

2層せん断型制振構造体の地震動に対する応答解析

谷田健雄^{*1}・島崎洋治^{*2}

Simple vibration control system for shear structures under earthquakes

by

Takeo TANIDA^{*1} and Yoji SHIMAZAKI^{*2}

(Received on Mar. 31, 2004 & accepted on May 26, 2004)

Abstract

Conventional vibration control methods have problems that they are too complex and that they increase their costs of manufacturing and maintenance. In this research we propose a simple vibration-controlled flexible structure in which highly damping rubbers are inserted between two rigid frames, which incline toward each other. These structures are modeled to a system that has two degrees of freedom. Experiments involving two conditions, in which vibration is controlled and not controlled, are conducted. Under these conditions, the effectiveness of these structures for several earthquakes is demonstrated. Numerical analyses have also performed to make sure the effectiveness obtained by the experiments.

Keywords: Vibration Control, Earthquakes, Highly Damping Rubber, Shear Structure

1. まえがき

1.1 はじめに

建物を取り巻く社会環境や自然環境によって、様々な振動が生じ、建物に影響を及ぼしている。これらの振動により構造体に機能上の問題が生じたり、ときには構造物としての機能を果たせなくなる場合がある。これらの振動源は自然発生的なもの、人間の生活活動から発生する人工的なものがある。自然現象の代表例としては地震や風などが挙げられ、人工現象の代表例としては自動車や列車などの交通振動や建設機械、工作機械などによって発生する振動が挙げられる。近年、振動によって建物の安全性、機能性、居住性が損なわれないようにするための構造、すなわち制振構造を採用した事例が増えている¹⁾。

制振には、外部から力を受けることなく構造物の振動を抑えるパッシブ制振と、外部から供給されるエネルギーを利用して振動を低減するアクティブ制振がある。一般には何らかのダンパー装置やアクチュエーターなどの装置を建物に取り付けて、構造物の振動を制御、または構造物を揺れにくくする。従来の制振装置は、その性能を確実にするために複雑化し、コストが高くなるとともに維持管理の問題などがある。

そこで、著者らは特別な装置を取り付けず、構造体そのものを柔軟にして、振動に対する減衰を格段に大きくできる構造体を提案しこの自由振動に対する有効性について、一層および二層ラーメン構造模型を用いて検討してきた²⁾。本研究では傾斜した柱を持つ2層ラーメン構造模型を2棟連結させた構造体を用意する。この模型構造体において2棟間の床連結部分には高減衰ゴムを使用する。これら2つの構造体は柱の傾斜により水

平方方向の振動に対して鉛直方向にも連動する。このため高減衰ゴムが鉛直方向にせん断変形することによって構造物全体の振動を吸収することができる。この制振構造体の地震に対する有効性を調べるため、地震応答実験を行い、数値解析によってこの実験を確認した結果を示す。

1.1 基本的な構想

構造物の振動に対する変形モデルは片持ちばりのような曲げ変形するものとラーメン構造のようにせん断変形すると仮定できるものがある。Fig.1に示すような曲げ変形の場合、構造物断面の中立軸でせん断力が最大となる。この場合、この中立軸で2つの構造物に分け、これら2つの構造物の間に減衰装置を取り付けることによって制振効果を得る構造とすることができる。一方、Fig.2に示すようなせん断変形型モデルの場合、構造物を2棟並列させた柱に傾斜角を与えることにより、左右運動に加えて、お互いの構造物に上下の逆運動をさせることができる。この場合、左右の構造物の連結部分に減衰装置を取り付けることによって格段の制振効果を得ることができる。

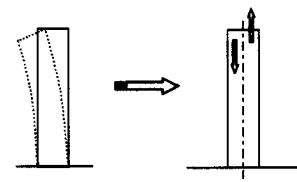


Fig.1 Bending structure.



Fig.2 Shearing structure.

*1 工学研究科土木工学専攻博士課程前期

*2 工学部土木工学科教授

2. 実験模型

Fig.3 は非制振構造模型の概略である。Pic.1 は制振構造模型の写真である。写真中の点線は柱の傾斜を分かり易くするために描いたものである。模型はエヌアイシ・オートテック株式会社のアルミニウム製の製品部材を組み合わせたラーメン構造で、梁と柱は剛結合となるよう、梁の両端にはアルミニウム製の板をかぶせて、片側につき長さ 2cm の 2 本のネジでとめてある。2 棟間には図に示すように高減衰ゴムが瞬間強力接着剤によって取り付けられている。またこの構造体は梁とアルミニウム製の柱の間に挟みこまれた板により柱に傾斜角を与えることができる。構造体は 1 基あたり高さ 92cm、幅 32.4cm、柱長 40cm である。その他の部材の寸法と個別に計測した質量を Table 1 に示す。また、柱に傾斜角をつけた場合の構造体も同様の材料を用いて用意する。柱材のアルミニウムのヤング率は $7.03 \times 10^{10} \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ である。高減衰ゴムの寸法は長さ 2cm、幅 0.2cm、厚さ 0.1cm である。また、高減衰ゴムの弾性係数は材料メーカーの資料より $G=5.884 \times 10^5 \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ と仮定してある。高減衰ゴムのばね定数 k' は接触面積 A と厚さ h より、次のように求まる。

$$k' = G \frac{A}{h} \quad (1)$$

よって

$$k'_2 = 5.884 \times 10^5 \times \frac{4 \times 10^{-5}}{1 \times 10^{-3}} = 2.353 \times 10^4 \text{N} \cdot \text{m}^{-1} \quad \text{となる。}$$

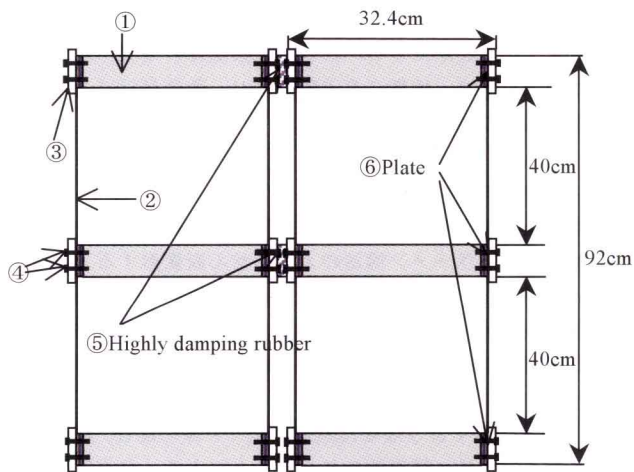
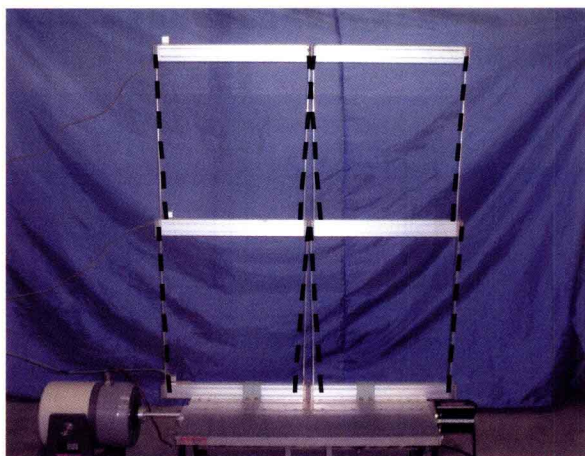


Fig.3 An outline of Structure.



Pic.1 Picture of Structure.

No.	Dimension (mm)	Mass (kg)	Number
①	40×300×20	0.214	6
②	500×2×20	5.155×10^{-2}	8
③	40×3×60	1.803×10^{-2}	12
④	φ 3.9	1.764×10^{-3}	24
⑤	1×40×2	—	2
⑥	40×2×20	0.402×10^{-3}	32

Table.1 The mass of every member

3. 実験方法

3.1 構造体の自由振動実験

2層せん断型制振構造体の地震応答実験を行う前に解析に必要な、構造体の固有振動数、高減衰ゴムのバネ定数と高減衰ゴムの減衰係数を算出するために構造体の自由振動実験を行った。自由振動実験では、構造体の最下層は実験台に万力で固定し、構造体の最上層部に初期変位 1.5cm を与え自由振動させた。そのときの構造体の応答加速度を 1 層目、2 層目に設置した加速度計により計測した。サンプリング時間は時間刻み 0.01sec で 1500 点、合計 15 秒間計測した。

3.2 構造体の地震応答実験

構造体の地震応答実験では、Fig.4 のように実験模型を起振機からのびた振動台の上に固定板により確実に設置し、各種の地震波を作用させる。Fig.4 の構造体は柱に傾斜角をつけた（制振型柱）もので、構造体を説明する目的のため誇張して描いてある。柱に傾斜角をつけた場合（制振型柱）の柱の傾斜角 θ (Fig.5 参照) は 89.14° である。実験では、柱に傾斜角をつけた場合（制振型柱）とつけない場合（非制振型柱）の 2 種類を行い、それぞれにエルセントロ地震（1940）、十勝沖地震（1968）の 2 種類の地震外力を与えた。その際の構造体の応答加速度を A 点、B 点に設置した加速度計により計測し、地盤の加速度は C 点に設置した加速度計により計測した。サンプリング時間は時間刻み 0.01sec で 6000 点、合計 60 秒間計測した。

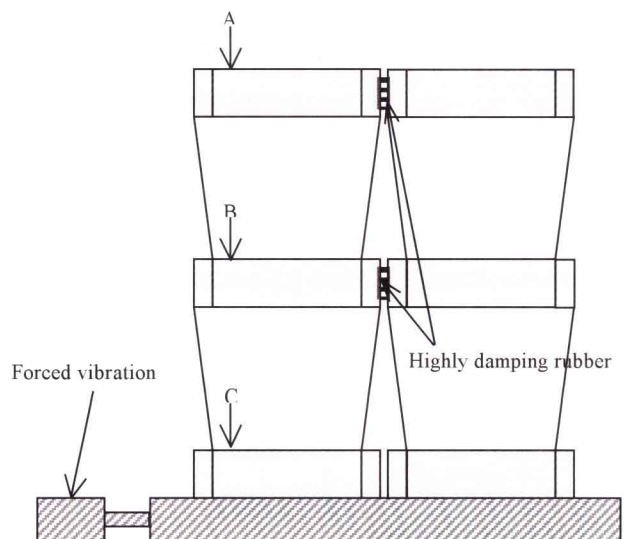


Fig.4 An outline of experiments.

4. 理論式

4.1 自由物体図

構造体は地震外力を与えることにより振動し、柱の傾斜角により、鉛直方向にも同時に振動する。このとき、高減衰ゴムはせん断方向のみに自由度をもつと仮定できるので、2層せん断型制振構造体は、2自由度をもつ振動系となる。本研究では左右対称の構造物を組み合わせていることから、Fig.5に一方の構造物についてモデル化した図を示す。柱はせん断変形をするため質点は柱に垂直な方向に運動すると考える。

Fig.6およびFig.7は2層型の各層における質量 m_1 、 m_2 の自由物体図である。高減衰ゴムの2要素モデルはゴムの振動特性を十分に把握することはできないが、本研究では構造体の制振効果を調べることを目的としたため、高減衰ゴムは力学的モデルとしては基本的な、ばねとダッシュポットを並列に結合した2要素モデルを用いた。この場合、弾性要素と粘性要素のひずみは等しいことになる。ここで、 y は鉛直方向の変位、 z は柱に垂直な方向の変位である。Fig.6、7を参考にして各層の質量 m に加わる力のつりあいを考えると運動方程式は次のように示すことができる。

4.2 運動方程式

2層部分のつりあいは次式のように書くことができる。

$$-k(z_2 - z_1) - c(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) - c'y_2 \cos \theta_2 - k'y_2 \cos \theta_2 = m_2(\ddot{z}_2 + \ddot{z}_\xi) \quad (1)$$

$$\text{ここで、 } y_2 = z_2 \cos \theta_2 \quad \text{より } \dot{y}_2 = \dot{z}_2 \cos \theta_2 \quad (2)$$

また、1層部分のつりあいは次式のように書くことができる。

$$-kz_1 + k(z_2 - z_1) - cz_1 + c(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) - k'y_1 \cos \theta_1 - c'y_1 \cos \theta_1 = m_1(\ddot{z}_1 + \ddot{z}_\xi) \quad (3)$$

$$\text{ここで、 } y_1 = z_1 \cos \theta_1 \quad \text{より } \dot{y}_1 = \dot{z}_1 \cos \theta_1 \quad (4)$$

式(1)に式(2)を、式(3)に式(4)をそれぞれ代入する。また、 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ であるから、これらを整理すると式(5)、(6)のような運動方程式を得ることができる。

$$m_2 \ddot{z}_2 + (c + c' \cos^2 \theta) \dot{z}_2 - c \dot{z}_1 + (k + k' \cos^2 \theta) z_2 - k z_1 = -m_2 \ddot{z}_\xi \quad (5)$$

$$m_1 \ddot{z}_1 + (2c + c' \cos^2 \theta) \dot{z}_1 - c \dot{z}_2 + (2k + k' \cos^2 \theta) z_1 - k z_2 = -m_1 \ddot{z}_\xi \quad (6)$$

- m : 質量
 - k' : 高減衰ゴムのばね定数
 - k : 構造物のばね定数
 - x_ξ : x 方向の地震変位
 - θ : 柱の傾斜角
 - c' : 高減衰ゴムの減衰係数
 - c : 構造物の減衰係数
 - z_ξ : z 方向の地震変位
- ただし添え字はそれぞれ、1層、2層の要素を示す。

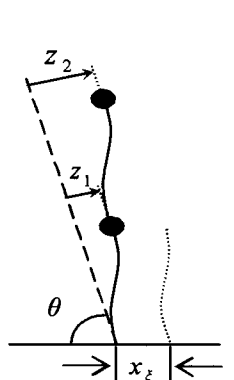


Fig.5 Two-story model

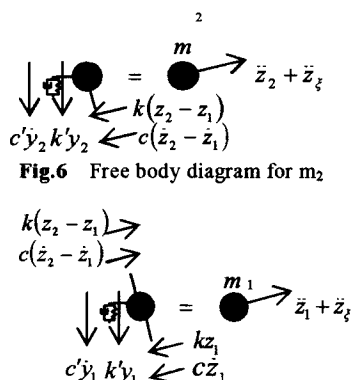


Fig.6 Free body diagram for m_2
Fig.7 Free body diagram for m_1

5. 実験および解析結果

実験では、柱に傾斜角をつけた場合(制振型柱)とつけない場合(非制振型柱)の2種類行ない、それぞれに2種類の地震外力を与えた。制振型としたときの柱の傾斜は 89.14° 度である。振動台により起こされる地盤加速度は起振機の性能により実際の地震の地盤加速度の約 1/10 程度のもとなっている。解析では、高減衰ゴムのせん断弾性係数、接着面積、厚さの関係より高減衰ゴムのばね定数 k' の値を $2.352 \times 10^4 \text{ N/m}$ 、また自由振動実験の結果より高減衰ゴムの減衰係数 c' の値を $4.704 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ とした。式(5)、(6)の解析には4次のルンゲクッタ法を使用した。Fig.8、Fig.9は実験および解析により得られた結果で、(a)が非制振型柱の実験結果、(b)が制振型柱の実験結果、(c)が制振型柱の解析結果であり、それぞれ上段が構造体の1層目、下段が2層目となっている。図中の横軸は時間(sec)、縦軸は加速度(gal)である。構造体の最大応答加速度はエルセントロ地震において1層目、2層目ともに制振型柱とすることにより、非制振型柱に比べ1/2程度の加速度となっている。十勝沖地震においては1層目、2層目ともに制振型柱とすることにより、非制振型柱に比べ1/3程度の加速度となっている。この結果より制振型柱の場合において、非制振型柱よりはるかに構造体の応答加速度が低減していることがわかる。

6. 構造体の固有振動数別応答解析

Fig.10およびFig.11は構造体の固有振動数を2.0Hzから5.0Hzまで0.01Hz刻みで変化させていった場合の1層目、2層目それぞれの最大応答加速度の変化を解析により示したものである。プログラムに入力する地盤の加速度は、実験より得られたエルセントロ沖地震、十勝沖地震のデータを用いた。左図が構造体の1層目、右図が2層目となっている。図中の縦軸は構造体の最大応答加速度(gal)、横軸は構造体の固有振動数(Hz)である。太線は制振型柱の解析結果をプロットしたものであり、細線は非制振型柱の解析結果をプロットしたものである。結果を見ればわかるように構造体の固有振動数を変化させても、制振型柱とすることにより地震動に対して有効な制振効果を得ることができる。また制振型柱において非制振型柱の場合より曲線が滑らかになっており共振を抑えられていることがわかる。

7. まとめ

構造体の組み合わせ形状の違いにより、格段に大きな減衰効果を得られる構造体を提案し、実験によりこの構造体の地震外力に対する有効性を示した。また2層せん断型制振構造体は、様々な周波数特性をもつ地震動に対しても有効であることを数値解析により示した。この構造体は高架橋などの上下振動の制振にも有効であり、その機構を現在検討中である。このせん断型制振構造体は基本特許(特許第3397678号)を平成14年2月14日に取得済みである。

参考文献

- 1) 金勝徳他: 建築の耐震・耐風入門, 彰国社, 1996, pp.112-128
- 2) 松山俊樹他: 東海大学紀要工学部 Vol.41, No.2, 2001, pp.83-86

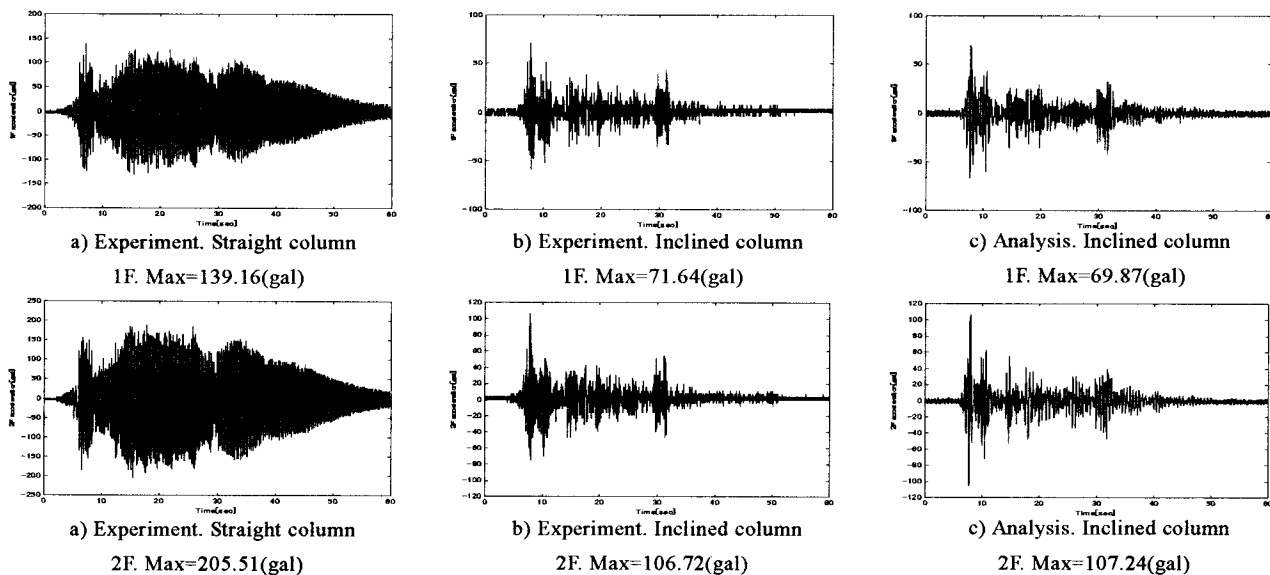


Fig.8 Earthquakes of Elcentro

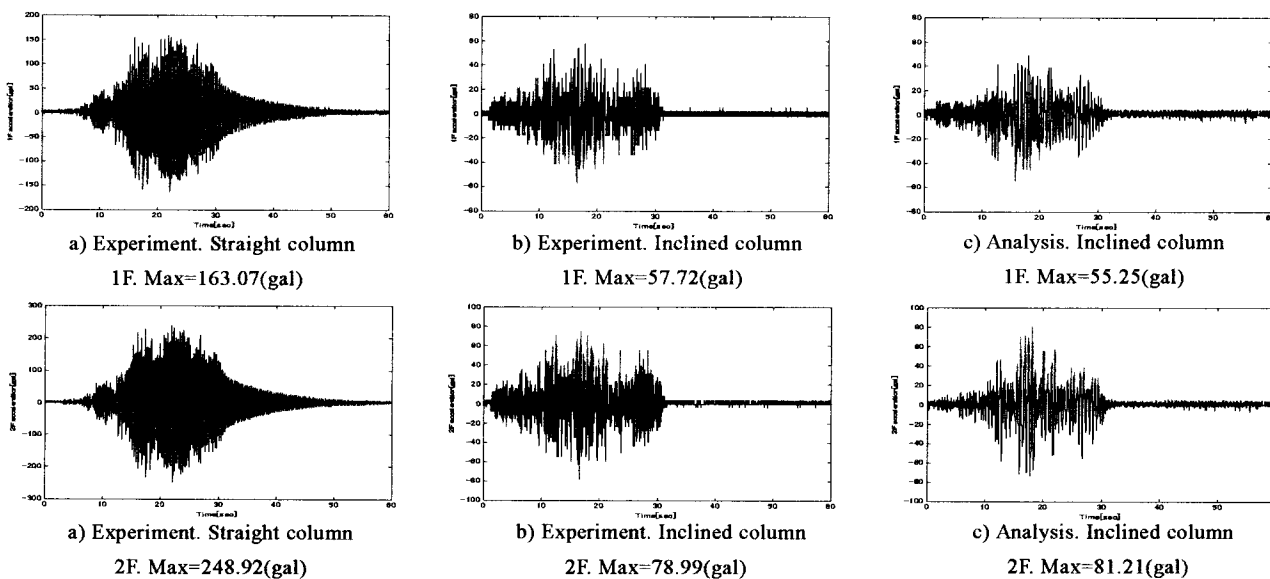


Fig.9 Earthquakes of Tokachi

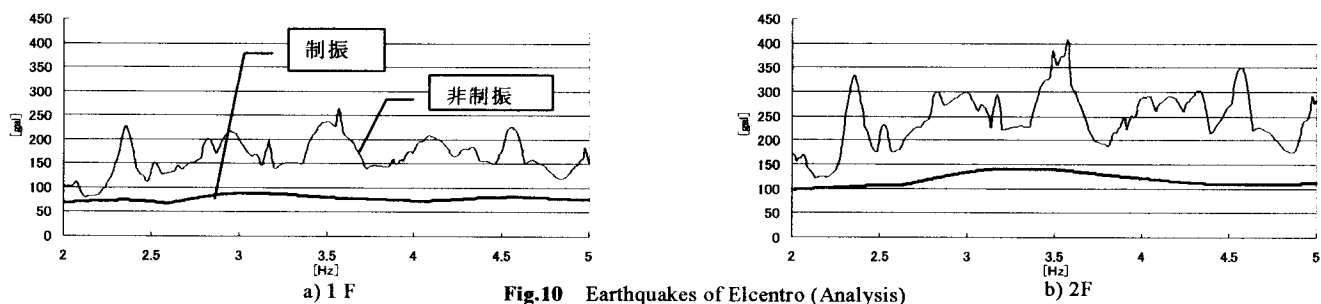


Fig.10 Earthquakes of Elcentro (Analysis)

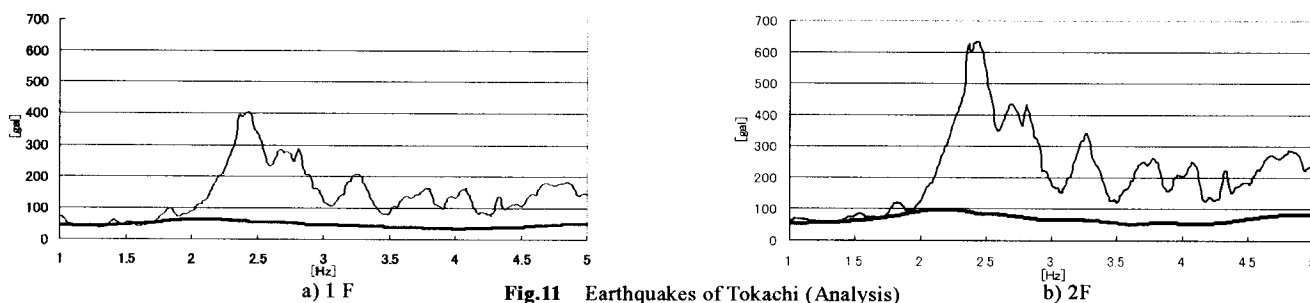


Fig.11 Earthquakes of Tokachi (Analysis)