

梁材端部 RC・中央部 S 造と柱 RC 造からなるハイブリッド構造 (FRASH 構法) の研究開発

Singh Upend Ravindra

佐々木 仁 増田 圭司

佐藤 幸博¹⁾ 有馬 義人²⁾

概 要

軽量でスパンを拡大化することができる鉄骨造が大スパンを有する建物の建設には多く使用されている。しかし近年、鉄骨の価格上昇等により建物の躯体工事のコストダウンの要求から、鉄骨造並みの大スパンを実現できる事務所ビルなどの研究開発が盛んに行われている。その実現方法の一つとして、鉄骨梁の材端部に鉄筋コンクリートを巻いたハイブリッド梁がある。本報では、梁の中央部が鉄骨造で材端部に鉄筋コンクリートを巻いたハイブリッド梁と柱が鉄筋コンクリート造で構成されるハイブリッド構造 (FRASH 構法) の開発を行っている。FRASH 構法は使用する鉄骨量が低減され、躯体工事のコストダウンが可能となる。また、梁の材端部を鉄筋コンクリートで巻くことにより梁の剛性が高くなり、居住性が改善されるといった特徴がある。本報では、ハイブリッド梁からなる十字形部分架構実験を行い、その実験概要およびハイブリッド梁の構造性能について報告する。

Research Development of RC column And Steel Hybrid beam Structure (FRASH Method)

Abstract

Since steel is lightweight and enables large spans, it is used mostly to construct buildings with large span. But in recent years, there's a concerted effort to reduce the skeleton cost of buildings, due to increase in the cost of steel. Therefore, research developments are being widely carried out on buildings using steel structure for large spans such as office buildings. One of the methods to construct these buildings is using steel beam with beam ends made from reinforced concrete. In this paper, development of hybrid structure with steel beam ends being reinforced concrete hybrid beam and columns being reinforced concrete (FRASH method) is carried out. The FRASH method reduces the usage of steel, which enables the reduction of the skeleton cost. And with beam ends being reinforced concrete, rigidity of the beam increases, resulting in improved habitability. In this paper, experimental outline and the structural performance of hybrid beams in a beam-column sub-assemblages is shown.

キーワード: FRASH 構法、ハイブリッド梁、曲げ
耐力、塑性変形、せん断補強係数

*1 首都圏支社 建築技術部

*2 首都圏支社 東京支店

§1. はじめに

1.1 背景

近年、鋼材の価格や加工費の高騰に伴い、鉄骨(以下 S と呼ぶ)造の建物を建設する際に経済性が求められている。これを背景に、S 造並みの大スパンを有する事務所ビルなどの建物に関する様々な研究が行われ、施工法が報告されている。特に、大スパンを実現する方法の一つとして S 造梁の材端部を鉄筋コンクリート(以下 RC と呼ぶ)で巻いたハイブリッド梁の研究が盛んに行われている。

そこで、梁材端部が RC、中央部が S 造と柱が RC 造からなるハイブリッド構造(FRASH 構法と名称)の開発を目的として十字形部分架構実験を行った^{1,2,3)}。

本報では、FRASH 構法の実験概要およびハイブリッド梁の構造性能について報告する。

1.2 FRASH 構法の概要

FRASH 構法の概要を図 1 に示す。梁の中央部が S 造で材端部に RC を巻いたハイブリッド梁と柱が RC 造で構成されるハイブリッド構造である。梁材端部に RC を巻くことや梁中央部側および梁端部側に集中補強筋(束にした数本の横補強筋)を巻くことによって、S 部の応力が RC 部に移行され、柱に伝達されるシステムとなっている。さらに、梁材端部に RC を巻くことによって、S 造梁に比べると梁の剛性が高くなる。これによって、架構の剛性も高くなり、梁のたわみや架構の層間変形角を小さくすることができ、居住性が改善する。また、鉄骨は接合部を貫通しないため、鉄骨量や加工手間の低減が図れ、コストダウンにつながる。

§2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は十字形の試験体 3 体で、形状寸法および配筋を図 2 に、試験体諸元を表 1 にそれぞれ示す。試験体は、梁加力点間距離 $L = 6,000\text{mm}$ 、柱支点間距離 $H = 2,000\text{mm}$ とし、実大の約 1/2 スケールの縮尺模型とした。各試験体の南梁および北梁の諸元を変化させて、計 6 本の梁とした。実験のパラメータは、梁の横補強筋比(以下 p_w

と呼ぶ)、コンクリートの設計基準強度(以下 F_c と呼ぶ)および梁の RC 区間の長さ(以下 l_c と呼ぶ)とした。試験体 No.1 は $l_c = 1,100\text{mm}$ 、 $F_c = 40\text{N/mm}^2$ と計画し、南梁の $p_w = 0.30\%$ 、北梁の $p_w = 0.50\%$ とした。試験体 No.2 は $l_c = 1,100\text{mm}$ とし、南梁の $F_c = 28\text{N/mm}^2$ 、 $p_w = 0.38\%$ 、北梁の $F_c = 60\text{N/mm}^2$ 、 $p_w = 0.17\%$ とした。また、試験体 No.3 は $F_c = 60\text{N/mm}^2$ とし、南梁の $l_c = 800\text{mm}$ 、 $p_w = 0.67\%$ とした上下 2 段配筋の試験体とした。それに対して北梁は $l_c = 580\text{mm}$ 、 $p_w = 1.34\%$ と計画した。試験体は 3 体とも梁の RC 部の曲げ降伏が先行するように計画した。

柱の諸元は 3 体ともに共通とし、 $F_c = 65\text{N/mm}^2$ とし、軸力比は $\eta = 0.15$ とした。

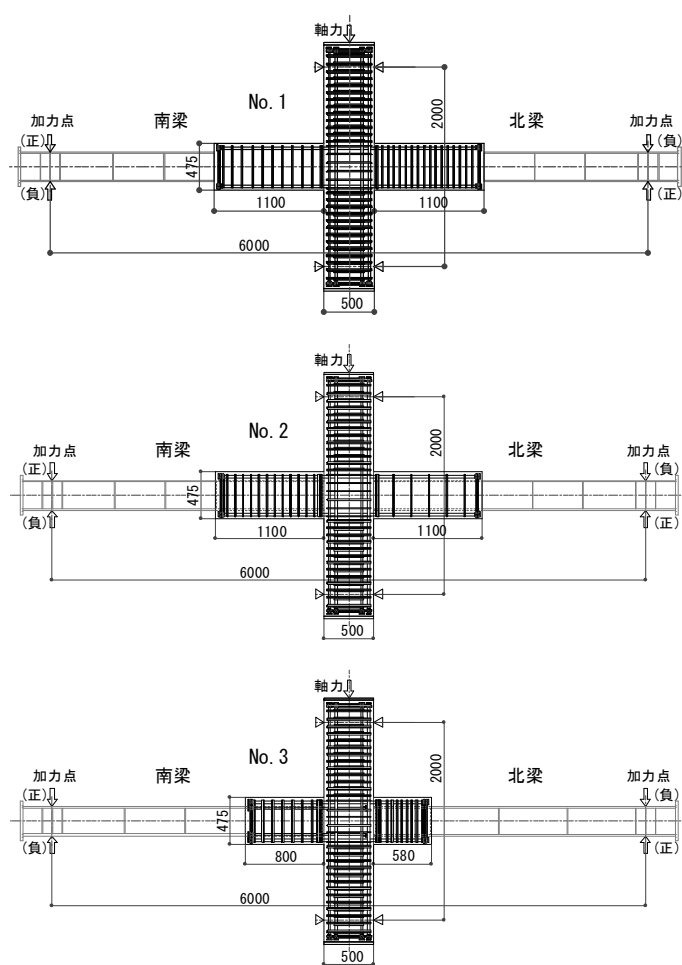


図 2 試験体図

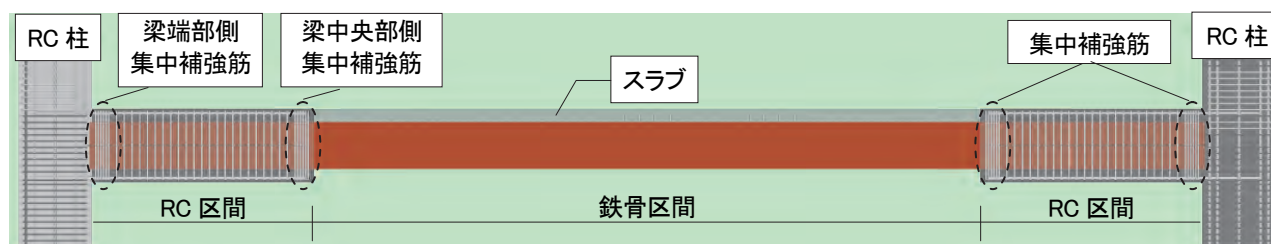


図 1 FRASH 構法の概要

2.2 加力および測定法

試験体の加力方法を写真 1 に、加力サイクルを表 2 にそれぞれ示す。加力は十字形の試験体を架台の上に横倒しにして柱に一定の軸力(約 2550kN)を導入した。加力時に架台と試験体の間にすべり材(テフロン)を用い、鉄骨梁が面外に振れないように面外拘束を設置した。梁先端(加力点位置)に取り付けた油圧ジャッキにより正負交番繰り返し载荷を行った。

部材角の測定として、加力点位置に取り付けた変位計により層間変形角(以下 R_t と呼ぶ)を計測し、加力は R_t により制御した。また、梁先端および RC 材端部に取り付けた変位計により梁先端部材角(以下 R_b と呼ぶ)および RC 材端部の部材角(以下 ${}_{RC}R_b$ と呼ぶ)をそれぞれ計測した。なお、 R_b および ${}_{RC}R_b$ は図 3 に示す部材角である。

2.3 使用材料

本実験で使用したコンクリート、鉄筋および鉄骨の力学的性質を表 3 に示す(単位: N/mm²)。コンクリートは $F_c = 28\text{N/mm}^2 \sim 65\text{N/mm}^2$ の普通コンクリートから高強度コンク

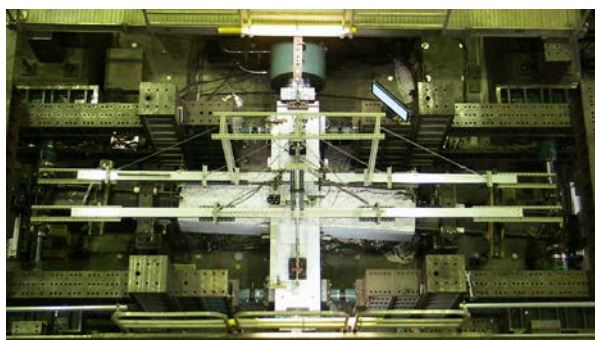


写真 1 加力方法

リートを計画し、それに対して圧縮強度(以下 σ_B と呼ぶ)も概ね同等なものが得られた。また鉄筋は、梁主筋に SD490、横補強筋に SD295A～USD785 の高強度鉄筋を用い、鉄骨は SM490A 材を使用した。

§ 3. 実験結果

3.1 実験経過

各試験体の主な実験経過の諸元を表 4 に、実験終了時のひび割れ状況を写真 2 にそれぞれ示す。いずれの試験

表 2 加力サイクル

制御変形角		制御変位	繰り返し回数
R_t (rad.)	$R_t (\times 10^{-3} \text{ rad.})$	δ_t (mm)	
1/400	2.5	7.50	±1
1/200	5	15.00	±1
1/100	10	30.00	±2
1/67	15	45.00	±2
1/50	20	60.00	±2
1/33	30	90.00	±2
1/25	40	120.00	±1
1/20	50	150.00	±1
1/15	60	180.00	±1

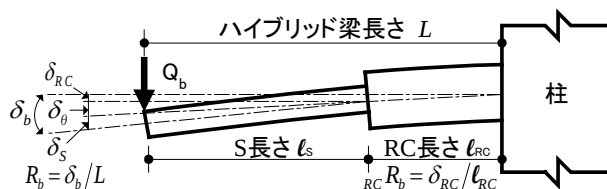


図 3 梁部材角の定義

表 1 試験体諸元

梁諸元							
試験体		No.1		No.2		No.3	
		南梁	北梁	南梁	北梁	南梁	北梁
B×D(mm)		425×475					
Fc(N/mm ²)		40	40	28	60	60	
Rc長さ(mm)		1100		1100		800	580
主筋(上・下)		5-D22 (SD490)		5-D22 (SD490)		5+2-D22 (SD490)	5-D22 (SD490)
横補強筋	配筋	4-D6@100 (SD295A)	4-D6@60 (SD295A)	4-D6@80 (SD295A)	4-D6@180 (SD295A)	4-K10@100 (USD785)	4-K10@50 (USD785)
	p _w (%)	0.30	0.50	0.38	0.17	0.67	1.34
集中補強筋 (中央部・端部)		6-K6 (USD785)	4-K10 (USD785)	8-K10 (USD785)	6-K10 (USD785)	10-K10 (USD785)	
鉄骨断面 300×150		12×12 (SM490A)	12×16 (SM490A)	12×12 (SM490A)		19×22 (SM490A)	12×19 (SM490A)
柱諸元							
試験体	B×D(mm)	Fc(N/mm ²)	主筋	横補強筋	p _w (%)	軸力比 η	
No.1～No.3 共通	500×500	65	12-D19 (SD390)	4-D10@70 (SD295A)	0.81	0.15	

表 3 材料の力学的性質

コンクリート			
部位	圧縮強度 σ_B	ヤング係数 $E_c (\times 10^4)$	割裂強度 σ_t
柱	68.6	3.16	4.82
	40.5	2.67	3.38
	29.9	2.40	2.69
梁	65.9	3.07	4.43
鉄筋			
部位	径	降伏点 σ_y	弾性係数 $E_s (\times 10^5)$
柱	D19	458	1.90
	D10	358	1.77
梁	D22	555	1.96
	D6	346	1.71
	K6	936	1.72
	K10	970	1.82
鉄骨			
部位	板厚	降伏点 σ_y	弾性係数 $E_s (\times 10^5)$
梁	P12	399	2.16
	PL16	376	2.15
	PL19	360	2.15
	PL22	351	2.10

体も $R_b = \pm 2.5 \times 10^{-3} \text{rad.}$ で梁の端部に曲げひび割れが発生し、 $R_b = \pm 10 \times 10^{-3} \text{rad.}$ において梁側面にせん断ひび割れが発生した。 $R_b = \pm 20 \times 10^{-3} \text{rad.}$ で梁主筋が曲げ降伏し、その後最大耐力に到達した。

写真 2 より、試験体 No.1 の南梁は最大耐力後、梁上端主筋に沿って付着割裂ひび割れが進行し、曲げ降伏後の付着割裂破壊 (FB モード) となった。それに対して北梁は大変形において梁端部の圧壊が進行して曲げ破壊 (F モード) となった。試験体 No.2 の南梁および北梁はともに上端と下端主筋に沿って付着割裂ひび割れが顕著となり、大変形においてコンクリートが剥落し、曲げ降伏後の付着割裂破壊 (FB モード) となった。また RC 区間が短い試験体 No.3 は、梁側面のせん断ひび割れが顕著となり、大変形において南梁の上端主筋に沿って付着ひび割れが進行して曲げ降伏後の付着割裂破壊 (FB モード) となった。それに対して北梁は梁端部の圧壊が見られ、曲げ破壊 (F モード) となった。

3.2 梁せん断力－梁部材角関係

各試験体の梁せん断力－梁部材角関係を図 4 に示す。同図の点線は梁せん断力 Q_b －梁先端部材角 R_b の関係を示し、実線は梁せん断力 Q_b －RC 材端部の部材角 ${}_{RC}R_b$ の関係をそれぞれ示す。

試験体 No.1 の南梁は最大耐力後、梁上端の付着割裂により耐力が徐々に低下した。それに対して、北梁は大きな耐力低下はなく、限界部材角 (実験値が最大耐力の $0.8 (0.8Q_{bmax})$ まで低下した部材角) が概ね $R_b = \pm 60 \times 10^{-3} \text{rad.}$ となった。一方付着割裂ひび割れが顕著だった、試験体 No.2 の南梁および北梁はともに最大耐力後に耐力が低下し、スリップ形の履歴となった。特に、横補強筋が少ない北梁 ($p_w=0.17\%$) では耐力の急低下や付着割裂によるスリップ形の履歴が顕著である。また RC 区間の長さが短い、試験体 No.3 の南梁および北梁はともに梁上端に付着割裂は見られたが、大きな耐力低下や変形の衰えはなく、良好な性能を示した。

3.3 曲げ終局耐力

図 5 に各梁の AIJ 学会略算式による曲げ終局耐力の計算値を梁先端荷重に換算した ${}_{cal}Q_{bmax}$ および実験値の最大梁先端耐力 ${}_{exp}Q_{bmax}$ の比較を示す。図中の□は正載荷時の最大耐力を示し、○は負載荷時の最大耐力をそれぞれ示す。AIJ 学会略算式による曲げ終局耐力の計算値に対する実験値の最大耐力は、ばらつきは小さく、平均値は 1.09 で、計算値と実験値は良好な対応を示しており、ハイブリッド梁の曲げ終局耐力は AIJ 学会略算式により評価できる。

3.4 せん断ひび割れ耐力

図 6 に各梁の主応力度式によるせん断ひび割れ耐力の計算値を梁先端荷重に換算した ${}_{cal}Q_{scr}$ と梁にせん断ひび割れが発生した実験値の梁先端耐力 ${}_{exp}Q_{scr}$ の比較を示す。主応力度式による計算値に対する実験値の平均値は 1.08 であり、変動係数は 18.0% である。ハイブリッド梁のせん断ひび割れ耐力は主応力度式により概ね $\pm 20\%$ の範囲で評価できる。

3.5 RC 材端部の塑性変形角

図 7 に各梁のせん断補強係数 (以下 $p_w \cdot \sigma_{wy} / \sigma_B$ と呼ぶ) および梁主筋の平均付着応力度に対する付着信頼強度の比 (以下 τ_{bu} / τ_f と呼ぶ) と、RC 材端部の塑性部材角 (以下 ${}_{RC}R_p$ と呼ぶ) との関係を示す。なお、 σ_{wy} は横

表 4 主な実験経過

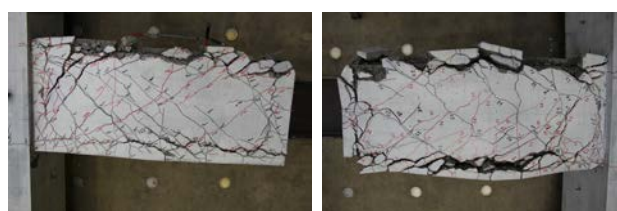
試験体	主な実験経過の梁部材角 $R_b (\times 10^{-3} \text{rad.})$				破壊形式
	曲げひび割れ	せん断ひび割れ	梁主筋降伏	最大耐力	
No.1 南梁	± 2.5	± 10	± 20	± 30	FB
No.1 北梁	± 2.5	± 10	± 20	± 30	F
No.2 南梁	± 2.5	± 10	± 20	-20, +30	FB
No.2 北梁	± 2.5	± 10	± 20	± 20	FB
No.3 南梁	± 2.5	± 10	± 20	-40, +50	FB
No.3 北梁	± 2.5	± 10	± 20	± 40	F

F = 曲げ破壊, FB = 曲げ降伏後の付着割裂破壊



No.1 南梁

No.1 北梁



No.2 南梁

No.2 北梁



No.3 南梁

No.3 北梁

写真 2 実験終了状況

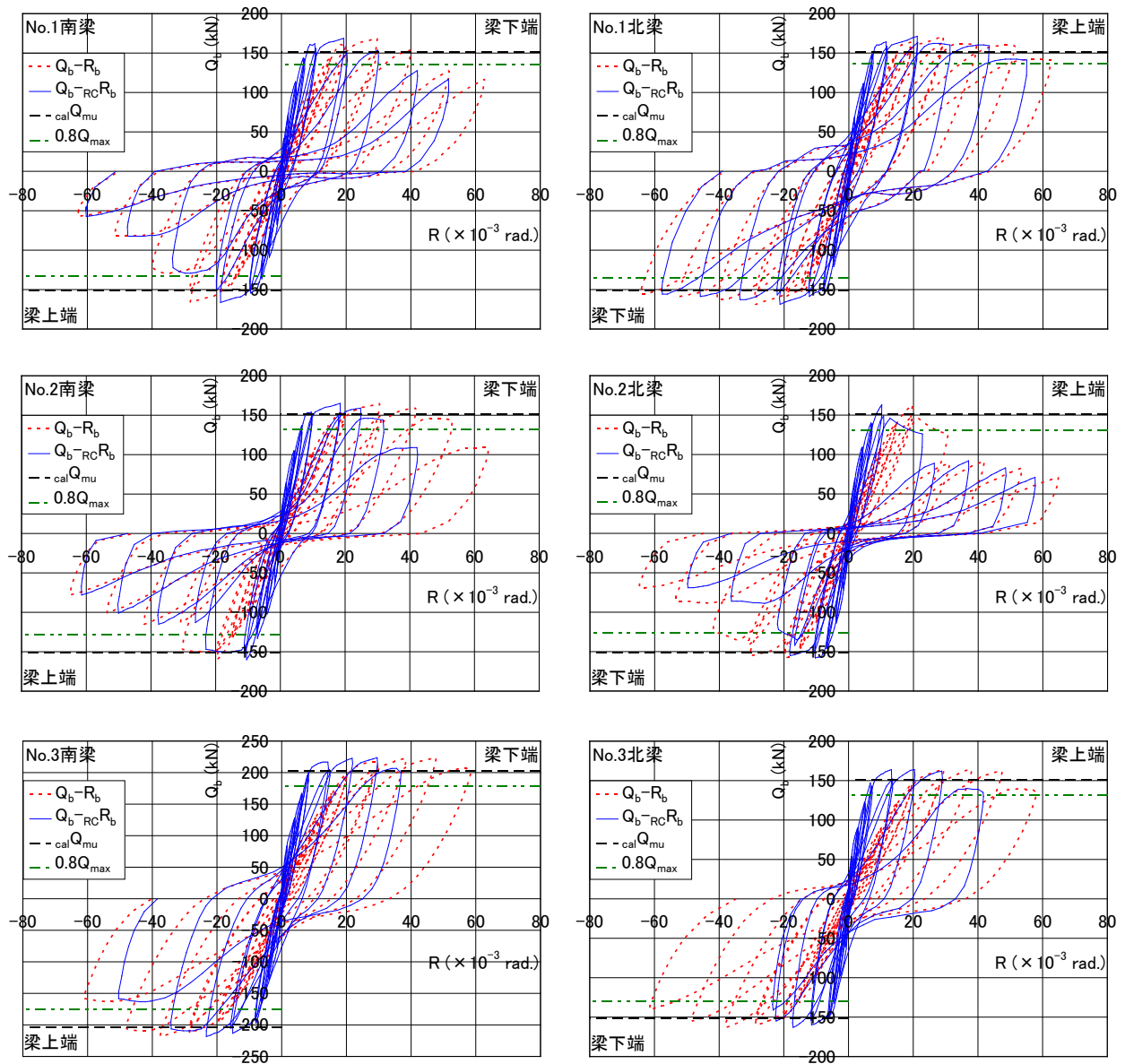


図 4 梁せん断力-梁部材角関係

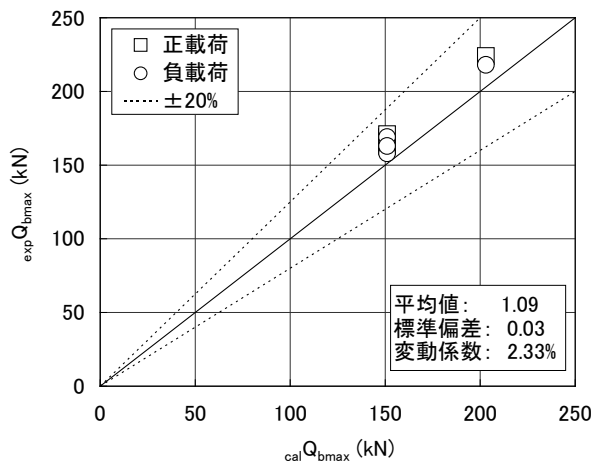


図 5 曲げ耐力の計算値と実験値の比較

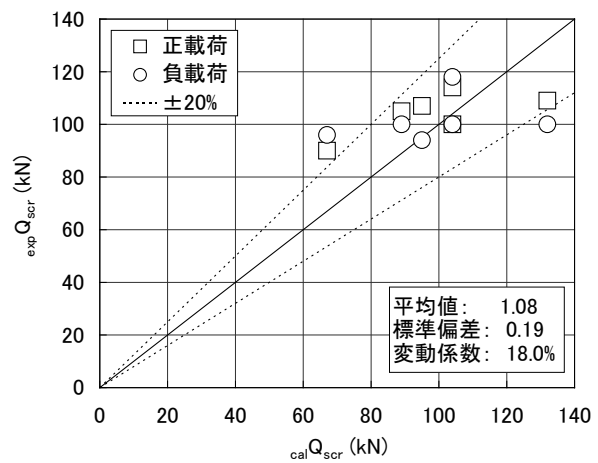


図 6 せん断ひび割れ耐力の計算値と実験値の比較

補強筋の降伏点で、 τ_{bu}/τ_f は文献 4 に基づいて算定し、 RCR_p は式 (1) による。

$$RCR_p = RCR_u - RCR_y \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 RCR_u ：材端部の限界部材角で、

実験値が $0.8Q_{bmax}$ まで低下した部材角

RCR_y ：梁主筋降伏時の部材角

$RCR_p - \tau_{bu}/\tau_f$ の関係より、試験体 No.2 の北梁に着目すると、 τ_{bu}/τ_f を 1 以上と計画したが、付着割裂破壊し、 $RCR_p = 2\%$ に達していない。それに対して、良好な性能を示した試験体 No.3 を見ると、 τ_{bu}/τ_f が 1 を下回っているのに、 $RCR_p \geq 2\%$ を確保している。一方、 $RCR_p - p_w \cdot \sigma_{wy}/\sigma_B$ の関係より、試験体 No.2 の北梁は $p_w \cdot \sigma_{wy}/\sigma_B$ は 0.9% と小さく、試験体 No.3 は 9.9% 以上である。これらのことより、 $RCR_p \geq 2\%$ を確保するには下記の関係が成り立つことがわかる。

$$\tau_{bu}/\tau_f \geq 1 \text{ かつ } p_w \cdot \sigma_{wy}/\sigma_B \geq 2.5\% \dots\dots\dots (2)$$

$$\tau_{bu}/\tau_f < 1 \text{ かつ } p_w \cdot \sigma_{wy}/\sigma_B \geq 10\% \dots\dots\dots (3)$$

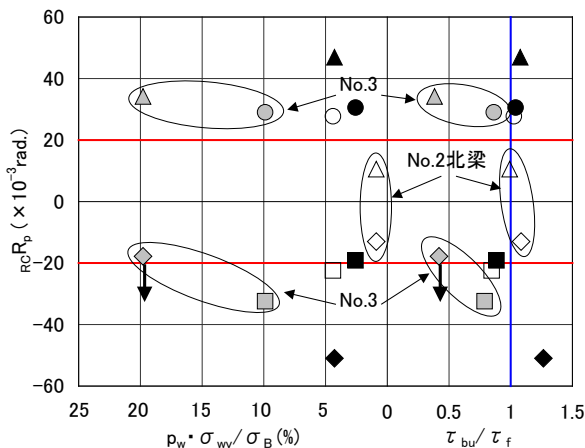


図 7 $p_w \cdot \sigma_{wy}/\sigma_B$ および τ_{bu}/τ_f の RCR_p との比較

§4. まとめ

梁の中央部を S 造、材端部を RC で巻いたハイブリッド梁と柱を RC 造とした FRASH 構法の開発を目的として十字形部分架構試験体 3 体を対象に実験を行った。ハイブリッド梁の構造性能について得られた知見を以下にまとめる。

- 1) いずれの試験体も計画通り梁主筋の曲げ降伏が先行し、その内 4 体が曲げ降伏後の付着割裂破壊 (FB モード) となり、2 体が曲げ破壊 (F モード) となった。

- 2) AIJ 学会略算式による曲げ終局耐力の計算値と実験値の最大耐力は良好な対応を示し、AIJ 学会略算式によるハイブリッド梁の曲げ終局耐力は評価できる。
- 3) 主応力度式による梁のせん断ひび割れ耐力の計算値と梁のせん断ひび割れ耐力の実験値との比は平均値が概ね 1 であり、主応力度式によるハイブリッド梁のせん断ひび割れ耐力は概ね $\pm 20\%$ の範囲で評価できる。
- 4) RC 材端部の塑性部材角はせん断補強係数と主筋の平均付着応力度に対する付着信頼強度の比との関係に影響され、平均付着強度を確保した場合、せん断補強係数を 2.5% 以上にする事で、塑性部材角 2% 以上を発揮することができる。

参考文献

- 1) Singh Upend Ravindra、佐々木仁、佐藤幸博、有馬義人：梁材端部 RC・中央部 S 造と柱 RC 造で構成されるハイブリッド構造に関する研究開発 その 1 内部柱梁部分架構におけるハイブリッド梁の構造性能、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、構造Ⅲ、pp.1271-1272、2011 年 8 月
- 2) Singh Upend Ravindra、佐々木仁、増田圭司、佐藤幸博、有馬義人：梁材端部 RC・中央部 S 造と柱 RC 造で構成されるハイブリッド構造に関する研究開発 その 2 RC 材端部の塑性変形およびせん断補強係数の妥当性、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、構造Ⅲ、pp.1393-1394、2012 年 9 月
- 3) 佐々木仁、Singh Upend Ravindra、増田圭司、佐藤幸博、有馬義人：梁材端部 RC・中央部 S 造と柱 RC 造で構成されるハイブリッド構造に関する研究開発 その 3 ハイブリッド梁の S ヒンジ試験体の実験概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、構造Ⅲ、pp.1395-1396、2012 年 9 月
- 4) 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 年 8 月

ひとこと

S 造に比べて、躯体工事のコストダウンや居住性の改善を狙った今回の FRASH 構法の開発を今後お客様に使用していただき、実績を延ばしていきたいと思っています。



Singh Upend
Ravindra