

委員会報告 コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会

濱 幸雄*1・緒方 英彦*2・林 大介*3・阿波 稔*4・湯浅 昇*5・新 大軌*6

要旨: コンクリート中の気泡は、施工性、硬化コンクリートの力学的性質、さらに凍結融解抵抗性に影響することが一般的に知られている。しかし、最近の研究において、中庸熱フライアッシュセメント等を用いた場合に気泡が合泡・破泡して凍結融解抵抗性が低下することや、収縮低減剤を用いる場合に適切な空気量の確保が困難になるという問題が指摘され、気泡の挙動を制御・管理する技術の必要性が再認識されている。本委員会では、コンクリート中の気泡について改めて着目し、気泡の役割や効果、気泡の量と質の制御・管理技術について、文献調査と実験的検討を通して総合的に整理した。

キーワード: 気泡組織, 空気量, ワーカビリティ, 耐凍害性, AE 剤, 収縮低減剤, 運搬および振動締固め

1. はじめに

コンクリート中の気泡は、施工段階でのワーカビリティや硬化コンクリートの力学的性質、さらに凍結融解抵抗性に影響することが一般的に知られている。特に、凍結融解作用を受けるコンクリートの凍害を抑制するためには、微細な気泡をコンクリート中に連行し、氷晶の生成にともなう不凍結水の移動圧を緩和する機構をつくるのが極めて重要となる。しかし、最近の研究により、ダムコンクリートとして一般的に使われている中庸熱フライアッシュセメントを用いたコンクリートでは、連行された気泡が合泡・破泡して凍結融解抵抗性が低下すること^{1,2)}や、収縮低減剤を用いる場合に適切な空気量の確保が困難になる^{3,4)}という問題が指摘されており、気泡の挙動を制御・管理する技術の必要性が再認識されている。そこで、コンクリート中の気泡に改めて着目し、気泡の役割や効果、気泡の量と質の制御・管理技術について、文献調査と実験的検討を通して総合的に整理することを目的として、JCI-TC-141A「コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会(以下、気泡委員会)」が設置された。

気泡委員会の構成は、表-1のとおりである。本委員会では、コンクリート中の気泡の役割に関する調査研究WG(以下、役割WG)、コンクリート中の気泡組織の試験評価WG(以下、評価WG)、コンクリート中の気泡制御技術WG(以下、制御WG)の3つのWGが設けられ、次の取組みを行った。

役割WGでは、既往の研究の文献調査ならびに実構造物の調査により、コンクリート中の気泡の役割や効果を整理し、様々な役割に対して必要とされる気泡組織について取りまとめた。評価WGでは、フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの気泡組織の試験評価方法を整理するとともに、フレッシュコンクリートの空気量

表-1 委員会構成

委員長	: 濱 幸雄(室蘭工業大学)
副委員長	: 緒方英彦(鳥取大学)
幹事長	: 林 大介(鹿島建設)
幹事	: 阿波 稔(八戸工業大学), 湯浅 昇(日本大学), 新 大軌(島根大学)
【役割WG】	: ◎阿波 稔(八戸工業大学), 小山田哲也(岩手大学), 橋本紳一郎(福岡大学), 石神暁郎(寒地土木研究所), 片平 博(土木研究所), 齊藤亮介(清水建設), 鈴木好幸(安藤・間), 星 和英(山宗化学), 迫井裕樹(八戸工業大学), 権代由範(仙台高等専門学校)
【評価WG】	: ◎湯浅 昇(日本大学), 谷口 円(北方建築総合研究所), 齊藤亮介(清水建設), 三田 卓(ミサワホーム総合研究所), 橋本 学(鹿島建設), 齊藤和秀(竹本油脂), 作榮二郎(BASF ジャパン), 西 祐宜(フローリック)
【制御WG】	: ◎新 大軌(島根大学), 北辻政文(宮城大学), 齊藤亮介(清水建設), 星田典行(ミルコン), 齊藤和秀(竹本油脂), 作榮二郎(BASF ジャパン), 星 和英(山宗化学), 西 祐宜(フローリック)
協力委員	: 山宮浩信(BASF ジャパン)
旧協力委員	: 坂田 昇(鹿島建設)

◎: WG 主査

および硬化コンクリートの気泡組織が運搬、振動締固めによってどのように変化するかを実験的に検討した。制御WGでは、コンクリート中に気泡を導入・制御する技術に関する既往の研究を文献調査して整理した。

報告書では、各WGの活動目的に即して、コンクリート中の気泡の役割、コンクリート中の気泡組織の試験評価方法、コンクリート中の気泡の導入・制御技術の順で章立てを行うことが当初考えられた。しかし、気泡の役割と制御の間には特に密接な関係があり、両者を別々の章で報告書に記述することは不相当であると考えられ、

*1 室蘭工業大学大学院工学研究科 教授 (正会員)

*2 鳥取大学農学部 教授 (正会員)

*3 鹿島建設株式会社技術研究所 上席研究員 (正会員)

*4 八戸工業大学大学院工学研究科 教授 (正会員)

*5 日本大学生産工学部 教授 (正会員)

*6 島根大学総合理工学研究科 准教授 (正会員)

また役割 WG による実構造物の調査, 評価 WG による実験的検討を独立した章として設けることが, 報告書の構成的にも適していると考えられたことから, 報告書では, 次のような章立てにすることにした。

第 1 章「概説」

第 2 章「気泡連行のメカニズム」

第 3 章「気泡の評価方法」

第 4 章「使用材料およびコンクリート種別が気泡組織に及ぼす影響」

第 5 章「製造・施工段階が気泡組織に及ぼす影響」

第 6 章「気泡組織がコンクリートの性質に及ぼす影響」

第 7 章「気泡組織に関する検証実験および実構造物の調査」

第 8 章「気泡の導入・制御に関するその他の技術」

第 9 章「おわりに」

報告書では, 第 2 章に本委員会において第一のキーワードとなる「気泡」について, コンクリート中への気泡連行のメカニズムを説明した後に, 第 3 章から第 6 章並びに第 8 章に文献調査を中心とした内容, 第 7 章に実構造物の調査および実験的検討の内容を示している。ただし, 第 3 章においては, 第 7 章で示す実験的検討の一部として取り組んだ内容を「空気量の評価方法の検証実験」および「気泡の質の評価方法の検証実験」として示している。

本報告は, 報告書の概要を示すものであり, 詳細については報告書を是非に参照いただきたい。以下, 報告書の目次に沿って, その概要を示す。

2. 気泡連行のメカニズム

現在, コンクリート中に連行される気泡の品質は, 界面活性剤 (AE 剤) および消泡剤を使用して技術的に非常に高次元な制御がなされている。

コンクリート中に気泡 (エントレインドエア) を連行するためには, 界面活性剤 (AE 剤) 分子が必要である。界面活性剤分子は, 水分子になじみ易く (Hydrophile), 油になじみにくい (Oleophob) 性質を持つ「親水基」と, 油になじみ易く (Oleophile), 水になじみにくい (Hydrophob) 性質を持つ「疎水基」を分子構造中に有している。そのため, 界面活性剤分子は, 気液界面すなわち水-空気の界面に吸着 (疎水基を空気側に配向) し, 界面性質を変化させる作用を持つ。泡の生成は, 界面活性剤水溶液に空気を入れた瞬間に, 水-空気界面に界面活性剤が吸着して配向し, 吸着層を形成する現象を応用したものである。泡自体は, 気体が液体か固体で包含された状態であり, 泡の集合体である泡沫 (Foam), 独立した気泡 (Bubble) に大別される。

空気連行性を有するセメント分散剤を使用する際は,

一定量の消泡剤を添加して, 粗大な気泡 (不安定な泡沫) を消泡した後に, AE 剤でエントレインドエアを連行するのが一般的である。消泡剤は生成された泡を破る破泡剤 (一時性消泡剤) と泡立ちを抑制する抑泡剤 (持続性消泡剤) に分けられる。コンクリート分野では, どちらかもしくは両者を使用して, コンクリート中の空気量を調整している。主に練混ぜ直後の空気量の調整には破泡剤, 経時的な空気量の調整には抑泡剤が使用されている。消泡作用には, 消泡剤の表面張力が泡膜の表面張力より低いこと, 消泡剤と泡膜の界面張力が低く, 泡膜に消泡剤が侵入可能であること, 泡膜に不溶であることが必要である。

コンクリート中に連行される気泡の品質は, AE 剤および消泡剤を使用して技術的に非常に高次元に制御を行うことができるが, 連行される気泡は必ず径の分布を持って連行される。換言すれば, 凍結融解抵抗性に必要な $50\mu\text{m}$ 以下の微細なエントレインドエアのみを連行できればよいが, $100\mu\text{m}$ 以上の空気もある程度連行されてしまう。そのため, 市販の AE 剤を使用して連行した空気量の分布は, 不必要な気泡径が存在しないように設計された化合物を選択しているといえ, 気泡の質の制御に関しては課題もまだある。また, これに関連する一つが収縮低減剤の影響であり, 収縮低減剤の影響を受けにくい AE 剤の開発も課題になっている。

3. 気泡の評価方法

コンクリート中の空気量は, ワークビリティのみならず強度および凍結融解抵抗性に影響を及ぼす。フレッシュコンクリートの空気量は, コンクリート中に連行された微細な独立気泡のボールベアリング作用により, スランプと単位セメント量が一定の場合, 空気量 1% で単位水量が 2~4% 減少される。硬化コンクリートでは, 凍結融解抵抗性に寄与する一方で, 圧縮強度は空気量以外の条件が一定の場合, 空気量が 1% 増加すると 5~7% 小さくなることから, 空気量が所定の範囲にあるかどうかを評価することは重要になる。

3.1 フレッシュコンクリートの気泡の評価方法

3.1.1 空気量の評価

フレッシュコンクリートにおける空気量の測定方法としては, JIS に規定されている空気室圧力方法, 容積方法, 質量方法および水柱圧力方法の他にミニエアメータによる測定がある。

空気室圧力方法には, 注水法と無注水法があり, 無注水法を用いる場合にはコンクリート表面が容器の上面と一致していないと誤差が生じる。容積方法は測定精度が高く故障が少ない。また, 骨材修正係数は試験中における骨材の吸水による影響を補正するためのものとなり,

表-2 コンクリートの配(調)合

配合名	水セメント (%)	細骨材率 (%)	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	単体量 (kg/m ³)							
					W	C	S1	S2	S3	G2	Ad1 C×%	Ad2* (A)
建築用調合 (SL18) 27-18-20N	55.0	49.3	18±2.5	4.5 以上	185	337	258	301	301	894	1.10	2A
土木用配合 (SL8) 27-8-20N	55.0	48.4	8±2.5	4.5 以上	167	304	264	308	309	950	1.10	2A

* 1A=C×0.001%

表-3 使用材料一覧

材料名	記号	摘要
水	W	上澄水, 密度:1.0g/cm ³
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度:3.16g/cm ³
細骨材	S1	砕砂 奥多摩町産 表乾密度 2.65g/cm ³ (2.5mm 以下), 粗粒率:3.00
	S2	山砂 万田野産, 表乾密度 2.58g/cm ³ (2.5mm 以下), 粗粒率:2.00
	S3	砕砂 秩父郡横瀬町産 表乾密度 2.65g/cm ³ (2.5mm 以下), 粗粒率:3.00
粗骨材	G	砕石 奥多摩町産:20mm~5mm, 表乾密度:2.65g/cm ³ , 実積率:60.0
混和剤	Ad1	AE 減水剤(標準形), (主成分:リグニンスルホン酸塩とオキシカルボン酸塩)
	Ad2	AE 剤(主成分:変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤)

圧力方法の骨材修正係数より一般に小さい値となるため、多孔質の骨材を用いたコンクリートについても測定が十分可能である。ただし、測定に時間を要する。質量方法は、同一配合での空気量が空気室圧力方法および容積方法に比べて低くなることもある。ミニエアメータにより測定される空気量は、従来の容積法で測定される空気量と同程度であり、小型軽量で必要サンプル量が少なく、普通コンクリートにも軽量コンクリートにも用いる事ができ、しかも信頼できる測定値が迅速に得られるとされている。

3.1.2 気泡の質の評価

コンクリート中に連行される気泡は、直径が 25~250 μm 程度のエントレインドエアと空気量の 1~2%含まれる粗大で不整形なエントラップトエアに大別される。コンクリートの凍結融解抵抗性にはエントレインドエアが重要であることが認識されており、気泡の大きさと間隔を表す気泡間隔係数により評価される。気泡間隔係数の測定は、一般的に硬化コンクリートを対象とした ASTM C457「Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete」により測定されるが、フレッシュコンクリートの気泡分布の測定方法としては、光ファイバーセンサーを利用した方法および浮力法がある。

光ファイバーセンサーを利用した方法は、光ファイバーセンサーで気泡の大きさを直接捉え、現場で迅速に、しかも持ち運び可能な装置で空気量測定ができる方法である。浮力法は、水中を上昇する気泡は径の大きなもの

ほど上昇速度は早く、上昇した気泡による浮力の経時変化を測定することにより、ストークスの法則を適用して気泡径分布、空気量、比表面積、気泡間隔係数などの気泡パラメータを解析する方法である。

3.1.3 空気量の評価方法の検証実験

フレッシュコンクリートの空気量の測定は、JIS で規定された空気室圧力方法で行われる場合が多い。しかしながら、測定者が異なった場合のばらつきに関する評価は少ない。そこで、評価 WG では、測定者が異なった場合の空気室圧力方法（無注水法）によるフレッシュコンクリートの空気量のばらつきについて、レディミクストコンクリートを対象に検証した。

コンクリートの配(調)合を表-2に、使用材料を表-3に示す。コンクリートの配(調)合は、生コンプラント保有の JIS 規格適合の配(調)合を参考として定め、建築用（以下、SL18）と土木用（以下、SL8）の 2 種類としている。スランブは、建築用調合 18±2.5cm、土木用配合 8±2.5cm とし、空気量は現着時で 4.5%以上を確保することにしている。

フレッシュコンクリートの空気量の測定は、練上がり直後のコンクリートの目標性能を確認した上で、4m³のコンクリートをアジテート車に積み込み、30分程度の運搬後の現着時にエアメータ 5 台に対してそれぞれ 5 人で行った。なお、エアメータは、試験当日にキャリブレーションを実施したものを使用した。また、練上がり直後の空気量は、5 台のエアメータのうちの 1 台で測定した。

表-4に測定結果と基本統計量を示す。練上がり直後

表-4 空気量の測定結果と基本統計量

配合名	基本統計量		フレッシュ コンクリート		配合名	基本統計量		フレッシュ コンクリート	
			空気量					空気量	
			練上がり 直後	経時 30 分 程度				練上がり 直後	経時 30 分 程度
建築用調合 (SL18)	全データ	<i>n</i>	1	5	土木用配合 (SL8)	全データ	<i>n</i>	1	5
		平均	5.9	6.3			平均	6.2	6.7
		標準偏差	—	0.24			標準偏差	—	0.16
		最小値	—	6.0			最小値	—	6.5
		最大値	—	6.7			最大値	—	6.9
		中央値	—	6.3			中央値	—	6.7
		変動係数	—	0.04			変動係数	—	0.02

表-5 ラウンドロビン試験の概要

機関番号		A	B	C	D	E	F	F	G
計測者	熟練度	3	2	1	1	2	2	2	1
計測 諸元	手動・自動	手動	自動+ 手動	手動	自動+ 手動	自動+ 手動	手動	手動	自動+ 手動
	計測時間	3 時間	3~4 時間	4 時間	30 分	60 分	4 時間	3 時間	60 分
	観察面	円形	矩形	矩形	矩形	矩形	矩形	矩形	矩形
	面数	1	2	2	2	2	1	1	2
	計測法	リニア	リニア	リニア	リニア	リニア	リニア	リニア	リニア
	計測線の 間隔	3	2	2.5	2.5	1.4	2	2	1.4
倍率	通常	150	120	400	120	120	40	40	120
	拡大	300	—	400	—	—	—	—	—
備考							SL18	SL8	

の空気量に対して現着時の空気量の平均値は、建築用は 6.3%、土木用は 6.7%となり、いずれの配（調）合も生コンプラント出荷時に比べて現着時の方が増加する傾向にあった。現着時の空気量のばらつきについては、建築用で最大値と最小値の差が 0.7%、土木用で 0.4%であり、これを標準偏差で表すと、建築用で 0.24%、土木用で 0.16%であった。また、変動係数は建築用で 0.04、土木用で 0.02であったことから、測定者の違いによる大きな差はないことが、本検討により明らかになった。

3.2 硬化コンクリートの気泡の評価方法（気泡の質の評価方法の検証実験）

硬化コンクリートの気泡組織の計測手法は、ASTM C457 に規格化され、準拠した測定が広く行われている。しかし、規格では、計測手順が必ずしも詳細に決められているわけではなく、研磨方法、測線のピッチ、観察の倍率などは個々の実績にゆだねられる部分が多い。さらには、人的計測であるため、気泡認識の個人差（熟練度等）の影響などが指摘されている。一方、近年では、測定手間の軽減を図るため、計測装置の一部自動化なども進み、各所で導入される事例も増えている。海外においては、手動計測や自動計測装置等を用いたラウンドロビン試験が実施され、結果が報告されている⁵⁾。しかしながら、我が国内の現在利用されている装置を用いて、測

定結果のばらつき、差について検討された例はほとんどみあたらない。そこで、評価 WG では、硬化コンクリートの気泡組織の試験方法であるリニアトラバース法について、国内の機関での同一サンプルを用いたラウンドロビン試験を行い、計測条件の相違による結果のばらつきについて検討を行うことにした。試験体は、後述する「施工段階が気泡組織に及ぼす影響の検証実験」において作製したものである。

試験体は、2 種類のレディミクストコンクリート（表-2、表-3）のそれぞれについて、現着時に作製した 100φ×200mm の円柱 1 本である。試験体は 14 日間 20℃ 水中養生を行い、気泡計測用の試験体は高さ方向中央部分から厚さ 20mm 程度でスライスし採取した 1 枚とした。

参加機関は全部で 5 機関（A と G は同じ、C と D は同じ）であり、計測数は 8 である。各計測における計測諸元および計測者の熟練度を表-5 に示す。熟練度は、計測経験枚数で分類し、10 枚以下で 1、10~100 枚で 2、100~1000 枚で 3、それ以上を 4 とした。装置は、手動と自動+手動の 2 種類に分けられた。手動計測装置は、古くから実施されている光学顕微鏡とステージを組み合わせ、目視で画面を確認しながら計測する装置を示す。自動+手動装置は、近年市販される CCD カメラと自動ステージからなり、拡大画像を撮影し、画像解析ソフトにより自

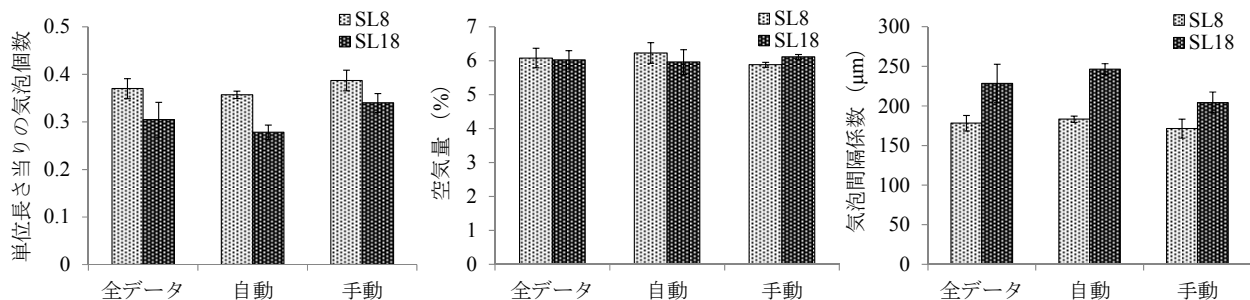


図-1 気泡計測結果 (単位長さあたりの気泡数, 空気量, 気泡間隔係数)

動で気泡を判別し、計測される装置である。ただし、自動装置による気泡の認識が不十分である場合があり、所有する機関すべてで、自動での認識後に手動(目視)での気泡の判別が行われていたことから、自動+手動装置とした。手動、手動+自動の両方の装置を有するのは、A、G および C、D の属する機関、自動+手動計測装置のみを所有するのはB および D の属する機関、手動計測装置のみは F の属する機関であった。今回参加した機関の自動+手動計測装置はすべて同一メーカーの製造であった。

計測は同一サンプルを用いて行い、計測終了後のサンプルを順に次の機関に送付して計測を実施した。図-1 に計測結果を示す。今回のラウンドロビン試験の結果からは、硬化コンクリートの空気量は計測手法による相違はそれほど大きくないこと、硬化コンクリートの気泡分布は、手動計測と自動+手動計測では微細な気泡の認識に差が認められ、手動計測では機関により差が認められたこと、硬化コンクリートの気泡間隔係数は変動係数 10%程度のばらつきがあったこと、が明らかになった。

4. 使用材料およびコンクリート種別が気泡組織に及ぼす影響

4.1 使用材料の影響

コンクリート中の気泡組織は、混和剤だけでなく使用材料であるセメントや混和材、骨材のそれぞれの影響を受ける。そこで、既往の研究の文献調査により、使用材料が気泡組織に及ぼす影響を次のように整理した。

(1) 混和剤

混和剤については、AE 剤がコンクリート中に気泡を連行する上で重要になることはよく知られている。AE コンクリート中の空気量は、一般にコンクリートの温度が低いときには空気量が大きく、温度が高くなると空気量は減る。一方、収縮低減剤は、コンクリートの乾燥収縮を低減するために重要な混和剤であるが、AE 剤を用いたコンクリートに対して凍結融解抵抗性を低下させることが指摘されている。収縮低減剤がコンクリート中に連行する気泡は、エントレインドエアと比較して径が大きく、コンクリートには不利なものであると報告されているが、収縮低減剤を後添加した場合、凍結融解抵抗性に有効と

されている気泡径範囲のピークが若干高くなるとの報告がある⁶⁾。また、収縮低減剤を使用すると、AE 剤の単独使用に比べ総気泡数、特に直径 200 μm 程度以下の微細な気泡が減少し凍結融解抵抗性が低下するが、微細な気泡を多数連行する AE 剤を使用すれば条件によっては凍結融解抵抗性を確保できるという報告⁴⁾や、疎水性化合物を組成することで凍結融解抵抗性を確保した収縮低減剤⁷⁾なども報告されており、今後、収縮低減剤の影響を受けにくい AE 剤の開発が重要になると考えられる。

(2) セメント

セメントとフレッシュコンクリートの空気連行性については、同一セメントであればセメントの粉末度および単位セメント量が増加するほど連行性が低下することが知られており、普通セメントに比べて超早強セメントを用いた条件で顕著となる。また、セメントの種類ではフライアッシュセメントを用いた条件において、フライアッシュに含まれる未燃カーボンによって AE 剤が吸着され連行空気量が減少することが知られており、連行された空気が時間の経過とともに低下することで気泡間隔係数が大きくなり、結果的に凍結融解抵抗性が低下する。

坂田ら⁸⁾は、硬化したコンクリートの気泡組織と凍結融解抵抗性に関するデータを分析した結果、凝結過程においてコンクリートの空気量は減少し、この傾向は普通ポルトランドセメントよりもダムコンクリートで一般的に使用される中庸熟フライアッシュセメントを用いた場合が顕著であることを示している。また、中村ら⁹⁾は、低熱ポルトランドセメントを用いた低水セメント比の高強度コンクリートの凍結融解抵抗性について、特に空気連行剤の働きに影響を与える練混ぜ水中のイオン強度に着目して検討しており、低熱ポルトランドセメントを用いた場合には、練混ぜ時の液相イオン強度が比較的低いために 3%程度の低空気量域での気泡間隔係数が普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べて大きくなる可能性があることを示している。

(3) 混和材

混和材については、フライアッシュや高炉スラグに関する知見として次のものがある。フライアッシュを混和材として用いたコンクリートは、特にアジテートするこ

とによって空気量が減少するとともに気泡間隔係数が大きくなる傾向にあるが、フライアッシュ用特殊 AE 剤を使用することによって、その低下に対しても気泡間隔係数を小さく保つことができる。また、高炉スラグについては、分離低減剤を添加したコンクリートにおいて、高炉スラグ微粉末の分量が増えるにつれ、径の小さい気泡の割合が多く、大きい気泡の割合が少なくなる。

(4) 骨材

コンクリート中の空気は骨材の粒度、粒形等の影響を受ける。特に細骨材の影響を受けやすく、細骨材量が増すと、空気量も増加する。細骨材のうち、概ね 0.3~0.6mm の部分が多いと気泡が連行されやすく、0.15mm 以下の部分が多いと気泡は入りにくいことが知られている。ただし、骨材の種類が硬化コンクリートの気泡組織へ及ぼす影響については、各種天然骨材を対象として硬化コンクリートの気泡組織の変化に着目して総合的に比較検討されているデータは少ない。

4.2 コンクリート種別の影響

普通コンクリートに限らず、高強度・高流動コンクリートにおいても、凍結融解抵抗性を確保する上で重要になるのは、絶対量である空気量ではなく、気泡間隔係数などで評価される気泡組織である。

低強度、中強度、高強度の 3 段階の強度レベルのコンクリートに対して、フレッシュコンクリートの空気量および硬化後の気泡分布、細孔分布の測定を行った結果からは、硬化後の空気量はコンクリート種別によらず、全般に練混ぜ直後の空気量より少なく、特に AE 助剤の使用量が多いものほど低下が大きくなる傾向があるとされている。さらに、ほぼ同じ空気量であっても強度が高い配合ほど、つまり単位ペースト量が多いものほど微細な気泡の数がより多くなり、これは、高強度で富調合なものほど、練混ぜ中の気泡の分散が容易となることや、混和剤の成分による分散効果が原因と推察されている。ただし、高強度になるほど、同じ空気量を確保するために導入される AE 助剤の添加量が多くなる傾向があることから、強度が高くなるほど AE 助剤で導入されるエントレインドエアの総量が多くなっていることに関連している可能性も考えられる。

5. 製造・施工段階が気泡組織に及ぼす影響

5.1 製造・運搬方法が気泡組織に及ぼす影響

製造方法が気泡組織に及ぼす影響については、異なるミキサで練混ぜた際のコンクリートの空気量の違いについて幾つかの報告がある。一方、運搬方法が気泡組織に及ぼす影響については、主にコンクリートの圧送に伴う圧送前後の空気量の変化が検討されている。多くの研究では、圧送の距離や圧送速度にもよるが、コンクリート

の圧送によって、圧送前の空気量より圧送後の空気量が減少することが示されている。これらは AE 剤や AE 減水剤を使用したコンクリートであり、中田ら¹⁰⁾は、高強度・高流動コンクリートをはじめとした高性能 AE 減水剤を使用したコンクリートの圧送前後の品質変化について、過去 17 年間の日本建築学会と土木学会で発表された文献を取りまとめている。その調査結果では、いずれの強度レベル（水セメント比）においても、圧送前に比べて圧送後の空気量が概ね増加する傾向を示している。これは、圧送後の空気量が減少する AE コンクリートの結果と異なり、高性能 AE 減水剤を使用したコンクリートに見られる特有の結果といえる。

5.2 打込み・締固め方法等と気泡組織

打込み・締固め方法と気泡組織の関係については、振動締固め後の空気量は、練上がり直後の空気量よりも低下するが、練上がり直後の空気量が多いほど、振動後の空気量の減少が少なく、また、単位セメント量が多いものほど、振動締固め後の空気量の減少量は少なくなる傾向にあるとされている。

5.3 養生方法が空気量の変化に及ぼす影響

プレキャストコンクリート製品の製造において最も多く採用されている常圧蒸気養生を取り上げ、蒸気養生の温度上昇勾配、前置時間、最高温度および蒸気養生後の二次養生がコンクリートの気泡組織へ及ぼす影響の文献調査を行った。その結果、蒸気養生における温度上昇勾配、二次養生がコンクリートの気泡組織に及ぼす影響は見られなかった。

5.4 表面気泡への影響要因

コンクリートの表面気泡に影響をおよぼす要因としては、はく離剤の種類、型枠の材質が挙げられる。また、型枠の傾斜角度の影響も指摘されている。はく離剤については、種類により表面気泡の発生状況は異なり、油性タイプでは界面活性剤を添加したものが表面気泡は少なくなる。また油性タイプと水性タイプの比較では、水性タイプの表面気泡は少ないが、表面気泡の開口部がセメントペーストで覆われた隠れ気泡が内部に多く発生する。

6. 気泡組織がコンクリートの性質に及ぼす影響

6.1 ワークビリティ

土木学会コンクリート標準示方書において、コンクリートの標準的な空気量は、練上り時においてコンクリート容積の 4~7%程度とするのが一般的であるとされている。この一般的な空気量の範囲において、空気量の違い（多い・少ない）による普通コンクリートのワークビリティを検討した研究は行われていない。高強度や高流動コンクリートにおいては、同一の配合の高流動コンクリートに対して AE 剤添加量を変えることで空気量を 2

～8%に変化させ、その際のスランプフロー値やV漏斗流下時間、ボックス充てん高さ等のフレッシュ性状への効果が検討されている¹¹⁾。これら空気量の範囲では、空気量の多い場合に連行空気の効果によりフレッシュ性状が良好になること、またこれら空気量の範囲であれば、空気量を多くしても材料分離は見られないことが示されている。

6.2 力学的性質

コンクリートの気泡組織と力学的特性に関する研究は、耐凍害性の確保に向けた研究とともに精力的に行われており、AEコンクリートの空気量と強度の相関性が示されている。一方、高流動コンクリートや高強度コンクリートについても、空気量と強度特性に関する検討がなされており、フレッシュ時の空気量の増加に伴う圧縮強度低下率の検討や、結合材の種類、配合強度および空気量をパラメータとした実験により、空気量の増減1%あたりの強度値への影響が検討されている。また、全空隙量とコンクリート強度の関係については、細孔容積が大きいとコンクリート強度は低く、総細孔容積が同じ場合にあっては、径の大きい細孔の比率が高いほど強度は低くなるとされている。圧縮強度の自然対数と有効総細孔量の間には直線関係があり、有効細孔量は養生条件や骨材種の異なるコンクリートに対しても有効な評価指標になることが示されている。

吸水率の高い人工軽量骨材を用いたコンクリートや繊維補強セメント系複合材料（FRCC：Fiber Reinforced Cementitious Composites）における強度と空気量に関する研究も幾つか見られ、特殊な材料を用いたコンクリートにおける検討も今後多くなると考えられる。

6.3 耐凍害性

(1) 内部損傷

セメント硬化体を凍害に起因する損傷から保護するためには、適切な気泡の確保が重要となる。凍害の基本メカニズムを説明する理論式・モデルに従えば、空気量が同一であっても、個々の気泡が小さく、気泡間距離が短いほど、未凍結水圧の緩和や未凍結水の吸収作用が大きくなり、凍結融解抵抗性に優れていることになる。つまり、硬化体中の空気量よりも気泡の間隔が重要であり、その指標として気泡の平均的な間隔を示す気泡間隔係数がよく用いられている。コンクリートの凍結融解抵抗性を確保するためには、微少な独立気泡を連行しAEコンクリートとする必要がある。

一般的に、JIS A 1148 などによる凍結融解試験（水中凍結水中融解）において凍結融解300サイクルで耐久性指数60以上を確保するためには、4～5%程度以上の空気量が必要であることは経験的によく知られている。また、JIS A 1148 などによる凍結融解試験を実施した場合、凍結

融解300サイクル終了時に凍結融解抵抗性を確保するためには、通常、250 μ m程度以下の気泡間隔係数が要求されている。なお、5%程度の空気連行を行ったAEコンクリートの気泡間隔係数は200 μ m程度となり、またPowersは凍結融解抵抗性を有すると考えられるコンクリートの気泡間隔係数を250 μ m程度であるとしている。

凍結融解作用に伴う内部損傷は、硬化体内部の気泡特性だけでなく、凍結速度や最低温度など外的環境要因によっても異なり、それら各種要因の影響は非常に複雑となる。加えて、コンクリート中の含水状態もまた凍害発生の主要因の一つであり、含水状態（飽水度）に基づく評価方法として限界飽水度法が挙げられる。これは、凍結融解作用に伴う内部損傷が初めて検出できる最小の飽水度として定義される限界飽水度（Scr）を求め、別途行う吸水試験から得られた飽水度（Scap）を比較し、凍結融解抵抗性を評価する方法であり、両者の差が0以下となる時、凍害を受けると評価される。一般的に、限界飽水度は80～90%程度とされており、この飽水度以上になると凍結融解抵抗性が著しく劣るとされている。このような高い飽水度では気泡の50%は水で満たされていると考えられており、気泡間隔係数の概念からすると、小さな気泡の導入のみでなく、水で満たされない気泡を導入することもまた重要となる。

1970年代に入り急速に発展した高強度コンクリートは、混和材料である高性能減水剤やシリカフェュームの影響により気泡間隔係数が大きくなる場合があるものの、セメントペーストの組織が緻密化され、基本的には耐凍害性に優れるコンクリートとなる。しかし、オートクレーブ養生など初期養生温度が高くなる場合は、耐凍害性が低下する場合があることが指摘されていた。1990年代に至って高強度コンクリートは、1980年代後半に開発された高流動コンクリートとともに、高強度・高流動コンクリートとして検討対象となることが多くなり、混和材料、養生方法、暴露条件などに関して、耐凍害性を評価軸とした様々な検討が行われてきた。それら検証の結果、高強度・高流動コンクリートにおいて、耐凍害性を確保するためには、混和材料や暴露条件の影響、また長期的な凍結融解抵抗性を考慮した場合は、普通コンクリートと同様に、空気量で3%以上、気泡間隔係数で200～250 μ m以下にすることが重要であること、また、耐凍害性の評価・判定を行うためには、空気量や気泡間隔係数に加え、100 μ m以下の微細な気泡組織や細孔構造の把握・評価も重要であることなどが判明してきている。

(2) 表面損傷

凍害による表面損傷は主にスケーリングとして認識されており、海水や凍結防止剤が作用する構造物に集中して発生する特徴を有し、相対動弾性係数の低下として定

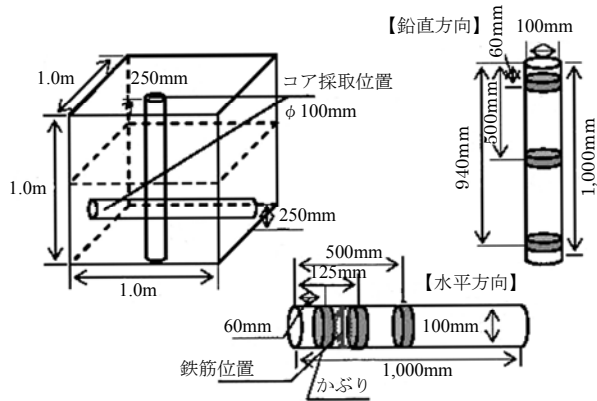


図-2 コア採取位置

量的に評価される内部損傷とは別の劣化と認知されている。ただし、空気量や気泡径分布を取り扱った多くの文献において、内部損傷と表面損傷の区別がなされていない、あるいは同一なものとして整理されているケースが多く、現段階で表面劣化に特化した研究例は少ない。

7. 気泡組織に関する検証実験および実構造物の調査

7.1 施工段階が気泡組織に及ぼす影響の検証実験

コンクリートの配（調）合および打込み・締固めが、フレッシュコンクリートの空気量および硬化後の気泡分布に及ぼす影響を把握するために、評価WGではマスブロックによる実規模実験を実施した。

マスブロックの寸法は1m×1m×1mであり、2種類のレディミクストコンクリート（表-2、表-3）のそれぞれで作製した。マスブロック試験体の配筋は、4面全てに主筋（縦筋）D22@150、配筋筋（横筋）D19@150としている。振動締固めは、高周波パイプレータ（φ40mm）および軽便パイプレータ（φ23mm）の2種類で行い、中心部は高周波パイプレータ、かぶり部は軽便パイプレータを用いている。打込みは2層（50cm/1層）で行った。

硬化後のマスブロック供試体から硬化後の気泡分布を測定するために、材齢14日にφ100mmのコアを採取した。コアは、図-2に示すように、水平方向については底面より250mmの位置から、鉛直方向については側面より250mmの位置から採取した。水平方向のコアにおける気泡分布測定のためのサンプル採取位置は、鉄筋の外側となる表面から60mm、内側に位置する125mmおよびマスブロックの中心位置500mmである。鉛直方向においては、天端から60mm、500mm、940mmである。

今回の実験では、土木用配合および建築用配合におけるフレッシュコンクリートの空気量と気泡分布の違い、気泡分布の経時変化についても考察を加えているが、本報告では、締固めによる気泡分布の違いについて示す。図-3に水平方向のコアにおける硬化コンクリートの空気量の比較、図-4に鉛直方向の比較結果を示す。ここ

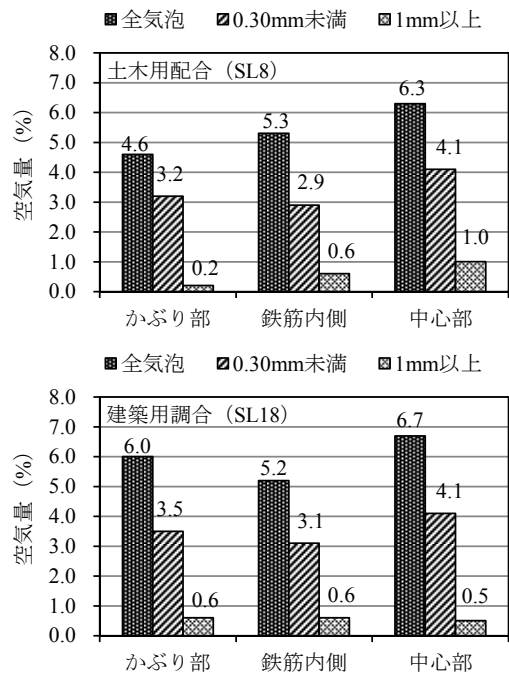


図-3 水平方向のコアにおける硬化コンクリートの空気量の比較

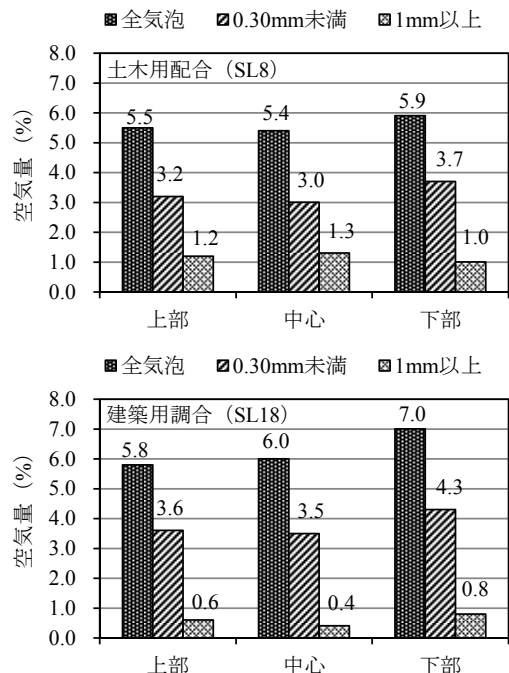


図-4 鉛直方向のコアにおける硬化コンクリートの空気量の比較

で、図中では、硬化後の空気量を全気泡とし、気泡径0.15mm付近の空気量をピークとする気泡径0.30mm未満の気泡をエントレインドエア、1mm以上の気泡をエントラップトエアとして示している。

水平方向コアでは、中心部と鉄筋内側およびかぶり部の比較において、全気泡が中心部よりも減少する傾向であり、土木用配合は中心部の6.3%に対し、鉄筋内側は5.3%と1.0%減少し、かぶり部では4.6%と1.7%の減少が

表-6 コンクリートの配合

工事名	コンクリート仕様	目標 空気量 (%)	実測 空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)							
				W/C	s/a	C	W	細骨材		粗骨材	混和剤 AE 減水剤
								陸砂	砕砂		
A 工事	24-12-25BB	4.5±1.5	3.5	54.3	44.8	306	166	—	816	1,018	4.59
B 工事	24-8-20BB	4.5±1.5	3.8	54.0	42.1	285	154	546	233	1,104	3.14
C 工事	24-8-25BB	6.0±1.0	6.0	50.1	42.1	292	146	534	235	1,180	2.92
D 工事	24-8-25N	4.5±1.5	5.0	53.2	44.9	296	157	828	—	1,020	2.96

認められた。建築用調合では中心部の 6.7%に対し、鉄筋内側は 5.2%と 1.5%減少し、かぶり部では 6.0%と 0.7%減少する結果となった。気泡径 0.30mm の気泡についても、土木用配合は、中心部の 4.1%に対し、鉄筋内側で 2.9%、かぶり部で 3.2%となり、建築用調合では中心部の 4.1%に対し、鉄筋内側で 3.1%、かぶり部で 3.5%となることから、ともに 1.0%程度の減少が認められた。一方で、気泡径 1mm 以上の気泡では、土木用配合は中心部の 1.0%に対し、鉄筋内側で 0.6%、かぶり部で 0.2%となり減少が顕著であるが、建築用調合では減少がほとんど認められず同程度であった。

鉄筋内側とかぶり部の気泡の減少については、締固めの影響が考えられ、かぶり部ではφ40mm に加え、仕上げとしてφ23mm のパイプレータを併用しており、2 回の締固めを行ったことで気泡が減少したものと考えられる。また、土木用配合の締固め時間は 1 箇所あたり 8 秒で建築用調合の 6 秒よりも長く、振動エネルギーの違いも気泡分布の違いに影響している可能性があると考えられる。1mm 以上の気泡は、土木用配合の方が建築用調合に比べコンクリートの粘性が高いことから、打込み時に気泡を巻き込みやすい状態にあり、巻き込んだ気泡が締固めによって減少したことが考えられる。

鉛直方向については、下部から上部になるに従って全気泡が減少する傾向が認められ、土木用配合は下部の 5.9%に対し、上部の 5.5%で 0.4%の減少し、建築用調合では下部の 7.0%に対し、上部の 5.8%で 1.2%減少する結果となった。この理由として、締固めによる減少に加え、ブリーディング水の上昇に伴うコンクリート中の気泡の破泡が考えられ、上部になるに従い、破泡によって硬化後の気泡が減少したものと考えられる。建築用調合ではブリーディング量が 0.07cm³/cm² と土木用配合の 0.02cm³/cm² よりも多かったため、下部に対する上部の全気泡の減少量が土木用配合の 0.4%に対し、建築用調合で 1.2%と多くなったものと考えられた。

以上の結果より、水平方向は、とくにかぶりへ実施する仕上げの締固めによって、表層部の気泡が減少する結果となった。また、鉛直方向では締固めに加え、ブリーディングの影響も考えられ、上部の気泡が減少する傾向

表-7 気泡組織の測定結果

工事名	A 工事	B 工事	C 工事	D 工事
気泡数(個)	198	288	1,164	419
平均気泡径(μm)	284	292	195	272
実測空気量(%)	3.5	3.8	6.0	5.0
硬化後の空気量(%)	1.6	2.4	6.1	4.0
気泡間隔係数(μm)	375	316	131	232

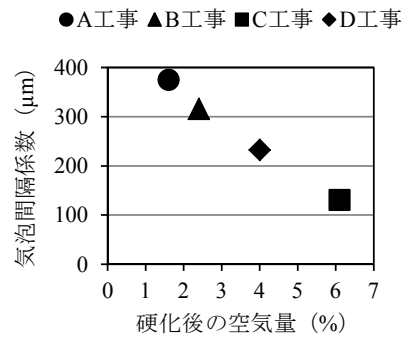


図-5 気泡間隔係数と硬化コンクリートの空気量

となった。気泡径 0.30mm 未満の気泡はエントレインドエアとして凍結融解抵抗性の確保に必要な気泡径であることから、凍害地域では、配(調)合や施工方法などによって気泡が減少することを配慮しなければならないことが示唆される結果となった。

7.2 ポス試験体による実構造物コンクリートの気泡組織の調査

実構造物におけるコンクリート中の気泡組織は、使用材料やレディーミクストコンクリート工場での製造方法、工事現場での運搬や打込み、締固め等の施工状況の影響を受ける。しかしながら、実構造物を対象とした硬化コンクリートの気泡組織の調査事例は必ずしも多くない。そこで、実構造物におけるコンクリートの気泡組織や耐凍害性を調査することを目的として橋梁下部工(フーチング)にポス試験体を設置した。ポス試験体を設置した現場は、4 箇所(A 工事~D 工事)である。いずれも復興道路(三陸沿岸道路)の岩手県内あるいは青森県内の工事であり、橋梁下部工のフーチングが対象となっている。

各工事におけるコンクリートの配合を表-6に示す。高炉セメント B 種を用いた工事が 3 工事、普通ポルトランドセメントを用いた工事が 1 工事となっている。なお、

調査対象とした工事で使用されたコンクリートのW/Cは50～55%の範囲となっている。

気泡組織の測定結果を表-7に示し、気泡間隔係数と硬化後の空気量の関係を図-5に示す。目標空気量を4.5%とした構造物では、荷卸し時の実測空気量と硬化後の空気量の変化に大きな差が認められる。A 工事では荷卸し時の実測空気量と比較し、硬化後の空気量が2%程度と大きく低下する傾向にあった。また、硬化後の空気量の減少にともない気泡間隔係数も低下する傾向が認められ、両者は良い対応関係にあることが分かる。

以上より、実構造物においてコンクリートの目標空気量を増加させることは、製造工場ごとの気泡組織の変動を考慮して、安全側で空気量と質を確保するための一つの方策として有効であると考えられる。

8. 気泡の導入・制御に関するその他の技術

コンクリート中に気泡を導入・制御するためのその他の技術としては、プレフォーム AE 剤、フライアッシュバルーン、中空微小球を用いる方法がある。また、軽量気泡コンクリート（ALC；Autoclaved Lightweight aerated Concrete）では、発泡剤と起泡剤を用いて気泡を発生させ導入する方法が開発されている。

プレフォーム AE 剤は、主成分のエーテル型アニオン活性剤と気泡膜強化剤からなる気泡原液を気泡生成装置に通して生成される微細な気泡である。フライアッシュバルーンは中空球状粒子であるフライアッシュの空間部分を利用するものであり、中空微小球はアクリロニトリル系の成分からなる中空微小球により気泡を導入する方法である。いずれの方法も、微細な気泡の導入により、凍結融解抵抗性の向上に寄与することが期待されており、今後の研究の発展が待たれる。

9. おわりに

本報告では、2 年間にわたる気泡委員会の活動を取りまとめた報告書の概要を示した。なお、本委員会の報告会は、2016 年 6 月 29 日に東京会場、同年 7 月 22 日に仙台会場、同年 8 月 5 日に札幌会場の 3 会場で開催される。本委員会の活動によって、コンクリート中における気泡の役割や効果、制御・管理技術に関する現在の知見が概ね整理されたと考えられる。本委員会報告書が、気泡に起因して凍結融解抵抗性が課題となるフライアッシュなどの産業副産物や収縮低減剤の利用促進、気泡制御技術の活用が期待される新たなコンクリート（高強度コンクリートや二次製品など）の研究開発の推進に寄与できれば委員一同幸いである。

参考文献

- 1) 坂田 昇・菅俣 匠・林 大介・橋本 学：中庸熱フライアッシュセメントを用いたコンクリートの耐凍害性に及ぼす凝結過程の空気量変化の影響，コンクリート工学論文集，Vol.22，No.3，pp.47-57，2011
- 2) 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
- 3) 神本英喜・石川浩三・内田美生：収縮低減剤を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性，セメント・コンクリート論文集，Vol.54，pp.410-417，2000
- 4) 張 友海・藤原忠司・小山田哲也・張 英華：収縮低減剤を用いたコンクリートの耐凍害性を確保する AE 剤の検討，コンクリート工学年次論文集，Vo.31，No.1，pp.1111-1116，2009
- 5) U.H. Jakobsen, C. Pade, N. Thaulow, D. Brown, S. Sahu, O. Magnusson, S. De Buck, G. De Schutter：Automated air void analysis of hardened concrete - a Round Robin study, pp.1444-1452, Cement and Concrete Research, 36, 2006
- 6) 神本英喜，石川浩三，内田美生：収縮低減剤を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性，セメント・コンクリート論文集，第 54 巻，pp.410-417，2000
- 7) 西 祐宜・橋爪 進・名和豊春：凍結融解抵抗性を改善した収縮低減剤の開発，コンクリート工学論文集，第 32 巻，第 1 号，pp.143-148，2010
- 8) 坂田 昇・橋本 学・菅俣 匠・緒方英彦：中庸熱フライアッシュセメントを用いたコンクリートの耐凍害性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.895-900，2013
- 9) 中村士郎・内田美生・枝松良展・安本礼持：低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの凍結融解抵抗性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.14，pp.717-722，2002
- 10) 中田善久・大塚秀三・毛見虎雄：ポンプ圧送に伴う高性能 AE 減水剤コンクリートの圧送前後の品質，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.223-228，2007
- 11) 小山田哲也・和田 篤・藤原忠司・張 金喜：高流動コンクリートの流動性に及ぼす連行空気の影響，セメント・コンクリート論文集，No.54，pp.324-331，2000