

傾斜地に建設された構造物の 地震時における挙動記録

阿世賀 宏* 小島 雅樹**
長谷部広行*** 後藤 徳広****

要 約

本報告は、海岸沿いの急傾斜地を削って建てられた9階建地下1階の建物において、偏土圧を受ける構造部分に地震時にどのような応力が働くかを観察するため、構造体に歪計を埋設し、その観測記録について波型解析を行ったものである。

記録は相模灘の群発地震時に、水平方向の最大加速度 $50.69\text{cm}/\text{sec}^2$ (気象庁震度階で震度IVの中震に相当)を受けたときのもので、建物に働く地震力は、傾斜面に対してほぼ垂直方向に卓越したパワーを受けた。地震動と歪の相関は、建物の部位によって異なる。フーリエスペクトルのピークは 2.8Hz (0.36秒)であった。建物固有周期は、常時微動と比較すると1.57倍ののびがみられた。

この記録から、こうした建物において地震力に対する処理としては、アースアンカー等によって斜方向に引張る工法が有効であることが判明した。

目 次

- § 1. 概要
- § 2. 記録の最大値
- § 3. 主軸方向
- § 4. 相関
- § 5. スペクトル
- § 6. 固有周期
- § 7. 結び

§ 1. 概要

当社の設計・施工による白浜ビーチマンション(静岡県下田市白浜)において、地震力を受けた建物各部の歪量についての計測を行った。

当建物の概要を図-1に示す。

この敷地は海に面した傾斜地で、建物はRC造とSRC造の複合形式となっており、現場造成杭とアースアンカーによって支持されている。

計測システムは図-2に示すように、柱の鉄筋、鉄骨、アースアンカー、杭のそれぞれの歪と地下室にセットし

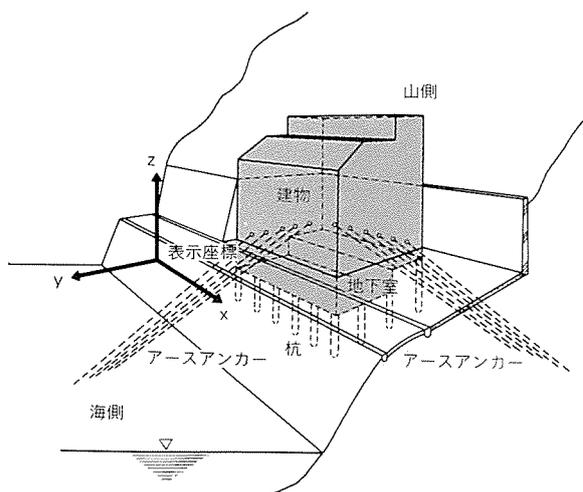


図-1 建物概念図

た加速度計による地震力の計測を行った。

本報告は、昭和53年12月3日22時15分に北緯 35.0° 、東経 139.3° (相模灘)で発生した地震における観測記録を対象として作成したものである。

§ 2. 記録の最大値

加速度、速度、変位の最大値と外力の強さを表すハウスナーのスペクトル強度とアリアスの強度を表-1に示す。

*技術研究部建築技術課係長
**技術研究部建築技術課
***技術研究部技術研究所
****建築設計部構造課

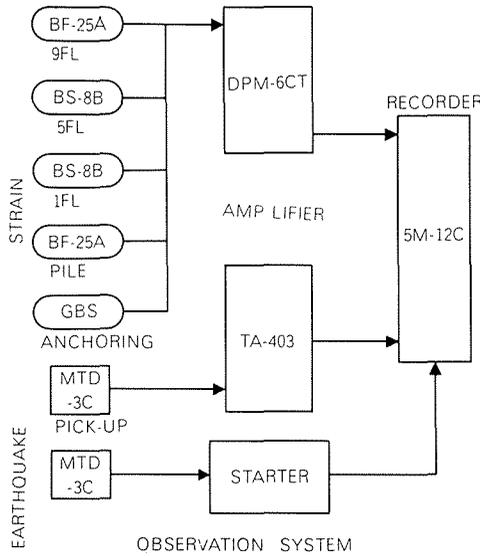


図-2 計測システム図

観測された水平方向の加速度最大値は50.69cm/sec²であったが、これを気象庁震度階で表わすと震度IVの中震に相当する。

水平方向と垂直方向の最大値比及びスペクトル強度比を表-2に示す。参考として米国における地震観測の統計的平均値を併記する。

表-1 最大値と強度

MAXIMUM-VALUE AND INTENSITY

| | Damping Ratio | Components X | Components Y | Components Z |
|-----------------------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| Housner's Spectral Intensity (cm) | 0.0 | 10.48 | 17.30 | 5.72 |
| | 0.2 | 6.18 | 9.83 | 2.50 |
| Arias's Intensity (cm/sec) | 0.0 | 0.89 | 1.74 | 0.30 |
| | 0.2 | 0.79 | 1.55 | 0.27 |
| Maximum Acceleration (gal) | | 44.56 | 50.69 | 21.47 |
| Maximum Velocity (cm/sec) | | 2.08 | 3.37 | 0.89 |
| Maximum Displacement (cm) | | 0.37 | 0.76 | 0.15 |

表-2 最大値比

THE RATIO OF MAXIMUM

| | Ah/Av | Vh/Vv | Dh/Dv | hS10/vS10 | hS12/vS12 |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Statistical Value of Earthquake in U.S.A. | 1.669 | 1.753 | 1.555 | 1.887 | 2.038 |
| at Shirahama Beach Mansion | 2.08~2.36 | 2.34~3.79 | 2.47~5.07 | 1.83~3.02 | 2.47~3.93 |

Ah : Horizontal Components of Acceleration
 Av : Vertical Components of Acceleration
 Vh : Horizontal Components of Velocity
 Vv : Vertical Components of Velocity
 Dh : Horizontal Components of Displacement
 Dv : Vertical Components of Displacement
 hS10 : Horizontal Components of Housner's Spectral Intensity (Damping Ratio 0.0)
 vS10 : Vertical Components of Housner's Spectral Intensity (Damping Ratio 0.0)
 hS12 : Horizontal Components of Housner's Spectral Intensity (Damping Ratio 0.2)
 vS12 : Vertical Components of Housner's Spectral Intensity (Damping Ratio 0.2)

本地震の場合は米国での観測記録の平均値と比較すると、水平動の値が大きめである。加速度、速度、変位の時刻歴を図-3-1~図-3-3に示す。ただし、表-1の最大値と図-3の時刻歴は、いずれもTRIFUNACによる補正を行った値である。

§ 3. 主軸方向

3成分の加速度記録について、ペンゼンと渡部とによる提案から主軸方向を求めて図化したものを図-4に示す。これによると最大主軸方向は記録軸方向と約45°方向にあり、他の主軸と比較するとパワーで約100倍となっている。

次に水平方向についての2成分の軌道を描いたものが図-5である。これを主軸方向と比較してみると、水平面内での方向は最大主軸方向とほぼ同じである。ただし、主軸を求めるための相互相関関数マトリックスは、 $\tau = 0.0$ としている。

§ 4. 相関

3成分の加速度記録と各部の歪記録との相互相関係数を表わしたものを図-6-1~図-6-12に示す。

ここで $\tau = 0.0$ 付近の係数値をみると、それぞれ次の相関度が高いことがわかる。

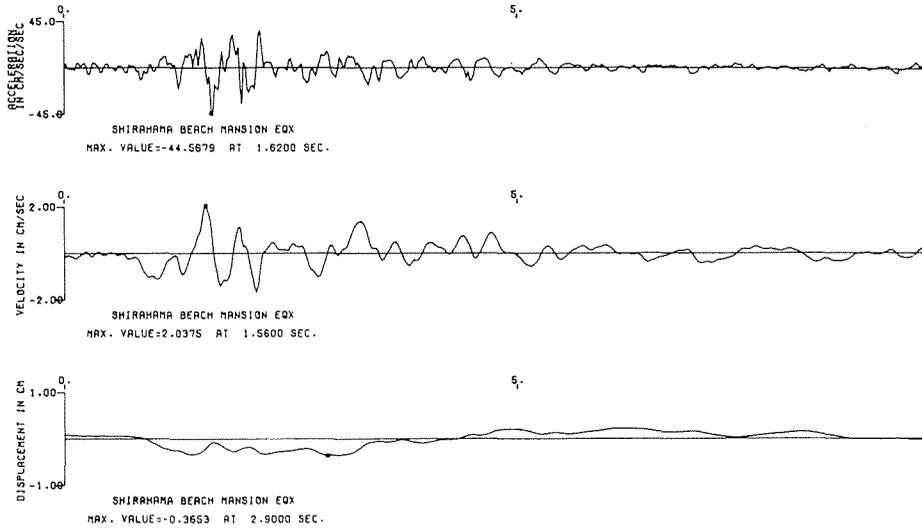


図-3-1 X方向加速度, 速度, 変位記録

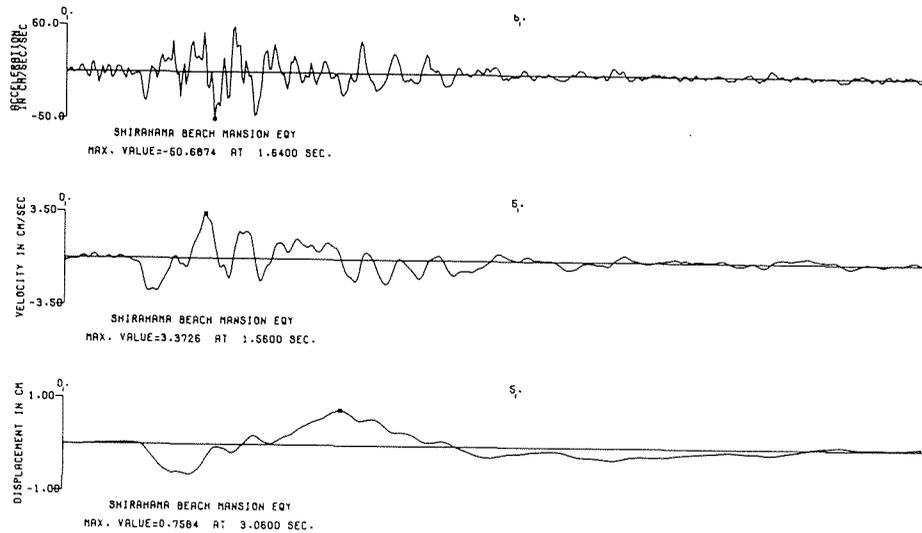


図-3-2 Y方向加速度, 速度, 変位記録

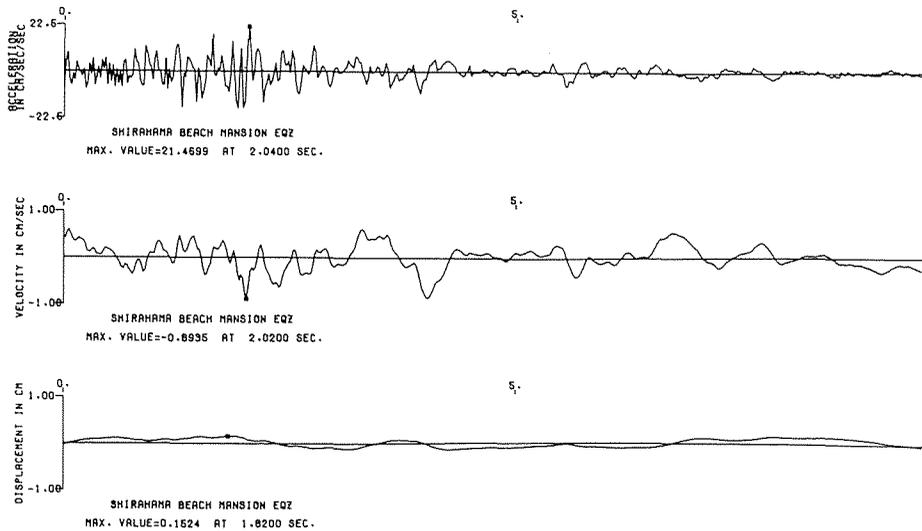


図-3-3 Z方向加速度, 速度, 変位記録

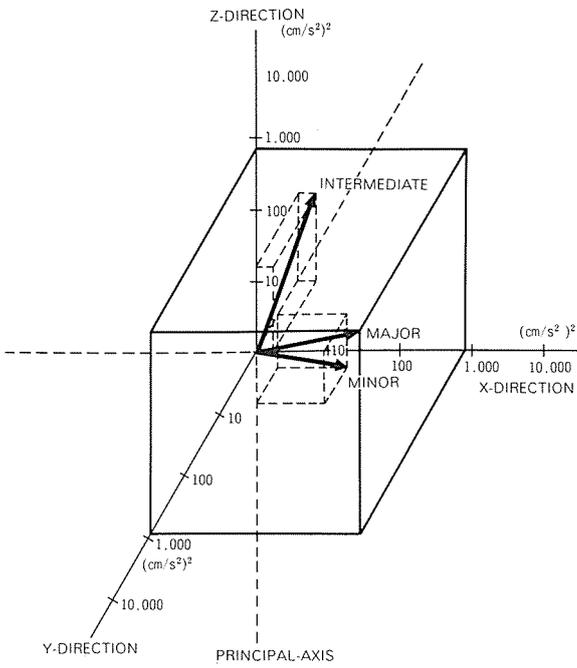


図-4 主軸方向



図-5 オービット図

X方向の加速度とアースアンカーの歪
 Y方向の加速度とアースアンカーの歪
 Z方向の加速度と5階柱頭の歪
 X方向の加速度と1階柱脚の歪
 Y方向の加速度と1階柱脚の歪
 Z方向の加速度と1階柱頭の歪
 このことはすなわち建物の部位によって、水平動と垂直動の相関の度合が異なることを示している。

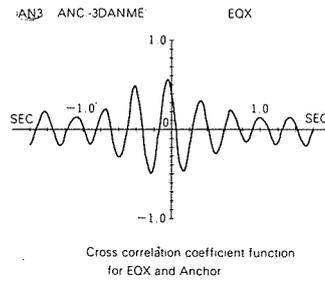


図-6-1 X方向加速度とアンカー歪の相互相関係数

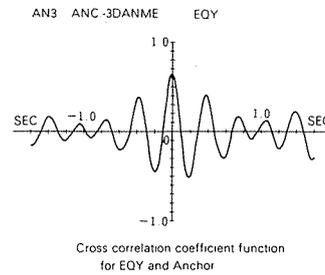


図-6-2 Y方向加速度とアンカー歪の相互相関係数

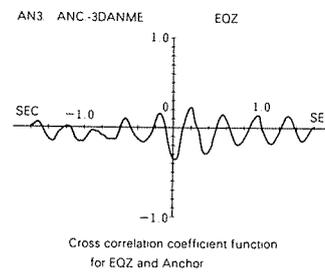


図-6-3 Z方向加速度とアンカー歪の相互相関係数

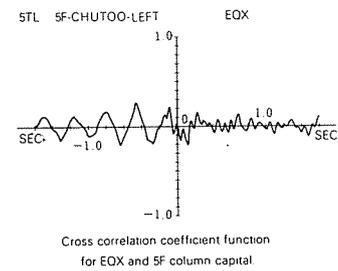


図-6-4 X方向加速度と5階柱頭歪の相互相関係数

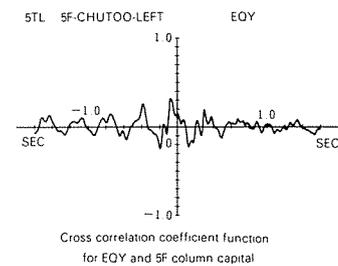


図-6-5 Y方向加速度と5階柱頭歪の相互相関係数

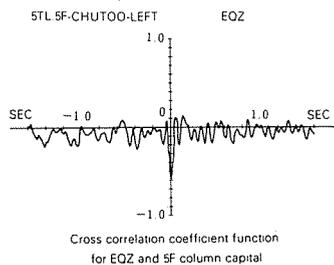


図-6-6 Z方向加速度と5階柱頭歪の相互相関係数

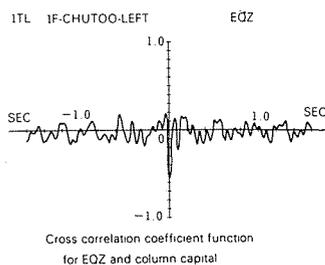


図-6-11 Y方向加速度と1階柱頭歪の相互相関係数

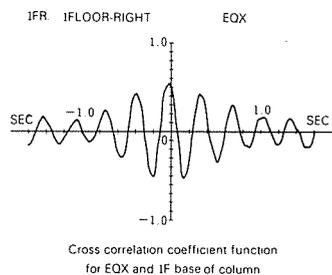


図-6-7 X方向加速度と1階柱脚歪の相互相関係数

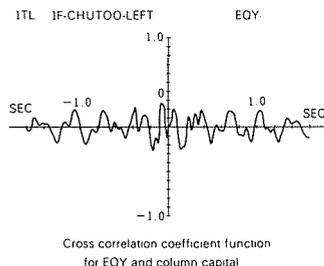


図-6-12 Z方向加速度と1階柱頭歪の相互相関係数

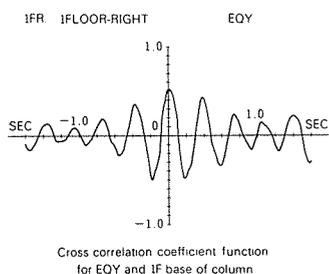


図-6-8 Y方向加速度と1階柱脚歪の相互相関係数

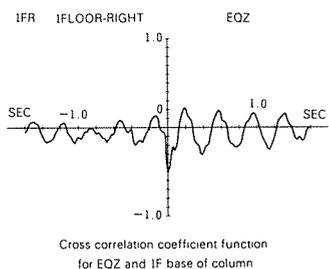


図-6-9 Z方向加速度と1階柱脚歪の相互相関係数

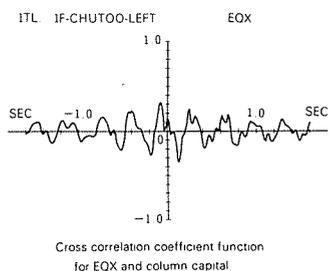


図-6-10 X方向加速度と1階柱頭歪の相互相関係数

§ 5. スペクトル

加速度記録の応答スペクトルを図-7-1～図-7-12に示す。また、フーリエスペクトルを図-8-1～図-8-3に示す。

次に各歪記録のフーリエスペクトルを図-9-1～図-9-4に示す。

これによると5階柱頭と1階柱頭の歪フーリエスペクトルを除いてほとんどが2.8Hz (約0.36秒) 付近にピークを持っている。

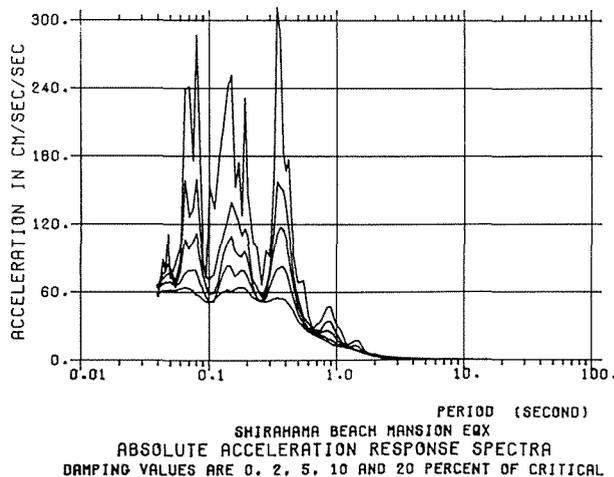
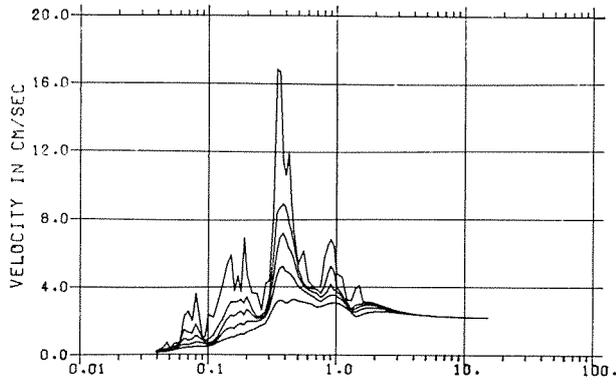
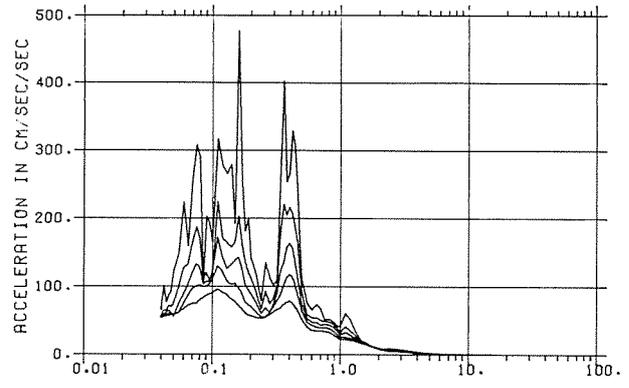


図-7-1 X方向加速応答スペクトル



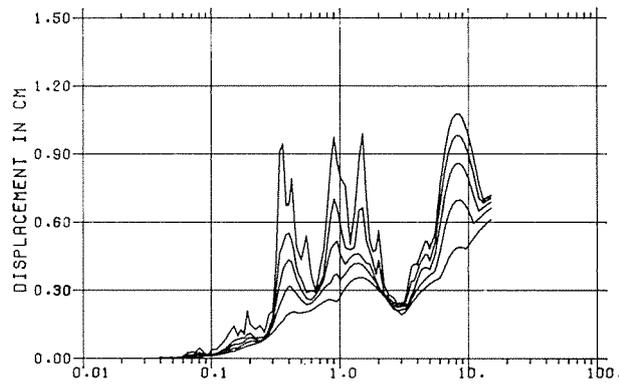
SHIRAHAMA BEACH MANSION EQX
RELATIVE VELOCITY RESPONSE SPECTRA
DAMPING VALUES ARE 0, 2, 5, 10 AND 20 PERCENT OF CRITICAL

図-7-2 X方向速度応答スペクトル



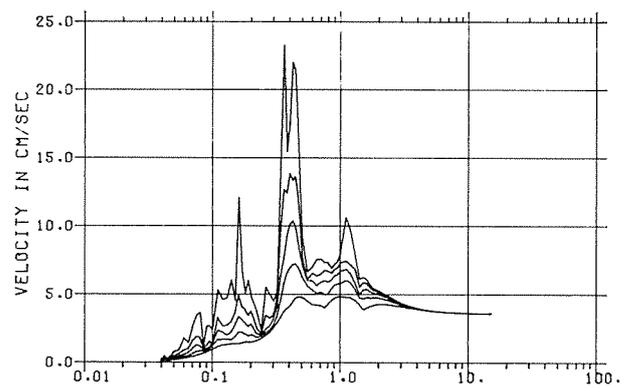
SHIRAHAMA BEACH MANSION EQY
ABSOLUTE ACCELERATION RESPONSE SPECTRA
DAMPING VALUES ARE 0, 2, 5, 10 AND 20 PERCENT OF CRITICAL

図-7-5 Y方向加速応答スペクトル



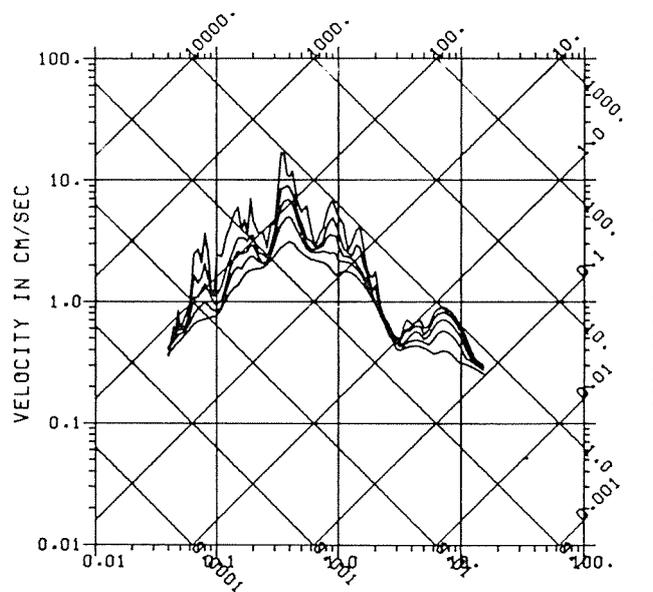
SHIRAHAMA BEACH MANSION EQX
RELATIVE DISPLACEMENT RESPONSE SPECTRA
DAMPING VALUES ARE 0, 2, 5, 10 AND 20 PERCENT OF CRITICAL

図-7-3 X方向変位応答スペクトル



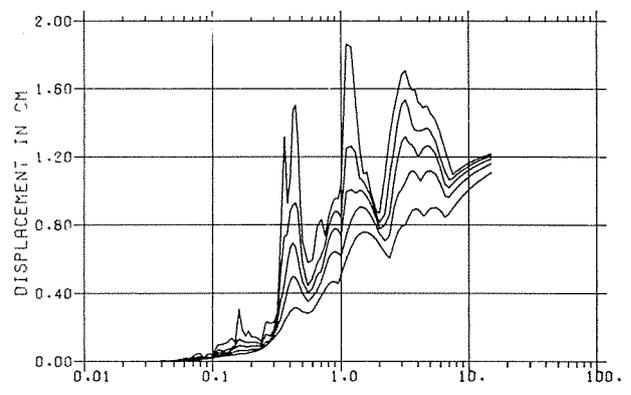
SHIRAHAMA BEACH MANSION EQY
RELATIVE VELOCITY RESPONSE SPECTRA
DAMPING VALUES ARE 0, 2, 5, 10 AND 20 PERCENT OF CRITICAL

図-7-6 Y方向速度応答スペクトル



SHIRAHAMA BEACH MANSION EQX
PSEUDO VELOCITY RESPONSE SPECTRA W*SD
DAMPING VALUES ARE 0, 2, 5, 10 AND 20 PERCENT OF CRITICAL

図-7-4 X方向擬似速度応答スペクトル



SHIRAHAMA BEACH MANSION EQY
RELATIVE DISPLACEMENT RESPONSE SPECTRA
DAMPING VALUES ARE 0, 2, 5, 10 AND 20 PERCENT OF CRITICAL

図-7-7 Y方向変位応答スペクトル

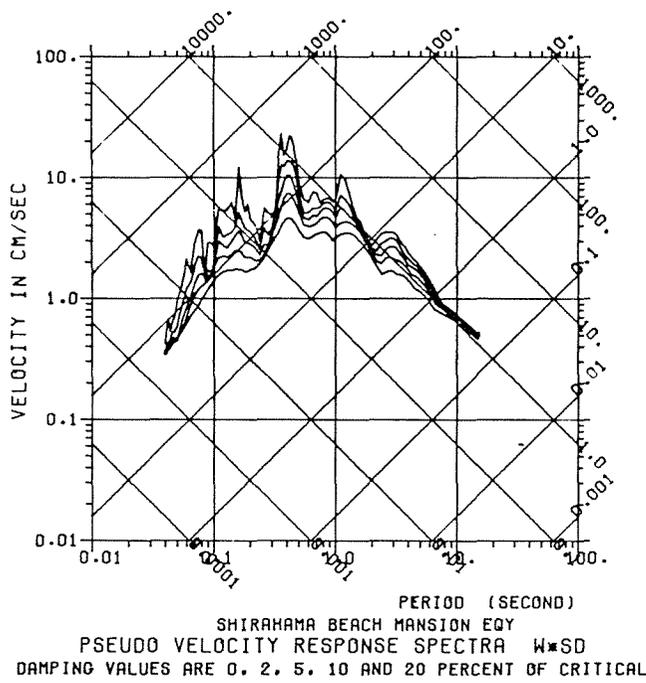


図-7-8 Y方向擬似速度応答スペクトル

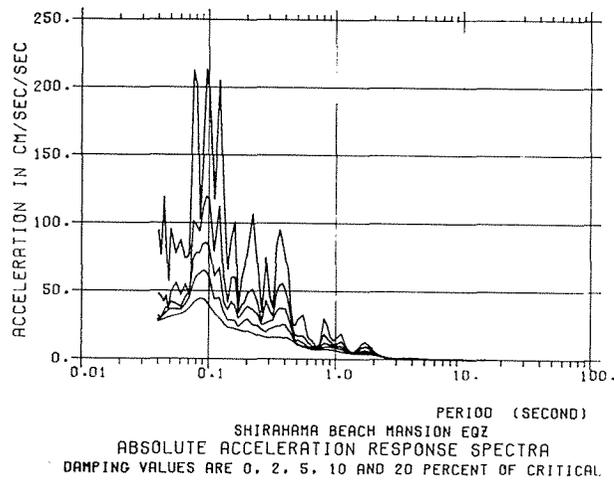


図-7-9 Z方向加速度応答スペクトル

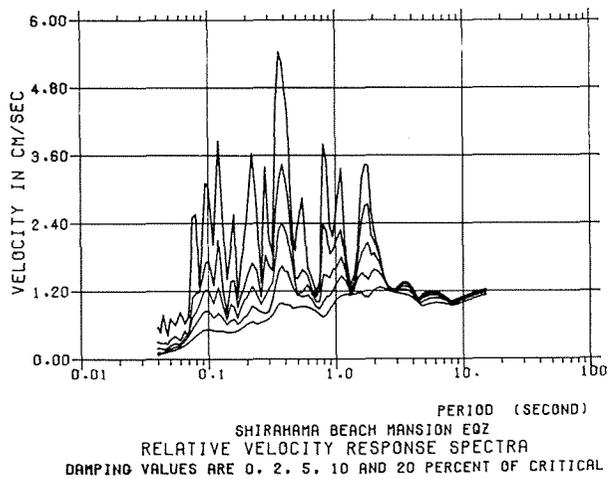


図-7-10 Z方向速度応答スペクトル

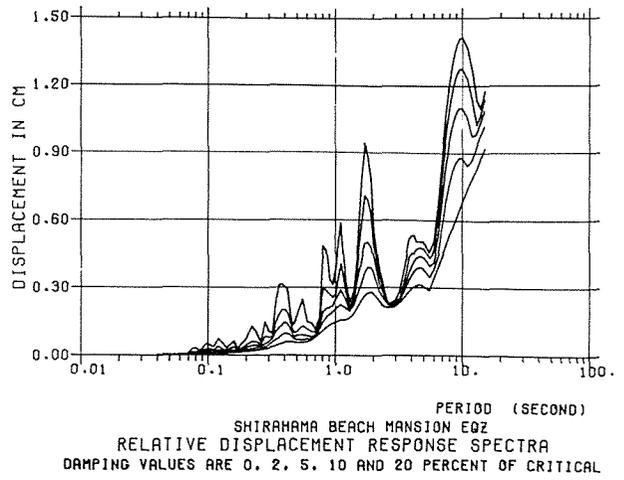


図-7-11 Z方向変位応答スペクトル

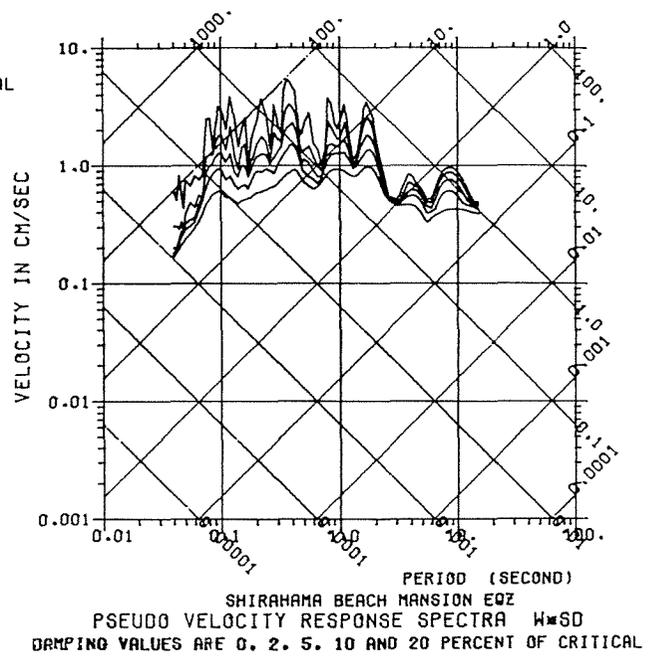


図-7-12 Z方向擬似速度応答スペクトル

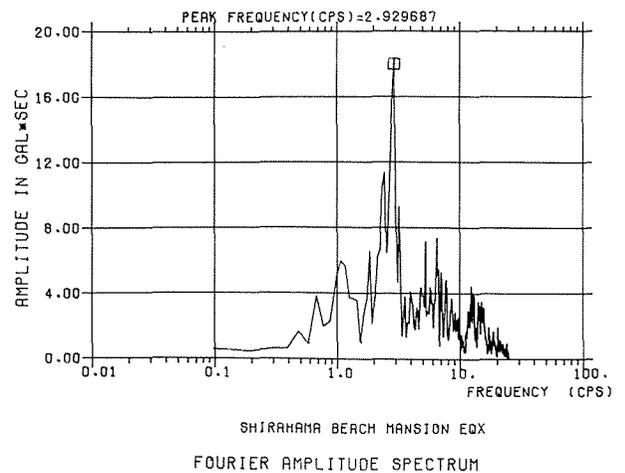
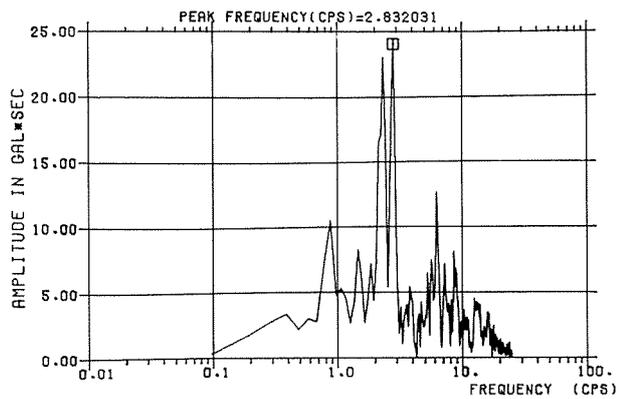
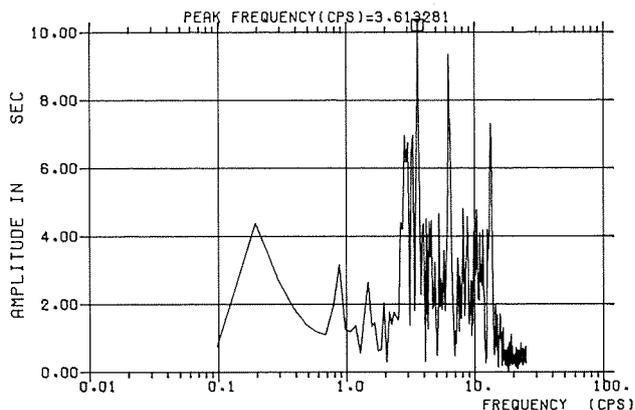


図-8-1 X方向加速度フーリエスペクトル



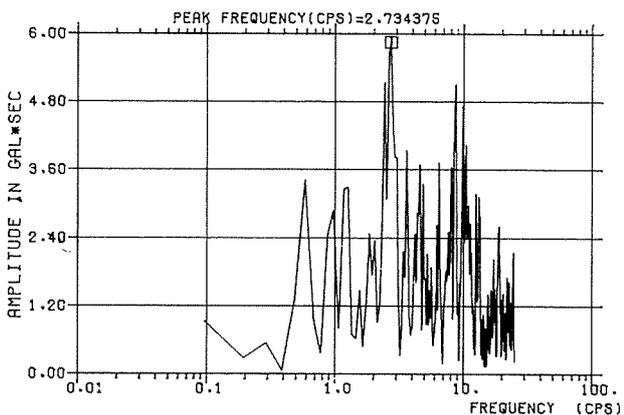
SHIRAHAMA BEACH MANSION EQZ
FOURIER AMPLITUDE SPECTRUM

図-8-2 Y方向加速度フーリエスペクトル



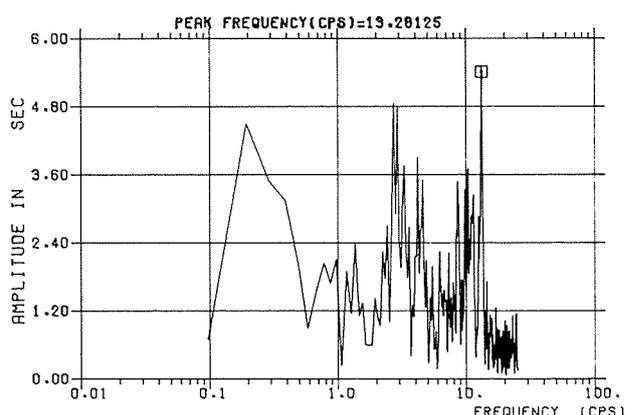
1TL. 1F-CHUT00-LEFT
FOURIER AMPLITUDE SPECTRUM

図-9-2 1階柱頭歪フーリエスペクトル



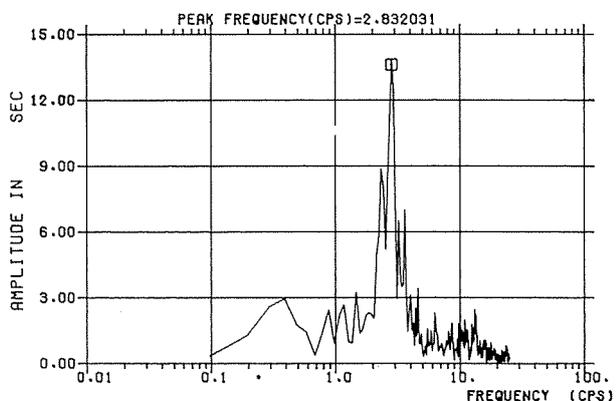
SHIRAHAMA BEACH MANSION EQZ
FOURIER AMPLITUDE SPECTRUM

図-8-3 Z方向加速度フーリエスペクトル



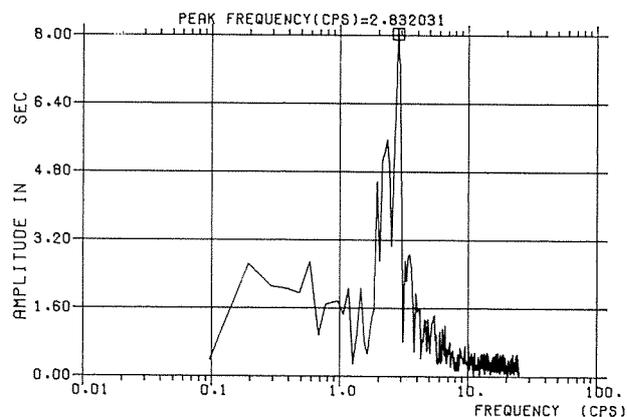
5TL. 5F-CHUT00-LEFT
FOURIER AMPLITUDE SPECTRUM

図-9-3 5階柱頭歪フーリエスペクトル



1FR. 1 FLOOR-RIGHT
FOURIER AMPLITUDE SPECTRUM

図-9-1 1階柱脚歪フーリエスペクトル



AN3. ANC.-30ANME
FOURIER AMPLITUDE SPECTRUM

図-9-4 アンカー歪フーリエスペクトル

§ 6. 固有周期

当建物が建設される以前に計測した海側と山側の地盤の常時微動のフーリエスペクトルを図-10-1～図-10-6に示す。これによると海が近いせいか波動によると思われる周期の長いピークが1Hz以下にでていたが、これを除いた場合6～11Hzにピークがみられる。

建物の屋上での常時微動のフーリエスペクトルを図-11-1と図-11-2に示す。

応答モデルに関して若干の検討を試みるために、フレームモデルとして図-12に示すものを考えた。壁部材のモデルに対しては、柱部材として曲げ剪断変形を考慮し、仮想の梁部材を持ち、壁の3～5桁大きい剛性のものでH型に置換した。図-13は2層の場合のフレームモデルとFEM平板と線材による組合せモデルの変形を比較したもので、ほぼ同様の変形状態を示している。ここでフレームモデルより曲げ剪断型の剛性を求めて、図-14の質点系の応答モデルに置換して固有値を計算した。その結果を表-3に示す。1次固有振動数では水平方向は2.85Hz、垂直方向では6.36Hzとなった。図-8に示した地震時の各部のフーリエスペクトルのピークがほぼ2.8Hzにあることからすると、この程度の地震に対するモデルとしては一応評価し得たと思われる。モード図を図-15-1～図-15-2に示す。なお、常時微動による固有振動数と地震時の固有振動数との間では、通常の場合に周期で表わすと1.5～2.0倍のびることが知られているが、当建物の場合常時微動のピークが4.4Hzであり、地震時の1次固有振動数を2.8Hzとすれば1.57倍の周期のびとなっている。

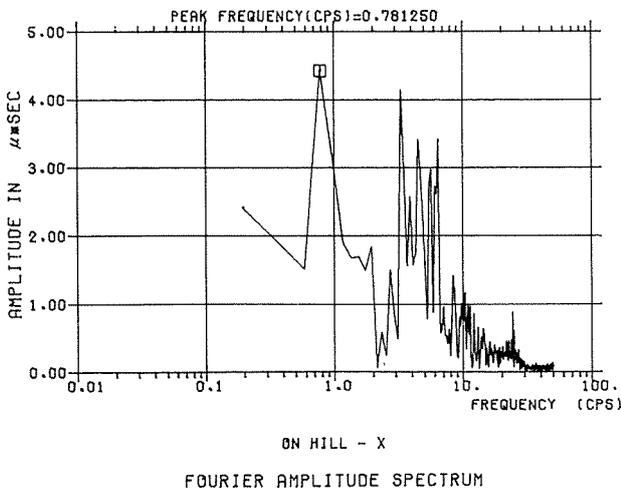


図-10-1 山側X方向常時微動

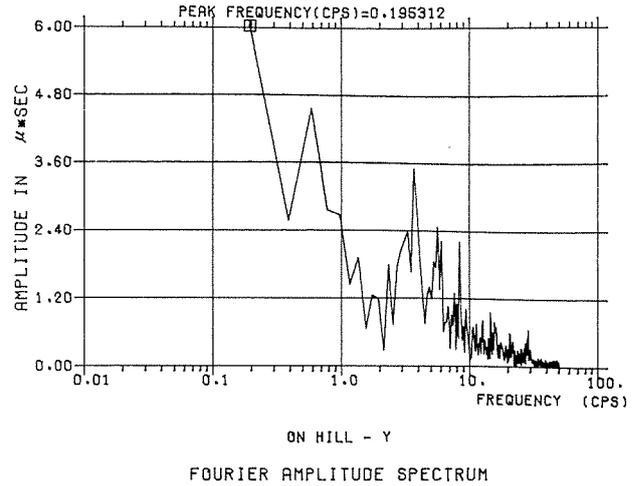


図-10-2 山側Y方向常時微動

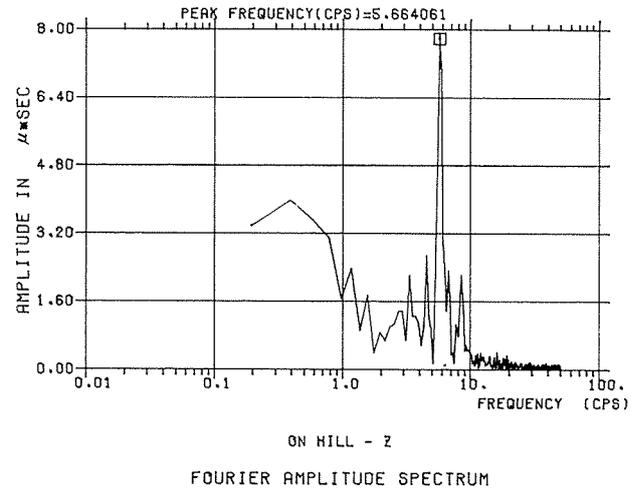


図-10-3 山側Z方向常時微動

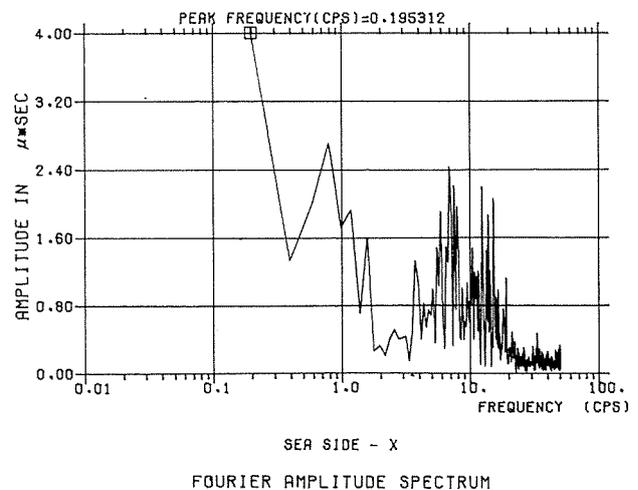
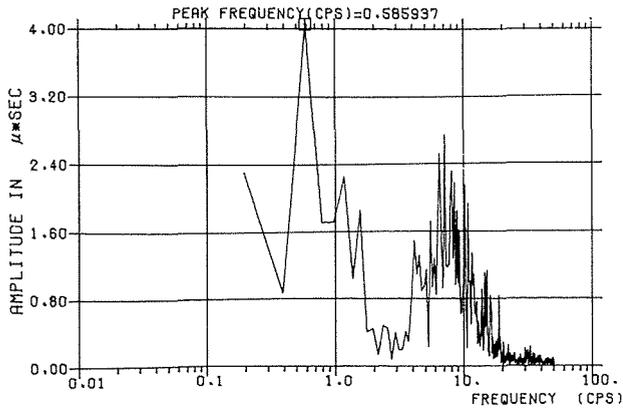
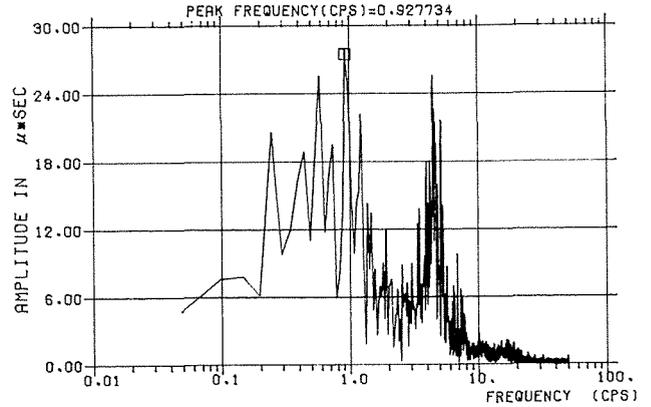


図-10-4 海側X方向常時微動



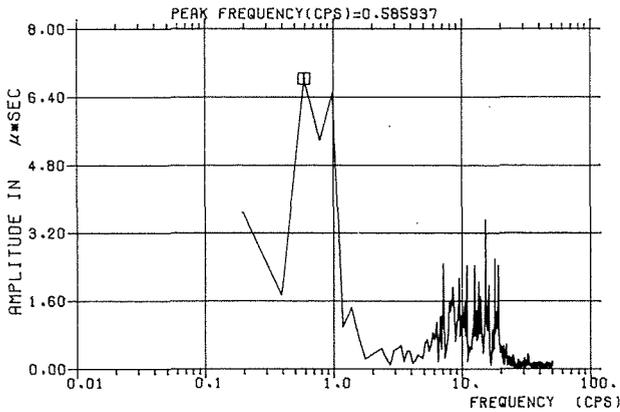
SEA SIDE - Y
FOURIER AMPLITUDE SPECTRUM

図-10-5 海側Y方向常時微動



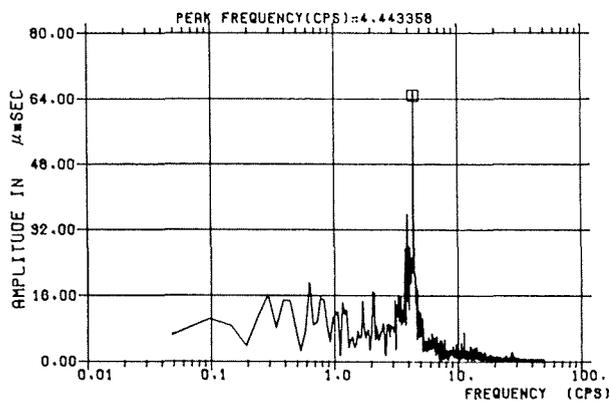
SHIRAHAMA BEACH MANSION - Y -
FOURIER AMPLITUDE SPECTRUM

図-11-2 建物Y方向常時微動



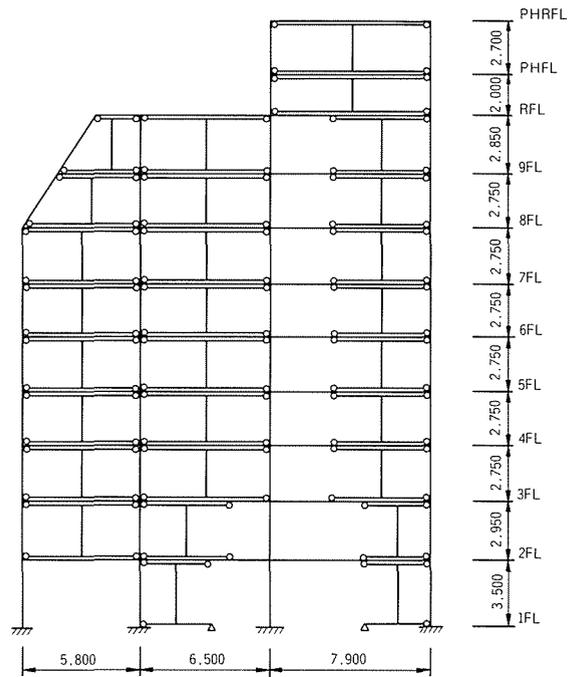
SEA SIDE - Z
FOURIER AMPLITUDE SPECTRUM

図-10-6 海側Z方向常時微動

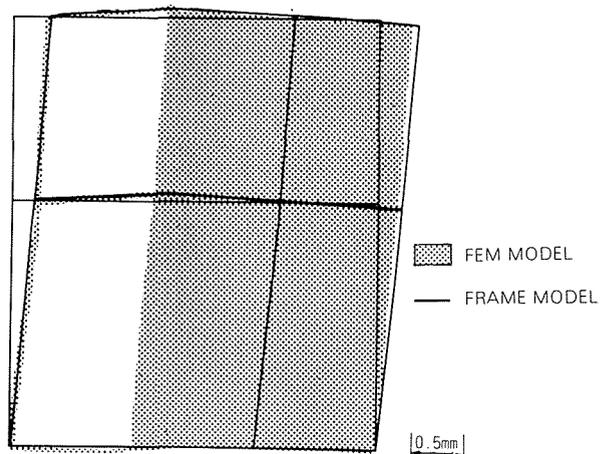


SHIRAHAMA BEACH MANSION - X -
FOURIER AMPLITUDE SPECTRUM

図-11-1 建物X方向常時微動



FRAME-MODEL
図-12 フレームモデル



DEFLECTION OF FEM AND FRAME MODEL

図-13 有限要素法モデルと線材モデルの変形量比較

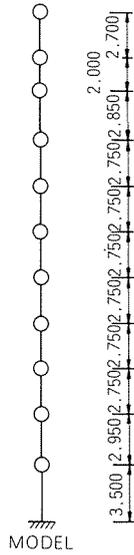


図-14 質点系応答モデル

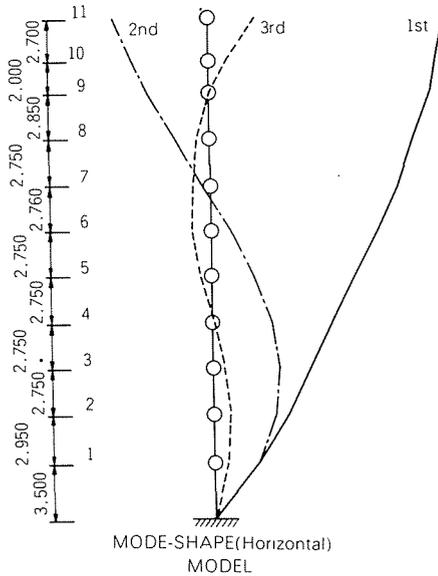


図-15-1 モード図(水平方向)

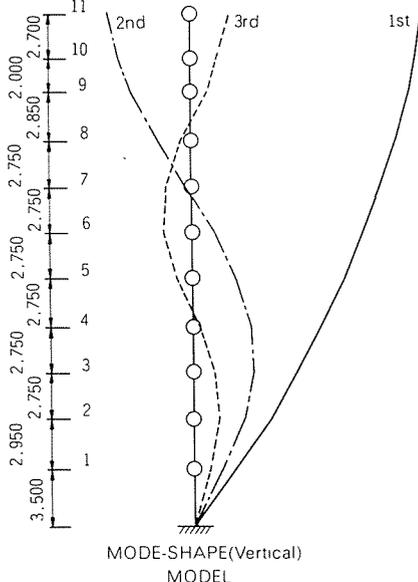


図-15-2 モード図(垂直方向)

表-3 固有値
RESULTS OF EIGENVALUE

| | | 1st | 2nd | 3rd | |
|-------|------------|------------------------|-------|--------|-------|
| MODEL | HORIZONTAL | NATURAL FREQUENCY (Hz) | 2.85 | 7.94 | 14.08 |
| | | NATURAL PERIOD (Sec) | 0.351 | 0.126 | 0.071 |
| | | PARTICIPATION FACTOR | 1.393 | -0.566 | 0.281 |
| | VERTICAL | NATURAL FREQUENCY (Hz) | 6.36 | 13.59 | 21.14 |
| | | NATURAL PERIOD (Sec) | 0.157 | 0.074 | 0.047 |
| | | PARTICIPATION FACTOR | 1.362 | -0.496 | 0.224 |

§ 7. 結び

傾斜地に建設された構造物の地震時の挙動として、ここでは波型解析結果を主に報告した。

最大主軸方向の結果にみられるように、地震時には敷地の傾斜方向とはほぼ垂直方向へ卓越したパワーを受ける可能性が高いことを考えると、当建物のようにアースアンカー等で斜方向へ建物を引張っておく工法は、地震力に対してはかなり有効であると考えられる。

また、応答モデルを考えた場合、敷地条件による影響、300~400cm/sec² (3~4 m/sec²) という大きな入力を受けた場合の状態など、今後また研究すべき点が多く、長期観測による同様なケースでのデータ集積が望まれる。

参考文献

- 1) Penzien. J and Watabe. M, 1975
「Simulation 3-Dimensional Earthquake Ground Motions」
International Journal of Earthquake Engineering, McGraw-Hill
- 2) 「急傾斜地に建つマンションの地下工事施工記録」
大竹, 有坂, 山岸, 西松技報Vol 1