

博 士 論 文

超高強度繊維補強モルタルの配合設計と 製造方法に関する研究

— 圧縮強度 200N/mm^2 級の繊維補強モルタル —

*(Study on mixture design and manufacturing method of
ultra-high-strength fiber-reinforced mortar:
Fiber-reinforced mortar of 200 N/mm^2 compressive strength)*

2022 年 3 月

玉滝 浩司

Koji TAMATAKI

山口大学大学院 創成科学研究科

目次

学位論文要旨	i
Summary of the doctoral dissertation	iv
第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	6
1.3 本研究の構成	7
1.4 第1章の参考文献	9
第2章 既往の研究	10
2.1 UFCの概要	10
2.2 材料および配合	13
2.3 フレッシュ性状	17
2.4 養生方法	18
2.5 強度性状および耐久性	20
2.6 実機プラントでの製造	23
2.7 適用事例	24
2.8 2章のまとめ	30
2.9 第2章の参考文献	31
第3章 配合設計	36
3.1 検討目的	36
3.2 ベースモルタルの設計	36
3.2.1 実験概要	36
3.2.2 実験結果および考察	42
3.3 UFCの設計	55
3.3.1 実験概要	55
3.3.2 実験結果および考察	58
3.4 3章のまとめ	65
3.5 第3章の参考文献	66

第4章 硬化物性および耐久性	68
4.1 検討目的	68
4.2 硬化物性	68
4.2.1 圧縮強度およびヤング係数	68
4.2.2 曲げひび割れ発生強度および割裂ひび割れ発生応力	71
4.2.3 曲げ強度および引張強度	74
4.2.4 接着強さ	76
4.2.5 乾燥収縮および自己収縮	78
4.3 耐久性	81
4.3.1 中性化に対する抵抗性	81
4.3.2 凍結融解抵抗性	81
4.3.3 塩化物イオンの拡散係数	83
4.3.4 塩化物イオンの侵入に伴う鋼繊維の腐食（オートクレーブ法）	86
4.3.5 塩化物イオンの侵入に伴う鋼繊維の腐食（温海水乾湿繰返し法）	89
4.3.6 塩化物イオンの侵入に伴う鋼材の腐食	97
4.3.7 耐薬品性	101
4.3.8 アルカリ骨材反応に対する抵抗性	102
4.4 4章のまとめ	103
4.5 第4章の参考文献	104

第5章 生コン工場における製造方法の検討	106
5.1 検討目的	106
5.2 ミキサ性能の影響	106
5.2.1 実験方法	106
5.2.2 実験結果および考察	107
5.3 細骨材の表面水率の影響	109
5.3.1 実験方法	109
5.3.2 実験結果および考察	109
5.4 鋼繊維の投入方法の検討	112
5.4.1 実験方法	112
5.4.2 実験結果および考察	114
5.5 運搬の影響	117
5.5.1 実験方法	117
5.5.2 実験結果および考察	118
5.6 製造および運搬時の材料ロス	120
5.6.1 実験方法	120
5.6.2 実験結果および考察	121
5.7 細骨材種類の影響	122
5.7.1 実験方法	122
5.7.2 実験結果および考察	124
5.8 5章のまとめ	129
5.9 第5章の参考文献	130

第6章 実現場における UFC の適用性の検証	131
6.1 検討目的	131
6.2 生コン工場における連続製造	131
6.2.1 製造概要	131
6.2.2 練混ぜ試験	134
6.2.3 製造	135
6.2.4 品質確認および品質管理	137
6.3 施工現場での製造と水流摩耗部材への適用	144
6.3.1 実施工前の検討	145
6.3.2 実施工	159
6.4 コンクリート製品への適用	165
6.4.1 設置面の目粗し方法の検討	165
6.4.2 耐摩耗パネルの製造	169
6.5 6章のまとめ	175
6.6 第6章の参考文献	176
第7章 結論	177
7.1 本研究のまとめ	177
7.2 今後の課題と展望	179
本論文に関する著者の発表論文	181
謝辞	183

学位論文要旨

超高強度繊維補強モルタルの配合設計と製造方法に関する研究 —圧縮強度 200N/mm² 級の繊維補強モルタル—

玉滝 浩司

現在、高度経済成長期に建設されたインフラ設備の多くが更新・修繕時期を向かえている。今後も継続して構造物の新設や補修・補強を行うなかで、維持管理コストを低減できる高耐久な材料が注目されており、その 1 つが超高強度繊維補強コンクリート UFC (Ultra-high-strength fiber-reinforced concrete) である。一般的に、UFC は高温の熱養生 (90°C-48h) が行われている。そのため、専用設備があるコンクリート製品工場での製造に限定される場合が多く、部材寸法や形状に運搬上の制約が生じる。

そこで本研究では、熱養生が不要で、一般的なコンクリートと同じ管理材齢 (材齢 28 日) で必要な性能を発揮する UFC の配合設計と製造方法について実験的検討を行った。本論文は全 7 章の構成であり、各章の内容は以下のとおりである。

「第 1 章 序論」では、日本の社会情勢や社会インフラの現状、高強度コンクリートおよび繊維補強コンクリートの変遷を述べたうえで、本研究の目的を示した。

「第 2 章 既往の研究」では、本研究に関連する既往の研究を調査・整理し、UFC の製造・施工における課題を明らかにした。

「第 3 章 配合設計」では、常温環境下で所定の性能を発揮できる UFC に適した材料選定および配合設計を検討した。5 種類のセメントと 4 種類の粉体材料を組み合わせながら、水結合材比や単位水量などを変化させて、ベースモルタルの配合設計を行った。次に、配合設計したベースモルタルに補強用繊維を添加した UFC について、補強用繊維の分散性、材料分離抵抗性と圧縮強度および曲げ強度などの強度性状を検討した。その結果、常温環境下で性能を発揮するためには、セメント中の C₃A が少なく C₃S を多く含むセメントや微細な反応性粉体を使用すること、細骨材の粒度や使用量を限定すること、

水結合材比を 14~21%とすることなどを明らかにした。

「第 4 章 硬化物性および耐久性」では、第 3 章で配合設計した UFC の硬化物性と耐久性を調べた。その結果、本研究で配合設計した UFC の圧縮強度は、材齢 28 日で 196N/mm^2 に達し、割裂ひび割れ発生応力および引張強度の特性値も、熱養生を行う UFC と同等となることを報告した。また、中性化、凍結融解劣化、塩化物イオンの浸透性、硫酸塩に対する抵抗性が高いことを示した。さらに、結合材が多い配合であることから、自己収縮ひずみが大きく、型枠などの拘束によるひび割れやプレストレスのロスには注意が必要なこと、硫酸や塩酸などによる劣化については標準的なコンクリートと同様に劣化するため、注意が必要なことを述べている。

「第 5 章 生コン工場における製造方法の検討」では、本研究で対象とした UFC のレディーミクストコンクリート（生コン）工場における製造方法を検討した。その結果、ミキサの能力によって、練混ぜ時間に若干差が生じるものの、一般的な設備で製造が可能なことを明らかにした。また、鋼繊維の添加方法については、プラントのミキサとトラックアジテータに添加する 2 つの方法を比較した。また、一般のコンクリートと同様にトラックアジテータで運搬が可能であるものの、粘性が高いため、トラックアジテータから排出できない材料が約 190L にも及び、一般のコンクリートの 80L よりも材料ロス量が著しく多くなる課題を指摘した。さらに、UFC の目標強度を達成するためには、使用する細骨材を事前に選定・使用することが必要と結論づけた。

「第 6 章 実現場における UFC の適用性の検討」では、本研究で対象とした UFC について、実現場での適用性を検証した。その結果、練混ぜ時のミキサの負荷は、練混ぜ量に比例して大きくなり、この負荷を考慮した場合、練混ぜ量の上限はミキサ容量の 80% 程度であることを明らかにした。また、生コン工場で数ヶ月間連続的に製造し、フレッシュ性状や強度性状の安定した UFC が供給できることを示した。さらに、運搬時の材料ロスを考慮すると、少量の施工の場合は、車載式ミキサを使用した現地製造が適していることを述べた。また、UFC の表面仕上げ時期は土壌硬度計を使用して適切に判断できることを示した。また、コンクリート製品に適用する場合、所定の性能を得るための熱養生条件は、熱養生を行う UFC の標準熱養生 (90°C -48h) よりも最高温度を低減でき、

かつ養生時間も短くできることを示した。

「第7章 結論」では、本研究で得られた成果・知見を取りまとめるとともに、今後の実用化に向けた研究課題と展望を示した。

Summary of Doctoral Dissertation

Study on mixture design and manufacturing method of ultra-high-strength fiber-reinforced mortar: Fiber-reinforced mortar of 200 N/mm² compressive strength

Koji TAMATAKI

Many infrastructures constructed in the period of high economic growth are currently deteriorated and need renewal / repair. Considering the future situation, new-build infrastructures should be more durable, so the use of high-strength materials capable of reducing maintenance and management costs is preferable. A suitable construction material for the future situation is an ultra-high-strength fiber-reinforced concrete (UFC). General UFCs are cured under high temperature (at 90°C for 48 hours). Most UFC members are often made in precast-concrete factories with dedicated curing facilities. A UFC manufacturable at general ready-mixed concrete plants has been required for various constructions using cast-in-placed concrete.

The study focused on the mixture design and the manufacturing method of UFC without heat-curing. The targeted strength of the UFC was 200 N/mm² at the concrete age of 28 days. To achieve the required performance for UFC, the experimental study was designed and conducted. The thesis consists of seven chapters, and the content of each chapter is as follows:

Chapter 1 “Introduction” shows the social concern in Japan, such as the present conditions of infrastructures. In addition, the chapter summarizes the transition of high strength concrete and fiber-reinforced concrete. The research background and the purpose of this study are described in this chapter.

Chapter 2 “Previous studies” shows the review of previous studies dealing with investigations on UFC. In addition, the chapter clarifies the problem of UFC manufacturing by referring to the previous studies.

Chapter 3 “Mixture design”, the materials and mixture proportions required for the UHPC manufacturable under ambient temperature conditions were investigated. Five types of cement and four types of powder materials were tested, as well as the fine aggregate needed to achieve proper fluidity, fiber dispersibility and strength. To achieve the appropriate flowability and adequate strength, the cement having low C₃A and high C₃S was suitable for the UHPC manufacturable at ambient temperatures. Furthermore, the mortar with W/B of 21 % achieved 200 N/mm² at 28 days, so it can be designed as the maximum W/B for the UFC. The test result confirmed that allowable fine aggregate

volume was lower than 600 kg/m^3 to obtain proper dispersion of steel fibers.

Chapter 4 “Material properties and durability of hardened UFC”, the hardening material properties and durability of the UFC designed in Chapter 3 were examined. The result confirmed that the UFC achieved 196 N/mm^2 at the age of 28 days. The UFC exhibited an excellent cracking strength and tensile strength which were almost equivalent strength of the conventional UFC. In addition, the UFC indicated excellent resistances to various degradation effects, such as neutralization, freezing and thawing, permeability of chloride ions, and sulfate attack. On the other hand, the UFC had low resistance to sulfuric acid and large autogenous shrinkage strain. The properties should be considered in the application of prestressed concrete owing to the loss of prestress.

Chapter 5 “Manufacturing method in RMC plant” reports the manufacturing methods at the ready-mixed concrete (RMC) plant. The result confirmed that UFC can be manufactured at a general RMC plant, the equipment although mixing time varies owing to the mixer capacity. In addition, the mixing methods of steel fibers were compared. Owing to the high viscosity of the UFC, undischarged UFC from the truck was approximately 190 L, which was extremely higher than ordinary concrete (80 L). The compressive strength of UFC using several types of fine aggregate were examined. The result suggested that the evaluation of the properties of fine aggregates in the UFC is necessary for the practical use.

Chapter 6 “Practical applications of UFC” verifies the applicability of UFC of at sites. The result confirmed that the mixing-load increased in proportion to the mixing volume, the maximum mixing volume was identified as 80% of the capacity of mixer. The result showed that the UFC made in a RMC plant indicated stable fresh and strength properties for a few months. Furthermore, the production of UFC with onboard mixers was tested. The result confirmed that the method reduced the material-loss during transportation. The surface-finish of UFC was also evaluated by comparing the results obtained from a soil hardness tester. Moreover, the heat curing conditions of UFC were investigated. The result confirmed that the highest temperature and the curing time for the heat curing were lower and shorter than the standard heat curing (at 90°C for 48 hours), respectively.

Chapter 7 “Conclusions” presents the remarkable conclusions in this study and further research for the practical application of the UFC.

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1 研究の背景

国内の社会資本ストックは、高度経済成長期に建設されたものが多く、国土交通省[2016]によると、建設から50年以上を経過する社会資本の割合は表-1.1.1に示す通りであり、老朽化が懸念されている。しかし、近年の社会保障費の増大等により、社会資本の維持更新に充てられる十分な予算がなく、老朽化した構造物の補修・補強および更新が十分に行われていないのが現状である。また、一般的にコンクリート構造物は建設コストよりもその後の維持管理コストの方が大きくなることが知られており、今後建設される構造物にはライフサイクルコストが小さくなるように高耐久性が求められている。

表-1.1.1 建設後50年以上経過する社会資本の割合（下水道管きよを除く）

国土交通省[2016]を参考に作成

	2018年3月	2023年3月	2033年3月
道路橋 [約73万橋 ^{注1)} （橋長2m以上の橋）]	約25%	約39%	約63%
トンネル [約1万1千本 ^{注2)}]	約20%	約27%	約42%
河川管理施設（水門等） [約1万施設 ^{注3)}]	約32%	約42%	約62%
港湾岸壁 [約5千施設 ^{注4)} （水深4.5m以深）]	約17%	約32%	約58%

注1)建設年度不明橋梁の約23万橋については、割合の算出にあたり除いている。

注2)建設年度不明トンネルの約400本については、割合の算出にあたり除いている。

注3)国管理の施設のみ。建設年度が不明な約1,000施設を含む。（50年以内に整備された施設については概ね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約50年以上経過した施設として整理している。）

注4)建設年度不明岸壁の約100施設については、割合の算出にあたり除いている。

耐久性に優れるコンクリートとしては、高強度コンクリートがあり、国内でも古くから研究が進められている。過去に行われた高強度コンクリートの研究では、吉田徳次郎博士の研究がある。吉田[1940]は、昭和15年に「最高強度コンクリートの製造に就いて」と題する論文を取りまとめている。この研究では、現在のように高減水効果を示す混和剤がなかった時代において、市中にある材料を使用し、配合、締固め、養生方法を工夫して圧縮強度が100N/mm²以上の高強度コンクリートを実現している。

今井ら[2013]の報告によると、現在も高強度コンクリートの研究は盛ん進められており、2013年には設計基準強度300N/mm²のプレキャストコンクリートも実用化されてい

る。1970年代～2010年代までの設計基準強度の最大値の推移を図-1.1.1に示す。特に2000年以降では、設計基準強度が飛躍的に大きくなっていることがわかる。さらに、2016年には、河野ら[2016]によって、脱気吸水もしくは煮沸吸水を行うことにより、圧縮強度が450～464N/mm²の超高強度コンクリートも開発されている。

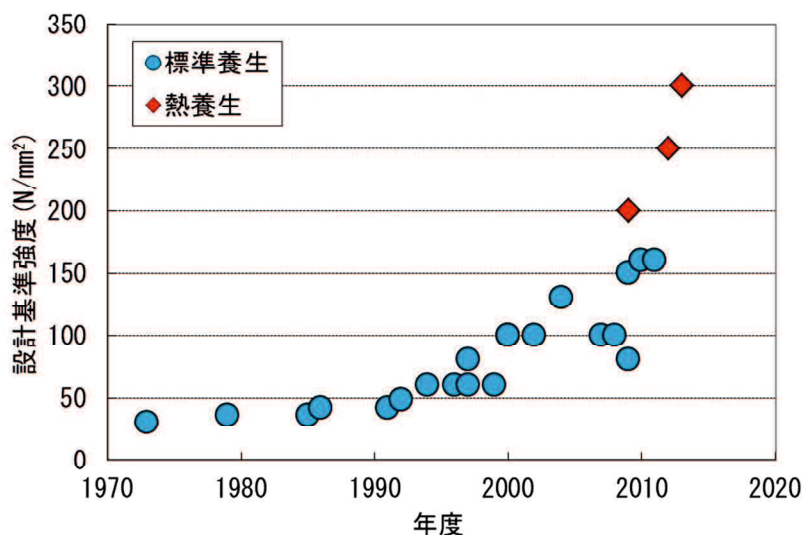


図-1.1.1 コンクリートの設計基準強度の変遷

一方で、コンクリートは圧縮には強く、引張には弱いという特徴がある。コンクリートの引張強度は圧縮強度の1/10とされ、高強度コンクリートではその割合はさらに小さくなる。このため、従来からコンクリートは鉄筋などの引張応力を負担する補強材と一緒に使用されることや、プレストレストコンクリートとして用いられることが多い。

高強度コンクリートや超高強度コンクリートを鉄筋等で補強した場合、マトリックス部分の塩化物イオン浸透抵抗性、中性化、などの耐久性は普通コンクリートよりも向上する。しかし、ひび割れ部などから劣化因子が侵入して補強材に到達した場合は、鋼材の腐食が生じる。そのため、コンクリート構造物に作用する引張応力を受け持つ鋼材の耐久性向上を目的として、エポキシ樹脂塗装鉄筋、ステンレス鉄筋、樹脂被膜PC鋼材およびFRP補強材・緊張材などが開発され使用されている。

さらに、コンクリート自体の引張強度を向上する方法についても検討されている。コンクリート自体の引張強度が向上すれば、補強材の使用を低減もしくは削減することができるため、配筋の省力化、将来の鋼材腐食の低減に繋がり、構造物の長寿命化やライ

フサイクルコストの低減も期待できる。

コンクリート自体の引張強度を向上させる方法として、繊維を混合することによる補強がある。コンクリートではないが、古代エジプトではレンガに粘土や砂と一緒に藁（わら）を練り込んでひび割れを低減していた。また、日本でも古くから建築物などに漆喰壁が用いられており、この漆喰にもスサなどの繊維質の材料が補強材として使用されており、これらが繊維補強コンクリートのルーツといえる。

国内における繊維補強セメント系複合材料の研究は、1970年代から行われており、コンクリートの剥落防止等に用いられてきた。日本コンクリート工学会が発刊している技術の要点[2020]によると、補強用繊維には様々な種類があり（表-1.1.2）、過去に使用実績が多いのは鋼繊維だが、現在では鋼繊維よりも引張強度は小さいものの軽量で耐腐食性が高い、ポリプロピレン、ポリビニルアルコール、ポリエチレン、アラミドなどの有機繊維も適用されている。なお、補強用繊維の種類と特徴については、土木学会から発刊されている「繊維補強コンクリートの構造利用研究小委員会成果報告書」[2015]で詳細にまとめられている。これらの繊維は目的、構造物の種類に応じて使い分けられており、使用する繊維の種類や量およびサイズが異なるとコンクリートの物性も変わる。

表-1.1.2 補強用繊維の種類と物性

「繊維補強コンクリートの構造利用研究小委員会成果報告書」[2015]

種別	素 材	種 別	直 径 (μ)	密 度	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	破断伸度・ 降伏(%)
無機繊維	石 綿	クリソタイル	0.02-30	2.55	588-980	157	2-3
		クロシドライト	0.1-20	3.37	2 746-4 120	167	2-3
	銅	せん断	500	7.85	880	206	3.5
		伸 線	500	7.85	1 180	206	3.5
		切 削	600程度	7.85	830	206	3.5
		メルトエクストラクション	450	7.85	780	206	3.5
	ガ ラ ス	AR	12.5	2.78	2 450	74	3.6
		E	10	2.54	2 160	71	4.8
		A	10	2.46	2 060	64	—
	炭 素	PAN-HM	7-9.7	1.95	1 960-2 450	382	0.5
		PAN-HT	7.6-8.6	1.75	2 650-3 630	245	1.5
		ビッチ-GP	18	1.6	690-980	29	2.0-2.4
		ビッチ-HP	10	1.9	1 960-2 940	196	0.5-0.6
	アルミナ	ボ ロ ン	33-10	3.6	1 080-1 770	324	—
SiC		100	2.62	2 940-4 410	392	—	
有機繊維	ポリエチレン	モノフィラメント	900	0.95	250-700	0.1-2.2	10-15
		モノフィラメント	10	0.98	2 550-4 710	69-127	2-5
	ポリプロピレン	モノフィラメント	10	0.9	300-760	3.5-4.9	23-25
		ファイブール	500	0.9	390	7.8	8
	ビニロン	モノフィラメント	14-16	1.3	980-1 470	30-36	3-13
		Kevlar49	11.9	1.45	2 750-3 530	123	2.2-2.8
	アラミド	Kevlar49	12	1.44	2 840	68	4.4
		テクノーラ	12.4	1.39	3 430	73	4.6
	アクリル		18	1.18	830-930	17-19	9-11
	ポリアミド		4	1.14	760-980	4.9	13.5-19
	ポリエステル		—	1.38	730-860	7.9	11-13
	セルロース		—	1.2	300-500	10	10-20

土木学会の委員会報告書[2018]でとりまとめられている、FRCC の分類を図-1.1.2 に示す。この中で繊維補強コンクリート（FRC : **Fiber-Reinforced Concrete**）は適用事例が最も多く、トンネル覆工コンクリートなどの剥落防止やコンクリート舗装および床版の増し厚補強工事などに使用されている。圧縮強度は一般のコンクリートと同等であり、繊維の添加による靱性の向上は超高強度繊維補強コンクリート※（**Ultra-high-strength Fiber-reinforced Concrete**, 以下 UFC と略記）やひずみ硬化型セメント系複合材料よりも小さい。

また、複数微細ひび割れ型繊維補強コンクリート SHCC（**Strain Hardening Cementitious Composites**）は、ひび割れが発生した後も微細なひび割れが分散して複数発生し、変形量の増加とともに引張応力が増加する硬化特性を示す材料である。このコンクリートには粗骨材は含まれず、モルタルと短繊維で構成されており、圧縮強度は一般的なコンクリートと同程度である。

本研究が対象としている UFC は、第 2 章で詳細に説明するが、圧縮強度 150N/mm^2 以上、引張強度 5N/mm^2 以上、ひび割れ発生強度 4N/mm^2 以上を特性値とするコンクリートである。この材料は 1999 年に国内に技術導入され、2004 年に土木学会から超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）[2004]（以下、UFC 指針と略記）が発刊されている。本指針内では、UFC は標準熱養生を行うことを原則としており、標準熱養生を行わない場合は、物性試験等を実施し、要求される性能を満足しなければならないとしている。

※海外では「UHPFRC : **Ultra -high-performance fiber-reinforced concrete**」として略記されることが多い。

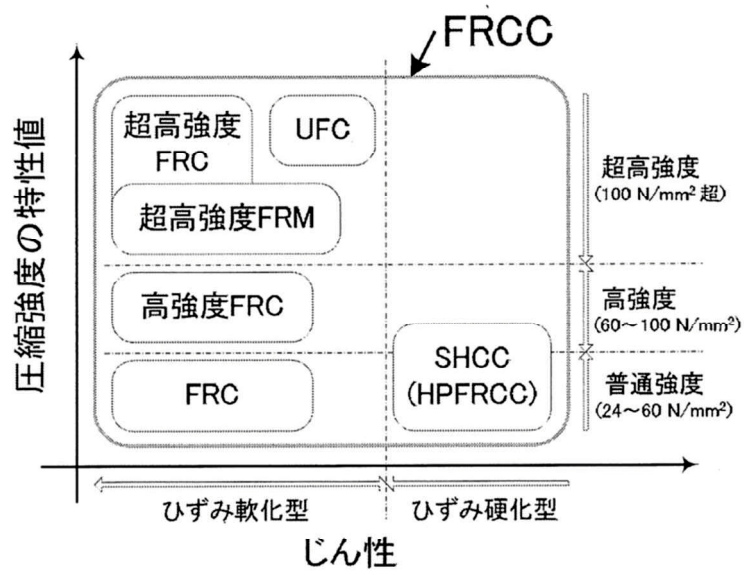


図-1.1.2 FRCC の分類

委員会報告書[2018]

1.2 研究の目的

上述した通り、UFC は一般的に高温の熱養生を行って所要の性能を発揮している。熱養生を行う利点としては、強度発現、緻密化が早い、自己収縮が早期に収束し、熱養生後のクリープが小さくなる、短期材齢で高耐久性が得られることなどが挙げられる。しかし、熱養生を行う場合は、専用の設備を要するため、主にコンクリート製品工場で製造する必要がある。そのため、施工現場まで運搬する必要があり、部材のサイズや形状に制約があることなどが問題となる。

また、詳細は2章に示すが、これまでに熱養生を行わないUFCの検討も行われているが、一般のコンクリートと同様の管理材齢(材齢28日)では、圧縮強度が150~170N/mm²程度とUFC指針の規準は満足しているものの、熱養生を行うUFCの特性値には到達していないのが現状である。

上記を踏まえ、本研究では、これらの課題を解決するため、熱養生が不要で一般的な養生(標準水中養生28日)でUFCの特性値を満足できる常温硬化型のUFCの開発について検討することを目的とした。このような材料が容易に製造・施工できるようになれば、UFCの利用拡大の一助となり、メンテナンスを最小化でき、ライフサイクルコストを低減できる構造物を現場で構築することが可能になると考えられる。

前述のような、熱養生不要なUFCを検討するにあたり、下記のような課題が挙げられる。

- 熱養生無しでUFCの強度特性値を満足する材料の選定と配合設計
- 配合設計したUFCの硬化物性や耐久性
- 熱養生しないUFCの製造方法の検討
- 実現場における適用性の検討

本研究では、これらの課題を解決し、熱養生不要なUFCに適した材料や配合設計手法を提案することを目的とする。また、得られたUFCの供給方法についても検討を行い、実現場への適用性について検証することとした。

1.3 本研究の構成

本論文は、図-1.3.1に示すように、全7章で構成されている。

第1章の「序論」では、研究の背景と目的および本論文の構成について記載した。

第2章の「既往の研究」では、UFCに関する国内外の既往の研究について調査し、材料、フレッシュ性状、硬化性状および適用実績についてとりまとめ、UFCの現状と課題を整理した。

第3章の「配合設計」では、数種類の結合材および混合材を使用し、材料の物性や使用量がUFCの流動性や硬化物性に与える影響を調べた。また、水結合材比や骨材量などがUFCの物性に与える影響を調べた。

第4章の「硬化物性および耐久性」では、第3章で配合したUFCの硬化物性（圧縮強度、曲げ強度、ひび割れ発生強度、収縮など）と耐久性（中性化、凍結融解、塩分浸透など）について調べた。

第5章の「製造方法の検討」では、市中の設備の異なる3つのレディーミクストコンクリート工場（以下、生コン工場と略記）でUFCの製造に及ぼす設備の影響や、細骨材種類や表面水率の影響を調べた。また、鋼繊維の添加方法についても検討した。さらに製造したUFCをトラックアジテータで運搬し、運搬中のフローロスや材料ロスについても調べた。

第6章の「実現場へのUFCの適用性の検証」では、5章で得られた結果を基に、実際の工事で熱養生が不要な超高強度繊維補強コンクリートを供給し、その適用性を検証した。具体的には、生コン工場で連続的にUFCを製造供給した場合、施工現場において車載式ミキサで製造して耐摩耗部材に適用した場合、コンクリート製品工場で製造した場合について検証した。

第7章の「結論」では、本研究で得られた結果を総括し、熱養生が不要な超高強度繊維補強コンクリートの配合設計や現場適用性についてとりまとめるとともに、今後の課

題を記述した。

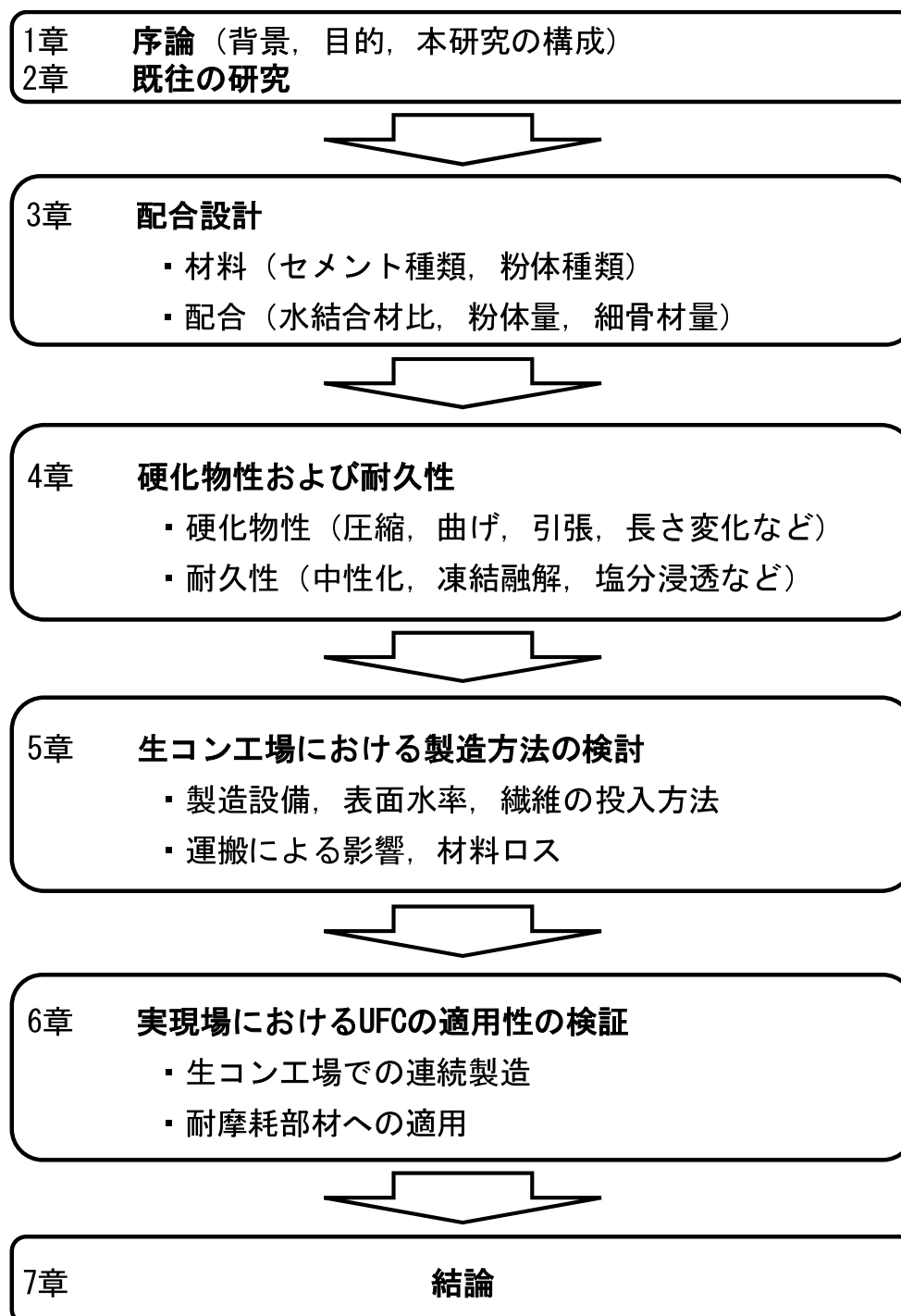


図-1.3.1 本論文の構成

第1章の参考文献

- 今井和正, 山本佳城, 加藤雅樹, 村松晃次: 設計基準強度 300N/mm² のコンクリートを用いた RC 細柱の開発と適用, コンクリート工学, Vol.51, No.12, pp.959-966, 2013.
- 河野克哉, 森香奈子, 多田克彦, 田中敏嗣: 世界最高強度を発現するコンクリートの開発ならびに更なる性能向上の可能性, コンクリート工学, Vol.54, No.7, pp.702-709, 2016.
- 国土交通省ホームページ: インフラメンテナンス情報, 2016,
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html
- 土木学会: 繊維補強コンクリートの構造利用研究小委員会成果報告書, コンクリート技術シリーズ 106, 2015.
- 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113, 2004.
- 日本コンクリート工学会: コンクリート技術の要点'20, 2020.
- 土木学会: 繊維補強コンクリートの構造利用研究小委員会(第2期)委員会報告書 繊維補強コンクリートの構造設計とその課題, コンクリート技術シリーズ 119, 2018.
- 吉田徳次郎: 最高強度コンクリートの製造に就いて, 土木学会誌, 第26巻, 第11号, pp.997-1006, 1940.

第 2 章

既往の研究

第2章 既往の研究

2.1 UFC の概要

UFC とは, Ultra-high-strength fiber-reinforced concrete (超高強度繊維補強コンクリート) の略称で, 日本固有の呼び方である。国際的なカテゴリーは, フランスで開発された, UHPFRC (Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete) であり, UHPC (Ultra-high-performance concrete) に繊維を加えたものである。

UHPFRC や UFC は圧縮強度が 150N/mm^2 を超えるということは共通して認識されており, その他の特徴として, $7\sim 8\text{N/mm}^2$ 以上の引張強度, 水結合材比が 0.25 未満, 補強用の鋼繊維を含むことなどが特徴とされている。また, UHPFRC の配合は一般のコンクリートと比べて結合材量が多く, 粒径の小さい骨材を使用し, モルタルマトリックスを極めて緻密にする必要があるため, 全ての材料が細密充填されるように設計されている。また, 施工性を確保するために多量の (化学) 混和剤を使用することも日本と同様である。

現在 UHPFRC と呼ばれている材料の開発は 1970 年代から行われており, Habel [2004] によると, Brunauer・Odler や Yudenfreund らによって, 低水セメント比のペーストに関する研究が行われ, 200N/mm^2 の圧縮強度を達成している。

また, 超微粒子と分散剤を組み合わせた DSP (Densified system containing homogeneously arranged ultra-fine particles) について検討が行われており, 従来の高強度コンクリートよりもさらに高強度 ($150\sim 400\text{N/mm}^2$) を達成している。さらに, ポリマー改質セメント系材料を使用した MDF (Medium density fiberboard) の開発も行われてきた。しかし MDF はその製造条件から特殊な設備が必要なことや, コンクリートと異なり耐水性に劣るといった欠点が指摘されている。DPS や MDF はいずれも高強度であるものの, 破壊形態が脆性的なため, 建設材料として適用するためには補強繊維の使用が不可欠である。しかしながら, その製造方法や性能から MDF に補強繊維を混入することは困難であるため, これまで UHPFRC の研究は DSP に補強用繊維を添加することが中心に行われてきた。

Rossi [2008] によると, UHPFRC は補強用繊維の添加量によって, 概ね 3 種類に分けられる。1 つ目はデンマークで開発された 10mm 以下の短繊維を $5\sim 10\text{vol.}\%$ 混入させた短繊維補強コンクリートである。この繊維補強コンクリートは, 高強度のマトリックスに短繊維を混入することによってコンクリートの引張強度を向上させたものである。し

かしながら、繊維が短いため、延性性能にはほとんど寄与しないといわれている。

2 つ目は短い繊維と長い繊維を組合せて、その混入率（最大で 11vol.%）も高めた UHPFRC である。これらの UHPFRC は繊維を多量に使用しているため、鉄筋を省略できる技術とされている。

3 つ目は前述したものよりも少し長い繊維を使用した UHPFRC である。これらの例としては、1990 年代に開発された DUCTAL[®]や CERACEM[®]などがある。これらの UHPFRC は長さが 13～20mm 程度の繊維を体積の 2～3vol.%混入するものであり、引張強度とじん性が向上する。日本に導入された UFC はこの技術である。

日本に UFC 技術が導入されたのは 1999 年であり、2004 年にはフランスの土木学会の設計・施工指針 SETRA/AFGC [2002]などを参考にして土木学会から UFC 指針[2004]が発刊されている。本指針では、UFC の強度（特性値）の適用範囲として下記を示している。

○圧縮強度 150N/mm² 以上

○ひび割れ発生強度 4 N/mm² 以上

○引張強度 5 N/mm² 以上

また、使用材料としては、粒形 2.5mm 以下の骨材、セメント、ポズラン材を用い、水セメント比は 0.24 以下とし、補強用繊維は引張強度 2×10^3 N/mm² 以上で、直径 0.1～0.25mm、長さ 10～20mm のものを 2vol.%以上混入することを標準としており、これら以外の材料を使用する場合は、本指針（案）に示された値と同等以上となることなどを確認することとしている。さらに、UFC は熱養生することを原則としており、熱養生を行わない場合には、硬化後の物性試験に基づいて養生方法や期間を定めることとしている。UFC 指針に記載されている、標準配合粉体を用いた UFC の配合例を表-2.1.1 に示す。

鶴澤ら[2001]によると、上記指針で示されている材料は、Richard らによって開発された反応性粉体コンクリート（Reactive Powder Concrete : RPC）をベースに改良を加えた材料である。RPC の力学的特性を表-2.1.2 に示す。RPC には RPC800 と RPC200 があり、RPC800 はプレス成形後に高温養生することによって、490～680N/mm² の圧縮強度を発現する。また、RPC200 はプレス養生無しで蒸気養生を行い、200N/mm² の圧縮強度を発現する材料である。

表-2.1.1 標準配合粉体を用いた UFC の配合例

[UFC 指針[2004]]

フロー 値 (mm)	補強用繊維				単位量(kg/m ³)			混和剤(kg/m ³)	
	繊維の 種類	繊維径 (mm)	繊維長 (mm)	混入率 (%)	水	標準配 合粉体	繊維	高性能 減水剤	その他
260	鋼繊維	0.2	15	2	180	2254	157	24	-

表-2.1.2 RPC の力学的特性

[鵜澤ら[2001]]

	RPC 800	RPC 200
圧縮強度 (N/mm ²)	490~680	170~230
曲げ強度 (N/mm ²)	45~102	25~60
破壊エネルギー (kJ/m ²)	1.2~2	15~40
静弾性係数 (GPa)	63~74	62~66
動弾性係数 (GPa)	32~36	59~61

国内の熱養生を行う UFC は、上述した UFC 指針に示される材料の他に、エトリンガイト系 (Aft 系) UFC 材料がある。土木学会技術推進ライブラリーNo.3[2006]に示される Aft 系 UFC も UFC 指針に示されている材料と同等の特性値 (圧縮強度 180N/mm², 引張強度 8.8N/mm², ひび割れ発生強度 8.0N/mm²) を有しており、養生は熱養生が採用されている。またこの材料は、径と長さの異なる、2 種類の鋼繊維を混合して使用しており、添加率は 1.75vol.%と若干少ないことが特徴である。Aft 系 UFC の標準示方配合を表-2.1.3 に示す。

表-2.1.3 Aft 系 UFC の標準示方配合

[土木学会技術推進ライブラリーNo. 3[2006]]

フロー値 (mm)	水結合材比 (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					サクセム用 補強繊維 (kg)
			水	サクセム セメント	サクセム用 骨材	サクセム用 高性能減水剤	サクセム用 消泡剤 ^{注4)}	
250±20	15	2.0 ^{注1)}	195 ^{注2)}	1287	905 ^{注3)}	32.2	—	137.4 (1.75Vol%)

注1) : 空気量は2%で配合設計することを標準とするが、品質管理においては5%以下とする。

注2) : 水の単位量は混和剤の水分を含む。

注3) : 骨材は表乾状態での単位量である。

注4) : 必要に応じてサクセム用消泡剤を使用する。その場合、消泡剤は単位水量の一部として取り扱う。

2.2 材料および配合

SINTEF Building and Infrastructure [2012]の調査によると、UFCに用いるセメントは、一般的なコンクリートの2倍以上の量が使用され、比表面積は $3000\sim 4500\text{cm}^2/\text{g}$ が好ましい。また、UHPCは水セメント比が著しく小さいため、 C_3A を多く含まないものが適しているとされている。これは流動性の改善だけでなく、高温養生したコンクリートに懸念される遅れエトリンタイト生成(DEF: Delayed Ettringite Formation)の危険性も小さくなるためである。Li *et al.* [2016]は、セメントのアルカリ量がUHPCのワーカビリティに与える影響を調べている。その結果、セメントのアルカリ含有量が0.7%以上の場合、アルカリ含有量が増えるほど、ワーカビリティが低下することを報告している。Ahmed *et al.* [2021]は、低 C_3A セメントの一部を高炉スラグ微粉末で置換したUHPCの性状を調べている。その結果、セメントの60%を高炉スラグ微粉末で置換した場合、材齢28日の圧縮強度が16%程度低下するが、特別な養生や繊維がなくても、 $150\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の圧縮強度が得られることを報告している。

また、混和材の使用が不可欠であり、代表的なものとしては、シリカフューム、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末などが使用されている。シリカフュームはセメントの水和生成物と反応し、高強度化が図れることや、ボールベアリング効果による流動性改善などの目的で使用される。また、シリカフュームの粒子はセメント粒子よりも小さいことから、セメント粒子の間隙を埋めることによる充填効果も期待できる。Wu *et al.* [2019]は、シリカフュームを含むUHPCの特徴を詳細に検討している。その結果、UHPCの粘度は、シリカフュームの添加率が0~15%までは添加率に伴って低下するが、置換率が15%よりも大きくなると、粘度が増加することを報告している。また、UHPCの圧縮強度は、シリカフュームの置換率が10~20%で最大となり、それ以上になると低下することを報告している。これは粘度の増加によって気泡が抜けにくくなることを要因としている。井口ら[2014]は、普通ポルトランドセメントと粉末度の異なる高炉スラグ微粉末を用いたUFCの研究を行っている。その結果、流動性は高炉スラグ微粉末の混和率と比表面積の増加に伴い向上することや、材齢28日において $170\text{N}/\text{mm}^2$ の圧縮強度が得られたことを報告している。Oudomsak *et al.* [2017]は、粉末度の異なる高炉スラグ微粉末を用いたUFCの研究を行っている。その結果、普通ポルトランドセメントと粉末度の異なる高炉スラグ微粉末を組み合わせることで、圧縮強度が 20°C 養生では、 $150\text{N}/\text{mm}^2$ 以上、 60°C 養生では最大で $227\text{N}/\text{mm}^2$ に到達することを報告している。Ba *et al.*

[2009]は、フライアッシュ、スラグおよび石英粉末を使用した RPC の研究を行っている。その結果、水結合材比が 0.23、フライアッシュのセメント置換率が 30%の時、圧縮強度が 160N/mm^2 、曲げ強度が 25N/mm^2 以上になることを報告している。また、フロー値は約 260mm でポンプ圧送も可能なことを報告している。Yazıcı *et al.* [2010]は、セメントの 20, 40, および 60%を高炉スラグ微粉末で置換した RPC の研究を行っている。その結果、熱養生後の圧縮強度は 250N/mm^2 以上であることや、養生時に加圧した場合の圧縮強度は、 400N/mm^2 に達したことを報告している。Kang *et al.* [2019]は、多量の石灰石微粉末を使用した低セメント量の UHPFRC を提案している。材齢 91 日の圧縮強度 $150\sim 180\text{N/mm}^2$ をセメント量 $400\sim 600\text{kg/m}^3$ で達成することが可能と報告している。Soliman *et al.* [2017]は、UHPC に使用されるシリカフュームは、限られた資源とコストが高いため、UHPC の普及を妨げていることを指摘している。シリカフュームをガラス微粉末で置換することによって、蒸気養生後の圧縮強度が 200N/mm^2 以上の UHPC の製造が可能なことを示している。Vigneshwari *et al.* [2018]は、入手が困難な場合があるシリカフュームの代替として、粃殻灰の検討を行っている。その結果、シリカフュームを粃殻灰で置換した UHPC は、強度および耐久性に優れていることを報告している。

Habel [2004]によると、UHPFRC に使用される骨材は、細かいものが使用され、多くの場合平均粒形は 1mm 以下となっているが、16mm 程度の骨材も使用される場合がある。部材の寸法が大きい場合は粗骨材の使用も考えられるが、UHPFRC が適用される個所は主に断面が小さい部材が多いため粗骨材が使用されるのは稀である。ただし、粗骨材を使用すると自己収縮や価格を抑制できる点で有利である。Yang *et al.* [2009]は、再生ガラスカレットや天然細骨材の UHPFRC への適用性を調べている。その結果、高価な珪砂を地場の天然砂で置換しても同等の力学的特性とじん性が得られることを確認している。UHPFRC を製造する際の環境負荷やコストを考慮すると、近隣で入手しやすい骨材を使用することが望ましいと考えられる。Vatannia *et al.* [2020]らは、コストと環境面を考慮して、骨材量を増加させた UHPFRC の検討を行っている。その結果、一般的な UHPFRC よりも、 CO_2 を 10%、コストを 25%削減できることを報告している。

Yu *et al.* [2015]は、ミクロとマクロの繊維を使用することで、比較的少ない結合材量 (620kg/m^3)、繊維量 (2vol.%) で UHPFRC の製造が可能なことを報告している。Kang *et al.* [2010]らは、0~5vol.%と繊維量を変えて、曲げ試験を行っている。その結果、曲げ強度は、この広範な配合でも繊維の混入量の増加に伴って増加することを報告している。

石関ら[2010]は、径と長さが異なる鋼繊維を用いて UFC の比較実験を行っている。その結果、引張強度が高く、アスペクト比が大きい繊維を用いることは、引張じん性係数の向上に有効なことや、表面積が大きく長さが長い鋼繊維は材料分離を引き起こしやすいことを報告している。また、鋼繊維の添加率を 2.5vol.%, 3.0vol.% と高めた場合は鋼繊維同士が絡み合い、分散性が低下して繊維の性能を有効に発揮できないことを報告している (図-2.2.1)。

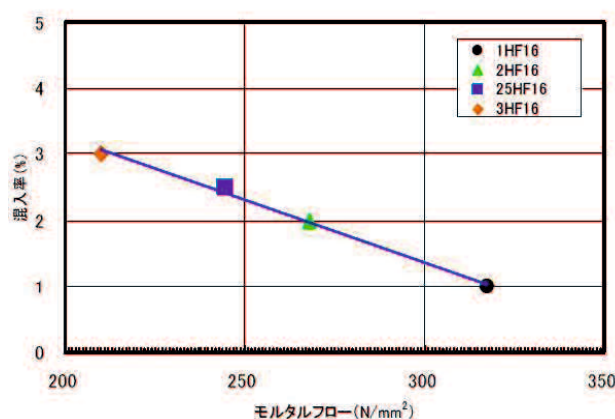


図-2.2.1 モルタルフローと繊維混入率
〔石関ら[2010]〕

大塚ら[2019]は、種類やサイズの異なる繊維を使用した UFC の研究を行っている。その結果、金属繊維無混入のモルタルと比較して、各種金属繊維を混和することによってフローの増加が期待できることや、圧縮強度が 150N/mm² 以上、曲げ強度が 30N/mm² 以上になることを報告している。森ら[2012]は、有機繊維の中で最も高い引張強度と弾性率を有している PBO 繊維を UFC に適用した場合の流動性、力学特性等を検討している。その結果、PBO 繊維を鋼繊維と同量 (体積割合で) 混入した場合、モルタルフローの低下が鋼繊維の場合よりも大きくなることを報告している。また、圧縮強度は鋼繊維を使用した場合よりも 20% 程度低下するものの、曲げ強度は同等の値が得られることを報告している。また、切欠きはりの 3 点曲げ試験結果によると、PBO 繊維を使用した場合の最大荷重は鋼繊維を使用した場合よりも大きくなるが、最大荷重以降の応力の低下割合は鋼繊維を使用した UFC よりも大きくなることを報告している (図-2.2.2)。この要因としては、マトリックスと繊維との付着力の差を挙げている。

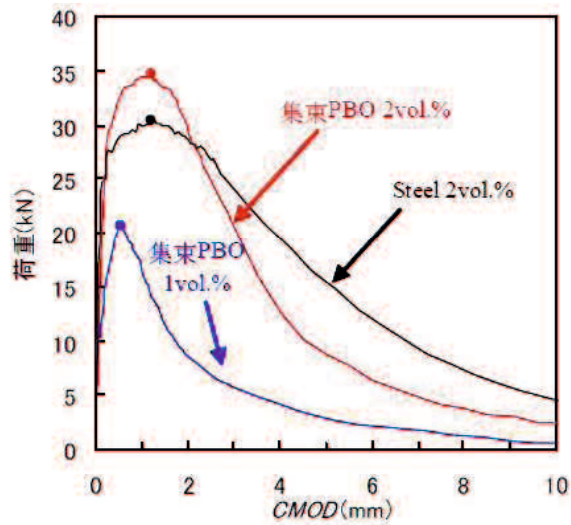


図-2.2.2 切欠き梁の3点曲げ試験結果
〔森ら[2012]〕

UHPFRC は水結合材比が小さいため、適正な流動性を得るためには、化学混和剤を一般のコンクリートよりも多量に使用する必要がある。大部分にはポリカルボン酸系の減水効果が高い混和剤が使用されており、最大でセメントの5質量%が添加されている。Chang *et al.* [2020]は、W/B を変えてUHPCの強度を調べている。その結果、B/W と強度には普通強度のコンクリートと同じように直線関係があることや、UHPCの最適W/Bは17~20%の範囲にあることを報告している。

Rossi [2001]によると、UHPFRCのじん性性能の付与のために添加される繊維は、主に引張強度と延性を向上させ、圧縮部材の場合は、構造物のスケールで延性を高めるとしている。また、繊維長の長い繊維は、大きなひび割れの抑制に効果があるが、混入率によってはワーカビリティが悪化するため、作業性を重視する場合は（例えば、流込み成形や吹付けコンクリートなど）、多量の短繊維と少量の長繊維の混合物が使用されたとしている。ACI 544.3R-93 [1998]では、一般的に繊維の添加率は30~157kg/m³とされており、上限は通常95~118kg/m³としている。また、作業性を考慮した繊維の添加率は施工条件、繊維の形状・量、減水剤の種類と量の影響を受けるとしている。

SINTEF Building and Infrastructure [2012]の調査によると、UHPFRCのW/Bは、一般的に0.16~0.2の範囲にあり、従来のコンクリートのW/Bよりもかなり低くなっている。

2.3 フレッシュ性状

松原ら[2006]は、長さや径が異なる鋼繊維を用いて、UFCのフレッシュ性状に与える影響を確認している。その結果、15mmおよび20mmの繊維を混入した場合、繊維混入率の増加に伴って、モルタルフローが小さくなることを報告している(図-2.3.1)。なお、10mm長の鋼繊維の場合は、実験範囲内ではモルタルフローに与える影響が小さいとしている。このことから、開発したUFCの流動性には、混入される繊維の本数よりも、繊維長の影響の方が大きいことを明らかにしている。これは、繊維長が長くなると、流動中の繊維同士の干渉が大きくなることによるものと考えられることを報告している。

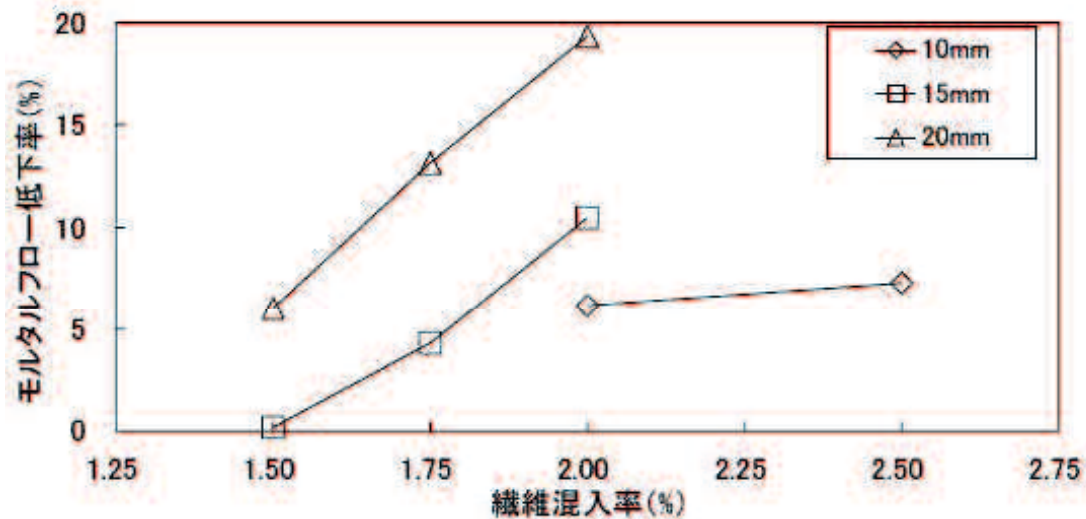


図-2.3.1 鋼繊維添加率とモルタルフロー低下率

[松原ら[2006]]

大野ら[2006]は、Aft系UFCに関して、表面水を有する細骨材を使用して実機プラントでの練混ぜ実験を実施している。その結果、表面水率を8%以下として、適切な頻度で細骨材の表面水率を測定し、練混ぜ水量の補正を行うことで、品質の安定したUFCが得られることを報告している。また、細骨材の表面水率の変動が著しく、真値を適切に反映することが難しい場合を想定した実験を行っている。その結果、表面水率の誤差が±0.5%の範囲であれば、モルタルフローや圧縮強度に変動はみられるものの、目標値の範囲内であり、UFCの品質に大きく影響を及ぼすことはないと報告している(図-2.3.2)。

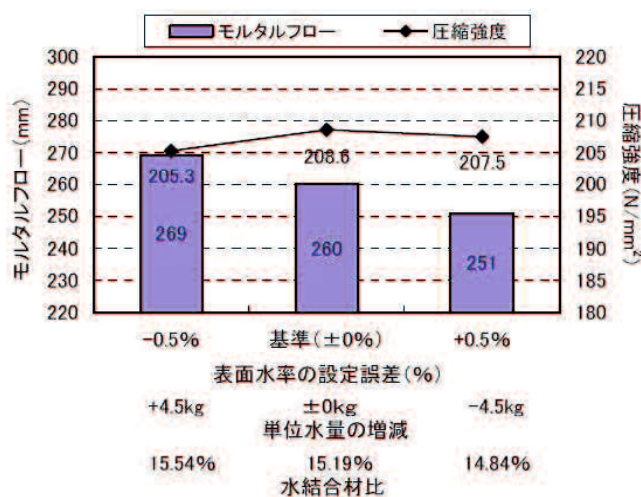


図-2.3.2 表面水の設定違いの影響

[大野ら[2006]]

2.4 養生方法

UFC指針[2004]では、標準熱養生を行うことを原則としており、熱養生を行わない場合は、適切な材齢における試験に基づいて特性値を定めることや、硬化後の物性試験に基づいて養生の方法や期間を定めることとしている。また、フランスにおけるUHPFRCの規準においても、熱養生を行うことが基本とされている。これらの熱養生は、UFCの緻密化、自己収縮、クリープなどの低減のために実施される。柳井ら[2006]は、養生条件を変化させて、UFCの空隙率と圧縮強度を測定している。その結果、Aft系UFCの二次養生は、最高温度を85℃とし、保持時間を20時間とすることで、200N/mm²程度の圧縮強度が得られると報告している(図-2.4.1)。また、一次養生後の圧縮強度が高いほど二次養生後の圧縮強度が低くなる傾向がわずかに認められたこと、練上り温度が35℃と

高い場合は、一次養生を 5~40℃のいずれの温度で実施しても、二次養生後の圧縮強度が低くなる傾向が認められたことを報告している。

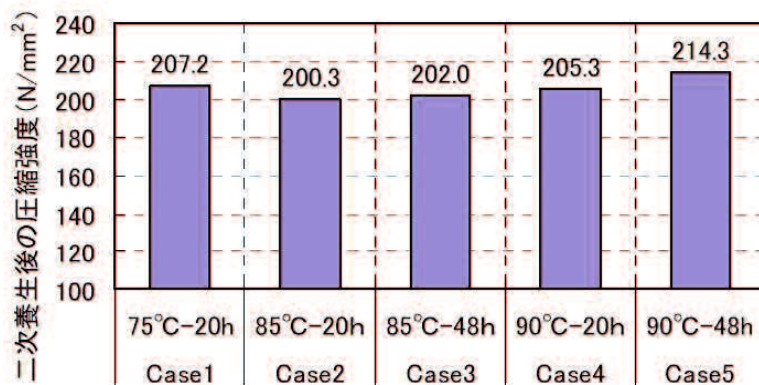


図-2.4.1 養生条件と圧縮強度

〔柳井ら[2006]〕

川口ら[2014]は、常温で硬化させた UFC の強度特性を調べている。その結果、圧縮強度は、標準熱養生を行った UFC には及ばないものの、養生温度が 20℃、30℃で、材齢 28 日以降の静弾性係数は同等となったこと、ひび割れ発生強度は、養生温度 20℃、30℃で、材齢 28 日以降に、標準熱養生を行った UFC とほぼ同等になったことを報告している。また、熱養生を行わなくても、収縮低減剤の添加により、収縮応力および収縮ひずみが低減できることを報告している。川崎ら[2014]は、冬期に場所打ちで UFC を施工した事例を報告している。冬期の施工であっても、養生初期の部材温度を制御することで、圧縮強度は材齢 22 日で UFC の特性値である 150N/mm²に達することを報告している。橋本ら[2017]は、常温環境下での強度発現を高めた UFC について、強度発現性を調査している。その結果、有効材齢により、20℃と 30℃環境の強度発現は 1 つの近似曲線で近似できるが、5℃については別途近似する必要があることを報告している。また、長期材齢における圧縮強度は 20℃と 30℃環境では 180N/mm²程度、5℃の場合は 130N/mm²程度となっている。島崎ら[2019]は、UHPFRC を RC 床版の上面増厚工法への適用を検討している。その結果、材齢 28 日の圧縮強度は、20℃養生、現場養生ともに 140N/mm²以上に達したことを報告している。Yang *et al.*[2009]は、20℃で養生した試験体と 90℃の熱養生を行った UHPFRC の比較試験を行った結果、20℃で養生した試験体の圧縮強度は

熱養生を行った試験体の圧縮強度の約 80%程度であったことを報告している。ただし、熱養生が UHPFRC の材料特性を向上させるのに効果的であるとしても、高価でエネルギーを消費し、そのため適用箇所がプレキャストに限定されることや材料も限定されるとしている。

2.5 強度性状および耐久性

松原ら[2006]は、長さや径の異なる鋼繊維を用いた UFC の圧縮強度と曲げ強度を測定している。その結果、検討の範囲内では圧縮強度に及ぼす繊維の影響は小さいことを報告している。また、繊維混入率が高くなるほど曲げ強度も高くなるが、その増加にも限度があることと、曲げ強度の増大には繊維長の影響が大きいことを報告している（図-2.5.1）。さらに、繊維長の異なる 2 種類の繊維を混入した場合、流動性と曲げ強度の関係において、単独で使った場合よりも流動性の低下が小さく、高い曲げ強度が得られる最適の混合割合が存在することを報告している。田中ら[2005]は、UFC の気中および水中疲労試験を実施している。その結果、はりの曲げ疲労強度は、気中と水中で差異が認められなかったことを報告している（図-2.5.2）。

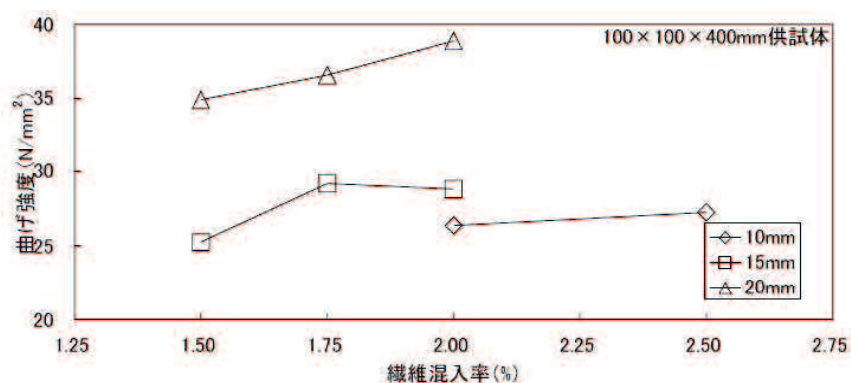


図-2.5.1 繊維混入率と曲げ強度

[松原ら[2006]]

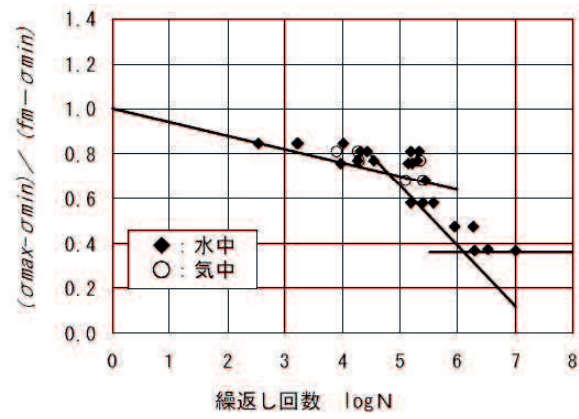


図-2.5.2 疲労 $S-N$ 曲線

[田中ら [2005]]

田中ら[2004]は、塩化物イオンを添加したオートクレーブ促進腐食試験により UFC の強度性状と鋼繊維の腐食の評価実験を行っている。その結果、UFC は、高い鋼繊維の腐食抵抗性を有しており、強度や変形性能は促進腐食試験により低下しなかったことを報告している。渡邊ら[2006]は、エトリンガイト生成系混和材を用いた UFC の塩化物イオンの拡散係数と透気係数を測定している。その結果、塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、浸せき期間が長くなるほど小さくなる傾向を示し（図-2.5.3）、W/B=30%の高強度コンクリートの見掛けの拡散係数よりも2桁小さい値を示したことを報告している。また、透気係数に関しても、高強度コンクリートよりも3桁小さい値を示したこと、凍結融解抵抗性およびアルカリシリカ反応に対する抵抗性も高いことを報告している。

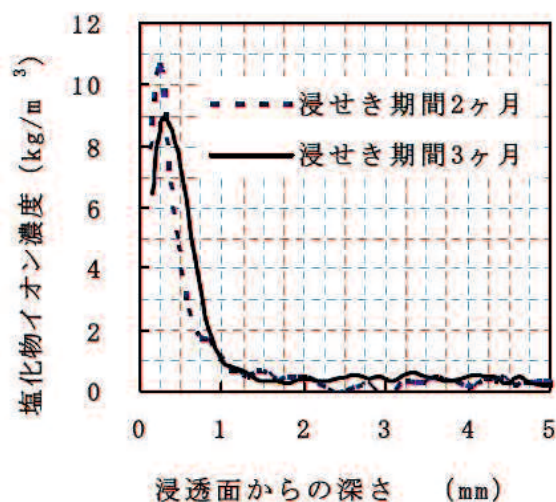


図-2.5.3 塩化物イオンの浸透深さと濃度分布
〔渡邊ら[2006]〕

渡邊ら[2017]は、海洋環境に約4年間暴露した UFC の曲げ疲労試験を行い、力学性能の経年的な変化を確認している。その結果、静的曲げ試験では、残留ひずみやひび割れを有していても力学特性は低下しないことを報告している。しかし、曲げ疲労試験においては、残留ひずみや初期ひび割れを有し、腐食環境に置かれる場合、UFC 指針の $S-N$ 曲線よりも早期に疲労強度が低下する傾向があることを報告している (図-2.5.4)。

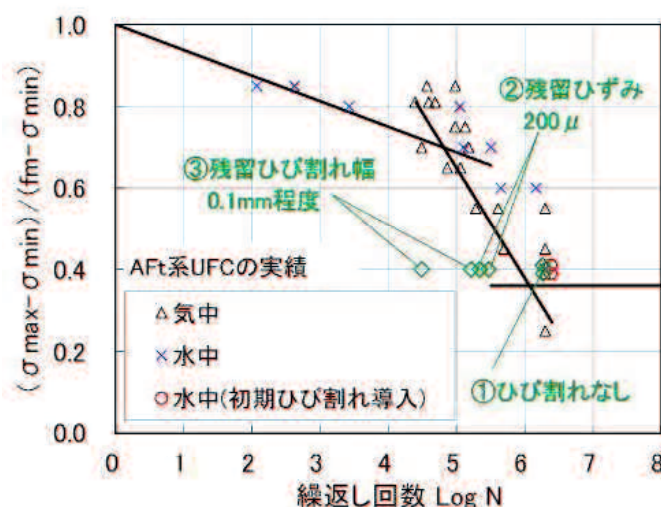


図-2.5.4 曲げ疲労試験結果

[渡邊ら[2017]]

2.6 実機プラントでの製造

大野ら[2006]は、Aft 系の UFC に関して、実機プラントで製造した後にトラックアジテータに積み込み、繊維混入率試験を実施している。その結果、トラックアジテータから排出する際の 1/3, 2/3, 3/3 から採取した試料とも繊維混入率は 1.72~1.81vol.%であり、試料採取部位間の変動は小さかったことを報告している。繊維混入率試験の結果が設定値 (1.75vol.%) よりも大きくなった理由については、トラックアジテータの内面にマトリックスが鋼繊維よりも多く付着している可能性を指摘している。

柳井ら[2007]は、Aft 系 UFC を大量適用することを目的として、レディーミクストコンクリート工場等で使用される汎用的なミキサを用いた製造実験を行っている。その結果、Aft 系 UFC は、ミキサ練混ぜ容量の 80%程度であれば練混ぜが可能なことや、練混ぜに必要な時間は 12~14 分であることを報告している (図-2.6.1)。また、高性能減水

剤の使用量を調整することで、製造季節が変わった場合でも一定の製造性と品質を確保できることを報告している。

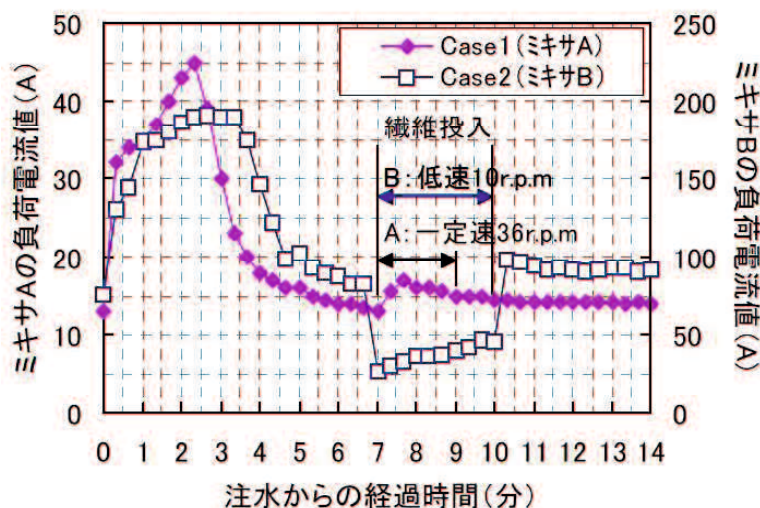


図-2.6.1 注水からの経過時間とミキサの負荷電流値
〔柳井ら[2007]〕

2.7 適用事例

(1) 酒田みらい橋

田中ら[2003]の報告によると、酒田みらい橋（写真-2.7.1）は日本国内で初めて UFC が適用された構造物（歩道橋）として知られている。酒田みらい橋は、2002年に Reactive Powder Concrete (RPC) の技術を基本として商品化された UHPFRC（商品名：Ductal）で製造されている。RPC の配合を表-2.7.1 に示す。

また、酒田みらい橋は、供用 15 年後に渡部ら[2018]によって調査が行われている。その結果、表面に認められる点錆のほとんどは供用 1 年までに発生しており、1 年以降の増加は少ないことが報告されている。また、ウェブ開口部間に発生したひび割れについては、ひび割れ幅は供用 10 年から大きな変化はなく、ひび割れ長さは小さくなっている箇所もあり、これは、未水和セメント等がひび割れ内部で反応した可能性があることが報告されている。また、圧縮強度や曲げ強度に低下は認められないことや、塩化物イオンの浸透深さは、表層から 1~2mm にとどまっていることが報告されている。



写真-2.7.1 酒田みらい橋

〔田中ら[2003]〕

表-2.7.1 RPC の配合

〔田中ら[2003]〕

水	セメント	珪石微粉末, シリカ, 他	鋼繊維	減水剤
180	818	1 479	157	24

単位：kg/m³，水 180 kg/m³ は高性能減水剤の水分 19 kg/m³ を含む

(2) 羽田空港 D 滑走路

佐伯[2011]，武者ら[2010]の報告によると，羽田空港 D 滑走路には，UFC 製の床版が 6,936 枚(標準寸法 7.8×3.5m)採用され，UFC の使用量は約 22,000m³ と世界最大である。武者ら[2010]は，航空機等の大きな荷重に耐えうる床版構造と量産システムの開発について報告している。短期間で大量の UFC 床版を経済的に製造する方法を検討した結果，生産ラインにおける型枠の設置位置などを工夫し，プレストレス導入作業の効率化を図っている。その結果，1 週間あたり，80 枚の UFC 床版の製造が可能になったことを報告している。また，UFC は結合材料が多いため，硬化時の収縮が大きく，型枠などに拘束された場合は，脱枠ができなくなることやひび割れの懸念があるが，部材の形状や型枠に収縮緩衝用のゴム部材を配置することによって対応している(写真-2.7.2)。

さらに，製造時の品質管理として，圧縮強度，ひび割れ発生強度および引張強度の測定を実施し，いずれの強度も特性値を満足し，ばらつきも小さかったことを報告してい

る（表-2.7.2）。



写真-2.7.2 UFC 床版の型枠設置状況
〔武者ら[2010]〕

表-2.7.2 UFC 強度のまとめ
〔武者ら[2010]〕

統計値	記号	単位	圧縮強度	ひび割れ発生強度	引張強度
本製作	標本数	N	----	623	623
	平均値	f_m	N/mm^2	211	10.2
	標準偏差	σ	N/mm^2	11.0	0.8
	変動係数	δ	%	5.2	7.6
	特性値	f_k	N/mm^2	193	8.9
UFC 指針	特性値(規格値)	f_k	N/mm^2	180	8.0

(3) 東九州自動車道堀越 C ランプ橋

黒岩ら[2005]の報告によると、東九州自動車道堀越 C ランプ橋は、国内で初めて UFC が適用された道路橋である。黒岩らは、道路橋の設計、製造および架橋について報告している。設計は UFC 指針[2004]に準拠しており、適用された UFC は圧縮強度の特性値が $180\text{N}/\text{mm}^2$ 、ひび割れ発生強度の特性値が $8.0\text{N}/\text{mm}^2$ 、引張強度の特性値が $8.8\text{N}/\text{mm}^2$ の性能を発揮するものである。また、UFC は打込み後所定の強度に達するまで一次養生を行い、その後、 90°C で 48 時間の熱養生が行われている。また、UFC を桁に使用することによって、従来よりも高強度化・軽量化できることから、工事では架設桁数の削減

やクレーンを小型化できるメリットを挙げている。さらに、耐久性が非常に高いため、ライフサイクルコストの低減が見込まれると報告している。

(4) 東京モノレール昭和島車庫線（モノレール桁）

田中ら[2005]の報告によると、通常、東京モノレール羽田線にはプレストレス・コンクリート製の桁が採用されており、桁長は20mである。UFCを適用することで桁長40mのモノレール桁の施工に成功している。使用されたUFCは「Ductal」である。Ductalと一般的にPC橋梁に用いられるコンクリートの材料特性値の比較を表-2.7.3に示す。一般的なコンクリートは引張力を受け持たないため、鉄筋が必要となり、かぶりを確保すると部材厚が大きくなる。田中ら[2005]は、Ductalの場合は、自己充填性があり、構造部材の薄肉化が図れるため、桁の自重は従来の約半分に低減できることを報告している。

表-2.7.3 Ductal と一般的なコンクリートの材料特性値の比較

〔田中ら[2005]〕

項目	単位	Ductal*1	40 N/mm ² の コンクリート	備考
水セメント比	—	0.22	0.4	
圧縮強度	N/mm ²	180	40	設計特性値
ひび割れ発生強度	N/mm ²	8.0	0	設計特性値
引張強度	N/mm ²	8.8	0	設計特性値
破壊エネルギー	Nm/m ²	36 100	100	曲げ試験による
弾性係数	N/mm ²	50 000	24 000	設計特性値
乾燥収縮	10 ⁻⁶	0*2	800	材齢 28 日
自己収縮	10 ⁻⁶	800	200	
クリープ係数	—	0.4	2.0	
拡散係数	cm ² /年	0.0019	0.64	塩化物イオン
単位重量	kN/m ³	25.5	23.5	

*1 Ductal は初期養生後 90°C の蒸気養生を 48 時間行う

*2 90°C の蒸気養生を 48 時間終了後で材齢 28 日以降

(5) 三岐鉄道「萱生川橋梁」

森川ら[2011]は、世界初の UFC 製の鉄道橋の製造について報告している。三岐鉄道「萱生川橋梁」の写真を写真-2.7.3に示す。萱生川橋梁掛替工事では、従来工法では設計の床版厚を満足できず(表-2.7.4)、軌道高さを変更した場合は大幅なコストアップになる可能性が想定されたため、部材の薄肉化が図れる UFC が採用された。なお、下路桁につ

いては、コンクリート製品工場で7分割して製造され、施工現場で組み立てられている。接合部にも UFC が適用されており、接合部を施工後、約2日間の40℃温風養生を実施している。



写真-2.7.3 三岐鉄道「萱生川橋梁」
〔森川ら[2011]〕

表-2.7.4 下路桁の設計結果比較表
〔森川ら[2011]〕

	UFC下路桁	従来設計によるPC下路桁																
断面形状																		
断面積	1.6 m ² (0.5)	3.2 m ² (1.0)																
設計荷重	<table border="1"> <tr><td>桁</td><td>700 kN (0.54)</td></tr> <tr><td>軌道, 碎石</td><td>500 kN</td></tr> <tr><td>列車</td><td>1 000 kN</td></tr> <tr><td>計</td><td>2 300 kN (0.79)</td></tr> </table>	桁	700 kN (0.54)	軌道, 碎石	500 kN	列車	1 000 kN	計	2 300 kN (0.79)	<table border="1"> <tr><td>桁</td><td>1 300 kN (1.00)</td></tr> <tr><td>軌道, 碎石</td><td>500 kN</td></tr> <tr><td>列車</td><td>1 100 kN</td></tr> <tr><td>計</td><td>2 900 kN (1.00)</td></tr> </table>	桁	1 300 kN (1.00)	軌道, 碎石	500 kN	列車	1 100 kN	計	2 900 kN (1.00)
桁	700 kN (0.54)																	
軌道, 碎石	500 kN																	
列車	1 000 kN																	
計	2 300 kN (0.79)																	
桁	1 300 kN (1.00)																	
軌道, 碎石	500 kN																	
列車	1 100 kN																	
計	2 900 kN (1.00)																	
断面剛性	1.6 × 10 ⁷ kN・m ² (0.76)	2.1 × 10 ⁷ kN・m ² (1.00)																

※()内は、対PC下路桁との比率を示す。

(6) 阪神高速道路

阪神高速道路[2018]は、阪神高速 15 号堺線玉出入路への UFC 製床版の適用について報告している。床版のリニューアル工事にあたっては、近年の車両の大型化を考慮して、既存設備よりも耐久性の高い床版に取り替えることが求められるが、従来の材料で耐久性の高い床版を製造する場合、厚く重い構造になることから、下部構造物の補強も必要となる。本工事によると、架け替える床版を UFC 製とすることによって、従来の RC 製の約 80%に重量を抑えることができたことが報告されている。

(7) 小滝川橋（場所打ちによる施工）

渡邊ら[2015]は、エトリンナイト生成系 UFC（以下、Aft 系 UFC）を小滝川橋掛替え工事に適用した事例を報告している。実橋梁の建設において国内で初めて構造物全体を UFC の場所打ち施工で構築した事例である。使用された Aft 系 UFC の配合を表-2.7.5 に示す。自己収縮によるひび割れを抑制するため、収縮低減タイプの結合材と収縮低減剤が使用されている。また、施工が冬季であることと、現場で実現可能な養生方法とするため、適用した Aft 系 UFC の設計基準強度は 150N/mm^2 としている。実際の施工では、養生に熱交換式温風機が使用され、打込みから 48 時間は部材温度が 30°C を下回らないように管理された。その結果、圧縮強度は材齢 22 日で設計基準強度 (150N/mm^2) に達している。

表-2.7.5 Aft 系 UFC の配合

[渡邊ら[2015]]

水結合材 比 (%)	単用量 (kg/m ³)						補強 繊維 (kg)
	水*	結合材 (収縮低減型)	細骨材	収縮 低減剤	高性能 減水剤	消泡剤	
15.2	195	1287	905	12.9	36.0	6.4	137.4

※高性能減水剤中の水分を含む

2.8 2章のまとめ

既往の研究を調査した結果、下記のことがわかった。

- (1) UHPFRC (UFC) は、緻密化、収縮低減およびクリープ低減の観点から熱養生することが一般的となっている。しかしながら、養生中のエネルギーが高価であること、適用がプレキャストコンクリートに限定されることに加え、材料も限定的であることが課題となっている。このことから、一般的な材料で、かつ熱養生を行わなくても所定の性能を発揮する UFC の開発が必要と考えられる。
- (2) 一方、熱養生を行わない UFC の研究も行われているが、熱養生を行う UFC よりも強度特性が劣るものが多い。管理材齢を長くすれば、熱養生を行う UFC と同等の強度が得られる可能性もあるが、構造物の供用開始時期等を考慮すると、一般的なコンクリートと同程度の材齢 28 日以内で強度管理できる UCF が求められている。

また、UHPFRC は、その高い性能を発揮させるため、多量のセメントや結合材を使用する。そのため、一般のコンクリートよりも、材料が高価であることや、材料に起因する CO₂ 発生量も多い。UHPFRC は、供用後の修繕回数が一般のコンクリートよりも少なく、修繕や更新工事に関わる CO₂ 発生を抑制できると考えられるが、今後はさらに環境面を考慮して、結合材を減じることや環境負荷の小さい材料で同等の性能を有する UHPFRC の開発が必要と考えられる。

2.9 第2章の参考文献

- ACI 544.3R-93, Guide for specifying, proportioning, mixing, placing and finishing steel fiber reinforced concrete, 1998.
- Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances, Recommandations Provisoires, (Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrete) Interim Recommendations, SETRA-AFGC, Groupe de travail BFUP, Paris, France January 2002.
- Halit Yazıcı, Mert Y. Yardımcı, Hüseyin Yiğitler, Serdar Aydın, Selçuk Türkel, Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag, *Cement and Concrete Composites*, Vol.32, No.8, pp.639-648, 2010.
- Heng-Jing Ba, Ai-Li GUO, Ying-Zi Yan, Mix proportion optimization and shrinking of new developed reactive powder concrete, *Key Engineering Materials*, Vol.405/406 pp.37-43, 2009.
- Katrin Habel, Structural behaviour of elements combining Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPRFC) and reinforced concrete, in Faculté Environnement naturel, architectural et construit - Institut de structures - Section de Génie Civil. 2004, École Polytechnique Fédérale de Lausanne: Lausanne.
- M. Vigneshwari, K. Arunachalam, and A. Angayarkanni, Replacement of silica fume with thermally treated rice husk ash in reactive powder concrete, *Journal of Cleaner Production*, Vol.188, pp.264-277, 2018.
- N.A. Soliman and A. Tagnit-Hamou, Partial substitution of silica fume with fine glass powder in UHPC: Filling the micro gap, *Construction and Building Materials*, Vol.139, pp.374-383, 2017.
- Pierre Rossi, Ultra-High Performance Concretes. *Concrete International*, Vol.30, No.02, pp. 31-34, 2008.
- Pierre Rossi, Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concretes, *Concrete International*, Vol.23, No.12, pp. 46-52, 2001.
- R. Yu, P. Spiesz, and H.J.H. Brouwers, Development of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPRFC): Towards an efficient utilization of binders and fibres, *Construction and Building Materials*, Vol.79, pp.273-282, 2015.
- Sharifeh Vatannia, Elsabe Kearsley, Derek Mostert, Development of economic, practical

and green ultra-high performance fiber reinforced concrete verified by particle packing model, *Case Studies in Construction Materials*, Vol.13, pp.1-16, 2020.

- SINTEF Building and Infrastructure, Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) - State of art -, COIN Project 44 - 2012.
- Siphavanh Oudomsak, 藤原浩己, 丸岡正知, 大塚亮介：粉末度の異なる高炉スラグ微粉末を用いた超高強度繊維補強コンクリートの基本性状に関する研究, *Cement Science and Concrete Technology*, Vol.71, No.1, pp.509-516, 2017.
- S.L.Yang, S.G.Millard, M.N.Soutsos, S.J.Barnett, T.T.Le, Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC), *Construction and Building Materials*, 23, pp.2291-2298, 2009.
- Sung-Hoon Kang, Yeonung Jeong, Kiang Hwee Tan, Juhyuk Moon, High-volume use of limestone in ultra-high performance fiber-reinforced concrete for reducing cement content and autogenous shrinkage, *Construction and Building Materials*, Vol.213, pp.292-305, 2019.
- Su-Tae Kang, Yun Lee, Yon-Dong Park, and Jin-Keun Kim, Tensile fracture properties of an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) with steel fiber, *Composite Structures*, Vol.92, No.1, pp.61-71, 2010.
- Tanvir Ahmed, Mohamed Elchalakani, Ali Karrech, M.S. Mohamed Ali, and Lanhui Guo, Development of ECO-UHPC with very-low C₃A cement and ground granulated blast-furnace slag, *Construction and building Materials*, Vol.284, pp.1-17, 2021.
- Wei Chang, and Wenzhong Zheng, Effect of key parameters on fluidity and compressive strength of ultra-high performance concrete, *Structural Concrete*, Vol.21, No.2, pp.747-760, 2020.
- Zemei Wu, Kamal H. Khayat, and Caijun Shi, Changes in rheology and mechanical properties of ultra-high performance concrete with silica fume content, *Cement and Concrete Research*, Vol.123, pp.1-12, 2019.
- Zhengqi Li, Kaveh Afshinnia, and Prasada Rao Rangaraju, Effect of alkali content of cement on properties of high performance cementitious mortar, *Construction and Building Materials*, Vol.102, pp.631-639, 2016.
- 井口 舞, 藤原浩己, 丸岡正知, 遊佐源邦：常温硬化型超高強度鋼繊維補強コンク

リートの基本性状に関する実験的研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.68 No.1 pp.488-493, 2014.

- 石関嘉一, 平田隆祥, 片野啓三郎, 武田宣典: 鋼繊維の種類が高強度高じん性セメント複合材料の引張特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.215-220, 2010.
- 大塚亮介, 藤原浩巳, 丸岡正知, 渡邊郁尋: 各種繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリートの基本性状に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.72, No.1 pp.300-306, 2019.
- 大野俊夫, 坂井吾郎, 保利彰宏, 樋口正典: 超高強度繊維補強コンクリートの品質安定性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1265-1270, 2006.
- 鴨澤正美, 山田一夫: RPC を用いた超高強度・高じん性コンクリートの開発動向, コンクリート工学, Vol.39, No.2, pp.53-56, 2001.
- 川口哲生, 河野克哉, Eduardo Daniel: 常温で硬化させた RPC 系超高強度繊維補強コンクリートの諸特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.274-279, 2014.
- 川崎文義, 林 英輝, 蓮野武志, 別府 教, 栖原健太郎, 渡邊有寿, 青山達彦, 柳井修司: 場所打ちによる超高強度繊維補強コンクリート製道路橋の施工, 土木学会第 69 回学術講演会, V-253, pp.505-506, 2014.
- 黒岩 正, 岩崎郁夫, 大熊 光: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた国内初の道路橋—東九州自動車道堀越 C ランプ橋—, コンクリート工学, Vol.43, No.10, pp.39-44, 2005.
- 佐伯登志夫: 羽田空港 D 滑走路建設工事の概要, コンクリート工学, Vol.49, No.1, pp.110-112, 2011.
- 島崎利孝, 橋本 理, 小栗直幸, 石田征男: 既設 RC 床版上面増厚工法への場所打ち UFC の適用性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, 2019.
- 田中敏嗣, 新藤竹文, 横田 弘, 下村 匠: 超高強度繊維補強コンクリート中における鋼繊維の腐食に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.267-272, 2004.
- 田中良弘, 武者浩透, 下山善秀, 小林忠司: PC 橋梁に用いた超高強度繊維補強コン

クリートの用途開発, コンクリート工学, Vol.41, No.3, pp.26-32, 2003

- 田中良弘, 小林 隆, 石堂政之, 大川真佐雄: 超高強度繊維補強コンクリートを適用した長大スパン・モノレール桁の技術開発, コンクリート工学, Vol.45, No.11, pp.27-34, 2005.
- 田中良弘, 横田 弘, 岩波光保, 前堀伸平: 超高強度繊維補強コンクリートの気中, 水中曲げ疲労特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1309-1314, 2005.
- 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113, 2004.
- 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術評価 報告書, 技術推進ライブラリーNo.3, 2006.
- 橋本 理, 渡部孝彦, 武田 均, 武者浩透: 常温環境下での強度発現性を高めた超高強度繊維補強コンクリートの強度発現性状:土木学会第 72 回学術講演会, V-387, pp.773-774, 2017.
- 阪神高速道路株式会社: 国内初! 「超高強度繊維補強コンクリート (UFC) 道路橋床版」を適用, 報道発表資料, 2018 年 11 月 26 日
- 松原功明, 大野俊夫, 坂井吾郎, 山田真人: 超高強度繊維補強コンクリートの諸特性に及ぼす鋼繊維の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1253-1258, 2006.
- 武者浩透, 大竹明朗, 横井謙二, 野口孝俊: 高耐荷 UFC 床版構造と量産化システムの開発, コンクリート工学, Vol.48, No.11, pp.28-35, 2010.
- 森香奈子, 河野克哉, 奥山幸成, 榎本 弘: 集束 PBO 繊維を使用した超高強度繊維補強コンクリートの力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.244-249, 2012.
- 森川陽平, 谷村幸裕, 神尾 正, 大熊 光: 三岐鉄道「萱生川橋梁」の設計と施工—世界初の UFC 鉄道橋—, コンクリート工学, Vol.49, No.4, pp.39-45, 2011.
- 柳井修司, 松原功明, 相澤一裕, 芦田公伸: 超高強度繊維補強コンクリートの強度特性に及ぼす養生条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1259-1264, 2006.
- 柳井修司, 坂井吾郎, 大野俊夫, 芦田公伸: 超高強度繊維補強コンクリートの大量製造性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.145-150, 2007.

- 渡邊芳春, 芦田公伸, 相澤一裕, 柳井修司 : 200N/mm² 級超高強度繊維補強コンクリートの耐久性と微細組織, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1271-1276, 2006.
- 渡邊有寿, 柳井修司, 入内島克明, 栖原健太郎 : 超高強度繊維補強コンクリート (UFC) を場所打ちで施工した PC 橋—小滝川橋—, コンクリート工学, Vol.53, No.7, pp.629-634, 2015.
- 渡邊有寿, 柳井修司, 宮口克一, 藤原浩己 : 超高強度繊維補強コンクリートの海洋環境暴露後の疲労特性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.217-222, 2017.
- 渡部孝彦, 橋本 理, 石井祐輔, 前堀伸平, 池田正行, 五島元樹 : UFC 歩道橋「酒田みらい橋」の供用 15 年次調査から見る UFC 構造物の耐久性, 大成建設技術センター報, 第 51 号, 2018.

第 3 章

配合設計

第3章 配合設計

3.1 検討目的

常温環境下で所要の性能（圧縮強度 180N/mm^2 ，引張強度 8.8N/mm^2 など）を発揮する UFC には，早期強度発現性と高い流動性の両方を満足する材料の選定と繊維の分散性および分離抵抗性を考慮した配合設計が必要とされる。そこで本章では，市販材料を対象に熱養生しない UFC に適した材料および配合条件について，室内実験において詳細に検討した。

3.2 ベースモルタルの設計

UFC は圧縮強度が 200N/mm^2 程度の超高強度モルタルと 2000N/mm^2 以上の高張力の鋼繊維から構成されている。本研究では先ず鋼繊維を添加しないベースモルタルについて検討することとした。

これまで，熱養生を行わない UFC に関する高性能セメント系材料について，井口ら[2014]，Oudomsak ら[2017]が検討しているものの，数種類の市販セメントや混和材（以下，粉体）を同一条件で比較した事例は少ない。このため，本章では，5種類のセメントおよび4種類の粉体を使ってフレッシュ性状と強度性状を調べることにした。本研究で対象としている UFC は生コン工場における製造を想定しているため，細骨材については一般の工場で使用可能な JIS A 5005 に適合する砕砂を使用した。

また，現場における UFC の圧縮強度の特性値は，UFC 指針[2004]に示される熱養生を行う UFC と同じ 180N/mm^2 とし，本研究では，ばらつきも考慮して，実験室における目標圧縮強度を 200N/mm^2 とした。

3.2.1 実験概要

(1) 使用材料

検討した5種類のセメントと4種類の粉体の詳細をそれぞれ表-3.2.1，表-3.2.2に示す。セメントには，汎用性が高く，各種工事全般に使用されている A， C_3S 量を高めて早期強度を必要とする工事に適用される B， C_3A 量を少なくして流動性を高めた C， C_3S 量と C_3A 量を少なくして高強度コンクリートやマスコンクリートなどに使用される D と E を使用した。なお， C_3S ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) とは，けい酸三カルシウムのことで，水和反

応速度が比較的早く、材齢 28 日以内の早期の強度発現に寄与する。また、C₃A (3CaO·Al₂O₃) とは、アルミン酸三カルシウムのことで、水和反応速度が非常に早い化合物である。また、P1～P3 は反応性を持つ粉体であり、P4 は反応性を示さない粉体である。また、使用した細骨材の物性を表-3.2.3 に示す。この細骨材は、圧縮強度 100N/mm² を超える高強度コンクリートの実績をもつ生コン工場で使用されているものである。いずれの配合においても、一貫してポリカルボン酸系の化学混和剤（高性能減水剤）を使用した。

表-3.2.1 使用セメントの化学組成と物理的性質

セメント 種類	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)	ig.loss (%)	SO ₃ (%)	R ₂ O (%)
A	3.16	3280	59.6	13.8	8.9	9.6	2.28	1.98	0.437
B	3.14	4570	64.3	9.6	9.5	8.2	1.11	2.89	0.431
C	3.20	3260	50.7	26.9	2.9	12.9	1.02	2.29	0.308
D	3.21	3630	27.4	51.1	4.8	9.4	0.7	2.7	0.358
E	3.24	3560	16.0	64.0	2.9	10.0	0.76	2.68	0.335

表-3.2.2 使用粉体の性質

粉体 種類	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	ig.loss (%)	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)	R ₂ O (%)
P1	2.20	176000	2.58	91.11	0.67	0.25	0.70	2.035
P2	2.20	4110	2.88	60.31	3.16	22.11	0.58	1.625
P3	2.91	4780	0.62	28.72	44.95	13.54	3.91	0.407
P4	2.70	4570	43.49	0.30	55.45	0.05	0.02	0.010

表-3.2.3 使用細骨材の物性

表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粒形判定実積率 (%)	粗粒率
2.62	2.45	54.5	2.84

(2) 配合

セメント種類の影響を調べるためのベースモルタルの配合を表-3.2.4に示す。水結合材比（以下、W/B）は14%および16%の2水準とした。全ての配合について、反応性のある微細な粉体P1を結合材としてセメント質量の15%添加した。

次にW/Bの影響を調べるための配合を表-3.2.5に示す。W/Bの範囲は14%~17%としたが、一部の水準では19%、21%、23%でも実施した。なお、セメントにはセメントC（以下、Cと略記）を使用した。

粉体種類の影響を調べるための配合を表-3.2.6に示す。この水準では各粉体を結合材とみなして、それぞれ結合材質量の10、20、30%となるように置換した。

次にP1の添加率の効果を調べるための配合を表-3.2.7に示す。P1はセメントに内割置換するものとし、質量置換率は5%から30%まで5%刻みで変化させた。なお、P4と細骨材はいずれの配合でも容積比で1:1の割合で使用することとした。

細骨材を粉体で置換した場合の配合を表-3.2.8に示す。置換する粉体はP2、P3、P4とし、容積置換率を30、50、70、100 vol.%とした。

表-3.2.4 セメント種類の影響評価のための配合

セメント 種類	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)				高性能減水剤 (%)
		W	Cem.	P1	S	
A	14	220	1336	236	603	2.50
	16	220	1169	206	776	1.50
B	14	220	1336	236	597	2.30
	16	220	1169	206	770	1.55
C	14	220	1336	236	616	1.50
	16	220	1169	206	789	1.20
D	14	220	1336	236	621	2.00
	16	220	1169	206	791	1.80
E	14	220	1336	236	631	2.00
	16	220	1169	206	799	2.00

表-3.2.5 W/Bの影響評価のための配合

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)				高性能減水剤 (%)
	W	C	P1	S	
14	180	1093	193	969	1.80
	200	1214	214	796	1.65
	220	1336	236	616	1.50
	240	1457	257	440	1.35
15	180	1020	180	1045	1.80
	200	1133	200	878	1.60
	220	1247	220	707	1.40
	240	1360	240	540	1.30
16	180	956	169	1111	1.75
	200	1063	188	951	1.45
	220	1169	206	789	1.20
	240	1275	225	629	1.20
17	180	900	159	1171	1.70
	200	1000	176	1014	1.25
	220	1100	194	859	1.15
	240	1200	212	705	1.10
19	220	984	174	977	0.90
21	220	890	157	1077	0.65
23	220	813	143	1155	0.40

表-3.2.6 粉体種類の影響評価のための配合

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)							高性能減水剤 (%)
	W	C	P1	P2	P3	P4	S	
16	220	1238	138	-	-	-	812	1.20
	220	1100	275	-	-	-	762	1.45
	220	963	413	-	-	-	710	2.50
	220	1238	-	138	-	-	812	1.50
	220	1100	-	275	-	-	762	1.40
	220	963	-	413	-	-	710	1.65
	220	1238	-	-	138	-	854	2.15
	220	1100	-	-	275	-	841	2.05
	220	963	-	-	413	-	831	1.90
	220	1238	-	-	-	138	844	0.95
	220	1100	-	-	-	275	823	0.80
	220	963	-	-	-	413	802	0.70

表-3.2.7 P1の置換率を検討した配合

W/B (%)	P1 (%)	単位量(kg/m ³)					高性能減水剤 (%)
		W	C	P1	P4	S	
16	5	230	1366	72	392	380	1.65
	10	230	1294	144	381	369	1.30
	15	230	1222	216	365	354	1.40
	20	230	1150	288	351	341	1.85
	25	230	1078	359	338	328	2.30
	30	230	1006	431	324	314	3.00

表 3.2.8 細骨材を粉体で一部代替置換した配合

W/B (%)	P2, P3, P4 (vol.%)	単位量 (kg/m ³)							高性能減水剤 (%)
		W	C	P1	P2	P3	P4	S	
16	30	230	1222	216	178	-	-	495	1.30
	50				297	-	-	354	1.45
	70				416	-	-	212	1.65
	100				594	-	-	-	3.00
	30				-	236	-	495	1.35
	50				-	393	-	354	1.50
	70				-	550	-	212	1.75
	100				-	786	-	-	2.80
	30				-	-	219	495	1.30
	50				-	-	365	354	1.40
	70				-	-	510	212	1.55
	100				-	-	729	-	1.75

(3) 実験方法

(a) 練混ぜ方法

練混ぜには、容量 5L のホバートミキサを使用した。セメント、粉体および細骨材を投入して 30 秒間攪拌し、水と高性能減水剤を投入して 10 分間練り混ぜた。練混ぜ中の状況を図-3.2.1 に示す。注水後、徐々にモルタルの小さい塊が形成されるが、その塊が一体化した状態を「軟化」とし、注水から軟化までの時間を測定した。

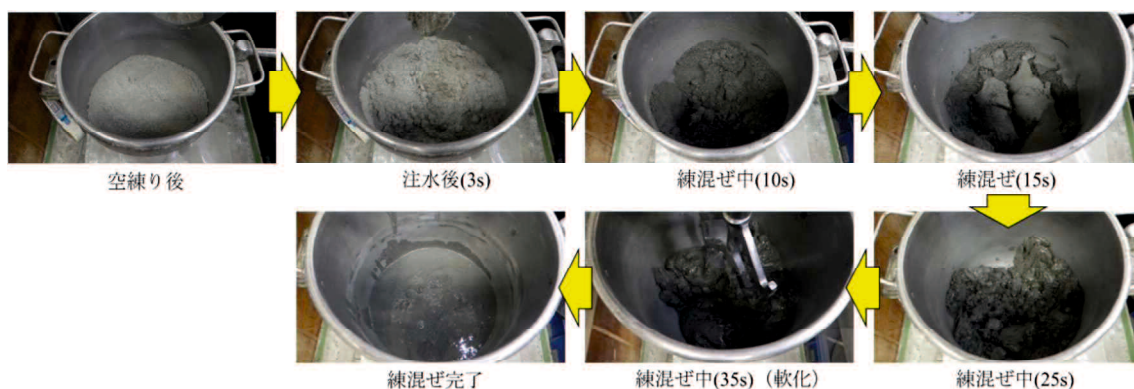


図-3.2.1 練混ぜ中のモルタルの状況例 (W/B=15%, W=220kg/m³)

(b) フロー試験方法

フロー試験は JIS A 5201 を参考に落下を与えないフローを測定した。また、フローが 250mm に到達するまでの時間を測定した。

(c) 粘度の測定方法

粘度の測定には Brookfield 社製の回転粘度計を使用した。

(d) 圧縮強度試験方法

圧縮強度試験は JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従って実施した。圧縮強度試験では、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体を用いた。

(e) 細孔径分布の測定方法

細孔径分布の測定には全自動細孔径分布測定装置 Pore Master 60-GT を使用した。

3.2.2 実験結果および考察

(1) セメントの影響

セメント種類を変えたときの C_3A の量と、フロー300mm に要する高性能減水剤添加率の関係を図-3.2.2 に示す。W/B=14%の場合、同一フローを得るための高性能減水剤添加率は、 C_3A の量に概ね比例している。セメント協会[1991]によると、 C_3A の水和は急速に進むことが知られており、これを抑制するためにセメントには石膏が添加されている。石膏は水に溶けて C_3A と反応し、エトリンガイトを生成する。これが C_3A の表面に生成することで、 C_3A が水と接触するのを抑制し、水和反応の速度を適度に遅らせてしている。 C_3A の含有量が多いセメントの場合、 C_3A の水和反応が多く、エトリンガイトが生成しても C_3A の水和反応を十分に抑制できず、初期の水和反応に消費される水が

増加している可能性がある。また、Yoshioka[2002]らによると、 C_3A は C_3S と C_2S よりも多くの減水剤を吸着することが報告されている。このため、本実験においても C_3A 含有量の多いセメントを使用した場合、流動性を得るための高性能減水剤の添加率が大きくなったと考えられる。この試験結果は、適切な流動性を維持するために、UFC には C_3A 含有量の少ないセメントが望ましいことを示唆している。なお、 $W/B=16\%$ の配合では、結合材に対する水の割合が比較的多いため、同様の傾向はみられなかったものと考えられる。

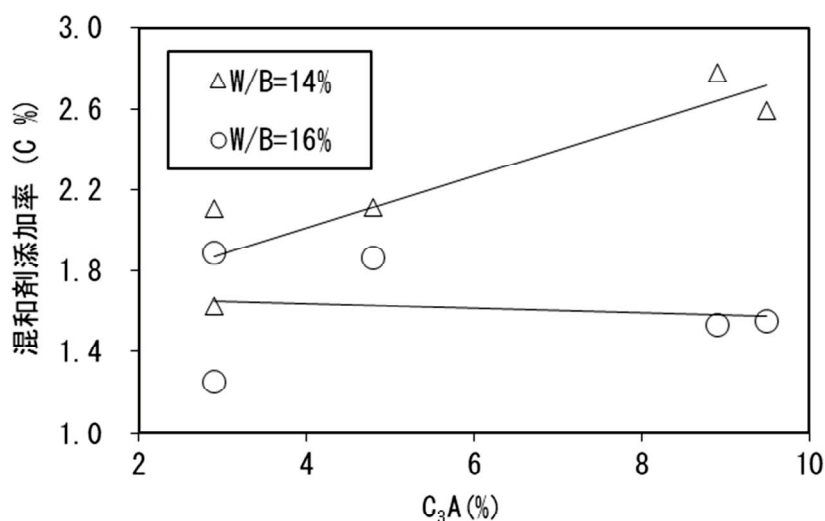


図-3.2.2 C_3A 量と高性能減水剤の添加率との関係

圧縮強度の試験結果を図-3.2.3 に示す。セメント C を使用したベースモルタルの 28 日圧縮強度は $200N/mm^2$ を超過し、既往の研究等で報告される熱養生した UFC とほぼ同等であった。なお、セメント A を用いた $W/B=14\%$ のモルタルは、 $W/B=16\%$ のモルタルよりも圧縮強度が低かった。これは、図-3.2.4 に示すようにセメント A の高性能減水剤の添加率は著しく高く、そのため、材齢 28 日時点でも硬化が遅延したことが一因と考えられる。また、図-3.2.4 にはフローの測定結果も併記しているが、セメント A を使用した $W/B=14\%$ のモルタルのフローは約 270mm であり、高性能減水剤添加率が最も高いにも関わらず、セメント C・D・E を使用したモルタルのフローよりも小さかった。図-3.2.4 に示すように C_3A 量の少ないセメント (D・E) を使用したモルタルは、比較的高いフロー値を示したが、それらの圧縮強度は、セメント C のモルタルよりも小さくなった。

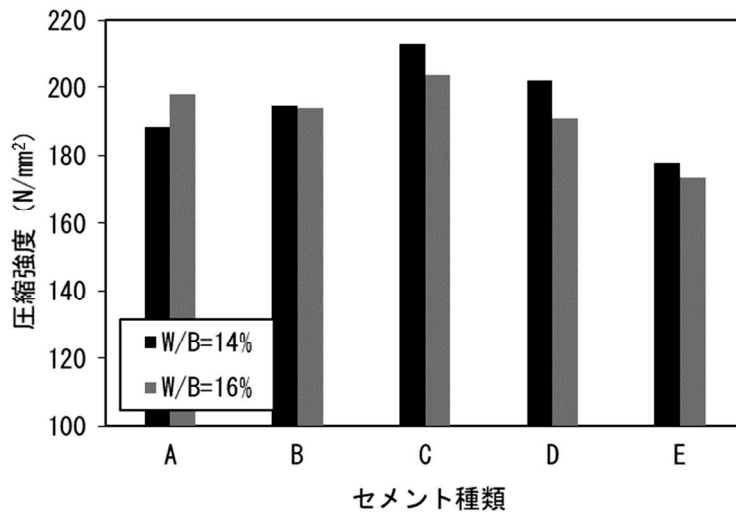


図-3.2.3 圧縮強度の測定結果 (材齢 28 日)

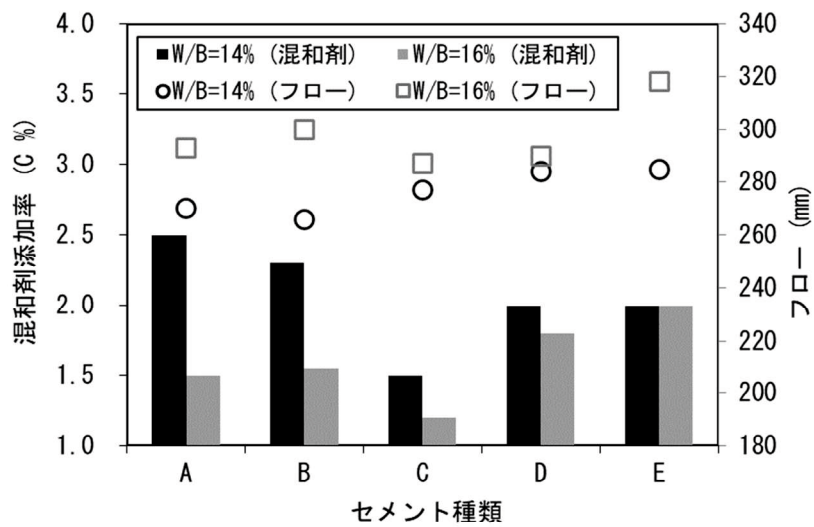


図-3.2.4 混和剤の添加率とフロー

C₃S の含有量と圧縮強度の関係を図-3.2.5 に示す。C₃S の含有量に伴って圧縮強度は増加し、C₃S 含有量の小さいセメントでは、材齢 28 日の圧縮強度 200N/mm² を満足できなかった。コンクリート技術の要点[2021]によると、C₃S の水和反応速度は比較的速く、材齢 28 日以内の強度発現に寄与し、C₂S の水和反応速度は遅く、材齢 28 日以後の長期強度に寄与するといわれている。また、依田ら[2014]の鉱物組成の異なるセメントを用いたセメントペーストの強度試験によると、材齢 28 日の圧縮強度は C₃S が多いセメントを用いたセメントペーストの方が大きくなったことが報告されている。これらの結果から C₃A が低くかつ C₃S が高いセメントが熱養生不要な UFC を製造するのに適しているものと判断した。

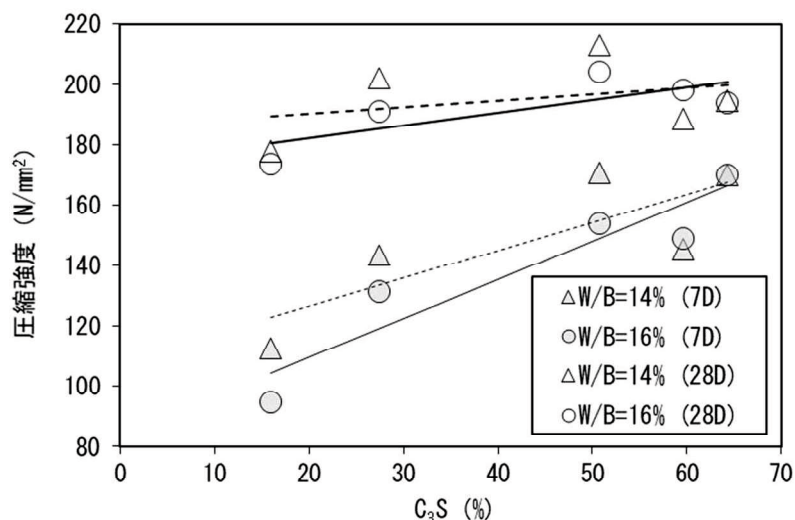


図-3.2.5 C₃S と圧縮強度の関係

ここで W/B=14% のモルタルの空隙率 (3nm~60μm) を図-3.2.6 に示す。セメント C を使用したモルタルは、材齢 28 日の圧縮強度が 210N/mm² と最も高く、空隙率は最も小さかった。UFC 指針[2004]によると、熱養生した UFC の空隙率は 4% 程度であり、主に 3~6nm の細孔で構成されるが、図-3.2.6 に示すように、本研究のモルタルの空隙率は、これらよりも大きくなった。最も高い強度を示したセメント C によるモルタルについても、6~10nm および 10~100nm の細孔が細孔径分布の約 60% を占めている。しかしながら、一般的な高強度コンクリートの空隙率 9% と比較すると十分に緻密である。これらの結果に基づいて、以降の試験ではセメント C を使用することとした。

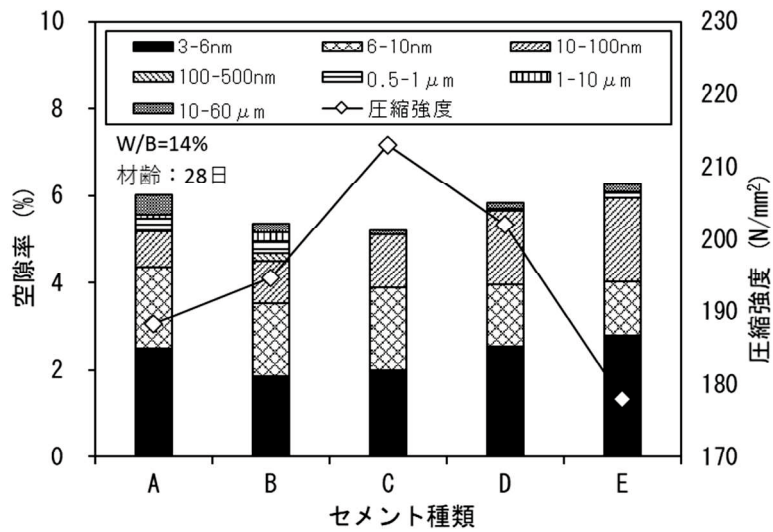


図-3.2.6 空隙率と圧縮強度

(2) W/B の影響

UFC の練混ぜ時間は一般的なコンクリートよりも長くなることから、練混ぜ時間は工場からの供給量に大きく影響を与える。そのため UFC の流動性や強度などの性能を満足する範囲で、可能な限り練混ぜ時間を短くする必要がある。

各材料を投入後、練混ぜ開始から軟化するまでの時間を図-3.2.7 に示す。なお凡例はベースモルタルの単位水量 (kg/m³) を示している。この結果より、W/B が低く、単位水量が少ないモルタルでは、軟化までの練混ぜ時間が著しく長くなることがわかる。

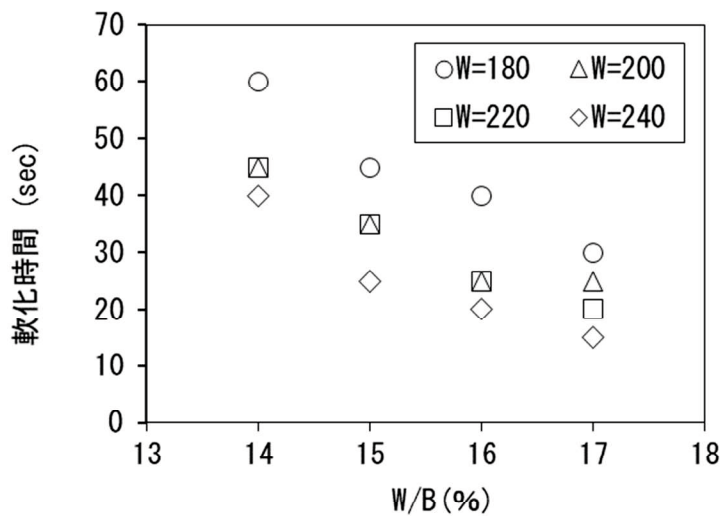


図-3.2.7 W/B と軟化時間の関係

図-3.2.8 に示す W/B と高性能減水剤添加率の関係によると、W/B や単位水量の増加に応じて、フロー300mm に要する高性能減水剤添加率が減少する。結合材に対して高性能減水剤の添加率が多くなると、一般に凝結時間が長くなるため、生コン工場で UFC を製造する際は、現場までの運搬時間や可使時間を考慮して適切に定める必要がある。

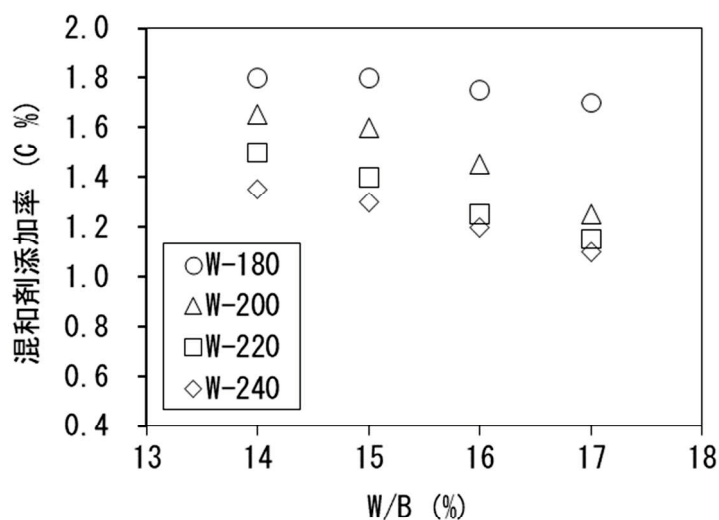


図-3.2.8 W/B と混和剤の添加率の関係

ここで、フローと粘度の関係を図-3.2.9 に示す。モルタルの粘度は、W/B=14~17%の範囲では、フローと負の線形関係にあったが、同一フローであれば、W/B が粘度に与える影響は明確ではなかった。

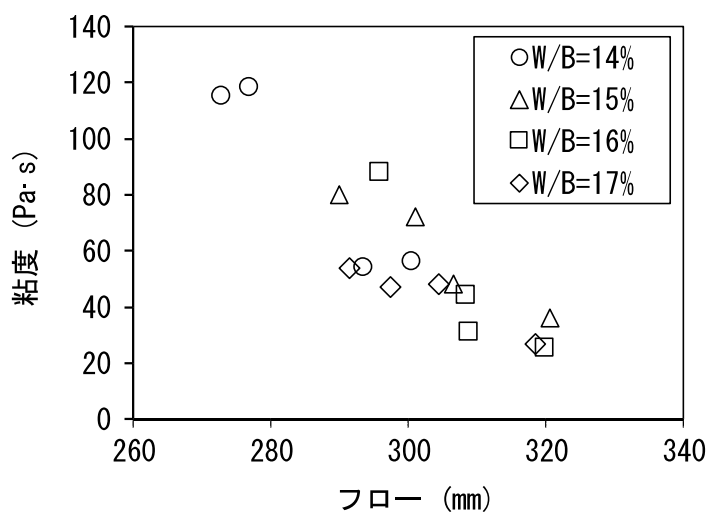


図-3.2.9 フローと粘度の関係

結合材水比 B/W と圧縮強度の関係を図-3.2.10 に示す。 W/B が 14~17%の範囲では、いずれも圧縮強度は 200N/mm^2 を満足する。しかし、単位水量 180kg/m^3 の配合では、低 W/B (高 B/W) において、他の配合よりも著しく低い強度を示した。これはベースモルタルの流動性に起因するものと考える。 $W/B=14\%$ 以外の配合では、単位水量によらず概ね同等の圧縮強度を示したが、 $W/B=14\%$ の配合では、単位水量が多いほど圧縮強度が高くなった。

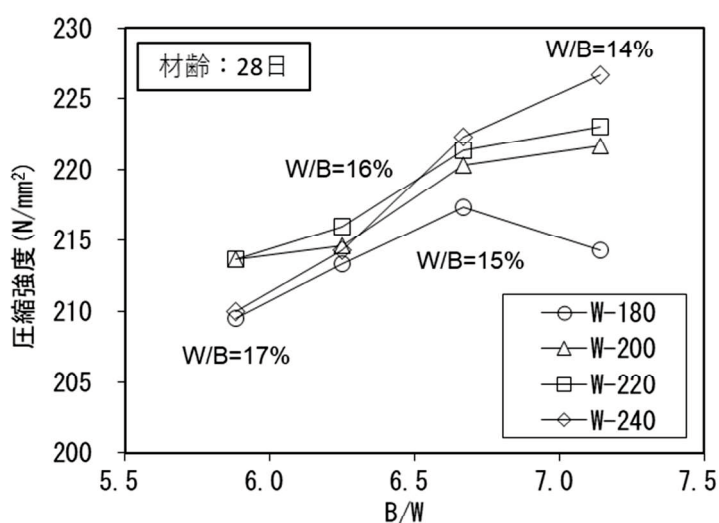


図-3.2.10 B/W と圧縮強度の関係

この結果を踏まえて、単位水量 220kg/m^3 の配合について、 $W/B=14\sim 23\%$ の範囲で圧縮強度を調べた。 B/W と圧縮強度の関係を図-3.2.11 に示す。 $W/B=14\sim 21\%$ の範囲において、圧縮強度は B/W に概ね比例していたが、 $W/B=23\%$ の圧縮強度はこの比例関係から逸脱して低くなった。同様の現象が伊藤ら[2003]、小林ら[2008]、山田ら[2005]、河上ら[2002, 2006]、湯浅ら[2007]、松本ら[2008]の研究でもみられている。 B/W が一定の値よりも大きくなると、圧縮強度の増加割合が小さくなるのは、骨材とペーストの付着力や骨材自体の強度が影響することや、水和反応が進行し、硬化体内部の反応水が不足するため、水和反応やポズラン反応の進行が緩慢になる可能性が指摘されている。これらの結果から、熱養生しないUFCには、 $W/B=21\%$ 以下が適当と考えられる。これはUFC指針に記載されている W/B の最大値 ($W/C=24\%$) よりも 3%小さいものである。

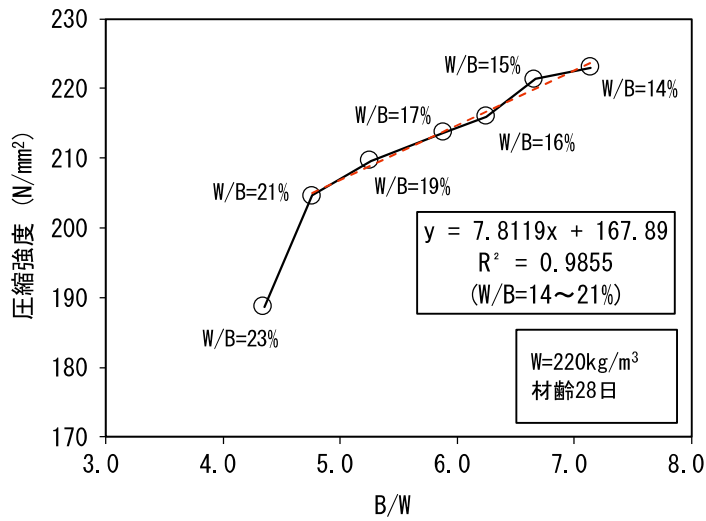


図-3.2.11 B/W と圧縮強度の関係

(3) 粉体材料の影響

粉体 P1～P4 をセメントに 10～30%質量置換した場合のモルタルのフローを図-3.2.12 に示す。P2・P3・P4 では、置換率によらずフローの有意な差異は認められなかった。しかしながら、P1 ではセメント置換率に応じてフローは著しく小さくなり、高性能減水剤の添加率を高めても改善できなかった。これは、P1 の比表面積が 176,000cm²/g と他の粉体よりも粒子が著しく小さいことによる結果と思われる。

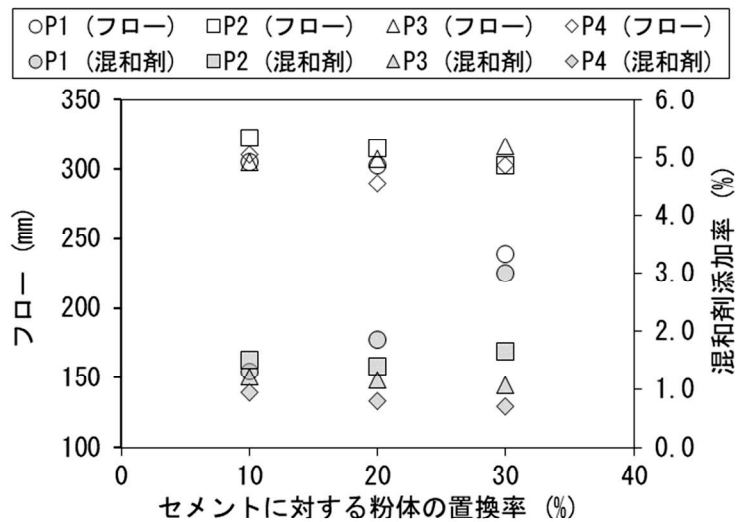


図-3.2.12 各粉体の置換率とフローおよび高性能減水剤の添加率

セメントに対する各粉体の置換率とモルタルフローの 250mm 到達時間の関係を図-3.2.13 に示す。P1 を 10～20%置換した場合、P2～P3 の粉体を用いたモルタルよりもフロー到達時間が短くなった。これは P1 の微粒子によるボールベアリング効果によるものである。UFC は W/B が極めて小さいため粘性が高くなる。流動性向上に寄与する P1 のような粉体の使用は有効と考える。

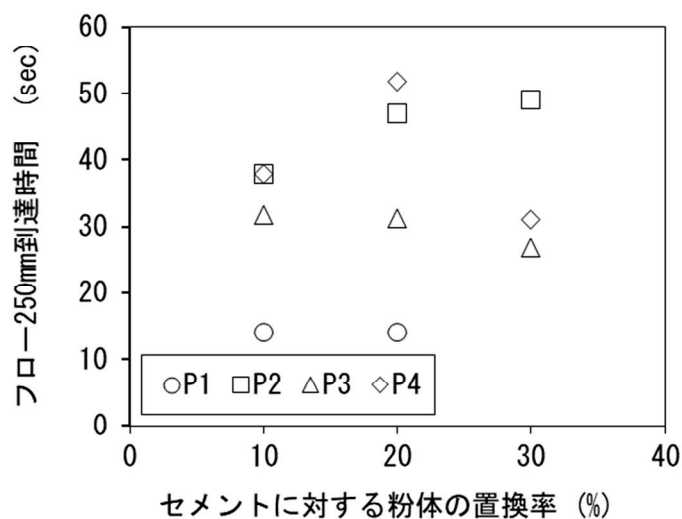


図-3.2.13 各粉体の置換率とフロー到達時間との関係

P1 のセメント置換率と高性能減水剤添加率およびフローの関係を図-3.2.14 に示す。フローがほぼ同じになるように高性能減水剤の添加率を調整したところ、置換率 20%以上の場合は高性能減水剤の添加率が著しく高くなった。また、P1 置換率 25～30%においては、高性能減水剤添加率を増やしてもフローは低下した。なお、使用した高性能減水剤の添加率が 2%以上となると、凝結時間に悪影響を及ぼすため注意が必要である。

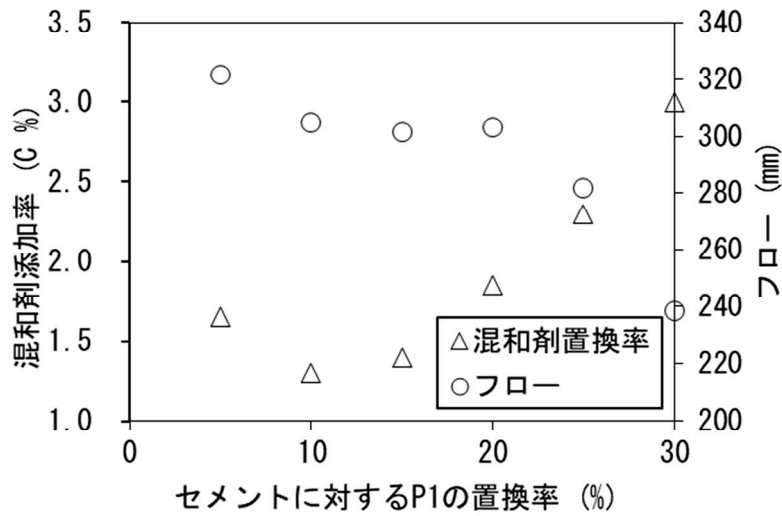


図-3.2.14 P1の置換率と高性能減水剤の添加率およびフロー

P1のセメント置換率とモルタルフローの250mm到達時間を図-3.2.15に示す。250mm到達時間はP1の置換率が20%まではほぼ一定だったが、それ以上になると到達時間が著しく長くなった。これらの結果より、適切なP1の置換率はセメント質量の20%以下と考えられる。

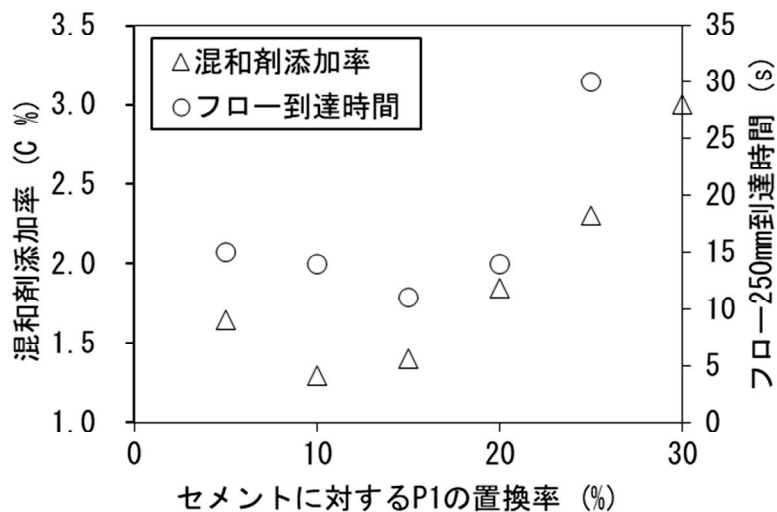


図-3.2.15 P1の置換率と高性能減水剤の添加率およびフロー到達時間

次に、他の粉体 P2・P3・P4 を細骨材に容積置換した場合における高性能減水剤添加率や粘度との関係を図-3.2.16 に示す。いずれも細骨材置換率に応じて高性能減水剤の添加率も増加したが、P4 を使用することで高性能減水剤添加率を P2・P3 より小さくできた。この P4 の効果は、粒子形状と化学組成に起因する可能性がある。UFC の製造には、高性能減水剤添加率と粘度を抑制できる P4 のような粉体を適切に使用することが望ましいと判断した。

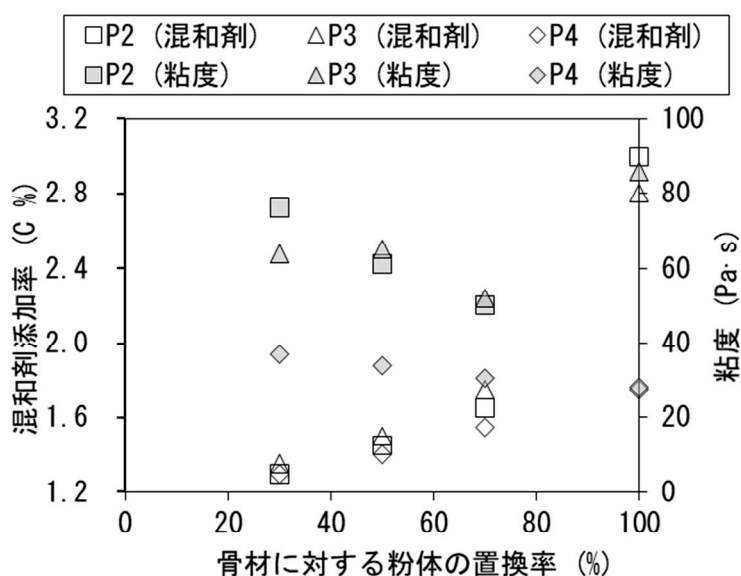


図-3.2.16 各粉体の置換率と高性能減水剤および粘度

P1～P4 のセメント置換率と圧縮強度の関係を図-3.2.17 に示す。多くの粉体では置換率の増加に応じて圧縮強度が小さくなったが、反応性を有する粉体 P3 では、30%置換すると比較的高い圧縮強度を示した。また、P1 を 10～20%質量置換したモルタルの圧縮強度は、他よりも優れた強度発現を示した。P1 は粉末度が高くポズラン反応を有する粉体材料のためである。P1 を 30%まで置換すると、前述したように高性能減水剤添加率が高くなり、凝結遅延が生じ、さらにモルタルの流動性が低くなることで、充てん率が低下し、その結果、圧縮強度が小さくなったものと推察される。

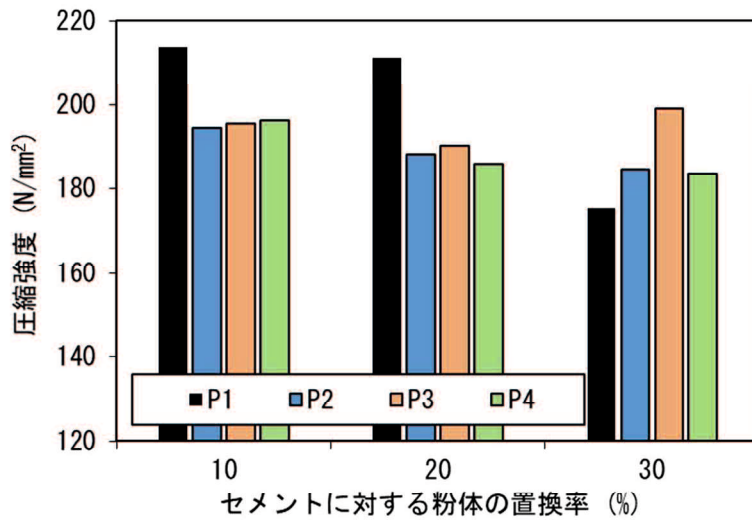


図-3.2.17 粉体の置換率と材齢 28 日の圧縮強度

P1 のセメント置換率に応じて変化する圧縮強度を図-3.2.18 に示す。材齢 28 日の圧縮強度は、置換率 20%以上となると顕著に低下した。前述した流動性の評価では、P1 の置換率が 20%までフローは低下しなかったことから、圧縮強度の発現まで勘案すると、P1 置換率は 15%以下が望ましいと判断した。

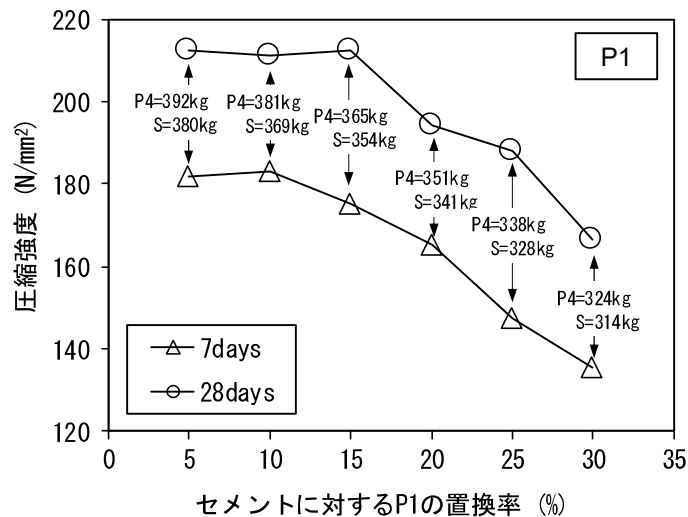


図-3.2.18 P1 の置換率と圧縮強度との関係

P2・P3・P4の細骨材に対する容積置換率と圧縮強度の関係を図-3.2.19に示す。図-3.2.16に示したようにP2・P3を100%骨材に置換した場合は、高性能減水剤添加率によらず流動性が低下し、さらに図-3.2.19に示すように圧縮強度も低下することがわかった。一方、P4を細骨材に置換したモルタルは、その置換率によらず、200N/mm²以上の圧縮強度を示した。

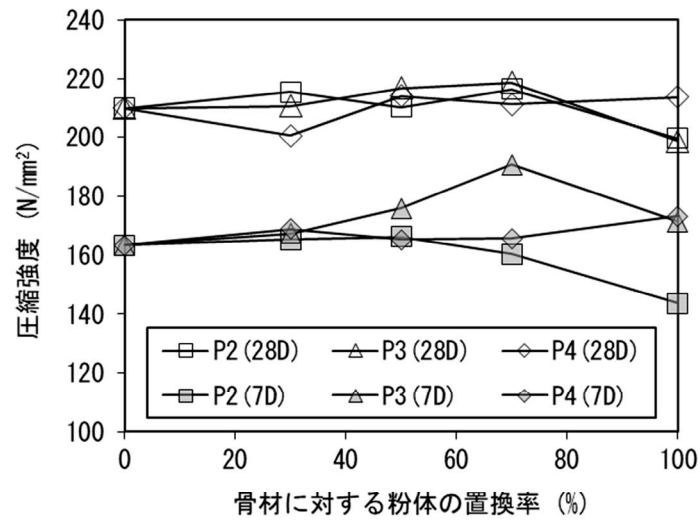


図-3.2.19 粉体の置換率と圧縮強度との関係

3.3 UFC の配合設計

3.3.1 実験概要

前章で得られたベースモルタルに鋼繊維を混入し、UFC としてのフレッシュ性状や強度性状を確認した。なお、本章では全ての配合にセメント C を使用し、石関ら[2010]の研究で良好な性能が確認されている鋼繊維を使用した。

(1) 使用材料

ベースモルタルには前章と同じ材料を使用した。直径 0.16mm、長さ 13mm、引張強度 2000N/mm² 以上の鋼繊維 (SF) を使用した。なお、鋼繊維は、延伸製法により製造された自動車タイヤに使用するスチールコードである。表面は真ちゅうでメッキ処理されている。

(2) 配合

骨材量の影響を調べるための配合を表-3.3.1 に示す。単位水量を 180~280kg/m³ まで変化させて細骨材量を調整した。なお、いずれの配合でも P1 の使用量は結合材の質量置換率 15%とした。

材料分離を評価するための配合表を表-3.3.2 に示す。水、セメント、粉体、細骨材および鋼繊維の量を一定とし、高性能減水剤の量のみを変化させた。

表-3.3.1 細骨材量の影響を調査した配合

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)				SF (vol.%)	高性能減水剤 (%)
	W	C	P1	S		
16	180	956	169	1111	2.0	1.55
	200	1063	188	951		1.35
	220	1169	206	789		1.25
	230	1222	216	707		1.25
	240	1275	225	629		1.20
	260	1381	244	464		1.20
	280	1488	263	301		1.15

表-3.3.2 材料分離を評価した配合

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)					SF (vol.%)	高性能減水剤 (%)
	W	C	P1	P4	S		
16	220	1169	206	405	393	2.0	1.20
							1.30
							1.40
							1.60
							1.80

圧縮強度および曲げ強度に与える材齢の影響を調べるための配合を表-3.3.3 に示す。配合は W/B を 16% とし、P1 の使用量は結合材の 15 質量% とした、なお粉体 P4 と細骨材は容積比で 1:1 とした。

表-3.3.3 圧縮強度および曲げ強度に与える材齢の影響を評価した配合

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)					SF (vol.%)	高性能減水剤 (%)
	W	C	P1	P4	S		
16	230	1222	216	365	354	2.0	1.25

(3) 実験方法

(a) 練混ぜ方法

練混ぜには、必要量に応じて容量 5L のホバートミキサもしくは容量 55L の二軸強制練りミキサを使用した。セメント、粉体および細骨材を投入して 30 秒間攪拌し、水と混和剤を投入して 10 分間練り混ぜた。その後、鋼繊維を投入してさらに 1 分間攪拌した。

(b) フレッシュ性状の試験

前章同様の方法でフローおよび粘度を測定した。さらに練り上がった UFC を円柱 (φ

52×250mm) に打ち込み、分離抵抗性を評価するため振動数が 140～180Hz の軽便壁打型バイブレータで 60 秒間締め固めた。硬化後（材齢 7 日後）に 3 つ（上層，中層，下層）に切断し（図-3.3.1），それぞれの層の密度を測定した。

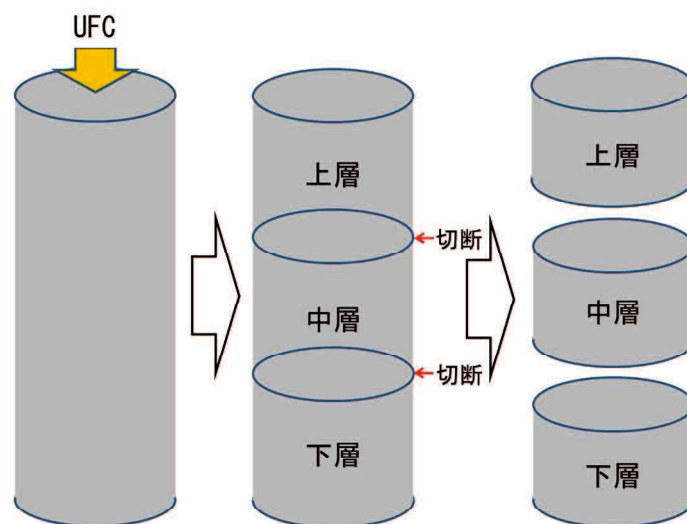


図-3.3.1 材料分離の評価方法

(c) 強度試験方法

圧縮強度試験は、前章と同様に $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体を用い、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従って実施した。曲げ強度試験は JIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」に従って実施した。供試体の寸法は $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱とした。

3.3.2 実験結果および考察

(1) 細骨材量の影響

細骨材量に伴い鋼繊維の分散性にも影響が及ぶことから、本章では単位細骨材量とUFCのフレッシュ性状の関係について実験的に調査した。単位細骨材量と高性能減水剤の添加率および粘度との関係を図-3.3.2に示す。同一フローを得るための高性能減水剤の添加率は、単位細骨材量が多いほど（単位水量が少ないほど）大きくなり、UFCの粘度は単位細骨材量が増えるほど（ペースト量が少なくなるほど）小さくなった。これは、単位細骨材量が増えると練混ぜ水を拘束する微粉末材料が減少するためである。

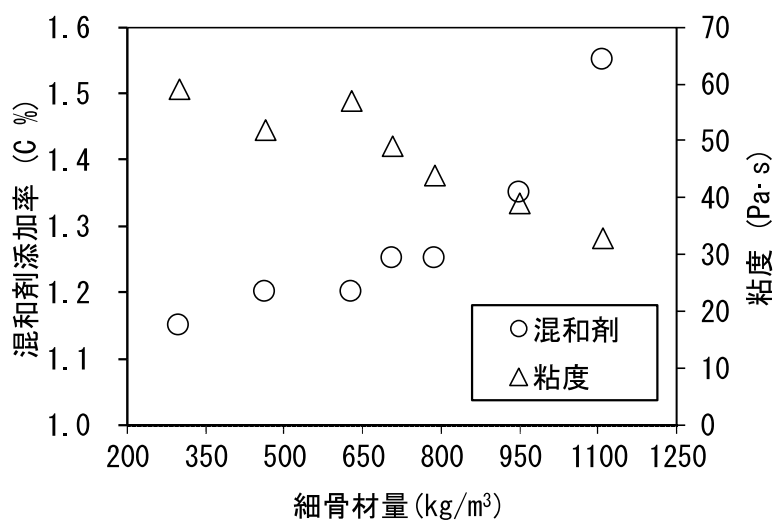


図-3.3.2 単位細骨材量と高性能減水剤の添加率の関係

単位細骨材量の異なる UFC のフロー試験後の状況を図-3.3.3 に示す。単位細骨材量が増えるほど、鋼繊維の分散が悪く、ファイバーボールが顕著にみられる。単位細骨材量を増やすと、粘度が下がりワーカビリティは向上するが、ここに示す鋼繊維の分散状況から判断すると、レディーミクストコンクリートの JIS に準拠する粒度の細骨材を使用する場合、本実験の範囲内では単位細骨材量は 629kg/m^3 以下が適当と考えられた。

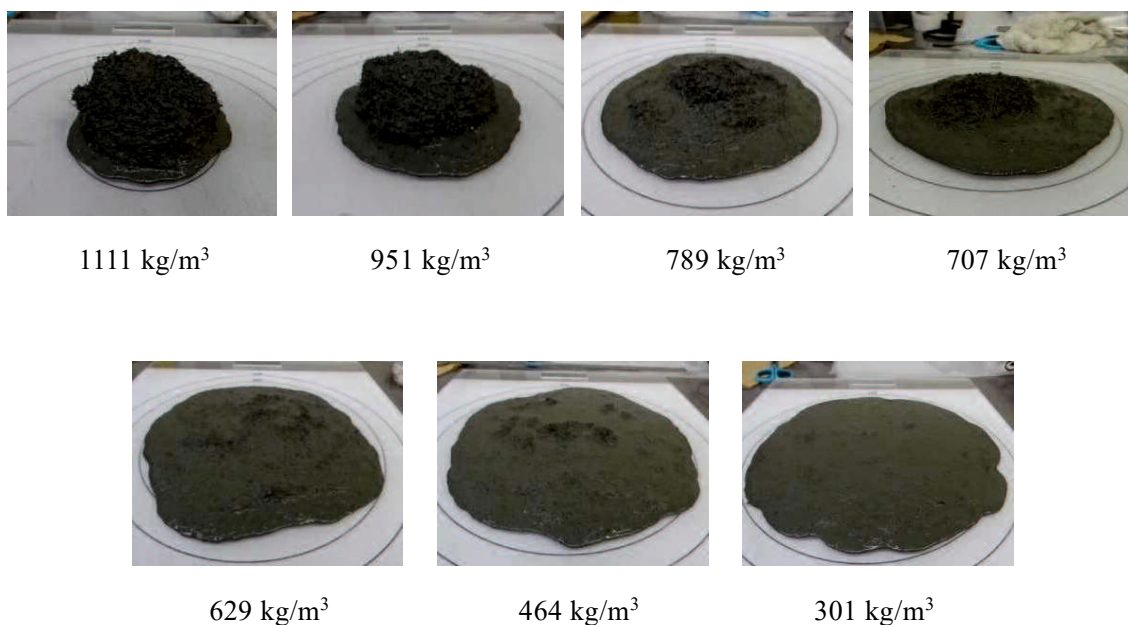


図-3.3.3 単位細骨材量が異なる場合のフロー試験後の状況

鋼繊維と水および高性能減水剤を除く構成材料の粒度分布を図-3.3.4 に示す。図中の凡例は単位細骨材量 (kg/m^3) を示す。粒度分布は $50\mu\text{m}$ 以上で各配合の差異が生じ、 $100\mu\text{m}$ 以上でより顕著になっている。この結果と図-3.3.3 の結果を考慮すると、鋼繊維を均一に分散させるためには、粒径が $100\mu\text{m}$ 以下の材料を少なくとも 70% 含むように材料の選定と配合を調整することが望ましい。

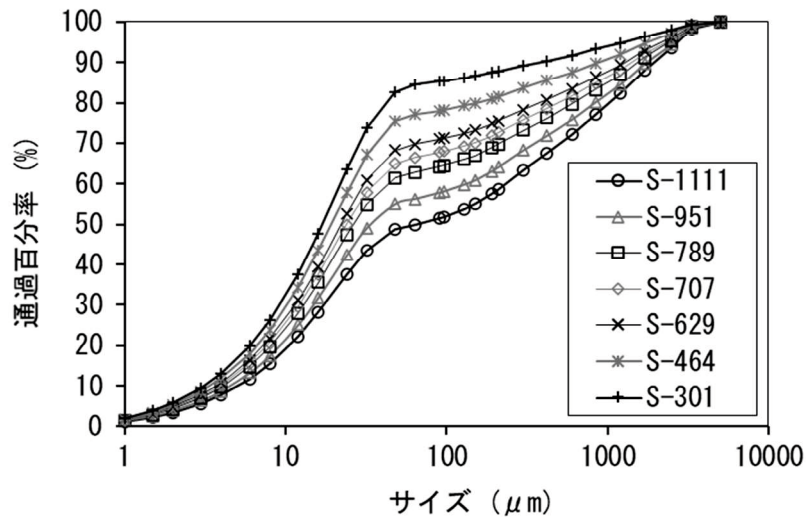


図-3.3.4 構成材料の粒度分布

単位細骨材量と圧縮強度の関係を図-3.3.5 に示す。この結果によると、細骨材量によらず UFC の圧縮強度は概ね一定である。

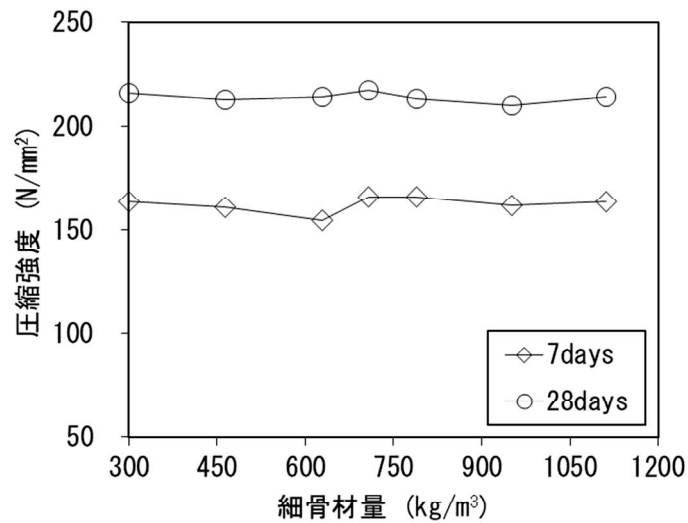


図-3.3.5 単位細骨材量と圧縮強度の関係

(2) 材料分離の評価

鋼繊維とベースモルタルの密度が異なるため、UFCの配合設計では、材料分離が生じないように注意する必要がある。ここでは、UFCの粘性がベースモルタルと鋼繊維の材料分離に与える影響を調べるため、高性能減水剤の添加率のみを変化させて流動性の異なるUFCの材料分離を評価した。

フローと高性能減水剤の添加率および粘度との関係を図-3.3.6に示す。フローは高性能減水剤の添加率に伴って大きくなるが、添加率1.8%ではフローの増加はほとんどみられなかった。また、UFCの粘度とフローの関係は負の直線関係がみられた。これらの流動性の異なるUFCを図-3.3.1に示す円柱型枠に打込み、60秒間バイブレータによって締め固めた。その後、材齢7日まで養生し、上中下に切断し、各部位の密度を測定した。

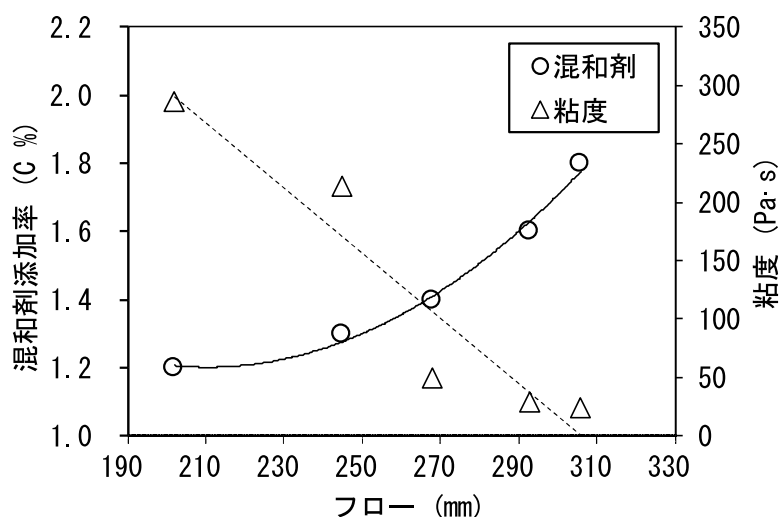


図-3.3.6 フローと高性能減水剤の添加率および粘度の関係

UFCの粘度と各部位の密度の関係を図-3.3.7に示す。同図の右縦軸は、上下層の密度差を示している。上層の密度はモルタルの粘度に関わらずほぼ一定だったが、中層と下層の密度は粘度の増加に伴って若干小さくなった。また、UFCの粘度と上下層の密度差の関係をみると、粘度50Pa·s以下では、密度差が大きくなり、モルタルと鋼繊維が分離していることが確認された。

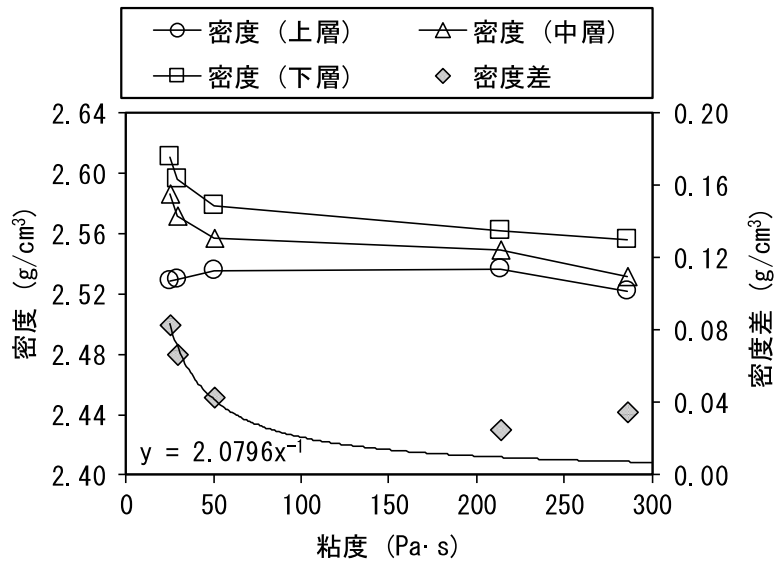


図-3.3.7 UFCの粘度と各層の密度および密度差

UFCの粘度と各層の密度から推定した鋼繊維の体積混入率を図-3.3.8に示す。UFCの粘度50Pa·sより小さい場合、鋼繊維の計画配合量は2.0vol.%でも、上層の鋼繊維の混入率が1.5vol.%程度まで低下している可能性がある。

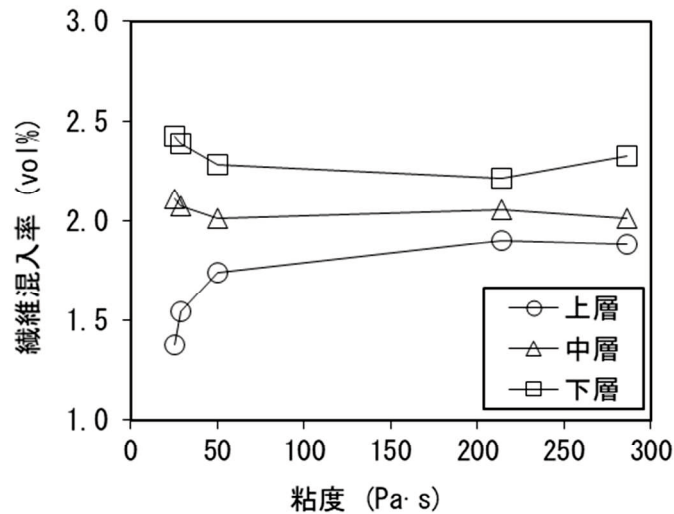


図-3.3.8 UFCの粘度と推定鋼繊維量の関係

フローと上層の(推定)鋼繊維混入量の関係を図-3.3.9に示す。上層の繊維混入率は、フローが約200~250mmの範囲では、ほとんど変化していないものの、フローが250mm以上になると上層の繊維混入率は直線的に小さくなっており、鋼繊維とモルタルが分離しやすくなっていると考えられる。また、鋼繊維の混入率を変えたUFCの曲げ強度を図-3.3.10に示す。鋼繊維混入率が1.5vol.%であっても、25N/mm²の高い曲げ強度が得られている。これはUFC指針[2004]に示される熱養生するUFCの曲げ強度の特性値と同等であり、坂本ら[2010]の研究で繊維量を変えて曲げ強度を測定した結果と同等の値であった。

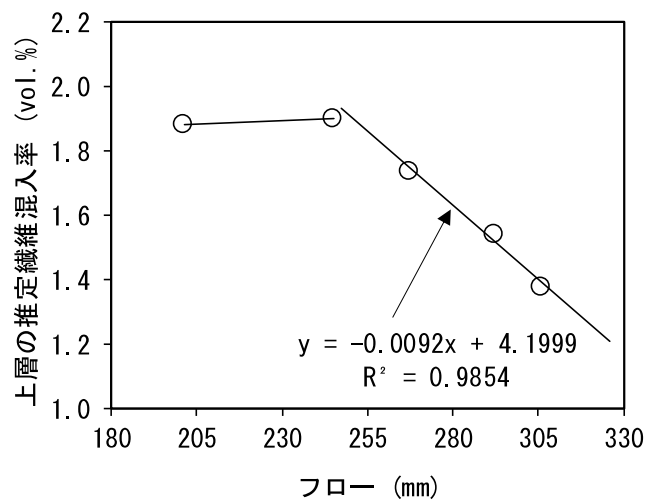


図-3.3.9 フローと上層の推定鋼繊維量

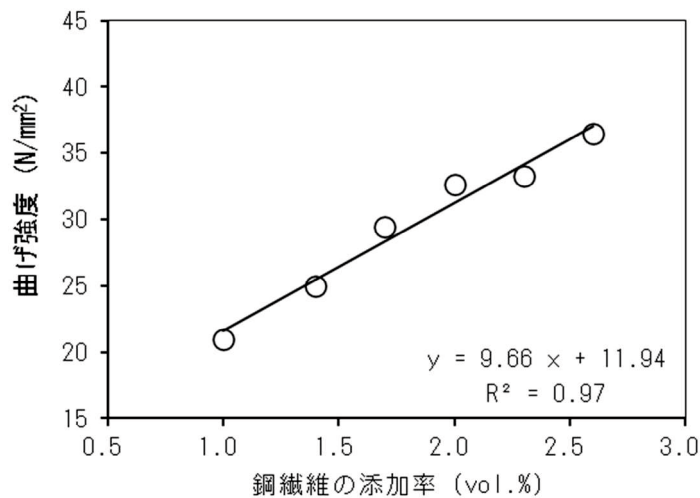


図-3.3.10 鋼繊維の混入率と曲げ強度の関係

(3) 圧縮強度および曲げ強度

UFC のフローと圧縮強度および密度との関係を図-3.3.11 に示す。材齢 28 日の圧縮強度はフローに応じて増加し、フロー230mm で目標圧縮強度 200N/mm² を超過した。またフロー260~290mm のときに最大値を示したが、それよりフローが大きくなると圧縮強度は低下した。これは、UFC の流動性が向上すると充てん率が高くなるが、それが過剰になると材料分離が生じるためと考えられる。材料分離の影響が材齢 7 日の圧縮強度にみられなかったのは、材齢 28 日の圧縮強度と比較して、強度レベルが低いためと考えられる。図-3.3.9 に示すように、フロー310mm のとき、繊維が分離しやすい上層では繊維混入率が 1.4vol.%以下になり、UFC の曲げ強度が 25N/mm² を下回る可能性が高いことから、UFC のフローの適正範囲は 230~290mm 程度と推察された。

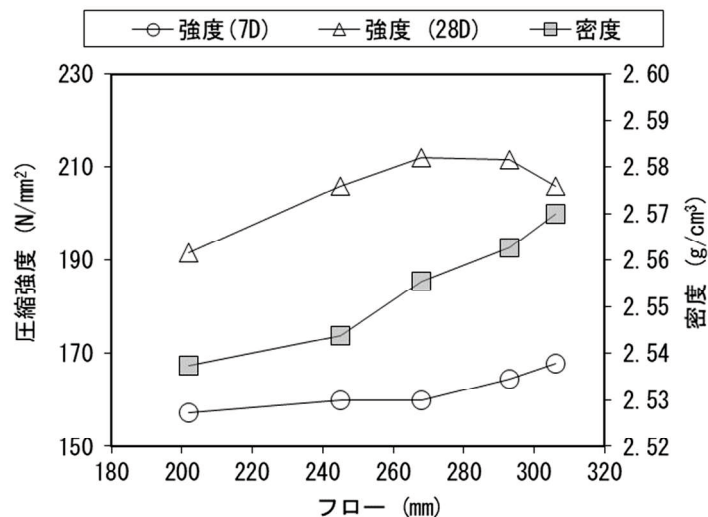


図-3.3.11 フローと圧縮強度および密度の関係

本研究で実験を行った圧縮強度・曲げ強度，および UFC 指針[2004]の式(1)を用いて曲げ強度から推定される引張強度の材齢変化を図-3.3.12 に示す。材齢 28 日におけるひび割れ発生応力と式(1) で推定した引張強度は，それぞれ 9.8N/mm²，11.2N/mm² であり，熱養生を行う UFC の特性値である 8.0N/mm² と 8.8N/mm² を満足することを確認した。

$$f_b = 2.59f_t + 1.54 \quad (1)$$

ここで、 f_b は曲げ強度(N/mm²)， f_t は引張強度(N/mm²)を表す。

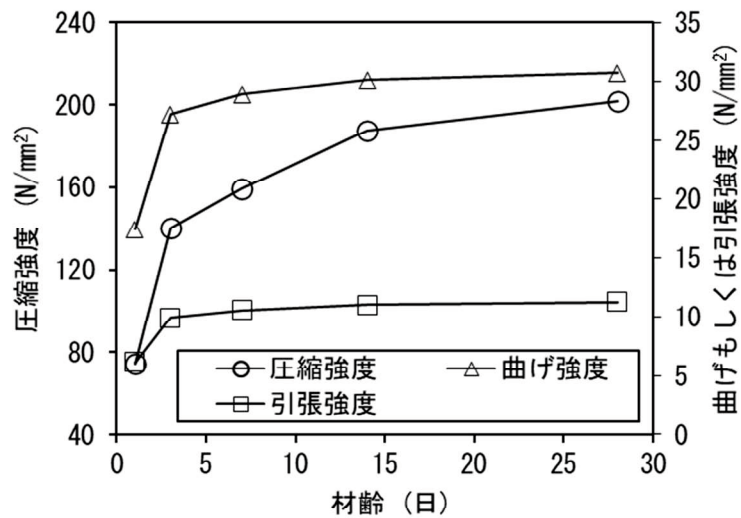


図-3.3.12 材齢と圧縮強度および曲げ強度，推定引張強度

3.4 3章のまとめ

常温硬化型 UFC に適した材料および配合に関して検討した結果，以下の知見を得た。

- (1) ベースセメントには C_3A が少なく， C_3S を多く含むセメントが適している。このセメントに加え，微細な反応性粉体を 10~20% の範囲で添加することで，UFC に必要な流動性および強度発現性を確保することができる。
- (2) 非反応性の粉体を細骨材の一部として使用することで鋼繊維の分散性を改善することができる。結合材と細骨材の粒子径が $100\mu\text{m}$ 以下の粒子を 70% 以上含むように配合した場合，鋼繊維の分散性が優れた UFC が得られる。
- (3) 鋼繊維の材料分離が生じないようにモルタルフローの管理値は $230\sim 290\text{mm}$ が適当である。そのためのフレッシュ時の粘性と強度発現性を得るための水結合材比 (W/B) は 14~21% の範囲が推奨される。

3.5 第3章の参考文献

- Kazuhiro Yoshioka, Ei-ichi Tazawa, Kenji Kawai, Tomoyuki Enohata : Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals, *Cement and Concrete Research*, No.32, pp.1507-1513, 2002.
- Siphavanh Oudomsak, 藤原浩己, 丸岡正知, 大塚亮介 : 粉末度の異なる高炉スラグ微粉末を用いた超高強度繊維補強コンクリートの基本性状に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.71, No.1, pp.509-516, 2017.
- 井口 舞, 藤原浩己, 丸岡正知, 遊佐源邦 : 常温硬化型超高強度鋼繊維補強コンクリートの基本性状に関する実験的研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.68, No.1, pp.488-493, 2014.
- 石関嘉一, 平田隆祥, 片野啓三郎, 竹田宣典 : 鋼繊維の種類が高強度高じん性セメント複合材料の引張特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.215-220, 2010.
- 依田侑也, 相川 豊, 新 大軌, 坂井悦郎 : 鉱物組成が異なるセメントの水和発熱量と圧縮強度の関係, セメント・コンクリート論文集, Vol.68, pp.118-124, 2014.
- 伊藤智章, 松永 篤 : 東京近郊の硬質砂岩系骨材を用いた高強度コンクリートの物性, 第57回セメント技術大会講演要旨, pp.234-235, 2003.
- 河上浩司, 西本好克 : F_c100N/mm^2 級の高強度コンクリートの強度発現に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.369-374, 2002.
- 河上浩司, 松田 拓, 西本好克, 小出貴夫 : $150N/mm^2$ 級高強度コンクリートの強度発現性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1235-1240, 2006.
- 小林利充, 和田高清, 鹿籠泰幸, 西浦範昭 : F_c150N/mm^2 超高強度コンクリートの開発, 西松建設技報, Vol.31, pp.33-38, 2008.
- 坂本 淳, 田中良弘, 新藤竹文, 宇治公隆 : 最大粒径 2.5mm の細骨材を用いたノンプレミックス型超高強度繊維補強コンクリートに関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.3, pp.325-336, 2010.
- セメント協会 : セメントの常識, pp.15-16, 1991.
- 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113, 2004.

- 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点 ‘21, p.8, 2021.
- 松本健一, 丸山一平, 谷村 充：低水結合材比におけるシリカフェーム混入セメント硬化体の若材齢時力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.103-108, 2008.
- 山田人司, 増田隆行, 澤田由美子：超高強度コンクリートの製造技術に関する実験的研究, ハザマ研究年報, Vol.37, pp.1-8, 2005.
- 湯浅 昇, 友澤史紀：超低水セメント比コンクリートの開発, 第3回日本大学大学院生産工学研究科生命工学・リサーチ・センター研究発表講演会, pp.23-26, 2007.

第 4 章

硬化物性および耐久性

第4章 硬化物性および耐久性

4.1 検討目的

本章では、第3章で配合設計した、熱養生不要な UFC について、硬化物性と耐久性を調べることを目的とした。

硬化物性としては、UFC 指針[2004]に記載されている、圧縮強度、引張強度およびひび割れ発生応力の各特性値を管理材齢（材齢 28 日）で満足できるかを調べるとともに、UFC は既存のコンクリート構造物の補修・補強材として使用される可能性があるため、接着強さを調べることにした。また、UFC は材結合材量が多く、収縮量が大きくなることが懸念されるため、収縮特性についても調べることにした。

耐久性については、一般的なコンクリートと同様に中性化、凍結融解、塩分浸透、耐薬品性、アルカリシリカ反応に対する抵抗性を調べた。なお、UFC はひび割れを許容しない設計となっているが、ひび割れが生じた場合に内部の鋼繊維や鉄筋に与える影響を把握する目的で、一部の試験については、予めひび割れを発生させた供試体を用いて耐久性試験を実施した。

4.2 硬化物性

4.2.1 圧縮強度およびヤング係数

(1) 配合

UFC の配合は 3 章で実施した結果から定め、セメントおよび粉体は予めプレミックスしたものを使用した。表-4.2.1 に配合を示す。なお、本章で行った実験には一貫してこの配合を用いた。

表-4.2.1 配合

単位量 (kg/m ³)				補強用鋼繊維 (kg)
水	プレミックス材	細骨材	高性能減水剤	
230 ^{※1}	1830	330	32	157

※高性能減水剤の水分を含む

(2) 練混ぜ方法

UFC の練混ぜには、水平二軸型強制練りミキサ（容量：55L）を使用し、1 回の練混ぜ量は 50L とした。

プレミックス材と細骨材をミキサ内に投入後、30 秒間練り混ぜ、高性能減水剤および水を投入して7分間練り混ぜた。その後、搔落としを行い、さらに3分間練り混ぜた。練り上がったモルタルに鋼繊維を添加し、さらに2分間練り混ぜて排出した。なお、本章で行った実験については、一貫してこの練混ぜ方法で練り混ぜた。

(3) 供試体の作製方法

生コン工場が保有する圧縮強度試験機は、最大荷重が1000kNの場合もあることから、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の供試体では、強度試験が実施できない可能性がある。そのため、圧縮強度試験に用いる供試体は $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ の円柱とした。なお、UFC 指針[2004]では、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ 供試体と $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ 供試体の圧縮強度を比較しており、その値に差がないことが記載されている。供試体の作製は、エントラップトエアを巻き込まないように、一層で流し込んだ後、エントラップトエアを抜くことを目的に鋼繊維が沈まない程度にタッピングして成形した。なお、脱型まで水分の蒸発を防ぐため、表面をビニールシートで覆った。

(4) 試験方法

圧縮強度試験は JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」を参考にして行った。なお、ヤング係数は、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じて測定した。養生は標準水中養生とし、材齢はいずれも 28 日とした。

(5) 実験結果および考察

圧縮強度試験結果の度数分布（ $n=149$ ）を図-4.2.1 に示す。圧縮強度の平均値は、 196.3N/mm^2 、標準偏差は 8.2N/mm^2 であった。正規分布を仮定し、危険率 5%となる値は 182.8N/mm^2 となることから、圧縮強度の特性値は、さらに安全を見込んで 180N/mm^2 を用いることが可能と考えられた。なお、圧縮強度のばらつきは、UFC 指針[2004]に示される、熱養生を行う UFC の標準偏差（ 7.7N/mm^2 ）とほぼ同等であった。

ヤング係数の度数分布（ $n=51$ ）を図-4.2.2 に示す。ヤング係数の平均値は $4.6 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ であり、一般的な UFC のヤング係数（ $5.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ ）よりも若干小さい値となった。また、圧縮強度とヤング係数の関係を図-4.2.3 に示す。図には日本建築学会[2018]記載の関係線と土木学会技術推進ライブラリーNo.3[2006]記載の熱養生を行う

UFC の関係線も記載している。本研究の UFC の圧縮強度とヤング係数の関係は New RC 式や熱養生を行う UFC の関係線よりも若干下側にプロットされた。川上ら[1996], [2006] は、モルタル中の細骨材量を変えて、弾性係数を測定しており、その結果、細骨材量の増加に伴い弾性係数が増加することを示している。これは、細骨材のマイクロクラック拘束効果やモルタルの均質化効果によるものと考えられている。本研究の UFC は既往の熱養生を行う UFC よりも細骨材量が少ないため、圧縮強度とヤング係数の関係が、その関係線よりも下側にプロットされたものと考えられる。

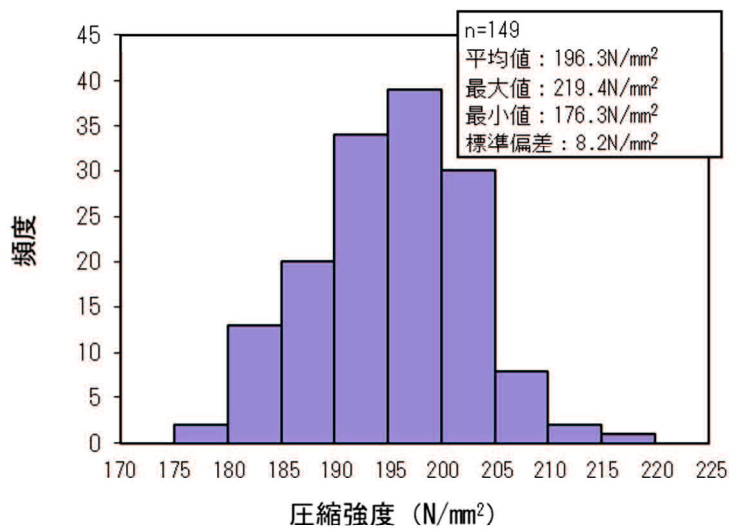


図-4.2.1 圧縮強度の測定結果

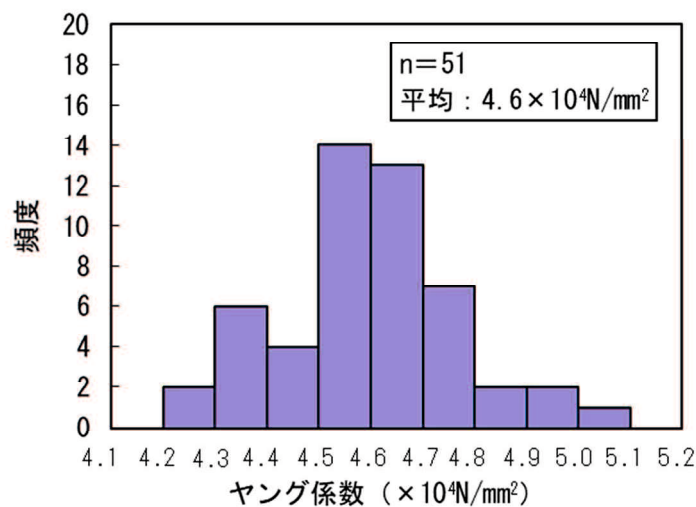


図-4.2.2 ヤング係数の測定結果

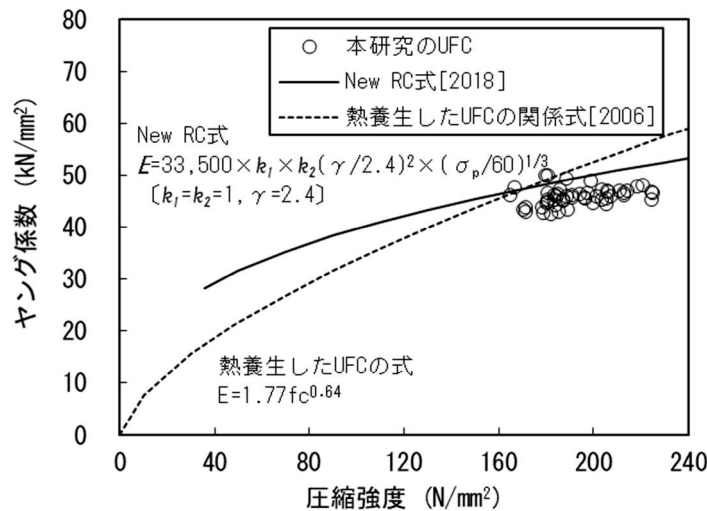


図-4. 2. 3 圧縮強度とヤング係数の関係

4. 2. 2 曲げひび割れ発生強度および割裂ひび割れ発生応力

(1) 供試体の作製方法

曲げひび割れ発生強度試験用供試体は 100×100×400mm の角柱とした。成形は合流部ができないように型枠の端部から一層で上面まで連続的に流し込んだ。また、割裂ひび割れ発生応力測定用供試体は、φ100×200mm の円柱供試体とした。なお、脱型まで水分の蒸発を防ぐため、両供試体とも打込み面をビニールシートで覆った。

(2) 試験方法

曲げひび割れ発生強度は、UFC 指針[2004] 3.5.3 記載「曲げ強度試験方法」に準じて測定した。曲げひび割れ発生強度は、供試体の引張縁に等曲げ区間全域を通るよう支間方向と平行に測長 120mm のひずみゲージを貼り付け、試験载荷時に荷重とひずみを連続的に計測することによって、計測値が不連続となった点を、曲げひび割れ発生時とした。この時の応力を曲げひび割れ発生強度とした。図-4. 2. 4 に曲げ強度試験によるひび割れ発生強度の測定結果（例）を示す。

割裂ひび割れ発生応力は、UFC 指針[2004] 3.5.2 記載「割裂引張強度試験」に準じて測定した。なお、ひび割れ発生時の応力は、曲げひび割れ発生強度の測定と同様に、供試体にひずみゲージを貼り付けることによって測定した。

また、各供試体は成形後翌日に脱型し、いずれも標準水中養生し、材齢 28 日で強度試験を実施した。

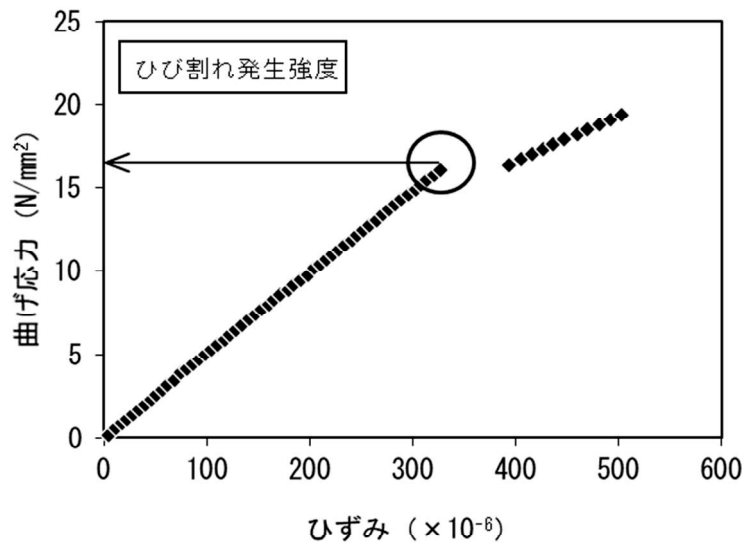


図-4.2.4 曲げ強度試験におけるひび割れ発生強度の測定結果（例）

(3) 実験結果および考察

曲げ強度試験から求めた曲げひび割れ発生強度の度数分布 ($n=40$) を図-4.2.5 に示す。曲げひび割れ発生強度の平均値は 15.7N/mm^2 、標準偏差は 1.3N/mm^2 であった。正規分布を仮定し、危険率 5%となる曲げひび割れ発生強度は 13.6N/mm^2 となった。割裂ひび割れ発生応力の平均値は 10.2N/mm^2 ($n=6$) であった。両者は、ひび割れ発生時の強度であり、UFC は繊維でマトリックスを補強しているため、ひび割れ発生後も荷重は増加する。一般的なコンクリートは繊維で補強していないため、ひび割れ発生強度が、曲げ強度もしくは引張強度に相当する。ここで、一般的なコンクリートの圧縮強度と曲げ強度、圧縮強度と引張強度の比は、コンクリート技術の要点[2020]によると、それぞれ $1/5\sim 1/8$ 、 $1/10\sim 1/13$ とされている。本研究の UFC の圧縮強度の平均値が 196.3N/mm^2 だったことから、それぞれの比を算出すると、曲げひび割れ発生強度／圧縮強度＝約 $1/13$ 、割裂ひび割れ発生応力／圧縮強度＝約 $1/19$ となった。これらの比は、高強度コンクリートになるほど小さくなることが知られており、UFC は超高強度のため、一般的なコンクリートよりも各強度の圧縮強度に対する比が小さくなったと考えられる。

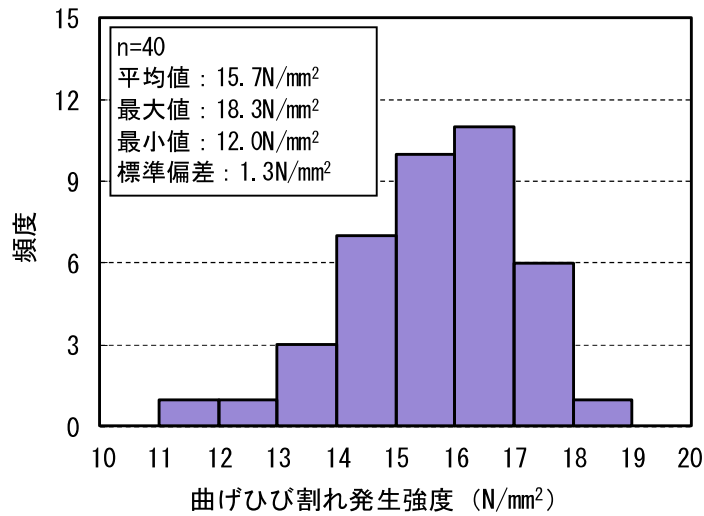


図-4.2.5 曲げひび割れ発生強度の測定結果

曲げひび割れ発生強度と割裂ひび割れ発生応力の関係を図-4.2.6 に示す。図中には UFC 指針[2004]に掲載されている関係線を合わせて示す。本研究の UFC の試験結果もこの関係線上にプロットされることがわかった。ただし、材齢 28 日の試験結果のみのため、強度レベルが低い範囲や、高い範囲のデータについては今後確認が必要である。

この UFC 指針[2004]の関係式を利用して、曲げひび割れ発生強度の特性値 (13.6N/mm²) から、割裂ひび割れ発生応力を算出すると、9.4N/mm²となる。よって、割裂ひび割れ発生応力の特性値は、さらに安全を見込んで、UFC 指針[2004]の熱養生を行う UFC と同様に 8.0N/mm²を用いることが可能と考えられた。

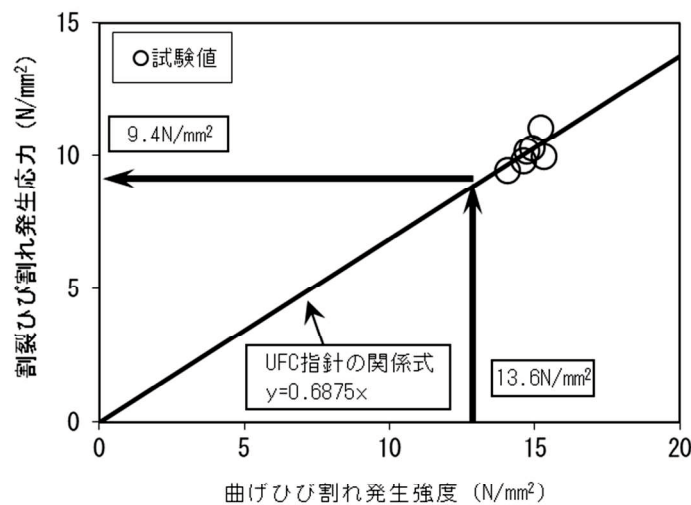


図-4.2.6 曲げひび割れ発生強度と割裂ひび割れ発生応力との関係

4.2.3 曲げ強度および引張強度

(1) 供試体の作製方法

曲げ強度試験および引張強度試験用供試体は $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱とした。成形は合流部ができないように型枠の端部から一層で上面まで連続的に流し込んだ。また、脱型まで水分の蒸発を防ぐため、供試体の打込み面をビニールシートで覆った。

(2) 試験方法

曲げ強度は、UFC 指針[2004] 3.5.3 記載「曲げ強度試験方法」に準じて測定した。また、引張強度は、JCI-S-002-2003「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」[2003]に準じて荷重と変位との関係を測定し、JCI-S-001-2003「切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法、付属書（参考）コンクリートの引張軟化曲線の推定方法」[2003]に従って引張軟化曲線を推定した。

また、各供試体は成形後翌日に脱型し、いずれも標準水中養生とし、材齢 28 日で強度試験を実施した。

(3) 実験結果および考察

曲げ強度の度数分布 ($n=107$) を図-4.2.7 に示す。曲げ強度の平均値は 32.6N/mm^2 、標準偏差は 4.6N/mm^2 であった。正規分布を仮定し、危険率 5%となる値は 25.1N/mm^2 であった。これは、UFC 指針[2004]に示される熱養生を行う UFC (24.4N/mm^2) とほぼ同じ値であった。

引張強度の測定結果と同一バッチで成形した供試体の曲げ強度の関係を図-4.2.8 に示す。図中の関係線と式は UFC 指針[2004]に記載されている、曲げ強度と引張強度の関係である。この結果から、本研究の UFC の材齢 28 日における曲げ強度と引張強度は、UFC 指針に掲載ある関係線上にプロットされることがわかった。曲げ強度や引張強度は補強繊維の影響を大きく受ける。UFC 指針[2004]の材料と本研究の UFC では鋼繊維の寸法 (UFC 指針： $\phi 0.20 \times 15\text{mm}$ 、本研究の UFC： $\phi 0.16 \times 13\text{mm}$) も同等であり、添加率も等しいことから、同じ関係線にプロットされたものと考えられる。引張強度試験は試験に時間を要し、特殊な強度試験機と治具を使用して測定するため、多くのデータを蓄積することが難しい。そのため、多くのデータがある曲げ強度の特性値 (25.1N/mm^2) を用いて、曲げ強度と引張強度の関係から、引張強度の特性値を算出すると、引張強度は 9.1N/mm^2 と算出できる。よって、引張強度の特性値はさらに安全を見込んで 8.8N/mm^2 を用いることが可能と考えられた。

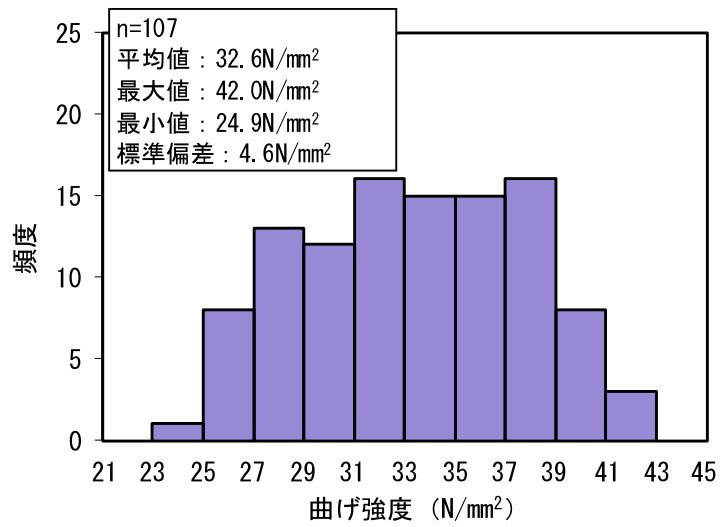


図-4.2.7 曲げ強度の測定結果

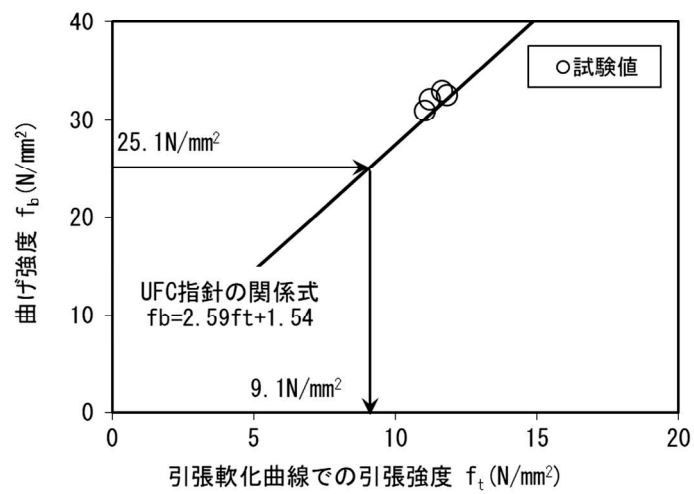


図-4.2.8 曲げ強度と引張強度との関係

4.2.4 接着強さ

(1) 試験方法

接着強さの測定は、JIS A 1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法」を参考に実施した。基盤コンクリートには JIS A 5371 に規定される普通平板を使用した。UFC との接着面となる基盤コンクリート表面の状態は、いずれも 150 番のサンドペーパーで研磨した後、表-4.2.2 に示す 3 水準の処理を施した。UFC を基盤コンクリート上に打ち込んだ後、所定の材齢（7，28 日）まで封緘養生した。所定の材齢で、試験部位にコンクリートカッターで切込みを入れ、40×40mm の金属製アタッチメントをエポキシ樹脂で接着させた。接着強さは、建研式接着試験機（サンコーテクノ社製テクノスターRT-3000LD）を使用して測定した。

表-4.2.2 接着面となる基盤コンクリート表面の状態

基盤コンクリート表面の状態	処理方法
無処理	—
水湿し	UFC を打ち込む直前に表面を水道水で湿らせた。 吸水量：39 g/m ²
プライマー塗布	アクリル系プライマー5 倍液を UFC 打込みの前日に塗布して乾燥させた。 塗布量：150 g/m ²

(2) 実験結果および考察

材齢と接着強さの関係を図-4.2.9 に示す。基盤コンクリートの接着面を「無処理」とした場合、接着強さは材齢 7，28 日ともに 1N/mm² 未満と小さかった。これは、基盤コンクリート表面が乾燥していたため、打込んだ UFC の水分を吸収し、十分に接着しなかったためと考えられる。打込み直前に水湿しをした水準では、材齢 7 日の接着強さは約 1N/mm² と小さかったが、材齢 28 日では 3N/mm² を超えた。接着面にプライマーを塗布した水準では、材齢 7，28 日とも 3N/mm² を超え、破断面のほとんどが基盤コンクリートで破壊しており、十分に接着していることが確認できた。プライマーは基盤コンクリートへの吸水を防止する機能があるため、UFC から水分が奪われず、水和反応が阻害されなかったことから高い接着力が確保できたと考えられる。さらに、プライマー塗布と水湿しの条件を比較した川上ら[2015]の研究によると、水湿しの場合は、付着界面の一部にわずかな隙間が生じていることが確認され、プライマーを塗布した場合は、厚さ

20～30 μm 程度のプライマー層により下地コンクリートと密着している状態が確認されている。さらに、アクリル系プライマーは、変形追従性が高いことから、せん断力等による接着界面への悪影響を低減している可能性が報告されている。

また、NEXCO3 社の接着強さの規格値は $1.5\text{N}/\text{mm}^2$ 以上とされており、プライマーを使用すれば、若材齢からこの規格値を満足できることがわかった。しかし、本実験では接着面積が広い場合や、温度および湿度などの環境条件が異なる場合の接着強さは確認できていないため、適用にあたっては、さらに詳細な検討が必要と考えられる。

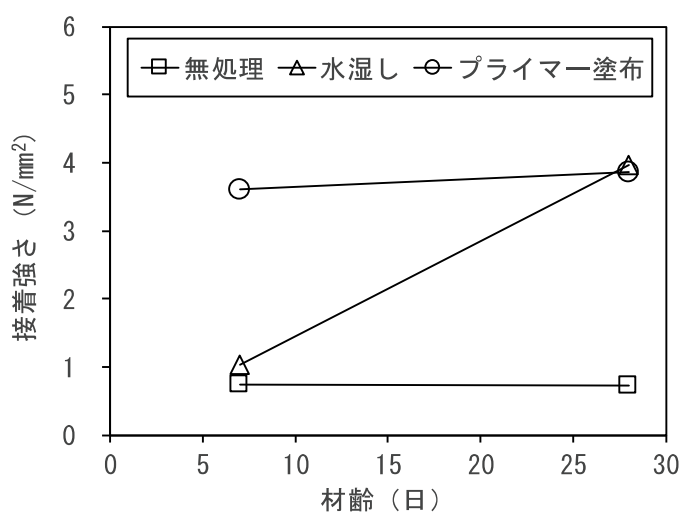


図-4.2.9 材齢と接着強さの関係

表-4.2.3 接着面の破壊状況

基盤コンクリート 表面の状態	破壊状況	
	材齢 7 日	材齢 28 日
無処理	供試体 1 a/b : 100	供試体 1 a : 70, a/b : 30
	供試体 2 a/b : 100	供試体 2 a/b : 100
	供試体 3 a/b : 100	供試体 3 a/b : 100
水湿し	供試体 1 a/b : 100	供試体 1 a : 100
	供試体 2 a/b : 100	供試体 2 a : 40, a/b : 60
	供試体 3 a/b : 100	供試体 3 a : 60, a/b : 40
プライマー塗布	供試体 1 a : 100	供試体 1 a : 100
	供試体 2 a/b : 100	供試体 2 a : 100
	供試体 3 a/b : 100	供試体 3 a : 100

※a : 下地コンクリートの破壊, a/b : 下地とスリムクリート界面の破壊

b : スリムクリートの破壊

4.2.5 乾燥収縮および自己収縮

(1) 試験方法

乾燥収縮は、JIS A 1129-2「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法—第2部：コンタクトゲージ方法」に準じて測定した。なお、測定は標準養生7日後を基準とし、材齢182日まで測定した。

自己収縮は、埋込み型ひずみ計を用いて、封緘状態のひずみを材齢182日まで測定した（写真-4.2.1参照）。また、同一バッチの材料で凝結時間を測定し、凝結開始からのひずみを自己収縮ひずみとした。

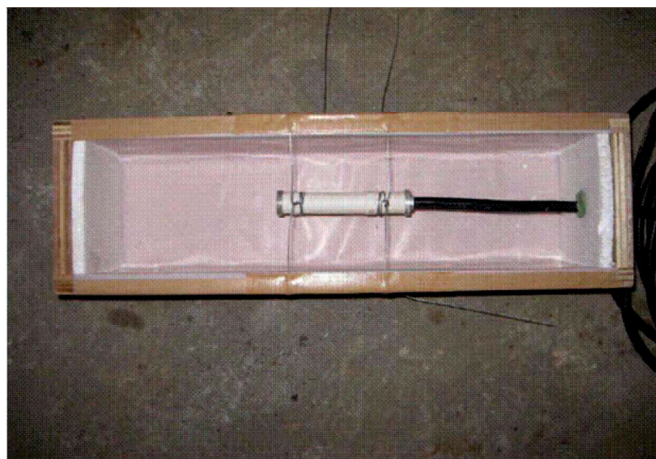


写真-4.2.1 自己収縮測定用埋込みひずみ計の設置状況

(2) 実験結果および考察

乾燥収縮ひずみの測定結果を図-4.2.10に示す。標準養生7日後を基準とし、20℃、湿度60%環境下で182日間測定した自己収縮ひずみを含む乾燥収縮ひずみは 400×10^{-6} であった。吉兼[2008]は、一般的なコンクリート334件の乾燥収縮ひずみを調査した結果、平均値が約 670×10^{-6} だったことを報告している。これらと比較すると本研究のUFCの乾燥収縮ひずみは小さいと判断できる。また、日本建築学会[2018]が示す特級仕様のコンクリートの規定値 500×10^{-6} や土木学会[2008]で示される収縮ひずみの最終値 1200×10^{-6} と比較しても小さい値であった。

凝結始発からの材齢と自己収縮ひずみとの関係を図-4.2.11に示す。材齢182日における自己収縮ひずみは 660×10^{-6} であった。マスコンクリートのひび割れ制御指針

[2016]によると、普通ポルトランドセメントを使用した $W/C=45\%$ のコンクリートの自己収縮ひずみは、最大でも 150×10^{-6} 程度となっており、これと比較すると UFC の自己収縮ひずみは大きい。UFC は結合材料が多く、粗骨材を含まないことから、通常のコンクリートと比較して自己収縮が大きくなったと考えられる。しかし、熱養生を行う UFC の自己収縮ひずみは、 750×10^{-6} や 500×10^{-6} との報告もあることから、これらと比較すると同等といえる。養生方法が自己収縮ひずみに与える影響については、土木学会[2006]でも比較されており、熱養生を行った場合は約 3 日で自己収縮ひずみが終局値に達し、常温養生の場合は、終局値に達するまで日数が長くなっていることが示されている。また、自己収縮ひずみの終局値はそれぞれ 750×10^{-6} と 800×10^{-6} であり、常温養生した場合の自己収縮ひずみが若干大きい値となっている。自己収縮ひずみが型枠、鉄筋およびインサートなどに拘束されるとひび割れが生じる可能性が高いため、硬化開始時に拘束を緩和することや膨張材や収縮低減剤などを使用して、自己収縮ひずみを低減する対策も必要と考えられる。

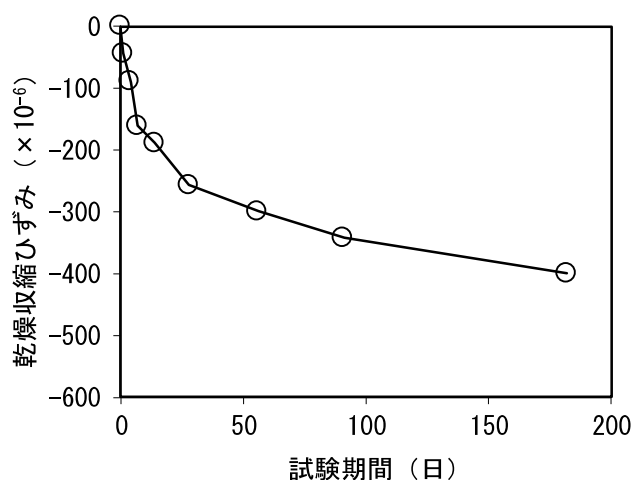


図-4.2.10 乾燥収縮ひずみの測定結果

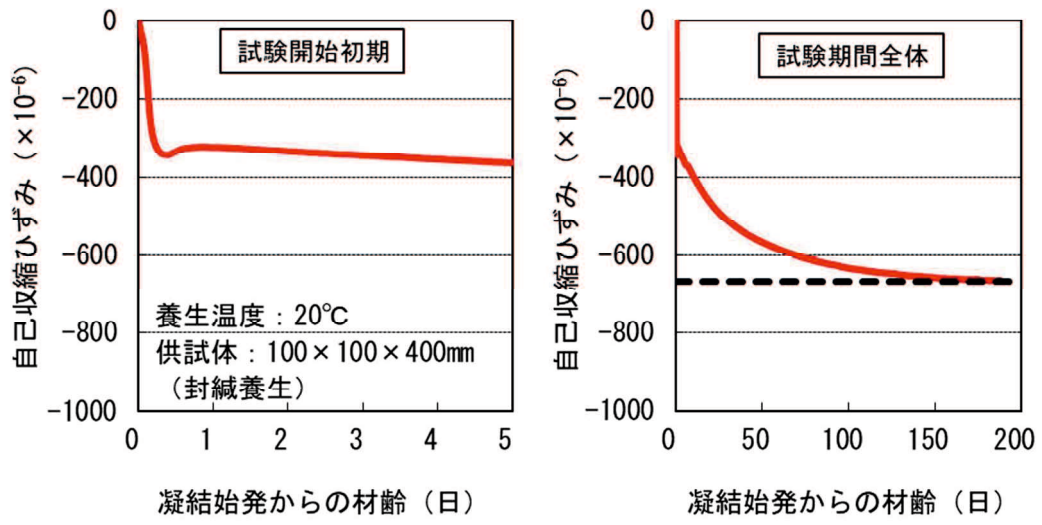


図-4.2.11 自己収縮ひずみの測定結果 (左: 若材齢, 右: 全材齢)

4.3 耐久性

4.3.1 中性化に対する抵抗性

(1) 試験方法

促進中性化試験は、JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠して行い、中性化深さは、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠して測定した。なお、供試体は40×40×160mmの角柱とした。

(2) 実験結果および考察

促進中性化期間 52 週における供試体にフェノールフタレイン溶液を噴霧した状況を写真-4.3.1に示す。割裂面は表層部に至るまでほぼ赤紫色で、中性化深さは0.01mm以下であった。促進中性化養生を開始した材齢は56日であり、圧縮強度は約200N/mm²と推定され（材齢28日の圧縮強度の平均値196N/mm²）、高強度で組織が緻密なため、中性化しなかったと推察される。

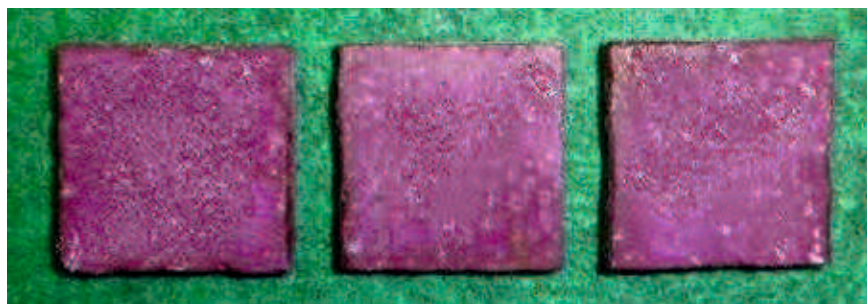


写真-4.3.1 促進中性化試験後の供試体断面（フェノールフタレイン溶液噴霧後）

4.3.2 凍結融解抵抗性

(1) 試験方法

凍結融解試験は、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法（A法）」に準じて行った。なお、測定は2000サイクルまで実施した。

(2) 実験結果および考察

サイクル数と相対動弾性係数および質量減少率との関係を図-4.3.1 および図-4.3.2に示す。凍結融解サイクル2000回においても相対動弾性係数の低下は認められなかった。また、供試体の質量減少も認められなかった。なお、供試体作製時の空気量は3.0%であった。

最低温度や湿潤程度（飽水程度）などの影響をもとに凍害危険度に応じた凍結融解回数
 の関係をまとめた自己充てん型高強度高耐久コンクリート構造物設計施工指針（案）
 [2001]によれば、465 回以上の凍結融解抵抗性を有していれば、いずれの凍害危険度にお
 いても、期間 100 年での凍結融解の繰り返しによる性能の低下はないとしている。した
 がって、本研究の UFC を用いた構造物は、設計耐用年数 100 年以内に凍結融解作用によ
 って所要性能が低下する可能性は低いものと考えられる。

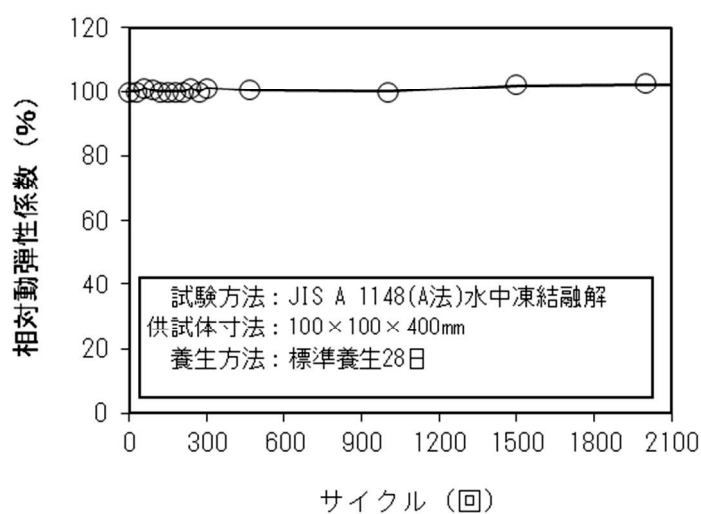


図-4.3.1 サイクル数と相対動弾性係数との関係

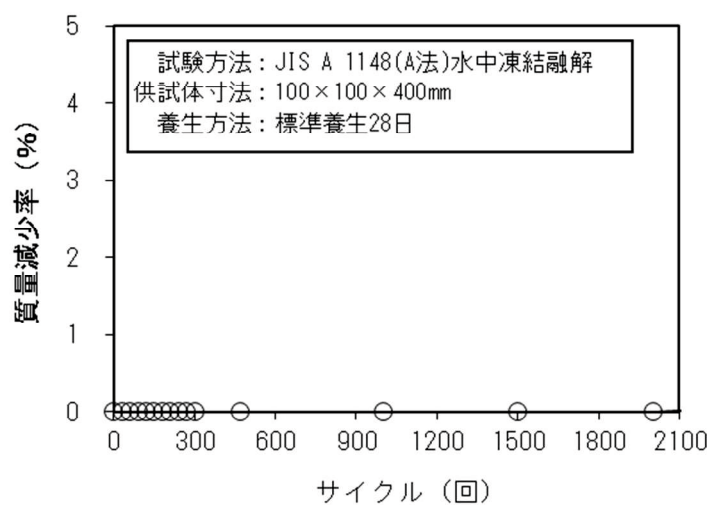


図-4.3.2 サイクル数と質量減少率との関係

4.3.3 塩化物イオンの拡散係数

(1) 試験方法

JSCE-G572-2010「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験法（案）」を参考に、本研究のUFCを塩水に浸せきし、試験体に浸入した塩化物イオンをEPMA法により測定した。塩水への暴露面は、打込み面に対して長手方向の側面とした。測定対象とした範囲は図-4.3.3に示す通りである。試験条件を表-4.3.1に示す。

表-4.3.1 塩化物イオンの拡散係数の測定条件

養生方法	標準養生 28 日
促進腐食試験方法	10%塩化ナトリウム水溶液（塩化物イオン濃度約 6%）に浸せき
塩化物イオン濃度の分析方法	電子線マイクロアナライザ（EPMA）
供試体寸法（mm）	100×100×400
浸せき期間（月）	6, 9, 12

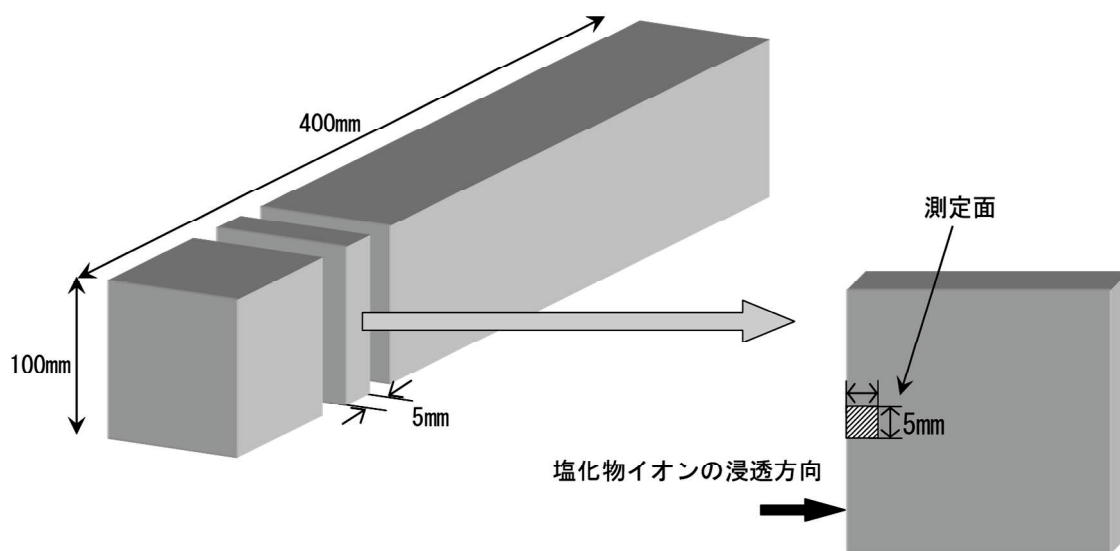


図-4.3.3 測定対象とした範囲

(2) 試験結果および考察

表面からの深さと塩化物イオン濃度の関係を図-4.3.4に示す。表面から1mmまでの範囲で、塩化物イオン濃度は10~20kg/m³となっているものの、浸せき期間が6か月から1年にかけて、塩化物イオン濃度分布はほとんど変わらず、塩化物イオンの浸入深さはいずれも2mm以下であった。また、図-4.3.5に浸せき期間と見掛けの拡散係数の関係を示す。UFC指針[2004]参考資料6.3.1に準じて算出した浸せき期間6か月、9か月および1年における塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、それぞれ0.0073、0.0051および0.0034cm²/年となった。見掛けの拡散係数は、浸せき期間に伴って減少し、浸せき期間1年の塩化物イオンの見掛けの拡散係数はUFC指針に示される標準粉体材料の浸せき期間1年における見掛けの拡散係数と同等の値となっている。よって、浸せき期間の経過に伴う塩化物イオンの侵入増加は認められず、浸せき期間を延ばした場合、見掛けの拡散係数はさらに小さくなると考えられる。見掛けの拡散係数が浸せき期間に伴って小さくなることは、混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針(案)[2018]でも述べられており、これは、塩化物イオンの侵入が表面付近で停滞していることが一因とされている。UFCの場合も塩化物イオンの浸透は極表面に留まっているため、同様の現象がみられたと考えられる。

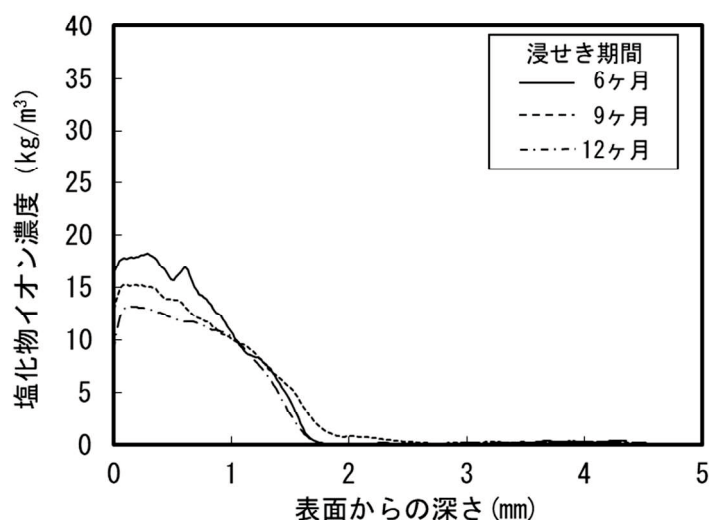


図-4.3.4 表面からの深さと塩化物イオン濃度の関係

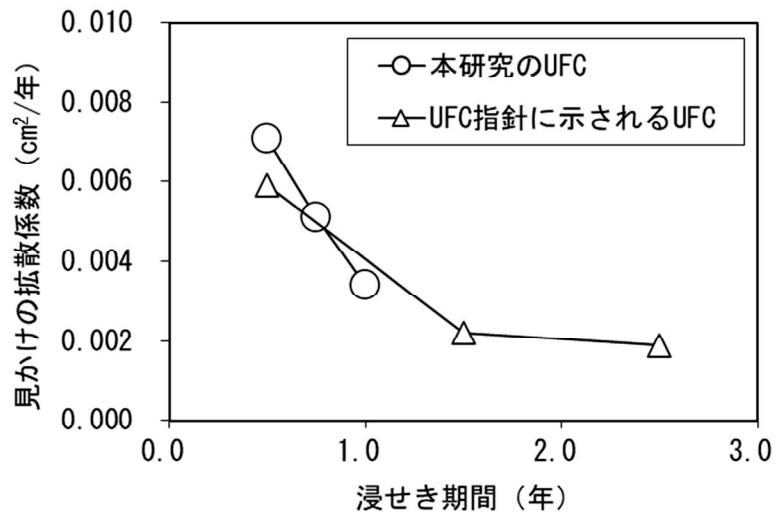


図-4.3.5 浸せき期間と見掛けの拡散係数の関係

4.3.4 塩化物イオンの侵入に伴う鋼繊維の腐食（オートクレーブ法）

(1) 試験方法

塩化物イオンの侵入に伴う鋼繊維の腐食に対する本研究の UFC の抵抗性を評価するため、ひび割れ無しとひび割れ有りの試験体を用いて、オートクレーブ法による促進試験を実施した。なお、ひび割れ有り試験体は、強度試験機を用いて、3等分点曲げ載荷を実施してひび割れを導入した。ひび割れの制御は試験体底部にπ型ゲージを設置して行った。試験条件を表-4.3.2に示す。

表-4.3.2 オートクレーブ法による促進腐食試験条件

試験条件	ひび割れなし	ひび割れあり	
		残留ひずみ 200×10^{-6}	残留ひび割れ幅 0.1mm
養生方法	標準養生 28 日		
促進腐食試験方法	JCI-SC2「塩分を含んだコンクリート中の補強用棒鋼の促進腐食試験法-オートクレーブ法」を参照		
曲げ強度試験方法	3等分点載荷, アムスラー		
供試体寸法 (mm)	40×40×160	100×100×400	
添加した塩化物イオン量 (kg/m ³)	ひび割れなし : 0, 6, 13 ひび割れあり : 13		
促進条件	180℃, 10 気圧, 8 時間保持 (×5, 10 サイクル)		

(2) 実験結果および考察

(a) ひび割れ無し

促進サイクル数と曲げ強度の関係を図-4.3.6に示す。促進サイクル数や硬化体中の塩化物イオン量の違いにかかわらず、促進腐食試験後の本研究の UFC の曲げ強度の低下はほとんど認められず、塩化物イオンの侵入に対する鋼繊維の腐食に対して高い抵抗性を示している。塩化物イオン量として 6kg/m³ 添加した供試体では、促進期間に伴って曲げ強度が低下している傾向だが、添加量 13kg/m³ とこれよりも大きい供試体の曲げ強度は低下していないことからばらつきの範囲内と考えられた。田中ら[2004]の報告によると、

熱養生を行う UFC についても鋼繊維の腐食とこれに伴う力学性能の低下の可能性がほとんどないとされていることから、本研究の UFC についても熱養生を行う UFC と同様の結果といえる。

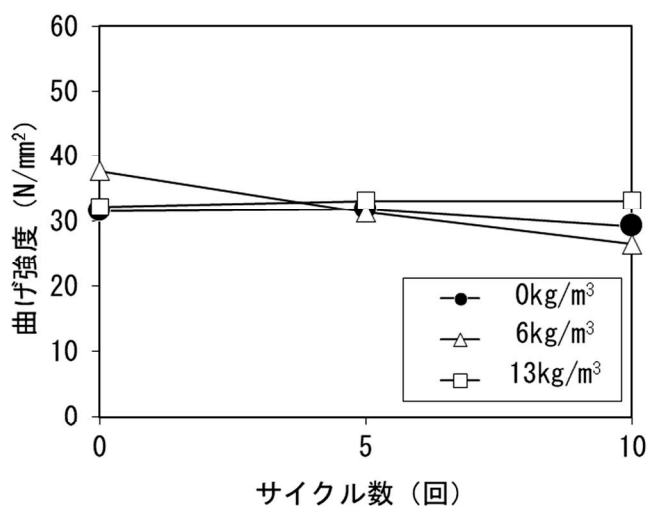


図-4.3.6 促進サイクル数と曲げ強度の関係

(b) ひび割れ有り

試験結果を図-4.3.7 に示す。ひび割れを有する状態で促進腐食養生された本研究の UFC の曲げ強度の低下はほとんど認められなかった。本研究の UFC のマトリクスに混入された鋼繊維は、UFC 指針に示す試験結果と同様に、塩化物イオンの侵入に対して高い腐食抵抗性を示している。

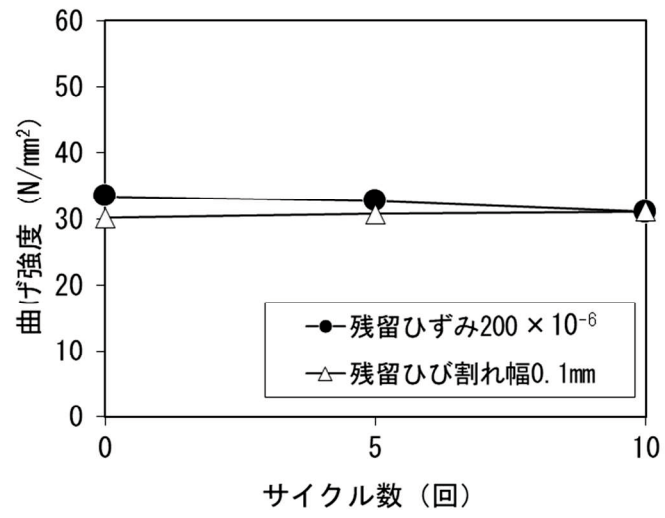


図-4.3.7 促進サイクル数と曲げ強度の関係（ひび割れ有り）

4.3.5 塩化物イオンの侵入に伴う鋼繊維の腐食（温海水乾湿繰返し法）

(1) 試験方法

塩化物イオンの侵入に伴う鋼繊維の腐食に対する本研究の UFC の抵抗性を評価するため、ひび割れ無しとひび割れ有りの試験体および比較試験体を用いて、温海水乾湿繰返しによる促進試験を実施した。なお、ひび割れの導入方法は、オートグレーブ法による促進腐食試験と同様に行った。試験条件を表-4.3.3に示す。また、試料の採取位置および EPMA による分析面を示した図を図-4.3.8に示す。

表-4.3.3 温海水乾湿繰返しによる促進腐食試験条件

供試体名	UFC			比較用 コンクリート※1
	ひび割れ なし	ひび割れあり		ひび割れ なし
		残留ひずみ 200×10 ⁻⁶	残留ひび割れ 幅 0.1mm	
鋼繊維の容積混入率 (vol.%)	2.0			
試験 条件	養生方法	標準養生 28 日		
	促進条件	60℃海水浸せき 3.5 日→送風乾燥 3.5 日 (×15, 30 サイクル)		
	塩化物イオン濃度分布 分析方法	電子線マイクロアナライザ (EPMA)		
	曲げ強度試験方法	3 等分点载荷		
	供試体寸法 (mm)	40×40×160	100×100×400	40×40×160
	添加した塩化物イオン量 (kg/m ³)	ひび割れなし : 0, 6, 13 ひび割れあり : 0		

※1 比較用供試体の配合は、単位水量165kg/m³，単位セメント量413kg/m³，細骨材率43.3%のコンクリート粗骨材を除いたものを単位量に換算したものの。

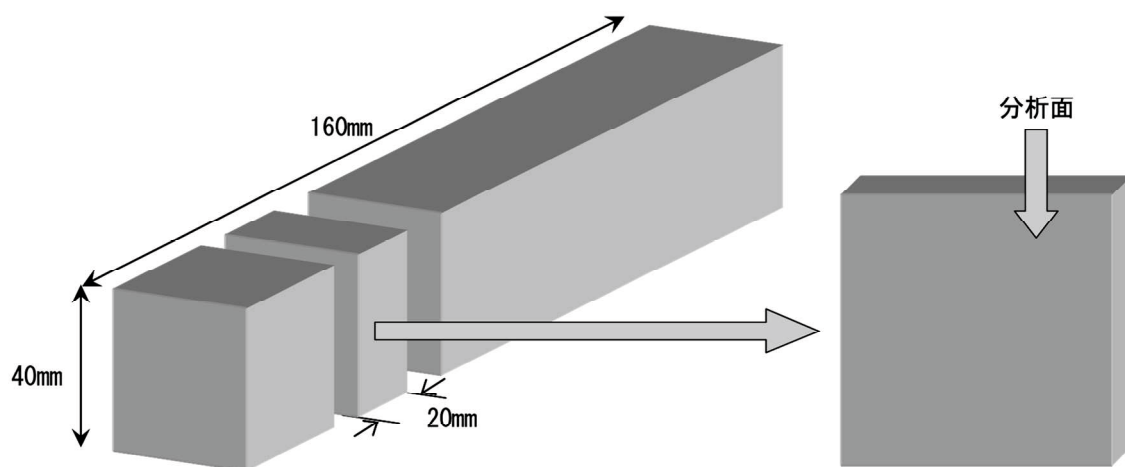


図-4.3.8 試料の採取位置および EPMA による分析面

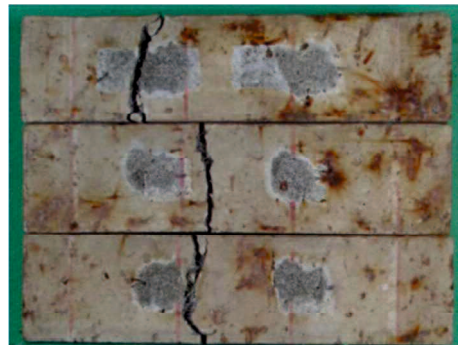
(2) 実験結果および考察

(a) ひび割れ無し

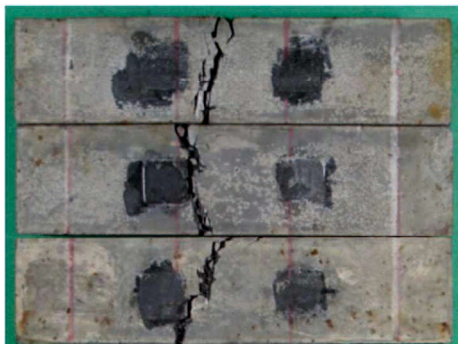
温海水乾湿繰返し 30 サイクル後の型枠底面の発錆状況を写真-4.3.2 に、試験体の形状および分析面の EPMA 画像を図-4.3.9 に、線分析の結果を図-4.3.10 に示す。温海水乾湿繰返しによって、初期塩分量が 0kg/m^3 の比較用試験体表面部のさびの発生や断面中心部までの塩化物イオンの浸透が見られるのに対し、初期塩分量が 0kg/m^3 の本研究の UFC は表面のさびが少なく、塩化物イオンの浸透もごく表層部に限られている。また、前述したように、中性化に対しても高い抵抗性があるため、内部の鋼繊維が腐食する可能性は低いと考えられる。さらに、兵頭ら[2004]も同様の試験を行っており、乾湿繰返し 15 サイクルにおいて、UFC 供試体表面の発錆は少なく、塩化物イオンの浸透も表面から 1.5mm 程度の表層で留まっていることを報告している。また、本研究の UFC では、促進サイクル数や硬化体中の塩化物イオン量の違いにかかわらず、図-4.3.11 および図-4.3.12 に示すとおり曲げ強度と変位はほぼ同等で、塩化物イオンの侵入に対する鋼繊維の腐食に対して高い抵抗性を示していることがわかった。



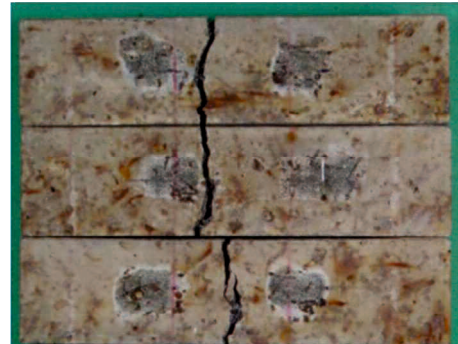
UFC $\text{Cl}^- = 0\text{kg/m}^3$



比較用コンクリート $\text{Cl}^- = 0\text{kg/m}^3$



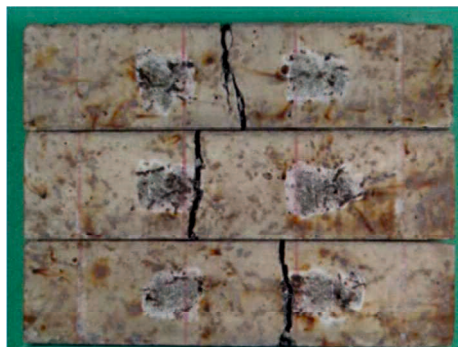
UFC $\text{Cl}^- = 6\text{kg/m}^3$



比較用コンクリート $\text{Cl}^- = 6\text{kg/m}^3$

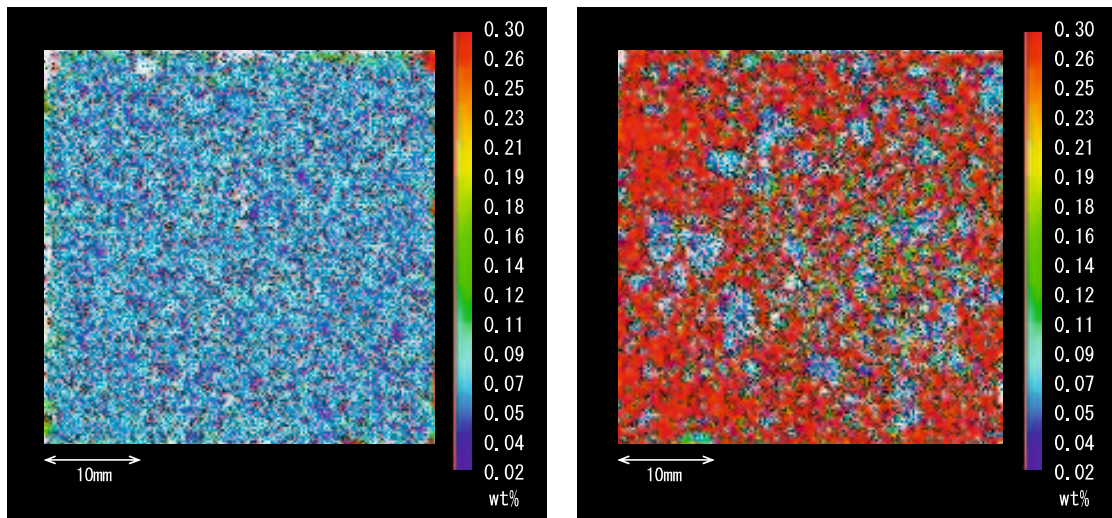


UFC $\text{Cl}^- = 13\text{kg/m}^3$



比較用コンクリート $\text{Cl}^- = 13\text{kg/m}^3$

写真-4. 3. 2 促進試験後の供試体表面の状況



UFC

比較用コンクリート

図-4. 3. 9 EPMA 画像

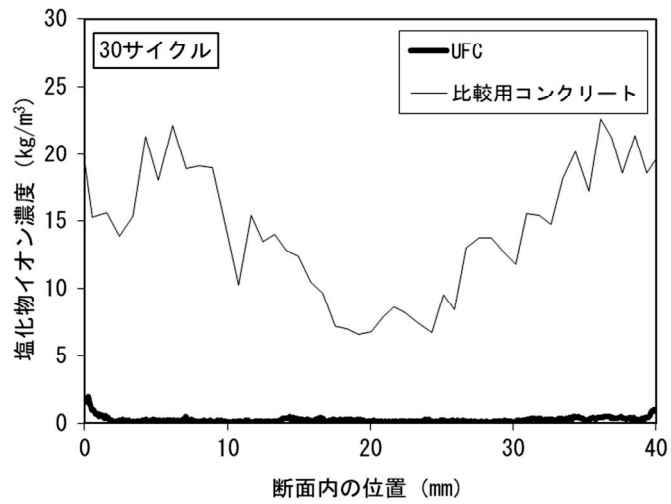


図-4. 3. 10 断面内の位置と塩化物イオン濃度の関係

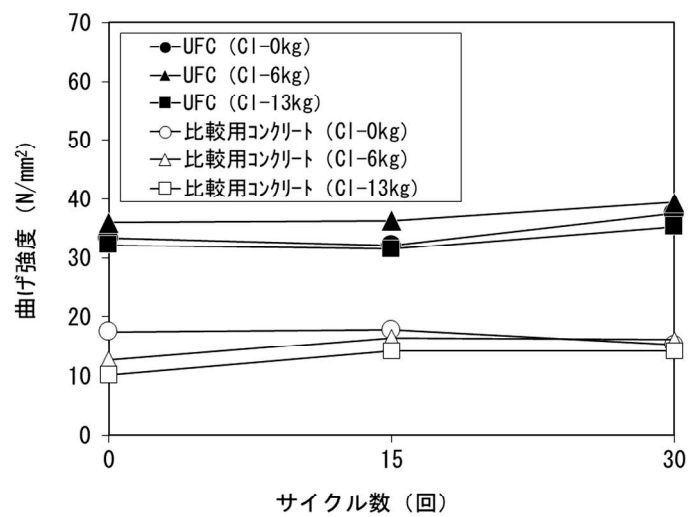


図-4. 3. 11 促進サイクル数と曲げ強度の関係

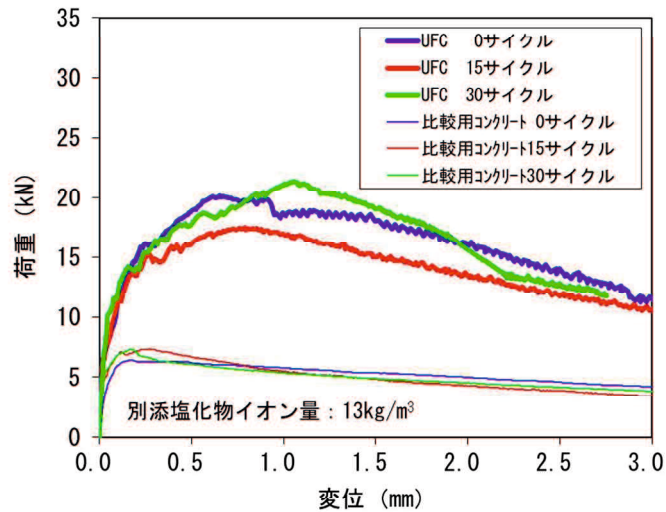


図-4.3.12 曲げ強度試験時の変位と荷重の関係

(b) ひび割れ有り

残留ひずみ、残留ひび割れを有する試験体が温海水乾湿繰返し試験に供された後に、曲げ強度試験を実施した。曲げ強度試験の結果を図-4.3.13に示す。ひび割れを有する状態で促進腐食養生したUFCの曲げ強度には大きな低下が認められず、UFCに混入された鋼繊維は、塩化物イオンの侵入に対して高い腐食抵抗性を示した。次に、図-4.3.14に示すとおり、温海水乾湿繰返し試験を行った試験体を対象に、EPMAを用いてひび割れ内部への塩化物イオンの浸透性を確認した。残留ひずみが 200×10^{-6} (実測 260×10^{-6}) の場合、ひび割れが発生した箇所はひび割れに沿って塩化物イオンの浸透が認められた (図-4.3.14中のひび割れの終点まで約50mm)。しかしながら、ひび割れ終点からの塩化物イオンの浸透は約0.03wt% (0.8kg/m^3)程度であり、ひび割れ始点の約0.26wt% (7kg/m^3)と比較して低かった。残留ひび割れ幅が0.1mm (実測0.15mm)の場合、分析範囲である80mmの深さまで塩化物イオンの浸透が認められ、ひび割れ幅が大きい箇所では、約0.26wt% (7kg/m^3)を超える高い塩化物イオン濃度となっていた。しかし、ひび割れた部分から内部への浸透は見られない。本実験より、ひび割れが生じた場合は、ひび割れ部には塩化物イオンが侵入するものの、曲げ強度試験と分析結果の結果から、本研究のUFCを用いた構造物において、微細なひび割れが発生した場合でも、短期間のうちに構造性能や耐久性が低下する可能性は低いと判断できる。また、橋本ら[2012]の研究

によると、初期ひび割れが大きい場合（ひび割れ幅 0.5mm 以上）、繊維の腐食によって、モルタルとの付着性能が向上するとの報告もあることから、本研究の UFC についても長期耐久性データの収集が必要と考えられる。

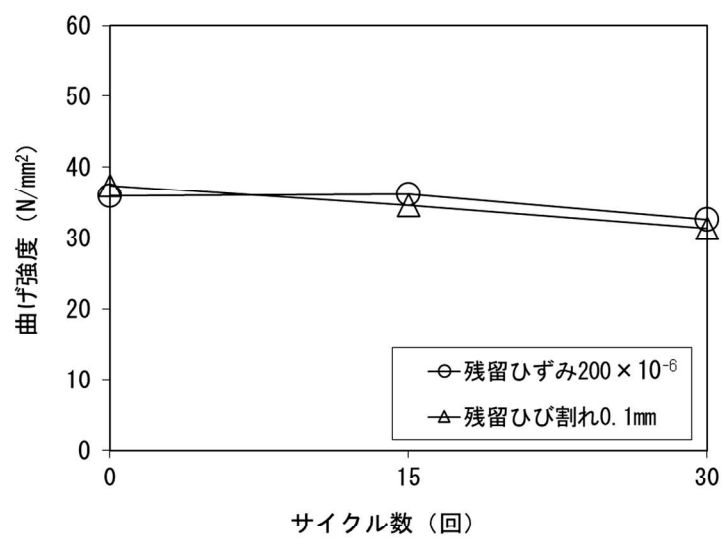
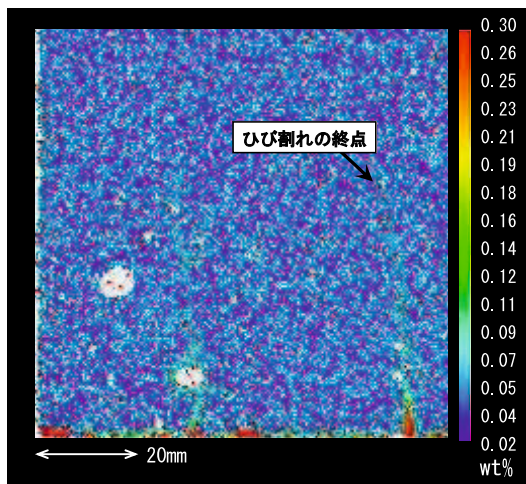
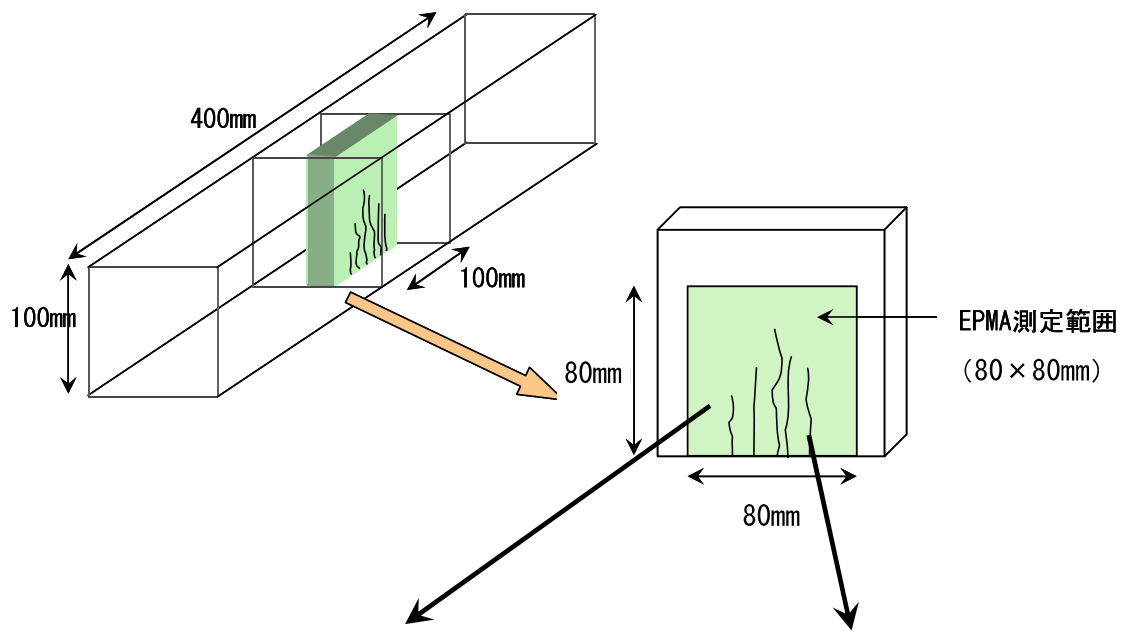
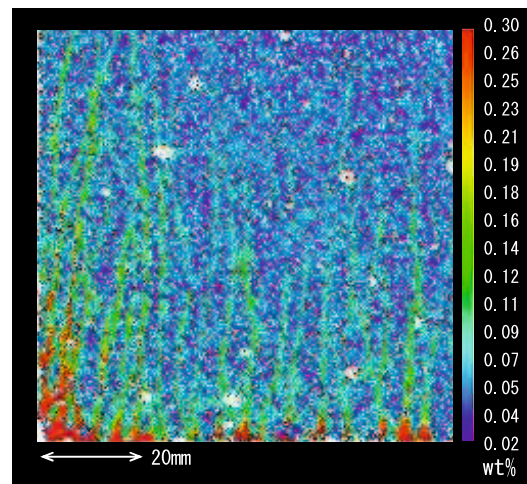


図-4.3.13 曲げ強度試験結果



残留ひずみ 200×10^{-6} の供試体



残留ひび割れ 0.1mm の供試体

図-4.3.14 ひび割れ内部の塩化物イオン侵入状況

4.3.6 塩化物イオンの侵入に伴う鋼材の腐食

(1) 試験方法

UFC 内に配置された鋼材の塩化物イオンによる腐食を調べるため、JCI-SC2「塩分を含んだコンクリート中の補強用棒鋼の促進腐食試験方法—オートクレーブ法—」に準じて促進腐食試験を実施した。試験条件を表-4.3.4に示す。

表-4.3.4 試験条件

供試体名		UFC	比較用コンクリート※1
使用材料	使用粉体・セメント	プレミックスマックス	早強ポルトランドセメント
	鋼繊維	鋼繊維（繊維径 0.16mm，繊維長 13mm）	
	鋼材	みがき鋼棒（φ13×180mm，JIS G 3108 に準拠）	
鋼繊維の容積混入率（vol.%）		2.0	
試験条件	養生方法	標準養生 28 日	
	試験方法	JCI-SC2「塩分を含んだコンクリート中の補強用棒鋼の促進腐食試験方法—オートクレーブ法—」	
	供試体寸法（mm）	φ100×200	
	添加した塩化物イオン量（kg/m ³ ）	13	
	促進条件	180℃，10 気圧，8 時間保持×5，10 サイクル	
	腐食減量測定試薬	クエン酸ニアンモニウム 10%溶液	

※1 比較用供試体の配合は、単位水量 165kg/m³，単位セメント量 413kg/m³，細骨材率 43.3% のコンクリート粗骨材を除いたものを単位量に換算したもの

(2) 実験結果および考察

鋼材の腐食減量を図-4.3.15に示す。また、写真-4.3.3に試験後の鋼材の状況を示す。10 サイクルの促進腐食によっても補強用棒鋼の著しい腐食は認められず、UFC は非常に高い腐食抵抗性を示している。UFC 中に塩化物イオンが存在しても、酸素や水の供給が少ないため、鋼材腐食の進行が一般的なコンクリートよりも遅いと考えられる。

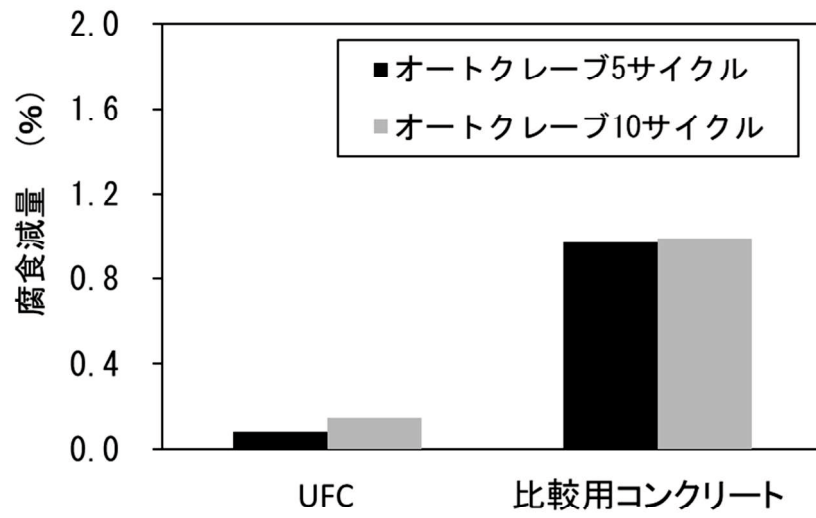


図-4. 3. 15 鋼材の腐食減量

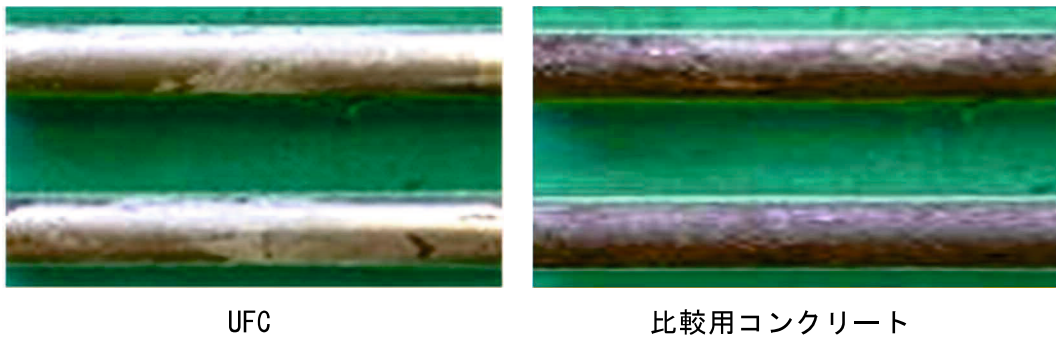


写真-4. 3. 3 試験後の鋼材の状況

コンクリート標準示方書【設計編】[2018] 3.1.4 に記載の式(2)に従って、UFC を用いた部材の表面から鋼材までの距離と鋼材腐食開始時期の関係（計算値）を試算した結果を図-4.3.16 に示す。初期塩化物イオン量は材料由来の塩化物イオン量とし、表面の塩化物イオン量はコンクリート標準示方書【設計編】[2018] 3.1.4.3 の解説 表 3.1.1 に示される飛沫帯に相当する値を用いた。塩化物イオンの拡散係数は 1 年の結果（0.0034cm²/年）を用いた。計算条件を表-4.3.5 に示す。UFC 指針[2004]に記載のある最小かぶり 20mm の位置の塩化物イオン量を算出した結果、限界腐食塩化物イオン量に達するのは、約 200 年と推定されるため、設計耐用年数 100 年とする場合、UFC 指針[2004]の熱養生を行う UFC と同様に塩化物イオンの侵入に伴うコンクリート中の鋼材の腐食に関する照査は行わなくてよいと判断できる。

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot c_d}{2 \sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right) + C_i \quad (2)$$

ここで、

C_d : 鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 (kg/m³)

C_0 : コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m³)

c_d : 耐久性に関する照査に用いるかぶりの設計値 (mm)

t : 塩化物イオンの侵入に対する耐用年数 (年)

γ_{cl} : 鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d のばらつきを考慮した安全係数

D_d : 塩化物イオンに対する設計拡散係数 (cm²/年)

表-4.3.5 計算条件

限界腐食塩化物イオン量 (kg/m ³) ※	1.2
初期塩化物イオン量 (kg/m ³)	0.202
表面塩化物イオン量 (kg/m ³)	13
塩化物イオン拡散係数 (cm ² /年)	0.0034

※結合材に微細な混和材を使用したため、シリカフェームを用いた場合と同様に 1.2kg/m³ を用いた。

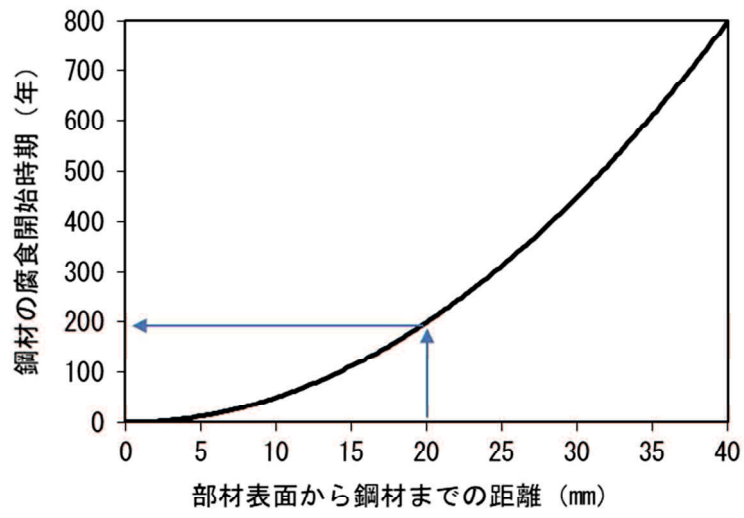


図-4.3.16 部材表面から鋼材までの距離と鋼材の腐食開始時期の関係

4.3.7 耐薬品性

(1) 試験方法

耐薬品試験は、JIS 原案「コンクリートの溶液浸せきによる耐薬品性試験方法（案）」[1985]を参考に行った。浸せき溶液は、5%硫酸溶液、2%塩酸溶液、10%硫酸マグネシウム溶液および10%硫酸ナトリウム溶液とした。試験溶液は、試験開始後1ヶ月間は毎週全量交換し、その後は1ヶ月毎に全量交換することとした。なお、供試体は $\phi 50 \times 100\text{mm}$ とした。

(2) 実験結果および考察

試験期間と質量減少率との関係を図-4.3.17に示す。硫酸ナトリウム、硫酸マグネシウムといった硫酸塩に対する抵抗性は高く、実環境下では硫酸塩の侵食によって、構造物の所要性能が低下する可能性は小さいと考えられる。一方、塩酸、硫酸に浸せきした場合、浸せき期間に伴って質量が低下しており、使用環境によっては表面被覆などの劣化防止対策が必要と考えられる。

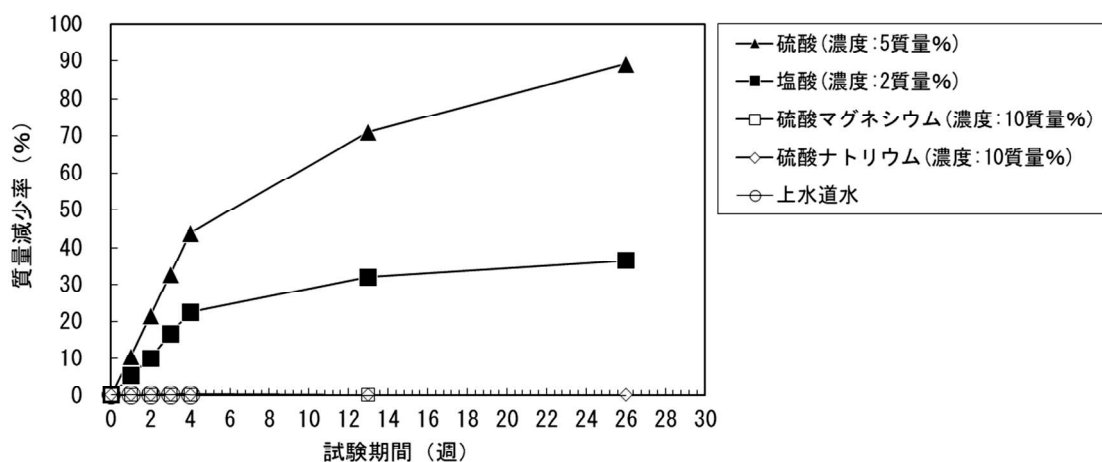


図-4.3.17 試験期間と質量減少率との関係

4.3.8 アルカリシリカ反応に対する抵抗性

(1) 試験方法

JCI AAR3「コンクリートのアルカリシリカ反応性判定試験方法（コンクリート法）」に準じて、表-4.3.6 に示す条件で促進膨張試験を実施した。

表-4.3.6 試験条件

使用材料	結合材	プレミックス材
	骨材	JIS A 5308 附属書 1 のアルカリシリカ反応による区分 A の骨材
鋼繊維の容積混入率 (vol.%)	0	
試験方法	コンクリートのアルカリシリカ反応性判定試験方法 (コンクリート法 JCI AAR3) 40℃湿度 95%促進試験	
供試体種類	NaOH を $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ で $2.40\text{kg}/\text{m}^3$ 加えたもの、 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=12.80\text{kg}/\text{m}^3$	
養生方法	標準養生 28 日	
供試体寸法 (mm)	100 × 100 × 400	
試験期間 (月)	1, 2, 3, 4, 5, 6	

(2) 実験結果および考察

試験期間と膨張量の関係を図-4.3.18 に示す。6 か月後の膨張率は 0.003% ($\leq 0.1\%$) であり、アルカリシリカ反応に対して、無害の骨材を使用した場合、アルカリシリカ反応に起因する膨張は生じないと判断される。本研究の UFC は硬化体組織が緻密であり、水の侵入を抑制できること、一般にアルカリシリカ反応に対して無害である骨材を使用することから、アルカリシリカ反応に関する照査を省略できると考えられる。

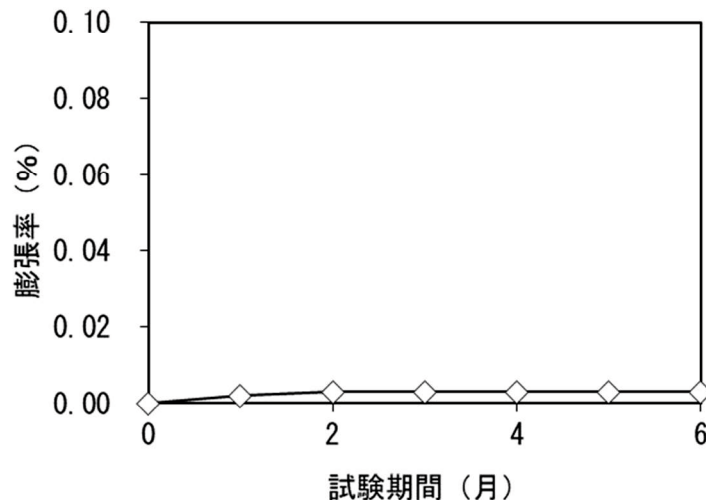


図-4.3.18 試験期間と膨張量の関係

4.4 4章のまとめ

- 本研究の UFC の圧縮強度，曲げ強度およびひび割れ発生強度の特性値は，熱養生を行う UFC 指針に示される標準配合粉体を使用した UFC と同等である。
- 乾燥収縮ひずみは一般のコンクリートよりも小さいものの，自己収縮ひずみは，一般のコンクリートよりも大きいため，打込み後の型枠脱型時期やプレストレスのロス等の設計に留意する必要がある。ただし，自己収縮と乾燥収縮を合わせた収縮量は一般のコンクリートと同程度である。材料面で自己収縮ひずみを低減することが今後の課題である。
- 設計耐用年数を 100 年とした場合，中性化による鋼材の腐食や凍結融解作用によって所要の性能が低下することはないと判断できる。
- 塩化物イオンの浸透性および硫酸塩に対する抵抗性は非常に高いことがわかった。ただし，硫酸および塩酸による劣化が生じる環境に使用する場合は適切な対策が必要である。また，ひび割れが生じた場合は，ひび割れ内部に塩化物イオンなどの劣化因子が侵入するものの，短期間のうちに構造性能や耐久性が損なわれる可能性は低い，長期的な耐久性については今後確認が必要である。

4.5 第4章の参考文献

- 川上英男, 脇 敬一: セメントモルタルの弾性係数と近似複合理論, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.1, pp.543-548, 1996.
- 川上英男: コンクリートの弾性係数と圧縮強度の関係についての一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.449-454, 2006.
- 川上明大, 片平 博, 渡辺博志: 片引き試験による断面修復材の付着強度試験方法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1603-1608, 2015.
- 田中敏嗣, 新藤竹文, 横田 弘, 下村 匠: 超高強度繊維補強コンクリート中における鋼繊維の腐食に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.267-272, 2004.
- 土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書【設計編】, 2008.
- 土木学会: 2017年制定コンクリート標準示方書【設計編】, 2018.
- 土木学会: 混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針(案), 2018.
- 土木学会: 自己充てん型高強度高耐久コンクリート構造物設計施工指針(案), コンクリートライブラリー105, 2001.
- 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113, 2004.
- 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術評価報告書, 技術推進ライブラリーNo.3, 2006.
- 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, 2018.
- 日本コンクリート工学会: JCI-S-001-2003「切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法」, 2003.
- 日本コンクリート工学会: JCI-S-002-2003「切欠きはり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」, 2003.
- 日本コンクリート工学会: コンクリート技術の要点 '20, p.70, 2020.
- 日本コンクリート工学会: コンクリート工学, Vol.23, No.3, pp.59-62, 1985.
- 日本コンクリート工学会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016, p.289, 2016
- 橋本勝文, 横田 弘, 豊田昂史, 河野克哉: ひび割れを有する超高強度繊維補強コンクリートの海水浸漬後の引張軟化特性およびひび割れ性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.220-225, 2012.

- 兵頭彦次, 新藤竹文, 横田 弘, 下村 匠 : 超高強度繊維補強コンクリートの塩分浸透性と鋼繊維の腐食に関する実験的検討, 土木学会第 59 回年次学術講演会, pp.1009-1010, 2004.
- 吉兼 亨 : 乾燥収縮ひずみの規制へのレディーミクストコンクリート業界の対応, コンクリート工学, Vol.46, No.11, 2008.

第5章

生コン工場における製造方法の検討

第5章 生コン工場における製造方法の検討

5.1 検討目的

本研究で検討している UFC は一般の生コン工場で製造して施工現場まで運搬して打ち込むことを想定している。そこで、本章では、第3章で配合設計した UFC を実構造物に適用することを想定し、関東地区および東海地区の4つの生コン工場で製造方法を検討した。

5.2 ミキサ性能の影響

5.2.1 実験方法

(1) 使用材料および配合

結合材料は3章で検討したものから選定、配合したプレミックス材料を用いた。細骨材は粒径5mm以下、表乾密度2.62g/cm³、吸水率2.50%の高強度コンクリートへの使用実績のある砕砂を使用した。混和剤は、ポリカルボン酸系の高性能減水剤、補強用繊維は直径0.16mm、長さ13mm、引張強度2000N/mm²以上の鋼繊維を使用した。UFCの配合を表-5.2.1に示す。

表-5.2.1 UFCの配合

単位量 (kg/m ³)				補強用鋼繊維 (kg)
水 ^{注)}	プレミックス材	細骨材	高性能減水剤	
230	1830	330	32	157

注) 水の単位量は減水剤の水分を含む

(2) 実験水準

使用した工場のみキサの仕様と練混ぜ条件を表-5.2.2に示す。関東地区の一般的な生コン工場(3工場)で製造を行った。各工場のみキサは練混ぜ容量と電動機の容量がそれぞれ異なる。

表-5.2.2 ミキサの仕様と練混ぜ条件

詳細		ミキサ A	ミキサ B	ミキサ C
ミキサ仕様	練混ぜ容量 (m ³)	3.3	2.5	3.0
	ミキサ形式	水平二軸型 (強制練り)		
	電動機	55kW×2 機 (400V)	37kW×2 機 (200V)	75kW×1 機 (200V)
	回転数 (rpm)	35	26	25
練混ぜ回数		5	2	1
練混ぜ量 (m ³)		1.7 (52%)	1.8 (72%)	1.5 (50%)

5.2.2 実験結果および考察

練混ぜ負荷が最大となった時間と練混ぜに要した時間を表-5.2.3に示す。また、ミキサ A 使用時の負荷の推移を図-5.2.1に示す。いずれのミキサにおいても、プレミックス材と細骨材が塊状になる際にミキサ負荷が最大値となり、スラリー化すると負荷値が低下して安定した。ミキサ A を使用した過去の製造実績をみると、W/C=24%の高強度コンクリート (圧縮強度 80N/mm²) を 2m³ 練り混ぜた時の負荷の最大値が 82kW となっており、UFC を 1.7m³ 製造した時の最大負荷値と同等であった。また、圧縮強度が 24N/mm² の普通コンクリート 2m³ を製造した時の最大負荷値は、60kW であり UFC 製造時よりも小さかった。ミキサ負荷が最大値になるまでの練混ぜ時間は、ミキサ A が最も短かった。これは攪拌速度が早く、また攪拌動力が大きいことから、材料に作用するせん断力が大きいと考えられる。材料が塊状になってからスラリー化するまでには 4~5 分を要しており、ミキサによる違いは認められなかった。ミキサ B とミキサ C は、合計動力が 75kW であったが、練混ぜ時間に差が生じた。これは、練混ぜ量の違いによると思われる。

UFC を練り混ぜる場合、材料が塊状になるときにミキサ負荷がピークとなり、負荷が落ちるまでに一般のコンクリートよりも時間を要するものの (図-5.2.1 の 4 分以降)、この実験から、ミキサ容量の 70%程度であれば設備に過剰な負荷をかけることなく UFC の製造が可能ながわかった。

表-5.2.3 負荷が最大となった時間と練混ぜ時間

ミキサ	注水後の負荷が最大となった時間 (分)	注水後の練混ぜ時間 (分)
A	4	8
B	11	16
C	7	11

注) ミキサ A および B は平均値を採用

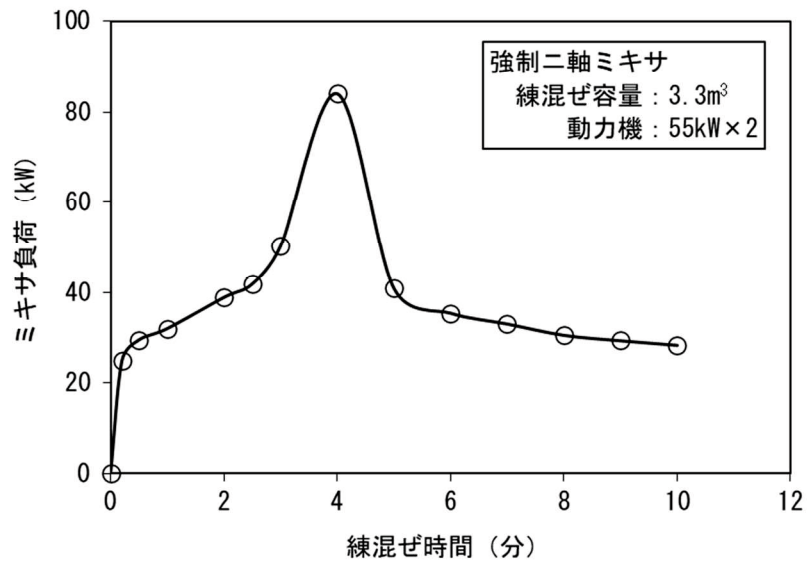


図-5.2.1 ミキサ負荷の推移例 (ミキサ A 使用)

5.3 細骨材の表面水率の影響

5.3.1 実験方法

(1) 使用材料および配合

結合材料は3章で検討したものから選定，配合したプレミックス材料を用いた。細骨材は粒径 5mm 以下，表乾密度：2.62g/cm³，吸水率：2.50%の高強度コンクリートへの使用実績のある砕砂を使用した。混和剤には，ポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用し，補強用繊維には直径 0.16mm，長さ 13mm，引張強度 2000N/mm² 以上の鋼繊維を使用した。配合を表-5.3.1 に示す。

表-5.3.1 UFC の配合

水 ^{注)}	単位量 (kg/m ³)			鋼繊維 (kg)
	プレミックス材	細骨材	高性能減水剤	
230	1830	330	32	157

注) 水の単位量は減水剤の水分を含む

(2) 実験水準

実験水準を表-5.3.2 に示す。

表-5.3.2 実験水準

ミキサ種類	A	B	C	試験方法
バッチ数	5	2	1	—
表面水率	○	○	○	JIS A 1111
フロー	○	○	○	JIS R 5201 フロー (落下なし)
空気量	○	○	○	JIS A 1128 に準拠
圧縮強度	○	○	○	JIS A 1108 を参考

5.3.2 実験結果および考察

コンクリートの製造においては，骨材の表面水率を正確に把握することが，品質安定化を図る上で重要なため，バッチ毎に細骨材の表面水率を測定して計量値に反映させた。図-5.3.1 に細骨材の表面水率とフロー値を示す。繊維投入直後のフロー値の平均は

259mm (243~280mm) となり、変動係数は 5.5%であった。一方、空気量の平均値は 2.0% (1.7~2.2%) となり、変動係数は 10.2%であった。また、練上り温度は 13~34℃となった。練上り温度が本検討の範囲であれば、フロー値や空気量の変動は小さいと考えられる。ただし、フロー値が 200mm に到達する時間は練上り温度が低くなると長くなる傾向にあった。これは低温環境において高性能減水剤の吸着量が低下し、結合材の分散状態が変化したことによると考えられる。

また、細骨材の表面水率と運搬前に成形した供試体の標準養生材齢 28 日の圧縮強度を 図-5.3.2 に示す。圧縮強度の平均値は 187N/mm² (181~192N/mm²) となり、変動係数は 4.0%であった。

UFC は一般のコンクリートよりも W/B が小さく、表面水の変動の影響がフレッシュ性状や強度性状に与える影響が大きい可能性が考えられたが、この結果によれば、細骨材の表面水率が変化しても、一般的なコンクリートと同様に表面水率を正確に把握し、計量値に反映させることで品質の安定した UFC が製造できることがわかった。また、大野ら[2006]の研究によると、熱養生を行う UFC についても同様の結果が得られている。

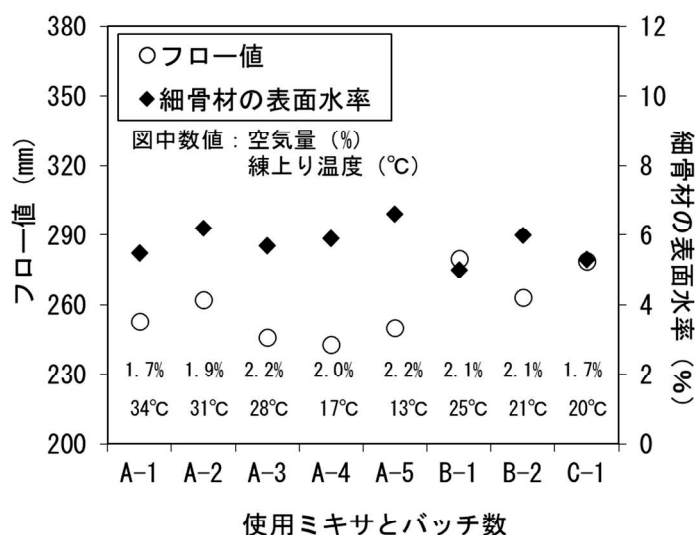


図-5.3.1 フローと表面水率の測定結果

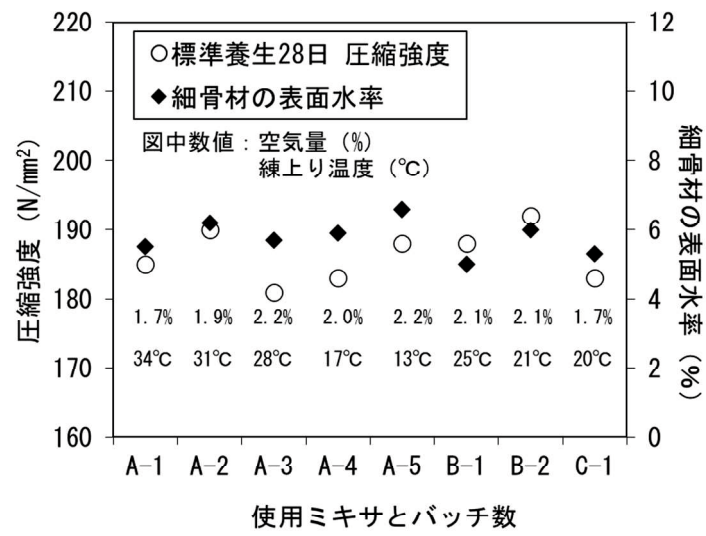


図-5.3.2 圧縮強度と表面水率の測定結果

5.4 鋼繊維の投入方法の検討

5.4.1 実験方法

(1) 使用材料および配合

結合材料は 5.2 で使用したのと同じである。細骨材は粒径 5mm 以下，表乾密度：2.68g/cm³，吸水率：1.22%の砕砂を使用した。混和剤には，ポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用し，補強用繊維には直径 0.16mm，長さ 13mm，引張強度 2000N/mm² 以上の鋼繊維を使用した。配合を表-5.4.1 に示す。

表-5.4.1 UFC の配合

単位量 (kg/m ³)				鋼繊維 (kg)
水 ^{注)}	プレミックス材	細骨材	高性能減水剤	
230	1830	330	24	157

注) 水の単位量は減水剤の水分を含む

(2) 実験水準

鋼繊維の投入方法については，プラントのミキサとトラックアジテータに投入する場合でメリットとデメリットを比較した。実験は東海地区にある一般的な生コン工場で実施した。工場の設備概要を表-5.4.2 に示す。

(a) ミキサに投入する方法

鋼繊維の投入場所の状況を写真-5.4.1 に示す。鋼繊維はミキサ上部の開口から投入することとした。この開口は膨張材などを投入する際に使用されるものである。開口に 50mm 間隔のメッシュを設け，これを通すことによって鋼繊維を分散させながら投入した。

(b) トラックアジテータに投入する方法

写真-5.4.2 のように足場を架設して，製造日までに鋼繊維を足場上部に荷揚げした。10m³ 分の鋼繊維の荷揚げに要した時間は約 20 分であった。鋼繊維は足場上部に設けた開口から分散機を用いて投入することとした。分散機は上部に設置した目開き 48mm の金属製メッシュ板 (500×350mm) に鋼繊維を投入し，毎分 1425 回の上下振動によって鋼繊維を一定の速度で分散させる仕様である。分散機の下部には長さ 2.5m のシュートを設置し，その先端をトラックアジテータ内部に挿入することで鋼繊維がトラックアジ

テータの投入口付近に付着することを防止した。投入はトラックアジテータのドラムを10rpm程度で回転させながら行った。鋼繊維の投入速度は7分/m³程度であった。また、雨天の場合は、投入作業を行う場所に簡易テントを設置して、雨水が混入しないように配慮した。なお、鋼繊維投入用の足場は、最低1日の最大製造量に当たる鋼繊維の荷重に耐える設計とした。

表-5.4.2 工場の設備概要

設備		仕様等
サイロ貯蔵量 (プレミックス材)		150t
計量 上限値	セメント	1,000kg
	細骨材	2,500kg
	混和剤	20kg
ミキサ 仕様	練混ぜ容量	2.5m ³
	ミキサ形式	水平二軸（強制練り）
	電動機	37kW×2 機（200V）
	回転数	30rpm



写真-5.4.1 鋼繊維投入場の外観



写真-5.4.2 鋼繊維投入場の外観

5.4.2 実験結果および考察

試験結果を表-5.4.3に示す。トラックアジテータへ鋼繊維を投入した場合のフレッシュ性状、硬化性状および鋼繊維の投入時間は、ミキサへ鋼繊維を投入した場合と同等の結果となった。しかし、製造時間は最後の鋼繊維の投入時間分（約10分）長くなった。また、ミキサに鋼繊維を投入する場合、ミキサの洗浄時間は30分であったが、トラックアジテータに鋼繊維を投入する場合のミキサ洗浄時間は約5分であった。トラックアジテータに鋼繊維を投入する場合は、ミキサに鋼繊維を混入していないため、洗浄は簡便であった。さらに、ミキサの洗い水に鋼繊維が混入していないため、一般のコンクリート廃棄物と同様に処理することができた。

鋼繊維の投入方法が異なる場合の連続製造実績の例を図-5.4.1に示す。トラックアジテータに鋼繊維を投入する場合、スラリー製造と並行して鋼繊維の投入ができたため、1日あたりの製造時間は、ミキサへ鋼繊維を投入する場合より若干長くなる程度であった。供給速度は、トラックアジテータに鋼繊維を投入する場合で約 $4.3\text{m}^3/\text{h}$ 、ミキサに鋼繊維を投入する場合で約 $4.7\text{m}^3/\text{h}$ で、若干ミキサへ鋼繊維を投入する工程の方が速かったがほぼ同等である。また、トラックアジテータへ鋼繊維を投入する場合は、ミキサの洗浄時間が短くなるため、速やかに通常出荷が可能ながわかった。

鋼繊維の添加方法の違いによる、メリットとデメリットを表-5.4.4に示す。ミキサへ鋼繊維を投入した場合は、製造時間が若干短縮できることと、鋼繊維投入時の雨天対策が不要というメリットがあった。しかし、一般のコンクリートへ鋼繊維の誤混入を避け

るため、ウォータージェット等を用いて入念に洗浄する必要があったため、ミキサの洗浄に時間を要した。また、追加発注に対応する際は、ミキサの洗浄時間も考慮して、他の出荷と調整する必要があった。

鋼繊維をトラックアジテータに投入する場合は、ミキサに水を溜めて攪拌することで洗浄できたため、ミキサの洗浄が簡略化できることがわかった。また、ミキサ洗浄が容易なことから、一般コンクリートの出荷の合間に追加発注に対応することができた。しかし、屋外で鋼繊維を投入するため、保管時の鋼繊維と投入時に雨天対策を施す必要があった。保管時の鋼繊維は、降雨に曝されると錆びるため、パレットを2枚重ねにして地面からの水の吸い上げを抑制することや、厚手のブルーシート等で二重に覆って雨水の侵入を防止する必要があった。また、製造時が雨天の場合は鋼繊維の投入箇所も簡易なテントを用いて雨水が鋼繊維にかからないように注意する必要があった。

表-5.4.3 比較試験結果

調査項目		試験結果		鋼繊維の投入 方法による影響
鋼繊維の投入場所		ミキサ	アジテータ	
フレッシュ 性状	フロー (mm)	272~295	281	影響なし
	空気量 (%)	1.5~2.6	2.3	影響なし
	コンクリート温度 (°C)	18.0~32.0	31.0	影響なし
硬化性状	圧縮強度 ^{※1} (N/mm ²)	191~205	196	影響なし
時間	繊維投入時間	10分	10分	影響なし
	ミキサ洗浄時間	30分	5分	ミキサに鋼繊維を投入する場合はミキサの洗浄に時間を要す
	製造時間 ^{※2}	20分	30分	トラックアジテータへ投入する場合は若干時間を要す

表-5.4.4 鋼繊維の添加方法の違いによるメリットとデメリット

繊維投入箇所	トラックアジテータ	ミキサ
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ・ミキサの洗浄が容易。 ・通常出荷に鋼繊維が混入する恐れがない。 ・追加発注に対応できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・供給速度が若干速い。 ・追加発注に対応するためには、他の出荷との調整が必要。
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> ・投入する敷地や足場の設置が必要。 ・鋼繊維や投入場所の雨天時の対策が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ミキサの洗浄に時間を要する。ウォータージェット等を用いて入念に洗浄する必要がある。

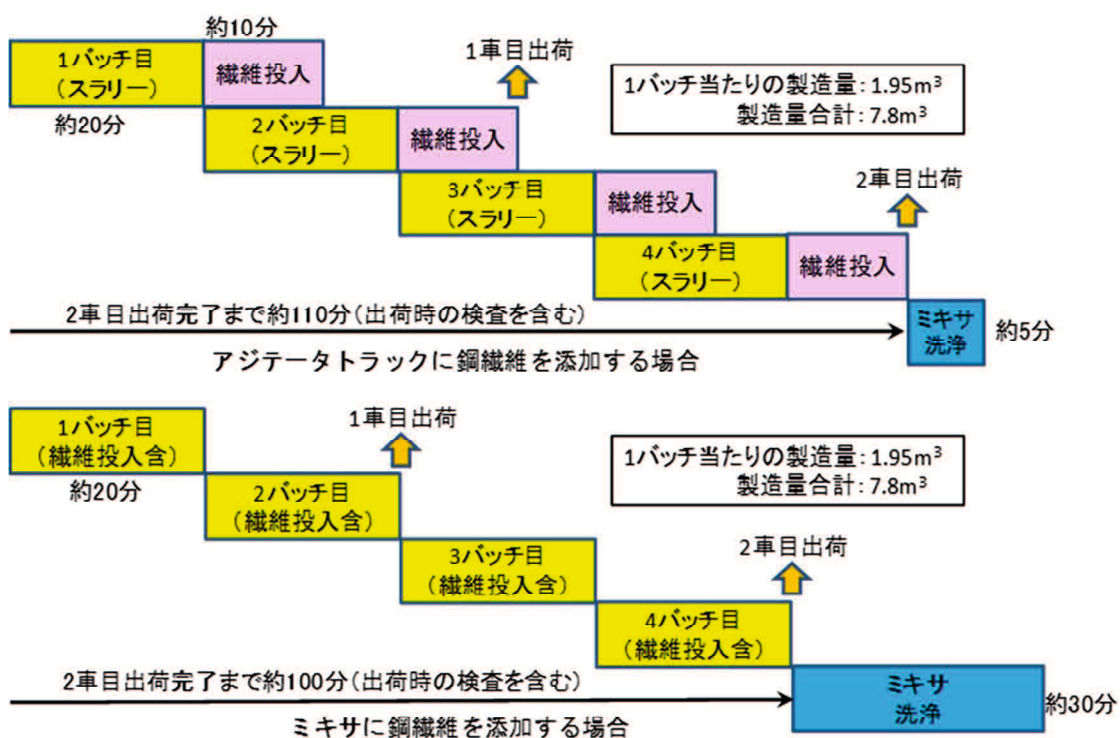


図-5.4.1 鋼繊維の投入方法が異なる場合の製造実績比較

(上：鋼繊維をトラックアジテータへ投入する場合)

(下：鋼繊維をミキサへ投入する場合)

5.5 運搬の影響

5.5.1 実験方法

(1) 使用材料および配合

使用材料および配合は、5.2 と同じである。配合を表-5.5.1 に示す。

表-5.5.1 UFC の配合

ミキサ種類	製造時期	単位量 (kg/m ³)				鋼繊維 (kg)
		水 ^{注)}	プレミックス材	細骨材	高性能減水剤	
A	夏期	230	1830	330	25	157
	冬期				26	
B	標準期				25	

注) 水の単位量は減水剤の水分を含む

(2) 実験水準

実験水準を表-5.5.2 に示す。製造条件は5.2と同様である。運搬時間は最大で4時間とし、運搬後にフレッシュ性状と強度性状を調べた。

表-5.5.2 実験水準

ミキサ種類		A		B	詳細	
運搬条件および測定項目	長距離運搬	運搬時期	夏期	冬期	標準期	ミキサ C で練混ぜを行った場合は、トラックアジテータに繊維を投入し、その直後に各種測定を実施
		運搬距離	23km	100km	52km	
		運搬時間	1時間	4時間	2.5時間	
		アジテータトラック容量 ^{※1}	4.25m ³		4.25m ³	
		積載量	1.7m ³	1.7m ³	1.8m ³	
運搬後	フロー値	○	○	○	繊維投入直後の測定に同じ	
	空気量	○	○	○		
	圧縮強度 ^{※2}	○	○	○		
	曲げ強度 ^{※2}	○	○	○		JIS A 1106 に準拠 (試験体寸法: 100×100×400mm)

※1 成形後の供試体は工場建屋もしくは現場建屋にて静置保管し、脱型後は試験材齢まで標準養生

※2 一般的なコンクリートを積載する時の公称積載容積

5.5.2 実験結果および考察

トラックアジテータでの運搬時間とフロー値および空気量の関係を図-5.5.1 および図-5.5.2 に示す。なお、図-5.5.1 中の数値は運搬前後の UFC の温度を示している。いずれの季節に製造した場合も、運搬後のフレッシュ性状が荷卸し時の目標値を満足した。試験結果から、環境温度が低い場合、同一フローを得るための高性能減水剤の使用量が多く必要だが、運搬時のフローロスをほとんど考慮する必要がない。逆に環境温度が高い場合は、同一フローを得るための高性能減水剤の添加率は環境温度が低い場合よりも少なくできるが、運搬時のフローロスが大きいため、これを考慮して練上り時のフローを大きくする必要がある。このことから、運搬を考慮する場合、実験範囲内の環境温度では、夏期と冬期で高性能減水剤の添加量はほとんど変える必要がなかった。また、運搬中の攪拌による空気量の増大や、著しい温度変化は認められなかった。100km を運搬した UFC の繊維分散状況も良好であった。

運搬前後の UFC を用いて成形した供試体の圧縮強度および曲げ強度を表-5.5.3 に示す。運搬後の UFC を用いて成形した供試体の圧縮強度は、運搬前の UFC と比較して差が認められなかった。これは運搬による空気量の巻き込みがなかったことによると考えられる。また、曲げ強度も運搬前後で差が認められなかったが、これは繊維分散の程度に差がなかったためと考えられる。

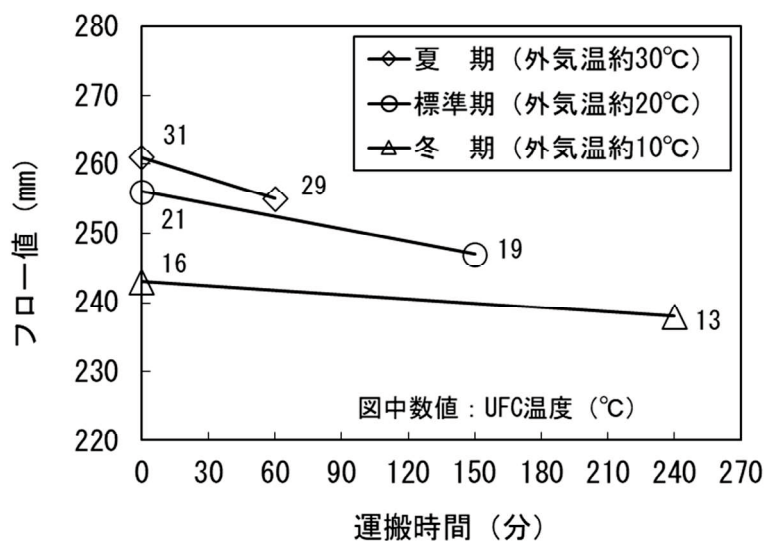


図-5.5.1 運搬時間とフローの関係

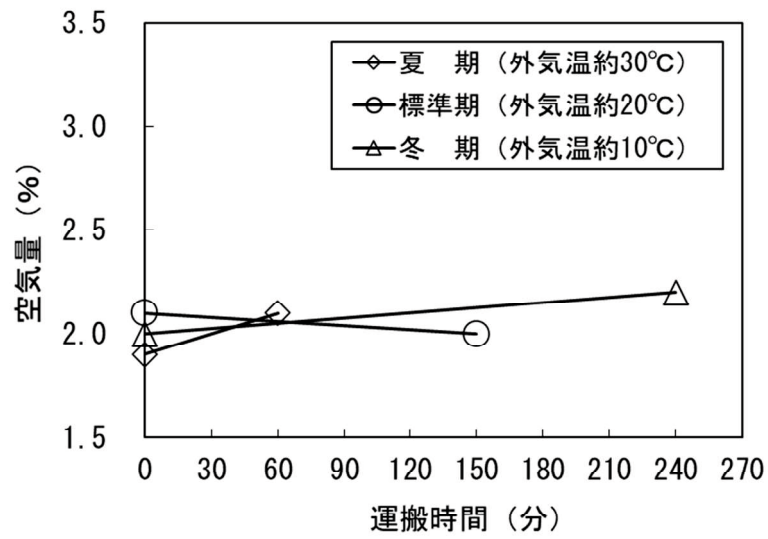


図-5.5.2 運搬時間と空気量の関係

表-5.5.3 運搬前後の圧縮強度および曲げ強度

運搬時期 運搬距離	圧縮強度 (N/mm ²)		曲げ強度 (N/mm ²)	
	運搬前	運搬後	運搬前	運搬後
夏 期 23km	190	184	33.2	32.5
標準期 52km	188	192	34.1	32.7
冬 期 100km	183	188	30.9	33.1

5.6 製造および運搬時の材料ロス

5.6.1 実験方法

(1) 使用材料および配合

結合材料は 5.2 で使用したのと同じである。細骨材は粒径 5mm 以下，表乾密度：2.57g/cm³，吸水率：1.90%の砕砂を使用した。混和剤には，ポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用し，補強用繊維には直径 0.16mm，長さ 13mm，引張強度 2000N/mm² 以上の鋼繊維を使用した。配合を表-5.6.1 に示す。

表-5.6.1 UFC の配合

単位量 (kg/m ³)				鋼繊維 (kg)
水 ^{注)}	プレミックス材	細骨材	高性能減水剤	
230	1830	330	30	157

注) 水の単位量は減水剤の水分を含む

(2) 製造および材料ロスの測定方法

製造は東海地区の一般的な生コン工場で行い，容量 3m³ の二軸強制練りミキサで，1 バッチ当たりの練混ぜ量を 2.2m³ として製造した。なお，鋼繊維は分散機とベルトコンベアを使用して，トラックアジテータで混入した。鋼繊維の投入状況を写真-5.6.1 に示す。

ミキサ内およびトラックアジテータ内に付着して排出できない UFC の量 (ロス量) を把握するため，積み込み前，積み込み後，荷卸し後および洗浄後のトラックアジテータの重量を車両重量計で測定し材料のロス率を算出した。



写真-5.6.1 鋼繊維の投入状況

5.6.2 実験結果および考察

工場のみキサに 2.2m^3 分の超高強度モルタル材料（計 5258kg ）を投入したが、みキサからトラックアジテータに排出する時に 29kg (0.6% 相当) の材料ロスが生じた。さらに、トラックアジテータに 345.4kg の鋼繊維を投入した後、運搬後にトラックアジテータから排出できなかった UFC は 480kg （約 190L ）であった。製造から運搬して排出するまでのロスの合計は製造量の約 9% におよぶことがわかった。岩永ら[2010]の報告によると、一般的なコンクリートのトラックアジテータ内での材料ロスが 80L との報告もあることから、運搬過程の UFC の材料ロス（約 190L ）は大きい。このような材料ロスはコストおよび環境面の問題となるため低減することが今後の課題である。

5.7 細骨材種類の影響

生コン工場で UFC を製造する場合、運搬コストや貯蔵の観点から、工場で常用している細骨材を使用することが望ましい。一方で、UFC の圧縮強度の特性値 180N/mm^2 を満足するためには、ばらつきを考慮すると、実強度として 200N/mm^2 程度必要なことから、使用する細骨材が弱い場合、目標の圧縮強度を満足できない可能性もある。そのため、本項では日本各地の細骨材を試験し、UFC への適用性を調べた。

5.7.1 実験方法

(1) 使用材料および配合

結合材料は 5.2 で使用したものと同一である。使用した細骨材を表-5.7.1 に示す。細骨材は、北海道、東北、関東、関西、中国および九州地区で入手できる 10 種類を使用した。混和剤には、ポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用し、補強用繊維には直径 0.16mm 、長さ 13mm 、引張強度 2000N/mm^2 以上の鋼繊維を使用した。配合を表-5.7.2 に示す。

表-5.7.1 使用した細骨材

細骨材	岩種	産地	表乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	粗粒率	微粒分量 (%)
A	陸砂	北海道	2.68	1.86	2.76	2.4
B	輝緑岩	東北	2.86	1.65	3.01	4.4
C	安山岩	関東	2.62	2.50	2.80	3.3
D	硬質砂岩	関東	2.60	1.55	2.87	2.0
E	硬質砂岩	関東	2.64	1.30	2.92	2.2
F	硬質砂岩	関東	2.68	1.62	3.02	2.2
G	山砂	関東	2.59	1.78	2.13	0.4
H	硬質砂岩	関西	2.58	1.73	2.80	3.3
I	硬質砂岩	中国	2.67	1.85	2.92	5.7
J	角閃岩	九州	2.89	1.41	2.81	2.0

表-5.7.2 配合

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)			
	水	プレミックス	細骨材	高性能減水剤
15.5	230 ^{※1}	1830	325~364 ^{※2}	32

※1：高性能減水剤中の水分も含む

※2：細骨材密度が異なるため、容積が一定となるよう単位量を調整

(2) 練混ぜ方法

練混ぜは、強制二軸練りミキサ（容量 55L）を使用し、1 回の練混ぜ量は 40L とした。まず、プレミックス材と細骨材を投入し、30 秒間空練りした後、水および高性能減水剤を投入してから 10 分間練り混ぜた。その後、鋼繊維を投入して、更に 3 分間練混ぜてから排出した。

(3) 実験水準

実験水準を表-5.7.3 に示す。

表-5.7.3 実験水準

試験項目	試験方法
モルタルフロー (0 打)	JIS R 5201 に準拠
空気量測定	JIS A 1128 に準拠
圧縮強度	供試体寸法：φ50×100mm JIS A 1108 を参考
自己収縮 ^{※1}	供試体寸法：100×100×400mm 埋込みゲージによって測定
細骨材破砕値	石橋ら[2005]の研究を参考

※1：材齢 91 日における圧縮強度が 200N/mm² 以上となった水準
について測定を実施

5.7.2 実験結果および考察

(1) モルタルフロー

細骨材の微粒分量とモルタルフローとの関係を図-5.7.1に示す。微粒分量の少ない細骨材を用いた場合に、モルタルフローは大きくなる傾向を示した。また、練上り直後の空気量は2.2~2.8%となり、細骨材種類による影響は認められなかった。

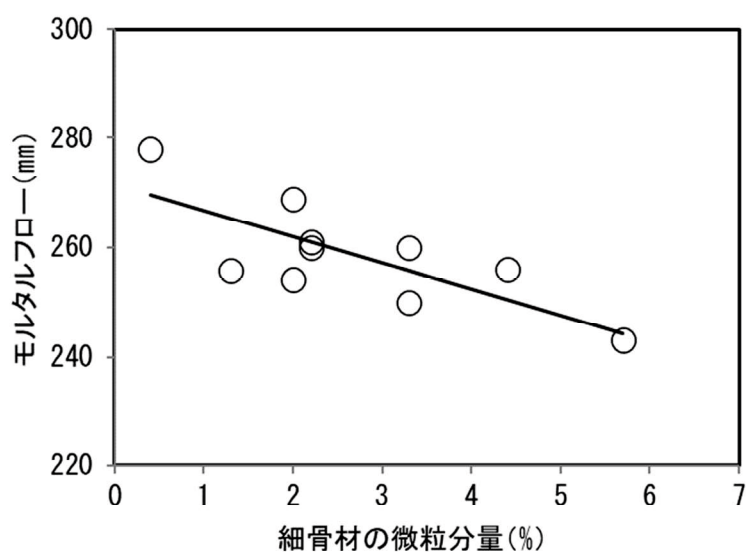


図-5.7.1 細骨材の微粒分量とモルタルフローの関係

(2) 圧縮強度

各種細骨材を用いた場合の圧縮強度を図-5.7.2に示す。細骨材 B, C, D, H および I を用いた場合は材齢 91 日の圧縮強度が 200N/mm^2 を超過した。細骨材の種類によって強度発現に差があり、また、同一岩種であっても圧縮強度が異なることから、岩種のみで UFC の圧縮強度を満足する骨材を選定することは困難と考えられる。静弾性係数は $4.6 \sim 4.8 \times 10^6 \text{N/mm}^2$ であり、細骨材種類による影響は認められなかった。

本実験結果から、UFC を生コン工場で製造するにあたり、その工場で常用されている細骨材を UFC に使用した場合に、目標の圧縮強度を満足できるかを事前試験によって確認しておく必要がある。

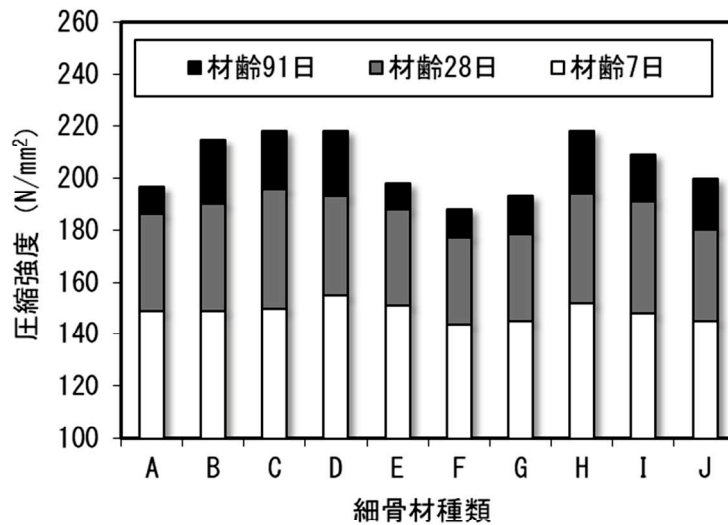


図-5.7.2 圧縮強度試験結果

(3) 細骨材破砕値

圧縮強度試験の結果、使用する細骨材によって UFC の圧縮強度が異なった。そのため、一部の細骨材について、細骨材の強さと圧縮強度の関係を調べることにした。細骨材破砕値の測定方法は、橋本ら[2005]の研究を参考とし、金属製の円筒容器 ($\phi 100 \times 45\text{mm}$) に予め粒径が $0.6 \sim 1.2\text{mm}$ になるようにふるい分けた細骨材を投入し、圧縮強度試験機を用いて 10 分間かけて最大荷重に到達するように载荷速度を調整して载荷した。荷重を除荷した後、細骨材を 0.3mm のふるいを用いてふるい分け、通過したものの元の質量に対する百分率を破砕値とした。試験条件を表-5.7.4 に示す。

橋本ら[2005]の研究では、細骨材を入れる容器のサイズが示されてなかったため、最大応力が不明であった。そのため、はじめに圧縮強度が最も高かった細骨材 C と 2 番目に小さかった細骨材 G を用いて、最大荷重を 3 水準 (100, 300, 500kN) 変えた試験を実施した。その結果、最大荷重が 100kN の場合、両細骨材の破砕値にほとんど差がなかった。また、最大荷重が 300kN 以上になると、荷重に伴う破砕値の増加割合が小さくなったため、最大荷重は 300kN で実施することとした。また、いずれの最大荷重においても破砕値の測定結果は、UFC に用いた場合に圧縮強度が高かった細骨材 C の方が大きくなった。

最大荷重を 300kN として破砕試験を実施した、破砕値と圧縮強度の関係を図-5.7.4 に、各種細骨材の破砕値と圧縮強度の測定結果を図-5.7.5 に示す。破砕値は細骨材の種類によって、15~30%の範囲で差が生じたが、圧縮強度との間には明確な関係はみられ

なかった。一般に、骨材の破砕試験は粗骨材で実施される場合が多く、細骨材の場合は明確な規準がないため、同一岩種の粗骨材による破砕値や岩石コアの圧縮強度との関係を調べる等、今後の検討が必要である。

表-5.7.4 試験条件

細骨材	岩種	産地	最大荷重 (kN)	最大応力 (N/mm ²)	载荷速度 (N/mm ² /s)
C	安山岩	関東	100	12.7	0.021
			300	38.2	0.064
			440 [※]	56.1	0.106
D	硬質砂岩	関東	300	38.2	0.064
E	硬質砂岩	関東	300	38.2	0.064
G	山砂	関東	100	12.7	0.021
			300	38.2	0.064
			500	63.7	0.106
H	硬質砂岩	関西	300	38.2	0.064
I	硬質砂岩	中国	300	38.2	0.064

※ 試験機の都合により载荷中断

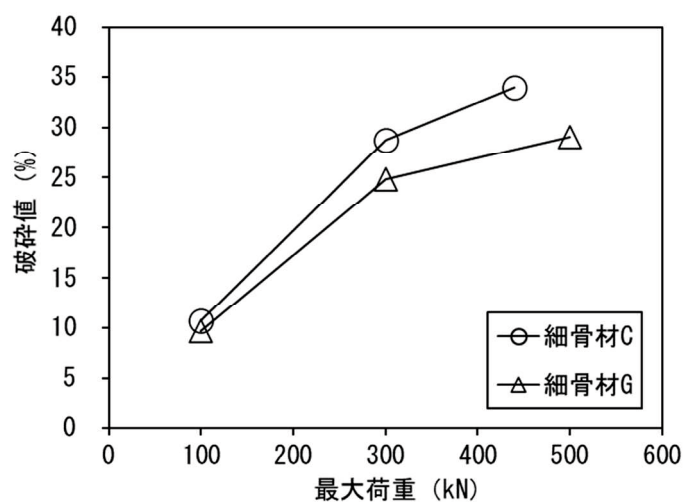


図-5.7.3 最大荷重と細骨材 G の破砕値の関係

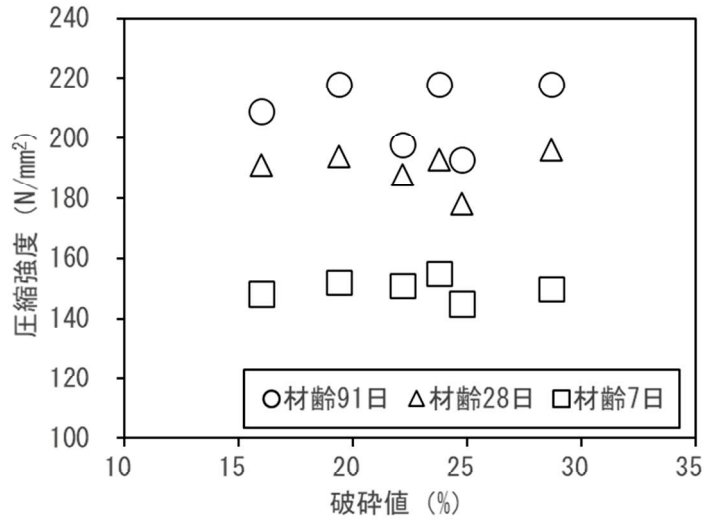


図-5.7.4 破砕値と圧縮強度の関係

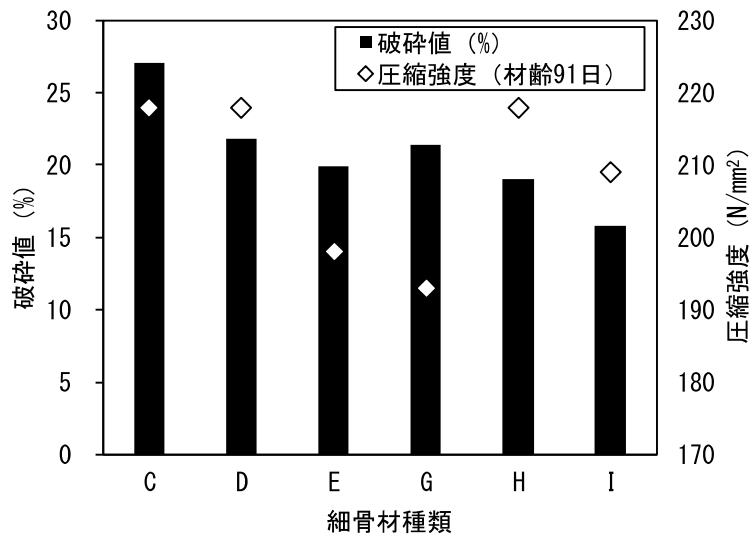


図-5.7.5 細骨材種類と破砕値および圧縮強度

(4) 自己収縮

自己収縮の測定結果を図-5.7.6に示す。打込みから6か月後の自己収縮ひずみは $590 \sim 680 \times 10^{-6}$ と、最大値と最小値の差は 90×10^{-6} であった。マスコンクリートのひび割れ制御指針[2016]によると、同一材料、同一配合のコンクリートの自己収縮ひずみは、試験所間で最大 50×10^{-6} の差があったことが報告されている。この報告の自己収縮ひずみの絶対値は 100×10^{-6} 程度であることから、本試験で得られた自己収縮ひずみの差(90×10^{-6})は小さいといえる。これは本研究のUFCの細骨材の単位量が約 330kg/m^3 と少ないため、細骨材種類による自己収縮ひずみへの影響は小さかったと考える。

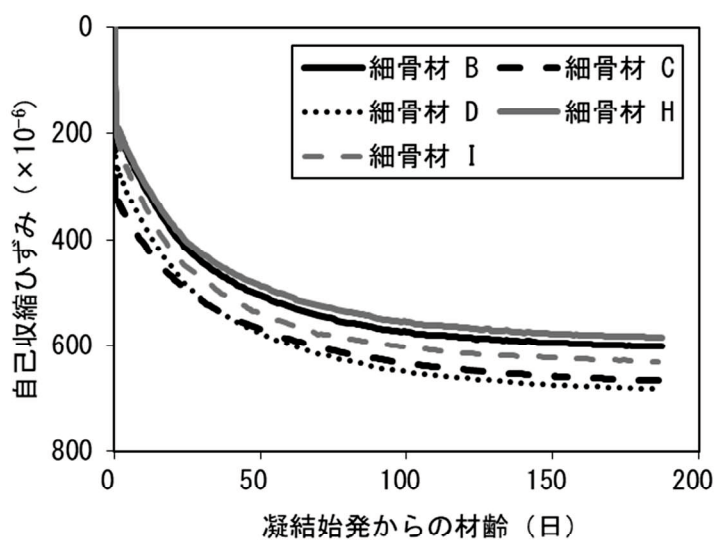


図-5.7.6 自己収縮ひずみの測定結果

5.8 5章のまとめ

生コン工場での製造方法を検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 本研究の UFC は生コン工場に常設されたミキサで練混ぜ可能である。ただし、必要とされる練混ぜ時間はミキサの性能や練混ぜ量によって異なる。
- (2) 表面水を有する細骨材を用いた場合でも、一般のコンクリートと同様に表面水を練混ぜ水に反映させることで、品質の安定した UFC を製造することができる。
- (3) 鋼繊維をトラックアジテータに投入する方法でも、ミキサに投入する場合とほぼ同等の製造時間で、フレッシュ性状の安定した UFC を連続的に供給することが可能であり、その硬化体物性も安定している。
- (4) 鋼繊維をトラックアジテータに投入する製造方法は、投入時の敷地や足場、雨天時の対策が必要なものの、ミキサの洗浄時間を短縮できることや、一般のコンクリートへ鋼繊維が混入するおそれがないことから、UFC 製造における製造工場の負担を軽減できる有効な製造方法と判断できる。
- (5) 本研究の UFC はトラックアジテータによる運搬が可能である。また、運搬前後においてフレッシュ性状や圧縮強度に差異は認められない。
- (6) UFC をトラックアジテータで運搬した場合、一般的なコンクリートの 2 倍以上の材料ロスが発生するため、発注量から設定する製造量の設定には注意が必要である。
- (7) 使用する細骨材によっては、圧縮強度が目標値を満足しない可能性がある。現状は細骨材の破碎値では判断できないため、新たに使用する細骨材は、UFC の性能を満足できるかを事前に実験によって確認する必要がある。

5.9 第5章の参考文献

- 石橋昌史, 松下博通, 佐川康貴, 陶 佳宏: 砕砂およびスラグ細骨材を用いたコンクリートの基礎的性状, 土木学会第60回年次学術講演会, pp.463-464, 2005.
- 岩永豊司: スラッジ水の有効利用と環境への配慮, コンクリート工学, Vol.48, No.9, pp.87-90, 2010.
- 大野俊夫, 坂井吾郎, 保利彰宏, 樋口正典: 超高強度繊維補強コンクリートの品質安定性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1265-1270, 2006.
- 日本コンクリート工学会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016, p.289, 2016.

第 6 章

実現場における UFC の適用性の検証

第6章 実現場における UFC の適用性の検証

6.1 検討目的

第3章から第5章で、熟養生不要な UFC の配合設計、物性、耐久性および製造方法について検討した。本章では、これまでの検討結果を基に、本研究で検討した UFC の実現場への適用性を検証することを目的とした。

6.2 生コン工場における連続製造

これまでに生コン工場において熟養生が不要な UFC を大量かつ長期にわたって製造した事例はない。また、一般的なコンクリートのように、安定的な供給の可否については定かでなかった。UFC は粘性が非常に高く、練混ぜ時のミキサ負荷も大きくなるため、適切な練混ぜ量を調べる必要がある。また、生コン工場で連続的に製造した場合に、適切に製造できているかを、フロー、空気量、強度の絶対値や変動係数から評価した。本章では、市中の生コン工場において、約4ヶ月にわたって、熟養生不要な UFC を製造した実績と供給期間中における品質管理試験結果について述べる。

6.2.1 製造概要

(1) 使用材料および配合

製造した UFC の配合を表-6.2.1 に示す。結合材には、3章で検討した材料を予めプレミックスしたものを使用した。細骨材には、高強度コンクリートへの使用実績がある粒径 5mm 以下の JIS A 5005 に準拠しているものを使用した。混和剤には、ポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用した。また、補強用繊維には、引張強度が $2,000\text{N/mm}^2$ を超える鋼繊維を使用し、混入率は 2.0vol.% とした。

表-6.2.1 配合

単位量 (kg/m ³)				鋼繊維 (kg)
水	プレミックス材	細骨材※2	高性能減水剤	
230※1	1830	330	20~24	157

※1 水の単位量は減水剤の水分を含む。

高性能減水剤は出荷時期に応じて適宜調整した。

※2 表乾密度 $2.68\text{-}2.69\text{g/cm}^3$ 、吸水率 1.30-1.53%

粗粒率 2.86-2.88 (細骨材物性の製造期間中の変動)

(2) 製造工場の概要

UFC は東海地区にある生コン工場で製造した。製造した生コン工場の外観を写真-6.2.1 に示す。なお、本工場から施工現場までの距離は凡そ 20km であり、運搬時間は 40～60 分である。

また、工場の設備概要を表-6.2.2 に示す。プレミックス材は、製造工場からジェットパック車で輸送し、容量 150t のセメントサイロに保管した。練混ぜは水平二軸型の強制練りミキサで行った。



写真-6.2.1 製造工場の外観

表-6.2.2 工場の主要設備

設備		仕様等
サイロ貯蔵量 (プレミックス材)		150t
計量 上限値	セメント	1,000kg
	細骨材	2,500kg
	混和剤	20kg
ミキサ 仕様	練混ぜ容量	2.5m ³
	ミキサ形式	水平二軸 (強制練り)
	電動機	37kW×2 機 (200V)
	回転数	30rpm
	投入口の有無	有

(3) 計量および品質管理項目

製造時の計量および品質管理項目を表-6.2.3に示す。

プレミックス材は、セメントの計量装置を用いて計量を行ったが、1回で全量計量することが不可能であったため、数回に分けて計量を行った。同様に、高性能減水剤も数回に分けて計量を行った。計量が数回に分かれる場合、製造システムの都合上、計量記録が印字できないこともあるため、計量記録を残すために、計量モニタの写真撮影を行った。また、鋼繊維の計量は工場の計量設備を使用しないため、ミキサ上部の投入口から手投入し、投入した鋼繊維の箱数で投入量を確認した。

表-6.2.3 計量および品質管理項目

管理項目		管理値	頻度	管理・試験方法等
製造時	計量記録	—	全バッチ	計量モニタの撮影により確認
	計量誤差	プレミックス材：1%以内 細骨材：3%以内 高性能減水剤：2%以内 練混ぜ水：1%以内	全バッチ	JIS A 5308 を参考
	鋼繊維投入量	—	全バッチ	空箱の数量により確認
荷卸し時	フロー値	260±30mm	1回/製造日	JIS R 5201（落下なし）
	空気量	3.5%以下		JIS A 1128 に準拠
	コンクリート温度	10℃以上		JIS A 1156 に準拠
	圧縮強度※1	180N/mm ² 以上		JIS A 1108 を参考 試験体寸法：φ50×100mm
	引張強度※1	8.8N/mm ² 以上		JIS A 1106 に準じた試験結果を用いて、以下の UFC 指針の関係式より算出 引張強度 (N/mm ²) = (曲げ強度 - 1.54) / 2.59

※1：標準水中養生 材齢 28 日で管理

6.2.2 練混ぜ試験

(1) 最大練混ぜ量の決定

許容される最大練混ぜ量を見極めるため、練混ぜ量を変えた製造確認試験を行った。練混ぜ量とミキサ電流値の最大値の関係を図-6.2.1に示す。ミキサ電流の最大値は練混ぜ量の増加に伴って直線的に増加した。図-6.2.1に示す関係式を用いて、練混ぜ量が決まればミキサ電流の最大値は推定できる。

使用したミキサの電流値の上限は300Aであり、240A以上が高負荷範囲（レッドゾーン）である。練混ぜ量を1.9m³とした場合のミキサ負荷は、220A程度であったが、攪拌停止後に再起動する場合の過剰な負荷の発生、ミキサ負荷値のばらつきおよび粉体材料投入時の嵩容積等を考慮して、本ミキサでの最大練混ぜ量は2.0m³（ミキサ容量の80%）に設定することとした。

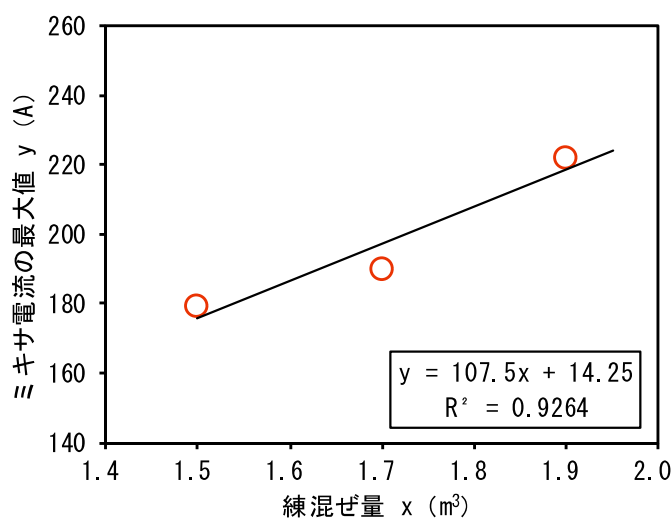


図-6.2.1 練混ぜ量とミキサ電流の最大値の関係

(2) 製造時間

練混ぜ時間とミキサ電流値の関係を図-6.2.2に示す。前述のとおり、練混ぜ量によって、ミキサ電流の最大値に差異は認められるものの、負荷が最大となる練混ぜ時間はほぼ同等であった。

鋼繊維はプラントミキサで添加することとし、ベースモルタルが軟化したことを確認して投入することとした。投入開始時期は、ミキサ電流値が最大値から降下し始める時

間を目安とした。なお、鋼繊維は、ミキサ上部の投入口から、1箱（15.7kg/箱）ずつ人力で投入した。鋼繊維投入後にミキサ電流値が概ね収束したことを確認し、練混ぜ完了とした。なお、製造量によって鋼繊維の投入量が異なるため、1バッチの製造に要した時間は15～20分と若干差が生じた。

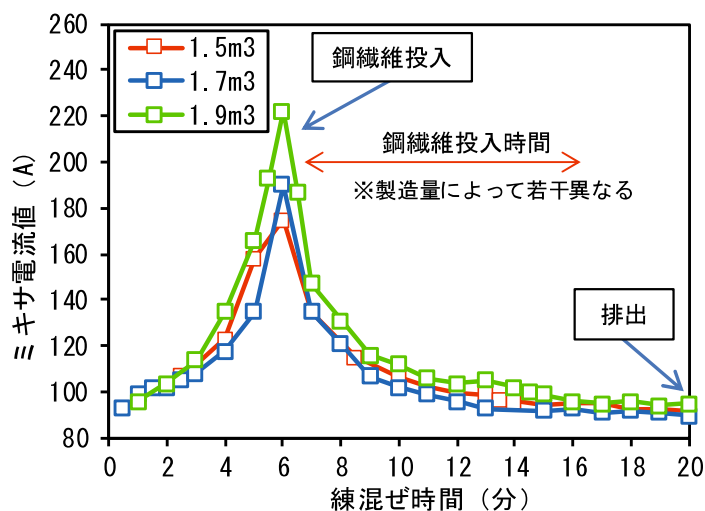


図-6.2.2 練混ぜ時間とミキサ電流値の関係

6.2.3 製造

(1) 製造結果

(a) 製造量

1日の製造量は、施工条件に応じて8.0～10.0m³とし、累計製造量は140m³であった。1日に4～6バッチの製造を行い、製造に要した時間は、1.5～2.0時間であった。製造実績を図-6.2.3に示す。

(b) 計量誤差

いずれの材料についても計量誤差は、全バッチで許容範囲内であった。なお、本製造期間における細骨材の表面水率は0.5～1.5%であり、これを考慮して練混ぜ水を計量した。

(c) 練混ぜ負荷と製造時間

練混ぜ量とミキサ電流の最大値の関係を図-6.2.4に示す。練混ぜ量とミキサ電流の最大値の関係は、ばらつきがあるものの、事前確認試験時と同様の結果となった。

練混ぜに要した時間は、事前確認試験とほぼ同等であり、製造時期によって練混ぜ時間が大幅に変化する傾向は認められなかった。また、この製造における1バッチの製造量は1.50~1.95m³であり、ミキサ容量の80%程度までであれば、練混ぜ量による製造時間の差は小さいものと考えられる。

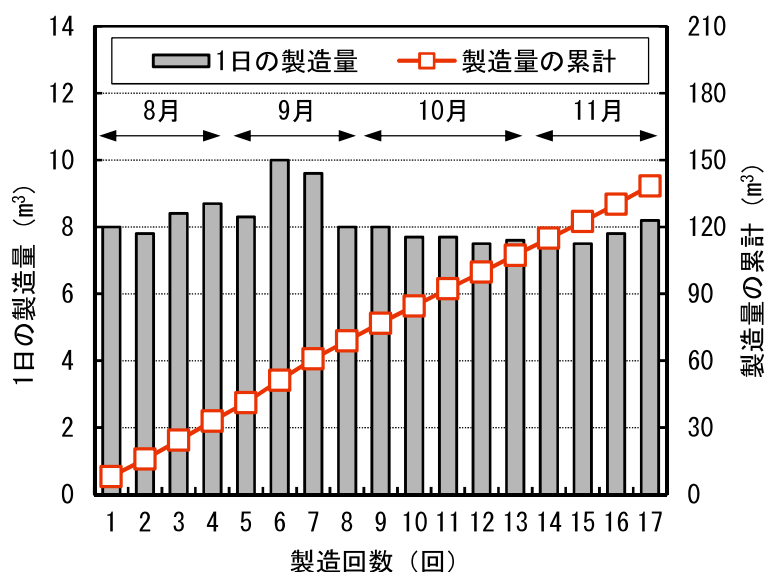


図-6.2.3 常温硬化型 UFC の製造実績

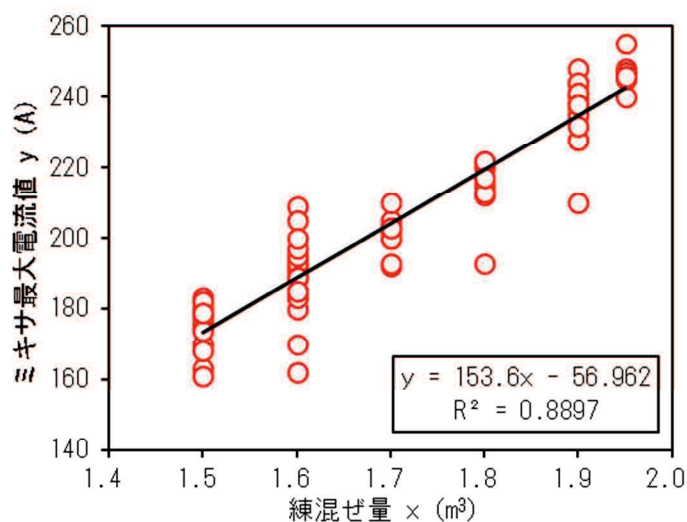


図-6.2.4 練混ぜ量とミキサ電流の最大値の関係

6.2.4 品質確認および品質管理

(1) 出荷時の品質確認結果

(a) フローおよび空気量

出荷時におけるフロー値と空気量を図-6.2.5 に示す。出荷時のフロー値は 272～295mm であった。製造回数が増えるに従って、出荷時のフロー値が小さくなっているが、これは季節が変わることによる外気温の変化に応じて、運搬中のフローロスを考慮して調整したためである。具体的には、高性能減水剤の使用量によって、外気温が高い夏期はフローロスを考慮して出荷時のフローを大きくし、外気温が低い秋期から冬期は、ほとんどフローロスがないため、出荷時のフローを夏期よりも小さくした。なお、本製造期間における細骨材の表面水率の変動は小さく、また、計量にこれを反映したため、細骨材の表面水率がフロー値に及ぼした影響は小さいと考えられる。出荷時の空気量は 1.5～2.6% であった。空気量は、4 章の凍結融解抵抗性試験を実施した際の 3.0% より小さかったものの、土谷ら[2001]、神代ら[2005]、伊藤ら[2006]、橋本ら[2006]、渡邊ら[2010]によると、超高強度コンクリートは空気量が小さい場合でも十分な凍結融解抵抗性を有していることが報告されており、製造した UFC についても凍結融解抵抗性は問題ないと推察される。

(b) コンクリート温度

出荷時のコンクリート温度を図-6.2.6 に示す。出荷時のコンクリート温度は 18～32℃ となり、外気温より 5℃ 程度高くなった。外気温の下降に伴って、コンクリート温度は低下した。

(c) 圧縮強度

出荷時に採取したコンクリートの圧縮強度の試験結果を図-6.2.7 に示す。製造日毎に 1 回供試体を採取した。圧縮強度の平均値は 199N/mm² (191～205N/mm²) であり、標準偏差は 4.1N/mm² と第 3 章で実施した材料試験の結果 (8.2N/mm²) より小さかった。変動係数は 2.1% と非常に小さく、大野ら[2006]が報告している熱養生を行う UFC を工場で製造した場合のばらつきと同等であり、品質の安定した UFC が製造できていることが検証できた。

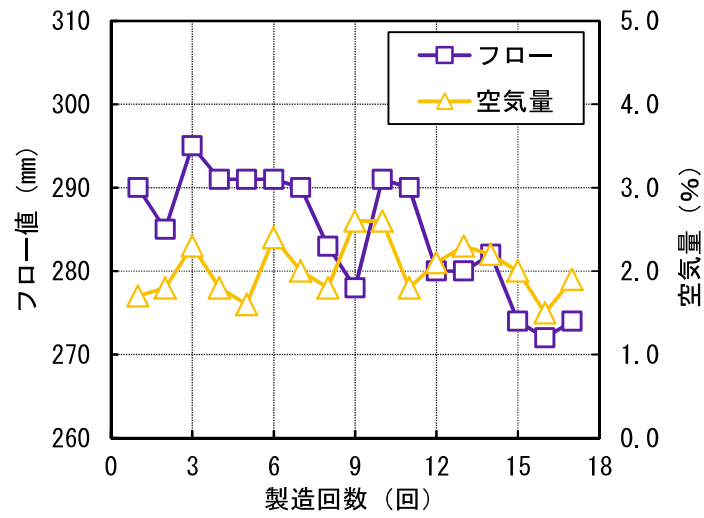


図-6.2.5 出荷時のフロー値と空気量

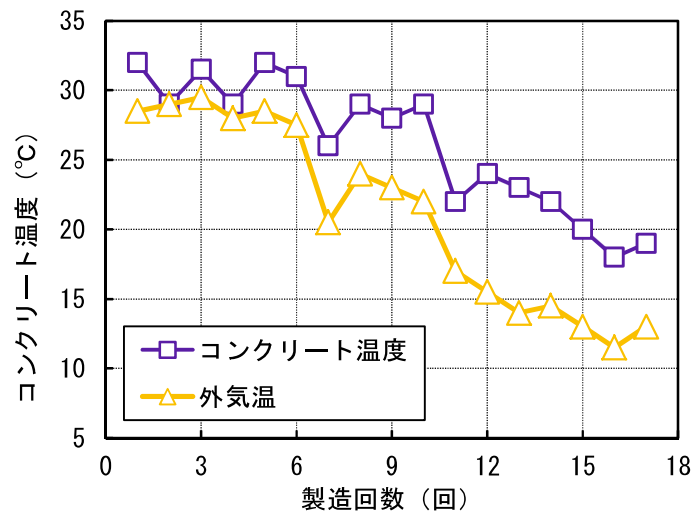


図-6.2.6 出荷時のコンクリート温度と外気温

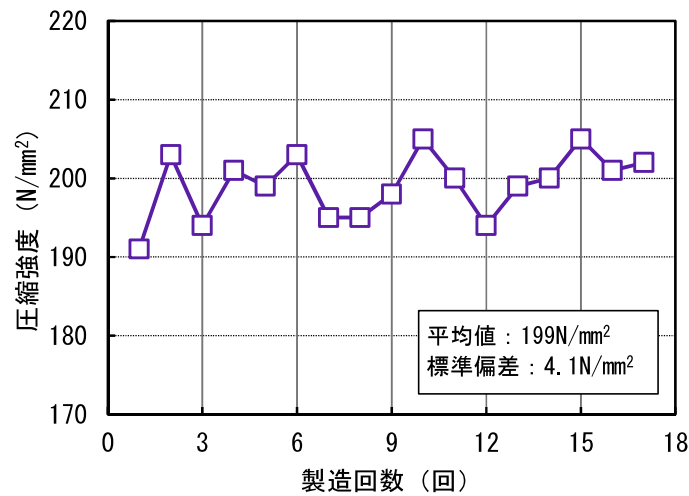


図-6.2.7 出荷時に採取したコンクリートの強度

(2) 荷卸し時の品質管理結果

(a) フローおよび空気量

荷卸し時におけるフロー値と空気量を図-6.2.8 に示す。また、運搬後のフロー残存率（出荷時のフロー値に対する荷卸し時のフロー値の割合）を図-6.2.9 に示す。

フロー値の平均は 275mm (265~283mm) となり、変動係数は 1.6%であった。出荷時と荷卸し時のフロー値を比較すると、外気温が 25℃以下の場合、フローロスがほとんど生じていないことがわかる。また、外気温が 25℃を超える夏期であっても、5%程度のフローロスにとどまっており、本研究の UFC の流動性は外気温による影響を受けにくいことが明らかとなった。冬期はフロー測定時における流動時間が長くなり、コンクリートの粘性が高くなった。これは、筒井ら[2008]が報告しているように、温度変化によって高性能減水剤のセメント粒子への吸着量が変化し、分散性に影響を与えていると推察される。なお、写真-6.2.2 に示すように、荷卸し時の UFC にはファイバーボールは認められず、鋼繊維は均一に分散していた。

荷卸し時の空気量は 1.5~2.7%となり、管理値 (3.5%以下) の範囲内であった。運搬中の攪拌による空気量の増大も懸念されたが、その傾向は認められなかった。

(b) コンクリート温度

荷卸し時のコンクリート温度を図-6.2.10 に示す。外気温の下降に伴って、コンク

リート温度は低下したが、いずれも管理値（10℃以上）を満足した。11月の外気温が低い環境で、UFCの練上がり温度が15℃以上となったのは、製造工場が練混ぜ水として冬期でも比較的暖かい地下水を使用していることも一因と考えられる。また、運搬による温度変化はほとんど認められなかった。

(c) 圧縮強度

荷卸し時に採取したコンクリートの圧縮強度試験結果を図-6.2.11に示す。圧縮強度の平均値は200N/mm²（195～206N/mm²）となり、管理下限値の180N/mm²を上回る結果となった。また、標準偏差は3.2N/mm²であり、ばらつきも小さいことが確認できた。なお、出荷時に採取したコンクリートとの強度差は認められず、トラックアジテータによる運搬が圧縮強度に与える影響は小さいと考えられる。

(d) 引張強度

曲げ強度試験結果からUFC指針[2004]に示される式(1)を用いて算定される推定引張強度を図-6.2.12に示す。推定引張強度の平均値は12.7N/mm²（11.5～14.5N/mm²）となり、管理下限値である8.8N/mm²を満足した。

$$f_b = 2.59f_t + 1.54 \quad (1)$$

ここで、 f_b は曲げ強度（N/mm²）、 f_t は引張強度（N/mm²）を表す。



写真-6.2.2 トラックアジテータからの荷卸し状況

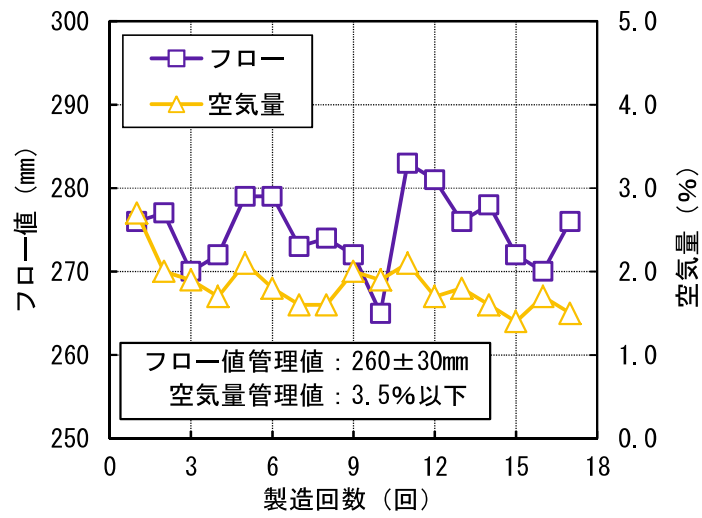


図-6.2.8 荷卸し時のフロー値と空気量

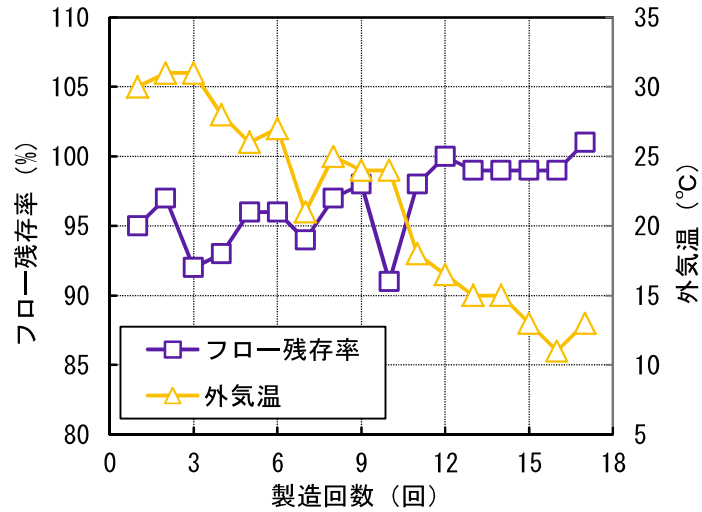


図-6.2.9 運搬後のフロー残存率

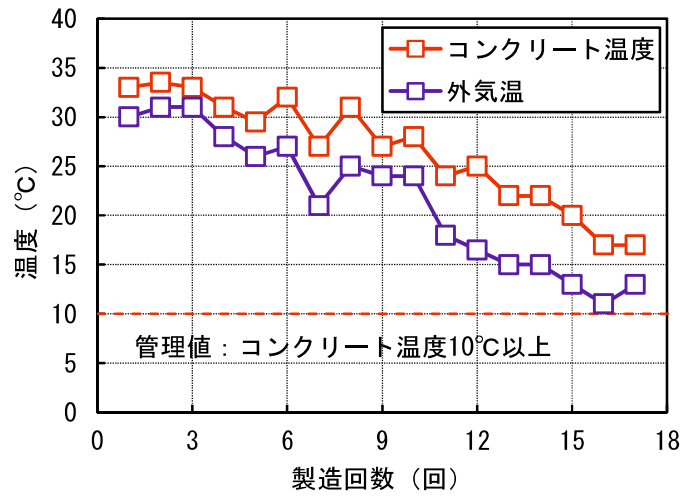


図-6.2.10 荷卸し時のコンクリート温度と外気温

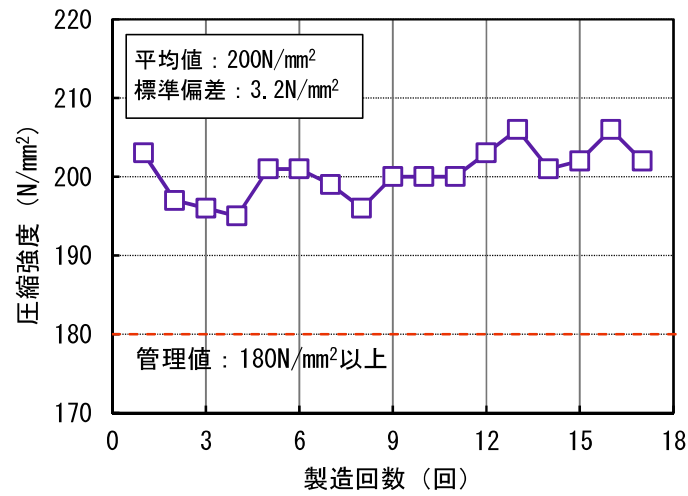


図-6.2.11 荷卸し時に採取したコンクリートの強度

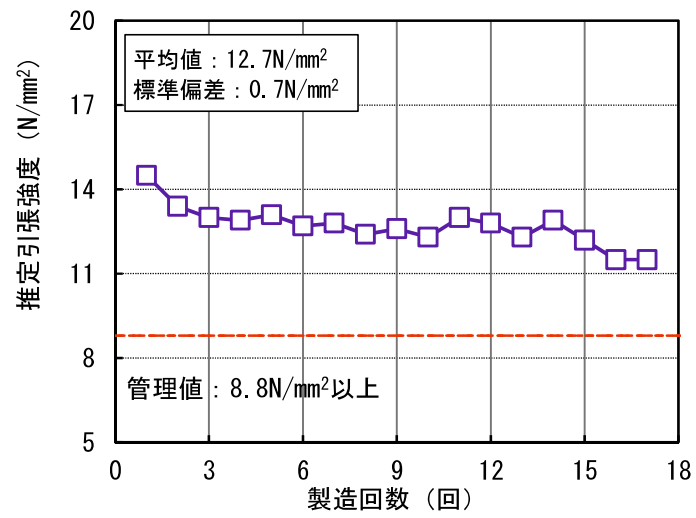


図-6.2.12 曲げ強度から算定した引張強度

6.3 施工現場での製造と水流摩耗部材への適用

本研究の UFC は一般の生コン工場で製造することを想定しているが、1日当たりの施工計画数量が少ない場合、生コン工場で製造すると、プラントの占有コストがかかることや運搬時の材料ロスが発生するなどの問題がある。そのため、少量の施工に対応できる車載式ミキサを製造し、施工現場で使用した。本項では、UFC の車載式ミキサでの製造と製造した UFC の水流摩耗部材への適用性を検討した事例を述べる。適用した橋梁を写真-6.3.1 に示す。

水流摩耗部材に適用するにあたり、本研究の UFC の耐摩耗性を調べる必要がある。また、施工現場での車載式ミキサを使用した製造は初めてのため、その練混ぜ性能（練混ぜ負荷や練混ぜ時間）を調べる必要がある。さらに、UFC の仕上げ面が広範囲となることや、現時点では UFC の施工に精通した技術者が少ないため、UFC の表面仕上げ時期を的確に判断できる指標を見出す必要がある。これらの課題を解決するために、実施工前に耐摩耗試験や製造試験を実施し、その結果を実施工に反映した。



写真-6.3.1 UFC を適用した橋梁

6.3.1 実施工前の検討

本研究の UFC の実施工における問題点を抽出する目的で、実構造物と同様な形状の模擬部材を構築し、製造方法、打込み方法、表面仕上げ方法、養生条件等の基本データを取得した。

(1) 耐摩耗性試験

UFC は超高強度で鋼繊維も含まれることから、耐摩耗性は高いものと推測される。しかしながら、本研究の UFC については、これまで耐摩耗性を検討したことがなく、摩耗を受ける部材に適用するためには、その性能を事前に調べておく必要がある。そのため、まず、O 式すりへり試験機を用いて、UFC の耐摩耗性を調べることにした。

(a) 使用材料および配合

結合材料は 3 章で検討した材料を予めプレミックスしたものを使用した。細骨材は粒径 5mm 以下、表乾密度 2.62g/cm³、吸水率 2.5% の高強度コンクリートへの使用実績のある砕砂を使用した。混和剤は、ポリカルボン酸系の高性能減水剤、補強用繊維は直径 0.16mm、長さ 13mm、引張強度 2,000N/mm² 以上の鋼繊維を使用した。耐摩耗試験用供試体を作製した配合を表-6.3.1 に示す。

表-6.3.1 製造試験に使用した UFC の配合

単位量 (kg/m ³)				鋼繊維 (kg)
水	プレミックス材	細骨材 ^{※2}	高性能減水剤	
230 ^{※1}	1830	330	32	157

※1 水の単位量は高性能減水剤の水分も含む

(b) 試験方法

電力中央研究所で考案した O 式すりへり試験機を参考にした、スチールロッド式摩耗試験装置を用いて摩耗試験を実施した。スチールロッド式摩耗試験は、図-6.3.1 に示すように回転するドラムの外周内面に供試体 (135×150×300mm、摩耗面の面積 367.5cm²) を 6 個設置し、供試体の内側に摩耗材としてスチールロッド (φ19×40mm×25 個、総質量約 2.2kg) を入れた状態で、流量 0.5m³/h の水 (水温: 15±1℃) を流しながらドラムを毎分 50 回転させ供試体の摩耗面に衝撃作用を与え、式 (1) を用い

て 10 時間後の単位摩耗量（単位面積あたりの摩耗容積）を求めた。また，1，3，5，7 時間後の単位摩耗量を測定した。

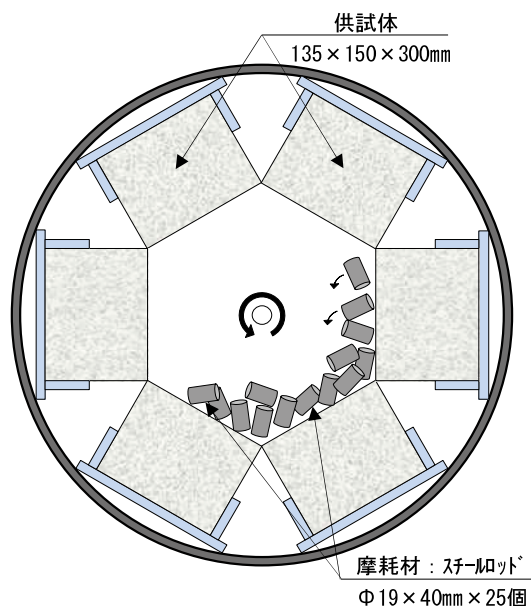


図-6.3.1 スチールロッド式摩耗試験装置概要

$$R_u = \frac{1}{A} \times \frac{(W_a - W_n)}{\rho_0} \quad \text{式 (3)}$$

R_u : 単位摩耗量 (cm^3/cm^2)

A : 供試体の摩耗面面積 (cm^2)

W_a : 試験前の供試体質量 (g)

W_n : 試験後の供試体質量 (g)

ρ_0 : 供試体密度 (g/cm^3)

(c) 試験結果

摩耗試験前および試験開始 10 時間後の試験体状況を写真-6.3.2 に示す。摩耗時間と単位摩耗量の関係を図-6.3.2 に示す。摩耗量は時間に伴って直線的に増加することがわかる。今回実施した本研究の UFC の摩耗量は，試験開始後 10 時間で， $0.28\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であった。摩耗時間 4 時間の時の単位摩耗量は約 $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であり，増田ら[1994]が報告している約 $175\text{N}/\text{mm}^2$ のモルタルとほぼ同等の摩耗量であった。また，増田ら[1993]の報告

による圧縮強度とすり減り係数の関係を見ると、超高強度になるとすり減り係数は $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 付近に収束しており、今回の試験結果も同様の結果が得られた。また、すり減り係数 $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$ は高強度コンクリートと比較しても十分に小さい値であり、高い耐摩耗性があることが確認できた。

コンクリート表面の摩耗進展のモデル図を図-6.3.3に示す。普通コンクリートの場合、粗骨材よりもモルタルの強度が低いために、粗骨材より先にモルタルが摩耗して、粗骨材が浮き出る。その後、モルタルと粗骨材の付着強度が低いために、粗骨材が抜け出し、その結果極端な洗堀が生じて摩耗が進行する。これに対して、高強度コンクリートは、モルタルの強度が粗骨材の強度に近く、粗骨材とモルタルが同程度に摩耗して行くことから、表面が均一に摩耗していくと考えられる。本研究のUFCは、モルタルの圧縮強度が普通コンクリートや高強度コンクリートと比較して高いため、モルタルの摩耗量が小さくなり、繊維でモルタル自体を拘束架橋しているため、ロッドの衝撃による破損や飛散が著しく小さくなり、摩耗量が普通コンクリートや高強度コンクリートと比較して、小さくなったと考える。

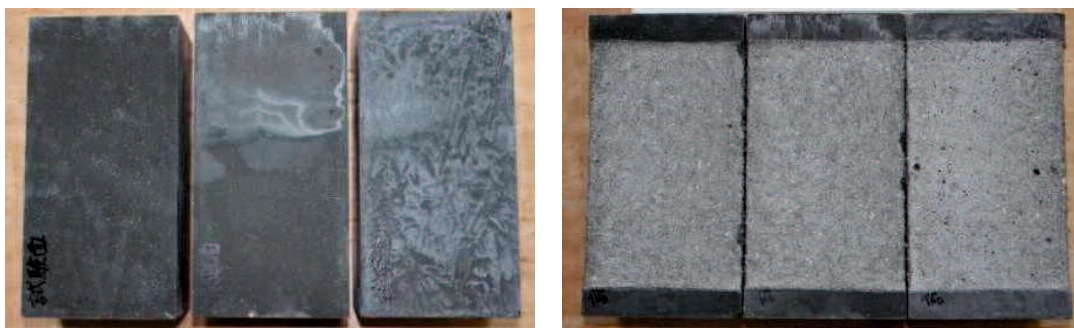


写真-6.3.2 摩耗試験前後の供試体（左：試験前，右：試験後）

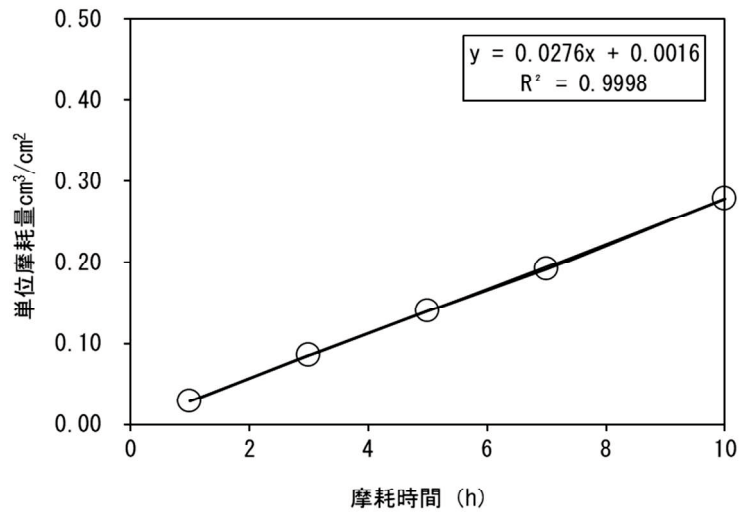


図-6.3.2 摩耗試験結果

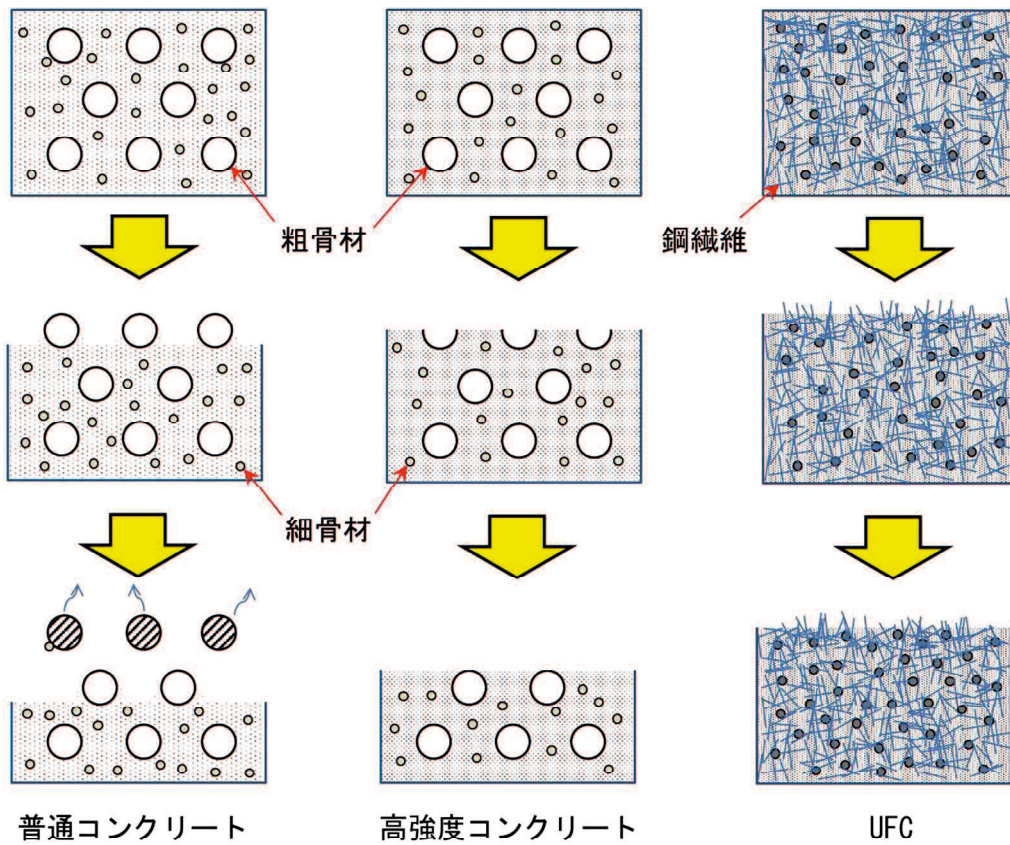


図-6.3.3 コンクリート表面の摩耗進展のモデル図

(2) 製造方法の検討

通常、本研究の対象とする UFC は、生コン工場で製造する。しかし、摩耗防止材を施工する場合、1日当たりの打込み計画数量が 0.5～3.0m³ 程度と少ないため、生コン工場を使用すると、工場の占有費用や通常出荷への悪影響および運搬時の材料ロスなどの問題が懸念された。そこで、少量の練混ぜを実施することを目的に、車載式のみキサを製造した。

製造した車載式みキサを写真-6.3.3 に示す。みキサは回転数を「高速 (45Hz)」、「低速 (30Hz)」の2段階で調整できるようにした。また、練混ぜ水は流量計を通して、JIS A 5308 に規定されている計量誤差範囲内 (±1%) でみキサ内に自動投入できるようにした。

「低速」、「高速」の2段階の練混ぜ時間と製造量を把握する目的で、1バッチ当たりの練混ぜ量を 0.5m³ とし、みキサの回転速度を変化させ練混ぜ試験を行った。なお、みキサ回転数「高速」は通常の生コン工場に設置してあるみキサと同等の回転数である。

使用材料は 6.3.1 に記載したものと同一ものを使用した。また、製造試験に使用した UFC の配合を表-6.3.2 に示す。

表-6.3.2 製造試験に使用した UFC の配合

単位量 (kg/m ³)				鋼繊維 (kg)
水	プレミックス材	細骨材 ^{※2}	高性能減水剤	
230 ^{※1}	1830	330	32	157

※1 水の単位量は高性能減水剤の水分も含む

練混ぜ試験の結果を図-6.3.4 に示す。その結果、みキサの回転を「低速」にした場合、みキサ負荷値がピークになるまでの時間が 23 分程度かかり、全体の練混ぜ時間は約 30 分であった。これと比較して、みキサの回転を「高速」にした場合は、みキサ負荷のピーク値は増加したものの、ピーク値までの練混ぜ時間を 7 分程度に短縮できた。そのため、全体の練混ぜ時間は 13 分程度となり、製造時間が短縮できることがわかった。なお、プレミックスと細骨材を投入して、スラリー化後に鋼繊維を投入する車載式みキサによる

UFC の製造時間は約 25 分であった。これにより打込み後の仕上げ時間を考慮した，車載ミキサによる 1 日当たりの最大供給量は 5m^3 程度と結論づけた。



写真-6.3.3 UFC の現地製造のために製造した車載式ミキサ

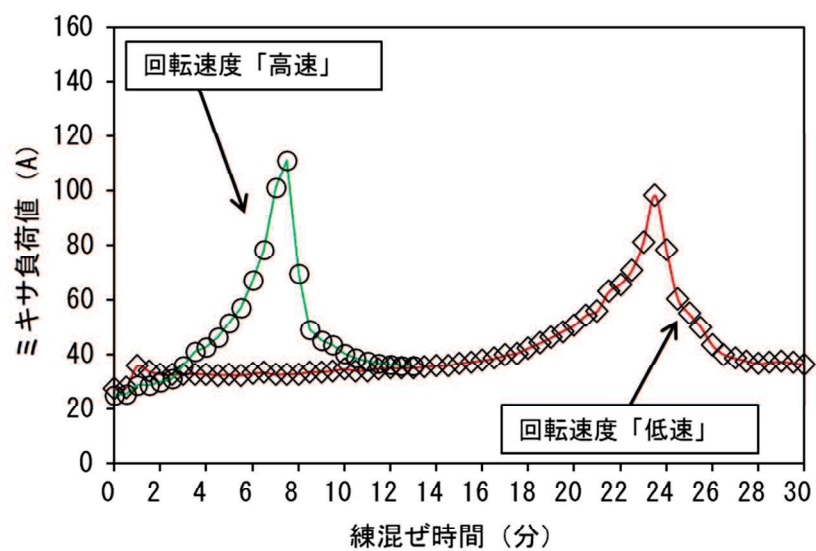


図-6.3.4 練混ぜ時間とミキサ負荷値との関係 (練混ぜ量 : 0.5m^3)

(3) ひび割れ対策

UFCは結合材料が一般のコンクリートに比べて多いため、自己収縮ひずみも大きくなる。第4章で示した通り、本研究のUFCの自己収縮ひずみは 660×10^{-6} のため、打込み面積が広い場合は、既設コンクリートに自己収縮ひずみが拘束され、ひび割れが生じる懸念がある。そこで、ひび割れの抑制を目的として予め目地を設けることとした。事前試験では、**図-6.3.5**に示す型枠にUFCを打ち込み、表面にひび割れが生じるかを調べた。

その結果、打ち込んだ $4000 \times 3500\text{mm}$ の部分（**図中左側**）で、ひび割れが生じないことが確認できた。これは、打込み直後は乾燥や日射から保護する目的でビニールシート養生を行ったことや、仕上げ後は表面の硬化状況を確認して、直ちに養生マットを敷設し、散水養生を行ったため、自己収縮の影響が小さくなったものと推察される。

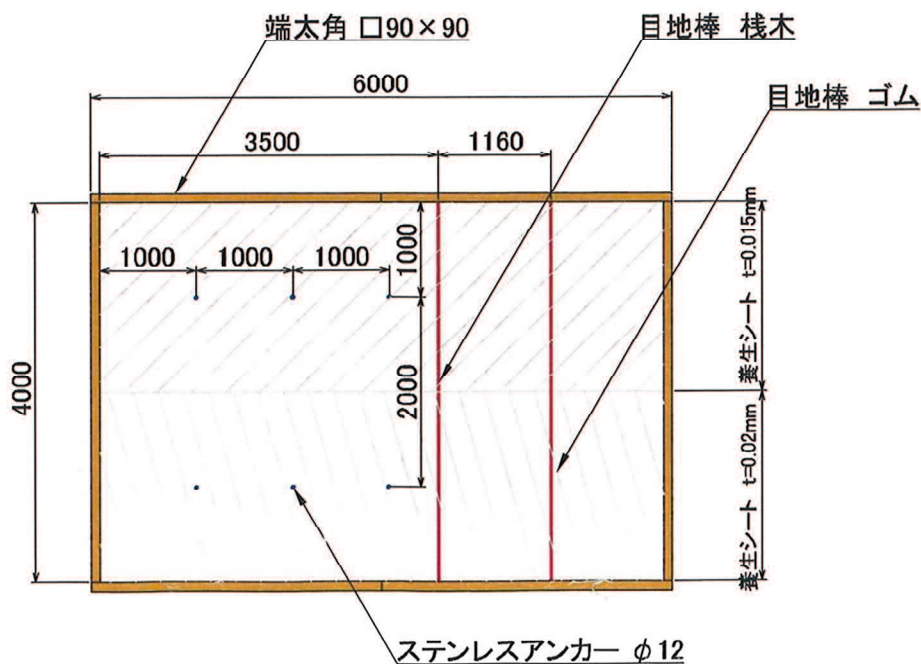


図-6.3.5 事前試験で構築した部材の平面図

(4) 表面仕上げ方法の検討

製造量が 0.5m^3 /バッチのため、打込みには 0.5m^3 のコンクリートホッパーを使用することとした。UFC は水結合材比が小さいためブリーディングが生じない。そのため表面仕上げには仕上げ剤を使用することとし、市販の 6 種類を比較した。仕上げ剤は、いずれも噴霧器を用いて、打込み面に均一に噴霧した。

また、UFC は粉体量が多く、粘性が高いため、一般的なコンクリートに精通した技術者であっても、表面仕上げ時期を判断することが難しい。そのため、打込んだ表面の硬さを測定して、その数値から適切な表面仕上げ時期を判断することを検討した。

打込み面の硬さの測定には、施工現場での運搬が容易な山中式土壤硬度計(全長:23cm, 貫入部位:円錐形, 以下, 硬度計と表記)およびスプリング式プロクター貫入試験機(全長:50cm, 貫入部位:円筒形, 以下, 貫入試験機と表記)を用いて測定した。使用機器を写真-6.3.4 および写真-6.3.5 に示す。

表面の硬度と貫入抵抗値を測定する供試体の寸法は $20\times 20\times$ 高さ 5, 10, 20cm の 3 種類とし、貫入部位の形状、繊維の有無および供試体高さが貫入抵抗値に与える影響を確認した。試験は、温度 $20\pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $60\pm 5\%$ の恒温室内で実施した。

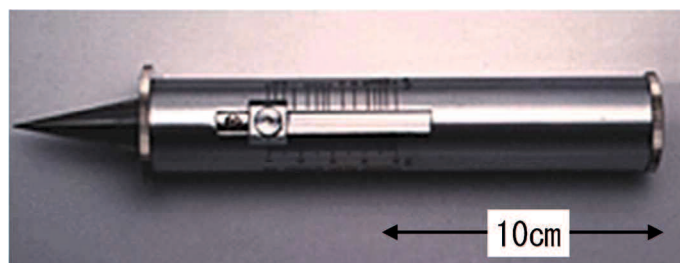


写真-6.3.4 山中式土壤硬度計

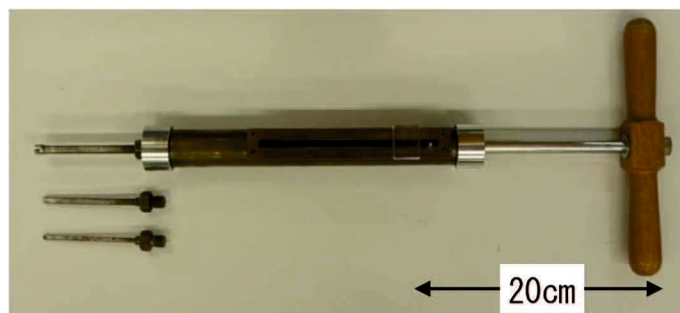


写真-6.3.5 スプリング式プロクター貫入試験機

注水からの経過時間と各使用機器で測定した貫入抵抗値との関係を図-6.3.6 に示す。また、表-6.3.3 に表面仕上げの判定結果を示す。表面仕上げに適した貫入抵抗値は、硬度計で $0.5 \sim 4.0 \text{ N/mm}^2$ 、貫入試験機で $1.8 \sim 9.0 \text{ N/mm}^2$ であった。

また、図-6.3.7 に注水から 8.5h における貫入抵抗値を示す。貫入部分のイメージ図を図-6.3.8 に示す。硬度計で測定した貫入抵抗値は、繊維有と繊維無で同等の値であった。これは、貫入部位が円錐状のため、繊維の抵抗を受け難かったと考えられる。一方、貫入試験機では、繊維有と繊維無の貫入抵抗値に差が生じた。これは、貫入部位が円筒状のため、繊維の抵抗を受け、繊維有の貫入抵抗値が大きくなったと考えられる。また、供試体高さが高いほど、同一時刻に測定した貫入抵抗値が大きい傾向にあった。この傾向は、注水から 7 時間以降に顕著であり、供試体の温度上昇は、供試体高さが高いものの方が早かったことから、水和反応の差が影響していると推察される。なお、貫入試験機の全長は 50cm とやや大きいですが、硬度計は全長 23cm と小さく、より簡便に運搬や測定が可能である。そのため、貫入抵抗値の測定には、硬度計が適していると判断した。

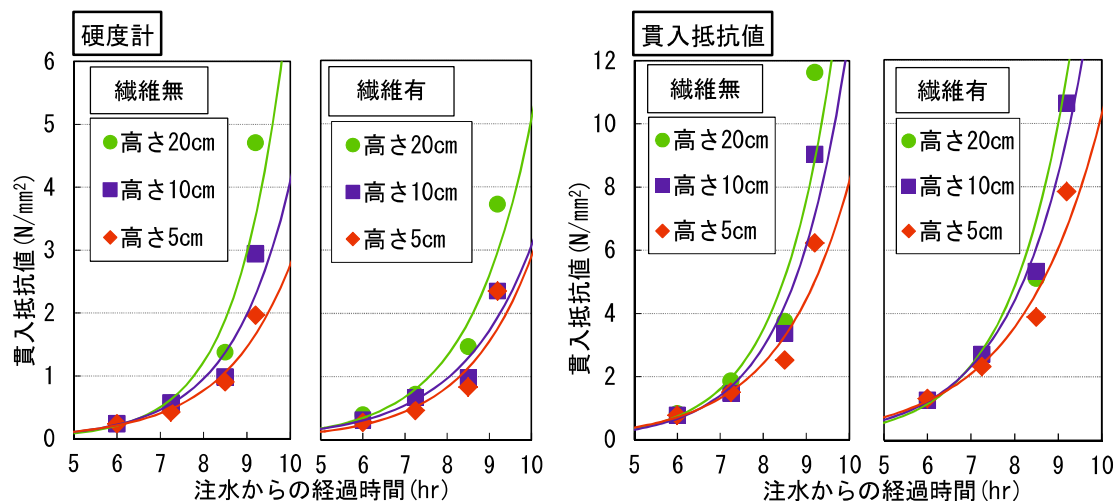


図-6.3.6 注水からの経過時間と貫入抵抗値との関係

表-6.3.3 表面仕上げの判断結果

貫入抵抗値 (N/mm ²)		金ゴテでの均し作業時		内部硬化 の程度	備 考
硬度計	貫入試験機	モルタルの 付着の有無	微細ひび 割れの有 無		
0~0.3	0~1.1	有	無	硬化不足	モルタルがコテに付着し、仕上げが困難であった。硬化不足により、表面が波打ち、平滑に仕上がらなかった。
0.3~0.5	1.1~1.8	無	有	硬化不足	コテへの付着はなくなるものの、硬化不足のため、仕上げ中に微細ひび割れが生じる場合があった。
0.5~4.0	1.8~9.0	無	無	適度な硬化	コテへの付着もなく、適度な硬化のため、平滑に仕上げ可能であった。
4.0以上	9.0以上	無	無	硬化	硬化が進み過ぎて、空気あばたや表面の凹凸がコテ仕上げで除去できない状況であった。

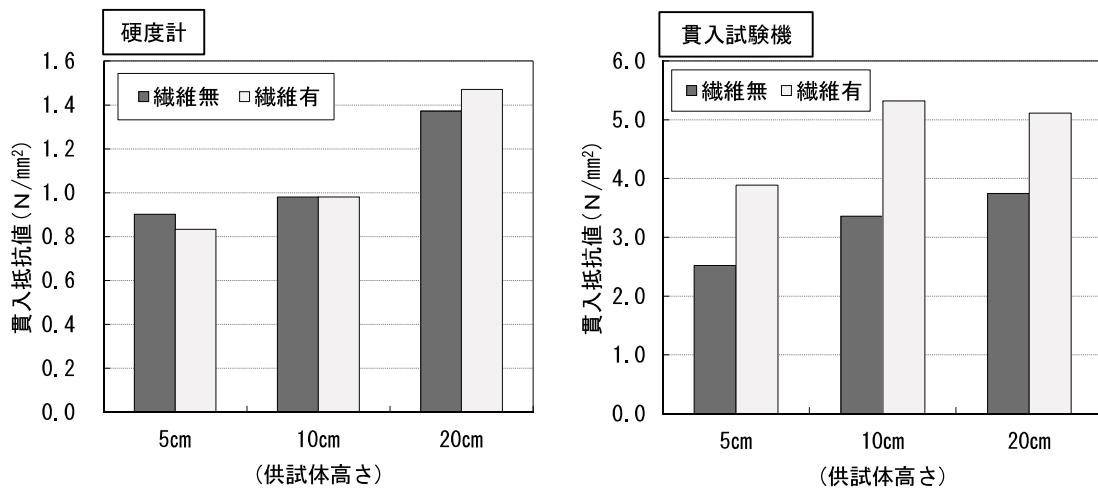


図-6.3.7 供試体高さが異なる場合の貫入抵抗値 (注水から 8.5h)

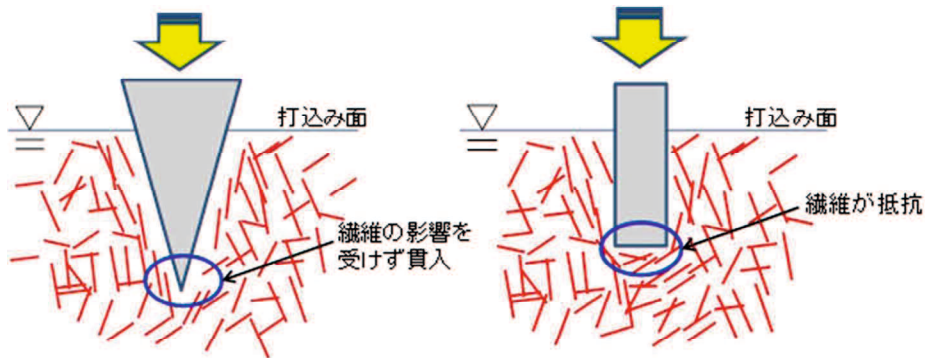


図-6.3.8 貫入箇所のイメージ図

表面仕上げ剤を評価した結果を表-6.3.4に示す。評価項目として、定性的であるが、色むらと微細ひび割れの発生の有無で判断した。パラフィン系1は表面に色むら、微細なひび割れとも発生せず良好な結果となった。それに対して、パラフィン系2、低級アルコール系1および2は微細なひび割れが発生しないものの、著しい色むらが発生し美観を損ねる結果となった。また、合成ゴム系およびアクリル系は若干の色むらが発生した。これらの検討結果から、打込み面の色むらが無く、微細なひび割れが発生しない、パラフィン系1の仕上げ剤を選択することとした。なお、成分が同一のパラフィン系の仕上げ剤で結果が異なったのは、含有される少量成分の違いが影響したものと推察される。

表-6.3.4 仕上げ剤の評価結果

成分	評価項目		判定*
	色むら	ひび割れ	
パラフィン系1	無	無	○
パラフィン系2	有	無	×
低級アルコール系1	有	無	×
低級アルコール系2	有	無	×
合成ゴム系	有少	無	△
アクリル系	有少	無	△

○：色むらひび割れ無。△：色むら多少有。×：色むらひび割れ有

(5) 養生条件および養生期間

2017年制定コンクリート標準示方書【施工編】[2018]によると、コンクリートの硬化物性は初期材齢において外気の影響を受けやすいため、必要に応じて温度制御養生を実施する。UFCも硬化過程で同様に外気の影響を受けるため、特に低温環境下では、強度発現が遅延することが予想される。実施工は昼夜の気温差が大きい時期に実施する可能性がたかいため、事前に強度発現性を調べた。

気象庁の統計データから、事前試験期間中の外気温は表-6.3.5に示すように、期間平均10℃を下回り、昼夜の温度差が10℃以上と予想された。そのため、保温養生を実施し、打込み面を保温することとした。

表-6.3.5 事前試験期間中に予想された外気温※

部位	予測温度 (°C)		
	期間平均	期間最大	期間最小
外気温	8.1	13.4	3.1

※気象庁統計データより

予備試験期間中に測定した各所の温度を表-6.3.6に示す。外気温は10℃前後で予想通りであったが、保温養生を行ったため、部材および供試体の平均温度は20～30℃に保持することができた。予備試験における現場封緘養生した供試体の材齢1, 2および7日の圧縮強度を図-6.3.9に示す。圧縮強度は、材齢1日で30N/mm²であったが、材齢2日では124N/mm²に達し、材齢7日では170N/mm²と設計基準強度(150N/mm²)を満足した。以上の結果から、実施工においても保温養生を実施することとし、設計基準強度を保証する材齢は7日と設定した。

表-6.3.6 事前試験中の温度測定結果*

測定部位	温度測定値 (°C)		
	期間平均	期間最大	期間最小
外気温	12.0	23.4	2.3
部材表面	28.6	37.8	5.0
部材内部	25.3	34.3	12.3
供試体	24.7	33.5	10.6

*測定は打込み後 7 日

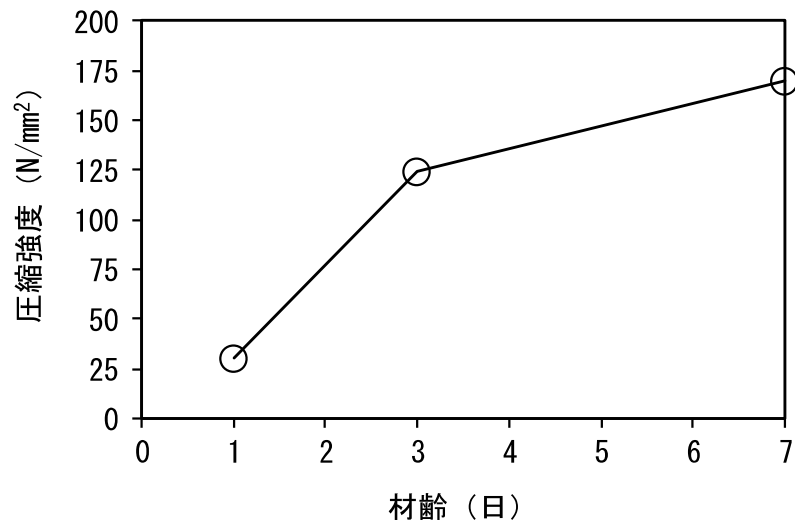


図-6.3.9 圧縮強度試験結果

(6) 実施工への反映

以上の事前試験の結果から、表-6.3.7に示す項目の留意点を抽出し、製造、施工方法を実施工へ反映させた。

表-6.3.7 事前試験結果の留意点および実施工への反映

項目	事前試験	実施工への反映
製造方法	車載式ミキサの使用 ミキサの回転速度：高速 製造量：0.5m ³ /バッチ	車載式ミキサの使用 ミキサの回転速度：高速 製造量：0.5m ³ /バッチ
ひび割れ対策	打込み区画： 最大 4,000×3,500mm×厚さ 40mm	打込み区画： 最大 3,500×3,500mm×厚さ 40mm
打込み	ホッパー：0.5m ³	ホッパー：0.5m ³
表面仕上げ	仕上げ剤：6種類評価	仕上げ剤：パラフィン系1
養生条件	養生条件：保温養生	養生条件：保温養生
養生期間	養生期間：7日	養生期間：7日

6.3.2 実施工

施工箇所は、橋梁基礎コンクリートの天端（写真-6.3.6）である。常時、水流や砂利、岩石により摩耗作用を受ける部分であり、コンクリートの摩耗による早期劣化が予想される。そこで、橋梁基礎コンクリート天端の表面保護材料として、本研究の UFC を用いて、摩耗による橋梁基礎躯体の早期劣化の防止を実施した。

まず、橋梁基礎となる普通コンクリートを打ち込み、翌日に打込み面の薄層除去（目粗し）を行い、その上に UFC による補強を施す手順とした。



写真-6.3.6 UFC の施工場所



(1) 製造

UFC は事前試験で使用した車載式ミキサを用いて製造した。UFC の製造結果を表-6.3.8 に示す。製造は2日間に分けて行い、合計約 7m³ 製造した。事前試験で定めた通り、ミキサの回転速度を「高速 (45Hz)」とし、1 バッチ当たりの製造量を 0.5m³ として製造した結果、いずれのバッチも製造時間は 20 分もしくは 25 分であった。モルタルフローおよび空気量は、3 バッチ/日でデータを収集したが、いずれも目標の範囲内で安定していた。このことから、製造した車載式ミキサは UFC の製造に概ね適していると判断できる。

表-6.3.8 UFC の製造結果

製造日	バッチ No.	製造量 (m ³)	製造時間 (分)	フロー (mm)		空気量 (%)		温度 (°C)
				測定値	管理値	測定値	管理値	
1 日目	1	0.50	25	263	260 ± 30	2.5	3.5% 以下	21.5
	2	0.60	25	—		—		—
	3	0.50	25	—		—		—
	4	0.50	20	266		2.8		27.5
	5	0.50	25	—		—		—
	6	0.50	20	—		—		—
	7	0.50	20	268		1.7		28.0
2 日目	1	0.50	30	278	260 ± 30	2.5	3.5% 以下	17.0
	2	0.50	20	—		—		—
	3	0.50	20	—		—		—
	4	0.50	20	266		2.7		20.0
	5	0.50	25	—		—		—
	6	0.25	20	—		—		—
	7	0.50	20	276		2.0		19.5

(2) 打込み

UFC の打込みは 2 か所の同一形状の躯体（橋脚周り）に実施した。打込みの区割りを  に示す。ひび割れ対策として、一方向に収縮が卓越しないように形状を概ね正方形に区画割りした。製造した UFC は、容量 0.5m³ のホッパーを用いて打込んだ。打込み状況を  に示す。

事前試験と同様に、打込み後は乾燥によるプラスチック収縮ひび割れを防止するためにフィルムで養生を実施した。養生を実施した後、タンピングを実施し、打込み面に気泡が発生しないことを確認してから、表面仕上げを行った。なお、表面仕上げの際は、

事前試験で最も評価が良かったパラフィン系1の仕上げ剤を使用した。仕上げ後は、打込み面に吸水性の高い養生マットを敷設して散水養生を実施した。(写真-6.3.8)。その結果、表面の仕上がり状況は、ひび割れや色むらも認められず、良好であった(写真-6.3.9)。ACI 305.1-06[2007]では、コンクリートのプラスチック収縮ひび割れを防止するために、外気温、コンクリート温度および風速から推定したコンクリート表面からの水分蒸発速度を考慮することが規定されている。UFCは特にプラスチック収縮ひび割れの可能性が高いことから、今後はこれらの資料も参考にして、施工管理することも必要と考える。

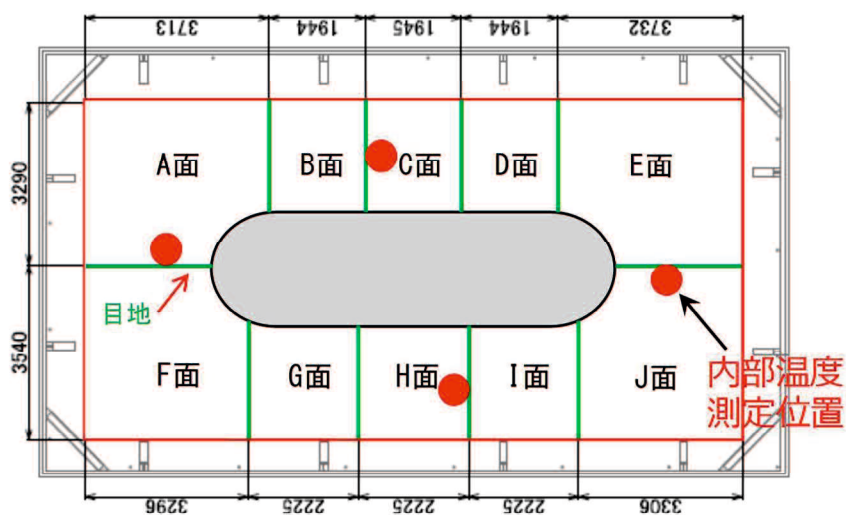


図-6.3.10 打込み区割り (単位: mm)



写真-6.3.7 打込み状況



写真-6.3.8 散水養生の状況



写真-6.3.9 養生完了時の状況

(3) 養生および強度管理

打込み面の乾燥防止と給水のための散水養生を開始した後、試験施工と同様に保温養生を行った。各所の温度測定結果を表-6.3.9に示す。T型熱電対を用いて、実部材のA面、C面、H面、J面の4箇所で温度を測定した。その結果、温度は全ての測定個所で同等であり、保温養生が適当であったことが確認できた。また、いずれの測定個所の温度も供試体より高くなった。そのため、実部材の強度発現は供試体よりも進んでいると推察される。

材齢と圧縮強度の関係を図-6.3.11に示す。圧縮強度は材齢3日で 165N/mm^2 、材齢7日で 175N/mm^2 となり、設計基準強度を満足した。また、供用開始時（材齢18日）に測定した圧縮強度は、いずれも 190N/mm^2 程度であり、供試体間のばらつきは小さかった。

UFC指針[2004]の式(1)を用いて、曲げ強度から推定した引張強度の結果を図-6.3.12に示す。UFCの引張強度の特性値は 8.8N/mm^2 であり、いずれもその値を満足した。

以上の結果から、本研究のUFCは、適切な養生管理を行うことで、外気温が比較的低い環境下でも所要の性能が得られることがわかった。

$$f_b = 2.59f_t + 1.54 \quad (1)$$

ここで、 f_b は曲げ強度 (N/mm^2)、 f_t は引張強度 (N/mm^2) を表す。

表-6.3.9 部材と供試体の温度測定結果

橋脚名称	測定部位	温度測定値 (°C)		
		期間平均	期間最高	期間最低
橋脚①	外気温	11.6	21.7	6.2
	A 面	21.0	43.4	9.9
	C 面	21.4	43.4	9.6
	H 面	22.9	32.6	11.5
	J 面	24.4	40.6	10.6
	供試体	19.6	43.4	9.9
橋脚②	外気温	16.4	21.9	12.0
	A 面	25.9	44.0	13.2
	C 面	24.5	44.6	16.0
	H 面	22.7	33.9	15.0
	J 面	—	—	—
	供試体	22.4	34.7	8.4

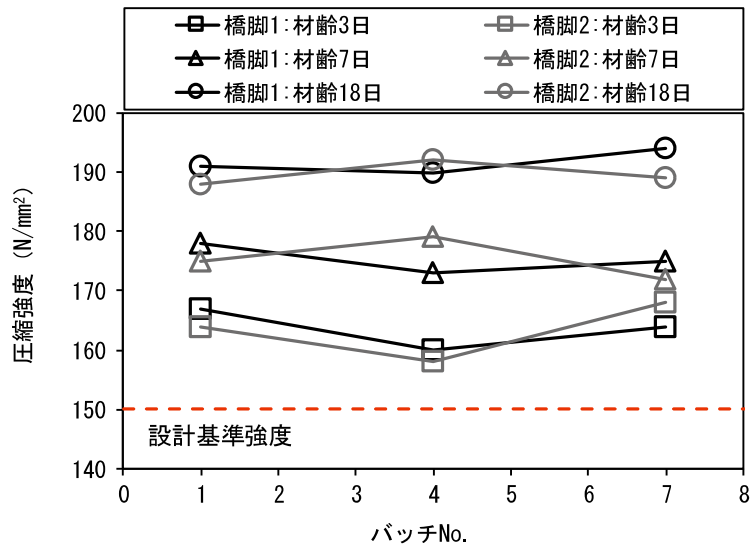


図-6.3.11 圧縮強度の測定結果

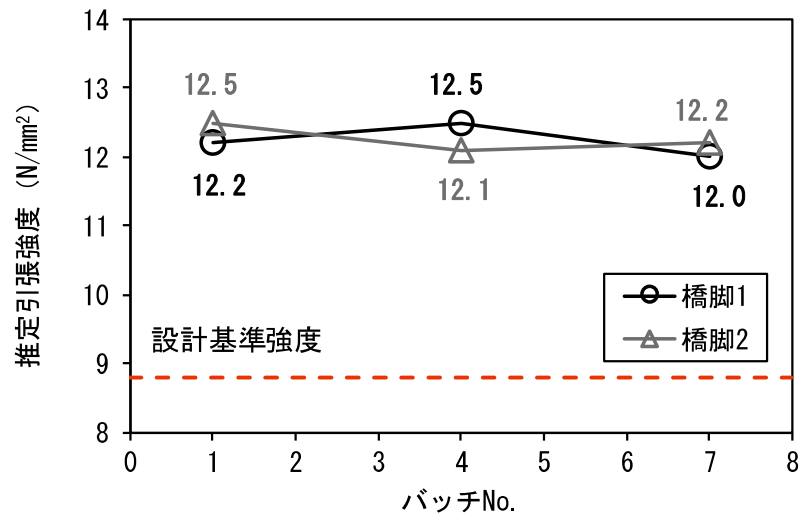


図-6.3.12 曲げ強度から推定した引張強度

6.4 コンクリート製品への適用

本研究の UFC は熱養生しないことを前提としているが、熱養生を行うコンクリート製品にも適用が可能と考えられる。

前項においては、UFC の優れた耐摩耗性を活かして、現場打ちで河川橋脚の根固めに適用した事例を記載した。本項では、本研究の UFC を用いて、耐摩耗性のあるコンクリート製品を製造し、常用洪水吐きの副ダムへの設置を検討した。

UFC は非常に緻密なマトリックスを形成するため、硬化体表面は極めて平滑となっており、このままの状態では既設コンクリートに設置すると、十分に付着しない可能性がある。そのため、UFC 部材の接着面は、既設コンクリートとの付着力を確保するため目粗しを施す必要がある。しかしながら、開発した UFC は凝結後の強度発現が非常に早いいため、環境条件によっては、打込み翌日の目粗しができない可能性が考えられた。そこで本検討では、既存のコンクリート構造物に設置する UFC 部材の製造を想定し、目粗しが可能な時期を定量的に評価するため圧縮強度の範囲や遅延剤の塗布量について検討を行った。得られた検討結果を設置する UFC パネルの製造条件に反映した。

6.4.1 設置面の目粗し方法の検討

(1) 実験概要

(a) 使用材料および配合

UFC の配合を表-6.4.1 に示す。材料には、プレミックス材、粒径 5mm 以下の細骨材、高性能減水剤、および補強用鋼繊維を使用した。また、目粗し面に散布する遅延剤には、市販のオキシカルボン酸塩系の遅延剤を使用した。

表-6.4.1 配合

単位量 (kg/m ³)				鋼繊維 (kg)
水	プレミックス材	細骨材	高性能減水剤	
230 ^{※1}	1830	330	24	157

※1 水の単位量は減水剤の水分を含む。

(b) 目粗し方法と水準

練混ぜ後の UFC は、鋼製型枠（10×10×40cm）に打ち込み、打込み面に遅延剤を散布した。打込み後は、シート養生による影響を確認できるようにし（図-6.4.1 参照）、同一環境下に保管した供試体（φ5×10cm）の圧縮強度を確認しながら高压洗浄機（吐出圧力：7.5MPa）による目粗しを行った（写真-6.4.1 参照）。

検討内容を表-6.4.2 に示す。遅延剤の散布量、散布後の養生方法および目粗しを行う際の強度を取り上げ、硬化の程度が目粗しに与える影響を確認した。試験環境は、条件の厳しい夏期における目粗しを想定し、温度 30±1℃、湿度 60±5%の室内で実施した。

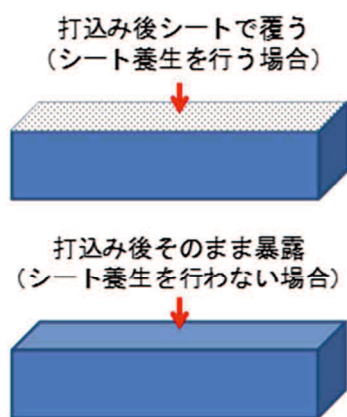


図-6.4.1 試験体の養生



写真-6.4.1 目粗し作業の状況

表-6.4.2 検討内容

検討した項目	検討範囲等
遅延剤の散布量	標準使用量 1.7 倍まで
散布後の養生方法	打込み面へのシート 使用の有無（図-6.4.1 参照）
目粗し時の圧縮強度	約 40～120N/mm ²

(2) 実験結果

(a) 遅延剤の散布量の影響

実験結果の一覧を表-6.4.3に示す。遅延剤の塗布量は、内部の硬化に影響を及ぼさない範囲として標準使用量の1.7倍を上限とした。塗布量を1.7倍に増やした場合(No.7)、作業時間が最も短く、仕上りが良好であった。なお、散布量を標準量の1.3倍に増やした場合(No.5)は、目粗しは可能で、仕上りも良好であったが、作業に時間を要した。散布量を標準使用量とした場合(No.4)は、部分的に目粗しができない箇所があった。

これらの結果から、本研究のUFCを目粗しする場合は、遅延剤の散布量を標準量よりも若干多くする必要があることがわかった。実験の範囲内では、目粗しに適した遅延剤の散布量は標準使用量の1.3~1.7倍であった。

表-6.4.3 実験結果一覧

No.	圧縮強度 (N/mm ²)	遅延剤 散布量*	打込み面の シート養生	良否判定	目粗し後の状況
1	36	1.3	有	△	強度が低く、深く削れる部分有り
2	58	1.3	有	◎	斑部分がなく良好な仕上り
3	80	1.0	無	×	打込み面が乾燥し、目粗しできない
4	80	1.0	有	△	部分的に目粗しできない箇所有り
5	80	1.3	有	○	仕上りは良好だが、作業に時間を要する
6	80	1.7	無	×	打込み面が乾燥し、目粗しできない
7	80	1.7	有	◎	斑部分がなく良好な仕上り
8	91	1.7	有	◎	斑部分がなく良好な仕上り
9	108	1.7	有	○	仕上りは良好だが、作業に時間を要する
10	120	1.7	有	△	硬化が進み、目粗しできない部分有り

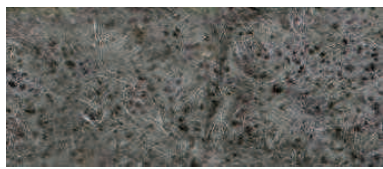
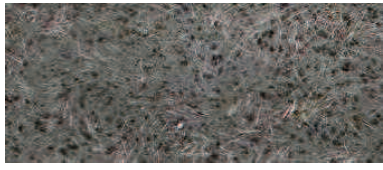


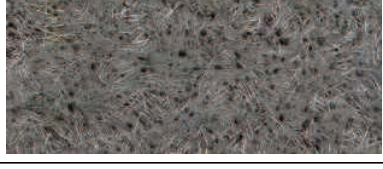
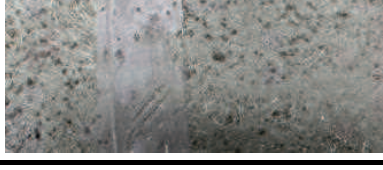
(b) 打込み面の養生の影響

遅延剤塗布面へのシート使用の有無の影響を確認したところ、シートを使用しない場合(No.3)には目粗しができなかった。また、許容範囲内で遅延剤使用量を増やしても目粗しができなかった(No.6)。これは表面乾燥による影響と考えられ、シートの使用は必須と考えられる。

(c) 目粗し時の圧縮強度の影響

目粗し後の試験体状況を写真-6.4.2に示す。各強度における仕上りを確認したところ、圧縮強度が58~108N/mm²の場合は、目粗しが可能であった(No.2, 5, 7~9)。一方、圧縮強度が36N/mm²(No.1)の場合には、強度が低いため、深く削れる箇所があった。また、圧縮強度が120N/mm²(No.10)の場合には、目粗しができなかった。このことから、目粗しは、圧縮強度が60~100N/mm²の範囲に到達したときに施すことが好ましいことがわかった。

写真-6.4.2 目粗し後の試験体表面の状況

No.	打込み後 経過時間	仕上り状況
1	12	
2	16	
3	20	
4	20	
7	20	
10	36	

6.4.2 耐摩耗パネルの製造

製造した常温硬化型 UFC パネルは、副ダムの流水面に合わせて設計した。寸法は、概ね一辺が 1,000～1,500mm，厚さを 50mm とした。UFC パネルを合計で 20 枚製造した。

(1) 製造概要

(a) 使用材料および配合

UFC の配合を表-6.4.4 に示す。材料には、プレミックス材，粒径 5mm 以下の細骨材，高性能減水剤，および鋼繊維を使用した。

表-6.4.4 配合

単位量 (kg/m ³)				鋼繊維 (kg)
水	プレミックス材	細骨材	高性能減水剤	
230 [※]	1830	330	20～24	157

※ 水の単位量は減水剤を含む。

(b) 練混ぜ

練混ぜは、写真-6.4.3 に示す容量 400L のパン型ミキサを用いて実施した。プレミックス材と細骨材を投入して 30 秒間練り混ぜ、高性能減水剤を含む水を投入した後、さらに 15 分間練り混ぜた。その後、鋼繊維を投入してさらに 2 分間練り混ぜた後、フレッシュ性状を確認してベッセルに排出した。



写真-6.4.3 製造に使用したミキサとベッセル

(c) 品質管理項目

品質管理項目を表-6.4.5に示す。各試験（曲げ強度を除く）は、1回/日の頻度で実施した。

表-6.4.5 品質管理項目

項目		管理値および内容	管理材齢
フレッシュ性状	フロー	260±30mm	—
	空気量	3.5%以下	
	温度	10℃以上	
硬化性状	圧縮強度	30N/mm ² 以上	1日
		180N/mm ² 以上	14日
	曲げ強度	25N/mm ² 以上	14日
製品検査	外観	角欠け ひび割れ,	14日
	寸法	+1~-3mm	

(d) 打込みおよび養生

ベッセルを天井クレーンで吊り、傾けて型枠に打ち込んだ。打込み状況を写真-6.4.4に示す。打込み後は表-6.4.6に示す養生を施した。これまでの検討結果から、環境温度が低い場合でも加温養生を行うことで十分な強度が得られることがわかっており、事前に予備試験を行い、所定の強度が確保できる養生条件を設定した。



写真-6.4.4 打込み状況

表-6.4.6 養生条件

	1次養生	2次養生
最高温度	30℃	65℃
保持時間	24h	5h
備考	特別な養生なし	蒸気養生

(e) 目粗し

打込み完了後、6.4.1で検討したオキシカルボン酸塩系の遅延剤を標準使用量の1.3倍量を目安にして打込み面に霧吹きで噴霧した。遅延剤噴霧後は乾燥を防止するため、シートで打込み面を養生した。

(2) 製造結果

(a) フレッシュ性状

フローおよび空気量の測定結果を図-6.4.2に示す。フローは、製造期間を通して約270mmといずれも管理値の $260 \pm 30\text{mm}$ を満足しており、ばらつきもなく安定していた。空気量も2.5%程度であり、いずれも管理値を満足した。なお、コンクリート温度は製造日によって若干差があったものの、いずれも 10°C 以上であった。

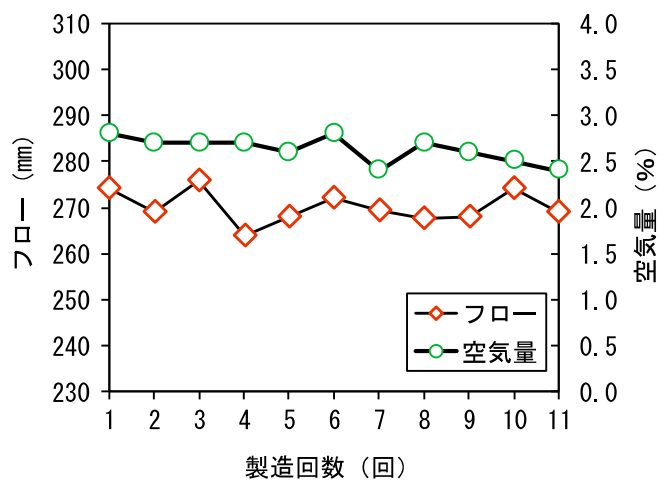


図-6.4.2 フローおよび空気量の測定結果

(b) 養生および硬化性状

養生温度の履歴を図-6.4.3に示す。槽内の温度履歴は最大温度で64°Cであったがコンクリート温度は水和熱の影響で77°Cまで上昇した。

圧縮強度試験結果を図-6.4.4に示す。1次養生後の圧縮強度は、60~90N/mm²であった。製造日毎に強度差が認められるのは外気温の影響と考えられる。2次養生後の圧縮強度は、製造期間を通して190N/mm²程度と基準値(180N/mm²)以上であった。2次養生の最高温度が65°C(槽内)、保持時間が5hとUFC指針[2004]に記載される標準熱養生(90°C-48h)と比較して、最高温度が低く、その保持時間も短かったが、いずれも管理値を満足した。曲げ強度試験は製造期間を通して1回実施した。曲げ強度は、36.7N/mm²であり、管理値(25N/mm²)以上であった。

これらの結果より、本研究のUFCを用いたプレキャスト製造の養生条件は概ね適切であったものと考えられる。

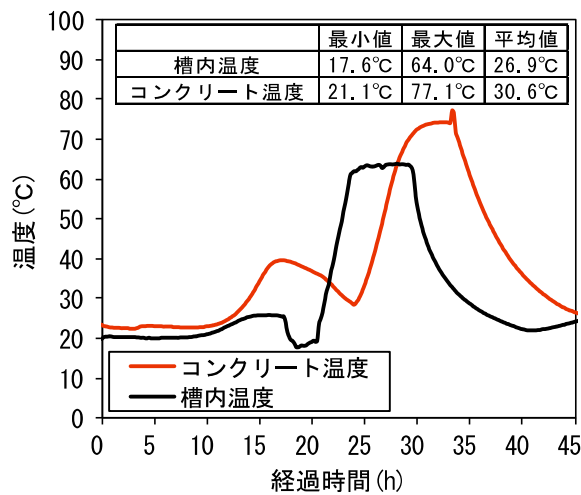


図-6.4.3 養生温度の履歴

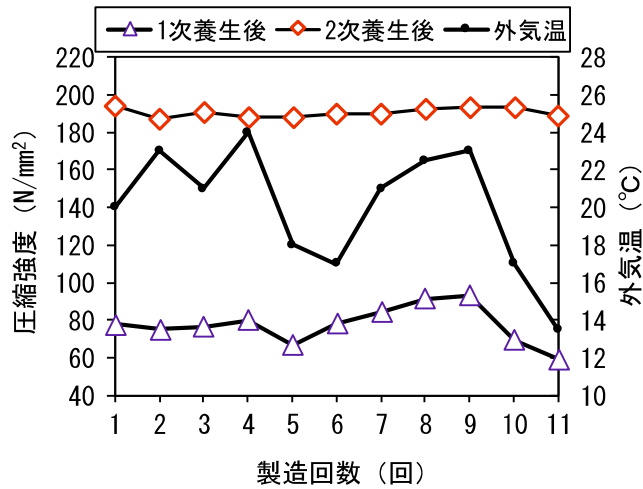


図-6.4.4 圧縮強度試験結果

(c) 目粗し

一次養生終了後に乾燥防止用のシートを撤去してから脱型した。その後、高圧洗浄機を用いて、打込み面の目粗しを行った。目粗し作業の状況を写真-6.4.5に示す。また目粗し後の状況を写真-6.4.6に示す。いずれのパネルも斑なく均一に目粗しすることができた。各パネルの製造日は同一でなかったため、一次養生後の圧縮強度は異なったが、いずれも圧縮強度は、事前検討で目粗しが可能だった58~108N/mm²の範囲内であり、過度な硬化や著しい凝結遅延がなかったため目粗しが均一に施せたものと考えられる。



写真-6.4.5 目粗し作業の状況



写真-6.4.6 目粗し後のパネル表面

(d) 製品検査

製造した常温硬化型 UFC パネルを写真-6.4.7 に示す。製品の製品検査の結果，角欠けやひび割れは認められず，寸法も許容範囲内であった。



写真-6.4.7 製造した UFC パネル

(3) パネルの設置

製造した UFC パネルは，アンカーで本体コンクリートに固定した。固定後，パネルと本体コンクリートの隙間に無収縮グラウトを注入して付着させた。設置状況を写真-6.4.8 に示す。



写真-6.4.8 パネルの設置状況

6.5 6章のまとめ

本研究の UFC の実現場への適用性を検証した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 常温硬化型 UFC は、生コン工場において、計量開始から排出まで、15～20 分／バッチで製造可能であり、ミキサ容量の 80%程度までであれば、練混ぜ量による製造時間の差は小さい。
- (2) 生コン工場において、約 4 ヶ月間、累計 140m³ (80 バッチ) を実機製造した結果、外気温に関わらず、フレッシュ性状の安定した UFC を連続的に供給することが可能であり、その硬化体物性も安定する。
- (3) 本研究の UFC の供給には、製造量に応じて車載式のミキサが適用可能である。
- (4) 外気温が低い環境で施工する場合でも、適切な保温養生を行うことで所定の性能を発揮することができる。
- (5) 既設コンクリートなどとの接合を目的とした、本研究の UFC の目粗しは、使用する遅延剤の量を標準使用量の 1.3～1.7 倍とし、散布後にシートを用いて乾燥を防止する必要がある。また、目粗しのタイミングは圧縮強度試験値が 60～100N/mm² の範囲を指標とできる。
- (6) 開発した UFC を熱養生する場合、所定の性能を得るための熱養生条件は、UFC 指針の標準熱養生 (90℃-48h (前置は除く)) よりも最高温度を低減でき、かつ養生時間も短くできることがわかった。

6.6 第6章の参考文献

- American Concrete Institute, ACI 305.1-06 Specification for Hot Weather Concreting, Reported by ACI Committee 305, 2007.
- 伊藤智章, 松永 篤 : 高強度コンクリートの凍結融解抵抗性に関する基礎的実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.523-524, 2006
- 大野俊夫, 坂井吾郎, 保利彰宏, 樋口正典 : 超高強度繊維補強コンクリートの品質安定性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1265-1270, 2006.
- 神代泰道, 一瀬賢一, 都築正則, 堀 長生, 斎藤 賢 : ジルコニア起源シリカ質微粉末を用いた超高強度コンクリートの特性 (その 3 乾燥収縮ひずみ, 耐久性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.387-388, 2005.
- 土谷 正, 清水哲史, 岡沢 智 : 超高強度コンクリートの強度発現性および耐久性に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.199-200, 2001.
- 筒井浩平, 大内雅博 : 温度変化による高性能 AE 減水剤の吸着量とセメント粒子の分散状態の変化, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 第 5 部門, pp.505-506, 2008.
- 橋本真幸, 谷村 充, 松本健一 : シリカフェームプレミックスセメントを用いた超高強度コンクリートの基本特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.49-50, 2006.
- 増田 隆, 松永嘉久, 渡邊芳春 : 超高強度コンクリートによる橋脚の補強, コンクリート工学, Vol.31, No.9, pp.53-61, 1993.
- 増田 隆, 松永嘉久, 渡邊芳春 : 高耐摩耗性コンクリート, コンクリート工学, Vol.32, No.7, pp.100-104, 1994.
- 土木学会 : 2017 年制定コンクリート標準示方書【施工編】, pp.126-127, 2018.
- 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113, 2004.
- 渡邊悟士, 黒岩秀介, 陣内 浩, 山本佳城, 吉田 泰, 並木 哲 : 設計基準強度 200N/mm^2 の超高強度コンクリートの実用化に関する研究 その 4 耐久性に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), pp.1001-1002, 2010.

第 7 章

結 論

第7章 結論

7.1 本研究のまとめ

これまで、UFCは、高温の熱養生を行うことが標準だったため、専用設備があるコンクリート製品工場での製造に限定される場合が多く、運搬面から部材寸法にも制約が生じていた。また、施工現場でUFCを施工した場合、熱養生するよりも強度特性が劣ることがあった。

本研究では、上記課題を解決するため、熱養生が不要なUFCについて検討を行い、その配合設計や製造方法および現場適用性を明らかにした。本論文は、これらの実験的研究をまとめたものであり、その主な要旨・結論を以下にまとめて示す。

第3章「配合設計」では、

常温環境下で所定の性能を発揮できるUFCに適した材料選定および配合設計を検討した。セメントについては、 C_3A が多いセメントを使用した場合、高性能減水剤の添加量が多くなることや所定の流動性が得られないことがわかった。また C_3S が少ないセメントについては、材齢28日の圧縮強度が目標値に到達しない場合があることがわかった。そのため、常温環境下で性能を発揮させるためには、 C_3A が少なく C_3S を多く含むセメントの使用が効果的であることがわかった。また、セメント以外の粉体材料については、比表面積が大きい反応性粉体をセメントに対して10~20%置換することで、流動性が向上し、高い圧縮強度が得られることを示した。なお、置換率が20%以上になると、高性能減水剤の添加率が増えることや、圧縮強度が小さくなるため注意が必要である。また、結合材水比と圧縮強度は、水結合材比が14~21%の範囲では直線関係にあるものの、水結合材比が21%を上回る場合は、圧縮強度が著しく低下する可能性があるため、水結合材比は14~21%の範囲が適していることを示した。細骨材の単位量を多くすると、粘性は低下するものの、鋼繊維の分散性に悪影響を与える。そのため、JIS A 5005に規定されている砕砂の粒度範囲に適合する細骨材を使用する場合は、単位細骨材使用量は 600kg/m^3 以下が適切であることを示した。また、モルタルの粘性が過度に低い場合、鋼繊維とモルタルが材料分離し、逆にモルタルの粘性が過度に高いと、圧縮強度が低下することから、モルタルフローの管理値は230~290mmが適当であることを示した。

第4章「硬化物性および耐久性」では、

第3章で配合設計した UFC の硬化物性と耐久性を調べた。本研究で配合した UFC の圧縮強度、ひび割れ発生強度および引張強度の特性値は、熱養生を行う UFC とほぼ同等であることを明らかにした。また、中性化や凍結融解に対する抵抗性が非常に高いことを示した。また、塩化物イオンの浸透性から、鋼材位置の塩化物イオン濃度が発錆限界に達するまでは約 200 年と推定され、構造物の設計耐用年数が 100 年の場合は、コンクリート中の鋼材腐食に関する照査が不要なことを示した。また硫酸塩に対する抵抗性が高いことや、アルカリシリカ反応（ASR）に対して無害の骨材を使用した場合、ASR による劣化が生じる可能性が低いことを示した。ただし、結合材量が多いため、自己収縮ひずみが大きく、型枠などの拘束によるひび割れやプレストレスのロス、硫酸や塩酸などによる劣化については注意が必要なことを明らかにした。

第5章「製造方法の検討」では、

本研究で検討した UFC の生コン工場における製造方法を検討した。練混ぜ性能はミキサの性能や練混ぜ量で変わるものの、一般的な設備で製造可能なことを示した。また、鋼繊維の添加はプラントとトラックアジテータのいずれの場合でも可能であり、トラックアジテータに添加する方が、ミキサの洗浄が容易なこと、追加発注に対応し易いこと、一般のコンクリートに繊維が混入するリスクが低いなどのメリットがあることを明らかにした。また、一般のコンクリートと同様にトラックアジテータで運搬が可能であるものの、粘性が高いため、材料ロス量が多いことを報告した。また、超高強度を実現するため、使用する細骨材の種類によっては、圧縮強度が目標値を満足しない可能性があることから、事前に使用できる細骨材を選定する必要があることを示した。

第6章「実現場における UFC の適用性の検証」では、

本研究の UFC について、実現場での適用性を検証した。連続製造する場合の製造時間は 15～20 分/バッチであった。生コン工場で数か月間連続的に製造し、フレッシュ性状や強度性状の安定した UFC が供給できることを示した。また、運搬時の材料ロスを考慮すると、少量の施工の場合は、車載式ミキサを使用した現地製造が適していることを示した。外気温が低い場合でも適切に保温養生することで、所定の性能が確保できることを示した。また、表面仕上げ時期の判断が一般のコンクリートと比較して難しいものの、

土壌硬度計を用いて判断する方法を提案した。コンクリート製品に適用する場合、所定の性能を得るための熱養生条件は、熱養生を行う UFC の標準熱養生 (90℃-48h (前置は除く)) よりも最高温度を低減でき、かつ養生時間も短くできることを示した。

7.2 今後の課題と展望

本研究では、常温環境下で UFC としての目標性能を発揮できる配合設計と製造方法を明らかにすることができた一方、今後の課題も明らかになった。以下にその課題を示す。

材料および配合設計

UFC は、目標強度を満足するため一般のコンクリートよりも結合材料が多くなる。そのため、自己収縮ひずみも大きく、ひび割れやプレストレスのロスに注意が必要である。強度を保持しつつ、膨張材や収縮低減剤を使用して自己収縮ひずみを低減する方法もあるが、さらなる検討が必要である。今後は、結合材量を減らして目標強度を達成する材料選定や配合設計、収縮ひずみを緩和できる養生および施工方法の検討も必要と考える。

製造方法

UFC は、水結合材比が小さいため、練混ぜ時間が一般のコンクリートよりも長い傾向にある。本研究の UFC の製造時間は 15~20 分/バッチであったが、製造に時間を要する場合、打ち継ぎが生じることや工程、工期にも影響を与えるため、練混ぜ時間の短縮は今後の課題である。また、生コン工場で製造してトラックアジテータで運搬する場合、材料ロスが約 200L 発生することがわかった。これは一般的なコンクリートの 2 倍以上のため、コスト面や環境面から好ましくない。今後はミキサやアジテータに付着し難い材料設計や付着しにくくする薬剤の開発も必要である。

その他

本研究では対象としていないが、UFC は、打込み方法や部材形状の違いによる繊維の配向が課題となっている。特に打込み時に合流部ができた箇所については、繊維が架橋せず、期待される性能が発揮できていないため、設計方法、配向を制御できる打込み方法および型枠の形状等の検討も今後の課題である。

また、UFC は、特殊な材料のため、製造や品質管理（試験）および施工が一般のコンクリートと異なるため、技術指導やマニュアル化によって、これらに対応できる技術者を増やし、品質の安定した UFC の製造と施工がいつでも可能なようにすることも課題のひとつに挙げられる。

前述のとおり、UFC には、多量の結合材を使用する。そのため、一般のコンクリートよりも、材料の価格が高いことや、材料に起因する CO₂ 発生量も多くなる。UFC は、供用後の補修などの回数が一般のコンクリートよりも少なく、修繕や更新工事に関わる CO₂ 発生を抑制できると考えられるが、今後はさらなる普及と環境面を考慮して、結合材を減じることや環境負荷の小さい材料で同等の性能を有する UFC の開発が必要と考えている。

本論文に関する著者の発表論文

査読のある雑誌等

1. 常温硬化型の超高強度繊維補強コンクリートの開発プロセスと現場適用性, 玉滝浩司, 伊藤智章, 石関嘉一, 平田隆祥, 吉武 勇, 土木学会論文集 E2, Vol.77, No.3, pp.119-133, 2021.

(本論文との関連：第3章, 第5章)

査読のある国際会議の会議録等

1. 常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートの諸性質, 玉滝浩司, 吉田浩一郎, 石関嘉一, 平田隆祥, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.208-213, 2012.
(本論文との関連：第4章)
2. 常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートの塩分浸透に対する抵抗性に関する研究, 石関嘉一, 平田隆祥, 玉滝浩司, 吉田浩一郎, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.214-219, 2012.
(本論文との関連：第4章)
3. 超高強度繊維補強コンクリートのレディーミクストコンクリート工場での製造に関する検討, 吉田浩一郎, 玉滝浩司, 松永篤, 石関嘉一, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.286-291, 2012.
(本論文との関連：第5章)
4. レディーミクストコンクリート工場における超高強度繊維補強コンクリートの大量製造, 玉滝浩司, 吉田浩一郎, 石関嘉一, 平田隆祥, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.316-321, 2014.
(本論文との関連：第6章)
5. 常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートの水流摩耗防止部材への適用, 石関嘉一, 相良光利, 玉滝浩司, 西平宣嗣, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1966-1971, 2014.
(本論文との関連：第6章)
6. 超高強度繊維補強コンクリートの鋼繊維添加方法に関する検討, 玉滝浩司, 藤野由隆, 吉田浩一郎, 桐山宏和, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1279-1284,

2015.

(本論文との関連：第5章)

7. 冬期における常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートを用いた底の製造検討, 吉田浩一郎, 玉滝浩司, 渕田安浩, 浅岡泰彦, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.253-258, 2015.

(本論文との関連：第6章)

謝 辞

本論文は、著者が宇部興産株式会社に在籍しながら、山口大学大学院博士後期課程（2019年4月～2022年3月）で取りまとめたものです。

本論文の査読を務めて頂いた山口大学大学院創成科学研究科教授 吉武 勇先生には、入学の準備、英文の構成や論文作成や添削など、多岐にわたり懇切丁寧にご指導を賜りました。また、学会論文を投稿する際は、休日、早朝、夜間にかかわらずご対応をいただきました。厚く御礼申し上げます。

山口大学大学院創成科学研究科教授 進士正人先生、同教授 中村秀明先生、同教授 李 柱国先生、同准教授 渡邊学歩先生には、御多忙にも関わらず、本論文の査読を快くお引き受けいただきました。予備審査と本審査で貴重なご意見とご助言を頂き、本研究の内容を充実させることができました。心より御礼申し上げます。

本論文の実験データの多くは、株式会社大林組様との共同研究開発の成果を使用しております。心より感謝申し上げます。

株式会社大林組技術研究所生産技術研究部 平田隆祥博士には、入学前から学位取得の心構えや入学以降も多くの励ましのお言葉を頂き、博士論文の添削まで快くお引き受けいただきました。石関嘉一博士には、施工に関するご助言やいつも前向きな姿勢を教わりました。川西貴士博士には、論文投稿や学位取得までの流れをご助言頂きました。構造技術研究部 野村敏雄博士には、開発当初から様々なご助言を頂くとともに本材料の暴露試験でもお世話になりました。田中浩一博士には、入学時や論文のとりまとめ段階でご助言と励ましのお言葉を頂きました。武田篤史博士には、博士後期課程への入学をご相談した際、励ましと応援のお言葉を頂きました。佐々木一成氏には、構造実験や繊維の配向などに関してご助言を頂きました。また、UFC材料を現場適用する際のデータ収集でも、多くの方にご支援を頂きました。特に、初めて橋脚の補強工事に適用した際には、櫛谷洋史氏、相良光利氏にご支援を頂きました。また、生コン工場から長期間に渡り供給する現場におけるデータ収集では、小澤武史氏にご支援を頂きました。また、ダム工事に適用する現場においては、小俣光弘氏にご支援を頂きました。ご指導、ご支援頂きました皆様に心より御礼申し上げます。

山口大学工学部技術職員 牧原貴之氏には、試験器具の拝借など、いつもご丁寧にご対応頂きました。ありがとうございました。

吉武研究室 博士後期課程の先輩にあたる、極東興和株式会社 三原孝文博士，株式会社日本ピーエス 福島邦治博士，三菱ケミカルインフラテック株式会社 長谷川泰聰博士には、大学院の単位取得や博士論文執筆に関してご助言を頂くとともに、論文執筆では御三方の博士論文を参考にさせて頂きました。心より感謝申し上げます。

株式会社ジャスト 茅田健次氏とは、偶然にも吉武研究室の博士後期課程の学生として同時期に入学，在籍しました。色々ご相談させていただき研究や論文執筆を進めることができました。心より感謝申し上げます。

山口大学大学院創成科学研究科吉武研究室の学生の皆様には、筆者在研究室に伺った際にはいつも温かく迎えていただきました。ありがとうございます。在籍中は新型コロナウイルスのため、ほとんど研究室に行くこともできず、懇親会もできなかったのが非常に残念です。

山口大学大学院博士後期課程に入学し、研究する機会を与えて下さいました宇部興産株式会社と技術開発研究所所長 大西利勝博士，萩森興産株式会社代表取締役(当時 技術開発研究所 所長) 松永 篤社長に心より感謝いたします。コンクリート開発部 五十嵐浩行部長，コンクリート開発 G 伊藤智章グループリーダーには業務面でご配慮いただき研究に取り組める時間を与えていただきましたことに厚く御礼申し上げます。宇部三菱セメント株式会社技術部 吉田浩一郎氏とは、開発当初，二人で朝まで試験練りをしたことなど数々の苦労が思い出されます。ここに感謝申し上げます。同僚の藤野由隆氏，伊藤隆紘氏には、本研究に関わる実験とデータ整理などを積極的に行って頂き、効率的に研究を進めることができました。同僚の桐山宏和博士には博士後期課程の先輩として、事務手続きや論文執筆に関するご助言をいただきました。御礼申し上げます。一緒に配合試験，強度試験，耐久性試験，実機試験などに取り組んで下さったコンクリート開発部員の皆様に御礼申し上げます。また，本研究を進めるにあたり，セメント開発部部長 大崎雅史博士，グループリーダー 丸屋英二博士をはじめ，部員の皆様にご指導とご支援を頂きました。心より御礼申し上げます。

実機試験や現場適用では、宇部三菱セメント株式会社様，宇部建設資材販売株式会社様，宇部興産建材株式会社様，関東宇部コンクリート工業株式会社様，萩森興産株式会

社様，株式会社富士宇部様，ユタカコンクリート工業株式会社様など多くの皆様にご支援いただきました。ここに感謝申し上げます。

最後に，著者が単身赴任のため結婚後のほとんどを留守にし，仕事，家事，子育てをいつもひとりで頑張って，家庭を支えてくれている妻 佳代子に感謝いたします。ありがとうございます。

本研究は，多くの方々のご指導とご支援により推進することができました。改めて，皆様に感謝の意を表し，謝辞と致します。

2022 年 3 月
玉 滝 浩 司