

# 木材による軽量鉄骨梁の補強効果に関する研究

## その1 集成材による軽量 H 形鋼梁と軽溝形鋼梁の局部座屈とねじれに対する補強効果

森 健士郎\*

(令和7年10月31日受付)

### A Study on Strengthening Effect on Timber on Light-gage Steel Beams Part I: Strengthening Effect of Glulam on Local Buckling and Torsion of Light-gage steel Beams

Kenjiro MORI

(Received October 31, 2025)

#### Abstract

Structural member made of light-gage steel are widely used in small buildings. However, unstable behavior often occurs when it is subjected to unexpected overload, making it difficult to ensure deformation capacity. This study proposes a composite beams made of light-gage steel with glued laminated timber (glulam), and experimental tests are conducted to evaluate the feasibility and structural performance of the proposed composite system. From test results of light-gage H-shaped steel beams with glulam, the reinforcement effectively suppressed post-buckling strength deterioration and improved deformation capacity. And from test results of light-gage channel steel beams with glulam, the reinforcement restrained torsional deformation and increased load carrying capacity.

**Key Words:** light-gage steel, H-shaped steel beam, glulam, local buckling, torsion, strengthening effect

#### 1. 序論

軽鋼構造は鉄骨造店舗や倉庫・車庫、仮設建物などの小規模な建物で広く採用されている。主要な構造部材に軽鋼構造を採用した建築物の構造性能や設計手法については既に多くの研究があり、「軽鋼構造設計施工指針」<sup>1)</sup>などでその知見がまとめられている。

軽鋼構造(軽量鉄骨造)建物では、薄板の軽鋼を柱や梁として用いるため部材の塑性変形能力が乏しく、想定外の大きな荷重を受けると局部座屈を生じて最大耐力に達し、その後大きく荷重が低下することが知られている。また、溝形鋼などの非対称断面の部材を用いた場合は横座屈が生じることでさらに不安定な挙動を示すことがある。

2024年1月の能登半島地震では重量鉄骨造の建物は一部の旧耐震基準の建物などを除き構造躯体自体の大きな被害はなかった<sup>2)</sup>一方で、主要構造部に軽鋼形鋼を用いた軽量鉄骨造の建物では局部座屈や破断などの部材の被害が確認されている。

軽量鉄骨造は一般に4階以下の小規模な建物に限られるため、設計では許容応力度計算を基本としたルート1が選択されることがあり、軽鋼構造設計施工指針(2024年改定)2025年の法改正でも保有水平耐力計算を用いない簡易な構造計算方法が示されている。

一方で、軽量鉄骨は重量鉄骨と比較して板厚が薄いため幅厚比や横座屈細長比が大きくなり、梁が曲げを受けた際にはフランジやウェブに圧縮力が生じて局部座屈や横座屈が発生しや

\* 広島工業大学 環境学部建築デザイン学科 講師・博士(工学)

すい。これらの“座屈”は部材の耐力や変形能力を大幅に低下させ不安定な挙動を引き起こすため、設計上の注意を要する。一般の設計ではスチフナーなどによる補強や横座屈補剛、板厚を増して幅厚比を小さくするなど、座屈の発生を防ぐ工夫が行われる。ただし、軽量形鋼に溶接で補強する場合は溶接性や熱ひずみの影響に考慮する必要がある。

局部座屈により耐力劣化するH形鋼梁に関する研究は既に多数報告されており、局部座屈防止のための対策としてスチフナーによる補強などが一般的に用いられる。

最近では、鉄骨部材と木材を用いた合成構造の開発も進められており、鉄骨部材と木材の欠点を相互に補完し合う効果について研究報告がされている。

田淵ら<sup>3)</sup>は、集成材を主材として鋼板で補強した木質-鋼合成梁を提案し、3点曲げ試験により剛性、強度、破壊性状を検証し、累加強度式と終局強度式を構築して耐力評価を可能としている。

石渡ら<sup>4)</sup>は、アルミニウム製の箱形断面材に対して、熟練した溶接技術を必要としない補強として木材を挿入した合成構造柱を提案し、純曲げ実験、せん断実験、圧縮実験により耐力や変形能力を検証し、柱材としての成立性を検証している。また、文献<sup>5)</sup>では、H形断面および溝形断面のアルミニウム材と集成材による合成構造梁を提案し、純曲げ実験を実施して剛性と耐力、変形能力を検証している。

原田ら<sup>6)</sup>は、集成材の端部にドッグボーン形状のH形鋼を接合して木鋼ハイブリッド構造の梁を用いた骨組の剛性や耐力手法を構築し、その耐震性能を解析的に検証し、実用化に向けて研究している。

これらのように、鋼やアルミニウム製の部材と木材を用いた合成構造部材が提案され、その構造性能を検証している研究は報告されているが、軽量鉄骨部材と木材による合成構造梁を対象としてその構造性能を検証した研究は報告されていない。

本研究は、軽量鉄骨と木材による合成構造部材を提案し、木材による軽量鉄骨の板要素への補強効果を明らかにすることを目的とする。

本稿では軽量H形鋼を主材として構造用集成材を用いた合成構造梁、ならびに軽溝形鋼を主材として構造用集成材を用いた合成構造梁を対象とし、局部座屈やねじれ変形といった不安定挙動に対する補強効果を実験的に検証することで、提案構造の成立性を検討する。

## 2. 実験計画

本稿では、合成構造梁の成立性を検討するため、4点曲げ載荷による実験を行う。

実験にあたり、軽量形鋼の梁に構造用集成材を接合し、形鋼の板要素の面外変形に対する補強とする合成構造梁の

構成を記述する。次に、基礎的な検討として、4点曲げ試験により弾塑性挙動、耐力・変形能力、崩壊モードを検証する。

### 2.1 合成構造梁の構成

合成構造梁の概要を図1に示す。鉄骨は溶接組立による軽量H形鋼(LH-200×100×3.2×4.5, SWH400)、軽溝形鋼([C-200×50×4.5)を、木材は強度のばらつきや加工性を考慮し、構造用集成材(オウシュウアカマツ、190×45)を用いる。

形鋼と集成材の合成方法について、形鋼の上フランジとしたフランジの間にウェブに沿うようにはめ込み、形鋼(フランジ、ウェブ)と集成材をボルトやビス、接着剤などで接合する。

本稿の実験では、集成材のせい方向中央部に窓状の孔を設け、次に形鋼フランジから窓状の孔までをM12ボルト用の孔をあけ、形鋼と窓状の孔の間にボルトを通して接合する(図1)。この接合により、形鋼フランジ板の面外変形を木材の支圧力により拘束可能かを検討する。なお、形鋼ウェブについては集成材と接合せず、接触のみで応力伝達するものとする。

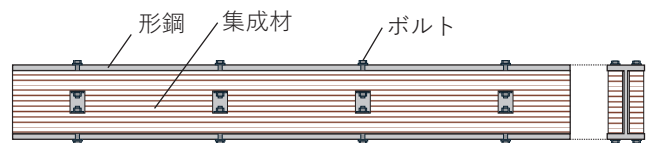
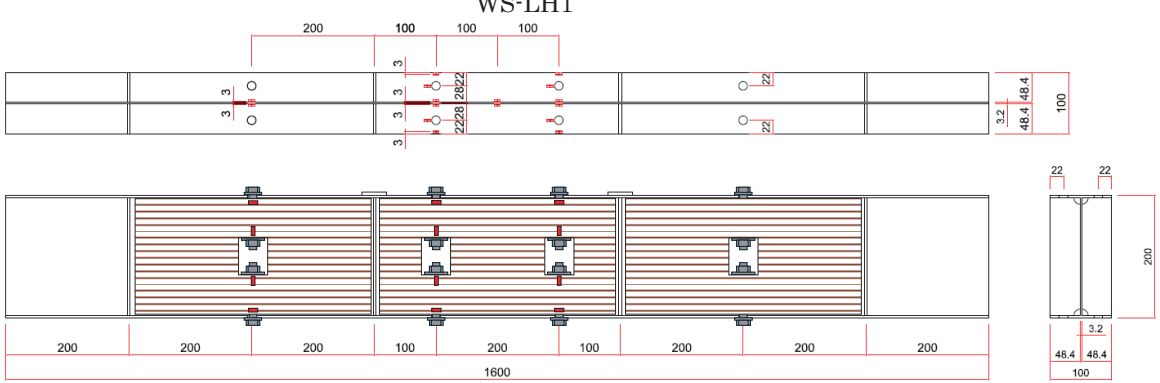
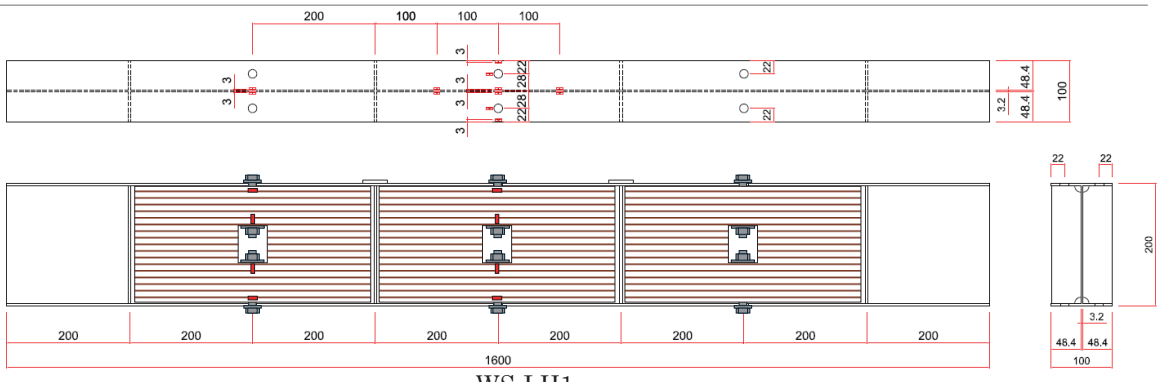
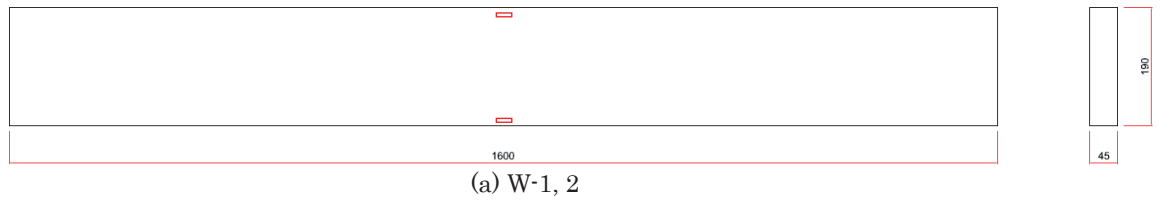


図1 合成構造梁の構成

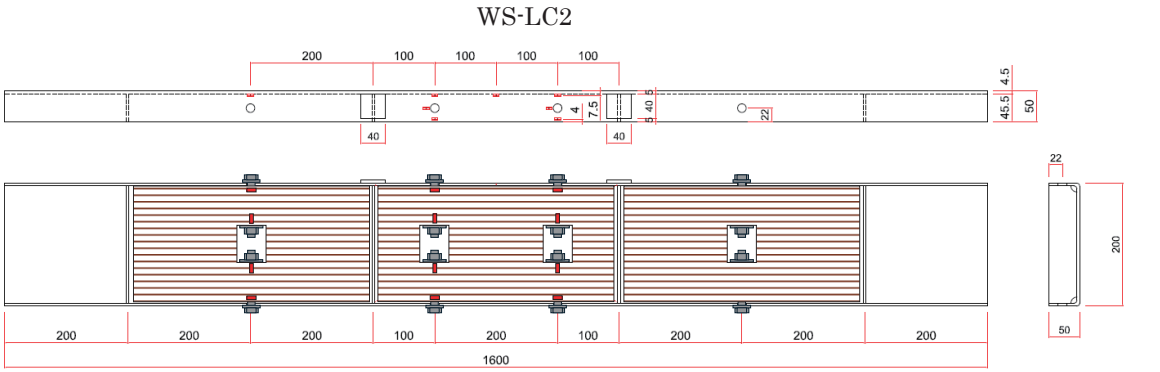
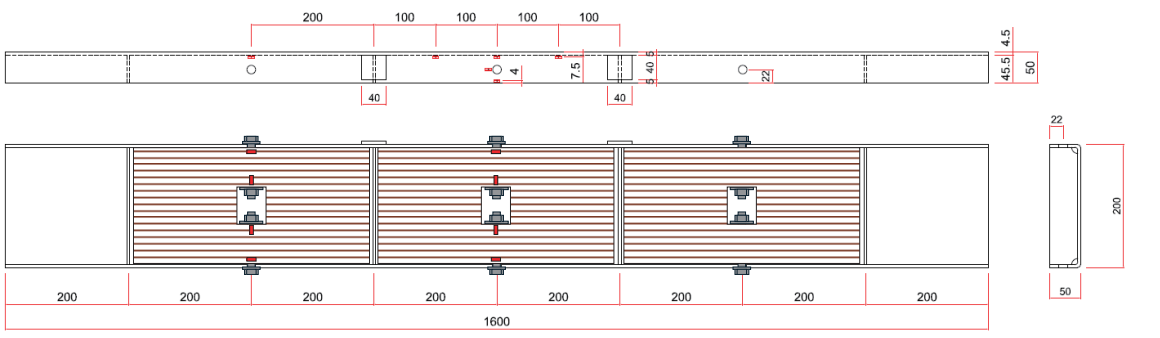
### 2.2 試験体

図1の構成で製作した試験体の概要と一覧を図2および表1に示す。試験体の全長は1600mm、4点曲げの支点間距離 $L=1200$ mm、せん断区間および純曲げ区間は400mm、である。実験の都合上、加力点と支点位置の計4点にはスチフナーを隅肉溶接し、さらに加力点のフランジには50mm幅のカバープレートも隅肉溶接している。また、参考のため集成材梁の試験体(W-a, W-b)についても合わせて示している。合成構造梁および集成材梁の試験体に用いる構造用集成材は、オウシュウアカマツ製、強度等級E105-F300を用い、積層数は7層であるが、上下端の層は形鋼のフランジ-フランジ間に挿入できる寸法(190×45)にあわせてカットしている。

合成構造梁は純曲げ区間での補強効果を主として検討することを想定しており、純曲げ区間のボルト接合の箇所数 $n$ を実験変数としており、純曲げ区間中央1箇所をボルト接合する試験体と、純曲げ区間の中間2箇所(加力点から100mmの位置)をボルト接合する試験体とした。



(b) S-LH, WS-LH シリーズ



(c) S-LC, WS-LC シリーズ

図2 試験体の概要

表1 試験体一覧

試験体名	鉄骨断面	集成材	$n$	$L$ [m]	$M_p$ [kNm]	$Q_y$ [kN]
S-LH	H形	なし	—	1.2	38.1	284
WS-LH1		あり	1			
WS-LH2		あり	2			
S-LC	溝形	なし	—	1.2	32.9	287
WS-LC1		あり	1			
WS-LC2		あり	2			
W-1	なし	あり	—	1.2	—	—
W-2						

※表中の  $n$  : 純曲げ区間の接合箇所数、 $M_p$  : 形鋼の全塑性モーメント、 $Q_y$  : せん断降伏耐力である。試験体名の W は木材、S は鉄骨、L は軽量形鋼、合成梁の末尾の数字は接合箇所数  $n$  を示している。

表2 使用材料の機械的性質

(a) 鋼材 (SWH400)

使用部位	板厚 [mm]	降伏強さ $\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強さ $\sigma_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	破断伸び $\epsilon_a$ [%]
フランジ	3.2	325	458	41
ウェブ	4.5	300	457	40

(a) 鋼材 (SSC400)

使用部位	板厚 [mm]	降伏強さ $\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強さ $\sigma_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	破断伸び $\epsilon_a$ [%]
全部位	4.5	387	491	36

(c) 集成材 (オウシュウアカマツ)

強度等級	基準強度 [N/mm <sup>2</sup> ]			
	$F_c^{**}$	$F_t^{**}$	$F_b$	$F_s^{**}$
E105-F300	23.2	20.2	38.0	1.8

※曲げ強度以外は規格値を参考に記載。

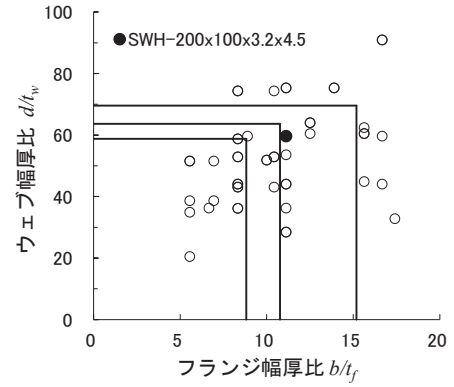
使用材料の機械的性質を表2に示す。ただし、木材の機械的性質については本実験と同じ実験形式で実施した曲げ試験から基準強度を求めて記載している。

図3に、試験体に用いた形鋼梁の幅厚比を標準サイズの形鋼の一覧と合わせて示す。なお図中の黒丸は試験体を、実線は幅厚比制限値 (H形鋼は幅厚比区分) を示す。本実験の試験体は、軽鋼構造設計施工指針<sup>1)</sup>の幅厚比制限値以下であるため、以降の検討ではフランジ全幅を有効幅として扱う。

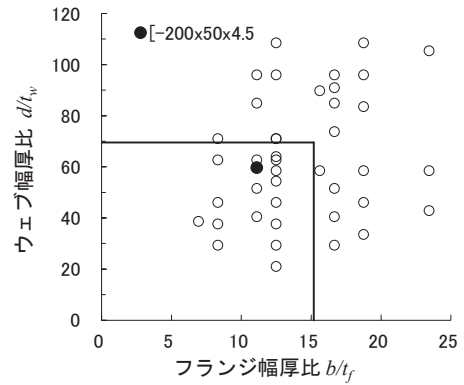
### 2.3 実験セットアップ、载荷計画、計測計画

図4に実験のセットアップ図を示す。

载荷方法について、3000kN 万能試験機 (島津製作所) に加力梁と支持治具を設置し、4点曲げ形式で単調载荷する。



(a) 軽量H形鋼



(b) 軽溝形鋼

図3 標準サイズの軽量形鋼と試験体の幅厚比

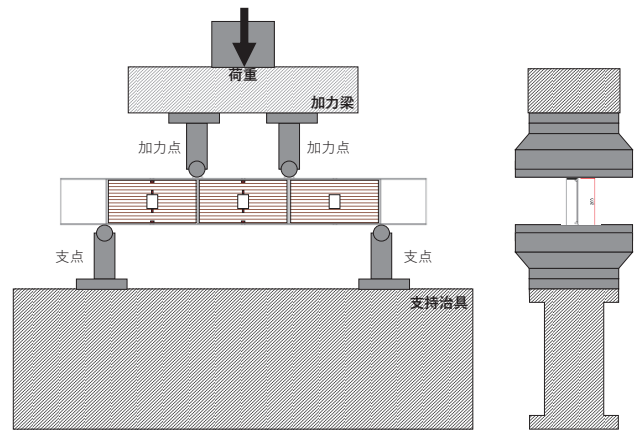


図4 実験セットアップ図 (3000kN 万能試験機)

なお、溝形鋼の試験体の場合は、断面の非対称性により横座屈が生じることが想定されるが、ねじりに対する木材による補強の挙動を確認するため、横座屈留めの治具は用いずに载荷する。

計測方法について、梁全体の挙動を把握するため、荷重、変位、およびひずみを計測する。

荷重について、万能試験機に内蔵されたロードセルにより、加力梁を介して加力点2点に作用する荷重の合計値を

計測する。変位について、それぞれの加力点の鉛直変位を棒型変位計により計測する。ひずみについて、形鋼のフランジに貼り付けたひずみゲージにより曲げによる形鋼の圧縮・引張ひずみを、木材側面に貼り付けたゲージにより木材に生じる圧縮・引張ひずみおよび支圧によるひずみを計測する。ひずみの計測位置については図2の試験体概要にあわせて示す。

### 3. 実験結果

#### 3.1 集成材梁

はじめに、参考データとして集成材のみの梁の実験結果を示す。図5に荷重-変位関係を示す。ただし、荷重  $P$  は加力点2点の荷重の合計値、変位  $\delta$  は載荷点の変位を示しているため、載荷点および支点での木材のめり込み量を考慮できていない。

W-1、W-2の両試験体で、荷重  $P = 20\text{kN}$  弱で木材から割れるような音がではじめ、剛性が下がりはじめた。その後載荷を継続すると断続的に音が鳴り、50kN 前後で大きな音とともに試験体下側に木目に沿って水平に割裂が生じ、試験体端部まで割裂が広がり、荷重が大きく低下したため載荷を終了した。試験体の終局状態の様子を写真1に示す。同図の赤線は割裂した部位を示しており、下側（引張応力側）の1～2層目で主に割裂が発生しており、水平方向に進行していることがわかる。

最大荷重はW-1で51.2kN ( $\delta = 35.4\text{mm}$ )、W-2で53.4kN ( $\delta = 35.4\text{mm}$ )、初期剛性はW-1で3.1kN/mm、W-2で2.5kN/mmであった。

#### 3.2 軽量H形鋼による合成梁

軽量H形鋼梁S-LH、および合成構造梁WS-LH1、WS-LH2の実験結果について、荷重-変位関係を図6に、試験体の実験後の状態の様子を写真2に、純曲げ区間の軽量H形鋼（以下、3.2節中は単にH形鋼と表記する）の荷重-ひずみ関係を図7に、集成材の荷重-ひずみ関係を図8に示す。荷重および変位は3.1節同様である。また、実験結果の概要を表3に示す。

3試験体共通の挙動として、載荷開始後は計算上の降伏荷重 ( $P_y = 171\text{kN}$ ) まで局部座屈は生じず、全塑性耐力に達する荷重 ( $P_p = 190\text{kN}$ ) 付近から剛性が大きく下がりはじめ、 $\delta = 10\text{mm}$  を超えたあと  $P = 210\text{kN}$  前後で圧縮側フランジに局部座屈による面外変形が観測され荷重が低下した（図7中の黒▼）。なお、WS-LH1、WS-LH2については計算上の降伏荷重に至る前に木材との接合用のボルト孔際が断面欠損と応力集中の影響で先行して降伏して比例限に達したものの、全体の弾塑性挙動に大きな影響は見られなかった。

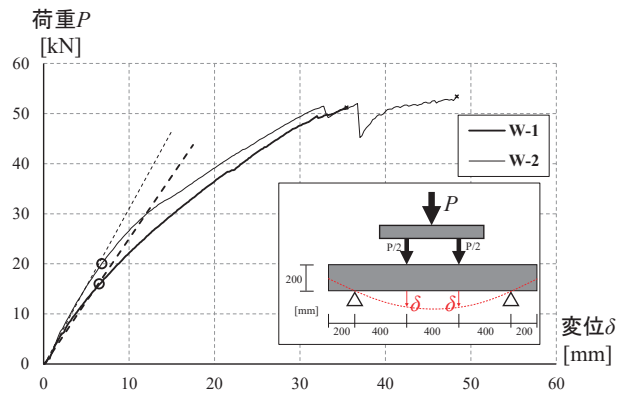
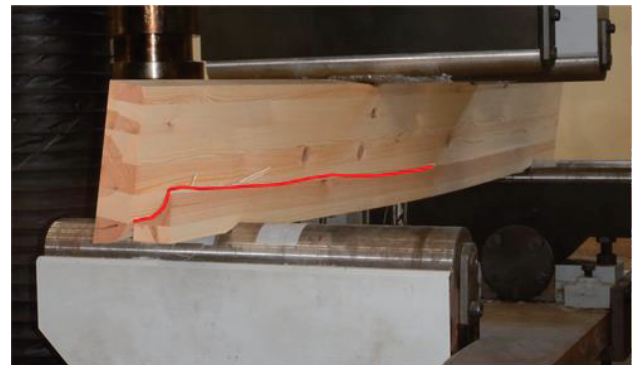
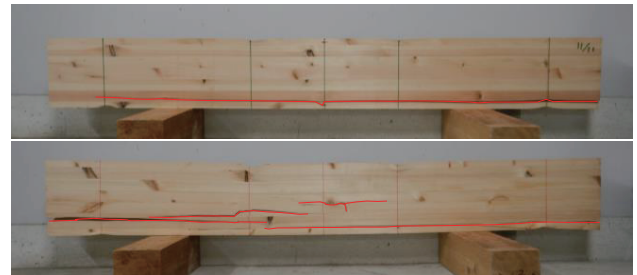


図5 集成材梁の荷重-変位関係



(a) 最大荷重後の様子



(b) 実験後

写真1 集成材梁の終局状態

その後、S-LHは局部座屈変形が進行して耐力劣化して終局状態に至った。一方で、WS-LH1、WS-LH2は局部座屈後に若干荷重が低下したものの、 $\delta = 55\text{mm}$  前後まで荷重を維持して変形した。両試験体ともに最終的には集成材のボルト接合用の窓状孔の角部から割裂破壊を生じて荷重が低下し、載荷治具の挙動が不安定となったため載荷終了した。

写真2より、どの試験体も純曲げ区間とせん断区間の載荷点近傍に局部座屈が生じていることがわかる。S-LHは純曲げ区間に局部座屈が生じ、この局部座屈による面外変形が進行した。WS-LH1では純曲げ区間に局部座屈が生じた後、せん断区間の載荷点近傍に局部座屈が生じ、その後は主に純曲げ区間の局部座屈による面外変形が進行した。WS-LH2では純曲げ区間とせん断区間の載荷点近傍に局部座屈が生じ、純曲げ区間とせん断区間の局部座屈に

よる面外変形が進行した。

WS-LH1、WS-LH2ではフランジ板と集成材との接触により内側への面外変形が抑えられ、かつボルト接合位置ではボルトを介した木材の支圧により面外変形が拘束されている様子がみられた。図7(a)より、S-LHは $P=209\text{kN}$ で局部座屈が生じ圧縮側フランジの圧縮ひずみが大きくなるものの、荷重が $190\text{kN}$ まで下がったあと圧縮ひずみが小さくなることから、フランジ板に面外変形による曲げ圧縮状態となっていることが推測される。

一方で図7(b)より、WS-LH1はボルト接合位置の圧縮ひずみは局部座屈後も小さくならず、面外変形による曲げの影響は生じていないことがわかる。図8(a)より、集成材の圧縮フランジ近傍には局部座屈後から大きく圧縮ひずみが生じており、座屈したフランジの代わりに圧縮力を負担していたものと判断できる。また、同様のタイミングで純曲げ区間の集成材の窓状の孔近傍が大きく圧縮ひずみに転じていることから、フランジの面外変形を拘束するためボルトを介して支圧力が生じていたことがわかる。

図7(c)より、WS-LH2は片側のボルト接合位置(図の黒線)は近傍の局部座屈の影響で曲げ圧縮の影響を受けたような動きをしており、逆にボルト接合位置ではない中央部(図の赤線)の圧縮ひずみには影響がでていないものと判断できる。これは写真2の実験後の変形状態からもわかるとおり、中央部分の面外変形がほとんど生じていないことが原因と思われる。図8(b)より、集成材の圧縮フラ

表3 軽量H形鋼・合成構造梁試験体の実験結果

試験体名	初期剛性 [kN/mm]	比例限荷重 [kN]	最大荷重 [kN]	最大変位 [mm]
S-LH	41.6	133	209	10.4
WS-LH1	42.3	135	229	(11.0)37.2
WS-LH2	42.3	135	239	(12.1)53.2

※「最大変位」は最大荷重時の鉛直変位を示している。合成構造梁試験体については、局部座屈により一時的に荷重が低下したときの変位を( )付きであわせて示している。

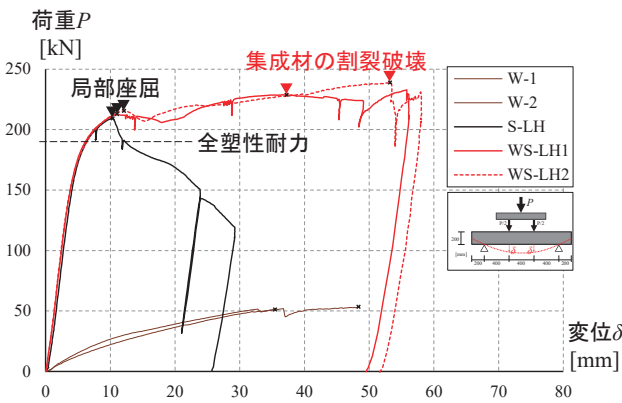
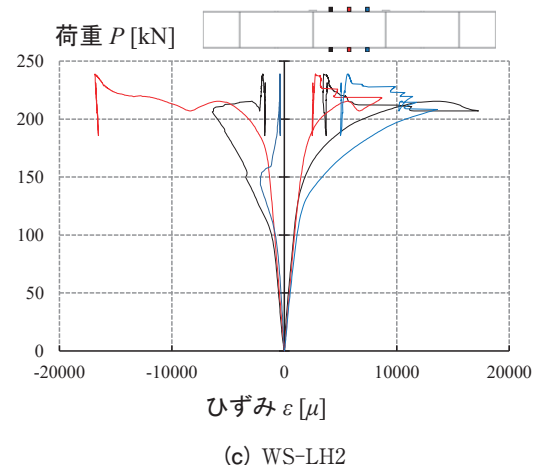
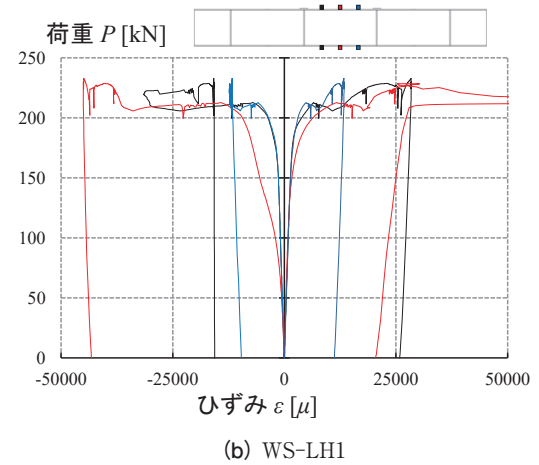
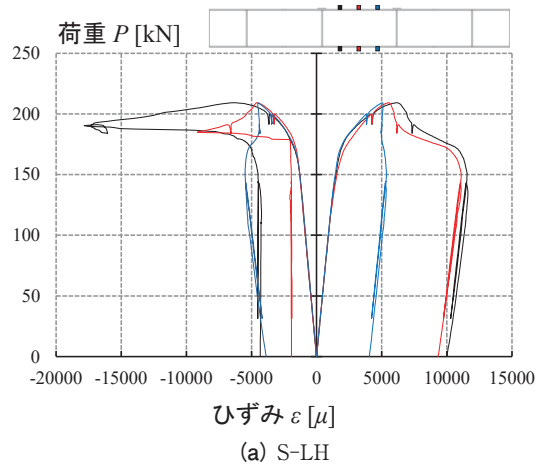


図6 軽量H形鋼・合成構造梁の荷重-変位関係



写真2 軽量H形鋼梁・合成構造梁の終局状態

図7 軽量H形鋼の荷重-ひずみ関係(純曲げ区間)

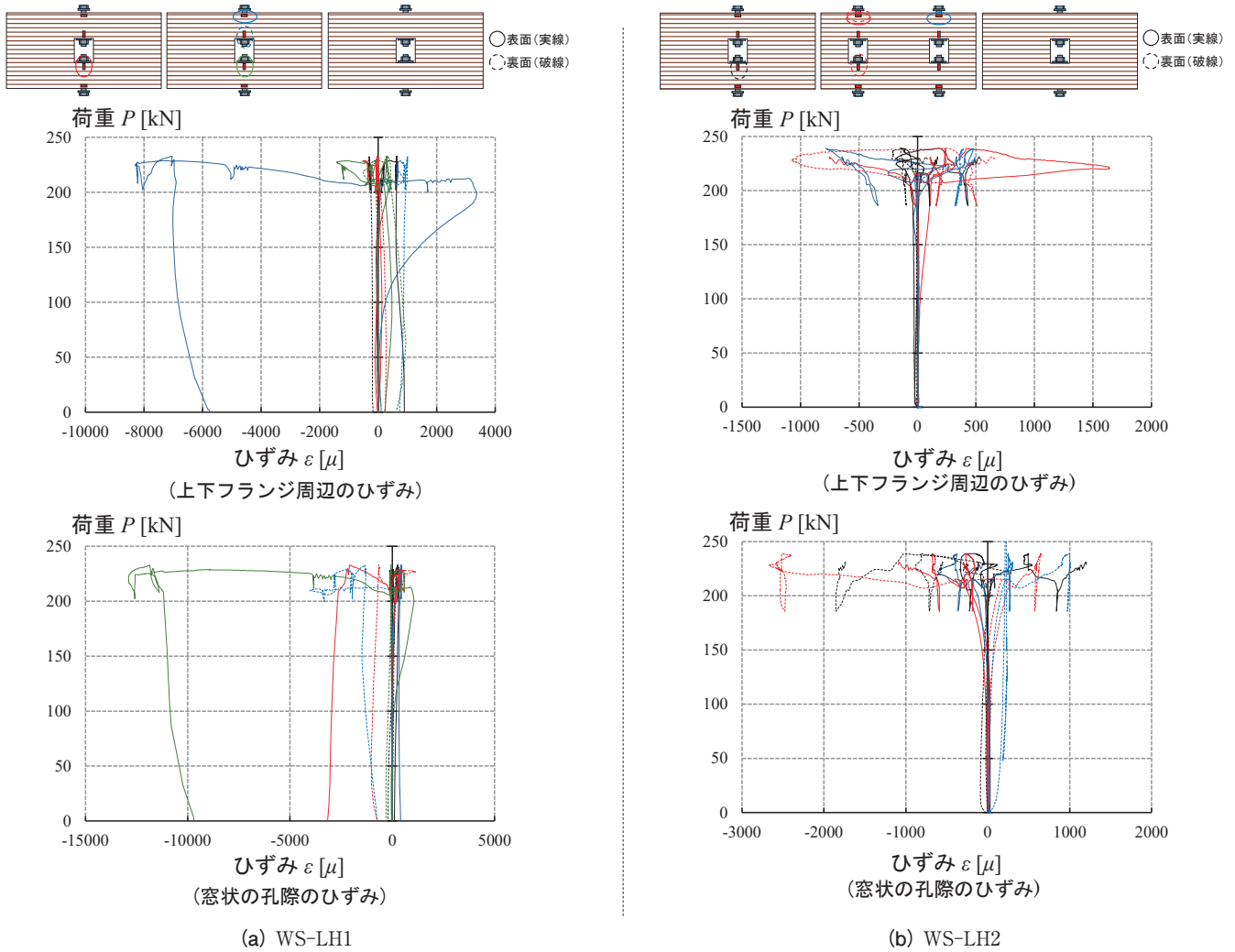


図8 集成材の荷重-ひずみ関係

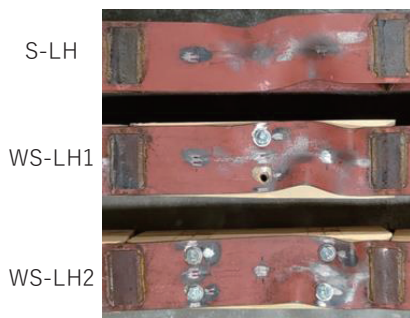


写真3 純曲げ区間の幅方向の変形状態

ンジ近傍には局部座屈後からひずみが大きくなっており、座屈したフランジの代わりに応力伝達していたと考えられるが、(図2で示した試験体概要図の)表面と裏面ではひずみの向きが異なり、裏面は引張ひずみが生じている。これは、写真3に示すようにH形鋼に挿入した集成材が面外方向(ウェブの法線方向)に飛びだそうとする動きをボルトが拘束し、面外方向に曲げが生じたためと考えられるが、計測データが不足しているため詳細な検討はできていない。また、同様のタイミングで純曲げ区間とせん断区間

の集成材の窓状の孔近傍が大きく圧縮ひずみに転じていることから、フランジの面外変形を拘束するためボルトを介して支圧力が生じていたことがわかる。

以上より、軽量H形鋼に集成材をボルトで接合した合成構造梁は、局部座屈による面外変形の進行抑制し、座屈後の不安定挙動を軽減しているものと考えられる。

### 3.3 軽溝形鋼による合成梁

軽溝形鋼梁S-LC、および合成構造梁WS-LC1、WS-LC2の実験結果について、荷重-変位関係を図9に、試験体の終局状態と実験後の様子を写真4に示す。荷重および変位は3.1節同様である。また、実験結果の概要を表4に示す。

3試験体共通の挙動として、本試験体シリーズは単一材の軽溝形鋼(以下、3.3節中では単に溝形鋼と表記する)で構成されるためねじれ変形が非常に生じやすく、実験でも載荷開始直後からねじれが生じていることを確認している。図9より、初期剛性は3試験体とも大きく変わらないが、比例限荷重はS-LC( $P=42\text{kN}$ )、WS-LC1とWS-LC2( $P=65\text{kN}$ 程度)で大きく異なる。その後、すべての試験

体でねじれ変形が進行して最大荷重に至るものの、WS-LC1とWS-LC2はS-LCに比べ最大荷重が大きく上昇している。また、最大荷重時の鉛直変位については合成構造梁は溝形鋼梁S-LCの2倍弱となっている。

合成構造梁の両試験体では荷重が100kNに達するまで木材に明確な破壊は生じておらず、ねじれ変形を除けば安定した挙動であった。荷重が100kNを超えると集成材のボルト接合用の窓状孔の角部から亀裂が生じ、最終的に割裂破壊を生じて荷重が低下した。また、溝形鋼のねじれにより純曲げ区間とせん断区間でそれぞれ集成材が面外に飛び出すような状態となり、ボルトがそれらを拘束していたものの、上述の亀裂・割裂破壊が生じる要因となったものと考えられる。

以上より、集成材によってねじれ変形が拘束されることで、補強効果があったものと考えられ、変形能力の向上にも期待できる。ただし、合成構造梁の試験体でも面内挙動を仮定したときの降伏耐力に達さず、最大荷重も  $M_p$  から算出される全塑性耐力の7割未満であり、単一材の溝形鋼梁として性能を担保できるレベルの補強効果はないと判断できる。

溝形鋼のねじれ変形に対する検討としては、載荷条件や計測などに不足があり、今回の実験では定量的な評価が難しいため、今後、追加の検討を計画している。

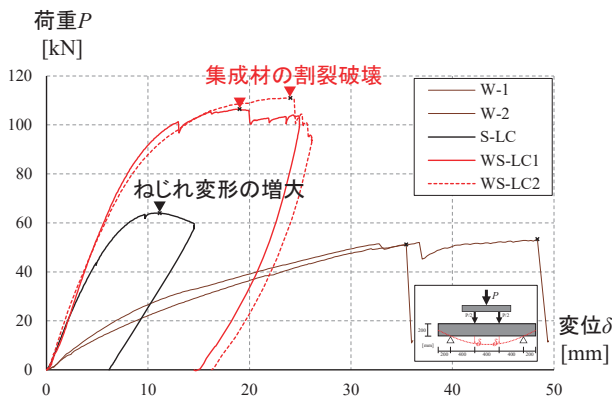


図9 軽溝形鋼・合成構造梁の荷重-変位関係

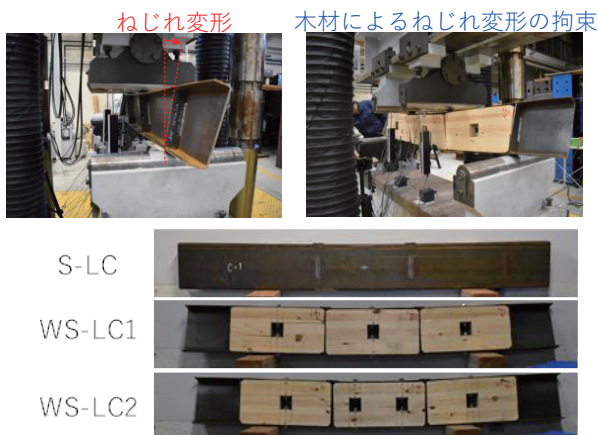


写真4 軽溝形鋼梁・合成構造梁の終局状態の様子

表4 軽溝形鋼・合成構造梁試験体の実験結果

試験体名	初期剛性 [kN/mm]	比例限荷重 [kN]	最大荷重 [kN]	最大変位 [mm]
S-LC	9.3	42	64	11.2
WS-LC1	10.6	67	107	19.0
WS-LC2	10.3	65	111	24.0

※「最大変位」は最大荷重時の鉛直変位を示している。

#### 4. 結論

本稿では、軽量H形鋼と軽溝形鋼を主材とし、構造用集成材を挿入した合成構造梁を提案し、実験的に弾塑性挙動と集成材による補強効果を検証し、その成立性を検討した。以下に本稿の結論を示す。

〈軽量H形鋼梁-集成材の合成構造梁〉

軽量H形鋼梁のフランジと集成材をボルト接合した合成構造梁では、

- ①初期剛性や耐力については、ほとんど補強効果はない
- ②一方で、フランジの局部座屈による面外変形を拘束することで、局部座屈後の耐力劣化を抑制して不安定挙動を軽減する。

- ③合成構造梁の終局状態は集成材の割裂で決まる

〈軽量溝形鋼梁-集成材の合成構造梁〉

軽溝形鋼梁のフランジと集成材をボルト接合した合成構造梁では、

- ④初期剛性については、ほとんど補強効果はない
- ⑤比例限耐力と最大耐力は大きく上昇するが、単一材として全塑性耐力を担保できるほどの補強効果はない
- ⑤変形能力の上昇にも期待できる可能性がある

本稿の検討の結果を踏まえ、以下を今後の課題とする。

- ・木質材料の分類（製材、集成材、CLTなど）による影響
- ・軽量鉄骨と木材の接合方法
- ・接合方法による補強効果の違い
- ・応力伝達機構と耐力評価手法の確立

#### 謝辞

本研究の実験実施にあたり、(元)広島工業大学卒研生およびゼミ生の宍戸飛翔さん、寺林皆人さん、平本拓土さん、三上友輔さんにご尽力いただきました。また、木材の加工について、広島工業大学の森田教授にご指導をいただきました。ここに記して謝意を示します。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：軽鋼構造設計施工指針 第3版，日本建築学会，2024年3月
- 2) 国土技術政策総合研究所，建築研究所：令和6年能登半島地震建築物被害調査等報告（速報），建築研究所資料，No.212号，2024年10月
- 3) 田淵敦士，内田保博，石倉龍人：木質－鋼合成梁の終局曲げ耐力および変形性能，日本建築学会技術報告集，第18巻，第39号，pp.499-504，2012年6月
- 4) 石渡康弘，伊藤有美，小松博：アルミニウム箱形断面材と木材による合成構造柱に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第83巻，第746号，pp.647-657，2018年4月
- 5) 高石惇平，小松博，鎌田貴久，石渡康弘：アルミニウム型材と集成材による合成構造梁に関する実験的研究－純曲げ実験－，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），構造Ⅲ，pp.1341-1342，2022年9月
- 6) 原田公明，水谷美和，重松瑞樹，杜凌子，林賢一，倉田高志，斉藤瞭，寺澤友貴，坂田弘安，竹内徹：木鋼ハイブリッド構造の実用化におけるフィジビリティスタディ，日本建築学会技術報告集，第28巻，第68号，pp.203-208，2022年2月