エポキシ接着剤の減圧充填による大断面集成材ドリフトピン接合部の補修とその効果

REPAIR AND THE EFFECT OF DECOMPRESSION FILLING OF EPOXY ADHESIVE OF GLT BEAM-TO-COLUMN DRIFT PIN JOINT

軽部正彦 —*1 林 知行 —*2
原田真樹 —*3

Masahiko KARUBE —*1 Tomoyuki HAYASHI —*2
Masaki HARADA —*3

キーワード：
荷重変形曲線，繰返し加力，耐力回復，実大実験，柱-梁接合部，ドリフトピン

Keywords：
Load-deformation curve, Cyclic loading, Strength recovery, Full-sized experiment, Beam-to-column joint, Drift pin

In this paper, we discussed the repair and the effect of decompression filling of epoxy adhesive of GLT beam-to-column drift pin joint. We applied same cyclic loading schedule to the joint before and after repair. As a result, strength and the absorption energy was the same or getting better compared with before and after repair.

And after all loading programs was over, we dismantled the repaired joint. Therefore we confirmed the adhesive was able surely to be filled by the decompression technique.

After the repair of this kind of epoxy, strength of joint has the possibility to go up more than it is built because three (bonding the crack, gap filling and the gluing members) were included in the effect of the repair.

1. はじめに

構造体の設計に際しては、地震時等に十分な安全性を発揮させるため、相応の耐力確保と同時に塑性変形等によってエネルギー吸収させるのが一般的である。そのため、被災後の構造体には、再び外力を受ける場合の安全性が保証されないのが通例であり、理想的には建替を余儀なくされている。しかし現実の大震災後には、被災した構造体であっても費用や時間的問題から、応急処置を含めて建替えではなく補修の選択肢が望まれる場合も多いと思われる。

地震等の外力に対して、大規模木造建築物等で一般的に用いられている鋼板挿入ドリフトピン接合部は、部材端で発生する回転モーメントを複数のドリフトピンが曲げ抵抗し、そのドリフトピンに対して木材がめり込み抵抗することによって処理している。そのためこのような接合部で、ドリフトピンにより木材が受ける主な損傷は、曲げ変形によるめり込みと副次的に現れる割れである。図1に接合部損傷の模式図を示す。

一方、従来コンクリート構造物の表面クラックの補修等においては、亀裂の表面側をシール材で塞ぎ、亀裂の内部空間に補修用エポキシ接着剤などを加圧充填し、補修する技術がある¹⁾。しかしながら、木材の接合部等が外力によって損傷した場合、亀裂の検出とその範囲を特定することが難しく、このような方法によって補修することは難しかった。また加圧による接着剤の充填には、亀裂の表面側等へ漏れ出さないように強く保持する必要があるため、充填箇所内での接着剤の流れを確認することは難しかった。その上、加圧法では亀裂の先端に残される気泡が押し潰されるだけで排出されるこ

とは無いばかりか、その部分の十分な充填状況を確認することも叶わず、苦慮してきたのが現実である。加圧法においては、充填したい箇所へ適切に接着剤を送り込むために注入口と充填箇所を結ぶ経路から他の経路へ流れ出さないことが求められるが、この経路が長くあるいは細く狭隘な場合には、より高い圧力で加圧しなければならない。その結果として、充填が不完全な場合や、充填目標位置の上流側で接着剤が漏れ出し周囲環境に飛散して汚すことが多かった。本報で報告する技術は、この接着剤充填作業に関わるこれらの問題を、加圧ではなく減圧によって、解決したものである。

本報では、この減圧による充填方法の実効性を検証するための実証実験として、中規模以上の木質構造で建築実績の多い集成材柱・

図1 接合部損傷の模式図

本技術報告の一部は既に文献8)において発表したものである。

*1 樹森林総合研究所構造利用研究領域 主任研究官・博士(工学)
(〒305-8687 茨城県つくば市松の里1)

*2 樹森林総合研究所構造利用研究領域材料接合研究室 室長・農博

*3 樹森林総合研究所構造利用研究領域 主任研究官・農博

*1 Senior Researcher, Forestry and Forest Products Research Institute, Dept. of Wood Engineering, Dr. Eng.

*2 Head, Forestry and Forest Products Research Institute, Dept. of Wood Engineering, Engineered Timber Joint Lab., Dr. Agric.

*3 Senior Researcher, Forestry and Forest Products Research Institute, Dept. of Wood Engineering, Dr. Agric.

表1 部材寸法 (単位 mm)

試験体	想定 スパン	梁相当部材			柱相当部材		
		せい	幅	ドリフト ピン	せい	幅	ドリフト ピン
T3	4550	416	171	24-φ14	302	171	24-φ10
T4	5005	454		24-φ14			
T5	5640	492		24-φ16			

梁鋼板挿入ドリフトピン接合部に対して、エポキシ接着剤の充填補修を挟んで、処女加力と補修後加力の二度の正負交番の繰返し加力試験を同じ接合部に対して行い、処女加力によって生じた亀裂とドリフトピンのめり込みに伴うピン周りの空隙が、充填補修によって効果的に補修できたことを、補修後加力とその後の接合部解体によって検証するものである。

2. 実験概要

実験作業の手順をまとめると以下の通りである。まず柱梁接合部試験体を反力床上に固定した加力装置に取付け、処女加力した。その後、変形角 0 rad.の中立点位置で、試験体を加力装置に取り付けたまま、エポキシ接着剤充填による補修を行った。1 週間以上の養生期間の後、処女加力と同じ加力計画で、補修後加力を行った。

2.1. 試験体概要

本研究では、一般的な規模の鋼板挿入ドリフトピン接合部の接着剤充填補修と、その耐力回復の効果を確認することを目的としている。そのため試験体にはベイツ集成材($E=110\text{tf/cm}^2$)を用い、柱・梁接合部を模してト型の鋼板挿入ドリフトピン接合部を施した。梁せいは想定した梁スパンによって 416 mm (T3), 454 (T4), 492 (T5)の3種類、柱せいは一定(302 mm)として、全3体を準備した。各部材の幅は全て 171 mm である。接合部は、① $l/d \geq 8 \sim 10$ 、②端距離 $\geq 7d$ 、③縁距離 $\geq 4d$ 、④ピン相互間隔 $\geq 7d$ の条件の下、最も負担の大きいドリフトピンが最初に降伏耐力に達する時点と短期許容荷重とする形で設計を行った²⁾。試験体形状(T5)及び加力装置を図2に示す³⁾⁴⁾。ピン本数は24本ずつとし、径は柱側φ10 mm、梁側φ14 (T3, T4), φ16 (T5)である。下穴径は木部同径、鋼板+1mm である。挿入鋼板のためのスリットは、鋼板厚さ+2mm である。

2.2. 加力計画

加力は処女加力、補修後加力とも変形制御の正負交番繰返し加力とし、変形レベルを漸増させながら、各変形角で5回繰返した。加力計画を図3に示す。変形角は過去の実験結果⁴⁾を基に、ドリフトピン接合部の最外縁ピンが降伏する荷重 11.76kN に相当する変形角 1/51 rad.を算出し⁵⁾、それを指標として設定した。また、一般的な繰返し加力は3回で行われることが多いが、過去の実験結果³⁾を参考に、繰返し回数が多く、より厳しい5回に設定した。

2.3. 接着剤充填補修

本報で適用した接着剤の充填補修方法⁶⁾は、空隙への接着剤充填に使われる通常の加圧充填方法とは異なり、接合部全体をシール材で包み、その中を減圧雰囲気とすることで、亀裂などの充填目標箇所の空気と接着剤を置換するものである。

なお、補修前に外観から確認できた接合部の損傷は、ドリフトピン近傍のめり込みと木材繊維に沿った小さな割裂だけであった。また損傷は3試験体とも柱側ドリフトピン近傍に集中していた。

2.3.1. 充填作業の概要

まず亀裂やドリフトピンのめり込み箇所を持つ接合部全体を柔軟

図2 試験体(T5)形状及び加力装置

図3 加力計画

図4 接合部補修方法の模式図

図5 排気及び接着剤充填の模式図

なシール材で包み、端を粘着テープなどで押さえて気密を保つ空間を作る。あらかじめ、接着剤の充填箇所となる木材の表面にはシール材の張り付きを防ぐためのメッシュを貼り付け、またシール材に接着剤溜りとなる気室を設けておく。気室の排気口や別途設けた注入口から充填する接着剤を流し込み、透明で柔軟なシール材の上から手で押さえるなどして接着剤を充填箇所に誘導する。充填箇所に接着剤が行き渡ったことを確認してから、シール材内部の空気を排気する。排気によって減圧雰囲気となった内部では、充填箇所の空気は流動性のある接着剤と置換され気泡となり、気室に集められる。接合部補修方法の模式図を図4に、排気及び接着剤充填の模式図を図5に示す。

2.3.2. 作業の実際

接着剤には、コンクリートの表面クラック補修用のエポキシ接着剤(コニシボンド E206W)を用いた。シール材には一般的なビニールシート、メッシュにはナイロン製の網袋を開いて用いた。排気には、一般の掃除機を用いて吸引して減圧した。接着剤充填および充填後養生状況を写真1から写真5に示す。

加圧ではなく減圧を利用する方法では、透明で柔軟なシール材が使用できる。そのため、接着剤の流動が外部から観察できるほか、充填接着剤の誘導、作業途中での気密漏れ箇所の特定や気密補修が容易であった。また注入充填作業の全てにおいて接着剤が漏れ

出すことは無かった。

3. 結果と考察

処女加力と補修後加力の両実験の結果を比較することによって、耐力と変形性能の回復を検証した。検証は、耐力については各サイクルの最大荷重の比較を通して、変形性能については荷重-変形角曲線と横軸で囲まれる面積の比較を通して行った。

写真1 シールされた空間内への接着剤の注入

写真2 亀裂箇所へシール外からの接着剤を誘導

写真3 一般の掃除機による排気減圧作業

写真4 接着剤充填補修作業の全景

写真5 硬化養生期間中の様子

荷重変形角曲線を図6から図8に示す。縦軸の荷重はジャッキ先端のロードセル出力、横軸はジャッキ先端のストローク変位を加力の梁スパンに相当する距離(3000mm)で除して変形角としている。処女加力に比べて補修後加力の曲線が重なるか、やや上回っており、期待した接着剤の補修効果が表れていることが分かる。

全ての荷重変形角曲線について包絡線を図9に示す。処女加力の包絡線は、3試験体とも主たる破壊個所が柱側のドリフトピン接合部であるため、殆ど同じであった。T4では全般に補修後加力が高い荷

重を示している。これは接着剤による補修が、亀裂接着と空隙充填以外の効果として、挿入鋼板と集成材を接着接合したために生じたものと思われる。T3とT5では、部分的にこの接着接合の効果が現れているが、これは鋼板を挿入したスリット部分での接着剤の充填状況の影響に他ならない。しかしながら、処女加力の曲線を下回る部分は、その程度と併せて僅かであり、木部亀裂の接着とドリフトピン周りの空隙充填が十分に達成されたものと思われる。

繰返し加力の各サイクルについて、荷重変形角曲線と横軸とで囲まれる面積を算出したものを図10に示す。図中では、変形角毎に点を

図6 荷重-変形角曲線(T3)

図7 荷重-変形角曲線(T4)

図8 荷重-変形角曲線(T5)

図9 包絡線

図10 各サイクルの荷重変形角曲線の囲む面積

図11 各サイクルの最大荷重

つなぎ、曲線として表示している。T3では $1/300\text{ rad.}$ 、T4では $1/200\text{ rad.}$ 程度までの変形角で補修による面積の増加が顕著である。それ以降の変形角でも補修によって処女加力を上回る結果を得ているが、変形角の増加に合わせてその大きさは減少している。概ね $1/30\text{ rad.}$ 程度までは、繰返し3回目以降の面積の減少が見られないが、 $1/15\text{ rad.}$ では5回目でも、なお減少傾向にある。これは過去の実験³⁾の知見と符合している。

繰返しの各ループについて最大荷重をまとめたのが図11である。図10と同様に、各変形角、正負毎に点をつなぎ、曲線として示している。が、補修の効果が変形角の増大に伴って減少している様子が見られるほか、繰返し回数の増加による最大荷重の減少が変形角によって傾向を異にしていることが良く分かる。しかしながら、補修によって耐力が回復していることは明らかである。

4. 解体による充填状況の確認

加力実験終了後、各試験体の接合部を解体して、破壊状況と補修用接着剤の充填状況を確認した。写真6から写真8に各試験体の分解した接合部内部を示す。本実験の範囲では、鋼板挿入のために集成材を切り込んだスリット部分を全て埋め尽くす量の接着剤を充填しなかったが、集成材のスリット内面側に残った挿入鋼板の黒皮から、充填できた範囲が判る。本実験の接合部は、処女加力での損傷

が柱相当部材側に集中していたために、損傷部に重点的に接着剤を誘導した。そのため梁相当部材側への充填量が少ない。柱相当部材の接合部は、充填目標とした木材割裂部分と、鋼板とドリフトピンが接する部分について、表裏とも充填できたことが判る。しかしながら、充填後加力において十分な耐力回復が得られた点から見れば、梁相当部材側の充填は特に必要がなかったとも言える。ここで特筆すべきは、加力実験の都合上、反力床上に寝かせた状態で設置した

写真6 解体後の接合部(T3)

写真7 解体後の接合部(T4)

写真8 解体後の接合部(T5)

写真9 解体中の接合部(T4)

写真10 解体後の接合部(ドリフトピン近影)

試験体の水平に保持された挿入鋼板の裏面にも十分に充填できたことである。

写真9から写真10に解体時の接合部近影を示す。矩形配置されたドリフトピンの外周に沿って解体した結果、処女加力によって生じた割裂部分に接着剤が充填できたことがわかる。また写真10に見られるように、矩形配置されたドリフトピン接合部の外縁に位置するものの中には、①のように破断するものや、②のようにくびれを生じていたものがあった。本実験の加力計画は繰返し回数が多く、かつ完全面振加力であったので、鋼板との接点で集中的に繰返し曲げを受けるドリフトピンには、厳しい強制変形が加えられたことになる。また鋼板側のピン穴も正円から長円に変化している。本実験の接着剤充填補修では、②のようなくびれ部分にも充填できたことが同写真③を代表例として確認できた。

5. まとめ

エポキシ接着剤の減圧充填による大断面集成材ドリフトピン接合部の補修とその効果を検証するために、エポキシ接着剤の充填補修を挟んで、処女加力と補修後加力の二度の正負交番の繰返し加力試験を同じ接合部に対して行い、処女加力によって生じた亀裂とドリフトピンのめり込みに伴うピン周りの空隙が、充填補修によって効果的に補修できたことを、補修後加力とその後の接合部解体によって検証した。以上により、限られた範囲からではあるが以下の知見を得た。

- 減圧によるエポキシ接着剤の充填補修により、鋼板挿入ドリフトピン接合部の耐力と変形性能が回復できた。
- 接着剤補修の効果には、①亀裂接着、②空隙充填、③接着接合があり、③によって原状以上の接合強度が得られる場合があった。
- 加力実験後の試験体接合部を解体した結果、処女加力により生じた木材繊維に沿った亀裂や、ドリフトピン近傍の空隙に補修用接着剤が十分に充填されていたことが確認できた。

本報では変形角 $1/15 \text{ rad}$ までの処女加力の後に補修を試みたが、鋼板挿入ドリフトピン接合の場合には木材と挿入鋼板との間に接合部施工上必要な隙間が設けられるので、より小さい変形角経験後の充填でも十分に重点が可能であると思われる。また木部の修復・空隙充填以外にあたる接着接合の効果は、処女加力をも受けていない接合部において耐力の向上の可能性はある。しかしながら、他の構造形式におけるエポキシ接着剤の充填補修方法と同様⁷⁾に、実構造物への適用において、補修後の耐力増大を予測することや、接合部剛性の変化が及ぼす全体構造への影響、経年変化などについては、今後検討を深めていく必要がある。

なお、塑性変形能力を高めるために細長いドリフトピンを用いる場合、繰返し加力の回数が増えるとピンへの塑性ひずみの蓄積が過大となり、本研究でも一部のピンが破断した。実構造物に対して、このような補修を行う場合には、接着剤の充填に先立ってドリフトピンの交換について検討する必要がある。

参考文献

- 1) きれつに対する補修・補強方法 : 沢出稔 : 建築雑誌 Vol. 94, No. 1155, pp. 48-51, 1979/09
- 2) 接合具の降伏を一部許容した集成材一層門型ラーメンの耐力・変形能力 : 小松幸平, 原田真樹, 軽部正彦 : 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道) 構造 III 22066, pp. 131-134, 1995/08
- 3) 集成材柱・梁接合部の繰返し加力と時効効果 : 軽部正彦, 原田真樹, 林知行 : 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III 22034, pp. 67-68, 2002/08
- 4) 集成材ラーメン構造におけるガセット板接合型モーメント抵抗接合(2) 柱・梁 T 字型接合部の静的正負繰返し加力実験 : 小松幸平, 軽部正彦, 原田真樹, 原康之, 福田一郎, 貝原尚夫 : 日本木材学会第 46 回大会研究発表要旨集 II-1115, p. 202, 1996/04
- 5) 荷重変形曲線のモデル化とその問題点共有のための提案 特徴点抽出の自動化ツールについて : 軽部正彦, 原田真樹, 林知行 : 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III 22108, pp. 215-216, 2001/09
- 6) 軽部正彦 : 各種資材の修復・強化方法 : 日本国特許出願 特願 2003-151987, 2003/05/29
- 7) 例えば、R.C.梁・柱部材のエポキシ樹脂注入による補修効果に関する実験研究 : 関口秀治, 中田慎介, 川島俊一 : 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北) 構造 2556, pp. 1631-1632, 1982/10
- 8) 軽部正彦, 原田真樹, 林 知行: 接着剤充填による集成材柱・梁接合部の補修とその効果, 日本建築学会, 大会学術講演梗概集 構造 III 22031 pp. 61-62, 2003/09

[2004年4月20日原稿受理 2004年7月29日採用決定]