

(14) 節理性岩盤内での水圧破碎による地圧測定

鹿島建設技術研究所 正会員 ○日比谷 啓 介

正会員 渥 美 博 行

正会員 青 木 謙 治

1. はじめに

水圧破碎法による地圧測定法は、従来多用されてきたオーバーコアリングによる応力解放法（以下オーバーコアリング法と称する）に比べ、①応力の直接測定法である、②操作が簡便であるため、多くの測定を実施することによって解の信頼性を高めるのが容易である、③オーバーコアリング操作を必要としないため、大深度の原位置地圧測定技術として唯一の方法である、等の多くの利点を有しているため、今後益々利用の増加が見込まれる。著者らは、3年間にわたり水圧破碎法による岩盤内の三次元地圧測定法の実用化を進めてきたが、開発した原位置地圧測定システムの検証を行うため、i)多くの岩種が複雑に錯綜する岩盤中^{*1}、ii)節理が発達した花崗岩岩盤中^{*2}、iii)節理が著しく発達した流紋岩岩盤中で、原位置試験を実施してきた。ここではiii)で行った測定結果について報告する。

2. 節理が発達した岩盤中における水圧破碎法の適用について

水圧破碎によってボーリング孔壁に生成するき裂は二つのタイプに分類される。すなわち、孔井周囲の応力集中場に依存して孔軸方向に新規に開口するき裂（以下たてき裂と称する）と、天然のき裂が開口し、一般に孔軸を横切る形で発生するき裂（以下よこき裂と称する）の二者である。よこき裂では地圧に関しひとつの情報しか与えないのに対し、たてき裂では独立な二つの情報を与える^{*1}ことから、水圧破碎法の適用にあたってはたてき裂の生成を期待することが多い。しかし、節理が著しく発達した岩盤中では、たてき裂を発生させるために必要な、き裂のない十分な長さの加圧区間長を設定することが困難な場合が多い。したがって、節理性岩盤では天然のき裂を積極的に利用し、方向の異なる少なくとも6枚の天然き裂を開口し、これらの閉合圧を測定することによって地圧を測定しようとするCornet^{*3}の考え方は極めて興味深い。この場合、各よこき裂は方向が一定で連続している必要があるが、節理の発達が著しい岩盤では孔井付近でいろいろな走向・傾斜をもつき裂系が複雑に交錯しており、水圧加圧によって開口するき裂は孔井を横切る一枚に限定されるとは限らない。また、このような岩盤では岩盤全体としてゆるみがみとめられ、き裂自体の流体抵抗も小さく余程大流量の注入をしなければ圧力が立たない場合がある（多くは、前述のサイトiii)での経験に基づく）。したがって、節理性岩盤においても、たてき裂の生成に期待しなければならない場合も少なくないものと考えられる。このような場合、水圧破碎法の適用にあたって留意すべき点として以下の項目が考えられる。

①天然き裂の分布状態に関する事前調査

孔軸方向に天然き裂が卓越する場合には、一見たてき裂が生成されたかにみえても天然き裂の開口である場合がある。このような場合のたてき裂は、孔井の断面でみれば直径でない弦状に通過する場合が多いため、見かけ上得られるき裂再開口圧は信頼性に乏しく解析用データとして用いることができない。したがって、前述のようにたてき裂の生成を期待する場合、孔井の方向は卓越するき裂の方向と異なっていることが望ましい。そのためには孔井方向を設定する前に試験箇所一帯の天然き裂の分布状態を綿密に調査しておく必要がある。き裂の調査結果に基づく孔井掘削方向の決定に関しては後述する。

②最適な加圧区間長の設定

新規にたてき裂を開口するためには、天然き裂の存在しない区間に対して水圧破碎を行う必要がある。しかし、節理の発達した岩盤ではき裂のない区間が短い場合が少なくないため、水圧破碎に先立って十分にコア観察を行い、適当な加圧区間長を実現できるパッカーを事前に用意しておく必要がある。

③適正流量の設定

節理性岩盤ではき裂が複雑に錯綜しているため、全体としての透水性が大きい場合が少なくない。したがって、流量が少ないと、き裂の生成を示すブレイクダウンを生じなかったり、ブレイクダウン以降の再加圧時にも水圧が十分に立たずき裂再開口に至らない場合もある。

④データの評価

水圧破碎を行って生成したき裂の走向・傾斜およびそのとき得られた水圧の特性値（き裂再開口圧、き裂閉合圧）を地圧解析用データとして用いるか否かについては事前にデータの質を十分に吟味することが肝要である。特に節理性岩盤では、孔井近傍の孔軸方向に近い天然き裂に依存して一見たてき裂様のき裂が開口する場合があります、不明瞭なインプレッション（型取りパッカーによって写し取ったき裂形状）を示したり、不安定な圧力挙動を示すことも少なくない。実際のデータの質の評価に関しては後述する。

3. 水圧破碎試験

3-1 試験地点の概要

水圧破碎法による地圧測定を行った地点の地質構造を図-1に示す。周辺の岩質はほぼ一様な流紋岩であり、ボーリングコアによるRQDは30～50%程度と節理がかなり発達した岩盤である。節理はシームを挟するものと、多くの冷却節理から構成される。試験は図-1中に示す横坑内で実施したが、その地点の被り厚さは約200mであった。

3-2 水圧破碎用孔井の配置

今回水圧破碎に用いた孔井は4本（いずれも直径66mm 孔井長20m）である。4孔井の配置は、従来オーバーコアリング法でよく用いられていた孔底一点集中型とせず先端放射型とし、さらに孔井の深度方向にできるだけ多くの測点を設けることによって一帯の平均的な地圧を精度よく求めることを目指した。また、その配

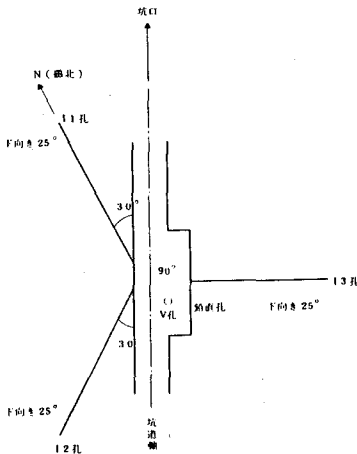


図-3 測定用孔井配置

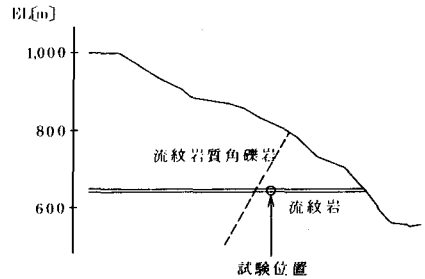


図-1 試験位置周辺の地質構造

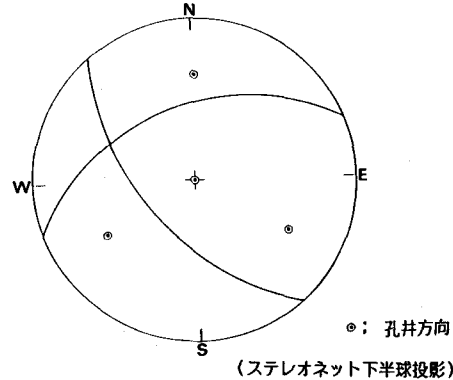


図-2 卓越き裂方向と孔井掘削方向

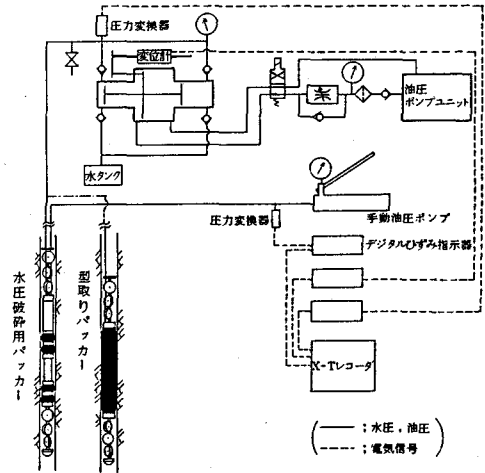


図-4 計測システム系統図

置も 4本の孔井間の角度が空間的に等間隔となる、いわゆるテトラポッド状配置となるようにし、地圧に関する情報をまんべんなく得られるように努めた^{*2}。孔井の絶対的な配置については、前述したように孔井方向が卓越節理方向と異なっていることが望ましいため、試験地点周辺の節理系の分布を図-2 に示すように調査し(卓越き裂方向を大円表示)、同図中に示すとりの孔井方向を決定した。孔井配置の平面図を図-3 に示す。

3-3 試験装置

図-4 に今回用いた試験装置のブロックダイアグラムを示す。水圧破碎に用いるストラドルパッカーの加圧区間長は、ボーリングコアの事前観察結果に基づき 8.5cmとした。水圧ポンプは 50cc/min から 5,000 cc/min までの注水が可能であるが、今回は予備試験の結果に基づき 500cc/minの定流量で破碎を行った^{*4}。

4. 試験結果

試験の結果得られた全22データのうち、き裂の形状が測定できた13データを表-1 にまとめる。これらのうち、明瞭にたてき裂と判断されたき裂のインプレッションの例を図- 5.aに、一見たてき裂にみえるが、き裂が直径方向を通過していない、孔軸に対して明らかな傾斜を成している等の理由で天然き裂の開口と判断されたインプレッションの例を図- 5.bに示す。図-6 は一見たてき裂に見えるものも含めたすべてのたてき裂面をステレオネット上に極表示したものである。図中の大円は各孔井に直交する平面を示し、コンターは天然き裂の密度分布を示す。たてき裂のうち図- 5.aに示すようなインプレッションが得られ、地圧解析用データとして用いられたものを○印で、また図- 5.bに示すようなインプレッションが得られデータとして棄却したものを●印で示した。後者は天然き裂の卓越方向と近接しており、これらのき裂が孔井近傍の天然き裂の開口により生成した可能性が高いことを示している。水圧破碎によって得られたデータの質の評価は地圧解析において極めて重要であるが図-6 に示すような天然き裂の卓越方向との近接度による評価もひとつの判断基準になると考えられる。また、水圧破碎

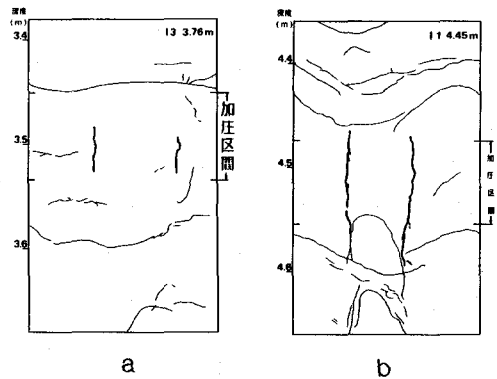


図-5 水圧破碎によって生じたき裂の型取り結果

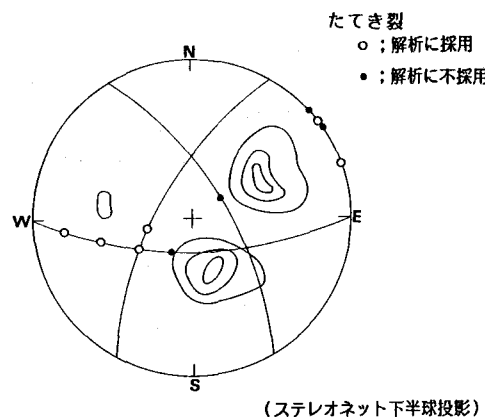


図-6 卓越き裂方向と水圧破碎によって生じたたてき裂の方向

表-1 各測定におけるき裂の方向と圧力特性値に関するデータ

孔井	孔 井		深 度 (m)	き裂タイプ	たてき裂 θ(°)	よこき裂法線		き裂初生圧 Pb	き裂再開口圧 Pr1	き裂閉合圧 Ps
	方位 (N・E)	傾斜 (°)				方位 (N・E)	傾斜 (°)			
I 1	0	25	5.7	T		-11.0	-12.1	139.5		87.6
	0	25	12.65	T ☆		-57.1	26.6	46.5		36.7
	0	25	18.33	L ☆	148			47.5	36.5	
	0	25	18.8	L ☆	166.1			51	27.6	
I 2	240	25	7.2	T ☆		-70.3	61.9	65		21.8
	240	25	11.6	L	53.1			51	39	
	120	25	3.76	L ☆	69.1			42	24	
	120	25	3.85	L ☆	55.2			57.4	27	
I 3	120	25	4.76	T		222.2	63.2	59		19.5
	0	90	8.2	L	146.3			50.5	43	
	0	90	10.8	L	137.7			45	15	
	0	90	12.83	L ☆	143.3			58	40.5	
V	0	90	15.2	L ☆	160.5			43	31.5	

き裂L: たてき裂、T: よこき裂 ☆: 3次元地圧解析用インプットデータ 圧力値の単位: (kg/cm²)

時に得られる岩盤の引張強度（＝ブレイクダウン圧力－き裂再開口圧）が異常に低い場合も、天然き裂の開口としてデータ棄却の根拠となる。

一方、よこき裂については、き裂が開口し正しいき裂閉合圧が求められたと判断されたものをデータとして採用し、最終的に表－1 中に☆印で示したたてき裂 6、よこき裂2 を解析用データとすることとした。

5. 地圧解析結果および考察

上記のデータに基づく三次元地圧解析^{*1}結果を表－2 に示す。なお同表中には、極く近傍で既の実施されていたオーバーコアリング法による地圧測定結果も併記した。オーバーコアリング法による地圧測定は、節理が著しく発達していたため困難を極め、結局解析に要する最小データ数で結果を求めざるを得なかったので信頼性に問題がないとはいえない。両者を主応力について比較してみると、水圧破碎法の結果はオーバーコアリング法の結果に比べ30%程度小さい値を示している。これはオーバーコアリング法が応力の間接測定法であり、応力解放によって生じた解放ひずみに較正係数を乗ずることによって地圧を求めていることに起因していると考えられる。すなわち、解放ひずみ量は節理性岩盤に対して測定された量であるのに対し、較正係数はき裂のない岩石に対する室内試験によって求めるため、実際の地圧より高めの値を与えている可能性がある。

解析の結果得られた主応力方向を図－7 のステレオネット上（下半球投影）に示した。併記したオーバーコアリング法による結果は、水圧破碎法の結果から少なからぬ量の回転をしていることが認められる。これは、応力の間接測定法であるオーバーコアリング法では節理性岩盤の異方性が評価されないことも一原因と考えられる。

6. おわりに

節理の発達した岩盤では、ボーリング孔内においてき裂のない区間長が短い場合が多く、多用されるひずみゲージ式のオーバーコアリング法の適用が困難となることが少なくない。これに対し水圧破碎法では、今回報告したように区間長が多少短くても試験の実施が可能である。また、多くの節理性岩盤ではゆるみが生じていたり、異方性が顕著であったりするため、応力の直接測定法である水圧破碎法の適用性は特に高いと考えられる。

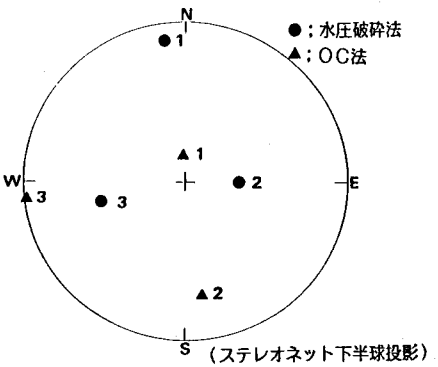
（参考文献）

- * 1 松永、日比谷、厨川他：水圧破碎法による三次元地圧原位置測定結果について（第18回岩盤力学に関するシンポジウム、1986）
- * 2 日比谷、渥美、青木：水圧破碎による三次元地圧測定結果（土木学会第41回年次学術講演会、1986）
- * 3 Cornet, F.H.: Analysis of Injection Tests for In-Situ Stress(Workshop on Hydraulic Fracturing Stress Measurement, 1981)
- * 4 日比谷、渥美、青木：水圧破碎時のき裂再開口圧について（土木学会第40回年次学術講演会、1985）

表－2 三次元地圧解析結果

応 力	水圧破碎法	オーバーコアリング法
σ_N	38.5 ± 5.4	44.3
σ_E	22.4 ± 2.5	17.5
σ_V	24.4 ± 2.8	51.9
τ_{NE}	-2.9 ± 1.6	-2.8
τ_{EV}	2.7 ± 1.7	0.1
τ_{VN}	2.1 ± 2.3	1.9
σ_1	39.1	52.3
σ_2	26.4	44.2
σ_3	19.8	17.2

(kg/cm²)



図－7 三次元地圧解析結果（主応力方向）

(14) In-Situ Stress Measurement by Hydraulic Fracturing
Method in Highly Fractured Rock Mass

Keisuke HIBIYA, Hiroyuki ATSUMI and Kenji AOKI
(Kajima Institute of Construction Technology)

On the application of hydraulic fracturing method for in-situ stress measurement in fractured rock mass, the following problem sometimes lead to questionable results:

- 1) Preexisting fractures exist immediately adjacent to the borehole.
- 2) Length of a portion of the borehole in which no preexisting fracture exist is often very short.

Therefore, special efforts are required to accomplish the proper measurement, as follows:

- 1) In order to create fracture parallel to the borehole axis, direction of the borehole is recommended to deviate from those of the predominant joint sets.
- 2) Straddle packer with appropriate pressurization interval, applicable to short fracture free section, should be prepared.
- 3) Suitable flow rate should be selected to insure satisfactory reopening pressure and shut-in pressure reading.
- 4) The quality of the data should be evaluated carefully to improve the precision of calculated result.

Devoting the special attention to the above mentioned items, the authors have conducted 3-D in-situ stress measurement in highly fractured rhyolite rock mass. Four boreholes of different directions are made, where 22 hydraulic fractures are created. Since the orientation and pressure data for each fracturing experiment differ in reliability, 3-D tectonic stress field was calculated by only 8 data picked out through the proposed qualification procedure. The result was compared with that obtained by overcoring method which has been conducted at very adjacent location. There appeared considerable difference in both magnitude and direction of the principal stresses between two methods. Possible reason for the discrepancy is high density of fractures of the test site. In conclusion, hydraulic fracturing method has possible advantages to overcoring method especially in highly fractured rock mass where anisotropy of the modulus of deformation cannot be neglected.