

3層木造住宅の外構面下層切り出し試験体に対する性能検証

第1報 実験概要と損傷過程

正会員 ○西 峻汰*1, 同 上段 聖也*1, 同 長江 拓也*1, 同 高橋 武宏*2, 同 梶原 浩一*2
同 山田 祥平*3, 同 柏 尚稔*4, 同 林 和宏*5, 同 井上 貴仁*2

2. 構造—7r 木質構造〔実大建物挙動〕

柱, 筋交い, 接合金物, サイディングボード, 石膏ボード, シャッター

1. はじめに

木造住宅の耐震性評価において、骨組変形に伴い進行する損傷過程と補修性、機能損失と継続使用性等の観点から、資料の蓄積が必要である。首都圏レジリエンスPJ(2017年度～2021年度)の中で実施されるEーディフェンスを用いた3層木造住宅実験(図1)の予備調査の役割を意図し、外構面の切り出し試験体に対する、正負交番繰返し載荷実験を2018年1月に実施した。本稿では、実験概要および損傷過程について報告する。



図1 震動台上の試験体 (2019年2月予定)

2. 実験概要

対象の木造住宅は軸組構法である。外構面についての面内載荷実験は、不二サッシ株式会社において運用されるF型層間変位試験装置を使用した(図2)。建物の地震時層間変形に対するカーテンウォールの追従性、各種性能を検証する装置で、不動床と可動床1-3の各床にファスナーを固定してカーテンウォールを施工し、可動床1-3を制御することで所定の層間変形角を与える。静的載荷および動的載荷が可能である。本実験では、対象とする3層住宅の地震応答時の1次モード等価高さを3階床位置と仮定し、下層2層を取り出した。設置状況を図3に示す。基礎を可動床1に固定し、3階床位置の梁中央を可動床2にピン接合で固定

した。実験において、正載荷では可動床1は正面左、可動床2は正面右へ同一変位量を与える。不動床位置には、試験体面外への触れ止めを施した。

図4に製作状況を示す。通常の手順に従い、骨組、内外装、サッシュ・シャッターの順で施工した。図5に骨組詳細を示す。基礎は鉄筋コンクリート製で通常配筋に加えて、直下の400H鋼梁に溶接したアンカー筋を配した。400H鋼梁を可動床1に固定した。骨組は、土台、柱、梁、まぐさから構成される。骨組接合部の固定には現在一般的に流通する金物を用いた。立面中央位置の耐力壁に

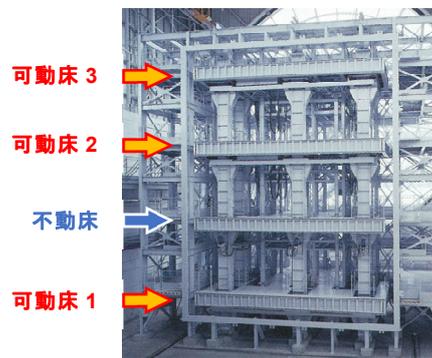


図2 実験装置

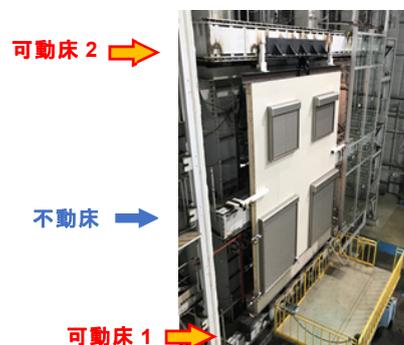


図3 木造骨組試験体設置状況

Performance Assessment for a Test Specimen Extracted from the Lower Part of a Three-Story Dwelling
Part.1 Damage Process and Hysteretic Behaviors in the Force-Deformation Relation

Ryota NISHI, Seiya UWADAN, Takuya NAGAE, Takehiro TAKAHASHI, Koichi KAJIWARA,
Syohei YAMADA, Hisatoshi KASHIWA, Kazuhiro HAYASHI, Takahito INOUE



(a) 1階柱脚・接合金物 (b) 構造用合板・釘固定 (c) 1階上部まぐさ (d) 石膏ボード・養生 (e) シャッター取り付け

図4 製作状況

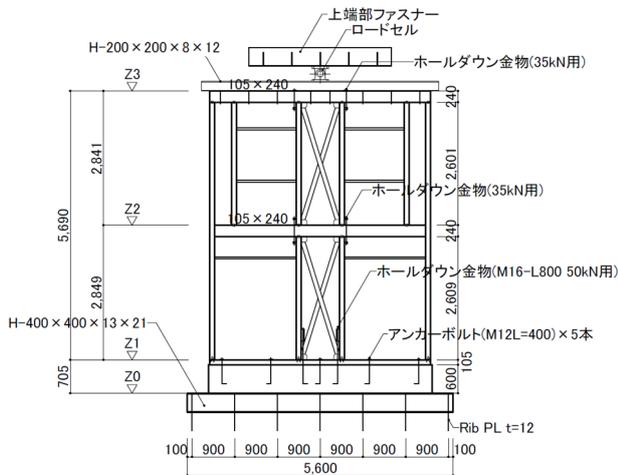


図5 骨組詳細

は、たすき掛け筋交いが組み込まれている。柱と土台は 105×105、窓枠は 105×40、筋交いは 30×90 とした。土台はアンカールボルト(M12×400)と角座金(40×40×t4.5)で基礎に固定した。全ての1階柱脚は、ホールドダウン金物(M16-L800, 50kN用)において固定した。基礎は外柱位置において直交方向(図5の奥側)に400mmの幅を有しており、外柱は柱裏側にホールドダウン金物を設置した。全て筋交いの両端を1.5倍用筋交いプレートで柱に固定した。1階柱頭と2階柱脚はホールドダウン金物(35kN用)において接合した。耐力壁には厚さ9mmの構造用合板を、N50釘(100mmピッチ)で固定した。その上に胴縁を介して窯業系サイディングを固定した。内壁は石膏ボード(t=15, ボードビスは200mmピッチ)、仕上げはクロス貼りとした。

荷重スケジュール(表1)はStep 1-13からなり、可動床1および可動床2の水平変位の和を16mm(8mm×2)から徐々に上げて行き、最終のStep 13では266mm(133mm×2)を与えた。Step1, 3, 5, 7, 9,

表1 荷重スケジュール

Step	変位制御	総変位量 =可動床1+ 可動床2 (mm)	2層木造骨組	
			公称全体変形角 (rad)	
1	静的		0.003	1/356
2	動的	16	0.004	1/237
3	静的		0.007	1/142
4	動的	24	0.014	1/71
5	静的		0.021	1/48
6	動的	40	0.028	1/36
7	静的		0.047	1/21
8	動的	80		
9	静的			
10	動的	120		
11	静的			
12	動的	160		
13	静的	266		

11, 13の静的荷重と、同水平振幅を最大値としてめざす動的漸増荷重(周期約2.5秒)のStep2, 4, 6, 8, 10, 12を交互に実施した。表には、可動床1と可動床2の総変位量を全体高さ5.69mで除した値を全体変形角として示している。

3. 実験結果と損傷観察(層間変形角と損傷状況)

計測値に基づく、骨組水平変位と層間変形角の分布状況を図6に示す。層間変形角について、1層目の値R₁が2層目の値R₂の2倍をやや超えており、1層目に変形が集中した様子が分かる。上部の器具の接合に若干ガタ生じ、予定の全体変形

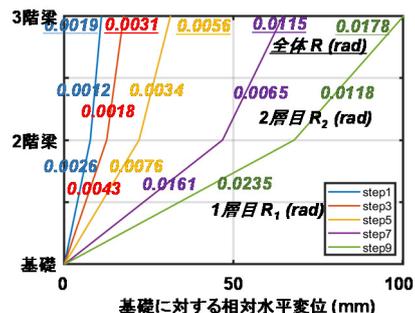


図6 骨組水平変位・層間変形角分布

角を少々下回ったが、最終の Step 13 まで問題なく荷重を実施できた。以降では、Step 数と対応する層間変形角ごとに、損傷観察結果を詳述する。図 7 に参照する損傷観察位置を示す。

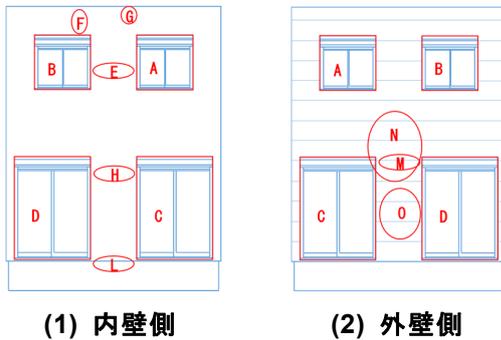


図 7 損傷観察位置

(1) Step1 ($R_1=0.0026\text{rad}$, $R_2=0.0012\text{rad}$), Step2

・**静的加力 内壁側**: (D)の右下, (C)の左下から壁紙に幅 0.75mm の亀裂が生じた。2 階部分に目立った損傷は見られなかった。**外壁側**: 目立った損傷は見られなかった。

・**動的加力 内壁側**: 変化なし。**外壁側**: 目立った損傷は見られなかった。

(2) Step3 ($R_1=0.0043\text{rad}$, $R_2=0.0018\text{rad}$), Step4

・**静的加力 内壁側**: 1 階においては, (C)の左下, (D)の右下の亀裂が伸展し幅が最大 1mm となった。石膏ボードまで貫通していた(図 8 Step3a)。垂直方向への伸展も見られた。(C)の左上, (D)の右上からも亀裂が生じ始めた。(C)の窓枠と壁の間に隙間が生じた。2 階では(A)の右上, 左下, (B)の右下, 左上において, 壁紙に亀裂が生じた。(B)の右下では圧縮力により, ボードが潰れて, 盛り上がる状況が見られた(図 8 Step3b)。**外壁側**: 目立った損傷は見られなかった。

・**動的加力 内壁側**: 亀裂の伸展・拡幅が見られた。手による確認で外柱のホールダウン金物のボルトにゆるみはなかった。**外壁側**: 目立った損傷は見られなかった。

(3) Step5 ($R_1=0.0076\text{rad}$, $R_2=0.0034\text{rad}$), Step6

・**静的加力 内壁側**: 1 階では(C)の左下, (D)の右下の亀裂が繋がり, 多くの部分で垂直方向にも亀裂が伸展した。2 階では(A), (B)の隅からだけではなく, (E), (F)のような中腹部を起点とする亀裂が生じ始め, 垂直方向や端部への伸展が見られた。(C)の窓枠と壁の間に生じた隙間が拡大した(図 8 Step5a)。外柱において, 変動軸力が圧縮側のとき, ホールダウン金物のボルトにゆるみが生じた。**外壁側**: 目立った損傷は見られなかった。

・**動的加力 内壁側**: 亀裂の伸展がみられた。**外壁側**: 目立った損傷は見られなかった。

(4) Step7 ($R_1=0.0161\text{rad}$, $R_2=0.0065\text{rad}$), Step8

・**静的加力 内壁側**: 1 階においても(H)の右側のような窓枠中腹部を起点とする亀裂が生じ始めた。全体としては, 亀裂が伸展・拡大していたことに加え, (G)のような窓枠ではない箇所を発端とした亀裂も生じ始めた。**外壁側**: (C)と接する内側の外装材が 1 枚ずつ加力方向へずれることで, シャッターフレームと外装材を繋ぐ目地材が引っ張られ, 伸びが生じていた(図 8 Step7a)。外装材の境界(M)に幅 6mm の隙間が生じていた。(A)のシャッターフレーム上側の目地の剥離が見られた。

・**動的加力 内壁側**: 亀裂の伸展・拡大した。土台と柱脚の隙間が顕著となった。**外壁側**: 加振終了後も, (M)左側の隙間が残ったままとなった。上側の外装材が 2 mm ほど浮き上がり, 隙間の幅は 1.1 mm となった(図 8 Step8a)。(C)右下に 0.08 mm の亀裂が生じた。

(5) Step9 ($R_1=0.0235\text{rad}$, $R_2=0.0118\text{rad}$), Step10

・**静的加力 内壁側**: 亀裂の伸展, 拡大, 連結が見られた。通し柱が顕著にたわんでいることが確認された(図 8 Step9a)。外柱のホールダウン金物の柱固定部のビス等に緩みは見られなかった。RC 基礎におけるアンカーボルト固定位置に少々ひび割れが見られた。**外壁側**: (C)の右下, (D)の右下, 左下の外装材に亀裂が生じた。(C)右側の目地材は前



図 8 損傷状況

ステップよりさらに伸びていた。上部の目地も伸びていた。外装材の境界(M)の左下側の外装材に圧壊が生じていた。シャッターのフレームは柱と同様に傾斜し、シャッター幕の下端部が傾いたが、動作には問題なかった。

・**動的加力 内壁側**：亀裂の伸展・拡大・連結が見られた。**外壁側**：加振終了後、(M)左側の隙間と剥がれが残留した(図 8 Step10a)。上側の外装材が約 2 mm 出っ張り、隙間の幅は 1.1 mm となった。(N)付近の外装材を固定していたビス数本が浮き上がっていた。

(6) Step11 ($R_1=0.0303\text{rad}$, $R_2=0.0189\text{rad}$) , Step12

・**静的加力 内壁側**：亀裂の伸展・拡大・連結が見られた。1階では(H), (L)右側の窓枠から切り離された石膏ボードが前にはらみ出してきた(図 8 Step11a)。**外壁側**：(C)の左上, 左下, (D)の右上, 右下に新たな亀裂が生じた。(M)左の圧壊していた箇所が剥落した(図 8 Step11b)。(C)右の目地が引張側では切れ始め、圧縮側でははみ出していた。(O)において外装材が前にはらみ出ることによって相対的にビスが埋没した。シャッターのフレーム傾斜、シャッター幕の下端部の傾きはより顕著になったが、動作には問題なかった。

・**動的加力 内壁側**：静的加力時にはらみ出していた(C), (D)間のボードが完全に剥離した。剥落した石膏ボードを留めていたビスが破断した。内部監察のために全て取り除いたところ、中柱のアンカーボルトの緩み(図 8 Step12a)が生じていた。また、柱と筋交いを固定する筋交いプレートの塑性変形、局所湾曲(図 8 Step12b)が確認できた。ビスの緩み、ビス周りにおけるプレートの亀裂等は見られなかった。**外壁側**：切れた目地部に顕著な隙間ができていた。(N)付近のビス数本は加振終了後に約 20mm 浮き上がった状態となった。

(7) Step13 ($R_1=0.078\text{rad}$, $R_2=0.0091\text{rad}$)

・**静的加力 内壁側**：1F 中央の壁の断熱材を取り除くと、筋交いの座屈(図 8 Step13a)、折損(矢印)が確認された。外柱(通し柱)が2階床付近で折損した。**外壁側**：(C)右側の目地が完全に断裂した(図 8 Step13b)。除荷後もビスは浮き上がったままで、目地部は隙間が空いている状態であっ



図 8 損傷状況 (つづき)

た。シャッター幕については、開ける際は動作した。閉める際(降ろす際)には傾斜したフレームに接触し、途中から下がらない状態となった。

5. まとめ

3階建て木造軸組構法住宅の外構面下層2層を対象に、骨組、内外装、サッシュ・シャッター類を忠実に実施工した。変位振幅を漸増させる正負交番繰り返し载荷を実施し、層間変形角に伴う損傷状況を記録した。

謝辞

本稿含む一連の報告は、平成29年度「首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト/サブプロジェクト(c) 非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ収集・整備」の一部である。

本実験にあたり、不二サッシ株式会社に多大なご協力をいただきました。文化シャッター株式会社、BXカネシン株式会社に技術支援をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

*1 名古屋大学
*2 防災科学技術研究所
*3 日建設計
*4 国土交通省国土技術政策総合研究所
*5 豊橋技術科学大学

Nagoya University
NIED
NIKKEN
NILIM
Toyohashi UT

3 層木造住宅の外構面下層切り出し試験体に対する性能検証

第2報 架構の力-変形応答と部材角に対するジャイロ出力

正会員 ○上段 聖也*¹, 同 西 峻汰*¹, 同 長江 拓也*¹, 同 高橋 武宏*², 同 梶原 浩一*²
同 山田 祥平*³, 同 柏 尚稔*⁴, 同 林 和宏*⁵, 同 井上 貴仁*²

2.構造-7r 木質構造 [実大建物挙動]

水平力-変形関係, 履歴性状, 柱部材角, ジャイロ, 積分, シャッター

1. はじめに

第1報では, 実験概要と実験での損傷過程を報告した。実験では, 徐々に全体変位振幅を上げる漸増載荷を実施しており, 1層目に2層目の2倍程度の変形が生じた(図1)。第2報では, 前半において, 試験体に加わった力と変形の関係に基づき, 剛性の低下状況, および履歴形状(等価粘性減衰定数)の推移について, 分析結果を報告する。本実験は首都直下レジリエンスPJの一環として実施される実大住宅実験の準備をかねている。後半では, 損傷モニタリング技術の検討として, 柱およびシャッターのガイドフレームに設置したジャイロによる部材角評価について述べる。

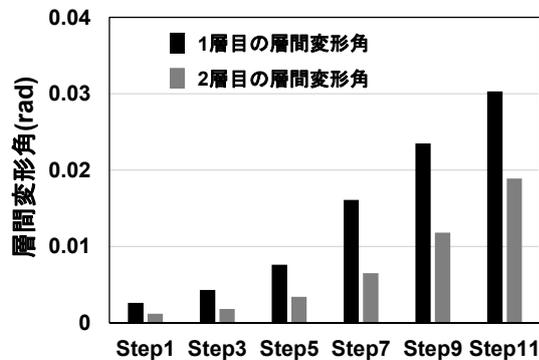


図1 各Step時の層間変形角

2. 力-変位関係

図2に実験で得られた力-変形角関係を示す。試験体の頂部中央を固定したピン治具内のロードセルで測定した水平力を縦軸にとっている。横軸には, 試験体頂部の梁の基礎からの相対水平変位を

当該高さの5.61mで除した全体変形角をとっている。Step1~Step9の図2上図では, 各振幅レベルにおいて, 先行の静的載荷が履歴の骨格をつくり, 後続の動的載荷はその骨格の内側においてスリップ性状を示しながら履歴を描いている。次の変位振幅レベルに向かう静的載荷の履歴を見ると, 経験済みの変位振幅領域における強度劣化は顕著でない。図2下図にStep13までの履歴を示す。実験では, Step13において全体変形角で0.045rad(1層

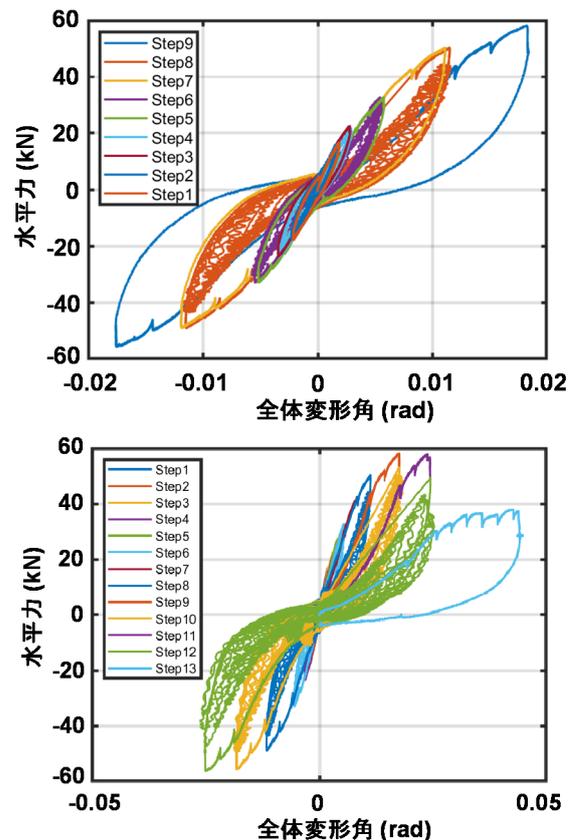


図2 水平力と全体変位角の関係

Performance Assessment for a Test Specimen Extracted from the Lower Part of a Three-Story Dwelling
Part.2 Force-Deformation Responses of the Frame and Gyro Outputs for Rotation Angle

Seiya UWADAN, Ryota NISHI, Takuya NAGAE, Takehiro TAKAHASHI, Koichi KAJIWARA,
Syohei YAMADA, Hisatoshi KASHIWA, Kazuhiro HAYASHI, Takahito INOUE

目層間変形角にして 0.078 rad) という大変形を加えて、1 層目における筋交いの座屈・折損、通し柱折損等の破壊を確認した。最大強度は Step9 の正側で記録しており、Step11 の 1 層の最大層間変形角約 0.03 rad (図 1) では、変形の繰り返しによる強度劣化が顕著となっている。Step9 までの変形領域では、その傾向はなく、強度上昇も見られなくなった Step11 のサイクルで上記の破壊が顕著に進行したと理解できる。

3. 等価剛性と履歴形状の検討

動的載荷では所定の最大変位振幅をめざし繰り返し変位振幅を増加させた (図 3 左図)。各振幅ピーク時における等価剛性 (割線剛性) をプロットすると (図 3 右図)、振幅が上昇していく前半では、徐々に値が大きくなり、振幅が減少する後半では、それに応じて徐々に値が下がる傾向にある。これはスリップ形状の特徴である。同じ振幅レベルで比較すると、後半において値が若干小さくなる。つまり、繰り返し変形を受けたことで、スリップの度合いが強まったことを意味している。各

ステップの最大振幅時 (動的載荷の場合は最初の点) における等価剛性をプロットしたのが、図 4 である。静的載荷と動的載荷の差は小さく、最大振幅が新たな領域に入ることによって、剛性が低下している。全体変形角が約 0.01 rad のとき、初期の 0.5 倍程度の等価剛性を有している。

図 4 に対応するループに対する等価粘性減衰定数を図 5 にプロットしている。この値の算出には、荷重値が 0 を通過する点から 1 サイクルの履歴エネルギー ΔW と、そのサイクルの正負のピーク荷重、変位の平均から求めた弾性歪エネルギー W_e を用いて、下式より求めた。

$$W_e = ((\delta_{max} + \delta_{min}) \cdot (P_{max} + P_{min})) / 4$$

$$h_{eq} = 1 / 4\pi \cdot \Delta W / W_e$$

図からわかるように、静的載荷 (最初の履歴) と動的載荷 (後続の履歴) において、大小の傾向がはっきりしている。静的載荷は 0.12-0.13 付近に、動的載荷は 0.08-0.07 付近に集中している。変位振幅に対する傾向ははっきりしない。0.002 rad レベルの Step1 から 0.1 を超える値となり、10 倍を超える振幅まで、ほぼ同等の値、という結果は、RC

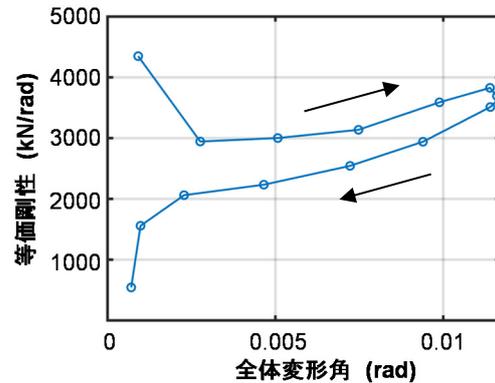
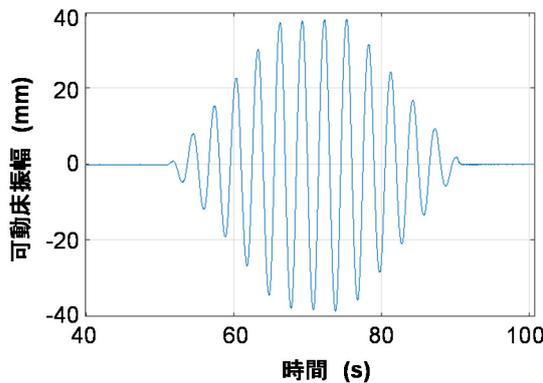


図 3 動的載荷方法と各サイクルにおける等価剛性推移 (Step8)

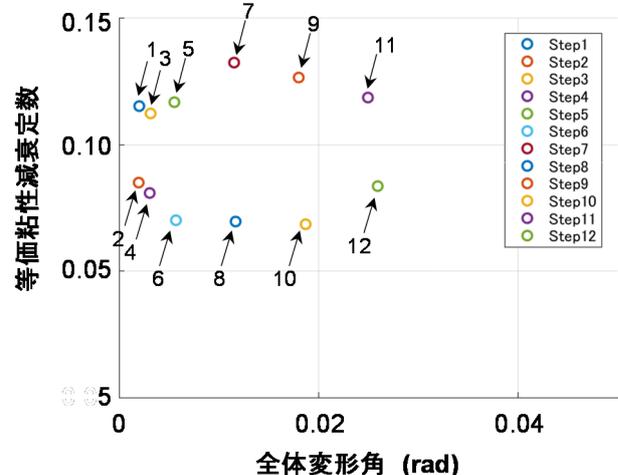
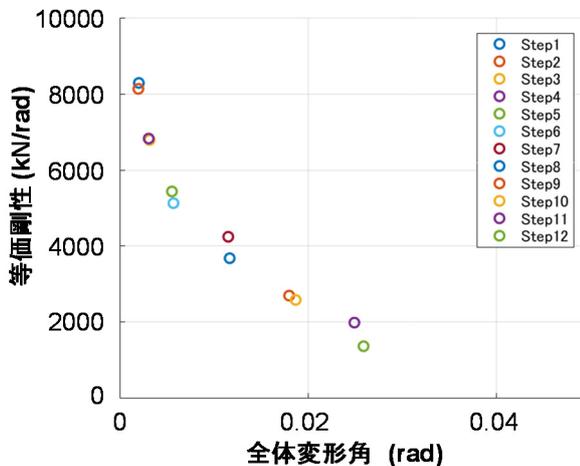


図 4 等価剛性と全体変形角の関係

図 5 等価粘性減衰定数と全体変形角の関係

造やS造の骨組と傾向を異にする。現行設計法では限界耐力計算法が整備されている。木造建物の変形を陽に求める評価法としても、この等価線形化法の類が実用的であり、必要な2つのパラメータに対して以上の結果が参考になる。一方で、これら等価剛性、等価粘性減衰定数の傾向から、損傷評価に有用なパラメータは等価剛性といえる。

4. ジャイロによる住宅損傷・機能モニタリング

関連の首都圏レジリエンスプロジェクトでは、大地震後の速やかな回復、適切な対応に向け、建物被害評価、機能損失把握を実現するモニタリング技術の向上を課題の柱に据えている。特に密集地域の住宅群を対象に、簡易で安価なセンサー類の適用展開により、街区レベル、地域レベルでの包括的被害評価を射程としている。

既存手法では基礎、床等に設置する加速度計によって、基礎入力、床応答を評価し、住宅に加わった力を予測する、もしくは、地域の観測震度を参照して過去の被害率曲線から間接的に被害推定することが行われる。一方で、第1報で示したとおり、内外装材やシャッター等付属機器類の損傷は、架構の変形レベルに応じて進行する。損傷評価、機能損失把握というような課題に対しては、架構の変形レベル評価によって精度が担保されるという過言でない。

本研究では、ジャイロを架構内、特に柱もしくは柱に設置される機器関連治具内への設置することを考えた。ここでは、共和電業製のGSAT-A-900(図6)を用いた。MEMS等への展開については、技術開発が進み、安価でコンパクトな機種が今後登場することを想定している。特に、本研究では、

シャッターのガイドフレーム内やカーテンウォールのサッシュ内に機器を具備したパッケージ商品として市販されるビジネスモデル、それに基づく実践展開について関係者と議論を重ねている。

5. 実験におけるジャイロ出力と分析

図7にジャイロの設置条件を示す。シャッターガイドフレームおよび柱に強力両面粘着テープで固定した。ガイドフレーム側についてはフレームの中央高さ位置に設置し(Ch3)、柱側については同高さ位置に合わせて設置した(Ch2)。

ここで対象とするのは、動の実験(Step2, Step8, Step12)である。ジャイロは角速度を計測しているので、出力データを時間軸に対して積分し、傾斜角度の時刻歴波形を求める。一方、シャッターガイドフレームの上下で水平変位を計測しており、ここからガイドフレーム部材角(Frame R)を評価し、比較検証する。図8に、ジャイロからの出力を示す。図9(1)にStep2の積分結果を示す。適切なフィルターなしでは、評価できない。0.003 rad

性能	定格容量	$\pm 900 \text{ deg/s} (\pm 15.708 \text{ rad/s})$
	非直線性	$\pm 0.5\% \text{ RO}$ 以内
	ヒステリシス	$\pm 0.5\% \text{ RO}$ 以内
	定格出力	約2.0V

センサ部

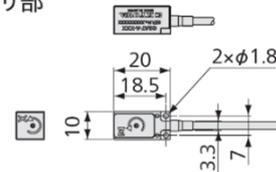


図6 ジャイロGSAT-A-900の詳細
(共和電業資料から転載)



図7 ジャイロの設置状況 (左: シャッターガイドフレーム正面, 右: 柱裏面)

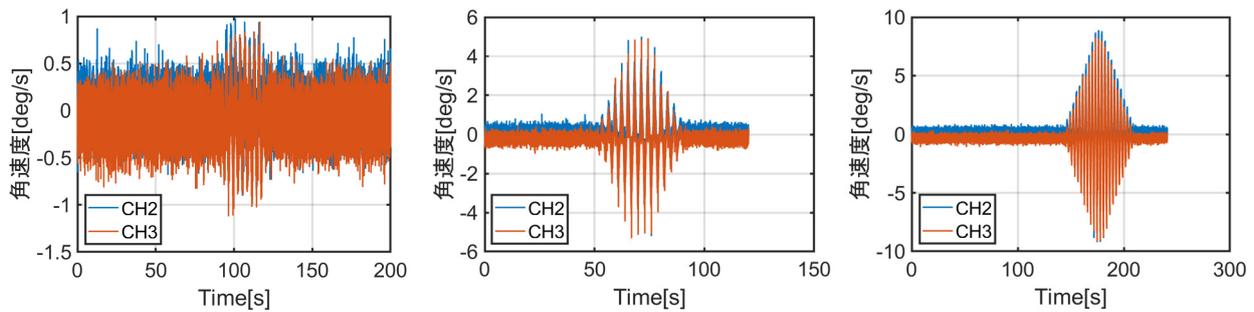


図 8 ジャイロ出力 (左から Step2, Step8, Step12)

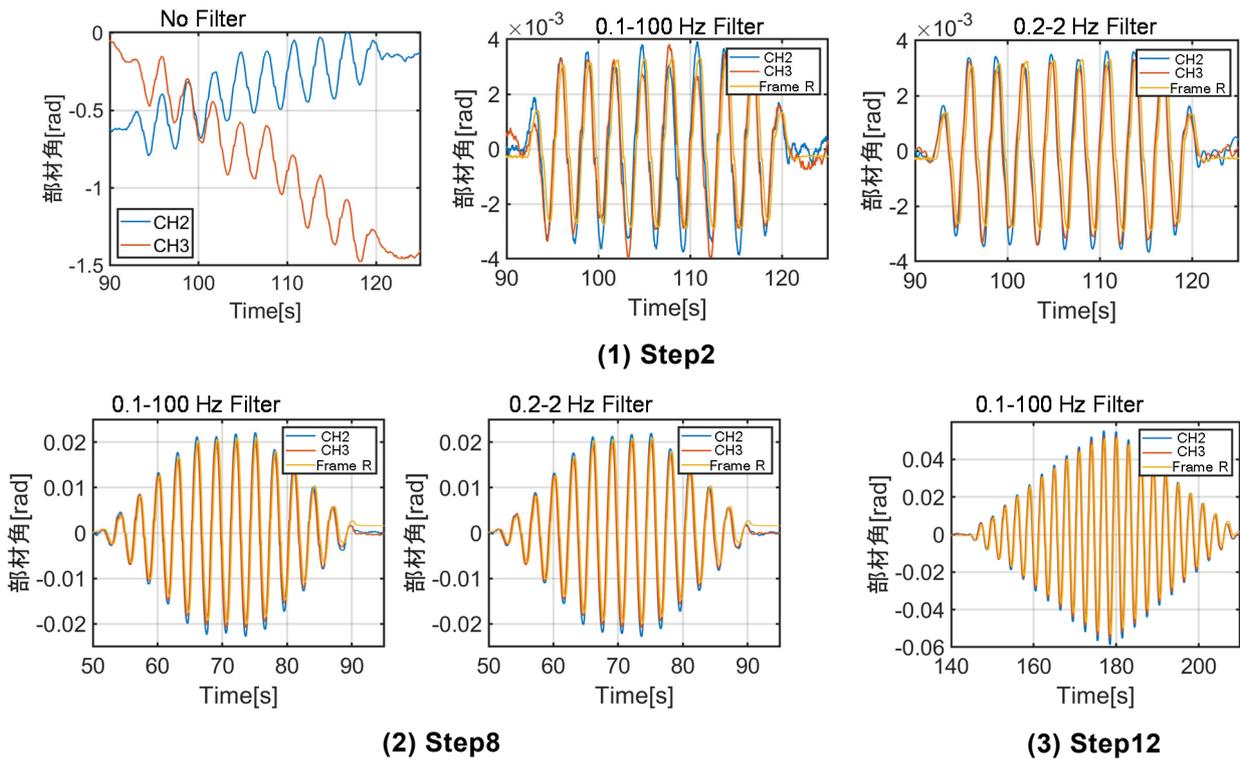


図 9 ジャイロ分析

程度の小振幅が対象となる場合、0.2-2Hz という狭いバンドを設定しなければ Ch3 結果と Frame R の値が近接しなかった。図 9(2)の Step8 では 0.02 rad 程度の振幅レベルを対象としており、この場合 0.1-100Hz のバンドで遜色なかった。また、Ch3 結果と Frame R が一致するのに対して、Ch2 結果がわずかに大きな値を示す。これは柱にビス止めされたガイドフレームのわずかなガタにより、その傾斜が柱の傾斜を下回ったことを示している。図 9(3)の Step12 はさらに倍以上の振幅を示している。Step8 と同じ傾向であり、大振幅領域まで、ガイド

フレームが柱によく追従したことを示している。

6. まとめ

題目実験について、力-変形関係を分析した。動実験では、シャッターガイドフレームを対象にジャイロによる部材角評価の適用性を検証した。

謝辞

本実験にあたり、不二サッシ株式会社および文化シャッター株式会社に多大なご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

*1 名古屋大学
 *2 防災科学技術研究所
 *3 日建設計
 *4 国土交通省国土技術政策総合研究所
 *5 豊橋技術科学大学

Nagoya University
 NIED
 NIKKEN
 NILIM
 Toyohashi UT