

高強度コンクリートのアルカリシリカ反応性

三井住友建設(株) 正会員 博士 (工学) ○谷口 秀明
 三井住友建設(株) 正会員 浅井 洋
 三井住友建設(株) 正会員 修士 (工学) 三加 崇
 三井住友建設(株) 正会員 博士 (工学) 三上 浩

1. はじめに

コンクリート標準示方書¹⁾では、設計基準強度 60～100N/mm²の高強度コンクリートに対しては、化学法(JIS A 1145)またはモルタルバー法(JIS A 1146)によって、アルカリシリカ反応性が無害と判定された骨材を使用することになっている。これは、高い強度を得るためには水セメント比を小さくする必要があるが、これに伴って単位セメント量が相当に多くなるため、アルカリ総量の抑制による対策が困難になること、普通コンクリートにおける対策の一つである混合セメント(混和材)の抑制効果が明らかになっていないこと、さらには普通コンクリートに対して実施される JCI 法(JCI AAR-3)²⁾等を高強度コンクリートの評価方法にも適用できるか必ずしも十分に確認されていないこと等を考慮したものである³⁾。

高強度コンクリートは、強度、耐久性の利点を活かし、部材断面の縮小による軽量化、施工の省力化、長寿命化等への寄与が期待できる。海洋環境や凍結防止剤の使用

地域のように、外部からの塩化物イオンの侵入や厳しい凍結融解作用が想定される場所では、耐久性の向上を目的として高強度コンクリートを使用される可能性があるが、そのような環境では外部からのアルカリの侵入による影響についても検討する必要がある。しかし、設計段階で高強度コンクリートを計画していても、我が国の骨材事情の悪化に伴い、無害と判定される骨材の入手が困難な地域がある。無害と判定される骨材を選定し、定期的な検査を実施しても、施工途中には採石場の地層変化等により無害でない骨材が混入する可能性もある。化学法およびモルタルバー法ではコンクリートの条件および環境条件が加味されないため、通常のコンクリートとは水セメント比等の条件が異なる高強度コンクリートのアルカリシリカ反応性や混和材の効果、あるいは外部からのアルカリの侵入による影響等を把握することができない。

PC 橋には、他の構造物に比べて、比較的高い強度域のコンクリートが多用される。筆者らの調査⁴⁾では、レディーミクストコンクリート工場の標準配合には、呼び強度 40 であっても設計基準強度 60N/mm²程度と同等の水セメント比または単位セメント量のものが存在する。このようなコンクリートに対しては、可能な範囲で単位セメント量の低減等を図るほか、コンクリート標準示方書が定義する高強度コンクリートと同様の対応が必要になるものと考えられる。コンクリートのアルカリシリカ反応性に着目した既往の研究は、RC 構造物を想定したものが多く、PC 橋で使用される比較的高い強度域のコンクリート(以下、コンクリート標準示方書の定義に関係なく、高強度コンクリートと呼ぶ)を対象とした検討は必ずしも十分とはいえない。そこで、筆者らは、PC 部材に使用される高強度コンクリートを対象とし、コンクリートバー法を用いて高強度コンクリートのアルカリシリカ反応性の確認を行った。なお、本論文では、高強度コンクリートのアルカリシリカ反応性を短期間に把握するため、促進試験を実施している。

表-1 使用材料

材料	種類	産地,物性,成分	密度	記号
水	水道水	栃木県下野市	1.00	W
結合材	早強ポルトランドセメント	比表面積4610cm ² /g, 全アルカリ0.49%	3.13	C
	フライアッシュ	I種, 比表面積5250cm ² /g	2.40	F
	高炉スラグ微粉末	比表面積6050cm ² /g, せつこうを含む	2.91	BF
	シリカフューム	エジプト産, 比表面積17.9m ² /g	2.25	SF
細骨材	川砂	鬼怒川産, 吸水率1.66%, F.M2.71, 化学法「無害」	2.58	S1
	砕砂	喜生産(硬質砂岩), 吸水率0.9%, F.M2.96, 化学法「無害」	2.64	S2
粗骨材	砕石2005	安山岩系, 吸水率1.91%, F.M6.64, 化学法による判定:「無害でない」 Rc=128mmol/L, Sc=627mmol/L, モルタルバー法による判定:無害でない, 6ヶ月後の膨張率0.49%	2.67	G
化学混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系(消泡タイプ)		SP
	AE剤	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤		AE

(密度: 単位は g/cm³, 骨材の値は表乾密度である)

2. 実験概要

2.1 コンクリートの条件

使用材料を表-1に示す。セメントには早強ポルトランドセメントを使用した。図-1は、セメントおよび混和材の種類が異なる高強度コンクリートの材齢と圧縮強度比の関係である。圧縮強度比とは、材齢28日の圧縮強度を基準とし、各材齢の圧縮強度を除した値である。混和材の使用はアルカリシリカ反応(以下、ASR)の抑制効果を確認することを目的としているが、PC部材として要求される初期強度の確保も考慮して混和材の種類と置換率を決めた。選定したフライアッシュ、高炉スラグ微粉末およびシリカフェームの置換率は、それぞれ、30%、50%および15%である。図-1に示すとおり、フライアッシュ(置換率30%)またはシリカフェーム(置換率15%)を使用した場合には、早強ポルトランドセメントもしくは普通ポルトランドセメント(強度比較のための参考)と同等の初期強度発現性を有する。高炉スラグ微粉末(置換率50%)の場合には、標準水中養生の供試体強度は他の配合に比べて材齢3,7日の圧縮強度比が若干小さい。ただし、部材寸法が大きい場合や製品工場で蒸気養生を行う場合には、高炉スラグ微粉末の水和反応が温度依存性の高いことに起因し、高い初期強度を確保できることが確認されている⁵⁾。

細骨材は化学法で無害と判定された川砂と砕砂の混合砂を使用した。粗骨材には化学法、モルタルバー法ともに無害でないと判定され、モルタルバー法において相当に高い膨張率(6ヶ月の試験値:0.49%,0.1%以上で無害でないと判定)を示す安山岩系の碎石を使用した。

単位水量は175kg/m³とし、水セメント比(W/C、混和材を使用する場合には水結合材比W/B)は30%、40%および55%とした。スランプは8~18cmの範囲を目標とし、水セメント比が小さいほど、大きな値に設定した。このため、単位粗骨材絶対容積は、水セメント比40%および55%では0.380m³/m³としたが、30%に関してはスランプが大きくてもプラスチックな状態が得られるよう、0.365m³/m³に抑えた。空気量はAE剤により4.5±1.0%の範囲に調整した。コンクリート中のアルカリ総量(Na₂O等量)は、水酸化ナトリウム(NaOH)を用いて最大9.0kg/m³まで増加させた。

2.2 実験方法

実験には、角柱供試体(100×100×400mm)と円柱供試体(φ100×200mm)を使用した。養生(貯蔵)方法は、いずれの供試体も、標準水中養生、40℃湿潤封かん状態(JCI法と同一)および40℃湿潤封かん状態を1ヶ月間実施した後、40℃飽和NaCl溶液浸せき状態の3通りとした。3番目の方法は、温度を50℃とすればデンマーク法⁶⁾と同一条件となるが、今回の実験ではJCI法と同じ温度条件下で外部からのアルカリの侵入の影響を確認した。標準水中養生を除く供試体は、室温40℃の大型養生室内に存置した。

角柱供試体を用いて、約1ヶ月ごとに膨張・収縮ひずみと動弾性係数を測定した。また、円柱供試体の動弾性係数も測定し、供試体の形状寸法によるASRの進行の相違を確認した後、圧縮強度および静弾性係数を測定した。圧縮強度と静弾性係数の試験材齢は、標準水中養生では28日と約8ヶ月、40℃湿潤・封かん養生では約2,3,8ヶ月、40℃飽和NaCl溶液浸せきでは浸せき開始から約2,3,7ヶ月とした。膨張・収縮ひずみと動弾性係数の測定は、供試体の温度が20℃に低下した時点で実施した。このほか、高強度コンクリートは通常のコンクリートに比べて自己収縮が大きいいため、ASRによる膨張ひずみに対する影響の度合を確認する目的で、角柱供試体内に埋込みひずみ計を設置し、20℃と40℃の環境温度条件(供試体は封かん状態)下での自己収縮ひずみを測定した。

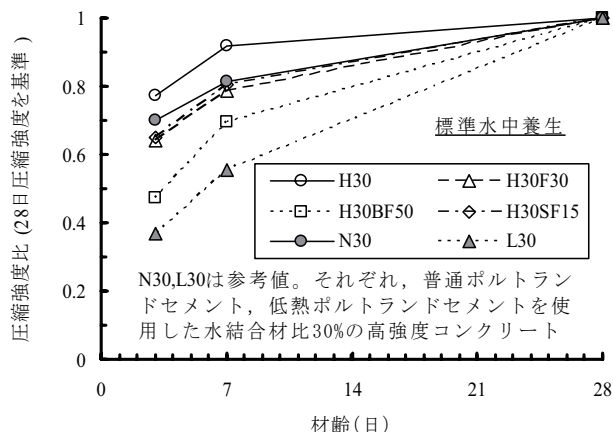


図-1 材齢と圧縮強度比の関係

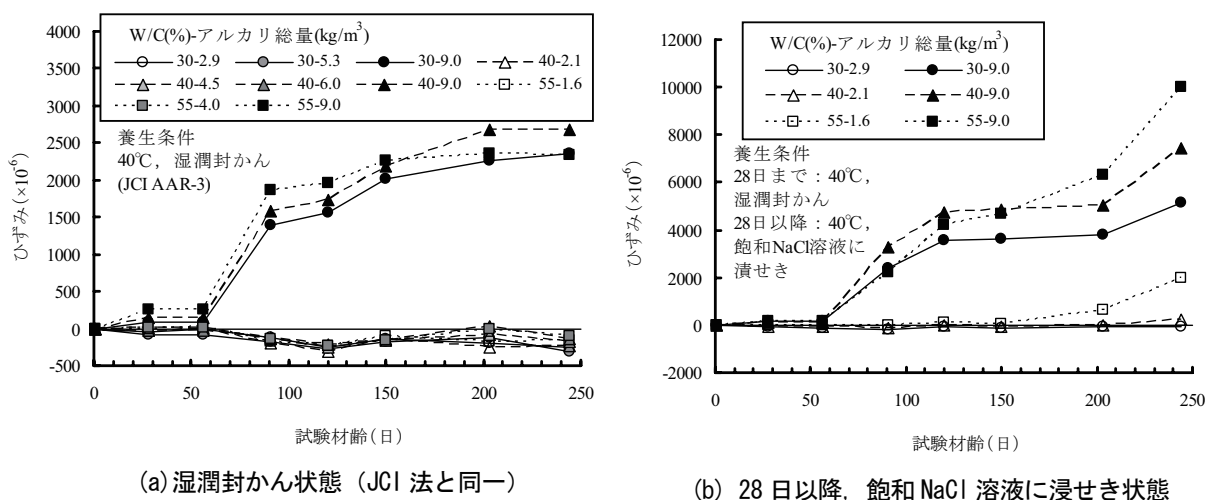


図-2 膨張・収縮ひずみの経時変化 (セメントのみ)

3. 実験結果および考察

3.1 膨張・収縮ひずみ

膨張・収縮ひずみの経時変化を、図-2 に示す。セメントのみを使用した場合、図-2 (a) に示すとおり、40℃ 湿潤封かんの条件下では、アルカリ総量を 9.0kg/m³ とすれば試験材齢 2 ヶ月より急激な膨張を示した。JCI 法では、アルカリ量 (Na₂O 等量) として 2.4/m³ 加えればよいことになっているが、今回の実験結果では JCI 法よりもアルカリ総量を高める必要がある。飽和 NaCl 溶液に浸せきすると、図-2 (b) に示すとおり、NaOH の無添加 (アルカリ総量 1.6kg/m³) であっても、水セメント比 55% では 150 日以降から膨張傾向を示す。

湿潤封かん状態においては、アルカリ総量が 9.0kg/m³ の場合、試験材齢 91~150 日の範囲では水セメント比が大きいほど、膨張ひずみがやや大きい傾向が認められるが、150 日以降では水セメント比による違いは明確ではない。一方、飽和 NaCl 溶液に浸せきを行った場合には、アルカリ総量が 9.0kg/m³ では水セメント比が大きいほど、膨張ひずみが急激に大きくなる。NaOH を添加していない場合 (図中の白抜き印) においても、200 日を超えた時点から膨張の傾向にある。このように飽和 NaCl 溶液に浸せきを行う方法では、コンクリートの水セメント比による供試体内部への浸透性の相違がアルカリシリカ反応性に影響を及ぼす。

図-3 は、水結合材比 30% の高強度コンクリートにおいて、セメントの 30% をフライアッシュ (F30) 、50% を高炉スラグ微粉末 (BF50) および 15% をシリカフェーム (SF15) で、それぞれ置換したコンクリートの膨張・収縮ひずみを示したものである。いずれの混和材も設定した置換率で使用した高強度コンクリートは膨張を示さず、試験材齢約 180 日までの範囲では ASR の抑制効果が認められる。

図-4 は、高強度コンクリート (水セメント比 30%) の自己収縮ひずみを示したもので、アルカリ総量 (2.9, 9.0kg/m³) と養生温度 (20, 40℃) の影響を確認している。高強度コンクリートの自己収縮は大きく、NaOH の添加によりアルカリ総量を 9.0kg/m³ まで増加させると、添加しないもの (2.9kg/m³) に比べて自己収縮がさらに増大し、試験材齢 150 日では約 700×10⁻⁶ に達する。アルカリ総量を 9.0kg/m³ とした場合、20℃ の条件下では、試験材齢 150 日までの間には収縮から膨張に転じることはないが、40℃ の条件下においては、約 10

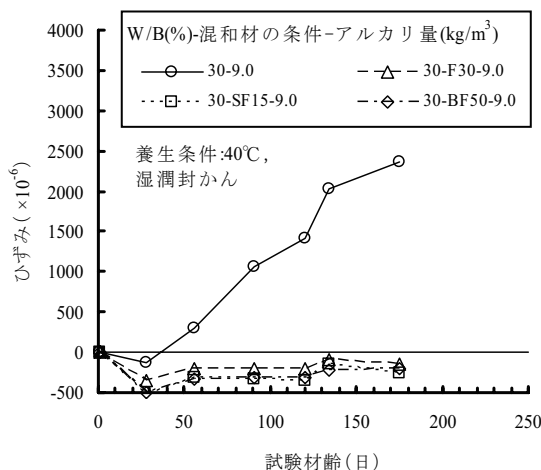


図-3 膨張・収縮ひずみの経時変化 (混和材の効果)

日まで収縮の傾向を示しても、その後、約30日まではASRによる膨張作用により収縮は進行せず、約30日以降に急激な膨張を示している。このように、測定された膨張ひずみは自己収縮ひずみを含んだ値であり、高強度コンクリートのASRによる膨張特性を正確に把握するためには自己収縮を考慮する必要がある。

3.2 円柱供試体で測定した圧縮強度、静弾性係数および動弾性係数の関係

円柱供試体を用いて測定された圧縮強度、静弾性係数および動弾性係数の関係を調べると、図-5、図-6のようになる。図-5に示すとおり、圧縮強度と静弾性係数の関係は、コンクリート示方書の構造設計で用いる設計基準強度に対する静弾性係数の標準値⁷⁾と比べると、任意の圧縮強度に対する静弾性係数の値が相当に小さいものも多く見られる。特に、圧縮強度が小さい領域であるほど、静弾性係数は大きく外れる傾向があり、圧縮強度が20N/mm²程度になると、静弾性係数は10kN/mm²以下にまで低下することがわかる。また、静弾性係数と動弾性係数の比(E_d/E_c)は、標準水中養生の供試体では一般的な値1.2前後であったが、40℃湿潤封かんおよび飽和NaCl溶液に浸せきによりASRの進行を促進した場合には、図-6に示すように1.2前後に分布するものだけでなく、最大で2.0を超えるものまで存在する。

3.3 膨張・収縮ひずみと圧縮強度、静弾性係数および動弾性係数の関係

3.2で述べたとおり、ASRが進行したコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係および静弾性係数と動弾性係数の関係は、健全なコンクリートとは異なる傾向が認められた。角柱供試体と円柱供試体で測定した動弾性係数の測定値は、図-7のように完全には一致しないが、±20%程度のばらつきの範囲である。そこで、角柱供試体で測定した膨張・収縮ひずみをASRによる劣化の進行の指標とし、円柱供試体で測定した圧縮強

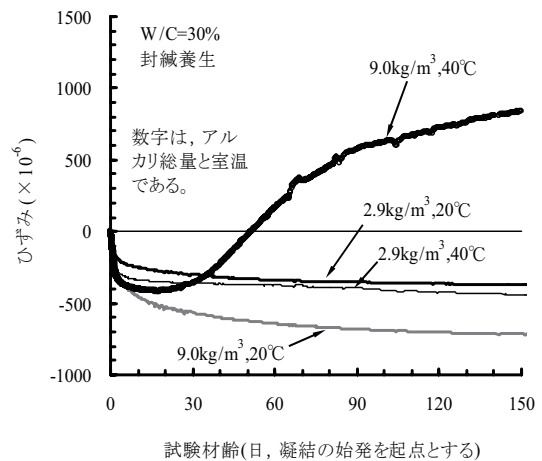


図-4 自己収縮ひずみ

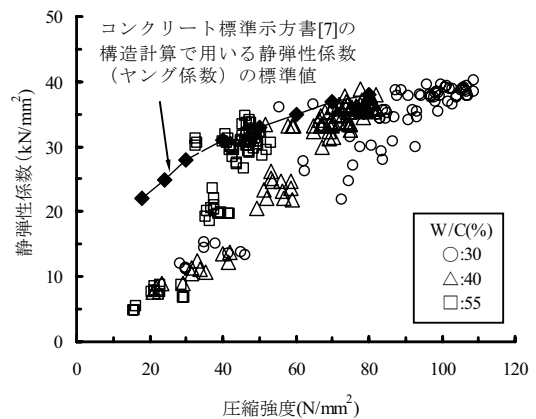


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

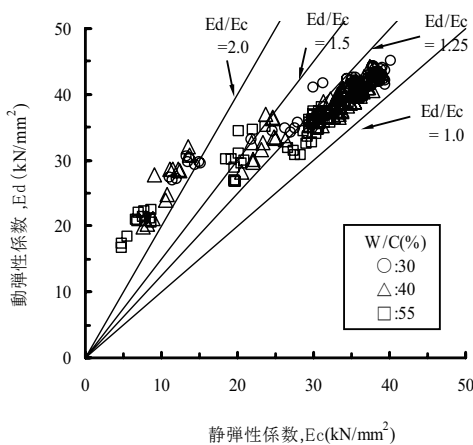


図-6 静弾性係数と動弾性係数の関係

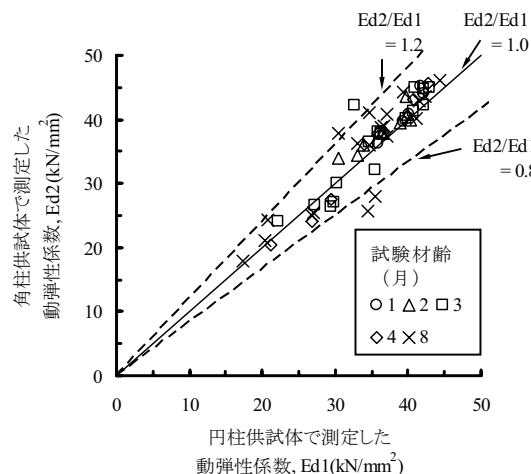


図-7 円柱供試体と角柱供試体の動弾性係数の比較

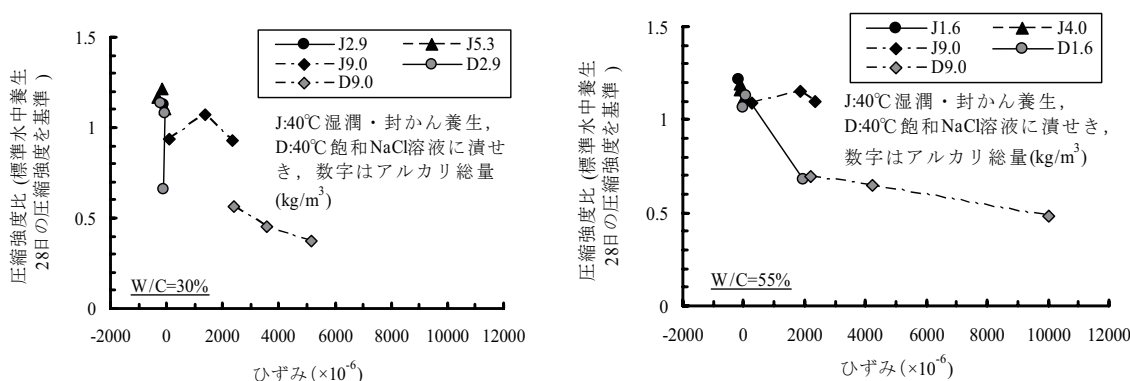


図-8 膨張・収縮ひずみと圧縮強度比の関係 (W/C=30%, 55%の場合)

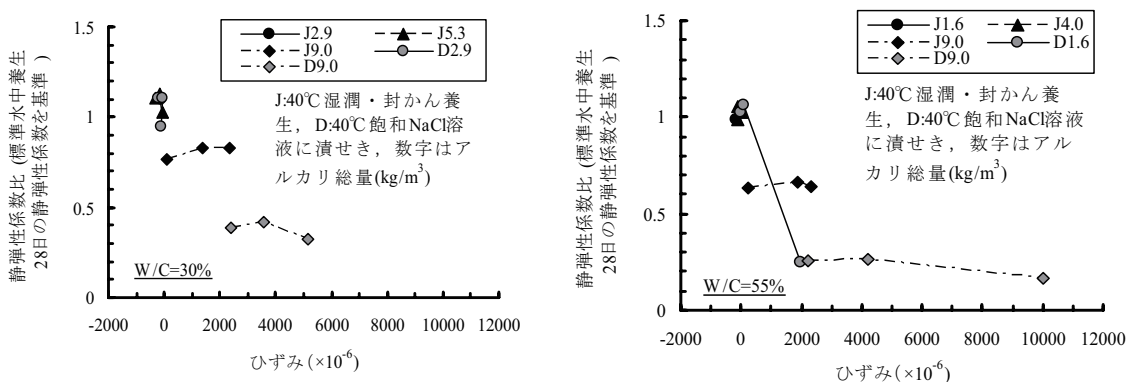


図-9 膨張・収縮ひずみと静弾性係数比の関係 (W/C=30%, 55%の場合)

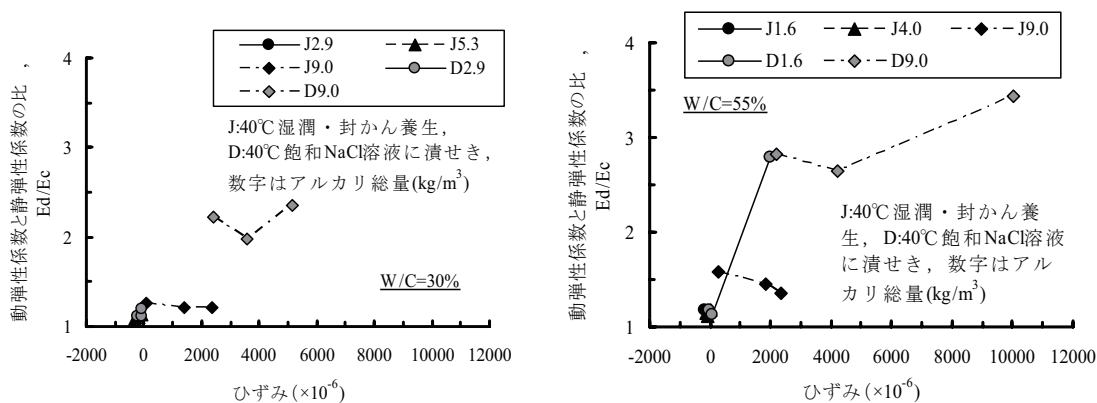


図-10 膨張・収縮ひずみと動弾性係数と静弾性係数の比 (Ed/Ec) の関係 (W/C=30%, 55%の場合)

度、静弾性係数および静弾性係数との関係を調べることにした。

図-8、図-9は、膨張・収縮ひずみと圧縮強度比および静弾性係数比の関係を示したものである。圧縮強度比、静弾性係数比は、標準水中養生を行った材齢28日の圧縮強度および静弾性係数を基準とし、促進養生を行った場合の各値を除いたものである。図-8に示すとおり、任意の膨張ひずみに対する圧縮強度比の低下量は、水セメント比が55よりも30のほうが大きい。一方、任意の膨張ひずみに対する静弾性係数比の低下量は、圧縮強度比とは反対に、水セメント比が55よりも30のほうが小さい。すなわち、高強度コンクリートにおけるASRに伴う膨張は、通常のコンクリートに比べて静弾性係数よりも圧縮強度に影響を及ぼしやすいことになる。

図-10は、膨張・収縮ひずみに着目し、図-6に示した動弾性係数と静弾性係数の比(Ed/Ec)の結果を整理

したものである。動弾性係数と静弾性係数の比(E_d/E_c)は、膨張ひずみの増加に伴い、大きくなる傾向がある。また、水セメント比が 55%よりも 30%のほうが、任意の膨張ひずみに対する動弾性係数と静弾性係数の比(E_d/E_c)は小さい。これらの結果は、前述の静弾性係数比の急激な変化を考慮すれば、膨張ひずみの増加は動弾性係数よりも静弾性係数に大きく影響を及ぼすことを意味する。したがって、動弾性係数を利用した非破壊検査器を用いてコンクリートのアルカリシリカ反応性を評価する場合には、それらの影響を事前に検討しておく必要がある。

4. おわりに

PC 部材への適用を想定した高強度コンクリートのアルカリシリカ反応性に関する実験により得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 実験条件の範囲では、40℃湿潤・封かん（JCI 法）、40℃飽和 NaCl 溶液浸せきのいずれにおいても、アルカリ総量を 9.0kg/m³程度にすると、早期にコンクリートのアルカリシリカ反応性の有無を判定できる。
- (2) 外部からアルカリが供給される環境を想定し、40℃飽和 NaCl 溶液浸せきを行った促進試験では、水セメント比が小さいほど、膨張ひずみが小さくなり、水セメント比の効果が確認された。
- (3) フライアッシュ、高炉スラグ微粉末およびシリカフュームは、高強度コンクリートにおいてもアルカリシリカ反応を抑制する効果がある。
- (4) 高強度コンクリートの場合、特に NaOH 添加によるアルカリ総量を増加させた場合には、自己収縮ひずみが大きいと、測定された膨張ひずみには自己収縮ひずみを加味する必要がある。
- (5) 膨張ひずみの増加は、圧縮強度、静弾性係数および動弾性係数のいずれにも影響を及ぼす。しかし、圧縮強度および静弾性係数への影響は水セメント比によって異なり、水セメント比の小さな高強度コンクリートでは、通常のコンクリートに比べて静弾性係数よりも圧縮強度への影響の度合いが大きい。また、動弾性係数と静弾性係数への影響を比較すると、動弾性係数よりも静弾性係数への影響の度合いが大きく、動弾性係数と静弾性係数の比は劣化の進行に応じて 1.2 前後から 2.0 を超える値まで変化する。

参考文献

- 1) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【施工編】，2008.3
- 2) 日本コンクリート工学協会：JCI-AAR3-3-1987，コンクリートのアルカリシリカ反応性判定試験方法（案）
- 3) 土木学会：2007 年版コンクリート標準示方書改定資料，2008.3
- 4) 谷口秀明，樋口正典，藤田学：PC 橋を対象とした高強度コンクリートの配合，強度および収縮に関する一考察，第 15 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.193-198，2006.10
- 5) 谷口秀明，渡辺博志，田中良樹，藤田学：高炉スラグ微粉末を用いた PC 用コンクリートの特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.531-536，2002.7
- 6) 鳥居和之：骨材のアルカリシリカ反応性の品質保証，コンクリート工学，Vol.39，No.5，pp.68-72，2001.5
- 7) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2008.3