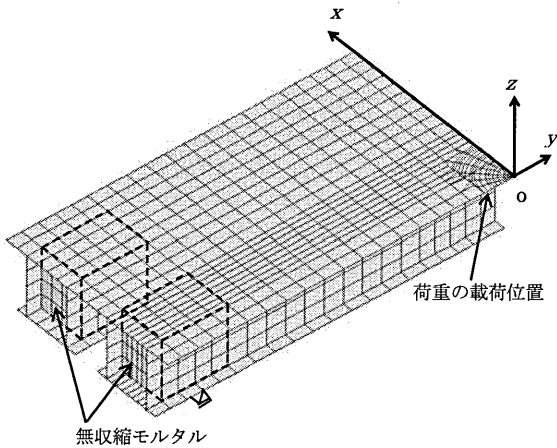


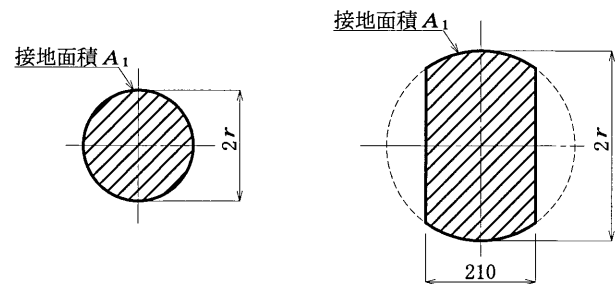
図-3 アルミニウム床版の要素分割

考慮した。アルミニウム床版に4節点厚肉四辺形シェル要素(MARCの要素 No.75), 充填モルタルに3次元直方体(六面体)要素(MARCの要素 No.7)を使用した。充填モルタルの節点とアルミニウム床版の節点が重なる位置において, 両者の節点を共有させた。

タイヤの標準空気圧(700kPa)に対してアルミニウム床版の開断面の中心にトラックタイヤ载荷された場合に対する平均接地圧力 $q_1$ , タイヤの接地面積 $A_1$ およびタイヤの接地半径 $r$ が次式で与えられる<sup>6)</sup>。

$$q_1 = \frac{1000P_1}{1613P_1 + 2838} \quad (2.5\text{kN} \leq P_1 \leq 20.2\text{kN}) \quad (1)$$

$$q_1 = 7.405 \times 10^{-3} P_1 + 0.422 \quad (20.2\text{kN} \leq P_1 \leq 50\text{kN}) \quad (2)$$



(a)  $2.5\text{kN} \leq P_1 \leq 20.2\text{kN}$  (b)  $20.2\text{kN} \leq P_1 \leq 50\text{kN}$

図-4 タイヤの接地形状

$$A_1 = 1613P_1 + 2838 \quad (2.5\text{kN} \leq P_1 \leq 20.2\text{kN}) \quad (3)$$

$$A_1 = \frac{1000P_1}{7.405 \times 10^{-3} P_1 + 0.422} \quad (20.2\text{kN} \leq P_1 \leq 50\text{kN}) \quad (4)$$

$$r = \sqrt{\frac{1613P_1 + 2838}{\pi}} \quad (2.5\text{kN} \leq P_1 \leq 20.2\text{kN}) \quad (5)$$

$$r = \frac{1000P_1}{3.6P_1 + 205} + 33.7 \quad (20.2\text{kN} \leq P_1 \leq 50\text{kN}) \quad (6)$$

ここに,  $q_1$ ,  $A_1$ ,  $r$  および  $P_1$  の単位はそれぞれ, MPa,  $\text{mm}^2$ , mm および kN である。

これらの式は, トラックタイヤを直接アルミニウム床版に载荷した場合に対するものであり, 舗装の影響は考慮されていない。

タイヤの接地形状を図-4に示す。図の $r$ は式(5)と(6)

表-1 材料特性  
(a) アルミニウム床版

材質と調質	A6061S-T6
0.2%耐力[MPa]	292
引張強さ[MPa]	309
ヤング係数 $E_a$ [GPa]	71.5
ポアソン比 $\mu_a$	0.31
伸び[%]	12.0

(b) 充填モルタル

圧縮強度[MPa]	75.5
ヤング係数[GPa]	27.7
ポアソン比	0.215

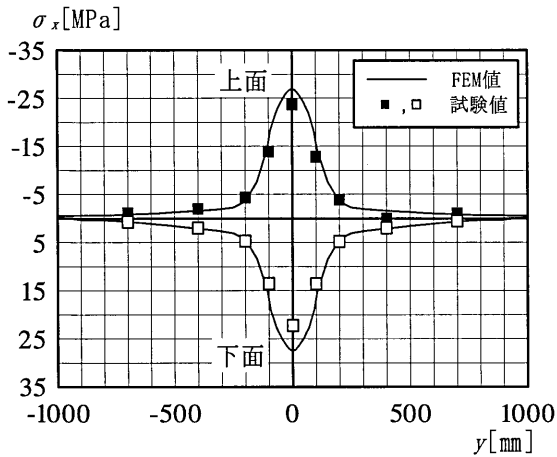
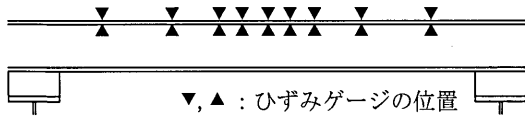


図-5 アルミニウム床版上板の  $\sigma_x$  の分布

で与えられる。  $P_1 \leq 20.2\text{kN}$  に対して、タイヤの接地形状は円形となり、  $P_1 \geq 20.2\text{kN}$  に対して、タイヤの接地形状は楕円形になる<sup>6)</sup>。FEM解析では、式(1)と(2)から算出される  $q_1$  を図-4 に示す接地形状に載荷した。

解析に用いたアルミニウム床版および充填モルタルのヤング係数とポアソン比を表-1 に示す<sup>9)</sup>。

### 3. 2 アルミニウム床版に生じる板曲げ応力

#### (1) 橋軸断面に生じる応力

荷重  $P_1=25\text{kN}$  に対して、FEM解析によるアルミニウム床版の上板の橋軸断面に生じる応力  $\sigma_x$  の分布を図-5 に示す。この図には、文献6)で行われたアルミニウム床版へのトラックタイヤ載荷(空気圧 700kPa)に対する試験結果も示されている。この図から分かるように、FEM解析値は試験値にほぼ一致している。

FEM解析による荷重  $P_1$  とトラックタイヤ直下の  $\sigma_x$  の最大値の関係を図-6 に示す。図には試験結果<sup>6)</sup>も示されている。FEM解析の  $P_1 - \sigma_x$  関係は、試験結果と同様に非線形性を示し、  $P_1=15\text{kN}$  辺りから  $\sigma_x$  の増加の割合が小さくなる。これは、タイヤの接地形状が変化すること、およびタイヤの接地半径が大きくなると、

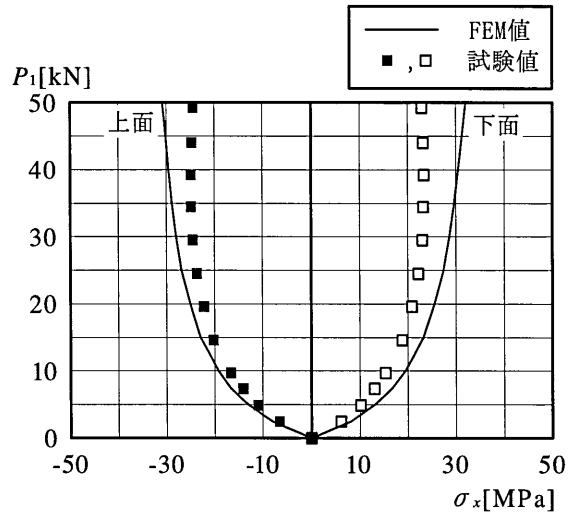


図-6  $P_1$  と  $\sigma_x$  の関係

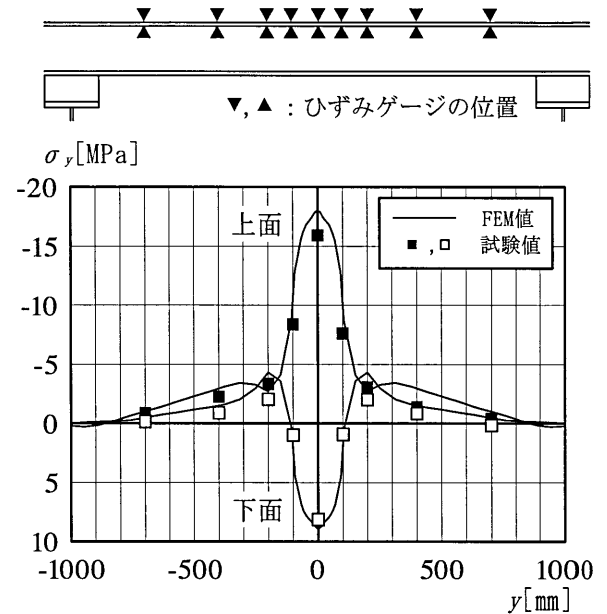


図-7 アルミニウム床版上板の  $\sigma_y$  の分布

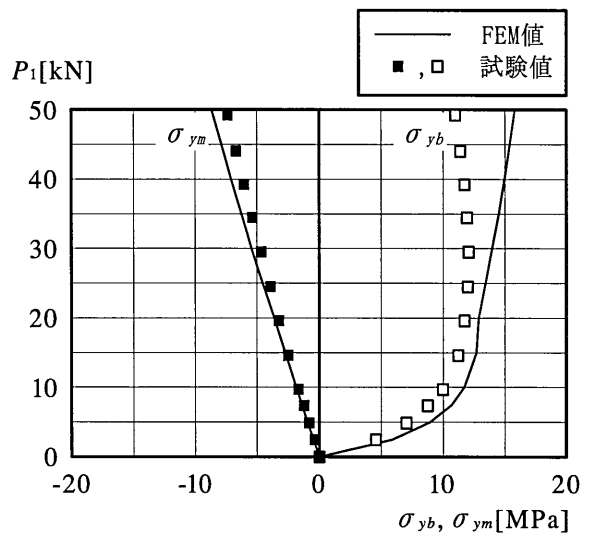
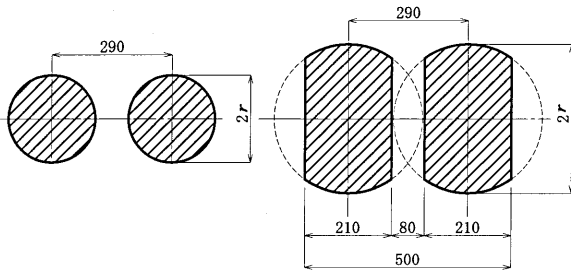


図-8  $P_1$  と  $\sigma_{yb}$  および  $\sigma_{ym}$  の関係



(a)  $5\text{kN} \leq P \leq 40.4\text{kN}$  (b)  $40.4\text{kN} \leq P \leq 100\text{kN}$   
 図-9 複輪トラックタイヤの接地形状

荷重が閉断面の上板に載荷されるようになり、これが閉断面の上板に負曲げモーメントを起こさせるからである。

しかし図-6において、 $P_1$ が約25kN以上になると、 $\sigma_x$ の試験値は増加しないが、解析値は依然増加している。この違いは、FEM解析では、式(1)と(2)から計算される平均接地圧力 $q_1$ は $P_1$ の増加に伴って増加するが、実際のタイヤの接地圧力<sup>6)</sup>はある一定値より増加しないからである。

#### (2) 橋軸直角断面に生じる応力

荷重 $P_1=25\text{kN}$ に対して、FEM解析によるアルミニウム床版の上板の橋軸直角断面に生じる応力 $\sigma_y$ の分布を図-7に示す。 $\sigma_y$ は、タイヤの直下の狭い範囲で局所的に高くなるのがFEM解析の結果からも確認できる。

FEM解析が与える、荷重 $P_1$ とタイヤ直下の $\sigma_y$ の板曲げ応力成分 $\sigma_{yb}$ および膜応力成分 $\sigma_{ym}$ の関係を図-8に示す。 $P_1$ と $\sigma_{yb}$ の関係は非線形で、 $P_1$ と $\sigma_{ym}$ の関係が線形になることがFEM解析によっても確認できる。

このようにトラックタイヤ載荷によってアルミニウム床版に生じる板曲げ応力は、FEM解析により再現できる。

### 4. 複輪トラックタイヤ載荷と長方形領域載荷によって生じる板曲げ応力

複輪トラックタイヤ載荷によってアルミニウム床版に生じる板曲げ応力と、道路橋示方書<sup>1)</sup>に規定されるT荷重に従って、500mm×200mmの長方形領域載荷によってアルミニウム床版に生じる板曲げ応力の比較をFEM解析によって行なう。

#### 4.1 複輪トラックタイヤ載荷と長方形領域載荷

複輪トラックタイヤ載荷に対して、図-9に示すように、タイヤとタイヤの中心間隔を290mm、複輪の最大接地幅を500mmとし、各斜線部分にタイヤ荷重を載荷する。図の $r$ は式(5)と(6)で与えられる。

各タイヤに対して、式(1)と(2)から計算される $q_1$ を図-9に示す接地形状に載荷する。複輪トラックタイヤ全体の中心をアルミニウム床版の支間中央に合わせた。複輪トラックタイヤ載荷の輪荷重 $P$ は単輪荷重 $P_1$ の2倍である。すなわち、

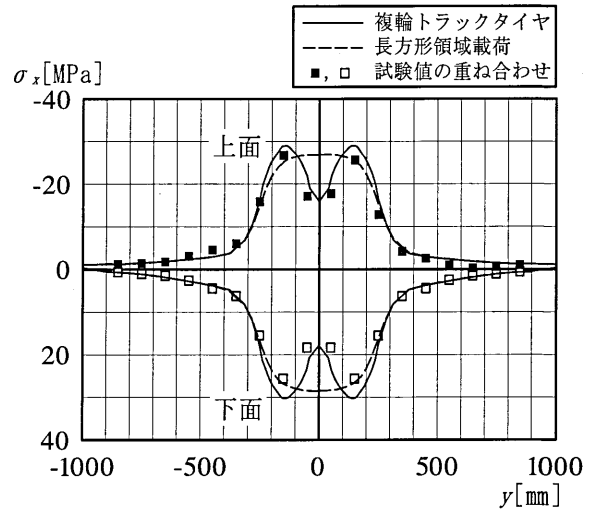


図-10 アルミニウム床版上板の $\sigma_x$ の分布

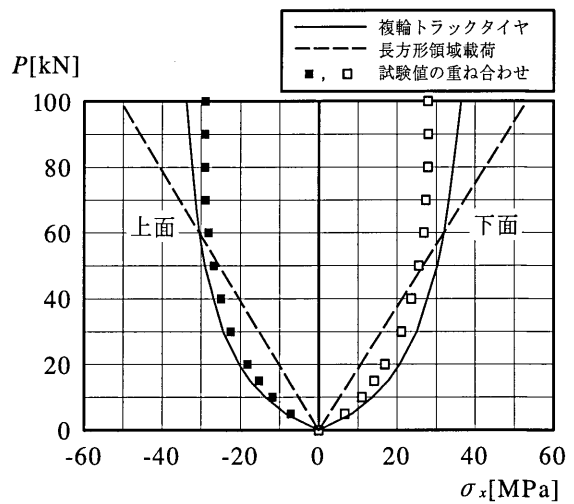


図-11  $P$ と $\sigma_x$ の関係

$$P = 2P_1 \quad (7)$$

他方、500mm×200mmの長方形領域載荷に対して、長方形の長辺の中央をアルミニウム床版の支間中央に合わせ、次式から計算される平均接地圧力 $q_s$ を長方形領域に載荷する。

$$q_s = P/100 \quad (8)$$

ここに、 $q_s$ と $P$ の単位はそれぞれMPa、kNである。

#### 4.2 アルミニウム床版に生じる板曲げ応力の比較

##### (1) 橋軸断面に生じる応力

輪荷重 $P=50\text{kN}$ に対して、アルミニウム床版の上板の橋軸断面に生じる応力 $\sigma_x$ の分布を図-10に示す。この図には、単輪トラックタイヤ載荷(空気圧700kPa)に対する試験結果の重ね合わせによって得られる値も示している。複輪トラックタイヤ載荷では、各タイヤの直下で応力が最大になる。他方、長方形領域載荷では、長辺の中央の位置で応力が最大になる。

輪荷重 $P$ と応力 $\sigma_x$ の最大値の関係を図-11に示す。 $P$ と $\sigma_x$ の関係は、複輪トラックタイヤ載荷に対して

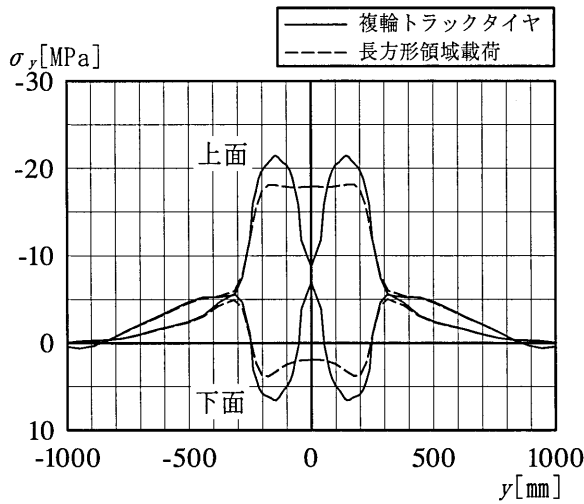


図-12 アルミニウム床版上板の  $\sigma_y$  の分布

非線形になるが、長方形領域载荷に対して線形になる。解析値では、 $P$  が約 60kN より小さいとき、複輪トラックタイヤ载荷の  $\sigma_x$  が、長方形領域载荷の  $\sigma_x$  より大きく、 $P$  が約 60kN より大きくなると、長方形領域载荷の  $\sigma_x$  が複輪トラックタイヤ载荷の  $\sigma_x$  より大きくなる。

(2) 橋軸直角断面に生じる応力

輪荷重  $P=50\text{kN}$  に対して、アルミニウム床版の上板の橋軸直角断面に生じる応力  $\sigma_y$  の分布を図-12 に示す。 $\sigma_y$  は、複輪トラックタイヤ载荷の場合、各タイヤの直下の狭い範囲で局所的に高くなり、長方形領域载荷の場合、長方形の長辺の両端の近傍で最大になる。

輪荷重  $P$  とタイヤ直下の応力  $\sigma_y$  の板曲げ応力成分  $\sigma_{yb}$  および膜応力成分  $\sigma_{ym}$  の関係を図-13 に示す。橋軸直角断面に生じる板曲げ応力成分  $\sigma_{yb}$  は、タイヤの接地範囲内で局所的に生じ、床版支間の影響を受けないので、単輪トラックタイヤ载荷(空気圧 700kPa)に対する試験値の重ね合わせによって与えられる値も示している。

$P$  と  $\sigma_{yb}$  の関係は、前述の  $P$  と  $\sigma_x$  の関係と同様に、複輪トラックタイヤ载荷に対して非線形になるが、長方形領域载荷に対して線形になる。解析値では、 $P$  が約 72kN より小さいとき、複輪トラックタイヤ载荷の  $\sigma_{yb}$  が、長方形領域载荷の  $\sigma_{yb}$  より大きく、 $P$  が約 72kN より大きくなると、長方形領域载荷の  $\sigma_{yb}$  が複輪トラックタイヤ载荷の  $\sigma_{yb}$  より大きくなる。

$P$  と  $\sigma_{ym}$  の関係は、図-13 から分かるように、複輪トラックタイヤ载荷の場合と長方形領域载荷の場合ともに線形になり、しかも両者の  $P$  と  $\sigma_{ym}$  の関係は重なっている。すなわち、アルミニウム床版の上板の橋軸直角断面に生じる応力  $\sigma_y$  の膜応力成分にタイヤの接地形状の変化は影響しない。

5. 接地長さが変動する長方形領域载荷によって生じる板曲げ応力

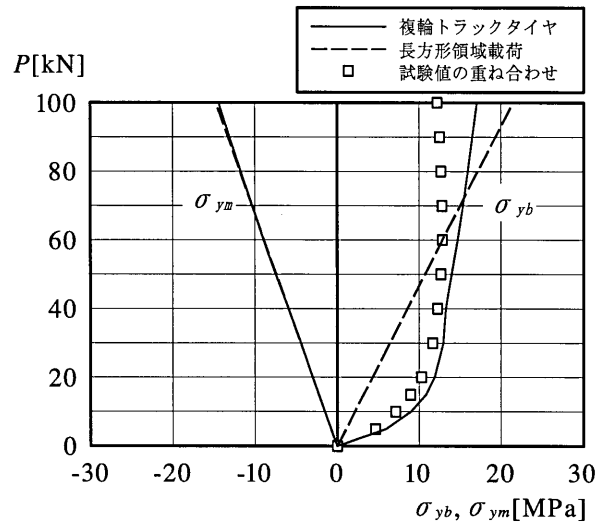
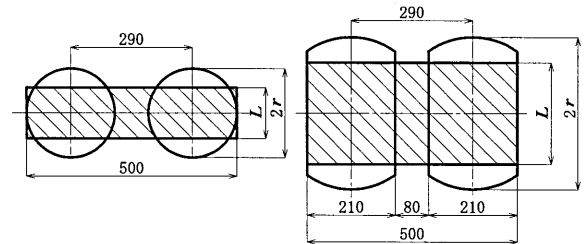


図-13  $P$  と  $\sigma_{yb}$  および  $\sigma_{ym}$  の分布



(a)  $5\text{kN} \leq P \leq 40.4\text{kN}$  (b)  $40.4\text{kN} \leq P \leq 100\text{kN}$

図-14 変動長方形領域载荷

前章では、道路橋示方書で規定される  $500\text{mm} \times 200\text{mm}$  の長方形領域载荷による板曲げ応力が、複輪トラックタイヤ载荷による板曲げ応力と大きく異なることを示した。そこで本章では、複輪トラックタイヤ载荷による板曲げ応力に近い値を与える、荷重の大きさによって接地長さが変動する長方形領域载荷について考える。本章では、板曲げ応力を安全側に評価するために、FEM 解析において充填モルタルを考慮していない。

5. 1 接地長さが変動する長方形領域载荷

図-14 に示すように、荷重の大きさによって変動する複輪トラックタイヤの接地面積を  $500\text{mm} \times L\text{mm}$  の長方形に置き換え、複輪トラックタイヤの接地面積と同じ接地面積を与える接地長さ  $L$  が次式で与えられる。

$$L = 3.226P + 11.35 \quad (5\text{kN} \leq P \leq 40.4\text{kN}) \quad (9)$$

$$L = \frac{P}{1.851 \times 10^{-3} P + 0.211} \quad (40.4\text{kN} \leq P \leq 100\text{kN}) \quad (10)$$

ここに、 $L$  と  $P$  の単位はそれぞれ mm と kN である。このように、荷重の大きさによって接地長さが変動する長方形領域载荷を変動長方形領域载荷と以後呼ぶ。

変動長方形領域载荷に対する輪荷重  $P$  と平均接地圧力  $q_r$  の関係は次式で与えられる。

$$q_r = \frac{P}{1.613P + 5.676} \quad (5\text{kN} \leq P \leq 40.4\text{kN}) \quad (11)$$

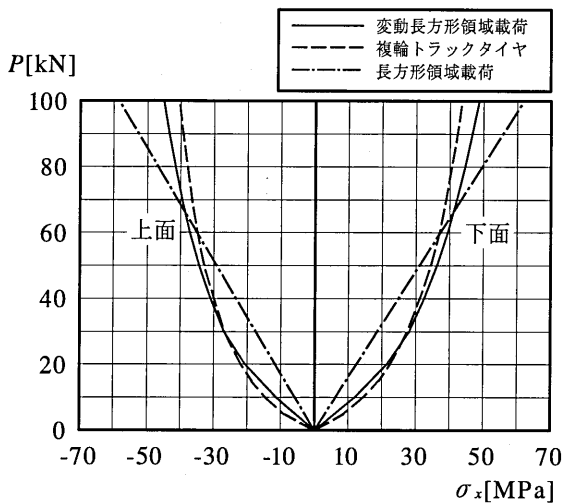


図-15 変動長方形領域載荷による  $P$  と  $\sigma_x$  の関係

$$q_r = 3.703 \times 10^{-3} P + 0.422 \quad (40.4 \text{ kN} \leq P \leq 100 \text{ kN}) \quad (12)$$

ここに、 $q_r$  と  $P$  の単位はそれぞれ MPa と kN である。

## 5. 2 変動長方形領域載荷によって生じる板曲げ応力

### (1) 橋軸断面に生じる応力

変動長方形領域載荷に対する輪荷重  $P$  と応力  $\sigma_x$  の最大値の関係を図-15 に示す。変動長方形領域載荷による  $\sigma_x$  は、複輪トラックタイヤ載荷の場合と同様に非線形となり、 $500 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  の長方形領域載荷よりも複輪トラックタイヤ載荷の  $\sigma_x$  に近いことが分かる。

### (2) 橋軸直角断面に生じる応力

変動長方形領域載荷に対する輪荷重  $P$  と応力  $\sigma_y$  の板曲げ応力成分  $\sigma_{yb}$  および膜応力成分  $\sigma_{ym}$  の関係を図-16 に示す。変動長方形領域載荷に対する  $P$  と  $\sigma_{yb}$  の関係は、 $500 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  の長方形領域載荷よりも複輪トラック載荷によるそれに近い。 $\sigma_{ym}$  に関しては、変動長方形領域載荷、長方形領域載荷とも、値は複輪トラック載荷の値と同じである。

## 6. 結論

本研究では、複輪トラックタイヤ載荷、 $500 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  の長方形領域載荷および  $500 \text{ mm} \times L \text{ mm}$  の変動長方形領域載荷に対して開閉断面アルミニウム床版の FEM 解析を行った。主な結論を以下に示す。

- 1) 複輪トラックタイヤ載荷の場合、アルミニウム床版の上板の橋軸断面に生じる応力は板曲げ応力であり、この応力は荷重に対して非線形になる。アルミニウム床版の上板の橋軸直角断面に生じる応力の板曲げ応力成分は荷重に対して非線形になる。しかし、アルミニウム床版全体の橋軸直角方向の曲げモーメントによって起こされる圧縮の膜応力成分は、タイヤの接地形状の影響を受けない。
- 2)  $500 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  の長方形領域載荷によってアルミ

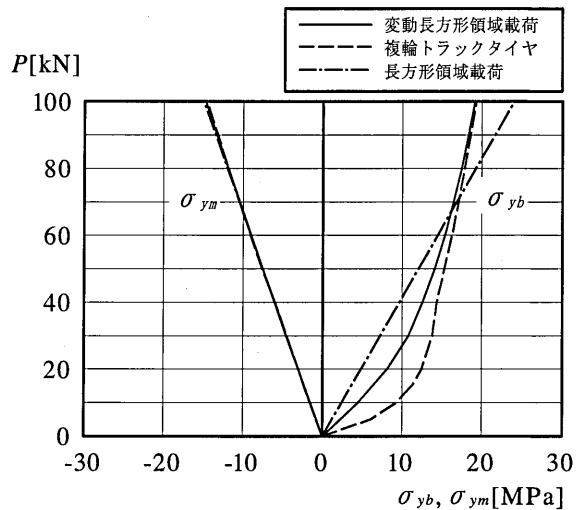


図-16 変動長方形領域載荷による  $P$  と  $\sigma_{yb}$  および  $\sigma_{ym}$  の分布

ニウム床版に生じる板曲げ応力は、複輪トラックタイヤ載荷による板曲げ応力と大きく異なる。

- 3)  $500 \text{ mm} \times L \text{ mm}$  の変動長方形領域載荷によってアルミニウム床版に生じる板曲げ応力は、 $500 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  による長方形領域載荷の場合よりも、複輪トラックタイヤ載荷による板曲げ応力に近い。

## 謝辞

本研究は、科学研究費補助金 基盤研究 (B) (研究課題名：アルミニウム床版による軽量橋の実現，課題番号 19360202，研究期間 2007～2008) の研究費補助金を受けた。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編 II 鋼橋編，丸善，2002。
- 2) 川合徳男，前島真二：鋼合成桁橋梁の床版取替えと主桁補強～乙津橋補強工事～，第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.189-194，2006。
- 3) 大倉一郎，萩澤亘保，岩田節雄，北村幸嗣：アルミニウム橋実現のための技術開発，軽金属，軽金属学会，第 54 巻，第 9 号，pp.380-387，2004。
- 4) 大倉一郎：アルミニウム合金の橋への適用，アルミニウム，日本アルミニウム協会，第 11 巻，第 56 号，pp.58-64，2004。
- 5) 大倉一郎，岡田理，萩澤亘保，大澤章吾：開閉断面アルミニウム床版の開発，構造工学論文集，Vol.51A，pp.1219-1227，2005。
- 6) 大倉一郎，石川敏之，筒井将仁，大澤章吾：トラックタイヤの接地形状がアルミニウム床版の板曲げ応力に与える影響，土木学会論文集 A，Vol.63，No.4，pp.655-666，2007。
- 7) 日本エムエスシー：MSC.MARC2001 日本語オンラインマニュアル，日本エムエスシー，2001。