

構造物へのエネルギー入力に基づく 2024年能登半島地震の強震動経時特性 の分析

久世益充¹・能島暢呂²

Analysis of Strong Ground Motion Temporal Characteristics of the 2024 Noto Peninsula Earthquake Based on Energy Input to Structures

Masumitsu KUSE¹ and Nobuoto NOJIMA²

Abstract

This study considered the dynamic effects of the strong motion observed during the 2024 Noto Peninsula earthquake had on structural response. In consideration, the cumulative energy input that obtained from the equation of energy equilibrium of the single-degree-of-freedom system was calculated. And, the time variation of the velocity response was analyzed based on energy input. Next, the cumulative energy input spectrum and the energy input rate spectrum were used to compare the effects of increasing and decrease the velocity response for every period. Furthermore, the temporal characteristics from the variation of the cumulative energy input by periodic band was considered.

キーワード：2024年能登半島地震，速度応答，エネルギー入力，水平成分，経時特性

Key words: 2024 Noto Peninsula Earthquake, velocity response, energy input, horizontal component, temporal characteristics

1. はじめに

2024年1月1日16時10分に発生した能登半島地震(M7.6)では、最大震度7の強い揺れが観測された。消防庁¹⁾によると、死者・行方不明者341名(災害関連死含む)、住家全壊6,273棟など、能

登半島を中心に大きな被害が発生した。

地震動による構造物被害を考える上で、構造物に作用した地震外力の影響について十分に考察する必要がある。強震動特性(振幅特性・周期特性・経時特性)で考えた場合、計測震度(振幅特

¹ 岐阜大学環境社会共生体研究センター
Center for Environmental and Societal Sustainability, Gifu University

² 岐阜大学工学部社会基盤工学科
Department of Civil Engineering, Gifu University

本稿に対する討議は2025年5月末日まで受け付ける。

性)が同じでも、強震動の継続時間が長い方が構造物被害への影響が大きくなる可能性が高く、継続時間評価の重要性が指摘されている²⁾。断層の大きさや地震規模から強震動継続時間を考察すると、断層モデル解析³⁻⁸⁾から、2024年能登半島地震の断層長さは120~180 km程度とされている。国内で最大震度7が観測された2016年熊本地震(M7.3, 断層長さ53 km⁹⁾)、2018年北海道胆振東部地震(M6.7, 断層長さ約25 km¹⁰⁾)と比較し、2024年能登半島地震は地震規模と断層が大きく、震源付近で観測された地震動は、強い揺れが40秒以上継続したことが報告されている¹¹⁾。

強震動の継続時間による被害などへの影響評価が可能な手法として、強震動が構造物へ繰り返し作用する影響を考慮した「疲労速度応答スペクトル強度」¹²⁾や、線形1自由度系の速度応答包絡線を用いた「速度応答包絡線閾値超過継続時間スペクトル」¹³⁾などが提案されている。また、強震動特性が及ぼす構造物被害への影響については、構造物へのエネルギー入力として評価される^{14,15)}。「構造物にもたらされる総エネルギー入力」は、主として、構造物の総質量および1次固有周期に依存し、構造物の強度、質量分布、剛性分布によらない安定した量である¹⁴⁾ことから、地震動の非定常性を評価可能なエネルギー入力率スペクトル¹⁵⁾や、累積エネルギー入力を周期別の時刻歴に分解した評価¹⁶⁾などが行われている。

一方で、これらの評価では、水平1成分(NSまたはEW成分)が対象であるが、構造物へ作用する地震外力を適切に評価するには、地震動の水平2方向の影響を考慮すべきである。水平2方向加振による実験では、1方向加振と比べて構造物の損傷が大きくなることが指摘されている^{17,18)}。そのため、地震動の水平2成分の影響や、地震動の震動方向の影響について検討されている。境・熊本¹⁹⁾は、地震動の方向性について各方向の地震動強さ指標を算出し、地震応答が平均的になるような「平均方向」について提案した。能島・久世²⁰⁾は、水平2成分の加速度波形を対象に、軸回転が振幅特性や継続時間に与える影響について、最大加速度などの複数の指標を対象に考察した。

各指標の最大値及び最小値が出現する回転角より、同一または異種指標間に見られる相互関係について考察した。井上ら²¹⁾は、地震動の方向性について検討し、地震タイプ別、応答スペクトルの周期別の変動について考察した。

本研究では、2024年能登半島地震で観測された地震動が構造物応答にもたらす動的効果として、地震動による構造物へのエネルギー入力が累積していく過程について考察する。具体的には、筆者らの検討^{22,23)}を基に、振動系のエネルギーの釣り合い式¹⁴⁾から導かれる累積エネルギー入力とエネルギー入力率¹⁵⁾を算出し、速度応答の増幅と抑制の時間変動について考察する。考察では、水平2成分の合成波形を用いた比較を行い、さらに、時間-周波数解析²²⁾を実施する。

2. 地震動観測記録の概要

本研究では、2024年能登半島地震で観測された多数の地震動記録より、断層直上で観測された、K-NET²⁴⁾の6地点(ISK001 大谷, ISK002 正院, ISK003 輪島, ISK005 穴水, ISK006 富来, ISK015 大町)、気象庁震度観測点²⁵⁾の4地点(輪島市門前町走出*, 輪島市鳳至町, 珠洲市三崎町, 能登町松波*, *は石川県観測点)、1995年兵庫県南部地震で観測されたJR鷹取駅の観測波形(以下、「JR鷹取」と表記)を対象とした。評価では、水

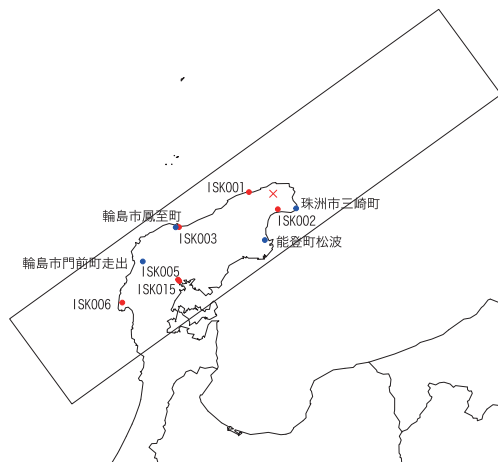


図1 観測点分布と断層モデル(断層モデルは文献⁸⁾の解析結果を参考に作成, ×は震央)

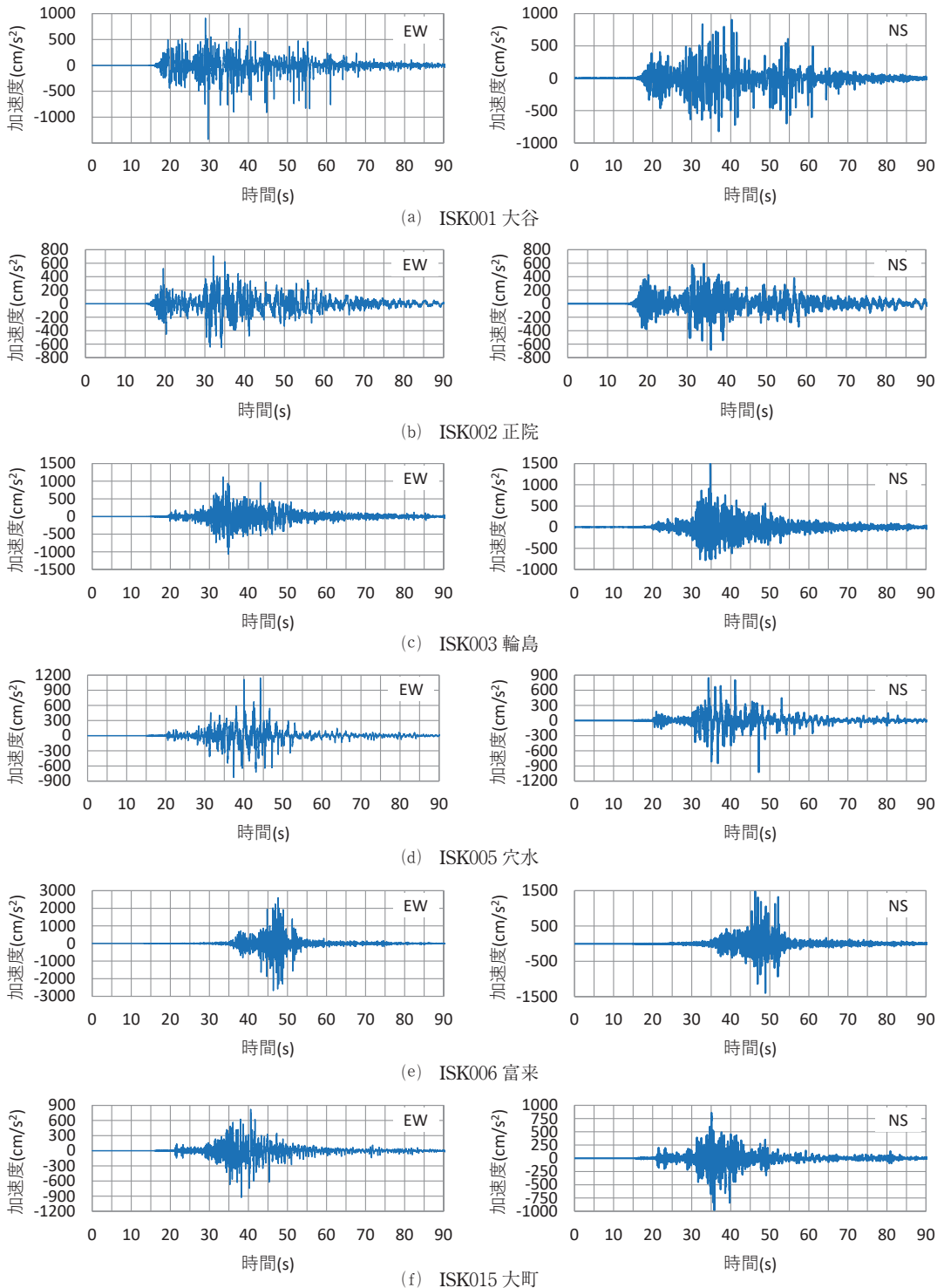


図2 加速度波形(その1)

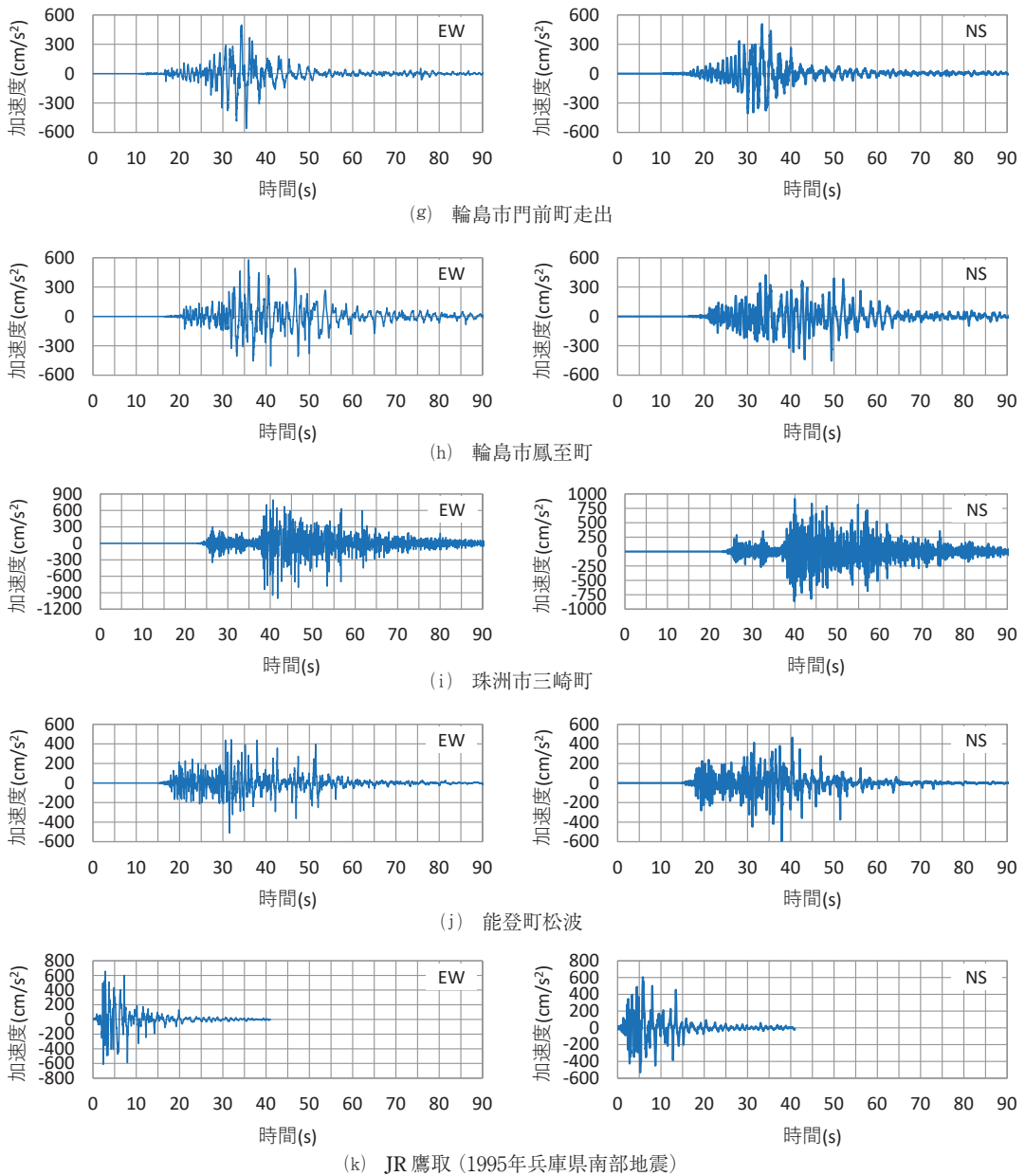


図2 加速度波形(その2)

平2成分(NS, EW成分)波形と、水平2成分の合成波形(以下、HZと表記)を扱う。図1に能登半島地震で観測された10地点の分布と断層モデル、図2に加速度波形をそれぞれ示す。2024年能登半島地震の断層は長さ150 kmにも及ぶ逆断層

型の地震⁸⁾であり、対象6地点が断層直上にあることがわかる。1995年兵庫県南部地震の断層長さは約40 km²⁶⁾であり、図2(k)に示すJR鷹取は強震動が10 s程度継続している。対象10地点は20~30 s程度である。能登半島地震の断層長さより、

10地点の地震動波形は、長い断層破壊により強震動が長く継続した特徴が確認できる。また、文献⁵⁻⁷⁾では複数のセグメントによる断層破壊が指摘されており、いずれの断層モデルにおいても、複数または比較的大きなアスペリティが推定されている。ISK001 大谷, ISK002 正院では、複数のセグメントまたはアスペリティによると思われる複数の波群が見られる。

図3に速度応答スペクトル、表1に各成分の最大速度応答値と周期を示す。速度応答スペクトルは、周期 $T=0.1\sim 10$ s の範囲を対数軸上で100等分した周期を用いている。 $T=1\sim 3$ s に着目すると、図3(a), (b)より、ISK001 大谷, ISK003 輪島, ISK015 大町, 能登町松波 (NS 成分) は200 cm/s 程度以上の高い応答値である。ISK002 正院, ISK005 穴水, 輪島市門前町走出, 輪島市鳳至町は, EW, NS 成分共に JR 鷹取を上回る。

水平2成分で比較した図3(c)では、 $T=1\sim 3$ s において、ISK001 大谷, ISK015 大町は300 cm/s 程度以上の高い応答値である。ISK005 穴水 ($T=1$ s 付近, 1.4~3 s), ISK002 正院 ($T=1.6$ s 付近, 2.5~3 s), ISK001 大谷 ($T=2.6\sim 3$ s), 輪島市門前町走出 ($T=1.6\sim 3$ s), 輪島市鳳至町 ($T=2.1\sim 3$ s) は JR 鷹取を上回る。

3. エネルギー入力による地震動の評価

(1) 線形1自由度系への地震動エネルギー入力

本研究では、地震動が構造物に及ぼす影響について、入力加速度と相対速度応答により規定されるエネルギー入力^{14,15)}に基づいて考察を行う。線形1自由度系の運動方程式は次式で表される。

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = -m\ddot{z}_0 \quad (1)$$

ここに、 m : 質点の質量, c : 減衰係数, k : 剛性, y : 質点の相対変位, \ddot{z}_0 : 地動加速度である。式(1)の両辺に微小時間 $d\tau$ における変位増分 $dy = \dot{y}d\tau$ を乗じて時刻0から t まで積分し、 m で除すると、単位質量あたりのエネルギーの釣り合い式¹⁴⁾が得られる。

$$\int_0^t \dot{y}dy + 2h\omega_0 \int_0^t \dot{y}^2 d\tau + \omega^2 \int_0^t ydy = - \int_0^t \ddot{z}_0 y d\tau \quad (2)$$

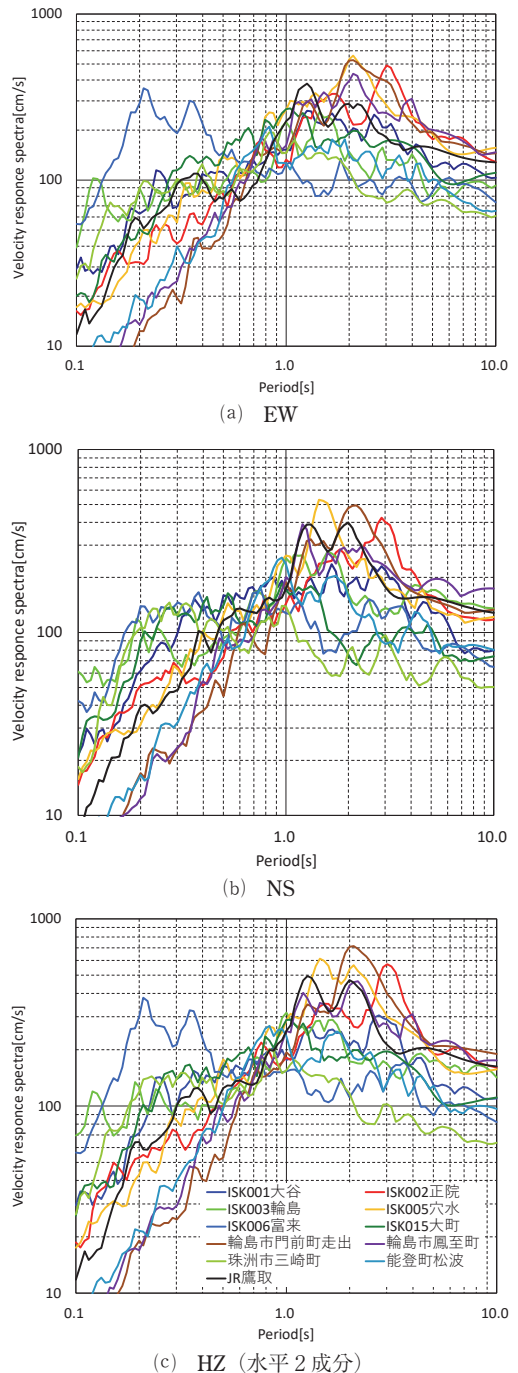


図3 速度応答スペクトル ($h=0.05$)

表1 卓越周期における速度応答スペクトルの比較 ($h=0.05$)

成分	EW		NS		HZ (水平 2 成分)	
	速度応答 [cm/s]	卓越周期 [s]	速度応答 [cm/s]	卓越周期 [s]	速度応答 [cm/s]	卓越周期 [s]
ISK001 大谷	261.46	1.26	236.11	1.66	305.24	2.75
ISK002 正院	490.26	3.02	423.70	2.88	572.23	3.02
ISK003 輪島	258.28	1.45	277.19	1.59	315.44	1.00
ISK005 穴水	561.44	2.09	531.37	1.45	612.81	1.45
ISK006 富来	357.41	0.21	172.39	0.76	379.10	0.21
ISK015 大町	270.49	1.05	185.28	0.96	288.77	1.00
輪島市門前町走出	527.70	2.09	495.45	2.19	715.89	2.09
輪島市鳳至町	436.77	2.19	390.52	1.20	464.34	2.19
珠洲市三崎町	194.23	0.83	145.89	0.28	202.52	0.83
能登町松波	209.98	0.83	256.24	0.96	267.81	0.83
JR 鷹取	380.91	1.26	398.40	2.00	495.08	1.26

ここに、 $\omega_0 = \sqrt{k/m} = 2\pi T$ ：固有円振動数、 $h = c/2\sqrt{mk}$ ：減衰定数である。式(2)の右辺は地震動が時刻 t までに構造物に行く単位質量あたりの仕事(累積エネルギー入力)¹⁵⁾を表す。また、その時間微分はエネルギー入力率(EIR: Energy Input Rate)を表す¹⁵⁾。

$$E(T, t) = -\int_0^t \ddot{z}_0 y dt \quad (3)$$

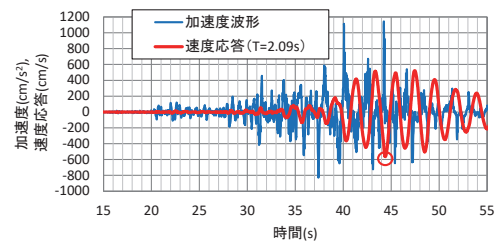
$$e(T, t) = \dot{E}(T, t) = -\dot{z}_0 \dot{y} \quad (4)$$

式(3)、(4)より、累積エネルギーとEIRは、加速度と速度応答が異符号の場合は正值、同符号の場合は負値である。質点の速度応答の方向と反対方向に加速度が入力されると、質点には運動方向と同方向に慣性力が作用するため、応答が増幅する。反対に、質点の速度応答の方向と同じ方向に加速度が入力されると、質点には運動方向と反対方向に慣性力が作用するため、応答は抑制される¹⁵⁾。

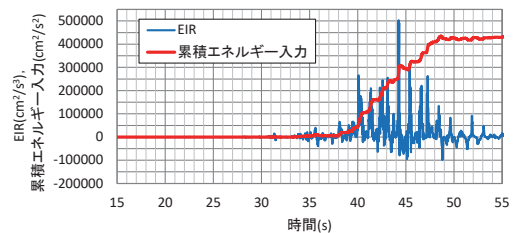
累積エネルギー入力の増加が継続的に見られる時間帯は正のEIRが支配的であり、共振的な作用が継続していると言える。累積エネルギーの急激な上昇は、パルス波のような、衝撃的な加速度入力による短時間の応答増加を示す^{22,23)}。

累積エネルギー入力、EIRの算出例として、ISK005 穴水(EW成分、 $T=2.09$ s、 $h=0.05$)を図4に示す。同図では、初動から最大速度応答後

までの動的挙動を考察するため、 $t=15\sim 55$ sの時間範囲を示した。図4(b)より、 $t=40$ sから速度応答のピークである $t=44.4$ sまで正のEIRが支配的であり、その後 $t=48.8$ sまでエネルギー入力が継続することで応答が持続している。これ以降も正のEIRが支配的であるが、加速度振幅の減少に伴いEIRは減少し、速度応答は抑制されている。累積エネルギー入力も $t=48.8$ s以降の増加は見られない。



(a) 加速度波形, 速度応答波形



(b) EIR, 累積エネルギー入力

図4 累積エネルギー入力の算出例 (ISK005 穴水 EW成分、 $T=2.09$ s、赤丸は最大速度応答)

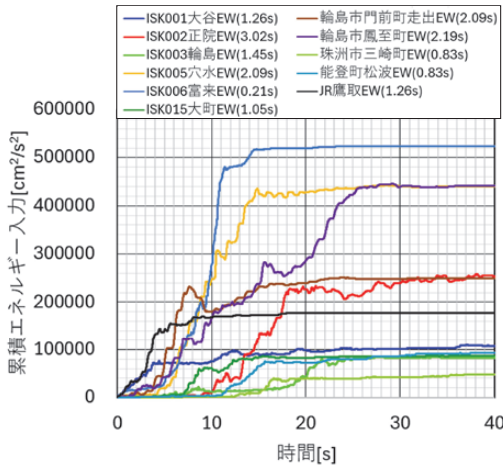


図5 卓越周期における累積エネルギー入力の比較 (EW成分, 凡例の数値は卓越周期)

図5に累積エネルギー入力を示す。同図では、各地点における速度応答スペクトルの卓越周期について、累積エネルギー入力を比較した。JR鷹取は5秒間程度間に急激な増加が見られるのに対して、2024年能登半島地震で観測された10地点では、10～25秒間程度増加が継続しており、輪島市鳳至町で最も長い。

(2) エネルギー入力による時間一周波数解析

前出図4(b)のEIRと累積エネルギー入力について、全周期 ($T=0.1\sim 10$ s) を対象に算出したEIRスペクトル¹⁵⁾、累積エネルギー入力スペクトル、線形1自由度系の応答包絡線の可視化手段として、次式の非定常パワースペクトル²⁷⁾をそれぞれ算出し、エネルギー入力による応答特性について考察する。

$$G(T,t) = \frac{2h\omega_0^3 \left(y^2 + \frac{y^2}{\omega_0^2} \right)}{\pi} = \frac{2h\omega_0 (\omega_0^2 y^2 + y^2)}{\pi} \quad (5)$$

水平2成分の累積エネルギー入力 $E_{HZ}(T,t)$ は式(6)のように、NS成分 $E_{NS}(T,t)$ とEW成分 $E_{EW}(T,t)$ の和として得られ、軸回転に対する不変量となる。水平2成分のエネルギー入力率 e_{HZ}

(T,t), 非定常パワースペクトル $G_{HZ}(T,t)$ も同様である。

$$E_{HZ}(T,t) = E_{EW}(T,t) + E_{NS}(T,t) \quad (6)$$

$$e_{HZ}(T,t) = e_{EW}(T,t) + e_{NS}(T,t) \quad (7)$$

$$G_{HZ}(T,t) = G_{EW}(T,t) + G_{NS}(T,t) \quad (8)$$

対象11地点について、水平2成分 (EW, NS成分) をベクトル合成した加速度波形、水平2成分の非定常パワースペクトル $G_{HZ}(T,t)$ 、エネルギー入力率 $e_{HZ}(T,t)$ 、累積エネルギー入力 $E_{HZ}(T,t)$ を図6に示す。同図では、特徴を明確に表すため、地点ごとに軸の範囲を設定した。また、波形全体が見られるように、時間軸の範囲は60秒間とした。

図6(a)～(k)の非定常パワースペクトルでは、時間-周期軸上の応答のピークが確認できる。EIRスペクトルでは、正値を赤、負値を青、0付近を白で表示しており、色と濃淡により、応答の増幅または抑制の大きさを視覚的に確認できる。累積エネルギー入力スペクトルでは、エネルギー増加の特徴を周期別に見ることができる。

ここで特に、 $T=1\sim 3$ sで水平2成分の最大速度応答が大きな4地点に着目すると、ISK002正院 ($t=30\sim 43$ s), ISK005穴水 ($t=35\sim 50$ s), 輪島市門前町走出 ($t=30\sim 43$ s), 輪島市鳳至町 ($t=33\sim 55$ s) に応答のピークが見られ、その時間帯では強い正のEIRが支配的である。輪島市門前町走出では $t=33\sim 38$ sに強い正のEIRが見られ、周期約2sの長周期パルスが2波継続し、累積エネルギー入力が急激に上昇した特徴が見られる。輪島市鳳至町の応答のピーク ($t=33\sim 55$ s) では負のEIRも見られるが、正のEIRが支配的であり、共振的な作用により累積エネルギー入力が上昇している。4地点はJR鷹取よりも正のEIRが長く継続した結果、累積エネルギー入力はJR鷹取を上回る。また、ISK001大谷、ISK003輪島、ISK015大町、珠洲市三崎町では、広い周期帯で正のEIRが継続している。

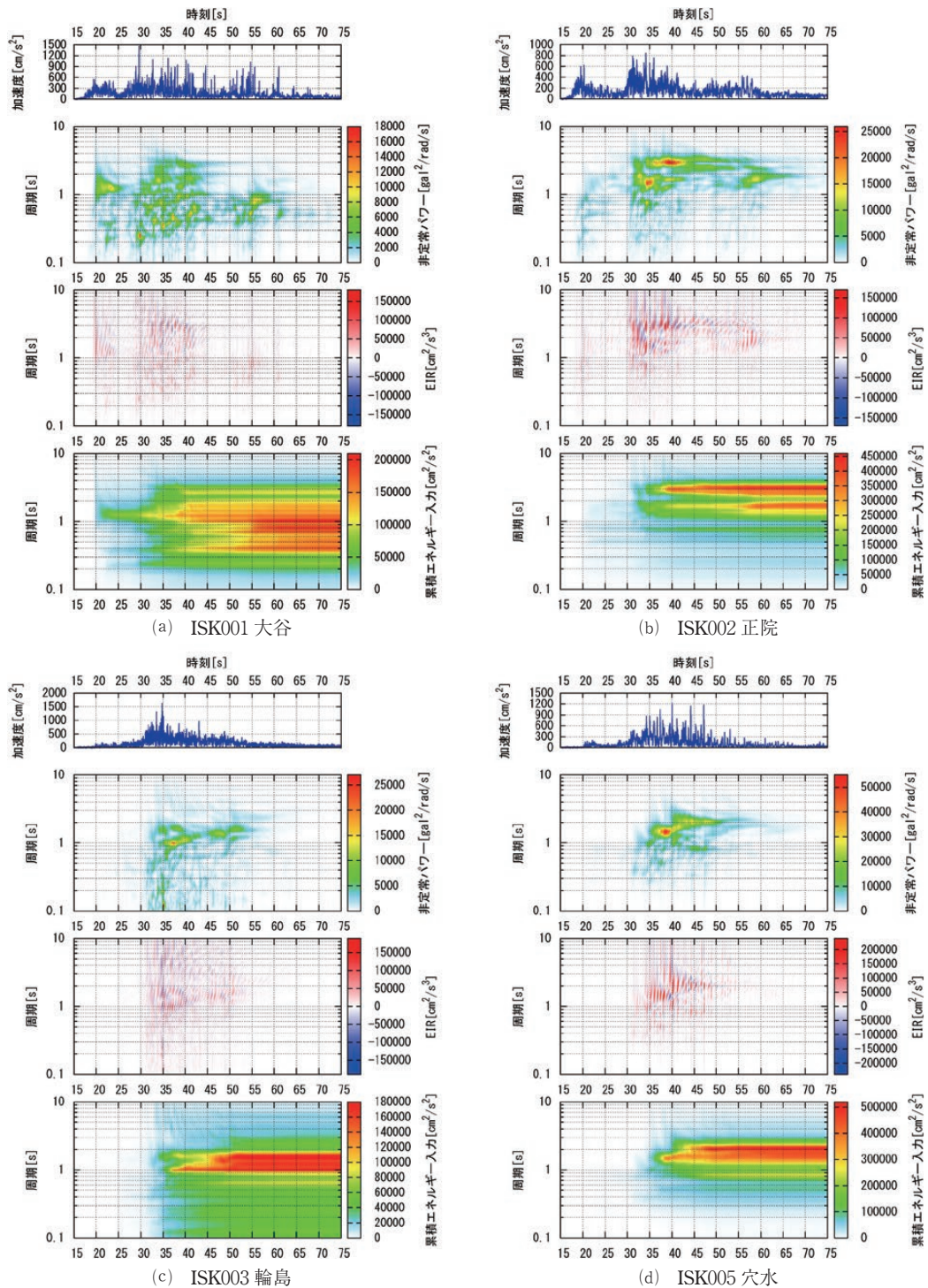


図6 加速度波形，非定常パワースペクトル，EIR スペクトル，累積エネルギー入力スペクトルの比較（水平2成分，その1）

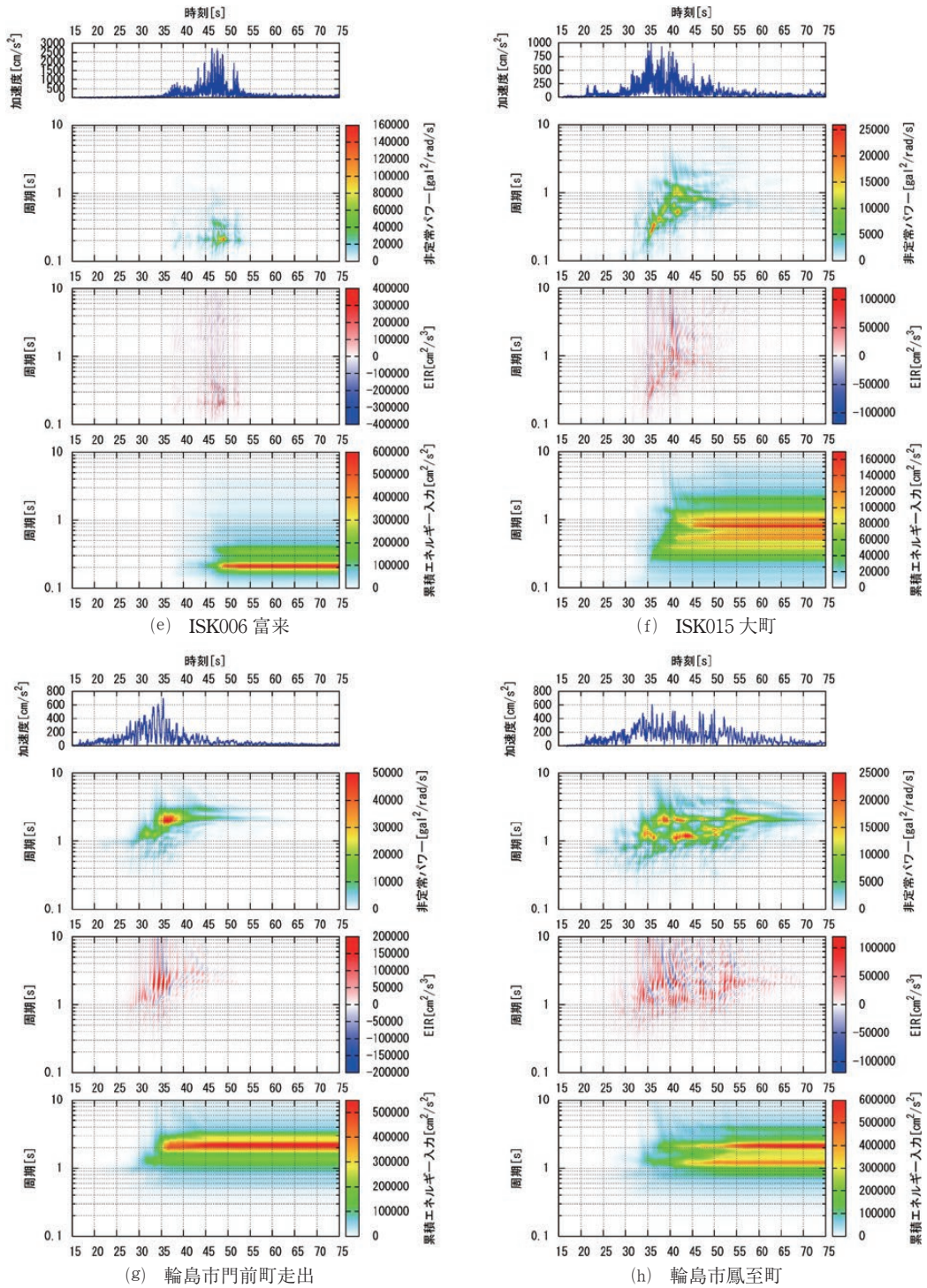


図6 加速度波形, 非定常パワースペクトル, EIR スペクトル, 累積エネルギー入力スペクトルの比較 (水平2成分, その2)

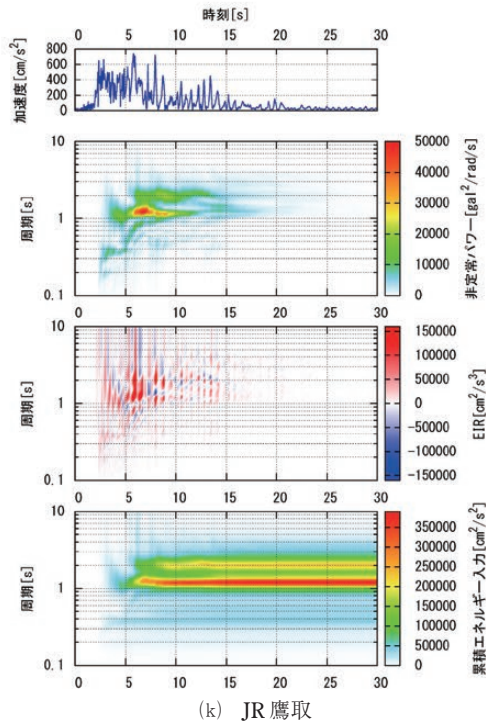
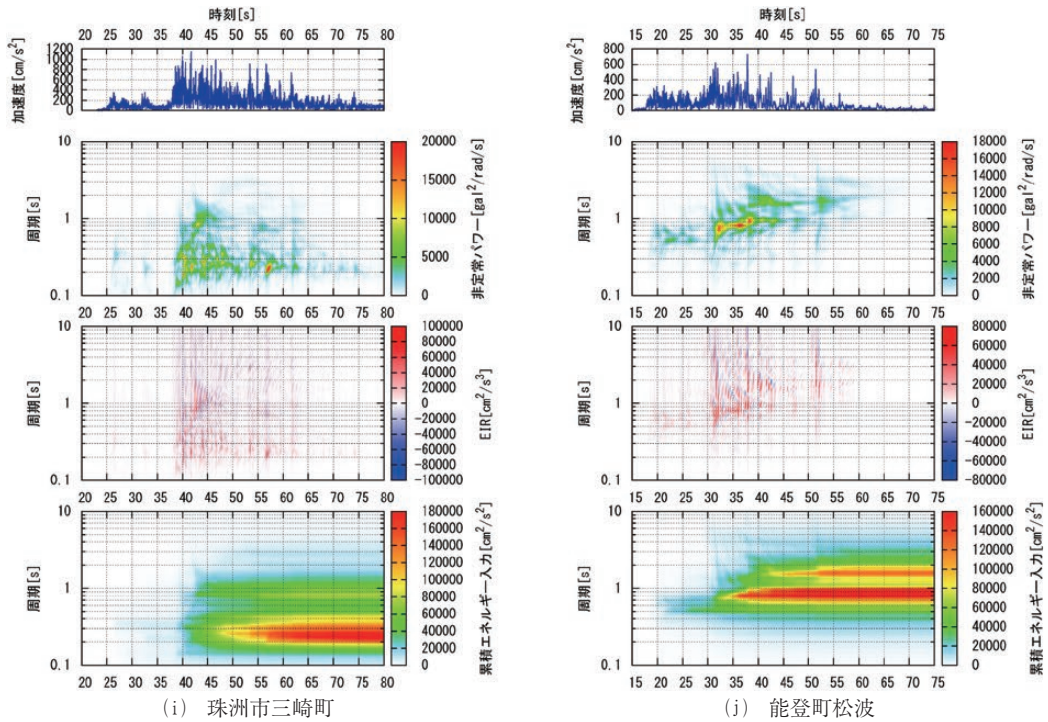


図6 加速度波形，非定常パワースペクトル，EIR スペクトル，累積エネルギー入力スペクトルの比較（水平2成分，その3）

(3) 累積エネルギー入力の周期別比較

式(6)の水平2成分の累積エネルギー入力において、周期 $T_m \sim T_n$ [s] の平均累積エネルギー入力を算出し、各波形の経時特性について周期帯別に比較する。算出においては、固有周期 $T=0.1 \sim 10$ s を対象に、 $\Delta T=0.1$ s 間隔とした。また、周期帯 ($T_m \sim T_n$) を12区分 (T_1, T_5) = (0.1 s, 0.5 s), (T_5, T_{10}) = (0.5 s, 1.0 s), (T_{10}, T_{20}) = (1.0 s, 2.0 s), (T_{20}, T_{30}) = (2.0 s, 3.0 s)....., (T_{90}, T_{100}) = (9.0 s, 10.0 s) とした。

$$E_{HZ,T_m-T_n}(t) = \frac{1}{m-n+1} \sum_{i=m}^n E_{HZ}(T_i, t) \quad (9)$$

$$T_i = 0.1i \quad (i=1, \dots, 100) \quad (10)$$

周期帯別に比較した結果を図7示す。同図では

各波形の時間位置を統一するため、 $E_{HZ,T_m-T_n}(t)$ の1%を時間原点 ($t=0$ s) とし、地点間で比較しやすいように縦軸のレンジは周期帯ごとに設定した。

家屋への影響が大きいとされる $T=1 \sim 2$ s (図7(c)) の経時特性を比較すると、JR 鷹取では $t=10$ s 程度でピークに達するのに対して、ISK005 穴水では $t=7$ s 程度、輪島市門前町走出では $t=12$ s 程度、輪島市鳳至町では $t=19$ s、ISK002 正院では $t=38$ s 程度で JR 鷹取を上回っている。最終的には、平均累積エネルギー入力は、ISK005 穴水、輪島市鳳至町が突出し、ISK002 正院、輪島市門前町走出、JR 鷹取の順となっている。

図7(d) ($T=2 \sim 3$ s) では、平均累積エネルギー入力の高い順に輪島市門前町走出、輪島市鳳至町、ISK002 正院、ISK005 穴水であり、JR 鷹取を大きく上回っている。経時特性に注目すると、

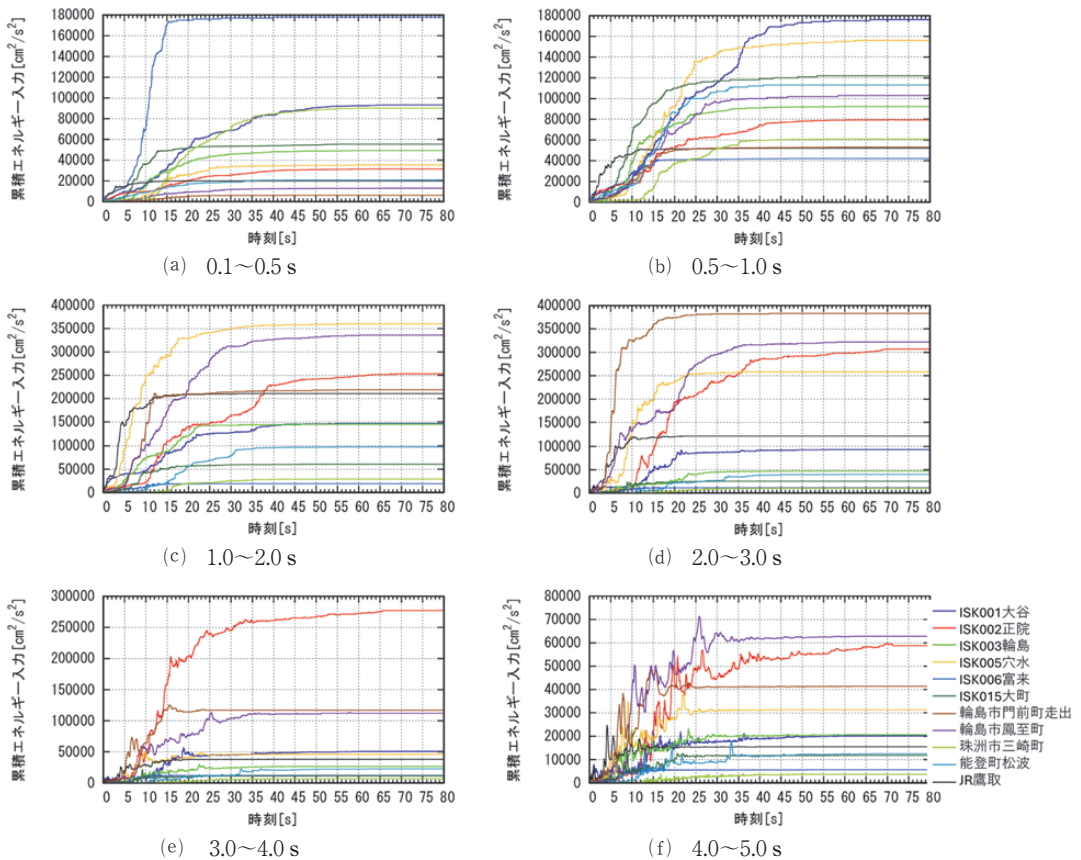


図7 周期帯別の平均累積エネルギー入力の比較

輪島市門前町走出については $t=7\text{ s}$ までのエネルギー累積が急激である上、その後も累積が続いている。一方、ISK002 正院、輪島市鳳至町、ISK005 穴水については、それぞれの経時特性は異なるものの、20~35秒に及ぶ長時間の累積効果により、高いレベルの平均累積エネルギー入力となったことがわかる。

図7(b) ($T=0.5\sim 1\text{ s}$) では、ISK001 大谷、ISK005 穴水、ISK015 大町など、長時間の累積により平均累積エネルギー入力がJR鷹取を大きく上回る地点が多く見られる。他の周期帯においても、多くの地点で平均累積エネルギー入力がJR鷹取を上回る。

4. おわりに

本研究では、2024年能登半島地震で観測された地震動について、水平2成分の合成波形のエネルギー入力率と累積エネルギーを算出し、地震動による構造物へのエネルギー入力が累積していく過程について考察した。得られた成果を以下に要約する。

- 1) 地震動(水平2成分)を対象に、振動系のエネルギーの釣り合い式から導出されるエネルギー入力率に基づいて構造物応答への動的効果について考察した。EIR スペクトル、累積エネルギー入力スペクトルと、非常常パワースペクトルから、速度応答の増幅と抑制の時間変動について考察した。
- 2) 周期帯別の平均累積エネルギー入力を比較し、各地点の特徴について考察した。どの地点においても、2024年能登半島地震の長い断層破壊による、強い揺れが長時間継続した特徴が見られ、特に輪島市鳳至町、ISK002 正院、ISK005 穴水では長い継続時間の特徴が顕著であった。
- 3) 周期 $T=1\sim 3\text{ s}$ に着目すると、ISK002 正院、ISK005 穴水、輪島市門前町走出、輪島市鳳至町の累積エネルギー入力はJR鷹取を上回り、多数の家屋被害の一因になったと思われる。

本報では、1995年兵庫県南部地震で観測された強震記録(JR鷹取)を、既往地震の顕著な波形記

録として取り挙げて比較した。今後は、2016年熊本地震で観測されたKiK-net 益城(KMMH16)など、他地震において観測された特徴的な地震動波形や、当該地震で観測された他の地震動波形について考察を行う予定である。

謝辞

本研究では(国研)防災科学技術研究所 K-NET、気象庁震度観測点(気象庁、石川県)、JR西日本のJR鷹取駅で観測された強震記録を使用した。記して感謝の意を表する。

引用文献

- 1) 消防庁災害対策本部：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109報)、<https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/20240101notohanntoujishinn109.pdf>, 2024年9月13日
- 2) 土木学会地震工学委員会：強震継続時間が長い地震動に対する土木構造物の耐震性検討小委員会：シンポジウム「強震継続時間が長い地震動に対する土木構造物の耐震性評価」, 2012.
- 3) 気象庁：2024年1月1日 石川県能登地方の地震「令和6年能登半島地震」- 遠地実体波による震源過程解析(暫定) -, <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/sourceprocess/event/2024010116102257far.pdf>, 2024年6月25日
- 4) USGS: M 7.5 - 2024 Noto Peninsula, Japan Earthquake, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000m0xl/executive>, 2024年6月25日
- 5) 国土地理院：2024年1月1日令和6年能登半島地震の震源断層モデル(暫定), <https://www.gsi.go.jp/common/000255954.pdf>, 2024年6月25日
- 6) 京都大学防災研究所：強震波形記録による令和6年能登半島地震の震源過程(暫定), https://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/topics/2024noto_source_20240115.pdf, 2024年6月25日
- 7) 防災科学技術研究所：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, 2024年6月25日
- 8) 名古屋大学地震火山研究センター：NGY 地震学ノート No.73, <https://www.seis.nagoya-u.ac.jp/>

- sanchu/Seismo_Note/2024/NGY73.pdf, 2024年6月25日
- 9) Kubo, H., W. Suzuki, S. Aoi, and H. Sekiguchi: Source rupture processes of the 2016 Kumamoto, Japan, earthquakes estimated from strong-motion waveforms, *Earth Planets Space*, 68, 161, 2016.
 - 10) Kubo, H., A. Iwaki, W. Suzuki, S. Aoi, and H. Sekiguchi: Estimation of the source process and forward simulation of long-period ground motion of the 2018 Hokkaido Eastern Iwate, Japan, earthquake, *Earth Planets Space*, 72, 20, 2020.
 - 11) Goto, H.: Strong Ground Motions, EERI, Learning From Earthquakes, Noto Peninsula, Japan, https://www.learningfromearthquakes.org/images/EERI_Strong_Ground_Motions.pdf, 2024年6月25日
 - 12) Murata, A., Kitaura, M. and Miyajima, M.: Prediction of Damage to Structures through Fatigue Response Spectra Considering Number of Earthquake Response Cycles, Proc. of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.648, 2004.
 - 13) 能島暢呂：速度応答包絡線を用いた閾値超過継続時間のスペクトル表現とその応用，日本地震工学会論文集，Vol.15, No.1, pp.1-17, 2015.
 - 14) 秋山宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計，技報堂出版，228p., 1999.
 - 15) 大井謙一・高梨晃一・本間靖章：地震動のエネルギー入力率スペクトル，日本建築学会構造系論文報告集，第420号，pp.1-7, 1991.
 - 16) 翠川三郎・作川孝一：地震エネルギー入力の時刻歴特性に関する基礎的考察，日本建築学会構造系論文報告集，第453号，pp.57-63, 1993.
 - 17) 荻本英典・川島一彦・渡邊学歩・永田聖二：水平2方向地震力の同時作用がRC単柱式橋脚の耐震性に及ぼす影響，土木学会論文集，No.801/I-73, pp.33-50, 2005.
 - 18) 党紀・中村太郎・青木徹彦・鈴木森晶：正方形断面鋼製橋脚の水平2方向載荷ハイブリッド実験，土木学会構造工学論文集，Vol.56A, pp.367-380, 2010.
 - 19) 境有紀・熊本匠：地震動の方向性の定量的な検討と地震被害推定のための平均方向の提案，日本地震工学会論文集，Vol.10, No.5, pp.5_1-5_20, 2010.
 - 20) 能島暢呂・久世益充：地震動の水平成分の軸回転が振幅，継続時間特性に及ぼす影響，日本地震工学会論文集，第19巻，第5号，pp.5_46-5_58, 2019.
 - 21) 井上和真・齋藤溪太・梅山雄多・五十嵐晃・池田隆明：強震動の観測記録に基づく周期特性を考慮した2方向地震動の方向性分析，土木学会論文集 A1, Vol.76, No.4, pp.I_205-I_213, 2020.
 - 22) 山本大喜・能島暢呂：地震動要素としてのパルス波がもたらす作用に着目した強震動特性の評価法，土木学会論文集 A1, Vol.74, No.4, pp.I_1023-I_1034, 2018.
 - 23) 山本大喜・能島暢呂：構造物へのエネルギー入力に着目したパルス波の衝撃の効果の評価，土木学会論文集 A1, Vol.75, No.4, 2019, pp.I_262-I_272.
 - 24) (国研)防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET, KiK-net)，<https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004>, 2024年6月25日
 - 25) 気象庁，強震観測データ，令和6年(2024年)1月1日16時10分 石川県能登地方の地震，https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/2401011610_noto/index.html, 2024年9月13日
 - 26) Kikuchi, M. and H. Kanamori: Rupture Process of the Kobe, Japan, Earthquake of Jan. 17, 1995, Determined from Teleseismic Body Waves, *J. Phys. Earth*, 44, 429-436, 1996.
 - 27) 亀田弘行：強震地震動の非定常パワースペクトルの算出法に関する一考察，土木学会論文報告集，No.235, pp.55-62, 1975.
- (投稿受理：2024年6月30日
訂正稿受理：2024年9月14日)

要 旨

2024年能登半島地震で観測された強震動が構造物応答にもたらした動的効果について考察した。具体的には，筆者らの検討を基に，振動系のエネルギーの釣り合い式から得られる累積エネルギー入力を算出し，速度応答の時間変動について考察した。さらに，累積エネルギー入力スペクトル，エネルギー入力率スペクトルにより，各周期の速度応答の増加・抑制の影響を比較すると共に，周期帯別の累積エネルギー入力の変動より，経時特性について考察した。