

この四半世紀のコンクリートの進化

－研究・技術者の喜怒哀楽－

技術研究所 副所長 橋田 浩

1. はじめに

バブルが崩壊してから四半世紀が経過した。最近の第二次安倍政権に重なる株価上昇はともかく、失われた 20 年と言われる日本経済の停滞期であった。1995 年には阪神・淡路大震災、2011 年には東日本大震災という未曾有の大規模災害に見舞われた。政権交代が何度もあり、民主党政権時代には無駄な公共事業を批判する「コンクリートから人へ」といったキャッチフレーズが流布された。

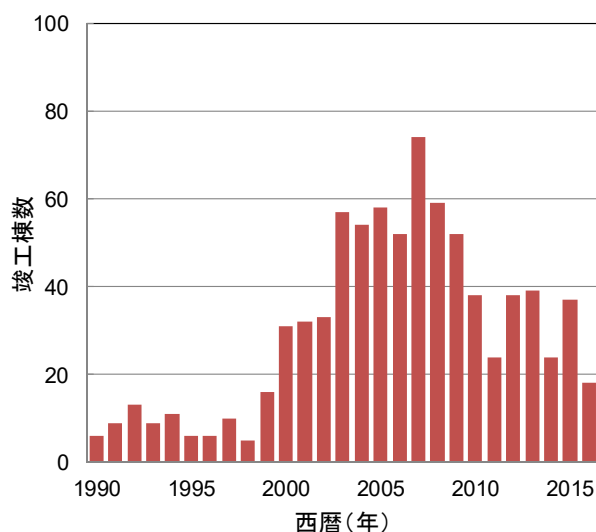
筆者が清水建設（株）に入社し、技術研究所の研究員となったのは、バブル景気が終焉したばかりの 1992 年である。それ以来 25 年間、メンバーの一員として、あるいはリーダーとして、コンクリートの研究開発に携わってきた。社会の要請に応えるように、あるいは時代を先導するように、我々はコンクリートの技術開発を推進してきた。この節目に、本誌で「コンクリート小特集」が組まれるにあたり、筆者が関わった技術開発やプロジェクトを中心に四半世紀のコンクリートの進化を振り返ってみたい。

建築分野に係わる「超高強度コンクリート」「環境配慮」「品質向上／収縮ひび割れ抑制」「生産性向上」という 4 つの技術分野で整理するが、当社の関連研究、技術を網羅しているわけではないので、その点はご理解願いたい。研究の楽しさや開発者としての喜びは勿論であるが、技術の進化には影の部分もある。後進の参考になればと思い、苦い経験にも言及する。

2. 超高強度コンクリート

建築分野では、1988 年から建設省総合技術プロジェクト「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（略称 New RC）」が実施され、従来強度の 2～4 倍の強度を有するコンクリートと鉄筋を用いた新しい鉄筋コンクリート（RC）造建築物の開発が推進された¹⁾。その実用化の口火を切るように当社は、1992 年着工の超高層 RC 造建築物に設計基準強度 60N/mm² の高強度コンクリートを適用している²⁾。その後 1997 年の容積率と日影規制の緩和が契機となって超高層集合住宅の建設ブームが到来し（図－1）、60N/mm²を超える高強度コンクリート、すなわち「超高強度コンクリート」を採用する気運が高まっていく。

その頃当社は、100 N/mm²クラスの超高強度コンクリートの最大の弱点を克服する研究開発を進めていた。超高強度コンクリートは、火災時の高温で RC 部材のかぶり部分が激しく爆裂し、耐力が低下することが懸念されていた。そこで、当時欧州で検討が始まっていた合成繊維を混入して爆裂を抑制する技術を導入し、超高強度コンクリートの火災時の爆裂をほぼ完全に防止できる技術に発展させたのである（写真－1）。



図－1 首都圏の超高層集合住宅（20 階建て以上）の建設棟数の推移（不動産経済研究所資料に基づき作成）



写真－1 超高強度コンクリート部材の耐火性

2000年には(株)竹中工務店と共同で、(財)日本建築総合試験所から耐火性に優れた超高強度コンクリート「AFR (Advanced Fire Resistant) コンクリート」の建築技術性能証明を取得し³⁾、設計基準強度 80 N/mm²、さらには 100 N/mm²の AFR コンクリートを超高層集合住宅に適用することになる⁴⁾。これらの実績が評価され、AFR コンクリートは2002年の日本コンクリート工学会賞(技術賞)を受賞している。その後、一般的なポリプロピレン繊維よりも爆裂防止に効果的なポリアセタール繊維を見出したことで⁵⁾、AFR コンクリートは設計基準強度 120N/mm²以上の RC 部材においても3時間の耐火性能を優に確保できる技術として結実している。

同時期に、低熱型ポルトランドセメントやシリカフェームセメントなど超高強度コンクリートに適したセメントが開発され、併せて高性能 AE 減水剤が格段に進歩したことで、水和熱と自己収縮を抑制でき、良好な施工性を有する超高強度コンクリート技術が確立した。現在までに、工事現場で打設されたコンクリートの設計基準強度は 150N/mm²(条件付きで 200N/mm²)まで到達しているが、『超高強度用セメント×高性能 AE 減水剤×AFR』技術が超高強度コンクリートの中核を成していることには変わりがない。

2010年代に入り同業他社では、高温養生と鋼繊維補強によって一程度の靱性を付与した200~300N/mm²の超高強度プレキャストコンクリート部材も実用化されている。このような超高強度繊維補強コンクリート製品は、2000年頃にセメントメーカーがフランスから技術導入したのが始まりであり、当社も試作はしているが(写真-4参照)、経済性や部材接合が難点となり、建築分野での利用は未だに限定的である。

超高強度コンクリートの進化は、成熟期を過ぎ、構造材料としての転換期にあるのではないだろうか。期待も込めて言えば、超高強度コンクリートは、超高層建築物だけでなく、各種災害やテロ対策が必須となる重要構造物、近未来的にはシミズ・ドリームにもある海洋・海中構造物(図-2)、さらには月(図-3)や惑星などでの利用に発展していく可能性を秘めている材料である。



図-2 海洋未来都市「GREEN FLOAT」

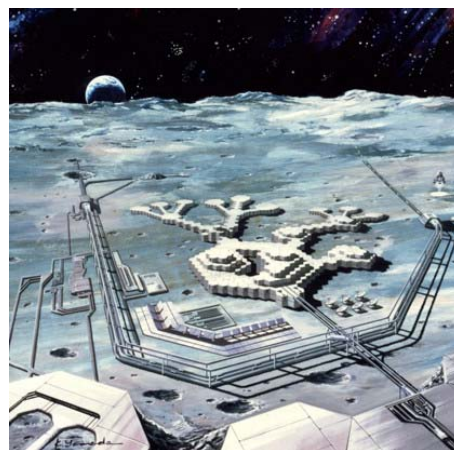


図-3 月面基地のイメージ

3. 環境配慮

コンクリートの環境配慮は、躯体の長寿命化、エネルギー・CO₂削減、省資源・リサイクルといった分野があげられる。当社の代表的な環境配慮技術は、2000年に技術研究所の音響実験棟増築工事で実用化した「コンクリート資源循環システム」である⁶⁾。このシステムは、建設廃棄物であるコンクリート塊を加熱した後、摩砕処理を施す「加熱すりもみ法」によって、解体コンクリートから高品質な再生粗骨材・再生細骨材を製造し、新たな構造物コンクリート材料として再利用するものである。併せて、副産物として発生するセメントペースト部分の微粉末は、セメント原料や地盤改良材として有効利用することができるため、完全なクローズドシステムとなり得るリサイクル技術である(図-4)。

「加熱すりもみ法」による骨材回収プラントと生コンクリート製造プラントを解体・新築(建替え)現場内に設けるケースでは、資源の有効活用が図られると共に、解体コンクリートの搬出ならびに生コンクリートの搬入車両が削減され、建設工事でのCO₂削減と近隣の環境保全が可能となる。このオンサイト型の「コンクリート資源循環システム」は、発注者の要望によって、2002年着工の2つの建替え工事で本格的に採用された⁷⁾(写真-2)。

これらのプロジェクトは社会的にも大きな反響を呼び、再生骨材 H（高品質）、M（中品質）、L（低品質）といった再生骨材関連の日本工業規格（JIS）制定の発端となった。これらの実績が評価され、本システムとプロジェクトは2003年の日経 BP 技術賞エコロジー部門および日本コンクリート工学会賞（技術賞）を受賞している。

「コンクリート資源循環システム」は環境配慮技術として大いに注目されたが、残念ながら、再生骨材 H の製造ならびに微粉末の有効活用コストが高く、プロジェクトの採用は限られている。再生骨材 M、L の利用が経済性の面でより現実的なリサイクルとする意見も多い。一方で、発注者や建築物の利用者が安心して受け入れられるのは、一般の JIS 生コンクリートと同等の品質が保証されたコンクリートであり、再生骨材 H を前提とする「コンクリート資源循環システム」は彼らの要望に応える正攻法といえる。現状、事業として成立するには補助金や税制優遇等が必須と思われるが、「コンクリート資源循環システム」の進化は今後も大いに期待される。

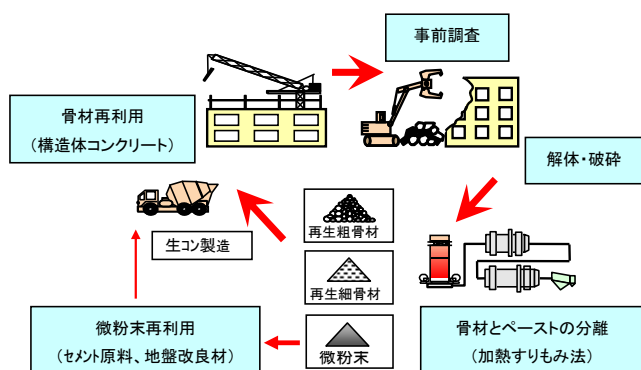


図-4 コンクリート資源循環システム



写真-2 コンクリート資源循環システムを導入した建替えプロジェクト

4. 品質向上／収縮ひび割れ抑制

RC 躯体の長寿命化を実現する上で、コンクリートの宿命ともいえる収縮ひび割れは、漏水や耐久性の低下、美観の悪化を招く厄介者である。古くは、化学混和剤の利用やスランプの変更によって単位水量を減らし、コンクリートの収縮率を低減することが唯一ともいえるひび割れ対策であった。1985 年頃から収縮低減剤や膨張材といった新材料がひび割れ対策に利用され始めるが、費用対効果が不明瞭なこともあり、工事で採用されることは少なかった。最近になって、市販コンクリートの単位水量と乾燥収縮率にはほとんど相関がないことが知られるようになった（図-5）。2006 年には、日本建築学会「鉄筋コンクリート造の収縮ひび割れ制御設計指針（案）・解説」が発刊され、ひび割れ抑制技術の定量化が進み、積極的なひび割れ対策が講じられるようになった。

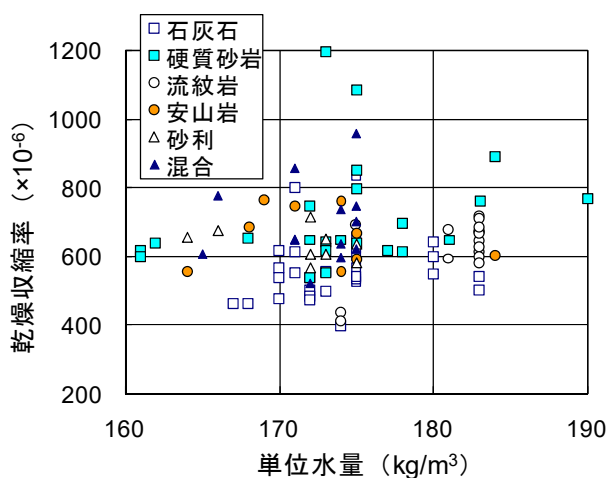


図-5 単位水量と乾燥収縮率の関係

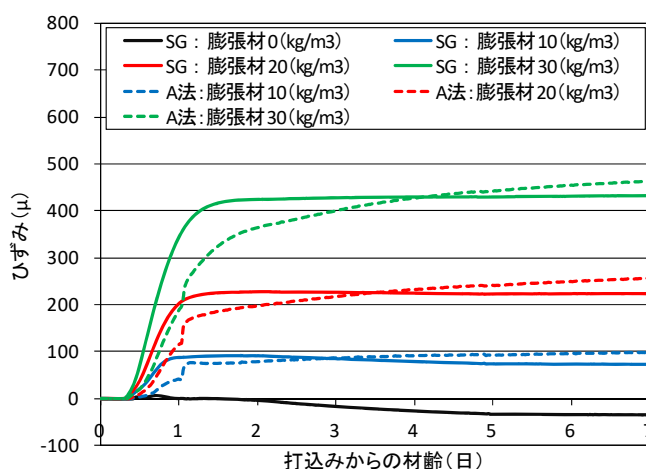


図-6 提案試験法（SG）と従来法（A法）による拘束膨張ひずみの試験結果の比較

当社の研究実績としては、骨材の収縮特性の検証法⁸⁾、膨張材による収縮応力低減の評価法⁹⁾、膨張材の簡便な品質試験法¹⁰⁾（図-6）などの提案がある。膨張材の品質試験法は2013年の日本コンクリート工学会奨励賞を受賞している。これらの成果を活用し、2010年には、200年躯体を謳うRC造事務所の新築工事で乾燥収縮率250 μ （平均的な乾燥収縮率の1/3）という当時最も乾燥収縮の小さいコンクリートの施工を実現している¹¹⁾（写真-3）。

以上のように、収縮低減に関する知見と技術を積み重ねた当社は、最後のピースとして、新機構の収縮低減剤を（株）日本触媒と共同で実用化したことで、乾燥収縮が実質ゼロとなるコンクリート「ゼロシュリンク」を遂に完成させる（写真-4）。ひび割れても仕方がないと考えられていたコンクリートの常識を覆す技術が実現されようとしているのである。2017年の先端技術大賞（産経新聞社賞）を受賞した「ゼロシュリンク」は本誌の小特集で報告されているので、詳細はそちらを参照していただきたい。



写真-3 200年躯体を謳う RC 造事務所

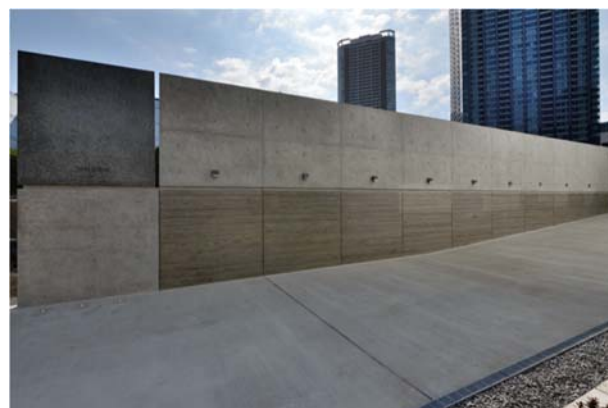


写真-4 250N/mm²の PCa 版（左端上）と
ゼロシュリンクの壁

5. 生産性向上

少子高齢化による労働力不足が顕著になる中で「働き方改革」を推進するため、建設業における生産性向上は喫緊の課題とされている。しかし、技術革新が目立たないといわれるコンクリート工事でも手を拱いていたわけではない。柱・梁部材のプレキャストコンクリート（PCa）化、コンクリート充填鋼管（CFT）構造と高流動コンクリートの普及、RC 造柱と鉄骨（S）造梁の混合構造の進化、機械式鉄筋定着・機械式継手の利用拡大、などがこの四半世紀での生産性向上技術の代表例である。

当社は、混合構造の技術開発で業界をリードしてきており、シミズ RCSS（RC 柱 S 梁、梁は柱を貫通）、シミズ RCST（CFT 柱 S 梁）、シミズ Hy-Ecos¹²⁾（RC 柱 S 梁、梁は柱を非貫通）といった多様な構法（図-7）によって、施工の合理化、工期短縮を図ってきた。特殊な PCa 化工法としては、外装一体型の PCa パネルを剛接して水平力も負担する外周フレームとし、内部コアウォールを芯材とした RC 構造がある。2012年に竣工した当社の新本社ビルはこの構造形式であり、アルミキャスト外装フレームと足元の木目調打放し門型柱によって、先進性と落ち着いた品格を併せ持つファサードを形成している¹³⁾（写真-5）。新本社プロジェクトのコンクリート工事については2014年の日本コンクリート工学会賞（技術賞）を受賞している。

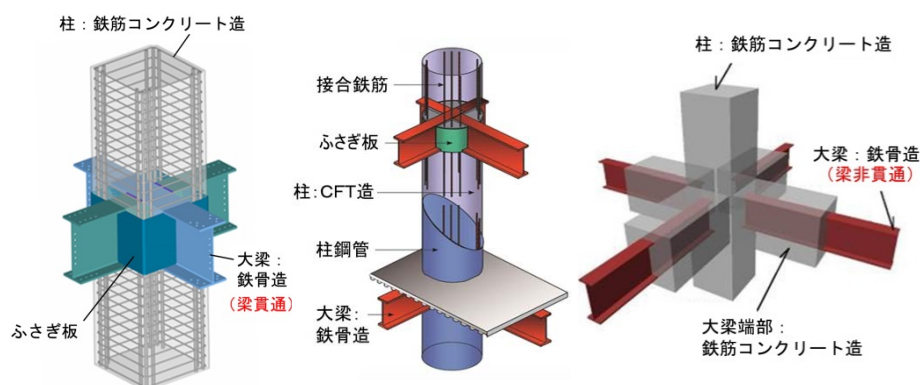


図-7 シミズの混合構法（左から RCSS、RCST、Hy-Ecos）



写真-5 清水建設本社ビル

さらなる生産性向上のためには、BIM（Building Information Model）、AI（人工知能）といったデジタル技術や施工ロボットと上記の合理化技術の有機的な連携が肝要と考えられる。また、PCa化は生産性向上に寄与しているが、労務が現場から工場に移動しているだけの面もある。そういう観点では、高流動コンクリートの利用やPCa部材の自動製作など、工場での生産性向上も当然必要である。コンクリートやPCa部材の各種品質検査、施工管理業務も現場係員の負担になっており、これらの自動化、合理化も忘れてはならない。

6. 技術の進化の影で

6. 1 超高強度コンクリートの適用競争

当社は業界でも逸早く、設計基準強度 60N/mm^2 の高強度コンクリートを超高層 RC 建築物に適用している。実はこれ以前に、 100N/mm^2 クラスの超高強度コンクリートの適用も視野にあったが（本実用化研究で1990年の材料学会技術賞を受賞）、先進過ぎる技術のため第三者機関での評価が困難とされ、さらに『超高強度コンクリートは不要』との声が社内にあったことで、研究開発者の思い通りにはプロジェクトに採用されなかった。バブル崩壊後は、コスト重視の姿勢が強かったこともあり、超高強度コンクリートの適用はより慎重になった。また、超高強度コンクリートの爆裂対策が重要課題となり、先述の AFR コンクリート技術を確立させることが最優先となった。

その間に同業他社では、設計基準強度 100N/mm^2 以上の超高強度コンクリートの実用化ならびにプロジェクトへの適用が進展した（他社は当初、爆裂対策として耐火ボードで覆うなどの措置をした）。最終的に当社が設計基準強度 150N/mm^2 の超高強度コンクリートをプロジェクトに適用したのは、 60N/mm^2 の適用から20年後であり、先行他社の8年遅れであった。超高強度コンクリートの適用競争において、当社は後塵を拝したのである。

如何に研究開発で先鞭を付けたとしても、プロジェクトに採用されなければ評価されないのが現実である。当時、筆者は入社して間もない頃で然程の感傷はなかったが、高強度 RC 造の研究開発をリードした先輩、同僚達は悔しい思いをしたのではないかと。AFR コンクリートの完成は、超高層 RC 建築物をより安心な構造物へと進化させ、その悔しさを和らげてくれた大きな成果であった。

6. 2 大臣認定/JIS 規格の不適合事例

それまで高層建築の物件毎の構造審査で認可されていた高強度コンクリートは、2000年の建築基準法の一部改正により、指定材料として事前に国土交通大臣の認定を取得しなければならなくなった。この高強度コンクリートで、大臣認定仕様の不適合が判明した事例がある。超高層集合住宅工事で使用した中庸熱ポルトランドセメントの水和熱が認定された管理値の上限をわずかに超えていたのである。

その理由は、認定仕様となるセメントの成分をメーカーが不注意に調整し、当社がその試験値の変化を見落としていたことにある。ただし、調整後のセメントでも水和熱は JIS 規格値に問題なく収まっている。大臣認定における審査の際に、普通強度レベルより厳しいセメントの管理を要求され、当時の製品の水和熱を基に JIS 規格より上限値を下げたことが仇となったのである。結果的には、新規のセメントを用いた高強度コンクリートの水和熱と強度が以前と優位な差が無いことを確認し、大臣認定を取得し直すことで決着をみた。実質的に無意味な「ダブル・スタンダード」を許容したことが事件の発端でもあった。

JIS 規格不適合のコンクリートによって、当社が被害を被った事例もある。2008年に発生した溶融スラグ骨材が混入したコンクリートのポップアウト事件である。溶融スラグは、廃棄物の焼却灰を高温で溶融、冷却固化して得られる粒状の固形物であり、環境負荷低減を目的に、建築・土木資材への積極的な活用が進められている。しかし、溶融スラグは、製造過程で石灰を使用するため、生石灰が残存することがある。生石灰はその後水と反応して消石灰になる時に体積が増大する。これがポップアウトの原因である。

当時、山砂の品質低下に苦慮していた M 生コン工場が、施工性改善を目的に溶融スラグを混入したコンクリートを製造し、建設現場に納入した。溶融スラグは、自治体の廃棄物焼却灰をリサイクルする業者が無償で提供したものであった。そして、高温多湿の季節になって、不気味なポップアウトが多数の現場で発生した（写真-6）。溶融スラグ骨材は、生コンクリートの JIS 規格では使用が認められておらず、M 生コン工場はそれを知りながら不正を働いた。一方で、このようなポップアウト現象が認識されながら、2006年版の溶融スラグ骨材の JIS 規格には、『呼び強度が 33 以下のレディーミクストコンクリート（生コン）に適用できる』と記載されていた。全国で焼却灰の高温溶融処理が推進され、溶融スラグのストック問題が顕在化していた時代背景があった。

念のために付け加えておくが、上記の2つの事例は、当社の技術者が認知してから直ぐに国土交通省に報告している。前者は当社が当事者であり、弁解の余地はない。現代社会には「ダブル・スタンダード」あるいは「都合のいい解釈」といった魔物が潜んでいる。品質確保、そして顧客の信頼を得るために、研究・技術者は、開発技術に対する気概と謙虚さを失わない努力が必要である。



写真-6 熔融スラグ骨材（生石灰）によるポップアウト

7. おわりに

筆者が清水建設（株）で携わった四半世紀に亘る研究・技術開発の歴史を振り返り、「超高強度コンクリート」「環境配慮」「品質向上／収縮ひび割れ抑制」「生産性向上」という4つの技術分野でのコンクリートの進化を整理した。トップランナーとして駆け抜けた研究・技術者人生は、楽しいこと、嬉しいことが多々あったが、一方で苦い経験もあった。

現在は、研究・技術者に対するコンプライアンスが一段と厳しくなった。社会変化のスピードが益々速まる中で、働き方改革も否応なしに進んでいく。じっくりと思案に耽る時間が徐々に削られていく。時代の要請に応えるために、業界をリードしていくために、研究・技術者は何を変え、何を守らなければならないのか。都合のいい解釈はせず、本質を見据えた誠実な挑戦者であり続けたいと、自戒の念を込めて切に願う。

<参考文献>

- 1) 室田達郎，青山博之，平石久廣：New RC プロジェクトの経緯および概要，コンクリート工学，Vol.32，No.10，pp.6-10，1994
- 2) 西田朗，山崎庸行，江原恭二，熊谷仁志，橋大介：高強度コンクリート（ $F_c=600\text{kgf/cm}^2$ ）の高層建築物への適用，清水建設研究報告，第58号，pp.1-10，1993
- 3) 森田武，山崎庸行，橋田浩，西田朗 他：AFR コンクリート工法，GBRC，第101号，pp.47-54，2001
- 4) 森田武，西田朗，刑部章，河内二郎：耐火性に優れた超高強度コンクリートの仕様と施工，コンクリート工学，Vol.39，No.11，pp.18-23，2001
- 5) 山下憲司，樋口健作，橋田浩，森田武：セメント成形体爆裂防止用合成繊維及び耐爆裂性セメント成形体，特許第4608176号，2010
- 6) 黒田泰弘，橋田浩，坂詰義幸，土屋正義：コンクリート資源循環システムを適用した建築工事，コンクリート工学，Vol.40，No.2，pp.64-70，2002
- 7) 黒田泰弘，森健治，宮地義明：建替工事へのコンクリート資源循環システムの適用，コンクリート工学，Vol.41，No.1，pp.150-152，2003
- 8) 田中博一，橋田浩：骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.553-558，2009
- 9) 橋田浩，菊池俊文，持田泰秀，平井吉彦：膨張材を使用したコンクリート造建築部材のひずみ挙動と発生応力評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.608-614，2011
- 10) 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
- 11) 辻埜真人，橋田浩，富岡啓一，榎本秀文：長寿命・超低収縮コンクリートの建築構造物への適用，コンクリート工学，Vol.50，No.7，pp.608-614，2012
- 12) 金本清臣，真瀬伸治，山野辺宏治：鉄筋コンクリート柱に接合された鉄骨梁端部を鉄筋コンクリートで巻いた混合構造梁構法の耐力評価，日本建築学会構造系論文集，Vol.76，No.659，pp.205-211，2011
- 13) 橋田浩，見城辰哉，中川健太郎，石水功一：超環境オフィスビルの外観を形成する高強度コンクリート躯体，コンクリート工学，Vol.51，No.3，pp.272-277，2013