合板と鋼材によるサンドイッチ パネルの圧縮耐荷機構に関わる 実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON COMPRESSION RESISTANT MECHANISM OF SANDWICHED PANEL OF STRUCTURAL PLYWOOD AND STEEL MEMBER

伊藤拓海 — * 1 神戸 渡 — * 2
近藤沙紀 — * 3 高橋清和 — * 4

Takumi ITO — * 1 Wataru KAMBE — * 2
Saki KONDO — * 3 Sumiya TAKAHASHI — * 4

キーワード：
合成部材, 合板, 鋼部材, 圧縮載荷試験

Keywords:
Composite structural member, Plywood, Steel member, Compression test

In this study, the composite structural member of plywood panel - steel is proposed. This member is consisted that the steel column is sandwiched with two sheets of plywood. To investigate the resistant mechanism and strength subjected to vertical load, the compression tests are conducted. In this paper, the parametric study is performed to investigate the effects of the thickness and the width of plywood panel. From the test results, it is observed that the maximum strength is determined by the flexural buckling, and also this combined member behaves as the layered beam.

1. はじめに

近年, 構造用合板や厚物合板が構造部材として広く利用されるようになってきており, 建築構造分野においても様々な利用方法が提案されている。また, 建築分野の木材需要の問題として, 安価な外国産の木材利用に押されて, 国産材の需要が少ないという問題がある。そこで, 国産間伐材の新需要を開拓し, 有効利用を促進するための試みが様々な分野で図られている。この問題の解決策の一つとして「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」¹⁾が施行され, 公共建築物への利用拡大が期待されている。

著者らは, 需要拡大が期待されている厚物合板と, 鋼部材を合わせた合成部材の開発を行っている^{2), 3)}。厚物合板は, 「住宅の品質確保促進等に関する法律」で要求されている高い床倍率の仕様においても用いられるものであり, その強度は鋼部材に対する補剛材としての効果が期待できる。この点を利用して, 鋼部材の補剛効果に期待して合板を使用した, 新しい合成部材の開発を目指している。

ここで, 既往の研究において, 木材と鋼材を用いた様々な合成部材が提案されている。坂田ら⁴⁾は, シアリングや摩擦接合型コネクタを用いた接合方法を提案している。高木ら⁵⁾は, トルシア型高力ボルトを用いて木質材料と鋼材を一体化させる方法を提案している。中島ら⁶⁾は, スリット入り薄鋼板を, 木パネルでサンドイッチすることで面外変形を抑制し, エネルギー消費量を大幅に増加させたダンパーを提案している。

これに対して本研究では, 図1に示すように, 鋼部材または鋼材フレームを, 合板でサンドイッチした合成部材を提案し, その構造

性能を把握することを目的としている。本工法では, ボルトを手締めにて接合することで, 施工時のトルク管理を不要とし, またリラクゼーションなどの問題が生じない。さらに, 経年劣化した合板を容易に交換することができる点も本工法の特徴である。

例えば, この合成部材の鉄骨造建物への適用例を図2に示す。同図のように, 壁要素として使用する方法を想定している。建物に作用する鉛直荷重や水平荷重は, 周辺架構の鋼梁を介して鋼材フレームに伝達される。さらに, 鋼材フレームの変形状態に応じて, ボルトを介して合板に力が伝達されると考えられる。このとき, 合板は鋼材フレームに対する補剛材として寄与することが期待される。

そこで本研究では, この合成部材がこれらの力を受けた場合の耐荷機構と構造性能を明らかにすることを目的としている。本稿では, この合成部材に鉛直力が作用した場合を想定して, 圧縮載荷試験を行ったので, その結果について示す。さらに実験結果に基づき, この合成部材の圧縮耐荷機構を明らかにする。

2. 鋼部材を合板でサンドイッチした合成部材の概要

図1のように, 鋼部材または鋼材フレームを合板で挟み込み, 予め設けておいた孔にボルトを差し込んで手締めで接合するものである。ボルト接合を手締めとすることで, 施工管理を容易とし, 合板の着脱が容易なシステムとなる。

この合成部材の構造性能に影響を与える変数として, 鋼部材または鋼材フレームの断面寸法と形状, ボルト孔のクリアランス, ボルトの本数と配置, 合板と鋼部材の接触面の状態, などが挙げられる。

本稿は, 文献2), 3)を再構成し, 加筆・修正したものである。

¹⁾ 東京理科大学工学部第一部建築学科 講師
(〒102-0073 千代田区九段北1-14-6)

²⁾ 東京理科大学工学部第一部建築学科 助教

³⁾ 東京理科大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生

⁴⁾ 東京理科大学工学部第一部建築学科 学部生

¹⁾ Lecturer, Faculty of Engineering, Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science

²⁾ Assistant Prof., Faculty of Engineering, Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science

³⁾ Graduate Student, Graduate School of Engineering, Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science

⁴⁾ Undergraduate Student, Faculty of Engineering, Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science

3. 圧縮載荷試験の概要

3.1 試験体の構成と使用部材の機械的性質

本稿では、合成部材の圧縮載荷時の構造性能を把握することを目的としている。ここでは、実験スペースなどを勘案して、鋼材フレームの鉛直部材のみを対象とし、圧縮載荷時の合板による補剛効果に着目して検討する。そこで本稿では、図3に示すような試験体を実験対象とする。なお、合板の板厚と幅を実験変数とする。

鋼部材は、長さ1,500mmとし、断面32mm×80mmの中実矩形断面（鋼種SS400）である。後述する実験条件から、鋼部材の細長比は183である。なお、鋼部材については、同一ロッドからのものを使用することができなかったため、以降では鋼材1、鋼材2と示し

図1 合板で鋼部材をサンドイッチした合成部材の概要

(a) 立面図

(b) 断面図

図2 建物への適用例

ている。合板は、長さ1,300mmとし、板厚12, 24, 28mmの3種類、幅80, 240, 400mmの3種類を用いた。なお、部材の初期不整について、鋼部材に有害な変形が生じていないことを目視により確認している。ただし、元たわみを実測していないため、本稿ではその影響についての検討は行わない。

合板と鋼部材は、図3に示すように合板の上下端よりそれぞれ100mmの位置で、ボルト（強度区分10.9、M16）を手締めして接合している。なお、ボルト孔径は、合板18mm、鋼部材17mmとした。試験体一覧を表1に示す。

ここで、上記の試験体寸法や細長比に対して、実際の建物へ適用した際、接合部や架構形式などにより本稿の条件と対応しない可能性も考えられる。これに関して、合板の細長比をパラメータとした耐圧縮性能に関する検討を別途行っており、試験体長さなどの寸法効果が与える影響については別報にて報告する予定である。

鋼部材の機械的性質を表2に示す。鋼部材の降伏強さと引張強さはミルシートの値、ヤング係数は次節の圧縮試験方法で行った弾性範囲の圧縮試験結果より得た値、降伏ひずみは降伏強さをヤング係数で除して求めた。なお、鋼部材の限界細長比は、鋼材1が120、鋼材2が111となる。

合板の機械的性質を表3に示す。合板の機械的性質に関して、JASの材料実験方法に準拠すると、寸法の制約から曲げ試験の実験が困難であったため、広葉樹合板の試験方法に準拠して行った。降伏ひずみは、材料試験より得られた応力ひずみ関係より、線形関係を示す領域として、曲げ強さの0.4倍の時点のひずみとした。

3.2 試験体のセットアップと載荷方向

試験体のセットアップ図を図4に示す。同図のように、両端にナイフエッジを設けて両端ピン支持状態とし、単調圧縮載荷試験により行った。なお、上下端のピン間距離は1,700mmである。ナイフエ

表1 試験体リストと使用鋼材

板厚	合板の幅		
	80mm	240mm	400mm
12mm	t12-w80 (鋼材1)	t12-w240 (鋼材2)	t12-w400 (鋼材2)
24mm	t24-w80 (鋼材2)	t24-w240 (鋼材2)	t24-w400 (鋼材2)
28mm	t28-w80 (鋼材2)	t28-w240 (鋼材2)	t28-w400 (鋼材1)

表2 鋼部材の機械的性質

	降伏強さ※1 (N/mm ²)	引張強さ※1 (N/mm ²)	降伏ひずみ※2 (μ)	ヤング係数※3 (N/mm ²)
鋼材1	251	429	1,146	2.19×10 ⁵
鋼材2	271	431	1,340	2.02×10 ⁵

※1：ミルシート値、※2 ヤング係数を降伏強さで除した値、※3：材料実験による値

表3 合板の機械的性質

板厚	曲げ強さ (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	ヤング係数 (N/mm ²)
12mm	51.6	3,032	6.86×10 ³
24mm	38.4	3,173	4.86×10 ³
28mm	19.3	2,497	3.10×10 ³

ッジは、鋼部材が弱軸回りに曲げ変形するように用いた。鋼部材の中央のひずみが $3,000\mu$ に達した時点で載荷を終了し、除荷した。

3.3 計測計画

計測図を図3, 4, 5にそれぞれ示す。圧縮荷重は試験機のロードセルより計測した。鉛直変位は図4に示すように、試験機のクロスヘッドと載荷テーブルの間に棒状変位計をセットして計測した。試験体中央位置の水平変位を得るため、図4に示すように試験体の両側から巻き取り式変位計をセットして計測した。

鋼部材と合板のひずみを計測するため、図3の位置にひずみゲージを貼付した。鋼部材と合板が接触する位置では、ゲージ面とリード線が納まるように合板に加工を施して貼付した。なお、合板の幅80mmのケースにおいては、合板外面のひずみは計測していない。

なお、本稿で実施した実験では、合板の幅80mmのケースでは合板の外側にひずみゲージを貼付するスペースが無かったため、ひず

図3 試験体の構成とひずみゲージ貼付位置

図4 圧縮載荷試験のセットアップ図と計測図

みを計測していない。また、t28-w400の実験において、変位計設置に不備があったため鉛直変位の計測結果が得られていない。そのため、これらのデータに関わる実験結果は、後述する第4章の結果に示していない。

4. 実験結果と考察

4.1 実験結果

実験結果において、鉛直荷重-鉛直変位関係を図6に示す。同図は、線形関係を示す領域で弾性線を引き、横軸との交点の変位を遊びとし、その遊びを除いて原点を合わせて示している。また、鋼材2の圧縮載荷試験結果を同図に比較して示している。

合板の幅方向のひずみ分布を図7、断面内のひずみ分布を図8に示す。図7, 8は、鉛直荷重が40, 80, 120kN、最大荷重時、ならびに最大荷重から95%まで荷重が低下した（以下、95%耐力と呼ぶ）時点の結果を示している。

部材の板厚方向の曲率と軸ひずみの関係を図9に示す。図9は、95%耐力点までの結果を示している。さらに、弾性線からはずれる時点（比例限荷重とする）、最大荷重時と95%耐力時の結果を示す。

なお、図6では圧縮荷重を正、図7, 8では引張ひずみを正、図9では圧縮ひずみを正としている。

さらに、実験結果において、比例限荷重、最大荷重、鉛直剛性の一覧を表4に示す。

鋼部材と合板の挙動に関して、最大荷重以降に図10のような曲げ変形の様子が確認された。同図の曲げ変形に対して、合板を引張側と圧縮側に区別する（以下、引張側合板、圧縮側合板と呼ぶ）。同図のように、引張側合板は、鋼部材に追従して曲げ変形していた。しかし、圧縮側合板は、鋼部材に追従できず、同図に示すように隙間が生じた試験体も観察された。

4.2 荷重変形曲線とひずみについて

図6の結果より、いずれの試験体も最大荷重を迎えたあと、荷重が低下する様子が確認できる。図6と表4の鉛直剛性の結果より、鋼部材のみの鉛直剛性の計算値 375kN/mm に対して、実験結果は小さくなっており、初期不整の影響があった可能性が考えられる。

図5 鋼部材と合板のひずみゲージの貼付位置

さらに、図7,8,9の各部材のひずみより、最大荷重時は表2,3に示す降伏ひずみ以下に概ね留まっており、最大荷重時までは弾性範囲の挙動であることが確認できる。

4.3 試験体の挙動について

4.3.1 合板の幅方向のひずみ分布

図7の結果において、合板の板厚が24, 28mmの場合、最大荷重時までの幅方向のひずみ分布は概ね同値を取っていることが確認できる。このことから、試験体中央部については、合板は鋼部材と接触している部分だけに変形しているのではないことが確認できる。

また、合板の板厚が12mmの場合、引張側合板も上述と同様の傾向を示しているが、圧縮側合板については最大荷重付近で鋼部材と接している部分のひずみが小さく、鋼部材と接していない部分は幅方向に概ね同値を取っていることが確認できる。

4.3.2 断面内のひずみ分布

図8の結果より、引張側合板と鋼部材のひずみ分布の勾配について、最大荷重時まで（図8の白抜きシンボル）は部材間で連続しており、試験体は一体的に挙動していることが確認できる。その後、最大荷重時にひずみ分布が部材間で非連続となっており、部材間で

(a) 合板の板厚 12mm の場合

(b) 合板の板厚 24mm の場合

(c) 合板の板厚 28mm の場合

図6 鉛直荷重—鉛直変位関係（圧縮を正）

(a) 合板の板厚 12mm の場合

(b) 合板の板厚 24mm の場合

(c) 合板の板厚 28mm の場合

図7 合板の幅方向のひずみ分布（引張を正）
（左図は引張側合板、右図は圧縮側合板の結果を示す）

ひずみが伝達されていない様子が確認できる。

4.3.3 軸ひずみと曲率の関係

図9の結果より、比例限荷重あたりから曲率が増加しはじめ、最大荷重以降に曲率が急増する様子が確認できる。なお、実験では、最大荷重以降に試験体中央部の横たわみが生じ、曲げ変形する様子が観察されたが、この挙動と整合している。また、最大荷重時付近において、各部材の曲率は概ね同程度になっている。さらに、合板の軸ひずみは鋼部材と比較して非常に小さいことが確認できる。

4.3.4 試験体の挙動について

以上の結果を整理すると、本試験体の挙動は以下のようになる。

- 1) 最大荷重時までは、部材は概ね弾性範囲に留まっている。

- 2) 最大荷重付近において、部材の曲率が増加し、曲げ座屈によって最大荷重が決まる。また、各部材の曲率は概ね同程度である。
- 3) 最大荷重付近では、部材間でひずみが伝達されていない。
- 4) 試験体中央部においては、合板は鋼部材と接触している部分だけが変形しているわけではない。

以上2),3)より、最大荷重付近では各部材の曲率が近い値になっていること、ならびに部材間でひずみが伝達されていないことから、本試験体は、いわゆる重ね梁^{7),8)}に近い挙動(図11)を示していることが考えられる。ただし、合板の設置区間や接合方法の影響、また今回の実験結果からは、その有効な補剛区間などを明らかにすることは困難であり、今後詳細な検討を行う必要がある。

図8 断面内のひずみ分布 (引張を正)

図9 部材の軸ひずみと曲率の関係 (軸ひずみは圧縮を正)

4.4 合板の寸法と最大荷重の関係

合板の板厚と最大荷重の関係を図 12 に示す。結果として、t28-w80 を除き、合板の板厚が大きいほど最大荷重が大きくなる傾向がある。また、幅の影響としては、有意な傾向を確認することはできない。

ここで、前節の通り、本試験体は曲げ座屈により最大荷重が決まり、試験体中央部では重ね梁に近い挙動を示すことから、最大荷重

表 4 実験結果一覧

試験体名	比例限荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	鉛直剛性 (kN/mm)
t12-w80	94.3	128.0	377.0
t12-w240	110.2	135.6	139.5
t12-w400	80.1	124.5	107.8
t24-w80	130.6	147.0	128.1
t24-w240	120.9	136.6	113.7
t24-w400	120.2	145.6	126.7
t28-w80	117.8	138.3	133.8
t28-w240	143.6	154.9	160.6
t28-w400	--	163.6	--

図 10 最大荷重以降の試験体の変形 (t28-W80 の場合)

図 11 重ね梁モデル^{7), 8)}に基づくひずみと曲率の分布

図 12 合板の板厚と最大荷重の関係

図 13 合板の板厚と鋼部材の曲率の関係 (鉛直荷重 80kN 時)

は合板の板厚と幅に比例する結果になることが予想される。しかし、合板の有効な補剛区間や詳細な抵抗機構などを明らかにし、その影響を考慮した検討を行う必要があると考えられる。

4.5 曲率の比較

比例限以下の荷重 80kN 時において、合板の板厚と鋼材の曲率の関係を図 13 に示す。結果として、t28-w80 を除き、板厚が大きいほど鋼材の曲率が小さくなっている。このことから、板厚が大きいほど曲げ剛性が大きくなり、最大荷重が大きくなったと考えられる。

5. 結び

本稿では、構造用合板または厚物合板で鋼部材を挟み込んだ合成部材を提案し、圧縮荷重下における挙動を明らかにするために実験的な検討を行った。

鋼材のみの最大荷重と比較して、合板で挟み込むことで最大荷重が大きくなる。合板の板厚が大きいほど最大荷重が大きくなるが、合板の幅が最大荷重に与える影響は小さい。

さらに、実験結果に基づいて、試験体の挙動ならびに耐荷機構について整理した。その結果として、本稿の実験条件においては、曲げ座屈により最大荷重が決まり、最大荷重時まで合板ならびに鋼部材は概ね弾性範囲に留まる。また、最大荷重時までは、部材間でひずみが伝達しておらず、各部材の曲率は近い値を示す。これらの結果より、本試験体は、いわゆる重ね梁に近い挙動を示す。

以上、本稿では実験的検討を行った。今後、実験結果に基づいた解析的検討を予定しており、結果については別報にて報告する。

謝辞

本稿の実験は、平成 22 年度東京理科大学特定研究助成金 (研究代表者: 伊藤拓海) より助成をいただきました。また、本稿の図の作成にあたり、東京理科大学学部生 三富遼太君に多大なる支援をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、林野庁編: 平成 23 年版 森林・林業白書
- 2) 近藤沙紀, 神戸渡, 伊藤拓海: 構造用合板と鉄骨部材によるサンドイッチパネル構造の曲げ座屈耐力, その 1 実験概要, その 2 実験結果, 日本建築学会関東支部研究報告集, 構造, pp.225-232, 2011.3
- 3) 神戸渡, 近藤沙紀, 伊藤拓海: 圧縮力を受ける構造用合板と鉄骨部材によるサンドイッチパネル構造の力学的特性, その 1 試験体および実験結果の概要, その 2 各部の挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, pp.261-264, 2011.8
- 4) 坂田弘安, 堀井健史, 竹内徹, 中村博志: シアリング接合部の木材繊維方向せん断性能に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 627 号, pp.773-779, 2008.5
- 5) 遠藤俊貴, 高木次郎, 荒木慶一: トルシア形高力ボルトを用いた摩擦接合により一体化した鋼木複合断面軸力材の曲げ特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 661 号, pp.591-598, 2011.3
- 6) 伊藤麻衣, 坪山紀子, 中島正愛: 木質パネルで面外補剛されたスリット入り鋼板の耐震性能, 日本建築学会構造系論文集, 第 657 号, pp.2055-2061, 2010.11
- 7) 松井千秋: 建築合成構造, オーム社出版, pp.67-69, 2004
- 8) 日本建築学会: 木質構造接合部設計マニュアル, pp.179-191, 2010

[2012 年 2 月 14 日原稿受理 2012 年 4 月 10 日採用決定]