

論文 高強度鋼繊維補強コンクリートの実製造に関する実験的研究

渡邊 悟士*1・加藤 優志*2・今井 和正*3・黒岩 秀介*4

要旨：設計基準強度 100 N/mm² 級の鋼繊維補強コンクリートについて、プレキャスト工場での実製造実験により構造体コンクリート強度などのデータを取得し、実製造に向けた検討を行った。鋼繊維混入時の空気量増加による影響を除外すれば、鋼繊維混入が圧縮強度に及ぼす影響は小さいが、間隙通過性の確保のために単位粗骨材絶対容積を小さく設定していることによる圧縮強度およびヤング係数への影響が見られた。また、1.0m 角の模擬柱部材を作製し、部材内部の温度履歴およびコア供試体の圧縮強度は、過去に実施した水結合材比が同じ鋼繊維を混入しない調合の実製造実験結果と概ね同様な傾向であることを確認した。

キーワード：鋼繊維補強コンクリート, 高強度, 実製造, 粗骨材量, 圧縮強度, ヤング係数

1. はじめに

コンクリートへの鋼繊維の混入により、靱性能の向上が期待できるため、筆者らは短スパン梁¹⁾や耐震壁²⁾への鋼繊維補強コンクリート(以下、SFRC)の適用検討を進めている。また、前述した梁・壁部材への適用を想定した設計基準強度 30~60 N/mm² 級(以下、普通強度)の SFRC について、各種性能¹⁾を確認し、さらに引張靱性の定量的な評価方法³⁾を提案している。

耐震壁に SFRC を適用する場合、それに付帯する柱にも高い靱性能が求められる。超高層建築物の場合、高い圧縮軸力が作用する下層階の柱に設計基準強度 100 N/mm² 級の高強度コンクリートが求められることがある。そのため、設計基準強度 100 N/mm² 級の高強度 SFRC についても、普通強度 SFRC と同様に各種性能および引張靱性を試験室実験で確認⁴⁾し、適用可能性を見出した。

加えて、実部材に適用するためには、実製造や構造体コンクリート強度などについて検討が必要となる。SFRC の製造を想定しているプレキャスト工場では、鋼繊維を混入しないコンクリートについては、実製造実験をもとに設計基準強度 30~200 N/mm² 級の構造体コンクリート強度などのデータを取得している。また、普通強度 SFRC についても実製造実験を実施済みであるが、鋼繊維混入後の間隙通過性などの確保のために単位粗骨材絶対容積(以下、Vg)を 250 L/m³ と小さく設定していることが、力学特性(圧縮強度、ヤング係数など)に多少影響することを確認⁵⁾している。

そこで、本研究では、設計基準強度 100 N/mm² 級の高強度 SFRC の実製造実験を実施し、構造体コンクリート強度などのデータを取得した。本報では、それらの結果をもとに、高強度 SFRC の実製造について検討した結果を報告する。

2. 実験計画

既報⁴⁾の検討結果をもとに設定した配(調)合(以下、調合)条件で、前述したプレキャスト工場で高強度 SFRC を実製造し、フレッシュコンクリートの性状、硬化したコンクリートの力学特性、さらに模擬柱部材作製による構造体コンクリート強度の確認を行った。

2.1 コンクリートの調合条件

表-1 および表-2 に、本実験におけるコンクリートの使用材料および調合条件を示す。

使用材料は既報⁴⁾と同様であり、鋼繊維には普通強度 SFRC の場合と同じ、直径 0.55 mm、長さ 35 mm の両端に 1.5 段⁶⁾のフック形状を有するものを、鋼繊維以外は工場通常使用している、普通ポルトランドセメント、高強度混和材、地下水、混合砂(天然砂+石灰石砕砂)、碎石、高性能減水剤、ポリプロピレン短繊維(火災時爆裂対策)を使用した。なお、高強度混和材は、JASS 5 M-701:2022(高強度コンクリート用セメントの品質基準)⁷⁾の附属書 3 のスラグせつこう系混和材にシリカフュームをプレミックスしたものである。

表-1 コンクリートの使用材料

分類	種類	詳細
結合材 B	C 普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm ³
	CP 高強度混和材	密度 2.64g/cm ³
水	W 地下水	
細骨材	S 混合砂	表乾密度 2.64g/cm ³
粗骨材	G 石灰石砕石 2005	表乾密度 2.72g/cm ³
混和剤	AD 高性能減水剤	ポリカルボン酸系
繊維	PP ポリプロピレン短繊維	長さ 20mm
	SF 両端フック形状鋼繊維	直径 0.55mm, 長さ 35mm 公称引張強度 1850N/mm ²

*1 大成建設(株) 技術センター 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター 主任 修士(工学) (正会員)

*3 大成建設(株) 技術センター 主席研究員 博士(工学) (正会員)

*4 大成建設(株) 技術センター 構造研究室長 博士(工学) (正会員)

表-2 コンクリートの調査条件

実施 時期	調査 記号	W/B [%]	Vg [L/m ³]	s/a [%]	空気量 [%]	スランプフロ- [mm]	単位量[kg/m ³]					AD [B×%]	PP [kg/m ³]	Vsf [%]	検討対象節			
							C	CP	W	S	G				3.1	3.2	3.3	3.4
事前	P18	18	250	51.4	2.0 ±1.5	600 ±100	733	183	165	810	680	1.0	1.0	○		△*		
夏期	S18													○	○	○	○	
冬期	W18													○	○	○		
事前	P21	21	250	55.1	2.0 ±1.5	600 ±100	629	157	165	810	680	1.0	1.0	○		△*		
夏期	S21													○	○	○	○	
冬期	W21													○	○	○		
事前	P27	27	250	59.3	2.0 ±1.5	600 ±100	489	122	165	810	680	1.0	1.0	○		△*		
夏期	S27													○	○	○	○	
冬期	W27													○	○	○		

※ 事前実験は、3.3節では(2)のみ検討対象のため△で表記

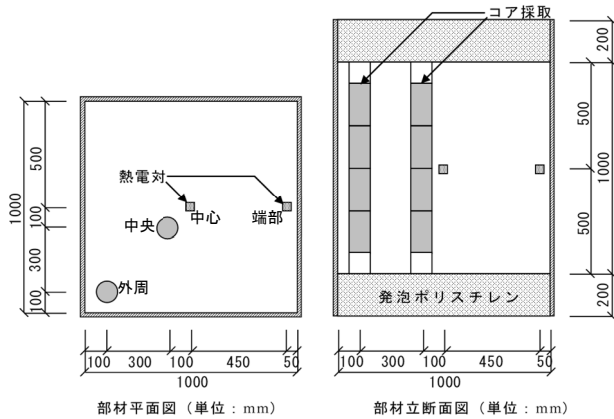


図-1 模擬柱部材の温度測定・コア採取位置

調査記号は、実験の実施時期(事前:P, 夏期:S, 冬期:W)と水結合材比(以下,W/B)を表している。W/Bは、同様な材料を使用して過去に実施した設計基準強度80~100 N/mm²の鋼繊維を混入しない調合(以下、普通調合)の実製造実験と同じ18・21・27%の3水準とした。単位水量およびVgは、既報⁴⁾の検討結果をもとに、それぞれ165 kg/m³および250 L/m³とした。なお、これらと鋼繊維の体積混入率(以下,Vsf)が1.0%であることが、普通調合(単位水量:150 kg/m³, Vg:330 L/m³, Vsf:0.0%)との相違点となる。その他の調合条件については、空気量およびスランプフローの設定値が2.0%および600 mm, 結合材中の高強度混和材の比率が20%, ポリプロピレン短繊維の混入量が1.0 kg/m³と、基本的に普通調合と同様とした。

2.2 練混ぜおよび試験

事前実験では、容量55Lの水平2軸形強制練りミキサを用いて、調合ごとにコンクリート30Lを練り混ぜた。練混ぜ、フレッシュコンクリート試験、圧縮強度試験用供試体作製の手順は、後述する1), 2), 4), 5)のとおりである。

表-3 コンクリートの試験項目

試験対象	試験項目	試験方法	備考
フレッシュコンクリート	スランプフロ-	JIS A 1150	鋼繊維混入前後
	空気量	JIS A 1128	
	単位容積質量	JIS A 1116	鋼繊維混入後
	コンクリート温度	JIS A 1156	
円柱供試体	圧縮強度	JIS A 1108	標準養生28日
	ヤング係数	JIS A 1149	
模擬柱部材	部材内部温度	熱電対	中心・端部
	構造体コンクリート強度	JASS 5 T-605 ⁷⁾	756日

夏・冬期実験では、容量2.3 m³の水平2軸形強制練りミキサを用いて、調合ごとにコンクリート1.2 m³を練り混ぜた。練混ぜ、フレッシュコンクリート試験、圧縮強度試験用供試体・模擬柱部材作製の手順は以下のとおりである。

- 1) C, CP, W (AD含む), Sを投入して、モルタルを練混ぜ
- 2) G, PPを投入して、ベースコンクリートを練混ぜ
- 3) 20L程度の試料を採取し、フレッシュコンクリート試験および圧縮強度試験用供試体(φ100×200 mm)作製
- 4) SFを投入して、高強度SFRCを練混ぜ
- 5) フレッシュコンクリート試験および圧縮強度試験用供試体(φ100×200 mm)作製
- 6) 1.0 m角の模擬柱部材(図-1)を作製

表-3に、コンクリートの試験項目を示す。

フレッシュコンクリート試験は、事前実験では高強度SFRCの練上がり時に行った。夏・冬期実験では、それに加えて、ミキサを一時停止して採取した鋼繊維混入前のベースコンクリートでも一部試験を行った。高強度SFRC(鋼繊維混入後)のスランプフローおよび空気量が、それぞれ表-2の範囲を満足することを確認した。

表-4 フレッシュコンクリート試験結果

調査 時期	記号	鋼繊維混入前		鋼繊維混入後			
		SLF※ [mm]	空気量 [%]	SLF※ [mm]	空気量 [%]	CD※ [t/m³]	CT※ [°C]
事前	P18			645	1.7	2.518	20
	P21			645	1.6	2.496	19
	P27			580	2.2	2.464	19
夏期	S18	680	1.0	505	1.5	2.522	34
	S21	740	0.8	595	1.4	2.511	32
	S27	700	0.8	545	1.4	2.474	32
冬期	W18	745	1.3	600	1.7	2.524	20
	W21	750	0.9	615	1.2	2.516	19
	W27	660	1.3	585	0.7	2.494	18

※ SLF：スランプフロー， CD：単位容積質量， CT：コンクリート温度

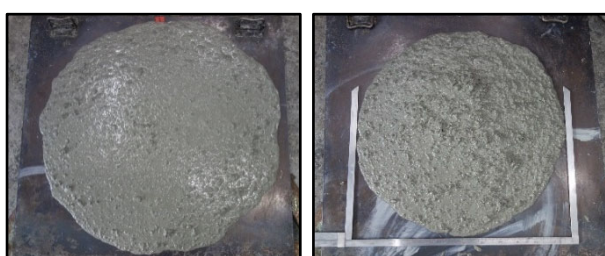


写真-1 調合 S21 のスランプフロー試験結果
(左：鋼繊維混入前 740 mm，右：混入後 595 mm)

圧縮強度・ヤング係数試験は、調合ごとに、φ100×200 mm の円柱供試体 3 個ずつについて、材齢 28 日まで標準 (20°C水中) 養生して行った。

上下面に断熱材を配した 1.0 m 角の模擬柱部材 (図-1) を作製し、中心・端部 (部材表面から 50 mm) で部材内部温度を測定した。材齢 5 日で脱型し、56 日で中央・外周部からそれぞれ 4 個ずつ採取 (図-1 参照) した φ100×200 mm のコア供試体における圧縮強度試験結果の平均値として、構造体コンクリート強度を評価した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの性状

表-4 に、フレッシュコンクリート試験結果を示す。

表-2 に示したように、高温環境下 (夏期実験) では高性能減水剤の添加量を増やす必要があったが、いずれの時期でも鋼繊維混入後のスランプフローで 600±100 mm を満足した。鋼繊維混入によりスランプフローが 75~175 mm 低下したため、鋼繊維混入前のスランプフローが 750 mm 程度と大きくなる場合もあったが、そのような場合でも写真-1 に示すように材料分離 (中央部の粗骨材の偏在、周辺部のペーストや遊離した水の偏在) は見られず、鋼繊維混入後の性状も良好であった。

空気量は、鋼繊維混入により概ね 0.5% 程度増加傾向にあったが、混和剤中の消泡成分により小さく抑えることで、鋼繊維混入後で 2.0±1.5% を満足した。

表-5 模擬柱部材の各箇所の最高温度

調査 時期	記号	最高温度 [°C]		温度上昇量※ [°C]	
		中心	端部	中心	端部
夏期	S18	96	82	62	48
	S21	93	82	61	50
	S27	86	74	54	42
冬期	W18	75	61	55	41
	W21	69	54	50	35
	W27	57	44	39	26

※ 練上がり時のコンクリート温度 CT と最高温度の差

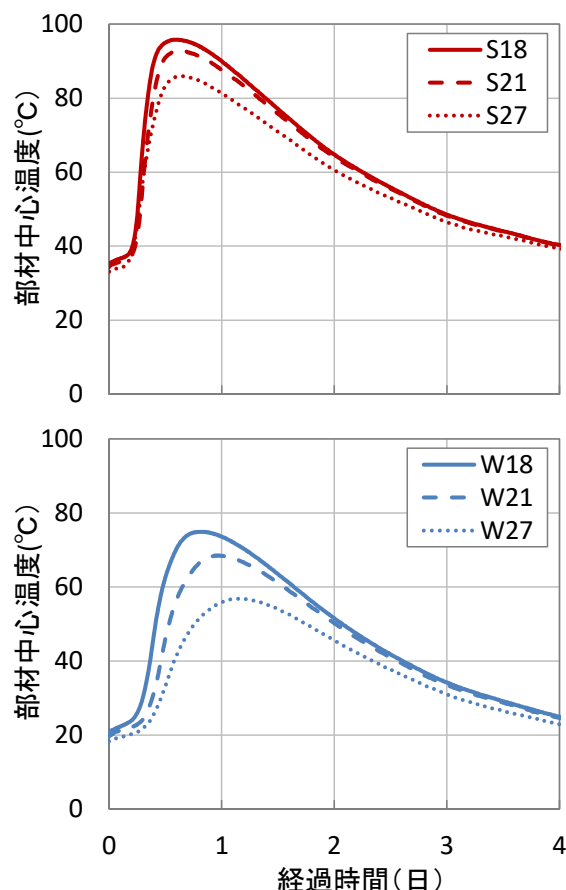


図-2 部材中心の温度履歴 (上：夏期，下：冬期)

3.2 模擬柱部材の内部温度

表-5 および図-2 に、模擬柱部材の各箇所における最高温度および中心における温度履歴を示す。

部材中心における最高温度は、夏期で 86~96°C，冬期で 57~75°C となった。練上がり時から最高温度までの温度上昇量は、夏期で 54~62°C，冬期で 39~55°C であり、過去に実施した普通調合の実製造実験結果と概ね同様な傾向であった。本実験では、普通調合に対して、単位水量を 1 割増やした分だけ結合材量も増えているが、普通調合に対する温度上昇量の差は平均で +5°C であった。

3.3 圧縮強度

本節では、鋼繊維混入前後で採取した標準養生供試体およびコア供試体の圧縮強度試験結果について考察する。

(1) 鋼繊維混入による圧縮強度への影響

図-3 に、標準養生供試体における鋼繊維混入前後の圧縮強度の関係を示す。図中には、夏・冬期の全データに関する回帰直線を実線で示している。

鋼繊維混入前後の圧縮強度は、概ね同等の値になっていた。回帰直線の傾きは0.97と、わずかに鋼繊維混入後の圧縮強度のほうが小さい傾向にあるが、鋼繊維混入により空気量が概ね0.5%程度増加傾向にあったことや、逆に鋼繊維混入後の空気量が減少していた調合 W27 (冬期の圧縮強度が最小の調合) では鋼繊維混入後の圧縮強度のほうが大きくなっていることから、これは鋼繊維混入前後の空気量の差に起因すると考えられる。したがって、普通強度 SFRC の場合と同様に、空気量の影響を除外すると、鋼繊維混入が圧縮強度に及ぼす影響は小さいと考えられる。

(2) 結合材水比と圧縮強度の関係

図-4 に、結合材水比と調合強度を定めるための基準とする材齢 28 日における標準養生供試体の圧縮強度の

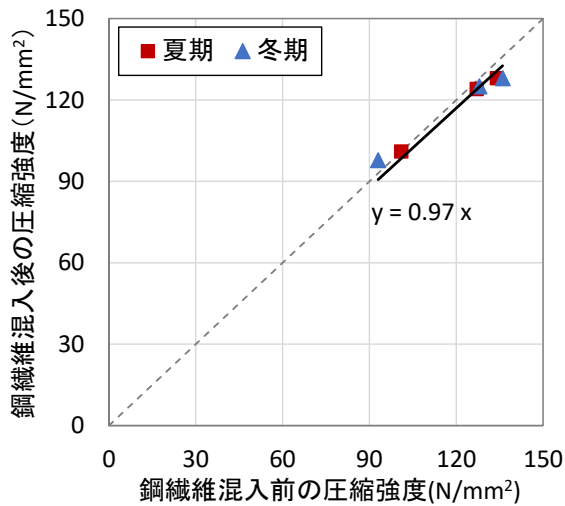


図-3 鋼繊維混入前後の圧縮強度の関係

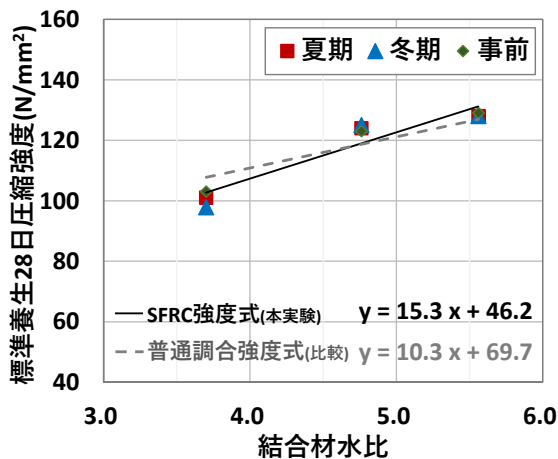


図-4 結合材水比と標準養生供試体の圧縮強度の関係

関係を示す。事前実験は厳密には実製造実験ではないが、調合条件が夏・冬期実験と同様で、圧縮強度試験結果も同等であったため、本項でのポテンシャルの圧縮強度の評価の対象とした。図中には、調合設計における強度式となる3つの時期の全データに関する回帰直線を、参考として実線で示している。併せて、過去に実施した普通調合の回帰直線(強度式)も、比較として破線で示した。

回帰直線同士の比較から、本実験で得られた高強度 SFRC における結合材水比と圧縮強度の関係は、鋼繊維を混入しない普通調合と概ね同様の傾向と評価できる。高強度コンクリートでは、Vgが大きくなると圧縮強度が小さくなる傾向にあり、強度領域が高い(結合材水比が大きい)ほどその影響は顕著になる⁸⁾。このことから、普通調合のほうが回帰直線の傾きが小さい要因としては、高強度 SFRC より Vg が大きいことも影響した可能性が考えられる。

(3) 構造体コンクリート強度

図-5 に、構造体コンクリート強度を保証する材齢 56 日におけるコア供試体の圧縮強度を示す。図中には、本実験の高強度 SFRC における試験結果と併せて、過去に実施した普通調合における試験結果も比較として示した。

結合材水比とコア供試体の圧縮強度の関係は、高強度 SFRC と普通調合で同様な傾向にあった。具体的には、結合材水比の変化による圧縮強度の変化の傾向に着目すると、結合材水比が4.76から5.56(W/Bが21%から18%)になると、冬期実験では標準養生供試体(図-4)と同様にコア供試体の圧縮強度は大きくなるのに対して、夏期実験ではほとんど変わらない傾向にあった。高強度コンクリートでは、モルタル部分と線膨張係数の差が大きい石灰石碎石を使用する場合に、高温履歴によるモルタル部分と粗骨材間の組織の緩みに起因して、圧縮強度が小さくなる可能性が示唆されている⁹⁾。さらに、その影響は練上がりから最高温度までの温度変化量(3.2節の温度

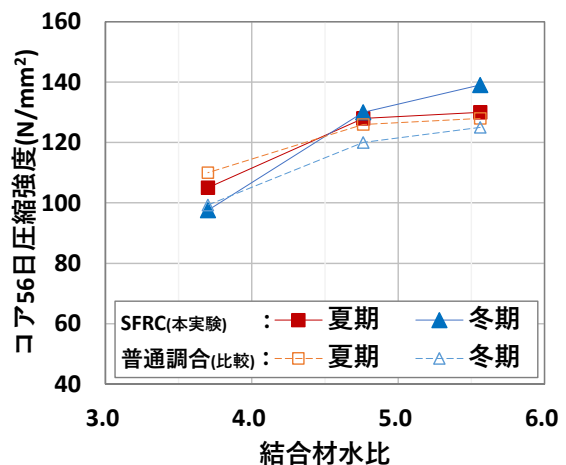


図-5 コア供試体の圧縮強度

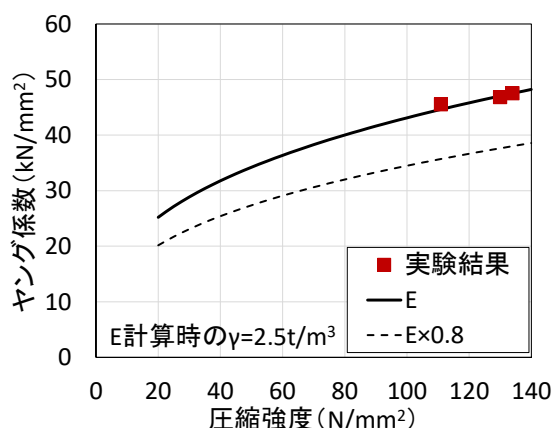


図-6 圧縮強度とヤング係数の関係

上昇量に相当)で評価できるとされている¹⁰⁾。これらの知見から、特に温度変化量が大きかった夏期実験の結合材水比が大きい領域では、結合材水比が4.76から5.56になり標準養生供試体の圧縮強度が大きくなっても、コア供試体の圧縮強度はほとんど大きくならなかった可能性が考えられる。なお、本実験と同様な普通ポルトランドセメント、スラグせつこう系混和材、シリカフェームで構成される結合材を使用した高強度コンクリートの構造体強度補正值に関する推定式(既報¹⁰⁾の式(10))から、高温ほど結合材の反応は促進される(既報¹⁰⁾の図7が負の値)傾向であるため、前述した石灰石砕石使用による影響は、それを打ち消す以上の効果と考えられる。

ただし、高強度SFRCについては、冬期実験の結合材水比が3.70(W/Bが27%)でコア供試体の圧縮強度(図-5)が標準養生供試体の圧縮強度(図-4)をわずかに(0.2 N/mm²)下回っているのを除くと、他はコア供試体の圧縮強度のほうが大きい結果となっているため、日本建築学会の「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事」(以下、JASS 5)で、両者の差をもとに0 N/mm²以上の値で設定することとされている構造体強度補正值⁷⁾は概ね0 N/mm²となる。したがって、設計基準強度100 N/mm²の調合は、普通調合と同様に、標準養生供試体の圧縮強度(図-4)で120 N/mm²(調合強度として設計基準強度に2割上乘せした値)となる水結合材比5.0(W/Bで20%)程度で実現可能と考えられる。

3.4 ヤング係数

図-6に、夏期実験の標準養生供試体における、圧縮強度とヤング係数の関係を示す。図中には、JASS 5の3.7項⁷⁾に示されている以下の式(1)で計算されるヤング係数推定値EおよびJASS 5におけるヤング係数の下限値とされているE×0.8を、それぞれ実線および破線で示している。なお、式(1)によるヤング係数の計算における単位容積質量γには、表-4の実測値をもとに2.5 t/m³を採用した。

$$E = 33.5 \times \left(\frac{\gamma}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{\sigma_B}{60}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

なお、E : コンクリートのヤング係数 [kN/mm²]

γ : コンクリートの単位容積質量 [t/m³]

σ_B : コンクリートの圧縮強度 [N/mm²]

本実験における高強度SFRCのヤング係数は、式(1)で計算されるヤング係数推定値Eと概ね同等であり、JASS 5の下限値であるE×0.8を十分に上回っていた。なお、一般的に、本実験のように石灰石砕石を使用した場合には、ヤング係数が式(1)で計算されるヤング係数推定値Eよりも大きくなる傾向にあり、JASS 5の3.7項解説⁷⁾に記載されている石灰石砕石使用の場合の修正係数1.2と、シリカフェーム使用の場合の修正係数0.95を乗じた1.14倍程度になることが想定される。ただし、鋼繊維混入は単位容積質量に直接的に影響を及ぼすのに対して、3.3節(1)の検討結果のように圧縮強度(最大荷重時までの力学特性)への影響はそれほど大きくないと考えると、式(1)でヤング係数を計算する場合の単位容積質量γに鋼繊維混入前の単位容積質量を採用するほうが妥当である可能性もある。例えば、本実験における鋼繊維混入前の調合上の単位容積質量の範囲2.418~2.459 t/m³を採用すると、γが0.97~0.98倍になり、ヤング係数推定値Eは0.94~0.96倍になる。この逆数である1.04~1.06は、前述した1.14倍よりは小さいが、この要因としては、普通強度SFRCと同様に、V_gが250 L/m³と小さいことによる影響⁹⁾などが考えられる。なお、式(1)でヤング係数を計算する場合に単位容積質量γをどのように設定するのが妥当かについては、鋼繊維混入前後のヤング係数の比較の追加検討なども含めて、今後の検討課題としたい。

4. まとめ

本研究では、直径0.55 mm、長さ35 mmの両端に1.5段⁹⁾のフック形状を有する鋼繊維を体積比率で1.0%混入した、設計基準強度100 N/mm²級の高強度鋼繊維補強コンクリート(以下、SFRC)を対象とし、プレキャスト工場での実製造実験を行って、構造体コンクリート強度などの実製造に必要なデータを取得した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 鋼繊維混入によるスランプフローの低下を考慮して、鋼繊維混入後のスランプフローで600±100 mmを満足するために、鋼繊維混入前のスランプフローを750 mm程度と大きくした場合でも、材料分離は見られず、鋼繊維混入後の性状も良好であった。
- (2) 空気量は、鋼繊維混入により概ね0.5%程度増加傾向にあったが、混和剤中の消泡成分により小さく抑えることで、鋼繊維混入後で2.0±1.5%を満足した。
- (3) 1.0 m角の模擬柱部材の中心における、練上がり時か

ら最高温度までの温度上昇量は、夏期で 54~62℃、冬期で 39~55℃と、過去に実施した水結合材比が同じ鋼繊維を混入しない調合の実製造実験結果と概ね同様な傾向であり、単位水・結合材量の 1 割程度増加による明確な影響は見られなかった。

- (4) 鋼繊維混入による空気量の増加傾向に起因して、鋼繊維混入後の圧縮強度のほうがわずかに小さい傾向にあったが、空気量の影響を除外すると、鋼繊維混入が圧縮強度に及ぼす影響は小さいと考えられる。
- (5) 結合材水比と圧縮強度の関係は、鋼繊維を混入しない調合と概ね同様の傾向であったが、単位粗骨材絶対容積を 250 L/m³ と小さく設定している影響⁸⁾などに起因して、結合材水比が大きい領域の圧縮強度が多少大きくなる傾向にあった。
- (6) 結合材水比とコア供試体の圧縮強度の関係は、鋼繊維を混入しない調合と概ね同様の傾向であり、石灰石碎石を使用する場合の高温履歴による影響¹⁰⁾などに起因して、結合材水比が 4.76 から 5.56(W/B が 21% から 18%) になると、冬期実験では標準養生供試体と同様にコア供試体の圧縮強度は大きくなるのに対して、夏期実験ではほとんど大きくなりえないという差が見られた。
- (7) 本実験の範囲では、構造体強度補正值は概ね 0 N/mm² となり、設計基準強度 100 N/mm² は、鋼繊維を混入しない調合同様に、水結合材比 5.0 (W/B で 20%) 程度で実現可能と考えられる。
- (8) 本実験における高強度 SFRC のヤング係数は、単位粗骨材絶対容積を 250 L/m³ と小さく設定している影響⁹⁾などに起因して、石灰石碎石を使用した調合としては小さめの傾向であったが、JASS 5 の (3.1) 式⁷⁾で計算されるヤング係数推定値 E と概ね同等であり、下限値である $E \times 0.8$ を十分に上回っていた。

参考文献

- 1) 高橋智也, 渡邊悟士, 今井和正, 渡辺英義: 鋼繊維補強コンクリートを用いた短スパン梁の開発, コンクリート工学, Vol.60, No.8, pp.661-668, 2022
- 2) 村松晃次, 小河雅広, 高橋智也, 杉山智昭, 河本慎一郎, 渡辺英義, 西山峰広: 鋼繊維補強コンクリートを用いた耐震壁のせん断特性に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.88, No.808, pp.984-994, 2023.6
- 3) 渡邊悟士, 今井和正, 高橋智也, 黒岩秀介: 鋼繊維補強コンクリートにおける引張靱性の評価に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.88, No.808, pp.880-887, 2023.6
- 4) 渡邊悟士, 高橋智也, 今井和正, 黒岩秀介: 高強度鋼繊維補強コンクリートの性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.1021-1026, 2024
- 5) 渡邊悟士, 高橋智也, 今井和正, 黒岩秀介: 粗骨材量を低減した鋼繊維補強コンクリートの性能に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.892-897, 2022
- 6) 中川晴日, 原田岳信, 高橋七海, 石川裕次: 高強度 SFRC 柱のせん断強度に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, pp.643-648, 2022
- 7) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 2022
- 8) 渡邊悟士, 太田貴士, 陣内浩, 黒岩秀介: 単位水量および単位細・粗骨材量が超高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響の評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1315-1320, 2017
- 9) 桜本文敏, 鈴木清孝, 関田徹志: 水和熱に起因する高温履歴を受ける超高強度コンクリートの強度性状 (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp.723-724, 1991.9
- 10) 渡邊悟士, 黒岩秀介, 陣内浩, 並木哲: シリカフェームを使用した高強度コンクリートの構造体強度補正值に及ぼす粗骨材種類の影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.723, pp.833-841, 2016.5