

(14) FLEM-DEM結合解析法の開発と積層導坑トンネルの安定性評価への適用

鳥取大学工学部 ○西村 強 木山 英郎
清水建設㈱ 新宅 正道 淵本 正樹

A proposal of a coupled FLEM-DEM analysis and its application to stacked-drift type tunnels

Tsuyoshi NISHIMURA, Hideo KIYAMA TOTTORI UNIVERSITY
Masamichi SHINTAKU, Masaki FUCHIMOTO SHIMIZU CORPORATION

Abstract

The FLEM is a numerical method which is helpful in analyzing large deformation and flow problems of a continuum. It is based on the similar concept of DEM and adopts the procedures of FEM effectively.

In this paper, a new coupled FLEM-DEM analysis is proposed. The numerical modeling of contact between a rigid body and a elastic body will be possible. The contact is idealized, if a element is in touch with other DEM elements, contact forces are calculated according to original DEM. However, contact forces acting on a FLEM element are distributed to adjacent nodes.

The FLEM-DEM analysis is successfully applied to a centrifugal test on stacked-drift type tunnels under an acceleration of 100G in dry sand. The aim of this calculations is to quantify earth pressures around the drifts and contact forces between drifts. A comparison of the numerical results with the previous experimental results will reveal a high applicability of this coupled numerical method.

1. まえがき

すでに、流動要素法 (FLEM) の基本概念、計算手法については報告している [1]。連続体を対象とする FLEM では、要素の回転運動に対するモーメントのつり合いは、要素間および要素内を通じての応力レベルの対称性 $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ によって満たされている。そこで、要素間でこの $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ の条件が満たされない内部境界や、離散化が可能な粒状集合体との境界問題においては、FLEM の適用に多少の工夫が必要となる。すなわち、これらの境界においては、本質的に分離した要素間の接触に対する個別要素法 (DEM) 的な手法を採用する必要がある。本研究では、FLEM 要素領域と DEM 要素領域が混在し、その境界が接する場合の FLEM-DEM 結合解析への拡張を試みている。まず、FLEM-DEM 結合解析の概要を述べ、その適用例として積層導坑トンネルの遠心模型実験のシミュレーションについて記す。積層導坑トンネルは、超大断面トンネルの新施工法として開発され、現在、実験・解析によって検討されているものである。実験結果と解析結果の比較を通じて、積層導坑トンネルの安定性について考察するとともに、FLEM-DEM 結合解析の適用性について検証する。

2. FLEM-DEM 結合解析の概要

FLEM 要素分割領域では、周辺小領域を代表する節点 (質点) が、そして DEM 領域では、それぞれの要素が、運動方程式に従い移動することによって変化する。この手法では、図 1 に示す FLEM 要素 e^j と DEM 要素 e^i の接触を考えておかねばならない。二つの要素の接触条件は、次のとおりである。

$$0 \leq x_p' \leq x_m', \quad y_p' \geq 0 \quad \cdots (1)$$

ここに、 (x_p', y_p') とは、節点 p の座標値を全体座標系 (x, y) から、節点 k を原点とする局所座標系 (x', y') へ座標変換したものであり、次式で求められる。

$$\begin{pmatrix} x_p' \\ y_p' \end{pmatrix} = [T] \begin{pmatrix} x_p - x_k \\ y_p - y_k \end{pmatrix} \quad \text{ここに、} [T] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \cdots (2)$$

つぎに、接触点 (x_p', y_p') における接触相対変位増分を求めることが必要となる。まず、DEM要素 e^i の重心の全体座標系における座標値を (x^i, y^i) 、変位増分を $(\Delta u^i, \Delta v^i)$ 、また、回転変位増分を Δw^i とすると、その一頂点 p の位置における変位増分は、次のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_p &= \Delta u^i - \Delta w^i (y_p - y^i) \\ \Delta v_p &= \Delta v^i + \Delta w^i (x_p - x^i) \end{aligned} \right\} \cdots (3)$$

そして、これを局所座標系 (x', y') へ変換すれば、

$$\begin{bmatrix} \Delta u_p' \\ \Delta v_p' \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \Delta u_p \\ \Delta v_p \end{bmatrix} \cdots (4)$$

次に、FLEM要素 e^j の接触点 (x_p', y_p') における変位増分を求める。節点 k, m の変位増分は既知であり、接触点の辺 km における内分比に応じて、次のように求める。

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_{c,km}' &= (x_p' / x_m') \Delta u_m' + \{(x_m' - x_p') / x_m'\} \Delta u_k' \\ \Delta v_{c,km}' &= (x_p' / x_m') \Delta v_m' + \{(x_m' - x_p') / x_m'\} \Delta v_k' \end{aligned} \right\} \cdots (5)$$

以上より接触点での接触相対変位増分 $(\Delta u_c', \Delta v_c')$ は、

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_c' &= \Delta u_p' - \Delta u_{c,km}' \\ \Delta v_c' &= \Delta v_p' - \Delta v_{c,km}' \end{aligned} \right\} \cdots (6)$$

となる。接触剛性係数 (k_n, k_s) および粘性定数 (η_n, η_s) を用いて、弾性抗力増分 $(\Delta e_n, \Delta e_s)$ 、粘性抗力増分 $(\Delta d_n, \Delta d_s)$ を求め、新たな接触力を算出する手順はDEMと同様である。式のみ示すと以下のようである。

$$\left. \begin{aligned} \Delta e_n &= k_n \Delta v_c' & \Delta d_n &= \eta_n \Delta v_c' / \Delta t \\ \Delta e_s &= k_s \Delta u_c' & \Delta d_s &= \eta_s \Delta u_c' / \Delta t \end{aligned} \right\} \cdots (7)$$

$$\left. \begin{aligned} e_n &= e_n + \Delta e_n & d_n &= \Delta d_n \\ e_s &= e_s + \Delta e_s & d_s &= \Delta d_s \end{aligned} \right\} \cdots (8)$$

ただし、式(8)の e_s, d_s には次の2条件を付す。 μ は接触摩擦係数、 $\text{SIGN}(z)$ は変数 z の符号を表す。

$$e_n \leq 0 \text{ のとき, } e_s = d_s = 0 \cdots (9)$$

$$|e_s| > \mu e_n \text{ のとき } e_s = \mu e_n \cdot \text{SIGN}(e_s), \quad d_s = 0 \cdots (10)$$

接触力は、式(11)で求められたのち、全体座標系へ逆変換される(式(12))。

$$\left. \begin{aligned} f_n &= e_n + d_n \\ f_s &= e_s + d_s \end{aligned} \right\} \cdots (11)$$

$$\begin{bmatrix} f_{x,p} \\ f_{y,p} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} f_n \\ f_s \end{bmatrix} \cdots (12)$$

要素 e^j に対しては、さきほどの内分比により節点 k, m に振り分けられる。

$$\left. \begin{aligned} f_{x,k} &= \{(x_m' - x_p') / x_m'\} f_{x,p} \\ f_{y,k} &= \{(x_m' - x_p') / x_m'\} f_{y,p} \end{aligned} \right\} \cdots (13)$$

$$\left. \begin{aligned} f_{x,m} &= (x_p' / x_m') f_{x,p} \\ f_{y,m} &= (x_p' / x_m') f_{y,p} \end{aligned} \right\} \cdots (14)$$

これらは、節点 k, m に直接作用する外力として、運動方程式の右辺に考慮される。

一方、DEM要素 e^i には、接触力は左辺粘性項、変位抗力項として取り込まれる。さらに、次の回転モーメント(反時計方向正)を求めなければならない。

$$M^i = f_{x,p} (y_p - y^i) - f_{y,p} (x_p - x^i) \cdots (15)$$

以下、節点とDEM要素の新たな加速度、速度増分、変位増分を求める手順は従来通りである[1][2]。

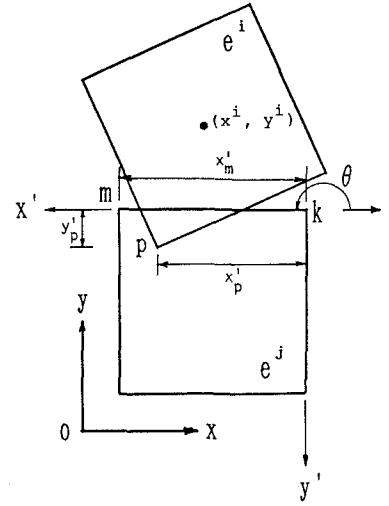


図1 要素の接触と局所座標系

3. 積層導坑トンネルの安定性評価への適用

(1) 積層導坑トンネル

積層導坑トンネルの概要、施工手順については、すでに報告されているので省略する。ここでは尾上ら[3][4]が実施している遠心模型実験とその結果について、解析に先立ちまとめておく。

図2に示すように、先行導坑として長さ14.9cm、直径2cmの円形の両腹を $r=1\text{cm}$ の曲面で切り欠いたアルミロッド、後行導坑として円形のロッド各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させてトンネル模型とする。遠心模型実験用土槽の前面と背面にはグリッドとメンブレンを貼り、壁面摩擦を

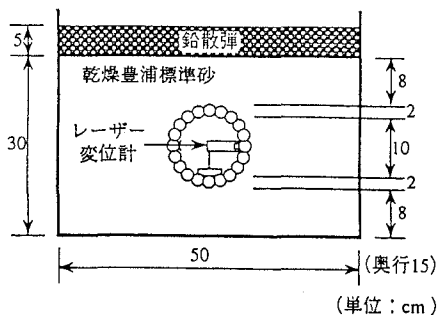


図2 トンネル模型と模型地盤

低減している。地盤は乾燥砂地盤と粘性土地盤について実施されているが、ここでは砂地盤に関して述べる。用いられた砂は豊浦砂で、地盤の乾燥密度 $\rho_d=1.6\text{g/cm}^3$ 、間隙比 $e=1.65$ 、相対密度 $Dr=0.87$ である。図2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。

周辺土圧と導坑間接触圧に関する結果を引用して、後述の解析結果との比較に供する。図3は導坑間接触圧をまとめたものである。図4は覆工構造体に作用する土圧その深度における有効土被り圧で正規化したものである。図3、4中には平均値が数値としても記入されている。実験では、遠心加速度0～100Gの繰り返し载荷・除荷過程において、初回の除荷後に地表面変位、内空変位とも100Gにおける値の約1/2の残留値が測定されている。载荷2回目以降は変形が弾性的に生ずることから、これは主として地盤の自重圧縮に伴う塑性変形と判断されている。そこで、図3、4では、载荷2回目以降はその残留値からの増分を測定値とし、载荷1回目と载荷2回目以降とに分けてそれぞれ遠心加速度100G時点の測定値で整理されている。

(2)解析条件

図2に示した覆工構造体が安定を保つメカニズムや土圧と導坑内部応力、施工に伴う変形などを解明することが解析の目的となる。解析は2次元平面ひずみ問題として行った。図5に解析モデルを示す。内径を10cm、一本のロッドを半径1cmの円形DEM要素とし、それを取り囲む砂地盤をFLEM解析領域とした。要素数225（DEM要素数11、FLEM要素数214）、総節点数280である。ロッドと地盤のなじみをよくするため、円要素間にできる隙間にもFLEM要素を配している。解析領域は模型の対称性を利用して半幅25cm、深さ30cmとした。境界条件は、側方は水平固定、鉛直自由、下端は鉛直固定とした。解析では、100Gに達した時の再現を目標として運動方程式において重力加速度を100倍にして入力し、载荷2回目以降の結果を比較の対象としている。鉛散弾については、単位体積重量

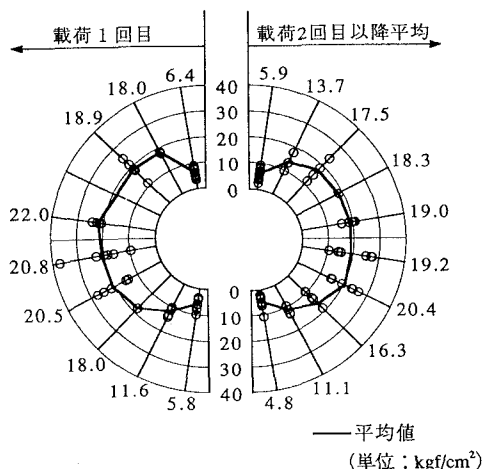


図3 導坑間接触圧（遠心模型実験）

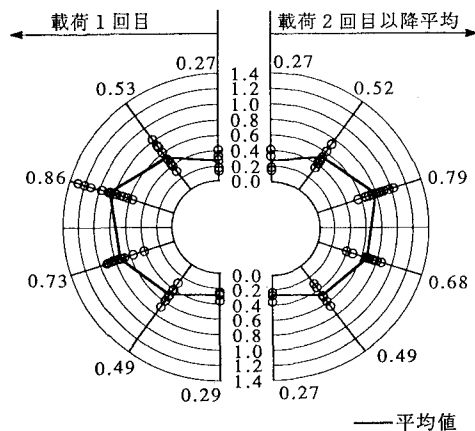


図4 正規化土圧分布（遠心模型実験）

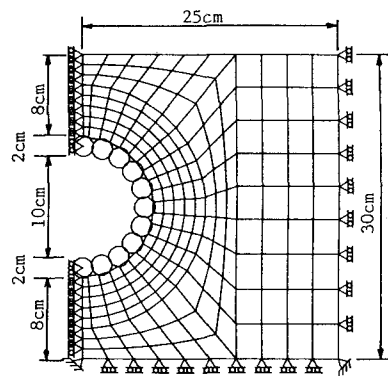


図5 解析モデル

表1 材料物性値

	弾性係数 (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 DEM解析定数

	接触剛性係数 $k_n / \rho_d g$ (cm ²)	減衰係数 $\eta_n / \rho_d g$ (cm ² ・s)
標準砂	50,300	33.0
アルミ	23,400,000	713.0

時間増分 $\Delta t = 5.0 \times 10^{-6}$ (sec)

表3 実験結果と解析結果の対応

		地表面沈下 (mm)		鉛直内空変位 (mm) *1	円要素接触圧 *2		
		中央	端部		上部	側方	下部
遠心模型実験		2.23	2.06	0.70	6.8	21.4	5.8
FEM解析	No.1	1.31	1.67	0.07	17.3	42.0	23.8
	No.2	1.49	1.70	0.25	20.6	45.1	26.1
	No.3	2.15	1.94	0.29	15.6	31.8	19.3
FLEM-DEM解析		1.92	1.80	1.00	24.8	39.1	25.9

注) *1: 圧縮が正 *2: 実験とFEMは kgf/cm², FLEM-DEMは kgf

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は表1のとおりである。DEMに関する定数はヤング率等に基づいてアルミと砂地盤について個々に求め、表2にまとめている[2]。砂地盤はFLEM要素領域であるが、導坑（アルミ）との接触力算出に際しては2.で述べたように接触剛性係数が必要となる。そこで、演算の収束性の観点からアルミ同様半径1cmの円要素として求めている。個々に求めることにより両者の接触では、異なる剛性を有する要素同志の接触を取り扱うことになるが、これについては文献[5]の手法を用いて処理した。

(3) 解析結果

遠心模型実験と解析結果を対比すると表3のようになる。FEM解析[6]において、No.1～3と条件を変化させることで地表面沈下、内空変位については改善されてきているが、周辺土圧はトンネル側方部よりトンネル上部・下部の方が大きくなるなど実験を十分説明できない部分が指摘された。これは、導坑間はまだ接触しているだけであり、引張力、曲げモーメントの伝達が無く、変形の自由度が大きいことなど、ロッド部分のモデル化に問題を残していることが一因と推察される。この点では、FLEM-DEM解析の方が模型に忠実で、よい結果が期待できる。

図6に地表面沈下量と鉛直、水平内空変位量の解析結果を示した。

()内の数値はさきの実験値である。この解析では、砂地盤は表1のような定数を有する弾性体として取扱い、弾性係数の低減などの措置は講じていないにも拘らず、実験結果とよい対応を示しているのが注目される。

図7のアルミロッド間の接触圧については、実験、FEM解析とも“応力”で示されているのに対し、本解析では、点-点接触であるので出力されるのは“力”であることに注意を要する。実験では、上部と下部の接触圧がほぼ同じで、側方との比は約1:3となっている。解析結果をみると、FEM解析では、どの条件下でも下部の方が20%～30%大きく、その平均値の側方に対する比も約1:2となっている。FLEM-DEM解析では、上部と下部の値はほぼ同一であるが、側方に対する比でみると1:1.6と実験とは差異がみられる。これは、後述の地盤内応力状態とも関連性があると思われる。

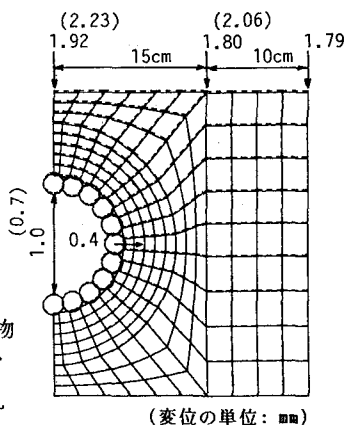


図6 地表面沈下と内空変位

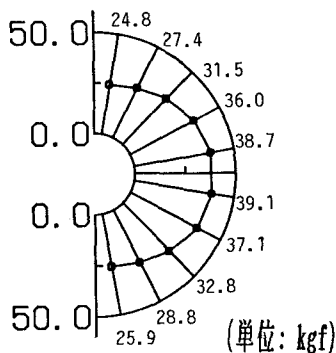


図7 導坑間接触圧の解析

図8に導坑周辺の地盤の応力状態を主応力図として示した。主応力は各要素の重心位置における値を表示しており、併記されている値はトンネル上部、側方部、下部において導坑に作用する土圧としてトンネル中心方向に作用する要素内応力成分を別途求めたものである。これを、その深度における有効土被り圧で正規化して実験結果と比較したものが図9である。図中には解

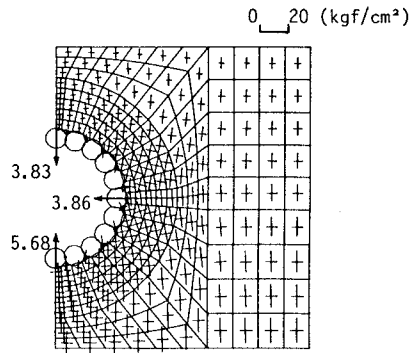


図8 主応力図

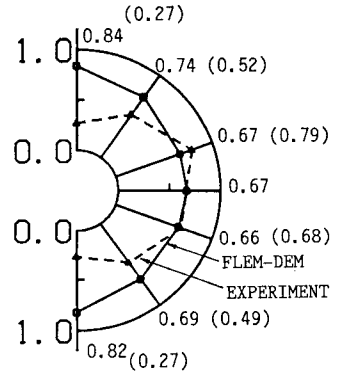


図9 正規化土圧分布の解析

析値と()内に図4の平均値を示した。解析結果は上部、下部で0.8程度、側方部で0.6程度の値を示して有効土被り圧に対してやや小さめの値となっている。実験・解析両結果は側方でよく一致しているが、上・下部では大差を生じている。すでに、DEM解析によるトンネル掘削に伴う支保特性曲線の再現と周辺地盤の挙動に関する考察については報告した。その中で、掘削とともにトンネル周辺地盤に発達するアーチ作用が必要支保圧の軽減、さらにはトンネル安定性に大きく寄与していることを明らかにした[5]。図8をみる限り、側方地盤の鉛直方向土圧が有効土被り圧を越えて、アーチの生成を思わせるような徴候は観察されない。また、予想外に上・下部における土圧低下も少ない。図7に示されるとおり側方部の導坑間接触圧が高いことから、地盤に比べ剛性の高い導坑によって負担されていると解釈するのが妥当であろう。そこで、導坑部の接触剛性係数を変化させて、数例の解析を実施したが、よい対応を得るには至っていない。一方、実験においても導坑部に対する鉛直方向の作用土圧が軽減されているのに対し、変形は横長の楕円状となっており、トンネルへの作用応力-変形の整合性が取れていないことが気になるところである。解析の適用性を実証するためにも、実験条件・測定精度を含めて、今一度詳細な検討を行う必要がある。

4. あとがき

本研究では、FLEM要素領域-DEM要素領域が混在したFLEM-DEM結合解析への拡張を試みるとともに、積層導坑トンネルの遠心模型実験の数値シミュレーションを実施した。その結果、地表面沈下量、内空変位についてはよい対応を示した。一方、導坑間接触圧、周辺土圧の分布の比較では、絶対値としては差異がみられたものの、全体的な傾向は実験結果とよく対応しており、従来のFEM解析に比べ改善がみられた。これは、導坑間の引張力、曲げモーメントの伝達をなくしたことにより変形の自由度が高められたことが主因と考えられる。実験結果との絶対値としての差異の本質的な説明をするに至らなかったが、実験精度、解析の適用性を実証するために重要な問題であるため、今後の検討課題とする。最後に、本研究をまとめるに際し、御協力頂いた清水建設(株)尾上 篤生氏、長谷川 誠氏、風間 広志氏、堀田 洋之氏に謝意を表します。

参考文献 [1]木山英郎他：連続体の大変形解析のための流動要素法(FLEM)の提案，土木学会論文集，No. 439/Ⅲ-17，pp.63-68，1991.12. [2]木山英郎他：カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析，土木学会論文報告集，第333号，1983.5. [3]尾上 篤生他：導坑積み重ねタイプトンネルの部材力と安定性について(その1)，第27回土質工学会研究発表会，pp.2061-2062，1992.6. [4]尾上 篤生他：積層導坑トンネルの施工法と遠心力載荷模型実験，第2回トンネル工学研究発表会講演論文集，1992.10. [5]木山英郎他：DEM解析によるFenner-Pacher型支保特性曲線の再現と考察，土木学会論文集，第394号/Ⅲ-9，pp.37-44，1988.6. [6]新宅 正道他：導坑積み重ねタイプトンネルの部材力と安定性について(その2)，第27回土質工学会研究発表会，pp.2063-2064，1992.6.