

論文 コンクリートの配（調）合および打込み・締固めが硬化後の気泡分布に及ぼす影響

橋本 学^{*1}・湯浅 昇^{*2}・緒方英彦^{*3}・林 大介^{*4}

要旨：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、マスブロックを用いた実規模実験を実施した。その結果、経時や締固めによってコンクリート中の気泡は減少すること、気泡径 0.30mm 未満のエントレインドエアについても減少すること、その傾向はスランプが小さい土木用配合の方が建築用調合よりも顕著であること、かぶりへの締固めによって表層部の気泡がさらに減少すること、鉛直方向の気泡分布には、ブリーディングの影響によると考えられる違いが生じることなどが分かった。

キーワード：空気量、気泡分布、締固め、エントレインドエア、エントラップトエア

1. はじめに

コンクリート中に含まれる気泡は、ブリーディングやフライアッシュを含むセメント等の影響により、硬化過程において減少する傾向があることがこれまでの知見¹⁾により明らかとなっている。また、締固め等の施工方法によってもコンクリート中の空気量が減少すること²⁾や、材料分離しやすい配合を用い、落下による衝撃を加えるなどの無理な施工を行った際にも空気量が減少する³⁾ことが確認されている。しかし、これまでにコンクリートの配（調）合に加え、施工方法を要因として硬化後の気泡組織に及ぼす影響について定量的に把握した実験は少なく、とくに施工方法の影響を把握することはフレッシュコンクリートの空気量を設定する上で極めて重要であると考えられる。そこで本論文では、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について把握することを目的とした検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料一覧を表-1 に示す。区分Ⅰ、Ⅱは異なるレディーミクストコンクリート工場2社を意味し、各工場

の常用の材料を使用した。混和剤についても、各工場が保有するものを使用した。

2.2 コンクリートの配（調）合

コンクリートの配（調）合は各工場が保有の JIS 規格適合の配（調）合を参考として定めた。コンクリートの配（調）合を表-2 に示す。区分Ⅰでは、スランプ 8cm の土木用と 18cm の建築用の2種類の配（調）合にて試験を行った。区分Ⅱは土木用配合のみで、AE 剤を使用

表-1 使用材料一覧

材料名	記号	区分	適 用
水	W	Ⅰ,Ⅱ	地下水および上澄水,密度 1.00g/cm ³
セメント	C	Ⅰ,Ⅱ	普通ポルトランドセメント,密度 3.16g/cm ³
細骨材	S1	Ⅰ	砕砂,2.65g/cm ³ ,F.M.3.00
	S2		山砂,2.58g/cm ³ ,F.M.2.00
	S3		砕砂,2.65g/cm ³ ,F.M.3.00
	S1	Ⅱ	砕砂,2.62g/cm ³ ,F.M.3.00
	S2		山砂,2.56g/cm ³ , F.M.1.80
粗骨材	G1	Ⅰ	砕石 2005,2.65g/cm ³ ,実積率 60.0%
	G1	Ⅱ	砕石 2005,2.65g/cm ³ ,実積率 69.5%
	G2		砕石 2005,2.70g/cm ³ ,実積率 59.5%
	G3		砕石 2010,2.66g/cm ³ ,実積率 59.5%
AE 減水剤	Ad1	Ⅰ	リグニンスルホン酸塩とオキシカルボン酸塩
		Ⅱ	リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテル系化合物の複合体
AE 剤	Ad2	Ⅰ	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表-2 コンクリートの配（調）合

区分スランプ	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)									
					W	C	S1	S2	S3	G1	G2	G3	Ad1 C×%	Ad2 ^{*1} (g/m ³)
Ⅰ-8	55.0	48.4	8±2.5	4.5以上	167	304	264	308	309	950	—	—	1.10	6.08 (2A)
Ⅰ-18	55.0	49.3	18±2.5	4.5以上	185	337	258	301	301	894	—	—	1.10	6.74 (2A)
Ⅱ-8	55.0	45.0	8±2.5	4.5以上	169	307	564	242	—	304	405	304	1.25	—

*1 1A=C×0.001%

*1 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 工修

*2 日本大学生産工学部 建築工学科 教授 博士(工学)

*3 鳥取大学農学部 生物資源環境学科 教授 博士(農学)

*4 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 上席研究員 博士(工学)

しない AE 減水剤のみのケースとした。スランブおよびフレッシュの空気量の規格値は、土木用配合で $8 \pm 2.5\text{cm}$ 、建築用調合では $18 \pm 2.5\text{cm}$ とし、フレッシュの空気量は、空気量の減少に着目していることから、現着時にて 4.5% 以上を確保することとした。また、水セメント比は RC 構造物を想定し、耐久性の観点から $W/C=55.0\%$ とした。

2.3 実験方法

(1) コンクリートの試験項目

コンクリートのフレッシュ時および硬化後の試験項目を表-3 に示す。工場にて練混ぜ直後のコンクリートのスランブおよび空気量を測定した。その後、アジテータ車に 4.0m^3 のコンクリートを積み込み、現着時に再度、フレッシュコンクリートのスランブ、空気量、ブリーディングの測定および気泡分布測定用の $\phi 100\text{mm} \times h200\text{mm}$ の供試体（以降、T.P.とする）を作製した。工場から実験場までの運搬時間は 30 分程度であった。

現着時のフレッシュ性状を把握した後、写真-1 および図-1 に示すように、マスブロック供試体 ($1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$) の作製を行った。マスブロックの作製方法の詳細については後述する。写真-2 および写真-3 に示すように、締固めを行った後、打上がり上面の中心およびかぶりの 2 箇所から試料を採取し、施工後のフレッシュコンクリートの測定および気泡分布測定用の供試体を作製した。また、経時によるフレッシュ性状を把握するために、土木用配合および建築用調合についてそれぞれ、練上がりから 80 分および 90 分後の試料をアジテータ車から採取し、スランブおよびフレッシュコンクリートの空気量を測定した。硬化後の気泡分布は ASTM C 457 に従い、T.P.を上・中・下の位置にて厚さ 10mm で横方向にスライスし、それぞれについて測定を行った。

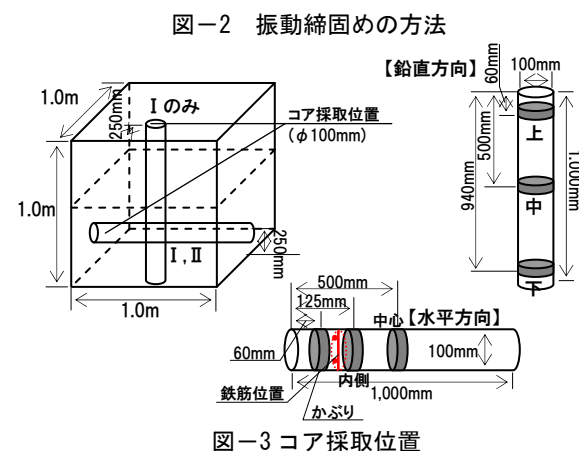
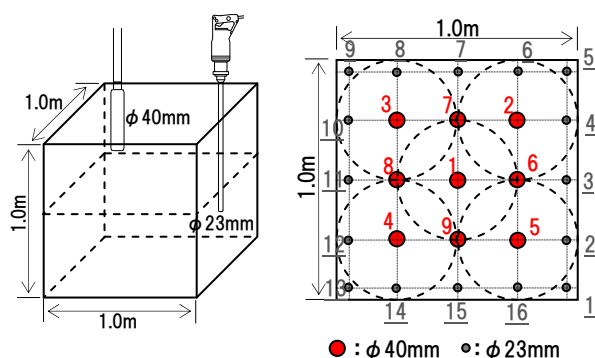
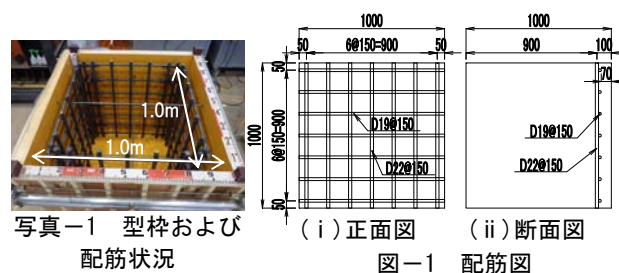
(2) マスブロック供試体の作製方法

マスブロック供試体 ($1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$) の作製にあたり、RC 構造物を想定して図-1 に示すように、4 面に縦筋として D22@150、横筋に D19@150 を配置した。アジテータ車のシュートから直接コンクリートを投入し、1 層あたりの打込み高さは 0.5m とし、2 層に分けて打ち込んだ。図-2 に示す棒状バイブレータには $\phi 40\text{mm}$ および $\phi 23\text{mm}$ の 2 種類を使用した。締固めの方法を図-2 に示す。中心部は $\phi 40\text{mm}$ の棒状バイブレータを用いて締め固め、鉄筋外側のかぶり部分については仕上げ用として $\phi 23\text{mm}$ を用いた。バイブレータの順序は図に示すとおりで、バイブレータの影響範囲（図中の丸点線）0.5m 程度を考慮して位置を定め、 $\phi 40\text{mm}$ の棒状バイブレータから行い、終了後に $\phi 23\text{mm}$ にてかぶり部の締固めを行った。締固め時間は、 $\phi 40\text{mm}$ および $\phi 23\text{mm}$ とともに土木用配合で 8 秒、建築用調合では 6 秒とした。

(3) マスブロック供試体の気泡分布の測定方法

表-3 コンクリートの試験項目

試験項目	試験方法	備考
スランブ	JIS A 1101 「コンクリートのスランブ試験方法」	8.0, 18.0 $\pm 2.5\text{cm}$
フレッシュコンクリートの空気量	JIS A 1128 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」	4.5% 以上
ブリーディング試験	JIS A 1123 「コンクリートのブリーディング試験方法」	—
硬化後の気泡分布	ASTM C 457 「リニアトラバース法」	—



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 日において $\phi 100\text{mm}$ のコアを採取した。コアは、図-3 に示すように、水平方向に

については底面より 250mm の位置から、鉛直方向はフレッシュの試料を採取しなかった図の箇所より採取した。気泡分布の測定位置は、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 にて試料を採取した。また、鉛直方向では、天端から 60mm、500mm および 940mm にて試料を採取した。なお、鉛直方向コアは区分Ⅰのみで採取した。

3. 区分Ⅰの実験結果

区分Ⅰでは、AE 減水剤と AE 剤を併用した土木用配合と建築用調合を用い、実規模の施工実験によって、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の経時変化や、締固めがそれらに及ぼす影響について検討した。

3.1 経時によるフレッシュ性状の比較

スランプおよび空気量の経時変化を図-4、図-5に示す。スランプについて、練上がり時では土木用配合で

11.0cm、建築用調合では 20.5cm、現着時ではそれぞれ 10.0cm、19.5cm で、練上がりから 80 分および 90 分の経時で、それぞれ 6.0cm および 15.5cm といずれも 5.0cm のスランプの低下が認められた。フレッシュの空気量については、現着時にて土木用配合で 6.7%、建築用調合で 6.3%となり、練上がり時よりもそれぞれ 0.5%、0.4%増加する傾向が認められた。この理由として、現着時にアジテータ車の高速攪拌を実施しており、それに伴う巻込みの空気によって増加したことが考えられる。経時については、建築用調合は空気量の減少がほとんど認められないのに対し、土木用配合では 1.7%減少した。今回の結果で、土木用配合の減少の割合が大きくなった理由については定かではないが、土木用配合と建築用調合のペースト量やモルタル量等⁴⁾の条件が異なることも考えられ、今後、その理由については、引き続き検討を進めていく。

打ち込んだフレッシュコンクリートの空気量を把握

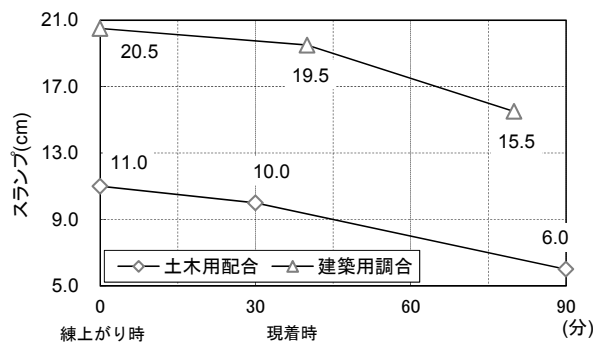


図-4 スランプの経時変化

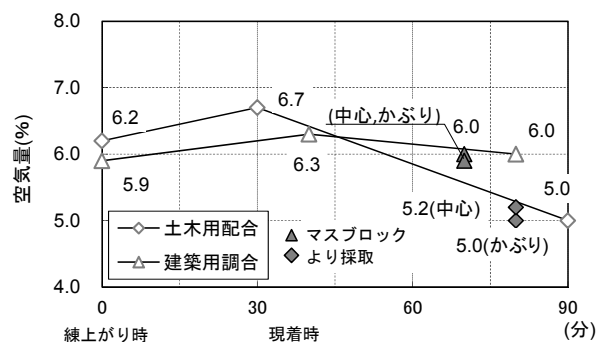
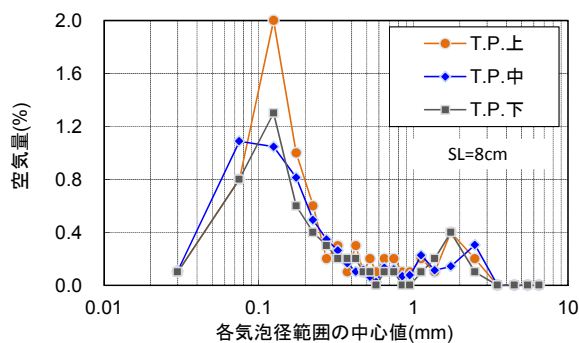
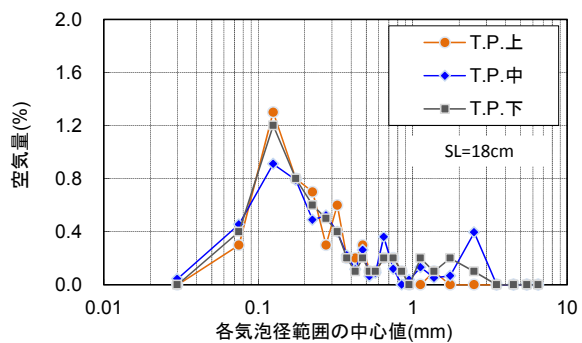


図-5 空気量の経時変化

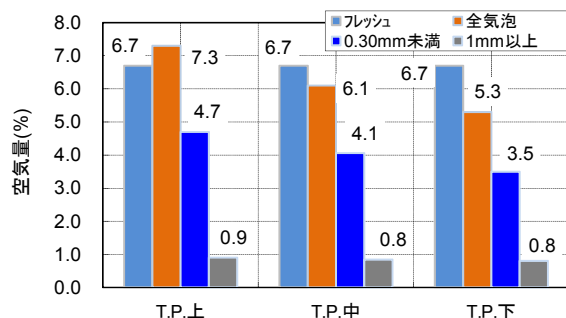


(i) 土木用配合 (SL=8cm)

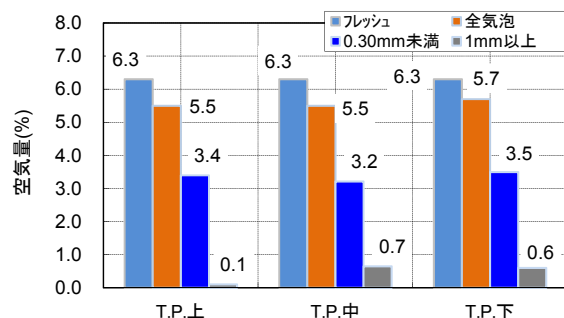


(ii) 建築用調合 (SL=18cm)

図-6 採取箇所ごとの気泡分布の比較 (現着時)



(i) 土木用配合 (SL=8cm)



(ii) 建築用調合 (SL=18cm)

図-7 現着時のフレッシュの空気量と硬化後の空気量の比較

することを目的として、マスブロックの施工が完了した時点で、マスブロック上面の中心位置およびかぶりから試料を採取し、空気量を測定した。その結果、建築用調合では、ともに 6.0%で練上がり時および現着時と同等の値を示した。一方、土木用配合では中心で 5.2%，かぶりで 5.0%となり、現着時の 6.7%に対して 1.5%程度低下し、現着時から経時 90 分までの経時による空気量の減少の傾向と一致した。このように、マスブロックから採取したフレッシュの空気量は、土木用配合において、経時により減少する結果となった。

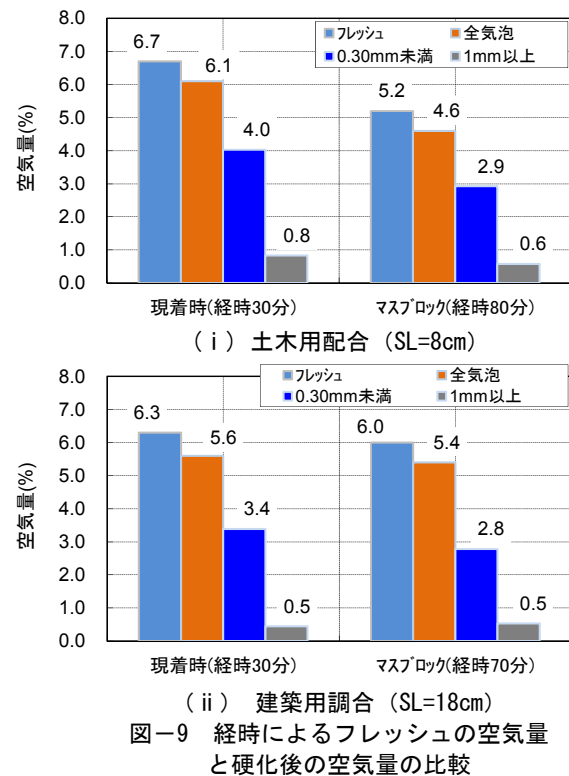
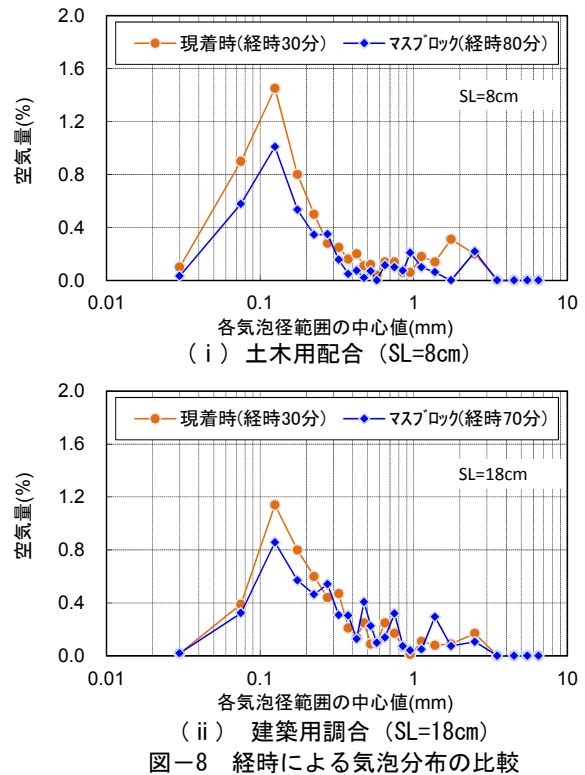
3.2 経時による硬化コンクリートの気泡分布の比較

(1) T.P.における気泡分布

図-6 に、T.P.の土木用配合および建築用調合の気泡分布を、図-7 に空気量の比較を示す。フレッシュと硬化後の空気量の測定は、試験方法が異なることから、相对比较により考察することとした。図-7 の各気泡径での空気量は、硬化後の空気量を全気泡とし、既往の研究³⁾より、エントラップトエアの影響が小さいとされる気泡径 0.30mm 未満をエントレインドエアと定義し、明確には定義されていないが、目視にて確認可能な 1mm 以上をエントラップトエアとした。フレッシュの空気量は現着時でのエアメータにて測定した結果を示す。図-6 より、気泡径 0.15mm 付近のピークに着目したときに、土木用配合においては上下間のばらつきが大きく、T.P.上部にて採取したものの空気量が 2.0%と多い結果となった。このため、測定位置でのばらつきを考慮して、上・中・下を各気泡径にて平均したものを気泡分布として算出することとした。

(2) 経時による気泡分布の比較

図-8 および図-9 では、経時 70 分および 80 分にて採取した T.P.の気泡分布および各気泡径での空気量の比較を示す。なお、現着のフレッシュの空気量は図-5 に示したとおり、経時によって減少し、その減少傾向はスランプの小さい土木用配合で顕著であった。一方、図-9 より硬化後の全気泡は、土木用配合、建築用調合ともに、フレッシュの空気量よりも減少傾向にあった。凝結過程において空気量が減少することは既往の研究²⁾より示されている。また、経時によっても全気泡が減少する傾向が認められた。同様の傾向は、図-8 より気泡径 0.30mm 未満の AE 剤 (Ad2) に起因するものについても認められ、土木用配合で 4.0%から 2.9%と 1.1%，建築用調合で 3.4%から 2.8%と 0.6%の減少であった。以上の結果より、スランプの小さい土木用配合の空気減少量が多くなる傾向は、前述したフレッシュの経時による結果と同様であり、今回の実験の範囲では、硬化後においても全気泡は経時によって減少し、その傾向は気泡径 0.30mm 未満の気泡においてより顕著であった。



3.3 締固めによる気泡分布の比較

締固めが硬化後のコンクリートの気泡分布に及ぼす影響を把握するために、水平方向コアの全気泡、気泡径 0.30mm 未満および 1mm 以上の硬化コンクリートの空気量の比較を図-10 に、鉛直方向コアの空気量の比較を図-11 に示す。

図-10 より水平方向コアでは、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ヶ所当たり 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。

図-11 の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⁵⁾、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 $0.07\text{cm}^3/\text{cm}^2$ と土木用配合の $0.02\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 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⁶⁾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。

4. 区分Ⅱの実験結果

区分Ⅱでは、土木用配合について AE 剤の併用の有無が締固めによってコンクリートの気泡分布に及ぼす影響を把握することを目的として検討を行った。水平方向に採取したコアの鉄筋内側の気泡分布の比較を図-12 に、硬化コンクリートの空気量の比較を図-13 に示す。AE 減水剤のみの試験ケースは、φ23mm のパイプレータによる締固めの有り・無しの 2 ケースについての結果⁷⁾を示したものである。フレッシュの空気量は AE 剤の有

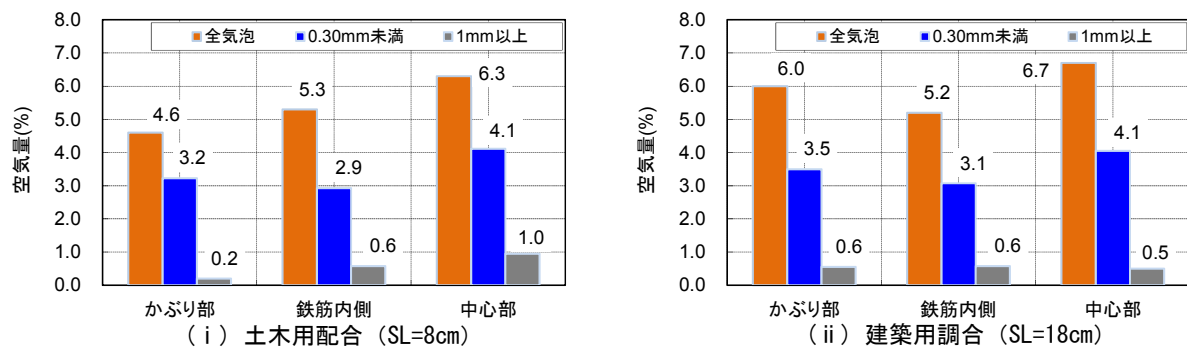


図-10 水平方向コアの硬化コンクリートの空気量の比較

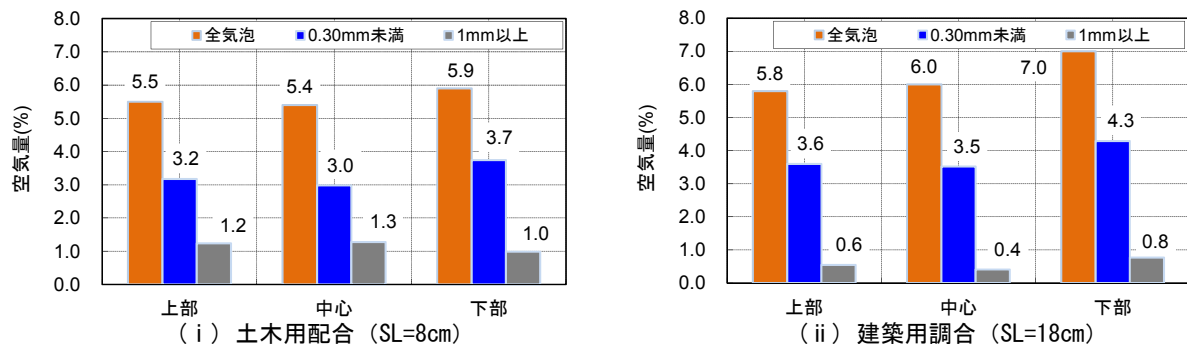


図-11 鉛直方向コアの硬化コンクリートの空気量の比較

無にかかわらず、4.5%以上を確保することとしており、AE 減水剤と AE 剤の併用のケースで 6.7%、AE 減水剤のみのケースでは 5.5%であった。図-12 中に示す数字は、各ケースで測定した気泡間隔係数で、AE 減水剤のみのケースでは、 ϕ 23mm の締固めの有無にかかわらず、気泡径 0.15mm 付近の気泡が AE 減水剤と AE 剤の併用のケースのものと比較して少なくなっており、気泡間隔係数で $400\mu\text{m}$ 程度と大きい値となっている。図-13 では、フレッシュの空気量に対し、締固めによって硬化後の全気泡が AE 減水剤と AE 剤の併用のケースは 6.7%から 5.3%で 1.4%減少し、AE 減水剤のみのケースでは ϕ 23mm の締固めがなしの場合で 5.5%から 4.8%で 0.7%減少し、締固めがある場合では 5.5%から 2.5%で 3.0%の減少が確認された。AE 減水剤のみのケースでは、 ϕ 23mm の振動締固めにより硬化後の全気泡が非常に少ない値となった。今回の結果は一回の実験結果であり、限られた条件ではあるが、フレッシュの空気量が 4.5%以上確保されても、使用材料や配（調）合、製造方法等の条件の違いにより、気泡径 0.30mm 未満のエントレインドエアが十分に連行されない場合も考えられ、とくに凍結融解抵抗性が問題となるような施工条件においては注意が必要であると考えられる。

5. まとめ

コンクリートの配（調）合および打込み・締固めの要因が硬化後の気泡分布に与える影響について、マスプロックを用いた実規模実験により以下の知見を得た。

- 1) フレッシュの空気量および硬化後の全気泡は、経時によって減少することが認められ、この傾向は気泡径 0.30mm 未満の気泡においても同様であり、スランブが小さい土木用配合ほど減少量が多くなった。
- 2) 水平方向では、締固めによって気泡は減少し、かぶり部への仕上げの締固めによって、表層部のコンクリートの気泡がさらに減少する傾向があった。土木用配合では気泡径 1mm 以上のエントラップトエアを巻き込みやすい状態にあり、締固めによってエントラップトエアも減少する傾向であった。
- 3) 鉛直方向では、下部から上部になるに従い、硬化後の気泡が減少する傾向にあり、その減少の傾向はブリーディングが多い建築用調合でより顕著であった。
- 4) フレッシュの空気量が 4.5%以上確保された場合でも、使用材料や配（調）合、製造方法等の条件の違いによって、エントレインドエアを十分に確保できない可能性があることが示唆される結果となった。

謝辞：本実験はコンクリート工学研究委員会「コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会 TC141A

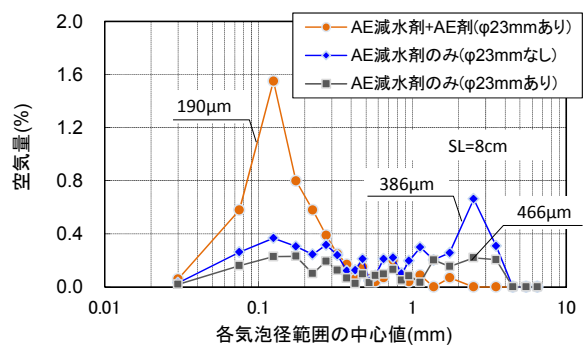


図-12 AE 剤の有無による気泡分布の比較 (SL=8cm)

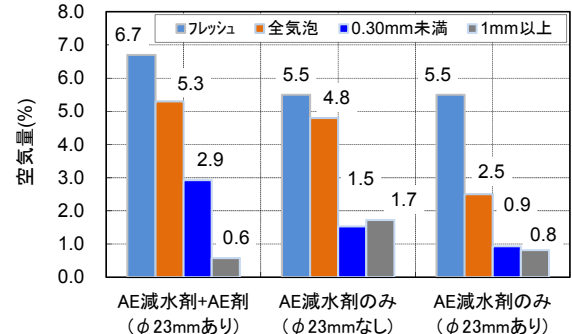


図-13 AE 剤の有無による硬化コンクリートの空気量の比較 (SL=8cm)

(委員長：濱幸雄室蘭工業大学教授)」の一環で実施したもので、実験に携われた関係各位に紙面を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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
- 2) 木沢久兵衛: 初期コンクリート中における空気量の変動とその影響, セメント技術年報, pp.372-380, 1963
- 3) 勝畑敏幸ほか: コンクリートの施工がエントレインドエアに及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.68, No.318, pp.291-298, 2015
- 4) 岸谷孝一: 特集・混和剤 (材) AE 剤, コンクリートジャーナル, Vol.8, No.3, pp.7-16, 1970
- 5) 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 作榮次郎: コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼすブリーディングの影響に関する一考察, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.2, pp.59-69, 2012
- 6) 坂田昇, 緒方英彦, 菅俣匠, 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関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, pp.895-900, 2013
- 7) 林大介, 緒方英彦ほか: コンクリートの振動締固めが硬化後の気泡分布に及ぼす影響に関する基礎実験, 土木学会年次学術講演会, pp.439-440, 2015