



2004年新潟県中越地震の強震観測点における表層地盤の地震動増幅

藤川 智¹⁾, 先名重樹²⁾, 藤原広行³⁾, 大井昌弘⁴⁾

1)正会員 防災科学技術研究所, 客員研究員 工修

e-mail: s.fujikawa@shimz.co.jp

2)正会員 防災科学技術研究所, 特別技術員 理修

e-mail: senna@bosai.go.jp

3)正会員 防災科学技術研究所, プロジェクトディレクター 理博

e-mail: fujiwara@bosai.go.jp

4)正会員 防災科学技術研究所, 特別技術員 理修

e-mail: ooi@bosai.go.jp

要 約

新潟県中越地震の本震では、小千谷市内の2地点の強震記録の振幅に大きな違いが見られた。また、地表地震動の大きさに比して、周辺の低層建物の被害の程度は小さかった。これらの原因を解明することを目的として、地震後に実施された地盤調査結果を用いて、両地点の物理的な地盤モデルを作成し、地盤の非線形応答解析により、両地点の地表地震動の再現を行った。また、周辺の建物支持層となりうる段丘堆積層上面の地震動を評価し、これを入力とする建物モデルの応答解析を行った。検討の結果、表層地盤の非線形応答解析により、両地点の地表地震動を精度よく再現できた。両地点の地表地震動の差は、主として表層約3mの増幅の差によることを示した。また、段丘堆積層上面の地震動レベルは、地表地震動の6割程度と推定され、これを入力とする低層RC造建物モデルの応答解析結果は、周辺で大きな被害がなかった状況と整合することを示した。

キーワード： 2004年新潟県中越地震, 強震記録, 表層地盤, 地盤増幅, 地盤非線形, 建物被害

1. はじめに

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震では、震源近傍にある小千谷市内の2地点で地表強震観測記録が得られた。そのうち、防災科学技術研究所（以下、防災科研）のK-NETでは、最大加速度が1300cm/s²以上、最大速度は130cm/s以上、震度7、という非常に大きな地震動であった。もう一つは気象庁の小千谷市城内¹⁾の観測点であり、最大加速度900cm/s²、最大速度90cm/s以上、震度6強、と大きな地震動であった。これらの2地点は、約700mしか離れていないにもかかわらず、地表地震動に相対的に大きな差があったことが特徴的であった。このような大きな地表地震動が観測された小千谷市内では、住家等で被害を受けた物件が多くあった。しかし、地表地震動の大きさのわりには、被害規模は小さい方であったことが指摘されている²⁾。

このような、近距離に在る 2 地点で地表地震動が大きく異なった原因の解明と、地表地震動の大きさと被害の関係を把握することは、強震動予測や被害予測の精度向上のために、重要な情報を与えることが期待される。

地震直後から、各機関により調査・研究が進められている。これまでに、両サイトの地表地震動の差異は、表層数メートルの地盤構造の違いで説明できることが指摘されている。時松ら³⁾は、表層土質の非線形特性の違いから、両地点の地震動の特徴の説明を試みている。先名ら⁴⁾は、小千谷市内の面的な微動測定とリファレンスとなる数地点のボーリング調査を実施し、表層の地質構造の差異が地表地震動に大きく影響した可能性を指摘している。これらの研究に加え、詳細な地盤調査に基づいた物理的な地盤モデルを用いて、観測地震動を波形レベルで再現できれば、表層地盤の非線形化を含む動的挙動が地表地震動に与えた影響が、定量的に明らかになると考えられる。

一方、被害状況の説明に関しては、境ら⁵⁾は木造建物の被害に着目し、地震動が 0.5 秒以下の短周期成分が卓越していたことが、被害が大きくなかった理由であることを指摘している。神原⁶⁾は、低層 RC 造建物に大きな被害が見られなかった被害状況に対し、K-NET の地表観測記録の振幅レベルを変化させた波形を入力とした応答解析から、被害との対応を検討している。その結果、地表記録の 50% 程度の振幅であれば、実際に被害が大きくなかった状況を説明できるとの結論を示している。しかし、建物への入力地震動を定量的に評価し、その大きさと被害程度との関係を定量的に説明している研究は見られない。

本研究では、小千谷市内の 2 つの強震観測点において、地震後に実施された地盤調査結果を用いて、両地点の詳細な地盤モデルを作成した。その地盤モデルを用いて、地盤の非線形性を考慮した応答解析により、両地点の地表観測記録と表層地盤応答の再現を行った。これより、両地点の応答特性の差異を明らかにした。また、作成した地盤モデルを用い、周辺の低層 RC 造建物の支持層となりうる段丘堆積層上面の地震動を評価した。さらに、これを入力とする低層 RC 造建物モデルの応答解析を行い、実際の被害状況との対応を考察した。なお、本検討は、既往の報告^{7,8)}を基にして、その後の検討により地盤パラメータを修正し、さらに追加検討を加えたものである。

2. 小千谷市内で得られた観測記録

新潟県中越地震では、本震と多くの余震の観測記録が、図 1 に示す小千谷市内の 3 地点で得られた。

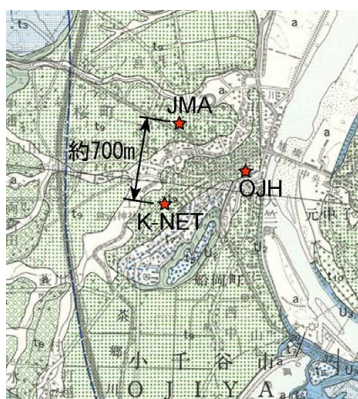


図 1 小千谷市の表層地質と観測点位置（文献 9)に加筆）

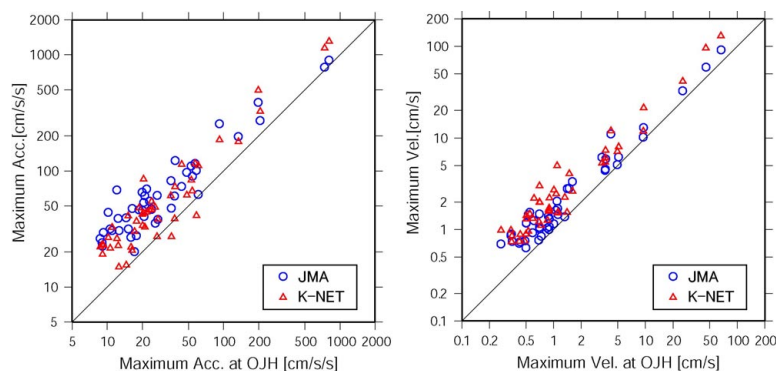
これらは、防災科研の K-NET の NIG019（以下 K-NET）と、気象庁の小千谷市城内（以下 JMA）、そして小千谷総合病院水仙の家（以下 OJH）の記録¹⁰⁾である。K-NET と JMA は大局的には同じ表層地質の地表面の観測点である。また、OJH は未固結の堆積岩上に建つ建物基礎の上で得られた記録である。表 1 には、本震(EQ.01)、主な余震(EQ.03~EQ.31)、及び本震前の地震(EQ.00, EQ.s1, EQ.s2)

の最大値を示し、図 2 には、最大加速度と最大速度の関係を、横軸に OJH の最大値、縦軸に K-NET と JMA の最大値として示す。同図で横軸を OJH の最大地動としたのは、後述のように、OJH で得られた観測記録が K-NET と JMA の共通の工学的基盤波と見なせるためである。また、図 3、図 4 には、本震の加速度波形、速度波形、擬似速度応答スペクトルを示す。

本震の最大加速度、最大速度ともに、K-NET は JMA の 1.5 倍程度大きい。本震の応答スペクトルより、K-NET は周期 0.7 秒付近で卓越しており、周期 0.4 秒から 1.5 秒の間で JMA より振幅が大きい。OJH は比較的硬い地盤上の建物基礎の上で得られた記録であるため、振幅は K-NET と JMA より振幅が小さいことがわかる。図 2 より、加速度は JMA の方が大きい傾向があるが、逆に、速度は K-NET の方が JMA より大きい傾向がある。この傾向は、地盤の非線形化が大きくないと考えられる小さな地震動レベルでも見られることから、両サイトの表層地盤の固有周期の違いが主に影響しているものと考えられる。ただし、本震などの大地震動レベルでは、加速度は JMA が K-NET より小さくなっている。この理由については、時松ら³⁾は両地点の非線形特性の違いとして説明している。

表 1 小千谷市内で得られた観測記録の諸元

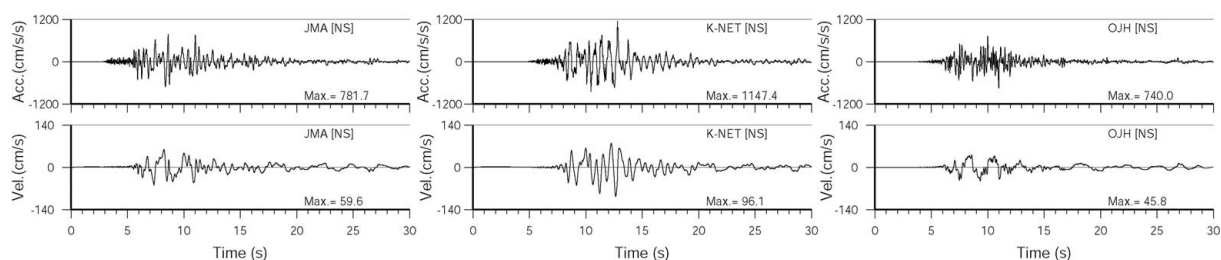
EQ.	DATE	TIME	Mj	JMA (NS/EW)		K-NET (NS/EW)		OJH (NS/EW)	
				Acc. [cm/s/s]	Vel. [cm/s]	Acc. [cm/s/s]	Vel. [cm/s]	Acc. [cm/s/s]	Vel. [cm/s]
00	2001.01.04	13:18	5.3	73/63	5.9/5.1	114/110	7.4/7.1	43/60	3.7/4.9
s1	2004.01.09	22:04	4.0	65/52	1.9/1.1	49/28	2.1/0.9	-	-
s2	2004.03.15	7:38	4.7	51/44	1.3/1.2	14/18	0.6/0.6	-	-
01(Main)	2004.10.23	17:56	6.8	782/898	60/92	1140/1308	96/130	740/808	46/67
03	2004.10.27	0:56	4.3	96/83	2.8/2.8	41/61	1.5/4.1	59/35	1.4/1.5
04	2004.10.27	2:05	3.8	61/35	1.7/1.1	38/49	1.5/2.7	37/24	1.1/1.0
05	2004.10.27	10:26	4.3	97/53	3.3/2.0	62/85	2.6/5.0	48/21	1.6/1.0
06	2004.10.27	10:40	6.1	197/390	10/33	162/461	12/41	135/199	9.4/26
07	2004.11.01	4:35	5.0	110/116	6.2/6.2	83/112	5.3/8.0	53/57	3.3/5.1
08	2004.11.02	0:40	4.1	29/34	0.8/0.7	15/15	0.7/0.7	13/13	0.5/0.4
10	2004.11.03	18:02	3.2	27/44	0.6/0.7	22/20	0.9/0.9	16/15	0.5/0.4
11	2004.11.04	8:57	5.2	267/255	13/11	321/186	21/12	207/92	9.6/4.2
12	2004.11.05	14:56	4.2	61/66	1.5/1.4	44/43	1.5/1.9	22/18	0.6/0.7
13	2004.11.06	22:05	4.4	47/47	1.0/1.0	27/55	1.3/3.0	36/24	0.9/0.7
14	2004.11.08	11:15	5.9	84/123	4.6/4.4	67/73	6.0/5.5	53/38	3.7/3.7
15	2004.11.09	4:15	4.8	38/61	1.4/1.5	38/27	2.3/1.5	27/27	1.3/1.1
16	2004.11.10	3:43	5.3	47/46	1.6/1.4	47/34	2.5/1.6	23/20	1.1/0.9
17	2004.11.11	18:04	3.9	39/69	1.3/1.4	43/26	1.6/0.9	21/12	0.9/0.5
18	2004.11.12	2:24	4.3	31/43	1.0/1.2	41/48	1.9/2.2	15/18	0.7/0.6
23	2004.11.15	9:39	4.7	26/30	0.8/0.7	22/23	1.1/1.2	8.7/9.3	0.7/0.7
25	2004.11.19	6:03	3.2	38/44	0.9/0.8	23/23	0.7/1.0	13/10	0.3/0.3
28	2004.12.10	16:22	3.5	61/54	1.1/1.3	32/46	1.3/2.2	20/23	0.5/0.9
29	2004.12.23	21:03	4.5	22/24	0.7/0.9	19/23	0.8/1.3	8.3/9.1	0.3/0.6
30	2004.12.25	10:23	4.4	31/28	1.2/0.7	32/22	1.4/1.0	11/9.4	0.5/0.3
31	2004.12.28	18:30	5.0	18/27	1.0/1.1	29/37	1.7/1.7	17/18	0.9/0.9



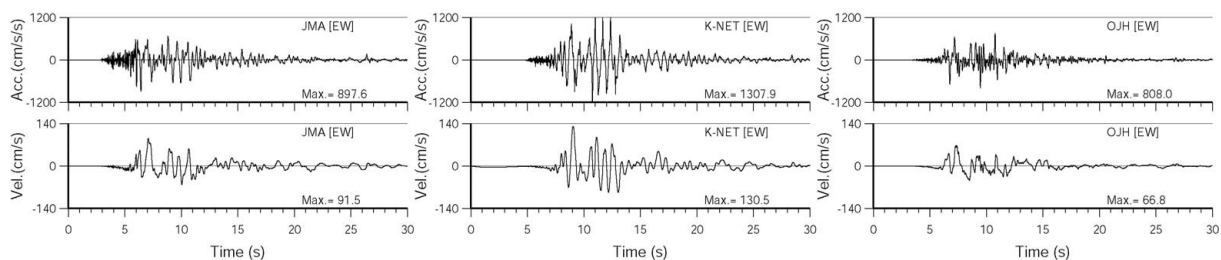
(a) 加速度の最大値

(b) 速度の最大値

図2 観測記録の最大値の比較

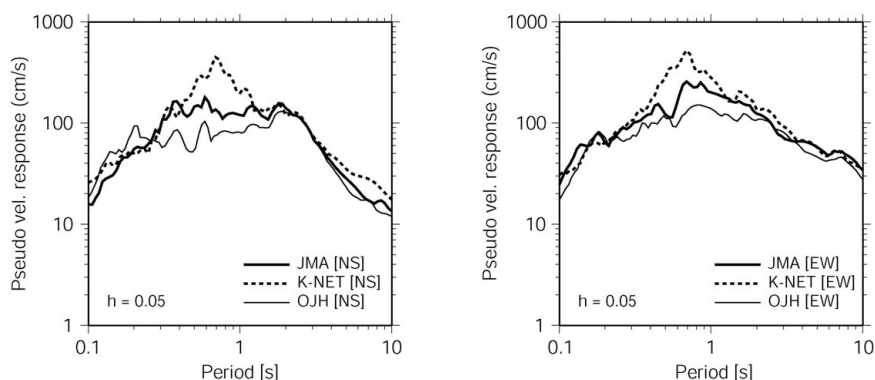


(a) NS成分 (左: JMA, 中: K-NET, 右: OJH)



(b) EW成分 (左: JMA, 中: K-NET, 右: OJH)

図3 本震(EQ. 01)記録の加速度波形, 速度波形



(a) NS成分

(b) EW成分

図4 本震(EQ. 01)記録の擬似速度応答スペクトル

3. 対象サイトにおける地盤調査

防災科研では、地震発生後から小千谷市内を中心に、アレー微動探査や面的な単点微動探査、数地点のボーリング調査とPS検層、地盤の非線形特性に関する室内試験などを実施した⁴⁾。以下には、地震応答解析の対象とするK-NETサイトとJMAサイトにおいて、地盤モデル作成の基になる各種調査の概要を示す。

K-NETサイトでは、新潟県中越地震以前に、深さ18mまでボーリング調査とPS検層が実施されている。これらに加え、より深い地盤構造と、表層のより詳細な物理的特性の把握のため、地表から深さ約100mまでのオールコアのボーリング調査とPS検層、および各種の土質試験を実施した。図5に深さ100mまでのS波速度構造を、表2に堆積層ごとに実施した調査・試験項目を示す。地表から深さ2.8mまでは盛土層、旧表土層、沖積層で構成されている。2.8m以深は、厚さ12m程度の玉石混じり砂礫層の段丘堆積層であり、その下からは未固結の泥岩や砂岩の互層からなる堆積岩で構成される。PS検層結果からは、表層のS波速度は50~60m/s程度と小さい。段丘堆積層以深は、深さ方向

に緩やかに S 波速度が増加する構造となっている。

K-NET サイトの沖積層は有機質土でありやや特殊な土質である。この層に対しては、非線形特性を把握するために動的変形試験が実施された。また、旧表土のシルト層でも動的変形試験が実施された。これらの基準化剛性とせん断ひずみの関係、および履歴減衰とせん断ひずみの関係 ($G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$ 関係) を図 6(a),(b)に示す。有機質土の非線形特性は、せん断ひずみレベルが大きくなっても剛性低下は大きくなく、同時に履歴減衰は大きくならないことが特徴である。この特性は、既往の研究でも指摘されている^{11),12)}。また、通常の砂や粘土に比べ、湿潤密度が小さく ($\rho_t=1.1t/m^3$)、含水比が非常に大きい ($w=470\%$)。

表 2 実施した主な地盤調査・試験

(a) K-NET			
深度[m]	堆積層	土質	実施した主な調査・試験
0~2.8	盛土	シルト	PS検層, 密度試験
	旧表土	シルト	PS検層, 密度試験, 動的変形試験
	沖積層	有機質土	PS検層, 密度試験, 動的変形試験
2.8~15.0	段丘堆積層	砂礫	PS検層, 密度試験
15.0~100	魚沼層	砂岩・泥岩	PS検層, 密度試験

(b) JMA			
深度[m]	堆積層	土質	実施した主な調査・試験
0~3.4	盛土	シルト	PS検層, 密度試験
	旧表土	シルト	PS検層, 密度試験
	沖積層	砂・シルト	PS検層, 密度試験, 動的変形試験, 非排水繰り返しせん断試験
3.4~14.8	段丘堆積層	砂礫	PS検層
14.8~30.0	魚沼層	砂岩・泥岩	PS検層

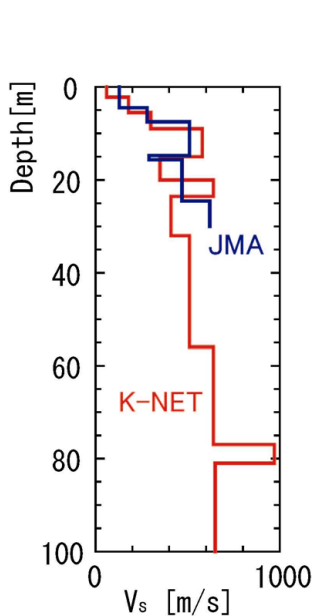


図 5 PS 検層による S 波速度構造

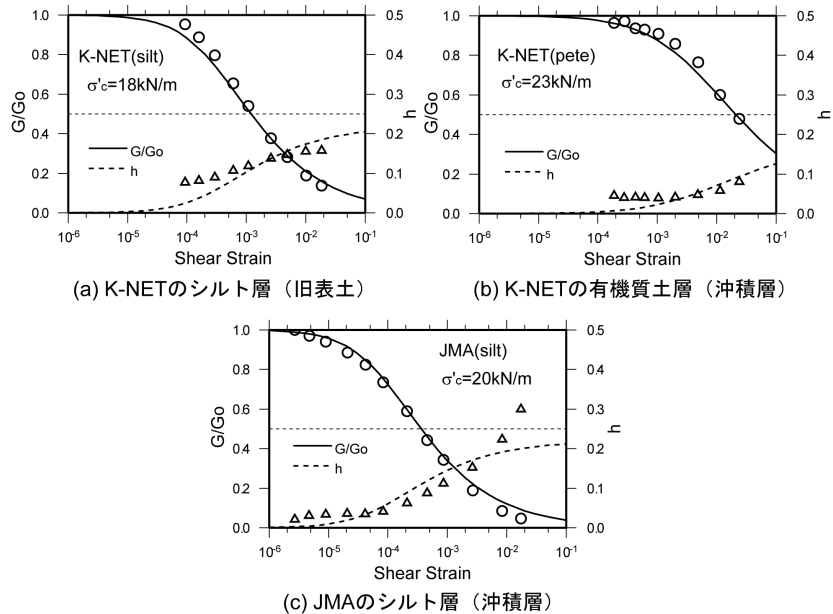


図 6 動的変形試験による $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$ 関係と R-0 モデルによる理論曲線

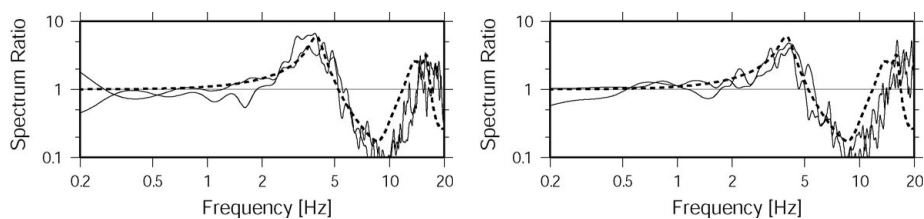
一方、JMA サイトでは、深さ 30m までのボーリング調査と PS 検層、動的変形試験等の土質試験を実施した。表層 3.4m は盛土層、旧表土層、沖積層であり、3.4m 以深は厚さ 11m 程度の玉石混じり砂礫層の段丘堆積層であり、その下からは未固結の泥岩や砂岩の互層からなる堆積岩で構成される。表層約 3m 以深の地層構成と S 波速度については、K-NET サイトと大きな差異はないと言える。表層部分を詳細に見れば、K-NET には見られない砂質土層があり、逆に有機質土層が見られない。また、S 波速度は 130m/s 程度で、K-NET より大きい。沖積層のシルト層では動的変形試験が実施された。この $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$ 関係を図 6(c) に示す。さらに、沖積層の砂質土層では、不攪乱試料に対する非排水繰返しせん断試験を実施した。この砂層は細粒分（シルト分 18%、粘土分 21%）が多く、液状化強度は $R_{20}=1.3$ と大きい値を示した。

K-NET と JMA の 2 地点については、図 1 に示すように、地質図上では同じ段丘堆積層の領域にあり、地形的にも大きな差は見られない。また、上述のように、表層から約 3m 以深の S 波速度構造と地質には大きな差は見られない。主な違いは、表層約 3m の土質と S 波速度である。これが、微動探査による H/V スペクトルの卓越周期の差異^{4),13)}や、地表地震動の差をもたらした可能性が高い。

4. 地盤モデルと入力地震動

4.1 地盤モデル

地震応答解析のための地盤のモデル化の基本方針として、K-NET および JMA の両サイトともに、上述の PS 検層結果や土質試験結果を用いて地盤モデルを作成する。表層約 3m の S 波速度については、PS 検層の精度等を考慮し、図 7 に示す小地震の記録を基にチューニングを行った。小地震は本震より前に発生した地震記録（表 1 の EQ.s1, EQ.s2）を用い、両サイトのスペクトル比と、地盤モデルの一次元理論増幅率の比を比較し、スペクトル比の山と谷の周期が整合するように、表層の S 波速度を微調整した。K-NET の深さ 100m のボーリング調査は、地震計位置から約 10m 離れた位置で実施された。また、前述のように、地震計位置では深さ 18m までのボーリング調査が過去に実施されている。これら 2 つの位置の表層約 3m には、地質層序にやや違いが見られた。このため、地表応答への影響を考慮して、K-NET の表層約 3m の土質は、100m のボーリング位置ではなく、既往のボーリング柱状図を基にモデル化した。



(a) 観測記録が EQ. s1 の場合

(b) 観測記録が EQ. s2 の場合

図 7 本震前の小地震記録のスペクトル比と理論増幅率のスペクトル比
(スペクトル比は K-NET と JMA の比 [K-NET/JMA] を示す。2 本の実線 [NS, EW] は観測記録の比を、破線は理論増幅率の比を示す。)

K-NET サイトのモデル化深さは GL-32m までとし、S 波速度 510m/s の層を入力基盤とした。これは、後述するように、入力地震波として用いる観測記録が得られた OJH サイトの S 波速度等を考慮したためである。JMA サイトでは、GL-30m までは PS 検層結果を用い、GL-30m から-32m は直上の S 波速度を延長した。K-NET サイトと同様に、モデル化深さは GL-32m までとし、入力基盤は S 波速度 510m/s とした。最終的にモデル化した S 波速度と密度を表 3 に示す。

地盤の非線形特性は、K-NET では第 2 層（シルト）と第 3 層（有機質土）で、JMA サイトでは第

4層（シルト）で動的変形試験が実施されたためその結果を用いた。それ以外は、文献 14,15)を参考に、土質ごとに標準的な $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$ 関係を与えた。表層約 3m の軟弱層だけでなく、段丘堆積層以深も含めた全層で地盤の非線形性を考慮した。深部地盤の非線形化の程度は大きくないと考えられるが、地表の最大速度が 20cm/s 以上の強震動では、S 波速度 450m/s 程度でも非線形性が生じているという強震観測記録の分析結果 16)を考慮したためである。

表 3 地盤モデルと地盤パラメータ

(a) K-NET					(b) JMA				
深度 [m]	堆積層	土質	Vs [m/s]	密度 [t/m ³]	深度 [m]	堆積層	土質	Vs [m/s]	密度 [t/m ³]
0.8	盛土	シルト	60	1.7	1.0	盛土	シルト	130	1.7
1.8	旧表土	シルト	60	1.7	1.6	旧表土	シルト	130	1.7
2.8	沖積層	有機質土	50	1.1	2.2	沖積層	砂	130	1.7
5.5			180	2.5	3.4		シルト	130	1.7
9.0	段丘堆積層	砂礫	300	2.5	4.5			200	2.0
15.0			580	2.5	7.5	段丘堆積層	砂礫	280	2.5
20.0		堆積岩	350	1.8	14.8			510	2.5
23.5	魚沼層	砂礫	640	2.0	15.7			290	1.9
32.0		堆積岩	410	1.9	24.5	魚沼層	堆積岩	470	1.9
		堆積岩	510	1.9	32.0			620	1.9
							堆積岩	510	1.9

[堆積岩は未固結の泥岩と砂岩の互層]

4.2 入力地震動

入力地震動は、OJH サイトの建物基礎上で得られた記録を基盤波とみなして使用した。図 3 には OJH での本震の観測記録を示した。同建物は免震建物（地下 1 階，地上 5 階，基礎平面約 35m 四方，根入れ約 4m の直接基礎）であり，本震と余震記録が公開されている 10)。同建物基礎は，魚沼層群と呼ばれる堆積岩上にあり，これは K-NET サイトと JMA サイトの段丘堆積層の下の堆積岩に相当する。同サイトの PS 検層では，基礎直下の堆積岩の S 波速度は 430m/s であり，工学的基盤と十分にみなせる。ただし，建物重量を支持していることを考えると，実際にはそれ以上の S 波速度に対応する剛性を有していると考えられる。このため，ここで得られた観測記録を，S 波速度 510m/s の層の入力地震波とすることに大きな問題はないものと考えられる。

ただし，建物の基礎上で得られた波形であるため，厳密には，入力損失と地盤～基礎～上部構造物系の動的相互作用の影響を考慮しておく必要がある。入力損失については，地盤の S 波速度が 430m/s と大きいことと基礎の根入れが約 4m と深くないことから，大きな影響はないと考えられる。参考に，既往の研究 17)による次式の入力損失の理論値 $\eta(f)$ は，表層の S 波速度を支持層の半分である 200m/s と仮定しても，振動数 1～10Hz で $\eta(f)=1.00 \sim 0.94$ と小さい。

$$\eta(f) = \left| \frac{V}{\pi \cdot B \cdot f} \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot B \cdot f}{V} \right) \right| \quad (1)$$

ここで， $\eta(f)$ ：地盤と基礎の振幅比，V：S 波速度，B：基礎根入れ深さ，f：振動数(Hz)

また，建物の免震層の固有周期 10)は弾性時で 1.0 秒，復元力特性をバイリニア型としたときの第二勾配に対応する周期は 4.5 秒である。地盤の応答解析で主として対象とする周期範囲は，対象サイトの表層固有周期である 0.1 秒程度から本震時に卓越する 0.7 秒付近であり，これらの周期よりかなり長周期である。このため，動的相互作用の影響も大きくないと考え，観測記録をそのまま入力地震動として用いた。

5. 地盤の非線形応答解析

5.1 応答解析手法とパラメータ

強震時に非線形化が考えられる表層地盤の地震応答解析手法としては、等価線形解析、逐次非線形解析、有効応力解析がある。一般に、これらの手法は、得られた地盤データの多寡・精度や、想定される地盤のひずみレベルによって選択される。K-NET サイトでは、表層の剛性は小さく、等価線形解析の適用範囲を超えるような大きなせん断ひずみの発生が予想される。また、表層は主として粘性土で構成されているため、地震時の急激な過剰間隙水圧の上昇はないものと考えられる。周辺の地盤状況からも、液状化の発生を示す根拠はない。このため、ひずみに依存した非線形性のみ考慮し、過剰間隙水圧の上昇は考えなくても表層応答を十分に説明できると思われる。

一方、JMA の表層には砂質土層が存在する。この砂層は細粒分（シルト分 18%、粘土分 21%）が多く、さらに、不攪乱試料に対する非排水繰返しせん断試験の結果、液状化強度は $R_{20}=1.3$ と大きい値を示す。このサイトでも液状化の発生を示す報告はない。これらより、両サイトともに、過剰間隙水圧の上昇は考えず、ひずみに依存した非線形性のみを考慮した逐次非線形解析¹⁸⁾を用いることとした。

ただし、K-NET サイトでは、本震後の余震記録の水平動と上下動のスペクトル比 (H/V スペクトル) の卓越周期が長周期側に移動し、しばらくその状態が続いたと報告された¹⁹⁾。ここでは、この卓越周期の移動分に対応する剛性低下が、過剰間隙水圧の上昇による拘束圧の低下によりもたらされたと仮定して、有効応力解析²⁰⁾も実施し、波形の位相や振幅の整合性を比較した。

なお、地盤の応答解析は、地盤モデルを水平成層構造とした次元解析とした。

土の応力-ひずみ関係には、R-O モデル²¹⁾を用いた。表 4 と表 5 には、各層に設定した R-O モデルのパラメータの値を示す。同表で、 $\gamma_{0.5i}$ は単位拘束圧(9.8kPa)における基準ひずみ $\gamma_{0.5}$ (等価剛性と初期剛性の比 $G/G_0=0.5$ に対応するせん断ひずみ)を、 h_{max} は最大減衰定数を表す。各層の $\gamma_{0.5}$ は有効拘束圧の 0.5 乗に比例させた。モデル化した地盤の全層 (深さ 32m) で非線形性を考慮し、表 5 に示すパラメータを表 4 に示す層以外に適用した。堆積岩については、未固結の砂岩と泥岩の互層であるため、砂と粘土の中間的な非線形特性を示すシルトのパラメータを与えた。図 6 には、室内試験結果にフィッティングした R-O モデルの理論曲線を示した。地下水位は、ボーリングデータを参考に、JMA は 1m、K-NET は 0.8m を仮定した。また、静止土圧係数 K_0 は、段丘堆積層以深は 0.8、それ以浅は 0.5 を仮定した。

表 4 動的変形試験を実施した層の R-O モデルパラメータ

サイト	層	土質	基準ひずみ $\gamma_{0.5i}$ ^{注)}	最大減衰定数 h_{max}
JMA	第 4 層	シルト	2.53×10^{-4}	0.22
K-NET	第 2 層	シルト	8.85×10^{-4}	0.22
	第 3 層	有機質土	1.37×10^{-2}	0.18

注) $\gamma_{0.5i}$ は単位拘束圧(9.8kPa)での基準ひずみ $\gamma_{0.5}$ を示す。

表 5 その他の層の R-O モデルパラメータ

土質	基準ひずみ $\gamma_{0.5i}$ ^{注)}	最大減衰定数 h_{max}
砂礫	1.26×10^{-4}	0.22
砂	1.58×10^{-4}	0.24
シルト	2.53×10^{-4}	0.22

注) $\gamma_{0.5i}$ は単位拘束圧(9.8kPa)での基準ひずみ $\gamma_{0.5}$ を示す。

5.2 逐次非線形解析

地盤の応答解析では、地表地震動が卓越した EW 方向の結果を示す。本震の解析による地表面の加速度波形、速度波形、擬似速度応答スペクトルを図 8 に示す。解析結果の波形は、振幅と位相ともに記録とよく対応しており、強非線形状態の地盤応答を精度よく再現していると言える。また、両サイトの振幅の差異が、記録と同様に解析でも再現できている。しかし、詳細に見ると、解析結果は時刻 10 秒前後の振幅がやや小さく、短周期成分がやや目立っている。これは、応答スペクトルの比較からわかるように、周期 0.7 秒付近のピークの振幅がやや小さく、逆に周期 0.4 秒付近は記録より大きくなっていることに対応している。

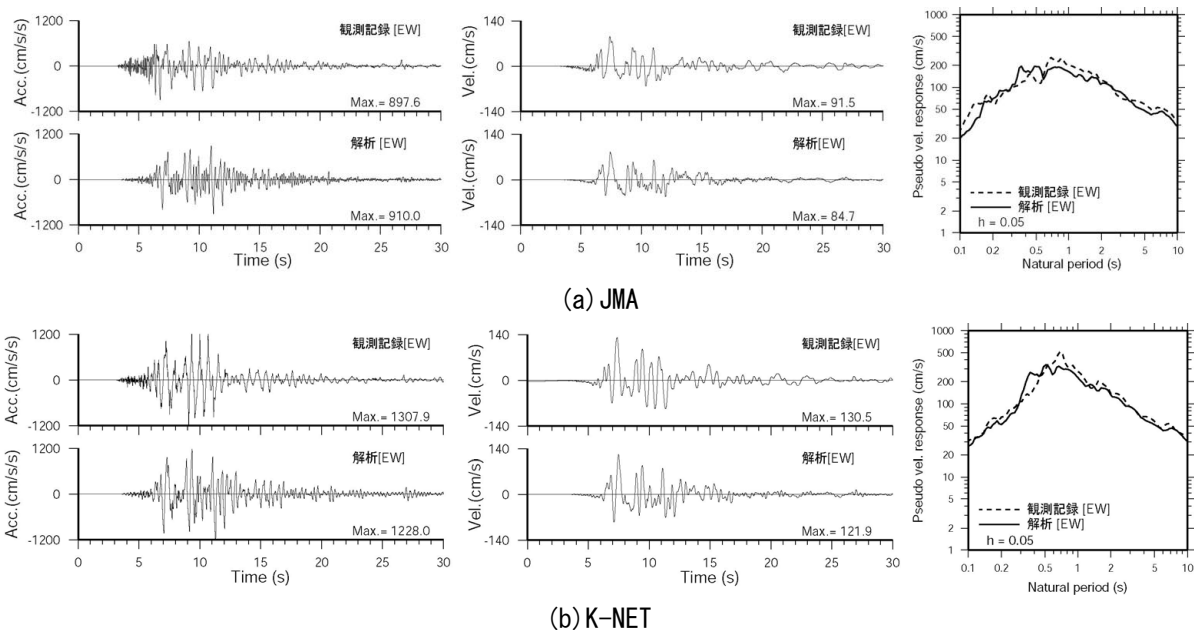


図 8 本震の逐次非線形解析による地表の加速度波形、速度波形、擬似速度応答スペクトル

図 9 には、最大加速度、最大速度、および最大せん断ひずみの深さ方向の分布を示す。最大加速度と最大速度は、地表から数 m 以深ではゆるやかな増幅であり、両サイトで大きな差は見られない。ところが、表層 3~4m 以浅でその差が大きくなり、K-NET の最大速度は 1.5 倍程度の増幅を示す。これより、両サイトの地表地震動の差異は、主として、表層約 3m の増幅率の差に起因することがわかる。

余震の解析例として、EQ.31 の結果を図 10 に示す。波形と応答スペクトルは観測記録とよく一致している。これらの結果より、設定した地盤モデルと入力地震動は妥当なものと考えられる。

本震と余震の解析による地表最大値を図 11、図 12 に示す。図 12 は K-NET と JMA の最大値の比を示している。余震記録でも、最大速度でみると K-NET の方が大きくなる傾向を示しており、解析でもこの傾向を再現できている。しかし、最大加速度については、K-NET では記録に比べやや大きい傾向がみられる。これは、本震後に表層の卓越周期が長周期側にシフトしたことと関係している可能性がある。つまり、余震時には、表層が本震前より剛性低下した状態であるため、初期剛性が小さくなっていると同時に、非線形化しやすくなっていると考えられる。このため、最大加速度に支配的な短周期成分が低下しやすくなり、解析ではこれを考慮していないことが原因の可能性はある。

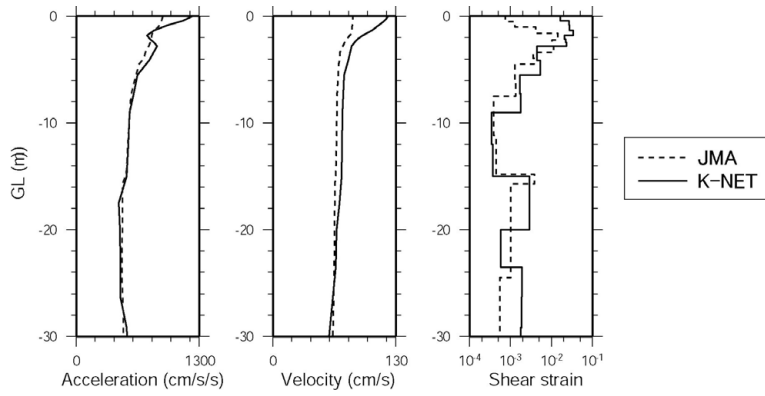
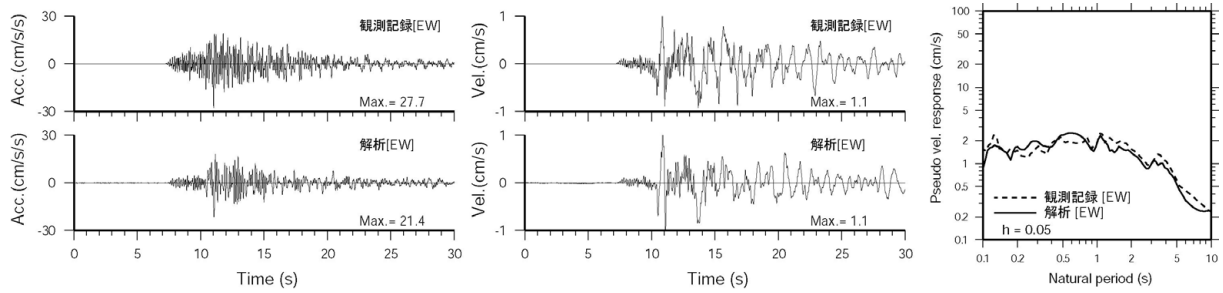
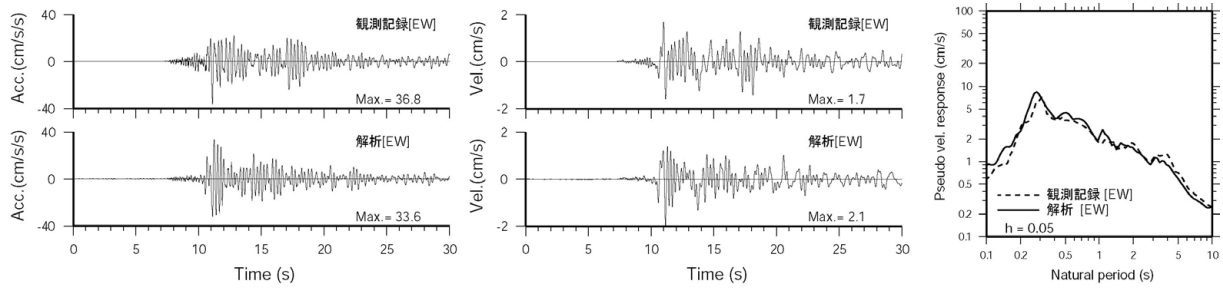


図9 本震の解析による最大応答値の深さ分布(EW成分)

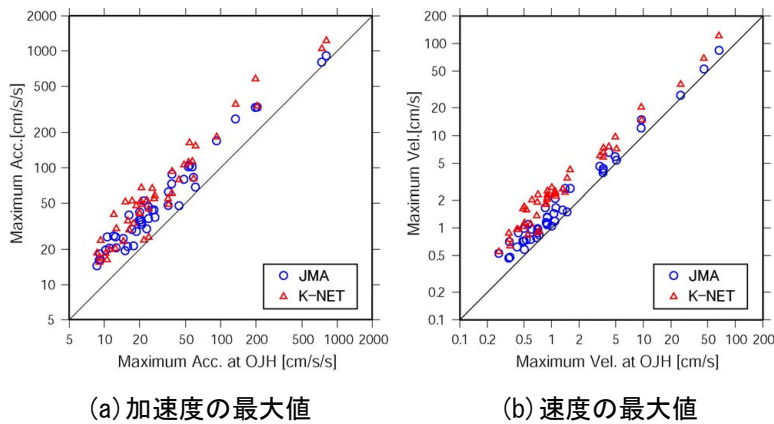


(a) JMA



(b) K-NET

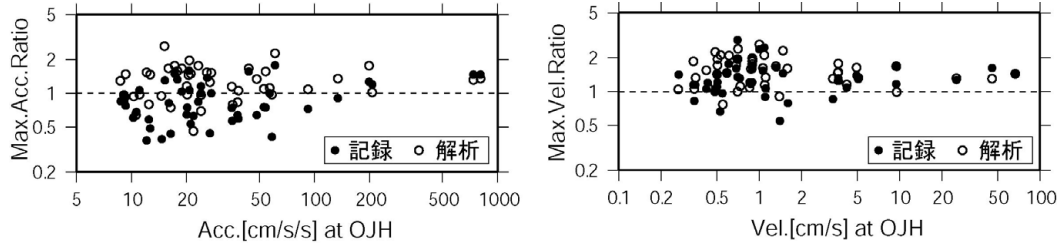
図10 余震(EQ. 31)の逐次非線形解析による地表の加速度波形, 速度波形, 擬似速度応答スペクトル



(a) 加速度の最大値

(b) 速度の最大値

図11 解析による地表最大値 (横軸はOJHの記録, 縦軸はJMA または K-NET の解析結果を示す。)



(a) 加速度の最大値の比 (b) 速度の最大値の比

図 12 記録と解析の地表最大値 (横軸は OJH の記録を、縦軸は K-NET と JMA の比 [K-NET/JMA] を示す。)

5.3 K-NET サイトの有効応力解析

上述のように、K-NET では、本震後に地盤の卓越周期が長周期側に移動し、それがしばらく維持されたことが報告されている。この原因としては、地盤の構造骨格が乱されたことや、過剰間隙水圧の上昇により剛性低下したものの、粘性土で透水性が悪いため、それが維持されたことなどが考えられる。また、移動した卓越周期が、その後はゆっくりと短周期側に戻りつつあるという報告²²⁾がある。これらを参考に、この卓越周期の移動分に対応する剛性低下が、過剰間隙水圧の上昇による拘束圧の低下によりもたらされたと仮定して、K-NET サイトの有効応力解析²⁰⁾を実施し、観測記録との波形の振幅や位相の整合性を検討した。

K-NET サイトでは、非排水繰り返しせん断試験が実施されていない。このため、卓越周期の移動分の剛性低下が、過剰間隙水圧による有効拘束圧の低下によるものと仮定して、過剰間隙水圧の上昇量を設定し、それをターゲットにパラメータを設定した。卓越周期は既往の調査²³⁾から、本震前 $T_b=0.23s$ から本震後 $T_a=0.3s$ になったとする。これによる本震後と本震前の剛性比 G_a/G_b は、 $1/4$ 波長則から、 $G_a/G_b=(0.23/0.3)^2$ である。せん断剛性が有効拘束圧の 0.5 乗に比例すると仮定すると、本震前後の拘束圧の比 σ'_a/σ'_b は、 $\sigma'_a/\sigma'_b=(0.23/0.3)^4=0.35$ である。つまり、本震後の過剰間隙水圧は初期拘束圧の 65% 程度発生したことになる。これより、表層の過剰間隙水圧比 (過剰間隙水圧と初期有効拘束圧の比) で $60\sim 70\%$ 程度まで上昇するように、過剰間隙水圧に関わるパラメータを設定した。解析に用いる土の構成式は、R-O モデルとダイレイタンスーモデル (おわんモデル^{15),20)} を組み合わせ、非排水条件を課すことで過剰間隙水圧を求めた。

有効応力解析による結果を図 13 に示す。波形の振幅、位相とも、逐次非線形解析によりやや改善されている。周期 0.4 秒付近の振幅は、記録と整合するようになってきている。前述の逐次非線形解析により観測記録は概ね再現できると言えるが、詳細にみれば、過剰間隙水圧の上昇を考慮した方がよりよく記録と対応する。ここでは、本震後の周期の移動を過剰間隙水圧の上昇により考慮したが、構造骨格の乱れによる影響もあると考えられる。有機質土の動的物性を含め、詳細な検討は今後の課題と思われる。

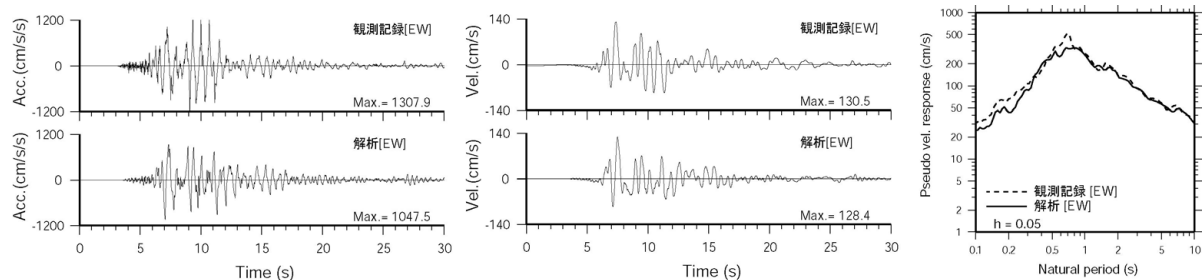


図 13 有効応力解析による K-NET サイトの地表の加速度波形、速度波形、擬似速度応答スペクトル

6. 低層 RC 造建物モデルの応答解析と被害状況の説明

前章の地盤非線形応答解析により、K-NET サイトでは、表層約 3m の軟弱層で地震動が大きく増幅したことを確認し、同時に、K-NET サイトと JMA サイトの地表地震動の再現性から、設定した地盤モデルと入力地震動の妥当性を確認した。この結果を受け、本章では、周辺建物の被害状況の説明を試みた。新潟県中越地震の本震では、観測された地表地震動が大きかったわりに、周辺の低層 RC 造建物等の非木造建物で構造的に大きな被害を受けたものは多くなかった²⁾ことが報告されている。本章ではまず、低層建物の支持層となりうる段丘堆積層上面の地震動を推定した。次に、低層 RC 造建物モデルを対象に非線形応答解析を実施し、実際の被害状況との整合を検討した。

6.1 段丘堆積層上面における地震動の推定

JMA サイトと K-NET サイトのボーリング調査からわかるように、これらの地点周辺では、地表から数メートルに玉石混じりの砂礫で構成される段丘堆積層が現れる。この層は、この周辺の低層建物の支持層となりうる。ここでは、本震における段丘堆積層上面の地震動の推定を行った。

K-NET サイトの表層 2.8m を取り除いた地盤モデルを用い、OJH の本震記録を入力として、逐次非線形解析を実施した。段丘堆積層上面の推定波形と擬似速度応答スペクトルを図 14 に示す。最大速度は 74cm/s であり、これは K-NET の地表観測波の 57%、JMA の 81%と小さくなっている。

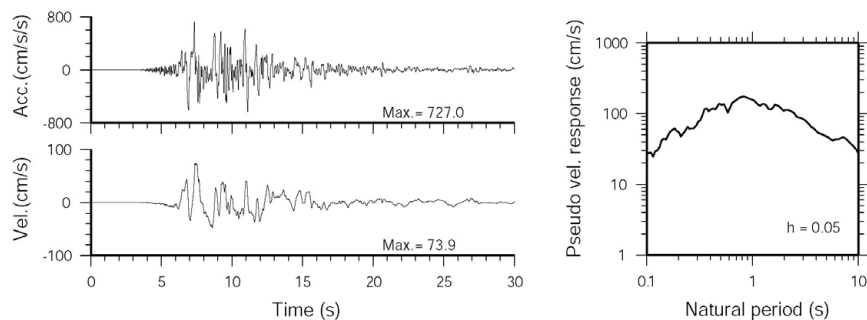


図 14 段丘堆積層上面の推定地震動 (EW 成分)

6.2 低層 RC 造建物モデルの非線形応答解析

強震記録が得られた K-NET サイトと JMA サイトの近傍には、それぞれ小千谷小学校校舎と小千谷消防署建物が建っている。これらは RC 造 3 階建て建物であり、その周辺の RC 造建物も 3 階程度の低層建物が多い。このため、RC 造建物モデルは 3 階建てとした。図 15 に示すように、建物の最大変形が 1 次モードで表されると仮定して、振動モデルを基礎固定等価 1 自由度系せん断型モデルとした。強震観測点周辺の建物の耐力や変形性能は不明である。このため、過去の地震被害調査から推定される建物耐力を参考に、複数の建物モデルを設定した。3 階建ての RC 造建物の場合、壁量から推定したせん断力係数の平均は 0.8 以上と推定されている²⁴⁾。これより、建物モデルのせん断力係数 C_y を $C_y=0.6, 1.0, 1.4$ の 3 ケースを設定した。復元力特性は骨格曲線をトリリニアモデルとし、履歴則を武田モデルで表した。入力波として、K-NET の地表観測記録 (EW 成分) と、上述の段丘堆積層上面の推定地震波 (EW 成分) を用いた。

建物モデルの応答解析結果を図 16 に示す。ここで、構造的被害の有無を判断するクライテリアを、最大層間変形角 1/100 と考えた。地表観測記録を入力した場合には、せん断力係数が $C_y=1.4$ と耐力が大きいモデルでも、最大層間変形角は 1/100 を大きく超えている、これは、実際に大きな被害がなかった状況と対応していない。一方、段丘堆積層上面の推定波を入力した場合には、平均以上の耐力と考えられるせん断力係数が $C_y=1.0$ 以上のモデルでは、最大層間変形角がほぼ 1/100 以下となる。これは、対象地点周辺において被害が小さかった状況と整合するものと考えられる。

以上より、JMA サイトや K-NET サイトの周辺で、低層の非木造建物の被害が少なかったのは、建物への入力動が K-NET サイトの地表地震動の 6 割程度であったためであると考えられる。このように、表層地盤で地震動が大きく増幅するような地点において、地震動の大きさと被害との関係を論じる場合には、地表面の地震動ではなく、表層増幅を考慮して、建物への入力地震動レベルを適切に評価することが重要と考えられる。

本検討では、低層建物モデルを想定し、地震動の大きさと建物の被害状況の整合を概略的に検討したが、今後は個別に実在の建物の詳細な調査を行い、被害の状況を説明できるかの検討が必要と考えられる。

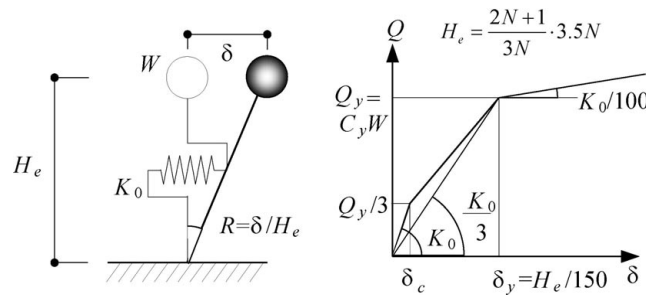


図 15 3 階建て RC 造建物モデル

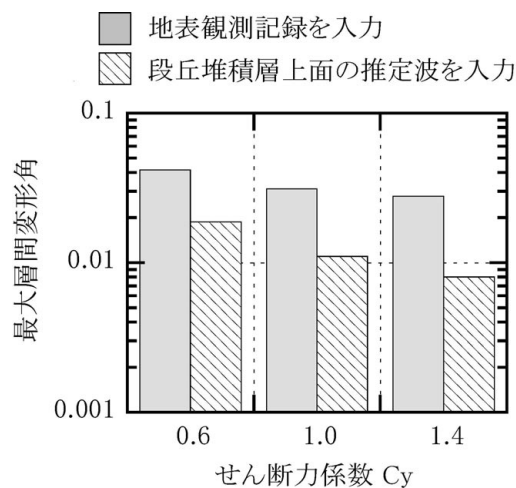


図 16 建物モデルの応答解析による最大層間変形角

7. まとめ

本研究では、2004 年新潟県中越地震において小千谷市内の 2 つの強震観測点で観測された地表地震動が大きく異なった原因と、地震動の大きさと低層建物の被害状況の整合について検討した。以下に、本検討で得られた結論を示す。

- (1) 小千谷市内の強震観測点、すなわち JMA サイトと K-NET サイトを対象に、現地での詳細な地盤調査結果と地震観測記録を基に、表層地盤の非線形応答解析に用いる地盤モデルを作成した。両サイトの地盤の主な違いは、表層約 3メートルの S 波速度と土質であり、S 波速度は JMA が 130m/s、K-NET が 50~60m/s と 2 倍以上の差があった。
- (2) 両サイトの地盤モデルの逐次非線形解析により、本震における両地点の地表地震動波形が概ね再現できた。また、両サイトの地震動の大きさの差も概ね再現できた。両サイトの地表地震動の差は、主として表層約 3m の増幅の差に起因することを示した。
- (3) ただし、K-NET サイトを対象として行った有効応力解析は、逐次非線形解析より波形とスペクト

ルの再現性がやや良かった。これより、K-NET サイトの表層地盤では、過剰間隙水圧が初期拘束圧の数十%まで上昇していた可能性がある。ただし、過剰間隙水圧の上昇に関する地盤パラメータの設定に関する根拠については、今後詳細な調査が必要と思われる。

(4) 小千谷市周辺の低層建物の支持層となりうる段丘堆積層上面の地震動レベルは、K-NET の地表地震動の 6 割程度と推定された。これを入力波として、3 階建て RC 造建物モデルの非線形応答解析を実施したところ、平均以上の耐力を持つ建物モデルの場合は、最大層間変形角が 1/100 以下となり、実際に大きな被害が見られなかった状況と整合することを示した。

謝辞

小千谷総合病院水仙の家の観測記録は(株)三菱地所設計殿より、JMA の観測記録は気象庁よりそれぞれ提供していただいたものであります。また、建物モデルの応答解析では、清水建設(株)技術研究所 神原浩 副主任研究員にご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 気象業務支援センター：95 型強震計波形データ(2004 年 1 月～12 月)。
- 2) 例えば、加藤大介，土井希祐，中村友紀子，本多良政：建築構造物（非木造）の被害，日本地震工学会他共催平成 16 年新潟県中越地震被害調査報告会梗概集，2004 年，pp.87-94.
- 3) 時松孝次，鈴木比呂子，関口徹，山高円：2004 年新潟県中越地震調査報告—地盤地震動災害—，東京工業大学都市地震工学センター地震工学研究レポート，No.92，2004 年，pp.33-41.
- 4) 先名重樹，森川信之，大井昌弘，安達繁樹，藤原広行：小千谷・川口地区における微動探査結果と浅部地盤構造モデルについて，地球惑星科学関連学会合同大会予稿集，2005 年，S101-P020.
- 5) 境有紀，小杉慎司，大月俊典，中村友紀子：強震動と建物被害，日本地震工学会他共催平成 16 年新潟県中越地震被害調査報告会梗概集，2004 年，pp.27-34.
- 6) 神原浩：5.3 節(b)地震応答解析による建物応答と被害との関係，平成 16 年新潟県中越地震被害調査報告書（速報），清水建設株式会社技術研究所，2004 年，pp.99-101.
- 7) 藤川智，先名重樹，藤原広行：2004 年新潟県中越地震における表層地盤の非線形応答解析，日本地震学会秋季大会予稿集，2005 年，B062，p.85.
- 8) 藤川智，先名重樹，藤原広行，大井昌弘：2004 年新潟県中越地震における小千谷市内の表層地盤応答の再現，日本地震工学会大会，2005 年，pp.424-425.
- 9) 柳沢幸夫，小林巖雄，竹内圭史，立石雅昭，茅原一也，加藤碩：5 万分の 1 地質図幅「小千谷」，地質調査所，1986 年.
- 10) 溜正俊，鴫田隆：免震建物の地震観測記録と振動解析結果，日本地震工学会他共催平成 16 年新潟県中越地震被害調査報告会梗概集，2004 年，pp.111-116.
- 11) Wehling, T. M., Boulanger, R. W., Harder, L. F., Jr., and Driller, M. W. : Confinement and disturbance effects on dynamic properties of fibrous organic soil, Proceedings, Lessons Learned from Recent Large Earthquakes, Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference, Istanbul, Turkey, 2001, pp.211-217.
- 12) 石原研而，國生剛治，堤千花，石田寛和：高有機質土の動的変形特性に関する研究，土木学会第 58 回年次学術講演会，2003 年，III-084，pp.167-168.
- 13) 山中浩明，元木健太郎，駒場信彦，太田原薫，福元俊一，田中均，高橋寿幸，山田悦子：2004 年新潟県中越地震の余震および微動の観測，東京工業大学都市地震工学センター地震工学研究レポート，No.92，2004 年，pp.11-15.
- 14) 今津雅紀，福武毅芳：砂礫材料の動的変形特性，第 21 回土質工学研究発表会，1986 年，pp.509-512.
- 15) 福武毅芳：土の多方向繰返しせん断特性を考慮した地盤・構造物系の三次元液状化解析に関する研究，名古屋工業大学博士論文，1997 年.

- 16) 藤川智：強震記録を用いた深部地盤の非線形性の定量的評価，第 60 回土木学会年次学術講演会，2005 年，I-244.
- 17) 山原浩：環境保全のための防振設計，彰国者，1976 年.
- 18) 大槻明，渡辺浩平，竹脇尚信：不整形地盤における二次元建屋地盤系液状化解析，土木学会論文集，第 368 号/I-5，1986 年，pp.363-372.
- 19) 青井真，森川信之，本多亮，関口春子，功刀卓，藤原広行：なぜ新潟県中越地震の地震動は大きかったか？，日本地震工学会他共催平成 16 年新潟県中越地震被害調査報告会梗概集，2004 年，pp.19-26.
- 20) K.Fukutake, A.Ohtsuki, M.Sato and Y.Shamoto：Analysis of saturated dense sand-structure system and comparison with results from shaking table test, Earthquake eng. struct. dyn. 19, 1990, pp.977-992.
- 21) 龍岡文夫，福島伸二：砂のランダム繰返入力に対する応力～ひずみ関係のモデル化について(1)，生産研究，第 30 巻 9 号，1978 年，pp.26-29.
- 22) 新井洋：中小地震記録から推定した K-NET および JMA 小千谷の表層 S 波速度の回復過程，日本建築学会大会学術講演梗概集，2005 年，21117, pp.233-234.
- 23) 翠川三郎，三浦弘之，秋場俊一：2004 年新潟県中越地震の地震動について，東京工業大学都市地震工学センター地震工学研究レポート，No.92，2004 年，pp.1-10.
- 24) 小野瀬順一：鉄筋コンクリート造建物の耐力分布と被害分布，第 6 回日本地震工学シンポジウム講演集，1982 年，pp.2081-2088.

(受理：2006 年 1 月 31 日)

(掲載決定：2006 年 6 月 6 日)

Earthquake Motion Amplification of Surface Soil Layers at the Strong Motion Stations in Ojiya during the 2004 Mid Niigata Earthquake

FUJIKAWA Satoshi¹⁾, SENNA Shigeki²⁾, FUJIWARA Hiroyuki³⁾ and OOI Masahiro⁴⁾

1) Member, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, M.Eng.

2) Member, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, M.Sci.

3) Member, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr.Sci.

4) Member, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, M.Sci.

ABSTRACT

During the 2004 Mid Niigata Earthquake, there was large difference between the earthquake motion amplitudes at the K-NET station and the JMA station in Ojiya, Niigata prefecture. The damage to low-rise buildings around the sites was relatively little for such large strong motions. To find the cause of the amplitude difference and the damage level, we conduct earthquake response analyses of surface soil layers considering soil nonlinearity and then earthquake response analyses of building models. These analyses show that the difference of strong motions at the two sites mainly depends on the surface soil amplification within approximately 3 meters below the surface. And by earthquake response analyses of building models, we confirm that the analytical results account

for the little damage to low-rise buildings in the earthquake.

Key Words: the 2004 Mid Niigata Earthquake, Strong Motion Record, Surface Soil Layers, Soil Amplification Characteristic, Soil Nonlinearity, Building Damage