

軟弱地盤と履帯の相互作用に関する有限要素解析

愛媛大学工学部 学生 ○河原 荘一郎
同 正員 室 達朗
同 正員 榎 明潔

1. まえがき 海底の軟弱地盤上を走行する履带式車輛の走行性を推定することを目的として、弾塑性有限要素法を用いて軟弱地盤と履帯の相互作用を明らかにしようとした。履帯モデルのけん引試験¹⁾について試料土のせん断特性より弾塑性有限要素解析を行ない、実験結果と比較することによってこの解析法の適用性を検討した。

表1. 試料土の α , E_{50} の値

α (gf/cm ³)	E_{50} (gf/cm ²)
0.113	12.0

2. 軟弱試料土のせん断特性 試料土¹⁾は粉末のカオリンを海水と2:3の重量比で混合したのち、試料箱の中で10日間自重圧密させたものを用いた。軟弱地盤では、深さ方向に非排水強度 C_u が直線的に増加していることが推測でき、深さ Z (cm)と C_u (kgf/cm²)の関係は次式のように表わされた。

$$C_u = \alpha \cdot Z \quad \alpha: \text{深さ方向の強度増加率 (kgf/cm}^2\text{)}$$

ベーン試験²⁾より定めたこの定数 α と弾性係数 E_{50} を表1に示す。

3. FEM解析の手法³⁾ この解析で用いた弾塑性FEMでは、関連流れ則を仮定し、材料的非線型と大変形の問題を統一的に取り扱っている。さて、弾性状態下では、平面ひずみ状態の応力-歪み関係は次のように表わされる。

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_x \\ d\varepsilon_y \\ d\gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [D_e] \begin{Bmatrix} d\varepsilon_x \\ d\varepsilon_y \\ d\gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

E : 弾性係数
 ν : ポアソン比

降伏条件は、次式の Von-Mises のものを用いた。

$$\bar{\sigma} = \left[\frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 3\tau_{xy}^2 \right]^{1/2} \leq \sigma_u \quad \sigma_u: \text{単軸圧縮強度}$$

$\bar{\sigma} = \sigma_u$ が満足されると降伏が始まる。弾性限度をこえたときの応力-歪み関係⁴⁾は次式のものを用いた。

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\tau_{xy} \end{Bmatrix} = [D_e] \begin{Bmatrix} d\varepsilon_x \\ d\varepsilon_y \\ d\gamma_{xy} \end{Bmatrix} - \frac{9G^2}{\bar{\sigma}^2(3G+H)} \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y & \sigma_x\tau_{xy} \\ \sigma_x\sigma_y & \sigma_y^2 & \sigma_y\tau_{xy} \\ \sigma_x\tau_{xy} & \sigma_y\tau_{xy} & \tau_{xy}^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_x \\ d\varepsilon_y \\ d\gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

G : 剛性率
 H : 歪み硬化率
 σ_x, σ_y : 偏差応力
 $\bar{\sigma}$: 相当応力

なお、引張破壊した要素については、弾性係数をもとの $1/1000$ 、ポアソン比を0.499にして処理した。図1にフローチャートを示す。

4. 解析条件 図2に示すType1と2の履帯モデルについて、それぞれ水接地圧を3.0, 4.5, 6.0 kgf/cm²と変えて解析を行なった。用いたのは、三角形要素で390要素、215節点である。図3に要素分割を示す。解析に用いた試料土のポアソン比は、けん引中に体積変化がないものとして0.490とした。履帯モデルの移動は、その右端にある2節点に強制変位として与え、けん引抵抗は2節点の節点力(反力)の和に等しいとした。沈下量は、履帯モデル上面の中央節点の沈下量とした。

5. 解析結果 図4にType1, 接地圧4.5 kgf/cm²の解析結果を示す。

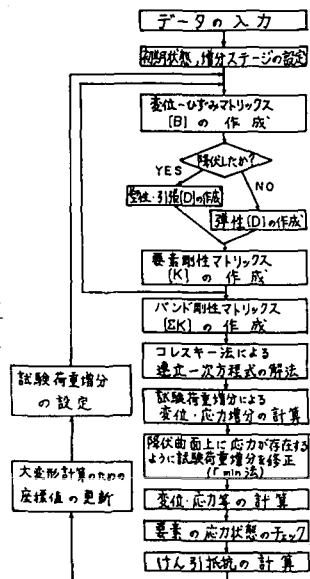


図1. FEMプログラムフローチャート

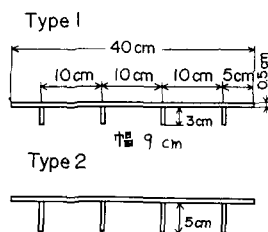


図2. 履帯モデル

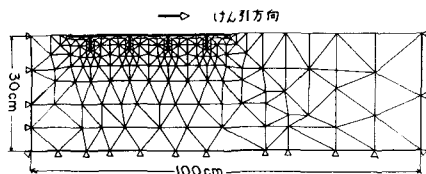


図3. 要素分割

FEMで求めたけん引抵抗は、けん引距離が約5 cmをこえると、実験値より大きくなり、過大に推定される傾向がある。この傾向は、他の接地圧のものについてもみられた。また、FEMで求めた沈下量は、けん引距離約5 cmで最大となり、以後けん引距離が増加するにしたがって沈下量は減少する傾向がある。この傾向は、けん引距離とともに沈下量が単調に増加する実験の傾向と逆である。これは、FEM解析では、けん引中に履帯モデル上に試料土が覆い被さることを考慮できないこと、拘束条件等の影響があるためであると考えられる。

次に、要素の破壊状態を図5に示す。鉛直載荷による沈下直後の履帯モデルの両端にある要素に引張破壊が生じており、また、履帯モデル下部にはせん断破壊域が多く存在している。けん引することによってせん断破壊域はさらに増え、深さ約12 cmまで達しているが、さらにけん引してもせん断破壊域はほとんど増加しない。5 cmけん引後で解析領域の左端部に引張破壊要素が生じているのは、左端を水平方向に変位拘束しているためであると考えられる。

6. 考察 FEMで求めたけん引抵抗が推定値として適切かどうかを検討するため、図6に示すように、接地圧と20 cmけん引時のけん引抵抗の関係を調べた。FEMで求めたけん引抵抗は、接地圧が高くなるにしたがって大きくなっている。また、同じ接地圧に対しては、グロース高さが高いほど、けん引抵抗は大きくなっている。この点からみると、FEM解析結果は、実験結果と同様の傾向を示している。しかし、けん引抵抗の値は、Type 1について実験値の1.6~1.8倍、Type 2について1.0~1.3倍であり、過大に推定される。今回の解析では、解析領域の側面を水平方向だけでなく、鉛直方向にも変位拘束しているため、けん引が進むにしたがって履帯モデル進行前部の要素が異様に盛り上がる。この盛り上がりをなくすため、側面を水平方向にだけ変位拘束することによって、FEMで求めたけん引抵抗が、さらに実験値に近づくものと考えられる。

7. まとめ 以上、深さ方向の強度変化を考慮して、履帯モデルのけん引試験の弾塑性FEMによる解析を大変形問題として試みた。FEMで求めたけん引抵抗は、実験結果と同様の傾向を示した。しかし、値そのものは、過大に推定された。また、沈下量に関しては、実験結果と逆の傾向を示した。今回の解析では、弾性係数として E_{50} を用いたが、それが適切かどうかについては不明であり、FEM解析に用いる試料土の物性値を的確に定めることが今後の課題である。

参考文献

- 1) 室 達朗・榎 明潔:超軟弱地盤における履带式車輛の走行性能,愛媛大学工学部紀要,10巻2号,pp.329-338,1983.
- 2) 山田 嘉昭:有限要素法による基礎と応用シリーズ2,マトリックス材料力学,培風館,pp.37-53,1980.

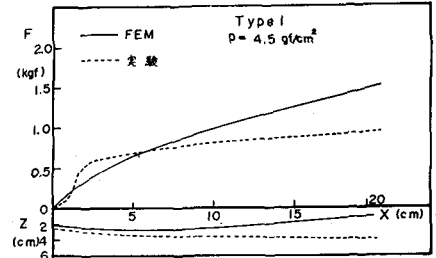


図4. けん引距離Xとけん引抵抗F,沈下量Zの関係

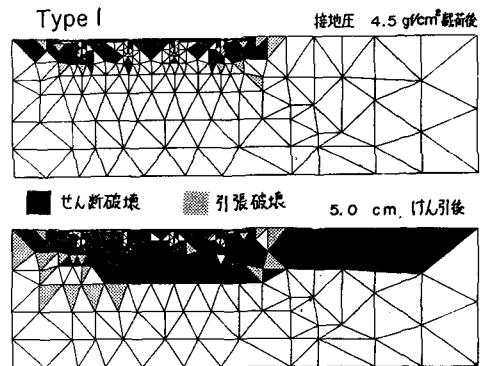


図5. 要素の破壊状態

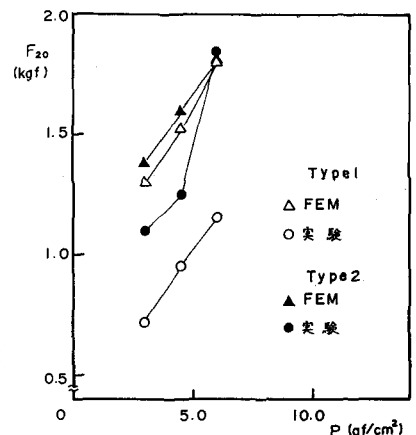


図6. 接地圧Pとけん引抵抗 F_{20} の関係 (20 cm けん引時)