

第1回 最近のコンクリート技術と適用事例

講師：田中 博一*

1. はじめに

1999年1月に掲載された「PCの新しい材料入門講座 第1回最近のコンクリート材料の発展」のなかで、「材料としてのコンクリートに要求される主要な性能は、強度、流動性（＝施工性）、耐久性の三大性能だといえます。コンクリートに関する技術開発の歴史は、これらの三大要求性能の高度化への挑戦の歴史ということもできます。」¹⁾と記述されています。それから、約15年が経過しましたが、コンクリートの技術開発の方向性としては、本質は変わっていないと思います。

本稿では、コンクリートの強度、流動性、耐久性の三大性能の高度化に向けた技術開発という視点で、この約15年間で実用化されたコンクリート技術について解説します。

2. コンクリートに関する技術開発の動向

2.1 超高強度化

最近、土木・建築両分野で、設計基準強度が100 N/mm²を超える超高強度コンクリートの適用が拡大してきています。土木分野では、超高強度コンクリートとPC構造を組み合わせることで可能となる部材の軽量化、長スパン化などを活かし、橋梁上部工や栈橋の床版などに適用されています。建築分野では、建物の超高層化に伴い、軸力の負担が過大となる低層部の柱などへ適用されています。図-1によると、設計基準強度の最大値は、2000年頃では100 N/mm²でしたが、2009年には200 N/mm²となり、2013年には300 N/mm²に達しました。一方、1999年に発表されたアンケート調査結果³⁾によると、2020年頃に実用化されているコンクリートの設計基準強度の最大値の予想は60～90 N/mm²が約半分を占め、150 N/mm²以上の予想はわずか7%でした。アンケート調査から約15年後の現在の設計基準強度の最大値は300 N/mm²に達し、予想をはるかに上回っています。超高強度コンクリートは水セメント比が非常に小さくなるため、セメントおよび混和剤の技術的な発展が大きく寄与しています。超高強度コンクリートは、普通強度コンクリートと比較して、火災時の爆裂の危険性、ぜい性的な破壊性状などの課題があり、これらを克服するための技術開発も同時に進められてきました。

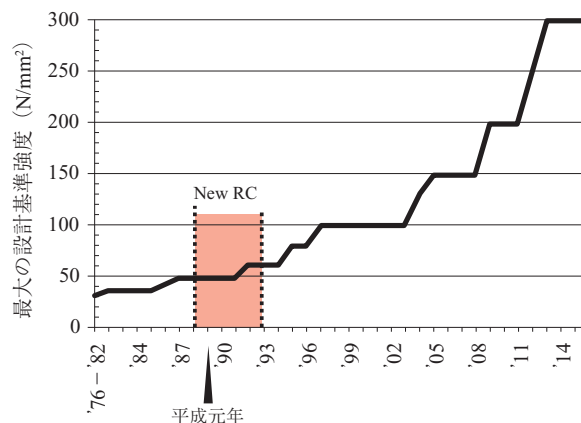


図-1 最大の設計基準強度の推移²⁾

2.2 高流動化

高流動コンクリートは、振動締固めが不要で高品質なコンクリート構造物を構築できる技術として、1988年に世界に先駆けて日本で開発されたコンクリートです。その後、1990年代には高流動コンクリートに関する技術開発が盛んに進められました。1998年には土木学会から「高流動コンクリート施工指針⁴⁾」が発刊され、土木構造物において、高流動コンクリートが広く使用されるようになりました。さらに、2012年には指針が改訂され、土木学会から「高流動コンクリートの配合設計・施工指針⁵⁾」として発刊されました。高流動コンクリートの施工現場における累積打設量は、2009年度末現在で約290万m³であり、一方、工場製品の年間使用量は2000年頃から40万m³程度で推移し、図-2に示すように、国内における全コンクリートに対する高流動コンクリートの割合は1.5%程度となっています。

2.3 超低収縮化

日本建築学会では、2006年に発行された「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説⁶⁾」において、コンクリートの乾燥収縮ひび割れに対し、表-1のような仕様が定められました。さらに、2009年の「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリ

* Hirokazu TANAKA：清水建設(株) 技術研究所

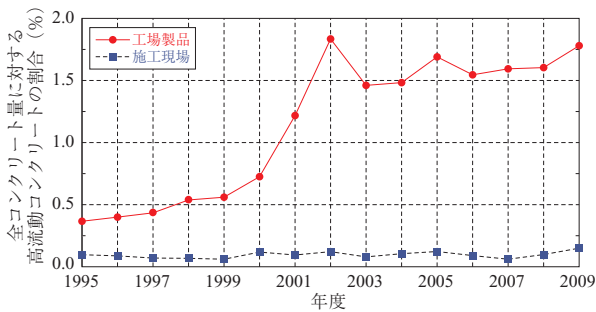


図-2 全コンクリートに対する高流動コンクリートの割合の推移⁵⁾

表-1 コンクリートの乾燥収縮ひずみの級⁶⁾

コンクリートの級	乾燥収縮ひずみ
標準	650 ~ 800 × 10 ⁻⁶
高級	500 ~ 650 × 10 ⁻⁶
特級	500 × 10 ⁻⁶ 以下

ート工事」⁷⁾の改定では、計画供用期間の級が長期および超長期のコンクリートについては、主として耐久性を確保するために収縮ひび割れを低減する必要があり、特記のない場合のコンクリートの乾燥収縮ひずみを 800 × 10⁻⁶ 以下とすることが規定されました。一方、土木分野においても、2003年に垂井高架橋の上部工に多数のひび割れや桁の垂れ下がりが確認され、それらの変状の原因の一つとして、使用されていた粗骨材にコンクリートの収縮を大きくする特性があったためと推定されました⁸⁾。これを機に、土木分野においても乾燥収縮に対する関心が高くなりました。

以上のような社会的ニーズからコンクリートの収縮を低減するために、石灰岩骨材、収縮低減剤、膨張材などを用いた低収縮コンクリートに関する技術開発が進められ、2012年には乾燥収縮が実質ゼロとなる超低収縮コンクリートが開発され、実用化されています。

2.4 高耐久化

塩化物イオン、二酸化炭素、水などの劣化因子の多くは、コンクリート表面から内部に侵入します。したがって、コンクリートの表層部の物質透過抵抗性を向上させることで、鉄筋コンクリート構造物の耐久性を向上させることが可能となります。コンクリートの表層品質については、2005年に発足した土木学会の「構造物表面のコンクリート品質と耐久性検証システム研究小委員会」⁹⁾で調査研究が進められ、コンクリートの耐久性に対して表層コンクリートの品質の重要性が示されました。表層コンクリートの品質を向上させるために、2010年ごろから新設コンクリート構造物の予防保全対策として、表面含浸工法が適用されはじめています。表面含浸材は、1970年代から主に建築用の防水材として適用され始め、1990年代後半からは、土木分野の既設コンクリート構造物の耐久性を向上させる材料として利用されています。2000年頃には、主成分濃度が80%を超える高濃度シラン系表面含浸材が市販化され、2005年に土木学会の「表面保護工法設計施工指針(案)」¹⁰⁾

が発刊されると、新設コンクリート構造物の予防保全対策としての適用が飛躍的に拡大されました。さらに、「表面保護工法設計施工指針(案)」をベースとしながら、けい酸塩系表面含浸材に特化した「けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案)」¹¹⁾が土木学会から2012年に発刊されました。

3. 最近のコンクリート技術

3.1 超高強度繊維補強コンクリート(UFC)

(1) 概要

超高強度繊維補強コンクリート(UFC: Ultra high strength Fiber reinforced Concrete)は、圧縮強度が200 N/mm²、ひび割れ発生強度が10 N/mm²程度までに達する超高強度と高耐久性と併せもつコンクリートです。セメント、細骨材、シリカフェームなどの混和材、高性能減水剤からなるモルタルに鋼繊維を体積比で2%程度混入したものです。1998年にフランスから技術導入されたのち、国内でも技術開発が進められました。現在、日本では、最初にフランスから技術導入された反応性粉体コンクリート(RPC: Reactive Powder Concrete)由来のもの、国内で開発されたエトリンサイト生成系のもの(Aft系)、および常温養生可能なエーライト(C₃S)の多いセメントを使用した3種類のUFCが利用されています。2004年には、土木学会から「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」¹²⁾が発刊されました。本指針に基づくUFCを用いた構造物の設計の特徴は、高い圧縮強度を活かす、引張特性を活かす、使用時にひび割れを許容しない、異形鉄筋を使用しない、の4点です。高い圧縮強度を活かし、より高いプレストレスを導入することで部材断面を縮小し、軽量化が可能となります。ひび割れ発生後も引張力を分担できるため、部材の終局耐力の増加に寄与できます。使用時にひび割れを許容しないことで構造物の高い耐久性を確保できます。なお、UFCは粉体量が多いため自己収縮が大きく、通常の異形鉄筋を用いて補強すると、鉄筋により自己収縮が拘束され、場合によってはひび割れが発生する可能性があります。そのため、異形鉄筋による補強をしないことを原則としています。

(2) 適用事例

UFCが日本で初めて適用された構造物は、2002年に建設された図-3に示す歩道橋¹³⁾です。その後、水路橋、



図-3 UFCが日本で初めて適用された歩道橋¹³⁾(酒田みらい橋)

道路橋、鉄道橋へと適用が拡大し、適用実績はすでに20件以上となっています。UFCの世界でも最大規模の適用事例として、2010年に完成した羽田空港D滑走路建設工事¹⁴⁾があげられます。ここでは図-4に示す3.6×7.8mのUFCプレキャスト床版が滑走路の栈橋部に約7000枚適用されました。また、図-3に示す歩道橋は耐久性が調査され、実橋ウェブにおいて塩化物イオン浸透深さは供用10年で1mm未満ときわめて小さいことが確認されています¹⁵⁾。



図-4 世界最大規模のUFC適用事例¹⁴⁾
(羽田空港D滑走路)

3.2 超高強度コンクリート

(1) 概要

日本における高強度コンクリートに関する技術は、1980年代の高性能AE減水剤の開発、シリカフュームの利用とともに発展してきましたが、とくに1988年から5年間実施された旧建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」(NewRC総プロ)を契機に技術開発が加速されました。その結果、2000年頃には設計基準強度が100N/mm²を超える超高強度コンクリートが適用されるようになりました。

一方、超高強度コンクリートは、組織が非常に緻密となるため、火災時に爆裂することが懸念されました。そこで、超高強度コンクリートの耐火性を確保するための技術開発が進められ、少量の合成繊維を混入する爆裂防止技術が開発されました。図-5に合成繊維を混入した耐火性に優

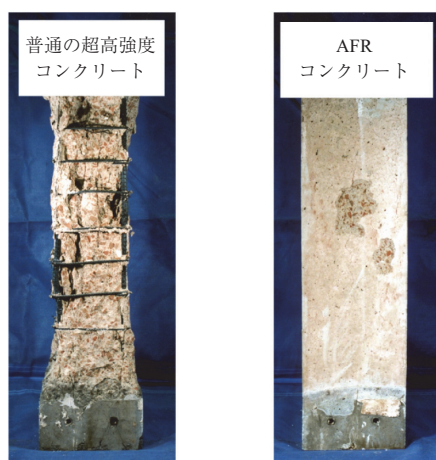


図-5 耐火性に優れた超高強度コンクリート (AFRコンクリート) の爆裂防止効果¹⁶⁾

れた超高強度コンクリート (AFRコンクリート) の爆裂防止効果¹⁶⁾を示します。

(2) 適用事例

超高強度コンクリートは、超高層集合住宅に適用される事例が多いです。超高層化に伴い高軸力が作用する柱部材のスレンダー化や大スパン化が可能となるため、居住性の高い快適な空間を実現することができます。2009年には、日本初となる設計基準強度200N/mm²の超高強度コンクリートが適用されました¹⁷⁾。2013年には、蒸気養生に加え100℃を超える特殊な養生を施すことで設計基準強度300N/mm²の超高強度コンクリートを用いたプレキャスト柱が世界で初めて実構造物に適用されています¹⁸⁾。

3.3 高流動コンクリート

(1) 概要

土木学会の「高流動コンクリートの配合設計・施工指針」では、図-6に示すように、通常のコンクリートと高流動コンクリートの流動性と充填に必要な締固めの程度との概念図が示されています。高流動コンクリートには、スランブフロー55~75cm程度の締固めをしないことを前提とした自己充填性を有する高流動コンクリートとスランブフロー35~65cm程度の締固めを必要とする高流動コンクリート(以下、中流動コンクリート)の2種類が示されています。自己充填性を有する高流動コンクリートは、多量の粉体、適切な骨材量、高性能AE減水剤などにより、高い流動性と材料分離抵抗性を両立させており、高密度配筋や締固めが不可能な箇所への施工を可能としました。一方、通常のコンクリートで施工できる箇所においても、省力化、品質向上などを目的とした中流動コンクリートの技術開発が2000年代中期以降に推進され、適用実績が拡大しています。

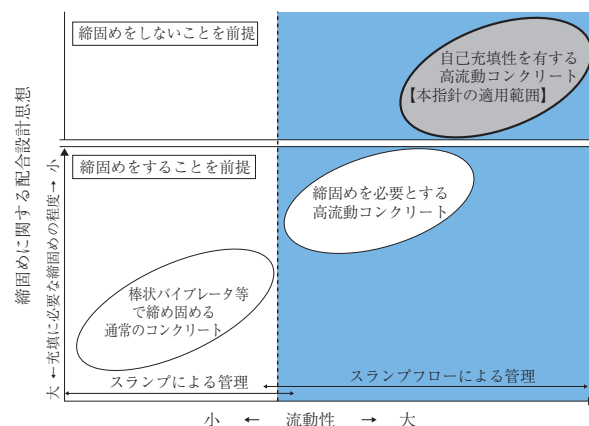


図-6 流動性を指標とした場合の高流動コンクリートと通常のコンクリートとの関係(概念図)⁵⁾

(2) 適用事例

自己充填性を有する高流動コンクリートは、大規模構造物の工期短縮の目的、高密度配筋部の施工や工場製品などに多く適用されています。工場製品への適用理由は、締固め作業を省略することにより、騒音や振動の低減、作業全

体の効率が図りやすいためです。中流動コンクリートは、NEXCO3社で基準類が整備され、トンネル覆工コンクリートへの適用が拡大しています。

3.4 超低収縮コンクリート

(1) 概要

コンクリートは、乾燥する環境下で収縮する性質があり、乾燥による収縮は、コンクリートに発生するひび割れの主要因となっています。過去のレディーミクストコンクリートの実態調査¹⁹⁾によると、JIS A 1129に準拠して測定された乾燥収縮ひずみの全国平均値は 679×10^{-6} であり、 400×10^{-6} 以下となるのは全体の2%と報告されています。したがって、乾燥収縮ひずみが約 400×10^{-6} 以下のコンクリートは超低収縮コンクリートといえるかと思われます。

2009年には、尿素と石灰岩骨材を併用することで乾燥収縮ひずみが約 400×10^{-6} となる超低収縮コンクリートが開発されました。尿素は無色、無臭であり、水に溶けやすい、非揮発性などの特徴があります。尿素は水と混ぜると吸熱反応するため、コンクリート温度を低下させ温度応力を低減できる効果や、非揮発性であるためコンクリート中の水分の蒸発を抑制して乾燥収縮を低減できる効果などが期待できます。図-7に示すように、尿素を用いることにより、膨張材と同等の乾燥収縮ひずみ低減効果を得ることができます。さらに、乾燥収縮の小さい石灰岩骨材と尿素を併用することにより、乾燥収縮ひずみは約 400×10^{-6} となり、普通骨材を用いた場合と比較して約45%と大幅に低減します。

2012年には、セメントに中庸熱ポルトランドセメント、骨材に石灰岩を用い、収縮低減剤を併用することで乾燥収縮ひずみが約 100×10^{-6} まで低減できる超低収縮コンクリートが開発されました²⁰⁾。さらに、膨張材による初期膨張効果(約 100×10^{-6})を考慮することで、収縮実質ゼロが達成されました。

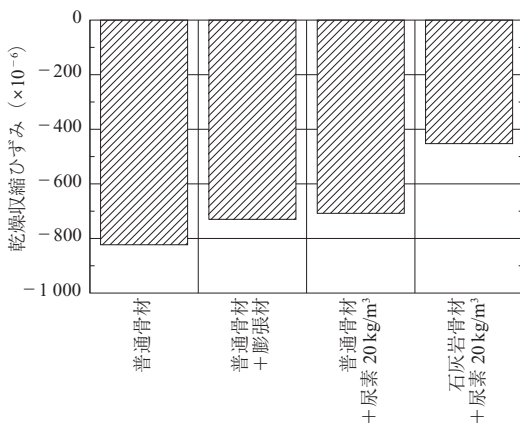


図-7 尿素と石灰岩骨材を併用したコンクリートの乾燥収縮ひずみ

(2) 適用事例

尿素と石灰岩骨材を併用した超低収縮コンクリートは、

2010年に日本で初めてRCラーメン高架橋に適用されました。施工約1か月後及び24か月後に実施されたひび割れ調査結果から、スラブに発生した尿素コンクリートのひび割れ本数は、普通コンクリートと比較して施工後約1か月で約65%、施工約24か月後においても約55%低減されることが確認されました²¹⁾。

収縮実質ゼロの超低収縮コンクリートは、2012年に日本で初めて5階建鉄骨造のスラブに適用されました²²⁾。施工後3年以上が経過したひび割れ状況を図-8に示します。普通コンクリートを施工した箇所においては、幅0.15mm程度のひび割れが複数発生していますが、超低収縮コンクリートにはひび割れは確認されていません。

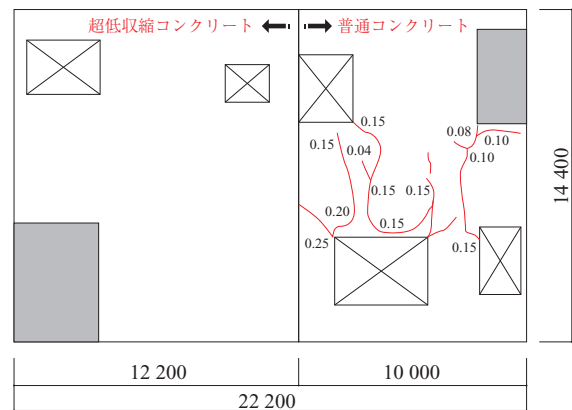


図-8 収縮実質ゼロを達成した超低収縮コンクリートのひび割れ調査結果(スラブ)²²⁾

3.5 表面含浸工法

(1) 概要

表面含浸工法は、含浸材を表面に塗布して、コンクリートの表層部を改質することでコンクリートの耐久性向上を期待するものです。表面含浸材の特徴としては、表面被覆材と比較して、低コスト、施工が容易、コンクリートの外観を変えず維持管理しやすい、再施工しやすいなどがあげられます。主に適用されている含浸材として、けい酸塩系表面含浸材およびシラン系表面含浸材があります。けい酸塩系表面含浸材は、コンクリート表層部に含浸し、ぜい弱なコンクリート表層部を固化したり、中性化したコンクリート表層部にアルカリ性を付与したり、細孔内部に不溶性の結晶体を生成して水や炭酸ガスの侵入を抑制する効果を期待できます。シラン系表面含浸材は、コンクリート表層部に撥水性を付与して吸水防止層を形成することで、外部からの塩分や水分などの劣化因子を遮断する効果が期待できます。シラン系表面含浸材は、比較的古くから適用されてきましたが、従来のシラン系含浸材は主成分濃度が約10~40%の低濃度であり、含浸深さが数mm程度と浅く、紫外線劣化しやすいため、効果の持続期間が数年程度ということが課題でした。しかし、2000年頃に主成分濃度が80%を超える高濃度シラン系表面含浸材が市販されるようになりました。高濃度シラン系表面含浸材は、含浸深さが4~10mm程度となり、紫外線劣化しにくいいため、効

果の持続期間の大幅な向上が期待されるようになりました。図 - 9 に示すように、塩害と凍害の複合劣化環境である北海道沿岸部における暴露試験により、表面含浸工法による遮塩性が実証されています²³⁾。

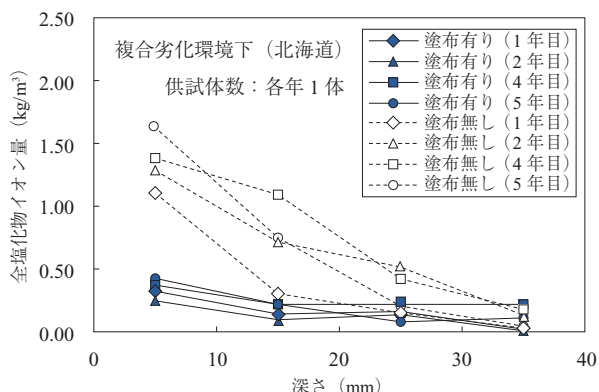


図 - 9 表面含浸材による塩化物イオン浸透抑制効果²³⁾

(2) 適用事例

表面含浸工法は、比較的安価で簡単に施工できるため、最近、橋梁の上部工、橋脚、高欄やボックスカルバートなどの新設構造物に対する予防保全対策工としての適用が拡大しています。鉄道高架橋の塩害抑制を目的とした適用事例を図 - 10 に示します²⁴⁾。近隣の高架橋で塩化物イオン浸透深さが経過年数 12 年で約 50 mm に達することが判明したため、コンクリートの温度応力や乾燥収縮による微細なひび割れが発生する可能性も考慮し、さらなる対策として、上部工の全周に表面含浸工法を施工することが決定されました。



図 - 10 表面含浸材の適用事例²⁴⁾

4. おわりに

2000 年頃から約 15 年間におけるコンクリートの技術開発の動向と最新のコンクリート技術についてご紹介しました。とくに、超高強度化については、予想を上回るほどの発展があったと思います。これからも、社会の多様なニーズに応えるため、コンクリート技術が大いに発展していくことを期待しています。本講座が、皆様のお役に立てれば幸いです。

参考文献

- 1) 松岡：講座「PCの新しい材料入門講座」第1回 最近のコンクリート材料の発展、プレストレストコンクリート、Vol.41, No.1, pp.113 ~ 119, 1999
- 2) 小島：超高強度コンクリート、コンクリート工学、Vol.54, No.5, pp.554 ~ 558, 2016
- 3) コンクリート工学編集委員会：「続 20 年後のコンクリートを考える」アンケート調査結果報告、コンクリート工学、Vol.37, No.1, pp.98 ~ 108, 1999
- 4) 土木学会：高流動コンクリート施工指針、1998 年 7 月
- 5) 土木学会：高流動コンクリートの配合設計・施工指針、2012 年 6 月
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説、2006 年 2 月
- 7) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事、2009 年 2 月
- 8) 土木学会：垂井高架橋損傷対策特別委員会中間報告書、2005 年 9 月
- 9) 土木学会：構造物表面のコンクリート品質と耐久性検証システム研究小委員会（335 委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集、コンクリート技術シリーズ 80, 2008 年 4 月
- 10) 土木学会：表面保護工法設計施工指針（案）、2005 年 4 月
- 11) 土木学会：けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針（案）、2012 年 7 月
- 12) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）、2004 年 9 月
- 13) 武者、大竹、児玉、小林：超高強度コンクリート系新素材「ダクトル」を用いた PC 橋梁の設計・施工 - 酒田みらい橋 -、プレストレストコンクリート、Vol.45, No.2, pp.40 ~ 48, 2003
- 14) 武者、渡辺、稲原、大島：UFC（ダクトル）を用いた構造物の特徴と展開、大成建設技術センター報、第 42 号、pp.20-1 ~ 20-8, 2009
- 15) 河野、川口、武者、小林：プレストレストコンクリート橋に日本で初めて適用された超高強度繊維補強コンクリートの供用 10 年間の耐久性、コンクリート工学年次論文集、Vol.36, No.1, pp.262 ~ 267, 2014
- 16) 西田、山崎、井上、渡部：爆裂防止用ポリプロピレン短繊維を混入した高強度コンクリートの性状に関する研究（その 1 ~ その 4）、日本建築学会大会学術講演梗概集、1994.9
- 17) 三井、小島、米澤、菅田、三橋：設計基準強度 150 ~ 200 N/mm² 超高強度繊維補強コンクリートの開発と実建物への適用、日本建築学会技術報告集、第 16 巻、第 32 号、pp.21 ~ 26, 2010
- 18) 今井、山本、加藤、村松：設計基準強度 300 N/mm² のコンクリートを用いた RC 細柱の開発と適用、コンクリート工学、Vol.51, No.12, pp.959 ~ 966, 2013
- 19) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの収縮問題検討委員会報告書、p.16, 2010 年 3 月
- 20) 辻埜、黒田、湯浅、片山、依田、菊地、寺本：膨張材と収縮低減剤を併用した超低収縮コンクリートの基本性能、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.47 ~ 48, 2013
- 21) 田中、綾野：尿素を用いたコンクリートのひび割れ低減技術、コンクリート工学、Vol.52, No.4, pp.303 ~ 308, 2014
- 22) 辻埜：超低収縮コンクリート、コンクリート工学、Vol.54, No.5, pp.572 ~ 577, 2016
- 23) 林、坂田、田口、遠藤：浸透性吸水防止材を用いたコンクリートの塩害および凍害環境下における耐久性に関する考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.30, No.2, pp.649 ~ 654, 2008
- 24) 林、芦澤、植田、前山：シラン・シロキサン系表面含浸工法による新設構造物の耐久性向上、コンクリート工学、Vol.49, No.5, pp.83 ~ 86, 2011

【2016 年 6 月 29 日受付】