

地盤上における建設車両用タイヤの 制駆動特性に関する研究

江口忠臣¹・室達朗²・Dang Thai TRAN³

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)

³正会員 博(工) 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

本研究の目的は建設車両の高精度車両制御に資するため、地盤上における建設車両用タイヤの制動特性および駆動特性を明らかにするものである。タイヤと地盤の接触作用は非線形力学の最も困難な問題のひとつであり、半実験的方法によって性能予測が可能となる。そこで、供試地盤上において荷重、制駆動試験を行い、3種類のタイヤ空気圧設定における特性について調査した。純粋転動時と同様にタイヤ空気圧設定による地盤表層破壊抑制効果が明らかになり、スリップ率の変化に伴う制駆動特性の詳細が判明した。また、離散化タイヤモデルによるタイヤ変形形状を基にしたシミュレーション方法を提案し、それに基づく数値解析の結果と実験値との比較を行うことによって走行性能予測の精度について検討した。

Key Words : *off the road pneumatic tire, inflation pressure, slip ratio*

1. 緒言

現在、土工現場において稼働している車輪式建設車両は、タイヤドーザ、ホイールローダ、重ダンプトラック、スクレーパ、モータグレーダ等数多く存在し、その用途も掘削・積み込み、運搬、整地と多岐にわたる。これまで土木施工における高効率化に対応すべく、建設車両も大出力機構を基盤に目覚ましい発展を遂げてきた。しかしながら、近年の環境問題への意識の高まりとともに、燃料消費を抑え、環境負荷低減を図りながら所要の成果を得る技術が求められている。

情報化施工技術はその対策として一翼を担うものであり、国土交通省は「各作業工程の電子情報を活用し、建設機械と電子機器、計測機器の組合せによる連動制御、施工管理の情報化を行い、施工全体として生産性および品質の向上を図る情報技術に立脚した建設生産システム」と定義している。このような状況の中、高精度測位法や広域建設車両管理システム等を統合した精密施工 (Precision Construction) という概念も提案されている¹⁾。精密施工システムは、1)施工サイトマッピング機能、2)施工情報管理機能、3)施工技術者意思決定支援機

能を有しており、建設車両の制御は施工情報管理機能に属するものである。特に建設車両のロボット化を想定した場合、建設車両制御の主たる部分は位置制御であり、測位システムによって管理される。移動式ロボットの位置決め技術は移動制御能力に支配されることから、現場路盤と建設車両との接触情報を詳細に把握しておくことは、精密施工システムの精度向上に寄与するものとなる。

車輪式建設車両と現場路盤との接触部は、対象を移動手段に限定すればタイヤである。ここでは建設車両用空気入りタイヤ (Off-the-road tire, 以下、OR タイヤと称す) を指すが、タイヤは空気圧を利用し、それ自身が大きく変形することによって荷重を支持するという特徴を持つ。現場路盤が変形する地盤の場合、タイヤと地盤との接触相互作用は非線形力学の最も困難な問題のひとつである。この問題を解決する方法として、半実験的評価法があり、タイヤと地盤接触における応力状態を実験的方法により求めた後、計算機援用手法を用いた数学的処理を行うことによって性能予測を可能にするものである。タイヤと地盤の接触状態を検討するための基本となるタイヤの直進転動形態としては、純粋転動状態、駆動状態、制動状態がある。著者らは、これまでの研究で、地盤上

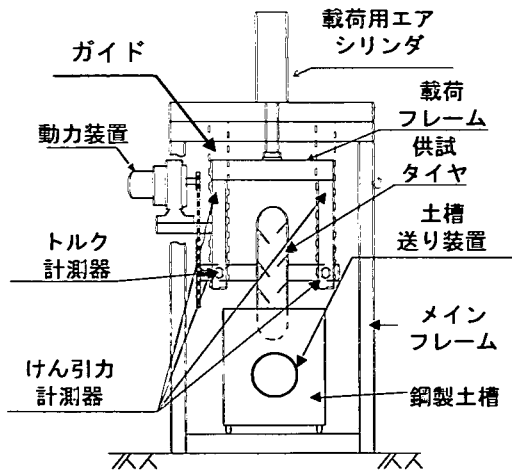


図-1 実験装置外観および各部名称

におけるORタイヤの弾性挙動と純粋転動特性を明らかにし²⁾、タイヤの変形状態を表示するため、計算機援用手法を用いたタイヤモデルを示した³⁾。

本研究では、実際に建設車両に装着されているORタイヤを用いて駆動 i_s 、制動 i_r 状態を実験的に再現し、高精度車両制御情報に資するように各状態における転動特性を把握することを目的とし、併せてタイヤモデルによる基礎的変形状態をもとにした転動数値解析を行った。

2. 転動試験

(1) 転動試験装置

純粋転動試験実施時に作製したタイヤ-地盤接触実験装置²⁾を制駆動試験が行えるように改良した。図-1に実験装置の外観と各部の名称を示している。

実験装置は、メインフレーム(2650×2000×2000mm)、荷重用エアシリンダ、荷重フレーム(700×1000×300mm)、鋼製土槽、土槽送り装置、土槽移動用レール、供試タイヤ、動力装置、メモライザーで構成されている。荷重フレームとエアシリンダの間にロードセルを設置し、タイヤに作用する垂直荷重を計測する。ガイドは荷重する際にタイヤ進行方向の振れを抑制するために、荷重フレームの周りに取り付けている。ガイドの内側には転動輪を取り付け、荷重フレーム昇降時における荷重フレームとガイドの間の摩擦力を軽減できるようにした。ガイドの取り付け部にけん引力測定用ロードセルを設置した。この荷重フレームの両端に軸受けを設置し、供試タイヤを取り付けた直径50mm、長さ1750mmの転動軸を通

し固定した。減速機付き動力装置から伝達装置を介して転動軸を回転させる。転動軸上の伝達装置と供試タイヤの間にトルク計測装置を設置した。鋳製土槽は送り装置によりレール上を移動できる構造になっている。駆動、制動時のスリップ率の設定は、転動軸の回転速度と土槽の送り速度との差によって行った。土槽のサイズは本実験における圧力球根が側壁に接触する時、最大圧力の10%以下となるように決定した。

(2) 供試地盤

供試地盤は、試料砂として愛媛県松山産のまさ土を使用した。気乾燥状態で最大粒径4.75mm以下に調整した。まさ土の土質特性は土粒子比重 $G_s=2.66$ 、平均粒径 $D_{50}=0.78$ mm、均等係数 $U_c=12.0$ 、曲率係数 $U_c=3.0$ 、最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.88$ g/cm³、最適含水比 $w_{opt}=12.8$ %である。ここで、曲率係数は粒度分析試験において、通過質量百分率30%粒径の二乗と60%粒径および10%粒径の積との比で表したものである。また、最適含水比はJISA1210の突き固めによる締固め試験から求めたものである。

この試料砂を実験土槽内にまき出して地盤表面を均一にし、密度分布を一定にするため、1.0m²の板にエアシリンダで14.7kNの荷重をかけ、15kPaの圧力で締め固める作業を2層に分けて行い供試地盤を作成した。供試地盤の座標系はタイヤ回転軸の直下でタイヤが地盤と接する位置を原点とし、タイヤ転動方向にX軸、地盤深さ方向にZ軸を設定した。また、供試地盤表面から深さ300mmのところをSST(Stress State Transducer)⁴⁾を埋設し、地中における垂直応力 σ_z およびせん断応力 τ_{zx} を測定した。

供試地盤のトラフィカビリティ計測のためコーン貫入試験を行った結果、コーン指数は深さ300mmの位置において680kPaであった。コーン指数によるトラフィカビリティの判定を行えば、一般にタイヤを装着したホイール式建設車両の場合、走行地盤のコーン指数は600~1200kPa程度必要とされている。今回用いた供試地盤は深さ300mmの位置において、この下限値付近のコーン指数を持つものである。

(3) 供試タイヤ

本実験で使用するタイヤはダンプトラック、スクレーパ等に使用されるJATMA(社)日本自動車タイヤ協会)1種タイヤである。建設機械用ORタイヤの構造機能を大別すると、軟弱地、泥ぬい地においても高荷重下で走行可能なこと、岩盤や森林地帯などの不整地での走路の凸凹による衝撃を緩和すること、制・駆動トルクおよび旋回時コーナリングフォースを路面に伝達することである。

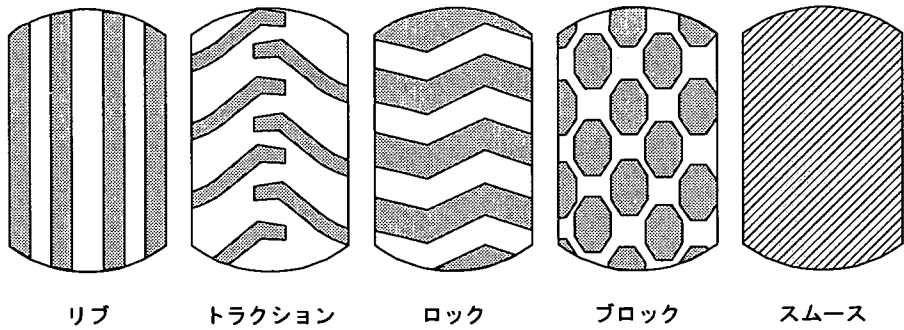


図-2 ORタイヤのトレッドパターン

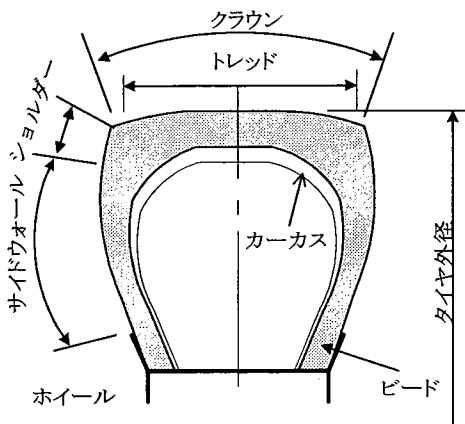


図-3 建設車両用タイヤ基本構造

ORタイヤの構造は図-3に示すように、クラウン、ショルダー、サイドウォール、およびビード部分からなる。タイヤの主要部分はカーカス(ケース)またはケーシングと呼ばれ、タイヤ内部の空気圧を保持すると共に、軸荷重 W 、制・駆動トルク Q 、推進力、抗力、有効制動力 F 、およびコーナリングフォースを車輪に伝達させ、所定の有効制・駆動力を発揮するための重要な役割を果たしている。

ORタイヤのトレッド面には用途に応じたトレッドパターンと称される溝形状が採用されている。図-2は各種のトレッドパターンを示している。リブ型はタイヤの回転方向にトレッド溝が切られており、横方向スリップによく抵抗するため操縦安定性がよい。このパターンはグレーダに用いられ砕石から砂利、泥土走路をカバーしている。トラクション型は有効牽引力を路盤へ十分に伝達するために設計されており、トレッド溝の方向がタイヤ回転方向に対して傾斜している。駆動輪として使用する場合は土を排出する側で装着し、制動輪として使用する

場合はその逆で装着するほうが効果的である。このパターンはアースムーバサービスにおいて主としてスクレーパーに用いられ砂利泥土走路で選択される。ロック型は土工現場においてアースムーバサービス、グレーダサービス、ローダ&ドーザサービスまであらゆる用途に対応し、アースムーバサービスでは全不整地に推奨される。耐カット性、耐摩耗性に優れていることも特徴である。ブロック型はボタンの密集したトレッドを有し、フローテーションを重視した構造である。軸荷重の増加によって接地面積が増加するので、軟弱地盤上での支持力を確保することができる。ブロック型は被牽引式スクレーパーによく用いられる。スムーズ型はトレッド溝が存在しないものであり転圧用タイヤローラに装着されている。

本実験では、ダンプトラック等の運搬用建設車両に数多く装着されているロック型のトレッドパターンを有するタイヤを用いた。ロック型は前述のようにあらゆるサービスに対応しており、アースムーバサービスにおいては全不整地に対応する汎用性の高いものであることから、本研究のねらいの一つである建設車両のロボット化における主たるトレッドパターンになると考えられる。タイヤの呼びは10.00-20-14PR(幅-ホイール径-強度)、タイヤ外径1055mm、タイヤ幅296mm、最大荷重負担能力24.2kNである。

(4) 制動・駆動試験

ORタイヤが堅固な路盤上で転動する場合、走行路盤の変形は無視し得るほど小さい。これに対して、ORタイヤの変形は接地しているトレッド部分およびカーカス部分でかなり大きいものとなる。したがって、ORタイヤの硬路盤上での転動は接地部分を3次元の場合は平面、2次元の場合は直線で表現することができる。ORタイヤと走行路盤の相互作用を論ずる場合は接地部の形状を規定することによって応力状態を推定することが可能となるため、その形状が平面または直線として表示できる

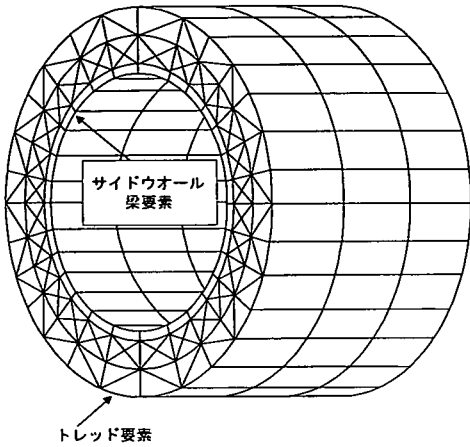
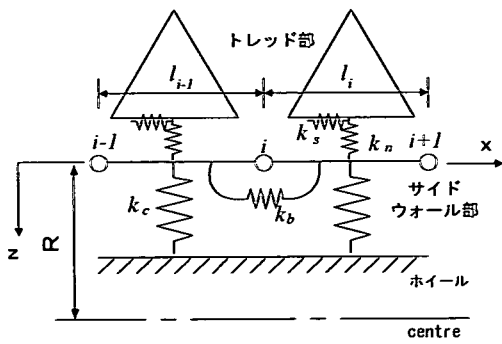


図-4 離散化タイヤモデルの座標系と要素分割

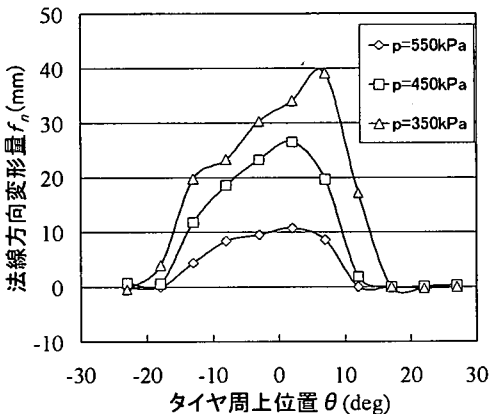
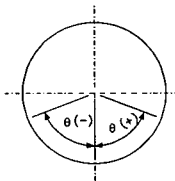


図-5 離散化タイヤモデルによるORタイヤ表面法線方向変形量解析値

ことは解析上殊に都合が良い。

OR タイヤの転動形態として純粋転動状態、制動状態、および駆動状態があることは先に述べた。純粋転動の場合、転動距離と移動距離は基本的に一致するが、制動、駆動状態ではスリップが生じるため同じにはならない。一般に、スリップの状態を数値で表すためスリップ率が用いられる。スリップ率 i (%) は、駆動状態 i_1 は式(1)、制動状態 i_2 は式(2)で定義される。

$$i_1 = \left(1 - \frac{V}{R\omega}\right) \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

$$i_2 = \left(\frac{R\omega}{V} - 1\right) \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

ここで、 V : OR タイヤの進行速度 (m/s), R : 回転半径 (m), ω : OR タイヤ回転角速度 (rad/s) である。

駆動状態において OR タイヤ周速度は OR タイヤ進行速度より大きくなるためスリップ率は正值となり、制動状態において周速度は進行速度より小さくなるためスリップ率は負値をとる。

転動試験は駆動、制動各状態のスリップ率 i_1, i_2 を設定して行った。本試験装置では OR タイヤの回転速度と実験土槽の送り速度によってスリップ率の設定を行っている。OR タイヤ空気圧設定 p は 350kPa, 450kPa, 550kPa の 3 種類、スリップ率は制動状態 i_2 , -9, -17, -23, -28, -33, -40% の 6 種類、駆動状態 i_1 , 9, 20, 29, 38, 45% の 5 種類、計 11 種類で実験を行った。軸荷重は 350kPa 時の最大負荷の約 50% である 10kN で行った。

3. 数値解析モデル

(1) OR タイヤの基礎的変形

OR タイヤの基礎的変形形状を規定するため既報の離散化タイヤモデル³⁾を用いる。モデルは図-4 に示す座標系と要素分割のように OR 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。モデルでは隣接する 2 要素間にはばねを設定し、そのばねを通して力が伝わるものと考えている。タイヤモデルはトレッド部とサイドウォール部に分割する。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、サイドウォール部そのものの曲げ剛性をふくめた円筒容器としている。

剛盤上における OR タイヤの載荷試験結果からサイドウォール部とトレッド部の等価弾性係数を求め、解析に用いている。サイドウォール部の等価弾性係数は

表 - 1 地盤 - 車輪系定数

		試験条件
k_1 (kN/m ⁿ¹⁺²)	11748	平板载荷
n1	1.29	
k_2 (kN/m ⁿ²⁺²)	421371	除荷
n2	1.20	

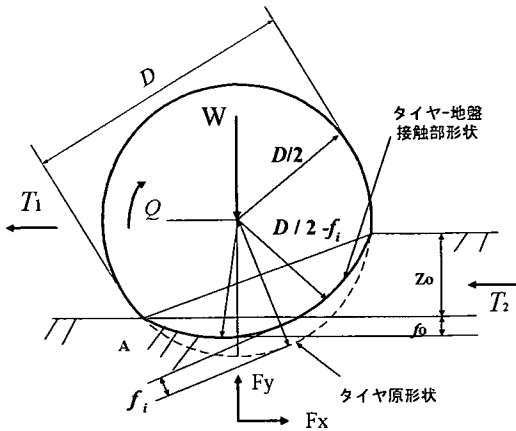


図 - 6 OR タイヤ転動モデル

59.8MPa, トレッド部の等価弾性係数は 13.0MPa とした。離散化タイヤモデルにより、純粋転動後の静止状態における OR タイヤ表面の法線方向変形量 f_0 を求めた結果が図 - 5 である。横軸 θ はタイヤ周上表面位置の中心角 (deg.) 示しており、タイヤ回転軸直下を 0 としている。 p は OR タイヤの空気圧である。OR タイヤの駆動、制動状態数値解析モデルを作成する上で、ここで求めた変形形状が基本接地形状として用いられる。

(2) 駆動・制動解析モデル

OR タイヤと変形する地盤との接触状態を解析する上で接地部の形状を仮定しなければならない。また、接触形状の仮定の良否によって解析精度が左右されるものである。OR タイヤの変形形状についてはいくつかの仮説が提起されている。OR タイヤ接地部分を中央の直線部とその両側の対数螺旋で構成されるとするものがある⁴⁾。対数部螺旋部分の任意の中心角 α における半径 r を式(3)によって求め、接触形状を決定している。

$$r = R \cdot \exp\{\beta(\alpha - \alpha_0)\} \quad (3)$$

ここで、 R : OR タイヤ半径、 α_0 : 対数螺旋開始点中心角、 β : 定数である。また、OR タイヤの軸方向および軸直角方向のたわみ変形によって生ずる断面形状を楕円形であるとし、軸直角方向たわみの近似多項式を用いる方法⁹⁾も示されている。簡単なものとして、OR タイヤ回転軸直下を中心として対称に直線部を考え、その両側に円弧部を仮定するものもある⁹⁾。

本研究では、筆者らが先に提案した Schmid の方法⁷⁾を基にした解析モデル⁸⁾を改良し、転動初期接触面形状を前節で求めた解析値にて仮定する。文献 7), 8) のモデルはタイヤ空気圧を制御する事を前提に構築されており、特に低空気圧を表示する上で有効であると考えられる。

図 - 6 は OR タイヤの転動解析モデルである。OR タイヤに作用する諸力として有効制駆動力 T_1 、制・駆動トルク Q 、地盤反力 F_x , F_y 、有効制動力 T_2 、軸荷重 W がある。解析モデル作成にあたって以下の仮定を設けた。

- ①接触形状は離散化タイヤモデルにより得られたものを採用する。
- ②地盤と接触していない部分のタイヤ形状は原形状とする。
- ③地盤上における転動中のタイヤたわみ f は剛盤上での静的タイヤたわみ f_k を上回らない関係を保持する。
- ④タイヤ幅は変化しないものとする。

この解析モデルでは、接触面における y 方向地盤反力の積分値が軸荷重と等しくなるようにタイヤたわみ量が規定されている。また、沈下を支配する定数として地盤一車輪系定数を用いている。本解析モデルの基礎式として以下のものを定める。

$$f(Z_0, f_0, (D/2 - f_i)) - \sqrt{1 - \frac{D/2}{D/2 - f_i}} f_k = 0 \quad (4)$$

$$W - F_y(Z_0, f_0, (D/2 - f_i)) = 0 \quad (5)$$

$$k_1 S_{\max}^{n1}(Z_0, f_0, (D/2 - f_i)) - k_2 (S_{\max}^{n2}(Z_0, f_0, (D/2 - f_i)) - f_0)^{n2} = 0 \quad (6)$$

式(4)は地盤上における転動中 OR タイヤのたわみ f と剛盤上における静的なタイヤのたわみ f_k の関係を表している。ここでは、第1項の Jonashi-Hanamoto の圧力-沈下式から得られるタイヤたわみ f と第2項の剛盤上における静的なタイヤのたわみ f_k と接触形状から幾何学的に得られるタイヤたわみが等しいという関係に基づいている。また、仮定の通り地盤上における転動中のタイヤたわみ f は剛盤上での静的タイヤたわみ f_k を上回らない状態を保持している。初期接触面各位置のたわみ f_i は接触形状の仮定により与えられる。鉛直方向の力の釣り合いは式(5)によって表され、OR タイヤと地盤接触の離脱点 A における接地圧が 0 になることを式(6)が示している。

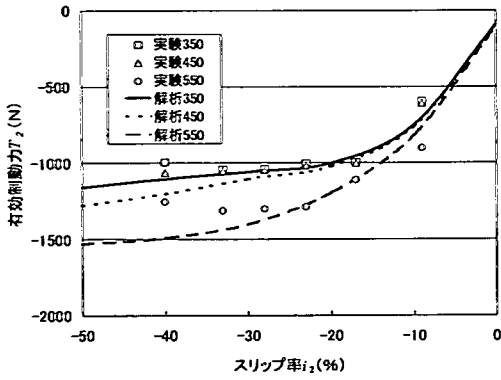


図-7 制動時における有効制動力 T_2 とスリップ率 i_2 の関係

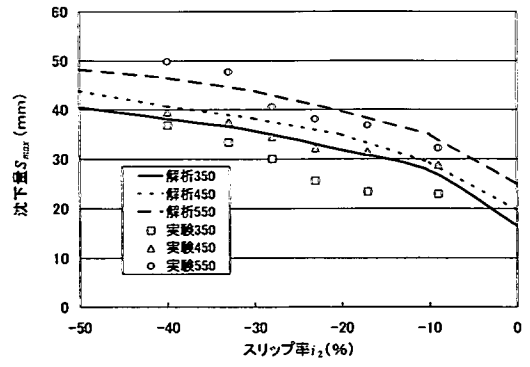


図-9 制動時における最大地盤沈下量 S_{max} とスリップ率 i_2 の関係

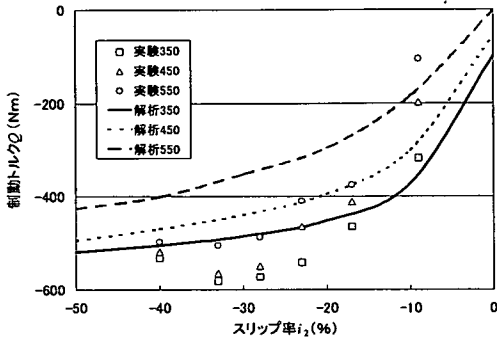


図-8 制動トルク Q とスリップ率 i_2 の関係

k_1, n_1, k_2, n_2 は地盤-車輪係数であり、平板載荷および除荷試験によって得られた値である⁹⁾。 S_{max} は OR タイヤの最大沈下量である。解析に用いた定数を表-1に示す。

4. 結果および考察

(1) ORタイヤの制動状態

変形する地盤上での OR タイヤの性能評価は、主として図-6 に挙げた諸力の測定または解析により算定することによって可能となる。

図-7 は有効制動力 T_2 とスリップ率 i_2 の関係を示している。実験値は各空気圧毎のプロット、解析値は 350kPa を実線、450kPa を細かい破線、550kPa を粗い破線で示している。スリップ率 i_2 は制動駆動ともに絶対値の大きくなる場合を増加とする。有効制動力は実験結果においてスリップ率増加の初期の段階でやや大きく立ち上がり、ピーク値を示した後に 550kPa 設定において薄減する傾

向にあり、450, 350kPa 設定においてはほぼ一定もしくは微減している。低内圧設定においてはスリップ率が小さい箇所にピーク値を示しており、350, 450kPa 設定ではスリップ率 i_2 20%付近である。一方 550kPa 設定では-25~-30%付近にピークがあるものと推測でき、空気圧設定が高くなると制動力は大きくなりピークの現れるスリップ率も大きくなっている。解析値は各空気圧設定とも実験結果のピーク値が現れるまでは、実験結果とよく一致している。しかし、それ以降は実験値の横ばいもしくは減少に対して解析値は増加している。解析値はすべり沈下の増加に伴う全締め抵抗の増分によって増加しているが、実験値はピークを示している付近以降において供試地盤表層部破壊とそれに伴うタイヤ接地部の水平地盤反力の低下が影響していると考えられる。実験および解析結果から、変形する地盤上では OR タイヤの空気圧を低く設定すると十分に制動力を得ることができないということがわかる。したがって車両の制動能力を維持するためには、低内圧設定は避けた方が良く考えられる。

図-8 に制動トルク Q とスリップ率 i_2 の関係を示す。制動トルクは実験値、解析値ともに OR タイヤの空気圧設定が低くなるに伴って増加している。これは、低い空気圧設定の OR タイヤでは、高い空気圧設定のタイヤと比較して大きい制動トルクを受けることになる。制動トルク Q はピークを示した後に減少する傾向にある。ピークの位置は各空気圧間の差は読み取れない。また実験値は解析値ほど空気圧設定毎の差は現れていない。OR タイヤ空気圧低減に伴う制動トルクの増加は、制動トルク発生の原因となる地盤反力の法線方向成分増加を誘導するタイヤ変形によるものと考えられる。今回の実験中、特に低空気圧設定スリップ率 i_2 30%付近の解析値と実験値が異なる部分において、ノンブレイキングモード (non-braking-mode) と呼ばれる制動状態¹⁰⁾になってい

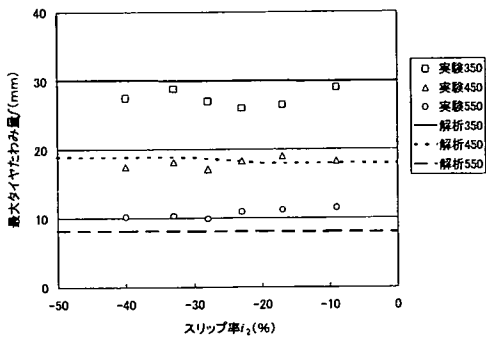


図 - 10 制動時におけるタイヤ最大たわみ量 f とスリップ率 i_2 の関係

る可能性があり、OR タイヤ寿命の向上や消費エネルギー低減のためには、この形態の制動トルクを抑制するため空気圧設定を高めることが望ましいといえる。建設車両においてノンブッキングモードが現象として確認された例は見当たらないが、ノンブッキングモードの制動状態が想定されるケースは、重ダンプトラック等の運搬車両が積載状態で軟らかい地盤で構成された坂路を下る時が考えられる。

図 - 9 は制動時における最大地盤沈下量 S_{max} とスリップ率 i_2 の関係を示している。各空気圧設定における沈下量は、空気圧設定が低くなるのに伴って減少している。しかし、各スリップ率において空気圧設定 350kPa と 550kPa の沈下量の差は実験値で 10~15mm 程度である。荷重条件が若干異なるが、先に報告した純粋転動における地盤沈下量は空気圧設定 350kPa と 550kPa との差が 60mm 強に達する実験結果もあり、現象として大きく異なっているといえる。OR タイヤに対して、低い空気圧設定を施すことによって期待する効果は、接地面積増加による過度の沈み込み防止、すなわちフローテーション性能の向上である。静的載荷、純粋転動状態に対して低空気圧設定が有効であることは既報の考察で述べた。制動時においても初期の沈下防止については相応の効果が確認できたが、制動状態のみに着目すれば、空気圧設定によるフローテーション性能向上効果は低下している。スリップ率の変化による沈下量の現象を見ると、いずれの空気圧設定においてもスリップ率 i_2 - 30% を超えると沈下量の増加が顕著になっている。沈下量の増加原因として考えられることは、接触面における地盤の破壊である。今回の結果からは破壊が大きく進行する位置が存在する可能性を指摘することができる。

図 - 10 は制動時におけるタイヤ最大たわみ量 f とスリップ率 i_2 の関係を示したものである。OR タイヤのたわみ量は、走行中の建設車両の状態をタイヤの変形量から

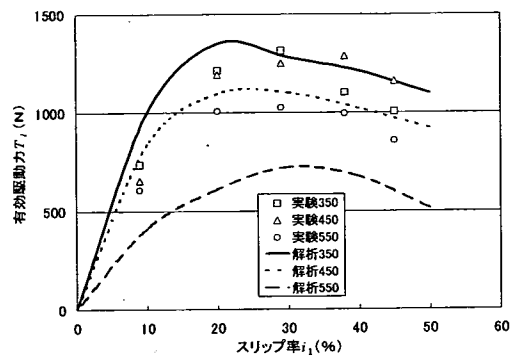


図 - 11 駆動時における有効駆動力 T_1 とスリップ率 i_1 の関係

推定する上で必要な因子の一つである。剛盤上と地盤上で静的載荷によるたわみ変形量を基にした式(4)を用いた解析結果は、制動時におけるたわみ量がほとんど変化しないことを示している。転動中のタイヤたわみ量を実測することは非常に困難である。本実験における OR タイヤのたわみ量は、転動中のタイヤ回転軸の中心線位置軌跡とタイヤ通過後の地盤変形形状との鉛直距離を以ってたわみ量としている。実験結果と解析結果の一致状況は良好であるといえる。

(2) OR タイヤの駆動状態

建設車両の移動は車輪すなわち OR タイヤの転動によって行われる。移動のための転動を支配する要因は駆動であり、この状態の把握は車両性能を十分且つ効率的に発揮させるために肝要である。

図 - 11 は駆動時における有効駆動力 T_1 とスリップ率 i_1 の関係を表したものである。実験値と解析値を併記している。制動状態のスリップ率表示と合わせるため、横軸の左側を 0% としている。駆動状態についても制動状態と同じく OR タイヤの空気圧設定は 3 種類 (350, 450, 550kPa) の実験と解析を行っている。解析値については、各空気圧ともにスリップ率 i_1 の増大に伴って有効駆動力は増加し、あるスリップ率 i_1 において最大値を示した後漸減している。OR タイヤの空気圧設定が低いほど小さいスリップ率で有効駆動力の最大値を示す傾向にある。空気圧設定 350kPa においてはスリップ率 i_1 20% 付近、空気圧設定 550kPa においては 30% 付近で有効駆動力 T_1 の最大値を示している。このスリップ率が有効駆動力 T_1 を検討する上での最適スリップ率 i_1 となり駆動制御の指標となる。解析上の最大有効駆動力は、空気圧設定 350kPa と 550kPa において 2 倍程度の差が生じている。解析上はさらにスリップ率を増加させていくと、有効駆動力が 0 となる場合が存在しけん引不能となる。

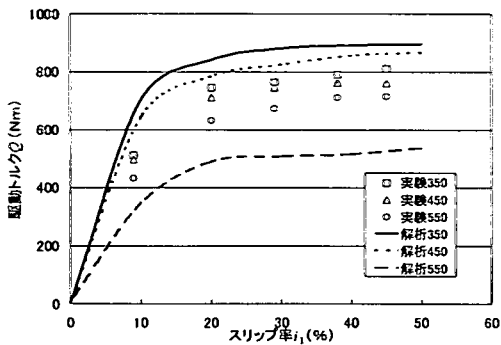


図-12 駆動トルク Q とスリップ率 i_1 の関係

一方、実験値は解析値と同様にスリップ率の増加に伴って有効駆動力が増加しているが、空気圧設定による値の差は解析値ほどは現れていない。また、有効駆動力 T_f の最大値が発生するスリップ率 i_1 も大きな差が見られない。この原因として考えられることは、実際のORタイヤの表面に刻まれたトレッドパターンの影響である。本実験で用いたORタイヤのトレッドパターンは前図-2に示すものうちロックタイプである。このタイプは土工現場における多くのサービスに対応しているが、けん引性能も低くない。解析においてはトレッドの形状を考慮に入れていないので、実験値との差が生じていると考えられる。特に空気圧が高い550kPaの場合は、トレッドパターンによるけん引力発揮が顕著に現れているといえる。トレッドパターンの突起部をラグ(図-2のトラクション、ロック型のハッチング部分)と呼び、ラグの地盤への貫入深さはけん引力に影響を与えるとされている¹¹⁾。トレッドパターンが地盤へ接触を開始する入射位置におけるラグの進入角度が低空気圧設定の場合小さくなり、結果として接触初期のラグ貫入量を低下させ、ラグによるけん引力発揮を低下させているものと考えられる。以上のことから、有効駆動力はORタイヤの空気圧設定を低くすることによって大きな値を得ることができるが、空気圧低下によるラグの効果の減少を考慮すれば、本実験において空気圧設定は450kPaの時が最も効率が良いといえる。上述の通り本解析モデルはトレッド表面のパターンを考慮していないため、建設車両の動力に関する出力制御の情報とするためにはなお改善が必要である。

図-12は駆動トルク Q とスリップ率 i_1 の関係を示したものである。実験における駆動トルク Q は、ORタイヤ回転軸のねじりによるひずみを測定することによって求められている。解析結果について、スリップ率 i_1 の増加に伴って駆動トルクも増加し、一定値に漸近していく結果となっている。ORタイヤ回転軸に作用するトル

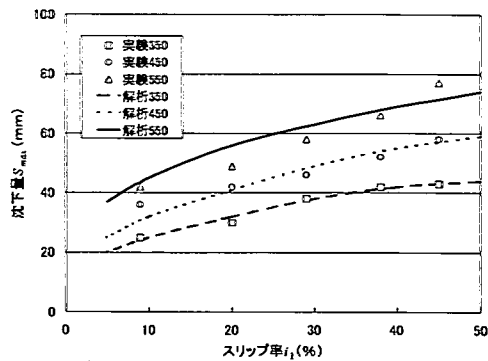


図-13 駆動時における地盤沈下量 S_{max} とスリップ率 i_1 の関係

ク Q ($N \cdot m$) は単純化すると式(7)のように、接地部に発生するせん断応力 τ (kPa) の積分値を用いて表すことができる。

$$Q = BR^2 \int_{\theta_r}^{\theta_f} \tau(\theta) d\theta \quad (7)$$

ここに、 B : ORタイヤ幅 (m)、 R : ORタイヤ半径 (m)、 θ_f : 接地入射角、 θ_r : 接地離脱角である。図-12においてスリップ率 i_1 が20%付近をこえると駆動トルク Q の増加が鈍ることから、式(7)の接地部で発生するせん断応力の総和が増加していないことを示している。この現象は密でない砂のせん断強度特性とよく似ているといえる。解析の結果は、ORタイヤの空気圧設定が低い場合に比べて、空気圧設定が高い場合は駆動トルクが大きく低下している。ORタイヤの接地表面付近のせん断応力発生はタイヤの変形が大きな要因の一つである¹²⁾。ORタイヤの空気圧設定が高い場合は、タイヤ全体の変形であるたわみ量が少なくなり接地表面付近のせん断応力低下をもたらした結果、駆動トルク Q の減少となって現れたと考えられる。

実験による駆動トルク Q とスリップ率 i_1 の関係は、解析結果と似た傾向を示している。しかし、空気圧設定による差は解析結果ほど現れていない。空気圧設定の違いによる駆動トルク Q の漸近値の差は350kPaと550kPaにおいて、解析値360Nm、実験値105Nmとなっている。空気圧設定550kPaの駆動トルク Q が実験値と比較して大きな値を示している原因は、有効駆動力と同様にラグの影響を受けているためと考えられる。簡易的にラグ部に発生するせん断応力 τ_l は式(8)¹³⁾によって求められるものとする。

$$\tau_l = \frac{\Sigma F}{B_l L} \quad (8)$$

ここに、 F : タイヤ回転方向のラグ面に作用する力 (N)、 B_l : ラグ幅 (m)、 L : ラグ厚さ (m) である。

タイヤ回転方向のラグ面に作用する力 F はラグの地盤への貫入深さの影響を受ける。空気圧設定が高い場合の接地部せん断応力は、タイヤ変形に起因する応力に対するラグ部に発生する応力の比率が高いということが実験結果に現れていると考えられる。空気圧設定 550kPa における駆動トルク Q の実験および解析の漸近値を元に、 $\tau(\theta)$ を式(7)によって算定すると 2.68kPa となる。この値は式(8)のラグ部せん断応力 τ_i の総和がORタイヤと地盤の接触面に等分布しているものと見ることが出来る。次に、低内圧設定における駆動トルクの実験値が解析値と比較して低い値を示していることについて考察する。本実験における駆動トルクの測定はORタイヤ回転軸のねじり変形を計測することによって行っている。一方、駆動トルク Q の発生要因はORタイヤと地盤との接触面付近に生じるせん断抵抗が大部分を占める。したがって、式(7)の右辺をORタイヤ半径 R で除して得られる力によって発生する変形が全て回転軸で起きた場合に全駆動トルクとなる。実験における低内圧設定のORタイヤはその剛性が小さくなっている。そのためにORタイヤのサイドウォール部でねじりによる変形が起きていると考えられる。接触面で発生するせん断応力が一定であるなら、ORタイヤ回転軸のねじり変形は小さくなり駆動トルク Q は測定上小さい値となる。このことは解析モデルのサイドウォール要素が回転軸周りのねじりに対してタイヤ剛性を十分に表現できていない可能性を示しており、前図-4のばね定数 k_b , k_c の設定をORタイヤのねじり試験等を通して今後検討して行かなければならない。

駆動トルク Q は有効駆動力 T_i と並んで建設車両の動力に関する出力制御のための情報となる。本結果において低内圧設定で高駆動トルクが発生するが、350kPa と 450kPa 設定の差は実験値、解析値ともに小さいことからラグによるせん断抵抗発生を考慮すれば、駆動トルク Q に対する低内圧設定の最適値が存在するといえる。

ここまでの考察の中で、ラグの影響を考慮することが今後のORタイヤの駆動特性予測上重要であることを述べた。ORタイヤの既往の研究成果をまとめた前述の文献(11)によれば、ラグの断面形状やトレッドパターンを境界条件として付与し、その影響を明らかにしていくことが課題の一つであるとしている。地盤上を走行するORタイヤの特性を解析する上で重要な要素は、タイヤの弾性挙動を表示することおよびラグ挙動の表示である。現在、この2つの要素を同時に解析するモデルを構築できる段階には至っていない。特に、本研究における低空気圧設定の場合のタイヤ変形に伴うラグの地盤進入形態は詳細を考察していく必要がある。

図-13は駆動時における地盤沈下量 S_{max} とスリップ率 i_s の関係を示したものである。スリップ率の増加と共に

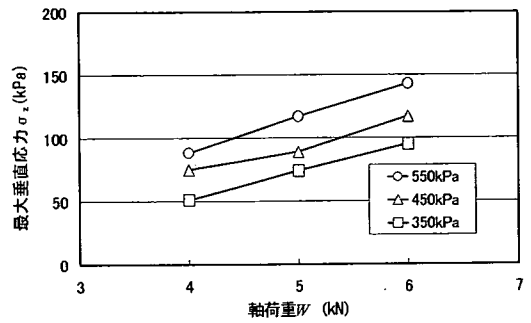


図-14 駆動下の最大地中垂直応力 σ_z

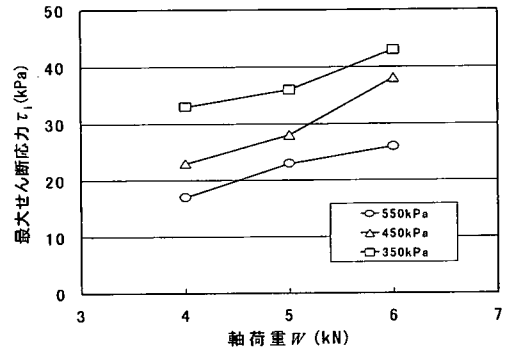


図-15 駆動下の最大地中せん断応力 τ_1

沈下量も増加している。実験値ではスリップ率 i_s が 10%~20%間の沈下量の増加がやや小さい。実験は静的載荷状態から転動を開始しているが、静的沈下が初期状態として存在する。駆動状態になるとスリップ率の増加に伴って静的沈下量が減少し、すべり沈下量が増加するために低スリップ率での沈下量増加が小さいと考えられる。実験値と解析値はよく一致しているといえる。空気圧設定の違いによる沈下量の変化は非駆動状態と比較して鮮明に現れており、低空気圧設定ではかなりの沈下抑制を期待できる。ORタイヤの性能の中でフローテーション性能は走行の可否を左右する重要な要素である。起伏の少ない現場においては建設車両の移動は駆動状態が主たる転動形態であることから、駆動状態でのフローテーション性能の向上を空気圧設定で行うことは有用である。

(3) 駆動下の地中応力状態

前節までは、主としてORタイヤと地盤接触面付近の諸因子について考察した。ここでは建設車両の移動の多くを占める駆動下での地中応力状態について若干の考察を行う。

図-14、図-15は駆動下の最大地中垂直応力 σ_z と最大せん断応力 τ_1 示したものである。軸荷重とORタイヤ

空気圧をそれぞれ3種類設定して実験を行っている。スリップ率 i_1 は 10%である。地中応力の測定は供試地盤の深さ 300mm の位置で SST (Stress State Transducer) ¹⁴⁾ を用いて行った。OR タイヤの地盤との接触面における垂直応力は軸荷重によらずに基本的にはタイヤ空気圧とほぼ同じ値を示す。純粋転動結果 ²⁾ と同様に地中垂直応力は軸荷重の増加に伴って増大し、OR タイヤ空気圧が高くなるほど増加している。垂直応力は地盤内では軸荷重の影響を大きく受ける結果を示している。せん断応力 τ_1 については空気圧設定が高いほど減少し、荷重が大きくなるにつれて増加している。地盤表面ではOR タイヤの変形に起因するせん断応力が発生するが、空気圧設定が低い場合は大きな変形が生じるためせん断応力も大きくなる。実験結果はこの影響が地中 300mm の深さにおいても及んでいることを示している。建設車両の通過による過度な地盤締めめに配慮しなければならない場合、地中応力状態の把握は欠く事ができないが垂直応力 σ_z とせん断応力 τ_1 に与える影響が OR タイヤの空気圧設定と軸荷重の組合せに拠ること、地盤表面付近と地中では空気圧設定と軸荷重の影響が異なることから、今回の結果を踏まえて過度な締めめ対策における車両条件を検討しなければならない。

(4) 移動制御のための空気圧設定

緒言に述べた精密施工システムの中で建設車両の移動制御技術は施工情報管理機能の中核を成すものである。ロボット化された建設車両の移動制御は情報の解析と動力系への命令によって行われる。本研究の結果は情報解析のためのデータベースとすることができる。特に、建設車両ロボット化の要素技術のうち内部位置認識技術と誘導技術 ¹⁵⁾ に活用できるものと考えられる。

本研究で得られた結果は駆動状態と制動状態において空気圧設定の効果が異なっている。しかし実際の建設車両ロボットを想定した場合、必ず両方の状態を有しているため、変形する地盤上での走行を容易にするためにはORタイヤの空気圧を可変にできることが望ましい。特にノンブッキングモードが起り得る坂路では空気圧の変更は不可欠になる。先に筆者らが提案したタイヤ空気圧可変式車両 ¹⁶⁾ はその一方策となるものである。

5. 結言

精密施工システムに利用できる高精度車両制御情報に資するため、OR タイヤと地盤の接触状態の把握に主眼を置いて考察を行った。本研究の結果は情報解析のためのデータベースとすることができる。特に、建設車両ロボット化の要素技術のうち内部位置認識技術と誘導技術

に活用できるものとする。以下に本研究によって得られた知見を示す。

- (1) 制動、駆動解析モデルは、離散化タイヤモデルによるORタイヤと地盤の接触形状結果を導入することにより諸性能予測の高精度化が図れた。更なる精度向上には、ORタイヤ回転軸周りのねじりおよびトレッドパターンを考慮する必要がある。
- (2) 制動時において、変形する地盤上ではORタイヤの空気圧を低く設定すると十分に制動力を得ることができないことが指摘できる。したがって車両の制動能力を維持するためには、低内圧設定を避ける。
- (3) 重ダンプトラック等の運搬車両が荷載状態で軟らかい地盤で構成された坂路を下る場合、ノンブッキングモード (non-braking-mode) と呼ばれる制動状態が想定されるが、ORタイヤ寿命の向上や消費エネルギー低減のためには、この形態の制動トルク Q を抑制するため空気圧設定を高めることが望ましい。
- (4) 制動時においても初期の沈下防止については締めの効果が確認できたが、制動状態のみに着目すれば、空気圧設定によるフローテーション性能向上効果は低下する。
- (5) 有効駆動力 T_f はORタイヤの空気圧設定を低くすることによって大きな値を得ることができるが、空気圧低下によるラグの効果の減少を考慮すれば、本実験において空気圧設定は450kPaの時が最も効率が良い。
- (6) 駆動状態 i_1 における空気圧設定 p の違いによる沈下量の変化は制動状態 i_2 と比較して鮮明に現れており、低空気圧設定ではかなりの沈下抑制を期待できる。建設車両の移動は駆動状態が主たる転動形態であることから、駆動状態でのフローテーション性能の向上を空気圧設定で行うことは有用である。

参考文献

- 1) 建山和由：ITと建設施工 - Precision Construction の試み -、建設の機械化、No.625、pp.3-7、2002。
- 2) 江口忠臣、室達朗、Tran Dang Thai：地盤上における建設車両用タイヤの弾性挙動に関する一考察、土木学会論文集 No.735/VI-59、pp.93-103、2003。
- 3) 江口忠臣、室達朗：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挙動解析、土木学会論文集、No.665/VI-49、pp.81-90、2000。
- 4) Karafiath, L.L. and Nowatzki, E.A. : Soil mechanics for off-road vehicle engineering, TRANSTECH PUBLICATIONS, pp.355-427, 1978.
- 5) Blaszkiewicz, Z. : A method for the determination of the contact area between a tyre and the ground, Journal of Terramechanics, Vol.27, No.4, pp.263-282, 1990.

- 6) Wong, J.Y. : Terramechanics and off-road vehicles, Elsevier, pp.214-241, 1989.
- 7) Schmid, I.C. : Inflation pressure control to improve terrain-trafficability –a model for simulation-, Proc. the 11th International Conference of the International Society for Terrain-vehicle Systems, pp.64-75, 1993.
- 8) Eguchi, T., Muro, T., Tran, D.T. and Naka, S. : Characteristics of Low Pressure Off-road Tire in Driving State Over Soft Terrain, 6th Asia-Pacific Regional Conference of the ISTVS Proc., Thailand, 2001.
- 9) Tran, D.T., Muro, T., Kaharawa, S. and Hirakawa, M. : Influence of track shape ratio on turning characteristics of a tracked vehicle running on fresh concrete, Journal of Construction Management and Engineering, JSCE, No.651/VI-47, pp.169-180, 2000.
- 10) Tamasho, T., Doi, K., Hamabe, T., Koshimizu, N. and Suzuki, S. : Technique for reducing brake drag torque in the non-braking mode, Elsevier, JSAE Review 21, pp.67-72, 2000.
- 11) テラメカニックス研究会タイヤ設計指針作成委員会 編 : オフロードタイヤ工学, pp.67-81, テラメカニックス研究会, 1999.
- 12) 室達朗, 江口忠臣 : 建設装輪車両タイヤと地盤の接触問題解析, 平成 11 年度建設機械と施工法シンポジウム論文集, pp.56-61, 1999.
- 13) 王秀嵩, 伊藤信孝, 鬼頭孝治, 道尾崇 : 強度を考慮したグロースシューの最適形状について, テラメカニックス第21号, pp.37-42, 2001.
- 14) Nichols, T.A, Beily, A.C, Johnson, C.E and Grisso, R.D. : A Stress State Transducer for Soil, Transaction of the ASCE, Vol.31, No.5, pp.1237-1241, 1987.
- 15) 室達朗, 荒井克彦, 深川良一, 建山和由 : 最新建設施工学, pp.51-62, 朝倉書店, 1994.
- 16) Eguchi, T., Muro, T. : A control system of the tire inflation pressure for running of a wheel system vehicle on soft terrain, 17th International Symposium on Automation and Robotics in Construction Proc., pp.573-578, 2000.
- 11) テラメカニックス研究会タイヤ設計指針作成委員会 (2003. 2. 3 受付)

CHARACTERISTICS OF OFF-ROAD TIRE IN DRIVING AND BRAKING STATE ON A GROUND

Tadaomi EGUCHI, Tatsuro MURO and Dang Thai TRAN

The purpose of this study is to grasp running characteristics of wheel system vehicle running on soft terrain. The influence of tire inflation pressure on running characteristics of tire is investigated based on a laboratory experiment and a proposed simulation. The object of the test is 1000-R20 off- the- road tire with initial inflation pressure of 550kPa. It was observed that the sinkage is accompanied by the set of the inflation pressure of the tire. The result shows that running performance of vehicle could be controlled by setting of inflation pressure. Furthermore, it is revealed that tractive force increases with decrement of inflation pressure.