

長周期地震動による免震建物の擁壁衝突に関する研究

正会員 ○稲垣慶多*1

同 堤和敏*2

キーワード：長周期地震動 免震建物 衝突 ダンパー ハザードマップ

1. 研究背景と目的

近年、想定されてこなかった長周期地震動の影響が懸念されている。特に、高層ビルは固有周期が長周期地震動と一致しやすく、大きな揺れを伴うことが指摘されているが、免震層を持つ建物への影響はあまり取り上げられてこなかった。免震建物は想定する揺れ幅以上の変位を生じることにより、建物と擁壁の衝突が考えられる。長周期地震動の検討の必要性がいわれ始めたのは、2010年からであり、それ以前設計された免震建物が日本全国に多く存在する。そこで、実際に起こりうる建物を数理的にモデル化し、南海トラフ4連動地震による長周期地震動の模擬波に対して、どういう建物が、どういう地盤条件のときに想定以上の変位による衝突が生じるのかを確認することにした。地盤条件については解放工学基盤面からの地盤増幅率を設定する。

本研究の目的は、長周期地震動による影響を受けると想定される免震建物に対して、各地域ごとに建物周期と地盤増幅率によるハザードマップを作成し、長周期地震動による擁壁衝突の可能性を示し、対策を促すことを目的とする。

2. 解析モデルの作成

2-1 解析手法

1) モデルの作成^[1]

解析モデルは免震層より上部建物を剛体とみなし、解析モデルは一質点系とした。パラメータ解析を行うため、積層ゴム1台に対して基準化する。質量は積層ゴムの剛性と各周期より求め、ダンパー量は文献[1]を参考に以下の式より求める。

① 免震固有周期Tを設定する。

$$T=3\sim 8\text{sec}$$

② 対象とする免震固有周期より、積層ゴム1台に対する建物質量を求める。積層ゴムは1300φを対象とし、その剛性は $K_f=1.88\times 10^6[\text{N/m}]$ $M=(T/2\pi)^2\times K_f$

③ 検討用地震波の応答スペクトルより、応答量 $S_a=3\pi/T$ $S_d=0.75T/\pi$ と設定する。

最大応答変位を55cmに設定すると、応答低減効果係数は $F_h=55/S_d$ $h_d=2.5\times(1-F_h^2)/(75\times F_h^2)$ となる。

④ 必要ダンパー耐力を求める。鉛ダンパーLD2426の降伏変位は $u_{dy}=0.73\text{cm}$ であり、

$$Q_{dy}=\pi\times h_d\times K_f\times 55^2/1.6(55-0.73)$$

⑤ ダンパー剛性を求める。

ダンパー1本の耐力は220kN、剛性は30kN/mm

必要ダンパー剛性は必要耐力から

$$k_d=30\times Q_{dy}/220\text{kN/mm}$$

2) ダンパー量の調整

作成した免震モデルは概算変位が55cmに収めるよ

うなダンパー量を設定したが、表層地盤の影響等により、実際に、告示波を入力した際には、超過する可能性がある。実際の建物では、最大応答変位が目標値に収まるよう調整を行っているため、本論では必要ダンパー剛性 k_d を0.1ずつ倍数を大きくして、目標値に収まるよう設定した。入力地震波は、表1に示す構造計画研究所が制作した解放工学的基盤上での告示波を使用する。また、建物に与える地震波は、各地点の様々な表層地盤に対応させるために、解放工学的基盤に対して地盤増幅率に1.0から1.8まで0.1刻みで設定を行う。表2,3は地盤増幅率が0.10と1.8のダンパー増幅倍数を示し目標値以下となるようにダンパー剛性 k_d にかける倍数を算出している。表中、黄色色のセルの値の算出値である。

表1 告示波地震波データ^[2]

位相地震波	$\Delta t(\text{sec})$	データ数	最大加速度
ART_EL	0.02	2688	377.6
ART_JMA	0.02	3500	378.1
ART_HA	0.02	2550	384.3

表2 ダンパー剛性の増幅倍数 (地盤増幅率1.0)

周期	$k_d\times$	ART_EL	ART_JMA	ART_HA
3.0s	1.0	37.4	34.8	28.9
4.0s	1.0	31.5	37.8	31.3
5.0s	1.0	34.1	39.5	31.7
6.0s	1.0	36.7	38.8	49.2
7.0s	1.0	39.9	34.1	56.0
	1.1	36.1	26.6	47.9
8.0s	1.0	43.8	30.4	51.2

表3 ダンパー剛性の増幅倍数 (地盤増幅率1.8)

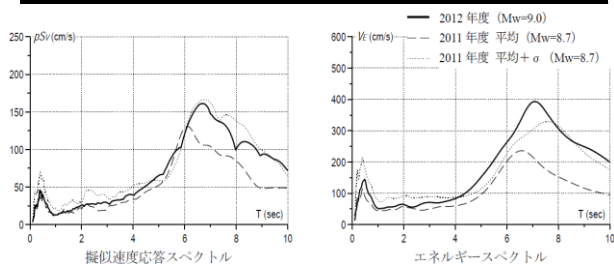
周期	$k_d\times$	ART_EL	ART_JMA	ART_HA
3.0s	2.0	55.8	51.0	45.8
	2.1	55.0	50.5	45.1
4.0s	3.0	34.2	58.6	32.9
	3.5	29.5	54.9	29.8
5.0s	2.4	42.9	56.5	38.8
	2.5	41.1	53.1	36.7
6.0s	2.3	50.7	43.1	57.8
	2.4	47.6	43.1	52.6
7.0s	2.5	45.3	39.4	57.0
	2.6	41.9	39.5	54.8
8.0s	2.5	44.7	38.6	62.8
	2.8	33.3	40.1	51.8

2-2長周期地震波^[3]

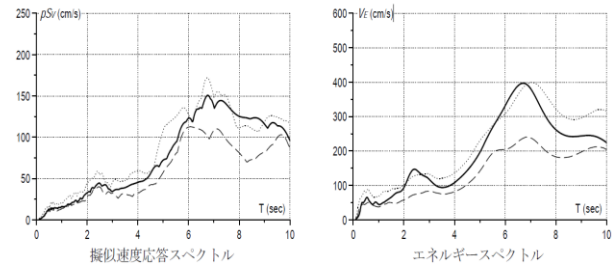
建築研究所から提示されている解放工学的基盤における長周期地震動のデータを使用する。表4に南海トラフ4連動地震の9つの地点の解放基盤面での設計用長周期地震動、代表地点の地表面の最大加速度を示す。2012年に内閣府の南海トラフ沿いの巨大地震の断層モデル(Mw=9.0)に基づき、4連動6セグメント震源モデルにより試算された9地点での長周期地震動である。また、図1はそれ以前の2011年に、東海・南海・南海の3連動地震による東京、大阪、名古屋で想定された長周期地震動平均波と平均+ α 波の模擬速度応答スペクトルとエネルギースペクトルも示されている。本研究ではMw=9.0のスペクトルを使用することとする。地震波の時間刻みはいずれも0.02秒で、波形長さは655.36秒となっている。また、表層地盤での増幅率の影響を考慮して、1.0から1.8まで0.1刻みで設定する。

表4 地震波概要^[3]

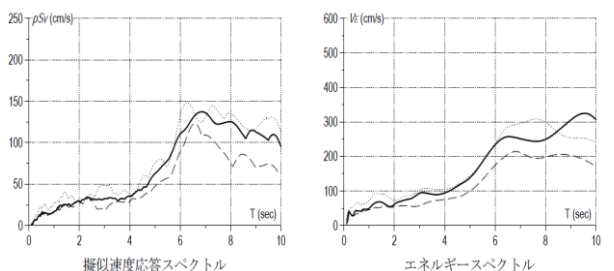
地点名	代表地点	最大加速度 (cm/s ²)
E4E	JMA大手町地点	185.3
KGIN	工学院大地点	55.5
TKY016	東雲地点	66.7
E56	JMA横浜地点	195.3
AIC004	名古屋地点	784.2
AIC003	津島地点	545.4
OSK005	大阪地点	224.4
OSKH02	此花地点	133.0
SZO024	浜松地点	640.3



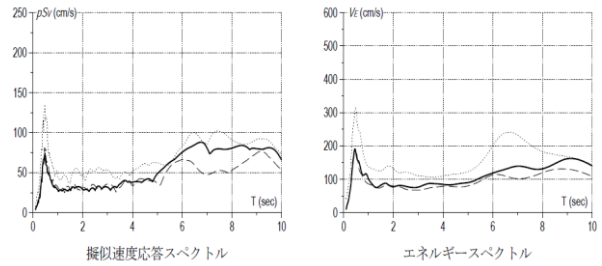
(a) E4E (大手町) 地点のスペクトル



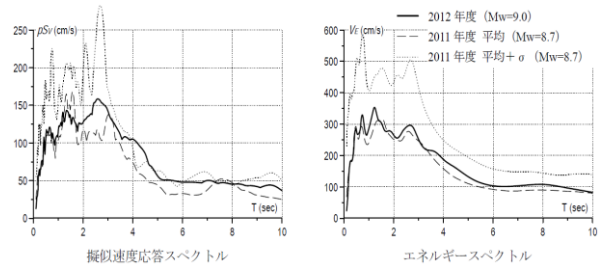
(b) KGIN (新宿) 地点のスペクトル



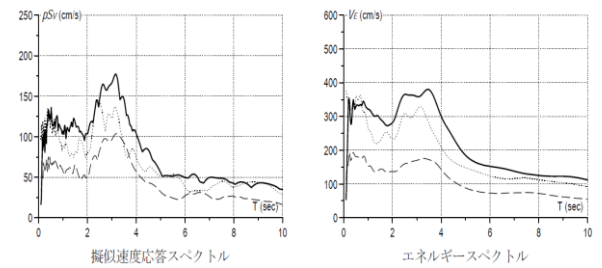
(c) TKY016 (東雲) 地点のスペクトル



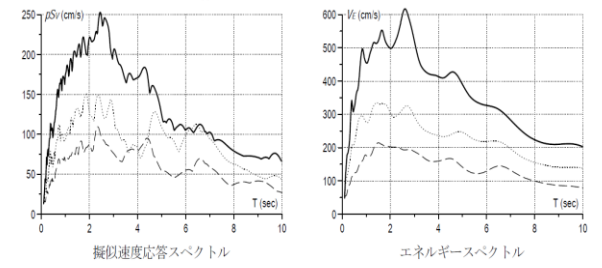
(d) E56 (横浜) 地点のスペクトル



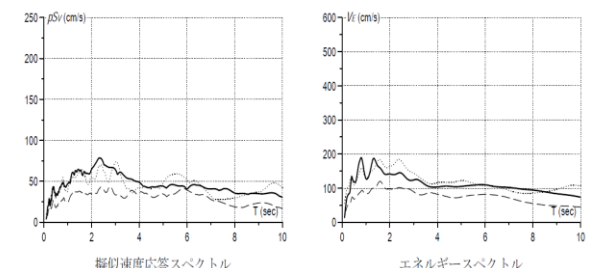
(e) SZO024 (浜松) 地点のスペクトル



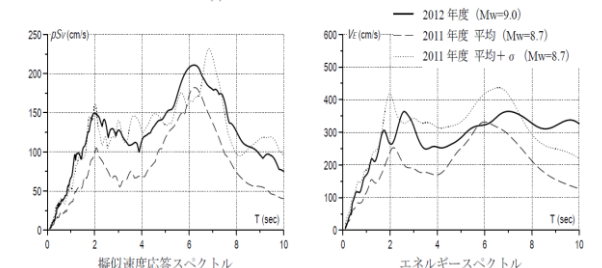
(f) AIC004 (名古屋) 地点のスペクトル



(g) AIC003 (津島) 地点のスペクトル



(h) OSK005 (大阪) 地点のスペクトル



(i) OSKH02 (此花) 地点のスペクトル

図1 応答スペクトルとエネルギースペクトル^[3]

3. 解析手順と結果

設定した解析モデルに対して、解放工学的基盤に対してつくられた長周期地震動に地盤増幅率を考慮して応答解析を行った。応答解析は2段階で行った。

1) ステップ I

概略解析として、建物周期を3~8秒の1秒刻みの周期で行った。表5(a)~(i)、図2, 3に9地点での応答変位の値を示す。名古屋地点 (AIC004)、津島地点 (AIC003)、大阪地点 (OSK005)、此花地点 (OSKH02)、浜松地点 (SZO024) の5地点で、衝突の可能性が高い大きな変位を示した。

表5 応答変位
(a) 増幅率1.0

	3s	4s	5s	6s	7s	8s
JMA大手町地点 (E4E)	5.0	6.0	5.9	4.5	2.5	4.2
工学院大地点 (KGIN)	7.4	5.7	4.7	4.1	3.6	5.4
東雲地点 (TKY016)	4.8	3.5	4.6	5.1	4.5	4.9
JMA横浜地点 (E56)	5.9	3.8	4.0	4.0	3.8	4.1
名古屋地点 (AIC004)	68.7	65.4	40.0	31.9	29.5	32.7
津島地点 (AIC003)	111.2	98.8	74.4	60.6	58.8	60.1
大阪地点 (OSK005)	33.4	15.6	12.3	11.4	10.9	12.5
此花地点 (OSKH02)	73.5	60.3	74.1	76.9	48.1	44.4
浜松地点 (SZO024)	65.4	59.4	30.8	29.9	28.9	27.3

(b) 増幅率1.1

	3s	4s	5s	6s	7s	8s
JMA大手町地点 (E4E)	6.1	7.3	7.8	4.2	2.6	2.9
工学院大地点 (KGIN)	9.1	6.9	6.9	4.9	4.2	4.2
東雲地点 (TKY016)	6.5	5.4	4.9	5.6	4.6	3.6
JMA横浜地点 (E56)	6.8	4.6	4.9	4.4	4.6	4.5
名古屋地点 (AIC004)	80.0	74.1	44.8	35.0	32.7	32.3
津島地点 (AIC003)	126.5	115.1	83.5	66.5	66.0	65.2
大阪地点 (OSK005)	38.0	17.5	14.0	12.3	12.2	12.5
此花地点 (OSKH02)	84.6	69.9	89.9	85.8	51.8	47.3
浜松地点 (SZO024)	72.8	67.8	33.8	32.8	31.2	30.4

(c) 増幅率1.2

	3s	4s	5s	6s	7s	8s
JMA大手町地点 (E4E)	7.3	9.1	9.2	2.7	2.6	3.1
工学院大地点 (KGIN)	10.6	7.8	6.2	3.9	4.7	5.9
東雲地点 (TKY016)	8.2	8.0	5.9	4.3	4.7	4.2
JMA横浜地点 (E56)	7.8	5.0	4.9	5.0	4.7	4.7
名古屋地点 (AIC004)	91.6	82.8	48.6	37.0	32.3	32.1
津島地点 (AIC003)	142.4	131.5	90.8	70.1	68.7	70.8
大阪地点 (OSK005)	42.7	19.4	15.0	12.2	11.9	12.1
此花地点 (OSKH02)	95.8	86.1	97.7	78.3	48.8	46.0
浜松地点 (SZO024)	79.9	76.4	36.8	35.7	34.6	33.8

(d) 増幅率1.3

	3s	4s	5s	6s	7s	8s
JMA大手町地点 (E4E)	8.5	11.1	6.8	3.1	3.4	2.3
工学院大地点 (KGIN)	12.2	9.8	4.7	4.7	5.1	4.3
東雲地点 (TKY016)	9.9	10.6	6.1	4.8	4.2	4.0
JMA横浜地点 (E56)	8.8	5.4	4.8	5.1	5.0	5.1
名古屋地点 (AIC004)	103.3	91.8	51.2	38.7	35.0	31.8
津島地点 (AIC003)	158.0	147.8	96.1	74.0	74.6	76.6
大阪地点 (OSK005)	47.4	21.3	15.4	12.1	12.8	13.1
此花地点 (OSKH02)	107.2	102.3	97.8	67.8	52.8	44.7
浜松地点 (SZO024)	87.0	84.9	39.6	38.4	37.5	37.2

(e) 増幅率1.4

	3s	4s	5s	6s	7s	8s
JMA大手町地点 (E4E)	9.7	13.3	4.4	2.3	3.2	3.0
工学院大地点 (KGIN)	14.2	12.5	4.6	4.5	3.8	4.1
東雲地点 (TKY016)	11.5	11.9	4.6	4.4	3.7	3.1
JMA横浜地点 (E56)	9.7	5.8	5.5	5.3	5.3	5.4
名古屋地点 (AIC004)	115.1	100.9	53.5	41.6	35.0	31.5
津島地点 (AIC003)	173.0	164.3	101.3	79.9	78.3	82.5
大阪地点 (OSK005)	52.1	23.0	15.5	12.9	13.7	14.2
此花地点 (OSKH02)	118.6	118.7	97.4	75.3	53.0	46.2
浜松地点 (SZO024)	94.0	93.5	42.4	41.3	40.5	40.5

(f) 増幅率1.5

	3s	4s	5s	6s	7s	8s
JMA大手町地点 (E4E)	10.9	9.4	3.9	2.9	2.7	2.6
工学院大地点 (KGIN)	16.3	5.6	4.9	3.9	4.2	4.2
東雲地点 (TKY016)	13.1	6.1	4.8	3.1	3.2	3.5
JMA横浜地点 (E56)	10.6	5.2	5.5	5.3	5.2	5.2
名古屋地点 (AIC004)	126.9	97.0	55.5	42.8	35.0	28.4
津島地点 (AIC003)	190.1	146.8	106.5	85.2	81.9	88.5
大阪地点 (OSK005)	56.9	22.7	15.3	14.3	15.0	16.1
此花地点 (OSKH02)	130.0	88.6	98.1	68.0	52.7	47.6
浜松地点 (SZO024)	101.0	88.0	45.2	44.2	43.6	44.6

(g) 増幅率1.6

	3s	4s	5s	6s	7s	8s
JMA大手町地点 (E4E)	8.1	2.4	2.7	2.8	3.0	2.2
工学院大地点 (KGIN)	12.9	3.3	3.5	4.1	4.5	4.8
東雲地点 (TKY016)	9.1	3.6	3.5	3.0	3.6	2.7
JMA横浜地点 (E56)	9.3	4.5	5.0	5.0	4.6	5.5
名古屋地点 (AIC004)	118.1	81.9	55.0	43.7	34.9	25.4
津島地点 (AIC003)	186.4	124.9	108.5	90.7	85.7	90.9
大阪地点 (OSK005)	56.6	19.7	15.3	15.5	16.3	15.2
此花地点 (OSKH02)	125.3	72.2	87.6	67.5	53.0	39.3
浜松地点 (SZO024)	106.0	73.2	47.6	47.0	46.8	47.8

(h) 増幅率1.7

	3s	4s	5s	6s	7s	8s
JMA大手町地点 (E4E)	6.7	2.3	2.8	2.7	2.3	2.4
工学院大地点 (KGIN)	11.5	3.2	4.2	4.6	3.5	5.1
東雲地点 (TKY016)	6.5	2.7	3.3	3.4	2.6	2.7
JMA横浜地点 (E56)	8.5	4.0	4.4	4.8	5.0	5.9
名古屋地点 (AIC004)	115.6	72.3	53.3	44.6	31.9	26.8
津島地点 (AIC003)	189.0	108.9	110.2	95.3	87.5	97.9
大阪地点 (OSK005)	56.8	15.3	15.9	16.6	17.1	17.0
此花地点 (OSKH02)	124.7	60.0	77.3	66.0	51.3	47.9
浜松地点 (SZO024)	110.8	67.5	50.0	49.9	49.7	51.1

(i) 増幅率1.8

	3s	4s	5s	6s	7s	8s
JMA大手町地点 (E4E)	7.3	2.4	2.6	2.3	2.9	2.3
工学院大地点 (KGIN)	8.6	2.4	4.3	4.2	4.7	2.6
東雲地点 (TKY016)	6.5	2.4	3.1	2.9	2.8	2.4
JMA横浜地点 (E56)	7.0	3.9	4.8	6.0	5.6	6.4
名古屋地点 (AIC004)	112.4	67.1	53.8	45.3	32.4	28.6
津島地点 (AIC003)	192.8	103.8	114.7	100.3	92.1	101.8
大阪地点 (OSK005)	54.8	13.8	16.7	17.5	17.5	15.6
此花地点 (OSKH02)	126.6	57.0	75.7	64.1	52.3	44.2
浜松地点 (SZO024)	113.3	65.0	52.6	52.7	52.9	53.3

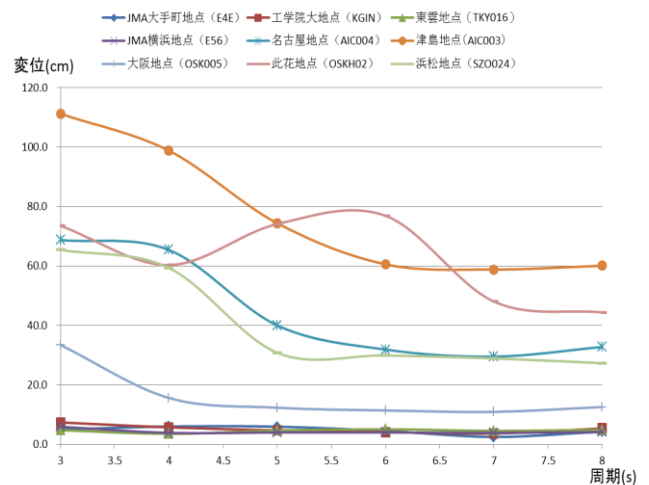


図2 変位-周期 (地盤増幅率1.0)

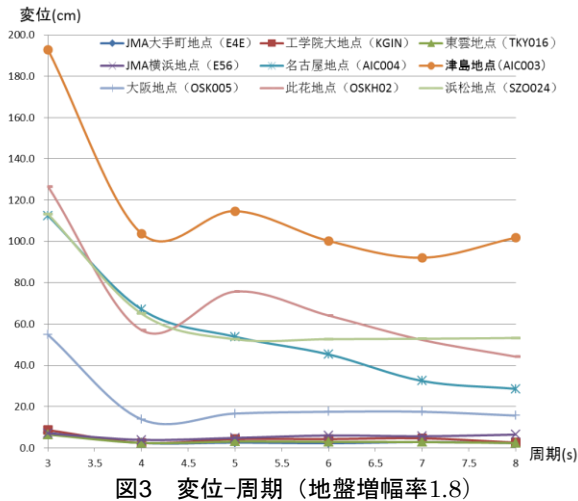


図3 変位-周期 (地盤増幅率1.8)

2) ステップⅡ

ステップⅠでは、名古屋地点 (AIC004)、津島地点 (AIC003)、大阪地点 (OSK005)、此花地点 (OSKH02)、浜松地点 (SZO024) の5地点で、ダンパー設定時に考慮した最大応答変位55cmより大きな変位を示した。この5地点において、衝突の可能性が大いに考えられるため、さらに詳細に応答解析を行うことにした。周期は3秒から8秒の0.1秒刻みで解析モデルを作成し、応答解析を行った。

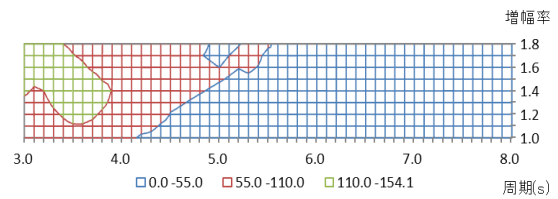
解析結果は縦軸を地盤増幅率、横軸を周期として、それぞれの変位を色で区分して、図4(a)～(e)に各地点のハザードマップを示す。青い箇所では応答変位55cm以下となり、想定するクリアランス幅に収まるため、衝突を回避できる箇所である。

6. 結論

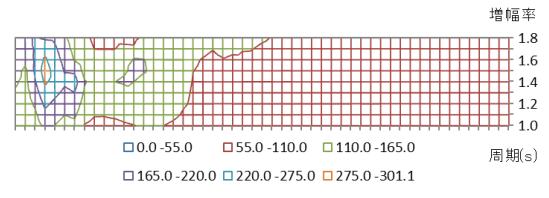
- ① 建物周期と地盤増幅率に対する免震層衝突ハザードマップを作成した。
- ② 国立研究開発法人が提供する地震ハザードステーションでは、各地点の地盤増幅係数を調べることができ、既存免震建物の固有周期と地盤増幅係数とを使って、このマップと見比べることにより、長周期地震動に対する衝突の可能性を概略知ることができ、長周期地震動対策に利用できる。
- ③ 長周期地震動によって過大な変形を生じ、衝突の可能性のある領域が多く存在することがわかる。

7. 今後の課題

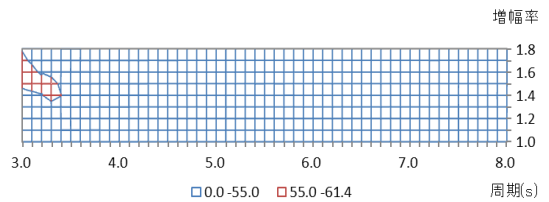
- ① 今後の課題として、建物が擁壁に衝突するのを回避するため免震層にどの程度ダンパーを追加する必要があるか検討する予定である。
- ② 衝突の可能性のある建物が持つ免震層の周期を明らかにすることで、本論は概算であり、精度を上げるために、より詳細な検討を行う必要がある。



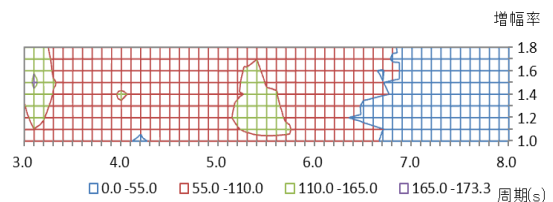
(a) 名古屋地点 (AIC004)



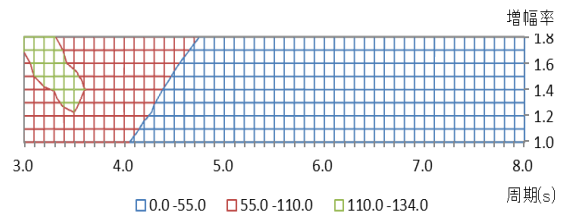
(b) 津島地点 (AIC003)



(c) 大阪地点 (OSK005)



(d) 此花地点 (OSKH02)



(e) 浜松地点 (SZO024)

図4 ハザードマップ

参考文献

- [1] 日本建築学会関東支部, 免震・制震構造の設計, pp. 14-18
- [2] 構造計画研究所, 建築構造解析プログラムResp-M2
- [3] 建築研究所HP <http://www.kenken.go.jp>

*1 芝浦工業大学 大学院生

*2 芝浦工業大学 教授・工博