

(36) 数値解析による地下の応答スペクトル低減特性の検討

電源開発(株) 正員 有 賀 義 明

電源開発(株) 正員 多 賀 宗 紀

【1】 まえがき 我が国の総国土面積約37万 km²のうち、人々が住むことの出来る可住地面積は約 8万 km²程度にすぎない。そこに、1 億 2千万人を越える国民が居住しているため、可住地面積に対する人口密度は約1500 (人/ km²) にも達することとなる。目覚ましい経済発展の中で、地上空間の開発利用が進み、特に都市平野部における土地利用が高密度に進んだ我が国では、将来、ますます、地下空間有効利用の必要性が増大するものと想定される。地下空間の有効利用を指向させる要因としては、土地利用の高密度・人口密度の増加・地価の高騰などの社会的要因に加えて、地下空間の有する工学的有利性、すなわち、地震力の減少およびそれに伴う耐震性の向上・岩盤の隔離性(放射性物質の格納性、ミサイルなどの直接攻撃の回避等)遮音性・保温保湿性などを挙げることができる。これらの工学的有利性のうち、地下空間の利用により地震荷重の低減および耐震性の向上を図り得る可能性が大にあるという点は、環太平洋地震地帯に位置する世界有数の地震国である我が国では、特に、注目すべき点であると考えられらる。

電力・エネルギー分野における地下空間利用構想としては、原子力発電所の地下立地、放射性廃棄物の地下貯蔵・地層処分、燃料の地下備蓄〔石油(現在建設中)、LPG〕、超電導電力貯蔵、高温岩体地熱エネルギー発電・地下貯水池式揚水発電所、地下実験研究施設等を列举することができる。これらのプロジェクトの検討に際しては、地下空洞および地下空洞内に設置される各種設備の耐震安定性の確認が重要な技術的検討項目となってくる。そこで、本研究では、地下構造物の耐震設計に用いる設計用入力地震動に関する研究の一環として、数値解析により、地下における地震動の応答スペクトルの低減特性について検討した。

【2】 地下構造物に関する設計用入力地震動 一般に地盤・構造物等の耐震安定性を評価する時に活用し得る入力地震動についてまとめてみると表-1のようになる。これらの中で地下構造物の耐震設計に用いるものとしては、想定サイトの地下において観測された強震記録が理想的であろうと考えられる。しかし、十分に規模の大きな強震記録は、なかなか得られるものではないため、現実的には、工学的に妥当な手法に基づき模擬地震動を作成して用いることになると考えられる。

従来の通常(地上式)の原子力発電所の耐震設計においては、“解放基盤表面”という概念が導入され、解放基盤表面において“基準地震動”が定義されている。そして、基準地震動に関しては、基準応答スペクトル(通称:大崎スペクトル)が提案されており、各サイトでは、基準応答スペクトルをもとに、それぞれの地点特性を考慮して設計用応答スペクトルを評価し、各サイトで想定される最大速度振幅・位相特性・確度強度関数をもとに模擬地震動を作成することとなる。

ところで、地震動の伝播とスペクトル特性との関係については、よく模式的に図-1のように表現されている。¹⁾すなわち、ある地表面における地震動スペクトルは、震源スペクトル・経路伝達スペクトル(震源～地震基盤)・表層地盤伝達スペクトル(地震基盤～地表面)の積として表現される。ここで、もし、震源スペクトル・経路伝達スペクトルおよび表層地盤伝達スペクトルが、マグニチュード、地震モーメント、断層長さ・断層幅・断層ズレ・断層方位・断層破壊形態・震源距離・震源深さ・エネルギー解放中心距離・地震断層面までの距離・地震基盤までの深さ・地質構造・表層地盤物性値・地形等のパラメーターにより、精度良く定量的に評価することができれば、地下空間の任意の位置の地震動スペクトルも同様の手法により評価することができ、それが最も妥当な手法であろうと考えられる。しかし、現時点では、これらのパラメーターについて、十分に解明されているとは限らず、必ずしも、地震波動の伝播に即して地震動スペクトルを十分な精度で評価しうるまでには至っていないように思われる。

そこで、本研究では、便宜的に、岩盤表面（解放基盤表面）において評価された地震動スペクトル（基準応答スペクトル）が与えられていることを前提として、岩盤表面における地震動スペクトルに対し、地下における低減スペクトルを乗ずることにより、地下地震動スペクトル（地下構造物の設計用応答スペクトル）を求める手法について検討した。

$$U(\omega) = R(\omega) \cdot G_o(\omega) \cdots (1)$$

ここに

$U(\omega)$: 地下の地震動スペクトル

$R(\omega)$: 地下における低減スペクトル

$G_o(\omega)$: 岩盤表面の地震動スペクトル

なお、地下での低減スペクトルは前出の表層地盤伝達スペクトルと同様に、地下の地質構造・地形・地盤特性等により様々な影響を受けるものであるが、概ね周期1秒以下の短周期領域については、主に、地表面下100m以浅の地質構造・地盤特性等の影響が支配的であろうと考えられ、また、我が国における大規模地下空洞はほとんどの場合100m以上の地山被りを有する地下に建設されていることを考慮し、ここでの検討対象は地下100m以深の地下空間とした。

【3】 地下での低減スペクトル 地下でのスペクトル低減特性に関する検討は、図-2に示すように、既設の水力地下発電所における地震観測記録および山腹地形モデルを用いた数値解析により実施した。（本報告では、後者について報告）

地下での低減スペクトルは、(2)式に示すように、解放基盤表面位置と地下空洞底盤位置の速度応答スペクトルの比として定義し算出した。

$$R_v(T) = S_v[UG](T) / S_v[FRS](T) \cdots (2)$$

ここに

$R_v(T)$: 地下での低減スペクトル

$S_v[UG](T)$: 地下空洞底盤位置の地震動の速度応答スペクトル

$S_v[FRS](T)$: 解放基盤表面位置の地震動の速度応答スペクトル

表-1 耐震設計に活用し得る入力地震動

地震動の種類	概 要	地下構造物に適用する場合の配慮事項
サイン波	最もシリアルな方法であるが、周波数・最大振幅・繰返し回数の設定が必要。	解析対象とする地盤、構造物の固有周期の把握が必要。地震動がある程度想定されている場合は、地震動のスペクトル解析結果をもとに、周波数・最大振幅・繰返し回数（例えば、周波数×継続時間）を評価することが可能。
強 震 記 録	国内 釧 路 (1962.4.23 広尾沖地震) 八 戸 (1968.5.16 十勝沖地震) 開北橋 (1978.6.12 宮城沖地震) 海外 El Centro (1940.5.18 Imperial Valley 地震) IAFI (1952.7.21 Kern Country 地震) Cholame Shandon (1966.6.27 Parkfield 地震)	地表面、あるいは構造物上で観測された記録がほとんどであり、そのままでは地下の特性を反映できない。 また、海外の記録については、岩盤条件が我が国とはかなり異なることもある。
標 準 地 震 動	野水が改良標準化耐震設計小委員会が提示した解放基盤表面で定義される基準地震動。 高地震地帯・低地震地帯・S1地震動・S2地震動・震災直下（直下、近距離、遠距離）等の条件設定に応じて、水平動7波・上下動3波が提案されている。	解放基盤表面において定義されているため、そのままでは地下の特性を考慮できない。 (シミュレーション地震動 参照)
実測地中地震動	鉛直アレー観測における記録 水力地下発電所における記録（沼原、下郷等）	実証データとして最も有意義と考えられるが、十分に大きな強震記録がなかなか得られない。
シミュレーション地震動	強震記録・標準地震動等、地表面での地震動を、重複反射理論・有限要素法等により、地下所定位置まで引き戻し、数値解析的に地下入力地震動を算出する。	シミュレーション解析に用いる解析モデル（地層構造、地盤物性値）の妥当性が非常に重要な意味をもつようになる。
模擬地震動 I 実測地中地震動より作成	地中地震動観測データにもとずき、地下地震動の設計用応答スペクトル・最大振幅・確定強度回数・位相特性を評価し、模擬地震動を作成する。	設計用応答スペクトルをはじめ、各条件の実証性妥当性が十分あることが必要。
模擬地震動 II (断層モデルより)	断層モデルから検討対象とする地下での模擬地震動を作成する。	将来的には、有望な手法と考えられるが、現段階では短周期領域まで十分に評価できるとは限らない。

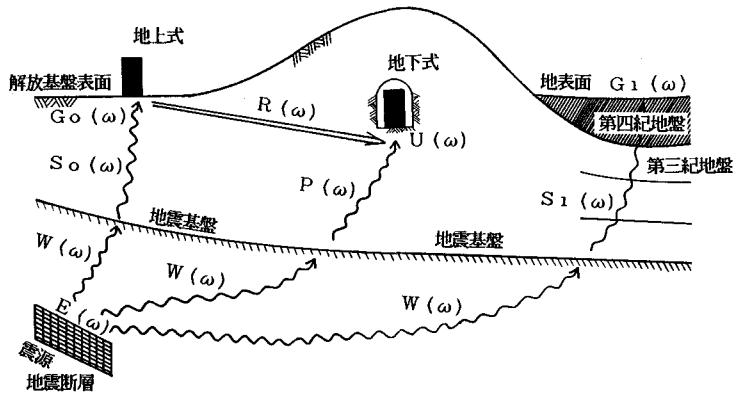


図-1 地震動の伝播とスペクトルの関係（一般的概念）

地震動スペクトルの一般的表現式
$G_i(\omega) = E(\omega) \cdot W(\omega) \cdot S_i(\omega)$ $U(\omega) = E(\omega) \cdot W(\omega) \cdot P(\omega)$ $U(\omega) = R(\omega) \cdot G_o(\omega)$ $\therefore R(\omega) = G_o(\omega) / U(\omega)$
ここに $G_i(\omega)$: 地盤表面における地震動スペクトル $E(\omega)$: 震源スペクトル $W(\omega)$: 経路伝達スペクトル（震源～地震基盤） $S_i(\omega)$: 表層地盤伝達スペクトル（地震基盤～地表面） $U(\omega)$: 地下空間における地震動スペクトル $P(\omega)$: 地盤伝達スペクトル（地震基盤～地下空間） $R(\omega)$: 低減スペクトル（解放基盤表面～地下） $G_o(\omega)$: 解放基盤表面の基準スペクトル ω : 周波数 $i: 0, 1, 2, \dots$

【4】 数値解析による検討

●解析方法 将来の電力・エネルギー分野における地下空間有効利用を想定した山腹地形をもとに、二次元有限要素モデルを作成し、当社で開発した地盤・構造物連成系の非線形動的解析プログラム“DANON”〔◎直接積分法（線形加速度法）による、◎非線形解析・多入力解析・疑似三次元解析等が可能、◎ジョイント要素を導入などの特徴を有する〕を用いて動的解析を実施した。地下での低減スペクトルは、解析モデル内に解放基盤表面位置と地下構造物設置（地下空洞底盤位置）を設定し、両位置の地震動の速度応答スペクトルから、（2）式に従い算出した。

●解析モデル 動的解析には、下郷水力地下発電所周辺岩盤を模擬して作成した地盤モデル（図-3参照）を使用した。この解析モデルでは、下郷水力地下発電所（福島県）における地震観測に関する地震動シミュレーション解析を実施しており、解析値と実測値との比較結果から、ほぼ、実地震現象の再現性を期待し得ると考えられるものである。解析モデルは、4種類の岩盤分類より成るが、それぞれの解析用地盤物性値は発電所建設時の各種調査試験データを参考に、表-2のように設定した。境界条件は、下方境界・側方境界ともに粘性境界とした。なお、ここでの解析は線形解析である。

●基準地震動と入力地震動 解放基盤表面位置は解析モデル右側境界の地表面とし、そこで、基準地震動として軽水炉改良標準化耐震設計小委員会が提示した7種類の標準水平地震動（表-3参照）を設定した。動的解析時の下方入力基盤における入力地震動は、右側側方境界の一次元地層モデルを用いて標準地震動を引き戻すことにより算出（入射波：2E）した。引き戻し計算には、解析プログラム“SHAKE”を使用した。

●解析結果 標準地震動 NO.7（遠距離地震：S2）を用いて動的解析を行った時の解放基盤表面位置における加速度時刻歴を図-4に、地下空洞底盤位置における加速度時刻歴を図-5に、また、解放基盤表面位置（実線）と地下空洞底盤位置（破線）の速度応答スペクトルの比較を図-6に示す。また、解放基盤表面位置と地下空洞底盤位置の速度応答スペクトルから求めた地下での低減スペクトル

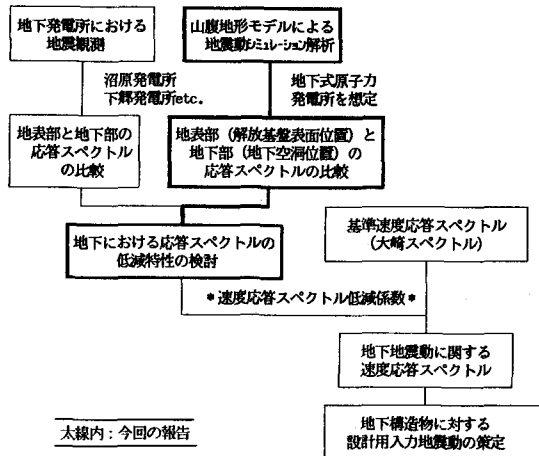


図-2 地下構造物に関する設計用入力地震動の検討フロー

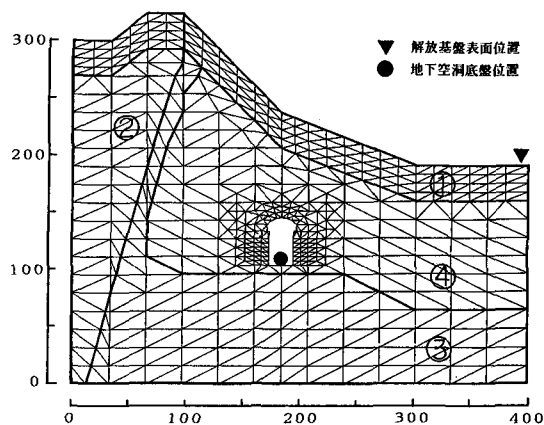


図-3 解析モデル

表-2 解析用地盤物性値

岩盤分類	密度 (t/m ³)	S波速度 (m/s)	ポアソン比	減衰定数 (%)	備考
1	2.2	1000	0.3	5	表層地盤
2	2.6	2300	0.3	2	細粒砂岩
3	2.7	2450	0.3	2	細粒砂岩
4	2.8	2600	0.35	1	閃緑岩

表-3 解析に使用した標準地震動

地震動番号	想定地震					最大加速度 (gal)	使用区間 (sec)
	種別	M	Δ (Km)	位相			
1	低地震地帯	S1	8.0	70	IAFT EW	230.63	0~15
2	低地震地帯	S2	6.5	7.2	Cholame Shandon	340.13	0~10
3	低地震地帯	S2	8.0	50	IAFT EW	353.36	0~18
4	高地帯	S1	7.0	20	EL. Centro	267.40	0~15
5	高地帯	S1	8.4	90	IAFT EW	286.15	0~15
6	高地帯	S2	7.5	24	IAFT EW	388.37	0~18
7	高地帯	S2	8.5	68	IAFT EW	407.10	0~18

軽水炉改良標準化耐震設計小委員会提示 (gal) (sec)

(地下空洞底盤位置／解放基盤表面位置)を図-7に示す。図-7には、7種類の標準地震動に対する計7ケースの解析結果が示されているが、この結果より、地下での低減スペクトルは、地震動の周波数特性にはあまり依存せず、地下の地盤特性に大きく支配されることが理解できる。

【5】実測例との比較 数値解析は下郷発電所地点のモデルを用いて実施したが、比較のために、ここでは、解析モデルとは異なる地点ではあるが、沼原発電所(栃木県)における実測例を紹介する。図-8に示すのは、沼原発電所の地表部(凝灰岩、 $V_p=2.3\text{km/s}$)と地下部(地下発電所空洞位置、閃緑岩、 $V_p=4.6\text{km/s}$)で観測された加速度時刻歴から算出した地下での低減スペクトル(最小地山被り:約250m、水平距離:約710m、標高差:約50m)の代表例(水平動、N-S成分、震央距離:30~200km、19波)である。図-7(下郷地点、数値解析)と図-8(沼原地点、地震観測結果)を比較してみると、地盤特性、地震動特性、2点間の位置関係、地形など、条件がそれぞれ相異なるにもかかわらず、地下での低減スペクトルは、ある程度、同様の傾向を示した。なお、同図中の曲線群をほぼ包絡しうる地下低減スペクトルは、概ね、 $T \leq 0.2(\text{s})$ において $R_v(T)=0.5$ 、 $0.2 < T \leq 1(\text{s})$ において $R_v(T)=0.85 \log T + 1$ 、 $1 < T$ において $R_v(T)=1$ であった。

【6】あとがき 地下空間における地震動の最大加速度が、地表部に比して、かなり低減されることは、古くから報告されているが、本研究では、模擬地震動を策定する際の基本条件となる速度応答スペクトルに着目して、地下空間におけるスペクトル低減特性について検討した。地下での低減スペクトルは、地形、地下の地質構造・地盤特性等により様々な影響を受けると考えられるが、その影響は、概ね、地表面から地下100m程度までの地質構造・地盤特性等によるものが支配的であろうと考え、地下での低減スペクトルについて結果の整理を試みた。今後は、異なった条件設定の数値解析および地震観測記録も加え、ある程度の地山被りを有する地下での低減スペクトルの工学的妥当性について更に検討を重ねて行く予定である。

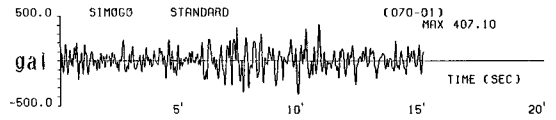


図-4 解放基盤表面位置の標準地震動
[地震動 NO. 7: 遠距離地震]

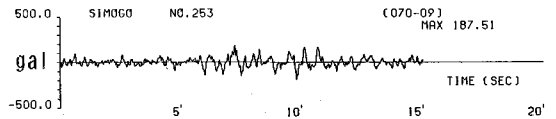


図-5 地下空洞底盤位置の標準地震動
[地震動 NO. 7: 遠距離地震]

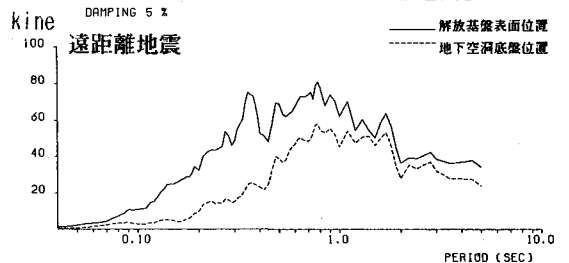


図-6 解放基盤表面位置と地下空洞底盤位置の
速度応答スペクトル比較 [地震動 NO. 7]

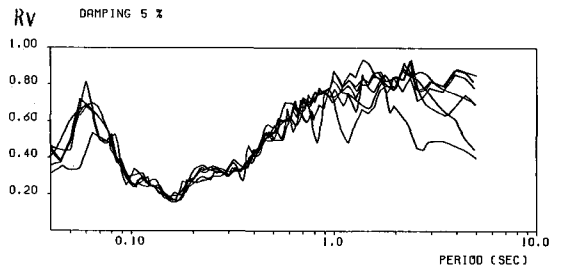


図-7 数値解析により算出した地下での
低減スペクトル (7波記入)

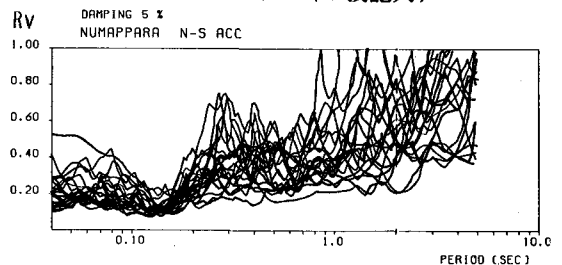


図-8 地下での低減スペクトル実測例
[沼原発電所、水平動(N-S)]

《参考文献》 1)日本建築学会;地震動と地盤-地盤震動シンポジウム10年の歩み、昭和58年 7月。 2)有賀、堀、多賀;地下構造物の設計用入力地震動に関する一考察、土木学会第41回年次学術講演会、I-564、昭和61年11月。 3)有賀、堀;地下発電所における地震動シミュレーション解析、土木学会第40回年次学術講演会、I-417、昭和60年 9月。 4)有賀、堀、市川;沼原地震記録による地下地震動特性、土木学会第38回年次学術講演会、I-419、昭和58年 7月。