

論文 エアメータ（注水法）を用いた振動締固めに伴う空気量減少量の推定に関する検討

迫井 裕樹*1, 阿波 稔*2, 松岡 智*3

要旨：コンクリートは、その耐久性確保の観点から、エントレインド・エアの確保が重要であるが、通常の空気量測定に置いて、そのみを測定することは困難である。一方、施工過程において締固めなどにより空気量が減少するほか、使用材料およびそれらの組合せも硬化後の空気量に影響を及ぼすと考えられる。本研究では、既存の空気量測定法を活用し、振動に伴う空気量減少および、エントレインド・エア量の推定が可能か検討を行った。その結果、通常の空気量測定と注水法による空気量測定を組み合わせることで、振動締固めに伴う空気量の減少程度を推定することの可能性が示された。

キーワード：振動締固め, 空気量, 気泡間隔係数, エアメータ, 注水法

1. はじめに

一般的にコンクリートの耐久性、特に凍結融解抵抗性を確保するにあたり、硬化コンクリート中の空気質・量が重要であることはよく知られている。ここで、硬化コンクリート中の空気は、練り混ぜ・施工等において巻き込まれる比較的径の大きなエントラップト・エアと、AE 剤等混和剤を用いて導入される比較的径の小さなエントレインド・エアに区分される。耐久性を確保するにあたり、後者の量・質を確保することが重要となるが、一連の施工において、両者を明確に区別し、エントレインド・エアのみを導入することは困難である。また、既存の空気量測定は、練り上がり直後のコンクリートを用いて、両者が含まれる総空気量を測定するものであり、両者の割合を区別・判断することも困難である。

また、プレキャストコンクリート、現場打コンクリートの違いによらず、いずれも一連の施工、例えば、ポンプ圧送や振動締固めにより、フレッシュコンクリート中から気泡が抜け、練り上がり直後に測定される空気量が減少することとなる。特に、プレキャストコンクリートにおいては、その製造工程において、ジャンカや表面気泡を防止するために過剰な振動締固めが行われる場合があり、硬化後の耐久性を確保できないことが懸念される。

さらに、使用材料の影響として、骨材の岩種や微粒成分により混和剤の効果が十分に発揮されない場合や、AE 剤主成分の違いによるエントレインド・エアの安定性が異なることなどが報告されている^{例えば、1)~2)}。

近年、ポンプ圧送や振動締固めがコンクリート中の空気量に及ぼす影響に関する検討^{例えば、3)~6)}が種々行われているが、それらの多くは、圧送後あるいは振動締固め後のコンクリートから試料を採取し、空気量の変化を検

討したものであり、施工工程後のコンクリートから試料を採取することで試料が乱され、配合設計時のコンクリートの状態とは差異が生じることが懸念される。

そこで本研究では、既存の空気量測定法を活用し、締固め前後で生じる空気量の変化(締固め後の残存空気量)を推定可能か、また、フレッシュ時にエントレインド・エアの量を推定可能か、実験的検討を行った。さらに、使用材料の組合せが、振動締固めに伴う空気量変化に及ぼす影響について検討を行った。

2. 注水法による残存空気量の測定法

2.1 実験方法

本研究で提案する振動締固め後の残存空気量測定法を図-1に示し、その概要を以下に述べる。

後述するモルタルまたはコンクリート試料を用いて、まず練り上がり直後のフレッシュコンクリートに対して、JIS A 1128 に準じて空気量の測定を行う(図-1(a)、以下、通常法と記す)。その後、一旦空気量測定器の蓋を外した後、外部振動機により振動を与える。その際、フレ

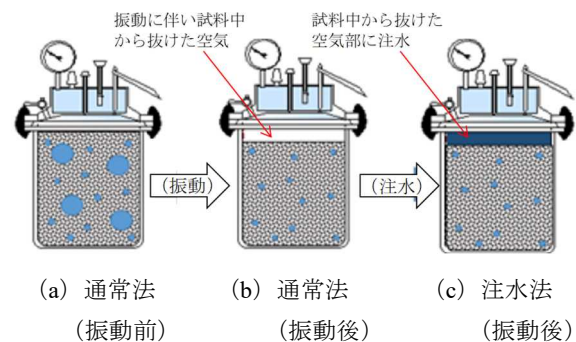


図-1 注水法による残存空気量の測定フロー

*1 八戸工業大学大学院 工学研究科 准教授 博士(工学) (正会員)

*2 八戸工業大学大学院 工学研究科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 公益社団法人 全国土木コンクリートブロック協会 技術委員長 博士(工学) (正会員)

表-1 コンクリート試料 使用材料・配合

| 記号 | W/C [%] | 空気量 [%] | s/a [%] | 単位量 [kg/m ³] | | | | | | スランプ [cm] | 温度 [°C] |
|-----|------------|------------|------------|--------------------------|-----|-----|------|--------|--------|--------------|------------|
| | | | | W | C | S | G | Ad. | AE | | |
| C-1 | 45.0 | 5.0±1.5 | 47.0 | 167 | 371 | 900 | 1007 | C×1.3% | C×8.0A | 8.0 | 19.5 |
| C-2 | | | 39.5 | 171 | 380 | 688 | 1069 | C×0.2% | C×3.0A | 8.5 | 18.0 |

使用材料：
 C-1：セメント:OPC、輝緑岩砕砂（密度：2.92g/cm³，吸水率：1.34%，F.M.2.57）、輝緑岩碎石（密度：2.90g/cm³，吸水率：1.17%）、AE 剤:アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤、Ad:リグニンスルホン酸系減水剤
 C-2：セメント:OPC、山砂（密度：2.64g/cm³，吸水率：2.27%，F.M.2.22）と石灰岩砕砂（密度：2.66g/cm³，吸水率：1.04%，F.M.3.05）の混合砂（F.M.2.72）、石灰岩碎石（密度：2.68g/cm³，吸水率：1.04%）、AE 剤:アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤、Ad:リグニンスルホン酸系減水剤

フレッシュコンクリートの内部の空気泡が抜け、上面が下がるが、試料の追加等を行わず、再度蓋を締めて通常法により空気量測定を行う（図-1 (b)）。この時点では、測定器内の空気量は、フレッシュコンクリート中の残存空気とフレッシュコンクリートから抜け装置上部に溜まった空気の合計、つまり、練り上がり直後の通常法により測定された空気量と同等となる。その後、注水を行い、装置内上部の溜まった空気（振動により、フレッシュコンクリートから抜けた空気部）を水で満たした後、空気量を測定する（図-1 (c)）。この際は、前述のように、振動により抜けた空気部が水で満たされた状態であり、ここで測定される空気量は、振動後のフレッシュコンクリート中に残存する空気のみが測定されることとなる。

なお、用いた外部振動機は、振動周波数 160～200kHz の軽壁打型振動機であり、振動時間は 60 秒とした。

2.2 検討試料

はじめに、練り上がり直後の空気量の異なる 3 種類のモルタル試料（M-1～3）を用いて、2.1 に述べた方法により、振動後の残存空気量の測定可否について、事前検討を行った。ここで用いたモルタル試料は、使用材料（セメント種、骨材種、混和剤種）を全て同一とし、実際のプレキャストコンクリート製品を製造する際に用いるコンクリート配合から粗骨材を除くモルタル部の配合を用いた。なお、セメントは普通ポルトランドセメント（OPC）、細骨材は輝緑岩砕砂（密度：2.92g/cm³，吸水率：1.34%，F.M.:2.57）、減水剤 Ad はリグニンスルホン酸系減水剤、AE 剤はアルキルエーテル系陰イオン界面活性剤（以下、非イオン系と記す）を用いており、練り上がり直後のテーブルフローは 260～270mm、温度 20.5°C であった。

練り上がり直後のモルタルの空気量を通常法で測定した後、1) 振動締めを行わない状態で注水法、2) 振動締め後、通常法および 3) 振動締め後、注水法により空気量の測定を行った。

表-2 フレッシュモルタルの空気量

| | 振動前 | | 振動後 | |
|-----|------|------|------|-----|
| | 通常法 | 注水法 | 通常法 | 注水法 |
| M-1 | 12.0 | 12.0 | — | — |
| M-2 | 7.8 | — | 7.8 | — |
| M-3 | 10.0 | — | 10.0 | 5.5 |

※単位：%

次に、使用材料、配合の異なる 2 種類のコンクリート試料（C-1～2）を用いて、2.1 に述べる方法による空気量測定を行った。C-1～2、各試料の使用材料、配合等を表-1 に示す。ただし、コンクリート試料に対しては、練り上がり直後の通常法および振動締め後の注水法のみを行った。また、フレッシュ時の空気量測定の各段階において、空気量測定を行ったエアメータ内の試料中央部が乱れないよう注意しながら容器を逆さにして試料を抜き出し、硬化後、ACTM C 457 に準じたリニアトラバース法により硬化後の気泡特性の測定を行った。硬化後の気泡特性の測定は、振動に伴い試験体高さ方向で気泡分布の差異が生じることが想定され、これがフレッシュ時の空気量測定に及ぼす影響を併せて検討するため、上端から 50mm 位置、高さ中央部および下端から 50mm 位置を切断・研磨し、測定に供した。

2.3 結果および考察

(1) モルタル試料

モルタル試料を用いた結果を表-2 に示す。M-1 の結果より、振動を与えない状態で、通常法および注水法で測定した空気量が同等であることが確認できる。次に、M-2 の結果より、振動前後で通常法で測定した場合、振動前後で同等の空気量を示しており、容器内上部の気泡だまりは振動に伴いフレッシュモルタルから抜けた空気を示しているものと推察される。最後に、M-3 の結果より、振動後容器内上部に溜まった気泡だまり（フレッシュモルタルから抜けたと推察される空気部）に注水を行

い測定すると、振動前における空気量から減少していることが確認される。ここで測定された空気量は、振動後のモルタル中に残存する空気量を示すものと推察される。換言すると、振動前後の空気量の減少量が、振動によって抜けた空気を示しているものと推察される。

(2) コンクリート試料

表-3 に振動締固め前後の空気量測定結果を示す。表-2 の結果より、いずれの試料においても、振動締固め後注水法により得られたフレッシュコンクリートの空気量は、練り上がり直後（振動締固め前）のそれと比較して、減少していることが確認された。2.2 (1) の結果と同様、ここで測定された空気量が、振動締固め後のフレッシュコンクリート中に残存する空気量を示しているものと考えられる。

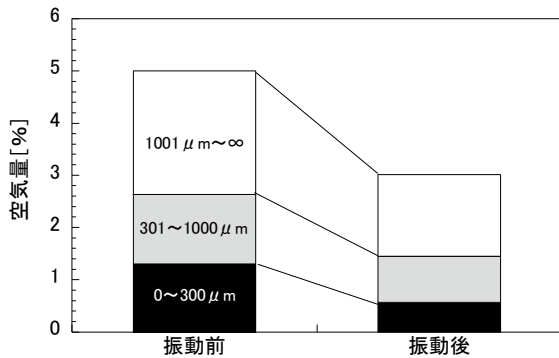
ここで、通常法、注水法それぞれで測定された空気量の妥当性を確認するため、エアメータで測定した試料をそのまま硬化させ、ASTM C 457 に準じてリニアトラバース法により、硬化後の気泡特性について検討を行った。

各試料における硬化後の空気量を図-2(a)および(b)に示す。図-2 に示す各試料の空気量は、細孔径 0~300 μm 、301~1000 μm および 1000 μm 以上の 3 区分に分けて示している。

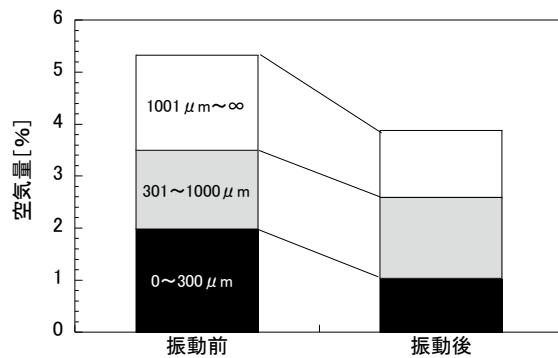
表-3 フレッシュコンクリートの空気量

| | 振動前 通常法 | 振動後 注水法 | 振動前後の 変化量 |
|-----|------------|------------|--------------|
| C-1 | 4.3% | 2.4% | -1.9% |
| C-2 | 5.6% | 3.7% | -2.9% |

図-2 より、いずれの試料においても、フレッシュ時のエアメータによる空気量と硬化後の空気量の差異は、0.5%程度（最小：0.1%，最大：0.7%）であり、概ね同等の値を示すことが確認された。ただし、実験前、振動締固めにより減少する空気は、主としてエントラップト・エアであり、残存空気は主としてエントレインド・エア（300 μm 程度以下）であるとの予想とは異なる結果を示すことが確認された。つまり、図-2 に示すように、振動締固め前後の空気量の内訳（各気泡径範囲毎の空気量の変動）を見ると、エントラップト・エアのみならず、エントレインド・エアも同様に減少しており、全気泡径範囲を通じて、空気量が減少することが把握された。これは、実験当初に想定・目的とした、通常法と注水法を組み合わせることによる残存エントレインド・エアのみの測定は困難であることを示すものである。

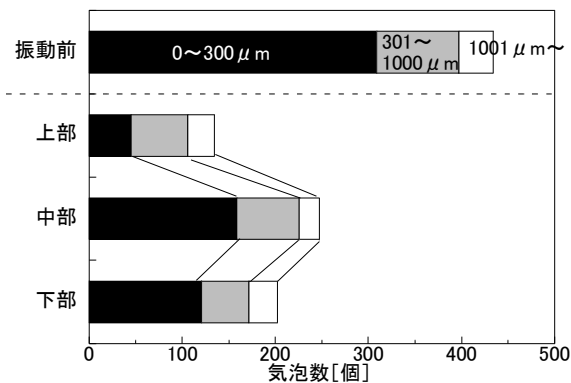


(a) C-1（振動前：4.3%，振動後：2.4%）

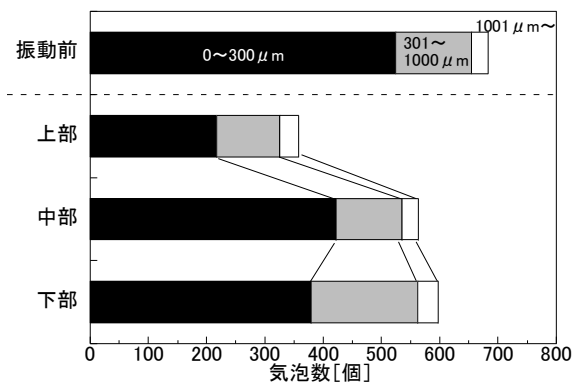


(b) C-2（振動前：5.6%，振動後：3.7%）

図-2 硬化後の空気量



(a) C-1（振動前：4.3%，振動後：2.4%）



(b) C-2（振動前：5.6%，振動後：3.7%）

図-3 硬化後の気泡数

ただし、振動前後の空気量の低下量は、フレッシュ時の空気量の測定法によるものと、硬化後の空気量の測定結果ではほぼ一致する低下量を示していることから、本研究で提案する測定法により、振動に伴う空気量の低下量を推定することが可能であると考えられる。

今後、データを蓄積し、フレッシュ時の空気量と硬化後の空気量の関係性を明確にすることおよび、測定された空気量と硬化後の耐久性の関係を明確にすることが必要であると考えられる。

図-3 (a) および (b) に、各試料の上部・中部・下部における硬化後の気泡数を示す。図中、気泡径を図-2と同様、0~300 μm 、301~1000 μm および 1001 μm 以上の3区分に分けて示している。また同図中には、振動締固め前の試料における上・中・下部の測定結果の平均値を併せて示している。

図-3 より、いずれの試料においても、振動締固め前の全気泡数と比較して、振動締固め後は全気泡数が減少していることが確認された。特に、C-1 (図-3 (a)) は、振動締固め後の全気泡数の減少が大きく、振動締固め前の全気泡数の約 50%以下となることが確認された。

測定位置の違いに着目すると、一部例外が認められるものの、概ね、上部ほど気泡数が少なくなる傾向を示すことが確認された。また、上・中・下部における各気泡径範囲の気泡数に着目すると、いずれの試料においても、300 μm 以下の気泡数は中部が最も多い一方で、1000 μm 以上の気泡数は中部が最も少ないことが確認された。

これらの結果は、コンクリートの配合 (フレッシュ性状) の違いに起因する気泡の抜けやすさや、使用材料 (セメント、骨材種、減水剤およびそれらの組合せ) に起因する導入されたエントレインド・エアの安定性などによるものと考えられる。

3. 骨材種と AE 剤種およびそれらの組合せが及ぼす影響

3.1 実験方法

前述のとおり、骨材岩種や AE 剤主成分によりエントレインド・エアの導入効果、安定性が異なることがあり、これは振動締固め後の残存空気量に影響を及ぼすことが懸念される。そこで本章では、細骨材岩種および AE 剤主成分を実験要因とするモルタル試料を用いて検討を行った。細骨材は 2 章で用いたもの同一の輝緑岩砕砂および比較用として標準砂を用い、AE 剤は主成分の異なる 2 種類 (非イオン系または、変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤 (以下、樹脂系と記す)) を用意し、表-4 に示す組合せで振動締固め前後の空気量変化に及ぼす影響について検討を行った。なお、配合は、プレキャストコンクリート製品工場にて用いているコンクリート配合から粗骨材を除くモルタル部と同一 (W/C=45.0%、

表-4 実験要因と組み合わせ

| | | 砂種 | |
|-------------|-------|-----|----------|
| | | 標準砂 | 輝緑岩 (砕砂) |
| AE 剤 主成分 | 非イオン系 | ○ | ○ |
| | 樹脂系 | — | ○ |

S/C=2.33, AE 剤添加量 : 8.0A) とし、減水剤はリグニンスルホン酸系 (C×1.0%) を用いた。練り上がり直後のテーブルフローは 250~260mm、温度は 21°C であった。

締固め前後のフレッシュ時の空気量の測定法および、硬化後の気泡特性測定のための試料採取は以下の手順で行った。まず、1) 各配合、練り混ぜ後に通常法でフレッシュ時の空気量の測定を行った。その後、エアメータ内の試料をできるだけ乱れないよう注意しながら容器を逆さにして試料を抜き出して硬化させ、硬化後の空気量測定用試料とした。2) 次に、1) で用いた試料と同一バッチの別試料を用いて、通常法により空気量の測定を行った。その後、エアメータの蓋を外して加振を行った後、注水法により空気量の測定を行った。エアメータ内の試料を 1) と同様、採取・硬化させ、硬化後の空気量測定用試料とした。3) 再度 2) と同様の手順を行った。ただし、加振後の空気量測定は注水せず通常法により行った。

3.2 実験結果および考察

各試料のフレッシュ時の空気量測定結果一覧を表-5 に示す。なお、前述した 1) ~3) の各測定段階の間は、約 10 分を要していることから、各段階で振動締固め前の通常法により得られた空気量は、各試料の空気量の経時変化を示すこととなる。

まず、砂種の違いに着目すると、打設直後の空気量に差異があるため一律に比較することは困難であるが、標準砂を用いた場合、振動に伴い 1.0% の空気量低下が、輝緑岩を用いた場合、4.5% の空気量低下が確認され、砂種によって振動に伴う空気量の減少量が異なることが把握された。前章の結果より、振動前後の空気量の減少量が硬化後の空気量の減少量とほぼ一致することおよび、各気泡径範囲の気泡数の割合は、振動前後で同程度であることから、本実験で確認される減少量の大小は、AE 剤により導入される空気量の大小を示すものと同義であると考えられる。これより、同一 AE 剤を用いたとしても、使用する骨材種によって、エントレインド・エアの安定性が異なるものと推察される。

次に、AE 剤主成分の違いに着目すると、空気量の経時変化は、非イオン系 AE 剤を用いた場合にやや大きくなる傾向を示すことが確認された (非イオン系 : 12.0% → 10.0% → 7.8% ; -4.2% , 樹脂系 : 10.0% → 10.0% → 8.8% ; -1.2%)。一方で、振動に伴う空気量の減少量は、

表-5 実験要因と組み合わせ

| AE 剤 主成分 | 砂種 | 振動前 | 振動後① | 振動後② |
|-------------|------|-------|--------------|--------------|
| | | 通常法 | 通常法→(振動)→注水法 | 通常法→(振動)→通常法 |
| 非イオン系 | 標準砂 | 13.0% | 13.0%→12.0% | — |
| | 輝緑岩 | 12.0% | 10.0%→5.5% | 7.8%→7.8% |
| 樹脂系 | (砕砂) | 10.0% | 10.0%→4.5% | 8.8%→8.8% |

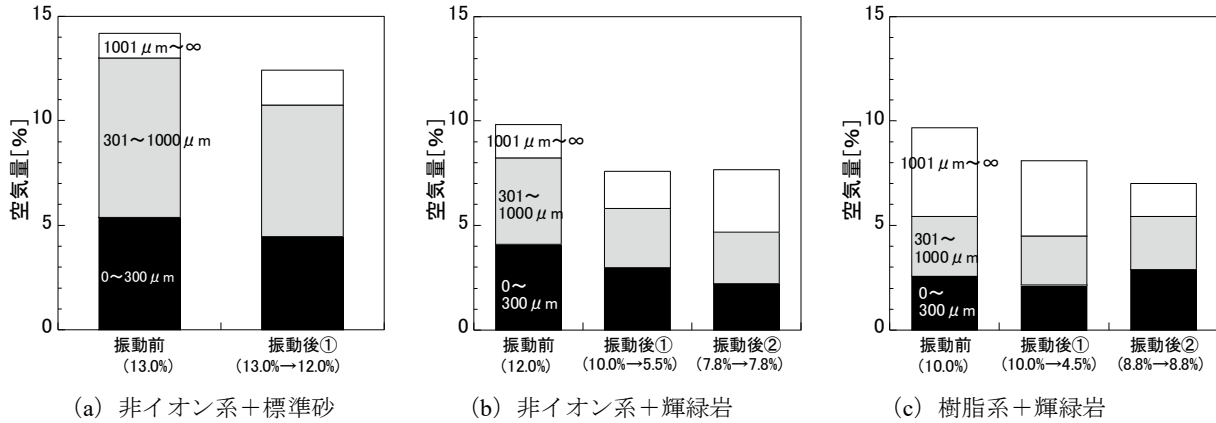


図-4 AE 剤種と砂種の組合せが硬化後の空気量に及ぼす影響

樹脂系 AE 剤を用いた場合に、やや大きくなる傾向が確認された。これは、AE 剤主成分によりエントレインド・エア導入メカニズムの違いにより、フレッシュモルタル中の空気安定性の違いによるものと推察される。

ここで、各組合せにおける硬化後の空気量を図-4 に示す。砂種の違い(図-4 (a) と (b))に着目すると、いずれの組合せにおいても振動前後での空気量が低下し、かつ、各気泡径範囲が同程度に減少していることが確認された。つまり、非イオン系 AE 剤を用いた場合の空気量の低下は、振動による影響を受け、砂種の違いによる影響は少ないものと推察される。

一方で、AE 剤種の違い(図-4 (b) と (c))に着目すると、振動前後で総空気量が低下する傾向は同様であるものの、減少する気泡径範囲が異なることが確認された。つまり、非イオン系 AE 剤を用いた場合(図-4 (b))、振動に伴い、各気泡径範囲が同様に減少するとともに、段階1 から段階2 において、1001 μm 以上の空気量の割合が増加していることが確認された。これは、エントラップト・エアが抜けず、エントレインド・エアが抜けることを示すものではなく、むしろ、硬化過程においてエントレインド・エアが合泡し、気泡径が大きくなったためと考えられる。一方で、樹脂系 AE 剤を用いた場合(図-4 (c))、振動後に 1001 μm 以上の割合が減少していることが確認された。これは、当初の予想どおり、1001 μm 以上の大きな空気が振動に伴い抜けることを示すだけでなく、樹脂系 AE 剤により導入されたエントレインド・エアが安定していることを示唆するものと考えられる。

4. 注水法による振動後の空気量と硬化後の気泡特性

図-5 には、前章までに検討を行った配合のうち、振動前後の空気量(振動後は注水法で測定)が把握されているものを対象に、フレッシュ時および硬化後の空気量の関係をプロットしたものである。縦軸は硬化後の空気量であり、横軸はフレッシュ時にエアメータにより測定した空気量を示している。また図中の破線は、フレッシュ時と硬化後の空気量が 1:1 となることを示している。

図-5 より、振動前に通常法により測定した空気量と硬化後の空気量は、良い相関を示すことが確認された。通常、硬化後の空気量は、フレッシュ時に測定された空気量から 1~2%程度低い値を示すことが多い。これは主として、測定法の違いによるものと考えられる。通常、硬化後の空気量測定は、エアメータによる空気量測定とは別に作成した供試体を用いて測定されるが、本研究では、エアメータによる測定を行った試料をそのままできるだけ乱さないように採取・硬化させ、硬化後の空気量測定に用いている。このため、図-5 に示すような良い相関性が得られたものと考えられる。

注水法により測定した空気量と硬化後の空気量に着目すると、一部傾向から外れるものが確認されるものの、通常法と同様、比較的良い相関性が示されることが把握された。注水法は、振動により試料中から上部に抜ける空気だまりに注水を行い測定するものであるが、その注水工程においても試料中から徐々に空気が抜けることも想定され、これが図-5 に示す傾向から外れる要因となったものと推察される。

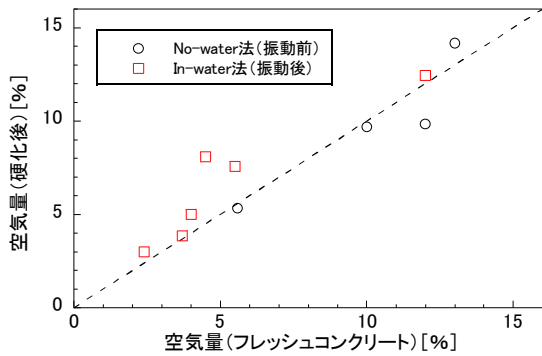


図-5 フレッシュおよび硬化後の空気量

図-6 には、振動締固め前後の気泡間隔係数と空気量の関係を示す。図中の矢印は、振動前後の空気量の変化を示している。図-6 より、練り上がり直後の通常法による空気量が 6.0%程度以下のものについては、振動による空気量の減少に伴い、著しく気泡間隔係数が増加することが確認された。

前述までの結果より、エアメータ（注水法）によりエントレインド・エアとエントラップト・エアを分離し、エントレインド・エア量を推定することは困難であるが、通常法と注水法を組み合わせることにより、振動に伴う全空気量の減少量が把握できる可能性が示唆されていること、図-5 よりフレッシュ時の空気量と硬化後の空気量は良い相関性を示すことおよび、図-6 よりフレッシュ時の空気量と気泡間隔係数の相関性が示されたことから、フレッシュコンクリートの空気量測定において、エアメータに試料充填の際に、実際の施工工程と同様の施工（振動締固め）を行い、本研究で実施した注水法を用いることで、硬化後の残存空気量推定の可能性が示唆されたものと考えられる。換言すると、注水法を用いて、振動締固め前後の空気量の減少量を事前に把握することにより、硬化コンクリート中に必要な空気量確保のための練り上がり直後の目標空気量の設定が容易になるとともに、施工（締固め）に起因する空気量の不足およびそれに伴う耐久性低下の防止につながるものと考えられる。

5. まとめ

- 1) 通常法および注水法を組み合わせた空気量測定により、振動締固めに伴う空気量の減少量、つまり振動締固め後の残存空気量推定が可能である。ただし、残存空気量中のエントレインド・エアとエントラップト・エアの区別は困難である。
- 2) 主剤が異なる AE 剤を用いた場合、砂種の違いにより、連行性や振動に伴う空気量変化に影響をおよぼす傾向がある。
- 3) 輝緑岩を骨材として用いた場合、AE 剤主成分によ

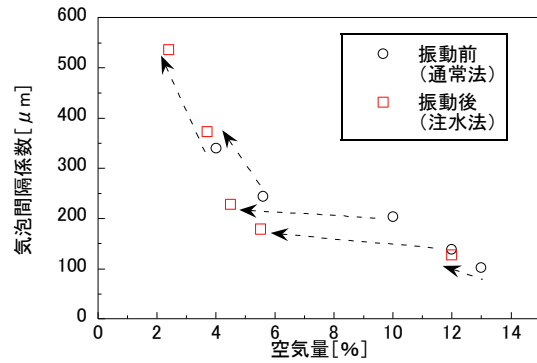


図-6 気泡間隔係数と空気量（フレッシュ、硬化後）の関係

り空気量保持性能が異なる。非イオン系 AE 剤を用いた場合は、エントレインド・エアが硬化過程において合泡し、気泡径が大きくなる可能性が示され、また、樹脂系 AE 剤を用いた場合は、エントレインド・エアが比較的良好な安定性を示すことが示唆された。

- 4) 通常法、注水法いずれの測定に置いても、硬化後の空気量、気泡間隔係数と良い相関を示すことが把握された。

参考文献

- 1) 袴田豊, 藤原忠司, 小山田哲也, 川代すが子: コンクリートの耐凍害性に及ぼす砕砂中のカーボンの影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.869-874, 2006
- 2) 小林正几: コンクリートの凍結融解作用による劣化に関する 2,3 の考察, コンクリートジャーナル, Vol.7.No.9, pp12-20, 1969
- 3) 小山田哲也, 平戸謙好, 山本英和: コンクリートのスケーリング劣化に及ぼす施工による空気量の変化の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.803-808, 2019
- 4) 片平博, 古賀裕久: 空気量, 振動締固め時間および細骨材の品質がスケーリング抵抗性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.771-776, 2018
- 5) 田中館悠登, 羽原俊佑, 小山田哲也, 林大介: フレッシュ時に外部からの圧力が硬化コンクリートの気泡組織およびスケーリング抵抗性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.793-798, 2017
- 6) 橋本学, 湯浅昇, 緒方英彦, 林大介: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1557-1562, 2016