

地下発電所空洞における地震観測

EARTHQUAKE OBSERVATION AT CAVITY OF UNDERGROUND
POWER STATION

駒田 広也*・林 正夫**・堀田 光***

By Hiroya KOMADA, Masao HAYASHI and Hikaru HOTTA

1. ま え が き

大型の発電施設などを地下に設け、地上の自然環境を保護し、かつ、狭い国土の有効な利用を図れるので、地下立地の検討が各方面で進められている。大型重要構造物の地下立地にはいくつかの特徴があり、その特徴の1つとして、地下立地では通常の地上立地に比べ、耐震設計における地震入力を小さくできるので有利であると推測されている。したがって大型地下構造物の耐震設計を具体化するには地下空洞と地表との地震波の特性の違いを調べ、地下構造物の設計地震波を決定しなければならない。しかしながら、現在までにボーリング孔に埋設された地震計による地中地震記録は発表され¹⁾、そして大型の地下空洞については、鬼怒川発電所²⁾、沼原発電所³⁾について、空洞の上部の岩盤中の地震波動が観測され報告されているが、地下空洞の構造物周辺の詳細な観測はされていない段階のようである。

以上の観点から、神奈川県企業庁所属の城山水力地下発電所で地震観測を行い、1976年7月から1978年10月までの期間で71個の地震波が記録されたので、以下の目的に沿って地震波を解析し、大型地下構造物の今後の耐震設計に反映させることにした。

- (1) 地上と地下との最大加速度の比較
- (2) 地上と地下との地震波特性の比較
- (3) 地下空洞周辺の最大加速度の分布
- (4) 地下空洞周辺の地震波特性

2. 城山発電所の地山の地質状態、地震計設置場所および観測設備

(1) 地質状態

城山発電所地下空洞(高さ40m、幅20m、長さ110m)は、神奈川県津久井郡城山町川尻(東経139°17′、北緯35°35′)に建設されている。この発電所周辺の地質特性⁴⁾は図-1に示すように、時代未詳中世層の小仏層群に属する千枚岩状粘板岩、砂岩およびそれらの互層からなっており地下発電所地点としては比較的軟質な岩盤である。層理面の走向は一般にNW-SE、傾斜は60°~90°SWであり、全般的に片理、亀裂が顕著に発達した岩質であって、ボーリングの際ビット圧力で砕け、コア採取率はきわめて低い。弾性波速度は図-1に示すように、地表部の風化部を除いて、P波速度は3.4~4.3km/sであるが、S波速度分布は不明である。地上からおもに粗粒砂岩(不規則な石英脈を有することが多く、黒色粘板岩のチップを含む堅硬な岩石である)、粘板岩、千枚岩状粘板岩(千枚岩状粘板岩は本地点の大半を占めて分布し、剝離性に富む黒色の岩石である。部分的に層厚の5~30cmレンズ状チャートをはさむ。岩片は指でつぶせるほど堅硬にみえる部分でもハンマーで容易に崩し得る。これが発電所の大部分を占めている)、珪質粘板岩(珪質粘板岩は、ハンマーでたたくと金属性の音を発し、非常に硬質で割れにくく、割れ目は比較的密着している)などからなる地質である。また、地表部では風化が進み、岩石が緑泥石化してハンマーで容易に崩せることが多いという結果が報告されている⁴⁾。

(2) 地震計設置場所

地震計(加速度計)を設置した場所は、図-2に示すように、地上にC-1、C-2、調圧水槽への連絡通路にB-1、地下発電所にA-1、A-2、A-3、A-4の7か所である。設置場所の詳細を高い標高から順次以下に示す。

- 1) C-1: EL. 304.0m, 地上事務所の基礎面に設置。
- 2) C-2: EL. 304.0m, 地上事務所脇の岩盤上に設置。C-1が建屋の影響を受けるかもしれないと思

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所土木技術研究所地盤耐震部地下構造物研究室

** 正会員 工博 (財)電力中央研究所土木技術研究所副所長

*** 正会員 (株)建設企画コンサルタント

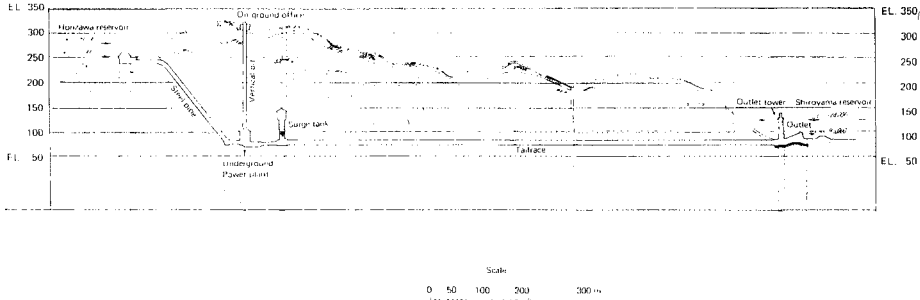


図-1 城山発電所付近の地形および地質図(断面図)

われたので C-2 を追加設置したが、後述の観測結果では、C-1 とほぼ同じ波形が記録されていることを確認した。

3) B-1 : EL. 140.0 m, 調圧水槽連絡通路のコンクリートライニングのインバート上に設置。この地点では、地下空洞天端より約 35 m も標高が高く、地下空洞の影響がない地下の岩盤の加速度が観測されたものと判断される。

4) A-1 : EL. 103.0 m, 地下発電所の天井アーチ部のはりの上に設置。この地点では、後述の観測結果によるとはりの振動の影響を受けて空洞天端の岩盤の加速度が精度よく観測されなかったように思われるが、地下構造物の頂部の主要部材の挙動として理解することにした。

5) A-2 : EL. 88.3 m, 地下発電所の発電電動機室の

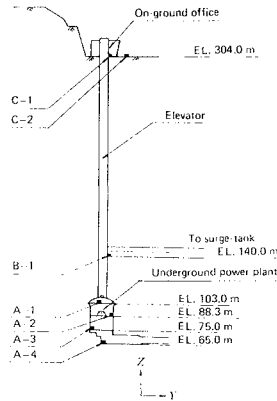


図-2 地震計設置位置(全体, 断面図)

床に設置。空洞高さのほぼ中央部であり、地震波に空洞の影響が最も大きく現われる地点と思われる。

6) A-3 : EL. 75.0 m, 地下発電所のタービンと水圧鉄管との取付部の床のコンクリート床に設置。

7) A-4 : EL. 65.0 m, 地下空洞最底部の排水ポンプ室のコンクリート床に設置。この地点では、地下空洞底部の岩盤の加速度が観測されているものと思われる。

なお、地下空洞における縦断方向両端の岩盤の影響が最も小さい横断面として、図-3 に示すように空洞長軸方向の中央部を選び、A-1, A-2, A-3 を設置した。

(3) 観測設備

各観測地点の測定成分は X, Y, Z 方向の3成分である。ここで、X 方向は地下発電所の長軸方向 (N 44°E), Y 方向は短軸方向 (N 46°W), Z 方向は鉛直方向である。増幅器、記録器などの計測装置は C 地点 (地上事務所)、B 地点 (調圧水槽通路)、A 地点 (地下発電所) の3か所に設け、C 地点と A 地点とは連動させ、C 地点に設置した自動起動器によって、C-1Y が 0.5 gal 以上になると C 地点と A 地点の計測装置が いっせいに起動するようにした。B 地点では他地点と連動する配線が困難であったので、B 地点の自動起動器により、B-1 Y の

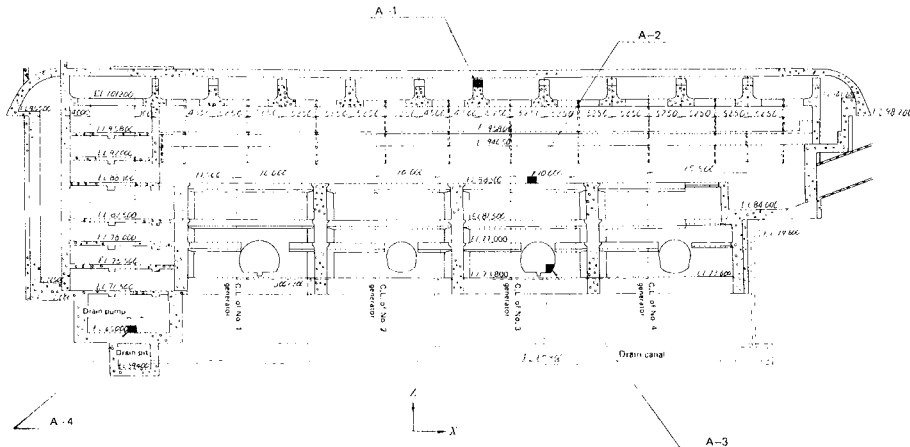
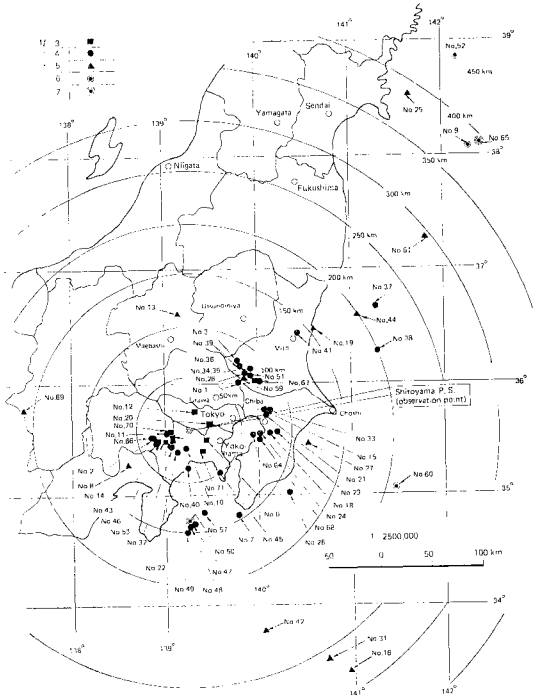
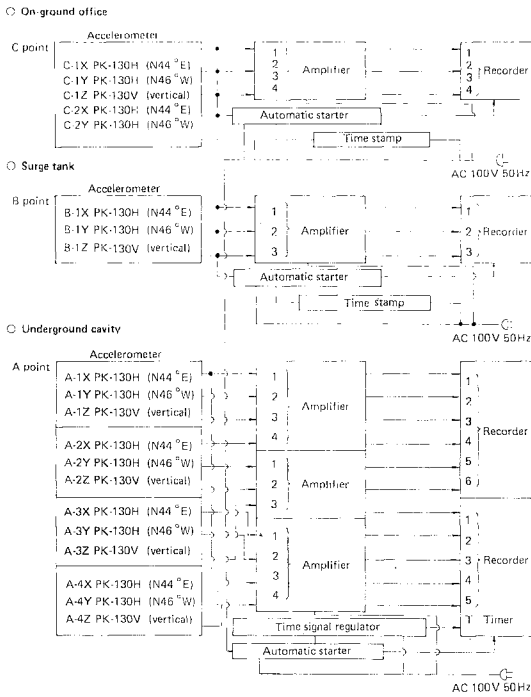


図-3 地下発電所の地震計設置位置 (A地点, 縦断面図)

表一 地震観測装置のブロックダイアグラム



図一 観測地震の震央位置

0.2 gal 以上で計測装置が起動するようにした。

観測装置のブロックダイアグラムを表一に示す。

3. 観測地震波の解析

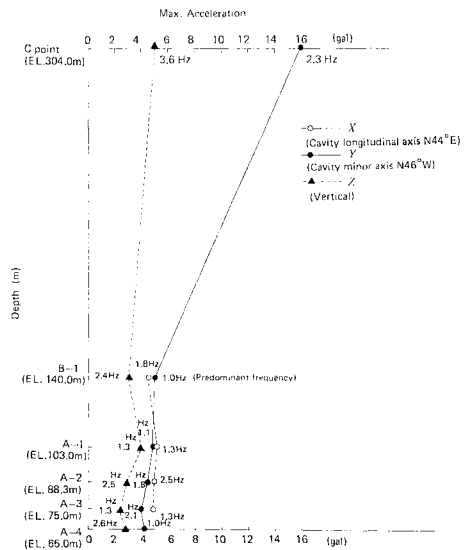
(1) 観測地震

観測された地震は、図一に示すように、1976年7月から1978年10月までの間に71個であり、マグニチュード (M) は2.9から7.4まで幅広く記録されている。その中で代表的なのが、No. 50の伊豆大島近海地震 (1978.1.14, 12:25, $M=7.0$) と No. 65の1978年宮城県沖地震 (1978.6.12, 17:16, $M=7.4$) である。

(2) 最大加速度

伊豆大島近海地震 (No. 50) では、図一5および図一7に示すようにC-1Y (地上部水平) で16.0 gal, B-1Y (地上と地下空洞の中間の地下部の水平) で5.0 gal, A-4Y (地下空洞底部水平) で4.2 gal が記録されており、また1978年宮城県沖地震 (No. 65) では、図一6, および図一8に示すように、C-1Y で7.6 gal, B-1Y で5.5 gal, A-4Y で5.9 gal が記録された。

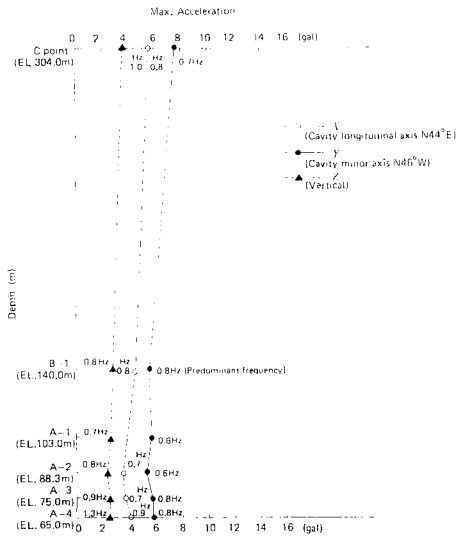
震源距離が90 kmの中距離地震である伊豆大島近海地震 (No. 50) では、地下に対して地上の増幅が大きく、また空洞内部における増幅も大きい。さらに水平方向に対する上下方向の比が大きく、中距離地震の特徴が明確



図一5 伊豆大島近海地震 (No. 50) の深度別加速度分布

に現われている。一方、震源距離が400 kmの遠距離地震である1978年宮城県沖地震 (No. 65) では地下に対して地上の増幅、および空洞内部の増幅が比較的小さく、水平方向に対する上下方向の比も小さい。また、卓越周波数も伊豆大島近海地震に比べ低く記録されている。なお、図一5および図一6に示した卓越周波数は最大加速度時の周波数である。

a) 各観測地点相互の最大加速度比



図—6 1978年宮城県沖地震 (No. 65) の深度別加速度分布

各観測地点相互の最大加速度の関係をプロットした図—9, 10 より以下のことが考察される。

1) C-1 (地上事務所基礎) と C-2 (地上事務所脇の岩盤上) はおおむね同じ最大加速度を記録しているので (図—9(1)), C-1 は建物の影響をほとんど受けていないと思われる。したがって、図—9(2) および図—9(3) に示した地上部と地下部との関係を求めるには、C-1 または C-2 のいずれかの最大加速度を用いた。

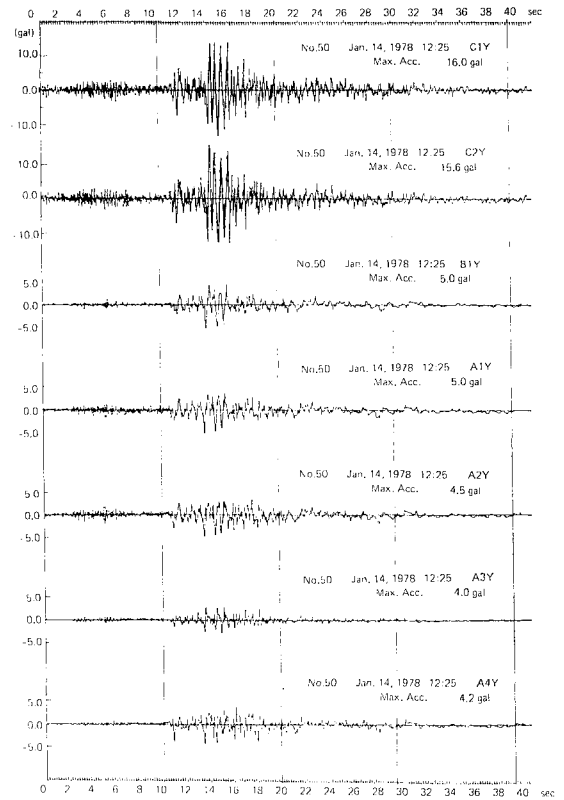
2) 地上の最大加速度に対する地下の最大加速度の比はおおむね $1/3 \sim 1$ の範囲であり、特に $1/2$ 前後に集中している (図—9(2), (3))。すなわち、地下 (B-1, A-4) の加速度は地上の加速度の約 $1/2$ であることがわかる。

3) 同じく地上と地下との比較 (図—9(2), (3)) において、上下方向 (Z 方向) の比は水平方向 (X, Y 方向) の比よりも 1 に近づいている。すなわち、地上における上下方向加速度は、水平方向ほどには地下の加速度に対して増幅していないことがわかる。

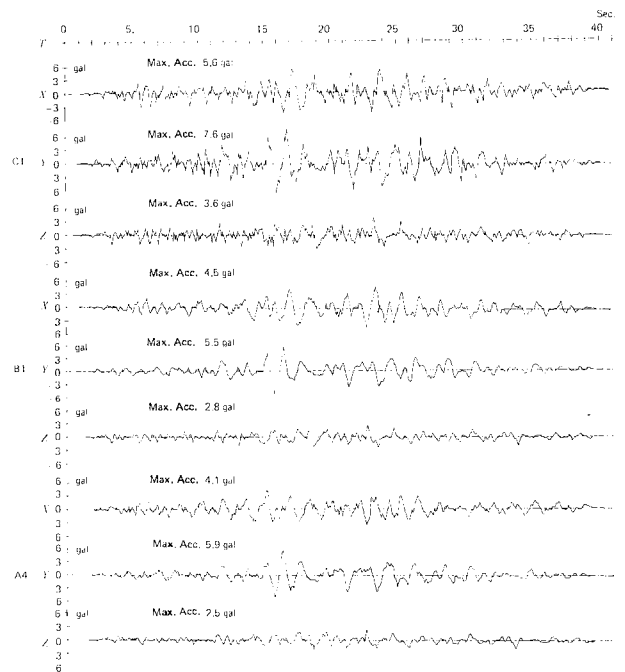
4) A-4 と B-1 との比較 (図—10(4)) では、比は 1 に集中しており、A-4 と B-1 とはほぼ同じ加速度を示している。このことから、B-1 は空洞掘削の影響を受けていない岩盤部と考えられるので、地下空洞底部も空洞掘削の影響が加速度の大きさに対して顕著に現われていないと思われる。この観測結果より地下空洞の耐震設計上の入力的位置としては、空洞の底面よりあまり低い位置をとらなくてもよいように思われる。

5) A-4 と地下空洞各点との比較 (図—10) で

は、A-1 (地下空洞アーチ部) および A-2 (地下空洞側壁中高部) は A-4 よりもいくぶん大きな加速度を示し



図—7 伊豆大島近海地震 (No. 50) の加速度波形 (Y成分)



図—8 1978年宮城県沖地震 (No. 65) の加速度波形

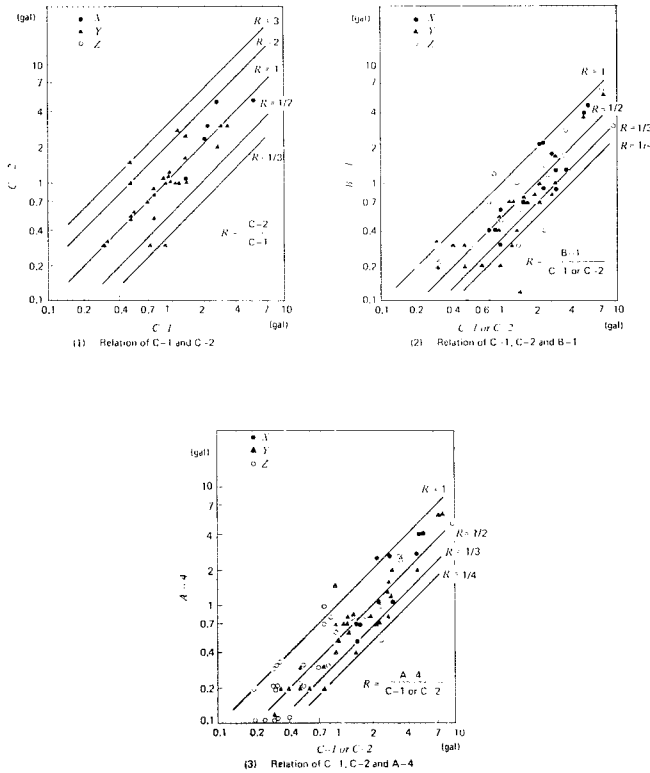


図-9 C-1 点と各点の最大加速度比

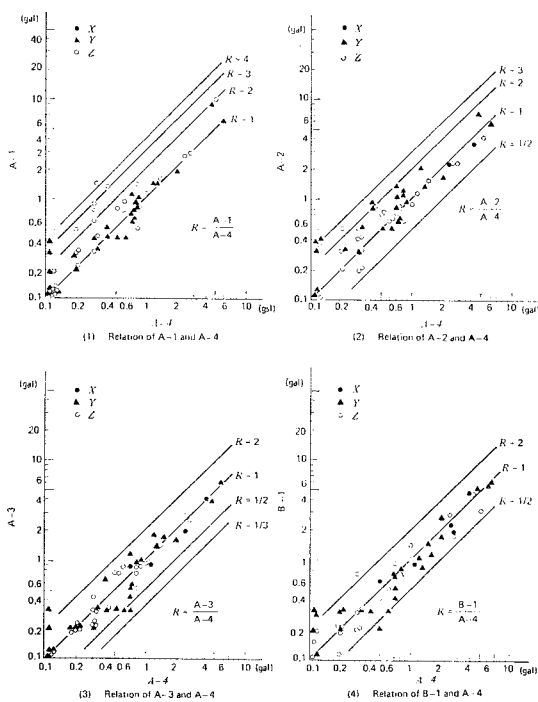


図-10 A-4 点と地下空洞各点の最大加速度比

ている。これより、地下空洞内部においても、局所的に加速度が増幅される傾向にあると思われる。

6) A-4 と A-1 との比較 (図-10(1)) では、特に Z 方向の比が 1~4 の範囲に多く含まれている。この現象は、A-1 の加速度計が空洞アーチ部のはり上 (図-2, 3) に設置されたため、空洞アーチ部の岩盤の加速度が測定されたのではなく、はりの振動によって増幅した加速度が測定されたものと考えられる。

b) 上下動と水平動の最大加速度比

各観測点における上下動と水平動との最大加速度比を示した図-11, 12 より以下のことが考察される。

1) 地上部における水平動の最大加速度に対する上下動の最大加速度の比は 1/2~1 の範囲に集中している (図-11(1))。しかし、これらの記録は 10 gal 以下の弱震地震である。10 gal 以上の地震では、図-5 に示した伊豆大島近海地震記録ならびに野田⁹⁾らの報告のように、比が 1/2 以下になる傾向にあるように思われる。

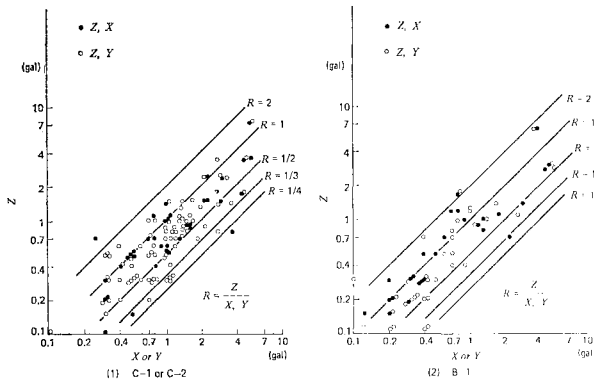
2) 地下では、地上と比べ比が大きい (図-11(2))。これより、上下動は地下より地上に伝播する過程において水平動ほどには増幅しないことがわかる。

3) A-1 では比が 1 に多くプロットされている (図-12(1))。これは A-1 の換振器が設置されている空洞アーチ部のはり自体の振動により、上下動が増幅したものと考えられる。

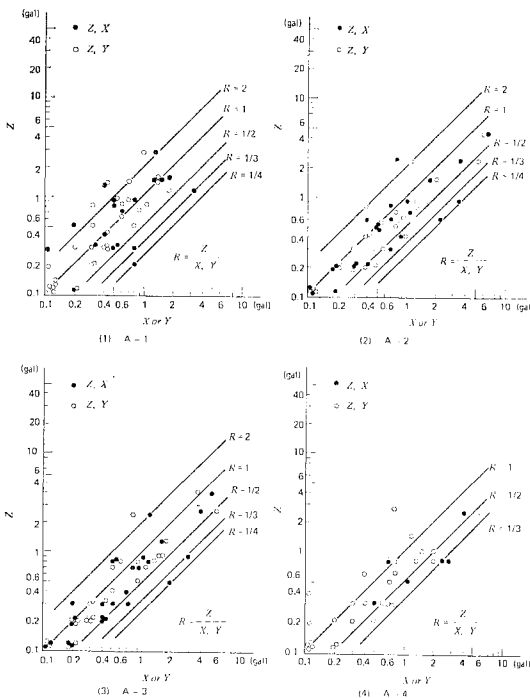
c) 地下空洞の短軸方向と長軸方向との最大加速度比

地下空洞における空洞長軸方向 (X 方向) と空洞短軸方向 (Y 方向) との最大加速度の関係を 図-13 に示す。

A-2 では短軸方向の加速度が長軸方向よりも大きくプロットされているが、A-1 では短軸方向よりも長軸方向の加速度が大きくプロットされている。空洞の長軸方向と短軸方向とで、いずれの方向の加速度が大きいかは、震源の方向にも関係すると思われるが、一般的には地下空洞の設計においては、A-2 の現象のように加速度が大きいと思われる空洞短軸方向鉛直断面について検討されるというのが通例である。



図一11 地上および地下における上下動と水平動との最大加速度比



図一12 地下空洞各点における上下動と水平動との最大加速度比

A-1 ははりの上に設置してあるため、この影響により長軸方向の加速度が大きくなったものと考察される。

d) 最大加速度比と震源距離との関係

地上の加速度に対する地下の加速度の比は、震源距離との関係では、図一14 のように同じ震源距離であっても、地上・地下の加速度比にかなりのばらつきがあり、顕著な相関が認められない。

次に、各観測点における水平動に対する上下動の比と震源距離との関係では、図一15 より、震源距離が短いところで、上下・水平最大加速度比が比較的大きくなるものがある。しかし震源距離の全領域において、特に明確な相関はみられない。上下・水平最大加速度比は震源

距離よりも、地震の発震機構ならびに伝播機構の影響を大きく受けるように思われるがまだ資料が十分でない。

e) 最大加速度と震源距離、マグニチュードの関係

地上部において観測された最大加速度 a_R と震源距離 R およびマグニチュード M との関係を図一16 にプロットしてみた。図一16 にプロットされたうちで、測定精度が悪い最大加速度の小さい値を除いて、べき乗の回帰分析により、水平成分および上下成分におけるマグニチュード別の最大加速度と震源距離との関係を図のような曲線で表わすことができる。これを式に表わすと次のようになる。

水平成分

- 1) $3.5 \leq M < 4.5$ (地震観測数 $N=11$)
 $a_R = 161.2 \cdot R^{-1.09}$
- 2) $4.5 \leq M < 5.5$ (地震観測数 $N=11$)
 $a_R = 2389.3 \cdot R^{-1.49}$
- 3) $5.5 \leq M < 6.5$ (地震観測数 $N=5$)
 $a_R = 2800.7 \cdot R^{-1.37}$

上下成分

- 1) $3.5 \leq M < 4.5$ (地震観測数 $N=9$)
 $a_R = 291.5 \cdot R^{-1.28}$
- 2) $4.5 \leq M < 5.5$ (地震観測数 $N=13$)
 $a_R = 2607.9 \cdot R^{-1.63}$
- 3) $5.5 \leq M < 6.5$ (地震観測数 $N=6$)
 $a_R = 9584.2 \cdot R^{-1.74}$

ここに、 a_R : 最大加速度 (gal)

M : マグニチュード

R : 震源距離 (km)

N : 地震観測数

である。

なお、地表面における水平成分の最大加速度推定式として、一般に用いられている金井式⁹⁾は次のように示され、観測式と金井式の比較を図一17 に示す。

金井式 :

$$a_R = 10^A \cdot 5 / \sqrt{T_G} \dots \dots \dots (1)$$

$$A = 0.61 M - (1.66 + 3.60/R) \cdot \log R$$

$$+ (0.167 - 1.83/R)$$

$$T_G : \text{卓越周期 (s)}$$

図一17 に示された金井式に使用した T_G の値は、図一16 にプロットされた観測値の平均の卓越周期をとった。

城山発電所での式は、金井式に比べて、全体的にかなり下回っていることがわかる。城山発電所での式の M を

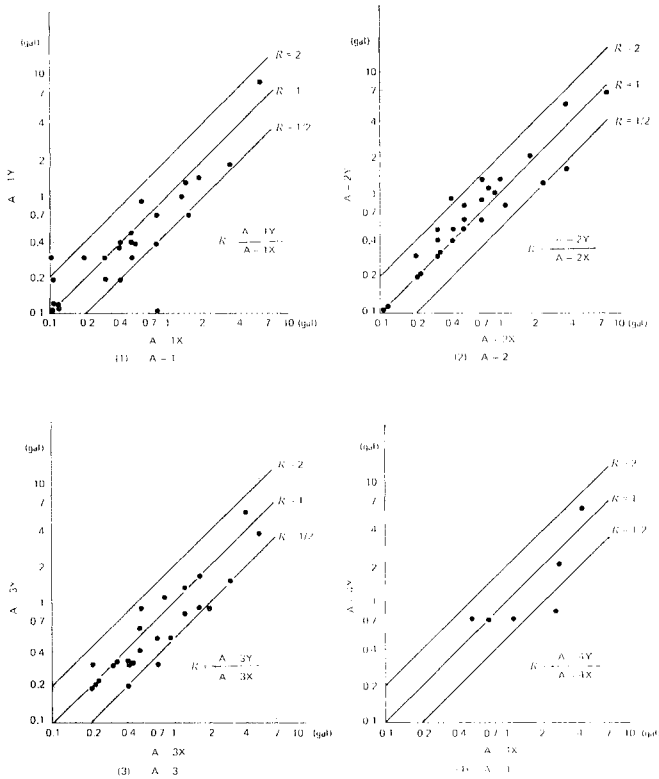


図-13 地下空洞における X 方向と Y 方向との最大加速度の関係

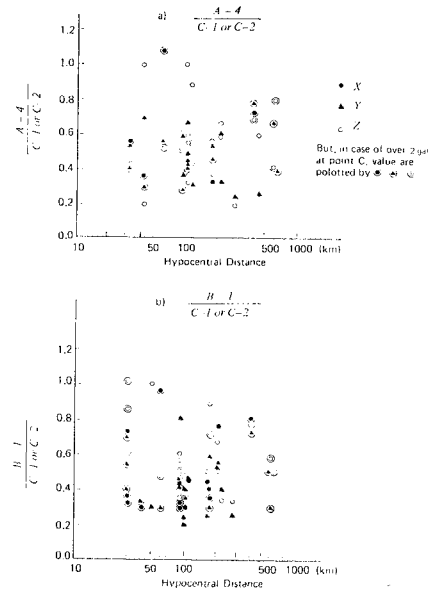


図-14 地下部/地上部と震源距離の関係

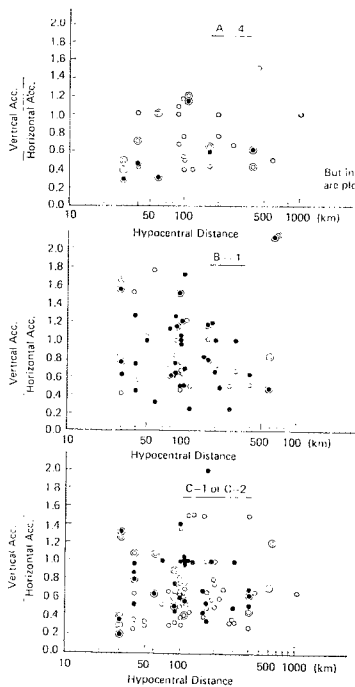


図-15 上下動/水平動と震源距離の関係

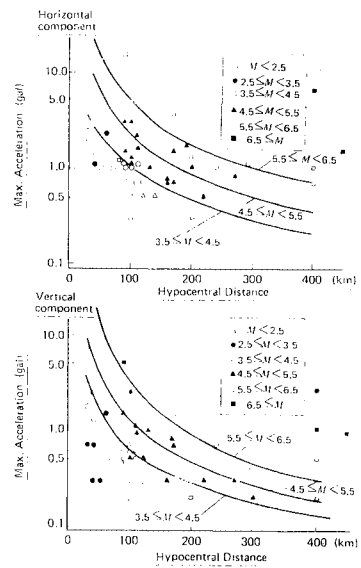


図-16 最大加速度と震源距離とマグニチュードとの関係 (地上部: C-1 または C-2)

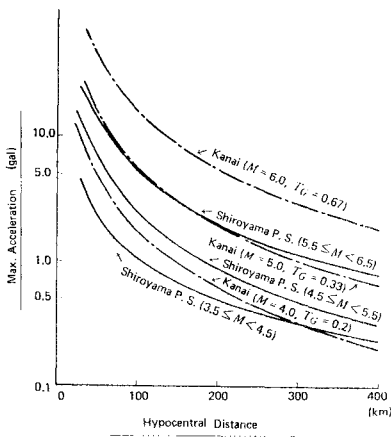
0.5~1.0 大きくすれば、金井式との整合はよくなるようである。これは、金井式は軟質な地表層上の予測式であるのに対して、城山発電所での式は地表岩盤上の観測記録による式であるためと考えられる。

同様に、地下部 (B-1) におけるこれらの関係を 図一18 に、地下空洞底部 (A-4) におけるこれらの関係を 図一19 に示す。ここで、図一19 の地下空洞底部 (A-4) におけるこれらの関係を式に表わすと次のようになる。

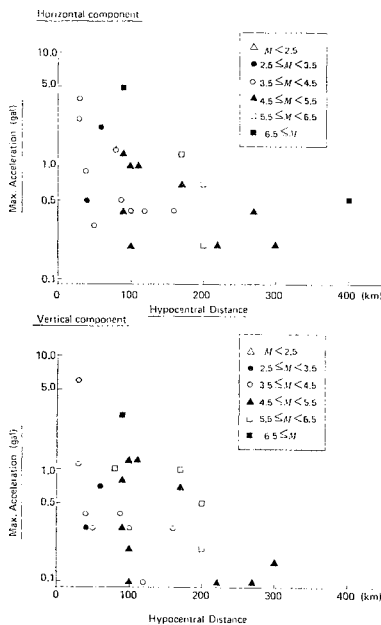
水平成分

1) $3.5 \leq M < 4.5$ ($N=5$)

$a_R = 1089.5 \cdot R^{-1.85}$



図一17 城山発電所地上部における水平成分の最大加速度観測式と金井式との比較



図一18 最大加速度と震源距離とマグニチュードとの関係 (地下部: B-1)

2) $4.5 \leq M < 5.5$ ($N=5$)

$a_R = 322.6 \cdot R^{-1.28}$

上下成分

1) $3.5 \leq M < 4.5$ ($N=7$)

$a_R = 19.6 \cdot R^{-0.98}$

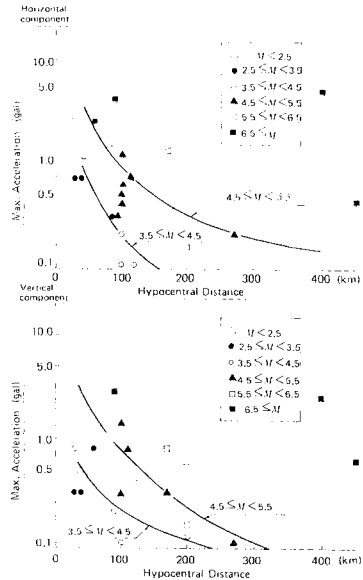
2) $4.5 \leq M < 5.5$ ($N=6$)

$a_R = 1152.2 \cdot R^{-1.64}$

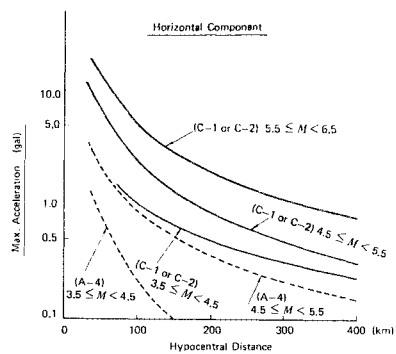
地上部と地下部におけるこれらの関係を 図一20 に示す。地下部は地上部に対して明らかに下回っているのがわかる。このことは、地上部と地下部との最大加速度の比によってさきに確かめられているが、ここではマグニチュード・震源距離という要因を組み入れても、同様なことが確認された。

(3) 地下空洞の振動モード

地下空洞の振動モードを調べるために、図一21 およ



図一19 最大加速度と震源距離とマグニチュードとの関係 (地下空洞底部: A-4)



図一20 地上部と地下空洞底部における最大加速度の比較

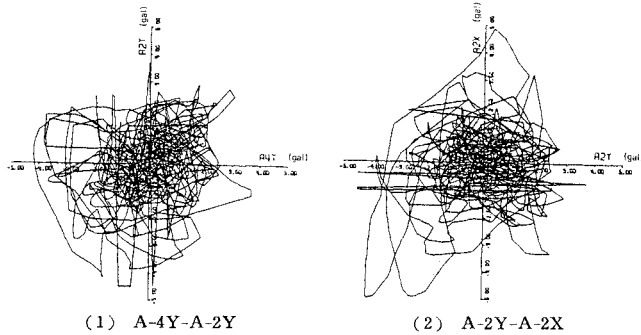


図-21 地下空洞における振動成分別位相相関 (伊豆大島近海地震の場合)

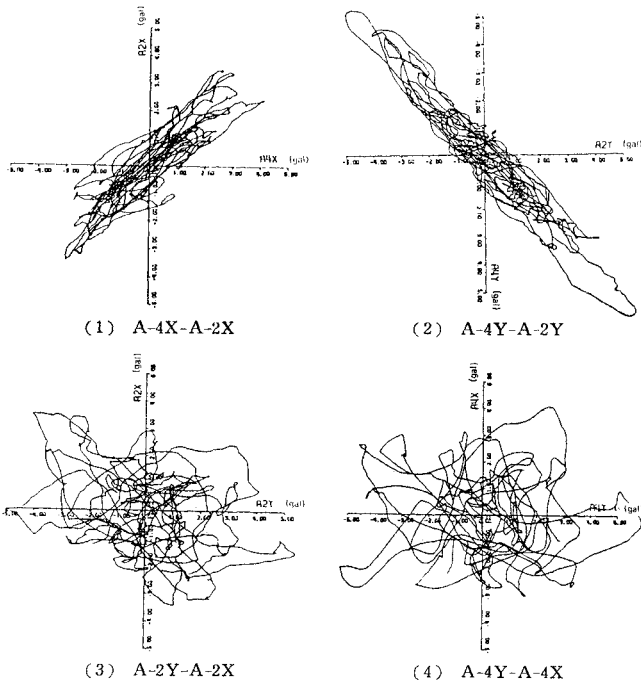


図-22 地下空洞における振動成分別位相相関 (1978年宮城県沖地震の場合)

び 図-22 に示すような振動成分別位相相関を描いてみた。観測された地震の代表として、図-21 に伊豆大島近海地震 (No. 50)、図-22 に 1978 年宮城県沖地震 (No. 65) を取り上げた。

図-21 に示す伊豆大島近海地震では、中距離地震でしかも、高周波地震であるため、顕著な正の位相相関は認められない。すなわち、ある点の最大振幅のときに、他の点は必ずしも最大振幅を生じないことが示されている。

図-22 の 1978 年宮城県沖地震では、遠距離地震で 1 Hz 以下の低周波数が卓越しているために、位相相関が明らかに現われている。A-4 と A-2 の位相相関は X 方向 (空洞長軸)、Y 方向 (空洞短軸) とともに正の相関であり、同位相となって単純な振動モードとなっている。また、A-2 および A-4 の各点における X 方向と Y 方

向との相関では、ある程度逆位相の Y 方向に強く引き寄せられたモードになっている。すなわち、空洞短軸方向が空洞長軸方向よりも大きな加速度が生じていることがわかる。

(4) 周波数特性

a) パワースペクトル

おもな地震の主要動のパワースペクトルおよび地上と地下空洞底部とのパワースペクトル比をそれぞれ 図-23 および 図-24 に示す。地上部、地下空洞底部とも、地震により周波数特性が異なり、一般的、かつ共通的な周波数特性は現われていない。しいて周波数特性を評価すれば次のようになる。

- 1) 伊豆大島近海地震 (No. 50) は中距離地震のため高周波数の減衰が少ない。
- 2) 1978 年宮城県沖地震 (No. 65) は遠距離地震のため地上部、地下空洞底部とも 1 Hz 付近の低周波数が卓越し、高周波数の減衰が著しい。
- 3) 一般には、地下部では、地上部よりも岩盤の剛度が大きくなるため、地震の卓越周波数が高くなり、パワースペクトルの地上部に対する地下部の比は、周波数が高くなれば、一般には大きくなることが考えられる。しかし、城山発電所の観測結果では、この傾向が顕著にはみられない。

b) ランニングスペクトル

地震波の周波数特性の経時変化を調べる目的で、図-25 に示す伊豆大島近海地震 (No. 50) (図-6 の原波形を参照) のランニングスペクトルを求めた。このランニングスペクトルは初期動から 20.48 秒間について各スペクトル解析区間を 2.56 秒 (標本値個数 256) とし、0.5 秒ずつ時間をずらし (スキップ間隔 0.5 秒、スキップ個数 50)、スペクトル解析個数 34 個から構成されている。また、図-25 では次のように 2 通りの表示をした。

- 1) 解析する地震波において卓越周波数が何秒後に現われるかを求める目的で、各スペクトルでのパワーの最大値の中で 1 番大きいものを 1.0 として全体を正規化した表示
- 2) 各スペクトルにおける卓越周波数がどのように経時変化をするかを求める目的で、各スペクトルでのパワーの最大値を 1.0 として、各スペクトルで正規化した表示

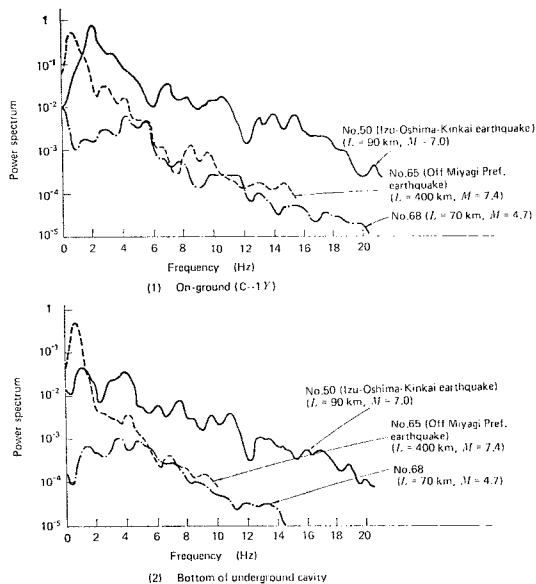


図-23 おもな地震の主要動部のパワースペクトル

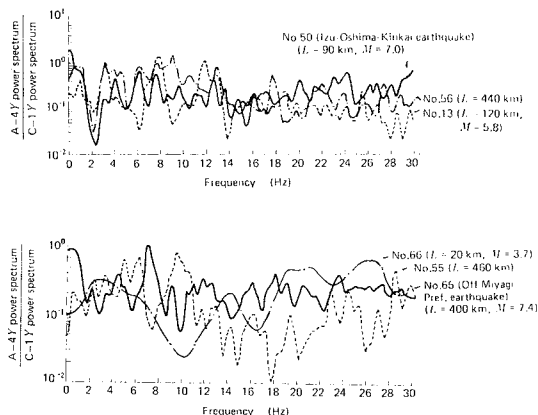


図-24 地上部と地下空洞底部とのパワースペクトル比

地上、地下ともに最大振幅を含む主要動は約 13 秒後に始まり、主要動の卓越周波数は地下空洞底部では 1.5 Hz と 4 Hz 付近、地中および地上部では 2 Hz 付近に現われている。これより、2 Hz 付近での地中増幅が大きいことがわかる。次に、主要動以前の初期微動時の卓越周波数は地上部で 14~20 Hz、地中で 8~12 Hz、地下空洞底部で 8 Hz 前後である。地上部における高周波発生は、山頂付近の複雑な地形、および地層構造の影響によるものかと考えられる。

c) 周波数と地中増幅の関係

地下空洞底部に達した地震波が、周波数の違いによって地下空洞、および地下部でどのように増幅するかを調べるために、A-4 の最大加速度に対する各観測点の最大加速度の比を、A-4 における地震波の最大加速度時の周波数ごとに区別して、図-26 のように表示した。

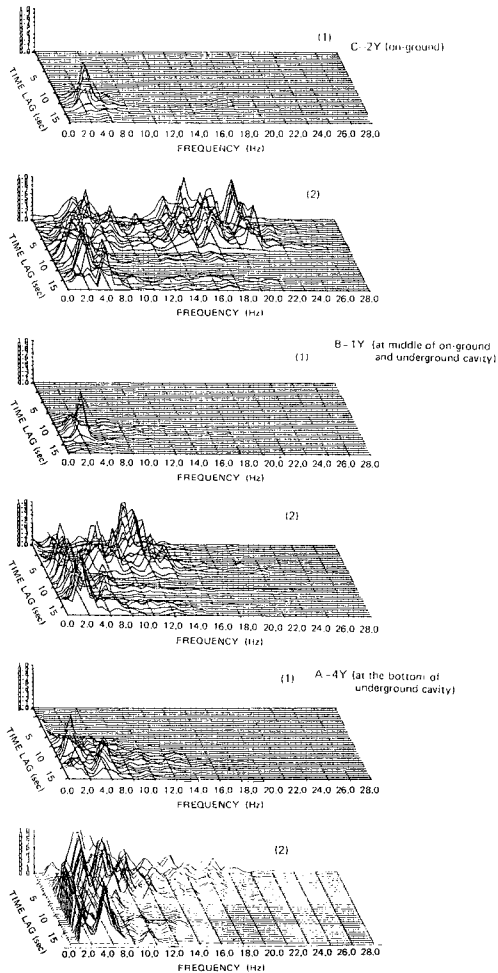


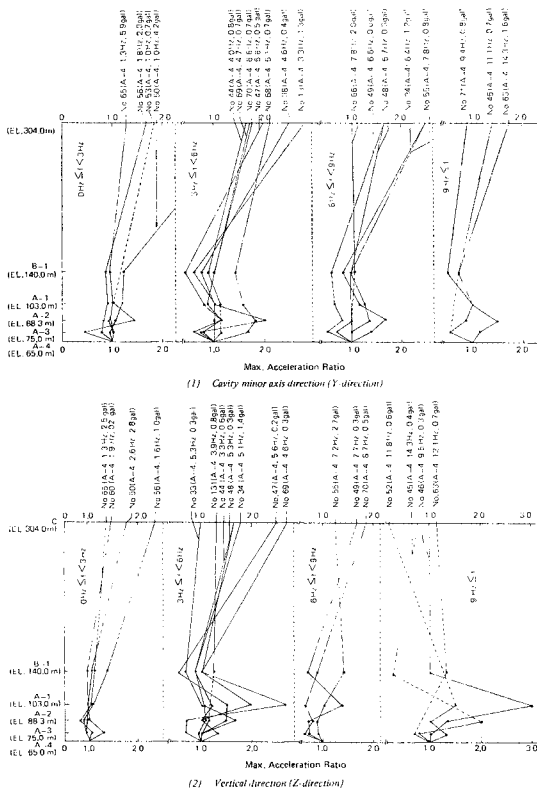
図-25 ランニングスペクトル (伊豆大島近海地震の場合)

これより以下のことが考察される。

- 1) 地上部での増幅は水平、上下方向とも 0~3 Hz の低周波数では比較的小さいが、伊豆大島近海地震 (No. 50) では、水平成分 (Y 方向) の 3.8 倍の大きな増幅になっている。3~9 Hz では地上部での増幅は大きく、9 Hz 以上では小さくなる傾向にある。
- 2) 地下部の B-1 での増幅はほとんどみられず、A-4 よりもむしろ減衰している場合が多い。
- 3) 地下空洞における増幅は、水平方向では A-2 で大きく、上下方向では A-1, A-2 で大きくなっている。A-2 における増幅は、水平、上下方向とも 3~6 Hz 付近が大きく、A-1 における上下方向の増幅ははりの振動の影響により、3~6 Hz で特に顕著である。

4. 結 語

現在、各種の大型地下構造物の建設が進められている



図—26 周波数別最大加速度比の分布

が、これらの重要地下構造物の設計地震入力に関する資料を得るために城山地下発電所で地震観測を実施し、1976年7月から1978年10月までの期間71個での地震が観測された。そのうちで代表的な地震は、伊豆大島近海地震(1978年1月14日、12時25分、 $M=7.0$)と1978年宮城県沖地震(1978年6月12日、17時16分、 $M=7.4$)である。そして観測記録より以下の結果が得られた。

(1) 地上の最大加速度に対する地下の最大加速度の比は、おおむね1/3~1の範囲であり、特に1/2前後に集中している。

(2) 地下空洞底部では、空洞掘削による加速度の増加は顕著に現われていない。したがって、耐震設計上の入力の位置としては空洞底部より特に深くをとる必要はあまりないと思われる。

(3) 地下空洞内部において、局所的に加速度が増幅される傾向にあると思われる。しかし、この傾向は地上式の発電所の場合と比べると著しく小さい。

(4) 地上における水平動の最大加速度に対する上下動の最大加速度比は1/2~1の範囲に集中している。

(5) 地下では上述の比が地上に比べて大きくなっている。これより、上下動は地下より地上に伝播する過程において水平動ほどには増幅しないことがわかる。

(6) 地下空洞の側壁の中上部では、空洞長軸方向よりも空洞短軸方向に大きな加速度が生じている。

(7) 地上の最大加速度に対する地下の最大加速度の比、および各観測点における水平動の最大加速度に対する上下動の最大加速度の比と震源距離との関係には、顕著な相関が認められなかった。

(8) 地上・地下とも良好に記録された地震においてそれぞれ周波数特性が異なるため、明確な周波数特性は、顕著には現われていない。しかし、強いというならば、1978年宮城県沖地震(No. 65)のような遠距離地震では1 Hz付近の低い周波数が卓越し、高い周波数の減衰が著しい。一方、伊豆大島近海地震(No. 50)のような中距離地震では5~6 Hzの比較的高い周波数が卓越し、高い周波数の減衰が少ない。

(9) 地下空洞の主要各点の振動成分の位相相関を調べたところ、伊豆大島近海地震(No. 50)は、この観測地点では中距離地震(90 km)であり、高周波地震であるために、顕著な正の相関は認められない。すなわち、ある観測点の最大振幅のときに、他の観測点は必ずしも最大振幅を生じていない。一方、1978年宮城県沖地震(No. 65)は、遠距離地震(400 km)で、1 Hz以下の低周波数が卓越し、明らかに正の相関があり、単純な振動モードとなっている。

(10) 伊豆大島近海地震(No. 50)のランニングスペクトルを、地上、地中、地下空洞底部の3か所で求めたところ、いずれも最大主要動は約13秒後に始まり、その卓越周波数は地下空洞底部で1.5 Hzと4 Hz付近、地中および地上で2 Hz付近であった。次に、主要動以前の初期微動時の卓越周波数は地下空洞底部で8 Hz、地中で8~12 Hz、地上で14~20 Hzであった。地上で高周波数が卓越するのは、山頂付近の複雑な地形、および地層構造の影響によるものかと考えられる。

謝 辞：城山発電所に地震計を設置させていただき地震観測にご協力下さった神奈川県企業庁の関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 大松沢恭一：福島原子力発電所における地震観測，火力発電，Vol. 22, No. 1, pp. 90~97, 1971年1月。
- 2) Tamura, C., S. Okamoto and H. Kawakami: Earthquake ground motion at rocky ground interspersed with thin soft layers. Bull. Ers. No. 10, 1976.
- 3) 市川芳忠・宥賀義明：地下空洞の地震時挙動観測例，土木学会第15回地震工学研究発表会，pp. 169~172, 1976年7月。
- 4) 野田・浜田：相模川総合開発事業(その3)(I)城山地下発電所工事，発電土木，No. 81, pp. 24~44, 昭和41年3月。
- 5) 野田：強震記録の上下動に関する一考察，第14回地震工学研究発表会概要，pp. 93~96, 1976年7月。
- 6) 金井 清：地震工学，共立出版株式会社，pp. 95~96, 昭和48年。