

地震地域係数の違いが山口県の RC 造建物の躯体費および補修費に及ぼす影響に関する研究  
(その2 RC 造学校建物モデルの補修費の概算)

地震地域係数 山口県 RC 造校舎 準会員○岡村直樹\*1 準会員 黒瀬哲矢\*1 正会員 松原大輔\*2  
時刻歴応答解析 損傷度 補修費用 正会員 秋田知芳\*3 正会員 稲井栄一\*4

1. はじめに

地震地域係数に係数を乗じて割増すと RC 造建物のコンクリートおよび鉄筋の使用量は増加するため、コストの増加につながる。その 1 では地震地域係数に係数を乗じて割増し、原設計と同等の保有水平耐力を確保できるように RC 造建物モデルを作成し、さらに、部材断面を変更して部材断面に基づいて躯体費を算出して比較した。しかし、建物には躯体の費用以外にも地震が起きた後には、補修の費用がかかってくる。躯体費と補修費をトータルで考慮すると、鉄筋を増やし、梁や柱の断面積を大きくしたほうが建物の損傷度は小さくなり補修費は低くなるのでトータルコストが抑えられる可能性がある。そこで、その 2 ではその 1 で用いたモデルのうち地震地域係数 0.8、0.9、1.0 のモデルをそれぞれ 1 つずつ選び、3 種類の地震波を与えて時刻歴応答解析を行い、得られた結果から RC 造建物モデルの損傷度による補修費を概算して比較した。また、その 1 で算出した躯体費とその 2 で概算する補修費のトータルコストを比較して検討した。

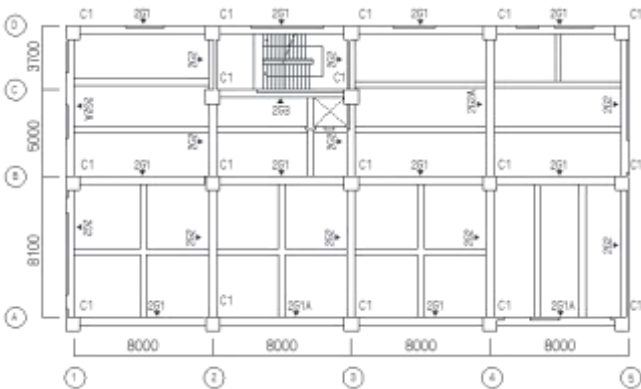


図 1 2階伏図

2. 検討対象建物

その 1 で用いた部材断面の変更モデルのうち原設計、D2 モデル、DN6 モデルを検討対象とする。その 2 では、それらを Z0.8、Z0.9、Z1.0 モデルと呼称する。保有水平耐力余裕度の算定結果から Z0.8 モデルは層間変形角が 1/200rad 時の Qu/Qu<sub>n</sub> は 1.30、1/100rad 時の Qu/Qu<sub>n</sub> は 1.40、Z0.9 モデルではそれぞれ 1.32、1.50、Z1.0 モデルではそれぞれ 1.35、1.58 となっている。Z0.9 モデルは鉄筋の径を変更し(D25 から D29)、梁せいを 5cm 増やした。Z1.0 モデルは Z0.9 モデルの変更内容に加え、主筋の本数を変更し(1 本増加)、柱せいを 5cm 増やした。柱と梁の断面を表 1、2 に示す。Z0.9 モデルの柱の断面は、フープの X 方向を 4 本から 5 本に、フープの Y 方向を 2 本から 3 本に変更し、Z1.0 モデルの柱の断面は、B×D を 80×80 cmから 85×85 cmに、主筋を 16 本から 20 本に、フープを Z0.9 モデルと同じように変更した。Z0.9、Z1.0 モデルともに梁断面のスタラップのピッチが 50mm 減少して、より狭くなった。梁の鉄筋を増やすときには上下端筋とも一段筋の本数を固定して、二段筋の本数を増やした。Z0.9、Z1.0 モデルの例として G1 の R 階を見てみると、梁断面は B×D を 45×95cm から Z0.9、Z1.0 モデルともに 45×100cm に変更し、鉄筋の本数と径を 4-D25 から Z0.9 モデルでは 4-D29 に径だけ変更し、Z1.0 モデルでは 5-D29 に本数も 1

表 1 柱断面表

		708モデル(原設計)			709モデル(D2)			710モデル(DN6)		
		C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1
3階	B×D	80×80	80×80	85×85	80×80	80×80	85×85	80×80	80×80	85×85
	主筋	16-D25	16-D25	20-D25	16-D25	16-D25	20-D25	16-D25	16-D25	20-D25
	フープ	X方向 4-D13@100 Y方向 2-D13@100	4-D13@100 3-D13@100	5-D13@100 3-D13@100	4-D13@100 3-D13@100	5-D13@100 3-D13@100	5-D13@100 3-D13@100	4-D13@100 3-D13@100	5-D13@100 3-D13@100	5-D13@100 3-D13@100
2階	B×D	80×80	80×80	85×85	80×80	80×80	85×85	80×80	80×80	85×85
	主筋	16-D25	16-D25	20-D25	16-D25	16-D25	20-D25	16-D25	16-D25	20-D25
	フープ	X方向 4-D13@100 Y方向 2-D13@100	4-D13@100 3-D13@100	5-D13@100 3-D13@100	4-D13@100 3-D13@100	5-D13@100 3-D13@100	5-D13@100 3-D13@100	4-D13@100 3-D13@100	5-D13@100 3-D13@100	5-D13@100 3-D13@100
1階	B×D	80×80	80×80	85×85	80×80	80×80	85×85	80×80	80×80	85×85
	主筋	16-D25	16-D25	20-D25	16-D25	16-D25	20-D25	16-D25	16-D25	20-D25
	フープ	X方向 4-D13@100 Y方向 2-D13@100	4-D13@100 3-D13@100	5-D13@100 3-D13@100	4-D13@100 3-D13@100	5-D13@100 3-D13@100	5-D13@100 3-D13@100	4-D13@100 3-D13@100	5-D13@100 3-D13@100	5-D13@100 3-D13@100

表 2 梁断面表

		Z0.8モデル(原設計)						Z0.9モデル(D2)						Z1.0モデル(DN6)					
		G1	G2	G3	G1A	G2A		G1	G2	G3	G1A	G2A		G1	G2	G3	G1A	G2A	
R階	B×D	45×95	45×95	45×95	-	-	45×100	45×100	45×100	-	-	45×100	45×100	45×100	-	-	45×100	45×100	45×100
	一段	4-D25	5-D25	3-D25	-	-	4-D29	5-D29	3-D29	-	-	5-D29	5-D29	4-D29	-	-	5-D29	5-D29	4-D29
	二段	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1-D29	-	-	-	-	-	-
	スタラップ	4-D25	4-D25	3-D25	-	-	4-D29	4-D29	3-D29	-	-	5-D29	5-D29	4-D29	-	-	5-D29	5-D29	4-D29
3階	B×D	45×95	45×95	45×95	-	45×100	45×100	45×100	45×100	-	45×105	45×100	45×100	45×100	-	-	45×105	45×100	45×105
	一段	5-D25	5-D25	5-D25	-	5-D25	5-D29	5-D29	5-D29	-	5-D29	5-D29	5-D29	5-D29	-	-	5-D29	5-D29	5-D29
	二段	1-D25	-	2-D25	-	2-D25	1-D29	-	2-D29	-	2-D29	2-D29	2-D29	2-D29	-	-	2-D29	2-D29	3-D29
	スタラップ	4-D13@200	4-D13@200	4-D13@200	-	4-D13@200	4-D13@50	4-D13@50	4-D13@50	-	4-D13@50	4-D13@50	4-D13@50	4-D13@50	-	-	4-D13@50	4-D13@50	4-D13@50
2階	B×D	45×95	45×95	45×95	50×100	45×100	45×100	45×100	45×100	50×105	45×105	45×100	45×100	50×105	45×105	45×105	45×105	45×100	45×105
	一段	5-D25	5-D25	5-D25	6-D25	5-D25	5-D29	5-D29	5-D25	6-D29	5-D29	5-D29	5-D29	5-D29	5-D29	5-D29	5-D29	5-D29	5-D29
	二段	1-D25	-	2-D25	2-D25	2-D25	1-D29	-	3-D25	2-D29	2-D29	2-D29	2-D29	2-D29	2-D29	2-D29	3-D29	3-D29	
	スタラップ	4-D25	4-D25	4-D25	6-D25	5-D25	4-D29	4-D29	4-D25	6-D29	5-D29	5-D29	5-D29	5-D29	5-D29	5-D29	6-D29	6-D29	5-D29
基礎梁	B×D	45×180	45×180	45×180	-	45×100	45×185	45×185	45×185	-	45×105	45×185	45×185	45×185	-	-	45×105	45×185	45×185
	一段	5-D25	5-D25	5-D25	-	5-D25	5-D29	5-D29	5-D29	-	5-D29	5-D29	5-D29	5-D29	-	-	5-D29	5-D29	5-D29
	二段	2-D25	2-D25	2-D25	-	2-D25	2-D29	2-D29	2-D29	-	2-D29	3-D29	3-D29	3-D29	-	-	3-D29	3-D29	3-D29
	スタラップ	8-D13@200	8-D13@200	8-D13@200	-	8-D13@200	8-D13@50	8-D13@50	8-D13@50	-	8-D13@50	8-D13@50	8-D13@50	8-D13@50	-	-	8-D13@50	8-D13@50	8-D13@50

本増やした。スタラップは 3-D10@150 から Z0.9、Z1.0 モデルともに 3-D10@100 に変更した。

### 3 時刻歴応答解析

#### 3.1 解析計画

その 1 と同様に、X 方向に関して地震地域係数 0.8 に 1.125、1.25 をそれぞれ乗じて割増し、地震地域係数 0.9、1.0 相当とした。解析モデルには、部材を線材置換し剛床を仮定した立体骨組モデルを用いた。立体骨組モデルの梁は単軸バネで曲げとせん断をモデル化し、軸方向に関して剛床仮定により変形しないものとしている。柱のモデルについては MN モデル、壁のモデルについては MS モデルで軸方向と曲げのモデル化を行い、単軸せん断バネでせん断のモデル化を行った。Z0.8、Z0.9、Z1.0 モデルに 3 種類の地震波を入力して時刻歴応答解析を行う。

#### 3.2 入力地震動

本解析で使用した地震波は EL Centro 波 NS(1940)、Hachinohe 波 EW(1968)、Taft 波 EW(1952)の 3 波である。それらの地震波の速度を 25、50cm/s に基準化して、計 6 種類の地震波で解析を行った。表 3 に地震波を 25、50cm/s に基準化する際に使用した倍率を示す。また、図 2 に EL Centro 波、Hachinohe 波、Taft 波の速度を 50cm/s に基準化したときの加速度応答スペクトルを示す。各モデルの 1 次固有周期は Z0.8 モデルが 0.229s、Z0.9 モデルが 0.246s、Z1.0 モデルが 0.233s である。図 2 に示す直線は固有周期 0.23s の線である。その付近では、Taft 波に比べて、EL Centro 波と Hachinohe 波の加速度がやや小さい。減衰

定数は瞬間剛性比例で 5%としている。

### 3.3 解析結果

#### (1)最大層せん断力

図 3 に最大層せん断力を示す。今回使用した 6 種類の地震波ではいずれも、各モデルとも 3 階では値がそれほど変わらないのに対して、1 階では値の差が大きくなる傾向にある。Taft 波 25cm/s では、ほかの速度 25cm/s の波よりも値が全体的に大きくなっている。EL Centro 波 25cm/s および Hachinohe 波 25cm/s では、Z0.8 モデルと Z0.9 モデルの値が 1 階から 3 階までほぼ同じとなっている。Taft 波 50cm/s では、ほかの速度 50cm/s の波よりも全体的に大きくなっているが、Z0.8 モデルと Z0.9 モデルの値は EL Centro 波 50cm/s の場合とほぼ同じとなっている。Hachinohe 波 50cm/s では、ほかの 50cm/s の波よりも 1 階から 3 階までの値が小さくなっている。

#### (2)最大層間変形角

図 4 に最大層間変形角を示す。今回使用した 6 種類の地震波ではいずれも、最大層間変形角は Z0.8、Z0.9、Z1.0 モデルの順に値が小さくなり、Hachinohe 波、EL Centro

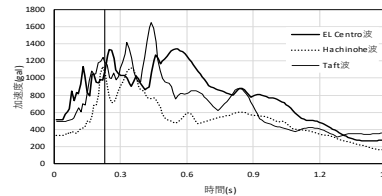


図 2 加速度応答スペクトル

表 3 基準化の倍率

	25(cm/s)	50(cm/s)
EL Centro	0.747	1.495
Hachinohe	0.726	1.452
Taft	1.411	2.823

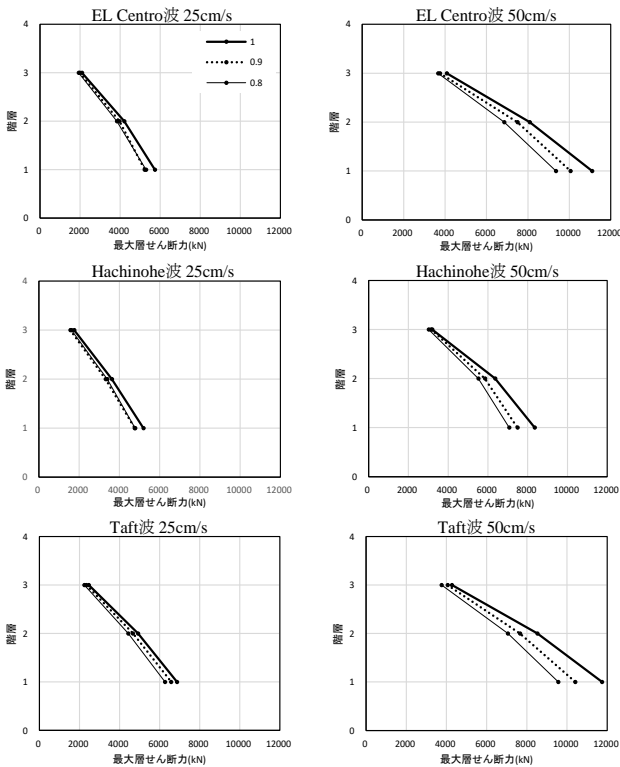
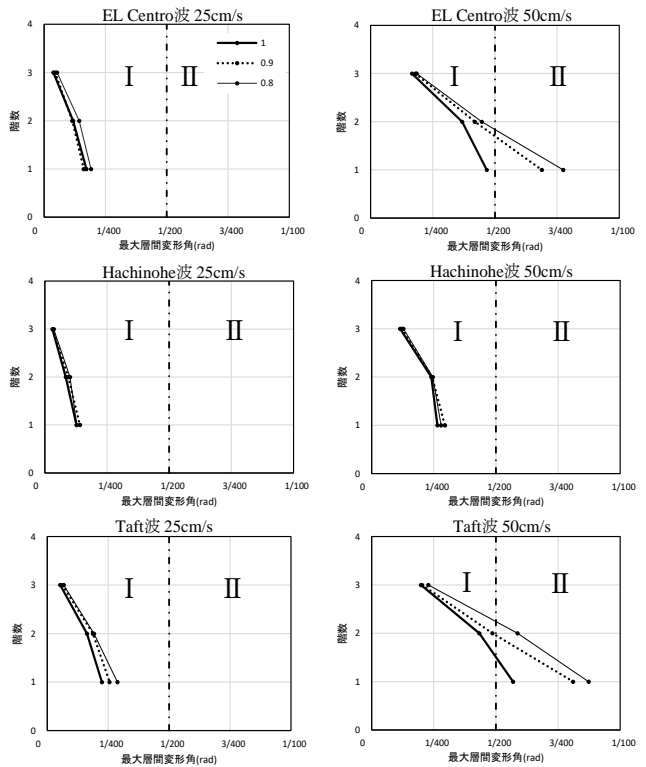


図 3 最大層せん断力



I・IIは損傷度を表す

図 4 最大層間変形角

波、Taft 波の順に値が大きくなっている。また、3 階、2 階、1 階の順に値が大きくなり、各モデルとも 3 階では値がそれほど変わらないのに対して、1 階では値の差が大きくなる傾向にある。EL Centro 波 25cm/s および 50cm/s では Z0.8 モデルの最大層間変形角は  $1/588\text{rad}$  および  $1/213\text{rad}$ 、Z0.9 モデルの最大層間変形角は  $1/625\text{rad}$  および  $1/145\text{rad}$ 、Z1.0 モデルの最大層間変形角は  $1/526\text{rad}$  および  $1/130\text{rad}$  が最大値である。Hachinohe 波 25cm/s および 50cm/s では Z0.8 モデルの最大層間変形角は  $1/769\text{rad}$  および  $1/365\text{rad}$ 、Z0.9 モデルの最大層間変形角は  $1/714\text{rad}$  および  $1/345\text{rad}$ 、Z1.0 モデルの最大層間変形角は  $1/769\text{rad}$  および  $1/357\text{rad}$  が最大値である。Taft 波 25cm/s および 50cm/s では Z0.8 モデルの最大層間変形角は  $1/455\text{rad}$  および  $1/175\text{rad}$ 、Z0.9 モデルの最大層間変形角は  $1/385\text{rad}$  および  $1/123\text{rad}$ 、Z1.0 モデルの最大層間変形角は  $1/345\text{rad}$  および  $1/115\text{rad}$  が最大値である。Taft 波 25cm/s では、ほかの波よりも値が全体的に大きく、Hachinohe 波 25cm/s では、ほかの波よりも値が全体的に小さくなった。Taft 波 50cm/s では、ほかの波より値が大きく、Hachinohe 波 50cm/s では、ほかの波より値が小さい。Hachinohe 波では速度 25cm/s のときよりも速度 50cm/s の方が 1 階と 2 階の

値がほかの波の場合と比べてより小さい。EL Centro 波 50cm/s では、Z1.0 モデルと Z0.8、Z0.9 モデルとで 1 階の値に大きな差がある。同様に Taft 波 50cm/s では、Z1.0 モデルと Z0.8、Z0.9 モデルとで 1 階の値に大きな差がある。

(3)ヒンジ図

各モデルの層間変形角  $1/100\text{rad}$  時のおよび B 通りヒンジ図を図 5 に示す。速度 25cm/s では、3 波ともいずれのモデルについても曲げひび割れしか発生しておらず曲げ降伏は発生していない。また、Taft 波 25cm/s では EL Centro 波 25cm/s、Hachinohe 波 25cm/s に比べて Z0.8、Z0.9 モデルで 3 階の柱脚や 3 階梁に曲げひび割れが多く生じているのに対して、Z1.0 モデルでは曲げひび割れが少ないことが読み取れる。速度 50cm/s では、Hachinohe 波についてはいずれのモデルでも曲げひび割れしか発生しておらず曲げ降伏は発生していないが、EL Centro 波と Taft 波ではいずれのモデルでも 1 階柱と 2 階梁に曲げ降伏が発生している。EL Centro 波 50cm/s、Taft 波 50cm/s の Z1.0 モデルでは 1 階柱脚のみに曲げ降伏が発生しており、Z0.8、Z0.9 モデルでは 1 階柱頭や 2 階梁に曲げ降伏が生じている。また、Taft 波 50cm/s のほうがより曲げ降伏の発生個所が多かった。曲げ降伏の発生状況から Hachinohe

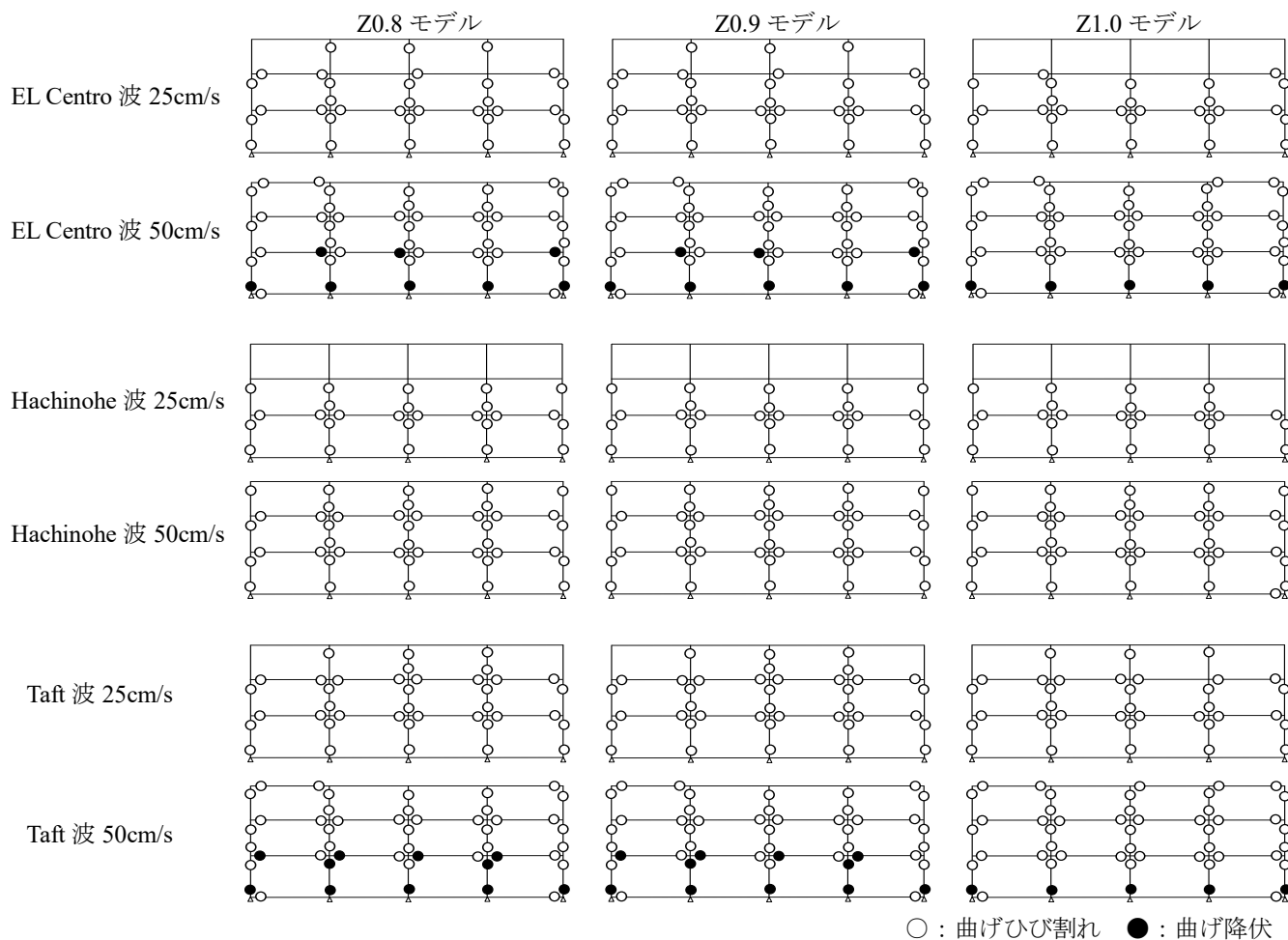


図 5 B 通りヒンジ図 層間変形角  $1/100\text{rad}$

波の層間変形角がほかの波より小さいことや Taft 波の層間変形角がほかの波より大きくなる事が分かる。

#### 4 補修費の算定

##### 4.1 損傷度と補修費

文献 1)を参考に、時刻歴応答解析で得られた層間変形角に基づいて層の損傷度を判定した後、層の損傷度に応じて被災度を決定し、被災度に応じた補修費用を概算する。設定した層間変形角、層の損傷度、被災度、補修費用の対応関係を表 4 に示す。層間変形角と層の損傷度の対応関係、損傷度と被災度の対応関係は「鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価型指針(案)・同解説」<sup>2)</sup>を、被災度と補修費の対応関係は文献 3)をそれぞれ参考に設定している。層間変形角が 1/200rad 未満の場合を層の損傷度 I として補修費用は 0~10,000 円/m<sup>2</sup>、層間変形角が 1/200rad 以上 1/100rad 未満の場合を層の損傷度 II とし補修費用は 10,000~29,000 円/m<sup>2</sup>、層間変形角が 1/100rad 以上 1/75rad 未満の場合を層の損傷度 III とし補修費用は 10,000~29,000 円/m<sup>2</sup>と設定した。床面積あたりの補修費用(円/m<sup>2</sup>)に床面積を乗じて補修費用を概算する。

表 4 損傷度・被災度・補修費用の設定

損傷度	状態	被災度	層間変形角	補修費用(円/m <sup>2</sup> )
I	使用	無被害または軽微	1/200	0~10,000
II	修復1	小破	1/100	10,000~29,000
III	修復2	中破	1/75	29,000~60,000
IV	安全	大破	1/50	建て替え
V	-	崩壊	-	

表 5 補修費

Z	階層	25(cm/s)			50(cm/s)		
		EL Centro	Hachinohe	Taft	EL Centro	Hachinohe	Taft
0.8	1	0~538(I)	538~1559(II)	0~538(I)	538~1559(II)	538~1559(II)	
	2	0~538(I)	0~538(I)	0~538(I)	538~1559(II)	538~1559(II)	
	3	0~538(I)	0~538(I)	0~538(I)	0~538(I)	0~538(I)	
	合計	0~1614	538~2635	0~1614	1076~3656		
0.9	1	0~538(I)	538~1559(II)	0~538(I)	538~1559(II)	538~1559(II)	
	2	0~538(I)	0~538(I)	0~538(I)	0~538(I)	0~538(I)	
	3	0~538(I)	0~538(I)	0~538(I)	0~538(I)	0~538(I)	
	合計	0~1614	538~2635	0~1614	538~2635		
1.0	1	0~538(I)	0~538(I)	0~538(I)	538~1559(II)	538~1559(II)	
	2	0~538(I)	0~538(I)	0~538(I)	0~538(I)	0~538(I)	
	3	0~538(I)	0~538(I)	0~538(I)	0~538(I)	0~538(I)	
	合計	0~1614	0~1614	0~1614	538~2635		

単位：万円 ()は損傷度を表す

表 6 躯体費と補修費のトータルコスト

##### (1) 補修費最大値

Z	躯体費	EL Centro		Hachinohe		Taft	
		補修費	躯体費+補修費	補修費	躯体費+補修費	補修費	躯体費+補修費
0.8	2723	2634	5357	1614	4337	3656	6379
0.9	2898	2634	5532	1614	4512	2634	5532
1.0	2995	1613	4608	1614	4609	2634	5629

##### (2) 補修費最小値

Z	躯体費	EL Centro		Hachinohe		Taft	
		補修費	躯体費+補修費	補修費	躯体費+補修費	補修費	躯体費+補修費
0.8	2723	538	3261	0	2723	1075	3798
0.9	2898	538	3436	0	2898	538	3436
1.0	2995	0	2995	0	2995	538	3533

単位：万円

#### 4.2 補修費の概算

各モデルの補修費の概算結果を表 5 に示す。補修費の概算は表 4 の最小値と最大値に対してそれぞれ行った。図 4 に損傷度 I、II の範囲を示している。速度 25cm/s のときは、3 波ともいずれのモデルでも最大層間変形角は 1/200rad 未満であるので、全層で損傷度は I となり、どの場合も補修費は同じ値となっている。また、Hachinohe 波 50cm/s も同様の理由で補修費は同じ値となっている。EL Centro 波 50cm/s の Z0.8、Z0.9 モデルの 1 階、Taft 波 50cm/s の Z0.8、Z0.9、Z1.0 モデルの 1 階、Z0.8 モデルの 2 階は最大層間変形角の値が 1/200rad 以上 1/100rad 未満であるので損傷度は II となっている。

躯体費と補修費を合わせて今回の対象建物にかかるトータルコストを比較する。速度 50cm/s のときのトータルコストを表 6 に示す。なお、速度 25cm/s と Hachinohe 波 50cm/s は補修費が同じ値なので補修費用が最大値、最小値ともに躯体費が一番高い Z1.0 モデルのときがトータルコストが一番高く、躯体費が一番低い Z0.8 モデルのときがトータルコストが一番低くなる。EL Centro 波 50cm/s では、補修費用最大値、最小値ともに Z1.0 モデルのトータルコストが一番低くなる。Taft 波 50cm/s では、補修費用最大値、最小値ともに Z0.9 モデルのトータルコストが一番低くなる。速度 50cm/s に関して Z0.8 モデルは Hachinohe 波のような被害が小さい地震波では補修費が少なくすむので、トータルコストを抑えられるが Taft 波のような被害が大きい地震波では補修費用が多くかかってしまうためトータルコストが一番高い結果となった。

#### 5. まとめ

Z0.8、0.9、1.0 の RC 造建物モデルの時刻歴応答解析を行い、損傷度による補修費の概算および躯体費を合わせたトータルコストを比較し、以下の知見が得られた。

- 1) EL Centro 波 50cm/s、Taft 波 50cm/s では、各モデルの 1 階および 2 階の最大層間変形角の差が大きくなった。
- 2) 速度 25cm/s の 3 波と Hachinohe 波 50cm/s は全層で損傷度 I であったため補修費は同じ値となり、EL Centro 波 50cm/s では Z1.0 モデル、Taft 波 50cm/s では Z0.9、Z1.0 モデルで補修費が低くなった。
- 3) EL Centro 波 50cm/s では Z1.0 モデル、Taft 波 50cm/s では Z0.9 モデルが躯体費と補修費を合わせたトータルコストを低く抑えられた。

#### 参考文献

- 1) 岡島浩平、中田慎介、伊藤瑞悦、田部浩史郎：RC 建物の免震化による損傷レベル制御 その 2 免震化と経済性、日本建築学会四国支部研究報告集、pp.11-12、2005.5
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価型指針(案)・同解説、pp.61-69、2004.1
- 3) 諏訪仁、野畑有秀、関松太郎：兵庫県南部地震の被災データベースを用いた既存建築物の地震リスク評価に関する研究、日本建築学会技術報告集、第 12 号、pp.41-46、2001.1

\*1 山口大学工学部感性デザイン工学科 学部生 Student, Dept. of Perceptual Sciences and Design Eng., Faculty of Eng., Yamaguchi Univ.  
 \*2 山口大学大学院創成科学研究科博士 前期課程 Student, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ.  
 \*3 山口大学大学院創成科学研究科講師 博士(工学) Lecturer, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ., Dr. Eng.  
 \*4 山口大学大学院創成科学研究科教授 博士(工学) Prof, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ., Dr. Eng.