木造建築物における仕上材の損傷状況と地震時経験最大層間変形角の推定に関する研究

STUDY ON ESTIMATION METHOD OF DAMAGED SITUATION OF FINISHING MATERIAL OF WOODEN BUILDINGS AND MAX STORY DRIFT ANGLES

大木洋一郎 — * 1 三津橋 歩 — * 2
梶川久光 — * 3

Yoichiro OKI — * 1 Ayumu MITSUHASHI — * 2
Hisamitsu KAJIKAWA — * 3

キーワード：

木質構造, 内外装材, 損傷状況, データベース, 被災度評価, ひび割れ, 経験最大層間変形角

Keywords:

Wood structure, Interior and exterior finishing material, Damaged condition, Database, Damage evaluation, Crack, Max story drift angles

This report proposed a method to estimate the degree of earthquake damage of wooden buildings. We conducted a static loading experiment to understand the relation between the damage situation and the displacement of the finishing material. Focusing on the cracks generated around the opening, a figure and equation showing the relationship between cracks and maximum displacement was prepared.

1. 背景

地震による被災建築物、特に一般の木造住宅等においては、所有者にとって建築物の復旧の要否やその内容に応じた費用について早急に把握したいものである。震災後の木造建築物の被災度の判定や復旧についての技術指針として「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【木造建築物】（以下、被災度区分判定基準）」¹⁾があり、被災度区分判定は主として構造躯体に関する損傷状況を建築構造技術者が調査することにより実施される。木造建築物における仕上材の損傷状況から経験最大層間変形角を推定することは、構造体の被災度や耐震性能残存率を判定している為、重要な項目となっている。

実験による仕上材の損傷状況に関する研究として、鶴田ら²⁾は、静的及び動的加力実験による仕上材の損傷状況と経験最大層間変形角の関係について検証し、被災度区分判定基準の改定に反映されたと考えられる。また、高梨ら³⁾は、二次災害防止の観点で仕上材の損傷状況と残余耐力の関係について報告している他、前川ら⁴⁾は外装材の損傷状況について、当研究グループは、鶴田らの研究における課題であった建築物の仕上げ損傷から構造体の損傷の度合いを予測する指標について検証を行ってきた^{5), 6)}。

一方、実地震における被害調査報告書^{7), 8)}では、内外装材の損傷状況の記録が大半を占め、実験と同様に壁面開口部周辺に生じる仕上材の損傷状況についての記録も多く示されている。

しかしながら、多岐にわたる仕上材に対して実験データが少なく、また、実験による加力除荷時の損傷状況の記録も少ないため、経験最大層間変形角と仕上材の損傷状況との関係についてもデータが少ない。そのため、被災度区分判定基準に示される経験最大層間変形角の推定においても数値的な指標がなく、被災度判定結果が建築構

造技術者に委ねられる部分が多い。

2. 目的

本研究では、木造建築物における被災度区分判定の精度を向上するため、仕上材を施した壁面の実験を実施し、仕上材に生じるひび割れと経験最大層間変形角との関係を実験的に明らかにするとともに、開口部に生じたひび割れ幅及び長さから定量的に木造建築物の経験最大層間変形角を推定する一手法を提案することを目的とする。

3. 仕上げ損傷確認実験

経験最大層間変形角と仕上材の損傷状況の関係を把握することを目的とし、近年普及している仕上材として、サイディング仕上げ、せっこうボードクロス仕上げを選定し、仕上げを施した壁面の静的水平加力実験を行った。

3.1 試験体概要

試験体は、木造軸組工法による躯体に外壁(Z0)及び内壁(ZI)を想定して内外装材を施した仕様とし、使用部材を表1に、構造躯体及び仕上げの状況を表2に示す。試験体の形状は高さ2730mm、壁長4P(1P=910mm)の壁面で、それぞれ無開口(N)、2P掃出し開口(H)、2P窓型開口(M)の開口形式とし、各仕様1体ずつ合計6体とした。

外壁タイプは表面に外装材、裏面に内装材を施し、内壁タイプは表裏ともに内装材を施した試験体とした。外装材は、2008年のJIS A 5422 改正後の仕様である14mm厚の窯業系サイディングの横張りとし、縦胴縁(15mm厚、455mm間隔)の上へ直接専用の釘(径2.5mm、長さ43mm)を胴縁に対して3本ずつ留めた。

内装材は、せっこうボード12.5mm厚を軸組にビス(径3.8mm、長さ28mm)を外周100mm、その他200mm間隔で直接留め、目地及びビ

本稿の一部は、既に文献5), 6)で報告されている。

¹⁾ ㈱ミサワホーム総合研究所 修士(工学)
(〒168-0071 東京都杉並区高井戸西1-1-19)

²⁾ ㈱ミサワホーム総合研究所 博士(工学)

³⁾ 明治大学理工学部建築学科 准教授・博士(工学)

¹⁾ Misawa Homes Institute of Research and Development Co., Ltd., M. Eng.

²⁾ Misawa Homes Institute of Research and Development Co., Ltd., Dr. Eng.

³⁾ Assoc. Prof., Dept. of Architecture, School of Science Technology, Meiji Univ., Dr. Eng.

ス部にパテ塗りした上に塩化ビニルクロスで仕上げた。せっこうボードの割付けは、表面は開口隅角部とせっこうボードの継ぎ目が一致する割付け（以下、割付A）とし、裏面は近年普及している開口隅角部とせっこうボードの継ぎ目が一致しないように開口隅角部からせっこうボードの継ぎ目を455mmずらした割付け（以下、割付B）とした。

3.2 加力及び計測方法

加力方法は、柱脚固定式による面内せん断実験とし、加力桁端部（表面右端部）に接続した油圧ジャッキにより静的加力を行った。加力スケジュールは、見かけのせん断変形角による変位制御とし、1/600、1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50、1/30、1/15rad.（以下、特定変形角）の正負交替で3回繰り返した。ただし、1/15rad.時のみ正負1回ずつの加力とした。

水平荷重は加力桁と油圧ジャッキの間に取り付けたロードセルで計測（表面右方向加力時が正）し、加力桁及び土台の水平変位並びに柱の鉛直変位を変位計により計測した。

3.3 観察記録方法

仕上材の損傷記録時期は、地震後の状態を想定して、図1に示すように、特定変形角における3回目の正負それぞれの繰り返し加力時の特定変形角時、特定変形角時から除荷を行い荷重が0となった時点（以下、荷重0時）及び更に除荷を行い水平変位が0となった時点（以下、変位0時）とした。

観察記録の方法は、観察者による目視及びクラックスケールを用い、ひび割れの幅及び長さは図2に示すように記録を行った。

3.4 実験結果

各試験体の荷重変形関係を表2に示す。また、本実験において着目した開口隅角部に生じたひび割れについて、各加力段階における変形角とひび割れ幅及び長さの関係を表3から表5に示す。

サイディング仕上げ面で観察された主な損傷状況は、開口上部隅角部からのひび割れ、釘留め部のひび割れ、平部におけるサイディング相互の水平方向のずれ、目地部の開き、釘の釘頭のずれ、浮き、抜け及び切断並びに筋かいの座屈によるサイディングの面外への膨らみ及び脱落であった。開口隅角部のひび割れは、1/100rad.以降で生じ、1/75rad.で割れが上下に通じ、以降、特定変形角から除荷を行った時点でのひび割れ（以下、残留ひび割れ）幅が大きくなった。なお、開口隅角部近傍に目地がある場合には、ひび割れは生じなかった。平部においては、1/50rad.でサイディング端部釘部の割れ、1/30rad.で釘の抜け、1/15rad.で筋かいの座屈による脱落が生じた。

せっこうボードクロス仕上げ面で観察された主な損傷状況は、クロスのよれ、膨れ及び切れ、せっこうボードのひび割れ、つぶれ、面外への浮き及び剥がれ、せっこうボード相互のずれ並びにビスの浮き、パンチングアウト、切れ及び引き抜けであった。開口隅角部

図1 観察時期

図2 ひび割れ幅及び長さ

表1 構造部材概要

部材	仕様
加力桁	105×180mm、べいまつ
土台	105×105mm、べいつが
柱	105×105mm、すぎ、両端短ぼぞ差し加工
間柱、窓まぐさ、窓台	45×105mm、すぎ
筋かい	45×90mm、すぎ
引き寄せ金物	性能認定金物 (SB2-10A01-02)
かど金物・山形プレート	品質性能試験報告書 受付第 08A2927 号
筋かいプレート	品質性能試験報告書 受付第 06A2332 号/第 06A2333 号

表2 試験体一覧及び荷重変形関係

	外壁タイプ（筋かいあり）			内壁タイプ（筋かいなし）		
	[表面:サイディング張り、裏面:せっこうボードクロス張り(割付B)]			[表面:せっこうボードクロス張り(割付A)、裏面:せっこうボードクロス張り(割付B)]		
	ZO-H（掃出開口）	ZO-M（窓型開口）	ZO-N（無開口）	ZI-H（掃出開口）	ZI-M（窓型開口）	ZI-N（無開口）
構造躯体						
仕上げ表面						
仕上げ裏面						
荷重変形関係						

表 3 特定変形角、荷重 0 時及び変位 0 時における開口隅角部ひび割れ幅及び長さ

損傷	仕上面	外壁タイプ（筋かいあり）			内壁タイプ（筋かいなし）		
		Z0-H（掃出開口）	Z0-M（窓型開口）		ZI-H（掃出開口）	ZI-M（窓型開口）	
		開口上部	開口上部	開口下部	開口上部	開口上部	開口下部
ひび割れ幅	表面			ひび割れなし			
	裏面						
ひび割れ長さ	表面			ひび割れなし			
	裏面						

※経験層間変形角(rad.)の正負は、開口隅角部に生じるひび割れが開く側の加力を正、ひび割れが閉じる側の加力を負として表現。
 凡例…◆●●：開口左隅角部 ◇○□：開口右隅角部 ◆◇：変位時 ■□：荷重 0 時 ●○：変位 0 時

表 4 開口隅角部におけるサイディング（横張り）仕上の損傷状況

	特定変形角加力後の変位 0 時における損傷状況			
	1/100rad.	1/75rad.	1/50rad.	1/15rad.
サイディング（横張り・釘留め）				
	ひび割れ発生（ひび割れ幅 0.1mm 以下） 近寄らないと見えにくい	目地までひび割れ通る（ひび割れ幅 1mm 程度） 肉眼でははっきりとわかる	目地までひび割れ通る（ひび割れ幅 2mm 程度） 比較的大きなひび割れ	目地までひび割れ通る（ひび割れ幅 2mm 超）

表 5 開口隅角部におけるせっこうボードクロス仕上の損傷状況

	特定変形角加力後の変位 0 時における損傷状況			
	1/300rad.	1/150rad.	1/50rad.	1/15rad.
割付 A				
割付 B				

のひび割れについては、ひび割れ幅は開く側の加力と閉じる側の加力で変形時及び荷重0時に差があるが変位0時は大差なく、また、内外壁、開口形状及び割付方法の違いにおいても同様の傾向が得られた。ひび割れ長さは加力方向に関わらず同様で、また、変位時、荷重0時及び変位0時でほぼ同じであった。内外壁及び開口形状の違いにおいては同様の傾向であったが、割付Bに対して割付Aの方が上下に通るのが早く生じた。平部においては、1/450～300rad.でクロスの切れが生じ、1/300～1/100rad.で切れが上下に通じ、割付Aに対して割付Bの方が早く割れが通った。また、1/150rad.でビスの浮き、1/50rad.でせっこうボードの面外への浮き、1/30rad.でビスの抜け及びパンチングアウトが生じた。

4. 仕上材のひび割れに着目した経験最大層間変形角の推定方法

仕上り損傷確認実験で確認した損傷状況から建築物の経験最大層間変形角の推定方法を検討する。

実験における試験体の状態と建築物の対応関係は、経験最大層間変形角を実験時の特定変形角、地震後の建築物の状態を実験時の変位0時と想定した。地震後の建築物の状態は、実験時の荷重0時と変位0時の間と想定されるが、構造体が塑性域に入ると荷重0時と変位0時に変位差が生じ、その間は非常に小さな荷重で変位する領域となる。そのため、実地震においては、余震も含めた小さな揺れの繰り返しにより、概ね変位0時に近い状態に戻ると推測した。ただし、地震後の建築物と実験時の状態の関係については検討が必要であり、次報以降に荷重0時の分析等を行う。

実験における特定変形角時と除荷後変位0時の損傷状況、特に開口隅角部のひび割れ幅及び長さに着目して、地震後の建築物の経験最大層間変形角の推定方法を示す。

4.1 サイディング（横張り）仕上げ面

サイディング（横張り）仕上げにおける開口上部隅角部のひび割れ幅及び長さや経験最大層間変形角の関係を図3及び図4に示す。1/100rad.以降ひび割れが生じ、1/75rad.を超えると割れが通ることにより、ひび割れが閉じ難くなり、残留ひび割れが大きくなる。また、サイディング端部の割れで1/50rad.、釘の抜けで1/30rad.、サイディングの脱落で1/15rad.が経験最大層間変形角の推定指標となる。ただし、データ数が少ないため、データの蓄積と推定式等の提案が課題である。また、適用範囲は釘留め仕様であり、金物留め仕様には適用できないことに注意が必要である。

4.2 セッコウボードクロス仕上げ面

せっこうボードクロス仕上げは、開口形状、せっこうボードの割付けがパラメータとなるひび割れ幅と経験最大層間変形角の関係において、明確な差が確認されなかったことから開口上下隅角部として整理した。

掃出開口上部隅角部及び窓型開口上下隅角部から生じるひび割れに対して、経験最大層間変形角とひび割れ幅及び長さとの関係を図5から図8に示す。ひび割れ幅及び長さ各々について、経験最大層間変形角毎に平均値（Ave）及び標準偏差（ σ ）を算出し、その平均値及び平均値 $\pm\sigma$ 各々に対する近似直線を経験最大層間変形角を推定する指標として図中に示す。また、平均値の近似直線を用いた経験最大層間変形角の推定式を式(1)から式(4)に示す。建築物の掃出開口及び窓型開口部のひび割れに対して、平均値の直線との交点がその壁面の経験した変形角と推定でき、平均値 $\pm\sigma$ をばらつきの範囲として示す。ただし、変形とともにせっこうボードのひび割れが大きくなると地震時の繰り返しの変形でひび割れ部分が圧壊し、ひび割れの測定が困難となるため、適用範囲は1/50rad.程度とし、ひ

図3 残留ひび割れ幅と経験最大層間変形角（サイディング仕上げ、開口上部）

図5 残留ひび割れ幅と経験最大層間変形角（せっこうボードクロス仕上げ、開口上部）

図7 残留ひび割れ幅と経験最大層間変形角（せっこうボードクロス仕上げ、開口下部）

図4 残留ひび割れ長さと経験最大層間変形角（サイディング仕上げ、開口上部）

図6 残留ひび割れ長さと経験最大層間変形角（せっこうボードクロス仕上げ、開口上部）

図8 残留ひび割れ長さと経験最大層間変形角（せっこうボードクロス仕上げ、開口下部）

び割れ部分の圧壊が大きい場合は 1/50rad. を超えていると判断する。開口隅角部のひび割れその他、平部におけるクロスの切れが上下に通ると 1/300～1/100rad.、顕著なビスの浮きで 1/150rad.、ビスの抜け又はパンチングアウトで 1/30rad. が経験最大層間変形角の推定指標となる。

$$\gamma_e = (Bu + 0.26) / 110 \quad \dots\dots (1)$$

$$\gamma_e = (Bd + 0.66) / 180 \quad \dots\dots (2)$$

$$\gamma_e = (Lu + 45.6) / 25200 \quad \dots\dots (3)$$

$$\gamma_e = (Ld + 165.5) / 55100 \quad \dots\dots (4)$$

ここで、 γ_e ：経験最大層間変形角(rad.)

Bu：開口上部隅角部に生じたひび割れ幅(mm)

Bd：開口下部隅角部に生じたひび割れ幅(mm)

Lu：開口上部隅角部に生じたひび割れ長さ(mm)

Ld：開口下部隅角部に生じたひび割れ長さ(mm)

5. 被災建築物における経験最大層間変形角の推定及び検証

前章で示した経験最大層間変形角の推定方法について、実際の被災建築物の損傷調査を行い、推定式を用いた経験最大層間変形角の調査が実際の被災建築物で可能であるか検討を行った。

5.1 熊本地震による被災建築物の損傷調査

2016 年 4 月 14、16 日に発生した熊本地震発生後に地震被害調査を行った。そのうち、ひび割れ幅の測定を行った益城町の物件について経験最大層間変形角の推定を行った。対象は木質接着パネル工法 2 階建ての 2 棟である。1 棟は、益城町島田に所在する築 9 年（以下、物件 A）で、主な被害状況は敷地内地割れ、給湯器転倒、基礎と犬走り等の開き並びに内壁開口部及び平部のクロス切れ等であった。もう 1 棟は、益城町馬水に所在する築 16 年（以下、物件 B）で、主な被害状況は、敷地内地割れ及び沈下、基礎仕上モルタル割れ、サイディング目地部塗装はがれ、ブロック塀転倒、外構土間の割れ、アルコーブ部サッシゆがみ並びに内壁開口部周辺のクロス切れ等であった。それぞれの平面図及びひび割れ測定箇所並びに被害状況を図 9 から図 12 に示す。

5.2 被災建築物の経験最大層間変形角の推定

被害調査で確認した内壁開口部に生じたひび割れ幅及び式(1)の推定式より経験最大層間変形角の推定を行った結果を表 6 に示す。調査におけるひび割れの測定は、調査時間の関係により目視における最も大きい箇所の幅について行っており、長さやサイディングの損傷状況に対する検証は行っていない。なお、調査時の記録箇所が多いほど推定結果の精度が上がり、測定が任意の箇所である場合は、状況に応じて推定図表に示すばらつきの範囲を考慮する必要があると考える。

5.3 構造計算による層間変形角の推定

調査物件の限界耐力計算の結果を表 6 に示す。安全限界時の層せん断力に対する 1 階の安全率は、物件 A で X 方向 3.6 倍、Y 方向 2.6 倍、物件 B で X 方向 2.8 倍、Y 方向 3.0 倍であった。

図 13 及び図 14 に 1 自由度系に縮約した骨格曲線と限界耐力計算による必要耐力曲線、周辺で観測された KiK-net 益城及び気象庁益城町宮園の応答スペクトルとの関係を示し、それらによる層間変形角を表 6 に示す。限界耐力計算による 1 階の層間変形角は、物件 A の X 方向で 1/276rad.、物件 B の Y 方向で 1/286rad. であった。

観測地震波に対する層間変形角は、物件 A の X 方向で 1/74～1/303rad.、物件 B の Y 方向で 1/78～1/274rad. であり、経験最大層間変形角の推定結果は、それぞれ 1/180（ばらつきの範囲 1/305～1/125）rad. 及び 1/155（ばらつきの範囲 1/245～110）rad. であり、周辺での観測地震波による応答値と比較して、概ね経験最大層間変形角を推定できていると考える。

図 9 平面図及び測定箇所（物件 A）

図 10 被害状況及び測定状況（物件 A）

図 11 平面図及び測定箇所（物件 B）

図 12 被害状況及び測定状況（物件 B）

表 6 構造計算結果概要及び経験最大層間変形角の推定結果

物件			A				B			
階			2		1		2		1	
階高 (cm)			257.8		275.8		257.8		275.8	
層重量 (kN)			125.0		183.2		78.9		127.7	
方向			X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
損傷限界耐力 Q _{di} (kN)			264.7	117.6	359.2	228.1	163.4	160.2	183.0	186.1
安全限界耐力 Q _{ui} (kN)			476.5	211.7	646.6	410.5	294.1	288.4	329.4	335.0
偏心補正係数 F _e			1.5	1.0	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
減衰による低減率 F _h			0.57	0.63	0.57	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63
限界耐力計算結果	損傷時	外力 (kN)	31.2	29.9	60.2	57.6	20.3	20.3	41.1	41.0
		(安全率)	(8.4)	(3.9)	(5.9)	(3.9)	(8.0)	(7.8)	(4.4)	(4.5)
	安全時	外力 (kN)	91.9	79.7	177.2	153.7	58.2	54.2	117.5	109.4
		(安全率)	(5.1)	(2.6)	(3.6)	(2.6)	(5.6)	(5.3)	(2.8)	(3.0)
構造計算による層間変形角	限界耐力計算 (安全)		1/401	1/252	1/276	1/252	1/519	1/510	1/281	1/286
	KiK-net益城 (前震)		1/134	1/93	1/75	1/91	1/170	1/207	1/65	1/81
	KiK-net益城 (本震)		1/131	1/87	1/74	1/85	1/206	1/200	1/75	1/78
	気象庁益城町宮園		1/440	1/231	1/303	1/228	1/593	1/487	1/321	1/274
調査による経験最大層間変形角の推定	ひび割れ測定の有無		無	無	有	無	有	無	無	有
	測定ひび割れ幅 (mm)		—	—	0.35	—	0.5	—	—	0.45
	推定経験最大層間変形角	平均値	—	—	1/180	—	1/145	—	—	1/155
		ばらつきの範囲	—	—	1/305 ~1/125	—	1/220 ~1/105	—	—	1/245 ~1/110

図 13 耐震性能評価結果 (物件 A)

図 14 耐震性能評価結果 (物件 B)

6. まとめと今後の課題

本報では、既往文献等より試験体仕様及び観察記録等を検討し、ひび割れの損傷状況の観察記録に重点においた 4P 壁面の静的加力実験を実施し、開口隅角部に生じるひび割れと経験最大層間変形角との関係について示した。特に開口部におけるせっこうボードの割付をパラメータとしてデータの拡充を図った。また、開口隅角部に生じるひび割れ幅及び長さから、定量的に経験最大層間変形角を推定する方法を提案した。更に、実際の被災住宅における損傷調査を用いて、経験最大層間変形角の推定を試行した結果、構造計算結果及び周辺観測地震波による層間変形角との比較により推定結果が概ね妥当であり、定量的な経験最大層間変形角の推定手法として使用可能であることを確認した。

本報では、主に内装材のひび割れ幅と経験最大層間変形角との関係についての検証を行ったが、ひび割れ長さによる検証や平部のひび割れに対する検証、更に外装材の検証を深めることにより、判定項目を増やし、精度向上が見込まれると考える。また、動的加力試験や実大振動実験の結果を分析することにより精度向上が見込まれると考える。

謝辞

本研究における実験のデータ分析にあたり、元(株)ミサワホーム総合研究所員神谷章太氏に多大なご協力を頂きました。また、防災科学技術研究所及び気象庁の観測記録を利用させて頂きました。ここに記して謝意の意を表します。

参考文献

- (一財)日本建築防災協会：2015 年改訂版 震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針 [木造編]，2016. 3
- 鶴田修，坂本功，大橋好光，平田俊次，岡部潤一：木質系住宅の地震時仕上げ損傷と建物変形角に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集第 613 号，pp. 73-80，2007. 3
- 高梨成次，大幡勝利，高橋弘樹，坂横義夫，道場信義，加川啓介，大橋好光：旧基準で建てられた木造住宅の残余水平耐力と損傷状況の関係に関する研究，日本建築学会構造系論文集 第 80 巻 第 712 号，pp. 895-904，2015. 6
- 前川秀幸，大橋好光，松留慎一郎，塚崎英世：木造住宅の層間変形角と仕上げ部材の地震時損傷状況に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅲ，pp. 53-54，2014
- 大木洋一郎，梶川久光：建築物の層間変位と仕上げ材損傷及び構造体損傷の関係に着目した被災度評価に関する研究 (その 1. 既往研究の調査)，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅲ，pp. 581-582，2014
- 神谷章太，梶川久光，三津橋歩，大木洋一郎，佐藤雅也：建築物の層間変位と仕上げ材損傷及び構造体損傷の関係に着目した被災度評価に関する研究 (その 2-4)，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅲ，pp. 541-546，2016
- 阪神淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告建築編-4，日本建築学会，1998. 7
- 木造住宅等震災調査委員会：平成 7 年阪神・淡路大震災木造住宅等震災調査報告書，日本住宅・木材技術センター，1995. 10

[2018 年 6 月 6 日原稿受理 2018 年 7 月 23 日採用決定]