

走行車輪下の土の変形解析システムの開発

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

泉, 裕巳
琉球大学農学部生物生産学科・生産システム工学講座

後藤, 春樹
酒井重工業株式会社・技術研究所

他

<https://doi.org/10.15017/23510>

出版情報：九州大学農学部学藝雑誌. 48 (1/2), pp.103-110, 1993-12. 九州大学農学部
バージョン：
権利関係：

走行車輪下の土の変形解析システムの開発

上野正実¹⁾・橋口公一²⁾・泉 裕巳¹⁾
後藤春樹³⁾・能勢行則³⁾・鹿内健志⁴⁾

九州大学農学部生物生産数理学研究室
(1993年9月1日受理)

Development of an Analyzing System for Soil Deformation beneath a Traveling Wheel

Masami UENO, Kouichi HASHIGUCHI, Hiromi IZUMI,
Haruki GOTOU, Yukinori NOSE and Kenshi SHIKANAI
Laboratory of Mechanics for Bio-production,
Kyushu University 46-05, Fukuoka 812

緒 言

車輪やクローラなどの走行性の研究においては、それらの下の土の変形現象の解明が重要である (Bekker, 1960)。特に、定量的な解析が重要であるが、土の変形の計測が困難なこともあり研究例はそれほど多くない。しかるに、けん引力や走行抵抗などと土の変形状態との相互関係を把握できれば、走行性の解明および合理的な走行装置の設計に大きく貢献するものと思われる。なお、土の変形状態は定常走行時においても刻々と変化するので、その経時変化についても明らかにする必要がある。

ところで、有限要素法は走行現象の解明における有力な数値解析法の一つとして期待されている。本法はこれまでも走行性の解析に適用されてきたが、未だに多くの課題を内包し、この分野では実用的なレベルには達していない。その原因として、土の変形挙動を記述する構成式が十分でなかったこと、接地面における境界条件を前もって知ることが困難なこと、が主なものとしてあげられる。加えて、解析結果を信頼性の高い実験結果によって体系的に検証するシステムが確立されていないことも、原因の一つと考えられる。し

たがって、有限要素法の性能向上を図る意味でも、実験的な変形解析システムを開発することが求められる。

すなわち、土の変形解析システムは走行現象を直接解明するためだけでなく、数値解析法の改善を図るサブシステムとしても重要な意味をもつ。そこで、本研究では車輪下の土の変形解析を簡便に行えるシステムの開発を行った。このシステムを土槽実験装置による車輪走行状態に適用した結果、所要の能力を有することが明らかになった。本論文では、変形解析システムの概要と、その適用結果を報告する。

方 法

1. 変形解析の概要

変形解析の第一の要点は、土粒子の変位あるいはひずみを精度よく検出することである。これに関しては、従来より、写真法、モアレ法、光弾性法、X線法などのような様々な方法の開発が試みられてきた。

写真法は簡易であるため、フーチングの沈下実験などを対象に多くの方法が開発されてきた。特に、土中のすべり状態や破壊のパターンを定性的に観察するのに適している。しかしながら、これらは破壊に至る以前の小さなひずみを十分な精度で定量的に検討するのは不向きである。このため、車輪の走行問題に適用した例では、車輪を非現実的なまでに深く強制的に沈下させた実験結果が報告されている (Wong, 1967, Windisch and Yong, 1970)。さらに、これらは定量的な解析だけでなく、けん引力などと変形の間係を検討するのにも適していない。

本研究では、写真法の簡便さを活かし、可動マーカ、

1) 琉球大学農学部生物生産学科・生産システム工学講座

2) 生物生産数理学講座

3) 酒井重工業株式会社・技術研究所

4) ヤンマーディーゼル株式会社・技術研究所

写真、座標読取装置およびパーソナルコンピュータから構成された安価なシステムを開発し、土粒子の変位を測定した。写真法では土へのマーキングの適否が鍵であり、簡単なものとして石灰などを用いて土層自体にマークをつける方法がある。これは砂などには困難であり、また、精度の面で難点がある。これとは別に、土槽側壁と土層との間に他の物体を設置し、この動きより間接的に変位を検出する方法も用いられている。この例として、龍岡 (Tatsuoka *et al.*, 1991) は格子を印刷した薄い2重構造のゴム膜を用いた方法をフーチングの沈下実験に適用している。本研究ではこの方法を参考にして、ゴム膜より追従性の高い小さなマークを使用する方法を採用した。

2. ひずみの計算法

本研究では、マークの変位からひずみを算出するのに、有限要素法で使用されている方法を用いた。

まず、いくつかの節点で構成されている小さな要素を土中に想定する。例えば、2次元状態においては3個の頂点を節点とする三角形要素を用いる。次に、要素中の任意の物質点(土粒子)の変位ベクトルは、座標の関数(変位関数)として記述できるものと仮定する。これより、この点のひずみは微小ひずみの定義などに基づいて算出できる。車輪下のひずみは、微小ひずみとみなすには一般に大きいので、増分法を適用して要素内の任意の点のひずみ増分を決定するために、変位増分を座標の関数として与える。この関数はいくつかの未定係数を含むが、節点の変位増分を何らかの方法で知ることができれば、未定係数は節点の座標値によって決定できる。

節点の変位増分は有限要素法では剛性方程式の解として与えられる。ここでは、マークを節点とみなし、その測定値を用いた。未定係数を節点座標で表示した変位関数をひずみ増分の定義式に適用すれば、ひずみ増分を具体的に算出できる。三角形要素では変位関数として一次関数を用いる場合が多い。この組合せでは要素内のひずみは一定値となる。

3. 変位解析システム

(1) マークの設置と写真撮影

本研究では、車輪下の節点の変位検出に上述のようにポリエステル製のマークを用いた。これは滑らかなポリエステルフィルムの面に十字線を印刷した直径5mmの円形マークである。これを、土を充填する前に、アクリル製の土槽内壁に水の付着力を利用して貼りつける。土に面するマークの裏側は、土粒子への追従性をよくするために、接着剤で土をまぶした粗い面となっ

ている(図1参照)。マークを一定間隔に貼りつけた後に、土を充填して一昼夜置く。この間にマークの水分は乾いてアクリル板への付着力はほとんどなくなる。マークの十字線が三角形要素の節点に相当し、土槽のアクリル壁を通して見ることができる。図2にマークの設置状態の一例を示す。

アクリル板

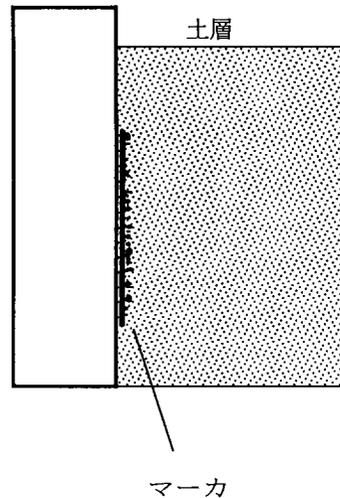


図1 マークの構造

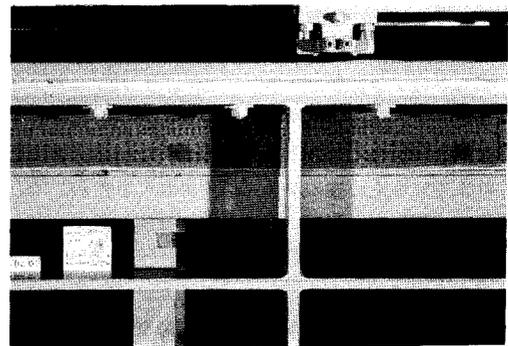


図2 土槽側壁(アクリル板)へのマークの設置状態

これらのマークを、土槽側面より、無変形の初期状態で撮影し、次に非回転状態で沈下させる初期沈下後の状態を撮影した。それ以降の回転状態においては、車輪回転角0.5度毎に一連の写真撮影を行った。

(2) 写真からのマーク座標の読み取り

(a) デジタイザ

これらの写真を四切りサイズに拡大し、パーソナルコンピュータに接続したデジタイザ(KD4300)で、

それぞれのマーカの座標を読み取り、座標データファイルを作成した。側壁上に設置した基準点間の距離をスケールとして、写真上の座標値を実際の座標値に変換した。

(b) 平面位置検出装置

ディジタイザは装置の特性として分解能が低く、また、マーカ十字線への照準に誤差が入りやすい。加えて、写真の拡大には限度があり、微小な変位の検出には不向きである。そこで、平面上の座標をより正確に

検出できる平面位置検出装置 (TWINKLER 200) を用いた。これは、2組のステッピングモータで駆動され、2直角方向 (x, y方向) に移動する水平板を用いた装置である。この上に写真を置いて、読み取り対象とするマーカをモータの駆動により定位置まで移動させ、その移動量より座標値を割り出す。この時、マーカを顕微鏡 (CCD) カメラ (CCD-Z1) で写してモニタ画面に拡大表示し、画面上の定点においてマーカの十字に照準を合わせる。装置の構成を図3に示す。

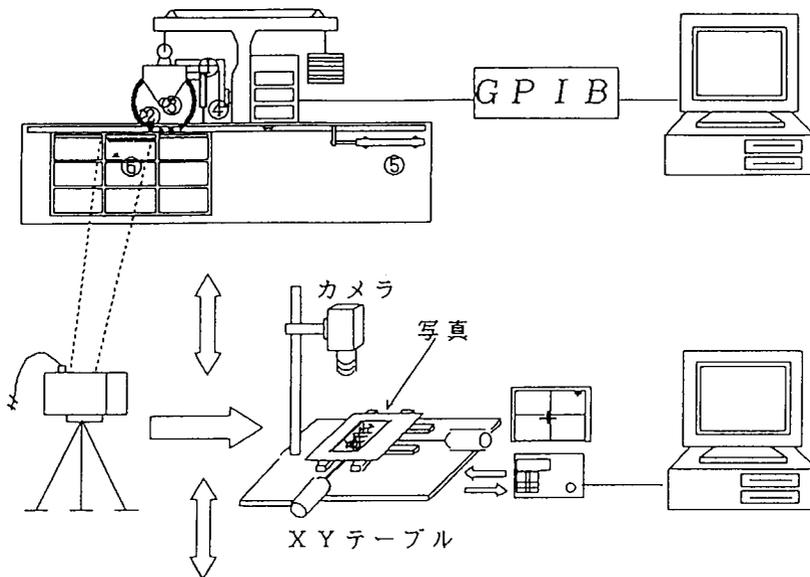


図3 走行実験および変形解析装置の構成

(3) 変位とひずみの算出

これらの装置で読み取られた節点座標データは、RS-232Cインターフェースを通してパーソナルコンピュータに転送される。これは写真上の座標値であるので、基準スケールによる実座標値に変換した後にデータファイルとして蓄えられる。この時、x, y軸に対する写真の傾きも併せて補正する。座標ファイルは、同一すべり率の実験に対して、無変形状態、初期沈下状態、回転状態1、回転状態2、・・・、と一連のステップのものができるので、これにステップ番号を付す。ある節点の変位増分は、同じマーカの (i + 1) ステップの座標値から (i) ステップの座標値を減ずることによって得られる。これをすべての節点について求め、第1ステップの節点変位増分データを作成する。

それぞれのステップにおけるひずみ増分は前述の手

順に基づいて算出する。すなわち、近接する3個の節点で要素を形成し、それらの変位増分を用いてその内部のひずみ増分を計算する。これをすべての要素について実施して第iステップのひずみ増分ファイルを作成する。このプロセスを最初のステップから順次実施し、その都度、増分値を加算してひずみを求める。解析のフローチャートを図4に示す。

(4) 結果の表示

解析結果を理解しやすくするためにグラフィック表示を用いた。変形状態はワイヤフレーム図で表し、また、別の方法として節点の変位ベクトルを線素を用いて描き、その長さで傾きで変位ベクトルの大きさと勾配をそれぞれ表した。水平・鉛直方向の垂直ひずみ、体積ひずみ、および、せん断ひずみの分布は等値線図で表示した。主ひずみは十字線素を用い、その長さ

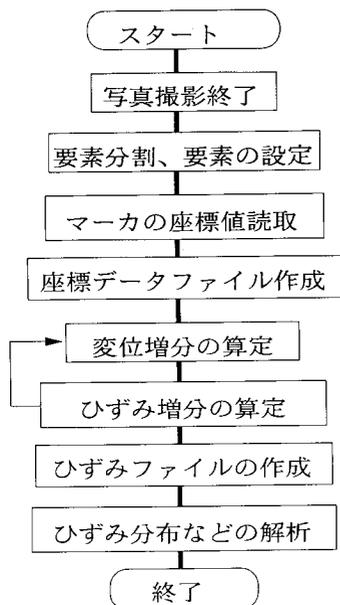


図4 変形解析のフローチャート

傾きでそれぞれ大きさと方向を示した。

4. 実験方法

平面ひずみ状態を満足する土槽（長さ1,888×414×深さ617mm）と、車輪より構成された走行実験装置を用いて、一定すべり率の走行実験を行った。すべり率の設定は、車輪の周速度5 mm/minに対して車輪を装着した移動台車の送り速度を選択して、0～100%の範囲で行った。この時、土槽側壁の亚克力板を通してマーカ（十字線間隔約10mm）を写真撮影した。本装置の構造と実験方法の詳細については別報に述べてある（Nohse *et al.*, 1991）。

車輪は、直径300mm、幅412mmで、重量804Nと約200Nの場合について実験を行った。供試土には気乾豊浦砂を用い、できるだけ均質になるように、一定高さの移動ホップより空中落下法によって注意深く土槽に充填した。土層厚は600mmと60mmの2通りに充填した。

実験の第1ステージでは、車輪の重量と土の反力が釣り合うまで非回転状態で静かに沈下させた。第2ステージでは、車輪を回転させ、すべりを発生させるために台車の走行速度を2軸スクルー駆動装置で制御した。

結果および考察

1. 読取装置による結果の比較

(1) 読取精度の評価

座標検出における読取精度は、機器の分解能、実物と写真の比率、標的（十字）のサイズ、照準方法、写真の鮮明度など多くの要因によって決まるので、その一般的な評価は容易ではない。そこで、分解能および実物と写真の比率より大まかな評価を行った。

本研究で用いたディジタイザと平面位置検出装置の分解能は、それぞれ0.1mmおよび0.005mmである。実物と写真との寸法比は、ディジタイザで0.47倍、平面位置検出装置で0.19倍であった。前者では拡大写真を使用したので寸法比は後者の約2.5倍になっている。これより、実際の分解能は、ディジタイザで約0.3mm、平面位置検出装置で約0.03mmとなり10倍程度の差となった。この数値はこれ以下の変位量は検出できないことを意味する。なお、後者に拡大写真を使用すれば分解能はさらに高くなる。実際の読取精度は他の要因の影響を受けるためこれより低くなるが、後者は周辺機器が充実しているため、低下の度合いは前者に比べるとはるかに小さいものと思われる。

(2) 読取装置によるひずみの比較

次に、ディジタイザと平面位置検出装置を用いて、同じ写真よりマーカの座標を読み取り、比較を行った。実験は重量216Nの鉄車輪を用い、土層厚600mm、すべり率90%で行ったものである。

(a) 初期沈下ステージ

まず、初期沈下ステージの結果について述べる。この時の沈下量は1 mm以内であった。両者におけるひずみの最大値および最小値を表1に示す。いずれのひずみにおいても、絶対値はディジタイザの方が大きな値を示していることがわかる。これはディジタイザの分解能が低く、また、照準などにおける誤差が入りやすいことに起因したものと思われる。初期沈下では、車輪近傍のひずみ分布は理論的には左右対称（せん断ひずみについては反対称）となるはずである。分布図をみると両装置の結果とも概略では対称性を示しているが、平面位置検出装置のものがいずれのひずみ分布でもそれはより明瞭であった。

(b) 回転角30度

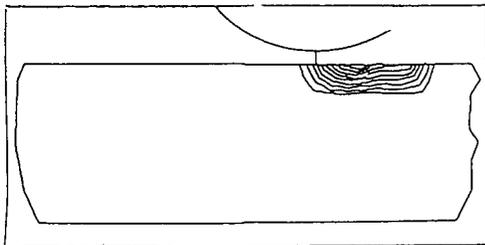
車輪の回転角がある程度大きくなると、肉眼においても変形の状態が観察できるようになる。特に、車輪後方には顕著な土の盛り上がり部が形成される。表1に示す回転角30度におけるひずみの最大値・最小値を

表1 読取装置による最小・最大ひずみの比較

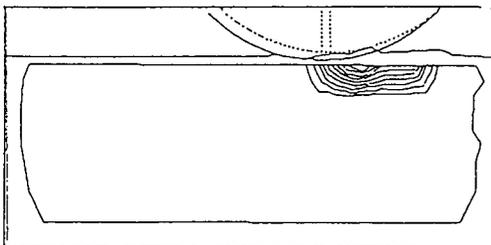
		ディジタイザ (DIGITIZER)		平面位置検出装置 (TWINKLER)	
初期沈下	ひずみの種類	最小値	最大値	最小値	最大値
	体積ひずみ	-0.0531	0.0405	-0.0403	0.0294
	ϵ_x	-0.0271	0.0450	-0.0167	0.0231
	ϵ_y	-0.0534	0.0292	-0.0296	0.0155
	せん断ひずみ	-0.0503	0.0449	-0.0361	0.0492
30度回転 slip=90%	ひずみの種類	最小値	最大値	最小値	最大値
	体積ひずみ	-0.0458	0.3120	-0.0691	0.2681
	ϵ_x	-0.2245	0.2221	-0.2214	0.2111
	ϵ_y	-0.0628	0.3320	-0.0638	0.3159
	せん断ひずみ	-0.0385	0.8806	-0.0314	0.8808

土層厚：60mm 車輪：鉄車輪 車輪質量：22kg
供試土：豊浦砂 初期間隙比：0.64

みると、両読取装置間のひずみの差は初期沈下状態に比べて相対的に小さくなっている。図5に両読取装置によるせん断ひずみの分布状態を等値線図によって示す。図では左方が進行方向である。等値線の値はその



MAX=0.8806 MIN=-0.0385
< DIGITIZER >



MAX=0.8808 MIN=-0.0314
< TWINKLER >

図5 読取装置によるせん断ひずみ分布の比較

時の最大値と最小値の差を10等分して決めてあり、正の値は実線で、負の値は破線で描いてある。両装置の結果とも、車輪直下のやや前方から後方部にかけて、正のせん断ひずみの顕著な集中領域が示されている。等値線の分布形状および範囲は両方ともほぼ同じであることがわかる。これは主として、車輪後方の変位量が大きいこと、微小な差が等値線図に表れないことによるものであろう。同様の傾向は他のひずみについてもみられ、変形が大きくなるとディジタイザでもひずみ分布をある程度適切に評価できることがわかった。なお、進行方向あるいは見る位置が逆になると、せん断ひずみの符号はこれとは逆になる。せん断ひずみの進行方向と符号の関係は以下同じである。

2. 変形図 (ワイヤフレーム)

車輪の回転に伴う土の変形状態を表すのに、節点間を直線で結んだワイヤフレーム図がよく使用される。図6に、すべり率90%、土層厚60mm、車輪重量200Nにおける、回転角1度、5度および10度のワイヤフレーム図の例を示す(読み取りは平面位置検出装置による)。同図において、車輪、土層ともに破線は変形前の状態、実線は変形後の状態を示す。なお、節点変位の縮尺は実寸である。

回転角1度では車輪直下よりやや後方に、比較的大きな変形領域が発生している。回転が5度、10度と進むと変形の大変領域は拡大し、10度では下層にまでおよんでいる。車輪直下付近では、土粒子が下向きに圧縮される状態と、水平方向にも移動する状態が読み取れる。このように、車輪直下のやや前方で圧縮を受

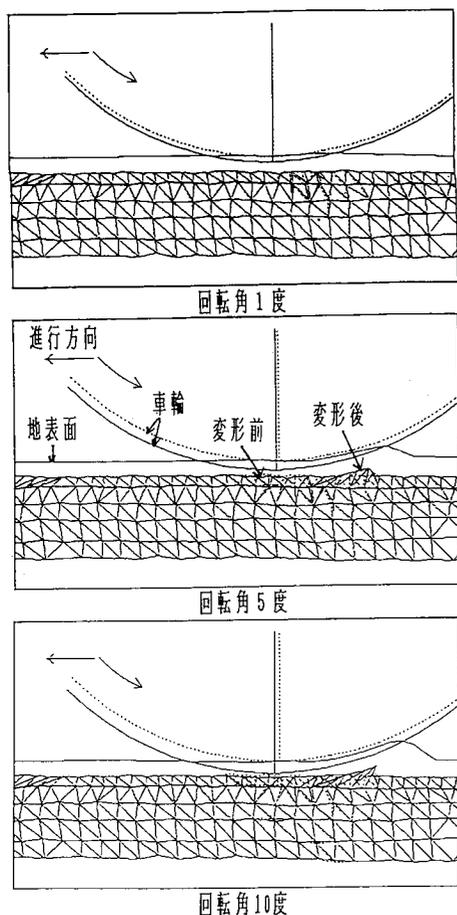


図6 ワイヤフレーム図による変形状態の表示例

け、直下より後方では蹴り出されるような様子が表示されている。さらに、車輪後方では、変形の大きな領域とそうでない領域の境界が明瞭に表れており、変形が車輪近傍に局所化されていく状態がわかる。また、車輪後方における地表部の盛り上がりと内部の変形状態は対応しており、これが形成される過程をみることができる。

3. 主ひずみの分布

主ひずみの分布をすべり率20%および100%の場合について図7に示す。この実験は土層厚600mm、車輪重量804Nに設定したものである（読み取りはディジタイザ）。ここでは車輪の回転角4度および20度の例をとりあげた。この図より、すべり率100%の方が

全体的に大きなひずみ領域が発生している状況がわかる。すべり率20%では、回転開始直後において車輪前方に相対的に大きな主ひずみが発生した。これは、回転が始まると始めに前方の土が変形することを意味している。回転角20度では、車輪後方において主ひずみの大きい領域が明瞭に表れている。このような分布状態が出現するのは回転角15度以上であった。

すべり率100%では、回転角4度の状態からすでに車輪直下より後方にかけて大きな主ひずみが発生している。顕著な主ひずみの表れている領域は、20%のそれよりも広く、また深くまで及んでいる。この時、車輪前方に向けて主ひずみの比較的大きな層がみられる。回転角20度になると、車輪直下より車輪後方部の主ひずみはますます大きくなり、また前方の層も明瞭になっている。主ひずみの大きい部分は領域というよりは、ある幅をもった層を呈しているようである。この層は車輪直下やや前方より後方部ならびに前方部に向けて弧を描いている。これらの弧の始点に当たる車輪直下やや前方部のその下層における主ひずみは小さくなっている。さらに、弧の内側に相当する上層においてもひずみの小さな領域がみられる。

主ひずみの大きな帯状の層は、すべり率20%の場合には明瞭ではなかった。これは、主ひずみの大きい領域が狭いために、要素のサイズが相対的に大きくなって帯状の層を表現できなかったものと思われる。すなわち、要素が十分に小さければ、この場合にも同様の結果を得ることができるものと予想される。

4. 等値線分布

等値線で表現したひずみ分布の例を、すべり率20%とすべり率100%のせん断ひずみについて図8に示す。これらは上述の図7にそれぞれ対応している。等値線の値はその時の最大値と最小値より決定してある。言うまでもなく、せん断ひずみはすべり率100%の方が全般に大きい。いずれの場合でも、正のひずみは車輪直下から後方において分布し、負のひずみは車輪前方に表れた。正の領域は車輪直下やや前方にまで広がっている。なお、すべり率100%の方が20%に比べて正の領域はより前方に及んでいる。

車輪直下ならびに後方では、土は車輪の動きに対応して後方に移動する。この土粒子の移動量は深さ方向に沿って減少するので、正のせん断ひずみとなる。これに対して、車輪前方においては、土粒子は深さ方向の相対差を持って前に押し出されるため、負のせん断ひずみが生ずる。その程度がすべり率によって異なることをこれらの等値線図は示している。ただし、見る

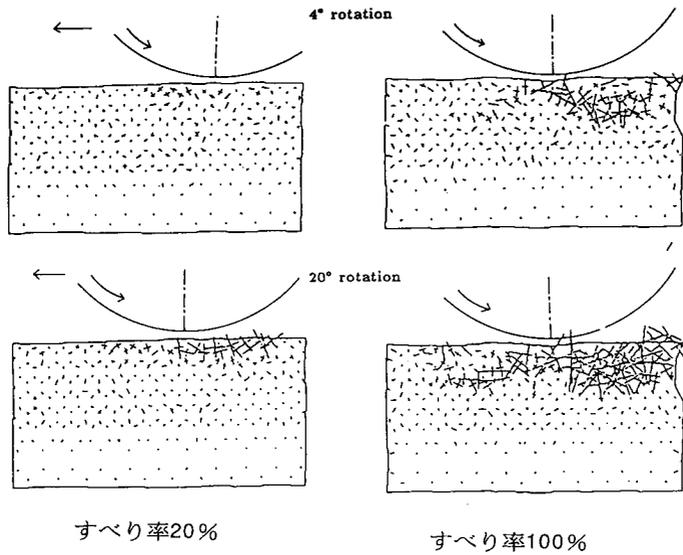


図7 主ひずみの分布例

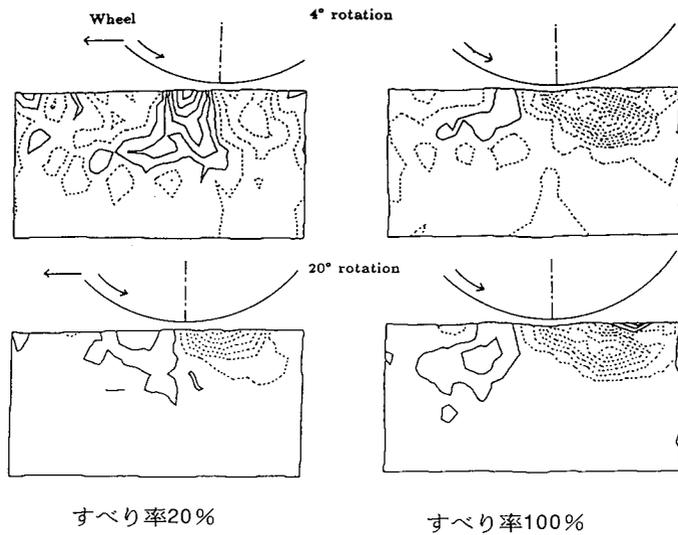


図8 せん断ひずみ分布の等値線表示例

位置を変える，すなわち土槽の裏側から見れば正負は反転する。

要 約

走行現象の解明や数値解析の検証に活用することをねらいとし，土の変形現象の解析システムの開発を行った。小さな円形可動マーカを用い，これを撮影した写

真より座標を読み取ることによって，土粒子の変位検出を行った。さらに，有限要素法の手法を用いたひずみ解析システムを開発した。本研究では，車輪下の変形現象解明の第一段階として，このシステムの適用性を検討し，次の結果を得た。

1) 節点座標の読み取りにデジタルイザと平面位置検出装置を用いた結果を比較し，小さな変形の分析に

は後者が優れていることを示した。

2) ワイヤフレーム図によって、車輪の回転に伴う車輪近傍の土の変形状態とその変化を表現することができた。

3) 主ひずみ分布図によって、すべり率20%と100%のひずみ分布の違い、および、車輪の回転に伴う分布の変化を表現できた。

4) 等値線図によってもひずみの分布状態をわかりやすく表現でき、すべり率や回転に伴う分布パターン之差を分析できることを示した。

このように、本研究で開発した変形解析システムは、車輪の沈下量が1mm以下であっても十分な精度で車輪走行時の解析が可能で、走行中の変形の特徴、変形パターンの経時変化を把握できることが明らかになった。現在、このシステムを用いて変形解析を系統的に実施し、変形現象を明らかにするとともに、けん引力などと変形との関係を検討している最中である。

文 献

- Bakker, M. G. 1960 *Off-the-Road Locomotion*, Univ. Michigan Press, Michigan (USA)
- Nohse, Y., K. Hashiguchi, M. Ueno, T. Shikanai and F. Koyama 1991 A Measurement of Basic Mechanical Quantities, *J. Terramechanics*, 28(4): 358-370
- Tatsuoka, F., M. Okahara, T. Tanaka, K. Tani, T. Morimoto and S. A. Mohammed 1991 Progressive Failure and Particle Size Effect in Bearing Capacity of a Footing on Sand, *Geotech. Engng. Congress*, 2: 788-802
- Windisch, E. J. and R. N. Yong 1970 The Determination of Soil Strain-Rate Behaviour beneath a Moving Wheel, *J. Terramechanics*, 7(1): 57-67
- Wong, J. 1967 Behaviour of Soil beneath Rigid Wheels, *J. Agri. Engng. Res.*, 12(4): 257-269

Synopsis

A convenient system for analyzing the soil deformation beneath a wheel has been developed in this study. It consists of two subsystems to detect the displacement of soil particles and to calculate strain or strain increment. In order to detect the displacement of soil particles with high accuracy, small and movable markers made of polyester sheet are set on the inside wall (acrylic resin plate) of a soil bin, and a series of their photographs are taken in a traveling experiment of a wheel. The coordinates of markers are read and stored in a data file, strains or these increments are calculated by using the data file, and the distribution patterns of the strains are discussed. The results by two types of detecting devices, i. e., a digitizer and a coordinates detector were compared with each other. The analyzing system was applied to some results of traveling experiments, and it was shown that the system is able to analyze the soil deformation with sufficient accuracy.