

氏名	いわき いちろう 岩城一郎
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成12年3月8日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和63年3月 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻前期課程 修了
学位論文題目	寒冷地において使用される高流動コンクリートの 強度発現性に関する基礎的研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 三浦 尚 東北大学教授 岸野 佑次 東北大学教授 鈴木 基行 東北大学教授 岩熊 哲夫

## 論文内容要旨

近年、フレッシュ時の材料分離抵抗性を損なうことなく流動性を高めた高流動コンクリートが急速に普及している。その中でも、打込み時の振動・締固め作業を行うことなく、型枠の隅々まで充てんすることが可能な自己充てん性を有する高流動コンクリートは、建造物の信頼性を向上させることができるだけでなく、工事現場の省力化、省人化、合理化を図ることができるため、今後ますます施工例が増加するものと予想される。特に寒冷地において冬期にコンクリート施工を行う場合、氷点下あるいはそれに近い過酷な労働条件下での打込み作業となるため、振動・締固め作業が不要な高流動コンクリートの施工が可能となれば、作業環境を大幅に改善し、信頼性の高いコンクリート建造物が実現すると思われる。よって、寒冷地においても今後、自己充てん性を有する高流動コンクリートの普及が望まれる。

高流動コンクリートを製造するためには、比較的多量の高性能 AE 減水剤または高性能減水剤を用いて流動性を高めるとともに、高炉スラグ微粉末、石灰石微粉末といった粉体を用いて水粉体比を減少させるか、増粘剤を添加することによって材料分離抵抗性を高める必要がある。高流動コンクリートは、材料分離抵抗性を付与する材料によって、粉体系高流動コンクリート、増粘剤系高流動コンクリート、併用系高流動コンクリートに分類される。

寒冷地で冬期に高流動コンクリートの施工を行う場合、一般に養生温度が低温となるため、普通ポルトランドセメントに比べ反応の遅い高炉スラグ微粉末を多量に混和した配合では、強度発現が遅延することが懸念される。さらに、高性能(AE)減水剤の多量添加はコンクリートの凝結硬化を遅延させる作用があるため、高炉スラグ微粉末を混和した高流動コンクリートを寒冷地において施工する場合、初期の強度発現が著しく遅延したり、材齢が経過しても十分な強度発現が得られないといった問題が発生する恐れがある。

石灰石微粉末は、水和熱を上昇させることのない粉体としてコンクリート中に添加することが可能な上、ブリーディングの抑制、初期の強度発現の促進といった効果が期待できるため、近年高流動コンクリートの粉体としての使用例が増加している。しかしながら、石灰石微粉末を混和した高流動コンクリートを寒冷地において施工する場合を想定し、低温環境下における強度発現性を調べた研究はこれまでほとんど行われていない。また、増粘剤系高流動コンクリートについては、増粘剤がコンクリートの凝結を遅延させることが指摘されており、その結果、コンクリートの初期の強度発現に悪影響を及ぼす可能性があるが、低温環境下において増粘剤系高流動コンクリートの強度発現性について検討を行った研究例はほとんど見当たらない。従って、石灰石微粉末を混和した高流動コンクリートや増粘剤系高流動コンクリートについては、まだ寒冷地においてこれらのコンクリートが普及していない今のうちに、低温環境下における強度発現性を十分に調査し、その特性を明らかにしておく必要があると思われる。

以上の背景より、本研究では、寒冷地において高炉スラグ微粉末や石灰石微粉末を混和した粉体系あるいは併用系高流動コンクリート、及び増粘剤系高流動コンクリートを施工する場合を想定し、その強

度発現特性と問題点を究明するとともに、得られた結果に基づいて、寒冷地における高流動コンクリートの利用方法について詳細な検討を行うことを目的とした。

本論文を要約すると以下の通りである。

第1章の「緒論」では、研究の背景、目的及び意義、方針を明示した。また、本研究に関連する既往の研究成果をとりまとめるとともに、議論を進める上で必要な用語の定義を行った。

第2章の「寒冷地における高流動コンクリートの強度発現性」では、低温環境下における各種高流動コンクリートの強度発現性について、基本的な特性と問題点を把握するため、高炉スラグ微粉末及び石灰石微粉末を使用した粉体系あるいは併用系高流動コンクリート、及び増粘剤系高流動コンクリートを対象にモルタル供試体を作製し、20℃及び5℃一定封かん養生下における強度発現性を調査した。

得られた結果の主なものは次の通りである。

1. 高炉スラグ微粉末を混和した高流動コンクリートは、低温下において初期の強度発現が遅延し、材齢が経過しても常温養生を行った場合の強度発現とかなりの開きが生じる可能性がある。
2. 石灰石微粉末を混和した高流動コンクリートは、低温下で強度発現が顕著に増進し、比較的早い材齢で常温養生を行った場合の強度発現に追いつく傾向がある。
3. 最も一般的な増粘剤（セルローズ系）を適量使用した増粘剤系高流動コンクリートは、高性能 AE 減水剤や増粘剤を添加せず、高流動性を付与していない同一水セメント比の普通コンクリートと同等の強度発現性を示す。

第3章の「寒冷地における高炉スラグ微粉末を混和した高流動コンクリートの強度発現性」では、第2章において低温下における強度発現性に問題のあった高炉スラグ微粉末を混和した粉体系高流動コンクリートを対象に、高炉スラグ微粉末の粉末度及び置換率を変化させた様々な配合条件に対して、養生方法及び養生温度を変化させて、その強度発現性を検討した。また、打設後所定の期間、30℃で給熱養生を行い、その効果についても調べた。

得られた結果の主なものは次の通りである。

1. 高炉スラグ微粉末を混和した高流動コンクリートに対して気中養生を適用すると、特に低温下において強度発現が著しく低下する。従って、寒冷地においてこの種のコンクリートを施工する場合には気中養生を避けるべきである。一方、封かん養生を行った場合、水中養生に近い強度発現が期待できるため、寒冷地において望ましい養生方法であると判断される。
2. 高炉スラグ微粉末を混和した高流動コンクリートの強度発現性は、スラグの粉末度と置換率に大いに依存する。粉末度の高い高炉スラグ微粉末を使用すると初期の強度発現が促進し、スラグ置換率を高くすると、常温と比較し、低温下において、長期の強度発現が低下する傾向にある。
3. 粉末度の低い高炉スラグ微粉末（高炉スラグ微粉末 4000）を比較的高い置換率（70%）で混和した高流動コンクリートでは、初期の強度発現が著しく遅延するため、場合によっては給熱養生を施す必要がある。給熱養生を行った場合、初期の強度発現の改善には効果を示すものの、長期においては強度発現が多少低下する傾向を示す。
4. 粉末度の高い高炉スラグ微粉末（高炉スラグ微粉末 8000）を用いた高流動コンクリートや、粉末度の低い高炉スラグ微粉末を比較的低い置換率（50%）で混和した高流動コンクリートでは、十分な初期強度が期待できるため、特に給熱養生を行う必要がないと思われる。給熱養生を行った場合には、むしろ長期の強度発現に悪影響を及ぼすため、一般に給熱養生を行うべきではないと判断される。

第4章の「外気温の上昇に伴う高炉スラグ微粉末を混和した高流動コンクリートの強度回復特性」では、寒冷地における具体的な気候条件を想定し、冬から春への季節の変化に伴う外気温の上昇が、高炉スラグ微粉末を混和した粉体系高流動コンクリートの強度発現性にどのような影響を及ぼすか検討し

た。

得られた結果の主なものは次の通りである。

1. 高炉スラグ微粉末を混和した高流動コンクリートに対して封かん養生を行った場合、はじめ低温であってもその後温度が上昇するに伴い強度発現が顕著に回復し、温度上昇後1ヶ月程度で常温養生を継続した場合の強度発現に追いつくあるいは追い越す傾向を示す。また、温度を上昇させる時期や温度上昇前の養生温度が変化しても、温度上昇後の強度回復特性に大きな影響を及ぼさない。一方、気中養生を行った場合、温度上昇後の強度回復はほとんど期待できない。

第5章の「寒冷地における石灰石微粉末を混和したコンクリートの強度発現性」では、第2章において、低温下で優れた強度発現性を示した石灰石微粉末を混和した粉体系高流動コンクリートを対象に、寒冷地においてこの種のコンクリートを施工する際に推奨される石灰石微粉末の置換率について検討を行った。また、石灰石微粉末の添加の有無、石灰石微粉末の産地、粉末度、添加量が低温下におけるセメント硬化体の強度発現性に及ぼす影響を調査した。さらに、石灰石微粉末とは構成鉱物が明らかに異なる安山岩砕石粉を添加した場合の強度発現性についても検討を行った。

得られた結果の主なものは次の通りである。

1. 石灰石微粉末の置換率を10%から60%の間で選定することにより、低温下においても常温と同等の強度発現性を発揮する高流動コンクリートの施工が可能となる。
2. 石灰石微粉末には、低温下におけるセメント硬化体の強度発現を増進させる効果がある。
3. 粉末度の高い石灰石微粉末を添加すると低温下における初期の強度発現を促進し、多量の石灰石微粉末を添加すると、養生温度に関わらず、長期にわたり強度発現が増進する。
4. 石灰石微粉末を混和したコンクリートの強度発現性は、石灰石微粉末を混和しないコンクリートの強度発現性と比較して、養生による影響を受けにくい。
5. 安山岩砕石粉を混和した場合にも低温下における強度発現増進効果が期待できる。

第6章の「石灰石微粉末を混和したコンクリートの強度発現機構」では、第5章で示された低温下における石灰石微粉末の添加による強度発現増進効果と石灰石微粉末の多量添加による温度とは無関係な強度増進効果について、初期の水和反応性と、材齢の経過に伴う水和反応の進行過程及び細孔組織の緻密化に着目し、メカニズムの解明を試みた。

得られた結果の主なものは次の通りである。

1. 石灰石微粉末の添加により常温だけでなく低温下においてもセメントの初期の水和反応が促進する。ただし、この効果は、常温と比べ低温で特に顕著に現れる効果であるとは言い難い。
2. 石灰石微粉末の添加による低温下における強度発現増進効果は、主に石灰石微粉末が水和生成物の析出サイトとして寄与し、セメント粒子周りの水和環境を改質したことに伴い、水和反応が長期にわたり安定して継続的に進行したためであると推察される。
3. 石灰石微粉末の多量添加による温度とは無関係な強度増進効果は、主に石灰石微粉末の空隙充てん作用により、ペースト部の細孔構造が変化し、特に強度に悪影響を及ぼす粗大な毛細管空隙が緻密化されたことに起因すると考えられる。

第7章の「結論」では、本研究で得られた主な結果を各章ごとにとりまとめるとともに、寒冷地における高流動コンクリートの利用方法と今後の課題について論じた。

以上の検討結果より、寒冷地における様々な状況を想定した配合条件、養生条件、環境条件に対する各種高流動コンクリートの強度発現性について明らかにすることができた。そして、寒冷地においても、適切な配合や養生方法を選定すれば、所定の強度発現を十分に満足する高流動コンクリートの施工が可能であるとの結論を導くことができた。本研究成果は、今後、寒冷地において高流動コンクリートを積極的に普及させる上で貴重な資料となり、また、実際にこのような地域において、高流動コンクリートの配合や養生方法を選定する上で、大きな役割を果たすものと思われる。

## 審査結果の要旨

我が国では、フレッシュ時の材料分離抵抗性を損なうことなく流動性を高めた高流動コンクリートが実用化されるようになった。高流動コンクリートは各種混和材料を多量に用いているため、普通のコンクリートと比べて低温下において強度発現が遅延する等、使用に当たって検討しておかなければならない問題が残されている。

本研究は、寒冷地において使用される各種高流動コンクリートを対象とし、低温下におけるこのようなコンクリートの強度発現性等についてその特性と問題点を解明し、得られた結果から寒冷地における高流動コンクリートの望ましい設計・施工方法の提案を行なったものであり、全編7章より成る。

第1章は序論である。

第2章では、低温環境下における各種高流動コンクリートの強度発現性について、基本的な特性と問題点を明らかにし、さらなる検討の必要性を述べた。

第3章では、高炉スラグ微粉末を混和した高流動コンクリートを気中養生すると低温下において強度発現が著しく低下すること、高炉スラグ微粉末の粉末度の影響が大きいこと、等を明らかにした。

第4章では、温度の低い冬季に打設されたコンクリートであってもその強度は季節変化に伴う気温の上昇とともに増加し、一般には、封かん養生を行いさえすればコンクリートは低温下で打設しても特に問題はないことを明らかにした。これは重要な結果である。

第5章では、石灰石微粉末を添加することによって低温下における初期強度発現性を著しく増大させることができ、場合によっては低温下においても常温と同等の強度発現性を得ることが出来ることを明らかにしている。これは有用な知見である。

第6章では、第5章で示された石灰石微粉末の強度発現増進効果のメカニズムの解明を試みている。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は、最近多く用いられるようになった高流動コンクリートの低温下における強度発現性を調査し、寒冷地でそのようなコンクリートを施工する場合の対策を明らかにしたものであって、コンクリート工学及び土木工学の進展に寄与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。