

清水建設(株) 和泉研究室 正会員 ○奥野哲夫
 同上 技術研究所 正会員 百田博宣
 同上 技術研究所 正会員 竹中 久
 同上 土木本部 正会員 高崎英邦

1. はじめに

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。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。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。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、新たに提案する工法と従来工法による立坑湧水量を有限要素法により解析・評価し、今後の大深度立坑掘削時の湧水対策の基礎資料とする。

2. 立坑掘削工法と3次元浸透流解析

比較する掘削工法は、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方法（以下、地下水压低減工法と呼ぶ）である。地下水压低減工法は、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压を低下しておく。その後、立坑を掘削すると、事前に地下水压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。

今回の検討が基礎的な検討であることから、浸透流解析モデルは特に地盤の不均質性を考慮せず、立坑が掘削される地盤の透水係数は 1.0×10^{-6} cm/sで均一と仮定する。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。立坑ならびに補助坑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。要素分割図など詳細は発表当日示す。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32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

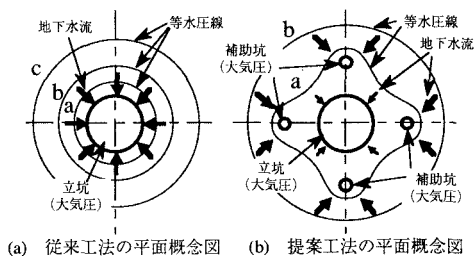


図-1 従来工法と提案工法の概念図

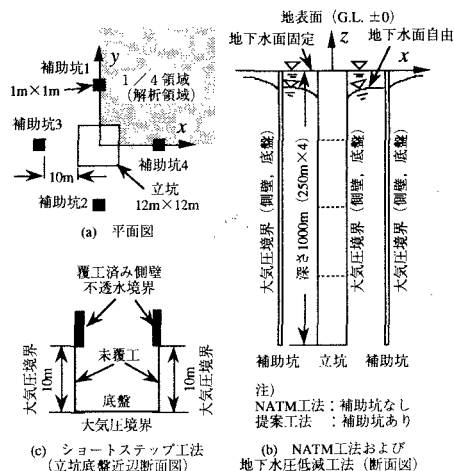


図-2 立坑/補助坑の配置と境界条件

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

キーワード：立坑、湧水、地下水、3次元数値解析

連絡先（住所：東京都千代田区内幸町2-2-2 富国生命ビル、電話：03-3508-8101、Fax：03-3508-2196）

面自由)とする2タイプを解析する。地表面からある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(地下水压0)とする(図-2(b)参照)。ショートステップ工法は、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(図-2(c)参照)。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。

3. 解析結果と考察

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-3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小さ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める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-4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ず増加しているものの、概ね500l/min前後と大きな変化はない。

4. 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の範囲で作業能率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。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。

5. 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。

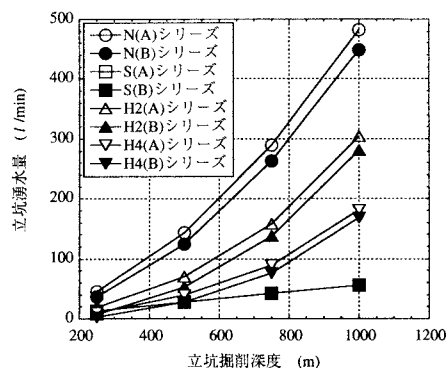


図-3 立坑掘削深度と立坑湧水量の関係

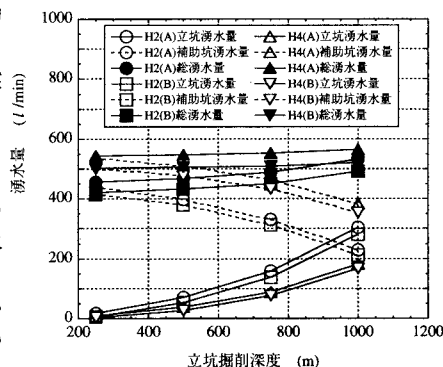


図-4 地下水压低減工法における総湧水量と湧水量内訳