

(18) 孔内載荷による亀裂の伸展と孔まわりの応力分布の変化

日本国土開発 正会員 菊 地 慎 二
正会員 ○ 中 村 哲 也
山口大学工学部 正会員 水 田 義 明
正会員 中 川 浩 二

1. はじめに

地盤の初期応力の測定は、現在までにいろいろな測定方法が提案され、試みられている。我が国において菊地らが実施しているチューブフラクチャリング法はボアホール孔内でウレタンチューブを介して孔壁に等圧載荷し、孔壁にて2方向の亀裂を発生させるものである。この方法によれば地盤の初期主応力の大きさは、それぞれの亀裂が発生した時の載荷圧から算定され、それらの方向は4方向の孔径変化を計測することによって定められる。地盤に初期応力が作用している状態でボアホールが掘削されると孔壁周辺の応力は変化し、接線方向に応力が集中する。この状態でボアホール内から圧力を作用させると接線応力は減少し（圧縮が正）、載荷圧の増加に伴い、初期応力に起因する応力集中が小さい箇所の接線応力は引張応力となり、最も大きい引張応力が地盤の引張強度を越えると孔壁に亀裂が発生する。したがって、はじめは水压破碎法におけるのと同じく初期地圧の最大主応力方向に亀裂が発生するが、この方法では亀裂内に流体が浸透しないので、亀裂は大きくは伸展せず、さらに載荷圧を増加させると孔壁の接線応力分布が変化して最小主応力方向にも引張亀裂が発生するようになる。

そこで、この応力測定方法による亀裂の発生および伸展過程を検討する一環として、主応力方向とボアホール軸が傾斜している場合について3次元応力解析を行うこととし、まず解析システムを確立した。

応力解析には、境界要素法を用いる。また応力不連続法（仮想応力法）に加えて、亀裂を取り扱うことのできる変位不連続法¹⁾を新しく取り入れる。すなわち、ボアホール境界面は応力不連続法（SDM）により、亀裂面は変位不連続法（DDM）によってモデル化され、それぞれの特長を生かした解析が行われる。また、岩盤主応力はボアホール軸と任意に傾斜しうが、ボアホール軸およびこれに沿う縦亀裂は、ボアホール軸方向に十分長いものとした準3次元モデルが取り扱われる。

2. 応力測定方法

チューブフラクチャリング法による応力測定は、あらかじめ掘削されたボアホール孔内にS-100とよばれる孔内載荷試験装置を挿入し、柔軟な高压チューブを介して油圧により等圧載荷する²⁾。S-100プローブ内には、45°毎にLVDTが設置され、孔径の変化がそれぞれの方向で測定され、載荷圧とともに自動的に記録される。

Fig. 1に示すように、載荷圧Pを増加させると、まず最初に $\theta = 0$ で接線応力が地盤の引張強度Tを越えこの位置で孔壁に引張亀裂が発生し、孔壁の応力分布は変化する。さらに載荷圧を増加させると $\theta = \pi/2$ の位置でも引張亀裂が発生するようになる。この時の孔壁の接線応力分布の変化を模式的に表したものを、Fig. 1に示す。①は初期状態（P=0）を表し、載荷圧を増加させると②、③で $\theta = 0$ の方向に亀裂が発生し、 $\sigma_\theta = 0$ となる。さらに内圧を増加させると、亀裂の伸展に伴いその影響が拡がる。この影響が小さい

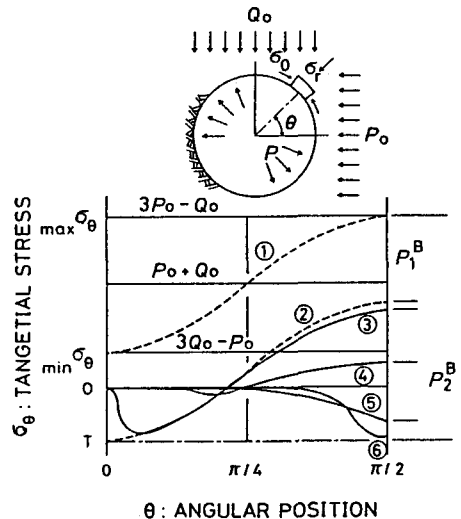


Fig. 1 Changing process of angular distribution pattern of tangential stress.

$\theta = \pi/2$ では引張応力が増加し、⑥に示すようにこの位置でも地盤の引張強度を越えるようになり、引張亀裂が発生する。地盤の初期応力は、地盤の引張強度を $T(>0)$ とすれば、この2つの亀裂が発生した時の載荷圧 (P_1^B , P_2^B) から次式を用いて計算される。

$$P_1^B = 3Q_0 - P_0 + T \quad (P_0 \geq Q_0, \text{圧縮が正}) \quad (1)$$

$$P_2^B = 3P_0 - Q_0 + T \quad (2)$$

地盤は一般に不均質であって亀裂が生じた箇所の引張強度を正確に決定することは難しい。そこで、実際には、まず大きな載荷圧で一旦亀裂を発生させ、 $T=0$ の状態にする。つぎに載荷を繰り返して行い、この亀裂が再び開き始める時の載荷圧から算定される。

3. 組み合わせ解析の手順

岩盤主応力の方向がボアホール軸に対して傾斜する場合には、最小接線応力（最大引張応力）が作用する方向はボアホール軸に対して垂直ではなくなるので、厳密には上式は成立しない。しかし、この場合でも、せん断成分（主応力差）がとくに大きかったり天然の節理を開いたりしない限り、少なくとも最初に発生する亀裂はボアホール軸に沿ってできることが確かめられている³⁾。そこで解析は3次元応力場においてボアホール軸に沿って十分長い縦亀裂が生じている場合について行う。ボアホールの境界面は、 n 個に分割された応力不連続法による要素で表される。一方、内圧の増大による亀裂の伸展をモデル化するために、最初にできる亀裂に対しては変位不連続法による要素を新しく導入し、これらと応力不連続法による要素とを組み合わせる。

応力不連続法による長空洞モデルの解析手法はBradyによって詳しく示されている⁴⁾のでここでは省略する。変位不連続法による長空洞（または長亀裂）モデルの解析手法を概説すればつぎのようである。ある弾性体内に x 方向の長さ $2a$ 、 y 方向の長さ $2b$ の長方形要素の全域にわたって、Fig. 2に示すような一様な三方向の変位不連続 D_x 、 D_y および D_z があるとき、要素の中心を原点とする座標において、点 (x, y, z) に生ずる6つの応力成分は弾性体の剛性率 G と x, y, z, D_x, D_y および D_z の関数として与えられ、たとえば σ_x は次式で表される⁵⁾。

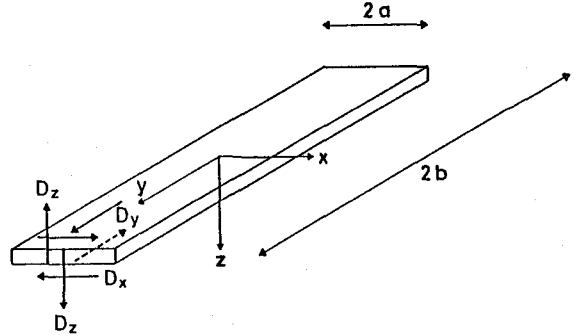


Fig. 2
Uniformly distributed transverse (D_x), longitudinal (D_y) and normal (D_z) strip displacement discontinuities ($b=\infty$).

$$\sigma_x = G/4\pi(1-\nu) \cdot \{ (2f_{xz} - z f_{xxx}) D_x + (2\nu f_{yz} - z f_{xyy}) D_y + [f_{zz} + (1-2\nu)f_{yy} - z f_{xxz}] D_z \} \quad (3)$$

上式中の f_{xz} など は次式で表される f の導関数であり、添字はその変数で偏微分することを示す。

$$\begin{aligned} f(x, y, z) &= \int_{-a}^a \int_{-b}^b \{ (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2 \}^{-1/2} d\xi d\eta \\ &= -(x-a) \log(r_1 - y + b) / (r_4 - y - b) + (x+a) \log(r_2 - y + b) / (r_3 - y - b) \\ &\quad - (y-b) \log(r_1 - x + a) / (r_2 - x - a) + (y+b) \log(r_4 - x + a) / (r_3 - x - a) \\ &\quad + 2|z| \{ \tan^{-1}(r_1 - x + a - y + b) / |z| - \tan^{-1}(r_2 - x - a - y - b) / |z| \\ &\quad + \tan^{-1}(r_3 - x - a - y - b) / |z| - \tan^{-1}(r_4 - x + a - y - b) / |z| \} \end{aligned} \quad (4)$$

ただし r_1, r_2, r_3 および r_4 は点 (x, y, z) と長方形要素の4つの頂点との距離を表す。

さて、いま各要素とも y 方向に無限に長い ($b=\infty$) ものとするれば、

$$\begin{aligned} f_x &= \log\{ (x-a)^2 + z^2 \} / \{ (x+a)^2 + z^2 \}, \quad f_y = 0, \\ f_z &= 2\{ \tan^{-1}(x-a)/z - \tan^{-1}(x+a)/z \} \end{aligned} \quad (5)$$

したがって、この場合、点(x, y, z)の応力成分はたとえば次式で与えられる。

$$\sigma_x = G/4\pi(1-\nu)\{(2f_{xz}-zf_{xxx})D_x + (f_{zz}-zf_{xzz})D_z\} \quad (6)$$

要素jの変位不連続 D_{jx} および D_{jz} によって要素iの中心に誘起される応力が上式によって得られるので、すべての変位不連続要素($j=1\sim m$)の変位不連続によって要素iの中心に誘起される応力はたとえば次式で表される。

$$\sigma_z^i = \sum_{j=1}^m (A_{xi}^{ij}D_{jx} + A_{zi}^{ij}D_{jz}) \quad (i=1\sim m) \quad (7)$$

一方、応力不連続要素に対しても、同様にして、各要素への仮想載荷 q_x, q_y, q_z によって各要素に生ずる応力が求まるが、両方の要素を組み合わせた場合には、応力不連続要素の数をnとするととき、(8)式と(9)式の $2(m+n)$ 元1次方程式および(10)式の $(m+n)$ 元1次方程式を解けばよい。

$$\sigma_z^i = \sum_{j=1}^m (A_{xi}^{ij}D_{jx} + A_{zi}^{ij}D_{jz}) + \sum_{j=m+1}^{m+n} (E_{xi}^{ij}q_{xj} + E_{zi}^{ij}q_{zj}) = -P_z^i + P \quad (8)$$

$$\tau_{zx}^i = \sum_{j=1}^m (B_{xi}^{ij}D_{jx} + B_{zi}^{ij}D_{jz}) + \sum_{j=m+1}^{m+n} (F_{xi}^{ij}q_{xj} + F_{zi}^{ij}q_{zj}) = -P_{zx}^i \quad (9)$$

$$\tau_{yz}^i = \sum_{j=1}^m C_{yi}^{ij}D_{yj} + \sum_{j=m+1}^{m+n} G_{yi}^{ij}q_{yj} = -P_{yz}^i \quad (i=1\sim m+n) \quad (10)$$

上式のPは内圧としての流体圧を表す。また $P_z^i, P_{zx}^i, P_{yz}^i$ はボアホールが掘削される以前に初期応力によって各要素の境界面に生じていた応力成分を表す。

4. 変位不連続解析のプログラムチェック

Fig. 3に示すような初期応力状態にY軸に沿ったボアホールが掘削された場合について変位不連続法による解析結果と理論解の比較を行う。ボアホールを72の要素で近似し、ボアソン比を0.25とした。初期応力はXY面でX軸から45°傾いた方向だけに P_1 が作用するものとする。

Fig. 4はY軸上の各応力成分の応力分布の計算結果を示す。また、この図には理論解⁶⁾が実線で示されているが両者の非常によい一致が見られる。

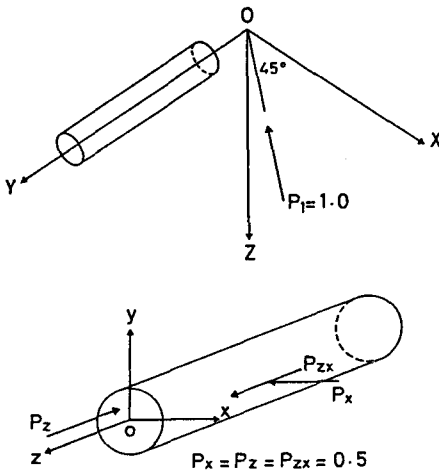


Fig. 3 The original rock stress state employed in program check.

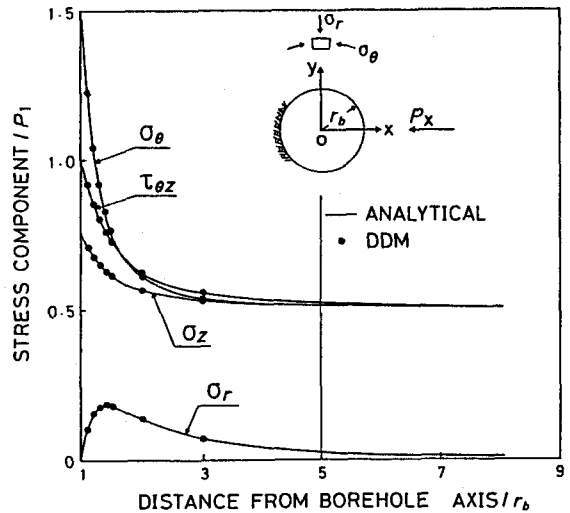


Fig. 4 Radial distribution of stress components calculated by DDM.

5. 組み合わせ解析の結果

前述した初期応力状態において、ボアホール孔壁に沿って縦亀裂が発生した場合の応力分布を求める。亀裂はFig. 5に示すようにx軸に沿って発生するものと仮定する。亀裂の長さdはひとまずボアホールの半径 r_b と等しいものとした。

ボアホール境界面は72個の応力不連続要素から成るが亀裂のモデル化は応力不連続要素ではできないので亀裂面は両側で20個の変位不連続要素からなるものとした。

解析から得られたボアホール孔壁の応力分布をFig. 6に示す。横軸はx軸からの角度を表し、縦軸は接線応力 σ_θ を示す。この図には亀裂がない場合の孔壁の応力分布の理論解を実線で示す。亀裂がある $\theta = 0$ においては当然 $\sigma_\theta = 0$ となり、その近傍もこれに近いものとなる筈であるが、亀裂近く($\theta \leq 7.5$)の応力不連続要素の接線応力は正しく計算されていないと思われるので、これらは表示されていない。亀裂の影響は θ が大きくなるほど少なくなるが $\theta = \pi/2$ においても若干の応力集中増加が見られる。

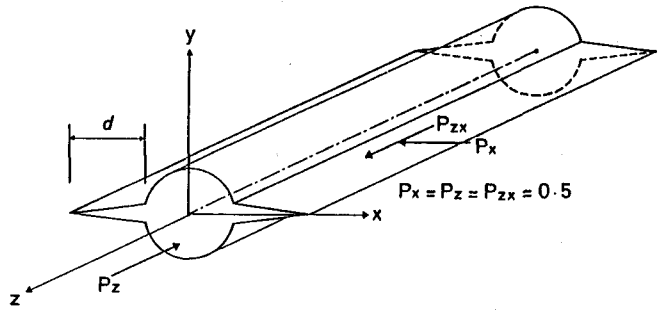


Fig. 5 Modelling of borehole boundary with a pair of primary longitudinal fracture.

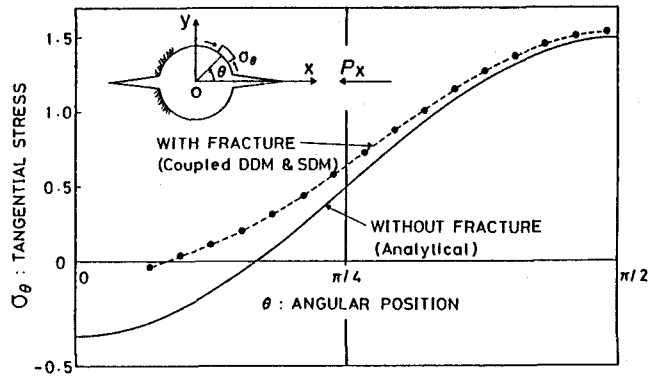


Fig. 6 Angular distributions of tangential stress calculated by the coupled DDM and SDM.

6. おわりに

開発された解析システムは準3次元解析を行うものであるが、もちろん2次元解析を行うこともできる。そこで今後の課題として、まず一つの主応力がボアホール軸に平行であるとした場合の本測定方法の適用性について検討する。すなわち、応力場に対する S_1 の大きさや内圧の増大に伴う亀裂の伸展に関連して P_0/Q_0 比の適用範囲を調べる。つぎに内圧を作用させる3次元解析により、せん断応力成分(主応力差とボアホール軸に対する傾きに関係する)が上記の適用範囲に及ぼす影響を把握する。

なお、解析システムの開発にあたり、数式の誘導などは山口大学工学部応用数学講座の栗山 憲助教授に御指導頂いた。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) S. L. Crouch and A. M. Starfield, George Allen & Unwin (1983).
- 2) 菊地慎二, 中村哲也, 世良田幸正, 第16回岩盤力学シンポジウム講演論文集, 155-159 (1984).
- 3) Y. Mizuta et al., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., in press.
- 4) B. H. G. Brady and J. W. Bray, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 15, 21-28 (1978).
- 5) 水田義明, 李 喜根, 水曜会誌第20巻第2号, 146-154 (1984).
- 6) Y. Hiramatsu and Y. Oka, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 5, 337-353 (1968).

- (18) The fracture growth and changing process of stress distribution on the borehole wall under increase of loading pressure

Shinji Kikuchi, Tetsuya Nakamura
Japan Development and Construction Co. Ltd.

Yoshiaki Mizuta, Koji Nakagawa
Faculty of Engineering, Yamaguchi Univ.

Abstract

In situ stress measurements using the Tube Fracturing Technique is to load hydraulic pressure on borehole wall through the urethane tube. This pressure will fracture the wall to the direction of the maximum principal stress, then the second crack will occur perpendicular to the first crack with increase of the pressure. In situ stress is calculated theoretically by two loading pressures at time of fracturing.

The authors have developed a computing system for analysis of rock behaviour after initiation of primary fracture under the conditions where the principal stresses are inclined to the borehole axis. And three dimensional stress analyses are going to be carried out by using the system in order to investigate applicability of the stress measurement technique.

Boundary element method may be effective in computation of the problem. However, the model to be solved contains thin cracks along borehole and the Stress Discontinuity Method (SDM), commonly used and called fictitious stress method, is not applicable to crack model. Hence, the Displacement Discontinuity Method (DDM) has been introduced and coupled with the SDM. That is, in modelling, the cracks are represented by the DDM elements with strip displacement discontinuities, while the borehole boundary is divided into the SDM elements with strip load intensities.

In this paper, the procedure of algorithm of the boundary element programs are shown and the DDM program is examined by comparing the computation result with the theoretical solution. After that, the coupled SDM and DDM program is applied to calculate the tangential stresses on the borehole boundary for a model in question and it may be concluded that accurate result can be obtained by the program although the results on the SDM elements adjacent to the DDM elements is meaningless.