

論文の内容の要旨

専攻名 システム創成工学専攻

氏名 渡邊 有寿

超高性能繊維補強セメント系複合材料（UHPFRC）は、圧縮強度 $100\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の超高強度で、設計に引張強度を組み込めるほどの靱性を有し、さらには非常に緻密なマトリクスで耐久性に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UFCがこのUHPFRCの一種とされているが、同指針では主に工場で作られる部材向けに設計や養生方法が取り纏められ、ひび割れは許容しない、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で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、現場での打込み・養生時の管理や品質確保に資するUHPFRCの硬化特性の把握を目的とした各種検討や強度推定手法の提案を行い、これらを実工事での施工に反映するとともに妥当性を実証した。さらには、UHPFRCのひび割れ抵抗メカニズムの解明、ひび割れを生じた状態でのUHPFRCの耐久性や、マトリクス内部の短繊維の変質・劣化を理解するために長期にわたる暴露試験にて検証を行った。以下に、各章の概要を示す。

第1章「序論」では、本研究の背景および目的について述べた。

第2章「UHPFRCの強度発現性に及ぼす養生の影響」では、エトリングイト生成系UHPFRCが様々な温度環境で養生されることを鑑み、若材齢からの強度発現特性を把握し、従来の積算温度法（ -10°C 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。本研究では、部材温度をもとに基準温度を補正する手法を提案し、さらに「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。

第3章「UHPFRCの耐久性に及ぼす養生の影響」では、高温履歴がUHPFRCの硬化体の細孔構造と耐久性に与える影響について検証した。UHPFRCは単位結合材量が非常に多いため水和熱が大きく、部材寸法や断熱状態によっては 100°C 以上の高温となり、エトリングイトが分解し、再膨張する「遅れエトリングイト生成（DEF）による劣化」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、仮にエトリングイトが分解しても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ため、DEFは生じる可能性は小さいと結論付けた。

第4章「場所打ちに向けた各種検討と施工」では、UHPFRCの現場打ち施工で橋梁を建設するプロジェクトに向け、想定される打込み時の懸念事項を実験的に検証した。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が明らかになり、実施工では鉛直打重ねを回避した施工計画に反映した。また、第2、3章の知見を活用し、マスコンクリートである部位の温度応力解析の精度を高め、無対策では110℃まで温度上昇する懸念があるところを実施工ではパイプクリーニングにより90℃以下まで低減した。さらに、提案した積算温度による強度推定をプレストレス導入材齢の管理などに反映させ、推定式の妥当性を示した。

第5章「マトリクスに生じるひび割れの発生機構」では、既設構造物や鉄筋などによって拘束を受けたUHPFRCのひび割れ抵抗性を評価するために、既存のJIS試験「拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法」と拘束度を任意に変化させることができる「TSTM試験」によって各種養生条件におけるUHPFRCの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。とくに、TSTM試験によって拘束度1.0（完全拘束）での詳細試験を行った結果、材齢初期から給熱養生を行うと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。

第6章「マトリクス内における繊維の健全性とその影響」では、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、残留ひび割れ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を得た。腐食の恐れのない合成繊維の検討では、まずポリプロピレン繊維では、高温時の伸びや引張強度の変化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、マトリクス内部の繊維の劣化（酸化）については100年以上の健全性が保たれることを明らかとした。アラミド繊維については温度依存性は認められず、マトリクス内の繊維が高温かつアルカリに曝されても、加水分解による強度低下が認められないことを実証した。

第7章「UHPFRCに対する補修や維持管理に向けた検討」では、ひび割れや断面欠損に対する補修を想定した検証を行った。ひび割れ部を注入や浸透防水材による補修では、載荷初期の剛性回復は見込めず曲げ強度やタフネスなどひび割れ後の挙動にも関与しないものの、適切に材料を選定すれば塩化物イオンの浸透を抑制できることを実証した。断面修復に関する検討では、特に引張縁の断面欠損レベルと曲げ強度の低下は比例するが、欠損箇所に残存する繊維を含めた補修をすることで強度低下が緩和される知見を得た。ただし、断面補修部が疲労を受けるような環境では、補修界面でのUHPFRCと断面修復材に付着切れやマイクロクラック、界面に架橋している繊維との付着について影響を及ぼす恐れがあることを明らかにした。

第8章「結論」では、これまでの全7章を含めた結果をまとめ、結論として記述した。

この研究により、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ることができた。