

(16) 地下空洞の地震時挙動観測例 - その2 -

電源開発(株) 正員 市川芳忠 正員 有賀義明 正員 青木信也

概 要

前回の第15回地震工学研究発表会(昭和54年7月)において、地下水力発電所空洞側壁の地震時の挙動について報告した。この時点では、5つの地震波が観測され、地下空洞内の相対する2つの側壁(東側壁及び西側壁)は、地震によっては反位相の動きを示す場合と同位相の場合とがあるが、上下動においてはすべて同位相であり、また、側壁の軌跡図には規則性が認められないという実測結果を報告した。

今回の報告では、その後の2年間に22の地震波を追加観測したので、空洞側壁の変位量を支配する要因等について分析した。その結果、空洞側壁変位量は、地震動の地下変位量で規制され、地下変位量は一般の地震動の強さと同様にスペクトル強度で表現しうるものと考えられた。また、位相はその後の観測ではすべて同位相であった。

目 的

わが国の国土の利用状況と経済開発の動向を考えると、そう遠くない将来において地下空間の利用が必要となるものと考えられる。現在でも、都市部における地下鉄道路線や地下街の発達は著しい。石油の地下備蓄用空洞や、放射性廃棄物の地層処分技術の実用化研究も進められている。

当社では、通商産業省資源エネルギー庁の行なった調査に協力し、原子力発電所を地下に立地するための技術的検討を行ない、地下立地方式原子力発電所は立地選択中の拡大に有効な技術で、わが国の原子力開発の将来に益することが大きいことを示すことができた。この検討過程において、基礎事項として地下岩盤の格納性及び耐震性について幾つかの知見を加えることができた。

地下空洞の耐震設計に関しては、設計用入力地震動の設定、動的解析手法の確立、空洞の地震時応答と地震荷重の算定、岩盤の動力学的特性、岩盤の安定性の評価手法確立など、今後解明すべきテーマは多い。このため、実規模の地下空洞の地震時挙動

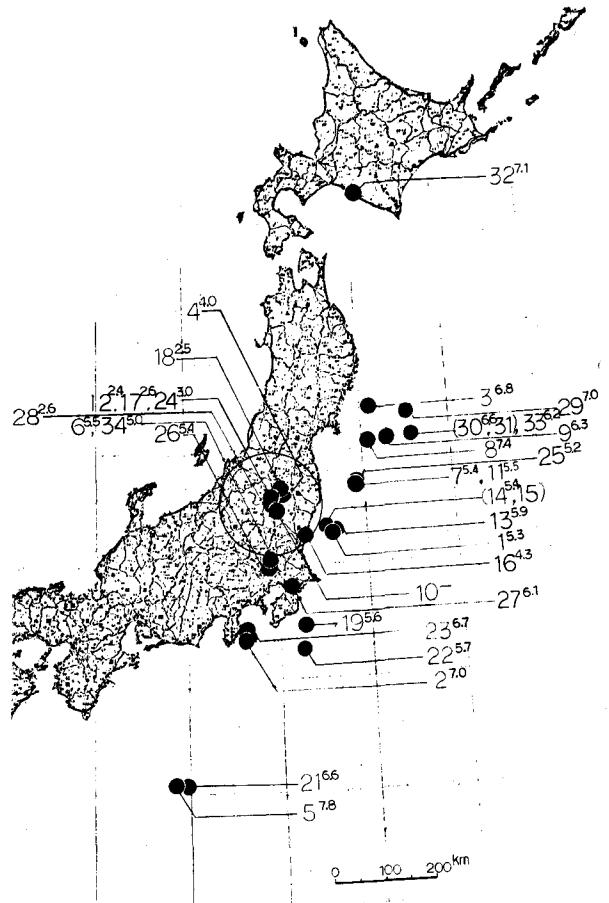


図-1 沼原地震記録震央図

を現地観測し、解析手法との照合、岩盤の物性値の妥当性の検討などを行なうことは大切なことである。この意味で、この報文に何んらかの参考となることがあれば幸いである。

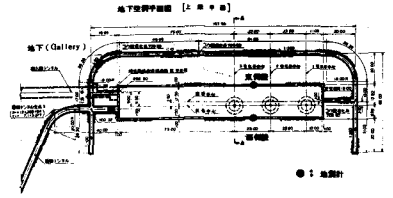
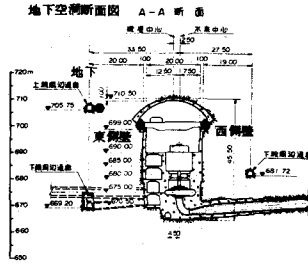


図-2 沼原地震計設置位置

観測地点

観測点は、今回の講演概要に詳

しく述べてあるように、東京の北方約160 km 那須岳西方の西向き斜面の地山かぶり250mの沼原発電所内である。

観測点は、図-1に示す位置(北緯37°06'、東経139°56')で、多発する東日本の地震を把握するのに便利な場所である。図-2に空洞内における換震器の配置個所の断面及び平面を示す。

沼原地点においては、地上部及び地下部それぞれについて3成分の加速度(Acc.)、変位(Dis.)を記録しているが、空洞内側壁については東西両側壁の変位のみをそれぞれ3成分、合計18成分の記録をとっている。

観測結果及び考察

沼原地点において観測された地震の震央は図-1に示すとおりであり、南方向8波、東方向4波、北東方向9波で、震央距離500 km以上の遠地震は3波、同じく30 km以内の近地震は7波である。これらの分類に従って、側壁変位の記録をとりはじめたNo.7地震以降の地震の観測結果を示せば表-1のとおりで、マグニチュードの最大は宮城県沖地震の7.4で、この時最大変位400μ、加速度の最大は地表で8gal、地下で3galであった。なお、地表での最大加速度は、No.6の30galが記録値である。

(1) 東西側壁の位相と相対変位

観測結果によれば、東西壁面の挙動が反位相となる地震は3波のみで、その後同一方向で同様のマグニチュードの地震が近傍に発生している(No.29、30、33)が、これらについては、水平動においても同位相の変位挙動を示していた。

また、西側壁と東側壁との同一時刻の相対変位(西-東)について波形解析を行なった例の幾つかを図

表-1 地震観測記録一覧

震源方向	地震番号	観測年月日	マグニチュード	距離		観測値				位相	
				震央距離	震源距離	地表加速度(gal)	地下加速度(gal)	地下変位(μ)	変位比(μ/gal)	水平動	上下動
近距離	24	80.7.7	3.0	10	10	25	17	10	17	同	同
	28	81.1.1	2.6	10	10	6	8	10	3	同	同
	17	80.3.8	2.6	10	14	9	7	3	10	同	X
	18	80.3.10	2.5	22	37	7	3	8	3	同	X
	12	79.6.17	2.4	10	14	3	8	2	9	同	同
	10	78.6.17	不明	27	27	12	16	10	13	反	同
南方向	23	80.6.29	6.7	250	251	1	3	41	14	同	同
	27	80.9.25	6.1	178	195	4	3	100	15	同	同
	22	80.5.8	5.7	290	296	0.5	1.5	24	15	同	X
	19	80.3.12	5.6	244	257	1	2	13	15	同	X
	26	80.9.24	5.4	126	150	14	6	56	3	同	同
	34	81.1.28	5.0	104	120	14	7	64	3	同	同
東方向	13	79.7.11	5.9	135	141	9	5	116	14	同	同
	15	79.11.25	5.4	106	139	20	9	44	2	同	X
	16	79.12.17	4.3	91	109	7	6	8	3	同	X
北東方向	8	78.6.12	7.4	229	232	8	3	423	1.1	反	同
	29	81.1.19	7.0	315	315	1.2	1.7	135	1.1	同	同
	31	81.1.23	6.6	302	302	-	-	133	0.8	同	同
	9	78.6.14	6.3	256	259	0.6	3	95	0.6	反	同
	33	81.1.23	6.2	301	301	-	-	34	0.8	同	同
	11	79.3.11	5.5	160	165	6	4	48	1.4	同	同
	7	78.5.11	5.4	167	172	3	5	46	1.3	同	同
	25	80.7.16	5.2	169	174	1.5	3	27	0.9	同	同
遠方	32	81.1.23	7.1	622	635	-	-	22	1.3	同	同
	21	80.4.22	6.6	579	704	10	3	55	2	同	同

表-2 相関係数

西側壁との相関	総成分	近距離	北東方向	東方向	南方向
東壁変位	0.99	0.94	0.99	0.98	0.94
地上加速度	0.08	0.77	0.76	0.07	0.68
地下加速度	0.40	0.20	0.86	0.48	0.53
地上変位	0.92	0.76	0.95	0.82	0.92
地下変位	0.96	0.72	0.95	0.97	0.95
S.I.(地上)	0.67	0.67	0.90	0.50	0.80
S.I.(地下)	0.83	0.61	0.91	0.70	0.67

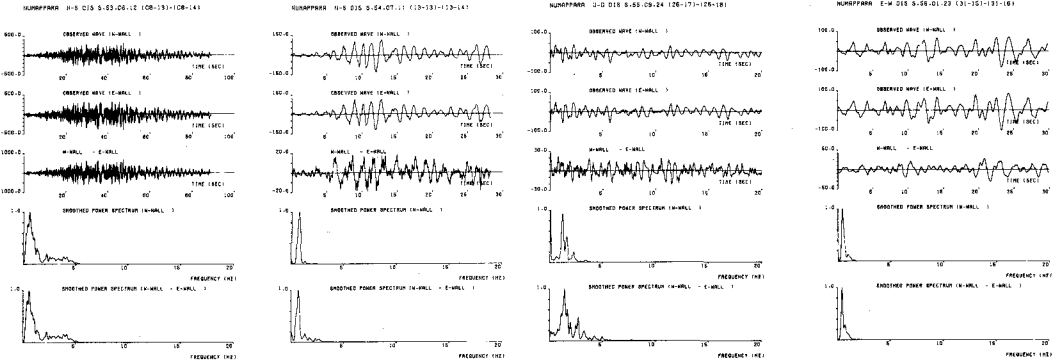


図-3 側壁の相対変位

— 3 に示す。壁面の波形と相対変位の波形には、周波数特性に大きな相異は認められないため、壁面挙動の解析には壁面での観測値をそのまま用いることにした。

(2) 壁面変位量を支配する要因

各種の観測値と西側壁との相関をとると、表-2 に示す様な相関係数が得られた。この表によれば、

- i) 東西両側壁はほとんど同じ変位量を示す。(図-4 参照)
- ii) 加速度振巾との相関性は非常に悪い。(図-5 参照)
- iii) 地下変位量とはよい相関を示す。(図-6 参照)
- iv) 概して、近距離地震は相関が悪く、北東方向の地震は相関がよい。

従って、地下の変位量から空洞壁面の変位量を推定することができるのではないかと考えられる。また、地下動の変位量は地震の強さに依存するから、壁面の変位の大きさに影響を与える要因としては、地震のマグニチュード、震央距離、地盤条件、地形条件などの一般的な地震強度であるといえよう。

(3) 地震強度と壁面変位

a) 東西側壁の位相と相対変位

西側壁変位の観測値を震央距離でプロットすれば、図-7 に示すとおりである。図上の斜線は、Seedの卓越周期と金井式との組合せによるものであり、傾向としてはおむね良い一致を示す。しかしながら、変位量の推定としては十分とはいえない。

b) スペクトル強度

地震強度として、次式で定義される Housner のスペクトル強度 (S.I.) をとることとする。

$$S.I. = \int_{0.1}^{2.5} Sv(h.T) dT$$

Sv : 相対速度応答スペクトル
 h : 減衰定数
 T : 1質点系の非減衰固有周期

なお、本計算においては、相対速度応答スペクトルの減衰定

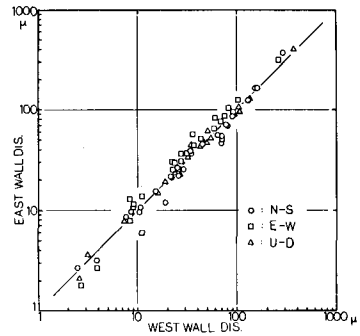


図-4 西側壁と東側壁の最大変位の相関

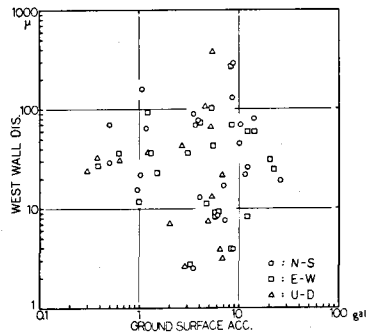


図-5 西側壁最大変位と地上最大加速度の相関

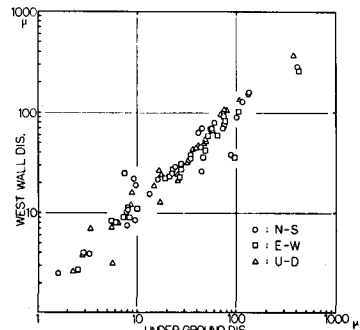


図-6 西側壁と地下の最大変位の相関

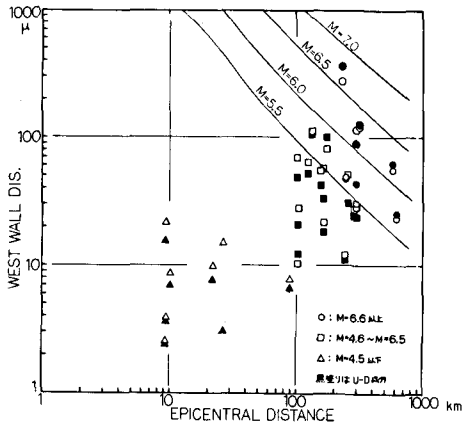


図-7 西側壁最大変位と震央距離

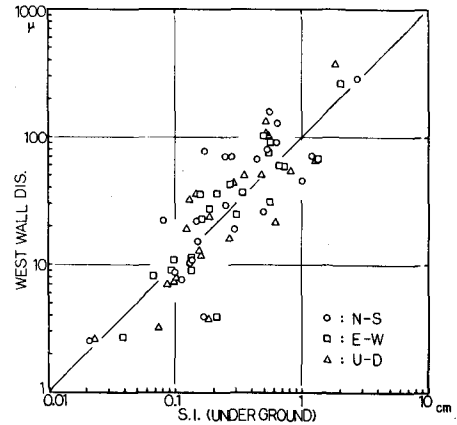


図-8 西側壁最大変位とスペクトル強度

数 h は 0.02 としている。地下のスペクトル強度に対する西側壁変位の観測値をプロットすれば、図-8 に示すとおりで、比較的よい線型関係を得ることができ、大まかに言って S.I. の 1% が空洞壁面の変位量に相当していることがわかる。空洞挙動を支配する周波数領域を適当に選定できれば更に精度のよい推定の可能性があると思われる。

まとめ

以上のとおり、空洞壁面の地震時挙動を実空洞で観測し、地下地震動の変位と空洞壁面変位がよい対応を示し(図-6)、地震動変位は当然ながら地震動の強さに支配され、地震強度としては、加速度の最大振巾よりもスペクトル強度が適当する(図-8)のではないかと考えられた。沼原発電所空洞では、スペクトル強度の約 1% が壁面変位であった。

あとがき

実空洞の地震時壁面挙動の実測は、東京大学生産技術研究所久保慶三郎教授の御推奨に従って、昭和53年度当初より沼原発電所において開始した。その後、紀伊半島池原発電所の地下空洞においても観測設備を改良し、本年3月より壁面挙動を観測している。これらは、空洞内の相対する一カ所の壁面で観測しているので、空洞の長手方向の位相差あるいは換れ現象は把握できない。現在工事中の福島県下郷発電所においては、側壁の相対する2カ所における壁面挙動の観測も含めた総合的な地震観測を本年7月より開始する予定である。この報告は、現地の計器管理、データ解析等多数の人々の努力の結果であることを記すと共に、末尾ながら御指導を頂いた久保先生に厚く感謝の意を表します。

参照報文

- 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集 1979
- 2) 有賀、市川、橋本 “地下における地震動特性” 第34回年講概要集 I-152 1979
- 3) 有賀、清水、市川 “沼原地震記録による地下地震動特性” 第35回年講概要集 I-185 1980
- 4) Housner, G.W. “Spectrum Intensity of Strong Motion Earthquakes” Proc. 1952 Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structures E.E.R.I., 1952