

修士論文

エネルギー吸収メカニズムの改善による  
木造家屋の耐震性の向上に関する研究

Study on improve earthquake resistance of wooden house by  
improvement of energy absorption mechanism

高知工科大学大学院  
工学研究科基盤工学専攻

西村 凌介

2018年3月



平成30年度 修士論文

エネルギー吸収メカニズムの改善による  
木造家屋の耐震性向上に関する研究

高知工科大学大学院

工学研究科基盤工学専攻 社会システム工学コース

耐震研究室 1205101

西村 凌介

指導教員 甲斐 芳郎 教授

副指導教員 島 弘 教授

# 論文要旨

エネルギー吸収メカニズムの改善による木造家屋の耐震性向上に関する研究

社会システム工学コース

1205101 西村凌介

## 1) 序論

建築基準法は1950年に制定されて以来、大きな地震により被害を受けるたびに改正を繰り返し木造住宅の耐震性能は向上してきた。しかし、2016年4月に発生した熊本地震では、短い期間で震度7を2度も観測された。この地震により新耐震基準を満たす木造住宅が1042棟倒壊し、内7棟は2000年以降の耐震基準を満たす建物であった。この2000年基準を満たす7棟の倒壊要因として、前震による建物の耐震性能の低下があげられている(小倉,2017)。また同時にその改善策として柱または梁の断面を大きくすることで耐震性能の低下を抑えることができるとあげられている。しかし木造住宅は耐震性において柱・梁の断面の大きさは考慮されない。本研究では、柱と梁の断面の違いが建物の耐震性能に与える影響について、エネルギーの観点に着目し検討を行う。

## 2) 研究方法

柱と梁の断面の違いが建物の耐震性能に与える影響について、エネルギーの観点に着目し検討を行うためには、建物に入力されるエネルギーを等しくする必要がある。入力エネルギーを等しくした上で、全バネにおける履歴吸収エネルギーを算出し、比較することで柱と梁の断面の大きさの違いが及ぼす影響について分析を行った。

## 3) 解析結果

熊本地震で倒壊した新耐震基準を満たす木造住宅の擬似モデルの柱または梁の断面を変え解析を行った。

## 4) 結論

熊本地震において柱・梁を大きくすることで耐震性能の低下を抑えることができたのは剛性の違いにより建物に入力されるエネルギーが減ったためであることがわかった。梁変更モデルは他のモデルに比べて少ない変形量でより多くのエネルギーを吸収できるため効率よくエネルギーを吸収できるとわかった。

# Abstract

## 1) Introduction

Since the enactment of the Building Standard Law in 1950, the seismic performance of wooden houses has been improved as the revision is repeated each time it is damaged by a major earthquake. However, in the Kumamoto earthquake that occurred in April 2016, seismic intensity 7 was observed twice in a short period of time. This earthquake led to the collapse of 1042 wooden houses meeting new earthquake resistance standards, and 7 of them were buildings meeting the earthquake resistance standards since 2000. As a collapse factor of seven buildings that meet this 2000 standard, a decrease in the earthquake resistance performance of the building due to the pre-quake has been raised (Ogura, 2017). At the same time, it is said that as a remedial measure, by increasing the cross section of the pillar or beam, it is possible to suppress the deterioration of the earthquake resistance performance. However, in the case of wooden houses, the size of the cross section of the column and beam is not taken into consideration in seismic resistance.

## 2) Methodology

Regarding the influence of difference in cross section between pillar and beam on seismic performance of building, in order to investigate from the viewpoint of energy, it is necessary to equalize the energy input to the building. Analyzed the influence of the difference of the size of the cross section of the column and the beam by calculating and comparing the hysteresis energy absorbed energy of all the springs with equal input energy.

## 3) Analysis result

We analyzed the cross section of the pillar or beam of the pseudo-model of the wooden house meeting the new earthquake resistance criteria collapsed in the Kumamoto earthquake and analyzed it.

## 4) Conclusion

It was found that the reduction of seismic performance could be suppressed by enlarging the column / beam in the Kumamoto earthquake because the energy input to the building decreased due to the difference in rigidity.

We found that beam change model can absorb energy more efficiently because it can absorb more energy with less amount of deformation than other models.

# 目次

## 論文要旨

第1章：序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	1
1.3 wallstat 概要	1
1.4 本論文の構成	4
第2章：耐震性能低下について妥当性の分析	6
2.1 入力エネルギー	6
2.2 解析諸元	7
2.2.1 建物モデル	7
2.2.2 復元力特性	10
2.2.3 入力地震波	11
2.3 解析結果	12
第3章：柱と梁の断面の違いが耐震性に及ぼす影響についての検討	15
3.1 建物モデルの接合部・耐震壁における履歴吸収エネルギーの比較	15
3.2 筋交いにおける最大変形とエネルギー吸収の関係	19
3.3 結果	21
第4章：結論	23

## 図目次

図 1.1 軸組のモデル化概要	2
図 1.2 接合部のモデル化概要	2
図 1.3 鉛直構面の概要	3
図 1.4 筋交構面の概要	3
図 1.5 解析モデルの重量の指定	4
図 2.1 1 質点振動系	6
図 2.2 1 質点系復元力特性	6
図 2.3 周期とエネルギースペクトルの模式図	6
図 2.4 建物モデル 1 階平面図	8
図 2.5 建物モデル 2 階平面図	9
図 2.6 接合部骨格曲線	10
図 2.7 構面骨格曲線	10
図 2.8 熊本地震波 (4 月 14 日)	11
図 2.9 熊本地震のエネルギースペクトルと建物固有周期の関係	13
図 3.1 建築センターBCJ-L1 加速度波形	15
図 3.2 建築センター模擬波 エネルギースペクトル	15
図 3.3 壁におけるエネルギー吸収量の比較	17
図 3.4 筋交いにおけるエネルギー吸収量の比較	18
図 3.5 引張筋交いにおける変位と吸収エネルギーの関係	19
図 3.6 圧縮筋交いにおける変位と吸収エネルギーの関係	20

## 表目次

表 2.1	建物概要	7
表 2.2	建物の剛性、建物固有周期	12
表 3.1	バネ毎の塑性エネルギー	16

# 第 1 章

## 序論

# 第1章：序論

## 1.1 研究背景

1950年に全国すべての建物に耐震設計が義務付けられ、同年に建築基準法は制定された。1964年の新潟地震、1968年の十勝沖地震を経て1971年に建築基準法が改正され、更に1978年の宮城県沖地震後、耐震設計法が抜本的に見直され、その後1981年に建築基準法は大きく改正された。その為、1981年以降の耐震基準を新耐震基準、それ以前のを旧耐震基準と区別される。その後も建築基準法は改正され、1995年の兵庫県南部地震を経て、2000年に改正された。建築基準法は大地震による被害を受けるたびに改正が行われてきた。にもかかわらず2016年4月に発生した熊本地震では新耐震基準を満たす木造住宅が1042棟倒壊し、2000年以降に建てられた建物が7棟倒壊した。

## 1.2 研究目的

2016年4月に発生した熊本地震において倒壊した2000年以降の建築基準を満たす住宅の倒壊要因として、4月14日に発生した大きな地震（前震）によって住宅の耐震性能が低下し、その後発生した4月16日に発生した大きな地震（本震）に耐えるだけの耐震性能が残っていなかったと示されている（小倉、2017）。また、その改善策として、木造住宅の柱または梁の断面寸法を大きくすることで地震による建物の耐震性能の低下を抑えることができると示している。

しかし、木造住宅は地震に対して耐力壁で抵抗すると考えられている為、耐震性能の検討は壁量計算によって行われおり、柱と梁の断面の大きさは考慮されていない。本研究では、柱と梁の断面の違いが建物の耐震性能に与える影響について、エネルギーの観点に着目し検討を行う。

## 1.3 wallstat 概要

### Wallstat

地震時の木造軸組構法住宅の動的挙動および、倒壊過程を、接合部、部材レベルの構成要素の実験データを入力値としてシュミレーションを計算機プログラムの開発を目的として実施された。

プログラムは、実大の振動台実験や、大地震の際の木造建物の被害調査の結果と比較し、信頼性の検証を行っている。

## モデル化

### 軸組

軸組は折損を考慮するために弾塑性回転バネ（塑性ヒンジ）+弾性梁要素でモデル化を行っている。骨格曲線の曲げモーメントがゼロの回転角に達すると部材が折損したとみなし、部材間の回転バネをピン接合に変更される。

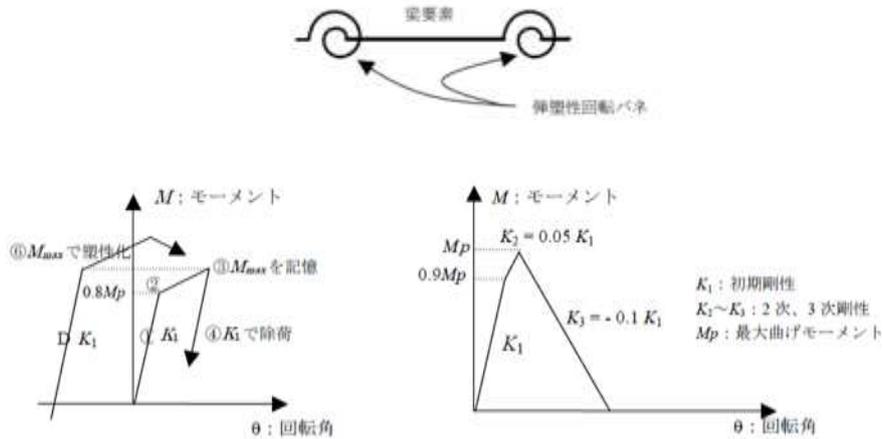


図 1.1 軸組のモデル化概要

### 接合部

接合部は回転バネ+弾塑性バネ（せん断に対しては剛）を用いてモデル化される。圧縮引張の弾塑性バネは片側弾性+片側スリップ型で、回転バネの履歴特性はスリップ型を用いられ、強軸と弱軸の各方に独立に作用するように設定される。

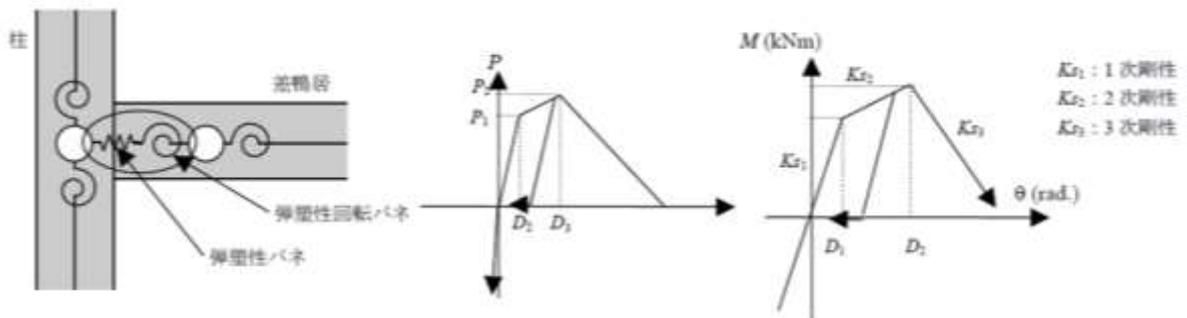
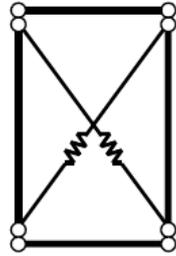


図 1.2 接合部のモデル化概要

## 構面

構面は、トラスバネでブレース置換することでせん断力のモデル化を行っている。履歴特性はバイリニア+スリップ型履歴側を用いた。



構面のバネ（ブレース置換）

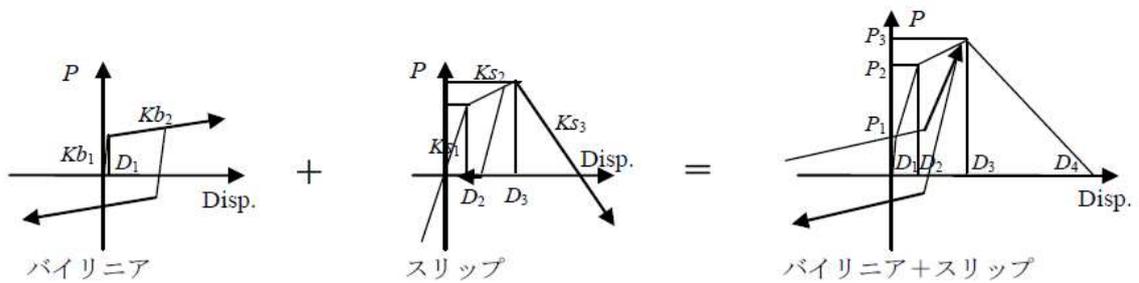


図 1.3 鉛直構面の概要

## 筋交い

筋交い構面は図 1.4 に示したように 1 本の筋交いに対して圧縮と引張の 2 本のトラス要素を配置することでモデル化される。履歴特性は構面のバネと同様にバイリニア+スリップ型の履歴則で表現される。

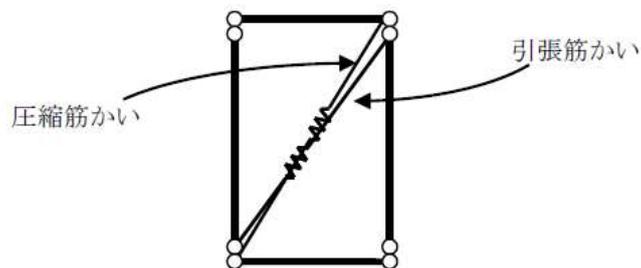


図 1.4 筋交構面の概要

## 建物重量

建物の各階重量は、各階床を中心として串団子置換した場合の等価質量として図 1.5 の様に「1 階下半分の重量」「2 階の下半分+1 階の上半分の重量」「2 階の上半分+小屋組の重量」と配分される。また、各層に指定した重量は当該高さには存在する要素の数で除され、均等に配分される。

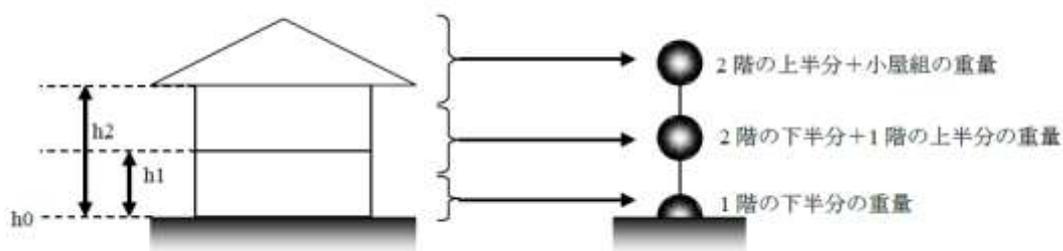


図 1.5 解析モデルの重量の指定

## 1.4 本論文の構成

本論文は序論と総括を含む 5 つの章で構成されている。以下に各章の概要を示す。

第 1 章「序論」では、研究背景や研究の目的、本研究で用いた解析ソフト wallstat の概要、本論文の構成を示している。

第 2 章「耐震性能低下について妥当性の分析」では、柱・梁の断面寸法を大きくすることで地震動を受けることによる耐震性能の低下を抑えることができるのか分析を行った。

第 3 章「柱と梁の断面の違いが耐震性に及ぼす影響についての検討」では、建物モデルの解析において置換したすべてのバネで吸収した履歴吸収エネルギーを算出し、比較を行った。

第 4 章「結論」では、得られた結論について述べる。

## 第 2 章

### 耐震性能低下について妥当性の分析

## 第2章：耐震性能低下について妥当性の分析

### 2.1 入力エネルギー

1方向の水平地震動をうける1質点振動系に対して、減衰力として粘性減衰力を考慮すると、振動方程式は次式のように書ける。

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + F(y) = F_e$$

$M$ ：質点の質量       $C\dot{y}$ ：粘性減衰力

$F(y)$ ：復元力       $F_e$ ：地震外力  $= -M\ddot{z}_0$

$z_0$ ：水平地動       $y$ ：質点の相対変位

両辺に  $dy = \dot{y}dt$  をかけ地震の全継続時間  $t_0$  にわたって積分すれば次式が得られる。

$$M \int_0^{t_0} \dot{y}^2 dt + C \int_0^{t_0} \dot{y}^2 dt + \int_0^{t_0} F(y) \dot{y} dt = \int_0^{t_0} F_e \dot{y} dt$$

右辺は地震外乱による系へのエネルギー入力の総量  $E$  を表している。左辺の第2項は減衰機構による消費エネルギー  $W_h$  を表している。左辺の第1項は部分積分を行うと  $M\dot{y}_{t=t_0}^2/2$  となり運動エネルギーを表わす。左辺第3項はバネ系に蓄えられる塑性歪エネルギー  $W_p$  と地震終了時の弾性歪エネルギーを表わす。地震終了時の運動エネルギーと弾性歪エネルギーは弾性振動エネルギー  $W_e$  を形成する。したがって、次のように書ける。

$$W_p + W_e + W_h = E$$

弾性振動エネルギー  $W_e$  の範囲は次式で与えられる。

$$0 < W_e < \frac{Q_Y \delta_Y}{2}$$

ここで       $Q_Y$ ：弾性限界水平力       $\delta_Y$ ：弾性限界変位

塑性歪エネルギー  $W_p$  は系の抵抗力を  $R(y)$  とすると  $R-y$  関係により描かれた面積を求めることで得られる。

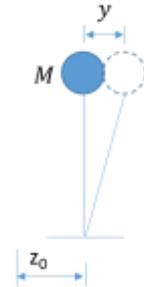


図 2.1 1質点振動系

エネルギー入力の総量  $E$  は質点系の初期剛性  $K_0$  と塑性化後の剛性  $K_1$  を式  $T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}}$  に代入することにより求めた周期  $T_0$  と  $T_1$  を求め、その周期  $T_0$ 、 $T_1$  とエネルギースペクトルで囲まれた面積とする。

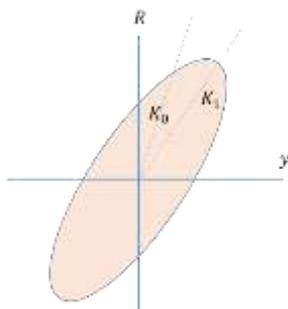


図 2.2 1質点系復元力特性

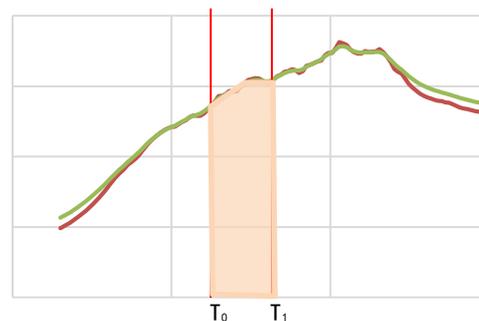


図 2.3 周期とエネルギースペクトルの模式図

## 2.2 解析諸元

一般診断法による上部構造評点  $I_w$  値を用いた木造住宅における被災時の残存耐震性能の評価(小倉、2017)では、柱または梁の断面寸法を大きくすることで耐震性能低下に効果があると示されており、建物の耐震性能の評価をエネルギーの観点から行うには地震動により建物に入力されるエネルギー量を明らかにする必要がある。そこで建物の初期剛性と地震動入力後の建物剛性から建物周期を算出し、熊本地震のエネルギースペクトルと算出した建物周期で囲まれた面積を入力されたエネルギーと定義し比較を行う。表 2.1 に建物モデルの概要を示す。ここでは耐震性能の低下防止に特に効果が大いいと示されている柱と梁の両断面を大きくした場合について検討を行う。図 2.4 に建物モデルの 1 階平面図を図 2.5 に建物モデルの 2 階平面図を示す。

### 2.2.1 建物モデル

表 2.1 建物概要

		標準モデル	柱変更モデル	梁変更モデル	柱・梁変更モデル
軸組	通柱	120×120	150×150	120×120	150×150
	管柱	105×105	120×120	105×105	120×120
	土台	120×120	150×150	120×120	150×150
	梁桁	120×210, 240	120×210, 240	120×240, 270	120×240, 270
	まぐさ	108×45	108×45	108×45	108×45
壁	耐震壁	45×90	45×90	45×90	45×90
接合部		HD-10kN HD-25kN	HD-10kN HD-25kN	HD-10kN HD-25kN	HD-10kN HD-25kN
床		構造用合板	構造用合板	構造用合板	構造用合板
床面積		1 階 96.27m <sup>2</sup>		2 階 72.87m <sup>2</sup>	

建物図面

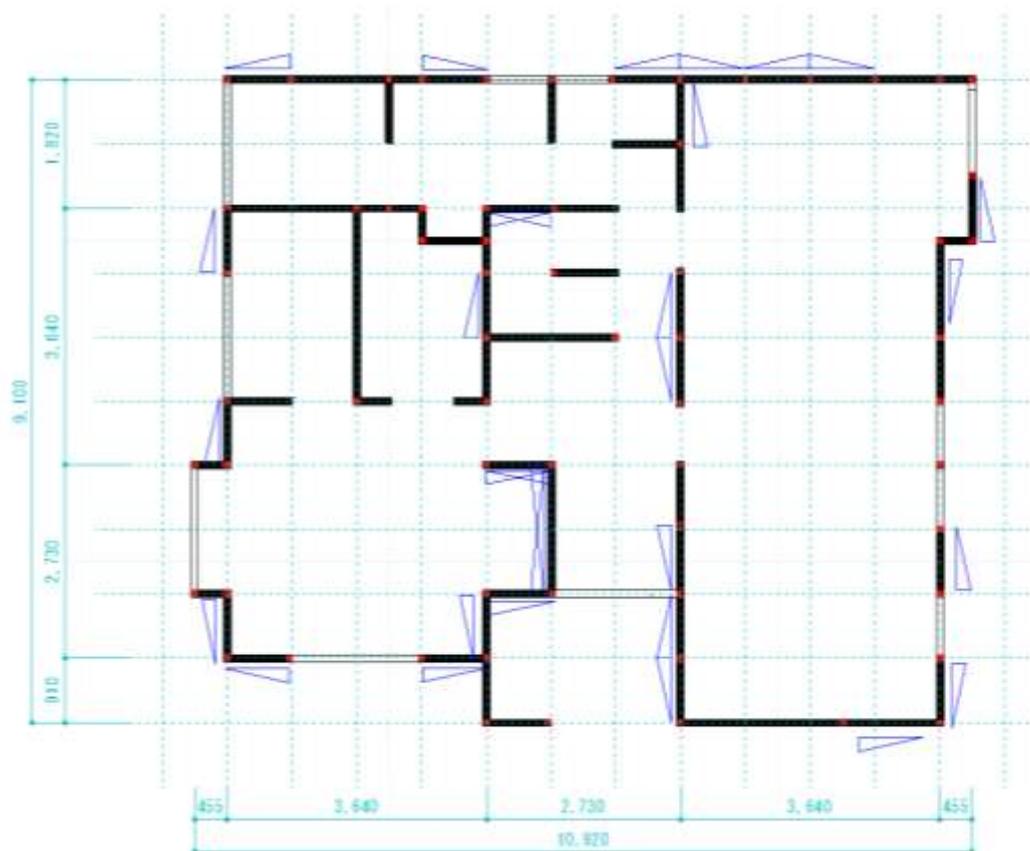


図 2.4 建物モデル 1 階平面図

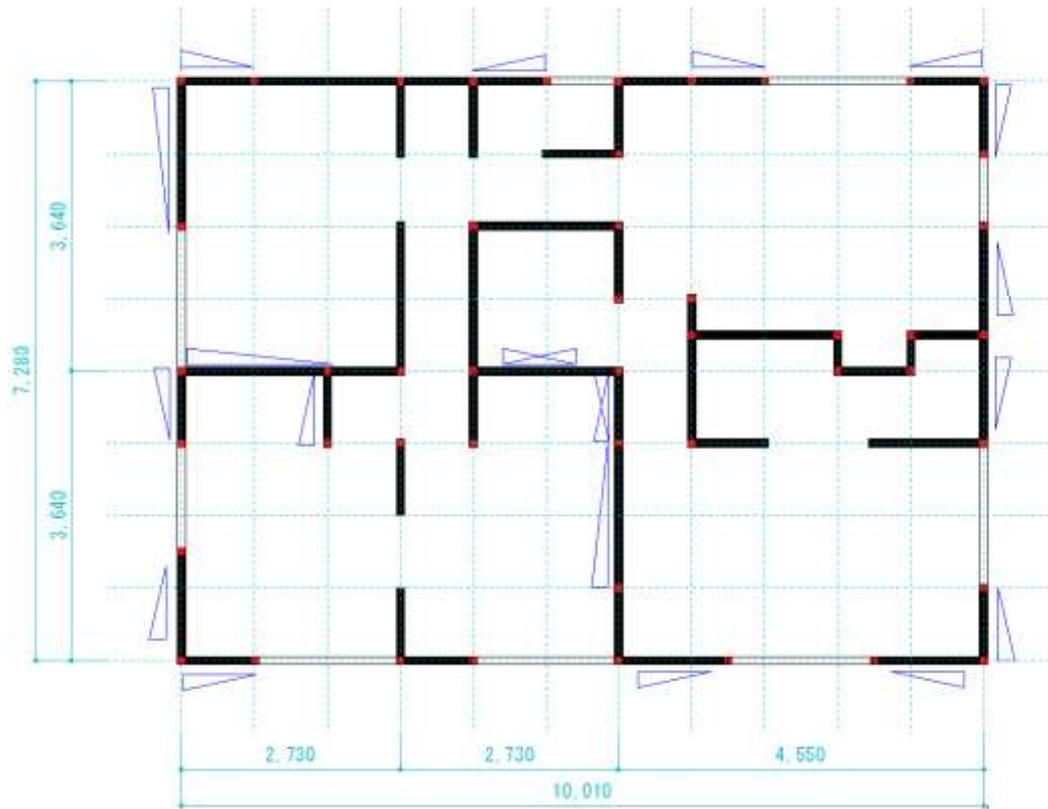


図 2.5 建物モデル 2 階平面図

### 2.2.2 復元力特性

接合部の引張バネと回転バネ、構面バネの骨格曲線は建物モデルに対しプッシュオーバー解析行うことで得られた. 図 2.6 に接合部引張バネと回転バネ、図 2.7 に構面バネの骨格曲線を示す.

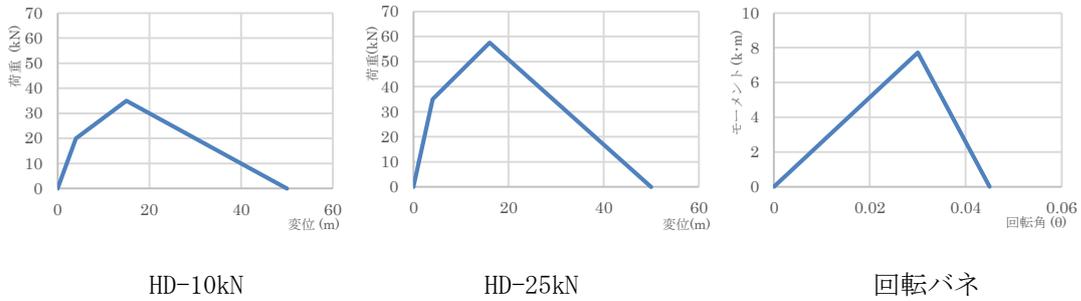


図 2.6 接合部骨格曲線

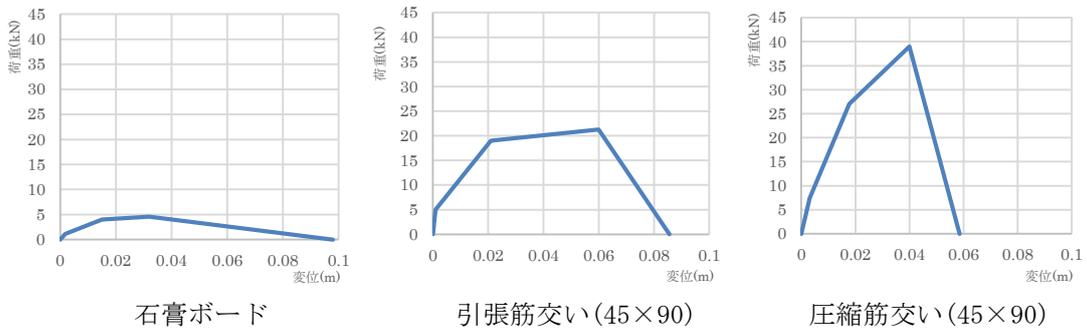


図 2.7 構面骨格曲線

### 2.2.3 入力地震波

入力地震波は熊本地震の際に熊本県益城町で観測された波形を用いた。図 2.8 に熊本地震の波形を示す、また図 2.9 に熊本地震のエネルギースペクトルを示す。

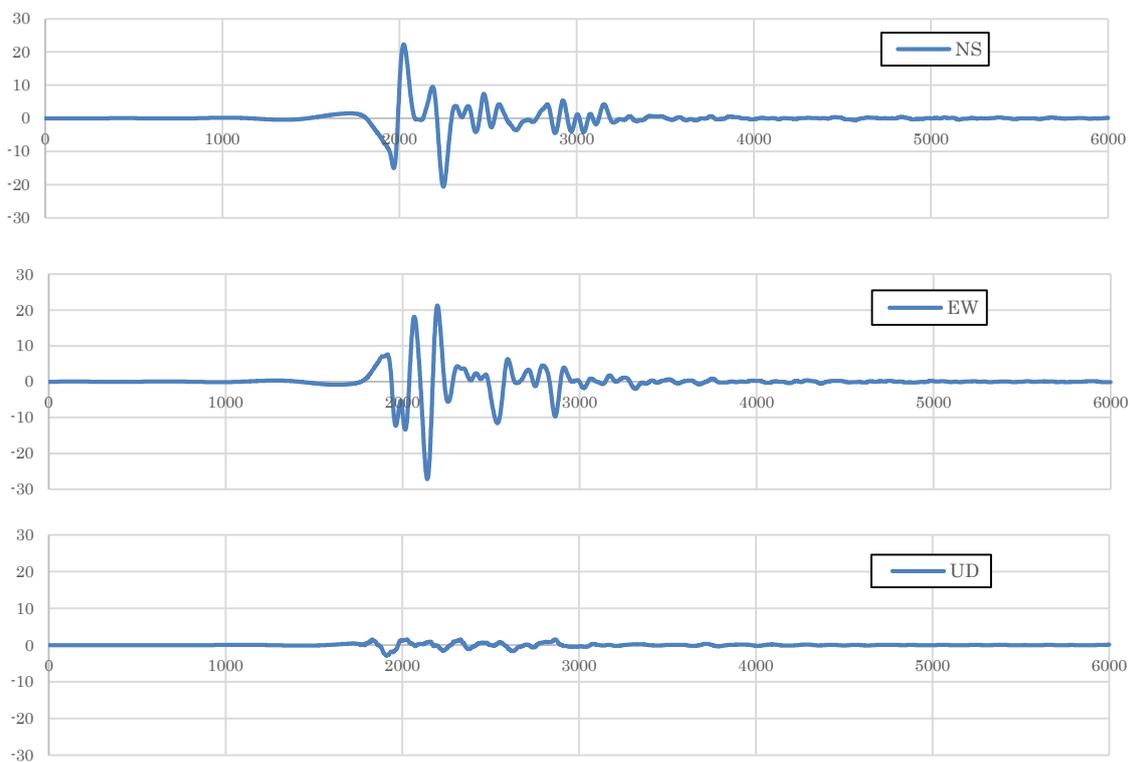


図 2.8 熊本地震波 (4月14日)

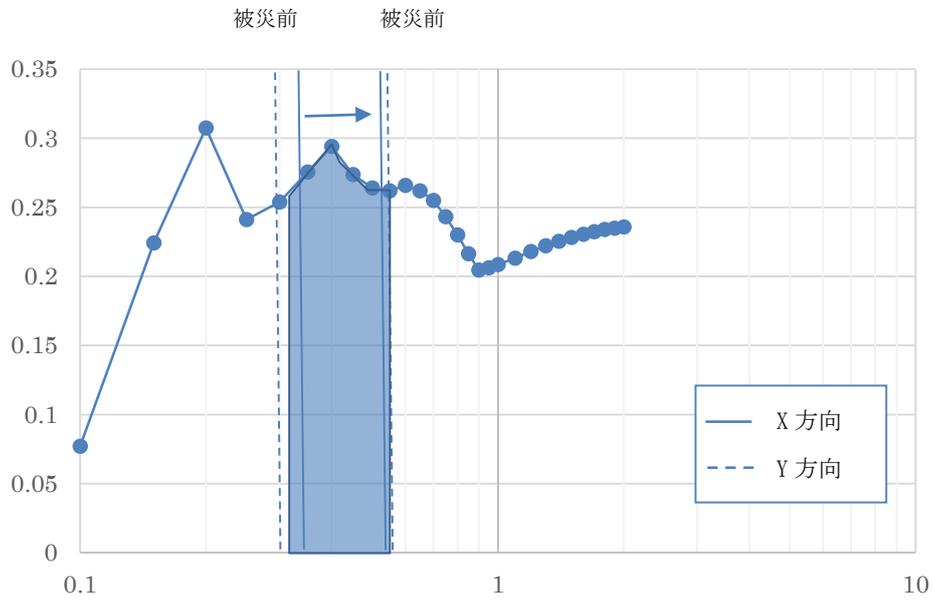
## 2.3 解析結果

表 2.2 に建物の被災前の剛性と固有周期、解析により得られた被災後の建物剛性と固有周期を示す。図 2.9 の建物周期とエネルギースペクトルの関係から、標準モデルに比べ柱・梁変更モデルの方が、エネルギースペクトルと周期で囲まれた面積が小さいことが分かる。つまり入力されたエネルギーは標準モデルの方が大きい。この結果から建物の柱または梁の断面を大きくすることで地震動による耐震性能の低下を抑えることができるとは一概には言えないことがわかる。

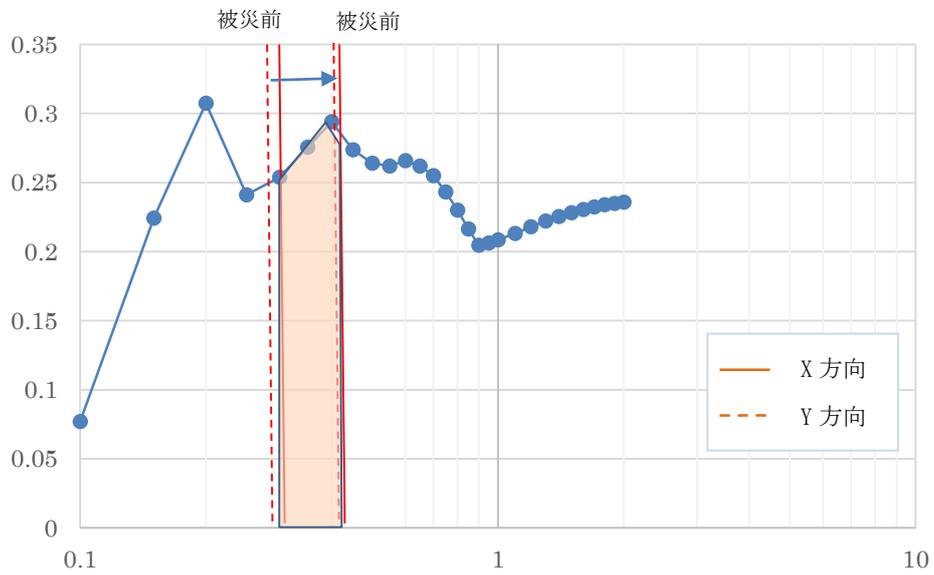
表 2.2 建物の剛性、建物固有周期

標準モデル		被災前		被災後	
		初期剛性	周期	剛性	周期
X	1F	13862	0.343	5731	0.474
	2F	4814		3093	
Y	1F	12413	0.301	4448	0.483
	2F	9530		4497	

柱・梁変更モデル		被災前		被災後	
		剛性	周期	剛性	周期
X 方向	1F	15247	0.309	7280	0.414
	2F	6769		4546	
Y 方向	1F	14647	0.278	6380	0.408
	2F	12225		6667	



(a) 標準モデルの建物周期とエネルギースペクトル



(b) 柱・梁変更モデルの建物周期とエネルギースペクトル

図 2.9 熊本地震のエネルギースペクトルと建物固有周期の関係

## 第 3 章

## 第3章：柱と梁の断面の違いが耐震性に及ぼす影響についての検討

### 3.1 建物モデルの接合部・耐震壁における履歴吸収エネルギーの比較

建物の柱または梁の断面寸法の違いが及ぼす建物の耐震性への影響について検討を行うため、建物のモデル化に伴い置換を行ったすべてのバネにおいて荷重と変形もしくはモーメントと回転角を出力し、バネで吸収した塑性エネルギーの算出を行った。

ここでは、建物モデルに入力されるエネルギー量をできるだけ比較しやすくするため、周期が0.1～1秒においてエネルギースペクトルが単調に増加する日本建築センターBCJ-L1加速度波形を用いた。波の入力はX方向、Y方向をそれぞれ独立に入力した。図3.1に建築センターBCJ-L1加速度波形を示す。図3.2に建築センターBCJ-L1加速度波形とエネルギースペクトルを示す。

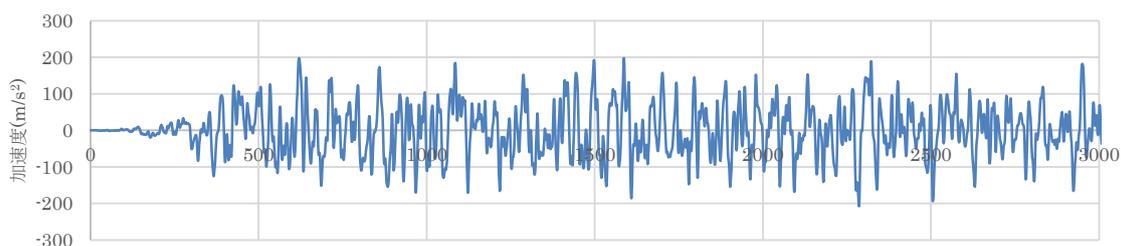


図 3.1 建築センターBCJ-L1 加速度波形

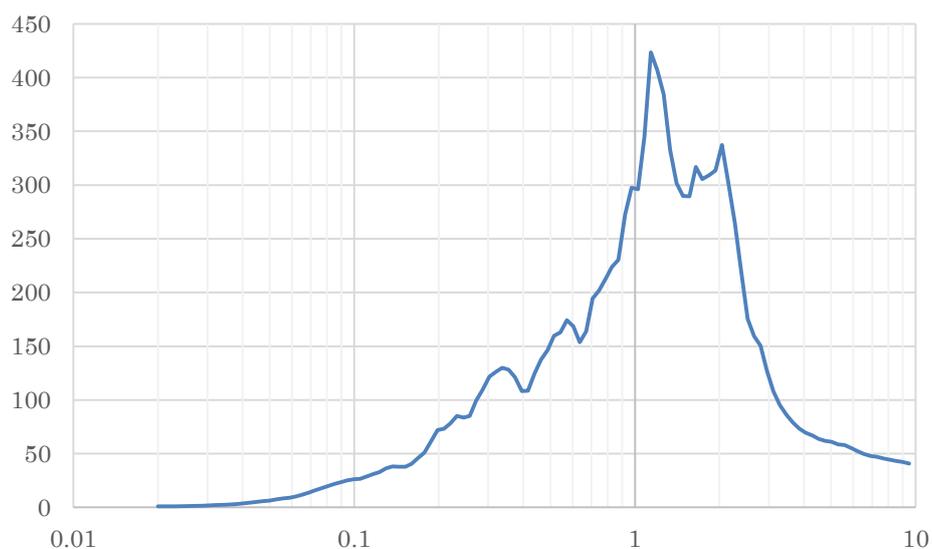


図 3.2 エネルギースペクトル

建物モデルは標準モデルに対して、柱の断面を大きくしたモデルと梁の断面を大きくしたモデル、柱と梁をともに大きくしたモデル計4つのモデルの解析を行った。表3.1に建築センターはを入力した際のバネ毎における塑性エネルギーの総和を示す。

表 3.1 バネ毎の塑性エネルギー

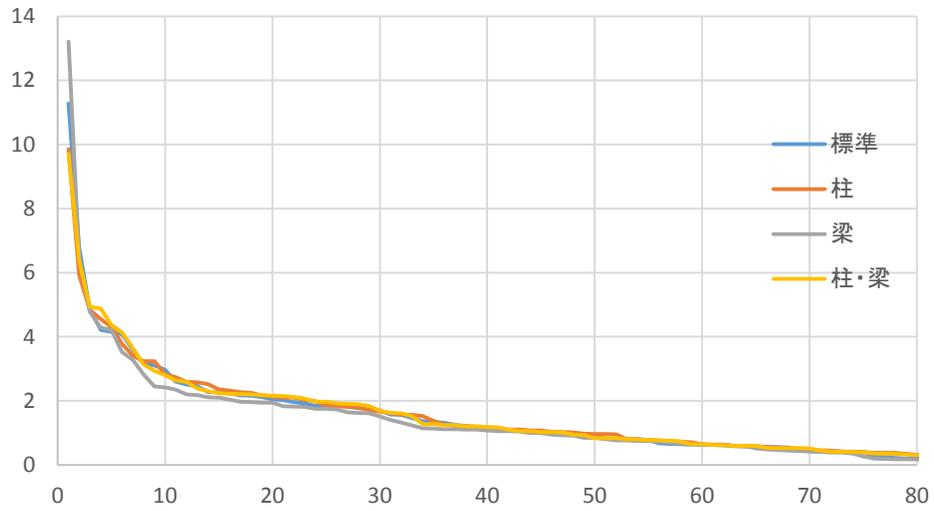
バネ	標準	柱	梁	柱・梁
弾塑性バネ	0.58	0.82	0.12	0.15
回転バネ Y方向	0.18	0.21	0.21	0.33
回転バネ Z方向	1.12	2.35	1.74	4.18
構面バネ	132.99	136.13	124.68	135.38
筋交いバネ	141.45	143.57	158.59	157.05

X方向に地震波入力時の塑性エネルギー

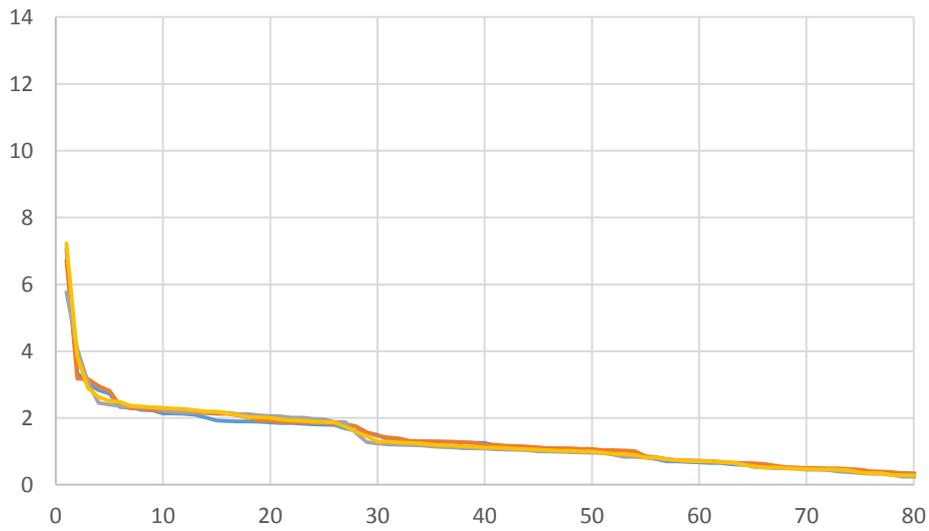
バネ	標準	柱	梁	柱・梁
弾塑性バネ	0.25	0.27	0.14	0.16
回転バネ Y方向	0.74	1.63	1.28	3.36
回転バネ Z方向	0.04	0.04	0.02	0.04
構面バネ	114.54	116.27	111.92	115.73
筋交いバネ	167.83	175.51	180.13	183.72

Y方向に地震波入力時の塑性エネルギー

表3.1から木造建物では主に壁でエネルギー吸収が行われており、特に耐震壁である筋交いによる吸収が大きいことがわかる。図3.3は各構面バネでの吸収量を縦軸にとり吸収量の大きいものから順に並べたものであり、図3.4は各筋交いバネにおける吸収量を縦軸にとり吸収量の大きいものから順に並べた図である。これらの図から非耐震壁である構面バネはエネルギー吸収量に大きな差がないことがわかる。よって柱または梁の断面寸法の違いが筋交いの履歴吸収エネルギーに与える影響について検討を行う。

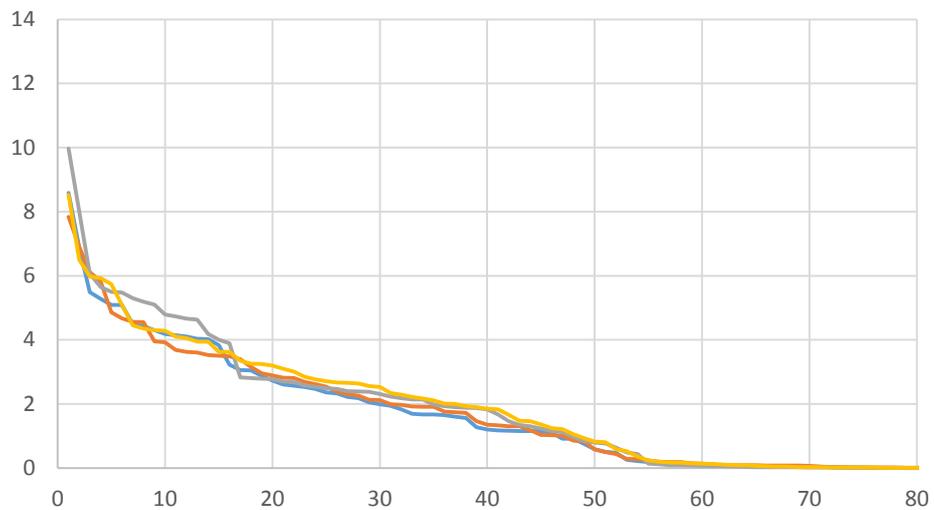


(a). X方向に加振した際に各構面バネで吸収したエネルギー量

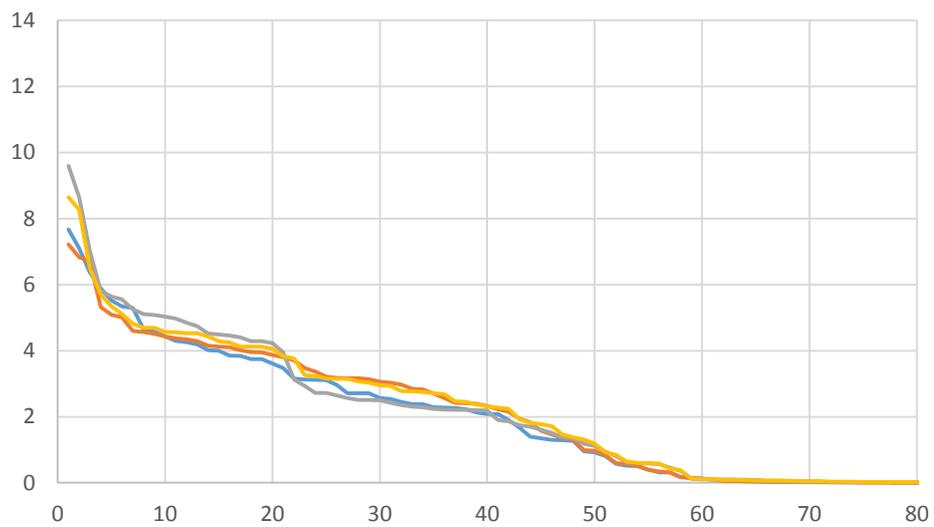


(b) Y方向に加振した際に各構面バネで吸収したエネルギー量

図 3.3 壁におけるエネルギー吸収量の比較



(a) X方向に加振した際に各筋交いバネで吸収したエネルギー量



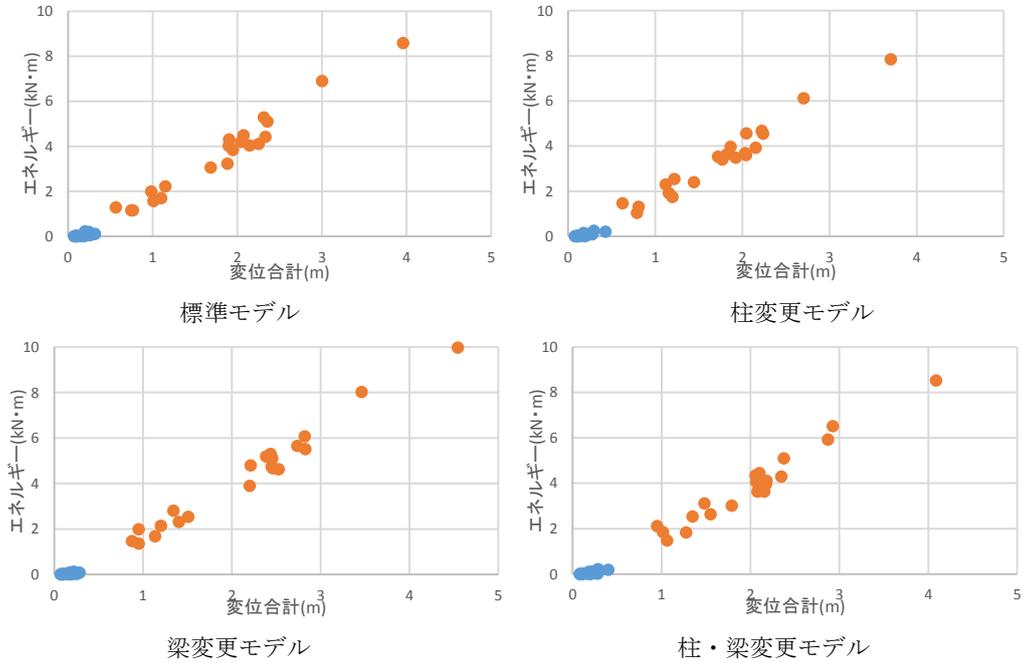
(b) Y方向に加振した際に各筋交いバネで吸収したエネルギー量

図 3.4 筋交いにおけるエネルギー吸収量の比較

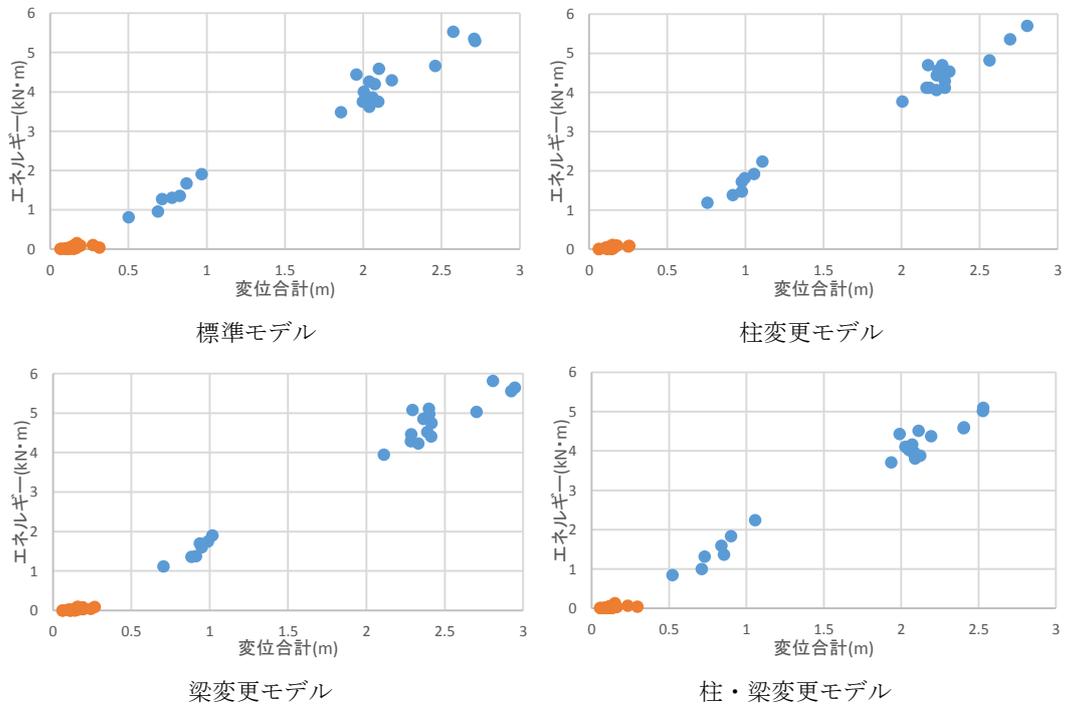
### 3.2 筋交いにおける最大変形とエネルギー吸収の関係

それぞれの建物モデルの引張り筋交いで吸収したエネルギーとその際の変位の合計を図

3.6 に示す、圧縮筋交いで吸収エネルギーと変位合計の関係を図 3.7 に示す。

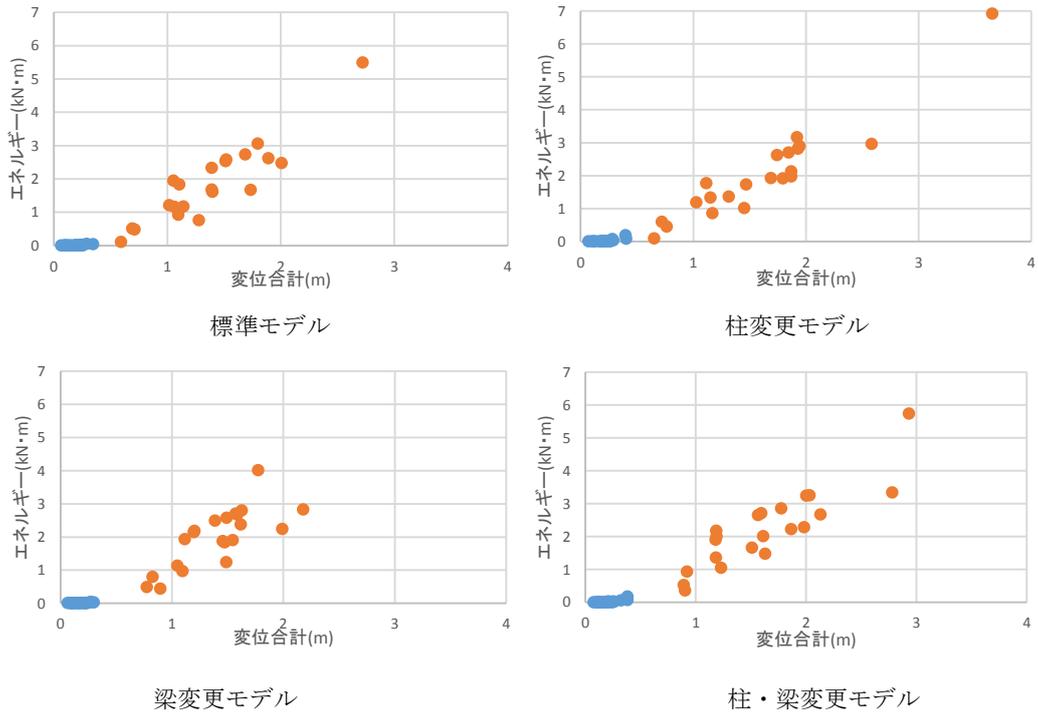


X 方向加振時における筋交いでのエネルギー吸収量と変位合計の関係

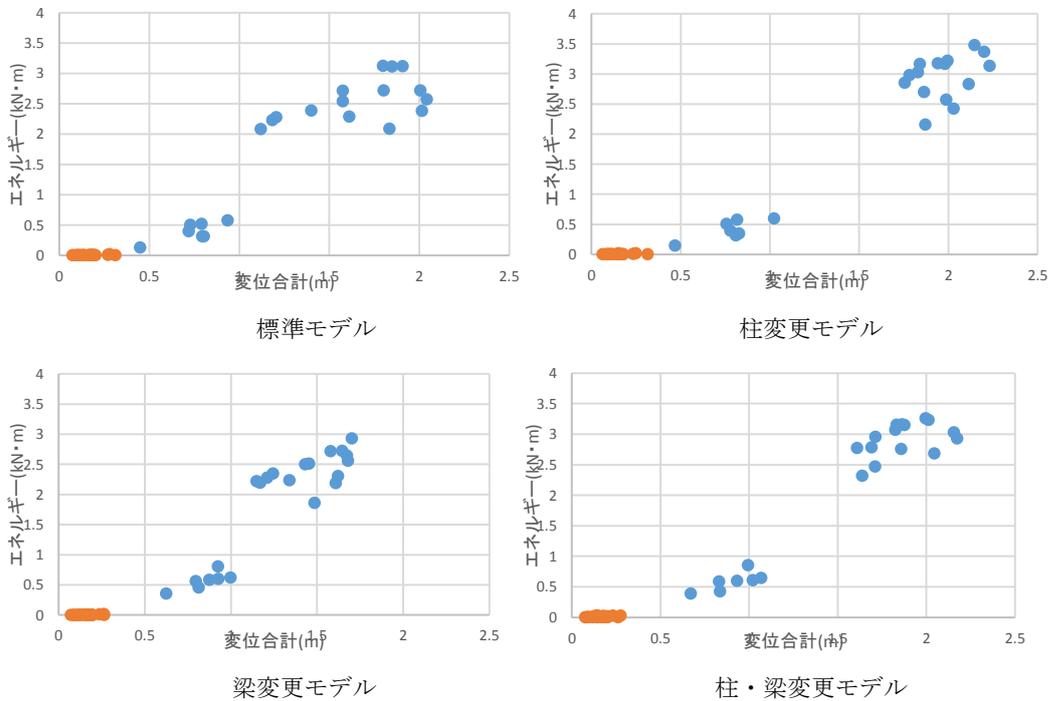


Y 方向加振時における筋交いでのエネルギー吸収量と変位合計の関係

図 3.5 引張筋交いにおける変位合計と吸収エネルギーの関係



X 方向加振時における筋交いでのエネルギー吸収量と変位合計の関係



Y 方向加振時における筋交いでのエネルギー吸収量と変位合計の関係

図 3.6 圧縮筋交いにおける最小変位と吸収エネルギーの関係

### 3.3 結果

引張り筋交いにおいて柱の断面を大きくした際、大きな変化が見られないが梁の断面を大きくした場合、変位合計が増えかつエネルギー吸収量も増加している。柱と梁断面を大きくしたモデルも同様に変位合計が増加しかつエネルギー吸収量も増加している。また、圧縮筋交いにおいて、柱の断面を大きくしたモデルではエネルギー吸収量が増加しており、梁断面を大きくしたモデルに大きな変化は見られなかった。

## 第 4 章

### 結論

#### 第4章：結論

本研究で得られた主な結論は以下である。

- 熊本地震において柱・梁を大きくすることで耐震性能の低下を抑えることができたのは剛性の違いにより建物に入力されるエネルギーが減ったためであることがわかった。
- 柱の断面を大きくしたモデルは、標準モデルに対し圧縮筋交いでのエネルギー吸収が大きくなることが分かった。
- 梁の断面を大きくしたモデルは、標準モデルに対し引張り筋交いでのエネルギー吸収が大きくなることが分かった。
- 柱と梁の断面を大きくしたモデルは、圧縮筋交いと引張り筋交い共にエネルギー吸収量が大きくなることが分かった。

## 謝辞

本研究を執筆するにあたり、指導教官の甲斐芳郎教授、副指導を引き受けてくださった池田雄一准教授、島弘教授にご指導いただきました。

また本研究を行うにあたり、独立行政法人建築研究所・中川貴文様開発の木造住宅倒壊解析ソフトウェア wallstat を使用させていただきましたことを感謝いたします。

その他にも様々な方々からのご指導ご協力のもと研究を進めることが出来ました。

このばをお借りして、厚く御礼申し上げます。

参考・引用文献

- (1) 小倉 宙 (2017)  
「一般診断法による上部構造評点  $I_w$  値を用いた木造住宅における被災時の残存耐震性能の評価」
- (2) 中川貴文 (2010) 「大地震動時における木造軸組構法住宅の倒壊解析手法の開発」
- (3) 脇田直弥、松蔭知明、樋口公平、中村秀司 「エネルギー法による建物の構造設計」
- (4) 日本建築学会 中国支部 構造委員会 「エネルギー法を学ぶエネルギー法に基づく耐震性能評価法の適用」
- (5) 滝本和志、川島一彦 「基部で曲げ破壊する RC 橋脚のエネルギー吸収容量の定式化」 土木学会論文集 No. 532/V-30, 5-13, 1996. 2
- (6) 「木造住宅の耐震診断と補強方法」
- (7) 秋山 宏 「建築物の耐震極限設計」
- (8) 北山春幸、財津和廉、馬谷原伴恵 「主架構の塑性化を考慮した精神構造のエネルギーの釣合に基づく応答評価法
- (9) 井戸田秀樹ら 「在来軸組木造住宅における一般診断の評点と損傷度の関係」