

## 高流動コンクリートの強度・耐凍害性に及ぼす蒸気養生条件の影響

芳野友則\*1 鮎田耕一\*2 山川勉\*3 須藤裕司\*4

\*1 北見工業大学 大学院工学研究科土木開発工学専攻 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165)

\*2 北見工業大学 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165)

\*3 信越化学工業株式会社 合成技術研究所研究部 (〒942-8601 新潟県中頸城郡頸城村大字西福島 28-1)

\*4 北見工業大学 大学院工学研究科物質工学専攻 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165)

要旨：高流動コンクリートは締固め作業を必要としないため、工場製品に適用できれば作業環境なども改善でき、欠陥の少ない一定の品質のコンクリートを安定して製造できる利点があるが、凝結遅延性があるため養生時間が長くなる欠点がある。そこで本研究は、凝結促進剤を添加した高流動コンクリートの圧縮強度と耐凍害性に及ぼす蒸気養生条件の影響について検討した。

その結果、昇温速度を 20 °C/h とするとひび割れが発生し所要の圧縮強度が得られないが、凝結促進剤を添加することでひび割れを抑制し圧縮強度の増進が図れること、昇温速度を 10 °C/h とすることで、凝結促進剤無添加でも所要の圧縮強度と耐凍害性が得られることなどを明らかにした。

キーワード：高流動コンクリート、蒸気養生、凝結促進剤、圧縮強度、耐凍害性、製品

## 1. はじめに

一般にコンクリート製品は、部材の厚さが薄く、鉄筋などが密に配筋されているものが多く、慎重な振動締固め作業が要求される。しかし、この作業には熟練を要し適切に行われなければ材料分離などを誘発し、均一なコンクリートを安定して製造することが困難になるほか、その際発生する騒音などが問題となることがある。自己充てん性に優れた高流動コンクリートは、締固め作業を必要としないため、工場製品に適用することができれば、材料分離や騒音などの問題を改善できるほか、型枠損傷の低減、製造設備の耐久化、省力化も期待でき、欠陥の少ない一定の品質のコンクリートを安定して製造することが可能であると思われる。また、コンクリート工場では製品の早期出荷を目的とし蒸気養生が広く行われており、高流動コンクリートを製品に適用する場合も適切な蒸気養生条件を選定す

る必要がある。高流動コンクリートは増粘剤と高性能減水剤の使用により凝結が遅延するという欠点<sup>1,2)</sup>があるので、筆者らはこれまでに蒸気養生下での硬化促進を目的として凝結促進剤の添加による改善を試みてきた<sup>3)</sup>。

本研究では、凝結促進剤の添加量および蒸気養生条件が高流動コンクリートの圧縮強度、耐凍害性に及ぼす影響を蒸気養生中のひび割れ発生面から考察した。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料および配合

Table 1 に使用材料、Table 2 にコンクリートの配合を示す。高性能減水剤、AE 剤の添加量はフレッシュコンクリートのスランプフローが 60 ± 5cm、空気量が 4.5 ± 0.5% となるように設定した。

Table 1 Materials

Cement	High-early-strength portland cement (Specific surface area: 4460cm <sup>2</sup> /g, Density: 3.14g/cm <sup>3</sup> )
Coarse Agg.	River gravel (Density: 2.65g/cm <sup>3</sup> , Absorption: 1.46%, F.M.: 6.99, Maximum size: 25mm)
Fine Agg.	River sand (Density: 2.65g/cm <sup>3</sup> , Absorption: 1.87%, F.M.: 2.65)
Admixtures	Viscosity agent (Water-soluble cellulose ether) High-range water-reducing agent (High-condensation triazine compound) Air-entraining agent (Natural resin) Accelerator (Ca(NO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> , 30% water solution)

Table 2 Mix proportions

W/C (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m <sup>3</sup> )							
		W	C	S	G	* 1	* 2	* 3	* 4
40	45	175	438	765	935	0.3	C×1.7%	C×0.05%	0
							C×2.3%		C×1.0%
							C×2.8%		C×2.0%
							C×3.3%		C×3.0%

\* 1 : Viscosity agent

\* 2 : High-range water-reducing agent

\* 3 : Air-entraining agent

\* 4 : Accelerator

Table 3 Conditions of steam-curing

Pre-Curing		Rate of curing Temp. rise	Isothermal heating	
Temp.	Time		Max. temp.	Hold time
20°C	0h	10°C/h	65°C	1h45min
	0, 1h	20°C/h		4h

## 2.2 練混ぜ

コンクリートの練混ぜは、強制練りミキサ(容量 50L)を用いて行った。粗骨材、細骨材、セメント、増粘剤を先に空練りし、練混ぜ水、AE 剤、凝結促進剤を加えて練り混ぜ、ミキサを一時停止後、高性能減水剤を添加してさらに練り混ぜた。

## 2.3 蒸気養生

Table 3 に蒸気養生条件を示す。前養生は供試体打込み後、恒温恒湿室(室温 20°C、相対湿度 90%)で行い、その後、供試体を蒸気養生槽に搬入した。蒸気養生の昇温速度は 10、20°C/h の 2 種類とし、温度上昇開始時から等温養生終了時までの時間はいずれの場合も 6 時間 15 分で一定とした。等温養生終了後は供試体をそのまま蒸気養生槽内で徐冷し、蒸気養生開始から約 24 時間後に脱型した。脱型後、供試体は所定の試験材齢まで標準養生(20°C 水中)を行った。

## 2.4 試験項目

### (1) 凝結時間

ASTM C 403 「Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance」に準拠し、コンクリートの凝結始発・終結時間を求めた。

### (2) 圧縮強度

土木学会コンクリート委員会高流動コンクリート研究小委員会「自己充填型の高流動コンクリートの試験方法(案)強度試験用供試体の作り方」<sup>4)</sup>に準拠して、円柱供試体を作製し、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠し、材齢 1、3、7、14、28 日の圧縮強度を測定した。なお、円柱供試体の寸法はコン

クリート製品の品質管理にも使われている  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  とした。

### (3) 耐凍害性

土木学会規準 JSCE-G501「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠し、材齢 14 日まで水中養生を行った後、水中における急速凍結融解試験を 300 サイクルまで行い、耐凍害性を評価した。また、ASTM C 666 「Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing」に準拠して、凍結融解 300 サイクル終了後の耐久性指数を求めた。

### (4) ひび割れ面積

10 × 10 × 40cm の角柱供試体から材齢 28 日以降にコンクリートカッターで供試体の長手方向の両端から 10cm の位置で 10 × 10 × 3cm の試料を 2 個切り出し、10 × 10cm の測定面におけるひび割れの長さ、幅を顕微鏡で測定し、その積をひび割れ面積とした。なお、供試体の両端から 10cm の位置で切り出したのは、温度が供試体に及ぼす影響が供試体全体の平均を表しているであろうとの判断からである。

## 3. 実験結果及び考察

Table 4 に実験結果を示す。

### 3.1 前養生と凝結促進剤が圧縮強度に及ぼす影響

Fig. 1 に凝結促進剤無添加、昇温速度 20°C/h とした場合の前養生時間と材齢 1、28 日の圧縮強度の関係を、Fig. 2 に前養生時間と 100cm<sup>2</sup> あたりのひび割れ面積の関係を示す。

Table 4 Results of experiments

Rate of curing Temp. rise (°C/h)	Amount of accelerator (C × %)	Pre-curing time (h)	Concrete temp. (°C)	Compressive strength (N/mm <sup>2</sup> )					Crack area (mm <sup>2</sup> )	Loss of mass (%)	D.F.
				Age (days)							
				1	3	7	14	28			
10	none	none	21.0	32.2	36.3	39.4	44.9	46.3	0.14	-0.29	102
	1.0		22.0	31.3	35.2	36.5	42.4	42.8	-	-	-
	2.0		22.0	35.2	35.9	39.7	41.7	46.0	-	-	-
	3.0		22.0	39.8	42.1	45.3	46.5	48.0	0.04	0.77	99
20	none	none	22.5	25.6	25.0	28.7	31.9	31.6	44.72	-	-
		1	22.5	27.8	26.0	30.9	34.1	37.3	10.39	-	-
	3.0	none	22.0	27.3	27.5	30.9	34.8	36.7	7.17	-	-
		1	21.5	29.4	35.7	38.2	42.4	44.1	2.19	0.25	99

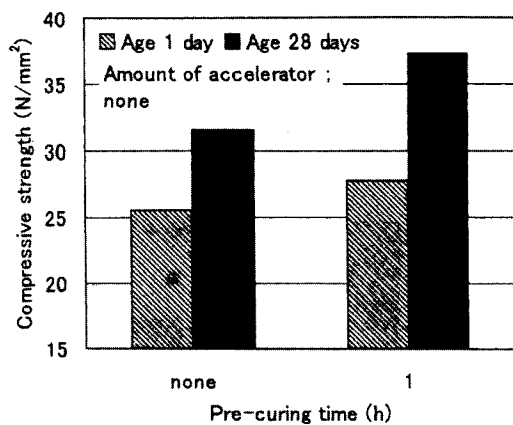


Fig. 1 Relationship between compressive strength and pre-curing time (Rate of curing temp. rise ; 20°C/h)

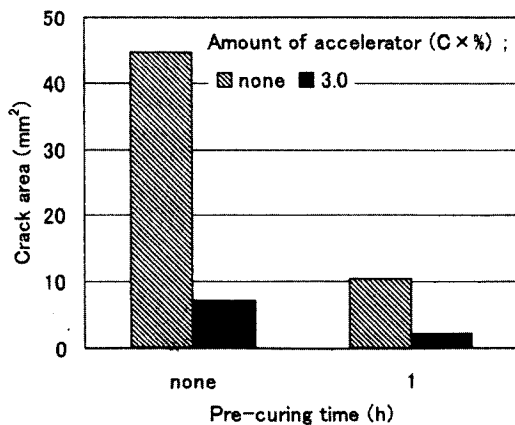


Fig. 2 Relationship between crack area and pre-curing time (Rate of curing temp. rise ; 20°C/h)

Fig. 1によれば、前養生を行わなかった場合の圧縮強度は、材齢1日で25N/mm<sup>2</sup>程度、材齢28日で30N/mm<sup>2</sup>程度になった。また、前養生を1時間行うことで、圧縮強度は高くなり、材齢1日で28N/mm<sup>2</sup>程度、材齢28日で37N/mm<sup>2</sup>程度になった。Fig. 2によれば、凝結促

進剤無添加で前養生を行わなかった場合、100cm<sup>2</sup>あたり約45mm<sup>2</sup>のひび割れが発生しており、前養生を1時間行うことにより約10mm<sup>2</sup>まで減少した。このひび割れは、幅0.3～1.0mm程度であり、打込み面上部の粗骨材との界面に多く発生し、ペースト部分に連続しているものも見られた。これらのことから、前養生を行わなかった場合の圧縮強度が低い原因の1つとして、ひび割れの発生が考えられる。しかし、前養生を1時間行ってもひび割れが発生しており、ひび割れ幅0.2mm以上のもも多くみられ、ひび割れの発生を抑制するには不十分であった。

Fig. 3に昇温速度20°C/hとした場合の凝結促進剤添加の有無と前養生時間が材齢1日の圧縮強度に及ぼす影響を、Fig. 4に同じく材齢28日の圧縮強度に及ぼす影響を示す。

Fig. 3、4によれば、材齢1、28日の圧縮強度は、凝結促進剤の添加量3.0(C×%)の場合に、凝結促進剤無添加の場合と比べ3～6N/mm<sup>2</sup>程度高くなっており、前養生を1時間行った場合、材齢28日で40N/mm<sup>2</sup>以上の高い圧縮強度が得られた。Fig. 2によれば、100cm<sup>2</sup>あたりのひび割れ面積は、凝結促進剤の添加量3.0(C×%)の場合に、凝結促進剤無添加の場合と比べかなり少なくなっており、前養生を行わない場合で約7mm<sup>2</sup>、前養生を1時間行った場合で約2mm<sup>2</sup>であった。また、ひび割れ幅も前養生を1時間行った場合、ほとんどが0.1mm以下であった。ひび割れは、凝結促進剤を添加し凝結を促進させることにより減少している。このことから、ひび割れは増粘剤と高性能減水剤による凝結遅延のため、蒸気養生過程で発生しているものと思われる。つまり、蒸気養生過程でコンクリート中の気泡や水の膨張により発生した応力のため、ひび割れが発生したと思われる。したがって、凝結促進剤を用いることによりひび割れの発生を抑制し圧縮強度の増進が図られると思われる。本実験の範囲では、凝結促進剤の添加量3.0(C×%)、前養生を1時間行うことで高い圧縮強度が得られた。

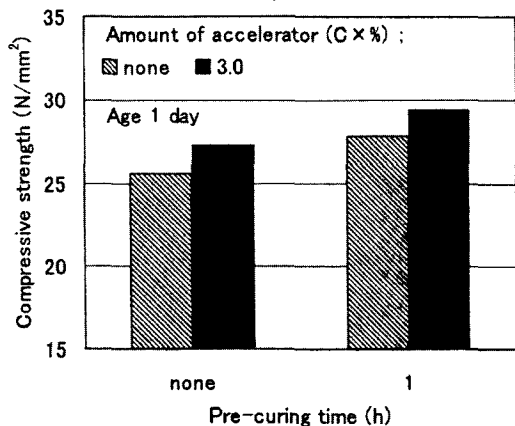


Fig. 3 Relationship between compressive strength and pre-curing time (Rate of curing temp. rise ; 20°C/h)

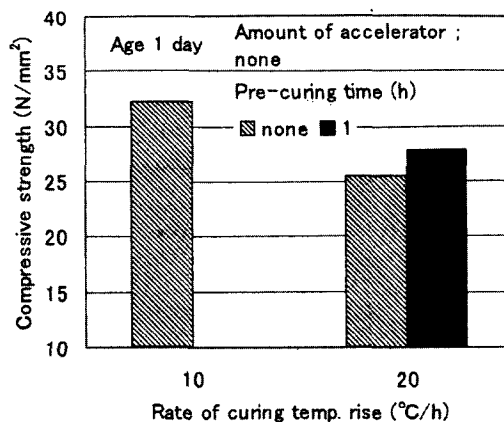


Fig. 5 Relationship between compressive strength and rate of curing temp. rise (Age 1 day)

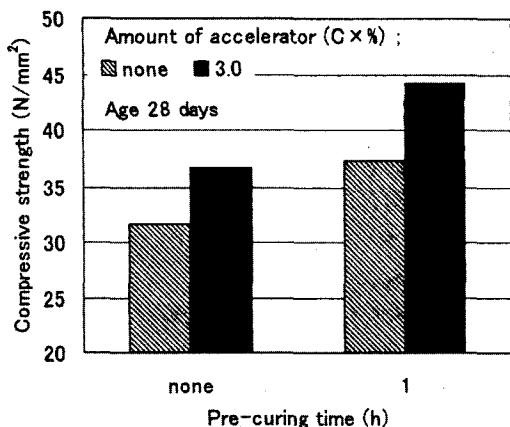


Fig. 4 Relationship between compressive strength and pre-curing time (Rate of curing temp. rise ; 20°C/h)

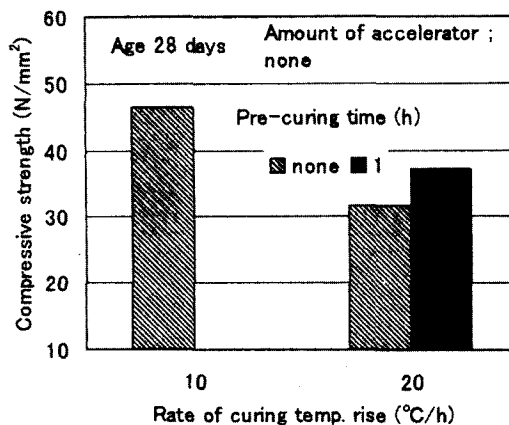


Fig. 6 Relationship between compressive strength and rate of curing temp. rise

一般にコンクリート製品は、蒸気養生を行った場合の圧縮強度は、材齢 14 日を基準としており、道路用製品などの一般的な製品で 32 ~ 42N/mm<sup>2</sup> 程度必要とされている<sup>5)</sup>。Table 4 から明らかなように、凝結促進剤の添加量 3.0 (C x %)、昇温速度 20 °C/h、前養生 1 時間行った場合、材齢 14 日の圧縮強度は、40N/mm<sup>2</sup> 以上になり製品に必要な強度は十分に得られている。また、耐久性指数も 100 程度であり、耐凍害性は極めて良好になった。しかし、この場合もひび割れは、100cm<sup>2</sup> あたり約 2mm<sup>2</sup> 発生しており、ひび割れを完全に抑制することはできなかった。

3.2 昇温速度と凝結促進剤が圧縮強度に及ぼす影響

Fig. 5、6 に凝結促進剤無添加の場合の、昇温速度と材齢 1、28 日の圧縮強度の関係をそれぞれ示す。

Fig. 5、6 によれば、材齢 1、28 日の圧縮強度は、昇温速度 10 °C/h とした場合、前養生を行わなくても、20 °C/h で前養生を 1 時間行った場合と比べて高くなって

おり、材齢 1 日で 32N/mm<sup>2</sup> 程度、材齢 28 日で 46N/mm<sup>2</sup> 程度の圧縮強度が得られた。また、Table 4 によれば、昇温速度 10 °C/h とした場合には、ひび割れはほとんど発生していない。

Table 4 によれば、凝結促進剤無添加、昇温速度 10 °C/h とした場合、材齢 14 日の圧縮強度は 40N/mm<sup>2</sup> 以上になり、所要の強度が得られている。また、耐久性指数も 100 程度であり耐凍害性は極めて良好になった。これらのことから、昇温速度を 10 °C/h と緩やかにすることにより、ひび割れの発生を完全に抑制することができ、凝結促進剤無添加でも材齢 1 日から材齢 28 日まで高い圧縮強度が得られることが明らかになった。

Table 5 に凝結時間の試験結果、Fig. 7 に凝結促進剤の添加量と凝結始発・終結時間の関係を、Fig. 8 に昇温速度 10 °C/h とした場合の凝結促進剤の添加量と材齢 1、14、28 日の圧縮強度の関係を示す。

Table 5 Setting time of concrete

Amount of accelerator (C × %)	Initial setting time (h-min)	Final setting time (h-min)
none	5-30	7-35
1.0	6-05	8-25
2.0	5-30	7-10
3.0	5-20	6-55

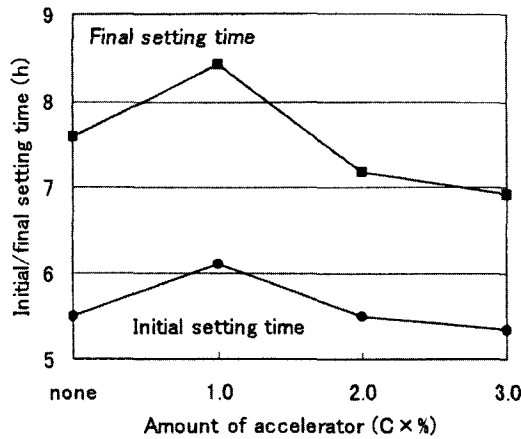


Fig. 7 Relationship between initial/final setting time and amount of accelerator

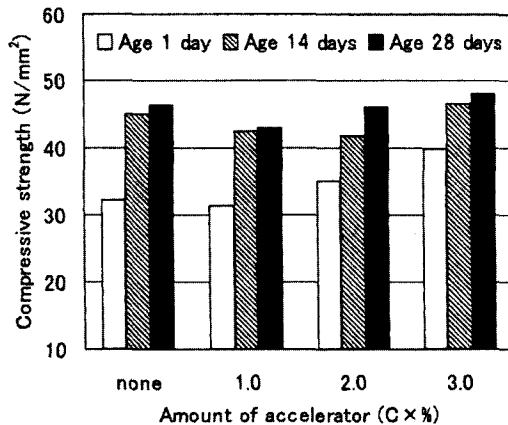


Fig. 8 Relationship between compressive strength and amount of accelerator (Pre-curing time ; none, Rate of curing temp. rise ; 10°C/h)

Fig. 7によれば、凝結始発時間は凝結促進剤を1.0 (C × %) 添加した場合に無添加の場合と比べ改善できなかったが、2.0、3.0 (C × %) 添加した場合はほぼ同程度になった。凝結終結時間は凝結促進剤を2.0、3.0 (C × %) 添加した場合に無添加と比べ20、40分程度それぞれ早くなった。凝結促進剤を1.0 (C × %) 添加しても無添加の場合に比べて凝結時間が短縮されなかったのは、凝結促進剤の効果よりも高性能減水剤の影響が大きかったためと考えられる<sup>2)</sup>。Fig. 8によれば、材齢1日の圧縮強度は凝結促進剤を2.0、3.0 (C × %) 添加

した場合に、無添加の場合と比べ高くなっており2.0 (C × %) の場合で35N/mm<sup>2</sup>、3.0 (C × %) の場合で40N/mm<sup>2</sup> 程度の圧縮強度が得られた。これは、凝結時間が短くなった効果が初期強度発現に現れたものと思われる。凝結促進剤の添加により初期強度は高くなったものの、コンクリート製品に必要とされている脱型時強度は5 ~ 15N/mm<sup>2</sup> 程度であり<sup>6,7)</sup>、凝結促進剤無添加の場合においても十分にこの強度レベルを満たしている。材齢14、28日の圧縮強度は、凝結促進剤を3.0 (C × %) 添加した場合に若干高くなったがほぼ同程度であり、材齢14、28日の圧縮強度に及ばず凝結促進剤の影響は、昇温速度10°C/hの場合では、ほとんどみられなかった。しかし、昇温速度20°C/hの場合には、凝結促進剤の使用による凝結時間の短縮がひび割れを減少させている。このことから、昇温速度が速い場合の凝結促進剤の使用は、ひび割れ発生の抑制に効果があるといえる。

以上のことから、昇温速度10°C/hの場合、凝結促進剤無添加でもひび割れを抑制し製品に必要な圧縮強度と耐凍害性が得られることが明らかになった。しかし、温度上昇期間が長くなるため、蒸気養生時間短縮が困難であるので、この解決がこれからの課題である。

#### 4. まとめ

高流動コンクリートを工場製品に適用することを目的とし、蒸気養生を行った高流動コンクリートの圧縮強度と耐凍害性をひび割れの発生の面から検討した結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 昇温速度20°C/hで前養生を行わなかった場合、ひび割れの発生が多く見られ、圧縮強度が低くなった。
- (2) 昇温速度20°C/hの場合、前養生を行い、凝結促進剤を3.0 (C × %) 添加することにより、ひび割れの発生を抑制し製品に必要な強度、耐凍害性が得られた。
- (3) 昇温速度を10°C/hとすることで、ひび割れの発生を完全に抑制し、凝結促進剤無添加の場合においても製品に必要な強度、耐凍害性が得られた。しかし、蒸気養生時間の短縮がこれからの検討課題である。

#### 参考文献：

- 1) 関博：海洋構造物における水中コンクリート、コンクリート工学、Vol.28, No.3, pp.10-17 (1990)
- 2) 庄司芳之、竹下治之、佐原晴也：高流動コンクリートの硬化後の品質に及ぼす蒸気養生の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16, No.1, pp.195-200 (1994)
- 3) 古西力ほか：凝結促進剤を用いた高流動コンクリートの製品への適用について、セメント・コンクリート論文集、No.52, pp.578-583 (1998)
- 4) 土木学会：コンクリートライブラリー 93、高流動コンクリート施工指針 (1998)

- 5) 日本コンクリート工学協会編：コンクリート便覧 [ 第二版 ]、技報堂出版 (1996)
- 6) 神田衛、中山紀男：コンクリートの製造と管理、共立出版 (1996)
- 7) 松永嘉久ほか：超早強混和材の特性とコンクリート製品への適用、セメント・コンクリート論文集、No.52, pp.412-417 (1998)

## EFFECT OF STEAM-CURING CONDITIONS ON COMPRESSIVE STRENGTH AND FROST RESISTANCE OF HIGHLY WORKABLE CONCRETE

Tomonori YOSHINO<sup>\*1</sup>, Koichi AYUTA<sup>\*2</sup>, Tsutomu YAMAKAWA<sup>\*3</sup> and Yuhji SUDOH<sup>\*4</sup>

\*1 KITAMI INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Course of Civil Engineering, Graduate School of Engineering (165 Koen-cho, Kitami, Hokkaido 090-8507, Japan)

\*2 KITAMI INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering (165 Koen-cho, Kitami, Hokkaido 090-8507, Japan)

\*3 SHIN-ETSU CHEMICAL CO., LTD, .Research Division, Specialty Chemicals Research Center (28-1 Nishihukushima, Kubiki, Niigata 942-8601, Japan)

\*4 KITAMI INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Course of Material Engineering, Graduate School of Engineering (165 Koen-cho, Kitami, Hokkaido 090-8507, Japan)

**ABSTRACT:** The noise and material separation associated with vibration compaction sometimes cause problems at factories producing precast concrete products. Since highly workable concrete exhibits high flowability and resistance to segregation, it has good self-compactability and so compaction is unnecessary. Thus, if highly workable concrete could be applied to precast concrete products, it is thought that high quality concrete could be produced without these problems. At precast concrete factories, it is standard practice to carry out steam-curing so as to improve form rotation rate. Appropriate steam-curing conditions are necessary for factory products. In previous research, the authors improved setting retardation by introducing an accelerator consisting of a viscosity agent and a high-range water-reducing agent.

In this study, the authors implement steam-curing and investigate the compressive strength and frost resistance of highly workable concrete containing the accelerator. The experimental parameters are rate of curing temperature rise (10 and 20°C/h), pre-curing time (none and 1 hour), and amount of accelerator (none, 1.0, 2.0 and 3.0(C×%)).

The investigation found the following:

1. Cracks occurred and high compressive strength was not obtained if the rate of curing temperature rise was 20°C/h.

2. The occurrence of cracking can be controlled by keeping the rate of curing temperature rise to 10°C/h, and the compressive strength and frost resistance needed for general concrete products even without pre-curing.

3. When the rate of curing temperature rise is 10°C/h, the accelerator does not affect the compressive strength at the age of 14 and 28 days.

**KEY WORDS:** Highly workable concrete, Steam-curing, Accelerator, Compressive strength, Frost resistance, Concrete products