

シリコーンオイルを添加したモルタルの中空形状材 料による耐凍害性の改善に関する研究

メタデータ	言語: Japanese
	出版者:日本材料学会
	公開日: 2020-12-17
	キーワード (Ja): シリコーンオイル, 耐凍害性, 中空微小球,
	中空糸
	キーワード (En):
	作成者: 安田, 僚介, 岸本, 豪太, 崔, 亨吉, 濱, 幸雄
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00010345

シリコーンオイルを添加したモルタルの 中空形状材料による耐凍害性の改善に関する研究

安田 僚介*1, 岸本 豪太*2, 崔 亨吉*3, 濱 幸雄*4

A Study on Improvement of Frost Resistance of Mortar using Silicone Oil by Hollow-shaped Materials

Ryosuke YASUDA*1, Gota KISHIMOTO*2, Hyeonggil CHOI*3 and Yukio HAMA*4

要旨:内添型吸水防止剤のシリコーンオイルを添加したセメント系材料は,AE剤の使用の有無にかかわらず,耐凍害性が低下することが報告されている.本研究では,中空形状の材料によって物理的に空隙を導入し,シリコーンオイル添加モルタルの耐凍害性の改善を検討した.その結果,樹脂系の中空微小球が凍結融解作用による内部劣化の抑制に有効であるものの,十分な耐凍害性の改善は難しいことがわかった.また,凍結融解試験前に乾燥-吸水過程を含むことで,シリコーンオイルによって吸水時の質量増加が抑制され,耐凍害性が向上することを確認した.

キーワード:シリコーンオイル,耐凍害性,中空微小球,中空糸

1.はじめに

論文

近年,環境負荷低減や廃棄物削減の観点から,産 業副産物の有効利用が求められており,フライアッ シュ (FA) や高炉スラグ微粉末 (BFS)を一部置換 した混合セメントを用いることで,環境への配慮に 努めている.しかしながら,それらのセメントをモ ルタルやコンクリート等に使用した場合,強度発現 の遅れや中性化速度の増大などが生じるため,建築 分野における汎用化はあまり進んでいないのが現状 である.その中でも,中性化は RC 造建築物の寿命 を評価する指標の一つであるため¹⁾,建物の長寿命 化を目的とした,中性化の抑制に関する研究が数多 くなされてきた.

中性化の抑制策としては、建物の外壁部に仕上げ 材を施すことで、防水層を形成する方法や透気性を 低下させる方法が一般的に行われている.また、低 水セメント比化²⁾、再生骨材コンクリートでのシラ ン系撥水剤の内添および塗布³⁾、シリコーンオイル (SO)の添加^{4),5)}が中性化抵抗性を向上させるとい う報告もある.

ここで、内添型吸水防止剤として使用される SO は、材料に撥水性能を付与し、中性化抵抗性の向上、 乾燥収縮率の低減、塩分浸透の抑制といった効果を もたらすことが報告されている⁵⁾. また、SO による 中性化抵抗性の向上効果は、OPC より BFS を用いた モルタルにおいて顕著であることが確認されており ⁹, SO の使用によるセメント系材料の高耐久化や BFS の利用拡大が期待される.しかしながら, SO 添加率の増大に伴い耐凍害性は大きく低下し, SO を用いた場合は AE 剤による耐凍害性の改善効果も 期待できないことが報告されている⁹.そのため, AE 剤以外の耐凍害性を向上させる手段を検討する 必要がある.

耐凍害性の向上手段として,AE 剤の他に多孔質 材料[¬]や,中空微小球(HMS)による物理的な空隙 の導入が有効とされている.中でも HMS は,特定 の径の空隙をコンクリート内に導入することができ ると考えられ,AE 剤を使用した場合より良質な気 泡組織を形成できる可能性がある.既報では,水中 不分離性コンクリートや FA を用いたコンクリート などの AE 剤の使用が困難な対象に適用し,耐凍害 性の向上効果が確認され,その作用機構についても 検討されている^{8),9),10)}.また,同じく中空形状の材 料として,断面に三つの空気層を持つポリプロピレ ン繊維の中空糸(HF)が近年開発され,HMS と同 様に AE 剤の代替としての効果が期待できる.

そこで本研究では、HMS および HF が持つ耐凍害 性の向上効果と基礎性状への影響の確認および把握 を行い、それらを用いて SO 添加モルタルの耐凍害 性を改善させることを目的とする実験を行った.

- *1 室蘭工業大学大学院工学研究科環境創生工学系専攻 博士前期課程
- *2 東洋建設(株)関東建築支店建築部
- *3 慶北大学校建築学部 助教授
- *4 室蘭工業大学大学院工学研究科くらし環境系領域 教授

2.実験計画および方法

2.1 実験計画

実験は2つのシリーズで構成されており、両シリ ーズにおいて,水セメント比 (W/C) 55%,セメン ト砂比(C:S)1:3のモルタルを用いて実験を行った.

シリーズ1ではHMSおよびHFがモルタルの基礎 性状および耐凍害性に及ぼす影響について検討した. 表-1 にシリーズ1の実験計画を示す. HMS の混入 率をセメント質量に対して 0.5, 1.2, 2.0%の 3 水準, 繊維長の異なる2種類のHFの混入率を0.5, 1.0, 1.5vol%の3水準とした.また,HMS および HF を 用いずに AE 剤の有無により目標空気量を調節した NonAE と AE4.5 の合計 11 種類のモルタルを作製し た. なお, AE4.5 以外のモルタルには消泡剤を添加 し, 連行空気の影響を排除した.

シリーズ2ではシリーズ1で耐凍害性改善に有効 であった HMS を用いて, SO を添加したモルタルの 耐凍害性改善効果の検討を行った.表-2にシリーズ 2の実験計画を示す. SO 添加率をセメント質量に対 して 0, 3, 5%の 3水準としたモルタルを対象に, それぞれについて HMS の混入率をセメント質量に 対して 1.2, 2.0, 4.0%の 3 水準とし、比較のため NonAE と目標空気量を 7% とした AE7 を加えた. ま た,SO の吸水防止効果を考慮した凍結融解試験を 行うため、試験前に供試体を乾燥-吸水させる条件を 加えた. なお, HMS を用いた場合にも消泡剤は用い ていない.

2.2 使用材料

表-3 に使用材料の物性を示す. セメントは普通ポ ルトランドセメント (OPC) を,細骨材は白老産陸 砂を用い、練混ぜ水には上水道水を使用した. HMS は粉立ちを抑えるため表面が湿潤状態であるものを 用いた. 図-1 に HMS の顕微鏡画像を示す. HF は断 面に三つの空気層をもつもので、繊維長 1mm およ び 5mm の 2 種類の繊維を用いた. 図-2 に HF の顕 微鏡画像を示す.また,SO は内添型の建材用シリ コーン吸水防止剤として市販されているもので、熱 処理することなく水和物に固定化される特徴をもつ ものを使用した. なお、モルタルの混練方法は、容 量 10L のミキサーを用い,セメント,細骨材および 中空形状材料を 30 秒間空練りした後,水を投入し 30 秒間練り混ぜ、かき落としを行った後さらに2分 間混練した.SOはこの工程の後に添加し、さらに2 分練り混ぜた.

2.3 評価項目および試験方法

(1) フローおよび空気量

フロー試験は JIS R 5201, 空気量の測定は JIS A 1128 (圧力法) に準拠して行った. HMS はその形状

表-1 実験計画(シリーズ1)

記号	W/C [%]	C:S	HMS [C×wt%]	HF [Vol%]	AE 剤 [C×wt%]	消泡剤 [C×wt%]	評価項目
HMS0.5			0.5	-			
HMS1.2			1.2	-			
HMS2.0			2.0	-			
HF1-0.5	1		-	0.5			空気量
HF1-1.0			-	1.0		0.01	フロー
HF1-1.5	55	1:3	-	1.5	-	0.01	圧縮強度
HF5-0.5			-	0.5			耐凍害性
HF5-1.0			-	1.0			気泡組織
HF5-1.5			-	1.5			
NonAE			-	-			
AF4 5	1		-	-	0.005	-	

± 0	中睦社市	(2.11	7 2)
衣⁻∠	美缺訂凹	(ンリー	- 人 Z)

記号	W/C [%]	C:S	HMS [C×wt%]	AE 剤 [C×wt%]	SO [C×wt%]	評価項目				
HMS1.2			1.2	-		空気量				
HMS2.0			2.0	-	0	フロー				
HMS4.0	55	1:3	4.0	-	3	圧縮強度				
NonAE			-	-	5	耐凍害性*				
AE7			-	0.01		気泡組織				
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~										

※凍結融解試験前に供試体を乾燥-吸水させる条件を加えた

記号 .... 比表

痡粨

表-3 使用材料の物性

		10% HF							
普通ポルトラ	OPC	盃)及 [g/cm ³ ]	面積 [cm ² /g]	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FE ₂ O ₃	CaO	MgO	$SO_3$
ントセメント		3.16	3500	21.4	5.5	2.8	64.3	2.1	1.9
		表乾	絶乾	ロび フ	√家	単位容積		宇持索	
種類	記号	密度	密度	吸水率 [%]		質	量		¤++ 61
		[g/cm ³ ]	[g/cm ³ ]			[kg/L]		[70]	
白老産陸砂	-	2.67	2.63	1.57		1.75		66.5	
插桁	記문	密度 [g/cm ³ ]		粘度 (cSt/25℃)		园托家		引火点	
1里大只	記り					лш 1) Г			[°C]
シリコーン	50	0.96		2	0	1	12	14	50
オイル	30	0.96		20		1.42		100	
禾粨	記문	密	度	全アルカリ量		塩化物イオン量			
112.75		[g/c	m ³ ]		[%]		[%]		
AE 剤	AE	1.04~	-1.08	3.70			0.00		
消泡剤	-	0.98~1.02		0.00			0.00		
種類	記号	繊維長 [mm] 組		成	直 [µ:	径 m]	真比重	自中	空率 [%]

植類	記号	[mm]	組成	[µm]	具比重	[%]
中空微小球	HMS	-	AN 系 コポリマー	40~60	0.03±0.01	84~89
中市文	HF1	1	ポリプロピ	<i>\$</i> 5 20	0.01	14.20
甲空杀	HF5	5	レン	利 30	0.91	14~20





化学組成[%]

HMSの顕微鏡画像 図-2 HFの顕微鏡画像

から、シェルが破壊や変形しない限り、圧力法では HMS 内部の空隙を含む空気量を,正確に測定できな いことが報告されているため¹⁰⁾, JIS A 1116 (質量 法)を参考に、NonAE の単位容積質量との差から HMS を使用したモルタルの空気量を換算した.以下 に計算式を示す.

$$T_0 = T \times \frac{100}{100 - A_N}$$
(1)

$$A_{\rm H} = \frac{T_0 - M}{T_0} \times 100$$
 (2)

ここに、T₀: 空気量 0%とした NonAE の単位容積 質量 (kg/m³)、T: NonAE の単位容積質量 (kg/m³)、 A_N: 圧力法での NonAE の空気量 (%)、A_H: HMS を使用したモルタルの換算空気量 (%)、M: HMS を使用したモルタルの単位容積質量 (kg/m³) である. また、単位容積質量は JIS A 1116 に従い測定した.

なお,HFの中空率は14~20%程度であり,1.5vol% 混入した場合でも,導入される中空部分は空気量に して約0.2%と少ないため,HFを使用したものに対 しては空気量の換算を行わず,圧力法のみ行った.

## (2) 圧縮強度

圧縮強度試験は φ 5×10cm の供試体を用い, JIS A 1108 に準じて 20℃水中養生 4 週で測定を行った.

## (3) 凍結融解試験

凍結融解試験は4cm×4cm×16cmの角柱供試体を 用い、20℃水中養生4週後に内寸5cm×5cm×50cm のゴム容器の中に供試体を縦に2つ重ねた状態で行 った.JISA1148A法に準じて、供試体の中心部温 度が5℃~-18℃,-18℃~5℃となるように、凍結時間 2時間30分、融解時間1時間30分とする凍結融解 を300サイクルまで与えた.シリーズ2では、凍結 融解開始前の養生条件として、20℃水中養生4週に 加えて、20℃・60%RHの恒温恒湿室において2週 間の乾燥と20℃水中での1週間の吸水を行った後に 凍結融解試験を開始する条件も追加した.

#### (4) 気泡組織

気泡組織は 4cm×4cm×16cm の角柱供試体を 20℃水中養生4週後に,コンクリートカッターで切 断し,切断面を#80,#320,#1000,#1500 の研磨材 で順次研磨し,洗浄後,自然乾燥した供試体を用い た.その後,倍率 175 倍の CCD カメラを搭載した 顕微鏡で,リニアトラバース法により側線を横切る 気泡と HMS の空隙の個数および弦長を測定し,硬 化空気量と気泡間隔係数を算出した.トラバース長 は ASTM C 457 に準じて定めた.

## 3. 結果および考察

## 4.1 中空形状材料がモルタルの基礎性状および耐 凍害性に及ぼす影響(シリーズ1)

## (1) フローおよび空気量

図-3 および図-4 に HMS および HF 混入率による フローおよび空気量の変化を示す. HMS の混入に伴 うフローへの影響はみられず,圧力法による空気量 の測定では,HMS 混入率にかかわらず 1%以下の空 気量を示した.一方,単位容積質量から換算した空 気量では,混入率の増加に比例して空気量が増加し



ており, HMS によって確実に空隙が導入されている ことがわかる.以降, HMS を混入したモルタルの空 気量は換算空気量を採用するものとする.

HF は混入率の増加に伴いフローが低下し、繊維 長が長いものの方が、より大きく低下した.また、 空気量も HF の混入によって増加している. HF によ って導入される中空部分の体積は少ないため、HF の空気量の増加は、主に流動性や粘性の低下に起因 するまき込み空気の増加が原因と考えられる.

## (2) 圧縮強度

図-5 に HMS および HF 混入率による圧縮強度の 変化を示す. HMS, HF ともに, 混入率が増加する ほど圧縮強度が低下しており, これは HMS 内の空 隙や HF のまき込み空気の増加によるものと考えら れる.

## (3) 耐凍害性

図-6 および図-7 に凍結融解試験による相対動弾 性係数および質量減少率の変化を示す. HMS を混入 したモルタルは添加率によらず高い相対動弾性係数 を維持し,換算した空気量が 2%の HMS0.5 において も,300 サイクル時点での相対動弾性係数 (RDM) は 80%と高い値を示している.また,AE4.5 は初期 段階から質量が減少しているのに対し,HMS は 100 サイクルを超えてから質量減少が始まっており, HMS を使用した場合は,AE 剤を使用した場合とは 異なるスケーリングの劣化傾向を示した.

HF においては凍結融解作用に対する改善はみら れず, NonAE と同程度の耐凍害性であった. 前述の 通り、本実験における HF の混入量では、HF により 導入される中空部分は少ないため、凍結時の圧力を 緩和できるほどの空隙は導入されていないと考えら れる.また、ワーカビリティの低下を考慮するとこ れ以上の混入は望めず, HF を用いて凍結融解作用 による内部劣化を抑制することは難しいと思われる. 一方, スケーリングに関して, NonAE は 70 サイク ル程度で供試体が崩壊したのに対し、HF を混入し たモルタルは RDM が 100 サイクル程度で測定不能 になったものの供試体形状は維持され,300 サイク ルでの質量減少率はAE4.5 より低いものが多くみら れる. この傾向は繊維長が 5mm のものに強くみら れることから,これは繊維の架橋効果によって,ス ケーリングが抑制されたものと考えられる 11). ここ で,HFを混入したモルタルはRDM が低下し内部劣 化が進行しているにも関わらず、質量減少が抑制さ れていることから, 試験中の吸水によって供試体内 部の含水率が高くなることで劣化が進行しているこ とも考えられる. これについては今後の検討が必要 である.



AE4.5(空気量 4.6%) HMS1.2(換算空気量 4.0%) 図-8 リニアトラバース法の観察面



図-8にリニアトラバース法での AE4.5 と HMS1.2 の観察面を、図-9 に気泡径分布を示す.なお、図-9 ではフレッシュ時の空気量が同程度の4水準を対象 とし、硬化空気量は、各気泡弦長間の平均弦長に気 泡数を乗じたものとトータルトラバース長との比か ら概算した.図-8からわかるように、フレッシュ時 の空気量が同程度であっても、AE 剤で連行された 気泡と、HMSで導入された空隙とでは、気泡径と気 泡数が異なり、HMS1.2の方が小径の気泡が多い. 同様に図-9においても、AE4.5は弦長 25~325µmの 気泡が同程度存在するのに対し、HMS1.2 は弦長 125µm 以下に多くの気泡が集中している.HMS の 直径が 40~60µm であることから、HMS も通常の気 泡と同じように観測することができると考えられる.

坂田ら¹²⁾は気泡径 150μm 未満の空気量と気泡間 隔係数との間に相関があること,150μm 未満の気泡 が多いコンクリートは耐久性指数が大きくなること を報告している.図-10 に気泡径 150μm 以下の硬化 空気量の総和と気泡間隔係数の関係を示す.HMS1.2 はAE4.5に比べて気泡径 150μm 未満の硬化空気量が 多く,より小さい気泡間隔係数を示している.以上 のことから,HMS は同程度の空気量をもつ AE モル タルより細かな気泡組織を形成し,耐凍害性をさら に向上できる可能性があることがわかる.

また,HF を混入したモルタルの空気量は,その 多くが気泡としての質が悪いエントラップトエアだ と思われ,気泡間隔係数が大きくなり,内部劣化を 抑制できなかったと推測される.

	20.						
		フロー [mm]	空気量 (圧力法) [%]	空気量 (換算) [%]	硬化 空気量 [%]	圧縮強度 [N/mm ² ]	気泡間隔 係数 [μm]
	HMS1.2	231	1.8	4.1	2.6	31.1	446
%	HMS2.0	234	1.9	6.2	4.5	26.3	220
õ	HMS4.0	235	2.5	11.0	3.3	22.9	186
Š	NonAE	226	1.3	-	1.5	40.9	124
	AE7	229	6.6	-	5.3	27.8	141
	HMS1.2	224	2.6	5.0	4.4	32.8	159
%	HMS2.0	219	3.6	7.7	6.6	28.8	127
03	HMS4.0	212	4.5	13.0	9.5	22.5	126
Š	NonAE	226	1.8	-	3.9	35.6	120
	AE7	227	7.5	-	7.0	28.7	88
	HMS1.2	229	1.7	4.5	4.5	32.7	153
%	HMS2.0	225	2.8	7.4	4.9	24.3	114
05	HMS4.0	218	3.5	10.8	5.0	21.3	93
Š	NonAE	237	1.7	-	2.6	34.3	105
	A E 7	221	6.6		82	25.0	129

#### 表-4 フロー,空気量,圧縮強度および気泡間隔係 数の結果

## 3.2 SO 添加モルタルの中空形状材料による耐凍害 性の改善効果(シリーズ 2)

表-4にフロー,空気量, 圧縮強度および気泡組織 の結果を示す. SO の添加によるフローや空気量へ の影響はみられなかった. 圧縮強度は NonAE にお いては SO 添加率の増加にともない低下しているが, それ以外の水準に大きな変化は見られなかった. 既 往研究において, SO が材料内部に油滴として存在 し, リニアトラバース法での測定時に気泡としてカ ウントされている可能性が報告されており^の,本実 験でも SO を添加した水準では硬化空気量は増加し, 気泡間隔係数の値は小さくなっている.

図-11 に凍結融解試験による RDM の変化を示す. 乾燥-吸水過程を含まない標準の凍結融解試験にお いて、SOを添加した場合、全水準のRDMの低下が 早まり, HMS4.0 以外は 100 サイクルまでに RDM60%を下回っていることがわかる. HMS4.0 の RDM は他の水準より比較的高い値を維持している が,HMS4.0の換算空気量は10%を超え,圧縮強度 の低下を引き起こしているため、耐凍害性の改善手 段としては現実的ではない.以上より, HMS を用い た場合でも SO 添加モルタルの耐凍害性の十分な確 保は困難であると考えられる.一方,乾燥-吸水過程 を加えた凍結融解試験においては、全水準の RDM の低下が遅延され, NonAE 以外の全水準が RDM100%に近い値を維持している. NonAE におい ても、乾燥-吸水過程を経ることで RDM の低下は遅 延されているが, SO を添加した場合は RDM が急激 に低下する傾向がみられる.これより,空気量が少 ない NonAE においても乾燥-吸水過程によって耐凍 害性は向上するが、試験が進むにつれて供試体の吸 水が進み、ある一定の含水率を超えた場合には、急 激な劣化が起きるものと推測される.

図-12 に 20℃水中養生 4 週後の質量を基準とする 乾燥後および吸水後の質量変化率を示す.14 日間の



図-11 凍結融解試験による相対動弾性係数の変化 (左:乾燥-吸水過程なし 右:乾燥-吸水過程あり)







乾燥終了時点での質量変化率は,SOの添加によら ず同程度の値を示している.一方,吸水後の質量増 加は,SO3およびSO5がSO0に比べて抑制されて おり,SOによる吸水の抑制が確認できる.また, 乾燥させた全水準で吸水後の質量変化率が0%以下 であるため,凍結融解試験開始時の供試体の含水率 は,乾燥-吸水過程を含まないものより低下している ことがわかる.

図-13 に各凍結融解試験方法での SO 添加率によ る耐久性指数の変化を示す.供試体の含水率が低下 すると耐凍害性は向上すると考えられるため,図-12 より,SO3 および SO5 は SO0 に比べて耐凍害性が 向上することが予想される.しかしながら,図-13 の NonAE の結果において,乾燥-吸水過程を経るこ とでの耐久性指数の向上程度は SO0 と SO3 で同程 度であり,SO5 においてはわずかな向上に留まって いる.これは SO による耐凍害性の低下が,含水率 の低下による耐凍害性の向上の程度を上回ったこと が考えられる.一方で,NonAE 以外の水準において は SO を添加しても大きな耐久性指数を示している ことから,適切に空気が連行されていれば,SO の 吸水防止効果による含水率の低下が耐凍害性に好影 響を及ぼすことが確認された.

## 4. まとめ

本研究では、AE 剤に代わる耐凍害性の向上手段 として中空形状の材料の使用を検討し、SO 添加モ ルタルへの適用を試みた.また、凍結融解試験前に 乾燥-吸水過程を経ることで、SO の吸水防止効果を 考慮した耐凍害性の評価を行った.得られた知見を 以下に示す.

- (1) HMS はフローに影響を与えず, 混入量によっ て導入される空気量を調節することができる. また, HF は混入量の増加に伴いワーカビリテ ィを低下させ, エントラップトエアを増加させ る傾向がある.
- (2) HMSはAE剤と同等以上の良質な気泡組織を形成し、高い耐凍害性を得ることができる.一方で、HF は凍結融解作用による内部劣化を抑制することができない.
- (3) HMSではSO添加モルタルの耐凍害性を十分に 改善することは困難である。
- (4) 乾燥-吸水過程を含んだ凍結融解試験を行うことで、SOの吸水防止効果が吸水期間中の質量 増加を抑制し、供試体の含水率を低減させるとともに、耐凍害性を大きく向上させることを確認した。

参考文献

- 日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事,2015
- 2) 鄭載東,平井和喜,三橋博三:中性化速度に及 ぼすコンクリートの調合及び細孔構造の影響 に関する実験的研究,コンクリート工学論文集, 第1巻,第1号,1990.1
- Zhu, Y.G. et at.: Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete, Cement & Concrete Composites 35, pp.32–38, 2013
- 4) 松下文明,柴田純夫,中村文彦,浅野武彦:軽 量気泡コンクリート(ALC)の耐久性向上耐炭酸 化に優れた ALC の開発,日本建築学会技術報 告集9号,pp.33-36,1999
- 5) 齋藤耕史,小山明男,菊池雅史,古尾谷紘行: 内添型シリコーン系吸水防止剤による各種コ ンクリートへの耐久性向上効果に関する研究 (その 2.耐久性),日本建築学会大会学術講演 梗概集,pp.449-450,2005
- 6) 岸本豪太,金準鎬,崔亨吉,濱幸雄:シリコー ンオイルが高炉スラグ微粉末を用いたモルタ ルの中性化抵抗性,乾燥収縮および耐凍害性に 及ぼす影響コンクリート構造物の補修,補強, アップグレード論文報告集, Vol.17, pp351-356, 2017.10
- 7) 天野佑樹,上原匠,梅原秀哲,武長祐樹:三州 瓦廃材のコンクリートへの有効利用, コンク リート工学論文集, Vol.21, No.2, pp.1-11, 2010
- 渡辺宏,堺孝司:中空微小球を用いたコンクリートの耐凍害性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15, No.1, pp.899-904, 1993
- 9) 劉宏涛,千歩修:中空微小球を用いたフライア ッシュコンクリートの耐凍害性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料 施工, pp.965-966, 2004
- 10) 宇城将貴,樋口隆行,盛岡実,岸利治:中空微 小球の混和による耐凍害性の向上メカニズム の検討,セメント・コンクリート論文集, No.69, pp.490-495, 2015
- 吉田行,田口史雄,山崎勲:ポリプロピレン繊 維補強コンクリートの圧縮強度および凍結融 解抵抗性,北海道開発土木研究所月報,No.608, 2004.1
- 12) 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 橋本学: コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.1, pp.35-47, 2012.1