

# E-ディフェンスのRC造建物震動実験を活用した地震時建物損傷レベル評価方法の提案

## Proposal of Damage Estimation System of Using 3-D Shaking Table Test of 10 Story RC Frame at E-defense

○山田哲也<sup>1</sup>, 佐藤栄児<sup>2</sup>, 土佐内優介<sup>2</sup>  
 Tetsuya YAMADA<sup>1</sup>, Eiji SATO<sup>2</sup>, Yusuke TOSAUCHI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>三井住友建設株式会社 技術本部 技術研究所

Technical Research Institute, Technical & Engineering Service Division, Sumitomo Mitsui Construction Co., Ltd.,

<sup>2</sup>国立研究開発法人 防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

Structural damage level estimation system was verified by 10 story RC frame experiment at E-defense. Safe/Caution/Danger of a structure is judged by story drift angles preset as standard values. The validity of the values was confirmed comparing with the state of cracks and strains by the experiment. We also proposed an estimation method of the max story drift angle by multiplying the 1st story drift angle by the coefficient obtained from drift distribution by push over analysis, and understood the necessity of consideration of the differences in failure mechanisms between the analysis and real phenomenon.

**Key Words** : Shaking Table Test, Damage Estimation, Story Drift Angle, Drift Distribution, Push Over Analysis, Verification

### 1. はじめに

防災・減災対策の1つとして、地震直後の建物の被害推定がある。自治体や企業は、応急段階で管理対象になる建物の損傷レベルを早期に把握し事業継続計画（BCP）を速やかに遂行する必要がある。自治体は、災害拠点となる建物や避難所が余震に対して安全を確保できるかの判断などが求められる。企業は、災害対策本部設置場所や被災施設・工場などの内部調査に対する安全性の判断が求められる。複数の建物が同時に被災した場合、調査のための専門家の不足なども予測される。

これらに対する対応策として第1筆者は、損傷評価を建物の層間変形角によって判断する地震時変位計測装置（以下、本装置）を開発してきた<sup>1)</sup>。本装置は、地震発生後に建物の損傷程度を建物管理者に即時に連絡し速やかなBCP対応に資することを目的としている。

損傷評価のためには、損傷程度を表すクライテリアを設定し、その判断指標である層間変形角との関連を明確にすることが重要である。このためには、地震による計測を積み重ねる必要があるが、実際の地震は、頻繁に発生するものではない。従って、地震を模擬した建物の震動実験による計測は貴重なものといえる。

本論では、国立研究開発法人防災科学技術研究所の実大三次元震動破壊実験施設で実施された10階建て鉄筋コンクリート（RC）建物骨組の震動実験<sup>2)</sup>の場を活用した、本装置を用いた建物損傷評価システム（以下、本システム）の検証結果および損

傷評価方法を述べる。

### 2. 実験計画

#### (1) 試験体

10階建てRC建物試験体は、長辺（純フレーム構造、3スパン：フレーム方向）、短辺（連層耐震壁付きフレーム構造、3スパン：壁方向）、高さ27.45mの実大を模したものである<sup>2)</sup>。試験体平面図・立面図を図1 a), b)に示す<sup>2)</sup>。

#### (2) 計測方法

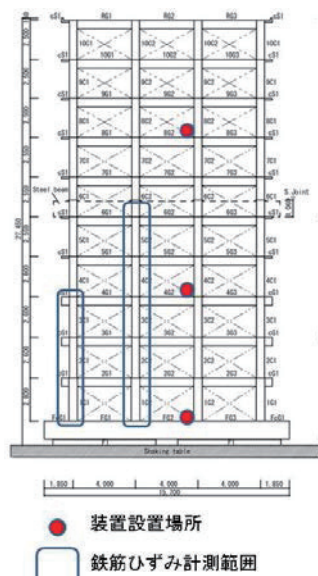


図1 a) 試験体立面図

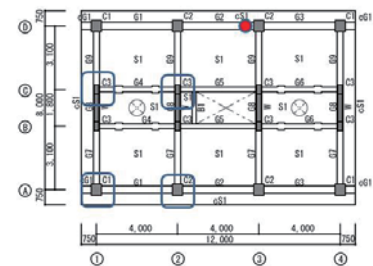


図1 b) 試験体平面図

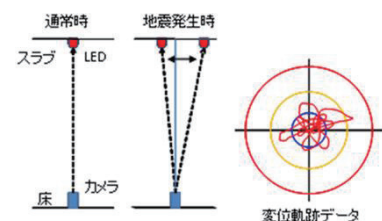


図2 計測概念図

本装置<sup>1)</sup>は、床上に設置したカメラ（80fps、解像度0.25mm/画素）で上階梁下に設置したLED照明を撮影し、地震時のXY平面の動きを非接触で計測する（図2）。本装置を1,4,8階の③-D通りの柱周りの長辺方向梁上に設置した。設置場所を図1に示す。

### (3) 加振ルール

加振波は、兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台で観測されたXYZ方向地震動（JMA-Kobe）を用い、振幅を10%（震度5弱）、25%（5強）、50%（6弱）、100%（6強）にして順次加振した<sup>2)</sup>。

## 3. 実験結果

### (1) 層間変形角

図3に本装置（実線）で計測した層間変形角と計測用変位計（レーザー変位計）（破線）の軌跡図（1階）の比較を示す。本装置は、XY平面の軌跡を1台で計測したものである。一方、レーザー変位計は、X、Y方向に剛な架台を介して各方向別々に計測したものである。両者を比較すると、壁方向（X方向）は本装置のデータがやや小さめになっているが、全体的にはほぼ一致することが確認できた。

図中の3種の楕円は、X方向（壁付きフレーム構造）、Y方向（純フレーム構造）の既往の文献から仮定した損傷判定値（層間変形角）を示し、それぞれ{1/800, 1/150, 1/75}、{1/500, 1/100, 1/50}としている<sup>3)</sup>。各閾値の物理的意味は、弾性時・降伏時・最大耐力時に相当する。10%加振では弾性範囲内、25%加振では弾性範囲を少し超えた状況、50%加振ではさらに変形角が増加しY方向（純フレーム構造）で0.005に達している。100%加振では、降伏の判定値を超えていることが分かる。

### (2) ひび割れ状況

RC構造物は、コンクリートのひび割れの位置や幅を観察することにより建物の損傷程度を把握することができる。本実験では、各加振が終了する毎にひび割れの観

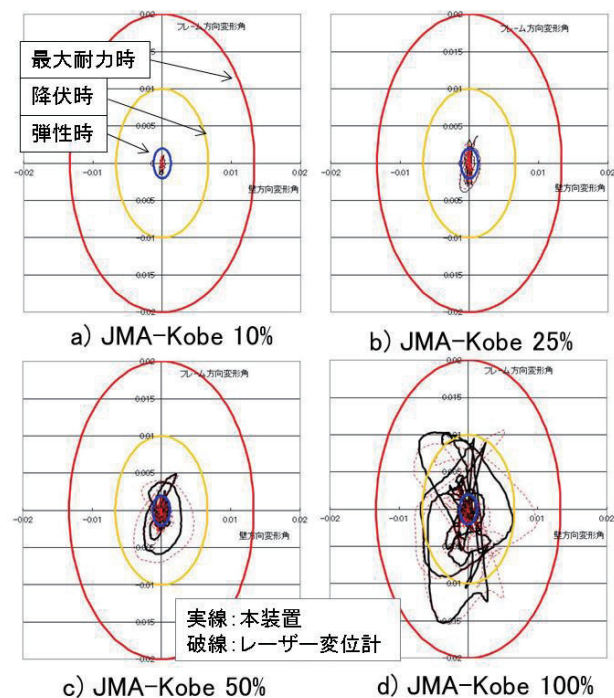


図3 軌跡図の比較

察を実施している。

その結果、10%、25%加振時には0.05mm以下の微細なひび割れのみで、50%加振時に柱と壁に幅0.05mmのひび割れが観察された。100%加振時には、ひび割れ幅は0.5mm程度になり、100%加振時に連層耐震壁1階脚部の圧壊と1階柱脚部のコンクリート剥落が観察されている<sup>2)</sup>その4。また、柱梁接合部は、50%加振時にひび割れ幅が0.15mm程度に達し、100%加振でかぶりコンクリートが剥落したことが報告されている<sup>2)その4</sup>。

### (3) 部材降伏状況

RC構造物の部材内部の鉄筋のひずみを計測することにより、各部材が降伏（降伏ひずみ：2000 $\mu$ ）に達しているか否かが分かる。降伏している個所を把握することにより建物全体の損傷状況が分かる。

フレーム方向に関して、10%加振では、柱や梁の主筋のひずみは数百 $\mu$ で、せん断補強筋のひずみは数十 $\mu$ レベルであった。25%加振では、主筋は千数百 $\mu$ 、せん断補強筋は100 $\mu$ レベルであった。いずれも降伏に達するレベルではないが、10%時に主筋の周辺に曲げひび割れが発生しているレベル（100~200 $\mu$ ）であり、25%時にせん断補強筋の近傍でせん断ひび割れが生じている可能性があるレベルである。

50%加振と100%加振時の部材の降伏状況をひずみゲージを貼った1-A（隅柱）、2-A（側柱）、1-C（壁柱）、2-C（壁柱）通りの部材（図1参照）に関して表現したものを図4に示す。これより、50%加振時には、3~5階に渡る柱梁接合部周りの部材が降伏していることが分かる。100%加振時には、降伏階が6階や1,2階へと上下方向に広がっている様子が分かる。

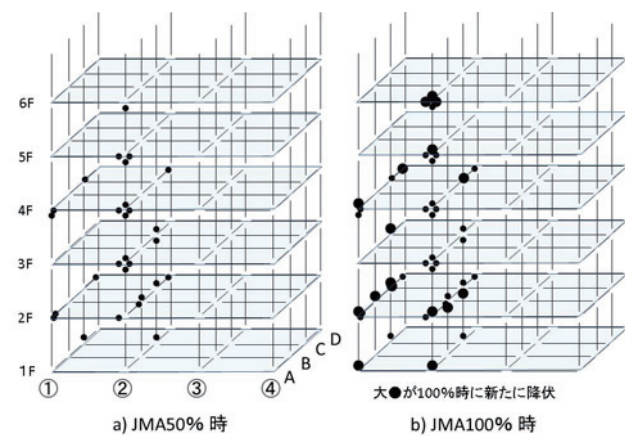


図4 降伏域分布図

壁方向は、縦横の壁筋と枠柱の帯筋のひずみを計測した。耐震壁内の縦壁筋のひずみ値は、25%加振以降で100 $\mu$ を超える値になり、100%加振時に縦横筋も1000 $\mu$ を超えるレベルに達した。帯筋は、25%加振以降で100 $\mu$ を超えるレベルになったが、100%加振でも壁筋・帯筋とも降伏点を超えるひずみには達していない。

## 4. 被災度区分判定の適用

地震後の建物損傷状況を判断する指標として文献4)の被災度区分判定基準がある。損傷が最も大きい階を対象に柱や壁毎のひび割れ幅などを計測して損傷度を調査し、損傷度レベルに応じた耐震性能低減率を考慮した建物の耐震性能残存率(R)から無被害・軽微・小破・中破・大破・倒壊の被災度区分を判定する。



これに基づき 3. (2)のひび割れ幅から被災度区分を判定する。柱・壁のひび割れ状況から判定すると50%加振時にフレーム・壁方向とも $R=95\%$ で小破になる。100%加振時には柱・壁のひび割れ幅から判定するとフレーム方向の $R$ が75%、壁方向の $R$ が64%でも中に中破と判定されるが、文献2)その5では柱梁接合部のひび割れ状況から中破から大破と判定されている。

本試験体の破壊状況に関し、文献2)その5では一般的な梁降伏でなく接合部降伏が生じているとしている。このため、損傷部位が接合部に集中し鉄筋が露出したため100%加振時の被災度区分が大破の可能性も含む判定になったと考えられる。

## 5. 変位計測装置を用いた損傷評価方法の検証・提案

### (1)損傷クライテリア

本装置は建物の損傷程度を層間変形角で評価するものである。損傷クライテリアとして、安全 (I, II)・注意・危険とし、それぞれ建物継続使用可・余震に注意して限定的使用可・継続使用不可を意味する。これらの閾値として文献3)で各種構造別に標準的な閾値を提案している。図3の楕円は内側から安全 I・安全 II・注意・危険領域の閾値を表している。

### (2)建物の損傷レベルと層間変形角との関連

本実験データから、RC構造物の各損傷クライテリアの閾値の妥当性を検討する。

RC構造の弾性限界は、ひび割れ発生の有無で評価される。主筋のひずみデータから10%加振時にひび割れが生じていることが推定される。10%時のフレーム方向の層間変形角は2~8階で0.0020~0.0028radに達している(図5a)。この結果、弾性を境界とする安全 I と II の閾値として、0.0020radは妥当であるといえる。一方、壁方向は、XYZ方向同時加振のため柱主筋はフレーム方向の加振の影響も受けているが、3. (3)より壁方向のみの影響が顕著に表れる壁筋と帯筋のひずみ値から判断して25%時にせん断ひび割れが生じていると考えられる。壁方向の標準的閾値0.00125は、図5b)より10%と25%加振時の間に位置し妥当といえる。

RC構造の降伏限界は、鉄筋のひずみが降伏点を越えたか否かで判断される。フレーム方向は、3. (3)より降伏現象は50%加振時に生じたことが分かる。この時、2~6階の層間変形角が0.01radを超えている(図5a)。1階柱脚の降伏は、50%加振時ではなく、100%加振時に生じている(図4)。1階の層間変形角は、50%加振時

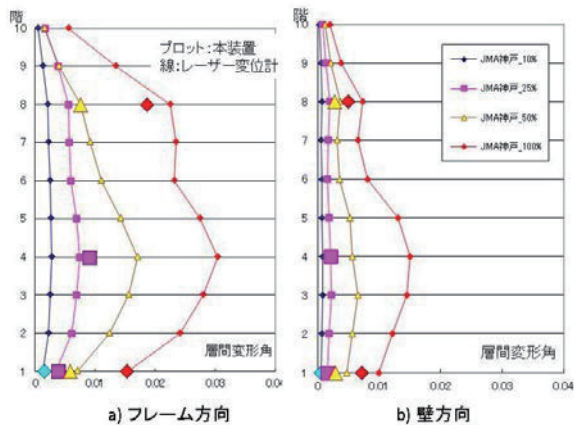


図5 最大層間変形角分布 (実験)

に0.0070rad, 100%加振時に0.0154radに達している(図5a)。この結果、降伏を境界とする安全 II と注意の閾値として、0.01radは妥当であるといえる。一方、壁方向では、壁筋・帯筋は50%加振時に降伏しておらず、降伏時の標準的閾値0.0067を僅かに下回る変形角であった(図5b)。よって、壁方向の降伏時変形角は過小とも考えられるが、現実のXYZ方向の地震波の場合、フレーム方向の柱主筋の降伏が壁方向にも影響を与えることを考慮し、本試験体のようにフレームと壁構造が混在している構造では妥当な値と考えられる。

RC構造の最大耐力時は、降伏後のひずみ硬化域を経て耐力が徐々に増加し、最大耐力後、鉛直部材の圧壊などにより軸力保持能力を失う。本実験で最大加振の100%でも荷重が低下する領域には達していないが、1階の柱や壁の脚部の圧壊が報告されている<sup>2)その4</sup>。この時、フレーム・壁方向の各層間変形角は、0.013, 0.01であった。最大変形を示した4階の層間変形角は、それぞれ0.033, 0.015に達している。この状態でも軸力を保持できない状況は観察されていない。従って、最大耐力時の変形角はこれらの変形角より大きいと考えられるが、本実験から明確に把握することはできない。既往の文献調査から標準値として設定した閾値(0.02, 0.013)は、1階と4階(最大変形層)の層間変形角の間にあり、やや安全側の設定と判断できる。

### (3)計測階と建物の最大損傷階との関係

層間変形角の高さ方向の分布は一樣ではない。本装置を全階に設置し変位分布を把握することも可能であるが、実用的には制約が多い。本実験では、高さを3等分した1, 4, 8階に本装置を設置したが、4, 8階では無線LANの接続状況が不安定で一部の加振ケースで計測できずデータが欠落した。ここでは、1階のみに本装置を設置した場合を想定し、計測階(1階)の層間変形角から建物の最大変形角を推定し、建物全体の損傷評価する方法を提案する。

建物の高さ方向の分布を把握するために、弾塑性増分解析を利用する。増分解析により、任意の外力レベルの層間変形角の分布を得ることができる。

増分解析の結果を図6に示す<sup>2)その4</sup>。この解析は、地震時に生じる水平力を各階に加え、建物各部のひび割れや降伏状態を加味しながら建物が保有する耐力を確認するためのものである。この解析では、柱・梁部材は両端非線形バネの剛体モデル、壁はエレメント置換でモデル化されている。

図7に最大変形層が3. (1)で示した安全 I・安全 II・注意・危険の閾値の変形角に達した時の分布図を示す。この結果、フレーム方向は4階で最大値を示す分布に、壁方向は4階と8階でほぼ同程度の変形角を示してい

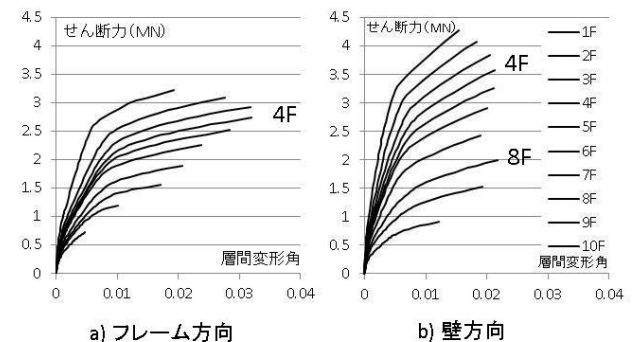


図6 荷重増分解析結果

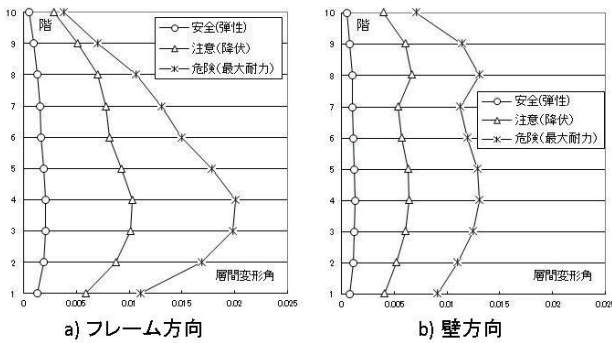


図7 層間変形角分布（増分解析）

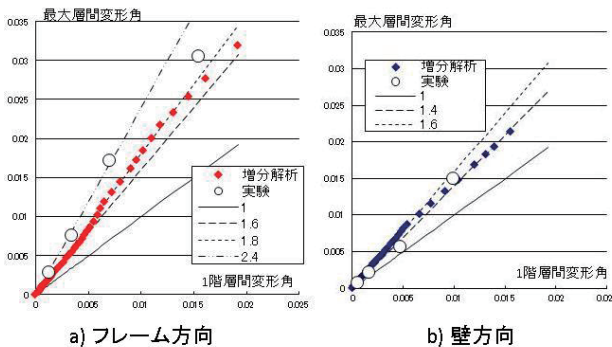


図8 1階変形角と最大変形角の関係の推移

る。この傾向を図5の実験結果と比較すると、フレーム方向は4階が最大となる同様の傾向になり、壁方向は4階が大きくなる点は共通であるが、8階の層間変形角が実験では増分解析が示すほどには大きくなっていない。これは、7階までである連層耐震壁が8階以上で無くなることによる剛性の変化や高次モードの影響によると思われる。各解析ステップの1階変形角と最大階変形角の関係の推移を図8に示す。横軸が1階、縦軸が最大階の変形角である。従って、1階が最大階であれば、係数1の線を推移することになる。フレーム方向は、4階が最大変形角を示し、1階と4階の関係をプロットするとほぼ係数1.6～1.8上を推移することが分かる。壁方向は、4階と8階の変形が大きくなり、1階と最大層間変形角の関係をプロットすると1.4～1.6の間を推移することが分かる。

これらの係数を1階の本装置で計測された層間変形角に乗じて、建物の最大層間変形角を推定ことを提案する。層間変形角の過小評価を避けるため、安全側の係数として最大値を選択すると、フレーム方向は1.8、壁方向は1.6となる。

さらに、今回の実験結果を比較すると、図8a)の○で示すように、同係数はフレーム方向で2.4になり増分解析結果の1.8よりも大きくなっている。これは、4.で述べたように荷重増分解析のモデルで考慮されていない破壊形式である接合部降伏が生じたためであると考えられる。接合部における梁に対する柱の曲げ耐力比が1.0に近い場合、接合部降伏によりスリップ型の履歴特性に移行するため<sup>2)その5</sup>。接合部の損傷が大きい3～5階の層間変形角が増分解析結果より過大になったと考えられる。一方、壁方向では、増分解析と実験(○)の1階に対する最大変位の比率はほぼ同じであった。これは、実験の破壊形式が増分解析の壁のモデルの範囲内であったと考えられる。

本実験の結果、フレーム方向では1階で計測された変形角の2.4倍、壁方向では1.6倍とすれば、ほぼ最大層間

変形角を把握することができることが分かった。しかしながら、建物の変形特性は、階数・形状によって建物毎に異なる。より個別性を加味した高さ方向の変形分布を求めるためには、地震応答解析による検討も必要である。この場合も解析モデルによって変形分布性状は変わると思われる。今後、解析手法や解析モデルが変形分布に与える影響を検討していきたい。

## 6. まとめ

E-ディフェンスを用いたRC造建物の震動実験により、地震時に建物の損傷を早期に判定するシステムの計測技術の検証および判定方法を提案した。

実験では、本装置による2次元の測定値と別途設置されたX方向とY方向の測定器（レーザー変位計）による測定値が概ね一致したことを示した。これにより、実建物への適用の可能性を示すことができた。

建物の損傷程度を層間変形角で判断するためには、損傷クライテリアと層間変形角の関係を明確にする必要がある。実際の被災建物では、RC造の場合、現地調査で事後的にひび割れの状況や傾きなどを知ることができる。しかし、部材の降伏状況を理解することは困難である。震動実験では、加振レベルごとにひび割れの状況や鉄筋の降伏の状況を詳細に確認できる。これらデータと層間変形角と対照することにより、安全・注意・危険レベルの損傷程度と層間変形角の関係を検証することができた。この結果、文献3)で示したRC構造物のフレーム構造と壁構造の標準的な損傷クライテリアの閾値となる層間変形角の妥当性を示した。

複数層の建物の場合、層間変形角は階ごとに異なる。この場合、最大層間変形角を生じる階の損傷で建物の損傷レベルを評価することになるが、本装置の建物内への設置の制約条件により、設置階が建物の損傷を代表する階にならない場合が想定される。本論では、設置階の層間変形角から建物損傷評価する方法として、荷重増分解析で得られる各階変位分布形状を用いて、計測階のデータから最大変形階のデータを推定する方法を提案した。本実験結果を用いて本方法の妥当性を検討した。その結果、フレーム方向は増分解析結果の分布よりも最大値がより大きい結果になり、壁方向はほぼ一致した。フレーム方向の違いは、解析で想定した部材損傷メカニズムで評価できない接合部降伏という現象が卓越したためと考えられる。

計測階が最大損傷階と異なると推定される場合、増分解析結果による変位分布形状を用いるに当たり、建物の損傷メカニズムが解析に反映されているか否かを考慮して判断することが重要といえる。

## 参考文献

- 1) 山田哲也 他：地震後の建物の健全性に関する研究（その1 非接触型層間変位計測システム）, B-2, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.669-670, 2009.
- 2) 梶原浩一 他：E-ディフェンスを用いた10階建て鉄筋コンクリート造建物（2015）の三次元震動台実験 その1～5, 構造II, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.863-872, 2016.
- 3) 山田哲也：地震時建物変位計測システムの防災上の活用方法に関する提案, 地域安全学会論文集, pp.15-24, No.29,2016,11.
- 4) 財団法人 日本建築防災協会：再使用の可能性を判定し、復旧するための震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針.