

[89] 小氷塊を用いたコンクリート製造法

正会員 鈴木 敏郎 (東京工業大学工学部)

正会員 ○瀧口 克己 (東京工業大学工学部)

§ 1. はじめに

本論文は、小氷塊を利用したコンクリート製造法に関する。ほぼ同様な内容を概に発表⁵⁾しているが、建築・土木両方の分野をとおし、より多くの方々の御意見・御批判をあおぐべく、あえてここに再発表するものである。本論文で論じている内容に関する具体的な実験資料は、「小氷塊を用いて製造するコンクリートの特性」⁶⁾で示す。

§ 2. 氷塊利用への発想

D. A. Abrams¹⁾の歴史的論文を引用するまでもなく、セメントに対する水の比率がコンクリートの特性にきわめて大きな影響を与えることはよく知られている。水量の少ないコンクリートを密実に打設すれば、種々の優れた特性を有する高品質コンクリート(注1)を製造することは明らかである。コンクリートの品質に悪影響を及ぼす余剰水の相当に多いコンクリートを使用せざるを得ないのは、練り混ぜ、搬送、打設、締め固め、というコンクリートの製造過程における取り扱い易さに起因している。水量の少ないコンクリートの製造過程における取り扱い易さを改良する試みの一つが、いわゆる流動化剤を利用した流動化コンクリートである。混和剤や混和材の開発、あるいは利用という方向ではなく、コンクリートの原点であるところの、水・セメント・骨材を混合したコンクリートにおいて、製造過程における取り扱い易さを改良する手法はないかという思考の方向も重要である。これは、コンクリートに対する原則的、基本的な問いかけということもできる。この基本的な問題、すなわち、水・セメント・骨材を混合して製造するコンクリートの製造過程における取り扱い易さを改良する方法は何かという問題、に対する解答の一つ、あるいは、唯一の解答は、水の容態を変化させるということである。水の容態を変化させるということから、液体から固体へ、すなわち、水にかえて氷を用いるという発想がうまれた。水にかえ小さな氷塊を用いて、氷塊とセメントと骨材を固相に近い状態で混合攪拌してコンクリートを製造するという考え方である。いうまでもないが、小氷塊を用いた混合攪拌を行うが、打設終了時には、氷塊は完全に融解し、水とセメントは均質に混練された状態になっている必要がある。小氷塊・セメント・骨材を混合攪拌して製造するコンクリートの特性のなかには、通常の水を使用するコンクリートの特性とは大きく異なるものがある。具体的な小氷塊を用いたコンクリート製造法と、この製造法を用いたコンクリートの特性を論ずるに先立ち、次節で、製造過程で要求されるコンクリートの特性について述べる。

§ 3. コンクリートの製造過程で要求される特性

コンクリートの製造過程は、一般に、

1. 練り混ぜ
2. 搬送(運搬、輸送を意味し、ポンプ圧送も含むものとする。)
3. 打設(締め固めを含むものとする。)
4. 養生

の4段階に大きく区分することができる。この製造過程の、1.練り混ぜ、で要求される特性としては、(1)練り混ぜが容易である。言葉を換えれば、練り混ぜに必要な動力を小さくしうる性質である。(2)巨視的に、各混合材が均質に混合しうることである。主として、2.搬送、で要求される特性としては、コンクリートの製造過程すべてに共通したものであるが、(3)できる限り、水和反応が進行しないこと。(4)骨材の分離が生じないこと。の2点が重要である。3.打設、で要求される特性としては、(5)可塑性(軟らかさ)(6)密実に締

め固めうる。この2点をあげることができる。4.養生,における重要な特性は、(7)養生条件によって、硬化コンクリートの性質が大きく変化しないことである。

練り混ぜに大きな動力を必要とすること、および、初期の水和反応の進行が速く、したがって、練り混ぜから打設までの時間で可塑性が小さくなるということが主たる理由で、高品質のコンクリートが得られることが予想されながら、水量の少ないコンクリートは、ほとんど使用されていない。

現在、水量の少ないコンクリートの製造過程の各種特性を改善する試みの主流は、流動化剤である。ここで提唱する、水にかえて小さな氷塊を用いて混合攪拌したコンクリートにおいても、水を用いた場合に比較して、上記のいくつかの必要とされる特性を格段に改善しうる。

§ 4. 小氷塊を用いたコンクリートの製造法

このコンクリートの製造法は、低水セメント比のコンクリートを対象としている。低水セメント比の領域は、水にかえて小さな氷塊を用いるのであるから、当然のこととして、水を用いた場合には、均質な混練に相当大きな動力を必要とし、従来、混練がむずかしいとされていた領域および、混練から打設までの間に、水和反応の進行によるスランブロスが打設性能に大きな影響を及ぼす領域である。

水にかえて用いる小さな氷塊は、極めて不安定なものである。²⁾ 熱、圧力等で融解し、また、焼結現象も生じる。従って、小氷塊の大きさは、小さいほど均質な混合ができるが、その小ささには、氷塊の製造法、温度の制御能力、等による制約がある。また、氷塊の小ささの必要性も、水セメント比、その他の条件で異なる。实用という観点から考えて、水セメント比がきわめて低い領域以外のコンクリートに用いる小氷塊は、アイス・スライサーでスライスしたもので十分である。実験室における供試体の製作に用いている小氷塊は、アイス・スライサーで製造している。多量の小氷塊が必要な場合は、アイス・スライサーで製造した小氷塊を、氷の融点以下、でき得れば、氷の表面に疑似液層が生じない温度で保存し、使用時には破砕(極めて簡単に破砕できる)して用いればよい。水セメント比が極めて低い領域のペースト・モルタル類を製造する場合に用いる小氷塊としては、その大きさをより正確に管理する必要がある。

小氷塊とセメントと骨材を混合攪拌すれば、氷塊の表面に発生する、あるいは、していた水膜に、セメント粒子が附着する。氷塊に附着する微細粒子は、氷塊を分散させる効果をもつ。小氷塊がスライスしたもので十分であると前述した理由はここにある。微細粒子が氷塊に附着し、附着した粒子に少量の水がコーティングされ、氷塊を核とし微細粒子が附着した、全体としてある程度の粘着性をもつ小さな固まりができる。この小さな固まりとセメント・骨材が存在する状態を、固相に近いという意味で、疑似固相とよぶ。この疑似固相が、小さな動力で、氷塊・セメント・骨材を巨視的に均質に練り混ぜる上で極めて有効である。小さな氷塊を用いることによって、セメント中に、水を均質に分散させることが容易になるともいえる。

疑似固相状態では、均質な混合が極めて容易であるので、この状態は、練り混ぜの最初に短時間出現すれば、その主目的が達成しうる。従って、セメント・骨材・ミキサー等は、特別な温度管理下におかなくてもよい。

氷塊が融解し、セメント中に水が分散し、疑似固相状態から、次第に、全体的に粘度の高い混合物に移行することは、骨材の分離を防ぐ効果をもっている。固相に極めて近い状態では骨材の分離が生じ易く、骨材の分離を防ぐという点で考えれば、ある程度の粘着性を有することは重要である。

氷塊が、完全に融解するまでは、水和反応は、ほとんど起きないと考えられる。また、氷塊が融解した後も、氷塊を融解させるために、相当の熱量が必要であり、混合物全体の温度が低く、そのため、通常の水を用いたコンクリートに比較して、最初の数十分の間の水和反応は、相当に遅い。このことによって、水和反応の進行による可塑性の低下を、練り混ぜから打設終了までの間、極めて小さくすることができる。水和反応が遅れる効果で、練り混ぜから打設終了までの時間を大きくとることができるともいえる。

一方、打設終了時まで、氷塊が完全に融解せず、コンクリート中に氷塊が残存していれば、氷塊部分がコンクリートの欠陥となる。それ故、締め固めをはじめめる段階では、氷塊が完全に融解していることが望ましい。

セメントおよび骨材の温度管理を行ない、断熱性能の良い搬送方法を用いて、氷塊の融解過程を相当正確に制御することも可能である。

コンクリートの製造に氷塊を利用する技術は、従来より存在、あるいは提唱されている。筆者らの調査した範囲では、次の2つが最も関連が深い。

一つは、日本国特許公報の公告(昭53-5694)に、「建築用ボードの製造法」³⁾として公告されているものである。それは、氷の融点以下に冷却された粉末状水硬性結合材と破碎した氷または雪状の凍結状の水とを実質的に乾燥状態で混合し、この実質的に乾燥した混合物を所定の厚さに圧縮し、圧縮層を水の融点以上の温度で硬化かつ乾燥させて、水硬性結合材の建築用ボードを製造する技術である。

他の一つは、ACI Journal / December 1972のACI Committee 224の報告⁴⁾「Control of Cracking in Concrete Structures」の中の、8.5.5 Cold Concreteの項に記述されているもので、計量混練水の全部あるいは、一部を氷の小片に置換して得られる低温コンクリートである。この低温コンクリートの特徴として、マスコンクリート工事における温度差の減少、気温の高いときのスランプロスの減少、ポンパティビリティの増大、等々種々の利点をあげている。

上記2例の氷塊を用いる従来技術とここで提唱しているコンクリート製造法とは、目的が異なるので比較検討を行う必要はないが、氷塊を利用するという共通点があり、また、前者とは氷塊の利用法、後者とは低温の効果、という点で、部分的に重複しているところもあるので、あえて、従来技術に対する本法の位置づけを行っておく。本法は、氷塊の融解過程を積極的に利用することで、工業化の容易さ、取り扱いうる水セメント比の領域、必要な特性を得るための効果、のいずれかの面から考えても、従来技術のそれぞれの利点を包含しえたといえる。具体的に説明すれば、前者における温度管理方式を、格段に簡略化し、このことにより混合攪拌後の氷塊の融解によって生じる混合物の粘性が骨材分離を生じさせないという利点を生み出している。小さな氷塊を用いて疑似固相状態とし、ごく少量であっても容易な均質混合を可能にした点が後者の技術を大きく発展させたといえる。

§ 5. 本製造法によるコンクリートの特性

前節の製造法で述べたことと内容が重複することを恐れず、この小氷塊を用いたコンクリートの製造法によるコンクリートの特徴とその有効性、等を論ずる。まず、第一の特徴は、

(a) 水量とはほとんど無関係に混合が極めて容易である。混合が容易であるということは、混合に必要な動力が少なく、かつ、均質に混合しようということを意味する。水量とは無関係に混合が容易であるということは、疑似固相状態で混合し、混合物の粘性を必要最小限にしたことの効果である。

(b) 使用しうる氷塊の形状、様態の範囲は極めて広い。前述したように、セメントの微細粒子が氷塊を分散させる効果を有するため、例えば、氷塊が鎖状につながっていても混合攪拌を開始すれば、それが分離し、均質に分散する。また、氷塊表面にマクロな水膜が生じている状態でもほとんど支障がない。このことは、実用化に向けて、氷塊の製造方法およびその管理方法を考える上で重要な特性である。

(c) 骨材分離が生じにくい。この特性は、疑似固相状態で混合し、氷塊を融解させていくという製造工程によるものであり、セメント・砂・砂利とは比重の異なる混入材を用いる場合、あるいは繊維状の混入材を用いる場合には、とくに重要である。

(d) 練り混ぜから締め固め終了時までの水和反応が遅延する。コンクリート全体が低温となるために、初期水和反応が遅延するが、その具体的な時間については、練り混ぜ時のセメント・骨材の温度、配合、コンクリートの量、断熱条件、等々によって大きく異なる。この水和反応の遅延を有効に利用すれば、練り混ぜから打設までの時間を大きくすることができる。このことは、気温の高い時期に、あるいは、しばしば、交通渋滞が生じる大都市部で、レディミックスドコンクリートを生コン車で輸送するコンクリートの供給システムを用いる場合、極めて有効な特性となる。温度による水和反応が遅れるのみで、温度が上昇してくれば、通常のコンクリートの水和反応と同様な速度となる。

以上、ここで提唱する製造法による主たる特徴を列記したが、水を小さな氷塊にかえるという手順を入れることにより、コンクリートの製造過程で必要とされる多くの特性を改善しうる。

§ 6. 展望

“液体を固体に”即ち“水を氷に”かえるという発想により、水量の少ないコンクリートの製造を可能にした点は極めて重要であるが、このコンクリート製造法が従来のコンクリートに関する“知識”、“常識”に投げかける問いも極めて重要である。

「混合性能、物性的搬送性能、時間的搬送性能、打設性能、締め固め性能、仕上げ性能、等、製造過程における特性評価法は？」「いわゆる反応水量より低い水セメント比のコンクリートを含めた標準養生はなにか？」

「取り扱わなくてはならない強度、剛性の範囲が大きく広がった場合の力学特性を把握するための試験法は従来のものでよいのか？」「強度を規定するといわれていた水セメント比説あるいは空隙比説の適用範囲は？」

「数パーセントという水セメント比領域を含めた強度発現の仕組みはなにか？」「乾燥収縮、膨潤、クリープ、等の機構は？」等々である。すべては、今後の研究課題であるが、本製造法を用いれば、極めて低水セメント比のペースト、モルタル、コンクリート供試体を用いた実験が実施しうるので、従来の手法、理論に対する検討を進めていきたい。本製造法は多岐にわたる学術的展望を有しているといえる。

実用的展望としては、「各種の混和剤・混和材の利用」をこの氷塊を用いる方法と合わせて考え、この方法のより効果的な利用法の検討がある。混和剤（材）との組合せによるより有効な利用方法の中には2つの側面を有する。一つは、本法と同様に、製造過程における特性改善を目的とした混和剤（材）との組合せであり、他の一つは、製造過程における特性改善以外の目的で開発された混和剤（材）で、それを用いることによって、製造過程における特性が悪化する混和剤（材）との組合せである。また、「各種繊維、重量骨材、等の混入材を用いたコンクリートの製造法」「加圧成形のコンクリート製造法」等との複合技術の開発をあげることができる。

§ 7. まとめ

本論文で小氷塊を用いた新たなコンクリート製造法とその特性を示した。この小氷塊を用いたコンクリートの製造法は、小氷塊を用いて単に混合を容易にしただけのものでも、氷を用いて単に低温コンクリートを作製するというものでもなく、練り混ぜから締め固めまでのコンクリートの製造過程に、小氷塊とその融解を有効に利用した総合技術である。

筆者らは水にかえて氷塊を用いる発想で、コンクリートの製造過程における各種問題点が解決できるということより、むしろ、この発想で、コンクリートの製造に新たな可能性を付加したというとらえ方をしている。

このコンクリートの製造法は鈴木が発想し、各種の実験・検討は、鈴木・瀧口が協力して行ってきた。

<参考文献>

- (1) Duff A. Abrams "Design of Concrete Mixtures" A Selection of Historic American Papers on Concrete 1876-1926; SP-52, ACI, pp.309-330
- (2) 前野紀一；氷の科学；北海道大学図書刊行会；1981
- (3) 日本国特許公報 昭53-5694・建築用ボードの製造法
- (4) Report by ACI Committee 224; Control of Cracking in Concrete Structures; ACI Journal, December 1972, pp.717-753
- (5) 鈴木・瀧口 「小氷塊を用いたコンクリート製造法の発想と特性」 日本建築学会 東海支部研究報告集 第24号, 昭和61年2月
- (6) 鈴木・瀧口・堀田 「小氷塊を用いて製造するコンクリートの特性」 1986年 第8回 コンクリート工学年次講演会論文集

(注1) 水量のすくないコンクリートの優れた特性として、現在すでに確認しているものは、高強度・乾燥収縮が小さい・膨潤が小さい・初期凍結が硬化コンクリートの強度を劣化させない、等である。