U.D.C 693.556.4

締固めを必要とする高流動コンクリートの締固め方法の設定に関する検討

鈴木　将充*　　早川　健司*

要　約：　本研究では，締固めを必要とする高流動コンクリートを対象として，流動性と粘性並びに棒状バイブレータの起振力が振動伝播に及ぼす影響を把握し，定量的に締固め方法を設定することを目的に，スランプフロー 45 cm 程度のコンクリートを用いて実験的に検討を行った。検討の結果，締固め時の振動伝播に及ぼす影響は，実用的に締固めを必要とする高流動コンクリートが成立する範囲で配合条件を変化させた場合よりも，棒状バイブレータの起振力の方が大きいことが明らかとなった。従って，棒状バイブレータの種類・能力を考慮して締固め方法を設定することが重要となる。締固め方法は，充塡に必要な締固めエネルギーに基づくことで締固め時間および締固め間隔を定量的に設定できる可能性が示唆された。

ｷｰﾜｰﾄﾞ：　高流動コンクリート，充塡，締固め，振動伝播，締固めエネルギー

目　次：

1. はじめに
2. 各種条件が振動伝播に及ぼす影響
3. 締固め方法の設定
4. おわりに

1. はじめに

締固めを必要とする高流動コンクリートは，普通コンクリートと比較して，流動性が高く，充塡に必要な締固めが軽減できるため，標準的な配筋量の構造物に対して，打込み時の筒先挿入間隔を長くすることや締固め時間を短くすることで作業が省力化され，施工の合理化を図ることが期待されている。現在，一般 RC 構造物を対象とした締固め方法等は定まっておらず，技術情報の整理が進められている状況である。施工の合理化という観点では，自己充塡性を有する高流動コンクリートの適用も考えられるが，締固めを必要とする高流動コンクリートの方が安定して供給可能かつ材料コストを低減できるといった利点がある。

筆者らはこれまでに締固めを必要とする高流動コンクリートの締固め方法について検討しており，比較的起振力の小さい軽便バイブレータを使用した場合でも，短い締固め時間で充塡が完了することを報告している[1)]。しかし，一般的にコンクリートの流動性と粘性や棒状バイブレータの起振力により振動の伝播距離が異なることが言われており，適切な締固め方法を設定するためには，これらの影響を把握する必要がある。

締固め方法の設定については，土木学会コンクリート標準示方書の記述[2)] に準拠すると定性的な判断になり条件毎に確認実験を行わなければならないため，定量的に検討可能な設定方法が必要となる。

本研究では，締固めを必要とする高流動コンクリートを対象として，流動性と粘性並びに棒状バイブレータの起振力が振動伝播に及ぼす影響を把握し，定量的に締固め方法を設定することを目的に，スランプフロー 45 cm 程度のコンクリートを用いて検討を行った。

表 1　使用材料

種類	記号	物性等
水	W	上水道水（密度 1.00g/cm³）
セメント	C	普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）
細骨材	S1	砕砂（表乾密度 2.63g/cm³，粗粒率 3.02）
	S2	砂（表乾密度 2.61g/cm³，粗粒率 1.56）
粗骨材	G	砕石 2005（表乾密度 2.62g/cm³，粗粒率 6.91）
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）

2. 各種条件が振動伝播に及ぼす影響

2.1　実験概要

2.1.1　使用材料および配合

表 1 に使用材料，表 2 にコンクリートの配合およびフレッシュ性状を示す。締固めを必要とする高流動コンクリートは目標スランプフロー 45 cm を基本とし，一般的な高性能 AE 減水剤を用いる配合とした。流動性はスランプ・スランプフロー，粘性は塑性粘度の測定に有効とされている 400 mm フロー到達時間[3)] を指標とした。なお，到達時間が短い程，塑性粘度，即ち粘性は小さくなる。流動性は，配合を変えずに化学混和剤の添加量で調整し，粘性は，実用的な範囲で s/a や W/C といった配合条件を変えて調整した。いずれも，顕著な材料分離は発生せず，目標とするスランプ・スランプフローと空気量を満足する配合であった。

フレッシュ性状について，スランプ・スランプフロー試験，空気量試験，コンクリート温度測定は各 JIS 規格に準拠して行い，加振ボックス充塡試験は JSCE-F701 を参考に仕切り板を開放すると同時に棒状バイブレータを始動させて行った。加振ボックス充塡試験では，材料分離抵抗性

＊技術研究所　土木材料グループ

表 2　コンクリートの配合およびフレッシュ性状

記号 SF-W/C-s/a	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3) W	C	S1	S2	G	SP C×%	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	CON 温度 (℃)	400mm フロー到達時間 (sec)	ボックス間隙通過速度 (mm/sec)	ボックス粗骨材残存率 (%)
45-50-50	50	50	175	350	659	220	877	1.3	23.5	45.0	3.7	18	2.25	24.5	104.2
55-50-50			175	350	659	220	877	1.5	-	53.0	3.0	18	1.73	4.0	99.7
12-50-50			175	350	659	220	877	0.6	12.5	-	3.4	19	-	3.1	101.4
45-50-45		45	175	350	593	198	964	1.0	22.0	42.0	3.1	19	1.10	8.0	88.9
45-50-55		55	175	350	725	242	789	1.6	22.0	45.0	3.1	19	2.54	36.0	104.3
45-45-50	45	50	167	371	660	220	878	1.5	23.5	47.0	3.0	18	2.46	23.8	99.2
45-55-50	55		181	329	659	220	878	1.1	22.5	43.5	3.7	18	1.00	11.9	95.5

表 3　試験条件

項目	水準
流動性	SL12cm, SF45, 55cm（φ40-240Hz-s/a50%-W/C50%）
細骨材率(粘性)	s/a45, 50, 55%（φ40-240Hz-SF45cm-W/C50%）
水セメント比(粘性)	W/C45, 50, 55%（φ40-240Hz-SF45cm-s/a50%）
振動機の径(起振力)	φ30, 40（240Hz-SF45cm-s/a50%-W/C50%）
周波数(起振力)	120, 240Hz（φ40-SF45cm-s/a50%-W/C50%）

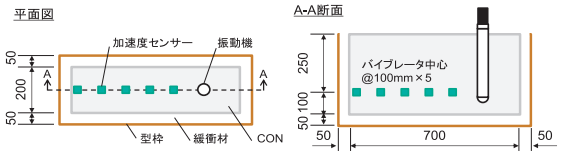

図 1　小型試験体概要

を表す指標として粗骨材残存率と補完的に間隙通過速度を算出した。なお，粗骨材残存率は充塡先の B 室上部の結果を用いた。

2.1.2　小型振動締固め試験

図 1 に試験体概要，表 3 に試験条件を示す。加速度の測定位置は，バイブレータの中心から 100 mm 間隔で 500 mm の位置までとした。棒状バイブレータは所定の挿入深さに 3 秒程度で達し，その後 5 秒間の加速度振幅の平均値として整理した。

2.2　実験結果と考察

コンクリートのフレッシュ性状（表 2）は，基本となる 45-50-50 と比較して次の通りであった。流動性を大きくした場合，材料分離抵抗性が低下することで間隙通過速度も低下した。流動性を小さくした場合，間隙通過速度が低下して締固め時間が長くなったが，充塡先で顕著な分離を生じていないことから材料分離抵抗性が向上したものと考えられる。粘性を変化させた場合，想定通り材料分離抵抗性も変化した。

図 2 に流動性が振動伝播に及ぼす影響を示す。棒状バイブレータ近傍では各配合に差が生じているが，SF45 と SL12 は 20 cm 以降同様の挙動を示し，SF55 は 20～30 cm で他より応答加速度が大きいが 40 cm 以降で他と同様の挙動を示した。流動性の影響については，30 cm 程度までは異なるが，それ以降では振動伝播に大きな影響を及ぼさない結果であった。ただし，締固め時のコンクリート表面の状態より，締固めが十分であると判断できる[2] までの時間と距離は，SF55：3 秒-50 cm，SF45：5 秒-50 cm，

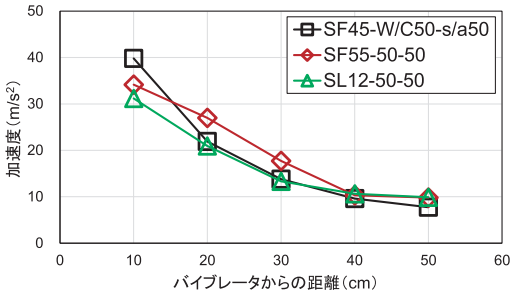

図 2　流動性の影響

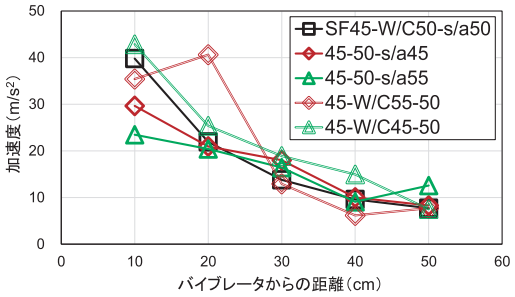

図 3　粘性の影響

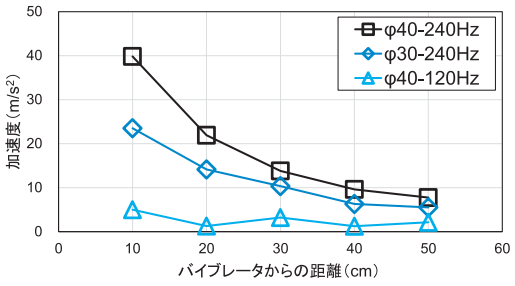

図 4　起振力の影響

SL12：30 秒-40 cm であり流動性の大きい配合が短かく長かった。

図 3 に粘性が振動伝播に及ぼす影響を示す。s/a の影響については，s/a50 より増減するとバイブレータ近傍で応答加速度が小さくなったが，20 cm 以降で同様の挙動を示した。W/C の影響については，粘性の小さい W/C55 の 20 cm の応答加速度が大きいがそれ以外の箇所で W/C50 と大きな差はなく，粘性の大きい W/C45 は 50 cm まで他より応答加速度が僅かに大きかった。粘性の影響については，s/a と W/C で粘性を変化させた場合の振動伝播の挙動は異なり，30 cm 程度まで影響が大きいが，締固めが十分で

表 5　コンクリートの配合およびフレッシュ性状

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)								スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	CON 温度 (℃)	400mm フロー到達時間 (sec)	ボックス間隙通過速度 (mm/sec)	ボックス粗骨材残存率 (%)
			W	C	S1	S2	S3	G1	G2	SP C×%							
30-45-20N	52	51.4	175	337	457	228	230	602	260	1.25	24.0	46.0	4.2	16	1.51	44.0	83.2

表 4　使用材料

種類	記号	物性等
水	W	地下水（密度 1.00g/cm³）
セメント	C	普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）
細骨材	S1	砕砂（表乾密度 2.64g/cm³, 粗粒率 3.00）
	S2	砂（表乾密度 2.63g/cm³, 粗粒率 1.60）
	S3	石灰砕砂（表乾密度 2.66g/cm³, 粗粒率 2.80）
粗骨材	G1	砕石 2005（表乾密度 2.63g/cm³, 粗粒率 6.60）
	G2	砕石 2005（表乾密度 2.65g/cm³, 粗粒率 6.60）
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）

表 6　試験条件

項目	水準
起振力	φ28 - 200Hz（既報 [1] の締固め条件）
	φ30 - 240Hz
	φ40 - 240Hz

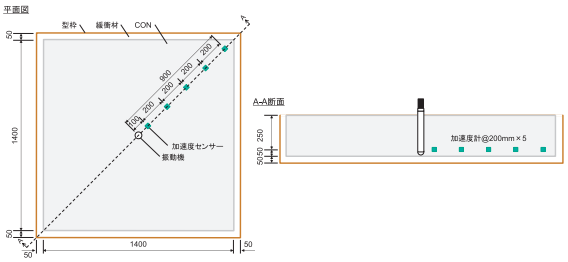

図 5　大型試験体概要

あると判断できるまでの時間と距離は，いずれも 5 秒-50 cm であったことから，50 cm 程度まで離れると締固めに大きな影響を及ぼさないものと考えられた。

図 4 に起振力が振動伝播に及ぼす影響を示す。起振力はバイブレータの錘の偏心質量と偏心距離に比例し，周波数の 2 乗に比例する[4]。各振動条件の起振力の比はおおよそ φ40-240 Hz＝4：φ30-240 Hz＝2：φ40-120 Hz＝1 である。各距離の応答加速度は，バイブレータに近い程，差が大きく，振動条件の影響を大きく受けるが，距離が離れるのに伴い，差が小さくなった。締固めが十分であると判断できるまでの時間と距離は，φ30-240 Hz：10 秒-50 cm であった。φ40-120 Hz では起振力が小さく，コンクリート表面の状態より，締固めが進行していないと判断され，本実験で用いたコンクリートに必要な最小起振力を満たしていないものと考えられた。起振力については，50 cm 程度まで離れても締固めに影響を及ぼす結果となった。

2.3　2 章のまとめ

締固め時の振動伝播に及ぼす影響は，実用的に締固めを必要とする高流動コンクリートが成立する範囲で配合条件を変化させた場合よりも，棒状バイブレータの起振力の方が大きく，棒状バイブレータの種類・能力を考慮して締固め方法を設定すればよいことが分かった。

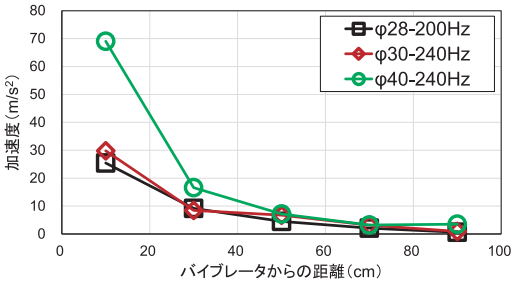

図 6　バイブレータからの距離と加速度の関係

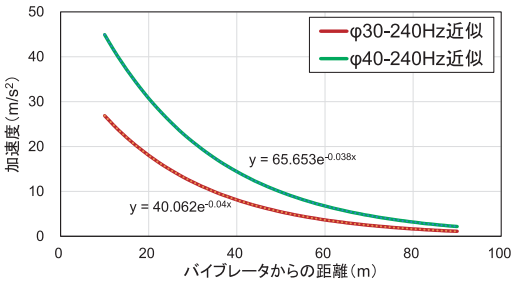

図 7　加速度分布

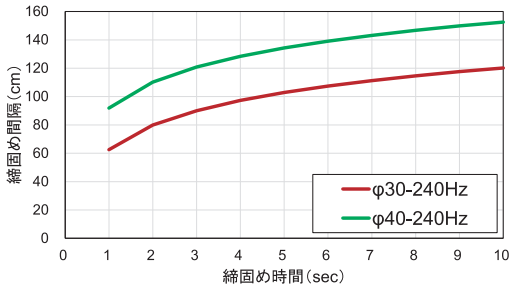

図 8　締固め時間と締固め間隔の関係

3. 締固め方法の設定

前章の結果を踏まえ，市中のプラントで製造した締固めを必要とする高流動コンクリートを用いて各振動条件の加速度を計測し，充填に必要な締固めエネルギーを求めて締固め方法を設定する。

3.1　実験概要

3.1.1　使用材料および配合

表 4 に使用材料，表 5 にコンクリートの配合およびフレッシュ性状を示す。フレッシュ性状は，2 章と同様の試験を行った。

3.1.2　大型振動締固め試験

図 5 に試験体概要，表 6 に試験条件を示す。2.2 より，起振力は 50 cm 程度まで離れても締固めに影響を及ぼしたため，加速度の測定位置はバイブレータの中心から 200 mm 間隔で 900 mm の位置までとした。試験条件は，既報[1] で使用した φ28 軽便バイブレータに加え，実務で使用する可能性が高い φ30 と φ40 棒状バイブレータとした。

なお，加速度は 2 章と同様の方法で整理した。

3.2 実験結果

市中プラントのコンクリートは 2 章で基本とした 45-50-50 と比較して，材料分離抵抗性が小さい配合であった。

図 6 にバイブレータからの距離と加速度の関係を示す。ϕ28-200 Hz と ϕ30-240 Hz はほぼ同様の挙動を示し，ϕ40-240 Hz は 30 cm 程度まで応答加速度が大きく，50 cm 以降で他と同様の挙動を示した。

3.3 締固めエネルギーによる締固め方法の設定

締固め方法は次の手順で設定した。まず，充填に必要な締固めエネルギーは，既報[1] の充填試験で外観の充填状況とコアの硬化試験から品質が確保されていると判断した締固め方法（ϕ28-200 Hz，バイブレータからの距離 50 cm，締固め時間 5.33 sec）と図 6 に示す距離 50 cm の応答加速度を用いて，既往の研究[5] の式（1）により求めた。計算の結果，充填完了エネルギーは 0.032 J/ℓ であった。次に，この数値を満足するための必要加速度を式（2）より求める。次に，一般的にコンクリート中の加速度分布は式（3）の形で表されるため，必要加速度を満足するバイブレータからの距離を式（4）より求める。ϕ30-240 Hz と ϕ40-240 Hz の加速度分布は，図 7 に示す応答加速度の近似式を用いた。バイブレータからの距離は，振動伝播範囲の半径を表しているため，2 倍の距離を締固め間隔とした。

$$E=\frac{\rho\cdot\alpha^2\cdot t}{4\pi^2\cdot f} \quad (1)$$

$$\alpha=\sqrt{\frac{4\pi^2\cdot f\cdot E}{\rho\cdot t}} \quad (2)$$

$$\alpha=a\exp(-bx) \quad (3)$$

$$x=-\frac{1}{b}\ln\frac{\alpha}{a} \quad (4)$$

ここに，E：t 秒間にコンクリートが受ける締固めエネルギー（J/ℓ），t：締固め時間（sec），ρ：試料の単位容積質量（kg/ℓ），α：加速度（m/s^2），f：振動数（s^{-1}），x：バイブレータからの距離（cm），a，b：定数

図 8 に締固め時間と締固め間隔の関係を示す。締固め方法はこの図を参考に設定するが，バイブレータ近傍の材料分離を考慮すると，1 箇所当りの締固め時間は 5 秒程度とするのが望ましいと考えている。

4. おわりに

締固め方法は，充填に必要な締固めエネルギーに基づくことで締固め時間および締固め間隔を定量的に設定できる可能性が示唆された。今後は，実大規模の施工実験により設定した締固め方法の妥当性を検証する。

謝　辞

本研究は東京理科大学と共同で実施したものであり，多大なご指導，ご協力をいただいた関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

1）鈴木将充・加藤佳孝・他 1 名：締固め時間が締固めを必要とする高流動コンクリートの充填に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 43, No. 1, pp. 820-825, 2021.7
2）土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書［施工編］，pp. 120-122, 2018.3
3）小門武・宮川豊章：スランプフロー試験による高流動コンクリートのレオロジー定数評価法に関する研究，土木学会論文集，No. 634, V-45, pp. 113-129, 1999.11
4）日本工業規格：JIS A 8610 建設用機械及び装置―コンクリート内部振動機，2004.3
5）國府勝郎，上野敦：締固め仕事量の評価に基づく超硬練りコンクリートの配合設計，土木学会論文集，No. 532/V-30, pp. 109-118, 1996.2

STUDY ON SETTING A COMPACTION METHOD FOR HIGH-FLUIDITY CONCRETE THAT REQUIRES COMPACTION

M. Suzuki, and K. Hayakawa

In this study, the effects of flowability, viscosity, and vibratory force of a rod vibrator on vibration propagation were experimentally studied using concrete with a slump flow of approximately 45 cm in order to understand the effects on vibration propagation and to set up a compaction method for high-fluidity concrete that requires compaction.

The results of the study revealed that the influence of the vibratory force of the rod vibrator on vibration propagation during compaction was much greater than when the mixing conditions were varied to the extent that the high-fluidity concrete that requires compaction in practice is feasible. Therefore, it is important to set the compaction method considering the type and capability of the rod vibrator. It is suggested that the compaction method could be based on the compaction energy required for filling, which would allow quantitative setting of the compaction time and compaction interval.