

阪神・淡路大震災によって損傷を受けた鉄骨建築物に 対する南海トラフ巨大地震動による振動実験

1. 研究背景・目的

1995年の阪神・淡路大震災では、阪神・淡路地域に立地する建築物に甚大な被害が発生しました。1981年に導入された新耐震基準に従い適切に設計・施工された建築物に関しては、この震災においても建築物が倒壊や大破に至った事例はほとんどなく、人命保護の観点において必要とされる耐震性能を発揮したと言えます。

しかし、これらの建築物に関しても、倒壊や大破といった深刻な被害は免れたものの、建築物の構造体に損傷が生じた事例が確認されています。特に、鉄骨建築物の構造上のかなめと言える柱と梁の接合部が破断するという看過できない被害事例が、国内で初めて確認されました。この被害が確認された建築物では、総じて地震後の建築物の傾き（残留層間変形角）が少なく、また外装材の損傷が比較的軽微であるという特徴も確認されています。すなわち、建築物の外観の被害程度だけからでは接合部の破断被害の有無を判定することは、困難な場合があるということです。

大地震を経験した建築物を恒久的に使用するにあたっては、地震後に構造体の状態を適切に把握し、残存する耐震性能が不十分と判断される場合には補修等を行う必要があるため、建築物の構造健全度を推定する新たな技術を開発する必要性があると言えます。

一方、2011年の東日本大震災の被害状況を踏まえて中央防災会議では、南海トラフを震源とする巨大地震モデルの検討を実施し、2012年3月にマグニチュード9.0の想定地震に基づく全国各地の震度分布を公表しています。新たな想定地震動に基づく神戸市内の震度は概ね震度6弱となっており、阪神・淡路大震災を経験した建築物が再び強い地震の揺れに遭遇する可能性を考慮に入れて、減災対策を再検討する必要性が生じています。

この様な背景のもと、本研究では、大地震を経験した鉄骨建築物の構造健全度をセンサーを用いて推定するための技術を開発し、阪神・淡路大震災を経験しながら十分な調査が実施されていない鉄骨建築物の構造健全度推定に役立てることを目指すほか、阪神・淡路大震災により柱と梁の接合部に損傷を受けたままの建築物が、南海トラフの巨大地震に遭遇する際の被害程度を把握することを目的としています。

既に阪神・淡路大震災後の知見を踏まえて柱と梁の接合部の施工詳細等の見直しが行われており、その後に設計・施工された鉄骨建築物については、耐震性能の問題は改善されたと言えます。しかし、これらの知見が反映される以前の既存鉄骨建築物については、新耐震基準による建築物であっても、今後大地震に遭遇した場合には、阪神・淡路大震災と同様の被害が発生する可能性が依然として残されています。本研究の成果は、阪神・淡路大震災を経験した鉄骨建築物にだけでなく、将来に発生が懸念される大地震における鉄骨建築物の震後対策に役立てられることが期待されます。

2. 試験体概要

新耐震基準に基づき設計された実大3階建ての鉄骨建築物の一部を取出した図1に示す試験体を製作しました。試験体の接合部については、当時の標準的な仕様を再現したものとなっています。試験体は、構造体の被害状況の再現を主眼とした他、構造体の挙動を精緻に把握することを目的に、仕上げ材や間仕切壁等を有さない鉄骨の柱梁とコンクリート床により構成された構造体となっています。

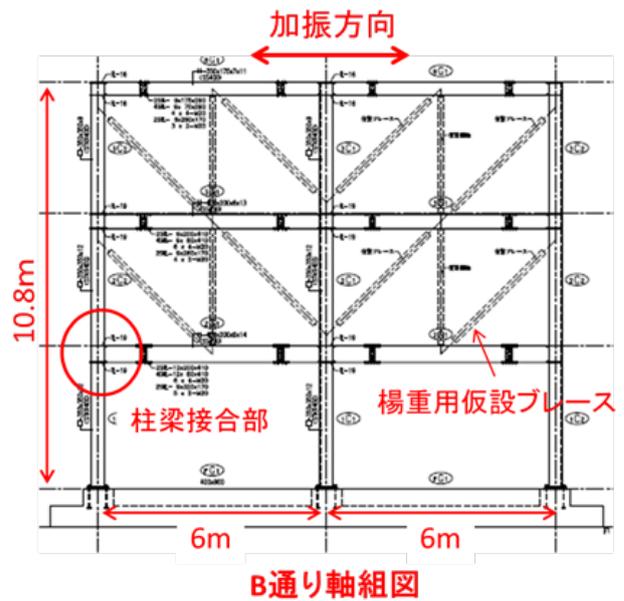
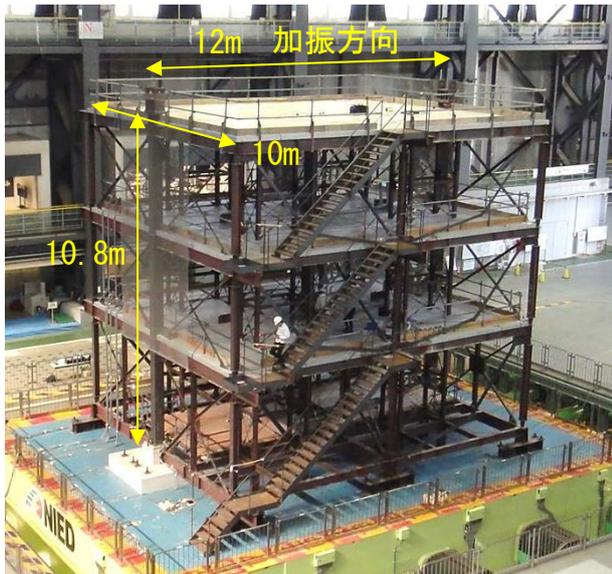


図1. 試験体

3. 実験で用いる地震動

本研究では、加振実験を10月8日、10月10日及び本公開実験となる10月15日の3日間で実施いたします。加振実験初日と3日目には、2012年の中央防災会議で作成された図2に示す南海トラフ巨大地震の想定地震動を用いて、加振実験を実施します。加振実験2日目には阪神・淡路大震災の観測波として、図3に示すJR鷹取駅で観測された地震動を用いて加振実験を実施します。いずれの加振も南北方向の加速度波形を用いた水平一方向加振としています。

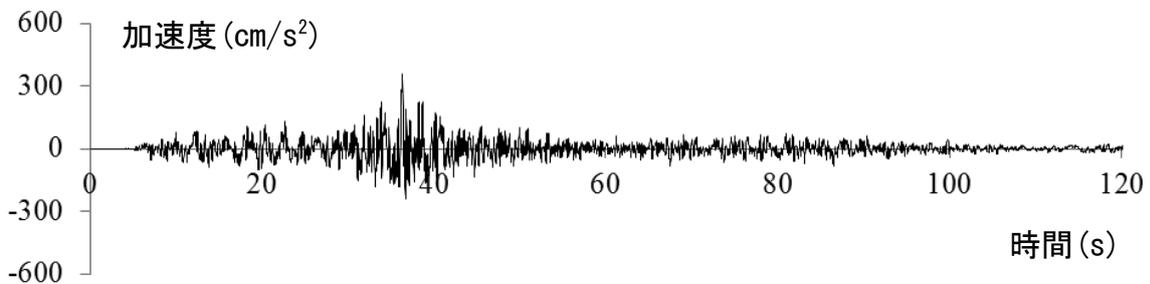


図2. 本実験で用いる南海トラフ巨大地震の想定地震動

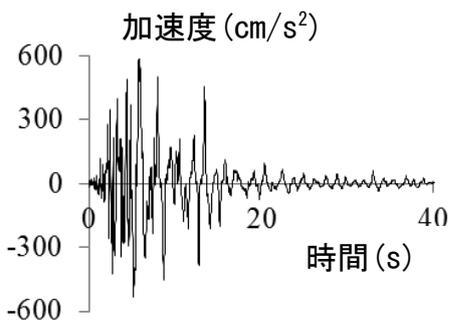


図3. 本実験で用いる JR 鷹取駅で観測された地震動

本実験で用いる想定南海トラフ巨大地震動は、紀伊半島沖を震源とし、断層領域を最も陸側まで広げたケースにおける神戸市役所所在地に最も近い位置の地震動です。中央防災会議が公開した地震波形は、工学的基盤と呼ばれる地中の硬い地盤における加速度波形であるため、実際に用いる加振波については、神戸市役所所在地のボーリングデータを基に、地表面の地震動をシミュレーションにより再現したものを用いています。再現された地表面の最大加速度は、 358cm/s^2 となっています。

加振実験初日では、鉄骨建築物が健全な状態で、南海トラフ巨大地震の想定地震動が作用した状態での挙動を把握することを目的としています。

加振実験2日目では、阪神・淡路大震災における鉄骨建築物の損傷状況を再現することを目的としており、加振実験3日目では、阪神・淡路大震災で損傷を受けた状態の鉄骨建築物に、想定南海トラフ巨大地震動が作用した状態での挙動を把握することを目的としています。

4. 構造健全度推定技術

本研究では、建築物の構造健全度推定技術として、2種類の技術開発を目指します。

1) 常時建築構造性能モニタリングシステム

建築物に各種センサーとセンサーノードにより構成される無線センサーネットワークを構築し、日常的に建築物の構造性能をモニタリングすると共に情報発信を行うシステム構築を目指します。搭載するセンサーの種類により様々な応用が可能ですが、本実験では、ジャイロセンサーを用いて鉄骨部材の破断を検出することや、加速度センサーを用いて建築物各層の変位を算出することを試み、本システムの有効性を検証します。

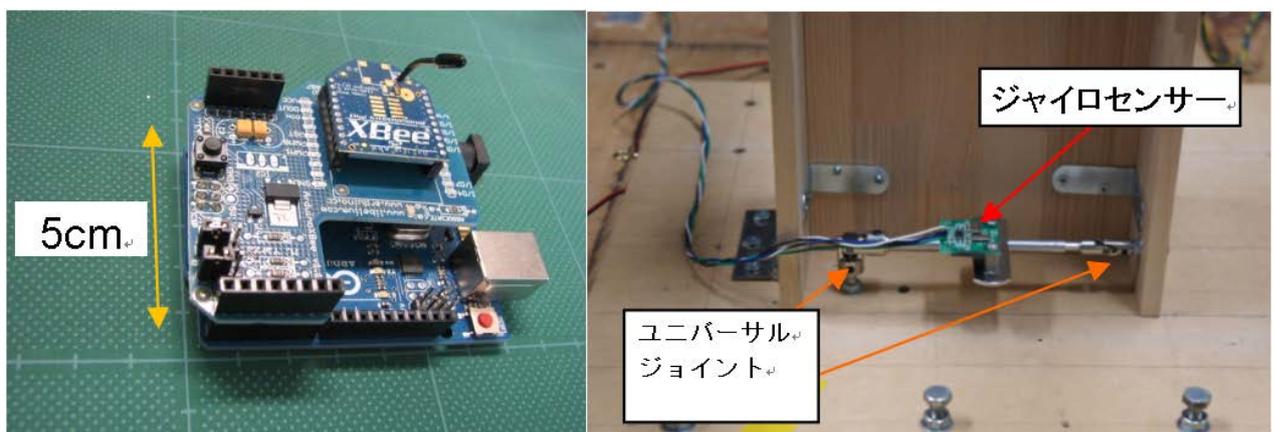


図4. センサーノードとジャイロセンサー設置状況

2) 随時型構造健全度推定法

建築物の構造部材に損傷を受けると振動特性に変化が生じる可能性があります。

「随時型構造健全度推定法」と命名した手法では、建築物に小型起振器を持ち込み、起振器により発生する小振動や地面から伝達してくる微小な環境振動が建築物の各部に伝搬される様子を振動センサーにより計測するものです。今回の開発研究では、大地震の発生前に事前計測を行っておき、大震災後に同様の事後計測を行うことで、建築物の損傷の発生や損傷を生じていると考えられる箇所の推定が可能かを検証します。

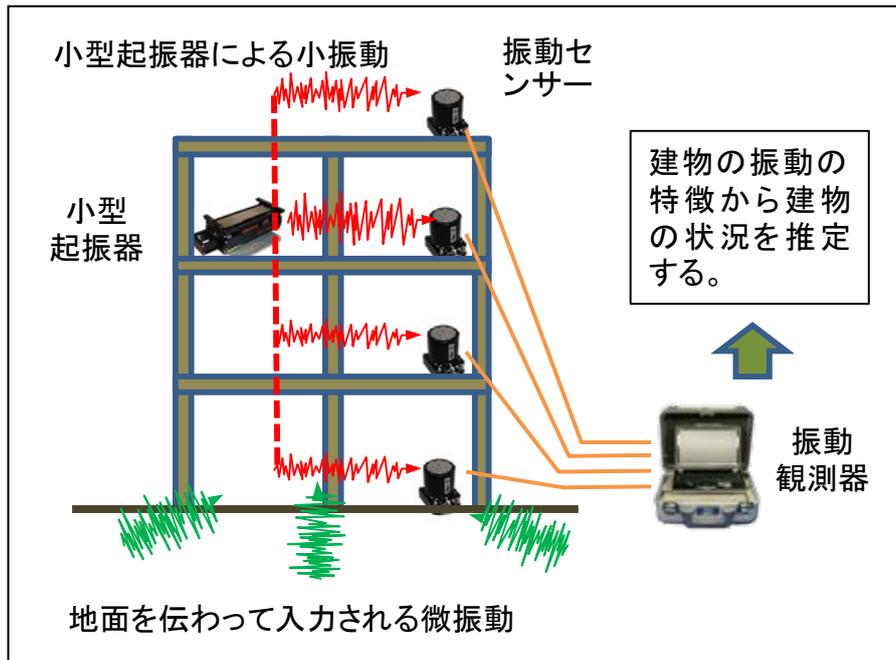


図5. 随時型構造健全度推定法の模式図

5. 実験研究分担者

【防災科学技術研究所】

梶原 浩一	防災科学技術研究所	兵庫耐震工学研究センター長
谷 和夫	防災科学技術研究所	契約研究員
山下 拓三	防災科学技術研究所	任期付研究員

【兵庫県】

高見 隆	兵庫県企画県民部防災企画局防災計画課	課長
------	--------------------	----

(兵庫県と神戸大学の共同型協力研究契約)

多賀 謙蔵	神戸大学大学院工学研究科	教授
谷 明勲	神戸大学大学院工学研究科	教授
藤谷 秀雄	神戸大学大学院工学研究科	教授
難波 尚	神戸大学大学院工学研究科	准教授
向井 洋一	神戸大学大学院工学研究科	准教授
山邊 友一郎	神戸大学大学院工学研究科	准教授
浅田 勇人	神戸大学大学院工学研究科	助教

阪神・淡路大震災によって損傷を受けた鉄骨建築物に 対する南海トラフ巨大地震動による振動実験 別添資料

1. 阪神・淡路大震災における鉄骨建築物の被害状況

出典：建築学会近畿支部鉄骨構造部会：1995年兵庫県南部地震鉄骨造建物被害調査報告書，1995.5
http://news-sv.aij.or.jp/kinki/activity/research/s_struct/tekkotu-j.pdf

1) 調査期間・調査方法

調査期間：1995年2月中旬～3月中旬

調査方法：

- ・調査範囲：図1に示す影を付けた領域で，長田区から芦屋市にかけて重点的実施。



図1 日本建築学会近畿支部調査範囲（報告書 p.3, 図 2.1）

- ・調査方法：外観被害状況写真の撮影。可能な場合は建物内部への立ち入り調査およびヒアリング。
- ・調査対象：鉄骨造建物で，なんらかの被害が認められたもの（無被害のものは母数に含まれない）
- ・被害レベルの分類：被害レベルの分類は以下による。
 - 小破：外装材などの亀裂・剥離，軽微なブレースの座屈が認められるが，柱・梁の主要構造部材に損傷が認められないもの。残留変形が殆ど認められないもの。
 - 中破：ブレース破断・座屈，柱梁の塑性化が認められるが，建物の残留傾斜角が $1/100\text{rad}$ 程度以下。修復後再使用可能なもの。
 - 大破：柱・梁・接合部などの多くの部位で破断を伴って修復が技術的に困難なもの。残留傾斜角が $1/100\text{rad}$ 以上と大きいもの。
 - 倒壊：全層，一部の層が完全に倒壊したもの。

2) 被害概要

調査された建物の合計は988件。表1および図2に階数別の被害状況を報告書より引用する。全調査建物の内，本研究で用いる試験体と同じ3階建物の建物が最も多く全調査建物の4割を占めている。各被害レベルの発生比率は概ね等しく，倒壊：大破：中破：小破の比は概ね $1:3:3:3$ であり，大破・中破・小破が同程度発生している結果となっている。表2に構造形式別・柱断面別の損傷部位別件数（建物数）を報告書より引用する。全構造形式で柱梁仕口(接合部)に損傷が確認された建物は167件で，小破以上の被害が確認された調査対象建物(988件)の17%となっている。本実験試験体と同じ構造

形式である冷間成形角形鋼管柱が用いられた純ラーメン構造(R-R)のみに着目すると、67件で柱梁仕口(接合部)に損傷が確認されている。なお、67件中29件の被害は不適切な溶接施工が原因である。

表1 階数別の各被害レベルの件数(報告書 p.13, 表 4.3)

階数	建物被害レベル				合計
	倒壊	大破	中破	小破	
1	1	11	9	4	25
2	7	46	21	28	102
3	36	141	96	120	393
4	30	72	53	56	211
5	10	23	25	22	80
6	1	7	9	21	38
7	0	7	11	7	25
8	0	7	9	15	31
9	0	0	3	4	7
≥10	0	9	26	20	55
不明	5	9	4	3	21
合計	90	332	266	300	988

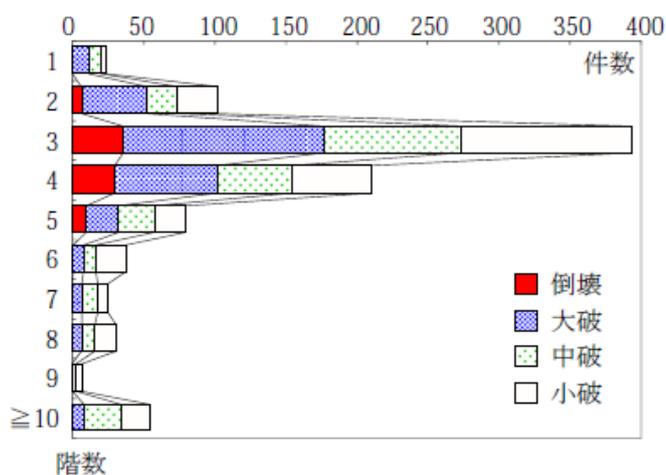


図2 階数別の各被害レベルの件数 (報告書 p.13, 図 4.1)

表2 構造形式別・柱断面別の損傷部位別件数(建物数)(報告書 p.19, 表 4.9)

構造形式		躯体損傷部位					
		柱断面	柱	梁	柱梁仕口	筋違	柱脚
R-R			153	48	112	—	112
柱断面別 内訳	□ (冷間)	46 (43)	31 (30)	71 (67)	—	46 (45)	
	H	77	16	30	—	43	
	日の字	23	2	7	—	14	
R-B			54	12	17	81	39
柱断面別 内訳	□ (冷間)	3 (2)	2 (1)	3 (2)	6 (4)	4 (3)	
	H	43	8	13	66	34	
	日の字	5	1	1	2	0	
B-B			11	4	6	22	8
柱断面別 内訳	□ (冷間)	3 (3)	4 (3)	3 (3)	5 (4)	1 (1)	
	H	5	0	3	12	6	
	日の字	1	0	0	1	0	
不明			88	17	32	9	59
合計			306	81	167	112	218

R-R：純ラーメン構造，R-B：一方筋筋違付き構造，B-B：両方向筋違付き構造
 □：箱形断面柱，H：H形断面柱，日の字：日の字形断面柱

3) 柱梁仕口(接合部)の損傷事例 (報告書 p. 36)

写真1に本研究で対象とする柱梁接合部の損傷を報告書の被害事例より引用して示す。



写真 CB1.6.1 下フランジの局部座屈と破断



写真 CB1.6.2 下フランジの全面降伏後脆性破面



写真 CB1.6.3 下フランジの破断とウェブの亀裂

写真1 柱梁接合部の被害事例

2. 実験結果速報

2. 1 10月8日 南海トラフ巨大地震想定波 (100%)

2.1.1 損傷状況

梁に軽微な塑性化の痕跡が確認されたが、柱梁接合部に亀裂や座屈といった損傷は確認されなかった (写真2.1) . 1階柱脚のアンカーボルトが塑性化し、2~3mmの残留伸び変形が確認された (写真2.2) .

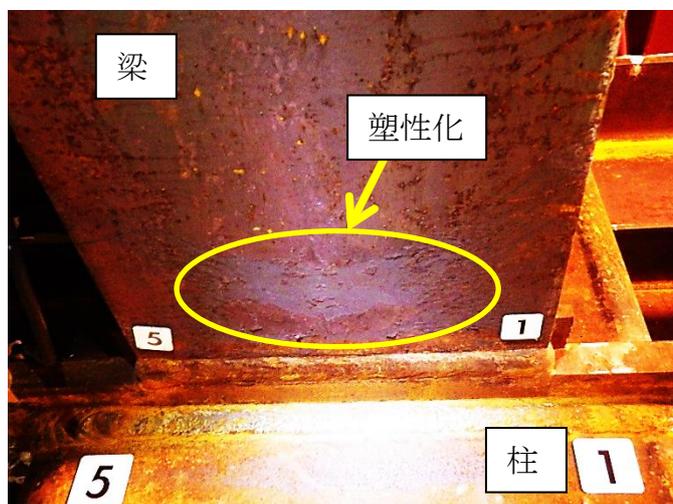


写真2.1 梁フランジの軽微な塑性化

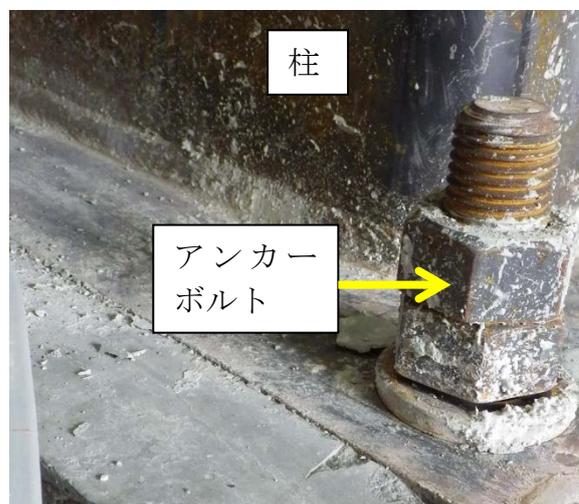


写真2.2 柱脚アンカーボルトの残留伸び

2.1.2 各階の層間変形角応答最大値

表2.1に各階の層間変形角の最大値および残留変形角の一覧を示す。

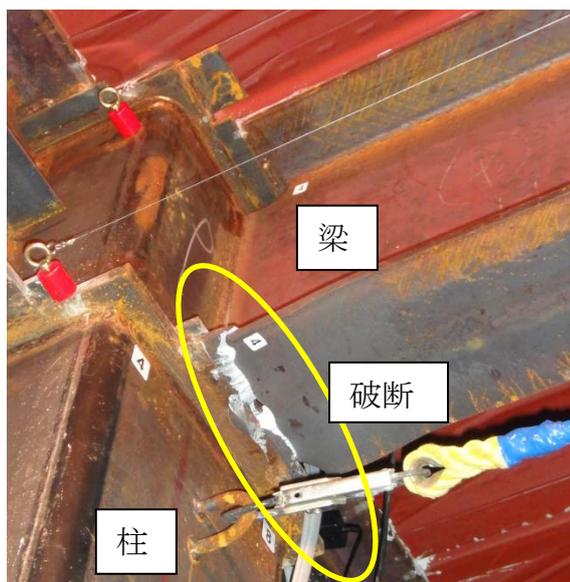
表2.1 各階の層間変形角応答

階数	1階	2階	3階
最大層間変形角 (rad)	1/83	1/89	1/110
残留変形角 (rad)	1/1901	1/1366	1/2212

2.2 10月10日 阪神淡路大震災観測波（JR鷹取NS方向100%）

2.2.1 損傷状況

3ヶ所の柱梁接合部において、梁の破断（1階天上で2カ所、2階天井で1カ所）が確認された他、2階天井の梁で破断には至っていないが、長さ100mmの大きな亀裂が確認された。梁の破断状況は、実際に阪神・淡路大震災で見られた破断と同様のものであった。また1階柱脚のアンカーボルトの残留伸びは25mm程度に達していた。



2.2.2 各階の層間変形角応答最大値

表2.2に各階の層間変形角の最大値および残留変形角の一覧を示す。非常に大きな最大応答が生じたにも関わらず、阪神・淡路大震災で見られたように残留変形角は小さい値となっている。

表2.2 各階の層間変形角応答

階数	1階	2階	3階
最大層間変形角 (rad)	1/14	1/20	1/47
残留変形角 (rad)	1/2902	1/740	1/423