

論文 フレッシュコンクリートに連行した空気泡による自己充填性のためのベアリング効果の解明

大西 悠*1・大内 雅博*2

要旨: ベアリング効果があるとされる微細な連行空気泡は、外力によって圧縮されても復元されるものと仮定し、フレッシュモルタルの圧縮試験と一面せん断試験を行った。径の小さい空気泡がより多く連行されているモルタルほどせん断応力が小さく、高い相関を示した。フレッシュモルタルを圧縮し除荷した際にひずみが残っており、気泡は外圧によって縮んでも復元することが明らかとなった。この空気泡の復元性の指標として各最大応力における剛性比を定義し、気泡径の小ささと剛性比またとの相関を得た。増粘剤を添加しているフレッシュモルタルは外圧による空気泡同士の合一を抑制し、大きな気泡も抜けにくくなった。

キーワード: 自己充填コンクリート, フレッシュモルタル, 微細空気泡, ベアリング効果, ひずみ, 増粘剤

1. はじめに

コンクリートは主要な建設材料であるが、コンクリート材料の信頼性や耐久性は施工過程における人的要因に大きく影響を受ける。この課題を解決するため、施工時に振動締め固めを必要としない自己充填コンクリート(Self-Compacting Concrete: SCC)が1988年に開発された。しかしながら、日本でSCCが開発されて30年が経過したが、SCCが普及しているとは言い難い。一因として、普通コンクリートよりも高価格・高強度であることが挙げられる。粉体にセメントのみを使用した従来のSCCは、自己充填性を付与するために高粉体量かつ高性能AE減水剤を添加し、セメントを分散させて自己充填性を得ている。そのため、材料分離の防止と個体間摩擦低減の観点からセメント使用量が普通コンクリートの約2倍となり、高価格・高強度なコンクリートとなっている。

単位セメント量を削減する方法として、コンクリート中に微細な気泡を連行することでこれまでセメントがもっていた流動性を空気泡に代替させた新型のSCC“気泡潤滑型自己充填コンクリート:air-SCC¹⁾”が開発され、実用化に向けた技術開発が行われている。このair-SCCは微細な空気泡のベアリング効果により個体粒子間摩擦を低減していると考えられているが、連行空気泡によるベアリング効果は直接的には示されていない。

液中での小さな気泡は、気泡の径が小さいほど表面張力により球形を保ちやすく、また、気泡内圧力が高いことがわかっている²⁾。本研究では空気泡がベアリング効果を持つとき、すなわち連行した気泡が小さいとき外圧によって潰れにくいものと仮定し、フレッシュモルタルを圧縮して連行空気泡の圧縮を試みた。そして、フレッシュモルタル中のせん断応力を直接測定することにより、連行された空気泡の径分布とフレッシュモルタル中の固

体粒子間摩擦との関係を調べた。

2. 試験方法と諸条件

2.1 使用材料

本研究で用いた使用材料を示す(表-1)。セメント(C)は普通ポルトランドセメント、細骨材(S)は石灰石砕砂を使用した。高性能AE減水剤(SP)は主成分がポリカルボン酸エーテル系化合物のものをを使用した。空気連行剤(AE)は変形ロジン酸化合物陰イオン界面活性剤を水で100倍希釈したものをを使用した。増粘剤(VM)は水溶性セルローズエーテル系のものを使用し、200g/m³(コンクリート体積のとき)添加した。消泡剤は添加するタイミングに応じて2種類使用しており、練混ぜ後に添加する場合はポリアルキレングリコール誘導体(D1)を水で100倍希釈したものを、練混ぜ前に添加する場合はポリエーテル系の粉体(D2)をVM重量×25%となるよう添加した。

表-1 使用材料

記号	材料	概要
W	水	上水道水
C	セメント	普通ポルトランドセメント 密度 3.15g/m ³
S	細骨材	石灰砕砂 密度 2.68g/m ³ , 粗粒率 2.63 粒径判定実積率 55.3%, 吸水率 0.81
SP	減水剤	高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系化合物)
AE	空気連行剤	変形ロジン酸化合物系 陰イオン界面活性剤
VM	増粘剤	水溶性セルローズエーテル系増粘剤
D1	消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体
D2		ポリエーテル系(粉体)

*1 高知工科大学大学院修士課程 工学研究科基盤工学専攻 社会システム工学コース (学生会員)

*2 高知工科大学 システム工学群 教授 工博 (正会員)

2. 2 配合

モルタル中の空気を除いた細骨材容積比(s/m)は 55%, 水セメント比(W/C)は 45%に設定し, 後述のモルタルフロー試験に応じて高性能 AE 減水剤(SP)添加量を変化させて試験を行った(表-2)。AE, SP, D1 はいずれも W に対し内割混合, VM, D2 はいずれも外割混合で使用した。

2. 3 練混ぜ手順

モルタル材料の練混ぜには, JIS R5201 に規定されたモルタルミキサを用いた。練混ぜ速度は低速(自転: 毎分 140±5 回転, 公転: 毎分 62±5 回転)で, 1 バッチあたりの練混ぜ量は 1.6L(空気を除く)として行った。連行する空気の質を変化させるために, 「消泡剤を用いた大径気泡の除去によるフレッシュコンクリートの自己充填性向上」で使用された練り混ぜ方法を参考に, モルタルの練り混ぜ方法を変更してモルタル試験を行った(図-1)。本研究では気泡径 1000μm 以上の気泡を大径気泡と呼び, 大径気泡が多く連行されている径分布を粗い径分布, 大径気泡が少ない径分布を細かい径分布と表現する。一括練りで粗い気泡径分布の, 分割練りで細かい気泡径分布の空気を連行した。さらに, 消泡剤を先に添加する方法では連行空気泡が気泡径に関係なく全体的に空気量を減らしたモルタル, 消泡剤を後から添加する方法では大径気泡を除去したモルタルを作成した³⁾。

2. 4 試験方法

同等の性能のモルタルで比較するため, 「自己充填コンクリートの粗骨材・モルタル粒子間相互作用の簡易評価法」⁴⁾より, モルタルフロー試験(図-2), 空気量試験(質量法)によりフレッシュ性状の試験を行った。モルタルフロー試験において, 試験結果 $d=240\text{mm}\pm 10\text{mm}$ となるよう SP 添加量を調整したモルタルで試験を行った。

3. モルタル中に連行された空気径の分布とせん断応力との関係

モルタル中に連行された空気径分布の測定のために, 自動空気解析装置(Air Void Analyzer: AVA)(写真-1)を使用した。この測定器は液中でモルタルを攪拌し連行空気を浮上させ, その浮上速度の差を利用してモルタル中に連行された空気の径を測定するものである。フレッシュ

表-2 気泡潤滑型自己充填モルタルの配合表
(空気を除く)

配合条件		単位量(kg/m ³)		
W/C	s/m	W	C	S
45%	55%	264	586	1474

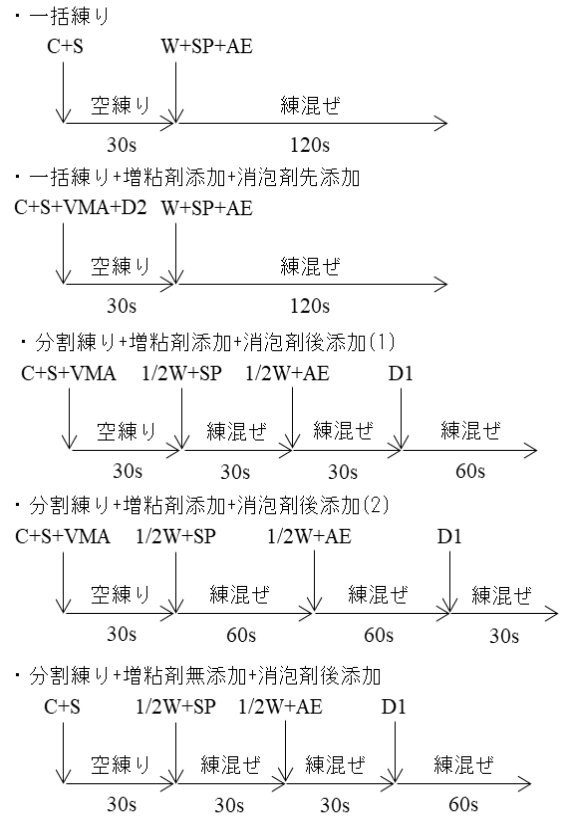


図-1 練り混ぜ方法

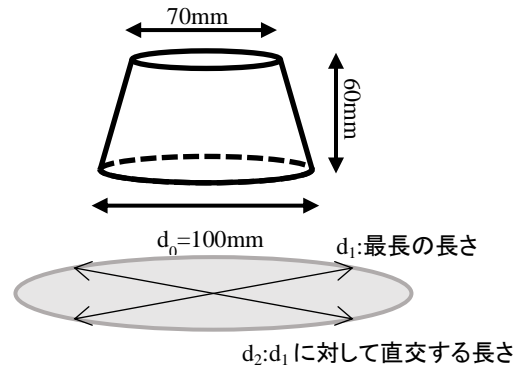


図-2 モルタルフロー試験



写真-1 自動空気径測定装置(Air Void Analyzer)

モルタルでの測定が可能のため、施工性に影響する空気泡を直接測定することが可能な試験方法である。試料として必要なモルタル量は 20ml である。

コンクリートは型枠に充填される際、鉄筋を通過するときに骨材同士が接近することで直応力が生じ、モルタルと骨材との間でせん断応力が生じる(図-3)。そのせん断応力を模式的に測定することが可能な、一面せん断試験機を使用した(写真-2)。上面のみが空いている固定された容器(下部)と底面・上面共に空いている容器(上部)にモルタルを入れ、直応力をかけた状態で上部のみを水平移動させる。下部の容器に入れられているモルタルと上部の容器に入れられているモルタルとの間に生じるせん断力応力を測定する(図-4)。試料として必要なモルタル量は 50ml、容器内側の直径は 60mm である。本試験機で測定した水平方向の変位とモルタル中のせん断力との

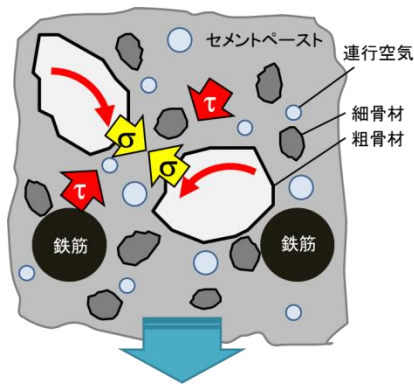


図-3 せん断応力が発生するイメージ図

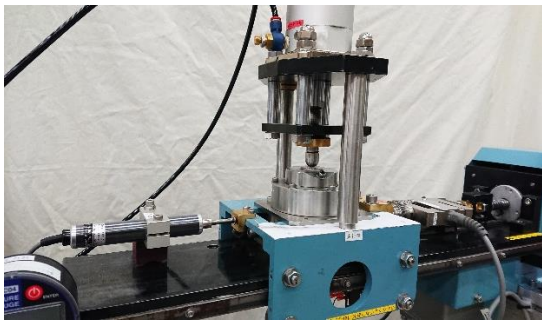


写真-2 一面せん断試験機

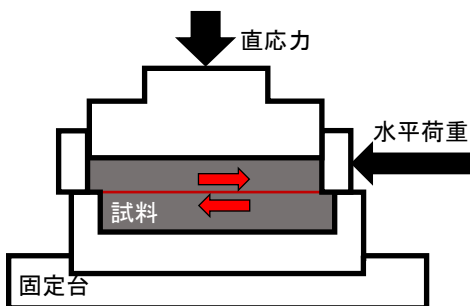


図-4 一面せん断試験の模式図

関係の一例を示す(図-5)。

また、一面せん断試験によって測定したデータでは、動き始めて最初に得られたせん断力のピークをモルタルが動き始めたときのせん断力として取り扱う(図-6)。この時、容器に何も入れずに測定したせん断力を試験器自体の摩擦とし、この値を減じた値をモルタル自体のせん断力として扱った。一面せん断試験は速度 0.06mm/sec、直応力 0.20MPa、0.35MPa で試験を行った。使用したモルタルは表の通りである(表-3)。

まず、予備実験として空気量 0%と 5%のモルタルで一面せん断試験を行った。しかし、この試験では空気量によってはせん断力に違いは見られなかった。これは連行空気に大径気泡が多いためであり、大径気泡はモルタル内の摩擦緩和に影響しなかったものと考察した(図-7, 8)。

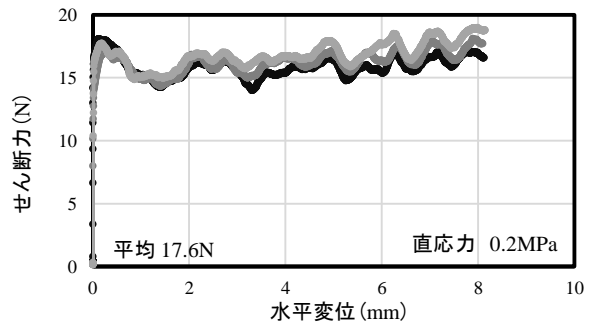


図-5 水平方向の変位とモルタルに生じるせん断力との関係

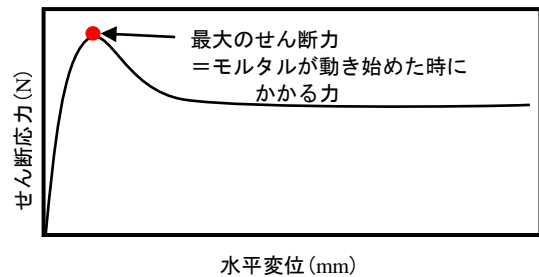


図-6 測定データの解釈図

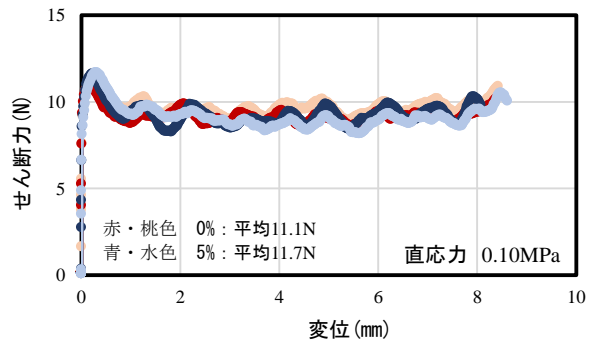


図-7 空気量のみを変化させたモルタル中のせん断力

次に、空気径分布を変化させたフレッシュモルタル中に
 連行された空気とフレッシュモルタル中に生じるせん断
 応力との関係を測定した。試験に使用したモルタルの空
 気径分布を下図に示す(図-9)。1000 μm 未満の空気量が多

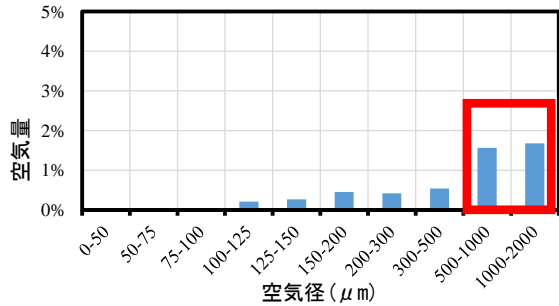


図-8 空気量 5%のモルタル中の気泡径分布

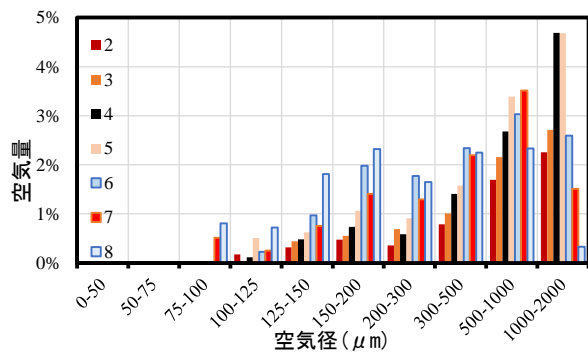


図-9 フレッシュモルタル中に連行された空気泡の径分
 布

くなるほどせん断応力は小さくなり、1000 μm の空気量
 が少なくなるほどせん断応力が大きくなっていることが
 わかった(図-10)。

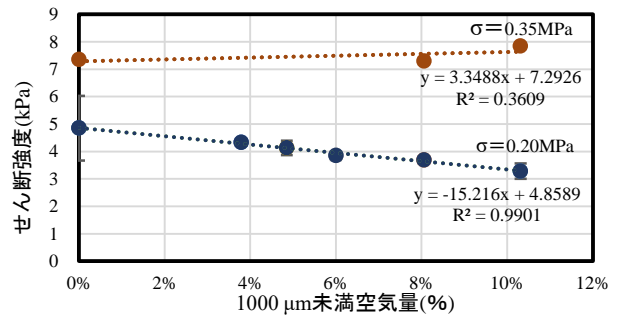


図-10 フレッシュモルタル中に連行された 1000 μm 未満
 の空気量とせん断応力との関係



写真-3 一軸圧縮試験機

表-3 配合と試験結果

	高性能AE減水剤 添加量 (C×%)	空気連行剤 添加量 (C×%)	増粘剤 添加量 (g/m^3) ※コンクリート 1m^3 のとき	消 泡 剤	消泡剤 添加量	練混ぜ方法	空 気 量	500 μm 未満 空気量	せん断力 (N)	$\mu_{\text{max}}/\mu_{\text{re}}$
1	0.8	-	200	D2	VM×25%	一括練り 消泡剤先添加	0%	0%	21.0	-
									16.1	
									24.2	
2	1.1	0.010	200	D1	0.04 (C×%)	分割練り 消泡剤後添加(2)	6%	2.10%	18.9	1.89%
									19.4	2.12%
									18.6	
3	1.1	0.010	200	D1	0.04 (C×%)	分割練り 消泡剤後添加(1)	8%	2.69%	19.2	2.20%
									18.6	
									17.4	
4	0.9	0.005	-	-	-	一括練り	11%	3.32%	18.1	3.26%
									17.0	
									17.7	
5	1.2 (消泡成分含)	0.010	200	D1	0.01 (C×%)	分割練り 消泡剤後添加(1)	13%	4.67%	17.5	3.01%
									16.7	
									17.2	
6	1	0.005	200	D1	0.01 (C×%)	分割練り 消泡剤後添加(1)	13%	7.28%	15.3	3.46%
									15.6	
									17.1	
7	1.6 (消泡成分含)	0.010	-	-	-	-	12%	6.42%	-	3.63%
8	1.2	0.005	-	-	-	-	12%	9.56%	-	4.68%

4. フレッシュモルタルの圧縮による連行空気の挙動

ベアリング効果を持つ空気は潰れにくいという仮説を立て、フレッシュモルタルを圧縮することで、空気の潰れやすさや復元の仕方を観察する方法で検討した。モルタルの圧縮は、土質試験の一軸圧縮試験を元とした圧縮試験機を用いた(写真-3)。直径 60mm、高さ 75.5mm の円筒形の容器にフレッシュモルタルを入れ鉛直方向に荷重をかけ、直応力とひずみの関係を観察した(図-11)。試験料として必要なモルタル量は 214ml である。本試験はひずみ速度 1.2~1.3%/min、最大直応力を 0.35MPa、0.20MPa で行った。フレッシュモルタル中の空気径分布は前章と同様に AVA を用い、圧縮試験前と圧縮試験後の空気径分布を測定した。

最大直応力の際のひずみを最大ひずみ(μ_{max})、除荷した際のひずみを残留ひずみ(μ_{re})とする。空気量 0% のモルタルでもひずみは生じているため、空気を除いたモルタル材料自体の圧縮を考慮し、空気量 0% のモルタルのひずみを減じた値で検討した。圧縮試験に際しては、載荷・除荷を交互に 10 回繰り返し、1 回目の載荷以降最大ひずみと残留ひずみに変動がないことを確認した。

外力により縮んだモルタル中の気泡の体積復元性の指標として「気泡の剛性比」を式(1)のように定義した。最大の圧縮応力によるモルタルの体積変化率 $\mu_{max}-\mu_{re}$ を、モルタルに残った空気容積比で割った値を気泡のひずみと見なし、その逆数を、その最大応力における「気泡の剛性比」とした。この値が高いほど、その最大応力下での復元性が高い気泡であることを意味する。

$$\text{気泡の剛性比} = \text{圧縮後の空気量}(\%) / \mu_{max} - \mu_{re} \quad (1)$$

最大直応力 0.20MPa のとき、空気の比表面積と剛性比は高い相関を示した一方、最大直応力 0.35MPa のとき、空気の比表面積と剛性比には相関は得られなかった(図-12)。直応力 0.20MPa では大径気泡のみが減少していること、小径気泡が多く連行されているほど剛性比も高くなっていることから、直応力 0.20MPa はモルタル中の微細気泡が合流しない程度の外力であり、直応力 0.35MPa では径の大きさに関わらず気泡が潰れてしまったと考察した。また、VM を添加していないモルタルでは気泡径に関わらず気泡が抜けているのに対し、VM を添加したモルタルでは大径気泡のみ抜けていた(図-13)。

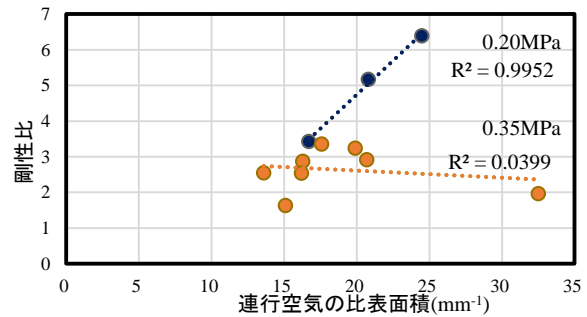


図-12 気泡の比表面積と「剛性比」ととの関係

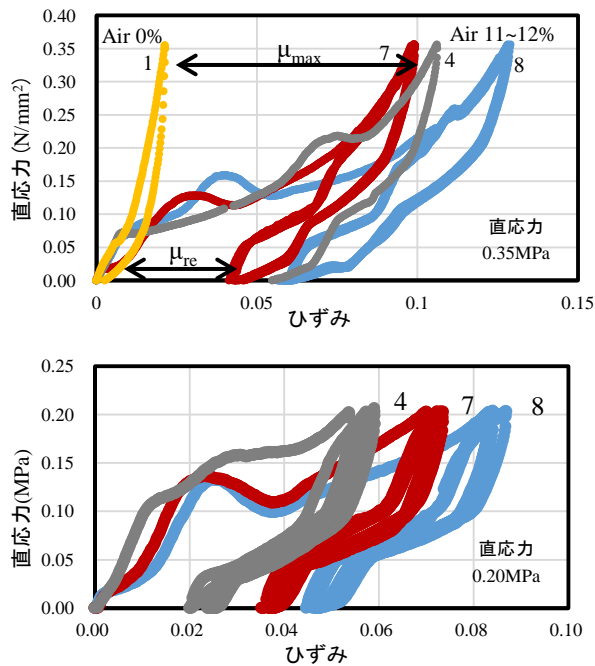


図-11 圧縮試験によるモルタルの応力ひずみ線図(上:最大直応力 0.35MPa, 下:最大直応力 0.20MPa)

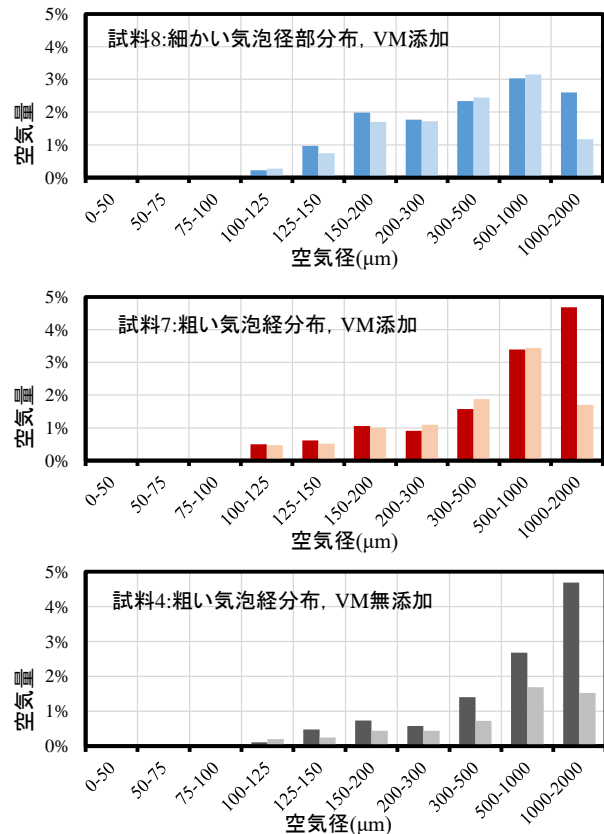


図-13 各モルタルに連行された空気泡の径分布(左:圧縮前, 右:最大直応力 0.35MPa で圧縮後)



写真-4 モルタルから抜ける直前の気泡に膜ができている様子

また、一軸圧縮試験を行った際、試験後に空気抜き穴を空けると空気が抜ける音をした。そのため、モルタル中の大径気泡や、合一してできた気泡が試験機上部に浮上している可能性を得た。圧縮試験後に解放したモルタル中の連行空気は、VMの添加の有無に関わらず、減少していた。外力がかかるとき、モルタル中から空気が抜けることが実際に測定できた。

また、VMを添加していないモルタルの場合は空気径によらず全体的に減少しているのに対し、VMを添加したモルタルの場合は大径気泡のみが減少していた。これは、モルタルの粘性が高いために連行空気が抜けるのを防いだため、または、有機物である増粘剤が連行空気泡の膜となり²⁾、気泡同士の合一や気泡の抜けを防いだためであると考えられる。そのため、モルタルから抜ける直前の大径気泡に上の写真のような膜ができ、破裂するまでに時間を要している様子を観察することができた(写真-4)。

5. まとめ

本研究ではフレッシュコンクリートのワーカビリティ、自己充填性の向上に効果があるとされる連行空気泡の効果の直接測定を目指した。コンクリートやモルタルに連行された空気泡は外力によって圧縮されるが、ベアリング効果がある微細な気泡は圧縮されても潰れにくいものと仮定した。それを検証するため、フレッシュモルタルの圧縮試験と一面せん断試験による固体粒子間摩擦の測定、連行空気泡の径分布の測定を行った。今回の測定で得られた知見を以下に示す。

- 1) 比較的小さい気泡が多く連行されているほど、モルタルのせん断強度(モルタル中の摩擦)が低くなった。
- 2) フレッシュモルタルを圧縮し除荷した際にひずみが残りに、モルタルが完全な元の状態には戻らないこ

とを確認した。モルタルの最大ひずみから除荷後の残留ひずみを除した $\mu_{max} - \mu_{re}$ の値を、圧縮力によるモルタル中の空気泡のひずみとし、それを圧縮後に残った空気量で割った値の逆数を、その最大応力での「剛性比」と定義した。直応力 0.20MPa では比表面積を指標とした気泡の細かさと剛性比との間に高い相関が得られた。一方、直応力が 0.35MPa と高くなると相関が得られず、気泡が潰れた可能性を得た。また、最大直応力 0.35MPa 下では微細な気泡はある程度は潰れているものの、完全に潰れてしまっているわけではないものと考察した。

- 3) 増粘剤を添加したフレッシュモルタルは連行空気泡の抜けが小さく、1000 μm 未満の気泡減少量はほとんどなかった。また、1000 μm 以上の連行空気泡についても抜けが小さくなった。これは、モルタルの粘性、または、増粘剤が気泡の周囲に膜を作り合泡や浮上による抜けを防止しているためであると考察した。小径気泡を保持しやすく、気泡がコンクリート中から抜けにくくなるため、この増粘剤の気泡潤滑型自己充填コンクリートへの有効性を確認できたといえる。

謝辞

本研究に際して、高知工科大学技術指導員 宮地日出夫氏と曾我部敏郎氏(株CDR コンサルタンツ専務取締役)には実験全般について御指導と御協力を頂きました。心より御礼申し上げます。

本研究の一部は JST 研究成果展開事業 A-STEP 機能検証フェーズ 平成 30 年度採択課題「省力化と急速施工が可能な汎用材料としての自己充填コンクリート」(課題番号 VP3041808881) によるものです。

参考文献

- 1) 亀島健太, 大内雅博: 連行空気泡による自己充填コンクリートの実用性向上, 第 69 回土木学会年次学術講演会, V-364, pp.727-728, 2014 年 9 月
- 2) 安井 久一: ウルトラファインバブル, 日本音響学会誌 73 巻 7 号, 424-431, 2017 年
- 3) 亀島健太, Anuwat ATTACHAIYAWUTH, 大内雅博: 消泡剤を用いた大径気泡の除去によるフレッシュコンクリートの自己充填性向上, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1419-1424, 2016 年
- 4) 大内 雅博, 枝松 良展, 小澤 一雅, 岡村 甫: 自己充填コンクリート中の粗骨材・モルタル粒子間相互作用の簡易評価法, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.21, No.2, pp.451-456, 1999 年 6 月