

ボーリング孔からの湧水および遮水パッカーの 効果に関する予備解析

榊 利 博

1995年4月

動力炉・核燃料開発事業団

東濃地科学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒509-51 岐阜県土岐市泉町定林寺959-31

動力炉・核燃料開発事業団

東濃地科学センター 技術開発課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Tono Geoscience Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 959-31, Jorinji, Izumi-machi, Toki-shi, Gifu-ken 509-51, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1995

公開資料

PNC TN7410 95-002

1995年4月

ボーリング孔からの湧水および遮水パッカーの 効果に関する予備解析

榊 利博*

要 旨

坑道から掘削された調査用ボーリング孔は、その周辺の水理環境を乱すと考えられる。坑道の掘削影響評価研究において取得したデータを適正に評価するためには、このようなボーリング孔の影響を事前に把握しておく必要がある。

ここでは、坑道から掘削されたボーリング孔からの湧水が周辺の水理環境に与える影響、および遮水パッカーの効果に関して、2次元のFEM解析により予備的に検討した。その結果、以下のことがわかった。

- (1) ボーリング孔からの湧水を放置した場合、その周辺の圧力水頭が低下する。
- (2) 遮水パッカーを設置した場合、圧力水頭の低下の度合が軽減される。
- (3) パッカーの本数が多いほど、その効果が大きい。

本報は、その詳細について報告する。

Preliminary Analyses on an Influence of Groundwater Leak from a Borehole,
and on an Effect of Sealing Packers

Toshihiro SAKAKI *

ABSTRACT

It is considered that boreholes drilled from a drift cause disturbance to the surrounding hydraulic environment. In the study on the excavation disturbance, it is necessary to understand the influence of boreholes for proper evaluation of acquired data.

Using the two-dimensional F.E.M. analysis, an influence of a borehole on the surrounding hydraulic environment and an effect of sealing packers are investigated preliminarily. The results are as follows.

- (1) Allowing groundwater to leak out from a borehole, pressure head in the vicinity decreased.
- (2) Placing sealing packers, the decrease in pressure head was reduced.
- (3) The more packers, the more effective.

This report describes the detailed results and discussions of the investigation.

目 次

1. はじめに	1
2. 検討内容	1
3. 計測用ポーリング孔の遮水状態を変えた場合の感度解析	2
3. 1 目 的	2
3. 2 解析条件	4
3. 3 解析ケース	5
3. 4 解析結果	7
3. 5 考 察	16
4. 簡易モデルによる鉛直2次元および3次元解析の比較.	18
4. 1 目 的	18
4. 2 解析条件	18
4. 3 解析ケース	20
4. 4 解析結果	21
4. 5 考 察	29
5. まとめ	31
6. 今後の課題	32
参考文献	35

1. はじめに

岩盤中に坑道を掘削した場合、それまでの地下水の環境は乱され、何らかの変化が起こる。あるシステム（岩盤）にある刺激（坑道掘削）を与えた場合、それに対する有意な応答（変位、間隙水圧の低下などの力学的、水理学的な変化）は、ある限られた範囲内においてのみみられる。一般に坑道の掘削によって変位が生じる範囲（力学的な影響範囲）は坑道径の約3倍程度であるのに対し、間隙水圧が低下する範囲（水理学的な影響範囲）はそれよりもずっと大きいことが知られている。

動力炉・核燃料開発事業団所有の東濃鉱山では、掘削影響評価試験を含め数々の原位置試験が実施されてきた。坑道掘削には多額の費用がかかるため、掘削影響評価試験の各種試験のために十分な坑道長を確保するのは難しい。平成5年度に東濃鉱山北延NATM坑道において実施した掘削影響評価試験では、15m程度の坑道区間に多数の計測用ボーリング孔を掘削した。これらのうち、計器を埋設した孔以外はそのまま放置されており、中には毎分1リットルもの湧水がみられるものもある。このようなボーリング孔がその周辺の水理環境に与える影響は、上記のような理由で広範囲におよぶ可能性があると考えられる。

平成5年度には、これらのボーリング孔の孔口に遮水パッカーを設置し、湧水を簡易的に防ぐことを試みた。岩盤中の間隙水圧測定の結果、パッカー設置後に間隙水圧が上昇する傾向がみられ、パッカーによる遮水が周辺の間隙水圧の低下を防ぐ効果があることがわかった。

本報では、坑道から掘削された計測用ボーリング孔からの湧水が周辺の水理環境に与える影響および遮水パッカーの効果について、数値解析により予備的に検討した結果について報告する。解析は岩盤を多孔質媒体として有限要素法（FEM）を用いた鉛直2次元飽和-不飽和浸透流解析プログラム（UNSAF：岡山大学西垣ら）により実施した。また、2次元解析では、ボーリング孔は坑道軸方向に面状にモデル化されるため、その影響は過大評価されると考えられる。そこで、ボーリング孔を簡易にモデル化して2次元および3次元解析を実施し、その結果を比較することでその違いを評価する。3次元解析はFEMを用いた飽和-不飽和浸透流解析プログラム（TAGSAC：埼玉大学渡辺ら）により行った。

2. 検討内容

前節で述べたように、次の2項目について検討した。次節以降に各項目の詳細について述べる。

- (1) 計測用ボーリング孔の遮水状態を変えた場合の感度解析
- (2) 簡易モデルによる鉛直2次元および3次元解析の比較

3. 計測用ボーリング孔の遮水状態を変えた場合の感度解析

3.1 目的

岩盤内に坑道を掘削すると、それまでの水理環境は新たな境界条件（坑道壁面あるいはその近傍における間隙水圧=0）を与えられ、それに伴って変化する。さらにその坑道からボーリング孔を掘削すると、同様の新たな境界条件（ボーリング孔壁面あるいはその近傍における間隙水圧=0）が与えられる。そのスケールは坑道のそれに比べて小さいものの、周辺の水理環境は変化するはずである。このような影響は、ボーリング孔の本数、長さ、そして掘削径などの増加とともに大きくなると考えられる。

坑道の掘削による周辺岩盤への力学的・水理学的な影響を評価するための掘削影響評価試験では、試験坑道内において数々の試験が実施される。理想的には各試験に対応したボーリング孔は、互いに力学的・水理学的に干渉しないような十分な距離をあけて掘削することが望ましい。そのためには坑道掘削長を長くする必要があるが、これはコスト的な理由などから現実には非常に難しい。東濃鉱山北延NATM坑道では、図3-1に示すように、透水試験用のボーリング孔（MH-1～3）近傍の15m程度の範囲に他の計測用ボーリング孔を8孔掘削して試験を実施しているのが現状である。これらのボーリング孔の中には毎分1リットルの湧水をしているものもあり、これを放置しておくことは周辺の水理環境に対して相当の影響（主に間隙水圧の低下）を与えているはずである。平成5年度には、これらのボーリング孔に遮水用パッカーを設置して簡易的に湧水を止めることにより、周辺の間隙水圧の低下の防止に対してある程度の効果が認められた。

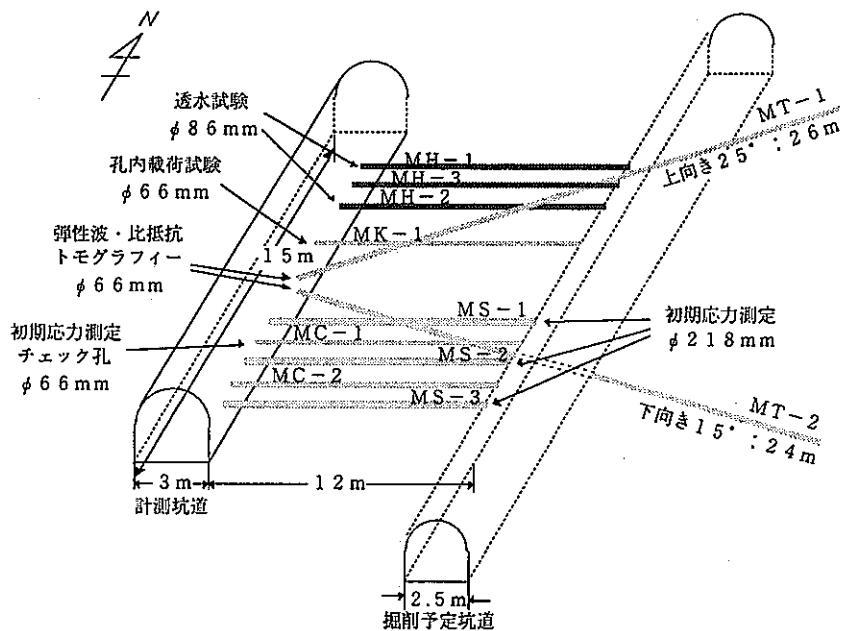


図3-1 東濃鉱山北延NATM坑道における計測用ボーリング孔の配置

ここでは、図3-1に示した計測坑道から掘削影響評価試験の計測用ボーリング孔を掘削予定坑道に向けて水平に1孔だけ掘削した場合を想定し、そのボーリング孔からの湧水を放置することによる周辺の水理環境への影響について数値解析により検討する。また、このボーリング孔の口元をパッカーにより遮水した場合、およびボーリング孔内の数点にパッカーを設置した場合の効果についても併せて検討する。

3. 2 解析条件

解析に用いたメッシュは図3-2に示したとおりである。また、下記の諸元等については実際の東濃鉦山北延NATM坑道に基づいて決定した。総節点数は1326、総要素数は1565、岩盤は等方・均質な多孔質体とした。岩盤の透水係数は全ケース共通で、既往の東濃鉦山周辺において実施した透水試験より得られた平均的な値である 1×10^{-7} (cm/sec)を用いた。計測坑道の深度は坑道底部が地表より125m、掘削径は3m、計測用ボーリング孔は $\phi 10$ cm、長さ12mとした。

境界条件を図3-3に示す。地下水面は地表面下20m、側方境界は水頭既知境界（圧力水頭=静水圧）、坑道壁面においては不飽和領域が発生しないと仮定し圧力水頭 $p=0$ 、その他は不透水境界とした。また、この地域における水理学的な影響範囲は既往の研究より50~100mとされているため、今回の解析範囲は坑道壁面より100mとした。解析はFEMによる鉛直2次元飽和-不飽和浸透流解析プログラム（UNSAF）を用いて実施した。

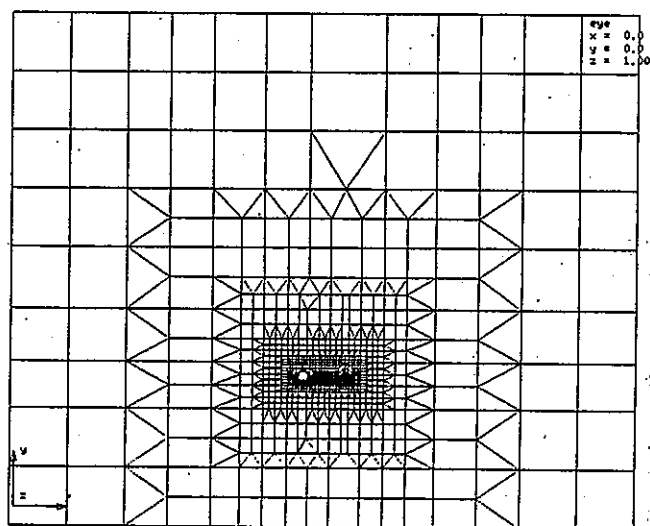


図3-2 解析メッシュ図

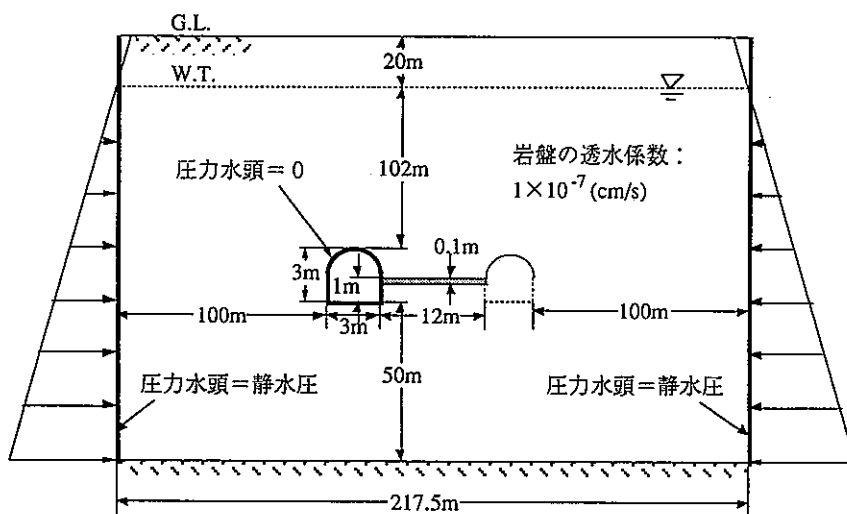


図3-3 解析領域および境界条件

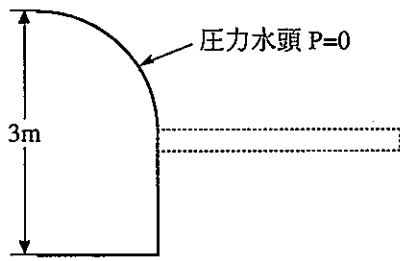
3.3 解析ケース

解析は、ボーリング孔を掘削する前の状態を基本ケースとし、ボーリング孔の遮水状態をいろいろと変えた以下の6ケース（表3-1および図3-4参照）について行い、その結果について比較検討する。ただし、パッカー部、難透水性材料および孔内高透水性部の透水係数については、岩盤の透水係数に対して相対的に決定した。一般に、透水係数を3オーダー以上変化させると十分に高透水性あるいは難透水性と見なせるといわれている。今回は、岩盤の透水係数よりそれぞれ±4オーダーずつ変化させた。

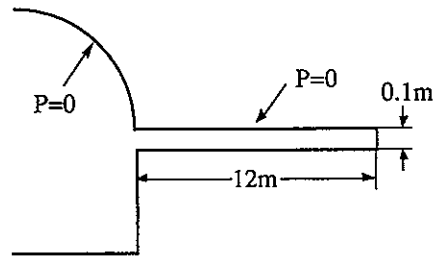
表3-1 解析ケース一覧

Case #	Descriptions
1	坑道のみ（基本ケース）
2	坑道+ボーリング孔（湧水放置）
3	坑道+ボーリング孔（遮水パッカ×1）※
4	坑道+ボーリング孔（遮水パッカ×2）※
5	坑道+ボーリング孔（遮水パッカ×4）※
6	坑道+ボーリング孔（難透水性材料で埋め戻し）※※

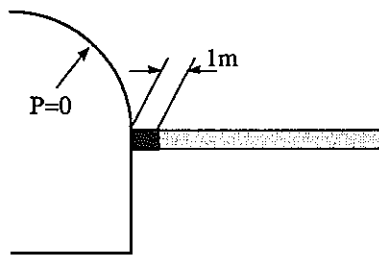
岩盤の透水係数（全ケース）： 1×10^{-7} (cm/s)
 ※ パッカ部の透水係数： 1×10^{-11} (cm/s)
 孔内高透水性部の透水係数： 1×10^{-3} (cm/s)
 ※※埋め戻し材料の透水係数： 1×10^{-11} (cm/s)



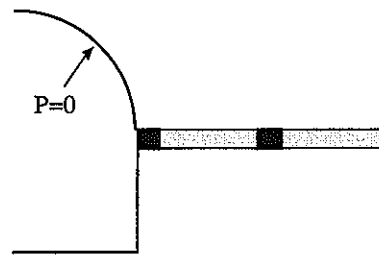
Case #1 : 坑道のみ



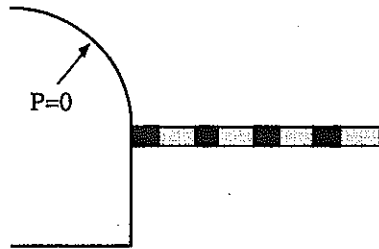
Case #2 : ホ-リング孔放置



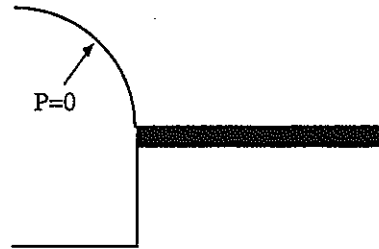
Case #3 : 遮水パッカー×1



Case #4 : 遮水パッカー×2



Case #5 : 遮水パッカー×4



Case #6 : ホ-リング孔内埋め戻し

図 3 - 4 解析ケース

3.4 解析結果

各ケースにおける圧力水頭の分布を図3-5~10に示す。図3-11~15は、ケース1（ボーリング孔がない場合）の圧力水頭値からの変化量を、ケース1の圧力水頭値に対する%表示で示したものである。ここで、正の変化は低下を表す。また、各ケースにおける坑道壁面からの湧水量を表3-2に示す。

表3-2 坑道壁面およびボーリング孔からの湧水量

Case #	坑道1 m当りの湧水量 (cm ³ /s)	Case #1 からの変化量 (%)
1	1.31×10^{-1}	—
2	1.61×10^{-1}	+23.2
3	1.41×10^{-1}	+8.0
4	1.36×10^{-1}	+4.5
5	1.33×10^{-1}	+1.7
6	1.30×10^{-1}	-0.2

ケース1

図3-5では、解析領域全体で坑道の掘削によるかなりの圧力低下がみられる。坑道近傍の等圧力線は坑道径の数倍程度までの範囲で、坑道を中心に同心円状に分布している。この範囲内においては、地下水は坑道中心に向かって流れる。

ケース2

図3-6のボーリング孔を放置した場合は、等圧力線は坑道およびボーリング孔を中心に同心円状となり、ボーリング孔の長さに対応して坑道の右側に大きく偏っている。例えば、ボーリング孔の先端からさらに1~2m奥の地点（坑道の掘削予定位置）における圧力水頭値は、ケース1とケース2でそれぞれ45m、15m程度となっている。これは、ボーリング孔を放置することにより、30mもの水頭低下が発生することを示す。

図3-11のケース1からの圧力変化（低下）量はボーリング孔を中心に同心円状に分布している。ボーリング孔の近傍での変化量は100%あるいはそれに近い値である。これは、ボーリング孔掘削前の圧力が全てあるいはほとんど0になったことを示している。

坑道内への地下水の流入量は、坑道の場合に比べて0.03cm³/s（約23%）増加しており、これがボーリング孔からの湧水量と考えられる。

ケース 3

ボーリング孔の口元に長さ1mの遮水パッカーを設置して湧水を抑えた場合、これを放置していたケース2に比べると、図3-7のように圧力の低下が抑えられる傾向がみられる。特に、孔口近傍(0~2m程度まで)の岩盤中の圧力水頭分布はケース1に近付いている。しかし、それ以深でのボーリング孔近傍における圧力低下は依然大きく、ボーリング孔の影響は明瞭に認められる。例えば、ケース2で参照したボーリング孔の先端からさらに1~2m奥の地点(坑道の掘削予定位置)における圧力水頭値は約30mである。これはケース2に比べて15m低下が抑えられているが、ケース1よりは15m低下している。

図3-12のケース1からの圧力変化量より、ボーリング孔による影響の割合およびその範囲はケース2に比べて小さくなっている。ボーリング孔先端部付近を中心とした直径15m程度の範囲で約15~40%の圧力低下が見られる。しかし、それ以外の部分における圧力低下量は15%以下と小さい。

坑道壁面およびボーリング孔からの地下水の湧水量は、坑道の場合に比べて約8%の増加がみられるが、ケース2の23%に比べると減少している。

以上より、口元のみ遮水パッカーを設置した場合は、ボーリング孔がないケース1とボーリング孔を放置したケース2の中間的な状態になっていると考えられる。

ケース 4

ボーリング孔の口元および中間の2カ所にそれぞれ長さ1mの遮水パッカーを設置した場合は、図3-8のようにボーリング孔近傍(2~3m程度の範囲)の圧力分布に影響がみられるもの、等圧力線のボーリング孔側への偏りはかなり小さくなっている。全体的な圧力分布としては、ケース1に比較的近いものとなっている。

ケース1からの圧力低下量は、図3-13のようにボーリング孔先端部付近を中心とした直径12m程度の範囲で、10~30%程度とケース3よりさらにその低下が抑えられている。

坑道壁面およびボーリング孔からの地下水の湧水量は、坑道の場合に比べて約4.5%の増加がみられるが、ケース3の8%に比べると減少している。

ケース 5

ボーリング孔の口元を含んだ4カ所にて長さ1mの遮水パッカーを設置した場合、顕著な圧力低下は図3-9のようにボーリング孔から1m以内の範囲でみられるが、その他の部分ではケース1の場合とほぼ同じ圧力分布となっている。

ケース1からの圧力低下量は、図3-14のようにボーリング孔の近傍5m程度の範囲においてのみ、5%以上の低下がみられた。

坑道壁面およびボーリング孔からの地下水の湧水量は、坑道の場合に比べて約1.7%の増加がみられるが、ケース4の4.5%に比べると減少している。

ケース6

ボーリング孔を難透水性材料で埋め戻した場合（遮水パッカーの数を極限まで多くした場合に相当する）は、図3-10のようにボーリング孔から数十cm程度の範囲でのみ圧力変化がみられるが、全体的な圧力水頭分布はケース1をほぼ一致する。

ケース1からの圧力変化はボーリング孔の近傍の非常に狭い範囲で発生し、またその変化量も非常に小さいため、図3-15に示したコンターのスケールでは全くみられない。

坑道壁面およびボーリング孔からの地下水の湧水量は、坑道の場合に比べて約0.2%の減少がみられる。

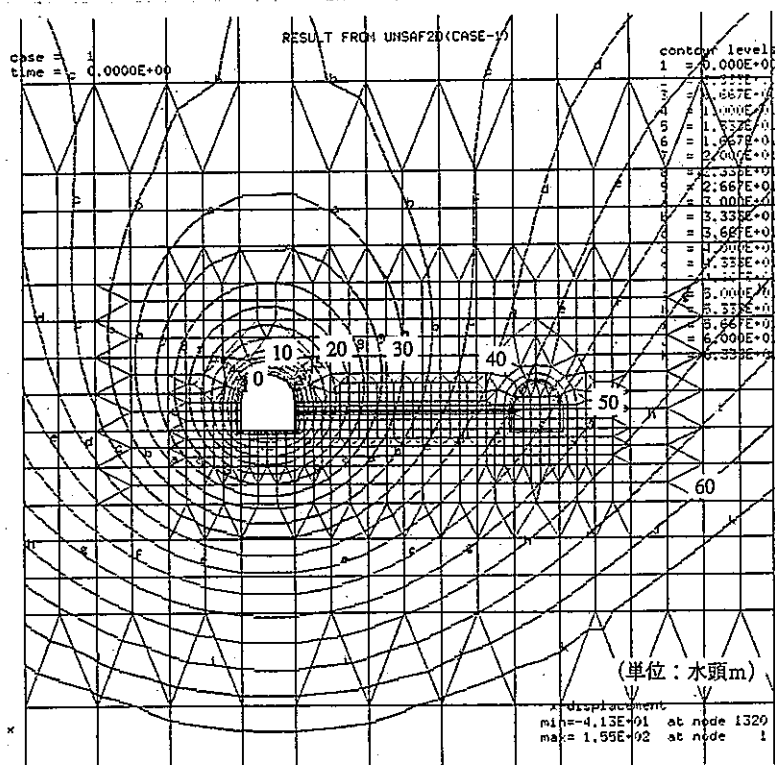


図 3 - 5 圧力水頭の分布 (Case #1)

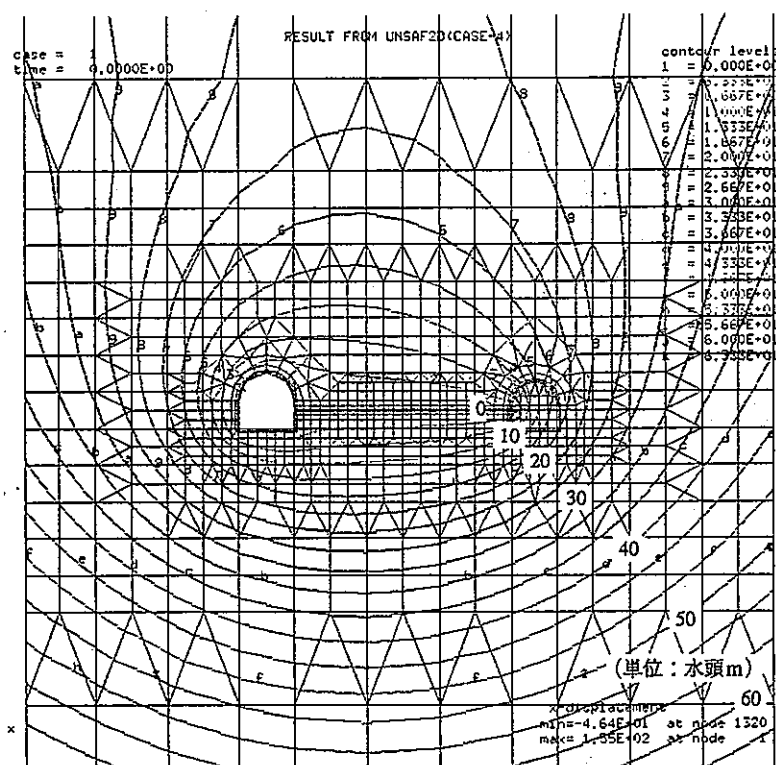


図 3 - 6 圧力水頭の分布 (Case #2)

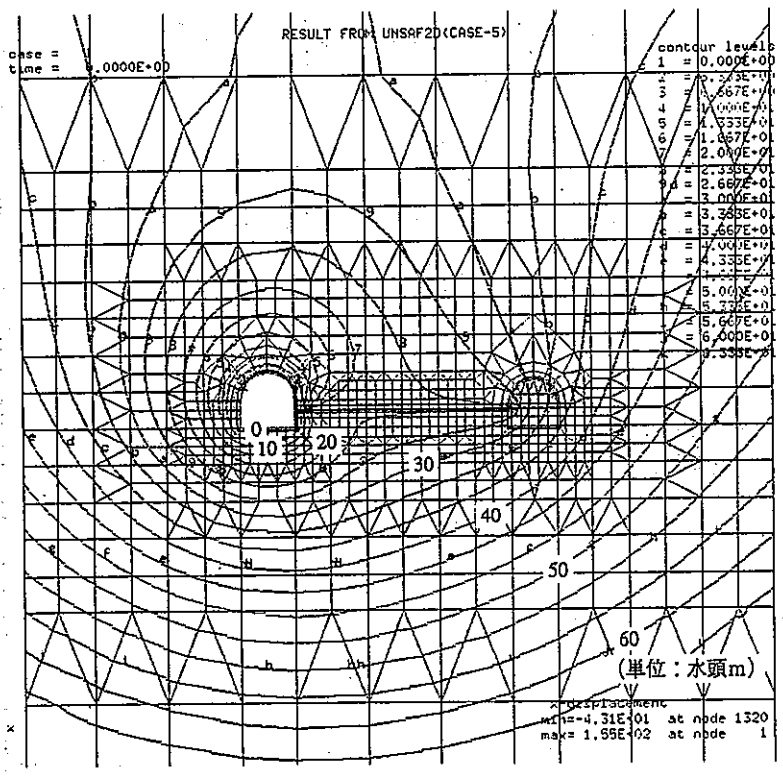


図 3 - 7 圧力水頭の分布 (Case #3)

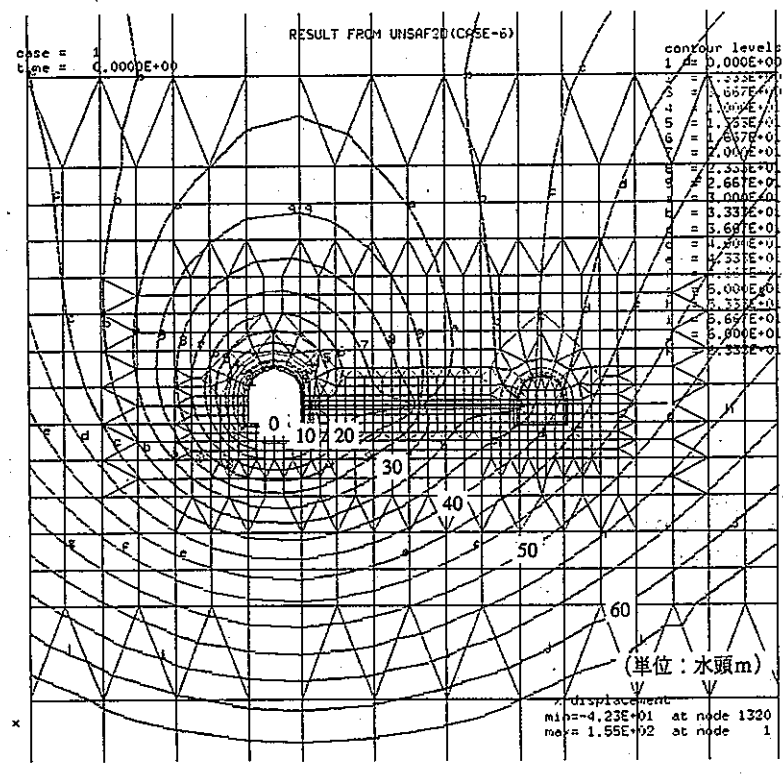


図 3 - 8 圧力水頭の分布 (Case #4)

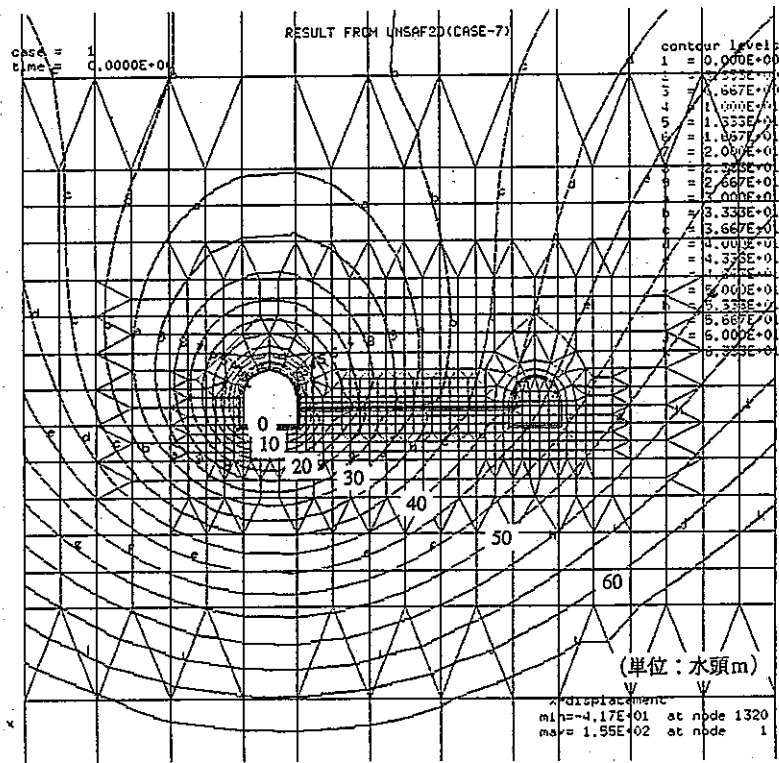


図 3 - 9 圧力水頭の分布 (Case #5)

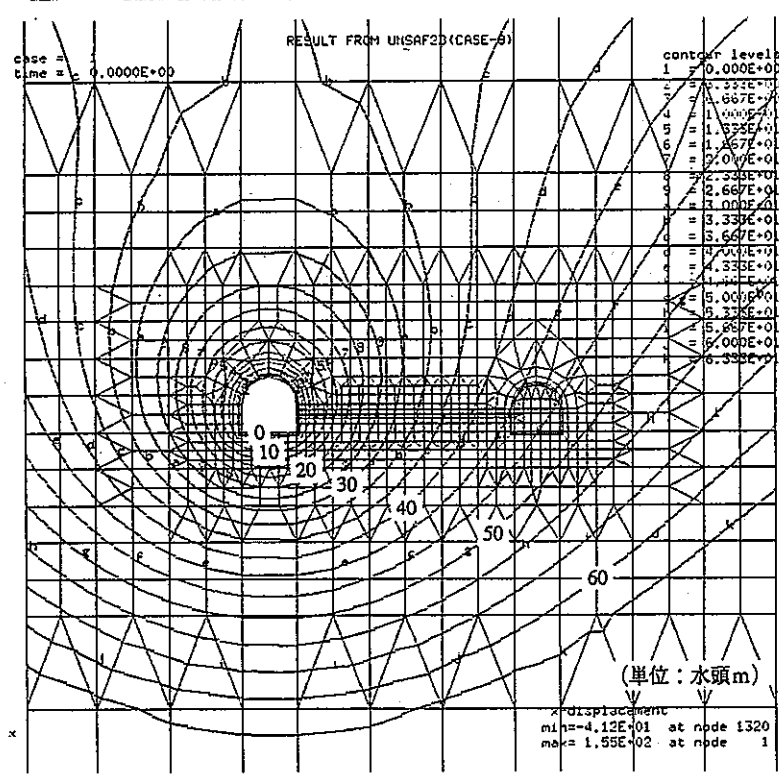


図 3 - 10 圧力水頭の分布 (Case #6)

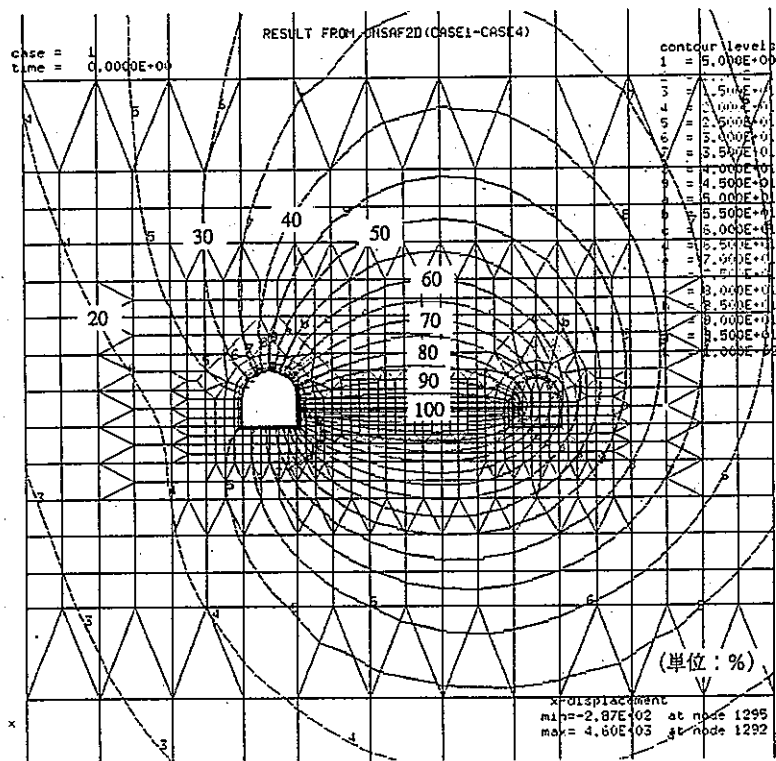


図3-11 ケース1からの圧力水頭低下量 (Case #2)

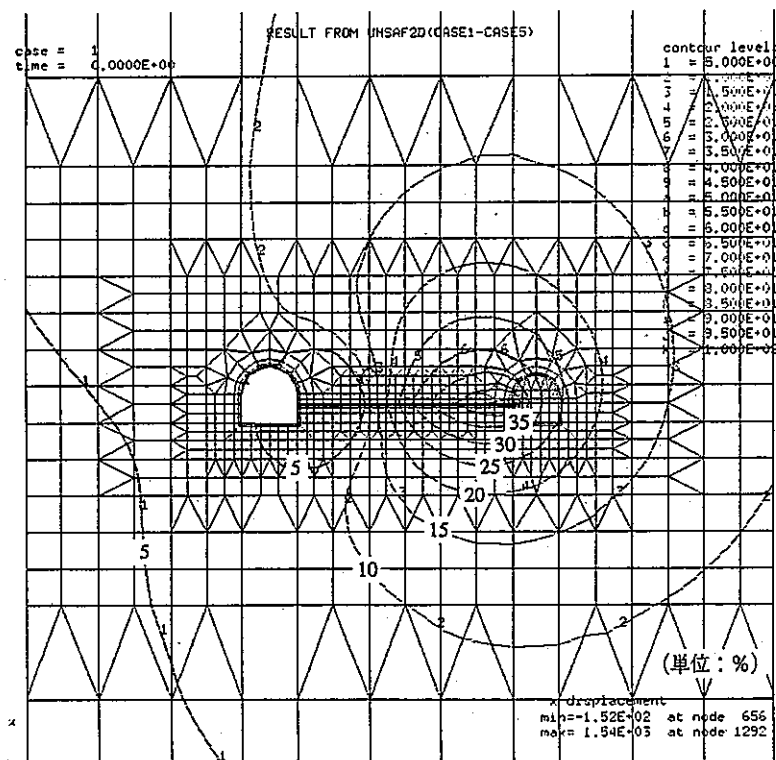


図3-12 ケース1からの圧力水頭低下量 (Case #3)

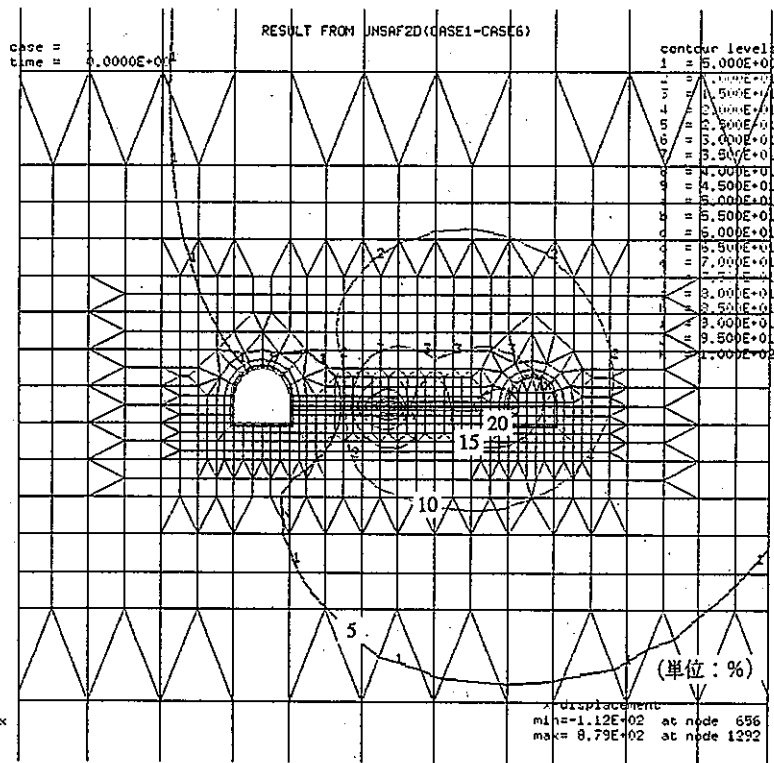


図 3-13 ケース 1 からの圧力水頭低下量 (Case #4)

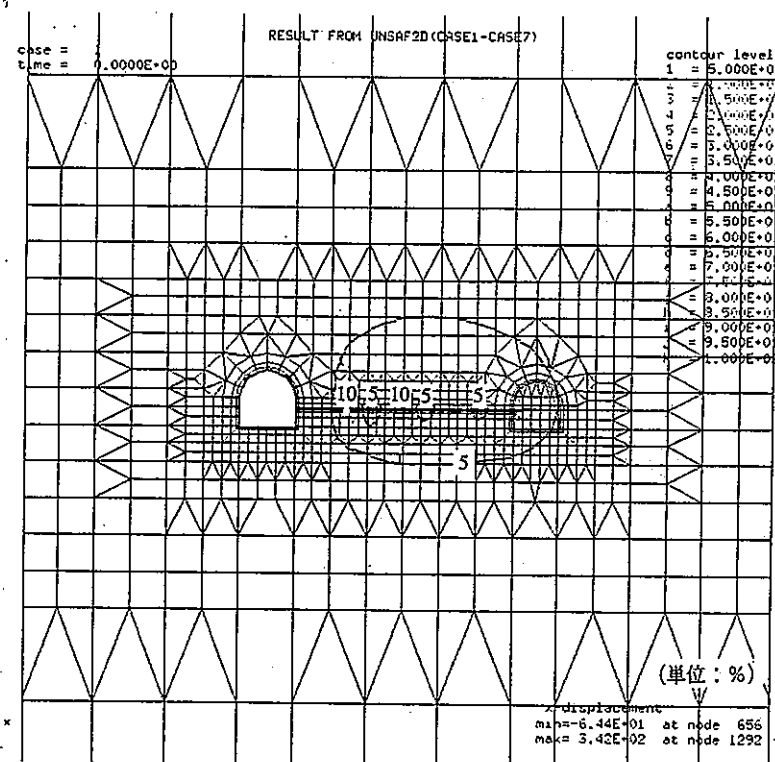


図 3-14 ケース 1 からの圧力水頭低下量 (Case #5)

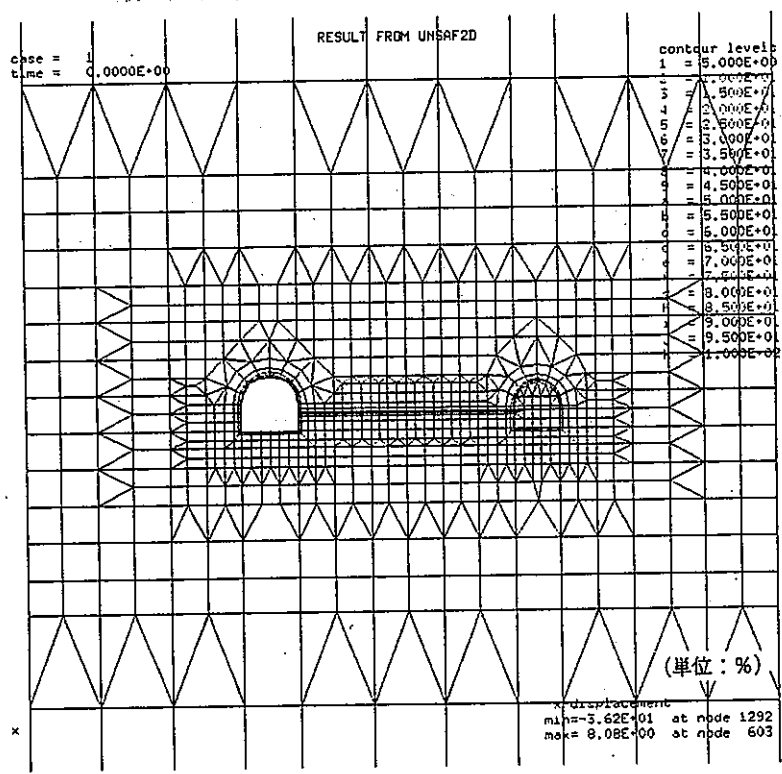
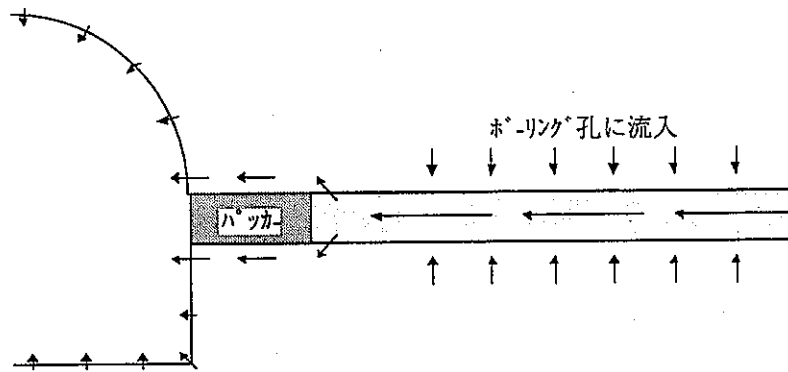


図 3 - 1 5 ケース 1 からの圧力水頭低下量 (Case #6)

3.5 考察

ボーリング孔からの湧水を放置した場合、孔内の1、2、4カ所に遮水パッカーを設置した場合、そして孔内を難透水性材料で埋め戻した場合の5ケースについて、ボーリング孔がない場合（ケース1）と比較する。

湧水を放置したケース2の場合は圧力の低下はボーリング孔および坑道を中心にかなりの範囲に広がった。ボーリング孔からの湧水量は、ケース1の坑道壁面からの湧水量の約23%に当たる0.03cm³/sであった。圧力水頭の分布はボーリング孔周辺で低下する傾向は正しく表現されていると考えられる。しかし、2次元解析であるためボーリング孔は面としてモデル化されており、実際のボーリング孔よりも大きなインパクトを与えていると考えられる。したがって、実際の坑道とボーリング孔のスケールの違いを考慮して今回の解析結果をみると、その低下量および湧水量は過大評価されている可能性がある。



	透水係数	動水勾配	流速
岩盤	中	中	中
パッカー	極小	大	極小
ボーリング孔	極大	小	極大

図3-16 ボーリング孔周辺の地下水の流れ

ボーリング孔内に遮水パッカーを設置した場合、その設置箇所が増加とともに圧力低下量は小さくなる。口元だけにパッカーを設置したケース3の場合、パッカー部分に等圧力線が集中し、残りの孔部分では等圧力線はボーリング孔に交わずにそれに沿うような分布になる。これは、ボーリング孔のごく近傍の地下水の流れは孔軸に垂直な向きで流入し、孔内においては場所による圧力差が小さいことを示している。孔内の圧力差が小さいと必然的に動水勾配も小さくなる。しかし、孔内の透水性が岩盤のそれに対して非常に高いことが動水勾配が小さいことに対して卓越するため、流速は岩盤中に比べて大きくなる。水は流れやすい部分を選択的に通るので、ボーリング孔周辺の地下水は孔内へ流入し孔内を坑壁に向かって流れることになる。このような

ボーリング孔内の流れは、パッカー付近に到達すると難透水性のパッカーはあえて通過せず、相対的に透水性のよい岩盤に戻り孔口近傍の坑道壁面から湧出すると考えられる（図3-16参照）。ケース3において、遮水パッカーによってボーリング孔からの湧水量が完全に遮断されずケース1に比べて依然8%多いのは、このような流れによるものと考えられる。

遮水パッカーの数をさらに増やしたケース4、5の場合も同様に、パッカー部分に等圧力線が集中し、その他の部分ではボーリング孔に沿うように分布する。周辺の地下水はボーリング孔に垂直に向かって流入する。しかし、ボーリング孔が数箇所区切られ1区間の長さが短くなるため、その1区間内での場所（坑道壁側と孔底側）による圧力差が小さくなる。これに伴い周辺の間隙水圧分布への影響（圧力低下）も小さくなる。それぞれの区間における圧力値はその場所に応じて違ったものとなる。奥の区間に流入した地下水はまずその区間を流れ、パッカーの手前で岩盤に戻り、再度次の区間に流入する。パッカーの数が増えるところの回数が増加し、またパッカーの全長が大きくなるため岩盤中を流れる距離が大きくなる。したがって、ボーリング孔内の流れは坑道まで到達しにくくなり、坑道内に流入する量は減少しケース1の流入量に近づく。

ケース6では微量ではあるが、坑道内への流入量が0.2%程度減少している。これは、ボーリング孔部分を難透水性材料で埋め戻したことにより、その分だけ地下水が流出できる坑道壁面の有効面積が減った(-0.9%)ためと考えられる。

これまでに何度も述べたように、ここで得られた全ての解析結果はあくまでも2次元解析の結果であるため、ボーリング孔の影響（圧力低下量およびその影響範囲、湧水量など）は過大評価されていると考えられる。しかし、ボーリング孔の湧水により周辺の間隙水圧は低下すること、遮水パッカーを設置することにより間隙水圧の低下をある程度抑えられパッカーの数を増やすとその効果は大きいこと、などの傾向は実際の傾向と一致すると考えられる。

4. 簡易モデルによる鉛直2次元および3次元解析の比較

4.1 目的

これまでに行ってきた解析は全て2次元解析である。そのため、図4-1に示すように実際には線状のボーリング孔は面としてモデル化され、周辺の水理環境への影響は過大評価されると考えられる。一方、3次元解析ではボーリング孔を線としてモデル化することが可能であり、より現実を忠実に再現することができる。ここでは、このモデル化の違いによる影響を定性的に評価するために、簡易モデルを用いて2次元および3次元解析結果の比較を行う。

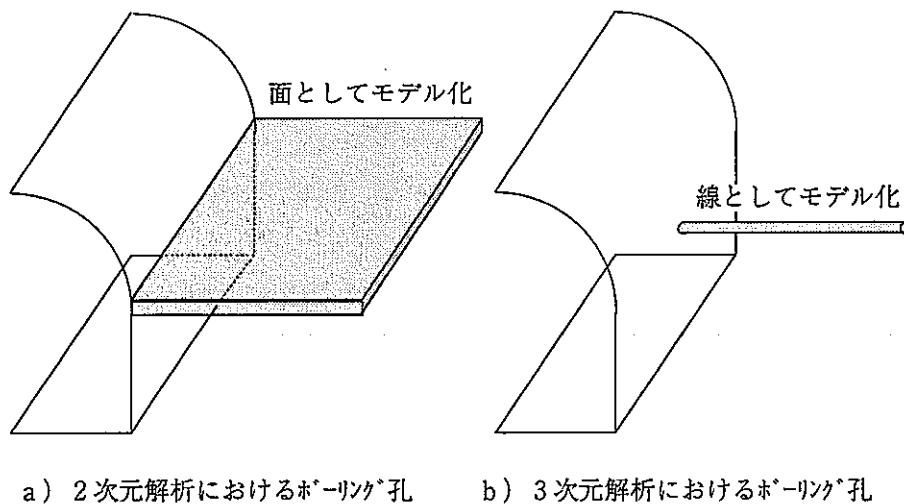


図4-1 2次元、3次元解析におけるモデル化の違い

4.2 解析条件

2次元および3次元解析に用いたメッシュは図4-2に示すとおりである。2次元モデルの総節点数は540、総要素数は494、3次元モデルの総節点数3780、は総要素数は2964である。半断面モデルであるため、坑道をはさんで左側にもボーリング孔がある状態をモデル化することになる。しかし、全断面解析ではメッシュが複雑になり計算時間が膨大になるため、ここでは半断面で解析することとした。岩盤は等方・均質な多孔質体とし、その透水係数は全ケース共通で 1×10^{-7} (cm/sec)を用いた。境界条件は図4-3に示すとおりで、地下水面は地表面下0m、側方境界は水頭既知境界(圧力水頭=静水圧)、坑道壁面においては不飽和領域が発生しないと仮定し圧力水頭 $p=0$ 、その他は不透水境界とした。ただし、3次元モデルの要素分割を簡単にするため、坑道はボーリング孔と同様に線としてモデル化した。2次元解析にはFEMによる鉛直2次元飽和-不飽和浸透流解析プログラム(UNSAF)、3次元解析にはFEMによる3次元飽和-不飽和浸透流解析プログラム(TAGSAC)を用いて実施した。

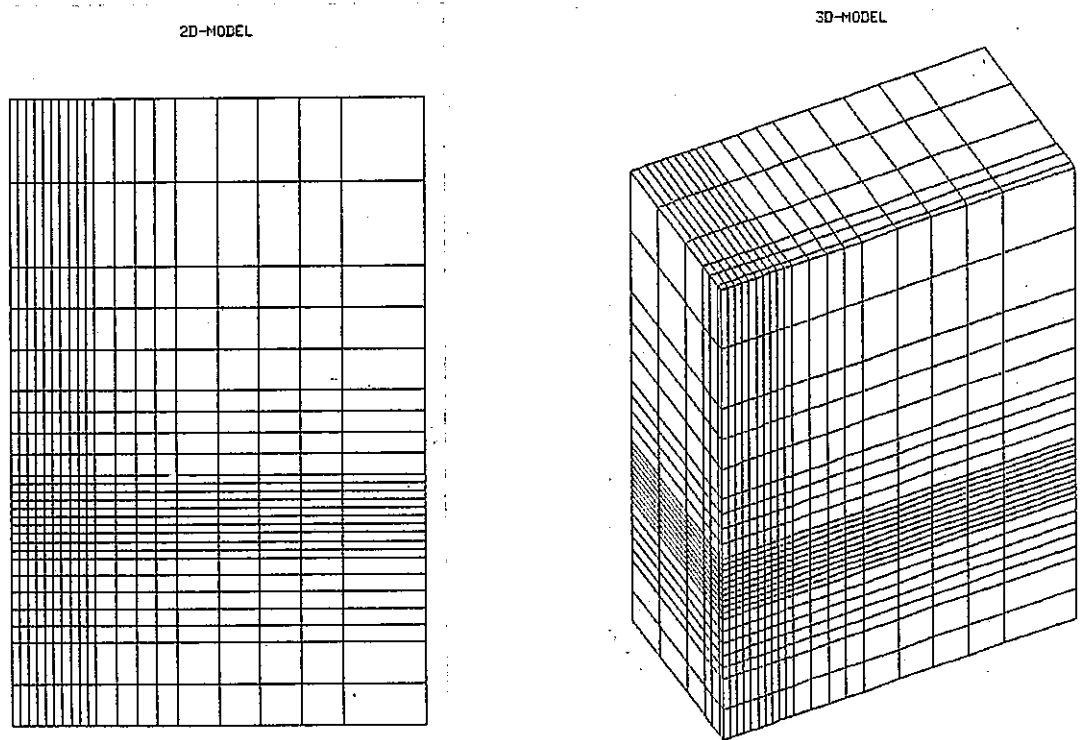


図4-2 2次元および3次元解析メッシュ図

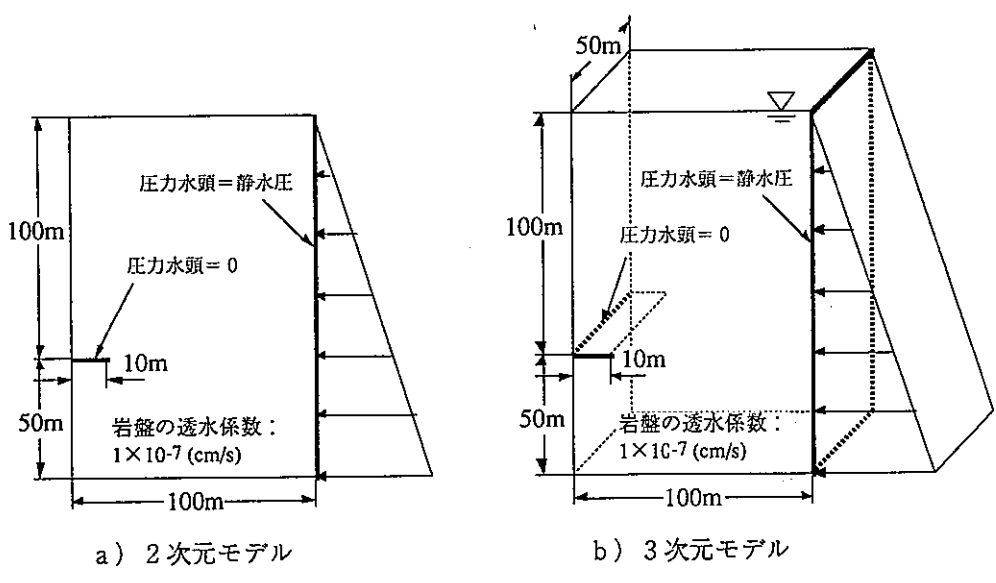


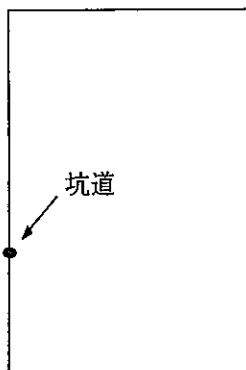
図4-3 解析領域および境界条件

4.3 解析ケース

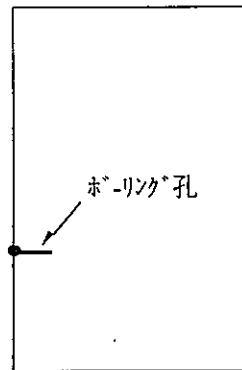
解析は、表4-1および図4-4に示す4ケースについて実施した。ただし、ケース9については、ケース8の2次元問題と全く同じ問題を3次元解析コードで解き、2次元および3次元解析コードの解が一致することを確認するために設定した。これは、飽和-不飽和浸透問題のような非線形問題では、それぞれの解析コードが持つ収束計算のアルゴリズムの違いなどにより解が一致しないことがあるためである。

表4-1 解析ケース一覧

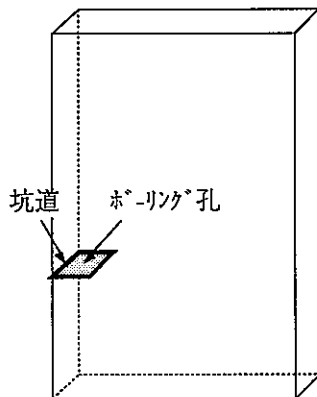
Case #	Descriptions
7	2次元、坑道のみ
8	2次元、坑道+面状ホ-リング孔
9	3次元、坑道+面状ホ-リング孔
10	3次元、坑道+線状ホ-リング孔



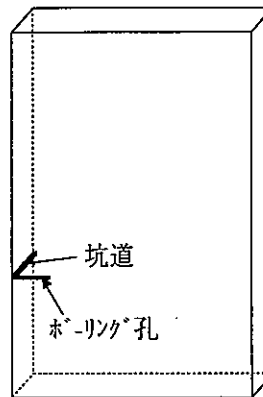
Case #7: 2次元
(坑道のみ)



Case #8: 2次元
(坑道+面状ホ-リング孔)



Case #9: 3次元
(坑道+面状ホ-リング孔)



Case #10: 3次元
(坑道+線状ホ-リング孔)

図4-4 解析ケース

4. 4 解析結果

図4-5～8に各ケースにおける圧力水頭分布および全水頭分布を示す。また、表4-2には、各ケースにおける坑道壁面（単位長さ当り）およびボーリング孔からの湧水量を示す。

表4-2 各ケースにおける湧水量

Case #	坑道 1 m 当りの湧水量 (cm ³ /s)	ボーリング孔からの湧水量 (cm ³ /s)
7	4.98×10^{-2}	—
8	0.50×10^{-2}	7.97×10^{-2} ※
9	0.50×10^{-2}	7.83×10^{-2} ※
10	4.95×10^{-2}	0.80×10^{-2}

※ 坑道軸方向 1 m 当り

ケース 7

2次元解析において坑道を1節点、つまり点としてモデル化（坑道軸方向に線状になる）したケース7の場合、その近傍における等圧力線は図4-5に示すように坑道を中心に同心円状に分布し、地下水は坑道へ向かって流れる。その時の坑道壁面からの地下水の湧水量は 4.98×10^2 cm³/sである。また、坑道の真上における地下水面は初期の状態より約17m低下する。

ケース 8

ケース7に、線（2次元解析であるので計算上は面になる）としてモデル化したボーリング孔を付け加えたのがケース8である。この場合の等圧力線は、図4-6に示すように、坑道およびボーリング孔の近傍ではこれらを囲むように分布する。坑道の真上における地下水面の低下量は初期の状態より約33mと、ケース7に比べてかなり大きい。坑道壁面からの地下水の湧水量は 0.50×10^2 cm³/sであり、ケース7に比べると約1/10である。一方、ボーリング孔からの湧水量は 7.97×10^2 cm³/sと坑道壁面からの湧水量に比べてかなり多い。ただし、この場合のボーリング孔からの湧水量は、面状にモデル化されたボーリング孔の坑道軸方向 1m 当りの流量である。

ケース 9

前述のように、ケース9は3次元解析において故意にボーリング孔を面としてモデル化し、ケース8と全く同じ状態としたものである。この両ケースでは等圧力線の分布、坑道内への流入量、そしてボーリング孔からの湧水量はほぼ一致している（図4-6、4-7参照）。また、ボーリング孔近傍の拡大図より坑道軸方向には圧力水頭、全水頭ともに一様な分布をしている。

ケース10

このケースでは、坑道およびボーリング孔はともに線としてモデル化されている。図4-8に示すように、地下水面はその低下量が一番大きいと考えられるボーリング孔を含む断面内の坑道の真上において約18m低下しており、坑道だけのケース7より1m前後低下量が大きいだけである。これに伴い、解析領域全体の圧力低下量はケース9に比べてかなり小さい。図4-8c、dのボーリング孔近傍の拡大図より、圧力水頭、全水頭ともに坑道軸方向に約20mの範囲までは大きな影響がみられる。しかし、それより離れた部分ではその影響は小さい。坑道壁面からの地下水の湧水量は $4.95 \times 10^2 \text{ cm}^3/\text{s}$ で、ケース7の坑道だけの場合とほぼ同じである。また、ボーリング孔からの湧水量は $0.80 \times 10^2 \text{ cm}^3/\text{s}$ であり、ボーリング孔を面としてモデル化した場合の湧水量に比べてかなり小さい。

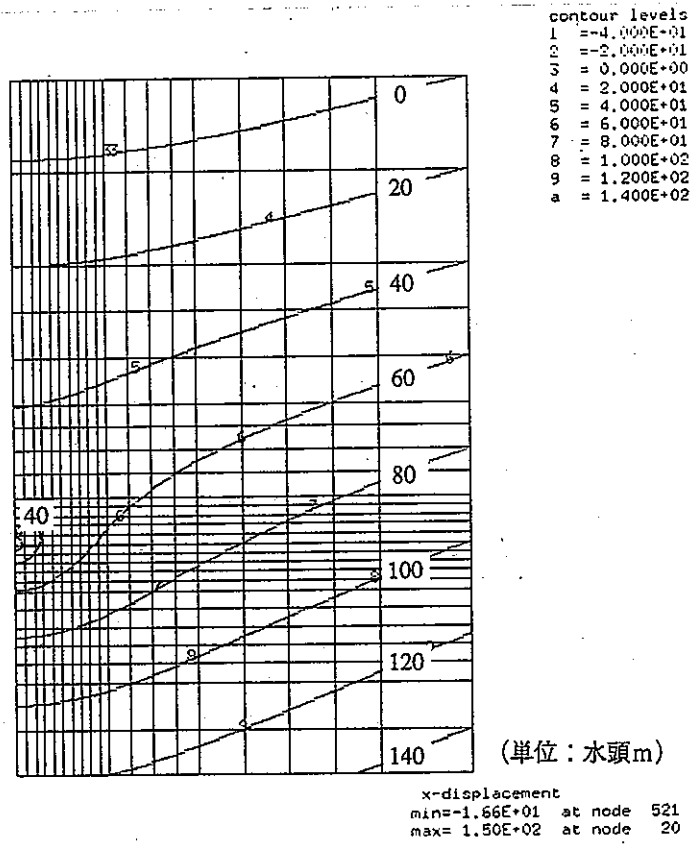


図 4 - 5 a 圧力水頭の分布 (Case #7)

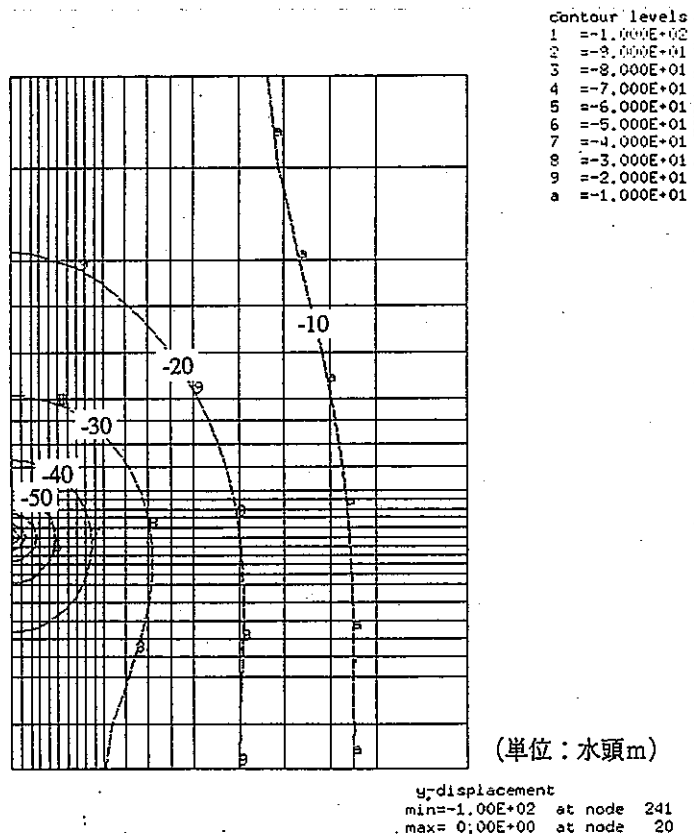
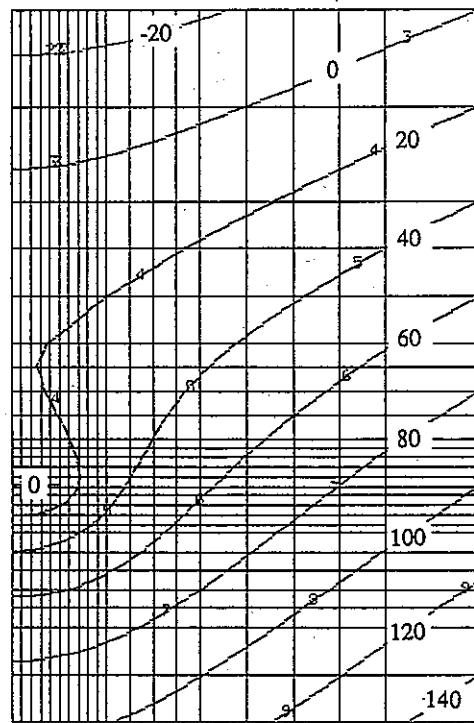


図 4 - 5 b 全水頭の分布 (Case #7)

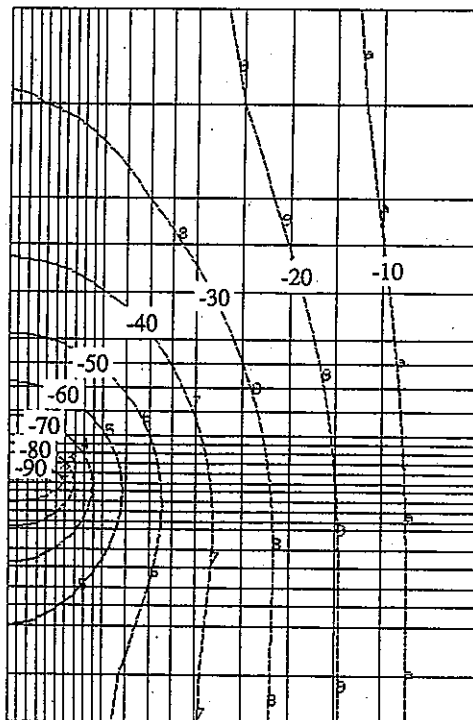


contour levels
 1 = -4.000E+01
 2 = -2.000E+01
 3 = 0.000E+00
 4 = 2.000E+01
 5 = 4.000E+01
 6 = 6.000E+01
 7 = 8.000E+01
 8 = 1.000E+02
 9 = 1.200E+02
 a = 1.400E+02

(単位：水頭m)

x-displacement
 min=-2.86E+01 at node 521
 max= 1.50E+02 at node 20

図4-6 a 圧力水頭の分布 (Case #8)



contour levels
 1 = -1.000E+02
 2 = -9.000E+01
 3 = -8.000E+01
 4 = -7.000E+01
 5 = -6.000E+01
 6 = -5.000E+01
 7 = -4.000E+01
 8 = -3.000E+01
 9 = -2.000E+01
 a = -1.000E+01

(単位：水頭m)

y-displacement
 min=-1.00E+02 at node 241
 max= 0.00E+00 at node 20

図4-6 b 全水頭の分布 (Case #8)

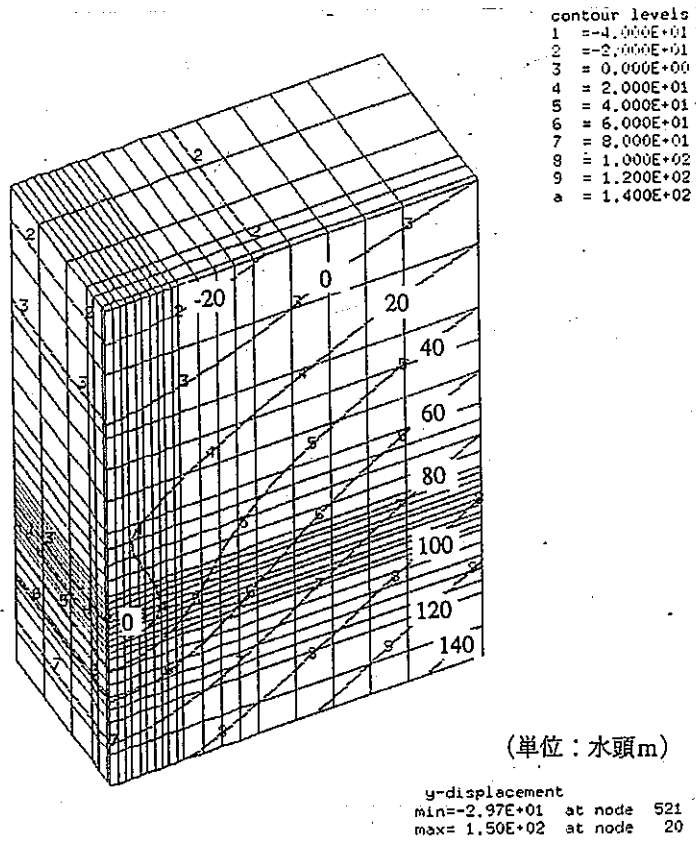


図 4 - 7 a 圧力水頭の分布 (Case #9)

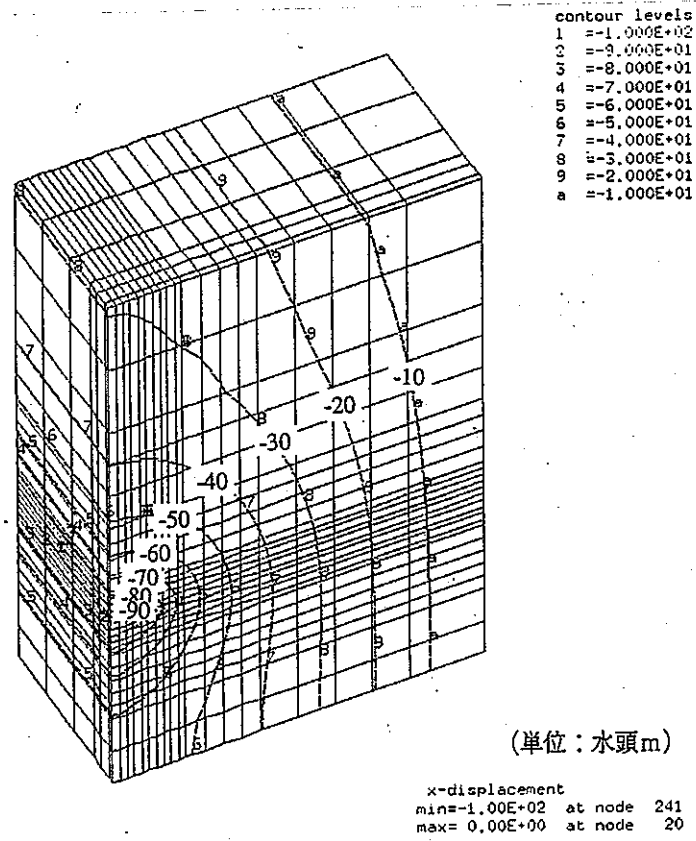


図 4 - 7 b 全水頭の分布 (Case #9)

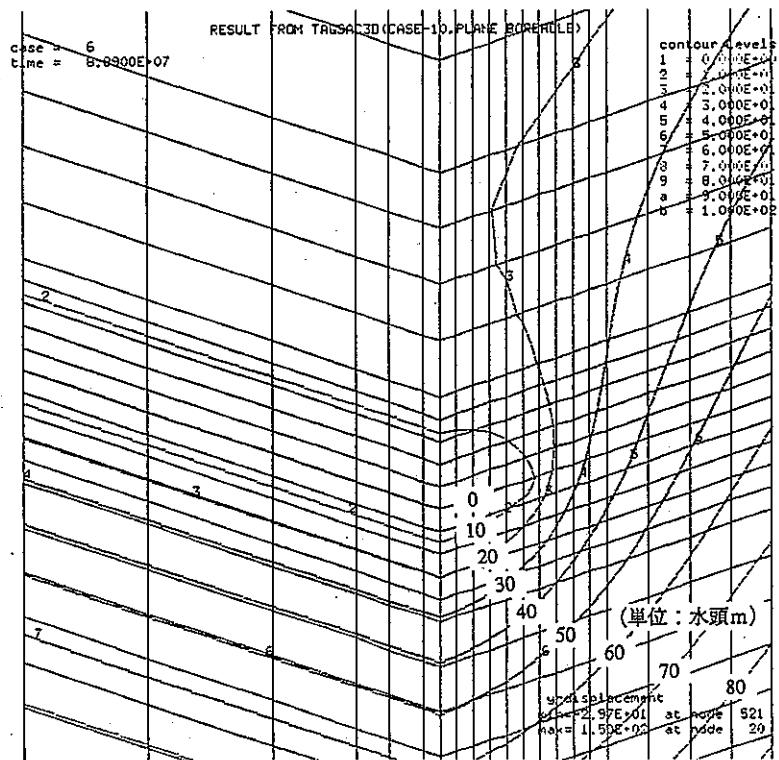


図4-7c 圧力水頭の分布 (Case #9) - 坑道近傍拡大図

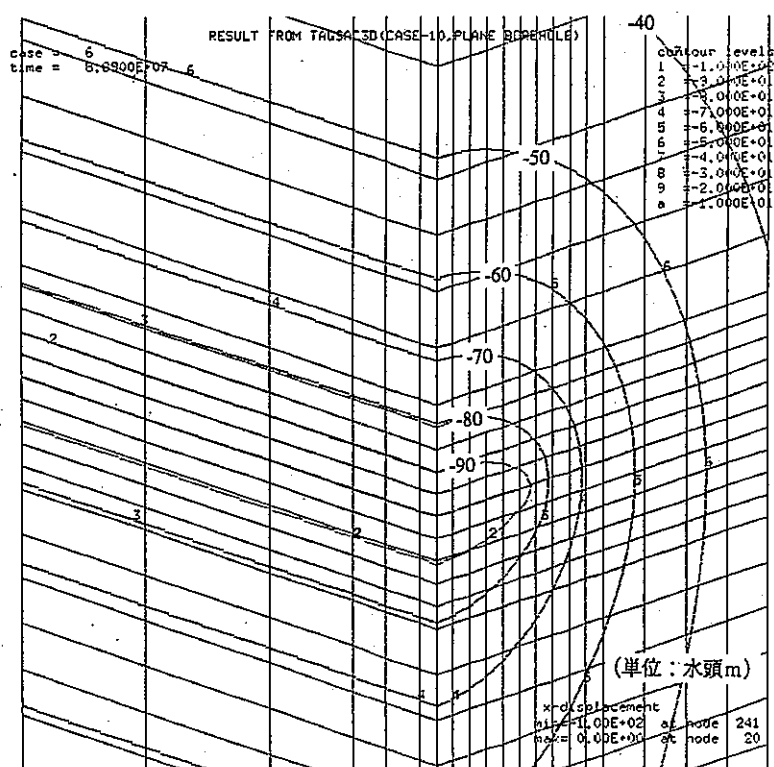
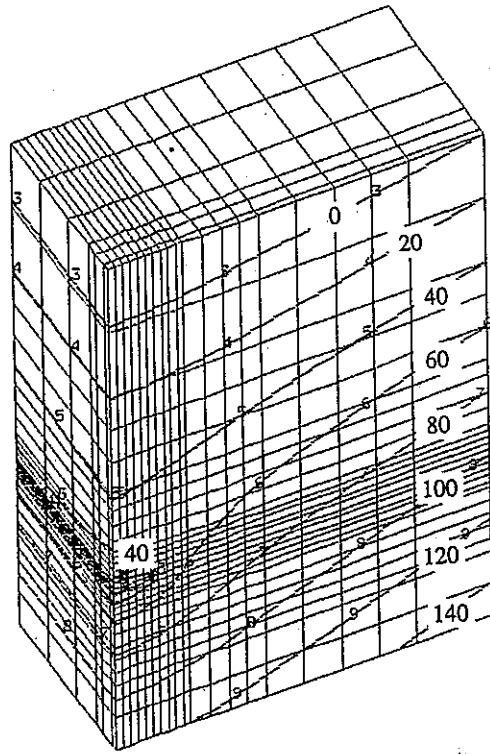


図4-7d 全水頭の分布 (Case #9) - 坑道近傍拡大図

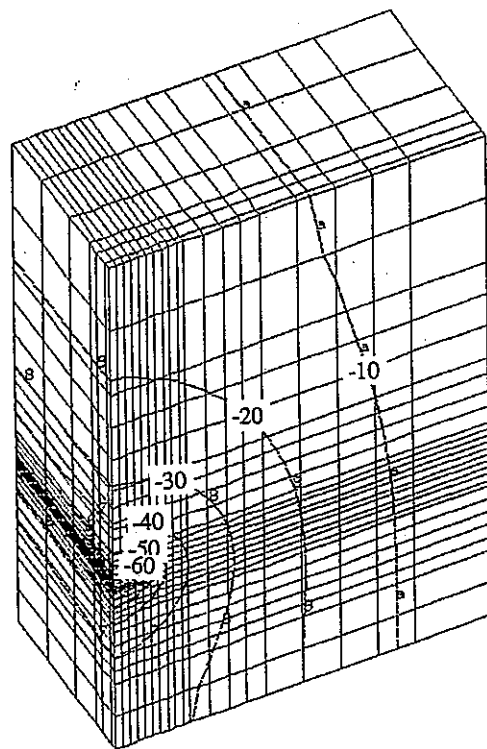


contour levels
 1 = -1.000E+01
 2 = -2.000E+01
 3 = 0.000E+00
 4 = 2.000E+01
 5 = 4.000E+01
 6 = 6.000E+01
 7 = 8.000E+01
 8 = 1.000E+02
 9 = 1.200E+02
 a = 1.400E+02

(単位：水頭m)

y-displacement
 min=-1.67E+01 at node 2681
 max= 1.50E+02 at node 20

図4-8 a 圧力水頭の分布 (Case #10)



contour levels
 1 = -1.000E+02
 2 = -9.000E+01
 3 = -8.000E+01
 4 = -7.000E+01
 5 = -6.000E+01
 6 = -5.000E+01
 7 = -4.000E+01
 8 = -3.000E+01
 9 = -2.000E+01
 a = -1.000E+01

(単位：水頭m)

x-displacement
 min=-1.00E+02 at node 241
 max= 0.00E+00 at node 20

図4-8 b 全水頭の分布 (Case #10)

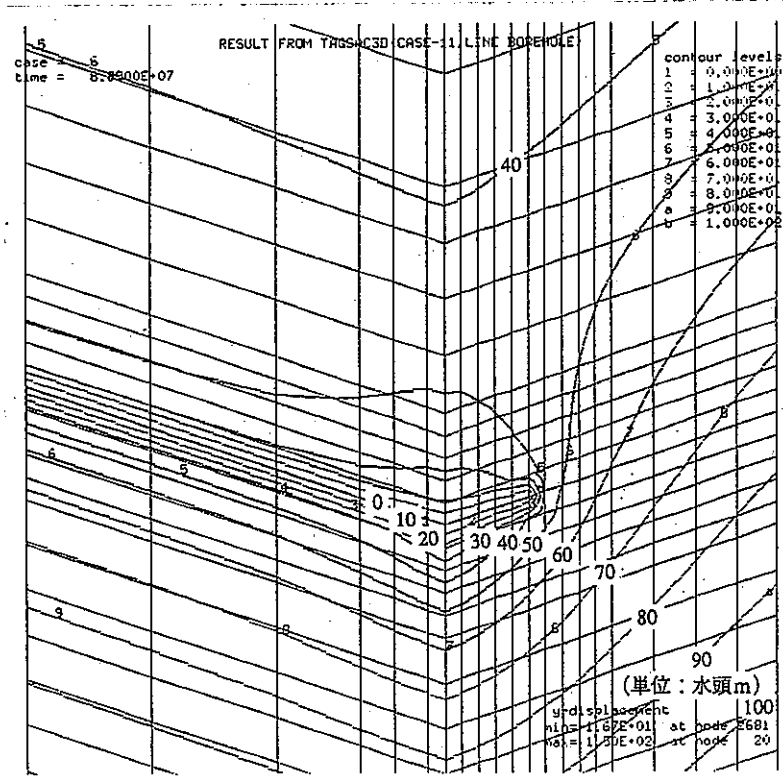


図4-8c 圧力水頭の分布 (Case #10) - 坑道近傍拡大図

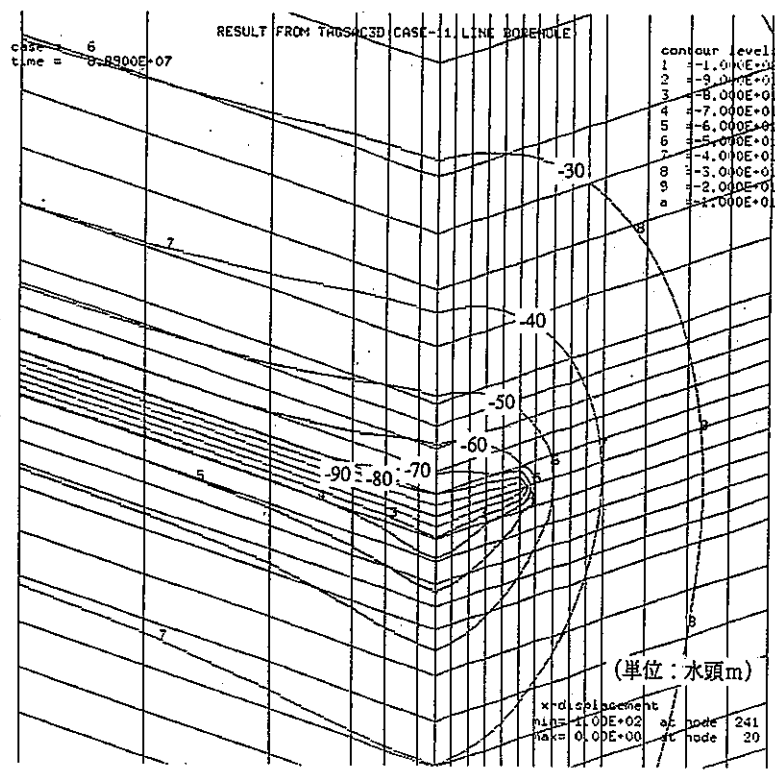


図4-8d 全水頭の分布 (Case #10) - 坑道近傍拡大図

4.5 考察

ケース7と8を比較する。解析領域全体の圧力低下は、ボーリング孔を含むケース8の方がケース7に比べて大きい。今回のように、線状に並んだ節点群にある境界条件を与えて坑道やボーリング孔をモデル化した場合、この坑道あるいはボーリング孔は、それを取り巻く要素の大きさによって決まる仮定の半径を持つことが知られている²⁾。一般に、1辺 ΔX の正方形あるいは正6面体アイソパラメトリック要素で囲まれた節点に境界条件を与えて坑道等をモデル化する場合、この仮定の半径は約 $0.1\Delta X$ となる³⁾。坑道をモデル化した節点群の周辺の要素は1辺1m、ボーリング孔をモデル化した節点群の周辺の要素は1辺1mの正方形要素である。これは、モデル化された坑道とボーリング孔は計算上は同じ10cm程度の半径を持つことを示す。通常の坑道のスケールから考えると、今回の半径10cmの坑道というのは明らかに過小にモデル化されている。しかし、ボーリング孔と坑道のスケールを相対的にみると、坑道に対してボーリング孔が過大にモデル化されていると考えることができる。したがって、ケース8では、図4-9 aのような坑道とボーリング孔というより、むしろ図4-9 bのように坑道とボーリング孔を合わせたスケールの横に細長い坑道がモデル化されていることになり、圧力低下量がケース7に比べて大きいと考えられる。

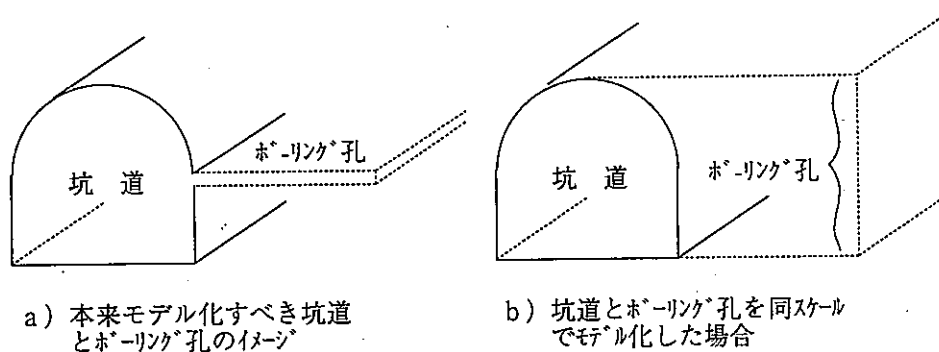


図4-9 坑道およびボーリング孔のモデル化（2次元）

以上のような理由で、本来モデル化されるべき坑道は、単に図4-9 bのような横長の坑道の一部となり、ケース8において坑道内（横長坑道の左壁面に相当）への地下水の流入量が非常に小さく、逆にボーリング孔（横長坑道の左壁面を除いた残りの部分に相当）からの湧水量がケース7の約2倍（表4-2参照）となっている。したがって、坑道およびボーリング孔をモデル化する場合は、上記のような仮定半径を考慮し、実際のスケールに合うようにすることが望ましい。しかし、現実的には解析メッシュが非常に複雑になること、計算時間が膨大になることなどの理由によりあまり行われていない。

次にケース8と9を比較する。これらは前述のように、全く同じ問題を2次元および3次元解析の2種類の方法により解析したものであるため、その結果はほぼ一致している。地下水面より上部の等圧力線およびボーリング孔からの湧水量に若干の差が

みられる。この理由としては以下のようなことが考えられるが、今回の場合にどれが卓越しているかは現時点では特定は難しい。

- ・ 2次元解析は坑道軸方向には理論的に無限遠として解くのに対し、3次元解析では坑道軸方向に有限の境界が有り（今回の場合は50m）その範囲を有限個の要素で分割して解く。
- ・ 2次元解析コードではいわゆるCST（要素内で水頭勾配が一定）要素を用いているのに対し、3次元解析コードではアイソパラメトリック要素を用いている。
- ・ それぞれの解析コードが、それぞれ違ったソルバーおよび繰返し計算のアルゴリズムを持つことによる計算誤差。

最後にケース9と10を比較する。ケース10の坑道壁面からの湧水量が坑道だけのケース7の場合とほぼ一致しており、ボーリング孔からの湧水量は非常に小さくなっている。湧水量の絶対値については、前述のモデル化スケールの問題のためその妥当性には問題がある。しかし、坑道およびボーリング孔からの湧水量の相対的な関係についての妥当性については、次のように検証することができる。掘削径3mで坑道長が無限遠の坑道から坑道軸に垂直に直径10cm、長さ12mの水平ボーリング孔を掘削した場合を考える。岩盤を多孔質かつ均質・等方と仮定すると、亀裂や破碎帯などは存在せず、坑道およびボーリング孔はこのような水みちと交差することはない。坑道壁面およびボーリング孔からの湧水は、あくまでも多孔質な坑壁あるいは孔壁全体から湧き出る量であり、その量はそれぞれのスケールに見合ったものとなる。したがって、坑道壁面からの湧水量よりボーリング孔からの湧水量が大きいケース9に比べて、ケース10の結果はより現実的であると考えられる。ただし、ケース10においても、坑道およびボーリング孔の解析上の仮定の半径は同じスケールとなっている。このことを考慮しても、ケース9のように面としてモデル化されたボーリング孔は線としてモデル化されたものに比べて、その影響は過大評価されていると考えられる。

以上のことから、2次元解析によりボーリング孔をモデル化した場合には、ボーリング孔は面としてモデル化されるため、実際に3次元解析でボーリング孔を線としてモデル化した場合に比べて、その影響は過大評価されることがわかった。また、今回は坑道を線としてモデル化したため、坑道とボーリング孔の計算上の掘削径は同じスケールとなり、ボーリング孔の影響がさらに過大評価された。圧力水頭値の低下量にこの過大評価の影響は明確にみられたが、圧力分布は2次元解析と3次元解析で同じような傾向を示した。したがって、2次元解析によりボーリング孔をモデル化した場合、圧力水頭値およびボーリング孔からの湧水量の信頼性は低いですが、周辺の圧力分布の変化の傾向は正しく表されていると考えられる。

5. まとめ

以上の検討結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 計測用ボーリング孔の遮水状態を変えた場合の感度解析

- ・ボーリング孔からの湧水を放置した場合、その流量は坑道のみの場合の約23%に当たる $0.03 \text{ cm}^3/\text{s}$ である。周辺の圧力低下はかなり広範囲に及び、ボーリングの上下10~20m程度の範囲でボーリング孔がない場合の圧力水頭に比べて約50%の低下がみられた。
- ・ボーリング孔内に遮水パッカーを設置した場合、その設置数の増加とともに圧力低下量およびその影響範囲は小さくなる。
- ・ボーリング孔のごく近傍の地下水の流れは孔軸に垂直な向きで流入し、パッカーで区切られたそれぞれの区間内においては場所による圧力差が小さい。
- ・ボーリング孔部分を難透水性材料で埋め戻すと周辺の圧力分布はボーリング孔がない場合とほぼ同じになる。
- ・ボーリング孔の湧水により周辺の間隙水圧は低下すること、遮水パッカーを設置することにより間隙水圧の低下をある程度抑えられ、パッカーの数を増やすとその効果は大きいこと、などの傾向がみられた。ただし、2次元解析であるため圧力低下量および湧水量は過大評価されていると考えられる。

(2) 簡易モデルによる鉛直2次元および3次元解析の比較

- ・線状に並んだ節点群により坑道やボーリング孔をモデル化する場合、要素サイズから決まる仮定の半径を考慮して、それぞれの掘削径に見合った大きさの要素で分割することが望ましい。
- ・全く同じ問題を2次元および3次元解析により解いた場合、理論の定式化、要素の種類、計算アルゴリズムの違いにより微少な違いはみられるが、ほぼ同じ結果が得られた。
- ・ボーリング孔を線としてモデル化した場合の湧水量および圧力分布は、面としてモデル化した場合に比べてより妥当であると考えられる。
- ・2次元解析ではボーリング孔は面としてモデル化されるため、その影響は実際のものより過大評価された。
- ・ボーリング孔を面および線としてモデル化した場合、圧力水頭の低下量にその違いは明確にみられた。しかし、圧力水頭の分布は両ケースにおいて同じような傾向を示したため、3節で述べた遮水パッカーの効果に関する知見は正しいと考えられる。

6. 今後の課題

本報で示した結果は、2次元のFEM解析による予備的なものである。したがって、定性的な現象の把握は可能であるが、定量的な把握までは至っていない。実際状況により忠実なモデル化を行い、さらに詳細な検討を行う手法の一つとして、3次元のFEM解析が考えられる。しかし、3次元解析で今回のようにボーリング孔や遮水パッカーをモデル化した場合、モデルが複雑になることは避けられない。

一方、今回の解析は以下に示すような仮定にもとづいている。それらがどのような場合に適用できるかという適用範囲についても検討が必要である。

- (1) 岩盤は多孔質媒体とみなすことができる。
- (2) 岩盤は等方・均質である。

実際の岩盤は、多くの亀裂または破碎帯を含み、等方・均質である場合は非常にまれである。岩盤中の地下水は多孔質体的なダルシ一流というより、亀裂や破碎帯などの水みちを選択的に流れるフラクチャーネットワーク的な流れが支配的であるといわれている。このような地下水の流れを解析するためのモデル化手法については、決定論的および確率論的の両方の立場から世界各国の研究機関で研究されている。しかし、決定論的なモデル化手法においては取得が非常に難しい個々の亀裂に関する物性値を必要とし、一方、確率論的なモデル化手法においても亀裂特性など全ての情報を含んだ透水テンソルのようなパラメータ（確率変数）の評価方法およびその信頼性などに問題がある。したがって、土壌中の浸透解析ほどに確立された手法はまだ存在しない。

以上のような理由で、ほとんどの場合において、岩盤中の地下水の流れは土壌中のその延長として解析しているのが現状である。(1)および(2)の仮定は、地質特性があまりよく把握されていない土質地盤中の地下水の流れを解析する際によく用いられるものである。しかし、実際の岩盤においては上述のように亀裂などを多く含むため、坑道から掘削したボーリング孔がこれらと交差した場合には、湧水量は非常に大きくなり、多孔質体としてのモデル化では表現し得ない複雑な現象が起こる。

図6-1に東濃鉦山北延NATM坑道内(MH-1、2孔：図3-1参照)において計測した間隙水圧を示す。隣接するボーリング孔(MT-1孔：図3-1参照)の遮水パッカーをある時点で撤去し湧水(毎分1リットル)を放置した場合、数m離れた計測地点で明らかに圧力が低下している。計測地点の位置によってその影響がすぐにみられるところとある程度の時間遅れがあるところとがある。これは、岩盤が多孔質、等方、均質であれば起こり得ない現象であり、岩盤中に複雑な水みちが存在することを示すと考えられる。

このような現象を詳細にモデル化・解析する手法を確立することは上述のように非常に難しい。仮にそのようなモデル化・解析手法があったとしても、岩盤中に3次的に分布すると考えられる複雑な水みちのネットワークをある程度特定するためには膨大な量のデータを必要とする。また、この3次的な現象を評価するためには最終

的には3次元解析に頼る以外にないが、メッシュが極度に複雑になること、計算時間が膨大になること、などの問題がある。現時点で確立されている解析手法、計測データの量、および解析ツール（解析コード、コンピュータの容量および性能、プレポストプロセッサの性能など）のレベルを考慮すると、岩盤中の水みちのネットワークを考慮した解析は難しいと考えられる。

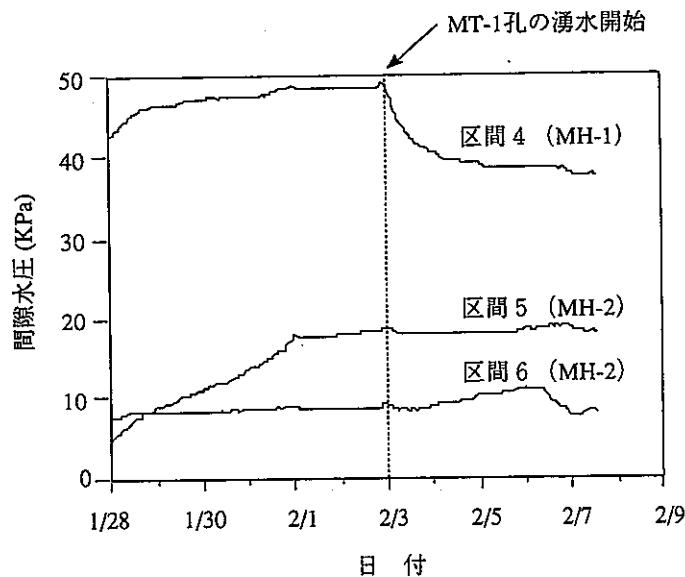
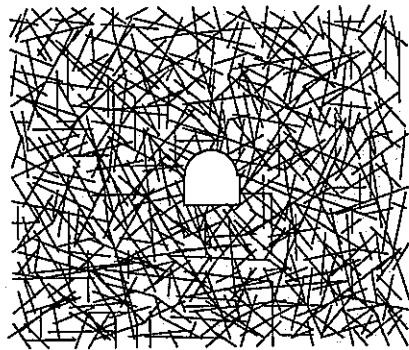


図6-1 隣接するボーリング孔からの湧水の影響

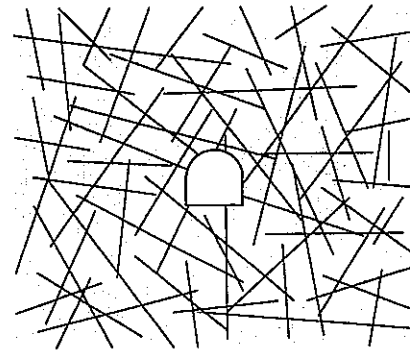
Long (1982)⁴⁾らは亀裂を統計的に発生させて数値解析を実施した。その結果、亀裂性岩盤を等価な多孔質体として取り扱うためには以下の条件を満たしていなければならないことを報告している。

- (1) 亀裂密度が大きいこと
- (2) 開口幅分布のバラツキが比較的小さいこと
- (3) 亀裂方向分布のバラツキが比較的大きいこと
- (4) 対象としている領域が大きいこと

このことを延長して考えると、例えば図6-2 aのように岩盤中に掘削する坑道のスケールに比べて亀裂間隔が十分に小さいような場合、周辺の地下水の流れは多孔質的な挙動を示すため、亀裂の影響を含めた岩盤の透水性を透水テンソルなどで表すことで従来の解析手法が適用できると推測される。逆に、図6-2 bのように坑道のスケールに比べて亀裂間隔が大きい場合には、局所的な亀裂の影響が卓越し、坑道近傍の地下水の流れは従来の解析手法で表現される多孔質体の流れとは違った挙動を示すと考えられる。また、今回のようにボーリング孔を含んだ解析の場合、亀裂間隔が坑道スケールの構造物に対して十分小さくても、ボーリング孔に対してそうでない場合には坑道周辺とボーリング孔周辺の解析精度が違ってくる可能性がある。



a) 坑道スケール \gg 亀裂間隔



b) 坑道スケール \leq 亀裂間隔

図6-2 坑道スケールと亀裂間隔

今後は、従来の多孔質体を対象とした解析手法の適用限界の検討に関する基礎研究の一つとして、図6-2に示したような坑道スケールおよび亀裂密度をパラメータとした感度解析（Longらと同様のフラクチャーネットワーク解析）を実施し、坑道周辺の岩盤の透水特性が多孔質近似できるための知見あるいは判断基準を得ることが必要である。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、東濃地科学センター環境地質課の石島文代氏に解析作業の一部を実施していただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 今井 久、柳沢孝一、渡辺邦夫 : 「立坑掘削の地下水流動影響予測解析 (II)」、第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 1992、pp. 71 - 75
- 2) Ichiro Kono : 「 The Equivalent Radius of A Source in Numerical Methods of Groundwater Flow 」、PROC. OF J.S.C.E.、No. 218、OCT. 1973
- 3) 榊 利博、上村佳司、田中良弘 : 「平面2次元浸透流解析における井戸のモデル化に関する一考察」、第28回土質工学研究発表会平成5年度発表講演集、1993
- 4) J.C.S. Long, et. al. : 「 Porous Media Equivalents for Networks of Discontinuous Fractures 」、W. R. R. VOL. 18、NO. 3、1982、pp 645 - 658

— 技術レポートリスト —

- TR/GE 89-01 清水和彦：地質環境データベースシステムの開発研究（基本設計），
PNC TN7410 89-029
- TR/GE 89-02 仙波毅・尾方伸久・坪田浩二：ボアホールレーダの我が国における花
崗岩岩盤への適用試験，PNC TN7410 90-003
- TR/GE 89-03 武田精悦（訳）：国際ストリパプロジェクト，PNC TN7410 90-004
- TR/GE 89-04 尾方伸久・大澤英昭：地下水特性調査技術開発の現状，検層技術(1)，
PNC TN7410 90-005
- TR/GE 89-05 尾方伸久・大澤英昭：地下水特性調査技術開発の現状，検層技術(2)，
PNC TN7410 90-006
- TR/GE 89-06 大澤英昭・吉田英一：深部花崗岩中の割れ目解析－花崗岩岩盤におけ
る割れ目特性およびその分布特性に関する研究－，
PNC TN7410 90-007
- TR/GE 89-07 杉原弘造・二宮康郎：堆積岩盤中における掘削影響評価－掘削による
緩み領域の計測・評価手法の研究開発－，
PNC TN7410 90-009
- TR/GE 89-08 柳澤孝一：広域地下水流動調査の現状について，PNC TN7410 90-021
- TR/GE 89-09 吉田英一：粘土質岩中における核種移行試験・研究－ベルギー・モル
原子力研究所との共同研究（その1）－，
PNC TN7410 90-019
- TR/GE 90-01 今井久・柳澤孝一：3次元飽和不飽和浸透流解析プログラムTAGSACの
概要，PNC TN7410 90-026

- TR/GE 90-02 野原壯・瀬尾俊弘・落合洋治：ウラン鉱床を利用したナチュラルアナログ研究（その1）－ウラン系列核種の放射非平衡について－，PNC TN7410 91-030
- TR/GE 90-03 吉田英一：粘土質岩中における核種移行試験研究－ベルギー・モル原子力研究所との共同研究（その2）－，PNC TN7410 91-017
- TR/GE 90-04 柳澤孝一・今井久・斎藤章・大澤英昭・中島誠：立坑掘削影響試験における地下水流動影響予測解析，PNC TN7410 91-013
- TR/GE 90-05 清水和彦：地質環境の長期的隔離能に係わる天然事象について(1)－気候変動と海面変動－，PNC TN7410 91-010
- TR/GE 91-01 H. Yoshida, M. Yui and T. Shibutani :A Study of Influence Factor on Uranium Fixation in the Tono Uranium Deposit, Japan, PNC TN7410 91-061
- TR/GE 91-02 中野勝志・斎藤章・花木達美：難透水性岩石を対象とした室内透水試験装置の開発，PNC TN7410 91-050
- TR/GE 91-03 尾方伸久・大澤英昭・仙波毅・柳澤孝一：多変量統計解析手法を用いた結晶質岩盤の割れ目解析，PNC TN7410 92-001
- TR/GE 91-04 石丸恒存・清水和彦：地質環境の長期的隔離性能に係わる天然事象について(2)－火山活動－，PNC TN7410 91-031
- TR/GE 91-05 仙波毅・尾方伸久・長谷川健・岩崎浩・渡辺邦夫：ボアホールレーダーによる結晶質岩盤中の割れ目帯調査－釜石鉱山原位置試験場における調査について－，PNC TN7410 92-005
- TR/GE 92-01 柳澤孝一・古屋和夫・大澤英昭・若松尚則・梅田浩司：我が国における地盤の透水性に関する調査研究（その1），PNC TN7410 92-015

- TR/GE 92-02 佐藤稔紀・石丸恒存・杉原弘造・清水和彦：文献調査による我が国の
岩石の物理的特性に関するデータの収集，
PNC TN7410 92-018
- TR/GE 92-03 瀬尾俊弘・清水和彦：我が国における地下水の水質に関するデータの
収集解析，PNC TN7410 92-017
- TR/GE 92-04 柳澤孝一・今井久・古屋和夫・若松尚則・梅田浩司：我が国を対象と
した地下水流動解析—その1 中部日本を対象にした地下
水流動解析—，PNC TN7410 92-019
- TR/GE 92-05 柳澤孝一・若松尚則・梅田浩司・今井久・古屋和夫：我が国における
水理地質学的特性に関する調査・研究，PNC TN7410 92-012
- TR/GE 92-06 松井裕哉・杉原弘造・佐藤稔紀・吉岡尚也：堆積岩地山における立坑
周りの力学的・水理学的な特性変化，PNC TN7410 92-046
- TR/GE 92-07 佐藤稔紀・松井裕哉・杉原浩弘・吉岡尚也：立坑掘削影響試験—地中
変位質計測に基づく掘削影響評価—，PNC TN7410 92-051
- TR/GE 92-08 湯佐泰久：立坑掘削影響試験ワークショップ—発表論文集—，
PNC TN7410 92-052
- TR/GE 93-01 H. Yoshida, T. Seo, T. Nohara, K. Ota, K. Hama, K. Kodama, T. Iwatsuki :Data
Compilation of Geoscientific Studies of Tono Uranium
Deposits, Central Japan, PNC TN7410 94-015
- TR/GE 94-01 前川恵輔・梅田浩司・小出馨・今井久・柳澤孝一：我が国を対象とし
た地下水流動解析—その2 東北日本を対象とした地下水
流動解析—，PNC TN7410 94-029
- TR/GE 94-02 杉原弘造・大石清隆・榊 利博・石島文代：機械による掘削影響試験
の事前調査・解析—平成5年度実施分—，PNC TN7410 94-