

## 建築研究所の強震観測

鹿嶋俊英\*

### Strong Motion Observation by Building Research Institute

Toshihide KASHIMA\*

*\*Building Research Institute*

*kashima@kenken.go.jp*

#### Abstract

For the purpose of development of the seismic safety for buildings, it is necessary to understand the characteristics of earthquake ground motions and the behavior of buildings during earthquakes. Building Research Institute (BRI) is operating a strong motion network in order to investigate actual dynamic behavior of buildings, and is conducting research projects concerned.

BRI has installed strong-motion instruments at 77 stations in major cities throughout Japan. One third of the stations are located in Tokyo and the surrounding area. All stations are equipped with up-to-date digital strong motion instruments and are connected to BRI via public telephone lines in order to maintain instruments and to collect strong motion records immediately after earthquakes. Our observation mainly aims at buildings, and basically places acceleration sensors on the top and at the basement of a building, and optionally on the ground. The configuration of sensors is decided according to the property of the target building in special cases.

This paper introduces the outline of the BRI strong motion network and recent results of the observation.

**Key words:** Strong Motion Observation, Input Earthquake Motion to Buildings, 2003 Tokachi-oki Earthquake, Base Isolated Building

#### 1. はじめに

独立行政法人建築研究所(以下建築研究所)では 50 年近くに渡り、建物の耐震設計技術の向上に資することを目的として、建物を対象とした強震観測と関連する研究を行っている。本稿では建築研究所の強震観測の概要と最近の観測事例を紹介する。

#### 2. 観測の経緯

1948 年福井地震の教訓から始まった強震計の開発段階から、建築研究所は主要な役割を果たしてきた。1953 年に強震計が開発されて観測への機運が高まり、総理府資源調査会は 1955 年に「強震測定計画に関する勧告」を行う。この勧告を受けて建設省は 1956～1957 年に 25 台の強震計を導入した(田中, 1994)。

建設省が導入した強震計はその後建築研究所に移管

され、以降建築研究所が建物を対象とした全国的な観測網を展開して行くこととなった。

50 年近い歴史の中で建築研究所の強震観測は多くの貴重な観測記録を採取している。例えば 1964 年新潟地震の川岸町アパートの記録は、大地震の被災地で得られた初めての記録であり、地盤の液状化による地震動特性の変化が克明に記録された。また 1978 年宮城県沖地震の東北大学では、9 階建て建物の頂部で 1G を超える加速度を観測し、地震動の入力レベルと建物の耐震性能の観点から貴重な知見を与えてくれた。

#### 3. 観測の目的と観測体制

建築研究所の強震観測は、その開始以来一貫して建物の耐震設計技術の向上に資することを目的としている。このために実地震時の地盤震動や建物の挙動を観測し、

\*独立行政法人建築研究所

その分析と関連する研究を行っている。

図 1 に示すように、現在全国の 77 ヶ所の観測地点に強震計を設置している。基本的な観測網は大地震発生時にどこかで記録が得られるように、200 km 程度の間隔で観測地点を配置し全国を覆っている。一方で東京を中心とした首都圏には約 1/3 の観測地点が放射状に配置されており、関東平野の地形的な影響を考慮した密な観測体制となっている。また仙台市周辺に 8 つの観測地点があり、うち 6 地点は地震動の特性を検討するため表層地盤を測定対象としている。

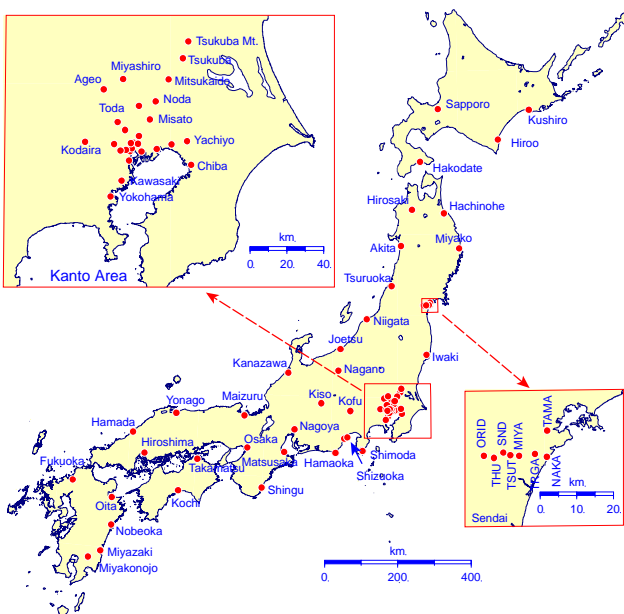


図 1 建築研究所強震観測地点の配置  
Fig. 1 Location of the BRI strong motion stations

各観測地点で用いられている観測機器は、16 ビットまたは 24 ビットのデジタル強震計となっており、内蔵の加速度センサーに加え外部に複数のセンサーが接続できる仕様となっている。ほとんどの強震計は電話回線によって建築研究所と結ばれ、強震計管理の省力化と記録収集の迅速化を実現している。

地盤を観測対象としている幾つかの観測地点を除いて、強震計は建物内に設置されている。建物の観測の場合、建物や周囲の状況に応じて複数のセンサーを配置することが多い。通常地震時の入力と応答を観測するため建物の頂部と基礎部にセンサーを置き、可能であれば地盤上にもセンサーを設置する。これは、地盤と建物の動的な相互作用の影響を検討するためである。図 2 に典型的なセンサー配置を示す。

図 3 に観測対象建物の階数による分類を、図 4 に構造種別による分類を示す。建物階数を見ると 10 階建て以下の中低層建物が全体の 8 割を占めている。また構造種別では鉄筋コンクリート(RC)造の建物がほぼ半数となっており、鉄骨鉄筋コンクリート(SRC)造を加えるとコンクリート系の建物の割合が 9 割に達する。これは建築研究所が強震計を設置している建物は国や地方自治体

の庁舎が多く、一般的な公的庁舎建物の階数や構造を反映したものと考えられる。

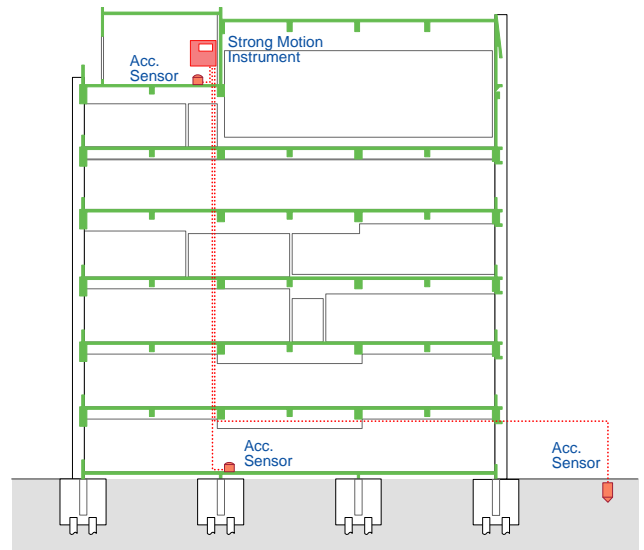


図 2 典型的なセンサー配置  
Fig. 2 Typical sensor configuration

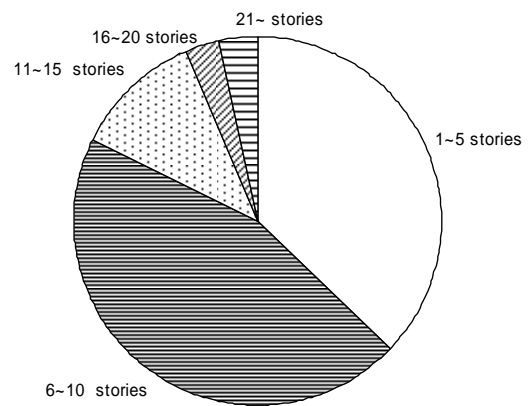


図 3 観測対象建物の階数による分類  
Fig. 3 Classification of target buildings according to number of stories

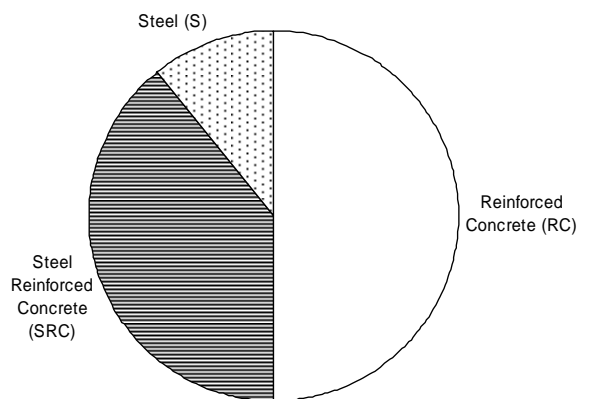


図 4 観測対象の階数による分類  
Fig. 4 Classification of target buildings according to structure type

4. 最近の観測事例

2003 年 9 月 26 日 4 時 50 分頃、釧路沖を震源とするマグニチュード 8.0 の地震(2003 年十勝沖地震)が発生し、北海道南東部を中心に少なからぬ被害をもたらした。建築研究所の強震観測網では北海道から東北にかけての観測地点で強震記録を採取した(鹿嶋他, 2003)。震央と建築研究所の観測地点の位置を図 5 に示す。なお各観測地点に示した数値は地表または建物の基部の記録から算出した計測震度相当値と最大加速度である。以下、大きな強震記録が得られた広尾町役場(HRO)と釧路合同庁舎(KGC)の観測記録についてその特徴を述べる。

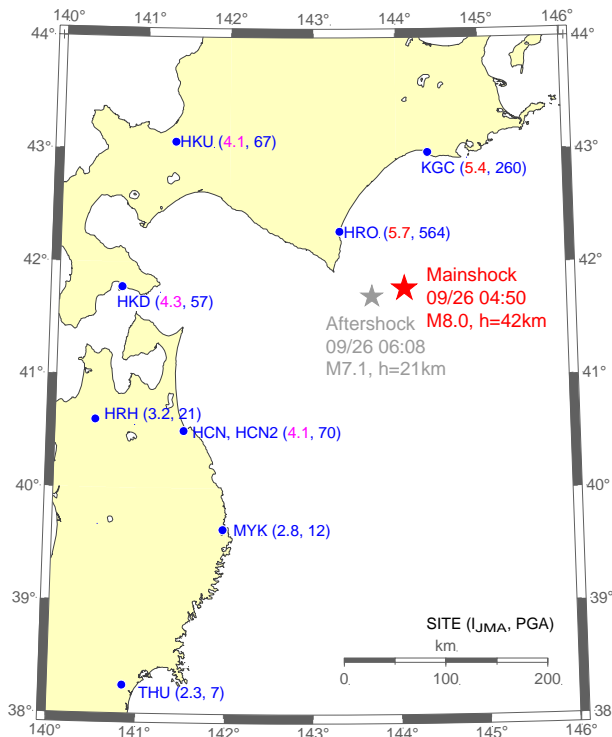


図 5 2003 年十勝沖地震の震央と強震観測地点  
Fig. 5 Strong motion stations which obtained records from the 2003 Off-Tokachi Earthquake

4.1 広尾町役場(HRO)の記録

建築研究所の観測地点のうち震央距離が 84km と最も近かった広尾町役場(HRO)は 3 階建(1 部 2 階建)の鉄筋コンクリート(RC)造の庁舎で、強震計は 2 階建て部分の 1 階に設置してある。ここで得られた強震記録は水平成分の最大加速度が  $564\text{cm/s}^2$  と非常に大きなものであった。

一方町役場の敷内地盤上には防災科学技術研究所の K-NET 広尾観測地点(HKD100)が置かれており、より大きな観測記録が得られている。表 1 にそれぞれの記録の最大加速度を、図 6 に加速度波形を示す。建築研究所の強震計は建物の方位に合わせて設置されているので、ここでは比較のため K-NET に合わせ元の波形の水平成分を NS-EW に変換して示している。波形の上段 3 つの記録が K-NET 広尾の NS, EW, UD 成分、下段 3 波が建築研究所広尾町役場の強震計で得られた NS, EW, UD

成分である。K-NET の最大加速度は建築研究所と比較して 3 成分とも 2 倍前後大きくなっており、波形上からも大きな違いが認められる。両者の観測機器は 40m 程度しか離れておらず、両者の記録の違いは主として建物の内と外という設置環境に起因すると考えられる。

図 7 はそれらの記録のフーリエスペクトル、図 8 は K-NET の記録を分母としたフーリエスペクトル比である。これらの比較からは両者の加速度記録の違いは 3Hz~6Hz 辺りの振動数成分に起因すると考えられる。広尾町役場周辺の地盤は地表に厚さ 5m 程度の火山灰質粘性土が堆積しており、K-NET の調査によるとそのせん断波速度は 100 m/s 程度と軟らかい。K-NET の強震計は地盤上に設置されているため表層の増幅の影響を直接受ける。町役場庁舎は堆積層の下にある砂礫層に杭支持されており、庁舎内にある建築研究所の強震計の記録には基礎や建物の拘束による入力損失が期待される。このような現象の説明は建物への入力地震動を適切に評価するために重要である。

表 1 K-NET 広尾(HKD100)と広尾町役場(HRO)で観測された記録の最大加速度

Table 1 Peak accelerations observed at K-NET Hiroo (HKD100) and the Hiroo Town Office (HRO)

	最大加速度 ( $\text{cm/s}^2$ )		
	NS	EW	UD
K-NET 広尾 (HKD100)	810	970	461
広尾町役場(HRO)	444	385	243
比 (HKD100/HRO)	1.82	2.52	1.90

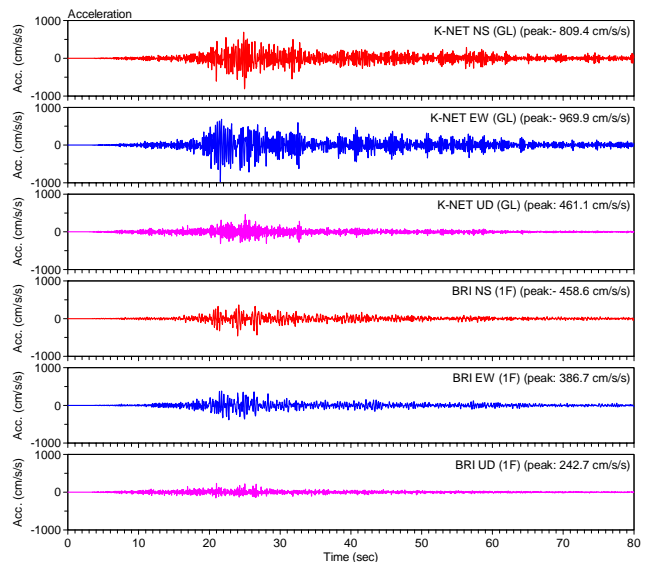


図 6 2003 年十勝沖地震の K-NET 広尾(上段)と広尾町役場(下段)の加速度波形

Fig. 6 Acceleration records observed at K-NET Hiroo (upper) and at the Hiroo Town Office (lower)

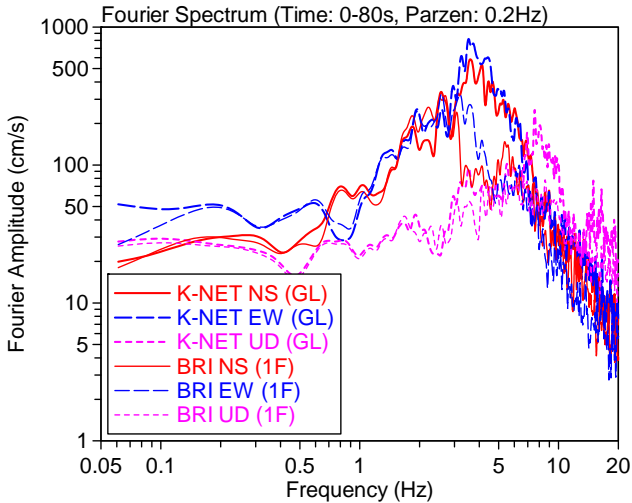


図 7 K-NET 広尾と広尾町役場の記録のフーリエスペクトル

Fig. 7 Fourier spectra of acceleration records observed at K-NET Hiroo and at the Hiroo Town Office

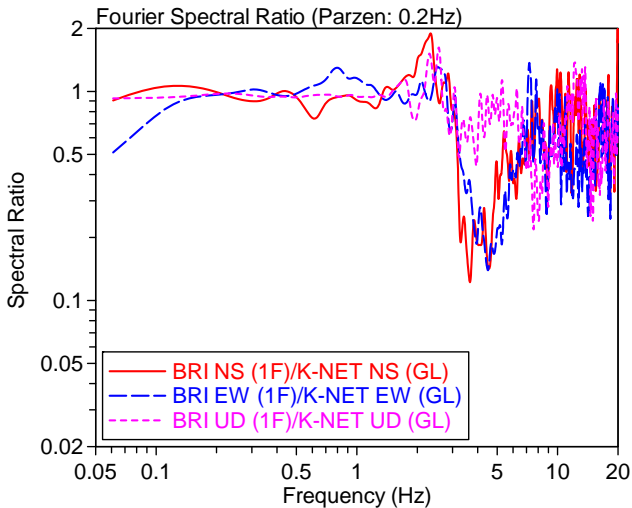


図 8 K-NET 広尾と広尾町役場の記録のフーリエスペクトル比

Fig. 8 Fourier spectral ratio of acceleration records at the Hiroo Town Office to ones at the K-NET Hiroo

4.2 釧路合同庁舎の記録

釧路合同庁舎は釧路市の中心部に位置する地下 1 階、地上 9 階、塔屋 1 階、軒高 43.7m、建築面積 4,680m<sup>2</sup>、延べ床面積 24,612m<sup>2</sup>の事務所建物である(塚野他, 2002)。天然ゴム系積層ゴム支承 64 基、鉛ダンパー 56 基、及び鋼棒ダンパー 32 基からなる免震装置が 1 階床梁と地下 1 階から立ち上がる片持ち柱の間に設置されている。構造形式は地上階が鉄骨ブレースを有する鉄骨鉄筋コンクリートのフレーム構造、地下階が鉄筋コンクリート造となっている。基礎は場所打ちコンクリート拡底杭で、地表面下 30m 程度で表れる砂岩層で支持されている。以浅の表層地盤は主として砂質土及び砂礫から構成されている。

建築研究所は釧路合同庁舎及び敷地地盤を対象に、6 台 18 成分の加速度計を配置し、強震観測を行っている。加速度計の位置を図 9 に示す。うち 3 台の加速度計は地表及び地中に設置され、最深の加速度計は深さ 34m と支持層である砂岩層に埋設されている。建物内の 3 台の加速度計は地下 1 階、免震層を挟んで 1 階、及び 9 階に設置されている。各加速度計の設置方位は建物の軸に合わせて、N167°E(北から時計回りに 167 度)に統一されており、N167°E 成分が建物の長辺方向に、N257°E 成分が短辺方向に対応する。

2003 年十勝沖地震で観測された各加速度計の最大加速度を表 2 に、建物短辺(N257°E)方向の加速度記録を図 10 に示す。地中 34m の砂岩上で 135cm/s<sup>2</sup>程度であった最大加速度は表層地盤で 2 倍程度に増幅し、地表の記録に比べて地下 1 階での最大加速度は 2/3 程度に減っている。また免震装置の効果で 1 階での最大加速度は地下 1 階の半分程度に減少し、1 階から 9 階への上部構造物の増幅は 1.2 倍から 1.5 倍と大きくはない。

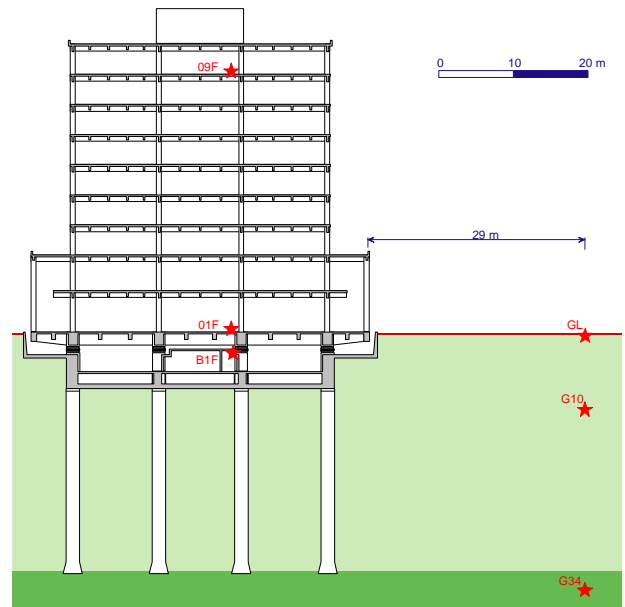


図 9 釧路合同庁舎(KGC)のセンサー配置

Fig. 9 Sensor configuration at the Kushiro Government Office Building (KGC)

表 2 釧路合同庁舎(KGC)で観測された最大加速度

Table 2 Peak accelerations observed at the Kushiro Government Office Building (KGC)

系	位置	最大加速度 (cm/s <sup>2</sup> )		
		N167°E	N257°E	UD
建物	9 階 (09F)	93.8	120.6	183.6
	1 階 (01F)	70.3	80.6	85.1
	地下 1 階 (B1F)	154.1	192.4	76.4
地盤	地表 (GL)	210.2	259.8	106.3
	地中 10m (G10)	173.3	214.4	71.9
	地中 34m (G34)	137.6	134.5	61.5

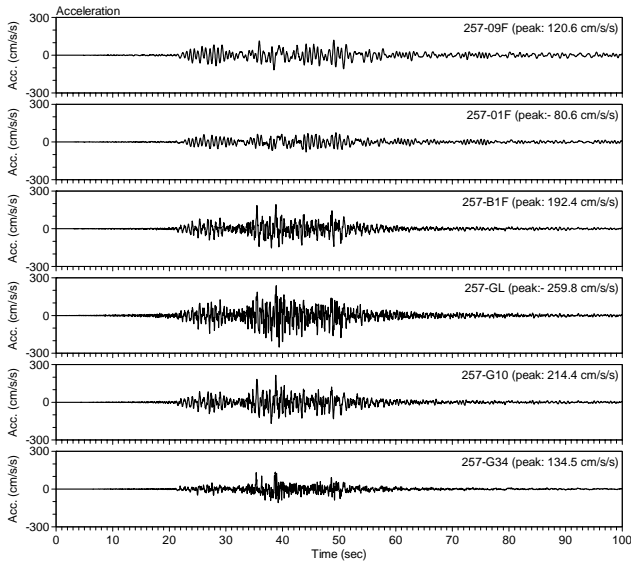


図 10 短辺方向(N257°E)の加速度記録  
Fig. 10 Acceleration records in the N257°E direction

地表(GL)で得られた加速度記録のフーリエスペクトルを図 11 に示す。0.5 Hz から 2 Hz の振動数成分が卓越しており、敷地周辺の地震動の特性は一般的な建物に対して厳しいものであったと指摘できる。図 12 は地表の記録の地中 34 m(G34)の記録に対するフーリエスペクトル比である。十勝沖地震の際の表層地盤の 1 次の卓越振動数は 1.5~1.6Hz 程度となっている。図中点線は PS 検層結果から得られた鉛直入射するせん断波の伝達関数であり、中小地震の記録のフーリエスペクトル比とは良い対応を示すものである(鹿嶋他, 2001)。今回の地震では地震動の振幅が大きかったため表層地盤が非線形挙動を示し、卓越振動数が 3 割程度低下したと推察される。

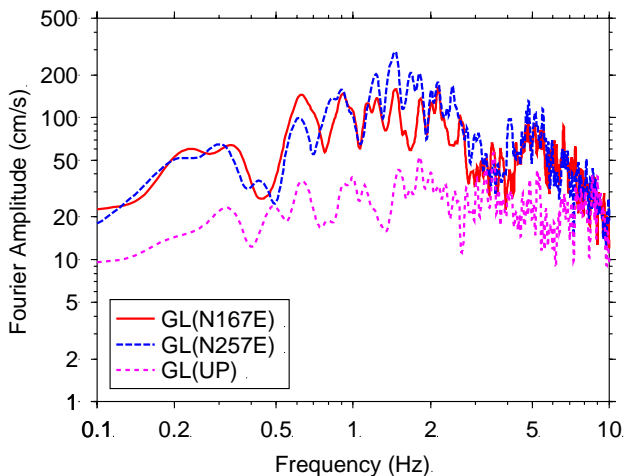


図 11 地表(GL)の記録のフーリエスペクトル  
Fig. 11 Fourier spectra of records on the ground (GL)

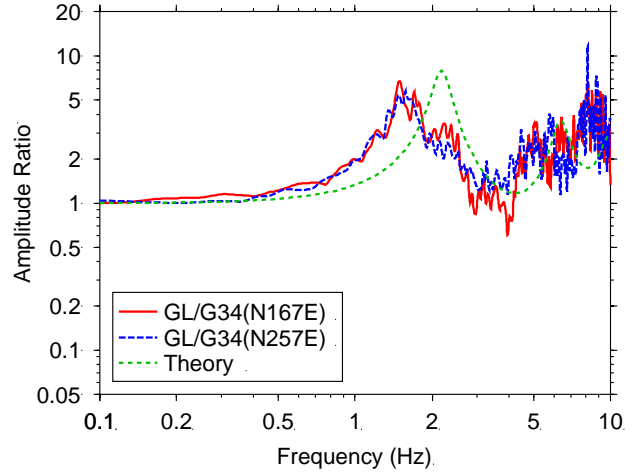


図 12 地表と地中の記録のフーリエスペクトル比 (GL/G34)  
Fig. 12 Fourier spectral ratio of the records on the ground to ones at 34 m below (GL/G34)

図 13 に地下 1 階(B1F)の地表(GL)に対するスペクトル比を示す。これは地表を基準とした場合の入力損失を表している。1 Hz 辺りまでの低振動数領域ではスペクトル比はほぼ 1 となっており、入力低下は認められない。1 Hz を超える高振動数領域では水平成分のスペクトル比は低下し、この差が最大加速度の違いとなって表れていると考えられる。

図 14 は免震層を挟んだ地下 1 階(B1F)と 1 階(1F)のスペクトル比で、水平成分のスペクトル比は免震層や上部構造の影響で大きく波打っている。1 Hz 付近や 3 Hz 付近の谷は、後述する上部構造物の固有振動数に対応する。

図 15 は建物 9 階(9F)の 1 階(1F)に対するスペクトル比で、上部構造の特性を表している。水平成分には 1 Hz 付近に明瞭なピークが存在する。一方上下動のスペクトル比に着目すると 7 Hz 辺りのピークが特徴的である。

図 16 は建物 9 階(9F)の地表(GL)に対するスペクトル比で、地表から建物頂部へ至る全体系の特性に相当する。水平成分の 0.4 Hz 辺りに全体系の 1 次固有振動と思われる緩やかなピークがあり、見かけの減衰は非常に大きい。また免震装置の効果で 1.5 Hz を超える高振動数領域のスペクトル比は著しく低下している。

このように地盤から建物の基礎、免震層を経て上部構造物に至る地震応答特性の変化が明瞭に捉えられており、今回得られた強震記録は大きな地震動を受ける免震建物の挙動を検証する上で貴重なものと言える。水平方向の振動特性は短辺方向と長辺方向で大きな違いはなく、免震構造に期待される加速度入力の低減効果は明確に認められた。一方上下動は 6 Hz から 7 Hz 辺りに明瞭な増幅が認められ、その生成要因と影響については更に検討が必要と考えられる。



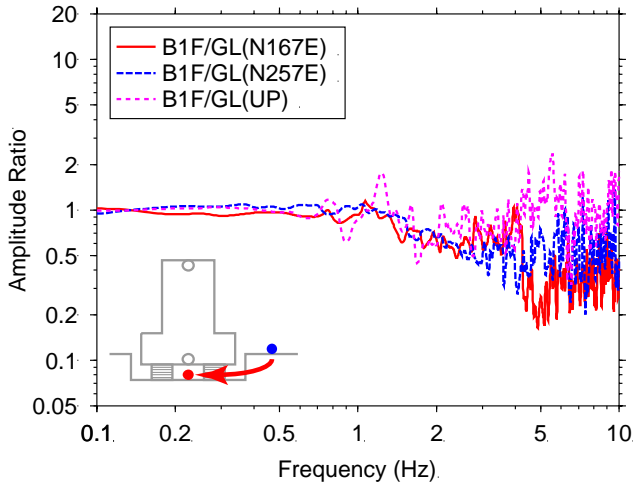


図 13 地下1階の地表に対するフーリエスペクトル比  
Fig. 13 Fourier spectral ratio (B1F/GL)

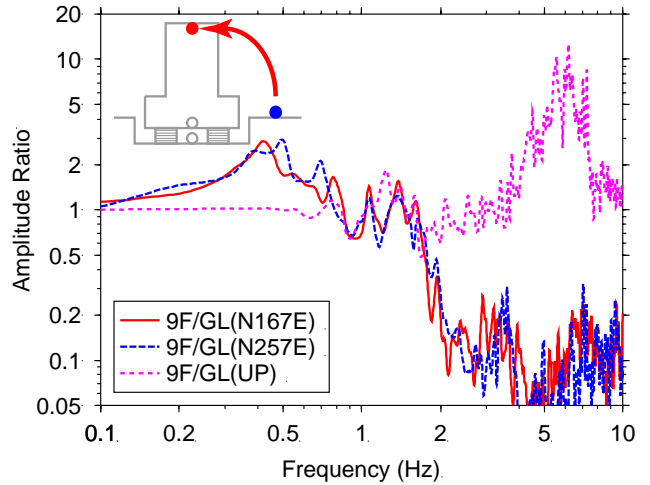


図 16 9階の地表に対するフーリエスペクトル比  
Fig. 16 Fourier spectral ratio (1F/B1F)

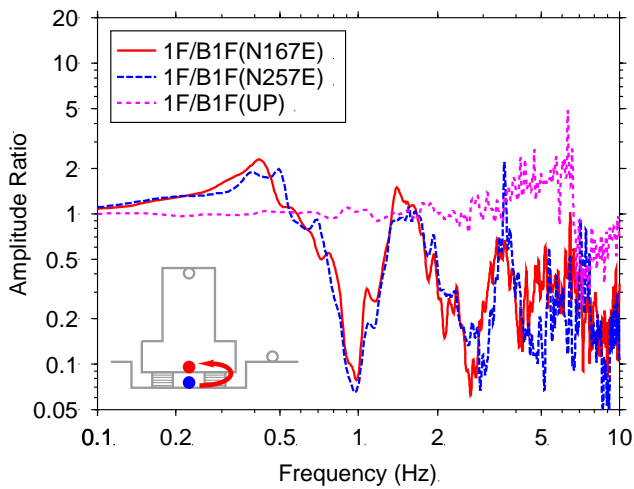


図 14 1階の地下1階に対するフーリエスペクトル比  
Fig. 14 Fourier spectral ratio (1F/B1F)

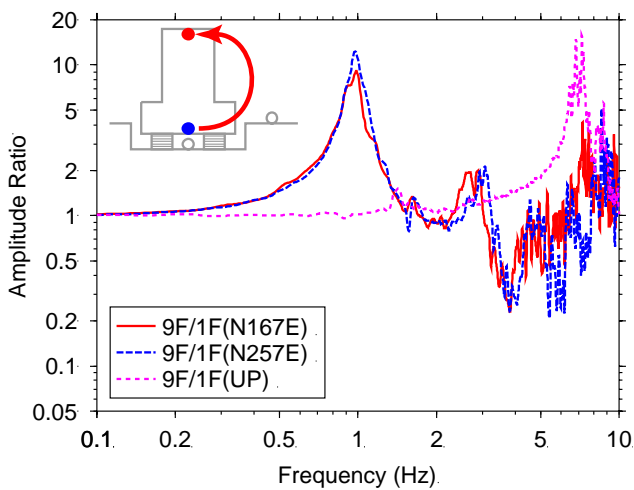


図 15 9階の1階に対するフーリエスペクトル比  
Fig. 15 Fourier spectral ratio (1F/B1F)

免震層の地震時挙動をより詳細に検証するために数値解析を行った。建物は層毎に質点系に置換し、質量は設計時の値を用いている。また上部構造の剛性は上部構造の1次振動数が一致するように設計値を調整している。免震装置の積層ゴムは線形ばね、鉛ダンパーはトリリニア、鋼棒ダンパーはバイリニアの履歴を仮定し、剛性や降伏せん断力などの定数は設計時の値を用いる。免震装置には2方向入力の影響が少なくないと想定されるため、桁行方向、梁間方向をそれぞれ個別に計算する場合(1D)と、免震装置にMSSモデル(和田他, 1985)を導入し、2方向同時解析を行う場合(MSS)の両者の解析を行っている。また設計時の座標に合わせてN257°E成分を反転してN077°E成分として扱っている。

図17に観測(Obs.)及び解析(Calc.)の免震層の相対変位を示す。上段には水平面内軌跡を、下段には時刻歴を描画している。解析結果は観測結果と全体的にはよく一致しているが、最大変位を生じる47秒から50秒辺りで違いが認められ、解析結果の最大変位が小さ目となっている。1次元解析(1D)と2次元解析(MSS)では2次元解析のほうがより対応が良い。免震装置の履歴モデルに若干の調整の余地が残されているが、概ね想定した解析モデルは地震時挙動を説明している。

以上のように設計時の定数を使ったシミュレーションの結果は観測結果を良く説明しており、免震装置は設計において期待した効果を発揮したと判断できる。

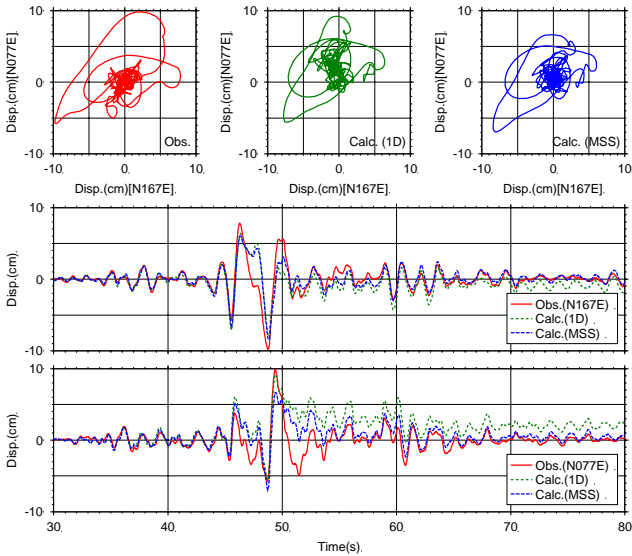


図 17 免震層変位の観測結果と解析結果の比較  
 Fig. 17 Comparison between observed and analyzed displacements of the base-isolated story

5. おわりに

建築研究所の強震観測の経緯を概説し、現況を紹介するとともに、2003 年十勝沖地震を例に観測記録例を報告した。地震を受ける建物の実際の挙動を正確に把握し、詳細に検討することは耐震設計技術の向上に大きな貢

献を果たすものである。今後とも観測体制の効率化を図りながら信頼性の高い資料の提供を続けてゆきたい。

なお、本稿では独立行政法人防災科学技術研究所の強震ネットワーク(K-NET: <http://www.k-net.bosai.go.jp/>)の記録を利用した。関係各位に謝意を表す。

6. 参考文献

- 1) 独立行政法人建築研究所 (2003): 強震観測速報, <http://iisee.kenken.go.jp/smo/20030926/20030926.htm>
- 2) 鹿嶋他(2001): 釧路地方気象台と釧路地方合同庁舎の地震動の特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)
- 3) 鹿嶋他(2004): 2003 年十勝沖地震における釧路合同庁舎の地震時応答, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 日本建築学会
- 4) 田中貞二(1994): 日本における強震計の開発と初期の強震観測, ORI 研究報告 94-02, 大崎総合研究所
- 5) 塚野他(2002): 寒冷地に建つ免震建物に設置された免震部材の環境温度測定, 日本建築学会技術報告集第 16 号, p.135
- 6) 和田, 木下(1985): MSS モデルを用いた柱降伏型の建物の立体振動性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)

要 旨

建物の耐震安全性の向上を図るためには、地震動特性や建物の地震時挙動を正確に知り、耐震設計の一層の合理的を図る必要がある。地震動や地震時の建物の挙動は非常に複雑であり、実際の現象を観測して分析することが極めて効果的である。このような背景から、独立行政法人建築研究所は建物を対象とした強震観測を行っている。

建築研究所は全国の 77 の観測地点に強震計を設置し、地震時の揺れを計測している。1957 年の観測開始以来観測技術と観測機器の改良を進め、現在全ての観測地点で新鋭のデジタル強震計が導入されている。観測の対象は主として建物で、通常建物の頂部と基礎、及び地盤上に加速度センサーを設置し、複数のセンサーの動きを 1 台の強震計で記録している。ほとんどの強震計は電話回線によって建築研究所と結ばれており、保守作業の軽減と迅速な記録の収集を実現している。

本稿は建築研究所の強震観測の概要と最近の観測事例について紹介する。

キーワード: 強震観測, 建物への入力地震動, 2003 年十勝沖地震, 免震建物