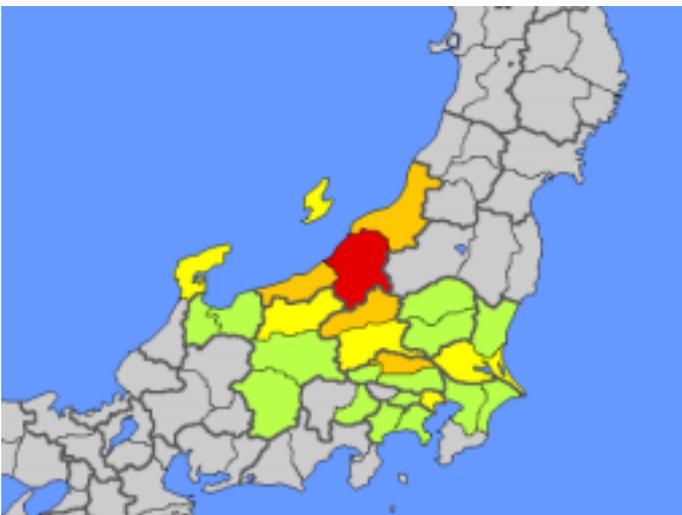


2004年 新潟県中越地震 K-Net・JMA 観測波 解析速報

独立行政法人 建築研究所
構造研究グループ 主任研究員 楠 浩一



(www.jma.go.jp)

各地の震度



(<http://www.mainichi-msn.co.jp/shakai/jiken/niigatajishin/etc/ShingenMap.html>)

1 対象とする地震波と時刻歴

2004年10月23日(土)17:56頃発生した新潟の地震で、K-Netにより観測された加速度データの中で、いずれかの方向の最大計測加速度が250galを超える記録計10波、およびJMA小千谷について、検討を行った。なお、K-NetおよびJMAで公開されている地震波データを、本節では物理量に変換して用い、それ以外では、加速度記録の基線ずれを除去するために全時間の平均値を引いたものを用いた。

K-netで公開されている各地震動およびJMA小千谷の最大加速度一覧を表1に、主要動部分の時刻歴を図1~図11に示す。小千谷および鹿瀬を除いて、最大加速度はNS方向が卓越している。特にNIG021十日町およびNIG019小千谷では、1000galを超える地震動が観測されている。NIG021のNSでは、いわゆるスパイクにより記録が大きくなっていると見受けられる。それ以外の地震動では、最大加速度がいわゆるスパイクによって記録されたと見受けられず、またNIG019小千谷の記録では、比較的長い周期の波が載っている事が見受けられる。

表1 各方向計測加速度最大値一覧 (cm/sec²)

| | | 北緯 | 東経 | EW | NS | UD |
|-----------|------|-------|--------|---------|---------|---------|
| NIG021 | 十日町 | 37.12 | 138.75 | 849.554 | 1715.5 | 564.395 |
| NIG019 | 小千谷 | 37.30 | 138.79 | 1307.91 | 1147.43 | 820.172 |
| NIG028 | 長岡支所 | 37.42 | 138.89 | 706.447 | 871.042 | 435.509 |
| NIG020 | 小出 | 37.23 | 138.97 | 407.401 | 521.431 | 312.136 |
| NIG017 | 長岡 | 37.44 | 138.85 | 369.012 | 468.393 | 330.974 |
| NIG023 | 津南 | 37.01 | 138.66 | 274.563 | 397.039 | 86.4849 |
| GNM003 | 沼田 | 36.65 | 139.08 | 292.507 | 359.115 | 126.051 |
| NIG022 | 塩沢 | 37.03 | 138.85 | 341.602 | 342.113 | 126.512 |
| GNM002 | 水上 | 36.78 | 138.97 | 279.321 | 340.904 | 194.497 |
| NIG012 | 鹿瀬 | 37.68 | 138.48 | 291.116 | 236.716 | 62.9275 |
| JMA OJIYA | 小千谷 | | | 897.6 | 779.2 | 730.8 |

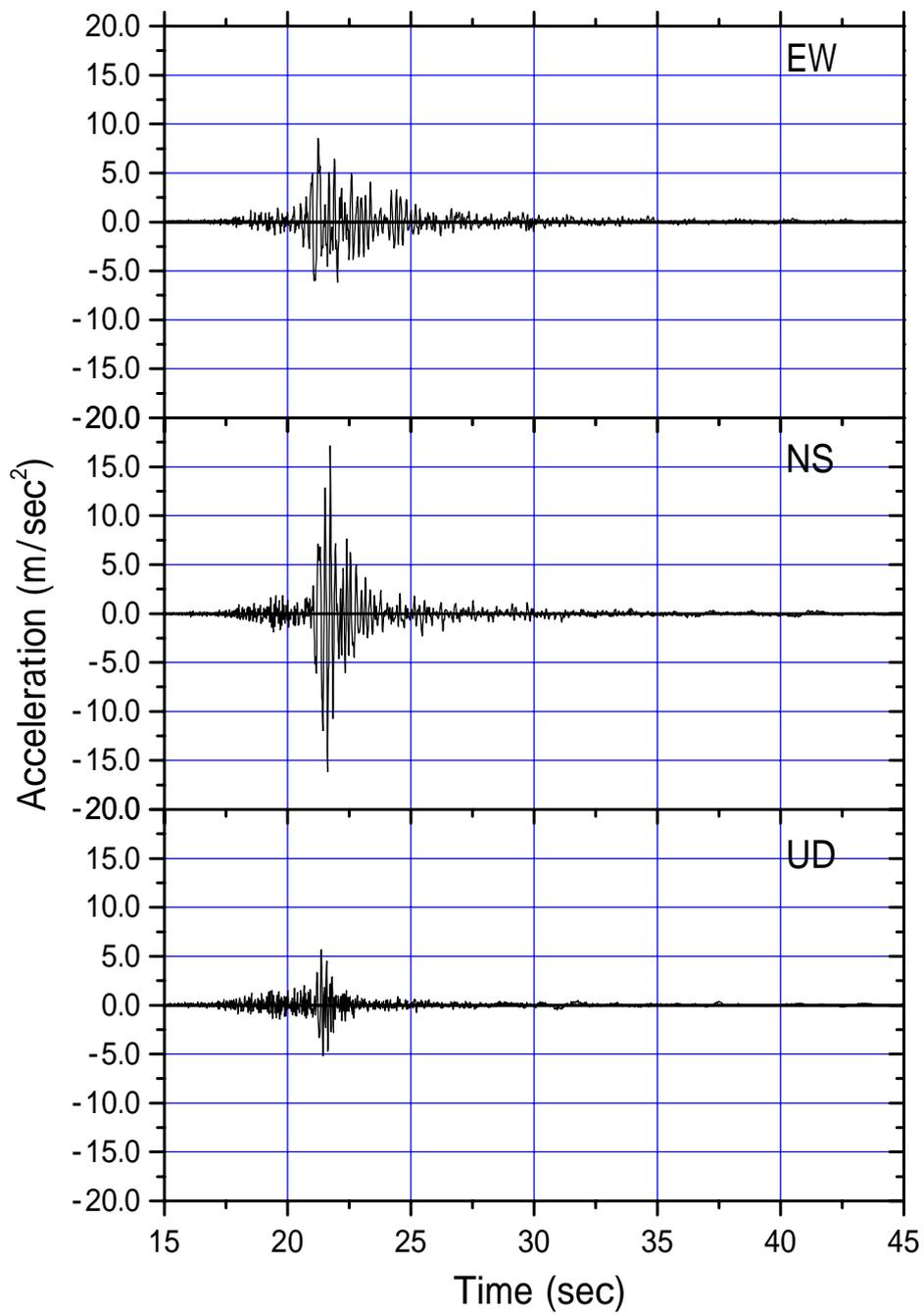


図 1 NIG021 十日町

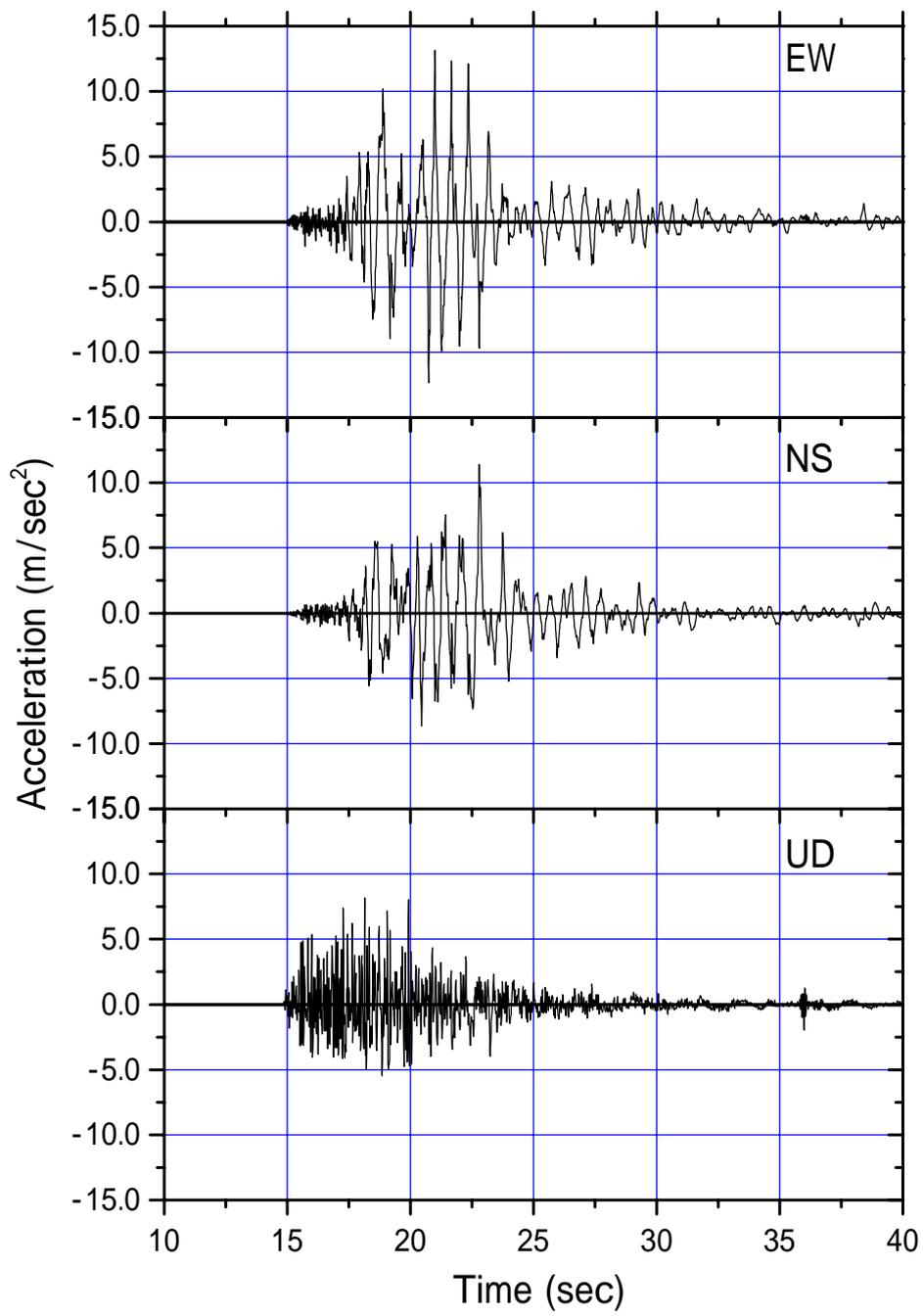


図 2 NIG019 小千谷

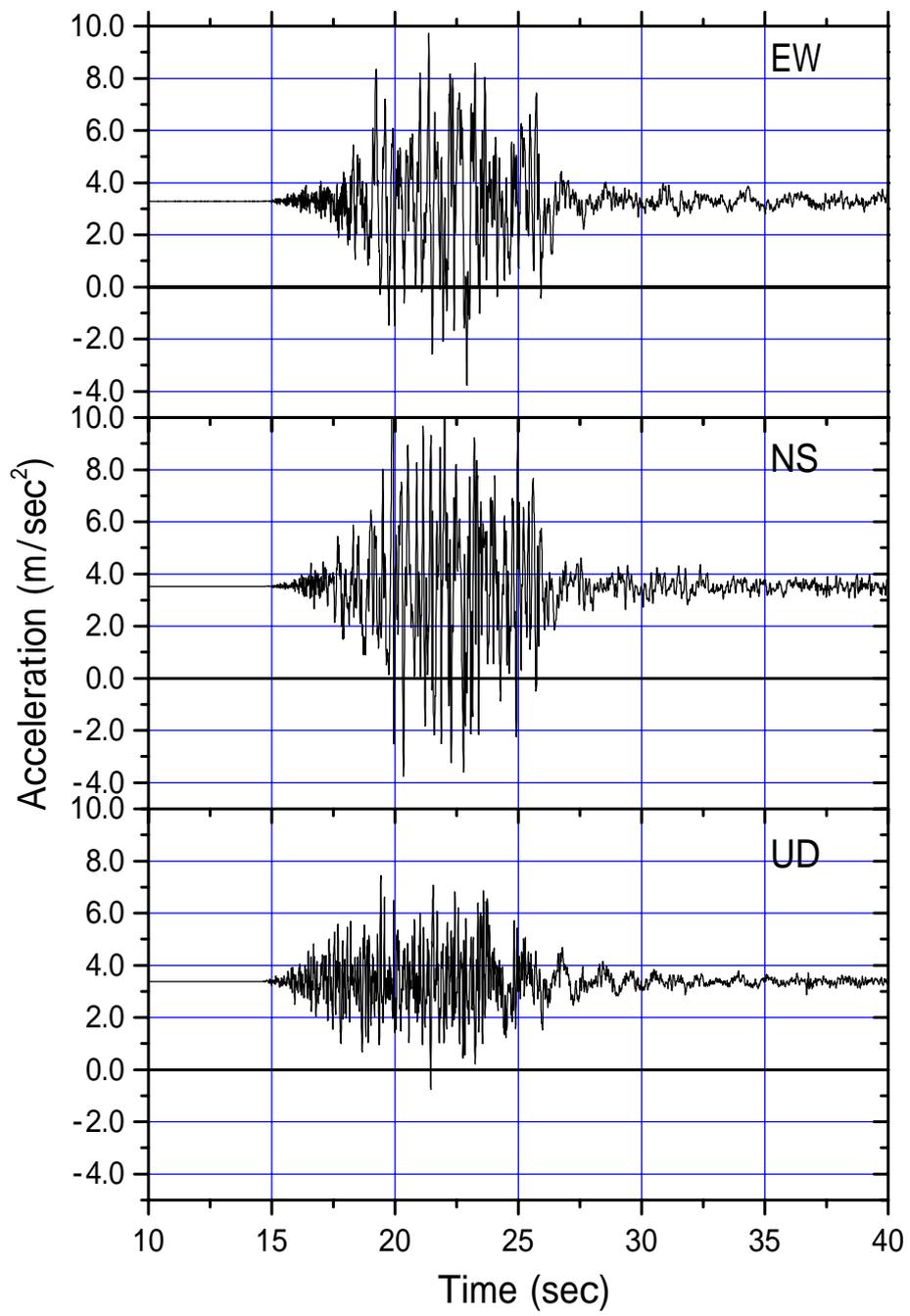


图 3 NIG028 長岡支所

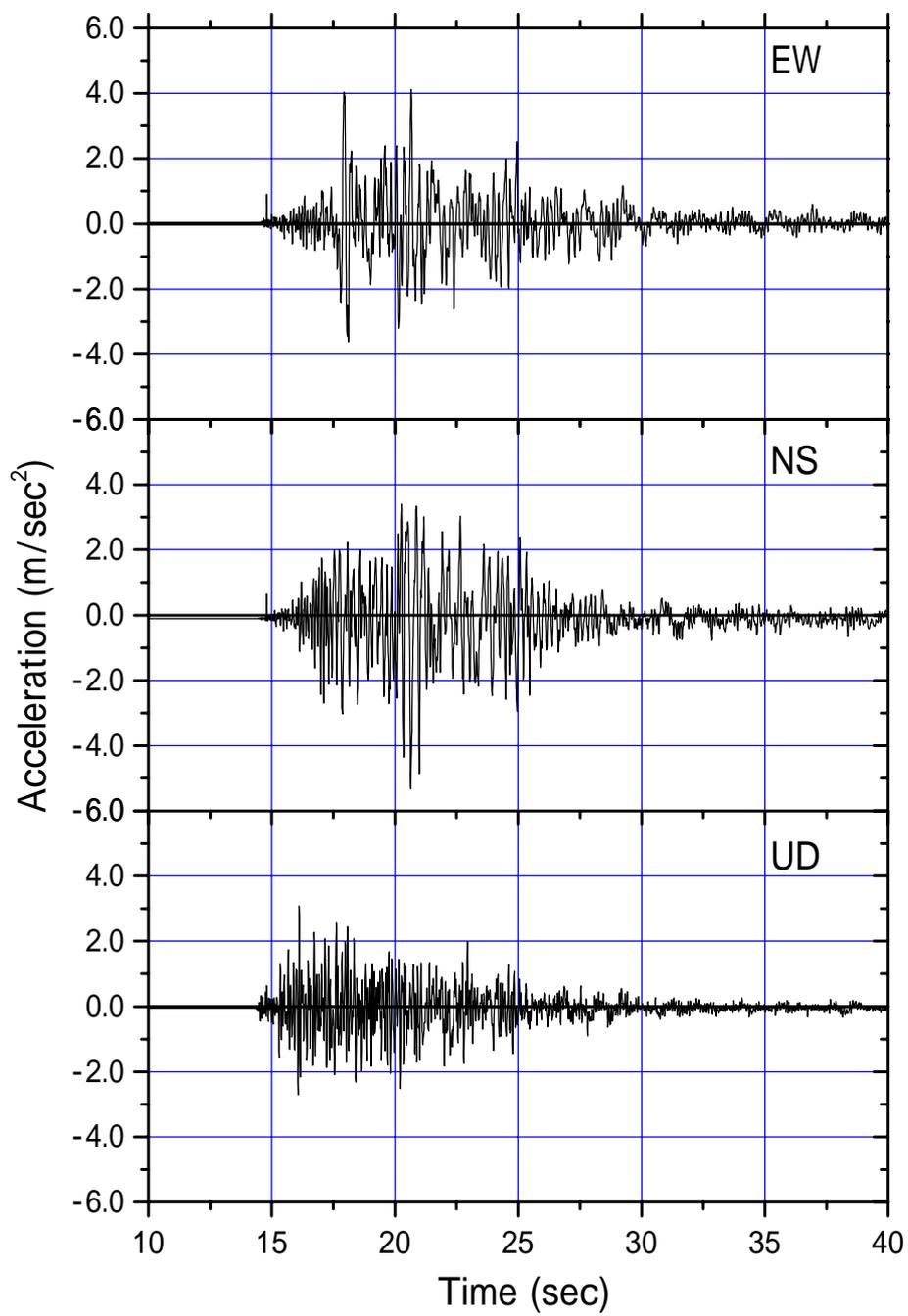


图 4 NIG020 小出

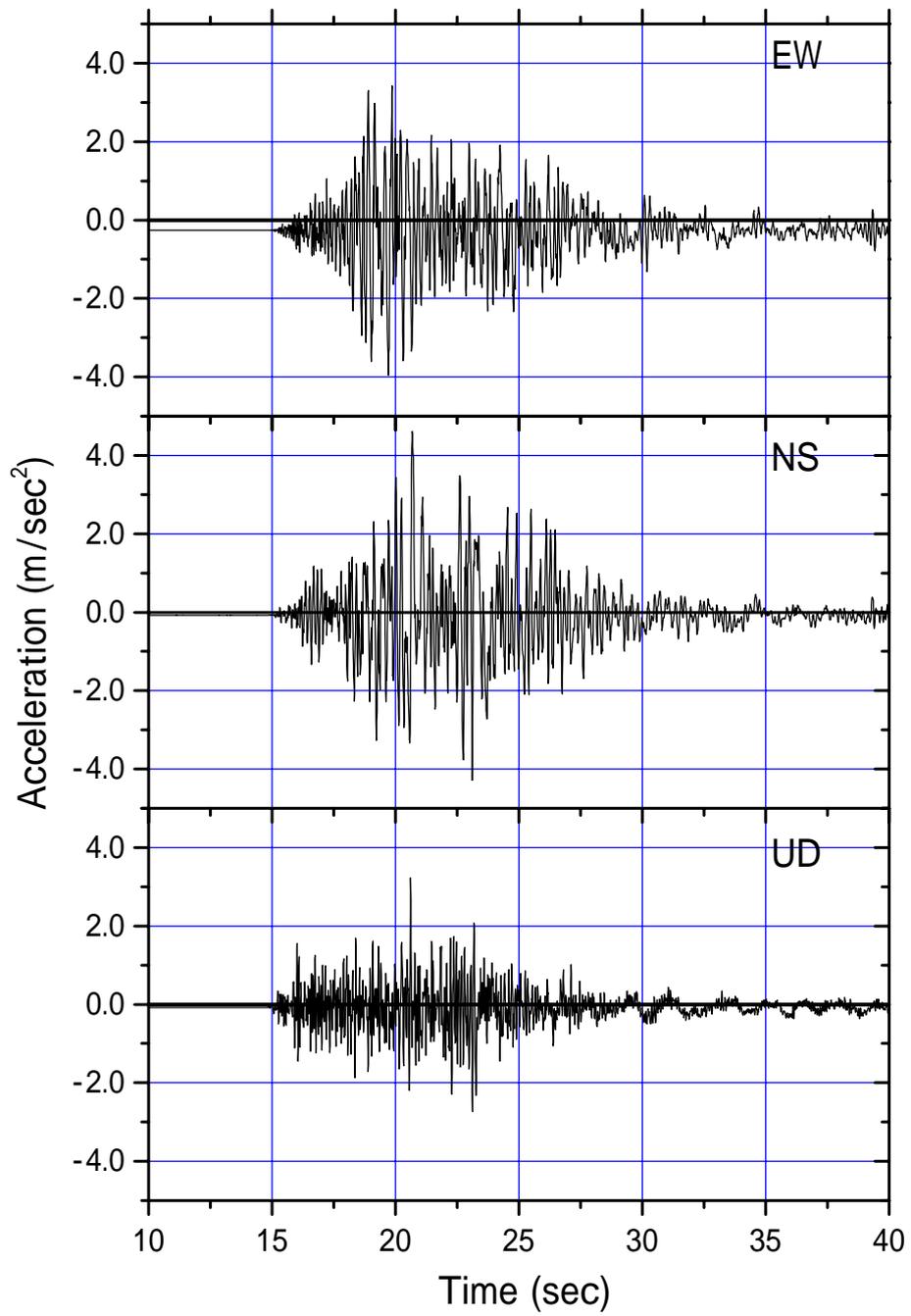


图 5 NIG017 長岡

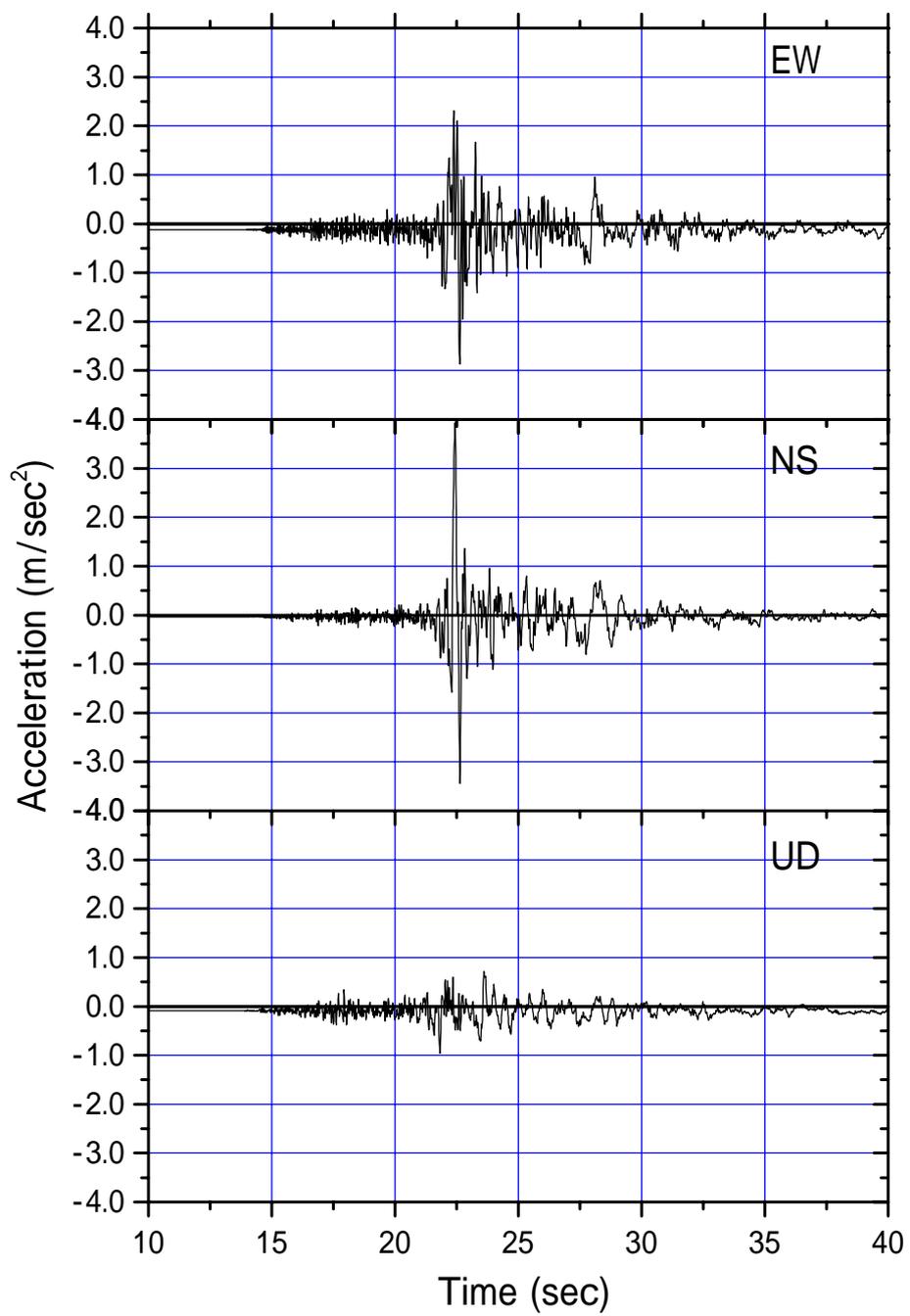


图 6 NIG023 津南

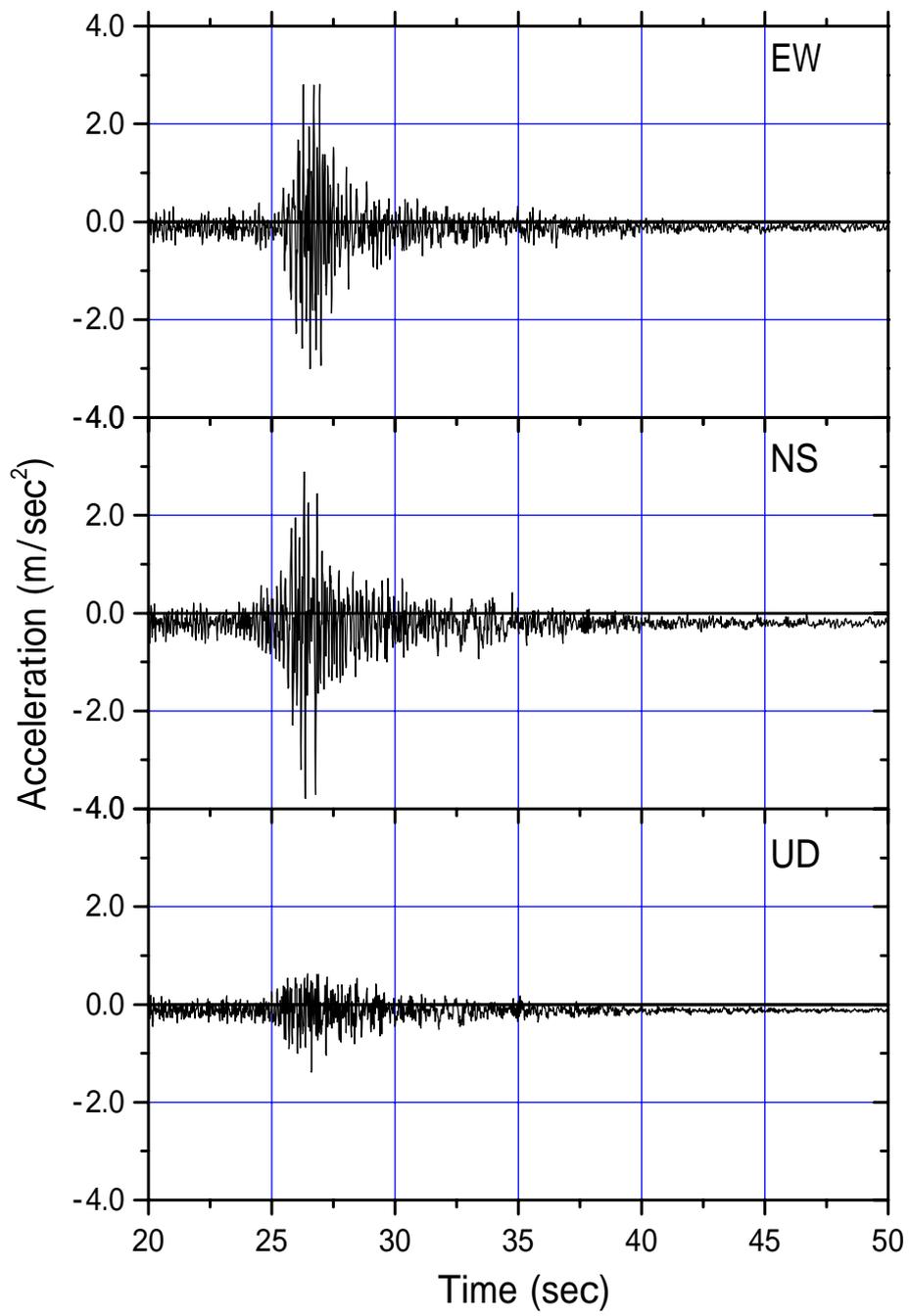


图 7 GNM003 沼田

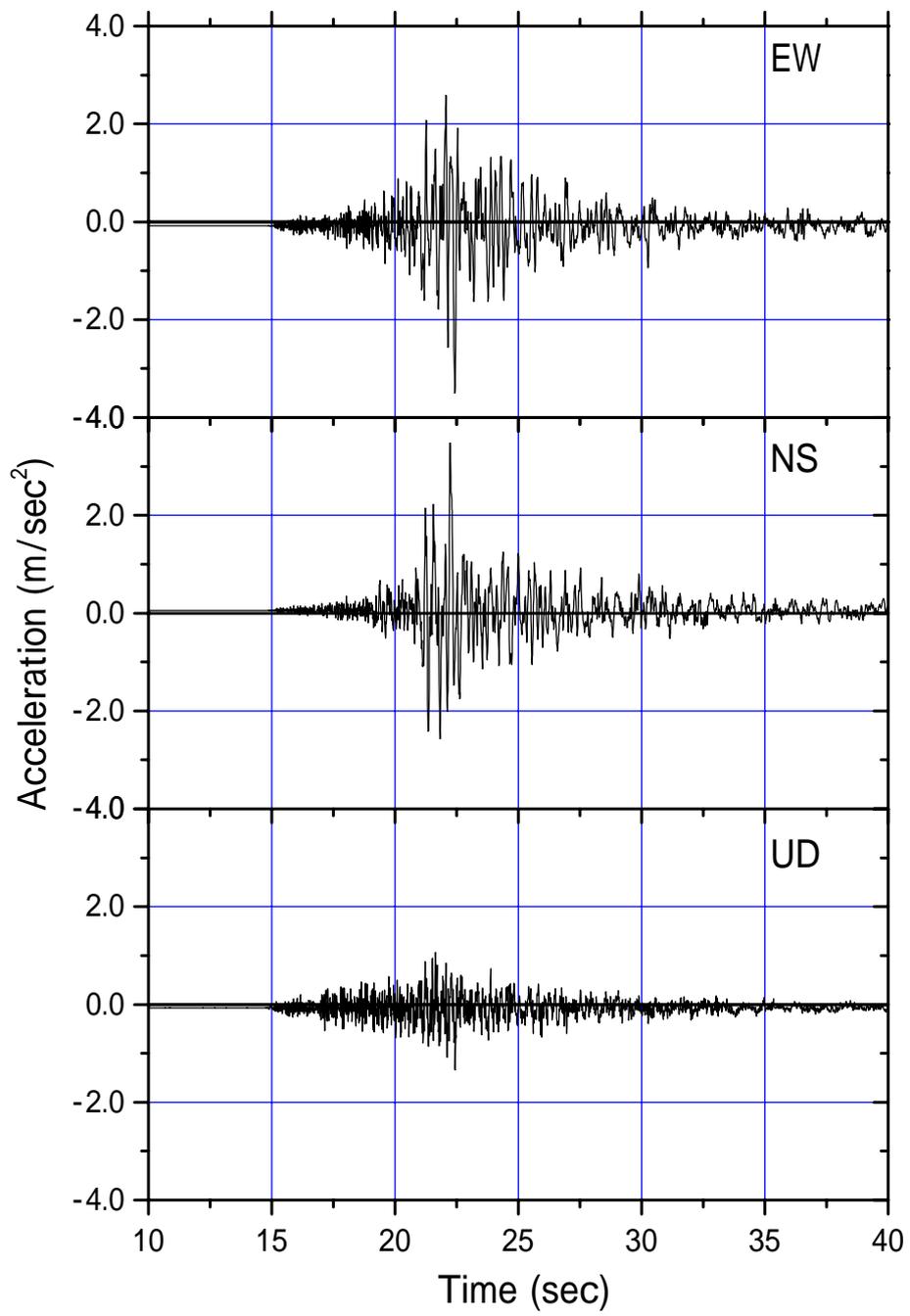


图 8 NIG022 塩沢

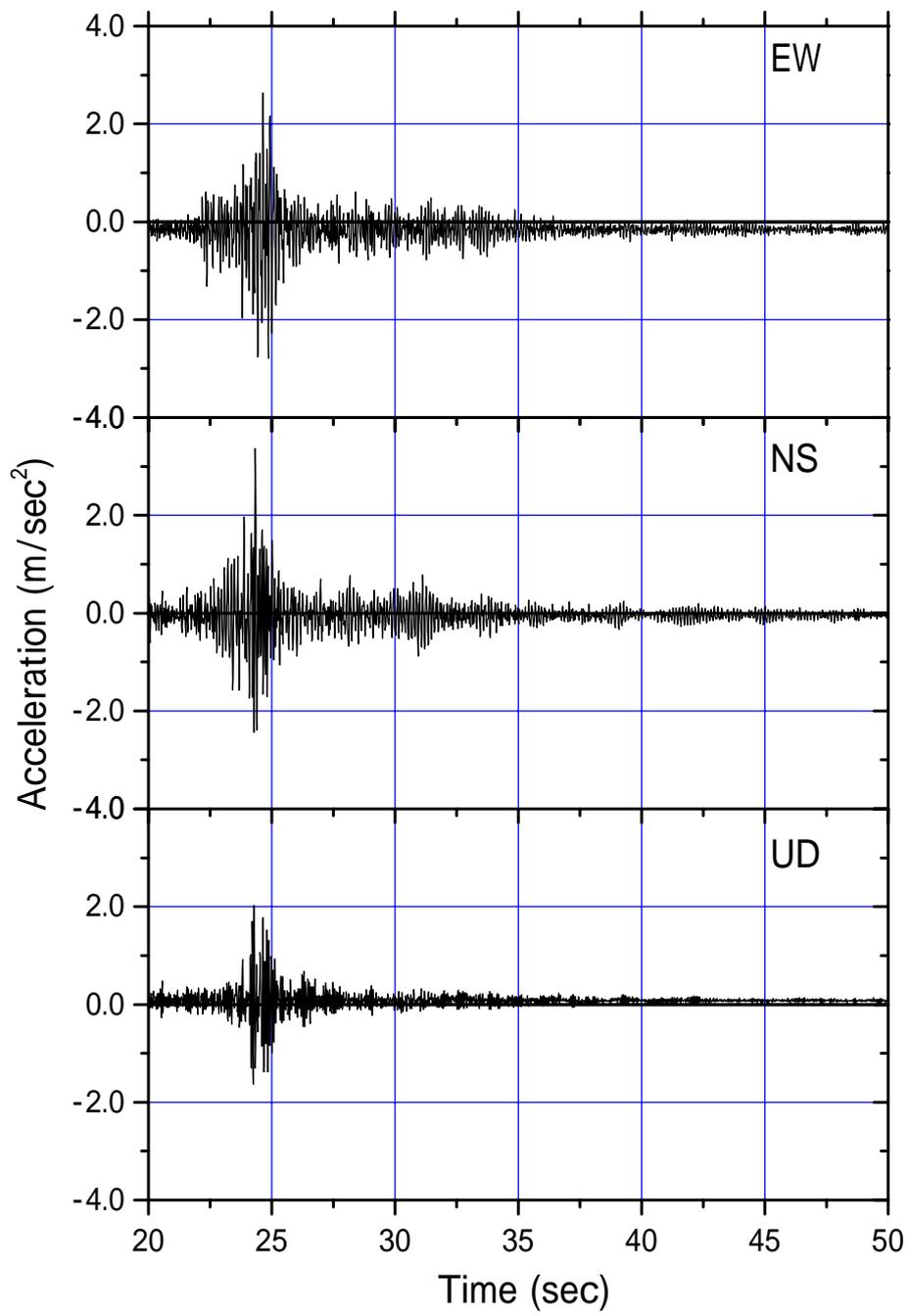


図 9 GNM002 水上

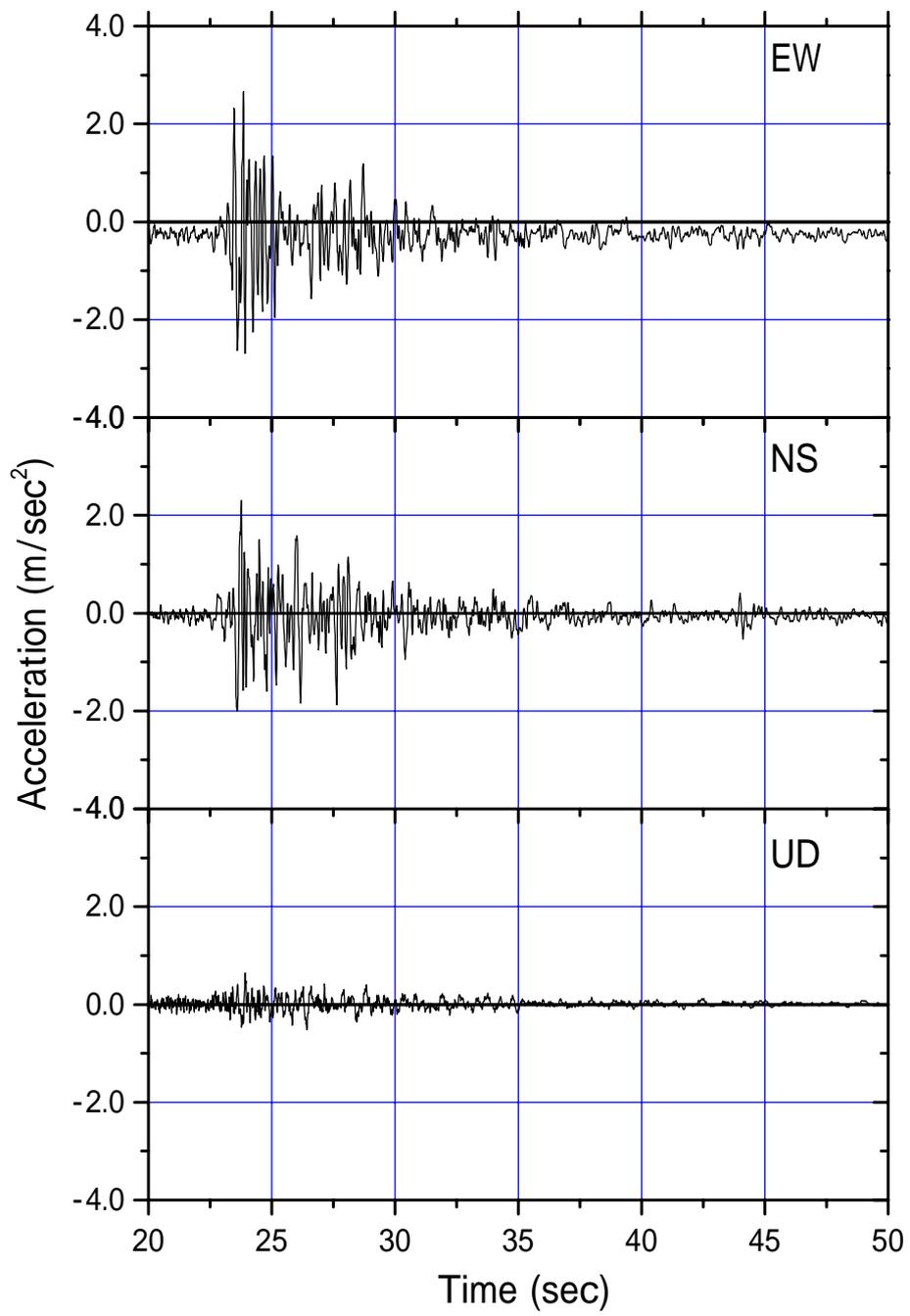


图 10 NIG012 鹿瀬

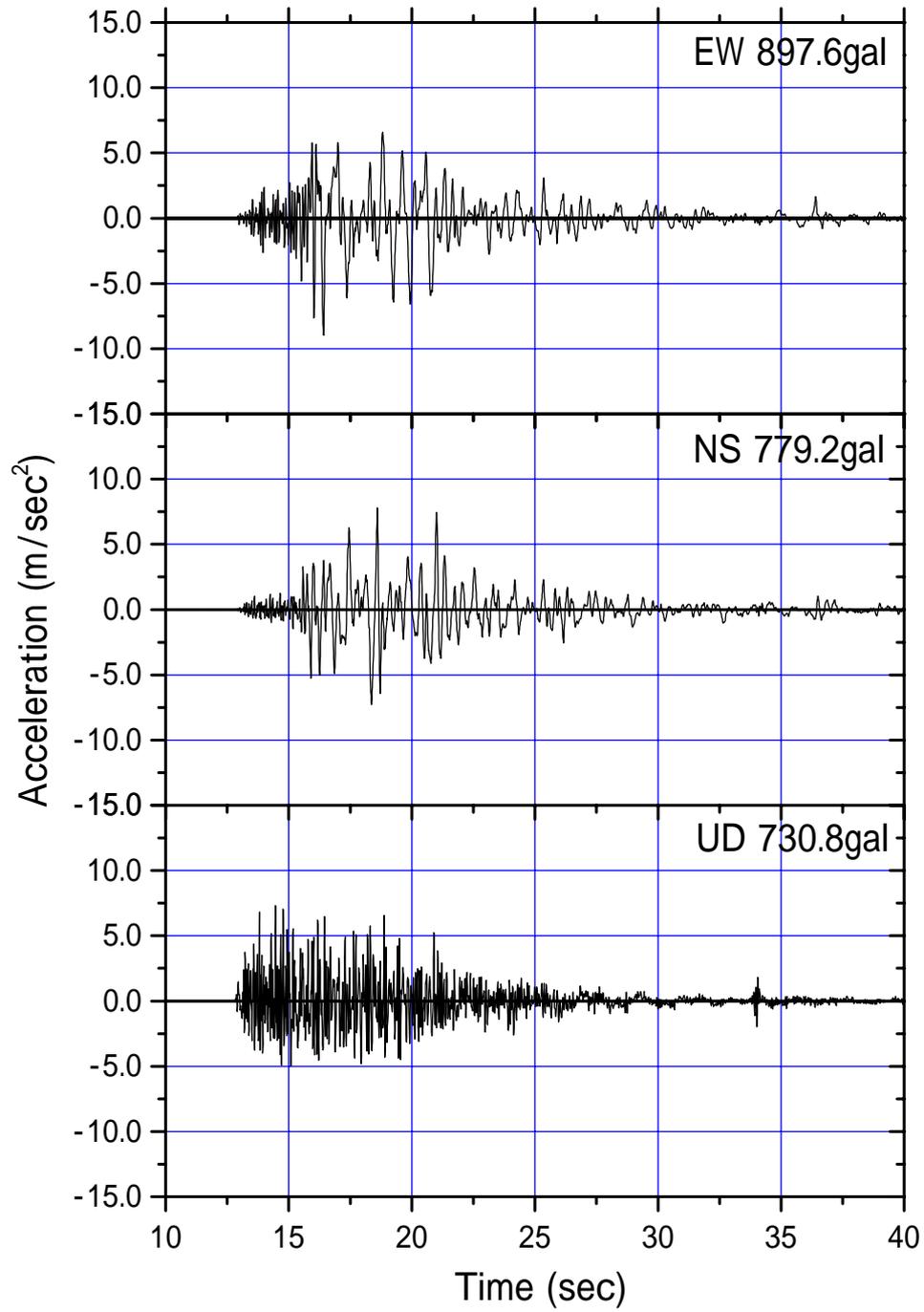


图 11 JMA 小千谷

2 加速度応答スペクトルによる比較

図 14～図 24 に 10 波の東西および南北成分の加速度応答スペクトルを示す。図中には、第二種地盤での Rt 曲線を併せて示す。Rt 曲線は、建築基準法で地震時に建物が弾性応答にとどまるために必要とされている建物のベースシア（ $C_0=10$ ）を表す。通常の設計では、建物の塑性化によるエネルギー吸収を考慮してこの値を低減する（ D_s ）。その値は、偏心等の不整形性が建物にない場合は、 $D_s=0.3 \sim 0.55$ の値をとる。

さらに、加速度応答スペクトルの比較的大きかった十日町 NS、小千谷 EW、長岡支所 NS、小出 NS、JMA 小千谷 EW、および兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台と神戸ポートアイランドで観測された地震波（NS 成分）の加速度応答スペクトルを図 12 に、小千谷 EW、JAM 小千谷 EW と神戸海洋気象台と神戸ポートアイランドで観測された地震波の比較を図 13 に示す。図中には第一種～第三種地盤における Rt 曲線をあわせて示している。

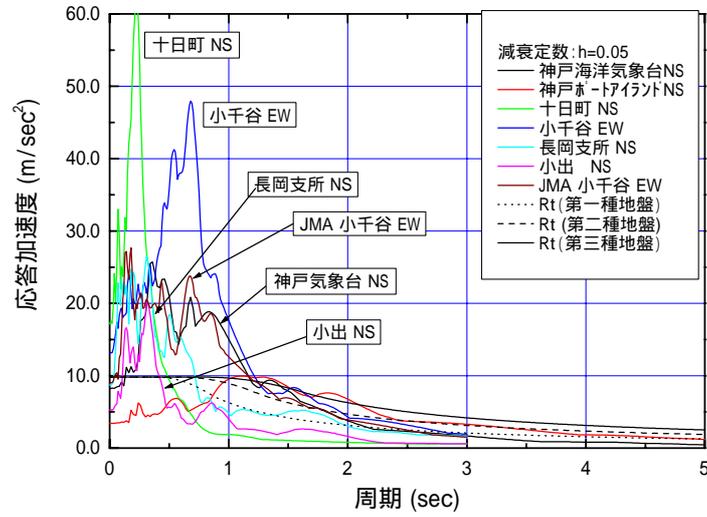


図 12 主要 5 波と兵庫県南部地震での記録の比較

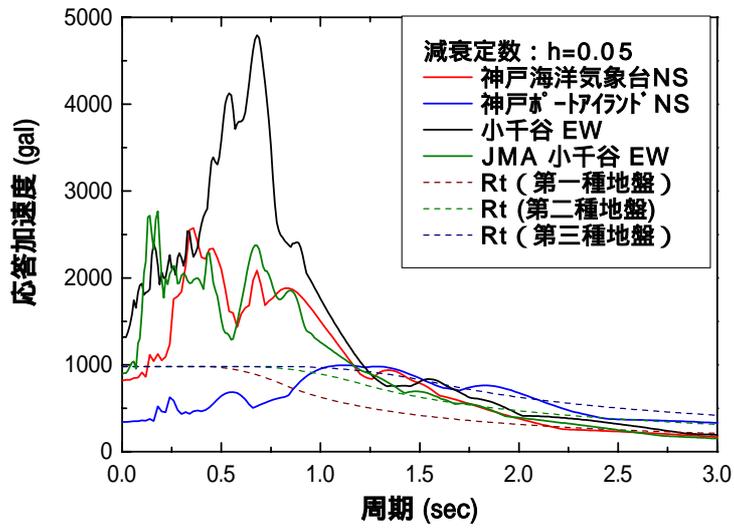


図 13 NIG019 小千谷、JMA 小千谷 EW と兵庫県南部地震の記録の比較

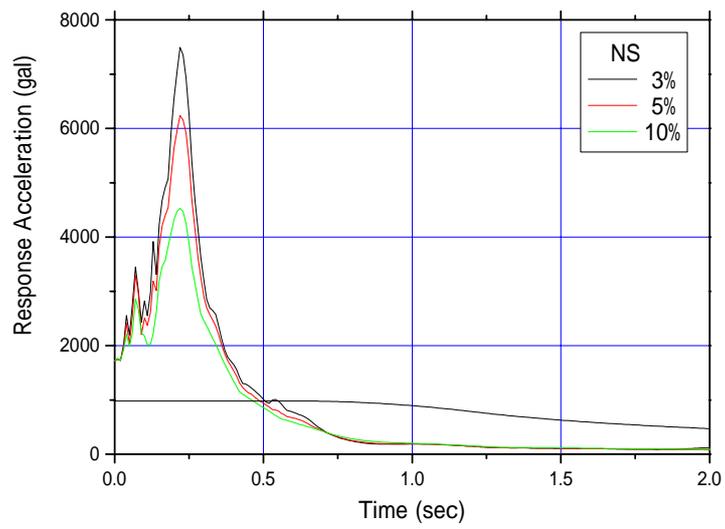
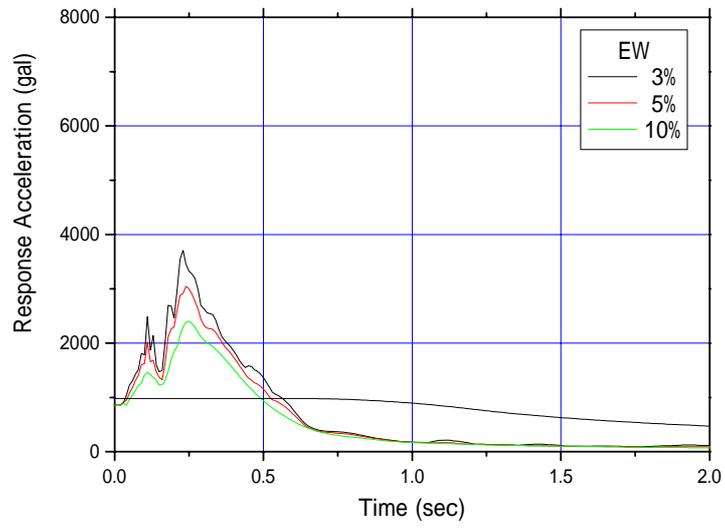


図 14 NIG021 十日町

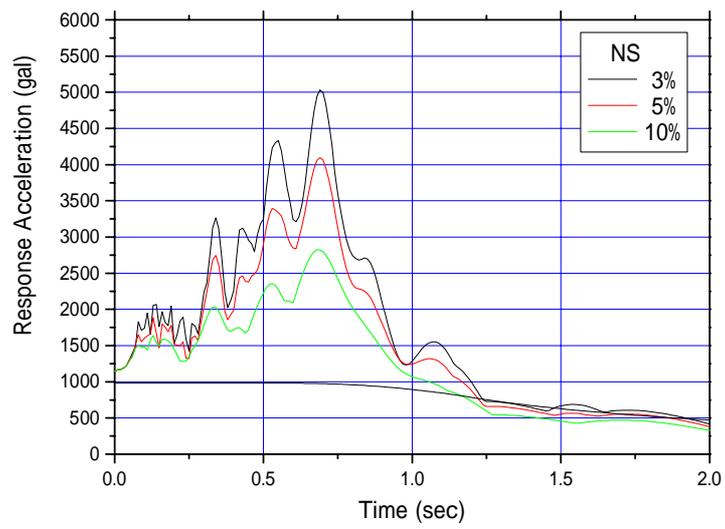
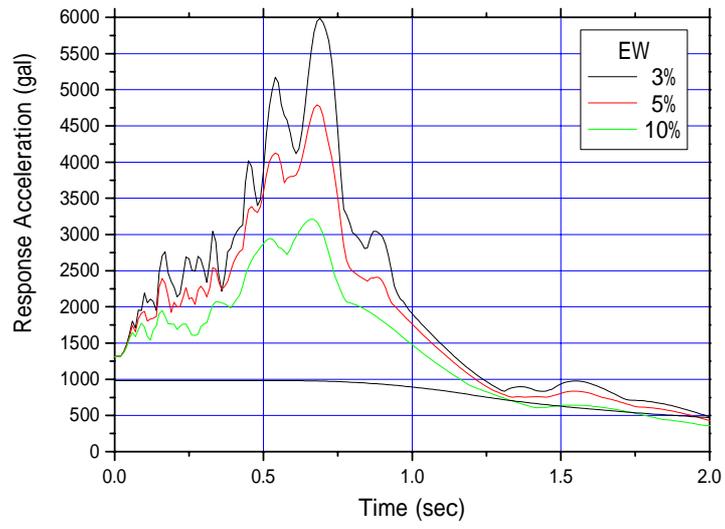


图 15 NIG019 小千谷

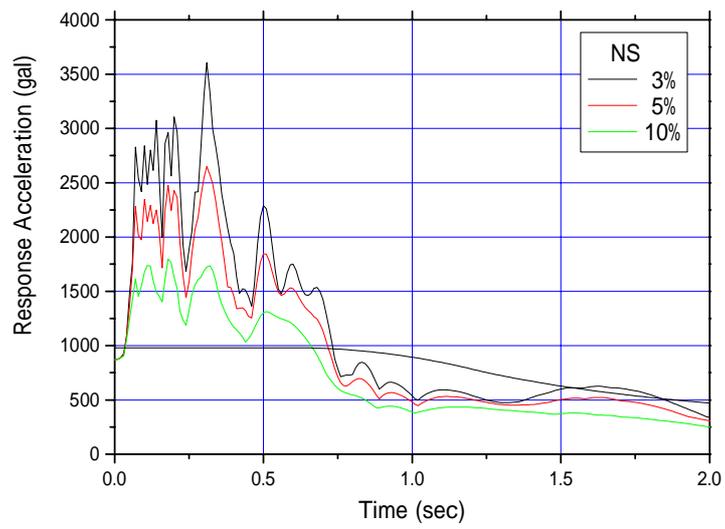
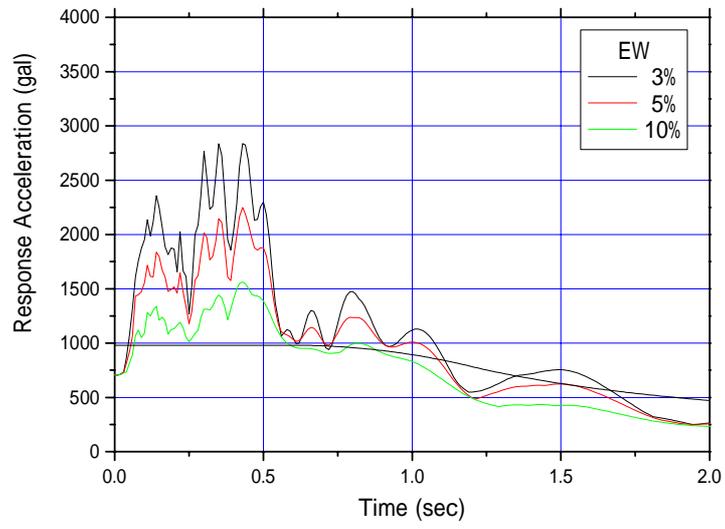


図 16 NIG028 長岡支所

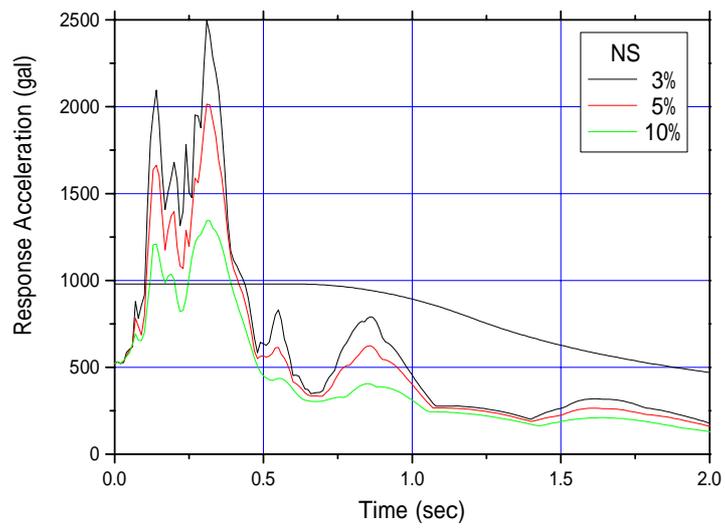
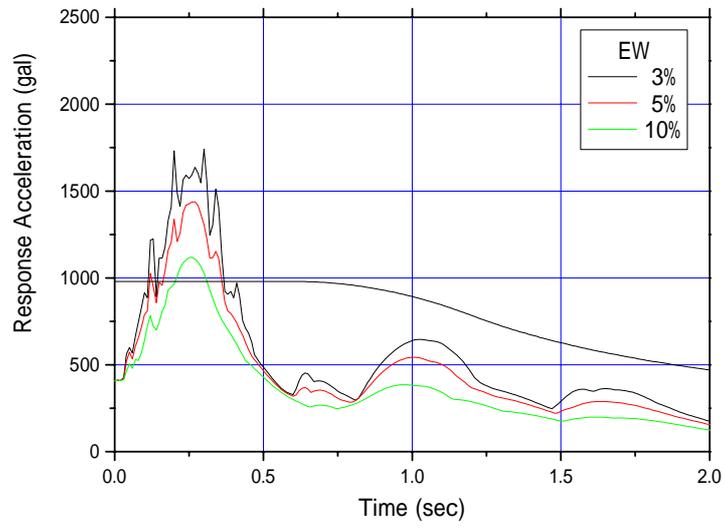


図 17 NIG020 小出

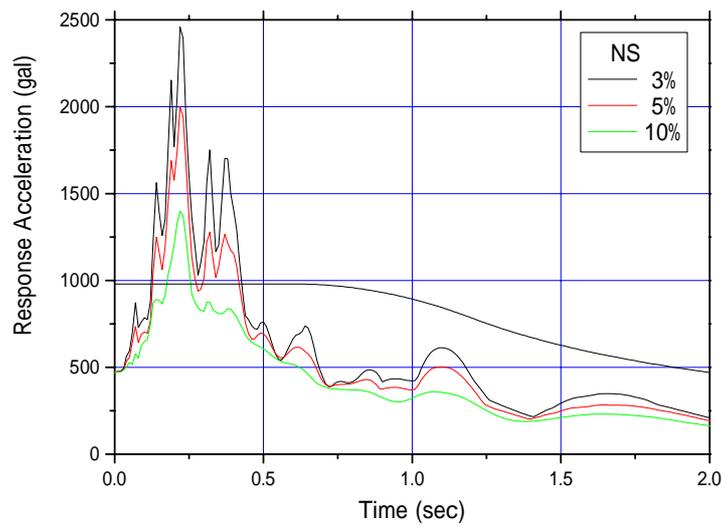
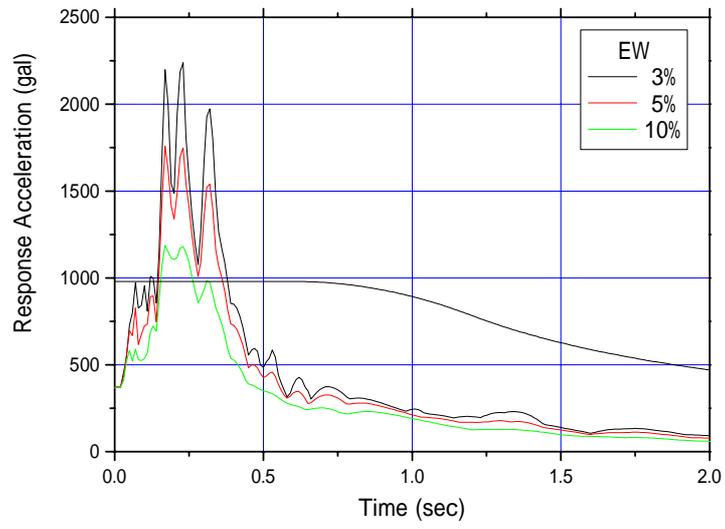


図 18 NIG017 長岡

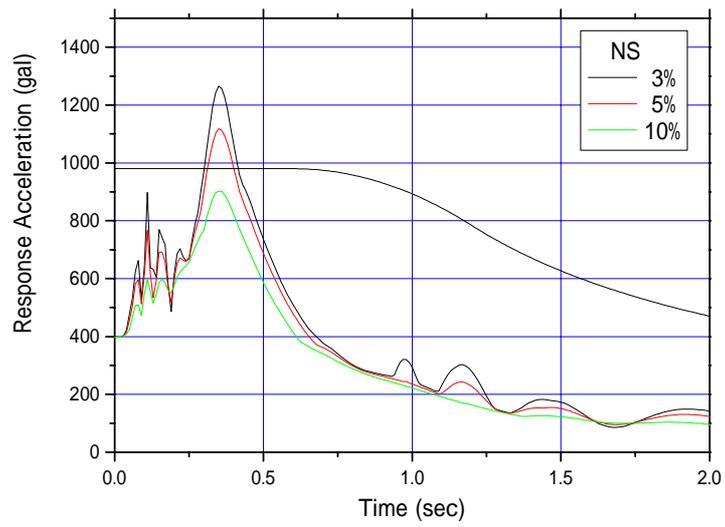
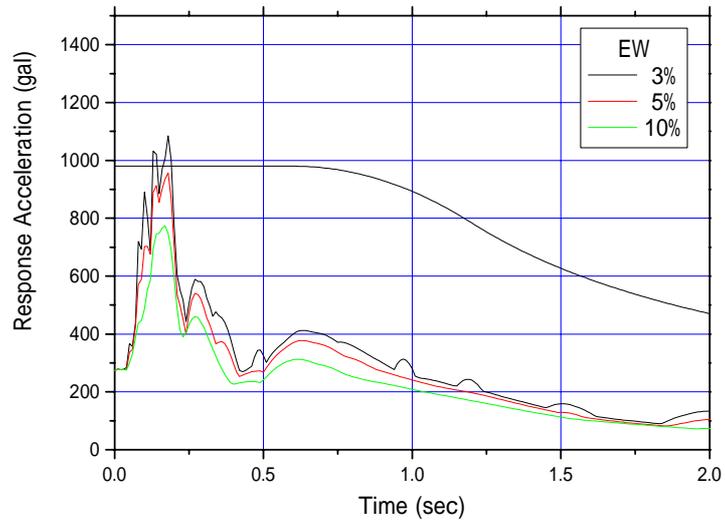


图 19 NIG023 津南

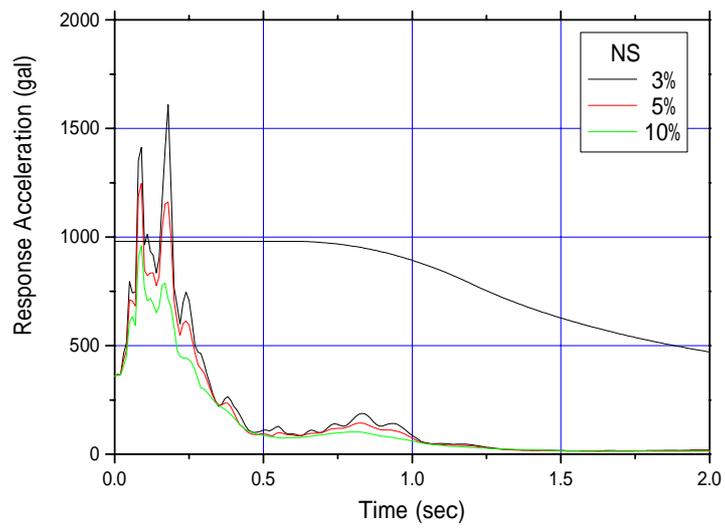
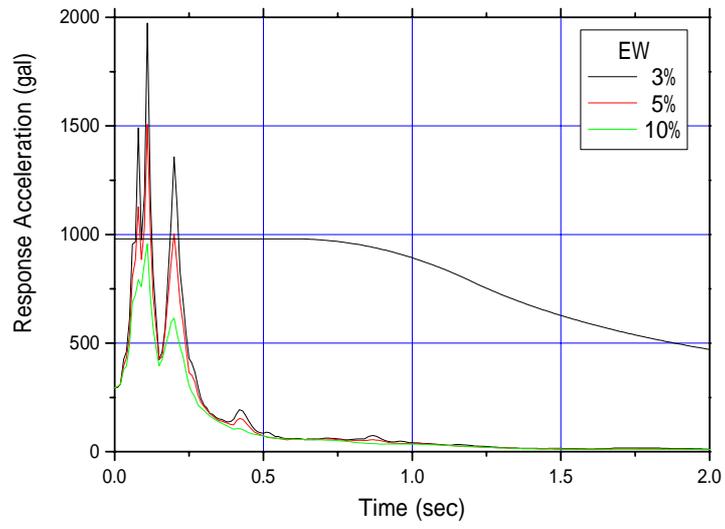


図 20 GNM003 沼田

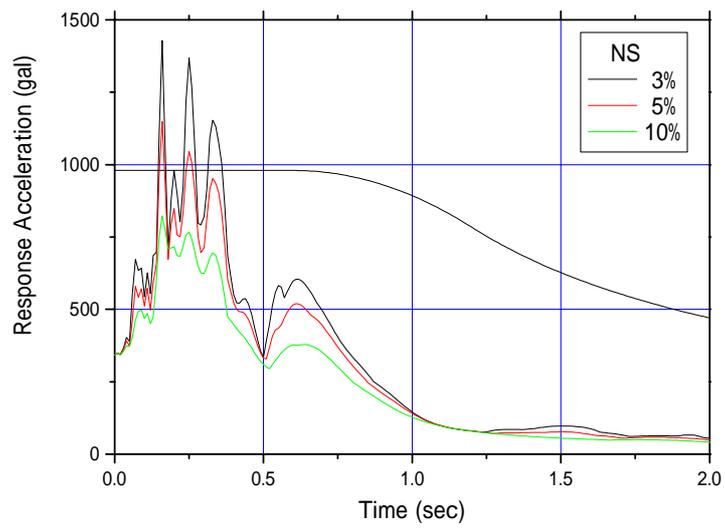
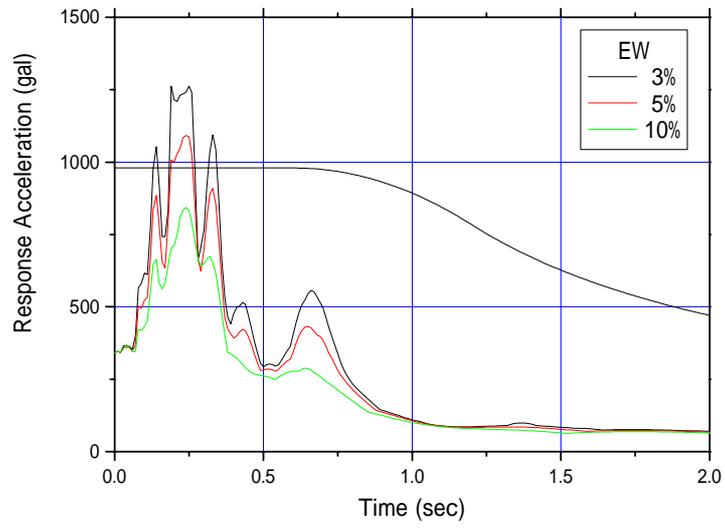


図 21 NIG022 塩沢

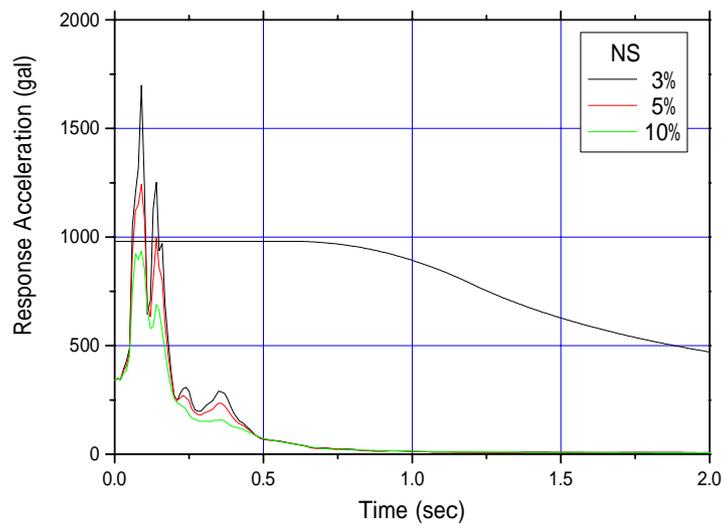
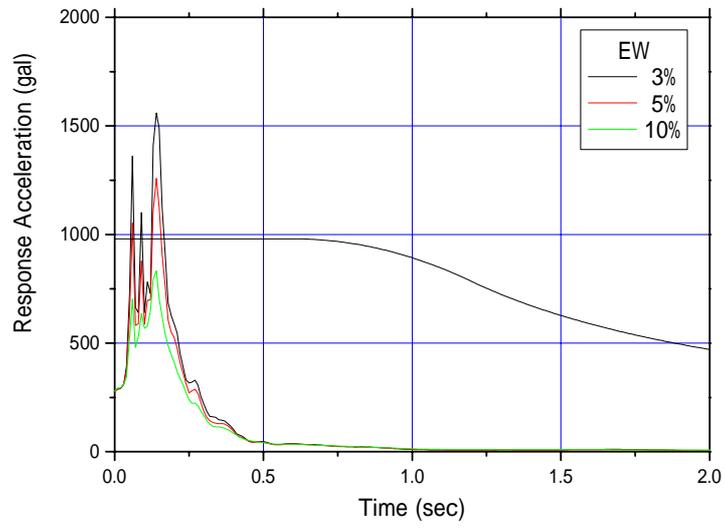


図 22 GNM002 水上

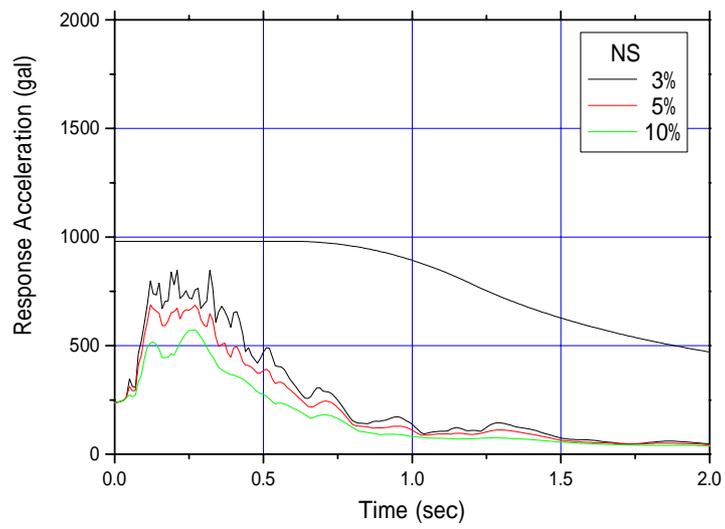
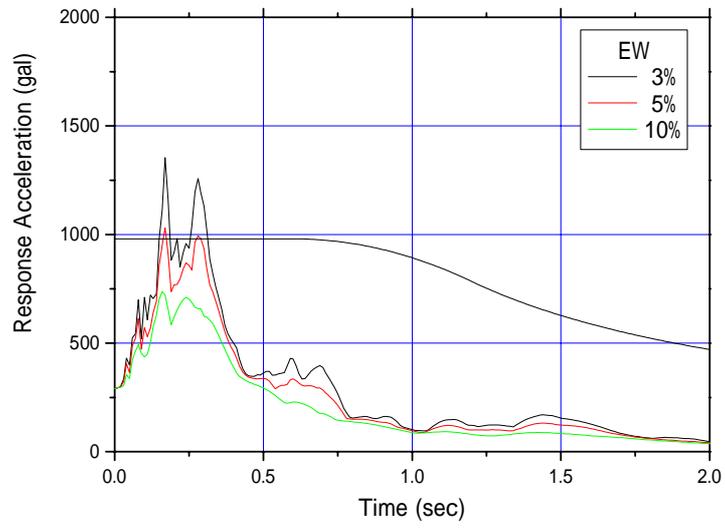


図 23 NIG012 鹿瀬

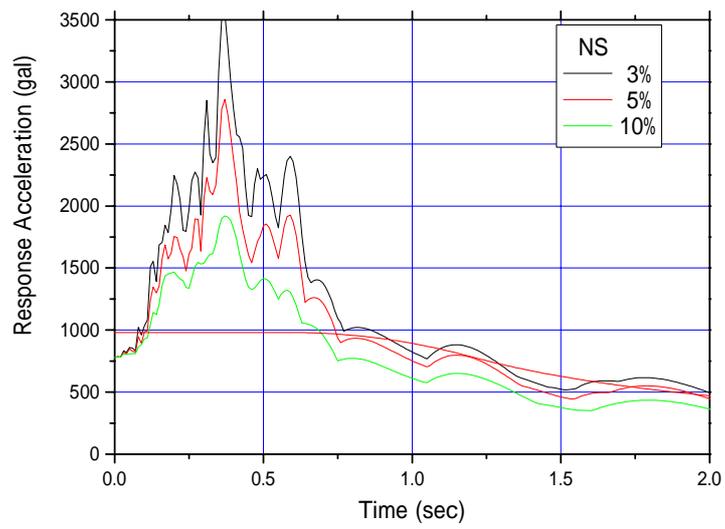
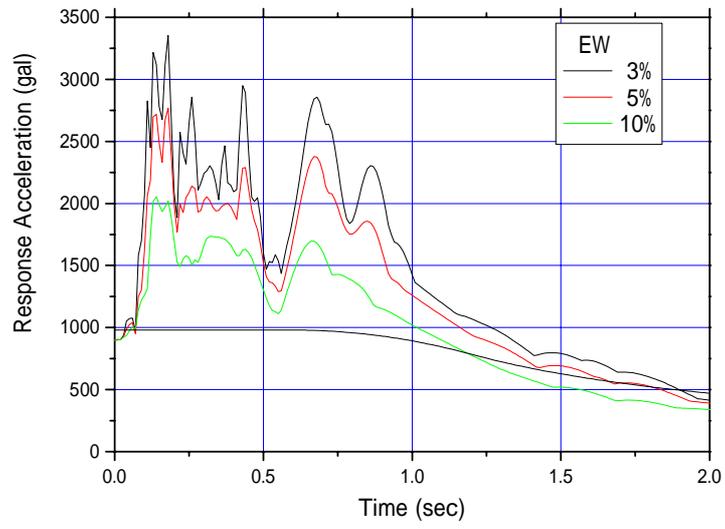


図 24 JMA 小千谷

3 要求曲線による比較

本節では、限界耐力計算で規定される要求曲線を用いて、地震動と被害の関係を検討する。図 27～図 37 に 5%および 10%減衰での各方向各地震波の要求曲線を示す。図中には第 2 種地盤での要求曲線を併せて示す。図中の上横軸は、建物の階高を 3m、等価高さを建物高さの 1/2 と仮定したときの建物全体の变形角を示している。実際の变形角は、横軸の値/100N (N:建物階数) である。

図 25 および図 26 に減衰 5, 10%での十日町 NS、小千谷 EW、長岡支所 NS、小出 NS、および JMA 小千谷の要求曲線を示す。図中には弾性周期 0.3sec, $D_s=0.5$ での履歴曲線を併せて示している。更に、ヘアークラック等による初期の剛性低下を考慮して、剛性低下率 50%での履歴を示している。

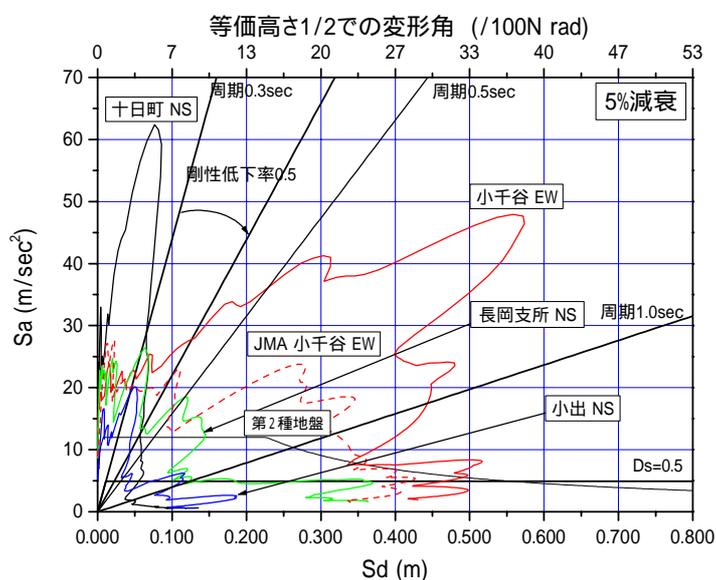


図 25 5%減衰での比較

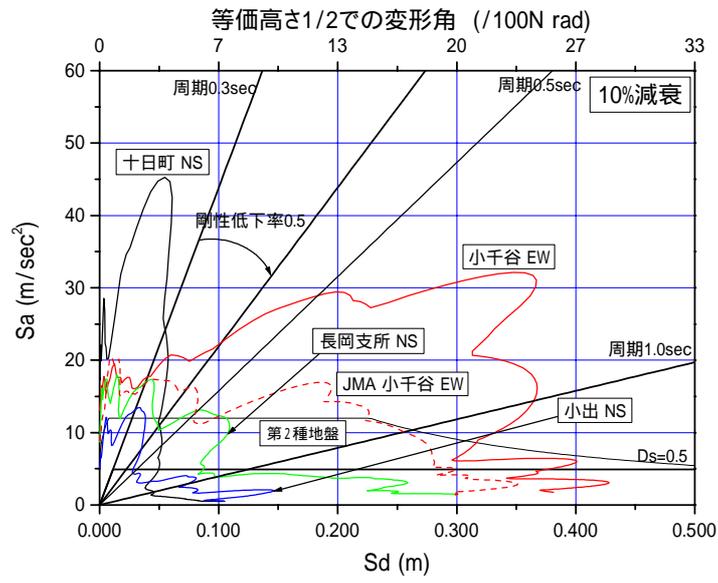


図 26 10%減衰での比較

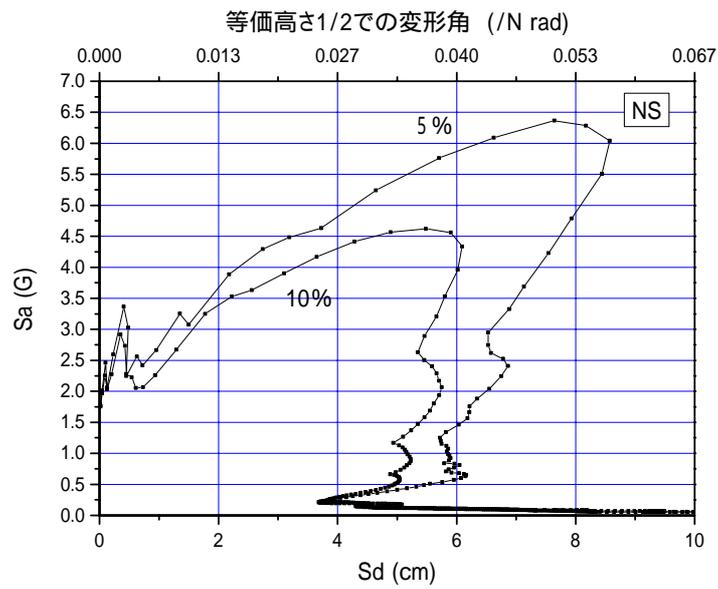
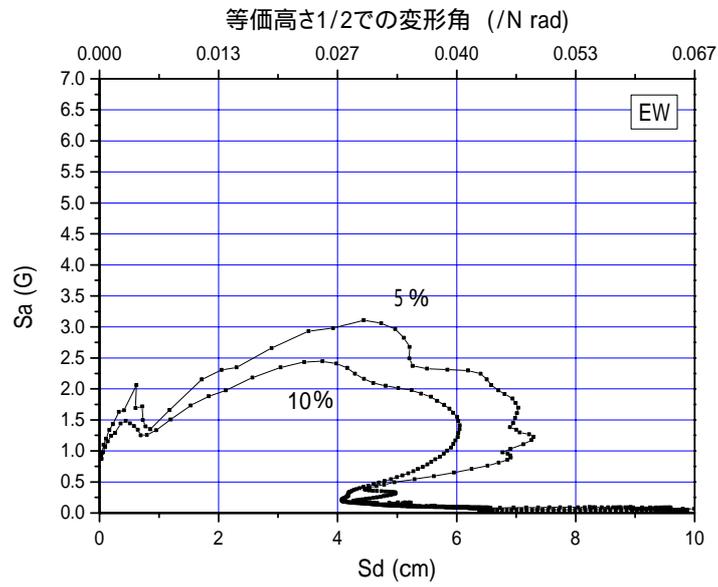


図 27 NIG021 十日町

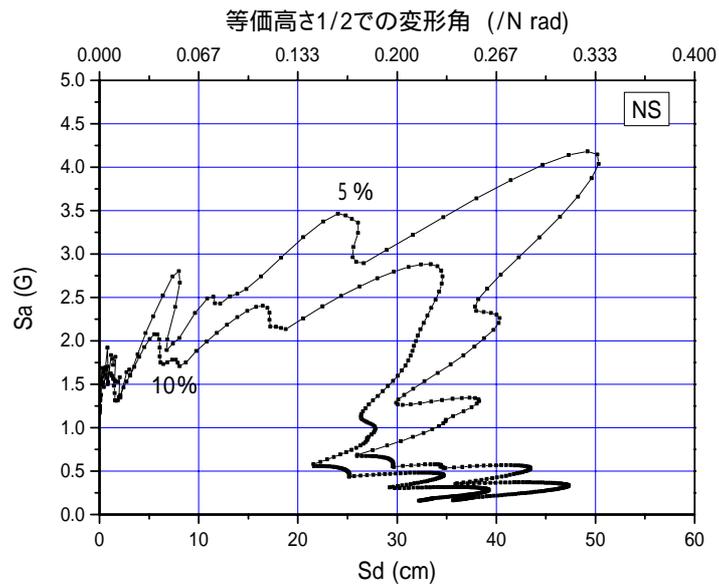
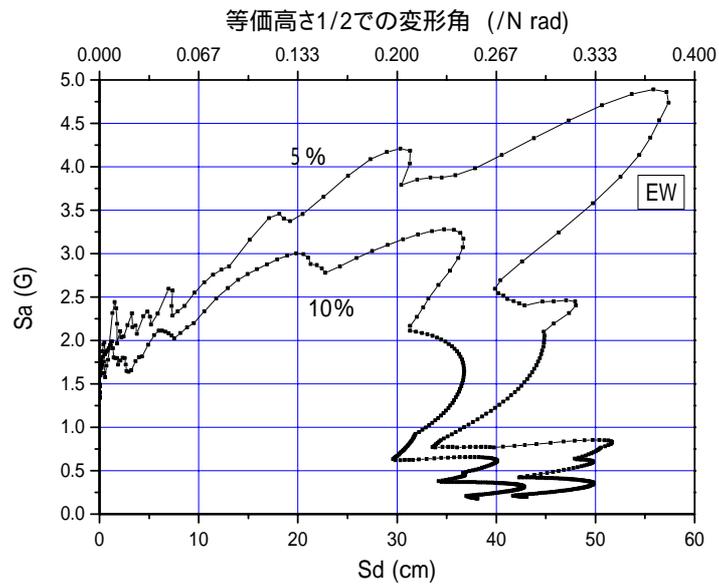


図 28 NIG019 小千谷

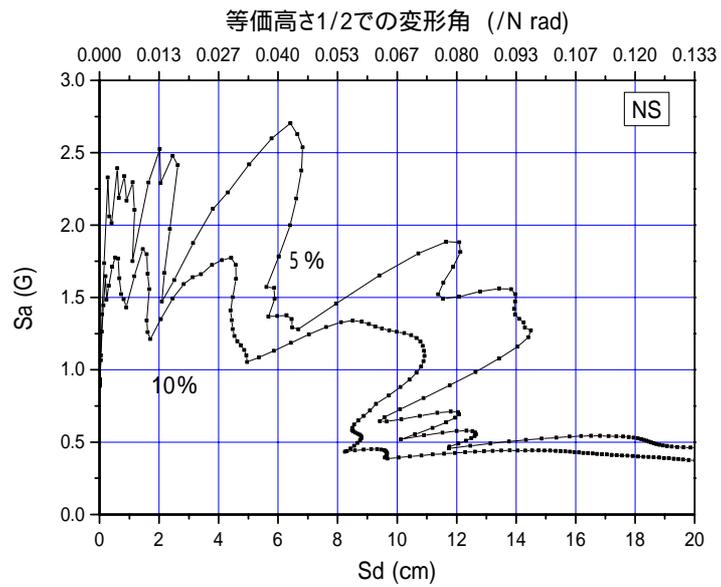
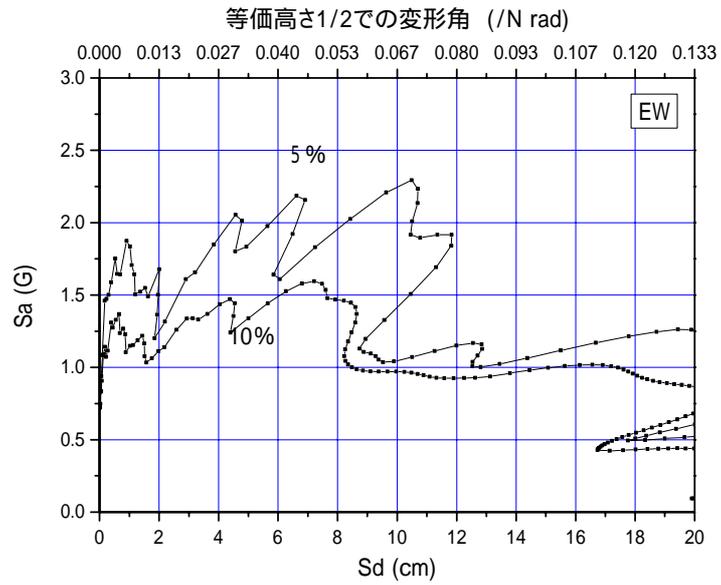


図 29 NIG028 長岡支所

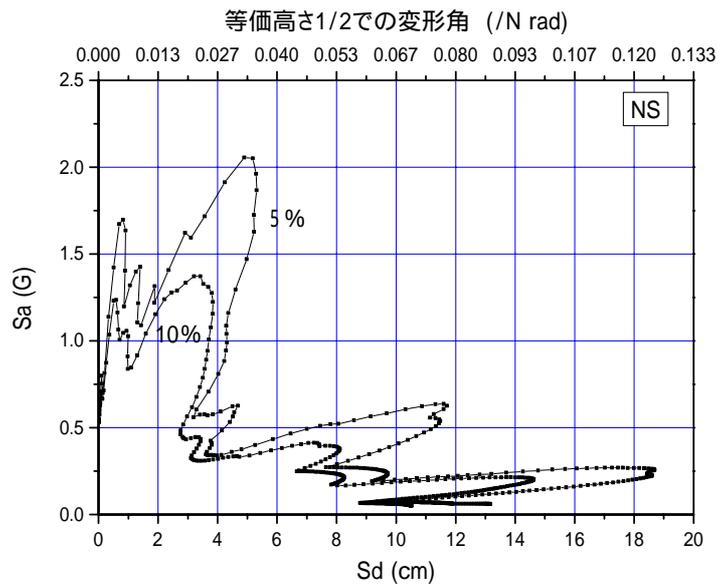
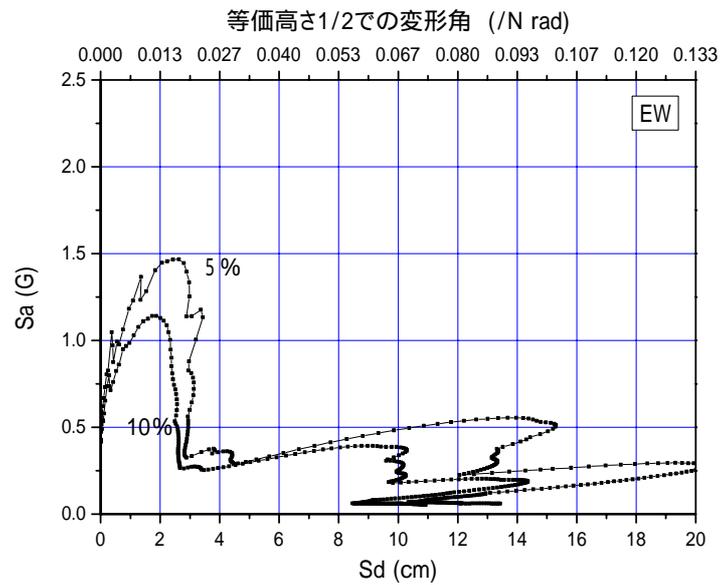


図 30 NIG020 小出

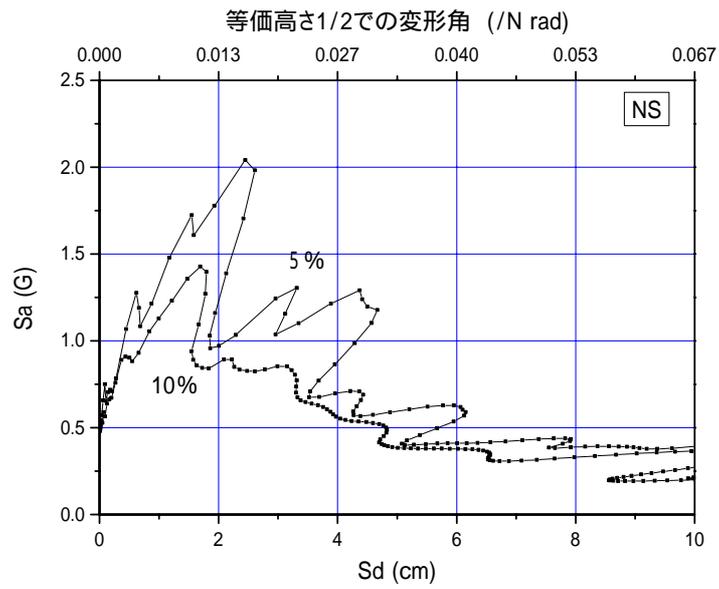
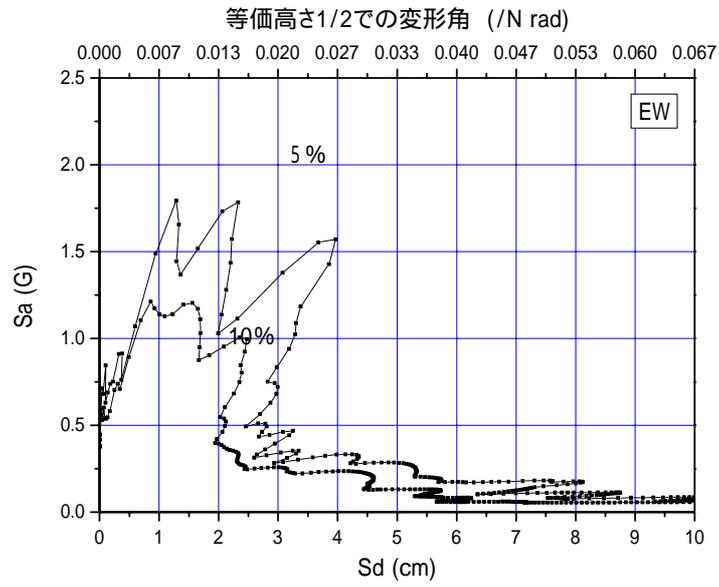


図 31 NIG017 長岡

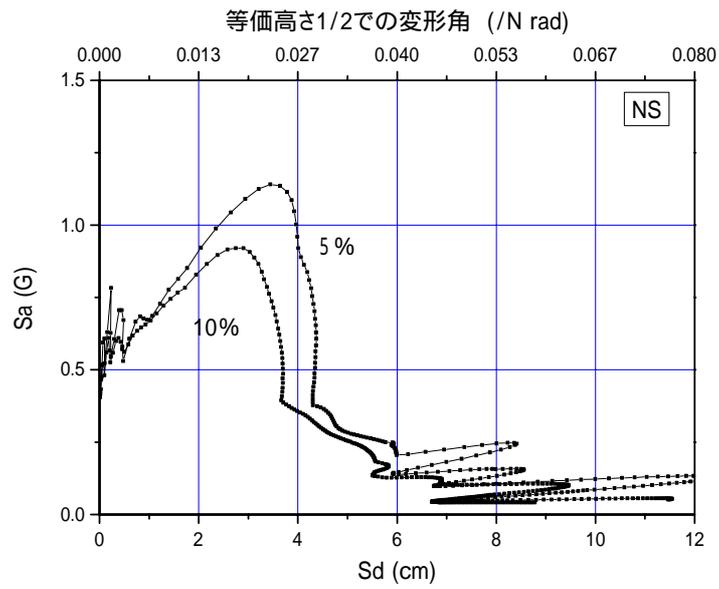
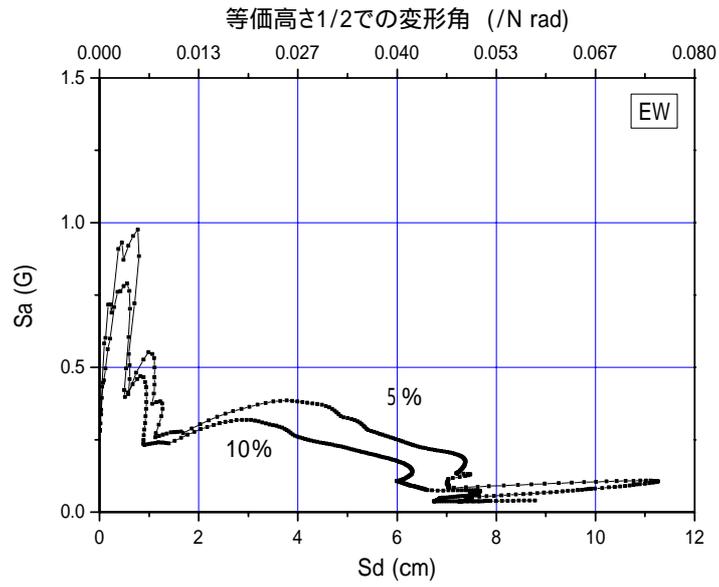


図 32 NIG023 津南

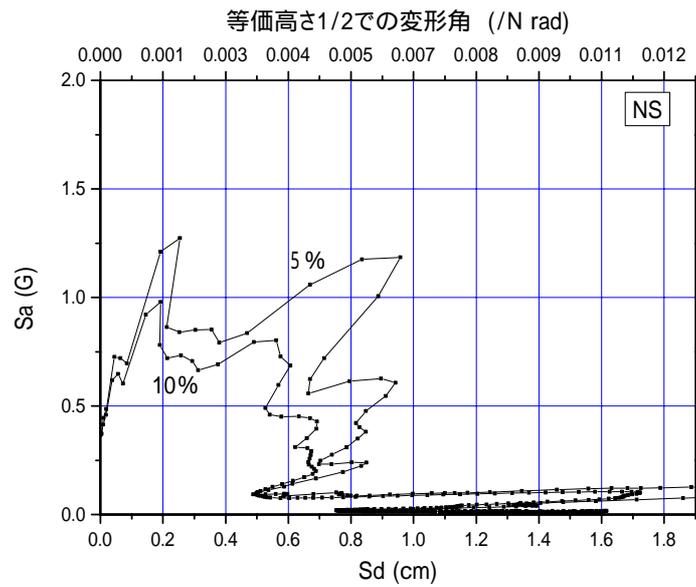
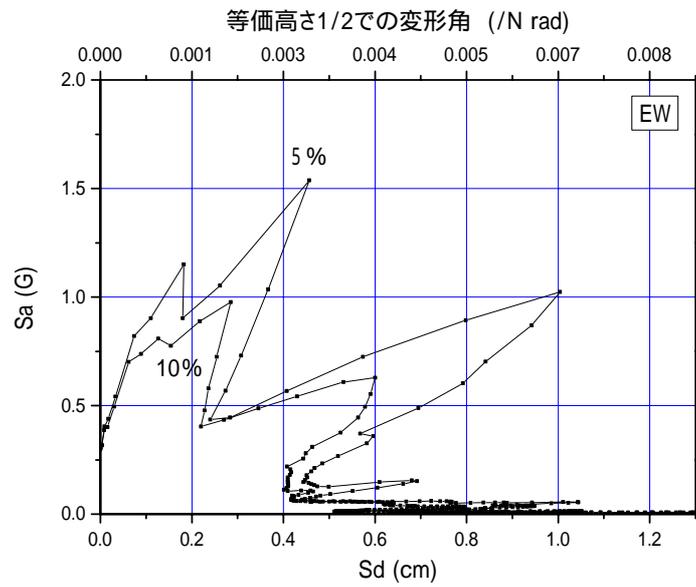


図 33 GNM003 沼田

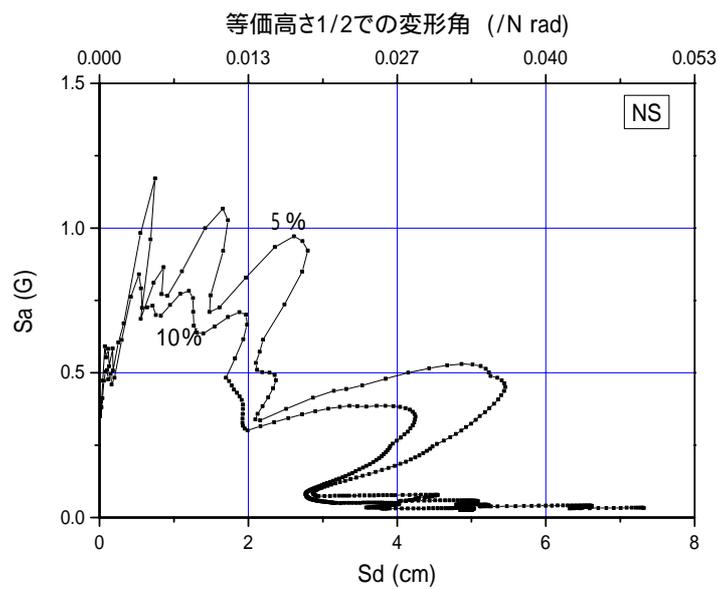
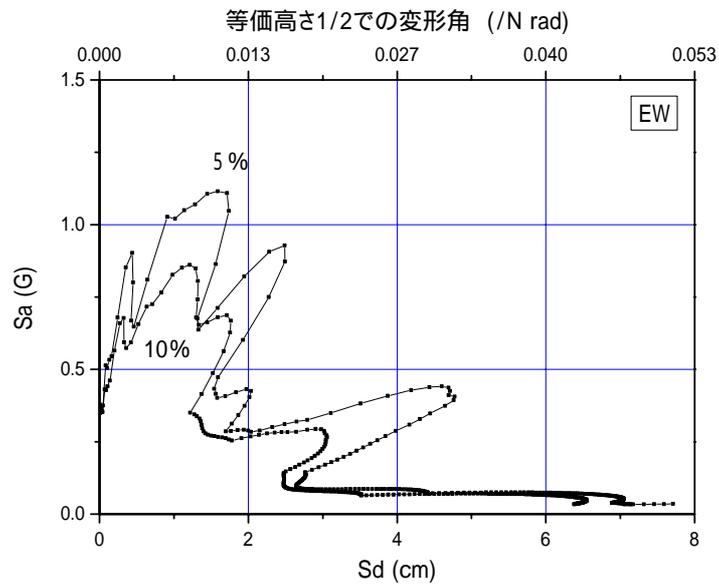


図 34 NIG022 塩沢

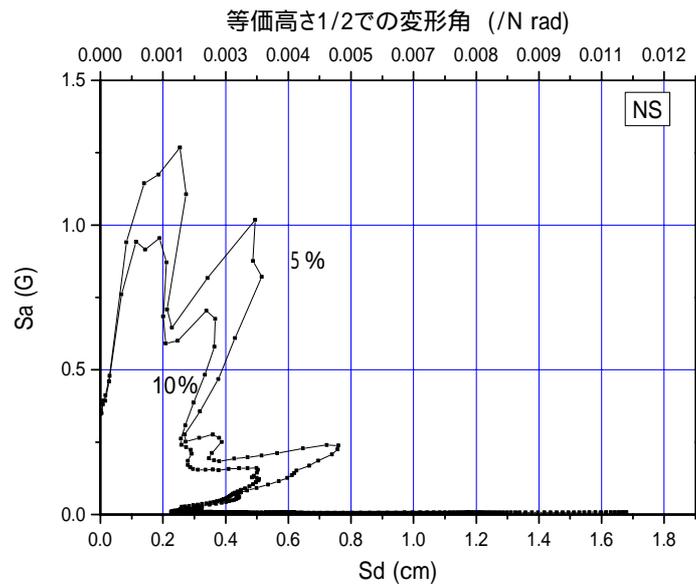
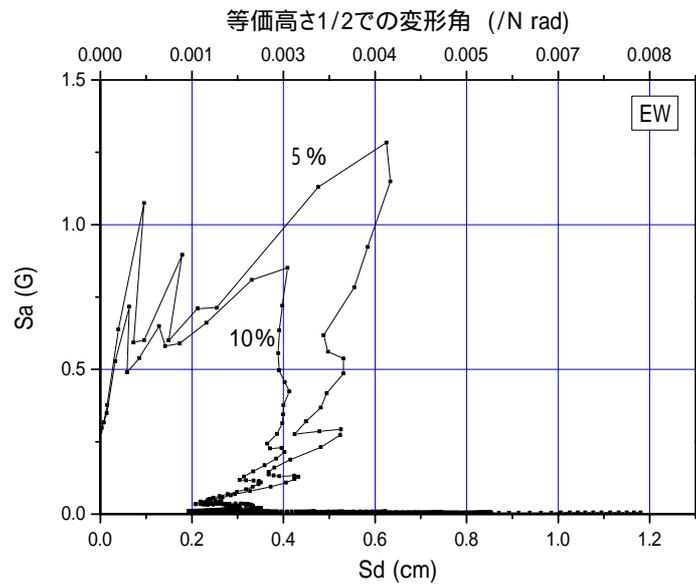


図 35 GNM002 水上

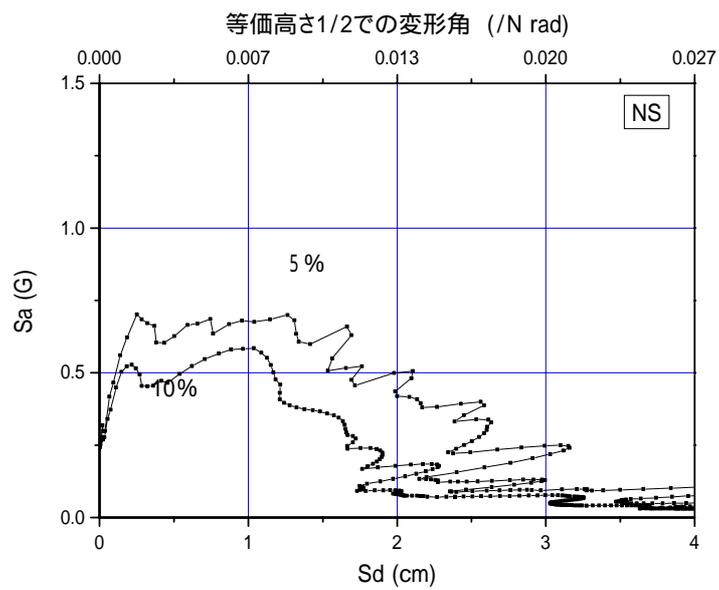
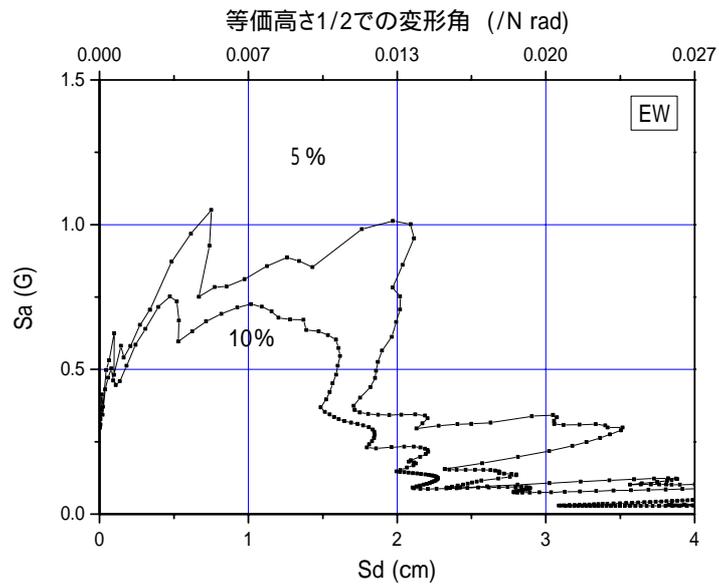


図 36 NIG012 鹿瀬

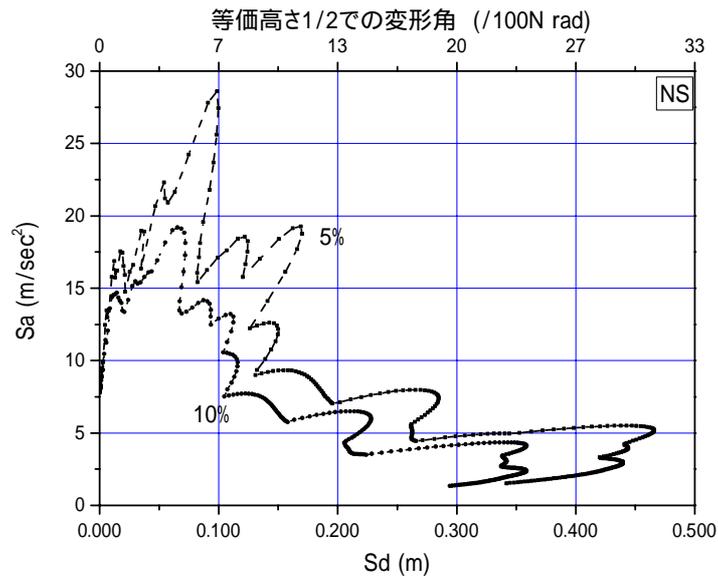
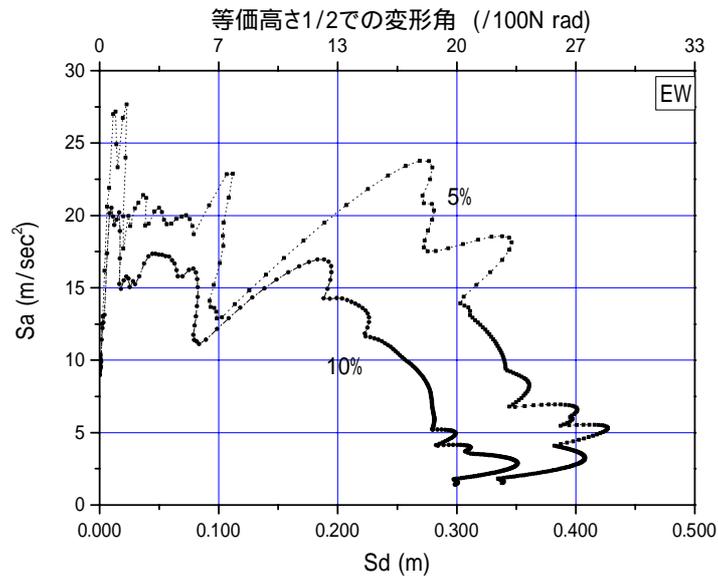


図 37 JMA 小千谷

4 エネルギースペクトルによる検討

図 38 に十日町 NS、小千谷 EW、長岡支所 NS、および小出 NS の入力エネルギー速度換算値 ($V_E = \int \ddot{x}_0 \cdot \dot{x} dt$) を示す。継続時間は、100 秒分を用いた。また、弾性応答によるエネルギー吸収量は

$$\frac{1}{2}(M \cdot C_B \cdot G) \cdot \delta_y = \frac{1}{2}(M \cdot C_B \cdot G) \cdot \frac{(M \cdot C_B \cdot G)}{K} = \frac{1}{2}M \cdot \frac{M}{K} \cdot (C_B \cdot G)^2$$

で計算される。ここで、M:総質量、C_B:ベースシア係数、G:重力加速度、 δ_y :降伏変位、K:建物剛性、である。

このエネルギーの速度換算値は、

$$\frac{1}{2}M \cdot V^2 = \frac{1}{2}M \cdot \frac{M}{K} \cdot (C_B \cdot G)^2$$

より、

$$V = C_B \cdot G \cdot \sqrt{\frac{M}{K}} = \frac{C_B \cdot G}{2\pi} \cdot T$$

となる。ここで、Tは建物周期である。

図中に C_B=1.0, 0.5, 0.3 での弾性応答の吸収するエネルギーを併せて示す。V_E が各線を上回る場合は、その差分は塑性化によりエネルギー消費されと考えられる。逆に下回る場合は、建物応答は弾性に収まると考えられる。

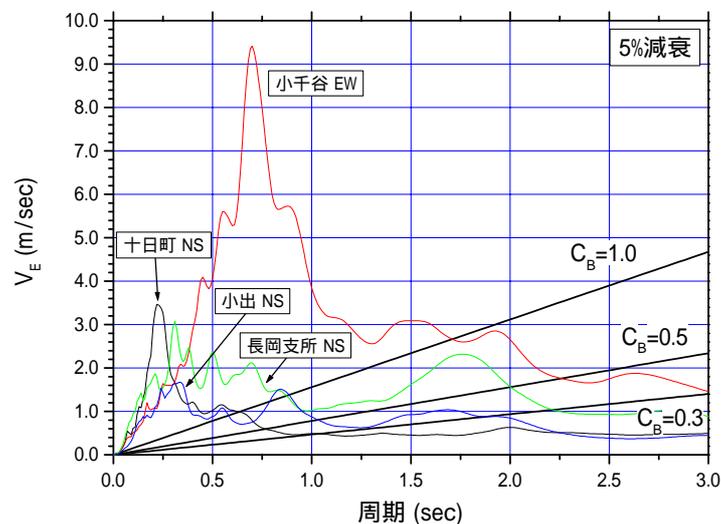


図 38 主要 4 波の入力エネルギー速度換算値

5 速度応答スペクトルによる検討

各地震動の、最大地動加速度の大きい方向の速度応答スペクトルを図 39 に示す。

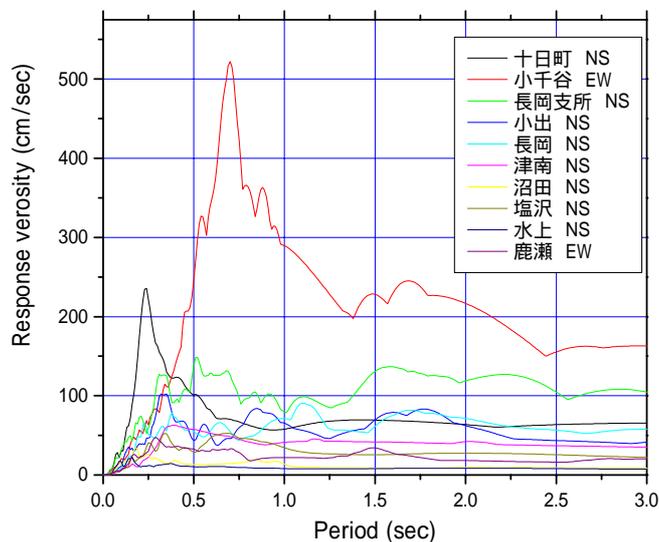


図 39 各地震動の速度応答スペクトル

6 弾塑性地震応答解析による検討

6.1 NIG019 小千谷 EW

NIG019 小千谷 EW を対象に、 $C_B=1.0$ 、 0.5 、 0.3 の 3 種類の建物について弾塑性地震応答解析を行った。解析では以下の仮定を用いた。弾性周期 0.3sec での解析パラメータを表 6-1 に示す。

- ・ 復元力特性は武田モデル
- ・ ひび割れ耐力(F_c)は降伏耐力(F_y)の $1/3$
- ・ 降伏時剛性低下率は 0.5
- ・ 降伏後剛性は初期剛性の $1/1000$
- ・ 減衰は瞬間剛性比例型減衰で 5%
- ・ 建物重量は 980tonf 。

各ケースでのせん断力 - 水平変形関係を図 6-1 に示す。最大塑性率は $C_B=1.0$ で 5.0 、 $C_B=0.5$ で 14.1 、 $C_B=0.3$ で 30.0 であった。

同様に、弾性周期 0.5sec に対して、表 6-2 に示すように同じく $C_B=1.0$ 、 0.5 、 0.3 の 3 種類の建物について弾塑性地震応答解析を行った。各ケースでのせん断力 - 水平変形関係を図 6-2 に示す。最大塑性率は $C_B=1.0$ で 2.4 、 $C_B=0.5$ で 6.6 、 $C_B=0.3$ で 12.3 であった。弾性周期 0.3sec に比べて被害は非常に小さくなっている。

以上のように、弾塑性解析を実施した結果、小千谷 EW 波では、弾性周期 0.3sec 程度および 0.5sec 程度の建物共に D_s が 0.5 以下では塑性率 4 を超える大きな被害が生じた。

また、応答塑性率がほぼ 1 となるための入力地震動レベルを表 3 に示す。表から、建物の応答塑性率がほぼ 1 以下となるためには、計測原波形を 50% 以下に低減する必要があることが分かる。

表 6-1 解析パラメータ (T=0.3)

| | | 解析ケース | | |
|------------|----|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | Case 1 ($C_B=1.0$) | Case 2 ($C_B=0.5$) | Case 3 ($C_B=0.3$) |
| 耐力 (kN) | Fc | 3201.33 | 1600.67 | 960.40 |
| | Fy | 9604.00 | 4802.00 | 2881.20 |
| 変形 (mm) | Dc | 7.45 | 3.72 | 2.23 |
| | Dy | 44.68 | 22.34 | 13.40 |

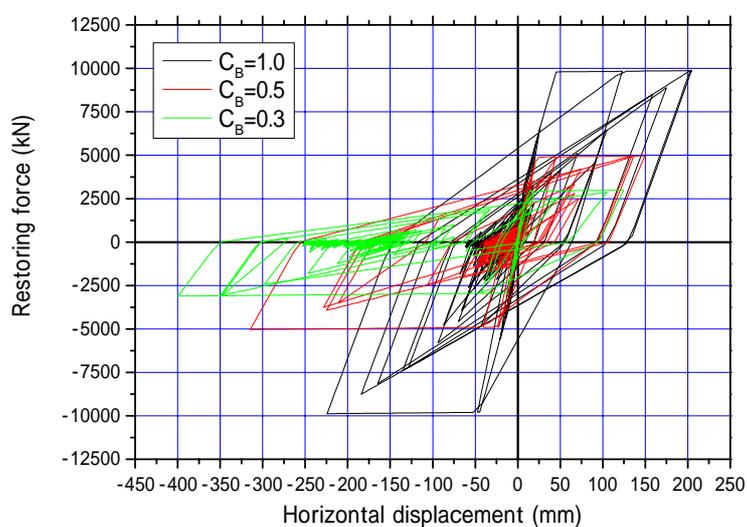


図 6-1 セン断力 - 水平変形関係 (T=0.3)

表 6-2 解析パラメータ (T=0.5)

| | | 解析ケース | | |
|------------|----|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | Case 1 ($C_B=1.0$) | Case 2 ($C_B=0.5$) | Case 3 ($C_B=0.3$) |
| 耐力 (kN) | Fc | 3201.33 | 1600.67 | 960.40 |
| | Fy | 9604.00 | 4802.00 | 2881.20 |
| 変形 (mm) | Dc | 20.69 | 10.34 | 6.21 |
| | Dy | 124.12 | 62.06 | 37.24 |

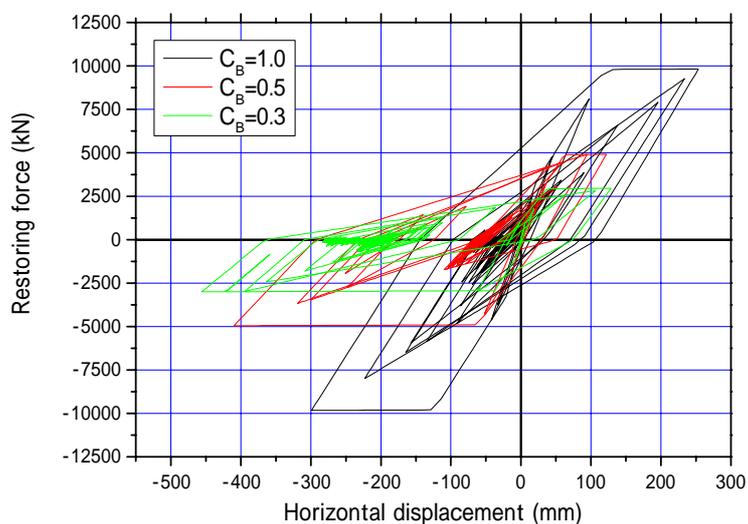


図 6-2 せん断力 - 水平変形関係 (T=0.5)

表 3 塑性率がほぼ1となる入力レベル

| | | C_B | | |
|----|-----|-------|------|------|
| | | 0.3 | 0.5 | 1.0 |
| 周期 | 0.3 | 200 | 300 | 650 |
| | | 0.15 | 0.23 | 0.49 |
| | 0.5 | 120 | 200 | 420 |
| | | 0.09 | 0.15 | 0.32 |

上段:最大入力地動加速度(gal) 下段:原波形に対する比率

6.2 JMA 小千谷 EW

JMA 小千谷 EW を対象に、 $C_B=1.0, 0.5, 0.3$ の 3 種類の建物について弾塑性地震応答解析を行った。解析では以下の仮定を用いた。弾性周期 0.3sec での解析パラメータは 6.1 で用いたもの（表 6-1）と同じである。

- ・ 復元力特性は武田モデル
- ・ ひび割れ耐力(F_c)は降伏耐力(F_y)の 1/3
- ・ 降伏時剛性低下率は 0.5
- ・ 降伏後剛性は初期剛性の 1/1000
- ・ 減衰は瞬間剛性比例型減衰で 5%
- ・ 建物重量は 980tonf .

各ケースでのせん断力 - 水平変形関係を図 3 に示す。最大塑性率は $C_B=1.0$ で 2.4、 $C_B=0.5$ で 6.5、 $C_B=0.3$ で 18.0 であった。

同様に、弾性周期 0.5sec に対して、表 6-2 に示すように同じく $C_B=1.0, 0.5, 0.3$ の 3 種類の建物について弾塑性地震応答解析を行った。各ケースでのせん断力 - 水平変形関係を図 4 に示す。最大塑性率は $C_B=1.0$ で 1.8、 $C_B=0.5$ で 3.2、 $C_B=0.3$ で 7.7 であった。弾性周期 0.3sec に比べて被害は非常に小さくなっている。

以上のように、弾塑性解析を実施した結果、小千谷 EW 波では、弾性周期 0.3sec 程度および 0.5sec 程度の建物共に D_s が 0.5 以下では塑性率 4 を超える大きな被害が生じた。

また、応答塑性率がほぼ 1 となるための入力地震動レベルを表 4 に示す。表から建物の応答塑性率がほぼ 1 以下となるためには、 $C_B=0.3$ で計測原波形を約 20% に、 $C_B=0.5$ で約 30% に、 $C_B=1.0$ で約 60% に低減する必要があることが分かる。

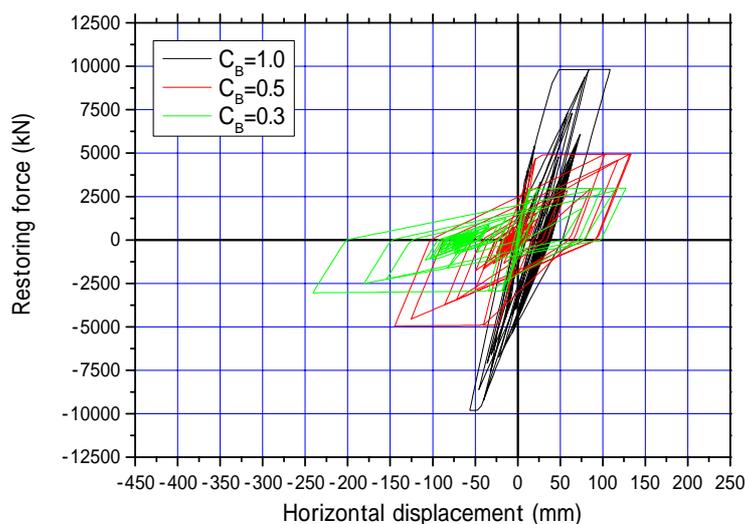


図 3 せん断力 - 水平変形関係 (T=0.3)

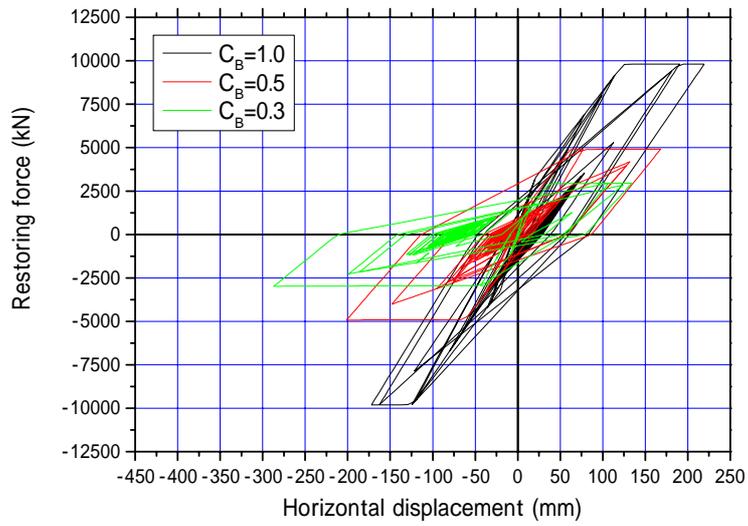


図 4 セン断力 - 水平変形関係 (T=0.5)

表 4 塑性率がほぼ 1 となる入力レベル

| | | C _B | | |
|----|-----|----------------|------|------|
| | | 0.3 | 0.5 | 1.0 |
| 周期 | 0.3 | 170 | 270 | 550 |
| | | 0.19 | 0.30 | 0.61 |
| | 0.5 | 170 | 280 | 560 |
| | | 0.19 | 0.31 | 0.62 |

上段:最大入力地動加速度(gal) 下段:原波形に対する比率

7 謝辞

解析には防災科学技術研究所の K-NET の強震記録を使わせていただきました。末尾ながらここに記して感謝の意を表します。