

FRASH構法におけるハイブリッド梁の梁-スラブ間のすべり耐力の評価法

シング ラヴィ 佐々木 仁
塚本 康誉 佐藤 幸博¹⁾

概 要

近年、建物の免震化の増加により、FRASH構法におけるハイブリッド梁は上層の一般階だけではなく、免震上部基礎梁にも採用されるディテールが増えている。特に、物流施設や病院などの大スパンを有する建物においては、従来、免震上部基礎梁を鉄骨鉄筋コンクリート造やプレストレスト鉄筋コンクリート造とした場合に比べると、より合理的な設計や施工の省力化とコストダウンが可能となった。

また、さらなる経済的な設計の観点から材端RC部の梁部分とスラブ部分をそれぞれのコンクリート強度とすることが求められている。しかしながら、ハイブリッド梁の梁とスラブ間に水平打継ぎを設けた既往の研究例はなく、すべり耐力の評価法が不明確である。そこで、FRASH構法におけるハイブリッド梁の材端RC部に水平打ち継ぎを設け、打継ぎ部のすべり耐力をせん断摩擦強度式に準拠して評価し、実験的に確認した。実験結果は過少評価となったため、せん断摩擦強度式の影響因子である打継ぎ部を横切る補強筋と打継ぎ部の摩擦係数に着目してハイブリッド梁のすべり耐力の評価法を提案した。本報では、その実験結果およびすべり耐力の評価法について得られた知見を報告する。

Evaluation of Shear Friction Strength of Beam to Slab Connections of Hybrid beams in FRASH Method

Abstract

In recent years, with an increase in the buildings with base isolation system, application of hybrid beams in the upper foundation beam of the base isolation is on the rise. Especially, in buildings with large spans such as, logistics and hospitals, a rational design as well as labor-saving and reduction of construction cost is achieved when compared to the conventional steel reinforced concrete beams or prestressed reinforced concrete beams.

On the other hand, with a concerted effort for a further economical design, concrete strength of hybrid beams needs to be differentiated for the beam portion and the slab portion respectively. However, with no previous research regarding the construction joint between beam and slab of hybrid beams, evaluation method of shear friction strength is unclear. In this paper, experimental research is being carried out on hybrid beam with construction joint between beam and slab, and the experimental results together with the evaluation method of shear friction strength of the joint is shown.

キーワード: ハイブリッド梁、打継ぎ、等価摩擦係数、せん断摩擦強度、すべり耐力

*1 西日本支社 建築技術部

§1. はじめに

1.1 背景

FRASH 構法におけるハイブリッド梁については、既報では、材端鉄筋コンクリート(RC)部の曲げ終局強度と塑性変形能および、せん断終局強度の評価法をそれぞれ提案した^{1~8)}。しかしながら、社会の変化に伴うニーズやさらなる経済的な設計の観点から材端RC部の梁とスラブをそれぞれのコンクリート強度に打分けること(異種強度梁)が望まれている。従来のRC造の梁では、梁とスラブ間に水平打継ぎを設けた場合の水平せん断力(すべり耐力)に対する設計は、現場打ち同等型指針式⁹⁾により評価されている。一方、ハイブリッド梁においては水平打継ぎを設けた既往の研究例はなく、すべり耐力は同様に評価できるかが不明である。

本報では、材端RC部の梁とスラブ間に水平打継ぎを設けたハイブリッド梁のすべり耐力を確認することを目的に、実験概要およびその結果と評価法について報告する。

1.2 FRASH構法の適用例

FRASH構法におけるハイブリッド梁は、梁の中央部が鉄骨(S)造で材端部にRCを巻いた構造で、中低層の事務所ビルや大学の講義棟などの一般階の梁として採用されている。しかしながら、近年建物の免震化の増加につれ、物流施設や病院などの大スパンを有する建物においては図1に示すように免震上部基礎梁にハイブリッド梁を採用するディテールが増えている。従来、大スパン建物の免震上部基礎梁は鉄骨鉄筋コンクリート(SRC)造やプレストレスト鉄筋コンクリート(PRC)造とすることが一般的であったが、ハイブリッド梁を用いることで合理的な設計や施工の省力化かつコストダウンが期待できる。

先端に定着プレートを取り付けた。材端RC部への鉄骨梁の埋込みは、固定用スタブの面位置まで呑み込ませた。固定用スタブの面位置から梁加力点までの距離 $L=2200\text{mm}$ とし、RC区間の長さ $l_c=1150\text{mm}$ とした。

試験体製作は、埋込み鉄骨梁は特別な処理を施さずに黒皮のままとし、上フランジ位置に水平打継ぎを設けた。上

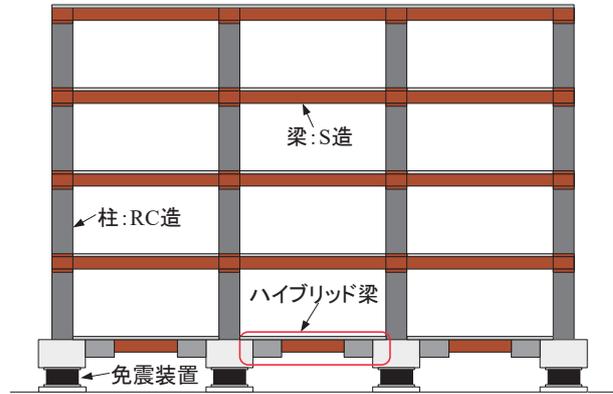


図1 ハイブリッド梁と免震構造の組合わせ

表1 試験体諸元

試験体		I No.4	I No.8
RC断面 (mm)		400×480	
スラブ厚さ t_s (mm)		90	
スラブ F_c (N/mm ²)		27	
梁 F_c (N/mm ²)		48	
梁主筋		6-D22 (USD685)	
横補強筋	配筋	2-D10@220 (SD295A)	2-D10@100 (SD295A)
	p_w (%)	0.16	0.36
集中補強筋	終端側	6-D10 (SD295A)	8-D10 (SD295A)
	始端側	8-D10 (SD295A)	14-D10 (SD295A)
鉄骨断面 (mm)		300×200×12×19 (SM490A)	

表2 材料の力学的性質(単位:N/mm²)

コンクリート	I No.4, I No.8			
	梁		スラブ	
σ_B	53.5		30.4	
σ_t	4.5		2.7	
E_c ($\times 10^3$)	35.33		28.10	
鋼材	D10	D22	PL12	PL19
σ_y	352	690	382	412
E_s ($\times 10^3$)	185	199	209	210

§2. 実験概要

2.1 試験体

試験体諸元を表1、材料の力学的性質を表2に、試験体の形状および断面を図2にそれぞれ示す。試験体は1/2スケールを想定し、固定用スタブを介して左右に片持ち梁形式とした。梁主筋は固定用スタブに通し配筋とし、全主筋とも

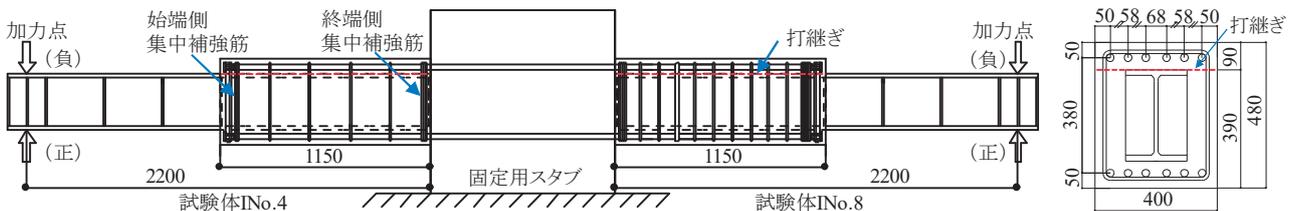


図2 試験体の形状および断面図

フランジより下部の先打ちを梁部分のコンクリート強度 $F_c=48\text{N/mm}^2$ とし、上フランジより上部90mmの後打ちをスラブ部分のコンクリート強度 $F_c=27\text{N/mm}^2$ とした。なお、打継ぎ部はレイタンスを除去して刷毛引きによりコンクリート面に人為的な凹凸を設けた。

2体とも材端RC部のすべり破壊が先行するよう計画し、実験パラメータは打継ぎ部を横切る補強筋量(横補強筋と集中補強筋)とした。また、打継ぎ部のすべり耐力は、せん断摩擦強度式に準拠して書換えた式(1)を用いて評価した。ただし、前述のように試験体の打継ぎ部に凹凸を設けたため式(1)における摩擦係数は文献9)に準拠して $\mu=1.0$ とし、また実験時にRC区間に鉛直応力を与えていないため $\sigma_0=0$ とした。

$$q_{fr} = \mu (s a_w \cdot s \sigma_{wy} + A a_w \cdot A \sigma_{wy} + o a_w \cdot o \sigma_{wy} + \sigma_0 \cdot b_c \cdot l_c) \quad (1)$$

ここに、

- μ : 打継ぎ部の摩擦係数 (=1.0)
- $s a_w$: 横補強筋の断面積の総和
- $s \sigma_{wy}$: 横補強筋の降伏点
- $A a_w$: 始端側集中補強筋の断面積の総和
- $A \sigma_{wy}$: 始端側集中補強筋の降伏点
- $o a_w$: 終端側集中補強筋の断面積の総和
- $o \sigma_{wy}$: 終端側集中補強筋の降伏点
- σ_0 : RC区間に生じる鉛直応力 (=0)
- b_c : せん断摩擦に有効なコンクリート幅 (= $B_c - B_s$)
- l_c : RC区間の長さ
- B_c : 材端RC部の梁幅
- B_s : 埋込み鉄骨梁幅

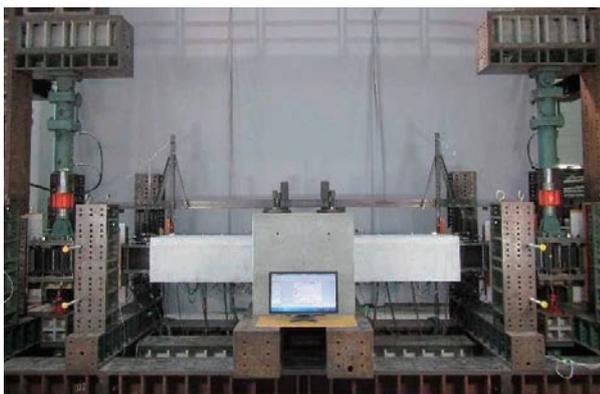


写真1 加力方法

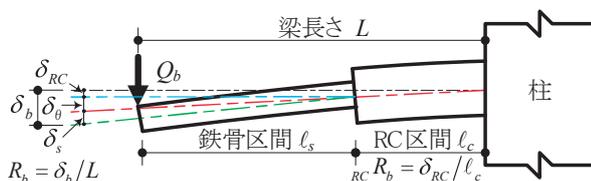


図3 梁部材角の定義

2.2 加力および測定法

試験体の加力方法を写真1に示す。加力は固定用スタブを反力床と固定し、加力時に鉄骨梁が面外に振れないように面外拘束を設置した。加力点位置に取り付けた油圧ジャッキにより上向き(スラブ圧縮)を正載荷、下向き(スラブ引張)を負載荷とし、正負交番繰り返し載荷を行った。加力は梁先端の部材角 (R_b) で制御し、加力サイクルは $R_b=\pm 2.5, \pm 5 (\times 10^{-3}\text{rad.})$ を各1回、 $\pm 10, \pm 15, \pm 20, \pm 30 (\times 10^{-3}\text{rad.})$ を各2回、 $\pm 40, \pm 50 (\times 10^{-3}\text{rad.})$ を各1回の繰返しとした。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 R_b を計測し、また材端RC部に取り付けた変位計により材端RC部の部材角 (${}_{RC}R_b$) を計測した。なお、 R_b および ${}_{RC}R_b$ は図3に示す部材角である。

§3. 実験結果

3.1 実験経過

各試験体の主な実験経過時の梁先端荷重 (Q_b) を表3に、材端RC部のひび割れ状況を写真2にそれぞれ示す。なお、ひび割れ状況は負載荷における横補強筋降伏時および正載荷における最大耐力時のものである。2体とも梁端部に曲げひび割れおよび小口部分に支圧ひび割れ発生後、 $R_b=-2.5 \times 10^{-3}\text{rad.}$ で打継ぎ部にひび割れが発生した。その後、負載荷時の $R_b=-5 \times 10^{-3}\text{rad.}$ および正載荷時の $R_b=+10 \times 10^{-3}\text{rad.}$ でせん断ひび割れがそれぞれ発生した。さらに、試験体INo.4は $R_b=-5 \times 10^{-3}\text{rad.}$ で、試験体INo.8は $R_b=-10 \times 10^{-3}\text{rad.}$ で打継ぎ部を横切る補強筋が降伏した。

大変形においては2体とも、正載荷時のせん断ひび割れの増加や、付着ひび割れが発生し、かぶりコンクリートが部分的に剥落した。一方負載荷では、写真2にあるように打継ぎ部のひび割れは梁端部まで延伸せず、端部付近の曲げひび割れと繋がったことが特徴的であり、ひび割れの幅や打継ぎ部の水平すべりが進んだ。また打継ぎ部付近の小口部分が損傷し、それに伴い鉄骨の拔出しや小口部分のかぶりコンクリートが部分的に剥落した。

2体とも打継ぎ部を横切る補強筋の降伏および打継ぎ部の水平すべりによりすべり破壊(SLモード)となった。

3.2 梁せん断力一部材角関係

各試験体の梁せん断力一部材角関係を図4に示す。同図の破線は $Q_b - R_b$ の関係を示し、実線は $Q_b - {}_{RC}R_b$ の関係をそれぞれ示す。また一点鎖線は、式(1)による打継ぎ部のすべり耐力の計算値 (q_{fr}) を梁先端の荷重 (Q_{SL}) に換算したものである。図4より、試験体INo.4は $R_b=-5 \times 10^{-3}\text{rad.}$ で負載荷時の最大耐力に達し、 $R_b=+15 \times 10^{-3}\text{rad.}$ で正載荷時の最大耐力に達した。試験体INo.8は $R_b=-10 \times 10^{-3}\text{rad.}$ で負載荷

時の最大耐力に達し、 $R_b=+20 \times 10^{-3} \text{rad.}$ で正載荷時の最大耐力に達した。2体とも負載荷時最大耐力($Q_{b \max}$)後、荷重は一旦低下しているが、その後実験終了までほぼ横ばいの傾向を示した。また、2体とも負載荷時の最大耐力($Q_{b \max}$)は梁先端の荷重に換算した打継ぎ部のすべり耐力の計算値(Q_{SL})に達しておらず、試験体INo.4では $Q_{b \max}/Q_{SL}=0.86$ 、試験体INo.8では $Q_{b \max}/Q_{SL}=0.76$ である。これにより、せん断摩擦強度式に準拠して仮定した式(1)よりハイブリッド梁のすべり耐力は評価できないことがわかる。

§4. 実験結果の検証および耐力評価法の提案

図4より負載荷時の最大耐力($Q_{b \max}$)に対して式(1)に仮定したハイブリッド梁のすべり耐力は過大評価となり、適合性が劣った。そこで、式(1)のせん断摩擦強度式の影響因子である打継ぎ部を横切る補強筋の効果および打継ぎ部の摩擦係数に着目し、実験結果の検証を行った。

4.1 せん断摩擦に有効な補強筋

まず、打継ぎ部を横切る補強筋の効果について検証する。試験体INo.4と試験体INo.8の負載荷時における打継ぎ付近の補強筋のひずみ度の分布を図5に示す。図5(a)は

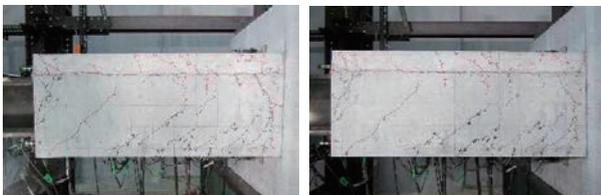
補強筋のひずみゲージ貼付位置であり、(b)は補強筋のひずみ度分布である。同図より、2体とも $R_b=-10 \times 10^{-3} \text{rad.}$ で打継ぎ部を横切る横補強筋のほとんどが降伏ひずみに達しているが、終端側の集中補強筋(SD1)のひずみは小さいことがわかる。これは前述の写真2のひび割れ状況に示したように、打継ぎ部のひび割れは梁端部まで進展せず、端部付近の曲げひび割れと繋がっているため、終端側の集中補強筋にひずみが生じなかった要因であると推察する。そこで、終端側の集中補強筋はせん断摩擦に対する抵抗力が小さいと考え、式(1)に仮定したすべり耐力の評価から終端側の集中補強筋($\alpha a_w \cdot \sigma_{wy}$)を除くこととした。

4.2 打継ぎ部における摩擦係数

次に、打継ぎ部における摩擦係数について検証する。試験体の打継ぎ部は刷毛引きにより人為的な凹凸を設けたため、式(1)の摩擦係数は文献9)に準拠して $\mu=1.0$ とした。しかしながら、ハイブリッド梁は図6に示すように打継ぎ部にコンクリート部分と鉄骨部分が混在しており、また文献9)の摩擦係数は先打ちコンクリートと後打ちコンクリート間の摩擦係数である。そこで、打継ぎ部の摩擦係数は、先打ちと後打ちコンクリート間の摩擦係数(μ_c)と、後打ちコンクリートと

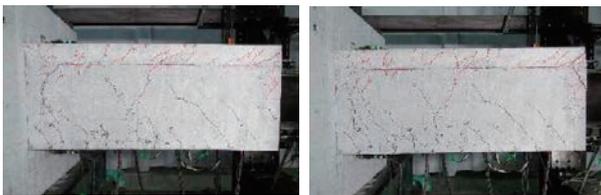
表3 実験現象および梁先端荷重

実験の主な現象		梁先端荷重 Q_b (kN)	
		INo.4	INo.8
曲げCrack	正	30	35
	負	-47	-19
打継ぎCrack	負	-42	-70
せん断Crack	正	140	142
	負	-76	-107
最大耐力	正	185	239
	負	-85	-135
破壊モード	打継ぎ部のすべり破壊(SLモード)		



INo.4(負載荷時)

INo.4(正載荷時)



INo.8(負載荷時)

INo.8(正載荷時)

写真2 ひび割れ状況

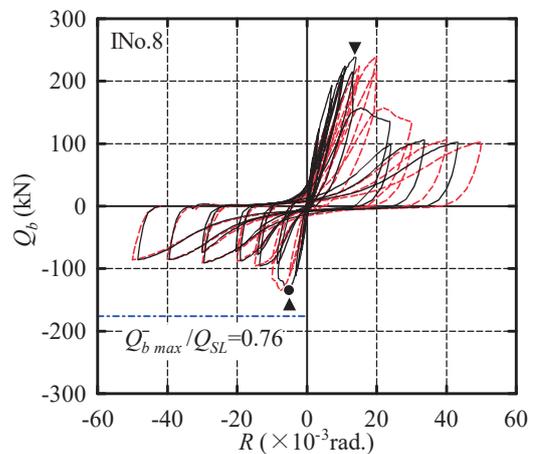
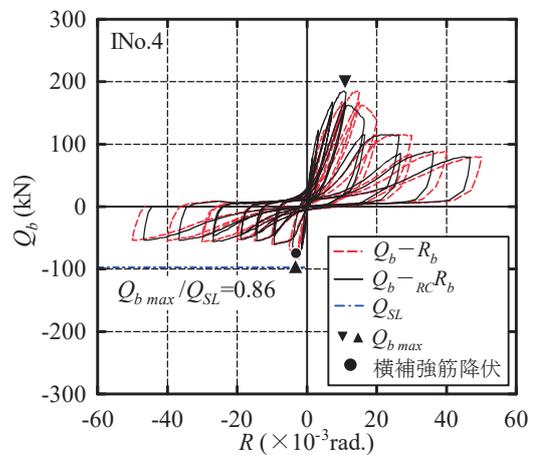


図4 梁せん断力-部材角関係

鉄骨間の摩擦係数(μ_s)をそれぞれ適切に評価する必要があると考える。よって、打継ぎ部における μ_{rc} と μ_s をそれぞれ考慮した等価摩擦係数(μ_{eq})を導入し、式(2)のように仮定した。なお、式(2)におけるコンクリート間の摩擦係数(μ_{rc})は文献9)に準拠し、コンクリートと鉄骨間の摩擦係数(μ_s)については実験結果より誘導することとした。

$$\mu_{eq} = \frac{\mu_{rc} \cdot b_c + \mu_s \cdot B_s}{B_c} \quad (2)$$

試験体INo.4と試験体INo.8の負荷荷時の打継ぎ部における水平すべり変位分布を図6に示す。図7(a)は水平すべり変位の測定位置であり、(b)は打継ぎ部の水平すべり変位の分布である。2体とも $R_b = -10 \times 10^{-3} \text{rad}$ で打継ぎ部の水平すべり変位(δ_{SL})が顕著に現れた。また前述の図5(b)よりも同様に $R_b = -10 \times 10^{-3} \text{rad}$ で終端側の集中補強筋を除き、打継ぎ部を横切る補強筋が降伏している。よって、このときの実

験時の梁先端の荷重がすべりに抵抗できるせん断力($exp Q_{SL}$)と考え、打継ぎ部のすべり耐力($exp q_{SL}$)に換算した。さらに式(1)を式(3)のように書換え、等価摩擦係数(μ_{eq})を実験結果より逆算した。なお、RC区間に生じる鉛直応力が無いため、 $\sigma_0 = 0$ とした。

$$\mu_{eq} = \frac{exp q_{SL}}{(s a_w \cdot \sigma_{wy} + A a_w \cdot A \sigma_{wy} + \sigma_0 \cdot b_c \cdot l_c)} \quad (3)$$

得られた等価摩擦係数(μ_{eq})と、コンクリート間の摩擦係

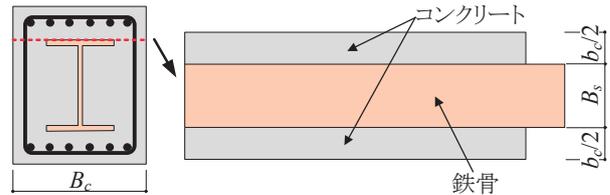
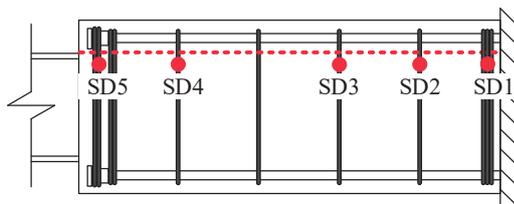
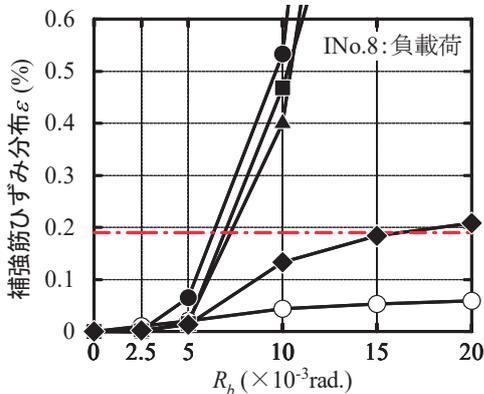
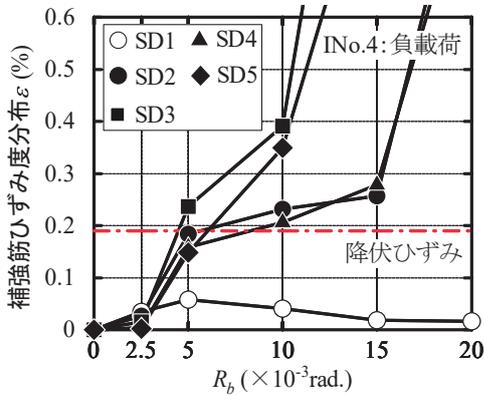


図6 打継ぎ部の切断面

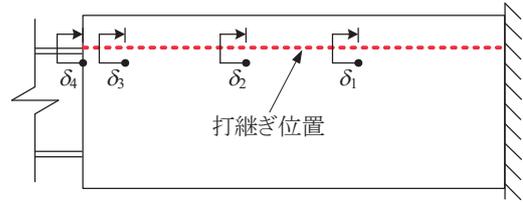


(a) ひずみゲージ貼付位置

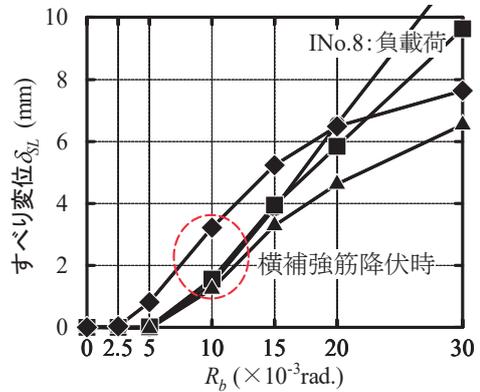
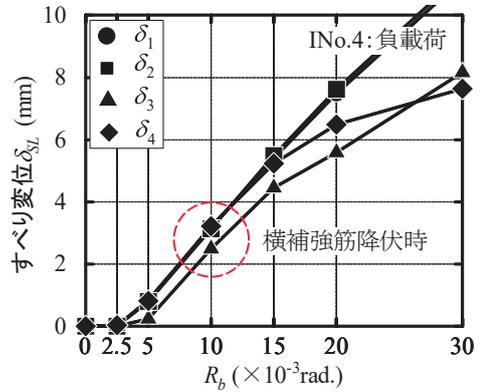


(b) 補強筋のひずみ度分布

図5 打継ぎ部を横切る補強筋のひずみ分布



(a) 水平すべり変位測定位置



(b) 水平すべり変位の分布

図7 打継ぎ部の水平すべり変位の分布

数($\mu_{rc}=1.0$)を用い、さらに式(2)を式(4)のように変形し、後打ちコンクリートと鉄骨間の摩擦係数(μ_b)を導出した。

$$\mu_s = \frac{\mu_{eq} \cdot B_c - \mu_{rc} \cdot b_c}{B_s} \quad (4)$$

以上の仮定により実験結果から導いた試験体INo.4と試験体INo.8の後打ちコンクリートと鉄骨間の摩擦係数(μ_b)を図8に示す。2体とも概ね同様な値を示し、試験体INo.4では $\mu_b=0.62$ と、試験体INo.8では $\mu_b=0.56$ となり、また2体の平均値は0.59であった。

4.3 すべり耐力評価法の提案

終端側の集中補強筋の控除およびコンクリートと鉄骨間の摩擦係数を考慮した等価摩擦係数(μ_{eq})を用いて修正した打継ぎ部のすべり耐力($q_{fr eq}$)の評価式を下記に示す。

$$q_{fr eq} = \mu_{eq} (a_w \cdot \sigma_{wy} + a_w \cdot \sigma_{wy} + \sigma_0 \cdot b_c \cdot l_c) \quad (5)$$

ただし、
$$\mu_{eq} = \frac{\mu_{rc} \cdot b_c + \mu_s \cdot B_s}{B_c}$$

試験体INo.4と試験体INo.8の負荷荷時の実験値の最大耐力および式(5)より再評価した打継ぎ部のすべり耐力の計算値を梁先端の荷重に換算した値の対応($Q_{b max}/Q_{SL eq}$)を表4に示す。なお、後打ちコンクリートと鉄骨間の摩擦係数は図8の下限値である0.56を用いた。試験体INo.4では $Q_{b max}/Q_{SL eq}=1.51$ 、試験体INo.8では $Q_{b max}/Q_{SL eq}=1.22$ となり、実験の最大耐力は式(5)により評価できる。

§5. まとめ

材端RC部の梁とスラブ間に水平打継ぎを設けたハイブリッド梁のすべり耐力の評価法について得られた知見を以下にまとめる。

- 2体とも計画通り打継ぎ部を横切る補強筋の降伏により水平すべり破壊(SL破壊モード)となった。
- 材端RC部のひび割れ性状および打継ぎ部を横切る補強筋のひずみより終端側の集中補強筋はせん断摩擦に対する抵抗力が小さいことがわかった。
- ハイブリッド梁における打継ぎ部のすべり耐力は終端側の集中補強筋を除くことおよび、等価摩擦係数を用いることで式(5)により評価できる。

参考文献

- 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、pp.1271-1272、2011.8

- 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、pp.1393-1394、2012.9
- 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(FRASH構法)の研究開発、フジタ技術研究報告、第48号、pp.49-54、2012.11
- Singh R., Sasaki H., Masuda K., Sato Y., Arima Y.: Development of RC column and Steel Hybrid beam system (FRASH method), The IABSE Conference, Nara, V. 104, NS-16 pp. 1-81, 2015.5
- シング ラヴィ, 佐々木仁, 佐藤幸博: 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4 ハイブリッド梁のせん断破壊実験の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1435-1436、2013.8
- 佐藤幸博, 佐々木仁, シング ラヴィ: 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5 ハイブリッド梁のせん断終局耐力の評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1437-1438、2013.8
- シング ラヴィ, 佐々木仁, 増田圭司, 佐藤幸博: FRASH構法におけるハイブリッド梁のせん断終局耐力の評価に関する研究、フジタ技術研究報告、第50号、pp.13-18、2014.11
- シング ラヴィ: 柱RC造と梁中央部S造・梁端部RC造のハイブリッド構法の開発と施工事例、建築技術、No.790、pp.54-61、2015.11
- 日本建築学会: 現場打ち同等型プレキャスト鉄筋コンクリート構造設計指針(案)・同解説、2002.10

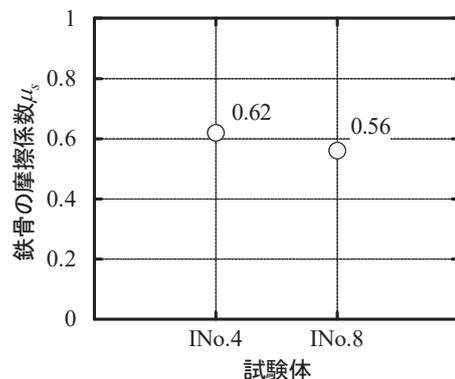


図8 後打ちコンクリートと鉄骨間の摩擦係数

表4 実験値の最大耐力とすべり耐力計算値の比較

	$Q_{b max}$ (kN)	$Q_{SL eq}$ (kN)	$Q_{b max}/Q_{SL eq}$
INo.4	83	55	1.51
INo.8	135	111	1.22

ひとこと

ハイブリッド梁は一般階の梁だけではなく、免震上部基礎梁への適用がより合理的な設計や施工の省力化を可能にした。今後も変化やニーズに応えるように進化させていきたいと思いをします。



シング ラヴィ