

離散化タイヤモデルによる建設車両タイヤの基礎的変形性状解析

江口忠臣¹・室達朗²

¹正会員 明石工業高等専門学校講師 都市システム工学科 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡 679-3)

²フェロー会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

本稿では、建設車両の走行性能予測および省力化に関する問題としてORタイヤの解析モデルを提案し、あわせてタイヤの基礎的変形性状解析結果を報告する。本研究ではORタイヤの機能をその構造から分析し外観上トレッド部とサイドウォール部の2つのブロックに分割する。タイヤの基本的な変形性状を表す情報として、載荷試験により荷重とたわみおよび接触形状とたわみとの関係を実測値からチャート化した。タイヤモデルを剛体一ばねモデルRBSM (Rigid-Bodies Spring Model) にて構築し、先のブロックに対する等価弾性係数を推定した。構築したタイヤモデルを検証するため順解析を行い、チャートとの整合性を確認した。そしてタイヤの基礎的変形性状について数値解析を行い、その一部を明らかにした。

Key Words : off the road pneumatic tire, RBSM, deformation behavior, deflection chart

1. 緒言

建設車両の軟弱な地盤上での走行性は、車輪通過によって発生する搅乱作用による地盤強度の低下や締め固め効果などの地盤状態の変化を考慮する必要がある。作業性能に影響を及ぼす要因としては、土質では力学的特性・含水比の状態等、地盤上では地表面の勾配・凹凸などが挙げられ、車両については車両重量・タイヤ軸荷重・接触長・幅・トレッド形状・接地圧分布など多様である。

各種建設車両の走行装置と地盤材料との相互問題を力学的に解明することは、建設現場に適合した建設車両の選定と、作業能力向上をめざした新しい建設車両の位置決めシステム開発に有益な指針を与えるものである。

建設車両と地盤材料の重要な接触部であるオフ・ザ・ロードタイヤ（以下ORタイヤと称す）は数種の材料で構成されており本来複合材として扱わなければならないが、地盤材料との接触を考察する場合これらすべてを考慮すると多数の因子を導入する必要がある。したがって数値シミュレーションを行う場合いかにモデルを単純化し合理性を得るかということである。従来はタイヤを1個の弾性係数で表現しタイヤの変形性状を明らかにしようとする試みがなされている¹⁾。さらに近年、路盤との

接触形状をあらかじめ数種のパターンに分類することによって走行性能を予測する方法が示されている^{2),3)}。また、中嶋らは接触域の形状を実際の現象に近づけるため2個の等価弾性係数を用いた有限要素タイヤモデルを提案している^{4),5)}。この有限要素タイヤモデルによる建設車両ORタイヤの解析例は報告されていないが、サイドウォール部に大きな剛性を持たせていることが特徴である。従って施工管理上重要な建設車両ORタイヤの耐外傷性、耐摩耗性等の評価には課題が残されており、荷重支持機能についても的確に表しきれていない面がある。先に筆者らは同様に2個の等価弾性係数を用いてタイヤをモデル化する方法を示した⁶⁾。この方法は提供される荷重とたわみとの関係を表すチャートから弾性係数を推定し、最終的に順解析後のたわみ-接触長の関係がたわみチャートに追随していることを確認することによってそのモデルの妥当性を検証している。その結果たわみの初期を除いてほぼチャートに沿うモデルになっている。

本研究では建設車両の走行性能予測および省力化に関する問題に対する一方策としてORタイヤの解析モデルを提案し、あわせてタイヤの基礎的変形性状解析結果を報告する。まず建設車両において機械要素としてはばねに分類できるORタイヤの機能をその構造から分析し

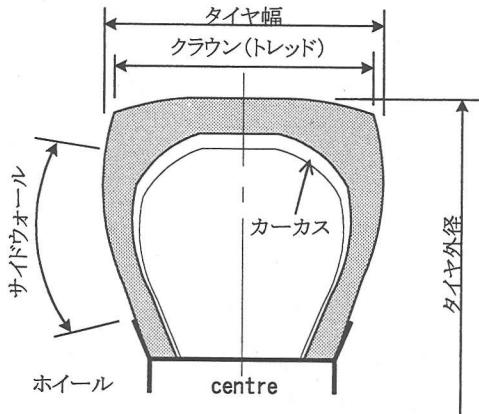


図-1 ORタイヤの基本構造

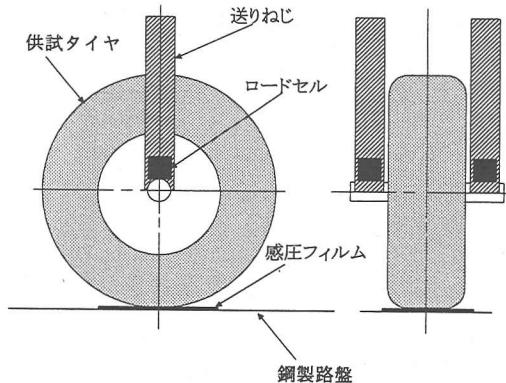


図-2 載荷試験装置概略図

表-1 ORタイヤの構成材料

構成部位	主な構成材料
カーカス	木綿、ナイロン、レーヨン ポリエステル、ゴム
クラウン	ゴム（耐摩耗、耐衝撃、耐熱）
サイドウォール	ゴム（耐屈曲、耐候）
ブレーカ	ナイロンコードスチールコード
ビード	鋼線

表-2 供試タイヤ諸元

呼び	10.00-20-14PR (幅-ホイール径-強度)
外径(mm)	1055
タイヤ幅(mm)	296
空気圧(kPa)	550
空気圧 700kPa 時の 最大負荷能力(kN) 時速 10km/h	52.1

2. タイヤ構造および載荷試験

(1) タイヤの荷重支持構造

タイヤは図-1 および表-1 に示す構造部位と構成材料から成っており、空気を充填しない状態ではそれ自体荷重を支えることはできない。しかしながら、ORタイヤに要求される機能としては、高荷重下で走行可能であり、走路の凹凸による衝撃の緩和、駆動力および制動力を確実に路盤に伝達することが挙げられる。

タイヤはこれらの構造機能を達成するため空気を充填し、荷重支持できる要素となっている。すなわちタイヤは薄肉の圧力容器を有し、タイヤ自身が変形することにより空気圧を利用して荷重を支え、圧力容器の外側にまかれたトレッドゴムにより路盤の凹凸に追随して駆動力および制動力を伝達するといえる。

(2) 載荷試験

a) 試験条件

タイヤは建設車両においてばねとして機能しているが、荷重支持および直進走行時の路盤からの衝撃吸収と

外観上トレッド部とサイドウォール部の2つのブロックに分割する。タイヤの基本的な変形性状を表す情報として、新たに載荷試験により荷重とたわみとの関係および接触形状とたわみとの関係を実測値からチャート化し、剛体一ばねモデル（Rigid-Bodies Spring Model、以下RBSM）を用いたタイヤモデルにてブロックに対する等価弾性係数を推定した。載荷試験は上述のたわみ初期の不一致の解消を目的としている。RBSM はばねによって力の伝達を規定することが特徴であり、今後の地盤上走行解析時の表層破壊表示にも有効であると考えられる。特にサイドウォール部はタイヤが車両中の機械要素としてばねに分類できることに着目し、円筒容器をばねモデル化することによってタイヤの荷重支持機能に近いモデルとした。次に、構築したタイヤモデルを検証するため順解析を行い、チャートとの整合性を確認した。そしてタイヤの基礎的変形性状の数値解析を行い、その一部を明らかにした。

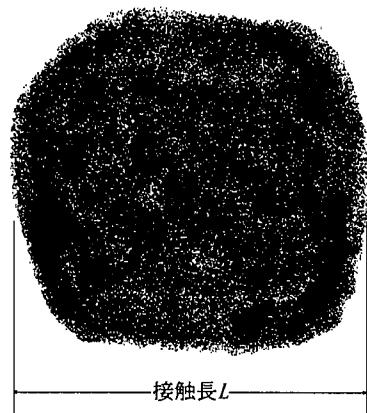


図-3 接触形状実測例

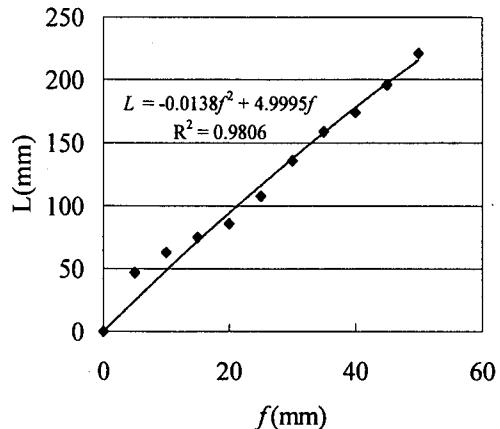


図-5 載荷試験による接触長 L とたわみ f との関係

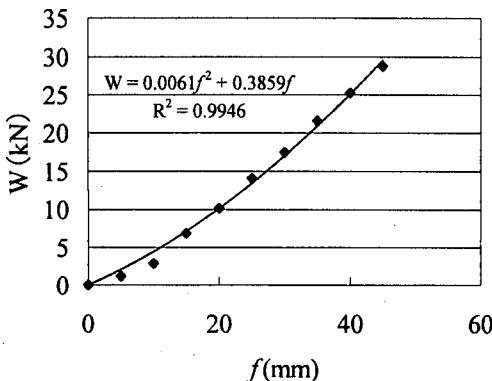


図-4 載荷試験による荷重 W とたわみ f との関係

いう点から見れば縦ばねに分類することができる。これまでタイヤを1個の弾性係数で表す場合にはこの縦ばねを計測もしくは推定することにより求めている。Abeels⁷は軸荷重およびトルクを作用させる実験装置によりタイヤの弾性係数を測定している。ここではとくにたわみの初期における接触形状（接触長）を明確にするため図-2に示すような載荷装置を用いて、荷重に対するたわみ量を測定した。また、接触面に感圧フィルムをはさみ接触形状を同時に測定した。載荷試験に用いたORタイヤの諸元を表-2に示す。供試タイヤは未使用のものを用いたため、負荷に対する挙動を安定させるために予備載荷として回転角30°毎にたわみ20mmを20回繰り返し与えた。接触形状の測定に際しタイヤ溝に変形に影響を与えない柔らかさのシリコン樹脂を充填し溝部分を投影した。図-3は接触形状の一例である。ここでは接触面のタイヤ回転方向の長さを接触長とし、接触形状は接触長で

代表できるものとしている。

b)荷重ーたわみ関係と接触長ーたわみ関係

図-4、図-5に載荷試験の結果より得られる荷重ーたわみ関係および接触長ーたわみ関係を示す。図中のプロットは回転角45°毎8回計測の平均値、実線は多項式にて近似したものである。いずれの関係の場合もたわみが0~20mm付近までのたわみ初期においてこの多項式と一致しない部分が認められる。一方で通常タイヤが使用されるたわみ域（たわみ20mm～、以下常用たわみ域と呼ぶ）においては、荷重ーたわみ関係および接触長ーたわみ関係のいずれも2次の項の影響は小さくほぼ線形関係にあるといえる。タイヤを建設車両中の一機械要素として分類するならば、この常用たわみ域の関係を用いて1個の弾性係数を推定することにより変形特性を表示することは有用である。しかしながら、接触形状を含めた変形性状を解析し、位置決め情報の提供に資するタイヤモデルの開発にはたわみ初期の状態も考慮したものが望ましい。

接触長ーたわみ関係においてたわみ初期の接触長の増加は、タイヤ全体の剛性と接触面付近の剛性の差異によるものと考えられる。すなわち、タイヤ全体の剛性に比してトレッド部の剛性が小さいことにより、最初にトレッド部が大きく変形し接触長が増加するということである。この現象は接触路盤形状（ここでは平面）への追従というトレッド部の本来の機能をあらわしたものであり、たわみ全域には及んでいないこともわかる。以上のことよりタイヤモデル構築のためには、トレッド部とそれ以外の外観上サイドウォール部の2つの部位に分割することが良いと考えられる。

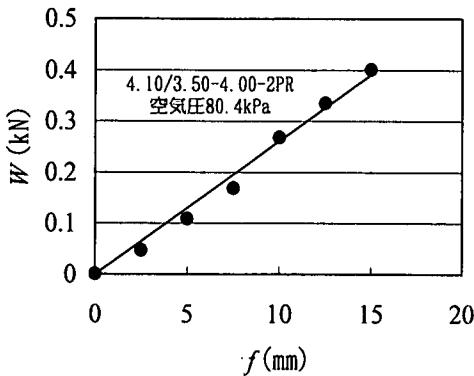


図-6 バフタイヤの載荷試験による

荷重 W とたわみ f との関係⁸⁾

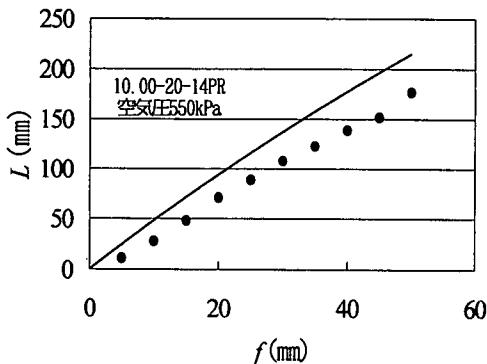


図-7 弾性係数1個表示による接触長 L とたわみ f との関係

3. タイヤモデルの構築

(1) RBSM の適用と等価弾性係数の推定

a) タイヤを1個の弾性係数で表した場合

一般にタイヤが接地部においてのみ変形し、接地圧がタイヤ空気圧 p に等しいと仮定すれば式(1)のようになり、軸荷重 W とたわみ f との間に比例関係が成り立つ。

$$W = 2\pi fp\sqrt{Rr} \quad (1)$$

ここで、 R ：タイヤ半径、 r ：クラウン半径

Yong ら⁸⁾は図-6 に示す空気圧 80.4kPa の 4.10/3.50-4.00-2PR のトレッド表面を研磨して平滑にしたバフタイヤの載荷試験結果より上式の妥当性を示しており、タイヤを1個の弾性係数で表す指標となっている。しかしながら、この結果においてもたわみ初期における荷重の立ち上がりは遅れており、これをタイヤにおける別機能によ

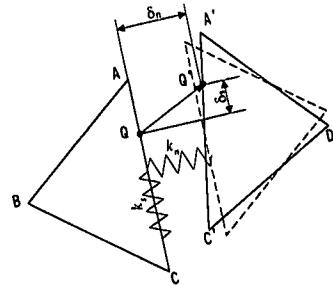


図-8 RBSM におけるばね

るものとする立場をとれば、別々の等価な弾性係数を導入することが良いと考えられる。さらに、Yong ら⁹⁾はタイヤを1個の弾性係数で表せるものとして次式を提案している。

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} &= \frac{16W}{\pi L^2} \left(\frac{1-\nu_B^2}{E_A} + \frac{1-\nu_A^2}{E_B} \right) / \left(1 + \frac{k_B^2}{k_A^2} \right) \\ k_A &= \frac{2}{\pi} \left(\frac{1-\nu_A}{G_A} + \frac{1-\nu_B}{G_B} \right) \\ k_B &= \frac{1-2\nu_A}{G_A} - \frac{1-2\nu_B}{G_B} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに R_A ：タイヤの半径、 R_B ：接触路盤の半径、 E_A ：タイヤの弾性係数、 E_B ：接触路盤の弾性係数、 G_A ：タイヤのせん断弾性係数、 G_B ：接触路盤のせん断弾性係数、 ν_A ：タイヤのポアソン比、 ν_B ：接触路盤のポアソン比、 W ：荷重、 L ：接触長

本研究における載荷試験の接触路盤は鋼製平面路盤であるので $R_B=\infty$ 、路盤の剛性もタイヤの剛性に比して十分に大きいので $E_B=\infty$ (211GPa)、 $G_B=\infty$ (82GPa) とすることができる。

タイヤの変形による容積変化が十分に小さいとすれば非圧縮変形体性状を考慮し ν_A は 0.5 とおくことができ、路盤に使用された軟鋼の ν_B は 0.284 とした。式(2)より表-2 のタイヤを1つの弾性係数を算定し接触長をもとめたものを図-7に示す。この時の E_A は 52.3MPa、 G_A は 17.4MPa であり、各々載荷試験より得られる縦ばね定数および一定載荷状態での強制横方向変位から得られる横ばね定数を換算したものである。図中の実線は図-5 の多項式近似曲線である。接触長はたわみが増すにつれて近似曲線から離れていく傾向にあり変形性状を的確に表現しているとは言い切れない。1つの弾性係数で表示した場合、接触形状に影響を与える接触面付近のトレッド部弾性係数が約4倍程度に扱われることがこの結果をもたらしていると考えられる。

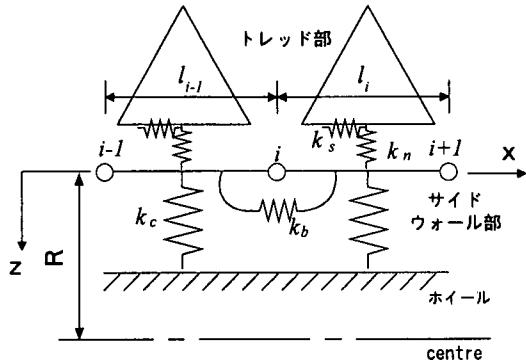


図-9 RBSM タイヤモデルの模式図

b)RBSM の適用

RBSM は非線形極限解析用モデルとして当初金属構造物の極限解析に利用されてきた。近年はその特徴を利用した地盤力学への展開が試みられている⁹⁾。先に述べた有限要素タイヤモデルと本モデルは2つの弾性係数を用いるという点で共通であり、以下の点でその特徴が異なっている。

- ①本モデルは弾性係数推定において実測データを用いた半実験的方法をとっている。
- ②有限要素モデルはサイドウォール部に大きな剛性を持たせているためにこの部分の耐外傷性評価が難しい。
- ③本モデルは荷重支持機能を本来のタイヤの機械要素としての働きであるばねで表現しており、サイド部の耐外傷性評価はゴム体の要素を追加することにより対応できる。
- ④RBSM の適用により地盤接触解析時に接触部の破壊、脱落の表現が有限要素モデルより容易になる。

RBSM では図-8 に示すように隣接する2要素間にばねを設定し、そのばねを通して力が伝わるものと考えている。

ばねは垂直方向相対変位 δ_n に抵抗するばね k_n とせん断方向のすべりに対応する相対変位 δ_s に抵抗するばね k_s を考え、回転に抗するばねは考慮しない。そして相対変位 (δ_n , δ_s) と単位面積当たりの表面力との間にばね系の力学が成り立っているものとしてモデルを作成している。モデルの構築を単純化するために以下の基本仮定を設けた。

- ①タイヤはトレッド部とサイドウォール部に単純に分割できる。
- ②トレッド部はゴム体、サイドウォール部は内圧を受ける薄肉円筒容器として表すことができる。

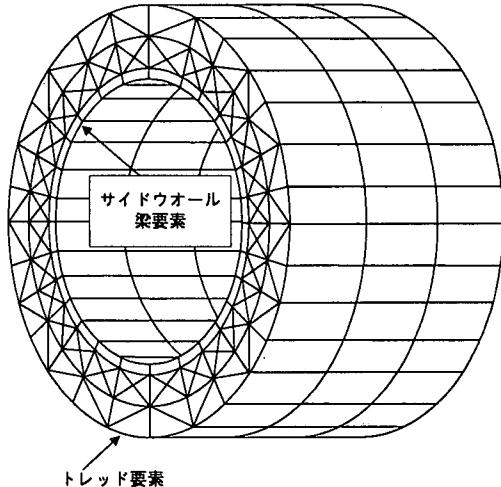


図-10 要素分割例

- ③タイヤの基礎的变形性状を解析するため接触路盤は剛路盤とする。
- ④空気圧は一定とする。
- ⑤ポアソン比は 0.48 とする。

タイヤモデルは仮定のごとくトレッド部とサイドウォール部に分割しそれぞれに RBSM を適用する。ただしサイドウォール部は変形による軸方向への膨らみを考慮しないので、サイドウォールそのものの曲げ剛性をふくめた円筒容器としている。

今回作成したモデルは図-9 に示す模式図のようにタイヤを円筒容器にゴムを巻いた形のものとしている。サイドウォール部を構成する要素は、荷重支持機能を分担するホイール要素に付加されたばねによって支持される。サイドウォールモデルは円筒を構成するカーカスに相当する部分を分割し l_{i-1} , l_i のはり要素とし、各要素に単位長さ当たり k_c の強さをもつばねを付加することにより得られる。付加されたばねは円筒の周方向の膜剛性を表している。要素同士の連結はピン結合であり曲げばね k_s を設定している。またトレッド部のゴム体は対象領域について図-8 と同様の要素分割を行い、要素間に k_n , k_s のばねを設定した。モデル中のばね k_c , k_n , k_s , k_b は式(3)で表される。

$$\begin{aligned} k_c &= E_s t^2 / R \\ k_n &= (1 - \nu) E_T / (1 + \nu)(1 - 2\nu) h \\ k_s &= E_T / (1 + \nu) h \\ k_b &= 2D / (l_{i-1} + l_i) \\ D &= E_s t^3 / 12(1 - \nu^2) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 t : サイドウォール要素の厚さ, h : RBSM における垂線の長さ

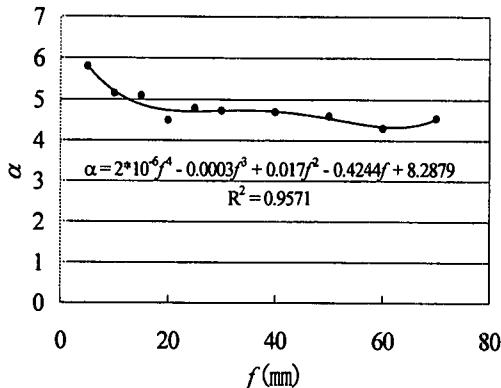


図-11 弾性係数比 α とたわみ f の関係

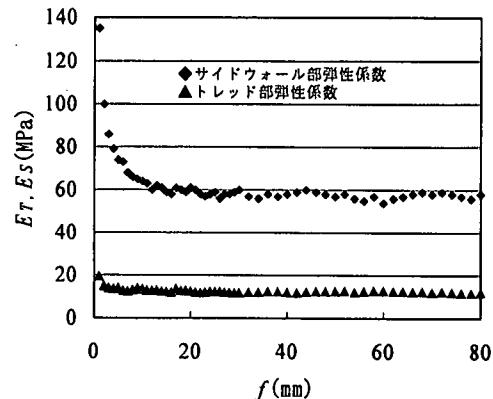


図-12 サイドウォール部とトレッド部の弾性係数推定結果

図-10 にホイール部を除くORタイヤ基本部分の要素分割例を示す。このときの要素数は588個である。

c) トレッド部とサイドウォール部の等価弾性係数推定

ここでは特に接触形状を出来る限り実際の現象に近づけるため、2個の等価な弾性係数を用いてモデル構築を行う。タイヤの構造上、路盤形状への追随と荷重支持とは別々の機能であり、トレッド部とサイドウォール部の空気層がそれぞれ機能分担している。単純化されたタイヤモデルについて、トレッド部とサイドウォール部の剛性の相違が接触形状に影響を与えることが有限要素モデルを提案した中嶋・Wong⁹⁾の報告に指摘されている。ここでも同様に剛性の比を表す式(4)を用いて等価弾性係数の推定を行う。

$$E_S / E_T = \alpha \quad (4)$$

ここに E_T : トレッド部の等価弾性係数、 E_S : サイドウォール部の等価弾性係数、 α : 弾性係数比

図-4、図-5における荷重-たわみ関係および接触長-たわみ関係は、タイヤを構成する各材料のパラメータの影響を含んだトレッド部の等価弾性係数 E_T と係数比 α の関数となる。これらはたわみによって表現され、ポアソン比が一定であることにより、接触形状-たわみ関係から弾性係数比が求められる。弾性係数比の推定はまず任意の2個の弾性係数比 α_1 、 α_2 を設定する。設定にあたっては、式(5)を用いて、任意に選択した弾性係数比 α_1 、 α_2 における接触長 L_1 、 L_2 に基づく図-5の近似曲線上の対応する接触長 L_j での線形補間を行う。

$$\alpha_j = \frac{(L_1 - L_j)}{(L_1 - L_2)} (\alpha_2 - \alpha_1) + \alpha_1 \quad (5)$$

以上により各たわみごとの弾性係数比を推定した結果が図-11である。図中の実線は4次多項式近似曲線であるが近似精度は良好なものとなっている。ただしたわみが100mm近傍まで増大すると見かけ上の E_T 、 E_S の関係が維持されなくなり、推定される係数比は保証されない。 $E_S = E_T \alpha$ と置き未知数を E_T 一つにすれば、弾性体の諸係数間の関係および変形量(たわみ)から、推定した弾性係数比と図-4の荷重-たわみ関係曲線を用いてトレッド部とサイドウォール部の弾性係数がまとめられる。図-12はその結果であるが、Nakashima and Wong⁹⁾とほぼ同様の傾向が現れている。今回の結果においては、たわみが7mm前後ですでにトレッド部、サイドウォール部ともに推定した弾性係数は一定の値を示しており高精度の推定結果が得られたと考えられる。

(2) モデルの検証

計算に使用したタイヤ(10.00-20-14PR)の諸元は表-2に示す通りであり載荷試験に用いたものと同じである。ただしタイヤは横方向溝のパターンであるラグを考慮しないものとする。図-12に示した等価弾性係数の推定結果より各部の弾性係数を決定する。たわみ0~5mm付近までの推定結果は、たわみ0mmにおいて弾性係数比 α が不定となることの影響を受けていると考えられるため除外し、それ以外のたわみ70mmまでの値の算術平均値をそれぞれの弾性係数とした。その結果トレッド部の弾性係数 E_T は 13.0 MPa、サイドウォール部の弾性係数 E_S は 59.8 MPa となった。サイドウォール部の弾性係数はサイドウォールのゴム、カーカスを構成するプライ(繊維を含むゴムシート層)、ブレーカ(緩衝材)

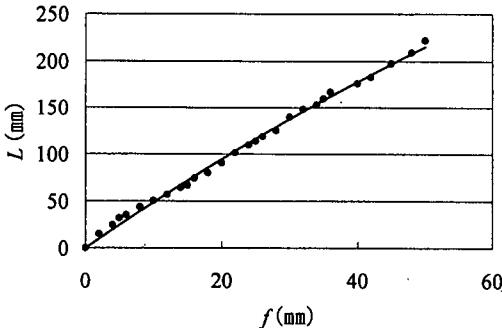


図-13 RBSM タイヤモデルによる接触長とたわみの関係

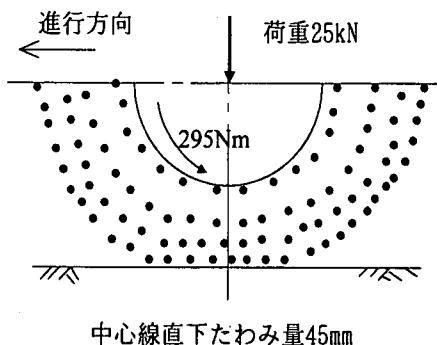


図-14 要素重心位置表示による変形形状

及び空気層の因子を包含したものとして計算されている。トレッド部の弾性係数はほぼ単一材料のゴム体として計算されたと見ることができる。また計算結果であるトレッド部の弾性係数 13.0 MPa は、JIS D 6403 に示されているトレッドゴムの最低引張強度 12.7 MPa をやや上回る値であり、このことからも今回のモデルによる推定結果は妥当なものが得られていると考えることができる。

RBSM タイヤモデルを用いて数値計算した接触長とたわみの関係が図-13 である。図中の実線は図-5 の載荷試験の結果より得られた接触長-たわみ関係の近似曲線である。たわみ初期における接触長の増加は近似曲線と実測値の中間に位置し、RBSM タイヤモデルにおいてもたわみ初期には他のたわみ域とは異なる挙動を示す。この点については、初期の変形がトレッド部のゴム体で発生していると考えれば、トレッド部の弾性係数がサイドウォール部の弾性係数と比較して小さいということと一致する。これはトレッド部が接触路盤の形状に追随するという本来の機能とも一致する。

常用たわみ域についてはきわめて良好な関係が得られており、たわみ初期も含めて RBSM タイヤモデルは静的変形状態の再現が十分になされているとみることができ。

タイヤは空気を充填していない状態では荷重支持できない構造であり、従来のモデルではサイドウォール部のゴム体にはトレッド部の弾性係数よりもさらに小さい弾性係数を導入していた。しかし、サイドウォールは自然形状において荷重方向に対して屈曲しており、荷重支持の点から見ればその影響は少ないと考えられる。したがってサイドウォールのゴム体を含めた今回のモデルのサイドウォール部の弾性係数についても、接触長-たわみ関係の解析結果を見る限り問題なかったといえる。

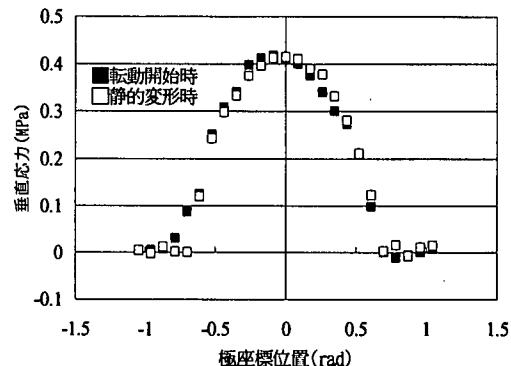


図-15 接触面付近の垂直応力分布（計算値）

4. 変形性状解析

(1) 静的および転動開始時の変形状態

タイヤの変形挙動の数学的記述は困難をきわめており、近似的にその全体像を表すには本研究で示すように離散化モデルによる解析が有力な方策のひとつになる。今回新たに構築した RBSM モデルにて既報のモデルと同様にスリップを起こす前のスリップ率 0% の転動開始時の挙動を第一段階として静的変形状態を再現し、第二段階として駆動トルクを伝達することにより解析した。図-14 に定常駆動状態における駆動トルクが 8.80 kN・m となるように、軸荷重 25kN、初期駆動トルク 295N・m を作用させた時の変形状態をタイヤ中心線の進行方向側および進行方向反対側について軸方向へ投影したものと示す。このときのタイヤのたわみは 45mm に相当する。図中の点は要素の重心位置を表しており、その座標値および回転角が与えられる。図-14 は接触面を含めた全体形状を表しており、細部にわたる情報が得られること

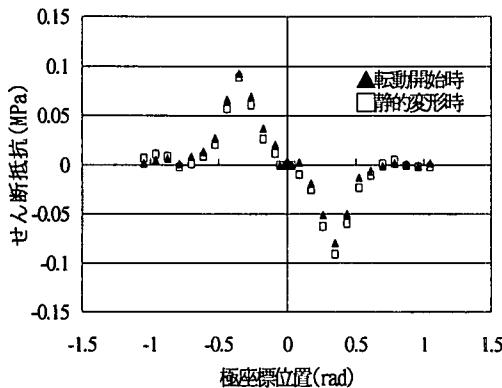


図-16 接触面付近のせん断抵抗分布（計算値）

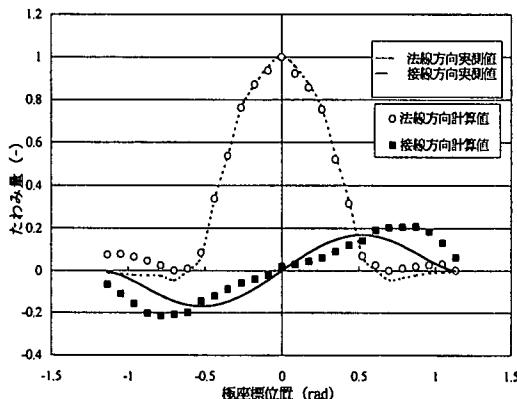


図-17 接触面付近のたわみ量計算値と実測例

から車両の位置決めシステムに活用できると考えられる。変形状態は既報の解析結果⁹⁾と同じく静的変形時の圧縮変形が転動開始時に進行方向側で更なる圧縮変形をうけており、また路盤と接触していない部分において法線方向への膨らみが認められる。進行方向反対側では接触部分の圧縮変形が解放される傾向にあり、路盤と接触していない部分においても伸長変形していることがわかる。

(2) 垂直応力分布およびせん断抵抗分布

接触面付近の応力状態を検討する。RBSMにおける応力は式(6)に示す要素表面力、ばね定数、変位の関係から計算できる。

$$\sigma_r = D \cdot \delta \quad (6)$$

σ_r は要素境界面上における単位面積あたりの表面力であり、せん断応力と垂直応力によって表される。D はばね定数行列であり、 δ は変位行列である。

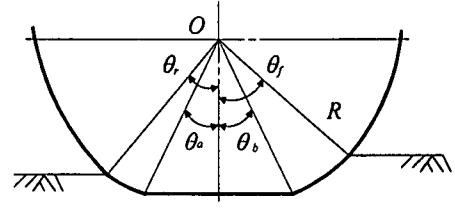


図-18 接触形状の仮定

図-15 は静的変形時と転動開始時の垂直応力分布をタイヤ変形前の極座標を用いて示したものである。角度はタイヤ中心線を0とし、反時計回りである。静的変形時はタイヤ中心線直下で最大となり、接触面端部に近づくにつれて減少し、接触面両端において0となる。転動開始時においては応力のピークはやや進行方向側に移動し、ピークを示す範囲が静的変形時と比べ拡がっている。接触路盤の変形はこの垂直応力によるところが大きいため沈下を伴って変形する場合変形後の形状効果を含め、応力のピークの移動は上述のタイヤ側の変形と同様に走行性の予測に重要な因子となる。応力のピークの移動は接触路盤が剛路盤のため接触形状が平面となり、位置の確定は困難であった。図-16 は静的変形時と転動開始時のせん断抵抗分布を垂直応力分布と同じくタイヤ変形前の極座標を用いて示したものである。タイヤ中心線直下で0となりその両側の極座標位置 0.35rad 付近でピークを示す。また進行方向側と反対側で向きが逆になるが大きさはほぼ等しい値を示している。計算結果のピークはやや先鋒な形状をしているが、モデルのせん断に抗するばねの設定方法と要素分割方法に改善の余地がある。転動開始時にはせん断抵抗は進行方向側において若干増加が認められるもののほぼ静的変形時と同じ値を示し、進行方向反対側で緩和されることがわかる。実際の駆動状態では駆動力により発生するせん断抵抗の増大により、接触面全域にわたって正となることが実測例で示されている¹⁰⁾。せん断抵抗は垂直応力分布とともに接触路盤の変形に関係し、駆動抵抗と接触路盤の破壊に影響を及ぼすのでさらに詳細な解析が必要である。

(3) 法線方向および接線方向たわみ量

先にも述べたようにタイヤ形状の数学的記述は困難なことから変形時の形状についても理論的に導くことは難しい。図-17 に RBSM タイヤモデルによるたわみ量を法線方向および接線方向について示す。図中の実線および破線は Keen and Craddok¹¹⁾がポテンショメータを用いてたわみ量を実測したものである。計算値との比較のため、法線方向たわみ量の最大値を1として無次元化して表している。法線方向のたわみ量はタイヤ中心線直下で最

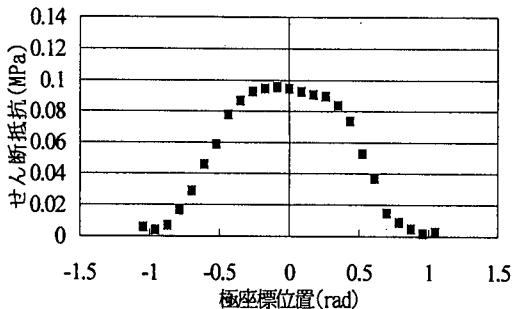


図-19 駆動状態における接触面付近のせん断抵抗分布（計算値）

大値を示し、垂直応力分布と似た形状をとる。接線方向のたわみ量はタイヤ中心線直下で0となり、せん断抵抗分布と似た傾向を示す。実測値との比較において法線方向のたわみは接触領域での一致精度は良い。しかし、接触面両端付近において実測値は負側に推移するのに対し解析値は接触面両端で0になった後正側で推移している。また接線方向のたわみ量は変形形状は実測値と同じ傾向を示すが、たわみ量のピークが解析値は外側にシフトしている。実測例はタイヤとの接触路盤がゆるく充填された土層であることから、両方向とも解析値との差がその部分で生じている可能性があるため、土との接触状態が表現できるモデルを構築したのちにこの点を評価しなければならない。

(4)作用トルクとせん断抵抗の検討

一般に、剛性車輪に対する作用トルクは理論的にスリップ率より車輪接地部におけるスリップ量分布を算定し、それによって発揮されるせん断抵抗の分布を積分することによってトルクを算定できる。たわみ性車輪であるタイヤの場合についても接地部の形状を推定することができれば、同様の方法でトルクをもとめることができる。すなわちせん断抵抗分布を $\tau(\theta)$ 、作用トルクを T とすれば次式を用いることができる¹²⁾。

$$\tau(\theta) = \{c_a + \sigma(\theta) \tan \phi\} [1 - \exp\{-aq_j(\theta)\}] \quad (7)$$

$$T = BR^2 \left(\int_{a_0}^{\theta} \tau(\theta) d\theta + \int_{a_0}^{a_0} \tau(\theta) \cos \theta d\theta \right. \\ \left. + \int_{a_0}^{\theta} \tau(\theta) d\theta \right) \quad (8)$$

ここに、 c_a ：タイヤと接触路盤との付着力、 $\sigma(\theta)$ ：垂直応力分布、 ϕ ：摩擦角、 a ：接触路盤の変形係数を最大せん断抵抗で除した値、 $j_d(\theta)$ ：スリップ量分布、 B ：タイヤ幅である。

式(6)は Mohr-Coulomb の破壊基準式を適用したものであり、今回の解析における剛路盤上の接触面（平面）と

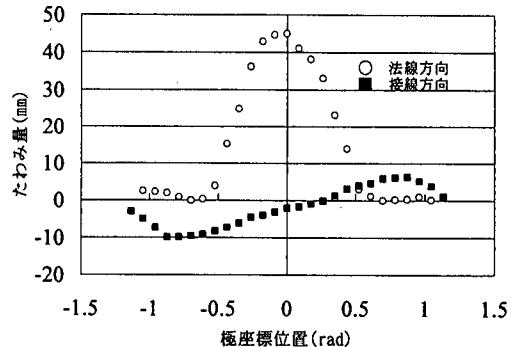


図-20 駆動状態における接触面付近たわみ量（計算値）

接触面の前後の円弧部分が図-18 の様に地盤と接触しているとすれば¹³⁾、式(7)により作用トルクの推定が可能である。図-16 のせん断抵抗分布は静止状態から転動開始状態への遷移過程であり、接触面において摩擦駆動力の発生により駆動状態となる。進行方向反対側のせん断抵抗が負値の部分では、実際の現象において短時間に正値に転ずることから初期駆動状態への過渡現象の解明にはさらに詳細な検討が必要である。図-19、20 はスリップ率 13%、接触面での摩擦係数を 0.69 としたときの駆動状態におけるせん断抵抗分布およびたわみ量を示す。たわみ量分布を見ると進行方向反対側において圧縮変形を示す部分が若干残っており、完全な駆動状態の再現には接触面の離脱部分の境界条件を整える必要がある。スリップ率を i_d とし、スリップ量分布が次式により求められるとすれば、

$$j_d(\theta) = j_d(\theta_b) + R \int_{\theta_b}^{\theta} \{1 - (1 - i_d) \cos \theta\} d\theta \quad (9)$$

となり、 $C_{\theta} = 0$ 、 $\tan \phi = 0.420$ 、 $a = 1.75(1/cm)$ としたとき式(7)、(8)による作用トルクの算定を行うと $8.02kN \cdot m$ となる。この値は初期設定の $8.80kN \cdot m$ に対して約 91% の値を示しており、ラグ面の仮定が影響しているものの推定精度は比較的高いと考えられる。

5. 結言

これまで数学的に記述することが困難であったタイヤの変形状態を、先に示された有限要素タイヤモデル同様離散化モデルとして扱うことにより解析を試みた。またORタイヤの構造機能をより的確に表現し、表層破壊を含む地盤との接触状態シミュレーションを想定した今回の RBSM タイヤモデルが静的変形状態において十分にタイヤの挙動を再現していることを示した。今後地盤との接触形状を仮定することなく解析でき得るモデルへ

の拡張が課題である。

今回の解析により得られた知見を以下に示す。

- (1) 載荷試験より得られる荷重-接触長関係の近似多項式を用いた弾性係数推定は高精度の結果が得られた。
- (2) RBSM タイヤモデルはたわみ初期を含めてたわみ-接触長関係との整合性が確認された。これによりタイヤの静的変形状態の再現が十分になされたといえる。
- (3) 転動開始時の変形は進行方向側で圧縮、反対側で伸長変形し、進行方向側接触端部上方で静的変形時よりさらなる膨らみが認められ、RBSM タイヤモデルの解析結果からその詳細情報が得られる。
- (4) 転動開始時の垂直応力分布は、静的変形時に比べピークが進行方向側に移動する。せん断抵抗分布は静的変形時において中心線直下で 0 を示し、ピークは両側にシフトする。
- (5) RBSM タイヤモデルによるたわみ量分布は、法線方向、接線方向ともに実測例と同様の分布形状を示した。
- (6) せん断抵抗と作用トルクとの関係は駆動初期の過渡現象についてはさらに詳細な解析が必要であるが、駆動状態における作用トルクの算定は RBSM タイヤモデルにおいても可能である。

謝辞：本研究を進めるにあたり住友ゴム工業株式会社から供試タイヤの提供ならびにご助言を賜りました。ここに、記して感謝する次第であります。

参考文献

- 1) たとえば、Yong.R.N., Fattah.E.A. and Boonsinsuk.P.: Analysis and prediction of tyre-soil interaction and performance using finite element, *J. of Terramechanics*, Vol.15, No.1, pp.43-63, 1978.
- 2) Hohl.G. H.: Correlational between slip velocity-shear displacement for the prediction of drawbar pull-slip of flexible tires, *Proc. Of the 12th Int. Conf. of ISTVS*, pp.99-106, 1996.
- 3) Schmid, I.C. : Inflation pressure control to improve terrain-trafficability a model for simulation, *Proc. Of the 11th Int. Conf. of ISTVS*, pp.64-75, 1993.
- 4) 中嶋洋 and Wong,J.Y. : 3 次元有限要素タイヤモデルについて、テラメカニックス第 12 号, pp.67-71, 1992.
- 5) Nakashima, H., Wong,J.Y. : A three dimensional tire model by the finite element method, *J. of Terramechanics*, Vol.30, No.1, pp.21-34, 1993.
- 6) 室達朗、江口忠臣：OR タイヤのモデル化に関する一考察、平成 10 年度建設機械と施工法シンポジウム論文集, pp.208-211, 1998.
- 7) Abeels,P. : Studies of agricultural and forestry tyres on testing stand, basis for standardizations, *Proc. 7th Int. Conf. ISTVS*, Vol.2, pp.439-453, 1981.
- 8) Yong.R.N., Boonsinsuk.P. and Fattah.E.A. : Tyre load capacity and energy loss with respect to varying soil support stiffness, *J. of Terramechanics*, Vol.17, No.3, pp.131-147, 1980.
- 9) たとえば、竹内則雄、塙原修、松田宏：川井モデルによる粘性土の支持力解析について、土木学会第 40 回年次学術講演会概要集（III），pp.401-402, 1985.
- 10) 全亨奎、谷口哲司、岸本正、吉田慎、玉利達人：3 方向応力測定器によるタイヤラグ面接地応力の測定、共和技報 No.480, 1998.
- 11) Keen,A. and Craddok,S. : A method for determining the tyre-soil contact of a rolling tyre by using the dynamic measurement of the radial and tangential tyre deflection, *Proc. of the European ISTVS Conference*, pp.139-146, 1997.
- 12) 室達朗：テラメカニックス、技報堂出版, pp.90-91, 1993.
- 13) Wong, J.Y.: *Terramechanics and off-road vehicles*, Elsevier, pp.214-241, 1989.

(1999. 5. 27 受付)

ANALYSIS OF A FUNDAMENTAL DEFORMATION BEHAVIOR OF AN OFF-THE-ROAD TIRE BY USE OF THE DISCRETE TIRE MODEL

Tadaomi EGUCHI and Tatsuro MURO

In this paper, we suggest an analytical model of an OR tire for running performances prediction, and report analysis of fundamental deformation behavior of a tire. The function of the OR tire was analyzed from the structure which divided in two blocks of tread department and sidewall department. The approximate polynomial expressions of the relationships of the load-deflection and also contact length-deflection were investigated by the load test. And two equivalent elastic moduli were estimated by the results. We constructed a discrete tire model by RBSM (Rigid-Bodies Spring Model). The calculation value of the RBSM tire model was inspected the fact in agreement with the chart. And we calculated static and treading states by using the RBSM tire model and clarified a part of fundamental deformation of a tire.