

【小特集】



地質環境の長期安定性に関する研究 —地震が地下水の水理に与える影響—

石丸 恒存

東濃地科学センター

資料番号：102-6

Study for Long-term Stability of Geological Environment
— Seismic Effect on Hydrogeological Environment —

Tsuneari ISHIMARU

Tono Geoscience Center

岩手県釜石鉱山における地震・地下水観測の結果、および1995年兵庫県南部地震の際の地下水変化に関する情報に基づき、地震が地下水の水理に与える影響について検討を行った。

釜石鉱山での地震・地下水観測の結果、地震時に地下水の水圧が一時的に変化する場合があるが、その後、元の状態に回復するという現象が認められた。また、兵庫県南部地震に伴う地下水位の変化も同様の傾向が認められた。これらのことより、地震が地下深部の地下水の水理に対して与える影響は、その復元性により長期的にはきわめて小さい可能性がある。

Seismic effects on the hydrogeological environment were examined, based on the results of earthquake/groundwater observation at the Kamaishi Mine, Iwate Pref. and information on groundwater changes related to the 1995 Hyogoken-nanbu Earthquake.

The result of earthquake/groundwater observations at the Kamaishi Mine showed that groundwater pressure temporarily changed due to the earthquake, but later recovered to its original level. A similar trend was also observed in groundwater level changes related to the Hyogoken-nanbu Earthquake. These indicate that seismic effects on hydrogeological environment deep underground may, in the long-term be negligible due to their stability.

キーワード

長期安定性、地質環境、地震の影響、地下水環境、釜石鉱山、兵庫県南部地震

Long-term Stability, Geological Environment, Seismic Effect, Hydrogeological Environment, Kamaishi Mine, Hyogoken-nanbu Earthquake.

1. はじめに

我が国において高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全性を科学的・技術的に示すためには、日本の地質環境を的確に把握し、さらに地質環境が数万年以上の長期にわたって安定であることを示す必要がある。

日本列島は、環太平洋造山帯の一部をなす弧状列島に位置しており、安定大陸に比べ、地震活動、火山活動、隆起・沈降運動等の天然現象が顕著である。このような背景を踏まえ、動燃事業団は、これらの天然現象が地質環境に与える影響の規模や範囲を把握することを目的とした「地質環境の長期安定性に関する研究」を進めている。本研究は、地層処分研究開発の基盤となる地層科学研究

の一つの柱をなすものである。

地質環境に影響を与える可能性のある天然現象のうち、地震活動については、特に、地震が地下水の水理に与える長期的な影響を把握することを目的の一つとして研究を進めている。

地震に伴い地下水の変化が認められることについては、これまでに多くの報告・研究例があるが、そのほとんどは地震予知の観点から地震の前兆現象を捉えることに主眼が置かれている。このため、長期的な観点から地震が地下水の水理にどのような影響を与えるかということについて論じられたものは、ほとんどない。

今回は、岩手県釜石鉱山において実施している地震・地下水観測の結果に基づき、地震に伴う地

下水の水圧（水位）変化の観測例を報告するとともに、その変化幅と地震規模との関係について検討を行う。また、1995年兵庫県南部地震に伴う地下水位変化の情報収集、ならびに2次元水理解析の結果について紹介し、地震が地下水の水理に与える影響について長期的な観点から考察する。

2. 釜石における地震・地下水観測

釜石鉾山周辺の地質は、古生代～中生代の堆積岩類と、これらを貫く花崗岩類よりなる。鉾山坑道周辺には、閃緑岩と花崗閃緑岩が分布し、坑道の西方に堆積岩類が分布している。

地震計（東西、南北、鉛直方向の3成分加速度計）は、地表部から深度約650m間の標高の異なる4レベル坑道内に鉛直方向に設置するとともに、標高約550m（地表下約315m）の坑道内に平面的に3カ所配置し、計7カ所（K-1～K-7）で同時観測を実施している（図1）。地下水の水圧は、標高550mの坑道の北端から北、北西、西に向けて掘削された3つの試錐孔（KWP-1～KWP-3）の孔口部分に圧力センサーを設置し、観測を継続している（図1）。

2.1 地震・地下水観測結果

(1) 地震観測

1990年2月より観測を開始して以来、1995年12月31日までに249回の地震記録（最大加速度が0.5 galを超えたもの）を得た。年間では20～50回の記録を得ており、これらの地震の震央位置は、青森県から宮城県沖の太平洋側（震央距離で20～250 km）に多い。大部分の地震はマグニチュードが6以下、観測される最大加速度は地表部（K-1）で4 gal以下がほとんどである。これまでに観測された地震のうち、最大のマグニチュードは8.1

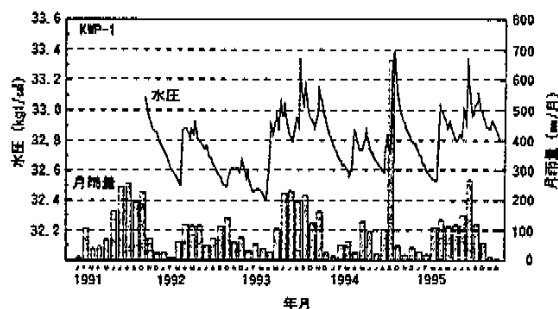


図2 KWP-1孔の水圧変化と月雨量
（1991年11月～1995年12月）
月雨量は、青の木地点（釜石鉾山の北東2 km）のデータによる。

（1994.10.4：震央距離675km）であった。

なお、これまでの深度毎の地震観測では、地下深部（K-6）の地震の最大加速度は、地表（K-1）に比べて1/2～1/4倍である。

(2) 地下水の水圧観測

水圧の長期変化の例として、図2にKWP-1孔の1991年11月から1995年12月までの観測結果を示す。KWP-1孔の水圧はいずれも11月～2月の冬季が低く、4月～5月の春季に急激に水圧が上昇する傾向がある。図2に同時に示した月雨量変化との比較では、水圧変化は、月雨量の増減の傾向と良く対応している。このように、KWP-1孔の年間の水圧変動は、基本的に雨量の季節変化によるものと考えられ、その変動幅は1.0 kgf/cm²程度である。このことは、KWP-2, 3孔についても同様である。

(3) 地震に伴う水圧変化

地震に伴う水圧変化の例として、KWP-1孔での1993年7月の水圧の観測結果を図3に示す。同図に見られる半日周期の規則的な水圧変化（約0.01 kgf/cm²以下）は、地球潮汐による影響と考えられる。また、同図では、1993年7月12日22時19分に発生した地震の直後に、水圧が急激に変化（約0.02 kgf/cm²上昇）する現象が確認できる。他の2孔についても、この地震の直後に水圧の急激な変化が観測されていることから、この変化は地震による影響と見なすことができる。

このような地震に伴う水圧の変化は、1995年12月までに21例が観測され、いずれも地震時にステップ状に変化した後、1週間程度で元のトレンド上に戻っている。これまでに観測された最大の水圧変化は0.35 kgf/cm²であり、それ以外は概ね0.1 kgf/cm²以内の変化である。

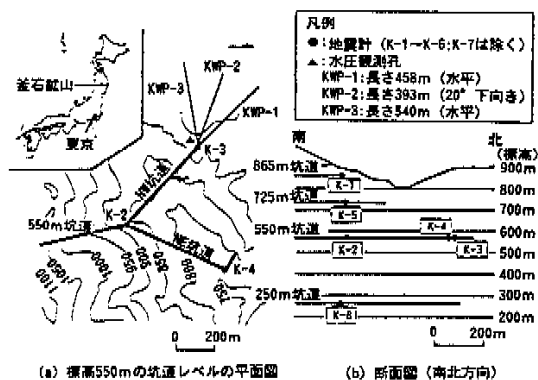


図1 釜石鉾山の地震計・水圧観測孔の位置図

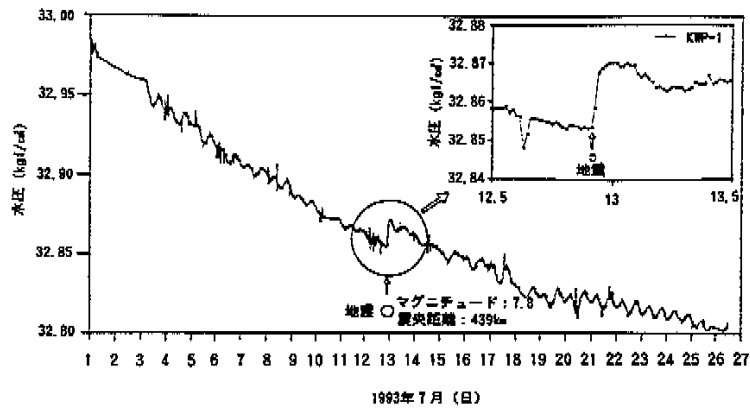


図3 KWP-1孔の1993年7月の水圧変化

2.2 水圧変化と地震規模との関係

(1) 水圧変化と最大加速度との関係

地震の最大加速度と水圧変化との関係では、最大加速度がある一定の値を超える場合に、水圧の変化が起こるというような関係を見出すことはできなかった。例えば、2 gal以下の小さな最大加速度を有する地震において水圧変化が確認される場合がある一方で、最大加速度が18gal以上と大きい値を示すにもかかわらず、水圧は変化していない場合が認められた。このことは、最大加速度の大きさが水圧変化を発生させる主要な因子ではないことを示すものと考えられる。

(2) 水圧変化と地殻歪み量との関係

1994年12月までに釜石鉱山で観測された地震については、Shimizuら¹⁾により、地震に伴う水圧変化の有無と地殻歪み量 (ϵ : 体積歪み変化) との関係について検討がなされている(図4)。地殻歪み量(理論値)については、地震のマグニチュードと震央距離から、Dobrovolskyら²⁾のSoft inclusion

model (均質媒体中に等方楕円体の弾性包有体を仮定した変形理論モデル) より計算できる。図4より、水圧変化が認められた地震は、理論的な地殻歪み量が 10^{-8} を越えたレベルにあてはまることがわかる。このことから、Shimizuら¹⁾は、地震に伴う水圧変化の発生は、地殻歪み量の大きさに依存していることを推察した。

ただし、3つの試錐孔(KWP-1~KWP-3)では、各地震に伴う水圧の上昇・下降のパターンやその変化量が異なっている。3つの試錐孔のうち、KWP-2孔が地震に伴う水圧変化の応答性が最も顕著であり、その原因は今のところ明らかではないが、これまでの観測において最も多くの水圧変化が認められ、その変化量も大きい値を示した。

ここでは、KWP-2孔の観測データに基づいて、地震に伴う水圧変化量と地殻歪み量との関連性の検討を行う。KWP-2孔の観測データについては、地震に伴う水圧変化量を水位変化量に換算し、地球潮汐によると考えられる変動幅より大きな10cm以上の変化が認められたものを抽出した。地震に伴う水圧変化は、地震時(コサイスマック)の変化だけでなく、地震発生に先立つ前兆的な現

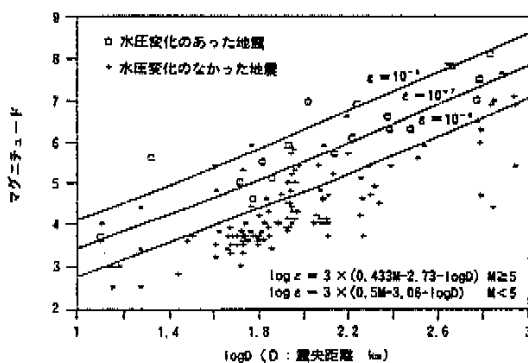
図4 水圧変化の有無と地殻歪み (ϵ) との関係

表1 KWP-2孔での地震に伴う水位変化

年月日	緯度	経度	マグニチュード	震源深度 (km)	震央距離 (km)	最大加速度 (gal)	KWP-2 水位変化 (cm)
95/ 1/ 7	40°14'	142°23'	7.0	50	120.7	34.68	-216.7
94/12/29	40°06'	143°00'	6.3	—	145.0	13.41	-97.2
94/12/28	40°24'	143°42'	7.5	—	212.6	31.25	-344.4
94/12/21	39°28'	141°15'	5.0	89	40.4	13.10	-69.4
94/10/ 4	43°22'	147°40'	8.1	30	675.1	36.94	-208.3
93/12/ 7	42°47'	139°12'	7.8	34	438.9	1.37	-255.6
93/ 1/15	42°51'	144°23'	7.8	107	455.7	25.37	-22.2
92/ 7/18	39°23'	143°39'	6.9	30	174.0	4.98	-120.0
92/ 7/16	39°20'	143°35'	6.1	—	165.4	1.91	-19.4
92/ 5/16	38°53'	142°06'	4.6	51	59.6	12.34	-22.2
92/ 4/13	39°07'	142°25'	5.1	58	72.6	21.33	+30.6

地震の緯度、経度、マグニチュード、震央距離は気象庁のデータによる。

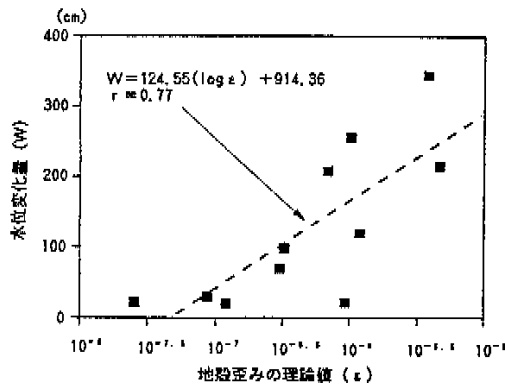


図5 水位変化幅と地殻歪み量との関係
■: KWP-2孔のデータ

象として認められる水圧の変化も含めて、地震前後の変化を総和として捉えた。それらのデータを地震の諸元とともに表1に示す。これらのデータより求められた水位変化量（絶対値）と理論的な地殻歪み量との関係には、強い正の相関が認められた（図5）。

釜石鉦山における地震・地下水観測により得られた知見について、以下にまとめる。

- ① 地下300m以深の地下水の水圧観測の結果、水圧は約1.0kgf/cm²の季節変化を起こす。
- ② 地震時に水圧が変化した21例のうち、最大の水圧変化は0.35kgf/cm²、それ以外は概ね0.1kgf/cm²以内であった。これらの変化はいずれも、ステップ状に変化した後、概ね1週間以内に元のトレンド上の水圧レベルに回復する。
- ③ これまでに観測された地震に伴う水圧の変化幅は、年間の季節変化による水圧の変動幅よりも小さい。
- ④ KWP-2孔での地震に伴う水圧の変化幅は、Dobrovolskyら²⁾による地殻歪み量（理論値）に対して強い正の相関を示す。

3. 1995年兵庫県南部地震に伴う地下水変化

阪神・淡路地域に多大の被害を及ぼした1995年兵庫県南部地震は、明石海峡付近を震央とするマグニチュード7.2の内陸型の地震であった。この地震に伴って淡路島の北西部地域においては、野島断層が明瞭な地表地震断層（全長8km以上）として出現した。

ここでは、兵庫県南部地震に伴う地下水変化に関する情報収集、および野島断層を対象とした2次元の水理解析の結果について紹介する。

3.1 地下水変化に関する情報収集

兵庫県南部地震に伴う地下水の水位、湧水、水温、水質等の変化については、各学会やシンポジウム等、様々な場で報告がなされている^{3)~6)}。

この地震に伴う地下水変化の情報については、文献調査や独自の情報収集作業により、主に神戸・大阪市周辺および淡路島における井戸・試錐孔で認められた地下水位の変化に関するデータを220件、また、湧水や河川の水量変化に関して50件のデータを収集・整理した。

収集したデータのうち、観測用の孔井等、地震の前後にわたって地下水位が定量的に計測されているものは全体の5割以下であった。また、深度数100m以上の孔井でのデータは限られていた。

ここでは、地震に伴う地下水位の変化の概要について、孔井の深度やストレーナ位置がわかっている信頼性の高いデータに基づき、以下にまとめる。

- ① 孔井の深度あるいはストレーナ深度が30m未満の場合の地下水位の変化は、データの9割以上が数10cmから5m以下であった。そのうち、最大の変化は、淡路島北端部の岩尾における18mの水位低下であった。
- ② 孔井の深度あるいはストレーナ深度が30m以上の深の場合の水位変化はすべて数cmから数十cmの範囲であった。
- ③ 水位変化の継続期間は、地震発生後、数日から数カ月程度と様々であった。また、多くの孔井においては、水位が地震以前の状態に戻る傾向が認められたが、特に、浅井戸の場合には、地震後に水位が低下したまま回復していない例がある。
- ④ 水位変化が確認された範囲は、静岡県奥の深度100m以深の観測井において数cm～十数cmの水位変化が確認された例⁹⁾のように、震央から数100km離れた場所に広がる。

地震に伴う湧水や河川の水量変化については、連続観測による定量的なデータは非常に限られている。全体の傾向としては、阪神・淡路地域において、既存の湧水地点からの湧水量や河川流量は地震後に増加している。

一方、淡路島北部において地震の際に地表に出現した野島断層近傍（断層の東側に限られる）からは、地震以前に湧水のなかった場所数カ所で新たな湧水が突発的に生じたことを現地調査により確認した（図6）。同様の結果は、例えば、田中ら⁴⁾、佐藤ら⁵⁾等でも報告されている。その後の

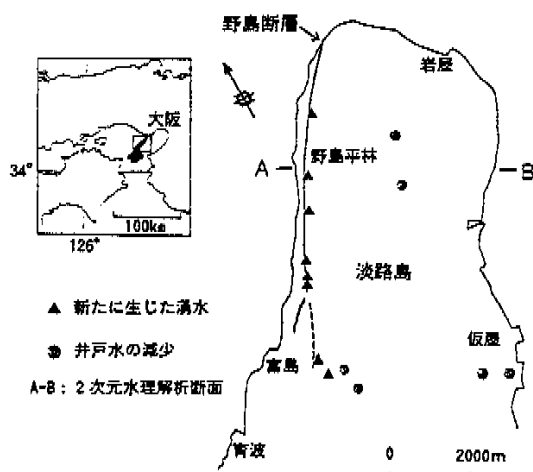


図6 兵庫県南部地震直後に確認された野島断層沿いの湧水発生地点と井戸水の減少地域

調査により、野島平林地区等の一部の湧水は2ヵ月後には停止していたことを確認した。

また、淡路島北部の脊梁山地部の幾つかの地域における10m前後の浅井戸では、地震後に井戸枯れが生じ⁶⁾、地震から1年以上経た後も井戸の水位は回復していない場所もある¹⁰⁾。

以上、兵庫県南部地震に伴う地下水変化に関する情報収集結果からは、概ね以下のようなことがいえる。

- ① 震央周辺の阪神・淡路地域では、地震に伴って地下水位の変化が報告されたが、定量的な連続観測データは少ない。特に、数100m以上の深い孔井でのデータは限られる。
- ② 地震に伴う地下水位の変化については、地下30m程度の浅層と比較し、それ以深では変化幅は小さい傾向にある。このことは、沖積層を含むような浅層の地下水と深部岩盤中の深層地下水では地震時の挙動が異なることを示唆する。
- ③ 震央から数100km以上離れた場所でも、地震に伴う地下水位の変化が生じる場合がある。
- ④ 地震直後の野島断層近傍からの新たな湧水の発生は、野島断層の活動による影響が考えられる。

3.2 野島断層を対象とした2次元水理解析

兵庫県南部地震の際に地表に出現した野島断層沿いに新たな湧水の発生を確認したという事実については、断層活動に伴って断層破砕帯の透水性が増大し、地下水が地表に湧出した可能性が考えられる。この仮説に基づいて、断層活動による

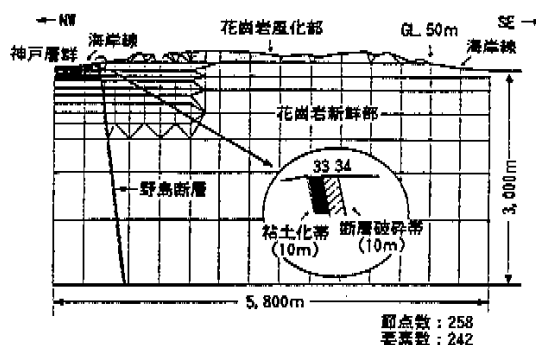


図7 淡路島北部の2次元水理地質構造モデル(野島平林地区)

地下水変化の予察的な検討を行うため、有限要素法を用いた2次元浸透流解析を実施した。

(1) 水理地質構造モデルの作成

野島平林地区の野島断層を通して淡路島を横断する東西断面(図6中A-B)を解析対象領域(東西5,800m、標高-3,000m)として、概念的な水理地質構造モデルを作成した(図7)。対象領域には、白亜紀の花崗岩類と新第三系の神戸層群が分布している。水理地質構造モデルでは、神戸層群、花崗岩類(新鮮部と風化部に分類)の境界の位置は、既往の文献^{11),12)}を参考に設定した。また、野島断層については、野島平林地区で実施された断層を貫く深度750mの試錐データ¹³⁾に基づいて、断層の傾斜を84°、断層帯の幅を20mとし、断層帯は単純化して、粘土化帯と断層破砕帯それぞれ10m幅の2層に分割した。

各地質は、多孔質媒体とし、それぞれの透水係数、間隙率、比貯留率を設定した(表2)。各水理定数の設定においては、当地域の各地質の原位置での水理定数は得られていないため、既往の文献¹⁴⁾⁻¹⁶⁾を参考とした。

表2 地質区分別の水理定数

地質区分	透水係数 (cm/sec)	間隙率 (%)	比貯留率 (m^{-1})
花崗岩新鮮部	5.0×10^{-7}	0.003	1.0×10^{-7}
花崗岩風化部	1.0×10^{-3}	0.25	1.0×10^{-4}
神戸層群	1.0×10^{-8}	0.03	1.0×10^{-5}
粘土化帯	1.0×10^{-9}	0.05	1.0×10^{-5}
断層破砕帯(地震前)	5.0×10^{-7}	0.003	1.0×10^{-7}
断層破砕帯(ケースI)	1.0×10^{-3}	0.25	1.0×10^{-4}
断層破砕帯(ケースII)	1.0×10^{-5}	0.1	1.0×10^{-5}

地下水源量: 0.57mm/日

(2) 解析方法

解析手法には、ダルシー則に基づく有限要素法を用いた2次元飽和不飽和浸透流解析を適用し、解析コードは、UNISSF (CRC総合研究所所有)を使用した。

境界条件は、地表部を浸出面境界、下部は不透水境界とし、側方は透水境界として標高0mの定水位条件を与えた。なお、不飽和浸透特性は飽和度と比透水係数・圧力水頭の関係¹⁷⁾を用いた。

解析においては、断層活動に伴い断層破砕帯の透水性が増大したとの仮定に基づき、地震前後で断層破砕帯(幅10m)の透水係数を変化させた。地震後の非定常解析の初期条件は、地震前の定常解析結果を用いた。

地震前の断層破砕帯の透水係数は花崗岩新鮮部(5.0×10^{-7} cm/sec)と同様と仮定し、実験的に、地震後の透水係数を4桁大きくしたケースI (1.0×10^{-3} cm/sec)、および2桁大きくしたケースII (1.0×10^{-5} cm/sec)について解析を実施した。

(3) 解析結果

主な解析結果は、以下のとおりである。

- ① 全水頭の変化から算出した地震直後の解析断面上の断層破砕帯からの地下水の湧出量は、ケースIでは約 $1.3 \text{ m}^3/\text{日}/\text{m}$ 、ケースIIではほとんど無視できる量(約 $0.002 \text{ m}^3/\text{日}/\text{m}$)である(図8)。
- ② ケースIでの短期的な湧水量の変化を見た場合、地震直後にピークがあり、約10日後で $1/5 \sim 1/4$ 程度、約50日後には $1/10$ 以下に減少する。
- ③ ケースIにおける解析領域の全水頭等高線分布の長期的な変化については、地震後、全水頭

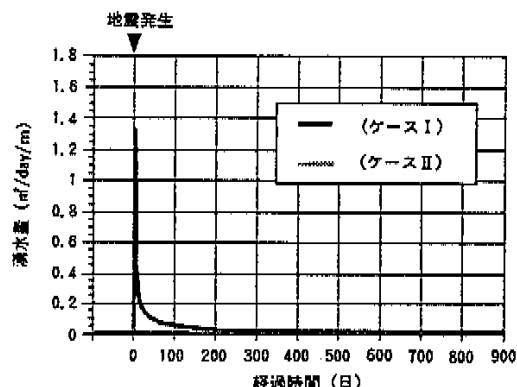


図8 断層破砕帯からの湧水量の経時変化
(湧水量は、断層破砕帯の地表の節点33、34(図7中)における解析断面奥行き1mあたりの流出量の合計である。)

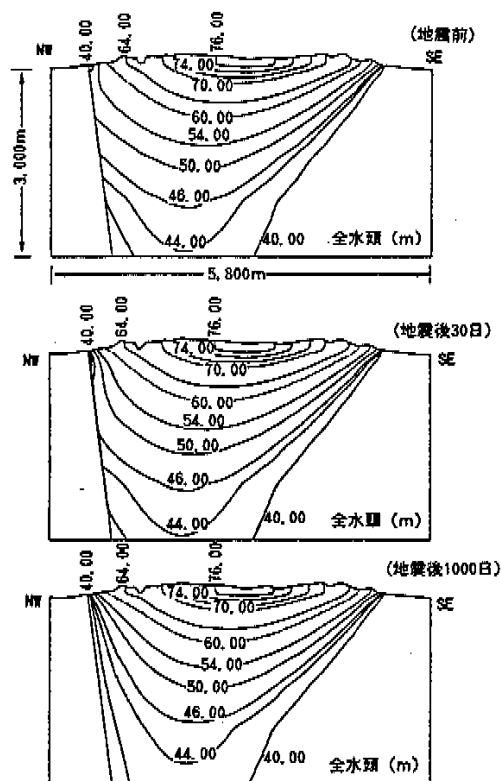


図9 地震前後の全水頭等高線の分布(ケースI)

等高線が時間の経過とともに断層付近で断層に平行的に配列し、地震前後の全水頭変化は断層に近いほど大きくなる(図9)。

- ④ ケースIにおいて、断層より離れた場所の地表部、すなわち、淡路島の脊梁山地部の地表付近では、地下水の全水頭は地震前後で全く変化しない。

(4) 考察

ケースIの場合、断層破砕帯からの湧出量は、地震直後にピークがあり、約50日で $1/10$ 程度に減少している。この解析結果は、野島平林地区において地震直後に断層近傍から新たな湧水が突発的に発生し、2ヵ月後には停止したという事実に対して、湧水量に関する定量的データは取得できていないものの、その経時変化はよく一致している。一方、ケースIIの場合では、湧出量は無視できるほどに小さい。

つまり、野島断層近傍の突発的な湧水は、ケースIで示されたように、地震に伴って断層破砕帯の透水係数が局所的に 1.0×10^{-3} cm/sec前後まで変化するという、断層活動による断層破砕帯の透水性の増大がその要因の一つであることが示唆さ

れる。

しかしながら、地震後に淡路島脊梁山地部の幾つかの地域で井戸枯れが生じたという事実は、今回の解析においては、地震前後でその付近の全水頭分布に変化が認められないということから、断層破碎帯の透水性の変化だけでは説明できない。

淡路島に見られた地震前後での地下水の変化の原因については、断層破碎帯だけでなく断層周辺の岩盤の透水性の変化や、断層周辺の応力変化による過剰間隙水圧の発生・消散等も考慮して、さらに検討を進める必要がある。

4. 地震が地下水の水理に与える影響の考察

釜石における地震・地下水観測や兵庫県南部地震に伴う地下水変化の情報収集から得た知見について、地震が地下水の水理に与える影響という観点から整理してみる。

地震が地下水の水理に与える影響は大きく2つの現象に分けて考えることができる。それは、①地震に伴う岩盤の振動や地殻歪みの変化が地下水の水理に与える広域的な影響と、②断層活動そのものによる岩盤の変位や破碎帯の形成、断層周辺の岩盤中の割れ目系の発生等が地下水の水理に与える局所的な影響である。

さらに、兵庫県南部地震に伴う地下水変化からも示唆されたように、浅層部と地下深部の地下水とでは地震に伴う挙動が異なると考えられるため、両者を分けて考える必要がある。ただし、この両者の明確な区別は難しいため、ここでの考察では、その目安として、地下数十m以浅を浅層部、地下数十m以深を地下深部と呼ぶものとする。

4.1 地震による広域的な影響

釜石鉱山で観測された地震に伴う地下水位の変化の例は、地震が地下深部の地下水に与えた広域的な影響と考えることができる。釜石鉱山での観測結果からは、地震に伴って地下水位の水圧や水位は変化する場合があるが、その変化は、一時的であり時間経過とともに元にもどることや、降雨等の影響と考えられる年間の季節変動による変化幅よりも小さいことがわかった。

また、兵庫県南部地震に伴う地下深部の地下水の水位変化は、数十cm以下と浅層部に比べ小さく、時間経過とともに回復傾向にあることが認められた。

その他、川辺の報告¹⁸⁾にある1946年南海道地震や1923年関東大地震の際の道後温泉の泉源井(深度約300m)における地下水変化の例や、動燃

事業団東濃鉱山の試錐孔(深度約130m)における1994年北海道東方沖地震や1994年三陸はるか沖地震に伴う地下水位の変化の例¹⁹⁾についても、地震に伴って地下水位が一時的に変化しても、やがては元の状態に回復するということが認められている。

地下水の水理の変化は、地下水位や水圧の変化として現れると考えられるので、以上のことから、地下深部の水理場は、地震に対して広域的に影響を受けたとしても、それは一時的でやがては元の状態に回復するといえる。つまり、地震が地下水の水理に与える広域的な影響は、その復元性により、数万年の長期間を考える場合には非常に小さいと考えられる。

さらに、地震に伴う地下深部の地下水の広域的な変化を予測するという観点からは、釜石での観測結果から求めた地殻歪み量と地下水位の変化幅の関係をを用いることにより、地震規模と震央距離に対する水位変化量を推定できる可能性がある。

一方、兵庫県南部地震の震央周辺の地域で確認された浅層部での地震に伴う地下水位変化は、地下深部に比べて大きく、地震後に元の状態に回復していない場合も多く確認されている。このことから、震源域周辺の浅層部の地下水の水理は、地震により変化する場合があるといえる。

4.2 断層活動による影響

淡路島北部の野島断層近傍から、新たな湧水が突発的に生じた現象については、2次元水理解析の結果からも示唆されるように、断層活動が地下水の水理に影響を与えたと考えられる。

ここでは、断層活動に伴う断層破碎帯の透水性の増大が一つの要因として推察されたが、かならずしも、その因果関係は明確になっていない。しかし、断層沿いの突発的な湧水が長期間にわたって継続するものではないことはいえそうである。

断層活動が地下水の水理に与える影響については、地下深部の水理状況がどのように、またどの程度の範囲まで変化するかを把握し、長期的にどう変化していくかを知ることが重要と考える。

5. おわりに

今回、釜石での地震・地下水観測結果や兵庫県南部地震に伴う地下水変化の情報に基づいて、地震が地下水の水理に与える影響という観点から考察を行った。

その結果、地震(動)が地下深部の地下水の水理に与える影響は、一時的(時間経過とともに元

の状態に回復する) であると考えられることから、長期的な影響はきわめて小さい可能性がある。

一方、断層活動が周辺の地下水の水理に与える影響としては、断層活動に伴い地下水が断層破碎帯等の割れ目を通して地表に湧出する可能性のあることがわかった。

今後とも、地震が地下深部の地下水の水理に与える影響については、観測データの蓄積を図るとともに、地震のタイプや規模の違いによる地下水変化の特徴について多方面から考察・解析を行い、地震に伴う地下水挙動のモデル化を進めていく必要がある。

断層活動が地下水の水理に与える影響については、現段階では、明らかになっていない部分が多く、地質環境の長期安定性の観点からの検討を進めていく必要がある。

謝辞

釜石での地震・地下水観測を進めるにあたっては、東京大学名誉教授の山口梅太郎先生をはじめとする「地震に関する調査研究委員会」の先生方に有益な助言を頂いた。また、兵庫県南部地震に伴う地下水変化の情報収集にあたっては、京都大学の大西有三教授をはじめとする「地震による地下水影響調査検討委員会」の先生方のご協力を頂くとともに、有益な助言を頂いた。ここに厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) I. Shimizu, H. Osawa, et al. "Earthquake-related groundmotion and groundwater pressure change at the Kamaishi Mine", *Engineering Geology*, 43, p107-118 (1996).
- 2) I.P. Dobrovolsky, S.I. Zubkov, et al. "Estimation of the Size of Earthquake Preparation Zones", *Pageoph*, 117, P1025-1044 (1979).
- 3) 西村進, 小泉尚剛, 他: "兵庫県南部地震前後の地下水・温泉水の変化", シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」講演論文集, P21-24 (1995).
- 4) 田中和広, 下木良雅弘, 他: "兵庫県南部地震における地下水挙動調査結果", 1995年日本地下水学会春季講演会講演要旨, P8-11 (1995).
- 5) 佐藤努, 高橋誠, 他: "1995年兵庫県南部地震後に生じた淡路島の湧水", 地質ニュース, 496, P61-66 (1995).
- 6) 大阪市立大学阪神・淡路大震災学術調査団地下水班: "兵庫県南部地震の温泉を含む地下水への影響", 「大震災 そのとき地質家は何をしたか」(柴崎達雄・植村武・吉村尚久編), 東海大学出版会, P133-147 (1996).
- 7) 角皆潤, 脇田宏: "1995年兵庫県南部地震前の地下水化学組成の変化", 月刊地球専外, 13, P190-193 (1995).
- 8) 遠川晋次, 田中和広, 他: "1995年兵庫県南部地震に伴うコナイスミックな地下水挙動", 地質, 48, P547-553 (1995).
- 9) 佐藤努, 高橋誠, 他: "1995年兵庫県南部地震に伴う地下水変動—淡路島の湧水および静岡県内の地下水観測", 「1995年1月17日兵庫県南部地震」調査速報会記録, P59-60, (1995).
- 10) 佐藤努, 高橋誠: "1995年兵庫県南部地震後に生じた淡路島の湧水(その2) 湧水量の変化", 地質ニュース, 506, P24-28 (1996).
- 11) 水野清秀, 服部仁, 他: "明石地域の地質", 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所 (1990).
- 12) 皆川潤, 大槻憲四郎, 他: "野島地震断層と構造物被害について", 「阪神大震災」中間報告会予稿集, 日本応用地質学会, P22-37 (1995).
- 13) 伊藤久男, 桑原保人, 他: "活断層掘削による野島断層の地下構造", 日本地震学会講演予稿集1996年秋季大会, B07 (1996).
- 14) 柳澤孝一, 今井久, 他: "立坑掘削に伴う地下水流動影響調査研究", 応用地質, 33, P32-49 (1992).
- 15) 宮水佳晴, 福原明: "地下石油備蓄基地の設計について", 地下石油備蓄基地建設関連発表文獻集, P95-106 (1994).
- 16) 尾方伸久, 大澤英昭, 他: "堆積岩の地質学的特性および透水性数—見かけ比抵抗相互の関係とその水理地質構造モデル化への適用", 応用地質, 32, P51-62 (1992).
- 17) 稲葉秀雄, 前川恵輔, 他: "我が国を対象とした地下水流動解析その3", TR/GE95-02 動力炉・核燃料開発事業団, (1995).
- 18) 川辺岩夫: "地震に伴う地下水・地球化学現象", 地質, 44, P341-364 (1991).
- 19) 脇田宏, 五十嵐丈二, 他: "岐阜県土岐における地下水位観測—遠地大震災前後の変化", 地球惑星科学関連学会1996年合同大会予稿集, P428 (1996).