

# 地震時の岩盤内間隙水圧上昇に関する一考察

片岡 俊一<sup>1</sup>・長谷川 誠<sup>2</sup>・植出和雄<sup>3</sup>・岡本 明夫<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 弘前大学助教授 理工学部地球環境学科 (〒036-8561 弘前市文京町3)

<sup>2</sup>正会員 博士(工学) 清水建設(株) 土木本部技術第2部 (〒105-8007 港区芝浦1-2-3)

<sup>3</sup>非会員 日本地下石油備蓄(株) 業務部 (〒105-0012 港区芝大門2-10-12)

<sup>4</sup>非会員 博士(工学) 日本地下石油備蓄(株) 業務部 (〒105-0012 港区芝大門2-10-12)

本論文では、1997年の鹿児島県北西部の地震の際に地下石油備蓄串木野基地で観測された岩盤内の間隙水圧および地震動データをもとに、間隙水圧の動的な変化と地震動との関係を述べている。まず、間隙水圧記録から動的な変化を取り出し、上下成分及び水平2成分の地動速度記録と対比することで、間隙水圧は主としてS波到来以降に生じていることを示す。間隙水圧の上昇には体積変化が必要である。そこで、SV波の斜め入射を考え間隙水圧の上昇を定性的に説明した。

**Key Words:** hydraulic behaviour, rock, earthquake ground motion, SV-wave

## 1. はじめに

近年、地下空間の利用が盛んに行われるようになってきているが、地震の影響を観測面から検討した例はそれほど多くない。特に、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数える程度である<sup>1) 2)</sup>。更にこれらの文献においても、事例紹介に留まっているのが現状と言えよう。

文献1)(以下、既報)では、地震時の間隙水圧波形が、水平方向加速度波形と比較的類似していることを指摘した。さらに、地震時の水圧の変化について、岩盤の亀裂が地震時に相対変形を起こすことによる亀裂の開閉に伴って、水圧が減少・増加することも指摘した。しかしながら、岩盤亀裂が開閉するために、亀裂周辺で岩盤が体積変化をする必要があるが、そのような体積変化を起こす地震波動についての言及は無かった。

等方均質な媒質では、S波は体積変化を伴わないので、水圧が主要動以降で大きくなるためには、主要動以降において体積変化を引き起こす波動の存在が必要となる。この問題に対し、佐々木・他は、液体で満たされた無限長の円筒(ボアホール)にSV波が入射するモデルを示し、釜石鉱山における観測データと比較している<sup>3)</sup>。彼らの結果では、水圧波形が速度波形と比例する事実は説明できたものの、振幅が異なり定量的な評価には至っていない。

本報告では、既報に示された地下石油備蓄串木野基地の地震時の岩盤内加速度計と間隙水圧計の記録を基に、地震時の動的な水圧変化に関して地震動の観点から考察を行う。

## 2. 観測概要<sup>1)</sup>

### (1) 串木野基地

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建設されたものであり、貯蔵容量175万キロリットル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列で構成されており、3つのユニットに分かれている。空洞天端(EL-20m)の地表からの土被りは平均150mとなっている。

岩盤タンクの設置域は、新第三紀北薩古期安山岩類からなり、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。ただし、タンクユニットの北西部に不連続面群(走向はN50° ~ N80° E, 傾斜35° ~ 55° S)がある。岩石の超音波試験の結果では、P波速度は3.5~4.6km/s、S波速度は1.7~2.7km/sであった。また、新鮮岩盤の透水係数は $1.5 \times 10^{-7}$ cm/sであるが、上述した不連続面群では透水係数が $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/sとなっている。

### (2) 計測システム

基地施設のトンネル内2カ所でボーリングを削孔後、各ボーリング孔に深さ方向に3段に間隙水圧計を設置し、各々は独立するようにシールした。埋設深さはEL-6m~EL-31mの間となる。これを地下電気室(EL+4m)に設置された地震計と接続し、トリガーレベルを鉛直加速度5cm/s/sとして、遅延時間10秒、最大収録時間70秒として地震時の計測を行っている。デジタル

表-1 対象とした地震の諸元・等

No.	発生日時	緯度	経度	深さ [km]	M(JMA)	震央距離 [km]	観測点から見た震央の方位
EQ1	1997.03.26 17:31	31.970 N	130.380 E	8.2	6.5	29	N 23 E
EQ2	1997.05.13 14:38	31.952 N	130.343 E	7.7	6.3	26	N 18 E

EQ1の震源は、九州大学理学部島原観測所、EQ2の震源は、鹿児島大学理学部による。

収録されるのは、6つの間隙水圧計の記録と鉛直加速度の計7成分だけであり、水平加速度2成分とそれを合成したものは、プロッター出力としている。以下で紹介する地震動の水平成分は、出力結果をディジタイザで読みとったものであり、水平・上下3成分間の同時性は厳密には保たれないが、以下の検討には問題がないと考えている。

### (3) 地震及び地震動

ここでは、1997年3月26日午後5時31分と5月13日午後2時38分に鹿児島県北西部で発生した地震を対象とする。以下、本報告では両者をEQ1、EQ2と呼ぶ。この2地震の震源は、観測点から比較的近く、串木野基地でも40~50cm/sと、これまで岩盤内で観測された値と比較しても小さくない加速度が観測された。表-1に地震諸元等を示す。

図-1にEQ1、EQ2の間隙水圧と上下動速度波形および数値化した水平動加速度を積分して得た速度波形を示す。間隙水圧の原記録には、水圧が地震動の経過に伴って蓄積される様子が一部含まれているが、本検討においてはこのような長周期成分は不要と判断し、計器のノイズ除去も兼ねて、カットオフ振動数0.25Hz、15Hzのバンドパスフィルターを適用している。また、加速度記録の積分は周波数領域で行い、その際に0.2Hz以下の成分は除去した。水平動成分のX、Y方向はそれぞれN223EとN313Eである。

上下動速度波形には、P波、S波の初動時間と思われる時刻にP、S'としたマークを記してある。S波初動の判断には、水平動記録も有効な手がかりであるが、水平動と上下動の間に同期が取られていないので、理論S-P時間、近傍のK-netの記録(KGS010)も参照して定めた。

波形から以下のことが指摘できる。

- 間隙水圧波形の振幅は、センサーによって大きく異なる。なお、WP1-3はEQ2には反応しているが、EQ1には反応しておらずセンサーに何らかの異常があるとも考えられる。
- 間隙水圧の波形は各ボアホールにおいて深度によらず互いによく似ている。
- 間隙水圧はS波到来後に大きく変化する。

- 間隙水圧の値は、各センサーにより大きく異なるが、2つの地震において、大きさの順序は変わっていない。但し、間隙水圧の大小は透水係数だけでは説明できない。
- 鉛直動成分は、S波到来後の水平動主要動部分(図の5~15秒)においてもそれ以前と同じ程度の振幅で揺れている。

間隙水圧計の間隔は10m程度であるので、地震動の波長から考えて波形が似るのは当然と言えよう。また、間隙水圧の値そのものは設置場所によって大きく異なるが、地震毎の計測最大値の観測点間の大小関係が2つの地震において同じであることは、水圧発生になんらかの物理的メカニズムがあると推察される。

さらに、既報では最大加速度と間隙水圧の比、つまり最大加速度当たりの水圧変動が、2地震の間でほぼ一定であることを指摘したが、最大速度について整理すると図-2のようになり、最大速度についても2地震間で値がほぼ同じであることが分かる。

なお、既報ではWP1-2、WP2-3のデータは、ノイズに紛れて信号が判読できなかったが、上述したバンドパスフィルター処理により上記の考察が可能となった。

### 3. 水圧上昇に関する考察

水圧が地震動により励起されたとすると地震動により体積ひずみが生じていることになる。水圧の変動はS波到来以降が大きいので、体積ひずみを生じさせる波動としては境界に入射するSV波が考えられる。

簡単のために、図-3に示すように半無限媒質を伝播するSV波が地表面に入射することを考える。この場合、反射するP波の影響で $\sigma_{xx}$ が生じる。この値は、係数を介して入射波の速度振幅に比例すると表現できる<sup>9)</sup>。この係数は、入射角とポアソン比の関数であり、臨界角付近でピークを持ち、そのピークはポアソン比が小さいほど急峻である。ここで、臨界角( $f_c$ )は反射波が質的に変化する角度であり、半無限媒質のP波速度を $\alpha$ 、S波速度を $\beta$ とすると次式で与えられる。

$$f_c = \arccos(\beta/\alpha)$$

対象地域の地下構造を、EQ1、EQ2の地震動を評価した論文<sup>9)</sup>で用いている地下構造<sup>6)</sup>を参考に表-2のようにモデル化する。震源から対象地点までのS波の波線を

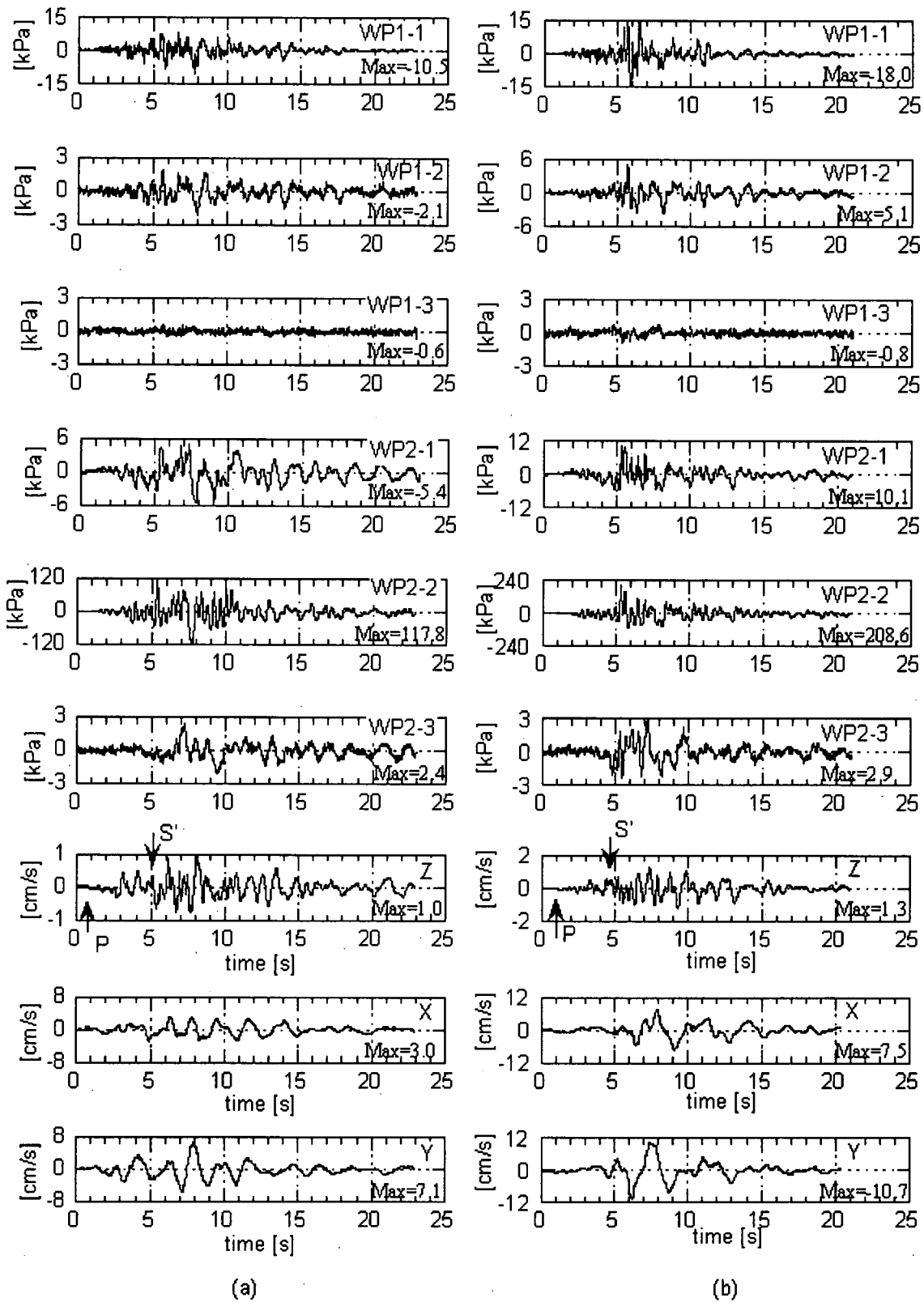


図-1 地震時の間隙水圧 (WP) および加速度記録から積分して得られた速度波形 (下3つ)。左がEQ1, 右がEQ2。水平速度 (X:N223E, Y:N313E) はプロッター出力をディジタル化したものである。

考えると、地表面への入射角の余角 (図-3の記号の  $e$ ) はEQ1で48度, EQ2で47度であり、表層の  $V_p$ ,  $V_s$  から算出される臨界角 (55度) に近い。また、最表層のポアソン比は0.25であるので、増幅率が大きいことが分かる。

先に、観測速度で間隙水圧を除いたものが2つの地震

の間ではほぼ同じ値になっていることを示したが、これは以下のように説明することが可能である。まず震源から射出された波動の周期成分は、2つの地震でメカニズム規模とも類似である<sup>9)</sup> ために、ほぼ同様であったと考えられる。また、地表における速度波形を地中における入射

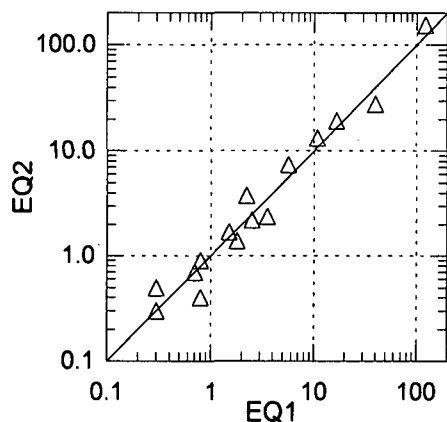


図-2 間隙水圧を最大速度で除した値の2地震間の関係

波に変換することを考えると、EQ1とEQ2とでは地表に対する入射角がほぼ同じであるので、同じ比率で地表の振幅から地中の振幅を推定することができる。地表における $\sigma_{xx}$ は入射波の関数であるが、EQ1とEQ2とでは同じ特性をもった入射波であるので、 $\sigma_{xx}$ の特性もEQ1とEQ2で同じとなる。よって、間隙水圧と地表最大速度との比が地震によらなかったであろう。ここでは、地表として議論したが実際のセンサーは地表から深さ130～150m程度深部に設置されている。地震動の波長から考えるとこの程度の深さは無視できよう。

上記の考察は半無限媒質の議論である。しかしながら、実際の岩盤には不連続面が存在しており、その不連続面における変位がさらに間隙水圧を上昇させていることが考えられる。そこで、地震動の主要動部分の粒子軌跡を図-4に示す。図から地震動はどちらかと言うと不連続面を開閉する動きをしていることが分かる。つまり、本例の場合は震源と対象地点の位置関係及び地震動の卓越方向と岩盤の不連続面の方向の関係が相まって間隙水圧を上昇させたと言えよう。

#### 4. まとめ

地下石油備蓄串木野基地における地震時の間隙水圧はS波到来後に上昇していた。震源と対象地点の位置関係および対象地点の地下構造を考えると、間隙水圧の上昇はSV波の斜め入射と岩盤の不連続面との2つの要因が重なったものと考えられる。

謝辞: 本論文で使用したデータは、日本地下石油備蓄(株)から提供を受けたものである。また、東京工業大学大町達夫教授には、本研究を進めるきっかけを与えて

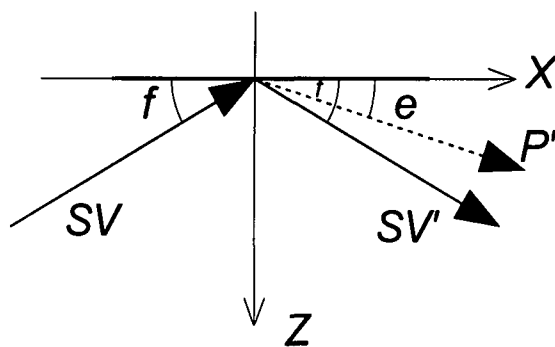


図-3 半無限媒質の自由面に入射するSV波の模式図

表-2 串木野基地周辺の地下構造モデル

Vp [km/s]	Vs [km/s]	Thickness [km]
4.0	2.3	0.5
4.8	2.7	4.5
6.0	3.4	10.0
6.7	3.8	20.0
8.0	4.5	Infinite

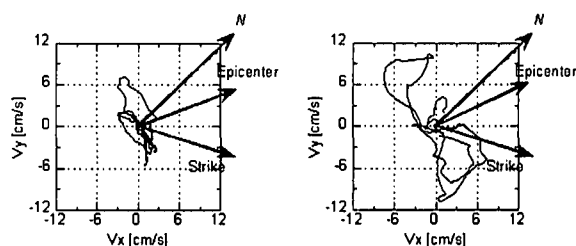


図-4 主要動部分の水平面内粒子速度軌跡(左:EQ1, 右:EQ2)と震央方向及び代表的な不連続面の方向との関係

いただいた。記して謝意を示す。

#### 参考文献

- 1) 長谷川誠, 宮下国一郎, 清水勝美, 岡本明夫: 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—, 土木学会論文集, No.631/III-48, 481-494, 1999.
- 2) (社)資源・素材学会: 地震に関する調査研究(XIV)総合報告書, 773p, (社)資源・素材学会, 1998.
- 3) 佐々木俊二, 安池慎治, 駒田広也, 小林芳正, 川村淳, 青木和弘: 釜石鉱山で観測された地震に伴う地下水位の動的変化, 電力中央研究所報告, 研究報告U99030, 33p, 1999.
- 4) 岡本舜三: 建設技術者のための振動学, オーム社, 27-232, 1976
- 5) 三宅弘恵, 岩田知孝, 入倉孝次郎: 経験的グリーン関数法を用いた1997年3月26日(M<sub>JMA</sub>6.5)および5月13日(M<sub>JMA</sub>6.3)鹿児島県北西部地震の強震動シミュレーション, 地震第2輯, 51, 431-442, 1999.
- 6) 角田寿喜, 宮町宏樹, 高木章雄: 九州—琉球弧北部域の稍深発地震, 地震2, 44, 63-74, 1991.