

第2回 骨材

講師：片平 博*1・古賀 裕久*2

1. はじめに

骨材はコンクリートの構成材料のうちの約7割の体積を占めています。見方を変えると、コンクリートというのは人工の石です。石を削って自由に形を作れば良いのですが、それは大変です。そこで、適当な大きさに砕いた石と砂を型枠に入れて、でも、それだけだと一体化しないから、セメントペースト（以下、ペースト）という接着剤で、全体を一体化させたものがコンクリートです。ですから、骨材の品質がコンクリートの品質に大きな影響を及ぼすのは当然です。

砂利砂、碎石砂、スラグ骨材等の各種骨材の品質（粒度、密度、吸水率、安定性等）はたとえばJIS A 5308「レディーミクストコンクリート」の附属書A（レディーミクストコンクリート用骨材）等で規定されています。しかし、規格を満足した骨材がすべて同じ品質というわけではありません。JIS A 5308の附属書Aの規格は、日本全国の気象条件を考慮して、コンクリートに不具合が生じないように、骨材に求める品質を定めたものといえます。コンクリートが使用される環境によっては過剰な要求品質である可能性もあります。一方で、骨材がコンクリートの各種性能に与える影響は、骨材となる岩石そのものの成立過程や骨材の製造方法などの影響を複雑に受け、本来は評価が難しいものです。これを、密度や吸水率といった比較的簡易に試験できる品質項目で規定していることから、規格を満足している骨材だからといって100%安心できるか、ということも必ずしもそうでない場合もあります。

表 - 1 構成材料がコンクリートの特性に与える影響

	特 性	ペースト	細骨材	粗骨材
1	フレッシュ性状・施工性	○	○	○
2	強度	○		
3	発熱（温度ひび割れ）	○		
4	塩分浸透抵抗性	○	△	
5	中性化抵抗性	○		
6	耐凍害性	○		○
7	乾燥収縮	△	△	○
8	アルカリ骨材反応性	○	○	○
9	乾湿繰り返し抵抗性			○

○：大きな影響を与える，△：やや影響を与える

コンクリートの構成要素をペースト、細骨材、粗骨材に分類して、それぞれがコンクリートの各特性に与える影響を大凡に整理すると表 - 1 のようになります（細かな点を考慮すると「違う」とお叱りを受けるかもしれませんがご容赦下さい）。表中の1の特性にはすべての構成要素が影響を与えます。2～5には主にペーストの品質が大きく影響します。6～9には骨材の品質が大きく影響します。このことから、1および6～9について最近の研究事例を含めて紹介します¹⁾。

2. 日本の地質と骨材
(石灰岩はどこから来たか)

各論に入る前に日本の地質構造について触れておきます。日本列島の地質はフォッサマグナを境に東北日本と西南日本に分かれます。西南日本の北側（中国地方）の地質は非常に古く、そこに付加体が付加されて、除々に日本列島が形成されてきたと考えられています。

付加体について説明します。かつて、地球上の大陸は一つであり、広大な海（現在の太平洋）に生物が大繁殖しました。やがて大陸はユーラシア、アフリカ、アメリカ大陸に分裂し、大西洋が誕生します。大西洋の拡大によって太平洋は徐々に狭くなり、太平洋プレートは日本海溝に潜り込んでいきますが、海底堆積物の一部は潜りきれずに海溝を越え、陸地（日本列島）に付加されていきます。これを付加体といいます。古代の海中生物の死骸の堆積物も付加体の一部となり、これが石灰岩となります。日本各地で純度の高い石灰岩が採掘できるのはそのためです。

東北日本については、関東周辺の山地、北上山地、日高山地に古い地層が見られますが、その他の地域は新第三紀の火山堆積物に厚く覆われています。この地域では良質な骨材はあまり採れません。

3. フレッシュ性状

図 - 1 は骨材生産量（道路用を含む）の推移を示したものです。図中の川、山（堆積物が成す丘陵）、陸（旧河川敷）、海は、いずれも天然の砂利・砂です。流水作用を受けて丸みをおびた形状をしており、これを用いたコンクリートのワーカビリティは良好なものとなります。しか

*1 Hiroshi KATAHIRA：国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター

*2 Hirohisa KOGA：国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター

し、高度成長期の需要増に追いつかず、また、河川の流域安全性の確保や、環境保護のための採取規制も相まって、次第に碎石・砕砂の使用割合が増えていきます。

粗骨材を砂利から碎石に変えると、角張った形状をしていることから、同じスランプを得るのに必要な単位水量が10～25 kg/m³程度増加します。現在、首都圏では粗骨材のほとんどが碎石（そのうち5割以上が石灰岩）に移行しています。その一方で、大きな河川のある地域（北海道、北陸、東海等）では、現在でも砂利が使用されています。

細骨材については、かつては天然の砂が多用されていましたが、天然資源の枯渇から、砕砂と天然砂との混合砂が増えていきます。西日本（近畿、中国、四国地方）では古くから瀬戸内海の家砂に依存してきましたが、環境保護の観点から採取が禁止され、一時期は中国から輸入されましたが、それも禁止されました。このため、西日本では現在、碎石、砕砂に頼らざるを得ず、製造設備の工夫で粒形の改善を図るものの、所定のスランプを得るのに必要な単位水量が増加する傾向にあり、より減水効果の高い化学混和剤の使用等によって単位水量を減らす努力が行われています。

特殊な事例ですが、細骨材にモンモリロナイト等の粘土鉱物が含有されている場合（固結度の低い堆積岩類に含まれている場合がある）には、鉱物中の金属イオンとセメントが反応して凝結が早まることがあります。その対応策としては超遅延剤が使用されます。

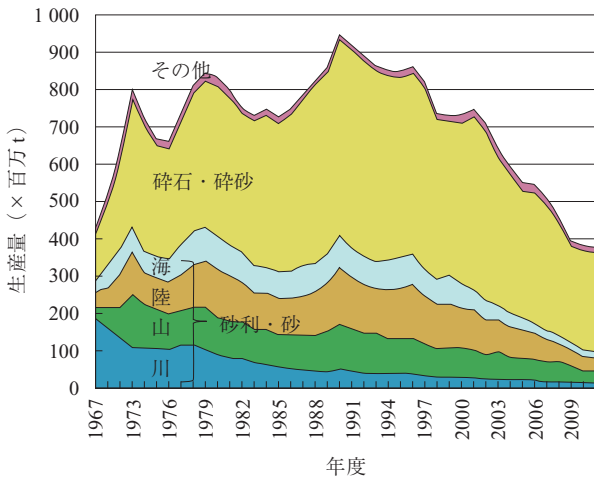


図 - 1 骨材生産量の推移（碎石協会ホームページより）

4. 耐凍害性

表 - 1 に示すように、コンクリートの耐凍害性を確保する上で主に重要なのはペーストの品質と粗骨材の品質です。細骨材はその品質が相当に悪くないかぎり、耐凍害性に与える影響は小さいことが分かっています²⁾。凍害はコンクリート中に浸入した水の凍結時の膨張によって生じますから、細骨材よりも骨材径が大きい粗骨材のほうが内部の空隙も大きく、浸入した水の膨張変形量が大きくなることとその理由と考えられます。

ペーストの耐凍害性は微細な空気（エントレインドエア）

を混入してAEコンクリートとすることで確保されます。粗骨材については良質なものを選択する必要があります。JIS A 5308 附属書 A にその品質が規定されています。

品質の劣る粗骨材がコンクリート中に存在する場合、たとえば JIS A 1148 「コンクリートの凍結融解試験方法」(A 法：水中凍結融解法) を行うと、写真 - 1 に示すように、低品質な粗骨材からひび割れが発生して、やがて供試体が破断します。ただし、このような顕著な破壊形態は水中で供試体の中心部まで強制的に -18℃まで急冷する促進試験だからこそ生じる現象です。実環境では、写真 - 2 に示すようにコンクリート表面付近の骨材がはく落するポップアウトという現象が生じます。

骨材の耐凍害性は、JIS A 1122 「硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法」によって評価されるのが一般的です。この試験方法は、骨材を硫酸ナトリウムの過飽和水溶液に浸漬し、その後、乾燥させるという行程を5回繰り返す試験です。硫酸ナトリウムが結晶化するときの作用圧力が、水が凍結する際の膨張圧に似ているという解釈で、耐凍害性の評価に用いられています。試験によって砕けた骨材の分量（以下、安定性）が12%以下であれば耐凍害性に優れた骨材と判断されます。しかしながら粗骨材の安定性試験の結果と、その粗骨材を用いたコンクリートの耐久性指数（JIS A 1148 (A 法) によって求める値で、一般には60以上で良好と判定される）を比較すると図 - 2 に示すように必ずしも一致するとはかぎりません。図 - 2 では、粗骨材の種類を砂利と碎石に分けて示しています。このうち砂利については、安定性の値が大きい（砕けやすい）ものほど、コンクリートの耐久性指数が小さくなる傾向が臆気ながら見て取れます（図中の楕円形）。これに対して碎石に関してはこのような傾向が明確ではありません。



写真 - 1 凍結融解試験でみられるひび割れ



写真 - 2 実構造物でみられるポップアウト

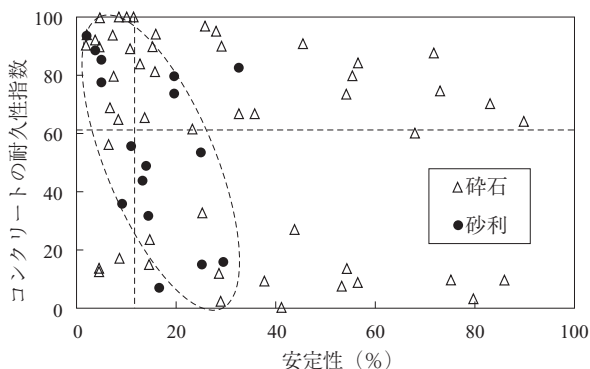


図 - 2 安定性試験の結果と耐久性指数の関係²⁾

砂利は河川の浸食作用でさまざまな山から削られた岩石の集合体です。さまざまな品質の粒子が混在しています。その中に耐凍害性の劣る骨材粒子がどれだけの割合で含まれているのかを評価する試験方法としては、安定性試験は有効と考えられます。これに対して碎石は、岩質がほぼ一定の岩盤を砕いて製造します。粒子間の品質の違いは小さいですが、採石場ごとにその岩石特有の個性があります。安定性試験後の骨材の劣化状態を詳細に観察すると、骨材が分裂するような破壊を示すものと、骨材の表面から少しずつ細粒化していくものがあります。後者の骨材はコンクリート中でペーストに覆われると劣化しにくくなるようです。図 - 2 において碎石で明瞭な対応関係が見られないのは、このように安定性試験での骨材の劣化メカニズムが、コンクリート中と異なるためと考えられます。では碎石の耐凍害性はどのように評価すれば良いのでしょうか。図 - 3 は粗骨材の吸水率とコンクリートの耐久性指数の関係を示したものです。JIS A 5308 附属書 A では粗骨材の吸水率を 3.0% 以下と規定していますが、吸水率が 3.0% 以下の碎石を使用することで耐凍害性は確保できる結果となっています²⁾。

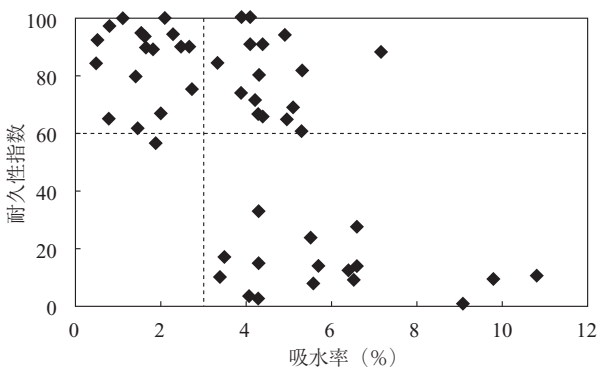


図 - 3 碎石の吸水率とこれを用いたコンクリートの耐久性指数の関係²⁾

5. 乾燥収縮

コンクリートは乾燥によって収縮します。その収縮が拘束され、拘束収縮ひずみが過大になるとひび割れが発生します。コンクリート中で主に収縮するのはペーストの部分

です。骨材の収縮は一般的には小さく、骨材はペーストの収縮に抵抗する役目を果たします。ところが近年、骨材そのもの乾燥によって収縮し、この収縮量が骨材の種類によって大きく異なることが分かってきました。コンクリートの乾燥収縮率は、一般的には JIS A 1129 「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」 附属書 A に従った試験によって乾燥材齢 6 ヶ月で測定します。

図 - 4 は細骨材と粗骨材の種類を変えてコンクリートを製造し、その乾燥収縮率を比較したものです。同じ記号の粗骨材と細骨材は同じ岩石から製造しています。この図から、コンクリートの乾燥収縮率に与える影響は、細骨材よりも粗骨材で大きいことが分かります^{2,3)}。

図 - 5 は、粗骨材にひずみゲージを貼り付け、この粗骨材を水中に浸漬させ、その後 20℃、60% RH の環境で一週間乾燥させたときの乾燥収縮率を横軸にとり、その粗骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮率を縦軸にとったグラフです。非常に良い相関を示しており、こういった粗骨材の試験によって、コンクリートの乾燥収縮率を推定することが可能です^{3,4)}。

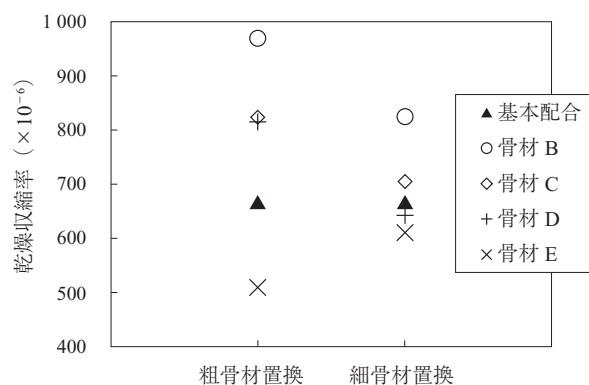


図 - 4 粗骨材と細骨材の影響比較¹⁾

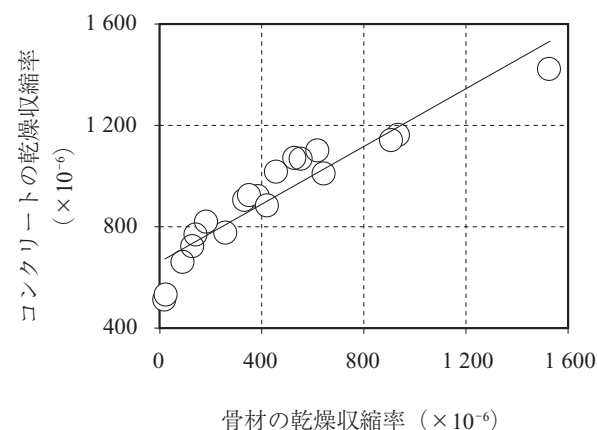


図 - 5 粗骨材とコンクリートの乾燥収縮率の比較²⁾

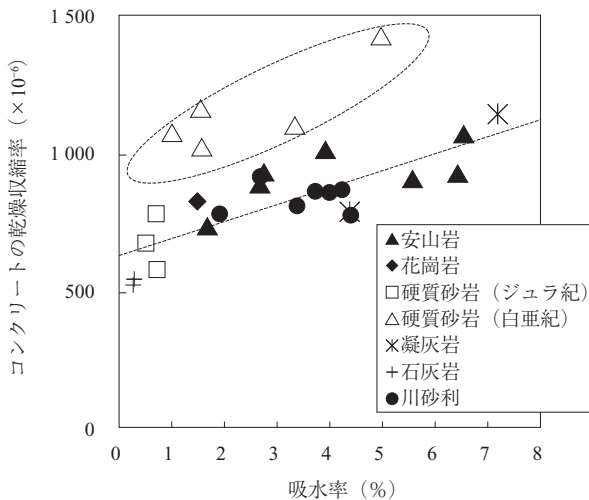


図 - 6 粗骨材吸水率とコンクリートの乾燥収縮率の関係²⁾

粗骨材の代表的な品質項目である吸水率と、その粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮率との関係を調べました。その結果を図 - 6 に示します。現在の粗骨材の品質規格である吸水率 3.0% 以下の範囲では、白亜紀に形成された硬質砂岩（一部、頁岩を含む）を除いて、著しく大きな乾燥収縮率を示すものはありませんでした。硬質砂岩は多くの地域から産出されますが、地質年代的にはジュラ紀と白亜紀のものがあり、乾燥収縮の大きな硬質砂岩は地質年代が新しい白亜紀のもののみでした。このように、地質的な整理を行うことで、乾燥収縮が大きくなる骨材の産地をある程度特定できるものと考えます²⁾。

なお、JIS A 1129 附属書 A で測定される乾燥収縮率の大きさと、実環境下での構造物の寸法変化やひび割れ発生との関係については不明な点も残されており、今後の研究が待たれます。

6. アルカリ骨材反応

アルカリ骨材反応は、コンクリート中の細孔溶液と骨材が反応し、膨張性のゲルを生成することによって、コンクリートにひび割れ等の変状を生じさせるものです。1986年に旧建設省の通達「アルカリ骨材反応暫定対策について」が示され、その後、変状の発生が激減しています。一方で、対策を行っても変状が生じている事例も報告されています。そこで、通達の内容が妥当であるか否かについて、長期暴露試験の結果からの検討が行われています³⁾。

アルカリ骨材反応は(1)骨材中に反応性物質が存在、(2)コンクリート中の pH が高い、(3)外部からの水分供給、の3要因が揃ったときに生じます。このうち(3)を完全に防止することは困難なので、通達では抑制対策として、①無害な骨材の使用、pH を下げる方法として②アルカリ総量規制 (3 kg/m³ 以下) または③混合セメントの使用、の3とおりの対策を示しています。

全国から収集した粗骨材を用いてコンクリート供試体を作製し、茨城県つくば市において暴露試験が行われています。粗骨材は化学法の結果で「無害な骨材」(40種類)と

「無害でない骨材」(54種類)の2水準、アルカリ量は 5 kg/m³ と 3 kg/m³ の2水準です。暴露開始から 23 年が経過し、供試体のひび割れを調査した結果を図 - 7 に示します。

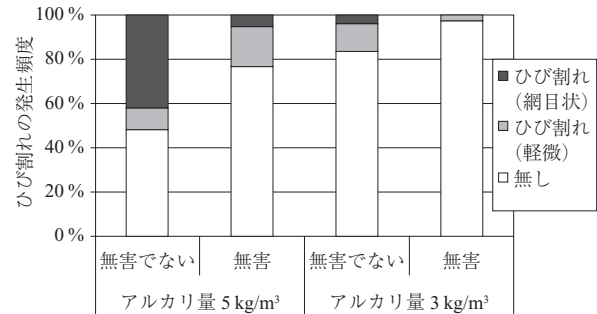


図 - 7 化学法による骨材試験結果と長期暴露した供試体のアルカリ骨材反応によるひび割れの関係

まず、アルカリ量が 5 kg/m³ の場合、「無害でない骨材」を使用した供試体の約半数にひび割れが発生しています。一方、無害な骨材を使用した場合、ひび割れの発生頻度は減少しているものの、一定割合存在する結果となっています。これは、反応性物質の中には、化学法による骨材試験の期間中にその反応性を確認できるほど反応性が高くないが、長期にゆっくりとアルカリ骨材反応を生じさせるものがあるためと考えられています。これは、モルタルバー法でも同様であり、試験によって反応性物質を 100% 排除することは困難といえます。そのような反応性物質として、たとえば、石英は結晶が肉眼で確認できるほど大きい場合は反応性がほとんどないが、結晶の大きさが微晶質（顕微鏡で区別できる程度）または陰微晶質（顕微鏡でも区別が困難）の場合、反応性は比較的小さいもののアルカリ骨材反応を生じさせる場合があることが知られています。

次にアルカリ量を 3 kg/m³ に抑制した配合について見てみます。無害でない骨材を使用した配合では 2 割弱の供試体に軽微なひび割れが確認されました。また、無害の骨材を使用した配合でも 1 体に軽微なひび割れが確認されました。

以上のように、骨材試験によって反応性を有する骨材を完全に排除することは困難であること、アルカリ量を 3 kg/m³ 以下に抑える抑制対策は、試験で「無害」の骨材を選択する方法と同等以上の確率で、アルカリ骨材反応の抑制が可能であることが分かります。

7. 乾湿繰り返し、その他

骨材中にローモンタイト（濁沸石）やモンモリロナイト（粘土鉱物）等が含有されていると、乾湿の繰り返しで骨材が劣化する場合があります。とくにローモンタイトの場合には含有率が 5% 以下の少量であっても有害な劣化が生じる場合があります。これらの岩石は表土に覆われた湿潤状態では安定していますが、新鮮で堅硬な岩であっても屋外に暴露するとわずかに数ヶ月で劣化することがあります。このため、砕石場を新たに開削するような場合には調査が必要とす⁴⁾。

このほかに、骨材中に黄鉄鋼が含まれるような場合には、酸化によってポップアウトが生じる場合があります。ただし、含有量が多くなければ、その現象はコンクリートのごく表面にかざられます。

8. おわりに

骨材の品質がコンクリートの特性に与える影響について、近年の研究成果をもとに紹介してきました。骨材は地域的な個性が非常に強い材料であり、その生産は中小企業を主体とした砂利業者、砕石業者に委ねられています。昨今、良質な天然骨材は減少し、また、乾燥収縮問題から石灰岩の需要が急増しています。今後のバランスの取れた安定供給には関係各位の連携、協力が必要不可欠です。研究分野でも、たとえば、寒冷地では凍結防止剤による凍害の促進が問題となっていますが、それに対応した骨材規格はまだ未整備で、今後の研究に頼る部分も多くありそうです。本稿を読まれた皆様が、少しでも骨材に関心をもっていたければ幸いです。

参考文献

- 1) 渡辺博志ほか：コンクリート用骨材について考える（第1回～最終回）、土木技術資料、Vol.56、No.1～6、2014.1～6
- 2) 渡辺博志、片平博ほか：骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮に与える影響と評価試験方法に関する研究、土木研究所資料、第4199号、2011.3
- 3) 河野広隆ほか：コンクリートの収縮特性評価およびひび割れへの影響に関する調査研究委員会報告書、日本コンクリート工学会、2012.8
- 4) 山田宏ほか：粗骨材の収縮特性の評価に関する検討、土木学会論文集E2、Vol.68、No.1、pp.63-71、2012
- 5) 古賀裕久ほか：屋外に23年以上暴露したコンクリートの観察結果に基づく骨材のASR反応性の検討、土木学会論文集E2、Vol.69、No.4、pp.361-376、2013
- 6) コンクリート標準示方書〔ダムコンクリート編〕、土木学会、2013

【2016年8月19日受付】

【講座・知っておきたいPC材料の開設にあたって】

プレストレストコンクリート（PC）の技術がわが国で実用化されてから、約70年が経過しています。その間、土木・建築分野で用いられるPCを構成する材料については、「コンクリート」、「PC鋼材」、「鉄筋」、「グラウトやシース」など、当時と今で大きくは変わりません。しかしその長い歴史のなかで、それぞれの材料の品質や特性が改良・進化してきたことで、現在の高品質・高耐久な構造物、建築分野における超高層建物などの実現に貢献しています。また一方で、長期間供用され続けている既設構造物の劣化や健全性の低下は、現在の大きな課題であり、それらを適切に維持管理していくためには、「補修・補強材料」も構造物の重要な構成要素になります。

58巻5号から開講した「講座・知っておきたいPC材料」は、PC構造物およびRC構造物を構成する材料にスポットをあて、回を分けてそれぞれの基本的な要求性能や最新事情を広く解説することにより、設計・施工・維持管理の最前線で活躍されている技術者にとっての実務の一助となることを目的としています。（掲載内容予定を表に示す）

過去、本誌において同様の趣旨の講座「PCの新しい材料入門講座」が連載されておりますが、約15年間が経過し、コンクリート構造物の分野では、高耐久化、高強度化、工期短縮および環境負荷低減といった近年のさまざまな要求から、新しい材料の実用化がなされ、多くの研究成果により有益な知見も蓄積されてきております。それに応じて、材料の規格の変更や技術基準の見直しも行われてきました。こうした材料技術の最近の動向を取り入れた内容とすることで、新しい材料の積極的な利用や研究開発へ繋がっていくことを期待しております。また、本講座と合せ、15年前の講座も参考にさせていただきたいと思っております。

本講座が、技術者にとっての一助となり、PCおよびRC分野の一層の技術発展に貢献できれば幸いです。（文責 講座部会）

	題名（予定）	掲載予定
第1回	最近のコンクリート技術と適用事例	58巻5号
第2回	骨材	本号
第3回	セメント	59巻1号
第4回	混和剤	59巻2号
第5回	混和材	59巻3号
第6回	PC鋼材	59巻4号
第7回	鉄筋	59巻5号
第8回	グラウト・シース	59巻6号
第9回	補修・補強材料	60巻1号

※編集者の不手際により掲載すべき第1回講座から掲載が遅れました。お詫び申し上げます。