

楕円形積層導坑トンネルの安定性に関するFLEM-DEM解析

大豊建設(株)(元鳥取大学工学部生) ○宮本 貴夫
鳥取大学工学部 木山 英郎 藤村 尚 西村 強
清水建設(株) 長谷川 誠 淵本 正樹

1. はじめに 流動要素法¹⁾(Flow Element Method, 以下FLEMとよぶことにする)とは、個別要素法(DEM)²⁾の基本である運動方程式の時間差分による逐次解法を活かして、各要素の自由な大変形を許しながら要素間の連続性を保持して、全体としての大変形から流動までを解析できる手法である。FLEMとDEMとともに質点の運動方程式の陽形式差分法を基礎としているため、この結合は合理的かつ容易に行い得る。

本研究はFLEM-DEM結合解析を積層導坑トンネルの安定解析に適用したものである。積層導坑トンネルは直径20m以上の大断面トンネルを比較的経済的に建設する工法として検討が進められているものである³⁾。すでに、円形トンネルにおける導坑間接触圧や地盤応力分布の解析結果を模型実験結果と比較しながら報告している⁴⁾。ここでは、トンネル内部の掘削に伴う接触圧等の変化、さらには、楕円形トンネルの力学的挙動を中心に解析を進めた。

2. 解析方法の概要 図-1に遠心模型実験装置の概略を示す⁵⁾。これに対応して設定したFLEM-DEM解析モデルを図-2に示す。従来の解析⁴⁾では、トンネル内部はすでに掘削されているとして遠心加速度(100G)場を再現していた。しかし、これではトンネル内部の掘削による変形量を把握することはできない。そこで、図-2に示すようにトンネル部にも要素を配し、初期応力（遠心加速度100G）を発生させたのちに、掘削を行う解析を実施した。トンネル内部は掘削されているとして求めた値を全変形解析、初期応力を求めたのち、掘削を行った解析を初期変形補正解析とよぶことにする。掘削要素は円形トンネルでは円形DEM要素、楕円形トンネルでは断面の面積を円形と同面積になるように長軸・短軸の長さを設定し（長軸:短軸=3:2）、FLEM要素で表した。解析に用いた材料物性値は表-1に示す。DEMに関する定数はヤング率に基づいて砂試料とアルミについて個々に求め、表-2に示す。

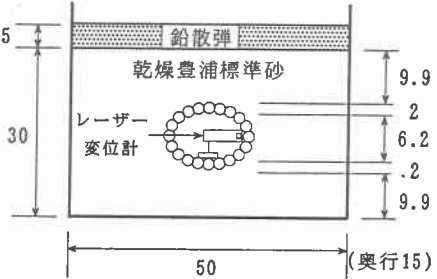


図-1 トンネル模型と模型地盤（単位:cm）

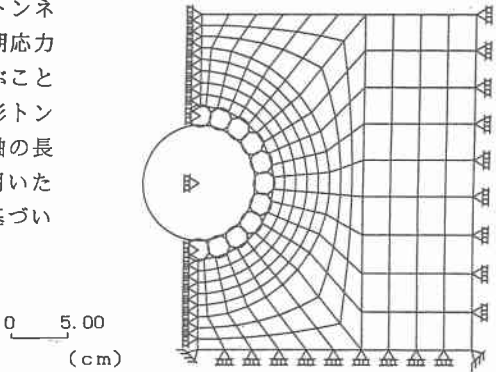


図-2(a) 解析モデル（円形）

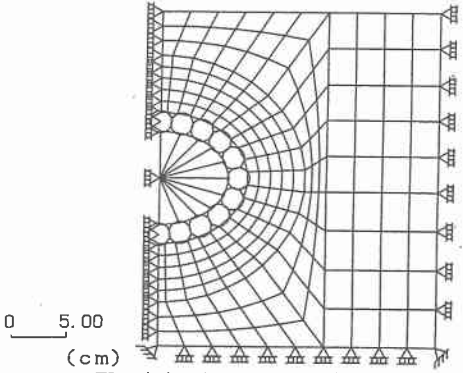


図-2(b) 解析モデル（楕円形）

表-1 材料物性値			
	ヤング率 (kgf/cm ²)	密度 (g/cm ³)	ポアソン比
標準砂	610	1.60	0.333
アルミ	720,000	2.75	0.345
鉛散弾		6.68	

表-2 解析定数		
接触剛性係数	$K_n / \rho g (\text{cm}^2)$	$K_s / \rho g (\text{cm}^2)$
標準砂	50,300	12,500
アルミ	23,400,000	5,850,000
減衰係数	$\eta_n / \rho g (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$	$\eta_s / \rho g (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$
標準砂	33.0	16.5
アルミ	713.0	356.0
時間増分	$\Delta t = 1.00 \times 10^{-6} (\text{sec})$	

3. 解析結果と考察 トンネルクラウン直上部の地表面沈下量を表-3に示す。同表では別途実施されている模型実験結果³⁾を全変形解析に対応するものとして示した。この表より円形、楕円形の比較のために初期応力状態の沈下量で掘削による増分沈下量を除すと、円形では0.03、楕円形では0.16となっている。掘削による変形は双方とも初期変形よりかなり小さいものの、楕円形の方が円形より大きい値を示している。

図-3には主応力図を示している。初期変形補正解析による内空変位量、導坑間接触圧および掘削による増分値（()内）を表-4に示す。この表では初期応力状態の値を上段に、掘削による値を下段に示している。さらに、掘削前後の導坑間接触圧、正規化土圧分布（トンネル円周方向の作用土圧を土被り圧で正規化したもの）を図-4,5に示す。以上の結果から、掘削完了時の導坑間接触圧については形状の違いによる明確な差異は認められない。土圧分布については楕円形の方が円形に比べて上下部で小さく、側方では大きくなっているのが特徴である（()内が掘削前の数値を示す）。

参考文献 1)木山他：土木学会論文集,第439号/Ⅲ-17,pp.63~68,1991.12 2)Cundall,P.A.: Technical Report,U.S.Army Corps of Engineers,1974. 3)尾上他：第2回トンネル工学研究発表会,pp.89~94,1992.7 4)西村他：第25回岩盤力学シンポジウム,pp.61~65,1993 5)尾上他：第30回土質工学研究発表会,pp.1969~1970,1995.7.

表-3 地表面沈下量 (単位:mm)

	実験値	解析値		
		全変形	初期変形	掘削による変形
円形	2.2	1.92	1.82	0.06
楕円形	2.9	2.38	2.07	0.32

表-4 解析結果

		鉛直内空変位(mm)		導坑間接触圧(kgf)			側方/上部
				上部	側方	下部	
円形	初期	0.50	(0.51)	20.3	31.7	18.7	1.56
	掘削	1.01		25.1	39.8	29.1	1.59
楕円形	初期	0.82	(0.75)	15.5	27.0	15.7	1.74
	掘削	1.57		22.9	36.3	23.5	1.59

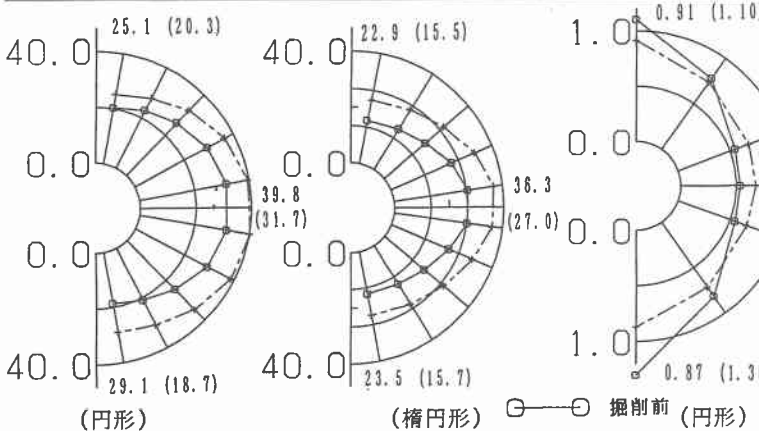


図-4 導坑間接触圧分布 (単位:kgf)

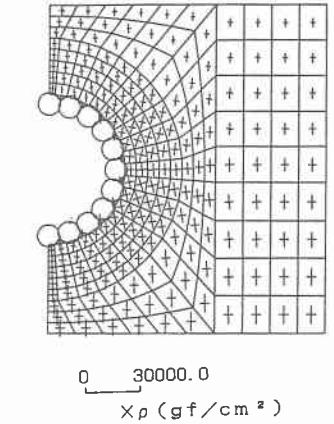


図-3(a) 主応力図 (円形)

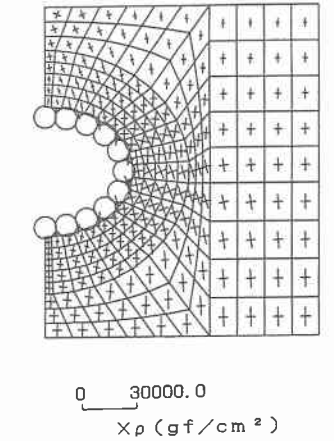


図-3(b) 主応力図 (楕円形)

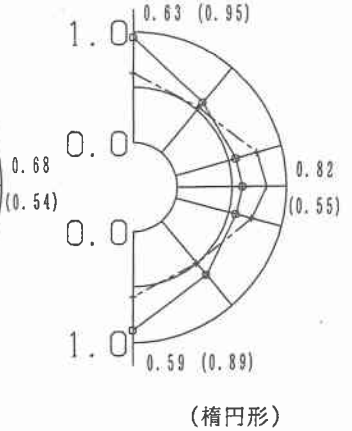


図-5 正規化土圧分布