

論文 超高強度繊維補強コンクリートの強度発現性状に関する実験的検討

渡邊 有寿^{*1}・柳井 修司^{*2}・坂本 真^{*2}・大野 俊夫^{*3}

要旨：プレキャスト部材を対象として普及・展開されているエトリンサイト生成系超高強度繊維補強コンクリートを現場で打込んで養生することを想定して、養生方法が強度発現に及ぼす影響について実験的な検討を行った。実験では、打設時期、養生設備等の現場条件を考慮した練上り温度、一次養生温度、二次養生温度ならびに養生時間をパラメータとして強度試験を実施した。また、水和反応が活発な若材齢を含めた引張強度や静弾性係数の発現特性を明らかにするとともに、強度発現性状を積算温度で定式化することを試みた。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、養生方法、若材齢、圧縮強度、引張強度、積算温度

1. はじめに

エトリンサイト生成系超高強度繊維補強コンクリート（以後、AFt系UFCと記す）は圧縮強度が 180N/mm^2 以上、引張強度が 8.8N/mm^2 以上の特性値とすることができる材料である。本材料は、2006年に土木学会の「技術評価制度」により、「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）（以後、UFC指針）」¹⁾に準拠した設計・施工が可能であるものとの評価を受けており²⁾、すでに実構造物への適用も進んでいる³⁾。

AFt系UFCは高強度・高耐久性を有していることはもとより、自己充てん性と繊維補強による高いじん性を有するため、鉄筋の無い極薄部材に適しており、また一般に蒸気養生を行うことから、主にプレキャストコンクリート部材への適用を基本としている。AFt系UFCを用いた部材に所定の硬化性状を付与するためには、打設後に常温で実施する一次養生と、その後に実施する 85°C -20～24時間の二次養生（蒸気養生）が必要とされている。また一方では、近年の構造物の多様化や施工方法の合理化に伴って現場施工されることも想定され、その場合には、現場条件を考慮した養生条件におけるAFt系UFCの強度発現性状を明らかにしておくことが重要である。

本検討では、AFt系UFC部材を現場にて製造する際に現場条件や目標強度に合わせた養生方法の目安を得ることを目的とし、打設時温度、養生温度および養生時間が強度発現性状に及ぼす影響について検討した。また、その圧縮強度の発現性状を積算温度で定式化することを試みた。さらに、若材齢時を含めた引張強度や静弾性係数の発現特性の定式化を試みた。本報は、これらの検討結果をとりまとめたものである。

2. AFt系UFCの配合

実験に供したAFt系UFCの配合を表-1に示す。AFt系UFCの結合材は、ポルトランドセメントとポゾラン材

表-1 AFt系UFCの基本配合

フロー値 ^{*1} (mm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				補強用 ^{*6} 鋼繊維 (kg)
		水 ^{*2}	結合材 ^{*3}	骨材 ^{*4}	高性能 ^{*5} 減水剤	
250	2.0	195	1,287	905	32.2	137.4 (1.75vol%)

^{*1}:フロー試験(JIS R 5201, 落下なし);打込み時の目標値(繊維混入後)

^{*2}:高性能減水剤の水分を含む

^{*3}:密度 2.98g/cm^3

^{*4}:表乾密度 2.66g/cm^3 , 吸水率1.18%

^{*5}:ポリカルボン酸系

^{*6}: $\Phi 0.2\text{mm}$, 引張強度 $2,000\text{N/mm}^2$, L=15mm, 22mm, 密度 7.85g/cm^3

およびエトリンサイト生成系混和材で構成されている。骨材は 2.5mm 以下に粒度調整したものを使用し、補強用鋼繊維は、引張強度 $2,000\text{N/mm}^2$ 以上で直径が 0.2mm であり、長さ 15mm と 22mm を混合したものである。また、高性能減水剤には低水セメント比のコンクリートに適したポリカルボン酸系高性能減水剤を使用した。

3. 養生条件が強度発現性状に及ぼす影響

3.1 実験概要

(1) 目的および実験概要

AFt系UFCは、一般的にプレキャストコンクリート製品を対象とした材料であり、所定の強度を満足させるために 85°C の蒸気養生を行うことを前提としている。本実験では練上り温度や養生条件を変化させた場合のAFt系UFCの強度発現特性を明らかにすることを目的とした。

(2) 練混ぜ方法

練混ぜには、水平二軸式強制ミキサ（容量 100 リットル、回転数 60r.p.m. ）を用い、1回の練混ぜ量は $80\sim 90$ リットルとした。練混ぜは、結合材と表乾状態の骨材をミキサに投入して 30 秒間攪拌した後、水と高性能減水剤を投入して 8 分間、その後繊維を投入し 2 分間攪拌した。なお、本実験ではAFt系UFCの強度発現特性の温度依存性を評価するため、初期の水和反応過程に影響を与える高性能減水剤の添加量⁴⁾は全ケースで 32.2kg/m^3 一定とし

^{*1} 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造・材料グループ 研究員 工修（正会員）

^{*2} 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造・材料グループ 主任研究員 工修（正会員）

^{*3} 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造・材料グループ 上席研究員 工博（正会員）

表－2 検討水準

Case	目標練上り温度		一次養生		二次養生		試験材齢(注水から)*4														
		環境温度	温度	時間	温度	時間	15h	18h	21h	1日	2日	3日	4日	6日	7日	8日	11日	28日	56日	91日	
0	20℃	20℃	20℃	1日	85℃	24h*1	—	—	—	—	—	—	●	—	—	—	—	△	—	—	
1	15℃	10℃	— (蒸気養生せず)				○	○	○	○	○	○	—	—	○	—	—	—	—	—	
2	20℃	20℃	—				○	○	○	○	○	○	—	—	○	—	—	○	—	—	
3	30℃	30℃	—				○	○	○	○	○	○	—	—	○	—	—	○	—	—	
4	20℃	20℃	20℃	1日	40℃*2	1日	—	—	—	—	●	—	—	—	△	—	—	△	—	—	
						2日	—	—	—	—	●	—	—	△	—	—	△	—	—		
						3日	—	—	—	—	—	●	—	△	—	—	△	—	—		
						5日	—	—	—	—	—	—	●	△	—	—	△	—	—		
						7日	—	—	—	—	—	—	—	—	●	—	△	—	—		
						10日	—	—	—	—	—	—	—	—	—	●	△	—	—		
						27日	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	●	△	—	
5	20℃	20℃	20℃	1日	60℃*3	1日	—	—	—	—	●	—	—	—	—	—	—	△	—	△	
						2日	—	—	—	—	●	—	—	—	—	—	—	△	—	△	
						3日	—	—	—	—	—	—	●	—	—	—	—	△	—	△	
						5日	—	—	—	—	—	—	—	●	—	—	—	△	—	△	
						7日	—	—	—	—	—	—	—	—	—	●	—	△	—	△	

*1:蒸気養生(昇温15℃/h, 最高温度85℃, 最高温度保持24h, 降温2℃/h)

*2, 3:徐冷は実施せず, 40℃, 60℃の水槽から試験材齢時に取上げた

*4:●印まで二次養生温度で養生し強度試験を実施。●印の材齢以後, 環境温度20℃で養生し△印の所定材齢で強度試験を実施。
○印は温度一定で養生し強度試験を実施

表－3 試験項目

試験項目	試験方法
フレッシュ性状 (練上り直後)	フロー JIS R 5201(落下なし)
	空気量 JIS A 1128
	練上り温度 JIS B 7411(温度計による)
硬化性状	圧縮強度 JIS A 1108
	供試体寸法φ100×h200mm*
	静弾性係数 JIS A 1149
	曲げ強度 JIS A 1106
	供試体寸法□100×400mm
割裂引張強度	JIS A 1113
	供試体寸法φ100×h150mm*

*:供試体はアルミ製簡易型枠

表－4 フレッシュ性状の測定結果

Case	目標練上り温度	練上り温度(℃)	フロー(mm)	空気量(%)
0	20℃ 環境温度:20℃	23.1	304×291(298)	3.4
1	15℃ 環境温度:10℃	15.7	306×305(306)	2.9
2	20℃ 環境温度:20℃	23.1	304×291(298)	3.4
3	30℃ 環境温度:30℃	30.1	267×260(264)	3.7
4	20℃ 環境温度:20℃	23.1	304×291(298)	3.4
5	20℃ 環境温度:20℃	27.2	269×264(267)	3.9

*試験値は補強用鋼繊維を混入した後のもの

*()内はフローの平均値

た。練上り温度は練混ぜ水および材料保管温度にて調整した。

(3) 養生条件

本実験では、想定される現場養生条件として、気候に左右される条件(外気温, 練上り温度, 養生温度, 養生時間)および施工条件(養生設備, 養生温度, 養生時間)を考慮し、表－2に示す検討水準, 養生パターンで実験を行った。養生は打設後から実施する一次養生(気中封かん24時間)とその後実施する二次養生(水中封かん)を連続的に行うこととした。ここで、実際の工事現場における二次養生は蒸気養生のような湿潤環境で養生することは困難であると考え、実験では外部から水の供給がないように水中に封かん養生とした。

(4) 試験項目

試験項目を表－3に示す。練混ぜ完了後、フレッシュ性状を確認するとともに、圧縮強度試験, 曲げ強度試験, 割裂引張強度試験用の供試体を採用した。強度試験は所定の養生が終了した後、脱型し直ちに実施した。なお、各Caseの養生温度は圧縮供試体(アルミ製簡易型枠)の中心に熱電対を埋込んで測定した。

3.2 実験結果および考察

(1) フレッシュ性状

フレッシュ性状の測定結果を表－4に示す。練上り直後のフロー値は打込み時の目標値より大きい目の264～306mm, 空気量は2.9～3.9%であった。また、練上り温度は目標練上り温度より0.1～7.2℃高めであった。高性能減水剤の添加量を一定とした今回の実験では、練上り温度が高い場合にはフローが小さくなる結果となった。

(2) 自己発熱特性

Case 1～4における注水からの供試体の中心温度の計測結果を図－1に示す。図より、AFt系UFCは供試体寸法がφ100×h200mmであっても、自己の水和発熱により温度上昇が生じていることが分かる。また、水和発熱のピークは注水から約0.6～0.7日後(15～17時間後)であり、練上り温度や一次養生温度が高いほど、ピークの時間は早くなる傾向が見られたが、練上り温度15℃では供試体の温度上昇は1日以内では認められなかった。また、練上り温度や一次養生温度が高いほど発熱量が大きく、一次養生温度が20℃の場合は練上り温度から9℃, 30℃の場合は21℃上昇した。

これらのことから、AFt系UFCは自己の水和発熱温度が高く、その発熱速度および温度上昇量は練上り温度、

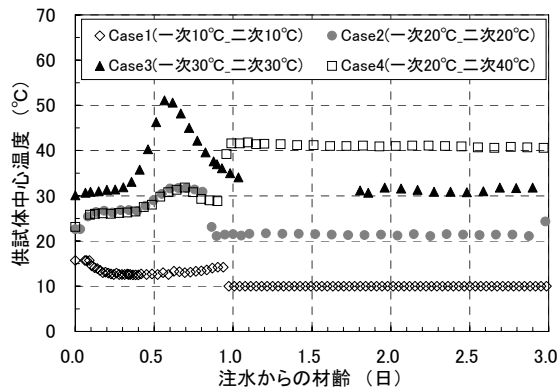


図-1 注水からの供試体中心温度

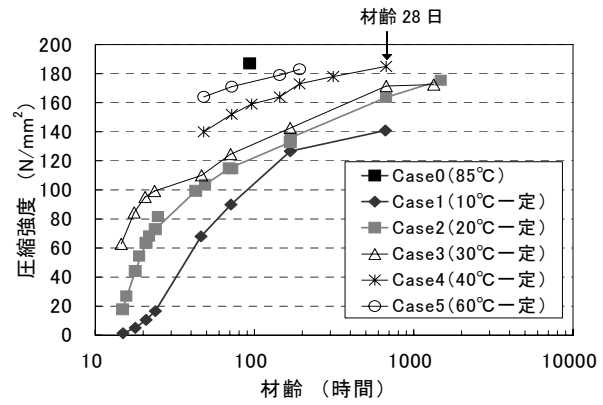


図-2 材齢と圧縮強度

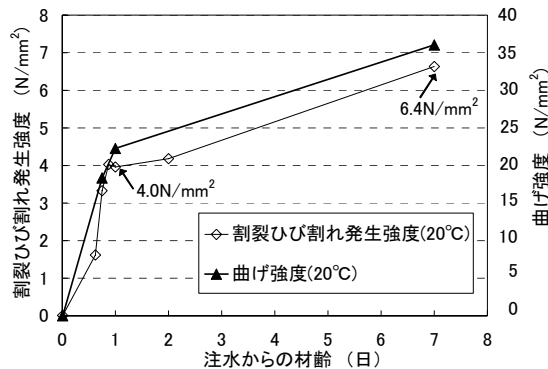


図-3 割裂ひび割れ発生強度・曲げ強度試験結果

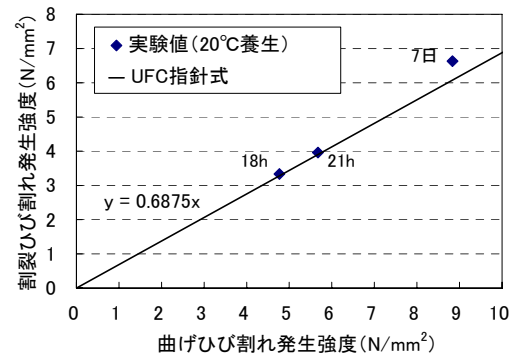


図-4 曲げひび割れ発生強度と
割裂ひび割れ発生強度の関係

養生温度に大きく依存することが明らかとなった。

(2) 硬化特性

各 Case の養生温度における材齢と圧縮強度の関係を図-2 に示す。図より、Case 2 (20°C 養生) および Case 3 (30°C 養生) においては練上りから約 20 時間で約 80~100N/mm² まで急激な強度増進を示し、以降は緩やかに強度が伸びていく傾向が見られた。また、養生温度が高いほど同一材齢での圧縮強度が大きいことが分かる。これは、AFt 系 UFC は単位結合材量が多く低水セメント比であるため、セメント粒子間の距離が小さく若材齢時から水和反応が活発であること、さらには水和反応の温度依存性が高いことが影響している⁵⁾ものと推察される。なお、今回の圧縮強度試験結果では、AFt 系 UFC が UFC 指針で対象としている圧縮強度の特性値 150N/mm² に達する材齢は 20°C、30°C 養生で 28 日 (672h)、40°C 養生で 3 日 (72h)、60°C 養生で 2 日 (48h) であった。また、AFt 系 UFC の圧縮強度の特性値である 180N/mm² に達する材齢は、40°C 養生で 28 日、60°C 養生で 8 日 (192h) であった。

Case 2 (20°C 養生) における材齢 7 日までの割裂ひび割れ発生強度、曲げ強度試験の結果を図-3 に示す。図より、割裂ひび割れ発生強度は材齢 1 日までに 4.0N/mm² まで達し、材齢 7 日で AFt 系 UFC のひび割れ発生強度の特性値である 8.0N/mm² の 80% (6.4N/mm²) に達した。

また、若材齢時における曲げひび割れ発生強度と割裂

ひび割れ発生強度の関係を図-4 に示す。図より、若材齢時においても、曲げひび割れ発生強度と割裂ひび割れ発生強度の関係式として UFC 指針式¹⁾を適用できることが分かった。

4. 強度発現性状の定式化

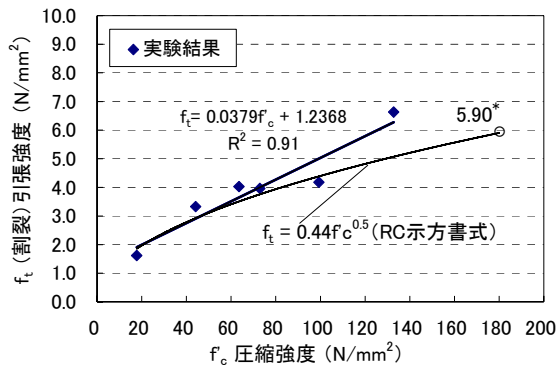
4.1 目的および検討概要

前章の結果からも分かるように、AFt 系 UFC は練上り温度、養生温度、養生時間といった各種条件により強度発現性状が大きく異なる。AFt 系 UFC を現場製造、現場養生する構造物に適用する場合、プレストレス導入時や架設時などの施工時強度を精度良く推定することが求められる。また、AFt 系 UFC は単位結合材量が非常に多い材料であるため、部材寸法によっては温度ひび割れが懸念される場合があり、温度応力解析を精度よく行うためにも強度発現特性を定式化しておく必要がある。本検討では AFt 系 UFC の強度推定式の提案を目的とし、積算温度を指標として圧縮強度の発現を推定することを試み、その適合性を検討した。また、圧縮強度と引張強度および圧縮強度と静弾性係数の関係を把握した。

4.2 各種強度の推定

(1) 引張強度

Case 2 (20°C 一定) における引張強度と圧縮強度の関係を図-5 に示す。今回の実験における AFt 系 UFC の引張



*圧縮強度180N/mm²の時に示方書式から推定される引張強度

図-5 圧縮強度と引張強度の関係

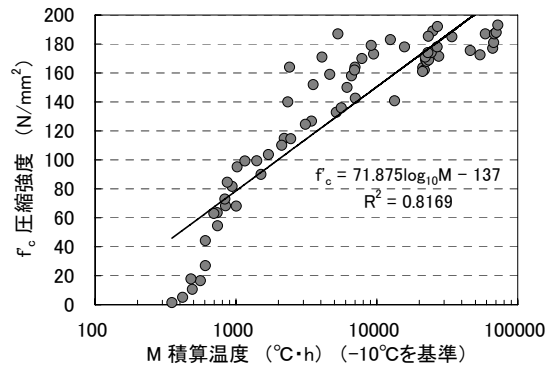


図-7 積算温度と圧縮強度の関係

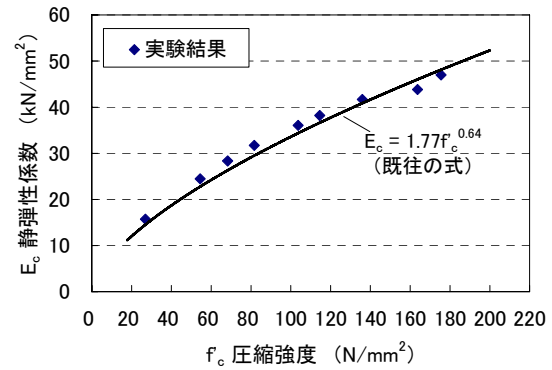


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係

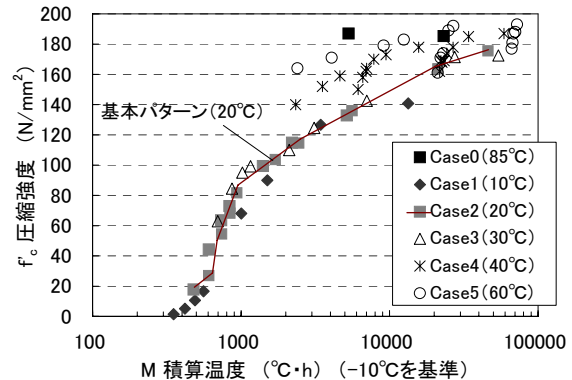


図-8 積算温度と圧縮強度の関係（養生条件別）

強度は圧縮強度が 100N/mm² までは示方書式⁶⁾に近いが、100N/mm²を超えると示方書式を大きく上回り、圧縮強度と引張強度には次式(1)に示すような線形関係が見られた。

$$f_t = 0.0379 f'_c + 1.2368 \quad \text{式(1)}$$

ここで、 f_t : 引張強度 (N/mm²)

f'_c : 圧縮強度 (N/mm²)

(2) 静弾性係数

Case 2 (20°C一定)における圧縮強度と静弾性係数の関係を図-6に示す。図より、本実験の結果はAFt系UFCの既往の検討における関係式²⁾と同等の結果となり、同式で若材齢時の静弾性係数も圧縮強度を指標として推定可能であることが分かった。

(3) 圧縮強度

既往の研究では一次養生中のAFt系UFCの圧縮強度は120N/mm²以下の範囲では、高性能減水剤の添加率ごとではあるが、養生温度によらず式(2)のような-10°Cを基準温度とする積算温度で推定できるとされている⁴⁾。

$$M = \sum (T+10)\Delta t \quad \text{式(2)}$$

ここで、M : 積算温度 (°C・h)

T : 部材温度 (°C)

Δt : 温度 T (°C) である期間 (h)

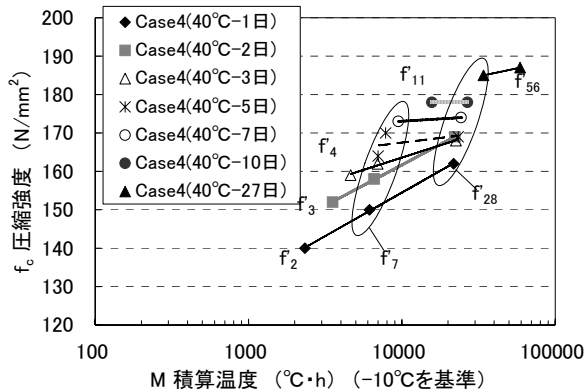
これは、プレストレス導入時の圧縮強度 (30N/mm²～100N/mm²) を予測することを主目的としており、圧縮強

度が限られた範囲でのものである。そこで、本検討ではAFt系UFCの圧縮強度の範囲を広めて、強度発現特性の定式化を目指した。

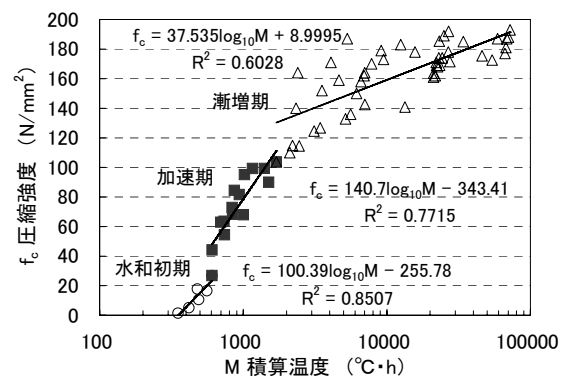
全Caseにおける圧縮強度と-10°Cを基準温度とする積算温度の関係を図-7に示す。図のように、圧縮強度と積算温度の関係を1つの式で近似すると、ある程度の相関が見られるが、各養生条件における圧縮強度を1つの積算温度関係式によって高い精度で推定できるまでには至っておらず、圧縮強度を精度よく推定するためには、いくつかの条件設定が必要であると判断した。

図-8に各養生条件別の積算温度と圧縮強度の関係を図-7のマークを変えて示す。まず、20°Cの養生条件の結果を基本パターンとすると、養生温度が10°Cの場合、基本パターンに比べて同じ積算温度でも圧縮強度が小さくなっており、強度発現が遅いことがわかる。また、養生温度30°Cの場合、圧縮強度100N/mm²に到達する積算温度が基本パターンよりもわずかに早いことが分かる。また、養生温度40°C、養生温度60°C、養生温度85°C(蒸気養生)の場合はいずれも基本パターンよりも強度発現が早く、30°Cよりも40°C、40°Cよりも60°C、60°Cよりも85°Cと同じ圧縮強度を得るのに必要な積算温度が小さくなっている。これはAFt系UFCの水和反応の温度依存性が高いことを示している。

次に、Case 4に着目し、二次養生時間を変化させた場



図－9 積算温度と圧縮強度の関係 (Case 4)



図－10 積算温度と圧縮強度の関係（領域別）

表－5 基準温度の補正

部材温度*1	係数*2 a	基準温度の補正值 B
10℃	1.0	－10℃
20℃	2.0	－20℃
30℃	3.0	－40℃
40℃	4.0	－80℃
50℃	5.0	－160℃
60℃	6.0	－320℃
85℃	8.5	－1810℃

*1:コンクリートが実際に受けた温度
*2:部材温度の間の係数は直線補間

合の積算温度と圧縮強度の関係を図－9 に示す。ここで、Case 4 は所定の二次養生時間（養生温度 40℃）を終了した後は 20℃で養生し、所定の材齢で強度試験を行っている。図より、同じ材齢（ f_7 や f_{28} ）でも 40℃養生の時間が長いほど圧縮強度が大きい結果となった。また、40℃養生が終了し、20℃養生に切り替えた後（表－2 の△印）の強度増進は、各 Case を直線で結んだ際の勾配から分かるように 40℃養生時間が短い方が大きい結果となった。これは、材齢初期に与えられる積算温度が小さいほど水和反応が進行しておらず、その後の強度増進に繋がったものと推察される。以上のような AFt 系 UFC のもつ温度依存性が、圧縮強度と積算温度の関係を 1 つの式で評価することを困難にしている要因と考えられる。

次に、本検討では積算温度と圧縮強度の関係をその傾きに着目して 3 つの領域に分けて評価してみることとした。まず、図－10 に示すように AFt 系 UFC の圧縮強度と積算温度の関係には圧縮強度 30N/mm² 付近と 100N/mm² 付近で 2 つの変曲点（水和反応の速度が移り変わる部分）があると判断した。本検討ではセメントが水に接してから 30N/mm² に到達するまでの範囲を「水和初期」、30N/mm² から 100N/mm² までの強度増進が著しい範囲を「加速期」、100N/mm² 以降の緩やかに強度増進している範囲を「漸増期」と称し、これら 3 つの領域について近似式を作成した。

「水和初期」、「加速期」および「漸増期」の 3 つの領域に分けた場合には、当然の結果であるが、図－7 に比べ

て特に「水和初期」での圧縮強度の推定精度の向上が見られた。ただし、それぞれの近似式の相関がまだ低いこと、得られた 3 つの近似式が相互に連続していない等の課題があり、従来の積算温度式では圧縮強度をある程度までは推定できるが、各種養生温度における AFt 系 UFC の圧縮強度を精度良く推定するまでには至っていない。

5. 積算温度の補正

5.1 目的と概要

前節にて、従来の積算温度をそのまま AFt 系 UFC に適用して圧縮強度を精度良く推定することは困難であることを示した。しかし、強度発現を温度と時間で簡便に表すことができる積算温度を指標として用いることは、AFt 系 UFC のように自己の水和熱によって部材温度が変化したり、養生温度を意図的に設定したりするようなコンクリートに対しては施工管理の上で必要である。ここでは養生条件が異なる AFt 系 UFC の圧縮強度の発現を、基準温度を補正した積算温度で定式化することを試みた。

5.2 基準温度の補正

AFt 系 UFC はこれまで示したように、初期に受ける養生温度が高いほど同一積算温度でも高強度に達する。従来の積算温度のように、基準温度を「－10℃」一定で評価すると、養生温度が異なる場合には同じ積算温度でも圧縮強度に大きな差が生じてしまう。一般に基準温度「－10℃」は－10℃以下では水和反応が生じないことに基づくものであるが、AFt 系 UFC の圧縮強度をあくまで積算温度を指標として推定することを目標に、式 (3) に示す方法で簡易的に積算温度を修正することとした。

$$M' = \sum (T - B) \Delta t \quad \text{式(3)}$$

ここで、 M' ：修正積算温度（℃・h）

T ：部材温度（℃）

B ：基準温度の補正值（℃）（表－5 参照）

$$B = -10 \times 2^{a-1}$$

a ：係数（ a = 部材温度 $\times 0.1$ ）（表－5 参照）

Δt ：温度 T （℃）である期間（h）

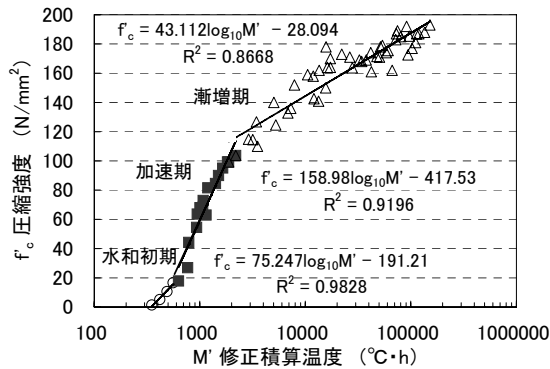


図-11 修正積算温度と圧縮強度の関係（領域別）

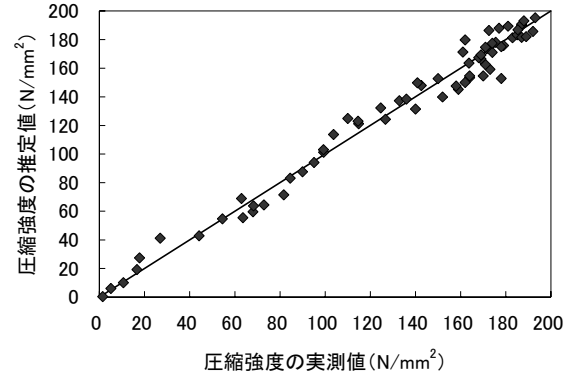


図-12 圧縮強度の実測値と推定値

本手法で算定した基準温度を用いた場合の積算温度（修正積算温度）と圧縮強度の関係を図-11 に示す。ここで、基準温度の補正值は、AFt 系 UFC が受けた温度履歴（部材温度）から算定しており、Case 0, Case 4 および Case 5 のように養生温度が途中で変わる場合も考慮している。図-11 より、修正積算温度を用いた場合には「水和初期」、「加速期」および「漸増期」の各領域において、図-10 の従来の基準温度（-10℃一定）を用いた場合よりも相関係数が高くできていることがわかる。

以上より、部材の温度をもとに基準温度を補正する修正積算温度を指標として用いることで、養生温度を変化させた場合でも AFt 系 UFC の強度を比較的精度よく推定することが可能であると判断された。

本検討で得られた修正積算温度と圧縮強度の関係を以下に示す。

$$\begin{aligned} & \bullet M' \leq 505 \text{ の場合（水和初期）} \\ & \quad f_c' = 75.247 \times \log_{10} M' - 191.21 \\ & \bullet 505 < M' \leq 2296 \text{ の場合（加速期）} \\ & \quad f_c' = 158.98 \times \log_{10} M' - 417.53 \\ & \bullet 2296 < M' \text{ の場合（漸増期）} \\ & \quad f_c' = 43.112 \times \log_{10} M' - 28.094 \end{aligned} \quad \text{式(4)}$$

得られた推定式から算出した圧縮強度の推定値と実測値の関係を図-12 に示す。図より、本検討で提案した修正積算温度を用いることにより、大きな誤差を生じることなく実際の圧縮強度を推定できることがわかる。

なお、本検討で提案した水和反応の領域分けや基準温度の補正值は、実際の現場での AFt 系 UFC の強度推定作業を簡便かつ精度よく行うために設定したものであり、現時点ではその根拠を学術的に論ずるまでに至っていない。今後は水和反応の温度依存性、水和に伴う組織の変化等を明らかにし、圧縮強度の推定精度のさらなる向上を図っていく予定である。

6. まとめ

本検討では、AFt 系 UFC の養生条件が強度発現に及ぼ

す影響について実験的な検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) AFt 系 UFC は自己の水和熱が大きく、その発熱温度および温度上昇量は練上り温度、養生温度に大きく依存する。
- 2) 引張強度および静弾性係数は圧縮強度と高い相関関係があり、若材齢においても圧縮強度を指標として推定可能である。
- 3) AFt 系 UFC の圧縮強度は従来の積算温度（-10℃基準）である程度までは推定できるが、若材齢時の強度を推定する場合には精度に課題がある。
- 4) 部材温度をもとに基準温度を補正する修正積算温度を用いることで AFt 系 UFC の強度発現を比較的精度よく推定することが可能である。

参考文献

- 1) 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），土木学会，コンクリートライブラリー113，2004.9
- 2) 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，土木学会，技術推進ライブラリー，No.3，pp.13，2006.11
- 3) 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
- 4) 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.1259-1264，2006.6
- 5) 丸山一平，野口貴文，松下哲郎：ポルトランドセメントの水和反応モデルに関する研究，日本建築学会構造系論文集，第593号，pp.1-8，2005.7
- 6) コンクリート標準示方書[施工編]-2002年制定-，土木学会，2002.1