

V-1

蒸気養生が低振動コンクリートの強度発現、耐凍害性に及ぼす影響

北見工業大学大学院 ○学生会員 藤平 顕次
日産化学工業(株) 正会員 須藤 裕司
北見工業大学 フェロー 鮎田 耕一

1. はじめに

一般のコンクリートの施工では、振動締固め作業に伴う品質の変動や騒音などが問題となる場合がある。そこで、コンクリートの流動性を高め締固め作業が不要な高流動コンクリートが開発されたが、品質管理がやや困難であるという欠点がある。そこで筆者らは石灰石微粉末と高性能減水剤を併用することで、材料分離を誘発するおそれのない微弱な振動(低振動)を短時間与えるだけで高流動コンクリートと同程度の流動性と充てん性を発揮する低振動コンクリートの開発を試みている¹⁾。

コンクリート製品工場では締固めに伴う騒音や材料分離の発生などが問題となっており、強力な振動締固めを行わなくとも型枠内に充てん可能な低振動コンクリートであれば、これらの問題は解決に向かうとともに、品質の向上や作業の効率化が期待できる。しかしながら、コンクリート製品工場では、製品の早期出荷を目的として一般に蒸気養生が行われており、その条件が低振動コンクリートの性状に及ぼす影響について明らかにしておかなければならない。

本研究では、寒冷地における低振動コンクリートの製品への適用を図ることを目的とし、蒸気養生条件やコンクリート(普通・低振動・高流動)、セメント(普通・早強)、混和材(石灰石微粉末・高炉スラグ微粉末・フライアッシュ)の種類が低振動コンクリートの強度発現、耐凍害性に及ぼす影響について検討した。

2. 実験内容

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、低振動、高流動コンクリートではスランプフローがそれぞれ40±5、70±5cmとなるように、普通コンクリートではスランプが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。

表1 使用材料

セメント		普通ポルトランドセメント(比表面積:3280cm ² /g、密度:3.16g/cm ³) 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)
混和材	石灰石微粉末	比表面積:3200cm ² /g、密度:2.70 g/cm ³
	高炉スラグ微粉末	比表面積:4140cm ² /g、密度:2.89 g/cm ³
	フライアッシュ	比表面積:3700cm ² /g、密度:2.27 g/cm ³
細骨材		川砂(富山産)表乾比重:2.56、吸水率:2.91%、粗粒率:2.93
粗骨材		碎石(青梅産)表乾比重:2.68、吸水率:0.48%、粗粒率:6.61
混和剤	高性能減水剤	メラミン系減水剤
	AE剤	天然樹脂酸塩

2.2 練混ぜ

練混ぜは、強制練りミキサを用いた。普通コンクリートの場合はセメントと細骨材を、低振動・高流動コンクリートの場合はそれに石灰石微粉末を加え空練り後、練混ぜ水、高性能減水剤、AE剤を添加し練り混ぜ、

表2 配合

配合 No.	コンクリート 種類	養生 条件	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								高性能 減水剤 (C×%)	A E 剤 ((C+P) ×%)
					微粉体					水 (W)	細骨 材 (S)	粗骨 材 (G)		
					セメント (C)		石灰石 微粉末 (P)	高炉 スラグ (B)	フライ アッシュ (F)					
					普通	早強								
1	低振動	A	50	45	350	—	100	—	—	175	728	932	1.5	0.020
2	低振動	B	50	45	350	—	100	—	—	175	728	932	1.5	0.022
3	低振動	C	50	45	350	—	100	—	—	175	728	932	1.5	0.020
4	低振動	D	50	45	350	—	100	—	—	175	728	932	1.5	0.022
5	低振動	E	50	45	350	—	100	—	—	175	728	932	1.5	0.022
6	低振動	F	50	45	350	—	100	—	—	175	728	932	1.5	0.025
7	低振動	G	50	45	350	—	100	—	—	175	728	932	1.5	0.025
8	普通	C	50	43	350	—	0	—	—	175	737	1022	0.2	0.008
9	高流動	C	50	47	350	—	200	—	—	175	686	877	2.7	0.019
10	低振動	C	50	45	—	350	100	—	—	175	728	932	1.9	0.030
11	低振動	C	50	45	350	—	—	100	—	175	731	936	1.6	0.015
12	低振動	C	50	45	350	—	—	—	100	175	731	936	1.6	0.015

さらにその後粗骨材を加えて練り混ぜた。普通コンクリートでは一般のバイブレータにより、低振動コンクリートでは振動エネルギーが一般の1/3程度のバイブ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 養生条件

表3に養生条件を示す。蒸気養生は昇温速度20℃/hの場合に最高温度45、65、85℃の3種類を設定し、最高温度65℃の場合は昇温速度20℃/hの他に昇温速度10、30℃/hを設定した。等温養生の保持時間はいずれも2時間で一定とした。前養生を行わない場合は打込み後すぐに蒸気養生槽に搬入した。前養生を行う場合は打込み後、恒温恒湿室(室温20℃、相対湿度90%)で1時間静置し、その後、供試体を蒸気養生槽に搬入した。

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℃水中)を行った。

また、比較のため蒸気養生を行わず恒温恒湿室(室温20℃、相対湿度90%)に1日間静置した後に脱型し、その後標準養生を行った供試体も作製した。

表3 養生条件

条件	前養生期間 (h)	温度上昇期間	等温養生期間		蒸気養生 全行程時間 (h-min)
		昇温速度 (℃／h)	最高温度 (℃)	保持時間 (h)	
A	行わない	10	65	2	6-30
B		20	45		3-15
C			65		4-15
D			85		5-15
E		30	65		3-30
F	1	20		4-15	
G	標準養生				0

2. 4 実験項目

(1)フレッシュコンクリート

①空気量

JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法（空気室圧力方法）」に準拠して測定した。

②スランプ

JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」に準拠して測定した。

③スランプフロー

土木学会規準「コンクリートのスランプフロー試験方法」に準拠して測定した。

(2)硬化コンクリート

①圧縮強度

JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠し、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を用い、材齢 1, 3, 7, 14, 28 日に試験した。

②耐凍害性

土木学会規準「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠し、材齢 14 日から水中における急速凍結融解試験を行い耐凍害性を評価した。また、ASTM C 666 に準じて凍結融解 300 回終了後の耐久性指数（DF）を求めた。

③細孔構造

材齢 14 日で供試体のモルタル部分を 5.0～2.5mm の大きさに粉碎し、アセトンによる洗浄、D-dry 法で水和を停止させた後、水銀圧入式ポロシメータを用いて測定した。

3. 実験結果及び考察

表 4 に実験結果を示す。

3. 1 蒸気養生条件が低振動コンクリートの強度発現、耐凍害性に及ぼす影響

(1)強度発現

図 1 に昇温速度 $20^\circ\text{C}/\text{h}$ 、最高温度 65°C の場合で、前養生時間を 0、1 時間とした場合の材齢と圧縮強度の関係を示す。前養生を行った場合、前養生を行わなかった場合より各材齢で高い圧縮強度を得ることができ、前養生を 1 時間行った場合の材齢 28 日の圧縮強度は $40\text{N}/\text{mm}^2$ 以上を示した。

表 4 実験結果

配合 No.	蒸気 養生 条件	圧縮強度 (N/mm^2)					耐凍害性		細孔構造
		1 日	3 日	7 日	14 日	28 日	質量 減少率 (%)	耐久性 指数	総細孔容積 (mm^3/g)
1	A	23.3	27.3	31.4	33.4	37.8	6.54	71	105.4
2	B	17.7	26.7	33.3	36.6	41.1	4.38	88	104.2
3	C	24.0	26.7	30.9	34.8	38.3	4.18	88	90.7
4	D	23.0	25.1	26.2	28.9	32.2	9.90	28	112.9
5	E	23.7	25.9	29.5	31.4	34.5	8.13	16	106.4
6	F	25.7	29.0	33.4	37.0	40.0	2.92	97	94.8
7	G	13.1	22.0	28.9	33.4	37.3	1.79	96	99.6
8	C	16.7	21.8	25.4	29.4	32.5	—	—	122.9
9	C	19.4	25.9	29.8	32.3	35.2	—	—	108.9
10	C	29.2	31.6	35.4	38.5	40.2	—	—	87.1
11	C	24.9	26.9	31.7	35.2	38.6	—	—	85.4
12	C	19.9	24.0	25.9	31.6	34.7	—	—	112.8

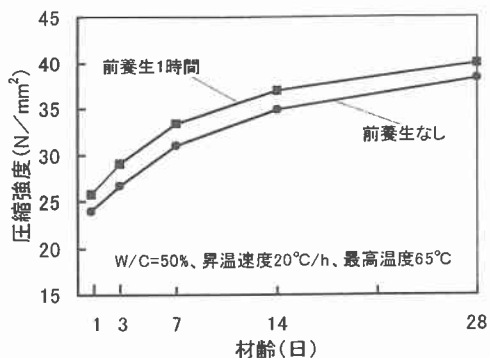


図1 前養生と圧縮強度

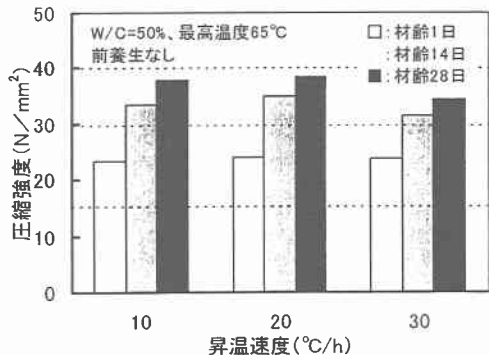


図2 昇温速度と圧縮強度

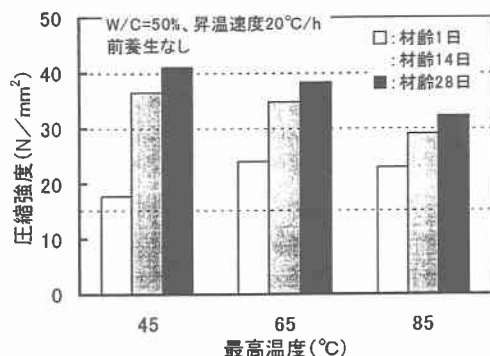


図3 最高温度と圧縮強度

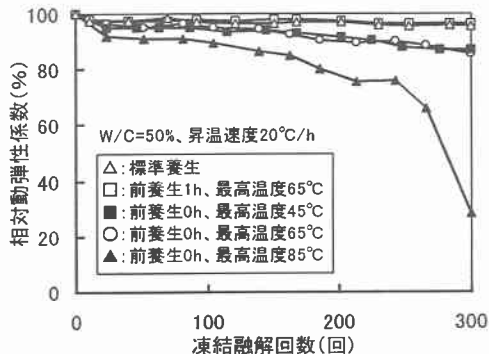


図4 養生条件と耐凍害性

図2に前養生を行わず最高温度を65°Cとした場合の昇温速度と圧縮強度、図3に前養生を行わず昇温速度を20°C/hとした場合の最高温度と圧縮強度の関係を示す。一般的なコンクリート製品が必要^{2,3)}とされる脱型時強度は15N/mm²程度、材齢14日の圧縮強度は30~40N/mm²であることを考慮した場合、図2から材齢1日の圧縮強度は、昇温速度10、20、30°C/hいずれの場合も23~24N/mm²程度で脱型時強度を十分に満足している。これに対し材齢14日の圧縮強度は昇温速度を30°C/hとした場合には31N/mm²程度であり、コンクリート製品に必要な圧縮強度を確保しているものの十分とはいえない。図3から材齢1日の圧縮強度は、最高温度65、85°Cの場合には23~24N/mm²程度であり、脱型時強度を十分に満足しているといえるが、45°Cの場合は18N/mm²程度であり必要な脱型時強度を十分に確保しているとはいえない。材齢14日の圧縮強度は、最高温度45、65°Cの場合には35~37N/mm²程度であり必要な圧縮強度を満足しているが、85°Cの場合は30N/mm²以下となり必要な強度を得ることができなかった。このことから、材齢1日、材齢14日で必要とされる圧縮強度を十分に満足している蒸気養生条件は、前養生を行わず昇温速度を10、20°C/h、最高温度を65°Cとした場合である。表3から前養生を行わず最高温度を65°Cとした場合の蒸気養生全行程時間は、昇温速度10°C/hの場合には20°C/hの場合と比較して2時間以上長くなっており、蒸気養生の効率性を考慮すると昇温速度20°C/hの条件が望ましいといえる。

以上の実験結果から、材齢1日、材齢14日で必要とされる圧縮強度を十分に満足しており、蒸気養生の効率性を考慮した最適な蒸気養生条件は、前養生を行わずに昇温速度を20°C/h、最高温度を65°Cとした蒸気養生条件であり、この条件で一般的なコンクリート製品に必要な強度を得られることが明らかとなった。

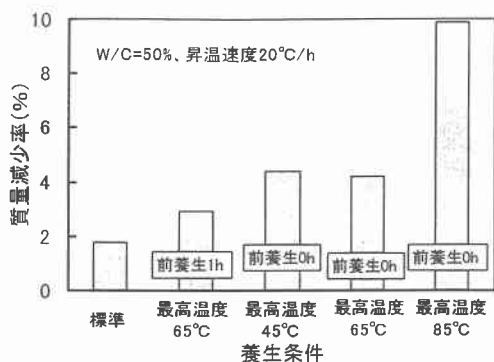


図5 養生条件と質量減少率

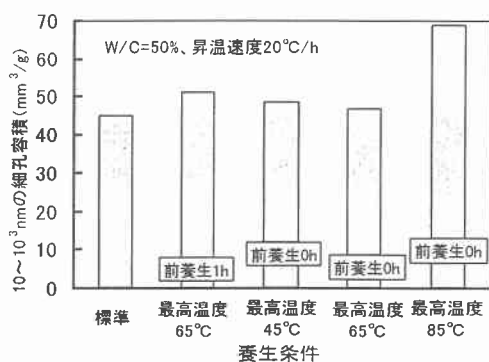


図6 養生条件と細孔組織

(2) 耐凍害性

図4に蒸気養生条件が相対動弾性係数に及ぼす影響について示す。前養生を行わず最高温度を85°Cとした場合には耐凍害性を確保することはできなかったが、最高温度を45、65°Cとした場合には凍結融解回数300回終了後の相対動弾性係数が80%以上となり良好な耐凍害性を示した。また、前養生を行い最高温度を65°Cとした場合には相対動弾性係数が90%以上となり非常に高い耐凍害性を示した。また、表4から明らかに前養生を行わず昇温速度10°C/h、最高温度65°Cとした場合は耐凍害性を確保することができたが、昇温速度30°C/h、最高温度65°Cとした場合には耐凍害性を確保できなかった。

図5に蒸気養生条件が凍結融解300サイクル終了後の質量減少率に及ぼす影響について示す。前養生を行わない場合、最高温度85°Cとした供試体の質量減少率は10%程度、最高温度45、65°Cとした供試体の質量減少率は4%程度であった。最高温度65°Cで前養生を行った供試体の質量減少率は3%程度に抑えられており、前養生を行うことでスケーリング抵抗性が若干改善されるといえる。

図6に蒸気養生条件と耐凍害性に密接な関係⁴⁾がある半径10~10³nmの細孔の容積との関係を示す。前養生を行わず最高温度を85°Cとした供試体の細孔容積は他の供試体に比べて多く、細孔組織が粗大化したことが耐凍害性に悪影響を及ぼしたと考えられる。

以上の結果から、前養生を行わず昇温速度を10°C/h、最高温度を65°Cとすることで耐凍害性を確保することができたが、耐久性指数80以上の良好な耐凍害性を得るには昇温速度を20°C/h、最高温度を45、65°Cの蒸気養生条件とする必要があり、最高温度65°Cの場合は、これに前養生を1時間行うことで耐久性指数90以上の非常に高い耐凍害性を得られ、スケーリング抵抗性も改善されることが明らかとなった。

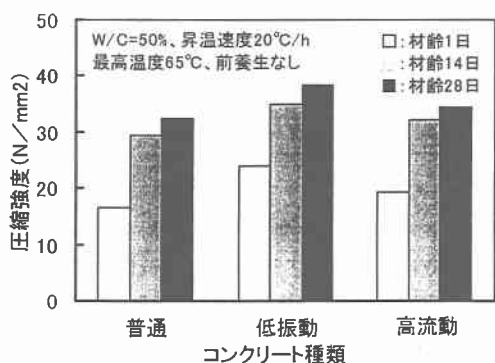


図7 コンクリート種類と圧縮強度

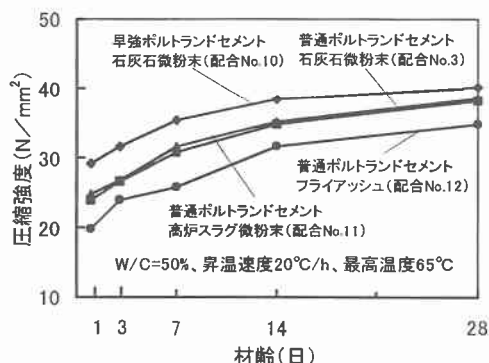


図8 セメント・混和材種類と圧縮強度

3. 2 低振動コンクリートと普通、高流動コンクリートの強度発現比較

図 7 に単位セメント量を $350\text{kg}/\text{m}^3$ で一定とした普通、低振動、高流動コンクリートの材齢 1 日、14 日、28 日における圧縮強度を示す。低振動コンクリートの圧縮強度は、普通・高流動コンクリートと比較して若干高くなった。このことから蒸気養生を行った場合でも低振動コンクリートは、普通・高流動コンクリートと同等以上の圧縮強度を有していることが確認できた。

3. 3 セメント及び混和材の種類が低振動コンクリートの強度発現に及ぼす影響

図 8 に前養生を行わず昇温速度を $20^\circ\text{C}/\text{h}$ 、最高温度を 65°C の蒸気養生条件で、セメント・混和材の種類が低振動コンクリートの強度発現に及ぼす影響について示す。早強ポルトランドセメントと石灰石微粉末を使用した供試体（配合 No. 10）の圧縮強度は、材齢 3 日で $30\text{N}/\text{mm}^2$ 以上、材齢 28 日で $40\text{N}/\text{mm}^2$ 以上となり、非常に良好な強度発現を示している。普通ポルトランドセメントを用い石灰石微粉末あるいは高炉スラグ微粉末を使用した供試体（配合 No. 3、No. 11）の圧縮強度は、各材齢でほぼ同程度であった。普通ポルトランドセメントを用いフライアッシュを使用した供試体（配合 No. 12）の圧縮強度は、これらの供試体と比較して各材齢で $5\text{N}/\text{mm}^2$ 程度低い強度発現を示した。

以上の結果から、前養生を行わず昇温速度を $20^\circ\text{C}/\text{h}$ 、最高温度を 65°C の蒸気養生条件で、石灰石微粉末を用いた低振動コンクリートは、早強ポルトランドセメントを使用することで特に良好な強度発現を示し、普通ポルトランドセメントを使用した場合の圧縮強度は、高炉スラグ微粉末、フライアッシュを使用した場合と比較して同等以上の圧縮強度を有することが確認できた。

4. 結論

蒸気養生条件、コンクリート種類（普通・低振動・高流動）、セメント（普通・早強）、混和材種類（石灰石微粉末・高炉スラグ微粉末・フライアッシュ）が低振動コンクリートの強度発現、耐凍害性に及ぼす影響について検討した結果、本研究の範囲で以下のことが明らかとなった。

- (1) 普通セメントと石灰石微粉末を使用した低振動コンクリートは、前養生を行わず昇温速度を $20^\circ\text{C}/\text{h}$ 、最高温度を 65°C の蒸気養生条件で、普通・高流動コンクリートと同等以上の圧縮強度を有し、一般的なコンクリート製品に必要な圧縮強度が得られる。また、耐久性指数 80 以上の良好な耐凍害性が得られ、これに前養生を 1 時間行うことで耐久性指数 90 以上の非常に高い耐凍害性を得られ、スケーリング抵抗性も改善される。
- (2) 前養生を行わず昇温速度を $20^\circ\text{C}/\text{h}$ 、最高温度を 65°C の蒸気養生条件とした低振動コンクリートは、早強ポルトランドセメントと石灰石微粉末を使用することで材齢 3 日で $30\text{N}/\text{mm}^2$ 以上、材齢 14 日で $40\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の良好な強度発現を示す。普通ポルトランドセメントを用いて石灰石微粉末を使用した場合の圧縮強度は、材齢 14 日で $35\text{N}/\text{mm}^2$ 程度となり、石灰石微粉末の代わりに高炉スラグ微粉末、フライアッシュを使用した場合と比較して同等以上の圧縮強度を有する。

【参考文献】

- 1) 藤平顕次・鮎田耕一・須藤裕司：石灰石微粉末を用いた流動性の異なるコンクリートの耐凍害性、寒地技術論文・報告集、Vol.14、pp.234-237（1998）
- 2) 神田衛、中山紀男：コンクリートの製造と管理、共立出版（1983）
- 3) 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）
- 4) 福留和人、喜多達夫、宮野一也：高炉スラグ微粉末を混入した水中不分離性コンクリートの凍結融解抵抗性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.1、pp.685-690（1990）