

論文 気泡増量コンクリートの実用化に向けた検討

俵積田 新也*1・梁 俊*2・坂本 淳*3・丸屋 剛*4

要旨：近年、実積率の低い砕石の使用が増え、コンクリートの単位水量が増加傾向にある。この課題に対して、ペースト体積の一部を気泡で置換することでワーカビリティを確保し、水セメント比を下げることで気泡の増加による強度低下を抑えた気泡増量コンクリートが提案されている。本研究では気泡増量コンクリートの実用化に向けて、施工性や硬化後の品質を確認した。その結果、一般のコンクリートに比べて気泡を増量させたコンクリートの鉄筋間隙通過性は向上し、断熱温度上昇量の差は最大で 3℃程度であった。また、水分浸透性は、水セメント比と空気量の両方の影響のバランスにより変化することが確認された。

キーワード：空気量、気泡増量、ワーカビリティ、鉄筋間隙通過性、水分浸透性

1. はじめに

近年、河川骨材などの良質な天然骨材の枯渇に伴い、砕石や砕砂の使用が増加しているほか、産業副産物の活用として各種スラグ骨材の使用が推進されている。しかし、これらの骨材は天然骨材とは粒度分布や粒形などが大きく異なっている。また、実積率の小さい砕石や砕砂を用いる場合、実積率の高い川砂利などを用いる場合と比べて、同程度のワーカビリティを確保するために余剰ペーストおよび単位水量を増加させる必要がある¹⁾。関西地方では採取できる砕石の品質が低下しており、関東地方に比べ普通コンクリートの同スランプを確保するための単位水量が増加していることが事前の調査により確認されている²⁾。単位水量の増加は、ブリーディング水の増加や乾燥収縮ひび割れを生じる可能性が高まるほか、材料分離抵抗性の低下に伴い粉体量を増加させる必要があり、これにより自己収縮量や温度上昇量も大きくなることが考えられる。

これに対し著者の一部では、ペースト体積の一部を気泡で置換することで、骨材の品質低下に伴い増量した単位水量を削減する気泡を増量したコンクリート（以下、気泡増量コンクリートと称す）を検討している³⁾。気泡増量コンクリートは、空気量を増加させて、骨材間距離を確保することでスランプを向上させ、単位水量の削減を目指す配合となる。一般に、空気量の増加に伴いコンクリートの強度は低下することが知られているが、これに対して、水セメント比を低下させることで、フレッシュ性状に加え、圧縮強度や静弾性係数等の硬化後の品質を保持した。既往の研究³⁾においては、凍結融解に対して高い抵抗性が確認できたほか、水セメント比が低下し

ペーストが緻密になることで中性化に対しても抵抗性を有する結果が得られている。しかし、この気泡増量コンクリートについて、施工性や硬化後の品質については、まだ十分な検討が行われていない。例えば、気泡の増加によるコンクリートの水和発熱に与える影響は明らかにされていない。さらに、気泡の増加が凝結時間や温度ひずみ、自己収縮などに及ぼす影響も検討する必要がある。

そこで本研究では、気泡増量コンクリートの一般構造物への適用性を確認するために、凝結時間、断熱温度上昇量および自己収縮ひずみ、硬化後のコンクリートの水分浸透への抵抗性を検討した。加えて、空気量の増加がコンクリートの締固め性に与える影響を確認した。

2. 使用材料および配合選定方法

本研究では、セメントに普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）、細骨材に君津産山砂と津久見産石灰石砕砂の混合砂（表乾密度 2.62g/cm³、吸水率 2.11%）、粗骨材に青梅産砂岩砕石（表乾密度 2.65g/cm³、吸水率 0.67%）を使用した。混和剤は、ポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤を使用し、一般的に使用されるアルキルエーテル系の AE 剤により空気量を調整した。本研究では、練上がり後の目標スランプを 8±2.5cm または 12±2.5cm、空気量を目標値±1.5%、材齢 28 日における圧縮強度が 40N/mm² となるように配合を調整した。凝結試験では、練上がり後 30 分にスランプ 12±2.5cm を保持するように配合を調整した。空気量の増加に伴う強度低下に対して、目標の強度となるように水セメント比を低下させ配合を選定した。空気量の調整は AE 剤の添加量を

*1 大成建設（株）技術センター社会基盤技術研究部 材工研究室 研究員 修士（正会員）

*2 大成建設（株）技術センター社会基盤技術研究部 材工研究室 主任研究員 博(工)（正会員）

*3 大成建設（株）技術センター社会基盤技術研究部 主幹研究員 博(工)（正会員）

*4 大成建設（株）技術センター エグゼクティブフェロー 副技術センター長 工博（正会員）

表－1 配合（凝結試験）

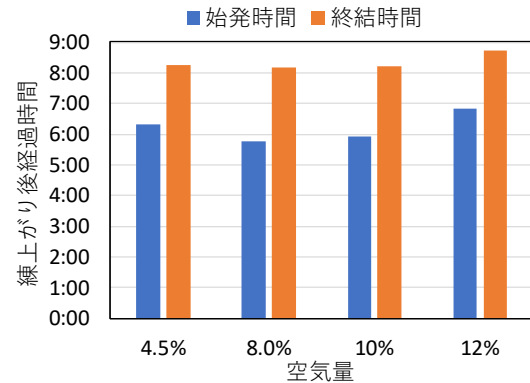
水準	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%)	
			W	C	S	G	AE剤	高性能AE減水剤
4.5%	55	51	165	300	927	902	0.030	0.2
8.0%	45	46	156	347	789	943	0.048	0.6
10%	42	44	147	350	739	952	0.090	1.2
12%	38	41	130	342	689	1002	0.132	2.1



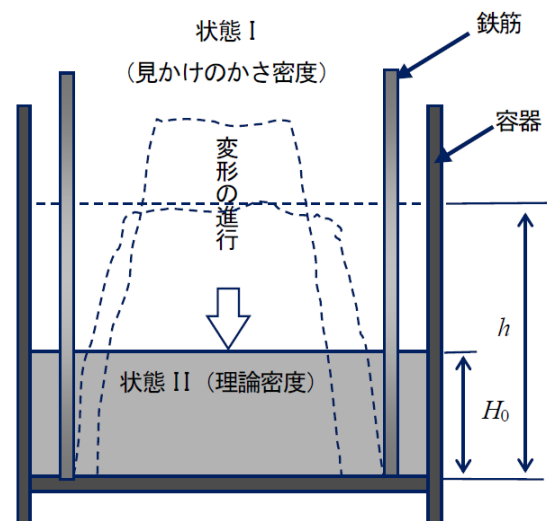
(a) W=165kg/m³ s/a=51% W/C=55%
練上がり 30 分後：スランプ 14.5cm 空気量 4.9%



(b) W=130kg/m³ s/a=41% W/C=38%
練上がり 30 分後：スランプ 14.0cm 空気量 11.5%
写真－1 スランプの状況



図－1 凝結時間の測定結果



図－2 締固め完了エネルギーの概要⁵⁾

変化させることで調整した。

配合は、目標空気量を 4.5～12%に変化させ、空気量の増加に合わせて水セメント比を調整し、単位水量と単位セメント量を決定した。その後、試験練りにより目標のフレッシュ性状となる細骨材率を選定することで配合を決定した。いずれの配合においてもスランプ試験や材料分離の有無等から、フレッシュ性状が良好であることを確認した。

3. 施工性に関する検討

3.1 凝結時間に与える影響

空気量を 4.5, 8.0, 10, 12%に変化させ、JIS A 1147「コンクリートの凝結時間試験方法」に従い、各水準の凝結時間の測定を行った。試験は、練上がり後 30 分のスラン

プが 12±2.5cm となるように調整した配合（表－1）を用いて実施した。写真－1 に空気量 4.5%と 12%におけるスランプ性状を示すが、いずれの水準においても良好なフレッシュ性状であった。図－1 に示す試験結果より、気泡増量に伴う配合修正が凝結時間に及ぼす影響は確認されなかった。なお、空気量 12%において始発・終結時間が 30 分程度遅い結果となったが、この要因として高性能 AE 減水剤の添加量による影響が考えられる。

3.2 締固め性に与える影響

空気量を増加させることでコンクリートのワーカビリティが改善されることが一般的に知られている。また、

表－2 配合（締固め性評価試験）

水準	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%)		
			W	C	S	G	AE剤	高性能AE減水剤	遅延剤
4.5%	51	50	164	322	907	907	－	－	2.00
10%	42	44	164	390	707	907	0.072	－	1.00
12%	38	41	164	432	618	907	0.108	1.0	1.00

空気量 1%の増減によりスランプが 2.5cm 程度変化すると言われている⁴⁾。しかし、空気量とワーカビリティの関係について定量的に評価された例は少ない。一方でコンクリートの締固めに関して、締固めエネルギーに基づいた評価手法に関する研究が進められており、著者の一部により、コンクリートが鉄筋間隙を通過して細部まで充填されるために必要なエネルギーを定量的に評価する試験方法が提案されている⁵⁾。本研究では同試験法を用いて気泡増量コンクリートの、鉄筋間隙を通過して型枠に充填される際の締固め性について検討を行った。

図－2 に試験方法の概要を、写真－2 に使用した実験器具を示す。鉄筋が配置された容器内でスランプ試験を実施することで試料を投入し、容器に振動を加える。試料の最も高い部分を高さ h とし、円筒容器の底面積 A との積 Ah より鉄筋の体積を差し引いた体積に対する見かけの密度と図－2 に示す理論密度との比を締固め度 γ (%) と定義し、締固め度が 99.5%に達するまでに加えたエネルギーを締固め完了エネルギーとした。締固め度は式 (1) によって示される。

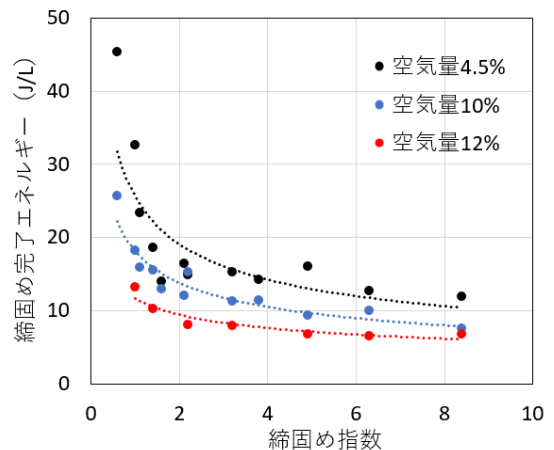
$$\gamma = \frac{m / \rho_0}{h(A - N \times 3.14 \times r^2)} \times 100 = \frac{H_0}{h} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 γ ：鉄筋間隙を通過し充填される際の締固め度(%)、 H_0 ：配合に基づく理論上の単位容積質量まで締め固められた時の試料の高さ(mm)、 h ：任意の締固め時間における試料の高さ(mm)、 m ：試料の質量(kg)、 ρ_0 ：試料の単位容積質量(kg/L)、 A ：円筒容器の底面積(mm²)、 r ：鉄筋の半径、 N ：鉄筋の本数とする。

また、鉄筋間隙の通過性は鉄筋径および鉄筋の純間隔によって変化する。梁らの計算手法⁵⁾に基づき、配筋状況による締固めへの影響を締固め指数として式 (2) のように定義した。締固め指数が大きいほど締固めは容易になり、締固め完了エネルギーは小さくなる。

$$a = \frac{s}{d} \quad (2)$$

ここで、 a ：締固め指数、 s ：鉄筋純間隔 (mm)、 d ：鉄筋の直径 (mm) とする。

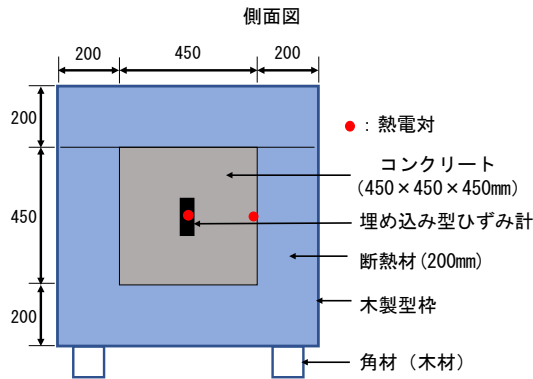


図－3 空気量ごとの締固め指数と締固め完了エネルギーの関係

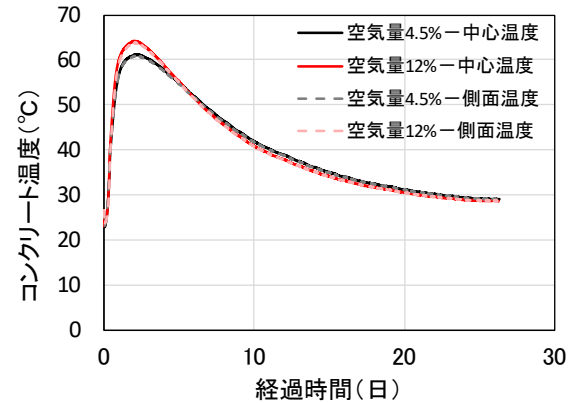
試験に用いた配合を表－2 に示す。目標スランプは 8cm とし、空気量は 4.5, 10, 12%とした。空気量の違いによる締固め完了エネルギーへの影響を確認するため、間隙通過性への影響が大きい単位水量と単位粗骨材量を一定とし、目標強度が得られる様に単位セメント量を決定した。また、目標スランプとなるよう細骨材率を調

表－3 配合（断熱温度上昇量および自己収縮試験）

水準	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%)	
			W	C	S	G	AE剤	高性能AE減水剤
4.5%	51	51	173	340	901	872	0.021	0.5
12%	38	41	129	340	692	1002	0.108	1.8



図－4 試験体概要（単位：mm）



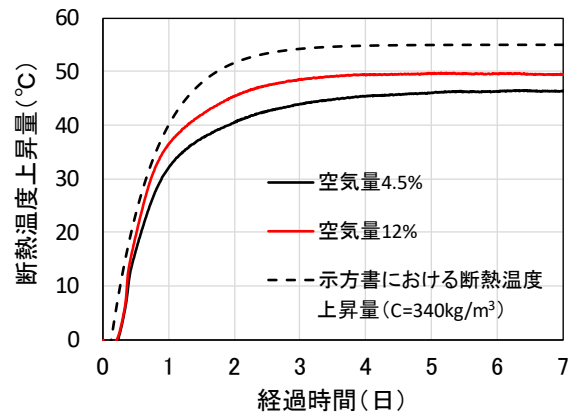
図－5 供試体中心部の温度履歴

整した。鉄筋は D19, D25, D32, D41 の 4 種類を使用し、それぞれの鉄筋径で容器に固定させる本数を 4, 9, 12 本にすることで鉄筋純間隔を変化させた。

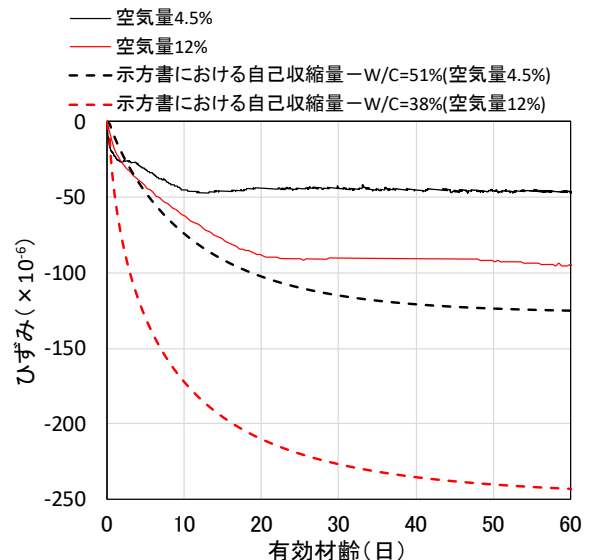
試験結果より得られた、各空気量における締固め指数と締固め完了エネルギーの関係を図－3 に示す。試験結果より、全ての配合でスランブを 8cm で一定としたが、空気量 12%で最も締固め完了エネルギーは低い値を示し、次に空気量 10%, 4.5%の順に締固め完了エネルギーは高い結果となった。締固め指数が 1 (D32, 12 本) におけるそれぞれの締固め完了エネルギーは、空気量 4.5%で 32.64J/L, 空気量 12%で 13.22J/L であり、締固め指数が小さく締固めがより困難な配筋条件であるほど、空気量の増加による締固め性向上の効果はより大きくなる結果となった。以上のとおり、空気量が多いほど締固め性は向上することを定量的に確認することができた。

4. 断熱温度上昇特性および自己収縮

空気量 4.5%と 12%における断熱温度上昇量と自己収縮を、マスブロックを用いた試験により確認した。大友ら⁶⁾の実施した試験方法に基づき供試体の作製および各計測を行った。コンクリート内での温度上昇は単位セメント量の影響を大きく受けるため、本検討では両水準で単位セメント量を一定とし、目標スランブを 12cm として配合を決定した（表－3）。図－4 にマスブロックと型枠の概要を示す。周囲を厚さ 200mm の断熱材で覆い、450×450×450mm のマスブロックを作製した。供試体表面及び外気の温度測定と、温度が最大となる中心部において、温度とひずみの経時変化を計測した。ひずみの計測には低弾性の埋込み型ひずみ計を用いた。また、同バッチのコンクリートを用いて作成した φ100×200mm の



図－6 断熱温度上昇量の経時変化



図－7 自己収縮ひずみの経時変化

円柱供試体を用いて熱膨張係数の計測を行った。マスブロックより得られた温度履歴から断熱温度上昇量を算出し、ひずみの経時変化より熱膨張係数から換算した温度ひずみを差し引くことで自己収縮量を算出した。

熱膨張係数（線膨張率）の測定は、自己収縮がおおむね終了したと考えられる材齢 28 日以降に実施した。供試体を温湿度制御槽に設置し、20–60℃の温度上昇、温度降下を1℃/hrの温度勾配で2サイクル与えて測定したひずみより算出した。熱膨張係数は4.5%で $9.36 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、12%で $9.44 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と同程度であり、空気量による影響は明確には認められなかった。

図-5 に供試体側面および中心部のコンクリート温度を、図-6 に試験結果より算出した断熱温度上昇量と、比較のためコンクリート標準示方書⁷⁾に示される断熱温度上昇量の推定式を用いて算出した単位セメント量 $340\text{kg}/\text{m}^3$ における断熱温度上昇量の推定値を示した。供試体中心部の最高温度は空気量 4.5%で 61.2°C 、12%で 64.2°C であった。空気量 4.5%の断熱温度上昇量は 46.5°C で、空気量 12%の断熱温度上昇量は 49.7°C であり、 3°C ほどの差が認められた。今回の検討では、両水準で単位セメント量を一定にしているため、両者の断熱温度上昇量の差は空気量による影響だと考えられる。軽量コンクリートの様に密度の低い骨材を使用した場合にコンクリートの熱伝導率は大きく低下することが確認されている⁸⁾ように、本研究において空気量の増加により断熱温度上昇量が増加した要因として、コンクリート内の気泡が増加したことにより、熱伝導が遅延され散熱が抑制されたことが考えられる。

図-7 に試験結果より算出した自己収縮ひずみと、各水セメント比における、コンクリート標準示方書に示される自己収縮の推定式による計算結果を示す。ひずみの起点は臼井ら⁹⁾の手法に基づき、温度-全ひずみ曲線の変曲点とした。材齢には、コンクリート温度 20°C を基準反応速度としアレニウス式をもとに温度の影響を考慮した有効材齢を用いた。自己収縮量の最大値は空気量 4.5%で 45×10^{-6} 、12%で 95×10^{-6} 程度であった。水セメント比が小さくなると自己収縮は大きくなると考えられており¹⁰⁾、コンクリート標準示方書における推定値では水セメント比 51%、38%の自己収縮量は各々 125×10^{-6} 、 250×10^{-6} であり、その増加割合は概ね 2 倍と試算される。これに対し、両配合の自己収縮量は 45×10^{-6} 、 95×10^{-6} であり、その増加割合は同様に2倍程度であった。コンクリート内の気泡径が小さいほど、空隙内での負圧は大きくなり¹⁰⁾、気泡増量コンクリートでは微小な空隙の量が増加するため³⁾、自己収縮量は増加することが考えられたが、試験結果より、空気量が増加しても自己収縮量の増加割合はコンクリート標準示方書に示される

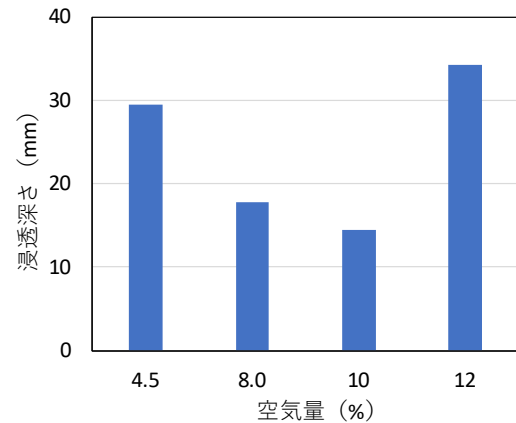
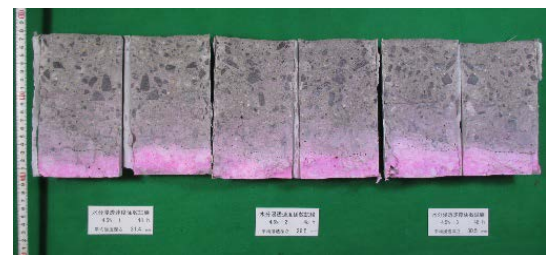
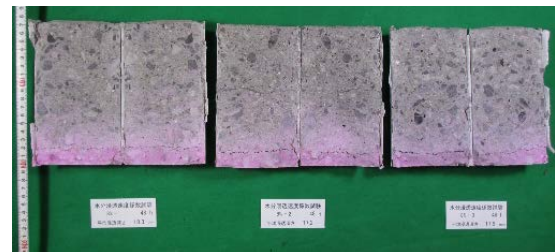


図-8 水分浸透深さ



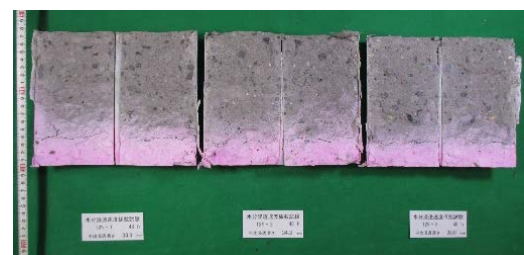
(a) 空気量 4.5% 浸透深さ 29.5mm



(b) 空気量 8% 浸透深さ 17.8mm



(c) 空気量 10% 浸透深さ 14.4mm



(d) 空気量 12% 浸透深さ 34.2mm

写真-3 水分浸透試験結果

値と同程度であった。

以上の結果より、空気量の増加による断熱温度上昇量の増加が認められた。また、空気量の増加による自己収縮量への影響は明確に認められず、示方書に示される水セメント比の低下による増加割合と同程度であった。

5. 硬化後の品質に関する検討

コンクリート構造物の劣化現象について、鉄筋腐食やアルカリシリカ反応などに共通の原因として、水分の供給が挙げられる。そこで本研究では、気泡増量コンクリートの耐久性を評価するため水分浸透性を確認した。土木学会が定める、JSCE-G582-2018「短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法（案）」に基づいた試験を、表－1 の配合を用いて実施した。フレッシュ性状は練上がり後のスランプが 12cm となるように調整した。φ100×200mm の円柱供試体を用い、材齢 28 日まで標準養生を実施した供試体を 40±2℃、湿度 30±5℃の環境で 28 日間乾燥させ、水分浸透を実施した。供試体の下部 10mm を水に浸漬させ、48 時間後における水分浸透深さを確認し、水分浸透性を評価した。水分浸透深さの確認は、水分現像剤を噴霧することで確認した。

試験結果を図－8 および写真－3 に示す。試験結果より、空気量 4.5%～10%の範囲では、空気量が増加するほど水分の浸透深さは小さくなる結果が得られたが、空気量 12%では空気量 4.5%に比べて浸透深さが大きい結果となった。4.5%、8.0%、10%では空気量の増加による影響より、水セメント比が低下し、水密性が向上したことによる水分浸透への抑制効果が大きく影響したことが考えられる。一方、空気量 12%では、空気量の増加による影響が水セメント比の低下による抑制効果より大きくなったことが考えられるが、今後の検討が必要となる。

以上の結果より、水分浸透性は、水セメント比と空気量の両方の影響を受けるため、気泡増量コンクリートの耐久性の検討においては、水セメント比と空気量のバランスを考慮する必要がある。

6. まとめ

本研究では、ペースト体積の一部を混和剤により連行される気泡で置換し、増加した気泡で骨材間距離を保持することによりワーカビリティを確保した、気泡増量コンクリートの施工時および硬化時・後の性状について検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 気泡増量に伴う配合修正が凝結時間へ及ぼす影響は小さいことが確認された。
- 2) 単位水量と粗骨材量を一定とし、気泡を増加させた配合を用いた試験においては、気泡の増加に伴う鉄

筋間隙通過性の向上および締固めに要するエネルギーの低減効果が確認された。

- 3) 空気量を 4.5%から 12%まで増加させた場合、同一単位セメント量において断熱温度上昇量は3℃程度上昇した。また、空気量の増加による自己収縮量への影響は明確には認められず、コンクリート標準示方書に示される水セメント比の低下による増加割合と同程度であった。
- 4) 水分浸透性に関して、空気量 10%までの範囲では気泡の増加による水分浸透に対する抵抗性の低下は認められなかった。一方で、空気量 12%では水分浸透に対する抵抗性が低下する結果となり、水セメント比とのバランスで配合を選定する必要があることが示唆された。

参考文献

- 1) 村田二郎, 國府勝郎, 辻和幸: コンクリート工学 (I) 施工, わかり易い土木講座 10, 土木学会編集, 彰国社刊, p.54, p.104, p.122, 1994.3
- 2) 大阪広域生コンクリート共同組合 <https://www.osaka-kouiki.or.jp/> (閲覧日: 2020 年 12 月 1 日)
- 3) 梁俊, 坂本淳, 丸屋剛, 大内雅博: 気泡増量コンクリートに関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1049-1054, 2019.7
- 4) 日本コンクリート工学会: コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会報告書, pp.79, 2016.6
- 5) 梁俊, 丸屋剛, 坂本淳, 井櫻潤二: 鉄筋間隙を通過するコンクリートにおける締固めエネルギーに基づいた締固め性に関する研究, 土木学会論文集, Vol.75, No.2, pp.142-156, 2019.2
- 6) 大友健, 阿部公一, 佐藤和憲, 佐々木隆三: 鋼管・コンクリート複合構造橋脚における温度ひび割れの発生機構とその評価方法に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.13, No.3, pp91-103, 2002.9
- 7) 土木学会: 2017年制定 コンクリート標準示方書【設計編】, 2018.3.
- 8) 社団法人 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム, 1982.9
- 9) 臼井達哉, 宮原茂禎, 丸屋剛, 大友健: 異なる養生条件下における高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみと収縮応力の特性, 土木学会論文集, Vol.70, No.1, pp.92-103, 2014.2
- 10) 社団法人 日本コンクリート工学協会: 自己収縮研究委員会報告書, 1996.11