

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

江口忠臣¹・室達朗²・TRAN DANG THAI³

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 工博 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車両制御, 走行性能向上に資するため, 地盤上における建設車両用タイヤの弾性挙動特性および純粋挙動特性を明らかにするものである。従来, 簡易的にタイヤの等価縦弾性係数が接触地盤の等価縦弾性係数より大きい時, タイヤは剛性車輪であると見なされてきた。供試地盤上において載荷, 純粋挙動試験を行い, 3種類の低内圧における特性について調査した。その結果, タイヤ沈下すなわち地盤表層破壊は載荷重よりもタイヤ設定空気圧に依存し, タイヤの等価縦弾性係数が接触地盤の等価縦弾性係数より大きい場合においてもタイヤが弾性挙動を示すことが明らかになった。タイヤ沈下はフローテーション性に大きく影響することから, 空気圧制御により走行性能を改善できる可能性を示した。

Key Words : off the road pneumatic tire, inflation pressure, elastic wheel

1. 緒言

タイヤドーザ, ホイールローダ, 重ダンブトラック, スクレーパ, モータグレーダおよびタイヤローラなどの掘削・積み込み機械, 運搬機械, 整地機械および圧延機械には, 建設車両用タイヤ(Off-The-Road Tire, 以下ORタイヤ)が装着されている。これらの空気入りゴム製タイヤは, 軸荷重やトルクの負荷によって弾性変形するので, 「たわみ性車輪」と呼ばれている。タイヤはそれが接触する相手からの反力を得て初めて性能を出すことができる。オンロードタイヤの場合, 舗装路面や土道であっても堅固な地表面を相手にしているので, タイヤが地表面から得る反力は主として接触面の摩擦力に依拠することになる。たとえば, 摩擦係数の非常に小さい氷面上において, タイヤはわずかの推進力しか出せないし, 横方向へ滑りやすくなるなどタイヤを装着している車両の安定性が失われやすくなる。これに対してオフロードタイヤの場合, 接地する相手は泥土や不整地の土などであり, 建設機械の場合は碎石などもあるが, いずれにしてもタイヤが接地して駆動されるときに変形を起こすものである。この時の反力はそれらの物体の変形によって

惹起される。その変形は, 地表面を構成する物体の性状に依存し, 圧縮変形, せん断変形, 流動変形などである。相手が土であれば, その種類, 含まれている水分量, 密度などによって変形の状態は様々であり, 反力も容易に予測しにくい多様性がある。

建設車両と地盤との相互作用を論ずる場合, 上述のようなことから特に変形や反力予測に関しては等価縦弾性係数が用いられてきた¹⁾。また筆者らはタイヤ変形に関してさらに変形性状表示を精確にするタイヤモデルを示した²⁾。

一方, 変形する地盤上の建設車両の走行については, タイヤ式車両より履帯式車両を用いることが有利とされている。これは先のタイヤ等価縦弾性係数が地盤等価縦弾性係数より大きい場合, タイヤは剛性車輪として扱うことが有用であるとされていることにも依拠している。藤本³⁾はタイヤカーカスの剛性によってのみタイヤが自立している場合の接地圧をカーカスの剛性圧力とすると, タイヤが剛性車輪であるとする限界空気圧は, ある荷重が作用したときの平均接地圧からカーカスの剛性圧力を差し引いた値であると定義している。使用現場においてこのような判定を行うことは困難であり, 実質上先の

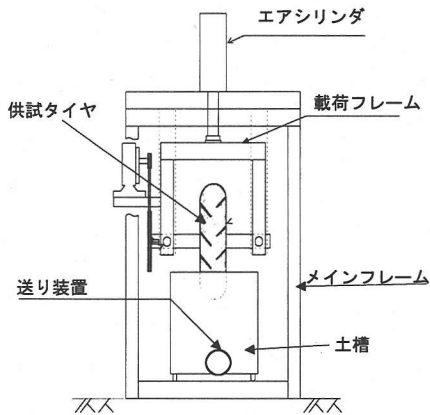
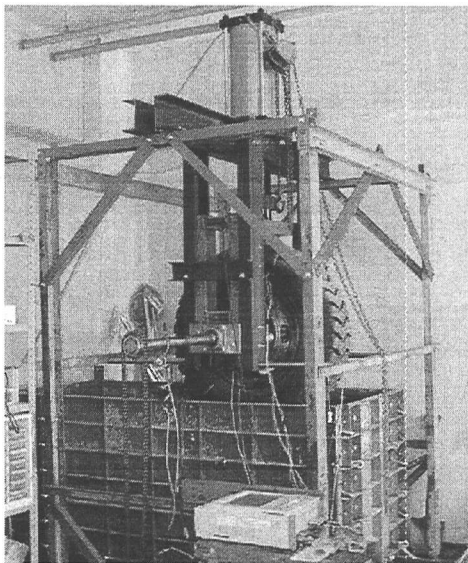


図-1 実験装置外観および各部名称

簡易判定によらなければならない。タイヤを剛性車輪として扱う場合、地盤との接触状態における変形はすべて地盤側で発生することとなり、大きな沈下すなわちフローテーション性能の低下を生じることになる。しかしながらタイヤ式車両はその機動性が優れており、変形する地盤上における走行性能が改善されれば新たな展望が開けてくる可能性がある⁹⁾。OR タイヤの設計と性能予測の基礎について既往の研究成果をまとめた文献⁹⁾によれば、OR タイヤの重要な走行性能として耐摩耗性、耐カット性、けん引性、フローテーション性、土の締固め性などが挙げられており、性能予測にはタイヤと地盤接触形状の規定および接地応力分布状態の把握を欠くことができないとされている。本来変形領域で使用するタイヤを剛性車輪として扱うことは接触形状および応力分布の精

確な把握は難しいため、先に挙げた走行性能予測を基にした合理的設計は容易でない。本研究では、重ダンブトラック、スクレーパ等に使用されている実サイズ建設車両用タイヤを用い、以下の項目を目的とした。

- ①従来剛性車輪として判定されている領域において OR タイヤが弾性挙動を示すか否かを実験により明らかにする
- ②計算機援用手法を取入れた半実験的評価方法による性能予測に資するように OR タイヤの弾性挙動を把握する
- ③OR タイヤの低内圧設定による走行性能改善を考察する

2. 載荷および転動試験

(1) 載荷転動試験装置

タイヤ—地盤接触実験を行うために図-1 のような外観を有する実験装置を作製した。

実験装置は、メインフレーム(2650×2000×2000mm)、載荷用エアシリンダ(最大容量0.97MPa)、載荷フレーム(700×1000×300mm)、鋼製土槽(1000×900×2200mm)、送り装置(モーター出力0.75kW)、供試タイヤ、メモライザーで構成されている。載荷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。ガイドは載荷する際にタイヤ進行方向の振れを抑制するために、載荷フレームの周りに取り付けている。また、ガイドの内側には転動輪を取り付け、載荷フレーム昇降時における載荷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。この載荷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。

供試タイヤにはタイヤが地盤と接触したときに受ける応力を測定するため、トレッド部に圧力センサを埋め込んだ。鋼製土槽は送り装置に連結させることで鋼製土槽がレール上を4.5mm/secで移動できる構造になっている。本実験ではセンサ類への衝撃荷重を低減するため低転動速度に設定した。純粋転動において、タイヤと地盤とのスリップは無いものと見なせるので、速度項を含んだエネルギー式を検討しない場合は低転動速度実験から転動特性が得られる。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

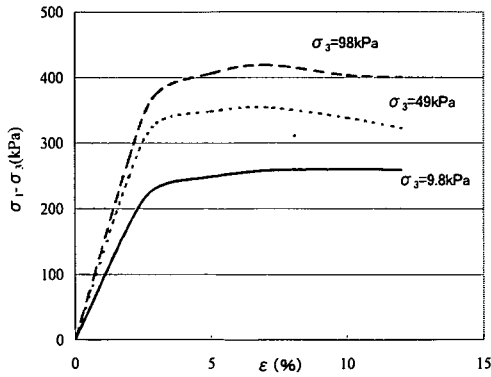


図2 三軸圧縮試験結果

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。

この試料砂を鋼製パネル板を組み立てた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、1.0 m² の板にエアシリンダで 14.7 kN の荷重をかけ、15 kPa 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 のところに SST (Stress State Transducer)⁹ 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。

(3) 三軸圧縮試験

タイヤと地盤の接触状態を考える上で、地盤の縦弾性係数を決定する必要がある。Yong¹¹⁾は、地盤の縦弾性係数を求める方法として三軸圧縮試験を行っている。本実験においても地盤の縦弾性係数の決定に三軸圧縮試験を行った。試験は側圧 9.8, 49, 98 kPa で行い、実験で使用するまさ土 (直径 50 mm, 高さ 100 mm) を供試体とした。求められる応力-ひずみ曲線の直線部分の傾きを算出し、これを土の縦弾性係数 E_B とした。試験より求めた応力-ひずみ曲線を図-2 に示す。

縦軸を偏差応力 $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)、横軸をひずみ ϵ (%) とし、次式により土の縦弾性係数 E_B を求めた。

$$E_B = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon} \quad (1)$$

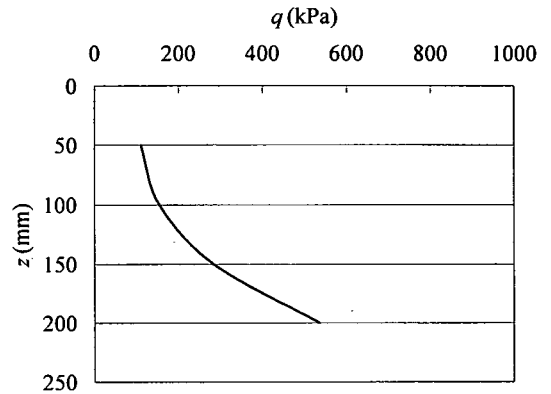


図3 供試地盤コーン指数

今回の実験により求めた地盤の等価縦弾性係数は、側圧 9.8 kPa のとき $E_B=8.8$ MPa、側圧 49kPa のとき $E_B=12.4$ MPa、側圧 98kPa のとき $E_B=13.8$ MPa であった。

(4) コーン貫入試験

先端角 α (deg)、底面積 A (cm²) の円錐コーンを一定の貫入速度で地中に貫入させる試験機をコーンペネトrometer (Cone Penetrometer) と称し、建設車両のトラフィカビリティの判定に広く用いられている。コーンペネトrometerには底面半径 1.45 cm、コーン先端長 5 cm、頂角 30 deg のものを使用し、これにロードセル (最大測定力 4.9 kN) を取り付けて貫入抵抗力を測定できるようにした。また、コーン貫入には、貫入用ジャッキに先ほどのコーンペネトrometerを装着し、モーターによって一定の速度 3.42 cm/min で行った。また、貫入深さの測定にはポテンショメーターを使用した。貫入力を底面積で除した値がコーン指数 q (kPa) である。

図-3 に本研究で用いた供試地盤のコーン指数の代表例を示す。縦軸は地盤表面からの深さを示している。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 200mm の位置においてもこの値を下回っているため、通常ホイール式建設車両では走行困難であると判定されるものである。

(5) 供試タイヤ

本実験で使用するタイヤはスクレーパ等に使用されるものである。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。

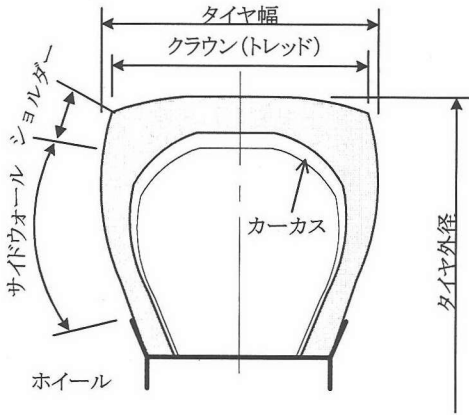


図-4 建設車両用タイヤ基本構造

OR タイヤの構造は 図-4 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、制・駆動トルク、推進力、抗力、走行抵抗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。クラウン部には、カーカスを保護するための厚肉のトレッドゴムがあり、タイヤと路盤との間の作用力を伝達すると共に、過酷なスリップに対して耐摩擦性、耐衝撃性、耐カット性、および耐熱性に富んだゴム材料が使用されている。OR タイヤの大きさと強度を表現するために、タイヤ幅/扁平率-リム径-プライレーティング(PR) として呼称されている。本実験で使用する供試タイヤの諸元は呼び 10.00-20-14 PR (幅-ホイール径-強度)、タイヤ外径 1055mm、タイヤ幅 296mm、ロックタイプトレッドパターンである。

(6) 載荷試験

OR タイヤが砂質地盤上で純粋転動する時の特性を解明するためには、タイヤおよび地盤の基本的な特性を知る必要がある。Yong ら²⁾はタイヤを1組の弾性係数で表せるものとして次式を提案している。

$$\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} = \frac{16W}{\pi L^2} \left(\frac{1-v_B^2}{E_A} + \frac{1-v_A^2}{E_B} \right) \left/ \left(1 + \frac{k_B^2}{k_A^2} \right) \right. \quad (2)$$

$$k_A = \frac{2}{\pi} \left(\frac{1-v_A}{G_A} + \frac{1-v_B}{G_B} \right)$$

$$k_B = \frac{1-2v_A}{G_A} - \frac{1-2v_B}{G_B}$$

ここに R_A : タイヤの半径 (m), R_B : 接触路盤の半径 (m), E_A : タイヤの縦弾性係数 (Pa), E_B : 接触路盤の縦弾性係数 (Pa), G_A : タイヤのせん断剛性率 (Pa), G_B : 接触路盤のせん断剛性率 (Pa), v_A : タイヤのポアソン比, v_B : 接触路盤のポアソン比, W : 荷重 (N), L : 接触長 (m)

先に筆者ら³⁾は OR タイヤの基礎的な変形性状解析を行うにあたって、OR タイヤの等価縦弾性係数を2個用いて正確にタイヤの構造機能を表現し、静的変形状態を性状表示した。等価縦弾性係数2個表示を用いたこの方法に拠る従来のタイヤ弾性判定では、タイヤは剛性車輪と判定される可能性がより高くなる。車両やタイヤの設計上、タイヤが剛性挙動を示すか、弾性挙動を示すかを判定することは重要な問題である。タイヤが剛性が弾性の判定を行うことは、タイヤと地盤の接触形状を規定する根拠となっており、剛性車輪の場合はタイヤ直径のみで接触形状が表現可能なことから力学的検討が容易になる。しかしながら、タイヤの合理的設計を考えた場合、剛性車輪は走行性能が弾性車輪と比較して劣ることが多い。例えば、建設車両用タイヤのように路外通過を主とする場合、けん引能力は走行性能の重要なものの一つであるが、剛性車輪として性能予測を行うと実際の能力より低く算定される。ここでは従来の判定基準によれば剛性車輪として扱われる領域のうち、カーカス剛性圧力低下によって生じる限界平均接地圧減少が推定されるタイヤの低内圧設定帯の弾性挙動を検証する。このため、鋼製路盤上で式(2)の関係を今回のトレッド溝付き OR タイヤに適用し、軸荷重 W 、タイヤ空気圧 p を変えた場合のタイヤ変形性状を考察する。タイヤ等価縦弾性係数1個を決定するための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 v_A は 0.5 とおくことができ、 v_B は路盤作製に使用した鋼材の材料定数を引用し 0.284 として式(2)より E_A を決定した。

実験の手順として、まずエアシリンダでタイヤに一定の軸荷重を負荷させる。このときの垂直荷重はエアシリンダと載荷フレームの間に取り付けたロードセルの値を基準としている。各軸荷重と各空気圧時のタイヤのたわみ量 f 、接地長 L を測定する。鋼製路盤においてはタイヤの接地長を測るために鋼製路盤と供試タイヤの間に感圧フィルムを設置し、フットプリントを採集した。この実験を垂直荷重 4.9, 7.4, 9.8kN、タイヤの空気圧を 550, 450, 350kPa に条件を変えて行った。なお、タイヤ空気圧 550kPa については軸荷重 12kN の場合もやっている。

次に砂質地盤においても同様に軸荷重 4.9kN, 7.4kN,

9.8kN, タイヤの空気圧を 550kPa, 450kPa, 350kPa に条件を変化させてタイヤの変形量 f , 接地長 L を測定する。砂質地盤の接地長はタイヤを除荷させた後にできるタイヤのフットプリントの原供試地盤への投影から測定した。また、それぞれの軸荷重, タイヤ空気圧に対する沈下量も同時に測定した。

(7) 純粋転動試験

変形する地盤上を純粋転動するタイヤの接地圧分布は、基本的には純粋転動時の剛性車輪に対する分布形状と一致するが、接地部のタイヤ変形に伴って接地圧の大きさは相対的に低下する傾向にあることを Krick⁷⁾ や 笈田⁸⁾ らは実証している。また、Shōne⁹⁾ はタイヤ下の応力分布が地盤の変形と締め固めに与える影響について、タイヤ下の地中に発生する圧力球根は軸荷重および地盤特性などによって変化することを指摘している。ここでは、OR タイヤが砂質土地盤上を走行したときに発生するタイヤ接触面付近の接地圧分布形状および沈下量, 地中応力等の地盤に与える影響について、剛性車輪走行の諸現象と比較することによりタイヤの弾性挙動を考察する。実験は砂質地盤上にて、軸荷重, 空気圧の条件は載荷試験と同様に垂直荷重 4.9, 7.4, 9.8 kN, タイヤ空気圧 550, 450, 350 kPa に変化させている。実験に用いたタイヤの実車条件は 500 kPa の空気圧設定時垂直荷重 24 kN 程度であるが、供試地盤が走行困難な変形地盤を想定しているので、転動不能を回避するため実験における最大垂直荷重は実車条件の 40% 程度に設定した。実験の手順としては、エアシリンダでタイヤに載荷後, 4.5 mm/s の速度で土槽を送ることによりタイヤを純粋転動させた。載荷試験と同様, 地盤沈下量, タイヤたわみ量を測定し, 接地圧分布, SST による地中応力測定も行った。

3. 実験結果および考察

(1) タイヤ等価縦弾性係数

鋼製路盤上の載荷試験結果より軸荷重とタイヤたわみ量を用いて式(2)より OR タイヤの等価縦弾性係数を算出した。一般にタイヤの静荷重特性を表す場合, 縦ばね定数を用いることが多い。これはタイヤを一つのばね系とみなし, 荷重に対する縦たわみから求められる。縦ばね定数は走行性能のうち衝撃吸収性能, 操縦安定性能評価に用いられている。ここでは数種の異なる材料定数を持つ材料で構成されたタイヤを一つの弾性体とみなし, 算出された縦弾性係数を等価縦弾性係数としている。図-5 は各軸荷重における OR タイヤの等価縦弾性係数を各空気圧毎に示したものである。図-5 から空気圧と等価縦弾性係数の 2 つの因子は比例関係にあることがわかる。

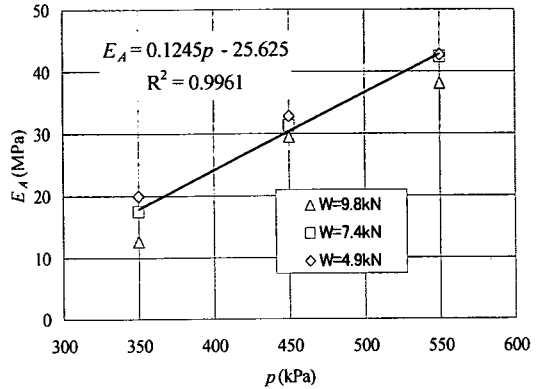


図-5 鋼製路盤上の各軸荷重におけるタイヤ空気圧 p とタイヤ等価縦弾性係数 E_A

ここで得られた等価縦弾性係数は OR タイヤの構成ゴムおよび圧力容器としてのケーシングのばね要素等を含んでいるものである。

また、このタイヤの標準空気圧は 500kPa であるが実験を行った 350kPa 付近まで等価縦弾性係数変化の比例関係を保っている。タイヤはそれ自体が変形することによって荷重を支持する圧力容器であり, 変形を支配する等価縦弾性係数と圧力容器内の空気圧が比例関係にある間はタイヤの機能を有していることになる。したがって本実験の範囲内において, 荷重負担能力は低下するものなお転動に耐えうるものである。空気圧 350kPa 時のタイヤ等価縦弾性係数は平均値で 17MPa 程度であった。一方, 供試地盤は側壁の影響が無く, ゆるく堆積した状態を設定しており, 無載荷状態の SST による測定値から前述 2. (3) の側圧 9.8kPa 時の等価縦弾性係数を採用すれば 8.8 MPa となり, タイヤ等価縦弾性係数はいずれの場合も供試地盤等価縦弾性係数を上回っている。したがって従来の弾性判定をそのまま適用すれば, タイヤ空気圧が低圧設定においても OR タイヤは剛性車輪ということになる。また, コーン貫入試験より得られた供試地盤のコーン指数は深さ 200mm まで 600 kPa 以下であり, 道路土工施工指針によればタイヤ標準空気圧においてこの地盤は数回走行不能であると判断できる。

(2) 鋼製路盤上および供試地盤上のタイヤたわみ量

図-6 は OR タイヤのたわみ量を各空気圧毎に鋼製路盤上と供試地盤上で載荷して計測したものである。OR タイヤの変形する地盤上における走行性能改善のため本研究においては低内圧の設定を行っており, 前節で述べたようにタイヤ等価縦弾性係数は供試地盤等価縦弾性係数より大きい値を示している。従来, 変形する地盤上の OR タイヤの変形性状については, 地盤等価縦弾性係数

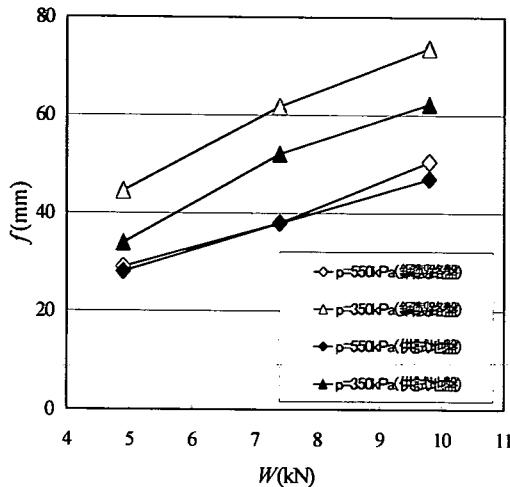


図-6 鋼製路盤および供試地盤におけるタイヤたわみ量 f と軸荷重 W の関係

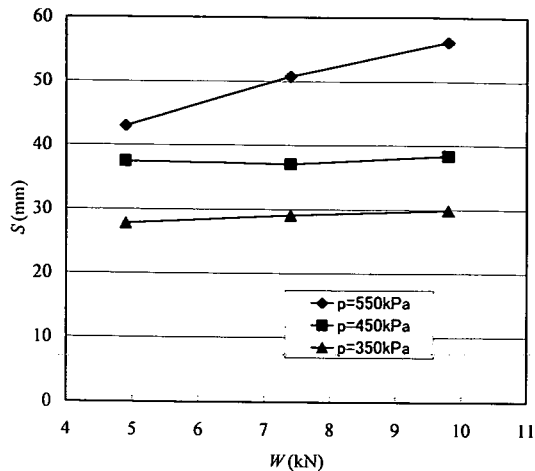


図-7 静的載荷時の地盤沈下量 S と軸荷重 W の関係

$E_b < \text{タイヤ等価縦弾性係数 } E_A$ の場合、タイヤは剛性車輪として扱われてきた。しかしながら、本実験結果からは変形地盤上においても OR タイヤは変形を有しており、その挙動は剛性車輪とは異なるものである。OR タイヤと地盤の接触相互作用問題は非線形力学の最も困難な問題の一つである。それは、あらかじめ接触形状が特定できず接触応力も求められないという特徴を持ち、特別な場合を除いて理論解が導出できないというものである。タイヤを剛性車輪とすることで接触相互作用問題の解析をある程度簡便にすることができた。しかしながら、近年有限要素法をはじめとする計算力学の進歩に伴ってタイヤの弾性解析技術は発達してきている。このような状況において、従来剛性車輪と判断されてきた境界領域のタイヤ弾性挙動を把握しておくことは、実験結果を数学的処理することにより性能予測式を得る半実験的評価法を確立する上で重要であると考えられる。したがって今後、自動化、ロボット化を目指した車両制御情報および車両オペレータ教育シミュレータ用基礎データとする場合、OR タイヤと接触地盤の両方の変形を考慮したものが望ましい。

(3) 地盤沈下量

変形する地盤において建設車両が走行するとき、地盤支持力を超過して車両が著しく沈下しないように接地領域の検討を行い、車輪等の大きさと形状を設計する必要があり、この問題をフローテーションと称する。地盤沈下量を考察することはこの問題に対応するために重要な因子となる。

図-7はOR タイヤに静的荷重を作用させたときの地盤沈下量を各空気圧毎の軸荷重との関係で示している。

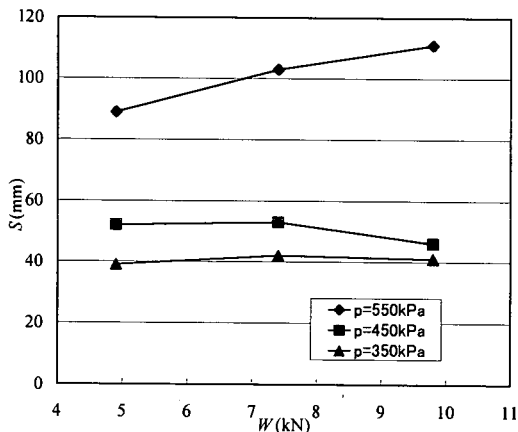


図-8 純粋転動時の地盤沈下量 S と軸荷重 W の関係

地盤沈下量は除荷後のリバウンド量を差し引いた値で表示している。空気圧 550kPa の設定において、軸荷重が増加するに伴って地盤沈下量が増加している。空気圧 450kPa, 350kPa の設定については、軸荷重の増加に伴う地盤沈下量の増加は見られずほぼ同じレベルで推移しているといえる。空気圧 450kPa, 350kPa の設定については、载荷によりタイヤ自体が十分に変形することによって接地領域が増加することによって地盤表層部の破壊が抑制されたと考えられる。静止時の沈下量は走行性能のうちフローテーション性の基本になるものであり、転動開始時の車両沈み込みを低減するためにも、沈下量を小さくする条件の一つとして低空気圧設定が有効である。

図-8はOR タイヤに静的荷重を作用させた後に純粋転動を行った時の地盤沈下量を各空気圧毎の軸荷重との関

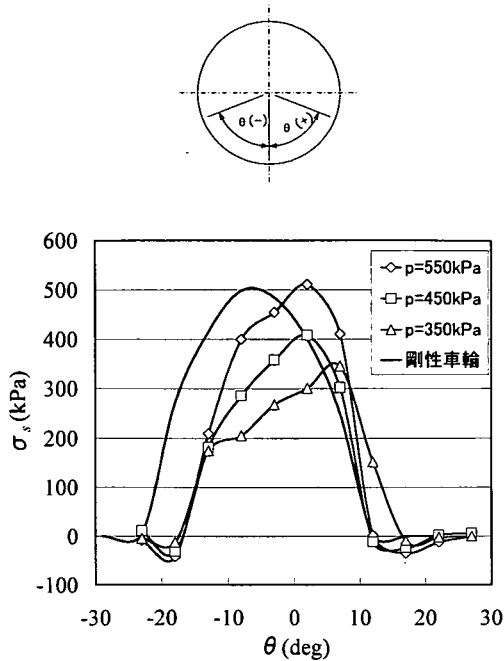


図-9 軸荷重4.9kNにおける接地圧分布 σ_s とタイヤ中心角 θ の関係(純粋転動時)

係で示している。地盤沈下量は静的載荷時と同じく除荷後に転動行程中の最大沈下位置で計測した値で表示している。軸荷重の変化に伴う地盤沈下量の変化傾向は静的載荷時と同じであるが、地盤沈下量そのものは純粋転動時の方が大きくなっている。特に空気圧 550kPa の設定において顕著な傾向が現れており、最大地盤沈下量で 110mm に達している。純粋転動時の地盤沈下量の増加は OR タイヤの転がり抵抗と転動方向への応力集中が原因として考えられる。内圧が高い場合はタイヤの変形量が小さくなることから、タイヤの円筒形状が維持され進行方向側へ応力集中位置が発生すると考えられ、沈下量を支配する要因の一つになっている可能性がある。

静的載荷時、純粋転動時のいずれの場合も地盤沈下量は空気圧に依存しており、低内圧設定においては軸荷重が増加しても地盤沈下量は増加しないことが明らかである。内圧設定において 550kPa と 450kPa との間に軸荷重による地盤沈下量変化の傾向に差が見られることから、地盤沈下量の観点に基づく弾性判定の空気圧境界値が存在する可能性が考えられる。

また、図-7、図-8 から空気圧を減らすことによってフローテーション性能を向上させ、地盤表層部の破壊を抑制することが可能となることがわかる。

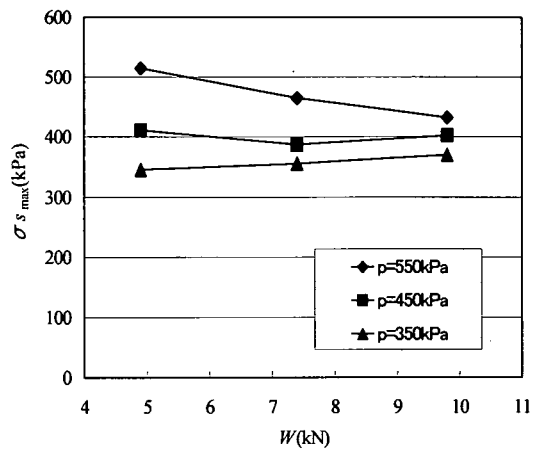


図-10 純粋転動時の最大接地圧 σ_{smax} と軸荷重 W の関係

(4) 接地圧

OR タイヤ表面の接地圧分布および最大接地圧を知ることは、トラフィカビリティ・モビリティ両面から重要なことである。

図-9 は純粋転動時の軸荷重 4.9kN における各空気圧設定毎の接地圧分布である。横軸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。接地圧は供試地盤へのタイヤ入射角から緩やかに増加し、最大値を示した後増加曲線より急な傾きを持つ減少曲線を描く。3種類の空気圧設定いずれの場合も供試地盤からの離脱直前に最大値を示しており、特に低内圧設定である 350kPa の時にその傾向が顕著であり、軸荷重が増加した場合も同様の傾向であった。入射角、離脱角がほぼ同様の剛性車輪の接地圧分布は図-9 に併記しているように、入射位置と離脱位置のほぼ中間位置であるタイヤ回転軸や前方に最大値を示す。前述した低内圧タイヤにおける現象は剛性車輪においては発生しないものであり、たわみ性車輪特有のものである。一般に接地圧を接触領域について積分すれば軸荷重と等しくなるが、本実験においてセンサはラグ(タイヤ表面の突起)部に設置されているため、図-9 は平滑な円筒の接触状況とは異なっている。また、変形する地盤上において、タイヤ変形に伴いサイドウォールの軸方向への膨らみが接触していることが影響していると考えられる。

図-10 は OR タイヤと供試地盤の接触域における最大接地圧と軸荷重との関係を空気圧設定毎に表したものである。空気圧設定 450kPa, 350kPa において最大接地圧の軸荷重による変化はほとんど見られず一定であるといえる。空気圧設定 350 kPa での最大接地圧は全軸荷重に対して設定空気圧と同じ 350 kPa 付近を示している。

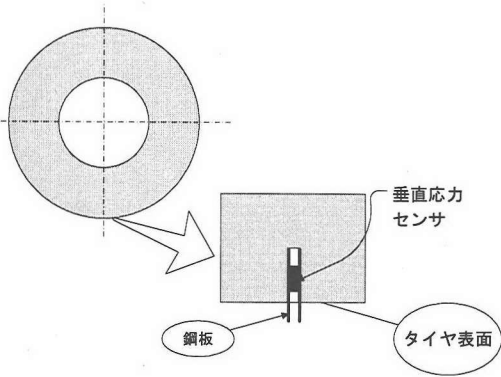


図-11 接線方向応力測定センサ取付け位置

空気圧設定 450 kPa においては最大接地圧が空気圧設定よりやや低い値で一定している。空気圧設定 550kPa の場合、軸荷重 4.9kN の時最大値 500kPa 強の値を示し、軸荷重の増加に伴って漸減している。これは先に述べた Oida and Triatanasrichai⁹⁾の指摘に合致する現象と見ることができる。これらから、低内圧設定においては設定空気圧と最大接地圧がほぼ一致するというニューマチックタイヤの特徴が現れており、設定空気圧が高くなると最大接地圧は設定空気圧より小さくなり、軸荷重増加に伴って漸減するという現象が確認できる。

OR タイヤの接地面における接地圧に並んで重要な因子がせん断応力である。しかしながら、タイヤ接地面付近のせん断応力を実測することは、計測装置が小型かつ複雑になること（前述の SST など）、計測装置の固定端が十分に取れないことなどの理由により困難である。ここでは図-11 に示すようにタイヤ表面に対して垂直に埋設した垂直応力センサ付鋼板を用いて、接線方向の応力を測定し、これをせん断応力に代わる指標として用いた。タイヤの載荷重が一定の場合、鋼板に対する直角方向すなわちタイヤ表面に発生するせん断応力 τ_{zx} は、鋼板に垂直に作用する地盤からの反力 F の総和、鋼板の幅 B および鋼板の突起がタイヤ周方向は影響を及ぼす距離 L で表わされ次式のようになる¹⁰⁾。

$$\tau_{zx} = \frac{\Sigma F}{cBL} \quad (3)$$

ここで、 c ：突起の厚さに対する定数

式(3)は建設装軌車両に用いられる履帯の突起（グロースシュー）の取り付け部に発生するせん断応力をもとめると同じである。本研究では、(3)式の F の代わりに、狭小部への取り付けが容易な垂直応力センサを用いて、鋼板垂直面へ作用する応力を測定した。一定条件下では B 、 L は変化しないので、接線方向応力を測定することにより、せん断応力の分布状態を推定することがで

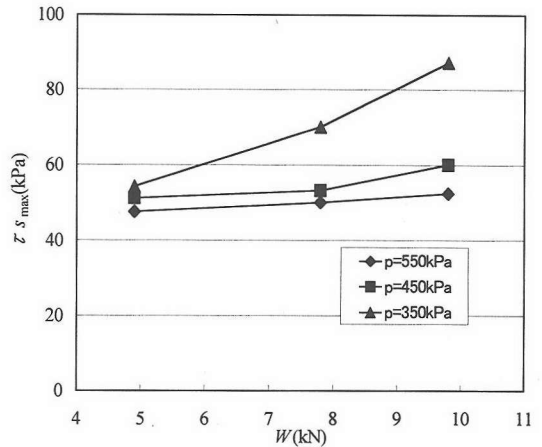


図-12 ORタイヤ表面における最大接線方向応力 $\tau_{s \max}$ と軸荷重 W の関係

きると考えられる。タイヤトレッドゴムの大変形が直接センサへ影響を及ぼすのを防ぐため、センサの両面に鋼板を取り付け保護した。また、タイヤ法線方向の力も直接作用しない位置までセンサを埋設した。

図-12 は OR タイヤ表面の最大接線方向応力と軸荷重の関係について各空気圧設定毎に示したものである。軸荷重 4.9kN の時は空気圧による差は少ないが、軸荷重が増加するにしたがって空気圧による差は大きくなっていく。また、いずれの空気圧設定においても軸荷重の増加に伴って最大接線方向応力は増加する。最大接地圧とは逆に空気圧設定が低いほど最大接線方向応力は増加している。このことはタイヤ変形に伴ってせん断応力が増加する解析結果¹¹⁾と一致する傾向にあるといえる。

(5) 地中応力

建設車両通過時の地中応力を把握しておくことは、近年問題となっている車両通過に伴う過度の締固めや地盤表層破壊を防止する対策を講じる上で有益である¹²⁾。

地中応力測定には供試地盤表面から深さ 300mm のところに SST (Stress State Transducer) を埋設し、地中における鉛直方向応力 σ_z およびせん断応力 τ_{zx} を測定した。SST は 6 個の土圧計を多面体治具に設置したものであり、主応力、せん断応力、8 面体応力が算定できるようになっている。SST の測定値を用いて式(4)によりせん断応力 τ_{zx} を算定した。

$$\tau_{zx} = \frac{3}{4}(\sigma_{n1} + \sigma_{n3}) - \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (4)$$

図-13 は純粋転動、軸荷重 4.9kN の時の供試地盤表面から深さ 300mm における地中応力分布を各空気圧設定毎に示している。横軸は SST 直上を 0 (mm) とし、OR

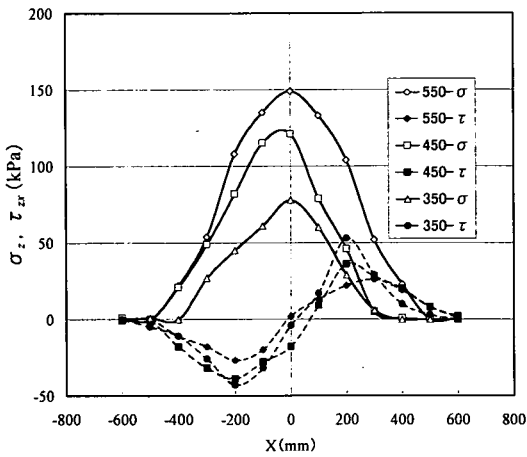


図-13 鉛直方向応力 σ_z , せん断応力 τ_{zx} と水平距離 X との関係 (深さ 300mm, 軸荷重 4.9kN)

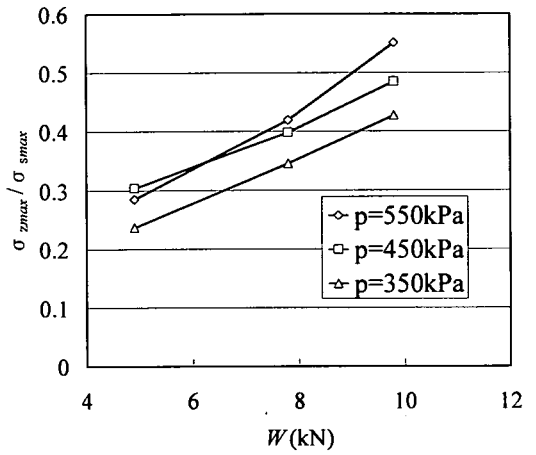


図-15 応力比 $\sigma_{zmax} / \sigma_{smax}$ と軸荷重 W の関係

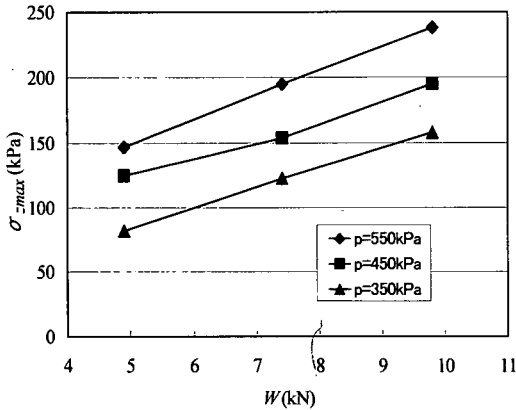


図-14 最大鉛直方向応力 σ_{zmax} と軸荷重 W の関係 (深さ 300mm)

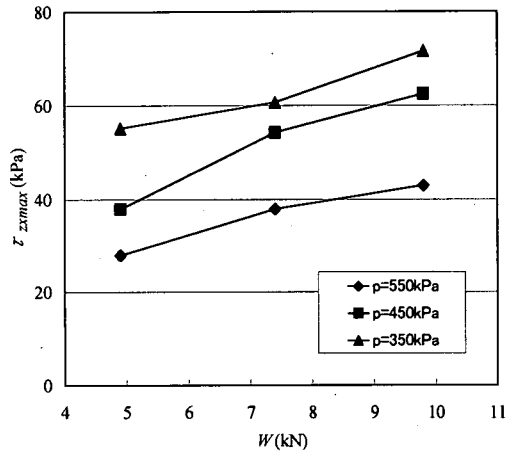


図-16 最大せん断応力 τ_{zxmax} と軸荷重 W の関係 (深さ 300mm)

タイヤ中心軸の SST に対する相対位置を表している。鉛直方向応力はタイヤ中心線付近で最大値を取り、ほぼ左右対称の分布形状を示している。せん断応力は最初負値が増加し-200mm 付近にて最大値を示し、その後減少してタイヤ中心線付近にて負値から正值に転ずる。正值に転じた後は負値と同様に 200mm 付近で最大値を示しその後減少する。軸荷重 7.4kN, 9.8kN のいずれの場合も同様の現象が見られた。

図-14 は供試地盤表面から深さ 300mm の位置における地中最大鉛直方向応力と軸荷重の関係を各空気圧設定毎に示したものである。地中最大鉛直方向応力はいずれの空気圧設定においても軸荷重と正比例関係にあり、地盤表面における最大接地圧の状況とは異なっており、軸荷重が大きくなるほど圧力球は大きくなり等圧線の間隔が広がっていることがわかる。また、空気圧設定と地中

最大鉛直方向応力との間にも比例関係が認められる。図-15 は供試地盤表面からの深さ 300mm の位置における最大鉛直方向応力 σ_{zmax} と最大タイヤ接地圧 σ_{smax} との比を応力比 $\sigma_{zmax} / \sigma_{smax}$ と定義し、軸荷重 W の関係を各タイヤ空気圧 p 設定毎に示したものである。いずれの場合も軸荷重が増加するにしたがって応力比は増加しており、地中における最大鉛直方向応力は軸荷重の影響が大きい。したがって地表面付近の応力対策には OR タイヤの設定空気圧を、地中の応力対策には軸荷重を制御することが有効であるといえる。応力比を深さ方向に計測すれば、各接地圧および各軸荷重に対する圧力球の到達位置を表示することが容易になり、接地圧の減衰程度を数値的に考察するための目安となる。図-15 においては軸荷重 4.9 kN の応力比が小さくなっており、地盤表層部のみ土の密度増加を起こしていると考えられる。

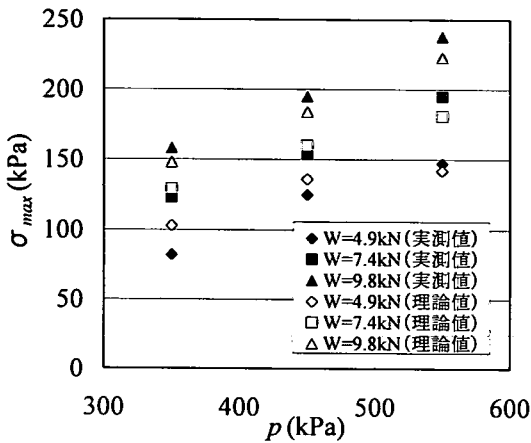


図-17 タイヤ空気圧 p に対する地中最大鉛直方向応力 σ_{max} の理論値と実測値

図-16 は供試地盤表面から深さ 300mm の位置における地中最大せん断応力と軸荷重の関係を各空気圧設定毎に示したものである。軸荷重の増加により地中最大せん断応力は増加し、設定空気圧が低いほど地中せん断応力は大きな値を示す。

図-12 における OR タイヤ表面の接線方向応力と軸荷重、設定空気圧の関係と同様の傾向を示していることから、先の接線方向応力をせん断抵抗の簡易的指標として用いることは有用である可能性がある。

地盤改良設計で用いられるプーシネスクの理論¹³⁾によれば輪荷重のような円形等分布荷重の中心下の深さ z で鉛直応力度から算定する場合、輪荷重を円形等分布荷重と考え、その中心軸下の最大鉛直方向応力を式(5)から求めることができる。

$$\sigma_{max} = \frac{3p}{4} \left\{ 1 - \frac{(z/a)^3}{[1+(z/a)^2]^{3/2}} \right\} = \frac{3p}{4} \left\{ 1 - \left[\frac{1}{1+(a/z)^2} \right]^{3/2} \right\} \quad (5)$$

ここに、 σ_{max} ：地中に発生する中心軸下の最大鉛直方向応力 (Pa)、 a ：載荷面半径 (m)、 p ：載荷面のタイヤ接地圧 (Pa)、 z ：深さ (m) である。

図-17 はプーシネスクの式を理論値として計算を行った結果と実測値の比較である。深さは SST の位置とした。載荷試験から得られたフットプリントを基に接触長から接触面積を算定し、これと同等の円形の半径を載荷面半径とした。載荷面の接地圧は設定空気圧を用いた。実測値と理論値とは良く一致しており、低空気圧設定における接触面形状を基に決定した載荷面半径を用いて理論値を算出することは可能であるといえる。また、実験土槽の底板および側壁の土圧は空気圧 550 kPa、軸荷重 9.8 kN において実測値で 20 kPa を下回っており、土槽

境界の影響は小さいと見ることができることから、プーシネスク式を適用することができる。

4. 結言

従来、OR タイヤの弾性評価に関しては、その等価縦弾性係数が接触対象である地盤の等価縦弾性係数より大きい場合、剛性車輪として扱われてきた。しかしながら、建設車両の走行性能改善を目指した低内圧実験において異なる現象が確認された。弾性挙動を基にした本成果は OR タイヤと地盤との接触形状規定に重要な情報を与えるとともに応力分布状態の解明により性能予測に寄与するものである。以下に本研究によって得られた知見を示す。

- (1) 建設車両用タイヤは低内圧域においても空気圧と等価縦弾性係数の間に比例関係を保ち、一般的な変形する地盤の等価縦弾性係数より大きい等価縦弾性係数を持つ。
- (2) 従来の判定では剛性車輪として扱われていたタイヤ等価縦弾性係数においても地盤上で変形を有しており、その挙動は剛性車輪とは異なるものであることが確認された。
- (3) 建設車両の走行性能に大きく影響する地盤沈下量は静的載荷、純粋転動のいずれの場合も軸荷重よりタイヤ空気圧に依存している。したがってフローテーション性能向上のためには OR タイヤの空気圧制御が有効である。
- (4) 接地圧分布はタイヤ地盤接触の離脱直前に最大値を示しており、特に低内圧設定である 350kPa の時にその傾向が顕著であり、軸荷重が増加した場合も同様の傾向であった。この現象は剛性車輪においては発生しないものであり、たわみ性車輪特有のものである。
- (5) 低内圧設定においては設定空気圧と最大接地圧がほぼ一致するというニューマチックタイヤの特徴が現れており、設定空気圧が高くなると最大接地圧は設定空気圧より小さくなり、軸荷重増加に伴って漸減する。
- (6) 地中最大鉛直方向応力はいずれの空気圧設定においても軸荷重と正比例関係にあり、地盤表面における最大接地圧の状況とは異なっており、圧力球の形状の違いが生じているといえる。
- (7) 軸荷重が増加するにしたがって応力比は増加しており、地中における最大鉛直方向応力は軸荷重の影響が大きい。したがって地表面付近の応力対策には OR タイヤの設定空気圧を、地中の応力対策

には軸荷重を制御することが有効であるといえる。

謝辞：本研究を進めるにあたりタイヤ製造元から供試タイヤの提供を賜りました。ここに、記して感謝する次第であります。

参考文献

- 1) 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) 江口忠臣, 室達朗 : 離散化タイヤモデルによる建設車両用タイヤの基礎的変形性状解析, 土木学会論文集 No.665 VI-49, pp.81-90, 2000.
- 3) Fujimoto, Y. : Performance of elastic wheels on yielding cohesive soils, *J. of Terramechanics*, Vol.14, No.4, pp.191-210, 1977.
- 4) 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.
- 5) テラメカニ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.47-187, テラメカニクス研究会, 1999.
- 6) 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.
- 7) Krick, G. : Radial and shear stress distribution under rigid wheel and pneumatic tires operating on yielding soils with consideration of tire deformation, *J. of Terramechanics*, Vol.6, No.3, pp.73-98, 1969.
- 8) Oida, A. and Triatanasirichai,K. : Measurement and analysis of normal, longitudinal and lateral stresses in wheel-soil contact area, *Proc. 2nd Asia-Pacific Conf., ISTVS, Bangkok, Thailand*, pp.233-243, 1988.
- 9) Shöne, W. : Druckverteilung im boden und bodenverformung unter schleppereifen, *Grundlagen der Landtechnik*, Heft 5, pp.49-63, 1953.
- 10) 王秀崑, 伊藤信孝, 鬼頭孝治, 道尾崇 : 強度を考慮したグロウサシューの最適形状について, テラメカニクス第 21 号, pp.37-42, 2001.
- 11) 江口忠臣, 室達朗 : ニューマチックタイヤの変形および転動特性, 愛媛大学工学部紀要, 第 18 巻, pp.295-304, 1999.
- 12) Muro,T., Miyoshi,M. and Mitsubayashi,T. : Effect of a tracked vehicle mounting an oscillator on the vibro-compaction of a high lifted decomposed granite sandy soil, *SOILS AND FOUNDATIONS*, Vol.38, No.4, pp.129-144, Dec, 1998.
- 13) セメント協会編 : セメント系固化工材による地盤改良マニュアル, セメント協会, 1985.

(2002. 1. 18 受付)

ELASTIC BEHAVIOR OF OFF THE ROAD PNEUMATIC TIRE FOR CONSTRUCTION VEHICLE ON A GROUND

Tadaomi EGUCHI, Tatsuro MURO and TRAN DANG THAI

The purpose of this study is to inquire into the primary factor closely for running of a wheel system vehicle on terrain. So far the inflation pressure of an off-the-road tire was used as in constant under operation, and when the equivalent elastic modulus of a tire was higher than that of terrain the tire was regarded as a rigid wheel. The object of the test is 1000-R20 off-the-road tire to be set a pressure of 550kPa. The experiments on pure rolling were made running tests on soft terrain for 3-pattern inflation pressure. It was observed that the sinkage is accompanied by the set of the inflation pressure of the tire. Furthermore, it was clarified that even though the equivalent elastic modulus of a tire was higher than that of terrain, the tire shows the behavior of elastic wheel. As a result, the running performance of vehicle could be controlled by using the set of inflation pressure.