

報告 FRCC を用いた部材の鉄筋の重ね継手に関する基礎的検討

竹山 忠臣*1・佐々木 亘*2・篠崎 裕生*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による継手強度の向上を検討した。その結果、短繊維補強コンクリートの引張軟化特性を高くすると継手強度は向上し、短繊維補強コンクリートの圧縮強度を高くしても継手強度は向上した。また、短繊維補強コンクリートを用いた場合の継手強度はプレーンコンクリートを用いた場合の継手強度よりも高くすることができる。

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の向上により、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⁾。

一方で、継手部のコンクリートに超高強度かつ短繊維補強による高い引張性能が期待できる UHPC (Ultra-high performance concrete) や超高強度繊維補強コンクリート (以下、UFC)⁴⁾を用いることで、鉄筋の重ね継手長を鉄筋径の 7.5 倍もしくは 5 倍とすることができるとの知見がある⁵⁾⁶⁾。これによれば、鉄筋の重ね継手の継手部に UHPC や UFC を用いることで、重ね継手長をループ継手⁷⁾を用いた場合の重ね継手長の 50~30%程度に設定することが可能となる。

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。

そこで、ここでは短繊維補強コンクリートを用いた場合の継手性能について検討した。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試験体を用いて継手単体の両引き試験により、継手強度を検討した。

2. 実験概要

2.1 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た (図-1)。圧縮強度は、試験時の目標圧縮強度が 80, 200N/mm² の 2 水準、引張軟化特性は、プレーンを含めて 5 水準設定した。目標圧縮強度 80N/mm² の試験体は、PL, A, B, C の 4 水準、目標圧縮強度 200N/mm² の試験体は、既往の研究⁵⁾⁶⁾を参考とし、UHPC や UFC と同程度の圧縮強度と引張軟化特性、さらには引張軟化特性を低下させたケースを含む PL, B, C, D の 4 水準とし、B 水準と C 水準は圧縮強度が異なっても、引張軟化特性が同程度になるように設定した。なお、目標圧縮強度 80N/mm² の試験体の配合および目標とする力学特性は既往の検討⁸⁾と同様である。

表-1 に使用材料、表-2 に配合を示す。本検討では、繊維径、繊維長と引張強度の異なる鋼繊維を 2 種類用いた。目標圧縮強度が 80N/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、アスペクト比 75、引張強度 2000N/mm² 以上の鋼繊維を使用した。目標圧縮強度が 80N/mm² の試験体の水結合材比は 40%、目標圧縮強度が 200N/mm² の試験体の水結合材比は 14.8% とし、短繊維は

*1 三井住友建設株式会社 技術本部 技術研究所 修(工) (正会員)

*2 三井住友建設株式会社 技術本部 技術研究所 博(工) (正会員)

*3 三井住友建設株式会社 技術本部 技術研究所 博(工) (正会員)

*4 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授 博(工) (正会員)

外割で混入した。圧縮強度 200N/mm² の試験体のベース配合は、既往の研究⁹⁾を参考に設定した。試験体製作に先立ち、圧縮強度 200N/mm² の試験体の短繊維混入率 (Vf) を決定する予備試験練りを実施し、200-B と 200-C の目標とする引張軟化特性は既往の検討における 80-B と 80-C の引張軟化特性と同程度になるように設定した。予備試験練りの結果、200-B の短繊維混入率は 0.25vol.%、200-C の短繊維混入率は 0.75vol.% とした。200-D の短繊維混入率は、200-C の引張軟化特性よりも高くするため、2.0vol.% とした (表-3)。なお、200-D の圧縮強度と引張軟化特性は、UFC 指針⁴⁾に示される特性値を満足するものがある。

2.2 供試体および試験体の製作

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 80N/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、前置きが注水後 4 時間、昇温速度 15°C/hr、最高温度 50°C、保持時間を 56 時間、降温速度 7.5°C/hr であり、前述の目的から保持時間を長く設定した。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、昇温速度が 15°C/hr、最高温度 90°C、保持時間を 48 時間、降温速度 3.0°C/hr と設定した。蒸気養生終了後、試験材齢まで静置した。

2.3 短繊維補強コンクリートの力学特性

強度試験は、蒸気養生終了後と試験時で実施し、圧縮強度試験、割裂引張強度試験、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、割裂引張強度試験は JIS A 1113 に準拠して実施した。割裂引張強度試験では、供試体端面に荷重方向と垂直になるようにひずみゲージを設置し、計測値が不連続になったときの荷重からひび割れ発生強度⁴⁾を

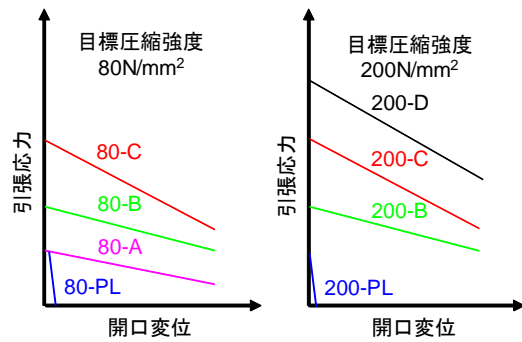


図-1 試験パラメータ

表-1 使用材料

材料	種類,物性など		備考
水	上水道水		
結合材	セメント	早強ポルトランドセメント, 密度 3.13g/cm ³	80N/mm ² 試験体
		低熱ポルトランドセメント, 密度 3.24g/cm ³	200N/mm ² 試験体
	混和材	エジプト産シリカフェーム, 密度 2.25g/cm ³	
細骨材	砕砂,栃木県産石灰砕砂,密度 2.73g/cm ³		80N/mm ² 試験体
	5号砕砂,密度 2.61g/cm ³		200N/mm ² 試験体
粗骨材	砕石 1505,栃木県産硬質砂岩,密度 2.64g/cm ³		
短繊維	鋼繊維	密度 7.85g/cm ³ ,繊維径 0.62mm, 繊維長 30mm,アスペクト比 48, 引張強度 1100N/mm ² ,両端フック	80N/mm ² 試験体
		密度 7.85g/cm ³ ,繊維径 0.2mm, 繊維長 15mm,アスペクト比 75, 引張強度 2000N/mm ² 以上	200N/mm ² 試験体
化学混和剤	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系	
	消泡剤	ポリアルキレン グリコール誘導体	

表-2 ベース配合

	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)						
				水 W	結合材 B 又は P			細骨材 (砕砂) S1	細骨材 (砕砂) S2	粗骨材 G Gmax 15mm
					早強セメント H	低熱セメント L	シリカフェーム SF			
80 シリーズ	40.0	69.0	3.5	175	394	-	44	1215	-	528
200 シリーズ	14.8	-	2.0	200	-	1151	200	-	877	-

表-3 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)	鋼繊維	繊維 混入率 (vol.%)	鉄筋応力(継手強度) (N/mm ²)									
				継手長									
				25d	20d	15d	10d	7.5d					
80-PL	No.1	80	-	-	380.8	-	306.2	-	-				
	No.2				387.5	-	334.4	-	-				
	ave				384.1	-	320.3	-	-				
80-A	No.1				φ0.62mm L=30mm	0.35	-	-	370.0	279.5	-		
	No.2						-	-	369.2	268.9	-		
	ave						-	-	369.6	274.2	-		
80-B	No.1						φ0.62mm L=30mm	0.75	-	-	379.3	316.3	-
	No.2								-	-	402.4	321.2	-
	ave								-	-	390.8	318.8	-
80-C	No.1	φ0.62mm L=30mm	1.5	-					-	450.6	361.8	230.9	
	No.2			-					-	435.2	346.4	242.7	
	ave			-					-	442.9	354.1	236.8	
200-PL	No.1			200	-	-			-	451.1	-	401.8	-
	No.2								-	453.7	-	351.7	-
	ave								-	452.4	-	376.8	-
200-B	No.1						φ0.2mm L=15mm	0.25	-	-	490.3↑	460.2	406.3
	No.2								-	-	490.3↑	456.6	390.7
	ave								-	-	490.3	458.4	398.5
200-C	No.1	φ0.2mm L=15mm	0.75						-	-	490.8↑	490.5↑	452.2
	No.2								-	-	491.0↑	490.3↑	465.5
	ave								-	-	490.9	490.4	458.8
200-D	No.1			φ0.2mm L=15mm	2.0	-			-	-	489.0↑	489.1↑	
	No.2					-			-	-	490.3↑	490.8↑	
	ave					-			-	-	489.6	490.0	

↑: 未破壊 (載荷した最大応力)

求めた。切欠きはりの3点曲げ試験は、JCI 試験方法¹⁰⁾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。

2.4 試験体

図-2 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25, 15, 10, 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-2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、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

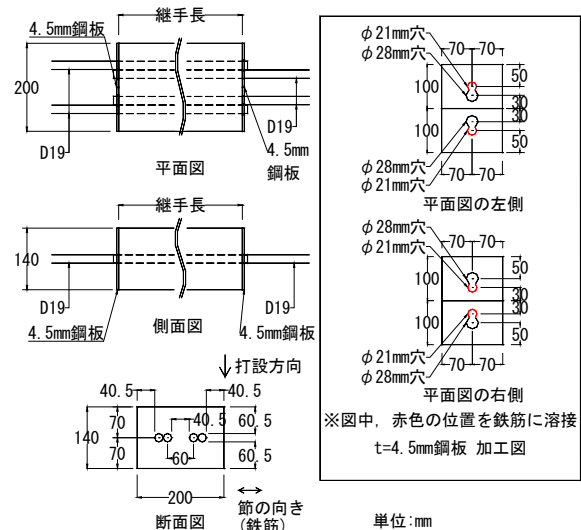


図-2 試験体

討した試験体の継手長を表-3に示した。プレーンコンクリートの試験体の80-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。200-PLの重ね継手長を80-PLの継手長よりも5d短くしたのは、

コンクリートの高強度化によりマトリクスが緻密化し、鉄筋とコンクリートの付着性能が高くなっていると予想したためである。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、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、既往の検討¹¹⁾の結果を参考として継手長を 10d, 7.5d の 2 水準とした。試験体数は 1 水準 2 体とした。

2.5 両引き試験

図-3 に両引き試験の方法を示す。この試験の方法は、既往の研究¹²⁾を参考とした。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ロード溶接で接合して載荷治具にナット定着し、φ23mm の PC 鋼棒とセンターホールジャッキを用い載荷した。載荷を行なうと載荷治具と PC 鋼棒が偏心して、載荷治具が回転することが考えられたため、載荷治具を H 形鋼により抑え込んで載荷を行なった。なお、載荷治具と 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。載荷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/mm² 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。

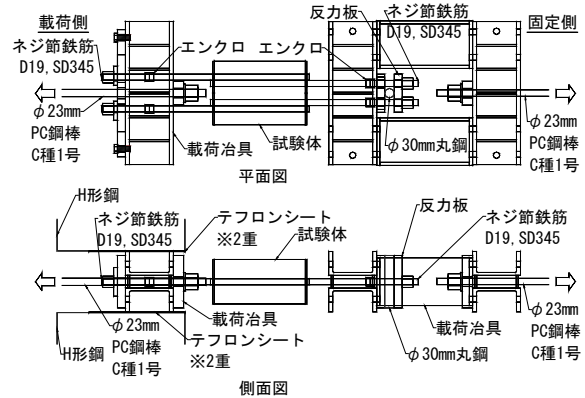


図-3 試験方法

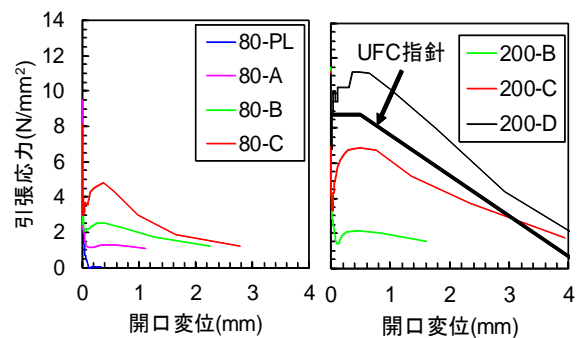
表-4 強度試験結果

種類	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング 係数 (kN/mm ²)	ひび割れ 発生強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
80-PL	91.2	40.5	3.38	6.42
80-A	93.7	40.1	4.97	6.54
80-B	87.8	39.2	4.21	8.05
80-C	89.6	37.8	4.55	13.65
200-PL	183.9	48.3	10.34	-
200-B	224.3	48.5	9.84	10.52
200-C	203.8	48.2	9.59	19.53
200-D	209.1	51.8	11.06	30.67

3. 実験結果

3.1 強度試験結果

表-4 に強度試験結果と図-4 に引張軟化曲線を示す。圧縮強度は、目標圧縮強度が 80N/mm² の試験体は全て 90N/mm² 程度ではほぼ目標の範囲内であったが、目標圧縮強度が 200N/mm² の試験体は 200-PL の圧縮強度が 180N/mm² で若干圧縮強度が低い結果となった。目標圧縮強度が 80N/mm² 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おり、既往の結果⁸⁾とほぼ同程度の結果であった。目標圧縮強度 200N/mm² の試験体の引張軟化曲線は 200-B, 200-C, 200-D の順に引張応力のピークは高くなっており、200-D は UFC 指針で規定される引張軟化特性を満足した。80-B と 200-B の引張軟化曲線はほぼ同程度になっているのが分かる。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/mm² 程度高い。しかし、200-C の引張軟化特性よりも高い 200-D を検討していること、80-B と 200-B の引張軟化特性が同程度であることから、80-C と 200-C の継手強度を比較するには十分であると考えられる。



a) 80 シリーズ b) 200 シリーズ

図-4 引張軟化曲線

3.2 両引き試験

3.2.1 試験結果

表-5 に試験区間内の鉄筋 (D19, 竹節) の強度試験結果を示す。いずれも降伏強度は 380~390N/mm² 程度であった。写真-1 に試験終了後の試験体の状況の一例として 200-C の 7.5d, 試験体が未破壊であった一例として 200-C の 10d を示す。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。目標圧縮強度が 200N/mm² の試験体の 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 は鉄筋の引張強度 490N/mm²

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。

3.2.2 引張軟化特性の比較

表-3 に両引き試験結果、図-5 に各圧縮強度における引張軟化特性の比較を示す。80 シリーズの 80-PL の継手長 25d の継手強度が 380N/mm²程度、継手長 15d の継手強度は 320N/mm²程度で継手長を 10d 短くすると 60N/mm²程度継手強度が低下した。短繊維補強コンクリートの試験体は継手長 15d を比較すると、80-A の継手強度が 370N/mm²程度、80-B の継手強度が 390N/mm²程度、80-C が 440N/mm²程度で引張軟化特性が高くなると、継手強度が高くなり、80-PL の継手長 25d の継手強度と 80-B の継手長 15d の継手強度が同程度であった。

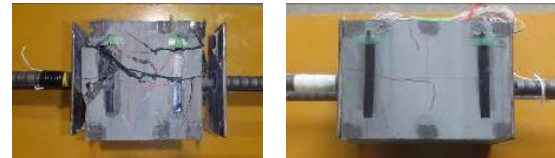
200 シリーズの 200-D は継手長 10d、7.5d のいずれも鉄筋応力 490N/mm²まで加力しても付着割裂破壊に至らず、既往の検討と同様の結果⁹⁾であった。200-C の継手長 15d と 10d は鉄筋応力 490N/mm²で試験体は付着割裂破壊に至らなかったが、継手長を 7.5d とすると継手強度が 460N/mm²程度になった。200-B の継手長 15d は鉄筋応力 490N/mm²まで加力しても付着割裂破壊に至らなかったが、継手長を 10d とすると継手強度は 460N/mm²程度になった。200-PL の継手長 20d の継手強度は 450N/mm²程度であったが、継手長を 10d とすると継手強度は 370N/mm²程度になった。

3.2.3 圧縮強度の比較

図-6 に目標引張軟化特性が同程度の水準で、圧縮強度の違いを比較した結果を示す。プレーンコンクリートである 80-PL と 200-PL の継手長と継手強度の関係における勾配を比較すると、勾配はほぼ等しく、目標圧縮強度を 80N/mm²から 200N/mm²に高くすることで継手強度は 100N/mm²程度高くなった。引張軟化特性が B 水準である 80-B と 200-B の継手長 10d の継手強度を比較すると、目標圧縮強度を 80N/mm²から 200N/mm²に高くすることで継手強度は 140N/mm²程度高くなった。引張軟化特性が C 水準である 80-C と 200-C の継手長 7.5d の継手強度を比較すると、目標圧縮強度を 80N/mm²から 200N/mm²に高くすることで継手強度は 220N/mm²程度高くなった。80-C と 200-C の継手強度の差が、80-PL と 200-PL、80-B と 200-B の継手強度の差よりも大きいのは、引張軟化曲線の違いであり、200-C の引張軟化曲線の応力は 80-C より同一開口変位に対して 2N/mm²程度高くなっているためであると考えられる(図-4)。プレーンコンクリートの引張軟化特性はひび割れ発生後、単調に応力が低下し、開口変位が非常に小さい段階で引張応力が 0N/mm²になるが、80-B と 200-B の引張軟化曲線における引張応力のピークは 2N/mm²程度になっており、引張応力の差は

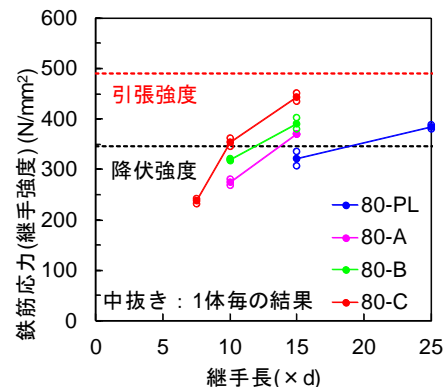
表-5 鉄筋の強度試験結果

	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
80-PL, A, B, C	396.3	576.0
200-PL, B	395.1	589.9
200-C	377.6	567.9
200-D	389.4	573.6

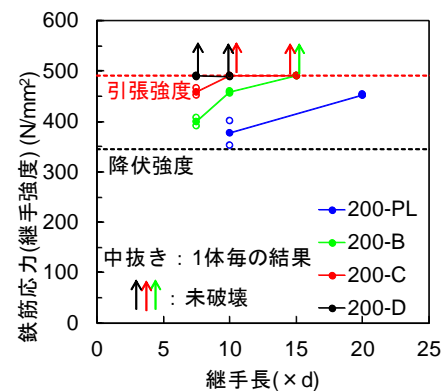


a) 200-C(7.5d) b) 200-C(10d)

写真-1 試験終了後（試験体側面）



a) 80 シリーズ



b) 200 シリーズ

図-5 継手強度（引張軟化特性の比較）

2N/mm²程度となる。目標圧縮強度が 80N/mm²と 200N/mm²の継手強度の結果で、プレーンコンクリートから引張軟化特性を B 水準にすると、継手強度は 70N/mm²程度高くなる。200-C と 80-C の継手強度の差が 220N/mm²程度であることから、200-C の引張軟化特性が 80-C の引張軟化特性とほぼ同程度であったとすると、圧縮強度が 80N/mm²から 200N/mm²に高くなった場合の継

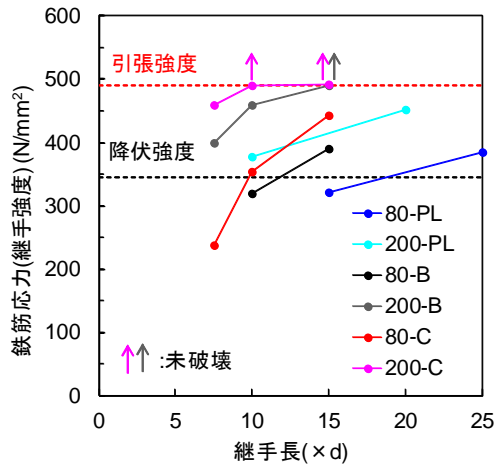


図-6 継手強度（圧縮強度の比較）

手強度の増加分は 150N/mm^2 程度になると考えられる。これより、コンクリートの圧縮強度を $80\sim 90\text{N/mm}^2$ から $200\sim 220\text{N/mm}^2$ 程度にすることで継手強度は $100\sim 150\text{N/mm}^2$ 程度向上すると考えられる。

4. まとめ

本検討では、鉄筋と短繊維補強コンクリートを併用した部材を対象として、短繊維補強コンクリートによる継手耐力の検討を行なった。本検討で得られた知見を以下に示す。

- (1) 鉄筋と短繊維補強コンクリートを併用した場合の重ね継手に対しては、短繊維補強コンクリートの引張軟化曲線の応力を高くすることで、継手の強度が向上する。
- (2) 鉄筋コンクリートの重ね継手に対しては、コンクリートの圧縮強度を高くすることで、継手の強度が高くなり、継手の強度を高くする上で超高強度の短繊維補強コンクリートを使用することが有効であると考えられる。

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関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と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。

謝辞

本検討を実施するにあたりご協力をいただきました岐阜大学大学院の磯部岳氏、横井晶有氏に厚く御礼申し上げます。

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) 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
- 5) Federal Highway Administration: Design and Construction of Field-Cast UHPC Connections, TECHNICAL NOTE, FHWA-HRT-14-084, 2014
- 6) 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
- 7) F・レオンハルト, E・メニッヒ (横道英雄訳): 鉄筋コンクリートの配筋, 鹿島出版会, pp.68-69, 1985
- 8) 竹山忠臣, 佐々木亙, 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
- 9) 河野克哉, 川口哲生, 橋本勝文, 横田弘: 初期ひび割れを通じて海水作用を受ける超高強度繊維補強コンクリートの力学特性と組成変化, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.283-288, 2015
- 10) JCI 基準: 切欠きはりをを用い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
- 11) 海野貴裕, 佐々木一成, 野村敏雄: UFC を用いた重ね継手構造の引張性能に関する実験的検討, 土木学会第73回年次学術講演会, 5-478, pp.955-956, 平成30年8月
- 12) 中村定明, 三浦尚: RC ループ継手の力学挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.774/V-65, pp.17-26, 2004