論文 養生中の温度履歴が超高強度繊維補強コンクリートの硬化性状にお よぼす影響

松原 功明^{*1}·渡邊 有寿^{*1}·樋口 正典^{*2}·山本 賢司^{*3}

要旨:エトリンガイト生成系超高強度繊維補強コンクリートについて、マッシブなブロック を製造し、その際の発熱性状を検討するとともに、養生中に高温履歴を受けた場合の硬化後 の物性を評価するために、コア供試体の強度試験および各種分析を実施した。発熱性状の検 討においては、二次養生を実施しないマッシブなブロックの内部温度の推移から逆解析によ って断熱温度上昇式の同定を試み、さらに、その断熱温度上昇式を用いて二次養生を実施し たマスブロックの養生中の温度変化を予測し、測定値と比較した。

キーワード:超高強度繊維補強コンクリート、マス部材、蒸気養生、発熱特性、温度履歴

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート(以下,UFC と称する)は、土木学会より「超高強度繊維補 強コンクリートの設計・施工指針(案)」が示さ れており、実構造物への適用も進んでいる¹⁾。 UFC は 200N/mm² レベルの圧縮強度を有し、設 計上、コンクリートに引張強度を負担させ、鉄 筋のない構造物を実現できる。そのため、UFC 構造物は RC 構造物と比較して部材厚を薄くで き、構造物を軽量化することができる。

UFC に所定の硬化性状を付与するための養生 は、打設後に常温で実施する一次養生と、その 後の85℃や90℃で実施する二次養生に分けるこ とができる。UFC では部材厚の薄い製品を製作 することが多いため、二次養生中は雰囲気温度 と部材温度がほぼ同一となり、容易に所定の温 度履歴を与えることができる。

しかし, 例えば PC 構造物のケーブル定着部な どのマッシブな部材の製作を想定した場合には, 二次養生中に部材が温まりにくく, 所定の温度 履歴を与えることが難しいことや, UFC は単位 結合材量が多いため, 内部温度が著しく高くな り, 内外温度差に伴う内部拘束応力によるひび 割れ発生が懸念される。また,水和初期に高温 履歴を受けたコンクリートは硬化性状に悪影響 をおよぼすことも懸念される。

本検討では、エトリンガイト生成系 UFC (以 下、AFt 系 UFC²⁾ と称する)のマッシブな部材 製作を想定し、養生中の温度履歴が硬化性状に およぼす影響を把握するとともに、養生中の温 度管理手法を確立することを目的とした。まず 初めに、二次養生を実施しないマッシブなブロ ック(以下、マスブロックと称する)の部材温 度を測定し、この履歴を逆解析して断熱温度上 昇式を同定することを試みた。次に、それを用 いて二次養生時のマスブロックの発熱履歴を推 定し、実際の温度測定結果と比較するとともに、 温度降下時の発生応力を解析的に確認した。そ の後、養生中に高温履歴を受けたマスブロック の圧縮強度、細孔構造、鉱物組成を確認した。

2. 実験内容

(1) 概要

本実験では、1.0×1.0×0.5mのマスブロックを 3体製作した。型枠には木製合板を使用し、打上 り面は特別な養生を実施しなかった。マスブロ

*1 鹿島技術研究所 土木構造・材料グループ 研究員 工修 (正会員) *2 三井住友建設株式会社 技術研究所 土木研究開発部 土木材料研究グループ長 工博 (正会員) *3 電気化学工業株式会社 青海工場 無機材料研究センター 研究員 工修 (正会員) ックは風雨に曝される ことを避けるために, AFt 系 UFC の打設終了 後,直ちにビニルシート と骨組で作製したテン トの中に設置し,テント 内を異なった条件で養 生し,養生終了までの AFt 系 UFC の温度履歴 を測定した。また,養生 終了後のマスブロック



からコアを採取し、硬化性状を確認した。

(2) 使用材料および配合

使用材料および配合を表-1に示す。AFt 系 UFC の材料および配合は,UFC の所定の性能を 満足できるように調整されたものである。結合 材の化学成分を表-2に示す。

(3)UFC の製造方法

練混ぜには練混ぜ容量 1m³の強制二軸式ミキ
サを使用し、1バッチの練混ぜ量を0.8m³とした。
2バッチ分を同じバケットに投入し、投入完了後、
3 体のマスブロック(合計 1.5m³)に打設した。

(4)検討ケース

本実験では、養生パターンを検討ケースとした。ケース1は二次養生を実施せず、テント内に静置した。ケース2およびケース3は23.4時間雰囲気温度で養生し、その後、二次養生を実施した。養生パターンを図-1に示す。二次養生は蒸気によって実施し、二次養生の設定温度の最高値を85℃とし、その保持時間をケース2では約27時間、ケース3では約51時間とした。

(5)測定項目

測定項目を表-3に示す。フレッシュ性状試 験の試料は、2バッチ分が投入されたバケットの 排出口から採取した。マスブロックの温度履歴 は図-2に示す位置に熱電対を設置して測定し た。また、二次養生終了後、ケース2およびケ ース3の図-2に示す位置において中心部と側 面部でコア供試体を各3体採取し、両側の2体 を圧縮強度試験に、中央の1体を細孔径分布の

表-1 使用材料および配合

使用材料	水	結合材	骨材	高性能 減水剤	鋼繊維
単位量 (kg/m ³)	193 [*]	1287	905	38.6 (結合材×3.0%)	137.4
*単位水量には高性能減水剤の水分を含める					

表-2 結合材の化学成分

SiO ₂	Al_2O_3	$\rm Fe_2O_3$	CaO	SO3	R_2O
33.4	6.4	2.8	51.1	2.4	0.7
					mass%



表-3 測定項目

測定項目		測定方法	ケースNo.		
			1	2	3
フレッシュ	モルタルフロー	JIS R 5201 (落下運動なし)	0		
111八	空気量	JIS A 1128			
温度履歴	マスブロック 温度	熱電対による	0	0	0
	雰囲気温度	(本文参照)	0	0	0
硬化性状	圧縮強度	JIS A 1108 ∲ 100 × 200 mm	I	T,C	T,C
	X線回折	_	-	T,C	T,C
	細孔径分布	水銀圧入法	_	С	С
エ・テフトピーフ ヘ・コア					

測定および X線回折に供した。

テストピースはケース2およびケース3につ いて各3体製作してマスブロックと同様に二次 養生を実施した。すべて圧縮強度試験を実施し, 分析用試料は試験後の供試体から採取した。

3. 試験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

打設直前の AFt 系 UFC のモルタルフローは

236mm, 空気量は 3.1%であり, AFt 系 UFC の目 標値(250±20mm, 5.0%以下)の範囲にあった。 また, 打設直後のコンクリート温度は, 型枠に 設置した熱電対により 19.0℃と測定された。

3.2 温度履歴

ケース1の温度履歴を図-3に示す。中心部 に近いほど最高温度が高い結果となった。

図中にはこの温度履歴を逆解析した結果も併 せて示した。逆解析の際に使用した熱特性値な どの入力値を表-4に示す。解析結果と測定結 果を一致させるために必要なAFt系UFCの断熱 温度上昇式は式(1)のとおりとなった。

図-3に示すとおり,上記の熱特性値と断熱 温度上昇式を使用することによって温度の実測 値と解析値をほぼ一致させることができた。温 度降下時など,完全には一致しない部分もある が,これは熱特性値や断熱温度上昇式の誤差や 時間依存性なども影響していると考えられ,よ り精度を高めるには更なる検討が必要である。

ケース2の温度履歴を図-4に示す。今回の 二次養生開始材齢は打設完了から23.4 時間であ ったが、いずれの箇所も一次養生の段階で発熱 の第一ピークが観測され、その温度はC1におい て 81.1℃に達した。水和熱による温度上昇が大 きいため, 仮に, 第一ピークが確認される前に 二次養生を開始すると、第一ピーク温度がさら に上昇することが考えられ、養生時の発熱をで きるだけ小さく抑えるためには、第一ピークが 確認されてから二次養生を開始することが望ま しいと考えられる。二次養生開始後、再び温度 が上昇しC3においては92.5℃まで達した。さら にその後は、徐冷に伴い温度が降下した。第一 ピークの温度はマスブロックの中心部に近いほ ど高く,その後の二次養生過程の温度上昇は中 心部に近いほど遅れる結果となった。

図中には、ケース1の逆解析で設定した熱特



表-4 解析に用いた入力値

(AFt 系 UFC の熱特性値)

項		入力値	単位
熱伝導率		1.77	W∕m°C
比熱		1.01	kJ∕kg°C
初期	温度	19.0	С°
熱伝達率	型枠	8.0	W/ / ²⁰ 0
	打設面	12.0	w/m C



性値や同定した断熱温度上昇式を使用した解析 値を示すが,全体的には温度履歴をほぼ予測 することができた。なお,二次養生中は解析値 よりも実測の温度の方が高い結果となったが, 図-3において発熱ピーク後の温度履歴が解析 値よりも若干大きくなっていることから,同じ 熱特性値と断熱温度上昇式を使用したケース2 の解析においても同様の傾向が現れたと考えら れる。

ケース3の温度履歴を図-5に示す。全体の 傾向はケース2と同様であり,実測の温度履歴 を解析によってほぼ予測できる結果であった。

AFt 系 UFC の二次養生は 85℃を 20~24 時間

以上保持することを標準としている³⁾が,今回 の実験ではケース2およびケース3においては それを満足する計画(約27時間および約51時 間)で養生を実施した。マスブロックの温度計 測点における85℃以上保持時間を図-6に示す。 ケース2では厳密には一部において標準の養生 時間を満足できなかったものの,概ね所定の養 生を満足できたと判断した。いずれのケースに おいても,部位によって85℃の保持時間が異な っている。このように,マス部材においては部 位によって温度履歴が異なるため,全部位に所 定の養生条件を満足させるためには,事前に解 析などによって検討し,養生時間を決定する必 要がある。

3.3 硬化性状

(1) 圧縮強度と細孔構造

ケース2およびケース3における圧縮強度試 験結果を図-7に示す。コア供試体は材齢5日 で採取し,直ちに圧縮強度試験に供した。また, テストピースは材齢20日の時点で圧縮強度試験 を実施した。ケース2とケース3では,同じ箇 所では同等の強度であり,すべての試験結果に おいて AFt 系 UFC の圧縮強度の特性値 180N/mm²を満足する結果であった。また,ケー ス3では AFt 系 UFC の標準の二次養生時間以上 の養生を実施したが,ケース2と比較して圧縮 強度の増進はなく,既往の研究³⁾と同様に,標 準の二次養生(ケース2程度)で圧縮強度は頭 打ちになることが確認された。

細孔構造の測定結果を図-8に示す。各コア の受けた温度履歴はそれぞれ異なるが、細孔径 の割合はほぼ同等であり、ケース2の養生によ って十分良好な硬化体が得られたと判断できる。 ただし、いずれのケースにおいても、全細孔量 は中心部の方が少ない結果となった。

全細孔量と圧縮強度の関係を図-9に示す。 同図より,おおむね全細孔量が少ないほど圧縮 強度が大きい結果となった。以上より,マスブ ロックの中心部は側面部と比較して,温度履歴





図-7 圧縮強度試験結果



が異なることによって組織が緻密化し,より高 い圧縮強度が得られたと考えられる。

(2) X 線回折結果

X線回折結果を図-10に示す。図に示すとお り、いずれの試料からもエトリンガイト(回折 角度:9.0°)が検出され、無水石膏(回折角度: 25.4°)は検出されなかった。一般に、エトリン ガイトは高温履歴を受けると、硫酸イオンを放 出してモノサルフェートに変化するものがある とされている⁴⁾。この硬化体に長期的に亘って 水や硫酸イオンが供給されると、再びエトリン ガイトが生成し、膨張によって構造物を劣化さ せることが懸念される。今回の試験結果では二 次養生後も無水石膏が検出されなかったことや、 硬化体が緻密であり水の移動がほとんど生じな いことから、エトリンガイトの遅れ生成が生じ る可能性は低いと考えられるが、今後、長期的 な観察が必要である。

3.4 養生終了時の温度に関する考察

UFC では、二次養生の終了時は急激な温度変 化による大きな内外温度差の発生を防ぐため、 徐冷することを基本としている。マッシブな部 材ではさらに内外温度差が大きくなることが懸 念され、また、中心部の温度上昇が遅れること から、部材厚が薄い場合よりも二次養生期間が 長くなるという課題もある。ここでは、徐冷の 打切り時間と打切り後の内外温度差および発生 引張応力を解析的に検討した。

解析では、85℃の二次養生終了時から、中心 温度(C1)が85℃、70℃、50℃になった時点で 徐冷を終了し、直ちに外気に曝すことを想定し た。すなわち、85℃のケースは全く徐冷を実施 しないこととなる。なお、ここではケース2の 温度解析結果を使用し、二次養生終了後に曝す 外気温はより厳しい条件を想定し、5℃一定と した。解析に使用した物性値を表-5に示す。 AFt 系 UFC の圧縮強度増進は、初期段階は積算 温度で整理できるが、二次養生開始後の強度は 必ずしも積算温度では整理できない³⁾。ただし、





表-5 応力解析に用いた入力値

(AFt 系 UFC の物性値)

項目		物性値	
圧縮強度 (N/mm ²)	M(°C•h)≦343	Fc=0.01	
	343 <m≦1089< td=""><td>Fc=298.71log₁₀M-757.26</td></m≦1089<>	Fc=298.71log ₁₀ M-757.26	
	1089 <m< td=""><td>Fc=40log₁₀M+30</td></m<>	Fc=40log ₁₀ M+30	
ひび割れ発生強度(N/mm ²)			
ひび割れ発	主強度(N/mm ²)	Ft=0.44Fc ^{0.5}	
<u>ひび割れ発生</u> ヤング係	<u>生強度(N/mm²)</u> 数(N/mm ²)	$\frac{Ft=0.44Fc^{0.5}}{Ec=2703.9\times F'c^{0.5}}$	
<u>ひび割れ発生</u> ヤング係 線膨張(<u>生強度(N/mm²)</u> 数(N/mm ²) 系数(m/°C)	$\frac{Ft=0.44Fc^{0.5}}{Ec=2703.9 \times F'c^{0.5}}$ 13.0×10^{-6}	

解析上は二次養生 以降の強度増進も 設定する必要があ るため、150N/mm² までは既往の研究 から得られた式³⁾ を使用し、それ以 降 は 緩 や か に 200N/mm² に近づ いていく設定とした。



図-11 徐冷しない場合の 引張応カコンター図

徐冷をしないケースの、二次養生終了直後からの発生引張応力について、最大経験値のコンター図を図-11に示す。また、図-11中の各点

における引張応力の推移を図-12 に示す。図-12 に示すとおり, 引張応力は S2 で最大値となる ことが確認できる。ここで, C1 と S2 温度の最 大温度差と S2 における最大引張応力及びその際 の材齢について整理した表を表-6 に示す。表 に示すとおり, 徐冷終了時の温度が低いほど, 発生する引張応力が小さい結果となった。今回 発生した応力は AFt 系 UFC のひび割れ発生強度 の特性値 8.0N/mm²よりも小さい値であるが, 今 回の実験よりも大きな部材ではさらに大きな引 張応力が作用することが想定され, また, 形状 が複雑な部材では, さらに大きな温度差による 応力や,型枠による外部拘束応力が発生するこ とも考えられるため, 徐冷終了時期は十分に検 討する必要があると考えられる。

4. まとめ

本実験により,以下の事柄が明らかとなり, 養生時に高温履歴を受けた AFt 系 UFC のマッシ ブな部材の硬化性状を確認することができた。 また,マス部材の製作において考慮すべき点を 抽出することができた。

- (1) 二次養生を実施しないマスブロックから断 熱温度上昇式を同定し、それを用いて二次養 生を実施した場合の温度履歴をおおむね予 測することができた。ただし、一部精度が低 い部分もあるため、解析精度の向上のために は、更なる検討が必要である。
- (2) 二次養生時の発熱ピークを低く抑えるため には、一次養生時の発熱ピークが確認されて から二次養生を開始するのがよい。
- (3) マスブロックでは二次養生中に設定温度よりも内部温度が高くなることがある。また、中心部では温度が伝達するのが遅れるため、全部位に対して所定の養生を与えることができるように事前に検討する必要がある。 今回実施した範囲では、AFt 系 UFC は養生時に高温履歴を受けても、良好な硬化体を得ることができた。
- (4) 細孔量と圧縮強度にはおおむね相関があり,



表-6 最大温度差と引張応力

百日	徐冷終了時の中心部温度(℃)			
項口	85	70	50	
C1-S2の最大値(℃)	47.0	37.1	28.9	
最大引張応力(N/mm ²)	5.54	3.76	1.92	
二次養生終了 からの時間(時間)	4.56	20.16	17.04 ^{**}	
※暴露前に最大応力が発生				

細孔量が少ないほど圧縮強度が高い。

(5) 今回の養生方法の検討範囲では, DEF の原因 となる因子は確認されなかった。ただし, 今 後,長期的な確認が必要である。

参考文献

- 石井精一,西村一博,児山祐樹,一宮利通: 超高強度繊維補強コンクリートの道路橋へ の適用事例,プレストレストコンクリート技 術協会第15回シンポジウム論文集, pp.15-16,2006.10
- 渡邉芳春, 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 の耐久性と微細構造, コンクリート工学年次 論文集, Vol.28, No.1, pp.1271-1276, 2006
- 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 におよ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
- 4) 平尾宙:硫酸塩劣化事例-エトリンガイトの 遅延生成(DEF)に関する研究,コンクリー ト工学,文献調査, Vol.44, No.7, pp.44-51, 2006.7