

# 地盤—建物系のアレー観測による 計測震度の変動

神山 眞<sup>1</sup>・長内優也<sup>2</sup>・松川忠司<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東北工業大学環境情報工学科教授 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

E-mail: mkamiyam@tohtech.ac.jp

<sup>2</sup>元東北工業大学大学院生 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

E-mail: mkamiyam@tohtech.ac.jp

<sup>3</sup>東北工業大学環境情報工学科助手 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

E-mail: matukawa@tohtech.ac.jp

震度計の設置環境における計測震度の差異を地盤と建物内での変動に注目して、アレー観測記録を用いて考察したものである。ここでは、過去 15 年にわたり観測が実施されている東北工業大学 6 号館の地震記録を用いて統計的な観点から自由地盤と建物 1 階、4 階の計測震度の変動が分析される。さらに、同じ設置条件による常時微動アレー観測を実施して地震動と常時微動における周波数特性の特徴などが比較される。計測震度の変動が回帰式として導かれるとともに、スペクトル解析によるスペクトル比が算定されて、計測震度変動の原因が周波数特性における観点から分析される。アレー観測によれば、建物 1 階では自由地盤に比較して、計測震度が約 0.2 小さくなる。

**Key Words :** *Intensity scale, instrumental intensity, array observation, free ground, building spectral ratio, earthquakes, microtremor*

## 1. はじめに

2003年7月26日発生の宮城県北部連続地震の被害調査から震度計の設置環境について問題提起がなされた<sup>1)</sup>。問題の本質は、折角設置されている震度計の設置箇所と設置方法が適切でないために、震度計の本来の設置目的である「地域を代表する揺れの大きさに関する情報」という趣旨を満足していないのではないかと指摘である。この問題は2004年新潟県中越地震などその後の被害地震でも種々の形で顕在化しており<sup>2)</sup>、我が国の地震防災対策を進める上での重要な課題となっている。

震度計の設置環境をめぐる問題の一つに建物内と自由地盤上での計測震度の差異があげられる。この問題に関する実測に即した研究は意外に稀少で、改めて本質的な検討が求められている。本小文はこの問題を考察するために過去15年間、東北工業大学6号館で実施されている建物内と自由地盤でのアレー強震観測結果を用いて分析した概要を述べたものである。また、設置環境による震度の差異をあらかじめ推定する手法としての常時微動のアレー観測についても地震動との比較の観点から考察される。

## 2. アレー観測の概要

東北工業大学香澄町キャンパス 6 号館では過去 15 年にわたり建物と周辺地盤でのオフライン方式によるアレー観測が行われてきている。この建物は 1969 (昭和 44 年) 8 月に竣工した鉄筋コンクリート 4 階建て (基礎: P C 杭) で典型的な学校形式の構造を有する。

コーダ波の研究を主目的として本建物と周辺地盤での同時観測によるオフライン強震観測システムが 1990 年に設置され、以後 15 年にわたり観測が行われている。建物と強震計配置の概要を **図-1** に示す。**図-1** に示すように本建物は 38.5m×22.5m の平面であり、ここでは平面 2 方向をそれぞれ図示の通り Y 長辺方向、X 短辺方向と仮称する。X 短辺方向の側壁は壁形式で Y 長辺方向は窓閉式となっている。

本建物 1 階フロア、4 階フロアおよび周辺の自由地盤に 3 成分デジタル型強震計が設置されている。**図-1** においてそれらの配置概略が示されているが、このデジタル強震計は NHK の時刻情報に合わせて 1 時間毎に時刻修正する水晶時計を内蔵しており、それにより時刻同期をとる形となっている。3 観測点の観測は水平 2 成分、鉛直 1 成分の同時観測であ

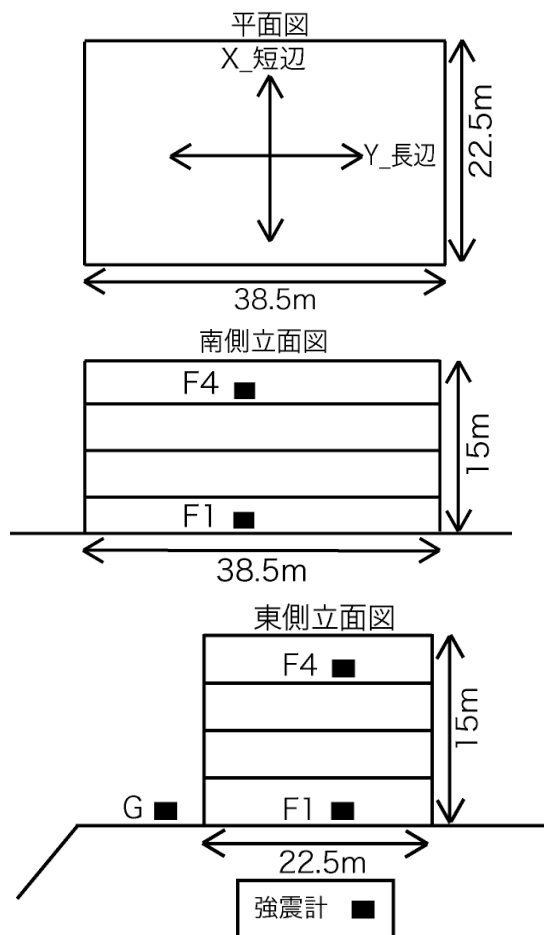


図-1 6号館建物の概要と強震計配置

り、水平成分は3観測点ともX短辺方向，Y長辺方向に設定されている。

地盤は表層から泥岩が堆積しており，N値は1m～8mの深さで10～50で推移して，約8mの深さでは $N > 50$ の固結砂岩が基礎基盤を形成する形で存在する．本建物はこの固結砂岩に着岩する直径350mm，長さ8mのPC杭で支持される基礎構造となっている。

### 3. アレー観測結果と記録例

1990年から現在までの観測により3観測点全部で起動がかかり，3成分の加速度記録が得られた地震は90に及ぶ．これらの地震には2003年5月26日宮城県沖地震（M7.1）や2003年7月26日宮城県北部地震本震（M6.4）も含まれる．ここでは代表的な例として2003年5月26日宮城県沖地震（M7.1）による記録を紹介する．

図-2は2003年5月26日宮城県沖地震（M7.1）による3観測点の加速度記録をペーストアップしたものである．図-2にみられるように，各点とも方向によって異なる挙動を示すが，建物最上階のF4での長辺方向の記録が最も大きな加速度レベルを与えていることがわかる．このことから，この

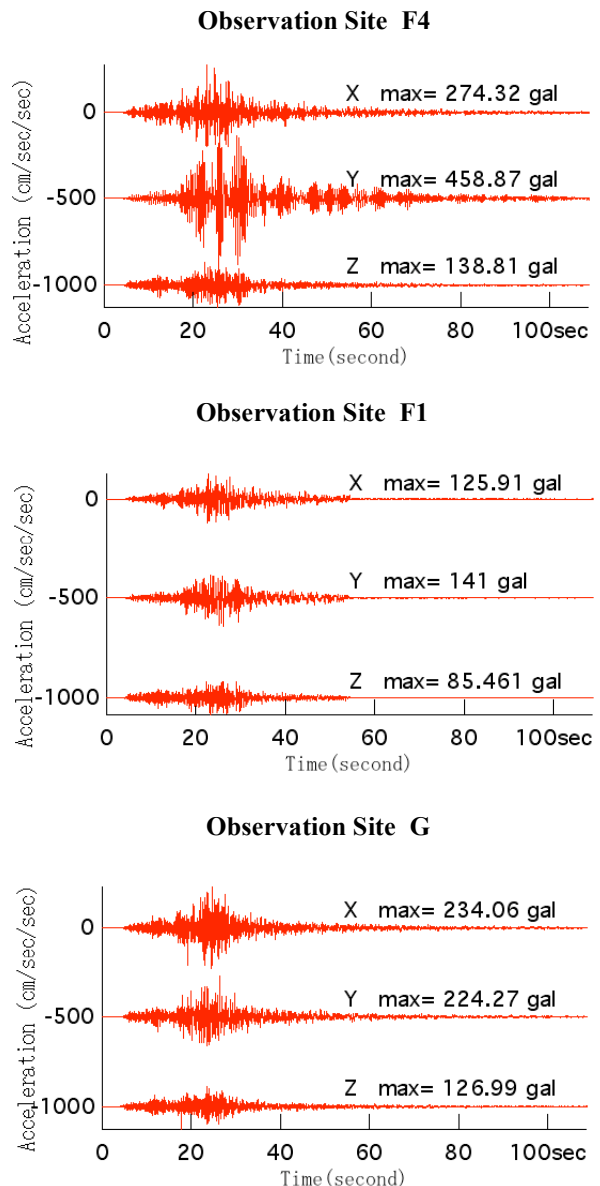


図-2 2003年5月26日の記録例

建物は長辺方向に強く応答増幅が存在すると推定されるが，これは短辺方向に耐震壁を配し、長辺方向は主に窓形式となっている本建物の構造が原因していると考えられる．一方，建物1階F1と自由地盤Gの記録に注目すると，両方向の水平動記録ともF1の加速度レベルがGでのそれより小さくなっている．これは，構造体の動的相互作用による入力損失が建物1階で生じていることに由来すると推定される．そこで，このような入力損失の周波数依存性をみるために，長辺方向の水平動（Y）を例に地盤Gと1階F1、4階F4の同時刻スペクトルを求め，そのスペクトル比 $F1/G$ ， $F4/G$ をプロットしたのが図-3・図-4である．これらの図をみると入力損失と建物応答増幅の実態が明瞭に観察される．例えば，図-3の $F1/G$ のスペクトル比では周期0.1～0.4秒で建物1階F1の振幅は自由地盤Gのそれより大幅に小さくなっていて，この帯域で入力損失が生じていることがわかる．一方，図-4の $F4/G$ のスペクトル比

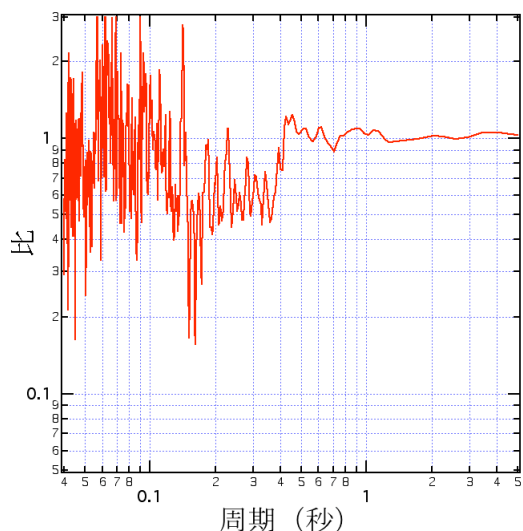


図-3 Y長辺方向のスペクトル費 F1/G

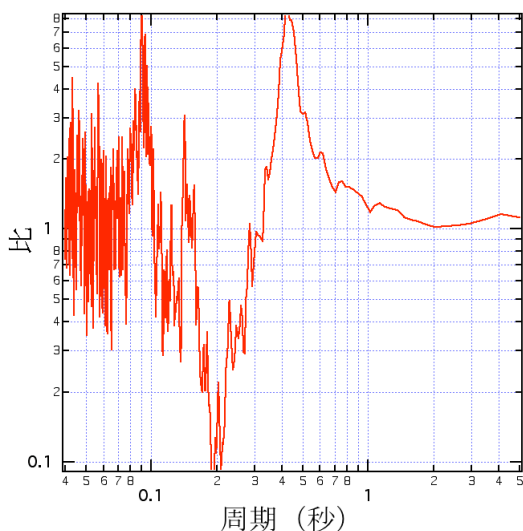


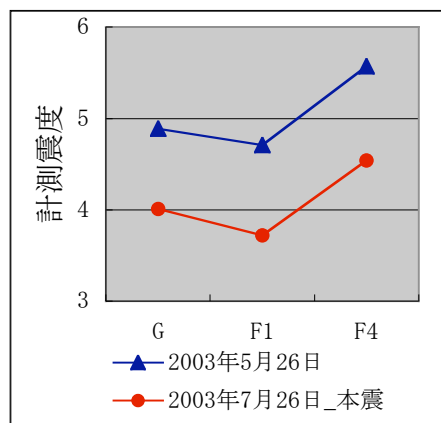
図-4 Y長辺方向のスペクトル費 F4/G

では同じ周期帯で入力損失が生じているのに加え、周期 0.45 秒付近で建物の固有周期を反映した応答増幅が存在することがわかる。

#### 4. アレー観測による建物と地盤での震度の差

以上のような建物-地盤アレー観測による観測記録を用いて震度の差異を検討した。ここでは観測記録3成分（水平2成分、鉛直1成分）を気象庁方式により計測震度値を求めた。以下では、最初に代表的な二つの地震による震度の差異を述べた後で、全地震を用いた統計的な検討を行う。

図-5 は 2003 年 5 月 26 日の宮城県沖地震（M7.1）と 7 月 26 日の宮城県北部地震本震（M6.4）での記録を対象とした計測震度を各点で比較して示したものである。これから上述の建物への入力損失と応答増幅の効果を受けて、建物 1 階



地震	G	F1	F4
2003年5月26日	4.89	4.71	5.57
2003年7月26日_本震	4.01	3.72	4.54

図-5 計測震度の違いの例

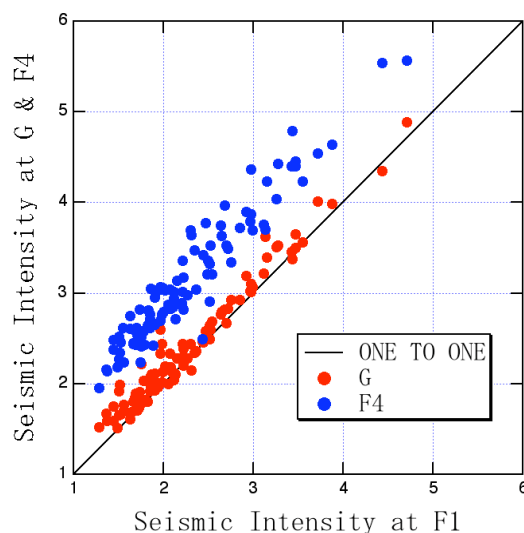


図-6 全地震の震度差（F1 に対する G, F4 の震度）

F1 では地盤 G に比較して 0.2 程度の計測震度の減少があると同時に、建物 4 階 F4 では 0.8～1.0 程度の震度増が存在していることがわかる。二つの地震とも震度の差異の変動はほぼ同じ様相を呈している。これから、地震に依存しない差異が存在すると推定されるが、これを基に、全地震を対象として同様な検討を行った。この結果をまとめたのが図-6 である。図-6 では F1 観測点での震度に対する G 観測点、F4 観測点の震度が全地震に対してプロットされている。これから、地震によらない震度の差異が明瞭である。図-6 では 1 対 1 の直線も描かれており、これと比較することにより観測点間の相対的な差異が識別できる。これから、F4 観測点はもちろん、G 観測点の震度も 1 対 1 直線より上に分布しており、これから明らかに F4 観測点、G 観測点での震度は F1 観測点の震度よりも地震によらず大きくなることがわかる。そこで、この差異を統計的に回帰分析

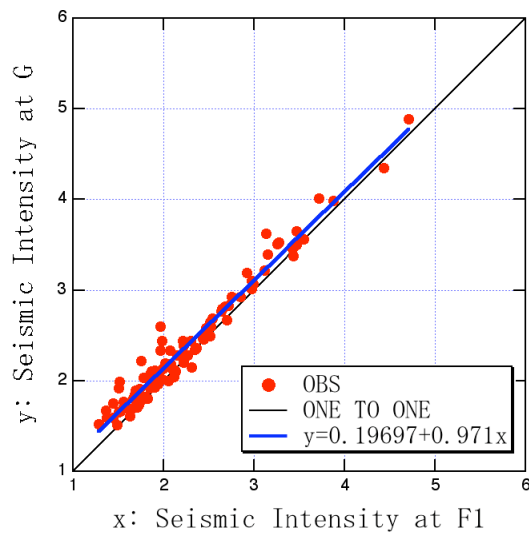


図-7 F1 と G での震度差と回帰式

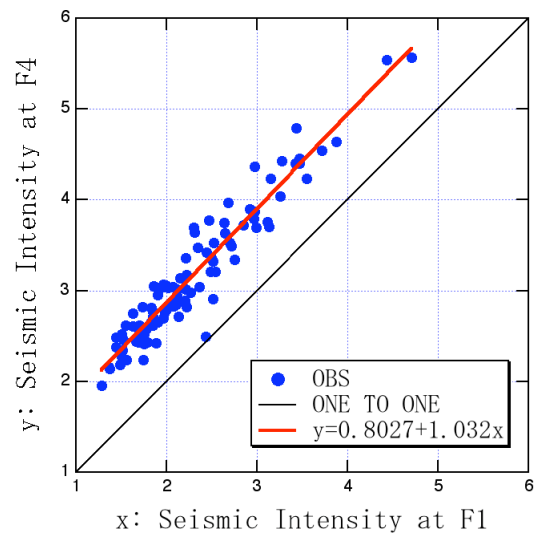


図-8 F1 と F4 での震度差と回帰式

した結果が図-7，図-8 である。図-7 は観測点 G と観測点 F1 との震度関係，図-8 は観測点 F4 と観測点 F1 との震度関係をまとめたものである。線形式で回帰分析された回帰式はそれぞれの図に与えられている。

図-7 の観測点 G と観測点 F1 の回帰式における勾配は 0.971 であり，縦軸切片の値は 0.197 と求まる。これから両観測点での計測震度は約 0.2 の差をもって，ほぼ正比例な関係で変動することが期待される。すなわち，この場合の建物では 1 階フロアでの計測震度は周辺地盤での計測震度よりも統計的に約 0.2 だけ小さいことになる。一方，図-8 の観測点 F4 と観測点 F1 との震度関係の回帰式は勾配 1.032，縦軸切片 0.803 であり，これから，4 階での計測震度は 1 階での計測震度にはほぼ正比例して，約 0.8 だけ統計的に大きくなることを指摘できる。

## 5. 常時微動観測とスペクトル比の考察

以上のように建物の影響による設置環境で震度計の震度はかなり変動することが実測により明らかとなったが，震度計の設置条件を決定する手法として，このような差異は震度計の設置以前に定量的に把握できることが必要である。そのための有力な手段として常時微動の利用が考えられる。そこで，強震観測と同地点で常時微動のアレー観測を実施して，地震動と常時微動の観測点間のスペクトル比の相関を検討した。

先に代表的な地震動記録により観測点間のスペクトル比 F1/G，F4/G を示したが，このようなスペクトル比を全ての地震記録について求めて，記録の最大加速度レベル毎に整理した。それらを記録方向（X 短辺方向，Y 長辺方向）別に示したのが図-9～図-12 である。これらの図で，各点の応答の非線形な変化を調べるため，最大加速度が 10 ガル以下，10～30 ガル，30～50 ガル，50 ガル以上の地震動毎のスペク

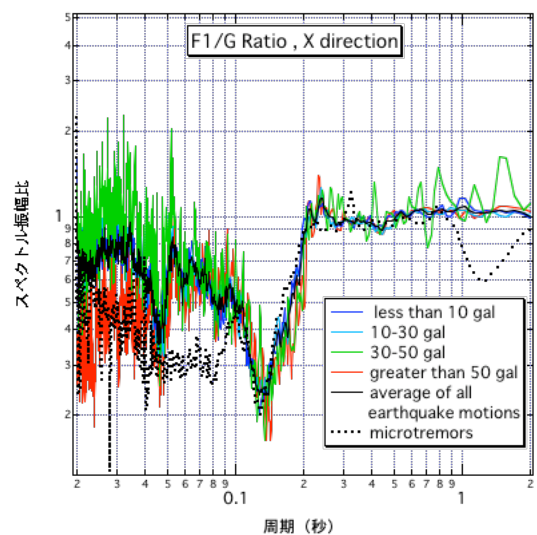


図-9 スペクトル比 F1/G（X 短辺方向）

トル比の平均がプロットされている。また，すべてのレベルの地震動のスペクトル比を平均したものも示されている。さらに，これらの図では地震観測と同じ配置でアレー観測された常時微動のスペクトル比が比較されて示されている。ここでの常時微動のスペクトル比は時間を変えて観測された 5 解析区間を平均したものである。

これらのスペクトル比をみると，周期 0.1 秒以下の短周期を除き，常時微動によるスペクトル比は地震動のそれとよく一致していることがわかる。特に，F1/G のスペクトル比において X 短辺方向，Y 長辺方向とも常時微動のスペクトル比は地震動のそれに周期，振幅比とも良く一致している。ただし，F4/G のスペクトル比では地震動のスペクトル比にレベルによる非線形な増幅変動が観測され，常時微動との違いが顕著である。以上から，建物 1 階では地震動の応答に非線形な影響がみられず，建物 1 階と自由地盤



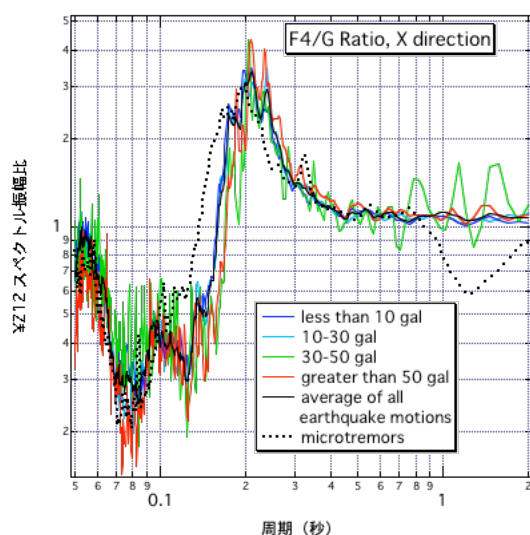


図-10 スペクトル比 F4/G (X 短辺方向)

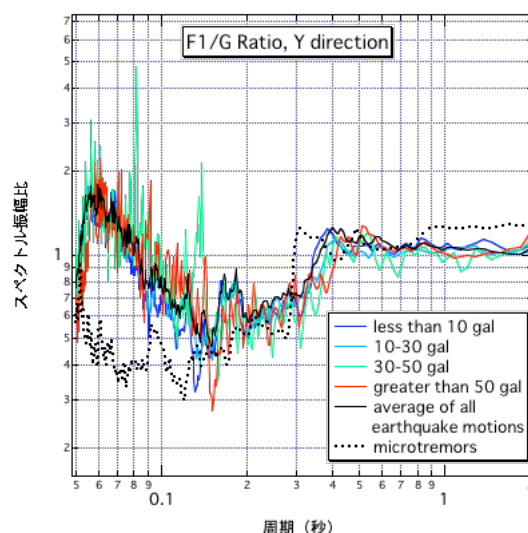


図-11 スペクトル比 F1/G (Y 長辺方向)

での震度の差異は常時微動観測から一定程度予測可能と考えられる。一方、常時微動による建物1階と自由地盤でのスペクトル比には建物固有周期より短い周期帯域で地震動のそれとかなり異なる様相がみられる。この原因については両者の波動伝播特性が異なることが考えられるが、詳細は不明である。今後、この原因を解明すると同時に、さらに多くの観測比較を積み重ねる必要がある。

## 5. むすび

以上に述べた東北工業大学香澄町キャンパス 6 号館における 15 年にわたる観測から得られた観測記録を用いた検討から、4 階建て程度の一般的な建物 1 階では周辺の自由地盤に比較して約 0.2 程度計測震度が小さくなることが指摘できる。この減少はスペクトル比の考察から建物躯体の地盤拘束による地震動の入力損失に由来するものと推定される。

計測震度における 0.2 の差異を大きいと判断するか小さいと判断するかは議論のあるところであるが、震度階 5 強と震度階 6 弱の間における 0.2 の計測震度の差異は非常にクリティカルな重要な差異であることは指摘できる。いずれにしても、建物と自由地盤での震度の差異に関する定量的な検討は、これまで意外となされていないことを考えると、今回の多くの地震による検討結果は十分な参考資料を提供していると言えよう。このような設置環境における震度計による震度の差異を前もって予測する手法として常時微動のアレー観測によるスペクトル比の解析

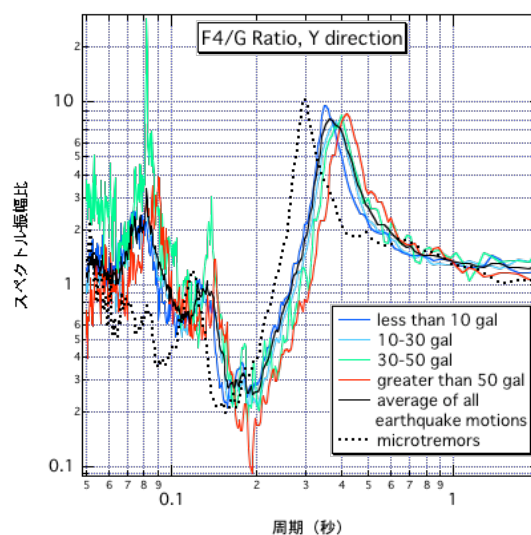


図-12 スペクトル比 F1/G (Y 長辺方向)

が有力であることも示唆される。

## 参考文献

- 1) (社)地盤工学会・2003年三陸南地震および宮城県北部地震災害調査委員会：2003年三陸南地震・宮城県北部地震災害調査報告書、2003年10月
- 2) (社)土木学会：土木学会（第1次）・地盤工学会合同調査団調査速報ホームページ，  
<http://www.jsce.or.jp/report/32/index>.

## A STUDY ON THE VARIATIONS OF SEISMIC INTENSITY BY USE OF ARRAY OBSERVATION SYSTEM OF EARTHQUAKE MOTIONS

Makoto KAMIYAMA, Yuuya OSANAI and Tadashi MATSUKAWA

Nowadays the seismic intensity scale has become an important information for real time counter-measures soon after disastrous earthquakes. However, some investigations of damage due to recent earthquakes such as the 2003 Miyagi Ken Hokubu Earthquake revealed problems over how and where to set an instrument for measuring seismic intensity. Especially, the difference in seismic intensity between at the ground surface and in buildings has focused. This paper deals with the variations of seismic intensity using records due to an array observation system for ground and building motions. The array observation system, which was installed at the campus of Tohoku Inst. of Tech. 15 years ago, has obtained some 90 motion records simultaneously at different sites of the free ground surface, the first floor and fourth floor of a 4-story building.

The instrumental intensity scales were obtained from the records to compare their values at the different sites. The results made it statistically clear that the intensity at the first floor is smaller by 0.2 than the one at the ground surface. This difference was also found in array observation of microtremors, leading to a conclusive remark so that microtremors are available to predict a difference of seismic intensity depending on installation sites.