

DEM を用いた地下空洞の安定性評価

長崎大学大学院 学生員 ○熊川貴伯 長崎大学工学部 正会員 棚橋由彦
鳥取大学工学部 正会員 西村 強 長崎大学大学院 学生員 志田泰崇

1. はじめに

地下における浅所空洞と大深度空洞では、初期応力が大きく異なり、その崩壊メカニズムと安定性評価も自ずと異なったものとなる。したがって、深度による応力集中度の相違や破壊モードの相違を考慮した新しい設計法の確立が必要となる。本報告では、地盤条件、空洞断面形状、空洞位置等の変化による破壊モードの相違の基礎的な情報入手を目的として、重力場における不連続性岩盤内の空洞掘削を個別要素法(Distinct Element Method, 以下 DEM)を用いてシミュレートする。

2. 解析方法の概要¹⁾

解析モデルを図 1 に示す。地盤要素は、多角形要素(最大 4 角形)を用い、主応力方向と不連続面の卓越方向に注目し、不連続面の方向を一方方向に絞り、その傾きを α 、不連続面の間隔 d を一定として配列したものを模型地盤とした。すなわち、地盤要素の最大・最小主応力が、鉛直と水平さらに、中間主応力が空洞軸に一致するとして不連続面の卓越方向を回転させることで不連続性岩盤の挙動を把握する。用いた要素定数等を表 1 に示す。表 1 中の*は、運動方程式の解の収束性から決定される。図 1 の中央下の多角形要素(幅 B 、高さ a)が、空洞掘削部であって、初期状態の要素剛性は他の地盤要素のそれと等しく K_0 とする。解析手順は、step0、および、1~6 の 7 段階を標準とする。step0 は、各配列の地盤要素を側方剛板を固定とした、 K_0 状態で静止状態を得る。これが、掘削前の初期応力状態を与えることになる。step1~6 は掘削過程を表わし、上記した側方固定剛板とした K_0 状態で、空洞要素の自重を 20% 刻みに 5 段階で 0 まで減少させ、その後さらに 1/10 低下させる。それと同時に空洞要素の剛性も 0.5, 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001, 0.00001(K_0)と 6 段階で指数関数的に減少させる。計算はそれぞれの段階で完全な静止状態を求めて、そのときの要素間の接触変位を継いで、次段階に進める方法を採用する。

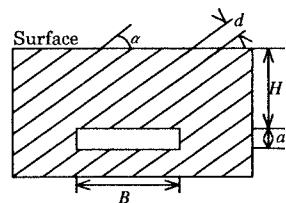


図 1 解析モデル

表 1 DEM 要素定数¹⁾

要素	
密度, ρ (g/cm ³)	2.65
ヤング率, E (kgf/cm ²)	750
ポアソン比, ν	0.3
要素間	
$K_n / \rho g$ (cm ²)	3.84×10^4
$\eta_n / \rho g$ (cm ² s)	$2\sqrt{m \cdot K_n / \rho g}^*$
$K_s / \rho g$ (cm ²)	3.84×10^4
$\eta_s / \rho g$ (cm ² s)	$2\sqrt{m \cdot K_s / \rho g}^*$
Δt (s)	1.0×10^{-4}
μ	0.424

3. 解析モデルの検討¹⁾

空洞要素の剛性変化と接触定数の設定を行う。掘削の進行における剛性の変化を表わすのに、空洞要素の重量の低減率(Δ)と剛性の低減率(n)でモデル化している。図 2 は剛性の異なる多角柱の接触変形に関する仮定を表わしている。A が通常剛性を有する地盤要素、B が剛性の低下した空洞要素を表わす。図 2(a)の AA における接触剛性定数を K_{AA} 、(b)の BB 接触における接触剛性定数を K_{BB} とすれば、それらは、A 要素、B 要素それぞれの剛性に比例する。仮定は、(c)の AB 接触において、それぞれの要素剛性に応じた接触変形を示し、接触変位量が

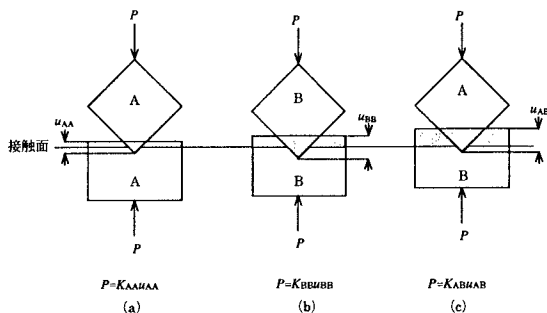


図 2 剛性の異なる多角柱の接触変形の仮定

$u_{AB} = u_{AA}/2 + u_{BB}/2$ で表わされるものとする。このとき、AB 接触の接触剛性定数を K_{AB} とおけば、 $P = K_{AA}u_{AA} = K_{BB}u_{BB} = K_{AB}u_{AB}$ が成立することから、 K_{AB} が次式のように求められる。 $K_{AB} = 2K_{AA}K_{BB}/(K_{AA} + K_{BB})$ (1)

そこで、地盤の接触剛性定数を $K_{AA} = K_0$ とし、 K_{BB} を n を用いて表わすと、 $K_{BB} = K_0(1-n)$ であるから周辺地盤との接触剛性定数 K_{AB} は、式(1)より

$K_{AB} = 2K_0(1-n)/(2-n)$ のように表わされる。このときの接触粘性定数 η_{AB} は、従来どおり運動方程式の解

の収束性から $\eta = 2\sqrt{mK_{AB}}$ の関係で定める。以上をまとめて、DEM 解析に必要な接触定数の計算式を示すと表 2 のようになる。実

際の計算では K, η をそれぞれ ρg で相対化した K', η' の形で用いる。また、掘削進行を表わす step0 から step6 までに採用した Δ, n の値と、それに対する接触定数 K', η' の値を示すと表 3 のようになる。

4. 解析結果

表 4 に解析条件を示す。変形図の一例として $\alpha = 60(\text{deg.})$ を図 3 に示し、 $(B, H) = (15\text{m}, 15\text{m})$ の地表面沈下量を図 4 に示す。図 4 より、 $\alpha = 45, 60(\text{deg.})$ で沈下は生じず、 $\alpha = 30(\text{deg.})$ で最大 15cm 沈下を生じた。配列と地盤内応力の関係を考えると、水平応力伝達の卓越した受動状態を表わす $\alpha = 30(\text{deg.})$ が不安定な地盤を表わし、さらに、鉛直応力伝達が卓越した主動状態を表わす $\alpha = 60(\text{deg.})$ は安定な地盤であると考えられる。また、 $\alpha = 45(\text{deg.})$ はその中間状態を表わす。

5. おわりに

今回示した解析モデルで空洞掘削時の挙動を DEM を用いて解析することができた。本報告で示した解析結果より地下空洞の安定性評価を行うことは安易であるが、地下空洞の安定性は不連続面の方向を一方に絞った場合 α に影響を受けると考えられる。今後は、 α と地表面および天端沈下量の関係や沈下形態や破壊モードの把握が必要となる。

参考文献 1) 木山英郎・藤村尚・西村強: DEM 解析による Fenner-Pacher 型支保特性曲線の実現と考察, 土木学会論文報告集, 第 394 号, pp.37-44, 1988.

表 2 接触定数の計算式

	AA	AB
ρ	ρ_0	ρ_0
m	m_0	m_0
K	K_0	$K_0 \cdot 2(1-n)/(2-n)$
η	$\eta_0 (= 2\sqrt{m_0 K_0})$	$\eta_0 \cdot \sqrt{2(1-n)/(2-n)}$
K'	$K'_0 (= K_0/\rho_0 g)$	$K'_0 \cdot 2(1-n)/(2-n)$
η'	$\eta'_0 (= \eta_0/\rho_0 g)$	$\eta'_0 \cdot \sqrt{2(1-n)/(2-n)}$

表 3 掘削・支保 step と K', η' の設定

	(ρ)	(K)	AA		AB	
	Δ	n	K'_{AA}/K'_0	η'_{AA}/η'_0	K'_{AB}/K'_0	η'_{AB}/η'_0
step0	0	0	1.0	1.0	1.0	1.0
step1	0.2	0.5	1.0	1.0	1/1.5	$\sqrt{1/1.5}$
step2	0.4	0.9	1.0	1.0	2/11	$\sqrt{2/11}$
step3	0.6	0.99	1.0	1.0	2/101	$\sqrt{2/101}$
step4	0.8	0.999	1.0	1.0	2/1001	$\sqrt{2/1001}$
step5	0.99	0.9999	1.0	1.0	2/10001	$\sqrt{2/10001}$
step6	0.999	0.99999	1.0	1.0	2/100001	$\sqrt{2/100001}$

表 4 解析条件

空洞幅, $B(\text{m})$	15
空洞深度, $H(\text{m})$	5, 10, 15, 20
空洞高さ, $a(\text{m})$	2
不連続面の間隔, $d(\text{m})$	2
傾き, $\alpha(\text{deg.})$	30, 45, 60

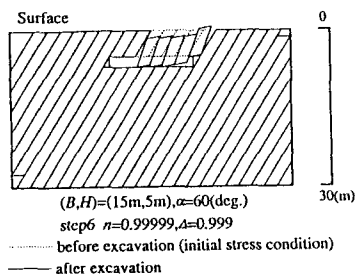


図 3 DEM 解析結果 ($\alpha = 60(\text{deg.})$)

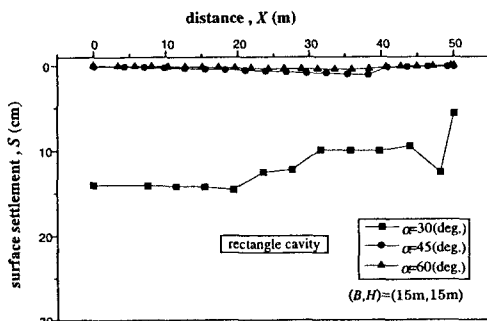


図 4 地表面沈下量