

地下空洞の地震時挙動とその解析

DYNAMIC BEHAVIOR OF UNDERGROUND CAVERN AND IT'S SIMULATION

竹脇尚信*、吉村 隆**、青木謙治***、花村哲也****、高田武彦*****

By Naonobu TAKEWAKI, Takashi YOSHIMURA, Kenji AOKI,
Tetuya HANAMURA and Takehiko TAKADA

Using strain records observed at Kikuma demonstration plant, the dynamic deformation of a rock cavern during earthquakes was investigated. The dynamic behavior of the cavern was also simulated by an analytical method.

The main conclusions obtained from the analysis are as follows:

- 1) The deformation of the rock cavern during earthquakes consists of various modes. However, it can be approximately decomposed into two dominant modes which correspond to the uniform expansion and contraction type mode in the vertical direction and the shearing type mode in the horizontal direction.
- 2) The analytical procedure presented here well simulates the observed records.

1. はじめに

菊間実証プラント^{1),2)}は石油公団により安全かつ経済的な石油地下備蓄技術を開発するために愛媛県の菊間町に建設された。1982年の施設・設備の完成前後から備蓄技術に係わる各種の実証実験が行われてきた。地震観測もその1つで、構造上の安定性に関する調査の一環として1981年12月より開始され現在も継続されている。

地震観測の目的は岩盤内空洞およびその周辺岩盤の地震時挙動を把握するとともに、シミュレーション解析を通じて動的解析手法の妥当性を検証して、岩盤内空洞の耐震安定性の評価手法を検討することである。観測開始以来、1988年6月までに38個の地震が観測された。おもに加速度記録に着目した検討やFEMによるシミュレーション解析については既に報告した³⁾ので、この論文ではひずみ記録を用いた空洞の挙動検討と解析学的なシミュレーション法について報告する。ここで用いたシミュレーション法は文献⁴⁾に述べられている調和波に対する応答解析手法をランダム波入力に拡張したものである。

*	工修	清水建設(株)大崎研究室	主席研究員	(〒100	東京都千代田区内幸町2-2-2富国生命ビル)
**	工修	清水建設(株)大崎研究室	研究員	(〒100	東京都千代田区内幸町2-2-2富国生命ビル)
***	工博	鹿島建設(株)技術研究所	主管研究員	(〒182	東京都調布市飛田給2-19-1)
****	工修	大成建設(株)技術本部技術開発部室長		(〒163	東京都新宿区西新宿1-25-1新宿センタービル)
*****		日揮(株)第1事業本部	マネジャー	(〒232	横浜市内南区別所1-14-1)

2. 地下空洞の地震時挙動

2.1 地震観測

菊間実証プラントでは加速度計とひずみ計を用いた観測を行っている。

加速度計の配置を図-2.1に示す。すべての測点とも3成分(N-S方向、E-W方向、U-D方向)で、風化層内にA-1、A-6およびA-7の3点、貯油槽底部とほぼ同一レベルのEL-60m付近にA-2、A-4、A-5およびA-8の4点、最深部のEL-103m付近にA-3の1点、合計で8点24成分である。

ひずみ計はサービストンネル内のB~B断面およびC~C断面の2箇所に設置されており、図-2.2に示すように横断方向とトンネル軸方向(カッコ内の測点)のひずみを測定している。ひずみ計はロッドタイプで1m離れた2点間の相対変位を計測してそれをひずみに換算している。

弾性波探査の結果によると、せん断波速度は貯油槽付近で2.5~2.6 km/s、EL±0m付近で1.0 km/sである。しかし、風化層内の値は正確には分かっておらず0.5~0.6 km/sと推定されている。

なお、以降の検討においては、ひずみ計の設置されているC~C断面の横断方向はN-S方向に一致しているものと仮定する(図-2.1参照)。

2.2 空洞の挙動の検討

表-2.1に検討に用いるNo.21からNo.38の18個の地震について、B~B断面およびC~C断面の横断面内の最大ひずみとB~B断面に設置されているA-6での最大加速度を示す。最も大きな加速度およびひずみを記録した地震はNo.34で、加速度はN-S成分で3.6gal、ひずみはS-9で1.46 μ である。No.21以降の地震記録を用いるのは、これ以前はひずみ計の感度が十分ではなかったために満足な記録が得られなかったからである(1985年7月にひずみ計の感度アップを図った)。

まず、ひずみの最大値について検討する。図-2.2から分かるように、S-1、S-6、S-7およびS-13は側壁の上下方向、S-2、S-5、S-9およびS-12は空洞の肩の部分の斜め方向、S-3とS-10は天端の水平方向のひずみである。最大値を地震ごとに見ると、肩部の斜め方向が最も大きく、ついで上下方向、水平方向の順になっている。そして、同一断面内での相対する測点、上下方向ではS-1とS-6およびS-7とS-13、斜め方向ではS-2とS-5およびS-9とS-12では、平均的にみるとほぼ同程度の値である。ただし、S-9とS-12ではS-9の値がS-12に比べると全体的に大きくなっているが、これはB~B断面の周辺地山の不均質性など局所的な原因によるものと思われる。

図-2.3はこれら18個の地震に関するB~B断面(S-1, S-2, S-5, S-6)およびC~C断面(S-7, S-9, S-12, S-13)でのひずみの平均パワースペクトルである。この図は各測点での卓越振動数を見るのが目的であるので、すべての記録の最大値は1.0 μ として計算した。相対する測点であるS-1とS-6、S-2とS-5、S-7とS-13およびS-9と

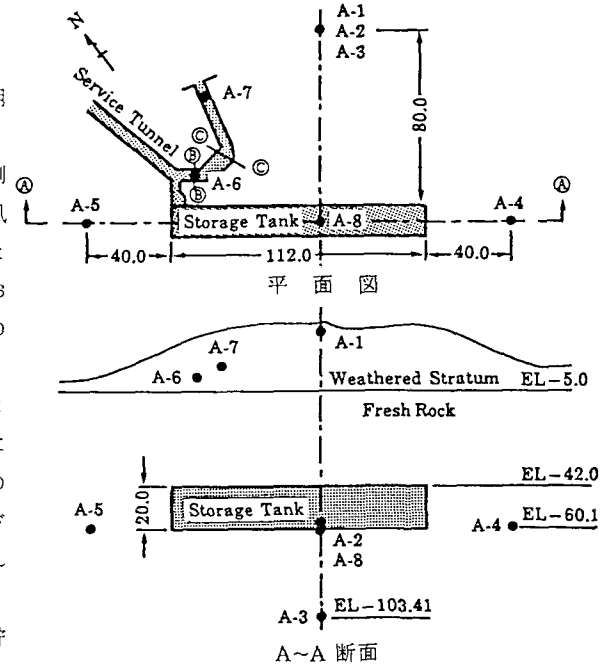


図-2.1 加速度計の配置

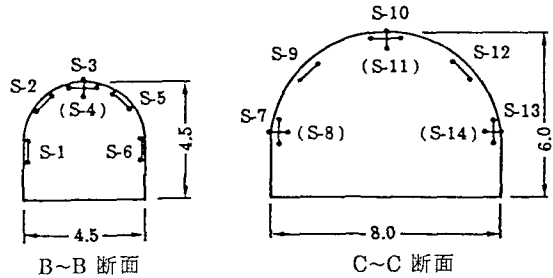


図-2.2 ひずみ計の配置

S-12ではスペクトル形状はかなり良く似ており、同じ振動数が卓越していることが分かる。

図-2.4は相対するする測点での位相の相関を見るため、表-2.1のはじめの2つの地震(No.21とNo.22地震)について主要動付近の波形を重ねがきしたものである。このとき、図-2.3から分かるように最も卓越する振動数は5~6Hz付近にあるので4~8Hzのバンドパスフィルターをかけ、最大値は1.0 μ とした。側壁部分の上下方向は同位相で、肩の部分の斜め方向はほぼ逆位相で振動していることが分かる。ちなみに、No.21地震は

表-2.1 最大ひずみおよびA-6での最大加速度

地震 番号	㊸~㊸断面でのひずみ(μ)					㊸~㊸断面でのひずみ(μ)					A-6での加速度(gal)		
	S-1	S-2	S-3	S-5	S-6	S-7	S-9	S-10	S-12	S-13	N-S	E-W	U-D
21	0.083	0.073	0.069	0.098	0.057	0.120	0.365	0.073	0.142	0.115	1.22	0.99	0.69
22	0.069	0.176	0.070	0.156	0.068	0.121	0.275	0.069	0.128	0.098	1.19	1.08	0.54
23	—	—	0.033	0.049	—	0.073	0.149	0.030	0.041	0.061	0.61	0.75	0.47
24	0.050	0.060	0.049	0.081	0.037	0.077	0.144	0.061	0.076	0.061	0.56	0.53	0.33
25	0.047	0.043	0.024	0.040	0.034	0.057	0.077	0.035	0.048	0.051	0.45	0.62	0.43
26	0.087	0.068	0.042	0.067	0.055	0.114	0.141	0.060	0.109	0.082	0.36	0.59	0.38
27	—	0.287	0.209	0.326	0.126	0.285	0.575	0.306	0.258	0.223	2.05	1.78	1.29
28	—	0.054	0.021	0.042	—	0.060	0.094	0.026	0.049	0.048	0.98	0.44	0.62
29	0.301	0.188	0.105	0.259	0.152	0.417	0.531	0.079	0.231	0.346	1.05	0.84	1.76
30	0.074	0.058	0.030	0.076	0.046	0.103	0.129	0.062	0.140	0.060	0.92	0.56	0.37
31	0.167	0.276	0.103	0.231	0.127	0.274	0.478	0.126	0.254	0.212	1.14	0.85	0.80
32	—	0.023	—	0.035	—	0.059	0.078	0.041	0.058	0.050	0.66	0.53	0.52
33	0.104	0.071	0.034	0.077	—	0.126	0.208	0.041	0.084	0.114	0.39	0.49	0.39
34	—	—	0.283	0.721	0.327	0.891	1.461	0.337	0.987	0.616	3.59	2.94	2.59
35	—	—	0.054	0.120	0.062	0.114	0.350	0.082	0.222	0.091	1.01	0.93	0.79
36	—	—	0.010	0.021	0.007	0.014	0.050	0.030	0.042	0.010	0.55	0.79	0.23
37	0.089	0.089	0.039	0.090	0.055	0.101	0.258	0.192	0.025	0.038	0.61	0.57	0.48
38	0.059	0.062	0.059	0.070	0.042	0.081	0.142	0.200	0.028	0.022	0.31	0.42	0.35

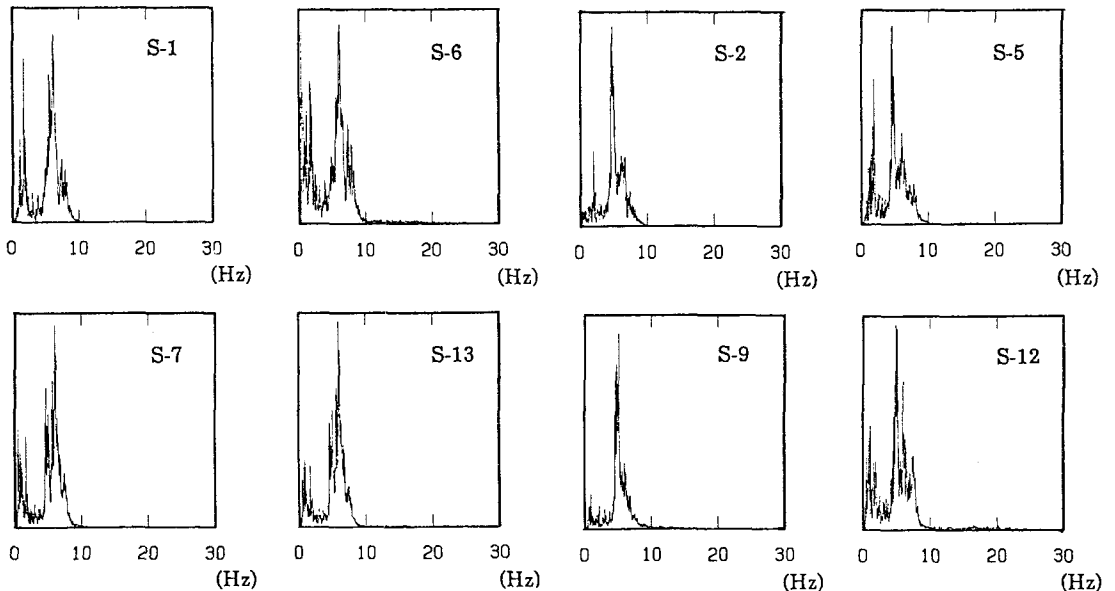


図-2.3 ひずみの平均パワースペクトル

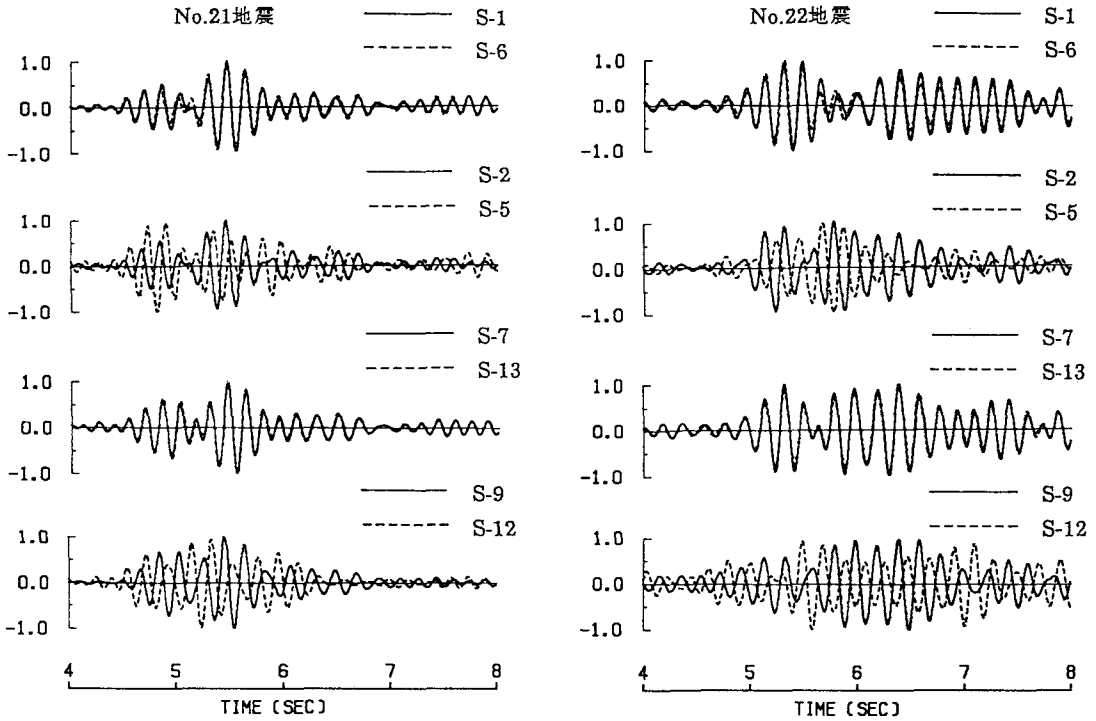


図-2.4 ひずみ波形の重ねがき

1985年7月12日に北緯33度53分、東経132度24分で発生したM 3.6、震央距離50km、震源深さ47kmの地震であり、No.22地震は1985年8月13日に発生し、震央位置は北緯33度53分、東経132度24分でMは4.7、震央距離130km、震源深さ121kmである。

以上のことから、震源が近くて浅く地震波が極端に斜め方向から来るような場合を除けば、空洞は上下方向に関してはほぼ一様な伸縮変形を、水平方向に対しては逆対称変形をすると推察される。これと同様な知見は浜田ら⁵⁾あるいは山口ら⁶⁾によっても得られている。

つぎに、A-6での加速度とひずみの卓越振動数の相関を検討する。図-2.5にN-S成分とU-D成分の平均パワースペクトルを示す。このときもひずみの場合と同様に最大値は1.0galとしてある。まえに述べたように加速度のN-S方向とC-C断面の横断方向がほぼ一致することから、N-S成分とひずみのS-9、S-12を、U-D成分とS-1、S-6、S-7、S-13をおのおの比較すれば、ひずみの卓越振動数が存在する10Hz以下について見ると、両者の相関は良い。しかし、スペクトル値は加速度の方がひずみより低振動数成分の方が大きい。

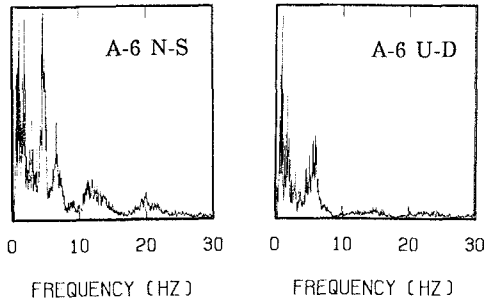


図-2.5 加速度の平均パワースペクトル

3. 観測記録のシミュレーション

3.1 解析手法

1) 調和波に対する応答解析

ここでは調和波に対する応答解析法を文献4)に沿って簡単にまとめておく。

図-3.1に示すような無限領域内の円孔近傍に、調和型のSV波が入射した場合を考える。波はx軸の正の方向へ進むものと仮定すると、入射波のポテンシャル関数はつぎのように書ける。

$$\phi_i = 0 \quad (3.1)$$

$$\psi_i = \psi_0 e^{i(\beta x - \omega t)} \quad (3.2)$$

ただし、 ψ_0 は入射波の振幅、 ω は円振動数で、 β はS波の波数である。また、(3.1)と(3.2)式の添字の*i*は入射波を意味する。

式(3.2)を図-3.1を参照して極座標系に変換した後ベッセル関数で展開すると、つぎようになる。

$$\psi_i = \psi_0 e^{-i\omega t} \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m i^m J_m(\eta) \cos m\theta \quad (3.3)$$

ただし、 ε_m と η は以下のとおりであり、 J_m は*m*次の第1種ベッセル関数である。

$$\varepsilon_m = \begin{cases} 1 & (m=0) \\ 2 & (m \geq 1) \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\eta = \beta r \quad (3.5)$$

入射波が円孔に達すると、そこでは2種類の反射波(反射せん断波と反射変容波)が発生し無限遠方へ去って行く。このときの反射波は、ポテンシャル関数を用いてつぎのように書ける。ただし、式(3.6)が反射せん断波を表し、式(3.7)が反射変容波である。

$$\psi_r = e^{-i\omega t} \sum_{m=0}^{\infty} A_m H_m(\eta) \cos m\theta \quad (3.6)$$

$$\phi_r = e^{-i\omega t} \sum_{m=0}^{\infty} B_m H_m(\zeta) \sin m\theta \quad (3.7)$$

これらの式に含まれる A_m と B_m は境界条件によって決まる未定係数、 H_m は*m*次の第1種ハンケル関数、 ζ は*a*をP波の波数とするとき次式で表されるものである。また添字の*r*は反射波を意味する。

$$\zeta = ar \quad (3.8)$$

いま、円孔内は空の状態であると仮定すれば、孔の半径を*b*とするとき、境界条件はつぎのように書ける。

$$\sigma_r = \tau_{r\theta} = 0 \quad (r = b) \quad (3.9)$$

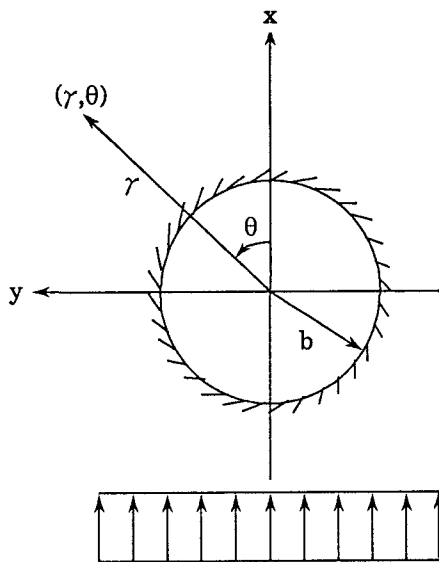


図-3.1 座標系

極座標における変位とポテンシャルの関係式、ひずみと変位の関係式、応力とひずみの関係式を用いて入射波と反射波による応力の和を計算し、上式に代入してそれが任意の m に対して成り立つための条件から A_m と B_m は決定できる。

このようにして A_m と B_m が決定されると、変位や加速度などの応答値はすべて計算できる。

2) ランダム波に対する応答解析

前節で調和波に対する応答が求まったので、外力をフーリエ変換することによりランダム波に対する応答が計算できる。

いま、図-3.1の円孔の中心と同一レベルにありかつ円孔からある程度離れた地点で、水平方向の加速度の時刻歴 $X(t)$ が得られているものとする。そうすれば、この記録を離散化した後フーリエ変換すれば、次式のように有限複素フーリエ級数で近似でき有限個の調和波形に分解できる⁷⁾。

$$x_m = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{i(2\pi km/N)} \quad m=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.10)$$

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m e^{-i(2\pi km/N)} \quad k=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.11)$$

一方、前節での定式化では入射波を式(3.1)と(3.2)に示すようにポテンシャル関数で与えているが、これらの式から水平方向の加速度を計算するとつぎのようになる。

$$\psi_i = \psi_0 i \beta \omega^2 e^{i(\beta x - \omega t)} \quad (3.12)$$

したがって、この分解された個々の調和波の C_k を $\psi_0 i \beta \omega^2$ に対応させ、各々の振動数ごとの応答を前節に示した方法で計算して結果を逆変換すれば、ランダム波に対する応答を得ることができる。

3.2 シミュレーション

以上の方法を最も大きなひずみ記録が得られたNo.34地震を用いて検証した。観測記録と解析結果の比較はA-6の加速度とS-9のひずみについて行った。

解析においてはA-6およびS-9が設置されているB~B断面およびC~C断面は、断面積の等しい円形断面に置換した。また、各解析での入射波は、A-3での加速度記録を用いてA-1~A-3に沿っての1次元波動解析から求めた。なお、A-6、S-9もと各断面の横断方向のシミュレーションであるから、A-6の場合には入射波とA-6での観測記録はB~B断面の横断方向へ変換した。

加速度のシミュレーション結果を図-3.2と図-3.3に示す。最大値および卓越周期とも観測記録と解析結果は比較的良く合っている。ただし、観測結果のパワースペクトルには最も卓越する5.5Hz以外にもいくつかのピークが見られ、これらは表層での反射波によるものと思われるが、解析では領域を無限としているので反射波の影響は考慮できない。

図-3.4と図-3.5にひずみのシミュレーション結果を示す。解析では鉛直下方からSV波を入射しているので、観測点の側壁部のS-7とS-13および空洞天端のS-10に相当する所の応答は零であり、さらに空洞の肩部のS-9とS-12に対応する所では、位相が逆であるほかは最大値も振動数も同じである。したがって、比較はS-9だけで行っている。なお、応答値には長周期成分を除くために、1Hz~30Hzのバンドパスフィルターをかけてある。加速度の場合と同様に両者はかなり良く合っている。

空洞断面を円形に置換していること、空洞の周辺地山を等方等質と仮定していることあるいは地表面を無視していること(解析断面の土被りは30m程度)など、いくつかの近似あるいは仮定を導入しているが、解析

は観測結果を比較的良くシミュレートしている。さらに、FEMやBEMなどに比較すればデータ作成の手間がほとんどかからないことや計算時間が大幅に短縮できるなどのメリットもある。したがって、この手法はあまり地表面に近くない空洞の耐震性の基礎的な検討には有効であろう。

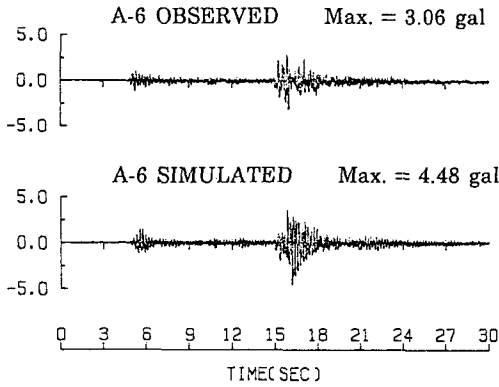


図-3.2 加速度波形の比較

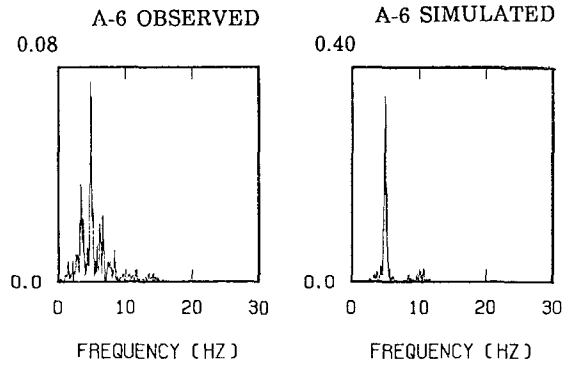


図-3.3 加速度のパワースペクトルの比較

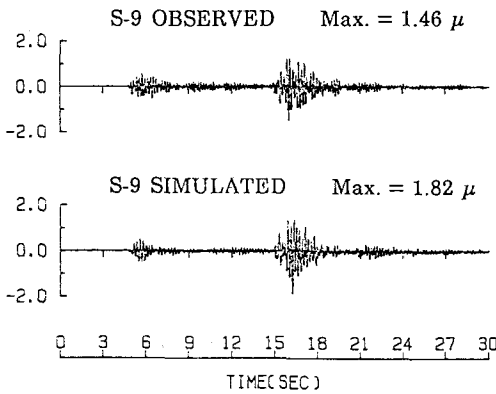


図-3.4 ひずみ波形の比較

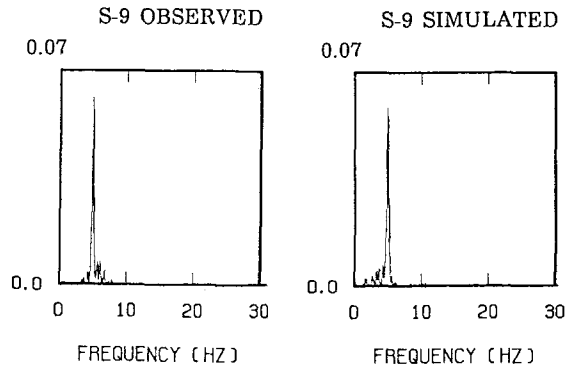


図-3.5 ひずみのパワースペクトルの比較

4. まとめ

菊間実証プラントでの観測記録を用いて、地下空洞の変形モードを検討すると同時に解析的手法によって観測結果のシミュレーションを試みた。その結果、空洞は上下方向に関してはほぼ一様な伸縮変形を、水平方向に対しては逆対称変形をすることが分かった。さらに、ここに示した解析手法によって加速度もひずみも比較的良くシミュレートできることが分かり、鉛直下方からのSV波入射に対しては、ここで用いた手法はほぼ妥当なものと思われる。ただし、この手法では地表面の影響が考慮できないので、今後改良する必要がある。

岩盤内空洞の耐震性や岩盤内での地震動特性に関するほとんどの研究は、菊間実証プラントに代表される石油の地下備蓄技術の研究開発や原子力発電所の地下立地に関する研究開発の一環として行われている。しかし、これらの研究から得られる知見は、最近注目を集めている大深度地下空間の開発に伴って掘削される大規模空洞の耐震設計に際しては、有益な情報を提供するものと思われる。

謝辞

本論文を執筆するにあたり資料を提供していただいた石油公団ならびに菊間実証プラントの関係者の方々に深く感謝します。

参考文献

- 1) Masakazu Kato : On performance Test of the First Pilot Plant in Japan for Underground Stockpiling of Crude Oil, Journal of the Japan Petroleum Institute, Vol.27, No.3, pp.179~187, May, 1984
- 2) 宮下国一郎, 青木謙治, 花村哲也, 田島孝也 : 岩盤内原油備蓄タンクの計測技術, 土木学会論文集, 第355号/VI, pp.30~37, 1985年3月
- 3) 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(1986)講演集, pp.1879~1884, 1986年12月
- 4) C.C.Mow and L.J.Mente : Dynamic Stresses and Displacements Around Cylindrical Discontinuities Due to Plane Harmonic Waves, Journal of Applied Mechanics, pp.598~604, Dec., 1963
- 5) 浜田正則, 杉原 豊, 志波由紀夫, 岩野正浩 : 岩盤空洞の地震時挙動観測と考察, 土木学会論文報告集, 第341号, pp.187~196, 1984年1月
- 6) 山口靖紀, 辻田 満, 脇田和試 : 山岳トンネルにおける空洞および周辺岩盤の地震時挙動—空洞のひずみと周辺岩盤の挙動の関係について—, 第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.241~245, 1986年2月
- 7) 大崎順彦 : 地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1976年

(1989年10月2日受付)