

中央部S造材端部RC造またはSRC造とした複合構造梁の構造性能 その2 鉄骨造端部降伏型実験と有限要素法解析による検証

鈴木 英之* 西原 寛*

Structural Performance of Composite Beam Consisting of Steel, Reinforced Concrete and Steel Reinforced Concrete

Part.2 The cantilever beam test with predominant flexural yielding at steel ends and verification by FEM analysis
by Hideyuki SUZUKI and Hiroshi NISHIHARA

Abstract

A hybrid structural beam that consists of reinforced concrete at the beam ends and H-shaped steel in the middle of the span has been proposed. To expand application of the design, structural tests of hybrid beam whose yield hinges were formed at the steel end was carried out. The test confirmed that the hybrid beams maintain good performance until large deformation. Moreover, nonlinear FEM analysis for specimen model was conducted. To prepare the contact element between the steel element and the concrete element, the load-deformation curves of the specimen were reproduced exactly. The validity of the stress transfer mechanism based on the macro model was confirmed by the results of FEM analysis.

要 旨

従来の複合構造梁構法(AHBS 構法)は材端部の RC 断面あるいは SRC 断面に降伏ヒンジを計画していた。この度、適用範囲の拡大を目的として、鉄骨部分の曲げ降伏が先行する複合構造梁の実験を行った。その結果、既往の研究で提案した接合部の耐力計算に準じた設計法により、大変形まで耐力低下がない安定した履歴が得られた。さらに、試験体の形状をモデル化した非線形有限要素法解析を行ない、鉄骨とコンクリートの境界面に接触要素を設けることで、実験結果を精度良く再現できた。FEM 解析の結果より、マクロモデルに基づいた応力伝達機構の妥当性を確認した。

キーワード：複合構造梁／鉄筋コンクリート／鉄骨鉄筋コンクリート／鉄骨造／応力伝達／FEM 解析

1. はじめに

鉄骨梁の材端部に鉄筋コンクリートを巻き、スパン中央部がS造、材端部がSRC造あるいはRC造で構成される複合構造梁構法(AHBS構法)は、開発以来物流倉庫をはじめ、生産施設や教育施設等、多くの建物に採用されてきた。

従来の技術では、材端部のRC断面あるいはSRC断面に降伏ヒンジを形成させていた。この度、適用範囲の拡大を目的として、鉄骨が埋め込まれる位置(以下、埋込始端位置)に降伏ヒンジを形成させる複合構造梁を開発した。本稿では、まず鉄骨部に曲げ降伏ヒンジが形成される片持ち梁の構造実験の結

果を報告する。

また、構造実験に使用した試験体をモデル化し、鉄骨とコンクリートの境界面に接触要素を設けた非線形有限要素法解析を行なった。この解析では、実験結果の再現を試みると共に、実験では把握しきれなかった接合部内部の応力状態を把握することを目的とし、既報のマクロモデルによる応力伝達やせん断抵抗機構との対比を試みた。

2. 構造実験

2.1 試験体

図1に試験体形状、表1に試験体一覧を示す。試験

* 技術研究所構造研究室

体の形状は、既発表の研究^[1]と同様に片持ち梁形式とした。4-1～4-2は材端部がSRC造であり、柱を想定したスタブまで鉄骨を貫通させた。4-3～4-6は材端部がRC造の梁である。

文献[1]に示した材端部RC造梁では、材端部のRC断面に降伏ヒンジを計画するため、柱面から0.5D (D:梁せい) の区間には鉄骨が埋め込まれていなかったが、本実験では埋込始端付近の鉄骨断面に降伏ヒンジを計画するため、スタブとの境界面まで鉄骨を埋め込んだ。鉄骨端部には図1中の断面図に示す

ような部分スチフナを設けた。

試験体に与えた主な変動要因は鉄骨の埋込長さ (L_j) とした。4-1は主筋の定着長が $12db$ (db :主筋径)、4-2は同じく $20db$ となるように、材端部のSRC造区間を定めた。材端部RC造の試験体では埋込長さを417, 510, 600, 700mmとした。埋込始端側の集中補強筋は梁鉄骨に作用するせん断力を材端部のRC部分に伝えることを目的としており、その鉄筋量は鉄骨が全塑性モーメントに達する時の梁のせん断力から算出した。表2に鋼材の材料試験結果を示す。

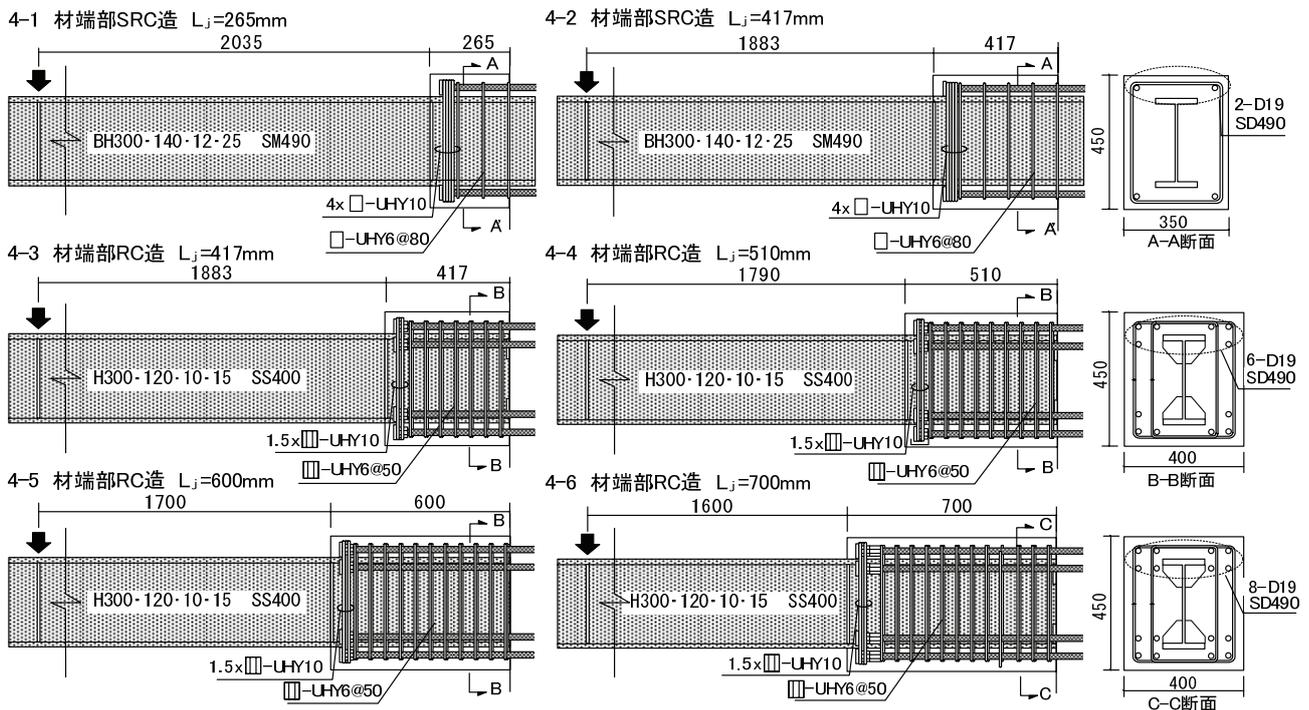


図1 試験体形状図

表1 試験体一覧および実験結果、曲げ耐力計算値一覧

試験体番号		4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6
梁の形式		材端部SRC造中央部S造		材端部RC造中央部S造			
鉄骨 区間	断面	BH-300・140・12・25 SM490		H-300・120・10・15			
	長さ L_s (mm)	2035	1883	1883	1790	1700	1600
SRC RC 区間	断面 $b \times D$ (mm)	350 × 450		400 × 450			
	長さ L_j (mm)	265	417	417	510	600	700
	$c \sigma_B$ (N/mm ²)	27.6	27.8	28.1	28.1	28.2	37.5
	主筋	上下2-D19 (SD490)		上下6-D19 (SD490)			上下8-D19
	筋筋	□UHD6@80		□□UHD6@50			
集中補強筋		4-□UHD9		1.5-□□UHD9			
実験値	曲げ降伏時	144	172	—	105	108	119
	最大耐力時	275	287	91.5	109	127	187
鉄骨曲げ耐 力計算値*1	曲げ降伏時	151	163	96.1	101	106	113
	全塑性モーメント時	178	192	112	118	124	131
破壊経過*2		S部By	S部By	切替部Su	S部By →切替部Su	S部By →切替部Su	S部By

*1 曲げ耐力計算値は埋込始端から材端側に 50mm の位置を降伏断面とし *2 By: 曲げ降伏 Su: せん断破壊

2.2 加力および計測

図2に加力装置図を示す。試験体は材端部側に固定用のスタブを設け、自由端側の鉄骨に加力点を設けた片持ち梁形式とした。自由端の鉄骨に取り付けた押し引き油圧ジャッキにより、正負交番繰り返し荷重を行い、その加力サイクルは部材の変形角が±2.5, ±5/1000rad.で1サイクル, ±10, ±20, ±30, ±40, ±50/1000rad.で各2サイクル繰り返し、最終加力は+67/1000rad.まで加力した。

主な計測項目は油圧ジャッキの荷重、加力点位置における部材の変位、主要箇所における主筋、肋筋および鉄骨のひずみ等とした。

2.3 実験結果

a. 実験経過

表1中に実験結果と曲げ耐力計算値の一覧、図3にせん断力-部材変形角関係を示す。図中の一点鎖線は鉄骨曲げ降伏時の梁せん断力、同じく点線は全塑性モーメント時の梁せん断力を表している。材端部SRC梁は曲げひび割れ、せん断ひび割れが発生した後、1/89~1/72rad.で埋込始端位置の鉄骨フランジが降伏し、その後も緩やかに荷重が上昇した。埋込長さの長い4-2の方が若干剛性が高くなったが、いずれも最終加力まで安定した履歴性能であった。

材端部RC梁では、最も埋込長さが短い4-3は鉄骨降伏前にRC部がせん断破壊した。埋込長さが長くなるにつれ、部材の剛性が高くなり、4-4, 4-5はいずれも鉄骨フランジが降伏したが、その後の繰り返

し荷荷でRC部分がせん断破壊した。最も埋込長さが長い4-6は鉄骨降伏後も安定した履歴を示し、最終加力まで耐力低下が無かった。

b. 主筋および鉄骨のひずみ分布

図4に鉄骨造端部が曲げ降伏した4-2, 4-6試験体の主筋および鉄骨のひずみ分布を示す。材端部がSRC造である4-2の鉄骨フランジは、降伏ひずみを越えた1/50rad.まではSRC区間のひずみがほぼ一定

表2 鋼材材料試験結果

種類	材質	使用箇所	降伏強度	弾性係数	伸び(%)
PL25	SM490	4-1, 2フランジ	331	20.5	29.1
PL12	SM490	4-1, 2ウェブ	338	19.8	29.0
H300	SS400	4-3~6	311	20.7	29.0
D19	SD490	主筋	535	19.2	16.0
UHD6	SHD685	肋筋	710*1	18.4	11.2
UHD9	SHD685	集中補強筋	791*1	20.6	12.6

*1:0.2%オフセット法による。単位:降伏強度N/mm² 弾性係数kN/mm²

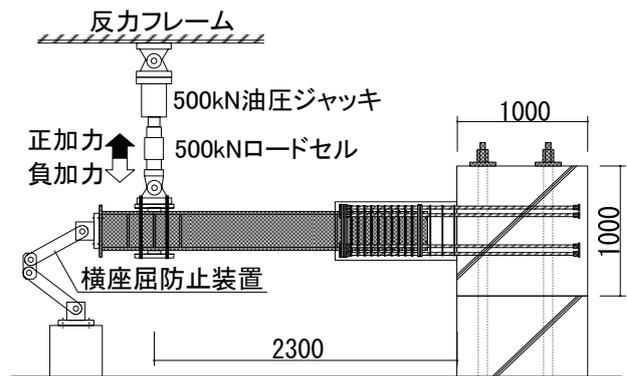


図2 加力装置図

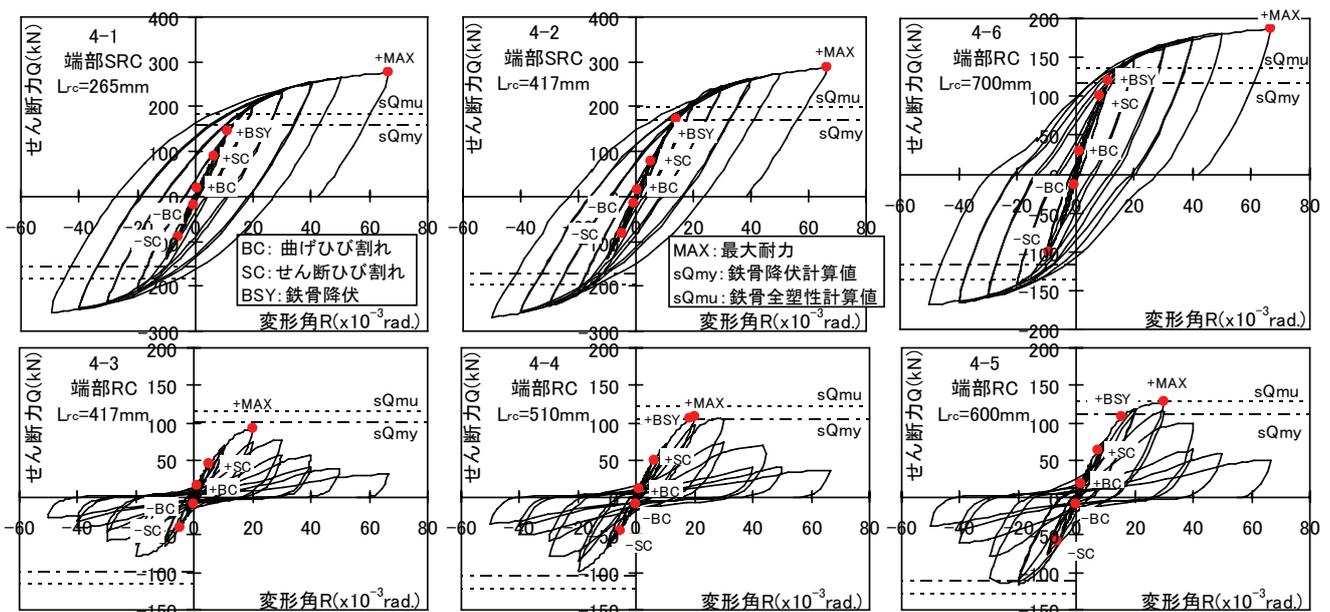


図3 せん断力-部材変形角関係

であり、埋込部全長にわたって降伏ひずみに達していた。その後変形が大きくなるにつれ、埋込始端から若干材端側の位置でひずみが最も大きくなった。材端部RC造の4-6の鉄骨フランジは埋込始端より若干材端部の位置でひずみが最も大きくなり、材端部にかけて小さくなった。同図中に切替部におけるSとRCが負担する曲げモーメントの模式図を示す。鉄骨を柱内まで埋め込むか否かで各部が負担するモーメント分布は異なり、材端部RC梁の切替部では部材に作用するせん断力の他に、埋め込まれた鉄骨の反力が作用するため、RC部分に作用するせん断力が大きくなる。本実験では文献[1]に示した切替部せん断耐力の計算法に基づいて筋筋や埋込長さを定めることによって、材端部RC梁においても鉄骨端部の降伏ヒンジの形成が確認された。

3. 試験体モデルのFEM解析

3.1 解析モデル

コンクリート系構造物を対象とした三次元非線形有限要素法解析コードであるATENA3D を使用し、加力実験に用いた試験体をモデル化した非線形FEM解析を行った。表3に解析ケースの一覧を示す。比較のために、文献[1]に示した材端部RC造断面の試験体3-3と3-5を加えている。これらはいずれも材端部のRC断面が曲げ降伏した試験体であり、鉄骨の埋込長さはそれぞれ850mm、700mmである。

解析ケースのC33、C35、C41、C42、C43、C44、C45、C46はそれぞれ試験体3-3、3-5、4-1、4-2、4-3、4-4、4-5、4-6に対応している。

図5に要素分割および境界条件を設定した解析モデルの形状を示す。解析モデルの形状は試験体寸法を忠実に再現した。コンクリートと鉄骨は三次元6面体8節点要素、主筋と肋筋は一次元2節点線要素とした。

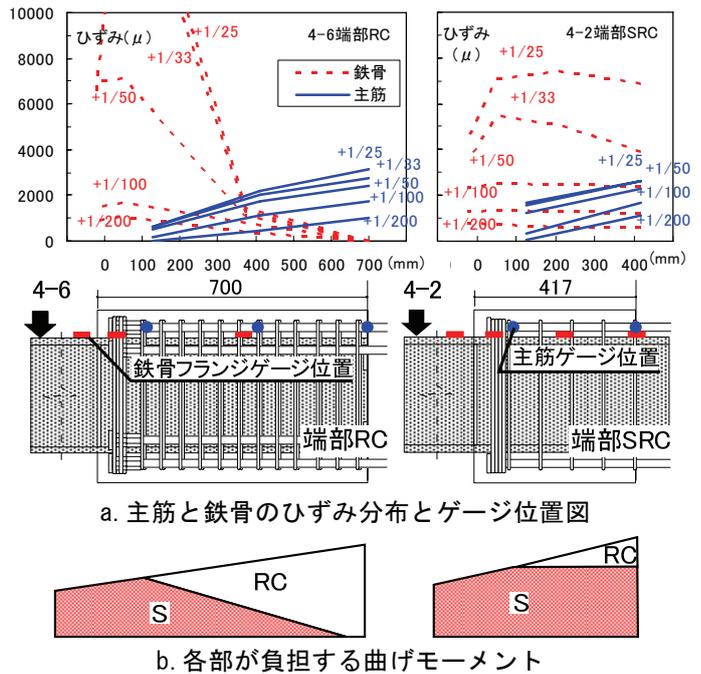


図4 ひずみ分布と各部の曲げモーメントの模式図

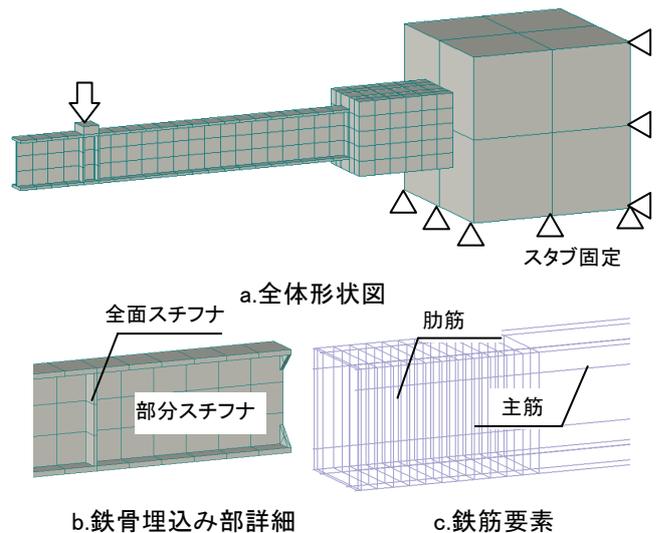


図5 解析モデルの形状図(C45)

表3 解析ケースおよび解析結果一覧

解析ケース	C41	C42	C43	C44	C45	C46	C46F	C33	C35
対応試験体名	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6	4-6	3-3	3-5
梁の形式	材端部SRC造				材端部RC造				
鉄骨埋込長さ	265	417	417	510	600	700	700	850	700
解析上の破壊経過	S断面 曲げ 降伏	S断面 曲げ 降伏	RC部 せん断 破壊	S降伏後 RC部せん 断破壊	S降伏後 RC部せん 断破壊	S断面 曲げ 降伏	S断面 曲げ 降伏	RC断面 曲げ 降伏	RC断面 曲げ 降伏
鉄骨降伏	188	203	—	115	124	136	135	—	—
主筋降伏	—	—	—	—	—	—	—	139	136
最大耐力	239	247	92.1	121	127	179	196	162	164
降伏荷重実験値／解析値	0.77	0.85	—	0.91	0.87	0.88	0.88	1.04	1.02
最大耐力実験値／解析値	1.15	1.16	0.99	0.90	1.00	1.05	0.96	0.96	0.96

図6に解析に使用した鉄筋、鉄骨、およびコンクリートモデルの $\sigma - \epsilon$ 関係と、鉄骨とコンクリート間の支圧、付着モデルを示す。コンクリートモデルは引張強度を考慮し、圧縮引張共に最大耐力時からの軟化曲線は破壊エネルギーを考慮したモデルとした。鉄骨、主筋、肋筋の材料モデルは構造実験の材料試験結果を利用し、降伏強度を折れ点とするバイリニア型とした。鉄筋は降伏以降の剛性を零とし、鉄骨は降伏点以降の剛性を弾性剛性の1/100とした。鉄筋要素とコンクリート要素間は完全付着モデルとした。鉄骨要素とコンクリート要素間には接触要素を設けた。C46Fを除き接触面に平行な方向の鋼とコンクリート間の付着力および摩擦力は零とした。C46Fは鋼材とコンクリート間の摩擦係数を0.5とした。接触面鉛直方向の離間力つまり鉄骨とコンクリート間の引張強度は零とした。つまりコンクリートと鉄骨間の応力伝達は、フランジ面および鉄骨の埋

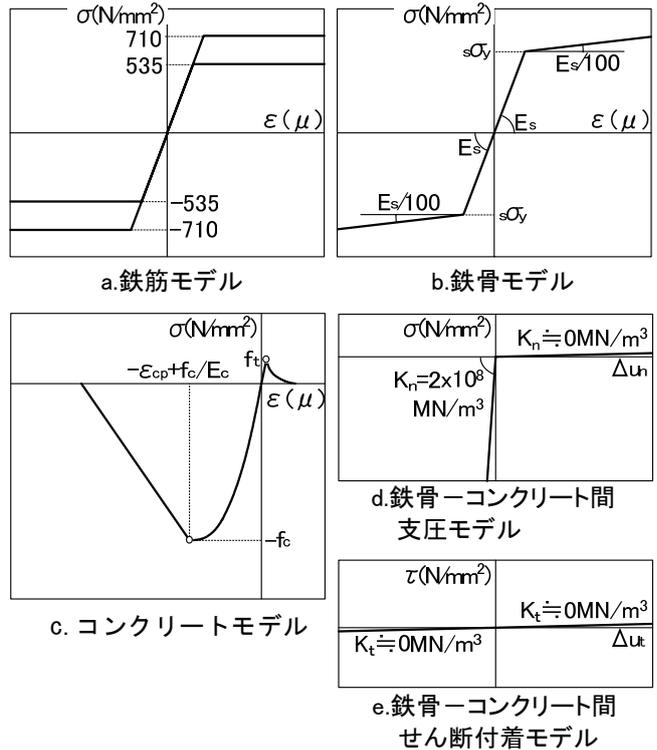


図6 解析に使用した材料モデル

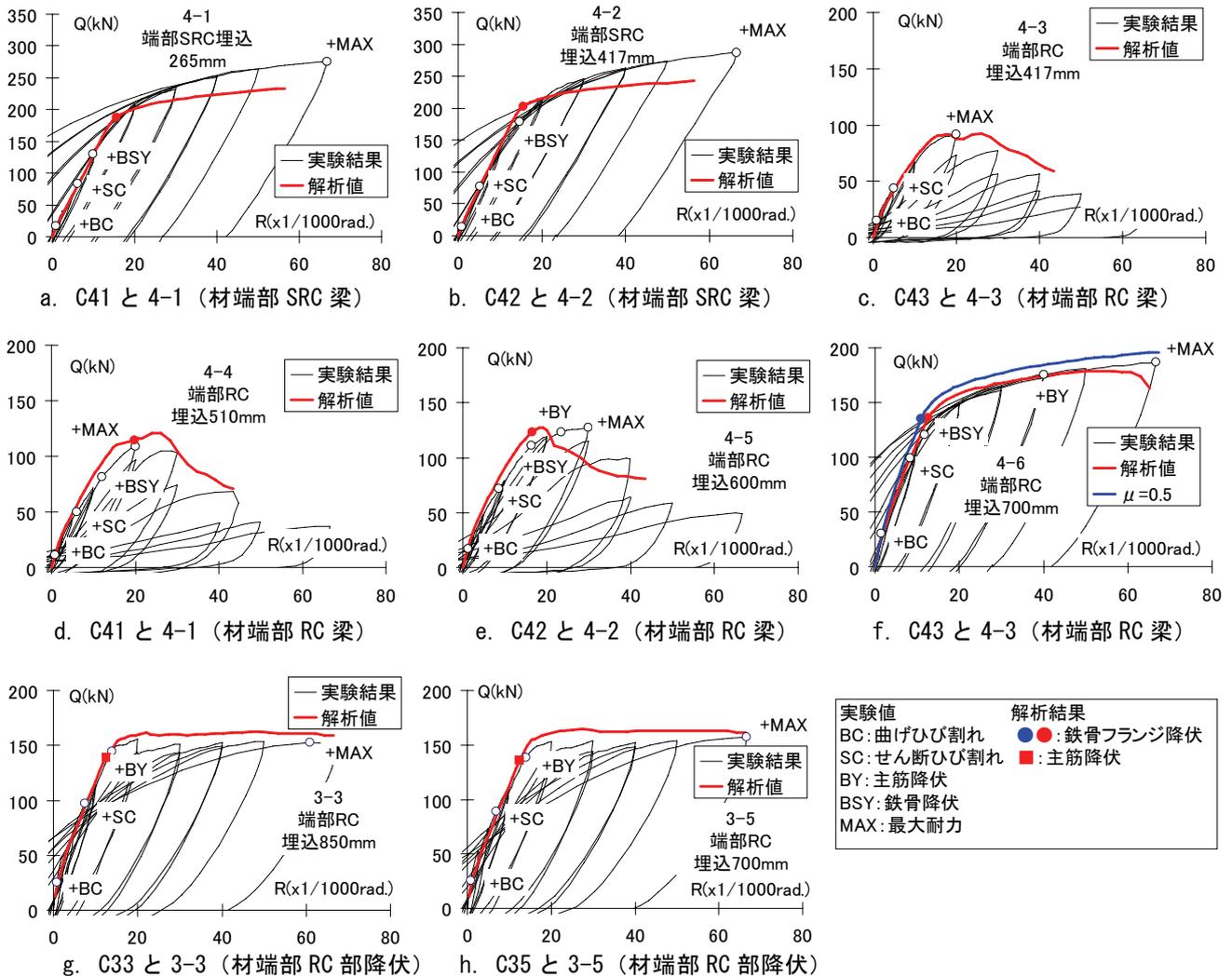


図7 せん断力(Q)-部材変形角(R)関係の実験値と解析値の比較

込始端と終端に設けたスチフナに作用する支圧力だけによると考えた。

3.2 解析方法

図5中に、解析上の拘束条件と荷重位置を示す。加力実験と同様にスタブ部分を固定支持とし、各ステップで鉄骨先端部に強制変位を増分させ、一方向単調荷重とした。また非線形求解法として非線形Newton-Raphson法を用いた。

3.3 解析結果

図7にせん断力(Q)一部材変形角(R)関係を示す。比較のため実験から得られた正加力のQ-R関係を重ねている。

4-1, 4-2は材端部SRC梁であるがそれをモデル化したC41, C42と比較すると、初期剛性から鉄骨降伏まではほぼ一致しており、鉄骨フランジ降伏後の耐力増加は実験値の方が大きくなった。

次に材端部RC造梁について比較する。4-3はRC部せん断破壊、4-4, 4-5は鉄骨降伏後のRC部せん断破壊であるが、それらに対応する解析ケースC43, C44, C45は実験経過を再現していた。S部が曲げ降伏し最後まで耐力低下しなかった4-6をモデル化したC46は実験結果をほぼ再現しており、包絡線は一

致していた。摩擦係数を0.5としたC46Fは鉄骨降伏時の剛性や降伏後の耐力が若干大きくなった。

材端部のRC断面に降伏ヒンジを計画した3-3, 3-5についても、それをモデル化したC33, C35は実験値と解析値の包絡線がほぼ一致していた。

図8に主筋または鉄骨フランジの降伏荷重、および最大耐力の実験値をそれぞれ解析値で除した値を示す。鉄骨の降伏荷重は解析値の方が大きくなるが、これはFEMではある厚さをもった要素で降伏を判断しているのに対し、実験ではフランジ表面のひず

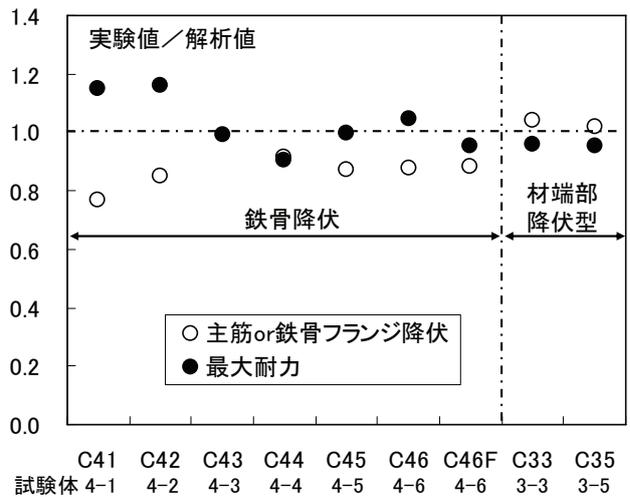


図8 降伏荷重、最大耐力の実験値/解析値の比較

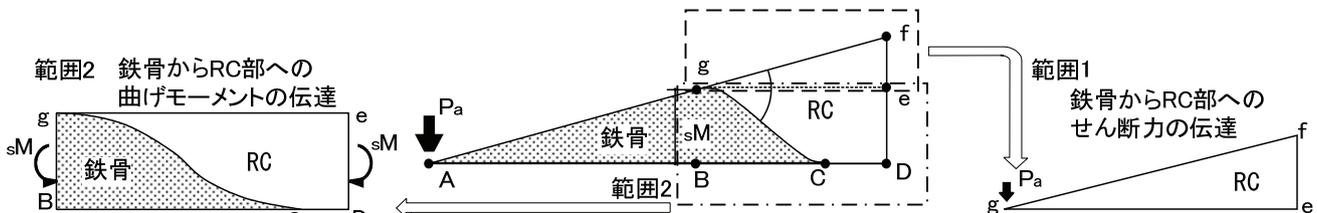


図9 曲げモーメント図の分割

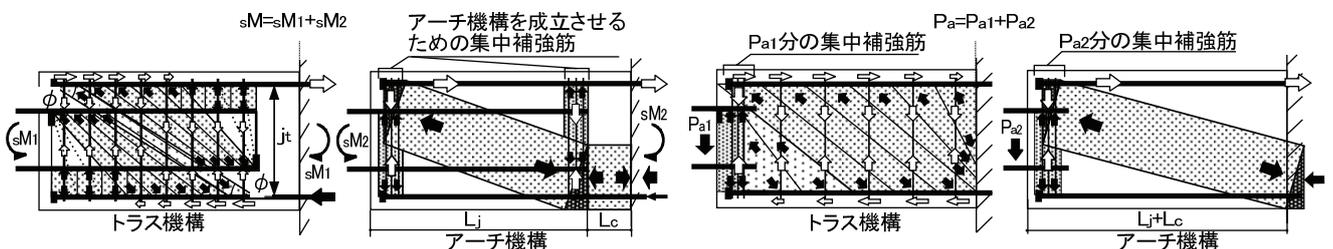


図10 RC部に形成されるせん断抵抗機構

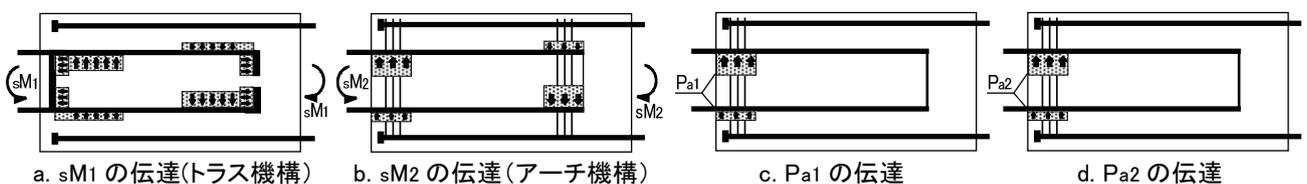


図11 鉄骨フランジおよびスチフナに生じる支圧応力

みゲージで降伏を判断しているためであると考えられる。主筋の降伏および最大耐力に関しては、概ね実験値と計算値が一致していた。

以上のように、接触要素を設けた材端部SRC造梁および材端部RC造梁の解析モデルによって、降伏ヒンジの形成位置や破壊経過を再現し、実験で得られた荷重変形関係をほぼ再現できた。

4. FEM 解析によるマクロモデルの検証

4.1 鉄骨-RC間の応力伝達機構

図9～図11に文献[1]で提案した鉄骨と鉄筋コンクリートの接合部における曲げモーメントおよびせん断力の伝達と、RC部に形成される抵抗機構を示す。筆者等は、固定端がRC造、自由端が鉄骨造の片持ち梁において、曲げモーメントとせん断力の伝達は鉄骨フランジと部分スチフナに作用する支圧応力によるとしており、それに伴うトラス機構とアーチ機構によってRC部のせん断抵抗機構が形成されるとし、せん断耐力式を提案している。このマクロモデルの詳細な説明は文献[1]に示されているので省略するが、ここではマクロモデルの妥当性をFEM解析の結果より検証する。

4.2 支圧による応力伝達

図12に鉄骨フランジに作用する支圧応力分布の模式図を示す。これは、図11に示したような支圧応力分布が鉄骨フランジに作用すると仮定し、それを単純に足し合わせた図である。このように階段状の支圧応力分布になるが、文献[1]ではこれを三角形分布に簡略化し、その重心位置に支圧力が集中している。

図13に解析結果から得られた、鉄骨フランジに作用している支圧力の分布を示す。この図は、鉄骨要

素の表面の接触要素を構成する節点の鉛直方向応力度に、フランジ幅を乗じたものであり、上下フランジに作用する支圧力の和を図示している。材端部SRC梁では埋込始端側の支圧力が大きくなっていた。材端部RC造梁では埋込始端側と終端側の支圧力が大きくなっていた。これらの分布形状は概ね三角形分布であり、図12の仮定と一致していた。なお、同図bにおいて摩擦係数を変動要因とした解析結果を比較すると、摩擦係数（ μ ）が0.5の方が若干支圧力が小さくなっていた。これは、摩擦力が作用することで、材軸方向の応力伝達が可能となり、てこ作用による応力伝達が減少するためであると考えられる。

4.3 コンクリート圧縮束

図14にコンクリート要素の最小主応力のコンター図を示す。ここに示したのはC46の結果であり、同図aは鉄骨幅の外側、同図bは鉄骨幅の内側の断面である。これによると、鉄骨フランジの内側と外側のいずれにもコンクリートの斜め圧縮束の存在が認められる。FEM解析の応力図を基に、マクロモデルにおけるトラス機構とアーチ機構がそれぞれ形成するコンクリート圧縮束を分けることはできないが、図14によるとフランジの内側と外側では異なった角

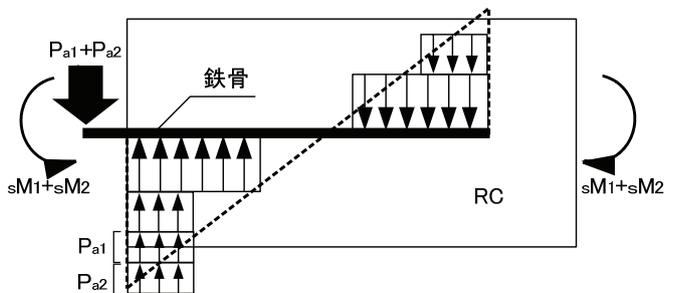


図12 鉄骨フランジに作用する支圧応力のモデル化

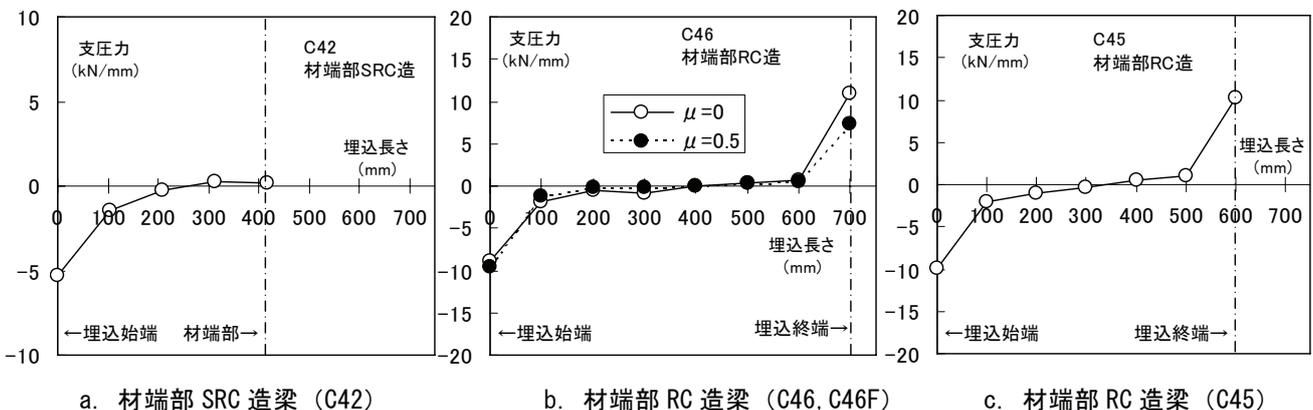


図13 鉄骨フランジに作用する支圧応力（解析結果）

度の圧縮束が形成されており，**図10**に示したRC部分のせん断抵抗機構と類似していた。

5. まとめ

材端部がRC造またはSRC造，中央部がS造で構成される複合構造梁において，鉄骨造端部に降伏ヒンジを計画する方式を開発した。模型試験体による構造実験を実施し，大変形まで耐力低下がない安定した履歴が得られることを確認した。

試験体の形状をモデル化した非線形有限要素法解析を行ない，鉄骨とコンクリートの境界面に接触要素を設けることで，荷重-変形角関係と破壊性状を精度良く再現できた。

その解析結果を基に，構造実験では把握しきれなかった接合部内部の応力状態を，視覚的にも明確にすることが可能となり，既往の研究で提案したマクロモデルによる応力伝達機構の妥当性が確認された。

参考文献

[1]鈴木英之，西原 寛：材端部 RC 造中央部鉄骨造で構成される複合構造梁のせん断耐力と変形性能，日本建築学会構造系論文集，NO.631，pp.1673-1680，2008年9月

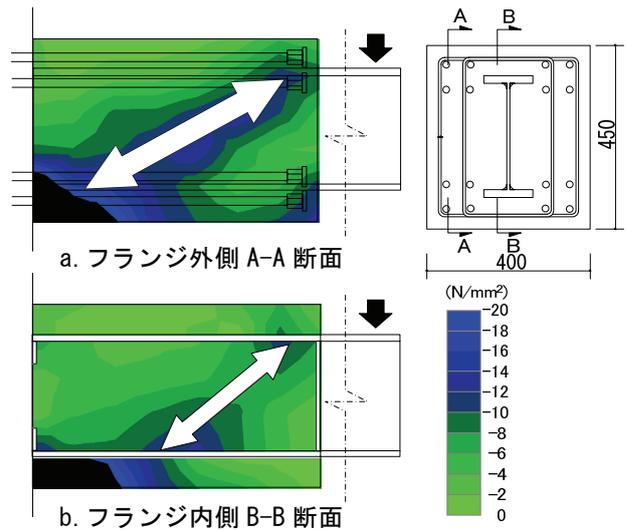


図 14 コンクリート要素の最小主応力コンター図
(解析ケース C46 step38 47.8/1000rad.)