

目 的

わが国は、国土の70%が山岳地形であり、平地の土地利用の高度化もあり、原子力開発を進めて行くためには、早晚、地下立地方式原子力発電所の実用化が必要となるものと考えられる。しかし、わが国における原子力発電所の耐震設計の現状から考えて、地下立地に対する耐震面での技術評価を下すには、未検討の課題がある。その一つは入力地震動の問題であり、一つは地下構造物の健全性の証明の問題である。言うまでもなく、これらの課題は、我々、土木技術者としての経験上からは何ら疑問のあるものではないが、地震と言う自然現象は、極めて複雑であり、地点依存が支配的で再現性が稀である上に、しばしば、人智を越すことがあるため、経験を一般化して、原子力発電関係者の納得の得られるものとしなければならない。このような観点から、当社では、昭和51年より、地下立地方式の実証研究の一環として、地表と地下の地震動特性、すなわち、最大振巾の大きさ、波形の解析による卓越周波数、応答スペクトルの比較など、地震入力上の問題解明に当るため、大規模地下水力発電所池原（奈良県、混合揚水式、350MW）、御母衣（岐阜県、貯水式、215MW）、および、沼原（栃木県、純揚水式、675MW）において、地震観測を実施して来ており、沼原での地震動の解析は、昭和52年度通産省委託調査報告にとりまとめ、報告した。その後、昭和53年度初頭より、地表・地下の地震観測と併行して、沼原発電所の地下空洞において、地震時の側壁の挙動・観測を開始した。実規模地下空洞における動的挙動観測の例が少ないので、現在までに得られた結果をそのまま紹介し御参考に供したいと思う。

観測地点

観測点は、東京の北方約160km那須岳西方の那珂川最上流部（東経139°56′、北緯37°06′）に位置し、基盤の花崗閃緑岩に第三紀中新世の凝灰岩が堆積した後、第四紀に至り那須火山の噴火をみたものである。付近は、第三紀の非火山性地形で、開折の進んだ急峻な山地で、全体としては、西向き斜面で、断層は南北方向に卓越している。図-1,2に示すように、この山中の基盤($V_p=4.0$ km/s)に建設した東西方向に巾22m、高さ45mの空洞を南北方向を長手とする長さ130m、約10万 m^3 の大空洞で、発電機を収納した上で、コンクリートで巻立て

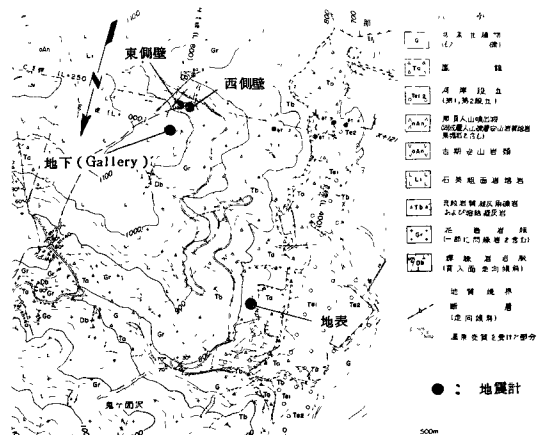


図-1 地震計設置場所

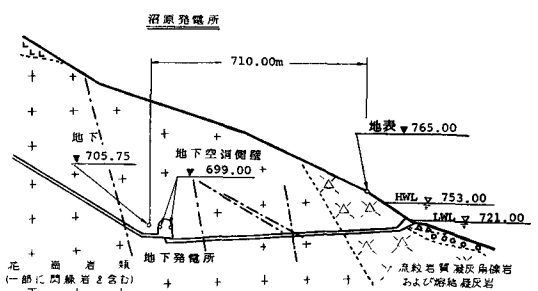


図-2 地下空洞断面図

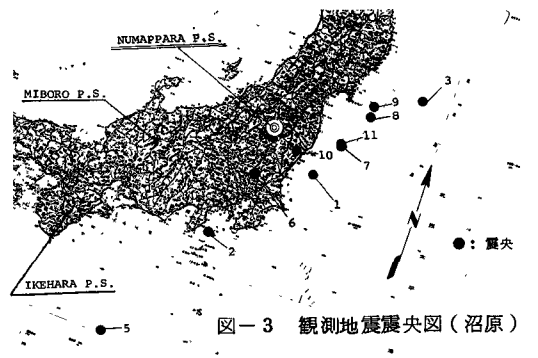


図-3 観測地震震央図(沼原)

である。その東側壁(East Wall)のほぼ中央部、及び、それと相対する西側壁(West Wall)に、3成分の速度型換振器が設置してある。また、この空洞の周辺には、巾2m、高さ2.5mの排水トンネルが配置されているので、ここに、3成分の換振器を設置し、地下地震動の観測点とした。地表部は、基盤を覆う凝灰岩上の崖錐層($V_p \approx 0.5 \text{ km/s}$)の上に観測点を設けたが、崖錐層の厚さは薄い。観測は、速度型換振器→全自動感度調整器(微分増幅器, 積分増幅器)→記録という流れで行っており、発電機の起動、断路器の空気振動などによる誤起動を防ぐために、地上・地下ともに0.05 Kineで起動することになっている。使用している速度型換振器の周波数特性を図-4に示す。

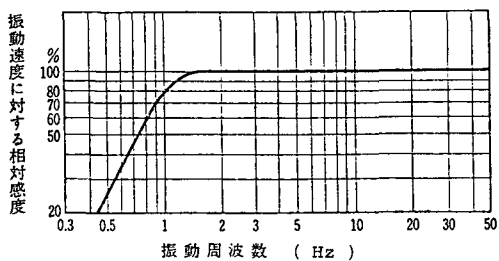


図-4 換振器周波数特性

観測例

沼原地点において観測された11波の地震の震央は、図-3に示す通りであり、伝搬方向、地震規模などが様々な地震が観測できたが、このうち、空洞側壁地震観測開始後の記録は、No.7~No.11の5波、No.8は宮城泉沖地震、No.10は近地地震である。これらの観測記録を表-1に示す。以下に観測例を示す。

NUMAPPARA POWER STATION							
No.	7	8	9	10	11		
Date	1978 5/11	1978 6/12	1978 6/14	1978 6/17	1979 3/11		
Hypocenter	N.L.	37°17'	38°09'	38°12'	36°53'	37°17'	
	Long.E.	141°48'	142°10'	142°29'	140°41'	141°43'	
Magnitude	5.4	7.4	6.3	—	5.5		
Focal Depth (km)	40	40	40	0	40		
Focal Distance (km)	170	230	260	70	160		
Maximum Acceleration Amplitude (gal)	Ground Surface	N-S	2.8	10.7	0.5	11.65	3.6
		E-W	3.0	9.6	0.62	11.95	5.5
		U-D	1.2	6.3	0.37	6.78	2.7
	Under Ground	N-S	0.5	3.3	0.24	1.09	1.6
		E-W	0.6	2.4	0.2	0.75	1.3
		U-D	0.4	2.6	0.16	0.60	0.8
Maximum Displacement Amplitude (μ)	Ground Surface	N-S	87.3	432	85.2	74.8	75.0
		E-W	60.9	476	54.8	81.0	66.0
		U-D	40.9	412	36.2	39.3	48.8
	Under Ground	N-S	38.4	411	72.7	9.3	43.8
		E-W	45.6	428	95.2	6.0	48.3
		U-D	42.0	375	32.1	5.6	35.9
East Wall	N-S	8.5	366	70.2	21.3	94.4	
	E-W	6.8	313	36.1	19.0	91.7	
	U-D	5.2	397	32.1	3.6	43.0	
West Wall	N-S	9.3	289	47.4	22.1	63.8	
	E-W	4.3	262	36.0	8.2	42.7	
	U-D	4.3	376	34.1	3.1	42.8	
Maximum Acceleration Amplitude Ratio (Ground/Underground)	N-S	5.6	3.24	2.08	10.7	2.25	
	E-W	5.0	4.00	3.10	15.9	4.23	
	U-D	3.0	2.42	2.31	11.3	3.38	
Maximum Displacement Amplitude Ratio (Ground/Underground)	N-S	2.37	1.05	1.17	8.0	1.17	
	E-W	1.34	1.11	0.58	13.5	1.38	
	U-D	0.97	1.10	1.13	7.0	1.36	

表-1 地震観測記録例

地表・地下における加速度記録：図-5、図-6に、それぞれ、No.8地震とNo.11地震の、地表と地下における加速度観測波形(N-S, U-D成分)、パワースペクトル[by FFT(大崎)], スペクトル振幅比(伝達関数)を示す。図-7、図-8には、それぞれ、図-5、図-6に対応する規準化加速度応答スペクトル(減衰定数=0.02, 0.05, 0.10)を示す。

図-5、図-6に対応する規準化加速度応答スペクトル

地下空洞における変位記録：図-9、図-10に、それぞれ、No.8地震の、地下と東側壁、西側壁と東側壁の変位波形(N-S, U-D)、パワースペクトルを示す。同様にして図-11、図-12にNo.11の地震のそれを示す。図-13には東側壁と西側壁の各振動成分に関する位相相関を、図-14には側壁のParticle Orbitを示す。

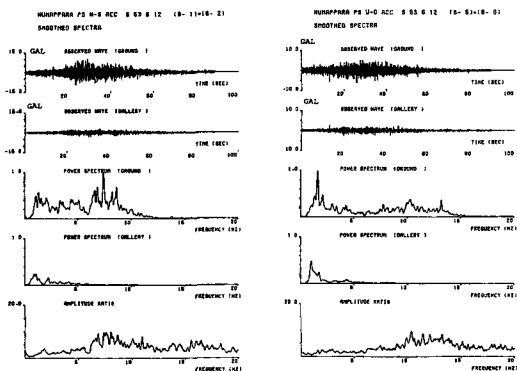


図-5 加速度記録〔No.8 N-S, U-D〕

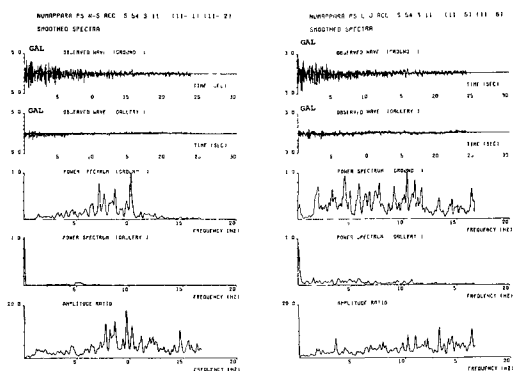
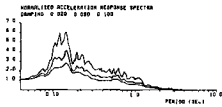
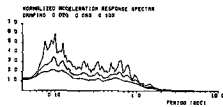


図-6 加速度記録〔No.11 N-S, U-D〕

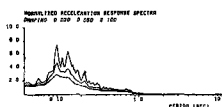
NUHAPPARA PS BRQND N-S ACC S 53 B 12 (8-11)



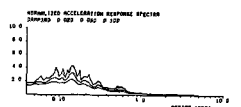
NUHAPPARA PS BRQND U-D ACC S 53 B 12 (8-9)



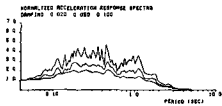
NUHAPPARA PS BRQND N-S ACC S 54 B 11 (11-11)



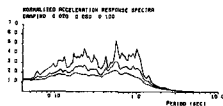
NUHAPPARA PS BRQND U-D ACC S 54 B 11 (11-9)



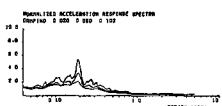
NUHAPPARA PS GALLERY N-S ACC S 53 B 12 (8-12)



NUHAPPARA PS GALLERY U-D ACC S 53 B 12 (8-6)



NUHAPPARA PS GALLERY N-S ACC S 54 B 11 (11-10)



NUHAPPARA PS GALLERY U-D ACC S 54 B 11 (11-8)

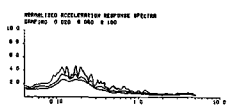


図-7 加速度応答スペクトル(No.8 N-S, U-D)

図-8 加速度応答スペクトル(No.11 N-S, U-D)

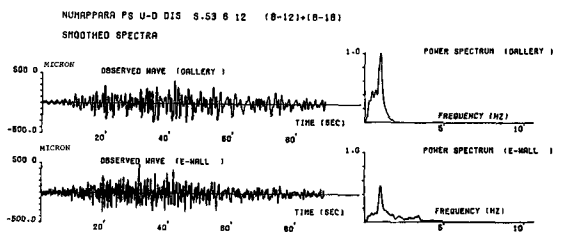
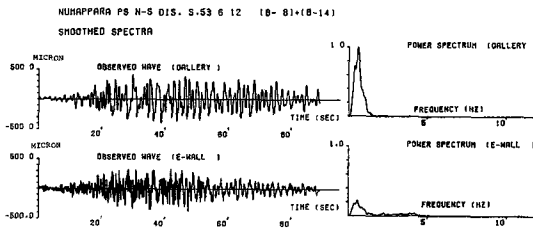


図-9 変位観測記録(No.8 N-S, U-D) (地下と東側壁)

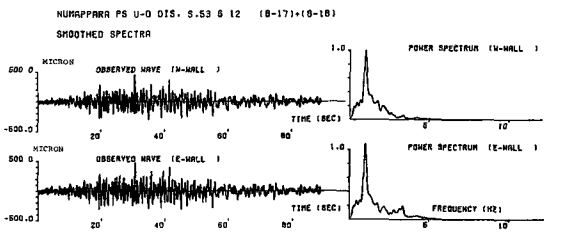
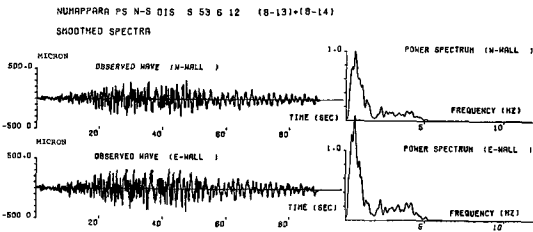


図-10 変位観測記録(No.8 N-S, U-D) (西側壁と東側壁)

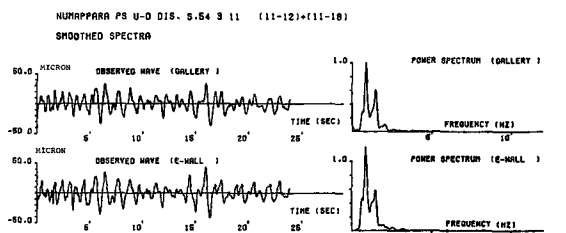
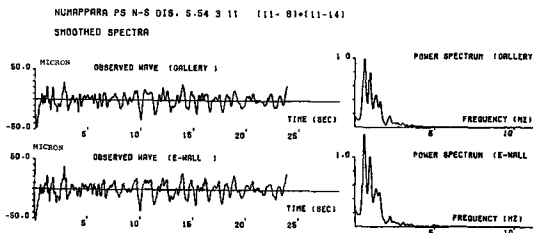


図-11 変位観測記録(No.11 N-S, U-D) (地下と東側壁)

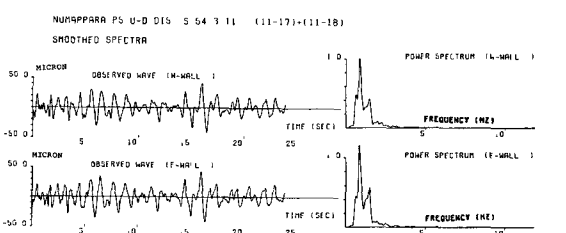
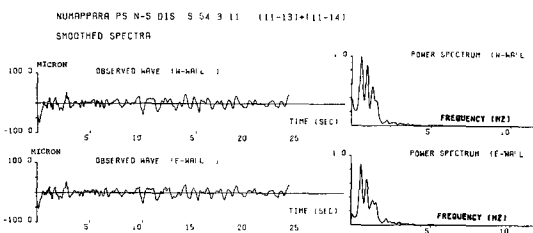


図-12 変位観測記録(No.11 N-S, U-D) (西側壁と東側壁)

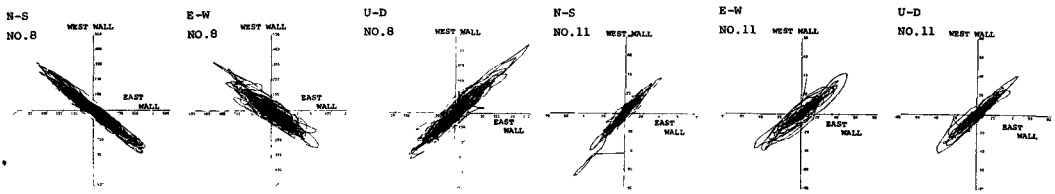


図-13 東側壁と西側壁の振動成分別位相相関

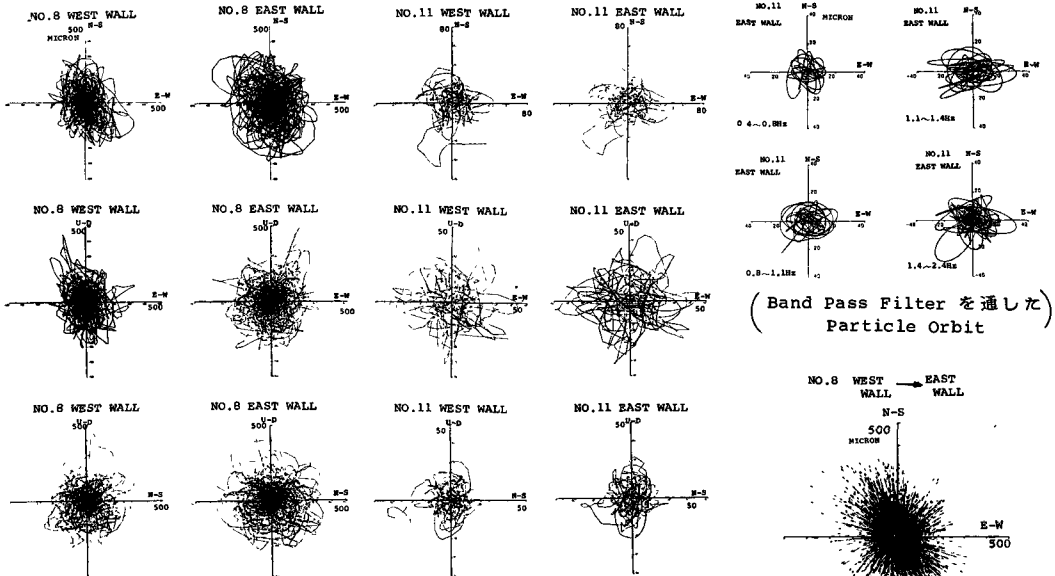


図-14 Particle Orbit

図-15 東側壁と西側壁の相対変位

変位記録の検討

地下と東側壁の変位記録は、図-9、図-11に示す通りである。パワースペクトルの卓越周波数は、ほぼ同一であるが、側壁の高周波側に、地下とは異ったピーク群が現われることがある。

東側壁と西側壁との、各振動成分の位相相関を見ると、水平動については、地震によって同位相の場合と、逆位相の場合があるが、上下動の場合は、同位相となっている(図-13)。各振動成分別には、このように、空洞側壁は、かなり規則正しい挙動を示しているが、Particle Orbitには特別な規則性は見られず、東側壁と西側壁の相対変位を示す図-15でも、現象はランダムとなっている。なお、相対変位の絶対値は、M8の地震でも観測された最大振幅の110%以内で、約400マイクロであり、支間20mに対して、百万分の20にすぎなかった。

あとがき

以上、過去一ケ年間に得られた観測例を紹介したが、その間、宮城県沖地震を含む5つの地震記録が得られた。当初、地震波の襲来方向が空洞長手方向の場合、反位相になり、直角方向の場合は同位相になる傾向があるように思われたが、M10の近地地震では、直角方向であるにもかかわらず反位相となっている。このように、地震の作用は複雑であるとの感想を深めているが、今後も観測を継続する一方、観測と並行して、波形解析を行うとともに、最終的には、シミュレーション解析コードを作成し、地下空洞の動的挙動の予測が出来るようにしたいと希望している。末尾ながら、本観測に当って御助言いただきました東京大学久保慶三郎教授に深く感謝の意を表します。

〔参考文献〕1) 大崎順彦：地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会(1976) 2) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店(1977) 3) 馬場恭平：ロックフィルダムの地震観測 大ダム 72号(6月，1975)