

高強度繊維補強モルタルとネジ節鉄筋の付着性能に着目した プレキャスト床版接合部の曲げ載荷実験

Bending loading tests of precast-slab joints focusing on bonding performance
of high-strength fiber reinforced mortar and screw rebars

池野勝哉†, 倉川義弘*, 水野剣一**, 岩城一郎***

Katsuya Ikeno, Yoshihiro Kurakawa, Kenichi Mizuno, Ichiro Iwaki

†博 (工), 五洋建設株式会社, 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

*五洋建設株式会社, 土木部門土木本部土木技術部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

**修 (工), 五洋建設株式会社, 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

***工博, 日本大学教授, 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1)

The authors focused on high-strength fiber reinforced mortar with compressive strength of 100 N/mm² class, and proposed a rational joint structure that is easy and economical to construct. The proposed structure is an open-jointed one in which screw rebars are used for the bridge axis direction rebars of the PCa slab, and a concave aspect is provided at the joint interface where the tip of the rebar fits. In this study, one-sided pull-out tests of rebars were conducted to evaluate the bonding performance of screw rebars in high-strength fiber reinforced mortar. In addition, bending loading tests were conducted on the slab joints of the proposed structure to examine the bending load capacity, cracking behavior, and rebar behavior.

Keywords: high-strength fiber reinforced mortar, slab joint, bending loading test

キーワード: 高強度繊維補強モルタル, 床版接合部, 曲げ載荷試験

1. はじめに

近年, 老朽化した道路床版の大規模更新事業が進められており, 既設鋼橋の RC 床版からプレストレスを導入したプレキャスト PC 床版 (以下, PC 床版) への取替工事が行われている. PC 床版の接合には, 従来のループ継手よりも接合幅が狭く, かつ薄い床版にも適用できる継手として, PC 床版から突出する橋軸方向鉄筋の先端を拡張し, 鉄筋の付着力と先端部の支圧力に期待した継手構造が数多く開発されている (例えば 2,3). 接合部への間詰め材には, 一般に収縮補償用の膨張コンクリートが用いられているが, 近年, 鋼繊維を混入した常温硬化型の超高強度繊維補強コンクリート 4) が開発され, 圧縮強度 150N/mm² を超える間詰め材の高い付着力により, 接合幅の更なる短縮が可能となってきた.

一方, 超高強度繊維補強コンクリートは自己収縮が大きいことや硬化特性が温度環境の影響を敏感に受け易い

こと, また特殊ミキサを使用しなければならないなどの課題があるため, 実施工においては圧縮強度 100N/mm² クラスの高強度繊維補強モルタルがより汎用的であると考えられる. そこで, 著者らは間詰め材として, 圧縮強度 100N/mm² クラスの常温硬化型の高強度繊維補強モルタル 5) に着目し, 施工性と経済性に配慮した合理的な継手構造を提案する. 図-1 に本研究で提案する継手構造の概要を示す. 本構造は, PC 床版の橋軸方向鉄筋にネジ節鉄筋を使用し, 接合部界面に鉄筋先端が収まる凹部を

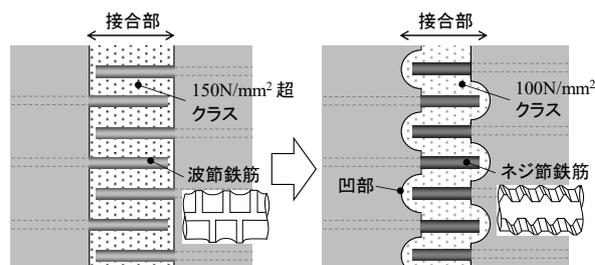


図-1 本研究で提案する継手構造

† 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: katsuya.ikeno@mail.penta-ocean.co.jp

設けたあき重ね継手である。鉄筋の付着性能は鉄筋節の支圧面積⁹⁾が重要な因子であることから、通常の波節に代えて支圧面積の大きなネジ節を使用し、接合部界面に凹部を設け、そこに対面する鉄筋端部を収めることで間詰め材の施工数量を低減している。

本研究では、高強度繊維補強モルタルにおけるネジ節鉄筋の基本的な付着性能を把握するため、圧縮強度や付着長、鉄筋種別を試験因子とした鉄筋の片側引抜き試験を実施した。また、ネジ節鉄筋の継手長や定着具の有無を試験因子とした床版接合部の曲げ載荷実験を実施し、曲げ耐荷性能やひび割れ性状、あき重ね継手の鉄筋挙動について考察した。

2. 高強度繊維補強モルタルの鉄筋片側引抜き試験

2.1 試験概要および試験ケース

鉄筋の片側引抜き試験の概要を図-2、試験ケースを表-1に示す。試験体の断面寸法を高さ150mm、幅100mm、長さ330mmとし、断面中央に鉄筋D19を埋設した。鉄筋の載荷端側には任意の非付着区間を設け、これを調整することで所定の付着長 L_b を設定した。なお、本研究ではPC床版の最小かぶり厚($c=40\text{mm}$)を念頭に、試験体側面の純かぶりを $c=40.5\text{mm}$ に設定した。

試験因子は、鉄筋種別(波節、ネジ節)、エポキシ樹脂塗装の有無、目標圧縮強度 f_c' 、付着長 L_b である。シリーズ1は鉄筋種別や目標圧縮強度 f_c' による違い、シリーズ2はエポキシ樹脂塗装の有無による違いに着目した。なお、表中における付着長 $L_b=15D$ のケースは、局所付着応力-すべり関係を求めるために実施したものである。

2.2 使用材料

高強度繊維補強モルタル⁹⁾の標準配合を表-2に示す。高強度繊維補強モルタルは、セメント、シリカフェーム、細骨材、高炉スラグ微粉末などから構成されたプレミックス材に水および高性能AE減水剤を投入し、鋼繊維(直径0.16-0.22mm、長さ13-20mm、引張強度2,750N/mm²以上)を体積比2.0%で混入した。練り混ぜには、60lの強制2軸ミキサを用い、フロー試験「JISR5201:2015セメントの物理試験方法」によってフレッシュ性状(フロー値300±10mm)を管理した。写真-1にフロー試験および混入した鋼繊維を示す。高強度繊維補強モルタルは自己充填性を有しているため、流し込み速度を一定に保ちながら、主として載荷端側から充填し、封緘状態で温度20度の恒温養生を行った。

試験に用いた鉄筋の機械的性質および形状の違いをそれぞれ表-3および表-4に示す。また、引抜き試験前(1週間以内)に実施した高強度繊維補強モルタルの材料試験値を表-5に示す。なお、本試験では局所付着応力-すべり関係を求めるため、鉄筋は比較的降伏点の高い材料(波節鉄筋:SD490, ネジ節鉄筋:USD685)を用いて

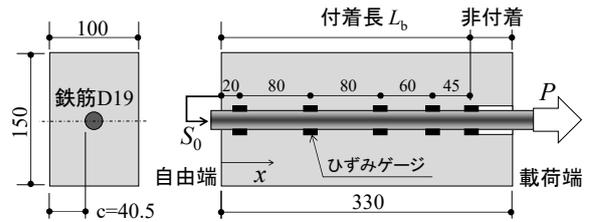


図-2 鉄筋の片側引抜き試験 [単位: mm]

表-1 試験ケース

	鉄筋種別	エポキシ樹脂塗装	目標圧縮強度 f_c' [N/mm ²]	付着長 L_b
				[$\times D$]
シリーズ1	波節	無し	120	5, 10, (15)
	ネジ節			5, 10, (15)
	波節	無し	150	5, 10, (15)
	ネジ節			5, 10, (15)
シリーズ2	ネジ節	有り	100	6, 8, (15)
		無し		(15)

※()は局所付着応力-すべり関係を求めるために実施

表-2 高強度繊維補強モルタルの標準配合

単位量 [kg/m ³]			
練り混ぜ水	プレミックス	高性能AE減水剤	鋼繊維 [2.0vol. %]
230.0	2,070.0	10.4	157.0



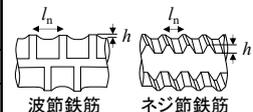
写真-1 フロー試験(左)と混入した鋼繊維(右)

表-3 鉄筋の機械的性質

種別	鉄筋径 D [mm]	降伏点 f_y [N/mm ²]	引張強度 f_t [N/mm ²]	弾性係数 E [N/mm ²]	備考
波節鉄筋	19.0	544.5	729.2	191×10^3	SD490
ネジ節鉄筋	19.0	713.7	907.1	195×10^3	USD685

表-4 鉄筋種別による形状の違い

種別	節の高さ h [mm]	節の平均間隔 l_n [mm]
波節鉄筋	1.3	12.1
ネジ節鉄筋	1.7	8.0



いるが、通常用いられる SD345（公称値）での降伏荷重レベルで試験結果を考察する。

2.3 荷重方法および計測項目

荷重は鉄筋軸を水平にした状態で、低ストローク仕様のセンターホールジャッキ（最大引張能力 350kN）を用い、鉄筋に引張力を単調に作用させた。荷重速度（手動制御）は、概ね 40~50kN/min である。計測項目は鉄筋ひずみ ε 、引抜き荷重 P 、自由端すべり S_0 である。鉄筋ひずみは、検長 3.0mm の電気式ひずみゲージを鉄筋の両面に貼付け、モルタルとの付着特性に与える悪影響がない事を確認した上で最低限の防水処理を施した（図-2 は付着長 $L_b=15D$ の計測配置）。

2.4 試験結果および考察

(1) 引抜き荷重と自由端すべりの関係

各シリーズの引抜き荷重 P と自由端すべり S_0 の関係を図-3 に示す。図中には使用した鉄筋（波節：SD490、ネジ節：USD685）の降伏荷重を黒線、SD345（公称値）での降伏荷重を赤線で示している。

図-3 (a)より、波節鉄筋およびネジ節鉄筋ともに、付着長 L_b が長く、圧縮強度 f_c' が大きいほど同自由端すべ

表-5 高強度繊維補強モルタルの材料試験値

呼び名	圧縮強度 f_c' [N/mm ²]	割裂強度 f_t [N/mm ²]	弾性係数 E [N/mm ²]	材齢	備考
100N	109.7	14.9	40×10^3	31日	シリーズ2
120N	119.9	14.8	42×10^3	31日	シリーズ1
150N	168.1	16.6	47×10^3	35日	シリーズ1

りに対する引抜き荷重が大きいことが分かる。また、鉄筋種別の比較として SD345 の降伏荷重レベル($P_y=98\text{kN}$)に着目すると、同じ付着長 $5D$ において波節鉄筋に比べてネジ節鉄筋の引抜き荷重が大きい。これは、鉄筋節の支圧面積の大小が関係しており、国分ら⁹⁾の支圧面積係数 BA （式(1)）を算出すると、波節鉄筋が 5.3%、ネジ節鉄筋は 9.6%であり、ネジ節鉄筋は波節鉄筋よりも 1.8 倍の支圧面積を有しているためだと考えられる。

$$BA = \frac{h}{l_n} \times \frac{U_0}{U} \quad (1)$$

ここで、 h ：節の高さ、 l_n ：節の平均間隔、 U_0 ：節の純投影長さ、 U ：公称周長

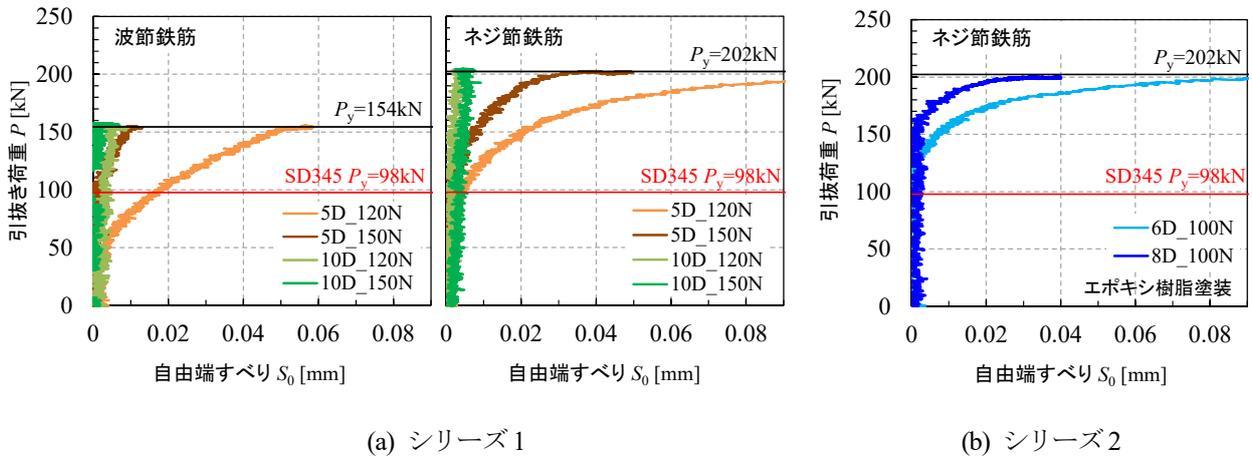


図-3 引抜き荷重 - 自由端すべり

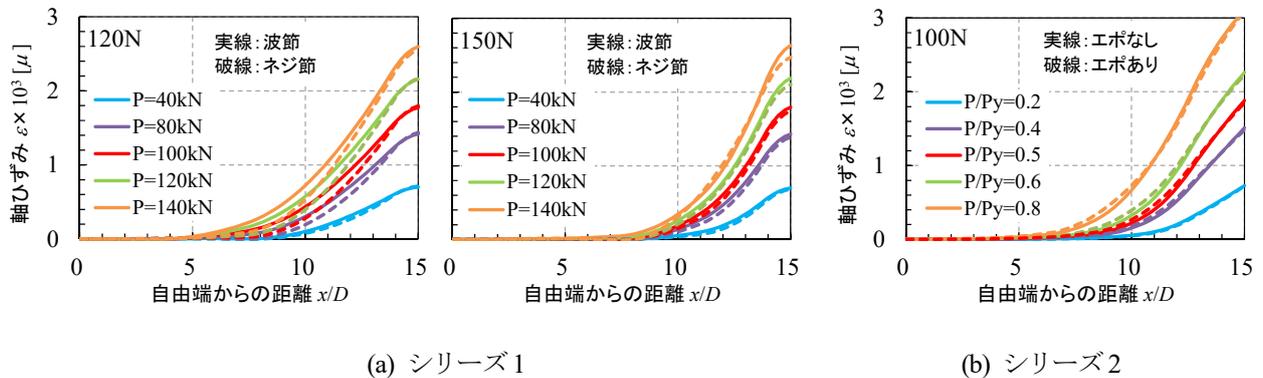


図-4 軸ひずみ分布 ($L_b=15D$)

次に、ネジ節鉄筋のエポキシ樹脂塗装の有無に着目した図-3(b)のシリーズ2を見ると、シリーズ1と同様に、付着長 L_b が長いほど自由端すべりに対する引抜き荷重が大きくなる傾向があるが、SD345の降伏荷重レベルでは付着長 $L_b=6D$ および $8D$ において、いずれも自由端すべりは生じていない。

(2) 鉄筋の軸ひずみ分布

付着長 $L_b=15D$ の試験結果について、自由端からの距離 x/D と鉄筋の軸ひずみの関係を図-4に示す。鉄筋の軸ひずみは、鉄筋両面に貼付けたひずみゲージの平均値から2次のスプライン関数で補間曲線を求め、シリーズ1は引抜き荷重、シリーズ2は降伏荷重 P_y に対する比として示している。また、凡例の赤線 ($P=100\text{kN}$ および $P/P_y=0.5$) はSD345(公称値)での降伏荷重相当である。

図-4(a)のシリーズ1(120N, 150N)において、120Nは自由端から $x/D=5\sim 15$ 、150Nは自由端から $x/D=7\sim 15$ の区間において軸ひずみが生じており、圧縮強度が大きいほど軸ひずみの発生範囲が狭いことが分かる。また、引抜き荷重が大きくなるほど、波節鉄筋(実線)とネジ節鉄筋(破線)に乖離が見られ、後者の傾きが大きく軸ひずみの発生範囲が狭くなっている。これは、軸ひずみの空間微分が鉄筋の付着応力に比例することから、波節鉄筋よりもネジ節鉄筋の付着性能が優れていることを示唆している。一方、150Nは波節鉄筋とネジ節鉄筋で明確な差異は認められない。これは、高強度繊維補強モルタルの圧縮強度に伴い付着強度が大きくなると、鉄筋節の支圧面積が及ぼす影響度が低下するためだと考えられる。このことから、ネジ節鉄筋の付着性能を有効に活用するためには、圧縮強度 120 N/mm^2 以下の高強度繊維補強モルタルが適していると考えられる。

図-4(b)のシリーズ2(100N)では、ネジ節鉄筋を用いたエポキシ樹脂塗装の有無を比較している。エポキシ樹脂塗装を施した異形鉄筋の付着強度は、一般に85~90%に低下する⁹⁾と考えられているが、ネジ節鉄筋を用いた本試験において両者の軸ひずみ分布に違いは見られなかった。この理由として、圧縮強度 100 N/mm^2 の場合、鉄筋の塗装状態よりもネジ節の表面凹凸に高強度繊維補強モルタルが充填されることで発揮される付着力の方が有意であるためだと考えられる。図-4(b)より、エポキシ樹脂塗装を施したネジ節鉄筋において、SD345の降伏荷重 ($P/P_y=0.5$) に着目すると、自由端から $x/D=7\sim 15$ の区間 ($=8D$ の範囲) で軸ひずみが生じている。図-3(b)で示したSD345の降伏荷重レベルで、付着長 $L_b=6D$ および $8D$ の自由端すべりが生じていない事を踏まえると、圧縮強度 100 N/mm^2 の高強度繊維補強モルタルにおいて、SD345相当のネジ節鉄筋は実質的に付着長 $L_b=8D$ 程度で抵抗しているものと考えられる。なお、図-4(a)より、120Nは付着長 $L_b=8D$ 程度、150Nでは付着長 $L_b=6D$ 程度が引抜き力に抵抗していると判断されるが、150Nでは波節鉄筋に対するネジ節鉄筋の付着優位性は認められない。

(3) 局所付着応力-すべり関係

図-4(b)の付着長 $L_b=15D$ におけるシリーズ2(100N)を用いて、局所付着応力 τ -すべり S 関係を求めた。局所付着応力 τ は、図-4(b)の軸ひずみ分布を距離 x で微分し、式(2)から応力に変換した。すべり S は、自由端($x=0$)から着目点 l までのひずみを積分したものに自由端すべり S_0 を加えて求めた(式(3))。

$$\tau = \frac{E \cdot D}{4} \frac{d\varepsilon}{dx} \quad (2)$$

$$S = \int_0^l \varepsilon dx + S_0 \quad (3)$$

ここで、 D : 鉄筋径、 E : 鉄筋の弾性係数、 ε : 鉄筋の軸ひずみ、 S_0 : 自由端のすべり、 l : 自由端から着目点までの距離

マッシブなコンクリート中にネジ節鉄筋が十分長く定着された局所付着応力-すべり関係は、島ら⁹⁾によって提案されており、コンクリートの圧縮強度 f_c' および鉄筋すべり ($s=S/D$) をパラメータとした関数形が定式化されている。川口ら¹⁰⁾はこれを拡張し、超高強度繊維補強コンクリート(体積比2.0%の鋼繊維)を対象に、 $c/D=1.1\sim 2.0$ の範囲 (c : かぶり) に限定して式(4)を提案し、回帰分析より表-6を得ている(ネジ節鉄筋の場合、 $\beta=2/3$)。

$$\tau = \alpha f_c'^{\beta} (1 - e^{-\gamma s}) \quad (4)$$

表-6 式(4)の回帰分析結果

	α	β	γ
本研究 (高強度繊維補強モルタル)	1.19	2/3	640
川口ら (超高強度繊維補強コンクリート)	1.05	2/3	550

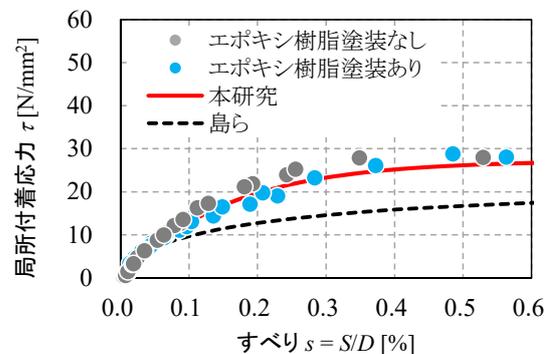


図-5 ネジ節鉄筋の局所付着応力 - すべり関係

本試験では、エポキシ樹脂塗装の有無による付着特性に大きな差異が見られないことから、エポキシ樹脂塗装の区別なく式(4)のパラメータを回帰分析した結果を表-6、ネジ節鉄筋と高強度繊維補強モルタルとの局所付着応力 τ とすべり関係を図-5に示す。局所付着応力 τ は、自由端から $x=114\sim 228\text{mm}$ ($6D\sim 12D$)の位置で算出したものであり、図中の赤実線は実強度 $f_c'=109.7\text{N/mm}^2$ および本研究の係数(表-6)を用いて、式(4)より求めたものである。参考としてマッシュピコンクリートを対象とした島ら⁹⁾の局所付着応力 τ を破線で示しているが、同強度を用いたとしても高強度繊維補強モルタルを対象にした本研究の方が大きいことが分かる。

3. プレキャスト床版接合部の曲げ載荷実験

前章の片側引抜き試験より、圧縮強度 100N/mm^2 クラスの高強度繊維補強モルタルにおけるネジ節鉄筋は実質的な付着長が $L_b=8D$ 程度であることが分かった。しかし、実機の床版接合部には、疲労荷重下における曲げモーメントやせん断力が複合的に作用するため、片側引抜き試験での付着応力状態とは異なる様相を示すと考えられる。本章では、提案継手構造の適用性を確認する第一

ステップとして、接合部を有する床版試験体の曲げ載荷実験を実施し、曲げ耐荷性能やひび割れ性状、あき重ね継手の鉄筋挙動について考察した。

3.1 試験体諸元および試験ケース

床版曲げ試験体の概要を図-6に示す。試験体は幅 $670\text{mm}\times$ 厚さ $220\text{mm}\times$ 全長 2700mm のプレキャスト床版とした。橋軸方向(長手方向)には、主鉄筋D19を上下ともに 125mm ピッチで5本ずつ、橋軸直角方向にD13を 125mm ピッチで配置した。ここで、本研究では橋軸方向鉄筋を主鉄筋と表記しており、全てエポキシ樹脂塗装を施している。比較対象とした従来のループ継手は、ループ内側に生じる割裂力に対して抵抗する補強筋D19を6本配置した。なお、鉄筋の材質は全てSD345である。プレキャスト床版の製作時には、接合部界面で目荒らし処理を施した鉛直打継面を設け、各ケースの接合部に後から現場打ちコンクリート(目標圧縮強度 50N/mm^2 、膨張材入り)あるいは高強度繊維補強モルタル(目標圧縮強度 100N/mm^2)を打設して一体化した。

試験ケースの一覧を表-7に示す。試験因子は、継手長 L ($6D, 8D$)、継手方法(定着具はプレートナットを使用)および鉛直打継面における界面形状(直線ST、半円

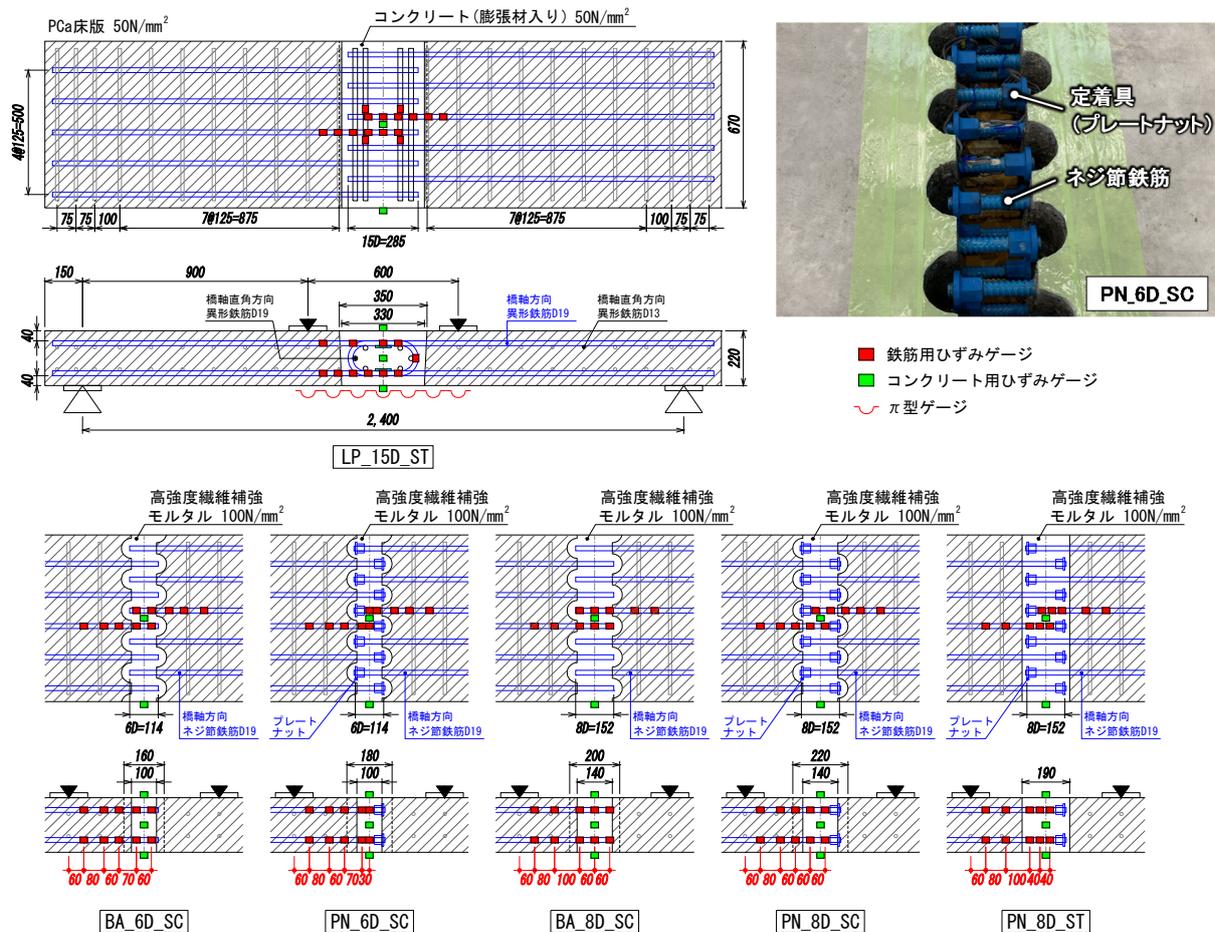


図-6 床版曲げ試験体の概要 [単位: mm]

表-7 試験ケース

ケース名	鉄筋種別 ^{※1}	目標圧縮強度 f_c' [N/mm ²]	継手長 L [× D]	接合幅 ^{※2} [mm]	継手方法	界面形状	備考
LP_15D_ST	波節鉄筋	50	15	330 / 350	ループ継手	直線ST	普通コンクリート
BA_6D_SC	ネジ節鉄筋	100	6	100 / 160	—	半円SC	高強度繊維補強 モルタル
PN_6D_SC				100 / 180	プレートナット		
BA_8D_SC				—	—		
PN_8D_SC			8	140 / 200	—		
PN_8D_ST				140 / 220	プレートナット		
				190		直線ST	

※1 主鉄筋はエポキシ樹脂塗装

※2 最短幅/最長幅

表-8 鉄筋の機械的性質

名称	鉄筋径 D [mm]	降伏点 f_y [N/mm ²]	引張強度 f_t [N/mm ²]	弾性係数 E [kN/mm ²]	備考
波節鉄筋	13.0	379	557	196	SD345
	19.0	387	549	193	SD345
ネジ節鉄筋	19.0	411	570	190	SD345

表-9 コンクリート・モルタルの材料試験値

名称	圧縮強度 f_c [N/mm ²]	割裂強度 f_t [N/mm ²]	弾性係数 E [kN/mm ²]	備考
コンクリート(PCa床版)	56.0	4.1	32.9	σ_{44}
コンクリート(膨張材入り)	49.5	3.7	33.1	σ_{36}
高強度繊維補強モルタル	109.7	14.9	40.0	σ_{31}

SC) である。ここで、前章の引抜き試験から高強度繊維補強モルタルの圧縮強度が 100N/mm² の場合、ネジ節鉄筋の継手長 $L=6D$ は不十分である可能性があるため、定着具の有無を試験因子に設定している。なお、本研究で提案する接合部界面が半円 SC に相当する。

3.2 使用材料および材料試験値

試験に用いた鉄筋の機械的性質、コンクリートおよび高強度繊維補強モルタルの材料試験値（載荷前）を表-8 および表-9 に示す。材料試験の結果、波節鉄筋 D19 およびネジ節鉄筋 D19 の降伏ひずみ ϵ_y はそれぞれ 2010 μ 、2160 μ であった。

3.3 載荷方法および計測項目

曲げ載荷試験は、純曲げ区間 600mm、載荷スパン長 2,400mm の 4 点曲げ載荷（せん断スパン比 $a/d=5.3$ ）とした。試験体支持には鋼製のピン・ローラー支承を設置し、1,000kN 油圧ジャッキにより使用時荷重レベルで 10 回の繰返し載荷後、一方向の単調載荷を行った。ここで、使用時荷重 ($P_a=54.6$ kN) レベルは、道路橋床版を想定し引張側主鉄筋の発生応力を 120N/mm²（許容応力度を 140N/mm² とし、20N/mm² 程度の余裕を考慮¹⁾）とした時の荷重である。コンクリートおよび鉄筋の公称値 ($f_c'=50$ N/mm², $f_y=345$ N/mm²), ヤング係数比 $n=15$ を用いた単鉄筋 RC 断面計算値として設定した。

計測項目は油圧ジャッキに取り付けた荷重計と試験体中央での鉛直変位、図-6 に示した鉄筋位置にひずみゲージを上下面に貼り付けた。また、純曲げ区間の下面には π 型ゲージを取り付け、載荷に伴うひび割れ幅を計測した。その他、ひび割れ発生時にはクラックゲージを用いた目視観察および写真撮影を実施した。

3.4 試験結果および考察

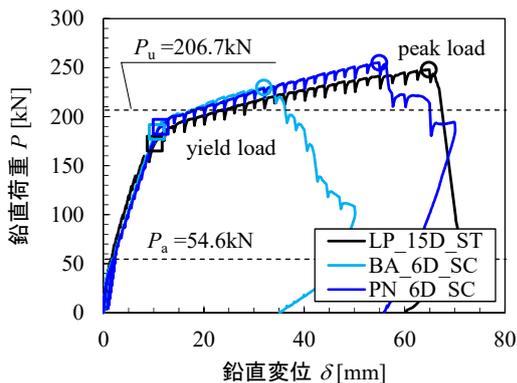
(1) 曲げ耐荷特性

試験で得られた鉛直荷重 P —鉛直変位 δ 関係を図-7、試験結果の一覧を表-10 に示す。なお、図中には 10 回の繰返し載荷を行った使用時荷重 P_a と、表-8 および表-9 の試験値を用いて算定した終局曲げ荷重 $P_u=206.7$ kN を水平破線と併記している。主鉄筋が降伏ひずみ ϵ_y に達した時の荷重を降伏値と定義し、表中には実験で得られた降伏値 P_y 、最大値 P_{max} と計算値である終局曲げ荷重 P_u との比を示した。

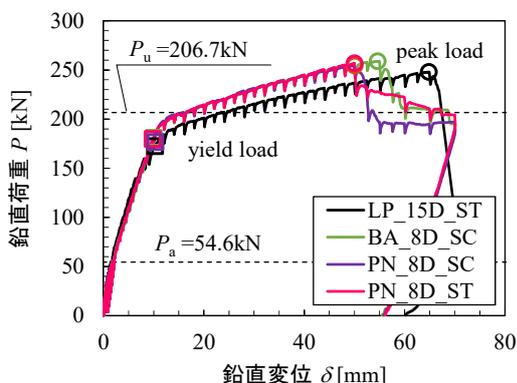
全てのケースにおいて、鉛直荷重の増大に伴い床版下面に曲げひび割れが発生し、使用時荷重レベルを超えた辺りから非線形性状を示した。その後、床版下側の主鉄筋が降伏ひずみ ϵ_y に達する付近で大きく折れ曲がり、終局曲げ荷重 P_u を超過した。図-7(a)を見ると、継手長 $6D$ の BA_6D_SC（定着具無し）は、他ケースと比較して早い載荷ステップ ($\delta=32$ mm, $P=230$ kN) で荷重低下が生じていることが分かる。これは、後述するひび割れ性状、X線 CT 計測による接合内部の可視化より、接合部における引張側主鉄筋の付着ひび割れが卓越し、鉄筋の引抜きが生じたためである。一方、他ケースは $\delta=50$ mm を超える辺りまで荷重は低下せず、248~259kN の耐荷力を発揮した。なお、実験で得られた最大値と計算値 ($P_u=206.7$ kN) の比は 1.11~1.25 であった。

(2) ひび割れ性状

使用時荷重 $P_a=54.6$ kN での繰返し載荷における最大ひび割れ幅の推移を図-8 に示す。ここで、最大ひび割れ幅は、純曲げ区間に設置した π 型ゲージで計測された最大値をプロットしたものであり、結果として接合部界面の開きに相当する。図中より、従来の LP_15D_ST（ループ継手）と比較して、高強度繊維補強モルタルを用いた



(a) ループ継手と継手長 6D シリーズ



(b) ループ継手と継手長 8D シリーズ

図-7 荷重-変位関係

全てのケースは、繰返し回数に伴う顕著な増加傾向が確認されておらず、最大ひび割れ幅は比較的安定しているものと判断される。

次に、試験体側面および下面におけるひび割れ性状について、使用時荷重での繰返し載荷 10 回後、降伏荷重時について図-9 に示す。ここで、クラックゲージで計測した試験体側面のひび割れ幅も合わせて示した。全てのケースにおいて、使用時荷重で目立っていない接合部界面のひび割れが降伏荷重時に卓越するものの、床版長手方向に渡って、比較的良好なひび割れ分散が確認できる。一方、降伏荷重時のひび割れ性状に着目すると、継手長 6D の BA_6D_SC (定着具無し) は、接合部内 (黄色ハッチング) に多くのひび割れが発生しており、不十分な継手長によって高強度繊維補強モルタルが顕著に損傷しているものと推察される。なお、本実験では接合部の界面形状が異なる PN_8D_SC (半円) および PN_8D_ST (直線) について、ひび割れ幅およびひび割れ性状に有意な差異は認められていない。

試験終了時 (除荷後) の接合部側面における損傷状況を写真-2 に示す。従来の LP_15D_ST (ループ継手) は、接合部内においてループ筋に沿ったひび割れ等、多くの

表-10 試験結果の一覧

ケース名	降伏値		最大値		
	変位 δ [mm]	荷重 P_y [kN]	変位 δ [mm]	荷重 P_{max} [kN]	P_{max} / P_u
LP_15D_ST	10.2	172.4	64.8	247.9	1.20
BA_6D_SC	10.6	184.3	32.0	229.7	1.11
PN_6D_SC	11.4	189.6	54.9	255.0	1.23
BA_8D_SC	10.0	180.9	54.6	258.9	1.25
PN_8D_SC	10.0	176.7	50.0	254.5	1.23
PN_8D_ST	9.8	179.7	50.0	256.8	1.24

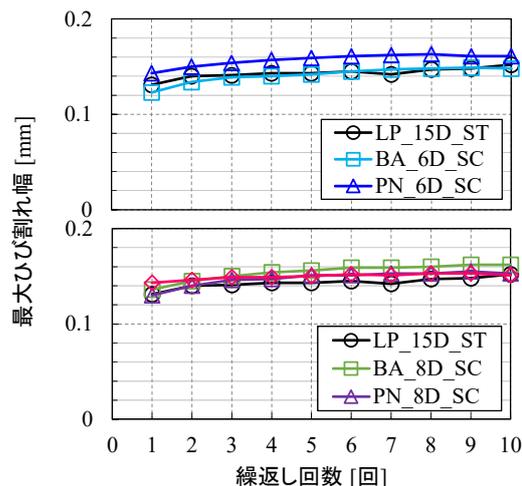


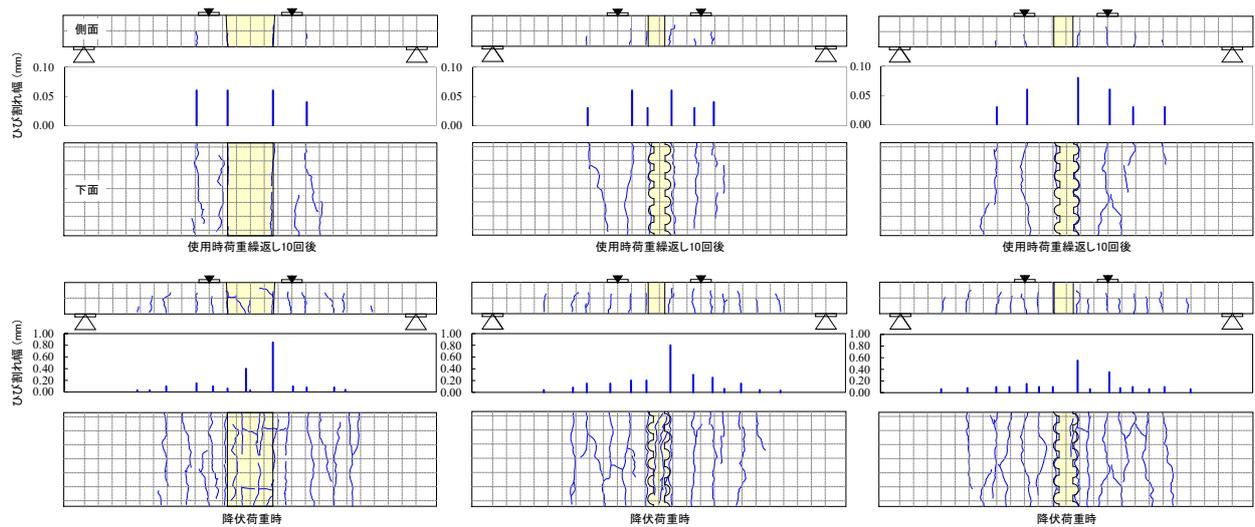
図-8 最大ひび割れ幅の推移

損傷箇所が確認された。他方、継手長 6D の BA_6D_SC (定着具無し) は接合部内に顕著な損傷が見られ、その他のケースでは目立った損傷は確認されていない。接合部内の損傷有無による内部を観察するため、継手長 6D の BA_6D_SC (定着具無し) および PN_6D_SC (定着具有り) の 2 ケースについて、写真-3 に示す接合部を切断したブロック断面を写真-4 に示す。写真-4 は切断したブロックを、それぞれ外側に倒した状況である。

写真-4 より、接合部内に顕著な損傷が見られた BA_6D_SC (定着具無し) は、床版下面の引張側主鉄筋周りに多くの付着ひび割れが確認でき、曲げ荷重によって接合部内の主鉄筋の引抜きが生じていたものと推察される。一方、PN_6D_SC (定着具有り) には引張側主鉄筋周りの付着ひび割れ等の損傷は確認されていない。このように、同じ継手長 6D においても、定着具の有無によって鉄筋周りの損傷状況は大きく異なっている。

(3) X線CT計測による接合内部の可視化

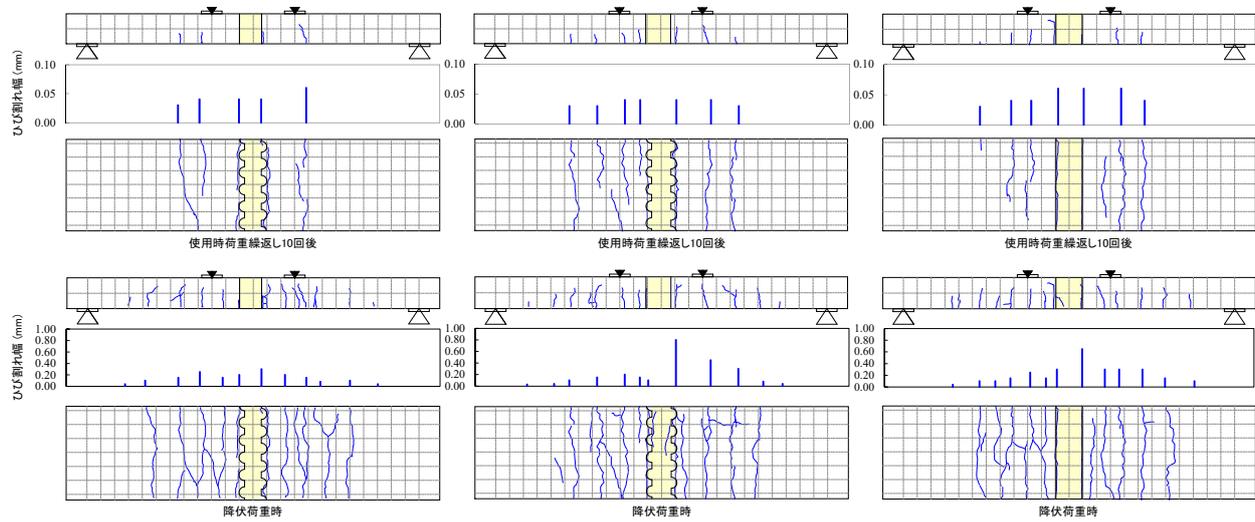
接合部内の損傷を可視化するため、BA_6D_SC (定着具無し) および PN_6D_SC (定着具有り) について、主鉄筋を含む高強度繊維補強モルタルの X 線 CT 計測を行った。X 線 CT 計測とは、物体密度による X 線吸収率の違いを利用して、物体内のひび割れを含む空隙構造の可視化および定量評価を行うものである。



(a) LP_15D_ST

(b) BA_6D_SC

(c) PN_6D_SC



(d) BA_8D_SC

(e) PN_8D_SC

(f) PN_8D_ST

図-9 ひび割れ性状 (使用時荷重繰返し 10 回後, 降伏荷重時)



(a) LP_15D_ST

(b) BA_6D_SC

(c) PN_6D_SC



(d) BA_8D_SC

(e) PN_8D_SC

(f) PN_8D_ST

写真-2 試験終了時 (除荷後) の接合部側面における損傷状況

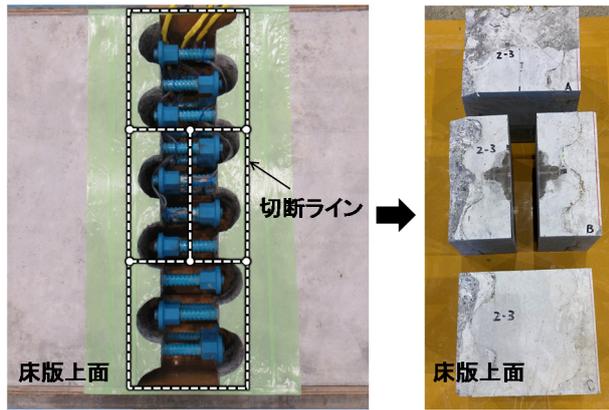
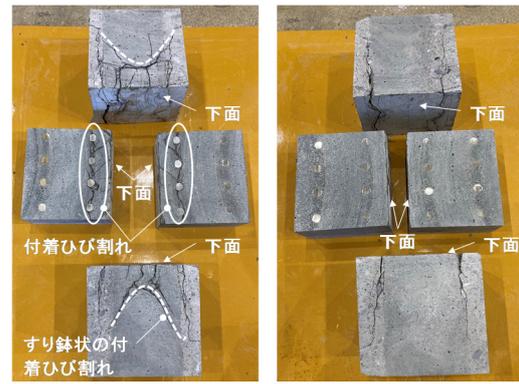


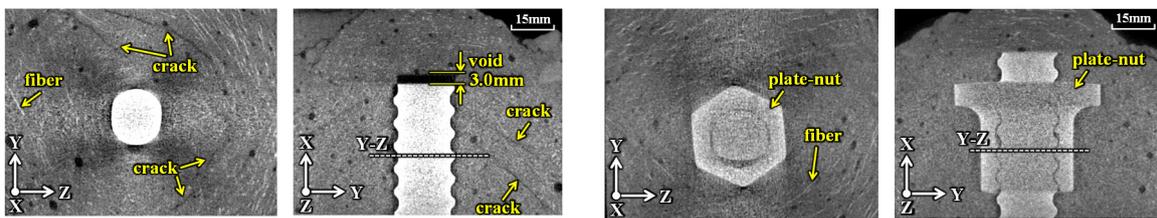
写真-3 切断箇所と切断ライン



(a) BA_6D_SC

(b) PN_6D_SC

写真-4 切断ブロック断面



(a) BA_6D_SC

(b) PN_6D_SC

写真-5 X線CT画像

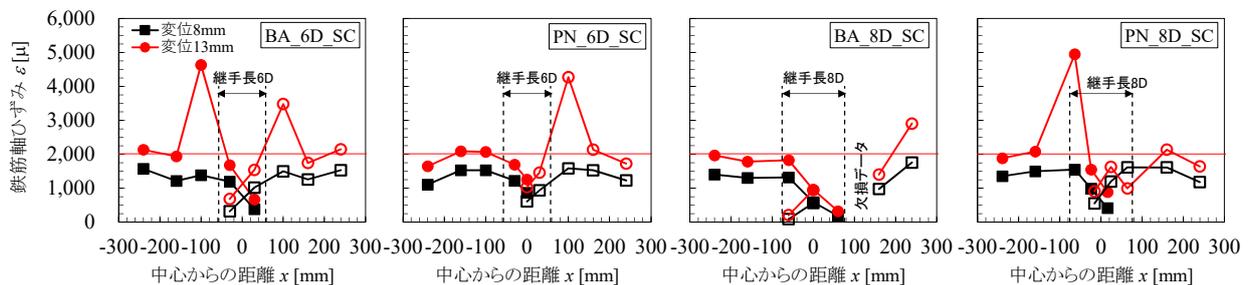


図-10 鉄筋軸ひずみ分布 (弾性域：変位 8mm, 塑性域：変位 13mm)

X線CT画像の撮影にはマイクロフォーカスX線CT装置を用い、撮影条件は管電圧 250kV、管電流 60 μ A、解像度は 159 μ m/pixel、スライス数は 720 枚である。

得られた X 線 CT 画像を写真-5 に示す。白い部分は主鉄筋、定着具あるいは鋼繊維、黒い部分は空隙やひび割れを表している。X 線 CT 画像における座標系は、床版試験体の長手方向 X、短手方向 Y、厚み方向 Z である。写真-5(a)より、BA_6D_SC (定着具無し) は鉄筋先端に引抜きによる 3.0mm 程度の空隙が生じ、引抜き方向に対して斜めに生じたひび割れ¹²⁾が明瞭に確認できる。一方、写真-5 (b)の PN_6D_SC (定着具有り) には、定着具周りにおいて明瞭なクラックや空隙は確認されていない。

(4) 主鉄筋の軸ひずみ分布

高強度繊維補強モルタル (BA_6D_SC, PN_6D_SC,

BA_8D_SC, PN_8D_SC) について、図-7 から判断される代表的な弾性域 (変位 $\delta=8$ mm) および塑性域 (変位 $\delta=13$ mm) での引張側主鉄筋軸ひずみ分布を図-10 に示す。なお、軸ひずみは鉄筋の上下面に貼り付けたひずみゲージの平均値であり、BA_8D_SC については一部、データが欠損している。弾性域 (変位 $\delta=8$ mm) は左右対称のひずみ分布を示し、高強度繊維補強モルタルが充填された接合部のひずみ勾配が大きいことから、接合部において鉄筋の付着応力が卓越しているものと考えられる。降伏域 (変位 $\delta=13$ mm) のピークひずみは、概ね接合部と PCa 床版との境界付近 (強度変化が大きい箇所) で発生している。継手長 6D の BA_6D_SC および継手長 8D の BA_8D_SC を比較すると、継手長 6D では接合部内の鉄筋先端付近のひずみが非ゼロであるのに対し、継手長

8D ではひずみがゼロであることから、継手長 6D の BA_6D_SC は、鉄筋の引抜きが生じていたことを裏付けている。なお、PN_6D_SC の定着具根元付近のひずみは非ゼロであるが、写真-4(b)および写真-5(b)で示したように、定着具を使用することで引抜きは生じていない。

以上より、本研究で提案する継手構造において、エポキシ樹脂塗装を施したネジ節鉄筋の継手長 6D は、圧縮強度 100N/mm² クラスの高強度繊維補強モルタルを間詰め材とした場合、鉄筋先端に定着具が必要であり、継手長 8D 以上であれば不要であると判断される。

4. 結論

本研究では、プレキャスト床版接合部の間詰め材として、実施工で扱い易い圧縮強度 100N/mm² クラスの常温硬化型の高強度繊維補強モルタルに着目し、ネジ節鉄筋を用いたあき重ね継手を提案した。ネジ節鉄筋の基本的な付着性能を把握するために、高強度繊維補強モルタルの圧縮強度や付着長、鉄筋種別を試験因子とした片側引抜き試験を実施した。次に、ネジ節鉄筋の継手長や定着具の有無を試験因子とした床版接合部の曲げ載荷実験を実施した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 片側引抜き試験より、圧縮強度 100N/mm² クラスの高強度繊維補強モルタルにおいて、ネジ節鉄筋の方が波節鉄筋よりも同自由端すべりにおける引抜き荷重が大きく付着性能が高いことが分かった。
- (2) ネジ節鉄筋は波節鉄筋よりも支圧面積係数 BA が 1.8 倍と評価され、鉄筋節の支圧面積が付着性能に大きく影響しているものと考えられた。
- (3) 実施工での使用が想定される鉄筋規格 (SD345) において、圧縮強度 100N/mm² クラスの高強度繊維補強モルタルに埋設するネジ節鉄筋は、8D 程度が実質的に抵抗している付着長であると判断された。
- (4) ネジ節鉄筋と圧縮強度 100N/mm² クラスの高強度繊維補強モルタルによる床版接合部は、継手長 6D の場合は定着具が必要であるが、継手長 8D 以上であれば定着具が不要であると判断された。
- (5) 接合部界面の開きは、使用時荷重による 10 回繰返し載荷において顕著な増加傾向は確認されず、従来のループ継手と比較して同程度であった。
- (6) 本研究の曲げ載荷実験では、接合部の界面形状が異なる PN_8D_SC (半円) および PN_8D_ST (直線) において、最大荷重やひび割れ性状、ひび割れ幅の観点から有意な差異は認められなかった。

本構造は接合部界面に対面する鉄筋先端が収まる凹部を設け、間詰め材の施工数量を最小限に抑えていることから、施工性と経済性を兼ね備えた合理的な継手構造と言える。一方、高い剛性を有する間詰め材を充填した接合

部では、疲労荷重下において界面形状が及ぼす影響について不明な点が多い。今後は、本構造の曲げ作用のみならず、静的あるいは動的な荷重作用下におけるせん断挙動を把握するとともに、輪荷重走行試験より耐用年数 100 年相当の耐疲労性の評価を行う予定である。

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，pp.73-77，2018.
- 2) 福永靖雄，今村壮宏，二井谷教治，角本周，原健悟：機械式定着を併用した重ね継手を有するプレキャスト PC 床版の輪荷重走行疲労試験，土木構造・材料論文集，No.28，pp.39-46，2012.
- 3) 吉松秀和，松井繁之，大澤浩二，中山良直，水野浩，表直也：床版取替え用プレキャスト PC 床版の合理化継手の開発，構造工学論文集，Vol.60A，pp.1159-1168，2014.
- 4) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」に関する技術評価報告書，技術推進ライブラリー，No.10，2017.
- 5) 水野剣一，正木徹，谷口修，茶林敬司：常温硬化特性を有した低炭素型高強度繊維補強モルタルの検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.934-939，2022.
- 6) 国分正胤，岡村甫：太径鉄筋の使用に関する研究，土木学会論文報告集，第 202 号，pp.103-113，1972.
- 7) 池野勝哉，田中智宏，長瀬靖佳，牧野常雄，山本勝：分光型光ファイバセンサを用いた高強度繊維補強モルタル内の鉄筋ひずみ計測，土木学会第 77 回年次学術講演会講演概要集，CS9-48，2022.
- 8) 土木学会：エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針[改訂版]，コンクリートライブラリー第 112 号，p.7，2003.
- 9) 島弘，周礼良，岡村甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり関係，土木学会論文集，No.378/V-6，pp.165-174，1987.
- 10) 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.
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III 鋼橋編，pp.276-277，2012.
- 12) 後藤幸正，大塚浩司：引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひび割れに関する実験的研究，土木学会論文報告集，第 284 号，pp.85-100，1980.

(2022 年 9 月 20 日受付)

(2023 年 2 月 10 日受理)