2007年能登半島地震における穴水町の建物被害の集中と 表層地盤構造の関係

THE EFFECTS OF SUBSURFACE STRUCTURE ON THE CONCENTRATION OF STRUCTURAL DAMAGE IN TOWN OF ANAMIZU DURING THE 2007 NOTO-HANTO EARTHQUAKE

清水 亮*, 前田寿朗**
Ryo SHIMIZU and Toshiro MAEDA

During the 2007 Noto-hanto Earthquake, the town of Anamizu experienced severe damage, though the town is located about 20 km away from the epicenter. More than 70 of wooden houses were completely collapsed in the area of 500m square and the damage was remarkably concentrated in the zone of 100 m square. We measured micro-tremor at more than fifty locations and found that the area with collapsed houses has predominant frequency between 1.1 Hz and 3.0 Hz and the concentrated damage zone has about 2.0 Hz. Two layered irregular subsurface model was constructed by simulating H/V spectrum peak frequencies with frequency dependence of the particle motion of Rayleigh wave fundamental mode. The concentrated damage zone seems to lay on thick soft layer of 12 m to 15 m surrounded by shallower bedrock with thinner surface layers; the zone seems to locate at the mouth of a bay of about 200 m wide. The two dimensional FEM model with Ricker wave incidence reveals the constructive interference of reverberation and the Rayleigh waves. The ground motion during the main shock was evaluated by the 2-D FEM equivalent linear analysis with simulated incident waves and soil non-linearity of surface layers, which reveals about 10 % increase of response spectrum around 1 Hz.

Keywords : Noto-hanto Earthquake, Micro-tremor, H/V spectrum, Topography, Subsurface structure

能登半島地震, 常時微動, H/V スペクトル, 不整形地盤, 表層地盤

1. はじめに

2007年3月25日に発生した能登半島地震において, 震源から約20km離れた穴水町の防災科学技術研究所 K-NET 観測点では最大加速度 782Gal が観測された。穴水町市街地中心部では多数の木造建物が被害を受け, 約 500m 四方の範囲で 70 棟以上の建物が全壊した。これらの建物被害の原因の一つとして軟弱な表層地盤の影響が考えられるが, 全壊建物の分布は系統的に偏っており, 100m 四方程度の集中域が認められている。本論文は, 高密度の微動測定による表層地盤構造の詳細なモデル化に基づいて, このような極端な被害集中の要因を明らかにしようとするものである。

1995年兵庫県南部地震における神戸では, 震災の帯と呼ばれる帯状の建物被害集中域が認められた。その集中域は, 断層上のアスペリティサイズで規定された 1Hz 程度の卓越した入射波が, 六甲山地沿いの断層の堆積地盤側において, 盆地のエッジ効果と呼ばれる直達波と表面波の増幅の干渉を引き起こしたため発生したと説明されている¹⁾。また, 局地的な地震被害を微動特性に基づいて評価しようとした研究も散見される²⁾。本論文では, 能登半島地震における穴水町市街地において, 局地的な地盤構造に起因した地震波動の増幅の干渉が極端な被害集中を引き起こしたものと推定し, 不整形な

表層地盤構造が建物被害の集中に及ぼす影響について検討を行った。

中小の建物がほとんどを占める穴水町において, 多数のボーリング調査結果に基づいて, 不整形性を含む詳細な表層地盤構造モデルを作成することはほぼ不可能である。近年の微動測定結果の応用においては H/V スペクトルが標準的に用いられ, 表層地盤の振動特性を安定的に求められることが示されている。著者らは 2007 年 8 月および 2008 年 9 月に穴水町において微動測定を行い, 穴水町の被害集中域における H/V スペクトルのピーク振動数が 2Hz 程度であることを示した^{3), 4)}。さらに広範な微動測定に基づく検討においても同様な結果が得られており⁵⁾, また表面波探査を併用して K-NET 観測点付近の基盤構造の不整形性と地震動強さの関係も論じられている⁶⁾。ここでは, K-NET 観測点および石川県土木事務所による河川橋梁に関するボーリング調査結果を参考に, 被害地域における高密度の微動測定結果に基づいて工学的基盤深さの平面的分布を推定し, 被害集中域の 2 次元断面構造を評価した。

穴水町市街地から東に 7km ほど離れた山中に防災科学技術研究所の KiK-net 観測点があり, 本震の主要動の一部ならびに余震の地震動が, 地表および GL-105m の岩盤内で記録されている。また, 穴水町の東側山際の工学的基盤相当の硬質地盤上にある町役場付近

* 元・早稲田大学 大学院生・修士(工学)

** 早稲田大学理工学術院建築学科 教授・博士(工学)

Former Graduate Student, Department of Architecture, Waseda University, M. Eng.
Prof., Department of Architecture, Waseda University, Dr. Eng.

において、臨時余震観測により得られた記録が公開されている。本震時には、K-NET 観測点の表層地盤に顕著なひずみ依存の非線形性が表れたと考えられており⁹⁾、本震および余震記録等に基づいて表層地盤の動的変形特性が検討されている¹⁰⁾。ここでは、距離減衰ならびに岩盤から硬質地盤までの増幅効果を考慮して、市街地直下の工学的基盤への入射波レベルを推定し、等価線形解析を用いて K-NET 観測記録のシミュレーションを行った。そこで設定された表層地盤の動的変形特性を不整形地盤モデルの等価線形解析に適用し、工学的基盤に入力することにより、不整形地盤における波動の増幅的干渉効果が被害集中域付近に集中的に表れることを示した。

2. 穴水町の建物被害と微動卓越振動数の分布

2.1 全壊率と H/V スペクトルピーク振動数の関係

能登半島地震において、石川県七尾市、輪島市および穴水町では震度 6 強が観測された。K-NET 穴水観測点 (ISK005) は震源の東側の震央距離約 20 km の穴水町市街地にあり、782Gal の最大加速度 (EW 成分) が記録された。図 1 は K-NET 穴水での本震のフーリエスペクトルである。EW 成分が NS 成分に卓越し、EW 成分のスペクトルは 0.7Hz および 1Hz 付近にピークを有する。これらの

1Hz 前後の振動数成分を多く含む地震動が、木造低層建物に大きな被害を与えた主要因であろうと考えられる¹¹⁾。穴水町役場による建物被害調査結果において、全壊と判定された建物を図 2 に●で示す。

図 1 K-NET 穴水の本震記録フーリエスペクトル

図 2 穴水町における全壊建物 (●) および微動 H/V スペクトルのピーク振動数分布

全壊建物は穴水駅の北東側の点線で示した 500m 四方程度の範囲に限られており、特に穴水駅と K-NET 観測点の間で著しい。

年代ごとの航空写真の比較によると、全壊建物の存在する地域のほとんどは昭和 22 年時点で開発済みの地域であり、建築年代に大きな差異があるとは想像しがたい。しかしながら、図 2 右上に示す、穴水町役場建物被害調査結果より求めた 100m グリッドごとの全壊建物総敷地面積比からは、左および下から 2 列目のグリッド（以下においては被害集中域と呼ぶ）の全壊建物面積比が他に比べて圧倒的に大きい。これらの地域の建物の代表的な工法は木造在来工法であり、また被害集中域の全壊建物の多くは東西道路に面してあり、EW 成分が相対的に弱い間口方向に対応したとも考えられるが⁹⁾、他の地域では必ずしもそのような傾向は見られない。したがって、これらの違いを生じた要因として、EW 成分のさらなる卓越を助長したローカルな表層地盤構造の影響も考えられる。

穴水町市街地の表層地盤構造を把握するため、単点微動測定を 2007 年 8 月および 2008 年 9 月に実施した。ポータブル地震計（ミットヨ製 GPL、サンプリング周波数 100Hz）、ならびにサーボ型加速度計（RION 製 LS-10C、サンプリング周波数：256Hz）とデータレコーダー（RION 製 DA-20）による微動測定システムを使用し、各点で水平 2 成分および上下成分の加速度を 15 分間測定した。微動記録のうちノイズが少なく定常的と思われる 20 秒間のサンプルを 6～40 個抽出し、各々にテーパリングを施した後、水平 2 成分のスペクトルの平方和の平方根の上下成分に対するスペクトルの比を計算し、全サンプルを平均して H/V スペクトルとした¹⁰⁾。これらより、0.7Hz から 15Hz の範囲でピークを読み取り、H/V スペクトルのピーク振動数を求めた。

図 2 に各測定点のピーク振動数およびコンターを示す。3Hz 以上にピークを示す地域、ピークの認められない地域、ならびに 1Hz 以下にピークを示す地域には、ほとんど全壊建物が認められない。500m 四方程度の中の全壊建物の存在する地域において、H/V スペクトルピーク振動数はほぼ 1.1Hz～3Hz にある。また、被害集中域のピーク振動数は 2Hz 程度であり、同地域は南西側の山地からのピーク振動数の高い 2 つの舌状の張り出しによって、北西側および東側をしきられた湾状をなしている。なお、表面波探査によって東側の段差構造がとらえられており、その段差構造の東側ではほぼ地表より S 波速度 500m/s 以上であるとされている⁶⁾。

2.2 H/V スペクトルに基づく工学的基盤深さの推定

H/V スペクトルがレイリー波基本モードの粒子軌跡に対応すると仮定して、表層 1 層および基盤層からなる 2 層地盤モデルの基盤深さを各測定点で評価した。K-NET 穴水での PS 検層結果において、S 波速度が 290m/s を示す GL-16m までの 3 層を 1 層に縮約し、その S 波速度（地表から順に層厚 2m, 7m, 7m に対して 120m/s, 60m/s, 130m/s）を層厚の重み付き平均により 100m/s とした。ちなみに、K-NET の表層部分の S 波走時を保存すると 85m/s となるが、以下の検討では基盤層 500m/s に対して同様に大きな波動インピーダンス比を与えることから、表層 S 波速度として 100m/s を使用した。また、林ら⁶⁾の表面波探査において、図 2 の被害集中域東側地表付近に見られた固い地層を参考にして、基盤層の S 波速度を 500m/s とした。P 波速度および密度は、K-NET 観測点の PS 検層

結果を参考とし、表 1 の物性を設定した。

2 層地盤のレイリー波基本モード粒子軌跡の水平上下振幅比のピーク振動数と表層厚の関係を回帰すると、S 波速度 100m/s に対する 1/4 波長則相当の関係である（ピーク振動数=24/表層厚）が得られた。この結果に基づいて H/V スペクトルピーク振動数から基盤深さを推定すると、図 2 中の市街地東の真名井川左岸の 0.8～1Hz で 20m 以上、同北側の 1.1～1.5Hz で 16m 程度が推定される。また、図 2 の被害集中域の 1.6～2.5Hz で 12m 前後に対して、その北西側の 3～5.9Hz で 4～8m、その東側の 6Hz 以上で 4m 未満の基盤深さが推定され、被害集中域の北西側で 6m 程度、東側で 8m 以上の段差が存在し、軟弱な表層が堆積しているものと推定される。

表 1 表層および基盤層の物性値

	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 (g/cm ³)
表層	100	710	1.4
基盤層	500	890	1.8

3. 高密度微動測定による不整形構造の推定

3.1 高密度測定による H/V スペクトル

図 2 のピーク振動数分布より、被害集中域は湾状の 3 次元不整形構造の湾口部分にあたり、局所的には東西を基盤にさえぎられた構造を有する。その東側の段差構造の詳細を検討するために、図 2 の被害集中域東側のハッチ部分において図 3 に示す 5m～10m 間隔での高密度の微動測定を実施した。また、本震観測記録が EW 成分で卓越し、被害集中域が局所的には東西の段差構造で区切られているため、以下では EW 断面における P-SV 波動場の検討を行うこととし、上下成分に対する東西方向水平成分の振幅比（EW/V スペクトル）を評価した。

図 4 に示す EW/V スペクトルより、HB1 では単峰で 2.0Hz にピークを示し、HB2 で高振動数側に移動し、HB3 およびその東側では 2 つのピークが観察され、それらの振動数は東側程高く、また高振動数側のピークが卓越する傾向にある。それらの傾向は、図 5 のピーク振動数(obs)の水平方向分布にも示されている。以下においては、ピークの個数および振動数の変化を手掛かりとして、段差構造のモデル化を行うこととする。

図 3 被害集中域東端での高密度常時微動測定点

(a) 微動測定結果

(b) FEM 解析によるモデル D の結果

図 4 微動および解析による EW/V スペクトル

図 5 EW/V スペクトルのピーク振動数の水平方向分布

3.2 2次元 FEM による段差構造の微動シミュレーション

微動は、主として観測点周辺の地表における水平および上下方向加振により生じると考えられ、若松ら¹¹⁾は 2 次元 FEM を用いた H/V スペクトルのシミュレーションにより、基本的な振動数特性が P-SV 問題により表現されることを示している。ここでは、同様な方法を P-SV 問題のみに適用し、段差構造のモデル化を行った。具体的には、図 6 に示すように地表に複数の上下および水平加振点を一様間隔で設け、(1)式により観測点での平均上下応答に対する平均水平応答の比を求めて、EW/V スペクトルを表現した。

$$EW/V = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 H_{ij}^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 V_{ij}^2} \quad (1)$$

Hij: horizontal component, Vij: vertical component
i: source point, j=1: vertical, 2: horizontal

図 6 2 次元 FEM による EW/V スペクトルの評価方法

解析は振動数領域で定常問題として行い、水平方向 250m、鉛直方向 139m の地盤モデルの領域をとり、側方にエネルギー伝達境界を、底面に粘性境界を設け、解析上限振動数 10Hz に対して解析振動数間隔を 0.1Hz とした。節点配置は格子状とし、要素寸法は地表付近で 1m×1m、深部では要素厚を 5m とした。加振点は 7 点とし、第 1 層および基盤層ともに履歴減衰定数を 2% とした。

H/V スペクトルのピーク振動数に基づいて、東側段差下部の基盤深さを 14m に、段差上部を 3m とした。なお、図 3 右上に□で示した石川県によるボーリング調査結果においては地表より 3m～4m で、図 3 左上の真名井川沿いの地点では地表より 8m 程度で N 値が 50 を超える層が急に表れている。基盤の段差 11m に対して、表 2 に示すように傾斜角を 90 度(鉛直)から 27 度まで設定し、ピーク振動数の分布に関する測定結果との比較により段差構造を設定した。

表 2 段差部分の解析モデル

モデル名	傾斜角 (度)	水平投影長さ (m)
A	90	0
B	63	6
C	45	11
D	37	15
E	27	22

微動 H/V スペクトルによるピーク振動数の分布より、段差構造は HB3~HB7 の間に存在すると考えられるので、いずれのモデルについても HB5 を段差中心に設定した。図 5 のピーク振動数の水平方向分布より、モデル D が測定結果に最もよく対応したため、以後の検討に使用することとした。図 4 に示すスペクトル形状の模擬について十分でない点はあるが、その基本的な特性は H/V スペクトルのピーク振動数変化の模擬で担保された 2 次元モデルで表わされている。また、被害集中域は湾状の盆地構造湾口部に位置するため、焦点効果に代表される 3 次元的不整形性の影響も考えられる¹²⁾。

4. 基盤に段差を有する地盤における強震動レベルの評価

4.1 工学的基盤入射波レベルの推定

防災科学技術研究所 KiK-net 穴水観測点は、穴水町市街地から東に約 6km 離れており、地表および GL-105 m の岩盤中 ($V_s=2,060\text{m/s}$) で地震観測がおこなわれている。同観測点では、能登半島地震本震記録の初動から約 9 秒間が、図 7 に示すように得られている。KiK-net 観測点の地表以下 105m 部分の増幅効果は、図 8 に見られるように 2Hz 以上に現れ、被害に関連の深い 1Hz 程度に対して上部地盤構造はほとんど影響を及ぼさないと考えられる。また、K-NET 観測点より 1km 程度東に離れた山際の穴水町役場では比較的固い地盤が露出しているとされ、KiK-net 観測点 GL-105 m に対する臨時観測記録の 6 個の余震記録のスペクトル比は、図 9 に示すように 10Hz 以下の振動数範囲において 10 倍程度以下の増幅を示し、本論文で対象とする 1Hz 程度では 3~4 倍である。

以上より、ここでは KiK-net の岩盤内の記録を地震基盤解放波相当と考え、本震時に工学的基盤以深が線形弾性であったと仮定して、KiK-net の GL-105m の記録を 3 倍にスケールリングして穴水市街地の工学的基盤解放波相当を設定した。1Hz 付近に限定した不整形地盤による波動の増幅的干渉の影響を調べる上で、限られた数の余震記録のばらついたスペクトル比に基づくよりも、1Hz 付近の倍率でスケールリングした観測波の使用が妥当であると考えた。

なお、司・翠川¹³⁾による最大加速度の距離減衰式を用いると、市街地での震源距離 19km と KiK-net 観測点の 25km を用いて、地震基盤解放波の距離減衰の補正は 1.3 倍となり、市街地での地震基盤から工学基盤までの増幅を 2.3 倍程度とみなしたことに相当する。また、図 10 に示す穴水町役場に対する K-NET 観測点の余震のスペクトル比においては、微動 H/V スペクトルと同様に 1.2Hz 付近に顕著な増幅が示されており、役場臨時観測記録を工学的基盤解放波相当と想定した根拠を与えている。

図 7 KiK-net 穴水観測点 (GL-105m) の本震記録 EW 成分

図 8 KiK-net 穴水本震 EW 成分のスペクトル比 (GL/GL-105m)

図 9 KiK-net 穴水 (GL-105m) に対する穴水町役場余震記録 EW 成分のスペクトル比

図 10 穴水町役場に対する K-NET 穴水余震記録 EW 成分のスペクトル比

4.2 表層地盤動の変形特性の設定

K-NET 観測点 PS 検層結果に基づいて表層構造を S 波速度 100m/s の 1 層に縮約し、工学的基盤以浅の地盤構造を表 3 のように設定した。Vs300m/s の層は K-NET 観測点の PS 検層結果最下部に見られるものであり、その層厚 21m は図 9 に示した穴水町役場に対するスペクトル比のピーク振動数を表現できるように設定された。K-NET 観測点南側には、図 2 の振動数分布からも読み取れるように段差構造が推定され⁹⁾、本震記録への影響についても考察されているが⁷⁾、ここでは動的変形特性の評価に着目して 1 次元解析を行った。

表 3 工学的基盤以浅の地盤構造

	層厚(m)	Vs(m/s)	Vp(m/s)	密度(g/cm ³)
表層	14	100	710	1.4
中間層	21	300	890	1.8
基盤層	—	500	890	1.8

時松ら⁸⁾が、余震および本震地震動の 8 秒区間ごとに評価した有効ひずみレベルと剛性低下率の関係を参考にして、図 11 に示す剛性低下率を設定し、またシルト質土の室内試験結果¹⁴⁾を参照して減衰定数のひずみ依存性を設定し、等価線形解析を行った。なお、表層以外は線形弾性とした。4.1 の議論に従って、KiK-net 地中観測波の 1.5 倍を基盤入射波としたときの地表地震動を、K-NET 観測記録とともに図 12 に示す。これらについては、2.5Hz でローパスフィルタを適用している。同図より主要なピークはよく対応し、また有効ひずみは図 13 に示すように最大で 1% 弱となり、時松ら⁸⁾の主要動付近における推定結果とおおむね対応する。

4.3 被害集中域の地震動レベルの推定

4.1 で設定した工学的基盤入射波と、4.2 で設定した表層の動的変形特性を用いて、被害集中域を含む FEM モデルにより本震時の地震動の推定を行った。図 2 に示すほぼ EW 方向の E-E' 断面を解析断面に設定し、東西の両端に段差構造を有する図 14 に示す地盤構造モデルを設定した。モデル東側の段差構造をモデル D 相当とし、西側の段差構造は直上での単点微動の H/V スペクトルのピーク振動数を参考に傾斜角を 27 度とした。また、林ら⁶⁾による深度 10m 付近の S 波速度構造を参考に、層厚 7m の S 波速度 300m/s の層を介して、中心部直下での深度 14m の基盤(Vs500m/s)に連続させた。

基本的な波動伝播性状を確認するために、東側段差構造のみを有するモデルについて中心振動数 2Hz のリッカー波を鉛直下方からせん断波として入射したときの、地表水平加速度成分および上下成分を図 15(a)および(c)に示す。また、水平成層部分への入射波をカットして表面波の伝播を示すために、段差構造西側に GL-34m より厚さ 5m の反射層 (Vs=10m/s, Vp=20m/s, 密度 0.8g/cm³, 減衰定数 0.5) を設けた時の解析結果を、図 15(b)に示す。これらの比較より、主要な波動は成層部分の重複反射と、段差部分から水平に伝播する波動により構成されている。水平方向に伝播する波動は、位相速度および粒子軌跡の検討より、水平成層部分の構造に対するレイリー波基本モード相当であることを確認している。

両側に段差を有する図 14 のモデルに対して、同様なリッカー波を入射した結果を図 16 に示す。同図より、両側の段差から水平方向に表面波が伝播し、段差からほぼ等距離で上下成分が逆位相、水平成分が同位相で共に順転の粒子軌跡を描き、盆地中央付近で水平成分が増幅的に干渉する様子が見られる。

このモデルに KiK-net 地中観測波の 1.5 倍を入射波として入力し、図 11 の動的変形特性を表層部分に用いて 2 次元 FEM による等価線形解析を行った結果を図 17 に示す。地表における水平成分の応答には、リッカー波に対する線形応答と同様に、表面波の増幅的干渉が認められる。図 18 に、図 14 のモデルの地表 30m ごとの計算点における加速度応答スペクトルを示す。段差構造内部の 0.7Hz 付近

図 11 K-NET 穴水観測点の表層地盤の動的変形特性

図 12 K-NET 穴水観測点の本震波形シミュレーション

図 13 等価線形解析における有効ひずみ分布

図 14 E-E'測線に沿った断面の2次元有限要素モデル

図 15 東側段差のみを有するモデルのリッカー波に対する加速度時刻歴

図 16 両側に段差を有するモデルのリッカー波に対する加速度時刻歴

図 17 等価線形解析による地表地震動水平成分 (左: 工学的基盤解放波)

の顕著な加速度応答は K-NET 観測点での観測記録および 1 次元解析結果と同様であるが、1Hz 強のピーク付近においては図 19 の応答スペクトル比にも見られるように、段差構造の傾斜部を外れた内側の 3 点 (95m, 125m, 155m) において K-NET での解析結果に比べて 10% 程度大きな応答が得られた。また、基盤の浅い段差上部の 2 点 (35m および 215m) では周期 1 秒から 1.5 秒に対応する振動数で K-NET 穴水の半分程度の入力レベルである。K-NET 穴水での木造建物全壊率と相関の高い 1–1.5 秒平均速度応答は 270cm/s 程度¹⁵⁾であり、段差上部では図 2 より全壊建物がきわめて少ないことは、その半分程度の入力レベルではほぼ全壊建物は生じていないという、被害率との対応に関する結果¹⁵⁾に調和的である。

一般に、低層の木造建物は 1Hz 前後の地震動成分によって大きな地震被害を受けると考えられているが¹⁵⁾、集中した被害について被害地点近傍での観測記録が得難いこと、ならびに地震動の強度指標と被害率の関係にはばらつきが大きいことから、強度指標に基づいて被害率を一律に推定することには困難が考えられる。

被害集中域では表層地盤の大ひずみによる剛性低下により地盤の卓越振動数が低下したとともに、水平成層地盤の重複反射と水平に伝播した表面波が増幅的に干渉しこれらの振動数成分がさらに励起されたものと考えられる。湾状の盆地構造の湾口部に位置する被害集中域においては、2 次元モデルの検討により 10% 程度の地盤応答の増加が見られ、さらに焦点効果等の 3 次元的な波動干渉により地盤応答が増大した可能性も考えられる¹²⁾。

5. まとめ

本論文では、能登半島地震の震源より約 20km 離れた穴水町市街地での建物被害を地盤震動の観点から説明するために、高密度の微動測定および FEM によるシミュレーションを行った。その結果、表層地盤の大ひずみによる剛性低下により地盤の卓越振動数が低下したとともに、水平成層地盤の重複反射と段差部分から水平に伝播したレイリー波が増幅的に干渉し、低層木造建物の被害を引き起こす 1Hz 付近の地表応答を増大させたものと結論づけた。議論の詳細は以下のとおりである。

- ・全壊建物は真名井川屈曲部を中心とする 500m 四方の範囲に存在し、全般的な築年が大きく変わらないと考えられる地域においても全壊率に偏りがあるため、被害分布に表層地盤が大きく影響したものと考えられる。単点微動測定による H/V スペクトルのピーク振動数は市街地一帯で系統的な偏りを示し、全壊建物の存在する地域ではほぼ 1.1Hz～3Hz にある。
- ・H/V スペクトルと 2 層地盤モデルのレイリー波基本モードの粒子軌跡の水平鉛直比ピーク振動数との比較より、市街地の表層厚は 4m から 25m 程度に分布し、特に全壊建物が集中した地域は湾状の盆地形状の湾口部に位置する。
- ・高密度微動測定による EW/V スペクトルピーク振動数の分布について、2 次元 FEM によりシミュレーションを行ったところ、被害集中域の東側に傾斜角 37° 程度で落差 11m に達する基盤段差構造の存在が推定された。
- ・市街地より東へ約 6km 離れた KiK-net 穴水の地中本震記録に、距離減衰および工学的基盤相当に対する増幅率を適用し、市街地での工学的基盤解放波を KiK-net 地中記録の 3 倍で設定し、既往

図 18 加速度応答スペクトル (減衰 5%, k-net は 1D 解析結果)

図 19 K-NET の 1 次元解析結果に対する加速度応答スペクトル

の研究を参考に設定した動的変形特性を用いて 1 次元等価線形解析で評価した地表応答は、K-NET 穴水の本震記録にみられる主要なパルスを再現した。

- ・これらの工学的基盤波および表層地盤の動的変形特性を、被害集中域を含む 2 次元断面に適用し、2 次元 FEM による等価線形解析を行ったところ、水平成層地盤の重複反射と両側の段差で発生したレイリー波が増幅的に干渉し、盆地内部の被害集中域では 2 次元モデルによる検討により 1Hz 付近で 10% 程度大きな加速度応答スペクトルが得られた。このように、能登半島地震における穴水町の被害集中域では、表層地盤の非線形性と局所的な基盤構造による増幅的波動干渉により、1Hz 前後の振動数成分が卓越し、建物被害が集中的に発生したものと推定される。これらの検討は 2 次元モデルによるものであるが、焦点効果等の 3 次元の波動の干渉が上述の効果をさらに高めた可能性についても今後の検討課題と考えられる。

謝辞

本検討では防災科学技術研究所 K-NET および KiK-net の公開データを利用させていただきました。また、産業技術総合研究所による能登半島臨時余震観測結果を使用させていただきました。石川県

穴水町役場ならびに石川県土木事務所より、能登半島地震による穴水町の被害および地盤情報に関する情報を提供していただきました。微動観測においては、元早稲田大学大学院生の斎藤豪氏の協力を得ました。本研究の一部は早稲田大学特定課題研究費（2008B-147）ならびに科研費（21510198）の助成を受けて実施しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 川瀬博, 松島信一, Graves, R.W., Somerville, P.G.: 「エッジ効果」に着目した単純な二次元盆地構造の三次元波動場解析—兵庫県南部地震の際の震災帯の成因, 地震 第2輯, 第50巻, 第4号, pp.431-449, 1998.
- 2) (例えば) 中島康雅, 藤本一郎, 瀬尾和大: 地域的地盤条件を考慮した地震危険度の評価に関する研究 (局地的に地震被害を受けた地域での微動特性), 日本建築学会大会学術講演梗概集B, pp.685-686, 1989.10.
- 3) 前田寿朗, 清水亮, 斎藤豪: 能登半島地震における穴水町での被害と卓越振動数の関係, 第26回日本自然災害学会学術講演会, pp.145-146, 2007.9.
- 4) Shimizu, R., Maeda, T., and Saito, G.: Ground Motion Simulation in Anamizu Town during the 2007 Noto-Hanto Earthquake, 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008.10.
- 5) Iwata T., Asano K., Kuriyama M., and Iwaki A.: Non-linear Site Response Characteristics of K-net ISK005 Station and Relation to the Earthquake Disaster During the 2007 Noto-hanto Earthquake Central Japan, 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008.10.
- 6) 林宏一, 田村昌仁, 平出務, Adhikari, K.N., 米田誠, 山本明弘, 表面波探査と微動アレイ探査による石川県穴水町中心部の地盤構造調査, 物理探査学会第117回学術講演梗概論文集, pp.37-40, 2007.10.
- 7) Yoshimi, M. and Yoshida, K.: Site Amplification and Strong Ground Motion of the 2007 Noto Hanto, Japan, Earthquake Estimated from Aftershock Observation, Earth Planets and Space, 60, pp.161-167, 2008.
- 8) 時松孝次, 鈴木比呂子, 翠川三郎: 2007年能登半島地震のK-NET穴水及びJMA輪島の強震記録に見られる地盤の非線形性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集B-2 pp183-184, 2007.8.
- 9) 境有紀: 2007年能登半島地震による構造物被害と地震動の関係, 第35回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, pp31-40, 2007.11.
- 10) BARD, P-Y, The Sesame Project: An overview and main results, 13th World Conference on Earthquake Engineering, #2207, 2004.8.
- 11) 若松邦夫, 安井諒: 短周期微動の水平上下スペクトル比による地盤増幅特性評価の可能性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.471, pp.61-70, 1995.5.
- 12) 川瀬 博, 松島信一: 三次元盆地構造を考慮した1995年兵庫県南部地震の神戸地域における強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第514号, pp.111-118, 1998.12.
- 13) 司宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, No.523, pp.63-70, 1999.9.
- 14) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, 1982.
- 15) 境有紀: 建物被害と対応した地震動の周期帯の再検討 —2007年能登半島地震, 新潟県中越沖地震のデータを加えて—, 日本建築学会構造系論文集, 第642号, pp.1531-1536, 2009.8.

(2009年5月8日原稿受理, 2009年10月27日採用決定)