

(165) 地下空洞の地震時挙動観測例 (その4)

髙電発環境緑化センター 市川 芳忠
 電源開発髙 総合技術試験所 有賀 義明

1 まえがき

大規模硬岩地下空洞に於ける地震時の挙動を観測するため、全国から四つの地下発電所を選定して、1977年以降地震観測を実施し、1981年からは空洞側壁の挙動を観測している。途上1987年末迄の主として沼原発電所の観測結果を表記題名で報告して来た。これらの検討を経て得られた課題は以下の通りである。

- a) 空洞側壁は、周辺岩盤と一体に振動するのか?
- b) 両側壁の差として求められる相対変位の時刻歴波形で、直下型地震では何故短周期となるのか?
- c) 両側壁の振動モードに反位相振動は存在するか?
- d) 側壁振幅または相対変位振幅の推定は可能か?

本報告では主として両壁面の相対変位の時刻歴応答の観測結果について述べる。地下発電所空洞の寸法はいずれも支間・高さ共に20mを超える規模である。

2 各観測所の地震観測概要

1) 沼原発電所においては、1977年以降12年間に149個(年平均12回の割合)の観測記録が得られた。図-1は、地震の震央位置の東西断面図である。

2) 池原発電所では、1977年以降、12年間半に115個(年約9回の割合)の記録が得られた。図-2は、近傍地震の震央位置の南北断面図を示す。緩く北へ傾斜する地震空白帯で、浅い地震と深い地震とに分けられる。

3) 御母衣発電所においては、1977年以降、32個(年約3回)の記録が得られた。ここの観測数は少ない。

4) 下郷発電所においては、空洞周辺に地震波の反射増幅現象を確認するため33成分の観測を行なった。1981年以降、43個(年約10回)の記録が得られた。地震の観測間隔を、この12年間について整理すると、表-1のとおりであり半年以上も無感であることは稀であった。観測結果をまとめると表-2のとおりである。

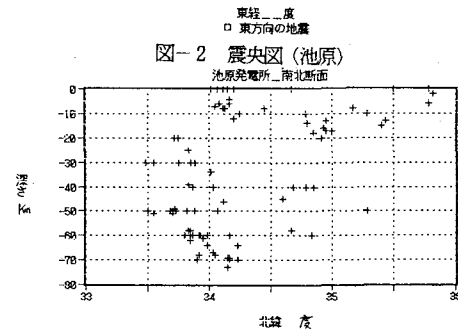
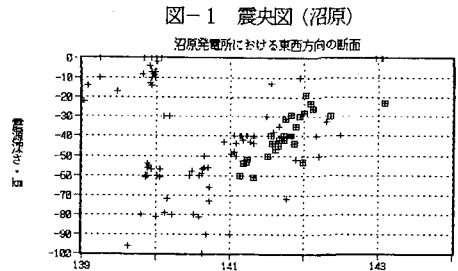


表-1 地震間隔

	沼原	%	池原	%	御母衣	%
1ヶ月以内	96	71	59	50	9	36
2ヶ月以内	15	82	19	71	4	52
3ヶ月以内	13	91	18	87	5	72
4ヶ月以内	9	98	7	92	5	92
5ヶ月以内	1	98	2	98	1	96
6ヶ月以上	2	100	2	100	1	100

表-2 観測結果一覧

(表中土の後の数字は標準偏差を示す。)

	沼原	下郷	池原	御母衣
観測年数(年)	12	4.6	12.5	9.5
MAG 平均	5.4±1.1	5.5±0.9	4.6±1.0	4.9±1.3
MAG 最大~最小	7.9~2.4	7.7~3.5	7.1~2.9	7.8~3.3
平均HYP (Km)	186±175	163±73	126±98	139±144
平均深さ (Km)	64±90	40±26	44±43	28±77
最大加速度 (ガル)	41.7	2.5(ハイ)	11.5	1.77
最大変位 (ミリ)	10.9	1.4(ハイ)	6.3	-
地上/地下ノ比	476	-	383	185
最大上下ノ比	425	-	-	165
最大上下ノ比	4.8±2.7	(ハイ)	1.62±0.64	-
最大上下ノ比	2.4±1.8	1.17±0.32	-	1.93±1.14
最大上下ノ比	4% (Dis)	0% (ハイ)	25% (Ac)	0% (Dis)
出現率	5%	9%	39%	9%

3 位相相関 (反位相は存在するか)

(1) 観測結果

前回報告から約6年全部で、沼原発電所約90ヶ・池原発電所約50ヶ・下郷発電所約30ヶの観測例を得た。沼原発電所ではNo11以降は No148迄の8年間、反位相は出現していない。池原発電所では、1981年1月にシステムを変更したNo41以降、全部で19ヶの地震で左右の側壁の振幅挙動が同一でない局部的乱れが観察されたが反位相とはいえない。両側壁の変位の局部的乱れは、次のような状況が観測された。

- イ 主要動で発生 7 振動初期に発生 9
- ロ X成分で 16 Y成分で 6 Z成分で 12
- ハ SW方向 14 S方向 2 W方向 2 N方向 1

このような地震の震史図を示せば図-3の田のとおりである。

変位の大きい地震の例は、以下のようなものがある。

番号	成分	変位量	状況
41	Z	50	第3波目のピーク値不一致
54	XYZ	352	主要動で振幅周期に乱れ
68	X Z	297	主要動前後で振幅周期に乱れ
83	X	55	主要動後ダンピング

下郷発電所では多数の換震器が概ね周辺岩盤と調和した挙動を示した。

(2) 考察

両側壁の最大振幅値も振動の周波数応答も、殆ど同じである。従って伝達関数もフラットであり、空洞は周辺岩盤と一体に挙動するものと考えられる。池原発電所ではS Wの方向性があるように見られる。この方向は地下発電所長軸方向(ウノス鞍部の地山方向)でもある。これをモデル化して解析計算を行なった結果高次応答として反位相挙動モードも有り得る事が計算された。(図-4参照)

以上の結果、壁面挙動について、典型的な反位相の挙動は観測されていないと考えて良いのではないと思われる。しかし、池原の様に瘦せた尾根に設けられた空洞では地表地形の影響から左右両側壁に反位相の様な乱れが生じることもある。

4 側壁変位量を支配する因子

(1) 両側壁の最大変位振幅

沼原発電所の東西両側壁の最大変位振幅については良く一致する(第16回報告)。図-5に示すように地下変位よりも側壁はやや大きめになり、平均して25%程度増幅する。池原発電所の両側壁の最大変位振幅についても、図-6に示すようによく一致する。池原では側壁と地下変位との同時観測値はない。

(2) S I と最大変位振幅

沼原・池原発電所における観測値で横軸にS、Iの対数を、縦軸に変位の対数をとり図-7に示す。両発電所の最大値を包絡する式は変位(ミクロン)は $\text{LOG 変位} = 1.28 \times \text{LOGS, I} + 2.67$ であった。

図-3 乱れのあった震央図(池原)

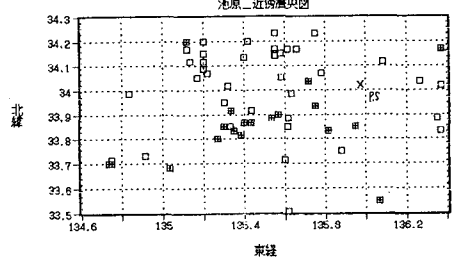


図-4 モデル解析

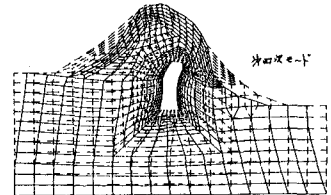


図-5 地下と側壁(沼原)

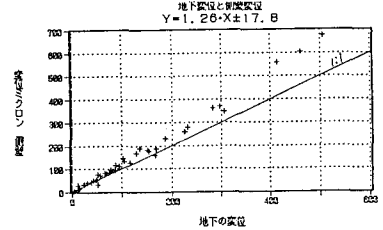


図-6 両側壁の相関(池原)

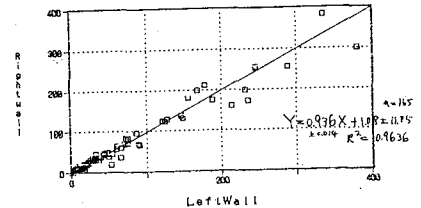


図-7 S I と最大振巾

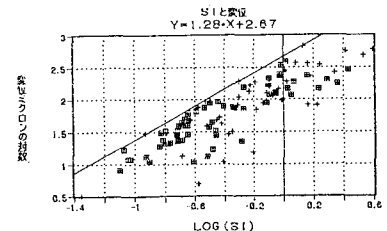


図-8 時刻歴変位記録

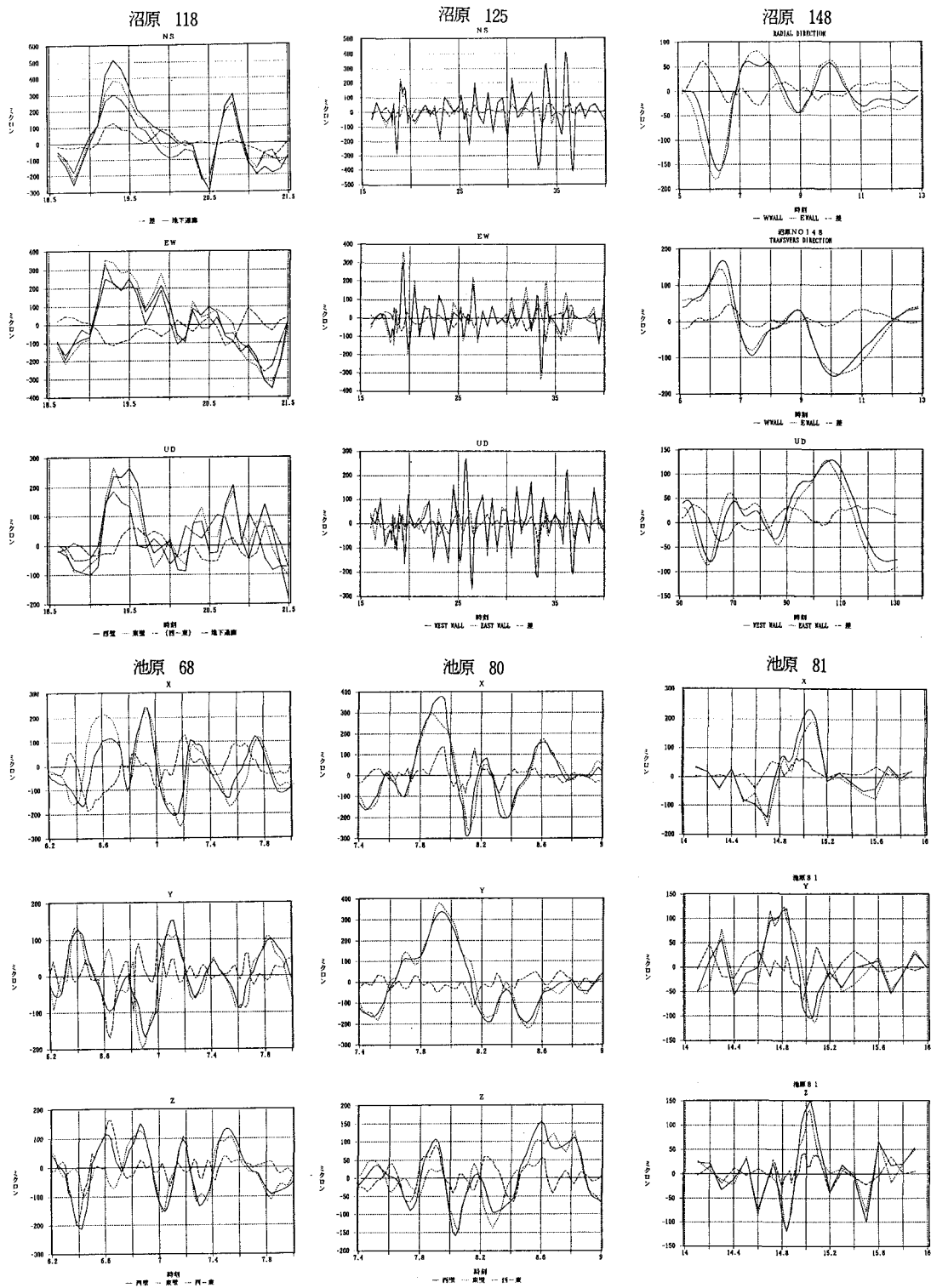


表-3 側壁変位(ミクロン)一覧

地震番号 方位	沼			原			池		原
	101	118	125	128	142	148	68	80	81
M A G	4.3	6.7	6.6	6.5	6.7	3.9	5.5	5.9	5.5
震源深さKm	8	35	61	47	58	6	67	70	68
震央距離Km	6.6	176	109	151	199	3.1	24	42	41
E W 左	193	381	367	160	260	128	245	380	232
右	172	416	322	181	201	108	252	300	198
左-右	60	130	105	57	67	39	186	136	66
N S 左	221	512	429	281	247	226	167	339	120
右	226	439	430	298	252	224	197	384	124
左-右	44	126	116	70	385	52	170	120	73
U D 左	88	314	272	226	272	129	213	189	148
右	97	353	274	197	233	130	160	175	132
左-右	45	113	220	59	91	38	189	92	45

5 空洞側壁の相対変位挙動

(1) 相対変位の最大振幅値

池原発電所についても、東西相対する両側壁の時刻歴変位観測値の差を相対変位として求め、そのパワースペクトルを比較した(第17回報告)結果と同一である。沼原のその後の観測値のうち大きいものおよび池原の例を表-3に示す。これによれば

- 1 両側壁の相対変位の大きさは、最大振幅値の単純差ではなく、その1/2~1/3程度となる。
- 2 両側壁それぞれの最大値の生起時刻は概ねほぼ等しい。
- 3 相対変位の周波数は、原地震の固有のものが現われる場合と、大きい方へ変化する例と、No115のY成分のように小さくなるものといろいろである。しかし、100ミクロンをこえる様な大きい地震ではすべて短周期側となる。

(2) アナログデータによる解析

壁面挙動のうち、比較的大きな変位の沼原発電所 No118(18.6~21.5秒) 125(15~40秒) 148(5~13秒) および池原発電所のNo68 (6.2~8 秒) 80(7.4~9秒) 81(14~16秒) の各3、計6ケの地震について時刻歴変位記録を0.01秒のアナログデータで示せば図-8(1)~(6)のとおりである。

この図によれば、3成分のピーク生起時刻は、必ずしも一致していない。両側壁の相対変位もピーク値は最大振幅時よりも、その前後の地震波の襲来または通過直後に最大値を示すことが多い。

空洞安定上問題となる相対変位のピーク値は東西両側壁の最大応答値の単純な差ではなく、両側壁の応答の遅れや、位相の差の結果として表現される。従って入力地震よりも応答は短周期となる。

6 まとめ

地下空洞の地震時挙動について現地観測の結果、以下の様なことが確認された。

- (1) 地下空洞の側壁の挙動は、多くの場合、地中の地震動と一体で同一位相であるが、地表地形の影響で左右側壁の動きに乱れが出ることもある。
- (2) 側壁変位の最大振幅は、地下地震動の変位振幅よりも沼原発電所では25%程度大きかった。池原・下郷発電所では同一であった。また、側壁変位振幅は、襲来する地震のS、Iと良い相関がある。
- (3) 側壁の相対変位は応答の時間差または位相差により生じ、壁面振幅の1/3程度となり、もとの地震波より短周期となる。

このように、空洞側壁変位は地下地震動変位に支配されているらしいので、空洞の挙動は、地下における地震波動本体の解明に問題が帰結する。このことから、空洞の耐震性を評価するには周辺の岩盤物性と地震波の周波数とりわけ空洞の寸法との関係が大切であると考えられる。

謝辞 末尾ながら久保慶三郎先生の御指導に感謝の意を表します。