

論文 締固めを必要とする高流動コンクリートの充填性の評価方法の検討

吉田 新*1・加藤 佳孝*2・高橋 駿人*2・鈴木 将充*3

要旨：締固めを必要とする高流動コンクリートは、振動締固めの影響を考慮して充填性を評価する必要がある。しかし、締固めを必要とする高流動コンクリートの充填性の評価方法が確立されていないのが現状である。既往の研究では、ボックス形充填試験を用いて検討が進められているが、本研究では、より簡易に充填性を評価できる試験方法を検討するために、加振 V ロート試験と加振スランプフロー試験を実施した。その結果、間隙通過速度と流下速度に相関があることが確認された。

キーワード：締固めを必要とする高流動コンクリート、充填性、流下速度、加振フロー速度

1. はじめに

コンクリート構造物の配筋量の増加や部材形状が複雑化する一方で、熟練労働者不足が深刻化していること等の問題を解決するための 1 つの方法として、締固め等の施工の省力化を図るため、締固めを必要とする高流動コンクリートの検討が進められている¹⁾。既報¹⁾では、締固めを必要とする高流動コンクリートの充填性を評価する試験方法として、JSCE-F 701-2018 の一部を改良した試験方法（以降、ボックス形充填試験）について検討している。しかし、ボックス形充填試験は、洗い分析や試験後の清掃の面で多くの作業量を必要とする試験となっている。

そこで本研究では、締固めを必要とする高流動コンクリートの充填性を評価する試験として、ボックス形充填試験よりも簡易な試験方法で代替する方法について検討した。簡易な試験方法として着目したのが、自己充填性を有する高流動コンクリートで用いられている V ロート試験とスランプフロー試験によるフロー速度の測定である。V ロート試験とスランプフロー試験をベースに、振動を与える等の変更を加えることで、ボックス形充填試験の代替試験としての可能性について検討した。

2. ボックス形充填試験

2.1 使用材料および配合

本試験で使用した材料は、セメント C は普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³)、細骨材は多摩産砕砂 S1(表乾密度 2.70g/cm³, F.M.3.16)および君津産山砂 S2(表乾密度 2.57g/cm³, F.M.1.52)を粗粒率が 2.60 となるように容積割合で S1:S2=70:30 となるように混合して使用した。粗骨材は多摩産砕石 G(表乾密度 2.67g/cm³, F.M.6.39, 実積率 58.1%)を使用した。化学混和剤は、樹脂酸系界面活

性剤を主成分とする AE 剤 Ad1 およびポリカルボン酸系化合物を主成分とする高性能 AE 減水剤 Ad2 を使用した。

本試験で使用した配合を表 1 に示す。右欄の SF[SL](cm)および Air(%)は実測値である。配合番号 3 は目視で粗骨材の沈降や水の先走りが無い範囲で、SF45±5cm, Air4.5±1.5%となるように混和剤の添加率を調節した。配合番号 1~5 は、モルタルの性状を一定として単位粗骨材量を変化させた配合、配合番号 6~10 は、単位粗骨材量を一定としてモルタルの性状(S/C)を変化させた配合となっている。この時、配合番号 3 以外は目標 SF を設定せず、目標 Air のみ 4.5±1.5%となるように AE 剤 Ad1 の添加率を調節した。しかし、配合番号 6 は材料分離が生じて、Ad1 の添加率を増加させても目標 Air に届かなかったため、Air2.7%であったが試験を実施した。

2.2 試験方法

ボックス形充填試験の概要を図 1 に示す。試験用器具は、JSCE-F 511-2018 の 3.a)に規定されているボックス形容器および JIS A 1116 に規定されている棒状バイブレータを使用した。試験方法について JSCE-F 701-2016 では、仕切りゲートを開放し、試料の流動が停止したことを確認してからバイブレータを始動するが、土木学会 358 委員会報告書²⁾を参考に、仕切りゲートを開放すると同時にバイブレータを始動させた。これは、流動性の高いコンクリートでは、自重のみで 190mm を超えてしまい、間隙通過速度が測定できないためである。バイブレータを始動させ、試料が A 室から障害 R2 を通過し、B 室正面の高さ 190mm および 300mm に到達した時間をストップウォッチで 0.01 秒単位まで測定し、300mm まで到達した時点でバイブレータを停止した。加振終了後は B 室上部から試料を 2L 採取し、容積、質量および JIS A 1112 に準じて洗い分析により単位粗骨材量を測定した。

*1 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 理工学部土木工学科 教授 博士 (工) (正会員)

*3 東京理科大学 理工学部土木工学科 助教 博士 (工) (正会員)

*4 東急建設株式会社技術研究所 (正会員)

表-1 配合

配合 番号	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	S/C	単位量(kg/m ³)					混和剤添加率 (C×%)		SF[SL] (cm)	Air (%)
					W	C	S1	S2	G	Ad1	Ad2		
1	20	55	57	2.91	188	342	707	289	758	0.006	0.75	31.5	4.7
2			55		184	335	692	282	795	0.008		44.0	5.3
3			53		180	327	676	276	837	0.006		48.0	3.9
4			52		176	320	660	269	877	0.008		37.5	6.0
5			50		172	312	644	263	917	0.006		[15.5]	5.5
6			51	200	364	616	251	837	67.0			2.7	
7			52	190	345	646	263		44.0			3.5	
8			53	185	336	661	270		35.0			4.5	
9			54	3.06	175	318	691		282			[11.0]	5.2
10				3.21	170	309	705		288	0.008		[5.5]	5.8

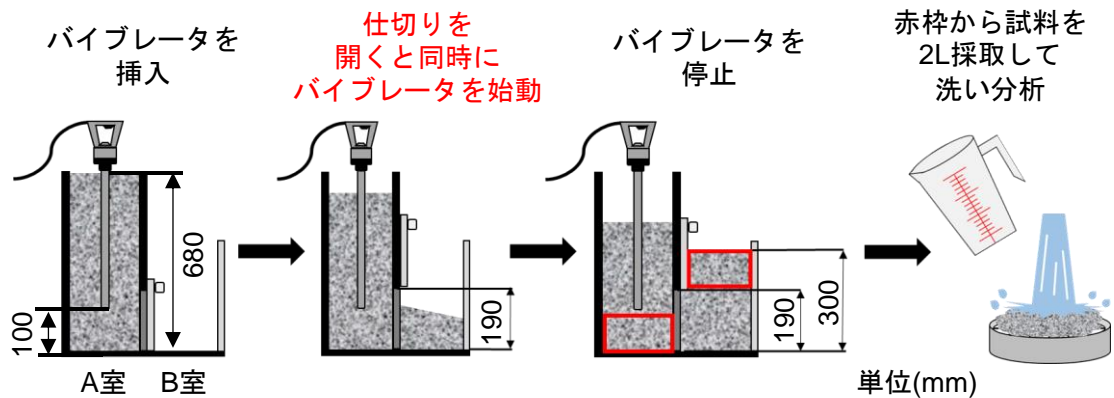


図-1 ボックス形充填試験概要

式(1)より間隙通過速度を、式(2)より粗骨材量比率を算出した。

$$V_{pass} = \frac{110}{t_{300} - t_{190}} \quad (1)$$

$$\delta_B = \frac{G_B}{G_0} \quad (2)$$

ここに、 V_{pass} ：間隙通過速度(mm/s)、 t_{300} ：300mm到達時間(s)、 t_{190} ：190mm到達時間(s)、 δ_B ：B室上部の粗骨材量比率(%)、 G_B ：B室上部の単位粗骨材量(kg/m³)、 G_0 ：配合の単位粗骨材量(kg/m³)である。

2.3 実験結果

配合番号 1～5 の単位粗骨材量を変化させた配合の間隙通過速度の結果を図-2 に、B 室上部の粗骨材量比率の結果を図-3 に示す。単位粗骨材量の増加に伴って、間隙通過速度および粗骨材量比率が減少している。配合番号 1 は SF31.5cm なのに対して、配合番号 3 は SF48.0cm だが、配合番号 1 の間隙通過速度が大きいことから降伏

値より、振動締固めと鉄筋間隙通過に伴う材料分離の影響で間隙通過速度が小さくなったと考えられる。

配合番号 3 および 6～10 のモルタルの性状(S/C)を変化させた配合の間隙通過速度の結果を図-4 に、B 室上部の粗骨材量比率の結果を図-5 に示す。S/C=2.8 で間隙通過速度は最大となり、その後、S/C の増加に伴って間隙通過速度が減少している。これは、S/C が増加することでモルタルの粘性が増加し、間隙通過速度が小さくなっていると考えられる。また、配合番号 6 の粗骨材量比率が 80%を下回っていて他の配合より材料分離が生じていることから、間隙通過速度が小さくなったと考えられる。

3. 加振 V ロート試験および加振スランプフロー試験

3.1 試験方法

JSCE-F 512-2018 および JISA 1150 に変更を加えた加振 V ロート試験および加振スランプフロー試験の試験方法について説明する。まず、加振 V ロート試験の概要を図-6 に示す。容器に試料を詰めた後にバイブレータの先

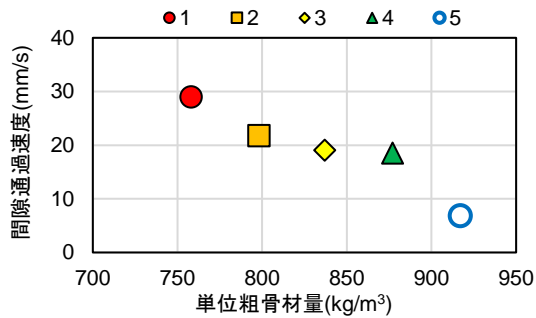


図-2 単位粗骨材量と間隙通過速度

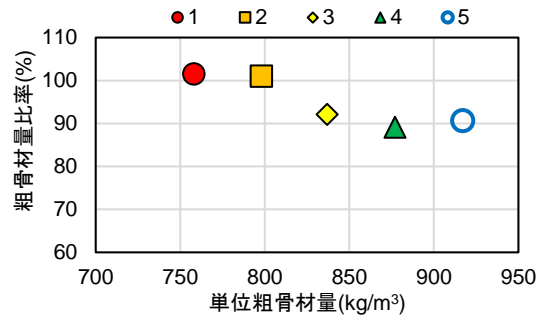


図-3 単位粗骨材量と粗骨材量比率

端が上面から 275mm となる位置まで挿入し、パイプレータの位置を保持しながら始動させ、3 秒間振動を与えた後に吐出口を開放した。これは、ボックス型充填試験の鉄筋間隙と V ロートの吐出口の大きさの違いを定性的に考慮し、流下を始める前に振動を与えることで、材料分離を生じるコンクリートの場合の流下に影響を与えるように設定した。その後、振動を加えながら、上面から流下状況を観察し、吐出口が開口した瞬間を流出完了と判断した流下時間をストップウォッチで測定し、式(3)によって流下速度を算出した。これは、自己充填性を有する高流動コンクリートの場合、振動を与えなくてもコンクリートの全量が流出するが、締固めを必要とする高流動コンクリートでは、振動を与えないと閉塞する可能性が高いためである。また、吐出口を開放して最初に流下してくる試料を 2L 程度採取し、容積、質量および洗い分析により粗骨材量を測定して単位粗骨材量比率を式(2)と同様に算出した。また、洗い分析の負担を減らし、試験方法の簡易化を検討するため、測定した容積と質量から式(4)より単位容積質量比率を算出した。

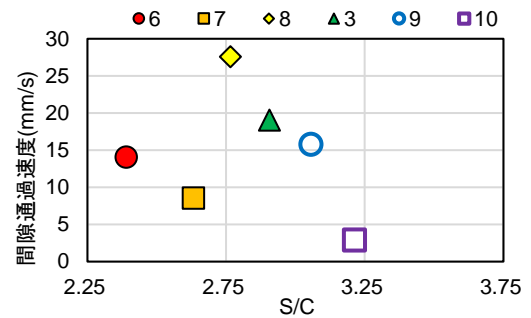


図-4 S/C と間隙通過速度

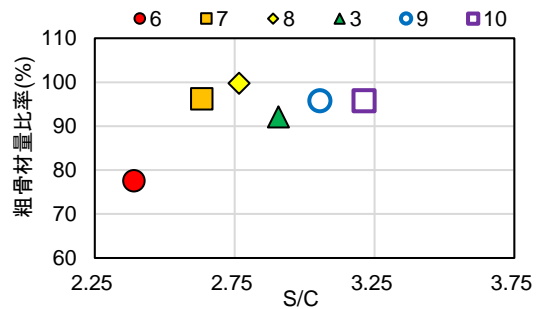


図-5 S/C と粗骨材量比率

$$v_v = \frac{V}{T_v} \quad (3)$$

$$\delta_\rho = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (4)$$

ここに、 v_v ：流下速度(mm/s)、 V ：V ロート試験器の容積(mm³)、 A ：吐出口の断面積(mm²)、 T_v ：流下時間(s)、 δ_ρ ：単位容積質量比率(%)、 ρ ：測定した単位容積質量(kg/m³)、 ρ_0 ：配合上の単位容積質量(kg/m³)である。

次に、加振スランブフロー試験は、NEXCO 試験法 733 「中流動覆工コンクリートの加振変形および充填性試験方法」に規定されている加振変形試験機および JIS A 1150 に規定されているスランブコーンを使用した。高流動コンクリートの配合設計・施工指針で無振時のフロー到達時間で充填性ランクを評価する方法があるが、締固めを必要とする高流動コンクリートは振動を受けた時の挙動を把握することが重要であるため、加振変形試験機で振動を与えた。加振変形試験機の中心にスランブコーンを

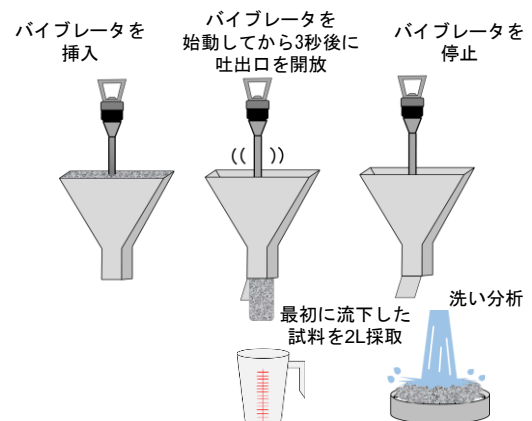


図-6 加振 V ロート試験の概要

設置し、試料を詰める。スランブコーンに試料を詰めた後、スランブコーンを引き上げると同時に加振を開始し、流動する試料の先端が直径 600mm の円の一端に到達し

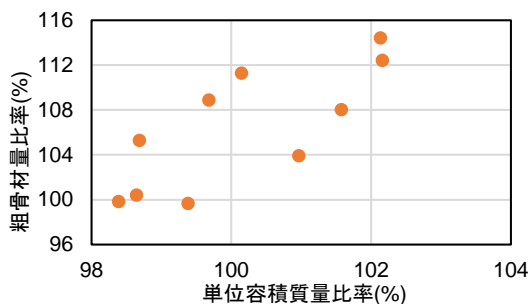


図-7 加振Vロート試験の粗骨材量比率と単位容積質量比率

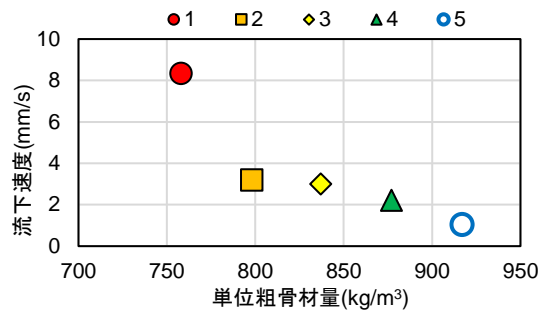


図-8 単位粗骨材量と流下速度

た時間を測定し、スランプコーンの底面直径(200mm)からの加振フロー速度として算出した。

加振Vロート試験および加振スランプフロー試験の使用材料および配合は2章で示したものと同一である。

3.2 実験結果

3.2.1 加振Vロート試験

本研究では、簡易に測定できる指標の検討を目的としているので、加振Vロート試験の粗骨材量比率と簡易に測定できる単位容積質量比率の関係を考察する。配合番号1~10の加振Vロート試験の粗骨材量比率と単位容積質量比率の関係を図-7に示す。粗骨材量比率が増加すると、単位容積質量比率2%程度のばらつきを持って増加する傾向にある。粗骨材量比率の変化の範囲は10%以上に対して、単位容積質量比率は5%程度と変化の範囲が小さくなっているが、材料分離の傾向は単位容積質量比率でも確認することができる。そのため、加振Vロート試験では、粗骨材量比率の代替として単位容積質量比率を用いることができると考えられる。これ以降は粗骨材量比率の代わりに単位容積質量比率の結果を用いることとする。

配合番号1~5の単位粗骨材量を変化させた配合の流下速度の結果を図-8に、単位容積質量比率の結果を図-9に示す。単位粗骨材量の増加に伴って、流下速度が減少しているが、単位容積質量比率には大きな変化が確認できない。そのため、単位粗骨材量が増加しても、顕著な材料分離は生じずに、単純に流下する速度が小さくなったと考えられる。

配合番号3および6~10のモルタルの性状(S/C)を変化させた配合の流下速度の結果を図-10に、単位容積質量比率の結果を図-11に示す。流下速度は、概ねS/Cの増加に伴って減少する傾向にある。また、配合番号6および7の単位容積質量比率はどちらも100%を超えており、材料分離の傾向にあると考えられるが、配合7と同程度の流下速度である単位容積質量比率が100%以下の配合番号8と比べても、材料分離が流下速度に影響を与えているとは考えにくい結果となった。

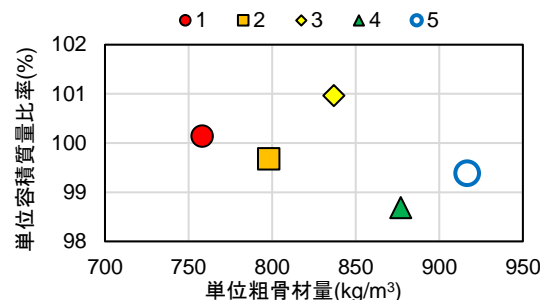


図-9 加振Vロート試験の単位粗骨材量と単位容積質量比率

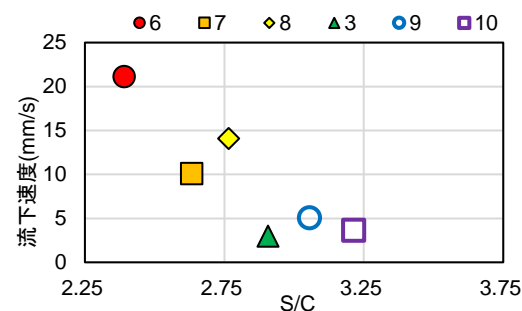


図-10 S/Cと流下速度

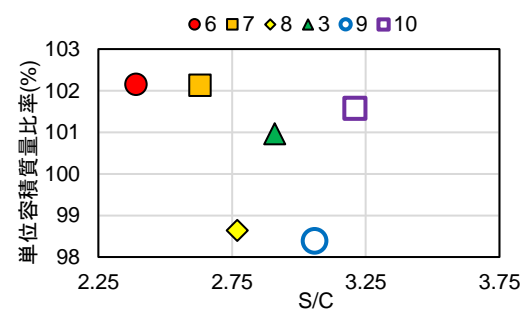


図-11 S/Cと単位容積質量比率

3.2.2 加振スランプフロー試験

配合番号1~5の単位粗骨材量を変化させた配合の加振フロー速度の結果を図-12に示す。単位粗骨材量が増加しても加振フロー速度に大きな変化はなかった。

配合番号3および6~10のモルタルの性状(S/C)を変化させた配合の加振フロー速度の結果を図-13に示す。S/C=2.65~3.05付近では加振フロー速度はほぼ一定であ

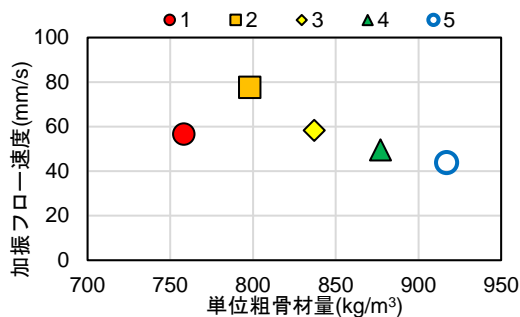


図-12 単位粗骨材量と加振フロー速度

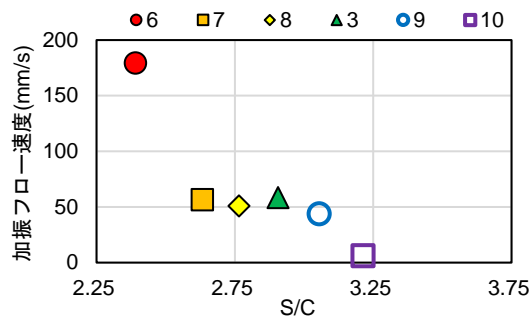


図-13 S/C と加振フロー速度

るが、S/C がその範囲を超えると加振フロー速度も変化している。このことから、加振フロー速度は、単位粗骨材量よりも S/C の影響が大きく影響していると考えられる。

4. ボックス形充填試験と加振 V ロート試験および加振スランプフロー試験の結果の比較

本研究の目的であるボックス形充填試験と加振Vロート試験および加振スランプフロー試験の関係を考察するため、表-2に示す配合番号11~25を追加して検討した。配合番号11~25は、細骨材の比率や混和剤の添加率を変えることで微粒分が多く粘性が著しく高い配合、目視でもモルタルと粗骨材に一体感がない配合や空気量が大きく変わった配合となっている。また、品質の悪いコンクリートを製造するために高性能 AE 減水剤 Ad3 使用した。

Ad3 は消泡剤と併用することが前提となっている AE 減水剤であるため、消泡剤を使用しない場合、目視でも確認できる粗大な気泡を大量に巻き込んでいた。

本研究で行った全配合のボックス形充填試験結果として、間隙通過速度と粗骨材量比率の関係を図-14に示す。間隙通過速度が小さくなる要因として考えられるのは、材料分離が生じて鉄筋間隙で粗骨材が閉塞する場合と、コンクリートの粘性が過多となっている場合である。そのため、間隙通過速度が 10mm/s 未満の場合、粗骨材量比率は 50%程度から 100%程度と広く分布している。しかし、間隙通過速度が大きくなると、粗骨材量比率は 100%程度に収束するような結果になっている。なお、土木学会 341 委員会報告書²⁾で実施工を模擬した模擬型枠充填試験では、充填不良の配合は粗骨材量比率が 80%以下だったことを参考にすると、間隙通過速度と粗骨材量

表-2 追加した配合

配合番号	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	S/C	単位量(kg/m3)					混和剤添加率 (C×%)			SF[SL] (cm)	Air (%)								
					W	C	S1	S2	G	Ad1	Ad2	Ad3										
11	20	55	57	2.91	188	342	707	289	758	0	0	0	[2.5]	0.8								
12							1010	0				0.75	35.5	2.8								
13							0	962					[0.0]	5.2								
14							1010	0				0.75	38.5	1.9								
15							0	962					[14.0]	6.1								
16							58	195				355	734	299	0.013	0	[18.0]	2.5				
17			55		179	325	670	273		35.0	10											
18			57		188	342	707	289		0.006	0	0.75	42.5	9.4								
19			53		180	327	676	276					36.0	4.3								
20			60		57	3.10	3.10	198		330	696	284	758	0.006	0.8	0	40.0	5.5				
21											181	301					634	259	917	40.0	1.4	
22											175	292					706	288	837	56.0	3.7	
23											54	3.41					175	292		706	288	47.5
24											52	2.68					195	325	649	265	837	0.8
25	52	2.68	195	325	649	265	[8.0]	4.9														

比率の結果を考慮して、本研究の範囲では、間隙通過速度が 15mm/s 以上であれば概ね粗骨材量比率も 90%程度は確保できているため、充填性が良好であると判断した。

4.1 ボックス形充填試験と加振 V ロート試験

間隙通過速度と流下速度の関係を図-15 に示す。間隙通過速度と流下速度の間の決定係数は $R^2=0.5144$ であり、正の相関があることが確認された。ボックス形充填試験で、コンクリートの粘性が過多、もしくはモルタルの粘性が低く粗骨材を運搬する性能が低い間隙通過速度が小さくなっている配合は、加振 V ロート試験の流下速度でも同様の傾向を示した。以上のことより、加振 V ロート試験の流下速度は、ボックス形充填試験の間隙通過速度の代替指標にできる可能性がある。

ボックス形充填試験の B 室上部の粗骨材量比率と V ロート試験の単位容積質量比率の関係を図-16 に示す。V ロート試験の単位容積質量比率は、振動を受けて最初に流下してくる試料を採取するため、材料分離が生じて粗骨材が沈降していた場合、単位容積質量比率は 100%を超える結果になる。そのため、ボックス形充填試験の粗骨材量比率と負の相関になると想定していたが、両結果の間に相関は確認できなかった。

4.2 ボックス形充填試験と加振スランプフロー試験

図-13 の結果より、モルタルの粘性と加振フロー速度に関係があると考えられたため、B 室上部の粗骨材量比率と加振フロー速度の関係を図-17 に示す。モルタルの粘性が高く、材料分離しにくい配合は、B 室上部の粗骨材量比率は大きく、振動を受けても流動しにくいいため、加振フロー速度は小さくなると想定していた。しかし、図-17 を見ると間隙通過速度が 50mm/s 以下であっても粗骨材量比率が 60%以下の配合や 100%を超える配合があり、粗骨材量比率と加振フロー速度の間に相関関係は確認できなかった。そのため、粗骨材量比率の代替として加振フロー速度を用いることはできないと考えられる。

5. まとめ

本研究では、ボックス形充填試験よりも簡易な試験方法で充填性を評価することを目的として実験を行った。そこで得られた知見を次に示す。

- 1) 単位粗骨材量や S/C 等のコンクリートの性状が変化した場合でも、ボックス形充填試験の間隙通過速度と加振 V ロート試験の流下速度の間には正の相関が確認された。そのため、流下速度は間隙通過速度の代替指標にできる可能性がある。
- 2) ボックス形充填試験の粗骨材量比率および加振フロー速度の間に相関は確認できなかったため、材料分離抵抗性の評価指標として加振フロー速度を粗骨材量比率の代替として用いることは難しい。

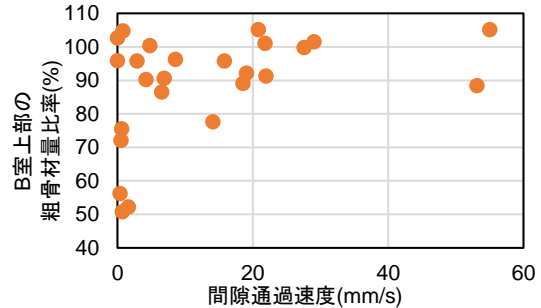


図-14 間隙通過速度と粗骨材量比率

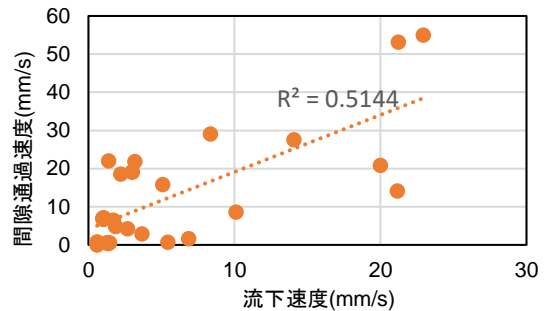


図-15 間隙通過速度と流下速度

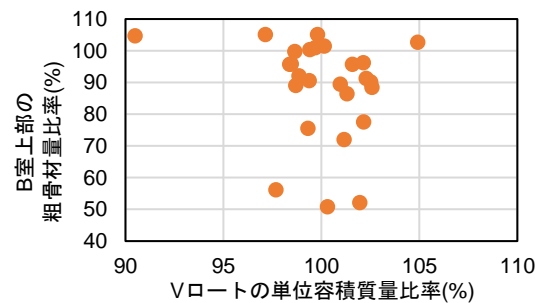


図-16 ボックス形充填試験と加振 V ロート試験の単位容積質量比率

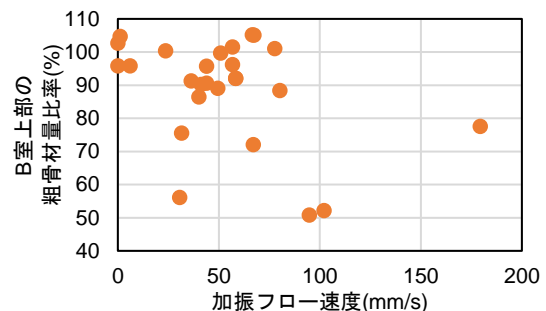


図-17 粗骨材量比率と加振フロー速度

参考文献

- 1) 土木学会：締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工技術研究小委員会(358 委員会)委員会報告書，2020
- 2) 土木学会：コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会(341 委員会)第 2 期委員会報告書，2013