

(31) 有限要素法による円孔周辺地山の応力解析と模型実験結果の比較

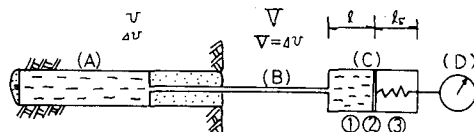
宮崎大学 工学部 教授 村上良丸 (工博)

同 助教授 中沢隆雄 (工修)

同 助手 ○瀬崎満弘 (工修)

要旨

一軸圧縮応力場の均質等方性地山に、円孔を開けたとき、その周辺地山内に生じる応力の再配分状態を、2次元有限要素モデルで数学的に解析した。その結果を、シラス土で実施したトンネル模型の破壊実験結果と対比し、地山内の体積ひずみの変化測定が、当該地山の安定度判定に有効であることを明らかにした。本報告は、その研究の一部である。



1. 体積ひずみの測定原理

筆者らの考案した体積ひずみの変化量測定計器

(バリミュー・セル)は、図-1に示すように、ボーリング孔内に埋設して地山に密着させるゴム製セル部(A)と、そのセル内に封入される液を、耐圧チューブ(B)を通して、大気中に置いた金属筒(C)内の

(A) ゴム製セル (B) 可撓耐圧チューブ
(C) 金属筒(断面積A) (D) バネひずみ(応力)の検出計
①不凍液 ②移動隔壁 ③バネ

図-1 バリミューセルの原理説明図

バネで圧する装置からなっている。すなわち金属筒内のバネで支えられる可動隔壁が、同筒液室を加圧することで、セル部に力を伝えるので、バランスしていたセル部地圧が増加すれば、金属筒内のバネ長 l_s は減り、逆の場合は地圧の減少を意味する。

いま、ボーリング孔内にセットした当初のセル部体積を V 、金属筒液室(平均断面積A、液室長 l)の体積を $V=A \cdot l$ とし、 $V=nV$ の関係があったとしよう。このセル埋設地点の地山に作用している鉛直圧を P_v (地表からの深さHと地山の単位体積重量 γ に関係し、 $P_v=\gamma H$)、水平圧を P_h (その地殻に作用している残留水平構造力)とすれば、この地山の平均応力 σ_m は：

$$\sigma_m = P_m = (P_v + 2 P_h) / 3.0$$

で与えられる。この σ_m が、付近の掘さくとか、地表荷重の増加などの影響で、 $\Delta \sigma_m$ だけ変化すると、対応してセル体積 V にも ΔV だけの変化が生じる。そして、 $\Delta V/V = e$ を〈体積ひずみ〉、 $K = \Delta \sigma_m / e$ を〈体積係数〉とよんでいる。

セル体積の変化 ΔV は、金属筒液室の体積 V に、 ΔV の変化を起し、 $\Delta V = \Delta V$ である。この時、金属筒液室の初期長 l に、 Δl だけの変化があったとすれば、(A=液室の平均断面積)

$$\Delta V = A \cdot \Delta l (= \Delta V), \text{ かつ } V = A \cdot l (= nV)$$

につき、

$$\Delta V / V = A \cdot \Delta l / A \cdot l = \Delta l / l = \epsilon, \text{ かつ } e = \Delta V / V = \Delta V / (V/n) = n (\Delta V / V) = n \cdot \epsilon$$

また、セル・セット時のバネ長 l_s に生じる変化量も Δl につき、バネの線ひずみ ϵ_s は、

$$\epsilon_s = \Delta l / l_s = (\Delta l / l) \cdot (l / l_s) = \epsilon (l / l_s) = e / n' \cdot (l / l_s) = n' \cdot e \quad \text{ここに } n' = n (l / l_s)$$

いま、バネ定数を R とすれば、 ϵ_s によって生じるバネ応力の変化量 $\Delta \sigma_m'$ は、

$$\Delta \sigma_m' = R \cdot \epsilon_s = R \cdot n' \cdot e$$

となる。この $\Delta \sigma_m'$ を〈セル応力〉と呼ぶことにする。

$\Delta \sigma_m'$ と、セル埋設部地山の平均応力に生じる変化量 $\Delta \sigma_m (= K \cdot e)$ の間には、

$$\Delta\sigma_m = \epsilon \cdot \eta' \cdot e = \epsilon \cdot \eta' (\Delta\sigma_m / K) = (\epsilon \eta' / K) \cdot \Delta\sigma_m \quad \text{ここに } \beta = \epsilon \eta' / K$$

が成立し、セル応力の変化 $\Delta\sigma_m$ は、地山に生じる平均応力の変化 $\Delta\sigma_m$ に比例することを示す。したがって、 $\Delta\sigma_m$ の経時観測から、セル・セット箇所地山の安定ないし局部破壊発生のカッチが可能となり、その進行状況から、坑道断面や切土斜面の安定度合の推定ができるであろう。

2. 模型トンネルでの実験結果

300cm×300cm×30cmの平置型鋼枠内に試料土を詰め、一つの可動側壁 (300cm×30cm=0.9m²) からジャッキで加圧 (最大300t/0.9m²≒33 kg/cm²)、所望深度の状態 P_0 まで締固めた後、前述のパリミュセルをセットし、上蓋中央のハッチをあけて、直径70cm (深さ30cm) の円孔を素早く掘り、それを2次元のトンネル断面模型と考え、ジャッキ載荷圧の増加に伴う孔壁の変位とセル応力の変化を測定する多数の室内実験を行なった。その代表例として図-2に、シラス土を、 $P_0=5.5$ kg/cm²まで締固めたケースで、 $1.5r=1.5 \times (0.7/2) = 0.525$ mの円周上にセットした合計8個のセル応力の変化量 $\Delta\sigma_m$ と載荷圧 P の関係を図示した。この図から、

i) 与圧 $P_0=5.5$ kg/cm² の下で開孔すると、 $1.5r$ 上のセル応力はすべて低下し、この部分が「ゆるんだ」ことを示す、

ii) 開孔後のジャッキ圧の増加に対しては、インバート中央の⑤点 (無覆工断面では、鉛直載荷重に殆ど無影響) を除いて、セル応力の変化量 $\Delta\sigma_m$ は増加後、低下する。この反転時に、対応する孔壁にクラックないしはく落が発生し、さらに進んで、 $\Delta\sigma_m$ が流れ状態になった所では、孔壁の内方変位が著しい。

因みに一軸圧縮場 ($P_v=P$, $P_h=0$) の均質等方性地山に、半径 r の円孔をあけたときの半径方向応力 σ_r と、それに直角方向応力 σ_t の、円孔中心からの距離に対応する変化は、理論的に解析されており、(Terzaghi & Richart, 1952)、図-3のように示せる。

3. 有限要素法による数値解析

上述の室内実験を対象に、有限要素法(FEM)による数値解析を試みた。その際に採用した主なる基本仮定は、①試料土と鋼枠の間のマサツカと付着力はすべて無視して、2次元問題として扱い、②直径70cmで開孔したテスト・モデルを、図-4に示すような374個の三角形要素 (節点数221) に分割し、境界支持条件を図示のように仮定して、③載荷ジャッキ圧 P の増加に伴って発生するセル・セット位置要素の主応力 (σ_1 , σ_2) の大きさと方向を算出し、 P に対応する平均応力 $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ を求めた。

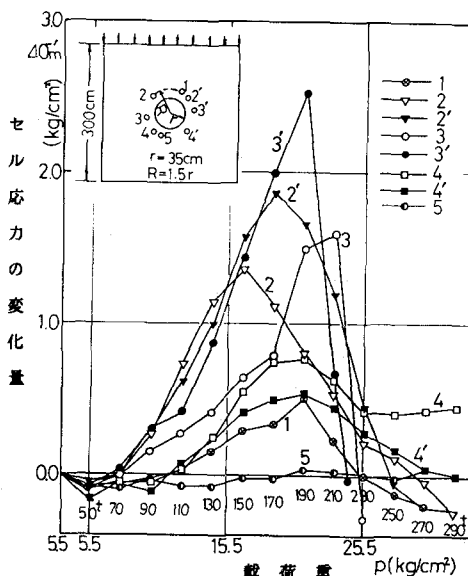


図-2 無覆工シラス土ケースの開孔周辺部地山のセル応力変化量 $\Delta\sigma_m$ と載荷圧 p の関係

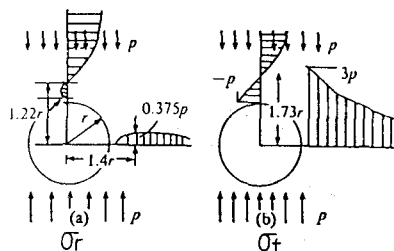


図-3 鉛直圧縮 (P) 場円孔の鉛直直径および水平直径上の応力分布

その際、任意要素の σ_2 が、試料土の引張強度 σ_t に達すると、そこに引張クラックが発生して、それ以後の p の増加に対しては、内部マサツ角 $\phi=0$ となり、低下した内部粘着力 C_p のみが、流動化に抵抗すると考えた。また試料土の C と ϕ できまるCoulomb線 $\tau=C+\sigma\tan\phi$ に接するMohr円となる (σ_1, σ_2) をもつ要素には、すべり破壊による局所降伏が起り、 C は C_p に落ちるが、 ϕ は一定と仮定することにより、 C_p を定めた。

この方法を与圧 $p_o=5.5\text{ kg/cm}^2$ で締固め、一軸圧縮強度 $\sigma_u=25\text{ kg/cm}^2$ を得た前述のシラス土試料での実験ケースに適用して見よう。このテストでは、開孔後のジャッキ圧増加と同時に、開孔クラウンに明瞭な引張クラックが発生したので引張強度 $\sigma_t=-5\text{ kg/cm}^2$ とし、 $(-5\text{ kg/cm}^2, 0)$ と $(0, 25\text{ kg/cm}^2)$ の2つのMohr円をかき(図-5)、その共通接線から求めた $C=5.5\text{ kg/cm}^2$ 、 $\phi=40^\circ$ をこの試料土の当初状態とした。そして、クラウンでの引張クラックの発生によって、開孔後の試料土の C は、 C_p に低下すると考え、 $(2C_p, 25\text{ kg/cm}^2)$ を直径とするMohr円に接する $\phi=40^\circ$ のCoulomb線 $\tau'=C_p+\sigma\tan 40^\circ$ と、 $(0, 2C_p)$ を直径とするMohr円に接する $\tau''=C_p$ 線から、 $C_p=1.8\text{ kg/cm}^2$ を求めた。かくして、開孔後のジャッキ載荷圧 p の上昇による試料土の局所破壊条件を、 $\sigma_m=(\sigma_1+\sigma_2)/2$ のMohr円が、 $\tau'=1.8+\sigma\tan 40^\circ$ に接することで与え、その局所破壊発生後は、 ϕ が 40° から 0° に向けて低下を続け、 $C_p=\tau''=1.8\text{ kg/cm}^2$ のとき、完全に流動化すると考えた。また任意要素の平均応力 σ_m と体積ひずみ e との間には、 σ - e カーブと似た図-6のような関係を仮定した。

(以上の条件で解析した結果とその考察は、発表会で述べることにする。)

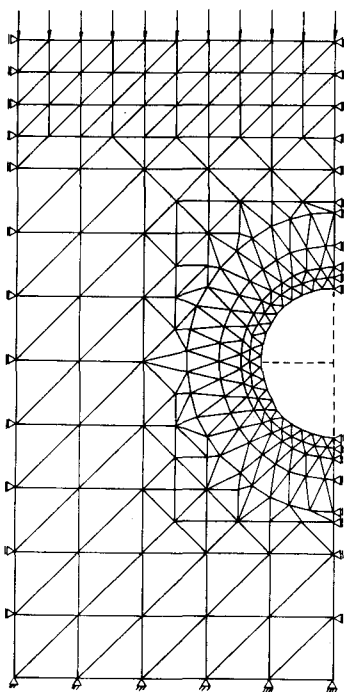


図-4 解析に用いた有限要素モデル

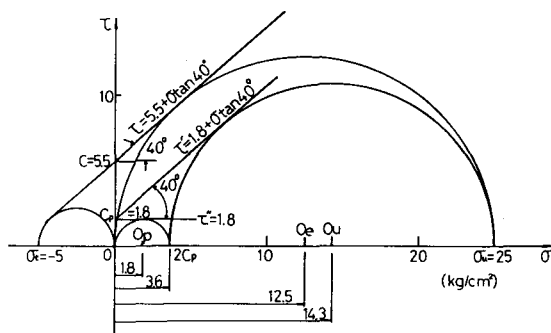


図-5 Mohr-Coulombの破壊基準

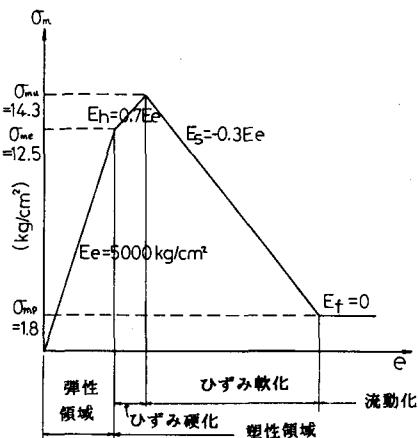


図-6 σ_m - e カーブ

- (31) A stress-analysis about a circular-hole by the finite element method and a comparison of its results with a model-test in laboratory

Prof.Dr.Yoshimaru Murakami,
Associate Prof.M.Takao Nakazawa and
Assist.M.Mitsuhiro Sezaki;
Civil Eng.Dep., Miyazaki University

When a circular hole has been excavated in a homogeneous and isotropic rock mass under a unidirectional (vertical) field of compression, the stresses around the circular-hole have been analyzed by the finite element method. In this analysis, we have adopted the law of Coulomb-Mohr for a local yield criterion of element. We compared this result with the corresponding model-test that was carried out in laboratory, and in this paper, we will reveal the fact that the measurement of Valimue-Cell-Stresses which are based on volumetric strains is very usefull for the judgement of ground stability.