

近年の強震観測記録に基づく表層地盤増幅の分析

清水建設 技術研究所 正会員 藤川 智

1. はじめに

地震ハザード評価や緊急地震速報を利用した即時予測では、距離減衰式と増幅度(サイト増幅に関する補正係数)を用いた簡便な予測手法が用いられる。最近では、地表地震動予測の高度化のため、地盤の非線形性を考慮した増幅度評価手法が提案されている^{1)~3)}。本検討では、2007 年能登半島地震で得られた強震観測記録などを基に、最大地動の増幅度と計測震度の増分に関して、入力依存性の有無の分析と、地盤非線形性を考慮した増幅度評価手法³⁾の検証を実施した。また、観測地点の一次元の非線形応答解析により、観測記録の再現性を検討した。

2. 観測点と観測記録

対象とする観測点は、防災科研の K-NET 輪島(ISK003, 以下 K-NET)と、気象庁の輪島市鳳至町(以下 JMA)の 2 地点である。これらは東西に 1km 程度しか離れていないが、表 1 に示す大小複数の地震で、地表地震動に大きな差が見られる。両地点の柱状図と S 波速度構造^{4,5)}を図 1 に示す。K-NET は硬質な地盤上にあり、表層の S 波速度から工学的基盤相当の硬質な地盤と見なせる。それに対し、JMA はシルト質の比較的軟弱な地盤上にある。このような表層地盤の差異が地震動増幅に影響したものと考えられている。

表 1 観測記録

No.	date,time	M	JMA輪島			K-NET輪島		
			Acc. [cm/s/s]	Vel. [cm/s]	震度	Acc. [cm/s/s]	Vel. [cm/s]	震度
1	20041023,1756	6.8	40.6	4.8	3.8	13.0	1.2	2.6
2	20041023,1803	6.3	22.2	2.4	3.4	7.7	0.7	2.3
3	20041023,1812	6.0	15.7	1.8	3.0	4.1	0.4	1.8
4	20041023,1834	6.5	31.8	3.5	3.4	11.3	1.0	2.5
5	20041023,1946	5.7	13.1	1.0	2.6	3.8	0.5	1.6
6	20041025,0605	5.8	13.1	1.0	2.6	3.6	0.3	1.5
7	20041027,1041	6.1	11.1	0.8	2.5	3.5	0.4	1.5
8	20041104,0858	5.2	10.5	0.8	2.5	3.7	0.4	1.5
9	20041108,1116	5.9	11.7	0.9	2.5	3.4	0.3	1.4
10	20051104,0102	4.8	6.0	0.5	2.1	2.6	0.2	1.0
11	20061226,0517	4.9	11.5	0.6	2.3	6.0	0.3	1.5
12	20070325,0942	6.9	463.0	98.0	6.1	524.1	41.0	5.5
13	20070325,1811	5.3	344.3	23.4	4.9	284.0	17.4	4.4
14	20070325,1813	3.9	19.8	0.6	2.3	9.4	0.2	1.0
15	20070327,0159	3.9	34.4	1.4	2.6	16.7	0.3	1.5
16	20070328,0808	4.9	200.8	13.0	4.7	120.2	5.6	4.0
17	20070328,1305	4.7	41.4	3.1	3.6	25.3	1.0	2.3
18	20070331,0809	4.4	37.1	1.5	2.6	16.8	0.4	1.4
19	20070402,2149	3.3	29.8	0.8	2.5	10.3	0.2	1.1
20	20070404,0818	3.9	49.7	1.6	2.9	7.6	0.2	1.2
21	20070406,1518	4.3	20.8	0.7	2.4	13.7	0.4	1.5
22	20070406,2142	4.7	7.4	0.7	2.2	2.7	0.2	1.1
23	20070502,2044	4.7	51.2	2.6	3.4	25.1	0.7	2.2
24	20070716,1013	6.8	100.3	12.5	4.7	38.4	4.8	3.7

注)No1:新潟県中越地震, No12:能登半島地震, No24:新潟県中越沖地震

3. 最大地動と震度の振幅依存性

軟弱な JMA の最大地動の増幅度と震度増分を、硬質な K-NET を基準に評価する。つまり、最大加速度と最大速度の増幅度を、JMA の地表地震動と K-NET の地表地震

動の比で定義する。また、震度増分は 2 地点の震度の差分として定義する。表 1 に示す地震記録をもとに、増幅度と震度増分の入力地震動(K-NET の最大地動)との関係を図 2 に示す。増幅度、震度増分のばらつきは大きい、入力地震動レベルが大きくなるに従い、それらが低減する傾向が見られる。加速度増幅度と震度増分は顕著であるが、速度増幅度にも振幅依存性が見られる。震度増分の振幅依存性は文献⁶⁾でも報告されている。2 地点の観測波形のフーリエスペクトル比を図 3 に示す。K-NET の計測震度の大きさで分類した。計測震度が大きくなるほど、短周期成分が低減し、卓越周期が長周期化する傾向が見える。これより、最大地動と震度の振幅依存性の要因は、主として表層地盤の非線形化の影響と考えられる。

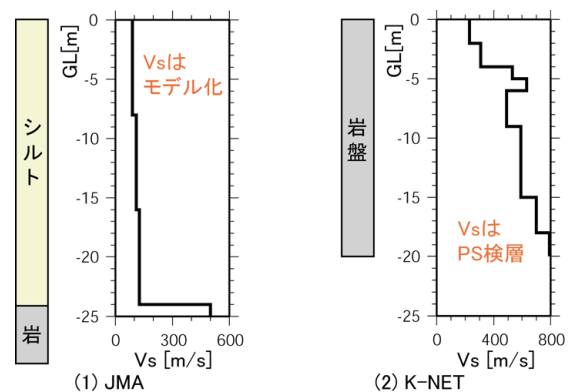


図 1 観測点の地盤

4. 増幅度評価手法の検証

既報(文献³⁾)では、地盤非線形性に起因する振幅依存性を考慮した最大加速度と最大速度の増幅度の簡易評価手法について示した。ここでは、前述の観測記録を基に、開発した増幅度評価手法の検証を行った。簡易評価手法の概要を以下に示す。

- 増幅度評価に必要な情報は、表層 20m の平均 S 波速度(AVS20)と基盤地震動(最大加速度、最大速度)である。
- AVS20<245m/s の地盤では増幅度の振幅依存性を考慮し、AVS20 $\geq$ 245m/s では一定の増幅度とする。
- 基盤地震動があるレベル以下の低振幅領域では、AVS20 より決まる一定の増幅度とする。それ以上の高振幅領域では、AVS20 に依存した勾配で増幅度を低減させる。

増幅度評価に際して、K-NET は PS 検層より AVS20

キーワード： 増幅度、非線形、強震記録、応答解析、振幅依存

連絡先： 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 TEL03-3820-6549

=479m/s, JMA は記録の卓越周期や、後述の解析モデルから、 $AVS20=103\text{m/s}$ と設定した。図2には、JMAの加速度と速度について、簡易評価による増幅度を破線で示した。観測記録と概ねよい対応を示しており、評価手法の妥当性が検証された。

5. JMA 地盤モデルの非線形解析

次に、JMA の表層地盤モデルを作成し、K-NET の記録を入力として、非線形応答解析を実施した。これにより、最大地動の増幅度や震度増分の入力依存性の再現性を検討した。地盤モデルは、柱状図や観測記録の卓越周期、さらに既往の研究による微動観測などを参考に設定した。地盤モデルの深さは24mとし、底面の入力基盤のS波速度は $V_s=500\text{m/s}$ と設定した。表層地盤は文献4)にはシルトと示されているが、文献7)には、周辺の沖積層には腐植物が混じることが示されている。このため、非線形特性(剛性と履歴減衰のひずみ依存性)には、シルトより非線形性が弱い粘土の平均的な値⁸⁾を用いた。解析では、水平2成分をそれぞれ独立に入力する一方向入力とした。震度は、水平2成分を用いた計測震度とした。

解析による増幅度と震度増分を図2に重ねて描いた。入力振幅の増大に従い、増幅度が低減する傾向が見られる。観測記録と定性的には対応しており、記録に見られる振幅依存性は表層地盤の応答だけで概ね説明可能と考えられる。ただし、解析による増幅度と震度増分は、観測記録よりやや過小評価の傾向がある。解析のうち、能登半島地震本震の結果を図4に示す。NS成分の再現性は概ねよいが、EW成分は周期1秒以上で過小評価となっている。これらは、地盤モデルと入力地震動の精度や、二・三次元的な増幅効果などが影響している可能性がある。今後高精度な波形の再現のためには、詳細な地盤調査結果を取り込む必要がある。

6 まとめ

強震観測記録の分析と地盤モデルの非線形解析から、最大加速度と最大速度の増幅度は、表層地盤の非線形化に起因して振幅依存性を示すことを確認した。さらに、震度についても、同様の振幅依存性を示すことを確認した。また、地盤非線形性を考慮した簡易評価手法による最大地動の増幅度は、観測記録と良く対応し、妥当な評価結果であることを示した。

謝辞： 気象庁による観測記録⁹⁾と、(独)防災科学技術研究所 K-NET の観測記録⁵⁾を使わせていただきました。

参考文献： 1) Sugito et al.: 7th Japanese earthquake eng. symposium, No.96, 571-576, 1986. 2) 藤本, 翠川: 日本地震工学学会論文集, 第6巻, 第1号, 11-22, 2006. 3) 藤川: 第62回土木学会年次学術講演会, I-518, 1032-1033, 2007. 4) 気象庁地震課: 強震時報, 第37巻, 113-115, 1972. 5) 防災科学技術研究所 K-NET ホームページ 6) 西川, 宮島: 第62回土木学会年次学術講演会, I-513, 1021-1022, 2007. 7) 紺野: 石川県地質誌・補遺, 2001. 8) 今津, 福武: 第21回土質工学研究発表会, 509-512, 1986. 9) 気象業務支援センター: 95 型強震計波形データ.

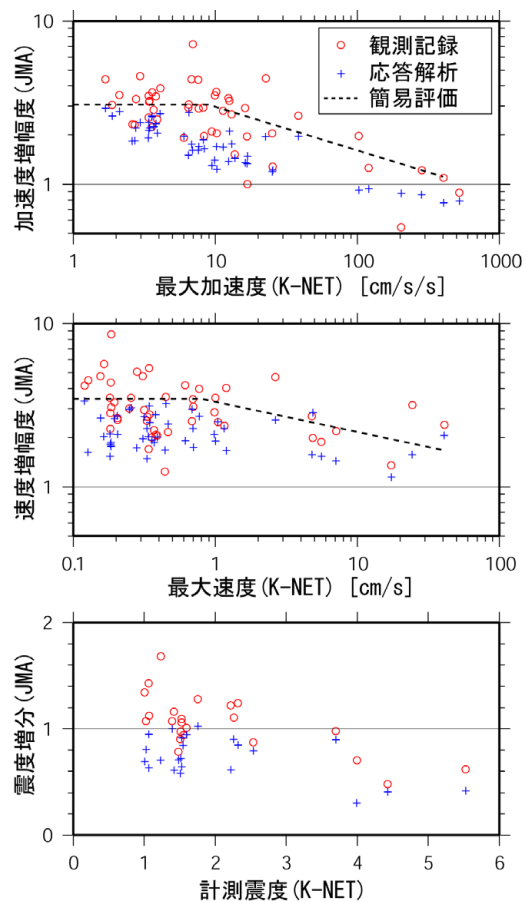


図2 最大地動の増幅度と震度増分

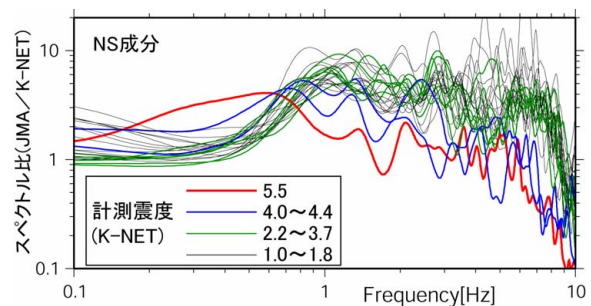


図3 JMAとK-NETのフーリエスペクトル比

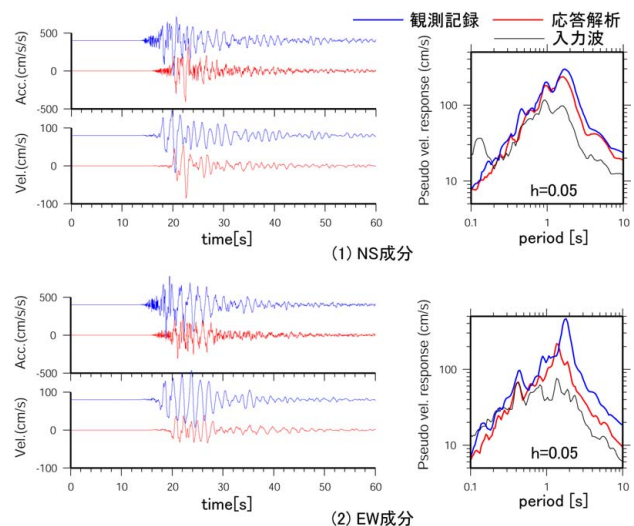


図4 JMAの非線形応答解析の結果の一例