小氷塊を利用した高品質コンクリート製造法[†]

鈴木 敏 郎* 滝 口 克 己*

High Quality Concrete Production Using Small Ice Pieces

by

Toshiro SUZUKI* and Katsuki TAKIGUCHI*

A new unique concrete production procedure has been developed utilizing small ice pieces. The concrete is made with small ice pieces substituted for the mixing water, at the start of mixing. The ice must completely melt prior to concrete placement, as a general rule. Various required properties of the concrete during production, including mixing efficiency, placement performance and consolidation ability are greatly improved with the use of ice.

Also presented in this paper are practical applications of this new method to ready mixed concrete for actual buildings. The data demonstrate that the workability of fresh concrete with small ice pieces is much better than that of conventional concrete.

As an application of this method using small ice pieces, a two-step hydration technique for high quality concrete products has been developed. The first step hydration is carried out with a very small amount of water which is dispersed uniformly on a macroscopic scale among the cement particles. After the relative positions of the cement particles have been fixed, water absorption and the second step hydration are carried out. By this two-step hydration technique, very high quality concrete products with little variation in quality can be easily made.

Key words : High quality concrete, Small ice pieces, Two step hydration

1 緒 言

コンクリートの練り混ぜ開始時に、練り混ぜ水の液相を液相から固相に変換する、すなわち、練り混ぜ水にかえて小氷塊を用いるコンクリート製造法の概念を、筆者らは、1986年に最初に公表した^{1),3)}。引き続いて、小氷塊を利用したコンクリート製造法に関する基本的な実験の結果を提示した^{2),4)}。これらの論文や記事における主たる主張は、練り混ぜ水にかえて小氷塊を用いることによって、コンクリートの製造過程における種々の特性を改善する可能性が大きく、この手法がコンクリートの製造に新たな可能性を付加したというものであった。

ここでは、コンクリートを、硬化した状態のみを表わす場合はセメント系硬化体と言い換えてもよい程度の広い意味で用いており、ここでいうコンクリートにはモルタルやセメントペーストも含まれる。

概念と基本的な実験の結果を公表した後、この手法をレディミクストコンクリートへ適用した結果をいくつか報告した^{5)-7),9)}。これらの報告には、寒い時期のコンクリート、および、暑い時期のコンクリートが含まれている。

また、小氷塊を用いたコンクリート製造法の一つの適用例として、安定して高品質なコンクリート製品を

作製しうる手法の概念を提示した⁸⁾。その高品質コンクリート製造法を、筆者らは、最適水量自動調整二段階水和法と称した。

本論文は、小氷塊を用いたコンクリート製造法に関し、その基本特性、実用を通して得られた結果、および、一つの適用例としての二段階水和法について述べるものである。表現をかえて、当初の論文で可能性として論じた事柄が次第に具現化してきたので、それらを本論文で報告するということもできる。具現化した事柄とは、一つは、小氷塊を利用した新手法をレディミクストコンクリートに適用し、予想を越える良好な結果を得たことであり、他の一つは、セメントの水和を二段階に分けて行わせるという新たな製造法が開発されたことである。この製造法では、第一段階の水和を水量が極めて少ない領域で行わせるために、少量の水とセメントとの巨視的均質混合が必要である。小氷塊を利用すれば、比較的簡便に巨視的均質混合を行うことができる。

本論文における論旨展開は、必ずしも詳細な分析結果に基づいたものではなく、実験的あるいは理論的な確認を省略した推論も含まれている。しかしながら、小氷塊を利用したコンクリートの製造法、および、その一つの適用例である二段階水和法には新規性があり、

[†] 原稿受理 昭和63年11月2日 Received Nov. 2, 1988

* 正 会 員 東京工業大学 東京都目黒区大岡山, Tokyo Institute of Technology, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo

本論文で提示する実験結果は、これらの新手法の有有用性を明快に説明している。本論文を草する理由と本論文の主張は、この新規性と有用性にある。

2 小氷塊を利用したコンクリート製造法

このコンクリート製造法は、コンクリートの練り混ぜ開始時に、練り混ぜ水にかえて小氷塊を用いる方法である。正確に表現すれば、セメントと水との練り混ぜを開始する時に、練り混ぜ水を小氷塊の形で供給するということになる。ただし、例えば、骨材の表面水、混和剤溶液の少量の水、等はそのまま水の形で供給してもさしつかえない場合が多い。また、小氷塊の表面の水膜も許容しうる場合がほとんどである。どのような製造法および管理法を用いるにしても、小氷塊を完全な固相状態に保つことは極めて困難である。ほとんどの場合、氷塊の表面には水膜が生じていると考えるべきである。完全な固相ではないという意味で、小氷塊の様態を筆者らは疑似固相と称している。固相に近いふるまいをするという意味で、小氷塊の表面の水膜にセメント粒子が付着した状態も疑似固相と考えられる。セメント粒子は氷塊と氷塊を分離させる働きをする。そのために、多くの場合、使用しうる小氷塊の状態は相当広範囲である。

小氷塊の大きさは、小氷塊を利用する目的、骨材やセメントの温度、ミキサーの型式や大きさ、等によって定まるもので、その範囲を一般的に限定することはできないが、通常の場合、最大粒径が5 mm 以下程度のものが効果が大いと思われる。少量の水とセメントの均質混合を主目的とする場合、あるいは、小氷塊を早く融解させたい場合などは、粒径の小さい小氷塊を用いるべきであるし、単に低温にすることのみが目的の場合には相当大きな小氷塊を用いてもよい。原則として、コンクリートの型枠への打ち込み終了時までに、小氷塊は完全に融解させなければならない。

小氷塊を利用した製造法、および、この製造法によるコンクリートは以下のような基本特性を有する。

(1) 練り混ぜ水を小氷塊すなわち疑似固相状態で供給するために、水量にはほとんど無関係に、巨視的な均質混合が容易である。

(2) 一旦巨視的に均質混合された小氷塊の融解水がセメントに供給される。セメントへの水の供給システムが、通常の水を用いた練り混ぜとは大きく異なる。具体的な資料は次章で示すが、小氷塊を利用して製造したコンクリートの練り上り時のスランプが、通常の水を用いたコンクリートのスランプに比較してはるかに大きい理由は、この水の供給システムの相違によるものと考えている。

(3) 小氷塊の融解に伴い、セメントペーストの粘度が変化する。この特性は、本論文では取り扱っていない。

いが、特殊材料混入コンクリートの製造に極めて有効である。

(4) 氷を利用するために、練り上ったコンクリートは、通常の水を使用したものに比較して低温になる。

これらの基本特性のうち、(2)を除く(1)、(3)、(4)については文献に詳述しているので参照されたい。

3 レディミクストコンクリートへの適用

この小氷塊を利用した手法の最初の実用レベルでの実験は、レディミクストコンクリート、すなわち、現場打ち込みコンクリートであった。最初の実用レベルでの実験がレディミクストコンクリートになった理由は次のとおりである。

第一の理由は、小氷塊の融解過程がフレッシュコンクリートの特性に重要な影響を与えると考えられ、融解過程は、コンクリートのボリューム、ミキサーの種類等によって異なるはずであるので、実用スケールの実験が必須であったことである。第二の理由は、水の様態を一時的に変換するという仕組みであるので、コンクリートの打ち込み終了時に氷塊が融解せずに残存していないことを確認しておけば、実用に何ら問題は生じないと考えられたことである。第三の理由は、現場打ち込みコンクリートが最も多量に使用されており、かつ、品質上の問題点も最も多いと考えられたことである。

実用を通しての特性確認実験は、すでに十数件を数えているが、ここでは、そのうちの二例を示す。第一の例は、倉庫の床に使用したコンクリートである。製造時期は1987年8月、場所は大阪府である。

水を用いた通常のコンクリートの場合に、工場出荷時のスランプが10 cm 前後になるように調合を定めている。普通ポルトランドセメント 311 kg/m³、水

Fig. 1. Slump, temperature and air content of the concrete produced by proposed method and by conventional method.

Fig. 2. Compressive strength of the concrete produced by proposed method and by conventional method.

Fig. 4. Compressive strength of the concrete produced by proposed method and by conventional method.

174 kg/m³, 2.5 mm 海砂 791 kg/m³, 20 mm 碎石 1023 kg/m³, AE 減水剤 0.778 kg/m³ である。水セメント比 56 wt%, 細骨材率 44.3 vol% である。同一調合で、通常の水を用いたコンクリートと、加える水を小氷塊にかえたコンクリートの二種類のコンクリートを製造している。小氷塊としては、クラッシュした氷で最大粒径約 5 mm のものを用いている。ミキサーは、2.5 m³ 可変速二軸強制練りタイプである。小氷塊を用いた場合は、一回に 2 m³ 製造し、練り混ぜ時間は 2 分とした。

同一調合の通常のコンクリートおよび小氷塊を利用したコンクリートのスランプ値、コンクリート温度、空気量を Fig. 1 に示す。図中、枠で囲んだ '87/8/7/Osaka は、コンクリートにつけた名称であり、製

造年月日と場所を表わしている。コンクリートの名称に関しては、Fig. 2, 3, 4 においても同様である。小氷塊を利用したコンクリートは通常のコンクリートに比較して、はるかに良好な特性を有しているといえる。Fig. 1 に示した二種類のコンクリートの圧縮強度を示したものが Fig. 2 である。二種類のコンクリートの圧縮強度はほぼ同一である。

第二の例は、1988 年 7 月に千葉県で製造した配送センターの床用のコンクリートである。通常の水を用いたコンクリートの場合に、工場出荷時のスランプが 10 cm 前後になるように調合を定めている。普通ポルトランドセメント 305 kg/m³, 水 152 kg/m³, 5 mm 陸砂 839 kg/m³, 25 mm 陸砂利 (50 wt%)・20 mm 碎石 (50 wt%) 1076 kg/m³, AE 減水剤 1.32 kg/m³ である。水セメント比 50 wt%, 細骨材率 44.1 vol% である。小氷塊としては、5 mm 以下のクラッシュした氷を用いている。ミキサーは 3 m³ 可変速二軸強制練りタイプである。小氷塊を用いたコンクリートは 1 バッチ 2 m³ とし、練り混ぜ時間は 2 分 30 秒とした。

スランプ等を Fig. 3 に示す。Fig. 3 には、トラックアジテーターで運搬した後の、現場における、荷卸し時のスランプとポンプ圧送後のスランプが示されている。通常のコンクリート、小氷塊を利用したコンクリートともに、荷卸し時とポンプ圧送後のスランプはほとんど同一であった。Fig. 3 に示した二種類のコンクリートの圧縮強度を Fig. 4 に示す。圧縮強度はほぼ同一であるが、スランプは小氷塊を利用したコンクリートの方が通常のコンクリートに比較してはるかに大きい。

Fig. 1 のように、練り上りから時間の経過とともにスランプ値が大きくなっていくようなコンクリートを製造しうることが、小氷塊を利用する方法の一つの大

Fig. 3. Slump, temperature and air content of the concrete produced by proposed method and by conventional method.

きな特色であるが、この特性は練り混ぜ時間を調整することによって付与することができる。このスランプ値が大きくなっていく現象の理由は明確には把握していないが、少なくとも、練り上り時に融解していない小氷塊が残存しているためではない。このことは、最大粒径が1 mm以下のスライスした氷を用いた他の実用レベルでの実験、および、実験室における実験によって確認されている。他の実験に関しては、文献に相当詳細な資料を提示しているのでそれを参照されたい。

Fig. 1, 3に示した通常のコンクリートと小氷塊を利用したコンクリートとのスランプの差異は、単にコンクリート温度の差で説明しうる範囲ではない。Fig. 1のコンクリートにおいては、小氷塊を用いたものと通常のものとの空気量はほぼ同じになっている。Fig. 3のコンクリートにおいては、通常のものの方が小氷塊を用いたものより空気量が多くなっている。コンクリート温度が高くなれば空気量が減少するという文献¹⁰⁾の記述とは異なる結果となっている。温度および空気量の測定値、および、文献に示されているコンクリート温度とスランプとの関係をもとに、Fig. 1およびFig.

3のコンクリートのスランプの差異をコンクリート温度の差異によるものと考えたとすれば、それは、せいぜい2～4 cm程度のスランプの差異にしかない。Fig. 1においては最大で約8 cm、Fig. 3においては約10 cmのスランプの差となっている。この差異は、主として、前章の基本特性の(2)に示した水の供給システムの差異によるものと考えている。

これまでの実用レベルでの実験で用いたミキサーは、可変速二軸強制練りタイプの他に、傾胴タイプ、強制練りパンタイプ、強制練りパンタイプ二槽式の四種類であるが、ミキサーによる本質的な差異はなかった。

Fig. 1, 3に示した程度にフレッシュコンクリートの特性を改善することが可能であるので、小氷塊を利用した製造法により、従来よりはるかに高品質な現場打ち込みコンクリートを製造することができる。

4 二段階水和法

小氷塊を利用したコンクリートの製造法の開発研究をはじめた当初から、極めて高品質の、特に引張り強度の大きなセメント系硬化体を安定して作製しうる手法の開発が目標の一つであった。一方、小氷塊を利用して練り混ぜれば、水セメント比数パーセントのコン

Fig. 5. Production procedure of cement paste and mortar specimens.

クリートであっても、比較的容易に巨視的均質混合が行えることが早い時期に確認されていた^{2),4)}。数多くの試行の末に、次のようなセメント系硬化体の製造プロセスに到達した。

まず、極めて少量の水をセメント中に均質に分散させたコンクリートを製造する。そのコンクリートを何らかの方法で密実に締め固め成形する。締め固め成形方法として最も簡便なものはいわゆる加圧成形である。水が十分に少量であれば、非排水で加圧成形ができる。成形体で第一次の水和を起こさせ、セメント粒子間の相対的位置関係を固定させる。第一次水和によってセメント粒子間の位置関係を固定させた硬化体に水分を与えて吸水させる。水分を与えるときに、硬化体の形が保持され、セメント粒子の相対的位置が大きく変化しないことが条件となる。水分を与える最も簡単な方法は、硬化体を水中に入れることである。吸水による水と未水とセメントで第二次水和を生じさせる。

実験室で作製したセメントペースト硬化体およびモルタルの具体的な製造プロセスを Fig. 5 に示す。水セメント比数パーセントの領域でも練り混ぜを行うので、この場合は、0.6 mm のふるいを通した相当小さな小水塊を用いている。小さな小水塊を使用しているので、粗く混合するまでのプロセスは -10°C の低温室で行っている。加圧成形した供試体は $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ の直方体であるが、加圧面は $4 \times 16 \text{ cm}$ の面である。直方体の稜の部分から排水できるように、型枠には稜に沿って 0.2 mm 幅の排水溝が設けてある。

最大加圧力 24.5 MPa (250 kg/cm^2) で加圧成形したセメントペースト硬化体の曲げ引張り強度に関する実験結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 の横軸は、最初の調合水セメント比である。水セメント比 18 wt% のペーストでは成形時に排水が認められた。最大加圧力

Fig. 6. Modulus of rupture of the cement paste specimen formed under maximum pressure of 24.5 MPa.

Fig. 7. Compressive strength of the cement paste specimen formed under maximum pressure of 24.5 MPa.

24.5 MPa で加圧成形する場合の最大含水量は水セメント比で 16~18 wt% である。Fig. 6 において、白丸で示した点は、加圧成形後 28 日間密封養生した供試体の実験結果であり、黒丸で示した点は、第一次水和を生じさせ、成形後 1 日で水中に入れ、吸水と第二次水和を起こさせた供試体の実験結果である。バラツキはあるものの、第一次、第二次の二段階水和を行わせた供試体の方が、はるかに高強度で、しかもその強度は最初の水セメント比とほとんど無関係である。

最大加圧力 24.5 MPa で加圧成形したセメントペースト硬化体の圧縮強度を示したものが Fig. 7 である。二段階水和を行わせることにより、強度は最初の水セメント比と無関係になり、かつ、高強度になる。強度試験は、JIS/R5201 に準じて行っている。

Fig. 8 は最大加圧力 24.5 MPa で加圧成形したセメントペースト硬化体の比重の変化を示したものである。水セメント比 4, 8, 12 wt% のセメントペーストで、加圧成形後、密封養生を行ったもの、および、1 日後水中に入れて吸水と第二次水和を行わせたものの結果

Fig. 8. Density of the cement paste specimen formed under maximum pressure of 24.5 MPa.

である。いずれの硬化体も、成形後7日以降は、105°Cの真空槽で乾燥させている。この図から明らかに、水中に入れたセメントペースト硬化体は吸水と第二次水和を行っている。

比重測定用の供試体も強度試験用のものと同一寸法で4×4×16 cmの直方体である。吸水に関して寸法効果がどの程度であるかの実験は行っていないが、以下の条件下では、十分な時間をかければ、硬化体の大きさによらず、吸水は行われると考えられる。

- (1) 第一次水和に用いた水量が、最大含水量以下である。
- (2) 第一次水和に用いた水量が、セメントの全量が水和するには不十分であり、未水和セメントが残っている。
- (3) 周辺から十分な水が供給される。

最大加圧力 98.0 MPa (1000 kg/cm²) で加圧成形したセメントペースト硬化体の曲げ引張り強度の実験結果を示したものが Fig. 9 である。この場合は、水セメント比 14 wt% 以上で成形時に排水が認められた。最大含水量は 12~14 wt% であると考えられる。二段階水和を行わせた硬化体の強度は黒丸で示しているが、成形時の水量とは無関係で高強度になっている。

Fig. 9 において、白丸で示す第一次水和のみをさせたセメントペースト硬化体の曲げ引張り強度は、排水が認められた水セメント比 14 wt% 以上のもので急激に低下している。この理由として考えられるのは、排水の際に生じる微小欠陥である。二段階水和を行わせた硬化体の曲げ引張り強度は、成形時に排水したもののでもそれほど低下していない。加圧成形時に排水のために生じた微小欠陥が第二次水和によって補修されたためだと考えている。微小欠陥の周辺に未水和セメントが残っており、そこに新たに水が供給されれば、新たな水和が起こり、それが程度微小欠陥を補修

Fig. 9. Modulus of rupture of the cement paste specimen formed under maximum pressure of 98.0 MPa.

Fig. 10. Compressive strength of the cement paste specimen formed under maximum pressure of 98.0 MPa.

すると考えられる。

Fig. 10 は、最大加圧力 98.0 MPa で加圧成形したセメントペースト硬化体の圧縮強度を示している。二段階水和を行わせたものは成形時の水セメント比に無関係に高強度になっている。圧縮強度に関しては、第一次水和のみを行わせた硬化体においても、排水による強度の低下はほとんど現われていない。圧縮強度の方が曲げ引張り強度に比較して微小欠陥の影響を受けにくいのであろう。

モルタルも、セメントペースト硬化体と同様な性状を示している。

本章で提示した二段階水和法は、水量とはほとんど無関係に、水とセメントの均質混合を可能にした小水塊を利用したコンクリート製造法の適用例であり、高品質コンクリートを安定して製造しうる有力な手法であるといえる。

5 結 言

小水塊を利用したコンクリート製造法に関し、最も一般的なレディミクストコンクリートへこの手法を適用した場合の有効性を示し、更に、この手法を基に開発したセメントの水和を二段階で行わせる新たなコンクリート製造法を提示した。小水塊を利用したコンクリート製造法の有用性を主張するに十分な資料を示し得たと考えている。

論を閉じるに際し、関係各位に謝意を表したい。3章で取り扱った実用を通しての実験は、青柳司博士をはじめとする(株)日建設計の方々、青木俊夫氏をはじめとする東急建設(株)の方々の御協力のおかげで実施しえたものであり、4章の実験結果は、木下卓也君をはじめとする東工大鈴木研の学生諸君および野田晃央君をはじめとする東工大滝口研の学生諸君の汗の結晶であるといえる。心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 鈴木敏郎, 滝口克己, 日本建築学会東海支部研究報告, 24, 41 (1986).
- 2) 鈴木敏郎, 滝口克己, 日経アーキテクチャ, 263, 80 (1986).
- 3) T. Suzuki and K. Takiguchi, Trans. JCI, 8, 81 (1986).
- 4) T. Suzuki, K. Takiguchi and H. Hotta, Trans. JCI, 8, 89 (1986).
- 5) 鈴木敏郎, 滝口克己, 日経アーキテクチャ, 286, 166 (1987).
- 6) T. Suzuki and K. Takiguchi, IABSE Report, 55, 339 (1987).
- 7) 鈴木敏郎, 滝口克己, ベース設計資料, 36, 8 (1988).
- 8) 鈴木敏郎, 滝口克己, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 28<構造系>, 5 (1988).
- 9) T. Suzuki, K. Takiguchi and S. Miyashita, IABSE 13th Congress Report, 57 (1988).
- 10) 岡田 清, 六車 照, “コンクリート工学ハンドブック”, p. 1217 (1981) 朝倉書店.
- 11) 土岐高史, コンクリート・ジャーナル, 4, 6, 31 (1966).

書 評

“衝 撃 工 学”

林 卓夫, 田中吉之助 (編著)

(1988年, 日刊工業新聞社発行, 14.5×21 cm, 373 ページ, 5000円)

本書は衝撃に関する各方面の研究者の共同執筆によるもので, 衝撃負荷を受ける材料や構造物の変形, 破壊の挙動, 衝撃現象の計測や応用など高速衝撃に関するさまざまな問題が解説されている。

本書の第6章までの前半では, 衝撃に関する基礎的事項がやさしく説明されている。第1章は緒論で, 衝撃に関する予備的知識や研究の発展過程が述べられている。第2章では, 弾性体中の応力波の伝ばに関する基本的事項が解説されている。第3章では, 高速変形する材料の応力-ひずみ関係に及ぼすひずみ速度の影響や, それらの間の関係を表す各種の構成式が解説されている。これらの構成式を用いて, 第4章では, 非弾性体中の粘塑性波の解析手法や伝ばの様子, 第5章では, 簡単な構造部材の衝撃による変形の解析手法や変形の様子が解説されている。第6章では, 衝撃を受けた構造部材の破壊挙動や動的破壊力学パラメータの解析法等について解説されている。

第7章以下の後半では, いろいろの衝撃問題が各論的に解説されている。第7章では, 衝撃負荷装置, 材料の力学的特性や衝撃現象の計測法, 第8章では, 超高速衝撃の場合の負荷装置, 計測法や材料の挙動, 第9章では, 衝撃問題の解析に用いられる各種数値計算法や電子計算機の計算コードのそれぞれについて解説されている。第10章では, 金属材料, 複合材料, セラミックおよびコンクリートの衝撃挙動の例, 第11章では, 液圧成形, 放電成形および爆発圧着の衝撃を応用した塑性加工法の例, 第12章では, 自動車の衝突, 核燃料輸送容器の落下衝撃, 天体に見られるクレータの形成など衝突や衝撃による破壊, 破損の実例がそれぞれ示されている。

以上のように本書の前半では衝撃に関する基礎的事項が系統的に解説されており, 一般の読者にとっては基礎知識の習得や整理に有用であると思われる。またその内容や分量から見て, 大学院における教科書としても好適であると思われる。本書の後半は各論的に述べられているので, 必要な部分のみを読むことができる。しかし本書の特色は広い分野の衝撃問題が易しく簡潔に解説されていることであって, 通読もさして困難でなく, それによって衝撃に関して広い知見や有益な示唆が得られることが多いと思われる。このように, 本書は他にあまり類例のない入門書性格が大きい衝撃問題に関する著書である。

(福井大学工学部 若杉 昇八)