

報告 改良型小型羽挿入式試験装置によるフレッシュコンクリートのレオロジー定数の測定

堀内 優大*1・高田 浩夫*2・犬飼 利嗣*3・藤森 繁*4

要旨: 本報では、小型羽根沈入式試験装置をもとに開発した小型羽根挿入式試験装置を改良し、フレッシュコンクリートのレオロジー定数を測定することを試みた。その結果、改良型小型羽根挿入式試験装置により測定したせん断速度とせん断応力の関係は、ばらつきはあるものの直線関係が得られること、見掛けのレオロジー定数を求めることは可能であり、配合要因による影響を傾向として捉えられることを示した。しかし、その一方で、改良型小型羽根挿入式試験装置で得られたレオロジー定数は一般的な値ではなく、より精度良くレオロジー定数を測定するには、実験条件や実験方法を全般的に再検討する必要があることも分かった。

キーワード: コンクリート, レオロジー, 小型羽根挿入式試験, 直接せん断, せん断速度, せん断応力

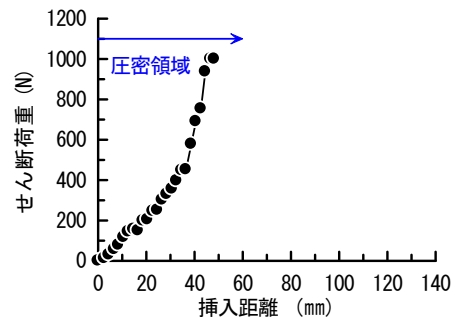
1. はじめに

コンクリートは一見、単一材料に見えるが、非常に複雑な複合構造である。したがって、実験を主体とした経験工学によって発展してきた。しかし、高齢化にともなう生産人口の減少や作業の省力化に対する要請には、建設工事のシステム化やロボット化が必要であり、これを実現するにはフレッシュコンクリートの挙動を理論的に体系化することが不可欠である。

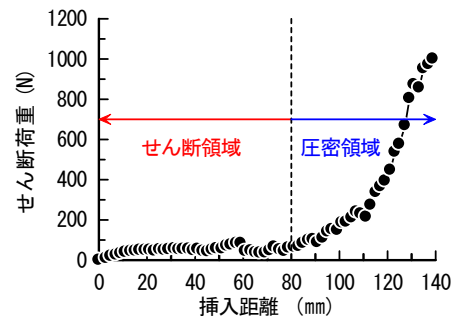
これまで、フレッシュコンクリートの流動性状を定量的に把握するために、レオロジーを導入した研究が数多く行われてきた。しかし、レオロジー定数を定量化することは、理論および数値解析的研究分野ではかなり進んでいる^{例えば1,2)}が、具体的なデータを測定する実験的研究の分野ではあまり進展していない。

筆者らも施工の合理化を図る上でレオロジー定数を定量化することを課題としており、小型羽根沈入式試験装置³⁾を改良した小型羽根挿入式試験装置を開発し、羽根挿入距離とせん断荷重の関係を検討している。その結果、図-1に示すように、羽根の挿入速度が75~90mm/min以上になると、せん断荷重と羽挿入距離の関係はせん断領域と圧密領域に区分することができ、せん断領域内のせん断力を平均することでせん断応力が求められることを示唆している⁴⁾。しかし、レオロジー定数を導出するには至らず、小型羽根挿入式試験装置の改良も含めて今後の課題となっている。

そこで本報では、小型羽根挿入式試験装置を改良し、フレッシュコンクリートのレオロジー定数を測定することを試みた。すなわち、駆動モーター、ロードセル、および挿入羽根を改良した小型羽挿入式試験装置を用い、



(a) 挿入速度45mm/min



(b) 挿入速度90mm/min

図-1 せん断荷重と羽根挿入距離の関係⁴⁾

せん断応力とせん断速度の関係から、各種フレッシュコンクリートのレオロジー定数を測定した。

2. 水セメント比がフレッシュコンクリートのレオロジー定数に及ぼす影響(実験1)

2.1 実験要因

実験要因は水セメント比とし、50, 55, 60, および65%の4水準とした。なお、単位水量は一律に184kg/m³

*1 岐阜工業高等専門学校 建築学科 (学生会員)

*2 岐阜県生コンクリート工業組合 技術センター所長 博士(工学) (正会員)

*3 岐阜工業高等専門学校 建築学科教授 博士(工学) (正会員)

*4 大同大学 工学部建築学科准教授 博士(工学) (正会員)

表-1 使用材料(実験1, 2)

材料名	種類	備考	記号
セメント	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm ³	C
細骨材	長良川産川砂	表乾密度:2.63g/cm ³	S
粗骨材	坂祝産碎石	表乾密度:2.67g/cm ³	G
混和剤	AE減水剤	変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系化合物の複合体	AD
	AE剤		
水	上水道水	-	W

表-2 配合(実験1)

No.	W/C (%)	空気量 (%)		スランブ (cm)		細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
		目標値	実測値	目標値	実測値		C	W	S	G	AD
1	50	4.5 ± 1.5	5.2	18 ± 2.5	18.0	45.9	368	790	946	4.42	
2	55		4.9		18.5	45.4	335	794	970	3.69	
3	60	1.5	4.5	2.5	17.0	47.5	307	842	946	3.68	
4	65		5.9		17.5	48.9	283	876	930	3.11	

としているものの、単位ペースト量、単位細骨材量、および単位粗骨材量は、良好なワーカビリティのコンクリートを得る上で一律にはしていない。したがって、実質的な実験要因は、異なる水セメント比によるフレッシュコンクリートの粘性等となるが、ここでは、実験要因を単に水セメント比として表現し、レオロジー一定数との関係について整理する。

2.2 使用材料および配合

表-1に使用材料を、表-2に配合を示す。空気量(4.5±1.5%)とスランブ(18±2.5cm)は、一定の範囲内に収まるよう単位混和剤量で調整した。なお、目標スランブは、建築用の一般的なコンクリートを対象として18cmとした。

2.3 実験方法

(1) コンクリートの練混ぜ

コンクリートは、容量55Lのパン型強制練りミキサを用い、JIS A 1138「試験室におけるコンクリートの作り方」に準じて35L練り混ぜた。

(2) スランブおよび空気量試験

スランブの測定はJIS A 1101「コンクリートのスランブ試験方法」に、空気量の測定は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)」に準じて行った。

(3) レオロジー試験

図-2に、改良した小型羽根挿入式試験装置を示す。また、図中には、シャフトの径をφ8mmから12mmに改良し、先端に針を取り付けた改良後の挿入羽根先端も示した。この試験装置は、試料内に一定の速度で3枚の羽根を挿入することができ、挿入距離に対応するせん断荷重を羽根シャフト上部に取り付けたロードセルから出力できるようになっている。なお、改良型小型羽根挿入式試験装置は、文献⁴⁾で示した実験結果を踏まえ、製作当初から以下を改良している。

1) 駆動モーター

羽根の挿入速度が小さい範囲では、せん断荷重と羽挿

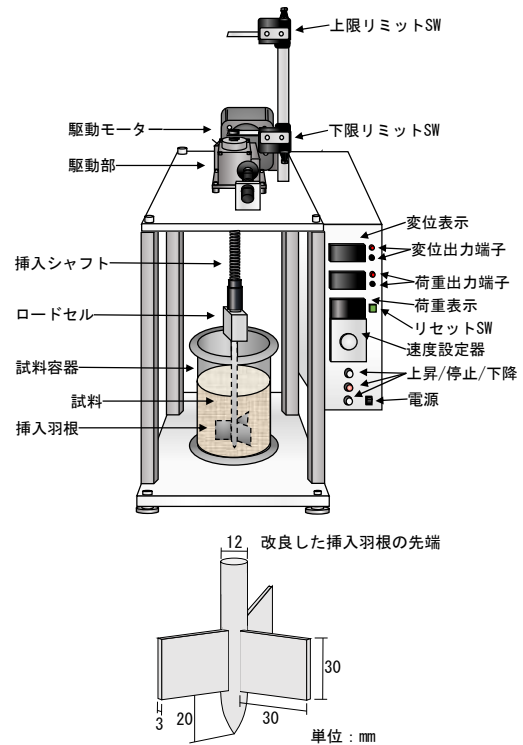


図-2 改良型小型羽根挿入式試験装置(実験1, 2)

入距離の関係に圧密領域が生じるので、それをできるだけ改善する上で駆動モーターの出力を60Wから200Wに変更した。羽根の最大挿入速度は、100mm/minから300mm/minに向上し、挿入トルクも大幅に向上した。

2) ロードセル

ロードセルは、駆動モーターおよびコントローラーの変更にともない、定格容量を1000.0Nから5000.0Nに変更した。

3) シャフトの径

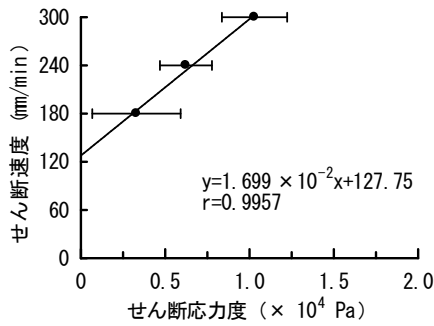
φ8mmのシャフトでは、圧密領域で変形する(曲がる)可能性が確認され、かつ駆動モーターの変更により挿入トルクも大幅に向上するのでφ12mmに変更した。

4) 挿入羽根

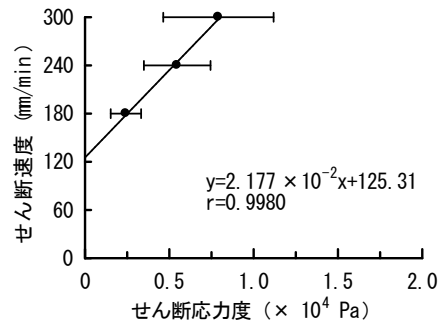
試料に圧密圧力ができるだけ生じないように、挿入羽根先端に針を取り付けた。

レオロジー試験は、以下の手順により2回繰り返して行った。なお、2回の試料は、それぞれ別に採取している。

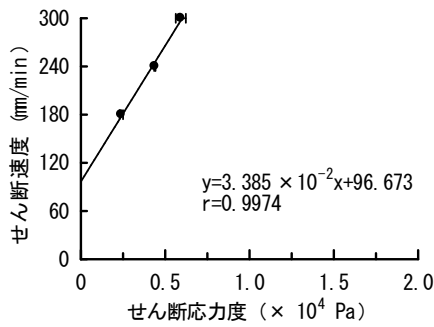
試料容器(内径150mm、高さ250mm)に、JIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方(4.3コンクリートの打込み)」に準じて試料を打ち込み、挿入羽根(幅30mm、高さ30mm、厚さ3mm)が試料に完全に挿入した状態から試験を開始した。羽根の挿入速度は180→240→300mm/minの3段階とし、それぞれ20mmずつ連続して試料に挿入した。挿入羽根の全挿入距離は初期挿入距離も含めると90mmになるが、この範囲でも圧密領域には至らないことを予備実験で確認している。



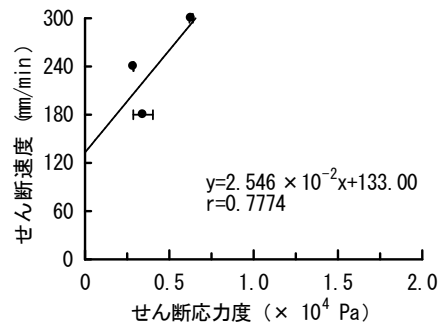
(a) 水セメント比50%



(b) 水セメント比55%



(c) 水セメント比60%



(d) 水セメント比65%

図-3 せん断速度とせん断応力の関係(実験1)

表-3 見掛けのレオロジー定数(実験1)

No.	W/C (%)	塑性粘度 (Pa·s)	降伏値 (Pa)
1	50	59.92	-7654
2	55	45.93	-5756
3	60	29.54	-2856
4	65	39.28	-5224

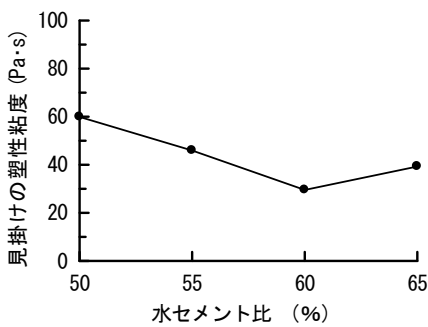


図-4 見掛けの塑性粘度と水セメント比の関係(実験1)

挿入距離にして2mm間隔の条件で挿入距離とせん断荷重の関係を測定し、各区間の平均せん断荷重から、それぞれ次式によりせん断応力を求めた。なお、小型羽根挿入式試験装置を開発する際に参考とした羽根沈入式のレオロジー試験^{3,5)}では、せん断速度とせん断応力の関係は1対1である。しかし本実験では、せん断領域の範囲であってもせん断荷重は挿入距離によって緩やかな変化が生じる。したがって、1章でも示したように、せん断領域の範囲にあるせん断荷重を平均して求めたせん断応力を各せん断速度に対応したせん断応力としている。

$$A = A_1 + A_2 \quad (1)$$

$$A_1 = 6 \cdot b \cdot h + 3 \cdot c \cdot h \quad (2)$$

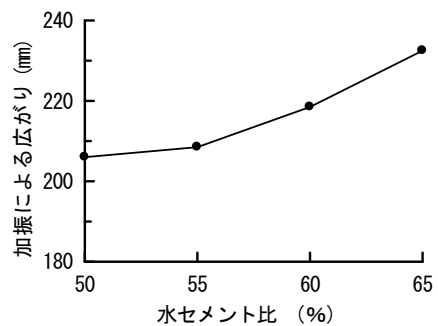


図-5 加振による広がり和水セメント比の関係(実験1)

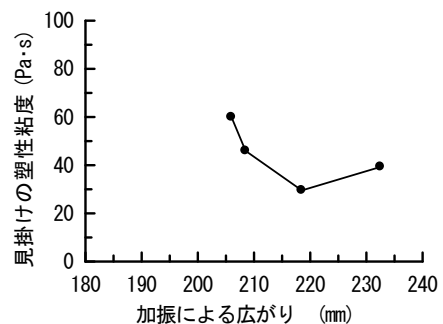


図-6 見掛けの塑性粘度と加振による広がりの関係(実験1)

$$\tau = S/[A/(1 \times 10^6)] \quad (3)$$

ここに、A：試料をせん断するせん断面の面積 (6531mm²)

A₁：試料をせん断する沈入羽根の面積 (5670mm²)

b：沈入羽根の幅(30mm)

h：沈入羽根の高さ(30mm)

表-4 配合(実験2)

No.	W/C (%)	空気量 (%)		スランブ (cm)		細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
		目標値	実測値	目標値	実測値		C	W	S	G	AD
1	55	4.5	4.9	18	18.5	45.4	335	184	794	970	4.02
2		±	4.5	±	18.5	44.0			770	994	3.69
3		1.5	4.6	2.5	18.0	42.7			746	1018	3.35

c : 沈入羽根の厚さ(3mm)

A₂ : 試料をせん断する軸の面積(861mm²)

$$A_2 = (ds \cdot \pi - 3c) \cdot h$$

ただし, ds : 軸の直径(12mm)

針の部分は対象外

τ : せん断応力度 (Pa)

S : 平均せん断荷重 (N)

(4) 加振変形試験

加振変形試験は, 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」に準じて行った。

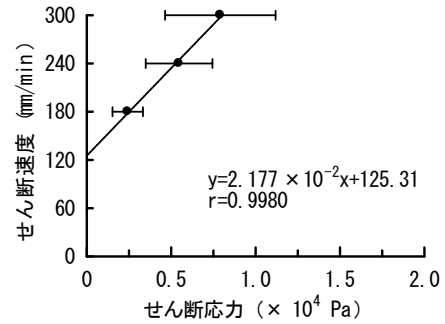
2.4 実験結果および考察

図-3に, せん断速度とせん断応力の関係を示す。図から分かるように, いずれの水セメント比においても, せん断速度が大きくなるとせん断応力も大きくなる傾向にあり, せん断速度とせん断応力は強い相関関係にある。また, 回帰係数は, 水セメント比が大きくなると, 大きくなる傾向にある。しかし, その一方で水セメント比が比較的小さい50%と55%の試料では, 繰り返し2回のばらつきが大きく, せん断速度とせん断応力の関係を精度良く測定できてはいない。これには, 採取した試料のばらつきが考えられ, 試験の繰り返し回数をより多くする必要があると考えられる。また, これは全試料に対してあてはまることではあるが, 試験方法も羽根の挿入速度を180→240→300mm/minの3段階とした1パターンしか実施していないので, 他の羽根挿入パターンや羽根挿入深さなども検討する必要はある。

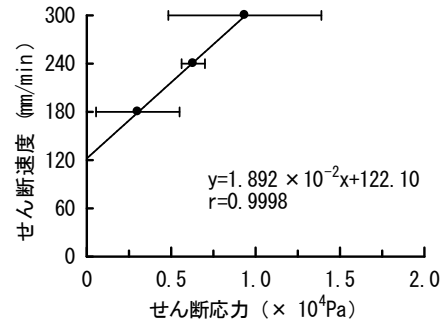
表-3に, 見掛けのレオロジー定数を示す。表から分かるように, 見掛けの塑性粘度は文献^{6,7)}と比較するとかなり小さく, 1/10程度の値となった。これには, 改良型小型羽根挿入式試験装置の羽根挿入速度が影響していると考えられるが明らかではない。また, 見掛けの降伏値は, いずれも負の値を示している。実際にはあり得ない数値であるが, このような傾向は文献⁸⁾の羽根沈入式試験器によるレオロジー試験でも確認されている。塑性粘度の値も踏まえると, 一般的に実験条件や実験方法を再検討する必要がある。

図-4に, 見掛けの塑性粘度と水セメント比の関係を示す。図から分かるように, 水セメント比が大きくなると見掛けの塑性粘度は小さくなる傾向にあり, 一般的な傾向を示している。

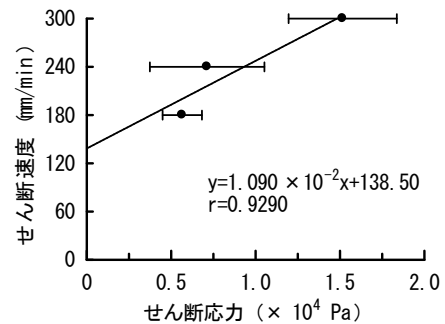
図-5に加振による広がり和水セメント比の関係を,



(a) 単位粗骨材量970kg/m³



(b) 単位粗骨材量994kg/m³



(c) 単位粗骨材量1018kg/m³

図-7 せん断速度とせん断応力の関係(実験2)

図-6に見掛けの塑性粘度と加振による広がりとの関係を示す。図から分かるように, 本実験条件の範囲では, 水セメント比が大きくなると見掛けの塑性粘度は小さくなり, 加振後のスランブフローの広がりは大きくなるようである。

3. 単位粗骨材量がフレッシュコンクリートのレオロジー定数に及ぼす影響(実験2)

3.1 実験要因

実験要因は単位粗骨材量とし, それぞれ970, 994, および1018kg/m³の3水準とした。なお, 水セメント比は55%, 単位水量は184kg/m³と一律にはしているものの, 単位モルタル量は一律にはならない。したがって, 実質的な実験要因は, 異なる単位粗骨材量によるフレッシュコンクリートの粘性等となるが, ここでは, 実験要因を単に単位粗骨材量として表現し, レオロジー定数との関係について整理する。

表-5 見掛けのレオロジー定数(実験2)

No.	単位粗骨材量 (kg/m ³)	塑性粘度 (Pa·s)	降伏値 (Pa)
1	970	45.93	-5756
2	994	52.85	-6453
3	1018	91.74	-12706

3.2 使用材料および配合

使用材料は、実験1と同様とした。表-4に、配合を示す。なお、水セメント比は55%とし、空気量(4.5±1.5%)とスランプ(18±2.5cm)は、実験1と同様に、一定の範囲内に収まるよう単位混和剤量で調整した。

3.3 実験方法

実験方法は、いずれも実験1と同様とした。

3.4 実験結果及び考察

図-7に、せん断速度とせん断応力の関係を示す。図から分かるように、いずれの単位粗骨材量においても、せん断速度が大きくなるとせん断応力も大きくなる傾向にあり、せん断速度とせん断応力は強い相関関係にある。また、回帰係数は、単位粗骨材量が大きくなると、小さくなる傾向にある。しかし、いずれの試料も、繰り返し2回のばらつきが大きく、せん断速度とせん断応力の関係を精度良く測定できてはいない。水セメント比を要因とした実験結果の考察でも述べたが、試験の繰り返し回数や試験方法を見直す必要がある。

表-5に、見掛けのレオロジー定数を示す。表から分かるように、水セメント比を要因とした実験結果と同様で、見掛けの塑性粘度はかなり小さい。また、見掛けの降伏値も同様で、いずれも負の値を示している。水セメント比を要因とした実験結果の考察でも述べたが、全般的に実験条件や実験方法を再検討する必要がある。

図-8に、見掛けの塑性粘度と単位粗骨材量の関係を示す。図から分かるように、単位粗骨材量が大きくなると見掛けの塑性粘度は大きくなる傾向にあり、一般的な傾向を示している。

図-9に、加振による広がり(加振後のスランプフローの広がり)と単位粗骨材量の関係を示す。図から分かるように、単位粗骨材量が大きくなると加振後のスランプフローの広がり(加振後のスランプフローの広がり)は大きくなっている。また、図-10に示した見掛けの塑性粘度と加振による広がり(加振後のスランプフローの広がり)の関係から分かるように、見掛けの塑性粘度が大きくなると、加振後のスランプフローの広がり(加振後のスランプフローの広がり)は大きくなるようである。これは、水セメント比を要因とした実験結果とは異なる傾向にある。現時点では明らかではないが、単位粗骨材量の大小によって振動の伝播が異なることも一因としては考えられる。

4. まとめ

本報では、改良型小型羽根挿入式試験装置により、フレッシュコンクリートのレオロジー定数を測定すること

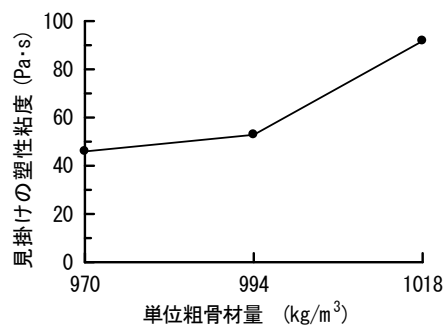


図-8 見掛けの塑性粘度と単位粗骨材量の関係(実験2)

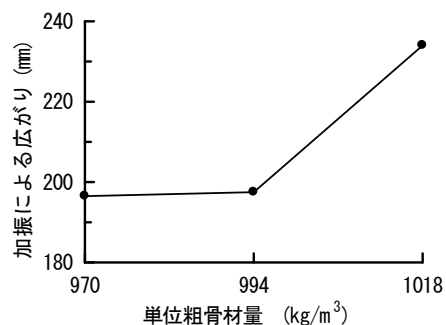


図-9 加振による広がり(加振後のスランプフローの広がり)と単位粗骨材量の関係(実験2)

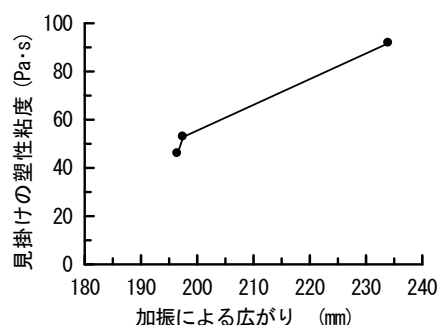


図-10 見掛けの塑性粘度と加振による広がり(加振後のスランプフローの広がり)の関係(実験2)

を試みた。本実験結果をまとめると、以下ようになる。

- 1) 改良型小型羽根挿入式試験装置により測定したせん断速度とせん断応力の関係は、ばらつきはあるが直線関係が得られる。
- 2) 改良型小型羽根挿入式試験装置により、見掛けのレオロジー定数を求めることは可能ではあるが、見掛けの塑性粘度の値は既報^{6,7)}と比較してかなり小さく、降伏値も負の値となる。
- 3) 改良型小型羽根挿入式試験装置で測定した見掛けの塑性粘度は、水セメント比や単位粗骨材量など、配合要因による影響を傾向として捉えることができる。
- 4) 改良型小型羽根挿入式試験装置で測定した見掛けの塑性粘度は、加振変形試験による加振後のスランプフローの広がり(加振後のスランプフローの広がり)と相関する関係にはある。

今後は、より精度良くレオロジー定数を測定するために、小型羽根挿入式試験装置の更なる改良を含め、実験条件や実験方法も全般的に再検討する必要がある。

謝辞

本研究費の一部は、JSPS科研費JP20K04802(研究代表者：犬飼利嗣)によった。また、本実験に際し、岐阜県生コンクリート工業組合中濃試験所、ならびに長田知紘君、古田ひかり君、辺志切琉成君(いずれも岐阜工業高等専門学校学生)のご助力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 山田義智, 東舟道裕亮, 上原義己, 崎原康平: セメントペーストのレオロジー定数測定とマーカー粒子粘弾性有限要素法によるセメントペーストフロー解析, 日本建築学会構造系論文集, 第84巻, 第756号, pp.139-148, 2019.2
- 2) 平野修也, 山田義智, 西 祐宣, 崎原康平: スランプで流動性が評価されるモルタルのレオロジー定数測定とMPS法によるモルタルのスランプおよびスランプフロー解析, 日本建築学会構造系論文集, 第85巻, 第774号, pp.993-1003, 2020.8
- 3) 片桐彰吾, 犬飼利嗣, 澤田 陽: フレッシュモルタルの塑性粘度および透水係数と配合要因の関係に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集,

Vol.37, No.1, pp.1075-1080, 2015

- 4) 平野夏帆, 高田浩夫, 犬飼利嗣, 藤森 繁: レオロジー試験に用いる小型羽根挿入式試験装置の開発と実験結果の適用方法に関する検討(その1: 羽根挿入距離とせん断荷重の関係), 日本建築学会大会(北海道)学術講演梗概集, pp.113-114, 2022.9
- 5) 室賀陽一郎, 伊達重之, 大須賀哲夫: モルタルの粘性評価試験装置の開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), 第5部, Vol.55, V-406, pp.814-815, 2000.9
- 6) 菊川浩治: モルタルおよびコンクリートの粘度式に関する研究, 土木学会論文集, 1990巻, 414号/V-12, pp.109-1181, 1990.2
- 7) 笹倉博行, 榊田佳寛, 李 榮蘭: 傾斜フロー試験器によるフレッシュコンクリートの流動性評価に関する実験, 日本建築学会技術報告集, 第18巻, 第38号, pp.11-14, 2012.2
- 8) 齊藤拓弥, 大八木雅人, 藤倉裕介, 伊達重之: 周波数の異なる振動下におけるモルタルのレオロジー特性と充填性能に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1353-1357, 2016