

近距離強地震観測による岩盤内半地下発電所の地震時挙動

BEHAVIOR OF SEMI-UNDERGROUND POWER STATION BY NEAR FIELD STRONG EARTHQUAKES OBSERVATION

駒田 広也*・日比野 敏**・江川 顕一郎***

By Hiroya KOMADA, Satoshi HIBINO and Kenichiro EGAWA

The earthquake observation has been carried out at Ochiai semi-underground hydro-electric power station installed in a cylindrical pit of 15 m in diameter, 22 m in depth in rock mass in purpose of evaluating the earthquake resistance of semi-underground nuclear power plants. The behavior of the cylindrical pit has been analysed mainly by the observed seismic waves of the near field strong earthquakes, which happend in August, 1983. And some of the obtained results are as follows.

(1) Ratios of subsurface maximum accelerations to surface maximum accelerations were almost in range from 1/2 to 1 in radial direction and 7/10~1 in vertical direction.

(2) The power spectrum in high frequency domain of more than 8 Hz in radial direction and more than 1] Hz in vertical direction decrease according to the depth from the ground surface.

1. ま え が き

今後の原子力発電所建設を推進するための一方策として、地下式原子力発電所の検討が進められている。その一環として昭和51年7月より地表面下150mの岩盤内地下空洞に収納された城山水力地下発電所で地震観測を実施してきた。そして、岩盤内地下空洞の地震時挙動が解明されつつあり、地下式原子力発電所の耐震設計のための貴重な資料が得られている^{1),2)}。

一方、最近では、地表から掘削した岩盤円筒ピットに原子力発電所を収納する、いわゆる半地下式原子力発電所も検討されている。この半地下型式の耐震性を実証することを目的に、昭和58年2月より神奈川県足柄上郡山北町落合に建設されている直径15m、深さ22mの岩盤円筒ピット型落合水力発電所で地震観測を実施している。

そして、観測地点から約17kmの震央距離で、1983年8月8日にマグニチュード6.0の地震が発生し、最大

加速度117.7galが観測され、さらに20個の余震も観測された。本論文は、これらの近距離地震としての本震、余震群の観測結果をとりまとめ、半地下式原子力発電所の耐震性について2、3の考察を加えたものである。

2. 地震観測概要

(1) 地震計設置場所

地震計が設置されている落合発電所は、図-1、図-2、および図-3に示すように、山腹斜面の中腹を地表より掘削した円筒ピットに収納されている。観測点はF-1測点として地上部(EL. 333.65m)の露頭岩盤部、F-2測点として地下部(EL. 315.00m)の円筒ピット底部である。各測点には発電所建屋の半径方向(R:N 22°W)と鉛直方向(Z)の2成分の加速度計(加速度周波数特性を図-4に示す)が設置されている。なお、F-1、F-2は平面的にみると、ほぼ同位置に設置されている。

観測点付近周辺の地盤は、新第三紀の変成岩類が分布しており、おもに、C_L~C_M級の緑色片岩から成っている。

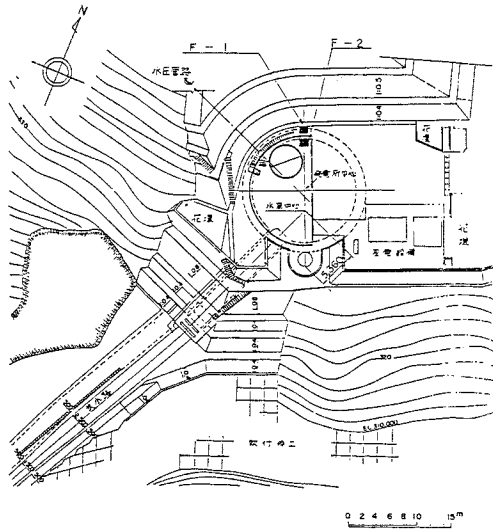
(2) 観測地震の概要

1983年8月8日12時48分頃発生 of 神奈川県・山梨県境地震の本震(M=6.0)と余震群(M=1.3~4.5)

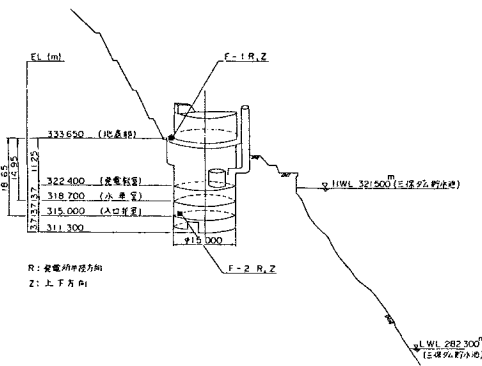
* 正会員 工博 (財)電力中央研究所土木研究所立地部土質基礎研究室長 (〒270-11 我孫子市我孫子1646)

** 正会員 工博 (財)電力中央研究所土木研究所立地部地盤構造研究室長 (〒270-11 我孫子市我孫子1646)

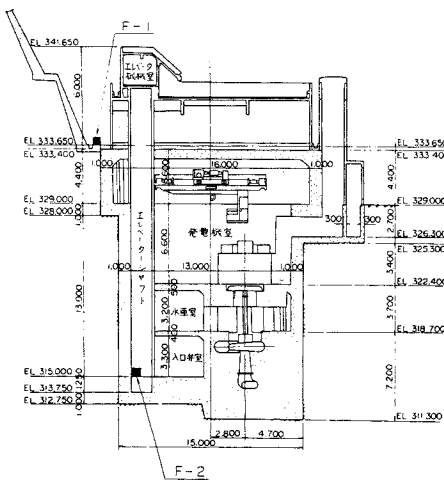
*** 正会員 東京電力(株)工務部工務土木課長 (〒100 千代田区内幸町1-1-3)



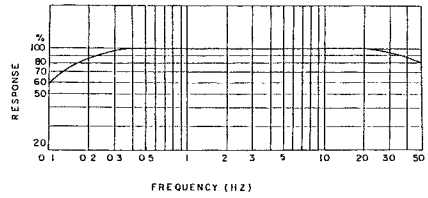
図一 地震計設置位置図(平面図)



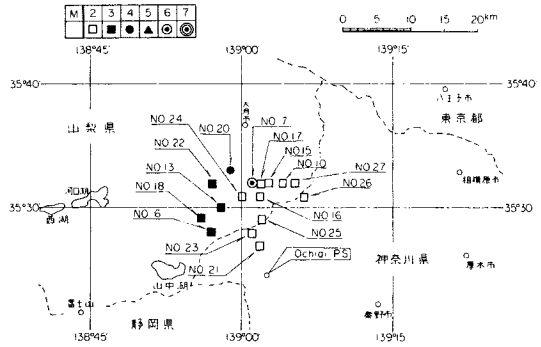
図二 地震計設置位置図(鳥かん図)



図三 地震計設置位置図(断面図)



図四 地震計(加速度計)の周波数特性



図五 観測地震波の震央位置

が観測された。これらの地震の震央位置は、図一五に示すように、観測地点からいずれも 17 km 以内の距離である。これらの観測された地震のおおの地震諸元を一覧して表一(気象庁発表資料による)に示す。なお、表一および図一五の地震番号は観測が開始された昭和 58 年 2 月からの累計地震番号である⁴⁾。No. 6 地震は No. 7 の本震とは関係がないと考えられるが、震央位置が本震の近くであり、加速度が比較的大きいので、今回の解析対象とした。

3. 観測地震波の解析

(1) 最大振幅値

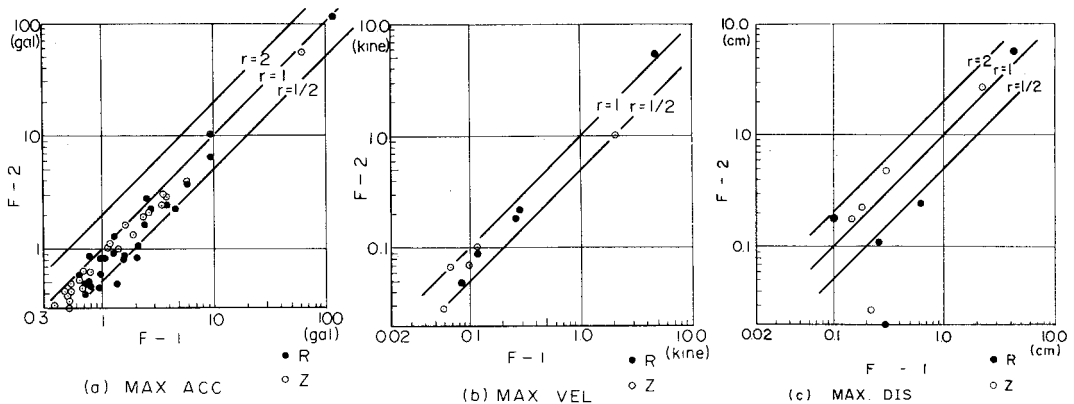
F-1(地上部)とF-2(地下部)における地震波の最大振幅値(加速度, 速度, 変位)の比較を図一六に示す。設置した地震計は加速度タイプであるので、速度波, 変位波は加速度波を Trifunac の方法³⁾によるゼロ線補正後に積分して求めたものである。

a) 最大加速度

図一六(a)に示すように、半径、鉛直方向とも最大加速度比 r (地下部の最大加速度/地上部の最大加速度) は 1/2~1 の間に分布している。鉛直方向はおもに、 $r = 7/10 \sim 1$ に集中し、半径方向に比べて最大加速度比は大きい。地上と地下の標高差は約 19 m ではあるが、地下では最大加速度の低減効果が現われている。なお、地上と地下の標高差が約 240 m の全地下空洞における地震観測では¹⁾、この最大加速度比 r はおおむね 1/2 であり、地表面下深くに設置された全地下式に比較すれば、

表一 観測地震波の諸元

No.	Origin time	Latitude	Longitude	Depth (km)	Magnitude	Epicentral Distance (km)	Hypocentral Distance (km)	Max. Acceleration (gal)			
								F-1		F-2	
								R	Z	R	Z
6	1983/7/12 16:56	35°28'	138°57'	2.0	3.4	1.0.5	2.2.6	4.4	5.9	2.2	4.0
7	8/8 12:48	35°32'	139°01'	2.0	6.0	1.3.9	2.4.4	11.7.7	61.9	11.7.6	55.0
8	8/8 12:49							0.6	0.5	0.6	0.3
9	8/8 12:50							0.8	0.5	0.5	0.4
10	8/8 12:50	35°32'	139°04'	2.5	2.8	1.3.9	2.8.6	3.8	2.6	2.5	2.1
11	8/8 12:51							0.8	0.5	0.5	0.5
12	8/8 12:52							1.2	0.8	0.9	0.5
13	8/8 12:58	35°30'	138°58'	2.0	3.4	1.2.1	2.3.4	2.0	2.3	1.1	1.9
14	8/8 12:58							1.3	1.4	0.5	1.0
15	8/8 13:02	35°32'	139°03'	4	2.8	1.3.7	1.4.3	2.8	1.6	2.3	1.6
16	8/8 13:04	35°31'	139°02'	1.7	2.3	1.1.9	2.0.7	1.6	0.8	0.8	0.6
17	8/8 13:06	35°32'	139°02'	8	2.5	1.3.7	1.5.9	1.5	0.7	0.9	0.5
18	8/8 22:37	35°29'	139°56'	2.0	3.5	1.2.8	2.3.8	9.3	3.4	6.4	2.5
19	8/9 18:51	35°32'	139°04'	1.5	1.3	1.3.9	2.0.5	0.9	0.5	0.5	0.3
20	8/10 01:51	35°33'	138°59'	2.0	4.5	1.6.5	2.5.9	9.4	3.8	10.4	2.9
21	8/10 19:37	35°27'	139°02'	1.7	2.8	4.5	1.7.6	0.7	0.4	0.5	0.3
22	8/11 9:46	35°32'	138°57'	0	3.7	1.6.1	1.6.1	0.8	0.6	0.9	0.5
23	8/11 17:57	35°28'	139°01'	1.5	2.7	6.7	1.6.4	2.0	1.9	0.8	1.4
24	8/12 16:43	35°31'	139°00'	1.8	2.7	1.2.5	2.1.9	1.0	0.5	0.6	0.4
25	8/12 22:17	35°29'	139°02'	2	2.6	8.2	8.4	1.3	1.1	1.3	1.1
26	8/12 23:06	35°31'	139°06'	1.6	2.3	1.3.0	2.0.6	1.0	0.7	0.8	0.6
27	8/14 3:32	35°32'	139°05'	1.7	2.6	1.4.2	2.2.2	1.0	0.6	0.8	0.5



図一六 地上と地下の最大振幅値の関係

今回の半地下式における最大加速度の低減効果は少ないといえる。

以上の現象を逆の見地から考察すれば、円筒ピットの底部に対して頂部の最大加速度は、せいぜい2倍程度にしか増幅していないことになる。一方、現在の地上式原子力発電所建屋では、5~15倍の増幅が観測されており、地下式原子力発電所において、原子炉建屋を円筒ピット側壁と結合した場合には、円筒ピット周辺岩盤の原子炉建屋・機器配管系に対する制震効果が十分に期待できると考えられる。

b) 最大速度

図一六 (b) に示すように、半径方向、鉛直方向とも最大速度比 r は $1/2 \sim 1$ に分布しており、最大加速度と同じ傾向を示している。

c) 最大変位

図一六 (c) に示すように、半径方向、鉛直方向とも非常にばらつきが多い。これは記録の最大加速度が小さいので加速度波形を積分したときに生じるゼロ線補正の誤差が占める割合が大きくなることにより、生じたものと考えられる。

これらのデータは1 構造物の限られたものであり、今後、この種のデータを集積して、詳細検討を加えていく必要がある。しかし、これまでに限られた以上の現象は原子力発電所の地上立地に比較して、半地下立地が以下の点で耐震設計上有利であることを示唆している。

- i) 構造物基礎からの地震入力が増加する。
- ii) 発電所建屋と周辺岩盤を密着させることにより、建屋の地震応答増幅を周辺岩盤の制震効果で減少させることができる。

(2) 最大加速度とマグニチュードの関係

観測された地震の最大加速度振幅 (α_{max}) とマグニチュード (M) の関係を図-7 に示す。これらの地震は震源距離が $8 \text{ km} < x < 29 \text{ km}$ 、マグニチュードが $1.3 < M < 6.0$ である。各測定位置、測定方向ごとの α_{max} と M の関係式を重回帰分析より求めると次式が得られる。

地上部 (F-1)
 半径方向 (R) $\alpha_{R1 \text{ max}} = 10^{0.652M - 1.610}$
 (決定係数 $\gamma^2 = 0.688$)

鉛直方向 (Z) $\alpha_{Z1 \text{ max}} = 10^{0.651M - 1.806}$
 ($\gamma^2 = 0.669$)

地下部 (F-2)

半径方向 (R) $\alpha_{R2 \text{ max}} = 10^{0.666M - 1.810}$
 ($\gamma^2 = 0.775$)

鉛直方向 (Z) $\alpha_{Z2 \text{ max}} = 10^{0.660M - 1.932}$
 ($\gamma^2 = 0.686$)

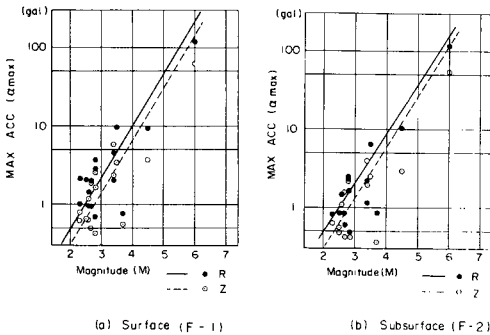


図-7 最大加速度とマグニチュードの関係

以上の関係式における M の係数は、地上部では約 0.65、地下部では約 0.66 である。なお、震源距離が $40 \sim 200 \text{ km}$ 、 M が $4.1 \sim 5.1$ の地震記録をもとに作成した金井式⁵⁾における M の係数は 0.61 である。また、近距離強地震記録に基づく Newmark⁶⁾ の式における M の係数は 0.8 である。

(3) マグニチュードと卓越周期の関係

近距離 ($22 \text{ km} < x < 29 \text{ km}$, x : 震源距離) にて発生

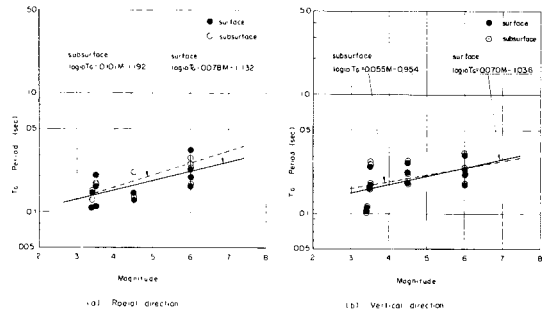


図-8 マグニチュードと卓越周期の関係

した地震のマグニチュード (M) と卓越周期 (T_c) の関係を図-8 に示した。なお、図-8 にプロットした卓越周期は、地震番号 No. 7, No. 18, No. 20 について、おのおのパワースペクトルの第 1 ピークの値の 6 割以上のピーク値を有するものに限定した。

半径方向、鉛直方向の両成分とも M が大きくなれば、 T_c が長くなる傾向を示している。この傾向には、地上と地下とで顕著な差がみられないが、地下の T_c が地上に比べて M に対する依存性がわずかに大であることがわかる。

(4) 伝達関数

地下部 (F-2) から地上部 (F-1) への周波数応答関数、つまり伝達関数 $T(f)$ を次式で解析することにする。

$$T(f) = \sqrt{P_{F1}(f)/P_{F2}(f)} \dots\dots\dots (1)$$

$P_{F1}(f)$: F-1 測点の地震動パワースペクトル

$P_{F2}(f)$: F-2 測点の地震動パワースペクトル

f : 周波数

この関係式によれば、2つの既知のパワースペクトルを用いて、その構造物の周波数応答特性を推定することができる。

ここで、観測波 (地震 No. 6, 7, 10, 18, 20) を用いて、各成分ごとの伝達関数を求めたものを図-9 に示す。図-9 において、各成分とも、原線 (パワースペクトル比=1.0) より上は F-1/F-2、下は F-2/F-1 のパワースペクトル比を示している。地震記録の 10 Hz 以上では、そのパワースペクトルは小さく、周波数伝達関数の信頼度が劣ると考えられるが、図-9 より以下のことがおおむね考察される。

半径方向成分では、円筒ビットの地上部は地下部に比較して、1~3 Hz、5 Hz 前後の周波数域が減衰する傾向があり、8~15 Hz の周波数域が増幅される傾向にある。鉛直方向では、ほぼ全周波数域にて増幅される傾向にあり、特に、11~14 Hz の周波数域にて顕著である。すなわち、地上に比較して、地下では半径方向で 8 Hz 以上、鉛直方向で 11 Hz 以上の高周波数域のパワースペクトル

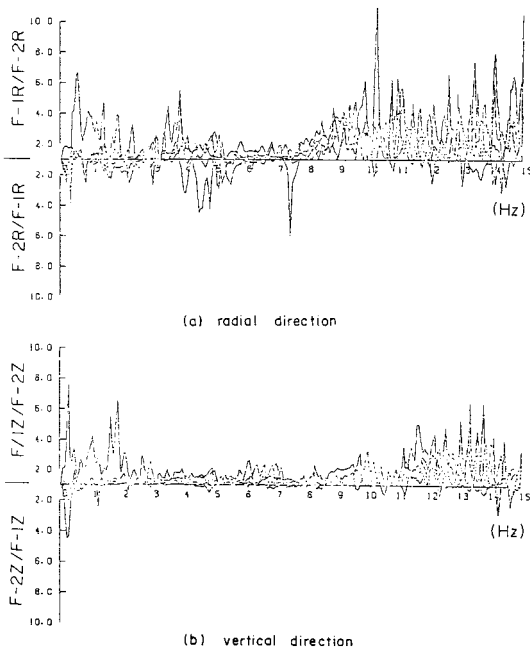


図-9 伝達関数

が減衰している。この現象の原因の1つとして、震動伝播特性が急変する地盤表層部での波動反射による高周波成分の発生が考えられる。なお、図-9において、2 Hz

までが卓越している地震は図-5 および表-1 に示した No.6 である。

(5) 応答スペクトル

a) 絶対加速度応答スペクトル, 相対速度応答スペクトル

3個の地震波 (No.7, No.18, No.20) の絶対加速度応答スペクトル, 相対速度応答スペクトルについて, 地上部と地下部で比較したものを図-10 に示す。

絶対加速度応答スペクトル, 相対速度応答スペクトルともに, 地下部は地上部よりスペクトルが小さくなっているのがわかる。特に, 絶対加速度応答スペクトルにて顕著な傾向は, 周期 0.15~0.2 s を境にしているが, 短周期側では地下のスペクトルがすべて減衰していることである。つまり, 5~6.7 Hz より高周波数側では地上部で増幅する傾向であることを示している。この現象は前述の伝達関数の特性と同じ傾向である。しかし, 相対速度スペクトルでは, このような統一的な傾向はみられない。

b) 規準化応答スペクトル

地上と地下の規準化応答スペクトルについて, 半径方向を図-11 に, 鉛直方向を図-12 に示す。各地震の震源距離は 22~29 km と近接しており, また震源地もほぼ同一地域とみなされることより伝達経路も同一であるから, これらの図はスペクトル形状とマグニチュード

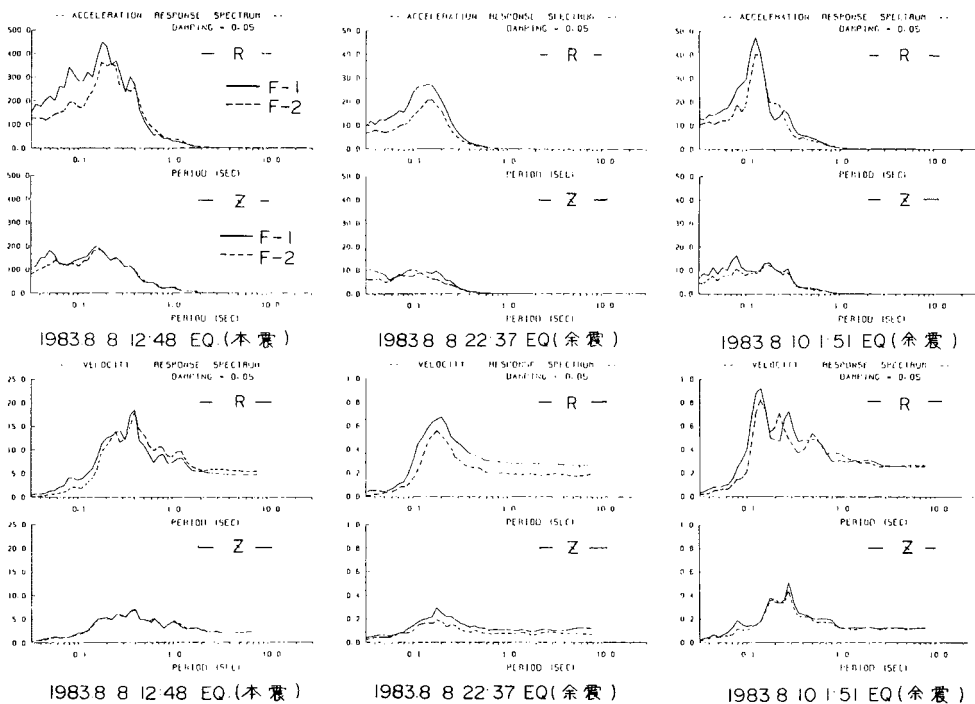


図-10 応答スペクトル (絶対加速度応答スペクトル, 相対速度応答スペクトル)

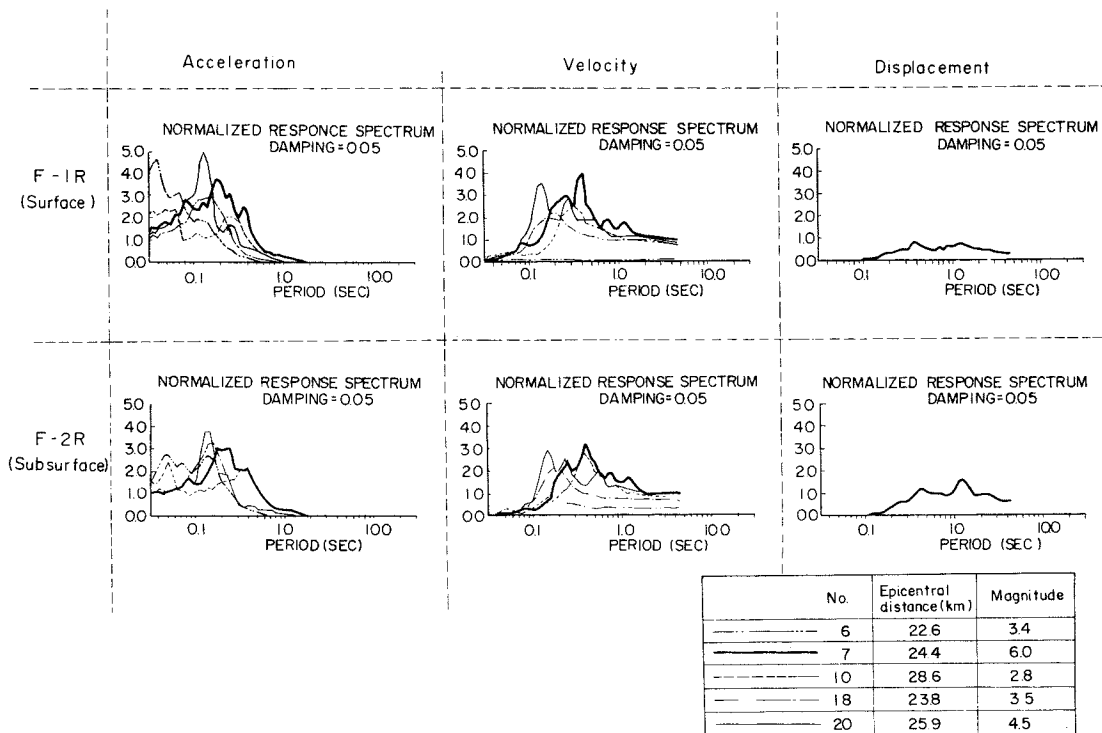


図-11 標準化応答スペクトル (半径方向)

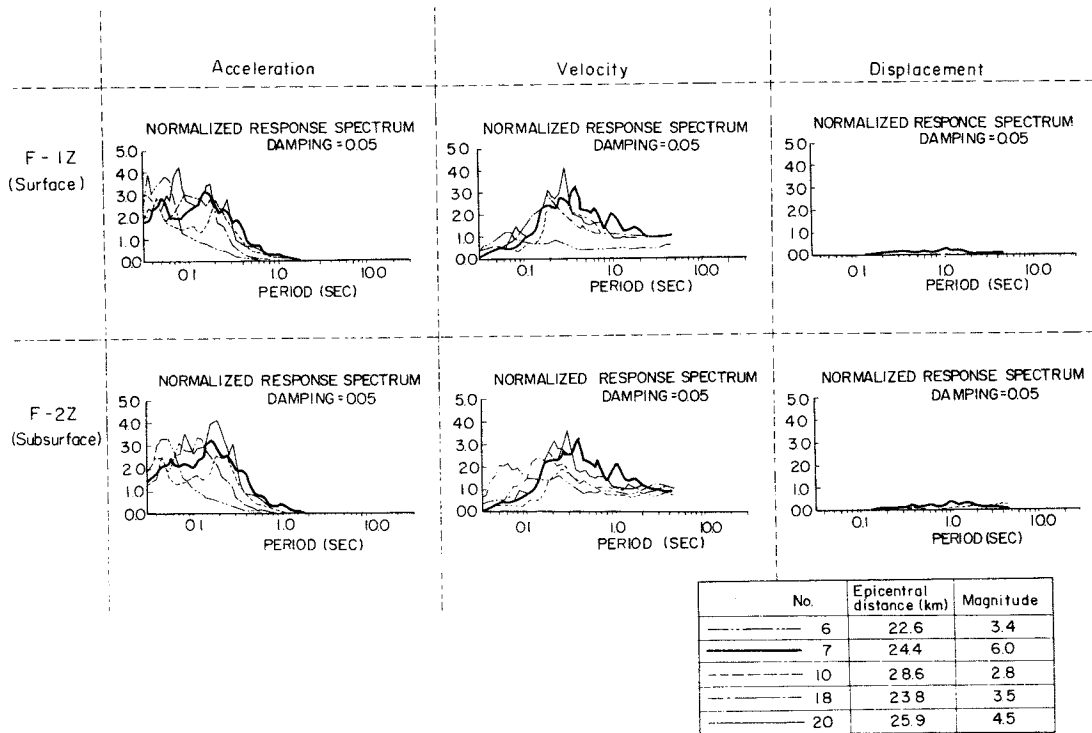


図-12 標準化応答スペクトル (鉛直方向)

(M) の関係を示したものと考えられ、以下のことが考察される。

- i) 地上、地下ともに、M が大きくなるとスペクトルの第1ピークを示す周期が長くなり、スペクトルの長周期成分が増大する傾向にある。この現象は規準化速度応答スペクトルに顕著である。
- ii) いずれの規準化応答スペクトルの形状も、地下部では地上部に比較して平坦化する傾向にある。

(6) スペクトル強度

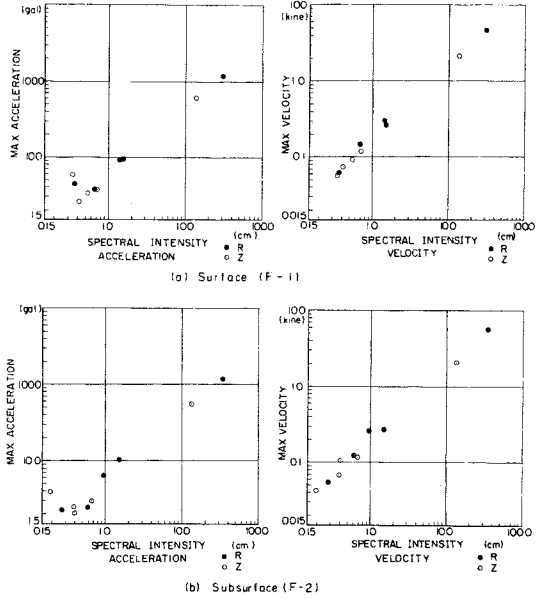
地震動が構造物に及ぼす効果を表わす指標として、スペクトル強度が用いられる場合がある。スペクトル強度 (Spectral Intensity : SI) は次式のように相対速度応答スペクトルの面積から算出したものである⁷⁾。

$$SI = \int_{\alpha}^{\beta} S_v(T, h) dT \dots \dots \dots (2)$$

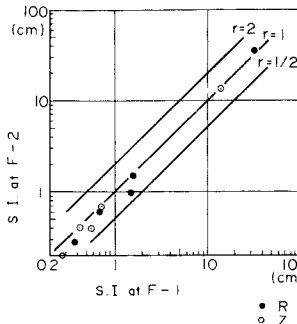
- S_v: 相対速度応答スペクトル
- T: 1 質点系の非減衰固有周期 (s)
- h: 減衰定数
- α, β: 積分区間 (s)

ここで解析したスペクトル強度は、 $h = 0.05$, $\alpha = 0.04$ s, $\beta = 5.0$ s とし求めている。

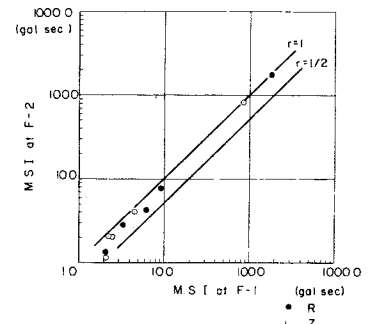
表一に記した地震番号 No. 6, 7, 10, 18, 20 の5個の地震について、スペクトル強度と最大加速度、最大速度との相関を図一13に示した。当然のことながら、各指標の間の相関はよく、特に、スペクトル強度は相対速度応答スペクトルから算出されているの



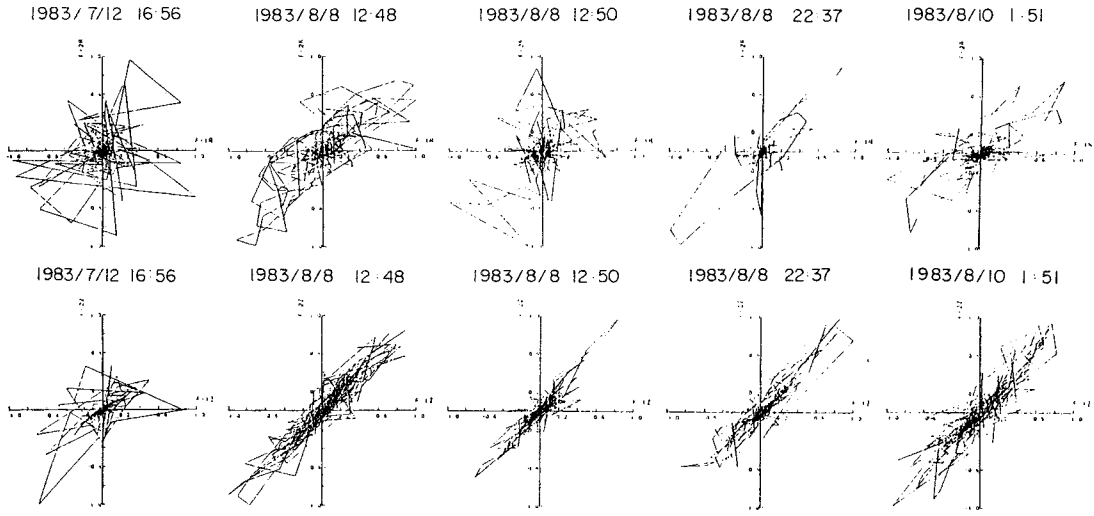
図一13 スペクトル強度と最大加速度、最大速度の相関



図一14 地上と地下のスペクトル強度



図一15 地上と地下の修正スペクトル強度



NO.6 7/12 16:56 NO.7 8/8 12:48 NO.10 8/8 12:50 NO.18 8/8 22:37 NO.20 8/10 1:51

図一16 加速度波の位相相関

で、スペクトル強度と最大速度とは高い相関性がみられる。

次に、地上と地下のスペクトル強度の相関を図-14に示す。標本数は少ないが、 $\gamma=2/3\sim 1$ ($\gamma=(\text{地下の } SI)/(\text{地上の } SI)$) にプロットされ、最大加速度、最大速度を用いて比較した地上と地下の相関関係(図-6)と同様な傾向を示している。

次に、式(2)の相対速度応答スペクトルの代わりに、絶対加速度応答スペクトルから算出した修正スペクトル強度(Modified Spectral Intensity: *MSI*)⁷⁾について、地上と地下の相関関係を図-15に示す。同図からも、 $\gamma=1/2\sim 1$ ($\gamma=(\text{地下の } MSI)/(\text{地上の } MSI)$) となり、他の諸指標(最大加速度、最大速度、スペクトル強度)と同様の傾向を示している。

(7) 位相相関

観測波の時刻歴をもとに、地上部の加速度を横軸に、地下部の加速度を縦軸にとり、成分ごとに地上と地下の位相相関を描いた結果を図-16に示す。近距離地震で卓越周波数も3~15 Hzの広い範囲にわたってばらついているにもかかわらず、半径方向、鉛直方向とも地上と地下の加速度波形の位相差がほとんどみられず、円筒ピットの頂部と底部はほぼ同位相の震動モードで挙動していることがわかる。

しかし、観測対象となった半地下円筒ピットは半径15 m、深さ22 mの比較的小規模な構造物であるので、円筒ピットの頂部と底部がほぼ同位相の震動モードを呈したと思われる。一方、原子炉を収納する半地下円筒ピットは半径60 m、高さ60 m程度の寸法を必要とするため、実際の原子炉空洞は今回の観測対象となった円筒ピットよりも複雑な震動モードになることが予想される。

4. 結 語

半地下式原子力発電所の耐震性を実証することを目的として、直径15 m、深さ22 mの岩盤円筒ピット型水力地下発電所で地震観測を実施していたところ、震央距離約14 km、マグニチュード6.0の地震とその余震が観測された。これらの記録をもとに、おもに近距離強地震時の円筒ピットの挙動を解析し、以下の結果が得られた。

(1) 地下発電所底部(EL. 315.00 m、地下と称す)の最大加速度は、地上露頭岩盤部(EL. 333.65 m、地上と称す)の最大加速度よりも、円筒の半径方向では1/2~1、鉛直方向では7/10~1に低減している。同様に最大速度についても、半径方向、鉛直方向とも地下は地上より1/2~1に低減している。

(2) 半径方向、鉛直方向の両成分ともマグニチュードが大きくなれば卓越周期が長くなる傾向にある。この傾向には地上と地下とで顕著な差が見られない。

(3) 半地下発電所の周波数応答関数、つまり地下から地上への伝達関数は、半径方向で8~15 Hzに、鉛直方向で11~14 Hzに顕著なピークを有する。すなわち、半地下発電所での底部では、半径方向では8 Hz以上、鉛直方向では11 Hz以上の高周波数域のパワースペクトルが減衰している。

(4) 絶対加速度応答スペクトルの地上と地下の比較では、周期0.15~0.2 sを境にして、長周期側はほぼ同じ形状を示しているが、短周期側では地下のスペクトルが減衰している。この現象は前述の伝達関数の特性と同じ傾向を示している。

(5) 地震動が構造物に及ぼす影響の強さを表わす指標の1つとして、スペクトル強度が最大加速度、最大速度などとともにはばしば用いられる。地上のスペクトル強度に対する地下のスペクトル強度比は2/3~1に分布し、地下は地上よりも構造物に及ぼす破壊強度が軽減される。

(6) 近距離地震(マグニチュード2.8~6.0、震源距離22~30 km)で卓越周波数も3~15 Hzの広い範囲にわたっての地震での加速度波形震動モードにおいて、半径方向、鉛直方向とも、地上と地下の位相相関がよく、円筒ピットの頂部と底部はほぼ同位相の震動モードで挙動を示している。

建設企画コンサルタント(株)堀田光氏には、観測装置の保守、点検および観測波の解析に協力頂いた。末筆ながら、ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 駒田・林・堀田：地下発電所空洞における地震観測，土木学会論文報告集，No. 309，pp. 91~101，1981年5月。
- 2) 駒田・林・堀田：地下発電所空洞周辺における地震観測，第16回地震工学研究発表概要，pp. 57~60，1981年7月。
- 3) Trifunac, M. D. : Zero Baseline Correction of Strong-Motion Accelerograms, B. S. S. A. Vol. 61, No. 5, 1971.
- 4) 駒田・日比野・石田：岩盤内半地下発電所における地震観測——その1微小地震による挙動(1983年2月~5月)——，電研報告 383018，昭和58年11月。
- 5) 金井：地震工学，共立出版，p. 95，昭和44年。
- 6) Newmark, N.M. and Rosenblueth, E. : Foundations of Earthquake Engineering, Prentice-Hall, pp. 233, 1971.
- 7) 市川・有賀：地下空洞の耐震設計，電源開発(株)，調査資料 No. 71。

(1984. 7. 11・受付)