

(32) 地下空洞の地震時挙動観測例 一その3一

電源開発(株) 正員 ○有賀 義明
 電源開発(株) 正員 堀 正幸
 電源開発(株) 正員 市川 芳忠

1 まえがき

狭小な国土における人口の稠密化・土地利用の高度化等の要因を背景として、最近、地下空間利用の重要性が多方面で強く認識されつつある。それに伴ない、地下鉄・地下街等、古くから人々の生活に直接馴染み深いものから、石油の地下備蓄・LNG地下タンク・放射性廃棄物の地下貯蔵等まで、様々な分野で地下空間利用が活発に推進されている。当社では、原子力発電所の地下立地方式に関する研究の一環として、地下地震動特性、大規模地下空洞の地震時挙動等を把握・解明するために、昭和51年度より、池原(奈良県)を皮切りに、以後、御母衣(岐阜県)、沼原(栃木県)、下郷(福島県)の各水力地下発電所で地震観測を実施している。本研究発表会では、これまで、二度、沼原での地震観測記録に基づき、大規模地下空洞側壁の地震時挙動に関する検討結果を紹介した。^{1),2)} 今回は、沼原発電所地下空洞の相対する二つの側壁の変位時刻歴から、両側壁の変位時刻歴の差として求まる相対変位を計算し、更に相対変位のバースベクトルを算出し、求められたバースベクトルを震央距離の大小に応じて、分類・整理してみたところ、地下空洞側壁の挙動に関して興味深い結果が得られたので紹介する。地下構造物の耐震設計を考える際の一参考資料にでもなれば幸いである。

2 沼原での地震記録

沼原では、昭和52年12月17日に最初の記録が得られてから、昭和57年12月末までに、46回の地震が観測されている。これら地震の震央を図-1に示す。また、地震記録概要を表-1に示す。表中の「東北」は沼原発電所を原点に真東を基準とし反時計回りに60°の領域を示すものであり、「東南」「南」「西南」は、それぞれ時計回りに60°毎に区分される領域を意味する。表-1中、地上・地下の最大加速度はNo.6の30.3(gal)と14.5(gal)、地上・地下の最大変位はNo.45の368(μ)と373(μ)、地下空洞側壁の最大変位はNo.45の666(μ)となっている。

3 地下空洞側壁の地震時挙動

(1) これまでの成果

現在までの地震観測により、幾つかの興味深い結果が得られているが、その中で、今回の報告に関連して参考となる事項を二点、以下に記す。

- ① 沼原では、地下発電所の西側壁と東側壁が、水平動に関して、地震時に互いに逆位相で挙動するという

表-1 沼原地震記録概要

分類	No.	発生日月	マグニチュード	震央距離(km)	震源深さ(km)	地下空洞側壁の最大変位(μ)	地上の最大変位(μ)	地下の最大変位(μ)	地上での最大加速度(gal)	地下での最大加速度(gal)	
直下型	42	81 12 22	4.4	21	0	116	239	83.6	20.5	3.8	
	78	3 6 4.0	22	50	—	28.4	15.6	9.6	5.4	1.4	
	24	80. 7 7	3.0	10	0	26.0	74.6	9.6	25.4	1.5	
	28	81 1 1	2.6	10	0	11.3	28.8	9.5	6.0	1.1	
	17	80 3 8	2.6	10	10	3.9	28.5	3.3	8.6	2.8	
	18	80 3 10	2.5	22	30	10.8	27.6	8.3	7.0	2.2	
	12	78 6 17	2.4	10	10	2.7	13.7	2.5	3.4	0.5	
	10	78 6 17	—	27	0	22.1	81.0	9.3	12.0	1.1	
	東北	8	78 6 12	7.4	229	40	397	469	423	8.3	3.0
		29	81 1 19	7.0	315	0	184	147	135	1.2	1.0
3		78 2 20	6.8	271	40	—	239	164	3.7	—	
31		81 1 23	6.6	302	0	166	105	134	—	—	
9		78 6 14	6.3	256	40	70.2	85.2	95.2	0.6	0.2	
33		81 1 23	6.2	301	0	38.8	42.8	34.3	—	—	
35		81 4 13	5.7	215	30	233	337	179	4.1	2.4	
東南	11	79 3 11	5.5	160	40	69.8	75.0	48.3	9.5	1.6	
	7	78 5 11	5.4	167	40	77.6	87.3	45.6	3.0	0.6	
	25	80 7 16	5.2	169	40	30.0	26.4	26.5	1.5	0.5	
	45	82 7 23	7.0	207	30	666	367	373	18.1	6.7	
	46	82 7 25	5.9	198	10	35.1	47.9	27.2	3.9	1.0	
南	13	79. 7 11	5.9	135	40	129	218	116	8.5	2.2	
	39	81 9 2	5.8	180	40	44.5	55.3	36.3	1.2	0.4	
	43	82 3 7	5.5	95	60	58.4	106	48.5	11.7	2.6	
	15	79 11 25	5.4	107	90	37.2	109	44.4	19.3	5.5	
	1	77 12 17	5.3	126	40	—	162	98.2	10.9	2.4	
	36	81 5 23	5.3	156	50	35.2	40.8	33.3	2.6	0.9	
	37	81 8 7	4.5	127	40	5.7	—	—	—	—	
	41	81 9 13	4.4	154	0	24.9	38.3	23.4	2.8	0.8	
	16	79 12 17	4.3	91	60	8.5	27.4	7.9	1.1	1.2	
	西南	2	78 1 14	7.0	266	0	—	74.4	55.6	0.8	0.3
23		80 6 29	6.7	250	10	63.6	59.2	47.4	1.3	0.6	
27		80 9 25	6.1	178	80	105	163	100	4.1	1.4	
22		80 5 8	5.7	290	60	31.0	37.8	25.6	0.5	0.3	
19		80 3 12	5.6	244	80	15.5	19.3	13.2	1.0	0.5	
6		78 3 20	5.5	113	50	—	364	344	30.3	14.5	
26		80 9 24	5.4	126	80	70.5	177	55.8	14.0	3.8	
34		81 1 28	5.0	104	80	83.5	184	64.2	13.9	3.6	
44		80 4 19	4.7	113	50	—	32.8	18.7	3.5	0.6	
遠方		38	81 8 25	5.1	366	340	12.0	—	—	—	—
	5	78 3 7	7.8	587	300	—	517	517	4.4	1.8	
	32	81 1 23	7.1	622	180	28.5	27.8	22.3	—	—	
21	80 4 22	6.6	579	400	31.0	102	54.8	10.0	3.0		

備考 No.2 伊豆大 島近海地震
 No.8 宮城県沖地震
 遠方 震央距離500km以上

記録が3回(No.8, No.9, No.10)得られている。

池原では、沼原で記録されたような終始逆位相で挙動した例はないが、最初同位相で挙動していたものが、途中から逆位相になった例がある。

地下空洞の側壁が逆位相で挙動するという事は、空洞スパンが拡大したり縮小したり、互い違いに変動することであり、側壁相互間の相対変位が増大するので、耐震設計上、留意すべき現象であり、このような現象の検討・解明も重要であるのではないと思われる。

② 地震動の強さを表わす指標の1つであるスペクトル強度³⁾(S.I.)を求め、地上と地下の比をとってまとめた結果を図-2に示す。図-2に関しては、昭和56

$$S.I. = \int_{0.04}^{1.0} S_v(h, T) dT \dots\dots(1)$$

S_v: 相対速度応答スペクトル(cm/sec)
 T: 1質点系の非減衰固有周期(sec)
 h: 減衰定数(h=0.02)

年10月にすでに報告しているが⁴⁾、同図にはそれ以後観測された23回の地震記録が追加されている。

図より、震央距離が小さくなるにつれて、バラツキはあるものの、地上と地下のスペクトル強度比が大きくなる(地下の地震動の強さは、震央距離が小さくなるにつれて、地上に比べて小さくなる)傾向のあることが分る。この傾向は、地震記録の数が増加した今回も、以前の報告と同様になっている。

(2) 地下空洞側壁の相対変位

これまでの成果を踏まえた上で、地下空洞の相対する二つの側壁が、地震時に相対的にどのような挙動特性を示すかを定量的に検討するために、西側壁の変位時刻歴[W(t)]と東側壁の変位時刻歴[E(t)]の差として、両側壁の相対変位[R(t)]を求めてみた。(2)式参照)

$$R(t) = W(t) - E(t) \dots\dots(2) \text{式}$$

計算結果の代表例を、直下型地震(震央距離≤30(km))・近距離地震(30(km)<震央距離<200(km))・遠距離地震(200(km)≤震央距離)に分類して図-3~図-5に示す。図中の波形は、上から、西側壁変位時刻歴、東側壁変位時刻歴、両側壁相対変位時刻歴、西側壁変位のパワースペクトル、両側壁相対変位のパワースペクトルを示す。両側壁の相対変位は、もし二つの側壁が全く同一の挙動をしているとすれば0となるはずであるが、図中の相対変位は0にはなっておらず、全くの同位相の挙動は認められなかった。

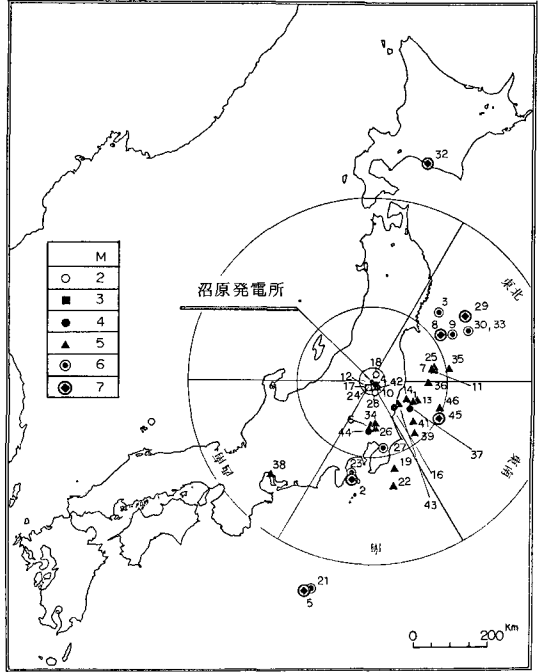


図-1 沼原地震記録震央図

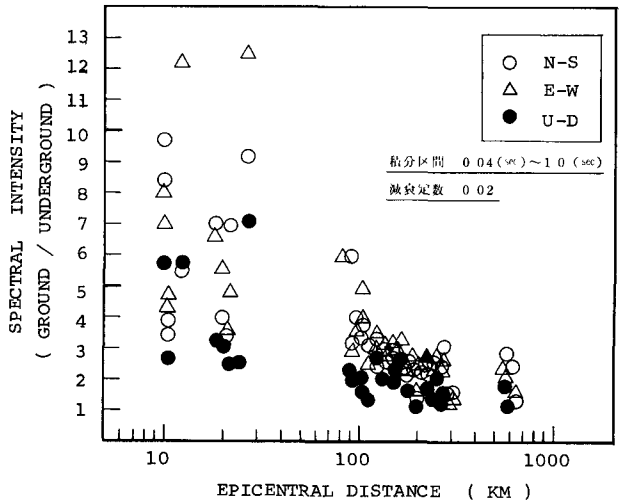


図-2 スペクトル強度比(地上/地下)と震央距離

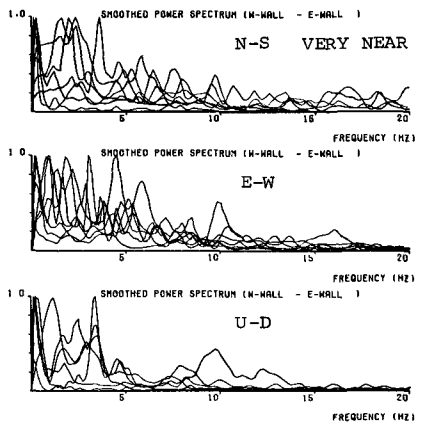
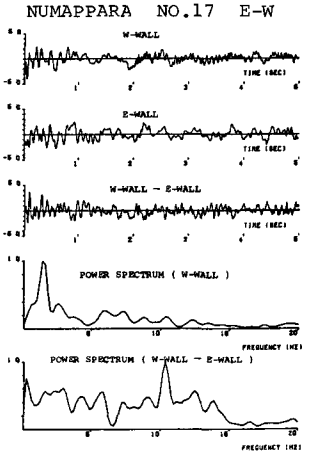
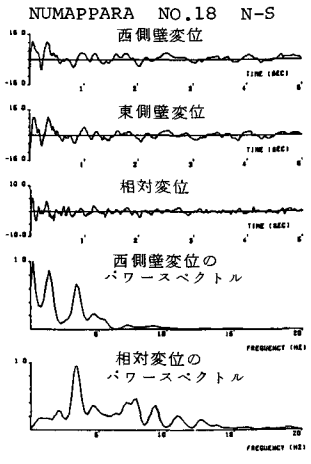


図-3 地下空洞側壁の相対変位〔直下型地震〕

図-6 側壁相対変位のパワースペクトル〔直下型地震〕

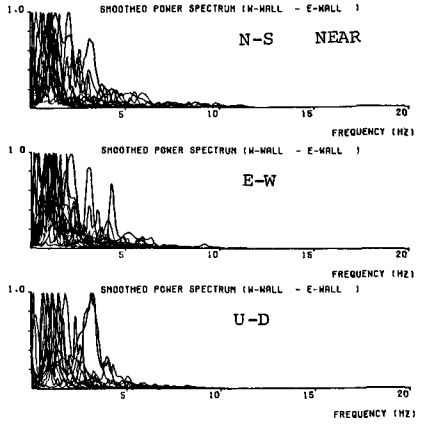
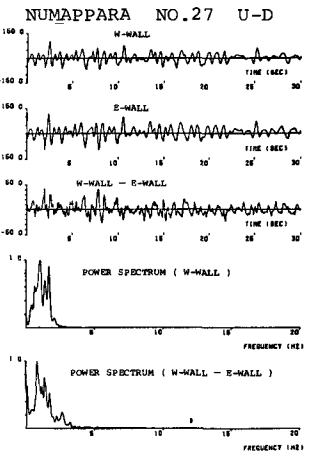
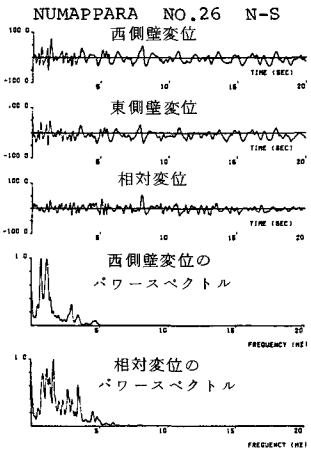


図-4 地下空洞側壁の相対変位〔近距離地震〕

図-7 側壁相対変位のパワースペクトル〔近距離地震〕

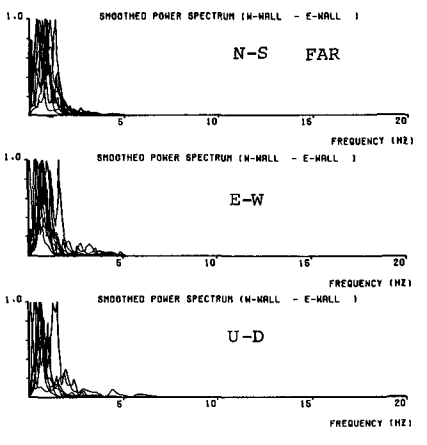
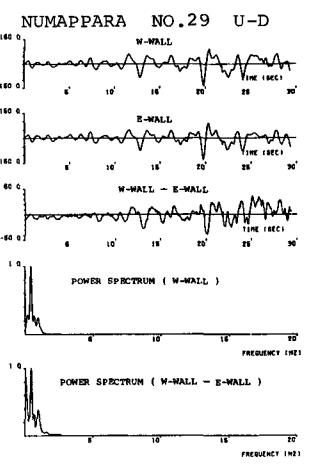
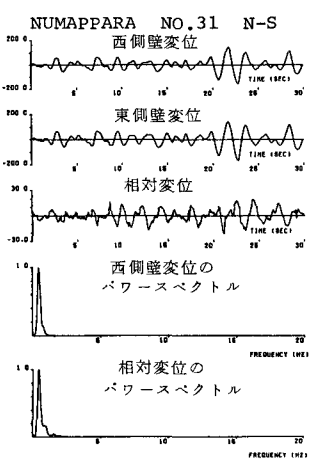


図-5 地下空洞側壁の相対変位〔遠距離地震〕

図-8 側壁相対変位のパワースペクトル〔遠距離地震〕

また、相対変位のパワースペクトルを見ると、震央距離に応じて、相対変位の周波数特性に相異のあることが理解できる。この傾向が一般的に認められるものなのかどうかを検討するために、両側壁相対変位のパワースペクトルを、直下型地震、近距離地震、遠距離地震に分類してまとめたところ、図-6～図-8に示すような結果になった。図より、震央距離が小さい場合は、相対変位のパワースペクトルは低周波数領域から高周波数領域まで広く分布するのに対して、震央距離が大きい場合は、限られた低周波数領域に分布するようになることが分る。震央距離の小さい場合、地下空洞側壁が実体波の有する周波数成分の影響を強く受けるためか、側壁の地震時挙動が複雑になるものと考えられる。

4 まとめ

沼原での地震観測記録によると、地下空洞の相対する側壁は、震央距離が小さくなるにつれて、相互に複雑な挙動を示すことが理解できた。なお、地震動の強さに関しては、震央距離が小さくなるにつれて、地下における地震動の強さが、地上に比して、より小さくなる傾向にあるという結果を得ている。

5 あとがき

地下立地方式原子力発電所に関しては、岩盤内に掘削された空洞自体が極めて重要度の高い原子力施設（Asクラス）として取扱われることになる。そして、その耐震設計においては、設計用入力地震動の策定、岩盤の動的物性値の選定、動的解析手法の確立および検証、安定性評価法の確立など、検討課題は少なくない。今後もこれら課題に対する考え方を確立して行くために、一步一步、努力を積重ねて行きたいと考えている。

なお、本報告は、現地で計器の保守・管理に当たっている方や、データの読み取り・解析等に携わっている多数の方々の努力の結果であることを記すと共に、末尾ながら、観測等に際して御指導頂きました久保慶三郎教授（埼玉大学）に厚く感謝の意を表します。

〔参考文献〕

- 1) 市川・有賀：地下空洞の地震時挙動観測例 第15回地震工学研究発表会講演概要 pp.169～pp.172, 1979
- 2) 市川・有賀・青木：地下空洞の地震時挙動観測例—その2— 第16回地震工学研究発表会講演概要 pp.61～pp.64, 1981
- 3) 大崎順彦：建築構造学大系24 振動理論 pp.67 彰国社 1980
- 4) 有賀・青木・市川：沼原地震記録による地下地震動特性—スペクトル強度— 土木学会第36回年次学術講演会講演概要集 I-226, pp.451～pp.452, 1981, 10