

車輪走行による半無限地盤の変形

上野, 正実
琉球大学農学部生物生産学科・生産システム工学講座

橋口, 公一
九州大学農学部生物生産数理学講座

鹿内, 健志
琉球大学農学部生物生産学科・生産システム工学講座

能勢, 行則
酒井重工業株式会社・技術研究所

他

<https://doi.org/10.15017/23550>

出版情報：九州大学農学部学藝雑誌. 49 (3/4), pp.207-214, 1995-03. 九州大学農学部
バージョン：
権利関係：

車輪走行による半無限地盤の変形

上野正実*・橋口公一**・鹿内健志*
能勢行則***・岡安崇史*・後藤春樹***

九州大学農学部生物生産数理学講座
(1994年12月19日受理)

Soil Deformation in a Semi-infinite Ground by a Traveling Wheel

Masami UENO, Kouichi HASHIGUCHI, Takeshi SHIKANAI,
Yukinori NOHSE, Takashi OKAYASU and Haruki GOTOU

Laboratory of Mechanics for Bio-production, Faculty of Agriculture,
Kyushu University, Fukuoka 812-81

緒 言

車輪の走行性と土(地盤)の変形との関係を明確にする研究の一環として、著者らは精密土槽実験装置(Hashiguchi et al., 1993, Nohse et al., 1991)と組み合わせた車輪下の土の変形解析システムを開発し報告した(上野ほか, 1993)。さらに、浅い密詰め砂地盤において、すべり率41%でゴム皮膜車輪の走行実験を行い、このシステムを用いて変形解析を実施した(上野ほか, 1994-2)。そこでは車輪回転に伴う地盤の変形とその経時変化を詳細に解析し、それらの特徴を把握した。さらに、初期沈下状態と回転状態におけるひずみの分布パターンを模式的に表した。

しかしながら、これは車輪半径と土層厚の比が2/5(60mm/150mm)と相対的に浅い地盤における変形挙動を対象としたものであった。土層の底面は硬い耕盤状であったので、土の変形にもこの影響が表れることが考えられる。これは農業機械などの走行性を議論する場合には意味を持つが、一般には半無限地盤における基本的変形挙動の解明がまず重要である。そこで、本研究では土槽底面の影響を無視し得る深い土層(580mm/150mm)を半無限地盤と見なして、車輪の走行実験を行った。すべり率16%と90%を対象に変形

解析を実施し、ひずみ分布および分布パターンを明らかにした。すべり率によるこれらの違い、および、車輪回転に伴う変化を検討し、けん引力や沈下量との関係を示した。さらに、半無限地盤と浅い地盤におけるひずみの分布パターンは、車輪直下近傍に限れば定性的にはほぼ同じであることを示した。

方 法

1. 車輪走行実験装置

車輪走行実験装置は、前報(上野ほか, 1993, 1994-1)で述べたものと基本的には同一構造であり、土槽、車輪装置、移動台車とその駆動装置、データ集録・処理装置、付帯装置より構成されている。表1にその主要諸元を示す。前報ではゴム車輪を用いたが、本研究では鋼鉄製(SS400)で外径300mm、幅412mmの車輪を使用した。車輪表面材鋼鉄と豊浦標準砂の摩擦特性は、静止摩擦係数0.385、動摩擦係数0.381であった。ゴム車輪では静止摩擦係数0.759、動摩擦係数0.557で鉄車輪より大きい値であった。各センサで検出された力学量(けん引力、接地荷重、トルク、沈下量、接地面法線応力、接地面接線応力、回転角度等)は、多チャンネルデータロガで増幅・A/D変換され、 GPIB を通して、パーソナルコンピュータに転送・集録される。

2. 実験方法

供試土には気乾状態の豊浦標準砂を用い、ホッパより空中落下・メッシュ法によって土槽に充填した。充填中、供試土の落下高さを800mmに維持し、さらに5

* 琉球大学農学部生物生産学科・生産システム工学講座

** 生物生産数理学講座

*** 酒井重工株式会社・技術研究所

段のメッシュによって拡散させ、初期間隙比（平均0.67）が一定になるように調整した。土層厚さは580mmとし、半無限地盤の条件を満たすようにした。

車輪の接地荷重は216N、回転周速度は5mm/minとし、すべり率は台車の移動速度を選択して一定の値を与えた。この走行実験は、車輪両端面と土槽側壁との隙間がほとんどない平面ひずみ（2次元）状態で行った。

実験では、土槽の所定の位置に車輪を非回転状態で静かに沈下させ、その後、車輪と台車を同時に駆動させた。初期沈下状態に入る前に路面間隙まで車輪を下ろし、沈下計などの計測機器の初期設定を行った後に回転させた。本研究における実験条件を表2に示す。

3. 変形解析

車輪下の土の変形を検出するために、ポリエステル製の可動マーカを土槽内壁に一定間隔に貼りつけた後に土を充填した。車輪の走行中にこれらのマーカを、土槽側面のアクリル板を通して写真撮影した。無変形の基準状態、初期沈下状態、および、車輪回転角5°間隔に一連の写真撮影を行った。

写真よりマーカの座標値を平面位置検出装置で読み取り、これと基準状態の座標値との差から変位を求めた。これらの変位データに有限要素法の手法を用いてひずみを算出した。これを全ての要素について実行し、

表1 車輪走行実験装置の主要諸元

土槽	長さ（内寸）	1840mm
	幅（内寸）	414mm
	深さ	620mm
車輪	幅	412mm
	半径	150mm
	接地荷重	150-980N
	材質（表面）	SS400
	駆動装置	ステッピングモータ 歯車列
	周速度	0-80mm/min
	駆動装置	ステッピングモータ ボールネジ
台車	走行速度	0-80mm/min

表2 実験条件

供試土	豊浦標準砂
間隙比	0.67（平均）
土層厚	580mm
車輪接地荷重	216N
車輪周速度	5mm/min
すべり率	16%, 90%

地盤のひずみの分布状態を求めた。変形状態は、変位ベクトル図の他に、水平方向および鉛直方向の垂直ひずみ、せん断ひずみおよび体積ひずみの等値線図で表した。

結果と考察

1. 車輪回転に伴うけん引力の変化

図1にすべり率16%および90%におけるけん引力と回転角の関係を示す。けん引力は車輪の回転に伴って急激に増大し最大値を示し、その後、次第に低下してある変動幅内に落ちつく。けん引力の最大値を最大けん引力、落ちついた状態を定常状態と呼び、そこでのけん引力の平均値を平均けん引力とする。同図より、すべり率が大きいほど最大値は高く、その発生角度は小さいことがわかる。

最大けん引力はすべり率15%付近までは急激に増加し、それ以上では緩やかに増加する傾向が見られた。平均けん引力はすべり率15%までは最大けん引力とほぼ一致し、15%付近で極大値を示した後、60%ぐらいまで緩やかに減少し、その後再び増加する結果を得た（鹿内, 1994）。これらの傾向は前報（上野ほか, 1994-1）に述べたゴム車輪の場合でもほぼ同様であった。

2. 変位ベクトルの分布

(1) すべり率16%

図2にすべり率16%、回転角20°における変位ベクトルの分布図を示す。同図における破線の円弧は初期沈下時の車輪を表し、実線のそれは回転角20°のものに対応する。車軸直下では変位ベクトルは斜め後方を向き、車輪近傍の浅い位置ほど変位量が大きい。これより後方では、変位ベクトルは次第に回転し、水平から斜め上向きへと向きが変化している。変位ベクトルは、鉛直車軸中心線やや前方より後方にかけて半円に沿う分布状態を示している。この半円領域の前方には、値の小さな斜め上向きの変位ベクトルがみられ、小さ

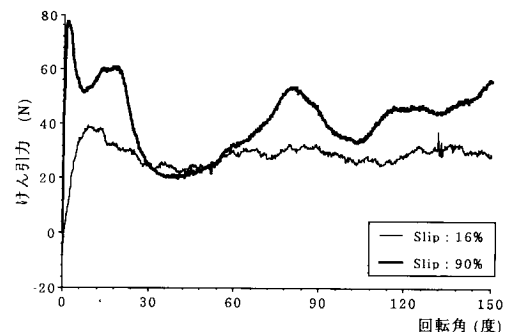


図1 車輪の回転によるけん引力の変化

な半円に沿って向きが変化することがわかる。

このような分布パターンは、回転角5°ではわずかに認められ、回転角10°~15°になると明瞭になっている。この付近から変位量は急増する傾向が見られる。車輪が進行すると、後方の変位はほぼそのまま残留して分布パターンは変化するが、車輪近傍に限ればほとんど同じである。車輪後方の変位ベクトルは水平よりわずかに上向きのものが多くなり、回転開始直後ほどには上向きの成分は大きくない。

(2) すべり率90%

図3に示すすべり率90%、回転角20°の結果をみると、車輪近傍の変位ベクトルはすべり率16%のそれに比べてかなり大きく、鉛直車軸中心線やや前方を境界とする2個の円弧状領域はより明瞭で広い範囲に及んでいる。すべり率90%では回転角5°ですでに同じような状態に達している。その後は車輪近傍の変位ベクトルは増加するが分布パターンの変化はそれほど大きくない。これはすべりが大きいために回転に対して車輪の移動量が小さいためである。すべり率16%の場合に比べると、車輪前方の斜め上向きのベクトルも大きいことがわかる。

3. ひずみの分布

(1) 水平方向の垂直ひずみ

図4にすべり率16%、回転角5°および25°における水平方向の垂直ひずみの分布を等値線図で示す。車輪

直下は正の領域となり、その両側に負の領域が分布することがわかる。これは車輪の重さによって車輪直下では鉛直方向に圧縮されて水平方向に伸張することによるものと思われる。このためその両側では水平方向に圧縮を受けて鉛直方向に伸張する。負の領域は車輪前方より後方が広く値も大きい。このような傾向は回転が進むとより明瞭になる。車輪直下の正の領域はほとんど同じ広さを維持して車輪に随伴する形で進行している。車輪後方の負の領域では局部的なくびれが生じており、変形発生の状態が一樣ではないことがわかる。回転角50°付近より車輪直下の正の領域が切れて車輪後方に残留する現象が見られた。負の領域のくびれが発達すると、車輪がこの部分より離れて力が及ばなくなるために、正の領域がそのままの状態に残留したと思われる。

すべり率90%におけるこのひずみの基本的な分布パターンは、すべり率16%のそれとほぼ同様であった。負の領域のくびれは回転角5°ですでに発生していることがわかった。

(2) 鉛直方向の垂直ひずみ

図5にすべり率90%、回転角5°および25°における鉛直方向の垂直ひずみの等値線図を示す。上述の水平方向の垂直ひずみとは逆に、車輪直下に負の領域があ

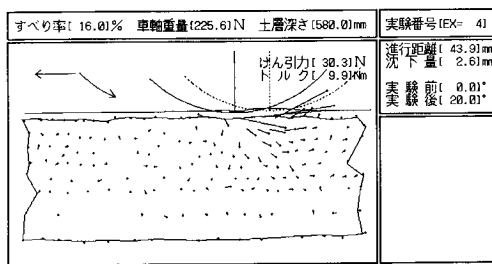


図2 すべり率16%における変位ベクトルの分布

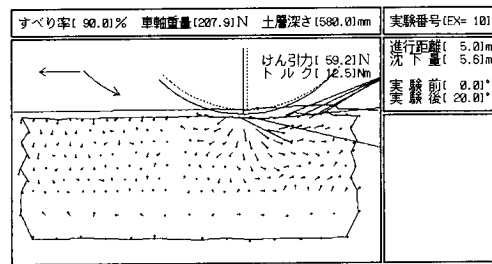
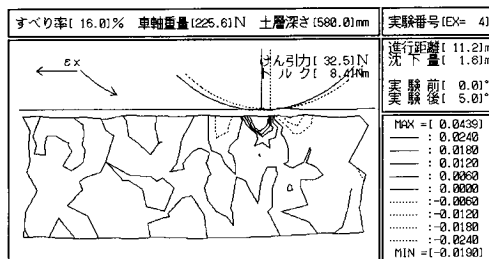
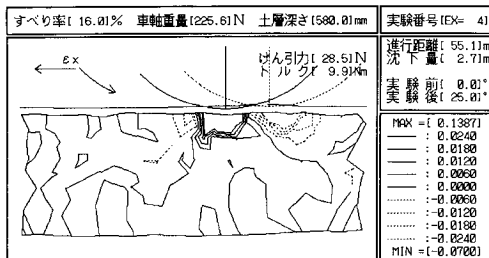


図3 すべり率90%における変位ベクトルの分布



(a) 回転角5度



(b) 回転角25度

図4 すべり率16%における水平方向の垂直ひずみの分布

り、その両側に正の領域が存在している。すなわち、車輪前方側と後方側では鉛直方向に伸張することがわかる。車輪後方の正の領域は回転に伴って次第に拡大した。

すべり率16%においても同様の分布パターンが見られるが、車輪直下の負の領域はすべり率90%ほどには明瞭でなく、また、圧縮ひずみの値も小さい。この場合には車輪直下近傍の負の領域は狭く、下向き、もしくは斜め下向きに広がるような形で分布している。車輪後方ではひずみが残留するために、正の領域は車輪の進行に伴って次第に拡大している。

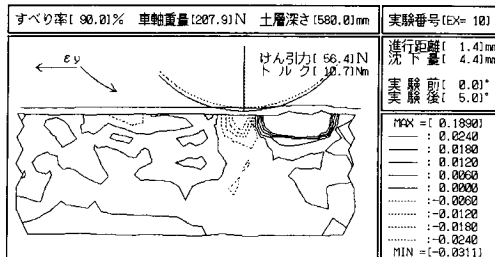
(3) せん断ひずみ

図6に、すべり率16%ならびに90%における回転角10°のせん断ひずみの分布を示す。いずれのすべり率でも、車輪鉛直中心線やや前方位置を境界として、その後方側には正の領域、前方側には負の領域が分布している。せん断ひずみの符号は車輪の進行方向と見る位置によって決まり、この状態で土槽の裏側から見ると符号は逆になる。車輪後方側の正の領域はすべり率16%より90%の方が広く、また、ひずみの値も大きい。車輪が進行すると後方側の正のひずみは残留するために、その領域は次第に拡大している。前方側の負の領域はその形状とひずみの大きさを幾分変えながら車輪

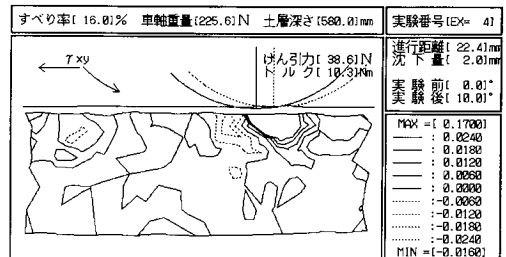
とともに移動している。この負の領域の前方には値は小さいが正の領域があり、その境界すなわちせん断ひずみゼロの位置において盛り上がりが発生している。これは車輪が前方に地盤を圧縮するために発生するものと解釈できる。なお、車輪後方側にも同様の盛り上がりが発生している。これらの盛り上がりは地表面の「シワ」に相当している。

(4) 体積ひずみ

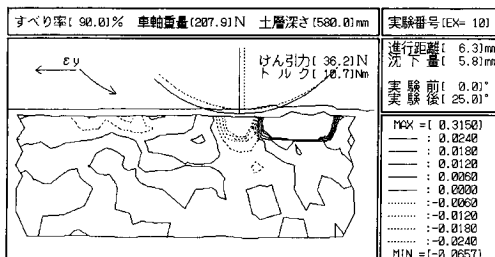
図7に回転角10°、すべり率16%ならびに90%における体積ひずみの分布を示す。いずれのすべり率においても、車輪直下から後方にかけて正の体積ひずみが発生している。すなわちこの領域は膨張していることを示している。この領域は車輪重量によって負の体積ひずみになりそうであるが、実際には逆の結果となった。これは水平および鉛直方向の垂直ひずみの和が正の値になることを意味している。土層が密詰め状態であるために、この領域におけるせん断ひずみにより体積膨張(ダイレイタンス)が発生することも一因と思われる。この膨張領域の前方およびその下層部には、わずかながら圧縮領域が見られる。すべり率16%と90%を比較すると後者の方が体積ひずみの値は大きい。車輪後方の正の体積ひずみは残留するので、車輪の進行に伴ってこの領域も拡大している。この場合にもくびれ部が発生しており、体積ひずみは水平方向の



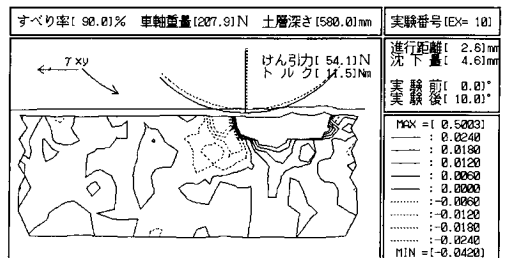
(a) 回転角 5度



(a) すべり率 16%



(b) 回転角 25度



(b) すべり率 90%

図5 すべり率 90%における水平方向の垂直ひずみの分布

図6 せん断ひずみの分布 (回転角10度)

垂直ひずみに大きな影響を受けることを示している。

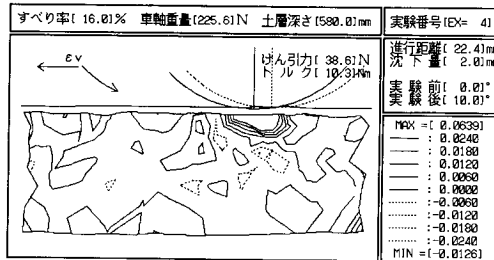
(5) ひずみの分布パターン

以上よりわかるように、半無限地盤を想定した土層におけるすべり率16%および90%のひずみ分布には共通のパターンが存在するようである。これを模式的に表示したのが図8である。前述のすべり率とけん引力の関係を見ると、すべり率16%以上ではけん引力の値に大きな差は見られない。このため、このすべり率の範囲内では他の条件が変わらない限り、ここに示す基本的な分布パターンは同じであると考えられる。ただし、細部に相違点があるのは当然であり、またひずみの大きさには著しい差がある。すべり率10%以内ではけん引力は大きく変化しているため、ここで述べた分布パターンと同じか否かは検討を要する。

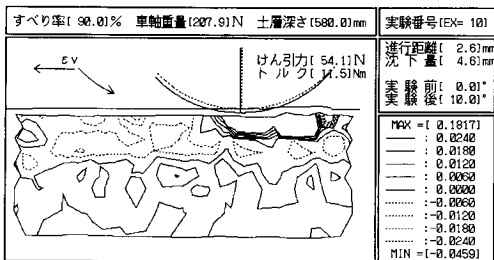
(6) 浅い地盤におけるひずみ分布との比較

前報(上野ほか, 1994-2)において、土層厚60mm, すべり率41%の条件で行った変形解析の結果について述べた。すべり率, および, 車輪表面のまさつ特性(鉄車輪とゴム皮膜車輪)などが異なるので直接的ではないが, 本研究の解析結果とひずみの分布パターンを定性的に比較してみた。

水平方向の垂直ひずみは, 車輪直下に正の領域が見られ, その両側に負の領域が表れるパターンはいずれの条件下でも同じであった。鉛直方向の垂直ひずみは



(a) すべり率 16%



(b) すべり率 90%

図7 体積ひずみの分布 (回転角10度)

土層の厚さに関係なく, 車輪直下両側に正の領域が広がり, その間に負の領域が発生するパターンが見られる。せん断ひずみについても車軸鉛直中心線やや前方より後方にかけて正の領域, その前方には負の領域が分布している(図9参照)。土層厚の影響は土槽底面付近に表れるようであるが, 車輪直下近傍のせん断ひずみの分布パターンは基本的には同じであった。体積ひずみの分布についても同様の結果を得た。

これらをまとめると, 車輪直下近傍のひずみの分布パターンは土層厚によらずほぼ同じであると言える。ただし, ここで比較したものより土層厚と車輪半径の比がさらに小さくなれば, 分布パターンは異なることも予想される。さらに, ひずみの大きさについては今後類同の条件下で実験を行って比較する必要がある。

(7) 回転に伴うひずみの変化

車輪回転に伴うひずみの分布パターンの変化については前述の通りである。回転開始直後は大きく変化す

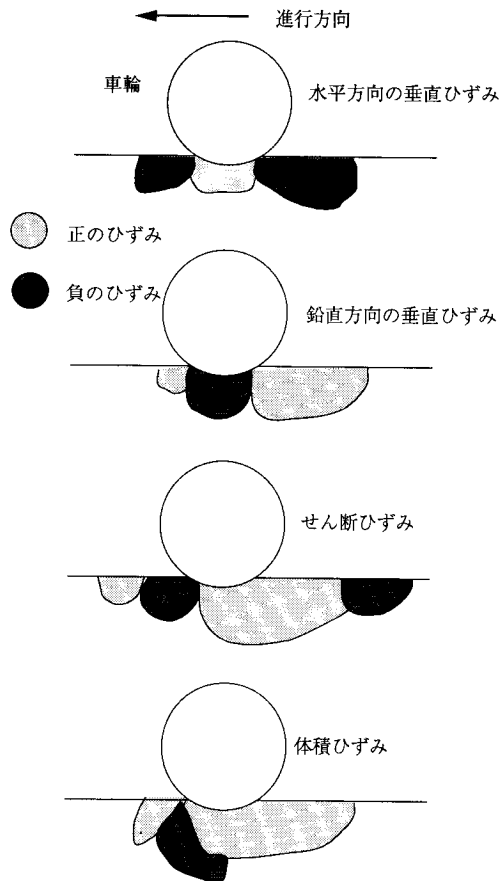


図8 ひずみ分布のパターン

るが、回転が進むと車輪後部の残留部は拡大するものの、車輪近傍ではほぼ同じ分布パターンになった。当然ながら、ひずみの大きさや分布領域の広さは異なり、それがけん引力や沈下量に反映するものと考えられる。そこで、回転に伴うひずみの最大値（正のひずみ）と最小値（負のひずみ）の変化を調べ、土の変形と走行性との関係を解析する糸口とした。

図10にすべり率90%における車輪回転角とひずみの最大・最小値の関係を示す。最大・最小値とも回転角 $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$ において急増することがわかる。回転角 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ ではひずみの値は変化せず、その後、回転角 20° 付近までは再び増加し、変化は次第に小さくなる傾向が見られる。ひずみ値が急増している $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$ の間は、けん引力は急激に増加してピークを示してから減少するまでの過程に対応している（図1参照）。ひずみ値の変化が小さい $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ の範囲では、けん引力は極小値を示してほとんど変化していない。ひずみが再び増加する $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ の範囲ではけん引力はわずかに増え、その後は減少している。このように、けん引力とひずみの変化の

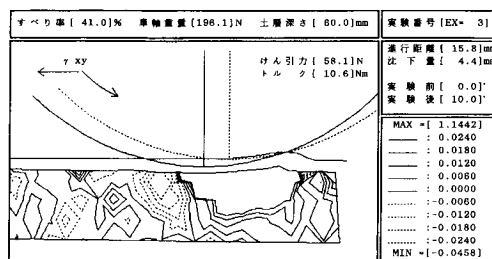


図9 浅い地盤におけるせん断ひずみの分布

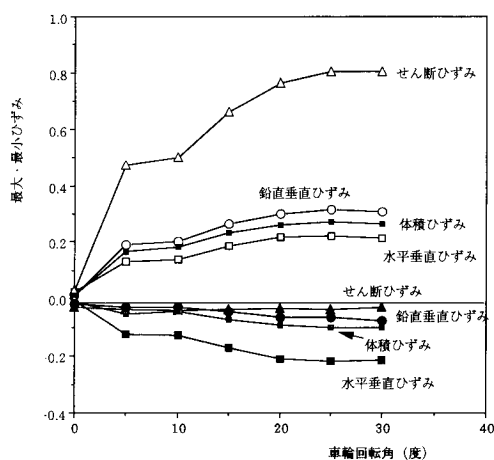


図10 車輪回転による最大・最小ひずみの変化 (すべり率90%)

間には密接な関係がありそうである。詳細な検討は今後の課題である。車輪の沈下量とひずみの最大・最小値の間にはほぼ直線的な関係が見られた（図11参照）。

すべり率16%ではひずみの種類によって傾向がやや異なるが、最大ひずみについて見ると、回転角 20° 付近までは急激に増大し、その後は一定もしくはわずかに減少している（図12参照）。最小ひずみについては水平方向の垂直ひずみとせん断ひずみには同様な傾向が見られた。鉛直方向の垂直ひずみおよび体積ひずみの最小値は全般に値が小さく変化の傾向は明瞭でなかった。供試地盤の間隙比が小さく接地荷重も相対的に小さいので、圧縮されにくいことに対応しているものと考え

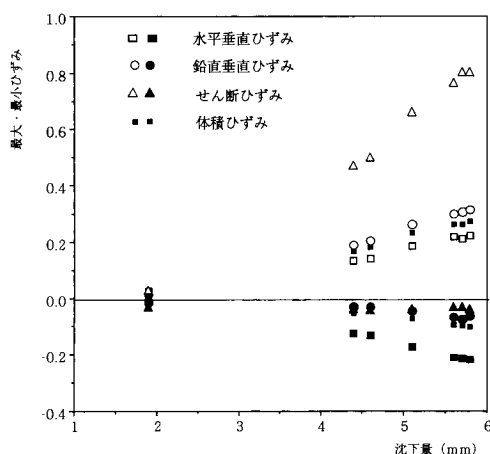


図11 車輪の沈下量と最大・最小ひずみの変化 (すべり率90%)

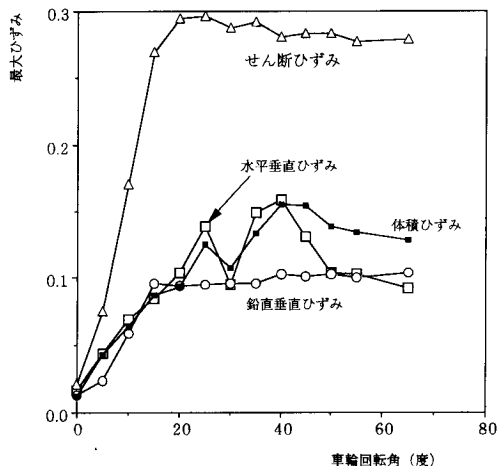


図12 車輪回転による最大ひずみの変化 (すべり率16%)

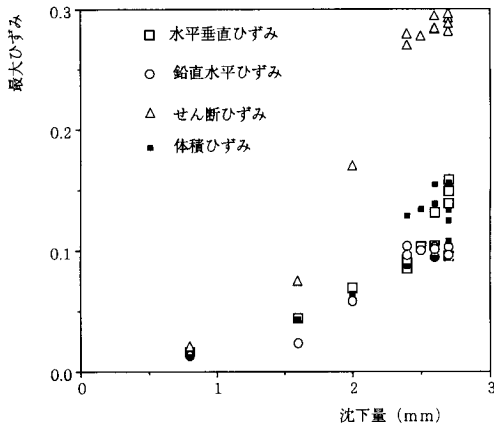


図13 車輪の沈下量と最大ひずみの関係
(すべり率16%)

る。図13に示すように、車輪の沈下量が増えると最大ひずみはほぼ直線的に増加する傾向が見られる。最小ひずみでは、水平方向の垂直ひずみに同様の傾向が見られ、また、せん断ひずみもこれにやや近い傾向があった。鉛直方向の垂直ひずみの最小値と沈下量の間にはこのような関係は認められなかった。けん引力と水平方向の垂直ひずみの最大値の間には負の相関が見られ、車輪直下近傍の土が水平方向に伸張する割合が大きいほどけん引力は減少することが明らかになった。

摘 要

本研究では半無限地盤を想定した深い土層において車輪の走行実験を行い、すべり率16%と90%について土の変形挙動を解析し、次の結果を得た。

(a) 変位ベクトルは、鉛直車軸中心線や前方を境界とする2個の円弧状領域を形成するように分布し、車輪直下より後方では斜め下向きから水平、斜め上向きへと向きを変え、前方の円弧領域ではこれと逆向きの分布形態となることを示した。

(b) 車輪が進行すると、後方の変位はほぼそのまま残留するので変位ベクトルの全体的な分布パターンは変化するが、車輪近傍ではほぼ同じであった。

(c) 水平方向の垂直ひずみは、車輪直下では正の領域、その両側に負の領域が広がるパターンとなった。これは車輪の重さによって車輪直下では鉛直方向に、その両側では水平方向に圧縮されることによる。車輪の進行に伴い直下の正の領域はほぼ同じ広さを維持して車輪に随伴・移動した。車輪後方の負の領域には局部的にくびれが生じ、車輪の進行に伴う変形の発生が

一様でないことを示した。

(d) 鉛直方向の垂直ひずみは、車輪直下に負の領域が、その両側に正の領域が発生することを示した。

(e) せん断ひずみは、車軸鉛直中心線や前方を境界として、その後方に正の領域、前方に負の領域が存在し、前方の負の領域はその形状とひずみの値を幾分変えながら車輪とともに移動することを示した。これらの領域の外側にはそれぞれ逆向きの符号の領域があり、その境界に盛り上がりが発生していることを明らかにした。

(f) 車輪直下から後方にかけて正の体積ひずみが発生し、この領域の前方およびその下層部にわずかながら負の領域が見られた。

(g) 車輪直下近傍のひずみの分布パターンは、半無限地盤でも浅い地盤でも土層厚によらずほぼ同じであることを示した。ただし、土層厚と車輪半径の比が本研究の設定値0.4より小さい場合については今後の検討を要する。

(h) すべり率16%と90%におけるひずみの分布パターンおよびひずみの大きさの比較を行い、その特徴を示した。

(i) 車輪の回転に伴うひずみの最大・最小値の変化を調べ、これらと車輪の沈下量の間にはほぼ直線的な関係が見られることを明らかにした。

文 献

- Hashiguchi, K., Y. Nohse, M. Ueno, K. Sumiyoshi, K. Uchiyama, and T. Yoshimaru 1994 Traveling Performance of a Wheel on a Finite Thickness Ground. *J. Terramech.*, 31(4), 257-263
- Nohse, Y., K. Hashiguchi, M. Ueno, T. Shikanai, and F. Koyama 1991 A Measurement of Basic Mechanical Quantities. *J. Terramech.*, 28(4): 358-370
- 鹿内健志・上野正実・橋口公一・能勢行則 1994 走行車輪に作用する土壌反力の変動に関する研究, 農業機械学会九州支部誌, 43: 13-18
- 上野正実・橋口公一・泉 裕巳・後藤春樹・能勢行則・鹿内健志 1993 走行車輪下の土の変形解析システムの開発, 九大農学芸誌, 48(1・2): 103-110
- 上野正実・橋口公一・泉 裕巳・後藤春樹・能勢行則・鹿内健志 1994 ゴム皮膜車輪の走行性に関する研究, 九大農学芸誌, 48(3・4): 263-272
- 上野正実・橋口公一・鹿内健志・後藤春樹・能勢行則・岡安崇史 1994 走行車輪下の土の変形, 九大農学芸誌, 49(1・2): 109-118

Summary

We have reported the characteristics of soil deformation beneath a traveling rigid wheel in a shallow sand ground (60mm depth). A variation of deformation with a rotation have been analyzed in 41% slip condition. On the other hand, it would be also important to analyze a deformation of a semi-infinite ground. In this study, we carried out traveling tests of a rigid wheel by using the soil bin with 580mm depth, which could be regarded as a semi-infinite ground, and analyzed soil deformations with 16% and 90% slip conditions. There were two semi-circular zones where large displacement vectors concentrated, which joined at the slightly front of wheel surface to the vertical center line of wheel axle. Normal strains of horizontal direction in a zone directly contacted to the wheel had positive values and zones of both side to it had negative values. In contrast, normal strains of vertical direction in a rear zone and a front zone to the wheel were positive, and a negative zone laid between these zones. Positive shear strains distributed at a rear zone to the wheel, and negative ones at a front zone to the wheel. The boundary line separating both zones located in the slightly front of wheel surface to the vertical center line of the wheel axle. Typical distribution patterns of strains were almost similar in deep and shallow grounds at the neighbor of the wheel.