

2024年能登半島地震における建物被害と発生した地震動

Damage to Buildings and Strong Ground Motions in the 2024 Noto-hanto Earthquake

境有紀・倉田真宏・川瀬博⁽¹⁾
中澤駿佑⁽²⁾・汐満将史⁽³⁾・伊藤恵理⁽⁴⁾・仲野健一⁽⁵⁾

Yuki SAKAI, Masahiro KURATA, Hiroshi KAWASE⁽¹⁾,
Shunsuke NAKAZAWA⁽²⁾, Masashi SHIOMITSU⁽³⁾, Eri ITO⁽⁴⁾, and Kenichi NAKANO⁽⁵⁾

(1) (一財) 日本建築総合試験所

(2) 宇都宮大学地域デザイン科学部

(3) 山形大学工学部

(4) 国立研究開発法人 建築研究所

(5) 安藤ハザマ技術研究所

(1) General Building Research Corporation of Japan

(2) School of Regional Design, Utsunomiya University, Japan

(3) Faculty of Engineering, Yamagata University, Japan

(4) Building Research Institute, Japan

(5) Technical Research Institute, HAZAMA-ANDO CORPORATION, Japan

Synopsis

We reported on the building damage and the strong ground motions that occurred during the 2024 Noto-hanto earthquake.

Regarding the characteristics of the earthquake motion, the strong ground motion that occurred in Wajima, Suzu, and Anamizu had a large component with a period of 1-2 seconds that caused major damage to buildings, while the earthquake motion observed at K-NET Togi, which recorded JMA seismic intensity of 7, had a large short-period component that is highly correlated with JMA seismic intensity, but a small component with a period of 1-2 seconds. A damage investigation was carried out around the strong ground motion observation points, and it was found that in the former area, extensive damage had occurred, primarily to old wooden houses, while in the latter area, no surrounding wooden houses had major damage.

The absence of school and medical building collapses and minimal damage to government buildings demonstrated the effectiveness of retrofitting efforts under Japan's seismic reinforcement policies. However, cladding and ceiling damage in steel buildings and uneven settlement in RC buildings were notable. Significant disruptions in medical services due to piping and equipment damage highlighted the need for enhanced resilience in healthcare infrastructure.

As for the physical cause of the high peak ground velocities (PGVs) in the middle of the heavily-damaged areas like Suzu, Wajima, and Anamizu, we investigated the horizontal site amplification factors (HSAFs) at the strong motion sites based on the

generalized spectral inversion technique for weak motions observed before the 2024 Noto earthquake. It turned out that we have significant amplifications in the frequency range around 1 Hz and below at those sites inside the heavily-damaged areas, while we see ordinary amplifications at the sites outside of the heavily-damaged areas.

キーワード: 地震被害調査, 計測震度, 木造建物, 非木造建物, 事業継続性, サイト増幅特性

Keywords: Damage Investigation, JMA seismic intensity, Wooden house, Non-wooden Buildings, Business Continuity, Site amplification factor

1. はじめに

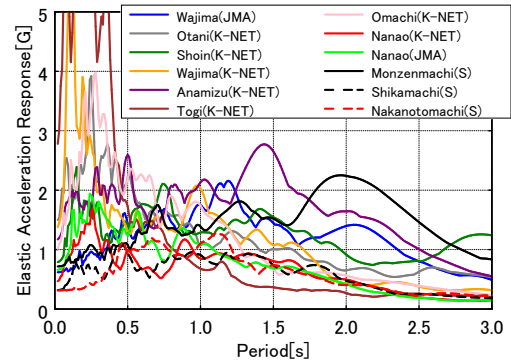
2024年能登半島地震では、古い木造家屋を中心に建物に甚大な被害が生じた。ここでは、発生した地震動と建物被害の対応、非木造建物被害と機能維持性、そして、既往中小地震から求めた強震観測点のサイト増幅特性について報告する。

2. 発生した地震動と建物被害の対応

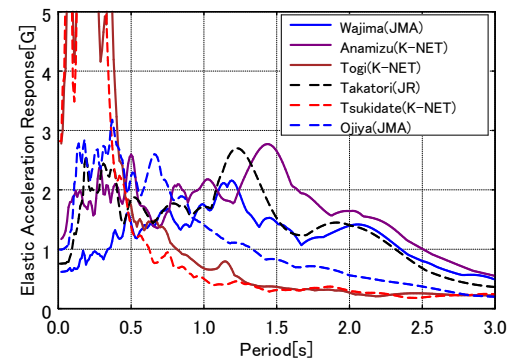
本章では、観測された地震動について述べた後、強震観測点回りの被害調査を行った結果による実際の建物被害、そして、地震動と建物被害の対応について報告する。

2.1 観測された地震動の性質

震度6弱以上を記録した強震記録について、地震動強さ指標をTable 2-1に示す。計測震度や地動最大加速度PGAといった一般的な指標の他、木造建物や中低層非木造建物の全壊・大破といった大きな被害と相関が高い周期帯の応答スペクトル値を基に求める1-2秒震度、1-1.5秒震度（境, 2013, 境他, 2023）も示している（いずれも、震度7が設定された1948年福井地震当時の木造建物の耐震性能を基準に震度6.5で全壊率10%（諸井, 武村, 1999）となるよう再定義されている）。複数の観測点でPGAが 1000 cm/s^2 を超え、K-NET富来では 2725 cm/s^2 と非常に大きい。PGVが



(a) 2024 Noto-hanto earthquake



(b) Comparison with past strong ground motions

Fig.2-1 Response acceleration spectra

100 cm/sを超えた観測点も複数ある。

Fig. 2-1(a)に弾性加速度応答スペクトル（水平2方

Table 2-1 Seismic intensity indices of observed strong ground motions

	Station name	JMA Seismic Intensity	PGA[cm/s ²]	PGV[cm/s]	I _{JMA}	I ₁₋₂	I _{1-1.5}
2024 Noto-Hanto	Shikamachi Sueyoshi Senko (Shindokei)	6-	312.8	55.3	5.7	5.89	5.59
	Togi (K-NET)	7	2725.0	83.7	6.6	5.51	5.55
	Nanao (K-NET)	6-	459.0	52.9	5.8	5.75	5.76
	Anamizu (K-NET)	7	1220.7	151.4	6.5	6.63	6.60
	Wajima (JMA)	6+	608.5	120.5	6.2	6.50	6.25
	Wajima (K-NET)	6+	1627.6	88.7	6.2	5.99	6.02
	Omachi (K-NET)	6+	992.0	106.4	6.3	5.99	6.05
	Nanao (JMA)	6-	642.1	52.6	5.8	5.84	5.75
	Nakanotomachi Notobeshimo (Shindokei)	6-	307.0	54.5	5.7	5.88	5.65
	Shoin (K-NET)	6+	847.1	132.2	6.2	6.36	6.29
	Otani (K-NET)	6+	1468.5	103.1	6.2	6.14	6.01
	Wajimashi Monzenmachi Hashiride (Shindokei)	7	701.9	157.8	6.5	6.61	6.37
	1995 Hogo-ken Nanbu, Takatori (JR)	6+	741.6	157.2	6.4	6.64	6.65
Strong ground motions observed in past earthquakes	2004 Niigata-ken Chuetsu, Ojiya (JMA)	6+	975.0	93.6	6.3	5.93	5.97
	2011 Tohoku-chiho Taiheiyō-oki, Tsukidate (K-NET)	7	2765.2	105.8	6.6	5.38	5.35
	2016 Kumamoto (4/16), Mashiki (KIK-net)	7	1313.8	131.6	6.5	6.38	6.48

※The JMA seismic intensity other than Takatori (JR) was cited from the Japan Meteorological Agency and the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention.

向ベクトル合成, 減衰定数5%) を, Fig. 2-1(b)に, 特に震度の大きな地震動の応答スペクトルを, 過去の大地震で観測された地震動のものと比較して示す. 震度7を観測したK-NET富来は, 全壊率0% (林他, 2013) の2011年東北地方太平洋沖地震K-NET築館と同様に, 計測震度と相関のある周期1秒以下の応答 (境他, 2004) は大きい, 建物の大きな被害と相関のある周期1-2秒の応答は全壊率1.8%の2004年新潟県中越地震JMA小千谷よりも小さく, 短周期の揺れが卓越して震度は大きくなるものの, 大きな建物被害は生じにくい性質の地震動である. 同じく震度7を観測したK-NET穴水は, 周期1-2秒の成分が全壊率43.1% (境他, 2023) であったJR鷹取と同程度で, 建物の大きな被害を引き起こす成分が非常に強い地震動と言える. 震度6強を観測したJMA輪島も, JR鷹取よりは小さいものの全壊率1.8%であったJMA小千谷の2倍程度の1-2秒応答であり, 建物の大きな被害を引き起こす成分が強い地震動である. この他にも, 震度6強を観測したK-NET大谷, K-NET正院, K-NET輪島は周期1-2秒で1g (=重力加速度) 以上の応答であり, 建物に大きな被害を引き起こす可能性のある地震動と言える.

2.2 強震観測点周辺の被害調査

このような地震動の解析により, 穴水, 輪島, 珠洲で建物の大きな被害が生じている一方, 震度7のK-NET富来周辺では, 大きな被害が生じていないことが推定された. そこで, 強震観測点周辺の被害調査を行った. 調査の対象とする強震観測点は

1. 震度7を観測した全ての観測点
2. 震度6弱以上を観測した観測点のうち, 調査を計画した時点で強震記録が公開されているか, 周辺に80棟以上の建物が存在するもの

という条件で, Fig. 2-2に示す12観測点に絞り込んだ. 図中のJMAは気象庁震度観測点, 震度計は地方公共団体震度計を示している. 観測点周辺の棟数は, 観測点の正確な位置を特定する前に衛星写真から集計しているため, 調査の結果80棟を下回った観測点もある. 調査範囲は観測点から半径200m以内とし, 範囲内の全ての建物について, 外観から全壊・大破といった大きな被害の有無, 木造・非木造を判定した. なお, 寺社, 倉庫, 蔵等や地盤被害, 基礎の被害を受けた建物は対象外とし, 被害率を算出するための全建物棟数と被害建物棟数にはカウントしていない. 調査結果の例として, K-NET穴水周辺の被害・建物分布図をFig. 2-3に示す.

調査を行った強震観測点周辺の中から, いくつかについて述べる.

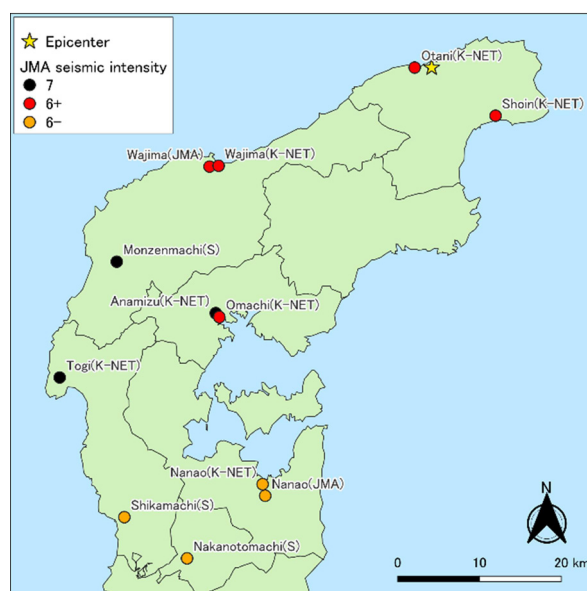


Fig. 2-2 Strong observation points investigated

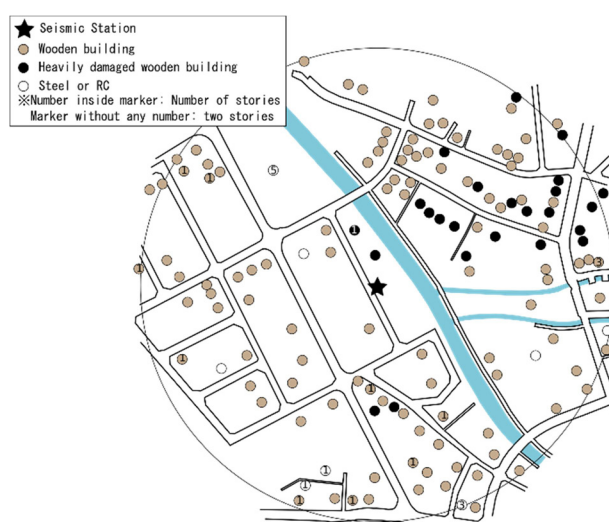


Fig. 2-3 Example of damage and building distribution (K-NET Anamizu)



Photo 2-1 K-NET Togi



Photo 2-2 Surrounding area



Photo 2-3 Damage to roof tiles



Photo 2-4 Damage to window glass

(1)K-NET富来(震度7, 調査日: 1/7)

観測点は志賀町香能にある農場付近の道路沿いに設置されている (Photos 2-1, 2) . 周辺には5棟の建物 (全て木造) があるが, 全壊・大破といった被害を受けた建物は見られなかった. 軽微な被害では, 瓦屋根に被害を受けた建物 (Photo 2-3) や, ガラス窓に被害を受けた建物 (Photo 2-4) が見られた.

(2)K-NET穴水(震度7, 調査日: 1/8)

観測点は, のと鉄道穴水駅から北に300mほどにある公園の敷地内に設置されている (Photo 2-5) . 周辺には137棟の建物 (うち木造建物129棟) があり, 木造建物24棟が全壊していた (Photos 2-6~8) . 建物の軽微な被害では, ガラス窓に被害を受けた建物が見られた. 建物以外の被害では, 地盤の被害や倒壊した塀が見られた.

(3)JMA輪島(震度6強, 調査日: 1/9)

観測点は輪島地方合同庁舎 (Photo 2-9) の南側に設置されている (Photo 2-10) . 周辺には222棟の建物 (うち木造建物207棟) があり, 木造建物54棟が全壊していた (Photos 2-11, 12) . 建物の軽微な被害では, ガラス窓に被害を受けた建物が見られ, 建物以外の被害では, 地盤の被害や倒壊した塀が見られた.

(4)K-NET輪島(震度6強, 調査日: 1/9)

観測点は一本松公園の北西の端にある坂の途中に設置されている (Photo 2-13) . 周辺には180棟の建物 (うち木造建物171棟) があり, 木造建物62棟が全壊していた (Photos 2-14~16) . 建物の軽微な被害では, 外装に被害を受けた建物が見られた. 建物以外の被害では, 地盤の被害や倒壊した塀が見られた.

(5)K-NET正院(震度6強, 調査日: 1/26)

観測点は正院町正院の道路沿いに設置されており, 観測点の北側には1.3mほどの段差がある. 周辺には38棟の建物 (うち木造建物34棟) があり, 木造建物15棟が全壊していた. 建物の軽微な被害では瓦屋根に被害を受けた建物が見られた. 建物以外の被害では, 地盤の被害や倒壊した塀が見られた.

(6)K-NET大谷(震度6強, 調査日: 1/26)

観測点は珠洲市立大谷小中学校の敷地の北側に設置されている. 周辺には30棟の建物 (うち木造建物28棟) があり, 木造建物14棟が全壊していた. 建物の軽微な被害では, 外装に被害を受けた建物が見られた. 建物以外の被害では, 舗装の被害や斜面崩壊といった地盤の被害が見られた.

(7)輪島市門前町走出震度計(震度7, 調査日: 1/27)

観測点は輪島市役所門前総合支所の庁舎に設置されている. 庁舎の敷地内には地盤の被害が多数見られたことから, 観測記録には建物の応答や地盤の被害の影響が含まれ, 周辺で生じた地震動と異なる可能性がある. 周辺には76棟の建物 (うち木造建物63



Photo 2-5 K-NET Anamizu



Photo 2-6 Heavily damaged wooden house



Photo 2-7 Heavily damaged wooden house



Photo 2-8 Heavily damaged wooden house



Photo 2-9 Wajima Regional Joint Government Building



Photo 2-10 JMA Wajima



Photo 2-11 Heavily damaged wooden house



Photo 2-12 Heavily damaged wooden house



Photo 2-13 K-NET Wajima



Photo 2-14 Heavily damaged wooden house



Photo 2-15 Heavily damaged wooden house



Photo 2-16 Heavily damaged wooden house

棟) があり, 木造建物14棟が全壊していたほか, 鉄

Table 2-2 Results of damage investigation and seismic intensity indices of observed strong ground motions

	Station name	JMA Seismic Intensity	N		Nd		D[%]	Dw[%]	Seismic intensity scales				
			All structural types	Wood	All structural types	Wood			PGA [cm/s ²]	PGV [cm/s]	I _{JMA}	I ₁₋₂	I _{1-1.5}
2024 Noto-Hanto	Shikamachi Sueyoshi Senko (Shindoike)	6-	82	76	0	0	0	(0)	312.8	55.3	5.7	5.89	5.59
	Togi (K-NET)	7	5	5	0	0	(0)	(0)	2725.0	83.7	6.6	5.51	5.55
	Nanao (K-NET)	6-	168	129	4	4	2.4	3.1	459.0	52.9	5.8	5.75	5.76
	Anamizu (K-NET)	7	137	129	24	24	17.5	18.6	1220.7	151.4	6.5	6.63	6.60
	Wajima (JMA)	6+	222	207	54	54	24.3	26.1	608.5	120.5	6.2	6.50	6.25
	Wajima (K-NET)	6+	180	171	62	62	34.4	36.3	1627.6	88.7	6.2	5.99	6.02
	Omachi (K-NET)	6+	91	71	1	1	1.1	(1.4)	992.0	106.4	6.3	5.99	6.05
	Nanao (JMA)	6-	74	60	0	0	(0)	(0)	642.1	52.6	5.8	5.84	5.75
	Nakanotomachi Notobeshimo (Shindoike)	6-	68	58	0	0	(0)	(0)	307.0	54.5	5.7	5.88	5.65
	Shoin (K-NET)	6+	38	34	15	15	(39.5)	(44.1)	847.1	132.2	6.2	6.36	6.29
	Otani (K-NET)	6+	30	28	14	14	(46.7)	(50.0)	1468.5	103.1	6.2	6.14	6.01
	Wajimashi Monzenmachi Hashiride (Shindoike)	7	76	63	19	18	(25.0)	(28.6)	701.9	157.8	6.5	6.61	6.37
	1995 Hogo-ken Nanbu, Takatori (JR)	6+	545	207	190	123	20.5	43.1	741.6	157.2	6.4	6.64	6.65
	2004 Niigata-ken Chuetsu, Ojiya (JMA)	6+	164	114	2	2	1.2	1.8	975.0	93.6	6.3	5.93	5.97
Strong ground motions observed in past earthquakes	2011 Tohoku-chiho Taiheiyō-oki, Tsukidate (K-NET)	7	58	51	0	0	0.0	0.0	2765.2	105.8	6.6	5.38	5.35
	2016 Kumamoto (4/16), Mashiki (KIK-net)	7	225	223	14	14	6.2	6.3	1313.8	131.6	6.5	6.38	6.48

D: Ratio of heavily damaged buildings Dw: Ratio of heavily damaged wooden buildings N: Number of buildings, Nd: Number of heavily damaged buildings

* The damage ratio around the station with 80 or fewer buildings are shown in parentheses as a reference value.

**The damage rates around JR Takatori have been adjusted according to references 1) 3).

*** The JMA seismic intensity other than Takatori (JR) was cited from the Japan Meteorological Agency and the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention.

骨造建物1棟が大破していた。建物以外の被害では、地盤の被害や倒壊した塀が見られた。

このように、複数の観測点周辺で、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物が多数見られた。建物以外の被害では多くの観測点周辺で地盤の被害が確認された。Table 2-2に各観測点周辺の被害率を示す。

2.3 地震動と被害状況の対応

強震観測点回りの被害調査結果、建物の大きな被害を引き起こす周期1-2秒の成分が大きかったJMA輪島、K-NET輪島、K-NET大谷（珠洲市）、K-NET正院（珠洲市）、K-NET穴水周辺では、実際の被害も甚大だった。一方、計測震度と相関が高い短周期

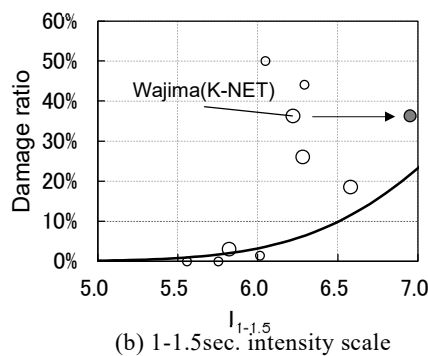
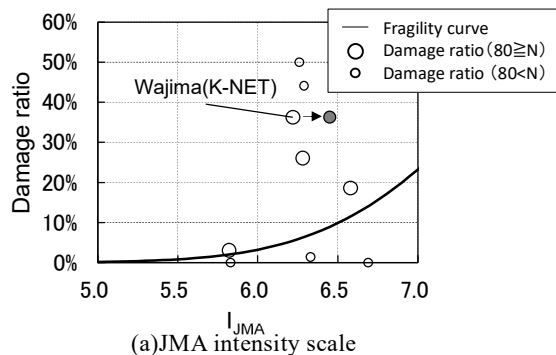


Fig. 2-4 Relationship between seismic intensity scales and actual damage

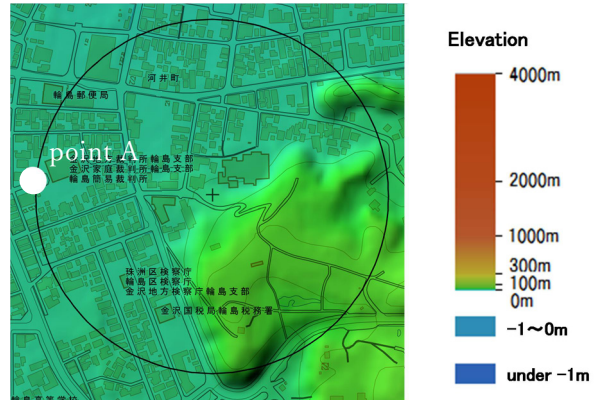


Fig. 2-5 Topography around K-NET Wajima (Geospatial Information Authority of Japan, 2024)

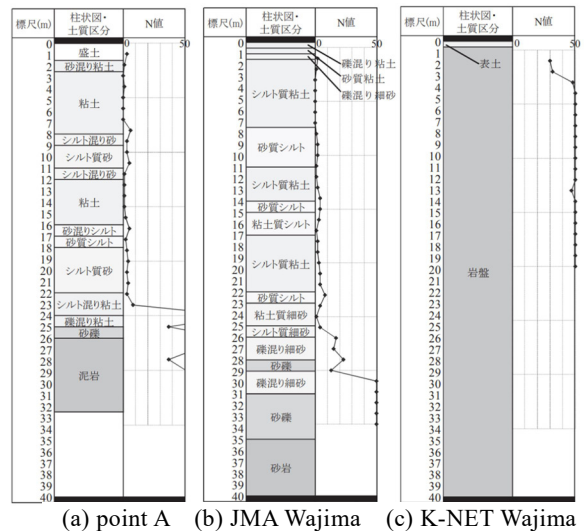


Fig. 2-6 Ground surface of K-NET Wajima and point A (Nakagawa et. al. (2013))

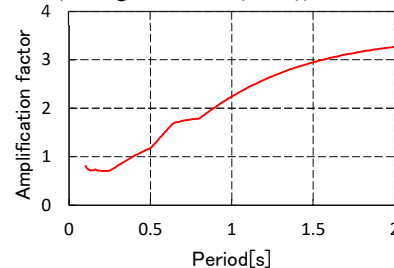


Fig. 2-7 Spectral amplification factor from K-NET Wajima to the surrounding area

成分は大きく、震度7を観測したものの周期1-2秒の成分は小さいK-NET富来周辺には、大きな被害を受けた木造建物はなかった。

このように、実際の被害は、概ね2.1で述べた地震動の分析から想定されるものだったと言えるが、いくつか留意すべきことを述べておく。まず、全壊率18.6%のK-NET穴水は、Fig. 2-1より、周期1-2秒の成分が全壊率43.1%であったJR鷹取と同程度で、建物の大きな被害を引き起こす成分が非常に強い地震動と言えるが、同程度の1-2秒応答でありながら全壊率が半分以上と小さい。これは、K-NET穴水では2007年能登半島地震の際に全壊率18.8%の被害が生じており（境他, 2008）、被害を受けた建物の建て替えや取り壊しによって耐力の低い建物の割合が少なくなっていたことが考えられる。

Fig. 2-4に計測震度、1-1.5秒震度（境, 2013）と実被害率の対応を示す。建物棟数が少ない観測点も参考のため小さいマーカーで示している。（a）の計測震度の場合は右上がりの傾向にならず、棟数は少ないものの全壊率0%のK-NET富来が最も計測震度が大きくなっている。（b）の1-1.5秒震度の場合は、全体的に右上がりの傾向が見られる。ただし、いずれの震度でもK-NET輪島の推定被害率との誤差が約30ptと大きい。この要因として、Photo 2-13およびFig. 2-5

（国土地理院, 2024閲覧）に示すようにK-NET輪島が周辺より標高の高い丘の途中に設置されており、比較的硬い地盤（中川他, 2013）の上に位置するため、周辺で生じた地震動が強震記録と異なる可能性が考えられる。地点AはK-NET輪島から半径200mの調査範囲のほぼ円周上に位置するが、Fig. 2-6より、深さ1mで岩盤に達するK-NET輪島に対し、地点Aで泥岩が現れるのは深さ26mと、両者の表層地盤は大きく異なる。そこでK-NET輪島の地盤データと周辺の微地形区分から求めたスペクトル増幅率（Fig. 2-7）（先名他, 2009, 境他, 2003）を用いて周辺の計測震度（計測震度と相関の高い周期0.1-1秒応答から求める0.1-1秒震度から換算（境他, 2004））、1-1.5秒震度を推定した。その結果、Fig. 2-4(b)に灰色のマーカーで示すようにK-NET輪島周辺の1-1.5秒震度は震度7となり、実被害との対応は改善した。同様に、計測震度の場合もFig. 2-4(a)に灰色のマーカーで示しているが、1秒以下の短周期は増幅率の差が1-1.5秒と比べて大きくないため、表層地盤の差を考慮しても実被害との対応はあまり改善しなかった。

ただ、全体として、全壊率は、被害関数（1995年兵庫県南部地震時点での平均的な建物群を対象とした推定全壊率に対応する）より大きく、特に棟数は少ないものの珠洲市のK-NET正院、K-NET大谷でその傾向が顕著である。

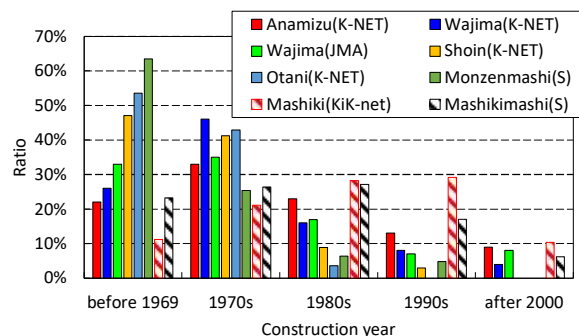


Fig. 2-8 Construction year distribution

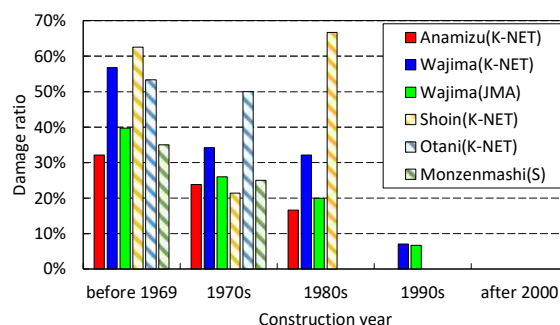


Fig. 2-9 Damage ratio by construction year

2.4 建築年代分布の推定と年代別全壊率

被害関数による推定被害率よりも実被害率が高い傾向にある要因の一つに、観測点周辺に古い建物が多かったことが考えられる。そこで、建物の外観から建築年代を推定する手法（戸田他, 2020, 汐満他 2024）を用いて、Fig. 2-8に示す5観測点周辺の建築年代分布と年代別全壊率を推定した。その結果、K-NET穴水では約5割、K-NET輪島とJMA輪島では約7割、K-NET正院とK-NET大谷では約9割の建物が1980年以前の旧耐震基準によるものであった。

比較のため、2016年熊本地震のKiK-net益城、益城町宮園震度計の年代分布を斜線で示しているが、これら2観測点より能登半島地震の5観測点では旧耐震基準の建物が多いことがわかる。2023年度の戸建住宅ストック総数（国土交通省, 2024閲覧）における旧耐震基準の割合が約3割であることを踏まえると、これらの観測点周辺には古い建物が全国平均よりも多く存在しており、このことが地震動強さ（1-1.5秒震度）に比して、大きな被害となった一因と考えられ、約9割の建物が旧耐震基準であったK-NET正院、K-NET大谷でその傾向が顕著であったことも整合する。

また、この中で、K-NET穴水の旧耐震建物の割合が最も小さいのは、2-3で述べたように2007年の地震で全壊率18.8%という大きな被害を受けて取り壊し

や建て替えが行われたことと整合するが、それでも5割に達しており、それが、発生した地震動の1-2秒応答が大きいことに加えて、今回の地震での全壊率18.6%という大きな被害に繋がったと考えられる。

Fig. 2-9には各観測点の年代別の全壊率を示す（建物棟数が少ないK-NET正院，K-NET大谷は、参考値として斜線で示している）。いずれの観測点でも建築年代の古い建物ほど被害が大きくなるが、2000年代以降と判定された建物に全壊したものはない。したがって、耐震化率を高めることで、将来、今回の地震のK-NET穴水やJMA輪島の程度の1-2秒応答を有する地震動が発生した場合、被害を軽減できると考えられる。

2.5 発生した地震動と建物被害の対応のまとめ

輪島、珠洲、穴水で発生した地震動は、建物の大きな被害を引き起こす周期1-2秒の成分が大きい一方、震度7を観測したK-NET富来の地震動は、計測震度と相関が高い短周期成分は大きいものの周期1-2秒の成分は小さかった。そして、強震観測点周辺の被害調査を行った結果、前者では、古い木造建物を中心に甚大な被害が生じており、後者では、周辺の木造建物に大きな被害を受けたものはなかった。また、建物建設年の調査を行った結果、1980年以前の旧耐震基準によるものが非常に多かった。以上のことから周期1-2秒の成分が大きいという地震動の性質に加えて、古い木造家屋が多かったことが甚大な被害に繋がったと考えられる。

3. 非木造建物被害と機能維持性

本章では、防災研究所の2024年能登半島地震報告会での発表をもとに非木造建物の被害と機能維持性について報告する。なお本稿の一部は既に、建築防災協会への鋼構造被害に関する寄稿（倉田，2024），米国地震工学センター（PEER）およびNHERI（Natural Hazards Engineering Research Infrastructure）のStEER（Structural Extreme Event Reconnaissance Network）と協力して執筆した英文レポート（Kurata et al, 2024），に報告している。

3.1 地震動の特徴と非木造建物への影響

現地調査に先立って、防災科学技術研究所の強震観測網（K-Net）により能登半島の各地点で観測された地震動と設計スペクトルの関係を確認した。Fig. 3-1に珠洲市内、輪島市内、穴水町、穴水町（大町）、富来町、七尾市の観測点で記録された地震動の加速度応答スペクトル（粘性減衰5%）を示す。

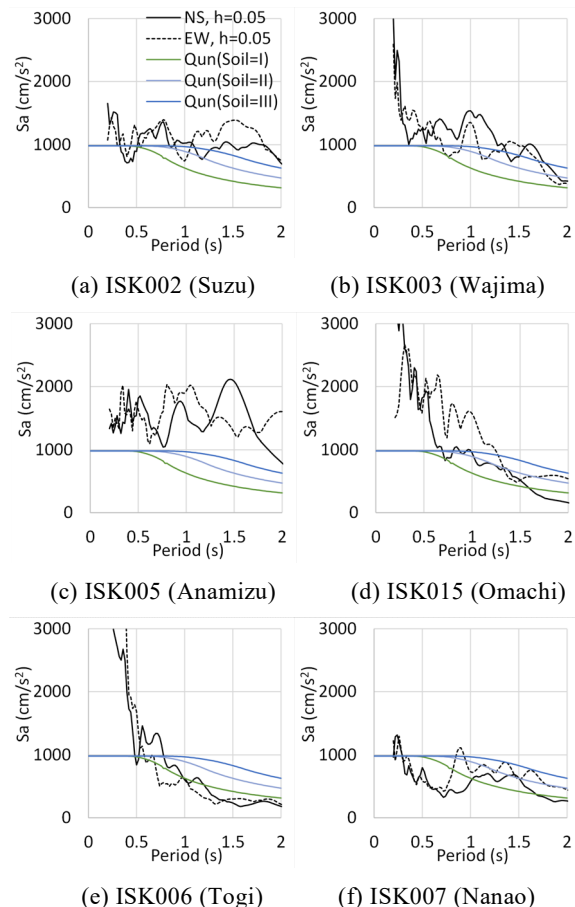


Fig. 3-1 Acceleration spectrum

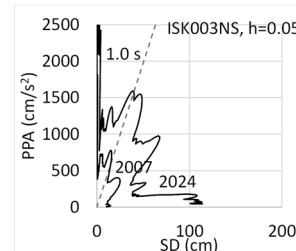
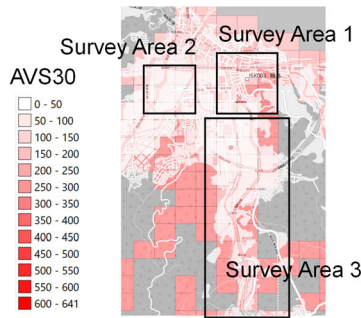


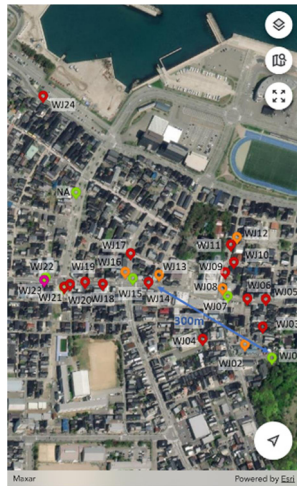
Fig. 3-2 Pseudo acceleration vs displacement spectrum

震源に近い能登北部（輪島市・穴水町・能登町・珠洲市）と能登中部（羽咋市・宝達志水町・中能登町・志賀町・七尾市）では地震動の大きさや被害が大きく異なる。Fig. 3-1(a)-(d) に示す北部の観測記録では許容応力度設計（1次設計）で想定する地震力を大きく超え、2種地盤でも2.0秒付近までは保有水平耐力設計（2次設計）で想定する地震力を超えている。能登中部では2次設計で想定する地震力を超える地点は限られている。直下の断層が本震の影響で動いた富来町では0.7秒以下の短周期で、また北部の境界に位置する七尾市ではスペクトルのピークが一部で超えている。

Fig. 3-2に輪島市の観測記録の疑似加速度応答スペクトルと変位応答スペクトルの関係を示す。周期約



(a) Survey area and ground characteristics



(b) Part of Survey Area 1

Fig. 3-3 Survey area in Wajima city

0.8～2.0 秒に大きな入力がある．輪島市と同様に珠洲市や穴水町で観測された地震動も1.0～2.0 秒の周期帯にパワーがある．輪島市は2007年にも地震の影響を受けているが，2024年は2007年の観測地震動に比べて約2倍強くなっており被害の程度は全く異なる．

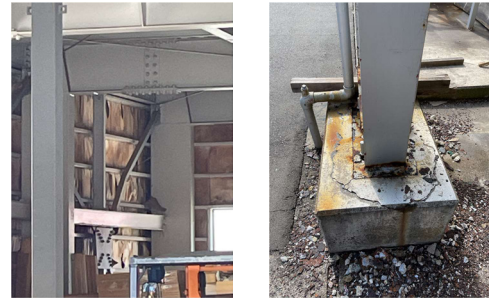
鋼構造の弾性固有周期は設計で $0.03h$ 秒 (h は建物高さ) と計算されるが，中低層鋼構造の実設計例を調査した文献(斎藤，2000)では1/200程度の変形で $0.5+0.027h$ 秒との報告もある．被災地域に多い3～5階建ての中低層では，前者の式で0.3-0.5秒，後者の式で0.75～1.0秒となる．弾性固有周期がやや長い場合や，塑性化により周期が伸びた状態で大振幅波が入力すると塑性変形が大きく進行する可能性がある．鉄筋コンクリート造(RC造)の中低層建物の固有周期は鋼構造よりやや短く，弾性固有周期を0.3-0.6秒である．また，RC造は鋼構造よりもDs値でやや高く設定され保有水平耐力が高い．例えば，京都市の被害想定で参照されている耐震診断等で収集された3, 4, 5階建物の構造特性係数(Is値)の統計値は1.20, 1.06, 0.90(京都市，2003)であり，この値を参照すると構造被害は小破から中破程度となる．



(a) RC building

(b) Steel building

Fig. 3-4 (Survey Area 1) Damages (Photos by Kurata)

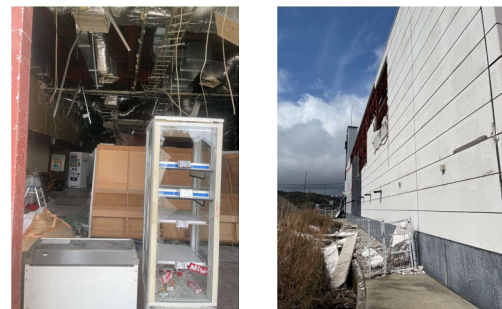


(a) Brace buckling

(b) Column base damage

Fig. 3-5 (Survey Area 2) 4F Steel Factory

(Photos by Kurata)



(a) Ceiling failure

(b) Cladding failure

Fig. 3-6 (Survey Area 3) Amusement facility

(Photos by Kurata)

3.2 輪島市内の現地調査

輪島市内の地盤特性(VS30)と調査範囲をFig. 3-3(a)に示す．調査にあたって，StEERから提供を受けた被害調査アプリを利用し，建物の位置と被害，メディア情報を収集した．Fig. 3-3(b)は，調査範囲1(図中Survey Area 1)で1月13日に記録したK-Net輪島の観測点(WJ01)から目抜き通りまで25棟の位置，を示している．また同範囲で3月24日にさらに17棟を外観調査した．うちRC造が9棟あり，鋼構造が5棟である．木造が大半を占めるなか，低層のRC造が散見されるが鋼構造は少ない．RC造には倒壊した7階建てのビルも含まれるが，中低層では大きな被害はなかった．ただし，Fig. 3-4(a)に示すように，RC造で躯体の損傷が軽微でも周辺地盤の変状や建物の沈下

激しい例が多かった。Fig. 3-4(b)に鋼構造の被害例を示す。木下地の外壁や柱のラスモルタルカバーが落下し、一部の柱や梁が剥き出しになっている。2階梁の端部や1層柱の柱頭が塑性化しており、下層部の層間変形が大きかったことがうかがえる。剥き出しになったH形柱の表面は腐食が激しく、ラスモルタルカバーが落下する原因にもなっており、沿岸部では特に注意が必要である。東日本大震災でも多数の報告があったが、下地に木材が利用されている点も特徴的である。他に、古い年代の強度の不足している建物で倒壊が2件あった。1層柱の断面サイズが小さい建物で、アンカーボルトの軸部破断、2階梁端部破断を伴う1層崩壊していた。

調査範囲2で外観調査した14棟では、RC造が1棟、鋼構造が6棟であった。この地域は木材の加工業者の作業所や木材倉庫が多く、これらの建物に鋼構造が採用されていた。耐震補強などの履歴は不明であるが、国土地理院が公開する地図・空中写真閲覧サービスを使用して確認したところ、作業所や倉庫の多くが1975年以前に建設されていた。Fig. 3-5に示す4階建ての倉庫では全層に渡ってブレースが座屈し、立ち上がり有する柱脚も側方破壊を呈していた。低層の鋼構造では外観に被害は見られなかった。地震動のスペクトル特性で予想されたように、やや固有周期が長い建物に被害が大きかった。

調査範囲3で外観調査した28棟では、RC造が1棟、鋼構造が8棟であった。この地域の鋼構造は店舗・遊戯施設とその駐車場、消防署である。Fig. 3-6に示す比較的大空間を有する遊戯施設では、吊り天井および外壁の被害が著しく、近くの3階建て店舗でも天井の被害が見られた。一方で、平屋の新しい年代の建物や駐車場には被害は見られなかった。

本稿では割愛するが、珠洲市、穴水町、七尾市の一部の地域でも、やや固有周期の長い鋼構造に被害が大きく、外壁や天井の落下が確認された。RC造では地盤変状の影響や不同沈下の被害が多くみられた。

3.3 文教施設

1995年に制定された「建築物の耐震改修の促進に関する告示」や補助金の助成により、文教施設の大半は1981年に導入された新耐震設計に適合した建物への建替えや耐震改修が施されている。2023年に実施された文部科学省の調査（文部科学省，2023）によれば、石川県内の文教施設の耐震化率は100%である。

Fig. 3-7(a)に示すように、多くのRC造校舎に鉄骨ブレースによる耐震補強が確認された。倒壊に至るような被害はないが、ディテールの不備によりせん断破壊を受けた柱やエキスパンション・ジョイントの

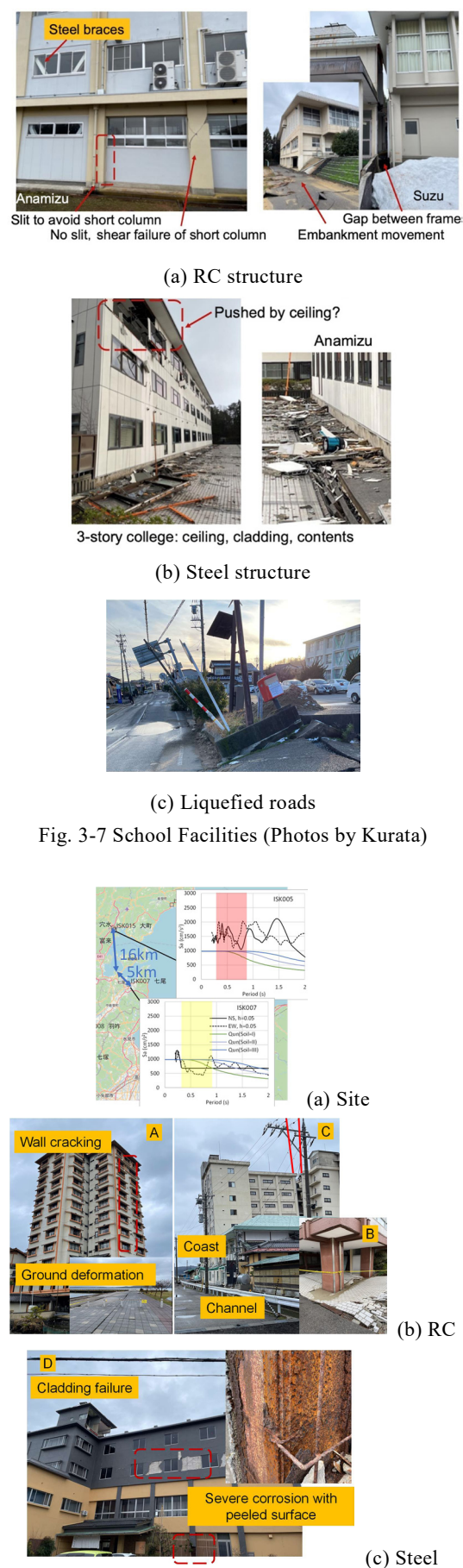


Fig. 3-8 Hotel facilities (Photos by Kurata)

損傷があった。他方、基礎周辺の埋立変形と盛土の破壊が深刻であり、建物間に隙間が生じていた。

鉄骨造の校舎は少数であった。外観で目立った被害は、Fig. 3-7(b)に示すように外壁に使用されるALC (Autoclaved Lightweight Concrete) パネルや押出成形セメントパネルの亀裂や落下であった。石川県内の文教施設の非構造部材の耐震化率は70%程度にとどまっている（文部科学省，2023）。2011年の東日本大震災後、全国的な非構造部材の耐震化キャンペーンが開始されたが、非構造部材の耐震欠陥は依然として残っている。

文教施設の機能性維持においては、敷地内や施設周辺の通学路での安全確保が重要となる。能登北部の文教施設では、通学路が崩落している箇所があり、また敷地内の地盤流動により運動場が著しく被害を受けた例もあった。Fig. 3-7(c)は金沢市近郊の内灘町に見られた液状化被害である。校舎の被害は限定的であるが、通学路となる周辺道路の液状化が著しい。また液状化に伴い、文教施設の機能維持に必要なライフラインへの被害も顕著である。

3.4 規模の大きい建物（旅館施設）

七尾市郊外の温泉街には、温泉と海岸線の素晴らしい景色を見下ろす中高層の旅館施設が数多くある。Fig. 3-8(a)に立地を示すが、地震動のレベルとしては、2次設計レベルをやや超える程度と推察される。旅館施設は不特定多数が使用するため、耐震診断は義務化されている。

RC造施設の被害状況をFig. 3-8(b)に示す。地盤が軟弱であるため、古いRC建物の多くは不同沈下を起こして傾いていた。敷地内や周辺地盤の液状化も著しい。また、雑壁に亀裂が見られた建物もあったが、柱や梁に大きな損傷は見られなかった。

鋼構造の被害状況をFig. 3-8(c)に示す。ラスモルタルが剥がれた柱に重度の腐食が見られた。鋼柱の表面に5mm以上の剥離が確認でき、海岸沿い特有の環境が原因と考えられる。また外壁の落下は加速度応答が大きくなる上層階で多く見られた。外壁の定着部が腐食している可能性も高く、落下していない箇所の調査も緊急に実施する必要がある。

3.5 庁舎・避難所

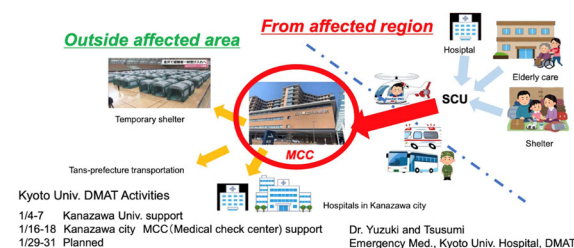
現地調査した鉄筋コンクリート造の庁舎や福祉施設は全て耐震化されていた。構造部材の損傷は限定的であったが、地盤変状による被害が大きい施設が多くあった。べた基礎を有するRC造建物では、上部構造の耐力が大きかったためか、基礎と地盤の間での滑動が確認できた。一般にコンクリートと地盤の間の摩擦係数は0.7程度であり（日本道路協会，2012）、0.7G（Gは重力加速度）以上の水平地震力が作用したことになる。福祉施設は登録され避難所として利用されていたが、天井や非構造部材の被害が大きく、利用範囲を限定して利用していた。また併設する体育館では、鉄骨トラス構造の屋根をRC柱や壁で支持する構造が多いが、それらの支持部に損傷があった。天井面積が200m²を超える場合は特定天井に分類され、耐震改修が義務付けられている。改修後の軽量の天井パネルがパネルを固定する鋼製金網と吊り材のブレースとともに落下している事例も確認された。

3.6 医療施設

厚生労働省の耐震化率に関する調査結果をTable 3-1に示す。県内の耐震化率は81.3%で全国平均の79.5%よりもやや高い。耐震診断を実施していない施



(a) Damage to facilities



(b) Kyoto University DMAT activities

(Credit: Yuzuki and Tsusumi)

Fig. 3-9 Medical Facility

Table 3-1 Earthquake Resistance Rate of Hospital Facilities

Prefecture	Surveyed facility #	EQ-resistance in all buildings	Base-isolated	EQ-resistance in some buildings	No EQ-resistance	No EQ diagnosis	Is values below 0.3	EQ-resistance rate
Ishikawa	91	74	12	4	1	12	3	81.3%
Japan	8085	6425	639	572	110	978	197	79.5%

設も12%残っている。能登北部・中部の施設は、すべて耐震化されており、構造部材への被害は限定的であった。また県内の免震化率は13%で、能登中部地域に免震構造の建物を有する施設が2病院ある。これらの施設では、能登北部地域からの患者を受け入れるなど、地域の医療継続に貢献した。

しかしながら、総じて医療施設は地震の影響を強く受けた。特に配管や給湯設備からの漏水など非構造部材の被害により、能登北部の全ての施設と能登中部の一部の施設では機能をほぼ喪失する状態となった。強い揺れにより、建物内では医療機器や什器が大きく移動し、水漏れによる水損も相まって大きな混乱が生じた。また、建物周辺の地盤変状が激しかったため、地下に埋設された貯蔵タンクや、玄関アプローチが損傷し、下水管が大きく損傷したため [Fig. 3-9 (a)]。下水管や浄化設備の応急復旧には数週間以上を有した事例もあり、給水があっても施設内では水が使えず、衛生環境が著しく悪化した。

地域の断水、停電、施設・設備の一部損傷（井戸水による継続）により、透析サービスは一時的に中断した。施設の機能低下だけでなく、被災した医療従事者が参集できない事情もあり、入院患者、重傷患者、発熱患者は地域外に搬送された。急性期治療の必要性は地震発生から数週間後には減少したが、被災地でのスタッフの疲労やインフラ被害による地域外への搬送の必要性から、災害医療 支援チーム (DMAT) は2ヶ月以上活動を継続した [Fig. 3-9 (b)]。通常、DMATは1週間程度の急性期における活動を想定しており、今回の半島災害の特異性を示している。

3.7. 非木造建物被害のまとめ

非木造建物では、大破や倒壊に至る事例は限られていた。能登北部地域では、設計地震動レベルを超えており、特に弾性固有周期がやや長い鋼構造で、外壁や天井の被害が顕著であり、一部で柱は梁などの構造部材にも損傷が見られた。鋼構造では、沿岸部特有の環境に起因するとみられる著しい腐食が、むき出しになった構造部材に多くみられた。外壁の定着部の腐食も確認されており、落下していない箇所点検方法に今後の技術革新が望まれる。RC造では、上部構造部材への被害は小さかったが、地盤変状が顕著で、不同沈下も多くみられた。

文教施設や庁舎、医療施設などは全国的な調査でも耐震化率の向上が認められており、構造上の被害は限定的であった。しかし、非構造部材や設備の被害、軟弱地盤における地盤変状の影響、などは非常に影響が大きかった。特に給排水に関連するライフライン設備の被害により、教育・医療サービスは著しく低下した。また大規模災害時にはサービスを提

供する側の従事者が被災して十分に参集できないことも改めて課題となった。今後の対策の必要性が浮き彫りになった。

4. 既往中小地震から求めた強震観測点のサイト増幅特性

本章では、既往の中小地震記録から求めた被災地域の強震観測点における増幅特性について、我々が地震以前に把握していた分離解析結果とその被害との関係について述べる。

4.1 震源域の強震観測点

2024年能登半島地震の震源断層は能登半島北部の沿岸部に沿って1km~5km沖合を上端とする高角の逆断層であり、よって能登半島北部全域が震源域であったと言える。Fig. 4-1には能登半島北部における強震観測点の分布を示す。赤い○は気象庁 (JMA) 震度計観測点、黄色のピンは防災科学技術研究所のK-NET、赤色のピンは同じくKiK-netを表す。

これらの観測点のうち、特に建物被害の甚大であった地区の観測点としては珠洲・輪島・穴水の3地区が重要であり、ここではそれぞれの地点に存在している2地点（珠洲はISK002とJMA CCA、輪島はJMA E10とISK003、穴水はISK005とISK015）を比較対象として分析する。

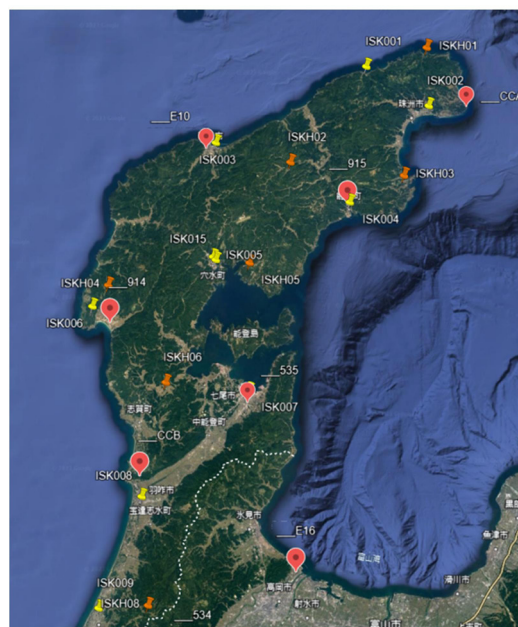


Fig. 4-1 Strong motion observation stations in Noto Peninsula. Red circles denote the JMA seismic intensity meters, yellow pins the K-NET stations of NIED, and red pins the KiK-net stations of NIED.

4.2 スペクトル分離解析

観測強震波形が多数得られた時、そのフーリエ・スペクトルを震源項・伝播経路項・サイト項に分離する方法を一般化スペクトル分離手法(Generalized Spectrum Inversion Technique, GIT)と呼び、Andrew (1981)の提案以降多くの検討結果が報告されている。以下詳細は仲野ら (2019) を参照されたい。ここではその概要のみを記述する。

地表面で観測される地震動は震源、伝播、サイトの主に3つの特性で構成され、それぞれは分離可能なものと仮定する。そうすると、周波数を f 、地震波形のフーリエ・スペクトルを $F(f)$ 、震源特性を $S(f)$ 、伝播特性を $P(f)$ 、サイト特性を $G(f)$ とするとそれらは

$$F(f)=S(f) \cdot P(f) \cdot G(f) \quad (1)$$

で表される。仲野ら (2019) では式(1)の伝播特性について地域依存と地震タイプ依存を仮定し、式(2)および式(3)のようにモデル化している。

$$\log_{10} F_{ij} = \log_{10} S_i - n_{l(i)} \log_{10} X_{ij} + \sum_{k=1}^m b_{l(i)k} X_{ijk} + \log_{10} G_j \quad (2)$$

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^m X_{ijk} \quad (3)$$

ここで S_i は i 番目の地震の震源特性、 G_j は j 地点のサイト増幅特性である。また n は幾何減衰を表しており、理論的には実体波で1.0、表面波では0.5となる。仲野ら (2019) では100km以下では1.0とし、100km以上では震源距離を20 km毎にグループ分けした上で n を評価している。 b は内部減衰および散乱減衰を表す項であるが、地域性を考慮し第四紀の火山の分布や糸魚川―静岡構造線等で複数の地域（その番号が k ($k=1, \dots, m$)で m は6地域)に分割した。また、地震タイプをType B (plate-Boundary earthquakes; プレート境界地震), Type I (Intra-plate earthquakes; プレート内地震), Type C (Crustal earthquakes; 地殻内地震)の3つに分け、 $l(i)$ は i 番目の地震のタイプを表している。なお、減衰項に乘じられている X_{ij} は震源距離であり、 X_{ijk} はそのうち領域 k を通る見かけの距離である。

仲野ら (2019) の分離解析では、まず点震源からのS波の生成と伝播を検討対象として、強震観測波形上でS波の到達から5 ~ 15 秒の短い区間を対象に分離解析を行い、その結果得られたS波部の基盤スペクトル ($S(f) \cdot P(f)$) を基準として、その後後続波群の寄与も含んだ観測波形全体を用いたサイト特性評価を実施して全波サイト特性を得ている。式(2)を解くためには拘束条件が必要なので、YMGH01 (防府)

の観測スペクトルから風化層の増幅特性をはぎ取った地震基盤スペクトルを基準対象としている。

解析対象データは、仲野・川瀬(2021)で用いられている1988年8月から2016年12月までのJMA87型、JMA95型、K-NETおよびKiK-net、CEORKAの強震記録である。当該期間・機関の記録に対して、原則として気象庁マグニチュード $M_{JMA} \geq 4.5$ 、震源深さ ≤ 60 km のデータを選定した。データ選定条件については震源距離 ≤ 200 km, 最小加速度 $\geq 0.2 \text{ cm/s}^2$, 最大加速度 $\leq 200 \text{ cm/s}^2$, 同一地震トリガー地点数 ≥ 3 の条件に合う加速度時刻歴波形を用いている (ただし CEORKA については数値微分で加速度時刻歴波形に変換)。解析に当たってはまず日本付近のS波の走時表を用いて、S波初動以降をマグニチュードに応じた時間区間 ($M_{JMA} \leq 6$ で5秒, $6 < M_{JMA} \leq 7$ で10秒, $7 < M_{JMA}$ で15秒) で切り出し、前後に

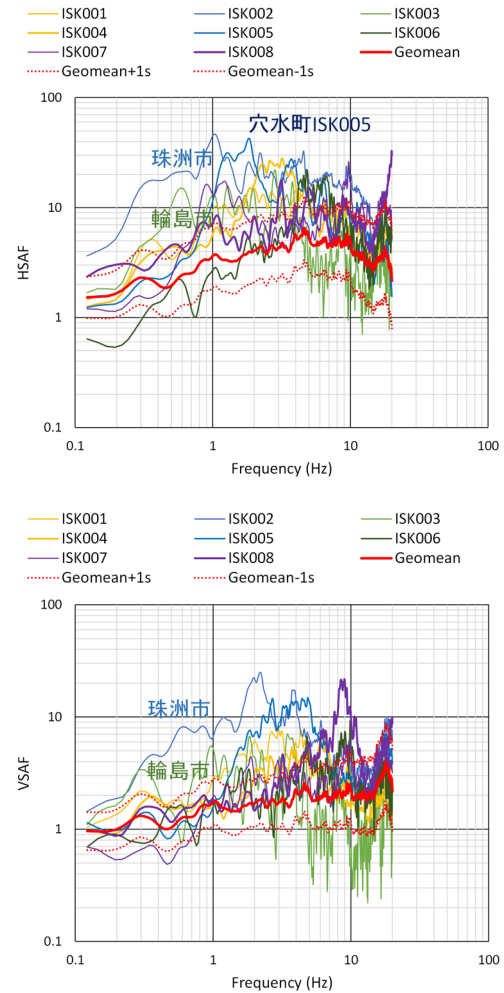


Fig. 4-2 Separated site amplification factors for horizontal (upper panel) and vertical (lower panel) components (sHSAF and sVSFAF) at eight K-NET stations in the Noto Peninsula. Red solid and dotted lines are geometrical mean and mean ± 1 standard deviation for all the K-NET stations in

2 秒のコサインテーパをつけ S 波部データとした。

4.3 能登半島の強震観測点のサイト増幅特性 (1) 全K-NET観測点のサイト特性

Fig. 4-2にはスペクトル分離解析で得られたS波部のサイト増幅特性を能登半島北部の全観測点ISK001~ISK008について示す。横軸は周波数 f である。この図から被害の顕著だった珠洲市(ISK002), 輪島市(ISK003), 穴水町(ISK005)のサイト増幅特性が顕著に大きいことがわかる。全国平均を赤実線で示したが、水平動の1Hzで約4倍, 5Hzで約6倍, 上下動の1Hzで約2倍, 5Hzで約3倍であり、能登半島の大半の地点ではこの平均レベルを大きく上回っている。特に珠洲市ISK002のサイト増幅率は大きく、水平動では1Hzでのピーク値が45倍, 上下動では2Hzのピーク値が25倍となっており、通常の硬質地盤では考えられないレベルの増幅率となっている。なおこのS波部のサイト増幅特性はS波速度3.45km/s相当の地震基盤に対する絶対的増幅率なので、通常用いられるようなS波速度350m/sや600m/sの工学的基盤からの相対的増幅率と比較すると2~3倍以上大きめの値となっていることに注意されたい。

(2) 珠洲市内の2強震観測点のサイト増幅特性

Fig. 4-3には珠洲市内のK-NET観測点ISK002とその西側3km地点の海岸段丘上に設置されていた気象庁震度計CCAの水平動サイト増幅特性を比較して示す。図にはS波部のサイト増幅特性sHSAFを黒実線で、全波のサイト増幅特性wHSAFを赤実線で、個々の地震の全波サイト増幅特性を灰色線で示している。赤点線は全波サイト特性の平均±1標準偏差である。この図から、被害集中地区から遠く離れたCCA地点では最大でも増幅率は6倍程度で収まっており、特に大きな増幅は生じていないのに対して、被害集中地区のほぼ中心に位置しているISK002地点では全波サイト特性のピーク増幅率は1Hzにおいて約80倍に達し、しかも1Hz以下の広い振動数範囲でS波サイト増幅率を上回る性状を示していることがわかる。この80倍というピーク増幅率を有するwHSAFは全強震観測地点の中でも上位1%に入るレベルの増幅率であり、通常ならば関東平野や大阪平野などの大規模堆積盆地の沿岸域の軟弱地盤サイトなどでしか観測されないレベルである。珠洲市のISK002サイトは背後に丘陵地の迫る狭小な平野部の海岸寄りサイトであって、そうした大規模堆積盆地に位置するサイトではない。防災科学技術研究所(2019)がweb上で公表しているボーリングデータによれば、ISK002の直下には少なくとも20m以上の沖積層が存在していることが明らかにされているが(その沖積層の10m~20mのS波速

度 V_s は130m/s)、その下には良好な洪積層および堆積岩からなる工学的基盤層が存在しているものと推察される。仮にこの工学的基盤の V_s を800m/sと仮定しても、そのインピーダンスコントラストは10を超えることはない。よって、この大きなサイト増幅特性が何故ISK002地点で生じているのかについては今後探求すべき重要課題であるが、その増幅率に鑑みてそれが珠洲市内での甚大な被害の原因であったことは間違いない。

(3) 輪島市内の2強震観測点のサイト増幅特性

Fig. 4-4には輪島市内のK-NET観測点ISK003とその西側1km地点の被災地区の南端に設置されていた気象庁震度計E10の水平動サイト増幅特性sHSAF・wHSAFを比較して示す。図の意味はFig.4-3と同じである。

JMA E10の水平動サイト増幅特性は驚くほど珠洲市内のISK002のサイト増幅特性と類似している。そのピーク振動数は約1Hzであり、sHSAFのピーク値は約40, wHSAFのピーク値は約100倍に達している。ISK002と異なっているのは、ISK002ではwHSAFとsHSAFの違いが0.5Hz~1Hzの周波数区間で他の区間に比して大きめとなっているのに対して、E10では0.12Hz~2Hzまでほぼ2倍で平行になっていることである。このE10のサイト増幅特性に比べてISK003のサイト増幅特性はsHSAFのピーク値が0.8Hzで約10, wHSAFのピーク値が同じく0.8Hzで約20となっており、2地点の違いは珠洲市内の場合ほどではないが、増幅率には大きな違いがあることがわかる。またE10の増幅特性の特徴として、10Hz以上の高振動数の振幅が小さいことが明らかであるが、これは地震基盤から上の堆積層の層厚が比較的均質でかつ厚いことを示唆している(堆積層が厚いと基盤から地表面まで地震波が上昇する間に堆積層の材料減衰と散乱減衰の効果で高振動数の波動が減少するから)。ISK003にはそうした高振動数域の顕著な減少効果は見られない。

ISK003における防災科研の公表しているボーリングデータからはISK003は岩盤上(堆積岩)に直接設置されていることになっており、4mの表層風化層の下に直ちに $V_s=500\text{m/s}$ を超える層が出現している。その堆積岩の層厚がそれほど厚くなければピーク振動数はもっと高くてもよいはずだが、それがE10と同様に1Hz付近であることを考えると、この地点も大局的にはE10と同じような堆積岩の盆地構造の内部に位置しているものと推定される。なおFig. 4-4でISK003のサイト名がISK103と表記されているのはこのサイトは早期に移設され、我々は専ら移設後の観測地震動を用いて分離解析を実施したためである。

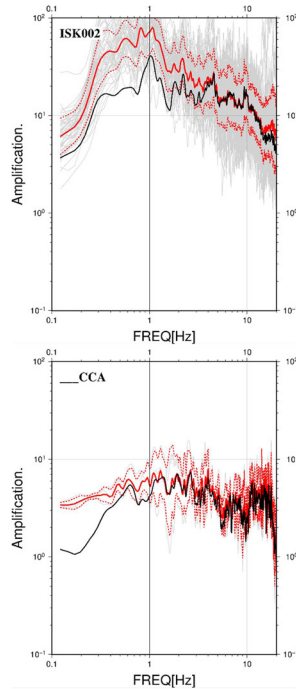


Fig. 4-3 Map of two stations in Suzu City (a red triangle is K-NET ISK002 and yellow one JMA CCA) and site amplification factors for the horizontal component at ISK002 and JMA CCA. Red solid and dotted lines are the geometrical means and means ± 1 standard deviations for all the observed events for the whole duration (wHSAF) drawn in gray, while black solid lines denote the geometrical means of sHSAF.

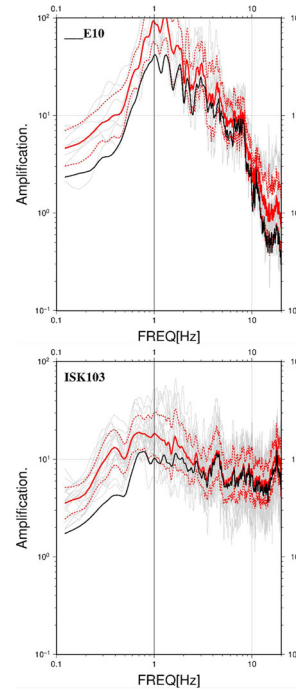


Fig. 4-4 Map of two stations in Wajima City (a red triangle is JMA E10 and yellow one K-NET ISK003) and site amplification factors for the horizontal component at JMA E10 and ISK003. Red solid and dotted lines are the geometrical means and means ± 1 standard deviations for all the observed events for the whole duration (wHSAF) drawn in gray, while black solid lines denote the geometrical means of sHSAF.

(4) 穴水町内の2強震観測点のサイト増幅特性

Fig. 4-5には穴水町内の被災地区の中心地に設置されていたK-NET観測点ISK005とその南東1km地点の周辺地域における被害の少なかったK-NET観測点ISK015の水平動サイト増幅特性sHSAF・wHSAFを比較して示す。図の意味はFig. 4-3・Fig. 4-4と同じである。

穴水市内の被災地区の中心部に設置されていたISK005のサイト増幅特性は、1Hz～2HzにおいてsHSAFで約40倍、wHSAFで約70倍に達しており、珠洲市や輪島市の被災地中心部でのサイト増幅率とほぼ同等の増幅率となっている。一方、1kmほどしか

離れていないISK015地点では1Hz付近の増幅率は10倍以下で、ピーク振動数は10Hzとなっており、そのピーク増幅率は約20倍となっている。このように穴水町内の2観測点間でもサイト増幅特性と被害レベルとの間にはよい相関がみられる。

ISK005のサイト特性の特徴として、基本ピーク振動数が最大のピーク値を示した後、より高い振動数域において繰り返し明瞭なピークが生じていることが指摘できる。これはインピーダンスコントラストの高い層構造が平行成層として存在しており、その一次元的な増幅を呈しているという可能性を強く示唆している。

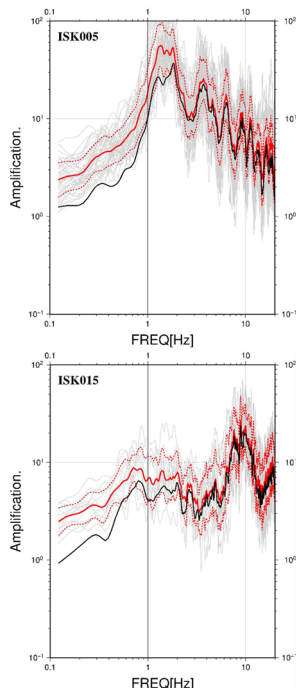
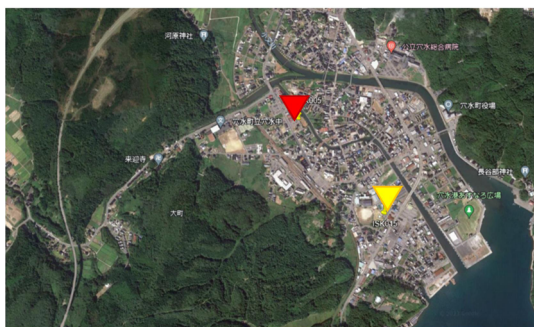


Fig. 4-5 Map of two stations in Wajima City (a red triangle is K-NET ISK005 and yellow one K-NET ISK015) and site amplification factors for the horizontal component at ISK005 and ISK015. Red solid and dotted lines are the geometrical means and means ± 1 standard deviations for all the observed events for the whole duration (wHSAF) drawn in gray, while black solid lines denote the geometrical means of sHSAF.

ISK015のボーリングデータからはこの地点の6m以深には堆積岩層が存在しており、そのS波速度 V_s は600m/s以上となっていることがわかる。表層の平均S波速度を240m/sとすれば6mの層厚は10Hzの卓越振動数に対応し、Fig. 4-5のピーク振動数は風化層を含む表層構造のS波増幅で説明できることがわかる。

一方ISK005のボーリングデータは17mで堆積岩層が出現しているが、そのS波速度は290m/sとされている。17m以浅のS波速度は60m/sから130m/sと非常に低く、1/4波長則からは2Hz以下の卓越振動数が示唆されるが、非常に大きなピーク増幅率から見て、こ

の表層だけでFig. 4-5のサイト増幅特性が説明できるとは考えにくい。なお穴水町の地盤特性と観測地震動の関係については、2007年能登半島沖地震の際のISK005における大きな観測速度値に着目した地下構造調査が浅野ら(2009)によって実施されているので参照されたい。

4.5 サイト増幅特性評価のまとめ

以上見てきたように、能登半島の震源域の強震観測点では、多数の中小地震による強震観測記録から求められた平均的サイト増幅特性が極めて特異的に、1Hzを中心とする「やや短周期」域において大きな増幅特性を呈していることを明らかにした。これらの増幅特性は、この地域が海岸や山間部の盆地に位置し、大規模堆積盆地の内部の観測点ではないことに鑑みると、この地域特有の工学的基盤よりも深く地震基盤よりも浅い堆積岩構造に起因する現象である可能性が高く、その原因と考えられる地下構造の同定を含め、今後の研究が待たれる。なお、ここで示したスペクトル分離解析によるサイト増幅特性はすべから線形のサイト増幅特性であり、今回の本震時の各地点でのサイト増幅特性とは必ずしも同一とは言えないことに注意されたい。

5. おわりに

本報告では、能登半島地震による建物被害と強震動特性との関係に着目して、主として建築構造物を専門とする研究者からなる3つのチームで独自に調査分析した結果を取りまとめた。第2章では発生した地震動と建物被害の対応について、第3章では非木造建物被害と機能維持性について、そして、第4章では被害の甚大だった市町村における強震観測地点での既往中小地震から求めたサイト増幅特性について報告した。本報告においては、各章の調査分析は各チームで独立に行われたもので、相互の整合性について十分な検討はされていない。その点については、あくまで速報であるとして読者の理解を求めたい。

謝 辞

2章の検討において、防災科学技術研究所、気象庁、石川県、鉄道総合技術研究所に強震記録を提供いただきました。調査に際し、自然災害研究協議会の支援を受けました。観測点位置図の作成に地球地図日本のデータを使用しました。建築年代の判定に宇都宮大学建築構造研究室の大学院生に協力いただきました。

3章の検討では気象庁、防災科学技術研究所によっ

て公開されている強震記録，国土地理院の空中写真記録を使用させていただきました．現地調査は，地震防災研究部門の後藤浩之氏，浅野公之氏，山田真澄氏，名古屋大学の長江拓也氏，東京大学の浅井竜也氏と，それぞれ共同で実施しました．また，令和5年度一般共同研究（課題番号：2023GC-08）および科研費（課題番号：JP21H04598）の助成をいただきました．さらに，地震動の分析には京都大学の井上瑠偉氏と入江冴氏に協力していただきました．ここに記して感謝します．

4章の検討では気象庁，防災科学技術研究所，関西地震観測研究協議会によって公開されている強震記録を使用させて頂きました．一部の作図にはGoogle Mapの衛星画像およびGMT(Wessel and Smith, 1998)を利用しました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

- Andrews, D.J. (1981): Separation of source and propagation spectra of seven Mammoth Lakes aftershocks, Proc. of Workshop 16, Dynamic Characteristics of Fault, USGS, 1981.
- 浅野公之・岩田知孝・岩城麻子・栗山雅之・鈴木亘 (2009)：地震および微動観測による石川県鳳珠郡穴水町における地盤震動特性，地震，第2輯，第62巻，pp.121-135.
- 京都市（2003），京都市第3次被害想定一報告書一，2003.10.
- 倉田真宏（2024）：能登半島地震の被害調査（鉄骨造），建築防災，日本建築防災協会，557，pp. 34-37.
- Kurata, M., M. Yamada, K. Ueda, C. Ochiai, G. Nakano, G. Zhou, K. Mosalam, T. Kijewski-Correa, I. Robertson, D. Prevatt, D. Roueche, S. Admin (2024). "StEER: Noto Peninsula Earthquake Preliminary Virtual Reconnaissance Report", in StEER - 01 Jan 2024 Noto Peninsula Earthquake. DesignSafe-CI. <https://doi.org/10.17603/ds2-g8st-r898>.
- 厚生労働省：病院の耐震改修状況調査の結果，2023，<https://www.mhlw.go.jp/content/10800000/001155408.pdf>.
- 斎藤幸雄（2000）：中低層鉄骨造建築物の固有周期と動特性，構造工学論文集B，2000.3.
- 国土交通省：令和5年度 住宅経済関連データ，(https://www.mlit.go.jp/statistics/details/t-jutaku-2_tk_000002.html, 2024/3/29閲覧)
- 国土地理院，地理院地図（電子国土Web）(<https://maps.gsi.go.jp/>, 2024/6/27閲覧)
- 境有紀，津野靖士，工藤一喜，壁谷澤寿海（2003），改正建築基準法の解放工学的基盤波を想定した表層地盤増幅特性の簡便評価法，日本建築学会構造系論文集，第565号，pp.73-78.
- 境有紀，神野達夫，額瀨一起（2004），震度の高低によって地震動の周期帯を変化させた震度算定法の提案，日本建築学会構造系論文集，第585号，pp.71-76.
- 境有紀，野尻真介，熊本匠，田中佑典（2008），2007年能登半島地震における強震観測点周辺の被害状況と地震動との対応性，日本地震工学会論文集，第8巻，第3号，pp.79-106.
- 境有紀（2013），2011年東北地方太平洋沖地震で発生した地震動と建物被害の対応性ー建物の大きな被害をより正確に推定する地震動強さ指標ー，日本建築学会構造系論文集，第78巻，第683号，pp.35-40.
- 境有紀，中澤駿佑，亀井健司（2023），建物被害から見た関東平野で発生する地震動の性質，第51回地盤震動シンポジウム，pp.60-68.
- 汐満将史，中澤駿佑，境有紀，松井貴宏，村嶋美波，江口直希（2024），2021年福島県沖の地震における強震観測点周辺の状況と発生した地震動との対応性，日本地震工学会論文集，第24巻，第1号，pp.148-177.
- 先名重樹，翠川三郎（2009），地形・地盤分類に基づく地震動のスペクトル増幅率の推定，日本地震工学会論文集，第9巻，第4号，pp.11-25.
- 戸田和徳，境有紀（2020），木造建物の建築年を外観写真から判定する方法，日本地震工学会論文集，Vol.20, No.4, pp.56-65.
- 防災科学技術研究所，National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience（2019）：K-NET and KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi: 10.17598/NIED.0004.
- 文部科学省（2023）：公立学校施設の耐震改修状況フォローアップ調査の結果について，2023.5 https://www.mext.go.jp/content/20230808-mxt_sisetujo-000031058_01.pdf.
- 中川貴文，佐藤弘美，多幾山法子，腰原幹雄，林康裕（2013），2007年能登半島地震における木造住宅の被害の再現，日本建築学会構造系論文集，第78巻，第688号.
- 仲野健一・川瀬博・松島信一（2019）：1988年から2016年までに観測された強震記録から分離したサイト特性に関する研究，日本地震工学会論文集，Vol. 19, No. 2, pp. 282-300, doi: 10.5610/jaee.19.2_1.
- 仲野健一・川瀬博（2021）：経験的に得られたフリーエ振幅・経時特性モデルに基づく統計的グリーン関数を用いた強震動予測手法の提案と適用性の検証，日本地震工学会論文集，第21巻，第2号，

- pp.130-153.
- 日本道路協会（2012）道路土工-擁壁工指針
- NIED (2019), NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi:10.17598/NIED.0004.
- 林佑樹, 飯塚裕暁, 汐満将史, 小林雄, 境有紀 (2013), 2011年東北地方太平洋沖地震の宮城県における強震観測点周辺の状況と発生した地震動との対応性, 日本地震工学会論文集, 第13巻, 第5号, pp.62-101.
- 諸井孝文, 武村雅之 (1999), 1995年兵庫県南部地震による気象庁震度と住家全壊率の関係, 地震, 第2輯, 第52巻, pp.11-24.
- Wessel, P. and Smith, H.F.W. (1998): New, improved version of Generic Mapping Tools released, Eos Trans. AGU, Vol. 79, No. 47, p. 579, 1998.

（論文受理日：2024年8月31日）