

産経新聞社賞

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

清水建設株式会社 技術研究所  
建設基盤技術センター

辻埜 真人 黒田 泰弘 片山 行雄  
菊地 俊文 依田 侑也 齊藤 亮介

# 1. 緒言

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 m<sup>3</sup>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、永遠の課題が少なくとも2つ存在している。

第一は、ひび割れてしまうこと。

第二は、美しい表層を実現できないこと。

第一の課題が生じる原因は、コンクリートは、水やセメントなどの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た（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低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、複合材料である柔らかいコンクリートを型枠に流し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込みかつ締固めるために、バイブ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がほとんどなく、真に良質な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。

本論文では、まず、一つ目の永遠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、既往の技術では実現できなかったコンクリートの収縮を低減する収縮低減剤と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コントロールすることで、コンクリートの収縮をゼロにした初めての技術である。次に、二つ目の永遠の課題を解決するために、これまでに研究開発されることが少なかったコンクリートの型枠に着目した。業界で初めてバイオミメティクス技術であるハス



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

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、二つの永遠の課題を克服した「アートコンクリート」を2016年度に初適用した実構造物の一例を紹介する。

## 2. 究極のコンクリート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 $679\mu$  ( $\times 10^{-6}$ )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。

一般社団法人日本建築学会において、一般的なコンクリート構造物では、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 $800\mu$ 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、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、目地を設ける必要のない超低収縮コンクリートの実現が求められている。

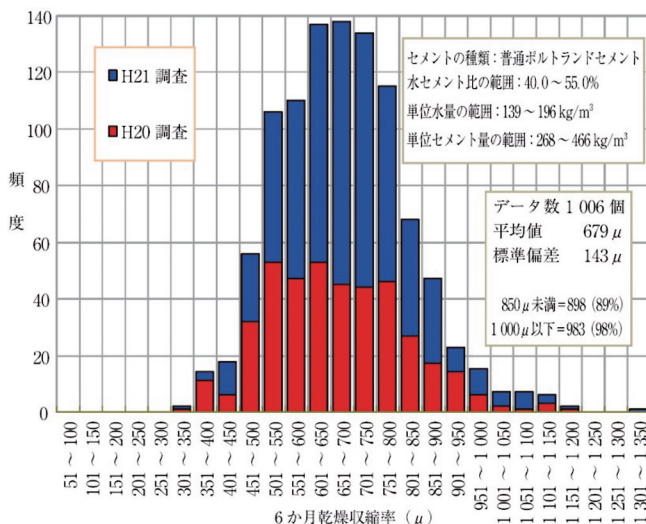


図1 コンクリートの乾燥収縮試験の調査結果[2]

### 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)部分の収縮を低減するために、新しい収縮低減剤を開発した[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原理によって、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、その欠点を克服した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開発に成功した。

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 $111\mu$ であり、全国平均の $679\mu$ 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適用された既報[5]の最高クラスのコンクリート(355 $\mu$ )と比較しても、1/3以下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。

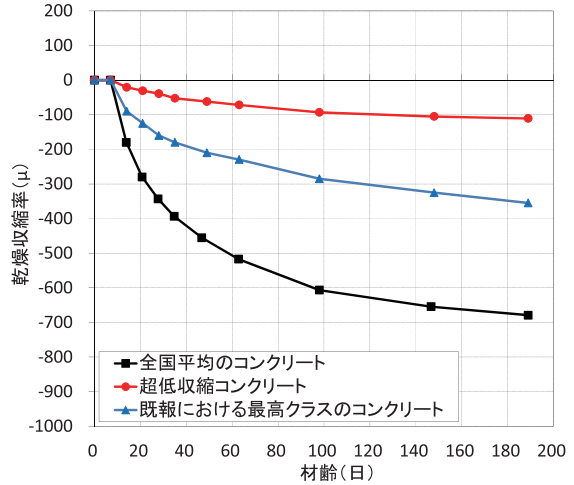


図2 超低収縮コンクリートの乾燥収縮率

### 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小さくなってはいるが、完全に低減することは出来ていない。そこで、材齢の初期にコンクリートを膨張させる膨張材をさらに活用して、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、コンクリートの密度を増加させることになり(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

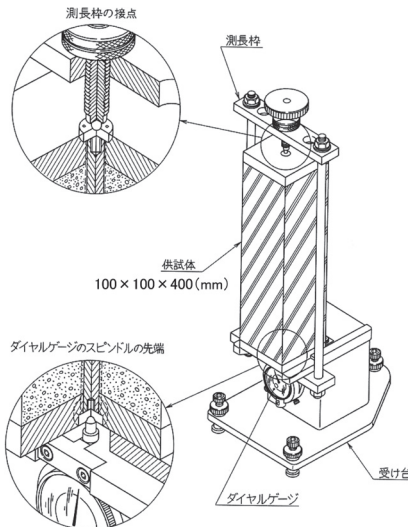


図3 JIS による試験方法の概要

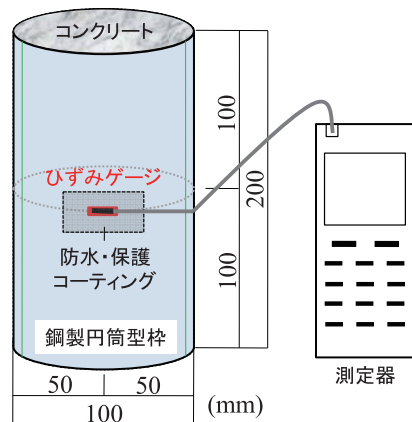


図4 円筒型枠を用いた試験方法の概要

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。

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、利便性の高さが明らかになった。なお、円筒型枠法は有用性が高いと認められ、公益社団法人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[6]。また、研究開発の論文[7]、[8]については、コンクリート工学会賞奨励賞を受賞している。

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、ほぼゼロにす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。

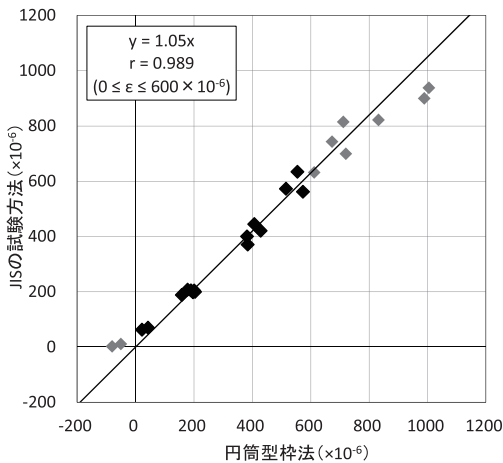


図5 各試験方法のひずみ比較

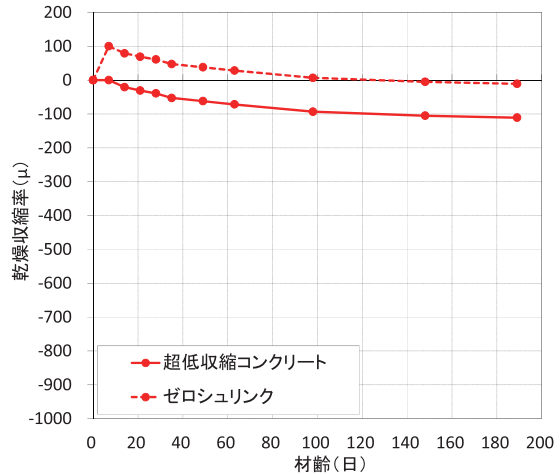


図6 ゼロシュリンクの乾燥収縮率

### 3. 美しい表層のコンクリートを実現する技術「アート型枠」の開発

#### 3.1 世界初となる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、南洋木材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。コンクリートの型枠表面へ、この超撥水加工技術を応用した。写真6は、従来の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。



写真2 ハスの葉の撥水状況

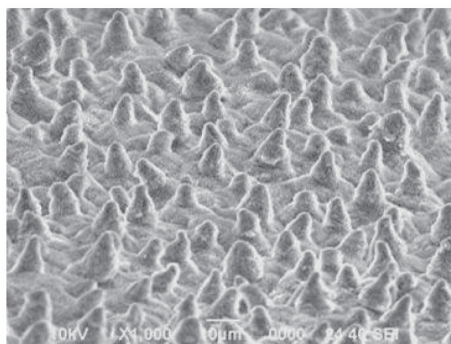


写真3 ハスの葉の微細な凹凸構造

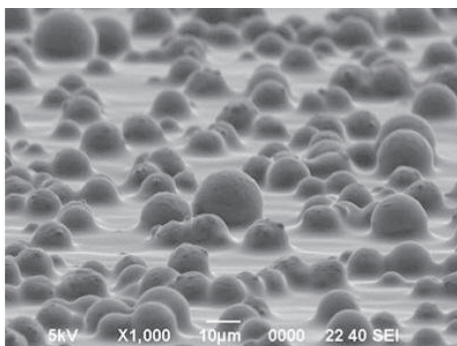


写真4 超撥水層の電子顕微鏡写真

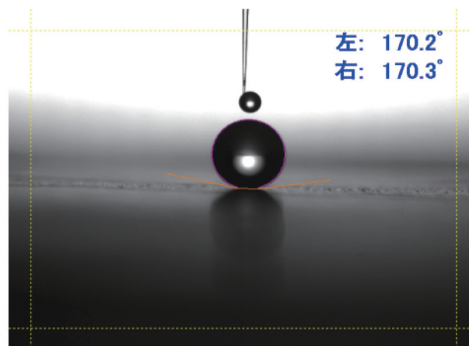


写真5 超撥水の様子



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

本技術の超撥水型枠は、バイオミメティクスに着目している点(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。なお、アート型枠については、「第46回日本産業技術大賞」の審査委員会特別賞を受賞した。

### 3.2 コンクリート表面の気泡の低減効果

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。やわらかいコンクリートを型枠に流し込む際には、密実に打ち込まれるように締固められるが、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傾向にある。

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°を超える場合のコンクリートの仕上りを写真7に示す。従来の型枠の接触角約80°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細かく分析した結果、150°以上では、ミクロ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。

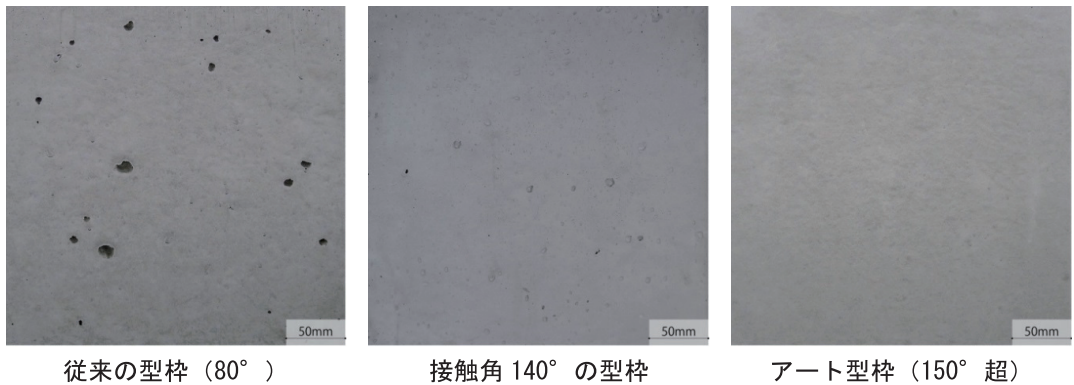


写真7 脱型後のコンクリートの仕上り

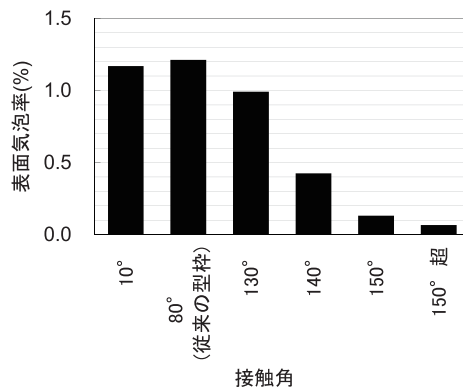


図7 型枠の接触角とコンクリートの表面気泡率



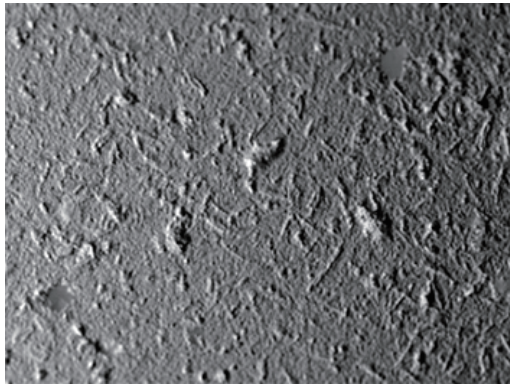


いずれのケースにおいても、気泡を発生する装置の孔の寸法による脱泡状況の違いは特に認められなかった。

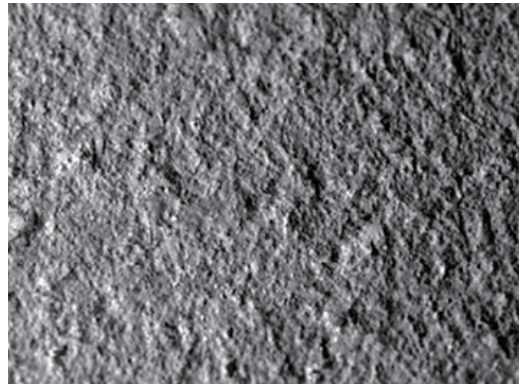
### 3.4 コンクリート表面の色むらの抑制効果

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型枠を使用した場合には、やわらかい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、均一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。

アート型枠は、ハスの葉のように、微細で複雑な凹凸構造を有している。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、従来の型枠で $0.24\mu\text{m}$ 、一方のアート型枠では $3.02\mu\text{m}$ 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。



従来の型枠



アート型枠

写真10 型枠表面のSEM画像

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、超撥水加工を行った場合の方が、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、平均値が大きくなっているにも関わらず、標準偏差が約50%小さくなっている。つまり、色むらが抑制され、明るくなっているといえる。

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、様々な角度に乱反射するため、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、テカりや色むらが少なく、均質な色の明るいコンクリート表面が実現できる。

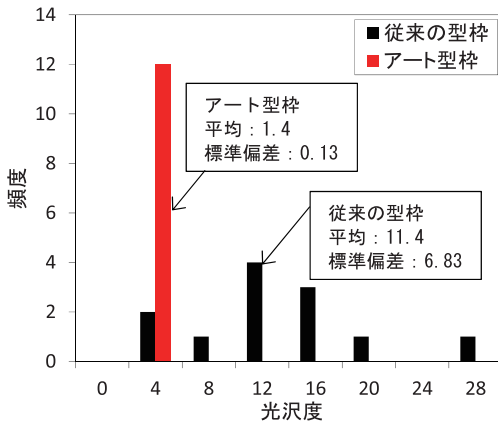


図8 光沢度とヒストグラム

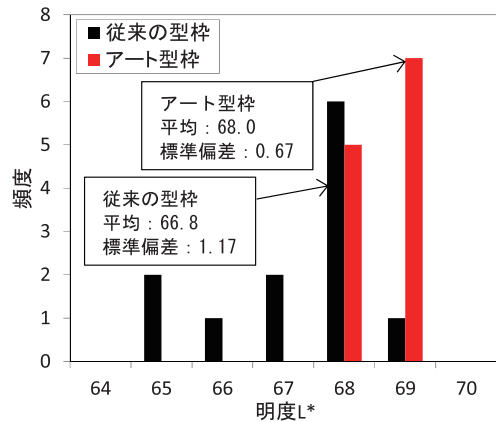


図9 明度L\*とヒストグラム

### 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、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、離型性が極めて高く、脱型作業が楽になる。

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も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方法では、使用後の型枠に打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、



従来方法

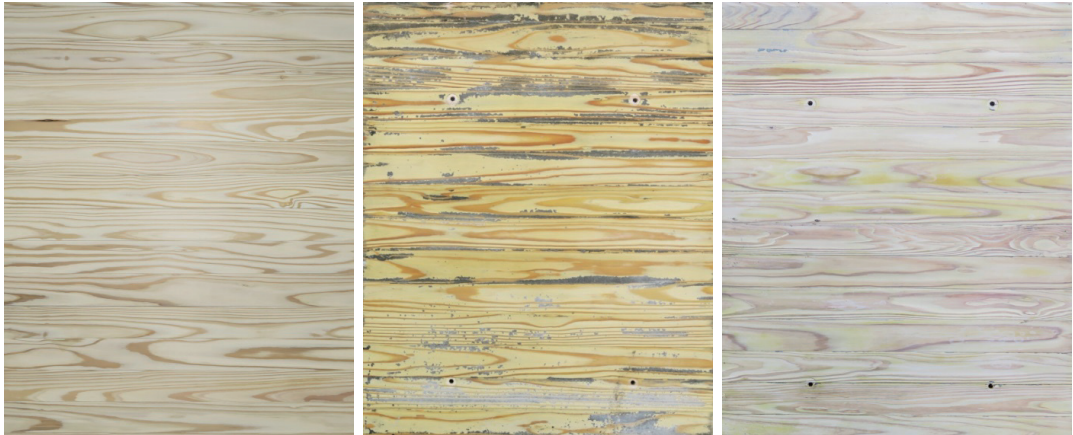


超撥水処理による方法（アート型枠）

写真11 コンクリートの仕上り状況

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はほとんど付着しておらず、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に貢献できると考えている。



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

#### 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の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ひび割れは一つも確認されておらず、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. 結 言

アートコンクリートに活用したバイオミメティクス技術とは、いつもの食卓にあるヨーグルトとの出会いから始まった。ヨーグルトの蓋にヨーグルトが付着しない超撥水現象が、研究開発者の魂を揺さぶったのである。ハスの葉の微細な凹凸構造を、型枠表面に応用・展開することにより、巨大なコンクリート構造物の美観性や耐久性を向上させられるところまで昇華するには、かなりの日数がかかったが、尽きない興味と永遠の課題を解決したい研究開発者の夢によって、成しえた技術と考えている。

クラシックな研究テーマであるコンクリートのひび割れ問題を解決する「ゼロシュリンク」と新しいバイオミメティクス技術を活用した「アート型枠」の融合は、社会に貢献するコンクリート構造物の構築に役立つだけでなく、異業種連携を含めた今後の研究開発のあり方を示しているように感じている。

一方で、教育分野においても、アートコンクリートは好影響を与えることを期待している。本技術で着目した植物は、人間にとって最も身近な生物であるが、その進化の過程で洗練された機能は誰もが知ることのできる優秀な教材である。また、「STEM」(Science, Technology, Engineering and Mathematics) と呼ばれる教育や学習方法が提案 [10] されている。近年では、「Art」を加えて「STEAM」と表現されることもある。科学や工学の検討に加えて、「美しさ」を生み出すアートコンクリートは、子どもたちから職人にいたるまで、「もの」や「ものづ



くり」への啓発や愛着を生み出すことにも貢献できると考えている。

今後は、永続的にコンクリート構造物を使用できるような耐久性に資する美観の維持や好ましいエイジングにつながる研究開発を進めていきたいと考えている。

## 6. 謝 辞

アート型枠については、東洋アルミニウム株式会社の西川浩之氏、麻植啓司氏、東清久氏と共同で開発を進めた。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。

## 7. 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] 建築工事標準仕様書・同解説(JASS 5)：日本建築学会、2015
- [4] 正長真理、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] 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/j/jci/study/jci\\_standard/JCI-S-009-2012\\_v2.pdf](http://www.jci-net.or.jp/j/jci/study/jci_standard/JCI-S-009-2012_v2.pdf)
- [7] 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
- [8] 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
- [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、458-461（2011）
- [10] Heather B. Gonzalez, Jeffrey J. Kuenzi : Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) Education : A Primer, August 1, 2012

