

電力中央研究所

駒田広也

同上

林 正夫

1. まえがき

原子力発電所の立地拡大の一つとして、地下式原子力発電所の検討が進められている。地下式原子力発電所にはいくつかの特長があるが、その特長の一つとして、現在の地下式よりも耐震性に優れていると言われている。しかしながら、現在のところ地下式原子力発電所の耐震性の解析手法および地震入力の評価法が確立されていない。したがって、ここでは、原子力発電所建屋と地盤との三次元震動応答解析法によって、軟質地盤における原子力発電所の地上式、半地下式、全地下式における建屋の震動応答特性を比較検討した。さらに、硬質地盤における全地下式の震動応答特性の検討も行なった。

2. 解析モデル

図-1に4ケースの解析モデルを示す。すなわちCase-1は軟質地盤における地上式、Case-2は半地下式、Case-3は全地下式である。さらにCase-4は硬質地盤における全地下式である。

三次元地盤の広がり、原子炉中心から地震力方向(X方向)に200m、地震力直角方向(Y方向)に150m、さらに深さ方向(Z方向)に地表面から200mとする。そして、半無限地盤を考慮するために、解析上の地盤の遠方境界面において波動の反射を吸収する粘性反力の要素を付加する。軟質地盤のCase-1、Case-2、Case-3における原子力発電所建屋の大きさは幅80m、奥行80m、高さ80mとする。これは地上式、半地下式、全地下式の比較検討のために現在の地上式の建屋がそのまま地下に収納されるものとした。しかし、地下式の場合には、発電装置の配置変えなどにより、空洞幅が約40m、空洞長さが約70m、空洞高さが約50m程度には縮小することが可能であると言われている。したがって、Case-4ではこれらの空洞寸法を用いることにした。

地盤内の弾性係数の分布を図-2に示す。地盤の減衰定数は軟質地盤で7%、硬質地盤で4%が想定されている。地震入力波として、軟質地盤(Case-1、Case-2、Case-3)には2Hz付近に卓越振動数を持つEl Centro波、硬質地盤(Case-4)には5Hz付近に卓越振動数を持つ人工波を用い、最大加速度を300galとした。

3. 解析手法の特徴

1). 三次元有限要素法による震動応答解析手法を用いた。2). 地盤および発電所建屋を表現するのに8節点6面体のIsoparametric要素を用いた。3). 地盤を三次元的に無限大広がりを持つものとして取り扱うために、解析上の三次元地盤の遠方境界において、波動の反射を吸収する粘性反力の要素を付加した。4). 地盤の粘弾性特性をVoigt型モデルで

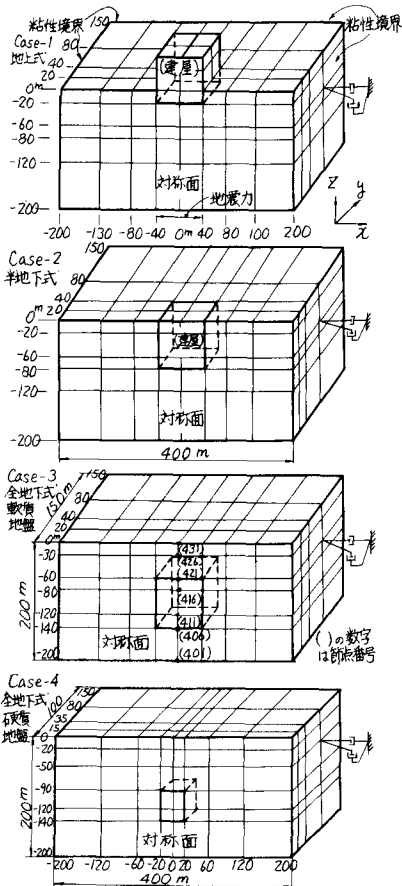


図-1 地盤と建屋の解析モデル

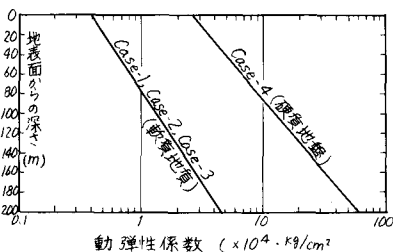


図-2 地盤内の弾性係数の分布

表示した。すなわち、地盤の内部粘性減衰を各有限要素の動的粘性係数 η で表現した。5). 地盤および建屋は線形振動すると仮定した。6). 震動系の時刻歴応答計算には、直接積分法Newmarkの β 法を用いた。

4. 解析結果と考察

図-3にCase-3の応答加速度の波形を示し、表-1に解析結果のおもな値を示す。これらの解析結果とその考察を以下に述べる。

1). 半無限地盤を表現するために解析上の地盤遠方境界面で波動反射を吸収する粘性反力を考慮したので、地盤遠方境界における特に地表付近の加速度応答および変位応答の増幅がほとんど見られなかった。この原因として、図-1に示したように、粘性反力要素の境界面側を固定したためと思われる。これに対する対策として、あらかじめ建屋構造物のない多層地盤構造におけるせん断波の地震応答解析より求められた変位、速度、加速度と粘性反力要素の境界側の節点に与えることが考えられる。2). 基盤面(地表面下200m)の地震入力300galに対して、建屋底部の最大加速度は地上式のCase-1で670gal、半地下式のCase-2で410gal、全地下式のCase-3で450galである。全地下式の最大加速度が半地下式の最大加速度よりも大きくなった原因の1つとして、基盤面付近の要素分割の違いによる高次固有振動の応答の違いが考えられる。したがって、今回の軟質地盤のモデルにおける半地下式と全地下式との建屋底部の加速度の違いは明確には示されなかった。今後、地盤の高次固有振動数と地震波の卓越振動数との関係を調べるために、他の震動波についても解析を行なう必要がある。

3). 硬質地盤における全地下式のCase-4では、建屋底部の最大加速度は340galであり、軟質地盤であるCase-3の450galと比較して、増幅率は小さいことがわかる。4). 軟質地盤における建屋の加速度応答の振動数特性は3ケースとも1.8Hzと1.2Hzに卓越振動数をもっている。これらの卓越振動数は入力地震波の卓越振動数と同じである。しかしながら、建屋の加速度応答のパワースペクトル分布では、地上式から全地下式になるにつれて、わずかながら相対的に低振動数(1Hz以下)が減少し、高振動数(2~3Hz)が増加する傾向にある。5). 建屋底部における基盤面に対する最大相対変位は、建屋が地表面より深くなると、また地盤が硬くなると小さくなる傾向にある。

参考文献

- 1). Lysmer J. etc "Finite Dynamic Model for Infinite Media" Proc. ASCE. Vol. 95, No. EM4, PP.859~877, Aug. 1969
- 2). 林, 北原, 藤原, 駒田「動的粘性係数を考慮した三次元地盤と地上構造物の連成震動解析」土木学会論文報告集, No. 217, PP. 11~23, 1973年9月

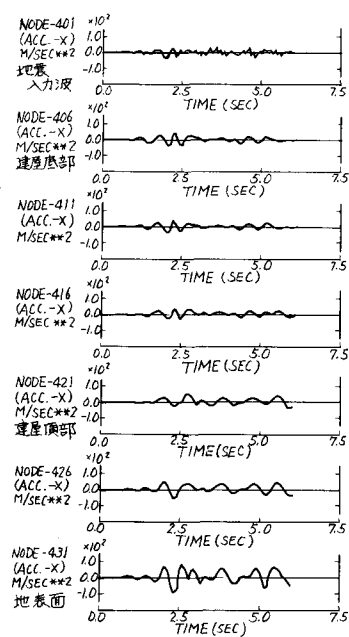


図-3 Case-3の応答加速度履歴、地盤と建屋の中心部

表-1 解析結果のおもな値

	Case 1 地上式	Case 2 半地下式	Case 3 全地下式	Case 4 全地下式
地盤条件	軟質地盤			硬質地盤 (水力修正係数)
建屋の大きさ	A 80m W 80m L 80m			L 50m W 40m L 70m
地震波	エルセントロ NS波 主要部 6秒間			人工波 6秒間
入力	300 gal			300 gal
力	2.2Hz (1.9 × 10 ⁻¹ m/sec ²), 1.8Hz (1.6 × 10 ⁻¹ m/sec ²)			2.2Hz (2.9 × 10 ⁻¹ m/sec ²), 1.8Hz (2.5 × 10 ⁻¹ m/sec ²)
建屋	60m (436)	0m (426)	-60m (421)	-90m (416)
DIS-X max (cm)	18.6 cm	7.9 cm	9.5 cm	1.2 cm
DIS-X power (Hz) (m ²)	1.2Hz (2.2 × 10 ³ m ²), 0.4Hz (2.2 × 10 ⁴ m ²)	1.2Hz (5.9 × 10 ³ m ²), 0.4Hz (3.2 × 10 ⁴ m ²)	1.2Hz (6.8 × 10 ³ m ²), 0.4Hz (3.1 × 10 ⁴ m ²)	2.4Hz (2.6 × 10 ³ m ²), 3.3Hz (1.5 × 10 ⁴ m ²)
建屋	1080 gal	594 gal	530 gal	600 gal
ACC-X max (gal)				
ACC-X power (Hz) (m/sec ²)	1.8Hz (5.7 m/sec ²), 1.2Hz (4.7 m/sec ²)	1.2Hz (1.4 m/sec ²), 1.8Hz (0.84 m/sec ²)	1.2Hz (1.6 m/sec ²), 1.8Hz (0.7 m/sec ²)	8.2Hz (0.69 m/sec ²), 6.1Hz (0.42 m/sec ²)
建屋	-20m (421)	-80m (411)	-140m (406)	-140m (406)
DIS-X max (cm)	9.8 cm	6.1 cm	2.4 cm	0.2 cm
DIS-X power (Hz) (m ²)	1.2Hz (9.6 × 10 ³ m ²), 0.4Hz (5.4 × 10 ⁴ m ²)	1.2Hz (2.5 × 10 ³ m ²), 0.4Hz (1.6 × 10 ⁴ m ²)	0.4Hz (2.8 × 10 ³ m ²), 1.2Hz (1.9 × 10 ⁴ m ²)	2.4Hz (1.7 × 10 ³ m ²), 3.3Hz (3.8 × 10 ⁴ m ²)
建屋	670 gal	410 gal	450 gal	340 gal
ACC-X max (gal)				
ACC-X power (Hz) (m/sec ²)	1.2Hz (1.8 m/sec ²), 1.8Hz (1.6 m/sec ²)	1.2Hz (0.89 m/sec ²), 2.2Hz (0.51 m/sec ²)	1.2Hz (0.16 m/sec ²), 1.8Hz (0.061 m/sec ²)	6.6Hz (0.16 m/sec ²), 7.5Hz (0.15 m/sec ²)
地	(426)	(426)	(431)	(431)
DIS-X max (cm)	10.4 cm	7.9 cm	11.7 cm	2.3 cm
DIS-X power (Hz) (m ²)	1.2Hz (1.1 × 10 ³ m ²), 0.4Hz (5.8 × 10 ⁴ m ²)	1.2Hz (5.9 × 10 ³ m ²), 0.4Hz (3.2 × 10 ⁴ m ²)	1.2Hz (1.2 × 10 ³ m ²), 0.4Hz (4.8 × 10 ⁴ m ²)	3.3Hz (1.4 × 10 ³ m ²), 2.5Hz (1.3 × 10 ⁵ m ²)
建	590 gal	594 gal	980 gal	1150 gal
ACC-X max (gal)				
ACC-X power (Hz) (m/sec ²)	1.2Hz (2.3 m/sec ²), 1.8Hz (1.0 m/sec ²)	1.2Hz (1.4 m/sec ²), 1.8Hz (0.84 m/sec ²)	1.8Hz (3.6 m/sec ²), 1.2Hz (2.8 m/sec ²)	3.3Hz (2.5 m/sec ²), 2.5Hz (1.2 m/sec ²)