

11. 建設装輪両タイヤと地盤の接触問題解析

愛媛大学：室 達朗
明石工業高等専門学校：*江口 忠臣

1. まえがき

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、建設現場における土質特性に適合した建設車両の選定と作業能力向上およびロボット化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。タイヤをたわみ性車輪として扱うことのできる離散化モデルは位置決め情報提供に有力な手がかりとなる。さらにタイヤと地盤との接触状態の把握はタイヤの摩耗寿命予測にも寄与するものである。先に筆者らはタイヤ装着型車両の走行性能予測システムのうちタイヤ性能に関するシミュレーションモデルを示した¹⁾。このシミュレーションモデルを拡張すべく地盤接触情報を得るため種々の接触試験を行った。その後、タイヤに作用する2方向力（鉛直方向力、推進方向力）と作用トルク、摩擦係数、沈下量から剛盤上のタイヤ変形状をもとに接触状態のモデルを再現した。今回は直進走行時における解析結果と拡張モデルの構築について報告する。

2. ORタイヤの変形状

2. 1 載荷試験

タイヤは建設車両中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。今回新たにたわみの初期における接触長を明確にするため図-1 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。

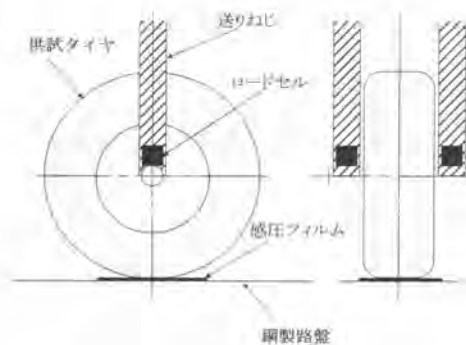


図-1 載荷試験

表-1 供試タイヤ諸元

呼び	10.00-20-14PR
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

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-1 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 回繰り返して与えた。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-2、図-3 は載荷試験の結果より得られる接触長-たわみ関係および荷重-たわみ関係である。

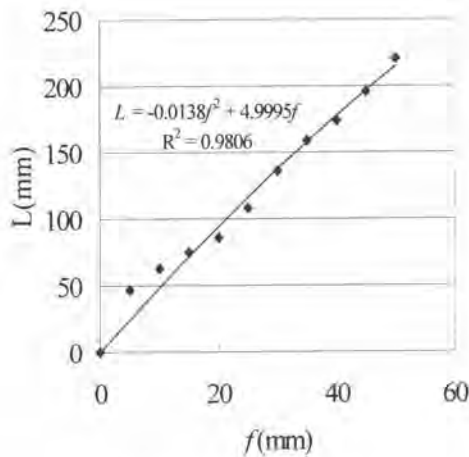


図-2 接触長 L -たわみ f

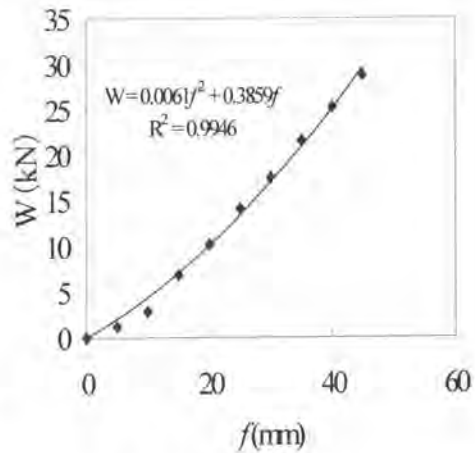


図-3 荷重 W -たわみ f

いずれの関係についてもたわみの初期部分 (15mm 付近まで) 以降は線形関係を示しており、従来の地盤接触予測においてはこの直線部分を用いた弾性係数測定が行われてきた。しかしながら軟弱地盤との接触領域の規定には1つの弾性係数でタイヤの変形性状を表すことは困難な面が生ずる²⁾。

2. 2 剛路盤上での接触形状

タイヤは周方向およびその直角方向 (車軸方向) のいずれにも曲率を有しており、剛路盤上での接触形状は楕円となり弾性体間の接触はヘルツの理論を用いれば一般に長軸の長さ L は次式で表される。

$$L = 2 \sqrt{\frac{3W}{4} \left(\frac{1 - \nu_A^2}{E_A} + \frac{1 - \nu_B^2}{E_B} \right) / \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} \right)} \quad (1)$$

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, 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

さらに、Yong ら³⁾はタイヤを1個の弾性係数で表せるものとして上式を基にした接触状態を示す式を提案している。

しかしながらタイヤの場合車軸方向の接触可能な幅は周方向に比して小さいため、たわみが大きくなると飽和することとなり接触形状は矩形に近づいていく。図-4は車軸方向の接触幅すなわち楕円の短軸側が飽和した後の接触形状例を示している。接触形状についてはタイヤ全体から見た弾性より接触域近傍の弾性の影響が大きいことから、2.1から推定できるトレッド部の等価弾性係数が重要となる。

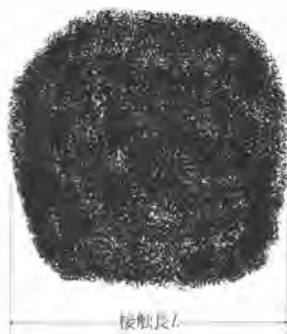


図-4 接触形状例

2.3 一面せん断試験機によるトレッド材と土の接触試験

ここでは一面せん断試験機を用いてトレッド材と地盤材間の基本的な接触挙動推定データを得る。試験方法としては試験機の下側せん断箱にトレッド材を整形して挿入し、上側せん断箱に地盤材を詰めることにより行った。トレッド材は表面付近の変形能によるせん断抵抗の変化も考察するため、厚さを1.5mmとし平滑面を有するものと表面にせん断直角方向に5mmピッチでサイピングを施した2種類を用いた。

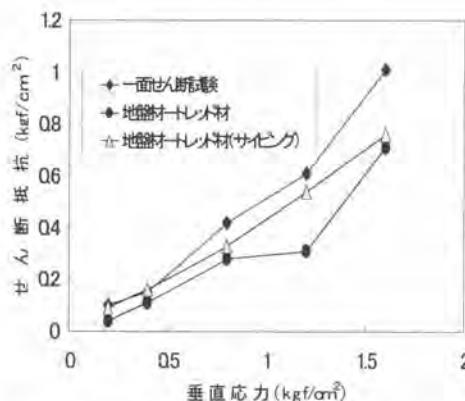


図-5 地盤材(砂)とトレッド材の接触試験結果

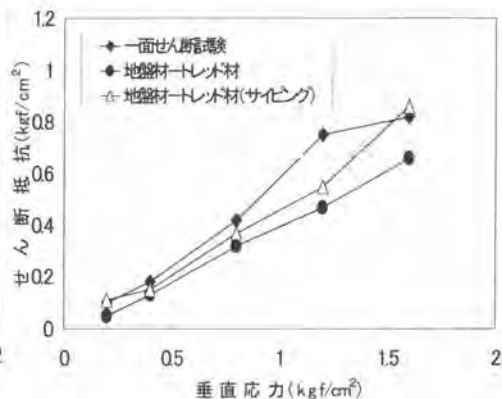


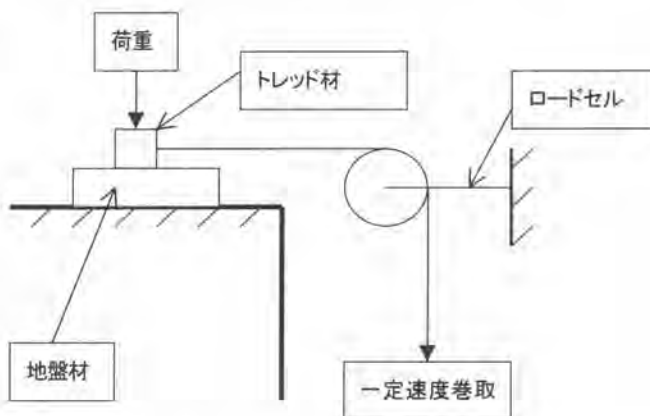
図-6 地盤材(まさ土)とトレッド材の接触試験結果

図一5、図一6は地盤材として海砂およびまさ土を用いて一面せん断試験機による接触試験を行った結果である。図にはそれぞれの地盤材の一面せん断試験の結果を併記している。いずれの地盤材においても、一面せん断試験のせん断抵抗は平滑面を有するトレッド材との接触試験によるせん断抵抗値より大きい値を示している。この結果は溝を考慮しないトレッド表面下において、垂直方向荷重から生ずる駆動抵抗によって地盤材内部のせん断変形破壊が起りにくいことを示していると考えられる。またサイピングを有するトレッド材の接触試験結果は平滑面トレッド材のせん断抵抗より大きい値を示している。サイピングを有している場合エッジ効果による抵抗増加が考えられるが、エッジ効果を発揮するためにはトレッド材の変形が必要条件となり、初期のせん断抵抗によって変形するに足る変形能をトレッド材が持ち合わせていることが必要である。

サイピングのない平滑面トレッド材についても十分な変形能を有する場合はせん断抵抗値が変化の可能性があり、試験方法を改善することによってこの点を調べていく必要がある。

2. 4 地盤材とトレッド材の摩擦係数

地盤材とトレッド材の摩擦係数を調べるため、図一7に示すような簡易摩擦係数測定装置を用いて測定を行った。



図一7 簡易摩擦係数測定装置

測定は接触試験に用いた海砂、まさ土および火山灰を含んだまさ土の3種類を用い、調整時5%、10%の含水比の試料を用意した。トレッド材は面積の等しい円形、楕円形、長方形を用いた。

表一2は静止摩擦係数の測定結果である。いずれの結果もトレッド材の接触形状による顕著な差が見られなかったため、試料ごとの全平均値で表している。火山灰を含むまさ土の含水比10%の試料を除いて0.62~0.64付近の値を示している。今回の試験は動摩擦係数の測定も可能な装置であったが、すべり沈下と同様な現象が発生しトレッド材が動き出した後に地盤材の中に埋もれ

ていったため測定できなかった。

表-2 地盤材と静止摩擦係数

まさ土 含水比5%	まさ土 含水比10%	砂 含水比5%	砂 含水比10%	火山灰を含む まさ土 含水比5%	火山灰を含む まさ土 含水比10%
0.626	0.621	0.641	0.639	0.637	0.779

3. 解析モデルと解析結果の検討

解析モデルは先に提案した図-8に示すRBSM タイヤモデルにて構築した。2. 1の載荷試験結果から得られたトレッド部とサイドウォール部の等価弾性係数の推定結果は図-9に示す通りである。推定の方法については前述の文献²¹⁾による。このモデルの特徴はタイヤを2つのブロックに分割し、それぞれに等価弾性係数を導入することによって接触形状の表示と荷重支持機能に起因するたわみの表示を明確にできるという点である。解析に用いた等価弾性係数はトレッド部 $E_T 10.3\text{MPa}$ 、サイドウォール部 $E_S 58.2\text{MPa}$ 、地盤材(砂) $E_{S0} 1.5\text{MPa}$ である。また地盤材(砂)の材料定数として2. 3. 2. 4の結果より $C=0$ 、 $\tan \phi = 0.562$ 、摩擦係数0.640を用いた。解析の仮定として以下の項目を設けた。

- (1) 接触面領域は弾性接触の範囲にて発生し、駆動抵抗およびタイヤの変形抵抗による地盤材内部の破壊は起こらない。
- (2) 対象タイヤモデルのラグはなく平滑である。

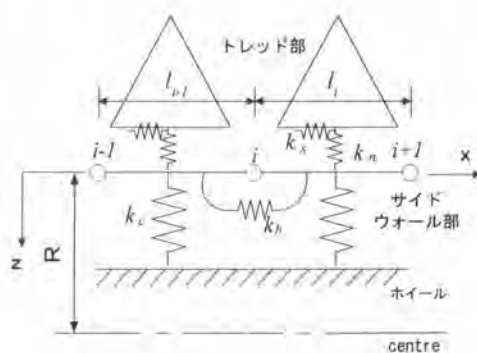


図-8 RBSM タイヤモデル

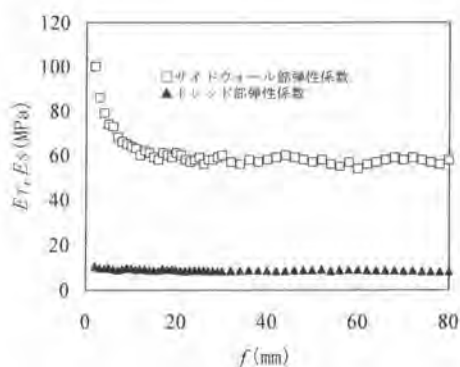


図-9 各ブロックの等価弾性係数

図-10に軸荷重 10kN、初期駆動トルク 295N・m を作用させた時のタイヤと地盤材(砂)の接触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を示す。図中の●はタイヤ、○は地盤材の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。この時の最大沈下量は 18.1mm に達しているが、タイヤを1つの弾性係数(55.2MPa)で表した場合の沈下 20.3mmの約 81%であり予測性能の違いが現れている。また等価弾性係数の推定とは別にトレッド部の等価弾性係数を 5.0MPa、トレッド厚さを 60mmとした場合の最大沈下量は 16.9mmとなり、トレッド部の硬度を下げ厚くすることで軟弱地盤上での沈下を抑え接触面積の増加を図ることができると考えられる。

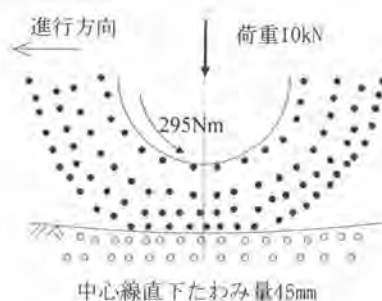


図-10 タイヤと地盤材(砂)の接触状態

図-11は接触域付近のタイヤの変形を示したものである。実線は剛路盤上での変形、破線は地盤接触を示している。とくにせん断方向変形は地盤接触について剛盤接触より中心線側にピーク値を持つことが分り変形量の総和も小さくなっている。このことは軟弱地盤上でタイヤ変形エネルギー減少による推進力低下を表している。

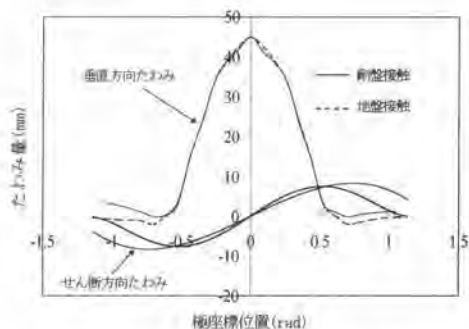


図-11 接触域付近のタイヤの変形

4. あとがき

先に示したORタイヤの変形解析シミュレーションモデルに地盤との基礎的接触情報を加えることによって、タイヤ-地盤接触を表現するための拡張モデル構築した。解析結果より剛路盤上と地盤材上のタイヤの変形性状の相違が確認された。さらに動的な現象解析のための接触基礎データの収集および地盤材上でのタイヤ変形の実測が今後の課題である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 室達朗, 江口忠臣: RBSMタイヤモデルによるORタイヤの基礎的変形性状解析, 土木学会論文集(投稿中)
- 3) R.N.Yong, P.Boonsinsuk and E.A.Fattah: Tyre load capacity and energy loss with respect to varying soil support stiffness, *J. of Terramechanics*, Vol.17, No.3, pp.131-147, 1980.