

(15) 地下発電所空洞周辺における地震観測

(財) 電力中央研究所 正員 ○駒田広也 正員 林 正夫
 (株) 建設企画コンサルタント 正員 堀田 光

1. まえがき

大型重要構造物の地下立地の検討が、各方面で進められている。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。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。以上の観点から、城山水力地下発電所（空洞の土被り200m、空洞高さ40m、空洞長さ110m、空洞幅20m）で地震観測を行い、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および地震波特性の比較、(2)地下空洞の最大加速度および最大動ひずみの分布、(3)地下空洞の地震時挙動。

2. 観測地点

城山発電所は神奈川県北部（東経139°17'、北緯35°36'）に位置し、周辺の地質特性は、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いる。（図-1）

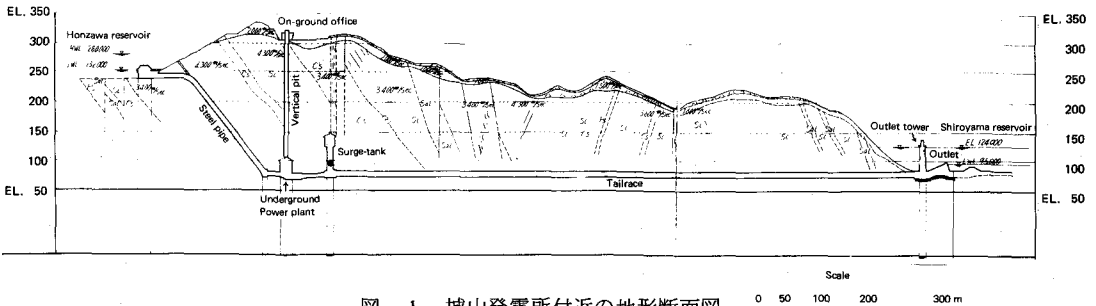


図-1 城山発電所付近の地形断面図

観測地点は図-2に示すように、A点として城山地下発電所空洞壁面（加速度計4点、動ひずみ計1点）、B点として地下空洞周辺（加速度計2点、動ひずみ計1点）、C点として地上事務所（加速度計3点）、D点として城山発電所から南東に2.6kmの地点に位置する津久井発電所（東経139°18'、北緯35°35'）の鉄管路監査坑口（加速度計1点）の4地点に大別される。加速度計は各点3成分であり、X方向は地下発電所の長軸方向（N44°E）、Y方向は短軸方向（N46°E）、Z方向は鉛直方向である。使用している加速度型換振器の周波数特性を図-3に、動ひずみ計の構造を図-4にそれぞれ示す。

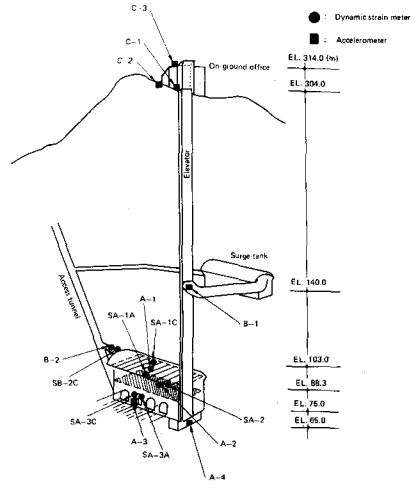


図-2 加速度計および動ひずみ計の設置位置

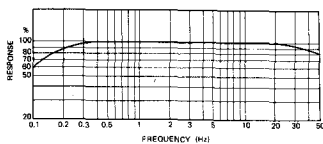


図-3 加速度計周波数特性

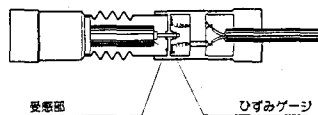


図-4 動ひずみ計の構造

3. 観測地震

観測された地震は、図-5に示すように、1976年7月から1980年8月までの125個であり、その中で代表的なのが、 M 5.0の伊豆大島近海地震(1978.1.14, 12:25, $M=7.0$)、 M 6.5の宮城県沖地震(1978.6.12, 17:16, $M=7.4$)、 M 1.18の1980年6月29日伊豆半島東方沖地震(1980.6.29, 16:20, $M=6.7$)である。図-6に M 1.18地震の各測点の最大振幅値を示す。

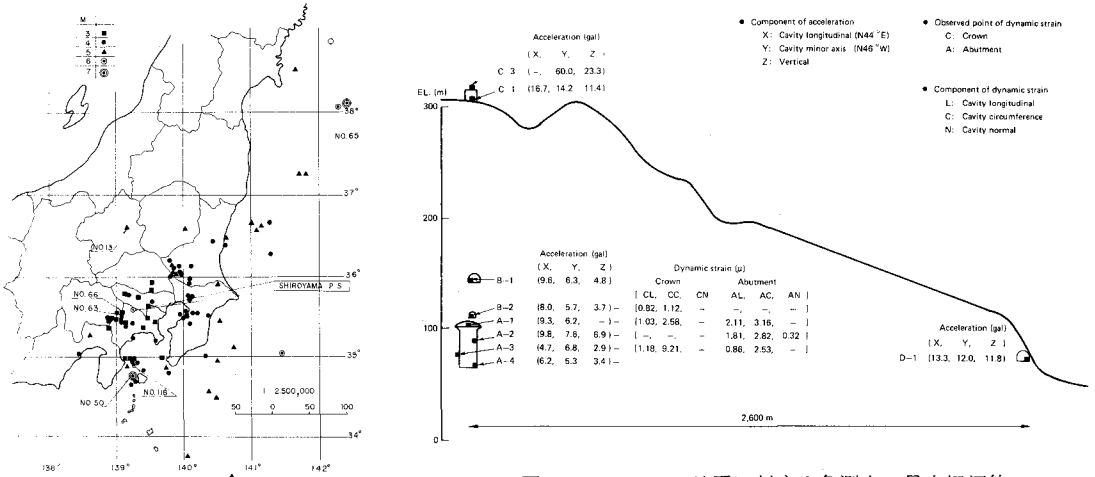


図-6 M 1.18地震に対する各測点の最大振幅値

図-5 観測地震の震央位置

4. 各観測点相互の最大加速度比

(i)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 $\frac{1}{3} \sim 1$ の範囲であり、特に $\frac{1}{2}$ に集中している。(図-7)、(ii)地表面の高低差(D点とC点の高低差230m)による最大加速度比は、1~2の範囲である。山麓から山頂にかけて、最大加速度振幅値が増幅される。(図-8)、(iii)地下空洞底部(A-4)に対して地下空洞中高部(A-2)はいくぶん大きな加速度を示している。これより、地下空洞内部においても局部的に加速度が増幅される傾向にあると思われる。(図-9)

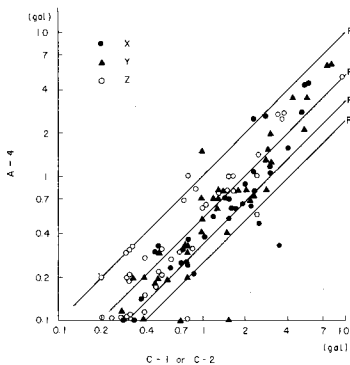


図-7 地上と地下空洞底部の最大加速度

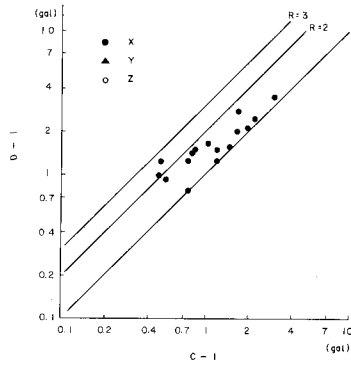


図-8 山頂と山麓との最大加速度比

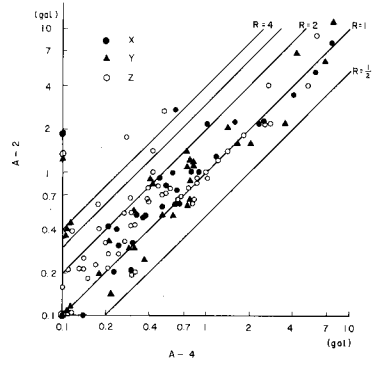


図-9 地下空洞底部と地下空洞中高部の最大加速度比

5. 各観測点相互の周波数特性の相関

各観測点間の周波数特性の相関あるいは伝達関数を調べる目的で、次式のパワースペクトル振幅比を解析し、

その結果の一例を図-10に示す。

$T(f) = \sqrt{P_1(f)/P_2(f)}$ $P_1(f), P_2(f)$ はパワースペクトルである。

地下部(B-1)から地上部(C-1)までの伝達関数は、水平動より上下動の方が概して小さいが、水平動Y方向で2.5~40 Hz, 上下動で4.5~6.0 Hz付近にピークが見られる。この値は観測した地点の地盤特性を表わしているものと考えられる。つぎに、地下空洞底部(A-4)から地下空洞中高部(A-2)までの伝達関数は、水平動, 上下動ともに、10 Hz以上の高周波数域でいくぶん大きくなっている。この現象は地下空洞の周波数特性を表わしているものと考えられる。

6. 加速度応答スペクトル

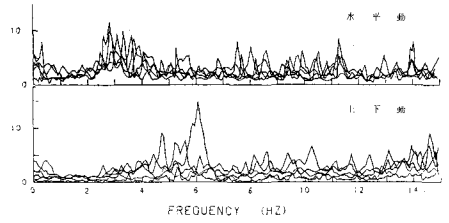
規準化加速度応答スペクトルを、以下の震源距離(R)別に求め、地上(C-1)と地下空洞底部(A-4)の水平動および上下動の解析結果を図-10に示す。

①近距離 $R < 50 \text{ km}$ (No. 63, No. 66), ②中距離 $50 \text{ km} \leq R < 200 \text{ km}$ (No. 13, No. 50, No. 68), ③遠距離 $200 \text{ km} \leq R$ (No. 56, No. 65)

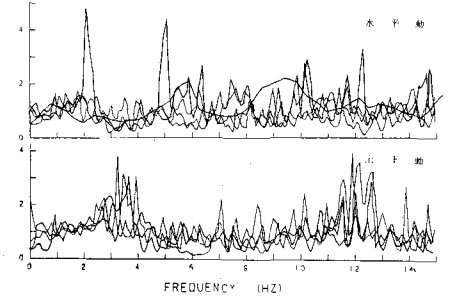
地表, 地下共に, そして水平動, 上下動共に, 近距離地震では短周期成分が卓越し, 遠距離地震では長周期成分が卓越していることが認められる。しかし, 地表と地下の差は, 水平動, 上下動共に, ほとんど認められず, さらに, 同地点の水平動と上下動の差もほとんど認められない。

7. 地下空洞の振動モード

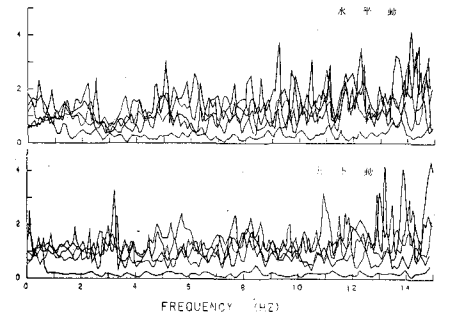
地下空洞の加速度および動ひずみの振動モードを調べる目的で, No. 118地震について, 各観測点における振動軌跡, および各観測点間の同一方向の振動履歴相関を解析した。その結果を図-12に示す。そして代表的な時刻における地下空洞の動ひずみ分布を



a) 地上部(C-1)/地下部(B-1)



b) 地下部(B-1)/地下空洞底部(A-4)



c) 地下空洞中高部(A-2)/地下空洞底部(A-4)

図-10 パワースペクトル振幅比

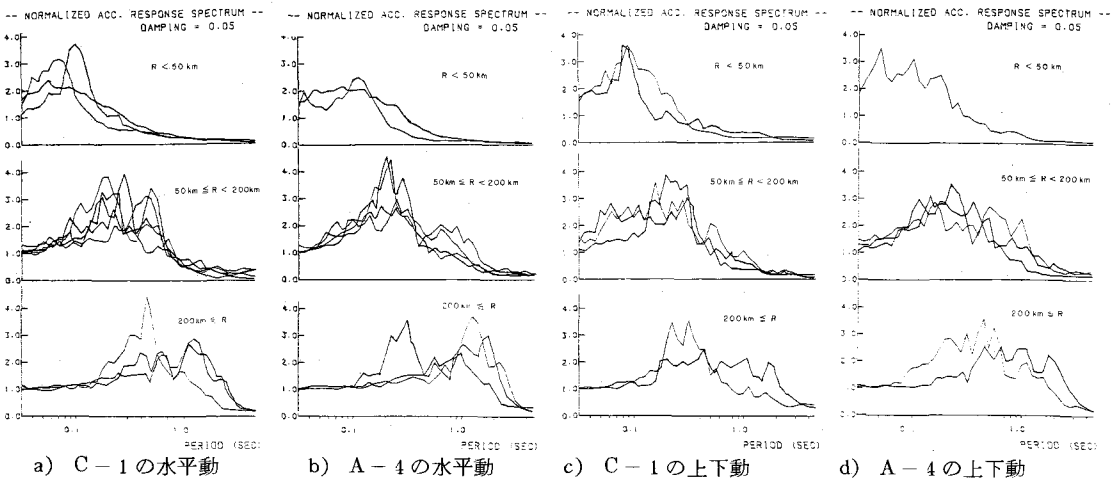


図-11 加速度応答スペクトル

図-13に示す。図-12より、地下空洞の長軸方向と短軸方向の加速度履歴の相関はほとんど見られないが、同一方向の各点間の加速度履歴には、位相ずれがほとんどなく、単純な振動モードを呈していることがわかる。図-13より、地下空洞の変形モードは、セン断振動ではなく、空洞周方向ならびに空洞長軸方向において一様な膨張・収縮挙動を呈していることがわかる。地下空洞の振動モードは入力地震波に大きく依存することが考えられるので、他の観測地震波についても検討の予定である。

8. 加速度と動ひずみの関係

№118地震について、図-14に示すように、地下空洞の観測加速度は、水平方向で3.5~6.5 Hz、鉛直方向で3 Hz 付近の卓越周波数を有しているのに対して、地下空洞の動ひずみは0.1Hz が卓越している。また、動ひずみの最大値が生じる時刻は加速度の最大値が生じた時刻よりも約1.2秒遅れている。この現象は、観測加速度を積分³⁾して得られた速度波が約0.1Hzで振動し、観測動ひずみ波と非常によく似ていることから理解できる。この対応は貴重な資料として、今後ともひずみ解析による地下空洞の耐震設計法の確立のために、理論的検討を続けることにしたい。

9. あとがき

以上、城山地下発電所で観測されたおもな地震波について、パワースペクトル、応答スペクトルおよび振動モードなどを紹介した。今後も観測を継続する一方、動的応答解析によって、これらの実測波をシミュレーションして、地下空洞の動的挙動の予測法を確立していきたいと考えている。

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) 駒田広也, 林正夫, 堀田光: 地下発電所空洞における地震観測, 土木学会論文報告集 第309号・1981年5月, PP.91~101
- 2) 駒田広也, 林正夫: 地下発電所空洞周辺における地震観測 - 1980年6月29日伊豆半島東方沖地震 - 電研報告380030 昭和55年12月
- 3) Trifunac, M.D. "Zero Baseline Correction of Strong Motion Accelerograms" B.S.S.A. Vol. 61, №5, 1971

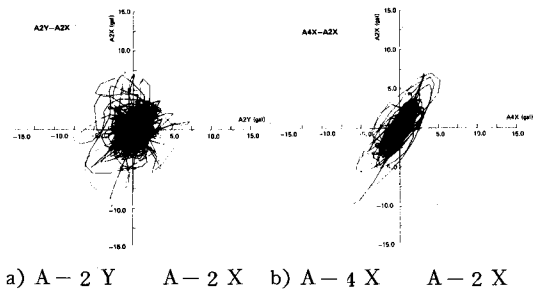


図-12 地下空洞における加速度履歴(№118)

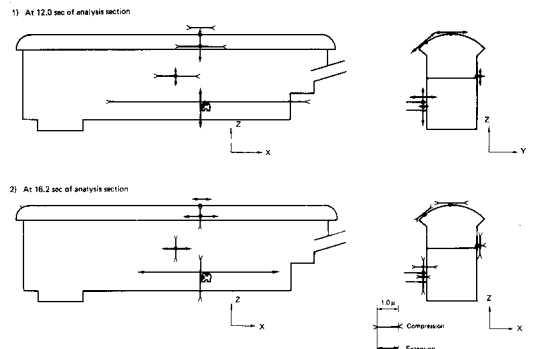


図-13 地下空洞の動ひずみ分布(№118)

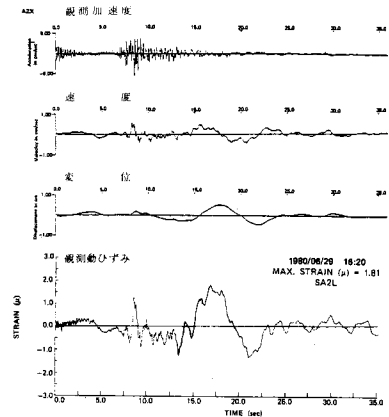


図-14 観測加速度波を積分した波と観測動ひずみ波の比較(№118)