

研 究 報 告

令和 7 年 4 月 3 0 日

公益財団法人 前田記念工學振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 福岡大
学

氏 名 : 田中 照久

研究課題名 : 部材リユースに資する鋼-コンクリート接合分離技術の性能評価に関する基礎研究

助成金額 : 1 0 0 万円

研究実施期間 : 自 令和 6 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 7 年 3 月 31 日

部材リユースに資する鋼-コンクリート接合分離技術の性能評価に関する基礎研究

Fundamental study on the performance evaluation of steel-concrete connection disassembly methods for component reuse

福岡大学 准教授 田中 照久

（研究計画ないし研究手法の概略）

1. はじめに

建築構造分野における資源循環の促進に向けて、「部材リユース」への関心が高まっている。しかし、従来の建物は解体し易い設計施工がなされておらず、建物骨組の分別解体と部材の回収を容易にするための要素技術の開発が喫緊の課題である。特に、鉄骨構造や合成構造に使用される鉄骨梁とコンクリート床スラブが一体化された合成梁は、耐震性・経済性・居住性の向上に不可欠な構造である反面、現状の解体法では図1（上段）のように、重機を使用して鉄骨部材に剛結されたコンクリートを噛み砕いていくため、将来のリユース実現を妨げる深刻な障壁である。

筆者らは、鋼材とコンクリートの強固な一体化と容易な脱着の両立を可能にする接合分離技術（図2）を考案し、部材リユースを想定した合成梁（図3）の施工試験・曲げ試験・解体試験でその有効性を実証してきた。最終目標は、異種材料部材で構成される耐震構造の合理的なリユースシステム（図1下段）を実現・普及することであり、本研究では接合分離要素の性能評価に焦点を当て、部材リユースを軸に設計・施工・解体・品質再評価のサイクル技術を構築することを目的とする。

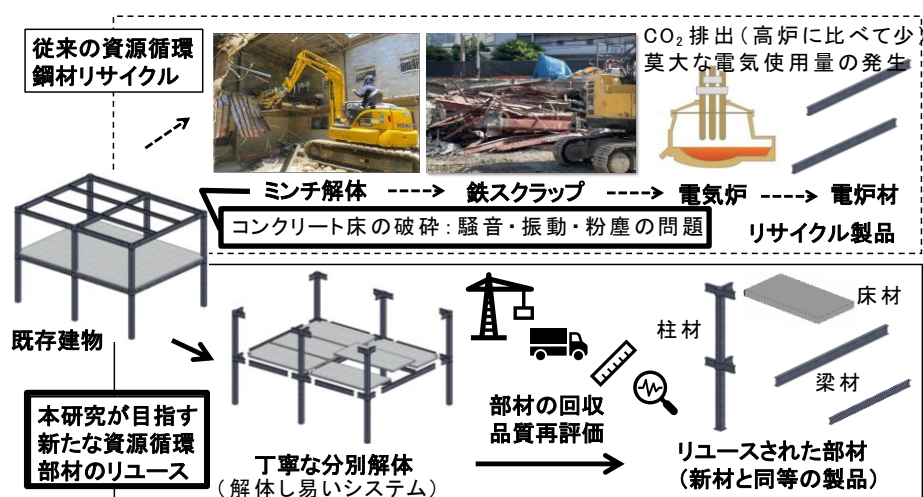


図1 建物解体時の鋼材リサイクル（従来）と部材リユース（本研究課題）

2. 研究の概要

本研究は、鉄骨梁とコンクリート床スラブの分別解体および部材リユースを可能にする接合部の設計法を検討するため、バーリングシアコネクタ（以下、BSC）鋼板と高力ボルトを併用した接合分離要素の押抜き試験ならびに合成梁の施工試験・曲げ試験・解体試験を実施した。それらの概要を以下に示す。

① 接合分離要素の押抜き試験

合成梁の接合部を模した押抜き試験を行い、鋼とコンクリートの応力伝達機構を分類し、接合分離要素のせん断耐力を定量的に評価するための実験データを収集する。

② 合成梁の施工試験・曲げ試験・解体試験

床スラブを施工する際に用いるデッキプレートと鉄骨梁の接合部は、焼抜き栓溶接またはデッキ貫通スタッド溶接することが一般的であるが、梁と床の丁寧な解体を困難にする。この課題を解決する一手段として、デッキプレートを鉄骨梁と接合分離要素の間に挟み込んで高力ボルト摩擦接合する合成梁を考案した。施工試験より、コンクリート床スラブに埋設された高力ボルトの締付け軸力性状を把握する。曲げ試験より、本合成梁（新材）の弾性挙動を把握する。解体試験より、高力ボルトのナット逆回しで梁と床を分離できることを実証する。最後に、再度組立てた合成梁（リユース材）の曲げ試験を行い、新材の弾性剛性と比較するとともに、弾塑性性状を明らかにする。

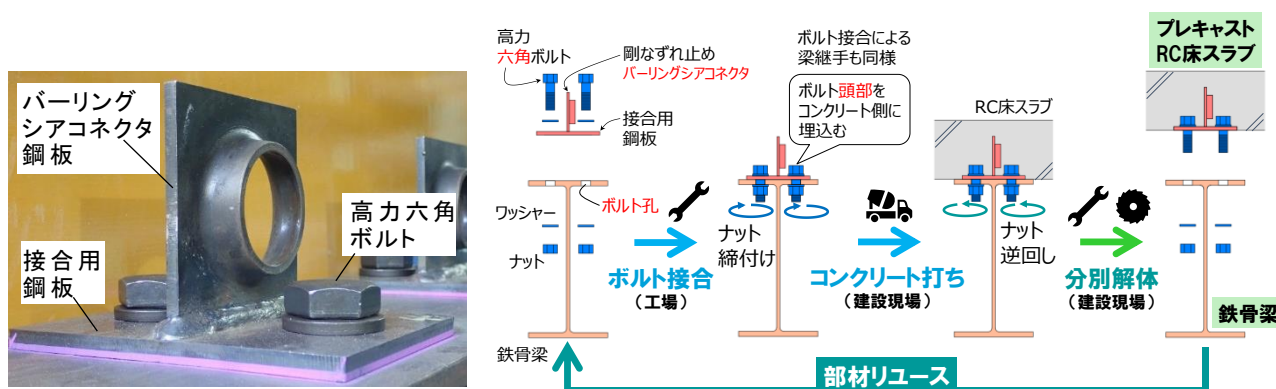


図2 鋼とコンクリートの接合分離要素

図3 鉄骨梁とコンクリート床スラブのリユースシステム

(実験調査によって得られた新しい知見)

3. 接合分離要素の押抜き試験による応力伝達機構の分類

図2のT形接合分離要素は、機械的ずれ止めのBSC鋼板をボルト孔があいた接合用鋼板に隅肉溶接で垂直に取り付け、それを梁上フランジに高力ボルト摩擦接合する。コンクリートに埋設される接合用鋼板小口および高力ボルト頭部によるコンクリート支圧抵抗（以下、それぞれPL支圧・HB支圧と呼ぶ）は設計耐力に見込んでいないが、これらの抵抗要素が応力伝達性能に与える影響を定量的に明らかにすることで、さらに合理的な設計・施工が可能になることが期待される。接合要素の短期許容せん断耐力 $j q_y$ は、式(1)によることを想定し、BSC鋼板の降伏せん断耐力 $bsc q_y$ と高力ボルト摩擦接合面のすべり耐力 $hb q_s$ が同程度になるように設計する。

$$j q_y = \min(bsc q_y, hb q_s) \quad \cdots (1) \quad bsc q_y = A_{bsc} \cdot \sigma_y / \sqrt{3} \quad \cdots (2) \quad hb q_s = n \cdot m \cdot \mu \cdot N_0 \quad \cdots (3)$$

ここに、 A_{bsc} ：BSC鋼板平板部の断面積，BSC鋼板の降伏応力度， n ：ボルト本数（=2）， m ：摩擦面の数（=1）， μ ：すべり係数（黒皮：0.23，赤錆：0.45）， N_0 ：設計ボルト張力（F10T M22：205kN，M20：165kN，M16：106kN）

3.1 実験計画

押抜き試験体の形状寸法および載荷方法を図4に、実験変数を図5に示す。実験変数は、HB支圧およびPL支圧の有無，高力六角ボルト（F10T）のねじの呼び（M22・M16），接合用鋼

板の厚さ(9mm・6mm)とし、試験体数は計5体である。コンクリートの圧縮強度は 25.8N/mm^2 である。押抜き試験体は、H形鋼の両フランジにコンクリートスラブが接合された形式である。床スラブの形状は等厚な断面とし、スラブの厚さは150mm、幅は400mmとした。スラブ筋はD10の異形鉄筋(SD295)で二段配筋とした。BSC鋼板は板厚6mmに孔径 50ϕ のバーリング加工を施した1辺100mmの正方形とした。PL支圧およびHB支圧を除去する際には、それぞれ接合用鋼板小口と高力六角ボルト頭部下部に発泡材を配置して空隙を設けた(図5の黒着色部)。摩擦接合面のH形鋼フランジとT形のBSC鋼板が取り付けいた接合用鋼板は黒皮未処理を基本とし、高力ボルトM16を使用する試験体No.5は、M22と同等のすべり係数にするため、摩擦接合面に赤さび処理を施した。なお、高力ボルト摩擦接合部の締付け軸力は、軸部に貼付したひずみゲージ2枚の平均値で評価した。

载荷は、高力ボルト摩擦接合の長期および短期相当の許容せん断耐力まで、BSC鋼板の $b_{sc}q_y$ まで、その後変位制御に移行し、相対ずれが1.0mmまでは0.2mmごとに、4.0mmまでは0.5mmごとに、それぞれ载荷・除荷の漸増繰返し载荷を行い、最後は相対ずれ9.0mmまで载荷した。

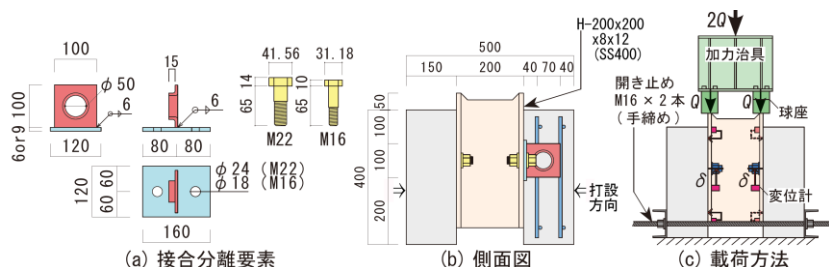


図4 T形接合分離要素を用いた押抜き試験体

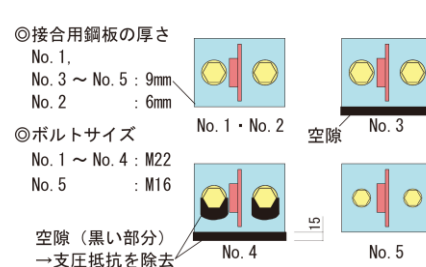


図5 押抜き試験の実験変数

3.2 実験結果

T形状の接合分離要素1個あたりのせん断力-ずれ変位関係を図6に示す。図中の実線はBSC鋼板の $b_{sc}q_y$ を、破線と一点鎖線はそれぞれ高力ボルト(M22: 黒皮, M16: 赤さび)の h_bq_s を示す。図7に、試験体No.1, No.3 およびNo.4の各ずれ変位時(5.0mmまで)のせん断力を骨格曲線で示す。図8に、各伝達要素の抵抗力-ずれ変位関係を示す。

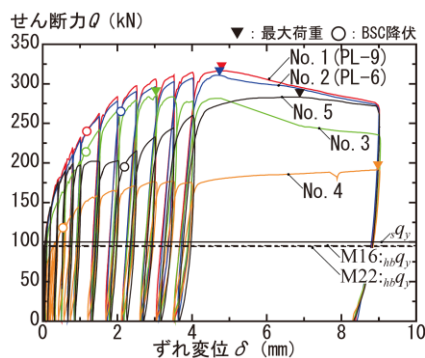


図6 せん断力-ずれ変位関係

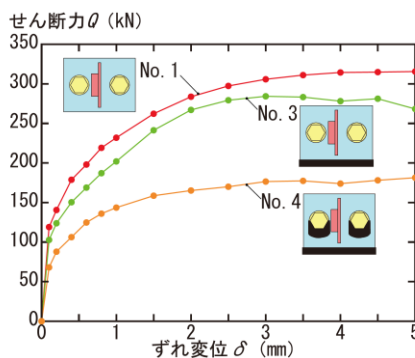


図7 骨格曲線の比較

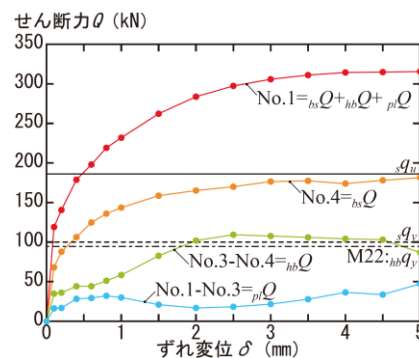


図8 各抵抗力-ずれ変位関係

図6より、基準試験体No.1に対し、PL支圧における接合用鋼板の厚さを9mmから6mmに変えたNo.2は、ずれ変位1.5mmまでの耐力差はほとんど見られない。図7より、接合用鋼板小口のPL支圧を完全に除去したNo.3は、No.1に比べてずれ変位0.1mm以降から荷重に差が生じ始め、最大荷重は約1割低下することが確認できた。さらにボルト頭部のHB支圧も除いたNo.4

は、No.3に比べずれ挙動に顕著な差が見られた．図6より，M16のNo.5は，ずれ変位1mm程度まではM22のNo.1と同様の荷重を示しているが，ずれ変位1mm～2mmまでの間に荷重が横ばいになり，ずれ変位2mmを超えると荷重の上昇が確認できる．これは，高力ボルト摩擦接合からボルト軸部とH形鋼ボルト孔内壁の支圧状態に移行したことによるものである．M16の最大荷重はM22に比べ約1割低下することが確認できた．

図7を用いて各ずれ変位時ごとのせん断力を足し引きして算出した各抵抗力和ずれ変位の関係を図8に，基準試験体No.1における各伝達要素の抵抗力の割合を図9に示す．図9より，基準試験体No.1の各伝達要素の抵抗割合は，ずれ変位0.1mmからほぼ一定の推移であることがわかる．具体的には，BSCのせん断抵抗 bsQ が約6割，HB支圧抵抗 hbQ が約3割，PL支圧抵抗 plQ が約1割であり，抵抗機構は3つの複合型であることが示された．

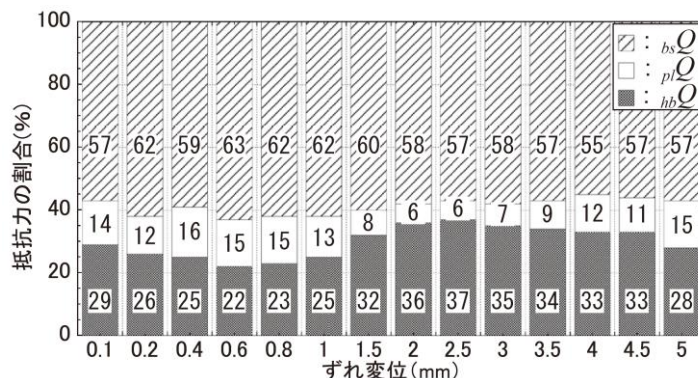


図9 基準試験体 No.1 における各抵抗力の分担率

4. フラットデッキを高力ボルト摩擦接合する合成梁のリユース検証実験

鉄骨梁とフラットデッキを用いたコンクリート床スラブの施工，解体，部材リユースまでのフローを図10に示す．施工時は，L形状の接合分離要素とデッキを梁材に高力ボルト摩擦接合し，図3と同様に解体時はナットを逆回しにすることで梁材と床材を分解して部材を回収する方法である．

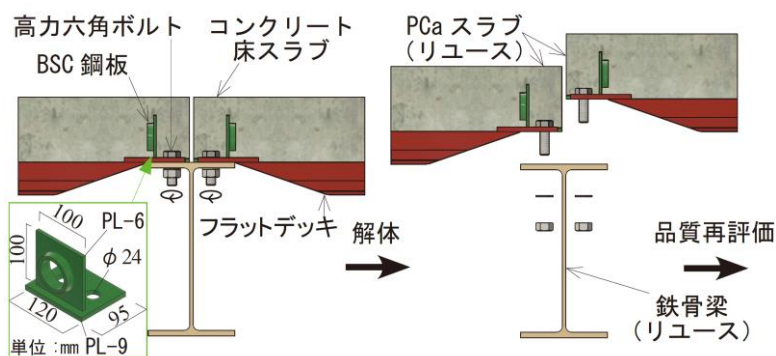


図10 フラットデッキを用いた合成梁のリユースシステム

4.1 押抜き試験の概要

フラットデッキをH形鋼とL形接合分離要素の間に挟み込んで高力ボルト摩擦接合した機械的ずれ止めの押抜き試験体および載荷方法を図11に示す．実験変数は図11(b)のように，分割されたスラブ間に隙間があるNo.1（グラウト無），その隙間に無収縮グラウトを充填したNo.2（グラウト有）の計2体である．図11(c)の載荷手順は，前述と同様である．

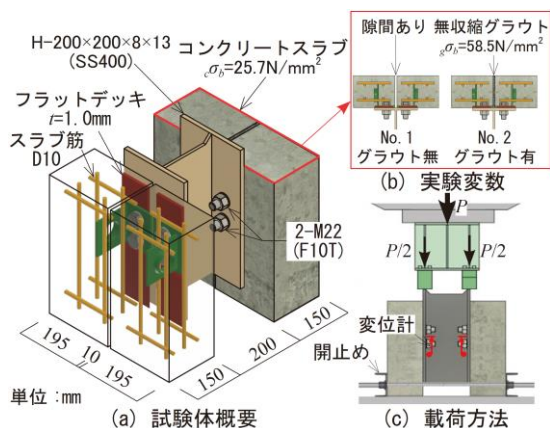


図11 フラットデッキを用いた押抜き試験

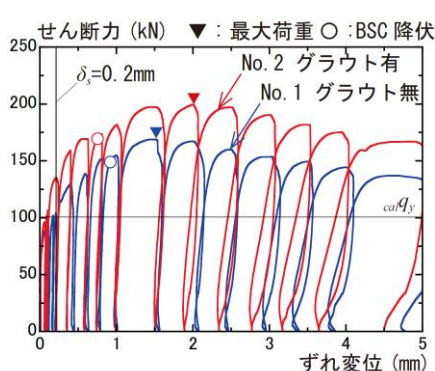


図12 L形接合要素1個

あたりの押抜きせん断挙動

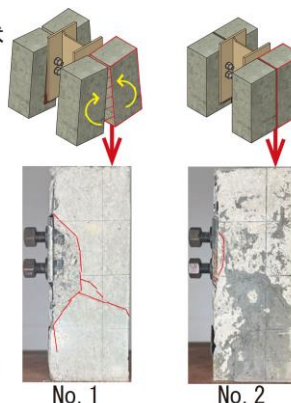


写真1 破壊状況

試験体のずれ止め1個あたりのせん断力—ずれ変位関係を図12に示す．図中の $calq_y$ は、BSC 鋼板部の降伏せん断耐力計算値 $bscq_y$ である．No.1 はずれ変位0.2mm時に $calq_y$ を発揮したのに対し、No.2 は約半分のずれ変位0.1mmで $calq_y$ に達しており、初期の段階からグラウトを充填する効果が得られた．BSC鋼板の降伏時耐力および最大耐力は、隙間にグラウトを充填することでいずれの耐力も約1.2倍増大した．これは、実験後の写真1に示すように、グラウトを充填することで、スラブの回転が拘束され、ひび割れ発生が抑制されたことが要因である．

4.2 曲げ試験の概要

合成梁試験体の形状寸法を図13に示す．試験体は4000mmの単純梁で、せん断スパン区間 L_s は1500mmである．フラットデッキを用いた分割形式の床スラブは幅800(=395×2+10)mm、厚さ150mmとした．コンクリートの呼び強度は F_c21 であり、スラブ筋はD10(SD295)を使用した．L形の接合分離要素は、デッキ平坦部に並列に配置し不完全合成梁として設計した．載荷方法は図14のとおり4点曲げ試験で、試験体の両端を単純支持とし、2点集中荷重を加える．所定のタイミングで載荷を終了し、梁と床を分離して、再び組み立てて載荷をする．高力ボルトの導入軸力は、軸部に貼付したひずみゲージ2枚の平均値を確認しながら標準ボルト張力(約226kN)まで締付けを行った．

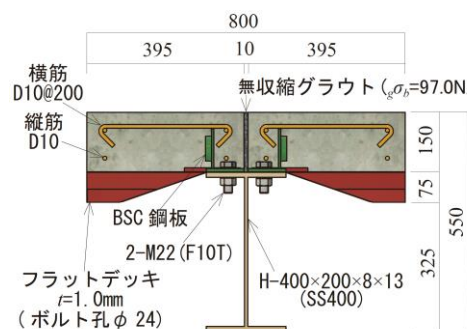


図13 合成梁試験体断面

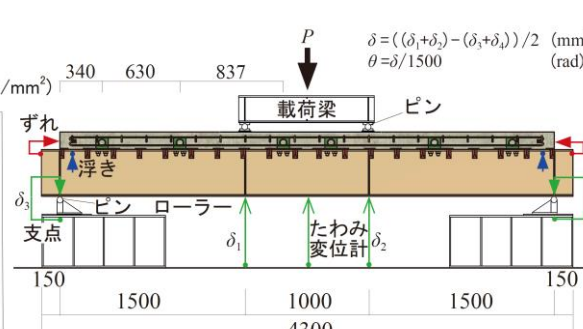


図14 4点曲げ載荷試験

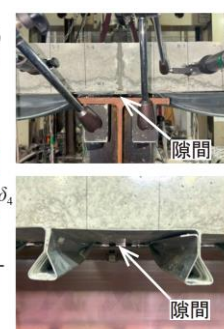


写真2 床と梁の分離

1回目の荷重—たわみ関係を図15(a)に示す．1回目の初期剛性は、純鉄骨梁の弾性剛性計算値 $calK_s$ に比べて約2.13倍の増加が確認された．写真2に示すように、実験終了後、フラットデッキを用いた分割型床スラブと鉄骨梁の分解は可能であり、再度組立も問題なく完了できた．2回目の荷重—たわみ関係を図15(b)に示す．2回目の初期剛性は、鉄骨梁の弾性剛性計算値 $calK_s$ に比べて約2.06倍の増加が確認され、

1回目と同等の合成効果が示された．梁下フランジは、 $calP_{su}$ を超えたあたりで降伏ひずみに達した．コンクリートスラブの曲げひび割れは、680kNあたりで等曲げ中央の側面に確認された．BSC鋼板は約810kNで降伏ひずみに達し、その倍程度の変形まで荷重が増加し、たわみ44mm程度で最大荷重に達した．その後、たわみ50mmあたりでスラブ上面中央部に圧壊が発生したことで荷重が低下したが、変形角1/30radまで安定した挙動を示した．

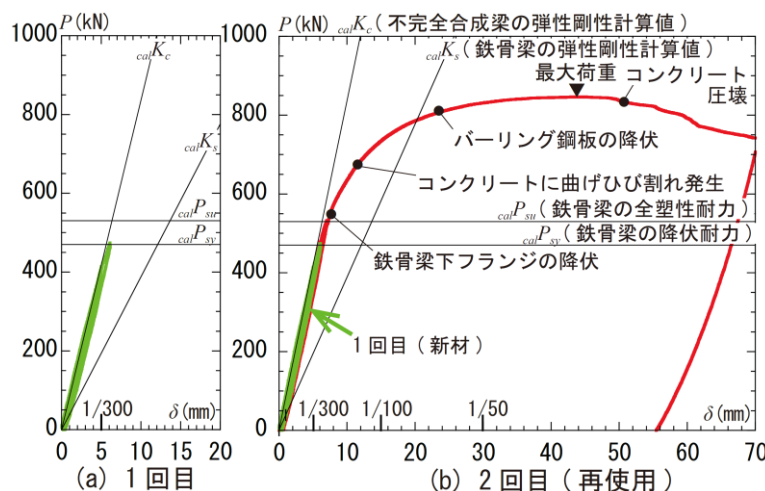


図15 荷重—たわみ(荷重点)関係

5. まとめ

本研究は、鋼構造および合成構造の骨組の丁寧な解体と部材リユースの実現に向けて、解体がし易い鋼・コンクリート接合部の各応力伝達要素を変数とした押抜き試験ならびにコンクリート床スラブの型枠用デッキプレートを接合分離要素の鋼板と鉄骨梁との間に挟んで高力ボルト摩擦接合する合成梁を対象に押抜き試験・施工試験・曲げ試験・解体試験を実施した。得られた結果を以下にまとめる。

接合分離要素の押抜き試験による応力伝達機構の分類

- 1) BSC鋼板と高力ボルトを併用したT形形状の接合分離要素における各抵抗力の分担率は、BSCのせん断力が約6割、高力ボルトの支圧力が約3割、接合用鋼板小口の支圧力が約1割であることを示し、終局せん断耐力を定量的に評価するための実験データを収集することができた。また、高力ボルト摩擦接合面は黒皮のまま未処理で2-M22 (F10T) を基本としてきたが、摩擦面を赤錆やショットブラストを施すことで2-M16 (F10T) に変更可能であることを示し、施工性・解体性の省力化を図るための知見を得ることができた。

フラットデッキを高力ボルト摩擦接合する合成梁のリユース検証実験

- 2) L形形状の接合分離要素の押抜き試験により、分割されたコンクリートスラブの隙間にグラウトを充填することでスラブ内面に発生するコンクリートのひび割れを抑制する役割を果たし、ずれ止め特性の改善に寄与することを示した。リユース材による合成梁の曲げ試験より、フラットデッキを用いた梁の変形角 $1/250\text{rad}$ までおよび純鉄骨梁の全塑性曲げ耐力計算値まで載荷しても新材と同等の弾性剛性を保持でき、変形角 $1/30\text{rad}$ まで安定した挙動を示す結果が得られた。

(発表論文)

- ・花山大樹，田中照久，楠本彩七，堺純一，吉澤幹夫：デッキプレートをを用いた分割型コンクリート床スラブと鉄骨梁のリユースシステムに関する実験的研究，日本建築学会九州支部報告，第 64 号，pp.329-333，2025.3
- ・楠本彩七，花山大樹，田中照久：バーリングシアコネクタと高力ボルトを併用した鋼・コンクリート接合分離技術の開発－押抜き試験による応力伝達機構の分類－，日本建築学会九州支部報告，第 64 号，pp.335-338，2025.3
- ・花山大樹，田中照久，楠本彩七，吉澤幹夫：鉄骨梁と床スラブの分別解体および部材の再利用を可能とする接合方法の開発（その 7）フラットデッキを高力ボルト摩擦接合する合成梁の検証実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，投稿済，2025
- ・楠本彩七，田中照久，花山大樹，堺純一：鉄骨梁と床スラブの分別解体および部材の再利用を可能とする接合方法の開発（その 8）接合分離要素の押抜き試験による応力伝達機構の分類，日本建築学会大会学術講演梗概集，投稿済，2025
- ・花山大樹，田中照久，楠本彩七，吉澤幹夫：デッキプレートをを用いた分割型床スラブと鋼梁を高力ボルト摩擦接合した合成梁のリユースシステムに関する研究，コンクリート工学年次論文集（採択決定）
- ・楠本彩七，田中照久，堺純一：バーリングシアコネクタと高力ボルトを併用した鋼・コンクリート接合分離要素のせん断耐力評価に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集（採択決定）