

Ⅲ－B128

FLEM-DEM 結合解析の積層導坑トンネルの応力・変形解析への適用

鳥取大学 西村 強 木山 英郎
清水建設 長谷川 誠 淵本 正樹

1. はじめに

本文は、個別要素法(DEM)とその基本過程である運動方程式の逐次解法を活用した連続体の変形解析法・流動要素法(FLEM)¹⁾の結合解析法による積層導坑トンネルの変形解析について報告するものである。本解析法の概要や積層導坑トンネルの施工法、遠心模型実験および数値解析による安定性評価等については、既に報告されているので省略する^{2),3)}。本文では、覆工構造体への周方向作用力に注目したトンネルの変形特性について報告するとともに本解析法の適用性について検討する。

2. 解析モデル

覆工構造体への作用土圧、変形および導坑間接触圧などを再現し、覆工構造体が安定を保つメカニズムを明らかにすることが研究の目的である。今回は、図-1に示す遠心加速度模型実験²⁾（最大遠心加速度 100G、G：重力加速度）を対象として解析を進めた。トンネル模型の概要は、先行導坑としての円形（長さ 14.9cm、直径 $D=2\text{cm}$ ）の両腹を半径 $r=1\text{cm}$ の曲面で切り欠いたアルミロッドと後行導坑として円形のアルミロッド各 10 本を交互に配置し、純内径 10cm、外径 14cm の積層導坑覆工体を形成するものである。地盤部分には、乾燥した豊浦砂が用いられており、図に示すように、土被り厚さが（トンネル外径から）8cm になるよう地盤表面が成形されている。さらに、この上に厚さ 5cm の鉛散弾（砂換算厚さ 22cm）が敷設されている。

図-2に解析モデルを示す。アルミロッドを DEM 円形要素（半径 1cm）とし、それを取り囲む砂地盤を FLEM 解析領域（平面ひずみ条件）とした。解析は、最大遠心加速度 100G に達した時の再現を目標とし、鉛散弾については単位体積重量を 100 倍して地表面上の等分布荷重として入力した。解析に用いた材料物性値等は表-1のとおりである。

3. FLEM-DEM 結合解析結果と検討

実験結果³⁾より、図-3(a)は導坑への半径方向作用土圧をその点における有効土被り圧で正規化した土圧分布 σ_r/p_v 、同図(b)は導坑間接触圧 σ_c に関する結果を引用したものである。(a)図より半径方向作用土圧はクラウンとインバートで有効土被り圧に比べかなり小さく、3割程度であること、側方では7割程度となっていることがわかる。さらに、(b)図より導坑間接触圧は、(a)図の土圧分布と同様にクラウンとインバートの方が側方より小さく、その比は 1:3 程度であることがわかる。

図-4は、図-3に対応する解析結果として、(a)導坑－地盤間接触力の半径方向成分 f_r と (b)導坑間接触力 f_c を示したものである。本

表-1 解析定数

	Sand	Aluminum	Lead
Young's modulus $E(\text{MPa})$	60	70,560	-
Unit weight $\gamma (\text{kN/m}^3)$	15.7	27.0	65.5
Poisson's ratio ν	0.333	0.345	-
Contact stiffness $K_n (\text{N/m})$	78870	36,690,000	
Damping $\eta_n (\text{N}\cdot\text{s/m})$	32.0	698.0	
Time step $\Delta t (\text{sec})$	5.0×10^{-6}		

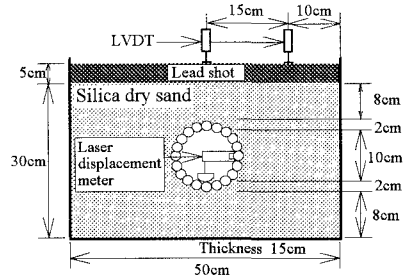


図-1 積層導坑トンネルの遠心実験模型

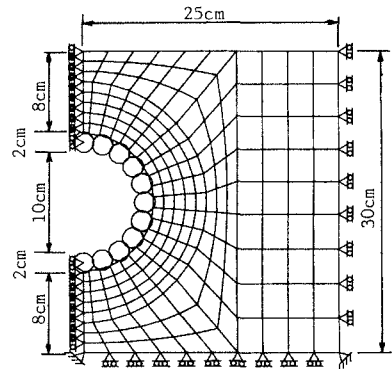


図-2 解析モデル

Key words : FLEM, DEM, Stacked-drifts-type tunnel, Earth pressure, Deformation.

連絡先: 鳥取大学工学部土木工学科 〒680-0945 鳥取市湖山町南 4-101, Tel. 0857-31-5297, Fax. 0857-28-7899.

解析では、FLEM-DEM 要素間を点接触として扱っているため、応力表示とはならないが、図-3 のような半径方向作用力あるいは導坑間接触力がクラウンとインバートで側方より小さくなる傾向を表現している。

剛性円管に作用する土圧は、クラウンとインバートでは土被り圧前後の値となるが、側方では静止土圧に近いとされる⁴⁾。円管がたわみ性になると管自体の変形に伴う土圧の再配分により正規化土圧分布は一様に近づく⁵⁾。そして、図-1 のような構造体が覆工を構成するとき、導坑間は接触しているのみであり、引張り力や曲げモーメントの発生はない。変形の自由度が高いことも一因となり、図-3 のようにクラウンとインバートでの作用土圧が側方を下回る傾向を示したと考えることもできよう。しかしながら、実験結果も同様であるが、図-3、4

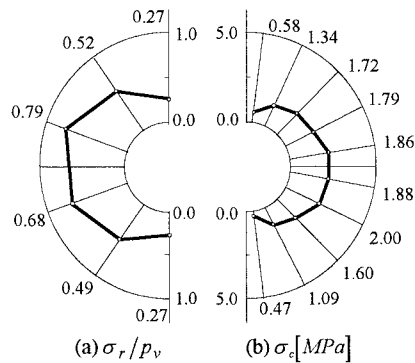


図-3 遠心模型実験結果

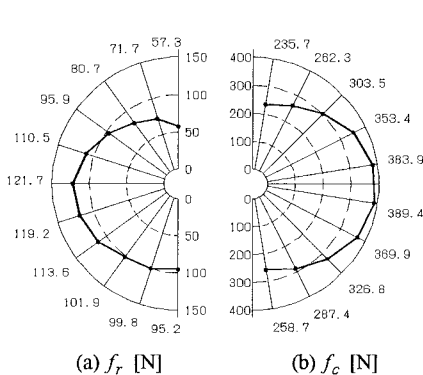


図-4 半径方向作用力と導坑間接触力

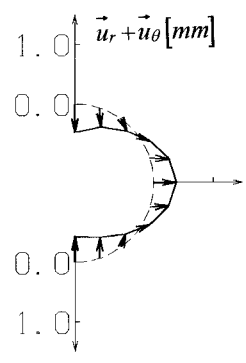


図-5 導坑の変位

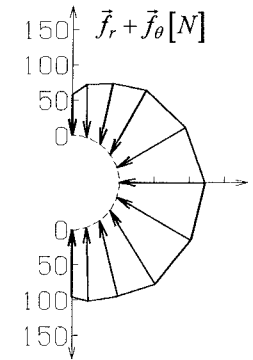


図-6 覆工構造体への作用力

ず、図-5 の解析結果に例示するようにトンネル自体は横長の楕円状への変形を呈しており、これらの結果のみでは作用力-変形関係を十分に説明できない。

著者等は、平面ひずみ状態における無限板中の円形ライニングの弾性厳密解を導いている⁶⁾。その解は、ライニングへの作用応力分布や変形形状は①ライニングの剛性と地盤の剛性の比の影響を受けること、②ライニングと地盤の境界が滑らか、粗い境界条件にも敏感であることを示している。さらに、粗い場合には、境界面に生ずる摩擦力によってクラウン（あるいはインバート）から側方に向かってライニングの軸方向応力が集積されることも示されている。

そこで、図-6 のように、導坑要素-地盤要素間の接触力の半径方向成分 f_r と周方向成分 f_θ の合ベクトル $(\vec{f}_r + \vec{f}_\theta)$ をまとめた。この図より、合力ベクトルがトンネル中心を指しておらず、クラウンから側方（あるいはインバートから側方）へと、 $\vec{f}_\theta$ が作用する様子がわかる。今回の例では表-1 のように、導坑自体の剛性は地盤の剛性に対して、剛性管の例とみなしても問題ないと考えられる。しかし、積層導坑トンネルでは、導坑が積み上げられて一体構造を成すことから、覆工構造体はある程度の変位・変形を許される。さらに、外周表面に凹凸を伴うので、周方向力が作用することになる。これら周方向力の作用はインバートおよびクラウン付近の半径方向作用力の減少と側方部の導坑間接触力の増大、さらには、図-5 に見られるような変形を生じさせるものと考えられる。

参考文献

- 1) 木山 英郎・藤村 尚・西村 強：土木学会論文集，No.439/III-17，63（1991）。
- 2) 西村 強・木山 英郎・新宅 正道・淵本 正樹：岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，Vol. 25，61（1994）。
- 3) 尾上 篤生・堀田 洋之・風間 広志・竹村 次朗・木村 孟：トンネル工学研究発表会論文・報告集，Vol. 2，89（1992）。
- 4) 萩原 敏行・日下部 治・野本 寿・三戸 憲二：土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol. 44，936（1989）。
- 5) 仲松 宇大・三戸 憲二・野本 寿・萩原 敏行・日下部 治：土質工学会研究発表会講演集，Vol. 25，1735（1990）。
- 6) 木山 英郎・藤村 尚・西村 強・池添 保雄：第 28 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，Vol. 28，97（1997）。