



JAEA-Research

2008-033

換気立坑掘削深度50mまでの湧水量解析

Prediction of Groundwater Flow Rate into Shaft to the Depth of 50m

柴野 一則 尾留川 剛* 安江 健一 舟木 泰智 操上 広志

Kazunori SHIBANO, Go ORUKAWA, Ken-ichi YASUE, Hironori FUNAKI and Hiroshi KURIKAMI

地層処分研究開発部門
堆積岩地質環境研究グループ

Sedimentary Environment Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

June 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

換気立坑掘削深度 50mまでの湧水量解析

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門
幌延深地層研究ユニット
柴野 一則^{*}, 尾留川 剛^{*}, 安江 健一⁺, 舟木 泰智, 操上 広志

[2008年1月28日受理]

立坑掘削に先立って立坑近傍に掘削した深度30m程度の10本の浅層ボーリング孔を利用したコア観察や透水試験結果を用いて、表層付近の水理地質構造モデルを構築し、換気立坑を対象とした簡易なモデルによる掘削解析を実施した。解析結果を深度50mまでの実測の湧水量と比較して表層付近の水理地質構造モデルや立坑周辺に設置した止水壁の性能を検証した。その結果、止水壁が充分に機能していること、止水壁より下部の掘削においては声問層の新鮮部の透水係数が湧水量に対して直接的に影響を及ぼすことが明らかとなった。

本報告のような簡易なモデルでの予測解析は迅速な評価・解析が可能であることから、地下施設の施工への反映に対して有益である。

幌延深地層研究センター（駐在）：〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432-2

※ 技術開発協力員

* 電源開発(株)

+ 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット

Prediction of Groundwater Flow Rate into Shaft to the Depth of 50m

Kazunori SHIBANO[※], Go ORUKAWA*, Ken-ichi YASUE[†], Hironori FUNAKI and Hiroshi KURIKAMI

Horonobe Underground Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received January 28, 2008)

The hydrogeological model of shallow zone was built by using the data of core observation and permeability tests in the shallow boreholes drilled prior to the shaft excavation. Then, groundwater flow analysis of shaft excavation was performed using the hydrogeological model. By making a comparison between inflow rate into the shaft obtained by the analysis and measured inflow rate to the depth of 50m, the hydrogeological model and the performance of the cut-off wall established around the shaft were evaluated. The prediction analysis showed that the cut-off wall was the adequate performance and the hydraulic conductivity of fresh rock in the Koetoi Formation directly influenced the inflow rate below the cut-off wall. The simplified model in the report is efficient to reflect the excavation of the underground facility.

Keywords: Horonobe Underground Research Laboratory, Groundwater Flow Inflow Rate, Prediction Analysis

※ Collaborating Engineer

* Electric Power Development Co., Ltd.

† Tono Geoscience Research Unit, Geological Isolation Research and Development Directorate

目次

1. はじめに	1
2. 解析条件の整理	2
3. 換気立坑掘削に伴う湧水量の予測	4
4. まとめ	6
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
2. Hydraulic conditions concerned with analyses.....	2
3. Groundwater Flow Analysis for Excavation of Ventilation Shaft	4
4. Conclusion	6
References	7

This is a blank page.

1. はじめに

日本原子力研究開発機構が実施している幌延深地層研究計画では、500m程度の立坑3本（換気、東、西立坑）と水平坑道からなる地下施設を建設する予定であり、平成17年度に地上からの調査研究段階（第1段階）を終了するとともに、地下施設を建設しながら行う調査研究段階（第2段階）¹⁾を開始した。平成18年度末現在、換気立坑は51m、東立坑は41mまで掘削を行っている。また今後、西立坑の掘削を進める計画である。

地下深部の地下水流动に着目した岩盤の水理に関する調査研究においては、立坑の壁面観察による割れ目などの地質性状の把握や立坑内の湧水量を測定するために設けた集水リングによる湧水量の把握、立坑周辺の水圧の長期モニタリング、坑道からのボーリング孔を利用した水理試験結果などを利用して水理地質構造モデルを構築・更新し、第1段階で構築したモデルとの比較を行うことにより、地下水流动の評価手法の妥当性の確認を目的のひとつとしている。さらに、第2段階あるいは地下施設を利用した調査研究段階（第3段階）で実施する調査研究課題の抽出などの計画へ反映するための、より詳細な水理地質環境の理解を目指している。

本報告では、立坑掘削に先立って立坑掘削予定地近傍に掘削した深度30m程度の10本の浅層ボーリングの岩石コアの地質観察とボーリング孔を用いた透水試験結果から、表層付近の水理地質構造モデルを構築し、換気立坑周辺を対象とした水理解析を実施した。

さらに、解析結果とその後に行った深度50mまでの実際の掘削にともなう湧水量の実測値と比較することにより、立坑の周囲に設置した止水壁が充分な性能を持つことを検証した。

2. 解析条件の整理

2.1. 表層付近の地質²⁾

Figure 2.1に、地表における露頭調査および浅層ボーリング調査の結果を踏まえて作成した、立坑周辺を対象とした深度30m程度までの表層付近における概念的な地質柱状図を示す。

表層付近の地質は、上位から主に土壌、泥岩の角礫～亜角礫と泥の基質からなる未固結堆積物、珪藻質泥岩からなる声間層に分類できる。声間層は、さらに上部の物理的風化部*と下部の新鮮部に分類できる。未固結堆積物は、上部から下部に向けて基質支持から礫支持と漸移的に変化する。また、同堆積物の上部には、所々に泥層が挟まれるとともに、植物片や炭質物なども含まれる。さらに、この堆積物は、北進地区の立坑周辺において平坦面を形成しており、現在の河川により下刻されている。以上の特徴から本堆積物は、角礫をともなう段丘堆積物と考えられ、以下では「角礫性段丘堆積物」とする。声間層の物理的風化部は脆弱で、部分的に著しく崩壊しており、上位の角礫性段丘堆積物との境界は漸移的である。声間層の新鮮部は、物理的風化部に比べて堅硬であり、直線的で割れ目面の明瞭な割れ目が認められる。

2.2. 表層付近の透水試験³⁾

地下施設および透水試験を実施した浅層ボーリング孔の位置をFigure 2.2に、各ボーリング孔の透水試験方法をTable 2.1に示す。換気立坑周辺において4ヶ所(HGW-V-1～HG-W-V-4)、東立坑周辺において3ヶ所(HGW-E-1～HG-W-E-3)、西立坑南方30m付近において1ヶ所(HGW-3-1(HGW-3-2, 3は異なる深度での水位観測孔))の掘削を行い、コア観察および透水試験を行った。各ボーリング孔の地質柱状図をFigure 2.3～Figure 2.5に、透水試験結果をFigure 2.6～Figure 2.13に、透水試験のデータをTable 2.2～Table 2.7にそれぞれ示す。

透水試験の結果、角礫性段丘堆積物の透水係数は、 $10^{-7} \sim 10^{-5}$ m/sオーダー、声間層の物理的風化部の透水係数は $10^{-7} \sim 10^{-4}$ m/sオーダー、声間層の新鮮部の上面約3mで $10^{-8} \sim 10^{-4}$ m/sオーダー、それ以深で $10^{-8} \sim 10^{-6}$ m/sオーダーの透水係数を示した。

角礫性段丘堆積物の中では下部の礫支持部の透水性が高いことがわかる。この原因としては、割れ目が泥などで充填されていない礫支持部や声間層の物理的風化部が、泥の基質からなる段丘堆積物上部よりも地下水を通しやすいためと考えられる。換気立坑周辺における声間層の物理的風化部の分布深度は、GL-10m～-25mの範囲であった。

透水試験の結果を踏まえた立坑周辺の表層における水理地質構造概念モデルをFigure 2.14に示す。角礫性段丘堆積物では上部の基質支持部から下部の礫支持部に向かい透水性が高くなり、声間層の物理的風化部において顕著な高透水領域が存在する。声間層の新鮮部の上面約3mでは、コア観察で確認できない凍結による割れ目によって透水性が高いと考えられる。それ以深の声間層の新鮮部では透水性は低い。

2.3. 止水壁の性能³⁾

立坑周辺における浅層ボーリング孔を利用した透水試験結果から、角礫性段丘堆積物の礫支持部および声間層の物理的風化部の透水性が高く、ここからの立坑への大量の湧水が発生するとともに、それが恒久的である可能性が示唆されたため、換気および東立坑周辺に止水壁を構築した。止水壁の施工深度は声間層の新鮮部上面深度であり、換気立坑でGL-28m、東立坑でGL-25mである。

* 岩石コア観察において声間層の物理的風化部と判断していた岩相は、立坑掘削時の壁面観察結果から、礫同士が接し合う礫支持の角礫層であることなどが判明した。

施工後の止水壁の性能を把握するために、止水壁においてボーリングを実施し、そのコアを用いた室内透水試験ならびに圧縮強度試験を実施し、また原位置での透水試験を行った。それらの試験結果を Figure 2.15, Table 2.8, 2.9 に示す。コアを用いた室内試験の結果から、透水係数は $1.65 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ を示した。

また、ボーリング孔を利用した原位置での透水試験の結果から、換気立坑では、止水壁材料は材齢 23 日で $9.65 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 、東立坑では、材齢 20 日で $7.57 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ の透水係数を示した。

2.4. 立坑への湧水量

立坑での湧水量の計測方法の概略図を Figure 2.16 に示す。止水壁内部への湧水量は、換気立坑では GL-28m に集水リングを設置し、積算流量計で測定している。また GL-28m 以深の湧水量は、排水時に積算流量計を用いて測定している。なお、流量の記録間隔は 7 日間を目安としている。

平成 19 年 2 月 12 日～平成 19 年 4 月 22 日までの湧水量の変化を Figure 2.17 に示す。GL 0～-28m の湧水量に大きな変動はなく、平均 $1.6 \text{m}^3/\text{day}$ であった。GL-28～-51m の湧水量は、3 月頃より増加傾向を示し、平均湧水量は $2.0 \text{m}^3/\text{day}$ であった。GL 0～-51m の平均湧水量は $3.6 \text{m}^3/\text{day}$ であった。

3. 換気立坑掘削に伴う湧水量の予測

3.1. 解析の概要

本章では、換気立坑の掘削に伴う湧水量の予測のための解析について記述する。換気立坑は東立坑に先行して掘削されること、また、両立坑での水理地質構造や止水壁の深度などの条件が同程度であることから、換気立坑のみを対象とした。

換気立坑では、平成18年度末現在 GL-51mまで掘削が行われており、平成19年2月12日～平成19年4月22日の期間における湧水量は平均 $3.6\text{m}^3/\text{day}$ 程度である。解析では、まず浅層ボーリング孔を利用したコア観察や透水試験結果を踏まえた水理地質構造モデルを利用した解析において、GL-50mまで掘削した段階での湧水量の実測値を説明することができることを感度解析によって確認し、止水壁性能や解析の妥当性について検討する。

湧水は地下施設建設において、排水処理設備等の観点から重要な鍵となっている。割れ目や断層の3次元分布などを詳細に取り入れた水理地質構造モデルを利用して湧水量予測解析を行う場合、数値解析用のメッシュ作成や解析に時間が掛かり、施工に反映することは現実的ではない。そこで本解析では、水理地質構造を水平と仮定し、また、割れ目分布なども考慮しない簡便な方法とした。

本来、岩盤は不均質続構造であり、地下施設建設が周辺環境へ与える影響を把握するためには、詳細な解析を行うことが重要である。一方、井戸理論を使った解析や2次元軸対称モデルを利用した解析や本報告で示すような簡易モデルは解析時間が短く、施工に反映する上では有効である。

このように本解析では止水壁の有効性を確認するとともに、その結果を施工に迅速に反映するための解析手法の有効性を評価するものである。

3.2. モデル化領域および解析メッシュの作成

予測解析は、3次元飽和一不飽和浸透流解析を有限要素法により実施した。作成した有限要素解析用メッシュをFigure 3.1に示す。モデル化領域は、理論式の影響範囲を考慮して換気立坑を中心に $100\text{m} \times 100\text{m}$ 、深度は GL-200mまでとし、東立坑を含まない範囲とした (Figure 3.2)。対象とした水理地質区分は、立坑周辺における表層付近の地質分布と対応するよう、表土、角礫性段丘堆積物、声問層の物理的風化部、声問層の新鮮部とした。

3.3. 水理定数および解析条件の設定

角礫性段丘堆積物、声問層の物理的風化部、声問層の新鮮部については、立坑周辺で実施した透水試験の実測値から透水係数を与えた。解析ケース一覧をTable 3.1, 3.2, 3.3に示す。Case-1は基本ケースである。基本ケース設定の考え方は以下の通りである。

- ・ 換気立坑から約 70m の位置に東立坑も並行して掘削されるが、本解析する深度 50m までは、換気立坑が先行して掘削されるため、東立坑の影響がないと推定されたため、解析ではその相互作用については考慮しない。
- ・ 表土については、実測値はないが主に泥と砂からなり、角礫性段丘堆積物の基質と類似していることから角礫性段丘堆積物と同じ透水係数とした。
- ・ 声問層の新鮮部の上面約 3m には透水性の高い部分がみられるが、地質ごとに透水係数を設定し、解析では考慮しない。
- ・ 止水壁の透水係数は、原位置透水試験結果に基づいて 10^{-8} m/s とした。
- ・ 掘削深度は 50m とした。
- ・ 降雨の影響については考慮せず、表面は不透水境界とした。

- 立坑の掘削面は浸出面境界とし、また側方境界は、HGW-V-2～4 の水理試験時の水位測定値を考慮し、GL-2m で水位固定とした。底面を不透水境界とした。

Case-0 は、止水壁の湧水抑制効果を確認するため、止水壁を施工しないケースとした。

Case-2～Case-4 は止水壁の透水係数に対し、Case-5, Case-6 は声間層の物理的風化部の透水係数に対し、また Case-7, Case-8 は、声間層の新鮮部の透水係数に対し、実測値を基準に想定しうる範囲で透水係数を変化させた。

なお全ケースとも、水分特性曲線は全て Figure 3.3, Table 3.4 に示すもの⁴⁾を使用した。

3.4. 解析結果

1) 止水壁の有効性

まず、止水壁を設置しなかったことを想定した解析 (Case-0) を行い、次に止水壁の透水係数を 10^{-11} m/s ～ 10^{-8} m/s に変化させ (Case-1～4)，止水壁の影響について検討した。止水壁を設置しない、また止水壁の透水係数と湧水量の関係、全水頭の分布、および湧水量の深度分布を Figure 3.4 ～Figure 3.6 に示した。

止水壁を設置しなかった場合 (Case-0) には、 $400 \text{ m}^3/\text{day}$ を超える湧水が生じたと考えられる。透水性の高い声間層の物理的風化部付近で大量の湧水が発生し、それ以深では湧水量が低下している。

止水壁を設置したケース (Case-1～4) について見ると、深度 28m 付近の声間層の物理的風化部と新鮮部との境界で顕著な湧水が見られる。これは、止水壁を回り込んだ地下水が境界付近に集中して湧出することを示している。止水壁の透水係数が 10^{-8} m/s の場合、湧水量は $17 \text{ m}^3/\text{day}$ 程度であり、透水係数が 10^{-9} m/s より低い場合は $3 \text{ m}^3/\text{day}$ 程度となった。止水壁の透水係数が 10^{-9} m/s の場合に実際の立坑からの湧水量 (約 $3.6 \text{ m}^3/\text{day}$) とほぼ同一の結果を示した。止水壁の透水係数を実測の 10^{-8} m/s より低く設定した場合において湧水量が実測値と近い結果となった原因の一つは、止水壁を対象とした原位置透水試験を実施した時は地下水温が約 8°C と低かったために、止水壁の材料であるセメントの水和反応が進行しておらず、高い透水係数を示していたことと想定される³⁾。

止水壁の透水係数を 10^{-9} m/s 以下に設定したケースで湧水量の実測値と解析結果が比較的整合した結果となったことから、止水壁の透水係数は 10^{-8} m/s , 10^{-9} m/s の 2 条件とし、声間層の物理的風化部、声間層の新鮮部の透水係数を変化させ感度解析を行った。

2) 声間層の物理的風化部

Figure 3.7, Figure 3.8, Figure 3.9 は、声間層の物理的風化部の透水係数を 10^{-6} m/s (Case-5), 10^{-4} m/s (Case-6) に変化させた時の湧水量、水圧分布および各深度での湧水量を示したものである。止水壁の透水係数が 10^{-9} m/s の場合、声間層の物理的風化部の透水係数の影響はほとんど見られず、湧水量はほぼ一定の $5 \text{ m}^3/\text{day}$ となっていた。止水壁の透水係数が 10^{-8} m/s の場合も、声間層の物理的風化部の透水係数に対する感度は小さいことが分かる。これは、止水壁によって上部の物理的風化部の高透水領域からの湧水が抑えられていることを示している。

3) 声間層の新鮮部

Figure 3.10, Figure 3.11, Figure 3.12 は、声間層の新鮮部の透水係数を 10^{-9} m/s (Case-7), 10^{-7} m/s (Case-8) に変化させた時の湧水量、水圧分布および各深度での湧水量を示したものである。図より湧水量は、新鮮部の透水係数に対して感度が大きい。これは、止水壁より下部における湧水量が声間層の新鮮部に直接的に依存しているためである。

4. まとめ

換気立坑掘削に先立って実施した深度 25～40m 程度の浅層ボーリング孔におけるコア観察や透水試験結果を用いて水理地質構造モデルを構築し、これを用いて、GL-50m までの立坑掘削解析を行つて実測の湧水量と比較して表層付近の水理地質構造モデルや止水壁の性能を確認した。

透水試験結果では、表層付近の角礫性段丘堆積物中の基質支持部で透水性が小さく、その下部の礫支持部や声問層の物理的風化部で透水性の高い箇所が存在し、新鮮部では物理的風化部に比べて透水性が低くなる結果を示した。

湧水量予測解析では、調査結果から得られた各層の基本的な透水係数を角礫性段丘堆積物を 10^{-7}m/s 、その下部の声問層の物理的風化部を 10^{-6}m/s 、その下位の声問層の新鮮部を 10^{-8}m/s を基本ケースとして、GL-50m までの掘削を対象とした感度解析を行つた。

実測された湧水量と感度解析との比較により、止水部の湧水量は主に止水壁の透水係数に依存し、止水壁の透水係数は 10^{-9}m/s 程度であったと推定され、止水壁が充分に機能していることが確認された。止水壁によって表層付近の高透性水領域からの湧水を抑えることは、深部の掘削を進めるにあたり、深部の水理地質構造や地下水の水質を把握するうえでも重要である。また、湧水抑制対策を施さない声問層の新鮮部の透水係数は、止水壁より下部の掘削によって生じる湧水量に対して直接的に影響を及ぼすことが示された。このことから声問層の新鮮部の透水係数を把握することが湧水抑制対策後の湧水量の正確な予測においては重要である。

今後、立坑および水平坑道の掘削が進むとともに、坑道内での壁面観察や集水リングでの湧水量の把握、坑道内からのボーリング孔を使用したコア観察や各種の調査が実施される予定である。また、地上からの調査段階で設置した水圧の長期モニタリング装置での観測を継続する予定である。これらの結果に基づいて、調査の進展とともに水理地質構造モデルの構築や地下水流動解析・湧水量予測解析を適宜行うことにより調査の進展に伴うモデルの高度化などの知見が得られることが期待される。

継続的なモデルの構築・地下水流動解析の実施は、調査の進展に伴う水理地質環境の理解の進展を提示する意味で重要であるが、それだけでなく、地下施設設計への反映のための情報化施工という観点でも極めて重要である。立坑間の相互作用や割れ目の連続性、地層の変形などを考慮したより詳細な検討を実施することは重要であるが、一方で、地下施設設計への反映においては、調査結果の迅速な評価・解析が要求されることから、本報告で示したような単純な水理地質構造を仮定した簡易な解析はプロジェクトの効果的・効率的な推進において重要である。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構幌延深地層研究センター：幌延深地層研究計画 坑道掘削(地下施設建設)時の調査研究段階(第2段階) 計画, JNC TN5400 2005-002, (2005)
- 2) 舟木泰智, 安江健一, 國丸貴紀, 尾留川剛, 名合牧人, 周氷河作用を被った地域における表層部の水理地質構造, 地質学会(2006)
- 3) 尾留川剛, 山上光憲, 舟木泰智, 名合牧人: 大深度立坑周囲に構築した止水壁による立坑湧水量の低減, 第42回地盤工学研究発表会平成19年度発表公演集(2007)
- 4) 池田光良, 関根達夫, 堀内康光: 地下水位・土壤水分観測システムの設置, 核燃料サイクル開発機構契約業務報告, JNC TJ5410 2004-014, (2005)

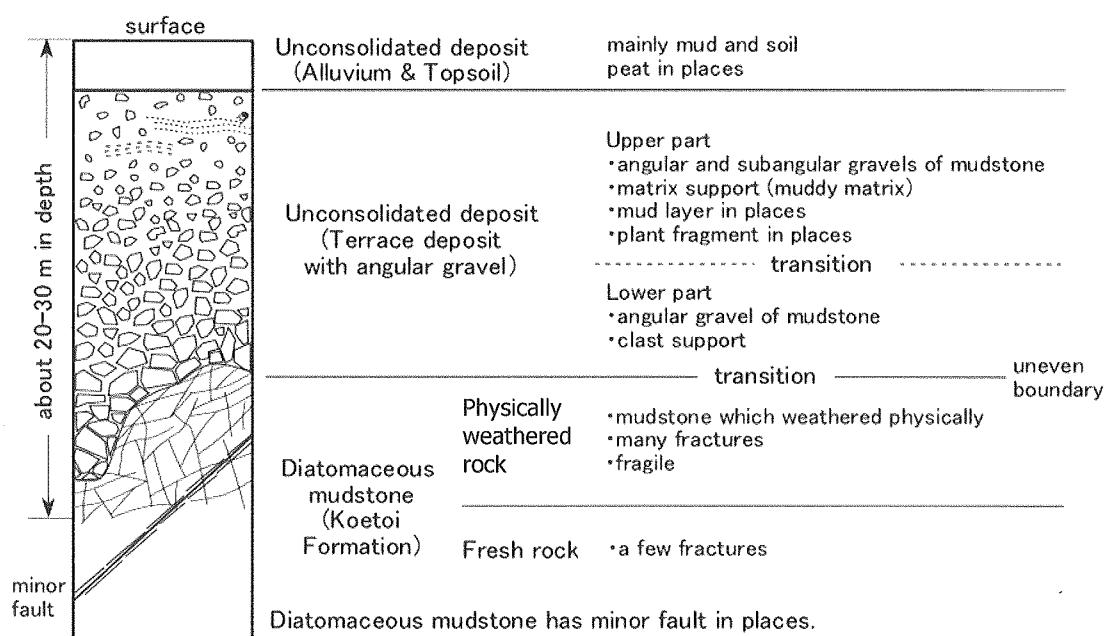


Figure 2.1 Conceptual geological column of shallow subsurface around URL

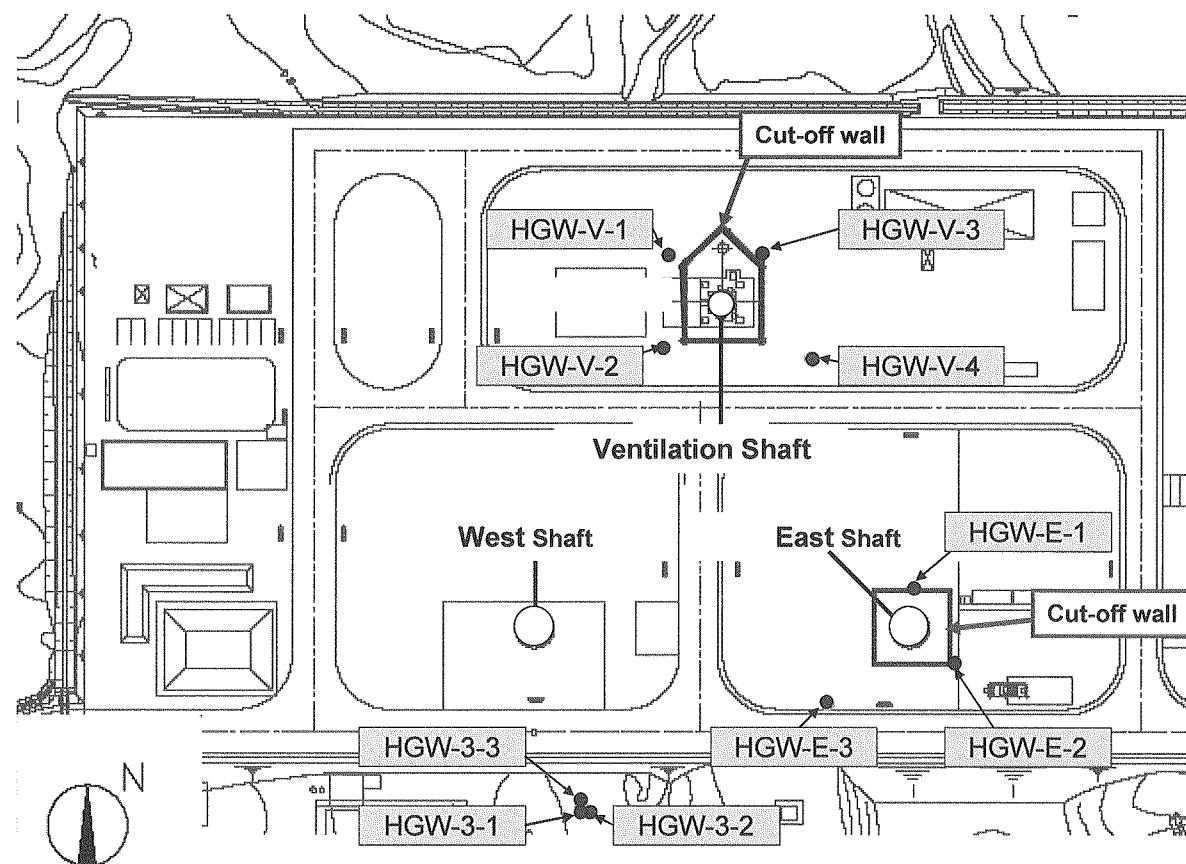


Figure 2.2 Domain for investigation

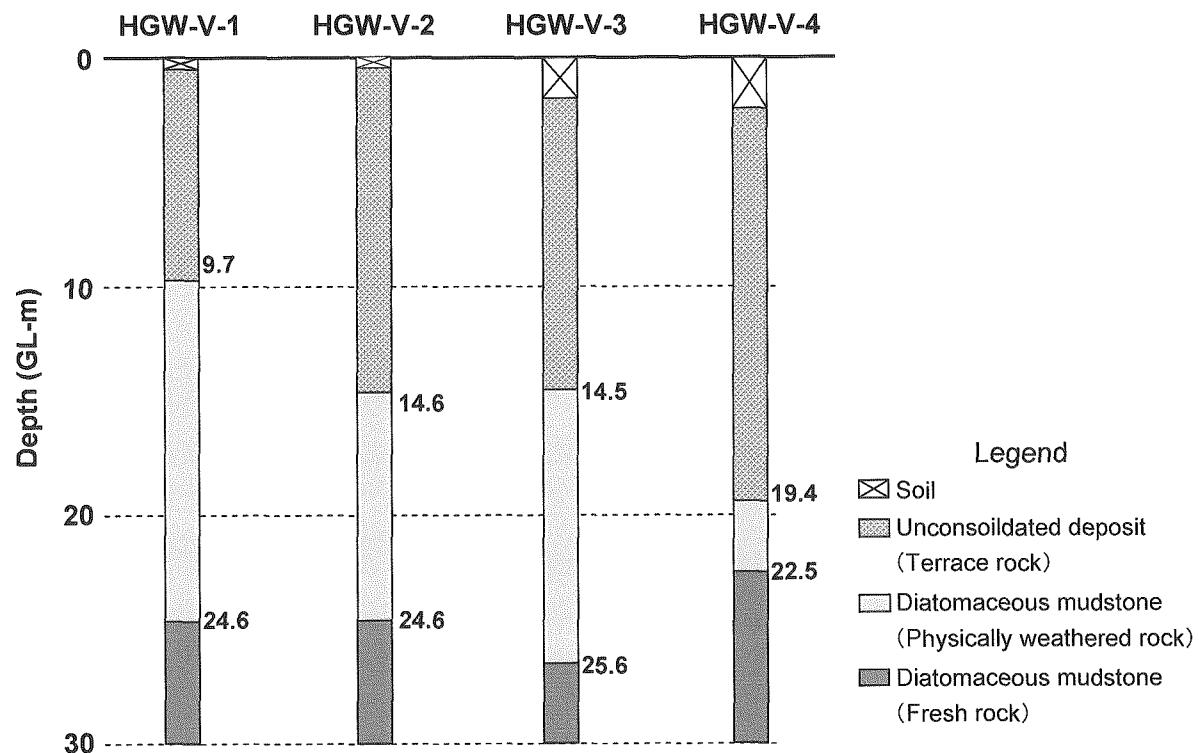


Figure 2.3 Geological column around the Ventilation shaft

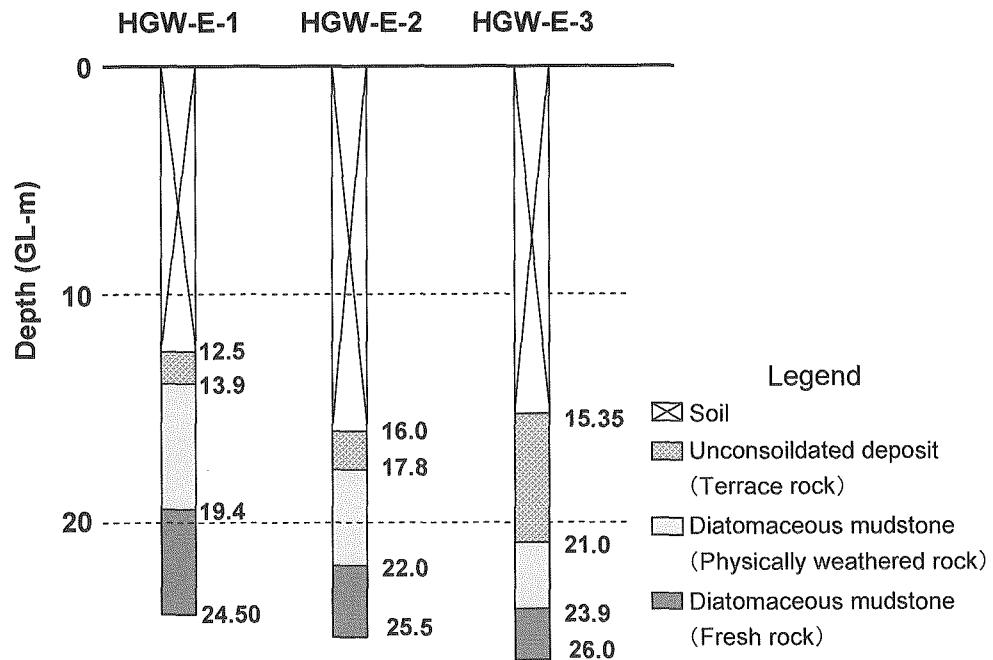


Figure 2.4 Geological column around the East shaft

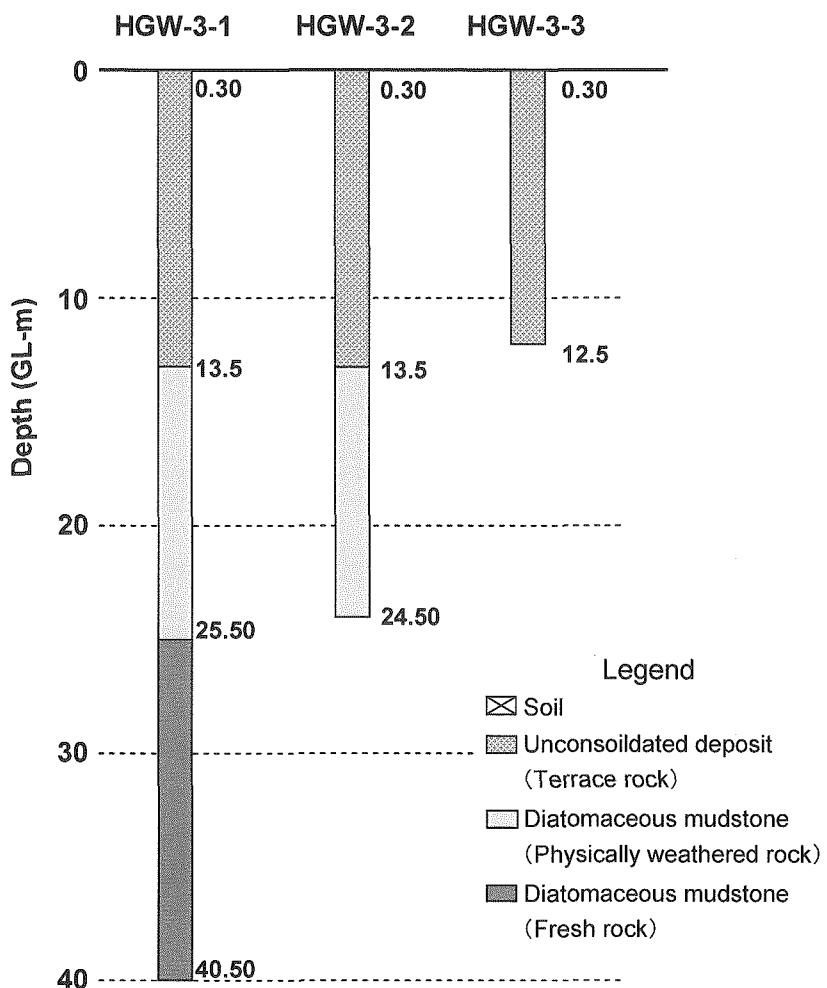


Figure 2.5 Geological column around the HGW-3 Borehole

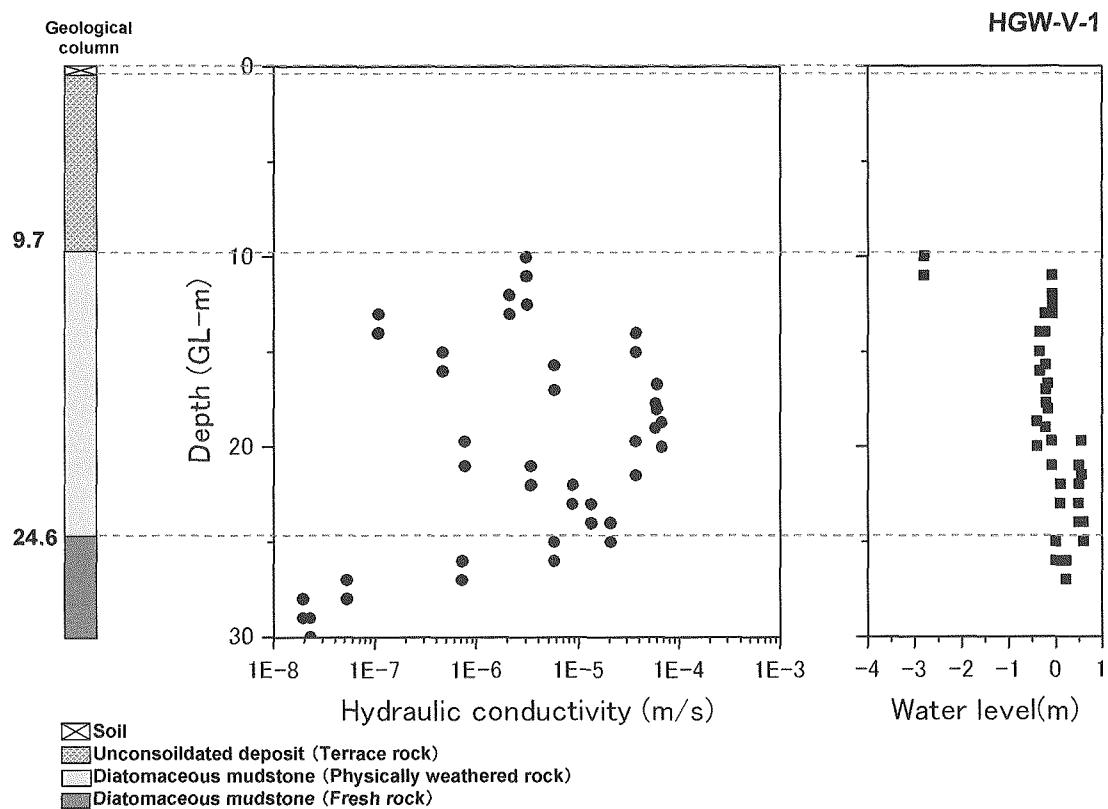


Figure 2.6 Hydraulic conductivity obtained by hydraulic tests in HGW-V-1

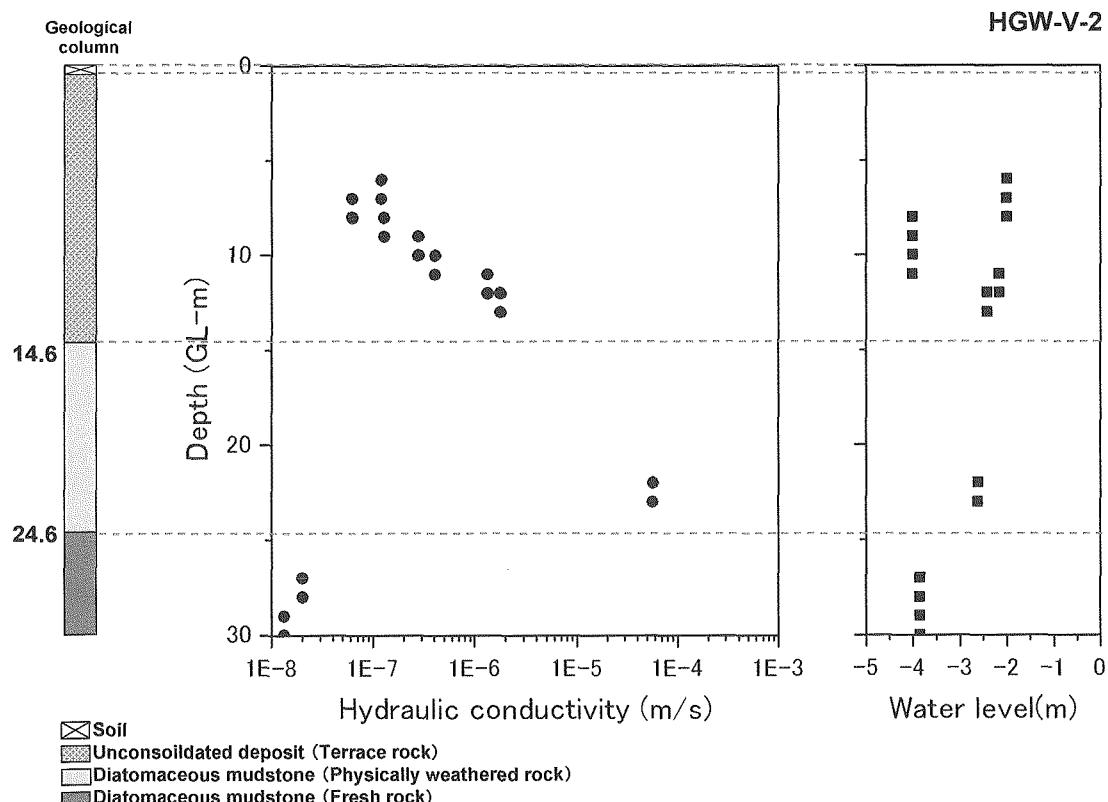


Figure 2.7 Hydraulic conductivity obtained by hydraulic tests in HGW-V-2

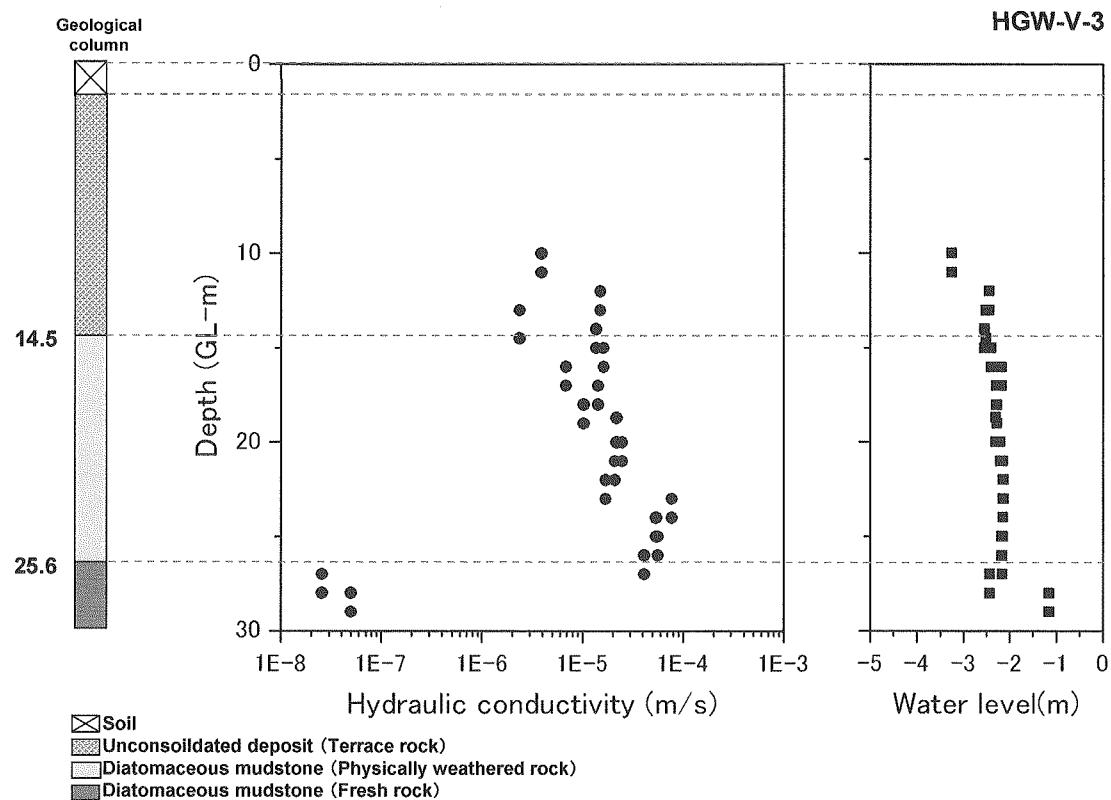


Figure 2.8 Hydraulic conductivity obtained by hydraulic tests in HGW-V-3

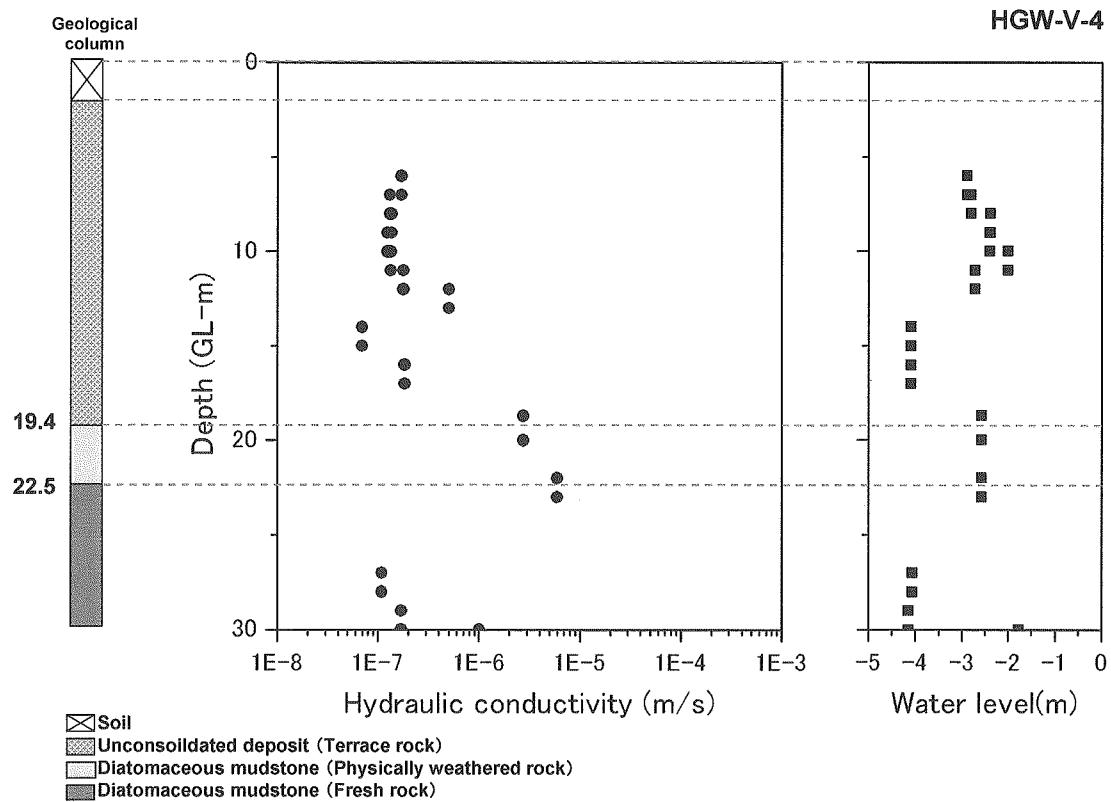


Figure 2.9 Hydraulic conductivity obtained by hydraulic tests in HGW-V-4

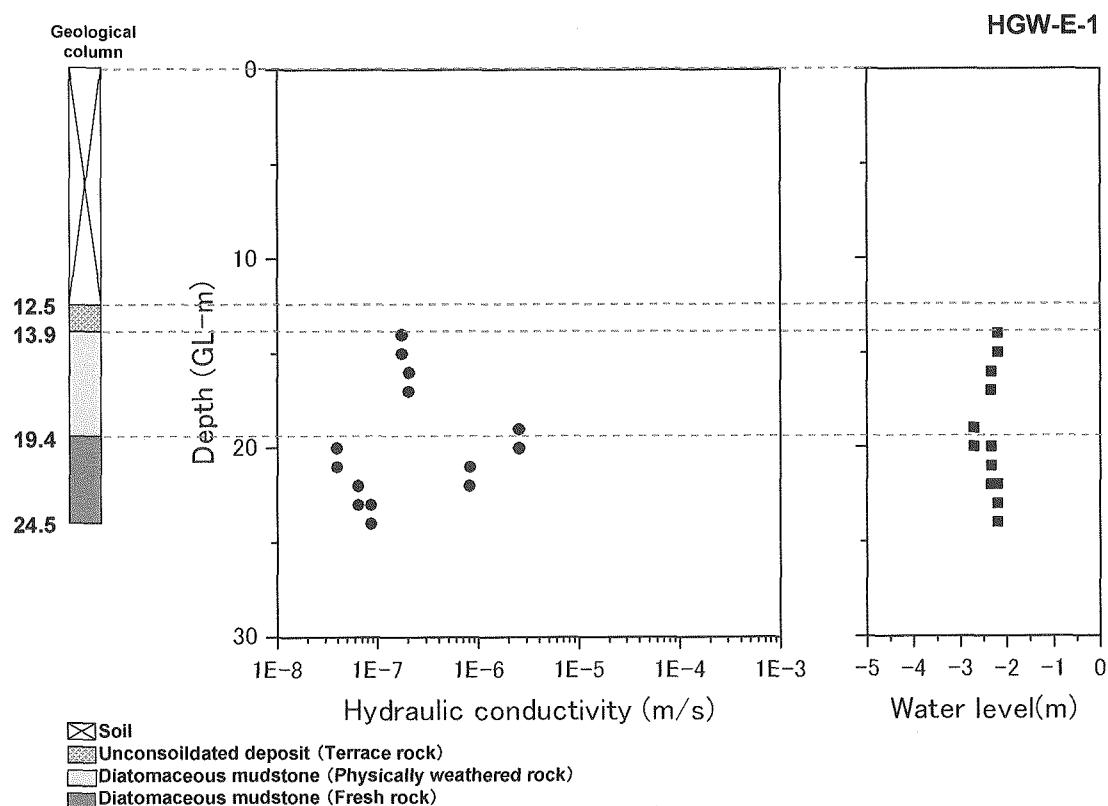


Figure 2.10 Hydraulic conductivity obtained by hydraulic tests in HGW-E-1

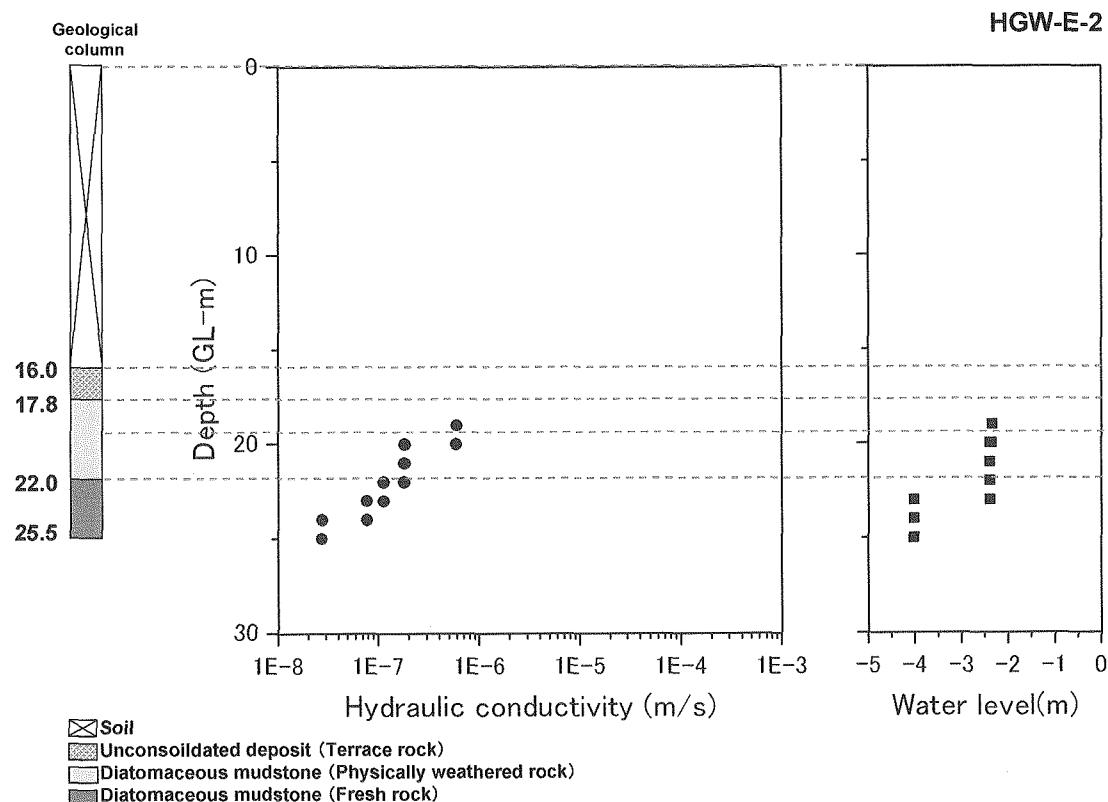


Figure 2.11 Hydraulic conductivity obtained by hydraulic tests in HGW-E-2

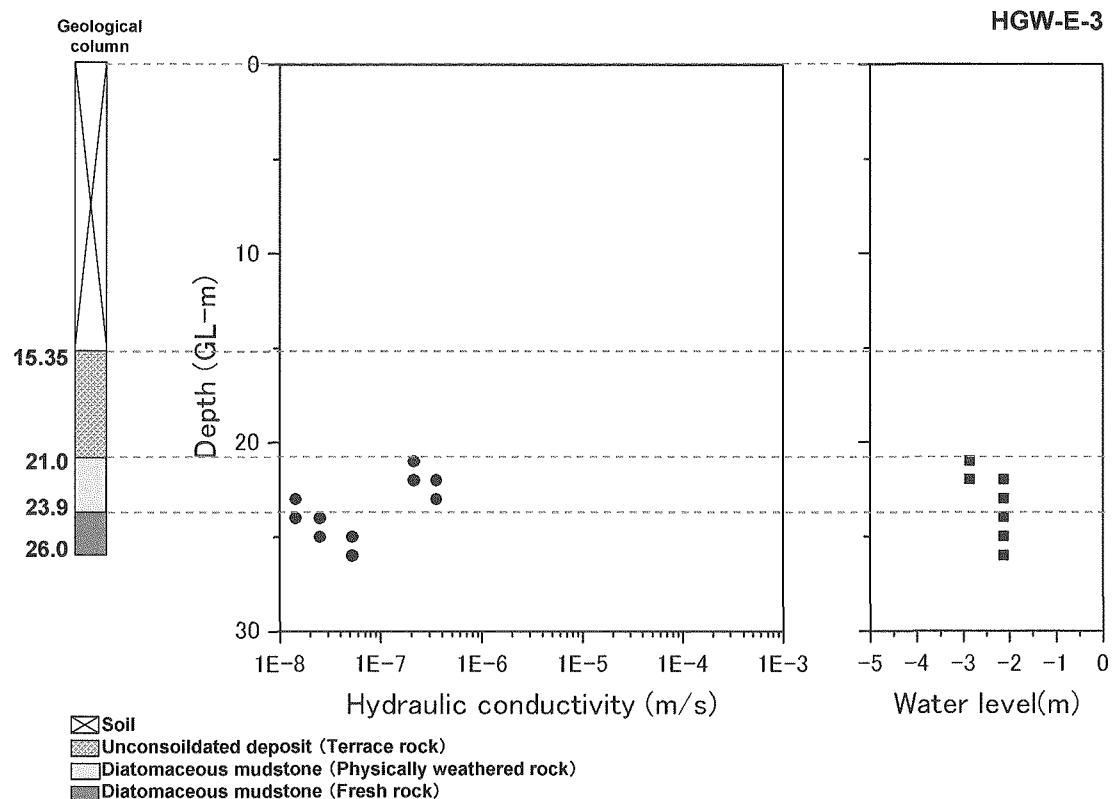


Figure 2.12 Hydraulic conductivity obtained by hydraulic tests in HGW-E-3

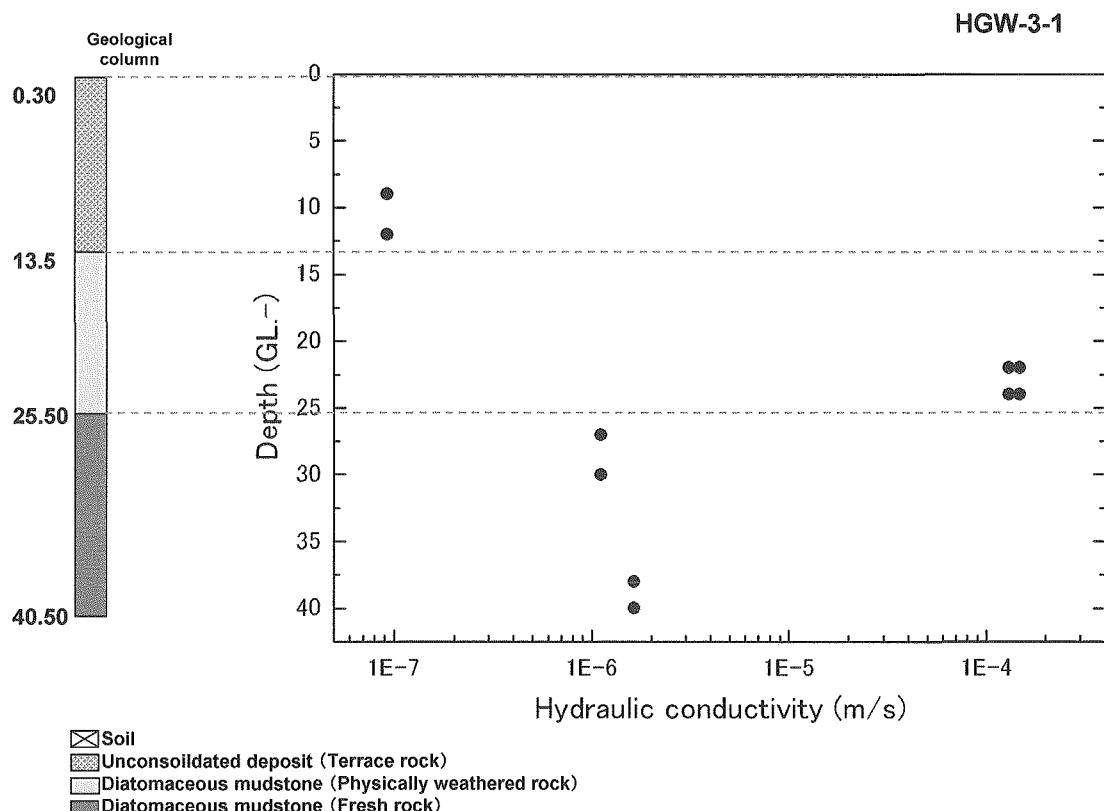


Figure 2.13 Hydraulic conductivity obtained by hydraulic tests in HGW-3-1

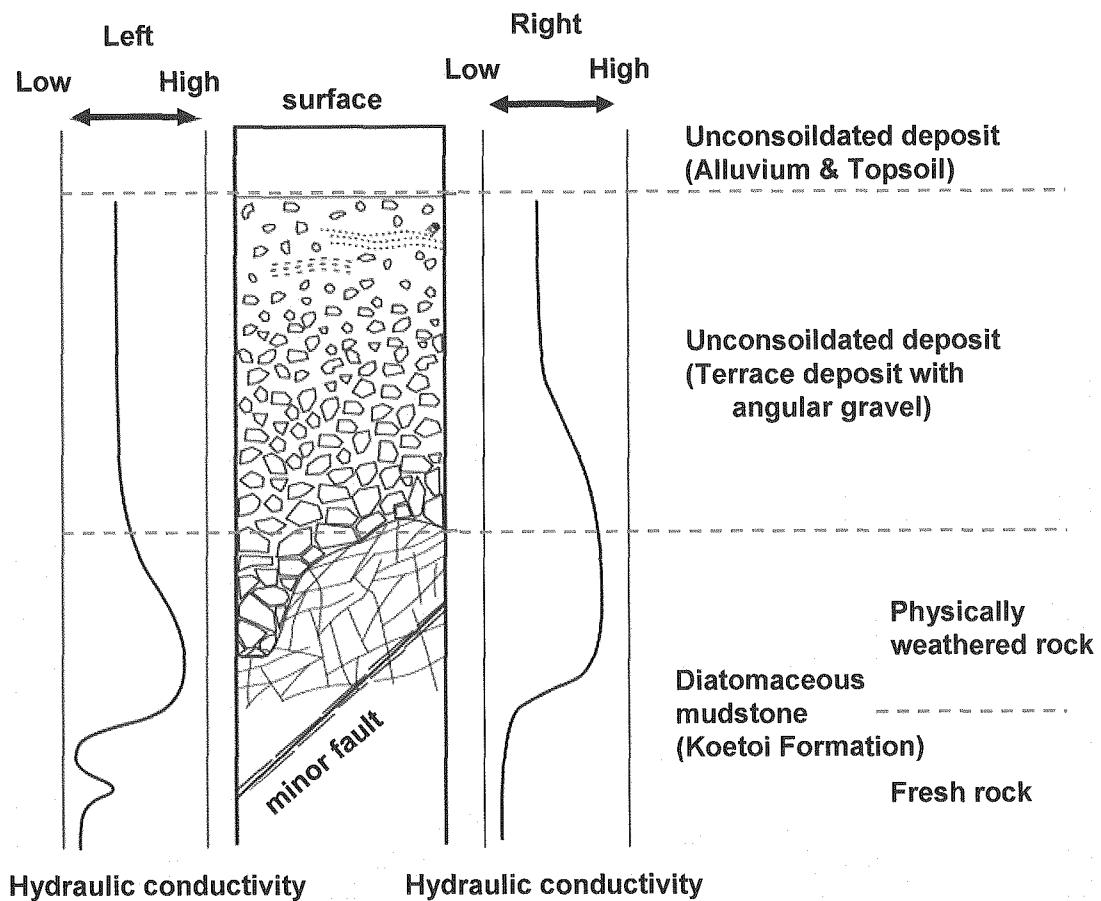


Figure 2.14 Hydrogeological model of shallow subsurface around URL

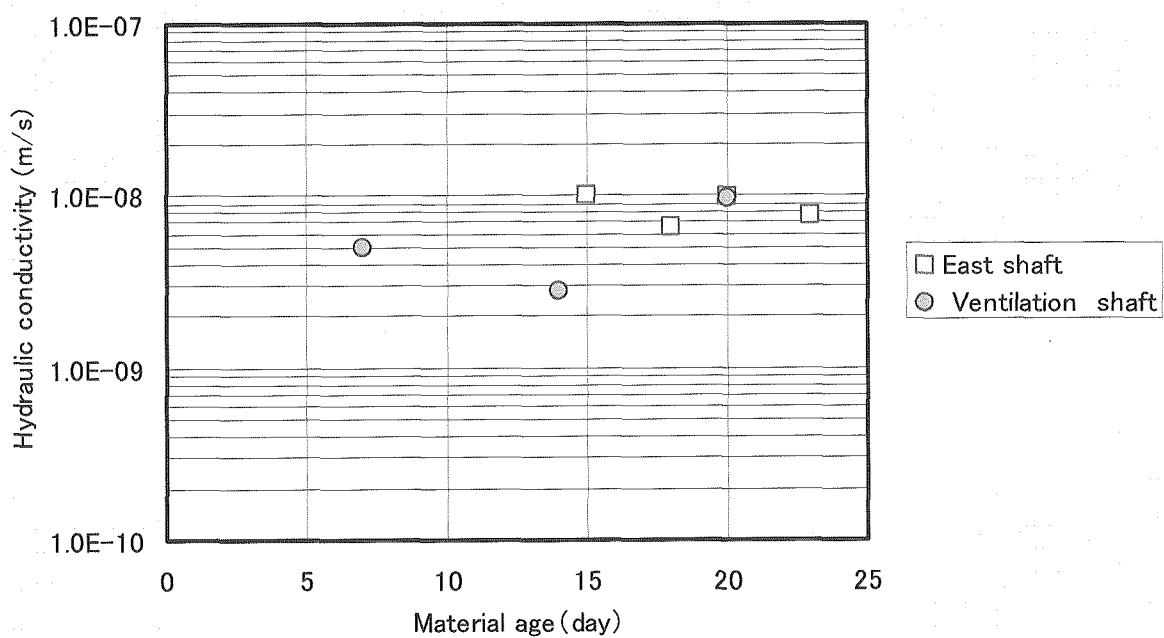


Figure 2.15 Relationship between material age and hydraulic conductivity of cut-off wall.

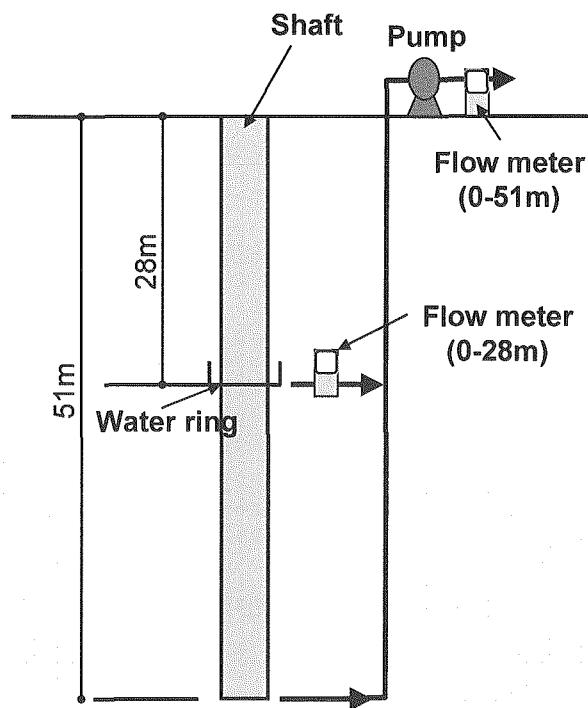


Figure 2.16 Schematic illustration of measuring groundwater inflow into the shaft

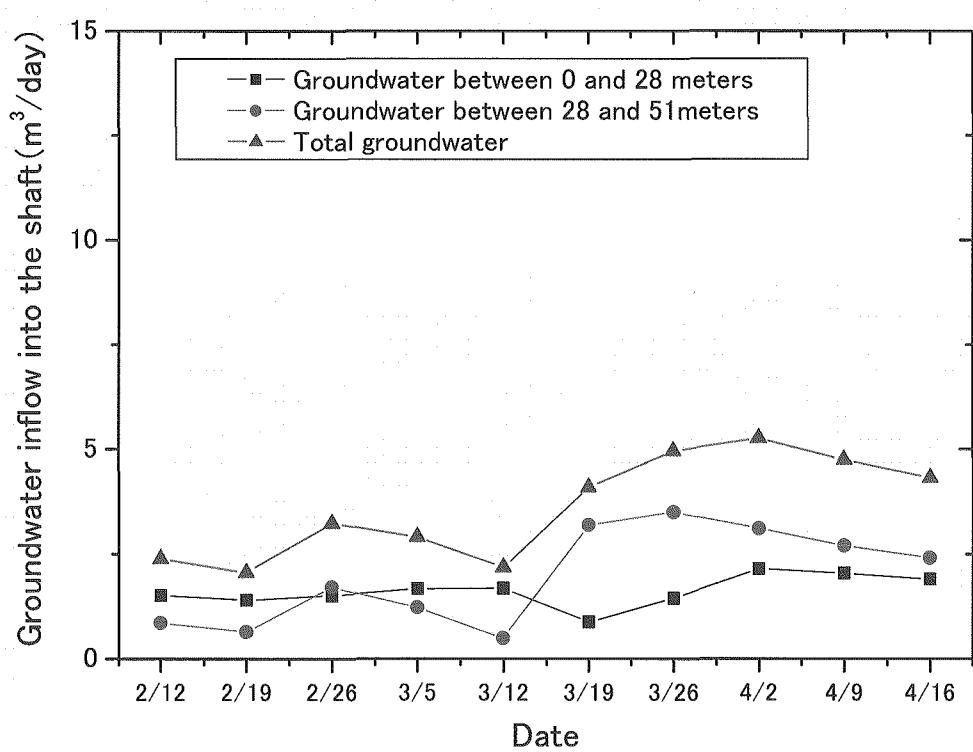


Figure 2.17 Groundwater inflow change into ventilation shaft with time

Table 2.1 Method for determination of hydraulic properties in boreholes

Boreholes	Method for determination of hydraulic properties	Standards
HGW-V-1～HGW-V-4	Instantaneous head recovery technique in single borehole	JGS1321-2003
HGW-E-1～HGW-E-3	Instantaneous head recovery technique in single borehole	JGS1321-2003
HGW-3-1	Aquifer in single borehole	JGS1314-2003

Table 2.2 Hydraulic conductivity obtained by hydraulic tests in HGW-V-1

No	Mean depth (m)		Interval (m)	Hydraulic Conductivity (m/s)	Water level (m)
	Upper	Lower			
1	10.0	11.0	1.0	3.09E-06	-2.800
2	11.0	12.5	1.5	3.14E-06	-0.060
3	12.0	13.0	1.0	2.12E-06	-0.060
4	13.0	14.0	1.0	1.08E-07	-0.215
5	14.0	15.0	1.0	3.73E-05	-0.330
6	15.0	16.0	1.0	4.69E-07	-0.330
7	15.7	17.0	1.3	5.79E-06	-0.200
8	16.7	18.0	1.3	6.02E-05	-0.170
9	17.7	19.0	1.3	5.83E-05	-0.202
10	18.7	20.0	1.3	6.76E-05	-0.388
11	19.7	21.0	1.3	7.71E-07	-0.075
12	19.7	21.5	1.8	3.72E-05	0.560
13	21.0	22.0	1.0	3.40E-06	0.500
14	22.0	23.0	1.0	8.73E-06	0.100
15	23.0	24.0	1.0	1.35E-05	0.510
16	24.0	25.0	1.0	2.09E-05	0.600
17	25.0	26.0	1.0	5.73E-06	0.010
18	26.0	27.0	1.0	7.26E-07	0.240
19	27.0	28.0	1.0	5.33E-08	-
20	28.0	29.0	1.0	1.97E-08	-
21	29.0	30.0	1.0	2.30E-08	-

Table 2.3 Hydraulic conductivity obtained by hydraulic tests in HGW-V-2

No	Mean depth (m)		Interval (m)	Hydraulic Conductivity (m/s)	Water level (m)
	Upper	Lower			
1	6.0	7.0	1.0	1.21E-07	-2.000
2	7.0	8.0	1.0	6.27E-08	-2.000
3	8.0	9.0	1.0	1.29E-07	-4.000
4	9.0	10.0	1.0	2.82E-07	-4.000
5	10.0	11.0	1.0	4.14E-07	-4.000
6	11.0	12.0	1.0	1.35E-06	-2.160
7	12.0	13.0	1.0	1.81E-06	-2.420
8	22.0	23.0	1.0	5.74E-05	-2.620
9	27.0	28.0	1.0	2.04E-08	-3.850
10	29.0	30.0	1.0	1.34E-08	-3.850

Table 2.4 Hydraulic conductivity obtained by hydraulic tests in HGW-V-3

No	Mean depth (m)		Interval (m)	Hydraulic Conductivity (m/s)	Water level (m)
	Upper	Lower			
1	10.0	11.0	1.0	3.89E-06	-3.250
2	10.0	11.0	1.0	3.89E-06	-3.250
3	12.0	13.0	1.0	1.51E-05	-2.450
4	13.0	14.5	1.5	2.37E-06	-2.510
5	14.0	15.0	1.0	1.37E-05	-2.540
6	15.0	16.0	1.0	1.63E-05	-2.400
7	16.0	17.0	1.0	6.89E-06	-2.180
8	17.0	18.0	1.0	1.43E-05	-2.290
9	18.0	19.0	1.0	1.03E-05	-2.270
10	18.7	20.0	1.3	2.18E-05	-2.300
11	20.0	21.0	1.0	2.48E-05	-2.200
12	21.0	22.0	1.0	2.11E-05	-2.140
13	22.0	23.0	1.0	1.70E-05	-2.130
14	23.0	24.0	1.0	7.75E-05	-2.140
15	24.0	25.0	1.0	5.42E-05	-2.150
16	25.0	26.0	1.0	5.66E-05	-2.170
17	26.0	27.0	1.0	4.14E-05	-2.165
18	27.0	28.0	1.0	2.58E-08	-2.429
19	28.0	29.0	1.0	5.01E-08	-1.150

Table 2.5 Hydraulic conductivity obtained by hydraulic tests in HGW-V-4

No	Mean depth (m)		Interval (m)	Hydraulic Conductivity (m/s)	Water level (m)
	Upper	Lower			
1	6.0	7.0	1.0	1.70E-07	-2.880
2	7.0	8.0	1.0	1.31E-07	-2.800
3	8.0	9.0	1.0	1.36E-07	-2.380
4	9.0	10.0	1.0	1.24E-07	-2.400
5	10.0	11.0	1.0	1.34E-07	-2.000
6	11.0	12.0	1.0	1.78E-07	-2.710
8	12.0	13.0	1.0	5.02E-07	-8.290
9	14.0	15.0	1.0	6.95E-08	-4.090
10	16.0	17.0	1.0	1.84E-07	-4.090
11	18.7	20.0	1.3	2.75E-06	-2.565
12	22.0	23.0	1.0	5.96E-06	-2.575
13	27.0	28.0	1.0	1.09E-07	-4.060
14	29.0	30.0	1.0	1.71E-07	-4.150
16	30.0	31.0	1.0	1.01E-06	-1.770
17	31.0	32.0	1.0	6.88E-07	-2.500
18	32.0	33.0	1.0	3.99E-07	-2.820
19	33.0	34.0	1.0	1.64E-07	-3.000

Table 2.6 Hydraulic conductivity obtained by hydraulic tests in HGW-E-1, HGW-E-1 and HGW-E-3

No	Depth		Interval (GL-m)	Hydraulic conductivity			Water level (m)		
				(m/s)					
	Upper	Lower		HGW-E-1	HGW-E-2	HGW-E-3	HGW-E-1	HGW-E-2	HGW-E-3
1	14.0	15.0	1.0	1.76E-07			-2.185		
2	16.0	17.0	1.0	2.06E-07			-2.330		
3	19.0	20.0	1.0	2.56E-06	5.93E-07		-2.700	-2.340	
4	20.0	21.0	1.0	3.97E-08	1.84E-07		-2.330	-2.380	
5	21.0	22.0	1.0	8.27E-07	1.81E-07	2.14E-07	-2.330	-2.380	-2.850
6	22.0	23.0	1.0	6.55E-08	1.13E-07	3.56E-07	-2.185	-2.380	-2.110
7	23.0	24.0	1.0	8.71E-08	7.69E-08	1.45E-08	-2.185	-4.020	-2.110
8	24.0	25.0	1.0		2.76E-08	2.53E-08		-4.020	-2.110
9	25.0	26.0	1.0			5.34E-08			-2.110

Table 2.7 Hydraulic conductivity obtained by hydraulic tests in HGW-3

Borehole	Depth	Hydraulic conductivity	
	(GL-m)	(m/s)	
HGW-3	9.0 ~12.0	9.31E-08	9.31E-08
HGW-3	22.0 ~24.0	1.30E-04	1.30E-04
HGW-3	22.0 ~24.0	1.47E-04	1.47E-04
HGW-3	27.0 ~30.0	1.11E-06	1.11E-06
HGW-3	38.0 ~40.0	1.63E-06	1.63E-06

Table 2.8 Hydraulic conductivity of cut-off wall obtained laboratory hydraulic tests

Material age (day)	Hydraulic conductivity (m/s)
27 day	8.81E-09
31 day	1.65E-09

Table 2.9 Hydraulic conductivity of cut-off wall obtained in-site hydraulic tests

Borehole	Cut-off Wall of Ventilation shaft	Cut-off Wall of East shaft
Material age (day)	Hydraulic conductivity (m/s)	
7	5.02E-09	-
14	2.79E-09	-
15	-	9.96E-09
18	-	6.65E-09
20	9.65E-09	9.76E-09
23	-	7.57E-09

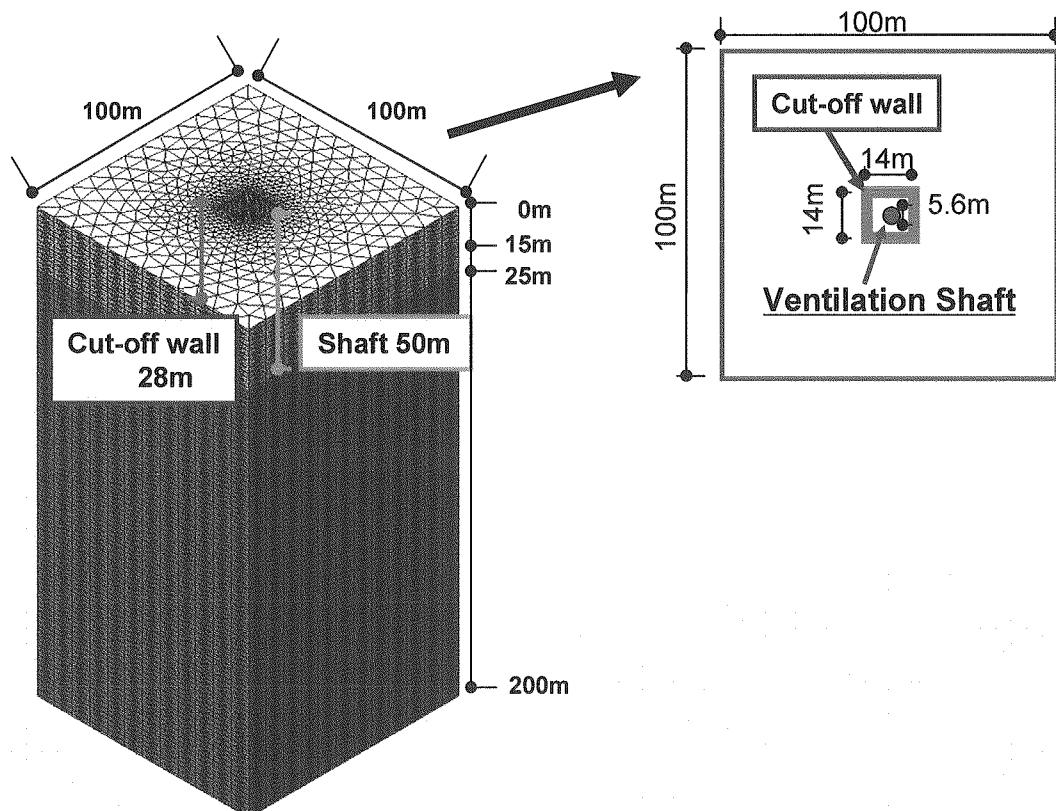


Figure 3.1 Domain for analyses

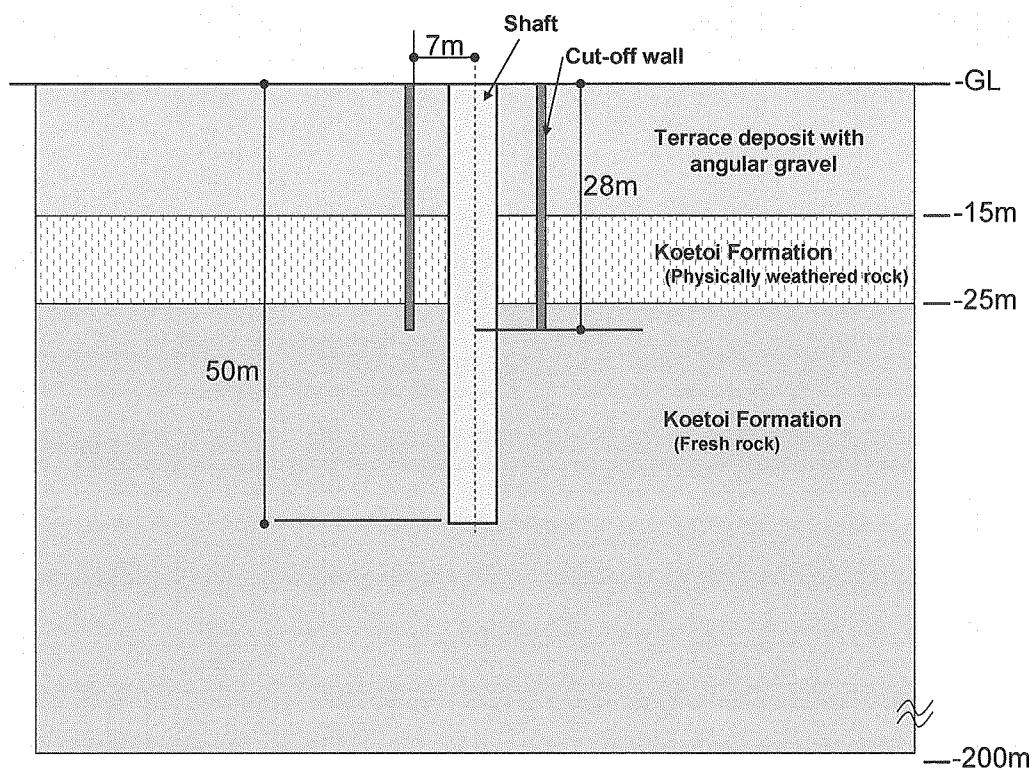


Figure 3.2 Cross-section of the analytical model through the ventilation shaft

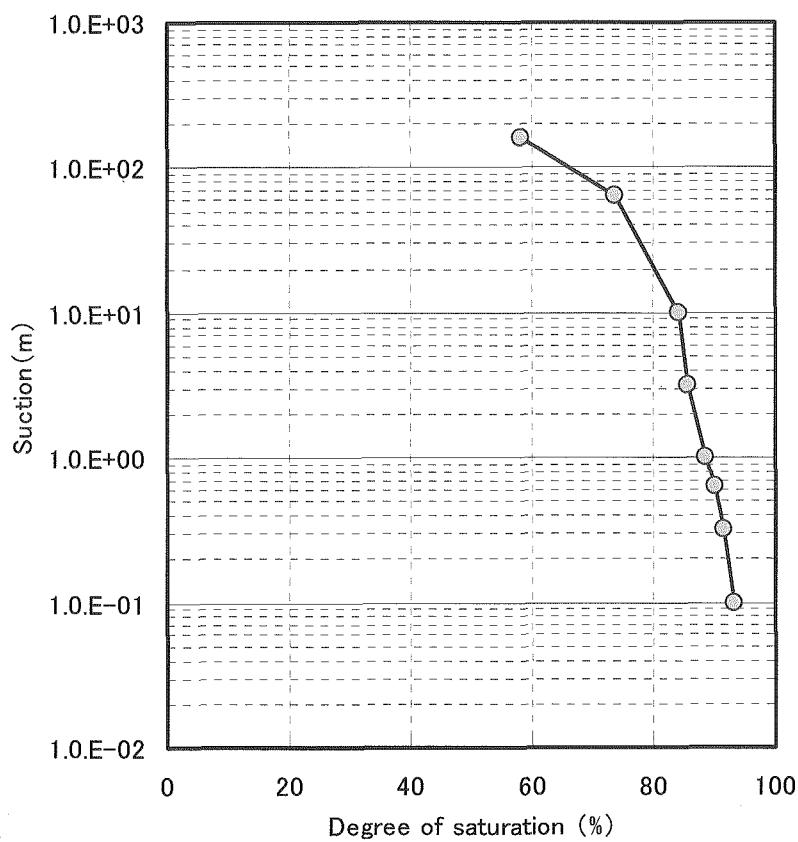


Figure 3.3 Moisture Characteristic Curve obtain from HGW-1

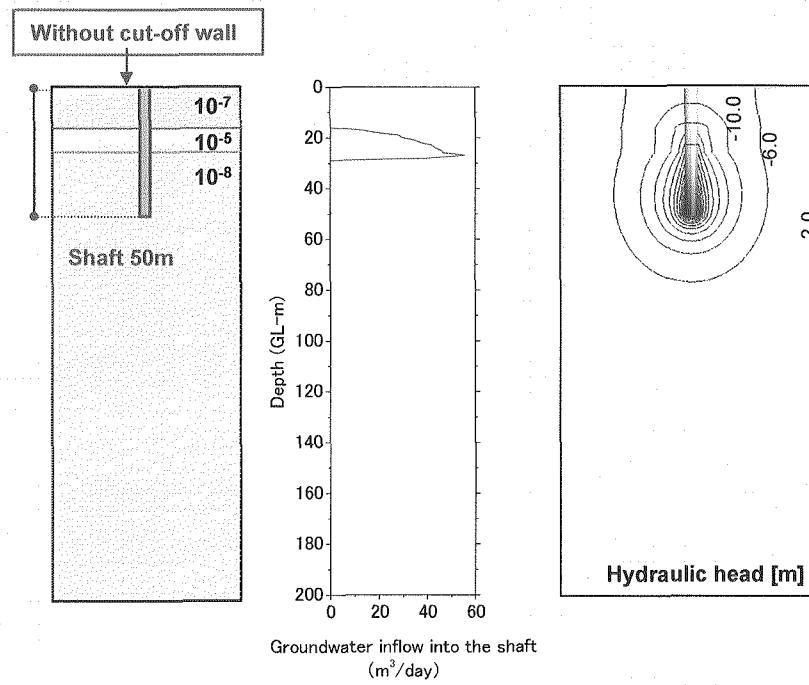


Figure 3.4 Calculated head distribution after shaft excavation at 50m depth without cut-off wall.

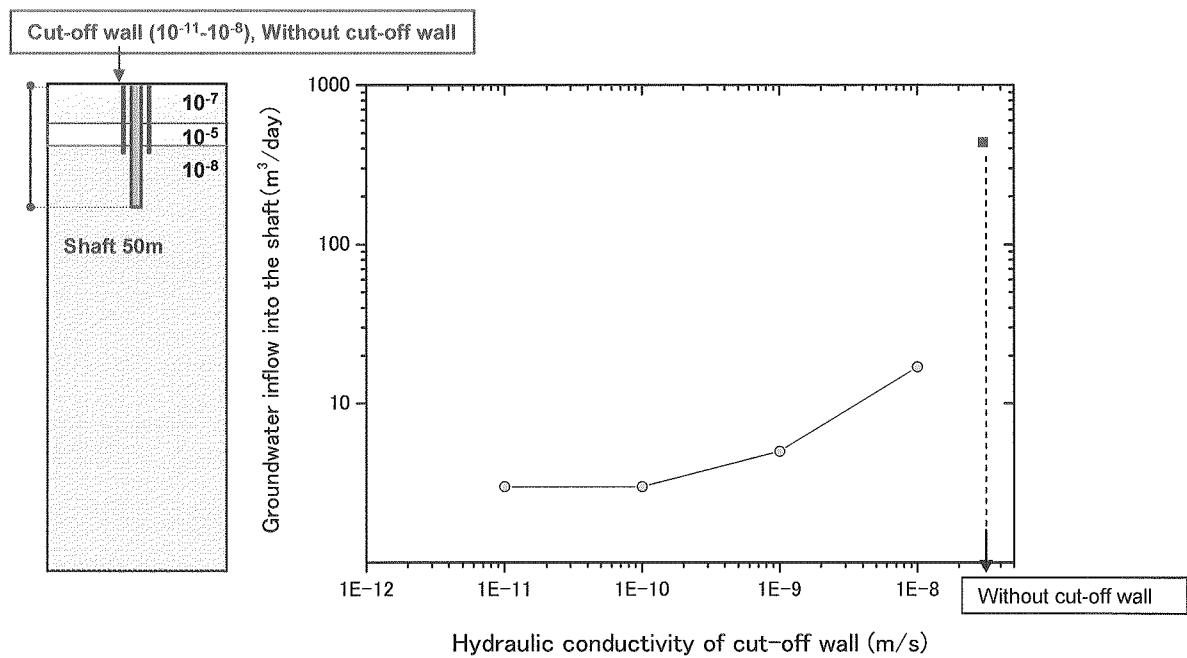


Figure 3.5 Relationship between hydraulic conductivity of cut-off wall and groundwater inflow into the shaft.

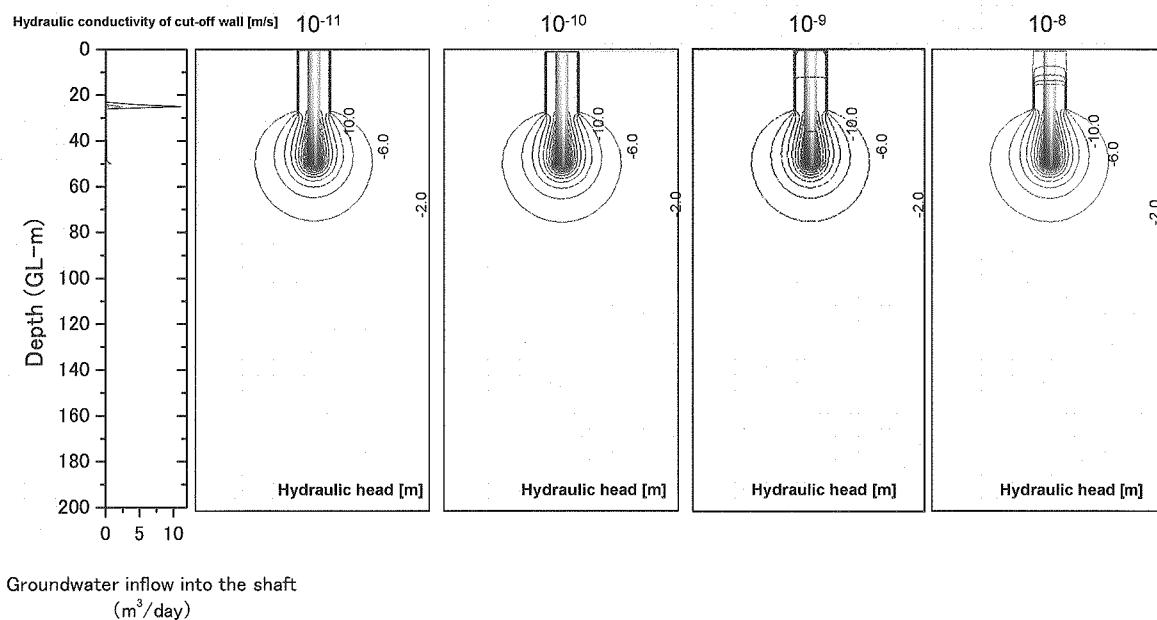


Figure 3.6 Calculated head distribution after shaft excavation at 50m depth. Value of hydraulic conductivity of cut-off wall between 10^{-8} and 10^{-11} .

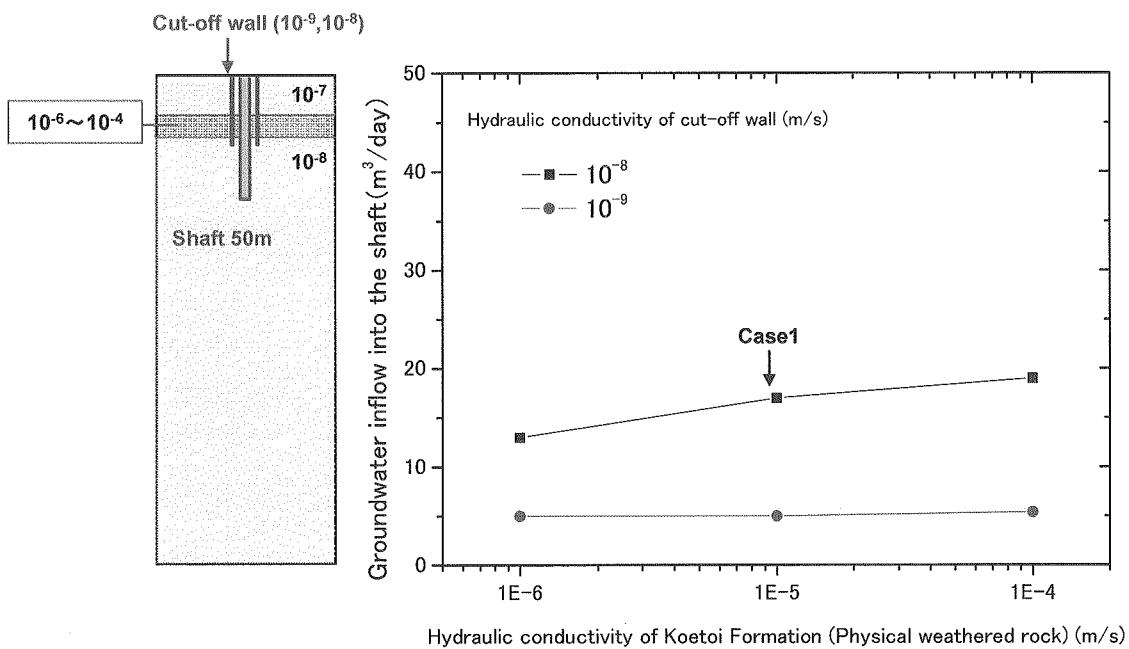


Figure 3.7 Relationship between hydraulic conductivity physical weathered rock in Koetoi formation of and groundwater inflow into the shaft.

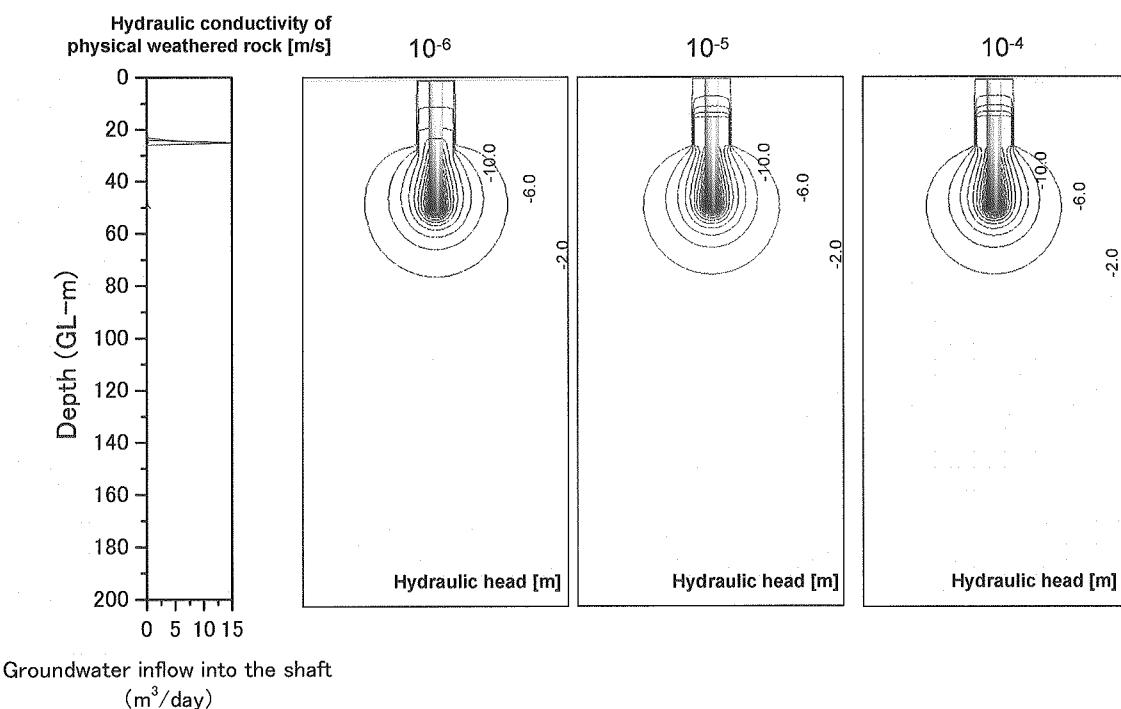


Figure 3.8 Calculated head distribution after shaft excavation at 50m depth. Value of hydraulic conductivity of Koetoi formation of physical weathered rock between 10^{-6} and 10^{-4} . Value of hydraulic conductivity of cut-off wall of 10^{-8} m/s.

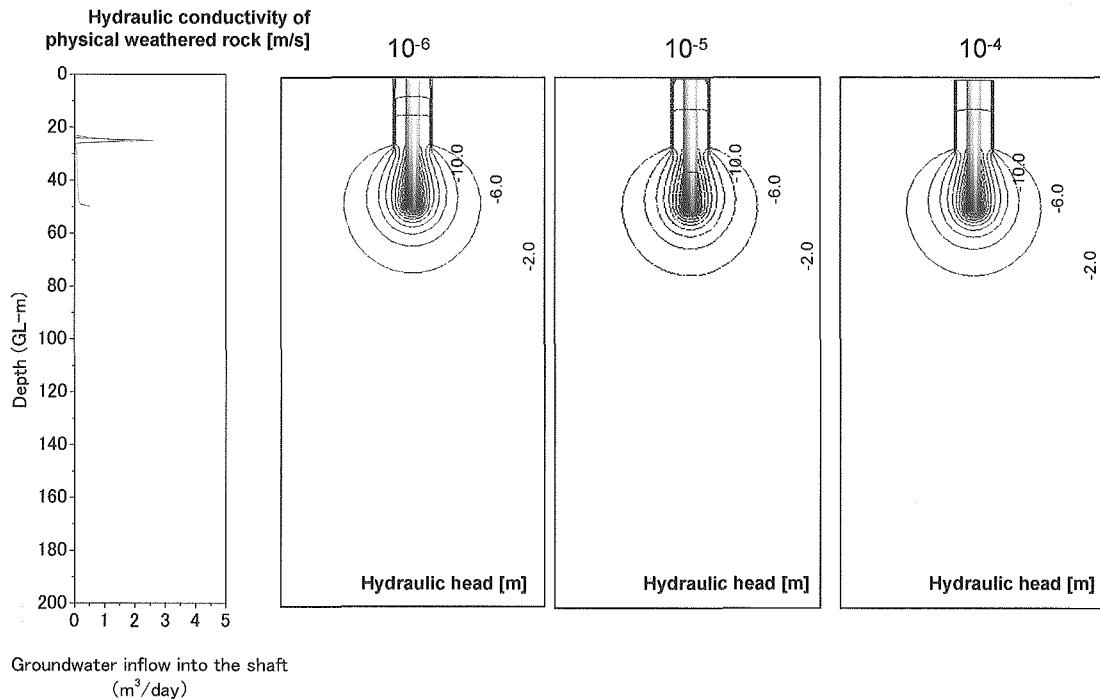


Figure 3.9 Calculated head distribution after shaft excavation at 50m depth. Value of hydraulic conductivity of Koetoi formation of physical weathered rock between 10^{-6} and 10^{-4} . Value of hydraulic conductivity of cut-off wall of 10^{-9} m/s.

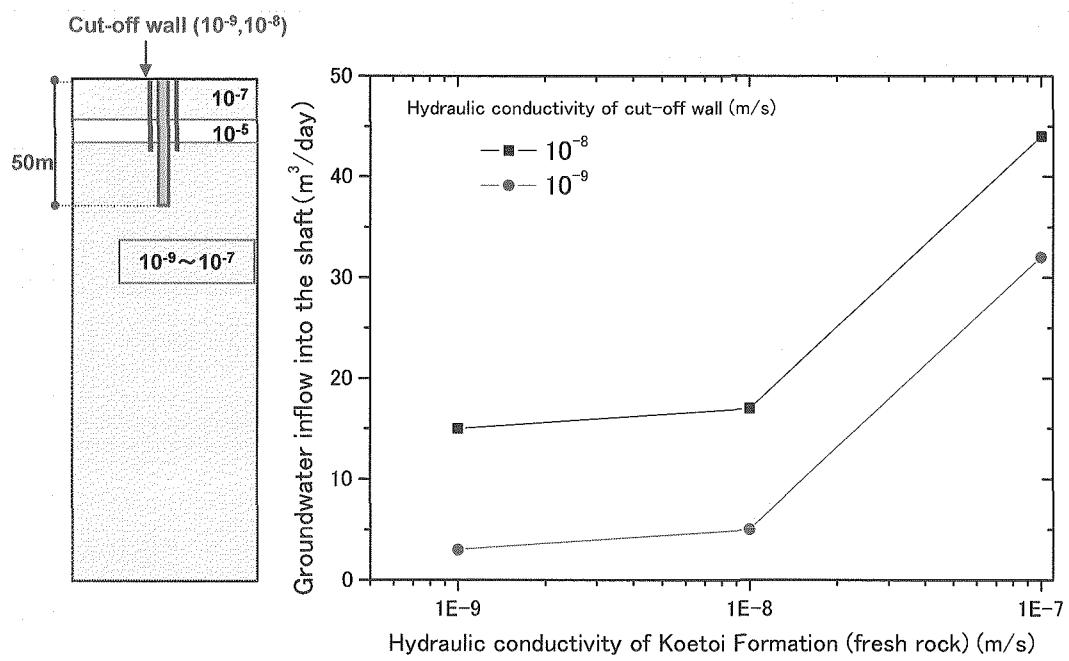


Figure 3.10 Relationship between hydraulic conductivity of fresh rock in Koetoi formation and groundwater inflow into the shaft.

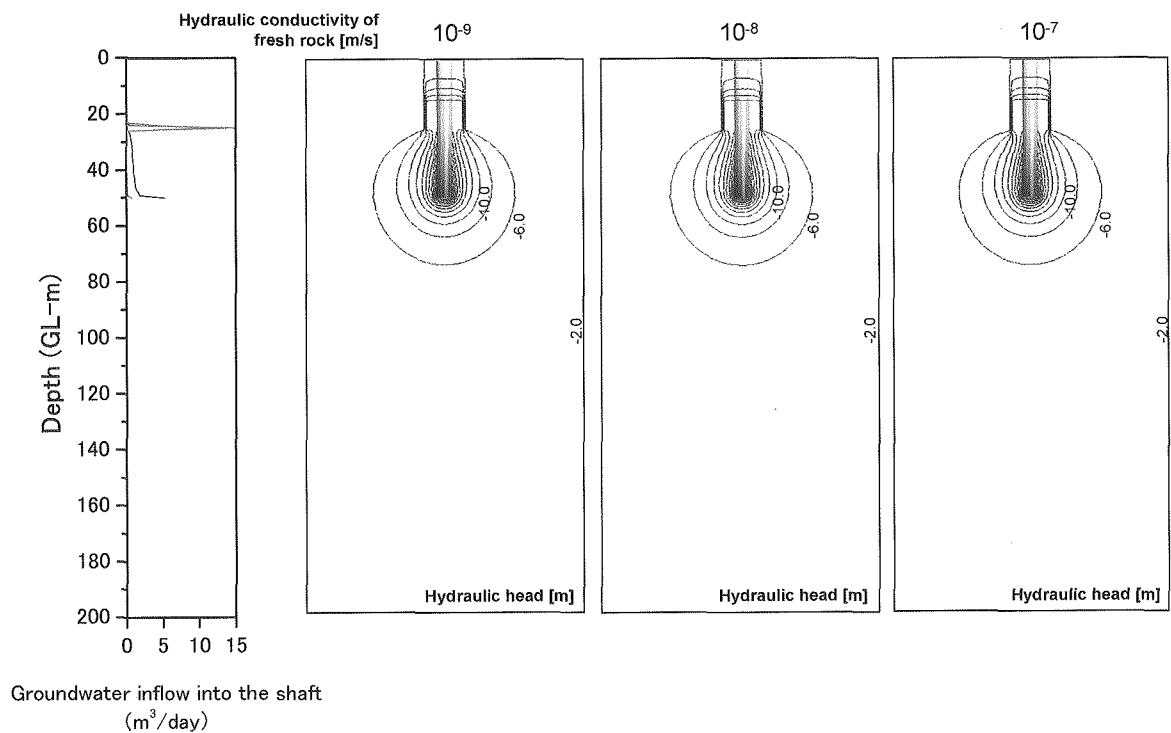


Figure 3.11 Calculated head distribution after shaftexcavation at 50m depth. Value of hydraulic conductivity of Koetoi formation of fresh rock between 10^{-9} and 10^{-7} . Value of hydraulic conductivity of cut-off wall of 10^{-8} m/s.

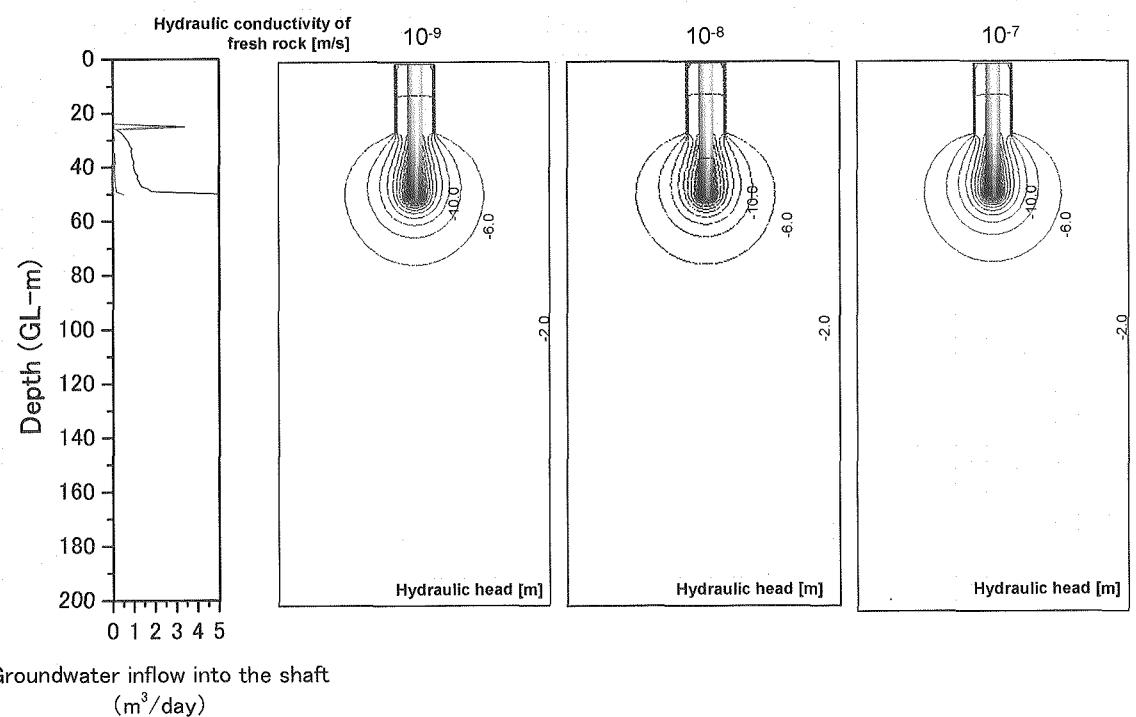


Figure 3.12 Calculated head distribution of excavation at 50m. Value of hydraulic conductivity of Koetoi formation of fresh rock between 10^{-9} and 10^{-7} . Value of hydraulic conductivity of cut-off wall of 10^{-9} m/s.

Table 3.1 Hydraulic parameters of the reference case (Case-1)

Parameter		Hydraulic conductivity (m/s)
Surface		1×10^{-7}
Terrace deposit with angular gravel		1×10^{-7}
Koetoi Formation	Physically weathered rock	1×10^{-5}
	Fresh rock	1×10^{-8}
Cut-off wall		1×10^{-8}

Table 3.2 Parameters of the sensitivity analyses

No.	Surface	Terrace deposit with angular gravel	Koetoi Formation		Cut-off wall	Excavation depth
			Physically weathered rock	Fresh rock		
Case-0	Sur1	Te1	Phy1	Fr1	Cu0	50m
Case-1	Sur1	Te1	Phy1	Fr1	Cu1	50m
Case-2	Sur1	Te1	Phy1	Fr1	Cu2	50m
Case-3	Sur1	Te1	Phy1	Fr1	Cu3	50m
Case-4	Sur1	Te1	Phy1	Fr1	Cu4	50m
Case-5	Sur1	Te1	Phy2	Fr1	Cu1, Cu2	50m
Case-6	Sur1	Te1	Phy3	Fr1	Cu1, Cu2	50m
Case-7	Sur1	Te1	Phy4	Fr1	Cu1, Cu2	50m
Case-8	Sur1	Te1	Phy1	Fr2	Cu1, Cu2	50m
Case-9	Sur1	Te1	Phy1	Fr3	Cu1, Cu2	50m

Table 3.3 Parameters of the sensitivity analyses

Parameters		Mark	Hydraulic conductivity (m/s)	
Surface		Sur1	1×10^{-7} m/s	
Terrace deposit with angular gravel		Te1	1×10^{-7} m/s	
Koetoi Formation	Physically weathered rock	Phy1	1×10^{-5} m/s	
		Phy2	1×10^{-7} m/s	
		Phy3	1×10^{-6} m/s	
		Phy4	1×10^{-4} m/s	
	Fresh rock	Fr1	1×10^{-8} m/s	
		Fr2	1×10^{-9} m/s	
		Fr3	1×10^{-7} m/s	
Cut-off wall		Cu0	Without cut-off wall	
		Cu1	1×10^{-8} m/s	
		Cu2	1×10^{-9} m/s	
		Cu3	1×10^{-10} m/s	
		Cu4	1×10^{-11} m/s	
Excavation depth		50m	50m	
		100m	100m	
		150m	150m	

Table 3.4 Data of moisture characteristic curve obtain from HGW-1

Degree of saturation (%)	Suction (m)
58.4	158.49
73.7	63.096
83.9	10
85.6	3.1623
88.5	1
90	0.631
91.3	0.3162
93.2	0.1

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積(体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率(数の)	1	1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	m · m ⁻¹ ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	m ² · m ⁻² ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
压力	ニュートン	N	m · kg · s ⁻²
エネルギー,仕事,熱量	ジューール	J	N · m
功率,放射束	ワット	W	J/s
電荷,電気量	クーロン	C	
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	アラド	F	m ⁻² · kg ⁻¹ · s ⁴ · A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	m ⁻² · kg ⁻¹ · s ³ · A ²
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリリー	H	kg · s ⁻² · A ⁻¹
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	Wb/A
光度	ルーメン	lm	cd · sr ^(e)
(放射性核種の)放射能吸収線量,質量エネルギー一分与,カーマ	ベクレル	Bq	lm/m ²
線量当量,周辺線量当量,方向性線量当量,個人線量当量,組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg
	シーベルト	Sv	J/kg

(a)ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b)実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa · s	m ⁻¹ · kg · s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N · m	m ² · kg · s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m · m ⁻¹ · s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m · m ⁻¹ · s ⁻² =s ⁻²
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg · s ⁻³
熱容量,エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² · kg · s ⁻² · K ⁻¹
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg · K)	m ² · s ⁻² · K ⁻¹
質量エンタルピー	モル毎ケルビン	J/kg	m ² · s ⁻² · K ⁻¹
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² · s ⁻² · K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m · K)	m · kg · s ⁻³ · K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ · kg · s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m · kg · s ⁻³ · A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ · s · A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² · s · A
誘電率	フアラード毎メートル	F/m	m ⁻³ · kg ⁻¹ · s ⁴ · A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m · kg · s ⁻² · A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² · kg · s ⁻² · mol ⁻¹
モルエンタルピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol · K)	m ² · kg · s ⁻² · K ⁻¹ · mol ⁻¹
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ · s · A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² · s ⁻³
放射強度	ワット毎平方メートル	W/sr	m ⁴ · m ⁻² · kg · s ⁻³ =m ² · kg · s ⁻³
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² · sr)	m ² · m ⁻² · kg · s ⁻³ =kg · s ⁻³

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨクタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペクタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼット	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h = 60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49) × 10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10) × 10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30) × 10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里每時=(1852/3600)m/s
アール	a	1a=1 dam ² =10 ⁴ m ²
ヘルツ	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バル	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
オンストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
ペイン	b	1b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイナ	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn · s/cm ² =0.1Pa · s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁸ Wb
スチール	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホルト	ph	1 ph=10 ¹⁴ x
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻⁵ Sv
X線単位	X unit	1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキ	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W · m ⁻² · Hz ⁻¹
フェルミ	fermi	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カリ	cal	1 cal=1J
ミクロ	μ	1 μ=1pm=10 ⁻⁶ m