

報告 小型羽根挿入式試験装置によるレオロジー一定数の測定方法と測定値の補正方法に関する実験的検討

堀内 優大*1・高田 浩夫*2・犬飼 利嗣*3・井向 日向*4

要旨: 本報では、小型羽根挿入式試験装置によるレオロジー一定数の測定方法と測定値の補正方法について検討した。その結果、レオロジー試験では試料容器の直径を200mmとし挿入羽根の挿入速度を180mm/min以上とする必要があること、せん断応力度の算出にあたっては挿入距離にして20~90mm(試料上面より50~120mm)の領域が対象となることが分かった。しかし、その一方で挿入羽根の挿入速度が大きく影響し測定した塑性粘度はかなり小さな値となること、シリコンオイルをモルタルと仮定した模擬材料をもとにフレッシュコンクリートの塑性粘度を補正すると実際にはあり得ない極端に大きな値になることなどの知見を得た。

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, せん断応力度

1. はじめに

フレッシュコンクリートのコンシステンシーは、フレッシュコンクリートの流動や変形に対する抵抗性を表し、一般にはスランプやスランプフロー値で評価されている。しかし、これらでコンシステンシーをすべて表すことは不可能であり、スランプやスランプフローが同一の値であってもコンシステンシーは異なることもある¹⁾。

そこで、フレッシュコンクリートを均質な粘塑性体と仮定してビンガムモデルを適用するなど、レオロジーの考え方を導入し、フレッシュコンクリートのコンシステンシーを定量的に表現しようとする研究が数多く行われてきた。しかし、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2,3)}が、精度の良い試験方法が確立されていないこともあって、具体的なデータを測定する実験的研究分野ではコンシステンシーの定量化に関する取り組みはあまり進展していない¹⁾。

筆者らもコンシステンシーを定量的に評価する上でレオロジー一定数を定量化すること課題としており、小型羽根挿入式試験装置⁴⁾を開発・改良し、レオロジー一定数の導出を試みている。その結果、測定したせん断速度とせん断応力度の関係は、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一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唆している⁵⁾。しかし、その一方で、見掛けの塑性粘度は既報^{6,7)}と比較してかなり小さく、降伏値も負の値となることも報告しており、正確なレオロジー一定数を導出するには至らず、今後の課題となっている。

そこで本研究では、より精度良くレオロジー一定数を測定するために、小型羽根挿入式試験装置によるレオロジ

一定数の測定方法について再検討するとともに、測定に供した試料の見掛けのレオロジー一定数を模擬材料のレオロジー一定数を適用して作成した検量線で補正することを試みた。

2. 試料容器の直径と挿入羽根の挿入速度がせん断応力度に及ぼす影響(実験1)

2.1 実験要因

表-1に、実験要因を示す。実験要因は、試料容器の直径と挿入羽根の挿入速度とした。

2.2 使用材料および配合

表-2に使用材料を、表-3に配合を示す。空気量(4.5±1.5%)とスランプ(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。化学混和剤は、AD1, AD2, およびAD3を使用することを基本とした。AD3は流動保持剤であり、実験中の流動性の変化を抑制するために使用した。また、経時にもなってさらに流動性が変化した場合は、AD4を後添加して調整した。なお、空気量はAD2またはAD5で調整している。なお、スランプは、建築用の一般的なコンクリートを対象として18cmとした。また、水セメント比は55%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、JISA 1138「試験室におけるコンクリートの作り方」

表-1 実験要因(実験1)

因子	水準
試料容器の直径 (mm)	150, 175, 200
挿入羽根の挿入速度 (mm/min)	120, 180, 240, 300

*1 岐阜工業高等専門学校 専攻科先端融合開発専攻 (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 岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科助教 博士(工学) (正会員)

表-2 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: 3.16 g/cm ³	C
細骨材	長良川産川砂	表乾密度: 2.63 g/cm ³ , 粗粒率: 2.79	S
粗骨材	坂祝産碎石	表乾密度: 2.67 g/cm ³ , 最大寸法: 20mm	G
混和剤	AE減水剤標準型I種	変性リグニンスルホン酸化合物	AD1
	AE剤I種	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤	AD2
	減水剤標準型I種	ポリカルボン酸エーテル系化合物	AD3
	減水剤遅延型I種	変性リグニンスルホン酸化合物とオキシカルボン酸化合物の複合体	AD4
	空気量調整剤	ポリアルキレングリコール誘導体	AD5
水	上水道水	-	W

表-3 配合(実験1)

W/C (%)	空気量 (%)	スランプ (cm)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				AD (C×%)				
				C	W	S	G	AD1	AD2	AD3	AD4	AD5
55	4.0	18.5	46.7	335	184	818	946	1.10	0.80	0.15	0.001	0.002

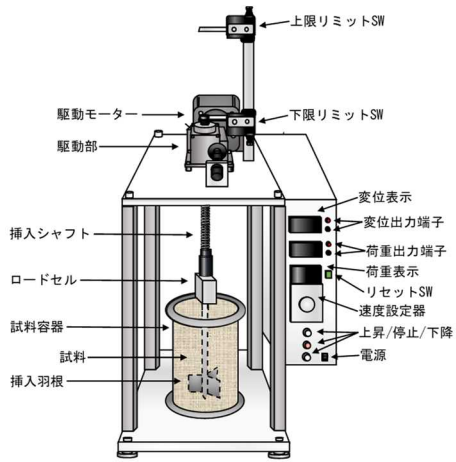


図-1 小型羽根挿入式試験装置(実験1~3)

に準じて30L練り混ぜた。

(2) スランプおよび空気量試験

スランプの測定はJISA 1101「コンクリートのスランプ試験方法」に、空気量の測定はJISA 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。

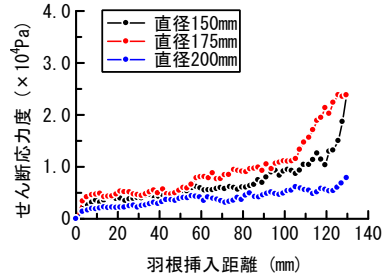
(3) レオロジー試験

図-1に、小型羽根挿入式試験装置を示す。この試験装置は、試料内に一定の速度(最大300mm/min)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(定格容量5000.0N)から出力できるようになっている。

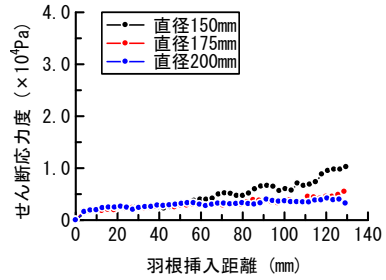
レオロジー試験は、以下の手順により2回繰り返して行った。なお、2回の試料は、それぞれ別に採取している。

試料容器(高さ200mm)に、JISA 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。所定の速度で挿入羽根を挿入し、挿入距離が130mmまたはせん断荷重が5000Nになるまで、挿入距離にして2mmの間隔で挿入距離とせん断荷重の関係を測定した。なお、せん断応力度は、次式により算出した。

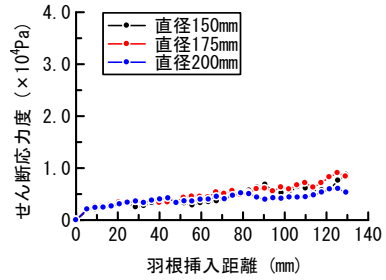
$$A=A_1+A_2 \quad (1)$$



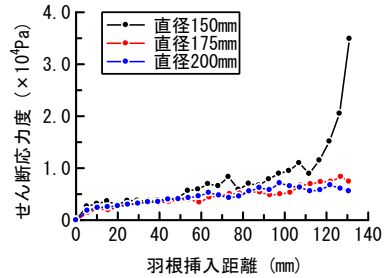
(a) 挿入速度120mm/min



(b) 挿入速度180mm/min



(c) 挿入速度240mm/min



(d) 挿入速度300mm/min

図-2 せん断応力度と羽根挿入距離の関係(実験1)

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

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

ここに、A: 試料をせん断するせん断面の面積 (6531mm²)

A₁: 試料をせん断する挿入羽根の面積 (5670mm²)

b: 挿入羽根の幅(30mm)

h: 挿入羽根の高さ(30mm)

c: 挿入羽根の厚さ(3mm)

A₂: 試料をせん断する軸の面積(861mm²)

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

ただし、d_s: 軸の直径(12mm)

針の部分は対象外

表-4 実験要因(実験2)

因子	水準
水セメント比 (%)	45, 50, 55, 60
挿入羽根の挿入パターン (mm/min)	パターンA: 180→240→300の3段階で連続挿入 各挿入速度における挿入距離: 20mm パターンB: 180→240→300の3段階で連続挿入 各挿入速度における挿入距離: 30mm

表-5 配合(実験2)

No.	W/C (%)	空気量 (%)	スランプ (cm)	細骨材率 (%)	単位置 (kg/m ³)				AD (G×%)						
					C	W	S	G	AD1	AD2	AD3	AD4	AD5		
1	45	4.1	19.0	44.8	409		756								
2	50	4.2	19.5	45.9	368		790								
3	55	4.0	18.5	46.7	335	184	818	946	1.10	0.80	0.15		0.001		0.002
4	60	4.6	19.5	47.5	307		842								

τ : せん断応力度 (Pa)

S: 平均せん断荷重 (N)

2.4 実験結果および考察

図-2に、せん断応力度と羽根挿入距離の関係を示す。120mm/minの挿入速度を除くと、挿入速度が大きくなるとせん断応力度も大きくなり、挿入速度にともなう一般的な傾向がみられる。既報⁴⁾にも述べたが、挿入速度が小さい120mm/minでは、挿入羽根の下に位置する粗骨材の骨格構造やかみ合いが保持されやすい状態となり、圧密圧力が支配的に働くことが推察される。一方、試料容器の直径に着目してみると、試料容器の直径が大きくなるとせん断応力度は小さくなる傾向にある。これは、試料の拘束状態に関連するもので、試料容器の直径が大きくなると試料に働く拘束力が小さくなることを意味している。また、挿入羽根の挿入直後は、せん断応力度が0Paから増加する範囲であり、試料には均一にせん断力が働いていない。したがって、挿入羽根の挿入直後の測定範囲は、せん断応力度を算出するにあたって除外する必要がある。そこで3章では、試料容器の直径は200mm、挿入速度は180mm/min以上とし、せん断応力度の算出範囲は挿入距離にして20~30mm(試料上面より50~60mm)以上の領域を対象とすることとした。

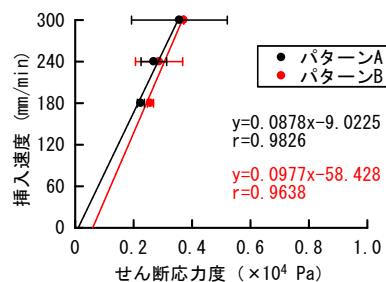
3. 水セメント比と挿入羽根の挿入方法が見掛けのレオロジー一定数に及ぼす影響(実験2)

3.1 実験要因

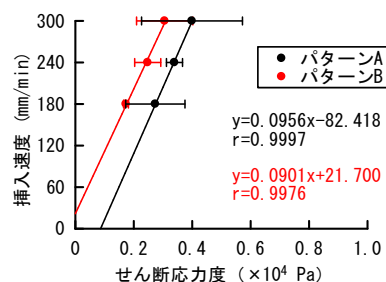
表-4に、実験要因を示す。実験要因は、水セメント比と挿入羽根の挿入パターンとした。パターンAは既報⁵⁾と同様であり、挿入速度を180→240→300mm/minの3段階とし、それぞれ20mmずつ連続して試料に挿入した。パターンBは、挿入速度は180→240→300mm/minの3段階でパターンAと同様ではあるが、全挿入距離による影響を検証するために、それぞれ30mmずつ連続して試料に挿入することとした。

3.2 使用材料および配合

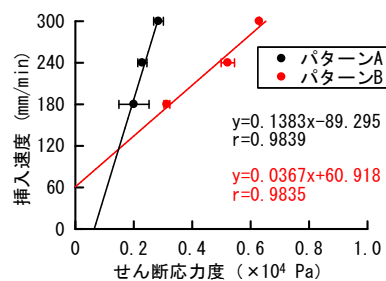
使用材料は、実験1と同様とした。表-5に、配合を示す。なお、空気量(4.5±1.5%)とスランプ(18±2.5cm)は、



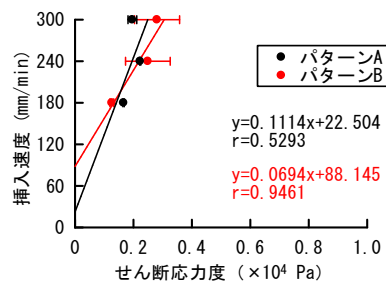
(a) 水セメント比45%



(b) 水セメント比50%



(c) 水セメント比55%



(d) 水セメント比60%

図-4 挿入羽根の挿入速度とせん断応力度の関係(実験2)

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。なお、2章で述べたように、試料容器の直径は200mmとし、せん断応力度の算出範囲はパターンAでは挿入距離にして20~80mm(試料上面より50~110mm)を、パターンBでは挿入距離にして30~120mm(試料上面より60~150mm)を対象とすることとした。また、見掛けのレオロジー一定数は、挿入羽根の挿入速度とせん断応力度の関係から得た回帰式(図-4参照)の傾きaと切片bから、次式により算出した。

$$\eta = 1/a \quad (4)$$

表-6 見掛けのレオロジー定数(実験2)

No.	W/C (%)	塑性粘度 (Pa·s)		降伏値 (Pa)	
		パターンA	パターンB	パターンA	パターンB
1	45	11.39	10.24	102.76	598.03
2	50	10.46	11.10	862.11	-240.84
3	55	7.23	27.25	645.66	-1659.89
4	60	8.98	14.41	-202.11	-1270.10

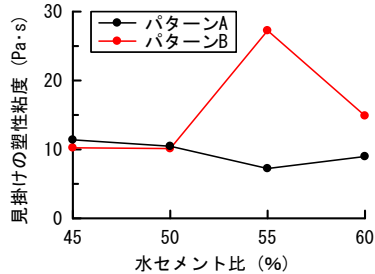


図-5 見掛けの塑性粘度と水セメント比の関係(実験2)

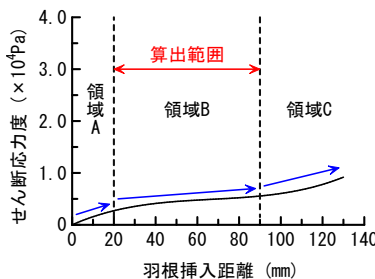


図-6 せん断応力度と羽根挿入距離の関係の模式図

$$\tau_y = -a/b \quad (5)$$

ここに、 η : 見掛けの塑性粘度 (Pa·s)

τ_y : 見掛けの降伏値 (Pa)

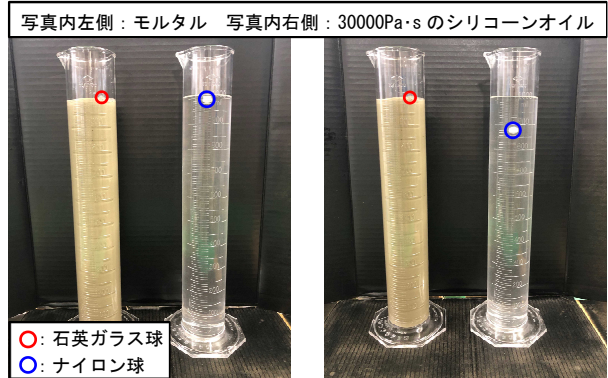
3.4 実験結果及び考察

図-4に、挿入羽根の挿入速度とせん断応力度の関係を示す。なお、図中に示したエラーバーは、繰り返し2回の最大値と最小値を示している。いずれの水セメント比においても、挿入速度が大きくなるとせん断応力度も大きくなる傾向にあり、挿入速度とせん断応力度は強い相関関係にある。しかし、その一方で、水セメント比の小さい45%と50%では、繰り返し2回のばらつきが大きく、挿入速度とせん断応力度の関係を精度よく測定できていない。これには、前報⁵⁾と同様に採取した試料の骨材分布によるばらつきが考えられ、適切な繰返し回数を検討する必要がある。また、水セメント比が50%では異なる傾向となるが、パターンBはパターンAと比較してせん断応力度が大きくなる傾向にあり、挿入距離が大きくなるとより顕著になる傾向がみられる。したがって、挿入距離がある値[ここでは、90mm(試料上面より120mm)程度]に達すると圧密圧力が支配的に働くことが推察される。

表-6に、見掛けのレオロジー定数を示す。見掛けの塑性粘度は文献^{6,7)}と比較してかなり小さく1/50程度の値である。これには、小型羽根挿入式試験装置の挿入羽根の挿入速度が小さく、それともなって測定されるせん断応力度も小さくなるが大きく影響している。また、

表-7 モルタルの配合(実験3)

W/C (%)	空気量 (%)	S/C (wt)	単位量 (kg/m ³)			AD (C×%)	
			C	W	S	AD1	AD2
55	6.9	2.4	518	285	1264	1.00	0.02

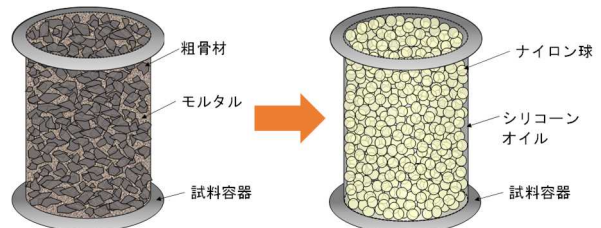


(a) 静置直後 (b) 10分後

写真-1 球体沈降試験の一例

表-8 球体の沈降距離と沈降速度(実験3)

シリコンオイルの粘度 (Pa·s)	沈降距離 (mm)	沈降速度 (mm/min)
25000	68.4	6.84
30000	59.4	5.94
35000	54.0	5.40
40000	48.6	4.86



コンクリート 模擬材料
図-7 模擬材料の概要(実験3)

見掛けの降伏値には負の値を示すものもあり、水セメント比との間にも一様な関係はみられない。したがって、試験装置には、更なる改良が必要である。

図-5に、見掛けの塑性粘度と水セメント比の関係を示す。パターンAとパターンBでは、水セメント比が55%と60%で異なる傾向がみられ、挿入距離が長いパターンBは水セメント比が大きくなると、挿入距離が短いパターンAより見掛けの塑性粘度が大きな値を示している。これには、水セメント比によって異なる挿入羽根の挿入による試料内部の構造の乱れ、すなわち粗骨材の移動や接触による骨格の形成が挿入抵抗として検出されているのと考えられる。

図-6に、実験結果をもとにしたせん断応力度と羽根挿入距離の関係の模式図を示す。前章と本章の考察を踏まえると、測定結果は挿入距離によって3つの領域に分けられる。なお、領域Aと領域Cは、相関係数が0.95以上となる3次の直交多項式の変曲点と実測値を照らし合わせて抽出している。領域Aは挿入羽根の挿入直後にあたる領域で、試料には均一にせん断力が働いていない。領域Cは、

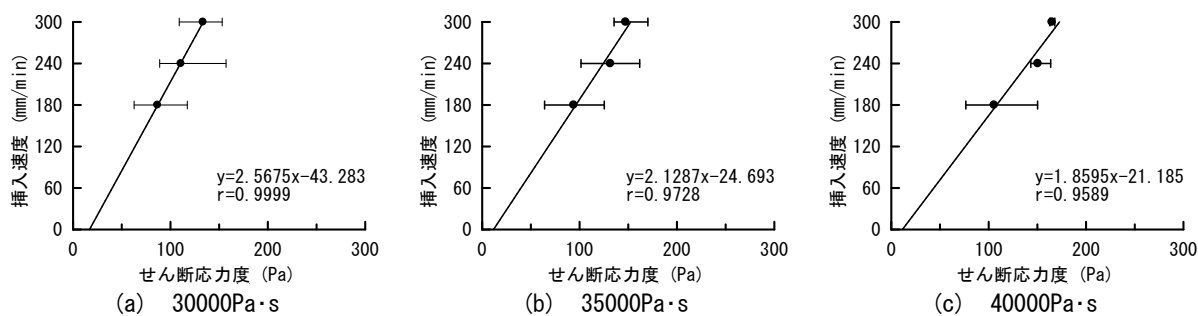


図-8 挿入羽根の挿入速度とせん断応力度の関係(実験3)

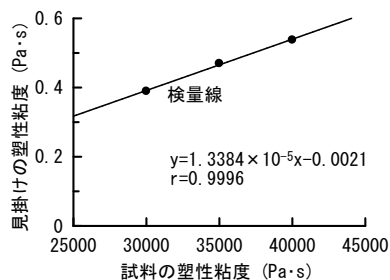


図-9 見掛けの塑性粘度(単にシリコンオイルの塑性粘度)とシリコンオイルの粘度の関係(実験3)

表-9 見掛けのレオロジー定数(実験3)

シリコンオイルの粘度 (Pa·s)	塑性粘度 (Pa·s)	降伏値 (Pa)
30000	0.39	16.86
35000	0.47	11.60
40000	0.54	11.39

表-10 補正した塑性粘度(実験3)

No.	W/C (%)	見掛けの塑性粘度 (Pa·s)	補正した塑性粘度 (Pa·s)
1	45	11.39	851173.04
2	50	10.46	781687.09
3	55	7.23	540354.15
4	60	8.98	671107.29

圧密圧力が支配的に働く領域である。したがって、せん断速度を算出する領域は、領域Bが適切だと判断される。本実験の範囲では、領域Bは挿入距離にして20～90mm(試料上面より50～120mm)程度となり、本章で試みたパターンA[挿入距離にして20～80mm(試料上面より50～110mm)]がこれに該当している。

4. 模擬材料のレオロジー定数を適用した検量線の作成とレオロジー定数の補正(実験3)

本章では、3章で導出したフレッシュコンクリートの見掛けのレオロジー定数を、模擬材料を用いて作成した検量線により補正することを試みる。

4.1 実験要因

実験要因は模擬材料の粘度と挿入羽根の挿入速度とした。ただし、模擬材料の粘度は、ここでは単にモルタルと仮定したシリコンオイルの粘度とし、30000、35000、および40000Pa·sの3水準とした。また、挿入羽根の挿入速度は、実験2の考察も踏まえ180、240、および300mm/minの3水準とした。なお、シリコンオイルの粘度は、次節で述べるシリコンオイルの選定結果をもとに決定した。

4.2 シリコンオイルの選定

模擬材料に用いるシリコンオイルの粘度は、球体沈降試験により選定した。

球体沈降試験は、モルタル(密度:2.07g/cm³)中に沈降するφ10mmの球体(石英ガラス球(密度:2.20g/cm³))とシリコンオイル(密度:0.98g/cm³)中に沈降するナイロン

球(密度:1.14g/cm³)の沈降速度を比較した。なお球体は、モルタルやシリコンオイルの密度と球体の密度差を同程度とするために、それぞれ石英ガラス球とナイロン球を用いた。また、ナイロン球は、後述する模擬材料として仮定する粗骨材である。

モルタルの配合は表-7に示すとおりで、使用材料は実験1と同様とした。また、シリコンオイルには、粘度が25000、30000、35000、および40000Pa·sの4種類を用いた。容量1000mLのメスシリンダーに、それぞれモルタルとシリコンオイルを1000mL満たし、その上に球体を静置した。その後、それぞれ球体を沈降させ10分間の沈降距離と沈降速度を測定した。

写真-1に球体沈降試験の一例を、表-8に球体の沈降距離と沈降速度を示す。石英ガラス球はモルタルに対してまったく沈降しないが、ナイロン球はシリコンオイルの粘度にもなった沈降速度を示している。モルタルと同様にナイロン球が沈降しないシリコンオイルとするには相当な粘度を要する。小型羽根挿入式試験では模擬材料を1回測定するのに90秒から120秒程度の測定時間を見込んでいるので、球体の沈降速度は6.0mm/minを上限とすることにした。そこで、模擬材料として仮定するモルタルには、30000、35000、および40000Pa·sのシリコンオイルを選定することとした。

4.3 模擬材料の作製

図-7に、模擬材料の概要を示す。模擬材料は、モルタルをシリコンオイルとし粗骨材をナイロン球と仮定したもので、それを混合攪拌して作製した。なお、ナイロ

ン球の実積率は文献⁸⁾を参考にして63.3%とし、実験1の配合と同様の単位粗骨材量となるよう、かさ容積にして0.59m³/m³とした。

4.4 実験方法

模擬材料のレオロジー試験は、実験1と同様に行った。ただし挿入羽根の挿入距離は、模擬粗骨材が球体であることから120mmとし、試験は繰り返し4回行った。なお、模擬材料を攪拌すると気泡が混入するが、シリコンオイルの粘度に関わらずいずれも混入空気量は1%以下であり、測定結果に及ぼす影響はないと考えている。

検量線は、模擬材料のレオロジー試験によって得られた見掛けの塑性粘度とシリコンオイルの粘度の関係から作成した。また、作成した検量線により、実験2で得たフレッシュコンクリートの見掛けの塑性粘度を補正した。

4.5 実験結果及び考察

図-8に、挿入羽根の挿入速度とせん断応力度の関係を示す。なお、図中に示したエラーバーは、繰り返し4回の最大値と最小値を示している。挿入速度が大きくなるとせん断応力度も大きくなる傾向にあり、挿入速度とせん断応力度は強い相関関係にある。しかし、模擬材料のせん断応力度は、フレッシュコンクリート(図-4参照)と比較するとかなり小さい。したがって、表-9に示した見掛けの塑性粘度も同様にして小さく、シリコンオイルの粘度と比較すると極端に小さな値となる。これには、3.4節でも述べたが、小型羽根挿入式試験装置の挿入羽根の挿入速度が大きく影響している。

図-9に見掛けの塑性粘度とシリコンオイルの粘度の関係を、表-10に補正したフレッシュコンクリートの塑性粘度を示す。なお、見掛けの塑性粘度は、図-9に示した回帰式により、次式によって補正した。

$$\eta' = (\eta + 0.0021) / 1.3384 \times 10^{-5} \quad (6)$$

ここに、 η : 見掛けの塑性粘度 (Pa・s)

η' : 補正後の塑性粘度 (Pa・s)

検量線により補正したフレッシュコンクリートの塑性粘度は、実際にはあり得ない極端に大きな値を示している。このような補正值には、小型羽根挿入式試験装置のせん断速度が大きく影響しているが、細骨材の骨格構造やかみ合いなどのないシリコンオイルをモルタルと仮定することにも課題があったと考えている。これは谷川ら⁹⁾が指摘したように、コンクリートに対して内部応力状態に依存しない一定の降伏値を持つビンガムモデルの適用に無理があり、粉粒体の崩れの評価、骨材のインターロッキングを考慮した補正の必要性を示していると考ええる。

5. まとめ

1) レオロジー試験では、試料容器の直径を200mmとし、挿入羽根の挿入速度を180mm/min以上とする必要がある。

2) せん断応力度の算出にあたっては、挿入距離にして20～90mm(試料上面より50～120mm)の領域が対象となる。

3) 挿入羽根の挿入速度が大きく影響し、測定した塑性粘度はかなり小さな値となる。

4) シリコンオイルをモルタルと仮定した模擬材料により検量線を作成し、フレッシュコンクリートの塑性粘度を補正すると、実際にはあり得ない極端に大きな値となる。

今後は、小型羽根挿入式試験装置の挿入羽根の挿入速度を改良するとともに、フレッシュコンクリートのレオロジー定数を補正する上での模擬材料についても検討していく必要があると考えている。

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。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 谷川恭雄ほか：建築材料を学ぶーその選択から施工までー，理工図書，2018.2
- 2) 山田義智ほか：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
- 3) 平野修也ほか：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
- 4) 平野夏帆ほか：レオロジー試験装置の開発と実験結果の適用方法に関する検討，プレキャスト施工技術論文集，Vol.4，pp.1-5，2022
- 5) 堀内優大ほか：改良型小型羽根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，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.1，pp.724-729，2023
- 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) 笹倉博行ほか：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) F. A. L. Dullien: Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure, Academic Press, 1979
- 9) 谷川恭雄ほか：フレッシュコンクリートの構成則および降伏条件に関する研究，コンクリート工学年次論文集，9-1，pp.115-120，1987