

暴露条件の違いがASRによる劣化特性に与える影響の評価

河野哲也* 七澤利明** 中谷昌一***

1. はじめに

近年、道路橋のフーチングにおいて、**アルカリ骨材反応***（以下、ASR）による損傷が報告されている¹⁾。中には鉄筋破断を伴うような甚大な損傷もあり、構造物としての性能の低下が懸念されるものの、ASRによる劣化について多くの知見を有する上部構造とは異なり、地中部にあって目視できないフーチングに対するASR劣化の知見は極めて少ない。そこで、筆者らはフーチングにおけるASR劣化のメカニズムを評価することを目的とし、実橋に近い条件において長期にわたるフーチングの暴露試験を実施している。その結果、ASRによる劣化の進展過程は周囲の温度等の環境条件によって複雑に変化することなどを示唆している²⁾。ただし、ASRは周囲の環境条件だけでなく、**ペシマム現象***などをみてもわかる通り、その骨材の特性によっても大きく変化する。

骨材のASR反応特性を評価する方法は、岩石学的試験、化学的試験、物理的試験の3つに大別される。岩石学的試験は骨材中にアルカリとの反応性が認められている鉱物、すなわちシリカが含まれるか否かを光学的方法、X線解析などにより調べるものである。また、化学的試験はアルカリ溶液などを用いて骨材を実際に反応させ、化学的に分析することでその程度を調べるものである。これらの方法によれば当該骨材がASRを起こすか否かについて、その可能性や程度を評価することができると考えられ、また、これらの方法については現在までに実施された多数の調査、研究の成果に基づいてASRを生じうる岩種などについておおむね明らかになっている^{例えば3)}。

一方、フーチングのような地中にある構造物のASRによる損傷という観点で重要なのはその骨材が気中と異なる条件でどの程度膨張するのか、その結果構造物はどのような劣化・損傷状況に至るのかという点である。これを評価するためには、

異なる環境条件での膨張特性の評価が極めて重要となるが、上記の岩石学的・化学的試験でこれらを実験するのは難しい。そこで、筆者らはフーチングの暴露試験を実施するにあたり、いくつかの骨材の異なる環境条件での膨張特性を評価することを目的として、無筋コンクリート供試体に対する恒温恒湿状態における長期暴露試験を行い、環境条件や骨材の種類などの違いによる膨張特性の違いを調べた。また、ASRによるコンクリートの劣化程度を評価する手法として用いられることが多い超音波試験を実施し、超音波試験結果による劣化度の評価の適用性を検討した。

2. 試験概要

2.1 供試体概要

本試験で用いた供試体は図-1に示すような100×100×400 mmの寸法の無筋コンクリートである。供試体のコンクリートの配合は表-1に示す通りである。なお、使用したセメントは普通ポルトランドセメントである。

2.2 試験ケース

本試験における試験ケースは、表-2に示す9ケースである。試験パラメータは非反応性骨材の種類、暴露環境(温度および湿度)、反応性骨材と非反応性骨材の割合の違いであり、ASRに関する一般的な条件の他に、地中部にあるフーチング特有の条件も考慮して定めた。なお、反応性骨材と非反応性骨材を区分するためには、前述の岩石学的試験や化学的試験を行ってその特性を評価する必要があり、しかもそれらによる評価によっても厳密に評価することは難しいとも言われている。しかし、前述の通り本実験はフーチングの暴露試験に用いる骨材の膨張特性を評価することを目的としているため、本研究においてはこれらの試験を実施しておらず、既往の実験や研究⁴⁾で反応性が高い骨材(反応性骨材)、反応性が低い骨材(非反応性骨材)として扱われていた骨材を使用することとし、本文では説明の都合上、反応性骨材、非反応性骨材と称する。

An evaluation of the concrete degradation by Alkali Silica Reaction

*土木用語解説：アルカリシリカ反応とペシマム現象

表-1 コンクリート配合

スラ ンプ (cm)	W/ C (%)	空気 量(%)	s / a (%)	単体量(kg/m ³)			
				水	セメ ント	細 骨 材	粗 骨 材
8	66	4.5	48.0	168	255	875	991

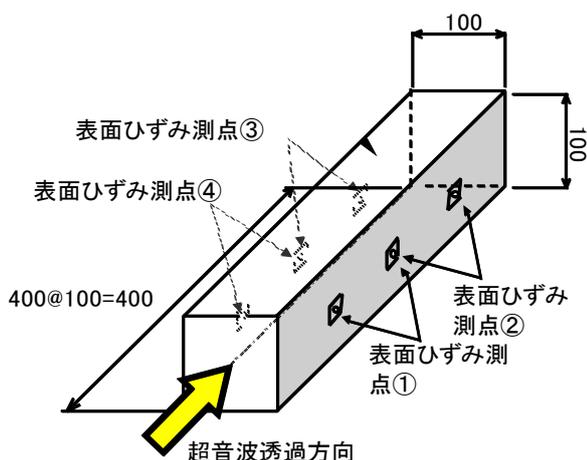


図-1 供試体および表面ひずみ・超音波試験計測概要

本実験において使用した非反応性骨材はS種(滋賀県産)、T種(茨城県産)の二種類である。いずれの非反応性骨材に対しても組み合わせる反応性骨材は一種類であり、文献⁴⁾で使用されているものとはほぼ同じものである。以後、非反応性骨材にS種を用いたケースをSシリーズ、T種を用いたケースをTシリーズと呼ぶ。Sシリーズの暴露環境は、40℃-湿度100%、30℃-水中、20℃-水中であり、Tシリーズの暴露環境は、40℃-湿度100%、20℃-水中、20℃-湿度90%である。反応性骨材と非反応性骨材の割合は、文献⁴⁾で検討されたペシマム試験の結果を参考に粗骨材・細骨材それぞれについて50:50、40:60とし、これらを

組み合わせてI~IVの4通りの配合とした。

2.3 計測概要

計測項目は、目視による表面のひび割れ状況、コンタクトゲージによるコンクリート表面ひずみ、超音波透過試験による透過波の伝播特性である。なお、本試験では各ケースに対して3体の供試体を作成しており、本文に示す表面ひずみ、超音波試験の結果は3体の平均値である。

(1) コンクリート表面ひずみの計測

コンクリート表面ひずみは、供試体表面に取り付けたコンタクトチップの間隔を計測し、コンタクトチップの間隔が膨張によって初期に比べてどの程度増加したかを計測するものである。図-1に示したように、コンタクトチップは各供試体の両側面に100mm間隔で6枚貼り付けた。そして、各コンタクトチップ間の距離(一供試体あたり4点)を計測し、4点の計測結果の平均値をその供試体の表面ひずみとした。

(2) 超音波試験

超音波試験は、供試体に超音波を透過させ、その伝播特性(伝播速度や周期成分)を評価することで供試体内部の劣化状況を評価するものである。

ASRによる劣化が生じたコンクリートに対して超音波を透過させると、ひび割れにより超音波が減衰・迂回するため、ASRによる劣化が生じていないコンクリートに透過させた場合に比べて超音波の伝播速度が低下するとともに、超音波の高周期成分が透過しにくくなることが既往の研究より分かっている^{5), 6)}。本研究では、図-1に示すように供試体の長手方向に超音波を透過させ、透過波の伝播速度、周期成分を分析して、コンクリートの劣化状況を評価した。

表-2 実験ケース一覧

Case	非反応性 骨材種	配合ケース					暴露環境 (温度-湿度)
		配合No.	粗骨材		細骨材		
			反応	非反応	反応	非反応	
S-I-20w	S種	I	50	50	50	50	20-水中
S-I-30w							30-水中
S-I-40			40-100%				
S-II-40		II	50	50	40	60	20-90%
S-III-40		III	40	60	50	50	
S-IV-40		IV	40	60	40	60	
T-II-20	T種	II	50	50	40	60	
T-II-20w							40-100%
T-II-40							

3. 試験結果

3.1 ひび割れ状況

写真-1(a)、(b) に、暴露開始から28週経過時のS-I-30w、S-I-20wのひび割れ状況を示す。この時点においては、S-I-20wにはひび割れは発生していない一方で、S-I-30wにおいては、網目状のひび割れが発生していた。

写真-1(c) に、暴露開始から4年経過時のS-I-20wのひび割れ状況を示す。この時点においては、S-I-20wの供試体においてもひび割れが発生しており、かつ一部にゲルの析出が確認される。以上から、温度条件によってひび割れの発生時期は異なるものの、いずれの暴露環境においてもASRによるひび割れが発生した。

3.2 表面ひずみ

図-2にS種の40℃湿度100%の環境条件において、非反応性骨材と反応性骨材の割合を変化させた4ケースの表面ひずみの時刻歴を示す。この図より、いずれのケースでも暴露開始200日程度でひずみが8000~9000 μ 程度に達した後は増加が見られないという傾向が確認でき、配合による膨張特性に大きな違いはないことがわかる。

図-3に、S種の配合Iの供試体について、環境条件を変化させた3ケースの表面ひずみの時刻歴の違いを示す。温度が40度のケース(S-I-40)と30度のケース(S-I-30w)について膨張が開始するまでの暴露期間を比較すると、S-I-40の方がわずかに早く膨張が開始している。また、最終ひずみはS-I-40の方が約8500 μ 、S-I-30wが約7500 μ であり、S-I-40の方が大きい。温度が20度のケース(S-I-20w)は、他の2ケースが最大膨張量に達した暴露開始後200日経過したあたりでようやく膨張し始め、

3ケースの中で膨張開始までに要した期間が最も長かった。また、他の2ケースに比べて膨張開始後のひずみの増加速度が緩慢であり、最終ひずみは約6000 μ と3ケースの中で最も小さかった。以上から環境条件によって膨張開始時期、最終ひずみに違いがみられ、高温ほどASRによるひずみの増加が早期に生じ、膨張開始後の速度や最終ひずみが大きい傾向にあることが分かった。一方、後に示す図-4中のT-II-20とT-II-20wを比較すると、湿度90%で暴露したT-II-20はひずみが増加した一方で、水中で暴露したT-II-20wは増加していない。このように、水中と気中という条件の違いによっても膨張特性は異なる。なお、同じ20℃水中条件でも、図-4に示したようにS種の場合はひずみが増加している。これについては、図-4に対する考察で後述する。

文献2)でも報告されているように、ASRによる劣化に関してはこのような環境条件の違いが構造物に大きな影響を与える。実橋の劣化状況の評価にあたっては近傍の構造物と比較することにより有意な情報が得られることもあるが、ASRのこのような複雑な特性を考慮し、当該構造物の劣化状況については慎重な評価が必要である。

図-4に非反応性骨材の種類が異なるS種とT種の試験結果を比較する。T種の3ケースの結果を比較すると、最も早くひずみが増加し始めたのは暴露環境の温度が最も高いT-II-40であり、S種と同様に温度が高いほどひずみの増加時期が早い傾向がみられた。一方、T-II-40とこれに次いで暴露開始後500日程度経過した時点でひずみが増加し始めたT-II-20は、暴露開始後約1400日時点でひずみの増加が収束した。T-II-40とT-II-20のひずみの収束値はほぼ同程度であり、S種において



(a) 暴露開始後28週目(S-I-30w) (b) 暴露開始後28週目(S-I-20w) (c) 暴露開始後約四年目(S-I-20w)

写真-1 供試体のひび割れ状況

確認された温度が高いほど最終ひずみが大きいという傾向とは異なる。さらに、同じ20℃水中に暴露しても、S-I-20wではひずみが増加したにもかかわらずT-II-20wでは増加していない。このように、非反応性骨材種によって膨張特性に違いがみられることが分かった。

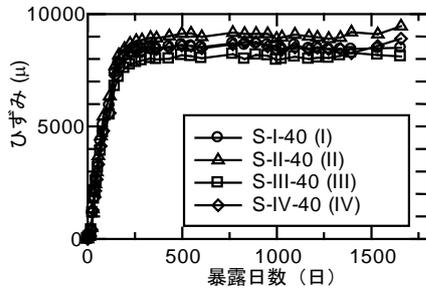


図-2 非反応性骨材と反応性骨材の割合による表面ひずみ時刻歴の違い(S種、40度湿度100%)

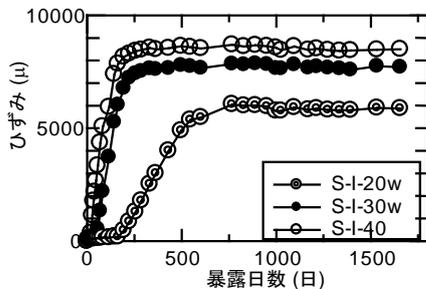


図-3 暴露環境による表面ひずみ時刻歴の違い(S種、配合I)

非反応性骨材の種類によるASRの膨張特性の違いについて、さらに詳細に分析する。環境条件や配合が同じで、非反応性骨材の種類のみが異なるS-II-40とT-II-40の結果を比較すると、T-II-40の最終ひずみはS-II-40の約半分の4000 μ 程度である。さらに、T-II-40はT種の中で最終ひずみが最も大きかったケースであるにもかかわらず、S種の中で最終ひずみが最も小さかったS-I-20wと比べても2000 μ ほど小さい。また、膨張開始後のひずみ増加速度について見てみると、T-II-40はS-II-40よりも小さい。

その一方で、T-II-40とS-I-20wのひずみ増加速度を比較すると、T-II-40の方が大きい。上述のように最終ひずみがS-I-20wの方が大きかったことから、図に示すように暴露開始500日あたりでS-I-20wの膨張量がT-II-40を上回ったものである。

以上から、同一環境においてはT種は最終ひずみ、増加速度ともにS種よりも小さいものの、T種とS種の違いは、ひずみ増加速度よりも最終ひずみに強く反映される結果となった。このように、

非反応性骨材の種類によってASRのひずみ増加特性が異なった理由としては、非反応性骨材に含まれるシリカ成分の違いや、非反応性骨材の表面積や構造・組織の違いによってゲルがアルカリ及び水を吸着する面積も異なることなどが要因と考えられる。ただし、詳細については材料学的・化学的な検証が必要である。

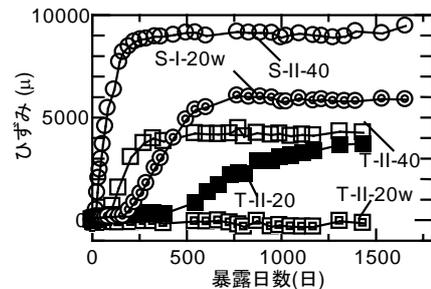


図-4 非反応性骨材による表面ひずみ時刻歴の違い

3.3 ASR劣化特性の変化と超音波の伝播特性

図-5~図-7に超音波試験の結果を示す。いずれも上段に伝播速度の時刻歴を、下段にスペクトル重心の時刻歴を示している。また、縦軸はそれぞれの時点の計測結果を初期値で除して無次元化した値としている。

図-5に、S種の40℃湿度90%の環境条件において、非反応性骨材と反応性骨材の割合を変化させた4ケースに対する超音波試験の結果を示す。

伝播速度とスペクトル重心の時刻歴はよく似ている。また、各ケースの時刻歴に大きな違いはない。これは、図-2の表面ひずみの時刻歴と同じ傾向であり、伝播速度とスペクトル重心による評価においても、配合の違いによるASRによる劣化特性の違いは大きくないことが確認された。

伝播速度の計測結果をみると、計測開始直後に一度値が増加する傾向がみられる。これは、既往の研究でも確認されているように、打設直後の供試体において未水和セメントの水和反応が進行したためにコンクリートが密実化したことをとらえたものであると推察される⁶⁾。その一方で、スペクトル重心には大きな変化が見られない。初期の密実化は、透過波のスペクトルよりも伝播速度に強く現れるようである。その後、暴露日数がおおよそ200日程度に至るまでの間に、伝播速度、スペクトル重心ともに著しく低下する。この期間は、図-2より明らかのように表面ひずみが増加している期間と同時期である。以上から、この期間

において伝播速度、スペクトル重心の計測値が低下した理由は、ASRの進行によるコンクリートの劣化をとらえたものであると推察される。その後、伝播速度、スペクトル重心ともに増加する傾向がみられる。図-2より、この期間は表面ひずみの増加が収束し、ASRによる膨張が完了した時期と同時期である。写真-1に示したように、ASRによる劣化ではアルカリシリカゲルが発生して内部に生じたひび割れが充填されるため、超音波の伝播特性が向上し、伝播速度、スペクトル重心が増加したものと推察される^{5), 7)}。ただし、伝播速度は最終的には伝播速度初期値とほぼ同程度の値を計測している一方、スペクトル重心は初期値よりもやや小さい値で増加が完了している。このような評価方法による違いについては、今後、実物大の構造物に対する試験なども踏まえ、さらに分析、検討が必要である。

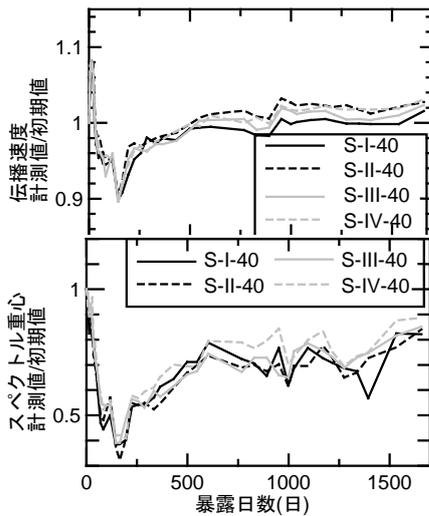


図-5 非反応性骨材と反応性骨材の割合による超音波伝播特性の違い(S種、40度湿度100%)

一般に、健全なコンクリートの超音波の伝播速度は4000 m/s 程度と言われている^(例えば8)。実橋において超音波試験を実施するにあたっては初期値や供用期間中の多数の計測値が得られることは稀であり、ASRによる劣化が完了した後の値のみしか得られない場合も想定される。計測時期がASRによる劣化が完了した後であれば健全なコンクリートと同程度の伝播速度が計測される可能性もある。実橋のASR劣化の評価にあたっては超音波試験のこのような特性も考慮し、表面や採取したコアのひび割れやゲルの析出状況なども踏まえて総合的に評価するのが望ましい。

図-6に、暴露環境の異なる3ケース(S-I-40、S-I-30w、S-I-20w)の超音波試験結果を示す。伝播速度、スペクトル重心ともに、40℃湿度90%のS-I-40と30℃水中のS-I-30wの時刻歴はよく似ている。ただし、S-I-40に比べるとS-I-30wにおいて伝播速度、スペクトル重心が低下し始める時期が若干遅い。これは、図-3の表面ひずみの時刻歴でも述べたように、S-I-30wはS-I-40に比べてASRによる劣化が生じるのが若干遅かったことをとらえたものと考えられる。

一方、S-I-20wにおいても、一度増加した後に減少に転じ、その後再度増加するという傾向は、他のケースと変わらない。ただし、伝播速度、スペクトル重心が低下し始める時期は遅く、ひび割れ状況や表面ひずみの時刻歴と同様に、ASRの進行が遅いことを示している。

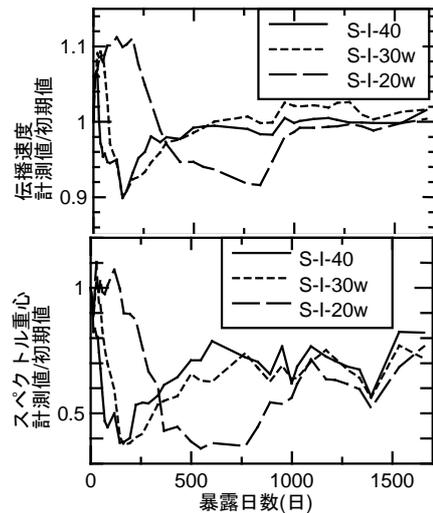


図-6 暴露環境による超音波伝播特性の違い(S種、配合I)

図-7に、非反応性骨材および暴露環境が異なる5ケースに対する超音波試験結果の時刻歴を示す。非反応性骨材にT種を用いたT-II-40、T-II-20は、図-5、6と同様に、初期に一度増加した後、表面ひずみが増加し始める時期に低下し、膨張が収束した時期にやや増加する。以上から、超音波試験の特性の変化は、非反応性骨材の種類によらず同様に生じることが分かった。一方、ASRによる劣化が進行せず、表面ひずみの増加が確認されなかったT-II-20wにおいては、超音波試験においても有意な変動は見られず、暴露期間中の計測結果はほぼ一定であった。

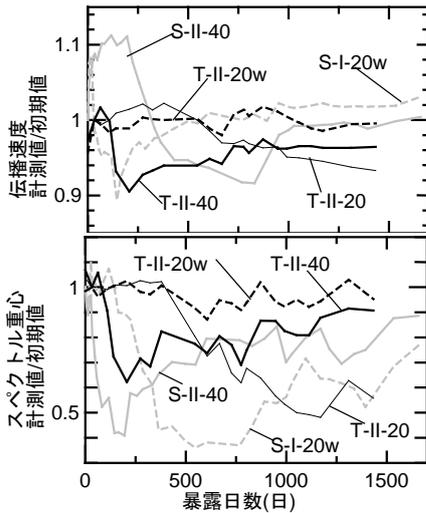


図-7 非反応性骨材による超音波伝播特性の違い

4. まとめ

本試験で得られた知見は以下の通りである。

- ・ 温度が高いほどASRによるひずみの増加が早期に生じ、膨張開始後の速度や最終ひずみが大きい。また、同じ暴露条件にあっても非反応性骨材の種類によって膨張特性は異なる。実構造物のASR劣化状況の評価にあたっては、本文に述べたような条件の違いなどに留意が必要である。
- ・ 超音波試験は、初期の水和反応によるコンクリートの密実化、ASRによる劣化、反応収束後のゲル等によるひび割れ充填というコンクリート内部の変状をよく評価できた。
- ・ 超音波試験の結果、反応収束後の値が評価法によって異なった。実物大の構造物に対する検討なども踏まえ、非破壊検査手法の評価法の違いによる結果の違いが生じた要因を分析するとともに、評価法の適用範囲などを検討する必要がある。
- ・ 本文では暴露条件の違いがASR劣化に与える影響について基礎的な知見を得るため、小型の供

試体に対する恒温恒湿状態での暴露試験の結果をまとめた。今後、骨材や環境条件の違いによるASR劣化の違いについて、より実構造物に近い条件での試験結果なども踏まえて引き続き検討していきたい。

参考文献

- 1) 鳥居和之、宮村雅之、湊俊彦、西川元気：能登有料道路の基礎構造物のASR劣化とその対策、コンクリート工学、Vol.46、No.4、pp.27～33、2008.
- 2) 河野哲也、中谷昌一、山本貴士、宮川豊章：実環境下での長期暴露試験に基づくフーチングのASR劣化状況の評価、材料、Vol.61、No.10、pp.837～844、2012.
- 3) 建設省土木研究所地質化学部：日本産岩石のアルカリシリカ反応性、土木研究所資料第2840号、1990.
- 4) 佐々木一則、十名正和、金海鉦：ASRにより鉄器kン破断が生じたPC梁のせん断耐力実験用試験体の変状報告、土木学会第61回年次学術講演会、pp.117～118、5-059、2006.
- 5) 森寛晃、小川彰一、久保善司、渡邊悠輔：アルカリ骨材反応を生じたコンクリート部材の弾性波法による品質評価について、コンクリート工学年次論文集、Vol. 30、No.1、pp.1059～1064、2008.
- 6) 葛目和宏、森雅司、松本茂：アルカリ骨材反応を生じた構造物に適用する非破壊検査、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文報告集、第2巻、pp.171～178、2002.
- 7) 岩波光保、横田弘、奥山和俊、鳥居和之：ASR損傷を受けたコンクリート柱の力学挙動と補強方法に関する実験的研究、土木学会論文集、No.704 / V-55、pp.129～142、2002.5.
- 8) 小林一輔、森弥広：ASRを生じたコンクリートの動弾性係数および超音波伝播速度に関する一考察、土木学会論文集、No.420 / V-13、pp.245～250、1990.8.

河野哲也*



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 研究員
Tetsuya KOHNO

七澤利明**



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 上席研究員
Toshiaki NANAZAWA

中谷昌一***



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所地質・地盤研究グループ長 (前 構造物メンテナンス研究センター上席研究員)、工博
Dr. Shoichi NAKATANI