

北関東を中心とした壁土を用いた真壁の耐震性能と補修効果の検証

関東職業能力開発大学校 山之内 隆志*
 小山工業高等専門学校 横内 基
 関東職業能力開発大学校 財津 拓三
 関東職業能力開発大学校 鶴田 暁

Structural Performance of Mud-wall and Experimental Verification on Effect of Repairing Mud-wall Which Underwent Large Deformation in the Northern Kanto Area.

Takashi YAMANOUCHI, Hajime YOKOUCHI, Takumi ZAITSU, Akira TSURUTA

要約 関東北部を中心とした壁土を用いた真壁の土塗壁の耐震性能に関する検証例に関する報告は希少である。また、地震等により損傷を受けた土塗壁の補修方法並びにその耐震性能に関する報告は更に希少である。そこで本報では地元の大工・左官職人と協力して土塗壁の製作を行い、面内せん断試験を実施した。さらに面内せん断試験で損傷した壁に補修を施し、面内せん断試験を再度実施した。その結果、告示で規定される壁倍率に対して同等以上の耐力を有していた。また、補修した壁も同程度まで回復した。今後損傷を受けた壁の補修方法の一例として活用することが期待される。

I はじめに

栃木県栃木市や茨城県桜川市真壁など北関東にある町並みには、多くの土塗壁を用いた歴史的建造物が現存している。2011年3月11日に起きた東北地方太平洋沖地震では、現存する歴史的建造物に甚大な被害をもたらした。土塗壁においても多くの損傷が確認され、その構造性能を解明することの必要性が指摘されている。しかし、北関東の歴史的町並みにおける土塗壁を主とする建造物の耐震性については、研究事例が希少でデータが乏しいのが現状であり、本報では、住宅の耐震要素の中でも木造民家用真壁の土塗壁の面内せん断強度を実験的に検証した。また、損傷を受けた土塗壁の補修法については明確なものが存在せず、さらには補修した土塗壁の構造性能についても損傷前との実験的な比較検証が必要である。そこで本報ではさらに損傷を受けた木造民家用真壁土塗壁の補修法とその補修効果について検証した。

II 民家用真壁の構造性能評価

1 民家用真壁の仕様

構造性能を明らかにする上で、栃木市に多く用いられている民家用真壁の仕様を調査した。告示との比較を表1に示す。調査を基に新規に作成した木造民家用真壁土塗壁の形状を図1～4及び表2に示す。壁土は、栃木市内で採取した荒木田土を使用した。

表1 告示と栃木仕様の比較

部材	項目	告示 (建設省告示第1100号3)	栃木市の仕様 (民家用真壁)
貫	寸法	厚さ 1.5cm 以上、 幅 10.5cm 以上	厚さ 1.5cm、幅 10.5cm
	間隔	91cm 以下で 3 本 以上	91cm (3 尺)、3 本
間渡し竹	寸法 及び 形状	幅 2cm 以上の割 竹	幅 3cm 程度、 肉厚 3～4mm 程度
		小径 1.2cm 以上の 丸竹	
小舞竹	寸法	幅 2cm 以上の割 竹	幅 3cm 程度、 肉厚 3～4mm 程度
	間隔	4.5cm 以下 (3 尺 に 22 本)	
土	塗厚	7.0cm 以上 (壁倍 率 1.5 の場合)	6～7cm 程度
		5.5cm 以上 (壁倍 率 1.0 の場合)	

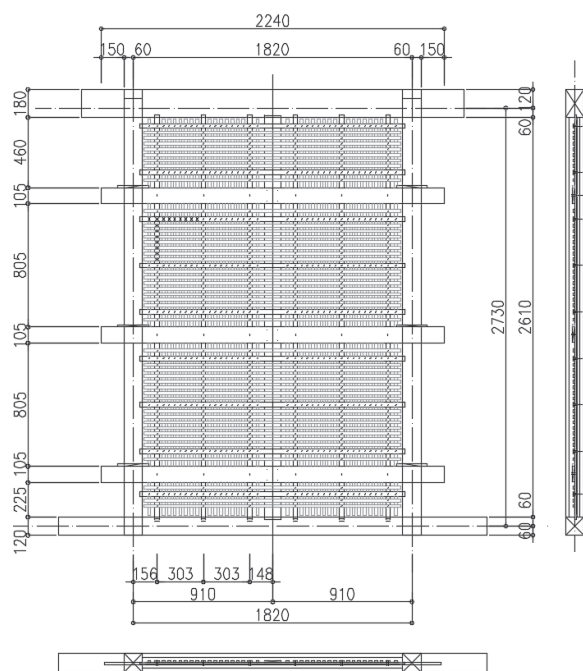


図1 民家用真壁試験体概略図

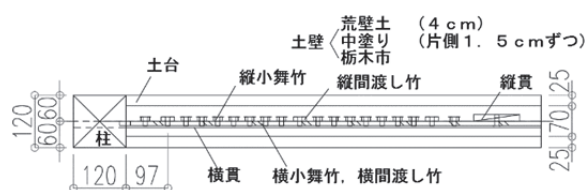


図2 民家用真壁試験体断面図(平面)

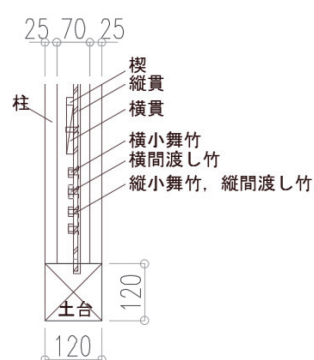


図3 民家用真壁試験体断面図(立面)



図4 民家用真壁試験体小舞揺き

表2 民家用真壁試験体使用材料

木材の断面寸法 (mm)	柱・土台	120×120 (杉)
	梁	120×180 (杉)
	貫	15×105 (杉)
小舞下地 (mm)	間渡し竹	幅20～30(割竹) (真竹)
	小舞竹	幅15～25(割竹) (真竹)
壁土	OR	栃木県栃木市産
	RE	埼玉県深谷産

2 試験方法

試験体の設置方法を図5に示す。試験方法は、無載荷式⁽¹⁾で行った。試験体は3体（以下 OR 試験体と称す）製作し、壁の静的加力試験の試験方法は、加力は正負交番繰り返し加力とし、見かけのせん断変形角が $1/600$ rad から $1/50$ rad となるよう、3 サイクルの繰り返し試験を行い、最後は、 $1/10$ rad を目途に、引き切りとした。加力スケジュールを図6に示す。各変形段階の一回目の正負で、ひび割れ等の形状を確認及び記録した。

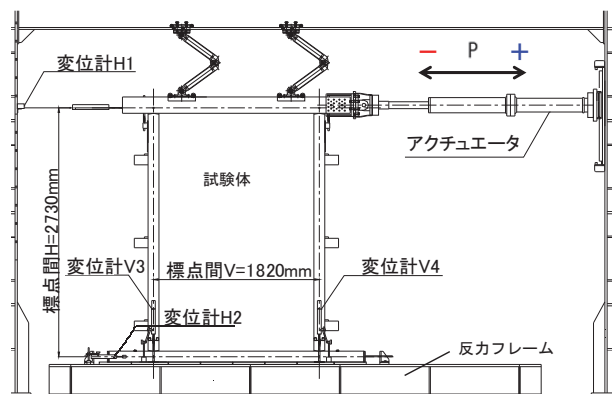


図5 試験装置図

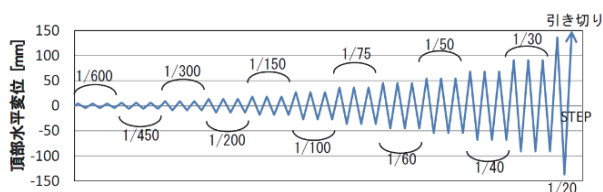


図6 加力スケジュール

3 試験結果

OR-1 試験体の荷重と変位の関係を図 7 に示す。また、試験体の諸性能及び壁倍率を表 3 に示す。最大荷重の平均値は 19.66kN となった。壁倍率について、平均 3.03 となっており、告示の壁倍率より大きな壁倍率を得ていることがわかる。このことから栃木県近郊で多く使用されている民家用真壁は告示の壁倍率に対して十分な耐力を有していることがわかる。

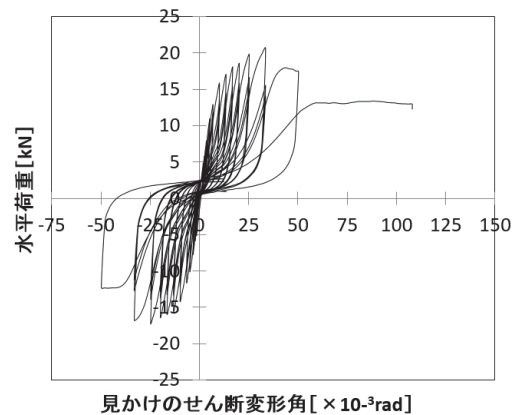


図7 OR 試験体の荷重履歴

表 3 民家用真壁及び補修壁の壁倍率及び諸性能

試験体 名称	P_{max} [kN]	$\delta-P_{max}$ [$\times 10^{-3}$ rad]	K [kN/ 10^{-3} rad]	δy [$\times 10^{-3}$ rad]	δv [$\times 10^{-3}$ rad]	δu [$\times 10^{-3}$ rad]	P_y [kN]	$2/3P_{max}$ [kN]	$0.2P_u/D_s$ [kN]	P_{120} [kN]	壁倍率
OR-1	20.68	33.52	1.62	8.40	11.31	50.41	13.63	13.79	10.33	13.53	2.9
OR-2	19.20	25.18	1.99	5.62	8.40	50.38	11.18	12.80	11.09	13.92	3.1
OR-3	19.10	33.47	2.03	5.90	8.12	50.14	11.96	12.73	11.09	13.85	3.1
RE-1	20.31	25.03	1.55	8.39	11.79	33.52	13.01	13.54	7.91	12.92	2.2
RE-2	16.87	16.67	2.12	4.56	6.54	50.04	9.66	11.25	10.49	13.70	2.7
RE-3	20.45	33.38	1.56	8.05	12.24	33.38	12.56	13.63	8.06	12.98	2.3

(※1)表中の記号を示す

P_{max} : 最大耐力 $\delta-P_{max}$: 最大耐力時の変形

K: 初期剛性 δy : 降伏変形 δv : 完全弾塑性モデルの降伏点変形 δu : 終局変形 P_y : 降伏耐力

P_u : 終局耐力 D_s : 構造特性係数 P_{120} : 見かけのせん断変形角が $1/120$ rad時の荷重

(※2)壁倍率は下式より算出した。なお、ばらつきを考慮していない。

壁倍率 $= P_a \times (1/1.96) \times (1/L) \times \alpha$

P_a : 短期許容せん断耐力[kN](網掛け部分は採用した値)

1.96: 壁倍率1倍のせん断耐力[kN/m]

L: 壁長さ(全試験体=1.82m) α : 低減係数($\alpha=1$)

III 試験体の補修方法

補修効果を検証するために加力試験後の OR 試験体に補修を施し、補修した試験体(以下 RE 試験体と称す)を 3 体製作した。補修過程を以下に述べる。実施後の試験体は、壁の静的加力試験により $1/10$ rad 以上の変形を受けているため土塗壁の補修を実施した。土塗壁の補修は、地元で伝統的建造物の修復に携わっている左官職人の判断・指導に基づき、図 8 に示す手順で行った。まず現況を確認し損傷部分を研った(図 9,10)ところ、小舞下地にしっかり定着しているように見える荒壁土も損傷していることが判明した。これにより、既存のままでは小舞竹や中塗土との十分な定着が期待できないとの判断に至り、 $1/10$ rad 以上の大変形を経験した土塗壁の補修は、既存の壁土を全て除去する必要があることがわかった。そのため、小舞下地が完全に露出する状態まで壁土を全て研り取ることにした。次に小舞下地の状況を確認すると①竹同土を結束する藁縄の一部に緩みや断線、②間渡し竹のめり込みによる間渡し穴の拡大(図 11)、③間渡し竹端部の折損(図 12)、④横小舞竹

が楔と接触したことによる面外への座屈などが確認できた。小舞下地の補修方法は麻縄を用いて藁縄の緩みや断線部分の搔き直しと楔の打ち直し、および座屈した小舞竹の所定の位置に戻したうえで麻縄により固定する復旧作業を行った。なお、折損した間渡し竹や拡大した間渡し穴については、部分的な交換が困難なため、既存のまま存置することとした。各試験体の小舞下地の損傷状況を図 13~15 に示す。その後は、OR 試験体と同じ工程で壁土を塗り直した(図 16,17)。ただし、OR 試験体は、栃木市内の田園から採取した荒木田土を使用した。が、栃木市周辺で荒木田土が量販されておらず、実施工ではコストや流通性に優れた埼玉県深谷産が用いられることが多い。そこで、今後のより実用的なデータの取得を考え、補修には深谷産の荒木田土を用いることとした。本報で使用了壁土の圧縮試験結果を表 4 に示す。使用した壁土はすべての圧縮強度が基準強度⁽²⁾を上回るものとなった。補修した試験体(以下 RE 試験体と称す)は 3 体製作した。

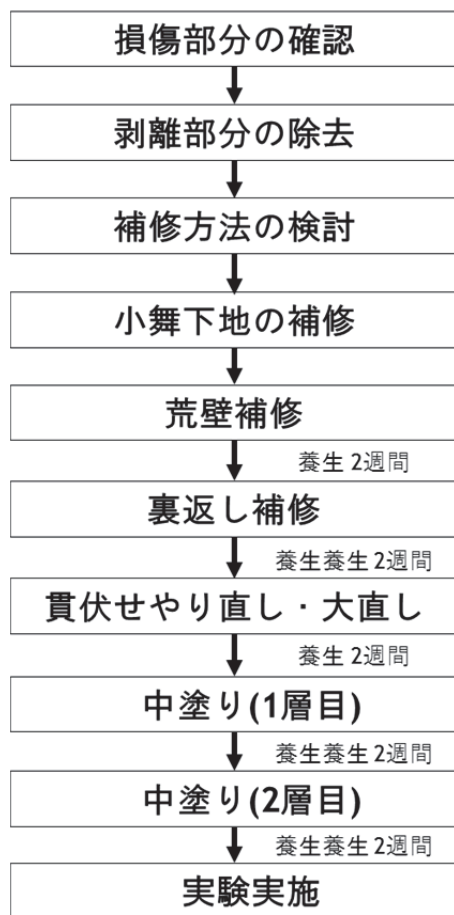


図8 補修工程

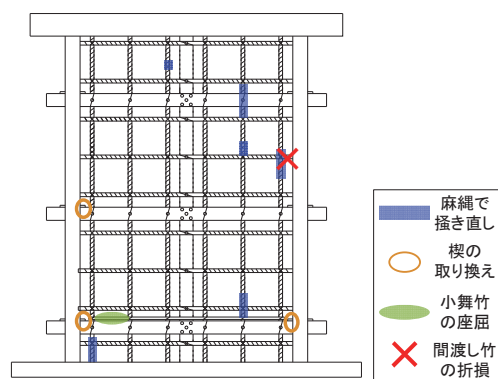


図13 OR-1 試験体損傷・補修箇所

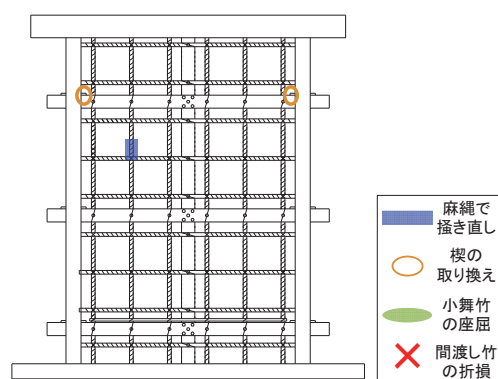


図14 OR-2 試験体損傷・補修箇所

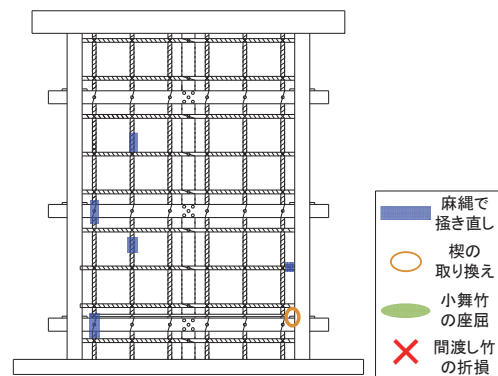


図15 OR-3 試験体損傷・補修箇所



図9 剥離部分の除去



図10 補修方法の検討

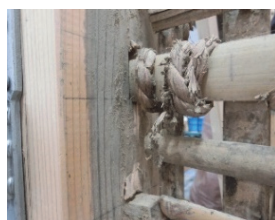


図11 拡大した間渡し穴



図12 折損した間渡し竹



図16 荒壁補修



図17 中塗り(2層目)

表 4 使用した壁土圧縮強度一覧表

供試体		塗厚	試験体数	圧縮強度[N/mm ²]			
		[mm]	[体]	最少	最大	平均	基準値
栃木県産荒木田 (OR)	荒	70	6	0.349	0.436	0.392	0.30以上
	中	70	6	0.330	0.514	0.402	0.55以上
	荒+中	荒40+中30	6	0.459	0.527	0.494	0.40以上
深谷産荒木田 (RE)	荒	70	6	0.420	0.639	0.485	0.30以上
	中	70	6	0.558	0.717	0.632	0.55以上
	荒+中	荒40+中30	6	0.606	0.735	0.635	0.40以上

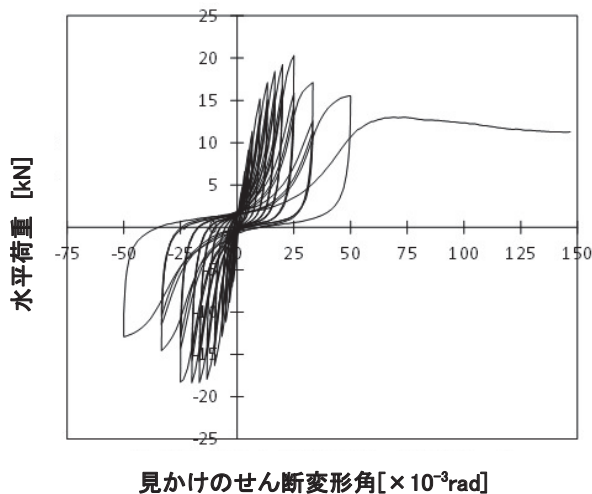


図18 RE 試験体履歴曲線

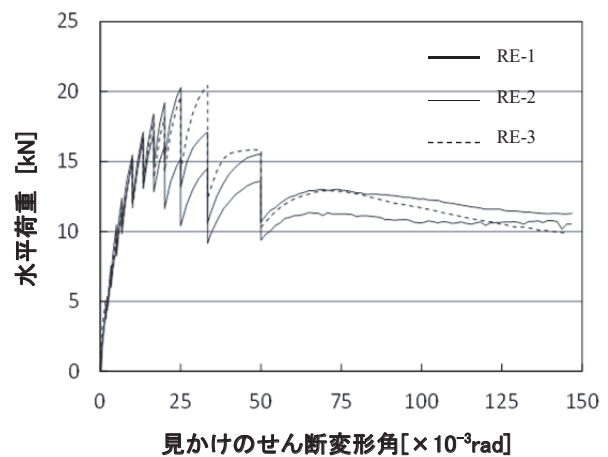


図19 試験体3体の骨格曲線(正加力側)

IV 民家用真壁の補修壁の構造性能評価

1 壁せん断試験結果

RE 試験体の履歴曲線を図 18 に、RE 試験体 3 体の骨格曲線（正加力側）を図 19 に示す。実験結果及び壁倍率の一覧を前述した表 3 に示す。まず RE 試験体の 3 体にのみ着目すると、初期剛性や 1/60rad 程度までの履歴性状は良く一致している。最大耐力は、RE-1,3 でそれぞれ変形角 1/40rad 時に 20.3kN、1/30rad 時に 20.5kN となり、大きさや変形レベルが概ね同等だったのに対して、RE-2 は 1/60rad 時に 16.9kN となり、他の 2 体と差異が生じた。RE-2 は、特に他の 2 体に比べて損傷の発生や進行が早く、損傷程度が大きかった。本報では、その原因までを明らかにすることはできないが、存置させた下地材の状況が起因していると推察され、それが耐力にも大きく影響していると考えられる。RE 試験体と OR 試験体の初期剛性や最大耐力について、それぞれ 3 体の平均値で比較すると、RE 試験体の初期剛性は OR 試験体の 93%であり、最大耐力は 98%であった。したがって、先に述べた補修により、

初期剛性や最大耐力がほぼ健全の状態と同程度まで回復することがわかった。また、壁倍率は、RE 試験体は 2.2～2.7 倍となり、OR 試験体の約 8 割程度まで回復している。RE 試験体は最大耐力以降の耐力低下が OR 試験体より大きい傾向があり、壁倍率を評価する際の終局変形 δu が小さくなることが要因と考える。

2 破壊形状

主要な変形レベルにおける損傷状況の比較を図 20 に示す。RE 試験体 3 体の主要な破壊経過は、隅角部のひび割れ→隅角部の圧壊、および貫に沿うひび割れ→せん断ひび割れ→損傷の進展→壁土の剥落の順で一致し、OR 試験体と同様の傾向を示した。しかし、その損傷の程度にばらつきが見られた。例えば、1/100rad までは OR 試験体と同様に、隅角部のひび割れや剥離などの損傷が確認されたが、その範囲や程度は RE 試験体の方が小さい傾向であった。また、RE-2 試験体および RE-1 試験体では、OR 試験体に比べて損傷の発生や進行が早く、損傷の程度が大きかった。それに対して RE-3 試験体については、破壊現象および発生時期は OR 試験体と概ね同様の傾向を示していた。1/20rad 以降の大変形レベルでの破壊状況は、OR 試験

体では縦貫側において大きなせん断ひび割れが生じたのに対して、RE 試験体ではそのような破壊は見られず、縦貫に沿ったひび割れが上下の横架材間で繋がりが、縦貫側の壁板を短冊状に2分割するような破壊が見られた。

V おわりに

本実験に供した試験体は、告示の壁倍率に対して十分な耐力を有していた。なお、損傷を受けた土塗壁も、検討された補修法の場合、初期剛性、最大耐力は健全な状態とほぼ同程度まで回復することが明らかになった。また、図 20 に示すひび割れ図は OR 試験体及び RE 試験体すべてにおいて変形角ごとに記録してあるため今後損傷を受けた土塗壁の補修方法を検討する指標として活用することが期待できる。さらに、今回得られた試験データは今後の補修並びに伝統的建造物の保存に有用な資料となり得る。

なお、本研究は、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業「伝統的建造物群保存地区における総合防災事業の開発⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾」の一環として実施したものであり、一部は大学コンソーシアムとちぎ“大学を超えた共同研究支援事業”「土塗壁の補修・補強効果の検証実験」の助成を受けた。

[参考文献]

- (1) 財団法人日本住宅・木材技術センター,木造軸組工法住宅の許容応力度設計 2008.12
- (2) 財団法人日本住宅・木材技術センター,土塗壁・面格子壁・落とし込み板壁の壁倍率にかかわる技術解説書 2004.2
- (3) 横内,大橋ほか:歴史的町並みの地震防災対策に関する研究その1, 2013年度日本建築学会大会学術講演梗概集, No.22231, p.461-p.462
- (4) 横内,大橋ほか:歴史的町並みの地震防災対策に関する研究その2, 2013年度日本建築学会大会学術講演梗概集, No.22232, p.463-p.464
- (5) 横内,大橋ほか:歴史的町並みの地震防災対策に関する研究その3, 2013年度日本建築学会大会学術講演梗概集, No.22233, p.465-p.466

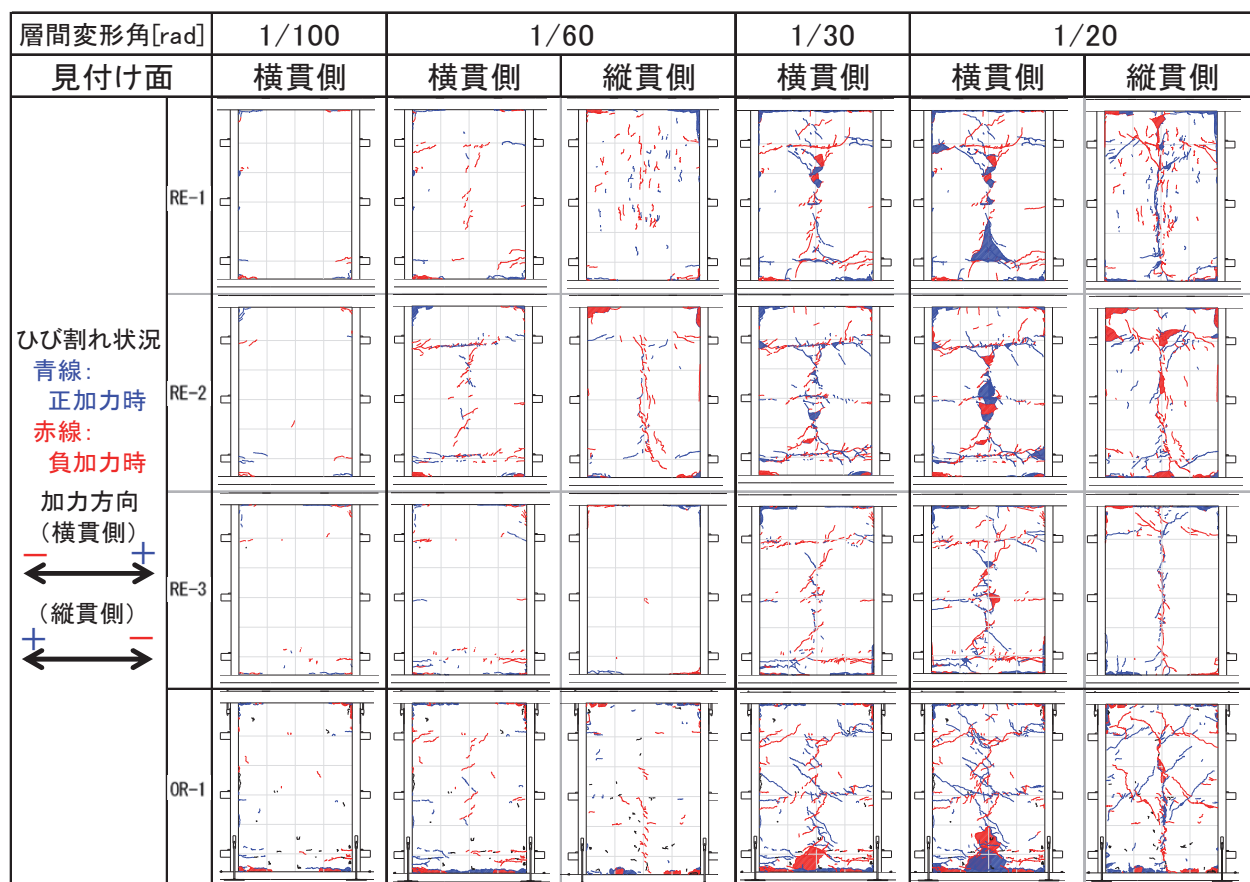


図20 変形レベルにおける損傷状況