

論文 振動条件が中流動コンクリートの流動性と硬化コンクリートに与える影響

須藤 裕司^{*1}・鮎田 耕一^{*2}・百瀬 雅将^{*3}

要旨: 著者らはコンクリート製品へ適用することを目的として、微弱な振動を与えるだけで打込みが可能な中流動コンクリートを開発してきた。本研究では、振動条件を変えることができるテーブルバイブレーターを用いて、振動条件が、中流動コンクリートの流動性や強度発現、耐凍害性、硬化コンクリート表面に発生する気泡に与える影響を、普通コンクリートと比較することで検討した。その結果、中流動コンクリートは微弱な振動を短時間与えるだけで打込みが可能であり、微弱な振動で打込んでも強度発現や耐凍害性が普通コンクリートと同等であること、振動条件を調整することで気泡の発生を抑制できることが判明した。

キーワード: 中流動コンクリート, 振動条件, 流動性, 表面気泡, 強度, 耐凍害性

1. はじめに

中流動コンクリートは、普通コンクリートと高流動コンクリートの中間の流動性を有し、微弱な振動（低振動）を与えるだけで打込みが可能なコンクリートである。

高流動コンクリートは、材料分離抵抗性を損なうことなく流動性を高め、無振動での打込みを可能としたが、普通コンクリートと比べて材料コストが高く、製造設備の更新や生産・品質管理の難しさから、未だ十分に普及していない^{1),2)}。一方、中流動コンクリートは、普通コンクリートと比べて材料コストの上昇も小さく、既存設備を用いた製造が可能で、生産管理も難しくない。

既往の研究から^{3),4),5),6)}、中流動コンクリートは棒型バイブレーターを用いた場合、普通コンクリートを打込む際の1/3程度の振動力で打込みが可能であり、十分な圧縮強度と良好な耐凍害性を示すことが明らかとなった。しかし、振動条件がコンクリートの諸物性へ与える影響は、未だ十分に解明されていない。

本研究では、著者らが中流動コンクリート適

用の主目的としているコンクリート製品を想定し、振動条件を変更することが可能なテーブルバイブレーターを用いて、振動条件が中流動コンクリートの流動性に与える影響を、普通コンクリートと比較しながら検討した。

また、振動条件が硬化コンクリート表面へ発生する気泡や、強度発現、耐凍害性に与える影響も検討した。

2. 試験概要

2.1 使用材料および配合

表-1に使用材料を、表-2にコンクリートの配合を示した。

中流動コンクリートには、普通コンクリートと同一材料を使用した。さらに、中流動コンクリートには材料分離抑制のための粉体として、石灰石微粉末を用いた。また、減水剤にはコンクリート製品用に著者らが開発した、新型のメラミン系高性能減水剤^{4),5),7),8)}を用いた。

配合は単位水量を一定とし、中流動コンクリートのスランプフローが 50.0 ± 2.0 cmに、普通コンクリートのスランプが 8.0 ± 2.0 cmとなるよ

*1 日産化学工業（株） 化学品事業本部機能材料事業部特殊材料部 工修（正会員）

*2 北見工業大学 工学部土木開発工学科 工博（正会員）

*3 北見工業大学 地域連携・研究戦略室知的財産本部 工修（正会員）

うに、高性能減水剤の添加量を定めた。フレッシュコンクリートの空気量は $4.5 \pm 0.5\%$ となるよう、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には、強制パン型ミキサを用いた。練混ぜは、セメント、石灰石微粉末（普通コンクリートの場合はセメントのみ）と細骨材を10秒間空練した後、高性能減水剤とAE剤を含んだ練混ぜ水を加えて30秒間、さらに粗骨材を加えて90秒間の本練を行った（注水後の練混ぜ時間の合計は120秒間）。

2.3 振動条件

本研究では、中流動コンクリートが様々な条件の振動を与えられた場合に、どの様な流動特性を示すかを検討するために、振動条件を変えることができるテーブルバイブレーターを用い、所定の振動条件下での中流動コンクリートの流動性の変化を、普通コンクリートと比較することで検討した。また、様々な条件で打込みを行った場合の、硬化コンクリート表面の気泡発生状況や強度発現、耐凍害性も、普通コンクリートと比較検討した。

表-3に、本試験で定めた振動条件を示す。

普通コンクリートを打込む際の一般的な振動条件は、本試験で用いたテーブルバイブレーターの場合、振動力7.0kN程度であり、この振動条件を基準（振動力：100%）とした。それに対して50%、33%、20%の振動力を有する振動条件を、各々振動力比50%、33%、20%とした。

なお、中流動コンクリートの場合には、振動力比100、50、33、20%で、普通コンクリートの場合には振動力比100%で、流動性を評価した。

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：3,370cm ² /g, 密度：3.16g/cm ³
粉体	石灰石微粉末 比表面積：4,090cm ² /g, 密度：2.70g/cm ³
細骨材	川砂(富山県神通川水系), 粗粒率：2.69, 表乾密度：2.58g/cm ³ , 吸水率：1.47%
粗骨材	碎石2005(東京都青梅産), 粗粒率：7.33, 表乾密度：2.68g/cm ³ , 吸水率：0.78%
高性能減水剤	新型メラミン系減水剤
AE剤	天然樹脂酸塩系

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)					スランブフロー (cm)	空気量 (%)
			W	C	P*1	S	G		
中流動	50	45	175	350	100	734	932	50.0±2.0	4.5±0.5
普通					—	765	975		

*1：石灰石微粉末, *2：スランブ(cm)

表-3 テーブルバイブレーターの振動条件

振動力 (kN)	振動力比 (%)	振動数 (Hz)	加速度 (m/s ²)	振幅 (mm)
7.0	100	70	51.9	0.27
3.5	50	50	25.9	0.27
2.3	33	40	17.1	0.27
1.4	20	30	10.4	0.27

2.4 振動条件下での流動性の測定

振動条件下でのスランブフローの変化は、テーブルバイブレーター上でスランブフロー試験（普通コンクリートの場合にはスランブも測定）を行った後、所定の振動を15、30、45、60秒間与えた時点でのスランブフローを測定した。

なお、スランブフローが広がっていく状況を、テーブルバイブレーター（天板上に同心円状のスケールを書き込んだ）鉛直上からビデオカメラで撮影し、所定時間でのスランブフローを測

定した。したがって、振動を止めることなく所定時間のスランプフローを測定できた。

2.5 供試体の作成と蒸気養生

硬化コンクリートの物性に関しては、コンクリート表面への気泡の発生状況と圧縮強度発現、耐凍害性を試験した。

なお、本試験ではコンクリート製品を想定して、供試体に蒸気養生を行った。

(1) 供試体の作成

供試体の作成は、コンクリート練混ぜ直後に、テーブルバイブレーターを用いて（型枠はバイブレーター上へ固定）、所定の振動条件下で行った。

(2) 蒸気養生

供試体は、コンクリート製品工場での蒸気養生条件を参考にし、以下の条件で蒸気養生を行った。

蒸気養生条件は、前養生は行わず、コンクリート打込み直後から、昇温速度 20℃/hr、最高温度 65℃、等温養生保持時間 2 時間で行った。なお、等温養生終了後は 20℃になるまで蒸気養生槽内で徐冷した。

徐冷終了後は、材齢 24 時間まで 20℃、湿度 90%の室内で気中養生を行い、その後脱型し、所定材齢まで 20℃水中養生を行った。

2.6 硬化コンクリート表面へ発生する気泡

所定の振動を 60, 90, 120 秒間与えて作成した直径 10cm×高さ 20cm の円柱供試体の側面に、透明シートを巻き、気泡を書き写した。その後、透明シートをデジタルカメラで撮影し、画像解析装置

表-4 振動条件下での流動性の変化

コンクリート種類	振動力比 (%)	スランプフロー (cm)				
		振動時間 (sec)				
		0	15	30	45	60
中流動	100	48	64	73	76	77
	50	48	61	69	74	77
	33	47	60	69	75	79
	20	49	62	73	78	80

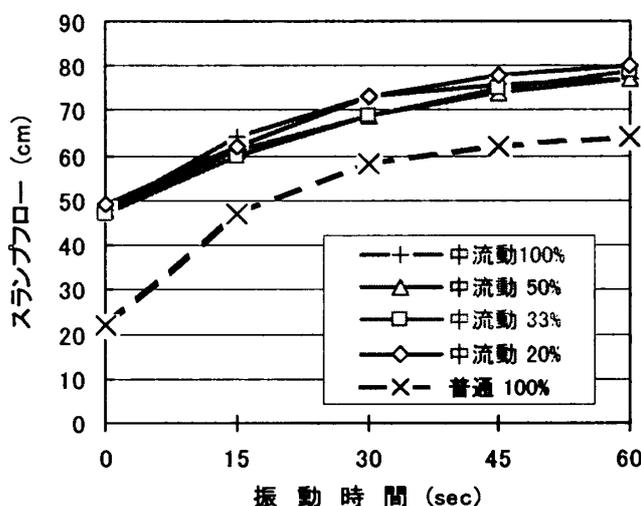


図-1 振動条件下での流動性の変化

表-5 硬化コンクリート表面の気泡組織

コンクリート種類	振動力比 (%)	振動時間 (sec)	気泡面積率 (%)	平均気泡面積 (mm ²)	最大気泡直径 (mm)
中流動	100	60	1.1	79	7.7
		90	1.0	65	7.5
		120	1.3	87	8.0
	50	60	1.3	67	9.0
		90	1.2	91	7.2
		120	0.9	130	8.2
	33	60	1.0	45	4.2
		90	1.2	44	4.0
		120	1.3	53	5.8
	20	60	2.1	108	13.3
		90	1.6	98	9.3
		120	1.7	106	9.5
普通	100	60	2.4	97	14.7
		90	1.8	92	10.0
		120	1.8	132	10.7

で供試体側面全体の面積中に占める気泡面積の比率(気泡面積率:%)を測定した。また、気泡の平均面積と最大直径も測定した。

2.7 圧縮強度試験(強度発現)

所定の振動を60秒間与えて作成した直径10cm×高さ20cmの円柱供試体に、蒸気養生を行った後、20℃水中養生を行い、材齢7、14、28日での圧縮強度を測定した。

2.8 凍結融解試験(耐凍害性)

所定の振動を60秒間与えて作成した10×10×40cmの角柱供試体に、蒸気養生を行った後、材齢28日まで水中養生した供試体を用いて、JIS A 1148に準拠した水中急速凍結融解試験を行った。また、同試験から耐久性指数を求めた。

3. 試験結果と考察

3.1 振動条件下での流動性の変化

表-4と図-1に振動条件下での流動性経時変化の試験結果を示す。

振動力が振動時間とスランプフローの関係に与える影響を示した図-1から、微弱な振動である振動力比20%や33%の場合でも、振動時間30秒後には高流動コンクリートと同等のスランプフローである70cmに到達した。このことから、中流動コンクリートは微弱な振動を短時間与えるだけで、高流動コンクリート並の流動性を発揮することが判明した。なお、普通コンクリートは振動時間60秒でも、スランプフローは70cmに達しなかった。

以上から、中流動コンクリートは普通コンクリートより短い振動時間でコンクリートの打込みに必要な流動性を得られることが判明した。

3.2 硬化コンクリート表面への発生気泡

表-5と図-2、図-3、図-4に硬化コンクリート表面へ発生した気泡に関する試験結果を示した。

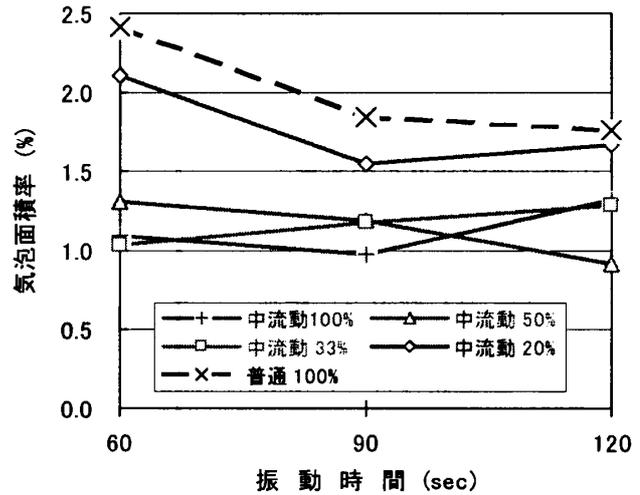


図-2 振動条件と気泡面積率

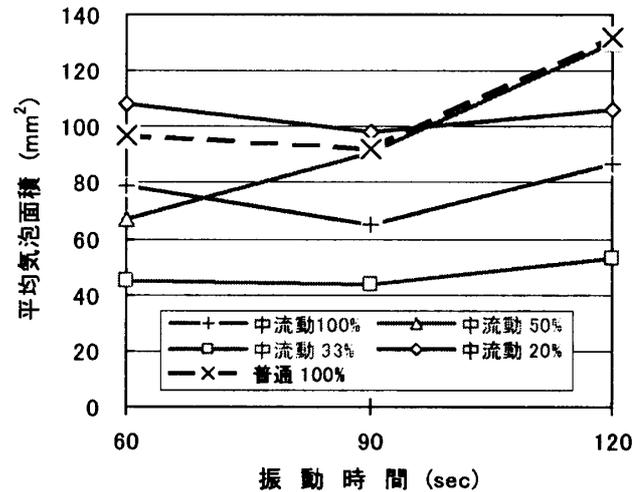


図-3 振動条件と平均気泡面積

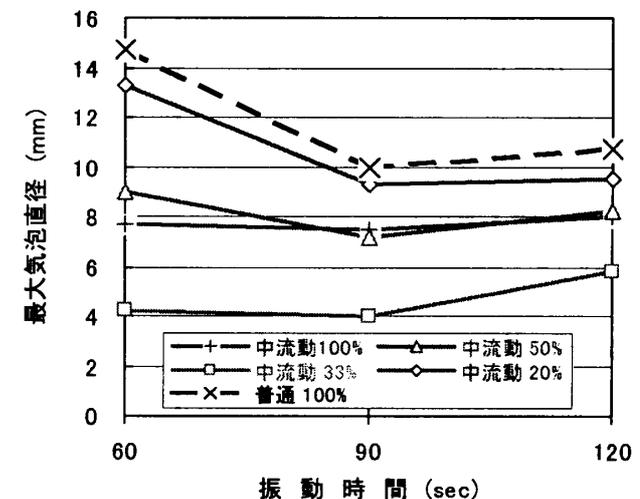


図-4 振動条件と最大気泡直径

振動力が振動時間と気泡面積率の関係に与える影響を示した図-2から、中流動コンクリートは振動力比20%の場合には、普通コンクリートと同等の気泡面積率であり、振動時間にかかわらず気泡面積率は1.6%以上あった。一方、振動力比が33~100%の場合には、振動時間にかかわらず気泡面積率は0.9~1.3%で、振動力比20%の場合よりも気泡の発生が少なかった。このことから、振動力比20%では振動力が不足であり、気泡の発生を少なくするためには、振動力比を33%以上にする必要があることが分かった。

また、振動力が振動時間と平均気泡面積の関係に与える影響を示した図-3と、振動力が振動時間と最大気泡直径の関係に与える影響を示した図-4から、振動力比33%の場合に生じた気泡の大きさが最も小さい。これは、振動力が大き過ぎると、振動時間が長くなるにつれて、小さな気泡が集まり大きな気泡になるためと考えられる。

以上から、コンクリートの外観を左右するためにコンクリート製品を製造する際に重要視される、気泡の発生量を少なくし、かつ、気泡の大きさを最小とするためには、振動力比33%が最適であるといえる。

3.3 圧縮強度の発現

表-6と図-5に、圧縮強度試験結果を示す。

振動力が圧縮強度の発現に与える影響を示した図-5から、7、14、28日いずれの材齢においても振動力の違いによる中流動コンクリートの圧縮強度差は認められず、中流動コンクリートの強度発現は普通コンクリートと同等以上であった。

表-6 硬化コンクリートの性状

コンクリート種類	振動力比 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)			耐凍害性 耐久性 指数
		材 齢 (day)			
		7	14	28	
中流動	100	26.7	30.1	33.5	96
	50	29.6	32.9	35.4	93
	33	26.6	30.9	33.6	94
	20	28.6	33.2	35.7	95
普通	100	25.1	30.1	32.7	97

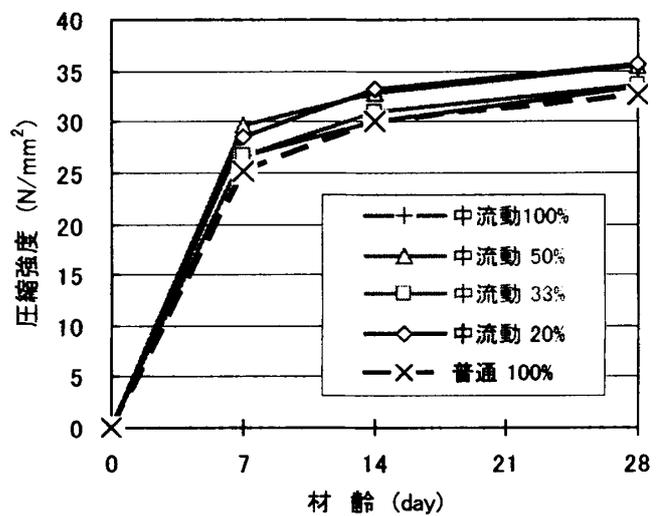


図-5 振動条件と強度発現

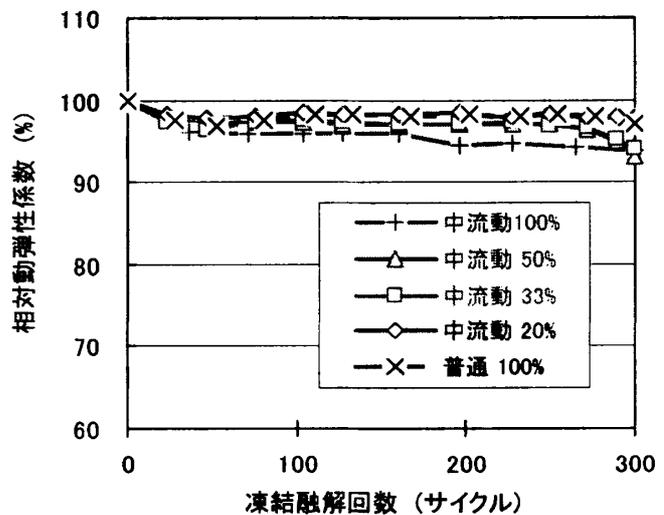


図-6 振動条件と耐凍害性

また、振動締め固めが不十分だと型枠の隅々にまでコンクリートが行き渡らずに充てん不良が発生し、振動締め固めが過剰であるとコンクリートの材料分離を誘発して、強度発現に悪影響を与える恐れがある。しかし、今回コンクリートに加えた振動条件の範囲では、硬化コンクリート表面の気泡発生状況に差異は認められたものの、充てん不良や材料分離は認められず、強度発現に対する悪影響も認められなかった。

3.4 耐凍害性

表-6と図-6に、凍結融解試験の結果を示した。

振動力が耐久性指数に与える影響を示した表-6と、振動力が凍結融解回数と相対動弾性係数の関係に与える影響を示した図-6から、振動数が異なっても中流動コンクリートの耐凍害性に差異はなく、耐久性指数は90以上で、普通コンクリートと同様に耐凍害性は高かった。

また、今回コンクリートに加えた振動条件の範囲では、振動締め固めの過不足により、硬化コンクリート表面の気泡発生状況に差異は認められたが、充てん不良や材料分離は認められず、耐凍害性に対する悪影響も認められなかった。

4. まとめ

中流動コンクリートのコンクリート製品への適用を目的とし、振動条件を変えることができるテーブルバイブレーターを用いて、振動条件が中流動コンクリートの流動性や硬化後の諸物性に与える影響を検討した今回の研究の範囲から、以下のことが明らかとなった。

- 1) 普通コンクリートに用いられる振動力を100%とした場合、その33%以下の微弱な振動を短時間与えるだけで、中流動コンクリートの流動性は高流動コンクリートと同等になることが判明した。
- 2) 振動力比33%の場合、コンクリート製品で外観の問題から重要視される、硬化コンクリート表面に発生する気泡を少なくでき、かつ、気泡の大きさも小さくできる。

- 3) 微弱な振動で打込みを行っても、中流動コンクリートの強度発現と耐凍害性は、普通コンクリートと同等である。

参考文献

- 1) 大竹淳一郎ほか：製品向け中流動コンクリートの振動締め固め成形に関する実験，セメント・コンクリート論文集，No.55，pp.562-532，2001
- 2) 松嶋信行，大和功一郎，米田俊一：二次製品用高流動コンクリートの振動成形に関する研究，宇部三菱セメント研究報告，No.4，pp.30-36，2003
- 3) 浦野真次ほか：加振スランプフロー試験によるフレッシュコンクリートのコンシステンシー評価指標に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.2，pp.247-252，2001.6
- 4) 須藤裕司，鮎田耕一，中山圭介，杉山高一：減水剤が低振動用コンクリートの流動保持特性と強度発現に与える影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp.175-180，2000.6
- 5) 須藤裕司，鮎田耕一，芳野友則：減水剤と蒸気養生が低振動用コンクリートの耐久性に与える影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.2，pp.175-180，2001.6
- 6) 須藤裕司，鮎田耕一，芳野友則：蒸気養生した低振動用コンクリートの耐凍害性と強度発現，セメント・コンクリート論文集，No.55，pp.450-457，2001
- 7) 須藤裕司，中山圭介，古屋裕子，鮎田耕一：新型メラミン系減水剤の流動保持機構，セメント・コンクリート論文集，No.54，pp.312-317，2000
- 8) Sudoh, Y. and Ayuta, K.: Slump Retention of a Melamine-Based New Type Superplasticizer, Sixth CANMET/ACI International Conference Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Oct. 2000