2024 年能登半島地震の地震動特性と基礎免震構造物の耐震安全性について

中川　肇*　長谷川　泰一*　リータイイー*

Seismic Characteristics of 2024 Noto Peninsula Earthquake and Seismic Safety of Base Isolated Buildings

Hajime NAKAGAWA, Taichi HASEGAWA, LI TAI Y

ABSTRACT

On January 1st, 2024, it occurred Noto Peninsula earthquake with M7.6. This earthquake is near field earthquake and the depth of epicenter is about 16km. Due to the earthquake and huge tsunami, it was seen lots of timber and RC structural building's collapse. Deaths and disaster-related deaths were 341 and 112 respectively. Totally and partially collapsed buildings were 6,273 and 20,892, respectively.

This paper presents the seismic characteristics of 2024 Noto peninsula earthquake and the seismic safety of base isolated building with 11 stories. In this earthquake, there were 13 observation points near the epicenter in Ishikawa and Niigata prefectures. The predominant period of the ground motions varied from station to station, but ranged from medium to long period. According to the analytical results of base isolated model under L2 (50 cm/s) earthquake, the maximum displacement response at ISK002 (Shouin) and ISK008 (Hakui) are from 27.11cm to 36.71cm against NS, EW components The displacement became less than the allowable value (40cm) of the rubber bearing based on the design criteria for seismic isolation.

However, the original wave of this earthquake would need to be considered in detail in the future.

KEY WORDS: Seismic characteristics of Noto peninsula earthquake, Predominant period, Damage of many buildings, Seismic safety of base isolated buildings

1．はじめに

2024 年（令和 6 年）1 月 1 日、午後 4 時 10 分に石川県能登地方を震源（深さ約 16km）とするマグニチュード（M）7.6 の地震が発生した。この地震で石川県羽咋郡志賀町と輪島市で最大震度 7、珠洲市、七尾市、穴水町、能登町で震度 6 強、また、能登半島の広い範囲及び新潟県長岡市で震度 6 弱の揺れが確認された [1]。地震による大きな揺れとその後に発生した火災、また大規模に発生した液状化現象や津波による浸水で多くの人的被害、建物被害を受けた。

一般的に震源の浅い内陸活断層破壊地震では、津波は発生しないと言われているが、能登半島で発生した地震は日本海沿岸部であり、津波が発生し大津波警報が発令された。

本論の目的は、2 点である。1 点目は、能登半島地震において、防災科学研究所を管理する地震観測網（K-NET, Kik-net）による石川県、富山県、新潟県の観測 13 地点の地震動特性を把握する。特に、地震動の最大地動加速度、最大速度、卓越周期の算出である。2 点目は、13 地点の観測地点の内、3 秒～5 秒が卓越する入力地震動に対し、一例として、11 階建て RC 造基礎免震構造物の挙動と耐震安全性を確認することである。

*建築学科

2．能登半島地震の概要と既往の研究

2･1　地震の概要

2024 年 1 月 1 日、午後 4 時 10 分に石川県能登地方（北緯 37.5 度、東経 137.3 度）を震源とした M7.6 の大地震 [1),2)]が発生した。この地震は、震源深さ約 16km の逆断層型の地殻内地震（内陸活断層破壊地震）で、能登半島北側には、複数の海底活断層が存在し、石川県珠洲市沖から輪島市沖にかけて伸びる

2 つの活断層帯（長さ 60km）が連動しずれ動いた可能性が高いと言われている。

表 1 に石川県、新潟県、富山県各地の震度を示す。

表 1　石川県、新潟県、富山県各地の震度 [1),2)]

県名	震度	市・町
石川県	震度 7	志賀町、輪島市
	震度 6 強	七尾市、珠洲市、穴水町、能登町
	震度 6 弱	中能登町
	震度 5 強	金沢市、小松市、加賀市、羽咋市等
新潟県	震度 6 弱	長岡市
	震度 5 強	中央区、南区、西区、三条市、柏崎市等
富山県	震度 5 強	富山市、高岡市、氷見市等

本震の石川県、富山県、新潟県の震度分布 [3)]を図 1 に示す。また、この 3 県の人的被害、住家被害 [2)] を表 2 で示す。

図 1　能登半島地震の震度分布 [3)]

表 2　人的・住家被害の状況 [2)]

県名	死者(人)	災害関連死(人)	全壊（棟）	半壊（棟）
新潟県	2	2	108	3,866
富山県	0	0	255	783
石川県	339	110	5,910	16,231
合計	341	112	6,273	20,880

図 1、表 2 より、震度 7、6 強を観測した石川県では、死者数は 339 人、全壊、倒壊した建物数は、22,141 棟で全体の 76.9 %を示している。特に、木造家屋については、地震及び津波による倒壊、流出である。2007 年 3 月 25 日の能登半島地震以降、耐震補強が進んでいなかったことが一つの理由であると考えられる。この地震で亡くなった方々に心からお悔み申し上げます。

2･2　既往の研究

本節では、能登半島地震、免震建物の被害調査に関する既往の研究を紹介したい。

文献 4）より、中澤等は、震度 6 弱以上を観測した石川県（富来市、七尾市を含め）12 地点を対象とし、観測点周辺の地震被害調査を実施し、地震動のとの関係について検討を行った。被害調査の結果より、K-NET 穴水、輪島で建物の全壊・大破が確認され、K-NET 輪島では、全壊率が 34.4 %である。棟数が少ないため、全壊率は参考値であるが、K-NET 大谷、正院では、全壊率が 25 %～46.7 %となっている。一方、棟数は少ないが震度 7 を観測した K-NET 富来周辺に全壊した建物は見られなかった。この原因については、3 章で示す本震の地震動特性で少し説明したいと思う。

文献 5）より、汐満、境等は、能登半島地震動の破壊力を検証するために、木造建物を対象にした非線形地震応答解析を実施した。木造の復元力特性モデルは、大変形と繰り返しによる劣化を再現できる修正武田-スリップモデルである。この研究において、耐力が低い建物から高い建物までを想定し、降伏ベースシア係数 Cy を 0.1～2.0 まで変化させ、弾性周期 T=0.18 秒～0.5 秒に対し、木造建物の最大変形角 θ を求めた。解析結果より、全壊に対応する変形角 θ を 1/15 [rad] (=0.067 rad) すると、K-NET 富来の最大変形角 θ は全ての Cy で、K-NET 大町では、Cy=0.2 以上でこれを下回っている。一方、甚大な建物被害を生じた観測点（K-NET 正院、大谷、輪島、穴水）では、旧耐震基準のような古い木造家屋に大きな被害を引き起こす破壊力の地震動であることを記述している。

文献 6）より、平野、吉敷等の調査グループは、石川県、富山県、新潟県に存在する計 24 棟の免震建物の調査結果を示している。この 24 棟の内、「罫書記録あり」が 16 棟、「罫書記録なし」が 8 棟であった。この罫書記録によれば、石川県と富山県では、西方向に最大 2～4 cm 程度変形している。なお、調査を行った建物の内、最も計測震度を記録した七尾市内の免震建物では、南方向に最大 19.2 cm 変形している。一方、新潟県では、免震層の最大変位とその方向にはばらつきが見られ、最も大きい記録では、北東方向に 14.4 cm であった。方向、ばらつきについては、免震建物の形状や地盤性状の違いが影響し

ていると記述されている。

文献 7)、8）より、池田、岡本は、1940 年の El Centro 地震から 2024 年の能登半島地震までに観測された国内外の強震動の中から免震建物の 1 質点系モデルの地震応答解析において、免震層の変位応答量が 50 cm を超える水平方向 79 成分の地震動を採用している。2024 年能登半島地震の速度応答スペクトルが免震建物の強震時周期帯域 3.5 秒～5 秒において、100 cm/s を大きく超える成分があることを示している。解析結果より、通常の鉛入り積層ゴム（以下、LRB）のみでは、免震層の最大変形量が 50 cm ～180 cm となっており、変位依存型あるいは速度依存型のオイルダンパーを付加することで、50 cm 程度以内に低減できることを示している。

能登半島地震の地震動特性及び基礎免震構造物については、3 章、4 章で詳細に説明したいと思う。

3. 能登半島地震の地震動特性の分析

本章では、文献 9)、4)、6）を参考にし、石川県 11 地点、富山県 1 地点、新潟県 1 地点の計 13 地点の強震動記録（K-NET、一部 Kik-net）を基に、地震動特性特に、最大地動加速度、最大速度、卓越周期、卓越周期時の最大速度値を算出する。なお、加速度波形から速度波形の変換については、文献 10）の大崎法を用いている。

図 2 に観測地点の位置を、表 3 に観測 13 地点の諸元を示す。なお、NIG025（直江津）は新潟県で、図 2 中には示していない。

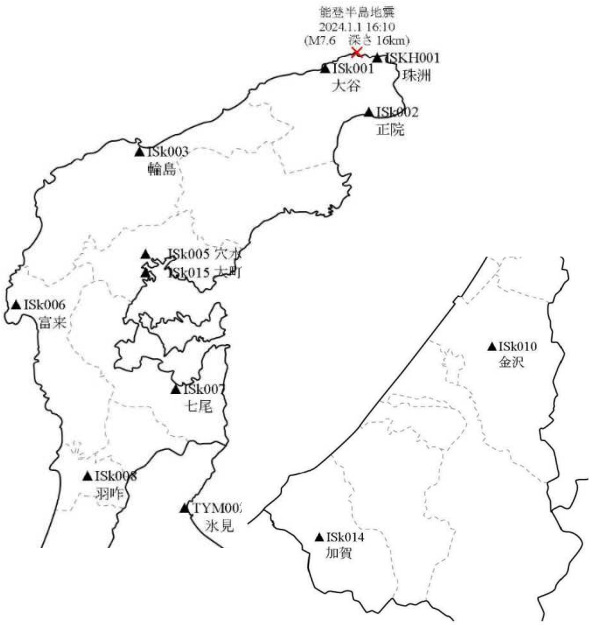

図 2　観測地 13 地点の位置

表 3　観測 13 地点の諸元

観測点コード	観測点名	成分	最大加速度 (cm/s^2)	最大速度 (cm/s)
ISK001	大谷	NS	903.84	**86.83**
		EW	1426.83	**117.27**
ISK002	正院	NS	685.76	**98.42**
		EW	708.17	**119.29**
ISK003	輪島	NS	1496.85	**102.50**
		EW	1122.67	**78.32**
ISK005	穴水	NS	1023.67	**119.45**
		EW	1145.74	**155.60**
ISK006	富来	NS	1482.69	**84.516**
		EW	2679.70	**78.918**
ISK007	七尾	NS	375.59	44.228
		EW	359.10	49.91
ISK008	羽咋	NS	372.05	44.89
		EW	479.01	66.42
ISK010	金沢	NS	214.94	13.57
		EW	162.97	12.62
ISK014	加賀	NS	178.36	23.64
		EW	252.49	20.34
ISK015	大町	NS	979.27	73.46
		EW	926.82	**108.38**
ISKH001	珠洲	NS	594.63	**96.57**
		EW	747.38	**91.30**
NIG025	直江津	NS	262.76	38.13
		EW	231.10	30.70
TYM002	氷見	NS	403.56	30.70
		EW	259.94	39.82

表 3 より、最大速度について、国土交通省告示 1461 号に示されている「極めて稀に発生する地震動」の最大速度値 75 cm/s（以下、L3 地震動）～99.9 cm/s には、**青字**を、100 cm/s 以上には**赤字**とした。26 成分中、青字の波形が 7 波形、赤字が 6 波形であり、全体の 50 %であることが分かる。

この地震動では、最大加速度が 1G の 980 cm/s^2 以上の場合、最大速度は、75cm/s 以上であるが、震源に最も近い ISKH001 珠洲市では、最大加速度が、夫々 594.63 cm/s^2、747.38 cm/s^2 に対し、最大速度が 96.57 cm/s、91.30 cm/s になっていることが分かる。

一般的な内陸型地震動の速度値より大きい地震である。

図 3～7 には、表 3 に示した観測 13 地点、NS、EW 成分の計 26 波形を示している。また、図 8、9 には、減衰定数 5 %で計算した図 3～7 の地震動波形の速度応答スペクトルを示している。

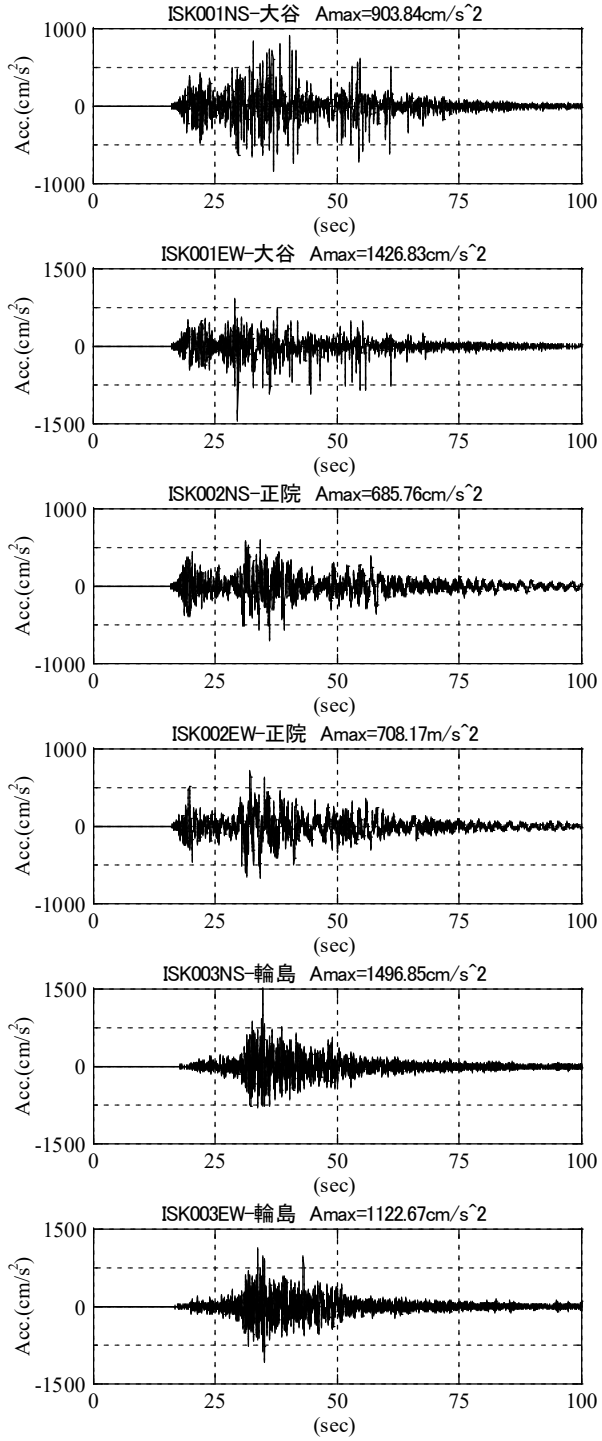

図 3　能登半島地震（ISK001,002,003NS-EW）

図 3 より、震源地に近い ISK001～003 の大谷、正院、輪島の最大地動加速度は、685.76 cm/s^2～1496.85 cm/s^2 となっている。内陸型活断層破壊地震の特徴を示す重力加速度 1G（=980 cm/s^2）以上であることが分かる。ISK001 大谷では、30 秒～60 秒付近で観測記録にパルス的な成分を含んでいるように思う。K-NET 地震計の感度が 1995 年時に比べ改良され、従来、観測されていない振動数領域での波形が観測されていると推察している。

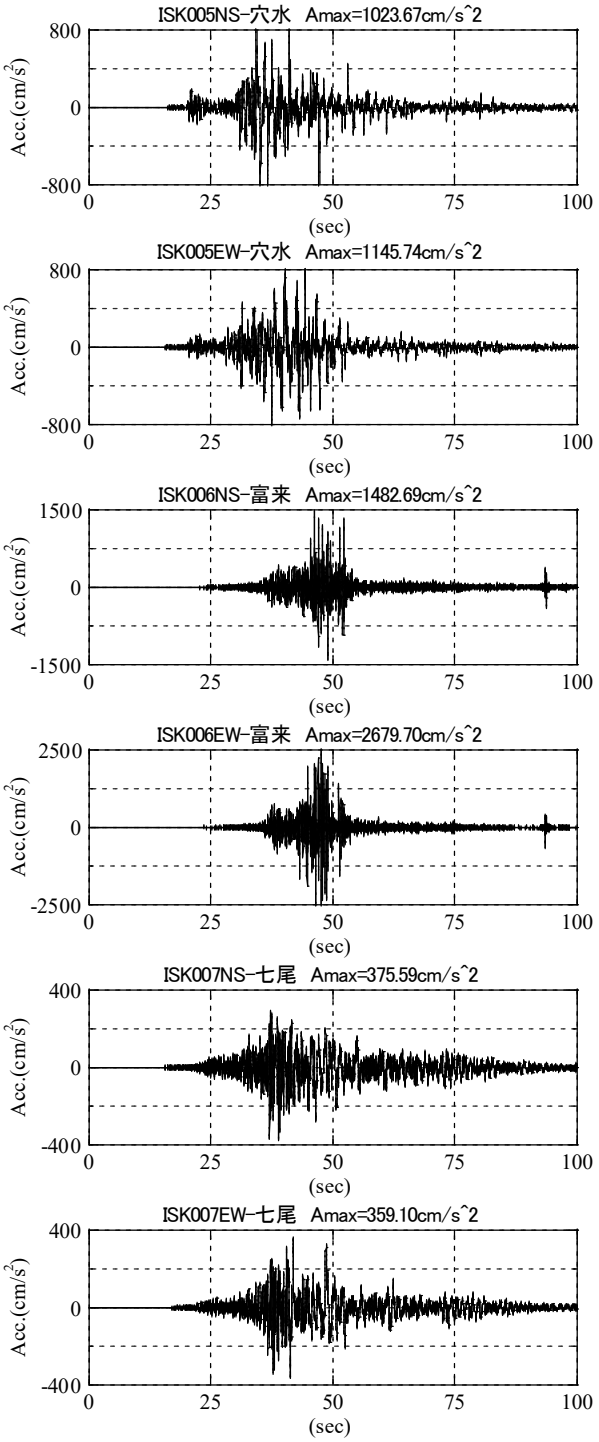

図 4　能登半島地震（ISK005,006,007NS-EW）

図 4 より、図 2 に示した能登半島の中央部に位置する ISK005～007 の穴水、富来、七尾の最大地動加速度は、359.10 cm/s^2～2679.70 cm/s^2 となっている。ISK007 七尾以外は、図 3 と同様に、重力加速度 1G（=980 cm/s^2）以上であることが分かる。特に、ISK005 穴水、ISK006 富来では、30 秒～55 秒付近、

35 秒～55 秒付近でパルス的な成分を含んでいるように思う。この扱いについては、今後検討したい。

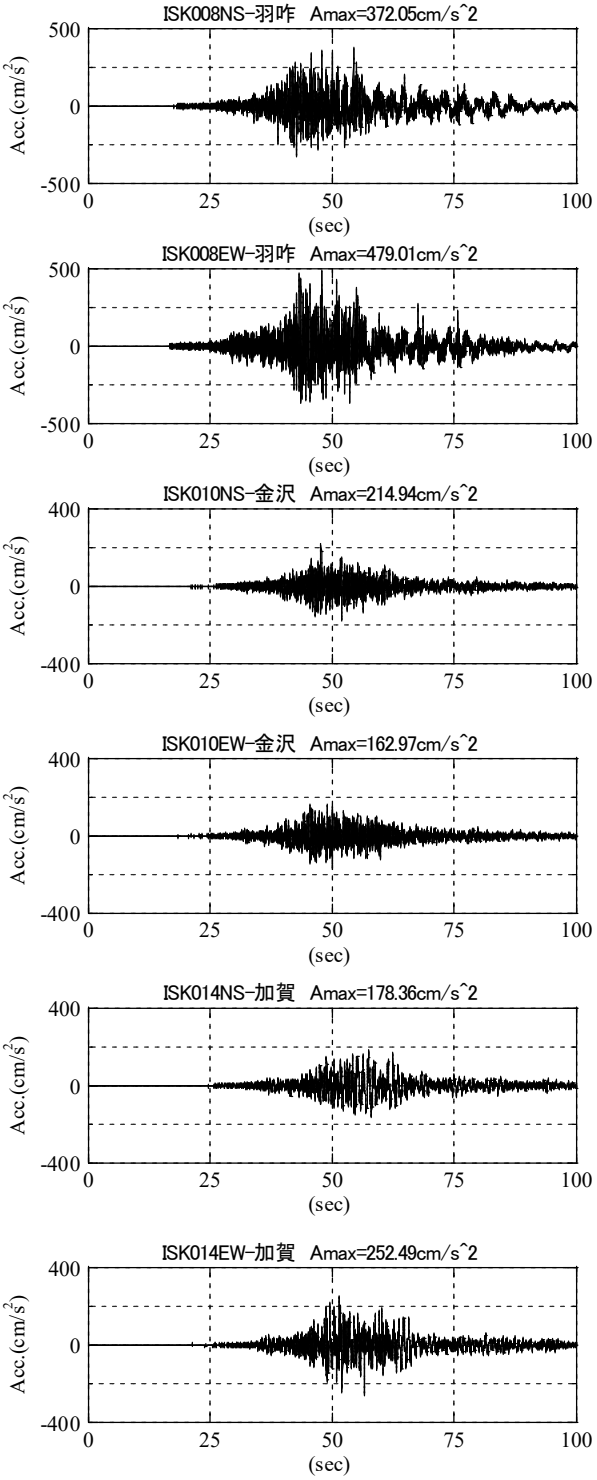

図 5　能登半島地震（ISK008,010,014NS-EW）

図 5 より、震源地に近い ISK008、010、104 の羽咋、金沢、加賀の最大地動加速度は、162.97 cm/s^2～479.01 cm/s^2 となっており、図 3、4 に示した観測 6 地点の最大値より小さくなっていることが分かる。ISK008 羽咋を除き、観測記録にパルス的な成分は見られなくなっている。

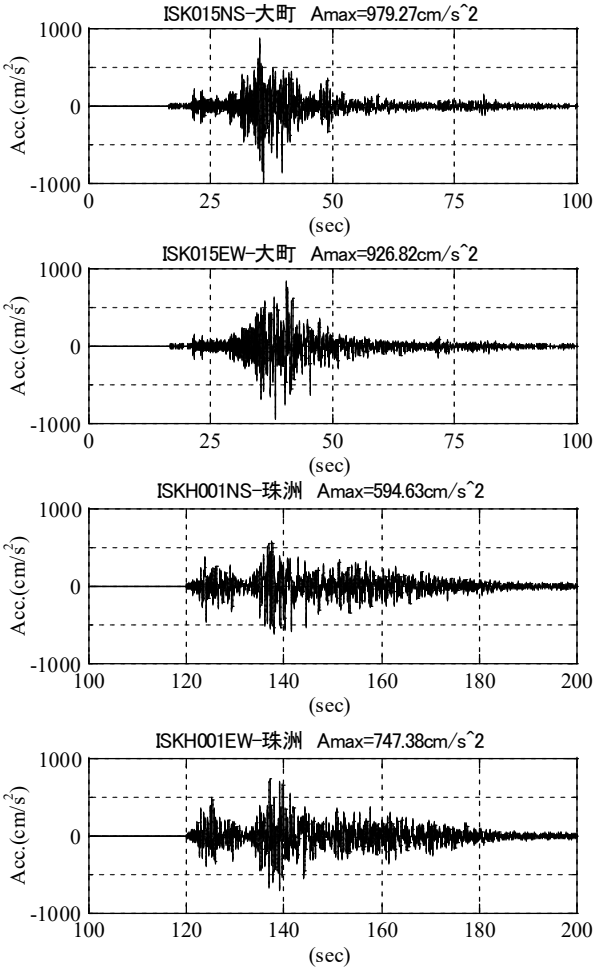

図 6　能登半島地震（ISK015, ISKH001NS-EW）

ISKH001 珠洲の観測記録は、防災科学研究所が管轄、運営する Kik-net の地震観測網の記録である。

図 6 より、ISK015 の大町の最大地動加速度は、両成分とも 979.27 cm/s^2、926.82 cm/s^2 となっている。

ISKH001 珠洲は、震源地に最も近く、最大地動加速度は 594.63 cm/s^2、747.38 cm/s^2 であるが、最大速度が 96.57 cm/s、91.30 cm/s となっていることが分かる。地震動の卓越周期については、図 8 以降で速度応答スペクトルを示し説明するが、内陸型活断層破壊地震で、90 cm/s を超え、卓越周期が 1～2 秒付近に存在する場合、木造、低層の鉄筋コンクリート構造（以下、RC 造）の建物が被害を受ける可能性が高い。能登半島地震において、木造建物、RC 造建物が被害を受けていることは、文献、報道等で明らかになっている。

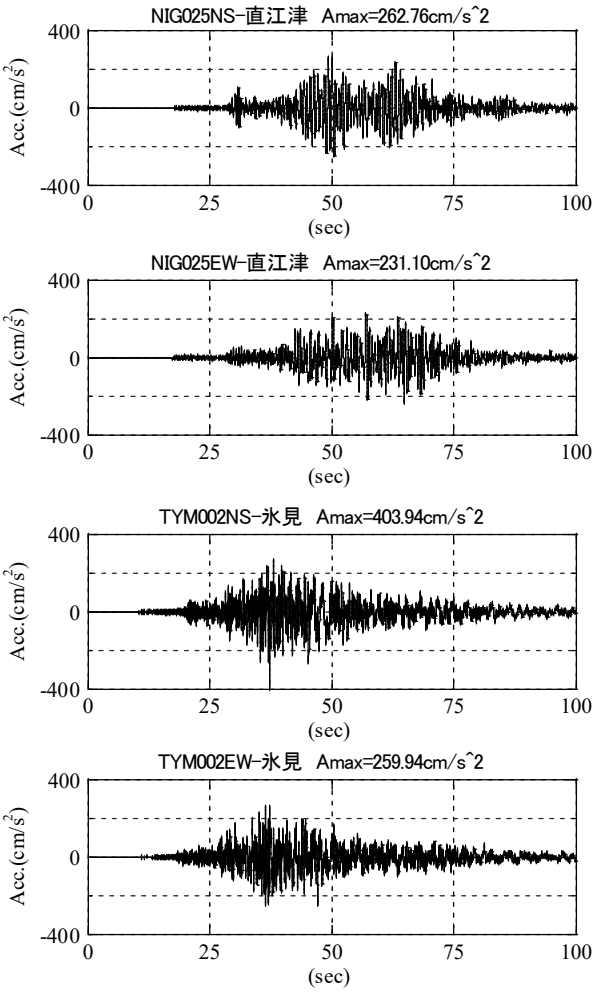

図 7　能登半島地震（NIG025, TYM002NS-EW）

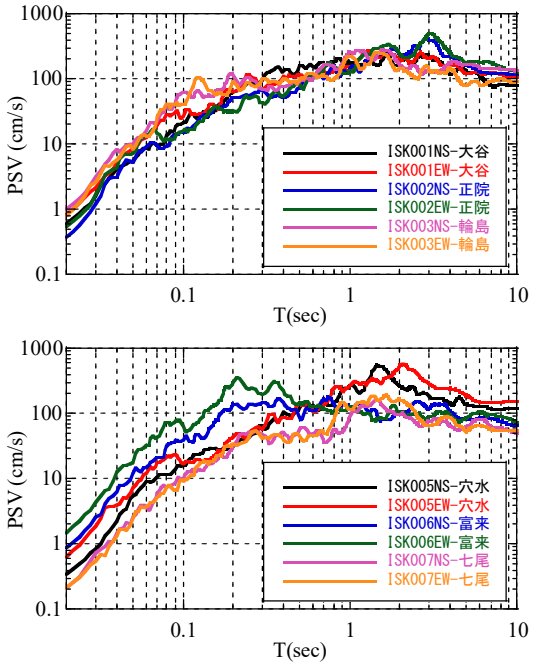

図 8　速度応答スペクトル（ISK001～ISK007）

図 7 より、新潟県 NIG025 直江津、富山県 TYM002 氷見の最大地動加速度は、231.10 cm/s^2～403.56 cm/s^2 であり、また、最大速度値は表 3 より、30.69 cm/s～38.13 cm/s であることが分かる。

図 8 より、地震動の卓越周期が 1 秒以下の短周期（0.21 秒、0.75 秒）を示したのが、ISK006 富来である。富来の最大加速度は 2679.70 cm/s^2 であるが、卓越周期が 1 秒以下であり、1～2 秒付近の速度応答値が他に比べ小さく、震度 7 を観測しているが、建物の被害は軽微である [4]。また、地震動の卓越周期が 1～2 秒の中周期を示したのが、ISK001 大谷、ISK003 輪島、ISK005 穴水、ISK007 七尾であることが分かる。地震動の卓越周期が、2 秒以上の長周期を示したのは、ISK002 正院で、地震動の最大速度が両成分とも 98.42 cm/s、119.29 cm/s であり、高速の長周期地震動であることが分かる。

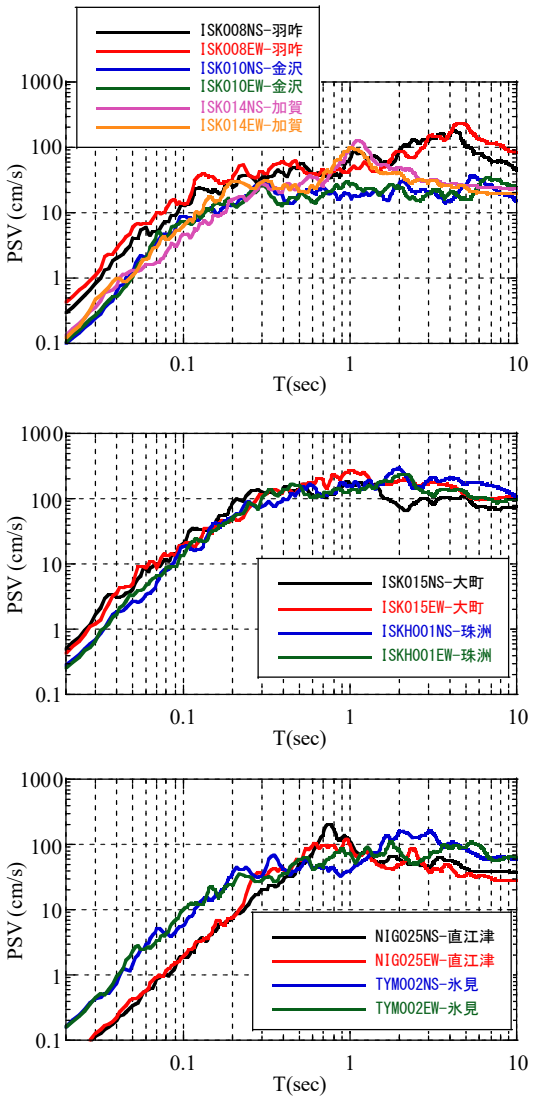

図 9　速度応答スペクトル（ISK008～TYM002）

詳細の結果については、表 4 に示すことにする。

図 9 より、地震動の卓越周期が 4 秒以上の長周期を示したのは、ISK008 羽咋と ISK010 金沢である。ISK008 羽咋の卓越周期は、両成分とも 4.2 秒、4.78 秒である。一方、ISK010 金沢の卓越周期は、両成分とも 5.46 秒、6.76 秒を示しているが、スペクトル図を詳細に見ると、約 0.5 秒以上、ほぼ変化なく一定である。地震動の最大地動速度は、13.57 cm/s、12.62 cm/s と小さく、建物への被害は少ないと考えている。

それ以外の 5 地点の卓越周期は、0.75 秒～2 秒の中周期であることが分かる。

表 4 には、図 8、9 に示した観測 13 地点での NS、EW 成分での卓越周期と卓越周期時の最大速度値を示している。なお、表中の**赤字**は、卓越周期が長周期成分を示した観測点と最大速度が他に比べ大きい観測点である。**青字**は、卓越周期が中周期である。

表 4　能登半島地震の卓越周期と最大速度値

観測点コード	観測点名	成分	卓越周期 (秒)	最大速度値 (cm/s)
ISK001	大谷	NS	1.68	237.36
		EW	1.28	265.60
ISK002	正院	NS	**2.88**	**422.07**
		EW	**3.04**	**490.07**
ISK003	輪島	NS	1.58	277.89
		EW	1.46	258.82
ISK005	穴水	NS	**1.48**	**536.13**
		EW	**2.06**	**562.05**
ISK006	富来	NS	0.75	174.42
		EW	0.21	358.92
ISK007	七尾	NS	1.44	159.63
		EW	1.64	189.36
ISK008	羽咋	NS	**4.20**	**182.31**
		EW	**4.78**	**237.00**
ISK010	金沢	NS	**5.46**	**36.71**
		EW	**6.76**	**33.71**
ISK014	加賀	NS	1.12	125.32
		EW	1.02	100.99
ISK015	大町	NS	0.97	187.77
		EW	1.02	272.32
ISKH001	珠洲	NS	1.96	291.89
		EW	2.00	231.40
NIG025	直江津	NS	0.75	206.60
		EW	0.96	121.90
TYM002	氷見	NS	2.04	163.83
		EW	1.78	110.24

表 4 より、地震動の卓越周期時の最大速度値が最も大きいのが、ISK005 穴水であるが、卓越周期が NS、EW 成分とも、1.48 秒、2.06 秒と中周期である。

ISK002 正院の卓越周期は、両成分とも、2.88 秒、3.04 秒で、長周期成分が卓越していると考えられる。

また、ISK008 羽咋の卓越周期は、NS、EW 成分とも 4.2 秒、4.78 秒で、長周期成分が卓越していることが分かる。卓越周期時の最大速度値は、182.31 cm/s、237.00 cm/s で、ISK002 正院より小さいことが分かる。これは、観測された原波の最大地動加速度が ISK002 正院の方が ISK008 羽咋より 1.84 倍、1.48 倍大きいためと考えている。

4. 基礎免震系モデルの解析結果

4-1 解析モデルと入力地震動モデル

本論では、RC 造 10 階建ての集合住宅（35 m×13 m の床面積 455 m^2、構造階高 3.2 m、地上 35.2 m、塔上比（X 方向が 1.00、Y 方向が 2.7）の基礎部に鉛入り積層ゴム（LRB）、を配置する 11 階建ての免震構造物を考える。つまり、上部構造物が 10 質点と免震層 1 質点を加えた 11 質点系の基礎免震系を意味する。LRB の荷重変形関係は、Bi-linear 型履歴特性とする。なお、免震構造物の場合、上部構造物は、弾性域を振動するために、その荷重・変形関係は線形モデルとする。上部構造物の 1 次固有周期を X 方向が 1.0 秒、Y 方向が 0.7 秒とし、基礎免震構造物の 1 次固有周期は、両方向とも 4 秒とする。ただし、各階の重量 Wi は一定で、3,640 kN とし、LRB の降伏せん断力係数 α は、全重量の 5 %とする。

入力地震動波形は、3 章の図 8、図 9 及び表 4 を参考に、基礎免震建物の挙動、耐震安全性を確認することを想定し、長周期成分が卓越する地震動波形として、ISK002 正院と ISK008 羽咋の観測 2 地点とする。免震建物の実施設計で採用している国土交通省告示 1461 号に示されている「稀に発生する地震動」と同等の地震動の 1.0 倍、所謂、最大速度 50 cm/s のレベル 2 地震動（以下、L2 地震動）とする。また、参考までに、「極稀に発生する地震動」と同等の最大速度 75 cm/s のレベル 3 地震動と原波（100 %）について、解析を実施する。

本論では、基礎免震系における免震層の最大変位応答及び絶対加速度応答の閾値（基準値）は以下の通りで規定する。

【1】L2 地震動に対し、免震層の最大変位応答は、積層ゴムの最大せん断歪 200 %（ゴム総厚 20 cm）の 40 cm 以下、絶対加速度応答は 300 cm/s^2 以下とする。

【2】L3 地震動に対し、免震層の最大変位応答は、積層ゴムの最大せん断歪 300 %（ゴム総厚 20 cm）の 60 cm 以下、絶対加速度応答は 500 cm/s^2 以下と

する。

4･2 最大速度 50 cm/s 入力時の解析結果

図 10、図 11 には、ISK002 正院（NS,EW 成分）、ISK008 羽咋（NS,EW 成分）を受ける基礎免震系の最大層間変位応答と絶対加速度応答が描かれている。図中には、積層ゴムの最大せん断歪 200 %（=40 cm）と絶対加速度応答の基準値 300 cm/s^2 を緑色で示している。

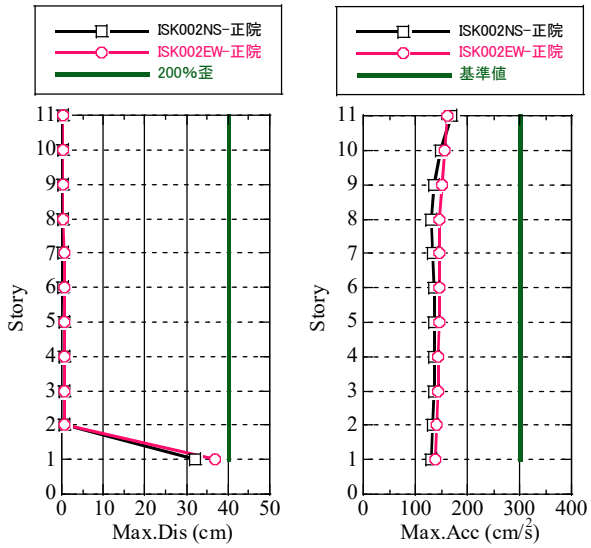

図 10　最大層間変位応答と絶対加速度応答
(ISK002 正院)

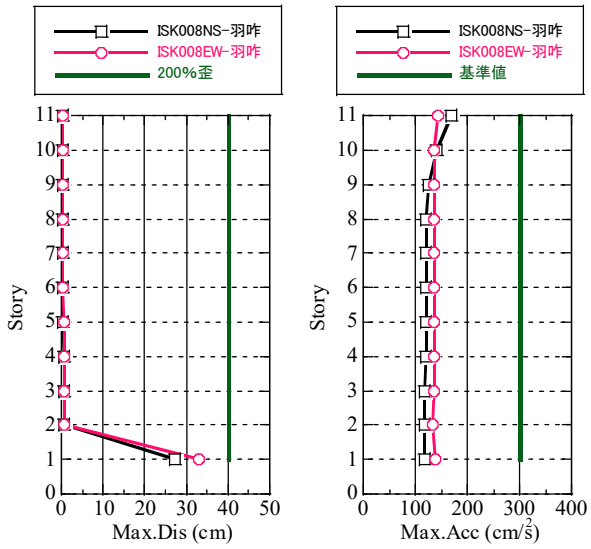

図 11　最大層間変位応答と絶対加速度応答
(ISK008 羽咋)

図 10 より、ISK002 正院での最大層間変位応答分布において、免震層の最大変位応答は、NS、EW 成分に対し、31.97 cm（せん断歪 160 %）、36.71 cm（せん断歪 184 %）で積層ゴムの最大せん断 200 %の 40 cm 以下となっている。また、上部構造物の層間変位応答は、NS 成分が 0.67 cm～0.29 cm の範囲を、EW 成分が 0.67 cm～0.29 cm の範囲を推移しており、層間変形角 θ で表現すると 1/477～1/1103、1/507～1/1280 となり、弾性域であることが分かる。一方、絶対加速度応答については、免震層の加速度応答は、NS、EW 成分に対し、131.52 cm/s^2、131.14 cm/s^2 であり、図 1 に示した L2 地震動の閾値（基準値）以下でかつ L2 入力地動加速度 384.40 cm/s^2、296.84 cm/s^2 の 65.8 %、53.1 %まで低減できることが分かる。

図 11 より、ISK008 羽咋での最大層間変位応答分布において、免震層の最大変位応答は、NS、EW 成分に対し、27.11 cm（せん断歪 136 %）、33.06 cm（せん断歪 165 %）で積層ゴムの最大せん断 200 %の 40 cm 以下となっている。また、上部構造物の層間変位応答は、NS 成分が 0.55 cm～0.29 cm の範囲を、EW 成分が 0.62 cm～0.25 cm の範囲を推移しており、層間変形角 θ で表現すると 1/582～1/1103、1/516～1/1280 となり、弾性域であることが分かる。一方、絶対加速度応答については、免震層の加速度応答は、NS、EW 成分に対し、118.80 cm/s^2、138.57 cm/s^2 であり、L2 地震動の閾値（基準値）以下でかつ L2 入力地動加速度 414.42 cm/s^2、360.61 cm/s^2 の 71.3 %、61.6 %まで低減できることが分かる。

本解析結果より、耐震安全性上、問題ないと言えるが、観測 2 地点での結果に過ぎず、今後、上部構造物の層数を低層から中層まで、基礎免震構造物の 1 次固有周期を 3.5 秒～5 秒まで変化した場合の解析は必要である。また、他 11 地点の観測波形についても検討が必要である。この検討については、明石高専研究報告第 2 号で報告したいと考えている。

4･3 最大速度 75cm/s 入力及び原波時の解析結果

本節では、4.2 節の入力地震動を L3 地震動と原波に変え、地震応答解析を実施し、免震層の最大層間変位応答と絶対加速度応答について検討する。表 5～8 は、4.2 節で示した ISK002 正院、ISK008 羽咋の観測記録に対し、最大速度を 75 cm/s 入力（L3 地震動）及び表 3 に示した原波（100 %）を入力した場合の基礎免震構造物の解析結果をしている。表中の低減率は、1.0－(免震層の A1max／地動加速度)で計算し、%表示した数値である。

表 5 より、L3 地震動入力の解析結果では、免震

層の最大層間変位応答 D_{1max} は 57.49 cm（せん断歪 287 %）で、絶対加速度応答 A_{1max} は 189.73 cm/s^2 で 4.1 節の設計方針で示した基準値、つまり、最大せん断歪 300 %以下、絶対加速度値 500 cm/s^2 以下で、問題なく制御できる。

表 5　L3 地震動と原波時の解析結果（ISK002-NS）

観測点コード・名	区分	75cm/s 入力 (L3 地震動)	原波入力 (100%)
ISK002 正院 NS	Amax (cm/ s^2)	522.60	685.76
	免震層 D_{1max} (cm)	57.49	**94.47**
	せん断歪(%)	287	**472**
	免震層 A_{1max} (cm/ s^2)	189.73	269.29
	低減率 (%)	63.7	60.7

しかし、ISK002 正院 NS の最大速度は 98.42 cm/s で、国土交通省が示す「極稀に発生する地震動」の L3 地震動以上となり、免震層を構成する LRB のみでは、免震層の最大層間変位応答を 60 cm 以下とはならず、免震用のオイルダンパーを付加的に設置することが必要である。

過去、筆者は、文献 11)、12）に示したように、宝永南海地震などの長時間・長周期地震動を LRB 内の鉛プラグが受けた場合、プラグ内部の温度上昇が発生し、鉛プラグのせん断耐力が低下し、この耐力低下を考慮した解析を実施している。免震用のオイルダンパーを付加的に設置し、免震層の最大変位応答を 60 cm 以下に留めることが可能であることを示している。本研究においても、今後、免震用オイルダンパーを採用し、原波においても制御可能であることを検証しなければならない。

表 6　L3 地震動と原波時の解析結果（ISK002-EW）

観測点コード・名	区分	75cm/s 入力 (L3 地震動)	原波入力 (100%)
ISK002 正院 EW	Amax (cm/ s^2)	445.26	708.17
	免震層 D_{1max} (cm)	**62.31**	**109.64**
	せん断歪(%)	**312**	**548**
	免震層 A_{1max} (cm/ s^2)	139.14	304.88
	低減率 (%)	55.9	56.9

表 6 より、表 5 の NS 成分とは若干異なり、L3 地震動、原波入力時の免震層の最大変位応答 D_{1max} は、夫々、62.31 cm（せん断歪 312 %）、109.64 cm（せん断歪 548 %）となり、最大せん断歪 300 %以上で過大変形となることが分かる。一般に免震層周辺に擁壁までに 60 cm～1 m のクリアランスを設けるが、表 6 の結果では、免震層の積層ゴムが擁壁に衝突することになる。衝突防止策として、表 5 の考察で述べたように、免震層の過大変形を抑制するために、免震用のオイルダンパーを適切に設置しなければならない。一方、免震層の絶対加速度応答 A_{1max} は、夫々 139.14 cm/s^2、304.88 cm/s^2 であり、絶対加速度の基準値 500 cm/s^2 以下で、問題なく制御できることが分かる。

表 7　L3 地震動と原波時の解析結果（ISK008-NS）

観測点コード・名	区分	75cm/s 入力 (L3 地震動)	原波入力 (100%)
ISK008 羽咋 NS	Amax (cm/ s^2)	621.62	372.05
	免震層 D_{1max} (cm)	58.58	23.20
	せん断歪(%)	293	116
	免震層 A_{1max} (cm/ s^2)	196.90	106.04
	低減率 (%)	68.3	71.5

表 8　L3 地震動と原波時の解析結果（ISK008-EW）

観測点コード・名	区分	75cm/s 入力 (L3 地震動)	原波入力 (100%)
ISK008 羽咋 EW	Amax (cm/ s^2)	540.92	479.01
	免震層 D_{1max} (cm)	43.79	34.66
	せん断歪(%)	220	173
	免震層 A_{1max} (cm/ s^2)	184.3	141.15
	低減率 (%)	65.9	70.5

表 7、8 より、ISK008 羽咋の最大速度は、両成分とも 44.89 cm/s、66.42 cm/s で、L3 地震動の 75 cm/s 以下である。最初に原波入力時の免震層の最大変位応答 D_{1max} は、両成分に対し、23.2 cm（せん断歪 116 %）、34.66 cm（せん断歪 173 %）で、絶対加速度応答 A_{1max} は、夫々 106.0 cm/s^2、141.15 cm/s^2 で、基準値の 200 %歪、300 cm/s^2 以下であり、問題なく制御できることが分かる。また、L3 地震動時は、免震層の最大変位応答 D_{1max} は、両成分に対し、58.58 cm（せん断歪 293 %）、43.97 cm（せん断歪 200 %）で、絶対加速度応答 A_{1max} は、夫々 196.9 cm/s^2、184.3 cm/s^2 で、基準値の 300 %歪、500 cm/s^2 以下であり、問題なく制御できることが分かる。

5．まとめ

本論では、①令和 6 年 1 月 1 日、午後 4 時 10 分に発生した能登半島地震の概要、人的・住家被害の状況、地震動特性の分析、②RC 造 11 階建て免震構造物の耐震安全性について、解析的な立場から論じた。解析結果から得られた工学的な知見は、以下の通りである。

1) 能登半島地震において、K-NET、Kik-net で観測した 13 地点の地震動分析では、最大速度が 75 cm/s を超える観測地点は 6 地点で全体の 46%である。2 秒以上長周期成分が卓越した地震動は、4 地点で、他 9 地点は 2 秒以下の中周期、短周期の地震動である。
2) 鉛入り積層ゴムを有する RC 造 11 階建て基礎免震構造物について、長周期成分が卓越した ISK002 正院波と ISK008 羽咋波を受ける地震応答解析を実施した。解析結果より、最大速度 50cm/s 入力では、両地震波形とも、免震層、上部構造物の耐震安全性は確保でき、問題なく制御できる。
3) 最大速度 75 cm/s、観測原波では、ISK008 羽咋波は、問題なく制御できるが、ISK002 正院の 75 cm/s（EW 成分）及び原波入力時において、免震層の最大変位応答が 60 cm 以上となることが分かる。最大せん断歪 300 %（=60 cm）以下にするために免震用のオイルダンパーを付加的に設置することが必要である。

本論では、②基礎免震建物の耐震安全性の検証を観測 2 地点に対し実施している。その他の 11 地点、上部構造物の階数、免震建物の 1 次固有周期の変動に対し検討が必要であり、稿を改めて論じたいと思う。

参考文献

1) 内閣府非常災害対策本部：令和 6 年能登半島地震に係る被害状況等について、2024.1.2
2) 内閣府非常災害対策本部：令和 6 年能登半島地震に係る被害状況等について、2024.8.21
3) 気象庁：2024 年 1 月 1 日能登半島地震の震度分布図、https://www.jma.go.jp/jma/press/2401/01c/kaisetsu202401012130.pdf
4) 中澤駿佑、汐満将史、境有紀：2024 年能登半島地震における建物被害と発生した地震動の破壊力（その 1）強震観測点周辺の被害状況と地震動の性質、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）B-2、7～8 頁、（2024）
5) 汐満将史、中澤駿佑、境有紀：2024 年能登半島地震における建物被害と発生した地震動の破壊力（その 2）非線形地震応答解析による地震動の破壊力の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）B-2、9～10 頁、（2024）
6) 平野一郎、吉敷祥一ほか：令和 6 年能登半島地震における石川県・富山県・新潟県の建物調査 その 1：免震建物の調査報告、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）B-2、243～244 頁、（2024）
7) 池田雄一、岡本尚大：国内外において観測された強震動に対する基礎及び中間層免震建物の地震応答性状に関する研究－その 1 免震層に大きな変位応答を生じさせる強震動の免震層変位応答量－、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）B-2、903～904 頁、（2024）
8) 岡本尚大、池田雄一：国内外において観測された強震動に対する基礎及び中間層免震建物の地震応答性状に関する研究－その 2 免震層直上階の応答加速度及び応答速度と免震層変位応答の関係－、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）B-2、905～906 頁、（2024）
9) 防災科学技術研究所：令和 6 年能登半島地震による強震動、強震観測網（K-NET, Kik-net）、https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoushin/
10) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門、133～138 頁、鹿島出版会、（1994）
11) 中川肇、角野嘉則：想定南海トラフ地震動を受ける鋼構造基礎免震構造物の耐震安全性の検証について～関西圏・中京圏・静岡圏での解析結果～、第 30 回鋼構造年次報告集、日本鋼構造協会、571～578 頁、（2022）
12) 中川肇、角野嘉則：宝永南海地震を受ける鉛プラグの耐力低下を伴う超高層基礎免震構造物をどのように設計すべきか、第 32 回鋼構造年次報告集、726～735 頁、日本鋼構造協会、（2024）