

報告 各種 FRCC を用いた鉄筋の重ね継手に関する検討

竹山 忠臣*1・篠崎 裕生*2・横井 晶有*3・内田 裕市*4

要旨：本検討では鉄筋と短繊維補強コンクリートを併用した重ね継手を対象として、短繊維補強コンクリートの圧縮強度と引張軟化特性による継手強度の向上と短繊維補強コンクリートに使用する繊維の種類が継手強度に与える影響を検討した。その結果、短繊維補強コンクリートの圧縮強度と引張軟化特性を高くすると継手強度は向上するが、圧縮強度を 80N/mm^2 から 120N/mm^2 に高くしても、継手強度は大きく向上しない。また、短繊維補強コンクリートに使用する繊維の種類を変えても、短繊維補強コンクリートの圧縮強度と引張軟化特性が同程度であれば、継手強度は同程度になる。

キーワード：短繊維補強コンクリート、鉄筋、重ね継手、引張軟化特性、付着割裂ひび割れ

1. はじめに

短繊維補強コンクリート (FRCC) は古くから研究が実施されており、コンクリート中に短繊維を分散させることで、せん断耐力の向上、コンクリートのじん性の向上などの効果が期待できる。短繊維補強コンクリートのじん性向上により、プレーンコンクリートを用いた場合の鉄筋の継手・定着性能よりも短繊維補強コンクリートを用いた場合の鉄筋の継手・定着性能は向上する^{1),2)}。しかし、既往の研究^{1),2)}では、短繊維補強コンクリートの強度域を限定、または使用する繊維を限定した場合の結果であるため、短繊維補強コンクリートを用いる場合の鉄筋の継手・定着性能に関する部材設計の方法が一般化されておらず、短繊維補強コンクリートにひび割れ発生後の特性、すなわち、ひび割れ面における架橋効果が合理的に考慮されていないのが現状である³⁾。

コンクリート構造物の設計にあたっては、要求性能に応じて、コンクリートの特性を定める必要がある。これは短繊維補強コンクリートに限ったことではなく、一般的なプレーンコンクリートを用いる場合にも共通していることである。短繊維補強コンクリートを用いたコンクリート部材の鉄筋の継手・定着性能であれば、短繊維補強コンクリートのじん性の向上による効果を設計に反映するのが望ましい。

筆者ら^{4),5)}は、鉄筋と短繊維補強コンクリートを併用した場合の継手性能に関する検討を行なっている。中でも、短繊維補強コンクリートの圧縮強度と引張軟化特性に着目して、重ね継手を想定した継手単体の両引き試験により、継手性能を検討している。既往の検討⁴⁾では、短繊維補強コンクリートの目標圧縮強度を 80 、 200N/mm^2 とした場合の継手性能を検討しているが、短繊維補強コンクリートの圧縮強度を既往の検討結果に加え

て変化させた場合に鉄筋の継手性能に与える影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

図-1 に試験体の概要を示す。試験体の断面は全て幅 200mm 、高さ 140mm で統一し、試験体長さ(継手長)を $25d$ 、 $15d$ 、 $10d$ 、 $7.5d$ (d : 鉄筋径)と変化させた。鉄筋は SD345, D19 の異形鉄筋(竹節)を使用し、かぶりを 40mm 、鉄筋のあきを 40mm で統一した。なお、鉄筋は試験体の側面(図-1 の断面図中、左右)に異形鉄筋の節が向くように配置した。試験体両端の継手区間の外側の鉄筋に厚さ 4.5mm の鋼板をコンクリート打設前に溶接し、埋設型枠として利用した。鉄筋がコンクリートから抜け出した時に、鉄筋が鋼板に拘束されることを防止する目的で、

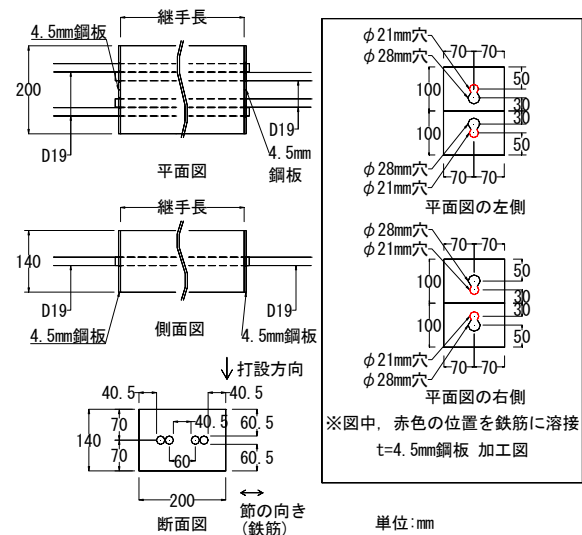


図-1 試験体

*1 三井住友建設株式会社 技術本部 (正会員)

*2 三井住友建設株式会社 技術本部 博(工) (正会員)

*3 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科 (学生会員)

*4 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授 博(工) (正会員)

表－１ 試験パラメータおよび両引き試験結果

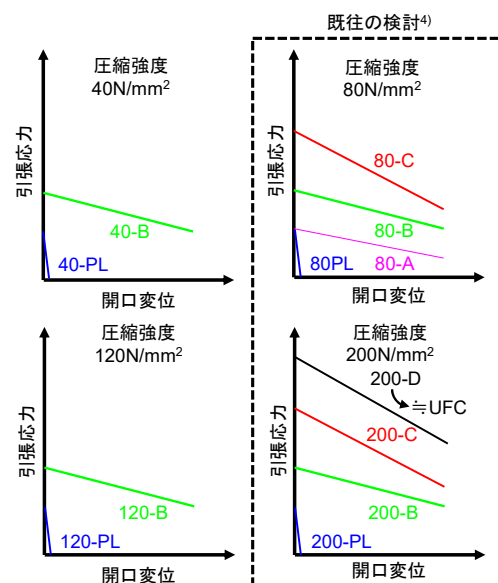
種類	目標 圧縮強度 (N/mm ²)	試験時の 圧縮強度 (N/mm ²)	使用 繊維	繊維 混入率 (vol.%)	鉄筋応力(継手強度) (N/mm ²)				
					重ね継手長				
					25d	20d	15d	10d	7.5d
40-PL	No.1	40	-	-	346.6	-	270.4	-	-
	No.2				400.5	-	254.2	-	-
	ave				373.5	-	262.3	-	-
40-B	No.1	40	SF48 φ0.62mm L=30mm	1.0	-	-	304.5	247.8	-
	No.2				-	-	357.2	266.1	-
	ave				-	-	330.8	257.0	-
80-PL ⁴⁾	ave	80	-	-	384.1	-	320.3	-	-
80-A ⁴⁾	ave		SF48	0.35	-	-	369.6	274.2	-
80-B ⁴⁾	ave		φ0.62mm L=30mm	0.75	-	-	390.8	318.8	-
80-C ⁴⁾	ave			1.5	-	-	442.9	354.1	236.8
80-B-SF110 ⁵⁾	No.1		SF110 φ0.2mm L=15mm	0.3	-	-	399.3	330.8	-
	No.2				-	-	380.5	323.5	-
	ave				-	-	389.9	327.1	-
80-B-PVA45 ⁵⁾	No.1		PVA45 φ0.66mm L=30mm	1.5	-	-	390.2	305.7	-
	No.2				-	-	398.8	300.2	-
	ave				-	-	394.5	302.9	-
120-PL	No.1	120	-	-	407.2	-	330.1	-	-
	No.2				384.9	-	311.1	-	-
	ave				396.0	-	320.6	-	-
120-B	No.1		SF48 φ0.62mm L=30mm	0.75	-	-	408.5	353.2	247.5
	No.2				-	-	398.8	321.6	261.3
	ave				-	-	403.6	337.4	254.4
200-PL ⁴⁾	ave	200	-	-	-	452.4	-	376.8	-
200-B ⁴⁾	ave		SF75	0.25	-	-	490.3↑	458.4	398.5
200-C ⁴⁾	ave		φ0.2mm L=15mm	0.75	-	-	490.9↑	490.4↑	458.8
200-D ⁴⁾	ave			2.0	-	-	-	489.6↑	490.0↑

※既報の結果は、平均値のみ記載

鉄筋を鋼板に溶接しない穴の径は十分に大きくなるような寸法とした。また、鋼板とコンクリートの縁切りを行なうため、鋼板にビニールフィルムを巻付けてからコンクリートを打設した。コンクリートの各水準において検討した試験体の継手長を表－１に示す。プレーンコンクリートの試験体の40-PL, 80-PL, 120-PLは継手長を25dと15d, 200-PLは継手長を20dと10dのそれぞれ2水準とした。短繊維補強コンクリートの引張軟化特性がA水準とB水準の試験体は継手長を15d, 10dとし, 120-Bと200-Bは7.5dも検討した。引張軟化特性がC水準の試験体は継手長を15d, 10d, 7.5dの3水準とした。引張軟化特性がD水準の試験体(200-D)は、継手長を10d, 7.5dの2水準とした。試験体数は1水準2体とした。

2.2 実験要因および使用繊維

本検討では、短繊維補強コンクリートの圧縮強度と引張軟化特性をパラメータとして、継手強度の検討を行な



図－２ 試験パラメータ（圧縮強度と引張軟化特性）

表-2 ベースコンクリートの配合

種類	W/C 又は W/B (%)	細骨 材率 s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)						
				水 W	セメントC, 又は結合材B			細骨材 (砕砂) S1	細骨材 (珪砂) S2	粗骨材 G Gmax 15mm
					早強 セメント H	低熱 セメント L	シリカ フューム SF			
40N/mm ² 試験体	55.0	70.5	4.5	175	318	-	-	1305	-	528
80N/mm ² 試験体	40.0	69.0	3.5	175	394	-	44	1215	-	528
120N/mm ² 試験体	22.0	62.0	3.5	175	795	-	80	890	-	528
200N/mm ² 試験体	14.8	-	2.0	200	-	1151	200	-	877	-

った(図-2)。圧縮強度は、試験時の目標圧縮強度が 40, 80, 120, 200N/mm² の 4 水準、引張軟化特性はプレーンを含めて 5 水準 (PL, A, B, C, D) 設定した。目標圧縮強度が 40N/mm² の試験体は、PL, B の 2 水準、目標圧縮強度が 80 N/mm² の試験体は、PL, A, B, C の 4 水準、目標圧縮強度が 120N/mm² の試験体は、PL, B の 2 水準、目標圧縮強度が 200N/mm² の試験体は、既往の研究^{6),7)}を参考とし、UHPC や UFC と同程度の圧縮強度と引張軟化特性、更には引張軟化特性が低いケースを含む PL, B, C, D の 4 水準とした。また、80-B を対象として、短繊維補強コンクリートに用いる繊維の種類を変えた場合の検討を行なった。圧縮強度の違いを比較するため、B 水準と C 水準は圧縮強度が異なっても、引張軟化曲線における引張応力が同程度になるように設定した。なお、目標圧縮強度 40, 120N/mm² の試験体の配合と目標とする力学特性は既往の検討^{8),9)}と同様である。また、200-D の圧縮強度と引張軟化特性は、UFC 指針¹⁰⁾に示される特性値を満足している。

表-2 にベースコンクリートの配合を示す。本検討では、繊維径、繊維長、引張強度の異なる鋼繊維を 3 種類、合成繊維である PVA 繊維を 1 種類用いた。目標圧縮強度が 40, 80, 120N/mm² の試験体には、繊維径 0.62mm, 繊維長 30mm, アスペクト比 48, 引張強度 1100N/mm² で両端にフック加工が施された鋼繊維 (SF48) を使用した。目標圧縮強度が 200N/mm² の試験体には、繊維径 0.2mm, 繊維長 15mm, 引張強度 2000N/mm² 以上の鋼繊維 (SF75) を使用した。短繊維補強コンクリートに使用する繊維の種類が継手性能に与える影響を検討するため、80-B を対象として、繊維径 0.2mm, 繊維長 22mm, 引張強度 2000N/mm² 以上の鋼繊維 (SF110), 繊維径 0.66mm, 繊維長 30mm, アスペクト比 45, 引張強度 900N/mm² の PVA 繊維 (PVA45) を使用した。目標圧縮強度 40N/mm² の試験体の水セメント比は 55%, 目標圧縮強度 80, 120, 200N/mm² の試験体の水結合材比はそれぞれ 40, 22, 14.8%と設定した。繊維は外割で混入することとし、繊維混入率は表-1 に示すとおりである。SF110 と PVA45 の繊維混入率はそれぞれ 0.3, 1.5vol.%とした⁵⁾。

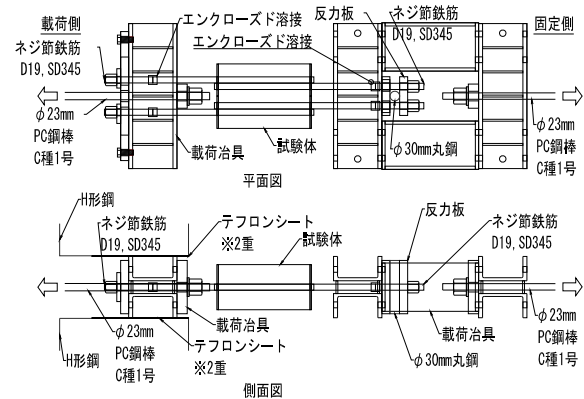


図-3 試験方法

2.3 試験体製作

コンクリートは容量 100 リットルの強制二軸ミキサにより練混ぜ、フレッシュ性状の確認後直ちに型枠内へ打込んだ。目標圧縮強度が 40N/mm² の供試体と試験体は、打込み後 3 日間の湿布養生を行なった後に、脱枠を行ない、材齢 28 日まで実験室に静置した。目標圧縮強度が 80, 120N/mm² の供試体と試験体は、早期の強度発現およびその後の強度変化の抑制を目的として蒸気養生を行なった。蒸気養生条件は、最高温度 50℃, 保持時間を 56 時間と設定した。蒸気養生終了後に脱枠し、試験材齢まで静置した。目標圧縮強度 200N/mm² の供試体と試験体は、打込み後、実験室に 1 日静置し、脱枠を行ない、蒸気養生を行なった。蒸気養生条件は、最高温度 90℃, 保持時間を 48 時間と設定した。蒸気養生終了後、試験材齢まで静置した。

2.4 短繊維補強コンクリートの力学特性

強度試験は、圧縮強度試験、切欠きはりの 3 点曲げ試験を実施した。圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠して実施した。切欠きはりの 3 点曲げ試験は、JCI 試験方法¹¹⁾に準じ、100×100×400mm の角柱供試体を用いた曲げ試験により得られた荷重-開口変位曲線の平均曲線を逆解析することで引張軟化曲線を算出した。

2.5 両引き試験

図-3 に両引き試験の方法を示す。試験体に埋め込まれている異形鉄筋 (竹節) に D19 のネジ節鉄筋をエンク

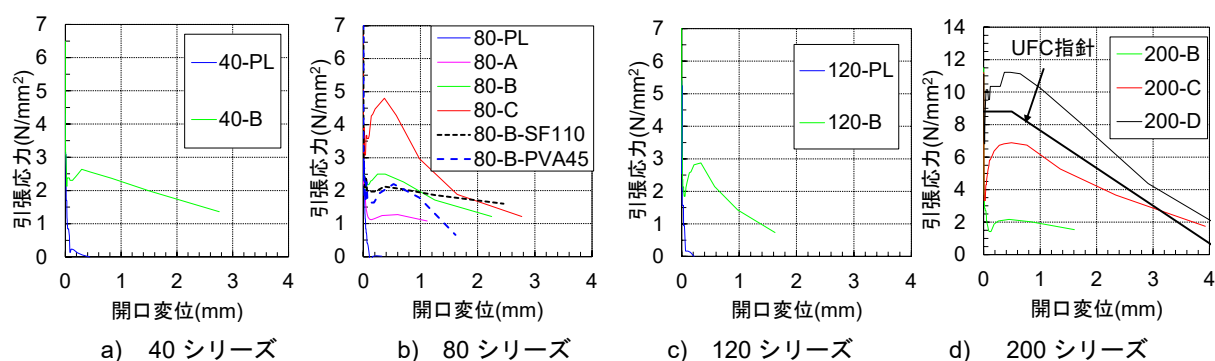


図-4 引張軟化曲線

ローズド溶接で接合して荷重治具にナット定着し、 $\phi 23\text{mm}$ のPC鋼棒とセンターホールジャッキを用い荷重した。荷重を行なうと荷重治具とPC鋼棒が偏心して、荷重治具が回転することが考えられたため、荷重治具をH形鋼により抑え込んで荷重を行なった。なお、荷重治具とH形鋼の間の摩擦を除去する目的でテフロンシートを2重で設置した。荷重は試験体が付着割裂破壊して荷重が低下する、もしくは荷重 280kN (D19, SD345の鉄筋の引張強度 490N/mm^2 相当) まで行なった。荷重の検出には容量 300kN のロードセルを用い、図中の固定側に配置した。

3. 実験結果

3.1 強度試験結果

表-1 に強度試験結果、図-4 に引張軟化曲線を示す。圧縮強度は目標圧縮強度が 40N/mm^2 の試験体は 50N/mm^2 程度、目標圧縮強度が 80N/mm^2 の試験体は 90N/mm^2 程度、目標圧縮強度が 120N/mm^2 の試験体は 120N/mm^2 程度でほぼ目標の範囲内であった。目標圧縮強度が 200N/mm^2 の試験体は200-PLが 180N/mm^2 程度で若干圧縮強度が低く、200-Bが 220N/mm^2 程度で若干圧縮強度が高い結果となったが、目標圧縮強度が 200N/mm^2 の試験体全てが概ね 200N/mm^2 となっており、目標の圧縮強度が得られていると言える。目標圧縮強度が 80N/mm^2 の試験体の引張軟化曲線は80-A, 80-B, 80-Cの順に引張応力のピークが高くなっている。B水準の40-B, 80-B, 80-B-SF110, 80-B-PVA45, 120-B, 200-Bの引張軟化曲線の開口変位が 0.5mm 程度までの初期部分を比較すると、引張応力のピークは $2\sim 3\text{N/mm}^2$ 、開口変位が $0.3\sim 0.5\text{mm}$ で引張応力が軟化しており、圧縮強度と短繊維補強コンクリートに使用する繊維の種類が異なっても引張軟化曲線の初期部分はほぼ同程度であった。200-DはUFC指針で規定される引張軟化特性を満足した。80-Cと200-Cの引張軟化曲線の引張応力のピークと開口変位が 0.5mm 以降の軟化域での同一変位における引張応力は、200-Cが80-Cよりも 2N/mm^2 程度高くなっ

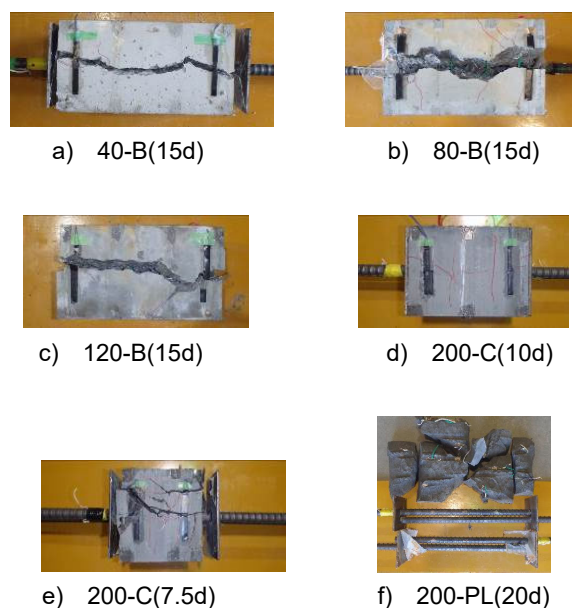


写真-1 試験体の破壊状況

た。

3.2 継手の試験結果

表-1 に両引き試験結果を示した。なお、継手強度は試験で得られた荷重を鉄筋の公称断面積で除して、鉄筋応力として示している。写真-1 に試験終了後の試験体の状況の一例として、40-Bと80-Bと120-Bの15d, 200-Cの7.5d, 200-PLの20d、試験体が未破壊であった一例として200-Cの10d、いずれの試験体も試験体の側面に付着割裂ひび割れが発生した後、ひび割れ幅が拡幅して付着割裂破壊に至った。200-Bの継手長15d, 200-Cの継手長10dと15d, 200-Dの継手長7.5dと10dは鉄筋応力 490N/mm^2 相当の荷重でも破壊しなかった。破壊しなかった試験体の最大荷重時の試験体表面におけるひび割れ幅は最大で 0.5mm 程度であった。なお、本検討では、鉄筋にSD345を用いており、継手強度が鉄筋の降伏点を超えている結果を含んでいる。鉄筋の降伏前後で鉄筋ひずみが大きく異なるため継手強度が変化する可能性があるが、本検討では鉄筋の降伏の影響は考慮せずに継手強度（最大応力）のみを比較することとした。

3.2.1 引張軟化特性の比較

図-5a)~d)に各圧縮強度における引張軟化特性の比較を示す。図中の f_{sy} と f_{su} はそれぞれ SD345 鉄筋の規格降伏点と引張強さである。40 シリーズの 40-PL の継手長 25d の継手強度は若干ばらつきがあるが 370N/mm^2 程度、継手長 15d の継手強度は 260N/mm^2 程度で継手長を 10d 短くすると継手強度は 90N/mm^2 程度低下した。40-B の継手長 15d の継手強度は 330N/mm^2 程度で、40-PL の継手長 15d よりも継手強度が 70N/mm^2 程度高くなった。

120 シリーズの 120-PL の継手長 25d の継手強度は 400N/mm^2 程度、継手長 15d の継手強度は 320N/mm^2 程度で継手長を 10d 短くすると継手強度は 80N/mm^2 程度低下した。120-B の継手長 15d の継手強度は 400N/mm^2 程度で、120-PL の継手長 15d よりも継手強度が 80N/mm^2 程度増加した。

3.2.2 繊維の種類の比較

図-6a)に短繊維補強コンクリートに使用する繊維の種類の違いを比較した結果を示す。80-B と 80-B-SF110 と 80-B-PVA45 の継手長 10d と 15d の継手強度はほぼ同程度であることが分かり、開口変位が 1mm 程度までの引張軟化曲線を同程度にすることで、継手強度は同程度になることが分かる。

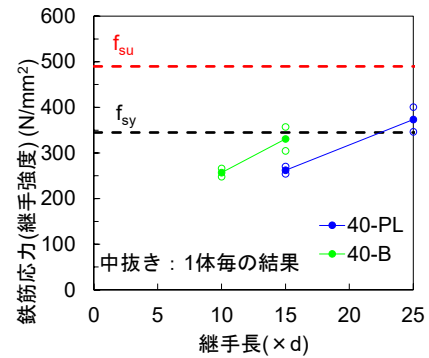
3.2.3 圧縮強度の比較

図-7 に目標引張軟化特性が同程度の PL と B 水準で圧縮強度の違いを比較した結果を示す。いずれも圧縮強度が 40, 80, 120, 200N/mm^2 の順に圧縮強度が高くなれば継手強度が高くなることが分かる。圧縮強度を 40N/mm^2 から 80N/mm^2 に高くすることで継手強度は高くなるが、圧縮強度を 80N/mm^2 から 120N/mm^2 に高くしても継手強度に大きな差はない。しかし、圧縮強度を 120N/mm^2 から 200N/mm^2 とすることで継手強度は大幅に高くなっており、継手強度を高くするには圧縮強度を 200N/mm^2 程度まで高くすることが有効であることが分かる。また、継手長 25d の 40-PL, 80-PL, 120-PL の継手強度と 200-PL の継手長 10d, 200-B の継手長 7.5d の継手強度を比較すると、継手長がそれぞれ 15d, 17.5d 短くなっても継手強度は同程度になっているのが分かる。

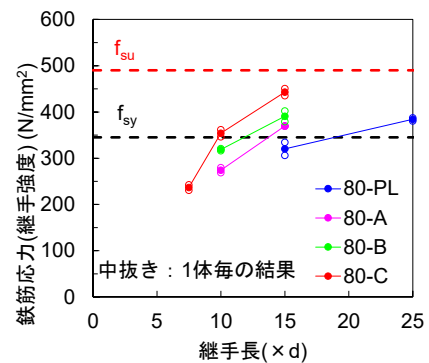
4. まとめ

本検討では、短繊維補強コンクリートを用いる構造を対象として、短繊維補強コンクリートの圧縮強度と引張軟化特性に着目して、重ね継手を想定した試験体を用いて継手単体の両引き試験により、継手強度の検討を行なった。本検討で得られた結論を以下に示す。

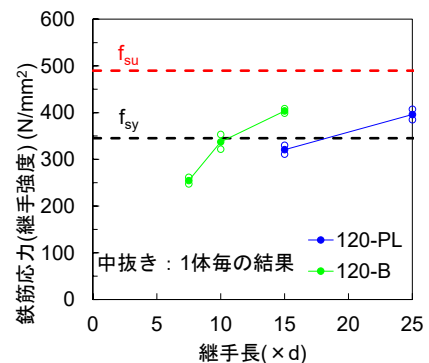
- (1) 短繊維補強コンクリートの圧縮強度と引張軟化特性を高くすることで、継手強度が高くなるが、引張軟化



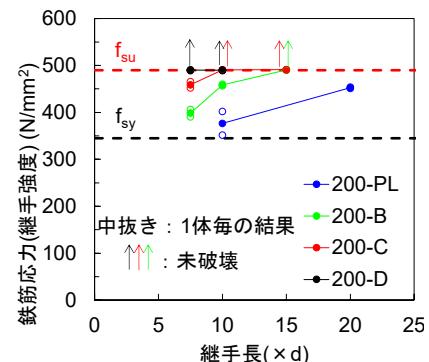
a) 40 シリーズ



b) 80 シリーズ⁴⁾



c) 120 シリーズ



d) 200 シリーズ⁴⁾

図-5 継手強度（引張軟化特性の比較）

特性を同程度にすると、圧縮強度を 80N/mm^2 から 120N/mm^2 に高くしても継手強度の増加は小さい。

- (2) 鉄筋コンクリートの重ね継手の継手強度を高くする上で、コンクリートの圧縮強度を 200N/mm^2 程度まで高くすることは有効であると考えられ、継手長を $7.5d$ とすることで圧縮強度が 40N/mm^2 で継手長を $25d$ とした場合と同程度の継手強度が得られる。
- (3) 短繊維補強コンクリートに使用する繊維の種類を変えても、圧縮強度と引張軟化特性が同程度であれば、継手強度は変わらないと考えられる。

本検討では、短繊維補強コンクリートを用いた場合の鉄筋の重ね継手に対する検討を実施したが、鉄筋の継手性能に対しては、コンクリートの特性だけでなく、鉄筋径やかぶりなどの検討が必要になると考えられるため、今後更なる検討を行なう予定である。

参考文献

- 1) 徳永光宏, 谷村幸裕, 伊藤始, 米田大樹: 鋼繊維補強コンクリートを用いた高架橋接合部における杭軸方向鉄筋の定着長算定手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.1273-1278, 2009
- 2) 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
- 3) 土木学会: コンクリート技術シリーズ 119, 繊維補強コンクリートの構造利用研究小委員会(第2期)成果報告書, 2018
- 4) 竹山忠臣, 佐々木亘, 篠崎裕生, 内田裕市: FRCC を用いた部材の鉄筋の重ね継手に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.2, pp.1075-1080, 2020
- 5) 竹山忠臣, 恩田陽介, 佐々木亘, 篠崎裕生, 内田裕市, 磯部岳, 横井晶有: FRCC を用いた鉄筋の重ね継手に対する短繊維の種類の影響, 土木学会第75回年次講演会概要集, V-219, 2020
- 6) Federal Highway Administration: Design and Construction of Field-Cast UHPC Connections, TECHNICAL NOTE, FHWA-HRT-14-084, 2014
- 7) 佐々木一成, 岩城孝之, 富永高行, 野村敏雄: 超高強度繊維補強コンクリートを用いたプレキャスト床版接合構造に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.583-588, 2018
- 8) 竹山忠臣, 佐々木亘, 篠崎裕生, 内田裕市: 鉄筋と短繊維補強コンクリートのひび割れ特性に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.20, pp.1207-1212, 2018

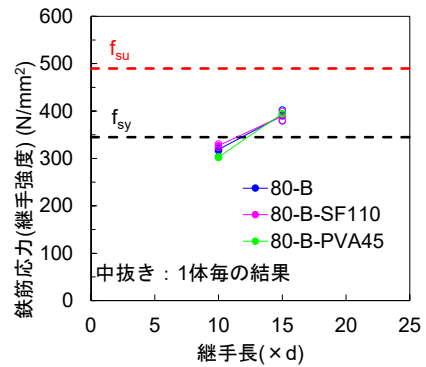
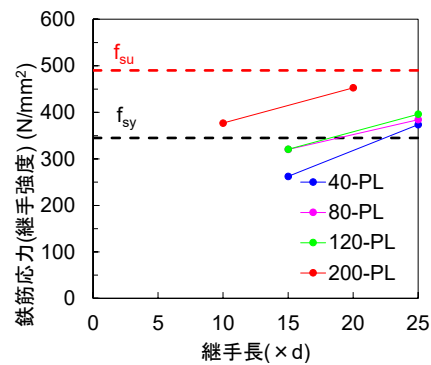
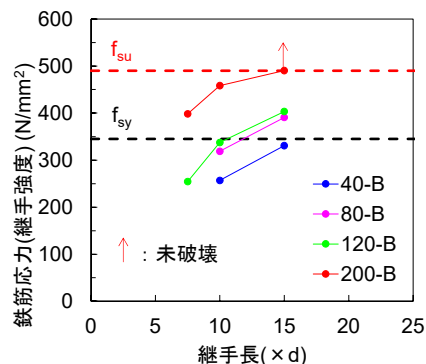


図-6 継手強度 (繊維の種類の比較⁵⁾)



a) PL 水準



b) B 水準

図-7 継手強度 (圧縮強度の比較)

- 9) 竹山忠臣, 磯部岳, 佐々木亘, 内田裕市: 鉄筋と短繊維補強コンクリートのひび割れ間隔に関する検討, 第27回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム集, pp.461-464, 2018
- 10) 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), コンクリートライブラリー, No.113, 2004
- 11) JCI 規準: 切欠きはりを有した繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法 JCI-S-002-2003(2020年8月確認)