

# 論文 高強度繊維補強コンクリートを用いたプレキャスト接合部を有する RC 梁部材の耐荷性状

黒岩 俊之\*1・羅 超賢\*2・笠倉 亮太\*3

**要旨：** 供用中の道路橋床版の更新工事に用いるプレキャスト床版の継手を開発している。継手の曲げ耐荷性状を確認することを目的に、単純梁の静的曲げ試験を行った。等曲げモーメント区間に継手を設けた試験では、開発継手の試験体の初期剛性および曲げ耐力は、継手のない梁部材やループ継手の試験体に劣らない結果が得られた。また、せん断スパンに継手を設けた試験では、最大荷重が継手のない RC 棒部材のせん断耐力の計算値を超え、かつ継手のない側のスパンでせん断破壊した。開発継手は、継手のない RC 棒部材以上のせん断耐力を有していることが確認された。

**キーワード：** 継手、プレキャストコンクリート、床版、高強度繊維補強コンクリート、曲げ載荷試験

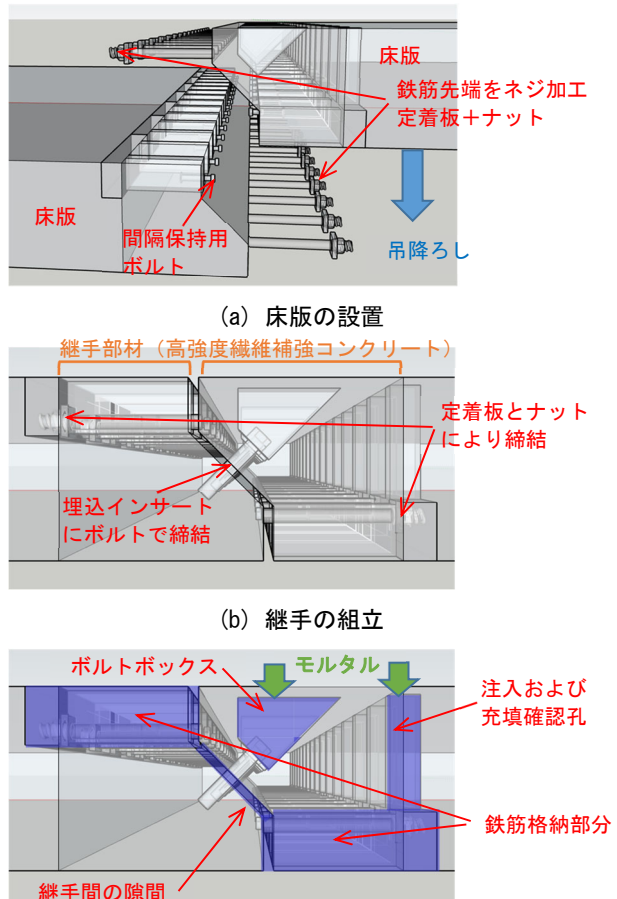
## 1. はじめに

道路橋床版の老朽化対策として、全国で床版の更新工事が行われてきている。道路橋床版の更新工事では、交通規制期間の短縮と耐久性の向上の観点から、プレキャスト床版が採用されることが多い<sup>1)</sup>。プレキャスト床版は幅員方向に一体として製造され、橋軸方向にループ継手を設け、現場打ちコンクリートを打設して接合する方法が一般的である。近年では、プレキャスト床版を効率的に施工するため、ループ継手に代わり機械式鉄筋定着や繊維補強コンクリートを利用するなど多くの接合技術が開発されている<sup>2)</sup>。一方、供用中の道路において、橋梁の幅員方向を一括施工するには橋梁を通行止めにする必要があり、上下線のどちらかを対面通行にするか、迂回路を設けるなど、広範囲に及ぶ交通規制の下で施工されている。しかしながら、工事区間の構造的な条件や、交通量が非常に多く交通規制が難しい場合などでは、複数ある車線の一部を規制し、残りの車線の通行を維持しながら、幅員方向に床版を分割して更新する、半断面施工<sup>3)</sup>により工事を行わざるを得ない。そこで、筆者らは幅員方向の分割を想定したプレキャスト床版の継手の開発を進めている。本研究では、静的曲げ載荷試験により、考案した継手（以下、開発継手）の曲げ耐荷性状やせん断耐力を確認した。

## 2. 開発継手の概要

図-1 に開発継手の概要を示す。開発継手の要件として、供用中の橋梁に生じる交通振動や変形の影響下で継手の品質を確保するため、無収縮モルタルの充填前に、継手間で応力伝達できる構造とした。開発継手は相対する継手部材で構成され、相対する継手部材は上下対称の

形状とした。図-1 (b) に示すように相対する継手部材は 2 cm 程度の隙間を設けて設置し、スペーサーで間隔を保持した状態で、断面の中心高さで斜め 45° 方向にボルトで締結することで固定される。さらに、継手部材からは軸方向鉄筋を突出させ、その鉄筋の先端をネジ加工して



(a) 床版の設置  
(b) 継手の組立  
(c) モルタルの充填  
図-1 開発継手の概要

\*1 東急建設 (株) 技術研究所 土木構造グループ グループリーダー 博士 (工学) (正会員)  
\*2 東急建設 (株) 技術研究所 土木構造グループ 研究員 修士 (工学) (正会員)  
\*3 東急建設 (株) 技術研究所 土木構造グループ 主席研究員 博士 (工学) (正会員)

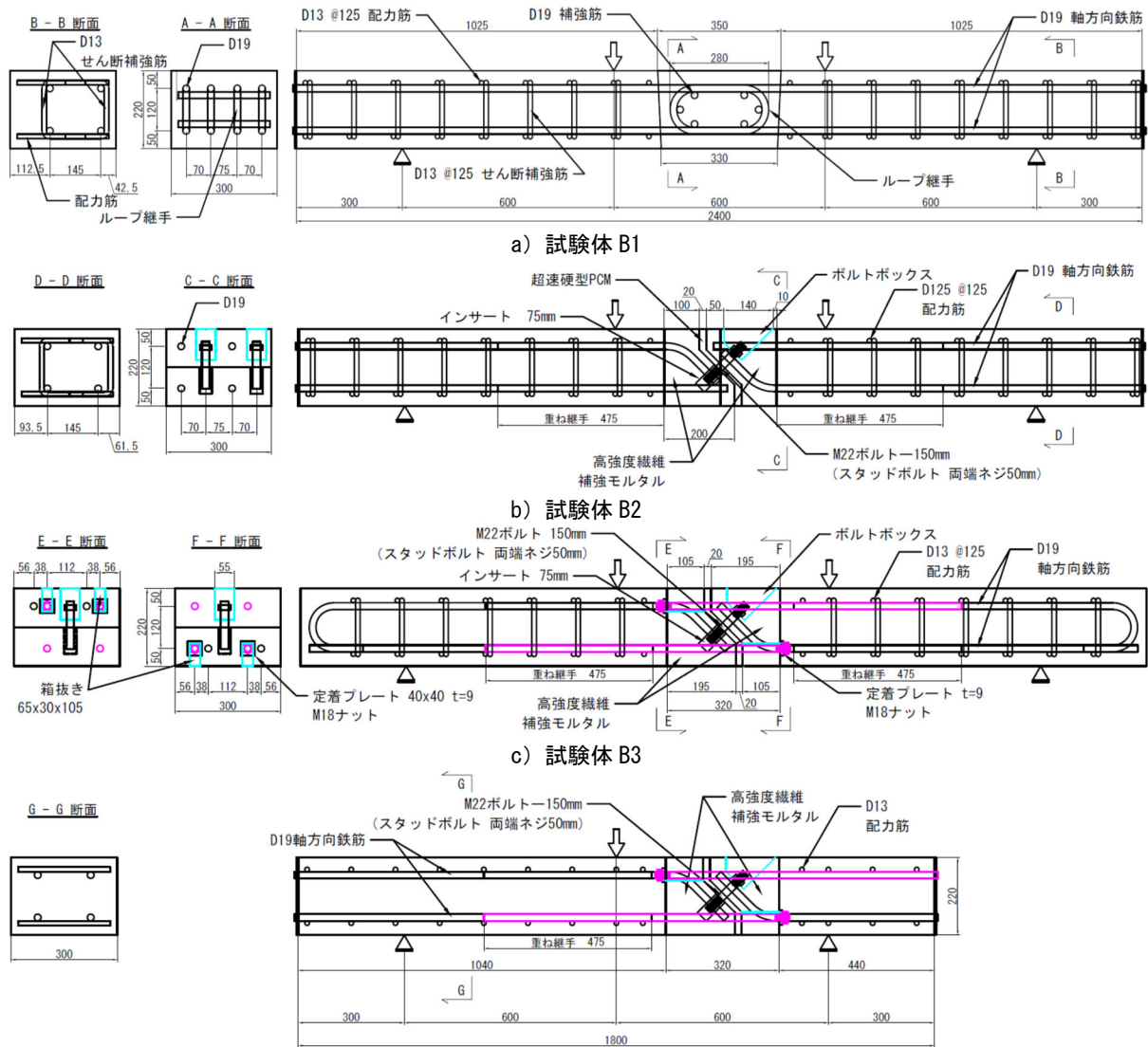


図-2 試験体形状の例 (単位: mm)

取付けたナットと定着板により相対する継手部材に定着することで、固定度を増すことができる。

最後に図-1(c)に示すように、継手間の隙間、鉄筋格納部分およびボルトボックスにはモルタルを充填する。

継手部材とプレキャスト床版は、継手部材から突出させた接続用の鉄筋とプレキャスト床版の鉄筋の重ね継手により接合し(図-2参照)、完成後は床版に対して継手部および継手間の引張鋼材の降伏が先行しない設計を行う。継手部材は複雑な形状で、鉄筋の定着板、ボルトおよび接続用の鉄筋によって、局所的に大きな応力が生じることから、圧縮および引張強度特性の優れた高強度繊維補強コンクリート<sup>3)</sup>(以下、UFC)を使用したプレキャスト製品としている。

### 3. 試験方法

#### 3.1 試験条件

表-1に試験体の一覧を示す。試験体の形状を図-2に

示す。表-2および表-3に使用材料の特性値を示す。試験体は断面高さ220 mm、幅300 mmの梁部材とし、床版スパン2.5 m程度を想定したもので、その断面高さやかぶり厚さなどの断面諸元および使用材料などは更新用のプレキャストPC床版を参考にした。試験のパラメータは、継手の有無、継手の位置、継手の種類および継手部の長さとした。

本試験では、継手の位置が異なるBシリーズとSシリーズの2種の試験体を製作した。Bシリーズは継手の位置を等曲げモーメント区間に設けた試験体、Sシリーズはせん断スパンに設けた試験体である。Bシリーズでは等曲げモーメント区間において、部材直角方向に配力筋やループ継手の補強鉄筋を配置することに加え、せん断破壊を防止するため、等曲げモーメント区間を除いてせん断補強筋を配置した。一方、Sシリーズではせん断補強筋は配置していない。

B0は継手を設けない比較用の試験体、B1は一般工法

表-1 試験体の一覧

試験体	継手種類	継手位置	ボルト本数	軸方向鉄筋	充填材	接合部全長(mm)
B0	なし	なし			—	—
B1	ループ継手	スパン中央	なし	圧縮：2本 引張：2本	コンクリート	340
B2	開発継手		2本	なし	PCM	320
B3			1本	圧縮：2本 引張：2本	モルタル	420
B4						
S1	開発継手	左せん断スパン	2本	なし	PCM	320
S2		右せん断スパン				
S3		右せん断スパン	1本	圧縮：2本 引張：2本	モルタル	

としてループ継手を用いた試験体とし、B2～B4は開発継手の試験体である。B2の継手では、ボルト締結と充填モルタルに超速硬型ポリマーセメントモルタルを用いた。B2のボルトは、ボルトを引張鋼材として計算した曲げ耐力がB0の計算値を超えるように配置した。超速硬型ポリマーセメントモルタルは、材齢2時間で10 N/mm<sup>2</sup>以上の圧縮強度を発現する速硬性を特徴としており、施工時の早期交通解放を想定して採用した。B3、B4は開発継手においてボルト締結に加えて鉄筋による固定度の向上を図った試験体である。B4は、継手部材の全長をB3に対して100 mm延長した試験体である。これにより、突出させた接続用の鉄筋の相対する継手部材への定着長が50 mm増加することになる。なお、鉄筋を利用したB3、B4に対しては鉄筋周辺への充填性に配慮して、流動性の高い無収縮モルタルを充填材として使用した。

継手にせん断力が生じるSシリーズでは、開発継手は左右非対称であることから、S1は荷重点に近い継手部材の突起が上側になるように、S2は荷重点に近い継手部材の突起が下側になるように荷重した。S1およびS2の継手部材はB2と同様である。S3は継手部材をB3、継手位置をS2とした試験体である。なお、継手はせん断スパンの片側のみに配置した。

試験体の製作において、B0は継手を設けない梁部材として製作し、B1は左右の梁部材を製作した後に、スパン中央でループ継手にコンクリートを打設して接合した。B2、B3、B4およびSシリーズは、継手部分を施工した後に、左右の梁部材を製作したため、注入および充填確認孔は再現していない。開発継手と梁部材の接合には、道路橋示方書<sup>4)</sup>に準拠した鉄筋の重ね継手を用いた。

### 3.2 荷重試験方法

Bシリーズは、スパン中央に継手を設けた梁部材に対して、支点条件を単純支持、等曲げモーメント区間およびせん断スパンを600 mmとした2点集中荷重を行った。

Sシリーズは、せん断スパンの中央に継手を設けた梁部材に対して、支点条件を単純支持、せん断スパンを600

表-2 鋼材の引張強度特性

試験体	鋼材の種類用途	降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )
B0,B1,B2 S1,S2	SD345 D19 軸方向鉄筋	388	188
B2,S1,S2	M22 連結ボルト	790	206
B3,B4,S3	SD345 D19 軸方向鉄筋	369	191
	M22 連結ボルト	925	207

表-3 材料の圧縮強度特性

試験体	種類部位	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )
B0,B1	コンクリート 梁部材	44.1	32.1
B1	コンクリート 継手部	45.5	32.9
B2,S1	コンクリート 梁部材	45.4	32.5
S2	コンクリート 梁部材	45.0	32.6
B2,S1,S2	UFC 継手部	227.0	55.2
	PCM 充填部	42.0	21.9
B3	コンクリート 梁部材	43.6	33.2
B4	コンクリート 梁部材	40.7	30.6
S3	コンクリート 梁部材	44.5	32.7
B3,B4,S3	UFC 継手部	210.5	56.5
	モルタル 充填部	116.1	35.0

mmとした1点集中荷重を行った。

計測項目は、鉛直荷重、鉛直変位(たわみ)、ひずみ(鉄筋・ボルト)、継手境界面の目開き幅とした。

## 4. 試験結果

### 4.1 破壊性状および耐荷力

表-4に試験結果の一覧を示す。表-4に示す耐力の計算値は、土木学会コンクリート標準示方書<sup>5)</sup>(以下、コンクリート標準)に基づき材料特性値を用いて算出し、試験の荷重値に換算したものである。

#### (1) Bシリーズ

写真-1に破壊状態を示す。また、図-3に荷重とスパン中央の鉛直変位の関係を示す。継手のないB0およびループ継手のB1は、等曲げモーメント区間において軸方向鉄筋が降伏し、圧縮側のコンクリートが圧壊して耐力低下を生じた。それぞれの最大荷重は、B0の153 kNに対してB1では127 kNであった。B1の耐力がやや小さくなった要因として、試験体における部材直角方向に配置したループ継手の補強鉄筋の端部定着が不十分であったためダウエル効果が減少し、ループ継手に生じる割裂引張力への抵抗力が低下したものと推察される。

一方、開発継手のB2は、荷重39 kNにおいて継手の接合面において目開きが生じると荷重が低下し、その後、

表-4 試験結果の一覧

試験体	継手種類	接合部全長 (mm)	計算値			試験結果			
			降伏耐力 (kN)	曲げ耐力 (kN)	せん断耐力 ※2 (kN)	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	破壊部位	破壊形態※3
B0	なし	—	112	128	336	103	153	梁部材	曲げ
B1	ループ継手	340	112 (113)※	128 (129)※	336	94	127	継手	曲げ
B2	開発継手	320	113	129 (135)※	337	—	39	継手	定着
B3			107 (131)※	123 (212)※	335	92	144	梁部材	曲げ
B4		420	106 (131)※	121 (212)※	332	102	159	梁部材	曲げ
S1		320	113	129	130	—	76	継手	定着
S2			113	129	130	—	90	継手	定着
S3			107	124	129	105	162	梁部材	せん断

※ ( ) 内の値は継手部の材料強度試験の結果により計算した値、※2 梁部材の材料強度試験の結果により計算した値  
 ※3 曲げ：曲げ降伏後の圧縮コンクリートの圧壊、せん断：曲げ降伏後のせん断破壊、定着：ボルト定着部の破壊

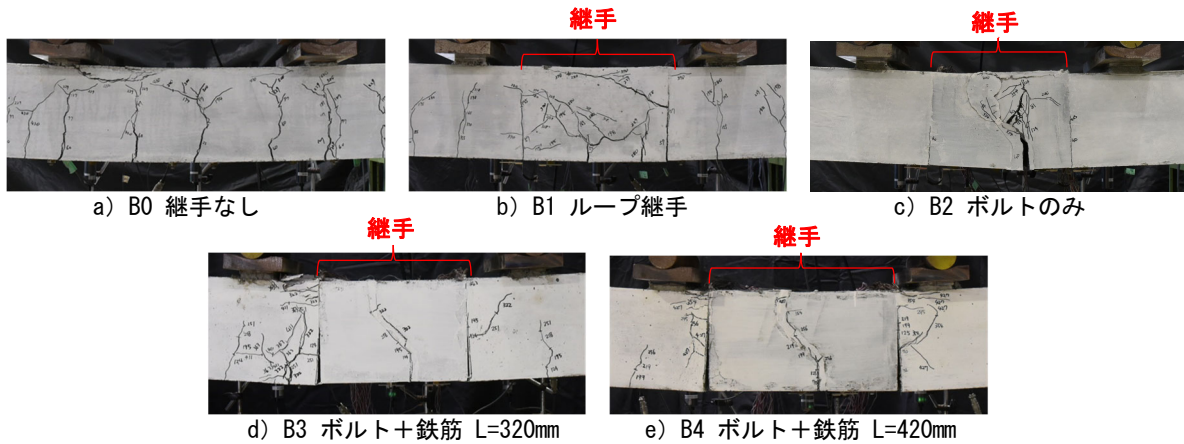


写真-1 破壊状況 (Bシリーズ)

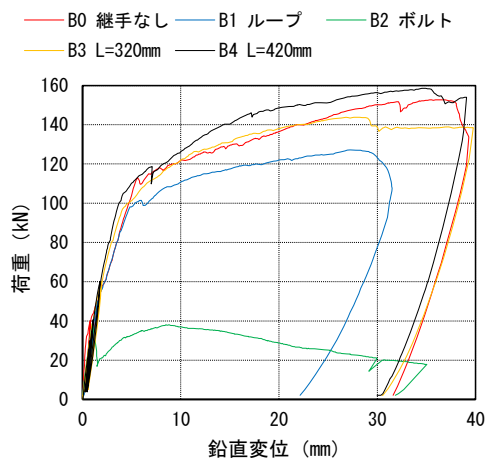


図-3 荷重と変位の関係 (Bシリーズ)

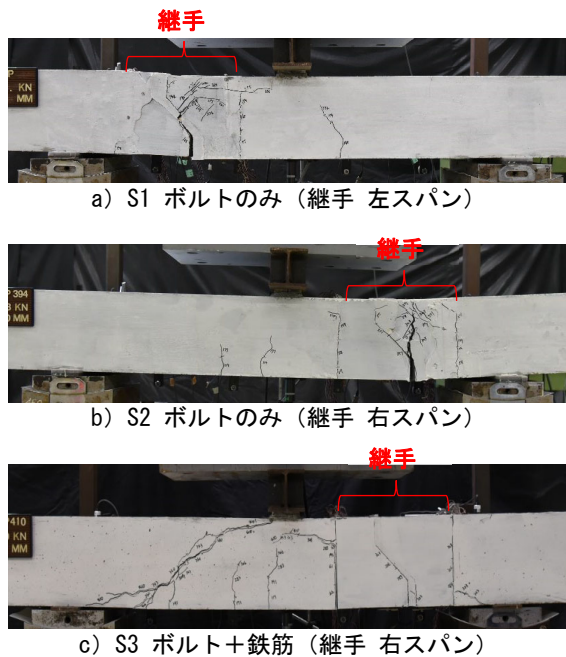
載荷を進めることで荷重は 38 kN まで回復したものの、ボルト定着部の UFC のひび割れが拡大し、なだらかに荷重低下を生じた。B2 の曲げ耐力は、継手部以外の RC 部分の曲げ耐力の計算値 (129 kN) および B0, B1 に対して大きく劣っていた。

ボルト締結に加えて鉄筋を追加した B3 および B4 は、等曲げモーメント区間において軸方向鉄筋が降伏し、継

手部近傍の梁部材のコンクリートが圧壊して荷重低下を生じた。ボルト定着部の UFC にひび割れは生じなかった。それぞれの最大荷重は、B3 の 144 kN に対して B4 では 159 kN であり、継手部以外の RC 部分の曲げ耐力の計算値 (B3 : 123 kN, B4 : 121 kN) を超えた一方で、B3 より継手部の長い B4 の方がやや大きくなった。加力点近傍の圧縮側コンクリートの圧壊で終局に至る破壊形態から推察すると、B4 の耐力増加は、等曲げ区間に占める継手部の割合が増えたことで、UFC 製の継手部と載荷板 (幅 75 mm) の間の圧壊領域が狭まり、圧壊領域が載荷板による拘束の影響を受けたものと考えられる。B3 および B4 の継手の初期剛性は、継手のない B0 にはやや劣るものの、ループ継手の B1 と比較してひび割れ発生まで同等であった。また、最大荷重も B1 および曲げ耐力の計算値を超えて B0 と同等であるため、鉄筋を追加した開発継手の曲げ耐荷性状は、継手部の長さに関わらず、継手のない部材やループ継手に劣らないものといえる。

(2) Sシリーズ

写真-2 に破壊状態の写真を、図-4 に荷重とスパン中央の鉛直変位の関係を示す。図中に示す耐力の計算値



a) S1 ボルトのみ (継手 左スパン)

b) S2 ボルトのみ (継手 右スパン)

c) S3 ボルト+鉄筋 (継手 右スパン)

写真-2 破壊状況 (Sシリーズ)

(降伏耐力  $P_{yd}$ , 曲げ耐力  $P_{ud}$ , せん断耐力  $R_c V_c$ ) は、コンクリート標準の RC 棒部材の計算式に基づき S3 の材料特性値を用いて算出し、試験の荷重値に換算したものである。

S1 および S2 は同様な破壊性状を示し、ともに継手の接合面においてひび割れが生じると荷重が一旦低下し、その後はボルト定着部のモルタルが破壊することで、なだらかに荷重低下を生じた。曲げひび割れ発生荷重は S1 の 58 kN に対して S2 では 78 kN、最大荷重は S1 の 76 kN に対して S2 では 90 kN であった。これは、継手の形状が左右非対称であることから、S1 と S2 では引張側最外縁の接合面の位置が異なるためであり、曲げひび割れ発生時の接合面の引張縁応力は、S1 では  $4.2 \text{ N/mm}^2$ 、S2 では  $4.0 \text{ N/mm}^2$  であった。また、曲げとせん断を同時に受ける場合、ボルト締結のみの継手の曲げ耐力は、継手に生じる断面力の方向の影響を受ける可能性がある。

ボルト締結に加えて鉄筋を追加した S3 は、継手のない側のせん断スパンにおいて斜めひび割れが卓越し、せん断破壊した。また、最大荷重は 162 kN であり、継手のない RC 部材のせん断耐力の計算値 (荷重換算で 129 kN) を超えていた。以上のことから、S3 の継手部材は、継手のない RC 部材以上のせん断耐力を有しているといえる。

## 4.2 鉄筋ひずみ

### (1) B シリーズ

継手のない B0 およびループ継手の B1 は、等曲げモーメント区間において軸方向鉄筋が降伏した。降伏ひずみ ( $2070 \mu$ ) に到達した時の荷重は、B0 では 103 kN、B1 では 94 kN であった。

図-5 に B3 の下側に配置した軸方向鉄筋のひずみの

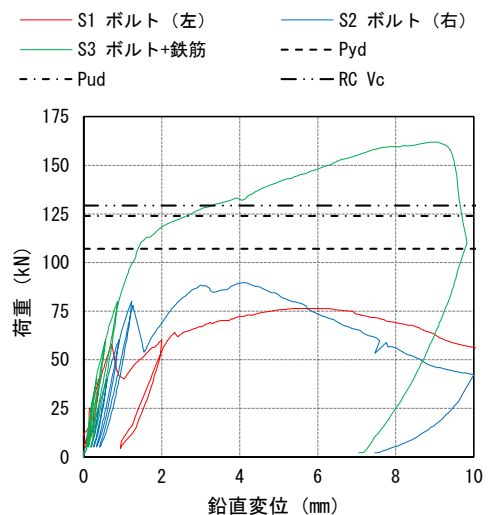


図-4 荷重と変位の関係 (Sシリーズ)

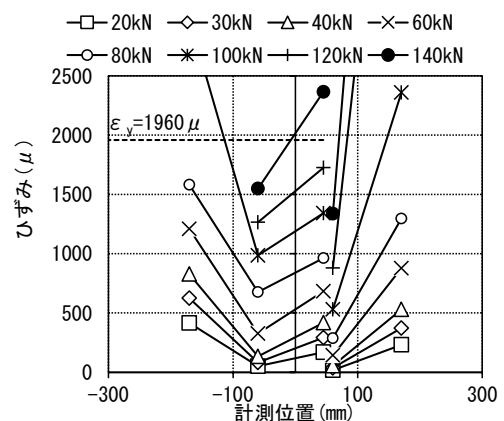


図-5 軸方向鉄筋のひずみ分布 (B3 下側)

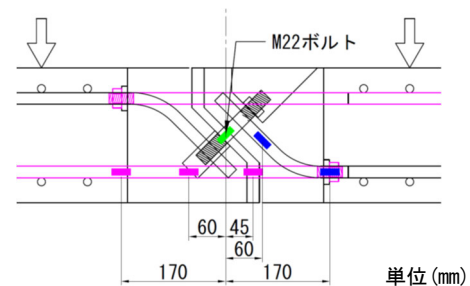


図-6 ゲージ位置図 (B3)

分布を示す。なお、図の計測位置は、スパン中央 (等曲げモーメント区間の中央) を  $x=0 \text{ mm}$  として記載している (図-6 参照)。

B3 および B4 は、継手部と梁部材の境界位置で先行して降伏ひずみ ( $1960 \mu$ ) に到達し、その後、継手どうしの境界位置で降伏ひずみに到達した。降伏ひずみに到達した時の荷重は、B3 では 92 kN、B4 では 102 kN であった。継手部分の長さに関わらず、継手内部の鉄筋ひずみは降伏に至らなかった。

### (2) S シリーズ

S3 では、荷重 105 kN 時に継手部と梁部材の境界位置付近で降伏ひずみに到達した。B シリーズと同様に、継

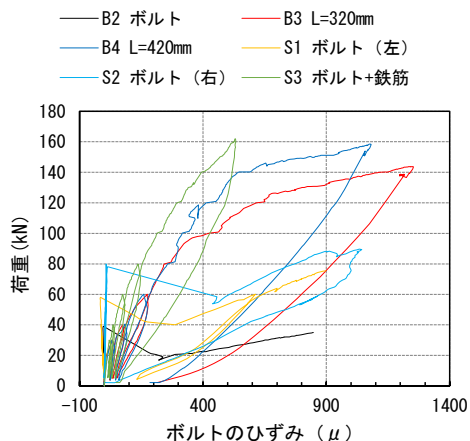


図-7 荷重とボルトひずみの関係

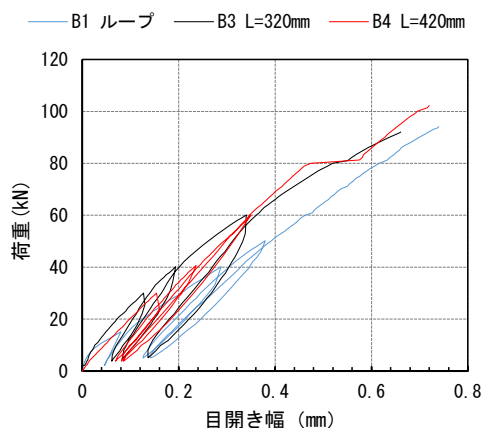


図-8 荷重と目開き幅の関係

手内部では大きな鉄筋ひずみは生じなかった。

### 4.3 ボルトのひずみ

図-7 に荷重とボルトひずみの関係を示す。ボルトのみで締結した B2, S1, S2 試験体では、継手の接合面の目開き発生時にひずみが急激に大きくなり、その後、荷重の増加に従いひずみも増加した。計測されたひずみは、最大 800  $\mu$  から 1000  $\mu$  程度であり、ボルトの降伏(3830  $\mu$ )には至らなかった。

一方、ボルト締結に加えて鉄筋を追加した B3, B4, S3 では、目開き発生時の急変はなく、荷重の増加に従いひずみも増加していた。これは、曲げの断面力に対して、ボルトが引張補強材として抵抗していたためと考えられる。計測されたひずみは、最大 500  $\mu$  から 1200  $\mu$  程度であり、ボルトの降伏(4470  $\mu$  以上)には至らなかった。

開発継手ではボルトは無収縮モルタル充填前に継手部材を相互に固定する役割を担っており、上述した結果から、施工時に生じる断面力に応じて、ボルトの本数、径および強度などを調整する余裕があるといえる。

### 4.4 境界面の目開き

図-8 に荷重と境界面の目開き幅の関係を示す。なお、図に示す目開き幅は、各試験体において軸方向鉄筋の降伏までに最大の目開き幅を示した境界面の値であり、B1 と B4 は左側の継手部と梁部材の境界面、B3 は右側の継手部と梁部材の境界面の値である。

B3 および B4 では、道路床版の疲労に対する鉄筋の曲げ引張応力度の制限値<sup>4)</sup>である 120 N/mm<sup>2</sup>(荷重 35.0 kN)時の目開き幅は 0.2 mm 程度であり、使用限界状態のひび割れ幅として問題ないといえる。また、B1 より目開き幅が減少しており、付着強度の大きい UFC<sup>6)</sup>を用いた継手部からの鉄筋伸び出し量が減少したものと推察される。

### 5. まとめ

床版スパン 2.5 m 程度の更新用の PC 床版を想定した

断面高さ 220 mm、幅 300 mm の梁部材を用いて、継手の載荷試験を行った。本試験の範囲で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) ボルトによる締結のみの開発継手は、継手の接合面においてひび割れが生じると荷重が低下し、継手のない部材やループ継手と比較して、曲げ耐力が大きく劣っていた。
- (2) ボルト締結に加えて鉄筋を追加した開発継手を等曲げモーメント区間に設けた場合、初期剛性はループ継手と比較してひび割れ発生まで同等であった。また、曲げ耐力は継手のない梁部材と同等であった。
- (3) ボルト締結に加えて鉄筋を追加した開発継手をせん断スパンに設けた場合のせん断耐力は、最大荷重が継手のない RC 部材のせん断耐力の計算値を超え、かつ継手のない側のスパンでせん断破壊したことから、継手のない RC 部材以上といえる。

今後、床版継手としての施工性やモルタル充填性、疲労耐久性を確認する必要がある。

### 参考文献

- 1) プレストレストコンクリート工学会：プレキャスト PC 床版による道路橋更新設計施工要領，2018.7
- 2) 土木学会：連続合成桁橋における床版取替え技術の現状と展開，2021.9
- 3) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），2004.9
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲ（コンクリート橋・コンクリート部材編），2017.11
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2023.3
- 6) 川口哲生，片桐誠，白井一義，二羽淳一郎：超高強度繊維補強コンクリートと補強用鋼材の付着応力伝達機構，土木学会論文集 E，Vol.65，No.1，pp.1-15，2009.1