

(16) 施工時死荷重による鉄骨の初期応力度がSRC部材の曲げ耐力に及ぼす影響

濱上 洋平¹・仁平 達也²・中田 裕喜²・池田 学²
谷口 望³・グエンバンクアン³

¹正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:hamagami.yohei.16@rtri.or.jp

²正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

³正会員 前橋工科大学 社会環境工学科 (〒371-0816 群馬県前橋市中区本町6-50-1)

鉄骨鉄筋コンクリート (SRC) 部材を橋りょうに用いる場合、一般的に、鉄骨を架設した後にコンクリートを打ち込むため、鉄骨にはコンクリート等の施工時死荷重による曲げ応力 (初期応力度) が生じる。一般的な鋼材比、鉄骨鉄筋比を有するSRC部材においては、この初期応力度がSRC部材の曲げ耐力に及ぼす影響は小さいとの報告があるが、机上の検討に留まっている。

本稿では、鉄骨に作用する初期応力度の有無をパラメータとしたSRC部材の載荷実験を行い、初期応力度がSRC部材の曲げ耐力や破壊性状に及ぼす影響について検討した。その結果、初期応力度の有無が曲げ耐力に及ぼす影響は小さく、曲げ耐力の算定は初期応力度を考慮しない照査法により評価できることを確認した。

Key Words : Steel-reinforced-concrete(SRC), bending capacity, initial stress, loading experiment

1. はじめに

2016年に鉄道構造物等設計標準・同解説 (鋼とコンクリートの複合構造物)¹⁾ (以下、複合標準) が発刊され、複合構造物の更なる展開が期待される。鉄骨鉄筋コンクリート (以下、SRC) 部材は、断面寸法に対して大きな耐力を有するため、部材断面を小さくでき、施工環境の厳しい条件下での施工性が優れる等の特徴がある。

SRC 部材を橋りょうに用いる場合、鉄骨を架設した後にコンクリートを打ち込む施工方法が採用されることが多い。この場合、施工時の鉄骨にはその自重に加えて、鉄筋やコンクリート等の重量 (以下、施工時死荷重) による曲げ応力 (以下、初期応力度) が生じることになる。この施工時死荷重による鉄骨の初期応力度の取扱いについて、複合標準では、曲げ耐力の算定において、施工時死荷重を考慮した曲げ耐力の算定法 (図-1 (a)) が示されている。具体的には、施工時死荷重を鉄骨が負担し、その他全荷重を合成後断面で負担するという考え方である。また、より簡易な方法として、施工時死荷重を考慮せず、合成後断面に対して施工時死荷重を含む全荷重を作用させる算定法 (図-1 (b)) が合わせて示されており、一般的な鋼材比、鉄骨鉄筋比を有する SRC 部材に対しては、後者により算定してよいとされている。

合成後の SRC 部材を対象とした検討^{例えば 2,3)}は数多く行われているが、施工時死荷重による初期応力度に着目した研究事例は少ない。文献 4)では、初期応力度を考慮した曲げ耐力の検討が行われているが、机上の検討に留まっており、初期応力度の有無が、曲げ耐力や破壊性状へ及ぼす影響については実証されていない。

そこで本研究では、施工時死荷重により鉄骨に作用する初期応力度の有無をパラメータとした載荷実験を行い、初期応力度の有無がSRC部材の曲げ耐力に及ぼす影響について検討した。

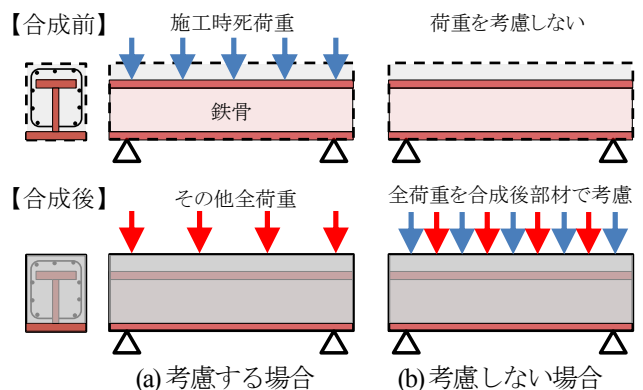


図-1 施工時死荷重の考慮／非考慮のイメージ

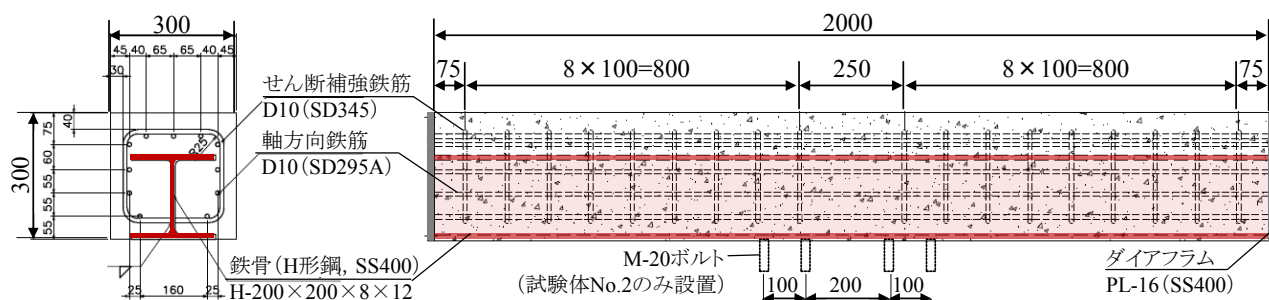


図-2 試験体概要 (単位: mm)

表-1 試験体諸元

試験体名	試験体パラメータ	試験体諸元					
	初期応力度 (施工時死荷重による曲げ応力)	部材断面 幅×高さ(mm)	鉄骨形状* A×B×t1×t2(mm)	軸方向鉄筋	鋼材比 (%)	鉄骨 鉄筋比	
No.1	なし	300×300	H-200×200×8×12	D10(SD295A)	6.9	6.9	
No.2	あり(鉄骨の引張降伏強度の60%)	300×300	H-200×200×8×12	D10(SD295A)	6.9	6.9	

表-2 鋼材の機械的性質 (ミルシート値)

種別	規格	寸法 (mm)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
鉄骨 (H形鋼)	SS400	H-200×200× 8×12	300	434	30
	SD295A	D10	400	519	28
鉄筋	SD345		409	453	30

表-3 コンクリート配合および材料試験結果

コンクリート配合				材料試験結果		
呼び 強度	スランブ (cm)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	セメント 種別	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (×10 ³ N/mm ²)
27	12	20	N	49	37.0	33.3

軸方向鉄筋には D10 (SD295A) を用い、鉄骨のまわりに計 11 本配置した。軸方向鉄筋の定着は、鉄骨の両端に取付けた鋼板 (ダイアフラム) に溶接することで確保した。せん断補強鉄筋には D10 (SD345) を用い、試験体の破壊形態が曲げ先行となるよう、純曲げ区間 (試験体中央 250mm の範囲) の外側に十分な量のせん断補強鉄筋を配置した。なお、せん断補強鉄筋は鉄骨ウェブに溶接して固定した。

実験に使用したコンクリートの配合、および材料試験結果を表-3に示す。試験体製作においては、コンクリート充填性を考慮し、鉄骨・鉄筋を組み立てた後、軸方向が鉛直となる向きに試験体を固定し、その状態で型枠を組立て、上面となる側のダイアフラムに設けた打設孔よりコンクリートを打ち込んだ。

2. 載荷実験の概要

(1) 試験体概要

試験体の諸元を表-1 に、概要図を図-2 に示す。試験体は、「初期応力度なし」(試験体 No.1)、「初期応力度あり」(試験体 No.2) の 2 種類各 1 体とし、試験体形状、寸法、使用材料は共通とした。鋼材比 (鉄骨断面積+鉄筋断面積) / コンクリート断面積) は 6.9%、鉄骨鉄筋比 (鉄骨断面積 / 鉄筋断面積) は 6.9 であり、SRC 桁の施工実績の範囲に収まる諸元とした。

実験に使用した鉄骨・鉄筋の概要および機械的性質を表-2 に示す。鉄骨には H 形鋼 (H-200×200×8×12) を用い、鉄骨の下フランジ下面が露出する形式となるように配置した。なお、試験体 No.2 については、後述する 2.(2) の初期応力度を導入するために使用するボルトを鉄骨下フランジ下面に溶接した。このボルトは載荷実験直前にグラインダーで切断し撤去した。

(2) 初期応力度の導入

試験体 No.2 への初期応力度の導入概要を図-3 に、導入状況を図-4 に示す。反力壁に支点治具を取付け、当該箇所に型枠を設置する前の鋼材のみで構成する状態の試験体を鉛直方向に設置する。鉄骨下フランジ下面に溶接したボルトに PC 鋼棒付きの鋼板を取付け、PC 鋼棒の先端をセンターホールジャッキにより加力することで静的に引張荷重を与え、鉄骨に初期応力度 (曲げ応力) を導入した。この状態を保持したまま型枠を設置し、コンクリートを打ち込んだ。

導入する初期応力度は、鉄骨のフランジにおいて降伏強度の 60% とした。これは、支間 30m 程度の SRC 桁の施工事例における、施工時死荷重により鉄骨に作用する初期応力度 (設計値) を参考に設定した。なお、所定の初期応力度が導入されたかどうかについては、軸方向中央断面の鉄骨下フランジ上面、ウェブから左右各

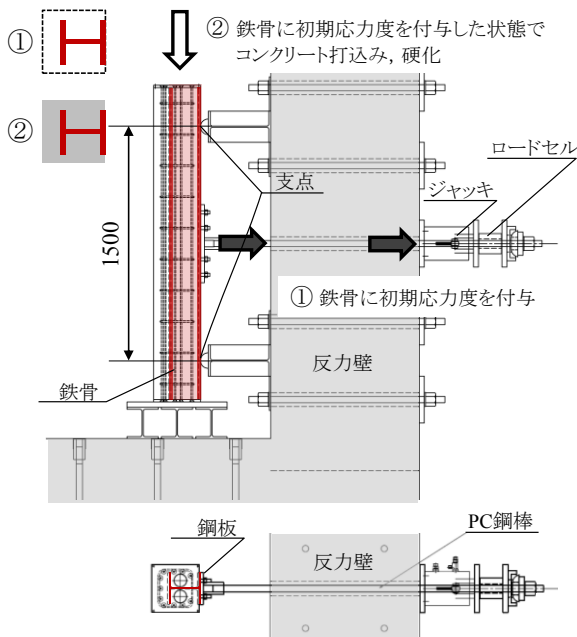


図-3 初期応力度の導入概要 (単位 : mm)

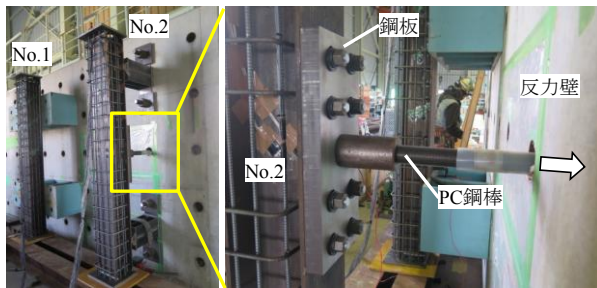


図-4 初期応力度の導入状況

50mm の位置に取付けたひずみゲージの計測値の平均値が、降伏強度 (300N/mm^2) を鋼材の弾性係数 ($2.00 \times 10^5\text{N/mm}^2$) で除した値 (以下、降伏ひずみ) の 60% (900μ) に達したかどうかにより判断した。

鉄骨に施工時死荷重による初期応力度が作用した後、合成後断面に対して活荷重等のその他全荷重が加わる状況を実験で再現するためには、加力した引張荷重を保持したまま、さらに試験体上面から荷重載荷する方法が考えられる。しかしながら、今回は実験の都合上、初期応力度の導入は横方向から引張荷重を与え、載荷実験前に一時的にこの引張荷重を除荷することとした。そのため、除荷後の鉄骨下フランジのひずみは、想定した初期応力

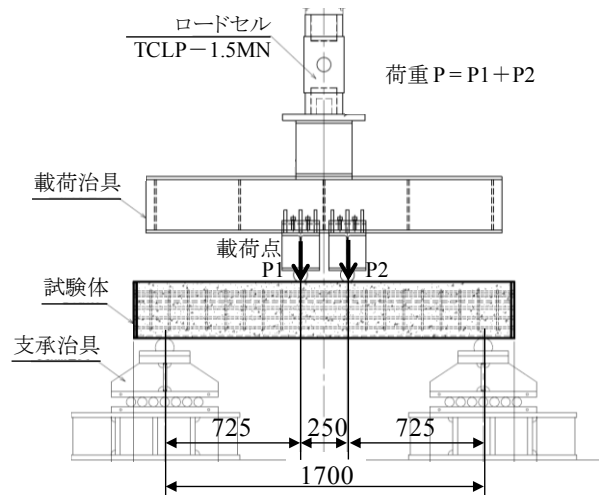


図-5 載荷装置の概要 (単位 : mm)

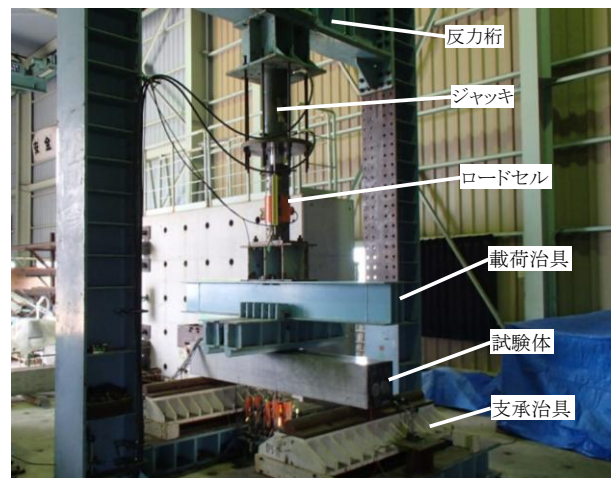


図-6 載荷実験の状況

度導入時のひずみ (900μ) とはならず、降伏ひずみの 18% (274μ) に低下していた。

(3) 載荷・計測概要

載荷装置の概要を図-5 に、実験状況を図-6 に示す。加力装置には 1500kN 油圧ジャッキを用いた。載荷方法は対称 2 点集中載荷とし、静的に単調載荷を行った。支点間距離は 1700mm、純曲げ区間は 250mm とした。なお、載荷点および支点には、回転および水平変位を拘束しない支承を用いた。

計測項目および計測位置の概要を図-7に示す。計測項

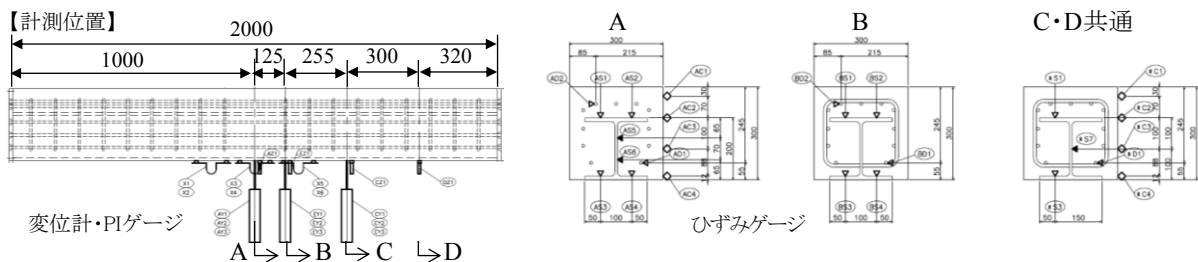


図-7 計測位置概要図 (単位 : mm)

目は、載荷点の荷重、各断面における鉄骨下フランジ下面の鉛直変位、鉄骨・鉄筋およびコンクリート表面の軸方向ひずみとした。荷重はロードセルにより計測し、以降、この計測値を荷重 P とする。また、破壊形態を確認するため、コンクリートのひび割れや、鉄骨とコンクリートの剥離状況について観察を行った。

3. 実験結果

(1) 荷重－変位関係

曲げひび割れ発生時荷重、鉄骨降伏時荷重、最大荷重を表-4に、最大荷重に至るまでの、荷重と支間中央鉄骨下フランジ下面の鉛直変位との関係を図-8に示す。

なお、文献2)を参考に、試験体No.1の材料諸元を用いて算定した計算値を合わせて示している。これは、鉄骨の両端部が十分に定着されていることを前提として、鉄骨とコンクリートとの付着は完全付着を仮定し、平面保持の仮定に基づき、鉄骨を鉄筋に換算して鉄筋コンクリート部材と同様に耐力、剛性を算定する方法（以下、RC方式）により求めた値である。

最大荷重について、試験体 No.1 の実験値と計算値を比較するとほぼ一致する結果となった。本実験の曲げ耐力は、RC 方式の計算により概ね評価できるものと考えられる。また、試験体 No.2 については、載荷開始時点で初期応力度を導入しているため単純な比較はできないが、試験体 No.1 の実験値と比較すると、試験体 No.2 の方が20kN程度上回る結果となった。

曲げ剛性について、試験体 No.1 の実験値と RC 方式による計算値を比較すると、曲げひび割れ発生以降の曲げ剛性に乖離が生じる結果となった。文献5)では、鉄骨とコンクリートの付着を考慮しない場合の方が実際の剛性をより評価できるとの報告と同様に、完全付着を仮定している RC 方式による計算値よりも実験値の曲げ剛性が小さくなる可能性が考えられ、本実験でも同様の結果となった。

試験体 No.1 と試験体 No.2 の実験値を比較すると、試験体 No.2 の方が曲げ剛性が小さくなった。これは、初期応力度導入の際の引張荷重による鉄骨の初期変形や、引張荷重を除荷した際の試験体に発生したひび割れ（3.(2)で後述）等が影響したものと考えられる。

以上より、本実験において、最大荷重は実験結果と RC 方式の計算値が概ね一致した。一方、曲げ剛性は、実験値と完全付着を仮定した計算値で乖離がみられ、これは既往の検討と同様であった。本研究では初期応力度の有無が曲げ耐力に対する影響を検討することを主眼としており、概ね良好な結果が得られたものとする。

表-4 実験結果 (P_{cr} , P_y , P_u)

試験体名		曲げひび割れ発生時 P_{cr} (kN)	鉄骨降伏時 P_y (kN)	最大荷重 P_u (kN)
No.1	計算値	29.6	607.2	666.5
	実験値	30.1	544.1	649.8
No.2	実験値	270.2	452.3	669.6

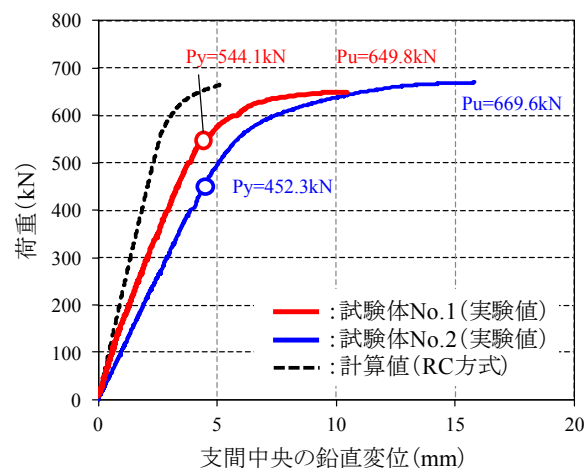
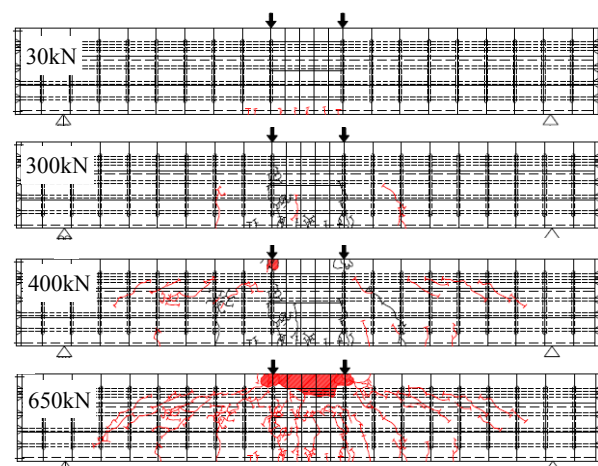
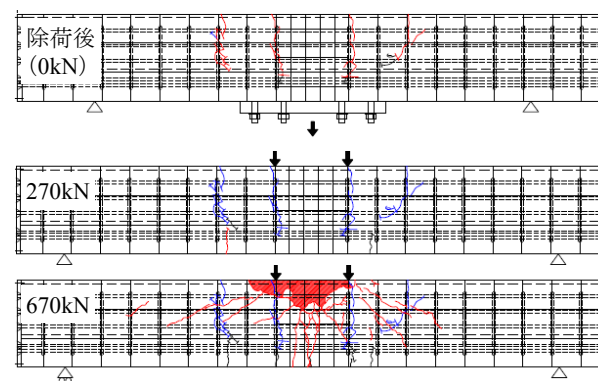


図-8 荷重－変位関係

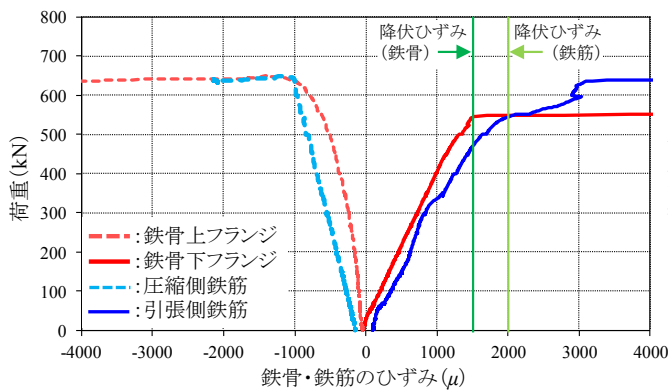


(a) 試験体 No.1 (初期応力度なし)

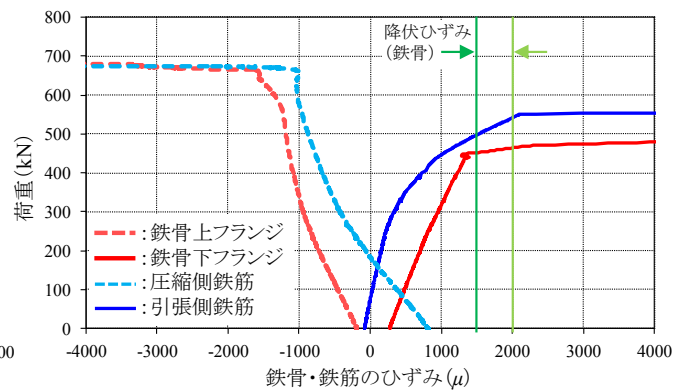


(b) 試験体 No.2 (初期応力度あり)

図-9 各試験体のひび割れ状況



(a) 試験体 No.1 (初期応力度なし)



(b) 試験体 No.2 (初期応力度あり)

図-10 鉄骨・鉄筋の荷重 - ひずみ関係

(2) ひび割れおよび破壊状況

各試験体のひび割れ状況および破壊形態を図-9に、荷重と鉄骨・鉄筋ひずみとの関係を図-10に示す。

a) 試験体No.1 (初期応力度なし)

30kNで純曲げ区間に曲げひび割れが観察され、荷重の増加とともに多数のひび割れが発生、進展し、200kNで鉄骨上フランジの高さまで達した。300kNで純曲げ区間外側200mmの位置にひび割れが発生した。380kNで載荷点近傍に、400kNで載荷点と支点との間に斜めひび割れが発生し、進展した。その後、544kNで鉄骨下フランジが降伏ひずみに達し、ほぼ同時に引張側鉄筋も降伏ひずみに達した。荷重は最大650kNまで増加し、その際、鉄骨上フランジが座屈し、最終的には載荷点間のコンクリートが圧壊して曲げ破壊に至った。

b) 試験体No.2 (初期応力度あり)

コンクリート硬化後、初期応力度導入時に鉄骨下フランジに作用させた引張荷重を除荷する際に、鉄骨下フランジが露出している側と反対側の試験体コンクリート上面から曲げひび割れが発生した。除荷終了時点では、ひび割れは引張側鉄筋の高さまで進展した。

載荷実験開始後、270kNで純曲げ区間外側100mmの位置に、350kNで純曲げ区間中央にひび割れが発生した。その後、載荷点近傍にひび割れが発生し、載荷点と支点との間に斜めひび割れが発生、進展した。452kNで鉄骨下フランジが降伏ひずみに達し、498kNで引張側鉄筋が降伏ひずみに達した。その後も荷重は増加し、665kNで鉄骨上フランジが座屈した。荷重は最大670kNまで増加し、最終的には載荷点間のコンクリートが圧壊して曲げ破壊に至った。

以上より、試験体No.1、試験体No.2ともに引張側鉄筋が降伏した後、鉄骨上フランジが座屈し、最終的に載荷点間のコンクリートが圧壊するという破壊形態は同様であり、初期応力度の有無による顕著な差異は認められなかった。

(3) 鉄骨・鉄筋の降伏時荷重

鉄骨下フランジ降伏時の荷重は、試験体No.1では544kN、試験体No.2では452kNであり、試験体No.2の方が100kN程度小さい。一方で、最大荷重は試験体No.2が試験体No.1を20kN程度上回っている。

鉄骨下フランジが降伏ひずみに達したときの引張側鉄筋のひずみに着目すると、試験体No.1で1989 μ （鉄筋降伏ひずみの99%）、試験体No.2で1051 μ （鉄筋降伏ひずみの53%）となっており、鉄骨下フランジ降伏時において、試験体No.2の引張側鉄筋の実ひずみは降伏ひずみに対し余裕を有していたため、それが最大荷重の大きさに影響したものと考えられる。

4. 初期応力度の有無が曲げ耐力に及ぼす影響

施工時死荷重により鉄骨に作用する初期応力度の有無が、SRC部材の曲げ耐力に及ぼす影響について検討する。具体的には、初期応力度を考慮しない場合、すなわち、施工時死荷重を含めた全作用に対して合成後断面が抵抗する場合を想定した試験体No.1の曲げ耐力 M_u （載荷実験における最大曲げモーメント）と、初期応力度を考慮する場合を想定した試験体No.2の曲げ耐力 $\overline{M_{ui}}$ を比較することで検討する。

(1) 初期応力度を考慮する場合の曲げ耐力の算定

本実験における初期応力度を考慮した曲げ耐力 $\overline{M_{ui}}$ については、複合標準¹⁾を参考に、初期応力度導入時の作用曲げモーメント M_d と、合成後断面における曲げ耐力 M_{ui} を累加することで求まる。

$$\overline{M_{ui}} = M_d + M_{ui} \quad (1)$$

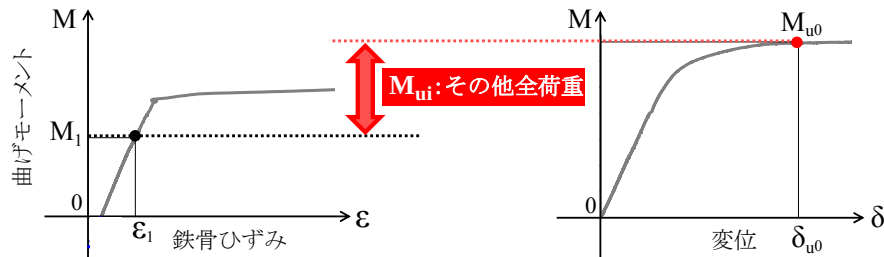
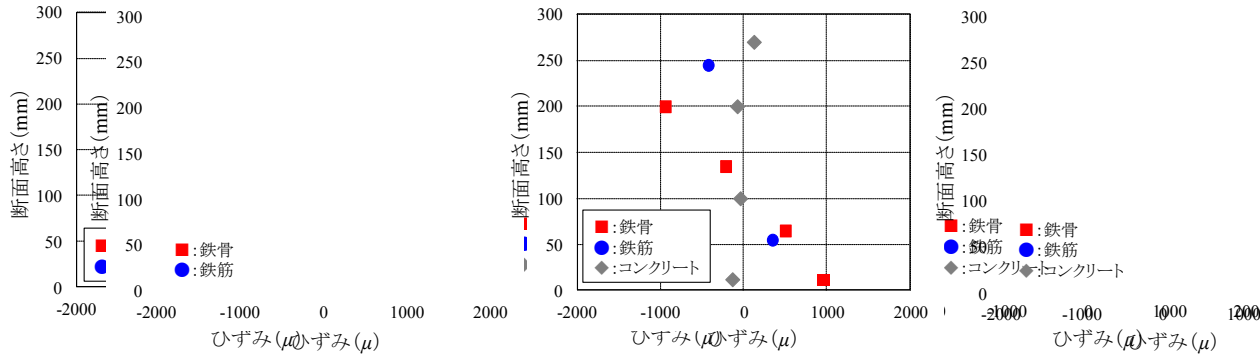


図-11 本実験における初期応力度を考慮する場合の M_u の算定概要



(a) 試験体 No.2：初期応力導入時

(b) 試験体 No.2：荷重実験時 (M_1 時)

図-12 鉄骨・鉄筋・コンクリートのひずみの断面高さ方向分布

ただし、本実験では初期応力度導入後に一旦荷重を除荷したため、初期応力度導入時に降伏強度の60%を導入した鉄骨下フランジの初期応力度が18%まで低下し、合成後断面における曲げ耐力 M_{ui} が見かけ上過大となっており、単純な累加では $\overline{M_{ui}}$ を求めることができない。そこで、荷重実験における鉄骨下フランジのひずみが、初期応力度の導入時のひずみ（降伏ひずみの60%、図-11の ϵ_1 ）に到達した際の作用曲げモーメントを M_1 とし、荷重実験における最大曲げモーメント M_{u0} と M_1 との差を M_{ui} とした。なお、鉄骨・鉄筋ひずみの断面高さ方向の分布について、初期応力度の導入時（図-12 (a)）と荷重実験における M_1 作用時（図-12 (b)）の分布はほぼ一致することから、算定した M_{ui} は概ね妥当と考える。また、初期応力度導入時の作用曲げモーメント M_{d1} は、鉄骨のみで初期応力度を負担するとして、降伏ひずみの60%（ 900μ ）を鉄骨下フランジに作用させる曲げモーメントを計算（ $\sigma = My/D$ ）により求めた。 M_{u0} 、 M_1 および M_{d1} の値を表-5に示す。

表-5 試験体 No.2 における荷重実験時の M_{u0} 、 M_1 および初期応力度導入時の曲げモーメント M_{d1}

		曲げモーメント (kN・m)	
荷重実験における最大曲げモーメント	M_{u0}	242.7	(P=669.6kN)
降伏ひずみの60%到達時の作用曲げモーメント	M_1	108.3	(P=298.8kN)
初期応力度導入時の作用曲げモーメント	M_{d1}	96.5	

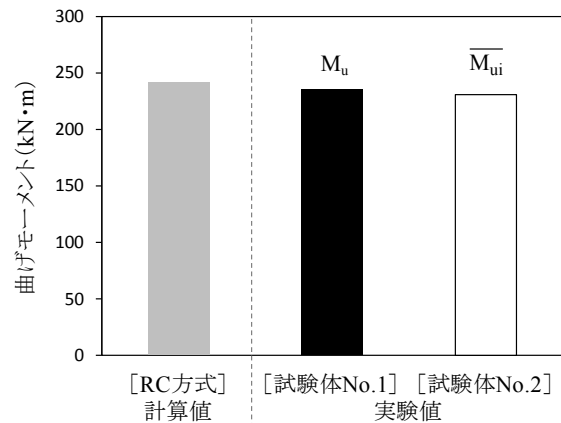


図-13 曲げ耐力の比較

(2) 曲げ耐力の比較

図-13に初期応力度を考慮しない場合の曲げ耐力 M_u と、初期応力度を考慮した場合の曲げ耐力 $\overline{M_{ui}}$ の算定結果を示す。なお、RC方式による計算値も合わせて示している。

両実験値の曲げ耐力は概ね一致し、両実験の曲げ耐力の比 $M_u / \overline{M_{ui}}$ （初期応力度非考慮／初期応力度考慮）は1.02となった。これは、既往の研究³⁾で示される、一

般的な鋼材比、鉄骨鉄筋比を有するSRC桁を対象とした試設計により算定した曲げ耐力比 0.97～1.04 と同様の結果となった。このことから、SRC部材の合成後断面について、施工時死荷重を含む全荷重に対する照査に用いる曲げ体力は、初期応力度を考慮せずに評価することができると思われる。

5. まとめ

本研究では、施工時死荷重により鉄骨に作用する初期応力度の有無をパラメータとした載荷実験を行い、初期応力度がSRC部材の曲げ耐力に及ぼす影響について検討した。以下に、本研究の範囲において得られた主な知見を示す。

- 1) 実験値と計算値（RC方式）の比較から、曲げ剛性については乖離が生じたが、最大荷重は概ね一致した。これより、曲げ耐力の算定を行う上では、初期応力度を考慮しない場合の実験値をRC方式による計算で概ね評価できるものと考えられる。
- 2) 鉄骨が先行降伏する本実験の条件下においては、SRC部材の破壊形態について、初期応力度の有無による顕著な差異は認められなかった。
- 3) 初期応力度を考慮しない場合の曲げ耐力 M_u と初期応力度を考慮した場合の曲げ耐力 $\overline{M_{ui}}$ は概ね一致し、曲げ耐力比 $M_u/\overline{M_{ui}}$ は1.02となった。これは、既往の研究において試算により算定された曲げ耐力比0.97～1.04と同様の結果を示した。
- 4) 上記より、SRC部材の合成後断面について、施工時死荷重を含む全荷重に対する照査に用いる曲げ耐力は、初期応力度を考慮せずに評価できる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社・猪股氏、日鉄住金環境株式会社・林氏に多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼とコンクリートの複合構造物），丸善，2016.1.
- 2) 谷村幸裕，渡邊忠朋，伊藤裕一：鉄骨鉄筋コンクリート梁の曲げ剛性に関する一考察，土木学会第49回年次学術講演会，Vol.49，V-496，pp.992-993，1994.9.
- 3) 渡邊忠朋，伊藤裕一：鉄骨鉄筋コンクリート部材の耐力，鉄道総研報告，Vol.9，No.4，pp.1-6，1995.4.
- 4) 河村佳英，中田裕喜，岡本 大，青木千里，池田 学：コンクリート打込み時の鋼材の初期応力度を考慮した合成部材の耐力評価，鉄道総研報告，Vol.28，No.1，pp.17-22，2014.1.
- 5) 中田裕喜，渡辺 健，田所敏弥，岡本 大，池田 学，谷村幸裕：両端固定されたせん断スパン比の小さい鉄骨鉄筋コンクリートはりのせん断耐力評価，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.72，No.4，pp.440-455，2016.12.

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECTS OF INITIAL STRESS DUE TO DEAD LOAD ON THE FLEXURAL CAPACITY OF SRC BEAMS

Yohei HAMAGAMI, Tatsuya NIHEI, Yuki NAKATA, Manabu IKEDA,
Nozomu TANIGUCHI, and Ngyen Van Quang

In this study, we set the experiment of two SRC beams to investigate the effect of initial stress on flexural capacity. One had the initial stress before loading test, another did not had. For those results, we confirm that the initial stress does not affect the flexural capacity, and that we can calculate the flexural capacity, when the steel frame has the stress from initial stress which is made by mainly dead load from concrete, by the ordinary design standard method.