

論文 搖動式加振装置を用いたフレッシュコンクリートの洗い分析試験

稻田 修^{*1}・橋本親典^{*2}・林 銳治^{*3}・村田 光^{*4}

要旨：外部振動機によるフレッシュコンクリートの締固め方法では、振動源から型枠内のコンクリートに振動が伝達するため、距離減衰が大きく、振動の過剰な領域と過小な領域が偏在し、過剰な領域では材料分離が発生し不均一な締固めになることが多い。

本研究は、型枠全体を搖動させ均一な振動を型枠全体に与えて締固めを行う新しい加振装置を開発し、従来の加振装置と新しい搖動型の加振装置の締固め効率を、全量洗い分析試験を行うことで実験的に比較した。その結果、搖動式加振による締固めでは、材料分離を抑えられた比較的均一なコンクリートが短い締固め時間で製造できることが明らかになった。

キーワード：搖動式加振装置、テーブルバイブレータ、洗い分析試験、材料分離

1. はじめに

通常のコンクリート 2 次製品のフレッシュコンクリートの締固め方法は、振動締固め、加圧締固めおよび遠心力締固め等がある。小型製品の外部振動機による締固めでは、型枠テーブルバイブルエタや壁打ちバイブルエタなどの型枠が固定された状態で、ある振動源から型枠内のフレッシュコンクリートに振動を与える方法が一般的である¹⁾。これらの締固め方法では、振動源から遠ざかるにつれて急激に締固め効率が低下するために締固め時間が長くなる傾向にあり、振動が一樣に伝達されない。その結果、全体が締め固められるまでに振動源付近のコンクリートが過度の振動を受けることになり材料分離が発生しがちになるという欠点を有している。この問題を解決する締固め方法の一つとして、型枠全体を一定の振幅で振動

することによりコンクリート全体に一樣な締固めエネルギーを与える方法（以下、搖動式加振装置と称す）を開発した。

2. 研究の目的

コンクリートの材料分離と締固め作業とは相反する現象であり、古くから研究が行われている。従来の材料分離では、ブリーディング水の発生による強度低下やコンクリートの s/a の分布の変動による不均一性に着目した例が多い。

本研究では、従来のバイブルエタに対する搖動式加振装置による締固めの有効性を検証するために、粗骨材の沈降による分離に着目した。

54 リットルの全量洗い分析試験の実験を合計 13 回行い、高さ方向に関する粗骨材とモルタルの容積比の変動から相対的に材料分離を定量化した。

表-1 実験に用いたコンクリートの示方配合表

	最大粗骨材寸法 (mm)	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	混和剤
配合 A	25	1.5	32	37	142	444	667	1150	5.33
配合 B	25	1.5	32	37	151	472	651	1121	5.66
配合 C	25	1.5	32	37	162	506	640	1102	5.55

*1 德島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 德島大学助教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*3 旭コンクリート工業(株) 西部支社製造課

*4 カヤバ工業(株) 油圧機器事業部

3. 実験概要

3.1 使用材料とコンクリートの配合

使用材料としては、普通ポルトランドセメント（比重 3.16）、岐阜県各務原市上戸町産の玉碎石（最大寸法 25 mm、比重 2.60、F.M. 7.10）、および川砂（比重 2.57、F.M. 2.96）、ナフタリンスルホン酸系高性能減水剤（比重 1.2）を用いた。目標スランプを大きく変化させるために、W/C と s/a を一定とした単位水量を 142,151,162 kg/m³ の 3 種類に変化させた配合を設定した。空気量は 1.5% として空気量調整剤は使用していない。実験に用いたコンクリートの示方配合を表-1 に示す。

実験は著者らの一人が所属するコンクリート 2 次製品工場の屋外ヤードにおいて、工場で実際に使用している材料を用いた。従って、13 回の実験に置いて細骨材の表面水率が最大で 7% 前後になった場合もあった。そのため、実測スランプは、約 1 cm から 21 cm まで変化し、同一の W/C にもかかわらず圧縮強度が 12N/mm² 程度、変化した。実験で製造したフレッシュコンクリートの性状と締固め条件を本論文第 4 頁下段の表-2 に後掲する。なお、本研究では材料分離を全量洗い分析による相対評価（5 頁の式(1)参照）によって検討しているので、バッチ間の単位量の変動は無視できるものと考えている。

3.2 型枠の形状および加速度計の位置

型枠は、150×600 mm のメタルフォームを 11 枚用いることにより製作した。型枠の各部位における振動のレベルを知るために、加速度計を型枠の 600 幅面と 150 幅面にそれぞれ、上下、前後、左右の 3 方向の加速度を計測可能となるように設置した。この型枠の形状及び加速度計の位置を、図-1 に示す。

型枠を 2 個据え付け可能なフレーム架台の形状、型枠の据え付け位置、天板の据え付け位置、およびフレーム架台に設置した上下方向の加速度計の位置を図-2 に示す。また、加速度計は型枠に設置したものとを合わせ合計で 7 個設置した。

取外しが可能な天板設置の目的は、練り混ぜた

フレッシュコンクリートを天板上に置いて流動化させ自然に型枠内に流下させることと、天板のしきりの構造をコの字状にすることで片方の型枠にしかコンクリートが流れ込まない状態にし、天板の向きを変えるだけで 2 つある型枠を交互に使用可能にすることの 2 つである。その結果 1 日に 2 回の洗い分析試験が容易に行えるようになった。

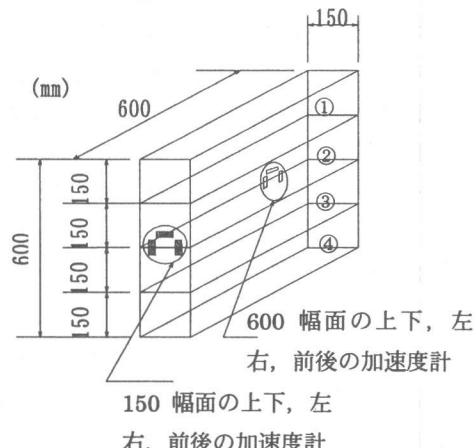


図-1 型枠内寸の形状および型枠加速度の位置

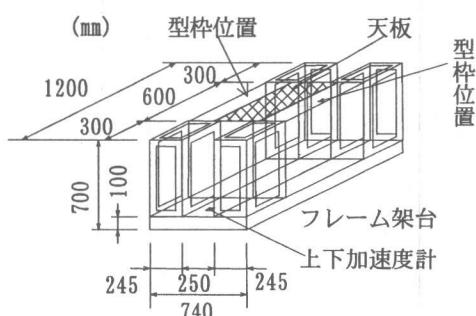


図-2 フレーム架台の形状および
天板、加速 度計の位置

3.3 加振方法

3.3.1 搖動式加振

搖動式加振は、本実験において締固め効率向上のために開発された加振方法である（以下、搖動型と称す）。振動台の中心を軸に 2 本の油圧シリンダーにより左右にシーソーのような動きをする。振動台の動きに合わせて上載した型枠本体も連動するため全体的な加振が可能となり型枠内のフレ

ツシュコンクリートには振動エネルギーが一様に伝わると考えられる。また、天板で流動化されたコンクリートが、型枠内で流動化が減衰してくると、そのフレッシュコンクリートは型枠と共に動くと考えられるため、その後の材料分離が抑えられる。振動源として油圧シリンダーを用いている。本加振装置の性能は、油圧ユニットを用いていることにより、周波数が 0~300Hz まで、振幅が 0~±30 mmまで制御可能である。揺動式加振装置の形状、および型枠の設置方法を図-3 に示す。

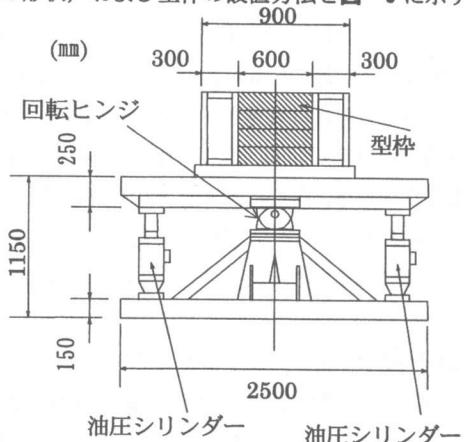


図-3 揺動式加振装置と型枠の設置

3.3.2 テーブルバイブレータによる加振

テーブルバイブレータは、テーブルの下部に振動源を取り付けた振動台（以下、従来型と称す）であり、コンクリートの 2 次製品工場で、一般的によく用いられる形式である。本実験で用いたテーブルバイブレータの周波数制御は、200Hz, 180Hz の 2 種類で、振幅の調節はできない。従来型では、局部的に下部からの振動により締固めるため、型枠内にフレッシュコンクリートを打ち込んでいくに従い、振動が減衰し一様な締固めができないと予測される。

3.3.3 壁打ちによる加振

壁打ちによる加振は、1 体型の壁型枠の側面に振動源を取り付け、側面から局部的に締固める加振装置（以下、壁打ち型と称す）である。今回実験に用いた従来型と同様に、周波数の調節は

200Hz, 180Hz の 2 種類のみであり、振幅の調節はできない。壁打ち型による締固めでは、振動源付近の側面から振動が型枠内部のフレッシュコンクリートに伝達するため、振動源から遠い領域では振動が伝達されにくく、従来型と同様に一様な締固めができない。

3.4 実験方法

3.4.1 コンクリートの練混ぜ方法

1 回の実験に必要なコンクリート量は、型枠容積（54 リットル）および強度試験用供試体、スランプ試験、空気量試験用に合計約 80~95 リットルである。コンクリートの練混ぜには、練混ぜ容積 60 リットルの強制 2 軸ミキサー（以下、ミキサーと称す）を用いた。練混ぜによるフレッシュコンクリートの性質を均一にするため、全練混ぜ時間を 120 秒とし、空練りで 30 秒間、ミキサーを止めたあと水を注ぎながら 90 秒間、練り混ぜた。

3.4.2 コンクリートの打込み方法

1 バッチの練混ぜが完了した後に、スランプ試験、空気量試験に必要な容積の試料を別の容器に即座に移し、これらの試験と平行して型枠へのフレッシュコンクリートの打込みを行った。コンクリートの打ち込みは、型枠を振動もしくは揺動させた状態に保持し、フレッシュコンクリートを天板状に置いて自然に型枠内に流下させる方法で打ち込んだ。1 バッチ容積が 40, 50 リットルのときの打継ぎは 1 バッチ目の打込みが完了する頃に、ちょうど 2 バッチ目の試料が練り終わるようにして、2 バッチ目も同様の方法で打込みを行った。スランプは、表-2 に記す 2 回の測定値の平均で示した。締固め時間は、フレッシュコンクリートを天板に置いたときを開始時刻とし、振動台を停止する時を終了時刻とし、3 種類の振動方法に関係なく同一とした。また、打継ぎ待機時間には、振動台を停止し、締固め時間には入れていない。続けて練り混ぜているため、締固めの停止時間は無視できるくらい小さい。

3.4.3 全量洗い分析試験方法

洗い分析は、「まだ固まらないコンクリートの洗い分析試験方法(JIS A 1112-1989)」に従って行った。通常の洗い分析は、サンプリングした代表的な試料について行われるが、本実験においては、洗い分析試験のデータを高い精度で知るため全量について行った。全量洗い分析とは、図-1に示した高さ方向に、試料を15cm間隔で4層に分け、各層間での材料の構成比率の変動より、材料分離の程度を比較するものである。なお、上層から順に第1層から第4層とした。

全量洗い分析試験の手順を以下に示す。

1) 試料を型枠一杯まで打込み、締固めが終了すると1層目のメタルフォームを取り外し1層目の範囲にある試料をハンドスコップでかき出す。

2) かき出した試料の正確な容積を知るために、Φ20×22cmの大きさの空気量試験用の鋼製の容器に試料を詰め込む。容器1杯目は一杯まで締め固めながら充填し、2杯目は、容器の上部から試料までの距離を、容器の周囲の直行する4点で、メジャーを用いて計測しその4点の平均値から試料高さを決定し2杯目試料容積を求めた。型枠の各層の容積はこの容器約2杯分であるため、2杯試料合計から各層の試料容積を算出した。

3) 取り出した試料は別の容器に移し、試料が硬

化しないように水を張った。この作業を各層においても同様に行い、各層におけるコンクリート容積(以下、 V_c と称す)を求めた後、コンクリートが硬化しないように別々の容器に水を張りその中に各層ごとに試料を沈めた。

5) 各層ごとに取り出した試料を、5mmのふるいの上に少しづつのせ水でモルタル層を洗い流すことにより、最終的には各層ごとの試料の中から各層ごとの粗骨材のみを採取し4層に分けておく。

6) 採取した粗骨材を日なたで、表乾状態になるまでそれぞれの層ごとに分けて乾燥させた。表乾状態になった層の粗骨材の質量を計測し記録した。4層とも粗骨材質量が求まると粗骨材の比重から粗骨材の絶対容積(以下、 V_g と称す)を計算により求めた。各層のモルタルの絶対容積(以下、 V_m と称す)は、各層の V_c と各層の V_g の差を計算により求めた。

材料分離の程度を評価するためのパラメーターの一つとして、本実験において求めた各層ごとの V_g と V_m の割合である粗骨材とモルタルの容積比(以下、 V_g/V_m と称す)を用いることにした。

表-2 実験に用いたフレッシュコンクリートの性状と締固め条件

実験番号	気温(℃)	コンクリート温度(℃)	配合	実測平均スランプ(cm)	実測空気量(%)	28日圧縮強度(N/mm²)	加振装置	周波数(Hz)	振幅(mm)	締固め時間(s)
1	30	30	A	3.0	2.5	53.8	従来型	200	—	136
2	29	30	A	0.75	3.0	58.2	揺動型	100	±0.14	125
3	31	29	B	7.75	2.5	46.4	揺動型	100	±0.14	60
4	32	33	B	21	1.0	46.7	従来型	200	—	300
5	32	33	B	6.0	1.7	48.8	従来型	180	—	396
6	30	32	B	17	1.1	52.6	揺動型	100	±0.06	300
7	32	32	B	15	1.0	56.8	揺動型	80	±0.07	203
8	31	31	B	7.0	1.7	—	壁打ち型	210	—	241
9	32	32	B	12	1.3	—	揺動型	80	±0.13	212
10	31	33	B	17	1.4	52.3	従来型	200	—	400
11	31	31	B	9.0	1.9	50.9	従来型	200	—	440
12	27	27	B	1.0	3.0	54.4	壁打ち型	210	—	900
13	29	28.5	C	11	1.5	52.5	壁打ち型	210	—	390

4. 実験結果と考察

4.1 粗骨材質量の補正値

示方配合表から、求められる V_g の値と、洗い分析試験によって得られた各層の V_g の合計した値とは一致するはずである。従って、その差は粗骨材の表乾状態の程度による表面水の違いと考え、 V_g を補正した。

補正の手順としては、実験データとして得られた試料体積の合計、つまり型枠に充填された全試料体積から示方配合の計算上の粗骨材質量を算定する。実験データとして得られた粗骨材質量の合計から計算上算定した粗骨材質量の値を引いた値が余剰表面水であるとする。この余剰表面水を、各層の粗骨材質量から、各粗骨材量に比例して分配した余剰表面水量を引くことにより誤差を補正した。以下に示す V_g/V_m の値はこの補正により求めた値である。

4.2 材料分離程度の検討

4.2.1 試料高さと V_g/V_m の関係

図-1 に示した 4 層を上から順に、試料高さ 1.2.3.4 と位置づけ、13 回の全量洗い分析試験で得られた各試料高さと V_g/V_m の関係を図-4 に示す。試料高さが低くなるに従い、 V_g/V_m の値は増加傾向にある。配合計算上の V_g/V_m から実測 V_g/V_m が離れる程、材料分離の程度が大きいことを示す。この分離は、モルタルに比べて比重の大きい粗骨材が振動によって下層に沈んだことに起因している。

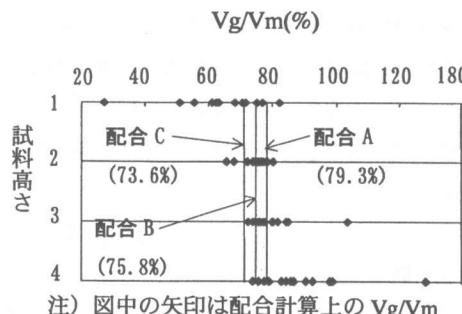


図-4 試料高さと V_g/V_m の関係

4.2.2 スランプと材料分離の関係

スランプが大きいコンクリートほど一般的に材料分離は起こりやすいと考えられる。本実験における材料分離の程度を考える上で、下記に記す式(1)で定義される分離指数というパラメーターを定めた。分離指数の値が零に漸近するほど材料分離は起こっていないことを意味する。

$$\text{分離指数} = (\text{第 } 1 \sim 4 \text{ 層の } V_g/V_m \text{ のうち最大値と最小値の差}) / (\text{第 } 1 \sim 4 \text{ 層の } V_g/V_m \text{ 平均値}) \cdots (1)$$

図-5 は、分離指数と実測スランプとの関係を示す。従来型はスランプが大きくなるに従い、分離指数が大きい。壁打ち型の実験回数は少ないが、従来型と同様にスランプが増加するほど、分離指数が大きい。

一方、撓動型はスランプが大きくなても分離指数は概ね小さい。なお、撓動型の実験データでスランプが 8.0 cm 付近（表-2 の実験番号 3 のデータ）において分離指数が 0.5 付近と大きな値を示しているが、これは撓動型の実験データで、スランプが 1.0 cm 付近（表-2 の実験番号 2 のデータ）のノースランプコンクリートの時と同じ振動条件であったことが原因であり、もう少し振幅を小さくすることにより、分離指数を低下させることが可能である。

従って、コンクリートのコンシスティンシーに応じて、周波数と振幅を変化させることにより、撓動式加振装置は、材料分離を抑えた最適な締固めが可能となる。

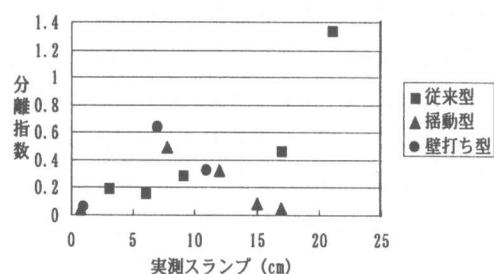
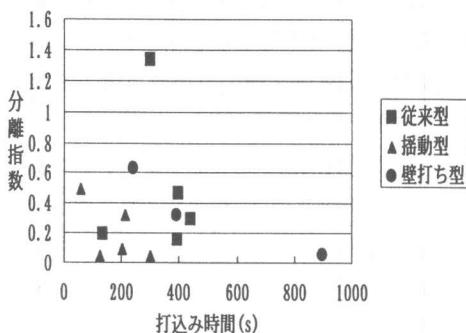


図-5 スランプと分離指数との関係

4.2.3 加振方法の違いによる締固め時間

図一6は、締固め時間と分離指数の関係を示す。揺動型による締固めでは、材料分離が小さく、締固め時間も短く、従来型や壁打ち型よりも作業効率が良い。



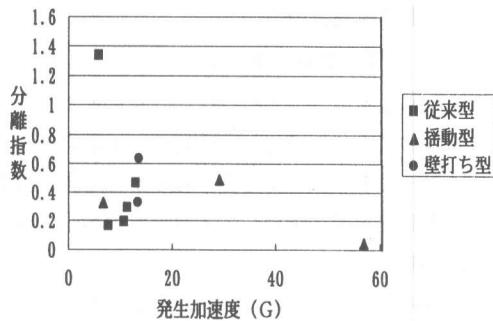
図一6 コンクリート締固め時間と分離指数の関係

4.3 各部位の加速度と分離指数との関係

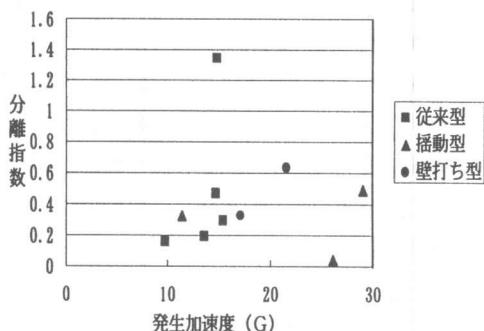
図一1および図一2に示した位置に設置した加速度計により、試料の打込み開始から締固め完了までの各部位における加速度を計測した。各部位のそれぞれの加速度は振動エネルギーの伝搬により発生するため、加速度の大きさは振動の伝達度を示すと考えられる。当然、型枠にコンクリートが打ち込まれるに従い加速度は減衰していく。

図一7は、フレーム架台上下加速度と分離指數の関係を図一8には150幅面の上下、左右、前後の3方向の合成加速度と分離指數の関係を示す。従来型と壁打ち型では発生加速度が小さいにもかからず分離指數は大きな値を示す。これは一様な加振が行われていないのに材料分離が起こったものと考えられる。これに反して、揺動型は発生加速度が大きいにも関わらず分離指數は小さな値を示しており、一様な加振状態でも材料分離が起こりにくい。600幅面の上下、左右、前後の3方向の合成加速度と分離指數の関係についても同様な傾向であった。

したがって、揺動型は振動エネルギーを一様に伝えながらも均一なコンクリートが打ち込まれる加振装置であると考えられる。



図一7 フレーム架台の上下加速度と分離指数の関係



図一8 型枠150幅面の合成加速度と分離指数の関係

5. 結論

本実験の範囲内で、得られた結論を以下に記す。

1) 従来型および壁打ち型における締固めとは異なり、揺動型による締固めでは材料分離が起こりにくい。

2) 揆動型による締固めでは、周波数、振幅を容易に変更可能でありコンステンシーの大きさによって締固めのレベルをコントロールでき、発生加速度のレベルが大きいにも関わらず、材料分離が発生しにくい。また、発生加速度のレベルが大きいため、従来型や壁打ち型に比べて、締固め時間が短い。

参考文献

- 1) 社) 日本コンクリート工学協会編：第8編
コンクリート製品 第1章コンクリート製品
1,2 製造方法 1,2,3 成形、コンクリート便覧[第2版]，pp. 695-696，技報堂出版，1996.2