

2004年新潟県中越地震の地震動について

翠川三郎^{1,2}, 三浦弘之¹, 秋場俊一²

1 東京工業大学 都市地震工学センター

2 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 人間環境システム専攻

1. はじめに

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震 ($M_j6.8$) では、震源近傍に位置する小千谷市と川口町において震度7相当の地震動が観測された。特に震源に近い川口町では甚大な被害が生じた。この地震での地震動の特性や被害状況を調査するため、10月30日～31日にかけて強震観測点における常時微動観測と被害状況の調査を行った。ここでは、本震での強震記録の特性、川口町における被害状況とその地震動強さ、常時微動観測結果、およびK-NET小千谷における地盤の非線形性状について報告する。

2. 地震と強震記録の概要

2004年新潟県中越地震 ($M_j6.8$: 最大震度7) は、10月23日17:56に発生した。この本震に続いて、18:03に発生した余震 ($M_j6.3$: 最大震度5強)、18:11に発生した余震 ($M_j6.0$: 最大震度6強)、18:34に発生した最大余震 ($M_j6.5$: 最大震度6強) と10月27日10:40に発生した余震 ($M_j6.1$: 最大震度6弱) とM6クラスの余震が数多く発生している。

山中(2004)によると、本震での断層の走向は北北東-南南西で、北西傾斜の逆断層タイプ、断層面積は $24 \times 8\text{km}$ 程度、震源深さは約13kmと浅く、すべりの大きな破壊はそこから浅い方向に進んだために、地表での揺れが大きくなったものと推定されている。この地震の M_w は6.6、最大すべり量は約0.9mとされている。また、最大余震の断層は本震のものとはほぼ平行であるが、震源深さは約15kmと本震よりも深い位置で発生しており、本震とは異なる断層面が動いたものと推定されている。また、最大余震の断層面積は $12 \times 8\text{km}$ 程度、 M_w は6.3とされている。

この地震では、K-NET, KiK-net, 気象庁, 自治体などの強震計により多くの強震記録が得られている。これらの強震記録による本震と最大余震での計測震度の分布を図1に示す。どちらの地震でも断層の上盤側にあたる断層の北西側において震度6強以上の強い地震動が観測されている。中でも震度7(計測震度6.5)を観測した川口町では、最大加速度 $1,722\text{cm/s}^2$ (3成分合成)が記録されている。震源近傍に位置するJMA小千谷(計測震度6.3), K-NET小千谷(計測震度6.7), K-NET長岡(計測震度5.5)およびK-NET十日町(計測震度6.2)での加速度波形, 速度波形を図2に示す。

JMA小千谷では最大加速度約 900cm/s^2 , 最大速度約 85cm/s である。一方、JMA小千谷の南南西約800mに位置するK-NET小千谷では、最大加速度約 $1,300\text{cm/s}^2$, 最大速度約 130cm/s と非常に大きな地震動が観測されている。JMA小千谷と比較すると、全体的な波形の形状は似通っているものの、最大振幅はK-NET小千谷の方が水平成分で約1.4倍大きい。また、K-NET小千谷の加速度波形EW成分では、図中の線で囲った10秒前後の範囲においてスパイク状の波がみられる。これは地盤の剛性低下に伴うサイクリックモビリティの影響によるものと推察される。また、K-NET長岡では最大加速度約 470cm/s^2 , 最大速度約 50cm/s であった。K-NET十日町では、最大加速度約 $1,700\text{cm/s}^2$ とK-NET小千谷以上の大きな加速度が観測されているが、速度波形ではその振幅は小千谷に比べるとやや小さく、最大速度で約 50cm/s であった。

主な強震記録の2次元速度応答スペクトルを図3に示す。図には比較のため、1995年兵庫県南部地震

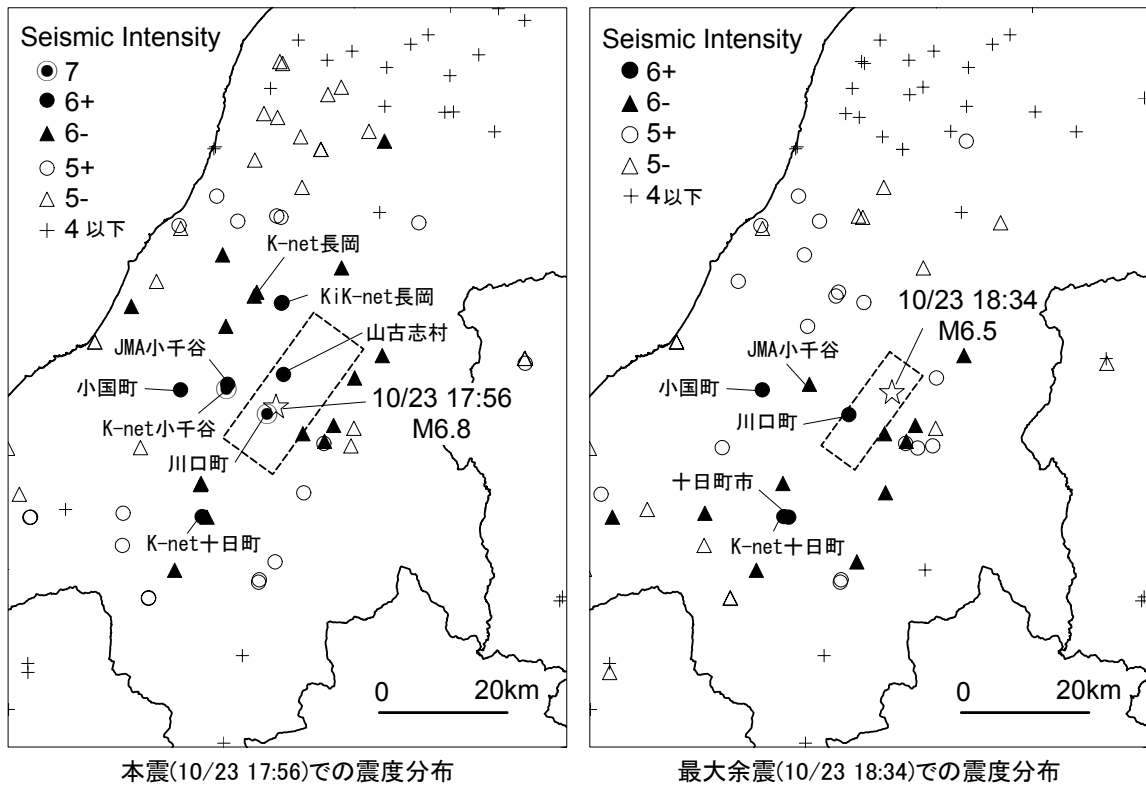


図1 2004年新潟県中越地震における計測震度の分布
(断層位置は瀨嶺ほか(2004)による)

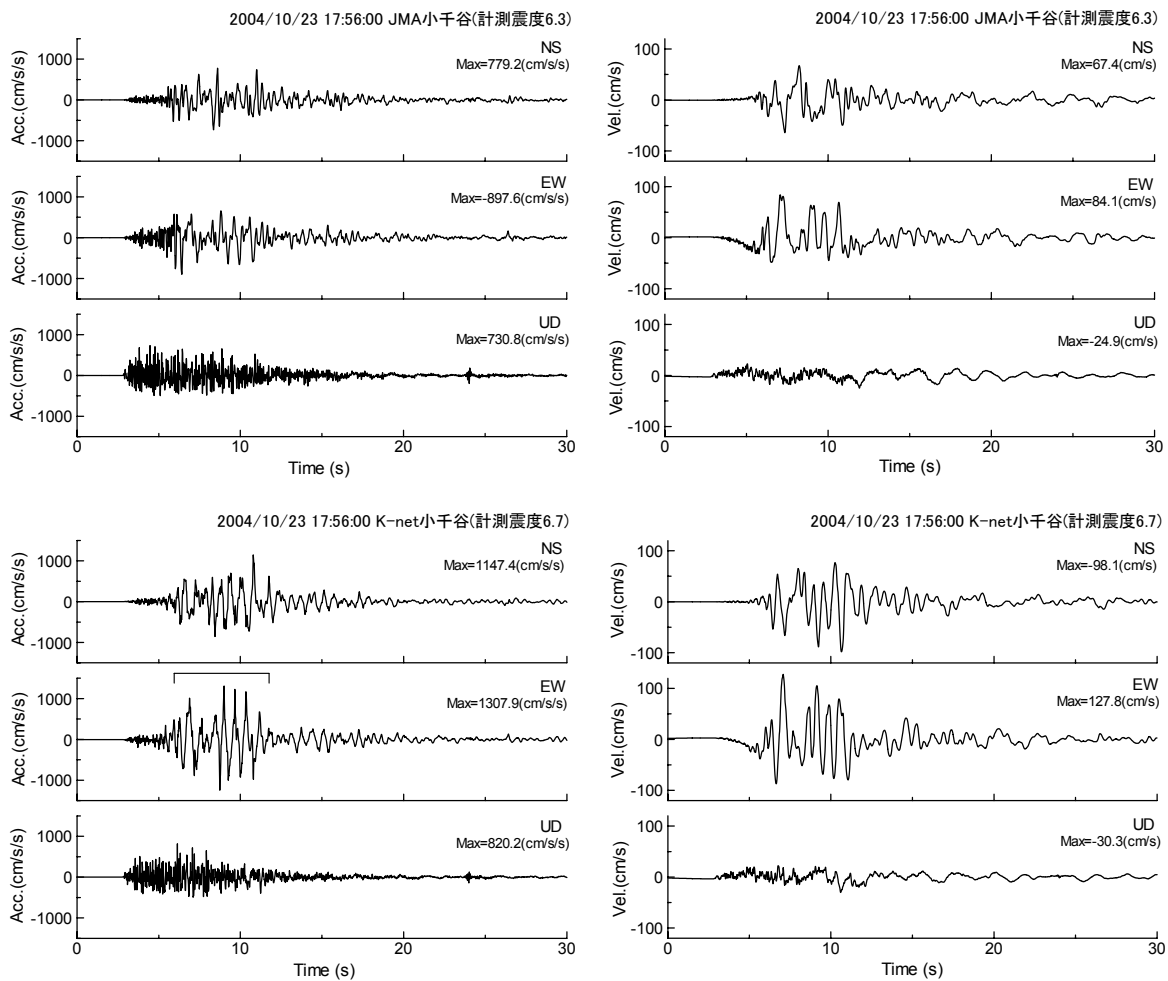


図2 JMA小千谷, K-NET小千谷での加速度波形と速度波形

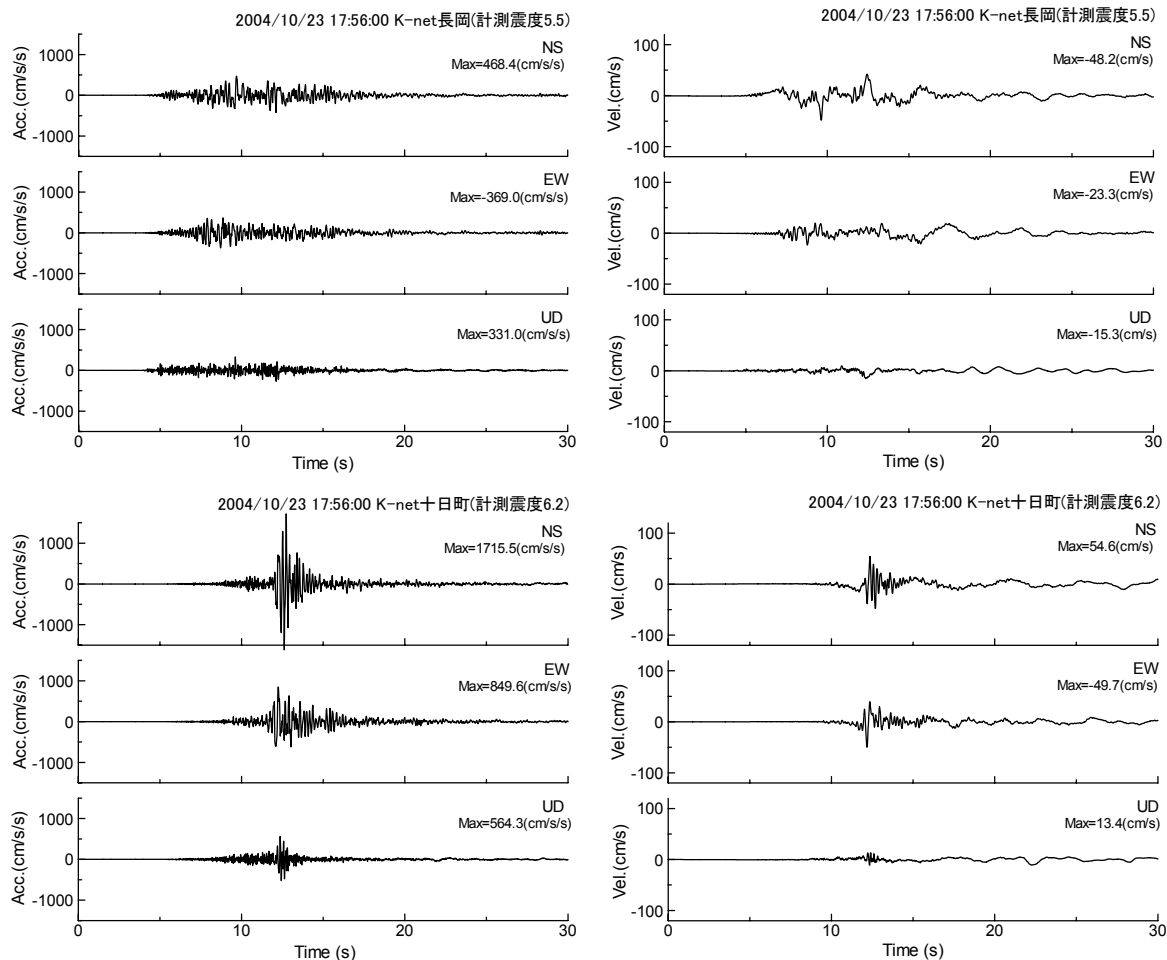


図2 (続き) K-NET 長岡, K-NET 十日町での加速度波形と速度波形

での神戸海洋気象台 (JMA 神戸) と JR 鷹取駅, 葺合におけるスペクトルも併せて示している. K-NET 小千谷でのスペクトルは周期 0.7 秒に明瞭なピークがみられ, 最大速度応答は 600cm/s 程度であった. その応答はほぼ全周期帯域で JMA 神戸を上回っており, 周期 1 秒以下では鷹取や葺合の記録よりも大きい. しかし, 周期 1 秒以上の応答は鷹取や葺合に比べるとやや小さい. また, JMA 小千谷では周期 0.6~0.8 秒付近にピークがみられ, スペクトル形状は K-NET 小千谷のものとはやや異なっている. その応答は JMA 神戸と比較して周期 0.7~1 秒あたりではやや小さいが, その他の周期帯域ではほぼ同程度であった. K-NET 十日町では 0.2 秒付近に明瞭なピークがみられ, その応答は 200cm/s 程度と神戸での記録よりも大きい, 周期 1 秒以上の成分については比較的小さく, 神戸の記録に比べても応答は小さかった.

3. 川口町における被害と地震動

計測震度 6.5 が観測された川口町役場周辺では, 小千谷や十日町の中心部に比べて大きな被害がみられた. 倒壊した建物の多くは, 老朽化したもの, 商店やガレージなど 1 階に大きな開口部があるものなどであり, 新しい建物には大きな被害はみられなかった. 南東-北西方向の道沿いの商店街の建物は北西方向に倒壊ないし傾斜したものが多い. しかし, これと直交する道沿いでは建物が北東に倒壊したり, 高さ 2m・幅 0.8m 程度の自販機が南西側に転倒したりしており, 被害の方向性は明瞭ではない. ある住民の話では, 自分の商店は 1 度目の本震の揺れで倒壊したという. また, 越後川口駅付近で線路の屈曲が数カ所でみられた.

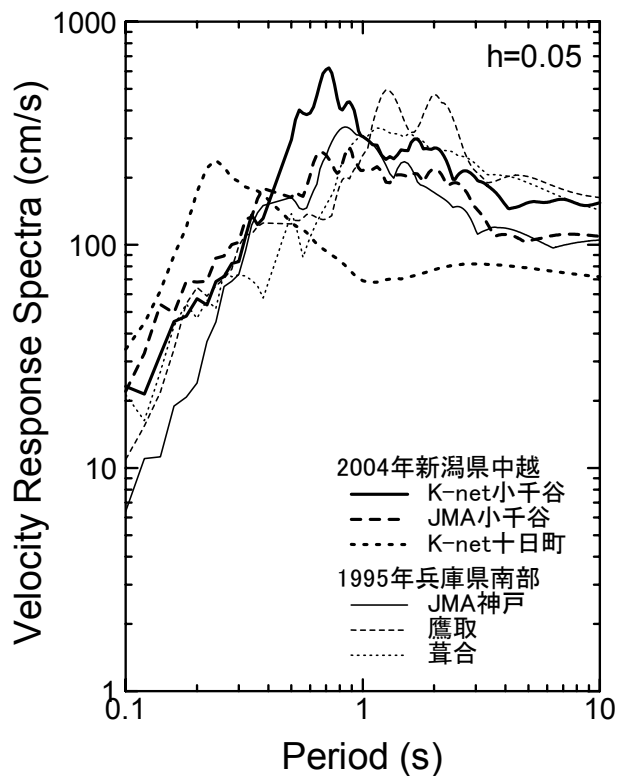


図3 新潟県中越地震と兵庫県南部地震での速度応答スペクトルの比較

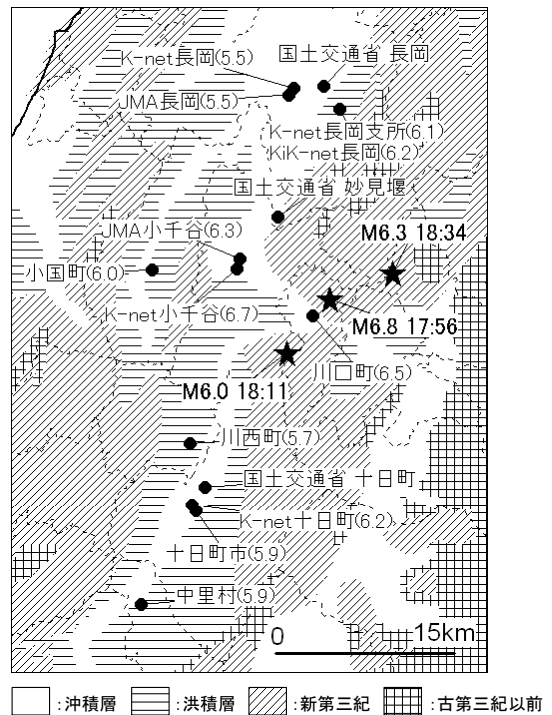


図4 常時微動観測点と表層地質 (括弧内の数字は本震での計測震度を表す)

町役場付近にある宝積寺では、200基強の墓石の内、立っていたのは13基であり、転倒率は約95%であった。墓石の大きさは高さ75cm・幅30cm程度であった。この他に地震動の強さを示唆する現象として、ガレージ内に駐車していた軽自動車シャッターを突き破って1m程度南西側に移動していた。これらの墓石の大きな被害や自動車の移動は兵庫県南部地震での震度7の地域でも観察されており(内山ほか(1995), 翠川(1996)), 川口町で震度7という判定と調和的である。

震度計は3階建の庁舎の直近に設置されている。最大加速度は、3成分合成で $1,722\text{cm/s}^2$ 、NS成分で $1,142\text{cm/s}^2$ 、EW成分で $1,676\text{cm/s}^2$ 、UD成分で 870cm/s^2 であった。卓越周期はNS成分で1.0秒、EW成分で1.3秒、UD成分で0.9秒であった。卓越周期は主要動10秒間のフーリエ加速度スペクトルの最大値に対応する周期である。例えば、JMA小千谷のEW成分は、卓越周期が0.7秒で、最大加速度および最大速度がそれぞれ 898cm/s^2 および 84.1cm/s だった。川口町では、卓越周期がこれより長いことから、最大加速度に対する最大速度の比は0.1程度はあったものと推測され、最大速度は100ないし 150cm/s 程度に達している可能性がある。

4. 強震観測点における常時微動特性

強震観測点における地盤特性について検討するため、震源近傍において震度6弱以上を観測した長岡市、小千谷市、十日町市、川口町、川西町、小国町、中里村の強震観測点14地点において常時微動観測を行った。観測点の位置と表層地質を図4に示す。常時微動観測を行った地点は全て沖積層または洪積層上に位置している。観測には周期2秒まで平坦な特性をもつ速度計を用い、サンプリング周波数100Hzで40.96秒間の観測を3回以上行った。観測された波形からノイズの影響が少ないと考えられる20.48秒間のデータを切り出して水平・上下動振幅スペクトル比(H/Vスペクトル比)を算出した。H/Vスペクトル比の計算では、時松・宮寺(1992)にならってNS成分とEW成分の相乗平均を水平成分として算出した。

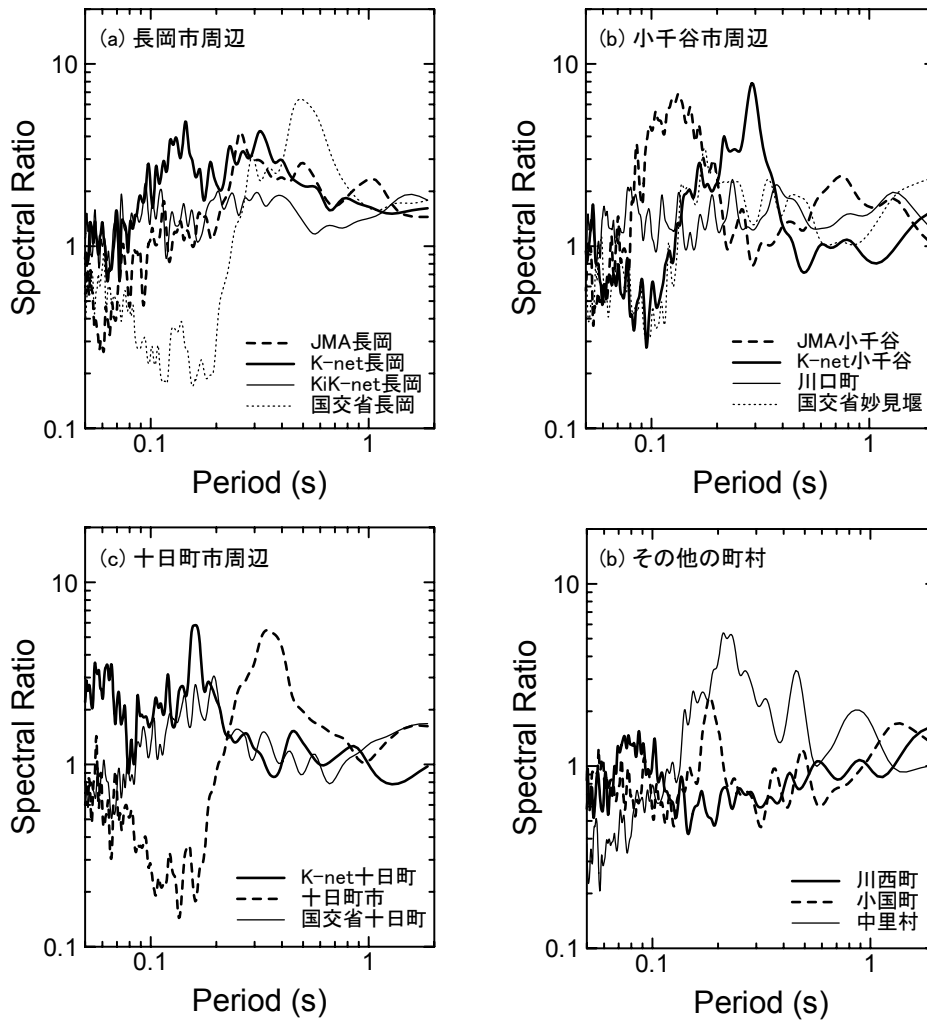


図5 常時微動のH/Vスペクトル比

各地点での H/V スペクトル比を図 5(a)~(d)に示す. (a)は長岡市の観測点を, (b)小千谷市と川口町の観測点を, (c)は十日町市の観測点を, (d)はその他の町村の観測点をそれぞれ示している. 図 5(a)をみると, JMA 長岡では周期 0.25 秒付近にピークがみられるのに対して, その近傍に位置する K-NET 長岡では周期 0.15 秒付近にピークがみられ, 卓越周期には違いがみられる. このため, 比較的近い距離にあっても地盤特性が変化していることが示唆される. また, それらの観測点のやや東側に位置する国土交通省の長岡国道事務所では周期 0.5 秒付近に明瞭なピークがみられる.

図 5(b)の小千谷市周辺のスペクトル比をみると, JMA 小千谷と K-NET 小千谷ではそれぞれ周期 0.15 秒, 0.3 秒付近にピークがみられ, 長岡市と同様に比較的近傍に位置する地点でも卓越周期には違いがみられる. 一方, 川口町ではスペクトル形状は平坦に近く, 明瞭なピークはみられなかった. 図 5(c)の十日町市周辺のスペクトル比では, 十日町市と国土交通省十日町出張所では周期 0.15 秒付近にピークがみられるのに対して, 十日町市役所では周期 0.35 秒付近に明瞭なピークが確認できる. 図 5(d)をみると, 川西町では明瞭なピークはみられないが, 小国町や中里村では 0.2 秒前後のピークが確認できる.

5. K-NET 小千谷における地盤の非線形性状

5.1 本震前後の常時微動記録と地震記録のスペクトルの比較

K-NET 小千谷では, 図 5(b)に示すように常時微動の卓越周期は 0.3 秒付近であるのに対して, 図 3 に示す本震での卓越周期は 0.7 秒と長周期側に移行している. また, 加速度波形にはサイクリックモビリ

ティの影響と考えられる波がみられることと併せて考えると、K-NET 小千谷では地盤の非線形性の影響が顕著に現れているものと考えられる。筆者のひとり、1998年5月にK-NET 小千谷とK-NET 十日町において常時微動観測を行っている。そこで、本震前後の常時微動記録と地震記録を用いて、K-NET 小千谷における地盤の非線形性状について検討する。

本震前の1998年5月と本震後の2004年10月に計測した常時微動のH/Vスペクトル比の比較を図6に示す。なお、1998年の観測では周期1秒まで平坦な特性を持つ速度計を用いている。図6(b)に示すK-NET 十日町においては、本震前後のスペクトル比の形状や卓越周期に明確な違いはみられない。一方で、図6(a)に示すK-NET 小千谷では本震前のスペクトル比は周期0.2秒強にピークがみられるのに対して、本震後のスペクトル比では周期0.3秒にピークがみられ、本震後に卓越周期が長周期化している傾向がみられた。

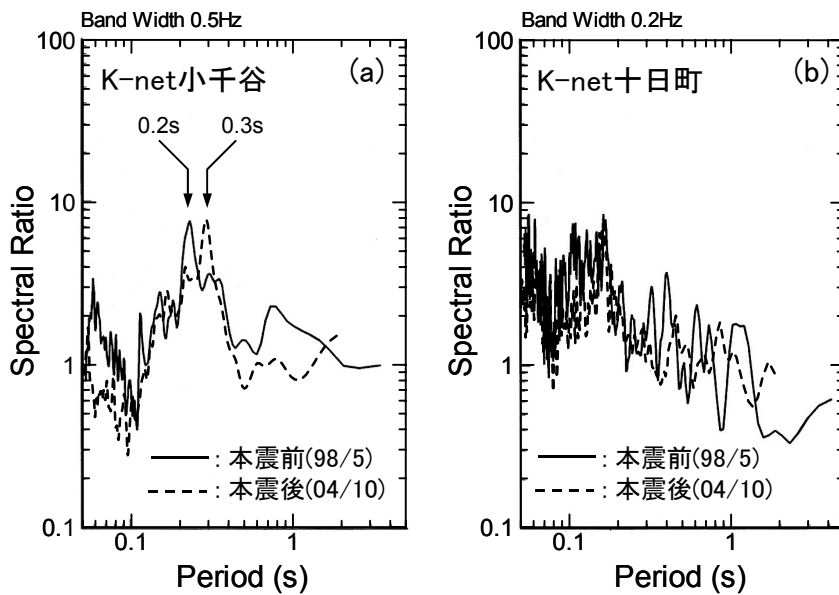


図6 本震前後での常時微動H/Vスペクトル比の比較

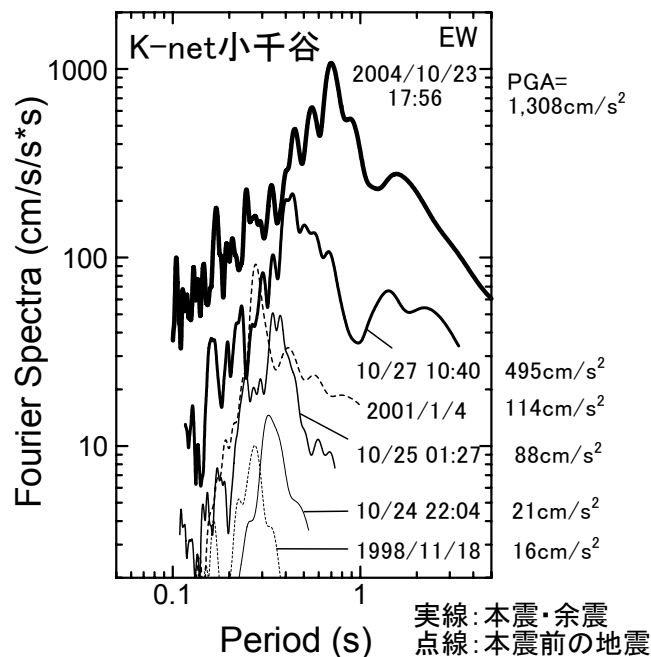


図7 本震前後の地震記録のフーリエスペクトルの比較

各地震記録のスペクトル形状の変化を検討するため、本震と主な余震、本震前の地震について加速度フーリエスペクトルを比較したものを図7に示す。図中の太実線で示したスペクトルは本震のものであり、実線は余震記録のスペクトル、点線は本震前の地震記録のスペクトルを表しており、図の右側には各地震での最大加速度も併せて示している。本震と余震でのスペクトルを比較すると、卓越周期は0.3~0.7秒の範囲にみられ、振幅が大きくなるほど長周期側にピークが移行している。同レベルの加速度が観測された余震記録と本震前の記録のスペクトルを比較すると、本震前のスペクトルの卓越周期は0.25秒付近にみられるのに対して、余震のスペクトルの卓越周期は0.3~0.4秒であり、常時微動の結果と同様に、本震後に卓越周期が長周期化している傾向がみられた。これらのことは、本震での強い地震動により地盤が非線形化し、低下した剛性が本震後にも復元していないことを示唆しているものと考えられる。

5.2 地震記録から推定される地盤の非線形形状

K-NET 小千谷におけるボーリング調査結果を図8に示す。この地盤では表層3mまでN値0~2、 V_s 100m/sの軟弱な層が存在し、その下には深さ13mまでN値50以上、 V_s 380~580m/sの礫からなるやや堅い層が続き、さらに下層にはN値20以上、 V_s 340m/sの岩盤が深さ18mまで存在している。3m以深の V_s 380m/s層を基盤とみなして表層地盤の理論増幅率を描くと、図9中の太実線のようになる(ケースA)。この場合、地盤の卓越周期は0.1秒付近であり、図6(a)に示した常時微動の卓越周期とは一致しない。

そこで、ケースAと同様に3m以深の層を基盤とみなし、表層の V_s を100m/sから60m/sに変化させて増幅率を描くと図中の太点線のようになる(ケースB)。この場合、卓越周期は0.2秒にみられ、常時微動の結果と対応する。また、図8に示す地盤モデルのさらに下層の18m以深に V_s 1,000m/sの基盤層が存在するものと仮定すると、増幅率は図中の細破線のようになる(ケースC)。この場合、表層3mの低速度層に対応する周期0.1秒付近のピークのほかに、それ以深の層による周期0.2秒弱にもやや小さなピークがみられるようになる。図8の地盤モデルによる卓越周期と常時微動による卓越周期が対応していない原因として、上記のように最表層の V_s がPS検層結果よりもさらに低速度であるか、あるいはより深い地盤の影響が考えられる。しかし、現時点では18m以深の地盤については不明なため、今回は予備的検討として、ケースBのように表層3mの層の V_s を60m/sと設定し、強震時にはその層のみが非線形化するものと仮定して以下の解析を行った。

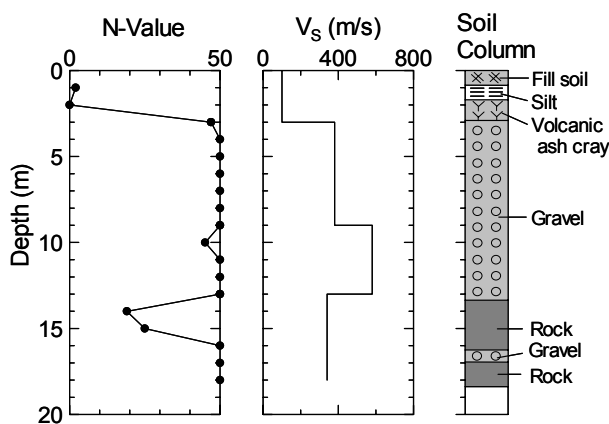


図8 K-NET 小千谷におけるボーリング調査結果

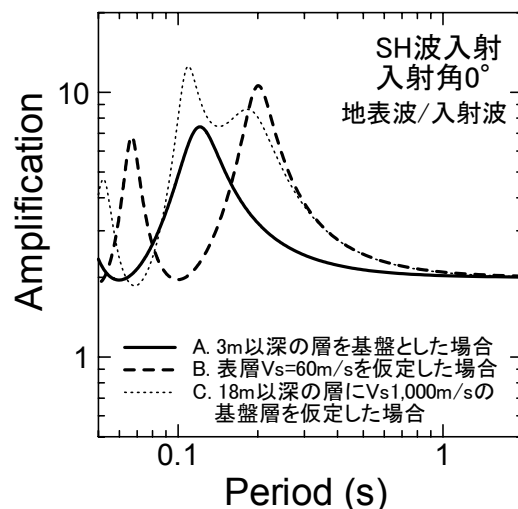


図9 K-NET 小千谷における理論増幅率

得られた地震記録から、Tokimatsu et al.(1989)による方法を用いて、表層地盤のせん断剛性比や有効せん断ひずみを算出した。この方法では、まず表層地盤のせん断剛性比 G/G_0 を (1) 式で算出する。

$$G/G_0 = (T_0/T)^2 \quad (1)$$

ここで、 T_0 は微小ひずみ時における地盤の卓越周期で、 T は地震記録の卓越周期を表す。ここで、 T_0 には図 6(a) に示す本震前の常時微動の H/V スペクトル比から 0.2 秒を用いる。次に、地表面での速度波形 $v(t)$ を用いて任意の深さ z における地盤のひずみを (2) 式で算出し、各深度の最大ひずみ γ_{max} を平均した値から (3) 式によって有効ひずみ γ_{eff} を算出する。

$$\gamma(t, z) = \{v(t + z/V_{SE}) - v(t - z/V_{SE})\} / 2V_{SE} \quad (2)$$

$$\gamma_{eff} = a(\gamma_{max})_{ave} \quad (3)$$

V_{SE} は地震記録の卓越周期から推定される地盤の S 波速度、定数 a は 0.65 である。

解析に用いた地震記録を表 1 に示す。本震以前の地震については最大加速度が 20cm/s^2 程度以上のもの 6 記録、余震は最大加速度 $10\sim 400\text{cm/s}^2$ 程度のもの 31 記録を用いた。解析では水平 2 成分のうち最大速度が大きい方の成分を用いた。求められた有効ひずみとせん断剛性比の関係を図 10 に示す。図には比較のため、Tokimatsu et al.(1989)による結果も併せて示している。本震時のひずみレベルは 3×10^{-2} 程度

表 1 解析に用いた地震記録

	日付	時間	M	PGA(cm/s ²)	
本震以前の地震	1998/2/21	9:55:45	5.0	194.8	
	1998/2/22	2:49:35	3.7	31.8	
	2001/1/4	13:18:30	5.1	114.2	
	2002/4/2	22:13:21	3.9	21.0	
	2004/1/9	22:05:00	4.0	49.4	
	2004/3/15	7:38:14	4.7	17.9	
本震	2004/10/23	17:56:03	6.8	1307.9	
余震	2004/10/23	19:46:00	5.9	432.1	
	2004/10/23	19:35:36	5.2	261.7	
	2004/10/23	20:01:28	4.4	72.7	
	2004/10/24	14:21:37	4.9	400.6	
	2004/10/24	9:28:08	4.6	216.1	
	2004/10/24	23:00:39	5.0	65.1	
	2004/10/24	7:16:11	4.2	43.3	
	2004/10/24	7:08:17	4.5	36.2	
	2004/10/24	13:54:30	3.9	31.5	
	2004/10/24	1:36:42	3.7	20.0	
	2004/10/24	10:29:30	4.2	9.8	
	2004/10/25	0:28:12	5.2	381.7	
	余震	2004/10/25	6:05:02	5.6	285.2
		2004/10/25	1:27:57	4.5	132.5
		2004/10/25	20:26:36	3.9	108.2
2004/10/27		10:40:56	6.0	495.8	
2004/10/27		10:26:25	4.3	85.1	
2004/10/27		0:56:45	4.2	61.2	
2004/10/27		2:05:46	4.2	46.7	
2004/10/27		10:35:28	4.1	25.9	
2004/10/27		10:56:34	4.2	15.6	
2004/10/28		2:03:59	4.0	48.2	
2004/11/1		4:35:53	5.0	115.8	
2004/11/1		13:04:26	3.1	12.0	
2004/11/2		0:40:21	3.9	34.0	
2004/11/4		8:57:35	5.2	326.1	
2004/11/5		14:56:49	4.1	44.2	
2004/11/6	22:05:15	4.4	54.5		
2004/11/8	11:16:06	5.8	73.0		
2004/11/10	3:43:17	5.1	46.5		
2004/11/12	2:24:04	4.3	48.1		

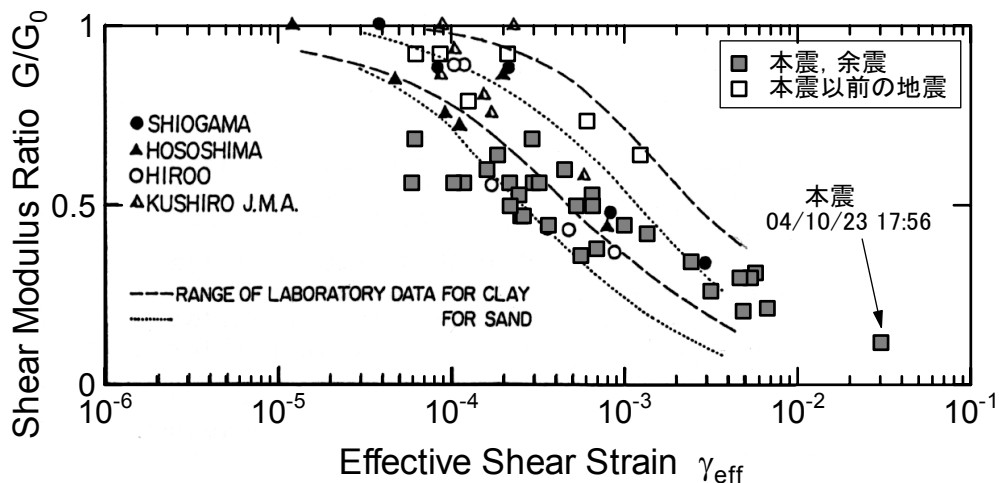


図 10 有効せん断ひずみとせん断剛性比の関係 (Tokimatsu et al. (1989) に加筆)

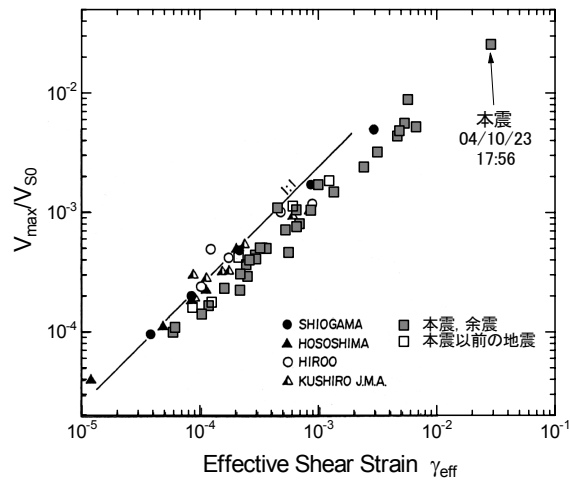


図 11 有効せん断ひずみと基準化した最大速度の関係
(Tokimatsu et al. (1989)に加筆)

と求められ、既往の結果に比べて約 10 倍大きな値となっている。また、せん断剛性比は 1/10 程度に低下している。本震での結果は既往の室内試験結果を外挿するような傾向がみられた。また、本震前後の結果を比較すると、本震後では卓越周期が長周期化していることから、同程度のひずみレベルでも本震前に比べてせん断剛性比が低くなっていることが確認できる。有効せん断ひずみと表層地盤の S 波速度に対する地表の最大速度の比の関係を図 11 に示す。Tokimatsu et al.(1989)によると両者には線形な関係がみられることが指摘されており、本検討でも同様な傾向がみられた。なお、前述のように本解析にはいくつかの仮定が含まれており、今後さらに検討を加える必要がある。

6. まとめ

2004 年新潟県中越地震では多くの観測点で震度 6 以上の記録が得られた。特に、震源近傍の川口町と K-NET 小千谷では震度 7 が観測された。兵庫県南部地震での強震記録と比較すると、全般に新潟県中越地震での強震記録は周期 1 秒以下の成分は神戸での記録よりもやや大きいものの、1 秒以上の成分については JMA 神戸と同程度、鷹取や葺合の記録と比べると小さい傾向がみられた。また、甚大な被害が生じた川口町では、墓石の大きな被害や自動車の移動がみられ、最大速度で 100~150cm/s の地震動であった可能性を指摘した。

震源近傍の強震観測点 14 点において常時微動観測を行い、地盤特性について検討した。その結果、比較的近くに位置する地点でも H/V スペクトル比の形状や卓越周期には違いがみられた。また、K-NET 小千谷では本震前後で常時微動記録、地震記録ともに卓越周期が長周期化していることを示し、地震記録と地盤データを用いて地盤の非線形性状について検討した。その結果、本震時のひずみレベルは 3×10^{-2} 程度であること、せん断剛性比は 1/10 程度に低下したこと、本震後のせん断剛性比は本震前のものと比較して顕著に低下していること、を示した。ただし、地盤の情報については不明な点も残されており、今後さらに検討を加える必要がある。

謝辞

調査に際して、各市町村役場の関係各位にご協力いただいた。防災科学技術研究所の K-NET および KiK-net、気象庁によるデータを使用させていただいた。1995 年兵庫県南部地震の鷹取と葺合の記録はそれぞれ JR 西日本、大阪ガスによるものである。記して謝意を表します。

参考文献

- 瀨瀬一起, 引間和人, 三宅弘恵, 田中康久: 2004 年新潟県中越地震 —強震動と震源過程—, <http://taro.eri.u-tokyo.ac.jp/saigai/chuetsu/chuetsu.html>, 2004. (11/12 現在)
- 翠川三郎: 飛び跳ねる自動車—兵庫県南部地震での激震動—, 地震ジャーナル, No.42, pp.38-43, 1996.
- Tokimatsu, K., Midorikawa, S. and Yoshimi, Y.: Dynamic Soil Properties Obtained from Strong Motion Records, *Proc. 12th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.3, pp.2015-2018, 1989.
- 時松孝次, 宮寺泰生: 短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 439 号, pp.81-87, 1992.
- 内山泰生, 翠川三郎, 武村雅之: 1995 年兵庫県南部地震の際の墓石の転倒調査 その 2 墓石の転倒率と地震動強さの関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.103-104, 1995.
- 山中佳子: EIC 地震学ノート No.154+, 2004 年 10 月新潟県中越地方の地震 (Mj6.8, Mj6.5, Mj6.1) , http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2004/EIC154a.html, 2004. (11/12 現在)