

実大振動台実験による残留変形角と最大層間変形角の関係に関する考察

正会員 ○小谷菜央*1 同 平井敬*2 同 永野康行*3

2.構造—2.振動—g.建物応答特性とその評価
地震動, 残留変形角, 最大層間変形角, 木造建物, 被害認定調査

1. 序

地震災害時、自治体による被害認定調査は住家の被害状況を調査し、災害による被害の程度を証明する罹災証明書を交付することに第一義的な目的がある。被害認定調査には、一次調査及び二次調査があり、専門外の職員により、目視によって調査が行われる。発災時は多くの住宅が被害にあうために調査員の効率的な配置及び迅速な対応が求められる。また、被害認定調査では、残留変形角を被害状況の推定に役立つ動きがある。内閣府・防災担当が定めるマニュアル¹⁾によると、被災住家の残留変形角をもとに最大層間変形角を導き出し、被害状況の認定をよりの確に導き出すことができるとされている。応急危険度判定マニュアル²⁾では、木造建築物の場合、一般に残留変形角は地震時の最大層間変形角の半分程度であるとしているが、わずかに数件の E-Defense 実験結果を用いた基準であるために、いまだ十分に立証されていないと言える。また、鋼構造における柱の損傷と残留傾斜角の関係について、既往研究では、伊藤ら³⁾は、局部座屈による柱部材の耐力劣化を考慮した骨組みに対し地震応答解析を行い、部材の損傷と残留傾斜角の関係を調査した。柱上端に着目した際に、ダメージと残留傾斜角が関連した関係にあるとしたが、建物全体への被害程度や残留変形角については言及されていない。そこで、残留変形角の推定により、最大層間変形であるダメージを推定する必要があると考える。

そこで、本研究では、木造建築物を対象に E-Defense^{4), 5), 6), 7)}の実大振動台実験の結果残留変形角と最大層間変形角との対応関係を検討した。

2. 研究方法

2.1 検討対象の試験体

検討対象とした試験体と加振内容を表 1 に示す。実験防災科学技術研究所の E-Defense 実験データを参照し、外壁損傷の見られた木造建築物の実験 5 件^{4), 5), 6), 7)}を対象とした。各試験体について複数回の加振が行われているが、表 1 にはそのうち最終の加振方向に関する情報を掲載している。表 2 にすべての加振履歴を示す。表 1、2 に示す JMA 神戸は、平成 7 年(1995 年)兵庫県南部地震にて JMA 神戸地点にて記録された地震動である。JR 鷹取も同様である。JMA 川口は、平成 16 年(2004 年)新潟県中越地震にて JMA 川口地点にて記録された地震動である。JMA 輪島は、平成 19 年(2007 年)能登半島地震にて JMA 輪島地点で記録された地震動である。また、KiK-net 益城は平成 28 年(2016 年)熊本地震の本震にて、KiK-net 益城地点にて記録された地震動である。BSL、BCJ_L2 は ASEBI にて作成された人工の地震動である。

2.2 最大層間変形角と残留変形角の算出

実験試験体の各構面に設置された変位計の記録から、残留変形角と最大層間変形角を求め、最大層間変形角 / 残留変形角の比を求めた。層間変形角 γ は、変位計の記録 D 、1 層の階高 H 、変位計取付部の水平方向の長さ B をもとに文献⁵⁾と同様に次式により算出した。

$$\gamma = \frac{\{(D+L) - H^{0.2}\}^{0.5} - B}{H} \tag{1}$$

ここで、 D 、 L 、 H 、 B は単位 mm での値を用いる。 L は下記のように定義される量である。

$$L = \sqrt{H^2 + B^2} \tag{2}$$

表1 試験体の諸元と最終加振内容

| 試験体名 | 工法 | 階数 | 入力地震動 | 加振方向 | 倍率 | H / mm | B / mm |
|------|------|----|------------------------|------|-----|--------|--------|
| A | 枠組工法 | 3 | JMA神戸 | X, Y | 1.0 | 2775 | 2730 |
| B | 軸組工法 | 3 | 人工地震波 (2種地盤) | Y | 1.6 | 2800 | 2730 |
| C | 軸組工法 | 2 | JMA神戸 | 3方向 | 1.0 | 3000 | 2959 |
| D | 軸組工法 | 2 | JMA神戸 | 3方向 | 1.6 | 3000 | 2959 |
| E | 軸組工法 | 2 | KiK-net 益城波 (本震2回目) | X, Y | 1.0 | 2959 | 2800 |

表2 各試験体の加振の履歴内容

| | | | | | | |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------|--------|
| 加振波 | JMA 神戸 | JMA 神戸 | JR 鷹取 | JR 鷹取 | JMA 神戸 | JR 鷹取 |
| レベル | 25% | 50% | 25% | 50% | 100% | 100% |
| 加振方向 | X,Y | X,Y | X,Y | X,Y | X,Y | X,Y |
| 試験体 | A | A | A | A | A | A |
| JMA 神戸 | JMA 神戸 | JMA 神戸 | JR 鷹取 | JMA 神戸 | ステップ波 | BSL |
| 25% | 25% | 100% | 100% | 100% | 100% | 160% |
| X,Y | X,Y | X,Y | X,Y | X,Y | Y | Y |
| A | A | A | A | A | B | B |
| ステップ波 | ホワイトノイズ | BCJ_L2 | BCJ_L2 | ステップ波 | BCJ_L2 | BCJ_L2 |
| 50 cm/s ² | 50 cm/s ² | 20% | 20% | 50 cm/s ² | 100% | 100% |
| X,Y,Z | X,Y,Z | Y | X | X,Y,Z | X,Y | X,Y |
| C | C | C | C | C | C | C |
| JMA 神戸 | JMA 神戸 | ステップ波 | ホワイトノイズ | BCJ_L2 | BCJ_L2 | ステップ波 |
| 100% | 100% | 50 cm/s ² | 50 cm/s ² | 20% | 20% | 50gal |
| 3軸 | 3軸 | X,Y,Z | X,Y,Z | Y | X | X,Y,Z |
| C | C | D | D | D | D | D |
| BCJ_L2 | BCJ_L2 | JMA 神戸 | JMA 神戸 | JMA 川口 | ステップ波 | JMA 輪島 |
| 100% | 100% | 100% | 100% | | | |
| X,Y | X,Y | 3軸 | 3軸 | 3軸 | X,Y,Z | 3軸 |
| D | D | D | D | D | D | D |
| JMA 神戸 | KiK-net益城 (前震) | KiK-net益城 (本震) | KiK-net益城 (本震) | | | |
| | 100% | 100% | 100% | | | |
| 3軸 | X,Y | X,Y | X,Y | | | |
| D | E | E | E | | | |

3. 分析結果

3.1 最大層間変形角と残留変形角の比

図1に試験体の構面ごとに最大層間変形角と残留変形角の関係を示す。グラフにプロットされている43個の点すべてを対象に、最大層間変形角が残留変形角に比例するとして最小二乗法により比例係数を算出すると、1.24であった。これは、最大層間変形角は平均的には残留変形角の1.24倍程度であることを示しており、応急分析結果マニュアル²⁾において説明されている2倍よりも小さな値である。

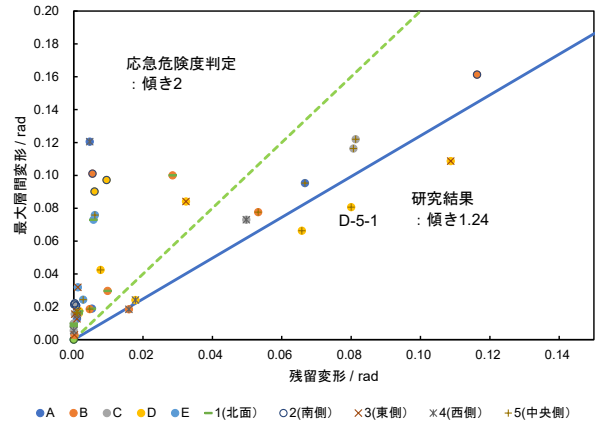


図1 残留変形と最大層間変形の関係，試験体の挙動の分類，および力-変位関係算出の対象とした試験体Dの記録

3.2 加振の履歴と最大層間変形角の関係

図1において最大変形角・残留変形角ともに最大となっているのは試験体Dである。表2に示す通り、加振を経験した回数は試験体Dが最も多く15回であり、次にA、C、E、Bの順となっている。そのため、試験体Dは他の試験体と比較して外壁並びに各構面の耐震性能が低下した状態であったことが推測される。試験体Dにおいて非常に大きな最大層間変形角ならびに残留変形角が生じたのはこのためと考えられる。

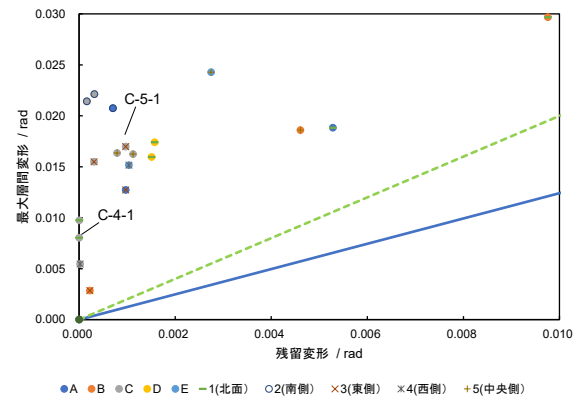


図2 残留変形と最大層間変形の関係および力-変位関係算出の対象とした試験体Cの記録

3.3 各構面における最大層間変形角と残留変形角

図1では、傾き1.24の比例直線付近に分布する点と、残留変形角をほとんど生じておらず縦軸付近に分布する点がある。大きな残留変形角を生じた記録は、各試験体の平面中央部、試験体Dの東側構面、および試験体E、Bの南側構面のものである。一方、ほとんど残留変形角を生じなかった記録は、各試験体の北側構面および試験体Cの側面のものである。こうした傾向は、各試験体とも北側に壁が多く、南側に大きな開口部があることによるものと推測できる。図3に残留変形角0.01以下の範囲について図1を拡大して示す。ここで、試験体Dの平面中央部(図1に示したD-5-1)、および試験体Cの平面中央(図2のC-5-1)に注目する。表1に示した通り、両試験体は同じ構造で、最終の加振内容も同じであるにもかかわらず、残留変形角が大きく異なっている。表2に示した加振の履歴の違いが影響している可能性がある。図3にD-5-1、図4にC-5-1の履歴ループをそれぞれ示す。いずれも力-変位関係が塑性領域に達している。

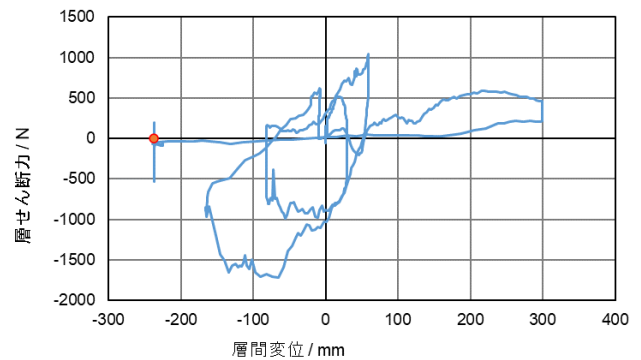


図3 試験体Dの1階平面中央の力-変位関係

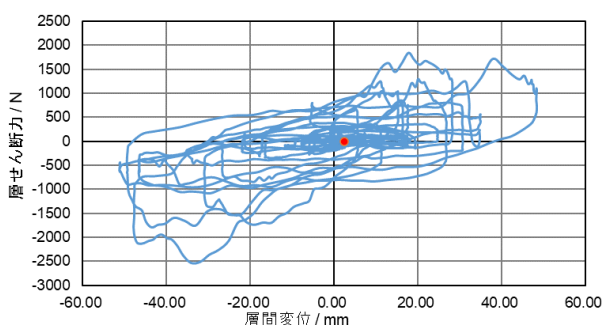


図4 試験体Cの1階平面中央の力-変位関係

このことから、試験体 C の残留変形がきわめて小さいことは力-変位関係が弾性範囲にあったためではなく、別の要因による結果であることが分かる。

4. 結

本論では、木造建築物を対象とし、E-Defense で行われた振動実験の結果の分析を行い、最大層間変形角と残留変形角との比率を検討した。以下に、本論で得られた結論を述べる。

- ・試験体の各構面に設置された変位計の記録をもとに 1 階部分の外壁各 4 面とその中央での層間変形角を求め、最大層間変形角と残留変形角の比を算出した。

- ・同じ試験体であっても、変位計の計測位置の違いや各構面と中央により残留変形角と最大層間変形角との比率は大きく異なった。

- ・最大層間変形角と残留変形角の比は、約 1.24 倍であった。

残留変形角は開口部の有無などの建築物自体が持つ構造特性や地震の振動特性に依存することから、検討を行う試験体を選定し、内陸及び海溝型の地震波による影響を考慮した建物の挙動推定に着目した最大層間変形角と残留変形角の比率において検討する必要がある、今後の課題である。

謝辞

本論の作成にあたっては、国立研究開発法人防災科学技術研究所地震減災実験研究部門契約研究員

藤原淳氏の協力を得ました。E-Defense 実験データアーカイブ (ASEBI)^{4), 5), 6), 7)}において公開されている E-Defense の実験データを使用しています。それぞれ、ここに記し謝意を表します。また、本研究の遂行にあたり、ひょうご震災記念 21 世紀研究機構による研究調査助成事業「演繹と帰納の両面からアプローチによる減災都市に向けた革新的建築設計法」の助成を受けました。

参考文献

- 1) 内閣府防災担当：災害に係る住家被害の被害認定基準運用指針，内閣府防災ホームページ，2021.3，https://www.bousai.go.jp/taisaku/pdf/r303shishin_all.pdf (2023/6/30 参照)
- 2) 被災建築物応急判定研究会：被災建築物応急危険度判定マニュアル，日本建築防災協会，1998.4
- 3) 伊藤慶彦，石田孝徳，松本由香：鋼構造剛接骨組みにおける柱の損傷と残留傾斜角の関係，鋼構造年次論文報告集，vol.31，pp.639-647，2023.11
- 4) 防災科学技術研究所：ASEBI E-Defense 実験データアーカイブ，課題名「耐震等級の異なる木造住宅の耐震性能検証に関する実験」，<https://asebi.bosai.go.jp/viewer/2017/13> (2024/03/04 参照)
- 5) 防災科学技術研究所：ASEBI E-Defense 実験データアーカイブ，課題名「3 階建て木造軸組工法の設計法検証に関する実験」，<https://asebi.bosai.go.jp/viewer/2009/134> (2024/03/04 参照)
- 6) 防災科学技術研究所：ASEBI E-Defense 実験データアーカイブ，課題名「2 階建て木造住宅(大安心の家)の耐震性能検証に関する実験」，<https://asebi.bosai.go.jp/viewer/2007/137> (2024/03/04 参照)
- 7) 防災科学技術研究所：ASEBI E-Defense 実験データアーカイブ，課題名「地盤配管設備等の非構造部材を含む 3 階建て木造住宅の機能を検証する E-ディフェンス実験」，<https://asebi.bosai.go.jp/viewer/2018/102> (2024/03/04 参照)

*1 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科 博士前期課程
 *2 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科 准教授・博士(工学)
 *3 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科 教授・博士(工学)

Graduate student, Grad. Sch. Dis. Res. and Gov., Univ. Hyogo
 Assoc. Prof., Grad. Sch. Dis. Res. and Gov., Univ. Hyogo
 Prof., Grad. Sch. Dis. Res. and Gov., Univ. Hyogo