

バイオミメティクス技術を活用した「アートコンクリート」の開発と実用化

辻 埜 真人 黒田 泰弘 橋田 浩 西田 朗 菊地 俊文 片山 行雄 依田 侑也 齊藤 亮介
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Development and Practical Application of "Art Concrete" Using Biomimetics Technology

Masato Tsujino, Yasuhiro Kuroda, Hiroshi Hashida, Akira Nishida, Toshifumi Kikuchi,
Yukio Katayama, Yuya Yoda, and Ryosuke Saito

本報では、美しく・品質に優れたコンクリートを実現する「アートコンクリート」に関する技術の概要および実用化の状況を示す。「アートコンクリート」は、主に2つの技術で構成されている。一つは、コンクリートの収縮を低減する新たな材料開発や膨張材の最適な調合によって実現した乾燥収縮によるひび割れが生じないコンクリート「ゼロシュリンク」である。他方は、水を著しくはじくハスの葉の表面機構を模したバイオミメティクス（生物模倣）技術を利用することで優れたコンクリートの表層品質を実現する「アート型枠」である。

This paper presents an overview of the technology and practical application related to "Art Concrete" for realizing concrete with excellent beautiful and quality. "Art concrete" is mainly composed of two technologies. One is a concrete "zero shrink" that does not crack due to drying shrinkage achieved by the development of new materials to reduce shrinkage of concrete and by the optimum mix proportion of expansive additive. The other is an "art form" that achieves superior concrete surface quality by using biomimetics technology that mimics the surface features of the lotus leaves that significantly repels water.

1. はじめに

コンクリートは、全世界で水に次いで使用量が多いと言われており¹⁾、我が国の社会資本におけるストック量も約100億m³と膨大である。しかし、建設関係者以外がその存在を強く意識することは多くないと思われる。コンクリートは、災害時には力強い印象を与える一方で、公共工事の象徴としてみられることが少なくなく、必ずしも良い印象を与えているとは言えない。

そのコンクリートには、永遠とも言われる課題が少なくとも2つ存在している。

第一は、ひび割れを無くすこと。

第二は、美しい表層（打放し）を実現すること。

第一の課題が生じる原因は、コンクリートは、水とセメントによる水和物から構成されており、一般的な雰囲気中では、乾燥によって余剰水が逸散することで収縮するためである。さらに、コンクリートが使用される構造物では、他の部材に必ず拘束される（例えば、壁なら柱や梁などに拘束される）状況になるため、収縮するコンクリート部材は、写真-1に示すようなひび割れが発生することになる。有害なひび割れは、漏水の発生や美観を損なうだけでなく、コンクリート内部の鉄筋

を腐食させる原因ともなり、コンクリート構造物の短寿命化など様々な影響を与える。よって、ひび割れを生じさせないために、収縮が生じないコンクリートの実現が強く望まれている。

第二の課題は、複合材料である生コンクリートを型枠に打ち込むことで成形するコンクリート構造物の施工方法に起因している。コンクリートを丁寧に打ち込みかつ締め固めるために、パイプレータの開発などは進められてきたが、写真-1に示すようなコンクリート表面に生じる「気泡」や「色むら」についてはこれまでに改善する方法は少なく、美しい高品質な打放しコンクリート構造物を実現するためには、コンクリートの表層品質をいかに向上させるかが必須の技術課題となっている。

本報では、まず、第一の課題を解決するために、コンクリートの収縮をゼロにした技術「ゼロシュリンク」の開発状況を示す。ゼロシュリンクは、優れた寸法安定性を有する骨材、新たに実用化した収縮低減剤およびコンクリートを膨張させることが可能な膨張材を適切に組み合わせることで、コンクリートの収縮をゼロにした技術である。次に、第二の課題を解決するために、これまでに研究開発の対象となることが少なかったコンクリー



ひび割れ



表面気泡



色むら

写真-1 コンクリートに生じる課題

トの型枠に着目した。業界で初めてバイオミネテックス技術であるハスの葉の超撥水機構を型枠表面に付与した「アート型枠」について詳述する。最後に、「ゼロシュリンク」と「アート型枠」を組み合わせることで、二つの課題を克服した「アートコンクリート」を2016年度に適用した実構造物の一例を紹介する。

2. 究極のひび割れ抑制技術

「ゼロシュリンク」コンクリートの開発

2.1 一般的なコンクリートの収縮量

一定の乾燥状況下でのコンクリートの収縮量について、2008年度と2009年度に、全国生コンクリート工業組合連合会技術委員会によって取りまとめられた調査結果²⁾を図-1に示す。一般的な評価指標となる6ヶ月経過時の乾燥収縮率の平均値は 679μ ($\times 10^{-6}$)と示されている。換言すると、10mの長さのコンクリートでは、6.79mm縮むことを意味している。

(一社)日本建築学会では、一般的なコンクリート壁部材において、約3メートル間隔ごとにひび割れを誘発させる目地を設け、有害なひび割れとならないために6ヶ月経過時の乾燥収縮率の目標値を 800μ に設定している³⁾。全国の平均値は、建築学会の目標値を満足しているが、目地を設けられない構造スラブやコンクリートの自由な形状を成形できる特長を最大限に生かすためには超低収縮なコンクリートの実現が求められている。

2.2 超低収縮コンクリートの実現

コンクリートの乾燥による収縮を低減するために、コンクリートを構成する全ての材料を選び抜いた。骨材には、温湿度による寸法変化の程度が小さい石灰岩を使用することにした。さらに、最も収縮の大きなセメントペースト(水+セメント)部分の

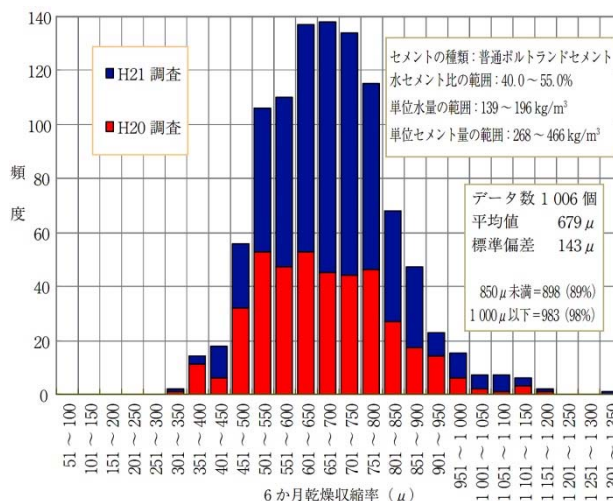


図-1 コンクリートの乾燥収縮試験の調査結果²⁾

収縮を低減するために、新しい収縮低減剤を共同開発した⁴⁾。既存の収縮低減剤は、ポリオキシアルキレングリコールのアルキルエーテルを基本構造とした非イオン界面活性剤を活用して、コンクリート内部の水の蒸発により生じる毛細管張力を低減する界面活性作用によって乾燥収縮を低減していたが、コンクリートの耐久性を低下させる問題があった。そこで、その欠点を克服するために、特殊ポリオキシアルキレングリコールを主成分とするコンクリート内部の水分を保水する作用により、乾燥収縮を低減する収縮低減剤の実用化に成功した。

石灰岩骨材および新しい収縮低減剤を使用して、実際の現場においても施工できる調合条件とした場合のコンクリートの乾燥収縮率の結果を図-2に示す。6ヶ月経過時の乾燥収縮率の平均値は 111μ であり、全国平均の 679μ のコンクリートに比べて1/6以下の超低収縮コンクリートを実現した。さらに、2016年度に他の技術を用いて実用化された既報⁵⁾の最高クラスのコンクリート(約 300μ)と比較しても、1/3程度の乾燥収縮率となっており、本技術の高い優位性が確認されている。

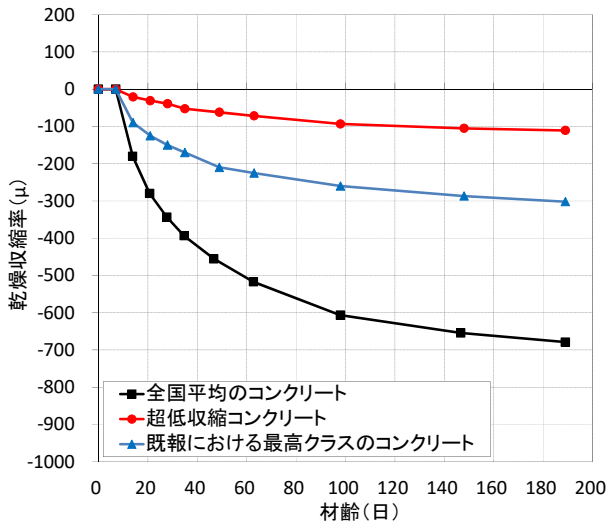


図-2 超低収縮コンクリートの乾燥収縮率

2.3 膨張材の活用によるゼロシュリンクの実現

前節で示したように、コンクリートの収縮は大幅に低減できるようになったが、収縮ゼロとは言い難い。ひび割れに対する安全性をさらに高めるために、材齢の初期にコンクリートを膨張させる膨張材を活用して、やむを得ず生じる収縮を相殺する収縮ゼロのコンクリートの実現を目指した。ただし、膨張材は、混和量によっては圧縮強度を低下させる可能性があり、圧縮強度を主な性能として求められるコンクリートにおいては、膨張量を十分にコントロールする必要がある。

膨張するコンクリートの変形量を測定する方法は、図-3に示すような測長器を用いたJIS A 6202 附属書 2 (参考) 「膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法」が規格化されているが、簡便な方法とは言えず、材料開発などの限られた評価の時に利用されるにとどまっている。そこで、図-4に示すような軽量の鋼製円筒型枠の中央部にひずみゲージを貼り付けた簡便な試験方法(以下、円筒型枠法)を開発した^{6),7)}。

円筒型枠法とJISの試験方法で測定した膨張ひずみの比較結果を図-5に示す。それぞれの試験によって得られた膨張ひずみの相関は高く、円筒型枠法の利便性の高さが明らかになった。なお、本試験方法は有用性が高いと認められ、(公社)日本コンクリート工学会の試験方法として規格化された⁸⁾。

簡便な円筒型枠法を積極的に活用することで、コンクリートの圧縮強度を大きく低下させることなく、膨張量を適切にコントロールすることが可能になった。その結果、やむを得ず生じていたコンクリートの収縮を図-6に示すように、ほぼゼロとみなせることが可能になった。これまでに実現できなかった

収縮ゼロのコンクリートを実用化することで、コンクリートの第一の課題であるひび割れ問題の解決に世界で初めて近づくことが可能になった。

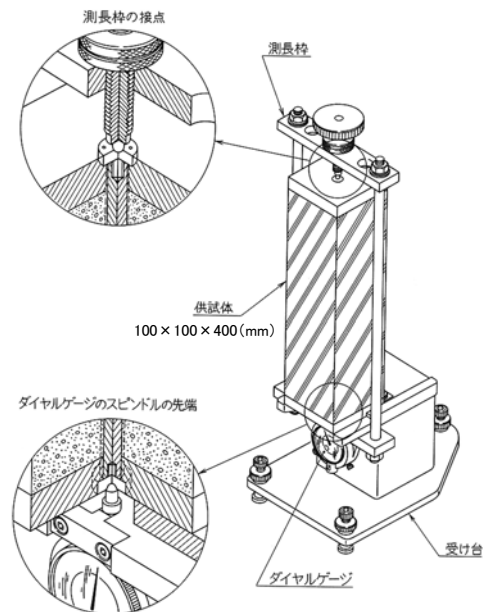


図-3 JISによる試験方法の概要

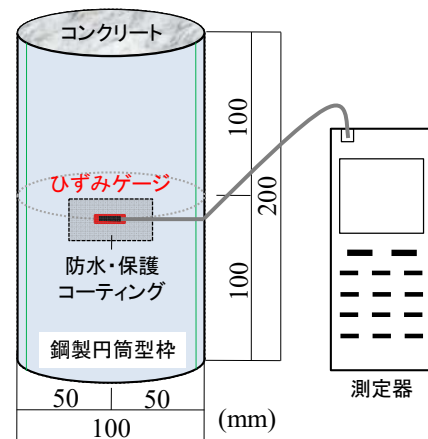


図-4 円筒型枠を用いた試験方法の概要

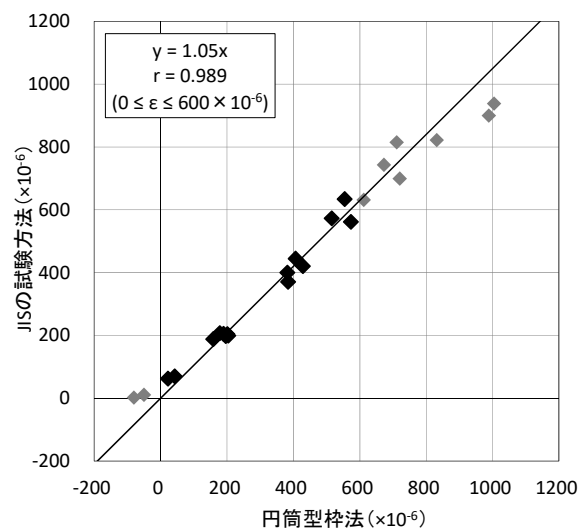


図-5 各試験方法のひずみ比較

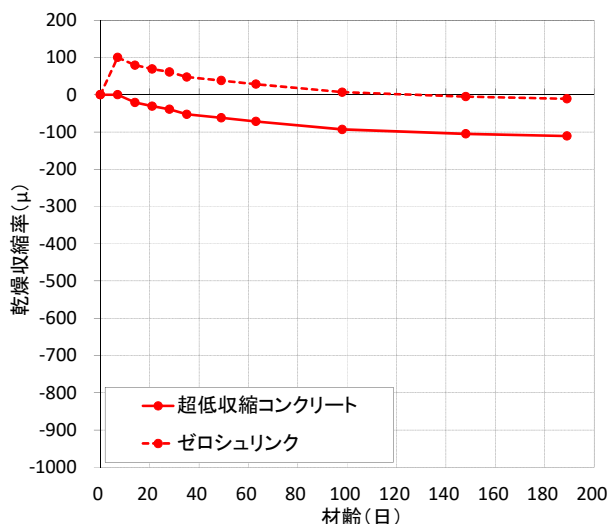


図-6 ゼロシュリンクの乾燥収縮率

3. 美しい表層を実現する技術

「アート型枠」の開発

3.1 超撥水機構を有するコンクリート型枠

「アート型枠」の実現

第二の課題であるコンクリートの美しい表層（打放し）を実現するために、着目されることが少なかったコンクリートの型枠に焦点を当てた。これまでのコンクリートの型枠は、現場での加工性や耐久性に

重点が置かれ、南洋材合板の表面にウレタンの塗装が施されているものが大半である。研究開発では、コンクリートと接する型枠の表層部分へ新しい特性を与えることにした。その特性とは、生物が厳しい環境のもと、進化の過程で獲得した特別な性質を模倣するバイオミメティクス技術の一つである、ハスの葉の超撥水機構である。

自動車のフロントガラスなどに使用されているフッ素樹脂材料などの接触角（個体表面における水が接する角度）は、一般的に 120°が限界とされている。しかしながら、自然界には、写真-2 に示すハスの葉のように、150°以上の接触角（超撥水性）を有しているものがあり、ロータス効果と呼ばれている。これは、写真-3 に示すような疎水性の微細な凹凸構造によって実現している。この表面構造を模倣した技術が包装業界において実用化され⁹⁾、ヨーグルトを蓋に付着させない製品（トータルロータス）で活用されている。写真-4 は、その蓋の表面の電子顕微鏡写真である。ポリオレフィン系の材料によって、ハスの葉のような微細な凹凸を人工的に構築し、さらにその表面にシリカ系の疎水性微粒子を配置することで、写真-5 のような 170°以上の超撥水性を実現している。この超撥水加工技術をコンクリートの型枠表面へ応用した。写真-6 は、従来の



写真-2 ハスの葉の撥水状況

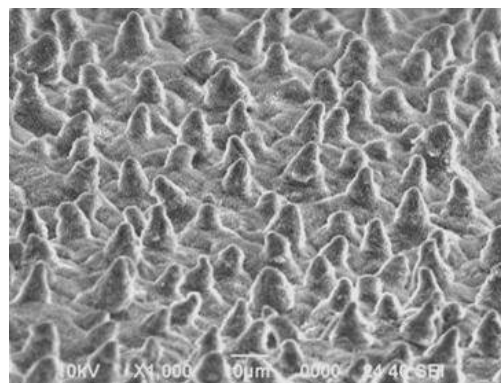


写真-3 ハスの葉の微細な凹凸構造

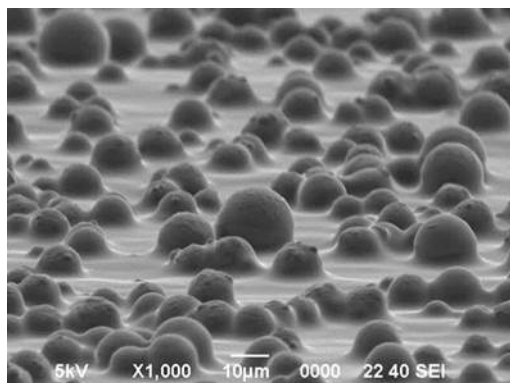


写真-4 超撥水層の電子顕微鏡写真

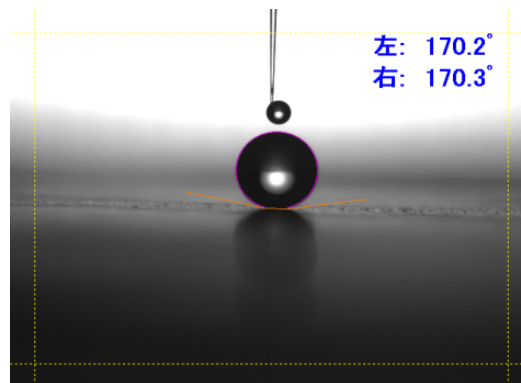


写真-5 超撥水の様子



従来の型枠（ウレタン塗装）



超撥水型枠

写真-6 型枠上のセメントスラリーの状況

コンクリート用の型枠と超撥水型枠にセメントペーストを滴下した状況である。超撥水加工により、セメントペーストが浮き上がっている様子がわかる。

超撥水型枠は、生物の機能を人工的に造り出して活用するバイオミメティクス技術に着目している点（自然の模倣⇌人工）や一品生産であるコンクリート構造物の芸術的価値を実現する意味を込めて、「アート型枠」と名付けた。

3.2 表面気泡の低減効果

本節では、超撥水型枠（以下、アート型枠）がコンクリートの表面の気泡に与える影響を明らかにする。生コンクリートを型枠に打ち込む際には、密実になるように締め固められるが、従来の型枠を使用した場合には、写真-7（左）に示すように型枠を外した（脱型）後のコンクリートの表面には必ずといってよいほどに気泡が残る。

様々な接触角を有する型枠を作製し、コンクリートの表面気泡率（気泡面積／対象面積×100）を調査した結果を図-7に示す。また、接触角が140°と150°を超える（アート型枠の）場合のコンクリート

の仕上りを写真-7（中）（右）に示す。従来の型枠を基準とすると、表面気泡率は接触角が約130°で20%程度、約140°で65%程度、そして150°以上では90%以上低減されることを確認した。さらに、コンクリート表面を詳細に観察した結果、アート型枠では1mm以下の微小な表面気泡も抑制されており、コンクリートの品質向上に資することがわかった。

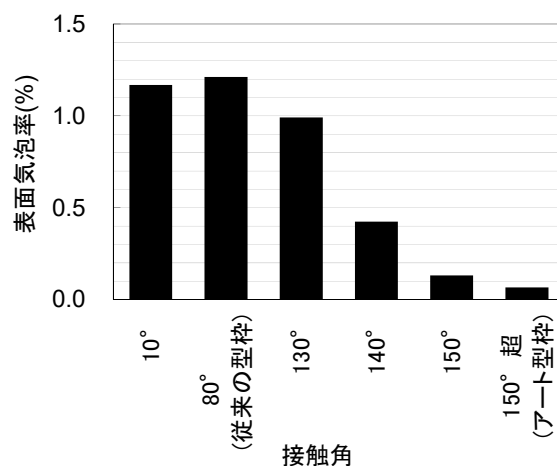
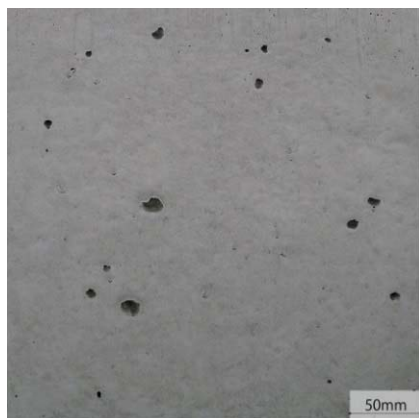
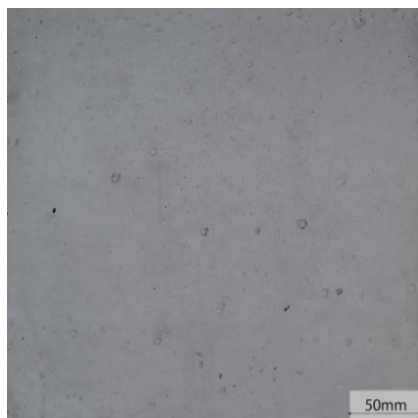


図-7 型枠の接触角とコンクリートの表面気泡率



接触角 80°の型枠（従来の型枠）



接触角 140°の型枠



接触角 150°超の型枠（アート型枠）

写真-7 脱型後のコンクリートの仕上り

3.3 型枠への超撥水加工による表面気泡の抑制メカニズム

超撥水加工を施したアクリル板を使って、水やコンクリートとの界面の気泡の挙動に与える影響を視覚的に検証した。検証は、写真-8 に示すような、内寸 300mm×300mm×100mm の容器の側面の一つをアクリル板とした型枠を 2 つ準備し、片方のアクリル板の表面に超撥水処理の加工を行った。いずれの型枠にも、底面から連続的に気泡を発生する装置（60mm 間隔に $\phi 4\text{mm}$ 、 $\phi 6\text{mm}$ および $\phi 8\text{mm}$ の孔）を取り付け、水を型枠の 2/3 程度まで満たした。型枠を鉛直面に対して約 15°傾けて、コンプレッサーを用いて双方の空気圧が同じとなるように空気を送り込み、アクリル板と水の界面における超撥水性の有無による気泡の挙動の違いを観察した。次に、水の代わりにコンクリートを打ち込み、同様に気泡の挙動の違いを観察した。

水の場合とコンクリートの場合の脱泡状況の違いを写真-9 に示す。いずれも、上方からアクリル板と水またはコンクリートとの界面の部分を撮影したものである。アクリル板と水との界面に達した気泡は、未加工の場合は界面の上部で泡として多数確認されるのに対し、超撥水加工が施されている場合は泡として滞留することなく、空気中に放出されて

いる様子がわかる。つまり、超撥水機能を有する型枠界面に達した気泡は、その場にとどまることなく、スムーズに上方へ抜けていき、気泡も生じにくいことを意味していると考えられる。一方、コンクリートの場合でも、未加工のアクリル板ではコンクリートが付着し、上部で脱泡やその痕跡が認められるのに対し、超撥水加工したものでは、そうした状況は確認できなかった。なお、いずれのケースにおいても、気泡を発生する装置の孔の寸法による脱泡状況の違いは特に認められなかった。

3.4 表面の色むらの抑制効果

脱型後のコンクリートの色合いは、型枠の微細な表面形状に影響を受ける。従来から使用されている塗装合板型枠を使用した場合には、コンクリートの不均質性や高さ方向の側圧の違いなどによってテカりを伴う色むらが生じ、均質で白色の表面仕上りを想定している顧客や設計者とイメージが合致しないことがある。

写真-10 に、ウレタンで塗装された従来の型枠とアート型枠の SEM 画像を示す。表面粗さ計を用いて、算術平均粗さ Ra を測定したところ、従来の型枠は $0.24\mu\text{m}$ 、一方のアート型枠は $3.02\mu\text{m}$ で、視認では判らないが、約 10 倍の粗さを有していることがわかった。アート型枠がハスの葉のように、微

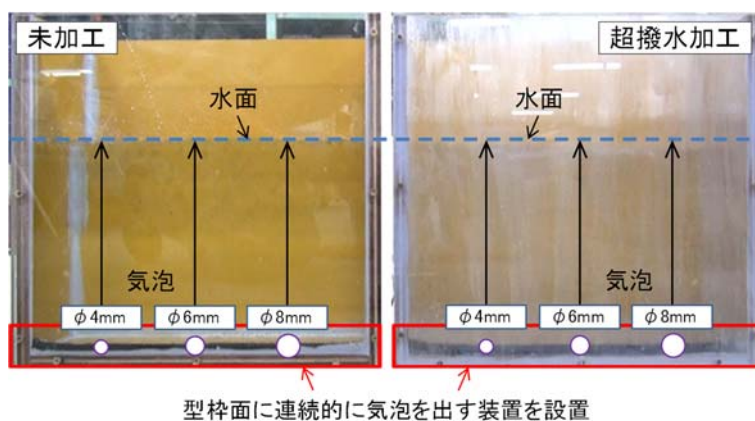
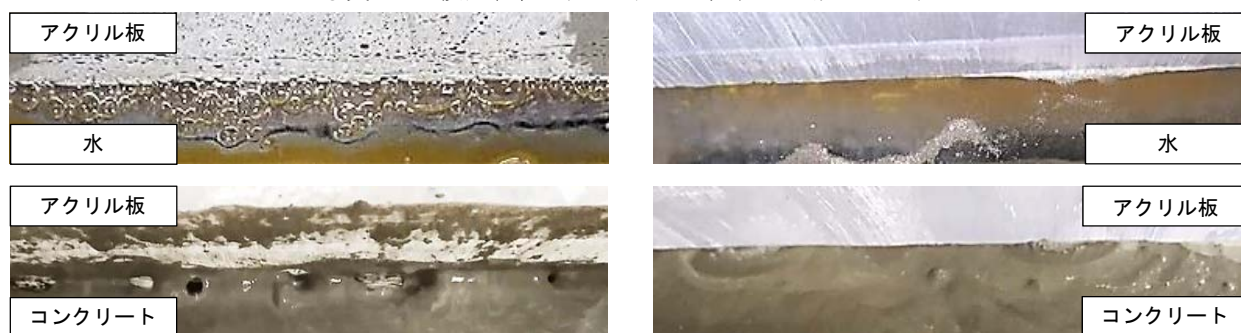


写真-8 検証装置（左：未加工、右：超撥水加工）



未加工の場合
超撥水加工の場合
写真-9 超撥水加工の有無による脱泡状況（上：水、下：コンクリート）

細で複雑な凹凸構造を有していることに起因していると考えられる。

次に、従来の型枠とアート型枠を使用して作製したコンクリート表面の光沢度と明度を調査した。それぞれの結果を図-8および図-9に示す。図-8より、従来の型枠に比べてアート型枠の方が、明らかに光沢度が低くなっていることがわかる。一方、図-9より、明度L*に関しては、アート型枠の平均値は高くなっており、標準偏差は約50%小さくなっている。つまり、アート型枠では、色むらが抑制され、明るくなっていると判断できる。

人は、物体にあたって反射した可視光を見ることで物体を認識し、その波長によって色を認識している。また、明るさは物体が反射する光の量で決まり、たくさん反射しているものほど明るく見え、少ないと暗く見える。物体の表面が鏡のような場合は、入射光は一定方向に反射されるため、光を反射する方向から見ると眩しく感じられるが、それ以外の方向では暗くなる。一方、細かな凹凸があると、入射光は様々な角度に乱反射するため、色むらが抑えられ、

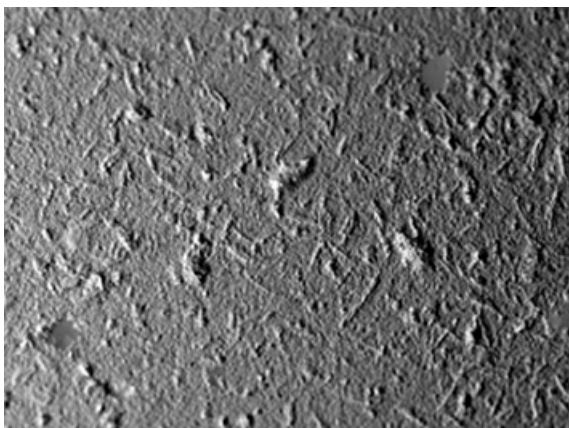
全体に明るく見える。アート型枠を使用した場合には、型枠の複雑な凹凸構造によって、コンクリート表面に可視光線の波長よりやや大きい微細な凹凸が形成され、テカリや色むらが少なく、均質な色の明るいコンクリート表面が実現できる。

3.5 アート型枠とコンクリートの離型性

(型枠の取外し易さおよびリサイクル性)

コンクリートの型枠には、硬化したコンクリートとの離型性が求められる。従来の型枠では、剥離剤とよばれる鉱物油などを型枠表面に塗布するが、十分な離型性が得られない場合やコンクリート表面の仕上りに影響を及ぼすことがある。一方、超撥水機構を有するアート型枠は、ハスの葉に水が付着しないように、コンクリートを付着させない性能を有しており、離型性が高く、脱型作業が容易になる。

写真-11に示すような打放しコンクリートの意匠性に特徴を与えるために使用される杉板を型枠として用いた場合の状況を紹介します。まずは、コンクリートの仕上りについては、前節までに示したように、アート型枠では表面の気泡が少なく、色むらに



従来の型枠



アート型枠

写真-10 型枠表面のSEM画像

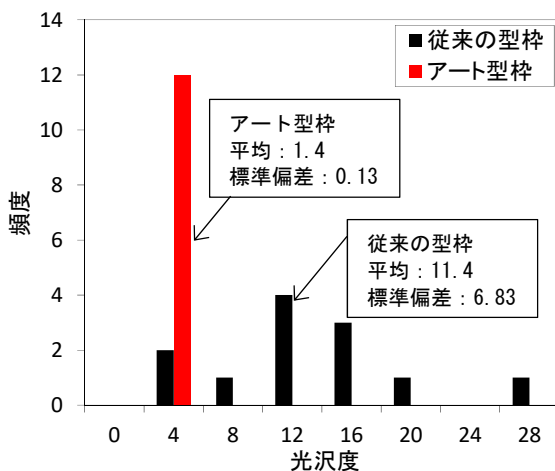


図-8 光沢度とヒストグラム

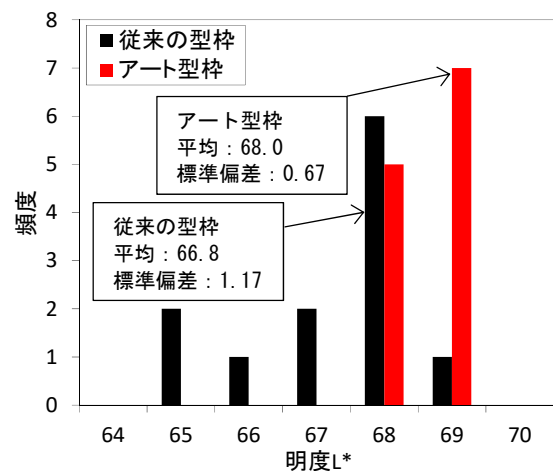


図-9 明度L*とヒストグラム



従来の方法

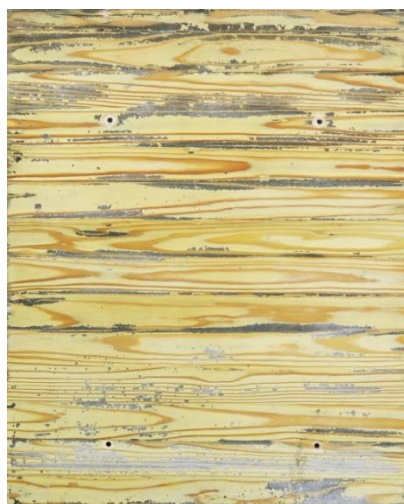


超撥水処理による方法（アート型枠）

写真-11 コンクリートの仕上り状況



使用前の型枠



従来の方法による
使用後の型枠



超撥水処理を行った
使用後の型枠（アート型枠）

写真-12 型枠の様子

についても抑制されていることがわかる。次に、使用した型枠の様子を写真-12に示す。剥離剤を使用する従来の方法では、使用後の型枠に打ち込んだコンクリートが多く付着している様子が見られる。つまり脱型は容易ではなく、コンクリートの表層品質にも影響を及ぼしていることがわかる。さらに、コンクリートが付着していることから型枠の再利用性にも影響を及ぼしている。一方、超撥水処理を行ったアート型枠の場合には、使用後もコンクリートの付着は少なく、再利用の可能性が期待できる。

コンクリート用の型枠には、天然資源の木材が主に使用されているが、地球環境問題の観点から、使用量の抑制が求められている。離型性の高いアート型枠は、型枠を傷める可能性が小さいため、再使用の回数を増加させ、リサイクル性が高く、木材の省資源化など地球環境問題に貢献できると考えている。

4. アートコンクリートの実構造物への適用

前章までに説明した「ゼロシュリンク」と「アート型枠」を組み合わせたコンクリートについては、美観と品質に優れたコンクリートとして「アートコンクリート」と名付けた。2016年度にアートコンクリートを適用した状況の一例を写真-13に示す。

ゼロシュリンクを使用することで、ひび割れを誘発する目地を設けずに、20mを超える長大な壁を構築することができた。一方、アート型枠を使用することで、表面気泡や色むらの少ない美観に優れたコンクリート構造物の実現が可能であった。

一般的には6ヶ月程度からコンクリートのひび割れが目立つようになるが、適用した構造物では1年4か月以上が経過した時点で、ひび割れは確認されておらず、美観のみならず、今後の維持管理の面に

においても有益になると考えられる。また、実際の施工担当者からは、これまでの施工方法では実現できなかった出来映えであり、最終仕上げの工程（補修等）が50%以上減ることになり、コンクリート工事におけるコストの低減も実現できたとの回答を得ており、本技術の有益性が確かめられた。



写真-13 アートコンクリートの実構造物への適用状況

5. まとめ

本報では、美しく・品質に優れたコンクリートを実現する「アートコンクリート」に関する技術の概要および実用化の状況を示した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 優れた寸法安定性を有する石灰岩骨材、新たに実用化した収縮低減剤および膨張材を適切に組み合わせることで、乾燥収縮によるコンクリートのひび割れが生じないコンクリート「ゼロシュリンク」を実現した。
- (2) 水を著しくはじくハスの葉の表面機構を模したバイオミメティクス技術を利用した「アート型枠」を使用することで、コンクリートの表面気泡や色むらを抑制し、優れた表層品質が実現できる。さらに、型枠のリサイクル性が優れることで地球環境問題に貢献できることを示した。
- (3) 「ゼロシュリンク」と「アート型枠」を組み合わせた「アートコンクリート」は、1年4ヶ月が経過した段階において、ひび割れは認められず、美しく・品質に優れた状態を実現している。

謝辞

アート型枠については、東洋アルミニウム(株)の西川浩之氏、麻植啓司氏、東清久氏と共同で開発を進めました。建設業界と包装業界の文化の違いから、開発の方向性に戸惑いが生じながらも、実構造物への適用まで実現できたことは、互いに大きな成果であったと考えております。心から感謝申し上げます。

<参考文献>

- 1) Jean-Louis Cohen and Gerard Martin Moeller : Liquid stone - New Architecture in Concrete, Princeton Architectural Press, 2006
- 2) 鈴木一雄, 辻本一志, 金井武明, 副田康英 : 生コンクリートの乾燥収縮に関する全国調査, コンクリート工学, Vol.48, No.7, pp.9-14, 2010.7
- 3) 日本建築学会 : 建築工事標準仕様書・同解説 (JASS 5), 2015
- 4) 正長眞理, 閑田徹志, 黒岩秀介, 西田朗, 名和豊春 : 保水性を有する新収縮低減剤を混和したコンクリートの実用化 (その1~その5), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.453-462, 2011.8
- 5) 佐藤敏之, 大木克清, 井上和政, 小川亜希子 : 無収縮タイプコンクリートを適用した化粧打放し建物の設計・施工, コンクリート工学, pp.167-172, 2017.2
- 6) 辻埜真人, 橋田浩, 湯浅竜貴, 高橋圭一 : 膨張コンクリートの簡易拘束膨張試験方法, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.437~442, 2011
- 7) 辻埜真人, 橋田浩, 湯浅竜貴, 菊地俊文 : 軽量型枠を用いた膨張コンクリートの拘束膨張試験による品質管理, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.520~525, 2012
- 8) 日本コンクリート工学会 : 円筒型枠を用いた膨張コンクリートの拘束膨張試験方法 : JCI-S-009-2012, JCI 規準, 2012 http://www.jci-net.or.jp/jci/study/jci_standard/JCI-S-009-2012_v2.pdf
- 9) 西川浩之 : “機能性包材 撥水性包装材料 TOYAL LOTUS について”, 包装技術, 第49巻 6号, pp.458-461, 2011