

(29) 孔内載荷による亀裂発生に関する実験とその考察

日本国土開発㈱ 正会員 佐久間 彰三
日本国土開発㈱ 正会員 菊地 慎二
日本国土開発㈱ 正会員 中村 哲也
日本国土開発㈱ ○正会員 岡 千裕

An experimental study on fracture initiation
by internal pressurization to borehole boundary

Shozo Sakuma, JDC Corporation
Shinji Kikuchi, JDC Corporation
Tetsuya Nakamura, JDC Corporation
Kazuhiro Oka, JDC Corporation

ABSTRACT

The stressmeter (S-200) has developed to measure the in situ stress according to the Double Fracturing method. This instrument can apply internal pressure to the borehole boundary, and measure diametral deformation simultaneously.

An experiment has been carried out to measure the diametral deformation by S-200, during the process of fracture develop or reopen in the mortar specimen(90cmx90cmx30cm). The specimen was confined by the biaxial against frame and pressurized by the flat jack(Pmax=5.0MPa).

The relationship between internal pressure and diametral deformation has become non-linear after initiating the fracture. During the process of reopening the fracture, the pressure at the starting point of non-linear diametral deformation was measured almost equal to the calculated minimum hoop stress around the borehole boundary.

1. はじめに

各種の地下空洞建設に伴う地山応力測定の必要性から、種々の測定方法が提案されている。筆者らは、地山応力測定法として水圧破碎法の特徴を取り入れた「ダブルフラクチャリング法」を開発した¹⁾。この方法は、柔軟なウレタンパッドを介してボアリング孔壁に流体圧を作用させ、このとき孔壁に発生する亀裂(1次および2次亀裂)の発生位置および発生時の載荷圧力、または亀裂の再開口時の載荷圧力から地山応力の算定を行うものである。

今回、この方法のために開発した地山応力測定システムを使用して、既知の応力状態にある供試体(モルタル 90cm x 90cm x 30cm)に設けたボアリング孔内での載荷試験を行い、「ダブルフラクチャリング法」の1次亀裂の進展および再開口に伴う孔内載荷圧力-孔径変位曲線の変化を検出することを目的に実験を実施したので報告する。

2. 地山応力測定システム

地山応力測定システム概念図を図-1に示す。システムは4つの部分に大別され、ホール孔壁に載荷する孔内載荷試験装置(S-200プローブ)、載荷試験データを収集するためのラップトップコンピュータ、データを解析するためのデスクトップコンピュータ、および孔内載荷圧力を制御する油圧ポンプ部によって構成されている。

S-200の構造図を図-2に示す。孔内載荷は、ウレタンチューブ内に油圧を作用させ、ウレタンチューブ表面で行う($P_{max}=70\text{MPa}$)。孔内載荷圧力 P は装置内の油圧ラインに接続された圧力センサー、孔径変位量 D はウレタンチューブ内にセットされた差動トランス(LVDT)によって直接測定され、孔内載荷圧力-孔径変位曲線(P - D 曲線)を得る。差動トランスは、 45° 毎に4個内蔵されている(1方向の差動トランスをチャンネルと称する)ので、1回の載荷試験で4方向の P - D 曲線を得ることができる。

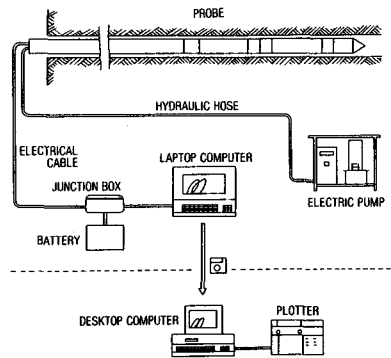


図-1 地山応力測定システム概念図

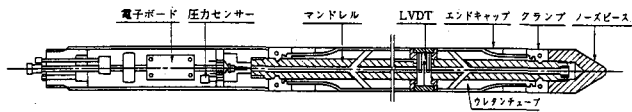
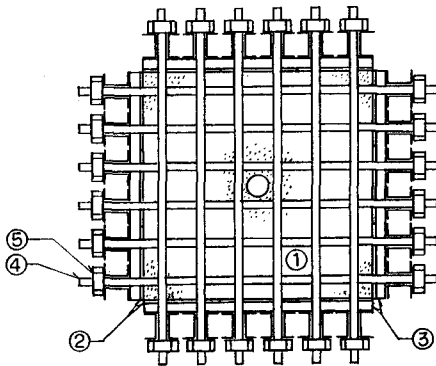


図-2 S-200構造図

3. 実験概要

3.1 反力装置

実験に先立ち反力装置を製作した。装置は、幅90cm×奥行90cm高さ30cmの供試体に対し、水平二方向から最大5MPaの圧縮力載荷が可能な性能を有している。図-3に反力装置の平面図を、図-4に全体構成図を示す。装置は、(1)反力板(高さ30cm長さ90cm、4枚)、(2)反力ロッド(直径36mm、24本)、(3)フラットヘッド(30cm×30cm、12枚)、(4)ポンプ、(5)圧力センサー等から構成されている。フラットヘッドに対する油圧ラインは、X軸、Y軸の2系統になっているので、供試体に異なった2軸の拘束圧を加えることができる。拘束圧は油圧ポンプで載荷し、各系統内の圧力センサーで管理した。



- ① 供試体
- ② フラットヘッド
- ③ 反力板 ($t=40\text{mm}$)
- ④ 反力ロッド ($\phi 36$)
- ⑤ ナット (M-36)

図-3 反力装置平面図

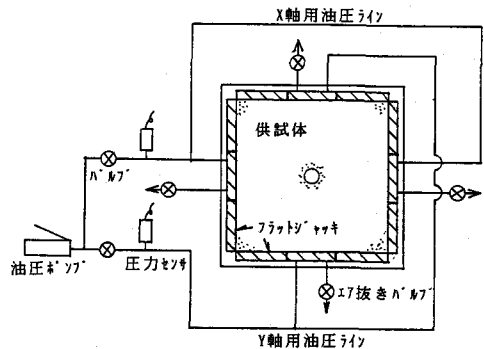
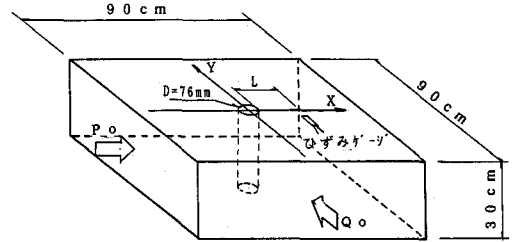


図-4 反力装置全体構成図

3.2 供試体

供試体としてモルタル($\sigma_c=34.9\text{MPa}$ 、 $\sigma_t=2.6\text{MPa}$ 、 $E_c=18.1\text{GPa}$)を用いた。供試体中央には、グイェントビットで削孔した直径76mmのS-200載荷用ホールが貫通している。

図-5に、供試体の概念図を示す。亀裂の進展を確認するために、ひずみゲージが有効であることが報告されており²⁾、供試体表面に貼付した。ひずみゲージは、X軸に平行に、ホールの孔壁から $L/D=0.25$ 、 0.50 、 0.75 、 1.0 、 1.5 、 2.0 、 3.0 (L :孔壁からの距離、 D :ホールの孔径)の位置に貼付した。また、亀裂が波状に進展していく場合、亀裂通過によるひずみゲージの破損を回避するために、X軸から1cm離れた位置に設置した。



$P_0 > Q_0$

図-5 供試体概念図

3.3 実験方法

拘束圧 P_0 、 Q_0 ($P_0 > Q_0$)を加えた供試体のホールの周辺に発生する最小円周方向応力 σ は、図-6(a)に示すA点で最小値 $\sigma_{\theta \min} = 3Q_0 - P_0$ となる。したがって、孔壁に $P = 3Q_0 - P_0 + T$ (T :引張強度)を作用させると、A点位置に1次亀裂が発生する。また、1次亀裂の十分な進展後に再載荷を行うと、圧力と孔径変位の関係は、図-6(b)~(d)の模式図ようになる。 $P = 3Q_0 - P_0$ までは弾性的に挙動し、孔径変位量 ΔD_e は圧力 P に対して線形になるが、更に圧力を上げた場合、亀裂の開口による孔径変位量 ΔD_c が加わり、圧力 P に対して非線形な挙動を示すと考えられる。実験では、 P - D 曲線の、線形から非線形に移行する点を検出することで、 $\sigma_{\theta \min}$ を測定する。

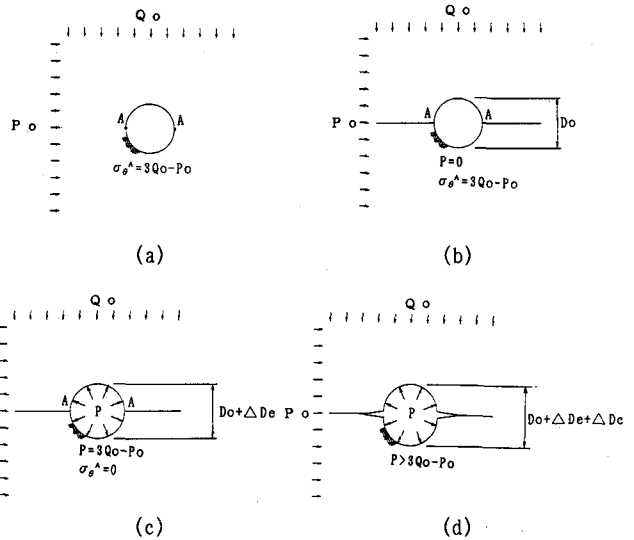


図-6 ホールの周辺模式図

実験は、供試体ホール内にS-2007ロッドを挿入し、Y軸方向に1つの孔径変位測定センサーをセットして孔内載荷試験を行った。載荷速度は、 1.0MPa/min を保つよう制御した。

3.4 実験ケース

実験は、1供試体を用いて表-1に示す3ケースの拘束圧の条件で行った。CASE1は、 $P_{\max}=30\text{MPa}$ まで載荷し、1次亀裂を発生させ十分に進展させた。CASE1の2回目載荷およびCASE2、CASE3において、それぞれの拘束圧で亀裂を再開口させた。

表-1 実験ケース

	拘束圧 (MPa)		$\sigma_{\theta \min} = 3Q_0 - P_0$ (MPa)	Pmax (MPa)	
	P_0	Q_0		1回目	2回目
CASE1	5.0	2.5	2.5	30.0	30.0
CASE2	5.0	3.0	4.0	11.0	----
CASE3	5.0	3.5	5.5	11.0	----

4. 実験結果および考察

4.1 亀裂の進展

拘束圧が $P_0=5.0\text{MPa}$ 、 $Q_0=2.5\text{MPa}$ (CASE1)のケースにおいて、亀裂の発生位置を知る目的で、S-200のウレタン樹脂表面に型取りフィルムを装着した。载荷試験後のトレスを図-7に示す。亀裂は、円周方向応力が最小となるX軸位置にほぼ直線状に入り、供試体の両面に貫通しているのが確認される。

図-8に孔内载荷圧力 P と供試体表面に貼付したひずみゲージによるひずみ ε の関係を示し、亀裂の進展を確認することを試みた。 P の増大に伴う ε の増大は、亀裂前方の領域での亀裂に垂直な方向の引張応力の増大によるものであり、またひずみの減少は亀裂がゲージ端の近傍を通過した後の引張応力の解放のためであると考え、ここではひずみが減少に転じる点を、亀裂がゲージ端部位置を通過した点とした。これによると、亀裂は孔内载荷圧力の増加と共に徐々に進展し、 $P=23.1\text{MPa}$ で3D(228mm)の位置に達しており、 $P_{\max}=30\text{MPa}$ ではさらに長く進展しているものと考えられる。

S-200により得られた P -D曲線を図-9に示す。孔径変位は当初線形に増大し、圧力の上昇と共に徐々に線形をはずれ、非線形な増大傾向を示している。これは、亀裂の進展に伴う亀裂の開口が、孔径変位としてとらえられていることを示している。しかし、孔径変位の非線形挙動は漸増的であり、その開始点(亀裂発生点)を明瞭に検出することはできなかった。

4.2 亀裂の再開口

CASE1の1回目载荷により1次亀裂を3D以上進展させた供試体に対し、各ケースによる拘束圧下で再载荷を行ったときの孔内载荷圧力-孔径変位曲線を図-10~12に示す(CASE1については、2回目载荷部分の拡大図)。図中、供試体を半無限体と考え、孔壁を応力不連続要素、亀裂を変位不連続要素でモデル化した境界要素法を用い、孔内载荷圧力の増加に伴う亀裂の開口を考慮した解析により計算した孔径変位を、孔内载荷圧力との関係でプロットした。

解析では、亀裂の開口に伴う孔径変位の非線形的増加は非常に小さく計算されたが、実験では比較的明瞭に非線形に移行しており、検出された $\sigma_{\theta\min}$ の値は各ケースとも $3Q_0-P_0$ の計算値にはほぼ近い値となった。

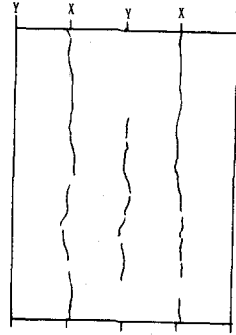


図-7 型取りフィルムトレス

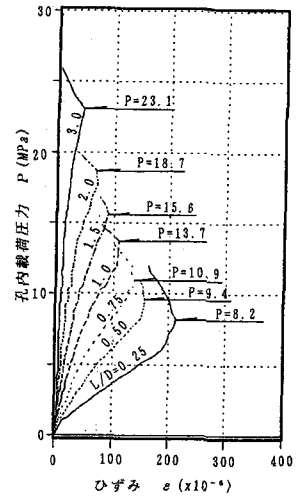


図-8 $P - \varepsilon$ 曲線

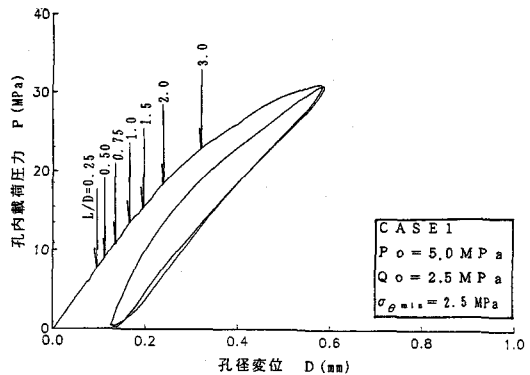


図-9 $P - D$ 曲線(CASE1)

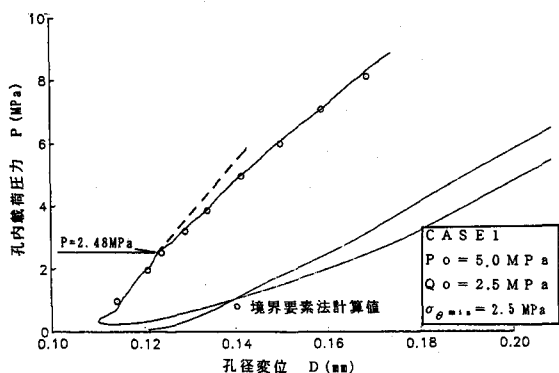


図-10 P-D曲線(CASE1、2回目载荷)

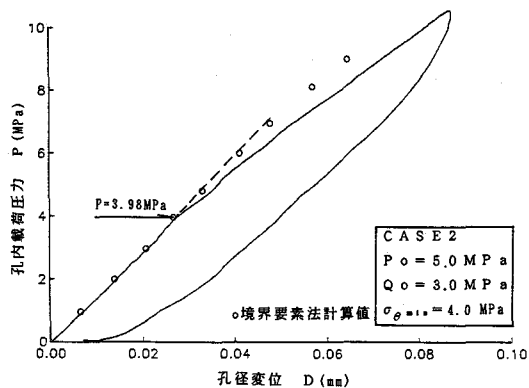


図-11 P-D曲線(CASE2)

5. おわりに

孔壁に流体圧を作用させて発生する亀裂の進展、および再開口を、孔内载荷圧力に対する孔径変位の非線形的な挙動として測定することができた。また、再開口時の線形から非線形への移行点は比較的明瞭で、拘束圧から計算される孔壁周辺の円周方向最小応力にはほぼ一致した。

今回の実験では、実際の測定システムを用いたため、供試体寸法に対する孔径が大きいという問題を含んでいたが、亀裂の再開口時の孔壁载荷圧力付近では、拘束圧の変化等の現象はみられず、設定した条件での実験が実施できたと考える。

また、「ダブルフラクチャリング法」の1次亀裂の進展および再開口のみに関して実験を行ったが、図-7に現れているように供試体孔壁には2次亀裂も発生している。今後は、2次亀裂の挙動も含めた実験、解析を行っていく予定である。

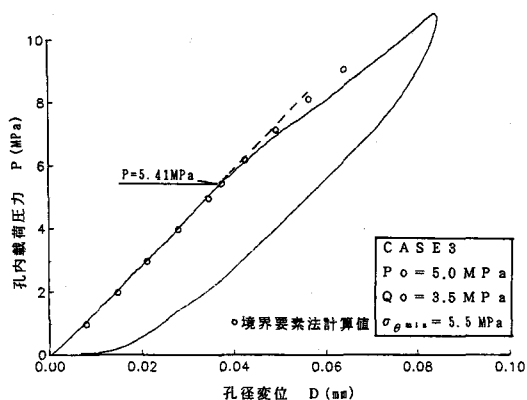


図-12 P-D曲線(CASE3)

参考文献

- 1) 佐久間 彰三、菊地 慎二、水田 義明、世良田 章正：ダブルフラクチャリング法による地山応力の測定、土木学会論文集 第406号/Ⅲ-11(1989)
- 2) 菅原 勝彦、尾原 祐三、坂口 清敏：Sleeve Fracturing -模型実験と考察-、第10回西日本岩盤工学会シンポジウム論文集(1989)