

# 論文 ハーフプレキャスト SC 部材の曲げ挙動に関する実験的検討

平 陽兵\*1・山野辺 慎一\*2・内藤 英樹\*3・鈴木 基行\*4

**要旨:** 鉄筋を用いない鉄骨コンクリートをハーフプレキャストとして利用した梁部材について、鋼材とコンクリート並びにハーフプレキャストと後打ちコンクリートの一体化のために孔あき鋼板ジベルを配置し、これの有無を試験要因とした 2 体の試験体について載荷実験を行った。その結果、ジベルの有無に関係なく終局曲げ耐力は鋼材とコンクリートの完全付着を仮定した計算耐力を上回っており、良好な一体性が得られた。また、目視だけでは判断できない試験体内部のひび割れによる損傷状況を比較するため、強制加振試験を実施した。その結果、ジベルの有無に依らずに 2 体の試験体は同程度の損傷状況であることが示唆された。

**キーワード:** 複合構造, SC 部材, ハーフプレキャスト, 曲げひび割れ幅

## 1. はじめに

プレキャスト部材は、構造物を構築する上で、現場施工の省力化や工場での製作による品質向上などにつながるから、多くの現場で使われている。プレキャスト部材を現場で架設する際、揚重設備に制限がある場合には、部材の全てをプレキャストとするのではなく、型枠を兼ねる部分など断面の一部をプレキャスト化したハーフプレキャスト (HPCa) 部材の利用が有効である。

鉄筋コンクリート (RC) による HPCa 部材は、建築構造物や鉄道高架橋<sup>1)</sup>など数多く施工されている。これを、鉄骨とコンクリートからなる SC 部材とすることで、鉄筋組立作業が不要となり、昨今の熟練工不足への対応や現場作業工程の短縮につながる。また、HPCa 部材の剛性を大きくできれば、さらなる支保工低減が可能になる可能性がある。

SC 部材については、これまでに多くの施工事例があるが、曲げ部材として使用する場合、鋼材のコンクリートとの付着性能が鉄筋とは異なるため、曲げひび割れ幅の評価が課題となる。そのため、鋼材とコンクリートとの付着確保のために、鋼材に突起付き H 形鋼<sup>2)</sup>や縞付き鋼板<sup>3)</sup>を用いた検討がなされている。

筆者らは、HPCa 部材を用いた SC 部材の適用を考え、付着確保のために鋼板に孔を設ける、あるいは孔あき鋼板ジベル (PBL) を設置することとした。HPCa 部材では PCa 部と後打ちコンクリートの一体性の確保も課題となるが、本実験では、コンクリート面に凹凸を設けるとともに、PBL を HPCa 部から突出させることでより一体性を高めた。このような部材に対し、本検討では、後打ちコンクリートとの一体性及び曲げ耐力及び曲げひび割れ幅などの基礎データの取得を目的に載荷実験を行った。さらに、試験体のひび割れの発生状況や試験体内部の損傷

状況を、目視観察だけでなく強制加振試験を実施し、これによって得られる共振周波数の変化によって確認した。

## 2. SC 梁の曲げ載荷実験

### 2.1 実験概要

#### (1) 試験体の種類と形状

図-1 及び 2 に試験体形状を、表-1 に試験体一覧を示す。試験体は 2 体とし、SC-PBL は上下フランジに PBL を取り付け、下フランジに取り付けた PBL は、HPCa 部材から突出させることで後打ちコンクリートと一体性を高めた。SC-N は SC-PBL から PBL を無くしたものである。試験体形状は、750mm×750mm の正方形断面で長さ 5,800mm の梁部材とした。鉄骨は上下フランジとウェブ鋼板によって口の字形の断面を構成し、鋼板は補強材として必要な鋼材量を確保した上で、コンクリートとの一体性確保の点から可能な限り大きな孔を設けた。PBL の孔は、粗骨材最大寸法以上であることと、これまでの事例を参考に直径 50mm とし、孔の間隔は複合構造標準示方書<sup>4)</sup>に示される構造細目 (孔径の 1.6~2.8 倍) から 2.0 倍とした。鉄骨はすべてコンクリートに埋め込まれる充覆形とした。実験時に載荷点及び支点となる位置に補剛

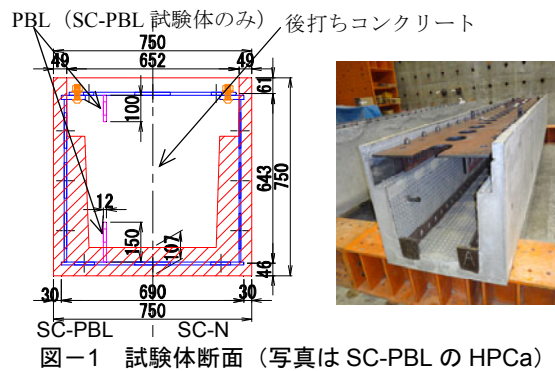


図-1 試験体断面 (写真は SC-PBL の HPCa)

\*1 鹿島建設 (株) 技術研究所 修 (工) (正会員)

\*2 鹿島建設 (株) 技術研究所 博 (工) (正会員)

\*3 東北大学准教授 大学院工学研究科土木工学専攻 博 (工) (正会員)

\*4 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

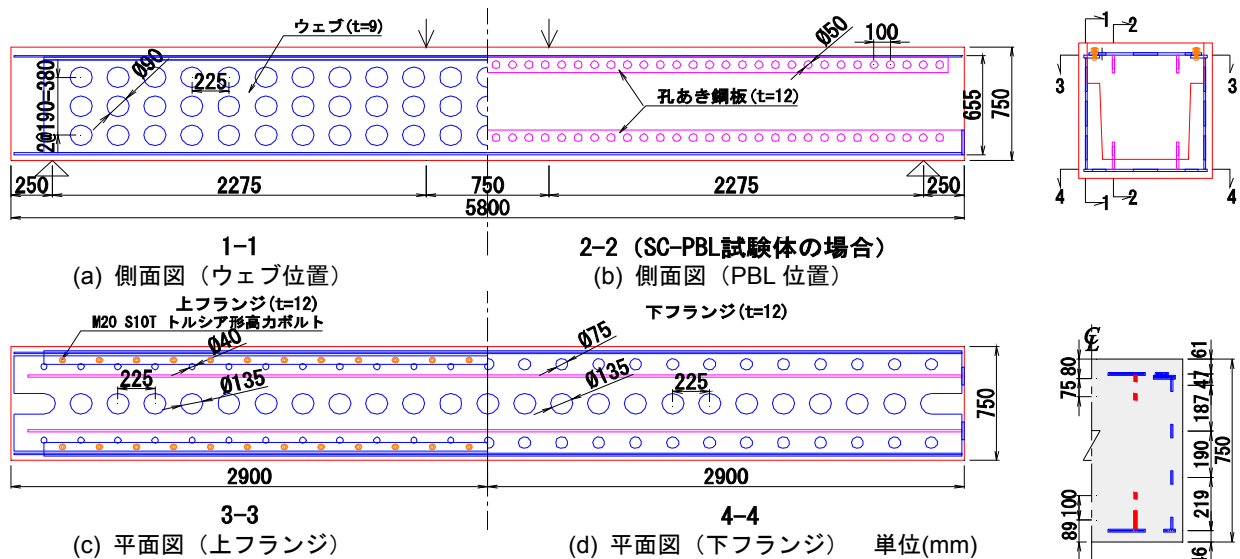


図-2 試験体形状図

図-4 鋼材位置 (SC-PBL)

表-1 試験体一覧

試験体	ずれ止め	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )		降伏荷重 (kN)		最大耐力 (kN)	
		HPCa 部	後打ち部	HPCa 部	後打ち部	実験値	計算値*	実験値	計算値*
SC-PBL	PBL 有り	53.9	54.0	4.03	3.90	1,682	1,733 (0.97)	2,608	2,185 (1.19)
SC-N	PBL 無し	57.6	55.2	4.31	4.11	1,391	1,361 (1.02)	2,025	1,710 (1.18)

表-2 鋼材材料試験結果

部位	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
フランジ, PBL	391	552
ウェブ	387	532

※計算値の ( ) 内数値は、実験値と計算値の比

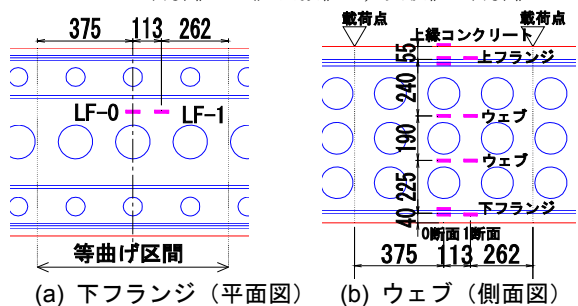


図-3 ひずみ計測位置図

材は設けず、補剛材により鋼材とコンクリートの一体性を高めることにならないよう配慮した。

先行して製作した HPCa 部材は、口の字形となっており、口の字を形成する 4 辺の内、3 辺は鉄骨とコンクリートで U 字形 (図-1 のハッチング部分) を形成し、残りの 1 辺は鋼板 (上フランジ) としたものである。コンクリートで覆われた下フランジとウェブは、隅肉溶接で接合した。上フランジはウェブに溶接して取付けた鋼板とボルト接合しており、コンクリートで覆われた U 字形部と一体となって挙動するようにした。これにより、後施工となる内部のコンクリート充填時には口の字の断面を有する HPCa 部材となる。コンクリートの境界面は市販の打継用シートを用いて深さ 8mm の凹凸を設けた。

## (2) 使用材料

鋼板は全て SM490A 材とし、板厚は上下フランジと PBL を 12mm、ウェブを 9mm とした。表-2 に鋼材の材料試験結果を示す。鋼材は全て塗装を行わなかった。

コンクリートは最大粗骨材寸法 20mm の普通コンクリートとした。HPCa 部と後打ちコンクリートは同じ配合であり、表-1 に実験時のコンクリート強度を示す。

## (3) 荷重方法

荷重は、試験体を支間長 5,300mm で単純支持し、等曲

げ区間 750mm を有する 2 点で行った。荷重では、事前のファイバーモデル計算により下フランジが許容応力度に達する荷重、降伏強度に達する荷重、及び  $3\delta_y$  (降伏時変位  $\delta_y$  の 3 倍) の時に除荷を行った。なお、試験体の自重により試験体中央に発生する曲げモーメントを荷重荷重に置き換えると 46kN となるが、以降の実験結果ではこの自重による荷重を荷重荷重に加えずに結果を示す。

## (4) 計測

計測は荷重と鉛直変位のほか、図-3 に示す鋼材ひずみとコンクリートひずみとした。また、最初の除荷の後、等曲げ区間に生じたひび割れの内、4 か所の断面下縁に

パイ型変位計を取り付けてひび割れ幅を計測した。

### (5) ファイバーモデル解析

試験体の事前耐力計算と実験シミュレーションとして、ファイバーモデルによる計算を行った。計算ではコンクリート断面を高さ方向に 100 分割し、鋼材は図-4 に示すように孔を控除した断面のみを考慮した。鋼材の応力-ひずみ関係はヤング係数を  $E_s=200\text{kN/mm}^2$ 、材料試験結果から得られた降伏強度を降伏点とし、降伏後の剛性を  $E_s/100$  としたバイリニアモデルとした。コンクリートの応力-ひずみ関係は、コンクリート標準示方書<sup>5)</sup>に示されるモデルとし、圧縮強度と引張強度はそれぞれ実験時の後打ちコンクリートの値と HPCa 部材の値とした。表-1 にファイバーモデル解析で得られた降伏荷重、及び最大耐力を示す。なお、最大耐力はコンクリートの圧縮縁のひずみがコンクリート標準示方書の終局ひずみ (SC-PBL:3367 $\mu$ , SC-N : 3327 $\mu$ ) となる荷重である。

## 2.2 実験結果

### (1) 耐荷力と破壊性状

表-1 に降伏荷重と最大耐力、図-5 に 2 体の荷重と支間中央における鉛直変位の関係を示す。またファイバーモデル解析結果も合わせて示す。図に実験結果イベントを示すが、降伏荷重は図-3 に示す LF-0 の計測値が降伏ひずみに達した荷重で、最大耐力は後述する圧壊が生じた荷重である。

両試験体とも約 400kN でひび割れ発生後、下フランジ、ウェブの順で鋼板が降伏ひずみに達し、その後も荷重は増加し、圧縮縁のかぶりコンクリートが圧壊して荷重が低下した。圧壊が生じたのは、SC-PBL は荷重 2,608kN、変位 46.6mm、SC-N は荷重 2,025kN、変位 56.5mm の時であり、これを最大耐力とした。その後も載荷を継続したところ、荷重は最大耐力程度まで増加したが、すでにコンクリートの圧壊を確認したので、変位  $6\delta_y$  で載荷を終了した。かぶりコンクリートの圧壊後も荷重が増加したのは、鋼板内のコンクリートが拘束効果により圧壊せず、圧縮域を形成したためと考えられる。

2 体の試験体を比較すると、ひび割れ発生後の剛性は SC-PBL の方が大きく、また最大耐力も SC-PBL は SC-N の約 1.3 倍であった。これは、SC-PBL では部材全長に渡ってフランジに連続して取り付けられた PBL の鋼板が曲げ剛性に寄与したためと考えられた。そこで、ファイバーモデル解析において、SC-PBL では PBL の孔を控除した鋼材断面を補強材として考慮して計算した。その結果、計算でも SC-PBL では実験結果と同様にひび割れ後の剛性と耐力の上昇が確認された。

実験値と計算値を比較すると、降伏荷重はほぼ同じ値となったが降伏後の剛性と最大荷重に違いがあった。これは、ファイバーモデルでは部材全体に渡って鋼材を孔

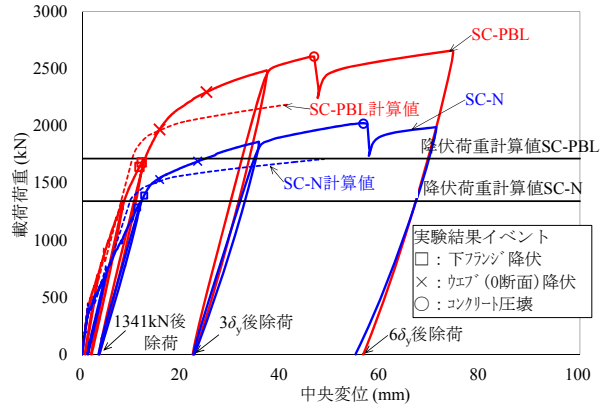
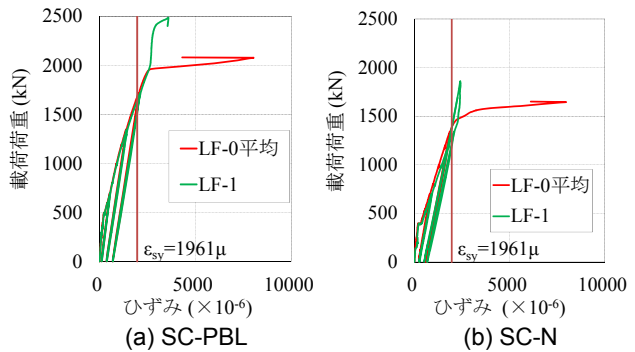
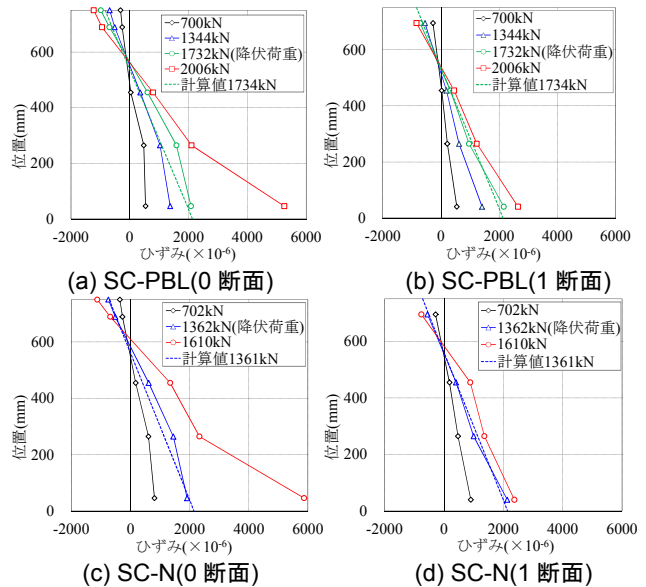


図-5 荷重-支間中央変位関係



(a) SC-PBL (b) SC-N

図-6 荷重-下フランジひずみ関係



(c) SC-N(0 断面) (d) SC-N(1 断面)

図-7 断面ひずみ分布関係

の無い断面として計算したためだと考えられる。また後述するようにひび割れと孔の位置に関連性が見られ、これも一因と思われる。これらについては今後の課題としたい。

### (2) フランジひずみ

図-6 に荷重と下フランジひずみの関係を示す。計測位置は図-3 に示す通りで、LF-0 は鋼板の両面の値の平均値、LF-1 は片面の値である。2 か所の計測結果を比較すると、降伏ひずみに達するまでは同じ挙動を示しているが、降伏ひずみ以降、LF-0 だけがひずみが増加した。これは、孔の位置との関係により鋼材ひずみが異なるこ

とを示している。

### (3) 部材の一体性

図-7 に試験体中央の軸方向ひずみ分布について、孔の有る断面(0断面)と無い断面(1断面)の2断面の結果を計算降伏荷重時のファイバーモデル計算値と合わせてそれぞれ示す。0断面ではウェブのひずみが1断面より大きく、降伏荷重以降では前述の通り0断面における下フランジのひずみが増加するため、両断面で若干分布の違いが見られた。降伏荷重時のひずみ分布は計算値とはほぼ一致しており、鋼とコンクリート並びに HPCa 部材と後打ちコンクリートが一体となり抵抗していたと考えられる。以上から本実験の諸元においては、HPCa 部材と後打ちコンクリートとは、境界面に設けた凹凸だけで十分な一体性が得られたと言える。

### (4) PBL ひずみ

PBL のずれ止めとしての挙動を把握するために、SC-PBL 試験体の PBL の孔と孔の間に 3 軸ひずみゲージを貼付した。この結果から算出した主応力の下フランジ降伏荷重までの履歴を図-8 に示す。主応力から算出したミーゼス応力の最大値は  $117\text{N/mm}^2$  (PBL-1.5L) と降伏強度に比べて小さく、いずれの測定箇所も弾性範囲内であった。上フランジ側の履歴はいずれも 1 軸の主圧縮応力が卓越しており、主として上フランジとともに圧縮補強材として機能していたと考えられる。一方、下フランジ側は荷重点側では 1 軸の主引張応力が卓越しており、下フランジとともに引張補強材として機能していたと考えられるが、支点側の PBL-2.5L では引張-圧縮の 2 軸状態となっており、せん断応力が大きくなっている。これは、孔あき鋼板ジベルが水平せん断力に対してずれ止めとして機能したためだと考えられる。

このように、下フランジ側の PBL は一体性確保のために寄与していたと考えられる。しかしながら、2.2(3)の結果から PBL が無い場合でも鋼とコンクリートが一体化した SC 部材としての耐荷性能は得られており、本実験ではコンクリートの凹凸面による付着により十分な一体性を確保できていた。

### (5) 曲げひび割れ幅

図-9 に鋼板降伏時までに生じたひび割れ状況を示す。ひび割れ図の上に下フランジの平面図を示すが、SC-PBL のひび割れは、フランジの孔とほぼ同間隔で生じているように見える。2 体を比較すると SC-PBL の方が、若干ひび割れ本数が多かった。

図-10 に荷重荷重とひび割れ幅の関係を示す。計測は、図-9 の○印のひび割れの両側面において、荷重荷重 700kN まで荷重・除荷した後にひび割れにパイ型変位計を取り付けを行った。取り付けた際のひび割れ幅は目視で 0.04mm 未満であった。

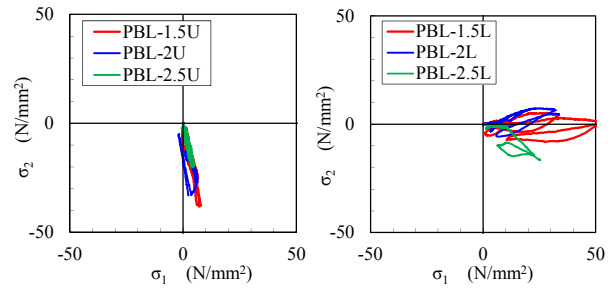


図-8 PBL ひずみ (SC-PBL)

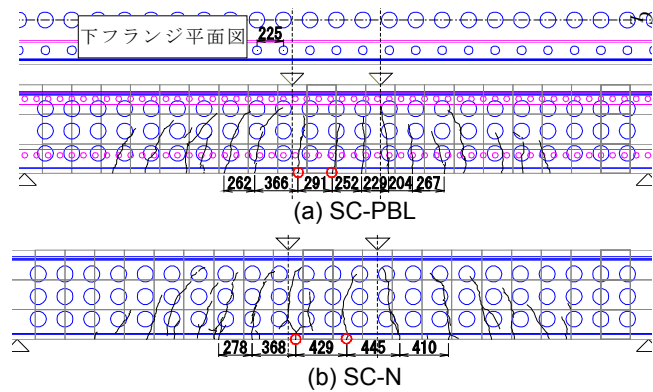


図-9 ひび割れ図

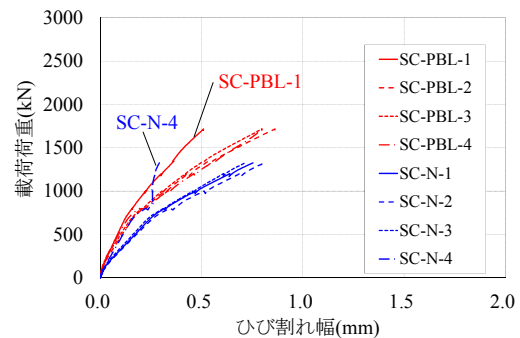


図-10 荷重荷重-ひび割れ幅関係

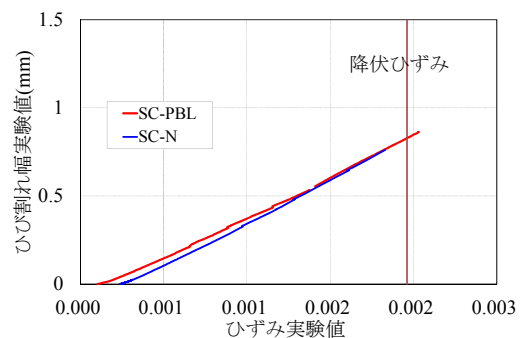


図-11 ひび割れ幅-下フランジひずみ関係

いずれも荷重荷重の増加に伴い、ひび割れ幅も大きくなっている。SC-PBL-1 と SC-N-4 が、同じ試験体のほかの計測位置と比較して発生ひび割れ幅が小さくなったが、ほかの 3 点については試験体ごとにそれぞれほぼ同じひび割れ幅となった。2 体を比べると、SC-PBL のひび割れ幅が小さくなった。これは前述の通り、PBL 鋼板が曲げ剛性に寄与し、SC-PBL の方が同じ荷重に対してフランジの発生応力及び変形が小さいためである。そこで、両

試験体のひび割れ幅をフランジの応力を基準として比較する。図-11 にひび割れ幅と下フランジひずみの関係を示す。ここで、ひび割れ幅は前述の3点の平均であり、フランジのひずみは試験体中央の下フランジのひずみ(LF-0)とした。図より2体のフランジひずみに対するひび割れ幅はほぼ同じとなり、PBLの有無がひび割れ幅に与える影響は見られなかった。また、ひび割れ幅はフランジひずみに比例して増加した。

ここで、RCの最大ひび割れ幅 $w_{max}$ は式(1)で表すことができる<sup>6)</sup>。これにより、本実験結果を検討する。

$$w_{max} = (\sigma_s / E_s - \sigma_{cm} / (E_s \cdot p_e) - \bar{\epsilon}_p) \cdot l_{max} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_s$ はひび割れ位置の鉄筋応力、 $E_s$ は鉄筋のヤング係数、 $\sigma_{cm}$ はひび割れ間の付着による鉄筋応力の減少量をコンクリート有効断面積 $A_e$ の平均引張応力に換算した値、 $p_e$ は有効鉄筋比(= $A_s/A_e$ )、 $A_s$ は鉄筋断面積、 $\bar{\epsilon}_p$ は収縮やクリープ等によって生じた鉄筋とコンクリート間の弾性ひずみ差、 $l_{max}$ は最大ひび割れ間隔を表す。

本実験のひび割れは鋼材に設けた孔によってその間隔が決まるとすると、孔間の鋼材表面には異形鉄筋の節のような付着を取れる機構はないため、ひび割れ間の鋼板表面とコンクリートの付着は小さくなることから $\sigma_{cm} = 0$ とする。また、収縮やクリープの影響は実験中にはないと考えられる。以上から、最大ひび割れ幅は鋼板ひずみと最大ひび割れ間隔の積で示されることになる。すなわち、図-11 実験結果の傾きが最大ひび割れ間隔の計算値となる。回帰計算により傾きを求めた結果、SC-PBLは453mm、SC-Nは480mmが得られた。一方、実験の最大ひび割れ間隔は図-9に示す通り、SC-PBLで366mm、SC-Nで445mmと計算値よりも小さい値であった。

ひび割れ幅と鋼材ひずみとの間には比例関係があったことから、RCと同様に鋼材応力によりひび割れ幅を評価できる可能性が示唆された。しかしながら、ひび割れ間隔は実際に生じたひび割れと計算値とで異なっており、ひび割れ間隔の算出方法についてはRCと異なる要因があると考えられ、今後検討する必要がある。

### 3. 強制加振試験

図-5の荷重-中央変位関係に示される除荷時に強制加振試験を行い、部材損傷やひび割れ分散性を検討した。加振器を用いた強制加振試験の概念図を図-12に示す。調和振動を与えることによって加振方向の縦振動を励起させ、振動が及ぶ範囲の共振周波数の測定とその低下に基づいて劣化・損傷を検知する<sup>7,8)</sup>。本実験では、部材軸方向(以下、全体振動)と断面高さ方向(以下、局所振動)を測定した。

総重量1.8kg(稼働部の質量:150g)の動電式加振器を厚さ1mmの両面テープで試験体表面に接触させ、加振

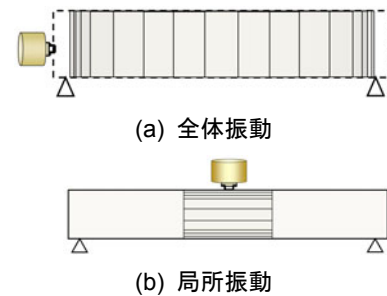
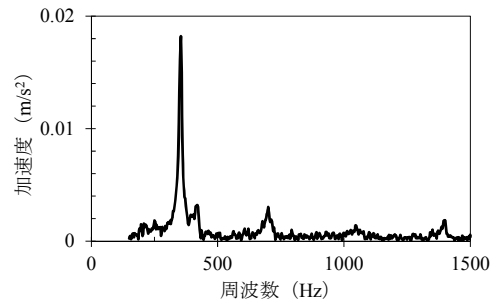
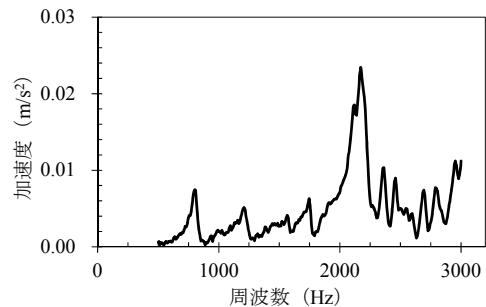


図-12 強制加振試験の概略図



(a) 全体振動



(b) 局所振動

図-13 共振曲線(健全時 SC-PBL)

器の最大加振振幅 $1m/s^2$ を一定に制御した上で、全体振動では掃引周波数150~1,000Hz、局所振動では500~3,000Hzを基本として、18秒間で周波数を直線的に上昇させた。このとき、加振点付近に加速度センサを貼付し、共振曲線(周波数-応答加速度関係)を得た。

健全時のSC-PBLの共振曲線を図-13に示す。全体振動と局所振動のいずれも図中に応答加速度のピークが表れており、共振周波数を得ることができた。

両端自由の1次元棒の縦振動は、次式によって共振周波数が算定できる。

$$f = \frac{v}{2L} \quad (2)$$

$$v = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (3)$$

ここで、 $f$ は1次の共振周波数、 $L$ は振動長さ、 $E_d$ は動弾性係数、 $\rho$ は密度である。鉄筋の影響を無視したコンクリートの物性による式(2)の理論値は、全体振動と局所振動でそれぞれ353Hzと2,732Hzであった。図-13(a)の全体振動の実測値は355Hzであり理論値と良く整合したが、図-13(b)の局所振動は実測値2,172Hzであり理論値を下

回った。式(2)は両端自由の1次元棒の振動方程式であるため、図-13b)の局所振動については評価式の見直しが必要である。

2体の試験体の全体振動に着目して、荷重ステップと共振周波数との関係を図-14に示す。図より、荷重に伴う共振周波数の低下が示唆された。SC-Nでは荷重ステップ1,714kNでの振動試験をおこなっていないため、この荷重でのSC-PBLとの比較はできないが、図-14より、2体の試験体は荷重ステップの増加に対して同様に共振周波数の低下傾向が示された。

次に、それぞれの試験体について、荷重ステップごとに共振周波数の分布を図-15に描いた。局所振動試験は、測定箇所での局所的なひび割れ性状(本数、幅、方向)によって共振周波数の低下が異なる。このため、損傷後のSC-PBLとSC-Nの共振周波数の分布は一致しないが、いずれも $3\delta_y$ から $6\delta_y$ の荷重ステップにおいて共振周波数の低下が見られた。これらはスパン中央の2,000mm程度の区間において共振周波数が大きく低下しており、SC部材の損傷区間はSC-PBLとSC-NのPBLの有無に依らず概ね同程度であると考えられる。すなわち、図-14と図-15の結果より、鋼材とコンクリートの付着の確保方法が異なる2体は同様に一体性を確保し、ひび割れによる損傷は同程度であったと考えられる。

#### 4. まとめ

断面の一部をハーフプレキャストとした鉄筋を用いない鉄骨コンクリート梁部材について、曲げ荷重実験及び強制加振試験を行った結果、以下の結果が得られた。

- (1) HPCa部材と後打ちコンクリートは、コンクリート境界面に設けた凹凸により一体性を確保できており、本部材は高い構造性能が発揮できる。曲げ降伏耐力は孔を控除した鋼材を鉄筋に置き換えたファイバーモデル解析によって精度よく計算できた。
- (2) 曲げひび割れ幅は、鋼材ひずみに比例して増加する結果であった。ただし、鋼材ひずみとひび割れ幅の関係から得られるひび割れ間隔と実際のひび割れ間隔には違いがあった。
- (3) 強制加振試験の結果、試験体の損傷状況と共振周波数の低下に関連性が見られ、共振周波数の値から、PBLの有無による損傷程度の違いは見られなかった。今後、降伏後剛性と終局曲げ耐力の評価並びに曲げひび割れ幅の評価法について検討を進める予定である。

#### 参考文献

- 1) 服部尚道, 増田芳久, 得能達雄, 玉井真一: U型ハーフプレキャスト部材を用いた合成梁の曲げ性状について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21,

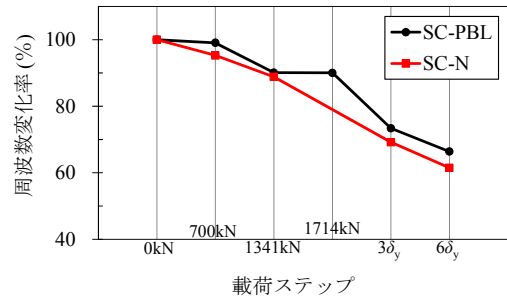
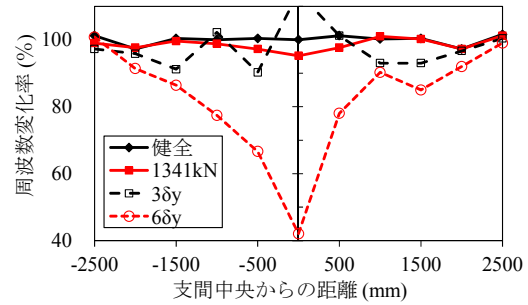
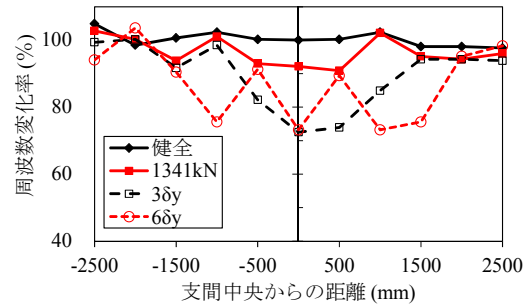


図-14 共振周波数の変化(全体振動)



(a) SC-PBL



(b) SC-N

図-15 共振周波数の分布(局所振動)

No.3, pp.781-786, 1999

- 2) 関口信一郎, 小原孝之, 舟橋政司, 横沢和夫: 鉄骨コンクリート複合構造板状部材の曲げ耐力と最大ひび割れ幅の評価法に関する研究, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1465-1472, 2001
- 3) 伊藤壮一, 長山秀昭, 能見昭広, 島岡久壽: 縞鋼板を用いたSC構造梁の曲げひび割れ性状, 土木学会第50回年次学術講演会, pp.210-211, 1995
- 4) 土木学会: 複合構造標準示方書, 2009
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2012
- 6) 角田与史雄: 鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅, コンクリートジャーナル, Vol.8, No.9, pp.1-10, 1970
- 7) 渡辺孝和, 長谷川俊, 内藤英樹, 鈴木基行: 固有振動数の低下に着目したRC部材の地震時損傷評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.901-906, 2012.7
- 8) 内藤英樹, 長谷川俊, 上田博之, 鈴木基行: 強制加振試験によるRC部材の曲げひび割れの検知, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.781-786, 2014.7