

基礎講座シリーズ

コンクリートの 基礎講座

「コンクリートの基礎講座」推薦の言葉

平成26年8月
工学博士 上村 克郎



この「コンクリートの基礎講座」は本当の優れた基礎講座である。コンクリートに関する必要不可欠な知識を最小限、簡潔に、少ないページ数でまとめている。これを手にした初・中級のコンクリート関連技術者あるいは学生は自分が必要とする情報の80%は得ることができるであろう。あとの20%は、もしどうしても必要ならそれにふさわしい情報源は多数有る。例えば、教科書的なもの、著作的なもの、ハンドブック的なもの、辞書的なものなどである。私の書棚にはコンクリートの専門図書の他に、古典的なクラインローゲルの「コンクリート総覧」、技報堂出版、コンクリート工学会などの「コンクリート便覧」、小林一輔他、狩野春一他、依田彰彦他などの「コンクリート(技術または用語)事典」などが所狭しと飾ってある。ところが、いずれも分厚いもので活用する頻度は非常に少ないといっても過言ではない。

私がこの「コンクリート基礎講座」を推薦する根拠は、次のように説明できるかも知れない。有名なパレートの法則(80/20の法則)というのがある。法則を例題で説明すると「あなたにかかってくる電話の80%は、かけてくる人の20%からかかる」、「レストランで注文される食事の80%は、メニューの20%である」、「80%のテレビの視聴は、全番組のうちの20%である」、「成し遂げたい仕事に重要度をつけて上位の20%を成し遂げれば、80%の成果を上げることができる」など。この「コンクリートの基礎講座」にはコンクリートに関する顧客の要求(知りたい知識、質問など)の80%が含まれており、かつ、よくみるところは講座内容の20%に集中していると想像している。だから、ハンディで満足度は高い。

推薦のことば

東京大学 名誉教授
工学博士 友澤 史紀



50年も前のことだが、私が大学で建築学を学んだ時、建築材料演習ではセメントや骨材の性質を実際に試験し、調合計算をしてコンクリートを練混ぜ、スランプ試験や強度試験などをやった。教養学部で数学や物理、化学、また心理学や論理学など高校とは違う高尚な学問の一端に触れるような勉強をした直後なので、砂・砂利相手の試験にはちょっと面食らったが、なるほどこれが実物を造る工学の基礎の勉強かと自分を納得させていた。

後になって実感するのだが、この実物体験での一種の認識方法論は、コンクリートに対する理解に役立つだけでなく、他の材料や、建築学のみならず他のあらゆる分野の理解にとって大変重要で、私にとっては宝物のようにになっている。その意味で、最近のIT化の進展は、実物に触れることなくバーチャルな情報だけですべてが分かったような気分させてしまう傾向があり、大きな問題である。工学分野では、実務者であれ、管理技術者であれ、研究者であれ、常に実物に触れ、教科書や専門書で学んだことを実物で確認することが何にも増して重要なのである。最近の建設分野で数多く報告される設計ミスや施工ミス、あるいはインフラの維持管理ができる技術者がいないなどの問題は、ここに遠因があるといえるだろう。

その意味で、本書は、一見、単純な材料を用いて容易な工程で製造されるが、その実、複雑で奥深いコンクリートという重要な建設材料について、上から目線ではなく、抽象的な高邁な理論ではなく、あたかも実物に触れるような表記方法でコンクリート構成材料およびコンクリートそのものの基本的性質とその試験方法を解説したもので、貴重な教科書である。これは、著者である真野孝次さんの長年にわたる建材試験センターおよび各種委員会での活動の経験の中で、どうしても伝えたいと感じておられたことを記述されたためではないかと思う。

コンクリートを初めて学ぶ人だけでなく、材料、設計、施工、監理、構造物管理などに携わる人たちにとって、欠かせないコンクリートの基礎知識を学ぶものとして、本書を推薦したい。

推薦の言葉

宇都宮大学 名誉教授
工学博士 梶田 佳寛



この「コンクリートの基礎講座」の著者である真野孝次さんは、長年、建材試験センターにおいて、コンクリートの試験・検査、調査・研究に携わってこられました。また、開発途上国において現地の技術者に対してコンクリートの材料・調合、試験・検査、品質管理などに関する技術指導をされてきた経験を有しています。その豊富な経験に基づいて本講座は執筆されており、コンクリートの基礎を初めて学ぶ学生や、コンクリート技術のおさらいをしようとする中堅技術者にとって最良のテキストになっています。

私は、一昨年度まで大学において建築材料の講義を担当してまいりましたが、その中で初学生にコンクリートの基礎を教える際の教科書として適当なものが見当たらないと感じてきました。コンクリートの教科書は無数にあり、多くの先生方が教科書を執筆されております。その中には、私の目で見ると非常に優れた教科書であり、勉強になると思われるものも少なくありませんが、それぞれ執筆された先生方の専門の研究が反映され、初学生には難しいところがあり、教科書としては必ずしも適切ではないと思っておりました。一方、一般的な資料を集めてまとめた教科書は、一通りの内容は網羅されているものの、一貫した考えやねらいが感じられず、面白くありません。私も、初学生を対象にした教科書をいつか書いてみようと思っておりましたが、いつの間にか定年を迎えてしまったという思いがあります。

本講座の特徴として、最重要な用語がまとめて、完結にわかりやすく示されるとともに、トピックス欄「知っていましたか！コンクリートのア・レ・コ・レ」で、コンクリートに関連する幅広い知識が得られるようになっています。本講座は、初めてコンクリートの基礎を学ぶ学生やおさらいをしたい中堅技術者にとって必要十分な内容が盛り込まれており、かつ、無味乾燥ではない記述となっています。以上のような理由によって、本講座をご一読されるよう推薦いたします。

監修にあたって

工学院大学 建築学部 教授
工学博士 阿部 道彦



監修とは、辞書によると書籍の著述や編修を監督することとある。この講座の執筆者である真野孝次氏は、建材試験センターの先達の例にもれず、骨材をはじめとするコンクリートの構成材料やコンクリートに関する試験・実験について長年月の豊富な経験をもっている。また、日本建築学会や日本コンクリート工学会における委員会活動をはじめ、JISの作成などにも深くかかわってきており、基規準類の制定の背景も熟知している。その意味ではまさしく本書の執筆に最適といえるであろう。材料編、基礎編、耐久性編、製造・調合編および構造物編という5編より構成される本書の端々には、氏のそうした経験が垣間見える。したがって、本書を監修するにあたっては、その記載内容についてはあまり手を加えていない。留意したのは、学生のような初心者にも、理解がより容易になるように、記述の順序を変えたり、基規準類についても正規の表記とは異なる簡明な表記をしていただいたことぐらいであろう。また、同じ説明が何度も出てくるとの印象を受けることがあるかもしれないが、それはむしろ意図して行っていることである。それは、コンクリートは用語も含めて非常に理解が困難な材料であり、多方面から何度も見ることによって理解がより深まると考えたからである。

いずれにしても本書は、コンクリート技術者や初心者が学ぶには、内容が実務的にも重要な事項に特化されていて恰好の書といえるであろうし、また、そのための監修を行ったつもりである。多くの方々が本書を座右に置いて活用していただき、良好な鉄筋コンクリート構造物の製造と維持管理に役立てていただくことを切に願う次第である。

コンクリートの基礎講座

目 次

I	材料編 「セメント」	1
	1. セメントの原料は何	
	2. セメントの製造方法は	
	3. セメントの種類とその品質規格	
	4. 各種セメントの特徴と主な用途	
	用語の解説	
I	材料編 「骨材」	5
	1. 骨材とは	
	2. 骨材の種類と特徴	
	3. 骨材の品質規格	
	4. 骨材の品質とコンクリートの性能との関係	
	用語の解説	
I	材料編 「混和材料」	11
	1. 混和材料	
	2. 「混和剤」の種類と特徴	
	3. コンクリート用化学混和剤について	
	4. 「混和材」の種類と特徴	
	5. その他の混和材料	
	用語の解説	
II	基礎編 「フレッシュコンクリート」	16
	1. フレッシュコンクリートとは	
	2. フレッシュコンクリートに要求される性能	
	3. ワークアビリティとは	
	4. コンシステンシーとは	
	5. コンシステンシーに影響を及ぼす要因	
	6. フレッシュコンクリートの試験	
	用語の解説	
II	基礎編 「硬化コンクリート(強度性状)」	21
	1. コンクリートの特徴	
	2. 硬化コンクリートとは	
	3. 硬化コンクリートの強度性状	
	4. 強度性状に影響を及ぼす各種要因	
	5. 硬化コンクリートの強度性状に関連する試験方法	
	用語の解説	

II	基礎編 「硬化コンクリート(変形性状, その他の性状)」	27
	1. 硬化コンクリートの変形性状	
	2. 応力-ひずみ曲線	
	3. 弾性係数	
	4. 体積変化	
	5. 温度変化に伴う体積変化	
	6. その他の性状	
	用語の解説	
III	耐久性編 「その1. 中性化, 塩害」	33
	1. はじめに	
	2. コンクリートの中性化	
	3. コンクリートの塩害	
	用語の解説	
III	耐久性編 「その2. アルカリシリカ反応, 凍害ほか」	38
	1. アルカリ骨材反応とは	
	2. コンクリートの凍害とは	
	3. その他の劣化現象	
	用語の解説	
IV	製造・調合編 「その1:レディーミクストコンクリート」	44
	1. はじめに	
	2. レディーミクストコンクリートとは	
	3. JIS A 5308 制定の経緯	
	4. 現行のJIS A 5308の概要	
	用語の解説	
IV	製造・調合編 「その2:コンクリートの配(調)合設計」	50
	1. はじめに	
	2. コンクリート配(調)合設計	
	3. コンクリートの配(調)合設計の基本	
	4. コンクリートに要求される性能	
	5. 配(調)合設計の手順	
	6. 配(調)合設計の具体的な手順	
	7. おわりに	
	8. 用語の解説	
V	構造物編「非破壊試験(微破壊試験), コンクリートコアの試験」	57
	1. はじめに	
	2. コンクリート, 鉄筋を対象とした非破壊試験	
	3. コンクリート構造物から採取したコアの試験	
	4. おわりに	

コンクリートの基礎講座



コンクリートは、鋼材とともに土木・建築工事に欠かせない材料であり、セメント、水、細骨材、粗骨材および若干の空気泡で構成される構造材料です。

コンクリートの性能（作業性、強度発現性、耐久性）は、使用する材料の種類や構成割合によって大きく異なります。また、同じ構成割合であっても、使用する材料の種類や品質によって、コンクリートの性能は大きく異なります。そのため、良いコンクリートを作るためには、使用する材料の種類および特徴、コンクリートに及ぼす影響等を理解しておくことが極めて重要となります。

本基礎講座では、コンクリートに関する基礎的な知識について、次の5編に分け解説していきます。

- I 材料編：セメント、骨材、混和材料
- II 基礎編：フレッシュコンクリート、硬化コンクリート
- III 耐久性編：中性化、乾燥収縮、塩害、凍結融解、アルカリシリカ反応
- IV 製造・調合編：レディーミクストコンクリート、調合設計
- V 構造物編：非破壊検査、微破壊検査、コアの物理試験、コアの化学分析

第1回目は、コンクリートの材料の一つである「セメント」を取り上げて紹介します。

なお、本文の下線を付した用語は解説欄をご参照下さい。

I 材料編 「セメント」

1. セメントの原料は何

セメントの主な原料は、石灰石、粘土、けい石、鉄原料、せっこうです。セメント1トン製造するために約1.5トンの原料が必要となります。

原料のすべてを国内で調達することが可能で、大量に生産できることから、セメントは安価であり、取り扱い、運搬なども容易な材料です。また、高温（1450℃前後）で焼成するため、他産業から排出される廃棄物や副産物を原料や熱エネルギーの一部として取り込むことも可能です。

現在、セメント焼成用の燃料として、廃タイヤや廃プラスチックが、原料の一部として、火力発電所から発生する石炭灰、下水処理場から発生する下水汚泥やその焼却灰、製鉄所から発生するスラグ、工事現場で発生する建設残土、自動車部品工場から発生する鋳物砂なども有効利用されています。

2. セメントの製造方法は

セメントの製造方法は、原料（石灰石、粘土、けい石、鉄原料）を乾燥・粉砕・混合し、キルン内にて高温で焼成し、急冷してクリンカーにします。このクリンカーにせっこうを加えて微粉砕した粉末がセメントです。

我が国では、1875年に製造が開始され、ピーク時の1996年には約99,000千トン生産されていましたが、近年の生産量はピーク時の60%程度にまで縮小しています。

種類別の生産量は、普通ポルトランドセメントが全体の約7割、高炉セメントが約2割であり、需要割合は、生コン用が約7割、製品用が1割程度となっています。

3. セメントの種類とその品質規格

セメントは、ポルトランドセメント、混合セメント、エコセメント、その他のセメントに大別されます。通常、私達が目にするのは、ポルトランドセメントの中の普通ポルトランドセメントです。

それぞれのセメントの種類および特徴は次のとおりです。

(1) ポルトランドセメント

普通、早強、超早強、中庸熱、低熱、耐硫酸塩の6種類のポルトランドセメントと、それぞれに低アルカリ形があり合計12種類が日本工業規格（以下、JISという。）にその品質が規定されています。

ポルトランドセメントに関するJISは2009年に大幅に改正され、普通ポルトランドセメントの三酸化硫黄の規格値、普通・早強・超早強の各ポルトランドセメントの強熱減量の規格値が改正されているので注意して下さい（表1参照：品質規格値の詳細は省略していますので、具体的な規格値はJISを参照して下さい）。

なお、低アルカリ形（全アルカリ：0.6%以下）は、社会的な問題となった骨材のアルカリシリカ反応（詳細は材料編：骨材で紹介）の抑制対策の一つとして規定されたセメントですが、現在は、ほとんど（全く）生産されていません。

(2) 混合セメント

混合セメントとは、ポルトランドセメントに、高炉スラグ微粉末、シリカ質混合材、フライアッシュなどの混合材をあらかじめ混合したセメントの総称です。現在、高炉・シリカ・フライアッシュの3種類の混合セメントがJISに規定されています。

表1 セメントの種類とJISの品質規格

セメントの種類		規格番号	種類, 品質等	
ポルトランドセメント		JIS R 5210	種類	普通, 早強, 超早強, 中庸熱, 低熱, 耐硫酸塩
			物性ほか	比表面積, 凝結, 安定性, 圧縮強さ, 水和熱
			化学成分	酸化マグネシウム, 三酸化硫黄, 強熱減量, 全アルカリ, 塩化物イオン
			鉱物組成	けい酸三カルシウム, けい酸二カルシウム, アルミン酸三カルシウム
混合セメント	高炉セメント	JIS R 5211	混合材	高炉スラグ(急冷, 塩基度1.60以上)
			種類※	A種(5%を超え30%以下), B種(30%を超え60%以下), C種(60%を超え70%以下)
			物性	比表面積, 凝結, 安定性, 圧縮強さ
			化学成分	酸化マグネシウム, 三酸化硫黄, 強熱減量
	シリカセメント	JIS R 5212	混合材	純度の高いけい石などの粉末
			種類※	A種(5%を超え10%以下), B種(10%を超え20%以下), C種(20%を超え30%以下)
			物性	比表面積, 凝結, 安定性, 圧縮強さ
			化学成分	酸化マグネシウム, 三酸化硫黄, 強熱減量
	フライアッシュセメント	JIS R 5213	混合材	フライアッシュ(火力発電所から副産する石炭灰)
			種類※	A種(5%を超え10%以下), B種(10%を超え20%以下), C種(20%を超え30%以下)
			物性	比表面積, 凝結, 安定性, 圧縮強さ
			化学成分	酸化マグネシウム, 三酸化硫黄, 強熱減量
エコセメント		JIS R 5204	種類	普通エコセメント, 速硬エコセメント
			用途	普通エコセメント(無筋, 鉄筋コンクリート), 速硬エコセメント(無筋コンクリート)
			物性	比表面積, 凝結, 安定性, 圧縮強さ
			化学成分	酸化マグネシウム, 三酸化硫黄, 強熱減量, 全アルカリ, 塩化物イオン

※()内の数値は混和材の量を示す。

混合セメントは、混合材の分量(%)によって、A種、B種、C種に分類されますが、混合する混合材の分量の規定値がセメントの種類によって異なるので注意する必要があります。

(3) エコセメント

エコセメントとは、「製品1tにつき、都市ごみ焼却灰などの廃棄物を乾燥ベースで500kg以上使用してつくられるセメント(JIS R 5214)」と定義され、その特徴によって普通エコセメントと速硬エコセメントに分類されています。

普通エコセメントは、高強度コンクリートを除くレディーミクストコンクリートに使用することが可能ですが、速硬エコセメントは、塩化物イオン量が多いため、用途が無筋コンクリートに限定されるので注意が必要です。また、エコセメントは、製造工場数や生産量が少ないため、主にコンクリート製品用として地域限定で使用されています。

なお、JIS R 5214も2009年の改正で、普通エコセメントの強熱減量の規格値が3.0%以下から5.0%以下に緩和されています。

(4) その他のセメント

その他のセメントとしては、膨張性のセメント、白色ポル

トランドセメント、高ピーライト系セメント(低発熱用セメント)、超速硬セメント、アルミナセメント、などがあります。また、近年では、工事の条件などによって混合材の種類、混合量を指定して作る特別なセメントとして、混合材が1種類の「2成分系の低発熱セメント」、2種類の混合材を混合する「3成分系の低発熱セメント」も製造・使用されています。

ただし、これらのセメントは、いずれも生産量はごく僅かで、それぞれの特徴を活かして、特殊な工事に限定して使用されています。

4. 各種セメントの特徴と主な用途

セメントは、コンクリートおよびコンクリート構造物に要求される諸性能を考慮して使い分けられています。現在、レディーミクストコンクリートやコンクリート製品に使用されている主なセメントの特徴と用途は表2のとおりです。

今回は、「I 材料編：骨材」について紹介します。

表2 主なセメントの特徴と用途

セメントの名称	記号	特徴	主な用途
普通ポルトランドセメント	N	・一般的な性質のセメントである。	・土木・建築工事およびコンクリート製品用として最も多く使用されている。
早強ポルトランドセメント	H	・ C_2S が少なく、 C_3S が多い。 ・早期に高い強度が得られ、長期にわたり強度増進を示す。	・プレストレストコンクリート、寒中コンクリート、工期短縮を要する工事、工場製品などに使用されている。
超早強ポルトランドセメント	UH	・ C_3S が多く、粉末度が細かい。 ・Hセメントの3日強度を1日で発現する。	・緊急工事、寒中工事、グラウト用などに使用されている。
中庸熱ポルトランドセメント	M	・ C_3S 、 C_3A が少なく、 C_2S が多い。 ・初期強度は小さいが、長期強度は大きく、水和熱が低い。	・ダムなどのマスコンクリート、建築用の高強度コンクリートに使用されている。
低熱ポルトランドセメント	L	・Mセメントより、更に C_2S が多い。 ・Mセメントよりも水和熱が低く、初期強度は小さいが、長期強度は大きい。	・ダムなどのマスコンクリートのほか、高強度コンクリート、高流動コンクリートに使用されている。
耐硫酸塩ポルトランドセメント	SR	・ C_3A が少なく、硫酸塩との反応が少ない。 ・多くが中近東方面に輸出されている。	・硫酸塩を含む土地地帯での工事に適している。
高炉セメント	B	・潜在水硬性を有する高炉スラグを混合したセメントである。 ・初期強度は小さいが、長期強度は大きい。 ・高炉スラグを多量に混合すると、水和熱の減少、化学抵抗性、耐熱性、水密性に優れ、アルカリシリカ反応抑制効果がある	・ダム、河川、港湾工事などの土木工事および一般のコンクリート工事に広く使用されている。
フライアッシュセメント	F	・ボゾラン反応性を有するフライアッシュ (FA) を混合したセメントである。 ・良質なFAは、球形であるため単位水量が減少し、長期強度の発現が期待できる。 ・乾燥収縮は小さく、水和熱も低い。 ・アルカリシリカ反応抑制効果がある。	・ダムなどのマスコンクリートに使用されている。
シリカセメント	S	・純度の高いけい石などの粉末を混合したセメントである。	・オートクレープ養生を行うコンクリート製品に使用されている。

注) C_3S ：けい酸三カルシウム、 C_2S ：けい酸二カルシウム、 C_3A ：アルミン酸三カルシウム



用語の解説

コンクリート

狭義には、骨材をセメントペーストで固めた複合材料のことを示しセメントコンクリートともいう。広義には、骨材をセメント、石灰、せっこう、アスファルト、硫黄、プラスチックなどの結合材(糊)の役目をする材料)で固めた複合材料の総称(例:セメントコンクリート、アスファルトコンクリート、レジンコンクリート)。

レディーミクストコンクリート

工場で製造され、工事現場にフレッシュな状態で配達されるコンクリートのこと。生コンとも呼ばれている。

細骨材、粗骨材(次回詳しく解説)

細骨材とは、10mmふるいを全通し、5mmふるいを質量で85%以上通る骨材の総称。粗骨材とは5mmふるいに質量で85%以上留まる骨材の総称。砂・砂利と同義語として使用されることがあるが定義は異なる。

セメントの鉱物組成

ポルトランドセメントの性質は、鉱物組成(組成化合物)の割合によって異なるため、品質項目として、鉱物組成の上下限値が規定されている。なお、表2で使用しているが、組成化合物は、通常、次に示す記号で表される。

けい酸三カルシウム(C_3S)、けい酸二カルシウム(C_2S)、アルミン酸三カルシウム(C_3A)。

セメントの物理的性質

比表面積：セメント1g当りの全表面積を示す指標。比表面積が大きいほど粒子が細かいことを示す。

凝結：セメントは水と接触した時点から水和が始まり、徐々に硬化するが、硬化初期の一つ段階を示す。

JISでは、セメントペーストに専用の針を貫入し、貫入の程度によって、始発、終結を定義している。

安定性：硬化の過程で異常な膨脹を起こさないこと。

セメントの水和熱

セメントと水との反応(水和反応)に伴う発熱を水和熱という。これによりコンクリートは、硬化初期に内部温度上昇を起こす。初期に高温履歴を受けると長期強度の低下や温度ひび割れが懸念される。部材寸法が大きい場合、セメントの水和熱が低いことが要求される。

高炉スラグ[高炉スラグ微粉末](混和材編で詳しく解説)

銑鉄を製錬する際に副産するスラグ(滓)を水

や空気などで急冷し、微粉碎して調整した微粉末のこと。

フライアッシュ(混和材編で詳しく解説)

石炭火力発電所において、微粉炭を燃焼する際に発生する石炭灰を電気集塵機などで捕集した副産物のこと。

潜在水硬性

スラグなどに固定している酸化物がアルカリの刺激を受けて溶出し、水和物を生成して硬化する性質のこと。高炉スラグ微粉末は、潜在水硬性を有する代表的な混和材料。

ボゾラン反応

材料自体には水硬性はないが、材料に含まれる二酸化けい素が水酸化カルシウムと化合して、不溶性のけい酸カルシウム水和物を生成する反応のこと。フライアッシュは、ボゾラン反応を有する代表的な混和材料。

マスコンクリート

土木と建築で定義が若干異なるが、部材断面が大きく、コンクリート内部の最高温度と外気温との差が大きくなることが想定されるコンクリートの総称。代表的な例として、大断面の地中梁やダムコンクリートが挙げられる。

知っていましたか！ セメントのア・レ・コ・レ

・セメント、モルタル、コンクリートを混同していませんか？

これらの材料は、構成材料、用途、性能が大きく異なります。各材料の主な構成材料は次のとおりです。

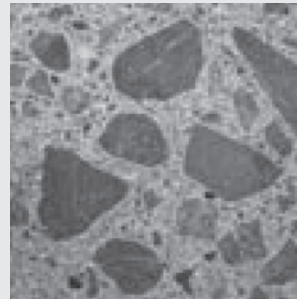
最近は少なくなりましたが、マスコミ等でも誤った使い方をしている場合が見受けられます。

セメント：水と反応して硬化する鉱物質の粉末

セメントペースト：セメント＋水

モルタル：セメント＋水＋細骨材

コンクリート：セメント＋水＋細骨材＋粗骨材



コンクリートの断面



モルタルの断面

・セメントはなぜ固まるのか

セメントを構成する化合物と水が反応（水和反応）して、水和生成物を生成し、やがて、安定したセメントペースト硬化体となります。一般的なセメントの強度は、28日程度で最終強度の80%程度になります。

なお、水和反応が終了するまでは、何十年もかかるといわれています。

・セメントの発明者

セメントの語源は、接着剤といわれています。広い意味でのセメントは、エジプトのピラミッドの目地材として使用されていたようです。

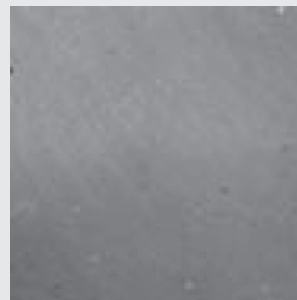
1756年、イギリスのスミートンが粘土と石灰岩を混ぜたセメントを発明し、その後、1824年、イギリスのジョセフ・アスプジンがポルトランドセメントの製造方法を発明し、特許を取得したのが有名です。

・ポルトランドセメントの名前の由来

硬化後の外観や特性がイギリスのポルトランド岬で産出される「ポルトランドストーン」に似ていることからポルトランドセメントと呼ばれるようになりました。

・セメントの流通形態

セメントの流通形態は、バラ、フレコン、袋の3種類に大別されます。バラ（バラセメント）は、専用の車両（粉粒体運搬車：バラセメント車）で運搬し、生コン工場等のサイロに納入されます。フレコンとは、フレキシブルコンテナパックの略で、通常1t入りで販売されます。



セメントペーストの断面



セメント（粉体）

私達がホームセンター等でよく見かけるのが、セメント専用紙袋で通常25kg入りです。

「セメント樽の中の手紙（著者：葉山嘉樹）」を読まれた方はご存じだと思いますが、かつて、セメントは樽に詰めて販売（400ポンド：約181kg）されていました。

紙袋は昭和初期から使用されはじめ、当初は50kg詰めでしたが、昭和46年に40kgに軽量化され、平成8年から現在の25kg詰めになっています。

・セメントと地名

愛知県豊田市は、トヨタグループの企業城下町（市名の由来）として有名ですが、セメントに関連する地名も数多くあります。代表的なものが、小野田市（現在の山陽小野田市）ですが、山口県西須恵村大字小野田に最初の工場がつけられた「小野田セメント製造株式会社」により発展したものです。また、山陽小野田市や津久見市には、「セメント町」という町名も残っています。

（文責：工事材料試験所 所長 真野 孝次）

コンクリートの基礎講座

I 材料編 「骨材」



第2回目はコンクリートの容積の大部分を占める「骨材」について紹介します。なお、本文の下線を付した用語は解説欄をご参照下さい。

1. 骨材とは

骨材とは、モルタルやコンクリートの骨(骨格)になる材料のことです。具体的には、モルタルまたはコンクリートを作るために、セメントおよび水と練り混ぜる砂利・砂、碎石・砕砂、スラグ骨材、再生骨材、軽量骨材やこれらと類似した材料の総称です。

骨材は、コンクリートの体積の約7割を占め、骨材の性質はコンクリートの諸性状に大きな影響を及ぼします。我が国は、全国に大きな河川があり、コンクリート用骨材として良質な河川産骨材の入手が容易でした。しかし、昭和40年代から良質な河川産骨材の入手が困難となり、最近では資源的・地域的な制約から、骨材の種類および使用方法は、多種多様化(例えば、天然骨材から碎石・砕砂、スラグ骨材に一部または全面的に移行。同一種類または異種類の骨材の混合使用。骨材の品質改善を目的とした混和材との併用。資源の有効利用の観点から再生骨材を使用など)しています。従って、使用する骨材の種類や品質に応じて、コンクリートの配(調)合条件を調整したり、施工方法等に配慮する必要があるといわれています。

なお、骨材の需要量は、1990年のピーク時には約9.5億トン(そのうちコンクリート用は約6億トン)でしたが、最近の需要量は約3.8億トン(そのうちコンクリート用は約2.6億トン)まで減少しています。

2. 骨材の種類と特徴

コンクリート用骨材は、わが国では、粒の大きさによって粗骨材と細骨材に分類します。粗骨材とは、5mm網ふるいに質量で85%以上とどまる骨材(概略5mm以上の骨材)のことです。一方、細骨材とは、10mm網ふるいを全部通り、5mm網ふるいを質量で85%以上通る骨材(概略5mm未満の

骨材)を示します。

また、採取場所・製造方法によって、天然骨材(砂利・砂)、碎石・砕砂、スラグ骨材、再生骨材、軽量骨材に大別されます。各種骨材の特徴は次のとおりです。

(1) 天然骨材(砂利・砂)

自然作用により岩石からできた骨材のことで、川、山、陸、海などから産出する砂利・砂の総称です。天然骨材の品質は、種類や産地によって大きく異なります。一般に、河川産骨材は、形状が球状であり、ワーカビリティの点でコンクリートに適しています。ただし、環境保全の観点から採取が規制され、供給量は年々低下し、近年の供給量は昭和40年代に比較して1/20程度まで減少しています。また、近年では海砂の採取規制に伴い、西日本での細骨材の確保が大きな課題となっています。

なお、砂利・砂は、粗骨材・細骨材と同義語として用いられることもありますが、砂利・砂は、あくまでも粗骨材・細骨材の一部です。

(2) 碎石・砕砂

岩石をクラッシャなどで粉砕し、人工的につくった粗骨材(碎石)・細骨材(砕砂)を示します。原石の岩種(岩石の種類)は20種類程度ありますが、安山岩、砂岩、石灰岩の3種類で全体の約7割を占めています。

碎石・砕砂は、一般に骨材強度が高く、セメントペーストとの付着も良いため高強度コンクリートに適しています。ただし、河川産骨材と比較すると、形状が角張っているためワーカビリティが低下する傾向があります。

なお、近年、天然骨材に替わり碎石・砕砂の使用量が増大し、粗骨材の約7割が碎石、細骨材の約3割が砕砂に移行しているといわれています。

(3) スラグ骨材

金属製錬などの際に副産するスラグ(滓)を原材料として人工的に作った細骨材・粗骨材の総称です。現在、日本工

業規格(以下、JISという)には、高炉スラグ骨材(粗骨材、細骨材)、フェロニッケルスラグ細骨材、銅スラグ細骨材、電気炉酸化スラグ骨材(粗骨材、細骨材)が規定されています。

高炉スラグ粗骨材は、天然骨材と比較すると、密度が小さく吸水率が大きく、また、他のスラグ骨材は、密度が大きく吸水率が小さいのが特徴です。

新しいスラグ骨材として、一般廃棄物や下水汚泥およびそれらの焼却灰を原料とした熔融スラグ骨材がありますが、原材料や用途が異なることから、JISでは前者をスラグ骨材、後者を熔融スラグ骨材と呼んで区別しています。また、資源の有効利用を目的として、フライアッシュを熔融固化したスラグ骨材の開発・研究も進められています。

(4) 再生骨材

再生骨材とは、建造物の解体などに伴って発生したコンクリート塊を原材料とし、破碎、磨砕、分級等の処理を行い製造したコンクリート用骨材の総称です。また、その品質によって、再生骨材H(高品質)、再生骨材M(中品質)、再生骨材L(低品質)の3種類に分類されます。

再生骨材Hは、高度な処理により、原骨材(当初の骨材)と同程度の品質を有しており、レディーミクストコンクリートに使用することが可能です。ただし、内・外装材などの不純物を含む場合があります。一方、再生骨材Mや再生骨材Lは、骨材の周囲にモルタルなどが付着しているため、天然骨材に比較して、密度が小さく吸水率が大きいのが特徴です。これらの再生骨材は、JISのレディーミクストコンクリートに使用することはできません。

なお、再生骨材Mを使用したコンクリートを「再生骨材コンクリートM」と称し、その用途としては、乾燥収縮や凍結融解の影響を受けにくい部位が想定されています。また、「再生骨材コンクリートL」は、裏込めコンクリートや捨てコンクリートなど、高い強度や高い耐久性が要求されない部材や部位に使用することを前提としています。

(5) 軽量骨材

コンクリートの質量の軽減、断熱などの目的で用いる普通の骨材よりも密度の小さい骨材の総称です。JISには、人工軽量骨材、天然軽量骨材、副産物軽量骨材の3種類が規定されていますが、レディーミクストコンクリートに使用されているのは、人工軽量骨材の一部だけです。

人工軽量骨材は、部材の軽量化に伴う経済性の向上を目的として、土木・建築構造用のレディーミクストコンクリートやカーテンウォールなどのプレキャスト製品用として広く利用されてきましたが、近年、その需要量は極端に低下しています。

なお、これまで9銘柄の人工軽量骨材が認定(旧建設省)されてきましたが、現在製造・販売されているのは2銘柄のみです。関連する団体・業界では、人工軽量骨材の新たな用途を求めて、開発・研究が進められています。

(6) 混合骨材

骨材の品質向上や資源の有効利用の観点から、複数の骨材を混合して使用する事例が増加しています。具体的な例としては、粒度分布を改善するため、粒度の細かい山砂に粒度の粗い砕砂を混合して使用する事例が挙げられます。混合骨材に要求される品質は、混合する骨材の種類によって異なり、JIS A 5308の附属書A(レディーミクストコンクリート用骨材)では、次のように規定しているので注意する必要があります。

①同一種類*の骨材を混合して使用する場合

混合後の骨材の品質が、それぞれの骨材の規定に適合しなければならない。ただし、混合前の各骨材の絶乾密度、吸水率、安定性およびすりへり減量については、それぞれの骨材の規定に適合しなければならない。

②異種類*の骨材を混合して使用する場合

混合前の骨材の品質が、塩化物量および粒度を除いて、それぞれの骨材の規定に適合しなければならない。

なお、混合後の骨材の塩化物量および粒度については、骨材の種類ごとに細かく規定されています。

*：JIS A 5308では、骨材の種類を、碎石及び砕砂、スラグ骨材(熔融スラグ骨材を除く)、人工軽量骨材、コンクリート用再生骨材H、砂利及び砂に分類し、異種類の骨材とは、例えば、「碎石及び砕砂」と「砂利及び砂」、「碎石及び砕砂」と「スラグ骨材」などの組み合わせを示します。

3. 骨材の品質規格

コンクリート用骨材の品質は、JISや関連学協会の示方書・仕様書に規定されています。ここでは、最も一般的なJISの内容について紹介します。JISに規定される品質規格の概要を表1に示します(詳細は各JISを参照)。

品質規格(品質項目、品質規格値)は、骨材の種類によって

表1 コンクリート用骨材の種類とJISに規定されている品質規格値の一例

種 別	記号	絶乾密度 g/cm ³ ※1	吸水率 % ※1	微粒分量 % ※2	規格番号	
天然骨材	砂利	—	2.5以上 (2.4以上)	3.0以下 (4.0以下)	1.0以下	JIS A 5308 附属書A
	砂	—	2.5以上 (2.4以上)	3.5以下 (4.0以下)	3.0以下 (5.0以下)	
碎石・砕砂	碎石	—	2.5以上	3.0以下	3.0以下 [5.0以下]	JIS A 5005
	砕砂	—	2.5以上	3.0以下	9.0以下	
高炉スラグ骨材	粗骨材	BFG	L : 2.2以上, N : 2.4以上	L : 6.0以下, N : 4.0以下	5.0以下	JIS A 5011-1
	細骨材	BFS	2.5以上	3.0以下	7.0以下	
フェロニッケル スラグ骨材	細骨材	FNS	2.7以上	3.0以下	—	JIS A 5011-2
銅スラグ骨材	細骨材	CUS	3.2以上	2.0以下	—	JIS A 5011-3
電気炉酸化 スラグ骨材	粗骨材	EFG	3.1 ≤ N < 4.0	2.0以下	5.0以下	JIS A 5011-4
	細骨材	EFS	4.0 ≤ H < 4.5	2.0以下	7.0以下	
再生骨材H	粗骨材	RHG	2.5以上	3.0以下	1.0以下	JIS A 5021
	細骨材	RHS	2.5以上	3.5以下	7.0以下	
再生骨材M	粗骨材	RMG	2.3以上	5.0以下	2.0以下	JIS A 5022 附属書A
	細骨材	RMS	2.2以上	7.0以下	8.0以下	
再生骨材L	粗骨材	RLG	—	7.0以下	2.0以下	JIS A 5023 附属書A
	細骨材	RLS	—	13.0以下	10.0以下	
人工軽量骨材	粗骨材	—	L : 1.0未満 M : 1.0以上 1.5未満 H : 1.5以上 2.0未満	—	—	JIS A 5002
	細骨材	—	L : 1.3未満 M : 1.3以上 1.8未満 H : 1.8以上 2.3未満	—	10以下	

注：※1：()内の値は、レディーミクストコンクリートの購入者の承認を得て採用できる規格値である。

※2：()内の値は、コンクリートの表面がすり減り作用を受けない場合の規格値である。また、[]内の値は、粒形判定実積率が58%以上の場合の規格値である。

表2 一般用途の場合の環境安全品質基準

項 目	溶出量 mg/L	含有量 mg/kg
カドミウム	0.01 以下	150 以下
鉛	0.01 以下	150 以下
六価クロム	0.05 以下	250 以下
ひ素	0.01 以下	150 以下
水銀	0.0005 以下	15 以下
セレン	0.01 以下	150 以下
ふっ素	0.8 以下	4000 以下
ほう素	1 以下	4000 以下

表3 港湾用途の場合の環境安全品質基準

項 目	溶出量 mg/L
カドミウム	0.03 以下
鉛	0.03 以下
六価クロム	0.15 以下
ひ素	0.03 以下
水銀	0.0015 以下
セレン	0.03 以下
ふっ素	15 以下
ほう素	20 以下

異なります。天然骨材および碎石・砕砂の場合は、原料(原石)が天然素材であるため、主な品質項目は、粒度・粒形、物理的性質、有害物質(不純物)に関する許容限度となります。

一方、スラグ骨材の場合は、原料が産業副産物であるため、粒度・粒形、物性等のほかに化学成分についても要求品質となります。さらに近年では、スラグ骨材のライフサ

イクル全般における環境安全性を踏まえて、有害物質の溶出量と含有量の上限值も規定(表2, 表3参照)されるようになっていきます。

再生骨材については、構造物の解体などにより発生したコンクリート塊が原材料であるため、別途、内・外装材などの不純物の上限值が規定されています。さらに、再生骨材HおよびMについては、アルミニウム片や亜鉛片などの両性金属の上限值に関する規定も設けられています。

なお、軽量骨材(人工軽量骨材)は、粒度・粒形、物理的性質、不純物に関する許容限度のほか、化学成分も要求品質となります。

4. 骨材の品質とコンクリートの性能との関係

(1) 骨材の粒度および寸法

細骨材の粒度は、フレッシュコンクリートの性状に大きな影響を及ぼします。粒度が粗すぎても細かすぎても問題があります。また、粒度が適切であれば、粗骨材の最大寸法が大きいほど、同程度のコンシステンシーを得るのに必要な水の量やセメントの量が低減でき、コンクリートの水和熱(温度上昇)や乾燥収縮の面からも利点が多くなります。

(2) 密度および吸水率

骨材の密度は、骨材を構成する鉱物および骨材中の空隙量によって異なります。密度は、コンクリートの配(調)合設計に必要な不可欠な指標ですが、造岩鉱物の違いに基づく密度の大小は、コンクリートの諸性能に悪影響を及ぼすことはありません。一方、同一岩種で吸水率(骨材内部の空隙量)が大きい骨材は、安定性損失質量やすりへり減量が大きく、いわゆる低品質な骨材の場合が多く、コンクリートの強度発現性や耐久性に悪影響を及ぼします。

なお、骨材は、複数の造岩鉱物で構成されていますが、造岩鉱物の密度は概ね 2.5g/cm^3 以上です。

(3) 単位容積質量および実積率

骨材の単位容積質量とは、容器に満たした骨材の質量を容器の容積で除した値で、また、実積率とは、それを骨材の絶乾密度で除した値です。一般的には、最大寸法が大きい骨材ほど単位容積質量は大きく、また、同程度の粒度分布、同程度の密度の場合は、単位容積質量が大きいほど、実積率が大きく、骨材の粒形が優れていると判断されます。粒形の優れた骨材は、同程度のコンシステンシーを得るのに必要な水の量やセメントの量を低減することが可能であり、コンクリートに適しているといえます。

なお、碎石・砕砂は、粒形の良否を判断する指標として粒形判定実積率に関する規定が定められています。

(4) 有害物質(不純物)

骨材には、さまざまな有害物質(不純物)が含まれます。有害物質(不純物)の量が少量であれば、コンクリートの諸性状に大きな影響を及ぼすことはありません。しかし、有害量含まれると、フレッシュコンクリートの性状、強度および耐久性に悪影響を及ぼします。主な有害物質(不純物)がコンクリートに及ぼす影響を表4に示します。

(5) その他

耐久性に優れたコンクリートを作るためには、化学的・物理的に安定しているとともに耐凍害性に優れた骨材を使用する必要があります。

骨材の耐久性は、安定性試験によって判断されていますが、安定性損失質量とコンクリートの耐久性の関係は、必ずしも整合しないという報告もあります。その他、骨材に要求される品質として、舗装版などコンクリートにすりへり抵抗性が要求される場合は、すりへり減量の少ない粗骨材が、耐火性を要求される構造物には、熱伝導率や熱膨張率が小さく、また、耐熱度の高い骨材が適しています。

近年、コンクリートの乾燥収縮が大きな話題となっています。コンクリートの乾燥収縮は、骨材の品質だけでなく、使用するセメントや混和材料の種類や品質、コンクリートの配(調)合条件などによって大きく異なります。従って、骨材の品質とコンクリートの乾燥収縮の関係を単純に論ずる

表4 主な有害物質(不純物)がコンクリートに及ぼす影響

有害物質(不純物)	対象となる主な骨材※	コンクリートに及ぼす影響(有害量含まれる場合)
粘土塊	山陸産骨材	コンクリート中の弱点となり、強度や耐久性が低下する。
微粒分	天然骨材：泥分 碎石・砕砂：石粉 再生骨材：泥分、石粉	泥分(粘土、シルト)は、①単位水量の増加、②ブリーディング量の減少、③凝結時間の変化、④レイタンス量の増加が問題となる。 石粉は、多すぎると泥分と同様な悪影響を及ぼすが、適度な粉末度・混入量であれば、強度の増進やワーカビリティの改善が期待できる。
有機不純物	河川産、山陸産骨材	フミン酸やタンニン酸などの有機物は、コンクリートの凝結を妨げ、強度や耐久性が低下する。
軟石	天然骨材 碎石・砕砂	軟らかい石片は、すりへり抵抗性を減少させるので、床版や表面の硬さが特に要求される場合に問題となる。
石炭・亜炭	山陸産骨材	石炭や亜炭に含まれる硫黄分の酸化の影響により、強度低下、耐磨耗性の低下、表面部が損傷する場合がある[かつては、運搬中(石炭を運搬した貨車を使用)に混入する場合もあった]。
塩化物	海浜産骨材 銅スラグ骨材(一部)	コンクリートの凝結、強度などに対する悪影響は少ないが、鋼材の腐食を促進させる(一部の銅スラグ骨材は、海水を用いて冷却している)。
有害鉱物	すべての骨材 (高炉スラグ骨材を除く)	最も代表的なものはアルカリシリカ反応性鉱物であるが、アルカリシリカ反応は、適切な抑制対策を講ずれば防止することが可能である。また、骨材中に化学的あるいは物理的に不安定な鉱物が含まれると、アルカリシリカ反応以外の原因によって、ひび割れやポップアウトなどの現象が生ずる場合がある。

※：有害物質(不純物)を含む可能性の高い骨材を示す。なお、軽量骨材は除外した。

表5 骨材の品質とコンクリートの乾燥収縮の一般的な関係

骨材の品質	コンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響
粒度・粒形 (主に細骨材)	粒度や形状が良いと、コンクリートの乾燥収縮率は小さくなる。(粒度や形状が適切だと、単位水量が減少し、コンクリートの乾燥収縮率は小さくなる。間接的に影響する。)
粗骨材の実積率 粒形判定実積率	実積率や粒形判定実積率が大きい(粒形が良い)と、コンクリートの乾燥収縮率は小さくなる。(粗骨材の粒形が良いと、粗骨材量が増加[モルタル量(セメントペースト量)が減少]して、コンクリートの乾燥収縮率は小さくなる。間接的に影響する。)
吸水率	吸水率が小さいと、コンクリートの乾燥収縮率は小さくなる。
弾性係数	弾性係数が大きいと、コンクリートの乾燥収縮率は小さくなる。
吸水膨張率	吸水膨張率が小さいと、コンクリートの乾燥収縮率は小さくなる。
乾燥収縮率	乾燥収縮率が小さいと、コンクリートの乾燥収縮率は小さくなる。
比表面積※	比表面積が小さいと、コンクリートの乾燥収縮率は小さくなる。

※：比表面積とは、骨材の表面積と表面から内部に繋がる空隙部分の表面積を加えて値 (cm²/g) を示す。

ことはできませんが、既往の研究成果によると、概ね、表5に示す関係が指摘されています。

なお、現時点では、骨材の物性値とコンクリートの乾燥収縮率の関係を具体的な数値(例えば、吸水率がX%のと

き、コンクリートの乾燥収縮率は $Y \times 10^{-4}$ など)で表すことはできません。

次回は、コンクリート用「混和材」を紹介します。

(文責：工事材料試験所 所長 真野 孝次)



用語の解説

ワカビリティ(コンクリート編で詳しく解説)

材料分離を生じることなく、運搬、打込み、締固め、仕上げなどの作業が容易にできる程度を表すフレッシュコンクリートの性質。

吸水率(%)

表乾状態の骨材に含まれている全水量を絶乾状態の骨材質量で除した値を百分率で表した指標。

乾燥収縮(コンクリート編で詳しく解説)

硬化したコンクリートは、乾燥に伴って収縮する。一般に、コンクリートの単位水量や水セメント比が大きいと乾燥収縮が大きくなる。コンクリートの乾燥収縮が大きいとコンクリートにひび割れが発生しやすくなる。

人工軽量骨材

けつ岩、フライアッシュなどを主原料として人工的に作られた構造用軽量コンクリート骨材のこと。構造用軽量コンクリート骨材には、人工軽量骨材のほか、天然軽量骨材、副産軽量骨材がある。

粒度

骨材の大小の粒の分布の状態のこと。粒度が粗い細骨材を粗粒(粗目)、細かい細骨材を細粒(細目)と称することがある。

絶乾密度(g/cm³)

骨材の絶対乾燥状態の質量を、骨材の絶対容積で除した値のこと(従来は、絶乾比重と称していた)。

絶対乾燥状態

骨材を105℃の温度で定質量になるまで乾燥し、骨材粒の内部に含まれる自由水を取り除いた状態を示す。絶乾状態と略称することがある。

表面乾燥飽水状態

骨材の表面水がなく、骨材粒の内部の空隙がすべて水で満たされている状態を示す。表乾状態と略称することがある。

すりへり減量(%)

骨材の摩耗に対する抵抗性を示す一つの指標。鋼製のドラムの中で鋼球と骨材を擦り合わせた際に、骨材がどの程度すりへるか(一部、衝撃破壊を含む)を示した値。

微粒分量(%)

骨材に含まれる75 μmふるいを通過する微粒末の量のこと。天然骨材の場合は、粘土やシルトが、碎石・砕砂の場合は、石粉が対象となる。

フレッシュコンクリートの性状(コンクリート編で詳しく解説)

フレッシュ(まだ固まらない)コンクリートの性状

のことで、具体的には、作業性、流動性、材料分離抵抗性、ポンプ圧送性などがある。

最大寸法(mm)「粗骨材の」

質量で骨材の90%以上が通過するふるいのうち、最小寸法のふるいの公称目開きで示される寸法のこと。

コンシステンシー(コンクリート編で詳しく解説)

フレッシュセメントペースト、フレッシュモルタル、フレッシュコンクリートの変形または流動に対する抵抗性のこと。

水和熱(温度上昇)(コンクリート編で詳しく解説)

コンクリートは、凝結・硬化する際に内部の温度が上昇する。コンクリート内部の温度上昇が著しいと、温度ひび割れが発生したり、コンクリート強度が低下する場合がある。一般に、コンクリートの内部温度は、セメント量が多いほど、また、部材寸法が大きいほど高くなる傾向がある。

安定性損失質量(%)

骨材の気象作用に対する抵抗性を示す一つの指標。骨材が硫酸ナトリウムの結晶圧によって、どの程度破壊・崩壊するかを示した値。

知っていましたか！ コンクリート、骨材のア・レ・コ・レ

・骨材の起源

我が国の骨材資源は、主に150万年前の更新世前後の堆積物、あるいはそれ以前の堆積岩や噴出岩といわれています。従って、人類の誕生と同時期かそれ以前ということになります。

・骨材の品質規格の歴史

我が国における骨材の品質規格の始まりは、1929年(昭和4年)に制定された日本建築学会の「コンクリート及び鉄筋コンクリート標準仕様書」(現行のJASS5の前身)になります。当時は、砂・砂利を対象として、粒度、微粒分量、有機不純物の3項目について品質が規定されていました。その後、昭和6年に土木学会の「鉄筋コンクリート標準示方書」でも同様な品質規格が制定されています。

なお、JISによる骨材(砂利・砂)の品質規格の制定は比較的遅く、現在のJIS A 5308の附属書Aに相当する品質規格は、1978年(昭和53年)の改正版からになります。

・骨材強度はどの程度

砕石および砕砂の原石強度は、原石の種類によって異なりますが、概ね100～200N/mm²程度(わかりやすく説明すると、1平方センチメートル当たり、1～2tfの力に耐えられる程度)であり、一般的なコンクリート強度の数倍の値です。なお、骨材粒子の強度を直接測定することはできません。

・骨材の耐熱度はどの程度

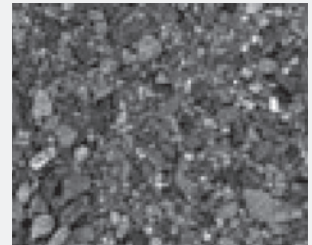
骨材の耐熱度は、岩種によって異なります。花崗岩や石灰岩の耐熱度は600℃程度、他の原石は1000℃程度といわれています。従って、高い耐熱度が要求される場合は、使用する骨材の岩種も検討する必要があります。

・強度が高い骨材を使用するほど、コンクリート強度は増加する？

コンクリート強度は、セメントペースト強度と骨材強度のうち、どちらか低い方の強度によって決まります。一般に、骨材強度はセメントペースト強度の数十倍ですので、それ以上強度が高い骨材を使用してもコンクリート強度が増加することはありません。ただし、軽量骨材は一般に強度が低いため、高強度の軽量コンクリートを作製するためには、強度の高い軽量骨材を使用する必要があります。



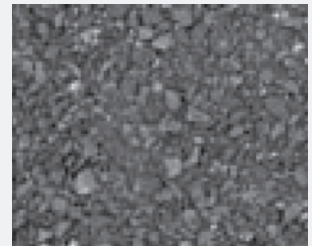
砂利



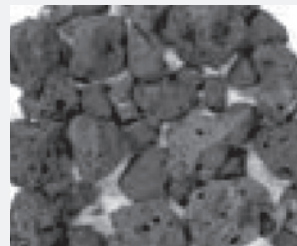
砂



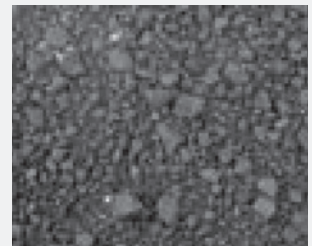
砕石



砕砂



電気炉酸化スラグ粗骨材



電気炉酸化スラグ細骨材

・骨材とリサイクル材料

スラグ骨材と再生骨材は、まさにリサイクル材料です。リサイクル材料に関する研究開発は、再生資源の有効利用と天然骨材不足への対応といった観点で進められ、最も古いリサイクル材料である高炉スラグ粗骨材は、1977年(昭和52年)にJISが制定されています。

スラグ骨材については、出荷からコンクリート構造物の施工、コンクリート製品の製造時および利用時だけでなく、解体後の再利用時または最終処分時を含めたライフサイクル全般において、スラグ骨材から影響を受ける土壌、地下水、海水等の環境媒体が、各々の環境基準等を満足できるように、環境安全品質が規定されるようになりました。

一方、再生骨材は、近年の改正で、アルミニウム片や亜鉛片など両性金属に関する規定が設けられるとともに、アルカリシリカ反応性試験方法として「再生骨材迅速法」が制定されています。

コンクリートの基礎講座

I 材料編 「混和材料」



第3回目は、コンクリートの品質を改善するために使用する「混和材料」について紹介します。なお、本文で下線を付した用語は解説欄をご参照下さい。

1. 混和材料とは

混和材料とは、コンクリートの品質を改善したり、特殊な性質を与えたりするため、コンクリートに混合使用する材料の総称です。JIS A 0203 (コンクリート用語) では、「セメント、水、骨材以外の材料で、コンクリートなどに特別の性質を与えるために、打込みを行う前までに必要に応じて加える材料」と定義されています。

混和材料は、薬剤的に少量用いる「混和剤」と、使用量が比較的多く、それ自体の容積がコンクリートの練上がり量に算入される「混和材」とに分類されます。一般的に、混和剤は有機質のものが、混和材は無機質のものが多くあります。

現在、コンクリートの品質改善および高性能化を目的として、さまざまな混和材料が使用されています。

2. 「混和剤」の種類と特徴

混和剤は、コンクリート用化学混和剤とその他の混和剤に大別されます。前者は、主として、コンクリートの品質を総合的に改善するために用いる混和剤であり、後者は、コン

クリートの品質改善や多様化する施工方法に対応するために開発・実用化された特定の機能を有する混和剤です。代表的な混和剤の主な作用と効果をまとめて表1に示します。

なお、混和剤の形態は、水溶液または粉体であり、通常は練混ぜ水に混和して使用します。使用量は、セメントの質量に対する比率で表わすことが多く、標準的な使用量は混和剤の種類によって異なりますが、セメント質量に対して多くても数パーセント程度ときわめて少量です。

3. コンクリート用化学混和剤について

コンクリート用化学混和剤は、最も一般的な混和剤であり、その種類と品質は、JIS A 6204 (コンクリート用化学混和剤) に規定されています。JISに規定されている化学混和剤の種類は、①AE剤、②高性能減水剤、③硬化促進剤、④減水剤、⑤AE減水剤、⑥高性能AE減水剤、⑦流動化剤の7種類です。また、減水剤およびAE減水剤は、それぞれ標準形、遅延形、促進形の3種類が、高性能AE減水剤および流動化剤は、それぞれ標準形、遅延形の2種類 (合計13種類) がJISに規定されています。

化学混和剤の種類と品質項目は表2のとおりです (品質規格値の詳細はJISで確認して下さい)。

ここでは、JIS A 6204に規定されているコンクリート用化学混和剤の中から代表的なものを取り上げ、その用途と

表1 混和剤の主な作用と効果

種類	主な作用	主な効果
AE剤	独立気泡の連行	コンクリートの品質を総合的に改善 (単位水量の低減, フレッシュコンクリートの性状改善, 強度発現性の向上, 耐久性の向上など)
AE減水剤 高性能AE減水剤	独立気泡の連行+セメントの分散	
減水剤 高性能減水剤	セメントの分散	コンクリートの品質を総合的に改善 (ただし, 空気を連行しないため, 耐凍害性の向上は期待できない)
流動化剤		練り混ぜたコンクリートの流動性の改善, 施工性の向上
硬化促進剤	初期硬化の促進	低温環境下における強度発現性の向上, 初期凍害の防止
防せい剤	不動態被膜の形成	塩化物による鋼材 (鉄筋) の腐食 (発錆) の防止
付着モルタル安定剤	凝結時間の遅延	トラックアジテータに付着したモルタルの凝結遅延
凝結遅延剤		コンクリートの凝結や初期硬化の遅延
促進剤	凝結時間の促進	初期の強度発現の促進, 低温環境下における初期凍害の防止
急結剤		凝結・硬化時間の著しい短縮, 超早期の強度発現の促進
収縮低減剤	水の表面張力の低減	コンクリートの収縮低減, ひび割れの抑制
分離低減剤	粘性の増大	コンクリートの分離抵抗性の向上
起泡剤, 発泡剤	空気泡の導入	コンクリートの軽量化, 断熱性の向上
防凍剤, 耐寒促進剤	凍結温度の低下	低温環境下における強度発現性の向上, 初期凍害の防止

表2 コンクリート用化学混和剤の種類と品質項目 (JIS A 6204)

品質項目	種類	AE 剤	高性能減水剤	硬化促進剤	減水剤			AE 減水剤			高性能 AE 減水剤		流動化剤	
					標準	遅延	促進	標準	遅延	促進	標準	遅延	標準	遅延
減水率		○	○	—	○	○	○	○	○	○	○	—	—	
ブリーディング量の比		—	—	—	—	○	—	○	○	○	○	—	—	
ブリーディング量の差		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	○	
凝結時間の差		○	○	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
圧縮強度比		○	○	○*	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
長さ変化比		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
凍結融解抵抗性		○	—	—	—	—	—	○	○	○	○	○	○	
経時変化		—	—	—	—	—	—	—	—	○	○	○	○	
塩化物イオン量		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
全アルカリ量		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

標準・遅延・促進は、標準形・遅延形・促進形を示す。○*：低温時（5℃）の強度発現性は形式評価試験だけで実施。
 ◎は型式評価試験および通常管理試験の両試験で実施する項目。○は型式評価試験だけで実施する項目を示す。

特徴を紹介します。

(1) AE 剤の特徴と用途

AE 剤は、コンクリート中に独立した微細な空気泡（平均直径0.05mm程度）を一様に発生させ、作業性および耐凍害性を向上させるために用いる混和剤です。コンクリート中に連行された空気泡は、ボールベヤリング的な作用をするため、作業性が改善され、所要の流動性を得るための水の量（単位水量）が減少します。また、この空気泡は、コンクリート中の自由水の凍結による膨張圧を緩和するため、コンクリートの耐凍害性も向上します。ただし、圧縮強度は空気量にほぼ反比例して低下し、空気量1%の増加に対し、同一水セメント比の場合、圧縮強度は4～6%程度低下します。

近年では、川砂利・川砂から砕砂・砕石への移行に伴い、より減水性能の優れたAE減水剤や高性能AE減水剤の使用が一般的となり、AE剤を単独で使用することはほとんどなく、AE減水剤や高性能AE減水剤の空気量を調整することを目的として使用されています。

(2) 高性能減水剤の特徴と用途

減水剤は、セメント粒子の表面に付着し、静電気的な反発作用などによってセメント粒子を分散させ、セメントペーストの流動性を向上させる混和剤です。高性能減水剤は減水剤に比較して、この減水性能がさらに優れ、使用量を増加しても過剰な空気連行性や凝結遅延性が少ないのが特徴です。用途としては、コンクリート製品、特に強度が高いコンクリート製品用のコンクリートに使用されています。

なお、高性能減水剤は、2006年の改正時に新たにJIS A 6204に規定された化学混和剤です。

(3) AE 減水剤の特徴と用途

AE減水剤は、AE剤が有する空気連行性と減水剤が有するセメントの分散作用とを併せ持つ混和剤であり、空気泡の連行、単位水量の減少、セメントの水和効率の増大など総合的効果が期待できる混和剤です。また、AE減水剤は標準形のほかに遅延形および促進形があり、遅延形はコンクリートの凝結を遅延させる作用があるため夏期に使用され

ています。一方、促進形は、凝結促進効果よりも初期強度発現の促進効果があるため、低温時における初期強度の発現や型枠存置期間の短縮などを目的として冬期に使用されています。

(4) 高性能AE減水剤の特徴と用途

高性能AE減水剤は、AE減水剤よりも高い減水性能と優れたスランプ保持性能を有する混和剤であり、通常強度のコンクリートから高強度コンクリートや高流動コンクリートまで幅広く使用されています。AE減水剤は、その性能を発揮するための使用量（標準使用量）の範囲がある程度限定されますが、高性能AE減水剤の場合は、比較的広い範囲の中から使用量を自由に選定することができます。従って、通常強度のコンクリートから高強度コンクリートまで幅広いコンクリートに使用することが可能です。

なお、現時点では明確に区分されていませんが、乾燥収縮を低減する機能を有する高性能AE減水剤（収縮低減タイプ）、コンクリートに適度の粘性を与えて分離抵抗性を付与した増粘形AE減水剤なども開発・実用化されています。

(5) 流動化剤の特徴と用途

流動化剤は、他の化学混和剤と異なり、あらかじめ練り混ぜられたコンクリートに「後添加」し、セメントの分散作用によってコンクリートの流動性を増大させる混和剤であり、流動化剤を使用したコンクリートを流動化コンクリートと呼びます。

標準形の流動化剤は、主に一般のコンクリート工事に使用され、遅延形は暑中コンクリートなどの凝結を遅延させたり、流動化後のスランプの低下を軽減させることを目的として使用されています。なお、流動化剤は、2006年の改正時に新たにJIS A 6204に規定された混和剤です。

4. 「混和材」の種類と特徴

混和材は、コンクリートの諸性状の改善およびコンクリートの高性能化を主な目的として使用されています。

混和材の形態は、ほとんどが粉体であり、セメントの一部と置換して使用する方法（内割り）とセメントに付加（外

表3 混和材の作用機構による分類と主な効果

作用機構に基づく分類	混和材の種類	主な効果
ポゾラン反応	フライアッシュ、シリカフェーム、各種ポゾラン(火山灰ほか)	水密性の向上、長期強度の増進、水和熱の低減、アルカリシリカ反応の抑制
潜在水硬性	高炉スラグ微粉末	高強度・高流動化、硫酸塩や海水に対する抵抗性の向上、アルカリシリカ反応の抑制
水熱反応	珪酸質微粉末	オートクレーブ養生によって高強度化
エトリンガイトの生成	無水石こう系混和材	超早強化、高強度化、急結・急硬
エトリンガイト等の膨張性水和物の生成	膨張材	ひび割れの抑制、ケミカルプレストレス
被膜生成、粒子分散	ポリマーディスパージョン、再乳化石粉末樹脂	付着性・曲げ強度の向上、ひび割れの抑制、物質の遮断性
不活性(非結合性)	石灰石微粉末、着色材	高流動化、水和熱の低減、着色

割り)する方法があります。使用量は、混和材の種類によって異なりますが、セメント質量に対して10～30%程度が一般的です。ただし、高炉スラグ微粉末は、他の混和材に比較して使用量が多く、セメント質量に対して60～70%(高炉セメントC種相当)を使用する場合があります。

なお、現在実用化されている混和材の多くは、その起源が産業副産物であることも大きな特徴です。

混和材の作用機構による分類と主な効果を表3に、JISに規定されている代表的な混和材の特徴と用途を次に紹介します。

(1) フライアッシュ (JIS A 6201: コンクリート用フライアッシュ)

フライアッシュは、石炭火力発電所で微粉炭を燃焼する際に副産する粉体状の石炭灰であり、JISでは強熱減量や粉末度などの品質によってI種～IV種に分類されています。良質なフライアッシュは表面が滑らかな球状で、コンクリートに混和した際、所要の流動性を得るための単位水量を低減することができます。また、適切な湿潤養生を行えば、ポゾラン反応により長期強度の増進、水密性の向上が期待できます。フライアッシュをセメントの一部と代替して使用した場合は、水和熱の発生が抑制されるのでマスコンクリートに適しています。さらに、アルカリシリカ反応の抑制効果も期待できます。

なお、未燃炭素含有量が多いフライアッシュは、AE剤の吸着量が増大し、空気連行量が低下する場合がありますため適切なAE剤の選択が重要となります。

(2) 膨張材 (JIS A 6202: コンクリート用膨張材)

膨張材は、水和反応によってエトリンガイトあるいは水酸化カルシウムの結晶を生成し、生成量の増大によりコンクリートを膨張させる作用がある混和材です。JISでは化学成分および物理的性質が規定されています。なお、現行のJIS(2008年追補)では、標準使用量を30kg/m³としていますが、現在市販されている膨張材の多くは、標準使用量が20kg/m³の低添加型膨張材です。

膨張材を混入したコンクリートは膨張コンクリートと呼ばれ、乾燥収縮を補償し、ひび割れの低減を目的として使用される場合とコンクリートに生ずる膨張力を鉄筋などで拘束し、ケミカルプレストレスを導入する目的で使用さ

れる場合に分類されます。

膨張材はセメントに比較して風化しやすいため貯蔵に注意が必要であり、コンクリートに混入する場合は膨張が水和反応に起因するため、材齢初期における十分な水分の供給が必要となります。

(3) 高炉スラグ微粉末 (JIS A 6206: コンクリート用高炉スラグ微粉末)

高炉スラグ微粉末は、高炉から排出されたスラグを急冷し、これを微粉砕して調整した粉体であり、JISでは比表面積(cm²/g)によって3000、4000、6000、8000の4種類が規定されています。

高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートは、水和熱による温度上昇を抑制し、温度ひび割れを低減することができます。ただし、養生温度が高くなると、活性が増し、水和熱が普通ポルトランドセメントを使用した場合よりも大きくなる場合があります。また、適切な湿潤養生を行えばセメントペーストが密実になるため、長期強度が増大し乾燥収縮が低減します。さらに硫酸塩や海水に対する抵抗性が改善され、アルカリシリカ反応の抑制効果も期待できます。なお、高炉スラグ微粉末の粉末度が大きい場合には、コンクリートの自己収縮が大きくなる場合があります。

(4) シリカフェーム (JIS A 6207: コンクリート用シリカフェーム)

シリカフェームは、金属シリコンやフェロシリコンを電気炉で製造する際に副産する超微粒子の粉体(製品には顆粒状もあります)であり、JISには化学成分、比表面積、活性度指数が規定されています。

シリカフェームをセメントと置換したコンクリートは、高性能AE減水剤と併用することにより所要の流動性が得られ、しかもブリーディングや材料分離が少なく、繊維補強コンクリートの場合には繊維の分散性が極めて向上します。また、マイクロファイラー効果によって強度発現性が増大すると共に、水密性や化学抵抗性なども向上します。また、多量に使用することによりアルカリシリカ反応の抑制効果が期待できるといわれています。コンクリートに使用する場合は、スラリー状(泥状の液体状態)にして使用するのが一般的です。ただし、最近の研究によると、低水セメント比の場合、凝結直後から大きな収縮(自己収縮)を生じ

ることが指摘されています。なお、我が国では、ほとんど副産されておらず、輸入に依存しています。

5. その他の混和材料

(1) 鉄筋コンクリート用防せい剤 (JIS A 6205)

鉄筋コンクリート用防せい剤は、コンクリート中の鋼材(鉄筋)が塩化物によって腐食(発錆)することを抑制するために使用される混和剤です。

コンクリート中の鋼材は、セメントの水和によって生じるアルカリ成分によって不動態被膜が形成され、通常は発錆しません。しかし、コンクリート中に一定以上の塩化物イオンが存在すると、塩化物イオンによって不動態被膜が破壊され発錆します。亜硝酸化合物を主成分とする防せい剤は、鉄イオンと亜硝酸イオンが反応して鉄筋を保護する被膜が形成され、鉄筋の発錆を抑制します。

(2) 付着モルタル安定剤 (JIS A 5308 附属書 D)

レディーミクストコンクリート工場では、廃棄物量の低減を目的として、トラックアジテータ内面などの付着モルタルをスラリー状にして再利用しています。

付着モルタル安定剤とは、コンクリートの全量を排出した後、トラックアジテータのドラムの内壁、羽根などに付着したフレッシュモルタル(付着モルタル)の凝結を長時間遅延させて再利用するために使用する薬剤です。付着モルタル安定剤を添加してスラリー状にしたモルタルは、アジテータ内または専用の容器に保存され、新たに積み込むコ

ンクリートと均質に混合して再利用されています。

なお、JISでは、付着モルタルのスラリー化は、コンクリートの練混ぜから3時間以内、スラリー状モルタルの保存は24時間以内と規定されています。

(3) 収縮低減剤

収縮低減剤は、現時点ではJISには規定されていませんが、コンクリートの乾燥収縮や自己収縮を低減する効果を持つ混和剤として注目されています。

収縮低減剤は、界面活性剤の一種であり、セメント硬化体の毛細管空隙に含まれる水の表面張力を低下させ、水の蒸発に伴う毛細管張力を小さくする機能を有しているといわれています。一般に、収縮低減剤は、添加量に伴って収縮低減効果に変化するため、コンクリートの乾燥収縮率を計画的に制御することが可能です。ただし、収縮低減剤の種類によっては、空気量の調整が難しく、凍結融解作用に対する抵抗性が低下する可能性があることが指摘されており、寒冷地での使用に際しては注意する必要があります。

なお、収縮低減剤を対象としたJISはありませんが、日本建築学会のJASS5 M-402でコンクリート用収縮低減剤の性能判定基準や品質基準が定められています。

次回は、「フレッシュコンクリート」について紹介します。

(文責：工事材料試験所 所長 真野 孝次)



用語の解説

独立気泡

コンクリート中の空気は、練混ぜ時に閉じこめられた空気とAE剤やAE減水剤などによって連行される微細な独立した空気に区分される。前者は100 μ m程度、後者は数10～100 μ m程度の寸法。なお、混和剤が空気を連行する性能のことを空気連行性という。

初期凍害

コンクリートが硬化するごく初期の段階に受ける凍害のこと。なお、凍害とは凍結または凍結融解作用によってコンクリートの表面劣化、強度低下、ひび割れ、ポップアウトなどが生じる現象のこと。

不動態被膜(不動態皮膜)

コンクリートはアルカリ性が高いため、コンクリート中の鋼材の表面には緻密な不動態被膜が形成される。不動態被膜は、鉄の酸化物またはオキシ水酸化物であり腐食抑制作用があるため、鋼材は腐食しにくい状態になっている。

トラックアジテータ

コンクリート(主に、レディーミクストコンクリート)の運搬に使用する車両。

減水性能

AE剤やAE減水剤を使用すると、同一程度の流動性を得るのに必要な水の量を低減するこ

とができる。この必要水量を低減する性能を減水性能という。

スランプ保持性能

コンクリートの流動性(スランプ)は、時間の経過に伴って低下する。高性能AE減水剤や流動化剤は、この流動性の低下を抑制する性能があり、この性能をスランプ保持性能という。なお、高性能AE減水剤と流動化剤のスランプ保持性能を比較すると、一般に高性能AE減水剤の方が優れている。

潜在水硬性

スラグなどに固定している酸化物がアルカリの刺激を受けて溶出し、水和物を生成して硬化する性質のこと。高炉スラグ微粉末は、潜在水硬性を有する代表的な混和材料。

ポゾラン反応

材料自体には水硬性はないが、材料に含まれる二酸化けい素が水酸化カルシウムと化合して、不溶性のけい酸カルシウム水和物を生成する反応のこと。フライアッシュは、ポゾラン反応を有する代表的な混和材料。

エトリンサイト

水とセメントとの反応の初期段階において、 C_3A とせつこうとの反応により生成する鉱物で針状結晶を形成する。

ケミカルプレストレス

膨張剤によるコンクリートの膨張を鉄筋などで拘束することによってコンクリートに蓄えられた圧縮応力。化学反応により発生するため、このように呼ぶ。ヒューム管などのコンクリート製品の高強度化に実用されている。

自己収縮

セメントの水和反応の進行に伴って、セメントペースト、モルタル、コンクリートの体積が減少し、硬化体が収縮する現象のこと。なお、硬化したコンクリートやモルタルが乾燥に伴って収縮する現象を乾燥収縮という。

マイクロファイラー効果

超微粒子のシリカフェームがセメント粒子の間に充填され、セメントペーストが密実となる効果のこと。このマイクロファイラー効果によって、強度発現性、水密性、化学抵抗性が向上するといわれている。

エフロレッセンス

れんが、タイルの下地や目地、コンクリートのひび割れ部などに水が作用して表面に発生する白色の結晶生成物。主成分は炭酸カルシウム。白樺、洩(はな)垂れ、ともいわれる。

知っていましたか！ コンクリート、混和材料のア・レ・コ・レ

・混和材料の歴史

ローマ時代に凝灰岩系の天然ポゾランがコンクリートに混和されたのが混和材の起源といわれています。また、混和剤については、紀元前では石灰モルタルに豚油を混合したり、ローマ時代には牛の血や油、牛乳などが使用されていたといわれています。

・化学混和剤の歴史

20世紀前半、アメリカでコンクリート舗装の凍害調査時に耐凍害性に優れた箇所があることから微細な空気泡の有効性が偶然発見されました。この発見がAE剤の開発に繋がり、1938年にAEコンクリートを使用した道路が初めて施工されました。

我が国においては、アメリカからAE剤(1948年)および減水剤(1950年)が導入されたのがきっかけとなり、ダム用のコンクリートに使用され、その効果が明らかになるとともに急速に広まりました。

・コンクリート中の空気の役割

空気は、良いコンクリートを製造するために必要な材料(構成要素)の一つです。コンクリートに空気が混入すると、水密性や強度が低下すると思われがちです。実際、コンクリート中の空気量が増加すると、圧縮強度は低下します。しかし、化学混和剤によって空気(微細な独立気泡)が連行されたコンクリート(AEコンクリート)は、単位セメント量を同じとすると単位水量が低減できるため、空気の連行に伴う強度低下と減水による強度増加とがほぼ相殺されます。また、AEコンクリートは、ワーカビリティが大きく改善されるため、型枠への充填性が良好となり打ち込み欠陥が減少します。さらに、凍結融解作用に対する抵抗性も大きく向上します。

・尿素によるコンクリートの乾燥収縮量の低減

コンクリートの乾燥収縮量を低減する方法として、膨張材や収縮低減剤などの混和材料を使用する方法がありますが、新たな試みとして、尿素の働きでコンクリートの乾燥収縮量を大幅に低減するコンクリート技術が開発・実用化されています。その仕組みは次のように説明されています。

粒状の尿素をコンクリートに混ぜると、尿素は液化し、液化した分だけ単位水量が低減できます。また、液化した尿素は水に比べて蒸発しにくいいため、コンクリートからの蒸発量が減少します。この複合作用によって、コンクリートの乾燥収縮量が大幅に低減するというこ

です。

なお、尿素は、無色・無臭であり、常温では固体で、水に溶けやすく、水溶液は蒸発しにくい性質をもっており、化粧品(保湿クリーム)や肥料にも使用されています。

・混和材とリサイクル材料

本文で紹介したように現在実用化されている混和材の多くは産業副産物が起源となっています。環境保全の観点から産業副産物を有効に利用するだけでなく、コンクリートの高性能化に繋げた諸先輩方の努力に敬意を表する次第です。

・静的破砕剤(静的破砕剤工法)

混和材料ではありませんが、少し変わった材料(一種のコンクリート)について紹介します。

テレビ等でコンクリート構造物の爆破解体を見る機会があると思いますが、我が国では、安全性や振動・騒音等の問題で、生活区域等の近傍での火薬類の使用は制限されています。そこで、コンクリート構造物を解体する方法として静的破砕剤工法が採用されています。静的破砕剤工法とは、穿孔した孔の中に生石灰系の膨張剤を充填し、水和反応に伴う膨張圧を利用してコンクリートや岩石を破砕する工法です。通常、破砕まで2～24時間かかりますが、30分～1時間程度で効果が期待できる速効タイプも開発されています。

・コンクリート用の練混ぜ水

誌面の都合で本文では割愛しましたが、コンクリート用の練混ぜ水について簡単に紹介します。

飲用に供される水は、練混ぜ水として理想ですが、上水道水以外の水であってもJIS A 5308 附属書C(規定)「レディーミクストコンクリートの練混ぜに用いる水」の品質基準を満足する水であれば練混ぜ水として使用することができます。また、トラックアジテータやミキサなどの洗浄水から骨材を除いた回収水も前述の品質規格値を満足すれば、条件付きではありますが、練混ぜ水として使用することが可能です。ただし、JASS5(建築工事標準仕様書・同解説, JASS5 鉄筋コンクリート工事)では、高強度コンクリートに回収水を使用することは禁止されています。なお、無筋コンクリートでは、鉄筋の腐食を考慮する必要がないので、海水を用いることができますが、長期における強度増進が小さく、耐久性を低下させ、エフロレッセンスが発生しやすいので注意する必要があります。

コンクリートの基礎講座

Ⅱ 基礎編 「フレッシュコンクリート」



コンクリートの基礎講座では、これまで3回にわたり“コンクリート材料”について掲載してきました。今回からは、Ⅱ 基礎編と題して、“コンクリートの基礎的な性能”について紹介します。

なお、本文で下線を付した用語は解説欄をご参照下さい。

1. フレッシュコンクリートとは

コンクリートは、セメントと水が接触した直後（練混ぜ直後）から水和反応が始まり、水和反応に伴って徐々に流動性を失い、やがて凝結・硬化します。フレッシュコンクリートとは、この一連の過程において、練混ぜ直後から凝結・硬化までの「まだ固まらない状態にあるコンクリート」のことです。

フレッシュコンクリートに要求される性能は、主に施工性に関連するものですが、フレッシュコンクリートの性状は、硬化後のコンクリートの強度発現性や耐久性にも影響を及ぼします。

2. フレッシュコンクリートに要求される性能

フレッシュコンクリートには、①「運搬、打込み、締固め、表面仕上げなどの一連の作業が適切に行えること」②「施工時および施工前後で、コンクリートの均質性や品質が変動しないこと」③「作業が終了するまでは所要の流動性を有し、その後は適切な速度で凝結・硬化すること」など作業に適したワーカビリティが要求されます。また、コンクリートの種類によっては、④「所定の温度、所定の単位容積質量を有すること」が求められる場合もあります。

コンクリートの施工を適切に行い、耐久性に優れたコンクリート構造物を構築するためには、ワーカビリティに関連するコンシステンシー、プラスティシティー、ポンパビリティ、フィニッシュアビリティなどの諸性状をバランス良く確保することが重要となります。

3. ワーカビリティとは

ワーカビリティとは、JIS A 0203（コンクリート用語）では、「材料分離を生ずることなく、運搬、打込み、締固め、仕上げなどの作業が容易にできる程度を表すフレッシュコンクリートの性質」と定義しています。

ワーカビリティに影響を及ぼす要因としては、コンクリートの配（調）合条件、使用材料の種類および品質、練混

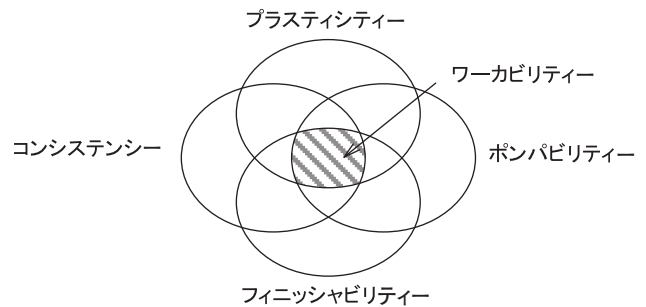


図1 ワーカビリティの概念図

ぜ時間などが挙げられます。例えば、コンクリート中の水の量を増加させると、流動性が増大して施工は容易になります。しかし、粘性が低下して材料分離が生じやすくなります。また、細骨材の割合を少なくしたり、粒子の粗い細骨材を使用すると、コンクリートの流動性は増大しますが、過度になると材料分離を生じやすくなります。このように、ワーカビリティに影響を及ぼす要因には、コンクリートの流動性と材料分離抵抗性に対して相反する影響を及ぼす要因が多いため、両者を同時に満足させることが難しいのが実状です。

なお、ワーカビリティの判定の基準は、構造物の種類、施工箇所、施工方法などによって異なるため具体的な数値ではなく、ワーカビリティが「良い」、「悪い」、「作業に適する」などで表します。

4. コンシステンシーとは

コンシステンシーとは、変形あるいは流動に対する抵抗性の程度を表すものです。コンクリートのコンシステンシーを測定する方法には、①「コンクリートに一定の力（重力、衝撃など）を加えた時の変形量を測定する方法（スランプ試験、フロー試験など）」②「所定の変形を生じさせるのに必要な仕事量を測定する方法（リモルディング試験、振動台式コンシステンシー試験など）」③「その他（レオロジー試験、締固め係数試験など）」があります。次に、代表的な試験方法を紹介します。

① スランプ試験

コンクリートのコンシステンシーを測定する最も一般的な試験であり、図2に示すように、スランプコーンを引き上げた際のコンクリート頂部の沈下量（スランプ）からコンシ

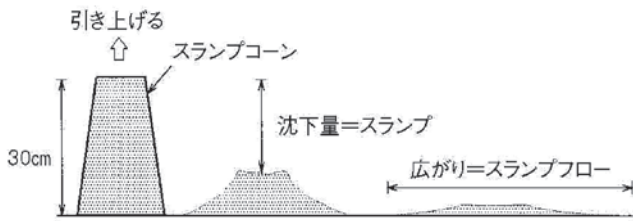


図2 スランプおよびスランプフロー試験の概要

ステンシーを評価する方法です。具体的な試験方法は、JIS A 1101 (コンクリートのスランプ試験方法) に規定されています。

試験装置や試験方法は簡便ですが、一般的 (スランプ5～18cm程度) なコンクリートの場合、スランプはコンシステンシーを的確に表すといわれています。また、スランプとタッピングなどを組み合わせることによって、かなりの確にワーカビリティを判断することができます。

また、同様な試験として、スランプフロー試験が JIS A 1150 (コンクリートのスランプフロー試験方法) に規定されています。スランプフロー試験は、流動性の高い高流動コンクリートなどを対象とした試験であり、図2に示すようにスランプコーンを引き上げた際のコンクリートの広がり (スランプフロー) からコンシステンシーを評価する方法です。

② 振動台式コンシステンシー試験

スランプ試験では硬練りコンクリートのコンシステンシーを評価することが難しく、また、スランプは重力による変形を示すものであるため、振動締固めのような外力を受けた場合に示す性状を反映するものではありません。このようなスランプ試験の欠点を補うために考案された試験が振動台式コンシステンシー試験です。この種の試験としては、フロー試験 (旧 ASTM C 124-71)、リモデルング試験、VB試験などがあります。我が国では、舗装コンクリートのコンシステンシー試験として、VB試験の改良型 (土木学会規準、JSCE-F501) が採用されています。

5. コンシステンシーに影響を及ぼす要因

コンシステンシー (コンクリートのスランプ) には、材料の種類および品質、単位水量、単位セメント量、細骨材率などの配 (調) 合、コンクリート中の空気量や練上がり温度などが影響を及ぼします。

各種要因がコンクリートのスランプに及ぼす影響 [標準的な影響度] を表1に示します。

(1) フレッシュコンクリートの性状：材料分離

コンクリートの材料分離とは、運搬中、打込み中または打込み後において、構成材料の分布が不均一になる現象のことで、①骨材 (粗骨材) が局部的に集中する現象。②時間の経過に伴い、コンクリート上面に水が浮き上がる現象 (ブリーディング) があります。材料分離が生じる主な要因は、コンクリートが数 μm ～数10mmまでの粒径を有する固体

表1 代表的な要因がスランプに及ぼす影響

要因	スランプに及ぼす影響 [標準的な影響度]
水量	水量が増加するとスランプは増大 [水量1.2%増減 → スランプは1cm程度増減]
空気量	空気量が増加するとスランプは増大 [空気量1%増減 → スランプは2.5cm程度増減]
粗骨材	粒形が良いとスランプは増大、水量が等しい場合、粒形判定実積率とスランプは直線関係
細骨材	水、セメント量が等しい場合、細骨材の割合が多いほど、粒子が細かいほどスランプは低下
化学混和剤	化学混和剤を使用すると、セメント粒子の分散作用、連行した空気の影響でスランプは増大
混和材料	良質なフライアッシュを使用すると、ボールベアリング的な働きによってスランプは増大
温度	コンクリート温度が高いとスランプは低下 [10℃上昇 → 2～3cm程度低下]

と液体の混合物であること、さらに、構成材料の密度が1～3g/cm³程度と大幅に相違していることが挙げられます。

なお、材料分離の程度は、フレッシュコンクリートの性状が同一であっても、施工方法や施工の良否によって著しく変化します。また、材料分離が生じると、コンクリートに豆板 (ジャンカ) などが発生し、強度発現性だけでなく水密性や耐久性も低下します。

① 骨材の分離

骨材の分離は、重力に起因するものであり、骨材を分離させる力は粒子の半径の3乗に比例します。また、分離を妨げる力は、粒子が周囲から受ける抵抗であり、これは粒子の半径の2乗に比例します。従って、骨材粒子が大きいほど、またモルタルの粘性が低いほど分離しやすい傾向があります。

- 骨材の分離に影響を及ぼす代表的な要因は次のとおりです。
- ・コンクリート中の水量が多く、スランプの大きいコンクリートほど分離しやすくなります。また、逆に水量が少なすぎると、モルタルの粘性が不足して分離しやすくなります。
 - ・粒形の優れた粗骨材を使用すると、扁平な骨材や細長い骨材を使用した場合よりも分離が生じにくくなります。また、細骨材の場合は、細粒分や細骨材率が増加すると、材料分離抵抗性が向上します。
 - ・化学混和剤や良質なフライアッシュを使用すると、コンクリート中の水量を低下させることができ、材料分離抵抗性が向上します。

② 水の分離

打ち込み後のコンクリートは、密度の大きいセメントや骨材が沈降し、密度の小さい水が微細な物質を伴って上昇します。この水が上昇する現象 (水の分離) をブリーディングといいます。具体的な試験方法は、JIS A 1123 (コンクリートのブリーディング試験方法) に規定されています。

コンクリートの表面仕上げを行うためには、ある程度のブリーディングが必要ですが、ブリーディングが過度になると、水平鉄筋の下端や粗骨材の下側に空隙を形成するた

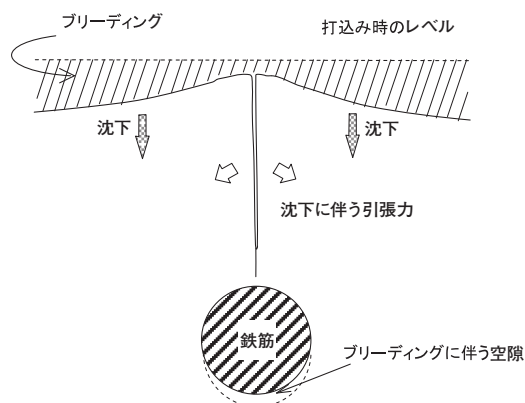


図3 ブリーディングおよび沈下ひび割れの概念図

め、水みちとなって水密性が低下したり、コンクリートと鉄筋との付着力が低下します。また、ブリーディング速度よりも表面の乾燥速度が速いと、コンクリート表面にプラスチック収縮ひび割れが発生したり、ブリーディングによるコンクリートの沈下に伴い、**図3**に示すように、鉄筋に沿って沈みひび割れが発生することがあります。

なお、ブリーディングに伴って上昇した微粒分は、コンクリート表面に薄膜となって沈積するレイタンスとなり、打継ぎ部の弱点となるため必ず除去してコンクリートを打ち継ぐ必要があります。

ブリーディングに影響を及ぼす代表的な要因は次のとおりです。

- ・粉末度が大きく（粒子が細かく）、凝結時間が早いセメントほど、ブリーディングは少なくなります。
- ・細骨材の粒度が細かいほど、ブリーディングは少なくなります。
- ・水セメント比が大きいほど、また、スランプが大きいほど、ブリーディングは増加します。
- ・化学混和剤や良質なフライアッシュの使用は、ブリーディングの低減に有効です。
- ・コンクリートの温度が低いほど、ブリーディングは長く続きます。
- ・過度の締め固めや上面のこて仕上げは、ブリーディングを増加させます。
- ・打込み速度が速いほど、1回の打込み高さが高いほど、ブリーディングは増加します。

(2) フレッシュコンクリートの性状：空気量

コンクリート中の空気泡は、エントラップトエアとエントレインドエアに大別されます。前者は、コンクリートの練混ぜ時にモルタルに閉じこめられた比較的大きな気泡（100 μ m程度以上）であり、その量はコンクリートの容積の2%程度以下です。この空気泡はコンクリートの品質改善には役立たないといわれています。

一方、後者は、化学混和剤を用いて計画的にコンクリートに導入された微細な独立気泡（数10～100 μ m程度）であり、

この空気泡は、コンクリートのワーカビリティを改善するだけでなく、耐凍害性を向上させます。具体的には、同程度のワーカビリティのコンクリートを製造する場合、エントレインドエアを1%増加させると、細骨材の割合を全骨材容積に対して0.5～1.0%、単位水量を約3%少なくすることが可能となります。また、耐凍害性を考慮すると、コンクリート中の空気量は3～6%が必要といわれています。

空気量は、一般に粗骨材の最大寸法に応じて3～6%とするのが標準ですが、粗骨材の最大寸法が小さいコンクリートほど空気量を多くします。これは、耐久性に優れたコンクリートとするためには、モルタル中の気泡間隔係数を一定の値以下にする必要があります。粗骨材寸法の小さいコンクリートは単位モルタル量が多くなることによります。

空気量の試験方法としては、JIS A 1116（質量方法）、JIS A 1118（容積方法）、JIS A 1128（空気室圧力方法）が規定されていますが、普通コンクリートの場合、JIS A 1128に規定されるエアメータを用いる方法が一般的です。

フレッシュコンクリートの空気量に影響を及ぼす代表的な要因は次のとおりです。

- ・化学混和剤の使用量が増加すると空気量も増大します。
- ・セメントの粉末度およびセメントの使用量が増加すると空気量は減少します。
- ・ポゾランやその他の微粉末混和材の使用量や粉末度が増加すると空気量は減少します。
- ・細骨材中の0.3～0.6mmの粒子が多いと空気量は増加します。また、細骨材の割合が増加しても空気量は増加します。
- ・コンクリート温度が低いと空気量は増加します。
- ・コンクリートの練混ぜ当初、空気量は急速に増加し、3～5分程度で最大に達し、その後は、徐々に減少します。
- ・コンクリートの運搬、振動締め固めなどによって、空気量は約1/4～1/6程度減少します。

(3) フレッシュコンクリートの性状：凝結時間

フレッシュコンクリートには、作業が終了するまでは所要の流動性を有し、その後は適切な速度で凝結・硬化することが要求されます。コンクリートの凝結が早すぎても、また、遅すぎても、打込み、締め固め、仕上げ作業に支障をきたす場合があります。

コンクリートの凝結の程度は定量的に表すことが難しく、コンクリートから採取したモルタルに先端の平らな針ないし棒を貫入し、その時の貫入抵抗値から「始発」、「終結」を判断します。具体的な試験方法は、JIS A 1147（コンクリートの凝結時間試験方法）に規定されています。

なお、凝結が進んだコンクリートに新しいコンクリートを打ち重ねると、コールドジョイントが発生する場合があります。コールドジョイントが発生すると、美観上の問題だけでなく、コンクリートの漏水や剥離・剥落の原因となるため、始発時間よりも相当早い時期に打ち重ねることが必要となります。

コンクリートの凝結時間に影響を及ぼす代表的な要因は次のとおりです。

- ・セメントの種類によって凝結速度は異なります。
- ・セメント量が等しい場合、スランプが小さいほど、水セメント比が低いほど凝結は早くなります。
- ・遅延形や促進形の化学混和剤を使用することによって凝結速度を調整することが可能です。
- ・海砂や練混ぜ水に含まれる塩分は凝結を早め、糖類や腐植土などの有機物は凝結を遅らせます。
- ・気象条件として、高温、低湿、日射、風などが凝結を早めます。

また、コンクリートの凝結・硬化に伴ってコンクリート温度は相当上昇するため、マスコンクリートやセメント量の多い高強度コンクリート、高流動コンクリートなどの場合は、上昇する温度の影響を十分に考慮する必要があります。硬化時の温度が高くなると温度ひび割れの発生が懸念されます。

なお、温度上昇は、セメントの種類、セメント量、コンクリートの打込み温度、養生温度、気象条件、コンクリート断面の大きさなどが影響します。

6. フレッシュコンクリートの試験

フレッシュコンクリートの性状は、施工性だけでなく、硬化後のコンクリートの強度発現性や耐久性にも影響を及ぼします。従って、コンクリートの打込み前にはフレッシュコンクリートの性状を確認しておくことが重要です。

レディーミクストコンクリート工場では、製品の品質を確認(保証)するため、また、施工者は、施工現場で実際に使用するコンクリートのフレッシュ性状を確認するため各種試験を実施しています。

現在、一般的に行われている荷卸し時におけるレディーミクストコンクリートの試験項目および試験方法を次に示します。

- ① ワークビリティ：目視
- ② コンクリート温度：JIS A 1156
- ③ スランプ、スランプフロー：JIS A 1101, JIS A 1150
- ④ 空気量：JIS A 1128, (JIS A 1106, JIS A 1108)
- ⑤ 塩化物含有量：JIS A 1144, 塩分含有量測定器
- ⑥ 単位水量(必要に応じて)：所定の方法
- ⑦ 強度試験用供試体の作製：JIS A 1132

今回は、「硬化コンクリート」について紹介します。

(文責：工事材料試験所 所長 真野 孝次)



用語の解説

水和反応

水溶液中において、溶質分子またはイオンが水分子と結合して水和物を生成する現象の総称です。コンクリートの場合は、セメントと水が反応して水和物をつくる反応のこと。

プラスチックティー

材料分離することなく、型枠に容易に打ち込むことができるフレッシュコンクリートの変形の容易さのこと。

ポンパビリティー

コンクリートの圧送を可能にし容易にするフレッシュコンクリートの性能のことであり、①「管壁でコンクリートが滑動するための流動性」②「管内のコンクリートが形状変化できる変形性」③「圧力の時間的、位置的変動に耐える分離抵抗性」の3つの性能で構成されるといわれている。

フィニッシュビリティー

粗骨材の最大寸法、細骨材率、細骨材の粒度、コンシステンシーなどによるこて仕上げの容易さを示すフレッシュコンクリートの性状のこと。

レオロジー

物質の力と変形速度および流動の関係を表す性質。フレッシュコンクリートのレオロジーは、概略的に塑性粘度と降伏値で表される。

タッピング

スランプの測定後、突き棒で沈下したコンクリートの側面を静かにたたき、コンクリートの変形やくずれかたを観察する行為のこと。

高流動コンクリート

フレッシュ時の材料分離抵抗性を損なうことなく流動性を著しく高めたコンクリートのこと。

豆板(ジャンカ)

モルタルと粗骨材が分離して粗骨材だけが集まり、空隙が生じて硬化した状態のこと。

細骨材率

コンクリート中の全骨材量に対する細骨材量の絶対容積比を百分率で表した値。水セメント比は質量比で示し、細骨材率は容積比で示すので注意が必要。

プラスチック収縮ひび割れ

モルタルやコンクリートの硬化初期の段階で発生する微細なひび割れのこと。初期乾燥ひび割れともいわれる。

レイタンス

密度の小さい泥、せっこうなどの微粒子がブリーディングによって浮上し、コンクリート表面にうすく形成される硬化しない物質の層のこと。

気泡間隔係数

コンクリート中の気泡の細かさを示す指標のこと。同一空気量で比較すると、気泡の径が小さいほど気泡間隔係数は小さくなる。一般に、気泡間隔係数が200~250 μ m以下であれば、耐凍害性に優れているといわれる。

ポゾラン

それ自体は水硬性をほとんどもたないが、水の存在下で水酸化カルシウムと反応して不溶

性の化合物を生成して硬化する鉱物質の微粉末の総称。比較的反応性の高いシリカ(SiO₂)を含むもので、火山灰の粉末や珪藻土、フライアッシュなど。

貫入抵抗値

硬化過程のコンクリートに断面積が12.5mm²~100mm²の先端の平らな貫入針(棒)を所定の深さまで貫入させるのに要する力のこと。

(凝結の)始発、終結

コンクリート(モルタル)が硬化し始める時点を「始発」、硬化がほぼ終了した時点を「終結」と呼ぶ。JISでは、貫入抵抗値が3.5N/mm²となった時点を「始発」、28.0N/mm²となった時点を「終結」と定義している。セメントについては別の試験法がある。

打重ね(打ち重ねる)

まだ固まらない状態のコンクリートの上に新しいコンクリートを打ち足す行為のこと。

コールドジョイント

先に打ち込んだコンクリートと後から打ち重ねたコンクリートが完全に一体化していない継目のこと。

温度ひび割れ

コンクリート温度の上昇及び下降によって生じる応力やひずみに起因するひび割れの総称。コンクリート表面と内部の温度差によって表面に生じるひび割れと、コンクリート温度が低下する際に部材が外部から拘束されて断面に生じるひび割れがある。

知っていましたか！フレッシュコンクリートのア・レ・コ・レ

・フレッシュコンクリートに関連する用語

フレッシュコンクリートに関連する用語として、本文や用語の解説ではワーカビリティ、コンシステンシー、プラスティシティー、ポンパビリティ、フィニッシュビリティなどを取り上げましたが、このほかにも、フローパビリティ（流動性）、プレーサビリティ（打込みの容易さ）、コンパクタビリティ（締固めの容易さ）、スランプロス（経時変化）などカタカナの用語が多数あります。

・「フレッシュコンクリート」と「生コン」

フレッシュコンクリートと生コンは、同義語のような感じがしますが、本来は、異なるものを示します。

フレッシュコンクリートとは、本文に記載したように、「まだ固まらない状態にあるコンクリート」と定義（JIS A 0203）されています。一方、「生コン」は、生コンクリートの略語で、工場で練り混ぜられ、まだ固まらないコンクリートの状態で工事現場（打込み場所）に運搬されるコンクリートをいい、正式にはJIS A 5308に規定される「レディーミクストコンクリート」を示します。

なお、レディーミクストコンクリートは、「レミコン」または「生コン」と呼ばれますが、レディーミクストコンクリート工場は、「レミコン工場」よりも「生コン工場」の方が一般的な呼び方です。

・グリーンコンクリート

建築学用語辞典（日本建築学会編）によると、フレッシュコンクリートとは、「練混ぜから運搬、打込み直後までのまだ軟らかい状態のコンクリート」を示し、グリーンコンクリートとは、「打込み後、材齢4、5日までのコンクリート」と解説されています。グリーンコンクリートとは、硬化が始まってから数日間の硬化ごく初期のコンクリートのことです。かつて、大先輩からグリーンコンクリート（青い状態のコンクリート）は、人と同様、未成熟な状態だから、大切に育てる必要があると教えられたことがあります。いわば「青二才コンクリート」とでもいえるものです。

・スランプ試験

スランプ試験は、試験装置や試験方法は簡便ですが、コンシステンシーを鋭敏に表すため、欧米をはじめ世界的に広く規格化されています。ただし、規格によって試料の詰め方やスランプの読取り個所などの詳細が若干異なるため、採用する規格によってスランプの測定値が変動することがあります。

・「打重ね」と「打継ぎ」の違い

よく似た用語として「打重ね」と「打継ぎ」があります。

用語の解説で紹介したように、打重ねは、まだ固まらない状態のコンクリートの上に新しいコンクリートを打ち足す行為です。一方、打継ぎは硬化したコンクリートに新しいコンクリートを打ち継ぐ行為のことです。両者は、似たような用語ですが、行為が異なるだけでなく、考慮すべき事項（前者は凝結時間の管理、後者はレイタンスの除去など）も大きく異なるので注意が必要です。

・「生コンの出荷量」および「生コン工場の工場数」の推移

材料編でも触れましたが、生コン（レディーミクストコンクリート）の出荷量は、バブルを境に年々減少しています。生コンの出荷量は、1990年度のピーク時には年間約198,000千 m^3 でした。ここ数年の出荷量は、東日本大震災の復旧・復興の影響もあり、やや増加していますが、2012年度の実績は約92,000千 m^3 とピーク時の半分以下です。

一方、生コン工場の工場数もバブル以後、年々減少し、1992年度のピーク時には全国で約5,000工場が稼働していましたが、現在では約3,500工場まで減少しています。

・「しゃぶコン」って何？

しゃぶコンとは、指定された強度とスランプのコンクリートが製造できるように配（調）合が決められた生コンクリートに、後から水を加えて（加水という）、水分過多のしゃぶしゃぶの雑炊のようになったコンクリートをいいます。しゃぶコンは、強度の低下、ひび割れの増加、じゃんかなどの打ち込み欠陥の増加などの品質低下をもたらします。そのため加水は厳しく禁止されていますが、ポンプ工法が普及し始めた昭和40年代から50年代ぐらいまでは、施工をらくにするため、ままたこのように行われていたといわれています。現在は、よほど管理がずさんな現場か、担当者のコンプライアンス意識は低い現場でなければ加水してしゃぶコンにすることはないといえます。

現在、建築用のコンクリートでは、単位水量（コンクリート1 m^3 中水量）は185kg以下、通常強度のコンクリートのスランプは18cm以下とするように定められています。セメント量の少ない、呼び強度が24～27N/ mm^2 程度以下のコンクリートに加水が行われると、コンクリートの品質低下はより大きくなります。セメント量の多い、呼び強度が33N/ mm^2 以上のコンクリートの場合は、スランプが21cmまで許されているので、加水によってスランプをさらに大きくする必要性はないといえます。

コンクリートの基礎講座

Ⅱ 基礎編 「硬化コンクリート(強度性状)」



コンクリートの基礎講座もいよいよ中盤を迎えました。今回と次回は、「硬化コンクリート」について紹介します。今回は硬化コンクリートの強度性状、次回は硬化コンクリートの変形性状に関する内容となります。

なお、本文中で下線を付した用語は解説欄をご参照下さい。

1. コンクリートの特徴

コンクリートが木材や鋼材など他の構造材料と最も大きく異なる点は、コンクリートはセメント、水、骨材、混和材料などで構成される複合材料であること、また、その状態や性能が、時間の経過に伴って変化することが挙げられます。従って、コンクリートの品質は、構成材料の種類、品質、構成割合によって異なると共に、施工方法、養生方法、材齢などの諸条件によって大きく異なることを認識しておくことが重要です。

硬化コンクリートに要求される基本的な性能は、構造安全性に関連する性能であり、具体的には、強度性状、変形性状、質量などが挙げられます。

今回は、硬化コンクリートの強度性状を取り上げ、基本的事項について概説します。

2. 硬化コンクリートとは

コンクリートは、その状態によって「フレッシュコンクリート」と「硬化コンクリート」に大別されます。JIS A 0203 (コンクリート用語) では、フレッシュコンクリートを「まだ固まらない状態にあるコンクリート」と定義していますが、硬化コンクリートについては、具体的に定義されていません。通常は、凝結・硬化過程を過ぎたコンクリートを総称して硬化コンクリートと呼んでいます。

なお、硬化コンクリートの性能は、材齢に伴って大きく変化するとともに、材齢初期の性状(例えば、初期強度、初期収縮、初期ひび割れ、初期凍害など)がその後のコンクリートの品質に大きな影響を及ぼすため、初期性状(打込みから材齢数日間までの性状)を区別して解説する場合がありますが、今回は特に区別せず、硬化コンクリートの基本的事項について総合的に概説します。

3. 硬化コンクリートの強度性状

硬化コンクリートの強度性状は多様であり、圧縮、引張、曲げ、せん断、支圧などの各種強度やコンクリートと鉄筋

との付着強度、繰返し応力に対する疲労強度などがあります。しかし、単にコンクリート強度という場合は、圧縮強度を示します。これは、鉄筋コンクリート構造物においては、コンクリートは主に圧縮力を負担すること、また、他の強度は、圧縮強度から概ね推定することが可能であるためです。

なお、舗装コンクリートやコンクリート製品の場合は、圧縮強度ではなく、曲げ強度が標準となることがあるので注意する必要があります。

4. 強度性状に影響を及ぼす各種要因

(1) 使用材料の種類および品質

・セメントの種類

セメントの種類は、コンクリート強度に直接影響を及ぼします。既に紹介しましたが、現在、コンクリートの種類・用途に応じて、さまざまなセメントが使い分けられています。セメントの強度発現性は、その種類によって異なるため、使用するセメントの種類によって、コンクリート強度(期待できる強度)や強度発現性(材齢と強度の関係)が大きく変化することを認識しておくことが重要です。

・骨材強度

骨材強度は、一般的なコンクリート強度に比較して相当高いため、コンクリート強度にほとんど影響を及ぼしません。ただし、軟らかい石片を多量に含むなど品質が劣る骨材を使用した場合や高強度コンクリートにおいては、骨材強度が影響して、水セメント比を低下させてもコンクリート強度が増加しない現象(強度の頭打ち現象)が生じる場合がありますため注意する必要があります。

・骨材の表面状態

骨材の表面状態が粗い場合、セメントペーストとの付着力が増大するため、コンクリート強度も大きくなります。碎石を使用すると、川砂利を使用した場合に比較して、同一水セメント比における圧縮強度は10～20%程度増大します。

なお、材料編の「骨材」で説明しましたが、川砂利・川砂を使用した場合、粒形の影響で単位水量が減少するため、同一セメント量・同一スランプのコンクリートの圧縮強度は、碎石・砕砂を使用した場合よりも高くなる場合があります。

(2) コンクリートの製造

・練混ぜ時間

練混ぜ時間が短すぎると、水とセメントが十分に混練されず、コンクリートが均質とならないため、コンクリート強度は低下します。一方、練混ぜ時間が長すぎると、空気量が減少する場合がありますので、ミキサの種類、性能に応じた適切な練り混ぜ時間を設定することが重要です。

・練混ぜ方法

練混ぜ後のコンクリートを加水せず再度練り混ぜ、適切に施工すればコンクリート強度は増加します。ただし、ワーカビリティの低下に伴い、施工が困難となり、締固めが不十分な場合逆に強度が低下する場合がありますので注意が必要です。

・加圧成型

コンクリートを成型時に加圧すると、密度が増大するとともに、自由水が除去され水セメント比が小さくなるため、一般に強度は増加します。このため、コンクリート製品などの場合は、遠心力締固め、加圧締固めなどの成型方法が採用されています。

(3) 配(調)合条件

・強度理論

コンクリートの配(調)合条件と強度との関係については、複数の強度理論が提案されています。代表的な例を次に示します。

① 水セメント比説

D.A.Abramsが提唱した理論で、コンクリート強度はセメントペーストの水セメント比によって支配され、次式によって表すことができるという理論です。

$$F_c = A / B^x$$

F_c : コンクリートの圧縮強度
 A, B : 実験定数(使用材料によって異なる)
 x : 水セメント比(W/C)

② セメント水比説

I.Lyseが提唱した理論で、コンクリートの圧縮強度とセメント水比との間には直線関係があり、次式によって表すことができるという理論です。なお、この式の形は、コンクリートの配(調)合設計において、強度算定式として現在でも汎用されています。

$$F_c = A + BX$$

F_c : コンクリートの圧縮強度
 A, B : 実験定数(使用材料によって異なる)
 X : セメント水比(C/W)

③ セメント空隙比説

A.N.Talbotが提唱した理論で、コンクリートの圧縮強度は、セメント空隙比によって支配され、次式によって表すことができるという理論です。

$$F_c = A + B(C/V)$$

F_c : コンクリートの圧縮強度
 A, B : 実験定数(使用材料によって異なる)
 C : セメントの絶対容積
 V : コンクリート1m³中の水の容積と空気容積との和

・空気量

同一水セメント比の場合、空気量が1%増加するとコンクリート強度は4~6%減少します。しかし、所定量の空気を連行すると、スランブが大きくなるため水の量を低減することができます。従って、スランブおよびセメントの量を一定とした場合は、水セメント比を小さくできることから、結果として、空気を連行しないコンクリートと同程度の強度を得ることができます。

(4) 材齢および養生方法

・材齢

コンクリート強度の増進は、セメントと水との水和反応に起因します。材齢7日程度からは水和反応はきわめて緩やかになりますが、一般に材齢が長いほどコンクリート強度は高くなります。セメントの種類や化学混和剤の種類によって若干異なりますが、通常、コンクリートの強度増進は、材齢7日から材齢14日程度までが著しく、材齢28日から材齢91日ぐらいでほぼ安定します。なお、材齢1年以上における強度増進は、一般にきわめて小さくなります。

・養生方法

養生方法は、適用するコンクリート[現場施工、コンクリート製品、品質管理(供試体)]によって、さまざまな方法が採用されています。表1は、代表的な養生方法を示したものです。一般に湿潤養生期間が長いほどコンクリート強度は増大します。また、コンクリートを乾燥させると、見掛けの強度は上昇しますが、乾燥以後の強度増加は期待できません。また、養生温度が気温程度の範囲では、材齢28日までの強度は、養生温度が高いほど大きくなります。しかし、長期の強度増進は、材齢初期の養生温度が低いほど大きくなるといわれています。このように、養生温度とコンクリート強度との関係は複雑ですが、要約すると、湿潤養生期間をできるだけ長くし、養生温度を適切に管理することが重要であるといえます。

表1 コンクリートの代表的な養生方法

養生方法の例		主な適用例	
湿潤養生	水中養生	標準養生(20℃)	供試体
		現場水中養生	供試体(構造体コンクリートの強度)
	湿布養生		現場施工、コンクリート製品
	湿砂養生		現場施工、コンクリート製品、供試体
散水養生		現場施工、コンクリート製品	
保水養生	現場封かん養生		供試体(構造体コンクリートの強度)
	シート養生、膜養生		現場施工、コンクリート製品
保温養生	断熱養生		現場施工、コンクリート製品
	被覆養生		現場施工、コンクリート製品
加熱養生	蒸気養生		コンクリート製品
	高温高圧養生		コンクリート製品

なお、工場製品の場合は、製品に要求される性能に応じて特殊な養生方法（蒸気養生、高温高圧蒸気養生など）が採用されています。

5. 硬化コンクリートの強度性状に関連する試験方法

コンクリートの各種強度は、圧縮強度から概ね推定することができますが、実際に試験を行って確認する場合があります。JISや関連学協会などに規定されている強度性状に関連する代表的な試験方法を表2に、代表的な供試体の外観を写真1～写真3に、各種強度および試験方法の概要を次に紹介します。

(1) 圧縮強度

圧縮強度とは、コンクリートが圧縮力を受けて破壊するときの強さを応力度（N/mm²）で表した値であり、破壊時の最大圧縮荷重（N）を供試体の断面積（mm²）で除して求めます。コンクリートの強度を示す最も一般的な指標であり、コンクリート構造物の構造計算に使用されています。

コンクリートの圧縮強度に影響を及ぼす試験方法上の要因は次のとおりです。

- ・ 供試体の形状によって圧縮強度は異なり、円柱供試体よりも角柱供試体の方がやや小さくなります。

表2 硬化コンクリートの代表的な強度試験方法

試験項目	試験方法（試験規格）	
供試体の作製	JIS A 1132	コンクリートの強度試験用供試体の作り方
圧縮強度	JIS A 1107	コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法
	JIS A 1108	コンクリートの圧縮強度試験方法
	JASS5T-603	構造体コンクリートの強度推定のための圧縮強度試験方法 ¹⁾
	JSCE-G 505	円柱供試体を用いたモルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験方法 ²⁾
	JSCE-G 551	鋼繊維補強コンクリートの圧縮強度および圧縮タフネス試験方法 ²⁾
	JCI-SF5	繊維補強コンクリートの圧縮強度及び圧縮タフネス試験方法 ³⁾
引張強度	JIS A 1113	コンクリートの割裂引張強度試験方法
曲げ強度	JIS A 1106	コンクリートの曲げ強度試験方法
	JSCE-G 552	鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法 ²⁾
	JCI-SF4	繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法 ³⁾
せん断強度	JSCE-G 553	鋼繊維補強コンクリートのせん断強度試験方法 ²⁾
	JCI-SF6	繊維補強コンクリートのせん断強度試験方法 ³⁾
付着強度	JSTM C2101	引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強さ試験方法 ⁴⁾
	JSCE-G 503	引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法 ²⁾
	JCI-SND1	硬化コンクリートの引抜き試験方法（試案） ³⁾

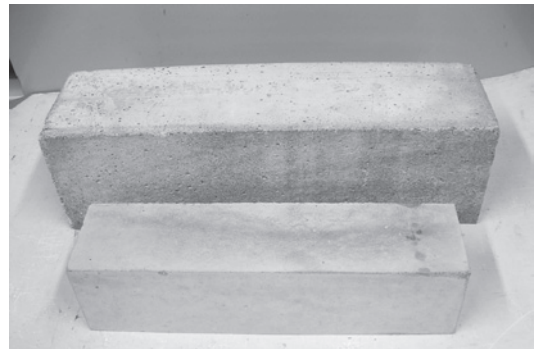
1) 日本建築学会規格 2) 土木学会標準 3) JCI（日本コンクリート工学会）規格 4) 建材試験センター規格



[φ 7.5×15cm, φ 10×20cm, φ 12.5×25cm, φ 15×30cm]

- * 圧縮強度試験用（JIS A 1132）
 - ・ 直径の2倍の高さをもつ円柱形
 - ・ 粗骨材の最大寸法の3倍以上、かつ、100mm以上
- * 割裂引張強度試験用（JIS A 1132）
 - ・ 粗骨材の最大寸法の4倍以上、かつ、100mm以上
 - ・ 長さは、直径から直径の2倍までの範囲

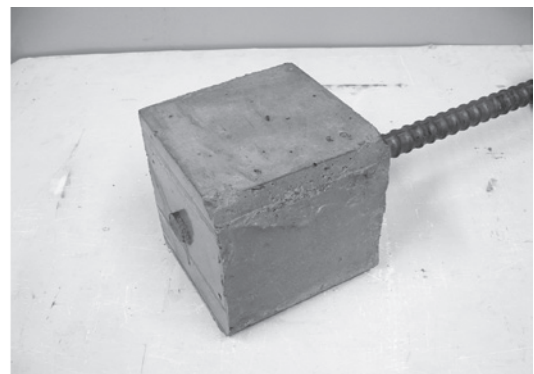
写真1 圧縮強度および割裂引張強度試験用供試体



[10×10×40cm, 15×15×53cm]

- * 曲げ強度試験用（JIS A 1132）
 - ・ 断面が正方形の角柱体とし、その辺の長さは粗骨材の最大寸法の4倍以上、かつ、100mm以上
 - ・ 長さは断面の辺の長さの3倍より80mm以上長いもの
- * せん断強度試験用（JSCE-G-552, JCI SF6）
 - ・ 断面は正方形で、その辺の長さは、繊維長さが40mmを超える場合は原則15cm、40A以下の場合は10cm
 - ・ 長さは断面の辺の長さの2倍以上、かつ4倍以下

写真2 曲げ強度およびせん断強度試験用供試体



- * JSTM C2101
 - ・ 粗骨材の最大寸法は20mm又は25mm
 - ・ 材齢28日の圧縮強度（標準養生）は30±3N/mm²
 - ・ コンクリートは立方体供試体とし、一辺の長さは鉄筋の公称直径の6倍
 - ・ 鉄筋の付着長さは鉄筋の公称直径の4倍
 - ・ 鉄筋の非付着長さは（供試体の一辺の長さ）－（鉄筋の公称直径の4倍）
 - ・ 鉄筋の配置方法は水平とし上下2段打ちしない

写真3 鉄筋とコンクリートとの付着強度試験用供試体

- ・ 供試体の直径に対する高さの比が小さいほど、圧縮強度は大きくなります。
- ・ 供試体の寸法が大きいくほど、圧縮強度は小さくなります。
- ・ 試験時の荷重速度によって圧縮強度は変動します。一般に、荷重速度が速いほど圧縮強度は大きくなります。従って、JISでは荷重速度を毎秒 $0.6 \pm 0.4 \text{ N/mm}^2$ と規定しています。
- ・ 荷重面（キャッピング面）の状態も強度に影響を及ぼします。荷重面の凹凸が強度に及ぼす影響は、凸の場合が顕著であり、圧縮強度は30%程度低下するといわれています。従って、JISでは、キャッピング層の厚さは供試体直径の2%以下、荷重面の平面度は直径の0.05%以内と規定しています。
- ・ 試験時の供試体の乾湿状態によって圧縮強度は異なります。強度試験時に供試体が乾燥していると濡れた場合より圧縮強度は大きくなります。従って、JISでは、所定の養生が終わった直後の状態で試験を行う旨が規定されています。

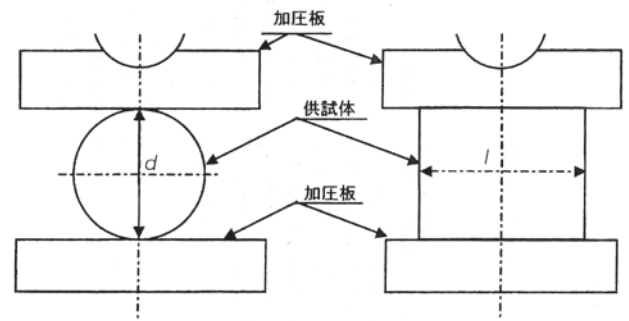


図1 割裂引張強度試験方法 (JIS A 1113)

(2) 引張強度

コンクリートの引張強度試験方法には、直接引張試験と割裂引張試験の2通りの方法がありますが、間接的に求める割裂引張試験方法が標準となっています。この方法は、図1に示すように、円柱供試体を横にして上下から圧縮荷重を加えることにより、供試体の中心軸を含む鉛直面に一様な引張応力を生じさせる方法です。

なお、割裂引張強度は、圧縮強度の1/10～1/13程度ですが、高強度コンクリートの場合、その比が小さくなるといわれています。

(3) 曲げ強度

コンクリートの曲げ強度試験方法には、中央点荷重法と3等分点荷重法がありますが、後者の3等分点荷重法が標準となっています。この方法は、図2に示すように、曲げスパンの3等分点に荷重し、最大曲げモーメント（破壊時のモーメント）を断面係数で除して、曲げ強度を求める方法です。

なお、3等分点荷重法によって求めた曲げ強度は、圧縮強度の1/5～1/8程度、割裂引張強度の1.5～2倍程度の値です。また、中央点荷重法と比較すると、見掛けの曲げ強度は小さくなりますが、これは、中央点荷重法の場合、曲げモーメントが最大となるのが1断面に限定されるのに対し、3等分点荷重法の場合、上側の荷重点間がすべて同一曲げモーメントとなり、その間で最も弱い断面で破壊するためです。

(4) セン断強度

曲げ荷重を受けるはりや柱にはせん断応力が生じ、壁には地震時に大きなせん断力を受けるので、コンクリートのせん断強度は重要です。試験方法は、JISには規定されていませんが、関連学協会で種々の方法が提案されています。2面せん断試験方法のせん断試験用ジグの一例を写真4に示します。これまで、数多くの直接せん断試験方法（特定の

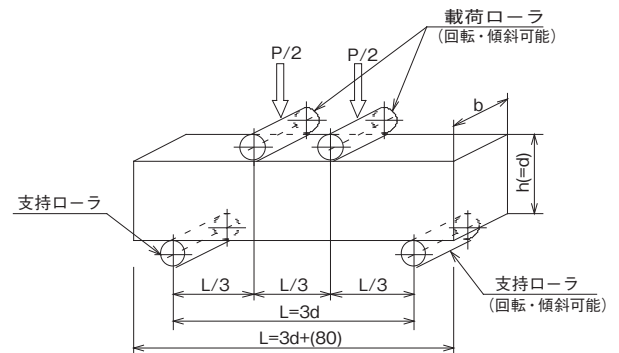


図2 曲げ強度試験方法 [3等分点荷重法] (JIS A 1106)

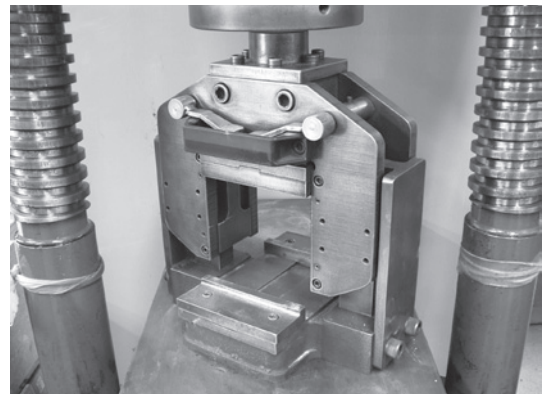


写真4 せん断試験用ジグの一例
[供試体：10×10×40mm用]

せん断面で強制的に破壊する方法)が提案されていますが、いずれの方法も曲げの影響があるため、真のせん断強度を求めることは難しいといわれています。

なお、せん断強度は、圧縮強度の1/4～1/6程度、引張強度の2.5倍程度の値といわれています。

(5) 支圧強度

支圧強度とは、コンクリートが局部的に大きな加圧荷重を受ける際の圧縮強度のことです。支圧強度の検討が必要な部位には、柱頭で直接支持される床版、橋台の橋脚上面の支圧部やプレストレストコンクリートにおける緊張材の定着部などが挙げられます。

なお、支圧強度は、圧力を受ける面積よりも圧力が分布する面積の方が大きいため、圧縮強度よりも大きくなりま

す。また、具体的な式は省略しますが、圧縮強度から支圧強度を求める算定式が提案されています。

(6) 付着強度

付着強度は、材料の種類によって付着対象物が異なりますが、コンクリートの場合は、通常、鉄筋とコンクリートとの付着強度を示します。鉄筋とコンクリートとの付着力に影響する要因には、①鉄筋とコンクリートとの粘着力、②コンクリートの側圧に伴う摩擦力、③鉄筋表面の凹凸による機械的な抵抗力があるといわれています。

付着強度は、鉄筋の表面状態によって著しく異なり、異形鉄筋に比較すると、丸鋼の付着強度は極めて小さな値です。また、付着強度は、コンクリートに生じるブリーディングの影響で、鉄筋の配置方法によって大きく異なります。一般に、水平筋に比較して垂直筋の付着強度は大きく、上端筋に比較して下端筋の付着強度は大きくなります。

(7) 疲労強度

疲労強度とは、コンクリートが繰返し応力を受けて破壊

するときのその応力で表されます。コンクリートは繰返し応力を受けると静的載荷による破壊応力(通常の圧縮強度)よりも低い応力で破壊する場合があります。従って、車や列車などの繰返し荷重を受ける橋梁などでは、設計時に疲労強度を考慮しておくことが重要となります。

なお、200万回疲労強度は、種々の要因によって変化しますが、概ね、静的強度の55～65%程度といわれています。

(8) その他の強度

その他の強度としては、3軸圧縮強度、ねじれ強度、複合加力強度、衝撃強度などがありますが、詳細は省略します。

今回は、「硬化コンクリート(変形性状)」について紹介します。

(文責：工事材料試験所 所長 真野 孝次)



用語の解説

養生(養生方法)

打ち込まれたコンクリートなどが所要の性能を発揮するまでに必要な諸条件(水分と温度、または圧力)を与えること(与える方法)、あるいは、性能を阻害する要因から保護すること(保護する方法)。

材齢

コンクリートの製造後(打込み後)の経過時間のこと(人の年齢に相当)。通常、日数で表し(例えば、材齢3,7,28,91日など)、長期的には週単位や月、年単位で表す。初期強度、高温促進養生などでは、時間単位で表すこともある。

初期強度

凝結・硬化過程におけるコンクリートの強度のこと。概ね、打込みから数日以内の強度を示す。

初期収縮

凝結・硬化過程の初期における収縮(縮み)のこと。水分の蒸発に伴う乾燥収縮と自己収縮がある。なお、乾燥収縮および自己収縮については、次回に紹介。

初期ひび割れ

明確な定義はないが、一般に、打込みから凝結が終了するまでに発生するひび割れをいう。沈下ひび割れ、プラスチックひび割れ、セメントの異常凝結や練混ぜ水中の不純物に起因するひび割れなどがある。

初期凍害

凝結・硬化初期において、コンクリートが凍結または数回の凍結融解の繰返しを受けることによって、セメントペーストの組織が破壊され、以後の強度発現が著しく阻害されること。

鉄筋コンクリート(構造物)

鉄筋で補強されたコンクリート(構造物)のことで、略してRCともいう。

舗装コンクリート

道路舗装の表層・基層に用いるコンクリートのことで、JIS A 5308(レディーミクストコンクリート)に規定されている。呼び強度は曲げ強度で表す。

軟らかい石片

黄銅棒でひっかいた際に黄銅色が付着する軟石のこと。試験方法は、JIS A 1126に規定されている。

高強度コンクリート

JIS A 5308では、呼び強度が50～60(圧縮強度が50～60N/mm²)のコンクリートを高強度コンクリート、呼び強度が45以下のコンクリートを普通コンクリートと規定している。なお、土木、建築では定義(強度の範囲)が異なる。

自由水

セメントペーストやコンクリート中の結晶水や吸着水などのように何らかの形で拘束されている水分以外の水のこと。

遠心力締固め

コンクリート製品の締固め方法の一つで、型枠の回転時の振動による締固め効果と、遠心力による水分の絞り出し効果を期待する締固め方法。

加圧締固め

コンクリート製品の締固め方法の一つで、コンクリートを型枠とともに高速で回転させ、振動締固めの後、コンクリートに所定の圧力をかけて成形する方法。

配(調)合設計

コンクリートに要求される性能を考慮して、構成材料の割合を設計する行為のこと。土木では配合設計、建築では調合設計という。詳細については、IV 製造・調合編で紹介。

湿潤養生

コンクリートを湿潤状態に保つ養生方法のこと。

水中養生、湿布養生、湿砂養生、散水養生などがある。

見掛けの強度

真のコンクリート強度ではなく、さまざまな行為・条件に伴って得られる見掛け上の強度のこと。

蒸気養生

コンクリート製品の養生方法の一つで、ボイラーなどで発生させた蒸気を養生室に通気し、コンクリートを常圧状態で加湿加温することにより、強度の発現性を早める養生方法。

高温高圧蒸気養生

コンクリート製品の養生方法の一つで、コンクリート製品を収納した压力容器に、高温高圧の飽和蒸気を通して養生する方法。オートクレープ養生ともいう。

(載荷面の)平面度

JISでは、平面部分の最も高いところと最も低いところを通る二つの平面を考え、この平面間の距離をもって表すことが規定されている。

プレストレストコンクリート

PC鋼材などによってコンクリートにあらかじめ圧縮力を導入して補強させたコンクリートまたはその構造方式のこと。

緊張材の定着部

プレストレストコンクリートに圧縮力を導入するPC鋼材を定着する部分のこと。

異形鉄筋

コンクリートとの付着をよくするために、表面に突起を設けた棒状の鋼材のこと。

丸鋼

断面が一様な円形の鉄筋のこと。

知っていましたか！ 硬化コンクリートのア・レ・コ・レ

・コンクリートおよび鉄筋コンクリートの歴史

コンクリートの起源は、約9,000年前の新石器時代という説もありますが、一般的には古代ローマ時代の橋やドームに使用されたのが始まりといわれています。

また、鉄筋コンクリートについては、1867年、フランスの造園家ジョセフ・モニエがモルタル中に網状の針金を入れて薄くて丈夫な植木鉢の特許を取得し、その後、鉄筋を用いて種々の補強方法を開発したのが始まりといわれています。

・鉄筋コンクリートの特徴

コンクリートは圧縮力には強いが引張力には弱いという性質があります。一方、鉄筋（鋼材）は、引張力には強いが、圧縮力を受けるとすぐ座屈し、大気中では錆びやすく、また、高温下では強度が著しく低下します。しかし、両者を複合した鉄筋コンクリートでは、鉄筋はコンクリートに保護され、錆びにくく（コンクリート中は、アルカリ雰囲気）、優れた耐火性も期待できます。さらに、鉄筋とコンクリートの線膨張率は概ね同様であるため、気温が変化しても同じように伸び縮みします。このように、鉄筋コンクリートは、両者の長所を複合した極めて合理的な構造材料です。

・コンクリートの強度(その1)

コンクリートは、大小の骨材粒子を糊（セメントペースト）で固めたものです。従って、糊の強度を高めればコンクリートの強度は増加します。糊は濃いほど強度が高く、高くなる比率は、糊を構成する材料（セメントと水）の割合（C/W）にほぼ比例します。

本文で紹介したリース（Lyse）の水セメント比説を簡単に説明すると上記のとおりです。

・コンクリートの強度(その2)

通常の土木・建築工事に使用されるコンクリートの圧縮強度は20～30N/mm²程度ですが、材料を厳選し、混和材料を有効に利用することにより圧縮強度が120～150N/mm²程度の超高強度コンクリートを生コン工場で製造することが可能です。既に、実際の現場で使用されています。

圧縮強度が120～150N/mm²程度とは、簡単に説明すると、1cm²当たり1.2～1.5t（軽自動車の質量）に耐えられることを意味します。これくらいの強度になると、岩石の強度に近く、骨材強度はコンクリート強度に大きな影響を及ぼします。

なお、高強度コンクリートや超高強度コンクリートは、破壊時に大きな破裂音や振動が発生するだけでなく、破片が飛散するため試験時には注意が必要です。

・コンクリートの年齢

材齢は、用語の解説で説明しましたが、人とコンクリートでは年齢の数え方が若干異なります。人の場合365日（閏年の場合は366日）が1年（1歳）ですが、コンクリートの場合は、通常52週（364日）を1年（1歳）と換算します。

なお、1ヵ月は4週（28日）、3ヵ月は13週（91日）、6ヵ月は26週（182日）です。このように定めることにより、月毎の変動（28日～31日）を取り除くと共に、製造した曜日と試験日の曜日を同一にすることができます。

・コンクリートは「お酒」や「温泉」が嫌い

人間は、疲労回復や滋養強壮を目的として、お酒を飲んだり、温泉で養生しますが、コンクリートは「お酒」や「温泉」が苦手です。

フレッシュコンクリートにお酒を混ぜるとどうなるでしょう？（実際に実験で確認された方もいます）例えば、フレッシュコンクリートにビールや日本酒を混ぜると、コンクリートは硬化不良を起こし、ほとんど強度はできません。ただし、焼酎の場合は、著しい強度低下はおきません。これは、アルコール度ではなく、お酒に含まれる糖分の影響であり、焼酎は糖分が少ない（ない）ことが、結果の異なる大きな要因です。

一方、温泉ですが、特に、酸性泉や硫黄泉はコンクリートの天敵です。コンクリートは、酸性泉や硫黄泉に浸かると、数週間から数ヵ月で痩せ細って（著しく浸食）しまいます。これは、温泉中の酸性成分によって硬化したセメントペーストが溶解されるためです。また、炭酸泉も苦手で、徐々に浸食されてしまいます。

コンクリートの基礎講座

Ⅱ 基礎編 「硬化コンクリート(変形性状, その他の性状)」

今回は前回に引き続き“硬化コンクリート”に関して、「変形性状, その他の性状」について紹介します。

なお、本文で下線を付した用語は、用語の解説を参照して下さい。

1. 硬化コンクリートの変形性状

フレッシュコンクリート(まだ固まらない状態のコンクリート)は、その形状を自由に変えることができます。このことがコンクリートの大きな利点ですが、コンクリートは硬化過程や硬化後にも形状や体積が変化します。

硬化コンクリートの変形性状とは、応力や温湿度変化などによって硬化したコンクリートの寸法・形状が変化する性質のことであり、例えば、応力に伴う変形(ひずみ, たわみ, クリーブ), 温湿度変化に伴う体積変化(膨張, 収縮)などがあります。

硬化コンクリートの変形性状は、部材や構造物の変形性状, 破壊性状, ひび割れの発生などと密接な関係があり、強度性状と同様、コンクリート構造物の構造安全性や耐久性に関連する重要な性能です。

硬化コンクリートの主な変形性状について次に概説します。

2. 応力-ひずみ曲線

材料に力が加わると、材料内部に応力が発生し、材料は変形します。このときの単位断面積あたりの力を応力度といい、単位長さ当たりの変形をひずみ度といいます(コンクリートの場合、応力度を応力, ひずみ度をひずみという場合が多いため、ここでは、応力, ひずみという用語を使用します)。応力とひずみの関係を示したものを「応力-ひずみ曲線」といい、この曲線からコンクリートの力学的性質(強度, 弾性係数)や破壊性状(靱性, 伸び)の概要を知ることができます。

硬化コンクリートは、鋼材と異なり完全な弾性体ではないため、応力とひずみの関係は、図1に示すように直線ではなく、初期段階から曲線を示すことが特徴です。これは、セメントペーストと骨材の界面に発生する微小なひび割れに起因するものです。なお、骨材単体の場合は、最大応力に達するまで、応力とひずみの関係は、ほぼ直線と見なすことができます。

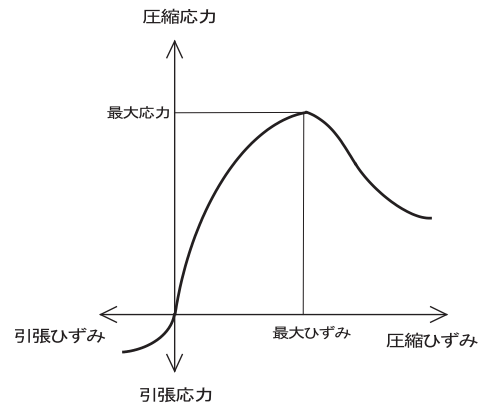


図1 コンクリートの応力とひずみの関係

3. 弾性係数

(1) 静弾性係数

静的な荷重を加えた際の応力とひずみの関係から求めた弾性係数(両者の勾配)を静弾性係数といいます。静弾性係数は、図2に示すように、①初期接線弾性係数, ②割線弾性係数, ③接線弾性係数の3種類に大別されます。通常、鉄筋コンクリートの設計には、静的破壊強度の1/3の応力の点と、ひずみ 50×10^{-6} の点を結んだ直線の勾配で表される割線弾性係数が用いられています。

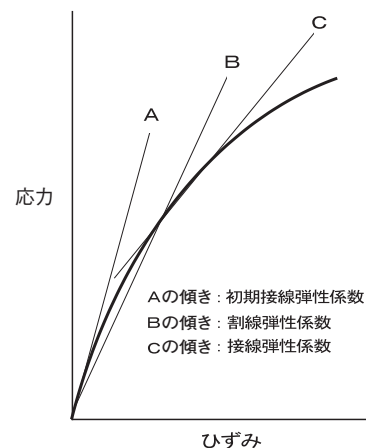


図2 コンクリートの弾性係数

試験方法は、JIS A 1149(コンクリートの静弾性係数試験方法)に規定されています。なお、同義語としてヤング係数(ヤング率)がありますが、JIS A 0203(コンクリート用語)では、「一軸静的載荷によって得られた応力-ひずみ曲

線において、原点と任意の点を結ぶ直線の勾配で表される値。コンクリートの場合、強度の1/3に相当する応力点と原点を結ぶ線分の勾配として与えられる割線ヤング係数で示す。」と定義されています。

コンクリートのヤング係数は、通常強度の範囲では圧縮強度の平方根に、高強度域では圧縮強度の3乗根に比例します。また、コンクリートの圧縮強度は、構成材料（セメントペースト、骨材など）の複合則が成立せず、材料が不均質なほど強度は低下しますが、ヤング係数は構成材料の複合則が成り立つのが特徴です。

(2) 動弾性係数

コンクリート供試体に縦振動またはたわみ振動を与えて、一次共鳴振動数を測定し、供試体の形状・寸法、質量との関係から算出した弾性係数を動弾性係数といいます。

試験方法は、JIS A 1127（共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法）に規定されています。なお、動弾性係数は、供試体中を伝わる弾性波速度から求めることもできます。

動弾性係数は、静弾性係数よりも10～40%程度大きく、静的な荷重を加えた際の初期接線弾性係数に近い値です。

(3) ポアソン比

材料（試験体）の軸方向に荷重を加えると、材軸方向とともに、材軸と直角方向にもひずみが生じます。この両者のひずみの絶対値の比をポアソン比といいます。また、ポアソン比の逆数をポアソン数といいます。

コンクリートのポアソン比は、コンクリートの種類や強度によって若干差がありますが、概ね、コンクリートの種類にかかわらず0.15～0.20程度の値です。

(4) クリープ

コンクリートに持続して荷重が作用すると、時間の経過とともにひずみが増大します。この現象をクリープといい、クリープによって増大したひずみをクリープひずみといいます。

コンクリートのクリープに関しては、次の2つの法則が成り立つことが知られています。

1) Davis-Glanville（デービス・グランビル）の法則

持続応力が圧縮強度の1/3程度以下の範囲では、クリープひずみは応力に比例し、圧縮に対しても引張に対しても、その比例定数は等しい。

2) Whitney（ホイットニー）の法則

材齢 t_1 で載荷された際のクリープの進行は、材齢 t_0 で載荷された場合の材齢 t_1 以後のクリープの進行状況に等しい。

この2つの法則によれば、コンクリートのクリープひずみは、載荷応力が小さいほど、載荷時期が遅いほど小さくなるといえます。なお、コンクリートのクリープは、載荷応力にほぼ比例しますが、載荷荷重がある限度よりも大きくなると、クリープひずみが時間の経過に伴って増大し、コンクリートは破壊します。この現象をクリープ破壊と呼び、クリープ破壊が起こる下限の応力をクリープ限度といいます。クリープ限度は、圧縮強度の概ね70～90%程度とされています。

一般的なクリープ試験状況を写真1に示します。試験方法は、建材試験センター規格JSTM C 7102（コンクリートの圧縮クリープ試験方法）に規定されていましたが、2010年にJIS A 1157（コンクリートの圧縮クリープ試験方法）が制定されました。

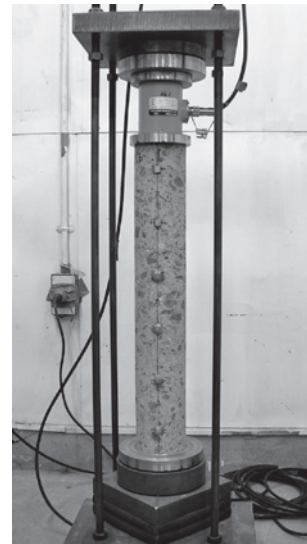


写真1 圧縮クリープ試験状況

4. 体積変化

(1) 水和収縮

粉体状のセメントと水が反応する際、生成する水和物の体積はセメントと水の体積の和より小さくなります。この現象のことを水和収縮といいます。後述する自己収縮は、練混ぜ直後から存在する気泡と水和により形成される空隙を含めた見掛けの体積の減少のことです。なお、水和収縮は、化学収縮や硬化収縮と呼ばれることもあります。

(2) 自己収縮

セメントの水和反応の進行に伴って、セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの体積が減少して収縮する現象を自己収縮といいます。また、自己収縮に伴って発生した応力を自己収縮応力といいます。なお、自己収縮には、物質の侵入や逸散、温度変化、外力や外部拘束に起因する体積変化は含まれません。

コンクリートの自己収縮は、従来の普通コンクリートでは、実用上無視できる値であると判断されてきましたが、近年開発された高強度コンクリートや高流動コンクリートなど、セメントなどの粉体量が多く、水セメント比が小さいコンクリートの場合には無視できない値であるといわれています。

コンクリートの自己収縮は、使用材料や配(調)合条件によって異なりますが、一般に、ペースト量(粉体量)が多いほど、また、水セメント比(水結合材比)が小さいほど大きくなります。さらに、化学混和剤の種類や添加率なども影響するといわれています。

(3) 乾燥収縮

コンクリートは硬化した後も吸水すると膨張(膨潤)し、乾燥すると収縮します。乾燥収縮とは、硬化したモルタルやコンクリートが、乾燥に伴って長さや体積が減少(収縮)する現象のことをいいます。

コンクリートの乾燥収縮は、使用材料や配(調)合条件によって異なりますが、普通コンクリートの乾燥収縮に伴うひずみは、概ね $400 \sim 1200 \times 10^{-6}$ 程度です。

乾燥収縮に影響を及ぼす主な要因を次に示します。

- ・単位セメント量および単位水量が多いほど、乾燥収縮は増大するが、単位水量の影響の方が著しい。
- ・部材断面寸法(供試体断面寸法)が大きいほど、乾燥収縮は小さくなる。
- ・骨材の弾性係数が大きく硬質の場合、乾燥収縮は小さくなる。なお、最近の研究では、骨材自体も乾燥収縮し、コンクリートの乾燥収縮に大きく影響するといわれています。
- ・十分に硬化が進んだコンクリートでは、乾燥開始材齢が乾燥収縮に及ぼす影響は小さい。

コンクリートの乾燥収縮は、それ自体は大きな問題ではありませんが、乾燥収縮が拘束されるとコンクリートにひび割れが発生します。このことが大きな問題となります。例えば、鉄筋コンクリート構造物の場合、乾燥に伴ってコンクリートは収縮しますが、内部の鉄筋は収縮しないため、鉄筋がコンクリートの乾燥収縮を拘束してコンクリート内部に引張応力が発生します。この引張応力がコンクリートの引張強度を上回るとコンクリートは破断し、ひび割れが発生します。

鉄筋コンクリート構造物のひび割れは、コンクリートの防水性を損ない、また、コンクリートの耐久性に大きな影響を及ぼします。この点から、乾燥収縮は硬化コンクリートの性能を評価する重要な指標となります。

乾燥収縮に伴うコンクリートの長さ変化の測定方法は、JIS A 1129(モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方

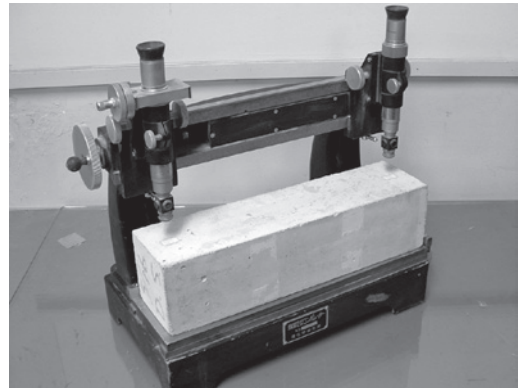


写真2 コンクリートの長さ変化測定状況
(コンパレータ方法)

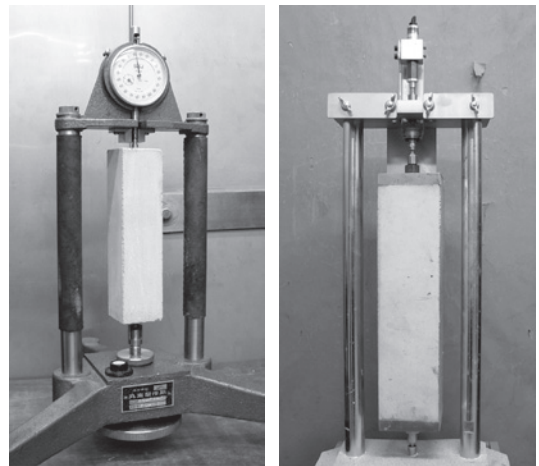


写真3 モルタルおよびコンクリートの長さ変化測定状況
(ダイヤルゲージ方法)

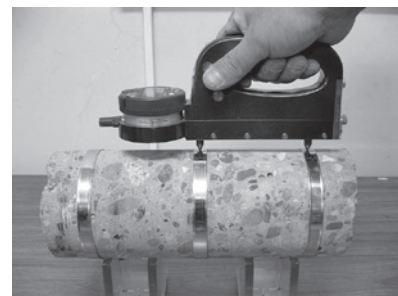


写真4 コンクリート(コア)の長さ変化測定状況
(コンタクトゲージ方法)

法)に3種類の方法(第1部:コンパレータ方法,第2部:コンタクトゲージ方法,第3部:ダイヤルゲージ方法)が規定されており,供試体の種類,形状・寸法,試験の目的に応じて使い分けられています。

モルタルおよびコンクリートの長さ変化の測定方法の一例を写真2～写真4に示します。

5. 温度変化に伴う体積変化

(1) 水和発熱膨張

打ち込まれたコンクリートは,セメントの水和反応によって凝結・硬化の段階で水和発熱し,その熱によって膨張します。普通コンクリートの場合,水和発熱に伴う温度上昇量は30～40℃程度であり,その場合,コンクリートは $300 \sim 400 \times 10^{-6}$ 程度膨張します。これは,1m当たり,0.3～0.4mmの長さ変化になります。また,コンクリート温度が低下すると同程度収縮します。この膨張と収縮に起因するひび割れが温度ひび割れです。温度ひび割れには,2つのタイプがあり,一つは,コンクリートの表面と内部の温度差から生じる内部拘束に伴うひび割れであり,硬化初期の段階に発生する表面ひび割れです。もう一つは,コンクリート温度が降下するときの収縮変形が隣接する構造物や岩盤などによって外部から拘束されて生じる引張応力に伴うひび割れであり,材齢がある程度進んだ段階で発生し,部材断面を貫通するひび割れに発展する場合があります。

なお,水和発熱による膨張が著しいコンクリートとしては,マスコンクリートが挙げられます。また,セメント量が多い高強度コンクリートや高流動コンクリートも温度ひび割れについて留意する必要があります。

(2) 熱膨張係数(線膨張係数)

硬化コンクリートの熱膨張係数は,常温の範囲では,1℃につき $7 \sim 13 \times 10^{-6}$ 程度であり,普通コンクリートの場合,一般に 10×10^{-6} が設計に用いられています(簡単に説明すると,コンクリートの長さが1mの場合,温度が10℃変化するとコンクリートの長さは±0.1mm変化することになります)。この熱膨張係数は,コンクリートの配(調)合条件や材齢による影響は少ないといわれています。

一方,骨材の岩種による相違は大きく,石英質の骨材をコンクリートに使用すると熱膨張係数は大きく,花崗岩,玄武岩,石灰岩を使用した場合は小さくなる傾向があります。なお,鉄筋とコンクリートの熱膨張係数がほぼ等しいので,温度変化があっても両者は同じだけ伸び縮みし,界面にずれが生じません。このことが,鉄筋コンクリート構造が成立する前提条件の一つとなっています。

6. その他の性状

(1) 水密性

硬化したコンクリートは,ひび割れや豆板(ジャンカ)がなくても,水が浸透したり透過します。この水の浸透・透過に対する抵抗性を示す性質を水密性といい,硬化コンクリートの使用性に関する要求性能の一つです。

コンクリートの水密性を評価する指標としては,次式で表される透水係数 K_c が用いられています。

$$K_c = \frac{Q}{A} \times \frac{L}{\Delta H}$$

ここに, K_c :透水係数(cm/s)

Q :水の流量(cm^3/s)

A :供試体の断面積(cm^2)

L :供試体の厚さ(cm)

ΔH :流入,流出の水頭差(cm)

コンクリートの透水係数については,次の事項が明らかにされています。

- ・透水係数(K_c)が大きく(水密性の低下)なる最大の要因は,材料分離,ひび割れなどの施工欠陥である。
- ・ひび割れなどが無い場合, K_c を支配する最大の要因は,水セメント比であり,水セメント比が55%を超えるとコンクリートの水密性は極端に低下する。
- ・同一水セメント比の場合は,貧配(調)合より富配(調)合の方が K_c は小さくなるが,富配(調)合になりすぎると逆に K_c は大きくなる。
- ・粗骨材の最大寸法が大きいほど,骨材下面の水膜が大きくなり K_c は大きくなる。
- ・作業性のよいコンクリートを十分に締め固めるほど K_c は小さくなる。
- ・湿潤養生期間が長いほど,また,材齢が進むほど K_c は小さくなる。なお,乾燥は K_c を著しく増大させる。
- ・コンクリート中の空気量は,その量が適正な範囲であれば K_c は小さくなる。また,良質なポゾランの使用は K_c を減少させる。

(2) 熱物性

硬化したコンクリートの熱膨張係数,比熱,熱伝導率,熱拡散係数などの熱物性は,水セメント比や材齢などの影響が少なく,骨材の種類および単位量に影響するといわれています。なお,具体的な数値については省略します。

(3) 耐火性

加熱によるコンクリートの強度や弾性係数の低下は,セメントペースト中の結合水の脱水,水酸化カルシウムなどの水和物の分解,骨材とセメントペーストとの熱膨張係数

の差に伴う組織のゆるみ、骨材の変質などによって生じ、強度よりも弾性係数の方が著しく低下します。

加熱されたコンクリートは、加熱温度が高いほど強度の低下が著しく、500℃に加熱すると常温時に比較して60%以下にまで強度は低下します。一方、弾性係数は、加熱温度の上昇に伴う低下が強度以上に著しく、500℃では常温の10～20%程度にまで低下します。

なお、高強度コンクリートなど緻密なコンクリートや含水率が高いコンクリートの場合は、急激な加熱によって表面からコンクリートが剥がれるような爆裂現象を起こすこともあります。

(4) 質量

硬化したコンクリートの単位容積質量は、通常の状態では2.3t/m³程度であり、化学混和剤によって空気を連行した場合は、やや軽くなります。

鉄鉱石などを用いた重量コンクリートの単位容積質量

は、3～5t/m³程度であり、X線やγ線の遮へい用コンクリートとして用いられています。

一方、人工軽量骨材や天然軽量骨材を使用した軽量コンクリートの単位容積質量は、1～2t/m³程度であり、コンクリート部材の軽量化を目的として使用されています。また、コンクリート中に大量の気泡を混入させた気泡コンクリートは、コンクリートの軽量化や断熱性を目的として使用されています。

硬化コンクリートのその他の性状としては、気密性、電気的特性、音響特性などが挙げられますが、詳細については省略します。

次回は、「耐久性編：その1. 中性化、塩害」について紹介します。

(文責：工事材料試験所 所長 真野 孝次)



用語の解説

・破壊性状

構造物あるいは構造部材が荷重を受け破壊する際の性状のこと。破壊の主原因となる応力の種類、破壊時の靱性など、破壊時の総合的な性状。

・靱(じん)性

構造物または部材のねばり強さのことで、構造物が弾性範囲を超えて破断するまでにエネルギーを吸収する能力。破壊することなく変形しつづける材料の性質は延性、破壊に至るまでの変形能力が乏しい材料の性質(材料の脆(もろ)さ)は脆(ぜい)性という。

・弾性体

他から加えた力を取り去ったとき、変形がもとの状態に戻る性質を有する物体。

・静的破壊強度

静的な荷重(時間的に変動のない荷重)を加えた際の破壊強度。通常行われている圧縮強度や曲げ試験などによって得られる強度。

・一軸静的載荷

側方からの拘束圧のない状態で静的な荷重を加えること。側方からの拘束圧を加えた状態で載荷する方法を三軸静的載荷という。

・複合則

複合材料の性質が、構成材料の性質と混合割合によって決定されるという法則。

・縦振動、たわみ振動

縦振動は、角柱の矩形平面もしくは円柱の経緯平面における長手(経度)方向の振動。たわみ振動は、供試体の材軸と垂直な方向の変形(たわみ)を生じさせる振動。

・一次共鳴振動数

供試体に縦振動やたわみ振動を加えたとき、振幅が最大となる振動数。

・弾性波速度

弾性体の内部を伝播する波の速度。

・高流動コンクリート

フレッシュ時の材料分離性を損なうことなく流動性を著しく高めたコンクリート。

・粉体量

コンクリート中のセメント、混和材および細骨材中の微粒分など粉状とみなせる物質の量。一般には、コンクリート中の150 μm以下または75 μm以下の粉体の総量。

・マスコンクリート

土木と建築で定義が若干異なるが、部材断面が大きく、コンクリート内部の最高温度と外気温との差が大きいコンクリートの総称。代表的な例として、大断面の地中梁やダムコンクリートがある。

・熱膨張係数(線膨張係数)

ある方向の、単位温度、単位長さ当たりの熱による膨張長さの割合。

・常温(常温の範囲)

明確な定義はないが、概ね5～35℃(20±15℃)を示す。

・豆板(ジャンカ)

コンクリートの打込み欠陥の一つで、モルタルと粗骨材が分離して粗骨材だけが集まり、空隙が生じて硬化した状態。

・貧配(調)合、富配(調)合

セメント量が少なく、骨材量の多い配(調)合

を貧配(調)合、セメント量が多く、骨材量の少ない配(調)合を富配(調)合という。

・比熱

単位質量の物質の温度を単位温度だけ上昇させるのに必要な熱量。通常は、1kg、1℃に対する値を用いる。

・熱伝導率

物質の熱伝導特性を表す比例定数のことで、熱伝導率が高いほど熱を伝えやすいことを示す。単位は通常(W/m・℃)。

・熱拡散係数

熱伝導媒体がもつ温度変化の速さを示す物性値で、熱伝導率を比熱と密度の積で割った値。

・人工軽量骨材

けつ岩、フライアッシュなどを主原料として人工的に作った軽量骨材。

・天然軽量骨材

火山作用などによって天然に産出する軽量骨材。

・気密性

物質(コンクリート)の相対する2面に圧力差が生じた際の気体の流れにくさを表す性質。

・電気的特性

コンクリートを電氣的に導体とみなした場合に電気の伝導現象を説明するために導入された基本的な物理定数(電気抵抗、電気伝導率)。

・音響特性

騒音防止設計や室内音響設計に関連するコンクリートの特性で、具体的には吸音特性や遮音特性がある。

知っていましたか！ 硬化コンクリートのア・レ・コ・レ

・鉄筋コンクリート構造物の寿命

鉄筋コンクリート構造物の寿命(共用期間)は、従来、設計目標として十分考慮されることはなく、通常の材料・仕様に従えば、暗黙の想定として50年から80年程度であろうと考えられていたようです(減価償却資産の法定耐用年数)。例えば、土木構造物では水道用ダム80年、トンネル75年、橋60年など、建築構造物では事務所用建物50年、住宅47年、学校45年などです。ただし、これは税法上のものであり、本来の寿命とは異なります。

1997年に改定された日本建築学会JASS 5では、鉄筋コンクリート構造体の計画供用期間(鉄筋腐食やコンクリートの重大な劣化が生じない期間)を、およそ30年、65年、100年と級別して、適切な仕様によって供用期間を定めることを規定し、設計目標として選択できるようにしました。なお、2009年の改定ではさらに200年の計画供用期間を追加しています。

・鉄筋コンクリート構造物のひび割れは宿命？

鉄筋コンクリートは、鉄筋とコンクリートで構成される複合材料です。本文で概説したように、コンクリート中の鉄筋は、コンクリートの乾燥収縮を拘束します。この拘束に伴ってコンクリート内部には引張応力が発生し、この引張応力がコンクリートの引張強度を上回るとひび割れが発生します。従って、鉄筋量が多く、拘束率が高い場所ほど乾燥収縮ひび割れは発生しやすくなります。具体的には、開口部の四隅(隅角部)の斜めひび割れや配管まわりの縦ひび割れが典型的な乾燥収縮ひび割れです。

乾燥収縮ひび割れは、鉄筋コンクリート構造物の宿命といわれており、このひび割れを抑制・制御するための材料・工法に関する研究が古くから行われています。しかし、現時点では、鉄筋コンクリート構造物の乾燥収縮ひび割れを全くなくすことは難しいのが現状です。

なお、乾燥収縮ひび割れが発生しても、コンクリート構造物の安全性が直ちに損なわれることはありません。

・鉄筋の種類とひび割れ

鉄筋コンクリートに使用する鉄筋は、丸鋼(断面が一樣な円形な鉄筋)と異形鉄筋(表面に突起を有する棒状の鉄筋)に大別されます。かつては、構造用として丸鋼も使用されていましたが、最近では、主要構造部分には、異形鉄筋が使用されています。異形鉄筋を使用する主な理由は、鉄筋とコンクリートとの付着力を向上させる

ことですが、副次的な効果として、ひび割れを分散し、ひび割れ幅を小さくすることが挙げられます。

・ひび割れの種類と特徴

ひび割れは、その発生原因によって、乾燥収縮ひび割れ、温度ひび割れ、曲げひび割れ、せん断ひび割れ、沈下ひび割れ、不同沈下ひび割れ、付着ひび割れなどに分類されます。また、耐久性に関連するひび割れの原因には、鉄筋腐食、中性化、塩害、凍害、アルカリ骨材反応などが挙げられます。

さらに、ひび割れの形態は、収縮ひび割れ(例えば、乾燥収縮ひび割れ)と膨張ひび割れ(例えば、温度ひび割れ(表面ひび割れ)、アルカリ骨材反応)に大別されます。

・日本初の鉄筋コンクリート橋

鉄筋コンクリートに関する技術は、明治時代に米国やフランスから日本に導入されました。日本初の鉄筋コンクリート橋は、1903年(明治36年)に琵琶湖第一疎水上に架けられた第11号橋といわれています。この橋の長さは7.3m、幅は1.5m、厚さは約30cmのアーチ型で、当時のオーストリア プラハ大学メラン教授の発明によるメラン橋と呼ばれるものです。100年以上も風雪に耐えて現存しています。

・日本初の鉄筋コンクリート造の集合住宅

長崎港から南西の海上約17.5kmの位置に「端島」という小さな島があります。かつては海底炭坑によって栄え、人口密度は当時の東京の約9倍以上で、世界一の人口密度を誇ったといわれています。読者の皆さんは、世界遺産への登録を目指す「軍艦島」(通称)と言ったほうが分かりやすいと思います。この島に1916年(大正5年)建設された集合住宅「30号棟」が、日本初の鉄筋コンクリート造の集合住宅(7階建ての高層アパート。ただし、竣工時は4階建て)といわれています。その後、この島では次々に高層アパートが建設されましたが、鉄筋コンクリート造の集合住宅が普及した理由は、狭い島内に数多くの住人を住ませるため、建物を高層化する必要に迫られたためだといわれています。

1974年(昭和49年)海底炭坑の閉山に伴い、島民が島を離れ無人島となったため、建設物の維持管理が行われず、多くの建物の劣化が急速に進んでしまいました。

コンクリートの基礎講座

Ⅲ 耐久性編 「その1. 中性化, 塩害」



コンクリート基礎講座は、今回から“耐久性編”に入ります。今回は、その1として中性化, 塩害について紹介します。

なお、本文で下線を付した用語は解説欄をご参照下さい。

1. はじめに

コンクリート(構造物)の耐久性とは、コンクリート(構造物)の性能や機能の低下の経時変化に対する抵抗性のことで、具体的には、気象作用、化学的浸食作用、機械的摩耗作用、その他の劣化作用に対して長期間にわたって耐えられるコンクリートの性能のことです。

コンクリートの耐久性を理解するためには、あらかじめコンクリートの基本的な特徴を理解しておくことが重要です。耐久性に関連するコンクリートの主な特徴は次のとおりです。

- ① 鉄筋コンクリートは、性質の異なる鉄筋とコンクリートで構成される複合材料である。
- ② コンクリートは、長期にわたって水和反応が進行する。水和反応は内在する化学物質だけでなく、外部から侵入する化学成分や環境条件の影響を受ける。
- ③ 打込み直後のコンクリートはアルカリ性であり、鉄筋(鋼材)の腐食を防止している。
- ④ コンクリートは連続した微細な空隙を有する多孔質な物質であり、この空隙を通して気体(酸素、二酸化炭素)、イオン(塩化物イオン、アルカリ金属イオン、硫酸イオン)、水分などの浸透や移動が生じる。

コンクリートの劣化現象には、中性化, 塩害, 化学的浸食, アルカリ骨材反応などの化学的なものと、凍害, すりへり作用などの物理的な現象が挙げられます。これらの劣化現象は、単独で進行する場合がありますが、複数の劣化作用が複合して進行(複合劣化)することも少なくないと言われています。

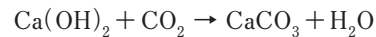
今回は、上記の劣化現象の中から、最も代表的な「中性化」および「塩害」について概説します。

2. コンクリートの中性化

(1) 中性化とは

中性化とは、硬化したコンクリート中の水酸化カルシウム $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ が主として大気中から浸入する二酸化炭素 $[\text{CO}_2]$ によって、表面から内部に向かって徐々に炭酸カル

シウム $[\text{CaCO}_3]$ になり、コンクリートのアルカリ性が低下(pHが低下)する現象のことで、その反応は次式によって表されます。



コンクリートの中性化は、フェノールフタレイン溶液(95%エタノール90mlにフェノールフタレインの粉末1gを溶かし、水を加えて100mLとした溶液: JIS A 1152)をコンクリート表面に噴霧し、赤紫色に呈色しない部分を中性化部分と判定します。このフェノールフタレイン溶液は、pHが10を超えると赤紫色に呈色するため、pHが10を下回る部分を中性化と判定します。コンクリートの中性化は、pHが7(中性)になるという意味ではないのですが、pHが10以下になると次に述べる鉄筋の防せい性能が失われるので、フェノールフタレインによる判定が適しているのです。

なお、水酸化カルシウム $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ の飽和水溶液のpHは通常12.4です。

(2) 中性化がコンクリートの性能に及ぼす影響

中性化は、コンクリート(コンクリート構造物)の劣化現象の一つですが、コンクリートが中性化しても直ちにコンクリートの性能やコンクリート構造物の機能が低下するわけではありません。中性化に伴ってコンクリートの組織が緻密になり、強度や硬さが向上する場合があります。

しかし、中性化がコンクリート中の鉄筋位置まで達すると、鉄筋の不動態被膜が破壊され、水や酸素の浸透によって鉄筋が錆び、構造物の耐荷性や耐久性が損なわれます。

このように中性化は、コンクリートの重要な性能である鉄筋の防せい性能が失われるという意味の劣化現象ということです。コンクリートの中性化深さ(コンクリート表面から赤紫色呈色部分までの距離)と劣化状況の関係は概ね表1のとおりです。

(3) 中性化に影響を及ぼす要因

中性化(中性化速度)は、コンクリートの配(調)合条件、使用材料、環境条件などによって異なります。中性化(中性化速度)に及ぼす主要因を次に示します。

- ・密実なコンクリートほど中性化の進行が遅くなる。従って、水セメント比が小さく、施工上の欠陥がないコンクリートほど中性化の進行は遅い。

表1 コンクリートの中性化深さと劣化状態の関係

状態	中性化深さと かぶり厚さの関係	劣化の状態
潜伏期	中性化深さは小さく、鉄筋位置まで達していない。	外観上の変化なし。
進展期	中性化深さが一部鉄筋位置まで達している。	少数の錆汁が見られる。 少数の腐食ひび割れが発生する。
加速期	中性化深さがかなり鉄筋位置まで達している。	多数の錆汁が見られる。 多数の腐食ひび割れが発生する。 部分的に、かぶりコンクリートの浮き・剥離・剥落が発生する。
劣化期	中性化深さが鉄筋位置まで半分以上達している。	多数の錆汁が見られる。 多数の腐食ひび割れが発生する。 ひび割れ幅が大きい。 多数のかぶりコンクリートの浮き・剥離・剥落が発生する。 変位・たわみが大きい。

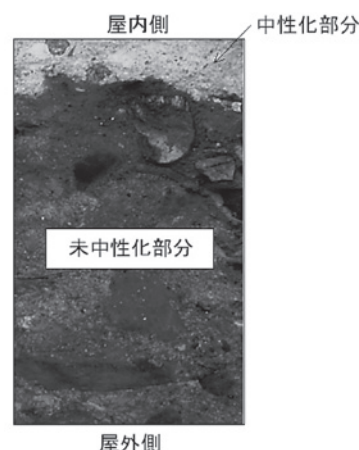


写真1 コンクリートコアの中性化状況

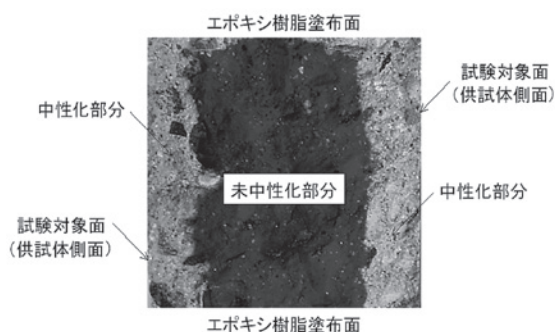


写真2 促進中性化試験を行った供試体の中性化状況

- ・同一水セメント比で比較すると、普通ポルトランドセメントに比較して混合セメントを使用したコンクリートの方が中性化速度は速くなる。
- ・ある期間に進行する中性化深さは、期間(年)の平方根に比例 $[\sqrt{t}]$ 則する。
- ・環境条件として、一般に二酸化炭素濃度が高いほど、温度が高いほど、湿度がある程度低いほど中性化速度は速い。従って、屋外側に比較して室内側のコンクリートの方が中性化速度は速くなる。
- ・コンクリートの含水率が高い(湿った状態)と中性化は進みにくい。従って、水中構造物や地中構造物では、中性化はほとんど進行しない。なお、著しく乾燥している場合も中性化は進みにくいといわれている。
- ・タイル、石張りなどの仕上げは、中性化の進行を遅らす上で有効となる。
- ・中性化の進行に伴い、コンクリート中に固定された塩化物イオンが遊離し、コンクリート内部へ移動して濃縮される。従って、中性化の進行は、後述する塩害を助長することになる。

(4) 中性化に関する試験方法

現在、JIS(日本工業規格)には、中性化について2つの試験(測定)方法が規定されています。

JIS A 1152(コンクリートの中性化深さの測定方法)は、コンクリート構造物のはつり箇所やコンクリート構造物から採取したコンクリートコアの中性化深さの測定方法に関する規定です。また、JIS A 1153(コンクリートの促進中性化試験方法)は、施工現場や試験室で作製したコンクリート供試体を二酸化炭素濃度を高めた条件下(CO₂濃度:5±0.2%)に保存し、コンクリートの中性化に対する抵抗性を

試験する方法です。促進条件と自然環境の関係は概ね把握されていますが、通常は、コンクリートの種類や使用材料等が異なる場合のコンクリートの中性化深さ(中性化速度)を相対的に比較する方法として利用されています。

参考として、コンクリートコアの中性化状況を写真1に、促進中性化試験を行った供試体の中性化状況を写真2に示します。

なお、コンクリートの中性化深さを非破壊的な試験によって求める方法として、(一社)日本非破壊検査協会からNDIS 3419(ドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化深さ試験方法)が提案されています。同方法は、直径約10mmのドリルを用いてコンクリートを削孔し、削孔粉の呈色反応から中性化深さを求める方法であり、コンクリート構造物の中性化深さの分布状況を確認する場合などに利用されています。

3. コンクリートの塩害

(1) 塩害とは

塩害とは、コンクリート中に存在する塩化物イオン(Cl⁻)の作用により、コンクリート中の鉄筋(鋼材)が腐食し、コンクリート構造物に損傷を与える現象のことです。

打込み直後のコンクリートは、アルカリ性が高いため、コンクリート中の鉄筋（鋼材）の表面には、緻密な不動態被膜が形成されています。しかし、コンクリート中に塩化物イオンが一定量以上存在すると、不動態被膜が部分的に破壊され、鉄筋は腐食しやすい状態になります。不動態被膜が破壊されると、鉄筋表面の電位が不均一となり、アノード部（陽極）とカソード部（陰極）が生じて電流が流れ、鉄筋の腐食が始まります。

鉄筋の腐食に伴って生じた錆の体積は、もとの鉄筋の数倍になるため、その膨張圧によって鉄筋に沿ってコンクリートにひび割れが発生します。ひび割れが発生すると、酸素と水分の供給が容易となり、鉄筋の腐食が加速し、かぶりコンクリートの剥落や鉄筋の断面積の減少により部材の耐力が低下します。この一連の現象（**図1**、**写真3**参照）が塩害です。

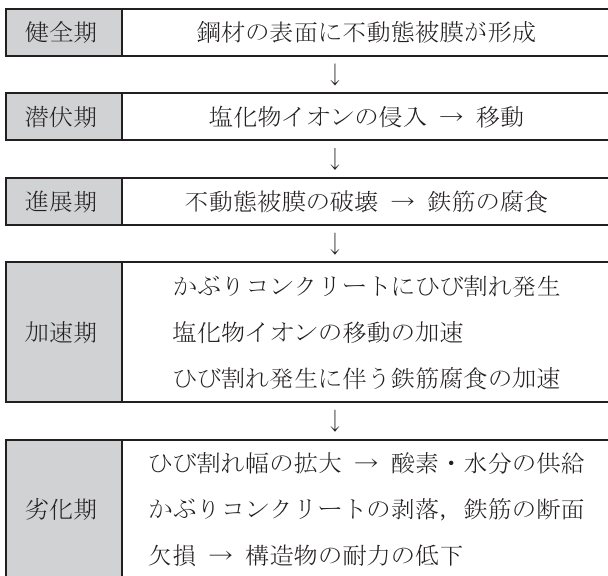


図1 コンクリート構造物の塩害の進行状況

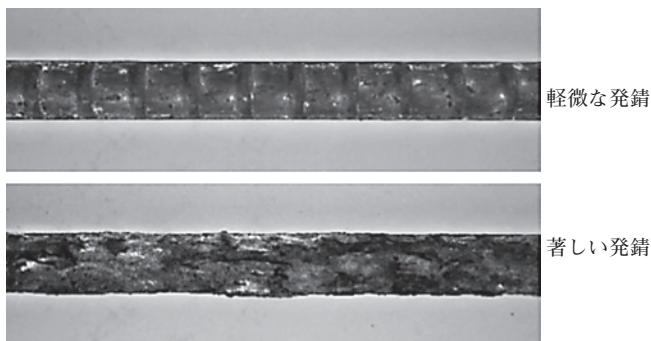


写真3 鉄筋の発錆状況の一例

(2) 塩害の対策（その1）

コンクリート中の鉄筋（鋼材）の腐食は、酸素や水分が供

給されやすく、塩化物イオンが存在する場合に著しくなります。従って、コンクリート中の鉄筋（鋼材）の腐食を防止するためには次の事項について配慮する必要があります。

- ・コンクリート製造時に混入する塩化物イオン量を制限する〔塩化物含有量の制限〕。
- ・外部からコンクリートへの塩化物イオンの侵入・浸透を抑制する〔仕上げ材の使用、コンクリートの密実性の向上、かぶり（厚さ）の確保、ひび割れ幅の制御〕。
- ・鉄筋表面への塩化物イオンの到達を抑制する〔エポキシ樹脂塗装鉄筋、亜鉛めっき鉄筋等の使用〕。
- ・コンクリート内部の鉄筋の電位を抑制する〔電気防食（外部電源方式、流電陽極方法）〕。
- ・混和剤として防せい剤を使用する〔防せい効果を有する混和剤（JIS A 6205に適合）の使用〕。

(3) 塩害の対策（その2）

コンクリートに塩化物イオンが侵入する要因には、使用材料（海砂、セメント、混和剤、練混ぜ水）に起因する場合（内在塩化物イオン）と、海水飛沫や海からの飛来塩化物などがコンクリート表面から浸透する場合（外来塩化物イオン）があります。

内在塩化物イオンについては、塩害を防止するためにJIS A 5308（レディーミクストコンクリート）やJASS5では塩化物含有量（塩化物イオン総量）を0.30kg/m³以下（購入者の承認を受けた場合には0.60kg/m³以下）と規定しています。また、表2に示すように、関連JISには各種使用材料の塩化物イオン量（塩化物量）の上限値が規定されています。

表2 各種使用材料の塩化物イオン量（塩化物量）の上限値

使用材料	塩化物イオン量（塩化物量）の規格値	対象規格
ポルトランドセメント	塩化物イオン（Cl）：0.02%以下	JIS R 5210
砂*	塩化物量（NaCl）：0.04%以下	JIS A 5308 附属書A
練混ぜ水	塩化物イオン（Cl）：200ppm以下	JIS A 5308 附属書C
化学混和剤	塩化物イオン（Cl）：0.02%以下（Ⅰ種） 0.02～0.20%（Ⅱ種），0.20～0.60%（Ⅳ種）	JIS A 6204

* 0.04%を超過のものについては、購入者の承認を必要とする。ただし、その限度は0.1%とする。
プレテンションプレストレストコンクリート部材に用いる場合は、0.02%以下として購入者の承認があれば0.03%以下とすることができる。

なお、塩化物量（NaCl）と塩化物イオン量（Cl⁻）との関係は次式のとおりです。

$$\begin{aligned} \text{塩化物イオン量（％）} &= \text{塩化物量（％）} \times 35.5 / (35.5 + 23) \\ &= \text{塩化物量（％）} \times 0.607 \end{aligned}$$

ここに、35.5：塩素（Cl）の原子量

23：ナトリウム（Na）の原子量

一方、外来塩化物イオンについては、土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕では、照査の判定基準として、 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を鋼材腐食発生限界濃度としています。

なお、外来塩化物イオンとしては、海水飛沫や飛来塩化物が代表的な例ですが、寒冷地では冬期に融雪剤や凍結防止材が散布されます。融雪剤や凍結防止材に含まれる塩化物イオンも外来塩化物イオンとして注意する必要があります。また、凍害との複合劣化も懸念されます。

(4) コンクリート中の塩化物含有量に関する試験方法

フレッシュコンクリート中の塩化物含有量は、コンクリート中の水の塩化物イオン濃度と配(調)合設計に用いた単位水量の積として求めます。フレッシュコンクリート中の塩化物イオン濃度は、JIS A 1144(フレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン濃度試験方法)に従って求めることが原則ですが、レディーミクストコンクリートの場合には、購入者の承認を得た上で、JASS5 T-502(フレッシュコンクリート中の塩化物量の簡易試験方法)等に従って、(一財)国土開発技術研究センターの技術評価を受けた「塩化物量測定器(試験紙法、イオン電極法、電極電流測定法など)」を用いて測定するのが一般的です。

一方、硬化コンクリート中の塩化物イオン量は、JIS A 1154(硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオン試験方法)に従って測定されています。同方法は、コンクリートを粉末にし、酸で溶解して塩化物を抽出し、その溶液中の塩化物イオン濃度から総塩化物量を求める方法です。

今回は、コンクリートの耐久性に関連する劣化現象の中から中性化と塩害について紹介しました。コンクリート構造物は、耐久性が確保されれば、100年以上供用することも可能です。

資源の有効利用という観点から、今後、コンクリート構造物の耐久性の確保はますます重要となってきます。読者の皆様には、この点について再認識していただければ幸いです。

次回は、「耐久性編：その2. アルカリシリカ反応、凍害」について紹介します。

(文責：工事材料試験所 所長 真野 孝次)



用語の解説

・不動態被膜

ある条件下で金属表面に反応生成物の被膜が形成され不動態の状態(金属が腐食されず安定である状態)になることがあり、その被膜を不動態被膜と呼ぶ。鉄筋コンクリートにおいては、コンクリートがアルカリ性であることが不動態被膜を形成する条件となる。

・かぶりコンクリート(表1)

鉄筋表面を覆う部分のコンクリートのこと。「かぶり(厚さ)」を参照。

・中性化速度

コンクリートが中性化する速度のこと。中性化深さ X と時間 t の間には、 $X=A\sqrt{t}$ の関係があり、 A を中性化速度係数と呼ぶ。

・配(調)合条件

コンクリート中のセメント、水、骨材、混和材、空気量などの割合(容積比、質量比)のこと。土木分野では配合条件、建築分野では調合条件といい、両者を併せて配(調)合条件という用語を使用する場合がある。

・水セメント比

コンクリート中のセメントに対する水の質量比または百分率(W/C)のこと。一般に水セメント比が小さい(セメントの質量に対して水の質量の割合が小さい)ほど、コンクリート強度が高く、

密実になる。

・はつり箇所

コンクリート内部の状態を確認するために、たがね等でコンクリート表面を削りとった箇所のこと。

・コンクリートコア

コンクリート構造物から試験用として抜き取った円柱状の試験体のこと。抜き取りには専用のコアドリルやコアビットを使用する。なお、供試体の直径は、一般に粗骨材の最大寸法の3倍を超える寸法とする。

・アノード部(陽極)

金属が腐食する際に金属が陽イオンになって溶け出す部分(陽極)のこと。

・カソード部(陰極)

金属が腐食する際にアノードに残された電子により、水と酸素から水酸化物イオン(OH⁻)が作られる部分(陰極)のこと。

・かぶり(厚さ)

鉄筋表面とこれを覆うコンクリート表面までの最短距離のこと。土木では「かぶり」、建築では「かぶり厚さ」という。

・エポキシ樹脂塗装鉄筋

塩化物イオンによる鉄筋の腐食を防止するため

に、表面にエポキシ樹脂を塗装した防食鉄筋の一種。

・亜鉛めっき鉄筋

防食のために鉄筋の表面に亜鉛をめっきした鉄筋のこと。めっきの方法には、溶融亜鉛めっきと電気亜鉛めっきの2種類がある。

・電気防食

電気によって金属の腐食を防止すること。コンクリート側の外部から鉄筋側に微小電流を流して金属イオンの流出を抑えることによって腐食を防ぐ。

・防せい剤

コンクリート中の鉄筋が使用材料に含まれる塩化物イオンによって腐食することを抑制するために用いる混和剤のこと。JIS A 6205(鉄筋コンクリート用防せい剤)に品質が規定されている。

・照査

照査とは、設計・計画された内容が要求された性能を満足しているかどうかを実施工が始まる前の段階で判定する行為のこと。一方、検査は、材料、製造・施工されたコンクリート、部材および構造物が要求性能を満足し、受け取り可能かどうかを判定する行為のこと。

知っていましたか！ コンクリートの耐久性のア・レ・コ・レ

・鉄筋コンクリートの特徴

コンクリートは圧縮力に強いが引張力に弱いという性質があります。一方、鉄筋（鋼材）は、引張力には強いものの、大気中では錆びやすく、また、高温下では強度が著しく低下します。しかし、両者を複合した鉄筋コンクリートでは、鉄筋はコンクリートに保護され、錆びにくく（コンクリート中は、アルカリ性雰囲気）、優れた耐火性も期待できます。さらに、鉄筋とコンクリートの線膨張率は概ね同様であるため、気温が変化しても同じように伸び縮みします。このように、鉄筋コンクリートは、両者の長所を複合した極めて合理的な構造材料です。

・コンクリートクライシス

従来、コンクリート構造物は、維持管理や保全などのメンテナンスが不要な永久構造物と思われてきました。しかし、昭和50年代の後半、塩害やアルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の早期劣化がマスコミ等で大きく取り上げられ、番組のタイトルであった「コンクリートクライシス（コンクリートの危機）」が大きな社会問題となりました。この問題を契機に、コンクリート中の塩化物総量の規制やアルカリ骨材反応に対する抑制対策が導入され、以降、新築されたコンクリート構造物においては、塩害やアルカリ骨材反応による早期劣化が著しく減少したといわれています。

その後、平成11年に「コンクリートが危ない」（小林一輔著、岩波書店）という書籍が出版され、それから約1カ月後に、複数のトンネルや高架橋からのコンクリート塊の落下事故が相次ぎました。こういった一連の事故から再び「コンクリートクライシス」が社会問題となり、これを契機にコンクリート構造物の維持管理の重要性が改めて認識されるようになりました。

・屋内と屋外の二酸化炭素濃度

環境条件は、屋内よりも屋外の方が厳しいのが一般的です。しかし、コンクリートの中性化に関しては、屋外よりも屋内の方が厳しい条件となります。屋外の二酸化炭素濃度は、概ね0.03～0.04%程度ですが、屋内

の二酸化炭素濃度は、居室の用途によって異なりますが、概ね0.1%程度であり、屋外の3倍程度の値です。日本建築学会の鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計指針（案）・同解説では、大気中の二酸化炭素濃度の測定値がない場合は、屋外では0.05%、屋内では0.20%を標準とすることになっています。

なお、気象庁の観測結果によると、大気中の二酸化炭素濃度は、年に約1.8ppmの割合で上昇しており、この傾向は世界的に認められ、全世界の二酸化炭素濃度の平均は、産業革命以前の濃度より3割程度増加したといわれています（2012年で393ppm）。

・山間部でも塩害は生じます

海洋構造物や海岸近くのコンクリート構造物の塩害は広く知られていますが、山間部でも塩害は発生します。寒冷地では、冬期に道路や橋梁の凍結を防止するため、融雪剤や凍結防止剤が散布されます。これらの材料は、現在ほとんどが塩化ナトリウムがであり、外来塩化物イオンとしてコンクリートに侵入し、塩害が発生する場合があります。

また、寒冷地では、凍害と塩害による複合劣化が発生する場合も少なくありません。さらに、塩化物イオン（ Cl^- ）は、塩害の原因となりますが、ナトリウムイオン（ Na^+ ）は次回紹介するアルカリシリカ反応を助長する場合があります。寒冷地では、凍害、塩害、アルカリシリカ反応による複合劣化も懸念されます。

・アルカリ性とアルカリ金属イオン

コンクリートの耐久性に関連する用語に「アルカリ」があります。今回紹介した中性化に関連する「アルカリ」は、酸性・アルカリ性の「アルカリ性」であり、主にOHなどのマイナスイオンが関係します。一方、次回紹介する「アルカリシリカ反応」に関連する「アルカリ」は、アルカリ金属のことで、NaやKなどのプラスイオンが関係します。

両者は全く異なるものですが、マスコミ等で両者を混同して報道している例が見受けられます。読者の皆様も気を付けて下さい。

コンクリートの基礎講座

Ⅲ 耐久性編 「その2. アルカリシリカ反応, 凍害ほか」



今回は、前回に引き続き、「耐久性編」のその2として、「アルカリシリカ反応, 凍害ほか」について紹介します。

なお、本文で下線を付した用語は、用語の解説を参照して下さい。また、今回は誌面の都合で「知っていましたか!」は割愛します。

1. アルカリ骨材反応とは

アルカリ骨材反応 (alkali aggregate reaction) とは、コンクリートの細孔溶液中の水酸化アルカリ (KOH, NaOH) と、骨材中の反応性珪物との化学反応のことです。一般的には、反応生成物の生成や吸水に伴う膨張によってコンクリート (コンクリート構造物) にひび割れなどが発生する現象をアルカリ骨材反応と総称しています。

アルカリ骨材反応は、1940年頃北米で発見され、我が国でも1950年頃から調査報告例はありましたが、1980年代になって、アルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の早期劣化が顕在化しました。

(1) アルカリ骨材反応の概要

1) アルカリ骨材反応の種類

アルカリ骨材反応は、かつては、アルカリシリカ反応 (ASR)、アルカリ炭酸塩岩反応、アルカリシリケート反応の3つに分類されていました。しかし、最近では、アルカリシリケート反応をアルカリシリカ反応と同一視し、アルカリシリカ反応 (ASR) とアルカリ炭酸塩岩反応の2種類に分類されています。

なお、我が国でアルカリ骨材反応といわれているものは、一般にアルカリシリカ反応 (ASR: alkali silica reaction) を示します。そこで、本編では、ASR (アルカリシリカ反応) と称して概説します。

2) 反応性珪物と岩種

ASRを引き起こす骨材には、反応性珪物が含まれていますが、その種類はさまざまです。反応性珪物としては、非石英質系のシリカ珪物 (トリジマイト, クリストパライト) および非晶質のシリカガラス, 潜晶質, または隠微晶質あるいは微晶質の石英などがあります。前者の反応は比較的早期に発現し、後者の反応は比較的遅れて発現する特徴を有しています。

なお、反応性珪物を有する岩種としては、安山岩, 玄武岩, 流紋岩, チャート, 砂岩, 粘板岩, 片麻岩などがあげられます。しかし、すべての骨材 (岩石) が有害な反応性を示すわけではないので誤解しないように注意して下さい。

3) ASRによる劣化現象

ASRが進行すると、コンクリート (構造物) には、ひび割れ, ゲルの析出, 目地のずれなどの現象が顕在化します。ひび割れの形態は、膨張を拘束する状態によって異なり、拘束力の小さな無筋コンクリート構造物の場合には亀甲状のひび割れが発生します。また、鉄筋コンクリート構造物では主筋方向に、部材両端が強く拘束されている構造部材では拘束されている面に対して直角にひび割れが発生します。

ASRによるひび割れは部材内部まで達しない場合が多いため、ひび割れが発生してもコンクリート部材の耐力が直ちに低下することは少ないといわれています。しかし、近年、ASRによる膨張力によって、伸び能力の低い鉄筋の曲げ加工部や圧接部周辺で鉄筋が破断したという事例が報告されています。

なお、前回も紹介しましたが、ASRに伴うひび割れは、鉄筋腐食, 塩害, 凍害などの劣化現象を促進する場合 (複合劣化) もあります。

4) ASRの特徴

ASRによる有害な膨張は、①反応性珪物を含む骨材が一定量以上存在すること、②細孔溶液中に水酸化アルカリが一定量以上存在すること、③コンクリートが湿潤状態に置かれていること。という3つの条件が同時に成立して初めて生じます。従って、反応性珪物を含む骨材をコンクリートに使用しても、細孔溶液中の水酸化アルカリを低減するか、コンクリートへの水分の供給を遮断すればASRによる有害な膨張を抑制することが可能です。

なお、ASRによる膨張は、コンクリート中に含まれる反応性骨材の量が多いほど大きくなるわけではありません。ASRによる膨張が最も大きくなるときの反応性骨材の割合をペシマム (ペシマム量) といいます。ペシマムは、セメント中のアルカリ量, 骨材の種類・粒度などによって変化します。また、ペシマムのない骨材も存在します。

反応性骨材の混合率とモルタルバーの膨張率の関係の一

例を図1に示します。図中の記号F以外の反応性骨材は、すべてペシマムを有しています。

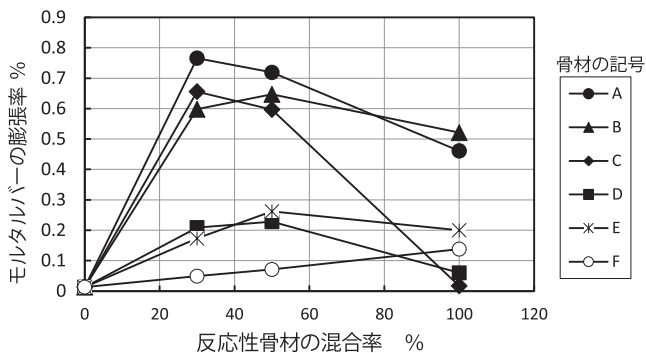


図1 反応性骨材の混合率とモルタルバーの膨張率との関係の一例

5) アルカリの供給源

コンクリート中のアルカリの主な供給源はセメントであり、セメント原料である粘土鉱物などから Na_2O や K_2O が供給されます。セメント中のアルカリ量は生産工場によって異なり、かつては、全アルカリ($\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$)が1%を超えるセメントも流通していましたが、JIS R 5210 (ポルトランドセメント)が1992年に改正され、ポルトランドセメントの全アルカリは0.75%以下という規定が設けられました。なお、現在流通している普通ポルトランドセメントの全アルカリは概ね0.5%前後の値です。

アルカリの供給源としては、セメントのほかに、細骨材に付着した塩化物(NaCl など)や化学混和剤に含まれる塩化物、硬化後に外部から侵入する塩化物などがあります。また、コンクリート中の水分の移動に伴ってアルカリが濃縮される現象もあるといわれています。

(2) 骨材の反応性試験方法

現在、骨材の反応性試験方法として、次に示す3種類の試験方法がJISに規定されています。

- ① JIS A 1145 [骨材のアルカリシリカ反応性試験方法 (化学法)]
- ② JIS A 1146 [骨材のアルカリシリカ反応性試験方法 (モルタルバー法)]
- ③ JIS A 1804 [コンクリート生産工程管理用試験方法—骨材のアルカリシリカ反応性試験方法 (迅速法)]

また、再生骨材を対象とした再生骨材迅速法(JIS A 5021, 附属書D)が2011年に制定されています。

化学法は、比較的短時間で骨材の反応性の有無を判断できます。しかし、モルタルバー法に比較して判定基準が厳しいといわれています。一方、モルタルバー法は、試験期間が6カ月以上と長い場合、骨材の反応性の有無を判定す

るまでに長期間を要するというのが欠点といわれています。通常は、化学法によって反応性の有無を確認し、「無害でない」と判定された場合にモルタルバー法を行うのが一般的です(化学法で「無害でない」と判定され、モルタルバー法で「無害」と判定された場合、その骨材の反応性は「無害」と判定します)。

ただし、複数の骨材を混合して使用する場合は、それぞれの骨材について試験を行い、1種類でも「無害でない」と判定された場合は、この骨材全体を「無害でない」と判定します。これは、前述したペシマムを考慮して規定された判定基準です。

なお、迅速法は、コンクリートの生産工程管理用の試験方法と位置付けられていますが、化学法と同程度の期間で骨材の反応性の有無が判断できるため、モルタルバー法の代替試験方法としても利用されています。

骨材の反応試験方法の概要を次に紹介します。

1) 化学法

化学法はアルカリに対する骨材の潜在的な反応性を化学的に試験する方法です。所定の粒度の粉碎した骨材を 80°C のアルカリ溶液で反応させ、その溶液のアルカリ濃度減少量(R_c)と溶解シリカ量(S_c)の関係から骨材の反応性を判定します。なお、アルカリシリカ反応性の判定方法は、次の3種類となっています。

- a) S_c が 10mmol/L 以上で、 R_c が 700mmol/L 未満の範囲では、 $S_c < R_c$ となる場合、その骨材を“無害”と判定し、 $S_c \geq R_c$ となる場合、その骨材を“無害でない”と判定する。
- b) S_c が 10mmol/L 未満で R_c が 700mmol/L 未満の場合、その骨材を“無害”と判定する。
- c) R_c が 700mmol/L 以上の場合には判定しない。

2) モルタルバー法

モルタルバー法はモルタルの長さ変化を測定することにより骨材の潜在的な反応性を判定する方法です。試験方法の概要は次の通りです。

- ・ 試料(細骨材, 粗骨材)を粉碎・分級して所定の粒度分布(細骨材)に調整する。
- ・ セメント : 水 : 細骨材(表乾状態) = 1 : 0.5 : 2.25(質量比), セメントのアルカリ量を1.2%に調整(水酸化ナトリウムを添加)して供試体(モルタルバー, $40 \times 40 \times 160\text{mm}$)を作製する。
- ・ 供試体を温度 $40 \pm 2^\circ\text{C}$, 相対湿度95%以上の条件下に6カ月間(26週)保存し、膨張量を測定する。
- ・ 供試体3体の平均膨張率が26週後に0.100%未満の場合は、“無害”とし、0.100%以上の場合には“無害でない”と判定します。

参考として、モルタルバーの膨張率測定状況を写真1に、モルタルバーの表面に発生したひび割れの一部を写真2に示します。

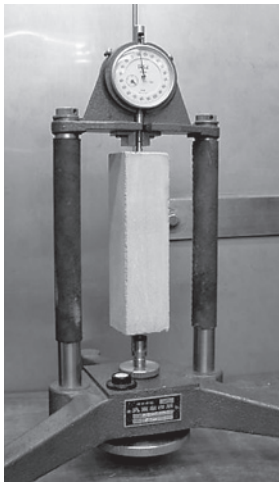


写真1 モルタルバーの膨張率測定状況

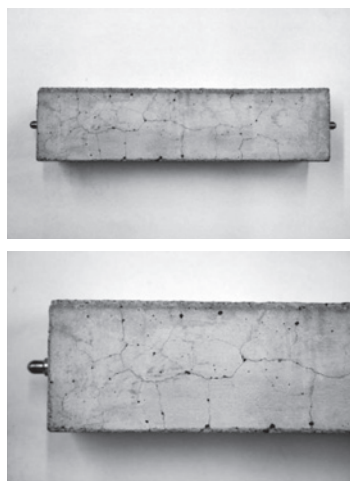


写真2 モルタルバーの表面に発生したひび割れの一部

3) 迅速法

迅速法は、主としてコンクリートの生産工程管理用に適用する試験方法であり、モルタルバーを高温・高圧で養生し、その特性の変化を測定することによって、骨材のアルカリシリカ反応性を迅速に判定する試験方法です。

モルタルバー法との違いは、供試体の養生方法のほか、試料の1/2に標準砂（JIS R 5201）を混合して供試体を作製すること、セメントのアルカリ量を2.5%に調整することなどが挙げられます。また、迅速法では、モルタルの特性の測定方法として、長さ変化、超音波伝ば速度、動弾性係数の3種類の方法が規定されています。

なお、判定基準は、化学法とモルタルバー法の間程度といわれていますが、化学法やモルタルバー法と判定結果が異なる場合がありますので注意が必要です。

4) その他の試験方法

その他の試験方法としては、日本建築学会JASS 5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事に規定されるJASS 5NT-603「コンクリートの反応性試験方法」、全国生コンクリート工業組合連合会規格ZKT-206（コンクリートのアルカリシリカ反応性迅速試験方法）、前述したJIS A 5021（コンクリート用再生骨材H）の附属書D（規定）「コンクリート用再生骨材Hのアルカリシリカ反応性試験方法（再生骨材迅速法）」などがあります。

また、関連団体の団体規格や海外規格には、コンクリート構造物から採取したコンクリートコアを対象とした各種の促進膨張率試験方法が規定されています。

(3) アルカリ骨材反応の抑制対策

JIS A 5308（レディーミクストコンクリート）の附属書A

（規定）「レディーミクストコンクリート用骨材」では、骨材をアルカリシリカ反応性により表1に示すように区分しています。

JIS A 5308では、一時期、アルカリシリカ反応性を有する骨材の使用を制限（禁止）する旨が規定されていました。しかし、その後の調査・研究により、反応性を有する骨材でも適切な抑制対策を講ずれば、通常の骨材と同様に使用できることが確認されたため、反応性を有する骨材の使用制限は撤廃されました。現行のJIS A 5308の附属書B（規定）「アルカリシリカ反応抑制対策の方法」では、アルカリシリカ反応抑制対策として次に示す3種類の方法を規定しています。

なお、抑制方法の詳細については、JIS A 5308の附属書B（規定）で確認して下さい。

①コンクリート中のアルカリ総量を規制する抑制対策

[アルカリ総量を $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ 以下に規制]

②アルカリシリカ反応抑制効果のある混合セメントなどを使用する抑制対策

[高炉セメントB種若しくはC種、フライアッシュB種若しくはC種を使用。高炉セメント微粉末又はフライアッシュを抑制効果があると確認された単位量で使用]

③安全と認められる骨材を使用する抑制対策

[区分Aの骨材（“無害”と判定された骨材）の使用]

今回は誌面の都合で、JIS A 5308に規定されているアルカリシリカ反応の抑制対策について概説しましたが、アルカリ骨材反応の抑制対策については、国土交通省（旧建設省）から各種の通達や通知が出されています。それらの詳細、経緯や背景などについては、別の機会に紹介します。

表1 アルカリシリカ反応性による区分

区分	摘要
A	アルカリシリカ反応性試験の結果が「無害」と判定されたもの。
B	アルカリシリカ反応性試験の結果が「無害でない」と判定されたもの、又はこの試験を行っていないもの。



写真3 反応促進装置（JIS A 1804）

2. コンクリートの凍害とは

コンクリートの凍害とは、コンクリートの細孔中に含まれる水分が凍結し、水の凍結膨張に伴う膨張圧、水分の移動圧などによって、コンクリートの表面劣化、強度低下、ひび割れ、ポップアウトなどコンクリートが劣化する現象のことです。JIS A 0203 (コンクリート用語) では、「凍結又は凍結融解作用によって、表面劣化、強度低下、ひび割れ、ポップアウトなどの劣化を生じる現象」と定義しています。関連する用語として、凍結融解作用に対する抵抗性、凍結融解抵抗性、耐凍害性などが用いられています。

凍害による劣化は、初期にはひび割れが観察され、より進行した段階で組織的な崩壊となります。ひび割れは、亀甲状の形態を示し、エフロレッセンスを伴う場合もあります。コンクリート表面のひび割れが著しくなった段階、つまり、内部のコンクリートの膨張が限界を超えた段階で、その部分のコンクリートは崩壊します。

なお、凍害による破壊現象は、セメントペースト中、骨材中および両者の界面に生じるほか、コンクリート表面のスケーリング、ポップアウトなどの劣化を引き起こす場合があります。

(1) 耐凍害性に影響を及ぼす要因

1) 骨材の品質

耐凍害性が劣る骨材を使用すると、骨材の破壊に起因するコンクリートの劣化が生じます。また、吸水率の大きい軟石を用いたコンクリートでは、凍結時に骨材自身が膨張し、表面のモルタルをはじき出すポップアウトを生じる場合があります。

一般に吸水率が大きい骨材は耐凍害性が劣るといわれていますが、JISの規格値(3.0～3.5%以下)を満足する骨材であれば実質的な問題はないといえます。また、骨材の耐凍害性を判断する試験方法として、JIS A 1122 (硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法)がありますが、最近の研究結果によると、骨材の安定性試験結果とコンクリートの耐凍害性は必ずしも整合しないといわれています。

なお、コンクリートは凍結融解の過程で大きな温度変化を受けるため、骨材とセメントペーストの線膨張係数の相違、表面の付着性なども耐凍害性に影響を及ぼす要因(骨材の品質)となります。

2) コンクリートの配(調)合

コンクリートの耐凍害性は空気量と密接な関係があり、粗骨材の最大寸法に応じて3～6%程度のエントレインドエアを連行することにより、コンクリートの耐凍害性は大きく向上します。これは、エントレインドエアは、微細な独立した空気泡であるため、コンクリートの硬化後も水で

満たされることがなく、凍結時の移動水分の逃げ道になるためと考えられています。JIS A 5308 (レディーミクストコンクリート)では、空気量の標準値を $4.5 \pm 1.5\%$ としていますが、この値は、コンクリートの耐凍害性を確保することも一つの目的としています。また、同一空気量の場合は、気泡が小さい(気泡の数が多いということ)ほど、すなわち、気泡間隔係数が小さいほど耐凍害性は向上します。一般に、気泡間隔係数が $200 \sim 250 \mu\text{m}$ 以下であれば、優れた耐凍害性が期待できるといわれています。

一方、水セメント比は、コンクリート組織の緻密さ、つまり細孔構造の特性を決定する基本的な要因です。水分の凍結がコンクリートの細孔径に依存することから、水セメント比が低い緻密なコンクリートほど耐凍害性に優れるということになります。さらに、細孔径がある限界値以下であれば、その内部の水分が凍結しないことを考慮すると、極めて水セメント比が低い高強度コンクリートの場合には、non-AEコンクリートでも凍結融解試験で優れた結果が得られる場合もあると考えられます。

3) 環境条件

海水の作用と凍結融解作用が複合すると、劣化作用は著しく大きくなります。寒冷地の港湾コンクリート構造物には、スケーリングやひび割れが発生している事例が数多く見受けられます。また、凍結防止剤が散布される構造物では、塩害と凍害との複合作用によりスケーリングが著しく促進されます。

(2) 骨材およびコンクリートの耐凍害性試験方法

1) 骨材の耐凍害性試験

骨材の耐凍害性は、JIS A 1122 (骨材の安定性試験方法)によって評価されます。

骨材の安定性試験は、骨材中に含まれる水が凍結する時の膨張と同様の作用を硫酸ナトリウムの結晶圧によって与えることにより、凍害に対する骨材の抵抗性を調べる試験です。一般に吸水率が大きい骨材ほど安定損失質量が多く、耐凍害性は劣ります。また、凍害に及ぼす影響は細骨材よりも粗骨材の方が著しいといわれています。ただし、前述しましたが、骨材の耐凍害性とコンクリートの凍害性は必ずしも一致しないという研究報告もあります。

2) コンクリートの耐凍害性試験

コンクリートの耐凍害性は、凍結融解作用を人工的に所定の回数繰り返し、相対動弾性係数の保持割合(耐久性指数)により評価します。試験方法は、JIS A 1148 (コンクリートの凍結融解試験方法)にA法(水中凍結融解試験方法)とB法(気中凍結水中融解試験方法)が規定されています。

一般に、凍結融解の繰返し回数300サイクル時の相対動弾性係数が60%以上の場合、そのコンクリートは耐凍害性に優れていると判断します。

3) コンクリートの耐凍害性に関する規定

日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 コンクリート工事」では、激しい凍結融解作用を受ける構造体に使用するコンクリートについて、使用する骨材およびコンクリートの品質基準を規定しています。骨材の品質基準は、表2に示すとおりであり、吸水率の値が一般のレディーミクストコンクリート用骨材の品質規格値より厳しくなっています。また、コンクリートについては、特記のない場合は、JIS A 1148に規定される凍結融解試験で300サイクルにおける相対動弾性係数が85%以上であることを定めています。

表2 凍結融解作用を受けるコンクリートの骨材の品質基準

品質項目	細骨材	粗骨材
吸水率 (%)	3.0以下	2.0以下
安定性損失質量 (%)	10以下	12以下

3. その他の劣化現象

その他、コンクリートの耐久性に関連する劣化現象には次のようなものがあります。

1) アルカリシリカ反応以外の骨材による劣化

アルカリシリカ反応を起こす鉱物以外に、物理的または化学的に不安定でコンクリート用骨材として使用すると、ひび割れやポップアウトなどの劣化現象を生じさせる鉱物類があります。有害鉱物によるコンクリートの劣化現象の一例を表3に示します。

なお、表に示した鉱物が常にコンクリートの劣化現象を引き起こすものではありません。

2) 化学的侵食

化学的侵食とは、外部環境から供給される化学物質とコンクリートとが化学反応を起こすことによって生ずる劣化

現象の総称です。具体的には、次に示す3種類に大別されます。

- ①セメント水和物と反応し、水に溶けにくいセメント水和物を可溶性物質に変化させ、コンクリート組織を多孔質化したり分解するなどの劣化を生じさせる現象です。劣化因子の例としては、酸、動植物油、無機塩類、腐食性ガス、炭酸ガス、硫酸の生成を伴う微生物の作用などが挙げられます。
- ②セメント水和物と反応して新たに膨張性化合物を生成し、生成時の膨張圧によってコンクリートを劣化させる現象です。劣化因子の例としては、動植物油、硫酸塩、海水、アルカリ濃厚溶液などが挙げられます。
- ③コンクリートが長期間にわたって地下水や海水などに接することにより、コンクリート中のセメント水和物の成分が外部に溶脱して硬化体組織が多孔質化し劣化する現象です。

3) すりへり

舗装路面や倉庫・駐車場の床、水路やダムの上流部のように、走行車両や流水によってコンクリートが摩耗作用を受ける構造物があります。このような構造物では、摩耗作用(すりへり作用)によって、コンクリート表面から徐々に劣化する場合があります。

コンクリートの耐摩耗性に対しては、セメントペーストおよび骨材の耐摩耗性、コンクリートの配(調)合などが影響要因となりますが、中でも粗骨材の耐摩耗性が大きく影響するといわれています。

粗骨材の耐摩耗性は、JIS A 1121(ロサンゼルス試験機による粗骨材のすりへり試験方法)に従って試験を行い、すりへり減量(摩耗減量百分率)を指標として評価されますが、すりへり減量は、粗骨材の種類や岩種によって異なります。すりへり試験結果の一例を表4に示します。

表4 粗骨材のすりへり試験結果の一例

川砂利	山砂利	砕石				
		安山岩	硬質砂岩	玄武岩	石英斑岩	石灰石
14.8	13.4	14.8	13.4	16.1	15.4	21.6

表3 有害鉱物によるコンクリートの劣化現象の一例

分類	鉱物の例	劣化現象(発生する可能性がある現象)
粘土鉱物	モンモリロナイト、クロライト、加水雲母、パーミキュライト	異常凝結、水和・吸水膨張、ひび割れ、ポップアウト、強度低下
沸石類	ローモンタイト(濁沸石)	乾湿繰返しによる骨材の破壊、表面剥離、強度低下、ポップアウト、崩壊
硫化物	黄鉄鉱、白鉄鉱、磁硫鉄鉱	エトリンガイトの生成 → 膨張、崩壊ポップアウト
硫酸塩	二水石膏、無水石膏、明ばん石	エトリンガイトの生成 → 膨張、ひび割れ
酸化物	CaO、MgO、FeO	水和・酸化膨張、ポップアウト
炭酸塩岩	ドロマイト質石灰岩	セメント中のアルカリと反応 → 膨張、ひび割れ

4) 電流の作用による劣化

鉄筋コンクリートの場合、電流が鉄筋からコンクリートに向かって流れる(鉄筋が陽極)と、鉄筋が錆び、体積膨張を引き起こしてコンクリートにひび割れが発生します。このような劣化現象を電食といい、コンクリート中に塩化カルシウムなどの塩化物を含むと劣化は著しくなります。

一方、コンクリートから鉄筋に過大な電流が流れる(鉄筋が陰極)と、鉄筋近傍のコンクリートが軟化して付着強度が低下します。また、過大な電流の作用は陰極となる鉄筋の表面および内部に水素を発生させ、PC鋼材などは水素脆化が生じることが知られています。

なお、鉄筋が陰極となるように電流を与えることは鉄筋の電気化学的防食工法の原理であり、供給電流量が適正であれば、付着強度の低下や水素脆化を招くことなく、鉄筋の腐食を電氣的に抑制することができます。

近年、地球環境問題や循環型社会の構築が大きな課題となっています。コンクリート構造物もスクラップ&ビルド

から長期供用のための維持管理の重要性が指摘されています。コンクリート構造物は、建設後100年以上、社会の利便性に貢献し、豊かな生活を提供することも可能です。そのためには、コンクリート構造物および使用するコンクリートの耐久性の確保が必要不可欠となります。コンクリートの耐久性に影響を及ぼす要因はさまざまですが、骨材の品質もコンクリートの耐久性に影響を及ぼす大きな要因の一つです。

読者の皆様には、この点について再認識していただき、コンクリートおよびコンクリート構造物の耐久性の確保に寄与していただければ幸いです。

今回は、「IV 製造・調合編:レディーミクストコンクリート、調合設計」について紹介します。

(文責:工事材料試験所 所長 真野 孝次)



用語の解説

・水酸化アルカリ

ナトリウムやカリウムなどアルカリ金属の水酸化物のこと。

・反応性珪物

アルカリシリカ反応を引き起こす可能性のあるシリカ質などの珪物のこと。

・アルカリシリカ反応

セメント中のアルカリと骨材中に含まれる反応性シリカとが水の存在下で反応してアルカリシリケートゲルを生成し、膨張を引き起こす現象のこと。我が国でアルカリ骨材反応といわれているものは、一般にアルカリシリカ反応を示す。

・アルカリ炭酸塩岩反応(炭酸塩反応)

セメント中のアルカリとドロマイド質の石灰石との反応のこと。

・アルカリシリケート反応

骨材中の活性度の高いシリカ質とセメントその他に含まれるナトリウム分との反応で、コンクリートの膨張を引き起こす現象のこと。最近ではアルカリシリケート反応をアルカリシリカ反応と同一視する説が有力となっている。

・ゲル

コロイド溶液が固まったゼリー状の固体のこと。

・圧接部

圧接とは鉄筋の継手方法の一つで、圧接部とは鉄筋をガス圧接によって接合した部分のこと。

・外部から侵入する塩化物

海水飛沫や海からの飛来塩化物、融雪剤や凍結防止材に含まれる塩化物などがある。

・アルカリ総量

セメント、骨材、混和剤などからコンクリート中に供給されるアルカリの総量のこと。 Na_2O および K_2O の含有量の和を、これと等価な Na_2O の量($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$)に換算して表した値で、 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}(\%) = \text{Na}_2\text{O}(\%) + 0.658\text{K}_2\text{O}(\%)$ と計算する。

・反応抑制効果のある混合セメント

高炉セメントB種もしくはC種、フライアッシュセメントB種もしくはC種がある。ただし、高炉セメントB種の高炉スラグ分量は40%(質量%)以上、フライアッシュセメントB種のフライアッシュの分量は15%(質量%)以上必要。

・ポップアウト

軟石の凍結膨張などが原因で生じた膨張圧によって、コンクリート表面が剥がれ、浅い円錐状のくぼみが生じる現象のこと。

・スケーリング

コンクリートの表面部分のモルタルが剥離・剥落する現象(表面劣化)のこと。

・線膨張係数

単位温度、単位長さ当たりの熱による膨張長さの割合のこと。線膨張率ともいう。

・エントレインドエア

化学混和剤などによってコンクリート中に連行される微小な独立した空気泡のこと。

・気泡間隔係数

硬化コンクリート中の気泡と気泡の間隔のこと。同一空気量の場合、気泡の径が小さいほど気泡間隔係数は小さくなる。

・non-AEコンクリート

化学混和剤などによってエントレインドエアを連行していないコンクリートのこと。

・相対動弾性係数

試験開始時のコンクリートの動弾性係数に対する試験中または試験終了後のコンクリートの動弾性係数の比率のこと。なお、コンクリートの動弾性係数は、強度が低下したり組織が緩むと低下する。

・耐久性指数

コンクリートの耐久性を表す指標のことで、凍結融解試験を終了したときの相対動弾性係数の値または相対動弾性係数が60%になったときの凍結融解サイクル数から算出される値のこと。

コンクリートの基礎講座

IV 製造・調合編「その1：レディーミクストコンクリート」



コンクリートの基礎講座も終盤を迎え、今回から“製造・調合編”に入ります。今回は、その1としてレディーミクストコンクリートについて紹介します。

なお、本文で下線を付した用語は解説欄をご参照下さい。

1. はじめに

コンクリートは、鋼材とともに土木・建築工事に欠かせない材料であり、年間88,000千 m^3 （H23年度実績）程度のコンクリート（生コン）が各種工事に使用されています。

コンクリートは、工場で製造して施工現場に配達されるレディーミクストコンクリートと、施工現場で製造する現場練りコンクリートに大別されますが、原子力発電所施設やダムなどの特殊な工事を除くと、ほとんどの施工現場でレディーミクストコンクリートが使用されています。

今回は、このレディーミクストコンクリートについて概説します。

2. レディーミクストコンクリートとは

レディーミクストコンクリートとは、工場で製造して施工現場に配達されるコンクリートのことで、JIS A 0203（コンクリート用語）では、「整備されたコンクリート製造設備をもつ工場から、荷卸し時点における品質を指定して購入することができるフレッシュコンクリート」と定義しています。

レディーミクストコンクリートの品質は、JIS A 5308（レディーミクストコンクリート）に規定されていますが、他の工業製品と異なり、半製品の状態で購入者に引き渡されるのが大きな特徴です。

レディーミクストコンクリート工場は、全国に点在しており、工場数は約3,500工場、工業標準化法に基づくJISの取得率が高いのが特徴であり、その取得率は約88%となっています（なお、旧工業標準化法に基づくJISマーク表示認定工場の取得率は約94%）。

3. JIS A 5308 制定の経緯

レディーミクストコンクリートは、海外からの技術導入により、1949年（昭和24年）末に商品化・販売が開始されましたが、この新しい工業を育成する観点からJISを制定する

必要性が生じました。当時は、東京で5社7工場、大阪、横浜、名古屋で各1工場が稼働していたにすぎず、十分な実績と経験がなかったため、ASTM C94-48（Standard Specification for Ready Mixed Concrete）を基本とし、1953年（昭和28年）11月にJIS A 5308-1953（レディーミクストコンクリート）が制定されました。

制定後は、技術革新や社会情勢の変化等を踏まえて、合計12回の改正〔1968年（昭和43年）～2011年（平成23年）〕を経て現在に至っています。

なお、2011年の改正は〔追補1〕（規定の一部の置き換え）であるため、JIS A 5308を使用する場合は、2009年版と2011年版を併用する必要があります。

参考として、JIS A 5308:2011レディーミクストコンクリート（追補1）の概要を表1に示します。

表1 JIS A 5308：2011レディーミクストコンクリート（追補1）の概要

箇条		主な改正内容（置き換え内容）
2	引用規格	西暦年を附記した引用規格は、最新版ではなく、西暦年のJISを引用すると改正。
8.1.3	（ミキサ）	ミキサは、固定ミキサとし、JIS A 8603：1994に適合するものと改正。
8.4	（運搬）	運搬時間は、生産者が練混ぜを開始してから運搬車が荷卸し地点に到着するまでの時間とし、その時間は1.5時間以内とすると改正。 注8）運搬時間は納入書に記載される納入の発着時間の差によって確認できると追記。
12.2	レディーミクストコンクリート納入書	納入書の末尾に、リサイクル材を用いる場合には、JIS Q 14021に規定するメビウスループを、使用材料名の記号およびその含有量を付記して納入書に表示できる旨を規定。

4. 現行のJIS A 5308の概要

現行のJIS A 5308（2009年版と2011年版の併用）は、本体と5つの附属書（規定）で構成されています。規格本体の構成と概要を表2に、附属書の名称と概要を表3に、本体および附属書の代表的な内容を次に概説します。

1) レディーミクストコンクリートの種類

レディーミクストコンクリートの種類は、普通コンクリート、軽量コンクリート、舗装コンクリートおよび高強度コンクリートの4つに区分され、粗骨材の最大寸法、スラ

表2 JIS A 5308 : 2009本体の構成と概要

箇条	概要
1 適用範囲	荷卸し地点までについて規定。配達後の運搬、打込みおよび養生については適用しない。
2 引用規格	用語, 使用材料, 試験方法, 機器など 58 規格を引用。
3 種類	普通, 軽量, 舗装, 高強度コンクリートの4区分を規定。購入者との協議事項を規定。
4 品質	荷卸し地点の品質として以下の項目を規定。 4.1 強度, スランブ又はスランブフロー, 及び空気量 4.2 塩化物含有量
5 容積	荷卸し地点での容積を規定。(納入書に記載した容積を下回ってはならない。)
6 配合	品質の保証。配合報告書, 塩化物含有量の計算, ASR 抑制対策の基礎資料の提示。
7 材料	使用材料として, 以下の4種類(附属書に適合, JIS に適合)を規定。 7.1 セメント 7.2 骨材 7.3 水 7.4 混和材料
8 製造方法	8.1 製造方法 として以下の4項目を規定。 8.1.1 材料製造設備 8.1.2 バッチングプラント 8.1.3 ミキサ 8.1.4 運搬車 8.2 材料の計量 として以下の2項目を規定。 8.2.1 計量方法 8.2.2 計量誤差 その他の事項として以下の3項目を規定。 8.3 練混ぜ 8.4 運搬 8.5 トラックアジテータのドラム内に付着したモルタルの取扱い 8.6 品質管理
9 試験方法	試験方法として, 以下の7項目を規定。 9.1 試料採取方法 9.2 強度 (9.2.1 圧縮強度, 9.2.2 曲げ強度) 9.3 スランブ 9.4 スランブフロー 9.5 空気量 9.6 塩化物含有量 9.7 容積
10 検査	検査項目, 検査方法として, 以下の5項目を規定。 10.1 検査項目 10.2 強度 10.3 スランブ又はスランブフロー, 及び空気量 10.4 塩化物含有量 10.5 指定事項
11 製品の呼び方	コンクリートの種類, 呼び強度, スランブ又はスランブフロー, 粗骨材の最大寸法, セメントの種類による記号による表示。
12 報告	報告事項として, 以下の2項目を規定。 12.1 レディーミクストコンクリート配合計画書及び基礎資料 12.2 レディーミクストコンクリート納入書

表3 JIS A 5308 : 2009 附属書の名称と概要

附属書の名称	概要
附属書A (規定) レディーミクストコンクリート用骨材	アルカリシリカ反応性による区分の規定。 砕石及び砕砂, スラッグ骨材, 人工軽量骨材, コンクリート用再生骨材H, 砂利及び砂の粒度, 品質を規定。
附属書B (規定) アルカリシリカ反応抑制対策の方法	3種類のアルカリシリカ反応抑制方法 [アルカリ総量規制, 混合セメント (混和材) の使用, 安全な骨材の使用] を規定。
附属書C (規定) レディーミクストコンクリートの練混ぜに用いる水	上水道水以外の水 (河川水, 湖沼水, 井戸水, 地下水, 工業用水など), 回収水 (上澄水, スラッジ水) の品質および試験方法を規定。
附属書D (規定) トラックアジテータのドラム内に付着したモルタルの使用法	付着モルタル安定剤の品質, 使用方法, 品質試験方法など, トラックアジテータのドラム内に付着したモルタルの使用法全般について規定。
附属書E (規定) 軽量型砕	ぶりき, 紙, プラスチック製の軽量型砕の品質および試験方法を規定。

ンブ又はスランブフロー, 及び呼び強度を組み合わせた表4に示す○印 (37種類) が規定されています。

また, a) セメントの種類, b) 骨材の種類など, 購入者と生産者との協議事項として17項目が規定されていますが, 水の区分 (スラッジ水の使用の有無) については, 2009年度の改正時に「呼び強度が36を超える場合*」に限定されたので注意する必要があります。

注*: 呼び強度が36以下の場合, 購入者との協議なしでスラッジ水を使用できることを意味する。

2) レディーミクストコンクリートの品質

2.1 強度

圧縮強度または曲げ強度 (舗装コンクリートの場合) については, 次に示す事項が規定されています。

① 1回の試験結果は, 購入者が指定した呼び強度の強度値の85%以上でなければならない。

② 3回の試験結果の平均値は, 購入者が指定した呼び強度の強度値以上でなければならない。

従って, レディーミクストコンクリートの配合強度は,

表4 レディーミクストコンクリートの種類

コンクリートの種類	粗骨材の最大寸法mm	スランブ又はスランブフロー cm	呼び強度													
			18	21	24	27	30	33	36	40	42	45	50	55	60	4.5
普通コンクリート	20, 25	8, 10, 12, 15, 18	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		21	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	40	5, 8, 10, 12, 15	○	○	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	
軽量コンクリート	15	8, 10, 12, 15, 18, 21	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
舗装コンクリート	20, 25, 40	2.5, 6.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	
高強度コンクリート	20, 25	10, 15, 18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	—	
		50,60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	○	○	

注：スランブ又はスランブフローの欄の50cm及び60cmはスランブフローを示す。
舗装コンクリートの呼び強度の欄の4.5は曲げ強度の基準値を示す。

次式で求めた配合強度のうち、いずれか大きい方の値を用いる必要があります。

①の条件に対しては、 $m \geq 0.85S_L + 3\sigma$ 式I

②の条件に対しては、 $m \geq S_L + (3\sigma/\sqrt{3})$ 式II

ここに、m：配合強度 N/mm²

S_L：呼び強度の強度値 N/mm²

σ：標準偏差 N/mm²

強度の検査は、高強度コンクリートの場合100m³に1回、その他のコンクリートの場合150m³に1回の割合を標準としていますが、前述のIおよびII式によると、すべての検査で呼び強度の強度値以上である必要はない(呼び強度の強度値を下回る可能性がある)ことを理解しておく必要があります。

なお、II式によると、正規偏差は1.73σ以上にすれば良いこととなりますが、実際のレディーミクストコンクリート工場では、安全性を考慮して、配合強度を算出する際の正規偏差を2σまたは2.5σとする場合がほとんどです。

2.2 スランブ又はスランブフロー

スランブ又はスランブフローの基準値および許容差は表5に示すとおりです。

普通コンクリートのスランブは5～21cmの7種類ですが、粗骨材の最大寸法によって指定できる値が異なります。

一般に、土木用は8～12cm程度の硬練りコンクリートが、建築では15～21cmの軟練りコンクリートが使用されています。スランブの許容差は、スランブの値によって異なります。なお、呼び強度27以上の普通コンクリートおよび軽量コンクリートについて、高性能AE減水剤を使用するスランブ21cmの許容差は±2cm(表5に[]で表示)に緩和されているので注意が必要です。

高強度コンクリートについては、スランブ製品とスランブフロー製品の2種類あるのが特徴です。許容差は、スランブと同様、スランブフローの値によって差があります。

表5 荷卸し地点でのスランブ、スランブフローの許容差

スランブ又はスランブフロー (cm)	スランブ又はスランブフローの許容差 (cm)
2.5	±1
5及び6.5	±1.5
8以上18以下	±2.5
21	±1.5 [±2]
50	±7.5
60	±10

注：50cm及び60cmはスランブフローを示す。

表6 荷卸し地点での空気量の許容差

コンクリートの種類	空気量	空気量の許容差
普通コンクリート	4.5%	±1.5%
軽量コンクリート	5.0%	±1.5%
舗装コンクリート	4.5%	±1.5%
高強度コンクリート	4.5%	±1.5%

注：購入者に空気量を指定された場合も許容差は±1.5%とする。

2.3 空気量

空気量の基準値および許容差は表6のとおりです。

空気量は、購入者からの指定がない場合は4.5±1.5%となります。これは、コンクリートの単位水量の軽減、ワーカビリティの改善、耐凍害性を向上させることが目的です。なお、軽量コンクリートの空気量は、5.0±1.5%が標準となっています。

2.4 塩化物含有量

塩化物含有量は、荷卸し地点で、塩化物イオン (CL⁻) 量として0.30kg/m³以下でなければならないと規定されています。ただし、購入者の承認を受けた場合には、0.60kg/m³

以下に緩和することができます。

塩化物含有量は、フレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン濃度と配合設計に用いた単位水量の積として求められますが、塩化物イオン濃度は、購入者の承認を得て、精度が確認された塩化物含有量測定器によることができます。ほとんどの場合、この測定器が使用されています。

なお、塩化物イオン濃度は、経過時間に伴う変動がないため、塩化物含有量の検査は、工場出荷時に行ってもよい旨が規定されています。

3) 使用材料の種類と品質

3.1 セメント

セメントは、JISに適合する各種ポルトランドセメント(普通、早強、超早強、中庸熟、低熟、耐硫酸塩ポルトランドセメント)、または、混合セメント(高炉、シリカ、フライアッシュセメント)を使用する旨が規定されています。また、エコセメント(普通、速硬エコセメント)については、普通エコセメントだけが適用範囲となっています。ただし、普通エコセメントは高強度コンクリートに使用することができません。

3.2 骨材

骨材は、附属書Aに適合する、碎石及び砕砂、スラグ骨材(高炉スラグ骨材、フェロニッケルスラグ骨材、銅スラグ骨材、電気炉酸化スラグ骨材)、人工軽量骨材、再生骨材H、砂利及び砂を使用する旨が規定されています。

高炉スラグ細骨材および粗骨材、人工軽量骨材以外の骨材を使用する場合は、附属書Bに規定するアルカリシリカ反応抑制対策を講ずる必要があります。なお、高炉スラグ骨材、人工軽量骨材が除外されている理由は、両骨材はアルカリシリカ反応性による区分(A、B)が規定されていない(アルカリシリカ反応を生ずるおそれがない)ためです。

3.3 水

水とは練混ぜ水のことであり、附属書Cに適合する上水道水(試験を行わなくても使用できる)、上水道水以外の水(河川水、湖沼水、井戸水、地下水、工業用水など)、または、回収水(上澄水、スラッジ水)を使用する旨が規定されています。

なお、回収水のうち上澄水は、JIS A 5308では高強度コンクリートにも使用できますが、日本建築学会の建築工事標準仕様書・同解説(JASS5)鉄筋コンクリート工事では、高強度コンクリートへの使用が禁止されているので注意する必要があります。

3.4 混和材料

混和材料は、JISに適合するコンクリート用フライアッシュ、コンクリート用膨張材、コンクリート用化学混和剤、鉄筋コンクリート用防せい剤、コンクリート用高炉スラグ微粉末、コンクリート用シリカフュームが使用できる旨が本体に規定されています。

また、上記以外の混和材料を使用する場合は、コンクリートおよび鋼材に有害な影響を及ぼさず、所定の品質およびその安定性が確かめられたもののうち、購入者が生産者と協議のうえ指定するものを用いなければならないと規定されています。

4) 製造設備

4.1 材料貯蔵設備

材料の貯蔵設備については、他の種類と混在したり、異物が混入しないことはもちろんですが、骨材の貯蔵設備については、レディーミクストコンクリートの最大出荷量の1日分以上に相当する量を貯蔵できる仕様であることが要求されています。また、人工軽量骨材を用いる場合は散水設備を備えること、高強度コンクリート用の骨材については、必ず上屋を設けるなど、製造するコンクリートの種類ごとに要求事項が若干異なることに注意する必要があります。

4.2 バッチングプラントおよびミキサ

バッチングプラントについては、主に計量器に関する事項が規定されています。表7は、各種材料の1回計量分量に対する計量誤差の規定値を示したのですが、コンクリートの諸性状に最も影響を及ぼすセメントおよび水の計量誤差が最も厳しい値(±1%)となっています。なお、混和材の中で高炉スラグ微粉末については、計量誤差がセメントと同様±1%に規定されている点に注意する必要があります。これは、高炉スラグ微粉末は使用量が多く、強度発現性に大きな影響を及ぼすことを考慮して定められたものです。

ミキサについては、かつては可動式ミキサも認められていましたが、現在は固定式ミキサに限定されています。また、ミキサの練混ぜ性能および練混ぜ時間に関する規定もあります。

表7 使用材料の計量誤差

材料の種類	1回計量分量の計量誤差
セメント	±1%
骨材	±3%
水	±1%
混和材*	±2%
混和剤	±3%

*:高炉スラグ微粉末の計量誤差は、1回計量分量に対して±1%とする。

4.3 運搬車

運搬車は、性能が確認されたトラックアジテータを使用する旨が規定されています。なお、運搬中はドラムが回転していますが、これは、コンクリートを練り混ぜているのではなく、コンクリートを均一に保持し、材料分離を生じさせないためであることを認識しておくことが重要です。

なお、コンクリートの練混ぜは、工場内の固定ミキサで行う必要があります。

5) 検査

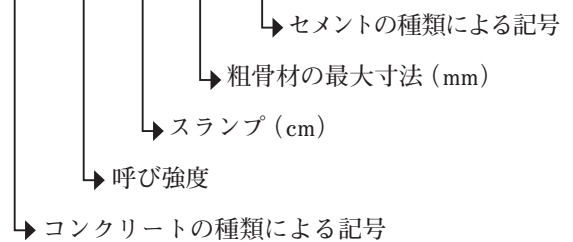
検査は、強度、スランプ又はスランプフロー、空気量及び塩化物含有量について行うことが規定されています。強度試験の頻度は、高強度コンクリートの場合100m³に1回、その他のコンクリートの場合150m³に1回の割合を標準とし、1回の試験結果は、任意の1運搬車から採取した試料で作製した3個の供試体の平均値で表す旨が規定されています。

なお、強度以外の項目については、試験頻度の標準は示されていませんが、通常は、圧縮強度試験用の供試体を採取する際に実施されています。

6) 製品の呼び方

製品の呼び方は、コンクリートの種類による記号、呼び強度、スランプ又はスランプフロー、粗骨材の最大寸法およびセメントの種類による記号で表示するのが一般的です。具体例を次に示します。

例：普通-24-18-20-BB



7) レディーミクストコンクリートの品質保証

レディーミクストコンクリート工場は、前述したように工業標準化法に基づくJISの取得率が高いのが特徴です。また、全国生コンクリート工業組合連合会では、産・官・学の体制からなる全国統一品質管理監査制度を定め、全国品質管理監査会議が策定した統一監査基準に基づいて、地区品質管理監査会議が工場の立入監査を実施しています。この監査に合格した工場に対しては、㊤マークの表示を認めています。関連学協会の仕様書の中には、レディーミクストコンクリート工場を選定する場合は、㊤マークを取得した工場から選定する旨を定めているものもあります。

次回は、製造・調合編「その2：コンクリートの配（調合設計）」について紹介します。

(文責：工事材料試験所 所長 真野 孝次)



用語の解説

・レディーミクストコンクリート

JIS A 5308 制定当時の規格名称。この名称は1989年版まで使用され、1993年に現在の「レディーミクストコンクリート」に改正。

・曲げ強度(舗装コンクリートの場合)

レディーミクストコンクリートの強度は、通常、圧縮強度を示すが、舗装コンクリートの場合、要求性能(用途)を考慮して曲げ強度を示す。

・呼び強度の強度値

呼び強度に小数点を付けて小数点以下1けた目を0とするN/mm²で表した値。ただし、呼び強度の曲げ4.5は4.50N/mm²を示す。なお、呼び強度は、無名数で一種の記号。

・精度が確認された塩化物含有量測定器

(一財) 国土開発技術研究センターの技術評価による承認を受けた塩化物含有量測定器のこと。これまで、十数種類の測定器が承認を受けているが、現在製造・販売されている測定器は数種類。

・回収水

レディーミクストコンクリート工場で、洗浄によって発生する排水のうち、洗浄排水を処理して得られるスラッジ水および上澄水の総称。

・人工軽量骨材を用いる場合は散水設備を備える

人工軽量骨材(粗骨材)は、ポンプ圧送時の加圧吸水を防止するため、製造過程で強制的に吸水(含水率20～30%)させる。この含水率を低下させないために散水設備が必要となる。

・必ず上屋を設ける

高強度コンクリートの場合、表面水率の変動が強度発現性状に大きな影響を及ぼす。従って、高強度コンクリート用骨材の貯蔵設備には、雨水による表面水率の変動を防止するため上屋が必要になる。

・トラックアジテータ

レディーミクストコンクリートの運搬車のこと。一般にミキサー車と呼ばれているが、トラックアジテータは可動式のミキサーではない。

・全国統一品質管理監査制度

レディーミクストコンクリートの品質管理の透明性および公正性を確保し、品質保証体制の確立を図るため、全国生コンクリート工業組合連合会が制定した制度のこと。

知っていましたか！ レディーミクストコンクリートのア・レ・コ・レ

・我が国初のレディーミクストコンクリート工場

レディーミクストコンクリートは、1949年（昭和24年）に誕生し、昭和30年代に本格的に普及しました。我が国初のレディーミクストコンクリート工場は、東京都・業平橋に開設された「東京コンクリート工業株式会社 業平橋工場」です。日本最初の生コンは、この工場から出荷され、その日を記念して11月15日は「生コン記念日」になっています。ちなみに、最初の出荷は、地下鉄銀座線・三越前駅の補修工事だったといわれています。なお、残念なことに、同工場は2007年（平成19年）に閉鎖されましたが、現在その地に東京スカイツリーがそびえ立っています。

現在は、3,500を超えるレディーミクストコンクリート工場が全国に点在しており、離島や山間部など特殊な地域を除き、全国のほとんどの施工現場にJISに規定された運搬時間の限度内（1.5時間以内）にレディーミクストコンクリートの配達が可能といわれています。

・生コンとレディーミクストコンクリート

生コン（生コンクリート）とは、工場で練り混ぜ、まだ固まらない状態で施工現場まで配達されるコンクリートのことで、国民的な用語となっています。しかし、JISでは「生コン」ではなく、「レディーミクストコンクリート」という用語を採用しています。これは、英語をそのまま使用したもので、本来、まだ固まらないフレッシュなコンクリートの意味である「生コン」ではなく、工場で練り混ぜられ、施工現場に配達される製品であることを明確にするため後者が採用されました。なお、レディーミクストとは、「あらかじめ練り混ぜた。すでに練混ぜを完了した。」という意味です。

・レディーミクストコンクリートの出荷量の推移

レディーミクストコンクリート（生コン）の出荷量は、建設需要に対応して増加してきました。経済産業省や全国生コンクリート工業組合連合会などの統計資料によると、生コンの出荷量の最盛期は1990年（平成2年）であり、その出荷量は、年間約198,000千 m^3 （現在の約

2.3倍）でした。ただし、土木と建築の用途別にみると、出荷量のピークはやや異なり、土木用のピークは1980年、建築用のピークは1990年となっています。また、両者の比率は、年代によって変化し、1980年代の前半までは土木用が過半数を占めていましたが、1980年代の後半から建築用の比率が土木用を上回っています。なお、工場数は出荷量の最盛期には約5,400工場でしたが、現在は約3,500工場と最盛期の約65%まで減少しています。

・レディーミクストコンクリートの強度の安全率

本文で紹介しましたが、規定上は、レディーミクストコンクリートの強度が呼び強度の強度値を下回る（強度割れ）可能性はあります。しかし、実際に強度割れする割合は極端に低く、「全国生コンクリート品質管理監査会議」の全国統一品質監査結果（平成24年度）によると、その比率は0.18%となっています。一方、呼び強度の強度値に対する試験値の割合が1.5倍を超える割合（過剰強度といわれる割合）は9.2%となっています。中には、呼び強度の強度値の1.7倍以上（例えば、呼び強度の強度値30.0N/mm²の場合、試験値が51.0N/mm²以上）のケースも散見されます。読者の方々は、この実態をどう思いますか？

・軽量型枠

JIS A 5308の附属書C（規定）に圧縮強度試験供試体作製の軽量型枠が規定されています。軽量型枠の材質は、ぶりき、紙、プラスチックであり、軽量で取り扱いやすいのが特徴です。また、供試体を大量に採取する場合や封かん養生を行う際に便利であり、主に、施工実験や施工現場で使用されています。附属書では、繰返し使用できるものと繰返し使用できないもの（使い捨て）の両者を適用範囲にしていますが、そのほとんどは後者の使い捨てです。軽量で便利ですが、資源の有効利用の面を考慮すると、使いすぎには気を付けるべきです。

コンクリートの基礎講座

Ⅳ 製造・調合編 「その2:コンクリートの配(調)合設計」

コンクリートの基礎講座も残り2回となりました。今回は、“製造・調合編”のその2として、コンクリートの配(調)合設計について紹介します。

なお、本文中で下線を付した用語は、用語の解説を参照して下さい。

1. はじめに

これまでも紹介してきましたが、コンクリートは、セメント、水、骨材(細骨材、粗骨材)、混和材料(混和材、混和剤)および若干の空気で構成される複合材料です。このコンクリートを構成する各種材料の混合割合または使用量を配合または調合といいます。また、各種材料の混合割合や使用量を計画・決定することを配合設計または調合設計といいます。

用語については、土木・建築分野で統一する試みもありましたが現在でも若干異なっています。代表的な例として、土木分野では“配合”，建築分野では“調合”という用語を使用しています。ここでは、便宜上両者を示す用語として“配(調)合”という用語を使用します。なお、レディーミクストコンクリートは、土木・建築の両分野で使用されますが、JIS A 5308では“配合”という用語を使用しています。

コンクリートの配(調)合は、コンクリートの性能や品質を支配する最も重要な要因のひとつであり、良いコンクリートを作るためには、配(調)合設計が極めて重要となります。コンクリートの配(調)合を決定するという行為は、コンクリートに要求される品質の設定と計画配(調)合を定めるための条件の設定、材料の選定と配(調)合計算、試し練りおよび配(調)合の調整、計画配合・計画調合の決定と現場配(調)合への補正という一連の行為が含まれています。今回は、このコンクリートの配(調)合設計について概説します。

2. コンクリート配(調)合設計

コンクリートの配(調)合設計の方法は、関連学協会の示方書や仕様書に標準(標準的な流れ)が示されていますが、その手法や用語は土木分野と建築分野で若干異なります。

これは、それぞれの分野で取り扱うコンクリート構造物の特性(例えば、土木構造物の場合は部材寸法が大きく比較的硬練りのコンクリートが使用される場合が多い。一方、

建築物の場合は、部材寸法が小さく配筋が密なため、軟練りコンクリートが使用される場合が多い。)が異なるため、それぞれに適した手法が検討・発展してきたからです。

3. コンクリートの配(調)合設計の基本

前述したように、土木分野と建築分野では、配(調)合設計の手法および用語が若干異なりますが、その基本は同様です。

配(調)合設計の基本は、図1に示すように、1立方メートル(1m³)当たりのコンクリートについて、各種材料の容積割合をどのように設定するかということです。これまでに紹介してきましたが、水セメント比(水とセメントの割合:W/C)を変化させるとコンクリート強度は変化します。また、単位水量(水の量)を変化させると、コンクリートの流動性や耐久性が異なります。さらに、エントレインドエア(空気量)を変化させるとコンクリートの流動性や耐凍害性が変化します。従って、コンクリートに要求される性能を考慮して、各種材料の使用量を経済的かつ合理的に定めることが配(調)合設計の基本となります。

なお、既に紹介しましたが、使用材料の品質もコンクリートの諸性状と大きな関係があります。従って、配(調)合設計を行う際には、使用材料の品質を確認し、良質な材料(骨材など)を選定すること、また、コンクリートに要求される性能を考慮して、品質の異なる材料を適切に使い分けることも重要な事項の一つとなります。

水(15~18%程度)	
セメント(8~15%程度)	
細骨材 (25~35%程度)	粗骨材 (35~40%程度)
空気(3~6%程度)	

図1 各種材料の一般的な容積割合

4. コンクリートに要求される性能

コンクリートに要求される性能は、①施工性にかかわる性能、②構造安全性にかかわる性能、③耐久性にかかわる性能、④使用性にかかわる性能の4項目に大別することができます。

施工性にかかわる性能とは、主に、フレッシュコンクリートに要求される性能のことです。具体的には、各施工段階において作業が容易に行えること、施工時および施工前後において均質性が保たれ品質の変化が少ないこと、作業が終了するまでは所要の流動性を有し、その後は正常な速さで凝結・硬化すること、所定の温度および単位容積質量を有することなどが挙げられます。

構造安全性にかかわる性能とは、硬化したコンクリート(構造体コンクリート)に要求される性能のことです。圧縮強度に代表されるように、硬化したコンクリートの性能(圧縮強度、曲げ強度)が構造設計時に定めた性能(設計基準強度)を満足することが基本となります。

耐久性にかかわる性能とは、供用期間中、硬化したコンクリート(コンクリート構造物)が環境条件や劣化外力に対して抵抗する能力のことであり、具体的には、中性化、凍害、塩害などに対する抵抗性などが挙げられます。主に、供用年数に関連する要求性能ということになります。

使用性にかかわる性能とは、建築物の場合は、通常の使

用状態において居住者がいかに快適に生活できるかという居住性能のことです。また、土木構造物においては、明確な定義はありませんが、コンクリート構造物の機能を発揮するための要求性能と考えることができます。

これらの要求性能を満足させるために、関連学協会では、使用材料の種類や品質を規定し、配(調)合条件の標準を示すとともに、管理すべき具体的な性能項目を定めています。

コンクリートの要求性能と主な目標性能項目との関係を表1に、関連学協会の示方書や仕様書に規定されている一般的なコンクリートの配(調)合条件に関する主な規定を表2に示します。

表1 コンクリートの要求性能と主な目標性能項目との関係

要求性能	主な目標性能項目
施工性にかかわる性能	・ワーカビリティ [流動性(スランプ、スランブフロー)、材料分離抵抗性] ・凝結時間 ・施工上要求される強度
構造安全性にかかわる性能	・圧縮強度 ・ヤング係数 ・気乾単位容積質量
耐久性にかかわる性能	・中性化および鉄筋腐食に対する抵抗性 ・塩化物イオンに対する浸透抵抗性 ・鉄筋の防錆性 ・アルカリシリカ反応に対する抑制性能 ・凍結融解作用に対する抵抗性 ・乾燥収縮、水和熱によるひび割れに対する抑制性能 ・表面劣化に対する抵抗性
使用性にかかわる性能	・水密性 ・遮蔽性 ・断熱性 ・クリープ

表2 一般的なコンクリートの配(調)合に関する主な規定

示方書または仕様書	項目	配(調)合条件に関する主な規定
コンクリート示方書 ¹⁾ [2007年制定]	水セメント比	65%以下を基本とする。 水密性を考慮する場合は55%以下を標準とする。
	単位水量	できるだけ少なくする。[上限175kg/m ³ を標準とし、175kg/m ³ を超える場合は高性能A E減水剤を使用することが望ましい。]
	粗骨材の最大寸法 (鉄筋コンクリート)	一般の場合は20mmまたは25mm、断面が大きい場合は40mmを標準とする。また、部材最小寸法の1/5、鉄筋の最小あきの3/4およびかぶりの3/4を超えてはならない。
	スランブ (鉄筋コンクリート)	部材の種類や施工条件によって決める。また、コンクリートの製造から打込みまでのスランブの低下を考慮して、どの段階のスランブであるかを定義し、スランブを設定する。
	細骨材率	単位水量が最小になるように定める。
	空気量	無筋および鉄筋コンクリートの場合は4~7%を標準とする。
鉄筋コンクリート工事 標準仕様書(JASS5) ²⁾ [普通コンクリート]	水セメント比	セメントの種類および計画供用期間の級による。 ポルトランドセメント(低熱ポルトランドセメントを除く)および混合セメントA種を使用する場合は65%以下とする。 低熱ポルトランドセメントおよび混合セメントB種を使用する場合は60%以下とする。なお、計画供用期間の級が超長期でポルトランドセメントを使用する場合は55%以下とする。
	単位水量	185kg/m ³ 以下とする。
	単位セメント量	270kg/m ³ 以上とする。
	粗骨材の最大寸法	使用箇所、骨材の種類に応じて20~40mmとする。
	スランブ	調合管理強度が33N/mm ² 未満:18cm以下とする。 調合管理強度が33N/mm ² 以上:21cm以下とする。
	空気量	普通コンクリートの場合は4.5%、軽量コンクリートの場合は5.0%を標準とする。
	塩化物量	塩化物イオン量として0.30kg/m ³ 以下とする。

注¹⁾:土木学会 ²⁾:日本建築学会

5. 配(調)合設計の手順

配(調)合設計の手順は、日本建築学会の「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事」や土木学会の「コンクリート標準示方書」に標準が示されていますが、一般的なコンクリートの配合設計の手順は図2に示すとおりです。なお、コンクリートの配(調)合設計を行うに際し、各種要因が変化した場合の対応方法(細骨材率、単位水量の補正)の一例を表3に示します。

6. 配(調)合設計の具体的な手順

配(調)合設計を理解するためには、関連学協会の示方書や仕様書に基づき、具体的な事例について順次解説する方法が有効です。しかし、誌面の都合上、ここでは、配(調)合設計のごく基本的な事項について、土木用コンクリートと建築用コンクリートの相違点を中心に概説します。

なお、土木用コンクリートと建築用コンクリートの配(調)合設計上の諸条件に関する規定(例えば、水セメント比の上限値、単位水量および単位セメント量の上下限値、スランブおよび空気量の標準値、粗骨材の最大寸法等)に関する相違点は、表2に示したとおりです。

(1) 配(調)合強度の決定

圧縮強度(舗装用コンクリートの場合は曲げ強度)は、コンクリートおよびコンクリート構造物に要求される最も重要な性能です。従って、コンクリートの強度(圧縮強度、曲げ強度)は、ばらつきが生じても構造設計時に定めた性能(設計基準強度)を満足する必要があります。配(調)合強度とは、強度のばらつきを考慮した上で目標とする圧縮強度(曲げ強度)のことで、以下に示す方法によって決定します。

土木用コンクリートの場合は、設計基準強度に割増し係数を乗じた値が配合強度となります。通常は、予想される強度の変動係数に応じた割増し係数(不良率5%)を使用します。例えば、変動係数を10%と仮定すると、割増し係数は1.2となり、配合強度は、設計基準強度に1.2を乗じた値となります。

一方、建築用コンクリートの場合は、土木用コンクリートに比較して複雑であり、まず始めに、式1によって構造体強度補正值を考慮した調合管理強度を求めます。次に、強

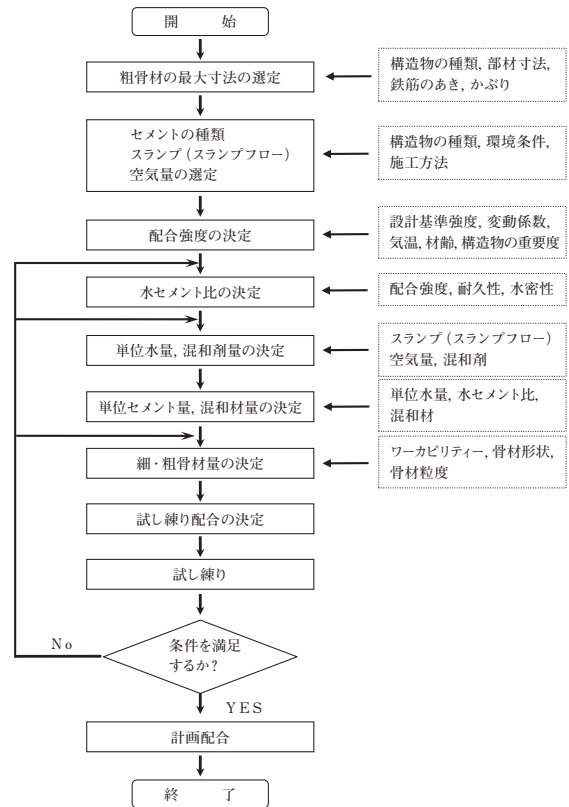


図2 一般的なコンクリートの配合設計の定め方

度のバラツキ(正規偏差と標準偏差の積)を加えた値が式2および式3を満足することを確認して調合強度とします。

$$F_m = F_q + mS_n \quad \text{式1}$$

ここに、 F_m : コンクリートの調合管理強度 (N/mm^2)

F_q : コンクリートの品質基準強度 (N/mm^2) 品質基準強度は、設計基準強度または耐久設計基準強度のうち、大きい方の値とする。

mS_n : 標準養生した供試体の材齢 m 日における圧縮強度と構造体コンクリートの材齢 n 日における圧縮強度の差による構造体強度補正值 (N/mm^2)。

$$F \geq F_m + 1.73 \sigma \quad \text{式2}$$

$$F \geq 0.85F_m + 3 \sigma \quad \text{式3}$$

ここに、 F : コンクリートの調合強度 (N/mm^2)

σ : 使用するコンクリートの圧縮強度の標準偏差 (N/mm^2)

表3 各種要因が変化した場合の対応方法の一例

要因	細骨材率(%)の補正	単位水量の補正
細骨材の粗粒率が0.1大きい(小さい)ごとに	0.5大きく(小さく)する	補正しない
スランブが1cm大きい(小さい)ごとに	補正しない	1.2%大きく(小さく)する
空気量が1%大きい(小さい)ごとに	0.5~1小さく(大きく)する	3%小さく(大きく)する
水セメント比が5%大きい(小さい)ごとに	1大きく(小さく)する	補正しない
細骨材率が1%大きい(小さい)ごとに	—	1.5kg大きく(小さく)する
川砂利を用いる場合	3~5小さくする	9~15kg小さくする

なお、調合強度は、標準養生した供試体の材齢 m 日(原則として28日)における圧縮強度で表します。

(2) 水セメント比の決定

水セメント比は、水とセメントの質量比(W/C)のことで、通常は百分率で表記します。

土木用コンクリートの場合は、圧縮強度に基づく水セメント比、耐久性から定まる水セメント比、水密性から定まる水セメント比のうち、最も小さい値を採用することを標準としています。なお、耐久性や水密性から定まる水セメント比の上限値は、構造物の種類、露出状態、断面、気象条件などによって異なるため注意する必要があります。

一方、建築用コンクリートの場合は、調合強度を得るための水セメント比、セメントの種類によって定められた上限値、コンクリートの種類および計画供用期間の級を考慮して定めることが基本です。調合強度を得るための強度算定式は、生コン工場の実績またはJASS 5に示された概略式を用います。なお、一般の仕様の普通コンクリートでも計画供用期間の級が異なると水セメント比の最大値が異なる(例えば、短期・標準・長期:65%, 超長期:55%)ので注意する必要があります。

(3) 単位水量の決定

単位水量とは、コンクリート 1m^3 中の水の質量のことです。単位水量は、使用する混和剤の種類、粗骨材の最大寸法、スランプ、空気量などを考慮して定めます。

土木用コンクリート、建築用コンクリートともに、単位水量はできるだけ少なくすることが原則ですが、土木用コンクリートでは $175\text{kg}/\text{m}^3$ 以下、建築用コンクリートでは $185\text{kg}/\text{m}^3$ 以下を標準としています。

なお、単位水量を定める際、使用する化学混和剤の減水率を考慮して、化学混和剤の使用量(混和剤量)も決定します。

(4) 単位セメント量の決定

単位セメント量とは、コンクリート 1m^3 中のセメントの質量のことです。

単位セメント量は、(2)の水セメント比と(3)の単位水量から算出します。また、セメントの絶対容積(1m^3 中のセメントの容積)は、単位セメント量をセメントの密度で除して求めます。

土木用コンクリートは、特殊コンクリートについて最小値が示されており、例えば、海洋コンクリートの場合は、耐久性から定まる単位セメント量の最小値を、環境区分、粗骨材の最大寸法に応じて $280\sim 300\text{kg}/\text{m}^3$ としています。これに対し、建築用コンクリートの場合は、普通コンクリートでは $270\text{kg}/\text{m}^3$ 、軽量コンクリートでは $320\text{kg}/\text{m}^3$ または $340\text{kg}/\text{m}^3$ としています。

なお、コンクリート用混和材は、通常、単位セメント量に対する比率で置換(内割り、外割り)するため、単位セメン

ト量の決定後に定めるのが一般的です。

(5) 細骨材量および粗骨材量

骨材量 [1m^3 中の細骨材および粗骨材の容積(絶対容積)および単位量(質量)]の定め方は、土木用コンクリートと建築用コンクリートで大きく異なります。

土木用コンクリートの場合は、まず初めに、 1m^3 (1000L)から骨材以外の材料(セメント、水、混在材料)の絶対容積および空気量を差し引いて、骨材の絶対容積を算出します。次に、粗骨材の最大寸法、空気量、混和剤の種類等に応じた細骨材率[全骨材の容積に対する細骨材の容積比(%)]の標準値を骨材の絶対容積に乗じて細骨材の絶対容積を算出します。この絶対容積に細骨材の表乾密度を乗じて、コンクリート 1m^3 中の細骨材の質量(単位細骨材量)とします。

また、粗骨材の絶対容積は、骨材の絶対容積から細骨材の絶対容積を差し引いて求め、その値に粗骨材の表乾密度を乗じてコンクリート 1m^3 中の粗骨材の質量(単位粗骨材量)とします。なお、最適細骨材率は、骨材の形状、粒度、粗骨材の最大寸法、混和材料の使用の有無等によって大きく異なり、所要のワーカビリティが得られる範囲内で、単位水量が最小になるように試験によって定めます。

一方、建築用コンクリートの場合は、最適細骨材率を使用することもあります。通常は調合条件ごとに定められた単位粗骨材かさ容積の標準値を用いて、次式によって粗骨材の絶対容積、単位粗骨材量を算出します。

・粗骨材の絶対容積($1/\text{m}^3$)

$$[\text{単位粗骨材かさ容積}(\text{m}^3/\text{m}^3)] \times 1000 \times [\text{粗骨材の実積率}(\%)] / 100$$

・単位粗骨材量(kg/m^3)

$$[\text{粗骨材の絶対容積}(1/\text{m}^3)] \times [\text{粗骨材の密度}(\text{kg}/1)]$$

【参考】単位について $1\text{kg}/1 = 1\text{g}/\text{cm}^3$

また、細骨材の絶対容積は、1000Lから細骨材を除く全材料の絶対容積(L)および空気量(L)を差し引いて求めます。その後、細骨材率(s/a)を算出します。なお、単位細骨材量は、細骨材の絶対容積に細骨材の密度を乗じて求めます。

近年、複数の骨材を混合して使用する事例が増加しています。骨材の混合方法には、容積方法と質量方法があります。前者は細骨材(粗骨材)の絶対容積に混合割合を、後者は単位細骨材(単位粗骨材量)に混合割合を乗じて、それぞれの骨材の絶対容積または単位量を算出します。

(6) 計画配合・計画調合の決定

(1)～(5)の手順で算出した各材料の絶対容積および単位量を取り纏めた一覧表を土木分野では計画配合、建築分野では計画調合と呼びます。一般に、計画配合には、粗骨材の最大寸法、スランプ、空気量、水セメント比(W/C)、細

表4 コンクリートの計画配合の一例

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
					水 W	セメント C	混和材 F	細骨材 S	粗骨材 G		混和剤 A
									mm ~ mm	mm ~ mm	

表5 コンクリートの計画調合の一例

品質基準強度 (N/mm ²)	調合管理強度 (N/mm ²)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (l/m ³)				単位量 (kg/m ³)				化学混和剤の使用量 (ml/m ³) または (× C%)	計画調合上の最大塩化物イオン量 (kg/m ³)
							セメント	細骨材	粗骨材	混和材	セメント	細骨材	粗骨材	混和材		

骨材率 (s/a) と共に、使用材料の単位量を明記します。

一方、計画調合には、コンクリートの諸条件、使用材料の単位量のほかに絶対容積を明記するのが特徴です。

計画配合の表記法の一例を表4に、また、計画調合の表記法の一例を表5に示します。

(7) 試し練りおよび試し練りの結果に基づく判定、修正

計画配合または計画調合に基づき試し練りを行い、コンクリートに要求される諸条件を満足することを確認します。なお、要求性能を満足しない場合は、試し練りの結果を考慮して、計画配合または計画調合の修正を行います。

(8) 現場配(調)合

計画配合または計画調合からコンクリート1バッチ当たりの練混ぜ量(1回に練り混ぜる量)を算出し、現場配(調)合を作成します。なお、その際、土木用コンクリートの場合は、細・粗骨材の粒度(過大粒、過小粒)および含水率の補正を行います。建築用コンクリートの場合は、通常、骨材の粒度の補正は行いませんが、骨材量が絶乾ベースか表乾ベースかによって含水補正の有無が異なります。

め、その手法を料理に例えた方がいました。先輩諸兄から、不謹慎であるとお叱りを受けましたが、私は最も理解しやすい説明だと思いました。

料理は味だけでなく、彩り、食感、または食後の消化・吸収、摂取する栄養素などを考慮して、素材の選択、組み合わせ、量、調味料、香辛料の種類や効果を検討します。また、素材の種類・量や組み合わせ、調理方法をレシピとして表します。コンクリートの配(調)合設計も基本的には料理を作る場合と同様です。

良いコンクリートを作るための配(調)合設計は、良質な材料を選定し、あるいは、地元で採れる材料を用いて、美味しく、栄養価の高い料理を作ることをイメージしていただくとうれしいと思います。

今回は、構造物編として、非破壊検査、微破壊検査、コンクリートコアの物理試験・化学分析等を取り纏めて紹介します。なお、コンクリートの基礎講座は次回が最終回となります。

(文責：工事材料試験所 所長 真野 孝次)

7. おわりに

コンクリートの配(調)合設計を分かりやすく説明するた



用語の解説

・設計基準強度

構造物および部材の構造計算において基準としたコンクリートの強度のこと。

・耐久設計基準強度

構造物および部材の計画供用期間の級に応ずる耐久性を確保するために必要とするコンクリートの圧縮強度の基準値のこと。

・計画供用期間の級

計画供用期間とは、建築物の計画時または設計時に、建築主または設計者が設定する建築物の予定供用期間のこと。その級としては、構造物および部材に対して、短期、標準、

長期、超長期の4つがあり、それに対応して耐久設計基準強度が設置される。

・品質基準強度

構造物の要求性能を得るために必要とされるコンクリートの圧縮強度で、コンクリートの品質の基準として定める強度のこと。通常、設計基準強度と耐久設計基準強度の大きい方を採用する。

・構造体強度補正值

調合強度を定めるための基準とする材齢における標準養生供試体の圧縮強度と保証材齢における構造体コンクリート強度との差に

基づくコンクリート強度の補正值のこと。

・調合管理強度

調合強度を定め、調合強度を管理する場合の基準となる強度で、品質基準強度に、構造体強度補正值を加えた値のこと。

・調合強度

調合する際に目標とするコンクリートの強度のこと。品質のばらつきを考慮して調合管理強度に割り増しを加えた値とする。

・単位粗骨材かさ容積

調合設計の際に用いるコンクリート1m³当たりの粗骨材のかさ容積のこと。

知っていましたか！ 骨材に関する品質規格の変遷

今回は、いつもと形式を変えて、私の好きな骨材に関する品質規格の制定の変遷について紹介します。

現在、コンクリートに使用されている骨材には、天然骨材、碎石・砕砂、スラグ骨材、再生骨材、軽量骨材などがあります。これらの骨材の品質は、JISや関連学協会の示方書や仕様書に規定されていますが、規格制定の変遷は別表のとおりです。

【骨材の品質規格の始まり】

我が国で骨材の品質が初めて規定されたのは、1929年(昭和4年)に日本建築学会が制定した「コンクリート及び鉄筋コンクリート標準仕様書」および「鉄筋コンクリート構造計算標準」になります。また、ほぼ同時期の1931年(昭和6年)に制定された土木学会の「鉄筋コンクリート標準示方書」にも骨材の品質が定められています。

当時は天然骨材を対象として、砂については「粒度、微粒分量、有機不純物」、砂利については「粒度」に関する品質が規定されていました。また、砂利については総則で、コンクリート中の硬化モルタルの強度以上であること、耐火的であること等が求められ、特別な場合として、碎石の使用も認められていました。なお、品質規格の制定当時は、試験方法に関する規定がないため、それぞれの仕様書には、付録として試験方法が掲載されていました。

上記の品質規格の詳細は、前者については日本建築学会の図書館で、後者については土木学会附属図書館のデジタルアーカイブスで確認することができます。

【関連学協会の品質規格】

土木学会および日本建築学会ともに制定当時(昭和初期)の骨材の品質規格は概ね同様でした。これは、両学会とも米国の仕様書および試験方法を参考にして規定されたからです。しかし、1949年(昭和24年)に制定されたコンクリート標準示方書から、骨材の品質規格に対する両学会の対応は若干異なっています。

1949年版のコンクリート標準示方書に規定された骨材の品質項目は、アルカリシリカ反応性に関する規定を除くと、現行の規定と概ね同様です。ただし、骨材の代表的な品質項目である「密度、吸水率」に関する規定がなく、1996年(平成8年制定)のコンクリート標準示方書に初めて品質が規定されました。

一方、日本建築学会のコンクリート工事標準仕様書(JASS5)では、規格制定時(1929年)から1965年(昭和40年)の改定時まで大幅な改定は行わず、粒度分布の改定や塩化物含有量に関する規定が追加された程度でした(比重、軟石量、安定性、実積率については具体的な規定はなく、解説に標準値が示されていた)。しかし、1975年(昭和50年)のJASS5の大改定で、骨材の品質規格は大幅に見直されました。具体的には、骨材を3種類(I級~Ⅲ級)に級別し、級ごとにその品質が規定されました。これは、コンクリートの等級(高級、常用、簡易)に応じて骨材を使い分ける方法の導入に対する対応です。ただし、有害物量(軟石、密度1.95他)の許容値や骨材の耐久性(安定性、すりへり)に関する規定は定められていません。なお、この品質規格は制定後10年間採用されましたが、1986年(昭和61年)の大改定時に廃止され、従来のⅡ級に相当する品質が一般的な骨材の品質規格になりました。

【JISの品質規格】

1. 天然骨材(JIS A 5308 附属書)

前回紹介しましたがJIS A 5308は、1953年(昭和28年)に制定されました。しかし、制定当時は骨材の品質規格はなく、骨材の品質はコンクリートの用途に応じて、関連学協会の示方書や仕様書に則って管理されていました。その後、1978年(昭和53年)の改正時に骨材に関する附属書1が制定され、初めて具体的な品質規格が定められました。ただし、当時の品質規格は、土木用骨材については土木学会のコンクリート標準示方書、建築用骨材については日本建築学会のJASS5の品質規格をそのまま引用したものでした。1993年(平成5年)の改正で、土木・建築共通のレディーミクストコンクリート用骨材としての品質規格が確立されました。その後は、アルカリシリカ反応(ASR)の抑制対策に対する対応、各種スラグ骨材、再生骨材Hの採用等を経て現在に至っています。

2. 碎石および砕砂(JIS A 5005, JIS A 5004)

碎石に関する品質規格は、JIS A 5005として1961年(昭和36年)に、砕砂に関する品質規格はJIS A 5004として1980年(昭和55年)に制定されました。JIS A 5005とJIS A 5004は、1993年(平成5年)にJIS A 5005に統廃合され、2000年(平成12年)に確認、2009年(平成21年)に改正されて現在に至っています。

3. スラグ骨材(JIS A 5011-1 ~ JIS A5011-4)

スラグ骨材については、1977年(昭和52年)に「高炉スラグ粗骨材(BFG)」に関するJIS A 5011が制定されています。その後、1981年(昭和56年)に「高炉スラグ細骨材(BFS)」に関するJIS A 5012が制定されました。両規格は、1992年(平成4年)にJIS A 5011に統廃合されるとともに、「フェロニッケルスラグ細骨材(FNS)」が追加されました。その後、1997年(平成9年)に「銅スラグ細骨材(CUS)」が、2003年(平成15年)に「電気炉酸化スラグ骨材(EFG, EFS)」が追加され現在に至っています。近年、スラグ骨材については、環境安全品質基準を考慮した大幅な改正が行われています。

4. 再生骨材(JIS A 5021 ~ JIS A 5023)

再生骨材については、まず初め、2005年(平成17年)に「再生骨材H」に関するJIS A 5021が制定されました。その後、2006年(平成18年)にJIS A 5023が制定され、その附属書に「再生骨材L」に関する規定が定められました。次いで、2007年(平成19年)にJIS A 5022が制定され、その附属書に「再生骨材M」に関する規定が定められ現在に至っています。近年、これらの3規格は、再生骨材コンクリートの普及促進を目的として、規格内容の見直しが行われました。

5. 構造用軽量コンクリート骨材(JIS A 5002)

軽量骨材に関するJISは、骨材の品質規格の中で最も早く、1955年(昭和30年)にJIS A 5002として制定されました。ただし、制定当時は天然軽量骨材を対象とした規格であり、1971年(昭和46年)の改正時に人工軽量骨材に関する品質規格が追加されました。その後、規格内容に大きな改正はなく現在に至っています。

別表 骨材関係の品質規格の制定の変遷 (JIS, 関連学協会の示方書・仕様書)

時期	骨材関係のJISの制定・改定状況		土木学会 [コンクリート標準示方書]	日本建築学会 [鉄筋コンクリート標準仕様書]
	天然骨材 (砂利・砂)	天然骨材以外		
1920年代				'29 コンクリート及び鉄筋コンクリート標準仕様書, 鉄筋コンクリート構造計算規準の制定 ・品質項目: 粒度, 微粒分量, 有機不純物
1930年代			'31 鉄筋コンクリート標準示方書の制定 ・品質項目: 粒度, 微粒分量, 有機不純物	
1940年代			'49 コンクリート標準示方書の制定 ・碎石の採用 ・有害物, 耐久性に関する品質の追加	
1950年代	'53 JIS A 5308の制定 ・骨材の品質は標準仕様書による	'55 JIS A 5002の制定 ・軽量骨材の品質を規定	'56 コンクリート標準示方書の改訂 ・砕砂の採用	'53 建築工事標準仕様書 (JASS5) の制定 ・鉄筋コンクリートに海砂利・砂の禁止
1960年代		'61 JIS A 5005の制定 ・碎石の品質を規定		'65 JASS5の改定 ・碎石の採用, 調合表の標準値の改定
1970年代	'75 JIS A 5308の改正 ・国際単位系の導入・併記 '78 JIS A 5308 附属書1の制定 ・土木用, 建築用骨材を区分	'71 JIS A 5002の改正 ・人工軽量骨材の品質を規定 '77 JIS A 5011の制定 ・BFGの品質を規定	'74 コンクリート標準示方書 (昭和49年制定) の制定 ・海砂の採用, BFGの条件付き採用	'75 JASS5の大改定 ・普通骨材を3種類 (I級~III級) に級別し, 品質規格を規定 ・砕砂の採用, BFGの条件付き採用
1980年代	'85 JIS A 5308 附属書1の改正 ・砕砂, BFGの採用 ・混合使用時の制限規定 '89 JIS A 5308 附属書1の改正 ・アルカリシリカ反応 (ASR) 抑制対策の導入	'80 JIS A 5004の制定 ・砕砂の品質を規定 '81 JIS A 5012の制定 ・BFSの品質を規定 '86 建設省技調発 第285, 287号 ・塩化物量総量規制基準 ・アルカリ骨材反応暫定対策	'86 コンクリート標準示方書 [施工編] (昭和61年制定) の制定 ・解説に塩分総量規制, アルカリシリカ反応の抑制対策について紹介	'86 JASS5の大改定 ・級別を廃止し, 従来のII級を骨材の品質規格として規定 ・高耐久性コンクリートおよび高強度コンクリート用骨材の品質規格の制定 (従来のI級相当以上の品質)
1990年代	'93 JIS A5308 附属書1の改正 ・土木用, 建築用骨材の一本化 '98 JIS A5308 附属書1の改正 ・CUSの採用 ・混合使用時の制限規定	'92 JIS A 5011 (5012) の統廃合 ・FNSの品質を規定 (JIS A 5011) '93 JIS A 5005 (5004) の統廃合 ・碎石と砕砂を統合 (JIS A 5005) '97 JIS A 5011の改正 ・CUSの品質を規定	'91 コンクリート標準示方書 [平成3年版] [施工編] の制定 ・塩化物の総量規制を導入 '96 コンクリート標準示方書 [平成8年制定] [施工編] の制定 ・絶乾密度, 吸水率に関する規定を追加	'91 JASS5の改定 ・解説にアルカリ骨材反応抑制対策に関する指針の掲載 '93 JASS5の改定 ・各種スラグ骨材の採用 * 概ね, 現行のJASS5の内容と同様
2000年代以降	'03 JIS A5308 附属書1の改正 ・EFG, EFSの採用 ・混合使用時の制限の明確化 '09 JIS A5308 附属書Aの改正 ・再生骨材Hの採用	'03 JIS A 5011の改正 ・EFG, EFSの品質を規定 '05 JIS A 5021の制定 ・再生骨材Hの品質を規定 '06 JIS A 5023の制定 ・附属書に再生骨材Lの品質を規定 '07 JIS A 5023の制定 ・附属書に再生骨材Mの品質を規定	'00 【平成11年版】コンクリート標準示方書—耐久性照査型— [施工編] の制定 ・仕様規定から性能規定に移行, 規格の記述方法 (標準とする) に統一 '02 【2002年版】コンクリート標準示方書 [施工編] の制定	'03 JASS5の改定 ・条件付きで, 高品質の再生骨材を採用

コンクリートの基礎講座

V 構造物編「非破壊試験（微破壊試験）、コンクリートコアの試験」

コンクリートの基礎講座も今回が最終回となりました。今月号は、構造物編と題して、コンクリート構造物の非破壊試験（微破壊試験）およびコンクリート構造物から採取したコンクリートコアの試験（物理試験、化学分析）について紹介します。

1. はじめに

試験（検査）は、その内容によって破壊試験と非破壊試験（検査）に大別されます。前者は、コンクリートの圧縮強度試験に代表されるように、材料（試験体）に外力を加えて、破断や亀裂の発生・成長を観察・計測し、その材料の品質や性能を調べる試験の総称です。一方、非破壊試験とは、JIS Z 2300（非破壊試験用語）によると、“素材又は製品を破壊せずに、品質又はきず、埋設物などの有無及びその存在位置、大きさ、形状、分布状態などを調べる試験”と定義されています。なお、広義には、目視観察（軽微な測定器の使用を含む）も非破壊試験の一つといえます。

コンクリート構造物の試験（検査）は、その構造物の健全度、変状の種類や原因、劣化の程度などを調査・診断する際に行われます。一般に、調査対象となる構造物は、今後とも継続して供用する機会が多いため、可能な限り損傷を与えずに、構成材料の品質や状態を把握する必要があります。

ります。そこで、コンクリートや鉄筋の品質や状態を推定するために、数多くの非破壊試験（微破壊試験）が提案・実用化されています。また、コンクリートや鉄筋の品質や状態を直接調べるために、コンクリート構造物の強度や耐久性に大きな影響を及ぼさない程度にコンクリートをはつり取ったり、コンクリートコアを採取して試験を行う場合もあります。

2. コンクリート、鉄筋を対象とした非破壊試験

非破壊試験は、様々な工業製品に幅広く利用されていますが、ここでは、表1に示すコンクリート構造物を構成する主材料であるコンクリートおよび鉄筋を対象とした試験について紹介します。また、国土交通省大臣官房技術調査室では、コンクリート構造物（橋梁上・下部工）の強度測定方法として、ボス供試体や小径コアによる微破壊試験を採用しているため、ここで併せて紹介します。

なお、コンクリートや鉄筋を対象とした非破壊試験方法の多くは、（一社）日本非破壊検査協会が団体規格として「日本非破壊検査協会規格（NDIS）」を制定しているため、試験方法の詳細についてはNDISを参照していただきたい。

表1 コンクリートおよび鉄筋を対象とした非破壊試験、微破壊試験

分類	試験対象（探査対象）	代表的な試験・測定方法
非破壊試験	コンクリートのひび割れの有無、進展	・目視観察（軽微な測定器の使用を含む）
	コンクリートのひび割れの位置・深さ、コンクリート表面の浮き・はく離、コンクリート内部の空洞の有無	・サーモグラフィー法 ・弾性波法（超音波法、衝撃弾性波法、打音法） ・アコースティック・エミッション（AE法） ・電磁波レーダ法
	コンクリートの圧縮強度	・反発度法（リバウンドハンマー） ・弾性波法（超音波法、衝撃弾性波法）
	鉄筋（配筋状態）、かぶり厚さ、埋設物の有無	・電磁波レーダ法 ・電磁誘導法
	コンクリート構造物内部の状況	・X線透過撮影法
微破壊試験	鉄筋の腐食状況	・自然電位法 ・分極抵抗法 ・電気抵抗法
	コンクリートの圧縮強度	・ボス供試体による圧縮強度試験 ・小径コアによる圧縮強度試験 ・局部破壊法（プルオフ法、プルアウト法、ブレイクオフ法）
	コンクリートの中性化	・ドリル削孔粉による中性化深さ試験

2.1 コンクリートのひび割れ、はく離、空洞の探査

標記の欠陥を検出する方法としては、(1)サーモグラフィ法 (2)弾性波法 (3)アコースティック・エミッション(AE法) (4)電磁波レーダ法などがあります。各試験(測定)方法の概要を次に紹介します。

(1) サーモグラフィ法(赤外線サーモグラフィ法)

サーモグラフィ法とは、赤外線映像装置を用いて、物体表面の温度分布(熱画像)を測定し、熱画像上の表面温度の異常部から、コンクリート表面や内部の欠陥の有無を推定する測定方法のことです。非接触で高速に大断面の測定が可能であり、壁面の仕上げ材の浮き・はく離、橋梁床板やトンネル覆工のコンクリートの浮き・はく離、構造物の漏水、住宅の断熱性能の評価などに利用されています。

(2) 弾性波法

弾性波法とは、コンクリート表面に設置した発振子や衝撃入力装置によってコンクリート内部に弾性波を発生させ、それをコンクリート表面の受振子で測定し、コンクリート内部の欠陥の位置や寸法を推定する測定方法の総称です。この弾性波法は、利用する周波数の範囲や弾性波の与え方、受信方法等によって、超音波法、衝撃弾性波法、打音法などに分類されます。

(3) アコースティック・エミッション(AE法)

アコースティック・エミッションとは、コンクリートのひび割れの発生に伴って発生し伝播する弾性波を検出する測定方法のことです。過剰な外力、地震時などの異常な荷重、鉄筋腐食などによってコンクリート内部にひび割れが発生すると弾性波として検出できるため、コンクリートの表面部にAEセンサを設置しておけば、ひび割れの発生監視に利用できます。なお、広義にはAE法も弾性波法に分類されます。

(4) 電磁波レーダ法

電磁波レーダ法は、コンクリート構造物内部の埋設物の有無、コンクリートの躯体厚さ、空洞等の有無を推定する測定方法の一つです。この方法は、コンクリート内部に放射された電磁波がコンクリートと電気的性質(比誘電率、導電率)が異なる物体(例えば、鉄筋、埋設物、空洞など)との境界面で反射する性質を利用した測定方法です。

簡便かつ短時間で広範囲の測定が可能であり、特別な資格・免許等が不要なため、すぐに結果が得られる方法です。しかし、簡便な手法ゆえに作業者の技量や経験に依存するところが多い測定方法となります。

2.2 構造体コンクリートの圧縮強度(非破壊試験)

構造体コンクリートの圧縮強度を非破壊で推定する方法

としては、(1)反発度法 (2)弾性波法(超音波法、衝撃弾性波法) (3)局部破壊試験による方法などがあります。各試験(測定)方法の概要を次に紹介します。

(1) 反発度法

反発度法は、最も一般的な試験方法であり、コンクリートの表面をリバウンドハンマー(通称:シュミットハンマー)によって打撃し、その反発度からコンクリートの圧縮強度を推定する試験方法です。

試験方法は、JIS A 1155(コンクリートの反発度の測定方法)に規定されています。ただし、同JISはコンクリートの反発度を測定する方法について規定したものであり、反発度から圧縮強度を推定する方法(強度推定式など)は規定されていません。なお、反発度から圧縮強度を推定する方法は、日本材料学会、日本建築学会、土木学会等の団体規格に規定されています。

(2) 弾性波法(超音波法、衝撃弾性波法)

弾性波法は、コンクリート内部の欠陥の位置や寸法の推定に利用されていますが、国土交通省では、橋梁の上部工(桁部)および下部工(柱部、張出し部)の強度測定方法として、弾性波法に分類される超音波法および衝撃弾性波法を採用しています。なお、これらの測定方法および強度推定方法として、「超音波試験(土研法)による新設の構造体コンクリート強度測定要領(案)」、「衝撃弾性波法 iTECS法による新設の構造体コンクリート強度測定要領(案)」、「衝撃弾性波法 表面2点法による新設の構造体コンクリート強度測定要領(案)」が提案されています。

2.3 構造体コンクリートの圧縮強度(微破壊試験)

国土交通省では、橋梁の上部工(桁部)および下部工(柱部、張出し部、フーチング部)の施工管理および発注者の検査における強度試験方法として、(1)ボス供試体による強度試験 (2)小径コアによる強度試験を微破壊試験と称して採用しています。また、その他数種類の(3)局部破壊試験も提案されています。各試験方法の概要を次に紹介します。

(1) ボス供試体による圧縮強度試験

ボス供試体とは、ボス型枠を用いてコンクリート構造物と一体で成型された突起状の供試体(代表的な寸法:100×100×200mm)のことであり、コンクリート構造物と同様な方法で養生したのちに割り取り、JIS A 1108(コンクリートの圧縮強度試験方法)に従って圧縮強度試験を行います。ボス供試体は、コンクリート構造物の外部に突起しているため、構造物の表面に割り取った跡は残りますが、構造物自体を損傷させることが少ないため、微破壊試験といわれています。

(2) 小径コアによる圧縮強度試験

小径コアとは、直径が50mm以下(通常25mm程度)のコンクリートコアのことです。小径コアによる圧縮強度試験とは、コンクリート構造物から小径コアを採取し、そのコアの圧縮強度から構造体コンクリートの圧縮強度を推定する試験方法です。

一般に、コンクリートコアによる圧縮強度試験は、JIS A 1107(コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法)に従って行われるため、コンクリート構造物から採取するコアの直径は、60～120mm(粗骨材の最大寸法の3倍以上)となります。このJISによる試験方法と比較して、コンクリート構造物の損傷範囲や損傷深さが軽微なことから微破壊試験と呼ばれています。

(3) 局部破壊試験

局部破壊試験とは、コンクリートの表層を一部破壊し、その破壊時の抵抗力から圧縮強度を推定する方法であり、プルオフ法(引張)、プリアウト法(引抜き)、ブレイクオフ法(曲げ折り)などが提案されています。ただし、我が国では、ほとんど採用されていません。

2.4 鉄筋(配筋状態)、かぶり厚さ、埋設物の探査

コンクリート中の鉄筋探査法として広く利用されている方法には、(1)電磁波レーダ法 (2)電磁誘導法 の2種類の方法があります。また、コンクリート内部の状況をほぼ実態に近い状態で確認できる唯一の方法として、(3)X線透過撮影法があります。各試験(測定)方法の概要を次に紹介します。

(1) 電磁波レーダ法

電磁波レーダ法とは、コンクリート構造物内部の埋設物[鉄筋(配筋状態、かぶり厚さ)、鉄骨、埋設管]を探査する測定方法の一つです。同方法は2.1で述べたように、測定原理上、コンクリートの躯体厚さやコンクリート内部の空洞等の有無を調査することも可能です。

(2) 電磁誘導法

電磁誘導法は、試験コイルに交流電流を流すことによってできる磁界内に試験対象物を設置することによって対象物の探査を行います。従って、適用範囲はコンクリート中の鉄筋位置や鉄筋径、鉄筋以外の埋設金属となります。

電磁誘導法は、電磁波レーダ法ではできない鉄筋径の推定が可能であり、また、コンクリート中に空隙や豆板等があっても鉄筋位置の推定が可能です。なお、測定精度は、径が大きな鉄筋ほど深い位置まで探査が可能であり、かぶり厚さは薄いほど測定精度は高くなります。

(3) X線透過撮影法

X線透過撮影法は、工業や医療分野で幅広く利用されている非破壊検査方法です。一方からX線を照射し、対向する裏面にフィルムを設置して透過像を撮影します。従って、試験する箇所の両面に、装置とフィルムを設置するための空間が必要となります。また、放射線防護のための安全管理上の制限があり、現場作業においては低エネルギーのX線装置の使用に限定されます。これらの制限から、建築構造物の場合は、壁、床の鉄筋位置や版厚の測定、土木分野では、橋梁のPC桁のシース内のグラウトの充填確認、床版における空洞の検出などに適用されています。

2.5 鉄筋腐食

鉄筋の腐食程度は、コンクリート構造物の健全度、変状の種類や原因推定の判断材料になるだけでなく、補修・補強の要否の判定、補修・補強方法を選定する際の重要な情報になります。

一般に、鉄筋の腐食状況の試験(調査)は、はつり調査によって行われますが、構造物内で鉄筋腐食の可能性が高い箇所を見つけるために、自然電位によって鉄筋の腐食状況を確認する場合があります。コンクリート中の鉄筋が腐食していると、電子は鉄筋内を流れ、イオンはコンクリート中を移動します。これら電子やイオンの流れを腐食電流と呼び、腐食反応の速さ(腐食速度)を表します。自然電位法は、腐食状況に応じて変化する電位を測定することにより、鉄筋の腐食状況を推定する電気化学的方法です。

標準的な測定方法は、土木学会規準 JSCE-E601(コンクリート構造物における自然電位測定方法)に規定されています。また、その他の測定方法として、分極抵抗法、電気抵抗法などの非破壊検査方法があります。

3. コンクリート構造物から採取したコアの試験

コンクリート構造物の耐震診断や変状が認められた構造物の劣化原因を推定することを目的として、構造物自体の調査に加えて、構造物からコンクリートコアを採取し各種試験を実施する場合があります。(表2参照)

コンクリートコアの試験は、表3に示すように、物理試験、化学分析、組織分析等に区分できます。ここでは、広く一般的に行われている代表的な物理試験と化学分析について紹介します。

表2 劣化原因、関連する試験項目と主な試験方法・測定機器との関係

劣化原因	関連する試験項目	主な試験方法・測定機器
強度ほか劣化全般	コンクリートのひび割れの有無、ひび割れ幅、ひび割れ深さ	非破壊試験：目視観察(クラックスケール、ノギス) 破壊試験：はつり調査
	コンクリートのひび割れの有無、コンクリートの浮き・はく離、コンクリートの表面劣化(ポップアウト、スケーリング)、コンクリート内部の空洞の有無	非破壊試験：目視観察、サーモグラフィ法、弾性波法(超音波法、衝撃弾性波法、打音法)、アコースティック・エミッション(AE法)、電磁波レーダ法 破壊試験：はつり調査
	コンクリート構造物内部の状況	非破壊試験：X線透過撮影法
	コンクリートの圧縮強度・曲げ強度	破壊試験：耐圧試験機(JIS A 1107, JIS A 1114) 非破壊試験：反発度法(リバウンドハンマー)、弾性波法(超音波法、衝撃弾性波法) 微破壊試験：ボス供試体、小径コア、局部破壊法(プルオフ法、プルアウト法、ブレイクオフ法)
	コンクリートの静弾性係数(ヤング係数)	破壊試験：ひずみゲージ法、コンプレッソメータ法(JIS A 1149)
	コンクリートのポアソン比	破壊試験：ひずみゲージ法、コンプレッソメータ法
	鉄筋の強度	破壊試験：万能試験機(JIS Z 2241, JIS Z 3120)
	鉄筋(配筋状態)、かぶり厚さ、埋設物の有無	非破壊試験：電磁波レーダ法、電磁誘導法 破壊試験：はつり調査
	配合推定	化学分析等：セメント協会法(F18 ¹⁾)、グルコン酸ナトリウム法(NDIS3422 ²⁾)、プラズマ発光分光分析(ICP)
中性化	中性化深さ	化学分析等：フェノールフタレイン法(JIS A 1152)、示差熱重量分析、粉末X線回折、電子線マイクロアナライザー(EPMA) 微破壊試験：ドリル削孔粉
	中性化速度	促進試験：促進中性化試験(JIS A 1153)
	中性化に伴う塩化物イオンの移動状況	化学分析等：塩化物イオンの試験方法(JIS A 1154)、EPMA
塩害	鉄筋の腐食状況、断面欠損率	化学分析等：10%クエン酸二アンモニウム溶液処理、プランニメータ 非破壊試験：自然電位法、分極抵抗法、電気抵抗法 破壊試験：はつり調査(腐食度の分類)
	塩化物イオン量、浸透状況	化学分析等：塩化物イオンの試験方法(JIS A 1154)、EPMA
	塩化物の浸透速度	促進試験：急速塩化物浸透法
凍害	表面の浸食深さ	破壊試験：はつり調査 化学分析等：EPMA面分析
	気泡間隔係数	組織分析：リニアトラバース法、画像解析
	空気量	組織分析：リニアトラバース法、画像解析
	細孔径分布	組織分析：水銀圧入式ポロシメータ
アルカリシリカ反応	アルカリ量	化学分析等：抽出液の原子吸光、プラズマ発光分光分析(ICP)
	アルカリ骨材反応による膨張予測	化学分析等：細孔溶液中の水酸イオンの定量
	析出物の分析	化学分析等：化学成分分析、粉末X線回折、SEM-EDX、蛍光X線分析、示差熱重量分析、酢酸ウラニル蛍光法
	骨材のアルカリシリカ反応性試験	化学分析等：化学法(JIS A 1145) 促進試験：モルタルバー法(JIS A 1146)、迅速法(JIS A 1804)、再生骨材迅速法(JIS A 5021)
	解放膨張率、残存膨張率	促進試験：JCI-DD2 ³⁾ (40℃、95%以上)、カナダ法(80℃、1NのNaOH溶液)、デンマーク法(50℃、飽和NaCl溶液)
	骨材の岩種、反応性鉱物の調査	岩石学的試験：目視観察、偏光顕微鏡観察、粉末X線回折(JCI-DD3)、有害鉱物の定量(JCI-DD4)
化学的腐食	化学的腐食深さ	化学分析等：EPMA
	析出物の分析	化学分析等：化学成分分析、粉末X線回折、SEM-EDX、蛍光X線分析、示差熱重量分析、酢酸ウラニル蛍光法

注¹⁾：セメント協会「硬化コンクリートの配合に関する共同試験報告(F18)」を示す。

²⁾：日本非破壊検査協会の団体規格「日本非破壊検査協会規格(NDIS)」を示す。

³⁾：日本コンクリート工学会の団体規格「JCI規準」を示す。

表3 コンクリートコアの試験の概要

分類	関連する試験項目	主な試験方法・測定機器
物理試験	ひび割れの深さ	目視観察(スケール, ノギス)
	圧縮強度・曲げ強度	耐圧試験機(JIS A 1107, JIS A 1114)
	静弾性係数(ヤング係数)	ひずみゲージ法, コンプレッソメータ法(JIS A 1149)
	ポアソン比	ひずみゲージ法, コンプレッソメータ法
	中性化深さ	フェノールフタレイン法(JIS A 1152), 示差熱重量分析, 粉末X線回折, 電子線マイクロアナライザー(EPMA)
	鉄筋の腐食状況, 断面欠損率	目視観察(腐食度の分類), 10%クエン酸二アンモニウム溶液処理, プラニメータ
化学分析	中性化に伴う塩化物イオンの移動状況	塩化物イオンの試験方法(JIS A 1154), EPMA
	化学的腐食深さ	EPMA
	塩化物イオン量, 浸透状況	塩化物イオンの試験方法(JIS A 1154), EPMA
	アルカリ量	抽出液の原子吸光, プラズマ発光分光分析(ICP)
	析出物の分析	化学成分分析, 粉末X線回折, SEM-EDX, 蛍光X線分析, 示差熱重量分析, 酢酸ウラニル蛍光法
	アルカリ骨材反応による膨張予測	細孔溶液中の水酸イオンの定量
	配合推定	セメント協会法(F18 ¹⁾), グルコン酸ナトリウム法(NDIS3422 ²⁾), ICP
組織分析	気泡間隔係数	リニアトラバース法, 画像解析
	空気量	リニアトラバース法, 画像解析
	細孔径分布	水銀圧入法ポロシメータ
	表面の浸食深さ	目視観察, EPMA面分析
促進試験	中性化速度	促進中性化試験(JIS A 1153)
	塩化物の浸透速度	急速塩化物浸透法
	骨材のアルカリシリカ反応性試験	化学法(JIS A 1145), モルタルバー法(JIS A 1146), 迅速法(JIS A 1804), 再生骨材迅速法(JIS A 5021)
	解放膨張率, 残存膨張率	JCI-DD2 ³⁾ (40℃, 95%以上), カナダ法(80℃, 1NのNaOH溶液), デンマーク法(50℃, 飽和NaCl溶液)
岩石学的試験	骨材の岩種, 反応性鉱物の調査	目視観察, 偏光顕微鏡観察, 粉末X線回折(JCI-DD3), 有害鉱物の定量(JCI-DD4)

注¹⁾:セメント協会「硬化コンクリートの配合に関する共同試験報告(F18)」を示す。

²⁾:日本非破壊検査協会の団体規格「日本非破壊検査協会規格(NDIS)」を示す。

³⁾:日本コンクリート工学会の団体規格「JCI規準」を示す。

3.1 コンクリートコアの物理試験

(1) 圧縮強度(曲げ強度)

構造物に使用したコンクリートの圧縮強度(曲げ強度)は、製品検査結果や施工時の管理記録等で確認できます。しかし、構造物コンクリートの品質は、施工条件や環境条件によって異なります。また、アルカリシリカ反応や凍害などによって、コンクリートの品質が低下する場合があります。そこで、耐震診断(補修・補強の要否の確認)などを目的として、コンクリート構造物からコアを採取し、実際の圧縮強度(曲げ強度)を確認する場合があります。

試験方法は、JIS A 1107(コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法)に規定されています。コアの採取場所は、試験の目的によって異なりますが、建築構造物の場合は、各階3箇所(3体)程度、橋梁の下部工では、一基当たり3箇所(3体)程度採取します。

なお、曲げ試験方法は、JIS A 1114(コンクリートからの

角柱供試体の採取方法及び強度試験方法)に規定されていますが、実際に試験を行うことはほとんどありません。

(2) 中性化

この基礎講座で既に紹介しましたが、打込み当初のコンクリートは強アルカリ性を示し、鉄筋の腐食防止能力を有しています。しかし、二酸化炭素の侵入に伴ってコンクリートは徐々に中性化が進行し、中性化領域が鉄筋位置に到達すると、急速に鉄筋が腐食する場合があります。そこで、コンクリート構造物の耐久性の観点から、中性化の状況、中性化速度、今後の進行状況を確認するために、コンクリートコアによる中性化試験が行われています。

試験方法は、JIS A 1152(コンクリートの中性化深さの測定方法)に規定されています。また、微破壊による中性化試験方法として、NDIS3419(ドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化深さ試験方法)が提案されており、部材(大断面)の中性化深さの分布状況を確認する場合などに

利用されています。

なお、後述しますが、コンクリートの中性化深さは塩化物イオンの移動・凝縮に関係するため、塩化物イオンの浸透深さなどと併せて評価・確認することが重要です。

(3) 静弾性係数 (ヤング係数)

ヤング係数が小さい骨材を使用すると、コンクリートの乾燥収縮量が増加したり、床版のたわみ量が大きくなる場合があります。そのため、日本建築学会では、既往の研究成果に基づき、圧縮強度とヤング係数との関係式を提案し、ヤング係数の下限値を規定しています。通常の骨材を使用したコンクリートの場合、この規定値を下回ることはほとんどありません。しかし、構造物が火害を受けたり、アルカリシリカ反応などによりコンクリートに微細なひび割れが発生すると、圧縮強度に比較して、ヤング係数は極端に低下します。そこで、コンクリートの劣化状況を把握することを目的として、コンクリートのヤング係数やポアソン比を確認する場合があります。

試験方法は、JIS A 1149 (コンクリートの静弾性係数試験方法)に規定されています。なお、ひずみの測定方法には、ひずみゲージ法とコンプレッソメータ法がありますが、コンクリートコアの場合は、前者が一般的です。

(4) アルカリシリカ反応性

アルカリシリカ反応は、コンクリートの細孔溶液中のアルカリ性成分と、その成分に対して溶解反応を示す骨材中の有害鉱物との反応です。アルカリシリカ反応の疑いのある構造物の調査項目には、ひび割れ、変色、ゲルの溶出などの目視観察、ひび割れ幅や膨張率の測定、構造物から採取したコンクリートコアの物理試験(膨張率)、化学分析、岩石学的試験などがあります。

ここでは、コンクリートコアの物理試験の中から、骨材のアルカリシリカ反応性試験および残存膨張率について概説します。

①骨材のアルカリシリカ反応性試験

耐久性編で紹介しましたが、骨材のアルカリシリカ反応性試験には、化学法、モルタルバー法、迅速法(再生骨材迅速法)があります。これらの試験方法は、コンクリートに使用する骨材を対象とした試験方法ですが、コンクリートコアから取り出した骨材についても適用することができます。この手法は、再生骨材を対象としたアルカリシリカ反応性試験方法として採用されています。

ただし、化学法の場合、骨材に付着したセメントペースト分を塩酸等で処理した後試験に供すると、“無害”と判定されるべき骨材が“無害でない”と判定される場合がある

ため、試験を行う際には、JIS A 5021 (コンクリート用再生骨材H)の本体および解説を参照していただきたい。

②コンクリートコアの解放膨張率・残存膨張率試験

アルカリシリカ反応性による区分が“無害でない”と判定された骨材を使用した場合、供用初期にはアルカリシリカ反応の兆候がなくても、環境条件などによってアルカリシリカ反応による劣化が顕在化する場合があります。

構造物の調査時までにコンクリートがどの程度膨張したか、また、今後どのぐらいの速度で、最終的にはどの程度まで膨張するか等について、確実な試験方法は確立されていません。ただし、これらの目安として、構造物から採取したコンクリートコアの解放直後の膨張率(解放膨張率)、促進養生条件下における膨張率(残存膨張率)を測定する方法が提案されています。

試験方法は、日本コンクリート工学会の団体規格であるJCI-DD2(アルカリ骨材反応を生じたコンクリート構造物のコア試料による膨張率の測定方法(案))に規定されています。また、その他の促進膨張試験としては、温度80℃、1NのNaOH溶液中に供試体を浸せきする方法(カナダ法)、温度50℃、飽和NaCl溶液中に供試体を浸せきする方法(デンマーク法)などがあります。

3. 2 コンクリートコアの化学分析

(1) 配合推定

配合推定とは、化学分析結果に基づいてコンクリートを構成する材料の割合を推定する試験です。打設されたコンクリートの構成材料の割合や、配(調)合どおりであるか等を確認するため、構造物から採取したコンクリートコアについて配合推定を行う場合があります。

試験方法として最も一般的な方法は、セメント協会法：セメント協会「硬化コンクリートの配合に関する共同試験報告(F18)」です。同方法は、微粉碎した試料を塩酸処理した後、不溶残分および酸化カルシウムを定量し、それらの値から、単位骨材量や単位セメント量を推定する試験方法です。ただし、同方法は、石灰石骨材や貝殻が混入した海砂を使用したコンクリートについては、セメント水和物中のカルシウムと骨材中のカルシウムが区分できないため適用することができません。そこで、この問題を解消するため、溶解液としてグルコン酸ナトリウム溶液を使用する方法(NDIS3422)、セメントの構成成分のうち酸化カルシウムに次いで量が多く変動の少ない酸可溶性シリカに着目し、プラズマ発光分光分析装置(ICP)を用いて測定する方法が提案されています。

(2) 塩化物イオン含有量

製造・調合編で紹介しましたが、JIS A 5308 (レディーミクストコンクリート) には、塩害を防止するため、荷卸し地点における塩化物含有量の上限値が規定されています。ただし、この規定は1986年の改正時に定められた規定であり、これ以前に建設された構造物については、塩化物含有量がわかりません。また、塩化物イオンは、海水や凍結防止剤など構造物の外部環境から供給される場合もあります。

そこで、塩害が懸念されるコンクリート構造物については、構造物から採取したコンクリートコアについては、塩化物イオン含有量やその分布状況を確認するための試験が行われています。

試験方法は、JIS A 1154 (硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法) に規定されています。なお、コンクリートの中性化に伴い、コンクリート中の固定化された塩化物イオンが遊離し、コンクリート内部に移動して濃縮される場合があるため、試験や評価に際しては、この点に注意する必要があります。

一方、分析可能領域の拡大に伴い、塩化物イオンの分布状況や炭酸化の進行状況を把握するため、電子線マイクロアナライザー (EPMA) を利用した分析も行われるようになってきました。

(3) アルカリシリカ反応性

アルカリシリカ反応性に関連する化学分析としては、アルカリ量の定量、細孔溶液中の水酸化イオンの定量、析出物の化学分析などがあります。

アルカリシリカ反応は、コンクリートの細孔溶液中の水酸化アルカリと、骨材中の有害鉱物との反応であるため、コンクリート中のアルカリ量を測定することによって、アルカリシリカ反応の可能性を判断することができます。コンクリートコア中のアルカリを分析する場合、水溶液試料を調整する必要があり、粉末試料の場合は強酸溶解法や熱水抽出法、コアの場合は高圧で細孔溶液を抽出する方法が採用されています。しかし、いずれの方法も規格化されていません。

なお、抽出・定容した水溶液は、原子吸光光度計やプラズマ発光分光分析装置 (ICP) にかけてNaとKの含有量を測定します。

3.3 コンクリートの組織分析 (微細構造)

ここでいう組織分析 (微細構造) とは、硬化コンクリート中の空気量、気泡間隔係数 (気泡の大きさ)、細孔の分布状況など、気泡組織や細孔構造に関する分析のことです。

コンクリートの凍害の可能性は、構造物の環境条件 (気象条件、部位条件、日射条件など) が重要な要因となります。一方、耐久性編で紹介しましたが、凍害は、硬化コンクリートの気泡組織とも密接な関係があります。そこで、寒冷地における構造物の変状の種類や原因を調べる際に、スケーリングやポップアウトなどの外観観察と併せて、硬化コンクリート中の空気量、気泡間隔係数を測定する場合があります。測定方法は、ASTMに規定されているリニアトラバース法が一般的ですが、最近では、画像解析によって気泡の大きさや数を短時間で測定する方法も採用されています。また、硬化コンクリートの細孔径分布は、水銀圧入ポロシメータを用いて測定します。

コンクリートコアを対象とした試験では、コンクリートの力学的性状だけでなく、劣化原因を推定するために必要な様々な情報を得ることができます。例えば、電子線マイクロアナライザー (EPMA) やX線回折によって、コンクリート中の元素情報や結晶形態を確認することが可能です。

4. おわりに

今回は、構造物編と題して、コンクリート構造物の非破壊試験 (微破壊試験) およびコンクリート構造物から採取したコンクリートコアの試験について紹介しました。誌面の都合で、はつり調査や鉄筋の腐食度試験など紹介できなかった試験も数多くあります。また、誌面で紹介した各試験・測定方法についても概要だけの説明になってしまいました。機会がありましたら、各種試験 (測定) について、コンクリート構造物の変状の種類、劣化原因別に詳しく紹介したいと思います。

約1年 (11回) にわたって掲載してきましたコンクリートの基礎講座も今回で終了となります。長い間、ご愛読いただきましてありがとうございます。

普段コンクリートにあまり馴染みのない読者の皆様にも少しでもコンクリートのことを理解して頂きたく平易な文章で紹介してきましたが、言葉足らずで誤解を招く表現もあったかと反省しています。

コンクリートは、ほぼ全ての材料が国内で調達できる数少ない工業製品であり、今後も土木・建築分野において欠かせない材料です。今回の基礎講座によって、読者の皆様も少しでもコンクリートに興味をもっていただければ幸いです。

(文責：工事材料試験所 所長 真野 孝次)

コンクリートの基礎講座

索引

【 A 】

AE減水剤 11, 12, 14
AE剤 11, 12, 13, 14, 15
AE法 55, 57, 58, 60
ASR 38, 45, 56
ASTM C94 44

【 C 】

C₂S 3
C₃A 3, 14
C₃S 3
CI⁻ 35

【 E 】

EPMA 60, 61, 63

【 F 】

FeO 42

【 I 】

ICP 60, 61, 62, 63

【 J 】

JASS 5N T-603 40
JASS 5 T-502 36
JCI-DD2 61, 62
JCI-DD3 60, 61
JCI-DD4 61
JSTM 23, 28

【 K 】

K₂O 39, 43
KOH 38

【 N 】

Na₂O 39, 43
NaOH 38, 60, 61, 62
NDIS 34, 57, 60, 61, 62

【 R 】

Rc 25, 39

【 S 】

Sc 39
SEM-EDX 60, 61

【 X 】

X線回折 63
X線透過撮影法 57, 59, 60

【 Z 】

ZKT-206 40

【 あ 】

アコースティック・エミッション 57, 58, 60
圧縮強度 12, 15, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 31,
45, 48, 51, 52, 53, 54, 57, 58, 59, 60, 61, 62
後添加 12
アノード部 35, 36
アルカリ金属 37, 43
アルカリ骨材反応 (ASR) 32, 33, 37, 38, 40,
43, 56, 60, 61, 62
アルカリシリカ反応 1, 8, 13, 36, 37, 38, 39, 40,
42, 43, 45, 47, 51, 56, 61, 62, 63
アルカリシリケート反応 38, 43
アルカリ総量 40, 43, 45
アルカリ炭酸塩岩反応 38, 43
安定性損失質量 8, 42

【 う 】

打重ね 19, 20
打継ぎ 18, 20

【 え 】

エアメータ 18
エコセメント 1, 2, 47
エトリンナイト 13, 14, 42

エフロレッセンス …… 14, 15, 41
エポキシ樹脂塗装鉄筋 …… 35
塩害 …… 1, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 51, 60, 63
塩化物イオン …… 2, 12, 14, 33, 34, 35, 36,
37, 46, 47, 51, 60, 61, 62, 63
塩化物イオン含有量 …… 63
塩化物含有量 …… 19, 35, 36, 45, 46, 47, 48, 55, 63
遠心力締固め …… 22, 25
円柱供試体 …… 23, 24
エントラップトエア …… 18
エントレインドエア …… 18, 41, 43, 50

【 お 】

温度ひび割れ …… 9, 13, 19, 30, 32

【 か 】

加圧締固め …… 22, 25
加圧成型 …… 22
解放膨張率 …… 60, 61, 62
化学的浸食 …… 33, 42
化学法 …… 39, 40, 60, 61, 62
角柱供試体 …… 23, 61
カソード部 …… 35, 36
カナダ法 …… 60, 61, 62
かぶり厚さ …… 36, 57, 59, 60
乾燥収縮 …… 1, 3, 6, 7, 8, 9, 12, 13,
14, 15, 25, 29, 32, 51, 62
貫入抵抗値 …… 18, 19

【 き 】

気泡間隔係数 …… 18, 19, 41, 43, 60, 61, 63
気密性 …… 31
吸水率 …… 6, 8, 9, 41, 42, 55
凝結 …… 2, 3, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 16,
18, 19, 20, 21, 25, 30, 42, 51
凝結時間 …… 8, 11, 12, 18, 20, 51
凝結遅延剤 …… 11
強度性状 …… 21, 23, 27
強熱減量 …… 1, 2, 13
供用期間 …… 32, 51, 53
局部破壊試験 …… 58, 59

【 く 】

空気量 …… 12, 14, 15, 17, 18, 19, 22, 30, 36, 41,
43, 45, 46, 48, 50, 51, 52, 53, 54, 60, 61, 63
空気連行性 …… 12, 14
クリープ …… 27, 28, 51

【 け 】

計画調合 …… 50, 53, 54
計画配合 …… 54
軽量骨材 …… 5, 6, 7, 8, 10, 31, 55, 56
軽量コンクリート …… 9, 10, 31, 44, 46, 51, 53
ゲル …… 38, 43, 62
減水剤 …… 11, 12, 15
現場配(調)合 …… 50, 54

【 こ 】

高温高圧蒸気養生 …… 23
硬化コンクリート …… 1, 19, 21, 23, 25, 26, 27, 29,
30, 31, 32, 36, 43, 60, 61, 62, 63
硬化促進剤 …… 11
高強度コンクリート …… 2, 3, 5, 12, 15, 19, 21, 24, 25, 26,
29, 30, 31, 41, 44, 45, 46, 47, 48, 56
高性能AE減水剤 …… 11, 12, 13, 14, 46, 51
高性能減水剤 …… 11, 12
構造体強度補正值 …… 52, 54
高炉スラグ骨材 …… 6, 7, 8, 47
高炉スラグ微粉末 …… 1, 3, 13, 14, 47
コールドジョイント …… 18, 19
骨材の最大寸法 …… 7, 18, 19, 23, 30, 36, 41,
44, 45, 46, 48, 51, 52, 53, 54, 59
コンクリートクライシス …… 37
コンクリートコア …… 34, 36, 40, 54, 57, 59, 61, 62, 63
混合骨材 …… 6
混合セメント …… 1, 2, 34, 40, 43, 45, 47, 51
コンシステンシー …… 7, 8, 9, 16, 17, 19, 20
混和剤 …… 11, 12, 14, 15, 35, 36,
43, 47, 50, 52, 53, 54
混和材 …… 2, 5, 9, 11, 12, 13, 15, 21, 31,
36, 45, 47, 50, 52, 53, 54

【 さ 】

サーモグラフィ法 …… 57, 58, 60

細孔径分布 60, 61, 63
 細骨材 1, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 16,
 17, 18, 19, 39, 41, 50, 52, 53, 54
 細骨材率(s/a) 17, 19, 51, 52, 53, 54
 細骨材量 19, 53
 砕砂 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 21, 45, 47, 55, 56
 再生骨材 5, 6, 7, 8, 10, 39, 40, 47, 55, 56, 60, 61, 62
 碎石 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 21, 45, 47, 55, 56
 材料貯蔵設備 47
 材料分離 9, 13, 16, 17, 19, 30, 48
 材齢 20, 21, 22, 23, 26, 28, 30, 52, 53, 54
 残存膨張率 60, 61, 62

【 し 】

支圧 21
 締固め 9, 16, 17, 18, 20, 22, 25
 自己収縮 13, 14, 25, 28, 29
 湿潤養生 13, 22, 30
 実積率 7, 8, 9, 53, 55
 始発 3, 18, 19
 遮へい用コンクリート 31
 砂利 3, 5, 6, 7, 10, 45, 47, 55
 終結 3, 18, 19
 収縮 9, 13, 14, 25, 27, 28, 29, 30
 収縮低減剤 11, 14, 15
 自由水 9, 22, 25
 蒸気養生 22, 23, 25
 靱(じん)性 27, 31
 小径コア 57, 58, 59, 60
 照査 36
 初期強度 3, 12, 21, 25
 初期収縮 21, 25
 初期凍害 11, 14, 21, 25
 初期ひび割れ 21, 25
 シリカ質混合材 1
 シリカフェーム 13, 14, 47
 人工軽量骨材 6, 7, 9, 31, 45, 47, 48, 55, 56
 迅速法 39, 40, 60, 61, 62

【 す 】

水酸化アルカリ 38, 43, 63
 水密性 3, 13, 14, 15, 17, 18, 30, 51, 53

水和収縮 28
 水和熱 2, 3, 7, 13, 51
 水和発熱膨張 30
 水和反応 3, 4, 13, 14, 15, 16, 22, 28, 30, 33
 スケーリング 41, 43, 60, 63
 砂 3, 5, 6, 7, 10, 35, 45, 47, 55, 56
 スラグ骨材 5, 6, 7, 10, 45, 47, 55
 スランプ試験 16, 17, 20
 スランプフロー 17, 19, 45, 46, 48, 51, 52
 すりへり 33, 42
 すりへり減量 6, 8, 9, 42

【 せ 】

脆(ぜい)性 31
 静弾性係数 27, 28, 60, 61, 62
 施工方法 5, 11, 16, 17, 21, 52
 絶乾密度 6, 8, 9
 設計基準強度 51, 52, 54
 全アルカリ 1, 2, 12, 39
 潜在水硬性 3, 13, 14
 せん断 21
 せん断強度 23, 24
 線膨張係数 30, 31, 41, 43

【 そ 】

早強ポルトランドセメント 3
 相対動弾性係数 41, 42, 43
 粗骨材 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 17, 18, 19, 23, 30, 31,
 36, 39, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 54, 59
 粗骨材量 9, 52, 53
 組織分析 59, 60, 61, 63

【 た 】

耐火性 8, 26, 30, 37
 耐久性指数 41, 43
 耐久設計基準強度 52, 54
 耐凍害性 8, 11, 12, 15, 18, 19, 41, 42, 46, 50
 耐硫酸塩ポルトランドセメント 3, 47
 たわみ 27, 34, 62
 単位水量 3, 8, 9, 11, 12, 13, 15, 17, 18, 19, 20, 21,
 29, 36, 46, 47, 50, 51, 52, 53, 54
 単位セメント量 15, 29, 51, 52, 53, 62

単位容積質量 8, 16, 31, 51
弾性係数 9, 27, 28, 29, 30, 31
弾性波法 57, 58, 60

【 ち 】

遅延形 11, 12, 19
中性化 1, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 51, 57, 60, 61, 63
中庸熱ポルトランドセメント 3
中性化速度 33, 34, 36, 60, 61
調合管理強度 52, 54
調合強度 52, 53, 54
超早強ポルトランドセメント 3

【 て 】

低アルカリ形 1
低熱ポルトランドセメント 3, 51
鉄筋 (配筋状態) 57, 59, 60
鉄筋コンクリート用防せい剤 14, 47
鉄筋の腐食 15, 35, 36, 43, 57, 59, 60, 61, 63
鉄筋腐食 32, 35, 38, 51, 58, 59
電気炉酸化スラグ骨材 6, 47, 55
電磁波レーダ法 57, 58, 59, 60
電磁誘導法 57, 59, 60
天然軽量骨材 6, 9, 31, 55
天然骨材 5, 6, 7, 8, 9, 10, 55
デンマーク法 60, 61, 62

【 と 】

透水係数 30
銅スラグ細骨材 6, 55
動弾性係数 28, 40, 43
トラックアジテータ 11, 14, 15, 45, 48

【 に 】

二水石こう 42

【 ね 】

熱拡散係数 30, 31
熱伝導率 8, 30, 31
熱膨張係数 30, 31
練混ぜ時間 22
練混ぜ方法 22

【 は 】

配 (調) 合 5, 8, 16, 17, 22, 29, 30, 31,
33, 36, 41, 42, 50, 51, 52, 54, 62
配合推定 60, 61, 62
破壊性状 27
はく離 57, 58, 60
パッチングプラント 45, 47
反応性鉱物 8, 38, 43, 60, 61
反発度法 57, 58, 60

【 ひ 】

ひずみ 19, 27, 28, 29, 62
比熱 30, 31
引張 21, 28, 37, 59
非破壊検査 1, 54, 59
微破壊検査 1, 54
引張強度 23, 24, 29, 32
比表面積 2, 3, 9, 13
標準形 11, 12
疲労強度 21, 25
品質基準強度 52, 54
貧配 (調) 合 30, 31

【 ふ 】

フィニッシュビリティ 16, 19, 20
フェノールフタレイン 33
フェロニッケルスラグ細骨材 6
副産軽量骨材 6, 9
付着強度 21, 23, 25, 43
付着モルタル安定剤 11, 14, 45
普通コンクリート 18, 25, 29, 30, 44, 46, 51, 53
普通ポルトランドセメント 1, 3, 13, 34, 39
不動態被膜 11, 14, 33, 35, 36
富配 (調) 合 30, 31
フライアッシュ 1, 2, 3, 6, 9, 13, 14,
17, 18, 19, 31, 40, 43
プラスチック 16, 19, 20
プラスチック収縮ひび割れ 18, 19
ブリーディング 8, 13, 17, 18
フレッシュコンクリート 7, 8, 9, 11, 14, 16, 17, 18,
19, 20, 21, 26, 27, 36, 44, 47, 51
粉末度 3, 8, 13, 18

【 へ 】

平面度…………… 24
ペシマム…………… 38, 39
変形性状 …… 21, 25, 27

【 ほ 】

ポアソン比 …… 28, 60, 61, 62
防せい剤…………… 11, 14, 35, 36
膨張 …… 3, 13, 14, 27, 29, 30,
31, 38, 41, 42, 43, 60, 61, 62
膨張圧…………… 12, 15, 35, 41, 42, 43
膨張材…………… 13, 15
ボールベアリング …… 17
ボス供試体 …… 57, 58, 60
舗装コンクリート …… 17, 21, 25, 44, 45, 46, 48
ポゾラン反応 …… 3, 13, 14
ポップアウト…………… 8, 14, 41, 42, 43, 60, 63
ポルトランドセメント…………… 1, 3, 4, 39, 47, 51
ポンパビリティ …… 16

【 ま 】

マイクロファイラー効果…………… 13, 14
曲げ…………… 21, 24, 48
マスコンクリート …… 3, 13, 19, 30, 31
豆板(ジャンカ)…………… 17, 19, 30, 31, 59

【 み 】

水セメント比(w/c)…………… 9, 12, 18, 19, 21, 22, 29, 30,
33, 34, 36, 41, 50, 51, 52, 53, 54

【 む 】

無水石こう …… 42

【 も 】

モルタルバー法…………… 39, 40, 60, 61, 62
モンモリロナイト…………… 42

【 ゆ 】

有害物質(不純物)…………… 7, 8
有害鉱物 …… 8, 42, 60, 61, 62, 63

【 よ 】

養生方法…………… 21, 22, 23, 25, 40
溶融スラグ骨材…………… 6

【 り 】

粒形判定実積率…………… 7, 8, 9, 17
流動化剤…………… 11, 12, 14

【 れ 】

レイタンス…………… 8, 18, 19, 20
レオロジー…………… 16, 19
レディーミクストコンクリート
…………… 1, 2, 3, 6, 7, 14, 15, 19, 20, 25, 35, 36,
40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 55, 63

【 わ 】

ワーカビリティ …… 5, 9, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 46

監修

友澤 史紀 東京大学・名誉教授
阿部 道彦 工学院大学・教授

お問合せ先 _____

一般財団法人建材試験センター
経営企画部 企画課

〒340-0015
埼玉県草加市高砂2-9-2 アコス北館Nビル
TEL. 048 (920) 3813 FAX. 048 (920) 3821

▶ 建材試験センターの機関誌「建材試験情報」の2013年6月号～2014年5月号に
連載した「コンクリートの基礎講座 (改訂版)」に加筆修正したものである。

コンクリートの基礎講座

2014年9月30日 第1版第1印発行
2015年4月1日 第2版第1印発行

非売品

編者 一般財団法人建材試験センター

〒103-0012 東京都中央区日本橋堀留町2-8-4 日本橋コアビル

<http://www.jtccm.or.jp>

発行者 村山 浩和

発行所 株式会社工文社

〒101-0026 東京都千代田区神田佐久間河岸71-3 柴田ビル

電話 03 (3866) 3504 FAX 03 (3866) 3858 <http://www.ko-bunsha.com/>