

地震による岩盤水理挙動

—地下石油備蓄串木野基地の事例—

長谷川 誠¹・宮下 国一郎²・清水 勝美³・岡本 明夫⁴

¹正会員 清水建設(株) 土木本部技術第2部(〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3)

²正会員 工博 清水建設(株) 技術研究所特別プロジェクト部(〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

³正会員 (株)東京建設コンサルタント 技術第2部(〒171-0014 東京都豊島区池袋2-43-1)(元)清水建設(株)

⁴工博 日本地下石油備蓄(株) 業務部(〒105-0012 東京都港区芝大門2-10-12)

1997年3月から8月にかけて鹿児島県川内市付近を震源とする群発地震が発生した。串木野基地においても震度5強～6弱をはじめとした揺れを頻繁に記録した。その間岩盤タンク周辺に設置した間隙水圧計測システムにより岩盤水理に関する貴重なデータを連続して取得することができた。本報告では、計測点の岩盤状況を照査し、この地震時に得られた間隙水圧の挙動について検討するとともに、岩盤タンク設置域の地下水系としての挙動について考察を加え、地震による岩盤水理挙動に関する知見を示した。

Key Words : *water-sealing system, underground oil storage, dynamic pore pressure, earthquake, in-situ measurement*

1. はじめに

近年の地下空間利用の発展に伴い、岩盤内の地下水の水理学的挙動についての研究が活発に行われるようになってきたが、地下水面下の岩盤構造物に地震が与える水理学的影響についての報告は、鉱山及びトンネルなどで地震直後の湧水量増加とその後の漸減傾向を報告^{1), 2)}したものが見られる程度でまだ少ないと言える。

国家地下石油備蓄串木野基地は、1994年11月に石油の受け入れが完了し現在本格的な操業段階にはいつている。串木野基地操業開始以来岩盤タンク内への湧水の排水処理・水封水供給水量の管理等の日常的維持管理業務が行われているが、同時に将来の保全技術の確立を図るための諸施策もあわせて実施中である。その一環として、地震時における岩盤水理挙動を解明するための基礎データを蓄積することを目的として、基地施設のトンネル内2箇所を削孔したボーリング孔内に間隙水圧計を設置し、これを既設の地震計に接続させた間隙水圧計測システムを構築し継続的な観測を行っている。

1997年3月から8月にかけて鹿児島県川内市付近を震源とする群発地震が発生した。串木野基地においても震度5強～6弱をはじめとした揺れを頻繁に記録した。その間岩盤タンク周辺に設置した間隙水圧計測システムにより岩盤水理に関する貴重なデータを連続して取得することができた。本報告は、計測点の岩盤状況を照査し、この地震時に得られた間隙水圧の挙動について検討するとともに、岩盤タンク設置域の地下水系としての挙動について考察を加え、地震による岩盤水理挙動に関する知見を示すものである。

2. 串木野基地の概要

串木野基地は、国家石油備蓄の一環として鹿児島県串木野市に1987年1月から1994年5月にかけて建設されたものであり、貯蔵容量175万klの大規模な水封式岩盤タンクである。岩盤タンクは幅18m、高さ22m、長さ555mの空洞10列で構成され、3つのユニットに分かれている。空洞天端はEL-20mであり地表からの土被りは平均で150mと

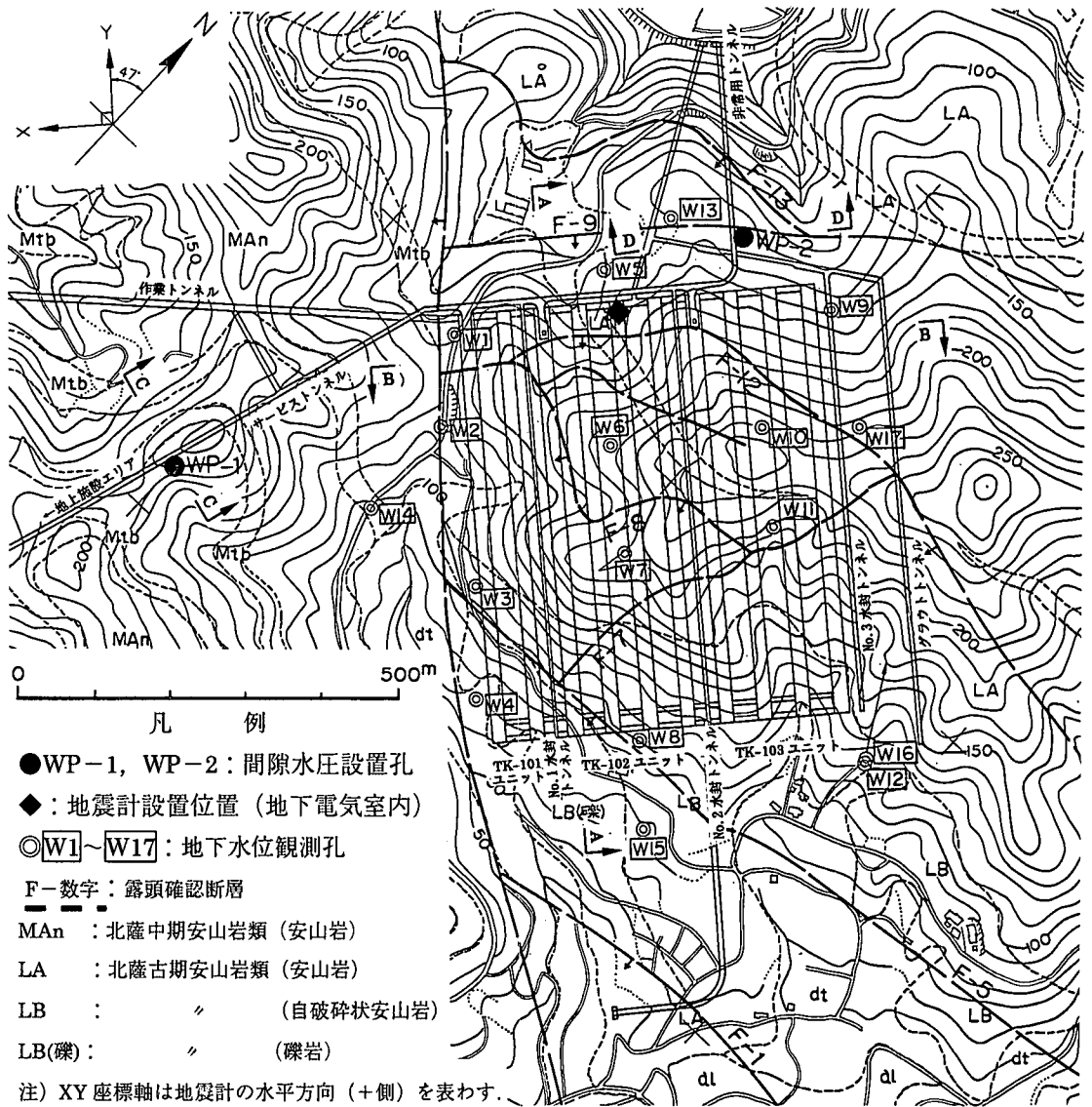


図-1 串木野基地施設全体図

なっている。(図-1, 2 参照)

1981 年度から 1986 年度にわたる調査・試験により、岩盤タンクの設置域は、新第三紀北薩古期安山岩類の自破碎状安山岩 (LB) 及び同礫岩 (LB (礫)) からなり、岩盤は全体として中硬岩に分類される緻密で割れ目の少ない良好な岩盤で構成されている³⁾。岩石の一軸圧縮強度は平均で約 49MPa、超音波速度試験の結果では V_p は 3.5~4.6km/sec、 V_s は 1.7~2.7 km/sec であった³⁾。また、ルジオン試験の結果を対数平均により求めた新鮮岩盤の透水係数は 1.5×10^{-7} cm/sec ときわめて低い値を示している³⁾。ただし、図-1 の F9 断層群 (F9~F14 断層の総称、走向は $N50^\circ \sim N80^\circ E$ 、傾斜は $35^\circ \sim$

$55^\circ S$ 。ただし、露頭で確認された断層のみ表示。) が、TK-103 ユニット北西端部から 200m までの区間においてタンク設置レベルではほぼ岩盤タンクを横断する形で分布し、この断層群が横断する部分 (図-2 (c) において TK-103 ユニットの TK-103A からグラウトトンネルの間) は割れ目に富み、一部には透水係数が $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/sec と高いオーダーを示した所もあり、空洞掘削および透水性の改良に施工上苦勞した部分である^{3), 4)}。

水封システムの管理上で重要となる、岩盤タンク内湧水量・水封水供給水量・地下水位は地上施設エリア内にあるコントロール室内でモニターしかつ記録している。

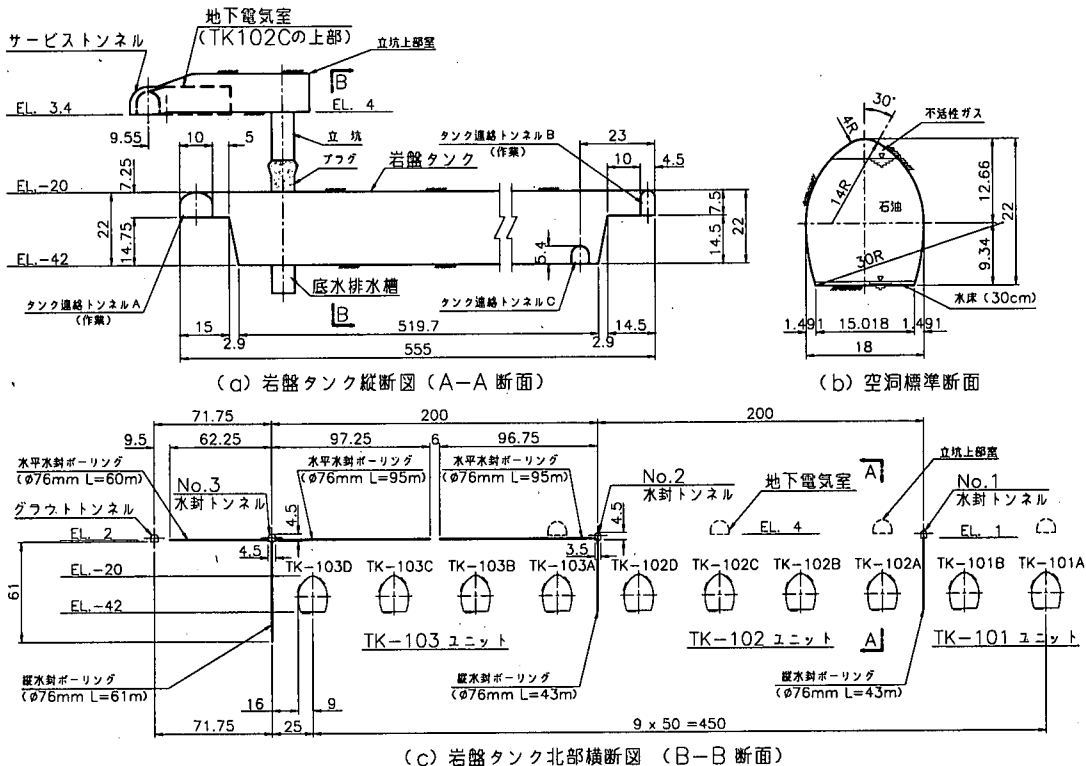


図-2 岩盤タンク縦断面図, 空洞標準断面及び岩盤タンク北部横断面図 (単位: m)

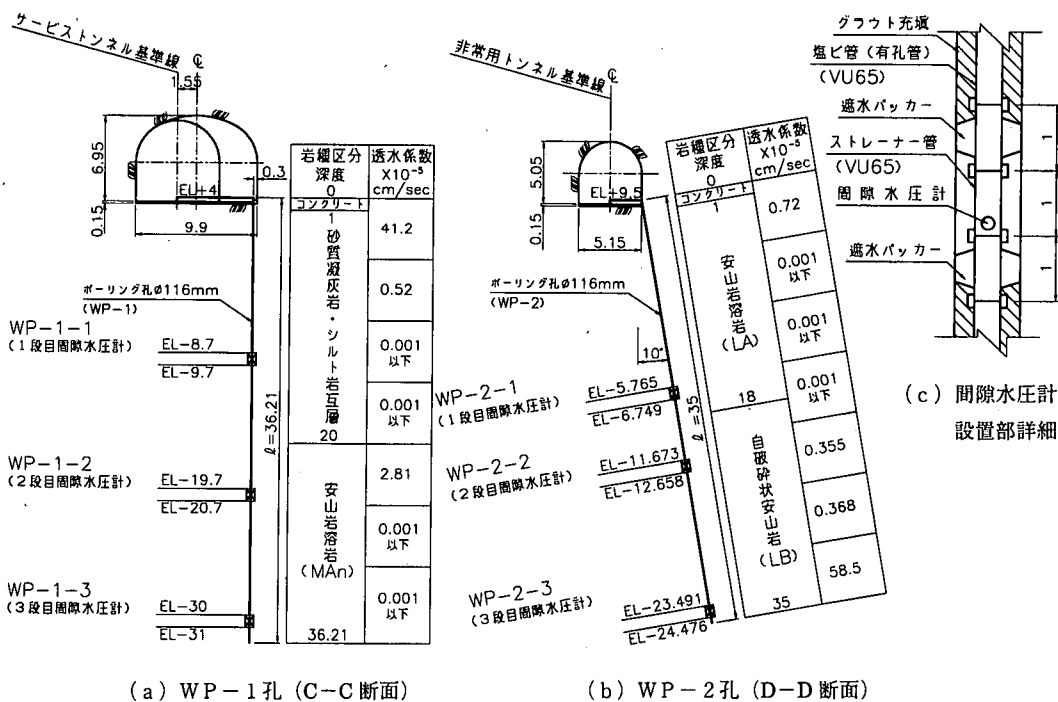


図-3 間隙水圧計設置孔断面図 (単位: m)

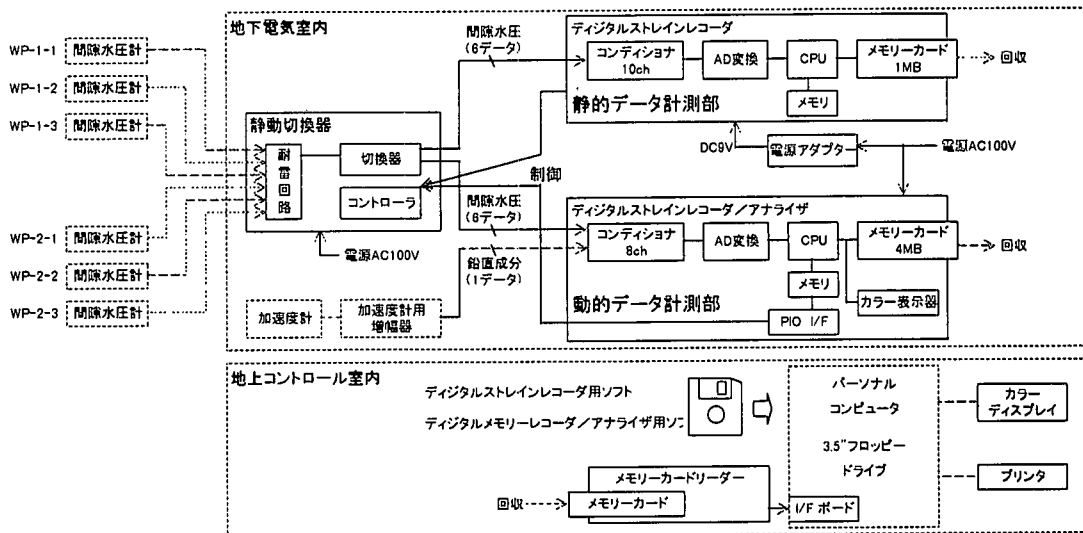


図-4 間隙水圧計測システムブロック図

岩盤タンク内への湧水は、図-2に示した底水排水槽内に集まった湧水をサブマージブルポンプで排水し、サービストンネル内の配管を通して地上施設エリアに導かれ油水分離した後処理される。この湧水量は積算流量計により測定されている。

水封水の供給水量は、図-1に示したNo.1~No.3水封トンネルへ地上施設エリアからサービストンネル内に敷設した配管を通しておこなわれる。この供給水量は積算流量計で測定され、また各水封トンネルのヘッドはEL+9.0mに維持されるように自動コントロールされている。

地下水位の観測は、図-1に示した地下水位観測孔(W1~W17)にて行なわれ、孔内水位は孔内にセットした水圧計により測定されている。なお、各観測孔は地表から設けられており、その孔底はEL-3mである。

3. 間隙水圧計設置位置及び間隙水圧計測システム

図-1に示したように、基地施設のトンネル内2箇所ではボーリングを削孔後、図-3に示すように各ボーリング孔に間隙水圧計を深さ方向に3段に設置し、おのおのは独立するようにシールした。これを図-2に示した地下電気室内の床面上(EL+4.0m)に設置された既設の地震計に接続し、常時においては静的データ計測部にて2時間に一度、地震時には動的データ計測部にてトリガーとした鉛直動が

5 cm/sec²以上の地震動を感知した時点で10秒前にさかのぼりデータを連続的に記録する間隙水圧計測システムを地下電気室内に設置した。データ収録はメモリーカードを利用し、その収録可能時間はトリガー感知後60秒間とした。図-4に示したように、収録データはメモリーカードを回収し、コンピュータで処理した。なお、図-1に示すように既設地震計の水平方向Xのプラス方向はN137°W、水平方向Yのプラス方向はN47°Wとなっている。

ここで、静的データ計測部で計測される間隙水圧を常時間隙水圧、地震時に動的データ計測部で計測される間隙水圧から常時間隙水圧(基準圧)を引いた間隙水圧の変動量を地震時間隙水圧と定義し以降使用する。

4. 地震観測記録と地震時間隙水圧測定結果

1997年3月下旬から1997年8月にかけて串木野基地周辺で得られた震度4以上の地震の諸元を表-1に示す。

この間、串木野基地では、臨時点検を地震の都度行ったが幸い基地の諸施設には被害が見られず、既設地震計および間隙水圧計は正常に作動し、貴重なデータが得られた。

ここでは、地震名の付けられた2つの規模の大きな地震を取り上げ、その時刻歴変化、周波数特性について検討するとともに、地震時間隙水圧変動のメカニズムについてはスペクトル解析を行なって地震

表-1 震度4以上の地震の諸元
(気象庁大口観測局による)

発生日時	震度	マグニ チュード	命名地震と その震源深さ
3月26日 17:31	5弱	6.3	鹿児島県北西部地震 8km
〃 17:38	4	4.7	—
〃 18:05	4	4.5	—
〃 22:24	4	4.4	—
4月 3日 4:33	5強	5.5	—
4月 4日 2:33	4	4.6	—
4月 5日 13:24	5弱	4.9	—
4月 9日 23:20	4	4.8	—
5月13日 14:38	6弱	6.2	第2鹿児島県北西部地震 8km
5月14日 8:32	4	4.7	—
7月26日 18:36	4	4.3	—

動と比較・検討することにより考察を加える。

(1) 鹿児島県北西部地震

a) 時刻歴変化

図-5は地震時間隙水圧および加速度の観測記録を示したものである。地震時間隙水圧は6箇所の間隙水圧計の変動状況を、また加速度は水平2成分・鉛直1成分および水平合成加速度の変動状況を示している。この地震の継続時間は30秒間で、主要動は時刻10～20秒の約10秒間である。この時の、加速度および地震時間隙水圧記録の時刻歴変化の特徴を以下に示す。

①水平加速度はY成分で最大39.6 cm/sec²発生しており、地下発電所における観測事例⁵⁾および菊間実証プラントにおける観測事例⁶⁾と比較しても岩盤内部で観測された記録としては大きい。水平加速度波形は比較的長周期成分の波が卓越し、これに短周期成分波が加算された形になっている。X方向とY方向の波形の形状および振幅を比較すると、両者に大きな違いが見られないことから、一方向に片寄って振動しているということはない。

②WP-1-2, WP-1-3, WP-2-3の3カ所は地震時間隙水圧の増減が少なく、S/N比(現象とノイズの割合)の関係からノイズ成分が大きく現れている。一方、WP-2-2の地震時間隙水圧の増減は顕著であり、最大値はプラス側126.5kPa、マイナス側119.6kPaとなっている。このことから、特にWP-2孔では間隙水圧計設置位置によって地震時間隙水圧の増減の違いが大きいことが分かる。地震時間隙水圧波形のピーク位置については、6成分とも良く

対応している。

③地震時間隙水圧波形は鉛直方向より水平方向の加速度波形に比較的近い。加速度の増減に伴い地震時間隙水圧も増減し、地震の継続中は加速度の変動にほぼ対応したかたちで地震時間隙水圧が変動している。

④WP-2-2のマイナス側にピークが見られる時刻15秒付近で、水平加速度にも同様のピークがある。しかし、WP-2-2のプラス側にピークが見られる時刻12.5秒付近には、水平加速度に対応するピークはない。

なお、鉛直加速度は水平加速度よりも短周期の波が多く含まれており、水平動と鉛直動の振動性状は大きく異なっているが、これは鉛直加速度には周期的な電気ノイズが含まれているためである。

b) 周波数特性

図-6は加速度3成分(水平2成分、鉛直1成分)と地震時間隙水圧の3成分(WP-1-1, WP-2-1, WP-2-2)のフーリエスペクトルを示したもので、周期の範囲は0.1～3.0秒である。この図から加速度および地震時間隙水圧の周波数特性の特徴は以下のように示される。

①水平加速度記録に見られる長周期成分波の周期は1～2秒であり、短周期成分波は周期0.2秒である。また、鉛直加速度記録のフーリエ振幅は水平加速度の1/5以下と小さく、水平加速度のような卓越したピークは見られない。

②地震時間隙水圧は周期0.8～2秒の成分が卓越し、WP-2-2にはさらに周期0.4秒付近の成分の波が含まれている。

③地震時間隙水圧の周期1～2秒(長周期側)の成分は、水平加速度のピーク(周期1～2秒)と良く対応している。地震時間隙水圧に見られる周期0.4秒付近の成分は水平加速度にはないが、鉛直加速度にはわずかに含まれている。なお、水平加速度Y成分に見られる周期0.2秒の成分は地震時間隙水圧にはない。

(2) 第2鹿児島県北西部地震

a) 時刻歴変化

この地震の継続時間は24秒間で、主要動は時刻8～18秒の約10秒間である。図-7に地震時間隙水圧および加速度の観測記録を示した。この図から加速度および地震時間隙水圧の時刻歴変化の特徴を

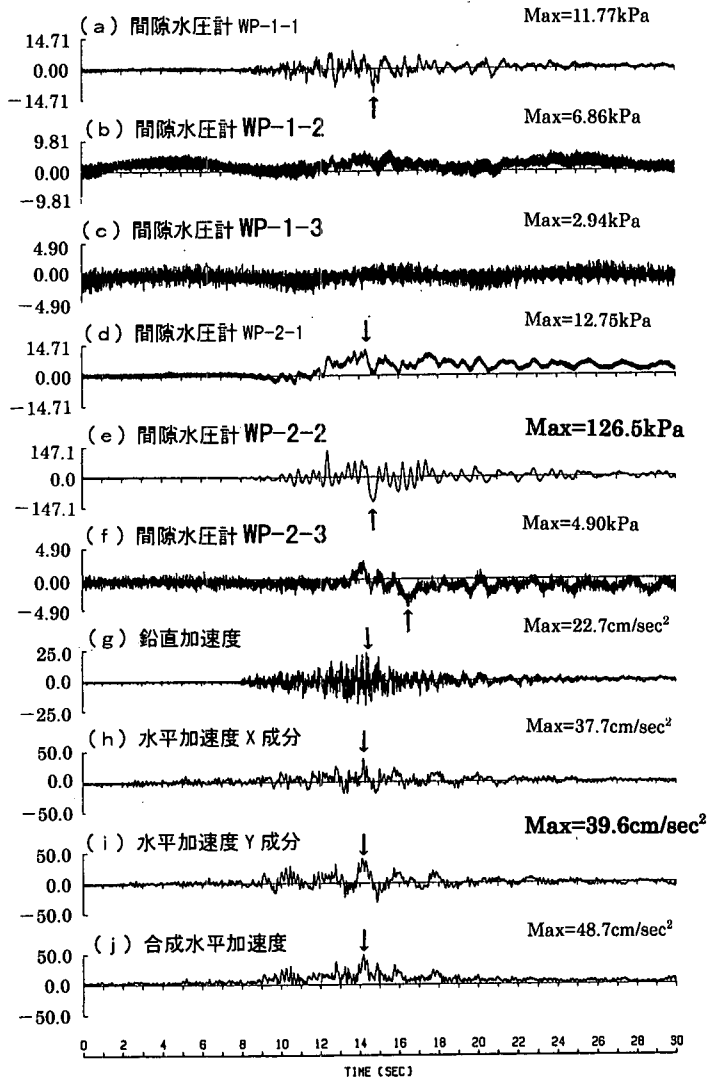


図-5 地震時間隙水圧および加速度の観測記録（鹿児島県北西部地震）

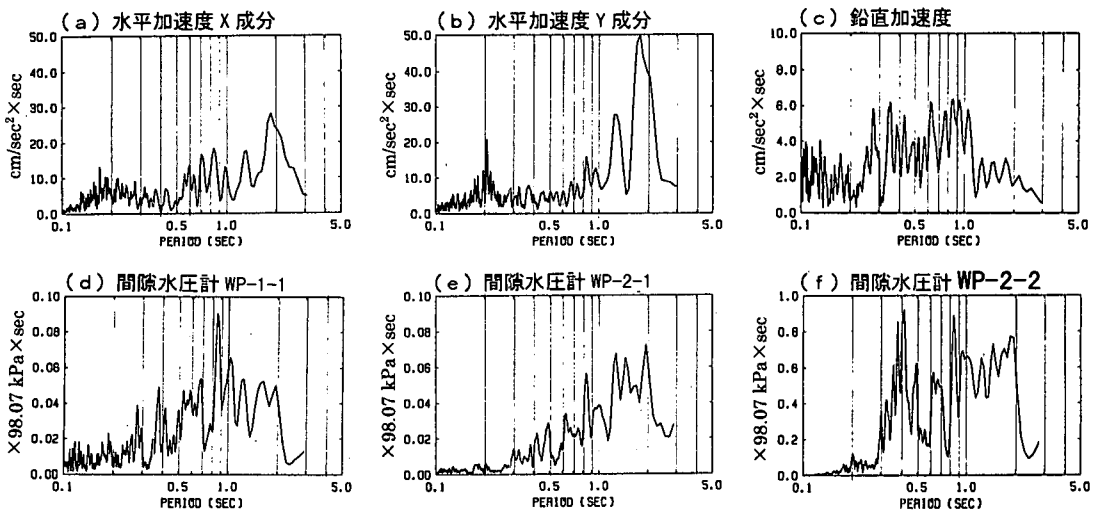


図-6 地震時間隙水圧および加速度のフーリエスペクトル（鹿児島県北西部地震）

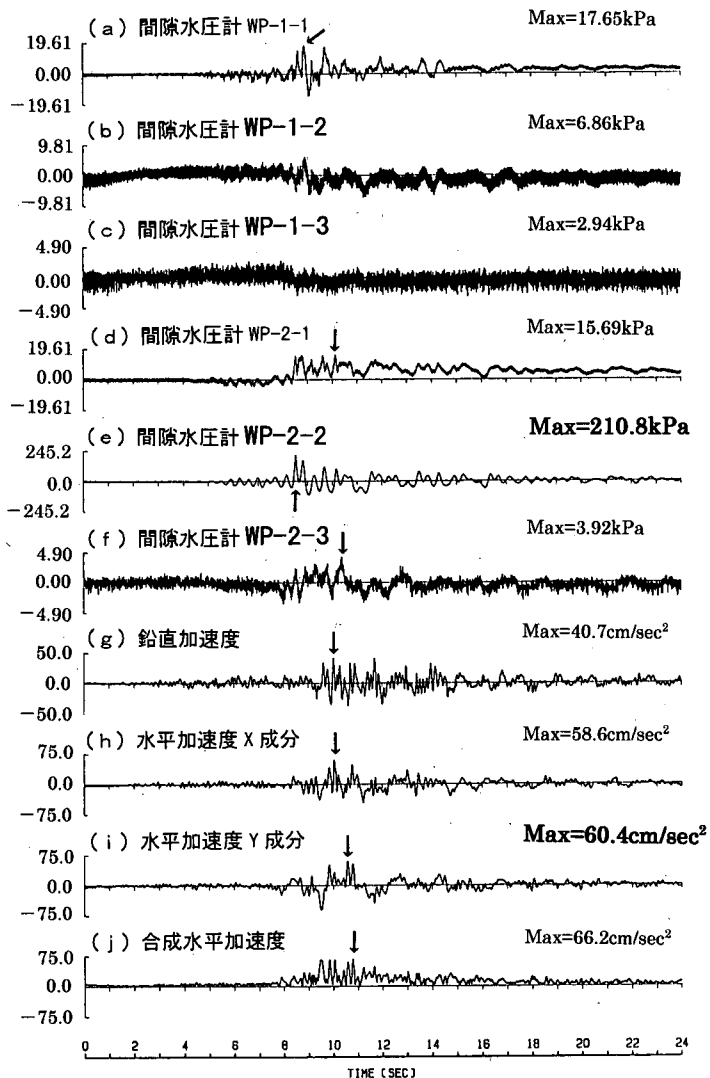


図-7 地震時間隙水圧および加速度の観測記録 (第2鹿児島県北西部地震)

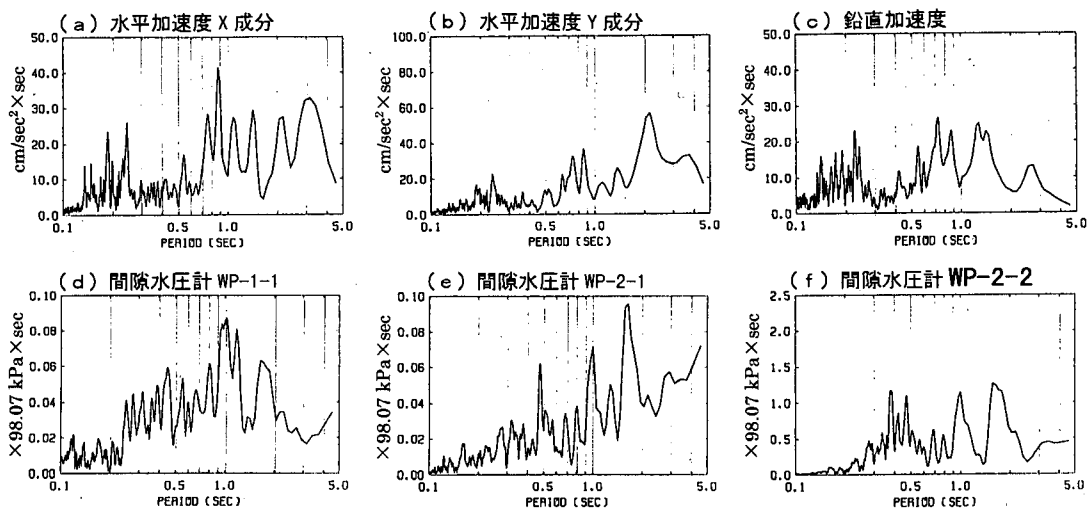


図-8 地震時間隙水圧および加速度のフーリエスペクトル (第2鹿児島県北西部地震)

述べれば以下ようになる。

①水平加速度Y成分は最大 60.4 cm/sec²で、鹿児島県北西部地震の約 1.5 倍である。鉛直加速度も同様に 1.8 倍程度大きくなっている。

②地震時間隙水圧は前記した鹿児島県北西部地震と同様に、WP-1-2, WP-1-3, WP-2-3 の3カ所は増減が少なく、WP-2-2 は最大 210.8kPa と顕著な上昇を示した。WP-2-2 の最大値は鹿児島県北西部地震の約 1.7 倍となっている (210.8/126.5=1.67)。

③地震時間隙水圧波形と加速度波形との対応は、鹿児島県北西部地震とほぼ同じ傾向を示している。

b) 周波数特性

図-8に(1)b)と同様にフーリエスペクトルを示した。この図から加速度および地震時間隙水圧の周波数特性の特徴は以下のように示される。

①加速度には、水平および鉛直ともに周期1秒以上の長周期側にピークがあるが、卓越周期は水平成分が周期2秒以上であるのに対して、鉛直成分は周期1秒強と差異が見られる。また、周期0.7~0.8秒と0.2秒付近に、水平および鉛直に共通して主要な周期成分の波が見られる。

②地震時間隙水圧には周期2秒弱、1秒前後および0.4秒付近にピークが見られる。

③地震時間隙水圧を加速度と対比した場合、周期1~2秒の長周期側の成分は水平加速度と良く対応しているが、地震時間隙水圧にある周期0.4秒付近の成分は加速度と明瞭な関係は見られない。一方、加速度に見られる周期0.7~0.8秒の成分は地震時間隙水圧にもみられよい対応を示しているが、周期0.2秒の成分は地震時間隙水圧にはない。

(3) 地震時間隙水圧測定結果に対する考察

(1)および(2)で述べた地震記録の最大値は表-2に示す通りである。

(1)b)の③と(2)b)の③から、地震時間隙水圧は水平加速度と対応が高いことを示したが、ここで両者の比をとると次のようになる。

・鹿児島県北西部地震について

$$\begin{aligned} \text{水平加速度 X} &: 126.5\text{kPa}/37.7\text{cm/sec}^2 \\ &= 3.36\text{kPa}/\text{cm/sec}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{水平加速度 Y} &: 126.5\text{kPa}/39.6\text{cm/sec}^2 \\ &= 3.19\text{kPa}/\text{cm/sec}^2 \end{aligned}$$

・第2鹿児島県北西部地震について

$$\text{水平加速度 X} : 210.8\text{kPa}/58.6\text{cm/sec}^2$$

表-2 地震記録の最大値

観測項目	鹿児島県 北西部地震	第2鹿児島県 北西部地震
水平加速度X(cm/sec ²)	37.7	58.6
水平加速度Y(cm/sec ²)	39.6	60.4
鉛直加速度Z(cm/sec ²)	22.7	40.7
地震時間隙水圧 (kPa)	126.5	210.8

$$= 3.60\text{kPa}/\text{cm/sec}^2$$

$$\text{水平加速度 Y} : 210.8\text{kPa}/60.4\text{cm/sec}^2$$

$$= 3.49\text{kPa}/\text{cm/sec}^2$$

これより、水平加速度1cm/sec²あたりの地震時間隙水圧は地震の強さに関わらずほぼ一定の関係にあることが分かる。

田中ら⁷⁾は、釜石鉱山において三陸はるか沖地震直後の弾性波速度の低下を測定した結果から、岩盤の応力降下による空隙の体積増加(閉合亀裂の開口や、開口亀裂の広がり)があると報告しているが、串木野基地での地震時間隙水圧測定結果は、空隙の時間的な体積の増減過程を記録しているものと判断される。すなわちボーリング孔周辺岩盤の亀裂(あるいは透水性が高い層)が地震時に相対変形を起こし、閉じた時に水圧が上昇し、逆に開いた時に水圧が減少するものと解釈できる。

さらに、地震時間隙水圧および加速度の時刻歴変化と周波数特性との対応を見ると、地震時間隙水圧の長周期成分(鹿児島県北西部地震では周期1秒以上、第2鹿児島県北西部地震では周期2秒付近)については、水平動によって発生したものと判断できる。

一方、加速度に見られる短周期側の0.2秒の成分が地震時間隙水圧に見られない理由は、地震時間隙水圧が低次の地盤振動(亀裂の開閉)で発生すると仮定すれば、この周期成分が上記の1秒以上の卓越周期に対しては高次の周期に相当するので周期0.2秒の成分が表れないことが理解できる。しかし、地震時間隙水圧に見られる周期0.4秒付近の成分については、加速度の周期成分と対応しておらず、その発生要因は十分説明できない。

なお、図-5, 7から地震時間隙水圧は正負で最大値にあまり差がないので、加速度と地震時間隙水圧の相関を、正負を区別せず(絶対値)に考察した。

5. 地震時の岩盤水理挙動

本章では、間隙水圧を水柱(ヘッド)で表示して説明を行なう。

表-3 間隙水圧計設置位置の地質状況及び間隙水圧変化状況

間隙水圧計		WP-1-1	WP-1-2	WP-1-3	WP-2-1	WP-2-2	WP-2-3
岩盤状況	設置標高(EL, 単位m)	- 8.700 ~ - 9.700	- 19.700 ~ - 20.700	- 30.000 ~ - 31.000	- 5.765 ~ - 6.749	- 11.673 ~ - 12.658	- 23.491 ~ - 24.476
	地質	砂質凝灰岩	安山岩溶岩 (MAn)	安山岩溶岩 (MAn)	安山岩溶岩 (LA)	自破砕状安山岩 (LB)	自破砕状安山岩 (LB)
	コア状況	短棒, 角礫状 細片状	長棒状	短棒, 角礫状 細片状	短棒状	短棒状	短棒, 礫状
	最大コア長 (cm)	5	50	30	30	30	35
	R Q D (%)	0	100	50	90	90	45
	硬さ ^{注2)}	C	B	C, B	B	B	B
透水係数 (cm/sec)	0.01×10^{-6} 以下	2.81×10^{-5}	0.01×10^{-6} 以下	0.01×10^{-6} 以下	3.55×10^{-6}	5.85×10^{-4}	
水理地質的考察	地質	強度は低く、スレーキング崩壊および層理面剥離がみられ、がさがさの状態となっている。	良好岩盤内にあるが所々に方解石の薄脈を伴う開口した節理が発達している。	WP-1-1同様スレーキング崩壊を起こすところのみられ、岩盤が脆弱化している所が多い。	良好岩盤内にあるが、所々に方解石の薄脈を伴う節理が発達している。	同左、方解石の薄脈を伴う開口した節理もあり、やや節理が発達している。	方解石の薄脈を伴う断層破砕帯がみられ開口した割れ目がみられる。
	水理	破砕帯内にあり、粘土化していることが考えられ、透水性は低い。	開口割れ目により透水性は大きい。	破砕帯内にあり、粘土化していることが考えられ、透水性は低い。	割れ目は発達しているが、方解石の薄脈で密着し透水性は低い。	開口割れ目により透水性はやや大きい。	開口割れ目により透水性は大きい。
鹿兒島県北西部地	地震時間隙水圧最大上昇量 (cm)	120	70	30	130	1,290	50
	常時間隙水圧 (cm) (3月26日 16:00)	1,242.6	2,605.3	3,676.2	1,414.5	1,966.1	3,221.0
	常時間隙水圧 (cm) (3月27日 18:00)	1,250.7	2,613.8	3,680.4	1,475.1	2,032.0	3,275.7
	地震後上昇量 (cm)	8.1	8.5	4.2	60.6	65.9	54.7
第2鹿兒島県北西部地震	地震時間隙水圧最大上昇量 (cm)	180	70	30	160	2,150	40
	常時間隙水圧 (cm) (5月13日 14:00)	1,244.8	2,520.9	3,591.7	1,465.6	2,018.2	3,267.0
	常時間隙水圧 (cm) (5月14日 16:00)	1,247.3	2,521.2	3,604.6	1,479.9	2,035.8	3,284.1
	地震後上昇量 (cm)	2.5	0.3	12.9	14.3	17.6	17.1
	常時間隙水圧 (cm) (5月19日 4:00)	1,248.6	2,518.0	3,588.8	1,508.6	2,063.0	3,314.6
	地震後上昇量 (cm)	3.8	-2.9	-2.9	43.0	44.8	47.6

注1) 間隙水圧は水柱に換算して表示した。

注2) 地下備蓄方式の硬さ分類³⁾で、Bはハンマー軽打で割れない状態を表し、

Cはハンマー軽打で容易に割れるが、小片状になっても岩片は硬い場合がある状態を表す。

(1) 間隙水圧計設置位置の岩盤状況と地震時間隙水圧の挙動

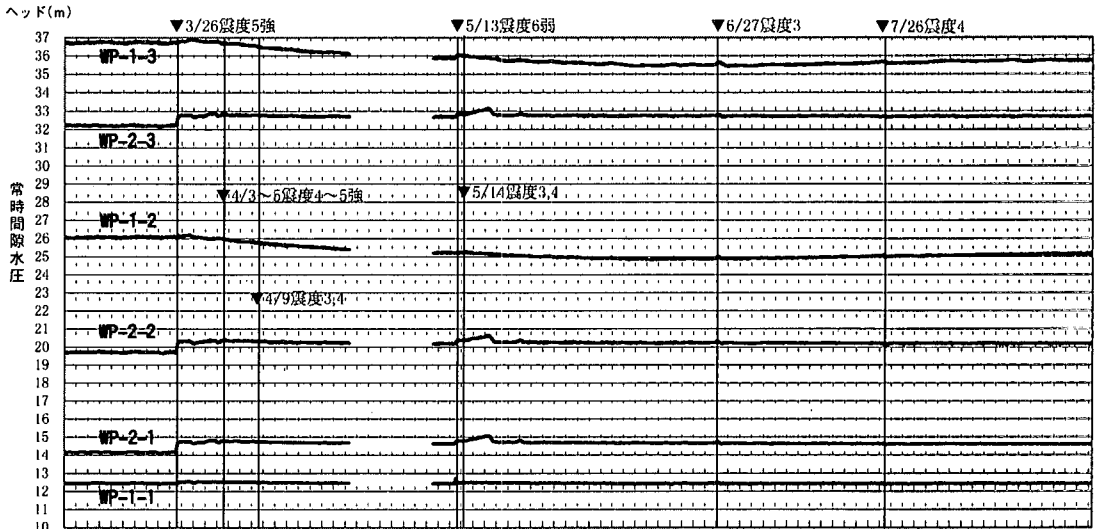
図-3に各間隙水圧計の設置位置の岩盤状況も示したが、その岩盤状況を柱状図及びコア写真をもとに詳細に整理した結果が表-3である。この表には各間隙水圧計の3月26日及び5月13日に発生した地震時における計測値の変動状況も合わせて示した。表-3から地震時間隙水圧の挙動について以下のことが示される。

①WP-1-2, WP-2-3のように、開口割れ目が発達し透水性が高いところでは、地震時間隙水圧の最大上昇量はWP-1-2で3月26日地震時に70cm、5月13日地震時に70cm、WP-2-3では3月26日地震時に50cm、5月13日地震時に40cmと小さいものとなっている。

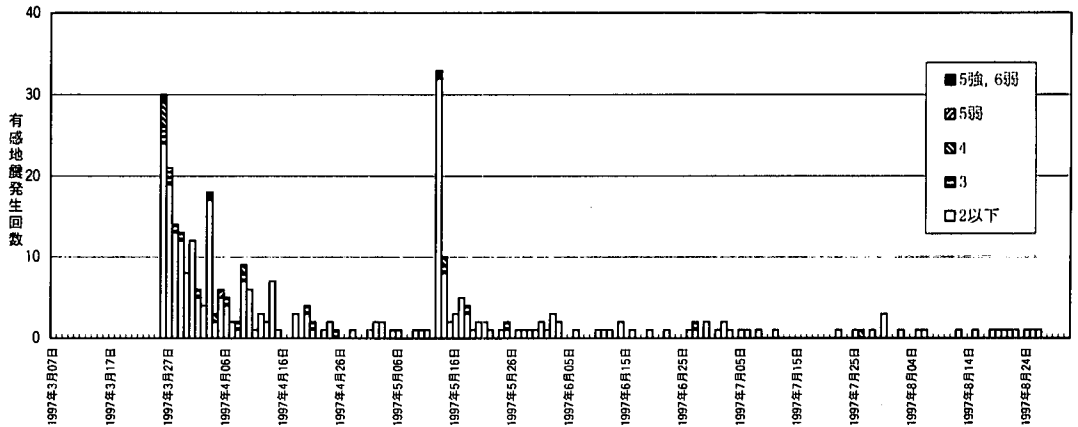
②WP-2-2は、開口割れ目がみられWP-1-1, WP-2-1に比べ透水性はやや高いが、3月26日地震時に最大12.9m、5月13日地震時に最大21.5mの極めて大きな上昇量を示した。

③WP-1-3については透水性が低く、地震時間隙水圧上昇量も30cmと小さいことから、変動は局所的に限定されたものと考えられる。

以上から、地震時間隙水圧は地震の揺れに応じて変動するが、その上昇量は間隙水圧計の設置位置の岩盤状況(透水性等)により異なるとともに、割れ目の開口程度・粘土介在物の有無等に影響されることが示された。



(a) 常時間隙水圧継時変化図(間隙水圧は水柱換算表示)



(b) 有感地震発生状況(大口観測局による)

図-9 常時間隙水圧経時変化図(1997.3.7 16:00~1997.8.19 14:00)と有感地震発生状況図(1997.3.26~1997.8.31)

(2) 群発地震発生状況と常時間隙水圧変動状況

図-9に群発地震発生状況と常時間隙水圧変動状況を示した。この図より地震の発生とそれに伴う常時間隙水圧の変動状況について以下のことが示される。

- ① 3月26日の地震により各間隙水圧計の値は上昇し、WP-2-1, WP-2-2, WP-2-3については上昇した値からわずかつづではあるが低下しながら推移した。WP-1-2, WP-1-3については上昇後徐々に低下傾向を示し、WP-1-1はわずかに上昇した後ほとんど変動がみられていない。地震後の水圧上昇値は各設置孔ではほぼ同程度となっており、地震後約1日で、WP-1孔では数cm、WP-2孔については60cm前後の上昇となっている。
- ② 5月13日の地震では、WP-2孔については地震直

後の上昇(3月26日後の上昇値付近まで一旦上昇)後も徐々に上昇し、累計上昇量が45cm前後となった5月19日頃にほぼ5月13日の地震前の値にまで下がり、その後はほぼ一定値で推移した。WP-1孔については、WP-1-3が13cm程度上昇した後徐々に低下した。WP-1-1は30cm程度の急激な上昇後下降を示したが、5月14日に数cmの上昇で落ち着いた後はほぼ一定値で推移した。

③ その他の地震については6月27日に発生した震度3の地震による影響と考えられるわずかな変動がみられる他は特に顕著な動きはみられていない。

④ 表-1および図-9から、主としてWP-2孔に関して、3月26日の鹿児島県北西部地震(震度5強)によって、一旦常時間隙水圧が上昇した後は同程度以下の地震ではそれほど影響を受けないことを示し

ている。これは、4月3日～9日にかけて頻発した震度5強を含む地震群によって常時間隙水圧にほとんど変動がみられなかったことから判断される。その後の5月13日の第2鹿児島県北西部地震(震度6弱)は、3月26日の地震より大きな地震であったので大幅な上昇ではないが変動したと判断される。

このように、地震後の常時間隙水圧は全般的に変化した。その量は孔によってほぼ同じ値となっており、これは間隙水圧計設置箇所(岩盤状況の影響というよりは、各孔周辺の地下水のポテンシャルによって支配されているもの)と判断される。

一方、WP-1孔とWP-2孔でみられる変動傾向の違いは、主に設置位置の地質的な差と判断されるが、それ以外に設置位置の地形的な違いも考慮する必要があると思われる。(図-1から、WP-1孔は根根地形、WP-2孔は沢地形に位置している。)

(3) 岩盤タンク内湧水量、水封水供給水量、地下水位の変化

図-10に1997年1月～1997年8月間の串木野基地の岩盤タンク内湧水量、水封水供給水量、地下水位等の変化を示した。これらの変化の特徴を以下の各項ごとに分けて述べ考察する。

a) 岩盤タンク内湧水量の変化

図-10(a)から分かるように、湧水量は2回の地震とともに地震直後、全タンク合計でそれぞれ約15%増加した。湧水量の増加が特にTK-103ユニットで顕著にみられるのは、2.で述べたF9断層群が影響しているもので、その付近に割れ目等が多く分布していたことによるものと判断される^{3), 4)}。これらの湧水量の増加は、地震の揺れによる既存の割れ目の透水性と間隙水圧の変化がもとで生じるものと判断される。この湧水量増加後は徐々に湧水量が低下しており、既存の割れ目の透水性と間隙水圧が、時間の経過とともに徐々に元に戻ることを示している。このような、地震直後の湧水量の増加とその後の漸減傾向は、参考文献1)および2)にも示されている。

b) 水封水供給水量の変化

図-10(b)から、TK-101およびTK-102ユニットの湧水量が増加するに伴い、No.1, 2水封トンネルへの給水量は増加していることが分かる。一方、TK-103ユニットの湧水量の増加に伴い、No.3水封トンネルへ給水量は減少し逆に湧水(抜水)に転

じている。

この現象は、2.で述べたようにNo.1～No.3水封トンネルが所定のヘッド(EL+9.0m)を維持するように自動コントロールされているために起こるものと解釈できる。すなわち、TK-101およびTK-102ユニットでは、ヘッドの減少を伴う岩盤タンク内への湧水が発生し、ヘッドを維持するためNo.1, 2水封トンネルからの給水(補給)が増加した。

一方、TK-103ユニットでは、ヘッドの減少を伴う岩盤タンク内への湧水が発生したが、No.3水封トンネルへの給水(補給)量以上の湧水が周辺岩盤から流入したため、ヘッドを維持するために結果として湧水(抜水)に転じたためである。このことは、5.(2)にも関連するが、No.3水封トンネルおよびグラウトトンネル周辺部分のポテンシャル(間隙水圧)が所定のヘッド(EL+9.0m)以上に増加したことを意味している。このような現象が発生した箇所は、2.で述べたように施工中に透水性の改良に苦勞したF9断層群の割れ目等が多く分布していた部分を横断したNo.3水封トンネルおよびグラウトトンネル周辺部^{3), 4)}と判断される。

その後の岩盤タンク内湧水の減少に伴い、供給水量も追隨して減少(No.3水封トンネルでは湧水の減少)していく。したがって、水封システムとしては地震による岩盤水理状況の変化に対応し、正常に機能していることが確認された。

c) 地下水位の変化

図-10(c)から、3月26日の鹿児島県北西部地震では、WP-2孔付近の地下水位観測孔W-13孔の水位が約1.2m上昇した。

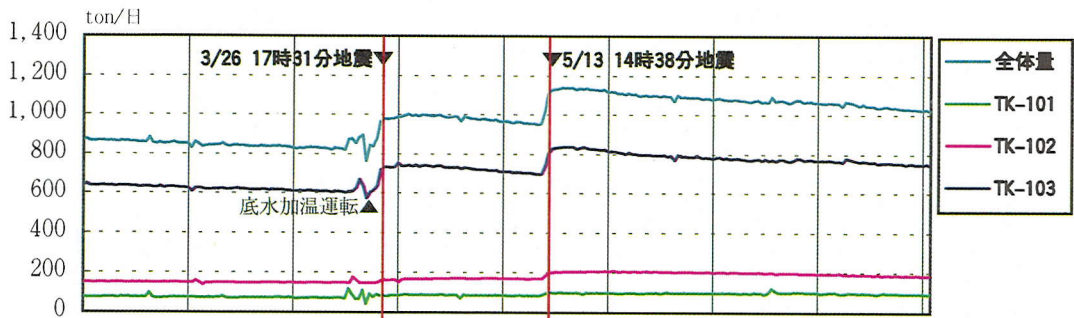
W-11孔は約1.5m上昇したが、図からも分かるように、水位変動が通常でも1m程度みられており、通常の変動範囲内と考えてもよいと判断される。

W-9孔については、約0.3mの上昇と少ないが、その後わずかずつではあるが徐々に上昇の傾向を示し、地震の影響がうかがわれる。

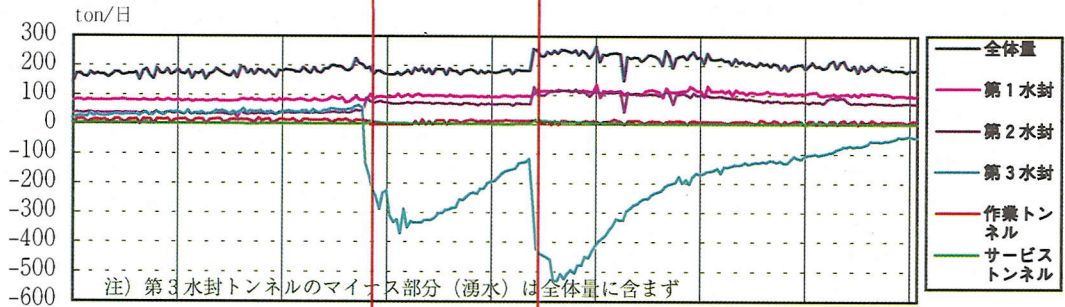
その他の孔についても同様に上昇、低下の動きがみられるが、顕著な変化ではない。

一方、5月13日の第2鹿児島県北西部地震では、W-11孔は約11mの顕著な上昇量を示したが、図-10(c)に示したようにその変化は不規則なところがあり、地震の影響がどうかについては明確ではない。

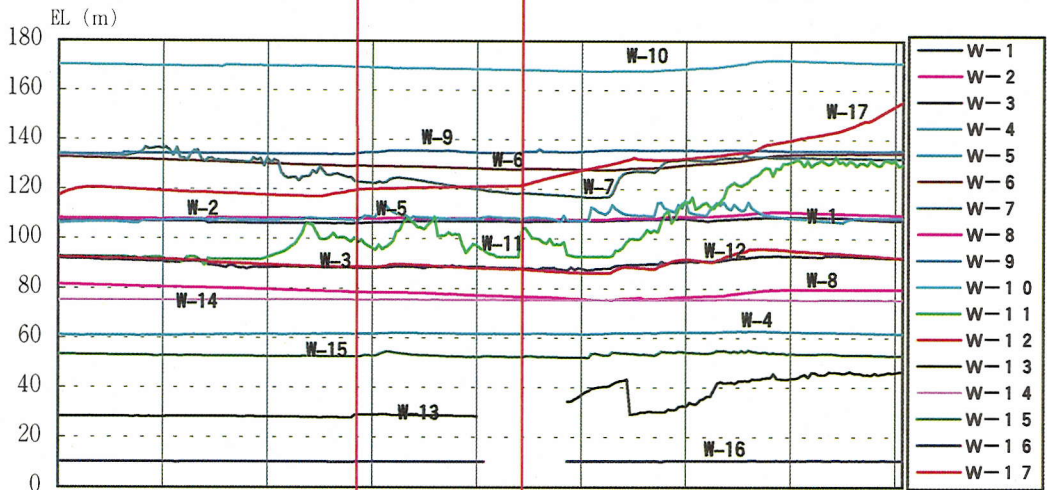
W-9孔は約0.4mの上昇と少ないが、3月26日



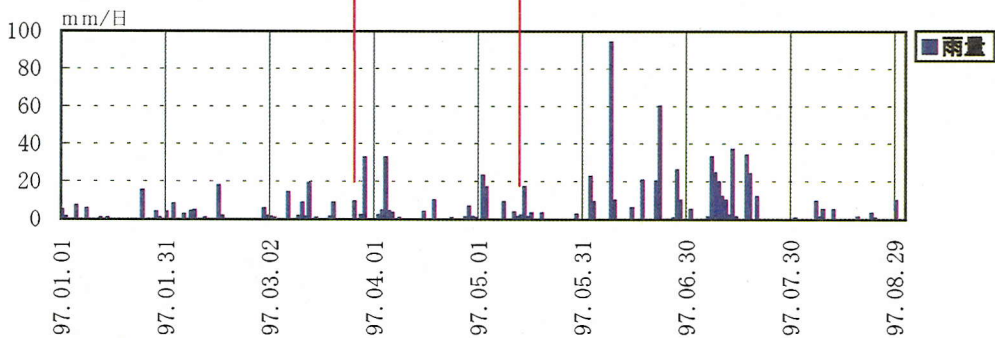
(a) 岩盤タンク内湧水量変化図



(b) 水封水供給水量変化図



(c) 孔内水位変化図



(d) 降水量

図-10 岩盤タンク内湧水量・水封水供給水量・孔内水位・降水量変化図

の地震同様、その後はわずかずつではあるが徐々に上昇の傾向を示した。

3月26日に明瞭な変動を示したW-13孔は、5月2日から5月26日の間計器の調整中でデータは欠測となっているので、5月26日以降の変動から地震の影響を受けている可能性があると思われるが詳細は不明である。

他の孔については3月26日と同様、上昇、低下の動きがみられるが、顕著な変化ではない。

地下水位に関して、地震の影響により変動を示したW-9孔は、**図-1**から判断すると沢地形もしくは斜面地形に配置されている孔であることがわかる。また、5月26日以降の変動に不明点はあるが、W-13孔も同様な地形に配置されている。

また、小野寺⁸⁾は、1995年の兵庫県南部地震において、土質地盤に設けられた地下水位観測孔が水位上昇を観測した事例を液状化ポテンシャルと関連づけるとともに、水位上昇のパターンとしては急激に上昇しその後徐々に低下をたどる観測孔、変化を殆ど示さない観測孔等を含め6パターン有ると報告している。このことから、急激な水位上昇を示す観測孔はないものの岩盤内部でも同じような現象が起こることを、串木野基地における地下水位の観測結果は示している。このような、地震による水位観測孔の水位変動等に関することを記述した文献としては川辺⁹⁾、松本ら¹⁰⁾、遠田ら¹¹⁾の報告等がある。

なお、操業以来約4年を経過した串木野基地の継続的観測結果から、降雨により季節的変動を受ける地下水位観測孔はW-3、W-6、W-7、W-8、W-11、W-12、W-17であることが判明している。**図-10(d)**から分かるように、これらの孔では6月初旬からの降雨の影響が、1~2ヶ月後に現れはじめていると解釈できる。しかし、6月上旬以前の地下水位の変動については、W-11を除き降雨の影響はあまり受けていないものと判断される。

6. まとめ

本報告により、串木野基地で観測された震度5強~6弱レベルの地震による岩盤水理挙動に関する知見を要約すれば以下ようになる。

①地震時間隙水圧は地震の強さに関わらず水平加速度にほぼ比例する関係にあり、その測定結果から、岩盤の亀裂が地震時に相対変形を起こし、閉じた時

に水圧が上昇し、逆に開いた時に水圧が減少すると解釈できる現象が捉えられた。また、その変動量は水みちとなる割れ目の透水性、割れ目の開口幅、粘土介在物の有無等で異なる。

②地震後の常時間隙水圧は、時間的空間的にも変化するが、空間的変化量は周辺岩盤内の地下水ポテンシャルの影響を受け、同一のボーリング孔での変化量はほぼ同じとなる。また、地震によって一旦上昇した常時間隙水圧は、群発地震期間中においては、震度が同程度以下の地震ではそれほど影響を受けないが、それ以上の震度の地震が発生した場合大幅ではないが上昇する。

③地震が誘因となって岩盤タンク周辺の透水性・ポテンシャルが変化することにより地下水流動が発生し、この結果、串木野基地では震度5~6程度の地震直後湧水量は約15%増加した。しかも、時間の経過とともに岩盤タンク内湧水量、水封水供給水量、地下水位が元の状態に戻ることから、岩盤タンク周辺の透水性およびポテンシャルも徐々に復元する。

このような過程は、地震時における砂地盤の液状化の現象¹²⁾に類似した現象が岩盤内部にも発生することを示すものと思われる。ただし、深部岩盤内では有効応力が砂地盤に比べて大きいため液状化には至らず、それ以前の段階で間隙水圧の逸散(空洞内への湧水量の増大やNo.3水封トンネルへの湧水)が起こり最終的に元の状態に復元するものと考えられる。

串木野基地は水封システムを採用した大規模な岩盤タンクであることから、従来の岩盤構造物では行われたことの無い観測・計測を系統的かつ継続的に行ってきた結果、上記の知見が得られたものである。しかし、地震による岩盤水理挙動のメカニズムを把握するためには更に一層の努力が必要であり、本報告で得られた知見が、今後の研究に少しでも役立つことを期待している。これに関連して、兵庫県南部地震に関する日本応用地質学会の報告¹³⁾では、地震前の聞き取り調査と地震後の水位観測孔の変化、地震前後の河川流量の変化、温泉等の湧水量の変化等から、地震により広域的な地下水流動現象が起こるものと推論しており、このような地下水流動現象の推定を行うためには断層モデルの改良や新たな手法の開発が必要であるとしている。

最後に、今回串木野基地で観測された震度5強~6弱レベルの地震において、水封システムに大きな

影響はみられないことが確認され、岩盤タンクの有効性が改ためて示されることとなったが、今後同程度あるいはさらに大きな地震の発生の可能性も考えられることから、地震時の諸データを今後とも集積し、分析することによって引き続き岩盤タンクの安全性を確認していくことが重要であると考えている。

参考文献

- 1) 高橋学：M7.0 以上の地震時の地下空間の震度について—1993 年釧路沖地震、北海道南西沖地震の事例—、北海道応用地学合同研究論文集，No.5，pp.24-31，1994.
- 2) 坂井五郎，高橋正義，山田由弘，鳴海栄治：青函トンネルの挙動計測—海底部区間の維持管理—，土と基礎，Vol.45，No.5，pp.373-376，1997.
- 3) 日本地下石油備蓄（株）：串木野地下石油備蓄基地 工事記録（岩盤土木），pp.20-165，1994.
- 4) 長谷川誠，宮下国一郎：串木野地下石油備蓄基地における水封設計及び施工管理，岩盤構造物の設計法に関する研究報告書，シンポジウム発表論文編，pp.1-4，日本学術協力財団・地盤工学会，1997.
- 5) （社）電力土木技術協会編：電力施設地下構造物の設計と施工，pp.1001-1019，1986.
- 6) 竹脇尚信，吉村隆，青木謙治，花村哲也，田島孝也：石油地下備蓄施設における地震観測と解析，第 7 回日本地震工学シンポジウム講演論文集，pp.1879-1884，1986.
- 7) 田中義昭，稲葉力，平田篤夫，石田一成，佐野修：原位置における高精度弾性波測定システムを用いた岩盤モニタリング技術の開発，土木学会論文集，No.561/Ⅲ-38，pp.185-192，1997.
- 8) 小野寺功，沢田好幸，堂元史博，別府亮：京阪地域の地震時浅層地下水位の挙動，応用地質技術年報，兵庫県南部地震特集号，pp.197-213，1997.
- 9) 川辺岩夫：地震に伴う地下水・地球化学現象，地震，第 44 巻特集号，pp.341-364，1991.
- 10) 松本則夫，高橋誠：地震に伴う地下水位変化検出のための時系列解析—静岡県浜岡観測井への適用—，地震，第 45 巻，pp.407-415，1993.
- 11) 遠田晋次，田中和広，千木良雅弘，宮川公雄，長谷川琢磨：1995 年兵庫県南部地震に伴うコサイスマックな地下水挙動，地震，第 48 巻，pp.547-553，1995.
- 12) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，pp.283-290，1976.
- 13) 日本応用地質学会 阪神・淡路大震災調査委員会：地震による地下水の変動，兵庫県南部地震—応用地質学からの視点—，pp.107-114，1996.

(1998.8.7 受付)

HYDRAULIC BEHAVIOR IN ROCK DURING EARTHQUAKES - A CASE STUDY OF THE KUSHIKINO UNDERGROUND OIL STORAGE PLANT -

Makoto HASEGAWA, Kuniichiro MIYASHITA, Katsumi SHIMIZU
and Akio OKAMOTO

In the period between March and August in 1997, earthquakes occurred in swarms with their epicenters near Sendai City, Kagoshima Prefecture. Motions of seismic intensity between slightly larger than 5 and a little smaller than 6 were frequently recorded in the Kushikino storage plant. During the earthquakes, invaluable data on hydraulic behavior in rock were obtained continuously.

In this study, behavior of the dynamic pore pressures measured during the earthquakes is studied by checking the rock conditions at measurement points, seismic behavior of the groundwater system in the storage area is considered, and knowledge about hydraulic behavior in rock obtained during the earthquakes is presented.