

論文 鉄骨区間と鉄筋コンクリート区間の境界に鋼製プレートを有する複合梁の非線形有限要素解析

川崎 健二郎^{*1}・佐藤 良介^{*1}・小澤 潤治^{*2}・中田 寛二^{*1}

要旨：材端部が鉄筋コンクリート造で中央部が鉄骨造である複合梁で、過去に実験を行った鉄骨区間と鉄筋コンクリート区間の境界に鋼製プレートを有する試験体に対して、三次元非線形有限要素解析を行った。その結果、最大荷重に至るまで荷重変位関係、鉄筋コンクリート区間と鉄骨区間のそれぞれの変位分担および、ひび割れ分布は実験と解析の結果が概ね整合することを確認した。また、曲げモーメント・せん断力を解析的に求めることで、鉄骨埋込み部分の鉄筋コンクリートに作用する断面力を定性的に評価した。

キーワード：非線形有限要素解析, 複合梁, 境界プレート, 混合構造, 片持ち梁

1. はじめに

材端部が鉄筋コンクリート(以下, RC)造で、中央部が鉄骨(以下, S)造で構成された複合梁は、建築物の柱を剛性が高く圧縮に有利なRC造、梁を軽量で長スパン化に有利なS造で構築でき、力学的合理性に優れているため古くから注目¹⁾と²⁾されている。図-1に示すような既往のS梁端部をRC造部分で巻いた、埋込み形式の複合梁²⁾では、同図(b)に示すようなてこ機構により、S梁が埋込まれているRC造部分の先端と埋込み終端に、S梁から受ける支圧反力が作用する。そのため、当該箇所集中的にせん断補強筋を配置することが多い。筆者らは主にRC造部分の先端の集中補強筋をなくし、施工性を向上させるためにS区間とRC区間の境界に鋼製のプレート(以下, BP)を配し、BPと主筋を緊結した複

合梁(以下, 境界プレートを有する複合梁)について研究を行ってきた³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。本論文は境界プレートを有する複合梁の力学的性状を把握するための解析モデルの構築を目的とし、境界プレートを有する複合梁に対して実施した非線形有限要素解析の結果について報告する。

2. 解析概要

解析対象は、過去に報告³⁾⁴⁾した表-1に示す7体の試験体とした。試験体AはBPを持たない従来の埋込み形式の複合梁である。試験体B-1からB-9は境界プレートを有する複合梁で、試験体B-1からB-3はBPとH形鋼を部分溶け込み溶接により接合したモデル(以下, 溶接タイプ)、試験体B-4~B-9はBPとH形鋼を溶接しないモデル(以下, 無溶接タイプ)である。図-2に代表的な解析モデルを示す。H形鋼は4節点シェル要素、BPおよびコンクリートは8節点ソリッド要素とし、鉄筋は軸剛性のみを有するコンクリートへの埋込み鉄筋要素としてモデル化し付着すべりを考慮した。H形鋼・BPとコンクリート間にはインターフェース要素を設定

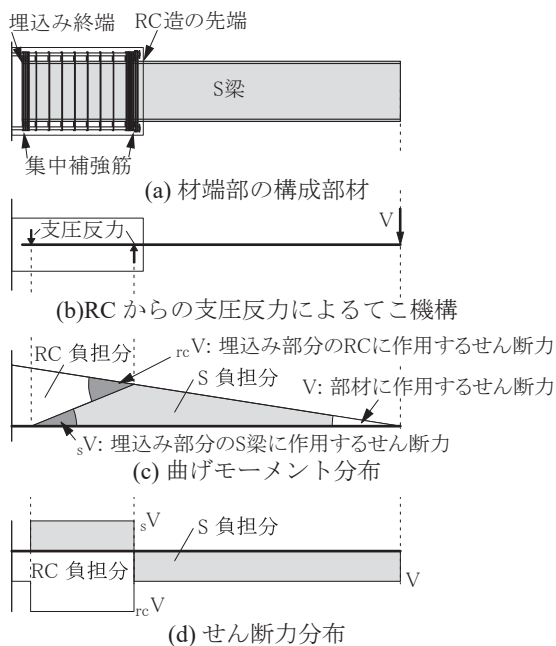


図-1 埋込み形式の複合梁の力学モデル

表-1 試験体³⁾⁴⁾

		A	B-1	B-2	B-3	B-4	B-8	B-9
境界プレート (BP)	板厚 (mm)	—	19			16		
	鋼種	—	SN490					
	H形鋼との溶接の有無	—	有			無		
鉄筋コンクリート (RC)	断面 B×H	440(mm)×580(mm)						
	長さ (mm)	870			800	1000	1235	
	埋込み部分のせん断補強筋比	0.0058	0.0034	0.0058	0.0036	0.0058		
鉄骨 (S)	断面	BH-400×175×9×16			BH-400×170×9×19			
	非埋込長さ (mm)	2,030			2,100	1,900	1,665	
	埋込み長さ (mm)	800	600	800	1000	800		

*1 東急建設(株) 技術研究所 博士(工学)(正会員)

*2 東急建設(株) 技術研究所 工修

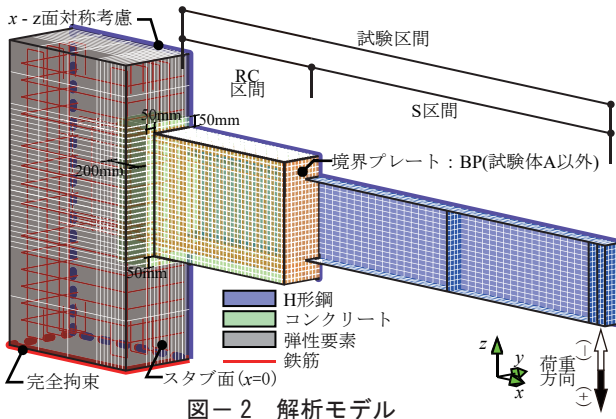


図-2 解析モデル

表-2 コンクリートの材料特性

	ヤング係数 (MPa)	ポアソン比	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	引張破壊エネルギー (N/mm)
A	22200	0.155	33.9	1.92	0.07610
B-1	23900	0.163	39.9	2.08	0.08035
B-2	24400	0.163	41.2	2.12	0.08121
B-3	24900	0.163	42.8	2.16	0.08225
B-4	22200	0.141	37	2.01	0.07835
B-5	21300	0.137	34.5	1.94	0.07655
B-8	23000	0.146	39.4	2.07	0.08001
B-9	22900	0.144	38.9	2.06	0.07967

した。H形鋼とBP間は、溶接タイプを剛接合とし、無溶接タイプは接合せず、接触も考慮しなかった。なお、本報では試験体のスタブ面からRC造部分の先端までをRC区間、RC造部分先端から載荷点までをS区間と定義する(BPを含む)。RC区間の長さは、表-1のRCの長さ、S区間長さは同表のSの非埋込長さに等しく、両区間を合わせて試験区間とする。座標系は試験体スタブ面と材軸の交点を原点とし、材軸方向をx軸、鉛直方向をz軸、材軸直交方向をy軸とする右手系である。境界条件はx-z平面に関して1/2対称条件とし、スタブ下端を完全拘束とした。スタブは図-2に示すように、試験体断面から50mm外側にオフセットした範囲で、スタブ中200mmの深さに対して破壊を考慮したコンクリート要素とし、その他の部分を弾性体とした。荷重は載荷点のH形鋼フランジをy方向に多点拘束し主点に対して鉛直下向きを正とする強制変位として与え、実験と同様の正負交番漸増繰返し載荷とした。なお、自重の影響は無視した。材料定数については、表-2、表-3に示す通り、コンクリートの引張強度を靱性指針式⁷⁾、引張破壊エネルギーを土木学会式⁸⁾、その他は材料実験の値を採用した。なお、鋼材のポアソン比は0.3とした。解析には汎用構造解析コードDIANA10.0を使用した。その他試験体の詳細については文献³⁾⁴⁾を参照されたい。

2.1 材料構成則

コンクリートにおける圧縮側の構成則は、ひび割れ前

表-3 鋼材の材料特性

	降伏強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	降伏強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	
A, フランジ	411	213	フランジ	397	212
B-1, ウェブ	387	203	B-4, ウェブ	398	208
B-2, BP	412	212	B-9, BP	390	212

	降伏強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	降伏強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	
A, 主筋	477	190	B-4, せん断補強筋 (埋込み終端)	837	216
B-1, せん断補強筋	702	168	B-8, せん断補強筋 (埋込み部)	710	163
B-2, せん断補強筋	702	168	B-9, せん断補強筋 (RC非埋込み部)	341	190

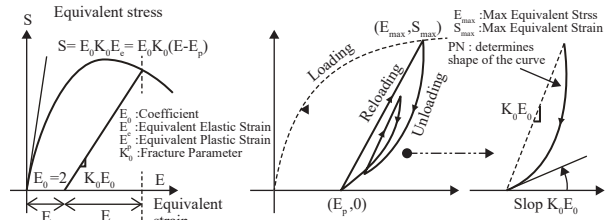


図-3 弾塑性破壊モデル⁹⁾

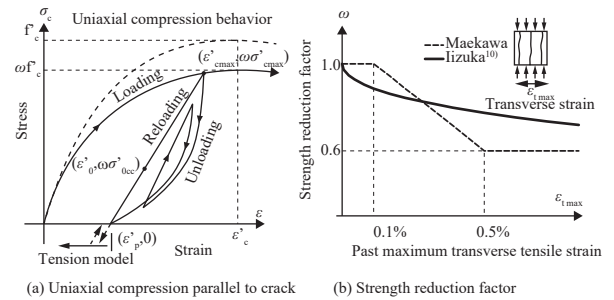


図-4 一軸圧縮モデル⁹⁾に加筆

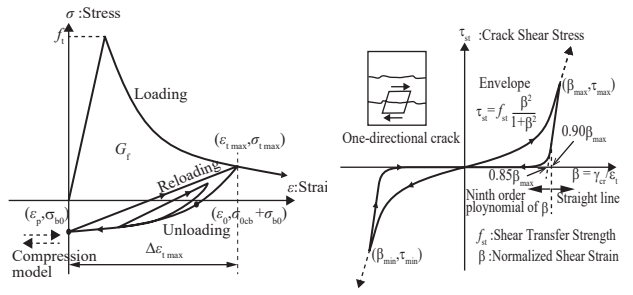


図-5 1軸引張軟化モデル¹²⁾に加筆

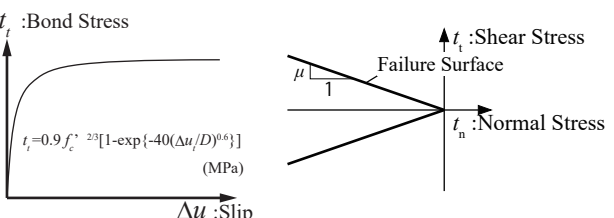


図-7 付着すべりモデル¹³⁾ 図-8 クーロン摩擦モデル¹⁴⁾

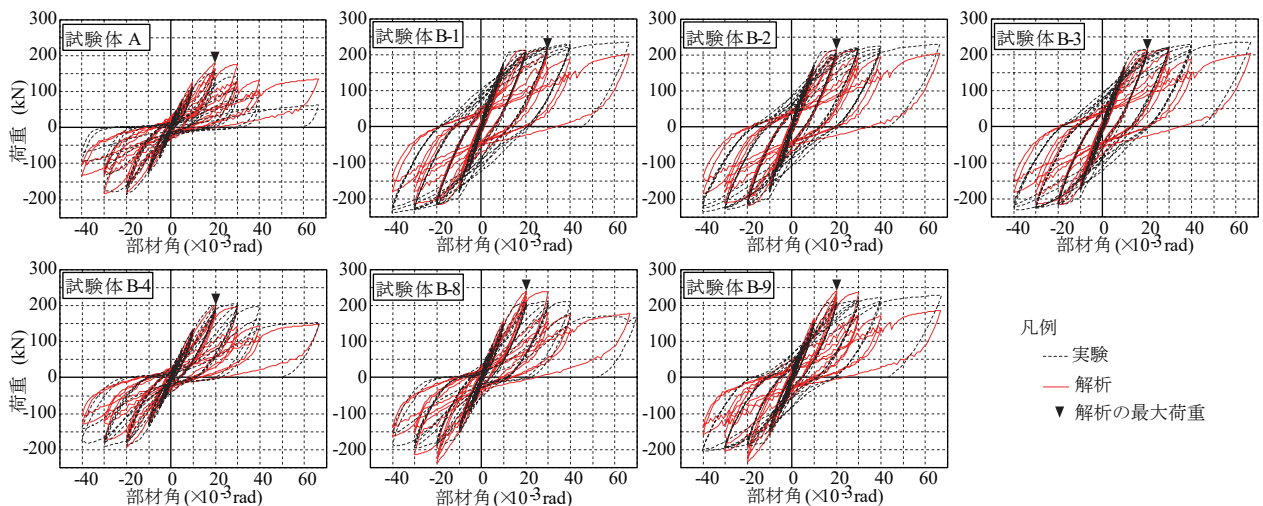


図-9 荷重変位関係

において図-3に示す弾塑性破壊モデル⁹⁾、ひび割れ後は図-4(a)に示す1軸圧縮モデル⁹⁾とし、平均引張ひずみによる圧縮強度低減は図-4(b)に示す飯塚のモデル¹⁰⁾とし、同図に前川のモデルと併記して示した。引張側の構成則は福浦らによるアクティブクラックモデルを用いた非直交多方向固定ひび割れモデル¹¹⁾を採用し、1軸引張軟化モデルは図-5に示すHordjikのモデル¹²⁾とした。ひび割れのせん断挙動は、図-6に示す接触密度関数モデル⁹⁾とした。鋼材は降伏基準をVon Mises、降伏後の剛性を弾性剛性の1/100のバイリニアとし、移動硬化則とした。鉄筋とコンクリートの付着すべりは図-7に示す島らのモデル¹³⁾とした。鉄筋以外の鋼材とコンクリートとの界面は、文献¹⁴⁾と同様に $f_t=0\text{N/mm}^2$ 、 $c=0\text{N/mm}^2$ 、 $\mu=0.65$ のクーロン摩擦モデルとした(図-8)。

2.2 計算概要

収束計算は、割線剛性法を使用し収束判定はエネルギーノルムに対して 1.0×10^{-10} 以下とした。1ステップの収束計算数の最大値は100回とし、未収束の場合の不均衡力は持ち越さないこととした。

3. 計算結果

3.1 荷重変位関係

図-9に荷重変位曲線を示す。同図の黒の破線は実験結果、赤の実線は解析結果である。加えて、表-4に正負両方向の各部材角における実験および解析の荷重を示す。ここで部材角とは、載荷点の z 変位を試験区間長さ(2,900mm)で除したものである。全ての試験体において、解析結果の荷重変位曲線は、解析の最大荷重までは実験結果とおおむね整合している。以下、部分的に不整合が生じている部分に対して確認する。載荷初期の部材角($1.0 \times 10^{-3}\text{rad}$, $1.3 \times 10^{-3}\text{rad}$)では、解析結果の荷重値

表-4 各部材角における荷重(kN)

部材角 ($\times 10^{-3}\text{rad}$)	1.0	1.3	2.5	5.0	10.0	20.0	30.0	40.0	66.7	
相対変位 (mm)	2.9	3.6	7.3	14.5	29.0	58.0	87.0	116.0	193.3	
A	+	Exp. 26.1	30.1	48.1	71.1	112.3	156.4	142.3	83.4	62.7
		Cal. 18.7	23.2	42.4	77.2	127.0	179.4	175.9	131.6	135.8
	-	Exp. -27.1	-33.1	-54.5	-86.2	-128.7	-186.0	-174.1	-93.1	-
		Cal. -17.3	-21.5	-40.6	-71.8	-123.3	-180.7	-183.3	-133.1	-
B-1	+	Exp. 31.0	37.6	63.1	101.6	168.2	213.0	222.5	229.1	235.2
		Cal. 26.6	32.1	54.2	96.6	169.7	213.0	216.6	189.1	202.8
	-	Exp. -32.5	-39.6	-68.1	-109.6	-182.9	-216.4	-230.9	-237.2	-
		Cal. -26.2	-31.8	-53.9	-93.3	-162.8	-216.2	-212.8	-180.1	-
B-2	+	Exp. 30.8	32.4	59.8	104.3	165.5	212.5	219.5	226.0	229.3
		Cal. 26.7	32.6	54.6	97.0	169.4	215.2	215.0	194.2	206.2
	-	Exp. -31.9	-39.5	-67.6	-108.6	-177.8	-216.1	-222.5	-233.2	-
		Cal. -26.3	-32.0	-54.4	-94.0	-163.4	-217.6	-210.4	-186.0	-
B-3	+	Exp. 27.0	31.7	55.7	90.1	166.5	215.1	220.0	225.8	234.3
		Cal. 26.1	32.1	52.7	92.9	159.4	209.2	208.2	183.6	198.5
	-	Exp. -30.4	-37.7	-63.6	-105.6	-176.8	-217.0	-225.7	-231.6	-
		Cal. -25.9	-31.5	-52.5	-89.8	-153.4	-210.8	-206.0	-182.0	-
B-4	+	Exp. 28.0	34.4	51.2	78.4	130.1	201.2	205.1	196.2	152.1
		Cal. 18.7	24.0	45.3	81.5	134.5	202.6	196.9	144.0	193.3
	-	Exp. -29.9	-36.0	-55.0	-84.8	-134.3	-187.7	-190.0	-176.8	-
		Cal. -16.2	-21.4	-43.0	-76.2	-129.8	-192.9	-172.9	-129.5	-
B-8	+	Exp. 32.0	35.7	58.6	91.1	149.9	210.4	211.4	209.7	154.4
		Cal. 24.5	30.6	52.8	94.0	158.3	240.0	237.8	172.8	177.7
	-	Exp. -34.1	-40.7	-63.0	-95.4	-150.8	-187.9	-194.2	-153.9	-
		Cal. -22.5	-26.9	-51.7	-90.1	-153.5	-235.8	-212.2	-163.0	-
B-9	+	Exp. 36.2	42.6	60.1	89.3	152.8	209.0	214.3	221.9	227.8
		Cal. 25.9	31.4	53.1	96.8	163.3	240.0	236.0	171.0	186.4
	-	Exp. -37.4	-44.9	-64.5	-97.0	-151.8	-188.9	-194.5	-203.7	-
		Cal. -23.6	-28.8	-52.8	-91.8	-157.4	-233.4	-203.2	-157.0	-

注) 解析の最大値は太字で示す。

が比較的低く評価される傾向にある。これは、鋼材とコンクリートとの界面の構成則が、引張強度・粘着力がいずれも 0N/mm^2 のクーロン摩擦則であり載荷初期に摩擦力が生じづらいためであると考えられる。実験結果は正方向より負方向の同部材角における荷重がわずかに増加している。これは、鋼材とコンクリートの界面の状態が $-z$ 方向へ打設されたコンクリートのブリーディング等の影響により加力方向の差異が生じているものと考えられる。解析結果は実験と逆の傾向を示しているが、正加力の影響により負加力時の荷重が若干減少したものと考えられる。BPを持たない試験体Aのみ、 $40 \times 10^{-3}\text{rad}$ 以

降の荷重を過大評価しているが、これは、実験上コンクリートが剥落する等の大きな損傷が生じていたことに起因すると考えられる。溶接タイプの試験体 B-1, B-2, B-3 の包絡線は、 40×10^{-3} rad 以降で解析結果が実験結果の荷重を過小評価する傾向がみられた。無溶接タイプの試験体 B-4, B-8 では 40×10^{-3} rad の部材角でのみ過小評価する傾向がみられ、試験体 B-9 は試験体 B-1, B-2, B-3 と同様に 40×10^{-3} rad 以降で荷重を過小評価している。以上のことから試験体 A を除いたすべての試験体において 40×10^{-3} rad 以降で過小評価傾向を示していることがわかった。これはコンクリート構成則、鋼コンクリートの界面構成則の非線形性等を検討する必要があるが今後の検討課題としたい。

3.2 各区間の荷重変位関係

図-10 に正サイクルの包絡線上における、RC 区間および S 区間の変位と荷重の関係を示す。ここで各区間の変位とは、RC 区間において、材軸上のスタブ面と RC 造部分の先端との Z 方向の相対変位、S 区間において、材軸上の RC 造部分の先端と載荷点との x 方向の相対変位である。同図の破線は実験結果、実線は解析結果とし、青系の色を RC 区間、赤系の色を S 区間とした。試験体 A は各区間とも最大荷重まではおおむね整合する。それ以降はコンクリートの剥落等の影響により、RC 部分の先端の変位計測ができなかったため実験の変位計測値はない。溶接タイプの試験体 B-1, B-2, B-3 は剛性低下が顕著となる以前は荷重・各区間の相対変位ともにおおむね整合しており、剛性低下前の各区間の剛性はよく実験を再現しているといえる。無溶接タイプの試験体 B-4 は載荷開始から最大変位まで荷重および各区間の変位はよく対応する。試験体 B-8, B-9 において、実験の最大荷重は若干小さいが、実験の最大荷重まで各区間の荷重および変位はおおむね整合する。

3.3 ひび割れ分布

図-11 に解析における正方向最大荷重時のひび割れ写真と、当該部材角における解析の最大主ひずみ分布を示す。正方向最大荷重時の部材角は、試験体 B-1 で 30×10^{-3} rad、試験体 B-1 以外で 20×10^{-3} rad である。なお、試験体 B-2 は B-1 と類似したひび割れ分布を呈していたためデータ記載を省略した。試験体 A は、実験上はせん断ひび割れが試験体全体に分布していたが、解析の最大主ひずみ分布においてもその傾向を確認した。試験体 B-1, B-3 は、実験上のスタブ面から埋込み終端部までのひび割れ分布、S 梁埋込み部のひび割れ分布ともに解析の最大主ひずみ分布とおおむね類似している。しかし、BP 近傍のひび割れは、その他の部分と比較し、軽減傾向にある実験結果に対して、解析結果は特に上端筋近傍でのひずみが増加傾向にあり、この点で実験結果との差

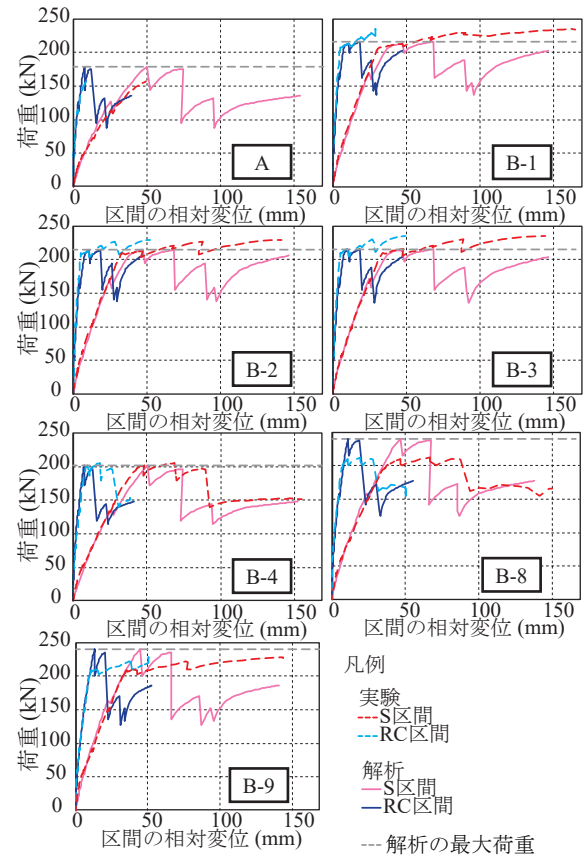


図-10 正載荷包絡線上の各区間端部の相対変位

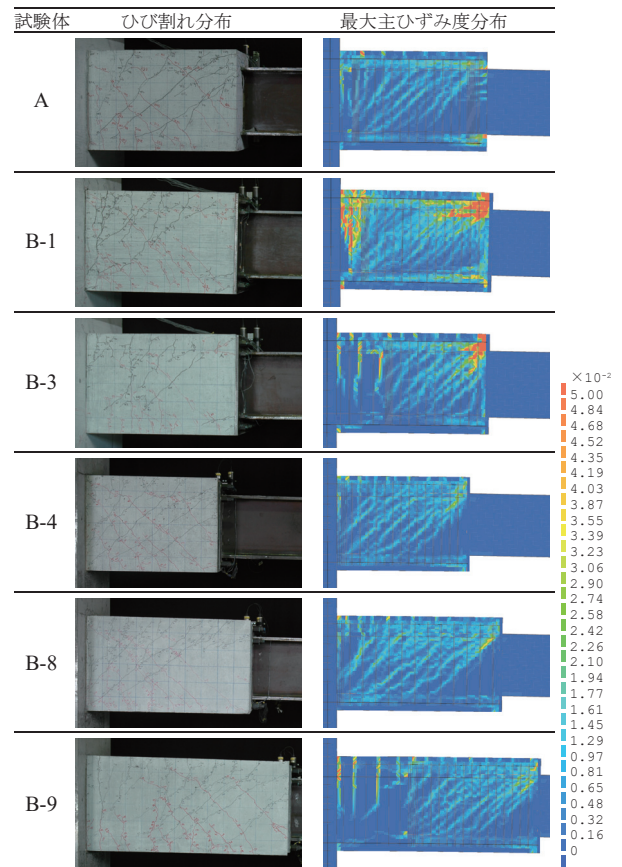


図-11 ひび割れ分布および最大主ひずみ度分布

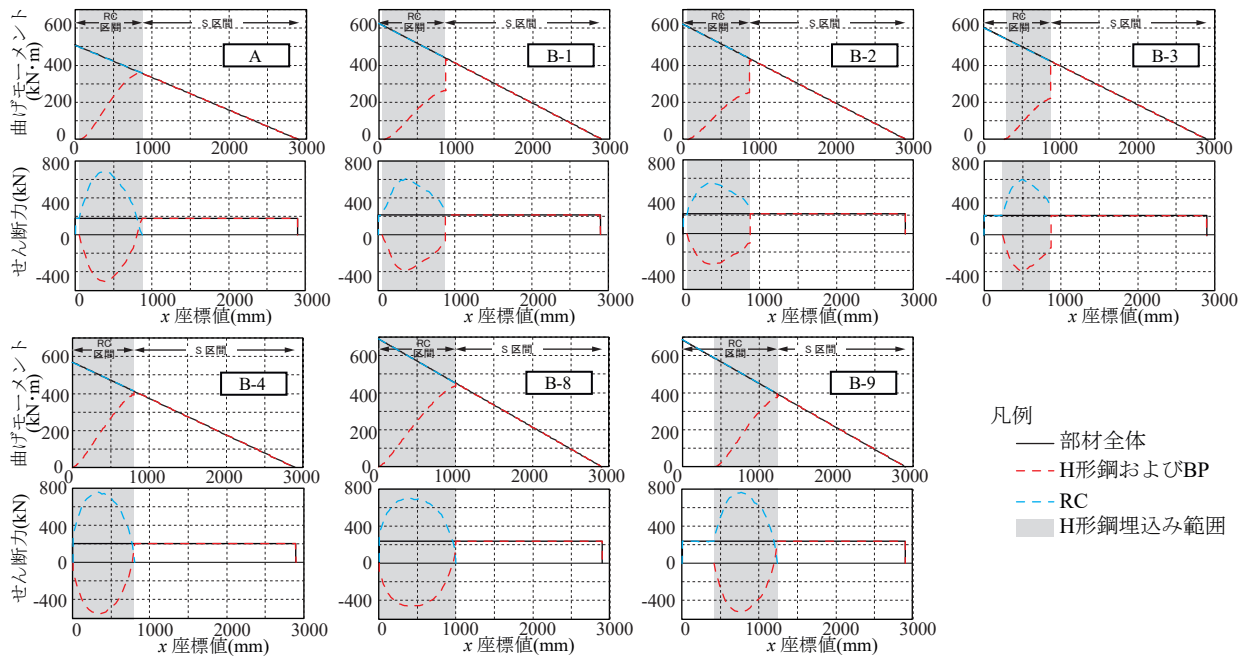


図-12 FEMによる曲げモーメントおよびせん断力分布

異が生じている。これは、BPの影響を強く受けていると考えられ、3.1 荷重変位関係でみられた荷重の過小評価に寄与している可能性も考えられる今後の検討課題である。試験体 B-9 のスタブ面から埋込み終端までは曲げひび割れが卓越する傾向も解析結果と類似する。

3.4 FEM 解析による曲げモーメント・せん断力分布

図-12 に解析の正方向最大荷重時の部材角における梁全体と H 形鋼、RC および BP の解析による曲げモーメント図およびせん断力図を示す。当該断面力は、材軸を基準軸として設定し当該軸の法線方向の応力を積分して求めたものである。本試験は片持ち梁であるため、部材全体の曲げモーメント図はスタブ面 ($x=0$) で最大となる直角三角形の形状となり、せん断力図は一定値となる。以下、図-12 中灰色ハッチングで示す RC 区間に埋込まれた S 梁に注目する。試験体 A において埋込部分の曲げモーメントは緩やかな曲線、せん断力はわずかに極値が終端側に偏った放物線形状であり図-1 の力学モデルとやや異なり、文献¹⁵⁾に示されるモデルと類似する。

溶接タイプの試験体 B-1, B-2, B-3 は、BP の位置で H 形鋼の負担曲げモーメントが急減している。これは、BP を H 形鋼に溶接し、かつ主筋と緊結していることから、BP を介しコンクリートへの支圧力ならびに鉄筋への引張力が作用することで、BP により S 梁から RC 部分への曲げモーメントが伝達されるためである。(以下、「BP から RC 造部分へ伝達される曲げモーメント」とする) このことにより S 梁埋込み部の曲げモーメントの変化が緩やかになり試験体 A と比較して RC 造部分の負担せん断力が軽減されている³⁾。またせん断力分布は、曲

線の極値がやや埋込み終端側に偏った曲線形状を呈している。試験体 B-1, B-2 は S 梁埋込み部のせん断補強筋比が異なるが、せん断力分担の顕著な変化はみられない。試験体 B-3 は、B-1, B-2 と比較して S 梁埋込み長さが短い、RC 造部分が受けるせん断力の最大値は試験体 B-1 とほぼ等しい値となる。一般に S 梁埋込み長さが短くなる場合、S 梁埋込み部分の RC 造部分に作用する最大せん断力は増大する²⁾が、BP から RC 造部分へ伝達される曲げモーメントが試験体 B-1 よりも増大したため結果的に同等程度の最大せん断力を示している。これは、BP から RC 造部分へ伝達される曲げモーメントと S 梁埋込長さの間に強い関係性があるためと考えられる。

無溶接タイプの試験体 B-4, B-8, B-9 のせん断力分布は試験体 A と同様に放物線形状となったが、試験体 A よりも RC 造先端のせん断力変化が急峻となり、より緩やかな放物線形状を示した。これは、RC 先端部の集中的なせん断補強筋よりも、BP が有効にせん断力を伝達していることを示しており、解析上 BP の有効性が示された。S 梁埋込み区間の長い試験体 B-8 のせん断力分布は緩やかな放物線形状を示し、試験体 B-4 と比較して RC 造部分が受けるせん断力の最大値は減少している。試験体 B-9 は、試験体 B-4 と同一の S 梁埋込み長さで RC 区間が長い、剛性が向上し部材全体に作用するせん断力が向上し、埋込み区間に作用する曲げモーメントおよびせん断力は同程度となった。

4. まとめ

材端部が鉄筋コンクリート造で中央部が鉄骨造で構成

されそれらの境界に鋼製プレートを有する複合梁について非線形有限要素解析を行った結果、以下の結果を得た。

- 1) 最大荷重までの荷重変形関係は概ね整合したが、部材角 40×10^{-3} rad 以降に荷重を過小評価する傾向がある。
- 2) 鉄筋コンクリートの区間と鉄骨のみの区間の変位分担は、著しい剛性低下以前は概ね整合していた。
- 3) ひび割れ分布は概ね類似していたが、境界プレート近傍のひび割れが抑制傾向にある実験結果に対し、解析結果は境界プレート近傍で最大主ひずみが増加傾向にある。
- 4) 境界プレートを H 形鋼に溶接していない試験体について、解析の最大荷重を示した部材角における、解析の曲げモーメント分布は、鉄骨梁の埋込部分でゆるやかな曲線形状であり、せん断力分布は、放物線形状を示す。
- 5) 境界プレートを H 形鋼に溶接している試験体について、H 形鋼および RC 造部分のせん断力の最大値は、境界プレートから RC 造部分へ伝達する曲げモーメントにより軽減され、埋込み長さとの強い関係性が示された。

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 材端部 RC、中央部鉄骨で構成される複合構造梁の載荷実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), 構造 II, 2895, pp.305-306, 1987.8
- 2) 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, p106, 2011.2
- 3) 佐藤良介, 小澤潤治, 坂井由尚 : 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, Vol.34, No.2, pp.1171-1176, 2012
- 4) 中田寛二, 佐藤良介, 小澤潤治, 古川雄太 : 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, コンクリート年次論文集, Vol.35, No.2, pp.1207-1212, 2013

- 5) 佐藤良介, 小澤潤治, 中田寛二 : 鉄骨部材と溶接された鋼製プレートで鉄筋コンクリート区間を強化した埋込み形式の複合構造梁の剛性評価手法の拡張解釈, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1087-1092, 2014
- 6) 佐藤良介, 小澤潤治, 中田寛二 : 鉄筋コンクリート区間と鉄骨区間の境界に鋼製プレートが配された埋込み形式の複合梁の部材剛性評価手法の適用性, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.1177-1182, 2016
- 7) 日本建築学会 : 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999.8
- 8) 土木学会 : 2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2013.3
- 9) K.MAEKAWA,A,PIMANMAS,AND H.OKAMURA :Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete. ,Spon Press, London, 2003.
- 10) 飯塚崇文 : 普通強度から高強度までの材料を用いた鉄筋コンクリート構成則と有限要素解析に関する研究, 千葉大学学位論文, 1992 年
- 11) 福浦尚之, 前川宏一 : 非線形支配ひび割れ面の三次元同定と空間平均化構成則の高度化, 土木学会論文集, 65(1), pp118-137, 2009
- 12) Dirk Arend Hordijk: Local approach to fatigue of concrete, Doctral Thesis, Delft University of Technology, 1991.
- 13) 島弘, 周礼良, 岡村甫 : マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力 - すべり - ひずみ関係, 土木学会論文集, 第 378 号 /V-6, pp.165-174, 1987.2
- 14) 中田寛二, 小澤潤治, 佐藤良介 : 柱梁せい比が小さい柱鉄筋コンクリート造・梁鉄骨造十字形接合部の構造性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.1081-1086, 2018
- 15) 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, Vol.73, No.631, pp.1673-1680, 2008.9