

論文 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

佐藤 良介*1・小澤 潤治*2・阪井 由尚*3

要旨: 材端部 RC 造中央部 S 造で構成された複合構造梁の構造性能について論じられている。このような複合構造梁を構築するにあたって、S 部材を材端部の RC 区間に埋込んで両者の応力伝達を図る場合、梁が負担するよりも大きなせん断力が埋込み区間の RC に入力されること等が問題となる。本論文は、これらの問題に合理的に対応するために提案された「S 区間と RC 区間の境界に鋼製プレートを配し、これを S 部材と溶接接合、RC 区間の主筋とナット接合した複合構造梁」の構造実験の結果について述べるものであり、プレートの導入効果に加え、S 部材埋込み区間長および RC 区間のせん断補強筋量の影響についても言及されている。

キーワード: 複合構造梁, 鋼コンクリート合成構造, 接合部, 応力伝達

1. はじめに

材端部が鉄筋コンクリート（以下、RC と略記）造で、中央部が鉄骨（以下、S と略記）造で構成された複合構造梁は、建築物の柱を剛性が高く圧縮に有利な RC 造で、梁を軽量で長スパン化に有利な S 造で構築できる力学的な合理性が古くから注目されているが¹⁾、昨今では更に、材端部 RC をプレキャスト化することによる工業化、架構に用いられる鋼材量の抑制によるコストダウン等、施工性や経済性の面での優位性にも期待が寄せられ、種々の構成方法が新たに提案されるようになってきている（例えば^{2)~4)}）。

一般に、鋼とコンクリートを組み合わせて構築される鋼コンクリート合成構造では、接合部における鋼とコンクリートの応力伝達が肝要となる⁵⁾。複合構造梁の構築にあつては更に、この応力伝達を「S 部材を材端部の RC に埋込む」ことで図る場合、「当該埋込み区間の RC に、梁が負担するよりも大きなせん断力が入力される」等、この仕様特有の問題が顕在化することが知られており⁵⁾、接合部には、応力伝達に加えてこれらの問題への対応も求められることになる。

そこで、この種の複合構造梁のより合理的な構築を目的に、新たな構成による複合構造梁の開発を試みた。本論文は、この複合構造梁の構造性能について述べるものであり、既往の代表的な複合構造梁を模したものを含めた全4体の試験体を対象に行った構造実験の結果に基づき、実用化のための課題を明らかにすることを目的としている。

2. 合理的な応力伝達を意図した複合構造梁の提案

複合構造梁の歴史は浅いものではなく、これまでにも種々の構成方法（例えば^{1)~4)}）が提案され、今日に到っている。

そこで、既往の複合構造梁について、主として鋼-コンクリート接合部における応力伝達の確保に着目して概観することで合理化のための課題を明らかにし、その解決を目的とした新たな複合構造梁の提案を試みる。

2.1 埋込み形式の複合構造梁の接合部に求められる力学的機能

図-1 に複合構造梁の模式的な外観を示す。同図-1 に見るように、複合構造梁には、外観上、材軸方向に連なった RC の区間と S の区間が存在するため、本論文では以後、この図に付したように、梁の材端部を RC 区間、中央部を S 区間と呼称していくことにする。複合構造梁を含めた鋼コンクリート合成構造に関しては、複合構造梁以外にも既に各種の構成方法が提案・実用化されているが、これら合成構造の応力伝達と抵抗機構について体系的にまとめられている既往の文献⁵⁾において、複合構造梁は、「1つの部材において、その構造形式が材軸方向で RC 造から S 造に変化する直列的な接合部」を有する構造として定義されている。直列的な接合部は更に、「埋込み形式」と「非埋込み形式」とに大別される⁵⁾が、前者の場合、RC 区間には、梁が負担するよりも大きなせん断力が入力される等、S 部材を埋込むことによって顕在化する問題が種々明らかにされている（例えば^{1)~3)}）。

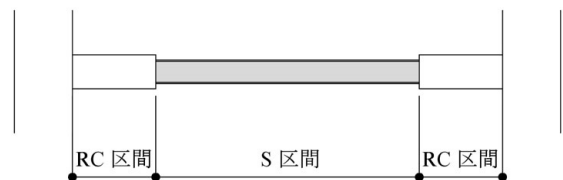


図-1 複合構造梁の外観

*1 東急建設（株） 技術研究所 基盤技術開発部 博士（工学）（正会員）
 *2 東急建設（株） 技術研究所 基盤技術開発部 工修
 *3 東急建設（株） 設計本部 構造設計部 博士（工学）（正会員）

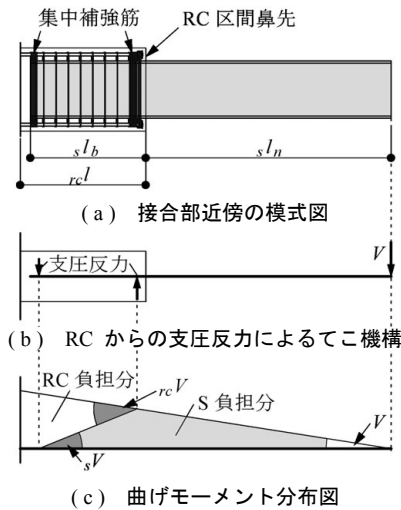


図-2 既往の複合構造梁の接合部近傍

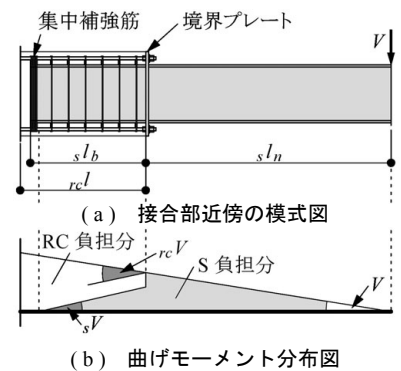


図-3 境界プレートを有する複合構造梁の接合部近傍

図-2 (a) に、既往の埋込み形式による複合構造梁の接合部近傍の構成を模式的に示す。なおこの図-2 (a) より明らかなように、埋込み形式の複合構造梁の RC 区間には、厳密には、断面が鉄骨鉄筋コンクリート (以下、SRC と略記する) 造となる区間と RC 造となる区間が存在し得るが、本論文では以降も図-1 での定義に従い、複合構造梁の材端部全体を RC 区間と呼称する。また図-2 (a) に示したように、RC 区間と S 区間の材軸上の境界を RC 区間の「鼻先」と呼び、鼻先から梁端までの区間長 (すなわち RC 区間の材軸方向長さ) を $r c l$ と定義する。更に、S 部材のうち、RC 区間に埋込まれる部位 (すなわち SRC 造断面を構成する部位) を「埋込み区間」と称し、その材軸方向長さを $s l_b$ とする。

図-2 (a) のような片持ち形式の複合構造梁の自由端にせん断力 V が作用した場合、そのせん断力およびこれに付随して生じる曲げモーメントの接合部における伝達は、「主に RC から S 部材への支圧反力によるてこ機構に拠る」とされており、その力学モデルを既往の文献⁵⁾ に倣って示すと、図-2 (b) および図-2 (c) のようになる。なお以後、このようにせん断力が作用する複合構造梁の S 部材について、その露出部の反曲点から鼻先までの長さを、図-2 (a) に示すように $s l_n$ と呼ぶ。

既往の埋込み形式の複合構造梁の多くは、このような力学モデルによる応力伝達を前提に接合部が構成されており、実際に梁を構築するために、その機能の確保を目的とした種々の構法が提案されている。

まず図-2 (b) に示したてこ機構は、既に述べたように RC から S 部材への支圧反力が起点となっていることから、これを確実に機能させるために、RC 区間が材軸直交方向に膨張して割裂き破壊に到らないような補強が必要になる。このため、たとえば図-2 (a) に示したように、RC 区間の主筋の材軸直交方向への拘束を意図して、支圧反力の作用点と想定される位置にせん断補強筋を集中的に配置する等の対応が見られている^{例えは1),2)}。

また曲げモーメントに関しては、図-2 (c) に示すように、S 部材が露出している $s l_n$ の区間では全てが S 部材によって負担されるが、RC 区間内では、S 部材埋込み区間において、これが RC と S の双方に分配される。この分配は、RC の負担分が、RC 区間鼻先近傍において零となり、埋込み区間終端近傍において複合構造梁全体の負担曲げモーメントに一致するまで直線的に増加すると仮定されている⁵⁾が、この場合、同図-2 (c) に示した勾配 $r c V$ および $s V$ が当該部分の RC と S に入力されるせん断力となる。図-2 (c) より明らかなように、この $r c V$ および $s V$ は、複合構造梁が部材全体で負担しているせん断力 V よりも大きな値を取り得るため、とりわけ RC としてのせん断補強には慎重な対応が見られており、この種の複合構造梁の開発における最大の問題として取り扱われているようである。

更に、以上に見てきた力学モデルは、複合構造梁を構成する S 造、SRC 造、RC 造のそれぞれの断面が確実に機能することを前提に成立している⁵⁾ため、たとえば図-2 (b) のような状況にあって、せん断力 V の漸増に伴って S 部材が抜出するような状態は想定されていない。したがって、S 部材の定着の確保も重視されており、たとえば埋込み区間の S 部材に抜出し防止用のスチフナを設ける等の対応が見られている²⁾。

2.2 合理的な接合部の提案

以上に示してきたように、埋込み形式の複合構造梁の接合部を構築する際には、i) RC からの支圧反力によるてこ機構、ii) 埋込み区間にて割り増される RC への入力せん断力 $r c V$ に対する適切なせん断設計、iii) 抜出し等を防止するための S 部材の定着、の三条件を満足することが特に重要となる。

そこで、これら三条件をより効率的に満たすことを目的に、図-3 (a) に示す新たな構成の埋込み形式の複合構造梁 (以下、「本構法」と呼称する) を提案する。本構法の最大の特徴は、RC 区間鼻先の小口に鋼製プレート (以下、「境界プレート」と呼称する) が配されていることに

表-1 試験体一覧

試験体名		A	B-1	B-2	B-3	
断面	RC	断面外形 $r_c B \times r_c D$ (mm)	440 × 580			
		主筋 上下対称	1段目 2段目			
		有効せい d (mm)	520			
		引張鉄筋比 p_t (%)	1.13			
		断面形状 (mm) ($r_c D$: 梁せい)	BH-400 × 175 × 9 × 16			
	S	SN 490 B				
せん断スパン:スタブ面-載荷点間距離(mm)		2900				
RC 部長さ:スタブ面-境界プレート間距離 $r_c l$ (mm)		870 (1.5 $r_c D$)				
境界プレート厚さ (mm)		無	19			
S 部材埋込み長さ $s_p l_b$ (mm)		800 (2.0 $s_p D$)			600 (1.5 $s_p D$)	
RC 部せん断補強筋	埋込み区間始端側集中補強 (SHD 685)	6 × 4 - D 6	-			
	埋込み区間	レイアウト (SHD 685)	4 - D 6 @ 50	4 - D 6 @ 50	4 - D 6 @ 85	4 - D 6 @ 50
		せん断補強筋比 p_w (%)	0.58	0.58	0.34	0.58
	埋込み区間終端側集中補強 (SHD 685)	4 × 4 - D6			5 × 4 - D6	

あり,この境界プレートは, RC 区間の主筋とはナット接合, S 部材とは溶接接合によって一体化されているものとする。この境界プレートの導入により本構法に期待される利点を先の三条件に対照させて示すと,次のようになる。

まず, RC 区間の主筋がナットによって境界プレートに緊結されていることから,先の条件 i) に求められる「RC 区間の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十分に確保されると考えられる。すなわち本境界プレートは,既往の複合構造梁で見られてきた図-2 (a) に示す集中補強筋のうち, S 部材埋込み区間始端側に替わる機能を果たすと期待される。

またこのように RC 区間の主筋とナット接合された境界プレートが,溶接によって S 部材とも一体化されていることから,鼻先位置の存在曲げモーメントの一部は, RC によって負担されると考えられる。すなわち,本構法による複合構造梁に図-2 と同様のせん断力 V が作用した場合の曲げモーメント分布を既往の力学モデル⁵⁾に準じて示すと,図-3 (b) のようになると予想される。この図では, S 部材が負担する曲げモーメント分布に, RC 区間鼻先位置にて不連続点が形成されているが,これが境界プレートによる RC への伝達分に相当する。この仮定が成立する場合, RC 区間への入力せん断力 $r_c V$ が先の図-2 (c) に比して小さくなることは明らかであり,この点において,せん断補強量の低減を期待できる。

更に,このように RC 区間と S 部材が境界プレートを介して一体化されていることは,せん断力 V の作用に対する S 部材の抜出し防止にも寄与し得るため,これは,先の条件 iii) の満足にもつながると考えられる。

3. 構造実験による性能確認

本構法による複合構造梁の構造性能を確認するために,構造実験を行った。ここでは,実験の概要に触れた後に得られた結果を示し,本構法の可能性について若干の検討を加える。

3.1 実験概要

(1) 試験体

表-1 に試験体一覧を,図-4 に試験体の形状と配筋を示す。試験体は全4体であり,いずれもせん断スパンが

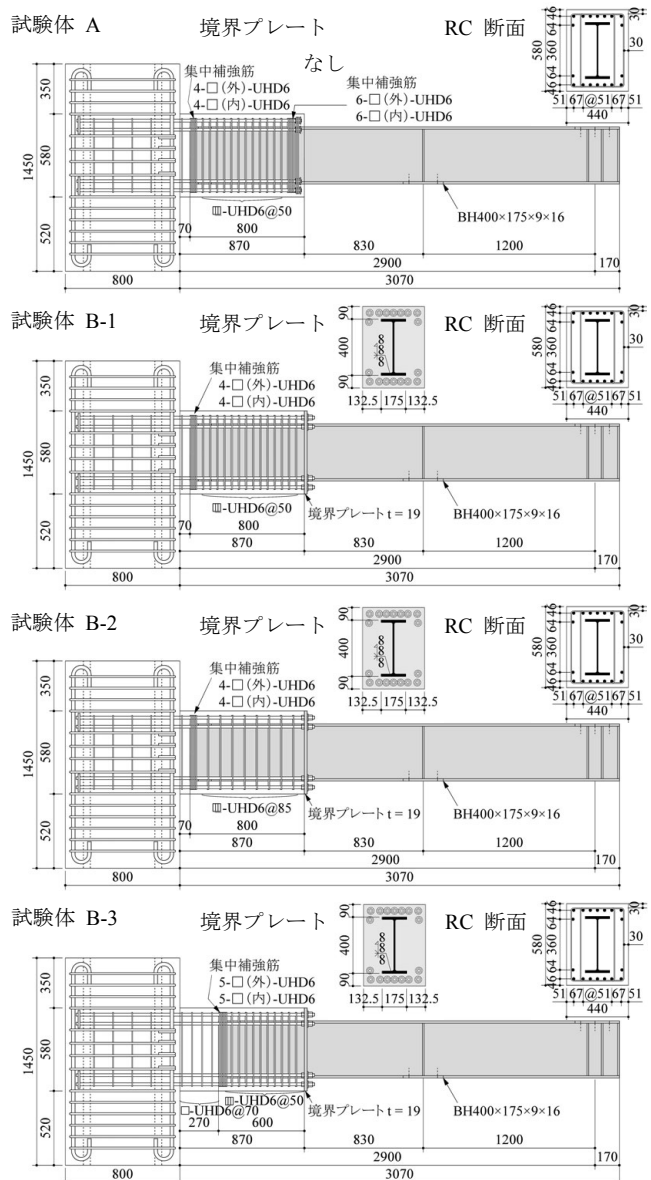


図-4 試験体の形状と配筋

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 ²)	ヤング係数(N/mm ²)	ポアソン比(-)	割裂強度(N/mm ²)
A	33.9	22,200	0.155	3.16
B-1	39.9	23,900	0.163	3.31
B-2	41.2	24,400	0.163	3.38
B-3	42.8	24,900	0.163	3.45

表-3 鉄筋の材料試験結果

鉄筋種類	降伏強度(N/mm ²)	ヤング係数(N/mm ²)	破断強度(N/mm ²)	破断伸び(%)
D19	477	190,000	649	17.2
D6	702	168,000	1160	11.0

表-4 鋼材の材料試験結果

厚(mm)	降伏強度(N/mm ²)	ヤング係数(N/mm ²)	破断強度(N/mm ²)	破断伸び(%)
9	387	203,000	551	36.0
16	411	213,000	532	43.2
19	412	212,000	538	45.7

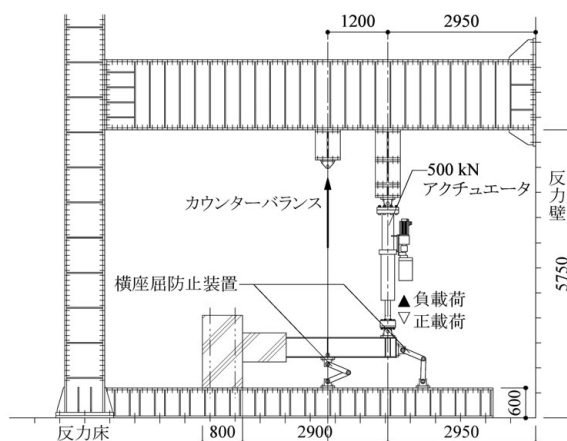


図-5 加力装置

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			
	$R (\times 10^{-3} \text{ rad})$		耐力 (kN)		$R (\times 10^{-3} \text{ rad})$		耐力 (kN)		$R (\times 10^{-3} \text{ rad})$		耐力 (kN)	
	正荷	負荷	正荷	負荷	正荷	負荷	正荷	負荷	正荷	負荷	正荷	負荷
A	0.97	2.18	26.21	50.05	5.06	4.14	73.21	76.07	-	-	-	-
B-1	1.00	1.10	31.00	35.23	4.83	4.11	101.59	97.11	12.67	10.42	208.04	199.70
B-2	1.00	1.00	30.75	31.87	5.00	5.01	104.33	110.81	13.36	9.94	209.78	194.72
B-3	0.50	0.77	15.44	24.03	5.01	4.01	99.60	90.14	13.66	11.37	210.41	200.69

2900 mm の片持ち形式の梁となっている。これら4体は、S 部材の断面、RC 区間の断面外形、主筋の配置および材軸方向長さ ℓ_c を共通因子としており、 ℓ_c と RC 区間の梁せい $\ell_c D$ の関係は、 $\ell_c D = 1.5 \ell_c D = 870 \text{ mm}$ となっている。

第一の変動因子は境界プレートの有無であり、境界プレートのない試験体 A に対し、B-1、B-2 および B-3 では、RC 区間小口全面に、S 部材断面に合わせてくり抜かれ、K 形開先を設けて S 部材と部分溶込み溶接された 19 mm 厚の鋼板が、境界プレートとして主筋にナットで締結されている。なおこれらの3体は、境界プレートが集中補強筋の機能を兼ねることが期待されるため、試験体 A とは異なり、埋込み区間始端側の集中補強筋が排されている。第二の変動因子は S 部材の埋込み区間長さ ℓ_b であり、S 部材の梁せい $\ell_b D$ との関係が、試験体 A、B-1、B-2 では $\ell_b D = 2.0 \ell_b D = 800 \text{ mm}$ 、B-3 では $\ell_b D = 1.5 \ell_b D = 600 \text{ mm}$ となっている。第三の変動因子は RC 区間のせん断補強筋量であり、埋込み区間におけるせん断補強筋比 (S 部材埋込み区間においても S 部材断面分を差し引くことなく、RC 断面がすべて有効であるとして算出) が、試験体 A、B-1 ならびに B-3 で 0.58%、B-2 で 0.34% となるようにせん断補強筋が配されている。なお境界プレートを配した3体の試験体はいずれも、RC 区間のスタブ面における曲げ降伏の先行が想定されている。またこれらの試験体に用いた各種材料の材料試験の結果は、表-2～表-4に示すとおりであった。

(2) 実験方法

図-5に加力装置を示す。S 部材に横座屈防止装置を設置のうえ、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加えた。加力は自由端の

変位制御としたが、以後、この自由端変位 δ 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。

3.2 実験結果

全4体の試験体への加力によって得られた結果について、まずは破壊に到るまでの経過を比較して各変動因子の影響を概括した後に、その間の変形挙動等を精査して境界プレートの導入効果に関する検討を行う。

(1) 破壊経過に及ぼす各変動因子の影響

表-5に実験結果一覧を、図-6に各試験体のせん断力-部材変形角関係を示す。4体の試験体の破壊形式が、境界プレートの有無によって大きく異なる結果となった。すなわち、境界プレートのない試験体 A が曲げ降伏前に RC 区間のせん断破壊に到って耐力低下した一方で、本構法による3体の試験体は、 $R = \pm 1/100$ をやや超過した変形時に想定通りスタブ面において曲げ降伏を見せた。図-6には、RC 区間スタブ面断面の降伏モーメントを鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説⁶⁾の略算式によって求め、これをせん断スパンで除した値も示してあるが、この計算値は、境界プレートを有する3体の曲げ降伏時耐力との良好な一致を見せている。

一方、曲げ破壊した3体の部材剛性には大きな差異がなく、本実験の範囲において、S 部材埋込み区間の長さ ℓ_b が部材の挙動に及ぼす影響は僅少であった。

同様の傾向は、第三の変動因子であるせん断補強量に関しても見られ、境界プレートを有する試験体の破壊経過に、せん断補強量の多寡による著しい相違は表れなかった。

(2) 境界プレートの導入効果に関する検討

写真-1に、各試験体における RC 区間の最終破壊状況を示す。これらの写真からは、境界プレートが配され

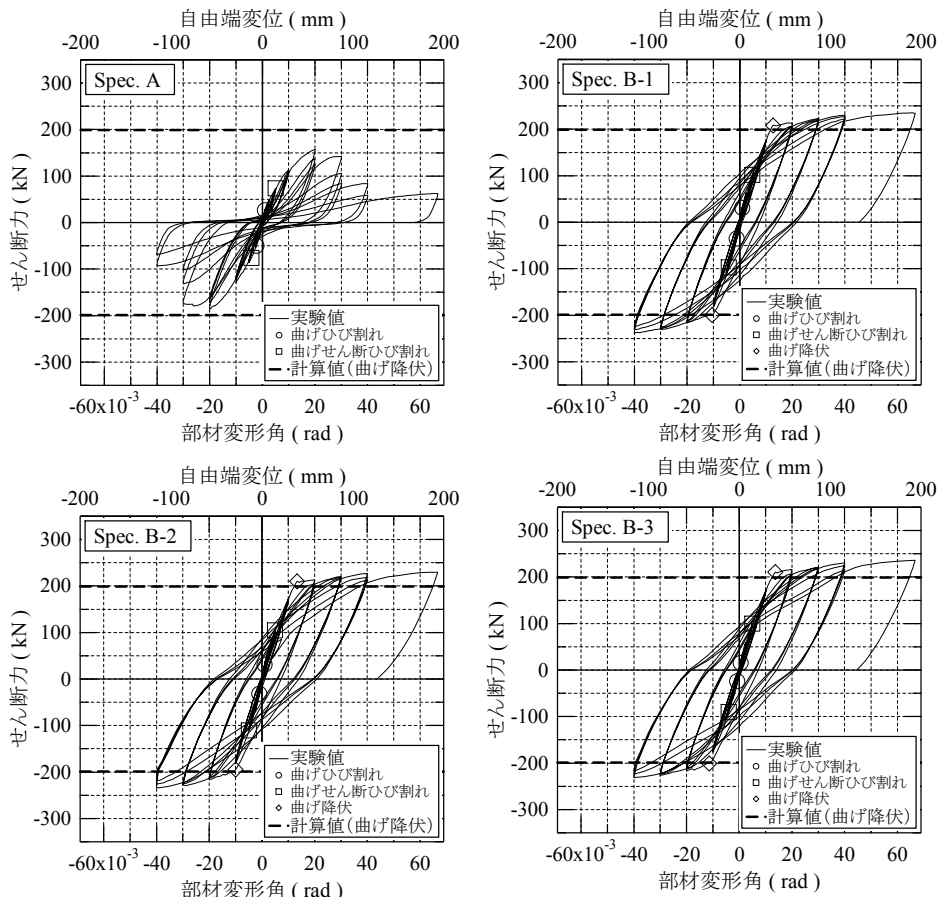


図-6 せん断力-部材変形角関係

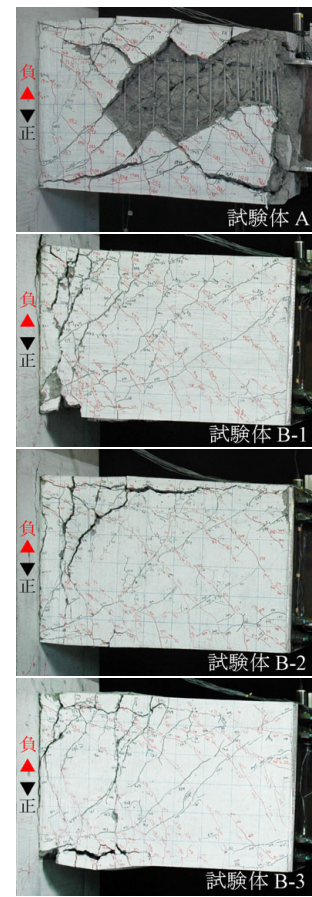


写真-1 最終破壊状況

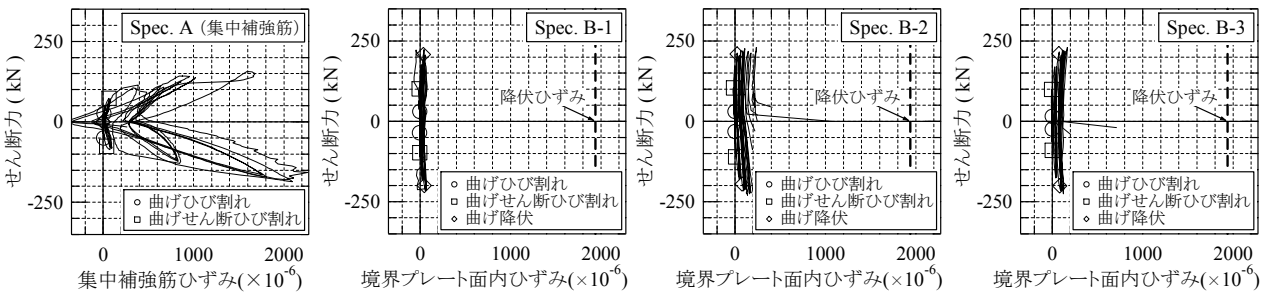


図-7 集中補強筋 (S 部材埋込み始端側) ならびに境界プレートのひずみ履歴

た3体の試験体の RC 区間鼻先近傍の損傷が比較的軽微に止まっていることを読み取ることができる。すなわちこの近傍における RC は、材軸直交方向に割裂かれることなく終始支圧反力を保っていたと推測され、これより、境界プレートが、埋込み始端側の集中補強筋の機能を十分に果たしていたことを窺い知ることができる。またこのことは、図-7に示した集中補強筋ならびに境界プレートのひずみ履歴の差異としても確かに表れている。

続いて図-8に、各試験体の RC 区間の上端筋について、これが引張主筋となる正方向処女加力時におけるひずみ分布の推移を示す。これらの図では、いずれの試験体においても RC 区間鼻先からスタブ面に向かってひずみが増大しているが、特に境界プレートのない試験体 A では、鼻先直近のひずみが終始ほぼ零に保たれており、RC の負担曲げモーメントが、図-2 (c) に示した既

往の力学モデル⁵⁾通りにこの近傍から滑らかな漸増を始めていたことが分かる。一方、境界プレートを有する3体では、主筋のひずみが鼻先直近において明らかな値を有しており、RC の負担曲げモーメントが、図-3 (b) にて想定したように不連続的に生じていたことが推測される。既に述べたように、この不連続分は、埋込み区間の RC への入力せん断力 v を低減し得るものであるが、前掲表-5および図-6にて示した曲げせん断ひび割れ発生時耐力が、境界プレートのない試験体 A において他の試験体よりも特に小さい値として得られている事実はこの仮定と符合しており、境界プレートが想定通りに機能していたことを示唆するものと考えられる。

最後に図-9に、S 部材の RC 区間鼻先からの相対的な拔出し変位の正方向処女加力時における推移を示す。これらの図からは、境界プレートの導入によって S 部材の拔出

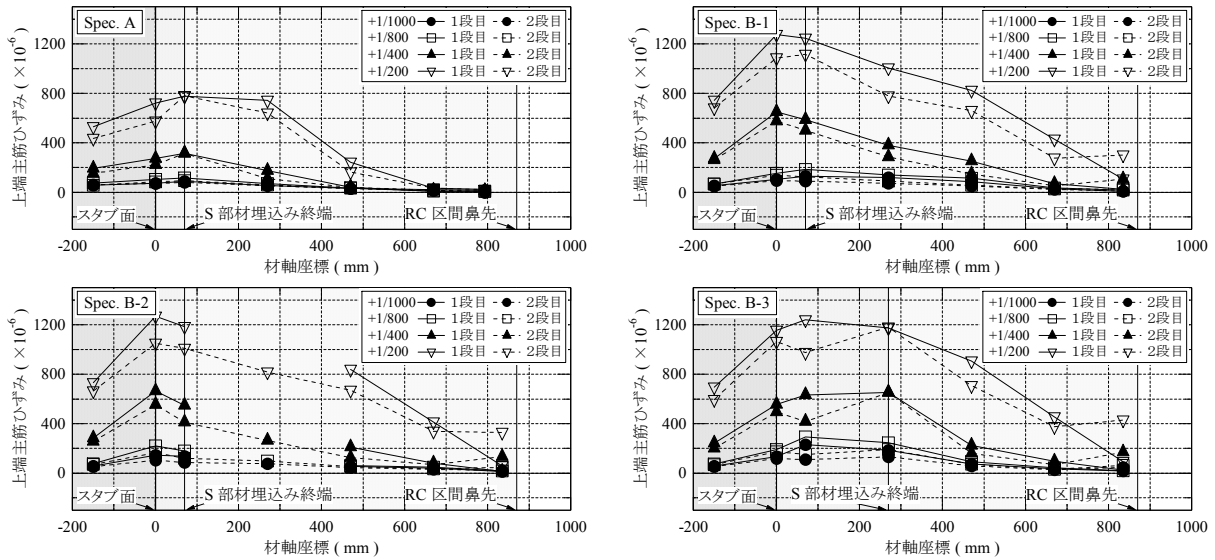


図-8 RC 区間の引張主筋のひずみ分布 (正方向処女加力時)

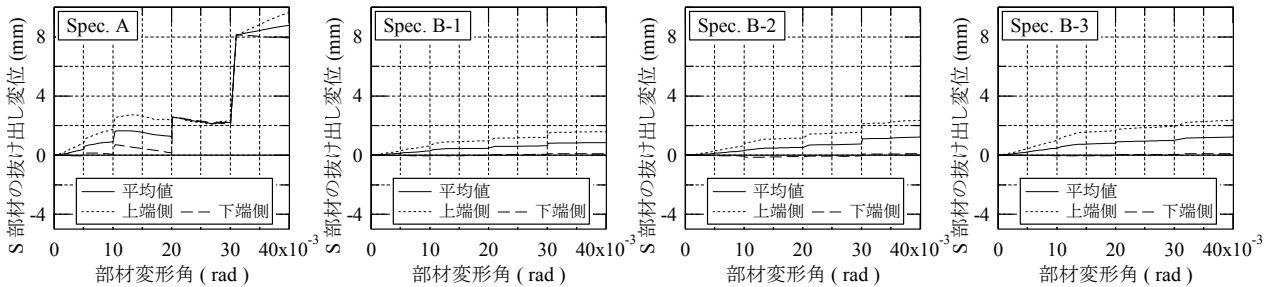


図-9 S 部材の抜け出し変位の推移 (正方向処女加力時)

しが著しく抑制されていることを読み取ることができ、この点でも境界プレートの有効性を確認できる結果となった。

量的に評価し、プレートの厚さ等を適切に設計することが不可欠になると考えられる。

4. まとめ

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をより合理的に構築することを目的に、新たな構成方法を提案し、その構造性能を確認する実験を行った。本複合構造梁は、RC 区間と S 区間との境界に鋼製のプレートを配し、これを RC 区間の主筋および S 部材と一体化させることによって「この種の複合構造梁の接合部に求められる機能の合理的な確保」を試みたものであり、実験は、主としてプレートの有無による複合構造梁の構造性能の比較を意図して全 4 体の試験体を対象に行われた。

実験の結果、本複合構造梁において、導入されたプレートが想定通り機能すること、また導入に際して既往の力学モデル⁵⁾をもとに設けた仮定が相応に妥当である可能性が示された。ただしこの仮定が成立する場合、プレートには面内引張と面外曲げが複合的に作用し、同時に、RC 区間の主筋は、鼻先において曲げ応力に加えれば応力も負担することになる。更に、プレートと RC 区間小口との界面には付着力や摩擦力も働き得る等、この近傍における応力場は極めて複雑となるため、実用化にあたっては、これらの相互作用を含めてプレートの導入効果を定

参考文献

- 1) 金田和浩, 吉崎征二, 宮崎直志, 川端一三: RC 積層工法による超高層骨組の構造実験(その 8 材端 RC, 中央部鉄骨で構成される複合構造梁の載荷試験), 日本建築学会大会学術講演会梗概集(近畿), pp.305-306, 1987.10
- 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, 第 73 巻, 631 号, pp.1673-1680, 2008.9
- 3) 金本清臣, 真瀬伸治, 山野辺宏治: 鉄筋コンクリート柱に接合された鉄骨梁端部を鉄筋コンクリートで巻いた混合構造梁構法の耐力評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, 第 659 号, pp.205-211, 2011.1
- 4) 都祭弘幸, 細井泰行, 植木理枝子: 端部 RC 梁主筋と中央 H 形鋼をプレート接合した複合梁の開発, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, 第 669 号, pp.1997-2004, 2011.11
- 5) 日本建築学会: 鋼コンクリート構造接合部の応力伝達機構と抵抗機構, 2011.2
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010.