

3次元 FLEM-DEM 結合解析法の開発

鳥取大学 学生 福田 毅
正 西村 強 木山 英郎
清水建設 正 風間 広志

1. はじめに

本研究では、積層導坑トンネル¹⁾の変形機構解明に有効であった流動要素(FLEM) - 個別要素(DEM)結合解析法の3次元解析プログラム開発を試みたものである。流動要素法 - 個別要素結合解析法とは、不連続性岩盤あるいは粒状体の解析法として提案された個別要素法と、連続体の大変形解析法の一手法として提案された流動要素法を結合したものである。これらは共に運動方程式の逐次解法を基本とすることから結合は合理的に行える。

今回の開発の一つの目的は、図-1に示すような群杭基礎の変形挙動を解析することにある。これは、鋼管矢板複合井筒基礎工法²⁾と呼ばれる基礎工法の下部場所打ち杭部分を対象としたものである。図では、矩形状に連続配置した杭に外周より土圧が作用し、あたかも一体であるかのような挙動をすることを期待する様子を示している。解析手法には、杭と地盤、それぞれの变形、杭同士の接触と地盤 - 杭の接触を表現していくことが求められる。本文では、特に接触のモデル化と簡単な解析例を示す。また、本手法は、補助工法を含むトンネル解析にも有効ではないかと考えている。

2. 接触のモデル化

杭は、軸方向変形、曲げ変形、ねじり変形を含むはり要素としてモデル化し、地盤部分は、六面体一次要素として分割している。杭一本一本の変形は、有限要素法により求められるが、地盤部分は、運動方程式の時間差分解法を利用して、節点変位増分を求めている。杭 - 杭間、杭 - 地盤間の接触面では、個別要素法と同様のばね - ダッシュポット系の接触モデルを仮定している。接触面は、接触点を含んで半径方向と直交するとし、その面に対する法線方向(n)と面上に直交する2方向を設けて接触力を求める。接触面上の直交2方向は、杭の中立軸に平行な方向(l)とそれに直交する方向(m)とした(図-2)。

図-3は、杭の中立軸を含む面内での杭の接触相対変位増分量の計算に関する仮定を示している。この図は、

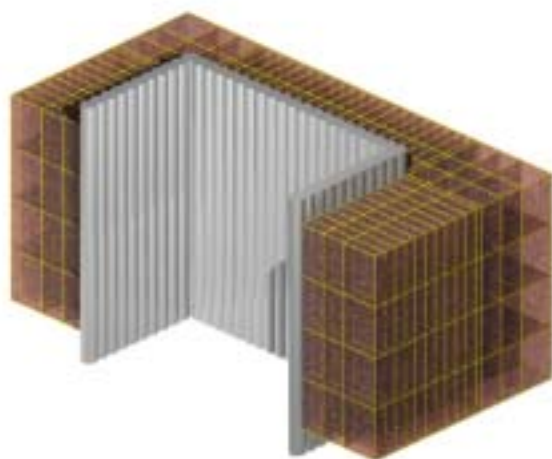


図 - 1 解析モデル

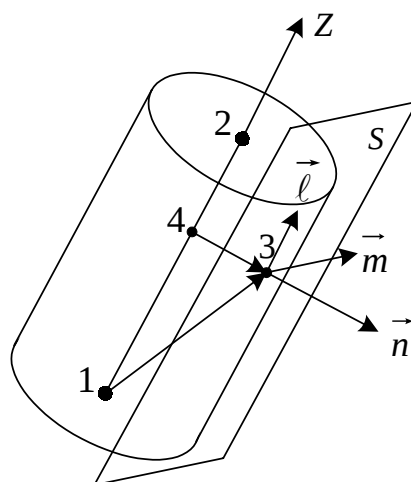


図 - 2 接触面

キーワード 井筒基礎、DEM、FLEM

連絡先 〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101 鳥取大学工学部 TEL 0857-31-5297

変形前に中立軸に対して垂直な線は、変形後も直線のままで、かつ、変形後も中立軸に垂直であるとの仮定を導入することに他ならない。杭の中立軸上に設けた節点1,2,3,4に変位増分 (u_1, u_2, u_3, u_4) とたわみ角増分がそれぞれ加わると変形し、図-3のようになるとする。ここで、杭表面上に点を $1', 2', 3', 4'$ とすると、それぞれの点の変位増分 $(u_{1'}, u_{2'}, u_{3'}, u_{4'})$ は次のように求められる。

$$u_{i'} = u_i + r\Delta\theta_i \quad (i=1,2,3,4) \quad (1)$$

ここに r は、杭の半径である。これより、たとえば、 $1'$ と $4'$ 間に発生する接触相対変位増分を、 $u_c = u_{1'} - u_{4'}$ として求めうる。また、中立軸に直交する面内における杭の接触計算は、DEMの円要素における接触判定および相対変位増分計算と同様である。発生する接触力は、地盤節点および杭節点に外荷重として作用する。

3. 解析例

図-1に示すモデル（井筒一辺20m）

において杭頭に水平方向へ一様な変位 δ を与え、開発したプログラムがどの程度群杭-地盤間の挙動を表現できるか検討した。特に、杭間に生じる接触力や杭頭に発生する節点力の総和 F と節点変位の関係に注目した。杭の諸元は、半径 $r=1.2\text{m}$ 、長さ $L=20\text{m}$ 、ヤング率を $E=3.0 \times 10^7$ (kPa)、ポアソン比を $\nu=0.2$ 、地盤については $E=1.0 \times 10^6$ (kPa)、 $\nu=0.3$ を与え、いずれも弾性体とした。

また、接触剛性係数には、法線方向 $Kn=1.0 \times 10^6$ (kN/m)、そして、時間増分 $\Delta t=1.0 \times 10^{-5}$ (sec)の条件を与えた。

まず、杭を $n=20$ 本直線配置(図-1の矩形の一辺に相当)して解析を行った例を図-4に示す。この図より、接線方向接触剛性係数 K_s の影響を知ることができる。次に、図-5に周辺地盤も考

えた解析結果を示す。横軸は、杭頭変位 δ を L で除した値、縦軸は、 F を矩形井筒の断面積（井筒外周）で除している。

この例では、 $K_s=1.0 \times 10^4$ (kN/m)とした。井筒内部に設けた隔壁の効果を知ることができる。今後、演算時間の短縮を図るとともに、実験結果等との対応についても検討を加えていきたい。

参考文献：1) 木山 他：材料、Vol47, No.5, pp.495-500, 1998。

2) 大久保 他：鋼管矢板複合基礎工法の概要、第24回日本道路会議、一般論文集、2001年10月

図-1に示すモデル（井筒一辺20m）において杭頭に水平方向へ一様な変位 δ を与え、開発したプログラムがどの程度群杭-地盤間の挙動を表現できるか検討した。特に、杭間に生じる接触力や杭頭に発生する節点力の総和 F と節点変位の関係に注目した。杭の諸元は、半径 $r=1.2\text{m}$ 、長さ $L=20\text{m}$ 、ヤング率を $E=3.0 \times 10^7$ (kPa)、ポアソン比を $\nu=0.2$ 、地盤については $E=1.0 \times 10^6$ (kPa)、 $\nu=0.3$ を与え、いずれも弾性体とした。

また、接触剛性係数には、法線方向 $Kn=1.0 \times 10^6$ (kN/m)、そして、時間増分 $\Delta t=1.0 \times 10^{-5}$ (sec)の条件を与えた。

まず、杭を $n=20$ 本直線配置(図-1の矩形の一辺に相当)して解析を行った例を図-4に示す。この図より、接線方向接触剛性係数 K_s の影響を知ることができる。次に、図-5に周辺地盤も考

えた解析結果を示す。横軸は、杭頭変位 δ を L で除した値、縦軸は、 F を矩形井筒の断面積（井筒外周）で除している。

この例では、 $K_s=1.0 \times 10^4$ (kN/m)とした。井筒内部に設けた隔壁の効果を知ることができる。今後、演算時間の短縮を図るとともに、実験結果等との対応についても検討を加えていきたい。

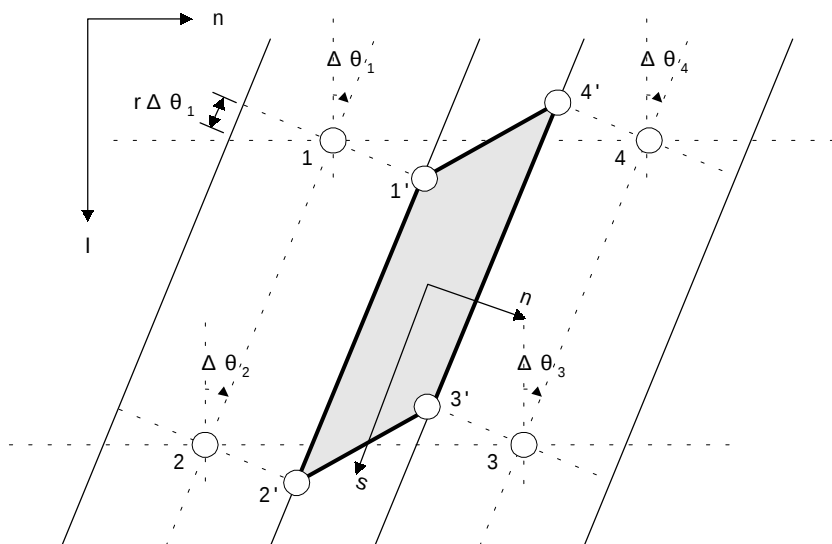


図-3 杭表面の変位量

$F/2nr$ (kN/m)

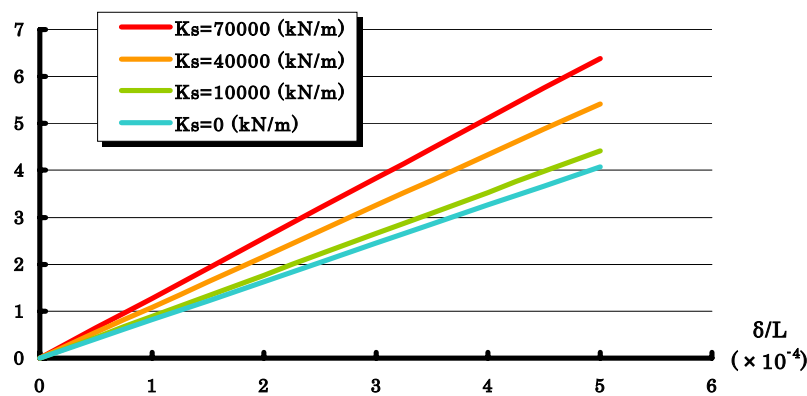


図-4 荷重-変位曲線（井筒）

F/A (kN/m²)

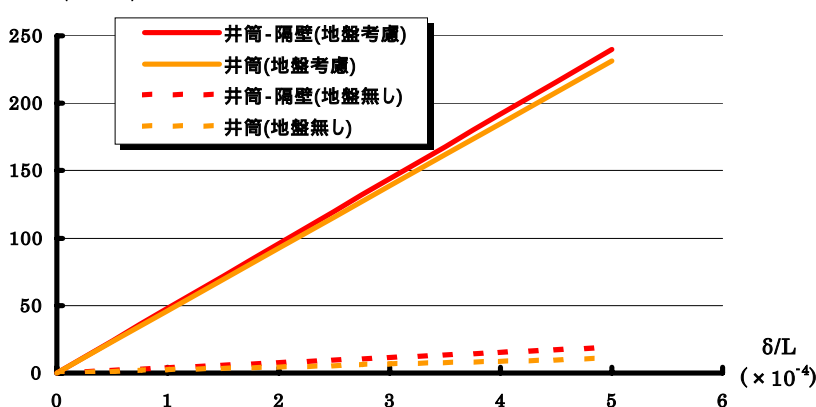


図-5 接触面荷重-変位曲線