

# 論文 中央部鉄骨造の材端部鉄筋コンクリート造への埋込み始端に鋼製プレートを有する複合構造梁の構造性能

中田 寛二<sup>\*1</sup>・佐藤 良介<sup>\*2</sup>・小澤 潤治<sup>\*3</sup>・古川 雄太<sup>\*1</sup>

**要旨**：本論文は材端部 RC 造中央部 S 造で構成された埋込み形式の複合構造梁の構造性能について論じるものである。埋込み形式の複合構造梁において S 区間と RC 区間の境界に設けた鋼製プレートを S 部材と溶接し、さらに RC 区間主筋とナット接合することで、その接合部をより合理的に構築できることが既に明らかにされているが、本論文ではさらに、鋼製プレートと S 部材の溶接を排した場合の構造性能の確認が試みられている。この複合構造梁を模した 4 体の試験体を対象に実施した構造実験の結果に基づき、特に、RC 区間における RC と S 部材の負担曲げモーメントの分配と、溶接を排しても期待される境界プレートの導入効果について言及している。

**キーワード**：複合構造梁、鋼コンクリート合成構造、鋼製プレート

## 1. はじめに

材端部鉄筋コンクリート造（以下、RC 造）、中央部鉄骨造（以下、S 造）で構成される複合構造梁は、建築物の大スパン化に対する力学的合理性が注目されており、種々の構法が提案されている<sup>例えば 1)2)</sup>。これらの複合構造梁では、S 部材を RC 区間へと埋込む直列的な接合部<sup>3)</sup>（以下、埋込み形式）が採用されているが、S 部材を RC 区間へと埋込むことに伴って接合部に形成される応力伝達機構は図-1 のようになるとされている<sup>3)</sup>。すなわち、一般に、埋込み形式の複合構造梁においては、図-1 に見るような、i) RC からの支圧力（以下、支圧力）によるてこ機構を確保するための補強（図-1 (b)）、ii) S 部材の RC 区間への埋込みによって割り増される RC への入力せん断力（図-1 (c), (d)）に対する適切なせん断設計に加え、iii) S 部材の RC 区間への確実な定着、の 3 点が特に重要となると言われている<sup>3)</sup>。既往の埋込み形式の複合構造梁<sup>例えば 2)</sup>では、S 部材埋込み始端と終端近傍に集中補強筋を設けることで、条件 i) に対応する例が多い。また、条件 ii) については図-1 (d) に示す RC 区間への入力せん断力 $r_c Q$  に対してせん断設計を行うこととされている。さらに、条件 iii) に対しては、埋込み区間の S 部材の埋込み終端にアンカー用の端部スチフナを設ける等の対応が見られている。

一方、条件 i) ~ iii) を満足する合理的な接合部を構築することを目的として、文献 1) では「RC 区間と S 区間の境界に設けた鋼製プレート（以下、境界プレート）を S 部材と溶接し、さらに RC 区間主筋とナットにより締結した複合構造梁」（以下、溶接タイプの複合構造梁）が提案されている。溶接タイプの複合構造梁<sup>1)</sup>の特徴は、RC 区間と S 区間の境界に RC 区間の主筋とナット接合された鋼製プレートを有し、さらにこのプレートが S 部

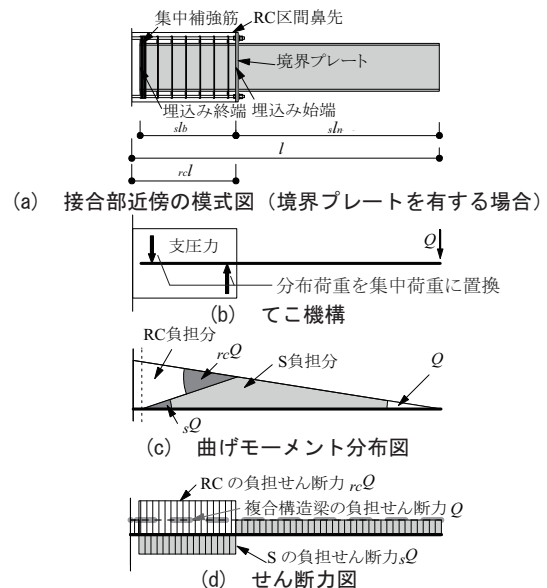


図-1 埋込み形式の複合構造梁の接合部近傍

材と溶接されていることにある。この 2 つの特徴を前述の条件 i) ~ iii) に照らし合わせると以下ようになる。

まず、i) に求められる「RC 区間主筋の材軸直交方向の拘束」は境界プレートの面内剛性によって確保される<sup>1)</sup>。これは、RC 区間主筋と境界プレートがナットで締結されていることに拠るとされている。また、境界プレートと S 部材の溶接接合によって、境界プレートを介して RC と S が一体化されるため、RC 区間鼻先位置の存在曲げモーメントは RC と S の双方が負担することになり、これに伴って図-1 (c) に示す曲げモーメントの S の負担分にはこの位置に段差が生じ、この段差の分、RC への入力せん断力 $r_c Q$  を既往の複合構造梁<sup>2)</sup>よりも低減することができる。さらに、この境界プレートを介した RC 区間と S 部材の一体化は S 部材の RC 区間からの抜出しの抑制にも寄与するとされ、iii) の満足にもつながっている。

この中で、条件 ii) および iii) の満足が境界プレート

\*1 東急建設（株） 技術研究所基盤技術開発部 修士（工学）（正会員）  
 \*2 東急建設（株） 技術研究所基盤技術開発部 博士（工学）（正会員）  
 \*3 東急建設（株） 技術研究所基盤技術開発部 工修

表-1 試験体一覧

試験体名		B-4	B-5	B-8	B-9
断面	RC	断面外形 $B \times H \times D$ (mm)			
		上端1段目			
		上端2段目			
		有効せい $d$ (mm)			
		引張鉄筋比 $p_t$ (-)			
		下端			
	S	断面形状 (mm) ( $D$ : 梁せい)			
鋼種					
埋込み終端のスチフナの有無		無	有		無
せん断スパン境界プレート		: スタブ面-載荷点間距離 (mm)			
RC 区間		スタブ面-境界プレート間距離 $l_c$ (mm)			
		S 部材埋込み長さ $l_b$ (mm)			
		$l_c - l_b$ (mm)			
RC 部 剪断補強筋 (SHD 685)	埋込区間	レイアウト			
	埋込区間	補強筋比 $p_w$ (-)			
	埋込区間	レイアウト/数 (組)			
	埋込区間	補強筋比 $p_w$ (-)			
一般 RC 部		レイアウト			
		補強筋比 $p_w$ (-)			

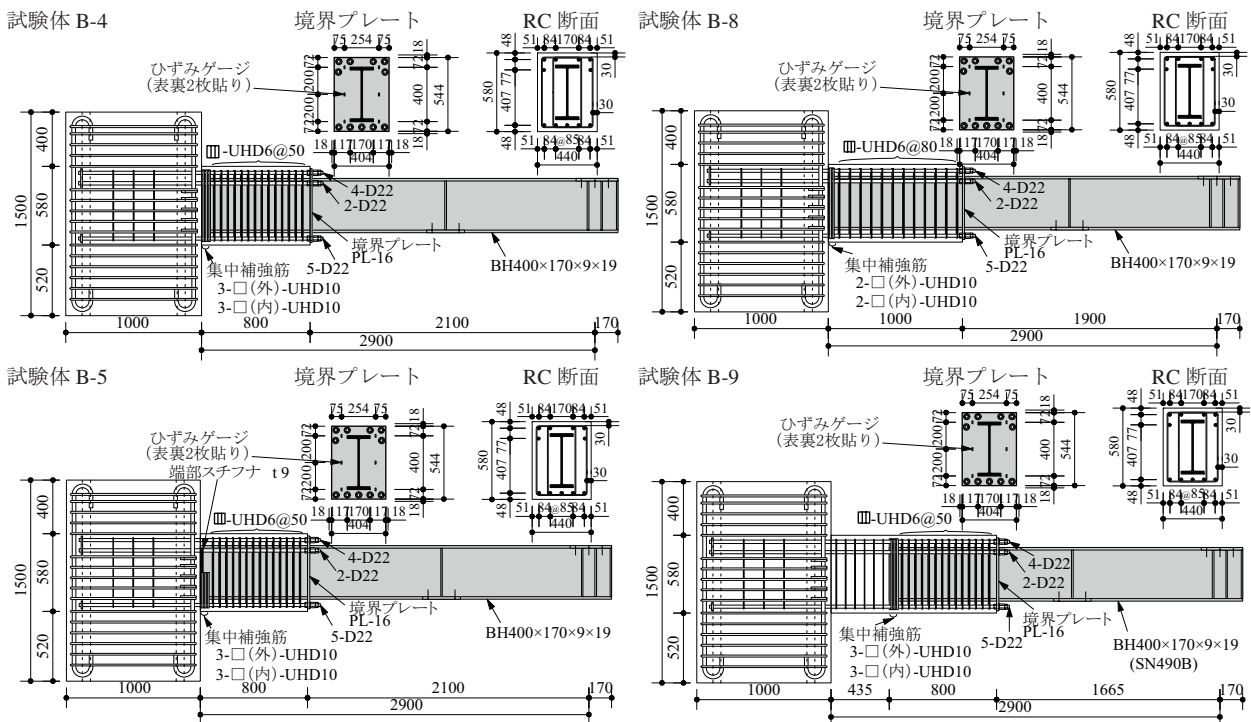


図-2 試験体の形状と配筋

と S 部材の溶接接合に拠っていることを考慮すると、溶接を排しても境界プレートは条件 i) の「RC 区間主筋の材軸直交方向の拘束」の満足に寄与すると考えられる。一方、溶接を排することでプレートを介した S と RC の力学的な一体性がなくなり、RC 区間鼻先位置の存在曲げモーメントは RC に負担されなくなる（全て S 部材が負担する）と考えられるが、この時の曲げモーメント分布は理論上、既往の力学モデル<sup>3)</sup>と同様図-1(c) になるため、RC 区間に従来以上のせん断補強が求められることはないと予測される。また、S 部材の RC からの抜出しへの対応としても、従来通り埋込み区間の S 部材終端位置にアンカー用の端部スチフナを設ける<sup>2)</sup>等を採用できると考えると、製作上の加工性や作業性、経済性等も加味すれば、境界プレートを有する複合構造梁には

溶接を排しても十分な有用性を期待できると思われる。

本論文は以上の考え方から実施された、境界プレートと S 部材の溶接接合を排した複合構造梁（以下、本複合構造梁）に関する構造実験について述べるものである。実験結果の精査によって、曲げモーメント分布が既往の力学モデル<sup>3)</sup>と同様となることから、RC 区間に従来以上のせん断補強を要しないこと、また境界プレートが「支圧力の負担要素」として十分安全側に機能することを確認することを主たる目的としている。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

表-1 に試験体一覧、図-2 に各試験体の形状と配筋を示す。試験体は全 4 体で、片持ち形式の梁となっており、

表-2 コンクリートの材料試験結果

試験体名	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 (-)	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )
B-4	37.0	22,200	0.141	3.22
B-5	34.5	21,300	0.137	3.05
B-8	39.4	23,000	0.146	3.38
B-9	38.9	22,900	0.144	3.35

表-3 鉄筋の材料試験結果

試験体名	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	破断強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破断伸び (%)
D22 (SD490)	546	193,000	712	-
D10 (SHD685)	837	216,000	996	-
D6 (SHD685)	710	163,000	923	10.9
D6 (SD295A)	341	190,000	523	18.5

表-4 鋼材の材料試験結果

試験体名	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	破断強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破断伸び (%)
t=19	397	212,000	540	47.6
t=16	390	212,000	528	46.0
t=9	398	208,000	544	36.7

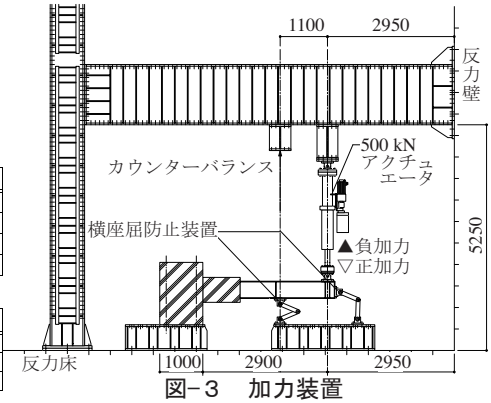


図-3 加力装置

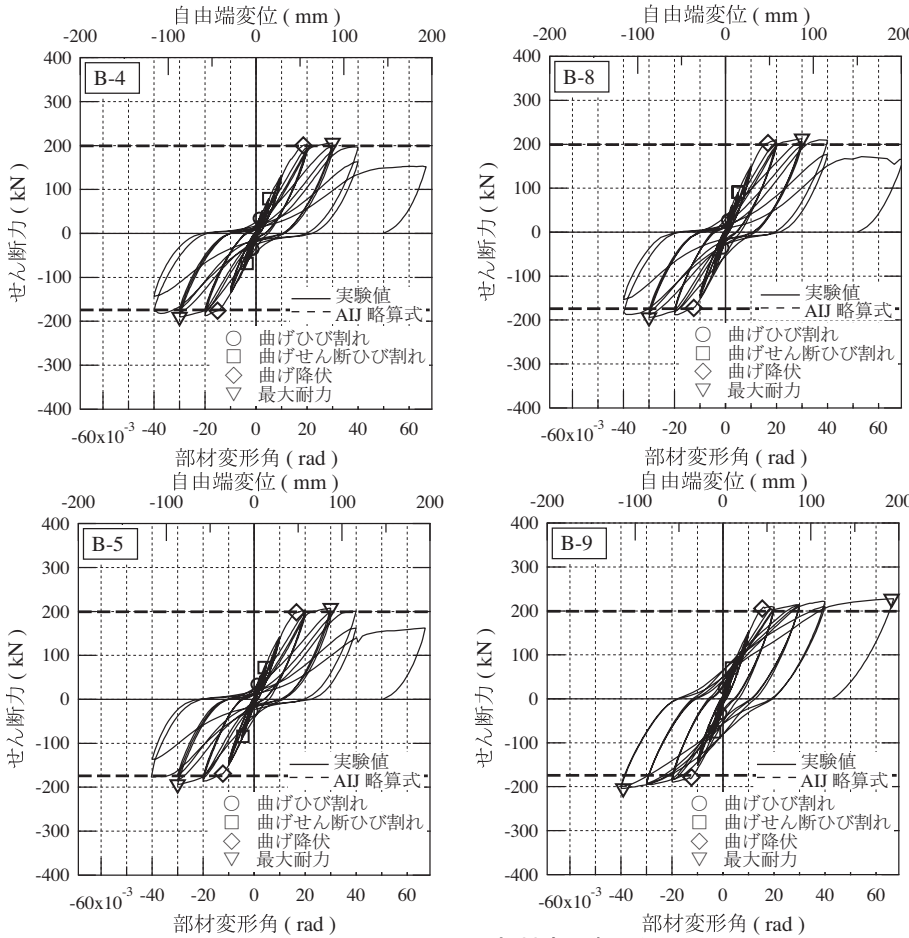


図-4 せん断力-部材変形角関係

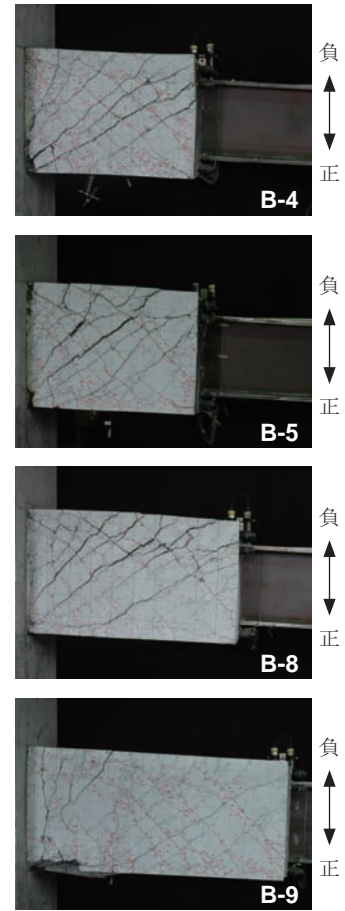


写真-1 最終破壊状況

表-5 実験結果一覧

試験体	曲げひび割れ発生時				曲げせん断ひび割れ発生時				曲げ降伏時			
	R(×10 <sup>-3</sup> rad)		耐力 (kN)		R(×10 <sup>-3</sup> rad)		耐力 (kN)		R(×10 <sup>-3</sup> rad)		耐力 (kN)	
	正載荷	負載荷	正載荷	負載荷	正載荷	負載荷	正載荷	負載荷	正載荷	負載荷	正載荷	負載荷
B-4	1.20	1.30	34.36	35.98	5.00	3.60	79.31	68.48	18.53	15.10	200.30	175.69
B-5	1.20	0.90	34.11	26.27	3.90	4.40	72.21	84.16	16.55	12.31	198.00	169.00
B-8	0.80	0.80	27.14	24.03	5.00	4.00	90.89	90.14	16.68	12.50	202.56	172.31
B-9	0.60	0.90	24.28	32.74	3.30	3.40	70.09	75.07	15.39	12.17	205.67	178.53

いずれも RC 区間スタブ面での曲げ降伏を前提として設計されている。境界プレートは 1 枚の鋼板を RC 区間小口面にて S 部材断面形状に合わせてくり抜き、RC 区間の主筋にナットで締結されている。

これら 4 体の試験体の共通因子は、せん断スパン (2900mm)、S 部材の断面、RC 区間の断面外形、主筋の配置である。基準試験体は、RC 区間の長さ  $l_c$  と S 部材の埋込み長さ  $l_b$  を  $2.0D$  ( $D$ : S 部材の梁せい) とし、

S 部材の終端を切り放しとした試験体 B-4 である。

B-4 に対して他 3 体に設けた変動因子は次のようになる。B-5 は、S 部材の RC 区間からの抜き出し防止のため、S 部材埋込み終端に四角いスチフナを設けた。全試験体中、この位置にスチフナを有するのは B-5 のみである。

B-8 は、 $l_b$  を B-4 の 1.25 倍の  $2.5D$  とした。これは、埋込み形式の複合構造梁では、S 部材が埋込まれる RC 区間が長いほど同区間における RC の曲げモーメント勾

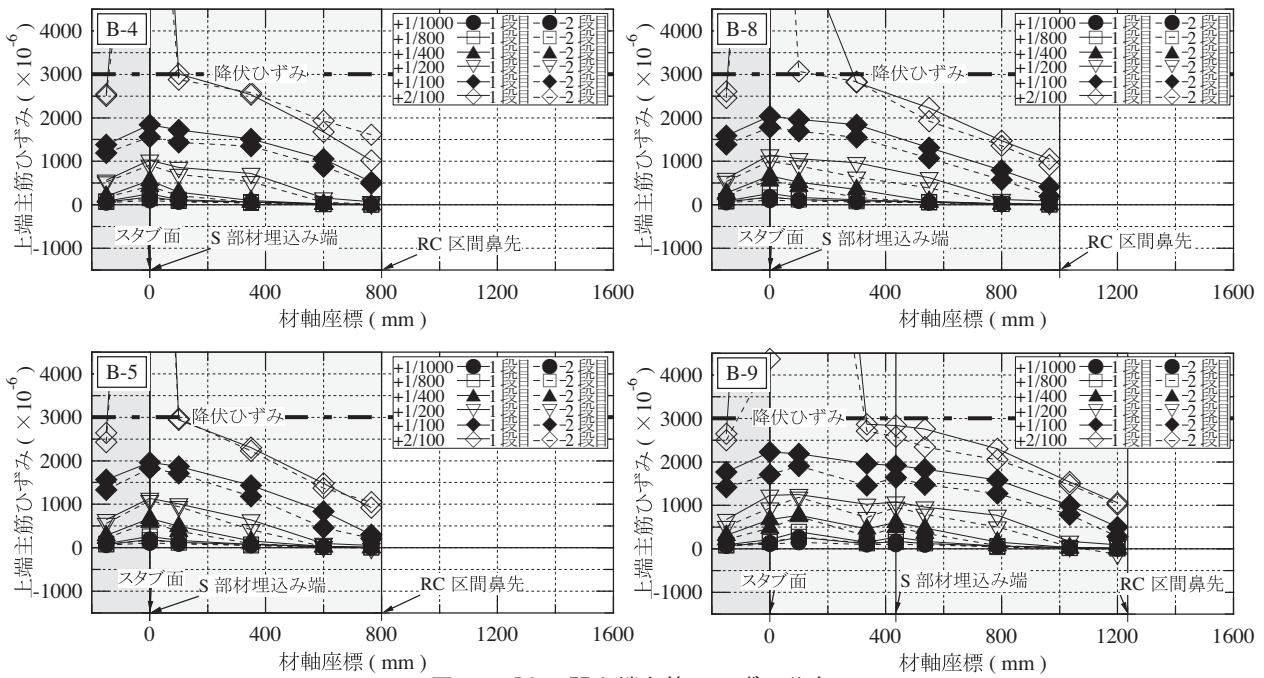


図-5 RC 区間上端主筋のひずみ分布

配が緩やかになり、負担せん断力が小さくなる<sup>3)</sup>こと(図-1(c))による影響について考察するための試験体である。

B-9はRC区間のスタブ面-境界プレート間距離 ${}_n l$ をB-4より435 mm伸ばして1235 mmとしているが、S部材の埋込み長さはB-4およびB-5と同じ $2.0D$ である。すなわち、他3試験体との差異はS部材が埋込まれていない純RC区間( ${}_n l - {}_s l_b = 0.75 {}_n l$ : RC梁において塑性ヒンジ領域が仮定される長さ)が存在することである。なお、せん断スパンが全試験体で共通であることから、B-8、B-9では ${}_s l_n$ がB-4、B-5より短くなっている。

これら試験体に用いた材料の試験結果は表-2～表-4に示す通りであった。

## 2.2 実験方法

図-3に加力装置を示す。S部材に横座屈防止装置を設置の上、500 kNアクチュエータで試験体の自由端に正負交番の静的漸増繰返し荷重を作用させた。加力は自由端の変位制御とした。以後、自由端の変位 $\delta$ を試験体のせん断スパンで除した値を部材変形角 $R(= \delta / 2900)$ とする。

## 3. 実験結果

### 3.1 せん断力-部材変形角関係

図-4に各試験体のせん断力-部材変形角関係、表-5に実験結果一覧を示す。写真-1は各試験体の最終破壊状況である。

まず、図-4より、全ての試験体が曲げひび割れ発生後、想定通りRC区間スタブ面での曲げ降伏の破壊形式となっていることが分かる。試験体の降伏耐力は、図中太線で示した降伏モーメントの略算式<sup>4)</sup>より算出した曲げ降伏耐力と良い対応を示している。ただし、B-4、B-5、

B-8では最大耐力到達後の大変形領域で若干の耐力低下が見られた。

次に、B-4を基準にして他3体の試験体において破壊経過に及ぼす各変動因子の影響を考察する。

S部材の埋込み終端にスチフナを有するB-5は、B-4とほぼ同様な挙動を呈した。つまり、B-4はS部材のRC区間への定着に関して、埋込み終端にスチフナを有する既往の複合構造梁<sup>2)</sup>と同等の性能を有していると考えられる。

${}_s l_b$ を $2.5 {}_s D$ とした試験体B-8では、B-5同様にB-4と同様な挙動を呈した。B-4、B-5、B-8において同様の耐力低下が見られている本実験の結果は、本複合構造梁に見られる曲げ降伏後の耐力低下に、 ${}_s l_n$ が及ぼす影響が僅少であることを示唆するものと考えられる。

${}_n l = 1235$  mmとすることで唯一純RC区間を有することとなったB-9も前記のとおり他3試験体と同様な挙動を示したが、この試験体のみ大変形領域における耐力低下は見られなかった。これは、B-9では ${}_n l$ の大規模な延伸に伴って ${}_s l_n$ が著しく短くなっていることで、図-1(c)においてRC区間鼻先位置における存在曲げモーメントが小さくなり、これに伴ってS部材埋込み区間におけるRCへの入力せん断力 ${}_n Q$ が小さくなったことから、RCのせん断損傷が他3試験体に比べて少なかったことに拠ると考えられる。

### 3.2 RC区間主筋のひずみ分布

図-5は正加力下における引張側のRC区間の上端主筋ひずみ分布である。全試験体を通してRC区間鼻先からスタブ面にかけて主筋のひずみは直線的に漸増し、スタブ面において最大となる傾向が見られる。また、本複合構造梁では、境界プレートとS部材の溶接を排し



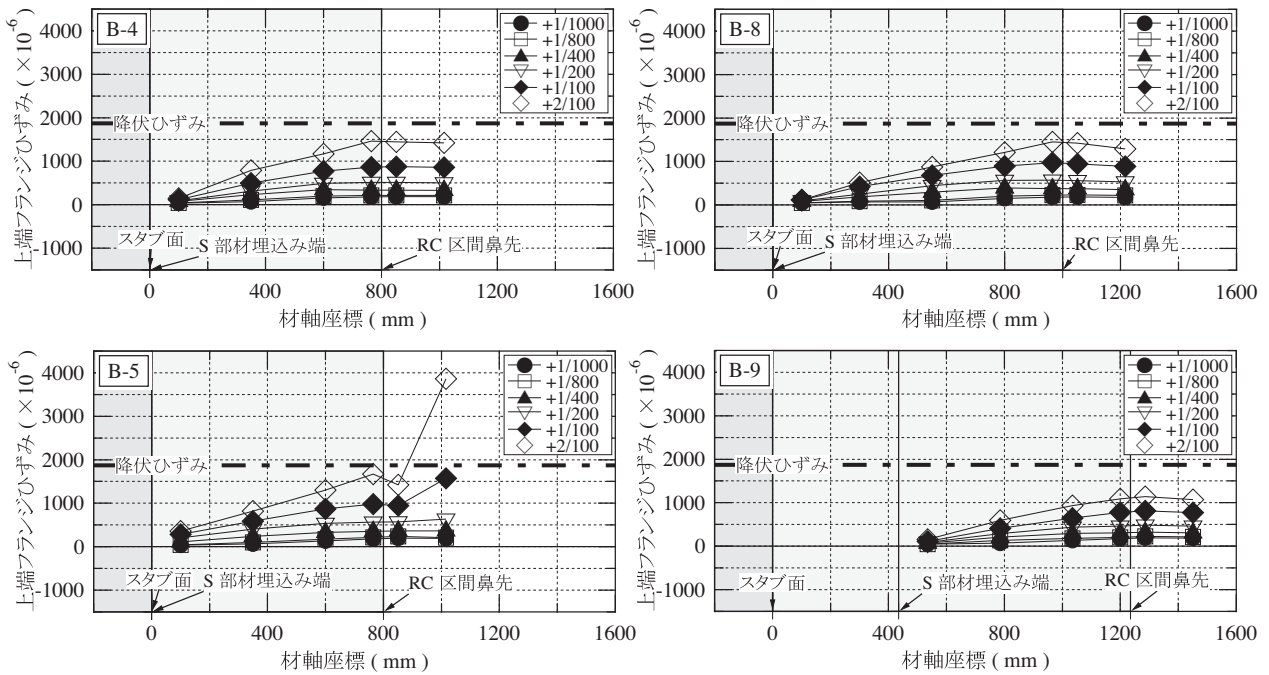


図-6 S 区間の上端フランジひずみ分布

たことで RC 区間鼻先位置における主筋の曲げモーメント負担が溶接タイプの複合構造梁<sup>1)</sup>より小さくなっており、特に  $R=1/200$  までは RC 区間鼻先位置の主筋ひずみが 0 を保持している点で溶接タイプ<sup>1)</sup>と異なる。このことから、RC 区間鼻先位置における存在曲げモーメントの RC の負担分は小変形領域において 0 を保つため、文献 3) と同様この位置における  $M$  図上の段差は生じないと考えられる。なお、純 RC 区間を有する B-9 においても、他 3 試験体と同様の傾向であった。

### 3.3 S 部材フランジのひずみ分布

図-6 は正加力下における接合部近傍の S 部材の上端フランジの材軸方向のひずみ分布である。

図より、いずれの試験体においても、フランジのひずみはその値が最大となる S 部材埋込み始端から埋込み終端の 0 に向かって直線的に減少する傾向が見られた。

前節および本節で述べた「RC 区間主筋のひずみ分布」と「S 部材フランジのひずみ分布」から想定される本複合構造梁における RC 区間の S 部分の負担曲げモーメントは、RC 区間鼻先近傍から S 埋込み終端に向かって直線的に漸減する文献 3) の傾向と同様の分布となると考えられる。これより、RC 区間のせん断補強が既往の複合構造梁以上になることは無いと判断される。

### 3.4 境界プレートの効果

S 部材との溶接を排しても境界プレートに期待される機能について述べる。具体的には、「RC からの支圧力の負担要素としての役割を担う S 部材埋込み終端の集中補強筋を含めたせん断補強筋の負担力分布」と「境界プレートの面内ひずみ履歴」から、プレートの面内剛性による支圧力の負担事実の有無について検証を試みる。

図-7 に RC 区間のせん断補強筋のひずみに表-3 に示すヤング係数および断面積を乗じて算定した補強筋の負担力分布<sup>5)</sup>を示す。降伏時負担力はせん断補強筋の降伏強度(表-3)に断面積を乗じたものである。全試験体を通して、S 部材埋込み終端において集中補強筋の負担力が大きいことが窺え、ここに、この位置における集中補強筋が RC からの支圧力を負担するとしている文献 3) との整合を見る。これに対して、S 部材埋込み始端のせん断補強筋は負担力が小さく、この点において文献 3) での想定からの乖離が認められるが、このことは S 部材埋込み始端側での支圧力の負担要素としてせん断補強筋以外のものが存在していたことを示唆するものであり、本複合構造梁においては、その負担要素が境界プレートであったと想定される。以下で境界プレートの面内ひずみを考察することで境界プレートの効果について確認する。

図-8 は境界プレートの面内ひずみ(図-2 中、矢印にて指示した位置)とせん断力の関係である。図中、一点鎖線で示す直線は境界プレートの降伏ひずみである。全試験体において、境界プレートは終始引張ひずみ下であり、確かに面内引張力を負担していたことが窺える。ただし、いずれのひずみも降伏ひずみに至ることなく弾性範囲内に留まっている。このことから、境界プレートは S 部材埋込み始端の支圧力を、その剛性を以て十分な安全率の下に負担していたということが分かり、境界プレートがその役割を十分果たしていたことが確認できた。

## 4. まとめ

RC 区間と S 区間の境界に設けた鋼製プレートと S 部材の溶接を排した複合構造梁について、全 4 体の試験体

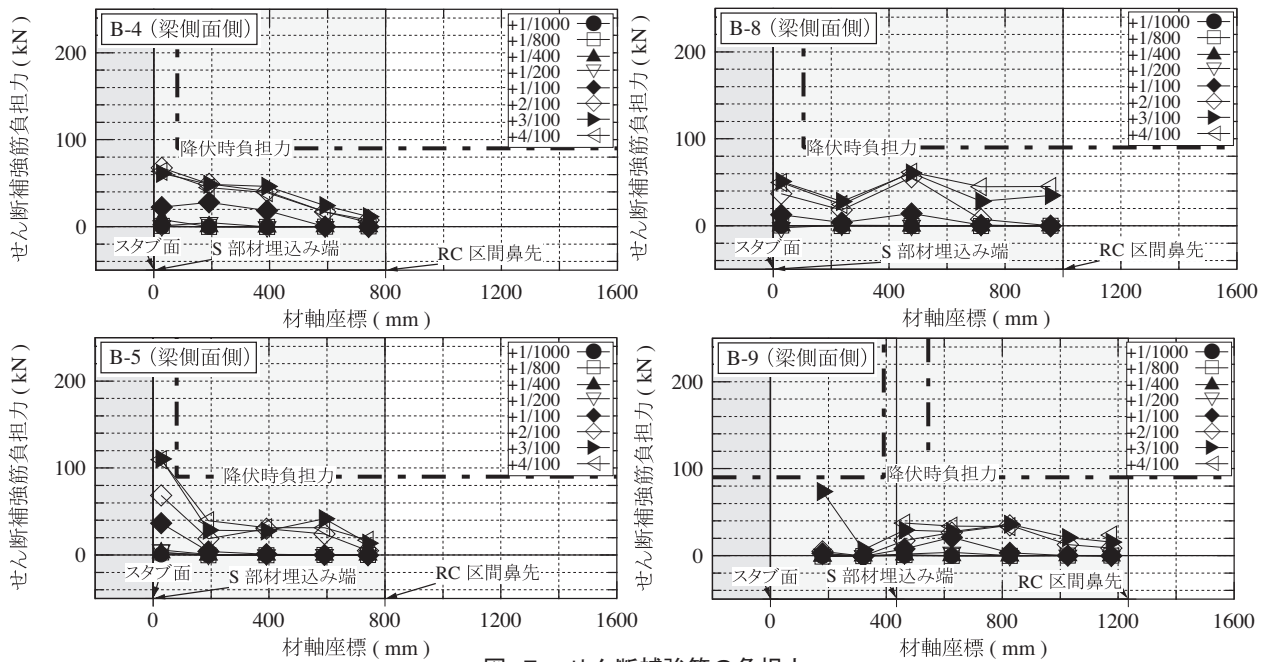


図-7 せん断補強筋の負担力

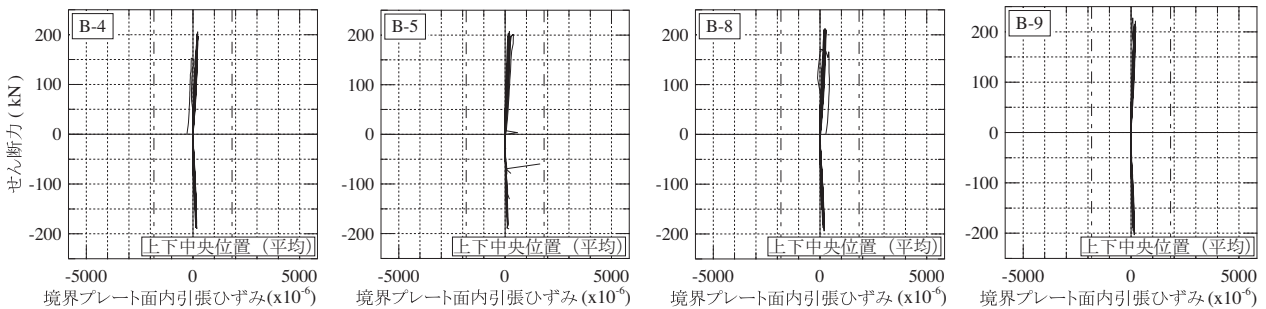


図-8 境界プレートの面内ひずみ履歴

に対して構造実験を実施し、その結果を報告するとともに、境界プレートの導入効果について言及した。本論文で得られた結論を以下に示す。

- 1) B-4におけるS部材のRC区間への定着性能は、S部材の埋込み終端にスチフナを有する既往の複合構造梁と同等なものであった。
- 2) 本複合構造梁を構成するS部材の曲げモーメント負担は、RC区間鼻先位置における存在曲げモーメントを全て負担した後に、S部材埋込み終端でS部材の負担曲げモーメントが0となるように直線的に漸減する。したがって、この分布に伴ってRCに入力されるせん断力は文献3)に示されているものと同様となることから、RC区間に従来以上のせん断補強が求められることはないと考えられる。
- 3) 境界プレートはS部材との溶接を排しても、RCからの支圧力の負担要素として十分機能する。

以上のように本論文では、各変動因子が本複合構造梁の構造性能に及ぼす影響を定性的な範囲で述べたが、これを設計過程に定量的に反映させることで、より合理的な構造設計が可能となると考える。特に境界プレートに関しては、溶接を排したことで溶接タイプのそれほどの

集約的な機能を期待する必要がないことが明らかになったものの、生じる応力場は相応に複雑となると考えられるため、より慎重な対応が求められる。

#### 参考文献

- 1) 佐藤良介, 小澤潤治, 阪井由尚: 材端部鉄筋コンクリート造中央部鉄骨造で構成された埋込み形式の複合構造梁の構造性能, コンクリート工学年次論文集 No.34, Vol.2, pp.1171-1176, 2012
- 2) 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.73, Vol.631, pp.1673-1680, 2008.9
- 3) 日本建築学会: 鋼コンクリート構造接合部の応力伝達と抵抗機構, 2011.2
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010
- 5) 細井泰行, 都祭弘幸, 植木理枝子: 梁端部RC造・中央部S造とした複合梁の開発 その2 実験結果及び考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), C-I分冊, 構造III, pp.1225-1226, 2008