

令和 5 年 4 月 26 日現在

機関番号：14501
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：20K04791
研究課題名（和文）高い耐震性と鋼部材の再利用性を兼ね備えた低コストリジリエントフレームの開発

研究課題名（英文）Non Welding Joint System of Steel Structures in Consideration for Earthquake Resistance and Reuse of Column and Beam

研究代表者
多賀 謙蔵（Taga, Kenzo）
神戸大学・工学研究科・名誉教授

研究者番号：40578259
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：鋼構造建築物の柱梁接合部は、構造上極めて重要な部位である。柱梁接合部は一般に溶接接合で形成されるが、高力ボルト接合によって形成できれば、被災後の取り換えが容易になる。大地震時には接合部品に損傷を集中させるような工夫を施すことによって、建物の耐震性能を確保しながら、被災後の補修が容易にできる構法を考案した。この接合部品は一般的な機械加工機を用いて製作できることも特徴である。この構法の有効性を実大の載荷試験によって確認し、併せて具体的な設計法を提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案構法は、わが国の新築建物の多数を占める5階建て以下の鉄骨造建物に低コストで適用可能である。これら大多数の建物の構造体に損傷が生じた場合にも早期に補修を施すことができるため、頻発する地震災害に対し都市の回復力・強靭さ向上させる有効な手段となり得る。また、この構法は、柱梁部材のリユースが可能で、地球環境問題に寄与できる工法である。

研究成果の概要（英文）：Column-to-beam joints in steel structures are structurally very important parts. Column-to-beam joints are generally formed by welding, but if they can be formed by high-strength bolt joints, it will be easier to replace them after a disaster. We devised a construction method that allows for easy repairs after a disaster while ensuring the seismic performance of the building by devising ways to concentrate damage on joint components during a major earthquake. Another feature of this joint component is that it can be manufactured using a general machining machine. The effectiveness of this construction method was confirmed by a full-scale load test, and a concrete design method was presented.

研究分野：建築構造工学

キーワード：鋼構造建物 スプリットティ接合 梁の段違い 塑性変形能力 繰返し載荷実験 有限要素解析 設計法

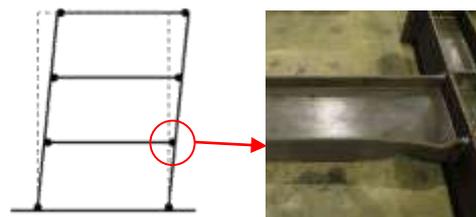
科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

わが国の現行建築基準は、極めて稀に起こる大地震に対しては「構造体の損傷を許容するが、重大な損傷がなく倒壊しない（人命を守る）」ことを求めており、これまでの耐震設計に関する研究の多くは構造体の塑性変形能力の解明に注がれてきた（図1）。一方、大地震に対しても機能維持や継続使用を図るべく、免震構造や制振構造に関する研究成果を受けて高い耐震性能を付与した建築物が実現しているが、相応の付加コストを要するためすべての建築物に採用することは難しい。わが国の新築建物のうち5階建て以下の鉄骨造建物は着工床面積において約1/3を占めており、頻発する地震災害に対し都市のレジリエンス（回復力・強靭さ）を向上させるためには、これら大多数の建物の構造体に損傷が生じた場合にも早期に補修を施すことができ、機能停止期間を最小限にとどめるための技術的解決が必要である。

一方、鋼材は、わが国の土木・建築構造物にとって欠くことのできない基礎資材で、強度が高く粘りがある（変形能力が大きい）という特性を活かしながら如何に効率よく繋ぐ（接合する）かが鋼構造物の設計上の要点である。これまでの接合部設計の基本的な考え方は、「接合される部材よりも接合部を強くしておく」ことにより、被接合材（柱や梁）の性能（塑性変形能力）を活かそうとするもので、鋼部材を溶接接合ではなく接合部品を用いて接合する「乾式接合」においても同様であった。このことは、大地震時には梁あるいは柱部材の損傷を許容することが前提となっており、人命を守ることができても早期の機能回復に配慮したものではないということでもある。



望ましいとされる 梁端部が大きく損傷→大が
梁崩壊メカニズム かりな補修又は取り壊し

図1 大地震時の損傷を許容する現行耐震基準

また、鋼構造建築物の接合部のうち加工工数が最も多く構造上極めて重要な柱梁接合部を、高力ボルト接合によって形成し、その接合部品を塑性化させる試みも既に行われているが、特殊な加工を要する部品を必要とする汎用性の問題、あるいは溶接接合と比べて剛性あるいは耐力が劣る性能上の問題などの課題を有している。

2. 研究の目的

本研究は鋼構造建築物の乾式接合に関する既往の研究の延長に位置付けられるものであるが、一般的な機械加工機を用いて製作でき、かつ被接合材が塑性化する場合と同等の剛性と耐力を有することによって、コスト上昇をほとんど伴うことなくレジリエントな構造を実現し、広く普及させることを目指している。

本研究が目指す乾式接合は、柱梁部材のリユースが可能で、地球環境問題に寄与できる工法であり、さらに、申請者が別途提案している「高強度鋼材をフランジに用いた異種鋼材 H 形断面柱による高耐震性構造」に適用することで、耐震性能をより高めたレジリエントフレームを実現することができる。

3. 研究の方法

提案工法の実現にあたってのポイントは、1)適切な剛性と耐力を有し、かつ十分な塑性変形能力を有するスプリットティの形状検討、2)柱にスチフナを設けずに梁の曲げ応力を適切に伝達するための H 形断面柱フランジの面外補強法ならびにパネルゾーンの補強法の確立、の 2 点である。具体的には次のように段階的に研究を進めた。

(1) 前年度までに行っていた自主研究の成果を整理し、これをもとにして架構が有する塑性変形能力を維持・向上させ、剛性や耐力を溶接接合形式にできるだけ近づけられるようなティフランジ塑性化スプリットティの形状を見出す目的で、スプリットティの形状を変化させた 4 種のト字型架構試験体を製作し、地震時の挙動を模した載荷実験を実施した。（令和 2 年度）

(2) 前年度に実施した実験によって、ティフランジの切削加工を適切に施すことで、塑性変形能力を向上させられる結果を得たことを踏まえて、柱への負荷が大きい十字型とした場合の影響、ならびに左右の梁段差の有無の影響を検討する目的で、2 体の十字型架構試験体を製作して地震時の挙動を模した載荷実験を実施した。（令和 3 年度）

(3) ト字型架構（令和 2 年）および十字型架構（令和 3 年）を対象として行った性能確認実験ならびに解析的検討によって得られた成果を統合して、設計法の構築ならびに構造設計者が接合部設計を容易に決定できる設計支援ツールの整備を行った。

4. 研究成果

(1) 対象とする無溶接柱梁接合部の概要

H 形強軸柱と H 形梁をスプリットティ接合することで架構を構成する場合を対象とする。詳細は図 2 に示す通りである。柱梁仕口部は柱フランジをアングルで、柱ウェブを鋼板で補強する。

これら補強材をそれぞれ「補強アングル」、「補強プレート」と呼ぶ。梁下端と柱とは積極的に塑性化させるスプリットティで接合し、梁上端と柱とはアングルで接合する。それぞれ「塑性化スプリットティ（以下、スプリットティ）」、「接合部アングル」と呼ぶ。各部材の役割は次の通りである。

- ・**塑性化スプリットティ**：大地震時に接合部材であるスプリットティに損傷を集中させようとするとき、高力ボルトは変形能力が乏しくスプリットティに損傷を集中させる方法が合理的であると考えられるため、ティフランジのみに塑性ヒンジが発生する崩壊系を形成させる。座板はティフランジの面外曲げによる塑性化範囲を制御し、さらに表座板はスプリットティ引き側の変形に対する固定度を確保する役割を、裏座板はスプリットティが変形するためのクリアランスとしての役割を有している。

- ・**接合部アングル**：梁上端には一般的に床スラブが取りつき補修が容易ではない。したがって、梁上端は梁下端のスプリットティが降伏した後も梁のせん断力を負担し、ピンと見なせる程度に回転剛性の小さい接合方法としてアングル接合を用いることで、この部分の大地震後の補修を不要とする。

- ・**補強アングル**：柱フランジにスプリットティのティフランジとともに高力ボルト引張接合され、スプリットティから伝達される引張力に対して柱フランジとともに抵抗し、柱フランジの面外変形を防ぐ。

- ・**補強プレート**：柱ウェブに補強アングルとともに高力ボルト摩擦接合され、パネルゾーンに作用するせん断力に対して柱ウェブとともに抵抗し、柱ウェブの損傷を防ぐ。補強プレートが、柱のフィレット部と干渉しないためのフィラープレートとしての役割も果たすため、フィレット半径と同等以上の板厚とする。

(2) 塑性化スプリットティの切削形状の違いによる影響

令和 2 年度は、先行研究において基本的な力学性状を確認した塑性化スプリットティについて、性能向上を目的に形状を改良し、これを付加した架構を対象として載荷実験を行った。

①試験体概要

スパン 6000(mm) 、階高 3000(mm) で柱梁耐力比 1.5 を満足する柱梁の組み合わせのト字型架構を想定し、柱は H-300×300×10×15、梁は H-350×175×7×11 を用いた。提案する 4 種類のスプリットティの寸法を図 3、表 1 に示す。テーパ開始位置を先行研究よりフィレット側にずらし、フィレット部の板厚を確保することによってティフランジ全体で塑性化が進展するよう改良している。フィレット側に 5mm ずらしたものを試験体 1、10mm ずらしたものを試験体 2、剛性向上を目的として面外曲げスパン ($l_1+l_2+l_3$) を小さく設計したものを試験体 3、これと同寸法で切削加工を施さないものを試験体 4 とした。ティフランジの最弱断面が面外降伏する時にティウェブに作用する軸力が 4 体ともほぼ等しくなるようにティフランジの板厚等を調整している。鋼材種は全て SS400 で、高力ボルトは全て F10T-M24 を用いた。セットアップを図 4 に示す。載荷は梁端回転角にして $\pm 1/400$ から $\pm 1/20$ までに相当する各変位振幅で各振幅 2 回ずつ行った。

表 1 スプリットティ寸法

試験体	B	t ₁	t ₂	l ₀	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅
1	250	18	9	27	26.5	10	26.5	25	43.5
2	230			17	26.5	10	26.5		
3	250	14	7.5	25	14.5	10	14.5		
4	250			-	-	-	-		

②実験結果

試験体 1 は $\delta = +1/20$ 二回目ピーク時、試験体 2 は $\delta = +1/20$ 一回目載荷中にスプリットティ外側フィレット部に亀裂と架構の耐力低下を確認し、実験を終了した。試験体 3 は $\delta = +1/25$ 一回目変形途中にスプリットティ内側の平坦部とテーパ部（曲げ降伏域）の切替わり位置に亀裂が入り、ピークに至る前に亀裂が進展・破断し、耐力が低下したため実験を終了した。試験体 4 は $\delta = +1/25$ の二回目ピーク直前にスプリットティ外側フィレット部の亀裂が進展し、耐力が低下したため実験を終了した。試験体 4 の $\delta = -1/50$ 二回目ピーク時には梁ウェブの面外変形を確認した。試験体 1、3 の最終状態を写真 1、2 に示す。

各試験体の荷重変形関係を図 5 に示す。また各試験体の弾性剛性と試験体 1 に対する比率および最大荷重と層間変形角 1/33 までにおける最大耐力を表 2 に示す。試験体 1、2、3 に着目すると、剛性が大きくなるにつれて、より小さな層間変形角で最大荷重に達する。一方で、層間変形 1/33 までの性状に着目すると、試験体 3 では試験体 1 に比べて最大荷重で 7.3% の向上が見られる。載荷荷重-ティフランジ変形関係を図 6 に示す。ティフランジ変形 δ_{st} は図 7 で示す値と

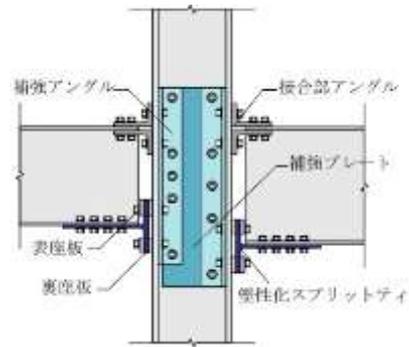


図 2 柱梁接合部詳細

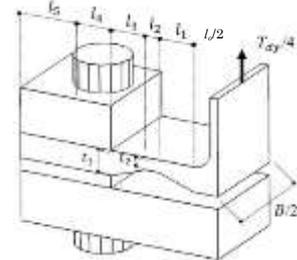


図 3 塑性化スプリットティ詳細 (1/4 モデル)

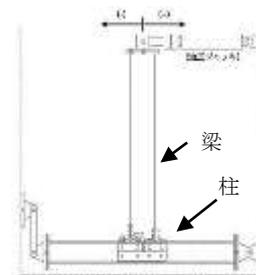


図 4 セットアップ

定義する。切削加工を施さない試験体 4 は他の試験体と比較し第 2、4 象限の剛性低下がやや大きく、最大荷重の上昇が顕著である。後者の原因は塑性化範囲が限定的になり、歪硬化がより進展したためと考えられる。特に後者に関しては母材の損傷を防ぐ観点からは望ましくない。



写真 1 試験体 1 破断状態



写真 2 試験体 3 破断状態

表 2 実験結果比較

	弾性剛性	試験体1に対する比率	最大荷重 実験値	層間変形1/33 までにおける 最大耐力
	kN/mm	%		
試験体1	1.67	100	78.5(+1/20)	67.4
試験体2	1.75	104.8	74.0(+1/25)	68.6
試験体3	1.88	112.6	72.3(+1/33)	72.3
試験体4	1.97	118	84.1(+1/25)	81.6

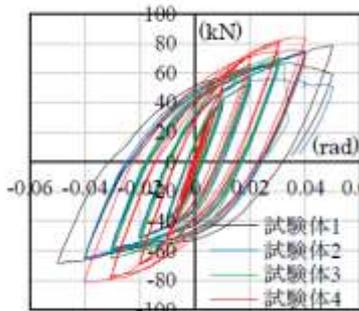


図 5 荷重-変形関係(実験値)

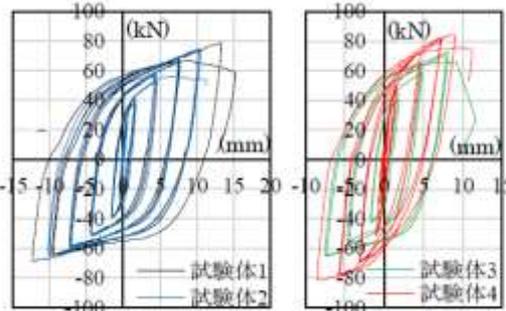


図 6 載荷荷重-ティフランジ変形 δ_{st} 関係

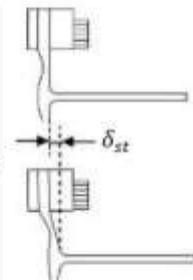


図 7 δ_{st} の定義

③得られた知見

- ・ティフランジの切削加工を適切に施すことで塑性変形能力が向上する。
- ・剛性の向上を主眼とした試験体 3 では、層間変形角 1/33 程度までの変形追随性を確保しながら、変形能力向上を主眼としたモデルに比べて剛性で 12.6%、最大荷重で 7.3%の向上が見られた。一方で、破断までの塑性変形能力は低下した。
- ・ティフランジの歪が局部的に集中するモデルでは歪効果によって母材への負担が大きくなる。

(3) 段違い接合部への適用可能性に関する検討

令和 3 年度は、柱への負荷が大きい十字型架構とした場合の影響、ならびに左右の梁段差の有無の影響を検討する目的で、2 体の試験体を製作して地震時の挙動を模した載荷実験を行った。

①試験体概要

スパン 4000mm、階高 2000mm の十字型架構とし、柱梁耐力比 2.0 以上を満足するよう、柱は H-300×300×10×15 (SN490)、梁は H-350×175×7×11 (SS400) を用いる。他の接合部材は前年度使用したものと同等 (スプリットティは試験体 1 の形状) とし、鋼種はいずれも SS400 とする。試験体は段違いの無い試験体 D0 と 100mm の段違いを有する試験体 D100 の 2 体とする。セットアップを図 8 に、試験体概要を図 9 に示す。載荷はスプリットティが降伏耐力に達する際の層間変形角 θ_p (1/160rad) を基準として 1/2 倍から 8 倍までに相当する変位振幅を各振幅 2 回ずつ与えて行った。

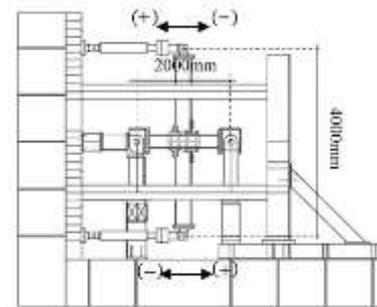


図 8 セットアップ

②実験結果

両試験体ともに層間変形角 $+8\theta_p$ 一回目ピーク時にスプリットティの外側フィレット部に亀裂が発生し、その後 $-8\theta_p$ 二回目載荷途中で破断して架構の荷重低下を確認し、実験を終了した。2 体を比較すると、試験体 D100 の方が僅かに早いタイミングで荷重低下を確認した。各試験体の最終状態におけるスプリットティの破断状況を写真 3 に示す。両試験体の弾性剛性および最大荷重の比較を表 3 に、載荷荷重-層間変形角関係を図 10 に、載荷荷重-スプリットティ変形関係を図 11 に示す。試験体 D100 の弾性剛性が 5%程度大きく同変形時のスプリットティの変形がやや大きい。

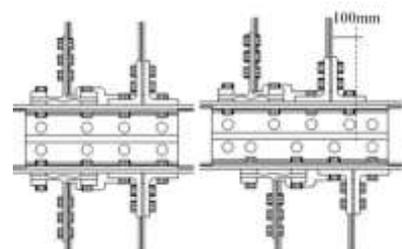


図 9 試験体概要 (左から試験体 D0, 試験体 D100)

要素ごとの変形割合の推移を図 10 に示す。柱フランジの面外変形を“局部”と表示している。試験体 D100 では大変形域での柱およびパネルゾーンの変形割合が試験体 D0 より 3%程度小さく、接合部材 (スプリットティ・接合部アングル) の変形割合が 5%程度大きい。この原因の一つは、

試験体 D100 では段違いを施すことで試験体 D0 と比較して補強アングルおよび補強プレートによる補剛領域が拡大した結果、柱の剛性が上昇してスプリットティの変形負担割合が増加したものと考えられる。

要素ごとの変形割合の推移を図 12 に示す。柱フランジの面外変形を“局部”と表示している。試験体 D100 では大変形域での柱およびパネルゾーンの変形割合が試験体 D0 より 3%程度小さく、接合部材（スプリットティ・接合部アングル）の変形割合が 5%程度大きい。この原因の一つは、試験体 D100 では段違いを施すことで試験体 D0 と比較して補強アングルおよび補強プレートによる補剛領域が拡大し、その結果柱の剛性が上昇してスプリットティの変形負担割合が増加したものと考えられる。



写真3 実験最終状態 (左から試験体 D0, D100)

表3 両試験体の弾性剛性および最大荷重の比較

試験体	弾性剛性		最大荷重(kN)	
	kN/mm	対 D0 比	正載荷側	負載荷側
D0	5.99	1.0	137.1	136.2
D100	6.25	1.04	137.4	137.3

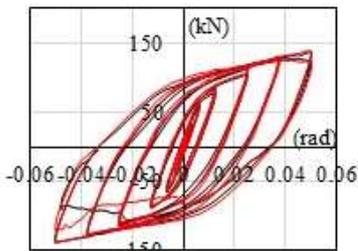


図10 荷重-層間変形角関係

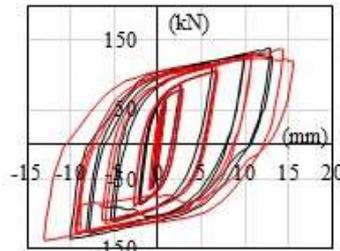


図11 荷重-ST変形関係

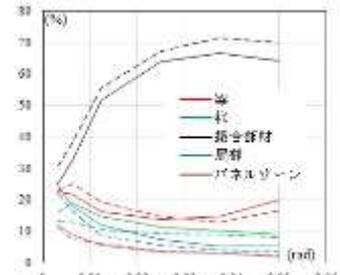


図12 構成要素ごとの変形割合の推移

③得られた知見

- ・接合部に段違いを施すことで補剛領域が大きくなり、弾性剛性が上昇するとともにスプリットティの変形負担割合が増加するものの、段違いによる差異は僅かであり、提案構法が段違い接合部にも十分適用可能である。
- ・有限要素解析による溶接モデルとの比較では、提案構法の弾性剛性は約 80%程度、最大荷重は約 70%程度となった。

(4) 設計法の構築と設計支援ツールの整備

令和4年度は、前年度までに行ったト字型架構および十字型架構を対象として行った性能確認実験ならびに解析的検討によって得られた成果を統合して、次の成果を得た。

①設計法の構築

構造設計者が設定した柱梁断面及びスパン・階高に対して、接合部の各部材（スプリットティととりつく高力ボルト、接合部アングルととりつく高力ボルト、梁フランジ、補強プレート、補強アングル、パネルゾーンの高力ボルト）の設計手順を示した（表4）。

②設計支援ツールの整備

表4内の番号に対応する、各接合部品等の設計式を示した。また、架構全体をパネルゾーン、柱、梁、スプリットティ・接合部アングルおよび柱フランジの面外変形の5つの構成要素に分割し、各要素の回転弾性剛性を予測する評価式を提示した。さらに架構全体が5つの構成要素の直列連結回転バネのような挙動を示すと考え、架構全体の剛性評価式を提示した（具体的な設計式、剛性評価式は主な発表論文の1件目に掲載）。

以上

表4 設計手順

部材	決定事項	確認事項
柱梁	柱梁断面 スパン・階高	
スプリットティ (ST)	ティウェブ 高力ボルト	ST 降伏時：すべりを生じない (1)
	設計用耐力	梁に先行して降伏 (2)
	座板寸法	テコ反力の低減
	ティフランジ 高力ボルト	ST 降伏時：離間しない ST 終局時：破断しない
接合部 アングル	ST 寸法	ST 降伏時： 特定の崩壊機構形成 (3) ティウェブが引張降伏しない
	高力ボルト (柱側・梁側)	ST 終局時：すべりを生じない (6) (7)
	接合部 アングル寸法	ST 終局時： 引張崩壊しない (8) ちぎれ破断しない (9) せん断降伏しない (11)
梁上 フランジ	面外抵抗に 必要な板厚	ST 終局時： 面外曲げ変形しない せん断降伏しない
補強 プレート	板厚	ST 降伏時：降伏しない (12)
		ST 終局時：全塑性に至らない (13)
補強 アングル	寸法	ST 降伏時：降伏しない (14)
		ST 終局時：全塑性に至らない (15)
パネルゾーン 高力ボルト		ST 終局時：すべりを生じない

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 伊原 拓哉、多賀 謙藏、田中 剛、浅田 勇人	4. 巻 30
2. 論文標題 鋼構造無溶接接合システムの設計法と段違い梁への適用性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 44-52
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 樋口 敦也、伊原 拓哉、浅田 勇人、多賀 謙藏、田中 剛	4. 巻 29
2. 論文標題 耐震性と柱梁母材の再利用に配慮した鋼構造無溶接システム 塑性化スプリットティの切削形状違いによる影響 塑性化スプリットティの切削形状違いによる影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 631-637
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 今村 勇貴、樋口 敦也、浅田 勇人、多賀 謙藏、田中 剛	4. 巻 28
2. 論文標題 ティフランジ塑性化スプリットティを用いた架構の繰返し載荷試験	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 361-366
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 伊原 拓哉、樋口 敦也、多賀 謙藏、田中 剛、浅田 勇人、吉敷 祥一
2. 発表標題 耐震性と柱梁母材の再利用性に配慮した鋼構造無溶接接合システム その4：段違い接合部への適用性能に関する検討
3. 学会等名 令和4年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊原 拓哉、樋口 敦也、多賀 謙藏、田中 剛、浅田 勇人、吉敷 祥一
2. 発表標題 耐震性と柱梁母材の再利用性に配慮した鋼構造無溶接接合システム その8：段違い接合部への適用性能に関する検討
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 樋口 敦也、伊原 拓哉、浅田 勇人、多賀 謙藏、田中 剛、吉敷 祥一
2. 発表標題 乾式接合による合理的な柱梁接合部の形成に関する研究 その3：塑性化スプリットティの切削形状の違いによる影響
3. 学会等名 令和3年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 樋口 敦也、伊原 拓哉、浅田 勇人、多賀 謙藏、田中 剛、吉敷 祥一
2. 発表標題 耐震性と柱梁母材の再利用性に配慮した鋼構造無溶接接合システム その7：塑性化スプリットティの切削形状の違いによる影響
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	吉敷 祥一 (Kishiki Shoichi) (00447525)	東京工業大学・科学技術創成研究院・教授 (12608)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	浅田 勇人 (Asada Hayato) (70620798)	芝浦工業大学・建築学部・准教授 (32619)	
研究分担者	田中 剛 (Tanaka Tuyoshi) (90243328)	神戸大学・工学研究科・教授 (14501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関