

車輪走行に伴う地盤変形の弾塑性有限要素解析

九州大学ベンチャービジネスラボラトリー ○岡安崇史

九州大学農学部 橋口公一, 池末英二, 堤成一郎

琉球大学農学部 上野正実, 鹿内健志

【Keyword】 弾塑性有限要素法, 有限変形理論, 下負荷面モデル, 転圧現象

I はじめに

農機, 建機等の路外車両の走行により地盤は著しい塑性変形を生ずる. この現象を境界値問題として解析するには, まず地盤を弾塑性体と仮定する必要がある. さらに, 機械の走行に伴って境界条件が時々刻々と変化するので, その考慮が求められる. 本研究では拡張下負荷面モデルを導入した有限変形FEMプログラム¹⁾を車輪-地盤系の境界値問題を解析し得るように拡張し, これを用いて剛性車輪走行下の地盤変形現象の解析を試みた.

II 車輪-地盤系の弾塑性有限要素法

1. 拡張下負荷面モデル

拡張下負荷面モデルは正規降伏面内部に常に現応力点を通り正規降伏面と相似形を保ちながら移動, 膨張および収縮する下負荷面を仮定することにより, 繰返し弾塑性構成式としての力学的要求条件(連続性の条件, 滑らか条件, 仕事率・剛性緩和, Masing効果)をすべて満たし得る. 本モデルに基づいて応力速度 $\dot{\sigma}$ はストレッチング $D (= D^e + D^p, D^e:弾性ストレッチング, D^p:塑性ストレッチング)$ により次式で与えられる.

$$\dot{\sigma} = E \left\{ I - \frac{\bar{N} \otimes \bar{N} E}{\bar{M}_p + \text{tr}(\bar{N} E \bar{N})} \right\} D \quad (1)$$

ここに, E は弾性係数テンソル, I は恒等テンソル, \bar{M}_p は塑性係数, \bar{N} は下負荷面に対する正規化された外向き法線, \otimes はテンソル積(ダイアド)を表す.

2. 有限変形に基づく速度形の仮想仕事の原理

有限変形に基づく速度形の仮想仕事の原理は次式で与えられる.

$$\int_V (\dot{\sigma} + W \sigma - \sigma W) \delta D + \{(\text{tr} D) \sigma - \sigma L^T\} \delta L dv = \int_a \pi^T \delta v da \quad (2)$$

ここに W は連続体スピン, L は速度勾配, v は変位速度および π^T は表面力速度である. なお, δ は仮想量を示している. 式(2)を有限要素離散化して下負荷面モデルに基づくFEMプログラムを開発した.

3. 車輪-地盤系の境界値問題に対する計算アルゴリズム²⁾

図1に車輪条件判定および収束計算に関するフローチャートを示す. 車輪-地盤系の境界値問題では, 車輪と接触する節点に対する変位増分を次式で与える.

$$\left. \begin{aligned} du_x &= r_w \{d\theta(1-s) + \cos(\phi + d\theta) - \cos(\phi)\} \\ du_y &= -r_w \{\sin(\phi + d\theta) - \sin(\phi)\} + du_s \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに, du_x, du_y はそれぞれ水平方向と鉛直方向の節点変位増分を表し, r_w は車輪半径, $d\theta$ は回転角度増分, s はすべり率, ϕ は節点と車輪中心を結ぶ直線と水平線のなす角, du_s は沈下増分を示す. この境界条件下で剛性方程式を解き, 未知の節点変位増分と節点荷重増分を求める. 次に, 接触節点の節点荷重を接線成分と法線成分に分解し, 法線荷重に対する接線荷重の比が

Coulomb摩擦条件 ($f_t/f_n \leq \mu$, μ :摩擦係数)を満たしているか判定を行い、この条件に反していればCoulomb摩擦から得られる接線荷重から求めた荷重増分を境界条件として与えて再度剛性方程式を解く(摩擦条件判定). なお、荷重増分を境界条件とした場合、得られる節点変位増分は車輪面上から離れてしまう可能性があるため車輪面上への修正変位増分を与えて再度剛性方程式を解く(幾何学条件判定). 次に車輪面から離れる節点をチェックし、離脱節点があればそれを接触点から除いて計算を繰り返す(離脱節点判定). 最後に車輪荷重が一定に保たれているかをチェックし、保たれていなければ車輪の沈下増分を修正して剛性方程式を解き直す(車輪荷重判定). さらに、応力と内部状態変数を仮更新し、収束条件に反していれば計算が繰り返される(非線形FEMのための収束計算). 以上がすべて満たされた場合には、次ステップへ計算が進行する.

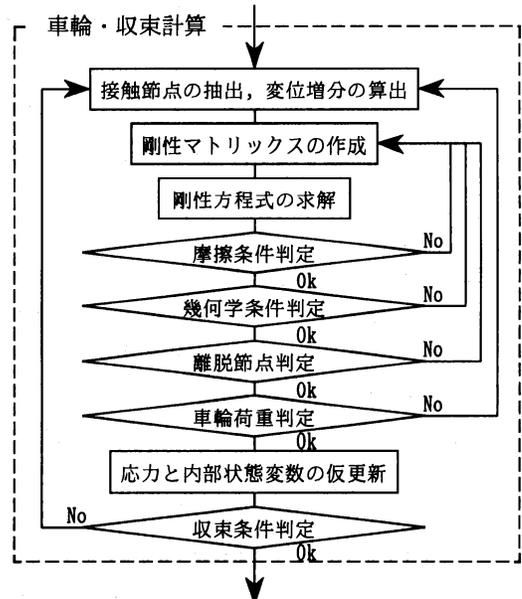


図1 車輪条件判定と収束計算のフローチャート

III 結果と考察

図2はFEM解析により得られたすべり率1.0%における車輪下の全変位ベクトル分布を5倍に拡大表示したものである。砂質地盤上で剛性車輪が低すべり率走行する際、土粒子は車輪前方へ変位することが実験的に示されているが、弾塑性FEM解析によってもこの現象が定性的に予測できていることがわかる。また、車輪後方部の地盤は塑性変形が残留してわだちが形成されている。

IV おわりに

開発した弾塑性FEMプログラムにより低すべり率走行する車輪下の地盤の変形現象を解析できることを示した。今後は車輪-地盤・収束計算などの改善を進めて、種々のすべり率での解析を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 橋口公一・岡安崇史・堤成一郎・上野正実 (2000): 拡張下負荷モデルを導入した有限変形・土-水連成有限要素解析プログラムの開発, 農業機械学会誌, 62巻第1号, 11-19 (印刷中).
- 2) 内山恵一・能勢行則・Andrzej Jarzebowski・橋口公一・上野正実(1992): 車輪と土の相互作用に関する数値解析, テラメカニクス, 12, 73-78.

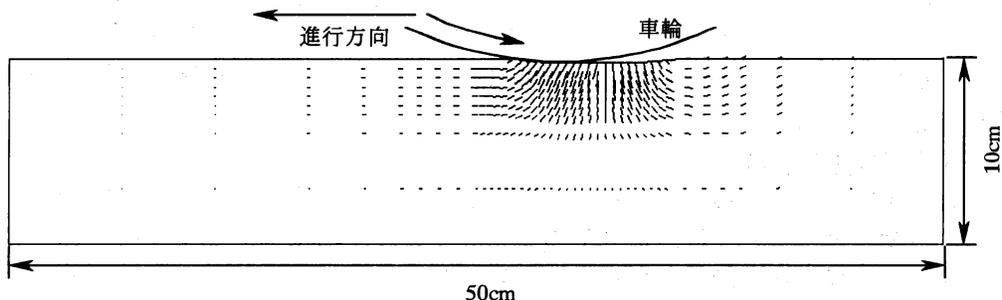


図2 走行車輪下の変位ベクトル分布(すべり率:1.0%, 進行距離:5.0cm)