

□ 能登半島地震の地震動と建物被害

東北大学 災害科学国際研究所 准教授 大野 晋

1. はじめに

2024年1月1日に石川県北部で発生した令和6年能登半島地震は、マグニチュード7.6の地殻上部で発生した浅発地震であり、2024年12月時点で災害関連死を含む死者489名、住家被害は全半壊合わせて29,670棟に達する甚大な被害をもたらした¹⁾。石川県での震度7を含む広い範囲で大きな揺れを観測しているが、ここではこれまでに報告された各種調査や既往研究に基づき、観測された地震動の性質、特に地盤増幅の影響について解説するとともに、建物被害との関連についても述べる。

2. 広域震度分布と地震動の概要

図1は能登半島地震の断層モデルの地表投影

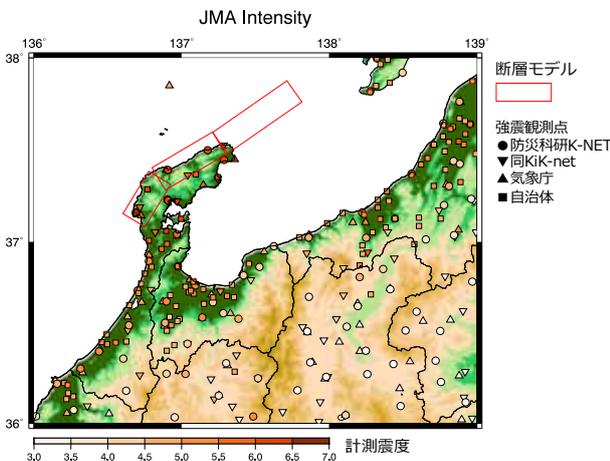


図1 能登半島地震の震源域と計測震度分布

面²⁾と震度分布を示したものである。東側の断層面は海域にあるが、西側2面は能登半島の北部を覆う形で広く分布している。断層の破壊過程のレビュー³⁾によると、破壊は中央の断層面の東端近く（珠洲市直下）から始まり、それぞれ東側と西側に伝播していること、断層の浅い位置で大きく滑っていることが報告されている。

各地点の計測震度の分布からは、震度6強以上の大きな揺れが震源域である能登半島北部に集中していることがわかる。また図1の背景は標高（緑が低地）であるが、震源から離れるとともに震度が小さくなる一方、石川県南部や新潟県では、低地で周辺よりも揺れが大きい傾向が確認できる。これは低地では山地よりも柔らかい地盤が多く、軟弱地盤による増幅があるためである。

図2は日本の内陸浅発地震で甚大な被害があった場所での観測記録について、左側に地震動の速度最大値と加速度最大値の関係を、右側に応答スペクトル図を示したものである。加速度最大値は短周期の揺れの、速度最大値は長周期の揺れの大きさの尺度として用いられており（計測震度は両者の中間的な性質を持つ）、大被害を受けた場所では両方が大きい値を示すことが指摘されている⁴⁾。兵庫県南部地震などの過去の被害地震と比較すると、複数の場所で同等の揺れであったことが確認できる。

一方、右側の応答スペクトルは建物を一質点系（1個の質量を1個の減衰つきバネで支える構造

で、揺れやすい固有の周期をもつ)に置き換えた時の応答最大値を固有周期に対して描いたものであるが、周期ごとの揺れの大きさの尺度として用いられる。日本の中低層建物の多くは、大地震で揺れる周期(等価固有周期)が1-2秒程度になり、被害が甚大になる場合はこの周期帯域で振幅が大きいことが指摘されている⁵⁾。図の過去の内陸地震の大被災域の記録でもその傾向が確認できる。能登半島地震で被害が大きかった場所の観測記録でも同様に、周期1-3秒程度で振幅が大きいことが確認できる。

3. 能登半島北部で観測された地震動と表層地盤

図3は能登半島北部で観測された強震動の速度波形である。前述の通り珠洲市直下から破壊が始まっているので、西側に行くにつれて初動が遅れて到達している。また、近接した観測点でも揺れの大きさに相違があることがわかる。地質図を併せて示しているが、図2で示した周期1-2秒振幅が大きい地点はいずれも完新世のいわゆる柔らかい地盤に属している。

各波形には震度階も示したが、志賀町 ISK006、

門前町67016、穴水町 ISK005の3地点で震度7を観測している。門前町と穴水町は速度波形の振幅も大きいものの、志賀町 ISK006では周囲の観測点と同等であり、震度7を観測した他2地点と異なる傾向を示している。

図4は図3の観測波形の応答スペクトルを市町別に重ね書きしたものである。速度波形同様、近接した場所でも周期特性が大きく異なることがわかる。また、図2右で示した通り、被害が大きかった輪島市門前町、同鳳至町47600、穴水町 ISK005、珠洲市正院町 ISK002は他の地点に比べて周期1-3秒の振幅が特に大きいことが確認できる。一方、震度7を観測した地点の一つである志賀町 ISK006では周期0.2-0.3秒程度が卓越しており、周期1-2秒の振幅は周辺よりもむしろ小さく、周辺では屋根瓦の被害はあるが倒壊建物は確認されていない。

図5は輪島市内の3観測点について、地質図上の位置、表層のS波速度構造⁽⁶⁾⁷⁾⁸⁾、観測点および周辺被害写真、2007年と2023年の地震の応答スペクトルを示したものである。河井町(ISK003)は新第三紀堆積岩(丘陵地のへり)に位置しており、鳳至町(47600)はISK003から西側に1kmほど離れた軟弱地盤上にある。門前町も軟弱地盤上に位

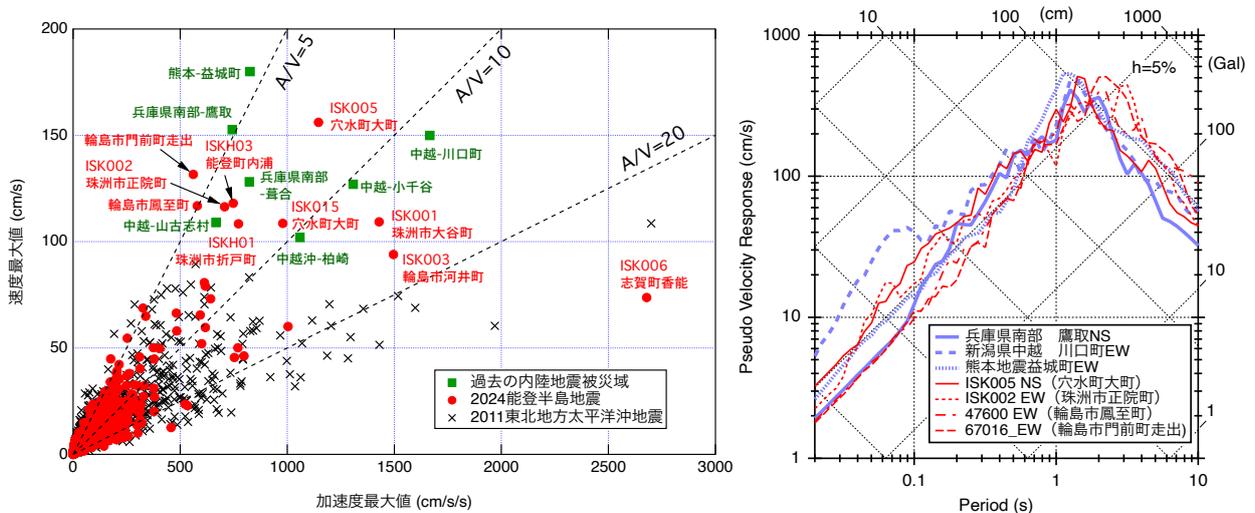


図2 甚大な被災域における過去の内陸地震と能登半島地震の観測記録の比較

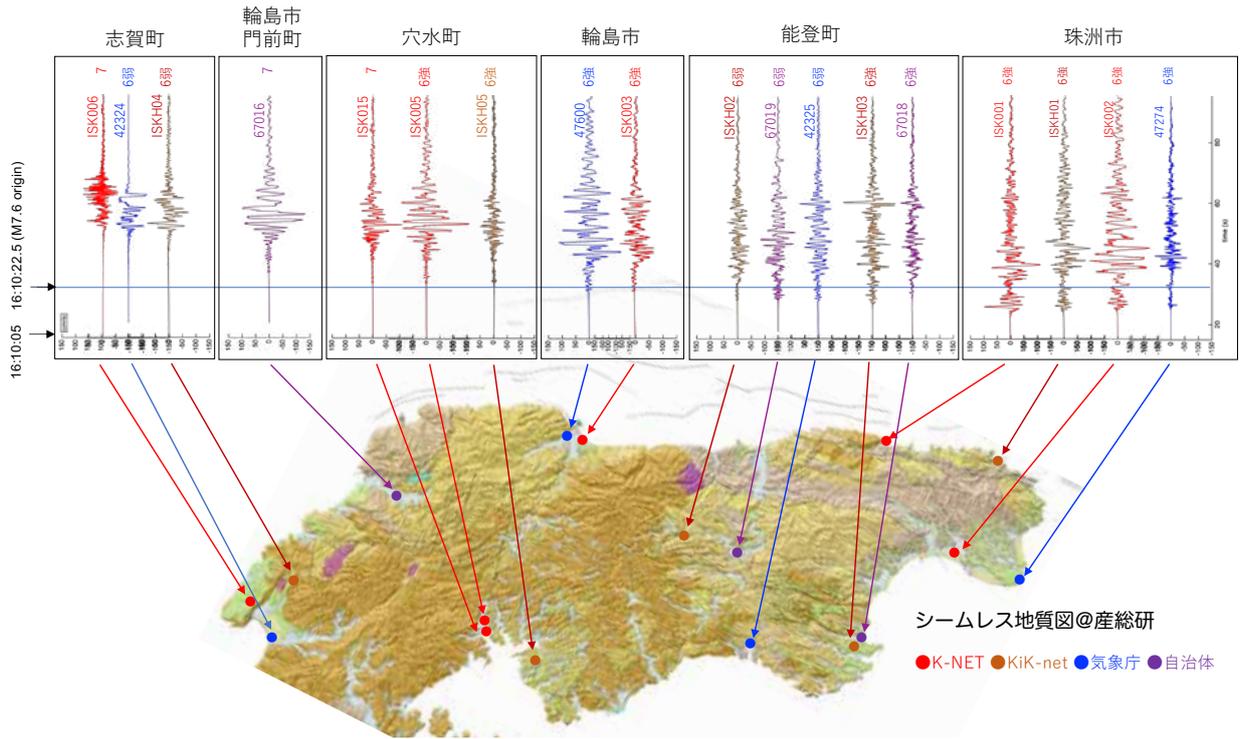


図3 能登半島北部の速度波形（東西成分）

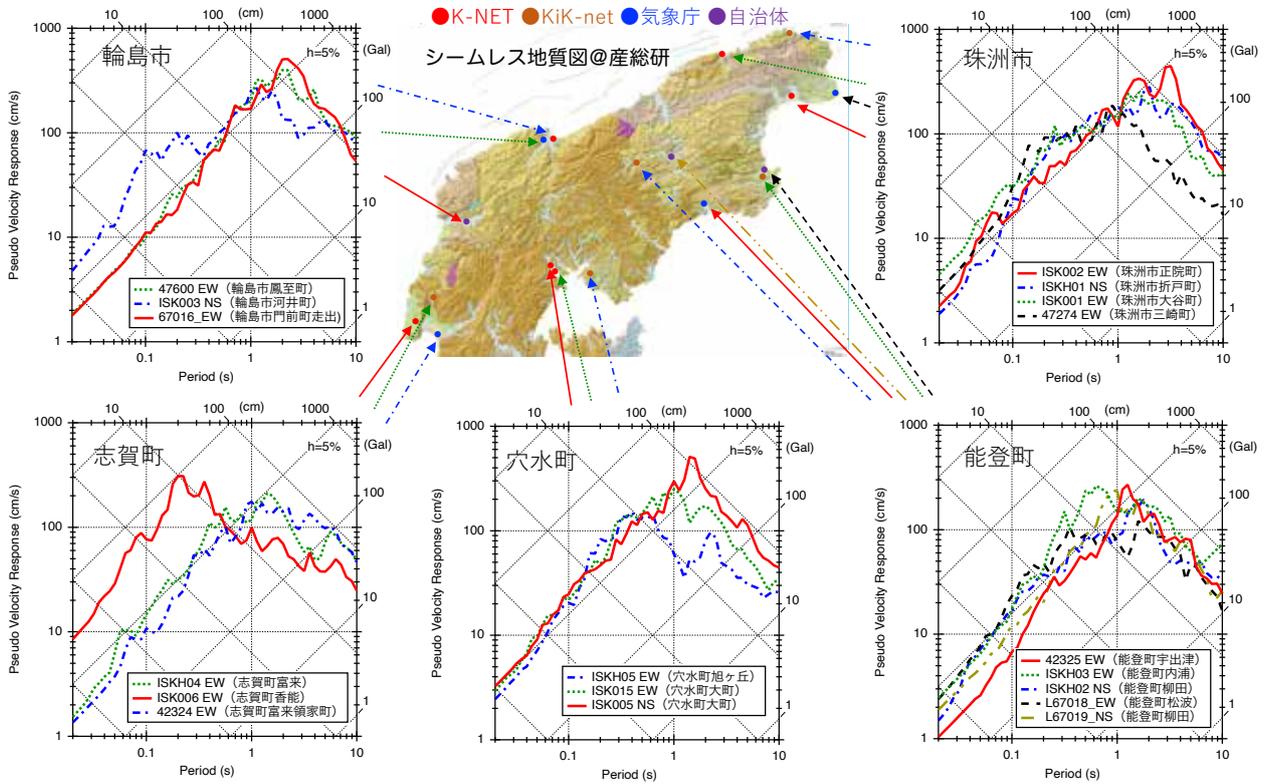


図4 能登半島北部の擬似速度応答スペクトル（水平2成分のうち大きい方）

置している。S波速度は地盤のせん断剛性に対応し、大きな値であるほど剛性が高いことを示す。通常工学的に基盤として扱われるのは400m/s程度、地震学的に基盤として扱われるのは3 km/s程度であり、河井町はごく表層の風化層を除いて工学的基盤とみなして良いが、鳳至町と門前町は深さ30-40mまでそれよりも低い（従って剛性が小さい）軟弱地盤である。

2007年能登半島地震後の常時微動計測や観測記録の分析などにより、軟弱地盤の2地点の卓越周期は概ね1秒程度と報告されている⁹⁾¹⁰⁾。図には2023年5月5日の能登半島沖の地震および2007年能登半島地震での応答スペクトルを重ね書きしているが、a) 2地震とも河井町よりも軟弱地盤の2地点の方が振幅が大きいこと、b) 振幅が小さい2023年の地震に対してはどちらも1秒程度にピークがあるが、2007年の地震（門前町は欠測）の鳳至町の卓越周期は2秒に伸びていることが確認できる。後者は振幅が大きくなると地盤剛性が

低下するためであり、2007年の地震の輪島市鳳至町や穴水町の記録でも確認されている⁷⁾。図4の2024年能登半島地震では2007年よりもさらに卓越周期が伸びている（剛性低下の度合いが大きい）ことが確認できる。

軟弱地盤の2地点周辺では写真に示すように家屋倒壊などの甚大な被害が発生した。河井町では、観測点ごく近傍の丘陵地に位置する建物の被害は限定的であるが、軟弱地盤の低地では他の2地点と同じような大きな被害を受けている。

図6は、志賀町・穴水町・珠洲市観測点の表層地盤のS波速度構造⁶⁾である。志賀町ISK006では薄い表層が短周期の揺れを増幅させたことが震度7の原因と思われる。穴水町ではISK005が震度7、ISK015とISKH05は震度6強であったが、ISK005の表層地盤は他2地点よりも明らかにS波速度が小さい（従って地盤増幅が大きい）ことが周辺での大被害の原因である。珠洲市では、特に大きな被害があった正院町（ISK002）では他の地

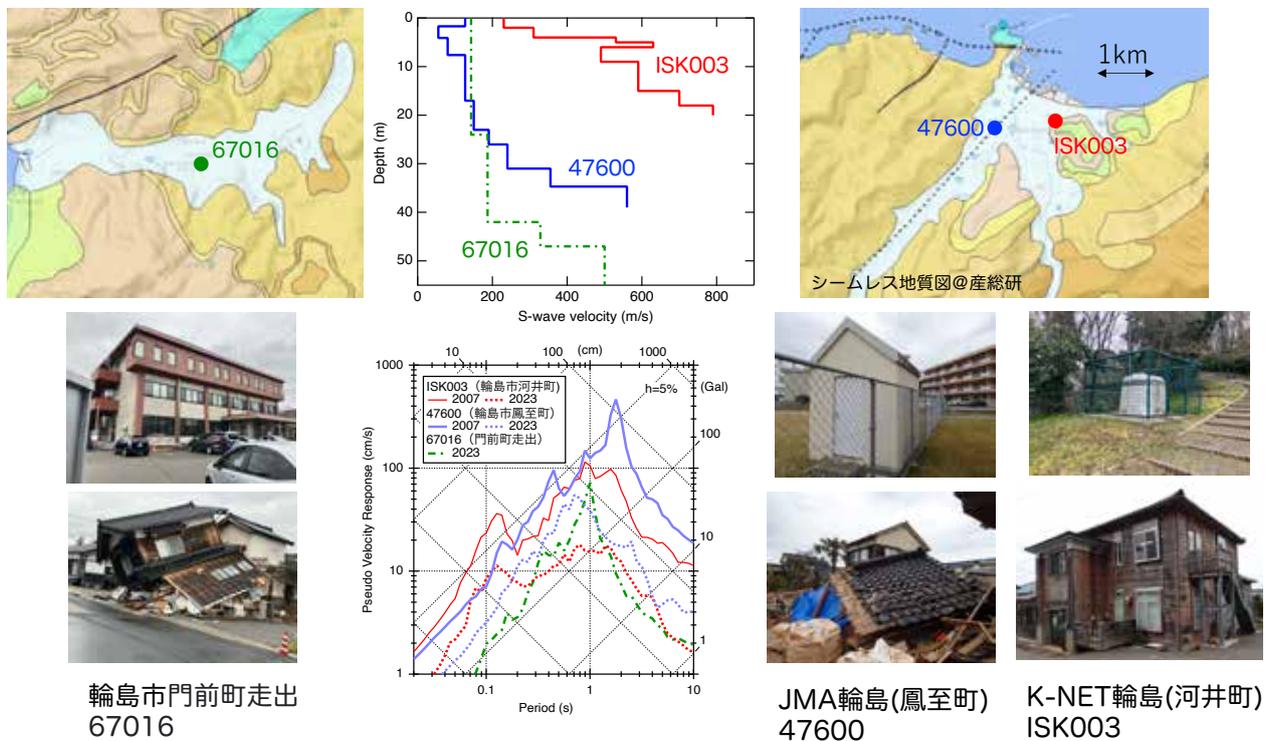


図5 輪島市3観測点の表層地盤のS波速度構造と2007年能登半島地震、2023年5月5日の能登半島沖の地震の擬似速度応答スペクトル。写真は上段が観測点、下段が2024年能登半島地震の周辺建物状況

点よりも S 波速度が小さく、1993年能登半島沖地震後の常時微動調査でも川沿いに表層地盤が厚く堆積していることが報告されている¹¹⁾。以上のように、図 2 右で示した大被害を生じた場所での周期 1-3 秒の卓越は、主に表層地盤の（大入力による剛性低下の影響を含んだ）増幅に起因すると思われる。なお、輪島や珠洲の地盤増幅については、より深部の（2 次元・3 次元性を含む）地下構造の影響も指摘されている¹²⁾。

4. 建物被害と地震動

建物被害については、各種機関による調査結果が速報として報告されている^{例えは¹³⁾}。それによると、構造種別では木造建物の倒壊・崩壊の被害が大きいこと、木造建物の被害率は建築年代による違いが大きく、現行基準である2000年以降に比べ、いわゆる新耐震基準である1981-2000年、旧耐震基準である1981年以前の順に古い年代ほど被害が大きいこと、これらは熊本地震での被害傾向と同様であることが報告されている。また、旧基準建物で耐震補強された建物に関する調査では、被害

を受けた建物でも倒壊・崩壊は報告されていない。

地震動と建物被害の関係については、これまで指摘されてきたように、周期 1-2 秒程度が卓越した場合に被害が大きくなっている。図 4 に示すように周期 2 秒強が卓越した地点もあり、耐力が低い古い木造住家に特に厳しい地震動となっている¹⁴⁾。

5. まとめ

2024年能登半島地震において、家屋倒壊などの被害が大きい場所で観測された地震動は、中低層建物の応答に影響が大きいと言われている周期帯（周期 1-2 秒程度）が卓越している。一方、震度 7 でも短周期のみが卓越している場所では、建物が倒壊するような被害は出ていない。これはこれまでの被害地震と同様の傾向である。

能登半島北部は山地が大部分を占めるが、市街地は主に河川・海岸沿いの低地に位置している。低地で（低層建物に影響が大きい周期帯の）地盤による増幅が大きいことが、地盤震動側から見た被害の大きな要因となっている。このことは、

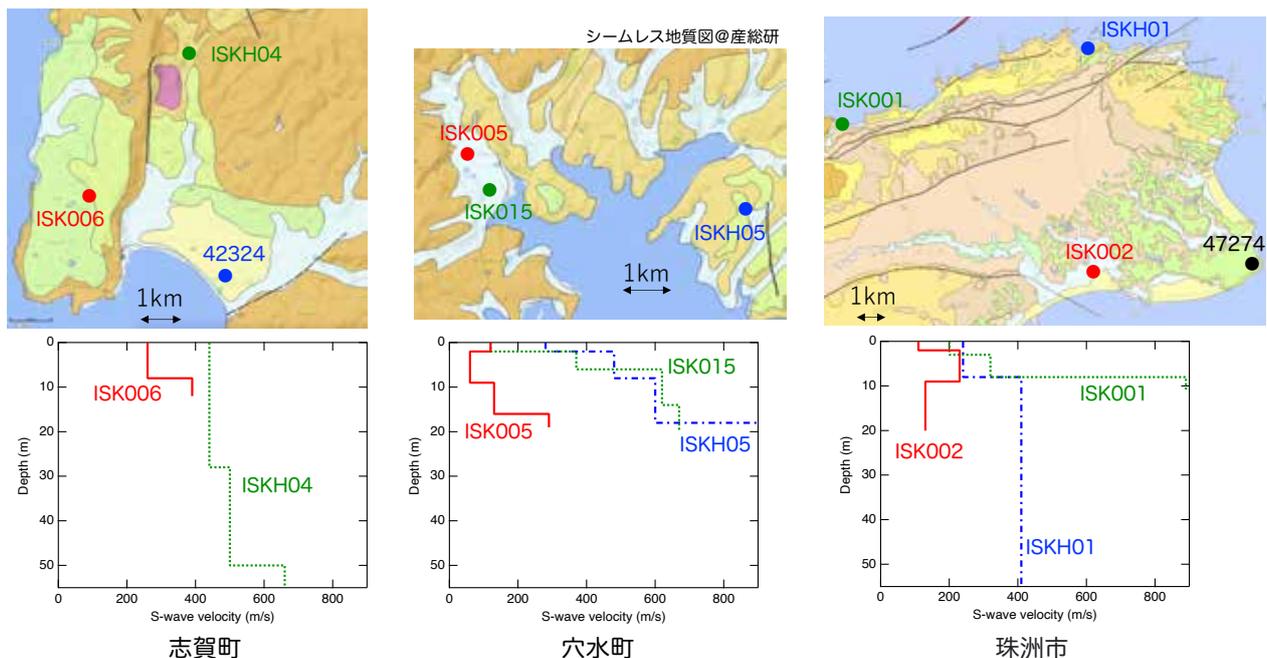


図 6 志賀町・穴水町・珠州市観測点の表層地盤の S 波速度構造

2007年能登半島地震後の調査でも既に指摘されていた。

一般に地震の被害集中域は、地盤増幅が大きい地区に古い脆弱な建物がある場合に生じる。例えば東北地方太平洋沖地震では、仙台の揺れが大きかった場所は概ね1978年宮城県沖地震と重なっていた。その結果同じ場所で同様の被害が出ているが、揺れが大きくても建物が建て替えが進んだ地区の被害は減少していた¹⁵⁾。能登半島地震で周期1-2秒の揺れが特に大きい場所でも現行基準の建物はほとんど倒壊していない。

地盤増幅は事前の地震観測や地下構造探査である程度評価できることから、地震被害を低減する上で、地盤震動側は地下構造の調査と強震時の地盤増幅率の評価、建物側は既存不適格建物の補強・建て替えが継続的な課題となっている。危険な場所に立つ建物を優先的に補強する方策があつていいように思われる。

謝辞

気象庁、防災科学技術研究所、自治体の強震記録を用いました。地図には、GMT¹⁶⁾と産業技術総合研究所のシームレス地質図を用いました。

【参考文献】

- 1) 消防庁，令和6年能登半島地震による被害及び消防機関等の対応状況（第116報）（令和6年12月24日14:00現在），<https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/20240101notohanntoujishinn116.pdf>
- 2) 久保久彦ほか：強震波形記録を用いた令和6年（2024年）能登半島地震（1月1日16時10分、M7.6）の震源インバージョン解析，https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/noto_20240101/inversion/inv_index.html
- 3) 浅野公之，2024：令和6年能登半島地震の震源モデル，第52回地盤震動シンポジウム，pp.3-12
- 4) 川瀬博，2001：建物の地震被害の予測とその軽減への展望，地学雑誌，110，pp.885-899
- 5) 境有紀ほか，2002：建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案，日本建築学会構造系論文集，555，pp.85-91
- 6) 防災科学技術研究所：観測点土質データ，<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/db/index.html>
- 7) 鈴木比呂子ほか，2009：2007年能登半島地震におけるK-NET穴水・JMA輪島の強震記録から推定した粘性土地盤の非線形性状，日本建築学会構造系論文集，645，pp.2003-2010
- 8) 山中浩明ほか，2008：2007年能登半島地震の余震観測と微動探査による輪島市門前町の地盤震動特性の評価，物理探査，61，5，pp.385-396
- 9) 岩田知孝ほか：森本・富樫断層帯における重点的な調査観測令和4年度成果報告書，3.3.2深部地盤構造モデルの構築と強震動予測，https://www.jishin.go.jp/database/project_report/morimoto_juten/morimoto_juten-r04/
- 10) 西川隼人ほか，2011：地震動指標の地盤増幅度と微動H/Vスペクトルによる増幅スペクトル推定，土木学会論文集A1，67，3，pp.454-463
- 11) 紺野克昭ほか，1993：珠洲市における常時微動特性 -1993年能登半島沖地震の被害と比較して-，地震工学研究発表会講演概要，22，pp.383-386
- 12) 川瀬博ほか，2024：2024年能登半島地震の大被災域（珠洲・輪島）における特異な地盤増幅特性，日本地震工学会第18回年次大会梗概集，Paper No. 20240089
- 13) 国土技術政策総合研究所・建築研究所，2024：令和6年能登半島地震建築物被害調査等報告（速報）国土技術政策総合研究所資料1296，建築研究資料212.
- 14) 境有紀ほか，2024：発生した地震動と建物被害，第52回地盤震動シンポジウム，pp.22-34
- 15) 大野晋ほか，2016：東北地方太平洋沖地震における仙台市悉皆調査区域の地震動と建物振動被害の関係の検討，日本地震工学会論文集，16，pp.3_201-3_212.
- 16) Wessel, P. et al., 2019: The Generic Mapping Tools Version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(11), pp.5556-5564