

論文 デッキプレート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

花山 大樹^{*1}・田中 照久^{*2}・楠本 彩七^{*3}・吉澤 幹夫^{*4}

要旨：著者らは、機械的ずれ止めのバーリングシアコネクタに高力ボルトを併用した新たな鋼とコンクリートの接合要素技術を開発し、鉄骨梁とコンクリート床スラブの強固な一体化と丁寧な分別解体の両立を可能にする合成梁構造の合理的なリユースシステムの構築を進めている。本論では、デッキプレートを用いた床スラブに着目して、デッキプレートを鉄骨梁と接合要素の間に挟み込んで高力ボルト摩擦接合する方法を考案した。提案する合成梁の曲げ試験および接合部の押抜き試験を実施し、既存の設計施工技術で、部材リユースを実現できる可能性が高いことを示した。

キーワード：リユース, バーリングシアコネクタ, 接合分離技術, 易解体性, 再組立性

1. 序論

著者らは、鉄骨梁とコンクリート床スラブで構成される合成梁の丁寧な分別解体と部材のリユースの実現・普及を目指して、機械的ずれ止めのバーリングシアコネクタ（以下、BSC）鋼板¹⁾と高力ボルトを併用した鋼材とコンクリートの接合分離要素の技術開発を進めている。

既往の研究では、等厚コンクリート床スラブおよび合成スラブ用デッキプレートを用いた床スラブを対象とした合成梁の曲げ試験、接合要素の押抜き試験を実施し、試験体の組立-載荷-分解の繰返し履歴が構造性能に及ぼす影響を明らかにしてきた^{2,3)}。文献4)では、プレキャスト床スラブの継目や解体時のスラブ切断箇所がH形鋼梁直上に設けられることを想定した接合部を提案し、リユース可能な合成梁として機能することを示した。

残された課題の一つに、鉄骨梁とデッキプレートの接合部において施工・解体がし易い合理的なリユースシステムを構築する必要がある。従来の接合法⁵⁾では焼抜き栓溶接またはデッキ貫通スタッド溶接されるため、デッキプレートが取り付けいた鉄骨梁と床スラブの丁寧な解体は困難であり、部材リユースの障壁になると考えられる。

そこで本論では、デッキプレートを鉄骨梁と接合要素の間に挟み込んで高力ボルト摩擦接合する合成梁の曲げ試験および接合部の押抜き試験を示し、提案する合成梁の構造性能およびリユース性能について述べる。

2. デッキプレートを用いた合成梁のリユースシステム

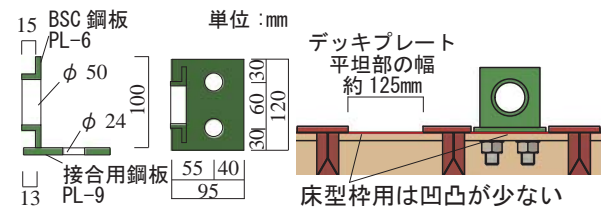
2.1 梁材と床材の接合と分解

鉄骨梁とデッキプレート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-1に示す。施工時は、接合要素とデッキを梁材に高力ボルト摩擦接合し、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。

2.2 接合要素とデッキプレートの選定

図-2(a)に接合要素²⁾の形状寸法を示す。BSC鋼板は板厚6mmに孔径φ50のバーリング加工を施した1辺の100mmの正方形とした。ボルトは高力六角ボルト(F10T)とし、ねじの呼びはM22, ボルト首下長さは65mmを用いる。接合用鋼板(SS400)は、PL-9×95×120とした。摩擦接合面は黒皮のままとし、BSC鋼板がせん断耐力を発揮して摩擦面で滑りが生じないように次式より設計した。

高力ボルト摩擦接合部のすべり耐力 $\mu_s q_y$ を式(1)に、BSC鋼板平板部の降伏せん断耐力 q_y を式(2)に示す。



(a) 接合要素の寸法 (b) 接合部のディテール

図-2 接合要素とフラットデッキプレートの接合部

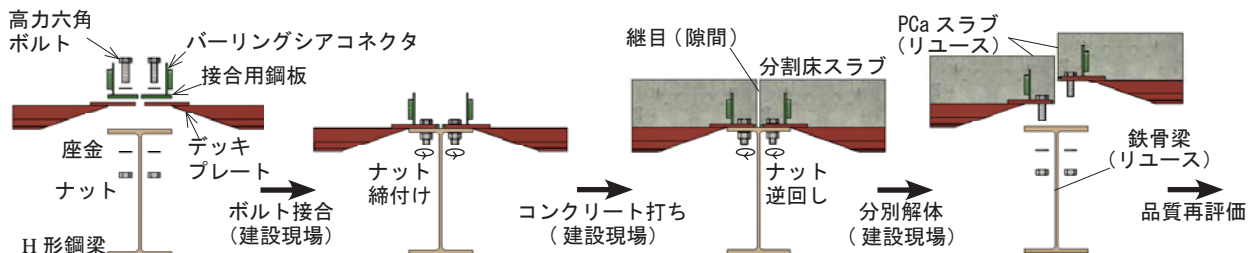


図-1 デッキプレートを用いた床スラブと鉄骨梁のリユースシステム

*1 福岡大学 工学部建築学科助手・学士(工学) (正会員)
 *2 福岡大学 工学部建築学科准教授・博士(工学) (正会員)
 *3 福岡大学 工学部建築学科助手・学士(工学) (正会員)
 *4 元 福岡大学 工学部建築学科教授・博士(工学) (正会員)

$${}_bq_y = n \cdot m \cdot \mu \cdot N_0 \quad (1)$$

$${}_yq_y = A_s \cdot \sigma_y / \sqrt{3} \quad (2)$$

ここに、 n : ボルト本数、 m : 摩擦面の数 (=1)、 μ : すべり係数 (黒皮の場合 $\mu=0.23^{\circ}$)、 N_0 : 設計ボルト張力 (F10T・M22 の場合 $N_0=205\text{kN}$)、 A_s : BSC 鋼板平板部の断面積 (=6mm×100mm)、 σ_y : BSC 鋼板の降伏応力度である。

デッキプレートを鉄骨梁と接合要素の間に挟み込むという使用上、図-2(b)のようにデッキプレートの平坦部が120mm以上必要であり、比較的凹凸が少ない床型枠用鋼製デッキプレート (以下、フラットデッキ) を使用することにした。

3. 接合要素の押抜き試験

3.1 実験計画

フラットデッキを鉄骨梁と接合要素の間に挟み込んで高力ボルト摩擦接合する機械的ずれ止めの押抜き試験を実施する。図-3に押抜き試験体の構成およびフラットデッキの形状を、図-4に試験体の形状寸法を、図-5に荷重方法およびずれ変位計測位置を示す。

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。H形鋼はH-200×200×8×13を用いた。分割されたスラブの形状は等厚な断面とし、スラブ間に10mmの隙間を設けた。スラブの厚さは150mm、幅は400(=195×2+10)mmとした。スラブ筋はD10(SD295)を用い、二段配筋とした。フラットデッキは図-3のとおり、接合用鋼板とH形鋼フランジ面に接する幅85mmに切断して使用した。コンクリート打込み方向は、実際

表-1 鋼材の機械的性質

使用材料	鋼種	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	σ_y/σ_u	E_s (N/mm ²)
H形鋼フランジ	SS400	295	426	0.69	201000
H形鋼ウェブ	SS400	333	444	0.75	200000
BSC鋼板 PL-6	SS400	290	437	0.66	215000
接合用鋼板 PL-9	SS400	338	469	0.72	204000
異形棒鋼D10	SD295	357	514	0.70	197000

σ_y : 降伏点、 σ_u : 引張強さ、 σ_y/σ_u : 降伏比、 E_s : ヤング係数

表-2 コンクリートの材料特性

使用材料	σ_b (N/mm ²)	E_c (N/mm ²)	ϵ_c (μ)
普通コンクリート	25.7	24000	2227

σ_b : 圧縮強度、 E_c : ヤング係数、 ϵ_c : σ_b 時のひずみ

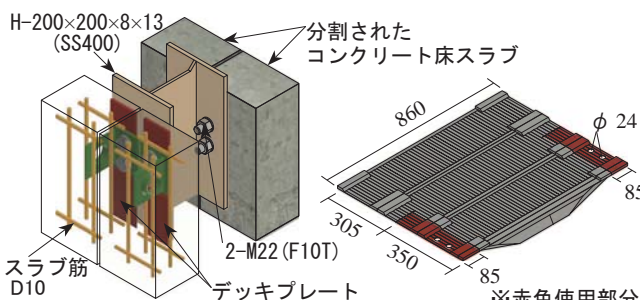


図-3 押抜き試験体の構成およびデッキプレートの形状

の条件と合わせて製作し、型枠を脱型した後に、デッキ付きのスラブとH形鋼を接合要素を介して高力ボルト摩擦接合した。高力ボルトの締付け軸力は図-4(a)のように軸部に貼付した表裏2枚のひずみゲージの平均値で評価した⁷⁾。ひずみゲージが損傷しないようボルト頭部と軸部には防水加工を施した。実験変数は、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体とした。押抜き試験体を使用した鋼材の機械的性質を表-1に、コンクリートの材料特性を表-2に示す。

荷重手順は、高力ボルト摩擦接合部 (黒皮) の長期許容せん断力⁹⁾ ($={}_bq_y/2$) まで、短期許容せん断力⁹⁾ まで (すべり耐力 ${}_yq_y$)、BSC 鋼板部の降伏せん断耐力計算値 ${}_yq_y$ まで、それぞれ荷重・除荷、その後、相対ずれが1.0mmまでは0.2mm増やすごとに、それ以降4.0mmまでは0.5mm増やすごとに、荷重除荷の漸増繰返し荷重を行った。

3.2 実験結果

押抜き試験の実験結果を表-3に、各試験体のずれ止め1個あたりのせん断力-ずれ変位関係を図-6に示す。せん断力は荷重荷重 P を4で除した値である。相対ずれ変位は、図-5に示す4つの変位計で得られた各ずれ

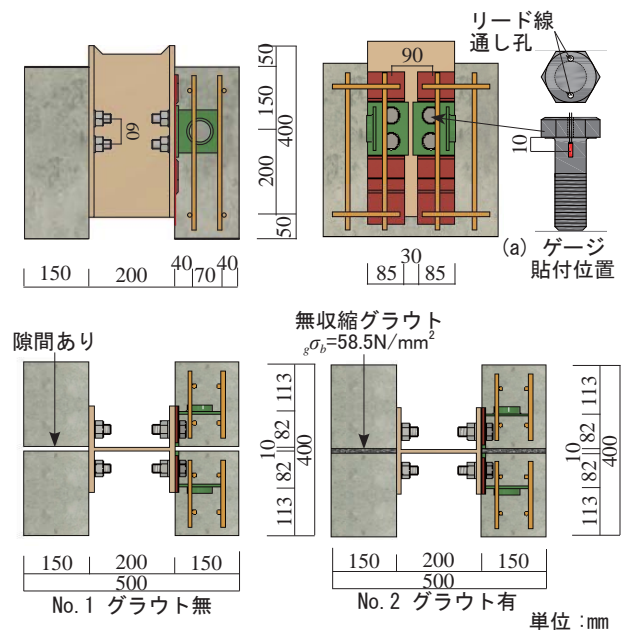


図-4 押抜き試験体の形状

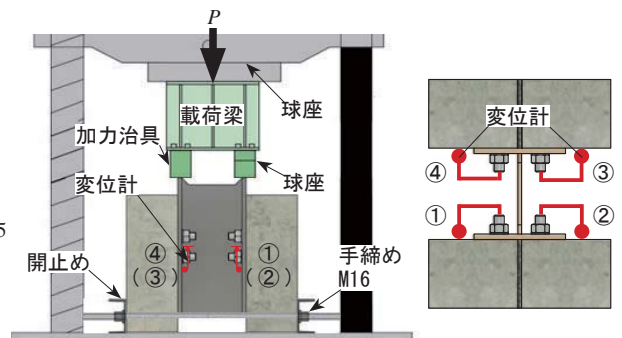


図-5 荷重方法およびずれ変位計測位置

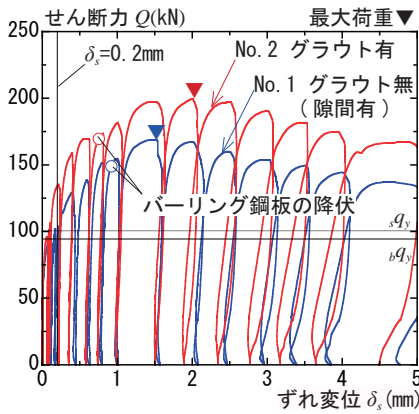


図-6 ずれ止め1個あたりのせん断力-ずれ変位関係

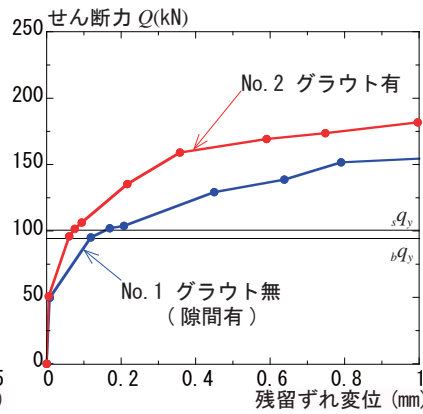


図-7 ずれ止め1個あたりのせん断力-残留ずれ変位関係

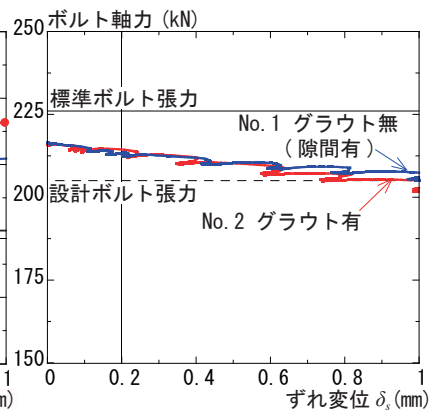
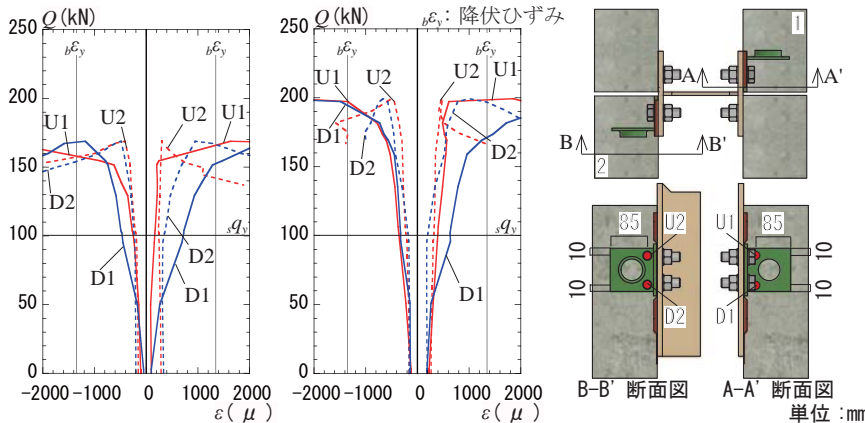


図-8 ボルト全平均軸力-相対ずれ変位関係



(a) No. 1 グラウト無 (b) No. 2 グラウト有 (c) 3軸ひずみゲージ貼付位置
図-9 BSC鋼板のせん断力-主ひずみ関係

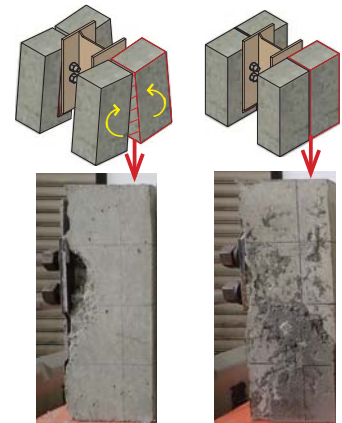


写真-1 スラブ内面の破壊状況

平均値である。図-7は、図-6に対応したせん断力-残留ずれ変位関係の1mmまでを示したものである。横軸の残留ずれは図-6の荷重が0kN時の値であり、対応する縦軸のせん断力は除荷する直前の荷重としている。

図-6より、No.1はずれ変位0.2mm時に q_y を發揮したのに対し、No.2は約半分のずれ変位0.1mmで q_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。 Q_y および Q_{max} は、それぞれNo.1が158kN、169kN、No.2が189kN、199kNであり、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、コンクリートブロックの回転が拘束され、ひび割れ発生が抑制されたことが要因であると考えられる。

図-7より、BSCの短期許容せん断力に対応する q_y 發揮時の残留ずれは、No.1が0.2mm以下に、No.2が0.1mm以下であり、グラウトを充填することで、除荷後に残るずれ変形を半分程度に抑制できることがわかった。

接合要素とH形鋼との間に挟んだフラットデッキによるすべりの影響を把握するため、高力ボルトの全平均軸力と相対ずれ変位の関係を図-8に示す。No.1とNo.2のボルト軸力は、グラウト充填の有無にかかわらず、ずれ変位が進行することで低下していく傾向が見られるが、急激な軸力低下は生じていないことが確認できる。また、

表-3 押抜き試験の実験結果

試験体名	$Q_{0.2}$ (kN)	N (kN)	μ_0 (kN)	Q_y (kN)	Q_{max} (kN)
グラウト無	100	225	0.22	158	169
グラウト有	135	223	0.30	189	199

$Q_{0.2}$: 0.2mm時の耐力, N : ボルト導入時軸力,
 μ_0 : すべり係数 ($=Q_{0.2}/2N$), Q_y : パーリング鋼板降伏時の耐力
 Q_{max} : 最大せん断耐力

ずれ変位1mm程度まで設計ボルト張力を保持していることから、フラットデッキが接合要素のずれ止め特性に及ぼす影響はないと判断した。高力ボルト摩擦接合面は、明確な主すべりによる耐力低下が生じていないため、ここでは文献(6)に準じて、ずれ変位0.2mm時をすべり耐力と定義し、標準ボルト張力に対応するボルト導入時軸力 N との関係から式(1)を用いたすべり係数 μ_0 はそれぞれ0.22、0.30であり、フラットデッキを用いた場合でも黒皮のすべり耐力⁹⁾として評価できるといえる。

BSC鋼板のせん断力-ひずみ関係およびひずみゲージ貼付位置を図-9に示す。横軸はBSC鋼板両面それぞれ上側Uと下側Dに貼付した3軸ひずみゲージから計測した平均主ひずみを示している。図中の ϵ_y はパーリング鋼板の降伏ひずみ、 q_y は式(2)から求めたBSC鋼板の降伏せん断耐力である。 q_y 時は、No.1とNo.2のBSC鋼板ともに弾性域である。 ϵ_y 時の Q_y は、 q_y 時に比べNo.1が1.57

倍, No.2 が 1.88 倍の耐力を有しており, これは接合要素のボルト頭部と接合用鋼板小口の支圧力によるものと考えられ, 応力伝達への寄与が期待される。

4. 合成梁の曲げ試験

4.1 実験計画

合成梁試験体の諸元を表-4に, 形状寸法を図-10に示す。H形鋼梁は H-400×200×8×13 (SS400) を用いる。試験体は 4000mm の単純梁で, せん断スパン区間 L_s は 1500mm とする。フラットデッキを用いた分割された床スラブは幅 800(=395×2+10)mm, 厚さ 150mm とする。コンクリートの呼び強度は F_c21 であり, スラブ筋は D10(SD295) を使用する。L 形の接合要素は文献 4) の試験条件と合わせるために, 合成梁断面が全塑性モーメントを発揮するのに必要な個数の 2~3 割程度の数量をデッキの平坦部に並列に配置し不完全合成梁として設計した。鉄骨梁のウェブ芯直上にくるスラブ間の隙間 (10mm) には無収縮グラウトを充填した。合成梁試験体に使用した鋼材の機械的性質およびコンクリートの材料特性をそれぞれ表-5, 表-6 に示す。その他の鋼材の材料特性は, 第 3 章の押抜き試験体に使用したものと同一である。

荷重方法は図-10(c) のとおり, 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荷重を終了し, 梁と床を分離して, 再び組み立てて荷重をする。1 回目は変形角 1/300rad まで, 1/250rad までそれぞれ荷重・除荷, その後, 全てのナットを緩め, 梁と床スラブの分離状況を確認し, 再度ナットを締める。2 回目は, 1 回目と同様の荷重履歴に加え, 純鉄骨梁の全塑性曲げ耐力計算値 ${}_{cal}P_{su}$ (=530kN) まで荷重・除荷, その後, 合成梁の最大耐力が確認できるまで荷重を行う。なお, 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。

表-4 合成梁試験体の諸元

部材	形状寸法 (mm)	
H形鋼梁 (SS400)	H-400 × 200 × 8 × 13	
コンクリート床スラブ (設計基準強度 F_c21)	スラブ幅	800
	スラブ厚	150
高力ボルト F10T	呼び径	M22
	首下長さ	65

表-5 鋼材の機械的性質

使用材料	鋼種	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	σ_y/σ_u	E_s (N/mm ²)
H形鋼フランジ	SS400	301	436	0.69	208000
H形鋼ウェブ	SS400	362	472	0.77	205000

σ_y : 降伏点, σ_u : 引張強さ, σ_y/σ_u : 降伏比, E_s : ヤング係数

表-6 コンクリートの材料特性

使用材料	σ_c (N/mm ²)	E_c (N/mm ²)	ϵ_c (μ)
普通コンクリート	32.3	26000	2288

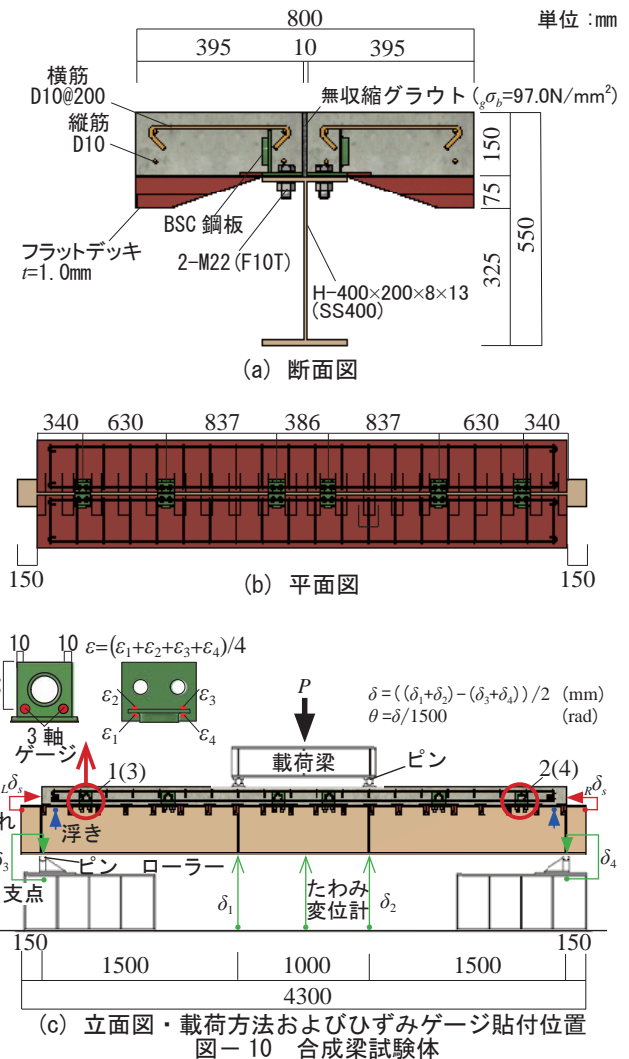
σ_c : 圧縮強度, E_c : ヤング係数, ϵ_c : σ_c 時のひずみ

4.2 実験結果

(1) 荷重-たわみ関係

図-11(a) は, 1 回目の荷重-たわみ関係に示しており, 荷重点たわみ 5mm ($\theta=1/300$ rad) まで荷重をかけて除荷, 次に荷重点たわみ 6mm ($\theta=1/250$ rad) まで荷重をかけて除荷した後, 全てのナットを緩めて, 床スラブと鉄骨梁の分離を行った。1 回目の初期剛性は, 純鉄骨梁の弾性剛性計算値 ${}_{cal}K_s$ に比べて約 2.13 倍の増加が確認された。なお図中に, 各種合成構造設計指針⁶⁾ に準じて算出した合成梁の弾性剛性計算値 ${}_{cal}K_c$ を示しており, 詳細については後述の第 5 章で述べる。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 回目の再度組立後の荷重-たわみ関係は図-11(b) に示しており, 2 回目は 1 回目と同等の荷重履歴に加え, ${}_{cal}P_{su}$ (=530kN) まで荷重をして除荷, その後たわみ 70mm ($\theta=1/20$ rad) まで荷重を行った。2 回目の初期剛性は, 鉄骨梁の弾性剛性計算値 ${}_{cal}K_s$ 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, ${}_{cal}P_{su}$ を超えたあたりで降伏ひずみに達した。コン



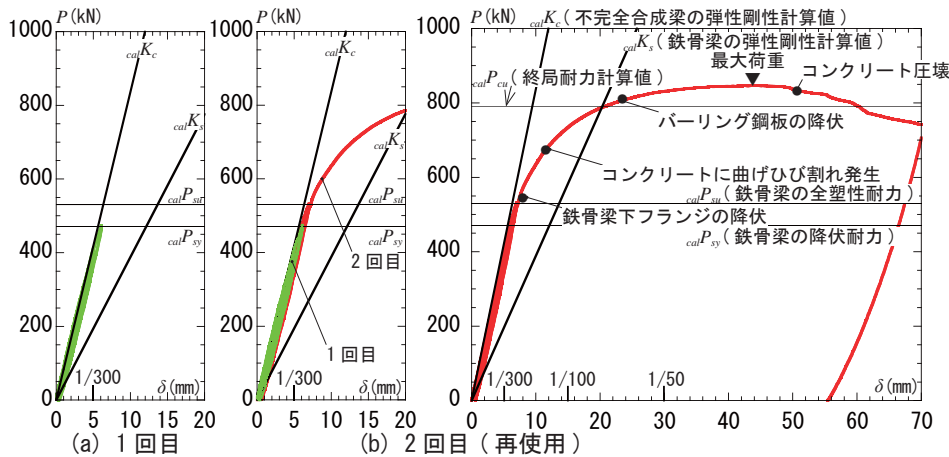


図-11 荷重-荷重点たわみの関係

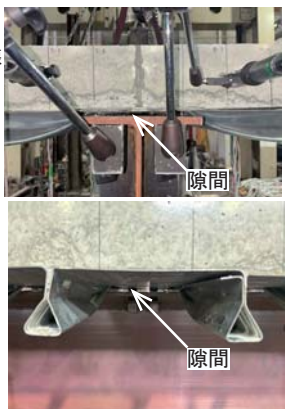
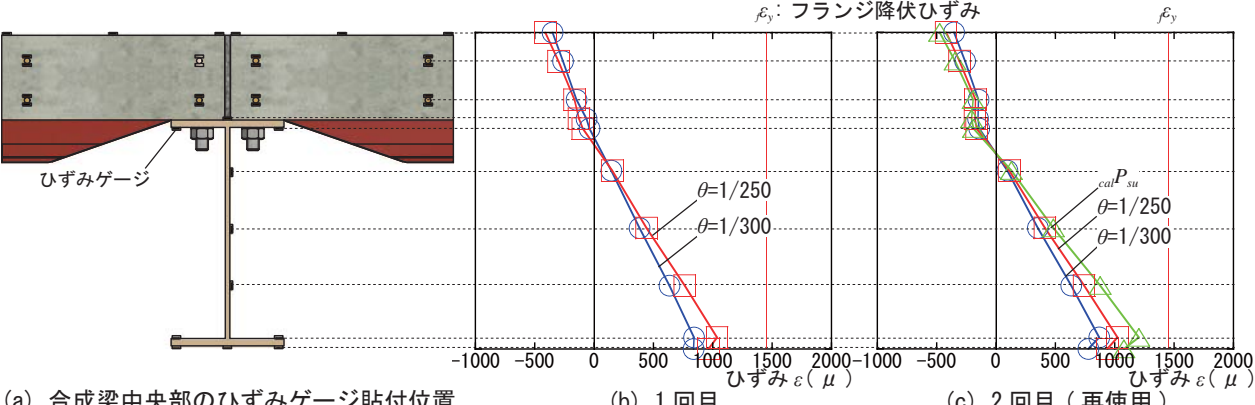


写真-2 1回目載荷後の分離状況



(a) 合成梁中央部のひずみゲージ貼付位置 (b) 1回目 (c) 2回目(再使用) 図-12 合成梁中央部断面のひずみ分布

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43mmで最大荷重847kNに達した。その後、荷重点たわみ50mm ($\theta = 1/30\text{rad}$)あたりでコンクリート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、大変形時まで安定した挙動を示した。

図中の $calP_{cu}$ は、不完全合成梁の終局曲げ耐力計算値⁴⁾である。ずれ止め1個あたりの終局せん断耐力 Q_u は、押抜き試験で得られたNo.2試験体の Q_{max} を、コンクリートの圧縮強度に比例倍した値 $250\text{kN} (=1.26Q_{max})$ とした。 $calP_{cu}$ に対する最大荷重 P_{max} の比は、1.07であり、フラットデッキを使用しても文献4)と同様に良い対応を示した。

(2) 合成梁のひずみ分布

スパン中央部における合成梁断面のひずみ分布を図-12に示す。ひずみは、変形角 $1/300\text{rad} \cdot 1/250\text{rad} \cdot calP_{su}$ 時をプロットしたものであり、概ね平面保持が成立していることから、鉄骨梁と接合要素の間にデッキプレートを挟んでも一体化して機能することが確認できた。

(3) 各部材のひずみ形状

コンクリート床スラブと鉄骨梁のひずみ性状を図-13に示す。横軸は、荷重点から外側100mmに貼付した各部位のひずみゲージから得られた平均ひずみである。図中

の ϵ_y は、H形鋼フランジの降伏ひずみである。 $calP_{su}$ の荷重時までは、分割型床スラブおよび鉄骨梁のいずれも弾性範囲であることが確認でき、 $calP_{su}$ の荷重時以降に下フランジが降伏ひずみに達している。

梁両端に配置されたBSC鋼板(計4個)のひずみ挙動を図-14に示す。横軸の主ひずみは、図-10(c)に示すようにBSC鋼板部に貼付した4枚の3軸ひずみゲージから算出した平均値である。BSCのひずみは、 $calP_{su}$ まで載荷しても弾性であり、810kN付近で降伏ひずみに達し、荷重がほぼ一定となる。このことから、BSC鋼板の降伏により最大荷重が決定したと考えられる。

(4) 床スラブと鉄骨梁間のずれ性状

図-15に荷重-ずれ変位関係を示す。横軸は2分割された床スラブ両端部でそれぞれ計測した平均ずれ変位である。図-10(c)の左側を赤線(${}_L\delta_s$)に、右側を青線(${}_R\delta_s$)で示している。最大荷重時までに両端に生じたずれ変位は、 ${}_R\delta_s$ と ${}_L\delta_s$ でほぼ同程度であることを確認した。拡大図より、鉄骨梁の全塑性曲げ耐力計算値 $calP_{su}$ までの載荷時のずれは最大で0.4mm程度であるが、除荷後の残留ずれは0.15mm程度であった。

5. 合成梁の初期剛性実験値と弾性剛性計算値の比較

表-7に合成率、初期剛性実験値 $expK_c$ および弾性剛性

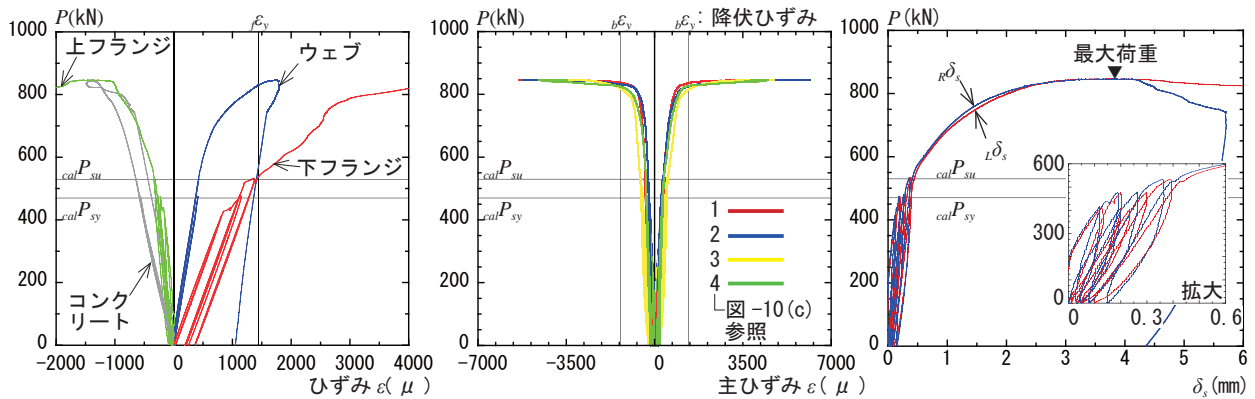


図-13 床スラブと鉄骨梁のひずみ挙動 図-14 BSC鋼板のひずみ挙動 図-15 梁端のずれ挙動

表-7 初期剛性実験値と弾性剛性計算値の比較

ずれ止め1個あたりの 終局せん断耐力	合成率 n_p/n_f	$cal K_c$ (kN/mm)	$exp K_c$ (kN/mm)	$\frac{exp K_c}{cal K_c}$
L形接合要素の終局耐力 $Q_{max}=250kN$	0.38	83.5	1回目 82.6 2回目 80.1	1回目 0.99 2回目 0.96

$cal K_c$: 合成梁の弾性剛性計算値, $exp K_c$: 合成梁の初期剛性実験値

計算値 $cal K_c$ を示す。 $exp K_c$ は変形角 1/300rad に達した点と原点を結んだ直線の傾きから求めた。 $cal K_c$ の計算方法は、文献5) に準じて、ずれ止め1個あたりの終局せん断耐力 Q_u は、前述と同様に 250kN を用いて、合成率 ($=n_p/n_f$) を算出し、等価断面二次モーメント I は式(3)より求めた。ヤング係数比は 8.0 ($=207000/26000$) であり、鋼材のヤング係数はウェブとフランジの平均を用いた。

$$I = I_s + \sqrt{(n_p/n_f) \cdot (I - I_s)} \quad (3)$$

ここに、 I_s : 鉄骨梁の断面二次モーメント, I : 完全合成梁の断面二次モーメント, n_f : 完全合成梁の1スパンに必要なずれ止め個数, n_p : 合成梁試験体のせん断スパン区間に配置されたずれ止め個数 (=4個)

表-7より合成梁の弾性剛性計算値 $cal K_c$ に対する合成梁の初期剛性実験値 $exp K_c$ の比は、1回目が 0.99、2回目が 0.96であった。

6. 結論

本研究では、鋼構造骨組の丁寧な解体と部材リユースの実現に向けて、コンクリート床スラブのフラットデッキを接合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提案した。本合成梁の構造性能を検討した押抜き試験および曲げ試験から得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 押抜き試験により、接合要素は、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。
- 2) 曲げ試験により、フラットデッキを用いた合成梁は、梁の変形角 1/250rad 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弾性状態を保持でき、変形角 1/30rad まで安定した挙動を示した。

- 3) 初期剛性実験値 $exp K_c$ と合成梁の弾性剛性計算値 $cal K_c$ の比較結果から、 $cal K_c$ に対する $exp K_c$ の比は1回目が 0.99、2回目が 0.96 であり、フラットデッキを含め各部材を再使用しても良い対応を示すことが確認された。

謝辞

本研究は、公益財団法人前田記念工学振興財団「令和6年度研究助成」を受けて実施した。日鉄建材(株)からデッキプレートを、日鉄ボルテン(株)から高力ボルトを提供して頂いた。ここに記して感謝の意を示す。

参考文献

- 1) 田中照久, 堺純一, 河野昭彦: パーリング加工を活用した新しい機械的ずれ止めの開発, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.694, pp.2237-2246, 2013.12
- 2) 田中照久, 坂本秀光, 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1)(その2), 日本建築学会大会学術講演概要集, pp.695-698, 2022.9
- 3) 田中照久, 坂本秀光, 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3)(その4), 日本建築学会大会学術講演概要集, pp.787-790, 2023.9
- 4) 楠本彩七, 田中照久, 堺純一, 吉澤幹夫: 分割型床スラブを用い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, vol46, No2, pp.649-654, 2024.7
- 5) 日本建築学会: 各種合成構造設計指針・同解説, 第3版, 2023.8
- 6) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, p.38, 第4版, 2021.2
- 7) 日本鋼構造協会: 高力ボルト接合技術の現状と課題, JSSCテクニカルレポート, No.93, 2013.3