

高強度コンクリートのアルカリシリカ反応性に関する研究

Study on Alkali-Silica Reactivity of High Strength Concrete

谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI
 三上 浩 HIROSHI MIKAMI
 浅井 洋 HIROSHI ASAI
 樋口 正典 MASANORI HIGUCHI
 藤田 学 MANABU FUJITA

本論文は、PC 橋等への適用を想定した比較的高強度域のコンクリートのアルカリシリカ反応性に関する実験結果を報告するものである。実験の結果、JIS A 1146 法（モルタルバー法）では、試験開始から約 2 ヶ月後には膨張が収束し、その後の膨張を生じないこと、モルタルを用いた ASTM 法や NaOH を添加した修正デンマーク法により迅速な判定が可能であること、コンクリートを用いた迅速な判定を行うにはアルカリ総量を 9.0kg/m^3 程度にする必要があること、混和材の使用は高強度コンクリートに対してもアルカリシリカ反応の抑制効果があることなどがわかった。

キーワード：高強度コンクリート、アルカリシリカ反応、弾性係数、圧縮強度、混和材

This study describes the examination results on alkali-silica reaction (ASR) of comparatively high strength concrete for PC members. As a result, the followings were obtained; 1) In JIS method, the mortar bar specimen does not expand after about two months, 2) The ASR using mortar bar specimen can be evaluated promptly by the ASTM method or the New Denmark method using NaOH, 3) In order to make prompt evaluation by concrete bar specimen, the amount of the alkali should be adjusted to about 9.0kg/m^3 , 4) The ASR of high strength concrete can be controlled by using the mixture material adequately.

Words: High Strength Concrete, Alkali-Silica Reaction, Modulus of Elasticity, Compressive Strength, Mineral Admixture

1. はじめに

コンクリート構造物を長期的に供用するためには、まずは建設段階において将来の劣化要因を排除し、排除できない場合には何らかの対策を講じてその影響を最小限に抑えることが重要である。材料に起因する劣化要因として代表的なものがアルカリ骨材反応である。

アルカリ骨材反応は、コンクリート中の細孔溶液中の水酸化アルカリと、骨材中のアルカリ反応性鉱物との間の化学反応であるが、一般には反応生成物の生成や吸水に伴う膨張により、コンクリートにひび割れが発生する現象を指す。アルカリ骨材反応のうち、我が国で発生しているものは、アルカリシリカ反応(ASR)である。

コンクリート標準示方書（以下、示方書と呼ぶ）¹⁾に

おいては、アルカリシリカ反応への対策として、コンクリート中のアルカリ総量の抑制、アルカリシリカ反応抑制効果をもつ混合セメント B 種の使用、およびアルカリシリカ反応性試験で区分 A「無害」と判定される骨材の使用のうち、いずれかの方法を採用することとしている。また、設計基準強度 $60\sim 100\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートに関しては、化学法またはモルタルバー法によって、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としている。これは、高強度コンクリートのアルカリシリカ反応性を抑制する効果やそれを確かめる試験方法が確立していないこと等を考慮した結果である。

しかし、良質な骨材が減少するなかで、アルカリシリカ反応性が無害と判定された骨材が安定供給できるとは限らない。また、アルカリシリカ反応性を判定する試

験の頻度は1回/6ヶ月であることや、採石箇所の地層変化により、計画・設計段階あるいは施工開始段階まで無害と判定されていても、竣工までのいずれかの段階で無害でない骨材が生コン工場に供給される可能性がある。さらには、JISで規定される化学法やモルタルバー法では実際に使用するコンクリートの骨材以外の材料や配合等の相違が加味されないこと、モルタルバー法では判定結果が出るまでに時間がかかること等、現状のアルカリシリカ反応性の判定方法にはさまざまな問題を有する。

PC橋には、設計基準強度 40N/mm^2 程度の比較的高い強度域のコンクリートが多用されるが、最近では、道路橋において設計基準強度 60N/mm^2 の現場打ち工法、設計基準強度 80N/mm^2 のプレキャスト工法の適用が可能になっており、これらは示方書で対象とする高強度コンクリートの範囲に含まれる。また、筆者らの調査²⁾では、呼び強度40であっても、レディーミクストコンクリート工場の標準配合には、設計基準強度 60N/mm^2 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。一般に、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、前述の背景や材料・配合上の特徴等を考慮したうえで、PC橋等に使用される高強度コンクリートを対象とした検討は必ずしも十分とはいえない。これに対し、筆者らは、アルカリシリカ反応を生じたPC部材の膨張挙動等に着目した実験を行っている^{たえば, 3)}。

本論文では、PC橋等に使用される強度が比較的高いコンクリートを対象とし、コンクリートバー法によってそのアルカリシリカ反応性を把握するとともに、混和材の反応抑制効果について若干の確認を行った。

2. モルタルを用いた実験

(1) モルタルの条件および実験方法

コンクリートの実験を実施する前に、化学法によって「無害でない」と判定された安山岩系砕石（後述の表-1を参照）を粉砕し、モルタルのアルカリシリカ反応性による膨張特性を確認することとした。普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比(W/C)を50%、砂セメント比(S/C)を2.25としたモルタルを試験に供した。

モルタルの膨張量はモルタルバー法により測定することとしたが、我が国で通常採用されているJIS A 1146法以外に、修正デンマーク法とASTM C 1260法を用い、また、修正デンマーク法に関しては、水酸化ナトリウム(NaOH)の添加の有無による影響も確認した。アルカリ総量(Na_2O 等量)は、水酸化ナトリウムを添加しない場合には 3.80kg/m^3 、添加した場合には 7.23kg/m^3 である。

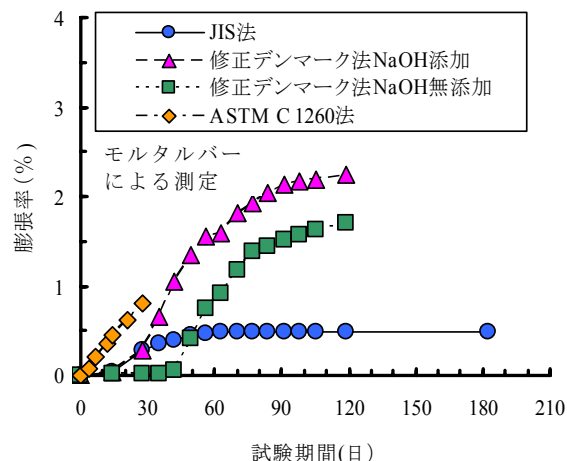


図-1 モルタルの膨張率

(2) 実験結果および考察

図-1に示すとおり、入手した骨材を用いたモルタルは、いずれの試験法を用いても極めて大きな膨張を示すことがわかる。JIS A 1146法の場合には、6ヶ月の膨張率が0.1%以上になると、「無害でない」と判定されるが、今回の結果では1ヶ月で0.28%、6ヶ月では0.49%に達した。このため、このような膨張率が高くなる骨材ではJIS A 1146法によっても早期に「無害でない」と判定することができる。しかし、一般にはこのような短期に高い膨張率になる骨材は少ない。JIS A 1146法は、試験中にモルタル中のアルカリが溶出して膨張が収束する場合がある⁴⁾とされるが、JIS A 1146法では、約2ヶ月後には膨張が収束し、その後の膨張が認められないことは、まさにその現象を裏付けるものと言える。

実施したなかでは、ASTM C 1260法が最も短期間で反応性の有無を判定できる。14日の膨張率が、0.10%未満では「無害」、0.10~0.20%では「無害・潜在的有害を含む」、0.20%以上では「潜在的有害」と判定される。海外では、ASTM C 1260法が普及している。この方法が早期に判定できる理由は、80℃の水酸化ナトリウム水溶液に浸せきして促進しているためである。

一方、沿岸部における飛来塩分、内陸で散布される凍結防止剤によって、コンクリートに塩化物イオンが供給されると、アルカリシリカ反応が促進されることがわかっている。この状態に近いものとして、デンマーク法、修正デンマーク法といった促進法が採用されている。デンマーク法では、91日の膨張率により、0.10%未満では「無害」、0.10~0.40%では「不明確」、0.40%以上では「有害」と判定される。修正デンマーク法は、デンマーク法のS/Cを変更し、前養生を実施しないものである。図-1より修正デンマーク法においてNaOHを添加すれば、早期に高い膨張が得られることがわかる。

骨材のアルカリシリカ反応性を判定するためには、より迅速に判定できる方法が望まれており、ASTM C1260法や（修正）デンマーク法が活用されつつある。ただし、いずれも、砕石を粉砕し、ある配合比率のモルタルで反応性を確認したものであって、実際のコンクリートにおける反応性については明らかではない。

3. コンクリートを用いた実験

2章の結果を踏まえ、コンクリートパー法によってコンクリートのアルカリシリカ反応性に関する配合条件の影響を確認した。

(1) コンクリートの条件

使用材料を表-1に示す。PC部材に使用するコンクリートを想定し、セメントにはいずれも早強ポルトランドセメントを使用した。フライアッシュ、高炉スラグ微粉末およびシリカフェュームの種類と置換率の組合せは、PC部材として必要となる初期強度を確保できる範囲で、アルカリシリカ反応の抑制効果が期待できる可能性がある条件とした。この実験では、それらの置換率は、それぞれ、30%、50%および15%とした。

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。一方、粗骨材には化学法で無害でない判定され、かなり大きな膨張を示す可能性が高い安山岩系のものを使用した。一部の配合では、化学法で無害と判定されたものとの混合比率を変え、膨張ひずみの違いを確認した。

単位水量はすべて $175\text{kg}/\text{m}^3$ とし、水結合材比(W/B)は30%、40%および55%の3水準を設けた。単位粗骨材絶対容積は、水結合材比が40%および55%では $0.380\text{m}^3/\text{m}^3$ とし、30%ではスランプが大きくても材料分離を生じないように、 $0.365\text{m}^3/\text{m}^3$ とした。空気量はAE剤により $4.5 \pm 1.0\%$ の範囲に調整した。

コンクリート中のアルカリ総量(Na_2O 等量)は、水酸化ナトリウムを用いて最大 $9.0\text{kg}/\text{m}^3$ まで増やした。

(2) 実験方法

実験には、角柱供試体 ($100 \times 100 \times 400\text{mm}$) と円柱供試体 ($\phi 100 \times 200 \text{mm}$) を使用した。養生方法は、いずれの供試体も、標準水中養生、 40°C 湿潤・封かん養生 (JCI AAR-3)、および 40°C 湿潤・封かん養生を1ヶ月間実施した後、 40°C 飽和 NaCl 溶液浸せきの3通りとした。3番目の方法は、溶液の温度を 50°C とした場合にはデンマーク法となるが、今回の実験では JCI 法と温度を合わせ、 40°C の条件ですべてのコンクリート供試

表-1 使用材料

材料	種類	産地, 物性, 成分	密度	記号
水	水道水	栃木県下野市水道課	1.00	W
結合材	早強ポルトランドセメント	比表面積 $4610\text{cm}^2/\text{g}$, 全アルカリ 0.49%	3.13	C
	フライアッシュ	I種, 比表面積 $5250\text{cm}^2/\text{g}$	2.40	F
	高炉スラグ微粉末	比表面積 $6050\text{cm}^2/\text{g}$, せっこうを含む	2.91	BF
	シリカフェューム	エジプト産, 比表面積 $17.9\text{m}^2/\text{g}$	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	葛生産 (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「無害でない」 Rc=128mmol/l, Sc=627mmol/l	2.67	G1
	砕石2005	葛生産 (硬質砂岩), 吸水率 0.94%, F.M6.66, 化学法「無害」	2.63	G2
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/cm^3 , 骨材の値は表乾密度である)

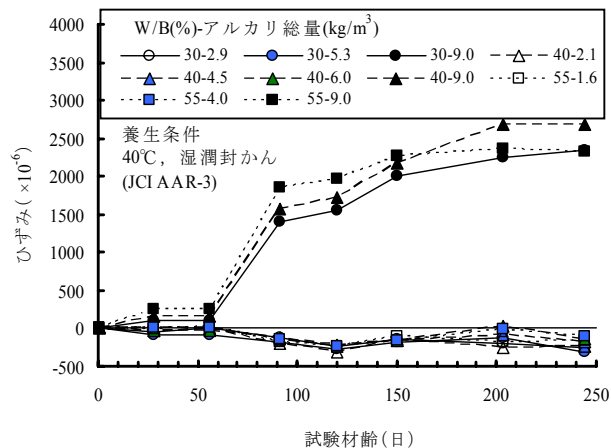
体が入る大型養生室内に存置した。

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。円柱供試体においても動弾性係数を測定し、供試体の形状寸法によるアルカリシリカ反応の進行の相違を確認したうえで、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°C 湿潤・封かん養生では約2, 3, 8ヶ月、 40°C 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。

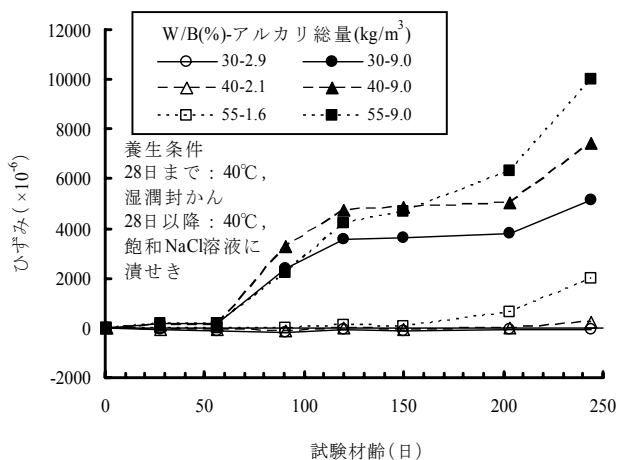
このほか、自己収縮ひずみを測定するため、角柱供試体内に埋込みひずみ計を設置し、封かん状態で 20°C と 40°C の環境温度条件で供試体を存置させた。なお、自己収縮ひずみも検討の対象とするため、この章では膨張率ではなく、膨張・収縮ひずみで表すこととした。

(3) 膨張・収縮ひずみの結果

図-2(a)に示すとおり、セメントのみを使用した場合、JCI法の養生条件ではアルカリ総量を $9.0\text{kg}/\text{m}^3$ 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(Na_2O 等量)として $2.4/\text{m}^3$ 加えればよいことになっているが、今回の実験結果の範囲では JCI 法よりもアルカリ総量を高める必要があると言える。飽和 NaCl 溶液に浸せきを行えば、図-2(b)に示すように水セメント比 55%ではアルカリ総量が $9.0\text{kg}/\text{m}^3$ 未満であつ



(a) 湿潤封かん状態 (JCI AAR-3)



(b) 28日以降、飽和 NaCl 溶液に浸せき状態

図-2 膨張・収縮ひずみの経時変化 (アルカリ総量と養生方法の影響)

でも試験期間を長くすれば膨張を始める。

また、図-2(a)に示すとおり、湿潤封かん養生 (JCI 法) においては、アルカリ総量が 9.0kg/m^3 とすれば試験材齢 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 55%の膨張ひずみの増加が鈍化しており、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、図-2(b)に示すように、アルカリ総量が 9.0kg/m^3 の場合には試験材齢が経過するほど、水セメント比が膨張ひずみに及ぼす影響が明確となり、水セメント比が大きいほど、膨張ひずみが急激に増加する。NaOH を添加していない場合 (図中の白抜き印) においても、試験材齢が 200 日を超えた時点から膨張が促進され始めている。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シリカ反応性に影響を及ぼす。

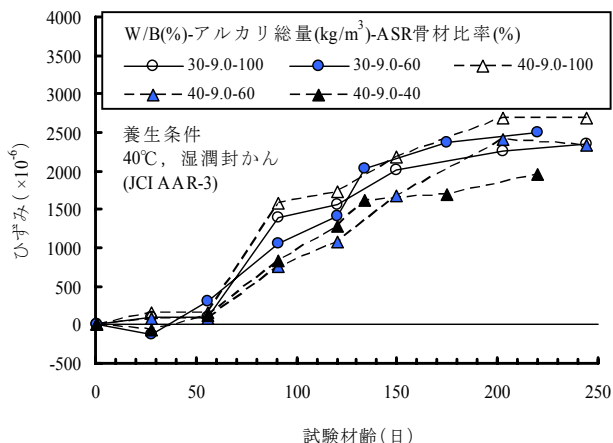


図-3 膨張・収縮ひずみの経時変化 (骨材比率の影響)

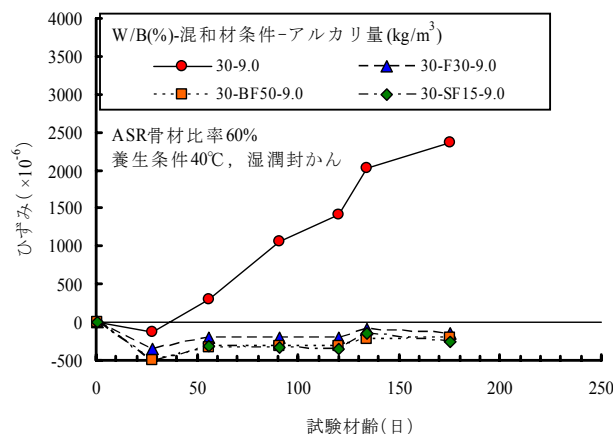


図-4 膨張・収縮ひずみの経時変化 (混和材の影響)

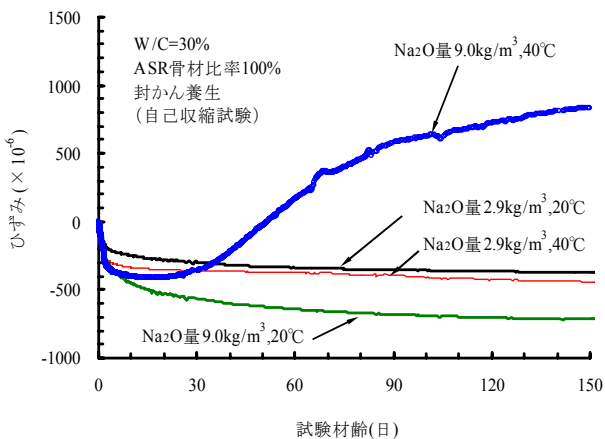


図-5 自己収縮ひずみ

図-3 は、粗骨材の G1 (反応性骨材) と G2 を混合した場合、G1 の比率を変化させた場合の膨張・収縮ひずみを調べたものである。水セメント 40% においては、反応性骨材 G1 の比率が高いほど、膨張ひずみが大きくなる傾向があるが、水セメント比 30% においては明確ではない。

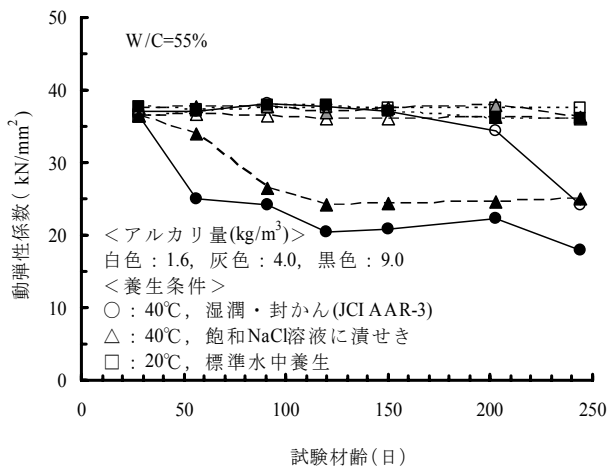
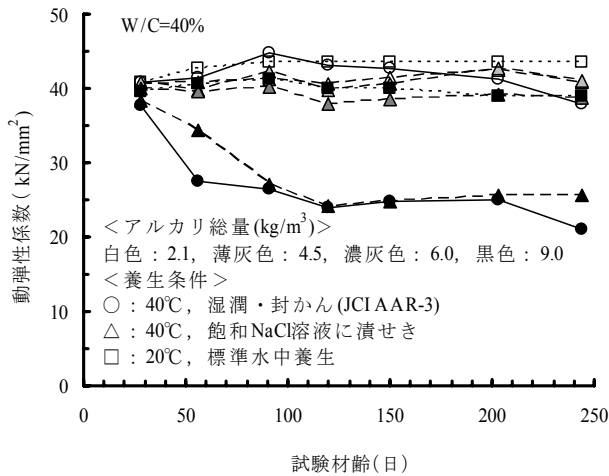
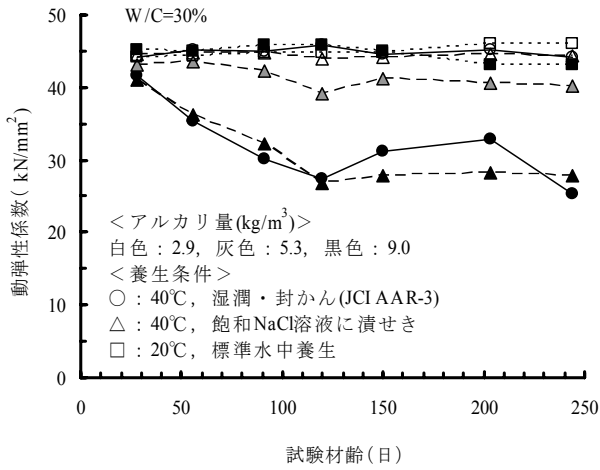


図-6 動弾性係数の経時変化 (角柱供試体)

図-4 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 日までの範囲ではアルカリシリカ反応の抑

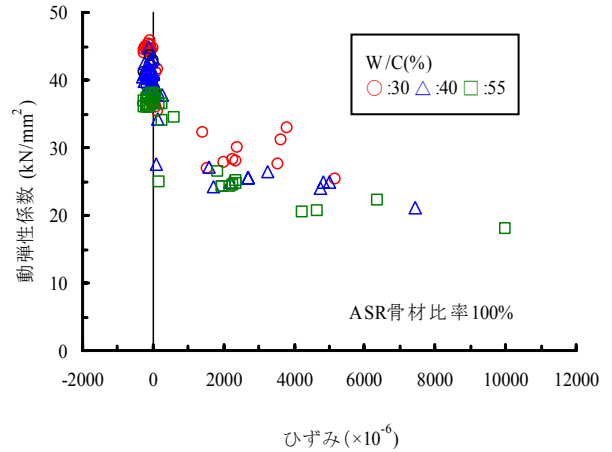


図-7 ひずみと動弾性係数の関係 (角柱供試体)

制効果が認められている。

図-5 に示すとおり、高強度コンクリートは自己収縮が大きく、また、NaOH を添加してアルカリ総量を増加させた場合には自己収縮がさらに大きく増大する傾向がある。このため、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、アルカリシリカ反応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と考えられる。

(4) 角柱供試体で測定した動弾性係数およびこれと膨張・収縮ひずみとの関係

図-6 は、角柱供試体を用いて測定した動弾性係数の経時変化を表したものである。動弾性係数は、アルカリ総量が 9.0kg/m³ の場合のみ、材齢 28 日から 120 日に急激に低下するが、その後は材齢が経過してもほとんど変化が認められない。また、その値は、養生方法が異なるにもかかわらず、ほぼ一致している。しかし、膨張ひずみは、両養生で全く異なるほか、動弾性係数の変化がほとんど見られない期間においても大きな膨張を継続している。

図-7 に示すとおり、水セメント比 30,40,55%の測定結果を総合し、膨張ひずみと動弾性係数の関係を表せば、膨張ひずみの増加に伴い、動弾性係数が低下する傾向がある。ひずみが 0 前後における動弾性係数の変化を除けば、膨張ひずみの増加が動弾性係数の低下に及ぼす影響はあまり大きくはないようである。

(5) 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を調べると、図-8、図-9 のようになる。コンクリート標準示方書⁵⁾ (以下、示方書) に示された

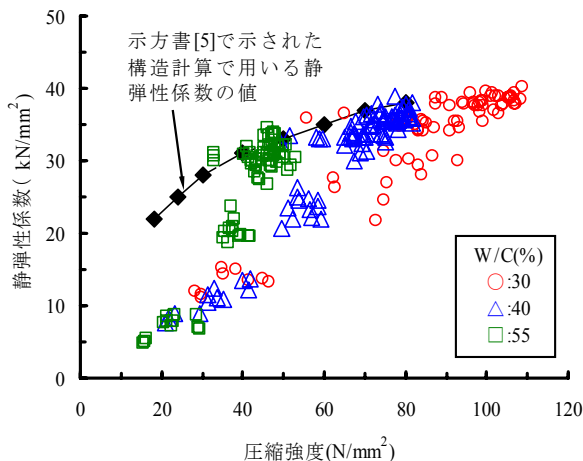


図-8 圧縮強度と静弾性係数の関係

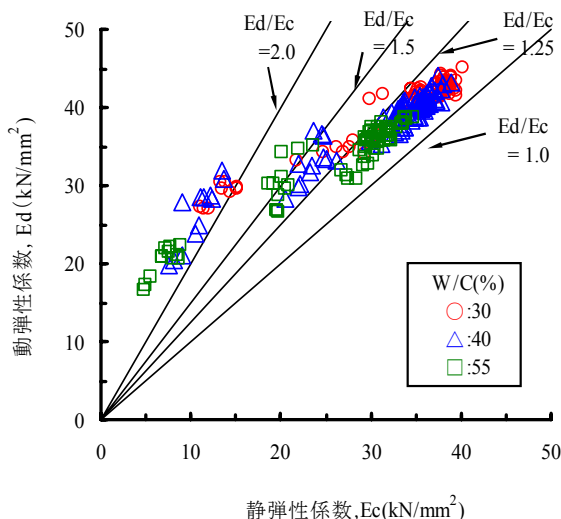


図-9 静弾性係数と動弾性係数の関係

構造計算に用いる静弾性係数の値は、設計上の目安であり、骨材の品質等によって大きく異なるが、今回の反応性骨材を用いたコンクリートの試験値は、劣化が進行していない段階では、おおよそ、示方書の値と一致している。図-8 に示すとおり、各水セメント比の圧縮強度と静弾性係数は、劣化が進行すると、示方書の値を結んだ線に比べて、静弾性係数が低下しており、この傾向は、圧縮強度が小さくなるほど顕著である。圧縮強度が 20N/mm^2 程度になると、静弾性係数は 10kN/mm^2 以下まで低下している。一方、円柱供試体においても角柱供試体と同様に動弾性係数の変化は緩やかであるため、図-9 に示すように、静弾性係数と動弾性係数の比(E_d/E_c)は、健全なコンクリートにおける一般的な値 1.2 前後からアルカリシリカ反応による劣化とともに大きくなる傾向があり、今回の実験結果では 2.0 を超えている。

4. まとめ

PC 橋等への適用を対象とした比較的高い強度域のコンクリートのアルカリシリカ反応性に関する実験を行った結果、以下のことがわかった。

- ① JIS A 1146 法 (モルタルバー法) の場合には、試験開始から約 2 ヶ月後には膨張が収束し、その後の膨張が認められない。これは、試験中にモルタル中のアルカリが溶出して膨張が収束したと考えられる。
- ② モルタルを用いた ASTM C 1260 法や NaOH を添加した修正デンマーク法により迅速な判定が可能である。
- ③ 実験条件の範囲では、 40°C 湿潤・封かん (JCI 法) あるいは 40°C 飽和 NaCl 溶液浸せきのいずれの場合においても、早期にアルカリシリカ反応性の有無を判定するためにはアルカリ総量として 9.0kg/m^3 程度とすることが必要である。
- ④ 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の使用は、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。
- ⑤ 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、膨張ひずみに対する自己収縮ひずみの補正が必要である。
- ⑥ 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、その影響の度合は異なり、動弾性係数よりも静弾性係数への影響が大きい。

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) 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.
- 3) 浅井洋，森下宣明，前野裕文，梅原秀哲：ASR を生じた PC 梁の膨張挙動について，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.1, pp.787-792, 2005.7
- 4) 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
- 5) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2008.3