

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3 補修費の算定方法の検討)

地震地域係数 山口県 RC造校舎  
時刻歴応答解析 損傷度 補修費用

準会員○坪井誠\*1 準会員 蒲池航洋\*1 正会員 岡村直樹\*2  
正会員 松原大輔\*2 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<sup>1)</sup>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。その2<sup>2)</sup>では地震地域係数0.8、0.9、1.0のモデルに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算定し、躯体費と補修費のトータルコストを比較して検討した。しかし、その2の補修費の算定法では、地震地域係数が0.8、0.9、1.0と違う場合であっても、同じ値の補修費が算出されることがあった。これは層という大きな視点から変形角を見て損傷度を出しているためである。そこで本研究では、地震地域係数の違いにより補修費に差が出るよう柱と梁の部材角から損傷度を定め、部材の補修費を算定し、それらを足し合わせることで補修費を算出した。

2. 検討対象建物

本研究では、検討対象建物はその2と同様に部材断面の変更モデルである原設計、D2モデル、DN6モデルを検討対象とし、それぞれZ0.8、Z0.9、Z1.0モデルと呼称する。各モデルは地震地域係数の0.8、0.9、1.0に対応している。また各モデルについて原設計と同等の保有水平耐力の余裕度を有している。柱と梁の断面表を表1、2に示す。

3. 時刻歴応答解析

3.1 解析計画

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8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既往波4波（EL Centro 波 NS、Hachinohe 波 EW、Taft 波 EW、JMA KOBE NS）と告示波4波（EL Centro 位相、Hachinohe 位相、JMA KOBE 位相、乱数）の計8波である。既往波は地震波の速度を50cm/sに基準化して解析を行っ

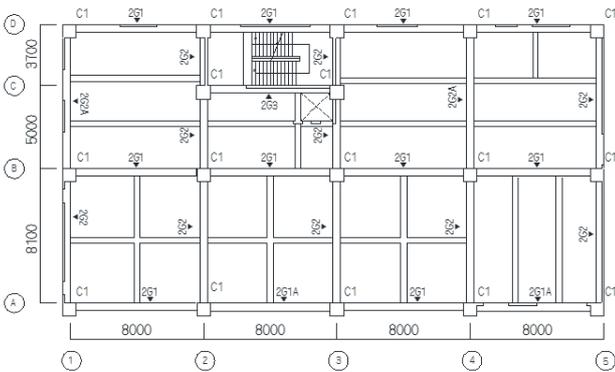


図1 2階伏図

表1 柱断面表

		Z0.8モデル(原設計)			Z0.9モデル(D2)			Z1.0モデル(DN6)		
		C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1
3階	B×D	80×80	80×80	85×85						
	主筋	16-D25	16-D25	20-D25						
	ブー	X方向 4-D13@100 Y方向 2-D13@100	5-D13@100 3-D13@100	5-D13@100 3-D13@100						
2階	B×D	80×80	80×80	85×85						
	主筋	16-D25	16-D25	20-D25						
	ブー	X方向 4-D13@100 Y方向 2-D13@100	5-D13@100 3-D13@100	5-D13@100 3-D13@100						
1階	B×D	80×80	80×80	85×85						
	主筋	16-D25	16-D25	20-D25						
	ブー	X方向 4-D13@100 Y方向 2-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	-	-
	一段	4-D25	5-D25	3-D25	-	-	4-D29	5-D29	3-D29	-	-	5-D29	5-D29	4-D29	-	-
	二段	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1-D29	5-D29	-	-	-
	下端筋	4-D25	4-D25	3-D25	-	-	4-D29	4-D29	3-D29	-	-	5-D29	4-D29	-	-	-
	スタップ	3-D10@150	3-D10@150	3-D10@150	-	-	3-D10@100	3-D10@100	3-D10@100	-	-	3-D10@100	3-D10@100	3-D10@100	-	-
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
	一段	5-D25	5-D25	5-D25	-	5-D25	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	1-D29	2-D29	-	3-D29
	下端筋	4-D25	4-D25	4-D25	-	5-D25	4-D29	4-D29	4-D29	-	5-D29	5-D29	5-D29	4-D29	-	5-D29
	スタップ	4-D13@200	4-D13@200	4-D13@200	-	4-D13@200	4-D13@150	4-D13@150	4-D13@150	-	4-D13@150	4-D13@150	4-D13@150	4-D13@150	-	4-D13@150
2階	B×D	45×95	45×95	45×95	50×100	45×100	45×100	45×100	45×100	50×105	45×100	45×100	45×100	45×100	50×105	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	6-D29	5-D29	
	二段	1-D25	-	2-D25	2-D25	2-D25	1-D29	-	3-D25	2-D29	2-D29	2-D29	1-D29	2-D29	3-D29	
	下端筋	4-D25	4-D25	4-D25	6-D25	5-D25	4-D29	4-D29	4-D25	6-D29	5-D29	5-D29	5-D29	6-D29	5-D29	
	スタップ	4-D13@200	4-D13@200	4-D13@200	4-D13@200	4-D13@200	4-D13@150	4-D13@150	4-D13@150	4-D13@150	4-D13@150	4-D13@150	4-D13@150	4-D13@150	4-D13@150	
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
	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
	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
	下端筋	5-D25	5-D25	5-D25	-	5-D25	5-D29	5-D29	5-D29	-	5-D29	5-D29	5-D29	5-D29	-	5-D29
	スタップ	1-D25	1-D25	1-D25	-	1-D25	1-D29	1-D29	1-D29	-	1-D29	2-D29	2-D29	2-D29	-	2-D29

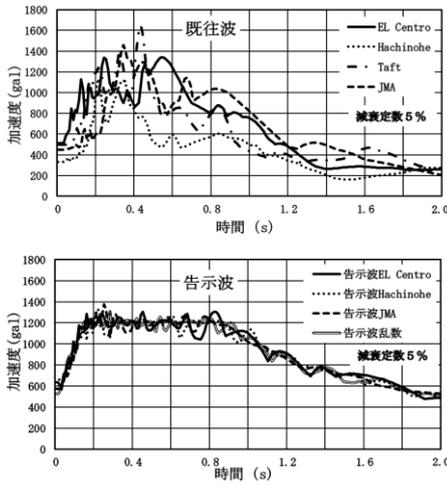


図2 加速度応答スペクトル

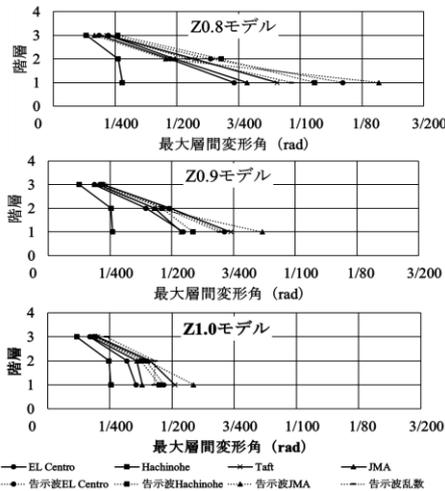


図3 最大層間変形角

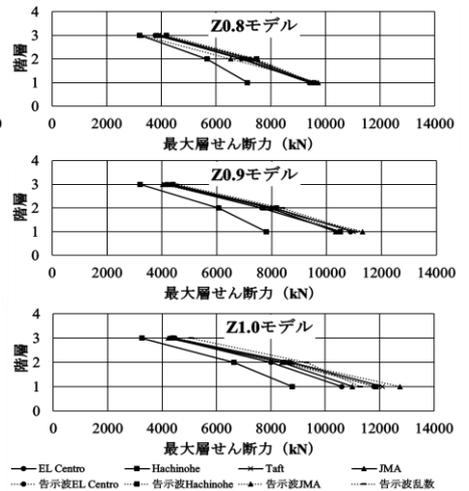


図4 最大層せん断力

た。既往波を 50cm/s に基準化する際に使用した倍率は EL Centro 波が 1.495、Hachinohe 波が 1.452、Taft 波が 2.823、JMA KOBE 波が 0.551 である。告示波の地盤は第二種地盤の増幅率をかけたものである。図 2 に速度を 50cm/s に基準化したときの既往波と告示波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。

### 3.3 解析結果

#### (1) 最大層間変形角

図 3 に最大層間変形角の分布を示し、実線は既往波、点線は告示波を表している。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っている。各モデルとも 1 階では告示波 JMA の値が一番大きい。既往波 Hachinohe は他の地震波よりも 1 階から 3 階までの値が小さくなっている。また Z1.0 モデルの告示波乱数以外では、3 階、2 階、1 階の順に値が大きくなり、3 階では値がそれほど変わらないのに対して、1 階では差が大きくなる傾向にある。Z1.0 モデルの告示波乱数では 1 階より 2 階の値の方が大きくなっている。

#### (2) 最大層せん断力

図 4 に最大層せん断力を示す。最大層せん断力は Z0.8、Z0.9、Z1.0 モデルの順に値が大きくなっている。各モデルとも 1 階では告示波 JMA の値が一番大きい。また、既往波 Hachinohe は他の地震波よりも 1 階から 3 階までの値が小さくなっている。今回使用した 8 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がある。

#### (3) ヒンジ図

0.8 モデルの B 通りヒンジ図を図 5 に示す。既往波 Hachinohe では柱と梁ともに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。柱については、既往波 EL Centro、既往波 JMA、告示波 JMA では 1 階のみ降伏が見られ 2 階、3 階ではひび割れしか発生していない。また既往波 Taft、告示波 EL Centro、告示波 Hachinohe、告示波

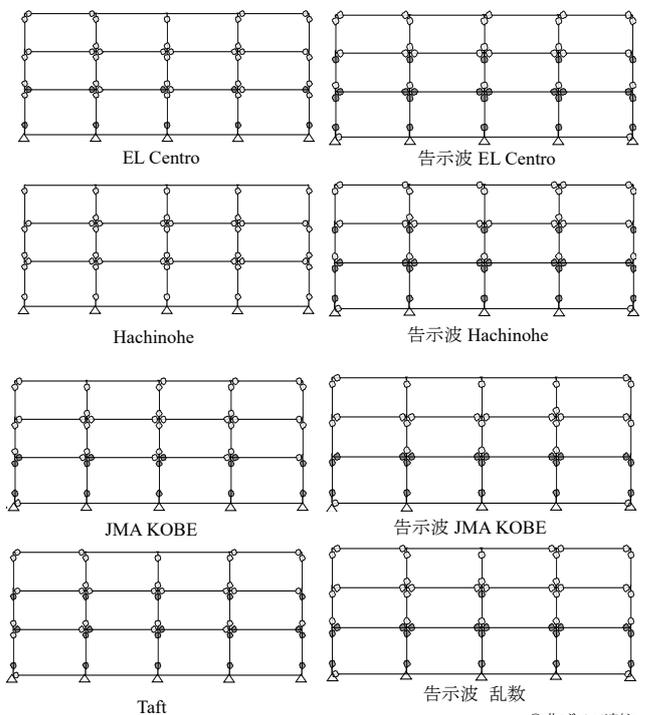


図5 ヒンジ図 B 通り

乱数では 1 階と 2 階で降伏が見られ、3 階では曲げひび割れのみ発生している。梁については、既往波 Hachinohe を除く 7 種類の地震波において 2 階の梁で降伏が発生し、基礎、3 階、R 階の梁は曲げひび割れが発生している箇所がある。

### 4. 補修費の算定

#### 4.1 補修費に含まれる費用

層間変形角に基づいて補修費を算定する方法を算定法 1、柱、梁の部材角に基づいて補修費を算定する方法を算定

表3 補修費に含まれる費用

補修費に含まれる費用	層間変形角に基づく補修費の算定	部材角に基づく補修費の算定	内訳
躯体工事費	○	○	柱、梁、壁、床
仕上げ工事費		○	内装、外装
設備工事費	○		電気、衛生、空調、昇降機など
仮設工事費			共通仮設工事費、直接仮設工事費
解体工事費		○	
その他			外構費、諸経費、設計費など

法2と呼称する。補修費は表3に示すように文献3)を参考に躯体工事費、仕上げ工事費、設備工事費、仮設工事費、解体工事費、その他の6項目を対象とし検討する。算定法1には躯体工事費、設備工事費が含まれ、算定法2には躯体工事費、仕上げ工事費、解体工事費が含まれている。

#### 4.2 層間変形角に基づく補修費の算定

算定法1では、文献4)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を算定した。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文献5)を、被災度と補修費の対応関係は文献6)を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算定する。補修費の算定は表4の最大値に対して行い、算定結果を表5に示す。

表4 損傷度、被災度、補修費の設定

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 方法1の補修費

Z	層	EL Centro	Hachinohe	Taft	JMA	告示波EL Centro	告示波Hachinohe	告示波JMA	告示波乱数
0.8	1	1559 (II)	538 (I)	1559 (II)	1559 (II)	3226 (III)	1559 (II)	1559 (II)	1559 (II)
	2	538 (I)	538 (I)	1559 (II)	538 (I)	1559 (II)	1559 (II)	538 (I)	1559 (II)
	3	539 (I)	538 (I)	538 (I)	539 (I)	538 (I)	538 (I)	539 (I)	538 (I)
合計		2635	1614	3656	2635	5323	3656	建て替え	3656
0.9	1	1559 (II)	538 (I)	1559 (II)	1559 (II)	1559 (II)	1559 (II)	1559 (II)	1559 (II)
	2	538 (I)	539 (I)	538 (I)	538 (I)	538 (I)	538 (I)	538 (I)	538 (I)
	3	538 (I)	540 (I)	539 (I)	539 (I)	539 (I)	539 (I)	539 (I)	539 (I)
合計		2635	1614	2635	2635	2635	2635	2635	2635
1	1	538 (I)	538 (I)	1559 (II)	538 (I)	538 (I)	1559 (II)	1559 (II)	538 (I)
	2	539 (I)	539 (I)	538 (I)	539 (I)	539 (I)	539 (I)	538 (I)	539 (I)
	3	540 (I)	540 (I)	539 (I)	540 (I)	540 (I)	540 (I)	539 (I)	540 (I)
合計		1614	1614	2635	1614	1614	2635	1614	1614

単位：万円 ( )は損傷度

告示波 EL Centro の Z0.8 モデルは1階の最大層間変形角の値が1/100rad以上1/75rad未満で損傷度IIIとなり補修費が高くなっている。また告示波 JMA の Z0.8 モデルは1階の最大層間変形角の値が1/75rad以上であるので損傷度はIVで建て替えとなる。既存波 Hachinohe は全層で損傷度Iとなりどのモデルも補修費は同じ低い値となっている。

#### 4.3 部材角に基づく補修費の算定

時刻歴応答解析で得られた柱、梁の部材角に基づいて部材の損傷度を判定した後、部材の損傷度に応じて補修費を算定する。設定した部材角、損傷度、ひび割れ幅、補修費の対応関係を表6に示す。ひび割れ幅と損傷度の対応関係は文献5)を、柱の部材角とひび割れ幅の対応関係

表6 損傷度、部材角、補修費

損傷度	状態	ひび割れ幅	部材角(柱)	部材角(梁)	補修費(万円/本)
I	使用	0.2mm以下	曲げひび割れ	曲げひび割れ	1~5
II	修復1	0.2~1.0mm程度	曲げ降伏	曲げ降伏	5~10
III	修復2	1.0~2.0mm程度	1/200rad以上	1/150rad以上	20~40
IV	安全	2.0mmを超える	1/67rad以上	1/75rad以上	80~100

は文献7)~10)、梁の部材角とひび割れ幅の対応関係は文献11)および12)、損傷度と補修費の対応関係は文献13)を基とし、その他2つの文献14)および15)を参考に設定している。

柱はひび割れ以降を損傷度I、降伏以降の部材角が1/200rad未満の場合を損傷度II、部材角が1/200rad以上1/67rad未満の場合を損傷度III、部材角が1/67rad以上の場合を損傷度IVと設定した。梁はひび割れ以降を損傷度I、降伏以降の部材角が1/150rad未満の場合を損傷度II、部材角が1/150rad以上1/75rad未満の場合を損傷度III、部材角が1/67rad以上の場合を損傷度IVと設定した。また、補修費については損傷度Iの時を1~5万円/本、損傷度IIの時を5~10万円/本、損傷度IIIの時を20~40万円/本、損傷度IVの時を80~100万円/本とする。柱・梁ともに補修費の算定は表6の最大値に対して行い、それぞれの値を合計することで全体の補修費を算定した。

既往波 EL Centro 波における Z0.8 モデルのヒンジ図および損傷度を図6に示す。部材の損傷度が異なる場合は両端の大きい方を採用し損傷度を決定した。その結果、柱については損傷度0が0本、損傷度Iは22本、損傷度IIは6本、損傷度IIIは17本、損傷度IVは0本となり、柱の補修費は850万円となった。梁については損傷度0が14本、損傷度Iは28本、損傷度IIは6本、損傷度IIIは0本、損傷度IVは0本となり、梁の補修費は200万円となった。したがって柱と梁の合計は1050万円となる。同様に各モデルの補修費の算定結果を表7に示す。補修費は Hachinohe 波を除き、Z0.8 モデルが一番高く、Z0.9 モデル、Z1.0 モデルと順に低くなり、地震地域係数が大きいほど補修費が低くなるのが分かる。Hachinohe 波のような被害の小さい地震波については、柱と梁ともに損傷度Iのみとなったため他の地震波と比べ低い値となり、各モデルの補修費にあまり差は出なかった。告示波 JMA では Z0.8 モデルにおいて最大層間変形角が0.015radで損傷度IVとなる柱が12本あり、補修費が1745万円と最も高い値となった。

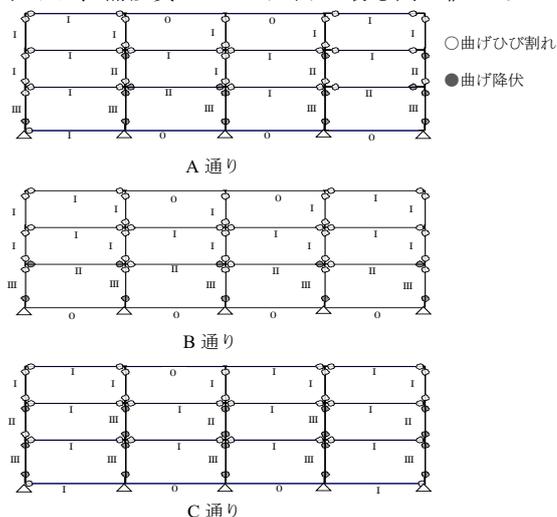


図6 Z0.8モデル 既往波 EL Centro ヒンジ図

表7 方法2の補修費

O既存波						Z0.9モデル						Z1.0モデル					
Z0.8モデル						EL Centro						EL Centro					
	IV	III	II	I	0		IV	III	II	I	0		IV	III	II	I	0
柱	0	17	6	22	0	柱	0	15	3	27	0	柱	0	0	3	42	0
梁	0	0	6	28	14	梁	0	0	2	34	12	梁	0	0	0	36	12
合計	0	17	12	50	14	合計	0	15	5	61	12	合計	0	0	3	78	12
金額 850						金額 765						金額 240					
本 万円						本 万円						本 万円					

表7 (続) 方法2の補修費

Hachinohe						Taft						JMA					
	IV	III	II	I	0		IV	III	II	I	0		IV	III	II	I	0
柱	0	0	0	45	0	柱	0	17	2	26	0	柱	0	17	4	26	0
梁	0	0	0	28	20	梁	0	0	0	25	23	梁	0	0	0	29	19
合計	0	0	0	73	20	合計	0	0	0	70	23	合計	0	0	0	74	19
金額 365						金額 350						金額 370					
本 万円						本 万円						本 万円					

図7 補修費比較 (左:方法1 右:方法2)

5. まとめ  
異なる地震地域係数における RC 造建物モデルの時刻歴応答解析を行い、部材ごとに損傷度を判定し補修費の算

定を行った。さらに層間変形角に基づく補修費の算定方法との比較を行い、以下の知見が得られた。

- 1) 算定法1では各モデルの補修費が同じ値になる場合があったが、算定法2ではモデルによって補修費が段階的に変化した。
- 2) 算定法2で求めた補修費に比べ算定法1の補修費は大きな値となった。
- 3) 算定法2について既往波 Hachinohe、既往波 Taft を除き、Z1.0 モデルの補修費は Z0.8 モデルの補修費のおよそ半分の値となっている。

参考文献

- 1) 黒瀬哲矢、岡村直樹、松原大輔、秋田知芳、稲井栄一：地震地域係数の違いが山口県の RC 造学校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1 RC 造学校建物モデルの躯体費の算定)、日本建築学会中国支部研究報告集第42巻、pp.295-298、2019.3
- 2) 岡村直樹、黒瀬哲矢、松原大輔、秋田知芳、稲井栄一：地震地域係数の違いが山口県の RC 造学校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)、日本建築学会中国支部研究報告集第42巻、pp.299-302、2019.3
- 3) 諏訪仁、関松太郎：兵庫県南部地震における建物の補修費用に関する統計的評価、構造工学論文集 Vol.50B、pp.149-154、2004.3
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 文野正裕、幸村信行、前田匡樹、壁谷澤寿海：軸方向変形拘束を受ける RC 梁部材の挙動に関する実験研究、コンクリート工学年次論文報告書、Vol.21、No.3、pp.517-522、1999
- 8) 永山憲二、文野正裕、鄭文淑、前田匡樹、田才晃、長田正至：柱部材の損傷状態に基づく震災 RC 造建築物の残余耐震性能評価 その2 残留ひび割れ幅と部材変形の関係、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、pp.453-454、2001.9
- 9) 王健男、岸本一蔵、大野義照：鉄筋コンクリート柱の残留曲げひび割れ幅の評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.3、pp.145-150、2007
- 10) 南口真一、岸本一蔵：曲げとせん断を受ける RC 造柱の曲げひび割れ幅算定式、日本建築学会構造系論文集、第77巻 第681号、pp.1709-1716、2012.11
- 11) 高橋典之、高橋絵里、中埜良昭：鉄筋コンクリート部材のひび割れ量推定モデルの検証、コンクリート工学年次論文集、Vol.31.No.2、pp.859-864、2009
- 12) 宿澤暁、中川翔太、高橋之：曲げとせん断を同時に受ける鉄筋コンクリート造梁のひび割れ間隔とひび割れ幅、日本建築学会東海支部研究報告書、第55号、pp.177-180、2017.2
- 13) 中島康策、衣笠秀行、古賀一八、小峯克彦：耐久性・修復性を考慮した RC 構造物の性能評価型耐震設計法の構築 (その2 補修費用算定式の提案)、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、pp.983-984、2003.9
- 14) 高原要、大久保全陸、広沢雅也：地震被害を受けた RC 造建物の補修費に関する部材別補修費の分析と概算復旧費の推定方法、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)、pp.599-600、1986.8
- 15) 恒川裕史、藤村勝、佐藤吉之、岡本肇：部材レベルの弾塑性応答解析を用いた地震予想最大損失率による RC 構造物の耐震性能評価、日本建築学会技術報告集 第17巻 第35号、pp.37-42、2011.2

\*1 山口大学工学部感性デザイン工学科 学部生  
\*2 山口大学大学院創成科学研究科博士 前期課程  
\*3 山口大学大学院創成科学研究科講師 博士(工学)  
\*4 山口大学大学院創成科学研究科教授 博士(工学)

Student, Dept. of Perceptual Sciences and Design Eng., Faculty of Eng., Yamaguchi Univ.  
Student, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ.  
Lecturer, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ., Dr. Eng  
Prof, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ., Dr. Eng.