

高流動コンクリートの圧縮強度に及ぼす

蒸気養生条件と凝結促進剤の影響

Effect of Steam-Curing Conditions and Accelerator on Compressive Strength of Highly Workable Concrete

北見工業大学大学院 ○学生会員 芳野 友則 (Tomonori Yoshino)
北見工業大学 フェロー 鮎田 耕一 (Koichi Ayuta)
北見工業大学 正 会 員 猪狩平三郎 (Heizaburoh Igari)

1. はじめに

自己充てん性に優れた高流動コンクリートは、フレッシュ時の材料分離抵抗性を損なうことなく著しく流動性を高めたコンクリートであり、打込みの際、締固め作業を必要としないという利点がある。高流動コンクリートをコンクリート工場製品に適用することができれば、振動締固めによる騒音や振動などの問題を改善できるほか、欠陥のない高品質なコンクリートを安定して製造できると考えられる。コンクリート製品工場では、製品の早期出荷、型枠の回転率向上を目的とし、促進養生のひとつである蒸気養生を行っているので、高流動コンクリートを製品に応用するには蒸気養生の影響について検討しておく必要がある。また、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る凝結の遅延や^{1,2)}、蒸気養生によるひび割れの発生と強度発現停滞のおそれがあるので、筆者らは、凝結促進剤を高流動コンクリートに添加することで品質の改善を図ってきた³⁾。

本研究では、高流動コンクリートの圧縮強度に及ぼす蒸気養生条件と凝結促進剤の影響をひび割れの面から考察し、製品への適用性を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

表1に使用材料、表2にコンクリートの配合を示す。

配合は単位水量を一定とし、高流動コンクリートはスランプフローが60±5cmとなるように、普通コンクリートはスランプが8±2cmとなるように高性能減水剤の添加量を定めた。いずれのコンクリートも空気量が4.5±0.5%となるようにAE剤の添加量を定めた。

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。普通コンクリートは粗骨材、細骨材、セメントを、高流動コンクリートの場合はそれに増粘剤を加え空練りし、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。普通コンクリートでは一般のパイプレータにより振動締固めを行った。高流動コンクリートでは締固めを行っていない。

2.3 蒸気養生及び実験パターン

表3、図1に蒸気養生条件を、表4に実験パターンを示す。供試体は、打込み後すぐに蒸気養生槽に搬入した。蒸気養生の昇温速度は10、20℃/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

表1 使用材料

セメント		早強ポルトランドセメント 比表面積：4460cm ² /g、密度：3.14g/cm ³
細骨材		川砂 表乾密度：2.65 g/cm ³ 、吸水率：1.87%、粗粒率：2.65
粗骨材		川砂利 表乾密度：2.65 g/cm ³ 、吸水率：1.46%、粗粒率：6.99、最大寸法：25mm
混和剤	増粘剤	水溶性セルロースエーテル
	高性能減水剤	高縮合トリアジン系化合物
	AE剤	天然樹脂酸塩
	凝結促進剤	亜硝酸カルシウム

表2 コンクリートの配合

コンクリート 種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					高性能 減水剤	AE 剤	凝結 促進剤
			W	C	S	G	増粘剤			
普通	40	45	175	438	765	935	0	C×0.2%	C×0.04%	無添加
高流動							0.3	C×1.7%	C×0.05%	
								C×3.3%	C×0.05%	

で標準養生(20℃水中)を行った。
なお、実験は表 4 の条件で供試体を作製し、図 1 の①～⑤の点及び材齢 1、14 日に行った。

表 3 蒸気養生条件

前養生 時間 (h)	昇温 速度 (℃/h)	等温養生	
		最高 温度(℃)	保持 時間(h)
なし	10	65	1-45
	20		4-00

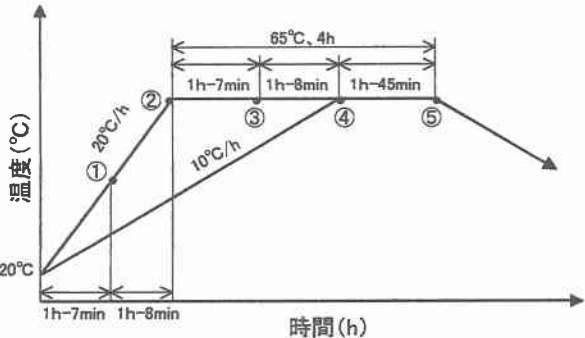


図 1 蒸気養生条件

2.4 実験項目

(1) コンクリート温度の測定

φ10×20cm の円柱供試体を用いて、蒸気養生中のコンクリート温度を熱電対により測定した。

(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」⁴⁾ に準拠して、φ10×20cm の円柱供試体を作製し、JIS A 1108「コンクリート

表 4 実験パターン

供試体名	コンクリート 種類	凝結促進剤	昇温速度
0-10	高流動	無添加	10℃/h
0-20			20℃/h
3.0-20		C×3.0%	
普通-20	普通	無添加	

の圧縮強度試験方法」に準拠し蒸気養生中および材齢 1、14 日の圧縮強度を測定した。

(3) 硬化コンクリートのひび割れ測定

φ10×20cm の円柱供試体をコンクリートカッターで長手方向に 2 つに切断し、10×20cm の測定面におけるひび割れの長さ、最大幅を測微鏡で測定し、ひび割れ面積を求めた。供試体は 1 条件に 3 個使用し、ひび割れの測定は各供試体 1 面ずつとした。

3. 実験結果及び考察

表 5 にコンクリートのフレッシュ性状を、表 6 に実験結果を示す。

3.1 ひび割れが圧縮強度に及ぼす影響

表 6 から昇温速度 10℃/h の場合（供試体名 0-10）には蒸気養生開始から 3 時間 22 分後、昇温速度 20℃/h の場合（供試体名 0-20、3.0-20、普通-20）には 2 時間 15 分後までは、コンクリートは硬化しておらず圧縮強度を測定することはできなかった。そこで、昇温速度 10℃/h

表 5 フレッシュ性状

供試体名	スランプ フロー	スランプ	空気量
0-10	57.5 (cm)	—	4.7 (%)
0-20	59.5 (cm)	—	4.3 (%)
3.0-20	61.5 (cm)	—	4.2 (%)
普通-20	—	8.5 (cm)	4.4 (%)

表 6 実験結果

実験項目	供試体名	測定時間（丸数字は図 1 参照）						材齢 1 日	材齢 14 日
		1h-7min①	2h-15min②	3h-22min③	4h-30min④	6h-15min⑤			
コンクリート 温度 (℃)	0-10	26.8	41.5	60.8	84.0	86.9	—	—	
	0-20	37.5	77.5	92.2	91.9	88.9	—	—	
	3.0-20	40.7	80.2	94.6	92.2	90.3	—	—	
	普通-20	42.8	85.0	95.4	92.7	94.1	—	—	
圧縮強度 (N/mm ²)	0-10	—	—	0.17	9.1	19.1	32.9	—	
	0-20	—	0.16	6.7	13.7	16.4	24.9	31.9	
	3.0-20	—	0.44	9.1	15.5	20.1	28.6	34.8	
	普通-20	—	1.16	10.1	13.7	17.1	23.9	—	
10×20cm あたりの ひび割れ 面積(mm ²)	0-10	—	—	0.24	0.52	0.50	0.79	—	
	0-20	—	42.43	57.79	55.79	49.65	46.49	—	
	3.0-20	—	5.14	4.27	4.74	3.64	4.14	—	
	普通-20	—	2.13	2.75	3.17	3.09	2.74	—	

の場合は、蒸気養生開始から3時間22分後（図1の③）の点、昇温速度20℃/hの場合は、2時間15分後（図1の②）の点をコンクリートが硬化し始めた点とした。

表6から凝結促進剤を添加していない高流動コンクリート（供試体名0-10、0-20）のひび割れは、昇温速度10℃/hの場合（供試体名0-10）にはほとんど発生していなかったのに対し、昇温速度20℃/hの場合（供試体名0-20）に多く発生していた。ひび割れは幅0.3～0.8mm程度であり、打込み面近くの粗骨材との界面やペースト面に多く発生しており、コンクリートが硬化し始めた点から多く発生していた。また、昇温速度20℃/hで凝結促進剤を添加（供試体名3.0-20）するか、コンクリート種類を普通コンクリート（供試体名普通-20）にすることにより、ひび割れの発生は減少し、ひび割れ幅は0.05～0.2mm程度になった。このことから、高流動コンクリートのひびわれ発生は、増粘剤と高性能減水剤の使用による凝結遅延が影響していると考えられる。図2にコンクリートが硬化し始めた点のコンクリート温度と10×20cmあたりのひび割れ面積の関係を、図3に蒸気養生開始から2時間15分後の圧縮強度と10×20cmあたりのひび割れ面積の関係を示す。図2から、コンクリートが硬化し始めた点のコンクリート温度は、昇温速度20℃/hの場合、凝結促進剤の有無、コンクリート種類に関係なくほぼ同程度の80℃前後であったのに対し、昇温速度10℃/hの場合には20℃/hの場合と比べて20℃程度低くなった。この温度差がひび割れの発生に影響を及ぼしていると思われる。つまり、増粘剤と高性能減水剤の使用により凝結が遅延し、コンクリートがまだ固まっていない状態で、コンクリート温度が上昇し、コンクリート中の気泡や水の膨張より発生した応力がひび割れの発生に影響を及ぼしていると考えられる。そのため凝結促進剤無添加で昇温速度20℃/hの場合に10×20cmあたり40mm²程度という多いひび割れが発生したと思われる。また、凝結促進剤を添加した場合と普通コンクリートを用いた場合、ひび割れの発生が少なかったのは、ひび割れが発生し始めた点の強度が影響していると思われる。図3から、凝結促進剤無添加の場合と比べ、蒸気養生開始から2時間15分後の圧縮強度は、凝結促進剤を添加することで約3倍、普通コンクリートを用いることで約8倍になった。これは、普通コンクリートの場合、増粘剤と高性能減水剤をほとんど用

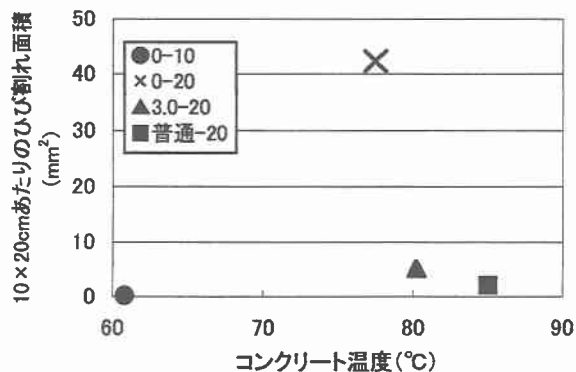


図2 コンクリート温度とひび割れ面積

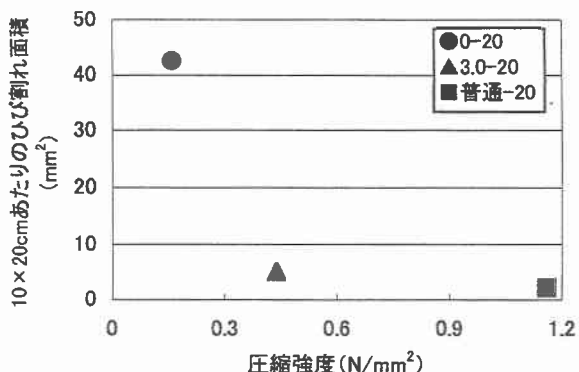


図3 圧縮強度とひび割れ面積

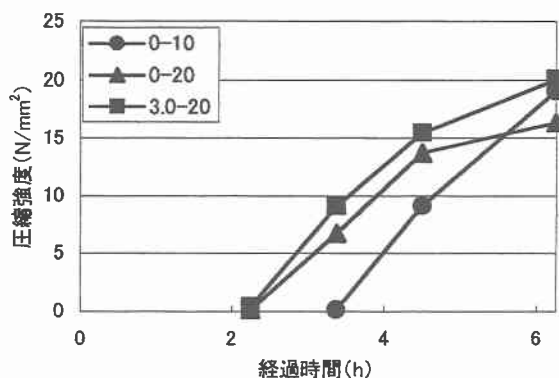


図4 経過時間と圧縮強度

いていないため、凝結遅延しなかったこと、凝結促進剤を添加した場合は、凝結促進剤の効果により、凝結時間が早くなり凝結遅延が改善されたため、凝結促進剤無添加の場合より早くから強度が発現したためと考えられる。そのため、まだコンクリート温度が低い間に、コンクリートは硬化し始め、ひび割れの発生を最低限に抑制したと思われる。図4に、蒸気養生開始からの経過時間と圧縮強度の関係を示す。この図から、蒸気養生開始から4時間30分までは、凝結促進剤無添加で昇温速度20℃/hの場合、10℃/hの場合と比べて高い圧縮強度が得られたが、蒸気養生終了時（6時間15分後）には、昇温速度10℃/hの場合のほうが20℃/hの場合と比べて圧縮強度は高くなり、20N/mm²程度の高い圧縮強度が得られた。また、昇温速度20℃/hで凝結促進剤を添加した場合、凝結促進剤無添加の場合と比べ、蒸気養生終了時（6時間15分後）の圧縮強度は高くなり、20N/mm²程度の高い圧縮強度が得られた。凝結促進剤無添加で昇温速度20℃/hとした場合の圧縮強度が低いのは発生したひび割れの影響と思われる。既往の研究⁵⁾によれば、蒸気養生によるひび割れの発生はコンクリート組織の緻密さを欠如させ強度を低下させると報告されており、本実験の結果から、昇温速度を10℃/hとするか、凝結促進剤を添加することで、ひび割れの発生を抑制し、材齢1日までの圧縮強度を増進できると考えられる。

以上のことから、凝結促進剤無添加、昇温速度20℃/hとした場合、凝結遅延の影響でひび割れが発生し圧縮強度は停滞するが、昇温速度を10℃/hとするか、凝結促進剤を添加することによりひび割れの発生を抑制でき圧縮

強度の増進が図れることが明らかになった。

3.2 製品への適用性

図5に材齢と圧縮強度の関係を示す。コンクリート製品工場では、蒸気養生時間を短縮することが重要である。昇温速度 10℃/h の場合、温度上昇期間は 4 時間 30 分であり、20℃/h の場合と比べ 2 時間以上長くなっている。そのため、蒸気養生時間の短縮を考慮すると昇温速度は 20℃/h にするのが望ましいといえる。一般の製品に要求される脱型時の強度は、脱型作業および運搬作業によって傷つかない程度の 5～15N/mm² であるとされている^{6,7)}。また、蒸気養生を行ったコンクリート製品に必要とされる材齢 14 日の圧縮強度は、道路用製品などの一般の製品で 32～42N/mm² である⁸⁾。図5から、昇温速度 20℃/h で凝結促進剤無添加の場合に脱型時に必要とされている強度は十分に満たしている。しかし、材齢 14 日の圧縮強度は 32N/mm² 程度であり、蒸気養生中に発生したひび割れの影響で強度発現が停滞し、製品に必要なとされている強度は十分には得られていない。それに対し、凝結促進剤を添加することにより材齢 14 日の圧縮強度は 35N/mm² 程度となり、製品に必要な強度を満たしており、製品への適用が可能である。

以上のことから、蒸気養生時間短縮と強度の面からコンクリート製品への適用性を検討した結果、昇温速度 20℃/h とし、凝結促進剤を添加することにより、道路用製品などの一般の製品への適用が可能であることが明らかになった。

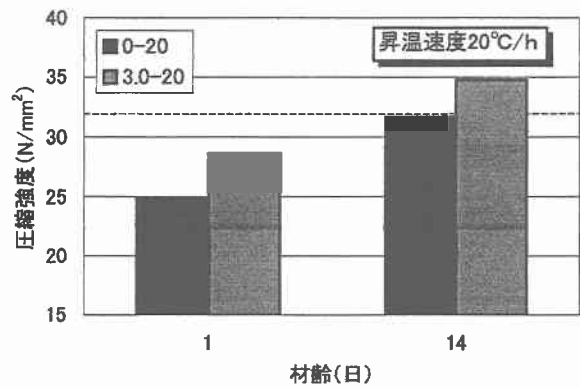


図5 材齢と圧縮強度

4. まとめ

蒸気養生した高流動コンクリートの圧縮強度とひび割れの面から、製品への適用性を検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 昇温速度 20℃/h、凝結促進剤無添加とした場合、蒸気養生中にひび割れが発生し、強度発現が停滞する。
- (2) 昇温速度 10℃/h とするか、昇温速度 20℃/h で凝結促進剤を添加することにより、ひび割れの発生を抑制し強度の増進が図れる。しかし、昇温速度 10℃/h の場合、温度上昇期間が長くなり蒸気養生時間の短縮は困難である。
- (3) 昇温速度 20℃/h、凝結促進剤を添加することにより、道路用製品などの一般の製品に必要なとされる強度が得られ、その適用が可能である。

【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) 芳野友則、鮎田耕一、猪狩平三郎：増粘剤系高流動コンクリートの圧縮強度に及ぼす凝結促進剤と蒸気養生の影響、土木学会北海道支部・論文報告集、第 56 号(A)、pp. 464-467 (2000)
- 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) 大塚浩司、庄谷征美、阿波稔：蒸気養生コンクリートの耐久性に及ぼす表面微細ひび割れの影響、土木学会論文集 No. 585/V-38、pp. 97-111 (1998)
- 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、渡邊芳春、坂井悦郎、大門正機：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)
- 8) 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)