

3次元浸透流解析による大深度立坑掘削時の湧水量低減方法の評価

Evaluation of groundwater discharge depending on the method of long shaft construction
by three-dimensional numerical analysis

奥野哲夫^{*}・百田博宣^{**}・竹中 久^{***}・高崎英邦^{****}

Tetsuo OKUNO, Hironobu MOMOTA, Hisashi TAKENAKA and Hidekuni TAKASAKI

The feasibility studies on nuclear waste repository and underground pumped hydroelectric storage plant have been done in recent years, and long shafts are considered to be needed for construction of these underground structures. Under construction of this shaft, which is completed in about 1000m depth, an appropriate method of construction for reduction of groundwater discharge and dewatering systems are needed, because the discharge seriously affects the execution. In this paper, for reduction of the discharge, we propose a new method of construction which has some additional shafts for reduction of groundwater pressure heads around a main shaft, and the discharge of the new method is compared with those of other existing methods based on three-dimensional groundwater analysis. As a result, the distinguishing groundwater behavior under condition of this new method is understood.

Key Words : shaft, groundwater discharge, groundwater flow, three-dimensional numerical analysis

1. まえがき

高レベル放射性廃棄物処分場や地下揚水発電所の建設など、地下1000m程度の地下利用構想があるが、これらの建設に際しては地表から深部岩盤に到達するための大深度立坑が必要になる。立坑は湧水が切羽に集まるため、横坑に比べて湧水量が施工性に大きく影響し、大深度立坑の場合は適切な湧水削減方法が必要になる。そこで本論文では、大深度立坑の湧水低減方法を開発する第一段階として、各種工法における立坑湧水量を解析・評価する。比較する工法は、従来のNATM工法とショートステップ工法および新たに提案する地下水压低減工法である。提案工法は、立坑周辺に別途掘削した補助坑を用いて周辺地下水压を低減させて立坑湧水量を低減するものである。本論文では、これらの工法の立坑掘削段階毎の立坑湧水量を3次元浸透流解析を用いて算出し、各種工法毎および各掘削段階毎の湧水量を把握すると共に、提案する地下水压低減工法の湧水削減効果を検討する。

2. 立坑掘削工法と湧水対策

立坑掘削において、立坑底部への連絡が不可能な場合や地盤が軟弱で切上り法では危険な場合は、掘下げ法(普通開削法)が採用される。掘下げ法では、ステップ工法の一つであるショートステップ工法が今日広く採用されている¹⁾。この工法は1ステップの長さは岩盤の自立状況により1.2～2.5m程度に定められることが多く、掘削と覆工が1サイクルの中で短時間に行われことから安全が確保され開削効率もかなり良い。また、自立性の高い良好な地盤では、道路トンネルの換気立坑や発電所の立坑にNATM工法が適用され始めている。

掘下げ法による立坑掘削の重大な障害の一つに湧水がある。これまでの実績から、湧水量50l/min程度までは作業能率にほとんど影響ないが、坑底水量200l/minでは概ね能率が半減し、500l/min以上の湧水があると掘進は極端に能率低下する²⁾。このためボーリング孔による水抜きや各種排水対策で対処できない場合は、セメントや薬液の注入、ウェルポイントやディープウェル工法など、止水対策工法や地下水位低下工法が採用されている。

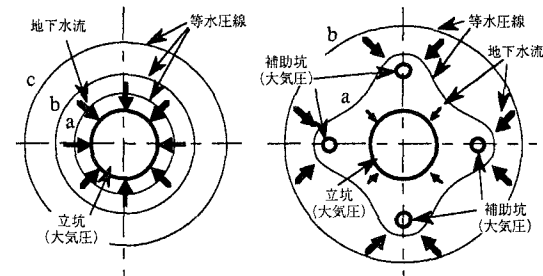
^{*} 正会員 博(工) 清水建設(株) 和泉研究室

^{**} 正会員 工博 清水建設(株) 技術研究所 特別プロジェクト部

^{***} 正会員 工修 清水建設(株) 技術研究所 特別プロジェクト部

^{****} 正会員 工博 清水建設(株) 土木本部 技術企画部

以上の現状を踏まえ、新たに補助坑により周辺地下
 水圧を低減させ、その結果立坑本体への湧水量を低減
 させる方法(以下、地下水圧低減工法と呼ぶ)を提案し、
 その効果を検討する。地下水圧低減工法概念図を従
 来工法(湧水対策なし)と比較して図-1に示す。地下
 水圧低減工法は、立坑掘削位置周辺に予め補助坑を掘
 削し、補助坑内を大気圧状態にすることで地下深部の
 地下水圧を低下しておく。その後、立坑を掘削すると、
 事前に地下水圧が低下していることにより立坑への湧
 水量が低減させられることを期待した方法である。



(a) 従来工法の平面概念図 (b) 提案工法の平面概念図
 図-1 従来工法と提案工法概念図

3. 3次元浸透流解析モデルと解析ケース

地下水圧低減工法の効果を比較するため、本論文で
 は従来工法としてNATM工法とショートステップ工法
 を取り上げ、各工法による立坑周辺の地下水流動を把
 握する目的から、有限要素法による3次元浸透流解析
 を実施する。はじめに、基礎的な検討であることから特
 に地盤の不均質性は考慮せず、立坑が掘削される地盤
 の透水係数は 1.0×10^{-6} cm/sで均一とする。また、掘削
 に伴い地下水位が低下し不飽和領域が存在する場合を
 考慮して飽和・不飽和解析を行う。この場合の水分特性
 曲線と不飽和透水係数の関係は文献2)の岩盤の不飽和
 浸透特性と同一のものをを用いる。メッシュ分割の簡略
 化のため、立坑ならびに補助坑の断面は矩形とし、その
 配置と境界条件を図-2に示す。各工法とも、立坑の仕
 上がり深さは地表面下-1000mとし、解析モデルはそ
 の対称性から1/4領域モデルとし、解析領域寸法は
 立坑中心位置(地表面)を原点として1000m(x方向)×
 1000m(y方向)×2000m(z方向下向き)とする。以上の物
 性と領域の下で、工法、地下水面の変動、掘削深度の条
 件設定から、表-1に示すような解析ケース(合計36
 ケース)を設定する。

掘削段階としては、代表的な掘削深度として-
 250m, -500m, -750m, -1000mの4段階まで掘削
 した状態を想定する。地下水の供給条件は、地表面から
 十分なかん養がある場合を想定して地表面に地下水位
 を固定する場合(地下水面固定)と、地表面からかん養
 が全くない場合を想定して地表面を不透水境界(地下
 水面自由)とする2タイプを解析する。地表面からある

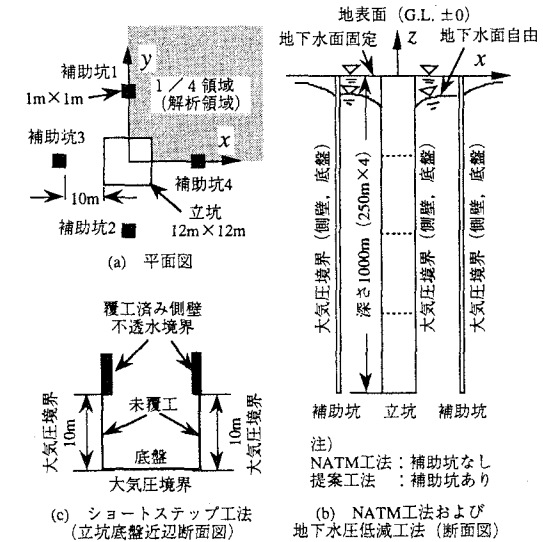


図-2 立坑/補助坑の配置と境界条件

表-1 解析ケース一覧(解析ケース名)

工法	地下水面の 固定/自由	掘削深度			
		-250m	-500m	-750m	-1000m
NATM	固定	N(A)250	N(A)500	N(A)750	N(A)1000
	自由	N(B)250	N(B)500	N(B)750	N(B)1000
ショート ステップ	固定	S(A)250	S(A)500	S(A)750	S(A)1000
	自由	S(B)250	S(B)500	S(B)750	S(B)1000
地下水位 低減工法 (補助坑2本)	固定	H2(A)250	H2(A)500	H2(A)750	H2(A)1000
	自由	H2(B)250	H2(B)500	H2(B)750	H2(B)1000
地下水位 低減工法 (補助坑4本)	固定	H4(A)250	H4(A)500	H4(A)750	H4(A)1000
	自由	H4(B)250	H4(B)500	H4(B)750	H4(B)1000

程度かん養がある場合は、両タイプの解析結果が上・下限値を与えるものと期待できる。なお、全解析ケースとも地表面
 を除く外周境界は地下水位一定で、1/4領域モデルの対称面と下端面は不透水境界とし、定常解析を行うものとする。

各工法毎のモデルの違いは、立坑内の側壁と底盤の境界条件ならびに補助坑の有無である。NATM工法では吹き付け
 コンクリートが施工されるものの、その止水効果は特に期待せず、全側壁・底盤とも大気圧境界(地下水圧0)とする

(図-2(b)参照)。ショートステップ工法は、前述のように1ステップの長さは1.2～2.5m程度ではあるが、有限要素法のメッシュ分割の制約から底盤から鉛直上向きに高さ10mの範囲が未覆工と想定し、この区間の側壁と底盤のみ大気圧状態とする。その他の覆工済み側壁は不透水境界とする。この状況は図-2(c)に示している。地下水压低減工法は、まず補助坑を-1000mまで掘削し、補助坑内を大気圧状態とした後、立坑本体を掘削する。したがって、各立坑掘削段階とも補助坑掘削深度は-1000mで一定とし、補助坑内壁は全て大気圧境界とする。また、立坑の覆工はNATM工法と同一に考え、全側壁・底盤とも大気圧境界とする(図-2(b)参照)。以上の条件に加えて、図-2(a)の補助坑が2本の場合と4本の場合でその効果も比較する。

以上の3次元飽和・不飽和解析により、立坑内部への湧水量および補助坑への湧水量を算定する。例として立坑の掘削深度が-500mの場合の解析モデルを図-3に示す。

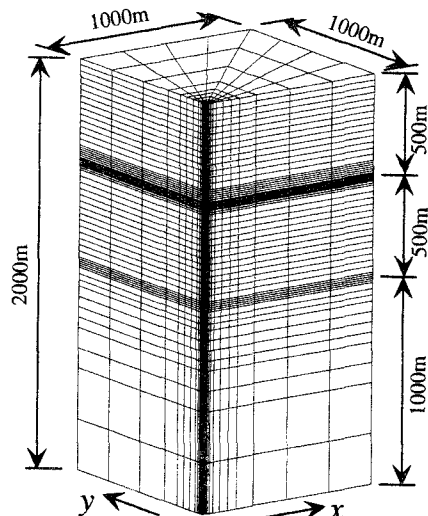


図-3 掘削深度-500mの場合の解析メッシュ図

4. 解析結果と評価

はじめに代表的な解析ケースに関して地下水の圧力水頭分布を示す。図-4, 5, 6, 7は、それぞれNATM工法、ショートステップ工法、地下水压低減工法の立坑掘削深度500mの場合の圧力水頭分布を示している。これらは地表面からのかん養が全くないN(B)500, S(B)500, H2(B)500, H4(B)500の4ケースであり、立坑掘削底面周辺の拡大図である。これらの図からNATM工法および地下水压低減工法では、立坑周辺の地下水压が低下していることがわかる。NATM工法では立坑内壁が全て大気圧境界であることが原因であるが、地下水压低減工法ではこれに加えて補助坑の効果が現れている。具体的には、図-6, 7の補助坑は-1000mまで施工されており、立坑掘削底盤-500mより深部まで圧力水頭が低下している。図-8, 9には補助坑が2本と4本の場合のH2(B)500, H4(B)500の2ケースの補助坑先端部周辺(深度-1000m)の圧力水頭分布を示している。解析領域が1/4領域であることから、補助坑2本および4本の場合に対応して、図中にはそれぞれ1本および2本の補助坑がモデル化されている。これらの補助坑により、局部的ではあるが深部まで圧力水頭が低減されていることがわかる。一方、ショートステップ工法は立坑底盤から上方10mの範囲のみ大気圧境界であることから、図-5に示されているように圧力水頭の低下は掘削底盤周辺に限られる。

次に、全解析ケースに関して立坑掘削深度と立坑湧水量の関係をまとめ図-10に示す。立坑の掘削深度の増大に伴って各工法とも立坑湧水量が増加するが、吹き付けコンクリートの止水効果を期待していないNATM工法の湧水量が最も多く、これに対して浸出面積が少ないショートステップ工法の湧水量が最も少ない。また、地表面からのかん養の有無による湧水量の変動は、各工法とも湧水量の絶対値にしろ割合は比較的小さい。

掘削深度が-1000mにおいて、NATM工法では500l/min近くの湧水量を示し、ショートステップ工法では50l/min程度である。このことから考えて、前述のように作業能率の低下はNATM工法では顕著になり、ショートステップ工法ではほとんど影響ないものと考えられる。地下水压低減工法では、補助坑の本数増加により立坑への湧水量が低減しており、掘削深度-1000mにおける湧水量は補助坑4本の場合で約200l/minに抑えられている。

作業能率から、立坑湧水量200l/minを一つの限界値と考え、NATM工法では深度約-600mまでの掘削が限度となる。地下水压低減工法において、補助坑2本の場合では深度約-800mが限度と考えられ、補助坑4本の場合では深度約-1000mまで掘削可能と考えられる。

地下水压低減工法では、立坑湧水量を抑える代わりに補助坑への湧水量が増大し、水処理のためにはそれらの総湧水量(立坑湧水量と補助坑湧水量の合計)とその内訳を把握しておく必要もある。図-11には地下水压低減工法で発生する湧水の総量と内訳を立坑掘削深度との関係で示している。補助坑は立坑を掘削する前から掘削(深度-1000m)されていることから、立坑掘削深度が小さい段階でも補助坑への湧水量は大きい。立坑掘削深度が増加するに伴い立坑湧水量が

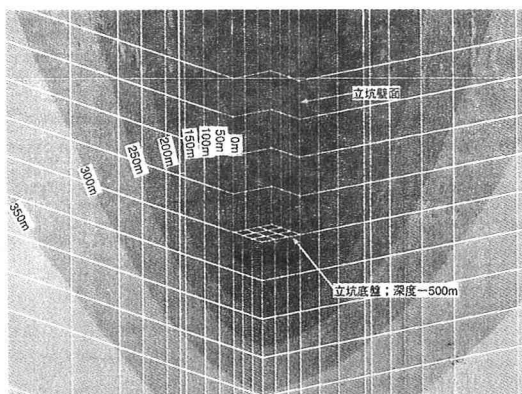


図-4 N(B)500 の圧力水頭分布

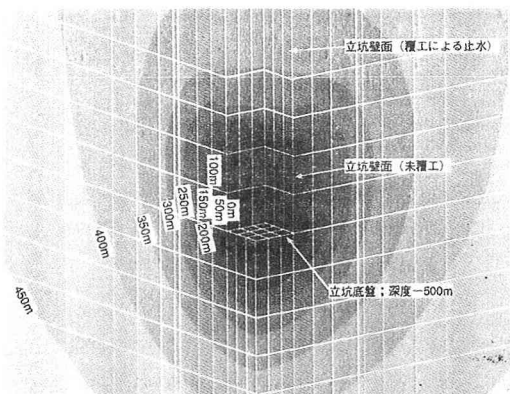


図-5 S(B)500 の圧力水頭分布

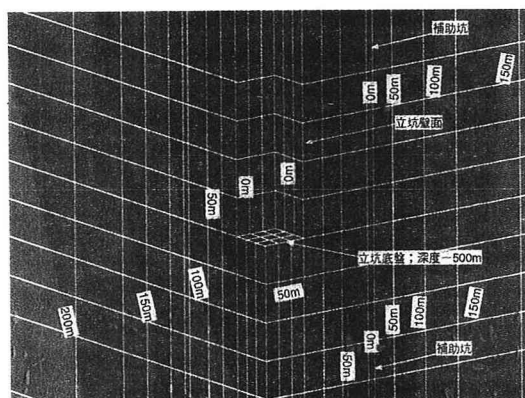


図-6 H2(B)500 の圧力水頭分布

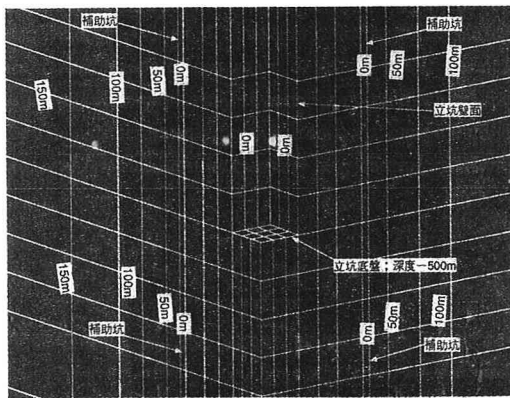


図-7 H4(B)500 の圧力水頭分布

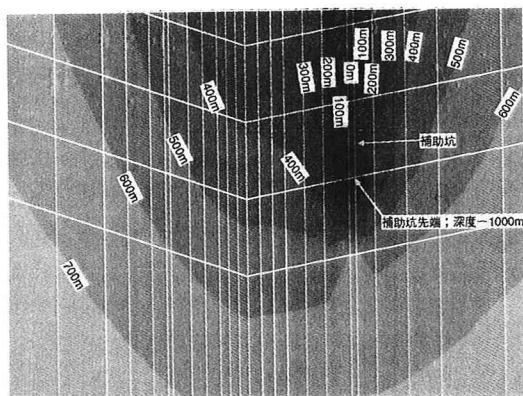


図-8 補助坑先端付近 (深度-1000m) の圧力水頭分布
解析ケース: H2(B)500

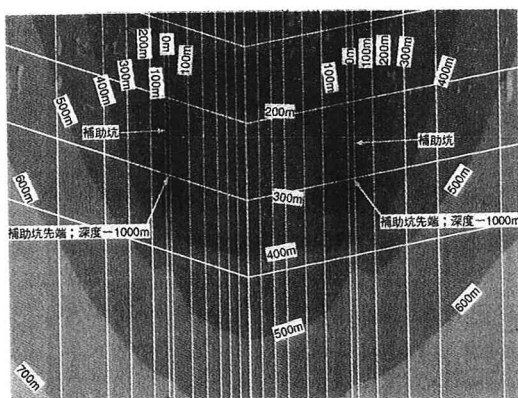


図-9 補助坑先端付近 (深度-1000m) の圧力水頭分布
解析ケース: H4(B)500

増加し、補助坑湧水量が減少する。総湧水量は、立坑掘削に伴い浸出面積の絶対量が増加するためわずかながら増加しているものの、概ね 500l/min 前後と大きな変化はない。

ところで、地下水压低減工法は、補助坑により立坑周辺の水压低減を目的としており、水位を掘削深度まで低下させることが目的ではない。このことから、各工法の立坑掘削深度と立坑壁面位置での地下水位を調べ、図-12に示す。図より、NATM工法では立坑掘削深度が増加すると地下水位が低下し、立坑掘削期間中の地下水位変動量は他の工法と比較して最も大きく、立坑掘削深度-1000mで約-160mの地下水位となる。ショートステップ工法では、覆工による壁面止水が確実になされれば、地下水位は-10m以内に抑えられており、立坑掘削深度が増加するとわずかながら地下水位が上昇している。水位上昇の理由は、ショートステップ工法では立坑への湧水が底盤近辺に限られるため、湧水が地下深部で生じるほど広域から地下水の供給が生じ、立坑近辺の局所的な水位低下がわずかながら緩和されるためである。これらの工法に対して地下水压低減工法では、立坑掘削前から補助坑が施工されていることから、立坑掘削期間中の地下水位は概ね-160m~-190mであり、地下水位の変動は比較的少ない。

5. おわりに

本論文では、大深度立坑掘削時に問題になる湧水対策を対象として、3次元浸透流解析により3種類の工法の湧水量を比較検討した。特に、今回新たに提案した補助坑を用いた地下水压低減工法では、湧水対策を行わない工法(NATM工法)と比較して、立坑湧水量を大幅に低減可能であることが確認された。これまでの実績から、湧水量が立坑掘削作業に及ぼす影響を考慮した場合、透水係数 1.0×10^{-6} cm/s 程度の地盤では、地下水压低減工法は掘削深度-1000mの範囲で作業能力を半減させない程度の湧水量 (200l/min) に抑えられる可能性があることが判明した。また、ショートステップ工法で確実な覆工 (壁面止水) が可能な場合は、浸出面積が極端に少ないため、湧水量を最も低減可能なことも確認された。今後は各工法の施工速度や経済性なども考慮して、効率的な掘削法の検討を進める予定である。

6. 参考文献

- 1) 北新建設株式会社：立坑開さく法 (改訂版)，富永写真製版印刷株式会社，1995。
- 2) 百田博宣，藤城泰行，青木謙治，花村哲也：降雨浸透を考慮した岩盤中の地下水挙動に関する解析的検討，土木学会論文集，第379号／VI-6，pp.74-82，1987。

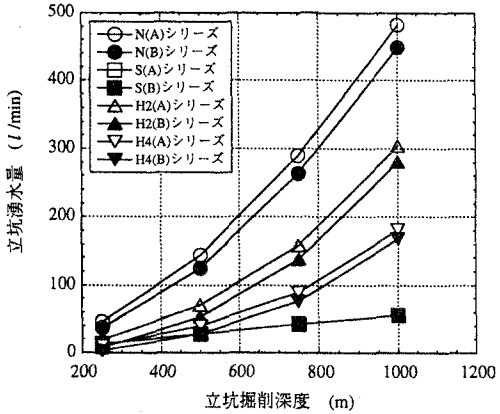


図-10 立坑掘削深度と立坑湧水量の関係

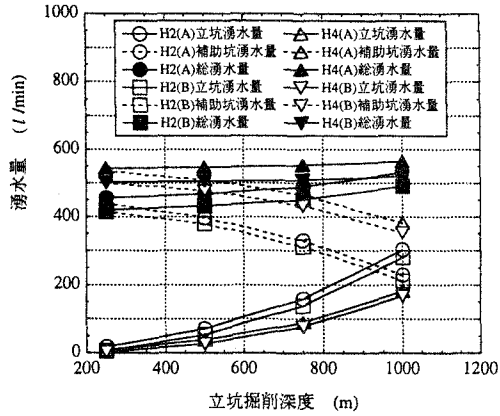


図-11 地下水压低減工法における総湧水量と湧水量内訳

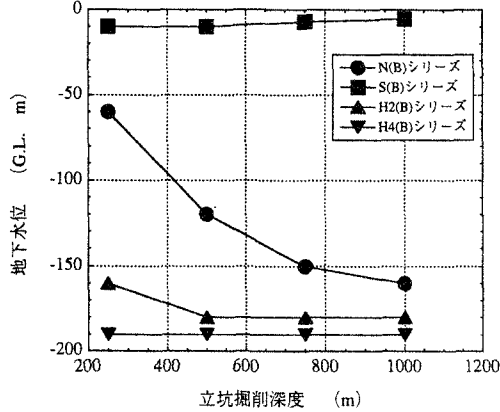


図-12 立坑掘削深度と地下水位の関係

に成形した。各岩石は室内で1週間以上自然乾燥させた後、デシケーター内でさらに1週間乾燥させた乾燥状態のもの(dry)と、この状態のものを真空ポンプを用いて真空状態にし、5時間脱気しながら試料に蒸留水を浸潤させた湿润状態のもの(wet)の2種類用意した。各岩石の物理的性質を表-1 に示した。

表-1 実験に用いた岩石の物理的性質

rocks	porosity (%)	moisture content ratio (%)	degree of saturation (%)	bulk specific gravity	true specific gravity
Oshima granite(dry)	0.8	0.1	28.5	2.65	2.67
Oshima granite(wet)	0.8	0.2	81.3	2.65	2.67
Inada granite(dry)	3.6	0.1	22.3	2.65	2.75
Inada granite(wet)	3.6	0.3	84.6	2.65	2.75
Kuma andesite(dry)	5.6	0.9	41.4	2.55	2.67
Kuma andesite(wet)	5.6	1.9	88.3	2.40	2.67

2. 2 温度履歴の与え方

岩石試料に温度履歴を与えるには熱サイクル試験装置を用いた。熱サイクル試験装置は $-170^{\circ}\text{C}\sim+150^{\circ}\text{C}$ の温度範囲内で任意の温度幅、履歴回数、保温時間、昇温・降温速度($0\sim5^{\circ}\text{C}/\text{min}$)で試料に温度履歴を与えることができる。実験に先立ち、制御温度と槽内温度を測定した結果、制御温度と槽内の平均温度との差は $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内で槽内の温度差も $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内であった。温度履歴を与える方法は以下のとおりとした。wetの試料は蒸留水に浸した状態で、dryの試料はそのままの状態で槽内に入れ、実験中の温度を測定するために温度センサーをwet, dryの供試体の中心(それぞれ1個)、wetの試料を浸した蒸留水の水槽内(3箇所)および槽内(25箇所)に設置した。この状態で 15°C の試料を 100°C まで加熱した。この場合、槽内の温度を直線的に上昇、降下させる必要があるため、熱源はヒーターと冷凍機を併用している。昇温速度は熱衝撃による影響を受けないとされている $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ とした²⁾。水は1気圧の下では 100°C で沸騰するため、実際の実験では沸騰する直前の約 $95^{\circ}\text{C}\sim 97^{\circ}\text{C}$ で実験を行ったが、本研究ではこれを便宜上 100°C と呼ぶ。試料の中心の温度が 100°C であることを確認しながら60分間保温した後、 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で降温させ 15°C の状態60分間保温した。ここまでの過程を1サイクルとする。また、履歴温度幅が岩石の強度・変形特性に及ぼす影響を求めるため、 15°C から 60°C までの温度履歴も与えた。供試体には最高10サイクルまで温度履歴を与えた。本研究では、温度変化による各構成鉱物粒子の熱膨張、収縮量の違いによって発生すると考えられるマイクロクラックが強度・変形特性に及ぼす影響について特に着目し、考察する。

2. 3 強度試験の方法

供試体に温度履歴を与えた後、一軸圧縮試験と圧裂引張試験を行った。実験中の雰囲気温度は室温(ここでは 15°C)および履歴の最高温度とした。なお、試験はwetの供試体については水中で、dryの供試体については空気中で行った。試験は荷重速度を一定として制御し、本実験では一軸圧縮強度試験の場合、 0.7 MPa/s 、圧裂引張強度試験の場合、 50 N/s で行った。また、一軸圧縮強度試験の際には供試体に貼り付けたひずみゲージにより縦ひずみと横ひずみを同時に測定した。各試験に用いる供試体は1つの条件に付き5本とした。

3. 実験結果および考察

3. 1 実験結果

図-1 および図-2 は大島花崗岩について、圧縮強度試験を行った結果をとりまとめたものである。いずれの場合においても温度履歴回数が増加するのに伴い、圧縮強度が低下している。しかし、温度履歴回数が増加するのに伴い圧縮強度の低下の割合が減少しており、今回の温度履歴幅ではいずれはある値に収束することがうかがえる。wetとdryで比較すると、dryの方がいずれの場合にも圧縮強度が大きい。また、温度履歴の幅が大きい方が強度低下も大きいことがわかる。図-3 はwetの試料における各岩石の圧縮強度(σ)を履歴を受ける前の圧縮強度(σ_i)で除した値を圧縮強度比(σ/σ_i)として示したものである。いずれの場合においても温度履歴回数が増加するのに伴い、圧縮強度が低下しているが、大島、稲田の両花崗岩に比べ、