

論文 気泡増量コンクリートに関する基礎研究

梁 俊*1・坂本 淳*2・丸屋 剛*3・大内雅博*4

要旨：近年、河川骨材などの良質な天然骨材の枯渇に伴い、砕石が大量に使用されているが、川砂利を用いる場合に比べて、同じワーカビリティを得るための余剰ペーストが増え、単位水量を増やす必要がある。本研究では、直径が0.25mm以下の気泡でペースト体積の一部分を入れ替え、増量した気泡のボリュームにより骨材間距離を確保することで、コンクリートのスランプを保持しつつ、コンクリートの単位水量を減らし、気泡増量コンクリートのフレッシュ性状と強度、静弾性係数、長さ変化、中性化深さ、塩化物イオン拡散係数、凍結融解などを確認した。

キーワード：気泡増量, 単位水量, 砕石, 骨材間隔, 強度, 耐久性

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う、砕石・砕砂の使用のほか、環境負荷抑制の観点も踏まえ、産業副産物である各種スラグ骨材が JIS 化され、コンクリート用骨材としての使用が推進されている。ただし、これらコンクリート用骨材の粒度分布と粒形は天然骨材と大きく相違している。

図-1 に示すように、粗骨材の実積率はコンクリートの単位水量と密接な関係があり¹⁾、試験も容易であるため、砕石の形状を評価する指数として実用上最も適している。

図-2 は、全国生コンクリート工業組合連合会・骨材対策部会で実施した、全国のレディーミクストコンクリート工場で使用されている粗骨材の実積率に関する調査結果である²⁾。砕石の場合 57~60%、川砂利の場合 60~63%の実積率のものが最も多く使用されている。

コンクリートにおいて、骨材粒子間の間隔が大きくなるほど、骨材粒子相互の内部摩擦抵抗の影響が少なくなり、コンクリートのワーカビリティは改善されると考えられる。これまでにも、コンクリートのペースト量を一定とし、骨材粒子間の間隔、すなわち余剰水膜厚、ペースト膜厚あるいはモルタル膜厚などに着目して数多くの研究が行われている^{3)~5)}。C.T.Kennedy は骨材の混合実積率を最大にすることにより、余剰ペースト膜厚を最も大きくすることで、最適なワーカビリティを求めることを提案している⁶⁾。

実積率が小さい砕石は、角ばった形状や粗い表面組織のために、河砂利を用いる場合に比べて、同じワーカビリティを得るための余剰ペーストが増え、図-1 から推察すると、単位水量を10%程度増加させる必要がある。

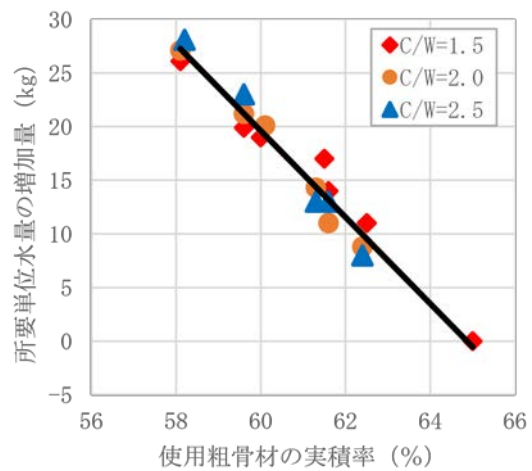


図-1 粗骨材の実積率と所要単位水量の増加量との関係¹⁾

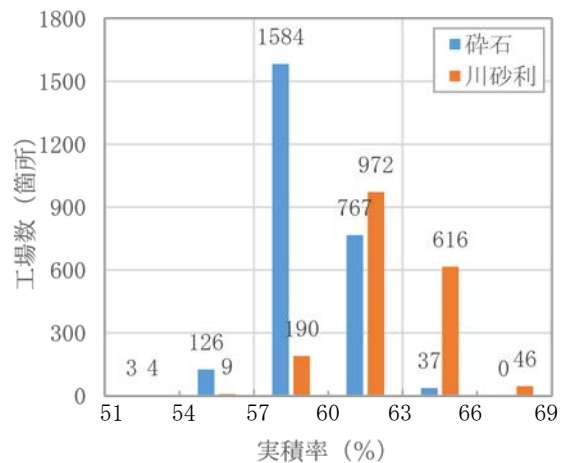


図-2 生コン工場で使用されている粗骨材の実積率²⁾

*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構造設計チーム 副主任研究員 博(工) (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 主幹研究員 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 工博 (正会員)
 *4 高知工科大学 システム工学群 教授 (正会員)

また、コンクリートの分離抵抗性を確保するためには、増やした単位水量に適合するように細骨材率も増加させなければならない。砕砂は天然砂に比べて角ばった形状や粗い表面組織になっているばかりではなく、石粉が多い場合もあるので、単位水量がさらに増加する。

単位水量の増加は、ブリーディング水の増加、乾燥ひび割れにつながるため、結局、コンクリートの品質に影響を与えることになる。

田中らは、従来の自己充填コンクリート中のセメント量の一部を連行空気泡に置換し、普通コンクリートと同程度のセメント量で従来の自己充填コンクリートと同水準の自己充填性能を有するコンクリートを求めることに関して検討を行った⁷⁾。本研究では、図-3 に示すように、気泡でペースト体積の一部を入れ替え、増量した気泡のボリュームにより骨材間距離を確保することで、コンクリートのスランブを保持しつつ、コンクリートの単位水量を減らす方法を検討した。本論文では、気泡の増量により、単位水量を減らしたコンクリートを気泡増量コンクリートと称する。気泡増量コンクリートの研究において、コンクリートの配合選定手法、硬化後の品質、空気量の安定性、施工性などの確保が課題となっているが、本論文では、まず、気泡増量コンクリートの配合選定および硬化後の品質に関する検討結果をまとめた。

2. 使用材料

使用材料として、セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）、細骨材は千葉県君津産山砂（表乾密度 2.62g/cm³、吸水率 1.56%）、粗骨材は青梅産石灰石砕石（最大寸法 20mm、表乾密度 2.60g/cm³、吸水率 2.86%、F.M.6.39、実積率 58%）を用いた。混和剤は、リグニンスルホン酸系の減水剤を使用し、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。

3. 水セメント比一定として気泡を増量した配合の検討

3.1 配合およびフレッシュ性状

図-4 に気泡増量コンクリートの配合選定の考え方を示す。砕石を使用している現在、スランブ 12cm のコンクリートの単位水量は 170kg/m³程度の場合が多い（図-4 中の赤の点）。図-2 が示すように、全国のレディミクストコンクリート工場で最も多く使用されている粗骨材の実積率は、砕石の場合が 57~60%、川砂利の場合 60

~63%で、その実積率の差は 3~6%である。実積率が単位水量に与える影響を図-1 の近似曲線により換算すれ

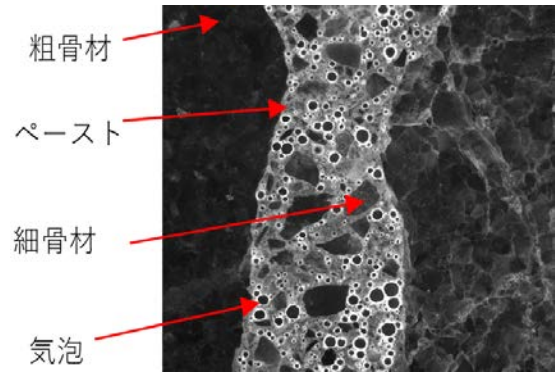


図-3 セメントペースト中に存在する気泡
(倍率：333 倍、写真一辺長 5.67mm)

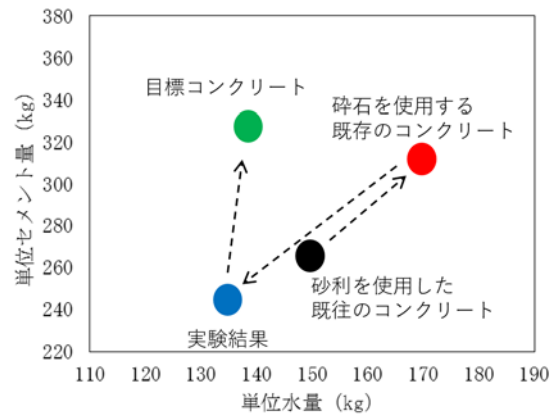


図-4 気泡増量コンクリートの配合の考え方

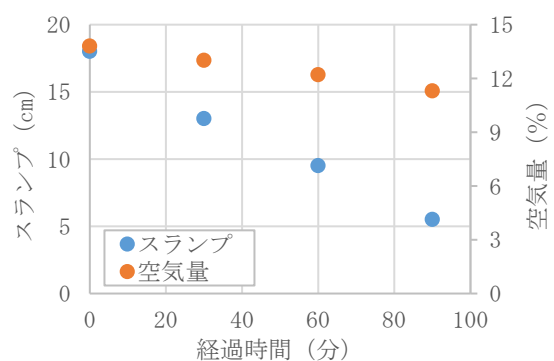


図-5 気泡増量コンクリートのスランブおよび空気量の経時変化 (W/C 一定)

表-1 コンクリートの配合 (水セメント比一定)

配合種別	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%)	
			W	C	S	G	AE 減水剤	AE 剤
空気量 4.5%	53	48	170	320	891	977	1.3%	0.0025%
空気量 12.0%	55	39	135	245	759	1200	0.9%	0.010%

W170kg/m³, s/a : 48%, W/C53%
練り上がり 30 分後 : スランプ 13cm, Air4.5%



W135kg/m³, s/a : 39%, W/C55%
練り上がり 30 分後 : スランプ 13cm, Air13%



図-6 気泡増加量が相違するコンクリート性状

ば、その量は 12~24kg/m³ で、川砂利を使用したスランプ 12cm のコンクリートの単位水量は、146~158kg/m³ 程度である (図-4 中の黒の点)。本研究では、まず、気泡でペースト体積の一部を入れ替え、ペーストと気泡で骨材間距離を確保しつつ、コンクリートの単位水量を減らすことを試した。細骨材率は、単位水量に適合するように調整した。なお、水セメント比は一定にした。表-1 に、基準になる空気量 4.5% の標準配合と空気量が 12% になるまで気泡を増やした配合を示す。気泡を増やした配合は、単位水量が 135kg/m³、単位セメント量が 245kg/m³、s/a が 39% で、スランプ 12cm の配合である。図-4 に示すように (図-4 中の青の点)、川砂利を使用した既往のコンクリートより単位水量が小さくなっていることがわかる。一般に、粗骨材を碎石から川砂利に入れ替えると細骨材率は 3~5% 小さくすることができる⁸⁾。図-5 に示すように、気泡増量コンクリートでは細骨材率を、川砂利を粗骨材にした場合より小さい細骨材率である 39% まで小さくして、単位水量を極端に 135kg/m³ まで絞ったにも関わらず、空気量は 90 分後まで許容値内に保持されている。図-6 の写真に示すように、気泡増量コンクリートはフレッシュ性状もよい。普通の AE 剤ではエントレインドエアを 10% 以上まで混入することが難しいし、混入されたとしても短い時間でエアが抜ける場合が多いといわれているが⁸⁾、今回選定した配合は 90 分後まで空気量が安定していることが確認できた。

3.2 硬化後の物性

コンクリートの気泡が増加することは、コンクリートの硬化後の品質にも大きく影響する。特に、圧縮強度と中性化の進行度に影響が大きい。図-7 にコンクリートの促進中性化試験方法 (JIS A1153 : 2012) に従い測定した中性化進行度の比較、図-8 にコンクリートの圧縮強度試験方法 (JIS A1108 : 2006) に従い測定した圧縮強度の比較、図-9 にコンクリートの静弾性係数試験方法 (JIS

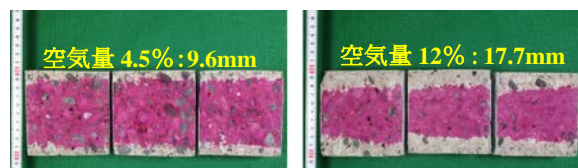


図-7 中性化進行度の比較
(W/C 一定, 促進材齢 56 日時点)

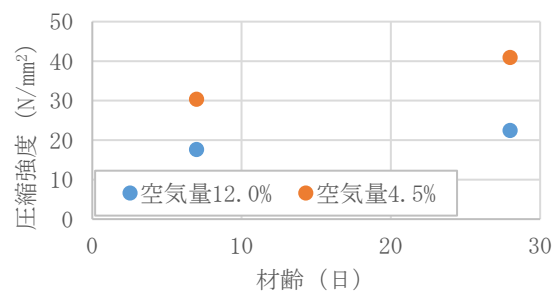


図-8 圧縮強度の比較 (W/C 一定)

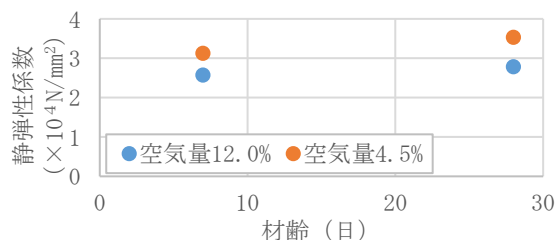


図-9 静弾性係数の比較 (W/C 一定)

A1148 : 2010) に従い測定した静弾性係数の比較を示す。図-7 が示すように、促進材齢 56 日時点の中性化深さは、空気量 4.5% のコンクリートの方が 9.6mm であることに比べて、空気量 12% のコンクリートの方は 17.7mm で、ほぼ 2 倍になっている。図-8 が示すように、コンクリートの圧縮強度 (σ_{28}) は、空気量 4.5% のコンクリートの方が 40.9N/mm² であることに比べて、空気量 12% のコンクリートの方は 23.7N/mm² で、ほぼ 1/2 になっている。水セメント比を一定にして、空気量を 12% まで大きくす

表-2 コンクリートの配合（単位セメント量一定）

配合種別	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%)		
			W	C	S	G	AE 減水剤	AE 剤 1	AE 剤 2
空気量 4.5%	51	48	171	336	848	931	-	0.0045%	-
空気量 8.0%	45	42	151	336	726	1017	0.50%	-	0.003%
空気量 10.0%	42	40	141	336	681	1035	0.75%	-	0.006%
空気量 12.0%	38	37	128	336	624	1075	1.20%	-	0.009%

れば、コンクリートのフレッシュ性状を保持しつつ、すれば、コンクリートのフレッシュ性状を保持しつつ、コンクリートの単位水量を減らすことができるが、空気量1%増に対して圧縮強度が5%程度減少した結果となった¹⁾。静弾性係数、中性化進行深さなどの硬化後の品質も大きく低下している。

4. 強度一定として気泡を増量した配合の検討

4.1 配合およびフレッシュ性状

前述通り、気泡増量コンクリートは、気泡の増加によりコンクリートの硬化後の品質が低下するため、次に、水セメント比を適切に小さく調整することで、気泡の増加によるコンクリート強度の低下を補うことを試した。強度を確保する気泡増量コンクリートの配合を次のように選定した。空気量4.5%の基本配合を選定し、それをベースとして、空気量を、8%、10%、12%に増やした配合を選定した。水セメント比は、事前に製作した試験体により強度を確認して、圧縮強度が40N/mm²程度になるように、それぞれ51%、45%、42%、38%（圧縮強度がそれぞれ40.2 N/mm²、46.9 N/mm²、42.2 N/mm²、40.9 N/mm²）にした。なお、単位セメント量は336kg/m³一定で、単位水量を減らして水セメント比を小さくした。表-2 に選定した配合を示す。表-2 に示すように、角ばった形状の碎石の適用で増加された単位水量を減らすことで、単位水量の増加に伴い増やされた細骨材率も小さくすることができた。コンクリートのスランブは、AE 減水剤の量により調整し、スランブ 12cm 一定にした（図-4 の緑の点）。

図-10 に各配合のスランブ試験後の試料の状態を示す。写真に示すように、空気量が12%の配合は、単位水量が128kg/m³まで減らされて、細骨材率も37%で、川砂利で碎石を入れ替える場合より小さいにも関わらず、試料の状態は、分離もせず、空気量が4.5%の標準配合とほぼ変わらない状態であった。単位水量の減少により減らされたペーストの代わりに混入された気泡が、骨材間の距離を確保する役割を十分に果たしたことを説明している。空気量12%の配合は、水セメント比が38%まで小さくなっているが、高強度コンクリートのように粘性が

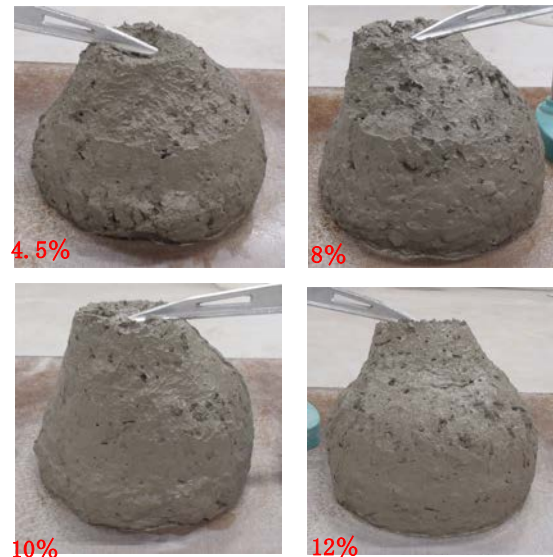


図-10 各配合のスランブ試験後の試料の形状（圧縮強度一定、練上がり30分後）

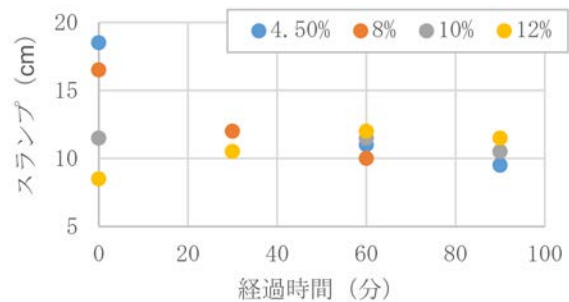


図-11 スランブの経時変化

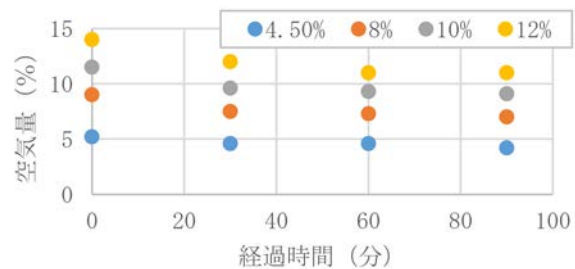


図-12 空気量の経時変化

大きくなりなく、大量の気泡の存在により、空気量4.5%の標準配合よりハンドリングがよい状態であった。図-11に、スランブの経時変化を示す。受け入れ検査時を想定した練上がり後30分から、90分経過までにスランブが安定している。練上がりから30分経過までのスランブは、空気量が8%を越えた方がより安定している。図-12に空気量の経時変化を示す。練上がり30分から90分経過まで空気量の変化量は1%以内である。

図-13に、コンクリートのブリーディング試験方法

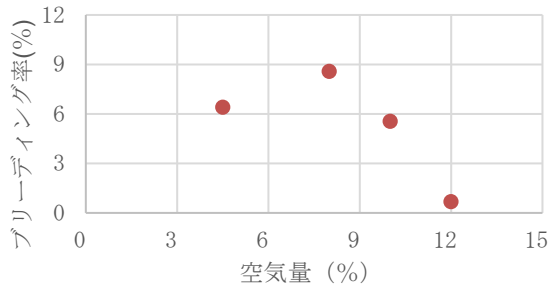


図-13 ブリーディング率

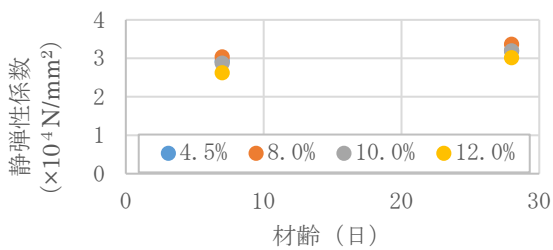


図-14 静弾性係数

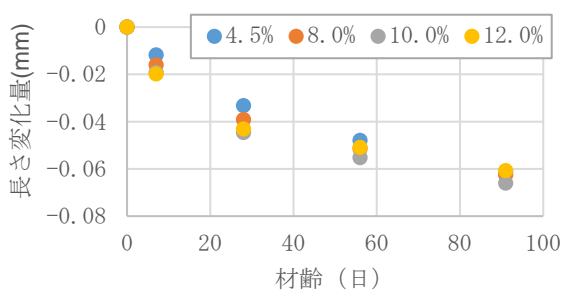


図-15 長さ変化量

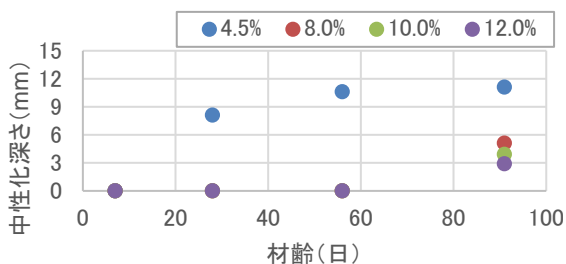


図-16 中性化深さ

(JIS A1123 : 2012) に従い測定した、各配合のブリーディング率を示す。図が示すように、気泡増量コンクリートは、空気量の増加により、ブリーディング率が小さくなっている。空気量が12%の配合の場合は、ブリーディング率がほぼゼロになっている。骨材間の距離を空気泡で保持し、コンクリートのフレッシュ性状を確保したため、施工性を確保するために必要だった水が少なかったため、ブリーディング率が小さくなったと考える。また、空気量4.5%の配合は、単位水量が大きいのに関わらず、ブリーディング率が小さくなっているが、これは単位水量とAE減水剤使用量のバランスの影響である考える。

4.2 硬化後の物性

図-14に、コンクリートの静弾性係数試験方法 (JIS A1148 : 2010) に従い測定した各配合の弾性係数を示す。図が示すように、空気量が相違しても、静弾性係数がほぼ一致していることがわかる。

図-15に、モルタルおよびコンクリートの長さ変化測定方法 (JIS A1129-3 : 2010) に従い測定した各配合の長さ変化量を示す。一般に、空気量増加により長さ変化は大きくなるといわれているが¹⁾、本研究においては空気量が増加しても、最終的な長さ変化はほぼ変わらなかった。空気量が多くと、単位水量は少ない配合としたため、硬化および乾燥に伴う容積変化が小さくなることが影響したものと推察される。図-16に、コンクリートの促進中性化試験方法 (JIS A1153 : 2012) に従い測定した各配合の中性化促進試験の結果を示す。空気量4.5%の標準配合の促進材齢28日時点の中性化深さが8.1mmであることに対して、空気量8%, 10%, 12%の配合は、促進材齢56日時点の中性化進行深さがゼロであった。空気量4.5%, 8%, 10%, 12%の配合の促進材齢91日時点の中性化進行深さはそれぞれ、11.1mm, 5.1mm, 3.9mm, 2.9mmであった。空気量が増えても、水セメント比を小

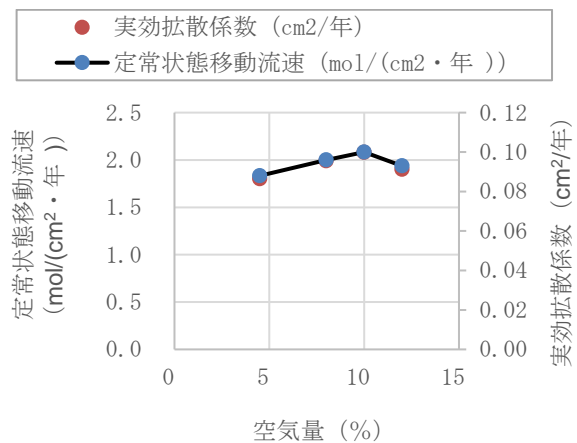


図-17 塩化物イオンの移動流束および実効拡散係数

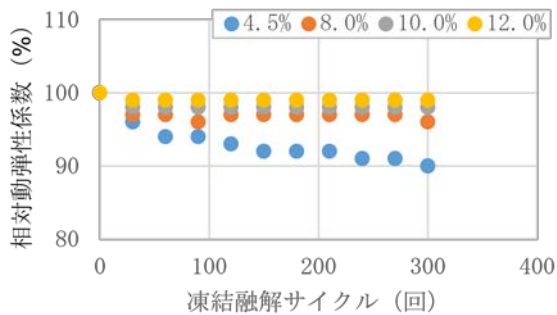


図-18 空気量の相違による相対動弾性係数

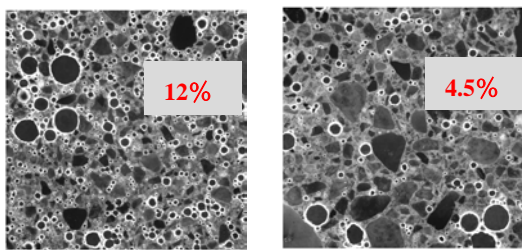


図-19 空気量の相違による気泡の分布
(倍率 : 333 倍、写真一辺長 5.67mm)

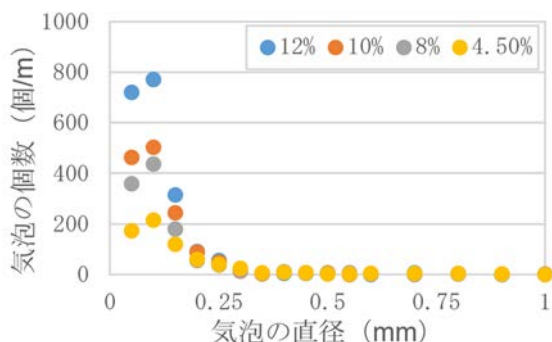


図-20 空気量の相違による気泡直径

さくすることで、中性化の進行を抑制することができることを説明している。

図-17に、電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法 (JSEC-G571-2013) に従い測定した、各配合の塩化物イオンの移動流束および実効拡散係数を示す。空気量の変化により、実効拡散係数が若干変化するものの、その差は小さい範囲に抑えられている。

図-18に、コンクリートの凍結融解試験方法 (JIS A1148 : 2010) に従い測定した、空気量が相違する各配合の相対動弾性係数を示す。図に示すように、空気量の増加により、相対動弾性係数は改善されていることがわかる。なお、空気量が 8%以上の場合、空気量の増加による相対動弾性係数の増加はそれほど大きくない。

図-19に、0.0027mm/画素の分解能で顕微鏡により撮影した、空気量 12%と 4.5%のコンクリートの供試体中

心部の横断面の写真を示す。写真が示すように、空気量 12%の方が細かい気泡が多いことがわかる。図-20に、面積が 2000mm²の試験体を対象として、トラバース長 2620mm の範囲の気泡の直径を測定した結果を示す。図が示すように、気泡増量コンクリートに増やされたのは、ほとんどが凍害抵抗に有効な 0.25mm 以下の独立気泡であった。

5. まとめ

空気量が増加すると、コンクリートの強度が小さくなるだけではなく、コンクリート品質のばらつきも大きくなる傾向にあるため、今までは、凍結融解に対する対策として空気量を入れる場合が多い。

本研究では、気泡でペースト体積の一部を入れ替え、増加された気泡で骨材間距離を保持することで、コンクリートのスランプを保持しつつ、コンクリートの単位水量を減らすことができることを実験的に検証した。

本論文では、気泡増量コンクリートのフレッシュ性状と強度、静弾性係数、長さ変化、中性化深さ、塩化物イオン拡散係数、凍結融解などに関して検討を行った。今後は、単位容積質量、熱特性、疲労強度、引張強度、クリープなどの他の品質や気泡増量コンクリートの充填性、ポンプ圧送性、凝結特性などの施工性に関して検討する予定である。

参考文献

- 1) 村田二郎, 國府勝郎, 辻 幸和 : 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) 全国生コンクリート工業組合連合会:コンクリート用骨材に関する実態調査報告書, 2001
- 3) 松下博通, 近田孝夫, 前田悦孝 : コンクリートの配合設計への余剰ペースト理論の適用に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.578/V-37, pp.57-70, 1997.11
- 4) 村田二郎, 岩崎訓明, 児玉和己 : コンクリートの科学と技術, 山海堂, pp.91-93, 1996
- 5) C.T.Kennedy : The design of concrete mixes, Proceedings of the American Concrete Institute, Vo1.36, 373, 1940
- 6) 田中一徳, Sovannasthya RATH, Anuwat ATTACHAIYAWUTH, 大内雅博 : 微細な空気泡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.37, No.1, 2015
- 7) 土木学会 : コンクリート標準示方書 (施工編), p.83, 2017