

報告 サンゴ骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送性に関する検討

山路 徹^{*1}・与那嶺一秀^{*2}・川端雄一郎^{*3}・堀口浩司^{*4}

要旨：サンゴ骨材は骨材中に空隙が多いため、ポンプ圧送時に加圧吸水による管内閉塞が懸念される。サンゴ骨材コンクリートのポンプ圧送性を明らかにするため、まずサンゴ骨材の加圧吸水特性について確認を行った。次に、実機プラントでポンプ圧送試験を行い、骨材の含水状況等がポンプ圧送性に及ぼす影響について検討を行った。その結果、サンゴ骨材は、常圧下で水浸させた状態では十分に飽水しない特性を有しており、この状態でポンプ圧送を行った際には加圧吸水し、圧送性は低下した。しかし、加熱吸水により事前に十分に吸水させることができた場合、圧縮強度は低下するものの、良好なポンプ圧送性を示した。

キーワード：サンゴ骨材、吸水率、骨材最大粒径、加圧吸水、ポンプ圧送

1. はじめに

国内の遠隔離島等での港湾整備においては、地盤がサンゴ由来の石灰岩の場合がある。この地盤から骨材を製造することで、骨材を現地調達でき、骨材の運搬費用を安く抑えることが可能となる。上記の地盤から採取した骨材（以下、サンゴ骨材）は、一般に骨材中に空隙を多く含む、吸水率の大きな骨材である。

骨材中に空隙を多く含む骨材として、人工軽量骨材が挙げられる。一般的な人工軽量骨材の場合、大気圧下で水中浸漬を継続しても飽和状態とならない一方で、加圧時には吸水を生じる。その結果として、ポンプ圧送時には骨材が吸水し、管内閉塞を起こす危険性がある¹⁾。これを防ぐために、一般に骨材を事前に十分吸水させるプレウェッティングが行われている。

サンゴ骨材を用いたコンクリートに対してポンプ圧送を行う場合、人工軽量骨材の場合と同様の問題が生じることが懸念される。そこで本検討では、まずサンゴ骨材の吸水特性、特に加圧時の吸水特性を把握した。次に、実際に生コンプラントでサンゴ骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送試験を行い、サンゴ骨材の含水状況や骨材最大粒度等がコンクリートのポンプ圧送性に及ぼす影響について検討を行った。

2. サンゴ骨材の吸水特性

2.1 はじめに

サンゴ骨材は内部に空隙が多く存在し、吸水率が大きいという特徴を有する。結果として、ポンプ圧送時には骨材に圧力が付加されることで、骨材中への圧力吸水が生じる。この圧力吸水の特徴を把握するため、異なる圧力状態での骨材の吸水特性について検討を行った。なお、

1) 大気圧（0.1MPa）下で24時間浸漬時、2) 0.75MPaで加圧、3) 真空状態（ ≈ 0 MPa）に減圧、の3種類の圧力条件で検討を行った。また、実際のコンクリート打設の際に、骨材を真空状態に減圧あるいは加圧させることは難しいため、それに代わる方法として、人工軽量骨材のプレウェッティング方法として行われている、加熱¹⁾させた場合の吸水特性についても検討を行った。

2.2 骨材概要

JIS A 1102 に準じて実施したサンゴ骨材のふるい分け試験結果を表-1に示す。粗骨材 25-05mm は5mm 以下の

表-1 粒度分布

骨材の種類		細骨材	粗骨材	粗骨材
		5mm以下	25-5mm	40-25mm
ふるい目 呼び寸 法(mm)	0.15	13		
	0.3	31		
	0.6	49		
	1.2	67		
	2.5	86		
	5	100	15	
	10		49	
	15		77	
	20		88	2
	25		100	44
	30			81
	40			99

*数値：ふるいを通るものの質量百分率(%)

表-2 骨材の基本特性

	40-25mm	25-5mm	5mm以下
表乾密度(g/cm ³)	2.28	2.37	2.62
絶乾密度(g/cm ³)	2.19	2.26	2.54
吸水率(%)	3.95	4.99	3.37
粗粒率	7.93	6.29	2.54

*1 国立研究開発法人港湾空港技術研究所 材料研究チーム 博士（工学）（正会員）

*2 国立研究開発法人港湾空港技術研究所 材料研究チーム

*3 国立研究開発法人港湾空港技術研究所 構造研究チーム 博士（工学）（正会員）

*4 (株) 中研コンサルタント 船橋技術センター（正会員）

ものを比較的多く含んでいる。また、いびつな形のものも多く含んでいる。

骨材の基本特性を表-2に示す。密度および吸水率はJIS A 1109（細骨材）、JIS A 1110（粗骨材）に準じて実施した。なお、ここでの吸水率は、大気圧下（0.1MPa）で24時間吸水させた場合の結果である。

粗骨材内部の空隙の状態を反射顕微鏡（ニコン社製OPTIPHOTO-POL）にて観察を行った。図-1は粗骨材40-25の研磨面を示したものである。写真中の黒色部分は空隙を示している。サンゴ骨材内部には幅0.1～0.2mm程度の空隙が少なくとも平面的に独立して存在していること、大きな空隙周囲のマトリクス中にも細かな空隙が点在していることがわかる。

2.3 骨材の加圧吸水特性

サンゴ骨材の加圧吸水特性は、以下の方法により把握した²⁾。試験装置の模式図を図-2に示す。

- 1)骨材をかき容積で計約1L採取し、質量を測定する。
- 2)採取した試料及び水を試験装置に投入する。
- 3)10分間、大気圧下で放置し、水位を計測する。
- 4)0.75MPa（文献2）や既往の知見³⁾におけるポンプ圧送時の管内圧力を基に設定）の空気圧を加え、加圧後、0分、1分、5分、10分、20分経過時の水位を測定する。
- 5)20分経過後、減圧し、減圧後に水位を計測する。
- 6)加圧前後の水位の差から骨材に吸水された水量を求める。加圧による単位骨材質量あたりの吸水量を計算する。
- 7)粗骨材についてのみ、加圧吸水後の骨材を回収し、JIS A 1110に準じて吸水率を測定する。
- 8)1)～7)を3試料について行う。

各骨材の加圧吸水試験結果を図-3に示す。細骨材の吸水率は、加圧により4%程度から10%程度まで増加し、その後はほぼ一定の値を示した。減圧時には吸水率が6%程度まで低下しており、加減圧1サイクルで吸水率が1%強増加した。

粗骨材25-05の吸水率は、加圧により4%強から10%強へ増加した。減圧後には吸水率は6%程度まで低下し、

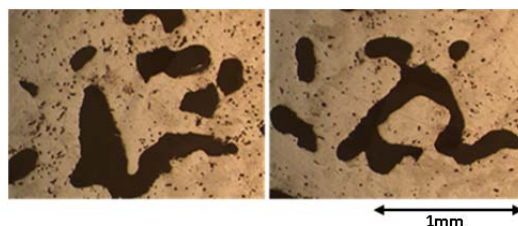


図-1 骨材断面（粗骨材 40-25mm）



図-2 加圧吸水試験の模式図

加減圧1サイクルで吸水率が2%程度増加した。

粗骨材40-25の吸水率は、加圧により3%強から10%強へ増加した。減圧後には吸水率は6%程度まで低下しており、加減圧1サイクルで吸水率が3%程度増加した。

以上の結果より以下のことが言える。

- 1)サンゴ骨材は、粒径にかかわらず、加圧時に吸水し、減圧時に吸水した水を排出する。また、加圧時の吸水量だけでなく、減圧時の排水量も大きい。
- 2)加減圧1サイクルあたりの吸水率の変化量は、粗骨材40-25で3%程度、粗骨材25-05で2%程度、細骨材で1%強程度であった。粒径が大きくなるほど増加した。

以上より、粒径が大きいほど、ポンプ圧送時の加減圧によって、骨材内外で出入りする水が多くなると言える。

2.4 真空時の吸水特性

2.2よりサンゴ骨材の内部空隙は大気圧下での24時間吸水では飽和しないと判断された。また、2.3より0.75MPaで加圧した際に吸水、減圧時に排水することが確認された。

ここでは、真空状態（大気圧からの圧力低下は約0.1

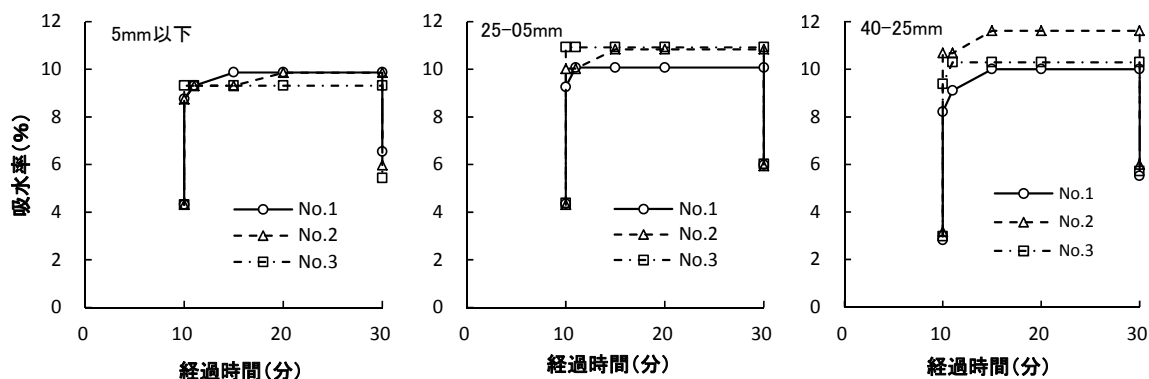


図-3 骨材の加圧吸水特性

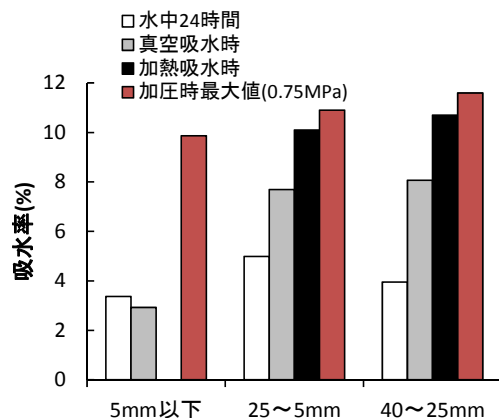


図-4 各試験条件での吸水率

MPa) まで減圧した際の、サンゴ骨材の吸水特性の確認を行った。まず、アスピレータにより、断続的に脱気して6時間、真空状態に保った。その後、36時間大気圧下で水浸・吸水させた。

真空吸水後の吸水率を図-4に示す。常圧下で水中に24時間浸漬させた際の吸水率（凡例：水中24時間）と比較すると、粗骨材40-25、25-5の場合に、真空吸水後に吸水率が増加した。これは、粗骨材内部の圧力を低下させることで、より多く吸水し、内部空隙はより飽和状態に近くなっているものと判断される。一方、細骨材の場合、真空吸水時に吸水率が増加していない。このことより、細骨材内外の圧力差が1気圧（0.1MPa）程度の場合、内部空隙に水は浸透しないと考えられる。一方、前述のように、0.75MPaで加圧した際には吸水率が増加した。

2.5 加熱吸水時の特性

前節までの結果から、サンゴ骨材内部の空隙を常圧下で飽水することは難しいことが明らかになった。したがって、ポンプ圧送時の吸水を考慮する必要がある。例えば、多くの空隙を有する骨材の代表例である人工軽量骨材では、吸水を促進するために、温度勾配を利用した吸水（焼成直後のある程度高温の骨材を水で急冷し、温度降下に伴う負圧を利用して内部空隙に吸水させること）が有効とされている¹⁾。ここでは、人工軽量骨材に関する知見を基に、サンゴ骨材の加熱吸水特性について検討を行った。なお、本節では、粗骨材のみを対象とした。

骨材の加熱吸水のメカニズムとしては、以下のことが考えられる。気体には「 $P \cdot V / T = \text{一定}$ 」の法則（ボイル・シャルルの法則）がある。ここで、 P ：圧力、 V ：容積、 T ：温度である。骨材内部の空隙（容積 V 一定かつ骨材外部の圧力変化の影響を受けにくいと仮定）が、急激に冷却（ T が大幅に減少）すると、 P も減少する。骨材内部の圧力が下がることで、骨材の内側と外側に圧力差が生じ、この圧力により、骨材内部に水が吸水され



図-5 骨材の加熱状況

ると考えられる。

加熱吸水の方法は、まず図-5のように、蒸気を発生可能な（最大蒸気発生量：1257kg/h）加熱プレート（10×5m）上に、粗骨材を詰めたフレコンバックを25-05：3袋、40-25：3袋の計6袋設置して、フレコンバックごと約8時間加熱した。バック内部には熱電対（T-G-0.65，東京測器研究所製）を設置し、骨材の温度を測定した。今回の加熱により、骨材の温度は90℃近くまで上昇した。その後、バック上部から水道水を注入して急冷した。

加熱吸水後の吸水率を図-4に示す。粗骨材の場合、加熱吸水時に真空吸水時と同等以上、さらには0.75MPa加圧時に近いレベルまで吸水率が増加した。よって、加熱吸水により真空吸水時と同等以上の効果が得られると推測される。また、加熱吸水時に骨材内外に生じている圧力差は0.1～0.75MPaの範囲であると推測される。

2.6 圧力変化によるサンゴ骨材の吸水特性に関する考察

サンゴ骨材の吸水特性について、吸水方法の違い、また骨材寸法によって異なる結果が得られた。ここでは、この原因について考察する。

サンゴ骨材の内部には、図-1に示すように独立した粗大な空隙と微細な空隙が混在している。また、図-3に示す結果では、加圧吸水前後において異なる吸水率を示していることから、これらの空隙には連続空隙と独立空隙が混在していると推察することができる。また、粗骨材では真空吸水時程度の圧力差（0.1MPa程度）でも高い吸水率を示したのに対して、細骨材では常圧下の吸水率とほぼ同等であった。したがって、圧力変化によるサンゴ骨材の吸水特性には粒径依存性があり、圧力変化の影響は特に粒径が大きいほど強いと考えられる。この結果から、ポンプ圧送時には骨材粒径が大きいほどの吸水し易いと推察できる。実工事では、全ての骨材に対して加熱吸水することが出来ない場合もあり、現場での実施体制や制約（ヤード面積、設備等）を勘案した上で、優先順位を設ける必要がある。このような場合、粒径の大きな粗骨材を優先的に加熱吸水させることも考えられる。

3. サンゴ骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送性に関する検討

サンゴ骨材は、一般的な人工軽量骨材と同様に、加圧時に多量の水を吸水することが確認された。この特性は、ポンプ圧送性に大きな影響を及ぼす。一方、サンゴ骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送性についての知見は皆無である。そこで本検討では、実機プラントにおいて、コンクリートポンプ車を用い、サンゴ骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送性について検討を行った。また、加圧ブリーディング試験を行い、実際のポンプ圧送性との比較を行った。なお、ここでは、施工時の厳しい制約条件下でのポンプ圧送を想定して、2.6の考察を基に、粗骨材のみ加熱吸水を行った。

3.1 実験概要

(1) 使用材料

使用した材料を表-3に示す。

(2) ポンプ圧送方法及び試験方法

コンクリートの圧送には、8t26m ブーム付のコンクリートポンプ（極東開発工業㈱製 PY115A-26B, 最大吐出量 100m³/h）を 30m³/h の設定として用いた。配管径は 125A とし、60m の配管の先に 4.75 インチのフレキシブルホース 6m を取り付け、ラフタレンクレーンにて高さ約 3m の位置で筒先を保持した。配管状況を図-6に示す。

なお、ポンプ圧送後のコンクリート試料を採取し、表-4に示す各試験を実施するとともに、ポンプ圧送の前後でφ125×250mm の供試体を作製した。閉塞時は、閉塞した部分の筒先から試料を採取した。なお、空気量については、加圧吸水の影響を受けない「質量法 (JIS A 1116)」を採用した。

(3) 配合の選定方針

圧力吸水によるポンプ圧送性低下を改善するためには、事前に骨材に十分吸水させることが基本となる。しかし、実際の現場で、骨材に十分に吸水させることは困難である場合が多い。このため、本検討では、事前吸水を含め、サンゴ骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送性改善のため、以下のような方策について、検討することとした。

i)事前吸水（加熱吸水による）

表-3 使用材料

材料	種類	仕様等
練混ぜ水	上水道水	
セメント	高炉セメントB種	
細骨材	サンゴ骨材	
粗骨材1	サンゴ骨材25-5mm	
粗骨材2	サンゴ骨材40-25mm	
混和剤	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
	空気量調整剤	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

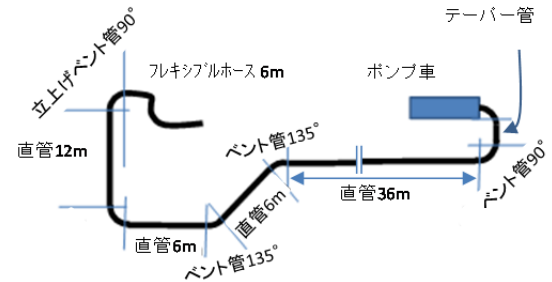


図-6 ポンプ圧送時の配管条件

表-4 試験項目

試験項目	規格	備考
スランブ試験	JIS A 1101	ポンプ圧送前・後
スランブフロー試験	JIS A 1150	ポンプ圧送前・後
空気量試験	JIS A 1116 (質量法)	ポンプ圧送前・後
加圧ブリーディング試験	JSCE F 502	ポンプ圧送前
単位容積質量	JIS A 1132	ポンプ圧送前・後
圧縮強度	JIS A 1108	ポンプ圧送前・後

骨材の吸水状態がポンプ圧送性に及ぼす影響の確認のため、加熱吸水させた骨材を用いた。

ii)水量増加

吸水率の大きい骨材の圧力吸水による管内閉塞の抑制策の1つとして、圧力吸水される水量を配合上増加させる方法が考えられる。ペースト部の水セメント比が高まることで材料分離が促進される可能性も考えられたが、極端な例として検討に加えた。この際、W/Cを増加させ

表-5 配合および圧送試験結果のまとめ

配合名		混和剤 の種類	W/C	粗骨材比 4025:2505	骨材	配合					骨材 修正 係数(%)	圧送 性	圧送 圧力 (kPa)	圧送 前/後	スラン プ(cm)	空気 量(%)
						W	C	S	G 4025	G 2505						
1	G40-AE	AE剤	0.508	1:2	通常	220	433	747	234	487	4.9	×	×	前	15.0	5.8
														後	10.0	-0.5
2	G25-AEW	AE 減水剤	0.450	0:1	通常	203	451	775	0	730	4.7	○	15	前	18.0	4.8
														後	19.5	3.9
3	G40-AE- 加熱	AE剤	0.508	1:2	加熱 吸水	220	433	747	239	489	2.5	◎	10	前	15.5	8.4
														後	16.5	6.9

(0.450→0.508), AE 減水剤を使用せず AE 剤のみとし、同一スランブの条件で単位水量を増やすこととした。

iii)粗骨材の最大寸法の変更

粗骨材の最大寸法に関して、40mm での使用を検討している。しかし、40mm とすることで、コンクリートの流動性および圧送性が低下する可能性がある。そこで、最大寸法 25mm の場合についても検討を行った。

3.2 ポンプ圧送試験

(1) 試験の流れおよび結果概要

用いたコンクリートの配合及び結果のまとめを表-5 に示す。計 3 配合でポンプ圧送試験を行った。まず、粗骨材 40-25 と 25-5 の混合割合を 1:2 とし、AE 減水剤を使用せず、スランブ一定(目標 18cm)の条件の下で、単位水量を極力増加させたコンクリート(配合 1: G40-AE)のポンプ圧送を行った。その結果、閉塞が発生し、ポンプ圧送は困難となった。閉塞は距離約 48m のベント管近傍で発生した。ジョイント部で配管を外した直後の配管内では、極端に流動性を失ったコンクリート部分と、多量の水を含んだセメントペーストの部分とに分離している状況が確認された。

配合 1 (G40-AE) のコンクリートが圧送困難であったことから、次に粗骨材 40-25 を使用せず、AE 減水剤を用いたコンクリート(配合 2: G25-AEW)のポンプ圧送を行った。圧送はほぼ問題なく終了した。なお、ポンプ車で計測された圧送時の圧力は 15MPa 程度であった。

最後に、粗骨材 40-25 と 25-5 の混合割合を 1:2 とし、AE 減水剤を使用せず、加熱吸水させた骨材を用いたコンクリート(配合 3: G40-AE-加熱)のポンプ圧送を行った。圧送は問題なく終了し、圧送時の圧力は 10MPa 程度であり、配合 2 (G25-AEW) の圧送圧力よりも低いことが確認された。なお、配合 1 で確認された材料分離は全く認められなかった。

(2) 圧送前後のフレッシュ性状の変化

ポンプ前後のフレッシュ性状の変化を表-4 に示す。配合 1 (G40-AE) の場合、圧送後の空気量が-0.5%となった。これは、空気量を質量法で求めたためである(圧力吸水によりサンゴ骨材の密度が増加するが、この密度は不明なため、骨材の絶対容積を求める際には、吸水前の密度を用いる。結果として、計算上、絶対容積が増え、コンクリート質量が減り、空気量がマイナスとなった)。一方、スランブは大幅(約 5cm)に低下した。配合 2 (G25-AEW) の場合、圧送前後でスランブが 1.5cm 増加、空気量は約 1%減少した。配合 3 (G40-AE-加熱) の場合、空気量の調整が困難であったため、ポンプ圧送性への影響度の大きいスランブのみを目標値内に収め、ポンプ圧送を行った。結果として空気量は 8.4%と目標値(4.5±1.5%)を上回っている。なお、圧送前後でスラン

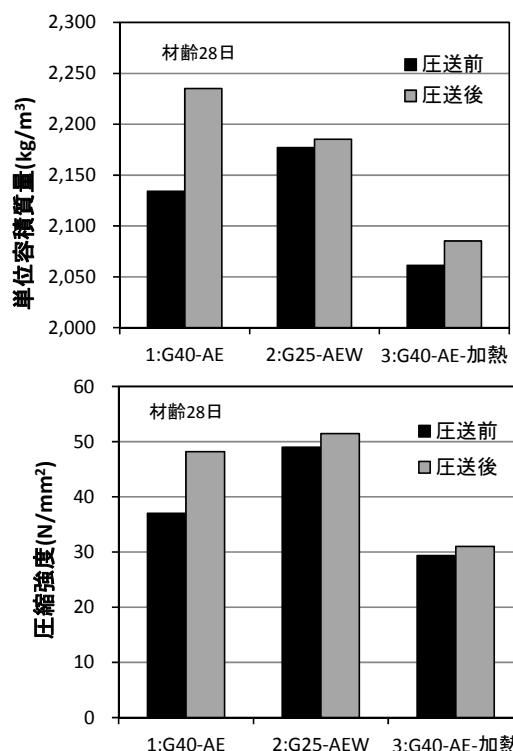


図-7 圧送前後の単位容積質量および圧縮強度の変化

ブが約 1cm 増加、空気量は 1.5%減少した。

(3) 圧送前後の硬化性状の変化

図-7 に圧送前後の単位容積質量および圧縮強度の変化を示す。単位容積質量および圧縮強度のいずれも圧送後に増加する傾向が確認された。特に、閉塞した配合 1 の場合に顕著であった。配合 1 の場合、骨材粒径が大きく、吸水可能な量が増える。結果として、配合 2 や 3 と比べて圧送時に多く吸水したと考えられる。圧送時の骨材内への吸水量が多い場合に、強度が増加するという現象は、人工軽量骨材の場合にも報告されている⁴⁾。

なお、同 W/C の配合 1 (G40-AE) に比べて、配合 3 (G40-AE-加熱) で単位容積質量が小さい理由としては、空気量が 8%と大きいことが考えられる。一方、圧縮強度が小さい理由としては、空気量の影響に加えて、骨材中に吸水されていた水が外部にしみ出し、骨材周囲の水セメント比が増加したことが考えられる。この現象は、再生骨材や人工軽量骨材の場合にも報告されている⁵⁾。

(4) 加圧ブリーディング試験とポンプ圧送性の比較

図-8 に加圧ブリーディング試験における脱水量の経時変化を示す。図中には、「加圧ブリーディング試験におけるポンパビリティが良好である条件における上限値と下限値⁶⁾」を併記した。

ポンプ圧送性が最も良好であった配合 3 (G40-AE-加熱) については、「ポンパビリティが良好である範囲(標準曲線の範囲内)」に収まっている。次に良好であった配合 2 (G25-AEW) については、下限値付近ではあるが、標

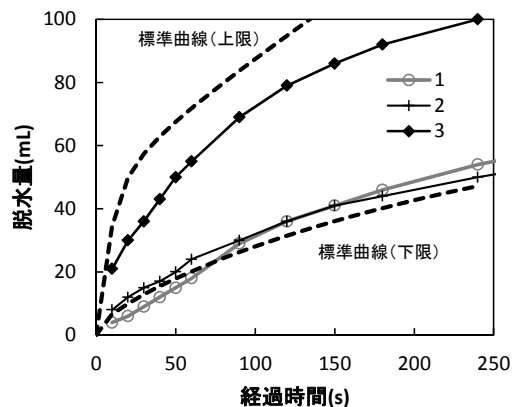


図-8 加圧ブリーディング試験結果

準曲線の範囲内に収まっていた。一方、閉塞した配合 1 (G40-AE) については、曲線の傾向としては配合 2 とほぼ同様であるが、加圧初期においては若干脱水量が少なく、標準曲線の範囲内から外れていた。

配合 3 においては、骨材内部まで事前に吸水されていることから、加圧の影響が小さく、脱水量が標準曲線の範囲内に収まっている。この場合、ポンプ圧送に必要なコンクリート中水分の移動のしやすさは良好であると考えられる。一方、配合 1 および配合 2 においては、骨材内部まで事前に吸水されていないため、加圧の際に骨材中に水が吸収された結果、脱水量が配合 3 と比べて大きく減少していると考えられる。

また、配合 1 および配合 2 で、配合 1 において若干脱水量が少ない理由としては、粗骨材 40-25 が含まれることで、加圧時に骨材中に吸水される水の量が増加したことが考えられる (2.3 参照)。

今回の結果においては、ケース数は少ないが、実際の圧送性と加圧ブリーディング試験との対応していた。

(5) ポンプ圧送試験まとめ

配合 1 (閉塞) と配合 2 (良好) の条件の違いは、粗骨材 40-25 の使用である。よって、配合 1 の閉塞の要因は粗骨材 40-25 の追加が考えられる。なお、粗骨材 40-25 の特徴として、1) 加減圧時に骨材中に蓄積される水量 (図-3 の加圧前と減圧後の吸水率の差) が大きい、2) いびつな形状のものも多く含まれることが挙げられる。圧送性の低下にこれらの要因が影響している可能性がある。

次に、配合 1 (閉塞) と配合 3 (非常に良好) を比較すると、いずれも粗骨材 40-25 を使用し、違いは粗骨材の加熱吸水の実施である。この結果より、配合 1 の閉塞の要因は、粗骨材 40-25 の追加よりも骨材の加圧吸水 (および減圧脱水) による影響が大きいことを示している。

また、配合 2 (良好) と配合 3 (非常に良好) を比較すると、配合 3 は粗骨材 40-25 を追加しているにもかかわらず、圧送性が向上した。この結果もまた、粗骨材 40-25

の追加よりも骨材の加圧吸水 (および減圧脱水) による影響の方が大きいことを示している。

4 まとめ

本検討より得られた知見を以下にまとめる。

(1) サンゴ骨材中には空隙が多く、その多くは独立して存在していた。結果として、常圧下で水中に浸漬しただけでは、骨材内部を飽和させることは困難であった。ただし、粗骨材については、真空吸水時 (圧力差 0.1MPa 程度) には吸水することが確認された。また、真空吸水と同程度以上の効果が加熱吸水 (最高温度 90℃ 程度) により得られることが確認された。

(2) 骨材を常圧下で事前に吸水させた場合、ポンプ圧送時に骨材が加圧吸水し、ポンプ圧送性は低下した。一方、加熱吸水により事前に十分に吸水させることができた場合、良好なポンプ圧送性を示した。ただし、圧送後の圧縮強度は低下した。この要因と 1 つとして、骨材中に吸水されていた水が外部にしみ出し、骨材周囲の水セメント比が増加したことが考えられた。

謝辞

国土交通省関東地方整備局東京港湾事務所 (実験当時) の方々には本実験の実施に際して、多大なご協力をいただきました。また、元 (株) 中研コンサルタント 内田美生氏 (現 全国生コンクリート工業組合連合会/全国生コンクリート協同組合連合会) には実施に際して多大なご尽力をいただきました。皆様に対して、ここに厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会：人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル，コンクリートライブラリー56，1985。
- 2) 石川雄康ほか：高性能軽量骨材の吸水特性がコンクリートのポンプ圧送に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，No. 21，Vol.2，pp.349-354，1999。
- 3) 例えば，川端雄一郎，岩波光保，加藤絵万，審良善和：銅スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの施工性と品質変化に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1541-1546，2010。
- 4) 毛見虎雄：コンクリートポンプによる骨材の圧力吸水とその影響 (人工軽量骨材)，コンクリートジャーナル，Vol.5，No.12，pp.8-13，1967。
- 5) 松下博通ほか：再生細骨材を用いたモルタルの細孔構造の粗大化と強度及び耐久性の低下，土木学会論文集，Vol.62，No.1，pp.230-242，2006。
- 6) 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針[2012 年度版]，コンクリートライブラリー135，p.26，2012。