



# 孔間水理試験装置の開発

竹内 竜史 仙波 毅\* 中野 勝志

東濃地科学センター  
\*本社 経営企画本部 バックエンド推進部

資料番号 : 8 - 6

Development of Crosshole Hydraulic Test Instrument for Sinusoidal Pressure Test

Ryuji TAKEUCHI Takeshi SEMBA\* Katsushi NAKANO  
Tono Geoscience Center

\* Nuclear Cycle Backend Division, Executive Office for the Policy Planning and Administration, Head Office

Blackら(1986)によって提案されている正弦波水理試験は、割れ目系岩盤の水理特性や水理学的な連続性に関する情報を原位置で取得できる有効な試験方法の一つである。著者らは、正弦波水理試験機能を備えた試験装置を開発し、この試験装置を用いた原位置試験により正弦波水理試験の適用性を評価した。その結果、開発した試験装置により、信頼性の高い試験データが得られることを確認した。また、正弦波水理試験結果による岩盤の水理特性の評価から、同試験方法の有効性が示された。

*The crosshole sinusoidal pressure test proposed by Black et.al. (1986) is considered to be one of the most effective methods to estimate the distribution and connectivity of flow paths and hydraulic properties in fractured rocks. Tono geoscience center has been developing a crosshole test system which is designed for sinusoidal injection, constant pressure and constant flow injection.*

*This paper describes an outline of the developed system and the results of applicability tests to confirm the performance of the system and the effectiveness of the analysis methods.*

*The results from the crosshole sinusoidal test were evaluated using on fractional dimension analysis and compared to the results of a conventional single hole and crosshole injection test.*

キーワード

孔間水理試験、正弦波水理試験、透水係数、比貯留係数、非整数次元解析

*Crosshole Hydraulic Test, Sinusoidal Pressure Test, Hydraulic Conductivity, Specific Storage, Fractional Dimension Analysis*

## 1. はじめに

割れ目系岩盤の水理特性（透水係数や比貯留係数等）は、岩盤内の地下水の流れを支配すると考えられる透水性割れ目の分布により空間的に不均質な分布を示すことが知られている。このため、岩盤内の地下水の流れを詳細に評価するためには、岩盤内の局所的な水理特性のみならず、地下水の主たる流動経路となる透水性割れ目の水理特性や水理学的な連続性についての情報を原位置で取得する必要がある。

岩盤の水理特性を求めるための現場試験としては、1本のボーリング孔による水理試験（単孔式水理試験）が一般的である。しかし、単孔式水理

試験で得られる結果は、ボーリング孔近傍の特性を強く反映するものであり、水理特性の空間的な分布や水理学的な連続性に関する評価を行うことは困難である。

この課題を解決するため、東濃地科学センターでは、岩盤内の水理特性のみならず、その空間的な分布や水理学的な連続性に関する情報を取得できる有効な試験方法である正弦波水理試験機能を備えた孔間水理試験装置の開発を進めてきた。

本報では、開発した試験装置の概要と試験例、及び試験結果を基にした正弦波水理試験の適用性について述べる。

## 2. 正弦波水理試験の概要

岩盤の水理特性を把握するための現場試験は、大きくルジオン試験やJFT試験などに代表される単孔式水理試験と複数のボーリング孔を利用した孔間水理試験に分けられる。

前者は、岩盤を対象とした現場試験において数多くの実績があるものの、得られる結果は基本的にボーリング孔近傍の水理特性を反映したものであると考えられており、水理特性の空間的な広がりや水理学的な連続性に関する評価が課題となっている。

一方後者は、複数のボーリング孔を配置することによりボーリング孔間での地下水の変化を直接的に観測できるため、水理特性の空間的な広がりや水理学的な連続性を把握するのに適している。土木分野では、多孔質地盤を対象にした定圧あるいは定流量条件下での“揚水試験”として広く行われている。近年では、岩盤を対象としても試みられるようになってきているものの、データの蓄積はいまだ十分とはいえず、試験手法の実用化を図る上で解決すべき課題は少なくない。

Blackら<sup>1)</sup>によって提案されている正弦波水理試験は、孔間水理試験の一つであり、注水区間に正弦波形の水圧変動を発生させ、観測区間での水圧応答を観測し、応答水圧に見られる振幅減衰率及び位相遅れから、注水区間と観測区間の水理学的な連続性及び水理特性（透水係数、比貯留係数）を求めることができる。一般的に行われる孔間水理試験（定圧又は定流量条件下での試験）に比べ、

岩盤の平均的な水理特性のみならず、単一割れ目の水理特性や透水異方性などを把握できるバックグラウンドの水圧が変化する場合でも水圧応答が捕えやすい

などの利点を有しており、精度良いデータが取得できる実用性の高い試験手法の一つであると考えられている。

## 3. 孔間水理試験装置の概要

以下に開発した試験装置の構成と機能、及び現場試験において確認された装置の性能を示す<sup>2)</sup>。

### 3.1 試験装置の構成及び機能

開発した試験装置の概要を図1に示す。試験装置の構造は、大きく地上部と孔内部に分けられる。地上部は、試験時の注水条件を制御する注水制御装置、試験区間内の水圧変化や注水流量変化、さらには試験時の温度や湿度などの試験データを計測・記録する計測装置などから構成される。試験

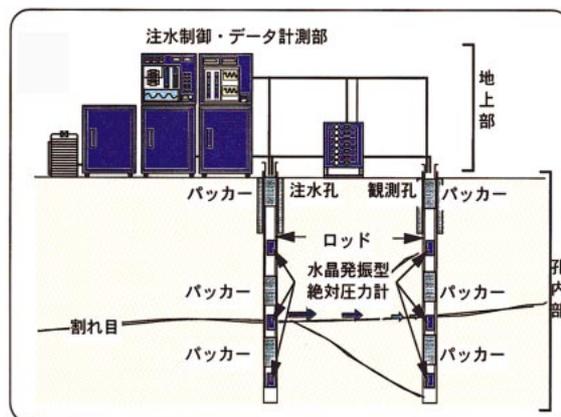


図1 孔間水理試験装置の概要

表1 孔間水理試験装置の基本性能

試験方法	正弦波注水試験
	定圧注水試験、定流量注水試験
正弦波周期	1cycle/min ~ 1cycle/day
注水条件	注水流量 0.02 ~ 200 /hour
	注水圧力 任意
圧力計	水晶発振式と差圧計測型の併用
パッカー	3連式

機能として、注水圧力の周期制御が可能な正弦波注水試験機能と、単孔式及び孔間水理試験としての定圧注水試験機能、定流量注水試験機能の3種類の注水試験機能を備えており、異なる試験方法による試験結果のクロスチェックが可能となっている。また、広範囲の流量測定を可能とするため、測定範囲の異なる5台の流量計を配置している。

孔内部は注水孔、観測孔に分かれ、共にパッカーにより3つの区間に分けられる。注水孔及び観測孔内のすべての区間には、高精度・高分解能を有する水晶発振式の絶対圧力計を備えており、各区間の圧力変化を計測することができる。

試験装置の基本性能を表1に示す。

### 3.2 現場試験による性能確認

上記の機能と性能が現場において発揮できることを確認するために、開発した試験装置の現場性能試験を実施した。以下に主な結果を示す。

#### (1) 単孔式及び正弦波水理試験機能

単孔式水理試験では、試験条件となる注水時の圧力又は流量の制御状況が試験結果の信頼性を大きく左右する。よって、現場試験では、定圧注水時の注水圧力及び定流量注水時の注水流量が一定

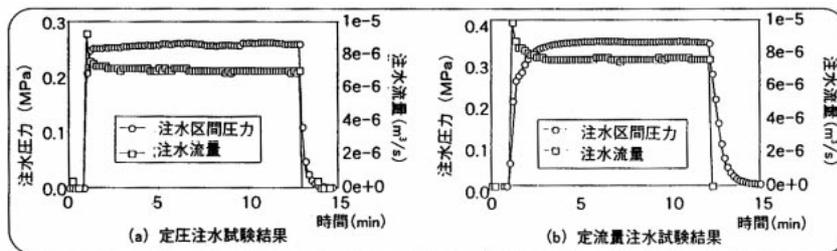


図2 単孔式水理試験結果

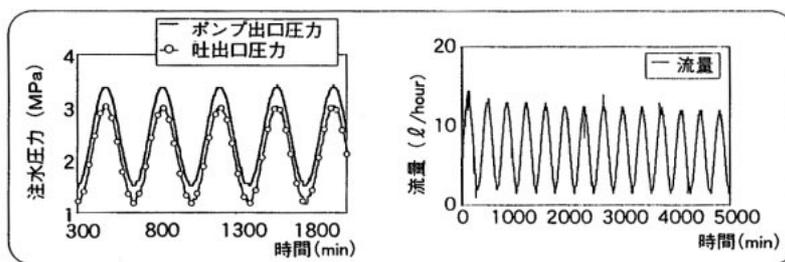


図3 正弦波水理試験結果

に制御できるか否かの確認を目的とした。図2に定圧及び定流量注水試験による試験結果の一例を示す。現場試験の結果から、定圧注水試験において試験区間での注水圧力が一定に保たれていること(図2(a))、及び、定流量注水試験において試験装置から試験区間に注水する流量が一定に保たれていること(図2(b))が確認できた。

正弦波水理試験では、注水区間と観測区間との間の圧力減衰率又は圧力変化の位相差を用いて透水係数、比貯留係数を算定する。そのため、注水時の周期的な圧力変化の正確さが試験結果の信頼性を大きく左右する。よって、現場試験では、注水圧力及び注水流量が一定周期の正弦波形で制御できるか否かの確認を目的とした。図3、図4に正弦波水理試験による試験結果の一例を示す。現場試験から試験装置出口の注水圧力及び注水流量

は一定の周期、振幅で制御できること(図3)及び、注水区間での圧力変化が一定の周期で制御できること(図4注水水圧)が確認できた。

以上のことより、現場において開発した試験装置の備える試験機能をが確認できた。

(2) 水圧観測機能

正弦波水理試験では、注水による周期的な水圧変化が岩盤内を減衰しながら伝達するため、正弦波水理試験において孔間距離を10数mから数10m確保するためには、観測孔において数kPa程度の微小な水圧の周期変化を測定する必要がある。よって、現場試験では、数kPaオーダーの微小な水圧変化を測定できるか否かの確認を目的とした。正弦波水理試験時に測定された水圧変化を図4に示す。受信水圧に示すように、観測区間では1kPa以下の水圧の周期変化を明確にとらえていることが確認できた。これらのことから、開発した試験装置は、正弦波水理試験を実施するために十分な水圧観測機能を備えていることが確認できた。

以上のことから、開発した試験装置による単孔式水理試験及び正弦波水理試験において、信頼性の高い試験データを取得できることが確認できた。

4. 現場適用例

現場において試験装置の性能が確認できたこと

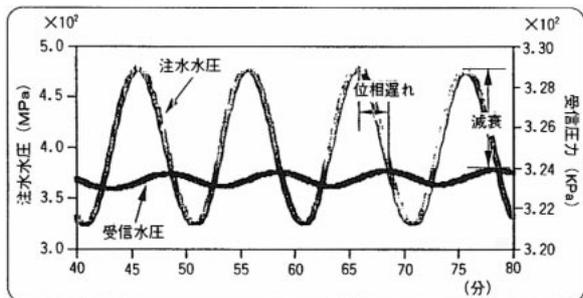


図4 正弦波水理試験における水圧変化

から、試験装置を用いて2孔間での現場適用試験を実施した。ここで得られた試験結果を基に、正弦波水理試験データの解析手法に関する検討、岩盤内の水理学的連続性に関する検討などを行い、試験装置及び試験手法の適用性について考察を行った。以下にその結果を示す。

#### 4.1 現場適用試験の概要

現場適用試験は、釜石鉱山原位置試験場550mレベル坑道及び同250mレベル坑道で実施した。

試験対象としては、坑道壁面観察により顕著な

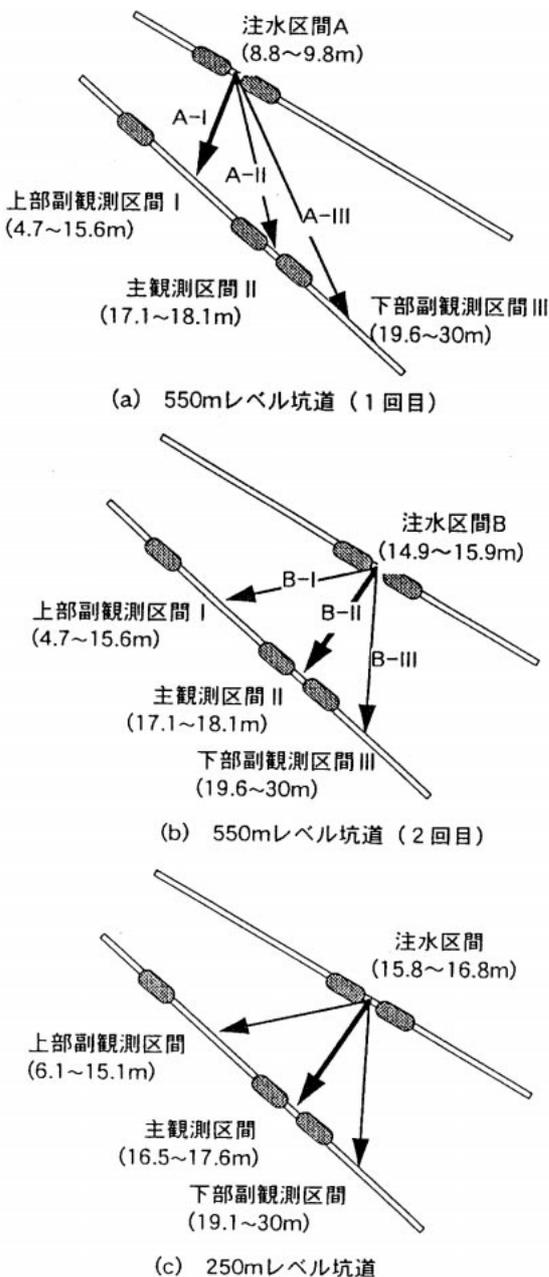


図5 試験区間

湧水が認められる単一と思われる割れ目を選択した。この割れ目と交差するように2本のボーリング孔を掘削し、対象となる割れ目を挟むように注水区間と主観測区間を設定した。水圧観測は注水区間、主観測区間及び主観測区間の上下区間(副観測区間)で行い、試験の信頼性の確保に努めた。

現場性能試験では、孔間での正弦波水理試験に先立ち、注水区間及び各観測区間の透水性をおおむね把握することを目的とした単孔式水理試験を行い、この結果を基に、正弦波水理試験の試験条件を設定した。

図5に550mレベル坑道及び250mレベル坑道での試験における試験区間を示す。なお、図中で示した測線は注水区間と観測区間を結んだものである。例えば、注水区間Aと観測区間を結ぶ測線を測線A-Iとする。

#### 4.2 解析手法に関する検討

##### (1) 正弦波水理試験結果の解析手法

正弦波水理試験結果の解析手法については、Blackら<sup>1)</sup>によって、地下水の流れを2次元流及び3次元流と仮定した場合の理論式が導かれている。ここで、2次元流とは、中心から同心円状に均等に広がる地下水の流れ、3次元流とは、中心から球状に均等に広がる地下水の流れである。

また、Noyら<sup>3)</sup>は、流れの次元を一般化した非整数次元流の理論式を提案している。ここで、流れの次元とは、流れの通過する面積と距離の関係から定義される一般化次元である。非整数次元流の理論を用いることにより、2次元流や3次元流のように均等に広がる地下水の流れに加え、どちらの流れにも属さないような両者の中間的な地下水の流れについても理論式上で考慮することが可能となる。

##### (2) 解析手法に関する検討

ここでは、上述した3種類の仮定(2次元流、3次元流、非整数次元流)の下で導かれた理論式を用いることにより透水係数 $K$ と比貯留係数 $S_s$ を求め、その結果を基に解析手法に関する検討を行った<sup>2)</sup>。

釜石鉱山原位置試験場550mレベル坑道で実施した現場試験において圧力応答が観測された測線(図5)において、上述したそれぞれの理論式を用いて得られた解析結果を表2に示す。ここで、表2における $K$ は透水係数(m/s)、 $S_s$ は比貯留係数(1/m)、 $\alpha$ は水頭拡散率(m<sup>2</sup>/s)である。

理想的な地下水の流れを仮定した2次元流及び3次元流で得られた結果を見ると、各測線での透

表2 正弦波水理試験による透水係数と比貯留係数

測線	周期 (min)	3D-Model			2D-Model			Fractional Dimension Model			
		(m/s)	S <sub>s</sub> (1/m)	(m <sup>2</sup> /s)	(m/s)	S <sub>s</sub> (1/m)	(m <sup>2</sup> /s)	n	(m/s)	S <sub>s</sub> (1/m)	(m <sup>2</sup> /s)
A -	10	7.38E-07	2.04E-06	0.362	1.84E-07	1.19E-06	0.154	2.0	1.84E-07	1.19E-06	0.154
	60	7.31E-07	4.11E-06	0.178	1.92E-07	9.91E-07	0.194		1.92E-07	9.91E-07	0.194
	360	6.08E-07	1.33E-05	0.046	1.53E-07	1.64E-06	0.093		1.53E-07	1.64E-06	0.093
A -	10	3.77E-07	1.30E-07	2.896	2.30E-07	2.14E-06	0.108	3.0	3.77E-07	1.30E-07	2.896
	60	3.57E-07	1.76E-07	2.033	3.48E-07	9.08E-07	0.384		3.57E-07	1.76E-07	2.033
	360	2.89E-07	2.75E-07	1.052	4.60E-07	7.91E-08	5.812		2.89E-07	2.75E-07	1.052
B -	10	3.80E-07	1.92E-07	1.977	1.45E-07	7.52E-07	0.194	2.1	1.11E-07	3.28E-07	0.337
	60	3.26E-07	3.74E-07	0.871	1.84E-07	3.94E-07	0.467		1.06E-07	4.96E-07	0.213
	360	2.83E-07	1.17E-06	0.241	2.21E-07	2.99E-07	0.740		1.21E-07	4.96E-07	0.244
B -	10	1.90E-07	8.25E-06	0.023	1.50E-07	4.00E-06	0.037	1.7	3.61E-07	6.35E-06	0.057
	60	4.90E-08	6.53E-06	0.008	4.98E-08	3.33E-06	0.015		2.25E-07	5.28E-06	0.043
	360	4.18E-08	8.10E-06	0.005	7.20E-08	3.04E-06	0.024		2.38E-07	3.49E-06	0.068
B -	10	4.55E-07	1.35E-07	3.367	2.30E-07	4.55E-07	0.506	2.1	1.52E-07	3.01E-07	0.506
	60	3.87E-07	3.05E-07	1.269	2.76E-07	2.74E-07	1.009		1.52E-07	4.34E-07	0.350
	360	3.19E-07	1.02E-06	0.314	2.90E-07	4.15E-07	0.699		1.27E-07	4.76E-07	0.266

K: 透水係数, S<sub>s</sub>: 比貯留係数, : 水頭拡散率

水係数Kの値は周波数によらずおおむね一定の値を示すものの(ただし、測線B-を除く)、比貯留係数S<sub>s</sub>の値は周波数により大きく変動する。しかしながら、非整数次元流モデルにより得られた透水係数Kと比貯留係数S<sub>s</sub>については、共に周波数に大きく依存しない結果が得られた。

岩盤中の地下水の流れは、実際には透水性割れ目の分布などに規制され、複雑に広がっていくと考えられる。このような場合、実際に取得されたデータに関係なく、理想的な条件である2次元流、3次元流モデルを事前に仮定して行う解析では、複雑な地下水の流れを必ずしも表現できるとは限らない。上述した現場試験において、2次元、3次元流モデルによる解析結果にばらつきが認められた原因としては、解析に用いた理想的な流れモデルが、実際の地下水の流れを十分に表現できていない可能性が挙げられる。

一方、非整数次元流れモデル(Fractional Dimension Model: 以下、FDモデル)による解析では、事前に流れのモデルを仮定し、その仮定に実測データを当てはめるのではなく、実測データから地下水の流れを最も適切に表現できる次元を決定し、その次元における透水係数、比貯留係数を求める。よって2次元流、3次元流モデルを用いた解析に比べ、岩盤内の複雑な地下水の流れに則した(実測データに応じた)解析が可能であると考えられる。このことから、上述した現場試験においても、FDモデルを用いることによって周波数に大きく依存しない解析結果が得られたものとする。

以上の結果より、正弦波水理試験から透水係数、比貯留係数を求める際にはFDモデルが有効であると考えられる。

### 4.3 単孔式水理試験結果との比較

単孔式水理試験結果が孔壁近傍の水理特性を強く反映するのに対し、孔間水理試験結果は、測線間を結ぶ水理学的に連続した経路の平均的な水理特性を反映していると考えられる。よって、両者の結果を単純に比較することはできない。ここでは、参考として両者の結果について比較を行った。

上記試験に先立って、正弦波水理試験の注水区間、観測区間のそれぞれで実施した単孔式水理試験結果から算定された透水係数を表3に示す。観測区間では、透水性が低く定常状態に至るまでに時間を要したため、非定常解析(Jacob法<sup>4)</sup>)により透水係数を求めた。その他の区間については、Hvorslevの定常式<sup>5)</sup>から透水係数を算定した。

注水区間A、Bと各観測区間の透水係数を比較すると、圧力応答が観測されなかった測線A-と注水区間-観測区間の透水係数の差が大きかった測線B-を除き、正弦波水理試験結果は、注水区間及び観測区間の透水係数と同程度もしくは中間値程度であり、単孔式水理試験結果とおおむね整合する結果となった。このことから、これら測線間については、透水係数では1オーダー程度のばらつきをもつものの、比較的均質に近い水理場が広がっているものと類推される。一方、発

表3 単孔透水試験及び正弦波水理試験結果の比較

K (m/s)		測線	K <sub>average</sub> (m/s) 正弦波水理試験
注水区間	観測区間		
A	1.95E-07	A -	1.76E-07
		A -	-
		A -	3.41E-07
B	1.25E-07	B -	1.13E-07
		B -	2.75E-07
		B -	1.44E-07

信 - 受信区間で透水係数の差が大きい測線 B - については、正弦波水理試験の結果は、単孔式水理試験結果より若干大きな値となった。これは、単孔式水理試験結果が、ボーリング孔近傍の水理特性を強く反映していることを示しているためと考えられる。

以上のことから、正弦波水理試験結果と単孔式水理試験結果は、比較的均質に近い水理場においては、おおむね同様の結果が得られることが確認できた。ただし、測線 B - に見られるように、測線間での透水係数のばらつきが大きい場合には、単孔式水理試験と孔間水理試験のどちらか一方の試験結果から、直接的に岩盤の水理特性を評価するのは困難である。よって、このような場合には、調査の目的に応じて両試験を使い分ける、もしくは、両試験結果を比較し、総合的に評価することが重要である。

#### 4.4 流量条件下での孔間水理試験結果との比較

釜石鉱山原位置試験場250mレベル坑道で実施した現場試験において、同一測線間で得られた正弦波水理試験及び定流量条件下での孔間水理試験の解析結果を表4に示す。ここで、定流量条件下での孔間水理試験結果の解析には、Noyらの方法と同様に、非整数流れの次元を考慮できるGRFモデル (Generalized Radial Flow Model<sup>6)</sup>)を用いた。なお、正弦波水理試験結果の解析には、先に述べたFDモデルを用いた。

正弦波水理試験及び定流量条件下での孔間水理試験について、流れの次元  $n=2.0$  として算定した場合、透水係数については両試験ともほぼ同様の値が得られているものの、比貯留係数については大きく異なる結果となった。一方、 $n=2.5$  として算定した場合には、透水係数、比貯留係数ともほぼ一致した値となった。この結果から、正弦波水理試験により、従来から行われている試験と同等の結果が得られることが確認できた。

適切な次元の値を決定し、試験結果を解析するためには、実測データから試験による注水以外の

表4 定流量注水試験結果と正弦波水理試験結果の比較

		透水係数 (m/s)	比貯留係数 (1/m)
n = 2.0	定流量試験	5.55E-07	3.04E-06
	正弦波試験	2.67E-07	1.04E-11
n = 2.0	定流量試験	2.11E-07	6.00E-09
	正弦波試験	2.64E-07	4.11E-09

要因で生じる水圧の変化(バックグラウンドの水圧変化)を除去し、試験による水圧応答成分を精度良く抽出することが必要となる。正弦波水理試験では、試験条件として周期的な水圧変化を与えるため、後述するようにバックグラウンドの水圧変化が生じるような場合でも試験による水圧応答成分を容易に抽出することが可能である。一方、定流量条件下の試験では、試験前後に十分な水圧観測を行い試験期間中のバックグラウンドの水圧変化を予測する、などの方法によって試験による水圧応答成分を抽出しなければならず、バックグラウンドの水圧変化の予測精度によって、試験結果の信頼性が大きく左右されてしまう。よって、正弦波水理試験は、特にバックグラウンドの水圧変化が生じる場合において、従来の方法に比べ信頼性の高いデータの取得・解析が可能な試験方法であると考ええる。

#### 4.5 水理学的な連続性に関する検討

図6に釜石鉱山原位置試験場250mレベル坑道で実施した試験結果の一例を示す。注水区間からの正弦波圧力変化に対し、主観測区間ではその応

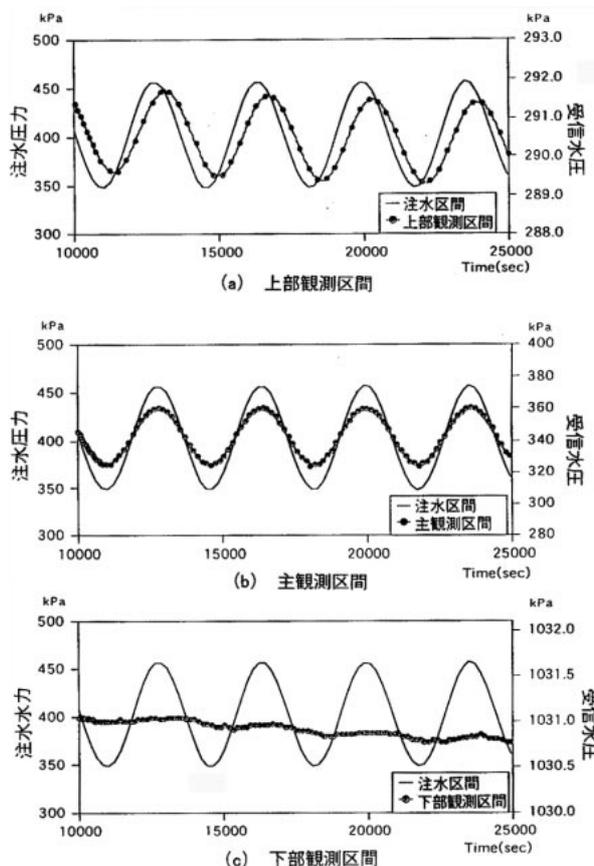


図6 正弦波水理試験における各区間の水圧変化

答(正弦波形の水圧変化)を明瞭にとらえており、注水区間と主観測区間の間は水理学的に連続していることが確認できた。また、上部観測区間では、ごく微小(数kPa程度)ではあるが注水に伴う変化と思われる周期的な水圧変動が確認できることから、注水区間と上部観測区間の間もわずかながら水理学的には連続しているといえる。一方、下部観測区間については、水圧の低下が確認されるものの周期的な変動はほとんど確認できないことから、注水区間と下部観測区間の間は水理学的に不連続であると判断できる。このように、正弦波水理試験では観測される水圧応答は周期的であることから、試験に伴う水圧変化とそれ以外の水圧変化(バックグラウンドのノイズ)の判断を容易に行うことができる。以上のことから、正弦波水理試験は、水理学的連続性を解釈する上で非常に有効であることが確認できた。

#### 4.6 流れの形状に関する検討

正弦波水理試験結果の解析から決定された流れの次元とポアホールテレビジョン観測及びコア観察から推定された割れ目の分布とを組み合わせ、地下水の流れの形状に関する検討を試みた。

図7に、釜石鉾山原位置試験場550mレベル坑道で実施した正弦波水理試験から得られた流れの次元と割れ目分布との対応を示す。

測線A-、B-、B-では2次元に近い結

果が得られている。これは、両測線での主たる水みちである割れ目が単一で平面的であることと対応しており、割れ目上をおおむね均等に広がる流れが生じていると考えられる。単一割れ目が存在する測線B-については $n=1.7$ であり、単一割れ目上において幾分選択的な流れの経路が生じていると考えられる。測線A-では、算定された流れの次元が3.0と大きくなっている。これは、区間距離が長いために、地下水が複数の割れ目あるいは割れ目帯を經由して流れている可能性が高く、割れ目ネットワーク中の流れに近くなっているものと解釈できる。

流れの次元は地下水の流れが通過する面積と距離の関係から定義されるパラメータであり、必ずしも流れの形状を示すものではない。よって、ここで示したような流れの形状の解釈については、地球物理学的調査手法など、他の調査結果と組み合わせた更なる検討が必要である。しかしながら、この結果から、流れの次元と割れ目の分布や地球物理学的調査手法で得られた調査結果などを組み合わせ考察することにより、岩盤内の地下水の流れについてその形状を解釈できる可能性がある<sup>2),7)</sup>。

#### 5. おわりに

本稿では、開発した試験装置の構成と機能を示すとともに、現場適用試験により得られた結果から開発した試験装置により信頼性の高い試験データを取得できることを示した。また、正弦波水理試験結果の解析手法及び試験結果による岩盤の水理特性の評価を行い、同試験の有効性を示した。しかしながら、流れ次元の解釈など解析・評価手法に関しては解決すべき課題が残されていることから、今後更に試験データの蓄積を図り、正弦波注水試験手法の実用化を目指すとともに、他の試験手法や調査手法との組合せなど、岩盤内の水理特性の評価手法に関する検討を進めていきたい。

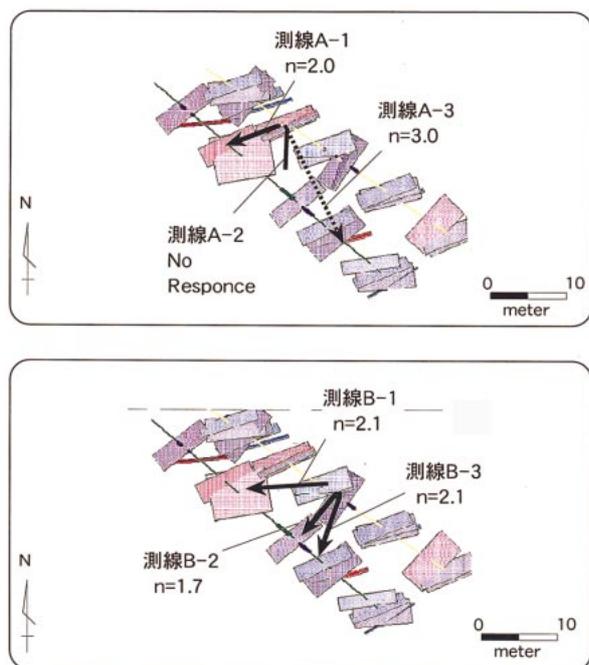


図7 流れの次元と割れ目分布との関係

#### 参考文献

- 1) J.H.Black, D.Noy et al. : " Crosshole investigations, The method, theory and analysis of crosshole sinusoidal pressure tests in fissured rock ", Stria Project IR 86-03, SKB, stockholm, Sweden (1986).
- 2) 竹内竜史, 仙波 毅 他 : " 孔間水理試験装置の開発と現場適用例 ", 第10回岩の力学国内シンポジウム論文集, p.725-730, (1998).
- 3) D.Noy, Barker, J.A. et al. : " Crosshole investigations, Implementation and fractional dimension interpretation of sinusoidal tests ", Stripaproject IR 88-01, SKB, Stockholm, Sweden (1988).

- 4 ) Cooper H.H.Jr , C.E.Jacob : " A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history " , Trans.Am.Geophys.Un., No.27, p.26-534 (1946).
- 5 ) Hvorslev M.J. : " Time lag and soil permeability in groundwater observations " , Corps of Engineers, U.S.ARMY, Waterways Experiment Station, Bulletin, No.36 (1951).
- 6 ) Barker,J.A. : " A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock " , Water Resources Res., 24, p.796-1804 (1988).
- 7 ) 竹内竜史, 仙波 毅 他 : " 正弦波水理試験による岩盤の水理特性評価の一例 " , 日本応用地質学会平成10年度研究発表会講演論文集 , p.25-28 (1998).