

論文 非構造部材の損傷を用いた RC 部材の損傷度推定手法と実大架構実験による検証

藤田 起章*1・Alex Shegay*2・田附 遼太*3・前田 匡樹*4

要旨:非構造部材がとりつき, RC 部材の直接の損傷観察が難しい建築物の残存耐震性能を評価するために, タイル, LGS 間仕切壁及びドアの損傷と RC 部材の損傷度の関係性と耐震性能残存率の算出法を提案した。その後, RC 造躯体に LGS 間仕切壁及びドアを取り付けた実大架構の試験体に静的載荷実験を行い, 非構造部材と RC 部材の損傷の関係を検証した。最後に, 提案した方法を用いて, RC 部材の損傷度を推定し耐震性能残存率を算出した結果, RC 部材の損傷観察により判定した場合の傾向を捉えることができ, タイルの損傷を用いて算出した場合が最も推定精度が高かった。

キーワード: 残存耐震性能評価, 損傷度, タイル, LGS 間仕切壁, ドア

1. はじめに

地震被害を受けた建物の補修, 補強の可否を判定し, 合理的な復旧計画を立案するためには, 被災後の耐震性能を適切に評価することが重要である。現在用いられている指標として, 被災前に対する被災後の耐震性能の比を表す耐震性能残存率 R がある。(財)日本建築防災協会の「震災建築物の被災度区分判定基準」¹⁾(以下, 現行基準)では, RC 部材のひび割れ幅や剥落などの損傷から部材の損傷度を判定し, 損傷度ごとの耐震性能低減係数 η (表 - 1)を, 部材の終局耐力(せん断力 Q_u あるいは曲げモーメント M_u)で重みづけ平均して建物の R を算出する略算法が提案されている(図 - 1)。しかし, 実際の建築物には, 非構造部材で RC 躯体が覆われており RC 部材の損傷の様子を直接確認することが困難な場合がある。

そこで, 本研究ではタイル, LGS 間仕切り壁及びドアがとりついた RC 造架構を対象として, 非構造部材の 1 損傷状況から RC 部材の損傷度を推定する手法の提案を行う。その後, タイル, LGS 間仕切り壁及びドアがついた実大架構の静的載荷実験に対して提案した手法を適用し, その妥当性を検証した。

2. 非構造部材の損傷を用いた損傷度推定手法の提案

現行基準¹⁾では, RC 部材の荷重-変形関係に基づく損傷度の区分は図 - 2 に示されている。塑性変形能力の大きい部材(曲げ部材), は, 地震時に経験した最大変形が降伏変形を超えない場合は大きな損傷は残らないものとして損傷度 I, 最大応答時に部材の最大耐力に達し

表 - 1 耐震性能低減係数 η

損傷度	RC 造柱	RC 造壁		RC 造梁
	曲げ	曲げ壁	せん断壁	曲げ
I	0.95	0.95	0.95	0.95
II	0.75	0.7	0.6	0.75
III	0.5	0.4	0.3	0.5
IV	0.2	0.1	0	0.2
V	0	0	0	0

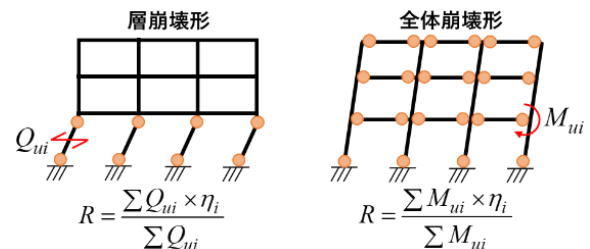


図 - 1 現行略算法の概念

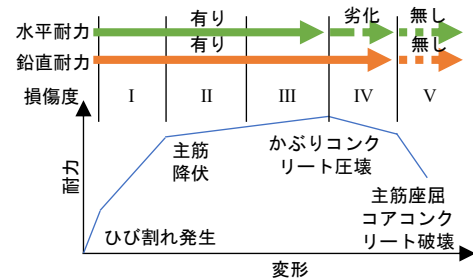


図 - 2 構造性能と損傷度の関係

ていなければ損傷度 II~III, 最大耐力を過ぎたが終局には至っておらず, 軸力はある程度保持されていれば損傷

*1 東北大学大学院 工学研究科都市建築学専攻 修士課程 (学生会員)
 *2 東北大学大学院 工学研究科都市建築学専攻 研究員 Ph.D. (正会員)
 *3 株式会社社長谷工コーポレーション技術研究所 研究員 (正会員)
 *4 東北大学大学院 工学研究科都市建築学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

表 - 2 RC 部材及びタイルの損傷

損傷度	損傷内容 (RC 部材)	損傷内容 (タイル) (モルタル下地工法)
I	小さいひび割れ発生 ひび割れ幅 0.2mm 以下	小さいひび割れ発生 ひび割れ幅 0.2mm 以下
II	大きいひび割れが多数 ひび割れ幅 0.2mm~1mm	大きいひび割れが多数 タイル剥離 ひび割れ幅 0.2mm~1mm
III	わずかのかぶりコンクリート剥落 ひび割れ幅 1mm~2mm	タイル剥落 目地剥落 ひび割れ幅 1mm~2mm
IV	かぶりコンクリート剥落 鉄筋露出 (未座屈)	かぶりコンクリート剥落 鉄筋露出 (未座屈)
V	コアコンクリート剥落 露出した鉄筋が座屈	コアコンクリート剥落 露出した鉄筋が座屈

度IV, 終局に至り, 水平耐力及び軸力保持能力が消失していれば損傷度Vと定義している。RC 部材の損傷度判定に用いる損傷状態を表 - 2 にまとめた。

2.1 タイル仕上げの損傷に基づく損傷度推定手法

RC 造集合住宅でよく用いられるタイル仕上げは, RC 部材の上から下地モルタルを塗り, その上からタイルを張り付けるのが一般的な工法である。各損傷度における RC 部材の損傷とタイルの損傷のメカニズムを図 - 3 に示す。損傷度 I では, 躯体コンクリートに小さなひび割れが生じると目地材やタイルにもひび割れが生じる。また, 高橋ら²⁾のタイルを張り付けた RC 部材の載荷実験では, 変形が小さい場合, RC 部材の露出面とタイル張り付け面の残留ひび割れ幅はあまり変わらないものとなっている。損傷度 II では, コンクリートにひび割れが多数発生するとタイルと下地モルタルの間に空隙ができタイルが剥離する。タイルの剥離は, 打診棒でタイルを叩いた際の異音から判断することができる。損傷度 III では, コンクリート部材が剥落し始めるのと同様に, 目地材やタイルが剥落し始める。損傷度IV以降は, 部材表面の損傷ではなくコアコンクリートや鉄筋が主な損傷なため, 表面のタイルは関係なく, 損傷状態は RC 部材のコンクリート露出面と同じとして省略した。以上から, RC 部材の損傷度とタイルの損傷状態の対応関係を表 - 2 にまとめた。

2.2 LGS 間仕切壁及びドアを用いた損傷度判定

LGS 間仕切壁は, RC 躯体に下地鉄骨を取り付け, それを骨組みに石膏ボードなどの仕切り材を張り付けて, 部屋の区画などの壁にするものである。さらに, そこに開口補強材と三方枠を取り付けて開口部を設け, ドアをとりつけることができる。

直接RC部材にとりつく非構造部材であるタイルと異なり, LGS間仕切壁及びドアは, RC躯体架構のスパン間に取り付けられるものなのでその損傷から直接各部材

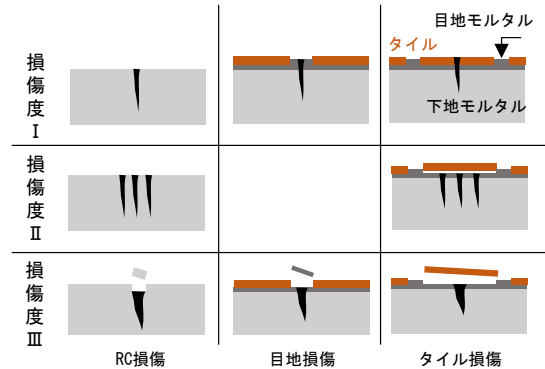


図 - 3 タイルの損傷メカニズム

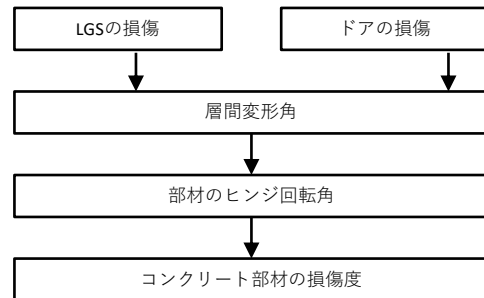


図 - 4 損傷度推定のフロー

表 - 3 LGS 間仕切壁損傷と層間変形角

層間変形角	LGS 間仕切壁の損傷
0.25%	・シーリング材の切れ ・上張りボードのヒビ, 折れ ・下張りボードのヒビ, 折れ ・ランナー端部の歪
0.50%	・上張りボードの目地のヒビ ・スタッドの水平移動 ・スタッドの軽微な歪
1.00%	・上張りボードの皺 ・上張りボードのロッキング ・ランナーの軽微な開き
1.30%	・壁間の隙間の開き ・スペーサーの外れ ・ビス穴からのヒビ ・ランナーを留めるビスの抜け
2.00%	・スタッド同士を留めるビスの抜け ・上張りボードの面外方向への変形 ・ピンの変形, 抜け
3.00%	・上張りボードの脱落 ・スペーサーの脱落

表 - 4 ドアの開閉力と層間変形角

層間変形角	ドアの損傷
0.50%	・除荷時開閉力 50N 以下 (異常無)
0.83%	・除荷時開閉力 50~100N
1.00%	・除荷時開閉力 100~150N
2.00%	・除荷時開閉力 150~200N
3.00%	・除荷時開閉力 200~300N

の損傷度を判定することは難しい。そこで, LGS間仕切壁及びドアの損傷からRC部材の損傷度を算出するフローを図 - 4 に示す。まず, LGS間仕切壁及びドアの損傷から層間変形角を推定する。その後, 躯体の構造解析の結果から層間変形角と各部材の変形(曲げ部材の場合塑性ヒンジの回転角)の関係を求める。最後に, 各部材の変形と構造部材の損傷度の関係から各部材の損傷度を判定する。

清家, 吉敷, 巽, 八木ら³⁾は, 実大S造架構にLGS間仕切壁及びドアを取り付けて載荷実験を行った。実験結果から, 躯体の変形の影響を受けて石膏ボードはロッキング変形をし, 下地鉄骨は変形することがわかっている。各層間変形角と, 損傷状態の関係を表 - 3に示す。限澤ら⁴⁾は, RC造実大試験体にドアを取り付け, 載荷して変形した際に開閉力試験を行った。得られた各層間変形角と, 非耐震扉の開閉力の関係を表 - 4に示す。なお, 耐震扉等で損傷による開閉力が変わる場合には表 - 4の値を変更して適用する必要があるが本検討では非耐震扉を対象とする。

層間変形角とRC変形には対応関係があり, 架構の寸法や部材の剛性によって決定される。そこで本研究では, 解析モデルの荷重増分解析を行い, 各層間変形角におけるそれぞれの部材の変形を算出した。

部材の変形から部材の損傷度を算出する際は, 現行基準¹⁾の荷重変形関係と損傷度の対応関係(図 - 2)と, 「鉄筋コンクリート造建築物の耐震性能評価指針・同解説²⁾」を参考にして図 - 5のように決定した。

3. 非構造部材つき実大架構の静的載荷実験

提案する手法の妥当性検証のため筆者らは非構造部材付き実大 RC 架構の静的載荷実験を行った⁶⁻⁹⁾。

3.1 実験計画

試験体は, 2019年に東北大学と大林組の共同研究で実施した振動台実験¹⁰⁾のRC造4層縮小試験の1フレームの1層部分を実大架構に拡大したものである。図 - 6に試験体の外観を, 図 - 7に平面図と立面図を示す。試験体は, 両端の柱と中央の耐震壁, 及びそれに接続する梁で構成されている。部材リストを表 - 5に示す。コンクリート強度は $F_c=30\text{N/mm}^2$ とした。柱・梁は, 柱脚及び梁端部で曲げ破壊が生じるように曲げ耐力に対してせん断耐力を十分高く設計し, 耐震壁は, せん断耐力と曲げ耐力を同程度に設計している。梁は, スラブがとりつくことを想定したT型断面とし, スラブ幅は内法スパン長 $L(2040\text{mm})$ の約0.1倍(0.1L)とした。

試験体には, タイル, LGS 間仕切壁及びドアを設置し

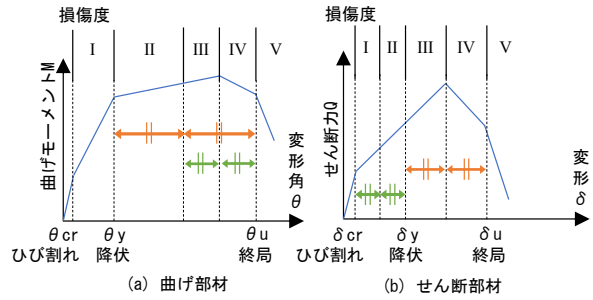


図 - 5 曲げ部材変形と損傷度



図 - 6 試験体写真(左:北面, 右:南面)

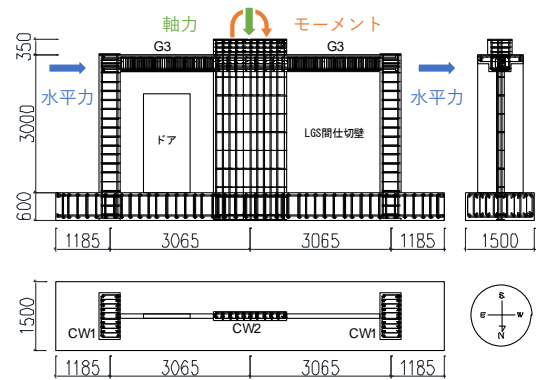


図 - 7 試験体図面

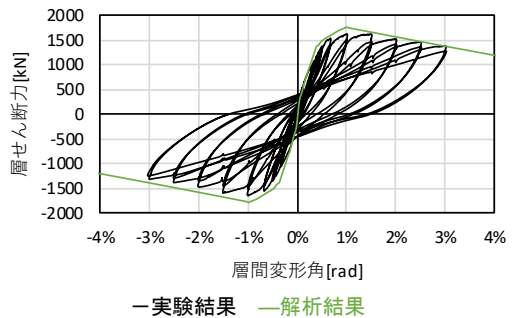


図 - 8 層せん断耐力層間変形関係

表 - 5 部材リスト

部材	柱 CW1	耐震壁 CW2	梁 G3
断面寸法 [mm]	700x450	180x1600	480x360 (スラブ厚 180)
主筋	20-D32 (SD345)	22-D22 (SD390)	上下端 5-D25 (SD345) スラブ筋 上下端 D10@200
せん断補強筋	目-D10@50 (SD295)	目-D10@400 (SD295)	目-D10@50 (SD295)
曲げ終局強度 [kN・m]	1158	2267	286
せん断強度 [kN]	1125	824	768
曲げせん断耐力比 (Q_{su}/Q_{mu})	2.1	1.1	2.7

表 - 6 各サイクルにおける損傷 ※()内は残留最大ひび割れ幅[mm]

変形角[%]	RC面柱(曲げ破壊)	RC面壁(せん断破壊)	タイル柱(曲げ破壊)	タイル壁(せん断破壊)	LGS間仕切壁	ドア
0.10	(0)	曲げひび割れ(0.05)	(0)	RC部ひび割れ 目地ひび割れ(0.10)	シーリング材の切れ 上張りボードの目地ひび割れ	開閉力 47N
0.33	ひび割れ(0.05)	せん断ひび割れ(0.05)	RC部ひび割れ 目地ひび割れ タイルひび割れ(0.10)	目地ひび割れ(0.10)	上張りボードのひび割れ スタッドとランナーの滑り	開閉力 46N
0.50	ひび割れ(0.25)	せん断ひび割れ(0.35)	目地ひび割れ(0.25)	タイル剥離(0.15)	シールの切れが拡大	開閉力 49N
0.67	ひび割れ(0.15)	中央に剥落 圧縮端鉛直ひび割れ(1.7)	目地ひび割れ(0.05)	タイル剥離(1.9)	上張りボードの皺 下張りボードのひび割れ	開閉力 49N
1.00	ひび割れ(0.55)	横補強筋露出(18)	タイル剥離(0.50)	タイルひび割れ 目地剥落(6.0)	下張りボードの角部ひび割れ 上張りボードに多数ひび割れ	開閉力 51N
1.50	剥落(4)	剥落増加 主筋座屈(14)	タイル剥離(1.9(タイル間))	タイル剥落 RC部剥落(19)	上張りボードの面外方向へのはらみ出し	開閉力 180N
2.00	剥落(1.4)	大きな剥落 主筋が5本露出(75)	タイル剥落 目地剥落(1.3)	鉄筋露出(5.0)	上部のランナーとRC梁を接合するビスの変形、抜け 振れ止めの変形	開閉力 320N (一般的力で開閉不可)
2.50	剥落(1.2)	剥落増加 壁が貫通(未計測)	タイル剥落(2.5)	目地剥落(未計測)	振れ止めのねじれ 下張りボードの面外方向へのはらみ出し	開閉力 286N (一般的力で開閉不可)
3.00	剥落(4.0)	剥落増加(未計測)	タイル剥落(4.0)	タイル剥離 目地剥落(未計測)	ボードの面外変形が拡大	開閉不可

た。タイル仕上げは、試験体表面を左右に分けて、左側はモルタル下地工法、右側は弾性接着工法が採用された。本研究では、以下、一般的によく用いられるモルタル下地工法の結果を用いる。コンクリート露出面の損傷とタイル張り付け面の損傷が比較できるように試験体の片側にはタイル仕上げを施さず、コンクリート躯体むき出しのままにした。LGS間仕切壁は東西2ヵ所のスパン間に設置した。西側のLGS間仕切り壁は全面無開口の平坦壁であり、東面のLGS間仕切り壁は鋼製ドアを含む開口部付き壁である。また、片面に強化石膏ボード2枚貼りし、もう片方は下地鉄骨の損傷を観察できるようにした。開口部付き壁に設置した鋼製ドアは、ランナーに固定された開口補強鋼材に三方枠を取り付け、三方枠にヒンジとドアクローザーを介して取り付けられている⁸⁾。ドアには、一般的な集合住宅に用いられている非耐震のドアで面内荷重50Nが作用した際に開閉の確認(JIS A 1519)がなされたものを用いた。

試験体の加力には図 - 7 に示すように試験体に取り付けた5本の油圧式ジャッキで加力を行い、軸力は218kNで一定とした。加力は、各2サイクルを計9回行う正負交番繰り返し载荷を行った⁹⁾。

3.2 試験体の荷重—変形関係の解析

試験体の解析は、弾塑性解析ソフト SNAPver7 を用いて静的増分解析を行った。モデル化は、部材端部に単軸の曲げ、せん断、軸力を受けるバネを設け、それ以外の部分は線材として置換した。剛性、曲げひび割れ耐力、曲げ降伏耐力、降伏変形、終局変形は「鉄筋コンクリー

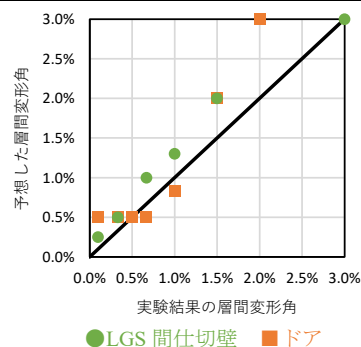


図 - 9 層間変形角推定結果

ト造建物の靱性保証型設計指針・同解説¹¹⁾により求めた。なお、耐震壁は柱・梁よりも早く終局限界に至ることを想定し終局後の低下剛性も解析に考慮した。

3.3 実験結果

実験結果の層せん断力層間変形関係を3.2で説明した解析結果とともに図 - 8 に示す。各サイクルの変形の損傷を表 - 6 にまとめた。柱・梁は設計の想定通り柱脚及び梁端部で曲げ破壊が生じた。耐震壁は、部材の対角線上にせん断ひび割れが発生しせん断破壊した⁶⁾。損傷の詳細は文献⁹⁾を参照されたい。各サイクルにおいて現行基準における表 - 2 のコンクリート面の損傷度評価の方法を用いて、構造部材の損傷度を算出した。その結果を表 - 7 に示す。

タイル仕上げ面の破壊はRC露出面で損傷が集中した部分(曲げ部材の塑性ヒンジ位置とせん断部材の中央部)にはタイル仕上げ面でも対応して大きな損傷がみられ、タイルの剥離や剥落、鉄筋の露出が起きた。詳しくは文

表 - 7 各手法から算出した損傷度と被災度

変形角 [%]	RC 面	タイル面	LGS 間仕切壁	ドア
0.10	 R=0.98 (軽微)	 R=0.98 (軽微)	 R=0.95 (軽微)	 R=0.66 (中破)
0.33	 R=0.95 (軽微)	 R=0.86 (小破)	 R=0.66 (中破)	 R=0.66 (中破)
0.67	 R=0.66 (中破)	 R=0.69 (中破)	 R=0.56 (大破)	 R=0.66 (中破)
1.00	 R=0.56 (大破)	 R=0.53 (大破)	 R=0.50 (大破)	 R=0.59 (大破)
1.50	 R=0.41 (大破)	 R=0.41 (大破)	 R=0.40 (大破)	 R=0.40 (大破)

献りを参照されたい。

LGS 間仕切壁の破壊は、変形角 0.1%の変形が小さい場合にはシーリング材の切れやボードのひび割れが観察された。変形角 1.5%を超えるとボードが面外方向にハラミ出すことが確認された。また、変形角 2.0%から、下地鉄骨の大きなゆがみが観察された。ドアは、変形が進むにつれて開閉力が大きくなり、変形角が 2.0%を超えると一般的な力で開閉することが不可能となった。詳しくは文献^{8,9)}を参照されたい。

4. 提案した推定手法の妥当性検証

4.1 タイルを用いた推定手法の適用

実験結果とタイルの損傷と構造部材の損傷度の関係から、各変形における部材の損傷度を判定した。その結果を表 - 7 に示す。コンクリート面を見て判定した場合と比較して 0.33%~0.67%の間で梁と耐震壁で多少の誤差があるが、それ以外はほとんどコンクリート面で判定した損傷度と一致している。

4.2 LGS 間仕切壁及びドアを用いた推定手法の適用

実験結果における LGS 間仕切壁の損傷と、LGS 間仕切壁と層間変形角の対応関係を用いて、層間変形角を算出した。同様に、実験結果におけるドアの損傷と層間変

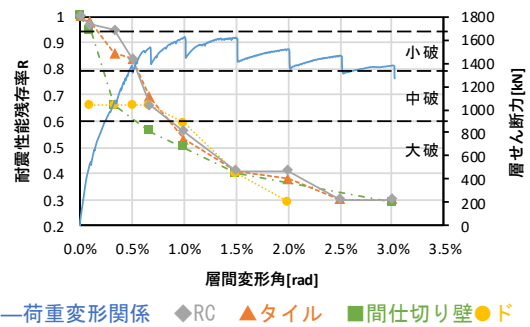


図 - 10 耐震性能残存率 R 算出結果

形角の対応関係から、層間変形角を算出した。算出結果を図 - 9 に示す。LGS 間仕切壁を用いて算出した層間変形角は、実際よりも大きな層間変形角を推定した。ドアを用いて層間変形角を算出する場合層間変形角 0.1~0.67%は開閉力が小さいため安全側として全て層間変形角 0.50%としている。

2.2 に示した方法から、LGS 間仕切壁及びドアの損傷から、RC 部材の損傷度を推定すると表 - 7 のようになる。全体として、コンクリート面を見て評価した結果よりも、損傷を進んだ方向に評価する傾向にある結果となった。その理由としては、非構造部材の損傷から層間変形角を大きめに算出していること、耐震壁 CW2 の損傷

度Vとするタイミングが計算値の方が速いことがあげられる。

4.3 耐震性能残存率

現行基準の耐震性能残存率 R の略算式を用いて、各方法で算出した損傷度に対応する耐震性能残存率 R を算出した。その結果を、図 - 10 に示す。タイルの損傷を用いて算出した場合、推定誤差が-9%~1%と非常に推定精度が高い結果となった。LGS 間仕切壁の損傷を用いて算出した耐震性能残存率 R の推定精度が-33%~-2%、ドアの損傷を用いて算出した耐震性能残存率 R の推定精度が-32%~5%とタイルの推定精度よりも低い結果となった。これは、タイルは部材に直接取り付く非構造部材であるため、それぞれの部材の損傷度をより正確に判定でき、LGS 間仕切壁及びドアは、躯体のスパンに存在し層間変形角から部材の損傷度を推定しているため、予想や想定する部分が多いからである。ただし、実際の建築物の被災度区分判定を行う際、RC 躯体の損傷が仕上げ材で直接観察できないことは多く、本研究で提案する LGS 間仕切壁やドアの観察から RC 部材の損傷度を評価することは、簡単でかつ有効な被災度判定法であり、耐震性能残存率 R を小さめ、すなわち、安全側に評価することが分かった。さらに、解析や計算などを組み合わせ、そこまで高精度でなくても損傷度や被災度を推定できるということは極めて実用的な手法であると考えられる。

5. まとめ

非構造部材が取り付けられた RC 造建物の各部材の損傷度と耐震性能残存率を評価するために、タイル、LGS 間仕切壁及びドアについて、非構造部材の損傷から RC 部材の損傷度を推定する手法を提案した。次に、タイル、LGS 間仕切壁及びドアを取り付けた実大 RC 造架構の静的載荷実験を行い、各層間変形におけるコンクリート面とタイル仕上げ面、及び LGS 間仕切壁とドアの損傷を観察し整理した。最後に、実験結果に提案した RC 部材の損傷度の推定手法を適用し、それぞれの損傷から算出した損傷度と耐震性能残存率 R を比較した。タイルは、直接 RC 部材に張り付ける仕上げ材であるため、RC 部材の損傷度を最もよく推定することができた。対して、LGS 間仕切り壁及びドアによる推定は、解析や計算に基づいて間接的に行う分、タイルより推定精度は下がるが、簡易的に損傷度を推定できる分十分実用的な指定結果となった。

謝辞

本研究における実験には、科学技術振興機構・産学共

創プラットフォーム共同研究推進プログラム (JPMJOP1723)「大規模都市建築における日常から災害時まで安心して社会活動が継続できる技術の創出」(領域統括：吉敷祥一・東京工業大学准教授)の支援を受けました。特に(株)長谷工コーポレーションの平田延明氏、東京工業大学の吉敷祥一氏、西村康志郎氏、巽信彦氏、東京大学の八木尚太郎氏に多大なるご協力をいただきました。その他、関連する研究にご尽力いただきました皆様に感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会:震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針. 2016.
- 2) 高橋典之他:鉄筋コンクリート部材のひび割れ量進展過程に関する実験的研究 その5 表面仕上げによるひび割れ量への影響. 日本建築学会大会学術講演梗概集. 2009, p. 171-172.
- 3) 清家剛他:鉄骨骨組みに取り付けられた乾式間仕切壁の繰り返し載荷実験 その1~その4. 日本建築学会大会学術梗概集. 2019.
- 4) 隈澤文俊他:地震によるRC造建築物の損傷状況・機能維持に着目した実大試験体実験 その9間仕切り壁および扉の挙動. 日本建築学会大会学術講演梗概集. 2011, p. 87-88.
- 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指針(案)・同解説. 2004.
- 6) Alex Shegay他:非構造部材を有する実大 RC 造架構の静的載荷実験 その1 実験の概要と構造部材の挙動. 日本地震工学会大会. 2020, A-1-1, p. 1-10.
- 7) 田附遼太他:非構造部材を有する実大 RC 造架構の静的載荷実験 その2 タイル仕上げの損傷. 日本地震工学会大会. 2020, A-1-2, p. 1-6.
- 8) 八木尚太郎他:非構造部材を有する実大 RC 造架構の静的載荷実験 その3 LGS 壁と鋼製ドアの損傷. 日本地震工学会大会. 2020, A-1-3, p. 1-9.
- 9) 巽信彦他:非構造部材を有する実大 RC 造架構の静的載荷実験 その4 LGS 壁と鋼製ドアの挙動. 日本地震工学会大会. 2020, A-1-4, p. 1-9.
- 10) 三浦耕太他:連層耐震壁を有する RC 造 4 層建物縮小試験体の振動台実験による 架構の破壊形式と安全限界の評価. 日本建築学会構造系論文集, 2021.2, 第86巻,第780号,pp.247-257
- 11) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説. 1999.