

論文の内容の要旨

初期高温履歴を考慮した超高強度コンクリートの物性評価および予測手法に関する研究

松田 拓

高強度コンクリートは、構造物の大型化や、大スパン化による土地の有効活用及び部材断面の縮小による空間の有効活用が期待される建設材料である。近年、設計基準強度 (Fc) で 150N/mm^2 級や 200N/mm^2 級の超高強度コンクリートが開発・実用化され、研究レベルでは $\text{Fc}300\text{N/mm}^2$ の達成が報告される等、各研究機関にてコンクリートの高強度化の研究開発が進められている。

その一方で、鉄筋コンクリート造建築物に生じるひび割れ問題が社会的注目を強く集めており、建築材料の品質および環境・施工条件を適切に予測・評価し、建築物・部材の要求性能を確実に達成することが求められている。超高強度コンクリートは、結合材量が多いために普通強度レベルのコンクリートに比べて初期の水和発熱が大きい。また、圧縮強度や自己収縮の特性は、初期材齢時の水和反応に伴う温度条件（初期高温履歴）に大きく影響され、初期高温履歴を受けることで大きく増進する。そのため超高強度コンクリートは自己収縮に起因する初期ひび割れ発生の危険性が高い。これらのひび割れは、耐久性や構造耐力さらには美観など、構造物性能が低下する原因となるため、制御する必要がある。この対策のひとつとして、事前に自己収縮を考慮した温度応力解析によりひび割れ発生の有無を検証し、調合条件や施工（温度）条件および部材のすなわち拘束条件を最適化する手法がある。汎用ソフトを用いて温度応力解析によるひび割れの検証を行う際には、様々な温度条件下で時間とともに増進する強度・静弾性係数などの力学特性や、自己収縮およびクリープ特性等を若材齢から長期材齢にかけて連続的に予測することが必要である。これ以外にも、構造体コンクリートの圧縮強度や静弾性係数および引張強度などの力学特性発現を精度良く予測することは、温度応力解析に限らず、施工時荷重の検討や長期クリープ変形の予測など、様々な場面で求められる。しかし、初期高温履歴と強度・自己収縮の関係を定量的に評価した研究は少なく、0.20 を下回る低水結合材比 (W/B) 領域については、一般化された予測手法が示されていない。

また、設計基準強度 120N/mm^2 を超えるような超高強度コンクリートの場合、標準水中養生がポテンシャル強度を発現する強度とならないと指摘する報告がある。また、超高強度コンクリートの圧縮クリープは、載荷時強度が同等でも初期高温履歴を受けたもののほうが小さくなることが報告されている。これらは、超高強度結合材ペースト硬化体（超高強度硬化体）は、初期高温履歴を受けることで水和生成物や組織構造が大きく変化する事を示唆する知見である。現時点でそのメカニズムは明らかにされていないが、初期高温履歴の超高強度硬化体への影響メカニズムを解明することは、以下の2点で大きな意義がある。

- 1) 初期～長期にかけて構造体コンクリート品質の適切な予測・管理に資すること。
- 2) 将来的な材料設計手法の発展に資すること（実験式でなくメカニズムに立脚した反応モデルやより精密な予測・評価手法の構築、および新材料の開発など）。

本研究では、「水結合材比 (W/B) が 0.20 以下で、ポルトランドセメントにシリカ質微粉末を混入した結合材を使用しているコンクリート」を対象とし、これを超高強度コンクリートと呼称する。本研究は以下を目的とし、コンクリートおよびペーストを用い、同じバッチから採取した試料に T_{max} の異なる初期高温履歴を与え、若材齢から長期材齢にかけて強度・自己収縮・反応生成物・

空隙構造を測定した。

- 1) 初期高温履歴が超高強度コンクリートの強度・自己収縮といった物理特性に及ぼす影響を確認し、実用的な精度を有する強度・自己収縮予測手法を提案する。
- 2) 初期高温履歴の反応生成物・空隙構造への影響を確認し、強度・自己収縮・圧縮変形特性等の物理現象と結び付けることで初期高温履歴が超高強度コンクリートの各種物性に及ぼす物理化学的メカニズムを説明付ける。

コンクリートによる実験結果から以下の知見を得た。

- 1) 超高強度コンクリートの強度・自己収縮増進は、マチュリティで整理した場合に特定の閾値温度（45～60℃）を超えると急激に増進する特性を持つ。
- 2) 強度・自己収縮とマチュリティとの関係は、 T_{max} が特定の閾値温度を越えるまではそれぞれ温度条件によらず統一的な関係にあるが、 T_{max} が特定の閾値温度を越えた以降は、「 T_{max} が閾値温度を超えたもの」「 T_{max} が閾値温度を超えないもの」それぞれ別々の曲線で表される。

以上の結果より、従来予測式を T_{max} の範囲でそれぞれ区分して拡張することで、初期高温履歴を受ける超高強度コンクリートの強度・自己収縮予測手法を提案し、その適用性を示した。

ペーストによる反応生成物の測定結果からは、以下の知見を得た。

- 1) 初期高温履歴条件下のペーストの強度・自己収縮増進特性はコンクリートと同様であること。
- 2) T_{max} が閾値温度を超えると結合水率が増加することなくポゾラン反応が急激に進行すること。

以上の結果より、 T_{max} が閾値温度を超えたときの急激な強度・自己収縮の増進の原因として、高温でエトリンガイトが放出する水がポゾラン反応に使われていることを考察し、閾値温度を超えた直後の自己収縮の急激な増進は、ポゾラン反応による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の急激な消費による体積減少で説明できることを示した。さらに、別途実施した初期高温履歴条件下でのエトリンガイト量の測定実験と、超高強度コンクリートの一軸拘束試験結果から、 T_{max} が閾値温度を超えることでエトリンガイト量が減少すること、およびエトリンガイトがペーストを一時的に拘束することを検証した。

ペーストによる空隙構造の測定結果からは、以下の知見を得た。

- 3) T_{max} が閾値温度を超えると、50nm 以下の範囲で、閾値温度を越えない条件では埋まらない連続空隙が埋まる。すなわち、空隙構造は細孔径の大きさにおいて、初期高温履歴の影響を受ける領域とそうでない領域に分けられる。また、50nm 以上の連続空隙から求めた細孔容積と強度・自己収縮との関係は、初期高温履歴によらず同一の関係にある。
- 4) インクボトル構造は、 T_{max} によらず材齢とともに成長し、 T_{max} が閾値温度を超えると急激に形成され、材齢とともに少なくなる。 T_{max} が閾値温度を超えてインクボトル構造が急激に成長する細孔直径範囲は 50nm 以下の範囲である。

以上の結果から、初期高温履歴による空隙構造の変化およびその強度・自己収縮・圧縮変形特性への影響として、以下を考察した。

- 5) 50nm 以下の細孔容積は、温度履歴によらず材齢とともにピークを迎えその後減少する。これ

は、エトリングサイトが生成し減少することによる。50nm 以下の微細空隙がピーク以降減少していく理由は、「超高強度硬化体中は反応生成物の析出空間が限られ、50nm 以下の空隙は充填されるが 50nm 以上の空隙が残存する」と考えられる。

- 6) エトリングサイトが 50nm 以下の空隙を一旦押し広げ、そこにシリカフェームのポゾラン反応による C-S-H②が生成される。その結果、シリカフェームのポゾラン反応による C-S-H②が多量に生成され、50nm 以下の空隙においてインクボトル構造が卓越すると考えられる。
- 7) 「 T_{max} が閾値温度を超えた」超高強度コンクリートの圧縮変形は、同等の強度で「 T_{max} が閾値温度を越えていない」ものと比べ、弾性変形は同等であるがクリープ変形量は少なくなる。その理由は、 T_{max} が閾値温度を超えると、50nm 以下の連続空隙量が少なくなる一方でインクボトル構造が成長し、50nm 以下のインクボトル構造に存在する自由水の移動性が低下するためである。また、50nm 以上連続空隙は初期高温履歴の影響をあまり受けないため、自由水の移動性は同じである。そのため、変形速度の速い弾性変形については初期高温履歴の影響を受けないと考えられる。
- 8) 蒸発水率の経時変化の測定結果から、初期高温履歴を受けることで強度が同等であっても超高強度硬化体中の自由水の移動性は低下することを検証した。この結果から、 T_{max} が閾値温度を超えて急激に生成する 50nm 以下のインクボトル構造内に自由水が取り込まれることを説明付け、また 90°C を超える温度履歴を受けることで、超高強度硬化体中における自由水の移動性は極端に低下することを示した。
- 9) 90°C を超える高い初期高温履歴を受けると、温度降下以降の強度・自己収縮の増進が停止する。この原因として、インクボトル構造の成長により微細空隙で起こる反応に起因する収縮駆動力が粗大空隙に収縮駆動力が作用しにくくなることと、硬化体の強度が相当に高くなり収縮駆動力が作用しても硬化体は巨視的には変形しにくくなることが考えられる。
- 10) 90°C を超える高い初期高温履歴を受けたものは、温度降下以降、自己収縮が停止しても結合水率は増加している。このことから、温度降下させずに人工的に高温条件を長時間保持することで、強度・自己収縮は更に増進する可能性を考察した。この考察の妥当性を、筆者が別途実施した実験結果により示した。

以上の結果から、超高強度硬化体は強度・自己収縮が同等であっても、 T_{max} が特定の閾値温度を越えることで、反応生成物の構成や空隙構造が異なることを明らかとし、強度・自己収縮の予測式を温度履歴の範囲で使い分けることを提案しその物理化学的妥当性を示した。また将来的な材料設計手法の発展に資する知見を得た。