

平成26年度
ものづくり中小企業・小規模事業者等連携事業創造促進事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「木造建築物の大空間・大開口化ニーズに対応する耐震性向上及び柱・梁のダメージを減少する高強度・高振動吸収締結ユニットの開発」

成果報告書概要版

平成27年3月

委 託 者 中部経済産業局
委 託 先 公益財団法人富山県新世紀産業機構
再委託先 株式会社グランドワークス
上田建築設計事務所
国立大学法人富山大学
国立大学法人京都大学
国立大学法人信州大学
富山県工業技術センター

目 次

第 1 章 研究開発の概要

1.1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1.2 研究体制	3
1.2.1 研究組織	3
1.2.2 研究者氏名	7
1.2.3 研究協力者	7
1.3 成果概要	8
1.3.1 特殊螺旋ボルトの開発	8
1.3.2 変形金物の最適設計、性能評価及び加工技術	8
1.3.3 締結ユニット搭載型建築の構造計算による最適構造体の試算	8
1.3.4 締結ユニットを搭載したフレーム体の性能評価	9
1.3.5 実建築物での振動試験による実証試験・評価	9
1.3.6 事業化の概要	10
1.4 当該研究開発の連絡窓口	10

第 2 章 本論

2.1 特殊螺旋ボルトの開発	12
2.1.1 特殊螺旋ボルトの設計・製作	12
2.1.1.1 3 軸転造加工条件の検討	12
2.1.2 特殊螺旋ボルトの性能評価	16
2.1.2.1 高引抜耐力の特殊螺旋ボルトの開発	16
2.2 変形金物の最適設計、性能評価及び加工技術	18
2.2.1 変形金物の設計・製作	18
2.2.1.1 ハイブリッド型変形金物構成部材の 繰返し引張圧縮疲労試験	18
2.2.2 締結ユニットの性能評価	20
2.2.2.1 締結ユニット構造部材（鋼製）の腐食試験	20
2.3 締結ユニット搭載型建築の構造計算による最適構造体の試算	22
2.3.1 目的	22
2.3.2 実大振動実験の際に想定したモデル住宅への適用性検証	22
2.3.3 結果と考察	26
2.3.4 まとめ	26
2.4 締結ユニットを搭載したフレーム体の性能評価	27
2.4.1 構造解析シミュレーションによるフレーム体の性能評価	27
2.4.1.1 振動試験体事前応答解析	27
2.4.2 フレーム体の構造物試験	31

2.4.2.1	締結ユニットで接合されたラーメンフレームの水平加力試験	・31
2.5	実建築物での振動試験による実証試験・評価	32
2.5.1	地震波負荷による大型振動試験とデータ解析	32
2.6	事業化の検討	39
第3章	全体総括	
3.1	全体研究開発成果	40
3.2	研究開発後の課題	45
3.3	事業化展開	46

第1章 研究開発の概要

1.1 研究開発の背景・研究目的及び目標

新設住宅着工戸数（戸建）における、木造住宅の割合は86.6%と高く、最近の住宅には、柱や壁を少なくして間取りの自由度を高める「大空間化」や、窓やドアなどの開口部を大きくして解放感のある室内空間を実現する「大開口化」へのニーズが高くなっている。

また、公共建築物木材利用促進法の制定により、国産材を用いた大型木造建築物や高層木造建築物に対応可能な建築技術のニーズが高まっている。

しかし、これまでの住宅工法では、柱材と梁材の締結に「ほぞ接ぎ」と締め付けボルトなどが多用されているが、断面欠損が大きいことや柔らかいスギ材では、初期剛性に乏しく経年変化で緩んでしまう問題が指摘されている。

これらの住宅の大空間化、大開口化、さらには大規模建築に適しているのは、「木造門型フレーム」のような木造ラーメン工法（図1.1）だが、阪神大震災を始め、中越地震、中越沖地震、東日本大震災など最近の大地震からフレームの強度向上、すなわちフレーム結合部（継手部）の強度向上や地震力を吸収する技術の開発が強く求められている。

また、新規着工以外にも、住宅リフォーム需要が年々拡大する状況のなかで、低コストでの耐震改修を実現する技術の確立が川下住宅メーカーから求められている。

本研究開発では、ラーメン構造の木造建築物の結合部の高強度化及び振動吸収性を高めることで、大地震時の地震力を結合部で吸収して木造建築物の構造部材の損傷を防ぎ、再利用を可能にする技術の開発を目的としている。



図1.1 大空間・大開口建築物例

開発結合部は、「部材締結ユニット」と呼び、木材と結合部を高強度につなぐ「特殊螺旋ボルト」及び「連結金物」、振動吸収機能を有する「変形金物」で構成されている。万一、大地震に被災した場合でも結合部の変形金物の交換のみで住宅を解体・廃棄することなく部材の再利用を可能とする本技術の実現には川下住宅メーカーの期待は大きい。

締結ユニットの開発内容は、

特殊螺旋ボルトの開発

高耐力で木材と結合部を連結する特殊螺旋ボルトの開発及び製造コストの低減を図るため、3軸転造加工装置を用いたパイプ素材による特殊螺旋ボルト製造技術を開発する。
変形金物の最適設計、性能評価及び加工技術

変形金物の形状と耐力、変形性能の関係をシミュレーション手法で検討し、初期剛性が高く変形性能の大きい変形金物を開発する。

締結ユニット搭載型建築の構造計算による最適構造体の試算

構造計算手法により最適化された締結ユニットを搭載したモデル建築構造体を設計する。

締結ユニットを搭載したフレーム体の性能評価

建築構造骨組みの構造解析シミュレーションにより、地震力に対するフレーム体の耐力と変形性能を検討し、フレーム体の製作と性能確認を行う。

実建築物での振動実験による大型振動試験とデータ解析

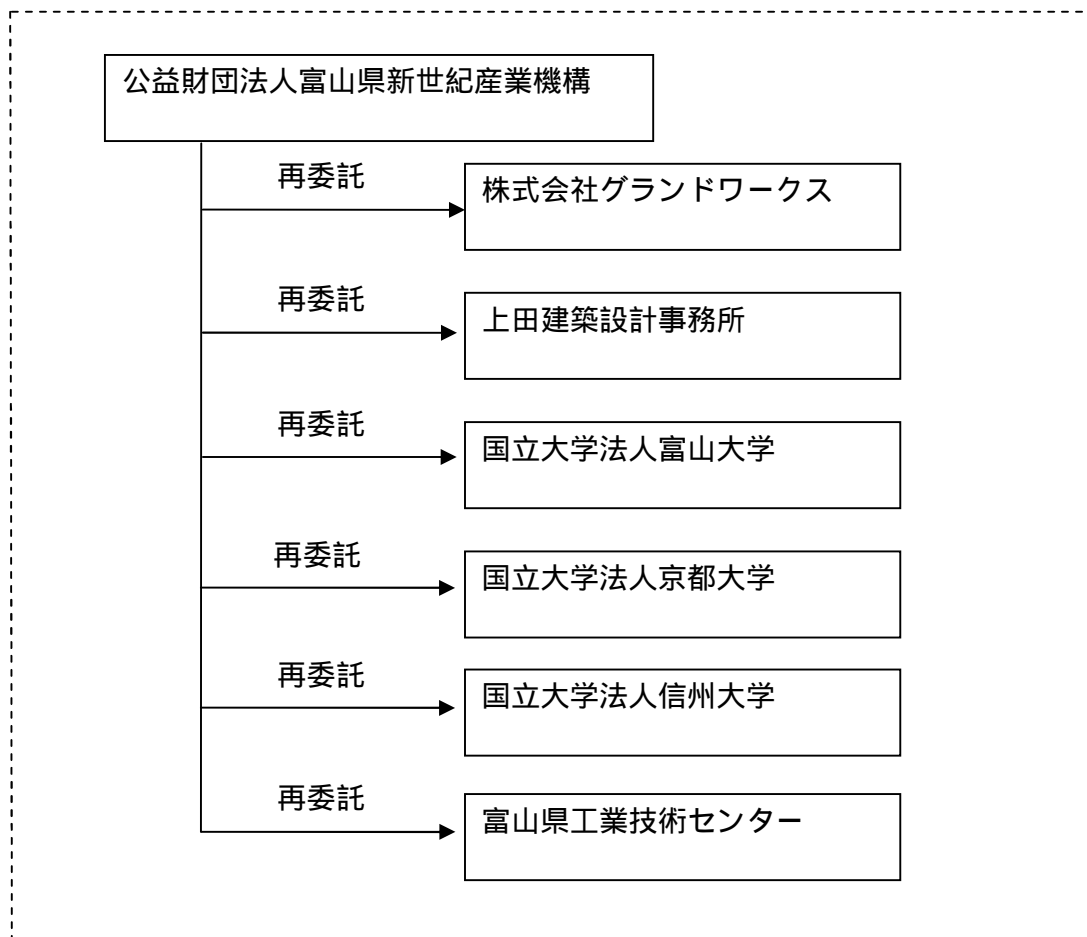
締結ユニットを用いた実大住宅の振動実験を行い、部材の損傷防止効果と変形金物交換による建物の耐震性能再現を確認する。

以上の開発と性能の検証により、大開口や大空間という住宅ニーズに対応し、大地震にも強い木造ラーメン工法技術を確立する。

1.2 研究体制

1.2.1 研究組織

1) 研究組織



総括研究代表者（P L）

株式会社グランドワークス

代表取締役社長 大倉 憲峰

副総括研究代表者（S L）

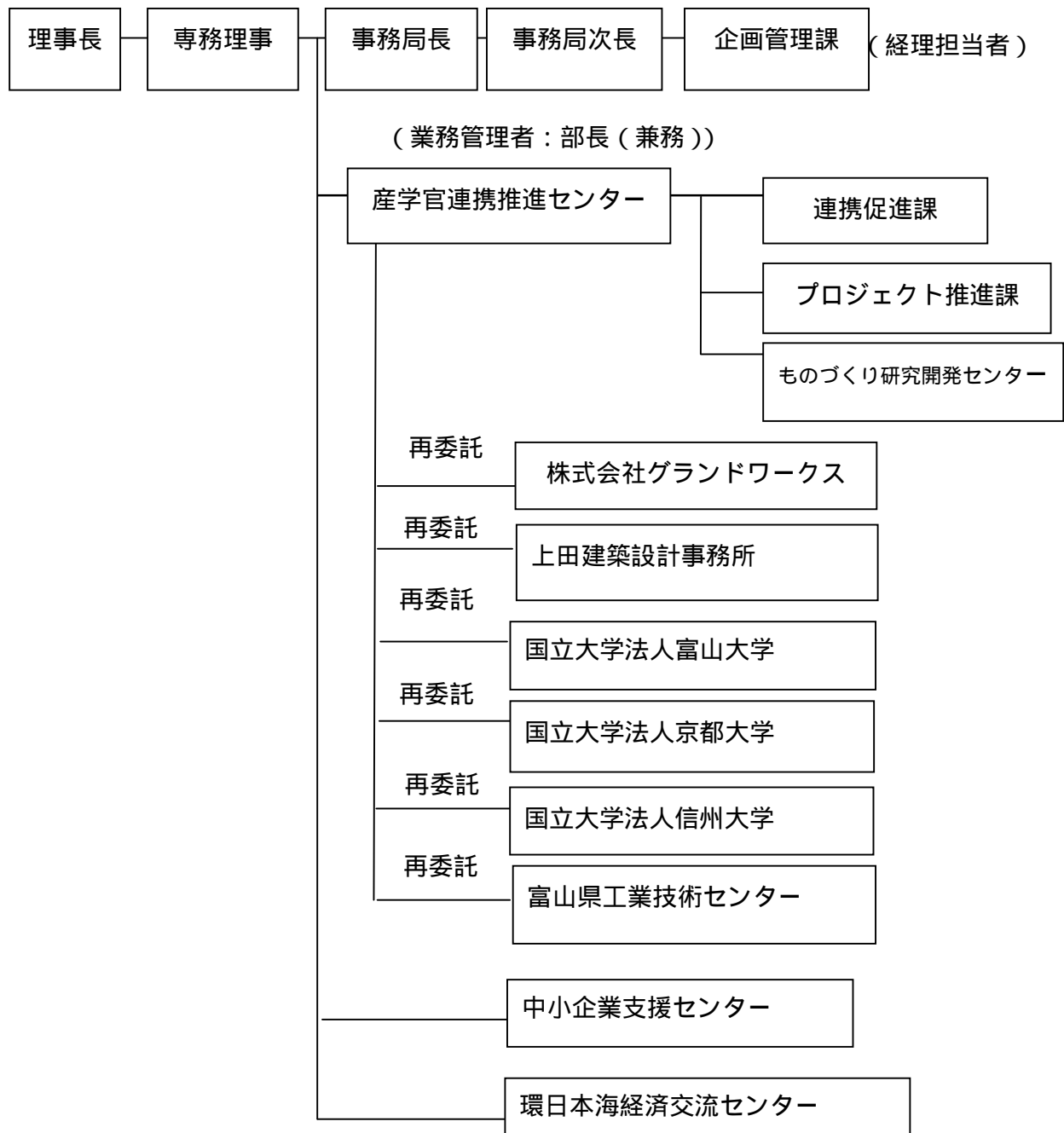
株式会社グランドワークス

取締役会長 大倉 義憲

2) 管理体制

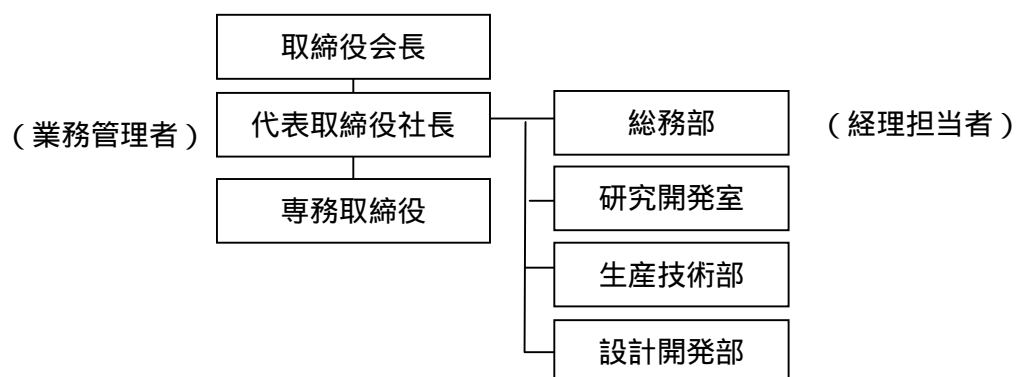
事業管理機関

[公益財団法人富山県新世紀産業機構]

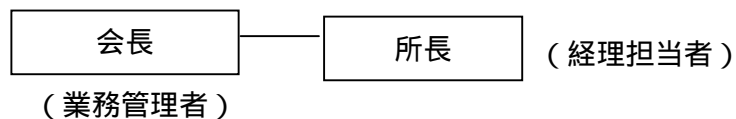


再委託先

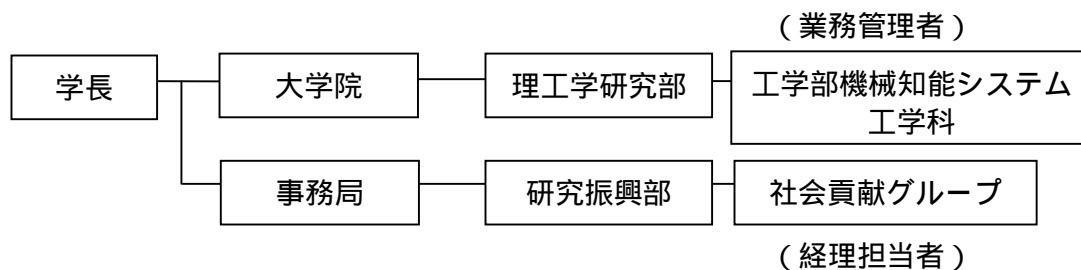
[株式会社グランドワークス]



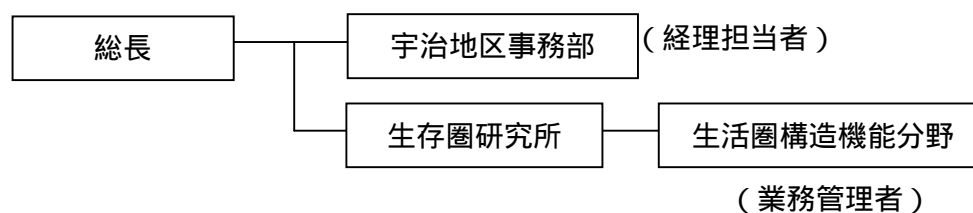
[上田建築設計事務所]



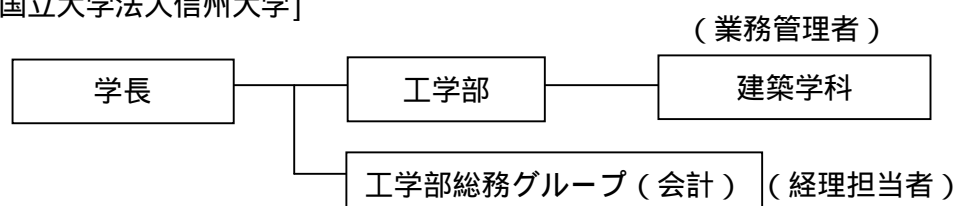
[国立大学法人富山大学]



[国立大学法人京都大学]

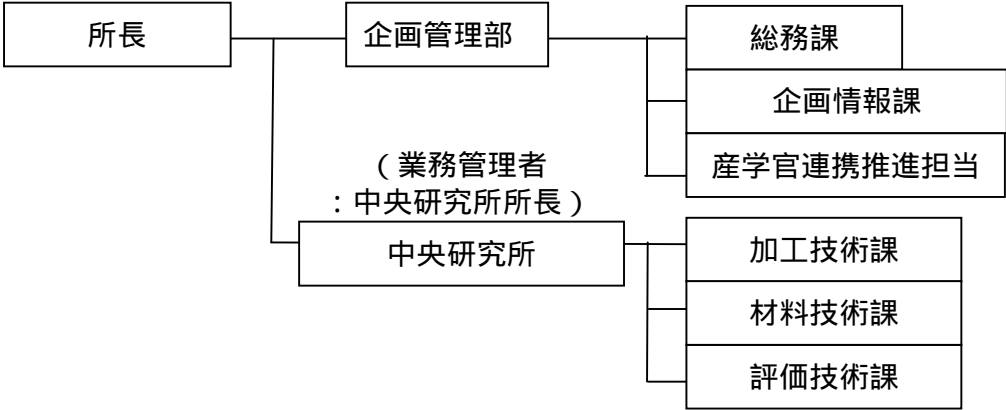


[国立大学法人信州大学]



[富山県工業技術センター]

(経理担当者)



1.2.2 研究者氏名

株式会社グランドワークス

氏 名	所属・役職
大倉 憲峰	代表取締役社長
大倉 義憲	代表取締役会長
大倉 義邦	専務取締役
中谷 浩	研究開発室長
林 美樹雄	生産技術部係長
吉井 隆朗	生産技術部
三浦 秀峰	生産技術部
長瀬沙耶佳	設計部
山崎 茂弘	生産技術部
護摩堂秀樹	生産技術部

上田建築設計事務所

氏 名	所属・役職
上田 邦成	所長

国立大学法人富山大学

氏 名	所属・役職
小熊 規泰	大学院理工学研究部 教授

国立大学法人京都大学

氏 名	所属・役職
小松 幸平	生存圏研究所研究員（名誉教授）

国立大学法人信州大学

氏 名	所属・役職
金子 洋文	工学部 教授
中込 忠男	工学部 研究員

富山県工業技術センター

氏 名	所属・役職
富田 正吾	中央研究所 加工技術課 課長
吉田 勉	中央研究所 評価技術課 副主幹研究員
川堰 宣隆	中央研究所 加工技術課 主任研究員
清水 孝晃	中央研究所 加工技術課 主任研究員

1.2.3 研究協力者

氏 名	所属・役職
石塚 喜彦	株式会社新昭和クレバリー F C 本部商品開発部 部長
兵道 博	サーラ住宅株式会社建設部 技術開発担当リーダー
山口浩一郎	株式会社ウンノハウス商品開発部 次長
竹生 敏俗	物林株式会社北海道支店 北海道建設資材部 一級建築士事務所 所長

1.3 成果概要

1.3.1 特殊螺旋ボルトの開発

3 軸転造加工された数種の特殊螺旋ボルトのネジ山形状観察、ネジ元の塑性流動組織観察、ネジ山面および軸の表面残留応力測定を行って加工品質ならびに使用状態に与える強度の影響を検討した。丸棒材では良好なネジ山形状、ネジ元の塑性流動が認められ、良好な 3 軸転造加工が行われていた。パイプ材では、ネジ山頂点まで材料が変形充填されておらず、頂点の成型性不良が認められた。これは、素材を塑性変形させる圧力が内径側に逃げるのが原因と考えられた。しかし、引抜耐力に影響を与えないようであり、性能上の支障はないものと考えられる。

1.3.2 変形金物の最適設計、性能評価及び加工技術

変形金物は、疲労に対する耐久性の向上から、ストレート型でかつ内側の金物に高強度鋼を用いるハイブリッド型に変更している。ストレート型の変形金物の耐久性の向上のために金物 1 枚（全 4 枚）の単体モーメント試験を行い、繰り返し負荷試験を行った。その結果、外側変形金物をより内側に寄せ、厚さ 9mm 鋼材で座屈しにくくすることが有効であることが明らかになった。締結ユニット設計では、特殊螺旋ボルトに損傷を与えない耐力レベルで、可能な限り外側金物を内側によせることとし、柱梁ユニットではピンから 148、113、50mm 位置に 9mm×9mm の金物を、柱脚ユニットでは 156、103、45mm 位置に 9x8mm の金物を配することとした。これにより、柱梁ユニットで降伏モーメント 25kNm、最大モーメント 40kNm、回転剛性 3600kNm/rad、柱脚ユニットで降伏 23.5kNm、最大 37.1kNm、回転剛性 4731kNm/rad の性能を持つ締結ユニットが完成した。

柱梁ユニットでは、外側の変形金物を比較的内側によせたため、目標の 4000kNm/rad を達成できなかったが、柱脚では十分に超えることができた。これまで行った締結ユニットのモーメント試験に対し、ミルシートからの数値で耐力推定をおこなったところ、最大モーメント、降伏モーメントとも十分な精度で予測できており、様々な締結ユニットの設計が可能となった。しかし、回転剛性はまだ十分な推定精度に至っておらず、今後の課題として残された。

1.3.3 締結ユニット搭載型建築の構造計算による最適構造体の試算

締結ユニットを用いたモデル住宅プランを作成し、それに基づいて振動実験用の上載荷重を算定した。プランは x 方向 3m、2 スパン、2 階建とした。当初 3 階建てで荷重を算出したが、振動台能力を超えたため、2 階建てに変更したものである。上載重量は、80 kN となり、屋根 10.3kN、2 階床 28.4kN とした。

3 階建て（門型フレームは 2 階まで）における 2 層 2 スパン門型フレームに対し、耐震等級 3（地震力は通常の 1.5 倍 9 として許容応力度計算を行った。その結果、応力は安全との結果となったが、中央柱は余裕が少ないので柱脚耐力を向上するのが望ましいことが示された。なお、層間変形角にはまだ余裕が認められた。

締結ユニットは、3階建てモデル住宅に十分適用が可能であること、また引きボルト形式の接合部より剛性・耐力共大きく上回り性能が高いことが検証された。

今後は求まっていない接合部の性能を明らかにすると共に、部材サイズのバリエーションを増やすことや中大規模木造建築に適用させる為に更なる剛性・耐力アップを図ることが望ましいと考えられる。

1.3.4 締結ユニットを搭載したフレーム体の性能評価

振動台実験を実施する前に、試験体の挙動を大凡予想するために、試験体を3次元半剛節骨組み構造でモデル化し、人口地震波であるBSL波とJMA神戸波NS成分の2種類の地震波を用いて時刻歴応答解析を行った。BSL波、JMA神戸波100%入力とも、層間変位はそれぞれ40mm、60mmで納まり、締結ユニット部によるエネルギー吸収が認められた。

集成材2層2スパン試験体において、中柱-梁十文字接合部についての接合性能を明らかにするため、柱頭に上載荷重を載荷した状態で、静的正負繰り返し加力実験を実施して、十文字接合部バネ常数や強度性能を評価した。

また、締結ユニットの制震効果をより相対的に明らかにするために、締結ユニット有りの試験体で終局状態まで加力した後、変形金物を取り外し、接合部の両面に厚さ9mmの鋼板をボルト締めした剛接合部の試験体を作成し、同じように水平荷重を載荷してそのせん断性能を比較した。剛性に関しては両者同じであるが、最大耐力は剛接合部の方がやや大きい。しかし変形能力に関しては、圧倒的に締結ユニットの方が優れており、変形金物の大変形によって、集成材部材や特殊螺旋ボルトは無傷のまま、再利用可能なことが実験的にも明らかになった。

締結ユニットで接合された門型フレームについて、水平加力を行い破壊まで負荷した後、変形金物を交換して、再負荷試験を行った。その結果、変形性能は1/14rad程度で、当初目標の1/20radの目標を達成できた。最大荷重、降伏荷重、初期剛性とも金物交換前後での差が無いことから、締結ユニットは、特殊螺旋ボルトに損傷を与えず、交換により初期のフレーム性能を再現できることが示された。

1.3.5 実建築物での振動試験による実証試験・評価

締結ユニットで接合された2層2スパンの集成材振動試験体に対し、BSL波とJMA神戸地震波を用いて2回の振動実験を行った。1回目の加震実験（地震波14波、正弦波10波）終了時で、初期の固有周期0.215秒が0.259秒に伸びており、剛性は70%低下した。2回目に先立ち変形金物を全て交換した。その結果、固有周期は0.211秒となり、初期値0.215秒にほぼ近い値に戻った。これにより、目標の一つである「極めて稀な地震を経験して建物が変形しても、変形金物を交換することで元の健全な状態に復帰できること」が実証できた。

2回目の加震実験で、固有周期に近い正弦波入力によって試験体は大きく共振し、ねじれを伴う大振幅の振動によって中柱の柱脚接合部を中心に変形金物が低サイクル疲労破壊を起こした。

特殊螺旋ボルトに作用した軸力は100kNを超えておらず、特殊螺旋ボルト引抜耐力の60～70%で十分に安全なレベルであった。外側金物の塑性変形により、特殊螺旋ボルトに入力

される軸力は適正レベルに制御されており、締結ユニットは目標通りに作動していたものと考えられる。

1.3.6 事業化の概要

実大振動実験に際して、本事業の実用化を踏まえ、2回目の振動実験を設計事務所、住宅メーカー、工務店に対して公開実験として行った。また、マスコミにも案内したことにより、木材、住宅業界新聞である「日本住宅新聞」、「日刊木材新聞」、「ニューハウジングジャーナル」ら3社、地元一般紙である「北日本新聞」、「富山新聞」が取材し、新聞、雑誌で広く紹介された。

実用化については課題も残されていることから普及資料やパンフレットの作成まで至っていないが、振動実験の様子はビデオで撮影し、営業や講習会に際して、開発事業の取り組みとして紹介し、普及に努めている。

1.4 当該研究開発の連絡窓口

(1) 事業管理機関

法人名：公益財団法人富山県新世紀産業機構

住所：〒930-0866 富山県富山市高田529番地

連絡担当者、所属役職名：産学官連携推進センター長 藤城 敏史

電話：076-444-5691 ファックス：076-433-4207

E-Mail：fjk@tonio.or.jp

(2) 総括研究代表者

法人名：株式会社グランドワークス

住所：〒930-1874 富山県滑川市大榎452番地

連絡担当者、所属役職名：代表取締役社長 大倉 憲峰

電話：076-471-2021 ファックス：076-471-2400

E-Mail：k-okura@grandworks.co.jp

(3) 副総括研究代表者

法人名：株式会社グランドワークス

住所：〒930-1874 富山県滑川市大榎452番地

連絡担当者、所属役職名：代表取締役社長 大倉 義憲

電話：076-471-2021 ファックス：076-471-2400

E-Mail：y-okura@grandworks.co.jp

(4) 研究実施者

実施機関名	代表者役職名	連絡先
株式会社グラ ンドワークス	代表取締役社長 大倉 憲峰	〒930 - 1874 富山県滑川市大榎452番地 連絡担当者：総務課 石黒 雅子 電話：076 - 471 - 2021 ファックス：076 - 471 - 2400 E-Mail：m-ishiguro@grandworks.co.jp
上田建築設計 事務所	会長 上田 邦雄	〒930 - 0887 富山県富山市五福1区1 - 531 連絡担当者：所長 上田 邦成 電話：076 - 432 - 8773 ファックス：076 - 433 - 0486 E-Mail：ueda@uedasekkei.com
国立大学法人 富山大学	学長 遠藤 俊郎	〒930 - 8555 富山県富山市五福3190番地 連絡担当者：大学院理工学研究部教授 小熊 規泰 電話・ファックス：076 - 445 - 6776 E-Mail：oguma@eng.u-toyama.ac.jp
国立大学法人 京都大学	総長 山極 壽一	〒611 - 0011 京都府宇治市五ヶ庄木質ホール2F 事務担当者：生存圏研究所 名誉教授 小松 幸平 電話：0774 - 38 - 3674 ファックス：0774 - 38 - 3678 E-Mail：kkomatsu@rish.kyoto-u.ac.jp
国立大学法人 信州大学	学長 山沢 清人	〒380 - 8553 長野県長野市若里4丁目17番1号 事務担当者：工学部建築学科 教授 中込 忠男 電話：026 - 269 - 5350 ファックス：026 - 269 - 5367 E-Mail：nakagom@shinshu-u.ac.jp
富山県工業技 術センター	所長 鳥山 素弘	〒933 - 0981 富山県高岡市二上町150番地 事務担当者：中央研究所評価技術課 副主幹研究員 吉田 勉 電話：0766 - 21 - 2121 ファックス：0766 - 21 - 2402 E-Mail：tsutomuy@itc.pref.toyama.jp

第2章 本論

2.1 特殊螺旋ボルトの開発

[実施担当：株式会社グランドワークス、国立大学法人富山大学、国立大学法人京都大学、富山県工業技術センター]

2.1.1 特殊螺旋ボルトの設計・製作

特殊螺旋ボルト製作においては、H24 年度に 3 軸転造加工装置の試作、H25 年度にはパイプ材を用いた 3 軸転造加工による特殊螺旋ボルトの製作が可能となった。これまで標準の外径 35mm、谷径 27mm（特殊螺旋ボルト 35-27 と表記）に加えて、より外径の大きなものから小径まで、様々な直径を持つ特殊螺旋ボルトの製作と性能評価を行った。

2.1.1.1 3 軸転造加工条件の検討（特殊螺旋ボルトの性状評価による検討）

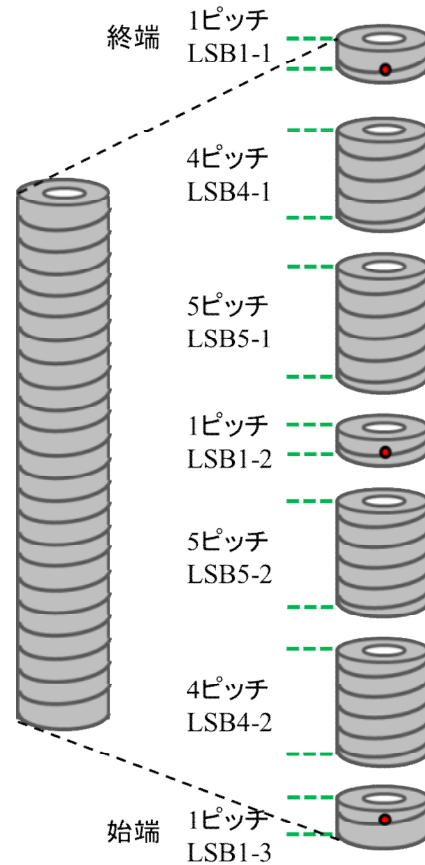
3 軸転造加工された数種の特殊螺旋ボルトのネジ山形状観察、ネジ元の塑性流動組織観察、ネジ山面および軸の表面残留応力測定を行って加工品質ならびに使用状態に与える強度の影響を検討した。調査した特殊螺旋ボルトの種類を表 2.1.1 に、パイプ材材における内径の成型性を調査した結果を表 2.1.2 に示す。

表 2.1.1 調査した特殊螺旋ボルトの材質とサイズ

	外径，mm	内径，mm
SS400 （丸棒材）	26	-
	31	-
	33	-
S45C （丸棒材）	26	-
	31	-
	33	-
SWCH45K （パイプ材）	31	18

表 2.1.2 . パイプ材の内径測定結果 (mm)

測定箇所		1	2	3	位置平均
LSB1-1	上部	18.22	18.20	18.17	18.20
	下部	18.35	18.36	18.40	18.37
LSB4-1	上部	18.34	18.30	18.34	18.33
	下部	18.35	18.28	18.30	18.31
LSB5-1	上部	18.30	18.33	18.34	18.32
	下部	18.30	18.34	18.31	18.32
LSB1-2	上部	18.29	18.30	18.35	18.31
	下部	18.33	18.29	18.30	18.31
LSB5-2	上部	18.37	18.35	18.32	18.35
	下部	18.29	18.29	18.30	18.29
LSB4-2	上部	18.09	18.10	18.11	18.10
	下部	18.28	18.31	18.30	18.30
LSB1-3	上部	17.83	17.80	17.80	17.81
	下部	18.25	18.22	18.24	18.24



2) 残留応力測定

表 2.1.1 に示した各種特殊螺旋ボルトのネジ山面および軸表面の X 線回折による残留応力測定を行った。ネジ山面の測定位置は図 2.1.1 に示すように、A : 頂点部、B : 中腹部、C : ネジ元部である。測定方向はネジ山の円周方向および半径方向である。また軸表面においては円周方向と長手 (軸) 方向である。

まず、丸棒材の 3 サイズの測定結果を表 2.1.3(a) ~ (c) に示す。丸棒材は概ね圧縮応力が残留しており、例えば特殊螺旋ボルトの木材への挿入時に大きな引張荷重が作用しても破壊に対する抵抗が安全側に作用するものと判断される。なお、位置 C の半径方向の測定において引張応力 (表中の赤字記載) の残留が見受けられるが、信頼限界値が高い (赤字で記載)ことから、切断したサンプルのネジ元と軸とに段差が残っており、回折 X 線がうまく測定できなかったものと推察される。なお、仮に半径方向に多少の引張応力が残留していてもこの方向に対する負荷は作用しないと考えられるので、特殊螺旋ボルトの強度に対する問題は無いものと考えられる。

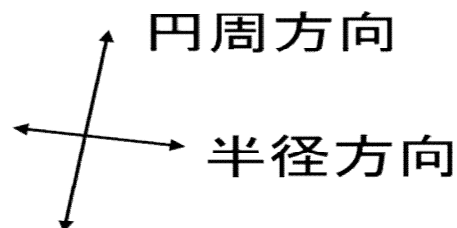
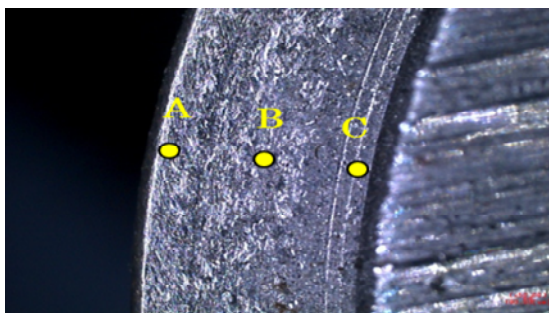


図 2.1.1 ネジ山面の残留応力測定方向

表 2.1.3(a) 外径 26mm 品の残留応力測定結果 (MPa)

LSB-26mm		S45C		SS400	
ネジ山	方向	残留応力	信頼限界値	残留応力	信頼限界値
A	円周 半径	-183	± 28.3	-103	± 7.5
		-287	± 34.5	-6.0	± 19.2
B	円周 半径	-266	± 28.0	-130	± 6.6
		-513	± 17.9	-250	± 35.6
C	円周 半径	-232	± 53.4	-204	± 10.6
		-282	± 51.7	-136	± 18.5
軸	円周 長手	-341	± 19.7	-130	± 21.8
		-126	± 13.9	-63.5	± 22.3

表 2.1.3(b) 外径 31mm 品の残留応力測定結果 (MPa)

LSB-31mm		S45C		SS400	
ネジ山	方向	残留応力	信頼限界値	残留応力	信頼限界値
A	円周 半径	-112	± 65.6	-212	± 18.7
		-67.4	± 19.5	-35.0	± 23.9
B	円周 半径	-482 62.5	± 38.6 ± 156	-420 -13.0	± 53.2 ± 8.76
C	円周 半径	-709 187	± 33.7 ± 74.5	-530 61.5	± 24.2 ± 102
軸	円周 長手	-310	± 40.5	-341	± 53.4
		-41.2	± 28.8	-79.4	± 14.2

表 2.1.3(c) 外径 33mm 品の残留応力測定結果 (MPa)

LSB-33mm		S45C		SS400	
ネジ山	方向	残留応力	信頼限界値	残留応力	信頼限界値
A	円周 半径	-60.0	± 20.4	-270	± 18.7
		-69.2	± 11.3	-158	± 23.9
B	円周 半径	-33.3 90.6	± 35.4 ± 53.3	-199 35.7	± 49.3 ± 43.5
C	円周 半径	-62.9 166	± 18.2 ± 22.4	-76.6 8.2	± 84.3 ± 108
軸	円周 長手	-64.2	± 34.6	-298	± 36.3
		52.0	± 23.5	-124	± 10.2

次に、パイプ材の軸位置に対する残留応力測定結果を表 2.1.4(a)～(c)に示す。それぞれ、始端、中間、終端における測定結果である。位置 C における引張応力の残留は丸棒材と同じ原因と考えられるが、注目すべきは終端位置で引張応力の残留が目立つことである。この原因は、加工時の終盤に素材の歩みが無くなり強制的に押し出して加工したことが原因と考えられる。ただし、この調査品を試作した時点ではそのように加工されたが、現在では、ダイス回転速度などの調整によって歩みの停止が解消され、より良好な加工条件が特定されていることを付記しておく。

表 2.1.4(a) パイプ材始端の残留応力測定結果 (MPa)

LSB1-3 (始端)		押し出し方向面		押し出し対面	
ネジ山	方向	残留応力	信頼限界値	残留応力	信頼限界値
A	円周	-225	± 11.5	-288	± 14.8
	半径	-438	± 57.3	-392	± 44.3
B	円周	-229	± 16.5	-185	± 8.1
	半径	-339	± 28.3	241	± 380
C	円周	-328	± 18.6	-171	± 10.2
	半径	-549	± 12.6	688	± 630
軸	方向	残留応力	信頼限界値	残留応力	信頼限界値
外径	円周	-133	± 6.5	47.2	± 41.2
	長手	-93	± 9.8	-596	± 18.2
内径	円周	105	± 3.3	136	± 62.2
	長手	-177	± 23.1	-34	± 23.8

表 2.1.4(b) パイプ材中間の残留応力測定結果 (MPa)

LSB1-2 (中間)		押し出し方向面		押し出し対面	
ネジ山	方向	残留応力	信頼限界値	残留応力	信頼限界値
A	円周	-167	± 18.3	-227	± 4.4
	半径	-360	± 49.4	-292	± 130
B	円周	-242	± 9.1	-184	± 9.9
	半径	-342	± 37.7	-469	± 65.6
C	円周	-284	± 11.2	-209	± 19.8
	半径	-489	± 99.7	-269	± 91.2
軸	方向	残留応力	信頼限界値	残留応力	信頼限界値
外径	円周	-82	± 20.1	29	± 30.3
	長手	-24	± 19.2	-111	± 17.8
内径	円周	97	± 31.3	23	± 45.2
	長手	-80	± 30.5	33	± 15.4

表 2.1.4(c) パイプ材終端の残留応力測定結果 (MPa)

LSB1-1 (終端)		押出し方向面		押出し対面	
ネジ山	方向	残留応力	信頼限界値	残留応力	信頼限界値
A	円周	62	± 31.6	2.9	± 7.3
	半径	75	± 90.3	-74	± 34.8
B	円周	88	± 55.8	-8	± 24.9
	半径	232	± 136	-376	± 47.5
C	円周	142	± 78.2	26	± 16.3
	半径	366	± 256	-337	± 113
軸	方向	残留応力	信頼限界値	残留応力	信頼限界値
外径	円周	-62	± 35.1	-73	± 14.9
	長手	-148	± 17.3	-196	± 50.0
内径	円周	108	± 11.8	54	± 20.2
	長手	-446	± 27.1	-37	± 17.4

2.1.2 特殊螺旋ボルトの性能評価

2.1.2.1 高引抜耐力の特殊螺旋ボルトの開発

特殊螺旋ボルトの引抜耐力については、今年度、大径ボルト及び小径ボルトの複数本利用を中心に検討した。また、特殊螺旋ボルトのネジ込抵抗について検討した。

ネジ込性能の評価

特殊螺旋ボルトは、先穴を開けた後に、シンプルトルコン（電動パワーレンチ）を用いて自力で木材にネジを切りつつ挿入される。挿入の際のネジ込トルクが大きいと、装置の能力不足に陥ったり、非常に時間がかかることや装置の耐久性にも影響を与えてくる。そこで、ネジ込み時のトルクや所要時間を計測し、適正な加工条件を検討した。

特殊螺旋ボルトは、既存の LSB35-27 ボルトを用いることとし、現在の最長深さ 445mm を条件に、直交方向、平行方向をそれぞれ行った。測定は、埋め込み深さ 50mm ごとに、時間と回転トルク計測を行った。

試験結果を図 2.1.2 に一括して示した。ねじ込みトルクは、並行では埋め込みが深くなると減少した傾向を示したが、直交ではほとんど変わらない傾向が認められた。トルク値は、平行で 650～700Nm だったが、直交はやや低く 600Nm 余りであった。ほとんどが、当初目標の 700Nm 以下であり問題の無いレベルである。埋め込み深さが大きくなるとねじ込みトルクがさがっているのは、機械に無断変速ギアが内蔵されており、トルクが大きくなると自動的にギアを変換し、低速ギアに変換しているためと思われる。50mm 間隔での所要時間や、挿入速度の変化をみると、埋め込みが深くなると 50mm 節間の所要時間はましているし、速度が落ちていることから明らかである。600～700Nm レベルに、回転トルクを抑えてねじ込むのが機械的にも無理がないものと考えられる。今後、多様な特殊螺旋ボルトの直径での適正なトルク、速度を明らかにしていく必要がある。

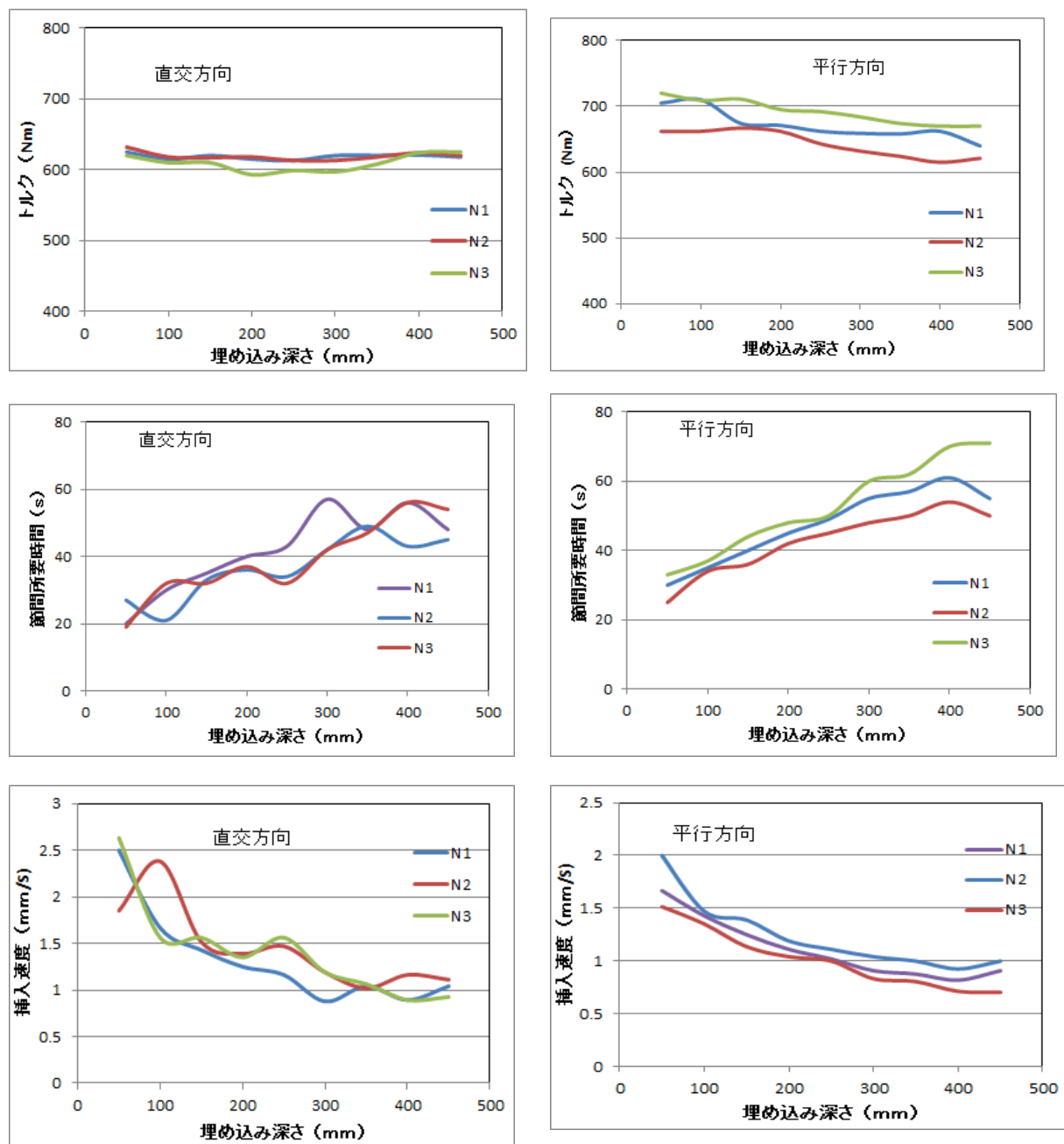


図 2.1.2 特殊螺旋ボルトねじ込み試験結果

2.2 変形金物の最適設計、性能評価及び加工技術

[実施担当：株式会社グランドワークス、国立大学法人富山大学、国立大学法人信州大学、富山県工業技術センター]

2.2.1 変形金物の設計・製作

2.2.1.1 ハイブリッド型変形金物構成部材の繰返し引張圧縮疲労試験

1) 試験方法

昨年度に引き続き、修正を加えたハイブリッド型変形金物外側構成部材を対象に疲労強度試験を実施した。ハイブリッド型変形金物外側構成部材（板厚 9 mm、材質 SS400）は昨年度の試験体は図 2.2.1 に示すとおりで板幅 7mm であった。

本年度は、公開振動実験で柱梁継手に利用された変形金物外側構成部材の疲労挙動を調べた。

試験には、(株)鷺宮製作所製 型式 FT-S を用いた。

疲労試験方法は変位制御方式とし、正負の所定変位量（振幅）を繰返し試験体に図 2.2.2 に示す方向に負荷した。

負荷変位速度は最大 0.1mm/sec とし、最大塑性変位量 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0mm となるよう正負繰返し負荷

するサイン波形の低サイクル両振り疲労試験を実施した。

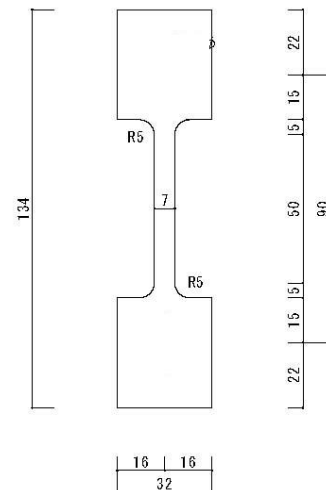


図 2.2.1 ハイブリッド型変形金物外側部材

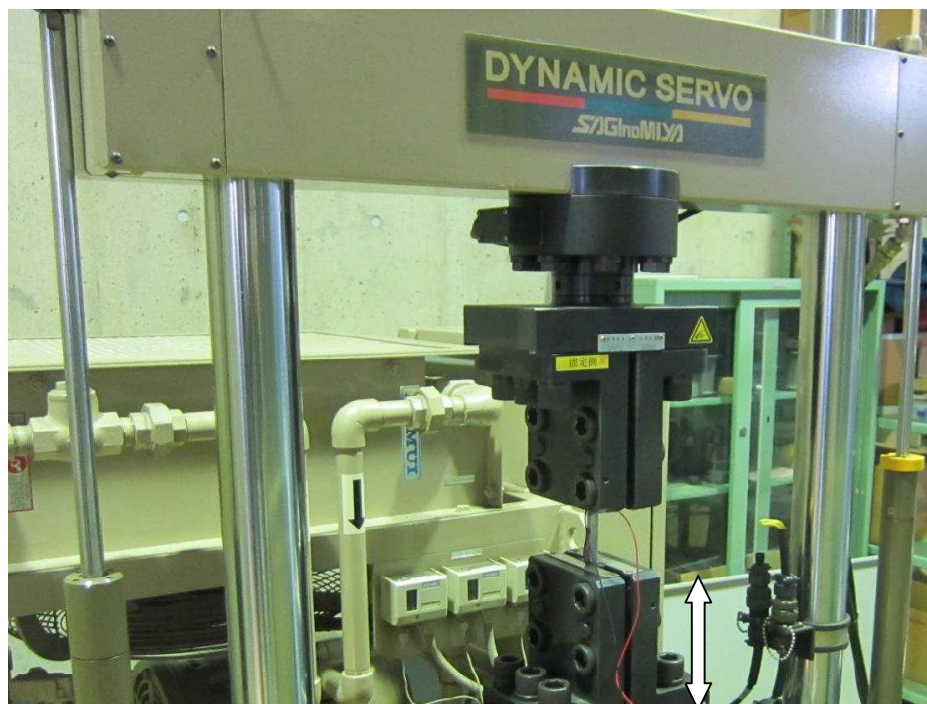


図 2.2.2 試験体及び試験中の外観写真
（写真中の白矢印は荷重負荷方向を示す）

2) 試験結果

疲労試験を実施する前に、試験体をストローク速度 0.1 mm/sec で引張試験を実施した。

その結果、弾性伸び量が 0.59mm と約 0.6mm であることが認められた。そこで、最大塑性変位量が、0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0mm となるように、総変位量（片側）

0.7, 0.8, 1.1, 1.6, 2.6, 4.6mm の両振り振幅の疲労試験を実施した。

疲労試験実施中、各サイクルにおける最大（最小）応力を示したものを図 2.2.3 示す。

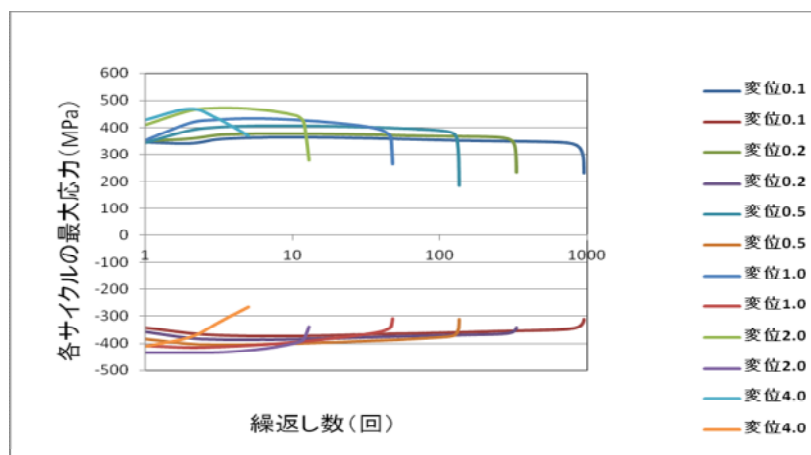


図 2.2.3 各サイクルにおける最大（最小）応力

また、塑性変位量と破断寿命（各サイクルの最大応力が 3/4 以下に低下する回数）の関係について調べた結果を図 2.2.4 示す。

図中赤色の□が今回の試験結果である。なお、黒色△は、昨年度実施した疲労試験の結果を合わせてプロットしたものである。

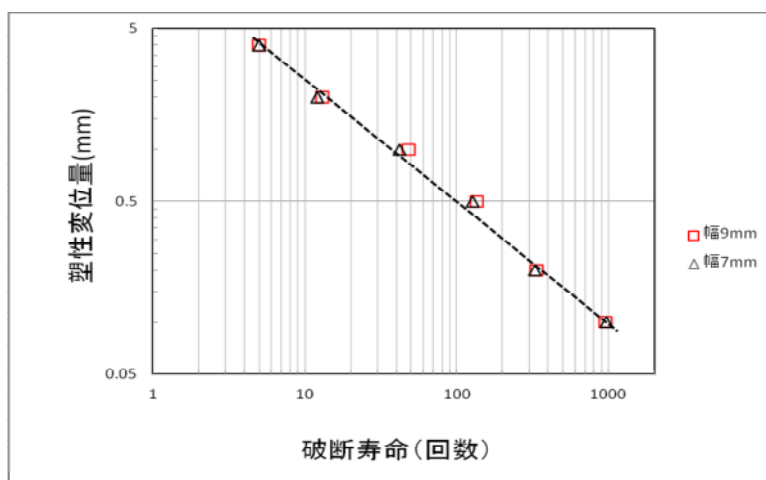


図 2.2.4 塑性変位量と破断寿命の関係

図から明らかなように、昨年度の疲労寿命試験結果と、今回公開振動実験に使用した変形金物外側構成部材の疲労寿命特性が再現性良くほぼ一致している。板幅の変化が、疲労寿命特性に全く影響を与えないことを示す結果となった。材質及び板厚・形状（ストレート）が一致し、表

面処理など生産方法が同じで表面性状が同じ（目視観察レベル）であれば疲労寿命が変化しないことが確認された。

疲労試験で破断後の試験体の外観写真を図 2.2.5 示す。

塑性変位量が 0.5mm 以上の疲労試験破断後試験体には、座屈が目視確認された。

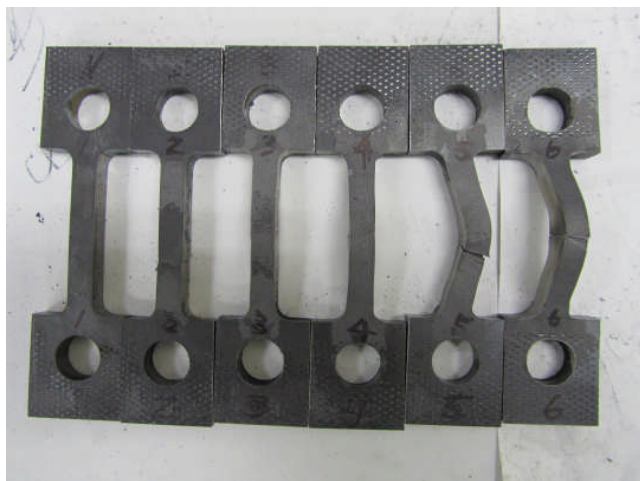


図 2.2.5 疲労試験で破断後の試験体の外観写真。

（写真左から 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0mm の塑性変位量を振幅とする両振り低サイクル疲労試験を行い、破断した後の試験体の外観。）

2.2.2 締結ユニットの性能評価

2.2.2.1 締結ユニット構造部材（鋼製）の腐食試験

腐食試験条件

キャス試験（JIS Z 2371）
溶液： 5%塩水＋塩化銅（Ⅱ）0.205g＋
（pH3.1～3.3）
噴霧室内温度：50℃
供給空気：0.098MPa
試験時間： 8, 24, 72, 96, 120 (h)

中性塩水噴霧試験（JIS Z 2371）
溶液： 5%塩水
噴霧室内温度：35℃
供給空気：0.098MPa
試験時間： 72, 168, 336, 504, 672, 840, 1



図 2.2.6 腐食試験条件

締結ユニット構造部材（鋼製）について、図 2.2.6 に示すように、塩水噴霧試験機を用い、JIS Z 2371 に定めるキャス試験、中性塩水噴霧試験を実施した。昨年度は、キャス試験の結果について報告したが、本年度は、塩水噴霧試験の結果も加えて報告する。

塩水噴霧試験を行った試験体の写真を図 2.2.7～図 2.2.8 示す。

塩水噴霧試験 クロメート処理品

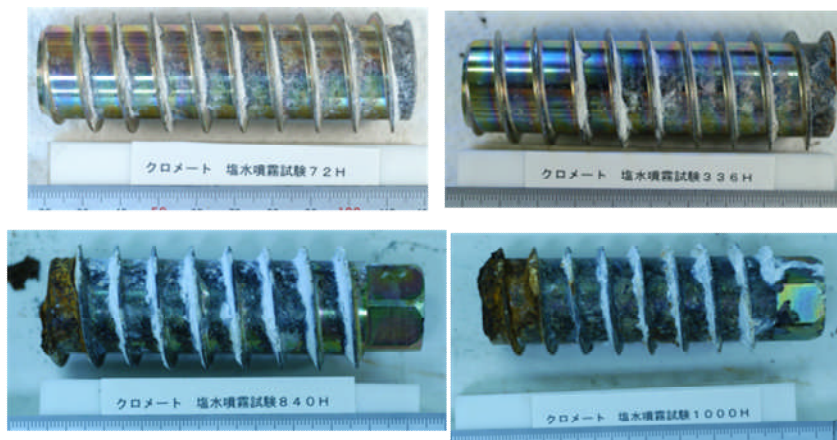


図 2.2.7 塩水噴霧試験結果 1

塩水噴霧試験 カチオン電着塗装処理品

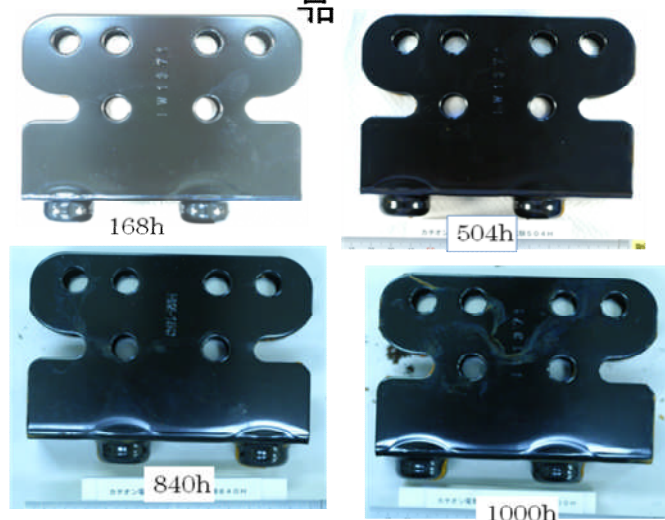


図 2.2.8 塩水噴霧試験結果 2

【まとめ】

・キヤス試験

- 1 カチオン電着塗装品については、正面は 120h 経過しても腐食痕跡は認められないが、端面については、24h 経過で塗装の剥離及び腐食（赤さび）が発生した。
- 2 クロメート処理品については、24h 経過では明瞭な腐食痕跡は認められなかったが、72h 以降では、スクリーンの根元を中心に腐食が発生した。
- 3 ジオメット処理品については、24h 経過でネジ部で腐食が発生し、96h 以上では、激しく腐食が進行した。

・塩水噴霧試験

- 1 クロメート処理品は、336h までは、腐食の進行は遅く、一部表面では、金属光沢が認められた。504h 以降では、ほぼ全域で腐食が進行していた。
- 2 ジオメット処理品については、1000h 経過しても腐食発生はほとんど認められなかった。
- 3 カチオン処理品は、穴や端部での腐食が認められたが、平面では、ほとんど腐食されなかった。1000h 経過しても、腐食状況について変化は小さかった。

2.3 締結ユニット搭載型建築の構造計算による最適構造体の試算

[実施担当：株式会社グランドワークス、上田建築設計事務所]

2.3.1 目的

平成 25 年度までは、高剛性、耐力の締結ユニットを用いたフレーム構造が適用可能な住宅の桁行き間隔、スパン、積雪条件等について検討した結果、通常的地域での適用に実用上問題のないことが確認された。

平成 26 年度では、計画当初、締結ユニットを用いた建物の構造、適用条件について、事務所や中規模の木造建築物など、より拡大した条件での適用性について検討することにして、中・大規模の建築物に適用するためには更なる剛性・耐力の向上や部材のバリエーションが必要なことから、以下の 2 つの目的に変更した。

改良型締結ユニット（ハイブリットダンパー）を用いたモデル住宅プランを作成し、実大振動実験をイメージしやすくし、それに基づいて実験用荷重を算定する。また想定したモデル住宅にハイブリットダンパーが適用可能かを検証する。

（公財）日本住宅・木材技術センターの講習会テキスト「木造ラーメンの評価方法・構造設計の手引き」の設計例と比較し改良型締結ユニットの優位性を明らかにする。

2.3.2 実大振動実験の際に想定したモデル住宅への適用性検証

ダンパー付門型フレームを使用したモデル住宅プランの作成

実用化後のイメージを高める為に、開発したダンパー付門型フレームを使用して実際に建設されるであろうモデル住宅プランを作成した。図 2.3.1～図 2.3.4 を示す。そしてそのモデルプランに基づいて実験用の上載荷重を算出した。表 2.3.1～表 2.3.3 を示す。門型フレームは実際の振動実験に用いる X 方向 3 m × 2 スパン、Y 方向 3.64m × 1 スパンとした。

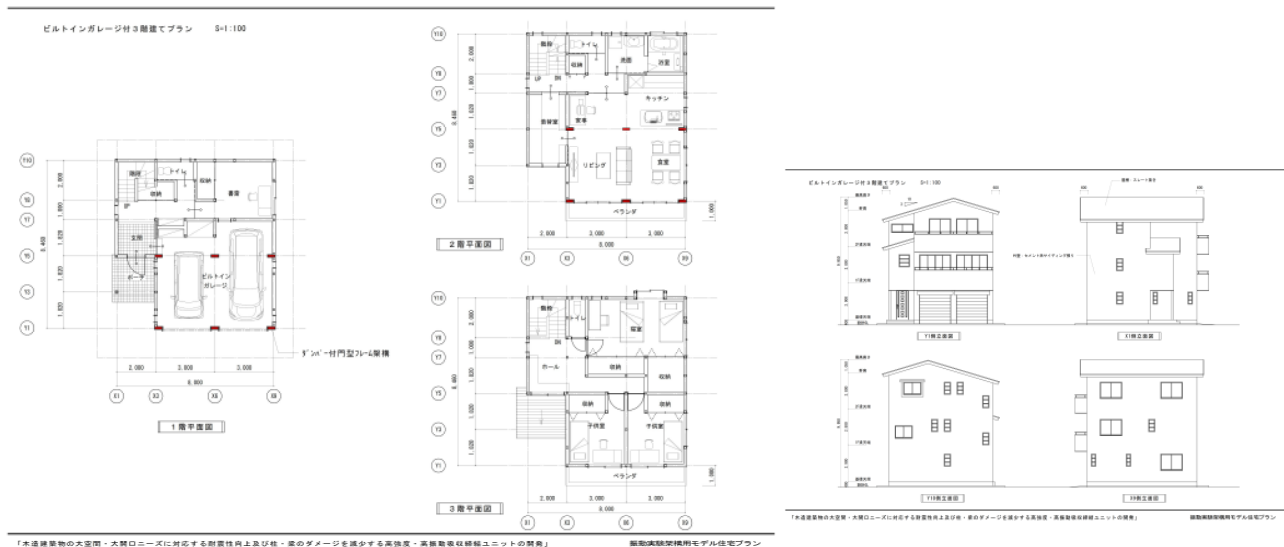


図 2.3.1 作成したモデル住宅プラン 平面図・立面図

地震用重量の算定は門型フレームのゾーニング手法によって支配面積に基づき計算した。

荷重の算定結果

始めに3階建てプランで荷重を算出した結果、振動台の能力（加速度 1 G の場合で 8 t 以下）を超えることがわかった為、2階建てに変更し荷重を再計算した。

- 3階建ての場合 **173kN > 80kN 重量オーバー**

表 2.3.1 門型フレームゾーンの地震用荷重の計算

層	部位	壁長 (m)	壁高さ (m)	面積 (㎡)	単位荷重 (kN/㎡)	荷重 (kN)	層の荷重 W _l (kN)	試験設備 自重W ₀ (kN)	W _l -W ₀ (kN)	上載荷重 W _u (kN)
3層 (3階上部)	3階屋根(勾配3寸)	—	—	28.21	0.408	11.51	35.91		35.91	
	3階軒天(勾配3寸)	—	—	9.47	0.157	1.48				
	3階水平天井	—	—	28.21	0.250	7.05				
	3階勾配天井(勾配3寸)	—	—	0.00	0.262	0.00				
	3階外壁(上半分×壁高2.7m)	15.190	1.350	20.51	0.350	7.18				
	3階内壁(上半分×壁高2.7m)	16.370	1.350	22.10	0.350	7.73				
	3階妻壁	6.000	0.450	2.70	0.350	0.95				
2層 (3階下部+2階上部)	3階外壁(下半分×壁高2.7m)	15.190	1.350	20.51	0.350	7.18	69.43	16.69	52.74	99.72
	3階内壁(下半分×壁高2.7m)	16.370	1.350	22.10	0.350	7.73				
	2階バルコニー壁	8.000	1.100	8.80	0.350	3.08				
	2階床	—	—	28.21	0.940	26.52				
	2階バルコニー床	—	—	6.00	1.150	6.90				
	2階バルコニー/オーガーハンク軒天	—	—	6.00	0.320	1.92				
	2階屋根(勾配3寸)	—	—	1.82	0.408	0.74				
	2階軒天(勾配3寸)	—	—	0.55	0.157	0.08				
	2階水平天井	—	—	30.03	0.250	7.51				
	2階外壁(上半分×壁高2.7m)	13.370	1.350	18.05	0.350	6.32				
	2階内壁(上半分×壁高2.7m)	2.730	1.350	3.69	0.350	1.29				
	2階妻壁	1.000	0.450	0.45	0.350	0.16				
	2階外壁(下半分×壁高2.7m)	13.370	1.350	18.05	0.350	6.32				
	2階内壁(下半分×壁高2.7m)	2.730	1.350	3.69	0.350	1.29				
1層 (2階下部+1階上部)	2階バルコニー壁	8.000	1.100	8.80	0.350	3.08	67.88	18.59	49.29	49.29
	2階床	—	—	30.03	0.940	28.23				
	2階バルコニー床	—	—	6.00	1.150	6.90				
	2階バルコニー/オーガーハンク軒天	—	—	6.00	0.320	1.92				
	1階水平天井	—	—	30.03	0.250	7.51				
	1階外壁(上半分×壁高2.7m)	13.370	1.350	18.05	0.350	6.32				
	1階内壁(上半分×壁高2.7m)	13.370	1.350	18.05	0.350	6.32				
	1階外壁(下半分×壁高2.7m)	13.370	1.350	18.05	0.350	6.32				
	1階内壁(下半分×壁高2.7m)	13.370	1.350	18.05	0.350	6.32				
	1階妻壁	1.000	0.450	0.45	0.350	0.16				
合計							173.21			

● 2 階建ての場合

$$74 \text{ kN} + \text{固定治具 } 6 \text{ kN} = 80 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

表 2.3.2 荷重算定結果（2 階建て）

門型フレームゾーンの地震用荷重の計算

層	部位	壁長 (m)	壁高さ (m)	面積 (m ²)	単位荷重 (kN/m ²)	荷重 (kN)	層の荷重 Wi(kN)	試験架構 自重Wo(kN)	Wt-Wo(kN)	上載荷重 Wi(kN)
2層 (2階上部)	2階屋根(勾配3寸)	—	—	25.94	0.408	10.58	27.80	16.69	11.11	10.34
	2階軒天(勾配3寸)	—	—	4.34	0.157	0.68				
	2階水平天井	—	—	25.94	0.250	6.49				
	2階勾配天井(勾配3寸)	—	—	0.00	0.262	0.00				
	2階外壁(上半分×壁高2.7m)	9.640	1.350	13.01	0.350	4.55				
	2階内壁(上半分×壁高2.7m)	9.640	1.350	13.01	0.350	4.55				
	2階妻壁	6.000	0.450	2.70	0.350	0.95				
1層 (2階下部+1階上部)	2階外壁(下半分×壁高2.7m)	9.640	1.350	13.01	0.350	4.55	49.09	18.59	30.50	28.38
	2階内壁(下半分×壁高2.7m)	9.640	1.350	13.01	0.350	4.55				
	2階床	—	—	25.94	0.940	24.38				
	1階水平天井	—	—	25.94	0.250	6.49				
	1階外壁(上半分×壁高2.7m)	9.640	1.350	13.01	0.350	4.55				
	1階内壁(上半分×壁高2.7m)	9.640	1.350	13.01	0.350	4.55				
合計							76.89	35.28	41.61	38.72
							Wo+Wi=		74.00	

上記より試験体に付加する積載重量は屋根 10.3kN、2 階床 28.4kN

ハイブリッドダンパーのモデル住宅への適用性検証

表 2.3.3 Ai 分布と各層（階）地震力の計算（ゾーニングの場合）

層 (階)	層の荷 重 Wi (kN)	層の支持 荷重 ΣWi (kN)	αi	高さ と 軒高の 平均 h (m)	建築物の 固有周期 T (s)	層せん断 力 分布係数 Ai	地震 地・ 係数 Z	振動特 性 係数 Rt	標準 せん断 力 係数 Co	層せん断 力 係数 Ci	地震 力 割増 β	地震力 QEI (kN)
3	35.91	35.91	0.207	9.43	0.283	1.609	1.00	1.0	0.20	0.322	1.5	17.33
2	69.43	105.34	0.608			1.206				0.241		38.12
1	67.88	173.21	1.000			1.000				0.200		51.96

層せん断力係数は建物全体のものを採用する

「耐震等級」

耐震等級 3 とし、地震力の割増 $\beta = 1.5$ とした。

解析モデルは 2 層とし、3 層の地震力は 2 層に階高の比で割増して入力する。

門型フレームの許容応力度計算

- ・通常の構造計算（許容応力度計算）に基づいて地震時の性能を検証した。
- ・ダンパーの剛性（材端バネ）は実験によって求まっている値を用いるが、求まっていないものは推定した。

実験値 柱脚端部:4700kNm/rad 柱脚中央:5300kNm/rad
 ト型梁端:3600kNm/rad

図 2.3.2 解析モデル・仮定荷重

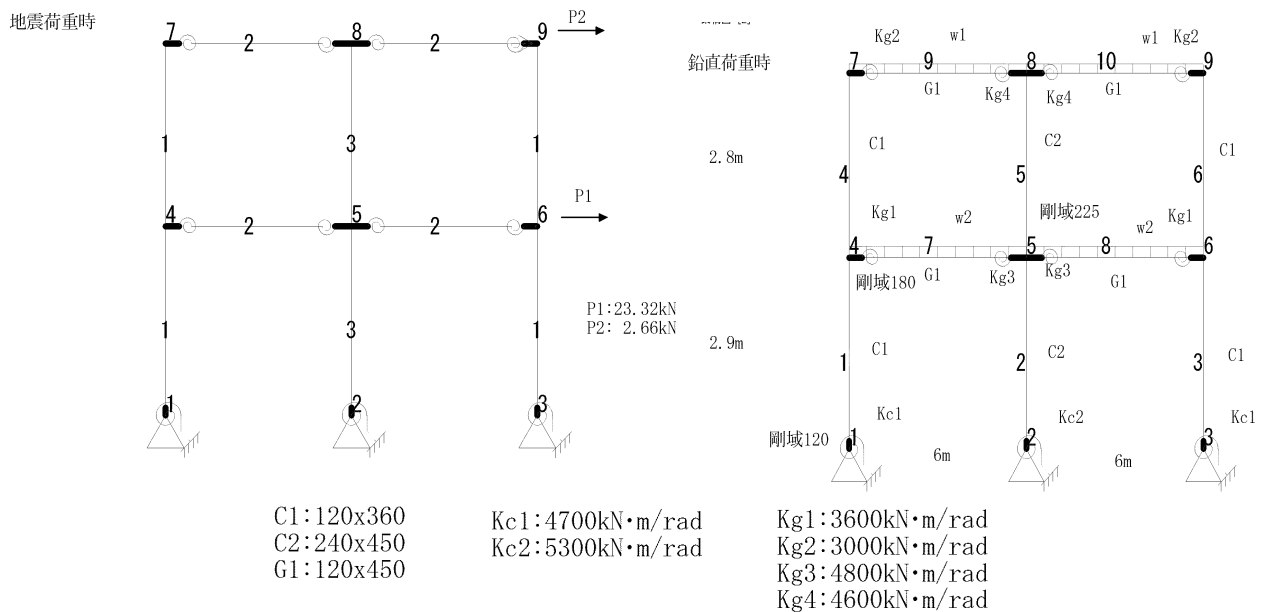
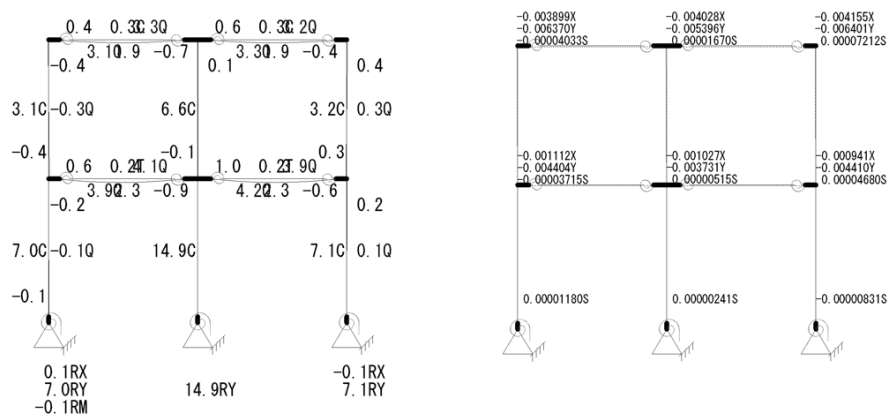


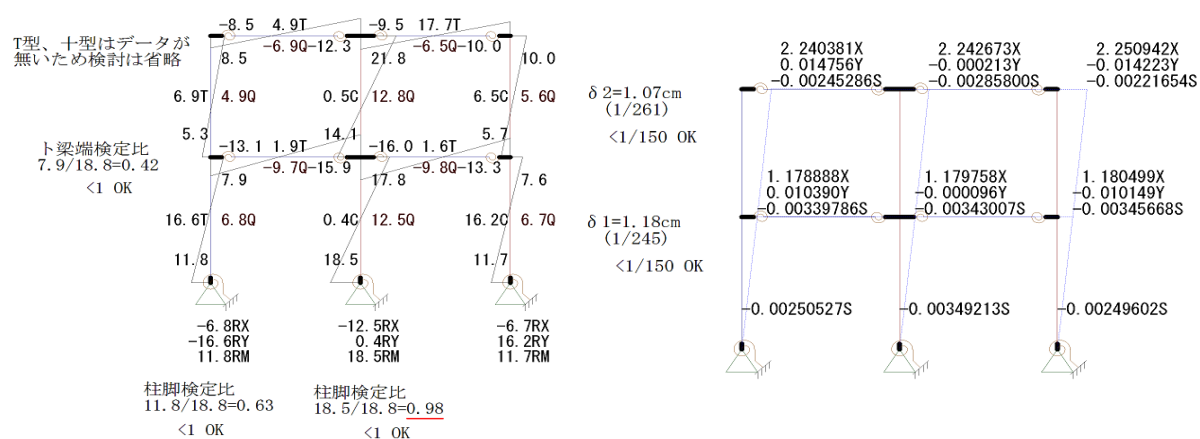
図 2.3.3 解析結果（長期荷重時）



応力図

変位図

図 2.3.4 解析結果（地震荷重時）



応力検定比 <1.0 OK

中央の柱は余裕が無いので部材なりに柱脚

耐力も上げた方がよいと思われる

2.3.3 結果及び考察

改良型締結ユニット（ハイブリットダンパー）を用いたモデル住宅プランを作成し、実大振動実験をイメージしやすくし、それに基づいて実験用荷重を算定した。3階建てモデルでは荷重が振動台の能力を超えてしまうため、2階建てのモデルにて実験用荷重を算出せざるをえなかった。

振動実験終了後、想定した3階建てモデル住宅にハイブリットダンパーが適用可能かを検証した。

その結果、剛性・耐力共に適用可能であることが確認できた。但し、中柱の応力検定比がぎりぎりの状態であり、部材の大きさに応じて柱脚の耐力も大きくした方が良いと考えられる。

（公財）日本住宅・木材技術センターの講習会テキスト「木造ラーメンの評価方法・構造設計の手引き」の設計例と比較し改良型締結ユニットの優位性を検証した。

その結果、テキストのモデルプランの引きボルト接合よりハイブリットダンパーの方が剛性、耐力共大きく上回り性能が高いことが明確となった。

応力解析に際し、実験で求まっていない接合部の性能は、グランドワークス社の既往の門型ラーメンの実験結果を参考に推定したが、これらの性能は今後確認する必要がある。更に、設計の多様性を図るためには部材サイズのバリエーションを増やす必要があると考えられる。

2.3.4 まとめ

改良型締結ユニット（ハイブリットダンパー）は、3階建てモデル住宅に十分適用が可能であること、また引きボルト形式の接合部より剛性・耐力共大きく上回り性能が高いことが検証された。

今後は求まっていない接合部の性能を明らかにすると共に、部材サイズのバリエーションを増やすことや中大規模木造建築に適用させる為に更なる剛性・耐力アップを図ることが望ましいと考えられる。

2.4 締結ユニットを搭載したフレーム体の性能評価

「実施担当：株式会社グランドワークス、上田建築設計事務所、国立大学法人京都大学」

2.4.1 構造解析シミュレーションによるフレーム体の性能評価

2.4.1.1 振動試験体事前応答解析

1) 応答解析に用いる接合部の骨格曲線と履歴性状

振動台実験を実施する前に、試験体の挙動を大凡予想するために、試験体を3次元半剛節骨組み構造でモデル化し、人口地震波であるBSL波とJMA神戸波NS成分の2種類の地震波を用いて時刻歴応答解析を行った。集成材2連2層箱型の実大試験体の概要を図2.4.1に、地震波の時刻歴形状と加速度応答スペクトルを図2.4.2、2.4.3に示す。

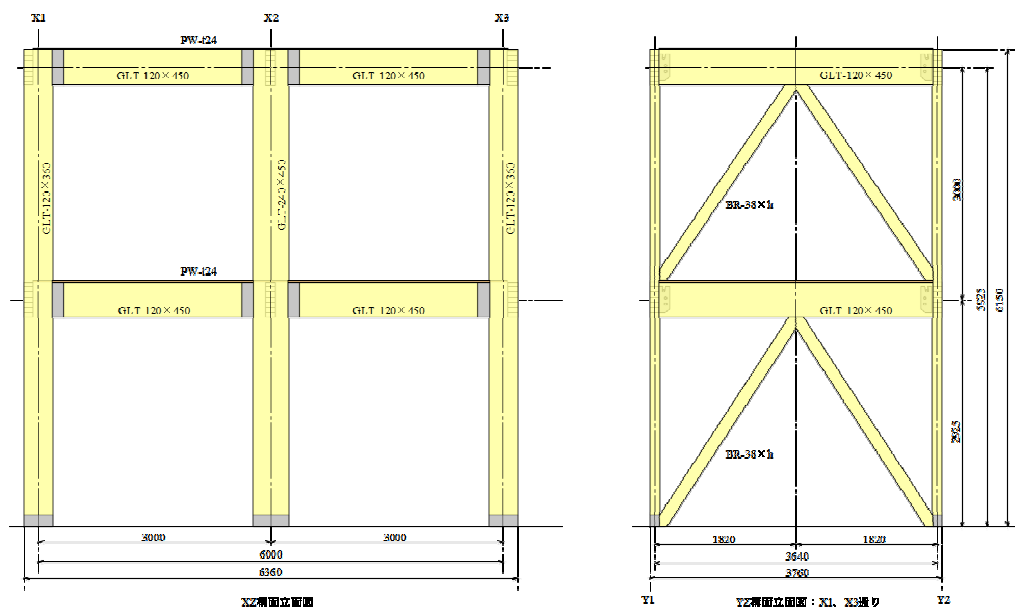
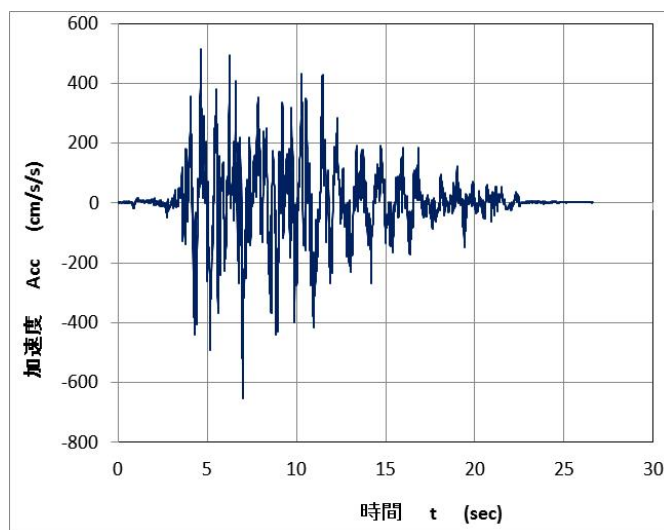
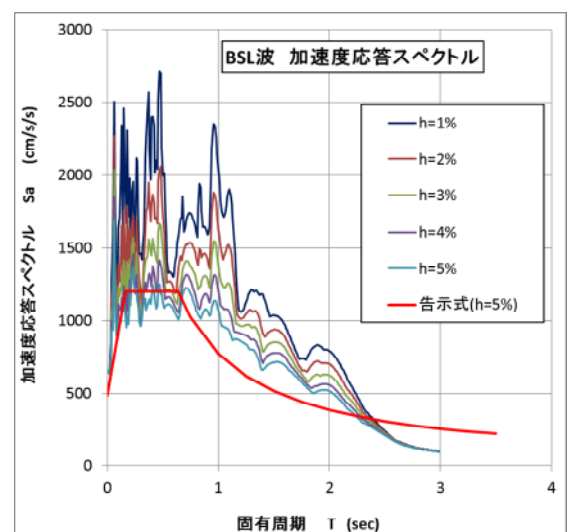


図 2.4.1 振動試験体形状

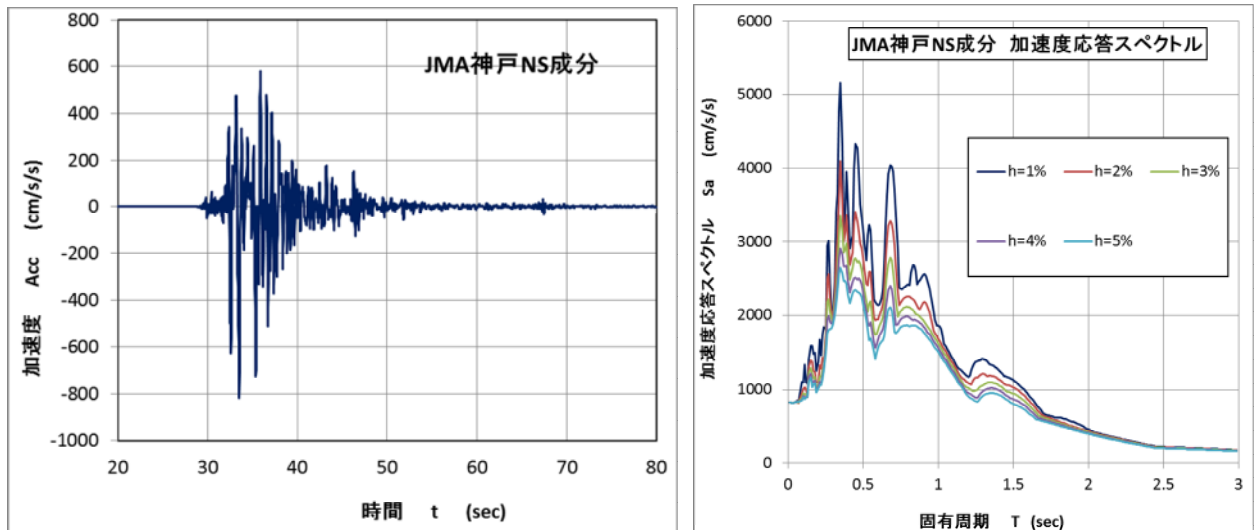


a)BSL 波の時刻歴形状



b)BSL 波の加速度応答スペクトル

図 2.4.2 BSL 波の時刻歴形状と加速度応答スペクトル

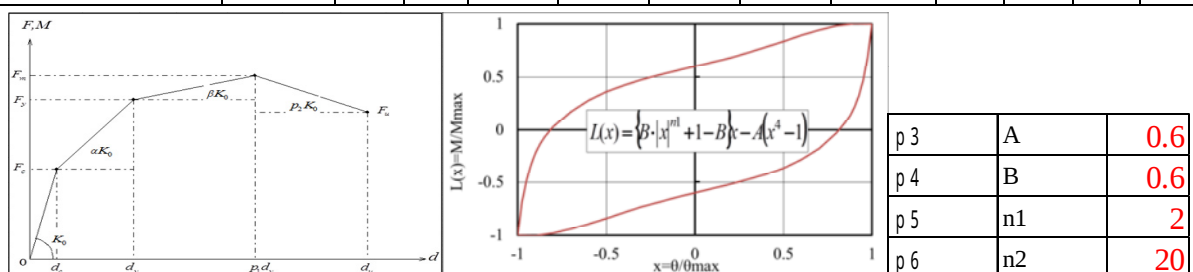


a) JMA 神戸波 NS 成分の時刻歴形状 b) JMA 神戸波 NS 成分の加速度応答スペクトル
図 2.4.3 JMA 神戸波 NS 成分の時刻歴形状と加速度応答スペクトル

非線形応答解析を実行するためには、各接合部の骨格曲線とモーメント-回転角関係の履歴性状をモデル化する必要がある。そこで GW 社が事前に実施した接合部の静的正負繰返し回転加力実験のデータを用いて、各接合部のモーメント-回転角の骨格曲線を 4 折れ線関係で、また履歴性状を 4 パラメータ固定型 NCL モデル²⁾で近似した。表 2.4.1 を示す。

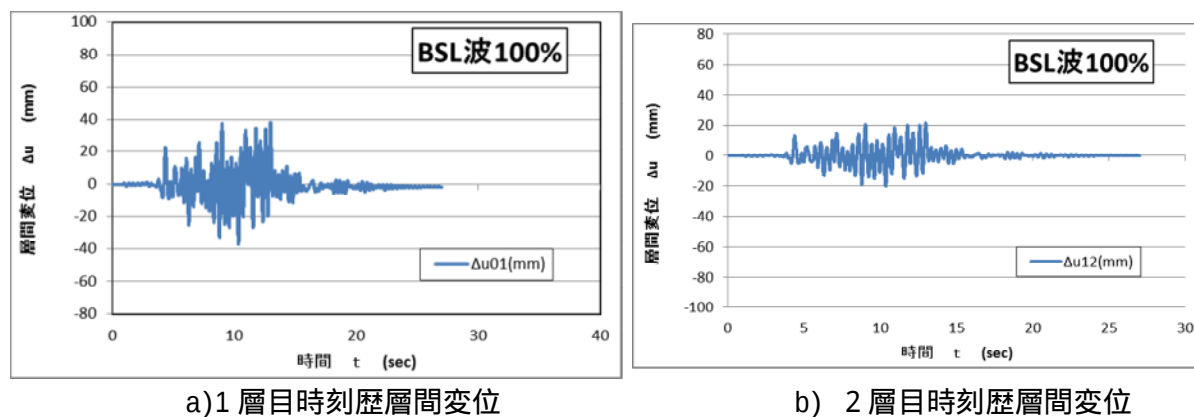
表 2.4.1 供試試験体の全半剛節接合部のモーメント-回転角の骨格曲線並びに履歴性状パラメータ

接合部部位	記号	M_c	M_y	K_0	α	β	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
		kNm		kNm/rad								
側柱柱脚	S0-L	26	34	4643	0.233	0.031	3.571	-0.010	0.6	0.6	2	20
中央柱柱脚	S0-I	26	34	5778	0.308	0.038	7.111	-0.013	0.6	0.6	2	20
1 層目側柱-梁	S1-L	26	34	3714	0.308	0.052	5.714	-0.030	0.6	0.6	2	20
2 層目側柱-梁	S2-L	26	34	3714	0.308	0.052	5.714	-0.030	0.6	0.6	2	20
1 層目中央柱-梁	S1-CR	13	17	4900	0.308	0.052	5.714	-0.030	0.6	0.6	2	20
2 層目中央柱-梁	S2-CR	13	17	4500	0.308	0.052	5.714	-0.030	0.6	0.6	2	20



2) BSL 波 100%入力時の結果

図 2.4.4 に時刻歴層間変位を、図 2.4.5 に層間せん断力 - 層間変位の関係を示す。



a) 1 層目時刻歴層間変位

b) 2 層目時刻歴層間変位

図 2.4.4 時刻歴層間変位

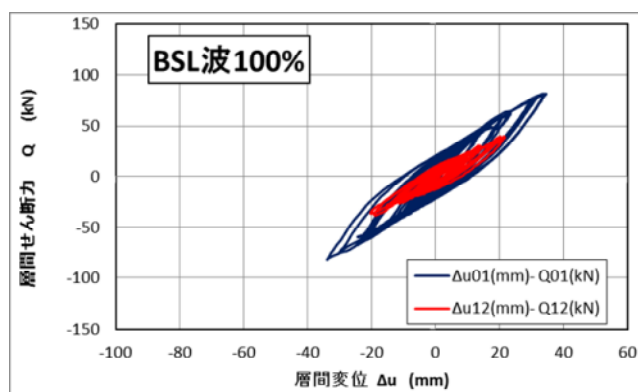
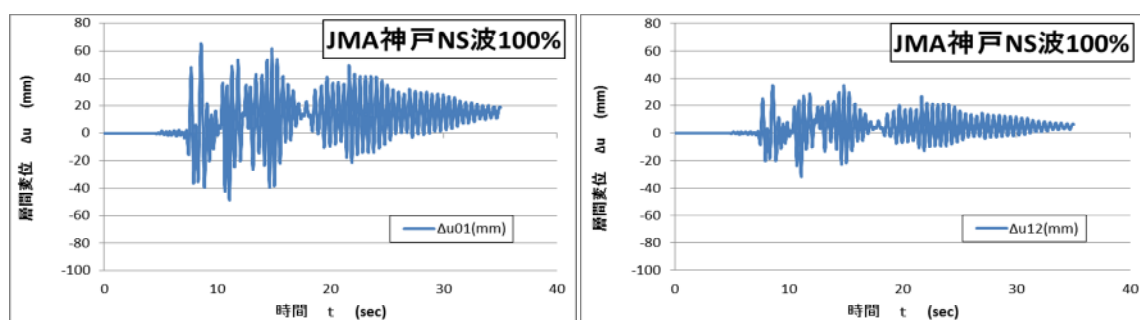


図 2.4.5 層間せん断力 - 層間変位の関係

3) JMA 神戸 NS 波 100%入力時の結果

図 2.4.6 に時刻歴層間変位を、図 2.4.7 に層間せん断力 - 層間変位の関係を示す。



a) 1 層目時刻歴層間変位

b) 2 層目時刻歴層間変位

図 2.4.6 時刻歴層間変位

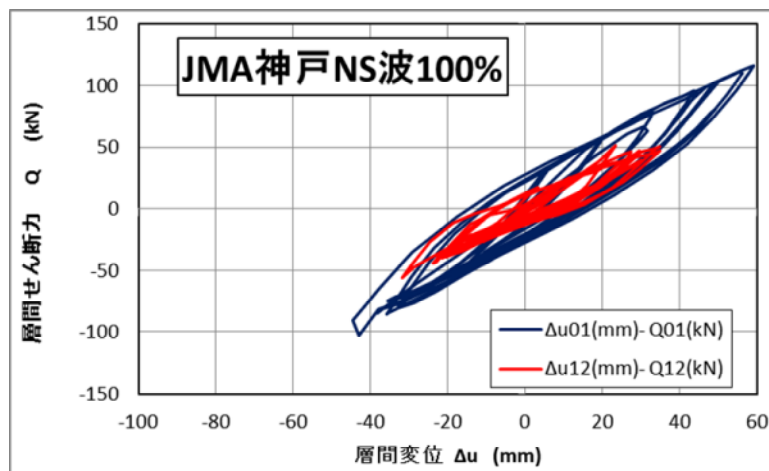
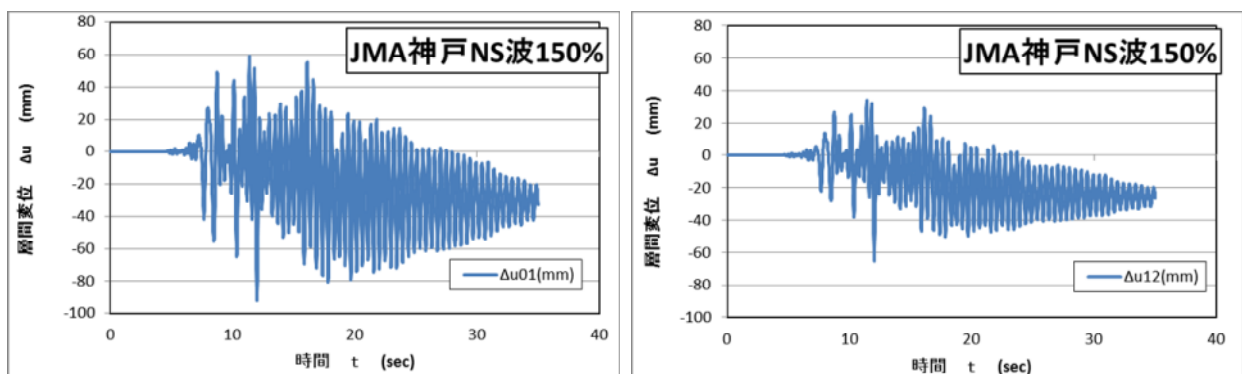


図 2.4.7 層間せん断力 - 層間変位の関係

4) JMA 神戸 NS 波 150%入力時の結果

図 2.4.8 に時刻歴層間変位を、図 2.4.9 に層間せん断力 - 層間変位の関係を示す。



a) 1 層目時刻歴層間変位

b) 2 層目時刻歴層間変位

図 2.4.8 時刻歴層間変位

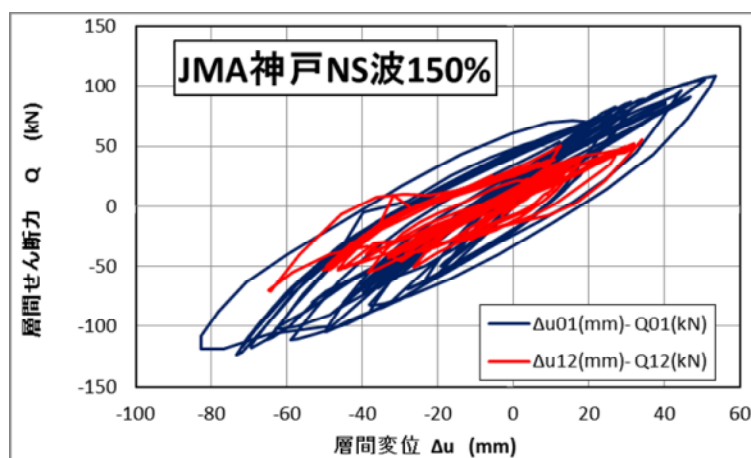


図 2.4.9 層間せん断力 - 層間変位の関係

2.4.2 フレーム体の構造物試験

2.4.2.1 締結ユニットで接合されたラーメンフレームの水平加力試験

締結ユニットは、大地震時に変形金物が塑性変形し、地震力を吸収して建物の揺れを軽減して、構造を守るのが大きな役割である。特に、木材との接合部となる螺旋ボルト埋め込み部は損傷を受けずに、変形金物の交換で建物性能を再現できることを目標にしている。

ここでは、最小構造体である締結ユニットで接合されたラーメンフレームに水平加力を加え、最終的に破壊まで負荷した後に、金物を交換し、ラーメンフレームの性能が再現できるかを検討した。

試験体は、スパン 2923mm、高さ 2725mm のラーメンフレームでオウシュウアカマツ集成材柱 105×360、120×450mm を柱梁締結ユニット、柱脚締結ユニットで接合したものである。特殊螺旋ボルトは既存の 35-27mm を用い、木口には埋め込み 490mm（働き 445mm）、直交方向は埋め込み 360mm（働き 345mm）となる。試験体を図 2.4.10 に示す。

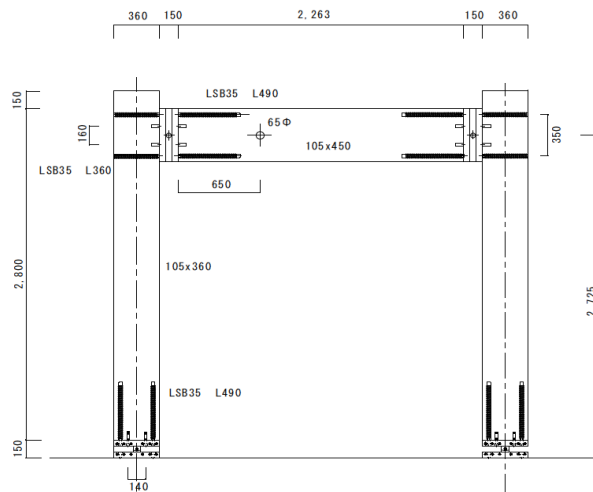


図 2.4.10 ラーメンフレーム試験



図 2.4.11 試験状況

加力は、耐力壁のせん断試験にしたがい、層間変形角の 1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50 に 1/30 を加えて各 3 回の繰り返しを行ったのち破壊まで負荷した。

試験状況を図 2.4.11 に示す。N1 の試験体では、押し 1/30rad の繰り返し中に金物の座屈によるねじれと荷重低下が起きたので、引きの最終負荷に向かった。引きでもねじれが顕著になってきたため、1/14rad で負荷を終えた。変形金物の変形状況を図 2.4.12 に示す。面外座屈をおこした変形金物のねじれ、破断の状態が認められた。

負荷終了後に、初期位置に戻し、変形金物を交換した。ねじれを含んだために、やや取り外しにくい場合もあったが、特に大きな問題は認められなかった。

交換後、同様の荷重方法で加力試験を行った。試験結果を表 2.4.2 に荷重-層間変形角の包絡曲線を図 2.4.13 に示す。最大荷重、降伏荷重、初期剛性とも N1 と N2 にほとんど数値の差がなく、荷重曲線もほぼ重なった状態にある。

これらの結果から、締結ユニットは、特殊螺旋ボルトに損傷を与えず、交換により初期のフレーム性能を再現できることが示されたと思われる。



図 2.4.12 変形金物の変形状況

表 2.4.2 試験結果

	Pmax	γ (Pmax)	P_y	γ_y	初期剛性 K
	k N	rad	k N	rad	kNm/rad
ラーメン N1	63.4	0.0253	39.2	0.0079	4973.2
ラーメン N2	65.6	0.0385	37.7	0.0072	5239.4

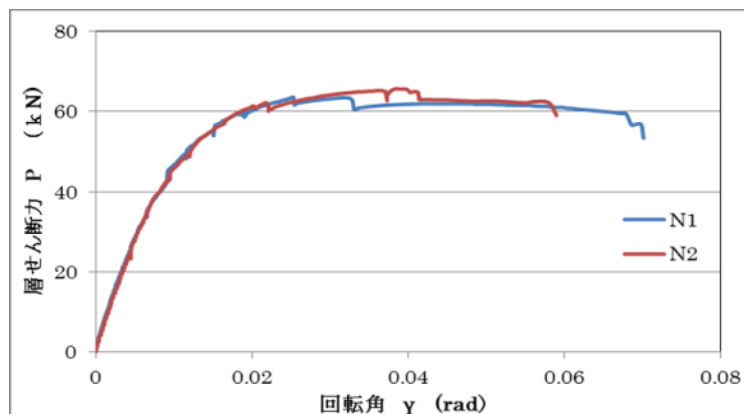


図 2.4.13 金物交換による性能の復元

2.5 実建築物での振動試験における実証試験・評価

[実施担当：株式会社グランドワークス、上田建築設計事務所、国立大学法人富山大学、国立大学法人京都大学、国立大学法人信州大学、富山県工業技術センター]

2.5.1 地震波負荷による大型振動試験とデータ解析

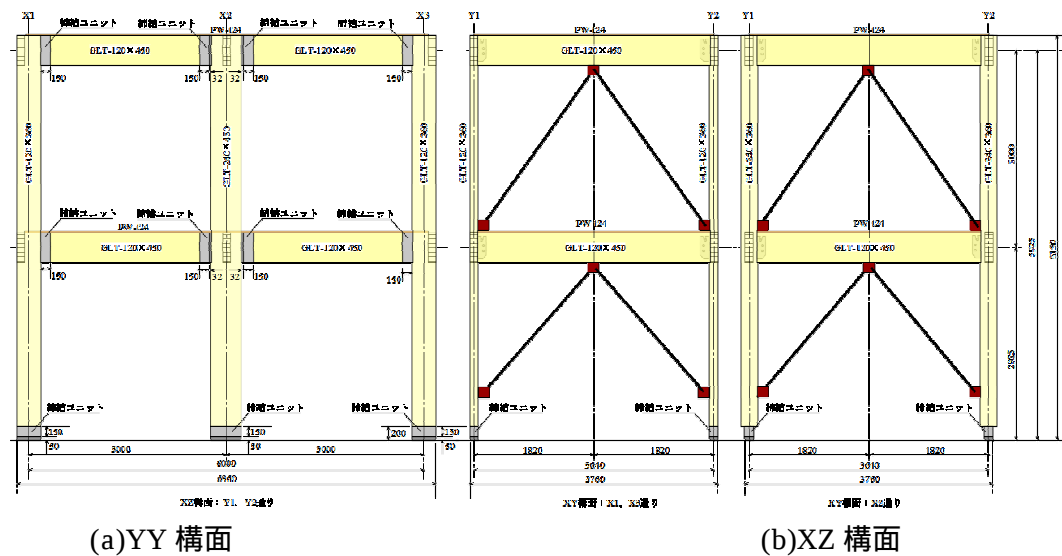
1) 実験の目的

グランドワークス社（以後 GW 社と記す）が開発した集成材純ラーメン用の「締結ユニット」を用いて柱-梁接合部、並びに柱脚接合部を緊結した集成材 2 層 2 スパン骨組み試験体を作成し、2 種類の地震波ならびに試験体の固有周期に近い周期の正弦波を与えて、締結ユニットの制震効果の発現状況を確認する。

2) 試験体

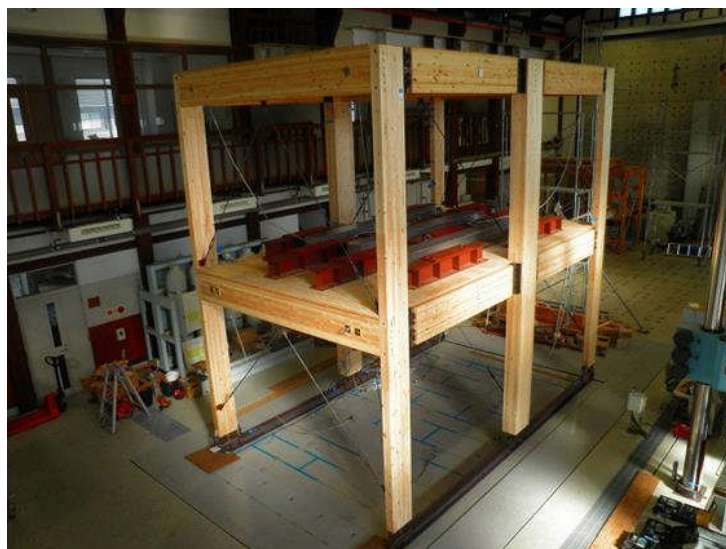
2)-1 集成材 2 層 2 スパン骨組み試験体

GW 社によって設計された集成材 2 連 2 スパン骨組み試験体の概要を図 2.5.1 に示す。



(a)YY 構面

(b)XZ 構面



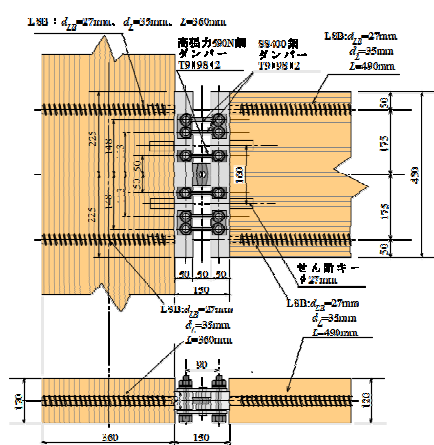
(e) 完成した集成材 2 層 2 スパン供試試験体 (富山県木材研究所)

図 2.5.1 集成材 2 層 2 スパン供試試験体

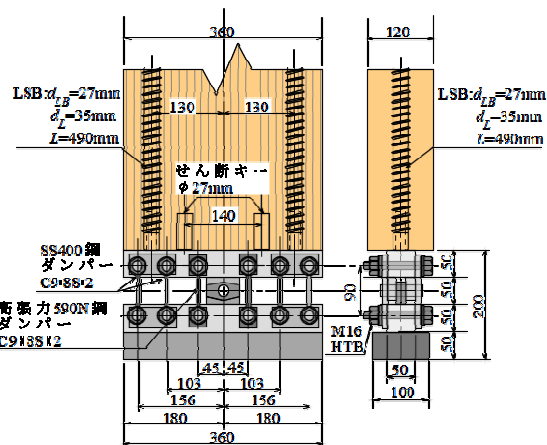
試験体を構成している主要な部材の断面は、側柱が $120 \times 360\text{mm}$ 、中央柱が、 $240 \times 450\text{mm}$ 、そして 1 層目と 2 層目の梁が $120 \times 450\text{mm}$ で、すべてオウシュウアカマツ集成材 E105 F300 である。床構面は厚さ 24mm の構造用合板が横架材にネジ留めされたが、床板と梁の合成効果を排除するため、四周の主要な集成材とは意図的にネジ留めされていない。

2)-2 接合部

柱-梁並びに柱脚接合部の詳細を図 2.5.2 に示す。集成材と締結ユニット間を接合するラグスクリーボルト (以後、LSB と記す) は GW 社が新規に開発した谷径 $d_{Lb}=27\text{mm}$ 、山径 $d_L=35\text{mm}$ のものを用いた。埋込長さは各接合部によって異なる。



側柱 - 梁接合部 (1層、2層とも共通)



側柱柱脚接合部

図 2.5.2 接合部詳細

供試鋼製ダンパーは、本プロジェクトで特別に開発された「ハイブリッドダンパー」と呼ばれるもので、締結ユニット中央部の回転ピンから見て外側2組のダンパー（図 2.5.2 参照）には、大変形時には破断することも許容される SS400 鋼が使用された。一方、内側には破断を許容しない高張力鋼(590N 鋼)が使用され、終局時の構造物の倒壊はこの高張力鋼製のダンパーによって免れることができるよう設計されている（サポイン内部資料による）。

2)-3 計測計画と積載荷重

図 2.5.3 に各接合部の相対回転角・柱脚水平変位計測用 CDP-50 変位計、各層の絶対水平変位計測用のレーザー変位計、並びに加速度計の配置・番号真を示す。

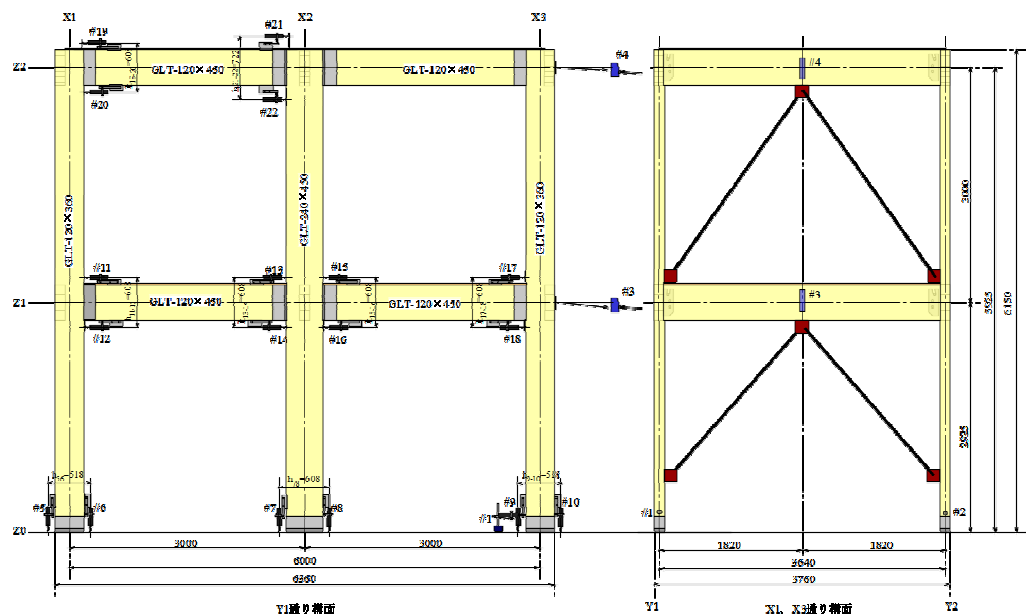


図 2.5.3 接合部相対回転角、柱脚水平変位、各層の水平変位計測用の機器配置と番号

3) 入力地震波と加震スケジュール

3) -1 BSL 波

BSL 波とは、解放工学的基盤上で発生した地震動が第二種地盤を通過することで、1.5 倍程度増幅されたと仮定した場合の地表面の地震波で、極めて稀に発生する（大）地震を想定した構造計算用の人工地震波（模擬波）である¹⁾。国土交通省の告示に適合するように数値が設定されており、様々な学術的耐震研究プロジェクトで多用されている人工地震波である。図 2.5.4 に本研究で用いる BSL 波の時刻歴波形、加速度応答スペクトルを示す（図 2.4.2 参照）。

3) -2 JMA 神戸波 NS 成分

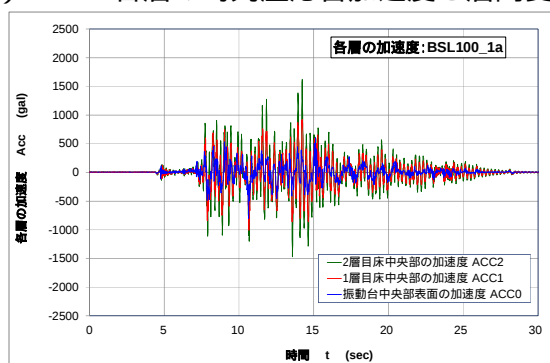
1995 年 1 月 17 日早朝に兵庫県南部地域で発生した大地震の観測波。気象庁(JMA)の旧神戸海洋気象台で観測された地震波である、JMA 神戸波と呼ばれ、今日まで極めて大きな地震を代表する観測地震波成分として様々な震動台実験において使用されている。本研究で用いる JMA 神戸波 NS 成分の時刻歴波形、加速度応答スペクトルを示す（図 2.4.3 参照）。

a)JMA 神戸波 NS 成分の時刻歴形状 b)JMA 神戸波 NS 成分の加速度応答スペクトル

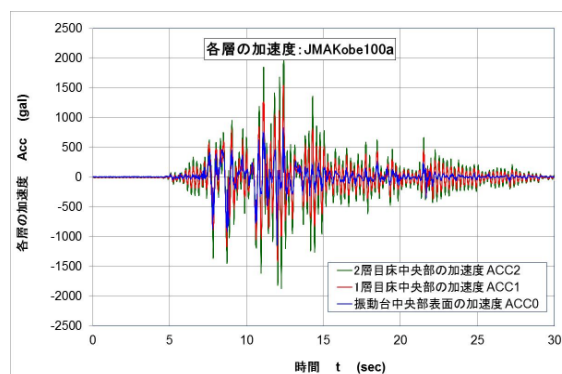
4) 実験結果

4) -1 第 1 回目（10 月 8 日）の実験

4) -1-1 各層の時刻歴応答加速度と層間変位

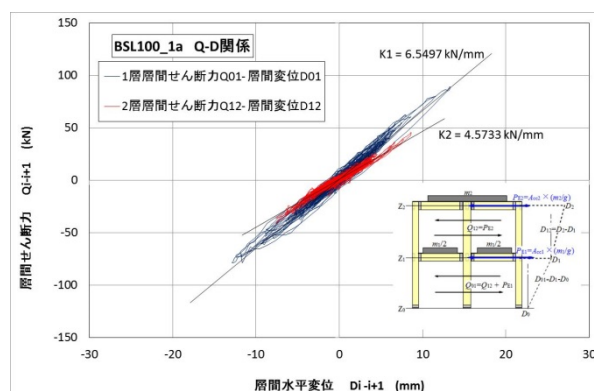


BSL100-1

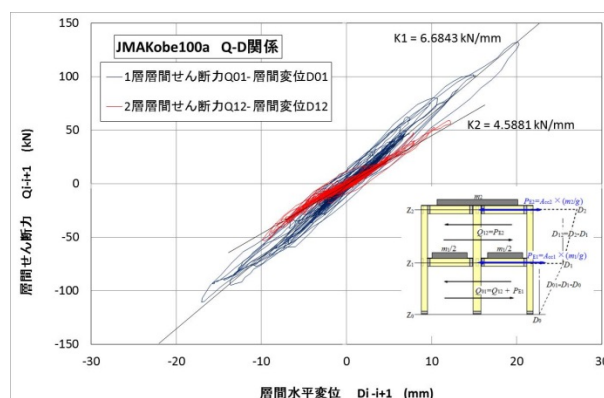


JMA-Kobe100

図 2.5.4 各層の時刻歴応答加速度



BSL100-1



JMA-Kobe100

図 2.5.5 層間せん断力-水平変位の関係

4) -1-2 第1回目加震実験における動的性能の推移

図 2.5.5 と図 2.2.6、減衰を考慮した固有周期 T' 、01 層間水平剛性 $K01$ 、12 層間水平剛性 $K12$ 、そして $K01 \cdot K12$ を使って固有値解析で逆算した T' 等の、各入力波に対する推移を示す。

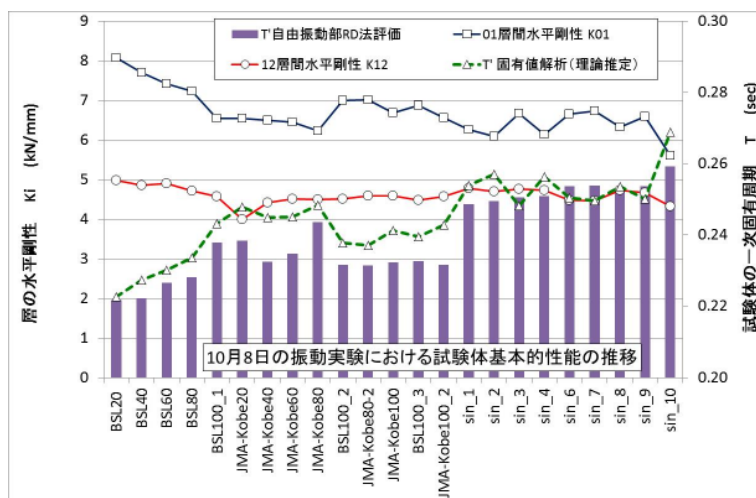


図 2.5.6 第1回目加震実験における各入力波に対する動的性能の推移

試験体の固有周期に近い sin 波による低サイクル疲労実験は何分にも始めての経験であり、試行錯誤的な入力であったため、全ての入力が効果的であった訳ではなかった。特に sin_6、sin_7、sin_9 は応答が小さかった。しかし、徐々に効果的な周波数と加速度入力レベルの組合せが分かってきたので、23 番目の sin_10 では最も効果的な低サイクル疲労実験が実施できた。

結果的に、初期状態の 01 層間剛性 $K01=8.0742\text{kN/mm}$ に比べ、23 番目の sin_10 入力時の 01 層間剛性は $K01=5.60\text{kN/mm}$ へと低下し、試験体の剛性は、初期状態の約 70% まで劣化した。第1回目の加震実験終了後、ダンパーの交換を行ったが、モーメント - 回転角関係の応答が大きかった接合部において、SS400 鋼のダンパーの幾つかが緩やかな S 字型の変形をしていたことが認められた。また、振動方向と直角方向の面外へのゆがみも観察された。

図 2.5.7 と図 2.5.8 に 10 月 8 日の第1回目加震実験において観察された締結ユニットの損傷状況等の写真を示す。ダンパーが S 字に曲がったり、面外変形を起こしたのは、主に、23 番目の sin_10 の入力によるものと思われる。



図 2.5.7 金物の変形状況

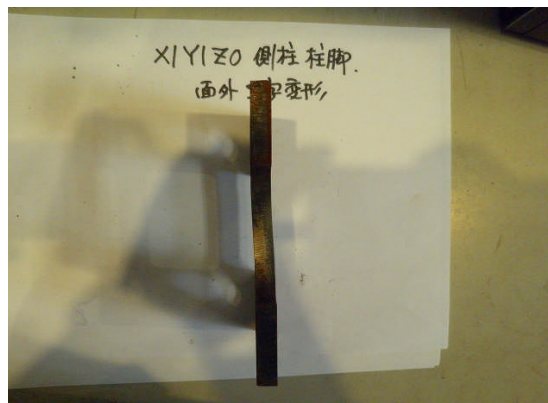
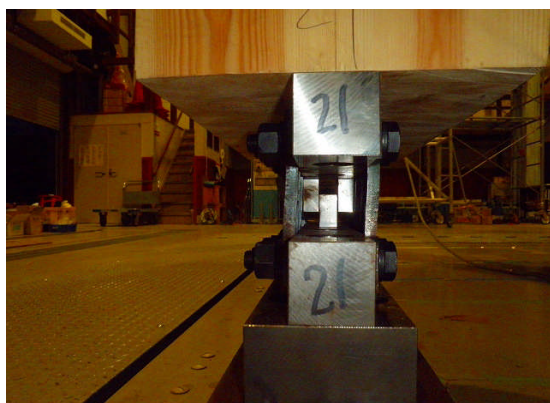


図 2.5.8 第 1 回目加震実験において観察された締結ユニットの損傷状況

4) -2 第 2 回目 (10 月 10 日) の実験

4) -2-1 各層の時刻歴応答加速度

第 2 回目加震実験においても、地震波に対しては、10_10JMAKobe100 以外の入力に対して、大きな応答は示さなかった。一方、試験体の固有周期に近い周波数で入力された sin 波の場合は、試験体に大きなダメージを与える周期と最大加速度の組合せが学習効果で明確になってきたので、10_10sin1 から 10_10sin5 に掛けて、徐々に共振状態を高めることができ、最終的に 10_10sin6 を入力して 10 秒経過後に、柱脚ダンパーの幾つかが破断し、試験体は激しくねじれながら振動したので、それ以上加震を継続することは危険であると判断して実験を終了した。

4) -2-2 第 2 回目加震実験における動的性能の推移

図 2.5.9 に、減衰を考慮した固有周期 T' 、01 層間水平剛性 K_{01} 、12 層間水平剛性 K_{12} 、そして $K_{01} \cdot K_{12}$ を使って固有値解析で逆算した T' 等の、各入力波に対する推移を示す。各評価値の評価方法は、4.1.3 で解説した方法と同じである。すなわち、減衰を考慮した固有周期 T' と減衰常数は RD 法で、層間剛性は層間水平せん断力 Q_{i-i+1} - 層間水平変位 D_{i-i+1} の関係をプロットし、それらのデータに一次線形式を当てはめて決定した。そして層間剛性を固有値計算式に代入して減衰を考慮した固有周期 T' を逆算した。

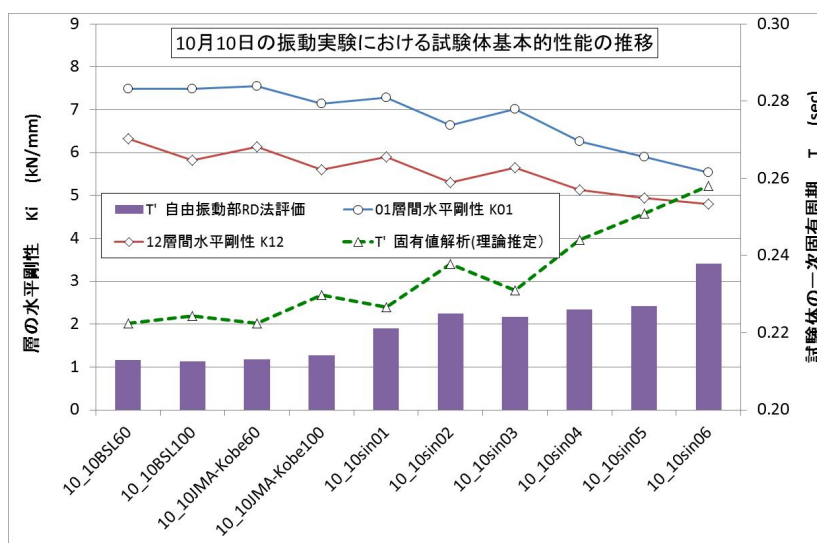


図 2.5.9 第 2 回目加震実験における各入力波に対する動的性能の推移

第2回目の加震実験を開始する前に、全ての締結ユニットのダンパーを新品と交換し、step加震を行ってダンパー交換後の動的性能を同定した。その結果、ダンパー交換後の固有周期は0.211secと同定され、10月8日に同定した初期値0.215secにほぼ近い値に戻った。これによって、プロジェクトの目標の一つである「極めて稀な地震を経験して建物が変形しても、ダンパーを交換することで元の健全な状態に復帰できる事」が実証できた。

第2回目加震実験の前半に入力した地震波は、JMA Kobe100以外は、大きな応答をもたらさなかった。そこで、第1回目加震実験後半に試みた「試験体の固有周期に近い正弦波を入力し、共振状態を起こして試験体を低サイクル疲労破壊させる」ことを再度試みた。第1回目加震の10回近い正弦波加震で「こつ」が分かってきたので、第2回目加震においては、2、3回の調整加震を経て、10_10sin6波の入力によって試験体を大きく共振させることができ、主として柱脚接合部のダンパーが低サイクル疲労破断を起こした。共振が起こった際、試験体は面内でねじれ振動を起こしていたように感じられた。

図2.5.10にダンパーの破断例を示す。面外への曲がりも認められる。



a) 側柱最外側ダンパーの破断例



b) 中柱外側ダンパーが2枚とも破断した例

図2.5.10 10_10sin6の入力で共振現象を起こし、破断したダンパー（SS400鋼）の状況

5) 要約

平成26年10月8日ならびに10月10日の2回に渡って実施した集成材2層2スパンの試験体を供試した振動台実験を通じて得られた結果は、以下のように要約されよう。

- 1) 試験体の初期固有周期は $T_{gs}=0.215\text{sec}$ で、10月8日に実施した第1回目の加震実験（地震波14波、正弦波10波入力）終了後、固有周期は $T_{gl}=0.259\text{sec}$ に延びていた。
- 2) これを、等価な1質点系モデルに置き換えて考えると、等価な建物剛性は $T_{gs}^2/T_{gl}^2=0.215^2/0.259^2=0.689$ 、すなわち剛性は約70%低下したことになる。
- 3) 第2回目加震実験に先だって、全てのダンパーを新品と交換した結果、固有周期は0.211secと同定され、10月8日に同定した初期値0.215secにほぼ近い値に戻った。これによって、目標の一つである「極めて稀な地震を経験して建物が変形しても、ダンパーを交換することで元の健全な状態に復帰できる事」が実証できた。
- 4) 試験体の固有周期が0.21秒代とかなり短かった（剛性が高い）ため、0.3~0.4秒辺りに卓越周期を持つBSL波やJMA神戸波の場合、JMA Kobe100を除いて、余り大きな応答を試験体に生じさせなかった。

- 5) 一方、試験体の固有周期 0.2 秒代に近い周期を有する正弦波（固有振動数=1/固有周期 = $1/0.2=4.5\text{Hz}$ ）は比較的小さな最大加速度レベルでの入力であっても、試験体が共振してかなり大きな応答を与え得る事が分かった。ただし、第 1 回目の加震では、不測の事態に備えて正弦波加震レベルを試行錯誤的に徐々に上げていったため、最適な振動数と最大加速度レベルの組合せを見出すのに時間を要した。
- 6) 第 2 回目の加震実験では、正弦波加震による低サイクル疲労実験のコツが掴めたため、効率的に実験が進み、2 度の調整加震を含めて、6 度目の正弦波入力（ $10_{-10}\sin 6$ 波）で試験体は大きく共振し、ねじれを伴う大振幅の振動によって中柱の柱脚接合部を中心にダンパーが低サイクル疲労破壊を起こした。
- 7) LSB 接合部に作用する力の推定値とダンパーに貼り付けたひずみゲージの測定値から間接的に評価された最外側ダンパー（SS400 鋼製）の応力-ひずみ関係は、3 回目の正弦波加震（ $10_{-10}\sin 3$ ）辺りから、ダンパーが SS400 鋼の降伏応力度（ 290N/mm^2 程度⁸⁾）を超える応力レベルに達していたことを示していた。
- 8) LSB 接合部に作用していた軸力は最大でも 100kN を超えておらず、LSB 自体の引抜き耐力（160kN）の 60～70%と十分安全なレベルであった。
- 9) 6)と 7)の結果から、外側ダンパーの塑性変形によって、LSB へ入力される軸力は適性レベルに制御されていたと判断でき、本プロジェクトで新規に開発されたハイブリットダンパーは効果的に作動していたと考えられる。
- 10) 中柱の断面を $240 \times 450\text{mm}$ に増大させた結果、パネルシアアール応力は最大でも 2N/mm^2 以下で、十文字接合部での脆性的なせん断破壊を回避することができた。
- 11) どのレベルの入力値でダンパーを降伏させるのが最適かという議論は、建築基準法、設計者の判断、住み手の判断、補修回数と補修費用など総合的な面から慎重に検討されるべきであろう。

2.6 事業化の検討

実大振動実験に際して、本事業の実用化を踏まえ、2 回目の振動実験を設計事務所、住宅メーカー、工務店に対して公開実験として行った(図 2.6.1)。また、マスコミにも案内したことにより、木材、住宅業界新聞である「日本住宅新聞」、「日刊木材新聞」、「ニューハウジングジャーナル」ら 3 社、地元一般紙である「北日本新聞」、「富山新聞」が取材し、新聞、雑誌で広く紹介された。

実用化については課題も残されていることから普及資料やパンフレットの作成まで至っていないが、振動実験の様子はビデオで撮影し、営業や講習会に際して、開発事業の取り組みとして紹介し、普及に努める。



図 2.6.1 公開実験の様子

第3章 全体総括

3.1 全体研究開発成果

特殊螺旋ボルトの開発

特殊螺旋ボルトは、丸棒を2軸の転造加工、軸に穴あけ、内ネジ加工の工程で製造しているが、生産の効率化を図るためパイプ材を用いた転造加工に取り組んだ。転造圧の低減のため3軸転造加工装置を開発した。

パイプ材を用いた最適な3軸転造加工条件を特定するために、大別して弾塑性解析ソフトによる転造シミュレーション（平成24～25年度）と試作品の性状調査（平成26年度）を行った。前者は、次の3ステップを踏んで3軸転造における最適加工条件の導出を試みた。

1軸単純モデルでの内部残留応力分布比較による解析ソフトの妥当性評価、現行2軸転造モデルでの特殊螺旋ボルトの加工形状と表面残留応力の整合性評価、目的とする3軸転造モデルでの加工解析。一方後者は、試作された数種の特殊螺旋ボルトのネジ山形状、ネジ元塑性流動、表面残留応力の調査を行うことで加工条件の善し悪しを検討した。

転造シミュレーションでは、ステップ まで順調にシミュレーションの妥当性評価と2軸転造モデルでの整合性評価を行うことができたが、ステップ でステップ の2軸転造モデルを反映した加工条件は特殊螺旋ボルトを成形できない結果となった。この主原因は素材の歩みが2軸転造と3軸転造で大きく異なるためと推定された。すなわち、2軸転造のダイス回転速度を3軸転造にそのまま適用すると、途中で素材の歩みが停止して、成形困難となることが明らかとなった。解析時間不足のため、最適加工条件の特定は実機での調整に委ねたが、ダイス回転速度の調整がキーポイントとなることが判明したことから、製品（またはダイス）サイズによって最適回転速度が存在することが示唆された。

引抜抵抗の高い特殊螺旋ボルトの開発として当初160kNの引抜強度の目標であったが、建築側からの要請で目標を160kNでも弾性的範囲と約1.5倍に目標を上げた。

変形金物の最適設計、性能評価及び加工技術

変形金物は当初“く”の字型の金物で始まったが、応力集中による疲労耐久性の低下や締結ユニットの耐力向上のため、ストレート型で高強度鋼を併用したハイブリッド型の変形金物となった。外側と中央の金物はSS400で変形性能を満たし、内側金物に高強度鋼を用いて最終破断を防ぎ、ユニットの安全を確保する構成となった。締結ユニットを図3.1に示す。

締結ユニットのモーメント性能は、変形金物のミルシート値等を用いて十分な性能で推定することができた。それによって、設計条件に応じて、最適な締結ユニットを製作することが可能となった。締結ユニットの最大モーメント性能の推定結果を図3.2に示す。



図 3.1 変形金物と締結ユニット
(試験後)

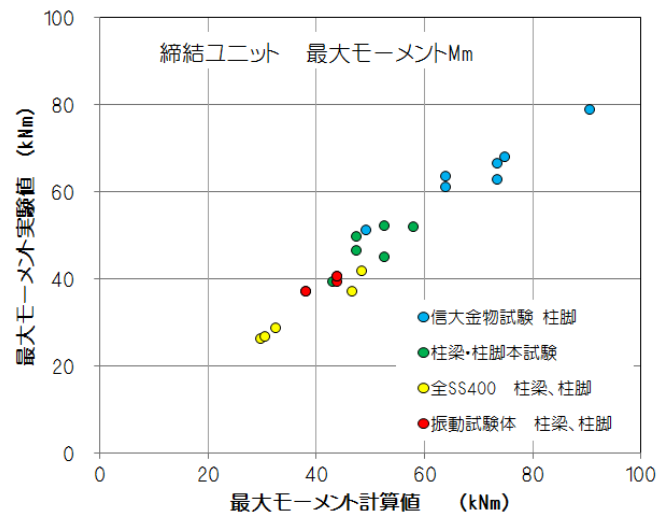


図 3.2 締結ユニット最大モーメントの推定

締結ユニットは、柱梁ユニットで 最大モーメント 40kNm、降伏モーメント 25kNm、回転剛性 3600kNm/rad となった。柱脚ユニットで最大 37kNm、降伏 24kNm、回転剛性 4700kNm/rad となった。耐力は、特殊螺旋ボルトを損傷させないという目標は満たしているが、回転剛性については柱梁ユニットで目標の 4000kNm/rad を満たせなかった。これは、繰り返し疲労耐久性を向上させるため、外側の変形金物をより内側に近づけたためである。変形性能は目標の 1/20rad にたいして、外側の金物が破断した時点でも 1/16rad をクリアしており、十分な変形性能を持っていることが確認された。繰り返し荷重におけるモーメント変形角曲線の例を図 3.3 に示す。塑性変形による高いエネルギー吸収性能が認められる。

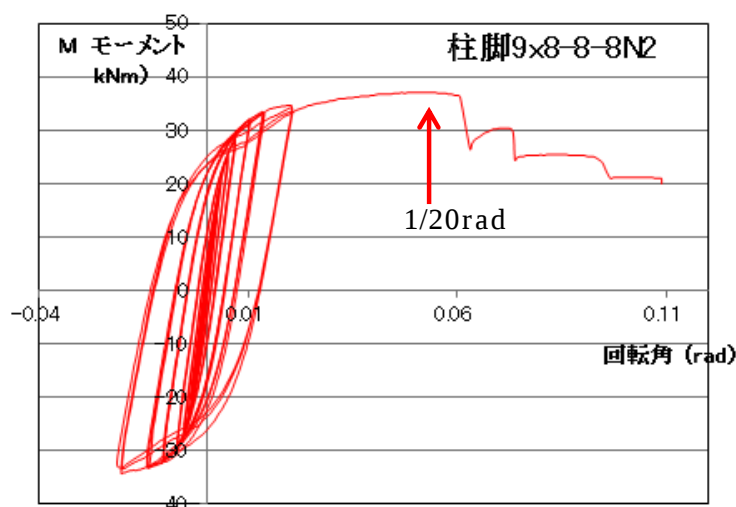


図 3.3 締結ユニットのモーメント性能

締結ユニット搭載型建築の構造計算による最適構造体の試算

使用条件に対応して必要な締結ユニットの性能を明らかにした。最終的に完成した締結ユニットを用いたモデル住宅プランを作成し、それに基づいて振動実験用の上載荷重を算定した。プランはx方向 3m、2 スパン、2 階建とした。当初 3 階建てで荷重を算出したが、振動台能力を超えたため、2 階建てに変更したものである。上載重量は、80 kN となり、屋根 10.3kN、2 階床 28.4kN とした。

3 階建て（門型フレームは 2 階まで）における 2 層 2 スパン門型フレームに対し、耐震等級 3（地震力は通常の 1.5 倍 9 として許容応力度計算を行った。その結果、応力は安全との結果となったが、中央柱は余裕が少ないので柱脚耐力を向上するのが望ましいことが示された。なお、層間変形角にはまだ余裕が認められた。

締結ユニットは、3 階建てモデル住宅に十分適用が可能であること、また引きボルト形式の接合部より剛性・耐力共大きく上回り性能が高いことが検証された。

今後は求まっていない接合部の性能を明らかにすると共に、部材サイズのバリエーションを増やすことや中大規模木造建築に適用させる為に更なる剛性・耐力アップを図ることが望ましいと考えられる。

締結ユニットを搭載したフレーム体の性能評価

振動台実験を実施する前に、試験体の挙動を大凡予想するために、試験体を 3 次元半剛節骨組み構造でモデル化し、人口地震波である BSL 波と JMA 神戸波 NS 成分の 2 種類の地震波を用いて時刻歴応答解析を行った。BSL 波、JMA 神戸波 100% 入力とも、層間変位はそれぞれ 40mm、60mm で納まり、締結ユニット部によるエネルギー吸収が認められた。JMA 神戸地震波 100% を負荷した時の層間変位と層間せん断力の関係を図 3.4 に示した。

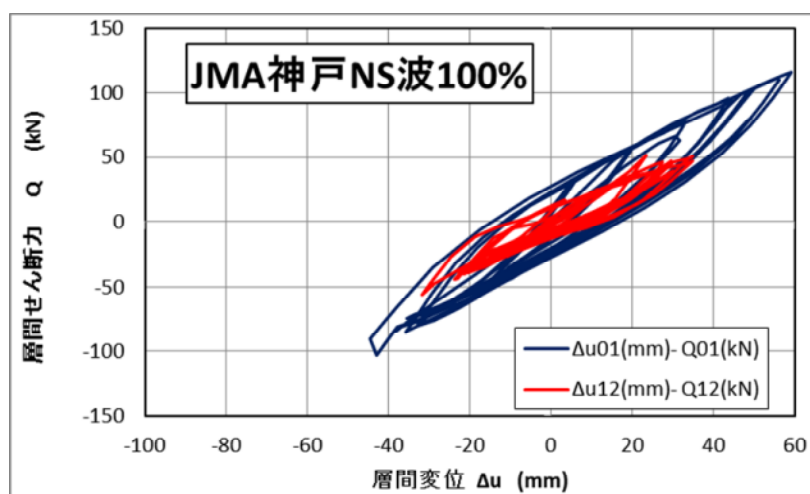


図 3.4 JMA 神戸波 100% 負荷時の応答計算

集成材 2 層 2 スパン試験体において、中柱-梁十字接合部についての接合性能を明らかにするため、柱頭に上載荷重を載荷した状態で、静的正負繰返し加力実験を実施して、十字接合部バネ常数や強度性能を評価した。また、締結ユニットの制震効果をより相対的に明らかにするために、締結ユニット有りの試験体で終局状態まで加力した後、変形金物を取り外し、接合部の両面に厚さ 9mm の鋼板をボルト締めした剛接合部の試験体を作成し、同じように水平荷重を載荷してそのせん断性能を比較した。剛性に関しては両者同じであるが、最大耐力は剛接合部の方がやや大きい。しかし変形能力に関しては、圧倒的に締結ユニットの方が優れており、変形金物の大変形によって、集成材部材や特殊螺旋ボルトは無傷のまま、再利用可能なことが実験的にも明らかになった。試験状況を図 3.5 に剛接合と締結ユニット接合における変形性能の違いを図 3.6 に示す。

締結ユニットで接合された門型フレームについて、水平加力を行い破壊まで負荷した後、変形金物を交換して、再負荷試験を行った。その結果、変形性能は 1/14rad 程度で、当初目標の 1/20rad の目標を達成できた。最大荷重、降伏荷重、初期剛性とも金物交換前後での差が無いことから、締結ユニットは、特殊螺旋ボルトに損傷を与えず、交換により初期のフレーム性能を再現できることが示された。図 3.7 に試験状況、図 3.8 に金物交換による性能の再現性、変形性能を示す。

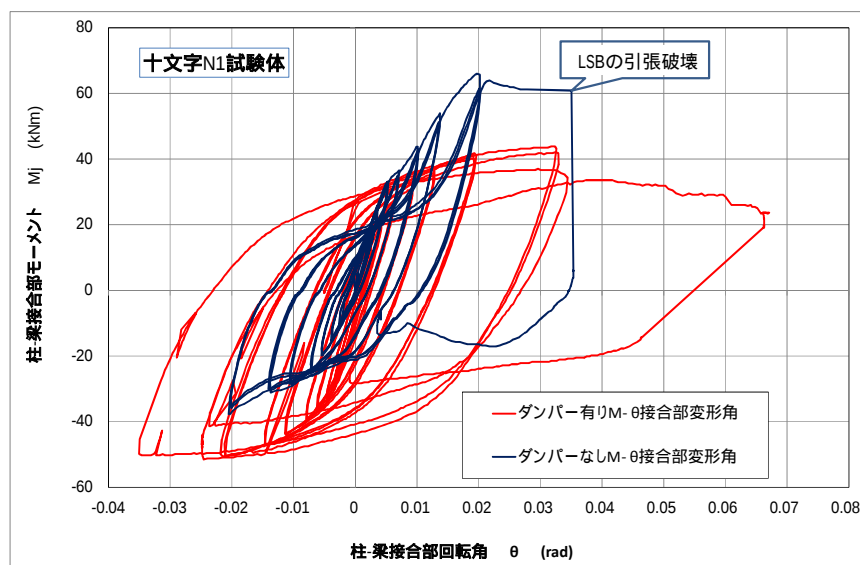


図 3.5 十字接合部試験

図 3.6 剛接合と締結ユニットの変形性能の違い



図 3.7 門型ラーメン試験

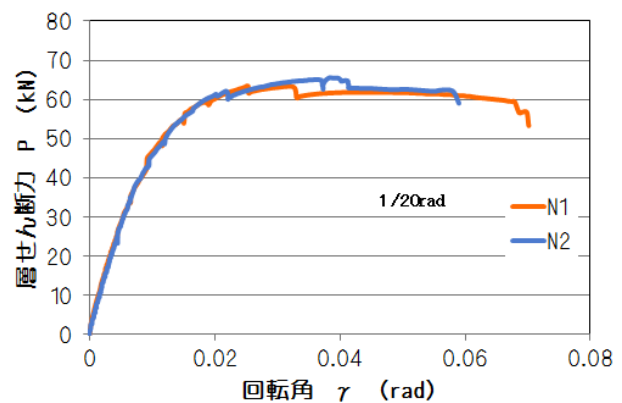


図 3.8 せん断性能の再現性

実建築物での振動試験による実証試験・評価

締結ユニットで接合された 2 層 2 スパンの集成材振動試験体に対し、BSL 波と JMA 神戸地震波を用いて 2 回の振動実験を行った。1 回目の加震実験（地震波 14 波、正弦波 10 波）終了時で、初期の固有周期 0.215 秒が 0.259 秒に伸びており、剛性は 70% 低下した。2 回目に先立ち変形金物を全て交換した。その結果、固有周期は 0.211 秒となり、初期値 0.215 秒にほぼ近い値に戻った。これにより、目標の一つである「極めて稀な地震を経験して建物が変形しても、変形金物を交換することで元の健全な状態に復帰できること」が実証できた。

2 回目の加震実験で、固有周期に近い正弦波入力によって試験体は大きく共振し、ねじれを伴う大振幅の振動によって中柱の柱脚接合部を中心に変形金物が低サイクル疲労破壊を起こした。振動試験状況を図 3.9 に、正弦波入力時の側柱接合部の変形例を図 3.10 に示す。

特殊螺旋ボルトに作用した軸力は 100kN を超えておらず、特殊螺旋ボルト引抜耐力の 60 ~ 70% で十分に安全なレベルであった。外側金物の塑性変形により、特殊螺旋ボルトに入力される軸力は適正レベルに制御されており、締結ユニットは目標通りに作動していたものと考えられる。

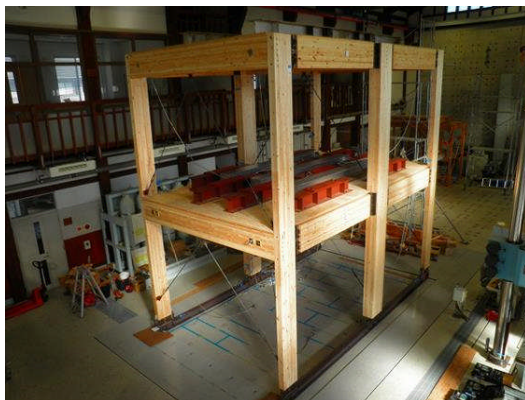


図 3.9 振動試験状況

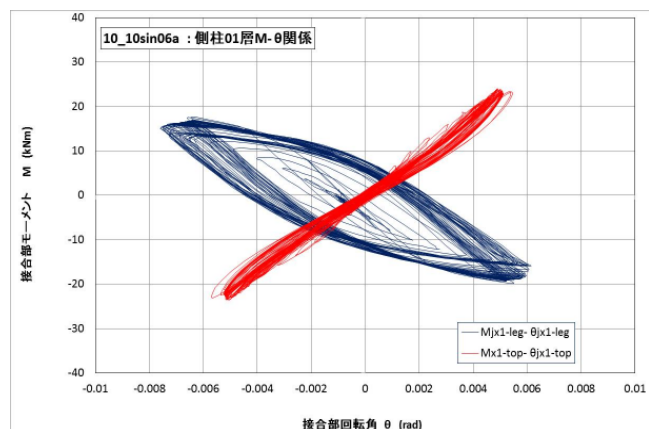


図 3.10 正弦波入力時の側柱柱脚接合部、側柱中 1 層柱梁接合部の M-θ 関係

事業化の検討

実大振動実験に際して、本事業の実用化を踏まえ、2回目の振動実験を設計事務所、住宅メーカー、工務店に対して公開実験として行った(図2.6.1)。また、マスコミにも案内したことにより、木材、住宅業界新聞である「日本住宅新聞」、「日刊木材新聞」、「ニューハウジングジャーナル」ら3社、地元一般紙である「北日本新聞」、「富山新聞」が取材し、新聞、雑誌で広く紹介された。

実用化については課題も残されていることから普及資料やパンフレットの作成まで至っていないが、振動実験の様子はビデオで撮影し、営業や講習会に際して、開発事業の取り組みとして紹介し、普及に努めている。



図 2.6.1 公開実験の様子

3.2 研究開発後の課題

特殊螺旋ボルトの製作、締結ユニットの開発について、当初目標は概ね達成し、基本的な締結ユニットの設計技術は確立することができた。しかし、実験を通して課題として残された技術的な課題として、締結ユニットの回転剛性の推定精度の向上、さらには締結ユニット接合部、門型フレーム、振動実験を通して現れた、変形金物の座屈にともなう構造物のねじれの発生である。大地震後に大きなねじれ変形を残すと金物交換による性能の再現が困難になることも予想される。直交方向の締結ユニットの存在でねじれの抑制が図られると期待できるが、連結金物等でもねじれ抑制方法を検討する必要がある。

さらに、実用上は積雪や建物条件に対応して、数種類の締結ユニットを開発する必要がある。また、各々の締結ユニットに関して十分なデータで許容耐力等を誘導し、締結ユニットの信頼性を高める必要がある。

コスト的には、連結金物等のコストが大きく、住宅レベルではより低コストの連結金物に改良する必要があると思われる。

本事業では住宅を対象としたが、コスト面からは中大規模の建築物への適用が有効と考えられる。この場合は、耐力性能の大幅アップが必要となり、新たな締結ユニットの開発が必要となる。

また、施工時あるいは大地震後の金物交換技術についても十分に検討しておくことが重要と思われる。

3.3 事業化展開

事業化に向けた基本方針

【川下企業（顧客）ニーズの状況と対応方法】

住宅メーカーや工務店にとって、耐震性、快適性、長期耐久性、最近では省エネ性などが、販売のための重要なセールスポイントとなっている。特に、昨年の東日本大震災の発生や最近の頻繁な大地震発生予測により、これまで以上に高い耐震性を持つ住宅が強く求められる傾向にある。さらに快適性への希求から住宅購入者には南面に大きな開口部を設けたいという潜在的なニーズがあり、アドバイザー企業であるサーラ住宅、ウンノハウス、クレバリーホーム等の住宅メーカーにおいても大きな開口部を設けながら耐震性を保持する技術への関心が高い。また、国土交通省がいわゆる「200年住宅」を目標に長期優良住宅制度を実施していることもあり、各住宅メーカーは長期耐久性に優れた住宅工法の開発に熱心である。

住宅メーカー各社の耐震性向上についての取り組み事例として、ミサワホームでは特殊な壁組で地震力を軽減する制震工法を扱うが、同工法は地震力軽減に効果があるものの大開口などの自由空間に対応できないことや大地震後の建物の再利用はできない点で本工法とは特徴が異なっている。本工法に類似した工法としては、住友林業が大開口・大空間と耐震性をセールスポイントに開発したBF構法があるが、震災の影響により販売状況は好調であるものの、変形能力が少なく大地震後の建物の再利用ができない仕様である。これに対し本事業の成果による工法は、高い耐震性により大空間・大開口が可能で震度7以上の地震であっても倒壊せず、部品交換で再利用が可能であること、かつ他工法に比して低コストとなることから高い優位性を持っている。また、施工後はメンテナンスフリーであり、多くの住宅メーカー、工務店への展開が可能と考える。

各社の耐震工法

	仕様	特徴（評価）
ミサワホーム	壁型の制振工法として、壁内の制振機構で振動を軽減	大開口に対応可能、大地震後の建物再生利用不可 ▲
住友林業	制振型の接合により、ラーメン構造で大開口・大空間が可能	変形能力が少ない、大地震後の建物再生利用不可 ▲
その他（アラミド工法）	耐震補助技術	接合部は高強度だが高コスト ▲
<本事業の開発成果>	ラーメン構造で大開口・大空間が可能、低コストかつメンテナンスフリー	震度7クラスへの対応可能、大地震後の建物再生

想定する市場（現在、今後の動向）

対象とする市場は一般住宅市場となるが、新規住宅市場ばかりではなくリフォーム市場も想定している。耐震性能が現状の建築法規を満足せず、耐震補強が必要な住宅は既存不適格住宅と呼ばれているが、特に市街地の狭小間口の住宅や店舗などの大開口を必要とする店舗併用住宅では危険性が高いことが指摘されている。大きな開口部が可能で、かつ耐震性の高い本工法は、耐震補強技術としてリフォーム市場への展開が期待できる。

また、平成22年に公共建築物木造利用促進法が施行され、2階建て以下の公共建築物は木造とすることが求められていることから、中・大規模の木造建築物が各地で増え始め

ている。公共建築物では大きな空間を求められることが多く、大開口・大空間が可能で耐震性の高い本工法が参入できる市場と考える。建築以外の分野としては、木橋などの土木関連分野への利用展開も検討している。