

合成梁の耐力と塑性変形能力に関する確認実験

Experiment of Strength and Plastic Deformation Capacity about Concrete Slab-Steel Beam Composite Member

技術研究所	江頭 寛	HIROSHI EGASHIRA
技術研究所	原田 浩之	HIROYUKI HARADA
構造技術部	古山 由佳	YUKA FURUYAMA
技術企画部	小坂 英之	HIDEYUKI KOSAKA
建築技術部	森岡 研三	KENZO MORIOKA
構造設計ディビジョン	和田 卓	TAKASHI WADA

コンクリート床スラブと H 形鋼梁で構成される合成梁の耐力と塑性変形能力を確認するために、床スラブの有無、および床スラブの種類や配置を実験要因とした部分架構試験体の加力実験を行った。その結果、全ての合成梁端部の最大曲げモーメントは、H 形鋼梁単体の全塑性モーメントより大きく、完全合成梁の全塑性モーメントにほぼ等しい値となった。また、合成梁端部の塑性変形倍率は、正曲げ時で 3.5~4、負曲げ時で 1.5~2 となった。

キーワード：合成梁、塑性変形能力、床スラブ、H 形鋼梁、横座屈

To evaluate the strength and plastic deformation capacity of concrete slab and steel beam composite member, the loading tests of the steel beam with composite beam were conducted. The test parameters are existence and arrangement of shear connectors of the concrete floor slab. It was confirmed that maximum moments in edge of all types of composite beams were larger than full plastic moments of steel beam itself and nearly equal to those of complete composite beams. Plastic deformation ratios of composite beam end were 3.5 to 4 in positive bending and 1.5 to 2 in negative bending.

Key Words: Composite beam, Plastic deformation capacity, Floor slab, Wide flange shapes beam, Lateral buckling

1. はじめに

コンクリート床スラブと鉄骨梁で構成される合成梁は、床スラブの補剛効果によって横座屈が抑制されることが既往の研究^{1)~5)}で確認されており、鋼構造塑性設計指針⁶⁾では、完全合成梁の耐力は、横補剛材が付いていない場合でも鉄骨梁の全塑性モーメントとして計算して良いことが示されている。一方、横補剛材が付いていない合成梁の塑性変形能力については十分に解明されたとは言えず、床スラブの仕様との関係を含め不明な点が多い。

本報では、合成梁の耐力と塑性変形能力を確認するために実施した、床スラブの有無、床スラブの種類や配置などの基本的な仕様を実験要因とした部分架構試験体の加力実験について報告する。

2. 実験計画

(1) 試験体

表-1に試験体の一覧を、図-1に試験体図を示す。試験体は、溶接組立 H 形鋼とコンクリート床スラブを頭付きスタッドで結合した合成梁であり、梁の両端を角形鋼管柱に接合した部分架構の形状をしている。試験体の縮尺は実大の 1/2 を想定し、鉄骨梁断面は BH-500x150x9x12 (SN490B)、梁の内法長は $L_0=5,650\text{mm}$ とした。鉄骨梁の幅厚比は、フランジが 6.25、ウェブが 52.9 であり、弱軸方向の細長比は $\lambda_y=193$ である。鋼構造限界状態設計指針⁷⁾による鉄骨梁の横座屈細長比は $\lambda_b=1.08$ で、細長比区分は L-III である。

試験体は全 5 体で、床スラブの有無、床スラブの配置(両側・片側)、床スラブの種類(平板・デッキ)を実

表-1 試験体の一覧

試験体	H形鋼梁 (溶接組立)							コンクリート床スラブ					合成率	床厚 梁せい比 t/D	梁せい スパン比 D/L _o	
	断面 (強度種別)	幅厚比		内法長 L _o (mm)	弱軸 細長比 λ _y	横座 屈細長比 λ _b	細長 比 区分	有 無	F _c (N/mm ²)	種類	配置	厚さ (mm)				幅 (mm)
		フランジ ^a	ウェブ ^b													
NS	BH-500x150 x9x12 (SN490B)	6.25 (FA)	52.9 (FB)	5,650	193	1.08	L-III	無	-	-	-	-	-	-	-	
FS2								有	21	平床	両側	75	1,350	0.88	0.15	0.09
FS1											片側		850	0.93		
DS2								有	21	デッキ 床	両側	65 (山上40)	1,350	1.47	0.13	
DS1											片側		850	1.65		

表-2 鋼材の材料試験結果

部位	厚さ (mm)	強度種別	降伏点 (N/mm ²)	降伏歪 (×10 ⁻⁶)	弾性率 (N/mm ²)	引張強度 ^a (N/mm ²)	伸び (%)
梁	フランジ	12	SN490B	401	1,900	549	37
	ウェブ	9	SN490B	391	1,890	551	36
	その他	9	SN490B	395	1,890	549	36
柱	16	STKR490	500*	4,540*	197,000	544	37
ダイヤフラム	19	SM490	374	1,890	204,000	538	46
スラブ筋 (φ5)		SWM-P	509*	4,480*	205,000	601	-

*0.2%オフセット値

表-3 コンクリートの材料試験結果

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	弾性率 (N/mm ²)
FS2	21.5	2.17	23,500
FS1	21.6	2.09	24,400
DS2	21.0	1.86	22,300
DS1	20.8	2.13	24,000

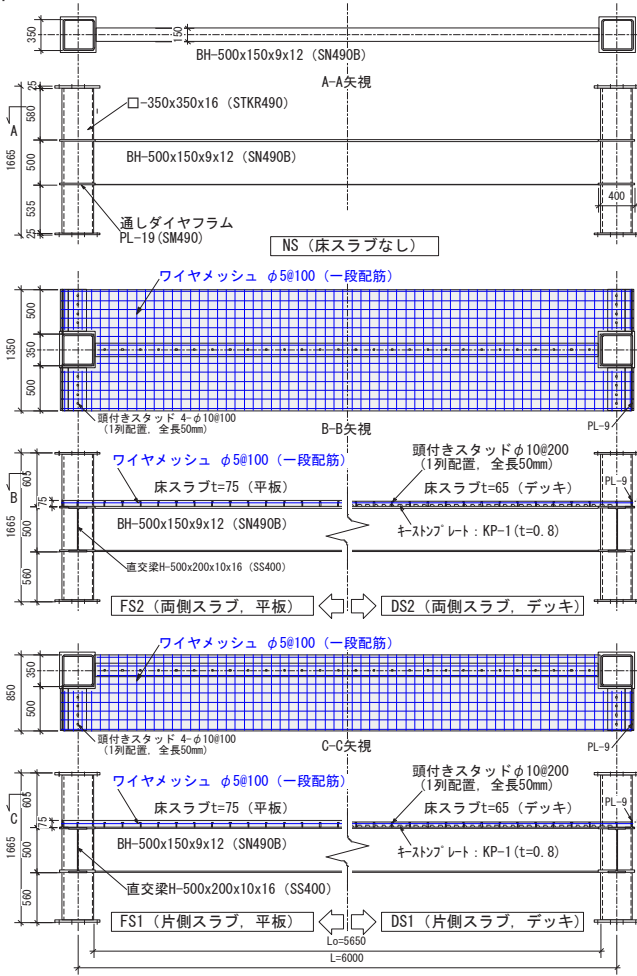


図-1 試験体図

験要因とした。NSは床スラブ無し、FS2とDS2は梁の両側に床スラブを有する（以下、両側スラブ付）試験体、FS1とDS1は建物の外周部の鉄骨梁を想定し、梁の片側のみに床スラブを有する（以下、片側スラブ付）試験体とした。なお、FS2とFS1は平板床スラブ（以下、平床タイプ）、DS2とDS1はデッキ床スラブ（以下、デッキ床タイプ）を用いた試験体である。

床厚 t は、平床タイプの FS2 と FS1 が t=75mm、デッキ床タイプの DS2 と DS1 が t=65mm（山上 40mm）であり、床厚 t の鉄骨梁せい D に対する比 t/D は、平床タイ



写真-1 加力状況 (FS2)

プが 0.15、デッキ床タイプが 0.13（山上 0.08）となっている。床スラブの幅は、鉄骨梁と床スラブが一体した合成梁として取り扱うために、各種合成構造設計指針⁸⁾に基づき計算した床スラブの有効幅とした。床スラブ筋は、φ5@100の溶接金網を用いた一段配筋とし、スラブ筋の両端は直交梁(H-500x200x10x6)の上フランジに固定した平鋼(PL-9)に溶接した。

床スラブと鉄骨梁はφ10、全長50mmの頭付きスタッドで結合した。頭付きスタッドの本数は、平床タイプの合成率（使用した頭付きスタッドの本数/完全合成梁として必要な頭付きスタッドの本数⁸⁾）が1程度となるように28本とし、配列は一列配置の200mmピッチとした。床スラブの種類の違いが及ぼす影響を明確にするために、デッキ床タイプの頭付きスタッドの本数と配列もこれに

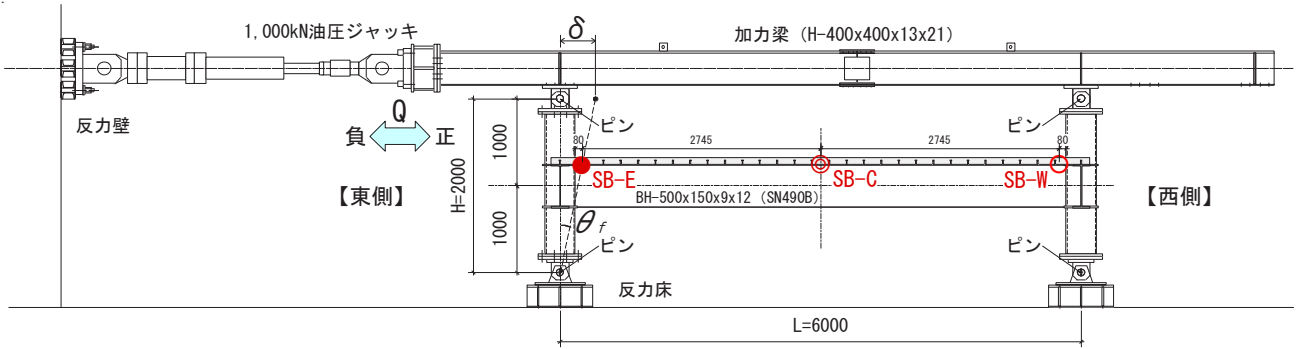


図-2 加力図



(1) NS



(2) FS2



(3) FS1



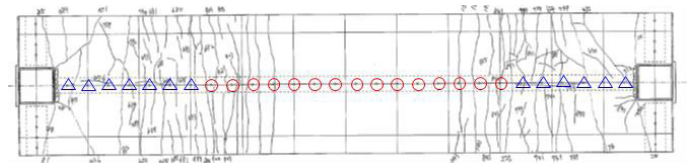
(4) DS2



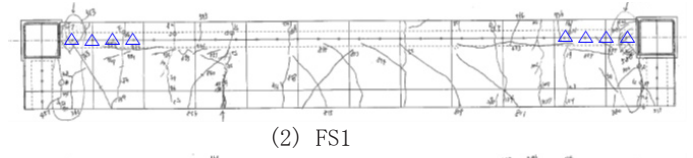
(5) DS1

写真-2 最終破壊状況

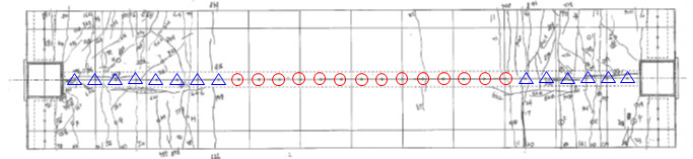
合わせた。このため、床スラブと鉄骨梁の合成率は、平床タイプのFS2とFS1がそれぞれ0.88と0.93、デッキ床タイプのDS2とDS1がそれぞれ1.47と1.65となった。



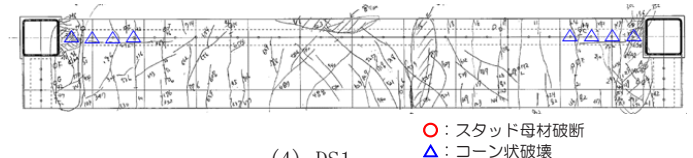
(1) FS2



(2) FS1



(3) DS2



(4) DS1

○：スタッド母材破断
△：コーン状破壊

図-3 床スラブのひび割れ状況

表-2と表-3に使用した鋼材とコンクリートの材料試験結果をそれぞれ示す。

(2) 加力および計測方法

写真-1に加力状況を、図-2に加力図を示す。試験体の柱脚と反力床、柱頭と加力梁をそれぞれピン結合し、反力壁に固定した1,000kN油圧ジャッキで水平方向に加力した。加力方法は、梁に逆対称曲げモーメントを作用させる正負交番の漸増加力とした。加力スケジュールは、柱上下のピン間の変形角 $\theta_f = \delta / H$ で規定し、 $\theta_f = \pm 5/1000, \pm 10/1000, \pm 20/1000, \pm 30/1000, \pm 40/1000, \pm 50/1000$ radまでを各2サイクル加力した後、最後に最大+100/1000radまで片押し加力することとした。

ジャッキ先端のロードセル、および各部に配置した変位計、ワイヤストレインゲージにより、試験体の耐力と

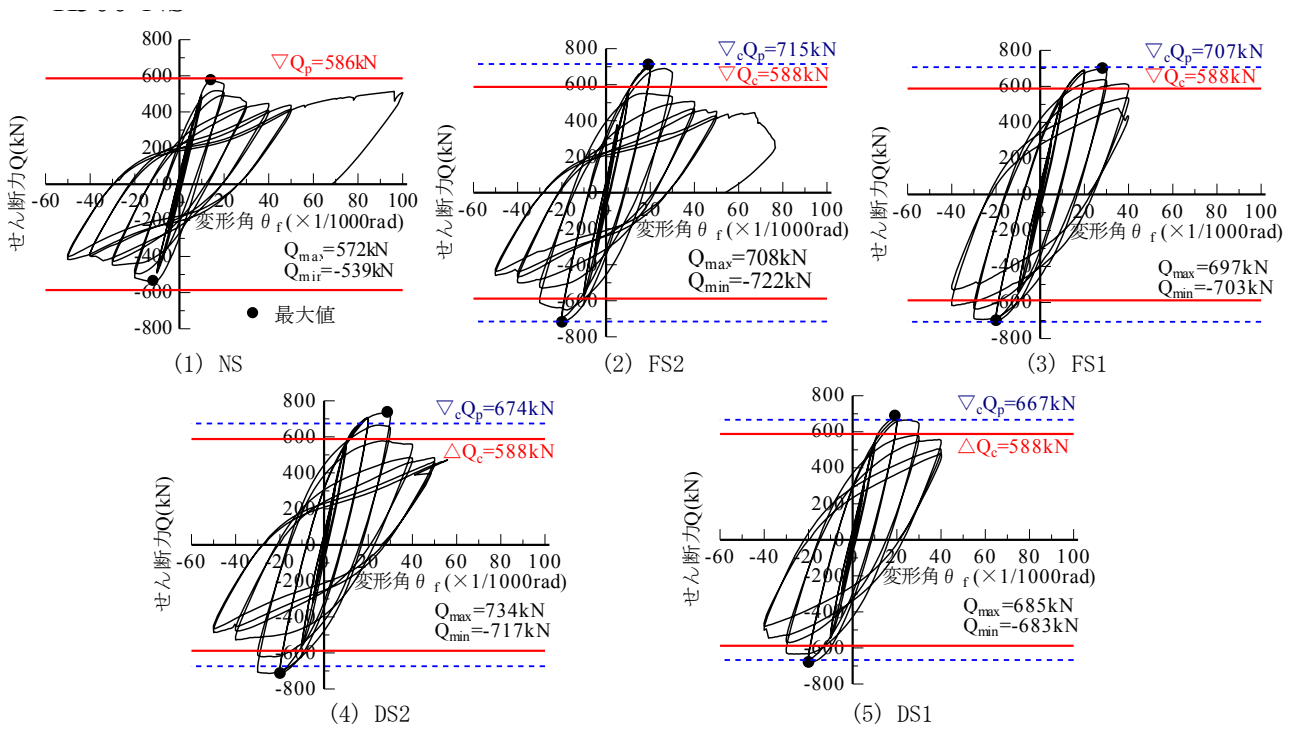


図-4 架構のせん断力と変形角の関係

変形、ひずみを計測した。

3. 実験結果

(1) 加力終了後の損傷状況

写真-2に、加力終了後における各試験体の損傷状況を、図-3に床スラブのひび割れ状況を示す。図-3には頭付きスタッドの損傷状況も併記した。

写真-2(1)に示す床スラブのないNSは、梁全体が大きくねじり変形する横座屈を生じた。床スラブを有する残り4体もNSと同様に横座屈を生じたが、床スラブが上フランジの面外変形を拘束したため、横座屈の度合いはNSよりも小さかった。

図-3に示す床スラブのひび割れ状況と頭付きスタッドの損傷状況は、両側スラブ付と片側スラブ付で異なる傾向を示した。両側スラブ付のFS2とDS2は、両柱芯から4D～5Dまでの範囲に曲げひび割れが集中した。一方、片側スラブ付のFS1とDS1は、両側スラブ付きのFS2やDS2と同様な曲げひび割れも生じたが、床スラブ中央部には梁の材軸に対し約45°方向のねじりひび割れが生じた。このねじりひび割れは、FS1よりも床スラブの薄いDS1の方が顕著であった。また、全ての床スラブの両柱面近傍において、コンクリートの圧壊が確認された。

両側スラブ付は、梁中間部の頭付きスタッドの破断により、当該領域での鉄骨梁の横座屈が進行し、これに抵抗した梁端部の頭付きスタッドが、最終的にコーン状破壊する破壊状況が観測された。両側スラブ付の加力終了

後の頭付きスタッドの損傷状況は、両柱芯から約3Dの範囲内ではコーン状破壊(△印)、3Dを超える中間部では母材破断(○印)であった。一方、片側スラブ付の頭付きスタッドの損傷状況は、両柱芯から2Dの範囲内でのコーン状破壊のみであり、梁中間部でのコーン状破壊や頭付きスタッドの母材破断は生じなかった。

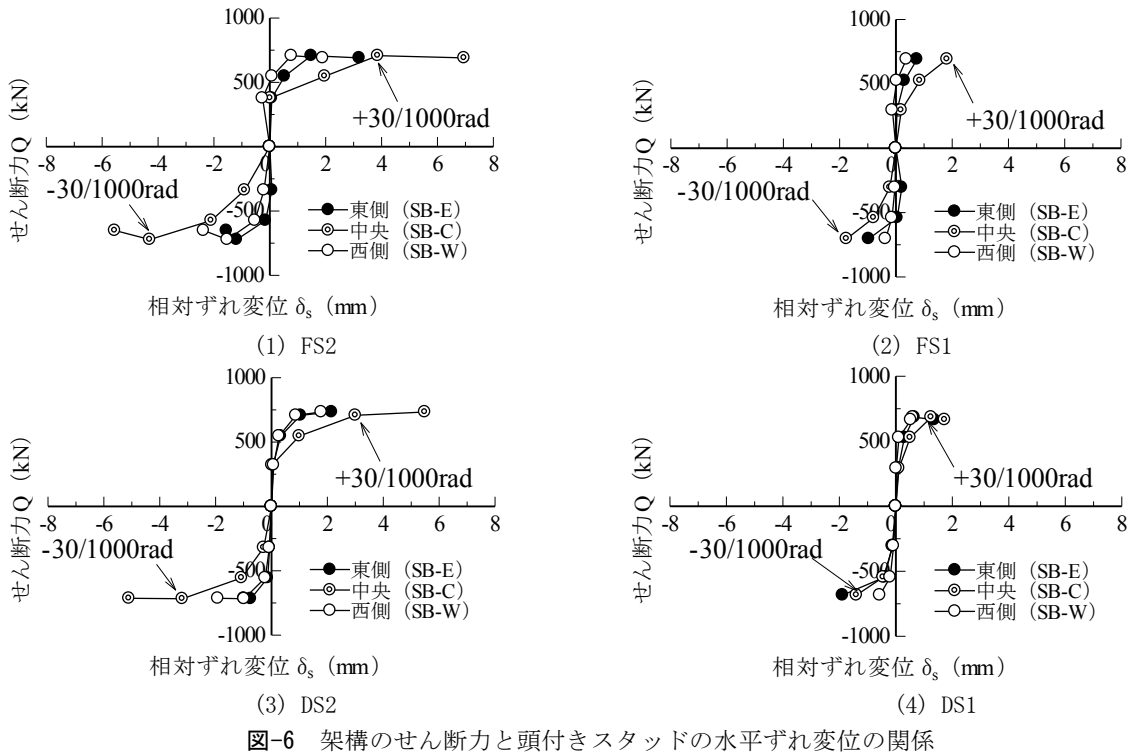
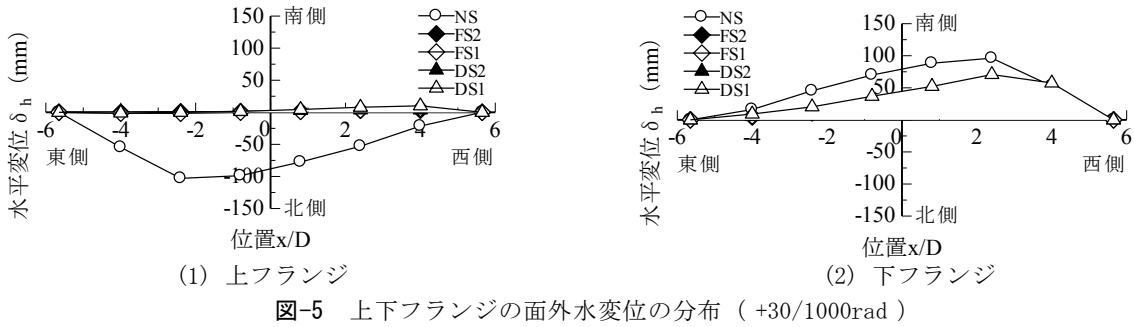
(2) 架構のせん断力と変形角の関係

図-4に各試験体の架構のせん断力と変形角の関係をそれぞれ示す。ここで、同図の縦軸は油圧ジャッキのせん断力Q、横軸は柱の変形角 θ_f である。なお、これらの各図には、梁単体の全塑性モーメント M_p^l と完全合成梁の全塑性モーメント ${}_cM_p^l$ のせん断力換算値 Q_p 、 ${}_cQ_p$ を併記した。

全ての試験体は10/1000radまでの変形領域では線形弾性の挙動を示し、それ以上の変形領域では剛性が低下する傾向を示した。以下、正加力に着目して考察する。

図-4(1)に示したNSは、+15/1000rad付近で横座屈が生じ、せん断力が頭打ちとなった。このときの最大せん断力は $Q_{max}=572kN$ であり $Q_p=586kN$ に近い値であったが、その後の横座屈の伸展とともに耐力は低下し+30/1000rad近傍で約450kNとなった。

同図(2)に示すFS2は+20/1000radで ${}_cQ_p=715kN$ とほぼ等しい $Q_{max}=708kN$ に達した。+30/1000radの変形領域までおおむね耐力を維持したものの、横座屈の伸展とともに床スラブとの合成効果を喪失し耐力が低下した。



同図 (3) に示す FS1 は +30/1000rad で $cQ_p=707\text{kN}$ にほぼ等しい $Q_{\max}=697\text{kN}$ に達した。最大せん断力に至るまでのせん断力 - 変形角曲線は、FS2 と同様な傾向を示したが、最大せん断力到達後の耐力低下は FS2 よりやや緩やかであった。一方、床スラブの損傷は FS2 よりも大きく、+40/1000rad から +50/1000rad に向かう加力の直前で床スラブが大きく損傷したため、それ以降の加力は中止した。

同図 (4),(5) に示すデッキ床タイプの DS2 と DS1 は、それぞれ平床タイプの FS2, FS1 と同様なせん断力 - 変形角曲線を示した。DS2 は +30/1000rad で $Q_{\max}=734\text{kN}$, DS1 は +20/1000rad で $Q_{\max}=685\text{kN}$ を示し、両者ともに cQ_p よりやや大きめの値であった。

(3) 梁の面外変位

図 -5(1),(2) に、 +30/1000rad の 1 回目ピーク時におけ

る鉄骨梁上下フランジの面外水平変位の分布をそれぞれ示す。同図の横軸は、梁の中央から測定位置までの距離を鉄骨梁せい D で無次元化している。床スラブのない NS の面外変位は上下フランジともに大きく、それぞれの最大変位はともに約 100mm であった。また、NS の上下フランジの変位分布は、上フランジが東側梁端から約 3D, 下フランジが西側から約 3D の位置で最大となる逆対称の形状を示した。一方、合成梁である残り 4 体の面外変位は、上フランジがほぼ零、下フランジも、NS と同様な変位分布を示すものの、変位量は NS の半分程度であり、床スラブによる横補剛効果が確認された。なお、合成梁である FS2, FS1, DS2, DS1 の面外変位は、同様な分布形状を示したが、変位量は片側スラブ付の FS1, FS2 のほうが、両側スラブ付の FS2, DS2 よりもやや大きい値を示した。

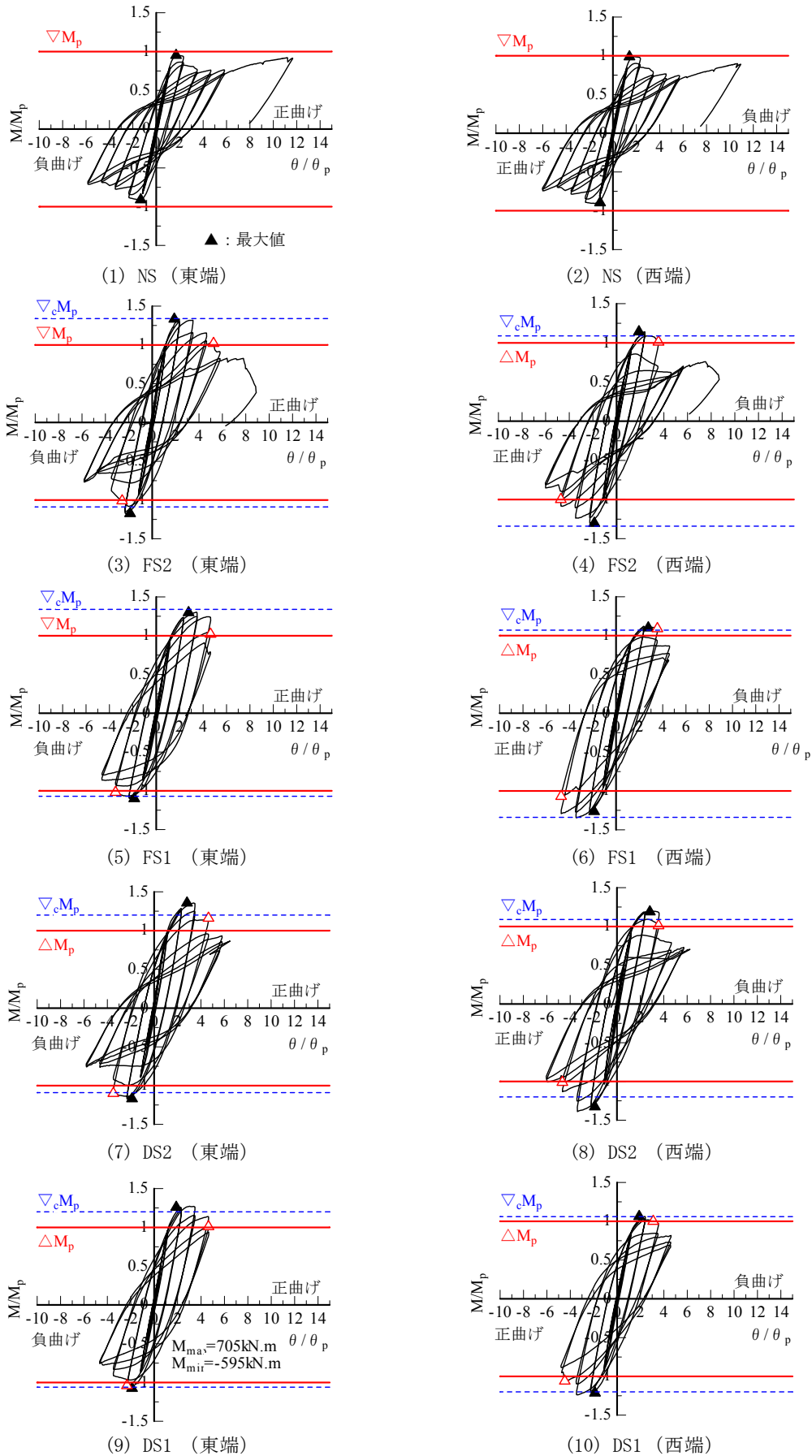


図-7 梁端部の曲げモーメントと回転角の関係

表-4 最大耐力の実験値と計算値の比較

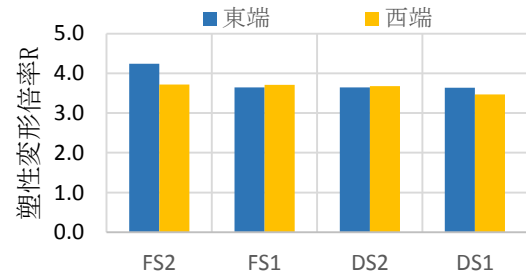
試験体	梁端方向	曲げ方向	実験値	計算値(全塑性モーメント)			
			最大値	梁単体	合成梁	耐力比	
			M_{max} kN.m	M_p kN.m	cM_p kN.m	M_{max}/M_p	M_{max}/cM_p
NS	東端	正	527	552	-	0.95	-
		負	504		-	0.91	-
	西端	正	500		-	0.91	-
		負	546		-	0.99	-
FS2	東端	正	740	554	742	1.34	1.00
		負	651		605	1.18	1.08
	西端	正	722		742	1.30	0.97
		負	632		605	1.14	1.04
FS1	東端	正	723	554	743	1.31	0.97
		負	610		592	1.10	1.03
	西端	正	746		743	1.35	1.00
		負	620		592	1.12	1.05
DS2	東端	正	751	554	666	1.36	1.13
		負	649		603	1.17	1.08
	西端	正	769		666	1.39	1.15
		負	665		603	1.20	1.10
DS1	東端	正	705	554	665	1.27	1.06
		負	595		590	1.07	1.01
	西端	正	686		665	1.24	1.03
		負	588		590	1.06	1.00

(4) 頭付きスタッドの水平ずれ変位

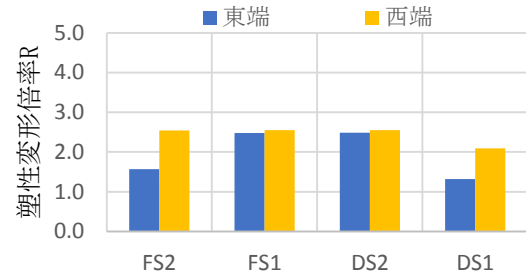
図-6に、合成梁架構のせん断力Qと頭付きスタッドの水平ずれ変位 δ_s の関係を示す。ここで、 δ_s は、図-2に示す東側梁端(●印)、梁中央(◎印)、西側梁端(○印)位置での上フランジと床スラブ下面間の梁材軸方向の相対水平ずれ変位である。また、図-6中のプロットは、各加力サイクルの1回目ピーク時の値を示している。これらの試験体の δ_s は、同一サイクル時で比較した場合、せん断力の増加に伴い中央部の方が端部よりも大きくなる傾向を示した。また、両側スラブ付のFS2、DS2と片側スラブ付のFS1、DS1を比較した場合、梁中央部の δ_s は両側スラブ付の方が大きく、 $\pm 30/1000\text{rad}$ 変形時における δ_s は、FS2が約4mm、DS2が約3mm、FS1とDS1が約2mmであった。なお、 $\pm 30/1000\text{rad}$ 変形時において、FS2とDS2の梁中間部の頭付スタッドの母材破断を複数箇所確認した。一方、FS1とDS1に関しては、頭付スタッドの母材破断が確認されなかったことから、FS2とDS2の梁中央部の δ_s は、頭付きスタッドの母材破断に伴って大きくなったと考えられる。

(5) 梁の曲げ耐力と塑性変形能力

図-7に各試験体の東西梁端部の曲げモーメントと回転角の関係を、表-4に最大耐力の実験値と計算値の比較を示す。ここで、図-7の縦軸は梁端の曲げモーメントMを鉄骨梁単体の全塑性モーメント M_p で無次元化した



(1) 正曲げ



(2) 負曲げ

図-8 合成梁の塑性変形倍率

M/M_p ，横軸は柱の変形角 θ_r と等しいとみなした梁端回転角 θ を M_p 時の弾性回転角 θ_p で無次元化した θ/θ_p である。なお、図-7の各図中には、正曲げおよび負曲げにおける完全合成梁の全塑性モーメント cM_p を併記した。

床スラブのないNSの最大曲げモーメント M_{max} は、 M_p に達するまでに横座屈を生じたため、 M_p 以下となった。一方、床スラブを有するFS2、FS1、DS2、DS1の M_{max} は、梁端部の下フランジが引張となる正曲げの方が負曲げよりも大きな値を示し、正負とも cM_p とほぼ等しい値となった。 M_p に対する耐力比 M_{max}/M_p は、FS2とFS1が1.10~1.35、DS2とDS1が1.06~1.39であり、合成梁の最大荷重は、 M_p 以上の値となった。

図-8に、図-7より求めた合成梁の塑性変形倍率Rを示す。ここでRは、Mが M_p を超えて最大値(図-7中▲印)に達し、再び M_p まで低下した時の回転角(図-7中△印)を限界回転角 θ_u とし、式(1),(2)⁹⁾で計算した。

$$\mu = \frac{\theta_u}{\theta_p} \tag{1}$$

$$R = \mu - 1 \tag{2}$$

図-8(1),(2)に示したRは、正曲げの方が負曲げよりも大きな値となった。同図(1)に示した正曲げのRは、試験体によらず、東端・西端ともにほぼ同じ値となったが、同図(2)の負曲げではややばらつき、FS2とDS1の東端のRが他よりもやや小さな値となった。このように、今回の実験の範囲では、床スラブの仕様とRとの間に相関は認められなかったが、正曲げ時のRは3.5~4、負曲

げ時のRは1.5～2.5であった。

4. まとめ

合成梁の耐力と塑性変形能力を確認するために部分架構実験を行い、以下の知見を得た。

- ①床スラブのないNSの加力終了後の損傷状況は、梁全体が大きくねじり変形する横座屈であった。床スラブを有するFS2, FS1, DS2, DS1も加力終了後には同様の横座屈を生じていたが、その度合いはNSよりも小さく、床スラブによる横補剛効果が認められた。
- ②FS2とDS2の床スラブの曲げひび割れは、両柱芯から4D～5Dまでの範囲に集中した。FS1とDS1にも同様な曲げひび割れ生じたが、床スラブ中央部にも梁の材軸に対し約45°方向のねじりひび割れが生じた。このねじりひび割れの発生はFS1よりもDS1の方が顕著であった。
- ③FS2とDS2の頭付きスタッドの損傷は、両柱芯から約3Dの範囲内においてコーン状破壊、3Dを超える中間部において母材破断であった。一方、FS1とDS1の頭付きスタッドの損傷は、両柱芯から2Dの範囲内でのコーン状破壊のみであった。
- ④NSは15/1000rad付近で横座屈が生じ、最大耐力は鉄骨梁単体の全塑性耐力 Q_p に達しなかった。一方、FS2, FS1, DS2, DS1の最大せん断力は Q_p 以上となり、合成梁の全塑性耐力 αQ_p とほぼ等しい値となった。なお、FS2とDS2、FS1とDS1のせん断力-変形角曲線はそれぞれ同様の形状であった。
- ⑤合成梁の頭付きスタッドの水平ずれ変位は、せん断力の増加に伴って梁中央部の方が梁端部よりも大きくなる傾向を示した。この傾向はFS2、DS2のほうがFS1、DS1より顕著であった。
- ⑥合成梁の両端部の最大曲げモーメント M_{max} は、正曲げの方が負曲げよりも大きな値となり、正負とも αM_p とほぼ等しい値となった。鉄骨梁単体の全塑性

モーメント M_p に対する耐力比 M_{max}/M_p は、FS2とFS1が1.10～1.35、DS2とDS1が1.06～1.39であり、合成梁の最大荷重は、 M_p 以上の値となった。

- ⑦本実験の範囲においては、床スラブの仕様と合成梁の塑性変形倍率Rとの間に相関は認められず、合成梁のRは正曲げで3.5～4、負曲げで1.5～2.5であった。

参考文献

- 1) 日建築学会：鋼構造物の座屈に関する諸問題2013, 2013.6
- 2) 伊賀はるな, 聲高裕治, 金尾伊織：横座屈によって終局状態を迎えるH形断面梁の実験データに基づく最大耐力と塑性変形能力の評価, 構造工学論文集, Vol.61 B, pp.185-198, 2015.3
- 3) 原田浩之, 松永健太郎, 江頭寛, 小坂英之, 森岡研三, 浅川拓哉：不完全合成梁の床スラブによる横補剛効果の確認実験その1 実験概要と梁の損傷状況, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1039-1040, 2017.8
- 4) 江頭寛, 松永健太郎, 原田浩之, 小坂英之, 森岡研三, 宮口大：不完全合成梁の床スラブによる横補剛効果の確認実験その2 実験結果と梁の塑性変形能力, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1041-1042, 2017.8
- 5) 江頭寛, 原田浩之, 松永健太郎, 小坂英之, 森岡研三, 浅川拓哉：不完全合成梁の床スラブによる横補剛効果の確認実験, 三井住友建設技術研究開発報告第15号, pp.87-92, 2017.10
- 6) 日本建築学会：鋼構造塑性設計指針, 2017.2
- 7) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計指針・同解説, 2013.3
- 8) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説, 2010.11
- 9) 日本建築学会：鋼構造座屈設計指針, 2018.2