

長周期地震動に対する中間層免震建物の
積層ゴムアイソレータに生じる引き抜きに関する研究
－平成28年熊本地震の強震動と比較した
長周期地震動によって生じる引張地震応答量に着目して－

山脇 拓巳*・池田 雄一**

**A Study on Laminated Rubber Isolator Uplift of Mid-Story Isolation Building
Subjected to Long-Period Ground Motion**
－ Focusing on Long Period Ground Motion Compared with The 2016 Kumamoto Earthquake Ground Motion －

Takumi YAMAWAKI*, Yuichi IKEDA**

Summary

In this paper, we analyzed the 2011 Tohoku earthquake and the 2016 Kumamoto earthquake. We considered the relationship between maximum tensile surface pressure and isolation seismic displacement. In addition, we considered bouncing compressive stress as a great influence on isolator earthquake records.

Keywords : The 2011 Tohoku earthquake, The 2016 Kumamoto earthquake, Mid-story isolation building, Uplift of Isolator, Long period ground motion

1. はじめに

近年日本各地において震度7の揺れを伴う地震が発生している。その中でも2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では特に津波による被害が大きく、長周期地震動の強震動成分を含む地震であった。2016年に発生した熊本地震では、熊本県益城町において木造家屋が倒壊・全壊する多くの建物被害を受けた。このような震度7の揺れを28時間のうちに立て続けに2度も受けるような地震入力について耐震設計では想定されていなかった。この2つの地震では強震動が及ぼす建物被害の傾向、そして強震動特性も違っていた。

本論文で扱う中間層免震建物は基礎免震建物と違い、免震層が基礎に設置されていないため、地下に免震層クリアランスを設ける必要がなく都市部等の地価の高価な場所での建設が期待されている。しかし、中間層免震建物は免震層を中間階に設置し、免震層を介して建物を上部構造と下部構造に分かれる構造のため、免震構造において問題となっている積層ゴムアイソレータ（以下アイソレータと示す）に引き抜きが生じた場合、上部構造の転倒・落下の最悪のケースが生じる可能性が否定できない。

* 高知工業高等専門学校専攻科建設工学専攻

** 高知工業高等専門学校ソーシャルデザイン工学科まちづくり・防災コース准教授

著者らは、中間層免震建物のアイソレータの引き抜き問題について取り扱うために、中間層免震建物用の平面骨組振動系モデル¹⁾を使用し、地震応答解析を実施した。これまでに著者らは熊本地震前震・本震強震動を入力した際の中間層免震建物のアイソレータの、その強震動に対する引き抜き問題に関して研究を行った。そして直下型地震である熊本地震に対する中間階免震層のアイソレータの引き抜きに及ぼす性状について報告を行った²⁾。

本論文では、2011年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動を用いて、その長周期地震動が中間層免震建物のアイソレータの引き抜きに及ぼす影響について、2016年熊本地震前震・本震の強震動と比較しながら考察を行った。

2. 解析に用いた長周期地震動と内陸直下地震の強震動

2-1. 解析に用いた強震動の水平成分・上下成分

本論文では、長周期地震動の強震動として2011年東北地方太平洋沖地震、内陸直下型地震の強震動として熊本地震前震・本震の強震記録を用いる。この強震記録を表1・表2に示す。強震動水平成分の最大速度振幅を横軸に、上下成分の最大速度振幅を縦軸に示したものを図1に示す。

図1より東北地方太平洋沖地震では上下動の加速度が熊本地震に比して小さく、水平動の影響の方が、建物の地震応答量に与える影響は大きいと考えられる。また、図1の熊本地震前震・本震の場合には、特に本震の場合において水平動の最大速度振幅及び上下動の最大加速度振幅がともに大きい。

なお、熊本地震前震・本震の強震記録に関しては、水平動成分と上下動成分を入力する際に、最も過酷な地震入力をするため、観測強震記録に周期1秒から4秒のバンドパスフィルターを施した後に、その平面加速度軌跡における最大加速度振幅を強軸(H1)と、これに反時計回りに90度傾いた弱軸(H2)を算出した。算出した強軸(H1)・弱軸(H2)より、強震動原波加速度時刻歴を強軸(H1)・弱軸(H2)に変換し、強軸(H1)が東西軸に、弱軸(H2)が南北軸になるように加工して用いている。

表1 長周期地震動である東北地方太平洋沖地震の強震記録

観測点	成分	最大加速度振幅 (cm/s ²)	最大速度振幅 (cm/s)	観測点	成分	最大加速度振幅 (cm/s ²)	最大速度振幅 (cm/s)
MYG006 古川	NS	444.1	58.24	TKY017 辰巳	NS	219.4	29.53
	EW	571.5	90.42		EW	157.6	30.32
	UD	238.8	23.49		UD	82.2	8.17
MYG013 仙台	NS	1517.2	74.27	TKY007 新宿	NS	192.4	17.55
	EW	982.3	40.71		EW	166.4	18.57
	UD	290.1	26.26		UD	75.4	7.44
CHB024 稲毛	NS	232.1	29.07	KNGH10 横浜	NS	209.4	23.00
	EW	203.2	31.25		EW	277.0	26.00
	UD	85.6	9.62		UD	122.0	8.35
CHB008 浦安	NS	125.1	27.41	AICH13 清須	NS	16.1	5.00
	EW	157.3	30.34		EW	15.9	4.25
	UD	75.2	7.62		UD	6.3	2.49
CHBH10 千葉	NS	106.7	21.5	OSKH02 此花	NS	14.8	10.33
	EW	131.4	19.35		EW	16.1	10.58
	UD	88.4	9.24		UD	6.9	3.87

表2 内陸直下型地震である熊本地震前震・本震の強震記録

	観測点	成分	前震 M6.5		本震 M7.3			
			最大加速度振幅 (cm/s ²)	最大速度振幅 (cm/s)	最大加速度振幅 (cm/s ²)	最大速度振幅 (cm/s)		
前震 M6.5	KMM004 一の宮	H2	38	2.8	KMM004 一の宮	H2	261	68.0
		H1	32	3.5		H1	379	85.2
		UD	35	2.3		UD	269	21.5
	KMM006 熊本	H2	372	58.2	KMM006 熊本	H2	609	57.5
		H1	514	58.4		H1	664	83.1
		UD	326	13.5		UD	534	33.0
	KMMH16 益城	H2	757	77.1	KMMH16 益城	H2	542	73.7
		H1	925	91.2		H1	1266	132.0
		UD	1399	55.8		UD	873	49.5
	益城町宮園	H2	725	122.7	益城町宮園	H2	762	94.0
		H1	815	131.9		H1	869	179.3
		UD	338	15.3		UD	669	52.1
	宇城市松橋町	H2	304	27.2	宇城市松橋町	H2	348	51.7
		H1	326	52.7		H1	494	77.3
		UD	221	7.9		UD	314	16.6
	西原村小森	H2	522	35.3	西原村小森	H2	723	132.6
		H1	322	33.6		H1	864	253.4
		UD	180	7.6		UD	531	131.1

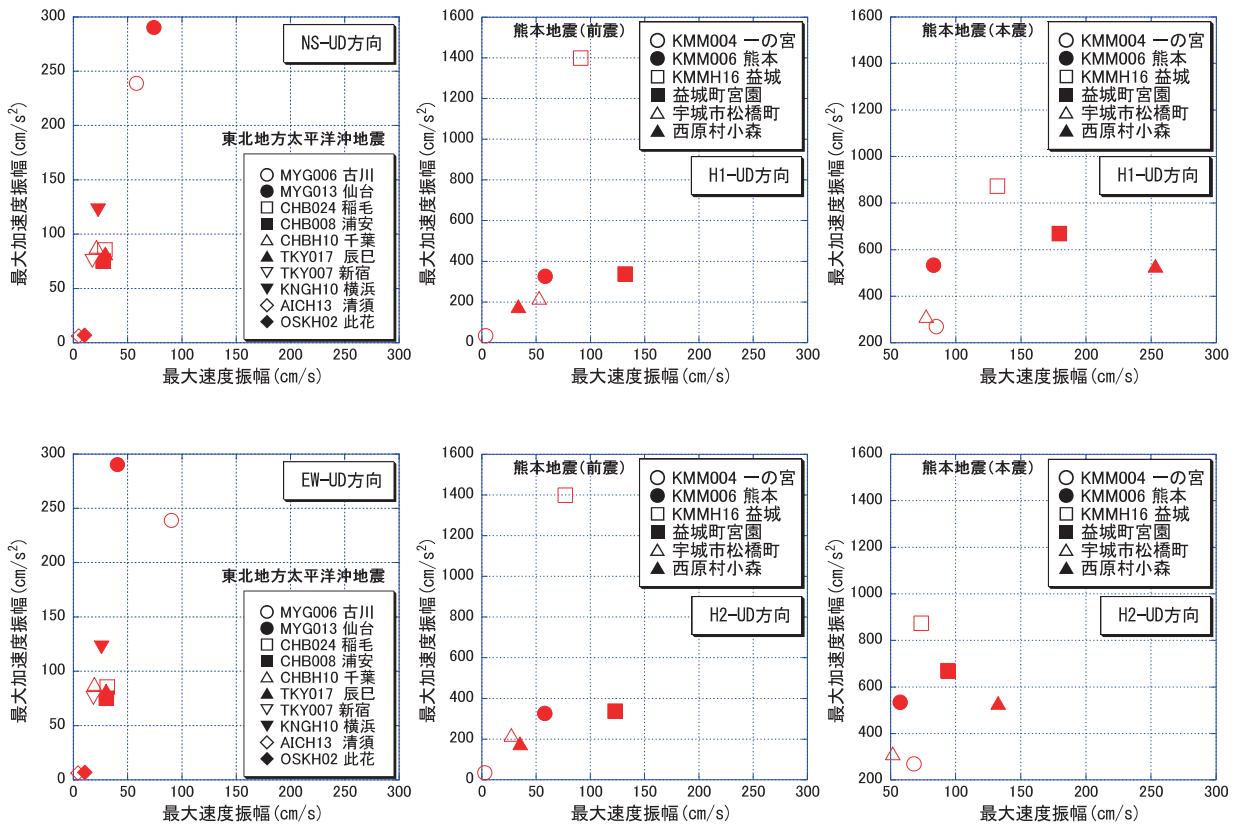


図1 水平動最大速度振幅と上下動最大加速度振幅の関係

2-2. 長周期地震動及び熊本地震強震動の各種応答スペクトル

東北地方太平洋沖地震及び熊本地震前震・本震の水平動速度応答スペクトルNS方向を図2に、EW方向を図3に、そして上下動加速度応答スペクトル(UD方向)を図4に示す。

図2の速度応答スペクトルNS方向から、長周期地震動の周期0.5~1秒においてMYG013(仙台)が300cm/s近い応答量を示しており、熊本地震前震において同じ周期帯における最大の応答量であるKMMH16(益城)よりも大きな応答量となっている。また、MYG013(仙台)、KNGH10(横浜)では周期0.5秒以下の短周期帯域で速度応答量は大きくなっている。これから、東北地方太平洋沖地震においても強震動の短周期成分の影響が大きい強震動があることがわかる。免震建物の振動周

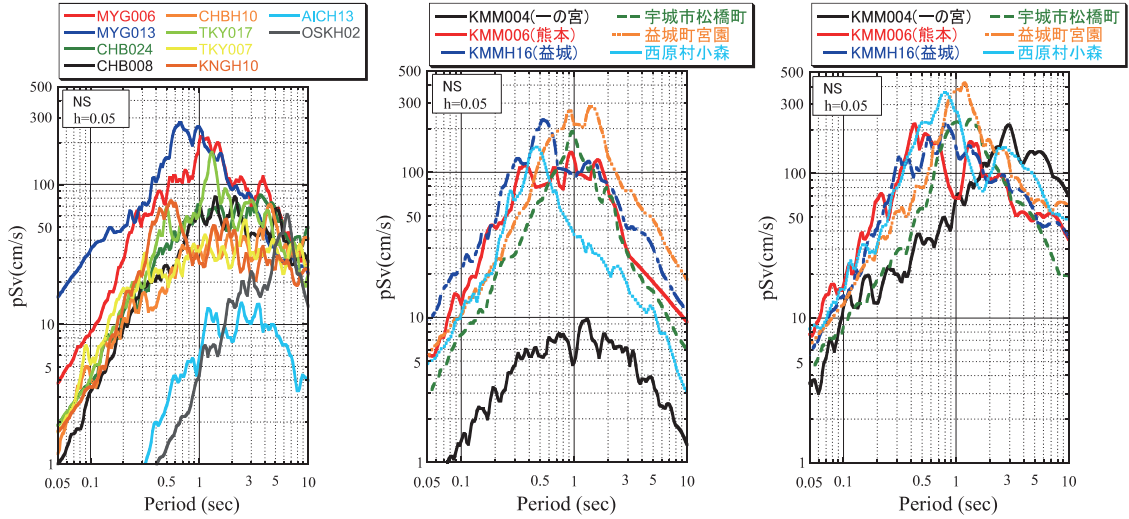


図2 速度応答スペクトル (NS方向)

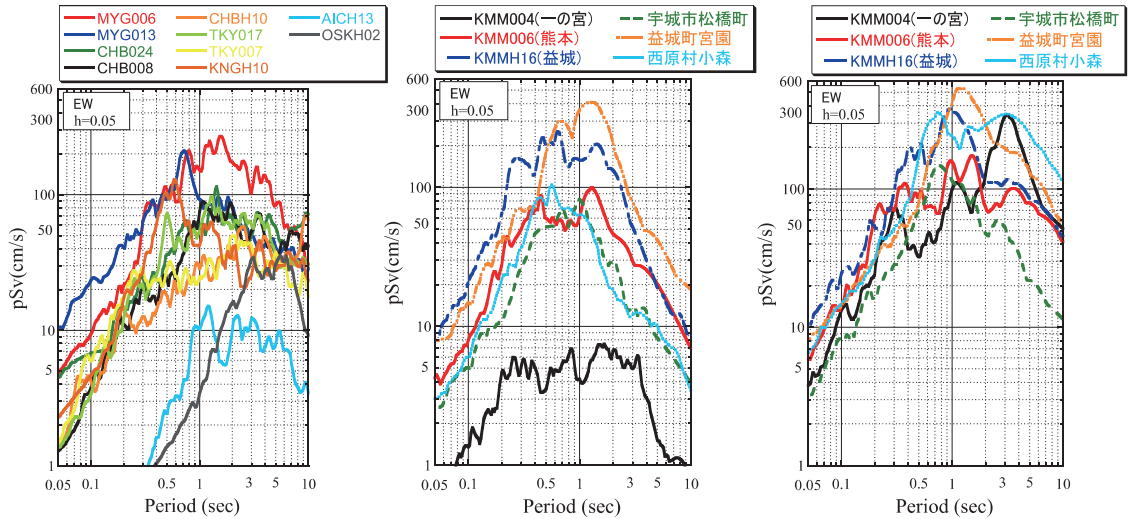


図3 速度応答スペクトル (EW方向)

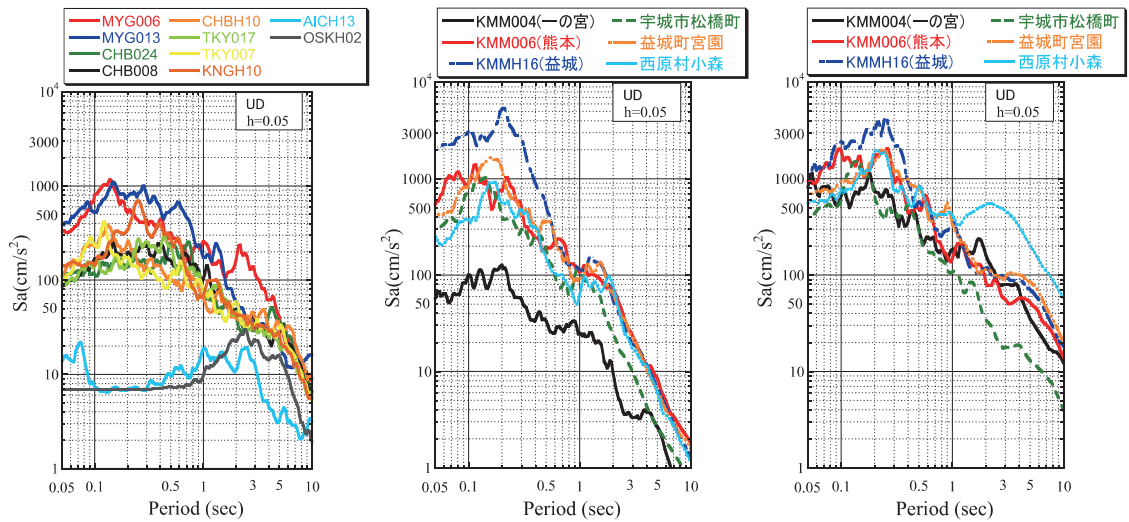


図4 加速度応答スペクトル (UD方向)

東北地方太平洋沖地震

熊本地震 (前震)

熊本地震 (本震)

期帯域である3～5秒においてはMYG006（古川）が100cm/sを超える程度速度応答量を示しており、同じ周期帯における熊本地震前震の強震動よりも大きな速度応答量となっている。図3の速度応答スペクトルEW方向から、NS方向の場合と異なった速度応答量を示す観測点がみられる。特にMYG006（古川）では周期1.5秒付近で200cm/sを超える速度応答量を示しており、熊本地震前震の強震動と比較しても、比較的大きな速度応答量であったことがわかる。また、周期3～5秒付近では、NS方向よりもEW方向の速度応答量が大きくなっている。MYG006（古川）EW方向では、周期3～5秒において150cm/s近い速度応答量となっている。図4の加速度応答スペクトルUD方向では、長周期地震動のMYG006（古川）において周期0.1～0.3秒で1000cm/s²近くの加速度応答量となっている。

2-3. 建物モデル

建物モデルについては、用途は事務所ビルを対象とし、構造はSRC造（柱：SRC造、梁：S造）、階高3.5mの17階建とする。桁行方向7m×5スパンの長さ35m、梁間方向12m×1スパンの長さ12mの各階床面積420m²とする。なお、単位面積当たりの重量は10(kN/m²)をしている。平面概略図を図5に示す。中間層免震建物の梁間方向軸組概略図を図6に示す。中間階免震層は、3階、7階及び13階に免震層を挿入した3種類の間中層免震建物とする。アイソレータの引き抜きに関しては、梁間方向（短辺方向）に強震動水平成分及び上下成分が作用する場合に、最もアイソレータに引き抜きが生じる可能性が高い。よって、建物解析モデルは梁間方向を対象とする。（図5、図6参照）

中間階免震層が3階、7階及び13階の場合、上部構造のアスペクト比（塔状比）H/Bはそれぞれ約4、3及び1程度となる。

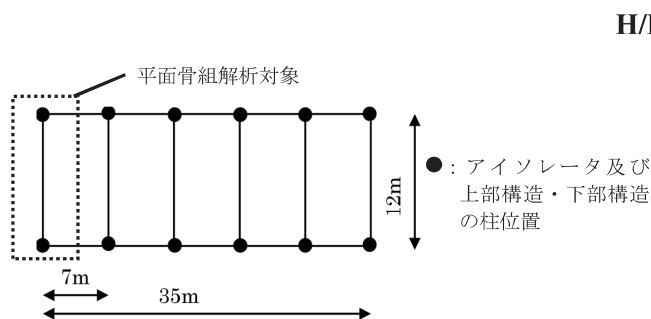


図5 平面概略図

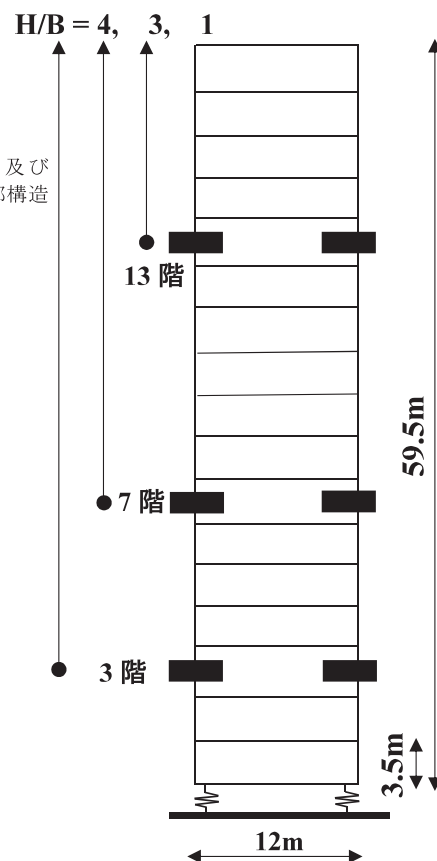


図6 梁間方向軸組図

2-4. 振動解析モデル

免震建物のアイソレータの引き抜き問題を取り扱うには、建物モデルに水平成分と上下成分を同時入力して、解析を行う必要がある。そこで本論文では、強震動水平1成分及び上下成分合計2成分同時入力を考慮できる平面骨組振動系モデルを用いることとする¹⁾。中間層免震建物を図7に示すように、まず中間階免震層を介して上部構造と下部構造の多質点系に分ける。そして上部構造・下部構造の多質点系の固有値解析より得られた、それぞれの1次固有周期・1次モードより得られる等価質量及び等価高さを算出する。得られた上部構造・下部構造の等価質量を、平面骨組モデル上部・下部構造の4質点に分散させる。次に平面骨組モデルの上部構造・下部構造の高さについては、分割した多質点系モデルから得られた等価高さを与え、地震応答解析を行う。

免震層のアイソレータ水平周期 T_f を3.5秒、4.0秒及び5.0秒、アイソレータ鉛直周期 T_v が0.07秒、0.15秒及び0.2秒のいずれも3種類の解析を行った。

減衰定数については剛性比例型とし、水平方向 $h_H=0.02$ 、鉛直方向 $h_V=0.02$ とした。地震応答解析は平均加速度法として、解析の刻み時間 $\Delta t=0.0005$ 秒(1/2000秒)として解析を行っている。

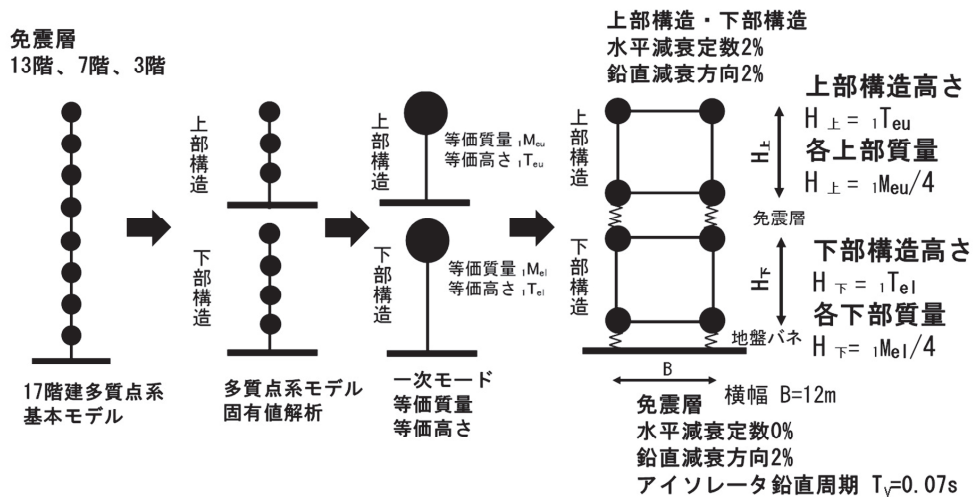


図7 中間層免震建物の平面骨組モデル作成概念図、平面骨組振動系モデル

3. 最大引張面圧時の免震層変位応答量

免震構造で用いられるアイソレータは、天然ゴムが使用されるため引張に弱いという性質があり、設計において圧縮面圧は $30\sim 40N/mm^2$ 程度以内で使用されるが、引張面圧は $1N/mm^2$ を設計許容応力度として設計されるケースが多い。これは引張面圧が $1N/mm^2$ を超えると免震層は非線形の挙動を示し、地震時にアイソレータが安定した復元力特性を示さないためである。そこで本論文では、特に地震時中間層免震建物のアイソレータの引き抜きについて着目する。

東北地方太平洋沖地震の長周期地震動に対する中間層免震建物のアイソレータに作用する最大引張面圧値と、そのときの免震層変位応答量との関係について、アイソレータ水平周期 T_f が3.5秒、アイソレータ鉛直周期 T_v が0.07秒、0.15秒及び0.20秒について図8に示す。熊本地震前震・本震では、アイソレータ鉛直周期 T_v が0.07秒の場合のみを図9に示す。図8及び図9については、東北地方太平洋沖地震の長周期地震動では水平動成分であるNS・EW方向のうち大きい最大引張面圧値を、熊本地震前震・本震の強震動については、H1成分のみを図8・9にプロットしている。

図8より、中間階免震層の設置階数が13階及びアイソレータ鉛直周期 T_v が0.07秒の場合に、

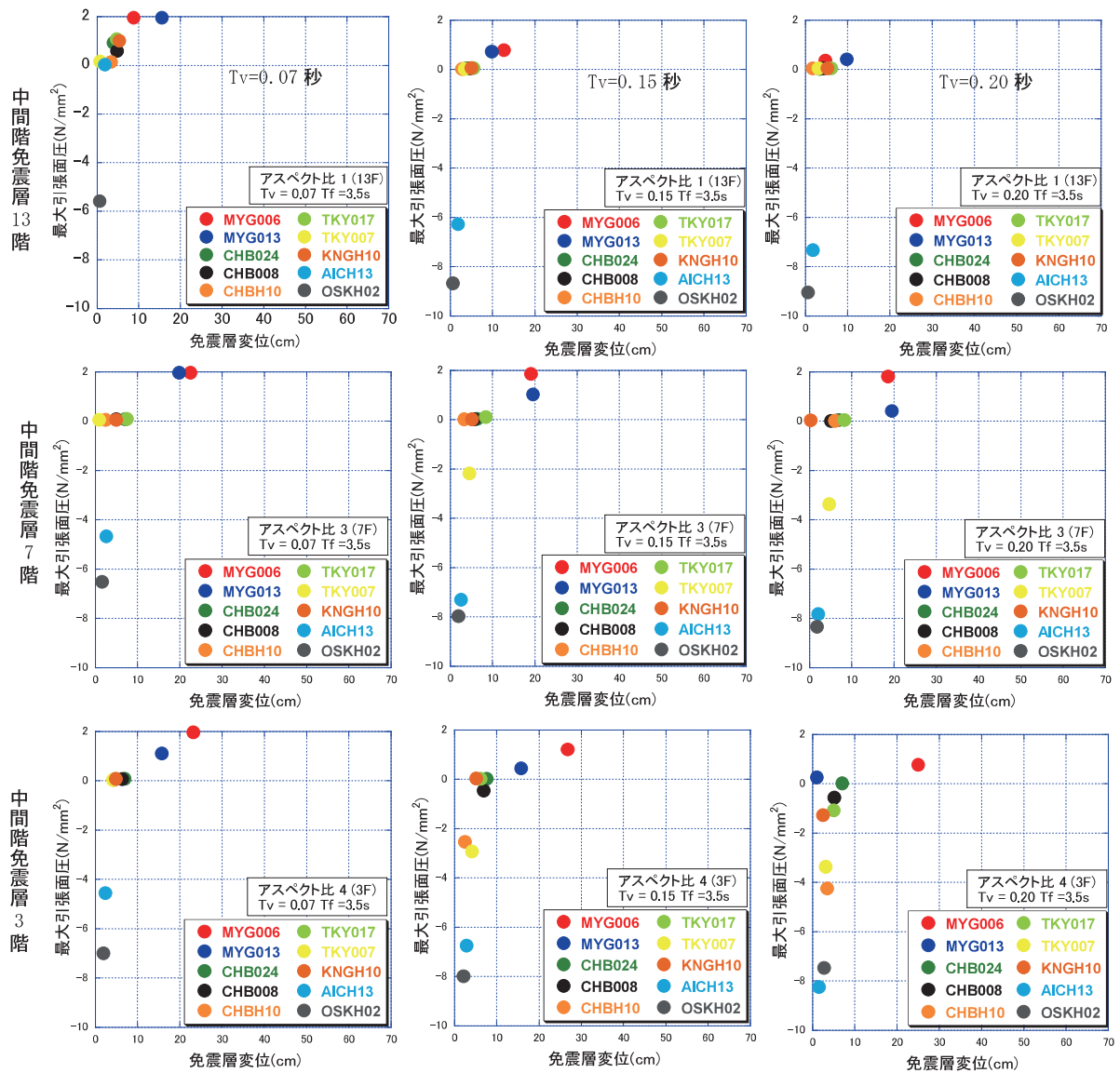


図8 最大引張面圧と免震層変位との関係（東北地方太平洋沖地震）

MYG006（古川）、MYG013（仙台）では約 2 N/mm^2 の引張面圧が作用している。図3の速度応答スペクトルからこの2つの観測点ではともに周期3～5秒において、水平動の速度応答量が熊本地震前震の場合と比べて、同等若しくは大きかったため、水平動の影響が引張面圧に影響を与えていると考えられる。

中間階免震層の設置階数が3階の場合では、特にMYG006（古川）（ $T_v = 0.07$ 秒）の場合において 2 N/mm^2 近くの引張面圧が作用している。3階に中間階免震層を設置している場合には、13階や7階よりも、上部構造のアスペクト比が大きくなるため変動面圧が大きくなりアイソレータに引き抜きが生じやすくなると考えられる。しかし、図8からは中間階免震層13階の方が引き抜きが多く発生している。また、アイソレータの鉛直周期 T_v を変化させた場合には引張面圧の分布にバラツキがみられる。アイソレータの鉛直周期 T_v が0.07秒、0.15秒及び0.20秒とした場合と比較すると、アイソレータの鉛直周期 T_v が0.07秒の場合に最も引き抜き地震動個数が増えていることが伺える。

図9に示す熊本地震前震・本震の強震動の場合、KMM004（一の宮）、KMMH16（益城）、益城町宮園及び西原村小森のアイソレータ鉛直周期 T_v が0.07秒の場合、前震ではKMM004（一の宮）を除

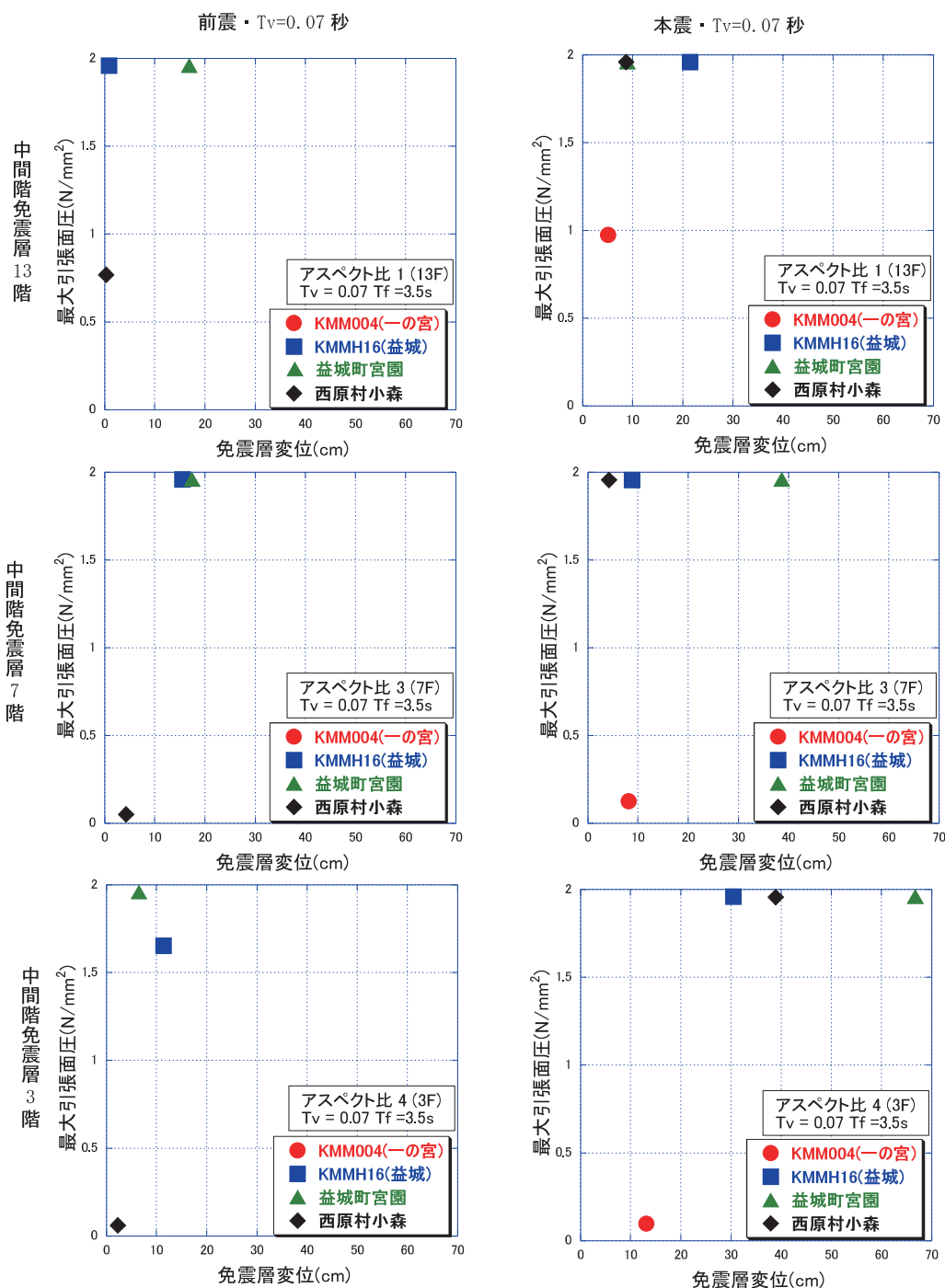


図9 最大引張面圧時の免震層変位応答量（熊本地震前震・本震）

く他の3つの強震動において引き抜きが生じる。特にKMMH16（益城）と益城町宮園においては1.5N/mm²を超え、2.0N/mm²近くの引張面圧となっている。

本震では、前震において引き抜きが生じなかったKMM004（一の宮）においてもアイソレータに引き抜きが生じ、KMMH16（益城）と益城町宮園に加えて、西原村小森の引張面圧も2.0N/mm²近くの引張面圧となっている。

最大引張面圧時の免震層変位応答量については、東北地方太平洋沖地震のMYG006（古川）・MYG013（仙台）のアイソレータ鉛直周期 T_v が0.07秒、0.15秒及び0.20秒、中間階免震層が13階の場合には免震層変位応答量10cm前後の変位を示し、中間階免震層が7階、3階ではMYG006（古川）

において20cmを超える免震層変位応答量を示している。熊本地震前震より益城町宮園のアイソレータ鉛直周期 T_v が0.07秒の場合に、中間階免震層が13階の場合より3階の方が変位が小さくなっている。熊本地震本震では、益城町宮園において中間階免震層が低位置になるにつれ免震層変位は大きくなり、中間階免震層3階の場合には60cmを超える変位がみられる。

4. アイソレータに作用する変動面圧

解析に用いた強震記録の中で、長周期地震動のMYG006（古川）及び熊本地震本震のKMM004（一の宮）に関して、アイソレータに作用する変動面圧時刻歴を図10に示す。図10は、アイソレータの水平周期 T_f を3.5秒およびアイソレータの鉛直周期 T_v を0.07秒の場合である。なお図10から、アイソレータに作用する常時圧縮面圧を（-）：マイナス、引張面圧を（+）：プラスとして表現している。アイソレータには常時作用している圧縮面圧（-） 10N/mm^2 に、地震時に変動面圧が加わり面圧が 0N/mm^2 を超えるときを引き抜きの発生と本論文では考えている。

図10より、MYG006（古川）及びKMM004（一の宮）の中間階免震層が13階の場合、中間階免震層3階に比べて、引き抜きの発生回数は多くなっている。図10より変動面圧時刻歴から中間階免震層13階の方が、中間階免震層3階は最大圧縮面圧も大きくなっている。一般的に、上部構造のアスペクト比が大きい方が、付加軸力が大きくなって、アイソレータに作用する最大引張面圧や最大圧縮面圧は大きくなりやすい。そのため中間階免震層が13階の場合よりも3階の方が、引き抜きが多く生じやすい傾向にある。しかし、図10の変動面圧時刻歴図からは、その傾向は見られない。この要因については、今後の検討課題としたい。

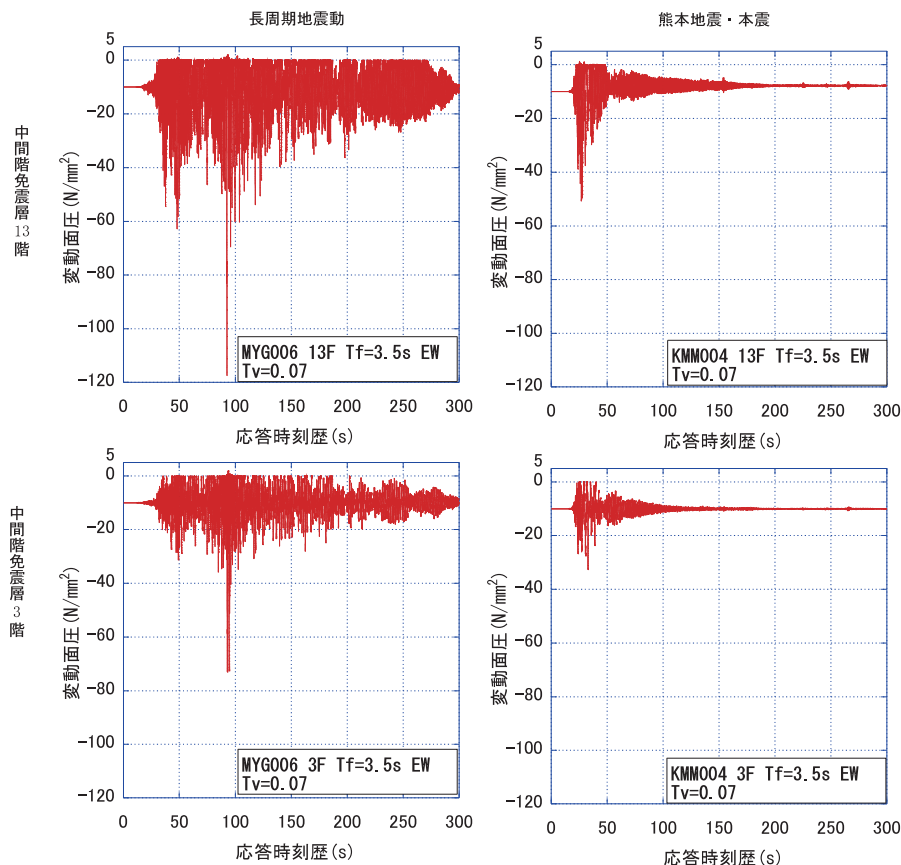


図10 アイソレータに作用する変動面圧時刻歴

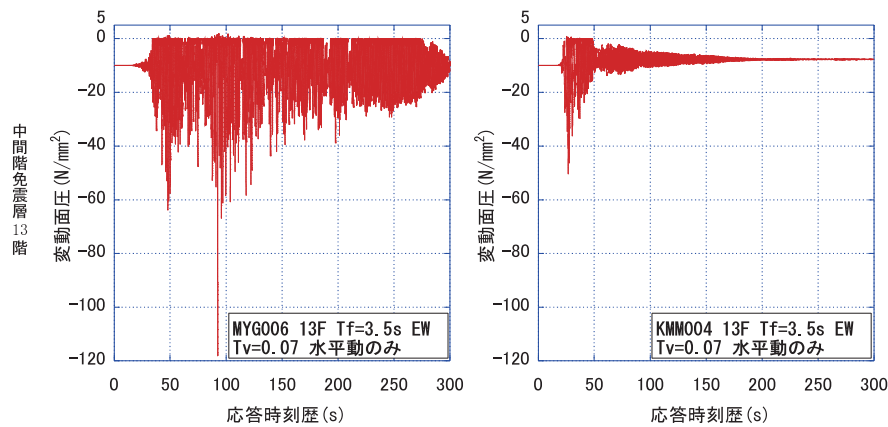


図11 アイソレータに作用する変動面圧時刻歴（水平動のみ）

次に、中間層免震建物の平面骨組振動系モデルに強震動水平成分のみを入力した場合について検討を行った。その変動面圧時刻歴を図11に示す。先に示した図10の中間層免震層13階と、図11の中間層免震層13階水平動成分単独入力時図と比較すると、変動面圧の図に大きな差異はみられない。これは長周期地震動であるMYG006（古川）及び熊本地震本震のKMM004（一の宮）の強震動について、中間層免震層のアイソレータの変動面圧には水平動の影響が大きく作用していることを示唆するものである。よって、中間層免震層13階の場合、水平動成分の影響が作用しやすいことを示している。

5. 結語

本論文では、東北地方太平洋沖地震の長周期地震動及び熊本地震の前震・本震の強震動を用いて、中間層免震建物の地震応答解析を行い、その中間層免震建物のアイソレータに作用する最大引張面圧と免震層変位応答量、変動面圧について考察した。その結果を以下に示す。

- 1) 東北地方太平洋沖地震の長周期地震動に関して、中間層免震層の設置階数に応じた上部構造のアスペクト比の違いによって、一般に上部構造のアスペクト比が大きい中間層免震層3階の方がアイソレータに引き抜きが発生しやすい。しかし中間層免震層13階において、中間層免震層3階よりも大きな引き抜き力がアイソレータに作用して、最大引張面圧が大きく、引き抜き回数も多くなる傾向にある。
- 2) 強震動水平・上下成分同時入力と、水平動単独入力のアイソレータの変動面圧時刻歴の比較から、中間層免震層13階のアイソレータの引き抜きについては、長周期地震動水平動の影響が大きいと判断される。

謝 辞

強震記録については、気象庁、地方自治体及び国立研究開発法人防災科学技術研究所の強震観測網による観測記録を使用させていただきました。

本研究に関しては、公益財団法人LIXIL住生活財団による平成28年度研究助成金（2016年11月～2018年1月）の助成を受け実施いたしました。

以上、諸機関に関してここに記して、謝意を申し上げます次第である。

参考文献

- 1) 山脇拓巳, 池田雄一: 中間層免震建物の積層ゴムアイソレータの引き抜きに関する研究-平面骨組振動系モデルによる中間層免震建物の地震応答解析-, 日本地震工学会・大会2016梗概集, pp.1-8(P3-24), 2016.9
- 2) 山脇拓巳, 池田雄一: 強震動が連続入力される中間層免震建物の積層ゴムアイソレータの引き抜きに関する研究-平成28年熊本地震の強震記録を用いた平面骨組振動系モデルによる検証-, 日本地震工学会・大会 2017.8

受理日: 2017年11月11日