

論文審査の結果の要旨

氏名：山口 晋

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：シリカフェームを用いたコンクリートのオートクレーブ養生温度の低温化に関する研究

審査委員：(主査) 教授 伊藤 義也 ㊞

(副査) 教授 柳内 睦人 ㊞ 教授 鶴澤 正美 ㊞

教授 町長 治 ㊞

オートクレーブ養生は、コンクリートの高強度化を目的とした促進養生の一つである。オートクレーブ養生による高強度化は、常温では反応しない不活性なケイ酸分とセメント中のカルシウム分が高圧下で反応し、結晶性のトバモライトが生成されこれが結合材として働き、内部構造が緻密化するためとされている。この理論は約 50 年前に市販の ALC(軽量気泡コンクリート)にかかわる研究成果をもとに総説されたものである。この高強度化理論を基として、1970 年代から地中杭をはじめとした高強度コンクリート二次製品の製造に適用されるようになった。当時から現在までのオートクレーブ養生の研究報告を探索したがすべて ALC を対象とした研究成果であり、高強度コンクリート二次製品を対象としたオートクレーブ養生とトバモライトの生成に起因する強度発現の研究報告は皆無であった。当時に比べ、超高層構造物建設の増加の影響から要求される圧縮強度が格段に上昇しているにもかかわらず、地中杭の製造は、現場の経験的知見や試行錯誤によって対応しているのが現状である。また、地中杭は 180°C・1MPa の高温高圧蒸気によって製造されており、環境面においても、数十 m に及ぶ製品を養生するためには、非常に大型な養生槽が必要となり、蒸気を発生させるボイラーに用いる化石燃料が多量に必要となる。これは多くの CO₂を排出することを意味し、環境への負荷を低減する新しい製造方法の構築が重要かつ急務でもある。

本論文は、これまで研究例のない、地中杭をはじめとした高強度コンクリート二次製品を対象としたオートクレーブ養生による高強度化要因の解明と現行のオートクレーブ養生温度の低温化について実験および検討を行い、これらの結果よりコンクリート二次製品の高強度の発現機構を解明し、オートクレーブ養生の低温化による環境負荷の低減を可能とする新しいオートクレーブ養生方法を提示している。そして、これらの方法が新たな高強度コンクリート二次製品の製造法を可能とする極めて有用な技術であって、現場における環境負荷低減への応用となることを述べている。

本論文は、7 章から構成されている。

第 1 章「緒論」

オートクレーブ養生およびコンクリートの高強度における既往の研究をレビューし、これに関する研究の現状と問題点の指摘を行い、本研究の位置づけを明らかにするとともに、研究の目的と概要を述べている。

第 2 章「けい石微粉末を用いたオートクレーブ養生による強度の発現性」

オートクレーブ養生に必要なケイ酸源に「けい石微粉末」を添加し、従来のオートクレーブ養生温度 180°C と 150°C に低温化した際のケイ酸源の反応性を確認するため硬化体強度の発現性および生成する水和物について基礎実験による検証を行い、次のことを明らかにしている。低温化した場合、水熱反応が認められず、オートクレーブ養生の低温化には、低温化したオートクレーブ養生温度でも反応するケイ酸源の選定が必要であること。また、水熱反応が認められたオートクレーブ養生温度 180°C の場合にもトバモライトの生成は認められず、その他の CaO・SiO₂・H₂O 系水和物にも着目した検討の必要性を述べ、オートクレーブ養生温度の低温化と高強度の発現要因の解明に関する実験の方向性を示している。

第 3 章「シリカフェーム混入プレミックス粉末を用いたオートクレーブ養生の低温化」

低温化したオートクレーブ養生温度下で水熱反応を起こす有効なケイ酸源として「シリカフェーム」

に着目し、反応性の確認を行っている。確認には他の配合要因による強度の変動を排除するため規定量のシリカフェームがあらかじめ混入されている「(公社)土木学会編超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針(案)」に準拠した既存のプレミックス粉末を用いた硬化体を用い、オートクレーブ養生温度 180℃と 150℃の硬化体強度の発現性および生成した水和物を実験的に検証し、次のことを明らかにしている。すなわち、オートクレーブ養生が 150℃の硬化体は、従来の養生温度 180℃の場合とほぼ同等の強度発現性が認められ、オートクレーブ養生の低温化にシリカフェームの添加が有効となること。十分な前置き時間を確保することで、さらに高強度化が得られる。さらに、トバモライトの生成は認められず、トバモライトの生成が無くとも十分な高強度を得ることができるという新たな知見について述べている。

第4章「シリカフェームを用いたオートクレーブ養生温度の低温化」

第3章の知見からシリカフェームをケイ酸源に選定し、低温オートクレーブ養生による高強度コンクリートの製造条件の最適化を目的に実験検討を行っている。すなわち、最適な配合条件と養生条件について強度発現性、細孔性状、微細構造を実験的に検証し、これらに関連づけて述べ、新しい低温オートクレーブ養生方法を提案している。さらに、生成した水和物を検証し、オートクレーブ養生による高強度コンクリートの強度発現要因を明らかにしている。すなわち、従来、高強度化に必須と言われていたトバモライトの生成は認められず強度発現は水熱反応により $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 系水和物が多量に生成され全空隙を減少させ緻密化することを検証し、オートクレーブ養生による高強度コンクリートの反応性について新たな知見を示している。

第5章「オートクレーブ養生によるトバモライトの生成が高強度の発現に及ぼす影響」

前章までで明らかにしたようにオートクレーブ養生によるコンクリートの高強度化は $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 系水和物の生成が要因であり、従来、高強度化には必須条件とされているトバモライトの生成は認められないため、第5章は、長時間のオートクレーブ養生を実施し、強制的にトバモライトを生成させ、トバモライトの生成が強度発現に及ぼす影響について述べている。その方法は、電子プローブマイクロアナライザによる水和物組成の特定、粉末 X 線回折、走査型電子顕微鏡による水和生成物の形態観察および水銀圧入式ポロシメータによる細孔空隙の測定を行なって実験検証し、これらに関連づけて述べ新たな知見を示している。すなわち、高強度コンクリートにおけるトバモライトの生成は毛細管空隙の増加を招き、強度を低下にさせる要因となることを明らかにしている。この知見を基にオートクレーブ養生によるコンクリートの高強度化に関する新しい仮説をたて、理論モデルを提案している。

第6章「オートクレーブ養生温度の低温化による環境負荷低減効果」

実際の工場でオートクレーブ槽を使用して第4章で提案した養生温度を低温化したオートクレーブ養生方法の環境への負荷低減効果について示している。すなわち環境省・経済産業省の温室効果ガス排出量算定・報告マニュアルによる「エネルギー起源 CO_2 算定式」を用いてボイラーの燃料である重油の使用量から CO_2 排出量の算出を試みている。その結果、従来のオートクレーブ養生温度である 180℃-1MPa に対して、提案した養生温度 150℃-0.5MPa のオートクレーブ養生では、約 18%の CO_2 削減効果のあることを明らかにしている。次に使用圧力の低減による養生槽の維持管理費、メンテナンス費の削減効果が期待できることを説明している。

第7章「総括」

本研究によって得られた成果を要約し、本研究の結論を述べている。

以上、本論文は、これまで研究例のない高強度コンクリート二次製品を対象としたオートクレーブ養生による高強度化要因を明らかにするとともに、現行のオートクレーブ養生温度を低温化できる新しいオートクレーブ養生方法を提示している。また、現場における環境負荷低減への応用ができることを確認している。これらの成果は高強度コンクリート二次製品の新たな製造法を可能とする極めて有益な知見となるものであり、生産工学、特にコンクリート工学、セメント材料化学の発展に寄与するものと評価される。

よって本論文は，博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平 成 年 月 日