

論文 表面締固めバイブレータの品質向上効果とそのメカニズム

関 健吾*1・林 大介*2・横関 康祐*3・曾我部 直樹*4

要旨: コンクリートの仕上げに表面締固めバイブレータを使用することにより、品質向上効果を得られることが報告されているものの、施工条件の影響や、品質向上メカニズムは明らかとなっていない。そこで、実構造物にて、施工時期、回数および速度を要因として品質向上効果を評価した。その結果、品質向上効果は、施工時の外気温および施工速度の影響を受けることが明らかとなった。また、室内試験にて、品質向上メカニズムを検討したところ、表面締固めバイブレータを使用することで、細孔空隙率への影響は少ないものの、気泡組織が改善され、推定圧縮強度、透気係数および凍結融解抵抗性が改善することが明らかとなった。

キーワード: 表面締固めバイブレータ、締固め、仕上げ、品質向上

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性向上を目的とした場合、凍害やすり減り作用等の外的劣化の影響を受けるとともに、塩分や二酸化炭素等の劣化因子の侵入経路となるコンクリート表層部の品質を確保・向上することが重要である。コンクリートの品質を向上する手法としては、材料による対策と、施工による対策に大別されるが、施工による対策として、打ち込んだコンクリートを入念に締め固めることが重要である。

スラブ部材を対象とした躯体表層部の品質向上手法として、表面締固めバイブレータの有効性が既往の研究¹⁾において示されている。しかしながら、品質向上に関するデータは十分でないのが現状である。また、品質向上効果については報告されているものの、そのメカニズムについての検討はほとんどなされていない。

そこで本研究では、表面締固めバイブレータを施工した場合について、環境条件や施工条件が品質に及ぼす影響の評価、および表面締固めバイブレータによる品質向上のメカニズムの明確化を目的として、実構造物による評価および室内試験による検討を行った。

2. 表面締固めバイブレータについて

表面締固めバイブレータの外観および機械仕様を図-1に示す。表面締固めバイブレータは、主にスラブコンクリートの仕上げにおいて、「均し」と「締固め」を実施する施工機械である。取り付けられたエンジンによってボード部が微細に縦振動し、その振動をコンクリート表層に伝えることで、締固めの効果が得られる。

表面締固めバイブレータは、図-1に示すように、打込み完了後の早い段階で、1次仕上げとして使用する。スラブなど、広範囲の仕上げ作業を行うコンクリート施

工においては、最終層のコンクリートを打ち込んで棒状バイブレータによる締固めを行った後、直ちに仕上げ作業を開始し、再振動を行わないことが多いのが実情である。このような場合でも、表面締固めバイブレータによる1次仕上げを行うことにより、コンクリートに再振動と同様の効果を付与することができ、表層品質の向上が期待できる。

3. 実構造物における品質向上効果の評価

3.1 施工条件および試験項目

(1) 施工条件

対象構造物はU型擁壁の底版スラブ(幅27.8m、長さ20.0m、厚さ2.4m)およびボックスカルバートの頂版スラブ(幅27.3m、長さ12.0m、厚さ1.0m)であり、表-1および表-2に示す条件ごとにエリア分けした。打込み時期による影響を評価するため、秋期(11/12、日平均気温9.1℃)、冬期(2/18、日平均気温2.9℃)および夏期(6/4、日平均気温23.7℃)にそれぞれ1回ずつ、計3回の施工を実施した。なお、品質管理試験時の空気量は、それぞれ4.2%、4.7%、および4.7%であり、表-2に示す各配合



図-1 表面締固めバイブレータの仕様および施工手順

*1 鹿島建設(株) 技術研究所 土木材料グループ 研究員 修士(工学)(正会員)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 博士(工学)(正会員)

*3 鹿島建設(株) 土木管理本部 土木技術部 要素技術開発グループ長 博士(工学)(正会員)

*4 鹿島建設(株) 土木管理本部 土木技術部 要素技術開発グループ 課長代理 博士(工学)(正会員)

表- 1 施工条件一覧

| 施工エリア | 配合名 | 施工時期 (打込み日) | 日平均 気温 | 表面締固めバイブレータの施工条件 | | 備考 |
|-------|------------|--------------------|-----------|------------------|-------|---|
| | | | | 施工回数 | 施工速度 | |
| 1-1 | 27-8-20BB | 秋期 (2013/11/12) | 9.1℃ | — | — | 既往の研究 ³⁾ 底版スラブ (厚さ 2.4m) |
| 1-2 | | | | 1 回 | 3m/分 | |
| 1-3 | | | | 2 回 | | |
| 2-1 | 27-8-20MKC | 冬期 (2014/2/18) | 2.9℃ | — | — | 頂版スラブ (厚さ 1.0m) |
| 2-2 | | | | 1 回 | 3m/分 | |
| 2-3 | | | | 2 回 | | |
| 3-1 | 27-8-20MKC | 夏期 (2014/6/4) | 23.7℃ | — | — | |
| 3-2 | | | | 1 回 | 3m/分 | |
| 3-3 | | | | | 12m/分 | |

表- 2 使用材料および計画配合

| 配合名 | Gmax (mm) | 目標スランプ ⁷⁾ (cm) | 目標空気量 (%) | W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | ブリーディング量 (20℃室内) | |
|------------|--------------|------------------------------|--------------|------------|------------|--------------------------|-----|-----|-----|------|------|---------------------|--------------------------------------|
| | | | | | | W | C1 | C2 | S | G | Ad1 | | Ad2 |
| 27-8-20BB | 20 | 8±2.5 | 4.5±1.5 | 54.5 | 44.7 | 159 | 292 | — | 822 | 1053 | 2.92 | — | 0.13cm ³ /cm ² |
| 27-8-20MKC | | | | 54.5 | 44.9 | 159 | — | 293 | 816 | 1037 | — | 3.75 | 0.11cm ³ /cm ² |

W：地下水（密度 1.00g/cm³），C1：高炉セメント B 種（密度 3.04g/cm³），C2：低発熱・収縮抑制型高炉セメント（密度 2.98g/cm³），S：砕砂（密度 2.61g/cm³），G：碎石（密度 2.70g/cm³），Ad1：リグニンスルホン酸塩とオキシカルボン酸塩，Ad2：リグニンスルホン酸塩，オキシカルボン酸塩とポリカルボン酸系化合物

表- 3 試験項目

| 試験時期 | 試験項目 | 試験方法 |
|-------------------------------|----------|--|
| 打込み完了から 1 時間後 [*] | ブリーディング量 | キッチンペーパー法 ⁴⁾ により，ブリーディング量を測定 (0.81m ³ を対象) |
| | 貫入抵抗値 | 山中式土壌硬度計 ⁵⁾ (平型) により，貫入抵抗値を測定 (3 回の平均値) |
| 材齢 28 日 | 推定圧縮強度 | JSCE G504 に準拠し，測定した反発度から圧縮強度を推定 |
| | 透気係数 | トレント試験機 (ダブルチャンバー方式) を用いて測定 |

※ 秋期および夏期の打込み時に測定

について事前に実施したブリーディング試験 (JIS A 1123) 結果は，0.13cm³/cm²および 0.11cm³/cm²と同程度であった。施工条件として，表面締固めバイブレータの施工回数および施工速度を要因とした。施工回数は，片道の施工を 1 回とし，片道だけの施工の場合 (1 回施工) と，往復での施工の場合 (2 回施工) とした。表面締固めバイブレータの施工速度は，施工実績を基に標準的な速度として設定した 3m/分と，施工速度が著しく大きくなった場合を想定した 12m/分とした。なお，比較のため，いずれの施工日においても，表面締固めバイブレータを施工せず，通常通りの木ごてによる仕上げを行う箇所も設けた。

表面締固めバイブレータあるいは木ごてによる仕上げを行った後は，いずれのエリアにおいても，金ごてによる仕上げを 2 回実施した。打込み翌日に沈みひび割れの調査を行った後，全エリアに対して，養生マットを用いて材齢 14 日まで湿潤養生を行った。

(2) 試験項目

試験項目を表- 3 に示す。いずれの試験についても，スラブ上面を対象として測定を行った。

打込み完了から 1 時間後には，キッチンペーパーを用いたブリーディング量および山中式土壌硬度計 (平型)⁵⁾を用いた貫入抵抗値の測定を実施した。材齢 28 日の時点においては，テストハンマーにて反発度を測定し，日本材料学会により示される式⁶⁾を用いて推定圧縮強度を算出した。また，トレント試験機を用いて透気係数を測定した。なお，透気係数の測定時には，表面水分率も併せて測定した。

3.2 施工条件がフレッシュ性状に及ぼす影響の評価

秋期のブリーディング量および貫入抵抗値の測定結果を図- 2 に，夏期の測定結果を図- 3 にそれぞれ示す。図- 2 より，秋期において，打込み完了から 1 時間後のブリーディング量は，表面締固めバイブレータによる仕上げが無い場合 0.03cm³/cm²であったのに対し，1 回施工の場合で 0.14cm³/cm²と約 5 倍に増加した。また，2 回施工では 0.26cm³/cm² とさらに増加した。これは，表面締固めバイブレータの振動効果により，コンクリート中の余剰水が排出されたことによるものと考えられる。

一方で，夏期に施工した場合 (図- 3)，いずれのケースでもブリーディング量は 0.01cm³/cm² 以下と少ない結

果であった。しかしながら、表面締固めバイブレータの施工直後は、図-4に示すとおりスラブ上面の光沢が増すことを確認している。このことから、表面締固めバイブレータを用いた施工により、若干ながら余剰水は排出されたものの、ブリーディング量を測定した1時間後までの間に消失してしまっただけの可能性もある。このように、表面締固めバイブレータの使用による余剰水の排出について、外気温が9.1℃の場合（秋期）には排出される余剰水の量が多かったのに対し、外気温が23.7℃の場合（夏期）にはあまり多くなかった。また、施工回数が多くなるほど、排出量は多くなった。このことから、余剰水の排出は、外気温および施工回数の影響を受けることが分かった。

秋期における貫入抵抗値は、図-2より、表面締固めバイブレータの使用によって0.2kg/cm²から1.9kg/cm²に増加したものの、実施回数による差はほとんどなかった。夏期における貫入抵抗値は、図-3に示すとおり、表面締固めバイブレータを3m/分で施工すると17.7kg/cm²となり、施工しなかった場合の0.5kg/cm²と比較して大きく増加した。この要因として、エントラップトエアや余剰水が排出されたことにより、コンクリートが密実になったことが考えられる。一方、施工速度が12m/分と著しく速い場合は0.8kg/cm²であり、施工しなかった場合と同等の貫入抵抗値であった。このことより、表面締固めバイブレータによる締固めの効果は、通常のバイブレータと同様に、締固め時間すなわちコンクリートを加振する時間の影響が支配的であるものと推察される。

3.3 施工条件が躯体表層部の品質に及ぼす影響の評価

(1) 施工時期および施工回数の影響

表面締固めバイブレータの有無による躯体表層部における推定圧縮強度の関係を図-5に示す。図より、表面締固めバイブレータの使用により表層部の推定圧縮強度は1.01~1.26倍となった。これは、材齢初期の時点において余剰水およびエントラップトエアが排出されたためと推察される。一方で、秋期と冬期は表面締固めバイブレータを2回施工した場合の方が、1回施工よりも推定圧縮強度が低下した。これらの推定圧縮強度は、表面締固めバイブレータを使用しなかった場合と比べて高い値となっており、最適な施工回数は今後の課題であるものの、品質が向上することが分かった。

次に、表面締固めバイブレータの有無による透気係数の関係を図-6に示す。図より、いずれの施工時期においても、表面締固めバイブレータを使用することで透気係数は改善された。特に、秋期および冬期は透気係数が2オーダー改善した。これは、図-2に示したとおり、表面締固めバイブレータを使用することで、材齢初期の時点で余剰水やエントラップトエアが排出されたためと推

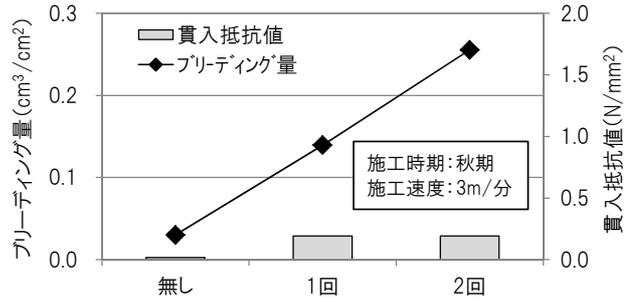


図-2 フレッシュ性状への影響（秋期）

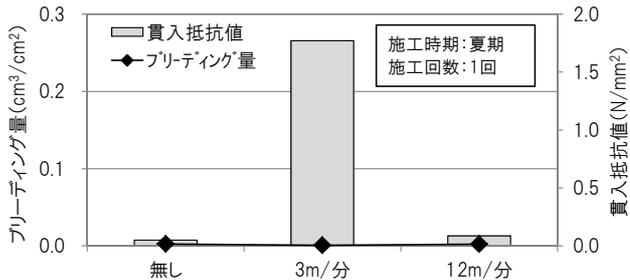


図-3 フレッシュ性状への影響（夏期）



図-4 表面締固めバイブレータ施工後の様子（夏期）

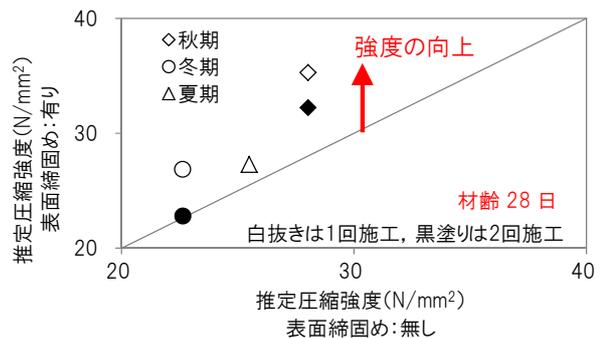


図-5 施工時期および回数が推定圧縮強度に及ぼす影響

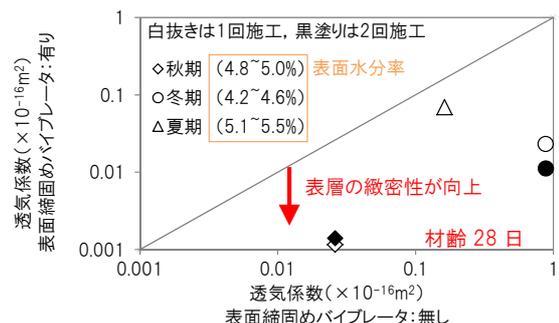


図-6 施工時期および施工回数が透気係数に及ぼす影響

察される。なお、夏期の施工については、前述のとおり、若干ながら余剰水は排出されたものの、その量は少なかったと考えられ、その結果、透気係数は若干向上する程度に留まったものと推察される。

一方で、秋期と冬期に表面締固めバイブレータを2回施工した際の透気係数は、前述の推定圧縮強度の場合と異なり、1回施工と同等以上の値であった。表面締固めバイブレータの施工回数が推定圧縮強度および透気係数に及ぼす影響については、今後、さらにデータを蓄積して検討する必要がある。

(2) 施工速度の影響

表面締固めバイブレータの施工速度が、推定圧縮強度に及ぼす影響を図-7に、透気係数に及ぼす影響を図-8にそれぞれ示す。推定圧縮強度は、施工速度が3m/分の場合には7%増加したものの、施工速度が12m/分の場合には2%の増加に留まった。同様に図-8より、透気係数についても、施工速度が3m/分の場合は向上したものの、12m/分の場合は表面締固めバイブレータを使用しなかった場合と同程度であった。これらのことから、施工速度が著しく大きくなると、品質向上効果はあまり得られないことが分かる。これは、通常の振動締固め機と同様に、締固め時間が短すぎると、締固めの効果が得られないことを示唆しているものと考えられる。

を挿入して締固めを行った。1箇所あたりの振動時間は5秒で一定とした。締固め完了後は金ごてで試験体上面を均し、Case「有り」については表面締固めバイブレータ

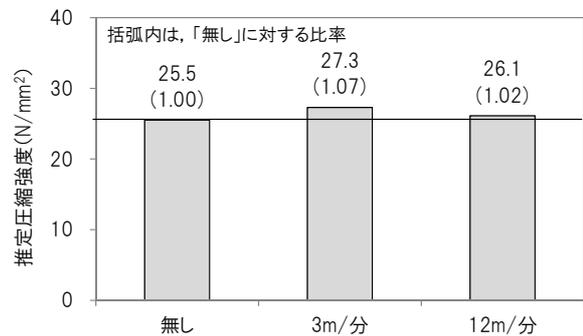


図-7 施工速度が推定圧縮強度に及ぼす影響

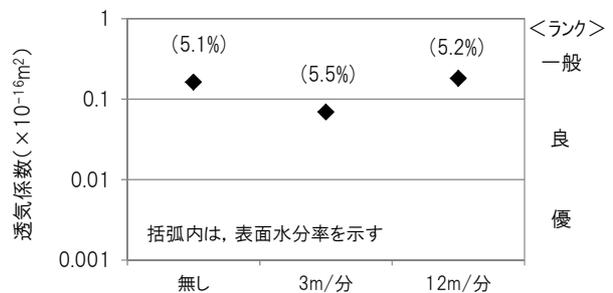


図-8 施工速度が透気係数に及ぼす影響

4. 室内試験による品質向上メカニズムの考察

4.1 試験条件および試験項目

室内試験では、表面締固めバイブレータの有無を要因として、品質向上メカニズムの検討を行った。試験条件一覧を表-4に、使用材料および配合を表-5にそれぞれ示す。試験体寸法はB2.2m×W0.8m×H0.2mとした。コンクリートを打ち込んだ後、50cm間隔で棒状バイブレータ

表-4 試験条件一覧 (室内試験)

| Case | 環境温度 環境湿度 | 表面締固めバイブレータ の施工条件 | |
|------|--------------|----------------------|------|
| | | 施工回数 | 施工速度 |
| 無し | 20.0℃ | — | — |
| 有り | 60%RH | 1回 | 3m/分 |

表-5 使用材料および計画配合 (室内試験)

| Gmax (mm) | 目標スランブ (cm) | 目標空気量 (%) | W/C (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m³) | | | | | フレッシュ試験結果 | |
|--------------|----------------|--------------|------------|------------|------------|-----|-----|------|-------|-----------|------|
| | | | | | W | C | S | G | Ad | スランブ | 空気量 |
| 20 | 8±2.5 | 4.5±1.5 | 55.0 | 44.6 | 170 | 310 | 796 | 1017 | 3.875 | 9.0cm | 5.0% |

W: 地下水 (密度 1.00g/cm³), C: 普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³), S: 砕砂 (密度 2.62g/cm³), G: 砕石 (密度 2.70g/cm³), Ad: リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体

表-6 試験項目

| 試験時期 | 試験項目 | 試験方法 |
|--------------------|----------|--|
| 打込み完了から1時間毎に5時間後まで | ブリーディング量 | キッチンペーパー法 ⁴⁾ により、ブリーディング量を測定 (0.81m³を対象) |
| | 貫入抵抗値 | 山中式土壌硬度計 ⁵⁾ (平型) により、貫入抵抗値を測定 (3回の平均値) |
| 材齢 28 日 | 推定圧縮強度 | JSCE G504 に準拠し、測定した反発度から圧縮強度を推定 |
| | 透気係数 | トリト試験機 (ダブルチャンバー方式) を用いて測定 |
| | 気泡組織測定 | 採取したコア (φ150mm) のうち、上面から45mmおよび95mmの位置について、ASTM C457 (リアトラガス法) により測定 |
| | 細孔径分布測定 | 採取したコア (φ100mm) のうち、上面から25~45mmおよび75~95mmの位置より試料を採取し、水銀圧入法により測定 |

を表- 4 に示す条件で施工した。仕上げは、木ごて 1 回（打込み完了から約 1.5 時間後）、金ごて 2 回（打込み完了から約 3.5 時間後および 5 時間後）とした。その後は、7 日間湿潤養生を実施した。試験項目を表- 6 に示す。打込み完了から 1 時間毎に、ブリーディング量および貫入抵抗値を測定した。その後、材齢 28 日の時点で推定圧縮強度および透気係数を測定した後に、コア（φ150mm および φ100mm）を採取し、表- 6 に記載した位置で気泡組織測定および細孔径分布測定を実施した。

4.2 試験結果

(1) フレッシュ性状への影響

表面締固めバイブレータの有無が、ブリーディング量および貫入抵抗値の経時変化に及ぼす影響を図- 9 および図- 10 に示す。図- 9 より、打込み完了から 1 時間後のブリーディング量は、表面締固めバイブレータの有無によらず同等であった。その後、2 時間後以降のブリーディング量に若干の差異が認められた。ブリーディングが終了した時間は、表面締固めバイブレータを使用した場合で 3 時間後であったのに対して、使用しなかった場合は 5 時間後であった。また、表面締固めバイブレータを用いることで累積ブリーディング量は約 7% 増加した。このことから、表面締固めバイブレータを使用することで、余剰水をより短い時間で排出できることが分かった。

図- 10 に示すとおり、打込み完了から 2 時間後の貫入抵抗値は、表面締固めバイブレータを使用しなかった場合の 48.1kg/cm² と比較して、118.8kg/cm² と約 2.5 倍となった。同様に、3 時間後の場合は 660.2kg/cm² が 2735kg/cm² となり、約 4 倍の貫入抵抗値となった。これは、2.5 時間後の時点で木ごて仕上げをしているため一概には言えないものの、余剰水やエントラップトエアが排出され、コンクリートが密実になったためと考えられる。

また、同図より表面締固めバイブレータによって、仕上げ時間を短縮できる可能性が示唆される。

(2) 気泡組織への影響

気泡組織の測定結果を表- 7 に示す。スラブ上面からの位置によらず、表面締固めバイブレータを使用することで全空気量が 0.4~1.0% 程度低下した。これは、表面締固めバイブレータの振動効果によって、エントラップトエアが排出されたためと考えられる。一方で、気泡間隔係数は、全体として既往の文献⁷⁾に示される値と比較して若干高いものの、表面締固めバイブレータの使用で全気泡数が増加したことによって 70μm 程度低下した。これらのことから、今後の検討が必要ではあるが、表面締固めバイブレータの使用により、振動によって上昇しやすい粗大な気泡は外部に排出されたと考えられる。一方、より小さな径の気泡は、振動によって下層から上昇してきたものの、粗大な気泡と比較すると上昇しにくいこと

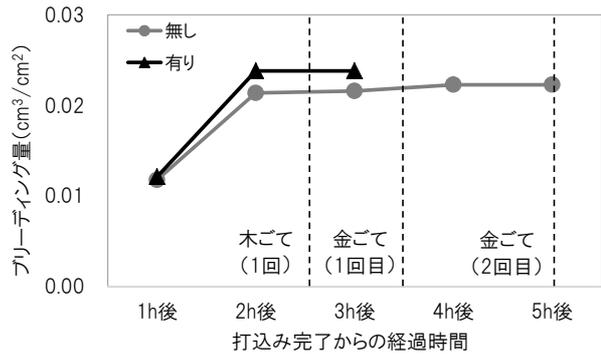


図- 9 室内試験におけるブリーディング量の経時変化

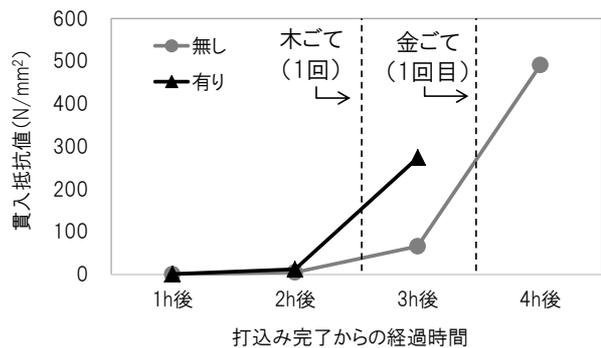


図- 10 室内試験における貫入抵抗値の経時変化

表- 7 気泡組織の測定結果

| Case | 上面から 45mm | 上面から 95mm |
|------|----------------|----------------|
| 無し | 全空気量 : 4.84% | 全空気量 : 5.18% |
| | 全気泡数 : 476 個 | 全気泡数 : 462 個 |
| | 気泡間隔係数 : 435μm | 気泡間隔係数 : 462μm |
| 有り | 全空気量 : 4.40% | 全空気量 : 4.19% |
| | 全気泡数 : 540 個 | 全気泡数 : 495 個 |
| | 気泡間隔係数 : 362μm | 気泡間隔係数 : 385μm |

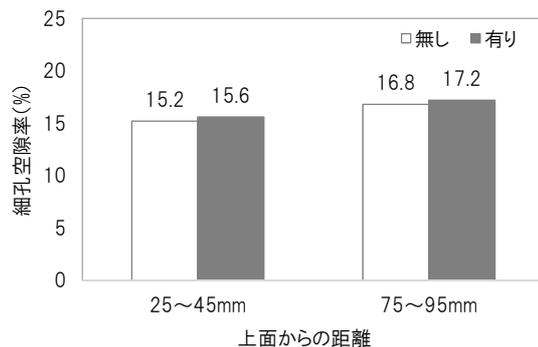


図- 11 細孔空隙率に及ぼす影響

から、外部に排出されるまでには至らず、内部に留まった結果、増加した可能性がある。このことが、透気係数の改善に影響を及ぼしている可能性が高いと考えられる。

(3) 細孔空隙率への影響

細孔空隙率の測定結果を図- 11 に示す。図より、いずれの部位においても、表面締固めバイブレータの有無に

よる差は少なかった。しかし、本試験では、表面締固めバイブレータの使用によって、少量ではあるものの余剰水が排出されており、ごく表面の水セメント比が低下している可能性が高いため、より表面に近い範囲では、細孔空隙率が低下していることも考えられる。

(4) 推定圧縮強度および透気係数への影響

表面締固めバイブレータを使用しなかった場合と使用した場合について、推定圧縮強度はそれぞれ 24.0N/mm² および 26.6N/mm² であり、表面締固めバイブレータを使用することで強度が 11%程度増加した。これは、外気温が同程度であった実構造物の夏期における結果と同じ傾向であった。透気係数はそれぞれ 0.0720×10⁻⁶m² および 0.0420×10⁻⁶m² であり、実構造物の夏期における結果と同じ傾向であった。既往の文献^{8),9)}では、透気係数が小さくなると、中性化や塩害に対する抵抗性は向上する傾向にあることが報告されている。よって、本研究でも、表面締固めバイブレータを使用することでこれらの耐久性は向上していると考えられる。

(5) 凍結融解抵抗性への影響

既往の研究¹⁰⁾によると、耐凍害性を確保するには、気泡間隔係数と 0.15mm 以下の空気量の両者に着目することが重要であると示されている。そこで、既往の研究¹⁰⁾に示される図中に、本研究における気泡組織の測定結果をプロットした(図-12)。図より、表面締固めバイブレータを使用しない場合は閾値付近に位置しているのに対し、表面締固めバイブレータを使用したケースは、耐久性指数 90%以上 (DF90 以上) が多くプロットされている領域に位置していることが分かる。以上より、表面締固めバイブレータを使用することで、凍結融解抵抗性を向上できる可能性が示唆される。

5. 結論

本研究の範囲において、以下の知見を得た。

- 1) 実構造物に表面締固めバイブレータを使用した場合、コンクリート表層の推定圧縮強度および透気係数が向上する。ただし、施工時の外気温および施工速度の影響を受ける。
- 2) 表面締固めバイブレータを使用することで、フレッシュコンクリート時にエントラップトエアや余剰水が排出されてコンクリートが密実になる。
- 3) エントラップトエアが排出される一方で、大径の気泡が減少して小径の気泡が増加する。その結果、空気量は低減するものの、気泡間隔係数は改善される。これにより凍結融解抵抗性が向上する可能性がある。
- 4) 細孔空隙率は変化しないものの、気泡組織が改善されることで、透気係数が小さくなる。よって、中性化や塩害に対する抵抗性は向上すると考えられる。

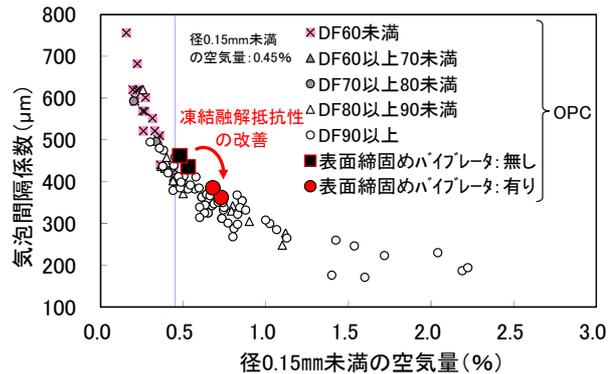


図-12 凍結融解抵抗性に及ぼす影響

参考文献

- 1) 國島正彦, 小沢一雅: 沈下ひび割れ防止によるコンクリート構造物の耐久性向上 (表面締固めバイブレータ使用の標準化の提案), 土木学会論文集 第421号/VI-13, pp.185-193, 1990.9.
- 2) 川口千大ほか: 振動や転圧による表面仕上げがコンクリート床版の品質におよぼす影響, 土木学会第69回年次学術講演会, pp.1123-1124, 2014.9.
- 3) 前川陽平ほか: 表面締固めバイブレータによるスラブ部材の品質向上効果, 土木学会第69回年次学術講演会, pp.1125-1126, 2014.9.
- 4) 皆口正一, 丸山久一, 稲葉美穂子, 坂田昇: 高流動コンクリートの材料分離測定方法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.87-92, 1996.
- 5) 山中金次郎, 松尾憲一: 土壌硬度に関する研究, 日本土壌肥科学, 第33巻, 第7号, pp.343-347, 1962.
- 6) 土木学会編: 2013年制定コンクリート標準示方書規準編 土木学会規準および関連規準, pp.335-338, 2013.11.
- 7) Backstrom,J, Burrows,R, Mielenz,R, and Wolkodoff,V: Origin, Evolution and Effects of the Air Void System in Concrete, Journal of the American Concrete Institute, 55, pp.261-272, 1958.
- 8) 田中章夫, 今本啓一, 唐沢智之, 山崎順二: 鉄筋コンクリート造建築物の表層透気性を評価する上での2,3の課題に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1775-1780, 2010.
- 9) R.Torrent, L.Fernandez Luco: Non-Destructive Evaluation of Penetrability and Thickness of the Concrete Cover, State-of-the-Art Report of RILEM TC 189-NEC, pp.45-51, 2007.5.
- 10) 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, 第23巻第1号, pp.35-47, 2012.1.