

論文の内容の要旨

氏名：山口 晋

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

近年、高強度コンクリート二次製品の一つである地中杭の需要が高まっている。経済産業省による窯業・建材統計年報によれば国内出荷量は、平成 22 年度の約 2,080 千 t に対し、平成 24 年度では約 2,250 千 t と増加している。これは近年の高層マンションをはじめとした超高層構造物建設の増加が影響しているものである。

地中杭は、主にオートクレーブ養生、すなわち養生条件が 180°C-1MPa の高温高圧蒸気によって製造されている製品である。オートクレーブ養生を行う理由としては、硬化を促進し、早期に所要の脱型強度を得て、効率良い型枠回転率の向上ならびに製品を量産するためである。一方、この養生方法は、常温では反応しない不活性なケイ酸分をセメント中のカルシウム分と反応させ、結晶性の 11Å Tobermorite(以下、トバモライト)を生成させることができる。この生成したトバモライトが結合材として働き、さらに内部構造が緻密化することで、コンクリートが高強度化されるとされ、この考え方が国内で 1965 年に総説されて以後、1970 年代から地中杭の製造が急激に広まった。

現在の地中杭の製造においても、約 50 年前に総説されたオートクレーブ養生による高強度化理論をもとに、圧縮強度が当時よりも格段に上昇しているにもかかわらず、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。また環境面においても、数十 m に及ぶ地中杭のような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、これまでに研究例のない地中杭をはじめとした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養生温度が、180°C のオートクレーブ養生の低温化の二つを目的としている。

そこでまず、初期段階としてケイ酸源の反応性に着目し、シリカ質混和材としてけい石微粉末とシリカフェームを用いた検討を行った。その結果、けい石微粉末では、養生温度を低温化すると圧縮強度は低下するが、シリカフェームを用いれば養生温度が 150°C-0.5MPa のオートクレーブ養生の場合でも、180°C と同等の圧縮強度が得られることを明らかにした。また、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ず、CSH の生成だけでも十分な高強度が得られる新たな知見を示した。さらに配合条件など作製条件を標準化するため、シリカフェームを用いて水セメント比、シリカフェームの添加率、さらに実製造では 2~5 時間程度実施しているオートクレーブ養生前に実施する前置き養生時間について検討を行った。その結果、配合条件は、水セメント比 30%、シリカフェームの添加率はセメント質量比で 10%以上とすれば良いことを示した。また、前置き養生時間は終結時間以上とすることが有効であることを明らかにした。

次に、トバモライトの生成が圧縮強度に与える影響について検討を行った。その結果、地中杭をはじめとしたコンクリート二次製品の場合、トバモライトの生成は圧縮強度を低下させることを明らかにし、高強度の発現の要因は、CSH の生成であることを明らかにした。

以上の結果より、コンクリート二次製品の高強度の発現機構を解明し、さらにオートクレーブ養生の低温化による環境への負荷低減を可能とする新しいオートクレーブ養生方法を提案した。

本論文は、全 7 章から構成されており、各章の要旨は以下の通りである。

第 1 章「緒論」では、本研究の背景、既往の研究について述べ、本研究の意義を明らかにし、本研究の目的を述べている。また、本論文の構成ならびに概要を示した。

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」では、ケイ酸源に比表面積約 4000cm³/g 程度のけい石微粉末を混和したセメント硬化体を用いて、オートクレーブ養生温度が 180°C と 150°C の場合における強度の発現性およびトバモライトの生成に関する基礎的実験を行った。その結果、従来の 180°C の場合、オートクレーブ養生による反応が認められたが、150°C の場合と比べると圧縮強度の差は大きく、従来の 180°C に対する 150°C の相対圧縮強度は約 67%にとどまった。このことから、養生温度の低温化を図るためには、けい石微粉末よりも高い反応性を示す高活性なケイ酸源を混入することが必要であることを明らかにした。なお、粉末 X 線回折によりトバモライトの生成は認められなかった。

第3章「シリカフュ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温度の低温化」では、ケイ酸源の選定の必要性を示したことから、本章ではまず、高活性なケイ酸源としてシリカフュームに着目し検討を行った。そこで、水セメント比およびケイ酸源の添加量といった強度発現要因の変動を排除するため、シリカフュームが予め規定量混入されている「(公社)土木学会編 超高強度繊維補強コンクリートの設計・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モルタルによる基礎的実験を行った。その結果、養生温度が従来の180°Cに対する150°Cの場合の相対圧縮強度は約90%を示した。このことから、シリカフュームが養生温度の低温化には有効な材料となることを明らかにした。

さらに、高強度の発現性を得ることを目的として、オートクレーブ養生前に実施する20°Cの前置き養生時間に着目した検討を行った。なお、前置き養生時間に着目した理由は、実製造では前置き養生を2~5時間行っているが、配合条件によってはコンクリートがまだ固まっていないこともあり、既往の文献によれば「硬化初期に高温履歴を受けるとセメント硬化体の強度増進に影響がある」との報告によることからである。その結果、前置き養生時間を18時間以上の十分な時間を確保すれば、養生温度が150°Cでも従来の180°Cと同等の高強度の発現性が得られることから、前置き時間の確保が重要であることを明らかにした。また、粉末X線回折および走査型電子顕微鏡の形態観察により、高強度化には必須条件とされるトバモライトの生成は認められず、多くのCSHが生成することを明らかにした。

第4章「シリカフュームを用いたオートクレーブ養生温度の低温化」では、水セメント比およびシリカフューム添加率といった配合条件、ならびに第3章で示した「オートクレーブ養生の低温化には十分な前置き養生時間が有効である」との知見から、凝結時間を考慮した前置き養生時間に着目し検討を行い、養生温度が150°Cの低温オートクレーブ養生方法による高強度コンクリートの作製条件の最適化を試みた。なお、実験はモルタルを使用した。その結果、オートクレーブ養生の低温化には、水セメント比が30%程度、ならびにシリカフュームの添加率はセメント質量比で10%以上にすれば良いことを明らかにした。次に、前置き養生時間は、終結時間以上の養生時間が必要であることを明らかにした。すなわち、水セメント比が低い30%の場合が最も圧縮強度が高く、40%、50%の順に圧縮強度は低くなった。また、シリカフュームの添加率は20%の場合が最も圧縮強度は高くなったが、添加率が10%の場合においても養生条件180°Cおよび150°Cでほぼ同等の強度発現性が得られた。次に、粉末X線回折および走査型電子顕微鏡観察、ならびに細孔空隙測定により、高強度化の主な要因はCSHの生成であり、トバモライトの生成は必ずしも必要でない第3章の知見を検証することができた。これらの結果より、新しい低温オートクレーブ養生方法を提案した。

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」では、第4章で得られた「オートクレーブ養生による高強度化の主因はCSHの生成であり、トバモライトの生成は不要」との知見に関して、トバモライトの生成が高強度の発現に及ぼす影響の検討を行った。なお本章では、トバモライトを強制的に生成させるためにオートクレーブ養生時間を100時間および300時間の長時間実施した。その結果、実製造における3~5時間程度のオートクレーブ養生時間に近い10時間の場合、粉末X線回折によるトバモライトの生成は認められなかったが、養生時間100時間の場合では若干の生成が認められ、圧縮強度も増加した。しかし300時間の場合では、トバモライトの生成は認められたものの、圧縮強度は低下する結果となった。この現象について、粉末X線回折および走査型電子顕微鏡観察、水銀圧入式ポロシメーターによる細孔空隙測定により検証を行った結果、生成したトバモライトによって、全空隙量に占める粗大な空隙の割合が増加することで全空隙量も増加することから、細孔空隙が疎な組織となることが主因であることを明らかにした。

第6章「オートクレーブ養生の低温化による環境負荷低減効果」では、実際の工場で使用されている実機を用いて、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検討した。なお、環境への負荷低減効果の検討は、ボイラーの燃料である重油の使用量から、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CO₂算定の基礎式」を用いてCO₂排出量を算出した。その結果、従来のオートクレーブ養生温度である180°Cに対して、提案する養生温度150°Cのオートクレーブ養生では、約18%のCO₂削減効果が認められた。また、養生温度が150°Cの場合、使用する圧力も約半分の0.5MPaとなることから、オートクレーブ養生槽の維持管理費やメンテナンス費の削減効果も期待できることを示した。

第7章「総括」では、本研究で得られた成果を要約し、本研究の結論を述べた。