

超高性能繊維補強セメント系複合材料の品質および耐久性確保に向けた研究

Study on Ensuring the Quality and Durability of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Cement-based Composite

渡邊 有寿 Yuji Watanabe

1. はじめに

超高性能繊維補強セメント系複合材料（UHPFRC）は、圧縮強度 100N/mm² 以上の超高強度で、設計に引張強度を組み込むほどの靱性を有し、さらには緻密なマトリクスで耐久性も極めて優れた次世代材料である。国内では土木学会指針にて定義されている超高強度繊維補強コンクリート（UFC）がこの UHPFRC の一種とされている。一方、同指針では主に工場で製作されるプレキャスト部材向けに設計・施工法が取り纏められ、ひび割れは許容しない、拘束ひび割れの要因となる異形鉄筋とは併用しないなど、適用範囲を限定する前提であれば照査なしに長期耐久性が担保できるとされている。近年は様々な UHPFRC が開発されてきているが、一般的なコンクリートのように現場施工された場合の留意点について研究した事例は少ない。

本研究では、現場での施工管理、品質および耐久性確保に資する UHPFRC の硬化特性、ひび割れ発生・抵抗メカニズムの把握、さらにはマトリクス内部の繊維の変質・劣化に焦点を当てた研究を行った。

2. UHPFRC の強度発現性に及ぼす養生の影響

UHPFRC を現場施工する場合、打設時期や養生設備等の現場条件から様々な温度にて養生されることが想定される。施工の過程で必要な強度を正確に推定することは施工管理を行う上で重要であり、また、水和反応が活発な若材齢からの引張強度や静弾性係数の発現特性を明らかにすることは、ひび割れ発生リスクを検証・照査する上でも重要である。

本研究では、打込み直後から各種温度条件における UHPFRC の強度発現特性を把握し、従来の積算温度法（-10℃基準）で推定する場合の精度に課題があることを明らかにした。加えて、部材温度をもとに基準温度を補正する手法式（1）を提案し、「水和初期」、「加速期」、「漸増期」の3つの領域について近似式を分けることで、簡便かつ精度の高い強度発現の推定を可能とした（Fig. 1）。

3. UHPFRC の耐久性に及ぼす養生の影響

UHPFRC は一般的に単位結合材量が多いため、例えば PC 構造物のケーブル定着部のような比較的断面寸法が大きい

$$M = \int_0^t (T + 10) dt \quad \dots(1)$$
$$B = -10 \times 2^{a-1}$$

ここで、M' : 修正積算温度（℃・h）

T : 部材温度（℃）

B : 部材温度の補正值（℃）

a : 係数（a=部材温度×0.1）

t : 温度T（℃）である期間（h）

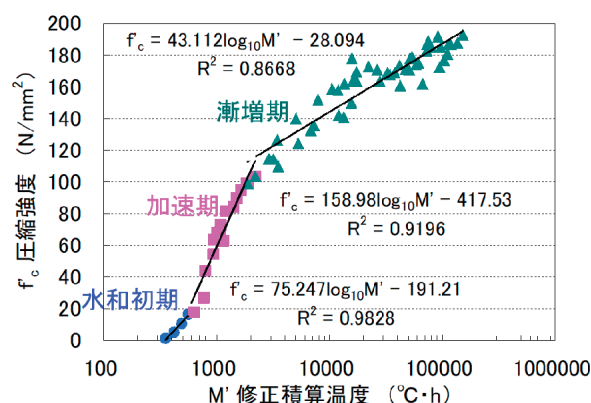


Fig.1 修正積算温度と圧縮強度の関係
(Relationship between Corrected Cumulative Temperature and Compressive Strength)

部材では、内部温度が著しく高くなることも想定される。また、水和初期に高温履歴を受けた場合、硬化体に悪影響が及ぶことも懸念される。

本研究では、1.0m 厚のマスブロック試験体に対して各種養生履歴を与え、コア部材の圧縮強度、細孔構造および鉱物組成を確認した。その結果、部材寸法や断熱状態によっては 100℃以上の高温でエトリンガイトが分解し、その後再膨張して硬化体を劣化させる「遅れエトリンガイト生成（DEF）」の可能性を確認した。一方、5～10 年の長期スパンで硬化体を追跡調査した結果、高温履歴の有無、暴露環境によらず強度が増進し、空隙量も減少・緻密化することが確認された。本研究ではこれらを総合的に判断し、仮にエトリンガイトが分解しても DEF の起因となる外部からの水や硫酸塩が供給されにくいいため、DEF が生じる可能性は小さいと結論付けた。

4. 場所打ちに向けた各種検討と施工

UHPFRC の現場打ち施工でプレストレストコンクリート橋梁を建設するプロジェクトに向け、現場打ちで懸念される

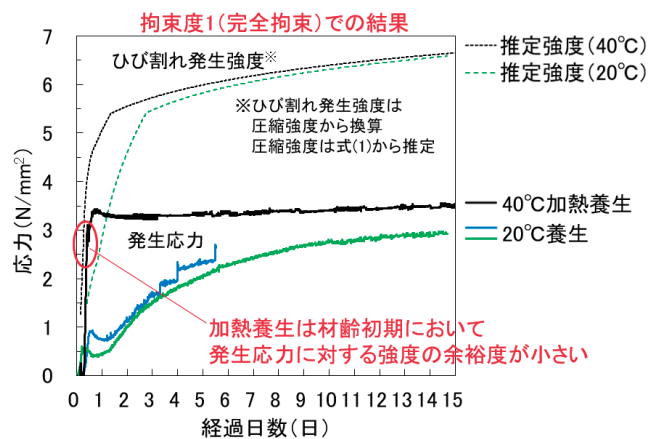


Fig.2 拘束応力に対するひび割れ発生強度の余裕度 (Margin of Cracking Strength Against Cracking Stress due to Restraint)

水平流動距離の限界や、水平・鉛直打重ねの影響を実験的に把握した。特に、鉛直打重ねは繊維の架橋や配向に大きな影響を及ぼし、突き棒によるかき乱しでは元の曲げ強度まで回復させることは困難であることを実験的に明らかにした。実施工では鉛直打重ねを回避した施工計画に反映するとともに、本研究で提案した強度発現推定手法でプレストレス導入材齢を管理した。

5. マトリクスに生じるひび割れの発生機構

多量の繊維が混入されている UHPFRC は、マトリクスが十分に硬化し繊維との付着が良好であれば、外力によってひび割れが生じたとしても繊維の架橋効果によってひび割れは分散し、幅も抑制されるため、ただちに耐久性に影響を与えることはない。一方、硬化の途中過程すなわち繊維架橋効果が発揮できない施工段階でのひび割れは幅・深さともに大きくなることが予想される。そのため、マトリクスの収縮を既設コンクリートや鉄筋が拘束する影響を把握・理解したうえで、ひび割れ発生リスクへの対策を施さなければならない。

そこで、拘束度を任意に変化させることができる「温度応力シミュレーション試験 (TSTM 試験)」によって各種養生条件におけるひび割れ発生機構の検証と、ひび割れに対する余裕度を評価した。特に、材齢初期から積極的に加熱養生を行うと UHPFRC の収縮量は抑制できる一方で、弾性係数の発現とともに拘束応力が大きくなり、強度に対する余裕度が小さくなることを明らかにした (Fig.2)。

6. マトリクス内における繊維の健全性とその影響

UHPFRC には鋼繊維が用いられることが多いが、ひび割れが生じると、ひび割れ部に露出 (架橋) している繊維が腐食することによって力学性能の低下を引き起こすことが懸念

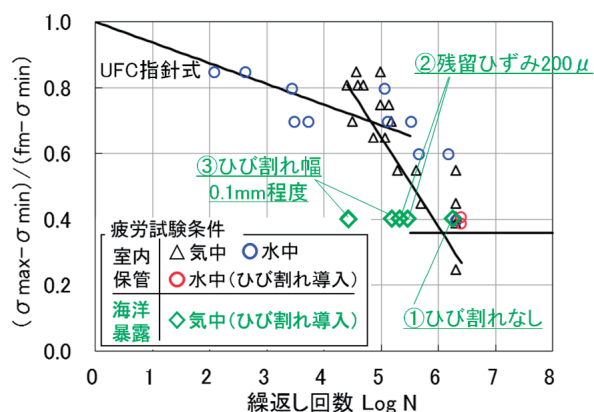


Fig.3 海洋環境暴露後の曲げ疲労試験結果: S-N 曲線 (Results of Bending Fatigue Test after Ocean Exposure: S-N Curve)

されている。そこで、ひび割れが残留した UHPFRC の耐久性や力学的挙動への影響を明らかにすることを目的に、マトリクス内の繊維の健全性に着目した検討を行った。

鋼繊維を用いた場合、0.1~0.2mm 程度の残留ひび割れでは 4 年間の海洋暴露後も静的な力学特性は低下せず、塩化物イオンは 11 年後でもひび割れからマトリクス内部には拡散していないことを確認した。ただし、酸素や水が常時供給される環境において、残留ひびずみやひび割れを有した状態で疲労を受ける際にはひび割れを架橋する鋼繊維の腐食破断が早まる恐れを示唆する結果も得た (Fig.3)。

腐食の恐れのない合成繊維の検討では、ポリプロピレン繊維は、高温時の伸びや引張強度の低下といった温度依存性が UHPFRC の力学特性にも影響を与えるが、マトリクス内部では酸化・紫外線から保護されるため 100 年以上の健全性が保たれることを明らかにした。アラミド繊維では温度依存性は認められず、マトリクス内のアルカリに加え長期的に高温履歴を与えても加水分解の影響が見られないことを実証した。

7. UHPFRC に対する補修や維持管理に向けた検討

今後の UHPFRC を用いた構造物の維持管理計画に資することを目的に、ひび割れや断面欠損を模擬した供試体に対して補修を施した際の物質浸透抵抗性や力学特性の回復の有無や程度を確認した。

8. おわりに

本研究により、UHPFRC が一般的なコンクリートと同じような現場打ち施工がなされた場合の留意点を明らかにするとともに、ひび割れの発生を想定した場合の耐久性の確保・照査、さらには今後の設計・施工法や維持管理手法の確立に資する知見を得た。

キーワード: 超高性能繊維補強セメント系複合材料(UHPFRC), 現場施工, 養生, ひび割れ, 耐久性

Keywords: UHPFRC, on-site construction, curing, cracking, durability