

氏 名	沼 尾 達 弥
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成4年9月9日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最 終 学 歴	昭和54年3月 東北大学工学部建築学科卒業
学 位 論 文 題 目	高温下のセメント硬化体の水分逸散と乾燥収縮に 関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 平井 和喜 東北大学教授 和泉 正哲 東北大学教授 柴田 明德 東北大学助教授 三橋 博三

論 文 内 容 要 旨

セメント硬化体の様な細孔を有する材料に於ては、材料中の水分の挙動が、弾性係数、クリープ挙動や乾燥収縮等その力学的挙動に大きな影響を及ぼす事が知られている。特にセメント硬化体が高温に曝される場合、セメント硬化体中の水分の逸散が著しく大きくなり、セメント硬化体中に含まれる水分の逸散過程を考慮することなしに、高温下での力学的挙動を表わすことは困難となる。

また、乾燥収縮は、セメント硬化体中に含まれる水分が時間の経過と共に空気中に散逸する事により直接引き起こされる現象であるため、セメント硬化体の力学的挙動の中で、水分移動と特に密接な関係を持っている。更に、時間によって変化する湿度分布は、セメント硬化体内部に収縮量の変化をもたらし、自己釣合的な内部応力を発生させる。この内部応力がセメント硬化体の引張り強度を越える場合には、セメント硬化体表面にひび割れが発生し、各種強度等に影響を与えることになる。それ故、水分の移動と乾燥収縮変形の間関係を定量化することは、高温下では勿論の事、常温下であってもセメント硬化体の力学的特性を考える上で特に重要な課題となっている。

セメント硬化体中の水分移動や乾燥収縮変形に関する実験結果は内外を問わず数多く報告されている。しかし、それらの多くは常温での研究が主であり、温度による影響を調べたものは著しく少ない。また、温度の影響を扱ったものでも、加熱方法等の実験条件により結果が大きく左右されており、これらの現象を統一的に表すまでには至っていないのが現状である。

本論文は、セメント硬化体の水分逸散及び乾燥収縮に関わる最も基礎的な特性として、材料の調合や環境温度・湿度の影響及び載荷応力の影響を調べる事、また、水分逸散過程で起こる部材断面内の含有湿度分布を解析的に求める事、更に、含有湿度と乾燥収縮変形の間関係を明らかにする事等

について、実験及び解析の双方から調べたものである。

本論文は、7章より構成されている。

第1章では、本論文の目的を述べると共に、本研究の特徴について箇条書き的に述べた。

第2章では、本論文の背景となる情報について、既往の研究成果の中から、セメント硬化体中の微細構造と水分移動及び乾燥収縮のメカニズムについて現在までの知見をまとめた。

第3章では、従来用いられている中実供試体に代えて、供試体内部での湿度勾配や温度勾配の発生を極力おさえ、かつ湿度平衡状態に比較的短時間で達し易い厚さ約1mm、外径15mm、長さ100mmの薄肉円筒供試体を採用して、第1節でその作製方法を述べると共に、強度、ヤング係数、細孔径分布、水分特性曲線等の基礎的な物性試験結果を示している。

第2節では、中実供試体との比較を行う事により薄肉円筒供試体の有効性について検証を行った。また、AE法を用いて、乾燥収縮過程におけるAE特性の変化を捉える事を試みた。その結果、外径が薄肉供試体と同じ15mmの中実供試体では、湿度平衡に達するまで1ヵ月以上を要するのに対し、薄肉円筒供試体の場合には、1週間程度で湿度平衡に達する結果となった。また、収縮変位の測定により、中実供試体では乾燥開始後1時間以内で乾燥ひび割れの影響による変位の不連続点が現れたこと、及び乾燥収縮時の表面ひび割れの影響により、中実供試体ではAEエネルギーが著しく大きい結果となった。この事から、薄肉円筒供試体を用いる事で、比較的短時間で乾燥収縮試験を行い得ることや、供試体内部の湿度分布による乾燥ひび割れの発生を抑えられることが示された。以上の結果より、セメント硬化体の乾燥収縮および水分逸散性状を実験的に調べる場合に、薄肉円筒供試体の使用が非常に有効である事が示された。

更に、乾燥収縮時に発生するAEは、乾燥初期と乾燥後期に集中し、乾燥の中頃には、乾燥収縮が進行しているにも拘らずAEの発生が少ない事が示された。また、水分逸散に伴う乾燥収縮変形速度の変化点とAE特性とは良い一致を示したことから、乾燥収縮挙動の変化をAE法を用いて捉え得る可能性が示された。尚、この乾燥収縮挙動をAE法により評価する試みは、内外を問わず新しい試みであり、貴重なデータを得る事ができた。

第4章では、セメント硬化体の水分逸散や乾燥収縮挙動に影響を及ぼすと考えられる要因の中から、調合、環境温度、環境湿度と軸応力の4点に絞って、各々第1節、2節、3節で実験的に検討を行った。

その結果、第1節では、水セメント比が高い程乾燥収縮が進む事、細骨材の混入により水分の移動は容易になるが、乾燥収縮変位量は減少する事が示された。また、細孔径分布と乾燥収縮変形挙動との関係を、重回帰分析により評価した結果、43nm以上の比較的大きな細孔と7.5nm以下の細孔の有意差が示され、各々毛細管及びセメント水和物内部の層間空隙に対応する事が示された。

第2節では、実験温度の影響は極めて大きく、130℃まで加熱乾燥を行った場合には、80℃(30%RH)の乾燥に比べ約4倍程度まで乾燥収縮が進む事が示された。また、水分逸散量と乾燥収縮との関係を表す曲線は幾つかの変化点を持つが、この変化は加熱温度が上昇すると共に大きくかつ明確になる傾向が示された。更に、熱膨脹係数と含水率との関係では、含水率の減少に伴って熱膨脹係数が大きくなる傾向を示す結果が得られた。

第3節では、供試体内外に飽和塩を配置して水分の透過量を測定する事により、環境湿度の減少に伴い水分移動速度が急激に小さくなる傾向を実験的に把握する事ができた。また、軸応力の載荷により水分逸散および水分移動は影響を受け、供試体内部の水分は逸散し易くなると共に、供試体を通過する湿気の透過速度は減少する傾向が示された。また、載荷応力が応力比で0.25以上になると、供試体内部に載荷応力による微細ひび割れが発生する事により、この透過速度は増加傾向を示す事も示された。

尚、水分逸散や移動に及ぼす軸応力の影響に関する結果は、内外を問わず殆ど報告がなく、セメント硬化体の乾燥クリープ現象に於けるPickett効果を考察する上で重要な示唆を与えるものである。

更に、第3節では、温度による水分移動への影響も併せて実験を行った。その結果、50°Cの場合、20°Cに比べ10倍程度、90°Cでは約75倍となり、100°C以下の場合でも水分移動に対する温度の影響が著しく大きい事が示された。

第5章では、高温下のセメント硬化体の水分逸散過程を解析的に予測する理論的方法について検討した。水分逸散過程は、拡散方程式によって解析することが可能であるが、含有水分の変化に伴って時々刻々と場所毎に拡散係数が変化するために、高度な非線形現象となる。そこで有限要素法を導入し、非線形拡散方程式を解くことにより、供試体内部の含有湿度分布の変化過程をシミュレートする方法を第1節に於いて提案した。この解析手法を、様々な実験方法により加熱乾燥を受けたセメント硬化体の水分逸散結果に適用して解析を行った。

第2節では、加熱温度が50°C/hrと急激に上昇し、供試体内部に温度勾配が生じる様な場合について、非線形熱伝導解析と本解析手法を併用して解析を行い、温度勾配の変化を伴う複雑な現象を解明する方法を提示した。

第3節では、第4章3節で行われた軸応力下の水分逸散過程の実験結果を解析して、軸応力が拡散係数に及ぼす影響を調べる事により、軸力によりセメント硬化体中の水分移動は大きく影響を受ける事を解析的にも明らかにした。

第4節では、他の研究者（Schwesinger及び松井ら）によって行われた実験結果の例を2例取り上げ解析を行った。また、解析によりシミュレートされた内部湿度分布を用いて、供試体内部に発生する応力を定性的に評価し、収縮傾向の変化を考察する事により、水分逸散過程と湿度勾配の変化の評価の重要性を示した。

以上の解析により、本章で示した解析手法を用いる事により実験方法や加熱方法が異なる場合でも、水分逸散過程を解析する事が可能である事が示された。

第6章では、乾燥収縮挙動を、材料や加熱温度及び含有湿度によって決まる湿度平衡状態での収縮変形量と、時間依存的に影響を受ける項に分けて考察する事により、水分逸散量と乾燥収縮変形との関係を示す数理モデルの提案を第1節において行った。また、第2節では、第3章4節で行われた20°C～80°Cの環境下での実験結果を解析した。その結果、異なる温度環境下に於ける実験結果であっても、本章で示した数理モデルにより、実験結果をよく再現できる事が示された。

第7章では、以上の実験及び解析結果について、得られた知見及び結果のまとめを行った。

審査結果の要旨

近年、セメント系材料は従来の使用範囲を越えて、高温などより過酷な環境で使用される場合が増えている。高温下でのセメント硬化体の力学的特性を評価する場合、セメント硬化体内部の水分逸散過程とそれに結びついた乾燥収縮挙動を捉える事が課題となっている。筆者は、高温下に於けるこれらの現象を統一的に表す事を目的に、主に、基礎的物性の評価、有限要素法による水分逸散過程の解析手法の検討、乾燥収縮変形量の推定方法の検討など実験及び解析的研究を行ってきた。本論文は、その成果を取り纏めたもので全編7章よりなる。

第1章は、序論である。

第2章では、既往の研究成果並びに問題点の整理を行っている。

第3章では、従来用いられている中実供試体に代えて、供試体内部での湿度勾配や温度勾配の発生を極力おさえ、かつ湿度平衡状態に比較的短時間で達し易い厚さ約1mmの薄肉円筒供試体を採用して、その作製方法を述べると共に、中実供試体との比較を行う事により薄肉円筒供試体の有効性を示している。

第4章では、セメント硬化体の水分逸散や乾燥収縮挙動に影響を及ぼすと考えられる要因の中から調合、環境温度、環境湿度と軸応力の4点に絞って実験的検討を行い、その影響を明らかにしている。特に、軸力の影響試験は全く新しい試みであり、軸力による影響は無視できないことを明らかにしている。

第5章では、高温下のセメント硬化体の水分逸散過程を解析的に予測する理論的方法について検討を行い、有限要素法を導入して非線形拡散方程式を解くことにより、供試体内部の含有湿度分布の変化過程をシミュレートする方法を提案している。さらに、この解析手法を、非線形熱伝導方程式と併用する事により、内部に温度勾配を伴う急速加熱の実験結果を解析している。その他、既往の実験結果の解析も併せて行い、提案した手法の有効性を示している。

第6章では、乾燥収縮挙動を、材料や加熱温度及び含有湿度によって決まる湿度平衡状態での収縮変形量と、時間依存的に影響を受ける項に分けて考察する事により、水分逸散量と乾燥収縮変形との関係を示す数理モデルの提案を行っている。また、20℃～80℃の環境下での実験結果を解析して、異なる温度環境下に於ける実験結果であっても、本章で示した数理モデルにより、実験結果を良く再現できる事を示している。

第7章は、結論である。

以上要するに本論文は、セメント硬化体中の水分移動と乾燥収縮に関する挙動を詳細に調べると共に、その挙動を解析する手法を明らかにして、高温下のセメント硬化体の力学的特性の変化過程を解明する為の有用な知見を提示したもので、建築材料工学の発展に資するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。