

反応性骨材を用いたRC供試体の膨張特性評価

九州工業大学

○益田 紘孝

九州工業大学 正会員 Ph. D.

幸左 賢二

九州工業大学

矢野 佑輔

Abstract : In this research, residual experiments (JCI-DD2 Method), in which experimental cores were drilled from ASR-affected structures, were conducted to predict the deterioration progress of ASR-affected structures. Experimental cores of ϕ 100mm and ϕ 75mm, which drilled from structures of small deterioration level, were used. Amount of residual expansion was defined by the difference between ultimate expansive amount with expansive amount of ASR-affected structures, which were exposed for two years. Bases on the experimental result, the residual amount of ϕ 100mm experimental core was almost same with the residual amount of ASR-affected structures. So that it was reasonable to use JCI-DD2 Method for prediction of deterioration. In addition, because in the ϕ 75mm core of alkali content was easy to leaching , the residual amount of ϕ 75mm experimental core is about 0.6 times of that of ϕ 100mm experimental core.

Key words : Alkali-Silica Reaction, exposure test, expansion test

1. はじめに

アルカリ骨材反応(以下, ASR)による劣化が進展すると内部ひび割れの発生や鉄筋破断により, 構造物の耐力は低下することが懸念される。ASR により劣化した構造物の劣化状況を適切に評価し, 今後の ASR の劣化進展を予測していくことは, 重要である。また, 富田らの実験結果¹⁾を基に, ϕ 100 や ϕ 75 の残存膨張量の補正が行われている。一方, この供試体は, 促進養生環境であり, 実構造物と同様な環境で行われていない。

そこで, 筆者らは, 反応性骨材を使用した供試体を複数作製し, 屋外暴露試験を実施することで ASR による劣化の進展について検討を行っている。具体的には, 供試体の外観ひび割れ計測により供試体の劣化程度を判断し, 採取コアによる圧縮強度試験, 残存膨張量試験や供試体切断による内部ひび割れ計測や供試体の変形量計測を行い, 供試体の外観および内部劣化の経時変化について検討を行った。本稿では, 2章で既往の研究について取りまとめ, 暴露開始から, 約2年経過した供試体から ϕ 100mm, ϕ 75mm のコアを採取し, JCI-DD2 法による残存膨張量試験を実施し, 供試体の膨張量と比較することでコア径の違いによる残存膨張量の違いや JCI-DD2 法の適用性について検討を行った。

2. 既往の研究による残存膨張量評価

採取したコアの膨張特性は図-1に示すとおり, 湿度95%以上で20°C標準養生すると, 一定量の膨張量(解放膨張)が生じ, さらに40°Cで促進養生すると反応性物質による膨張(残存膨張量)が生じる。コア採取時の

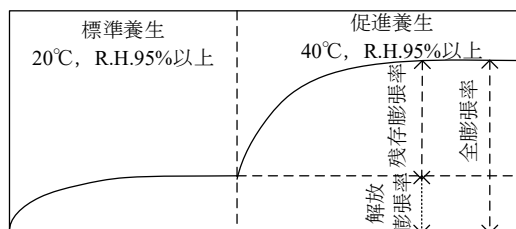
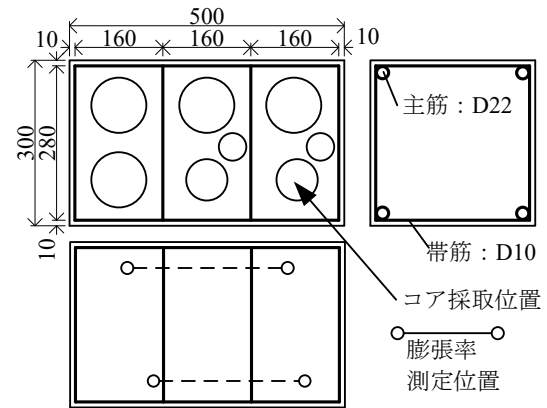


図-1 反応性コアの膨張特性概略図

表-1 既往の研究

著者	発表年	タイトル
鈴木宏信	1987	反応性骨材を用いたコンクリート膨張におよぼす養生条件および供試体の影響
岡田清	1987	大型コンクリートモデルによるASRひびわれ再現
富田穰	1988	コア採取法によるASR変状構造物診断の基礎的研究
高田潤	1990	コアの膨張特性と構造物の劣化予測
高倉岳夫	2009	アルカリシリカ反応を起こした鉄筋コンクリート構造物の変形に関する研究

構造物に生じている膨張量は解放膨張, 将来の膨張量は, 残存膨張で判断することができるとされている。表-1 に採取コアの膨張量について検討を行っている文献¹⁻⁵⁾を示す。これらの論文では, 実構造物や作製した供試体の ASR 膨張によるコンクリートや鉄筋の変形性状の評価や採取コアに対して膨張量の計測を実施している。本研究結果の整合性について検討するために, 供試体の膨張量と採取コアの残存膨張量を経時的に計測している富田らや高田らの研究について説明する。



2.1 実験概要

富田らが行った残存膨張量試験¹⁾について以下に概説する。図-2(1)に示すとおり, 供試体形状は300×300×500mmとし, 配筋供試体と無筋供試体を作製している。実験条件は, 2週間屋外で湿布養生後, コア採取を行い, その後40°C, R.H.100%の促進養生によって材齢6週と39週でコアを採取し, 残存膨張量の評価を行っている。また, 採取コア径はφ100, φ75, φ50mmの3種類である。膨張量をホイットモア変位計により測定し, コアの膨張量はJCI-DD2法によって試験を実施している。次いで, 高田らの実験概要^{4), 5)}について以下に概説する。供試体形状は, 図-2(2)に示すとおり, 800×500×1000mmとし, 配筋供試体と無筋供試体を作製している。なお, 供試体にコンタクトチップを貼り付け, 供試体の膨張量を計測している。材齢7ヶ月と9.5ヶ月と21ヶ月において, φ100mmのコアを採取し, 残存膨張量試験を実施している。

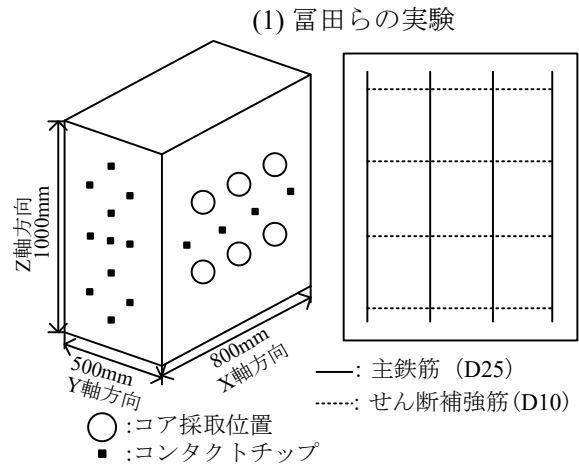


図-2 供試体概要

2.2 供試体膨張量

図-3 に富田らおよび高田らの供試体の膨張量の経時変化について示す。図中(1)に富田らの実験における膨張量の経時変化を示す。膨張量の計測箇所は図-2(1)に示すとおり主鉄筋方向のみであり, 配筋供試体の主鉄筋比は1.7%である。無筋供試体の膨張量は, 材齢39週時まで線形的に約4000μまで増加する傾向にあった。配筋供試体は無筋供試体と比べて膨張率は小さくなっており, 材齢39週の最終計測値で比較すると, 配筋供試体の膨張率は無筋供試体の膨張率の約50%となっていた。図-3(2)に高田らの供試体の膨張量について示す。膨張量の計測は, 図-2(2)に示すように, 各供試体X, Y, Z方向で計測を行っている。なお, X, Y方向の拘束である帯鉄筋比は0.16%, Z方向の拘束である主鉄筋比は, 1.0%となっている。鉄筋拘束の影響

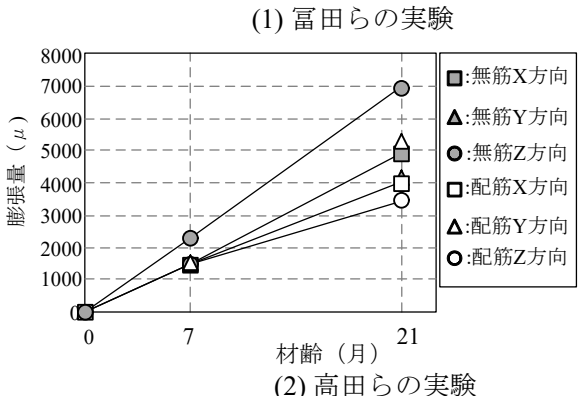
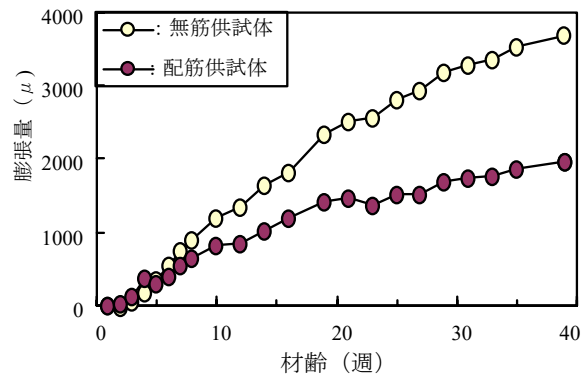


図-3 膨張量の経時変化(既往の実験)

の小さい X, Y 方向の膨張量は、材齢 7 ヶ月では、両供試体とも約 1500 μ 、材齢 21 ヶ月 においても約 4000 ~5000 μ とほぼ同様な値を示していた。また、拘束方向である Z 方向においては、材齢 7 ヶ月において無筋供試体、配筋供試体それぞれ約 1500 μ 、約 2000 μ であり、材齢 21 ヶ月において、無筋供試体では約 7000 μ 、配筋供試体で約 3500 μ となっており、富田らの実験同様に拘束によって膨張量は約 50%となっていた。

2.3 残存膨張量

図-4 に富田ら、高田らの実験による JCI-DD2 法試験の結果について示す。図には、 ϕ 100, ϕ 75, ϕ 50mm の 3 種類のコア径に対して実験を行っている富田らの無筋供試体の結果を代表として示している。図中(1)に解放膨張の結果を示す。解放膨張量は、すでに生じた供試体の膨張量とされているが、供試体の膨張が約 4000 μ である材齢 39 週に採取したコアの解放膨張量は負の値となっており、適用性が低いと判断された。この要因としては、採取コアに発生していたひび割れや、測定時の温度などの影響が考えられる。図中(2)の残存膨張量結果からコア径が小さくなるにつれ残存膨張量も小さくなっている。 ϕ 100mm の残存膨張量に対して、 ϕ 75mm は 50~70%の値を示しており、富田らの配筋供試体の結果などを平均すると約 60%となっていた。JCI-DD2 法では、結露などによってコア表面に発生した水滴を介してアルカリが溶脱するとされており、コア表面付近においては ASR による膨張は生じないことから、コア径が小さくなるほどの溶脱の影響を大きく受けると考えられる。図-5 に残存膨張量と材齢の関係について示す。また、自由膨張量で比較を行うため、富田らの実験では無筋供試体、高田らの実験では、鉄筋拘束の影響の小さい X, Y 方向の膨張量を用いる。

図-5(1)に示す富田らの無筋供試体の残存膨張量は、無筋供試体の材齢 39 週時における膨張量(最終計測値)3909 μ から、各材齢における供試体の膨張量を減ずることで算出した。また、コアの残存膨張量は、無筋供試体から採取したものを白色、供試体から採取したものを灰色で示した。 ϕ 100mm コアの残存膨張量は材齢 2 週のコアでは約 5500 μ であるが、材齢 39 週時では 500 μ 程度と小さくなっており、供試体の膨張量が増加するにつれ、コアの残存膨張量は低下する傾向となっている。図-5(2)に示す高田らの実験結果も同様に、材齢 7 ヶ月のコアの残存膨張量は、約 2000 ~3500 μ となっており、材齢 21 ヶ月においては、約 500 μ と富田らの実験同様に、供試体の膨張量が増加するにつれ、残存膨張量は低下する傾向となっている。

以上より、富田らの膨張量約 4000 μ である供試体の解放膨張量は負の値を示しており、適用性が低いことが考えられる。また、富田らや高田らの実験から ϕ 100mm コアの残存膨張量は、供試体の残存膨張量と概ね一致していることから、コアの残存膨張量によって ASR の劣化進展予測が可能であると考えられる。

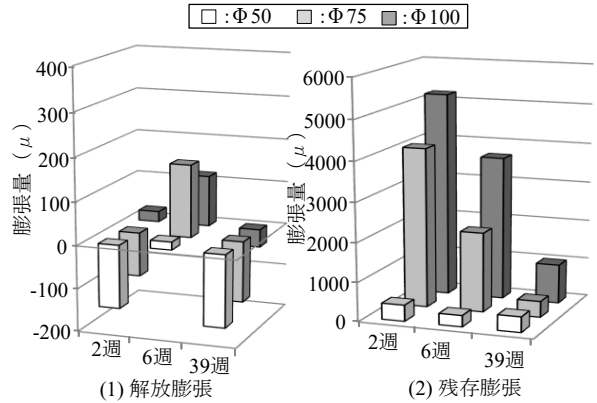
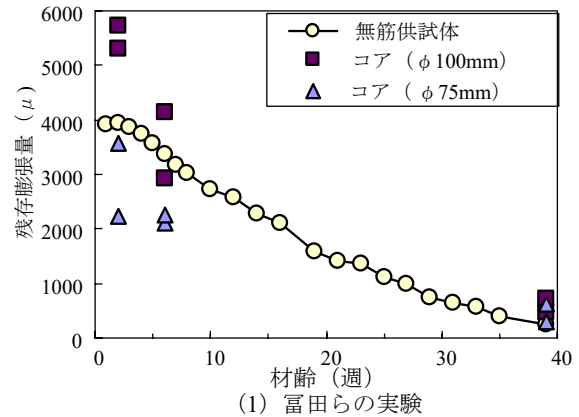
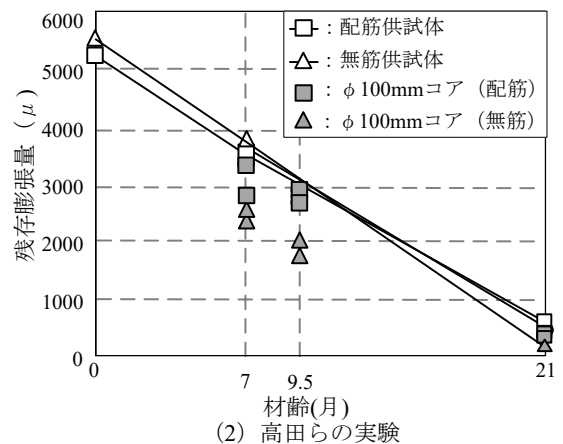


図-4 JCI-DD2法試験結果



(1) 富田らの実験



(2) 高田らの実験

図-5 残存膨張量の経時変化(既往の実験)

3. 本研究による残存膨張量評価

3.1 供試体概要

表-2 に実験ケースについて示す。これらの供試体について ASR マニュアル⁶⁾を参考に、ひび割れ幅 0.2mm 以上の外観ひび割れ密度 0~2m²/m²を劣化度小, 2~5m²/m²を劣化度中, 5.0m²/m²以上を劣化度大と定義した。本稿では, 残存膨張量試験を行った case1, 14 供試体と膨張量の計測を行っている case6 供試体を対象に検討を行う。供試体形状は図-6 に示すようにシリーズ I~III は供試体長さを 670mm し, シリーズIV供試体長さは 905mm とした。いずれの供試体もコンクリート配合は, W/C=46%, s/a=43%であり, 普通ポルトランドセメントを使用した。反応性骨材の置換比率は, 細骨材では反応性骨材と非反応性骨材の比率を 6:4, 粗骨材では 5:5 とした。また, ASR の促進を目的として, コンクリートの等価アルカリ量を 8kg/m³とし, シリーズ I, II, IVでは NaCl, シリーズIIIでは NaOH を添加した。なお, 同シリーズの供試体の作製条件は同じである。D19 の主鉄筋, および D10 の帯鉄筋には, 現在, 北九州地区で流通している鉄筋を用いている。また, D16 の帯鉄筋は, 昭和 60 年以前に建設された構造物より斫り出した鉄筋の直線部分を曲げ加工することで用いている。供試体は, 庇のない屋外に自然暴露している。

3.2 供試体劣化状況

図-7 に case6, 14 供試体で観察されたひび割れ密度の経時変化を示す。それぞれの供試体におけるひび割れ密度の経時変化は, 打設時期の違いによるなどから, シリーズごとのひび割れの進展時期において若干の差が見られたが, 暴露期間を通して概ね同じような増加傾向となっている。最終ひび割れ密度は, case14 供試体は 1.95m²/m², case6 供試体は 5.98m²/m²であった。

膨張量の計測は, case14 供試体の東面, 上面, 西面のそれぞれにおける軸方向および軸直角方向に対してコンタクトゲージにより行った (基長: 100mm)。図-8 に東面を代表とした膨張量計測位置を示す。軸方向は①~⑧の区間, 軸直角方向は⑨~⑰の区間を平均することで算出している。case14 供試体および劣化度大に達した case6 供試体の軸直角方向の膨張量の経時変化を図-9 に示す。case6 供試体は, 供試体端面(北面)および上面に設置した標点によって計測を行い, これらの計測箇所の結果を平均した値を図-9 にプロットしている。なお, case6 供試体は暴露開始直後と暴露開始から 1453 日時点のみ

表-2 実験ケース

シリーズ	case	打設日	暴露期間 (日)	劣化度	主な項目
I	1	2007/8/3	463	小	外観損傷 コンクリート 物性
	2		790	中	
	3		1149	大	
II	4	2008/3/12	550	中	外観と内部損傷 の関係性
	5		1168	大	
	6		1538	大	
III	7	2008/9/18	1845	大	鉄筋損傷と劣化 性状の関係性
	8		1523	大	
	9		暴露継続中	—	
IV	10	2012/11/2	28	初期	シリーズIIの 追加実験
	11		暴露継続中	—	
	12		暴露継続中	—	
	13		暴露継続中	—	
	14		629	小	
	15		暴露継続中	—	

※本論文における使用供試体

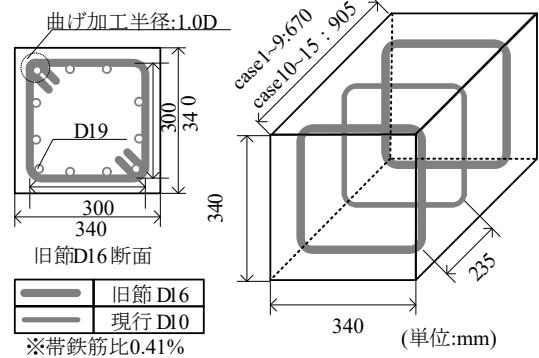


図-6 供試体形状

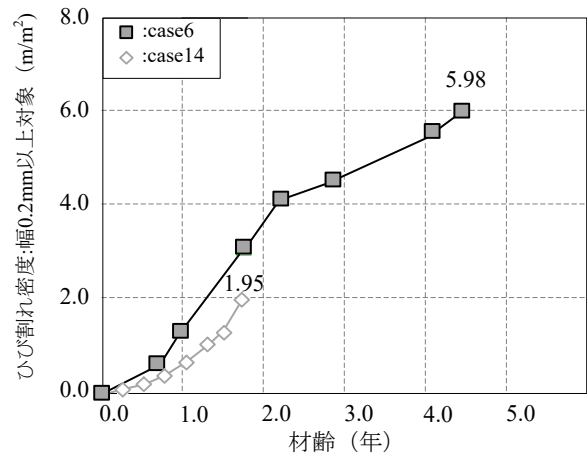


図-7 ひび割れ密度の経時変化

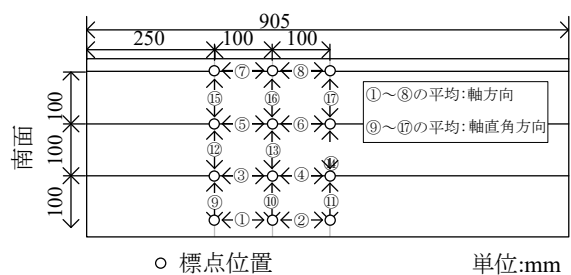


図-8 膨張量計測方法(case14東面)

の計測となっており、1453 日における軸直角方向および軸方向の膨張量は、それぞれ 5298 μ 、1468 μ 生じていた。case14 供試体の軸直角方向の膨張量は、暴露開始から、暴露日数 629 日にかけて 2577 μ まで増加し、軸直角方向は、617 μ まで増加している。軸方向の膨張量は、鉄筋拘束の影響を大きく受け、case6、14 供試体ともに軸直角方向の約 30%となっており、富田らや高田らの実験供試体よりも拘束方向の膨張の低下率が大きくなっていった。これは、富田らの実験よりも主鉄筋比(1.7%)に対して、本研究供試体の主鉄筋比を 2.97%と大きく設定していることが考えられる。

3.3 残存膨張量

図-10 に case1, case14 供試体のコアの採取箇所について示す。case1 供試体は、軸方向から 5 本、軸直角方向から 6 本 ϕ 75mm のコアを採取しており、このうち各方向 2 本ずつに対して残存膨張量試験を実施した。case14 供試体のコアの採取箇所は供試体の北面から 235mm の位置から供試体を切断し、その切断後のブロックから ϕ 100mm、 ϕ 75mm コアを 2 本ずつ採取した。試験方法は、JCI-DD2 法に従い、採取直後から 4 週間は温度 20 $^{\circ}$ C、湿度 95%以上の環境、その後温度 40 $^{\circ}$ C、湿度 95%以上の環境で養生した。

図-11 に case1, case14 供試体の残存膨張量試験の結果について示す。case1 供試体から採取したコアの残存膨張量は、軸直角方向では、それぞれ 2120 μ 、460 μ 、軸方向では、1300 μ 、1080 μ であった。case14 供試体から採取したコアの残存膨張量は、 ϕ 100mm では、3000 μ 、2080 μ 、 ϕ 75mm コアでは 1430 μ 、700 μ であった。既往の研究と同様に ϕ 75mm は ϕ 100mm の値は小さくなる傾向となっていた。

図-12 に case14 供試体と case1, case14 供試体から採取したコアの残存膨張量の経時変化を示す。高田らや富田らの供試体の膨張量が 4000~5000 μ であったことから暴露開始 0 日時点の case14 供試体の残存膨張量を case6 供試体最終膨張量である 5298 μ と仮定した。case6 供試体の最終膨張 5298 μ から、各暴露日数における case14 供試体の軸直角方向の膨張量計測結果 (図-9 参照) を引いたものを case14 供試体の残存膨張量とした。 ϕ 75mm コアの結果については、膨張量の計測距離 10cm であることから、高さを一定と考えると ϕ 75mm コアは、 ϕ 100mm コアよりも体積-表面積比が小さくなり、アルカリ溶脱による膨張量の低下の影響を大きく受ける。また、 ϕ 75mm は ϕ 100mm に対して体積の割合は約 0.6 倍⁷⁾になるため、0.6 で除すこ

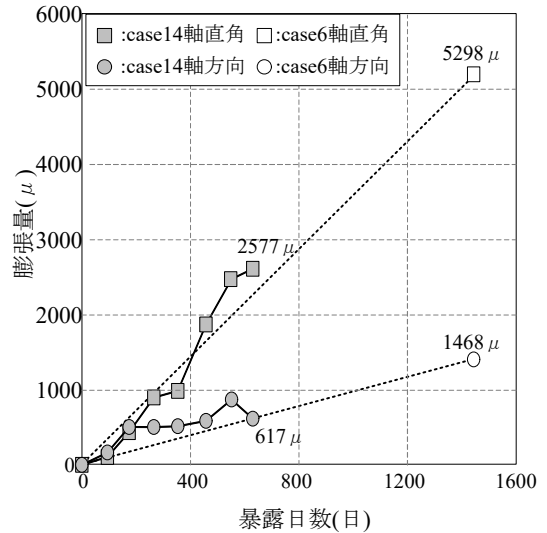


図-9 膨張量の経時変化

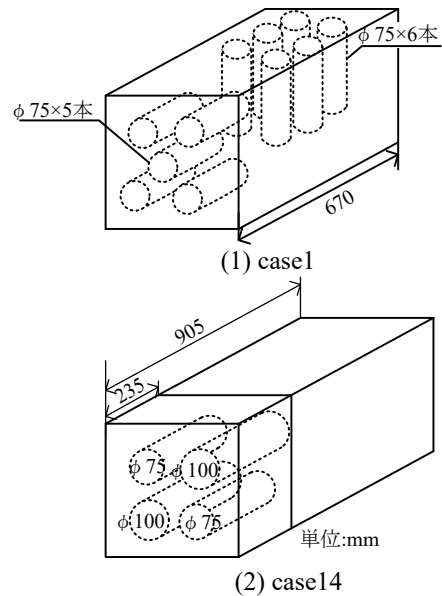


図-10 コア採取位置

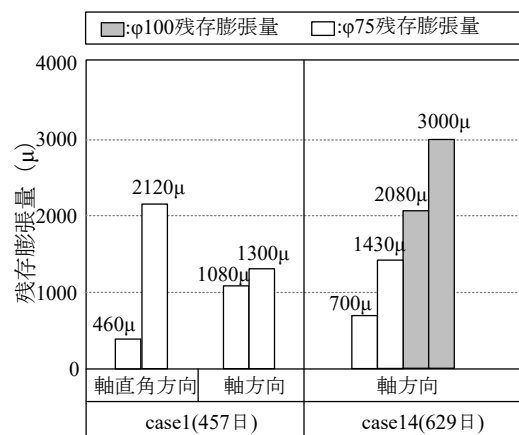


図-11 残存膨張量の試験結果

とでφ100mmの膨張量に補正しプロットしている。φ100mmコアの残存膨張量試験結果の平均値2540μは、628日時点のcase14供試体の残存膨張量2680μと同等な値を示していた。補正後の各caseのφ75mmの残存膨張量の最大値は、case1, case14それぞれで、3533μ, 2383μであり概ね供試体の残存膨張と同等の値となっていた。

以上より、今回の実験ケースでは、φ100mmコアでの評価がより適切であるが、0.6で除す補正によりφ75mmコアにおいても供試体の残存膨張を概ね評価できることが確認された。

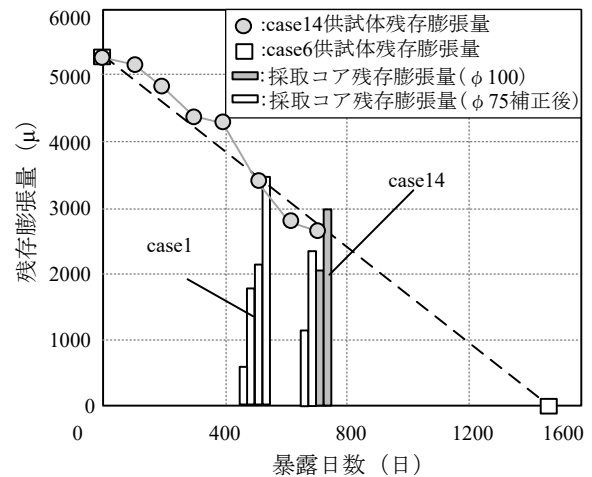


図-12 残存膨張量の経時変化

4. まとめ

本研究では、配筋したASR供試体を作製し、2-4年に及ぶ屋外暴露試験を実施した。劣化度小のASR供試体に対して、径の違うコアで残存膨張量試験を行い、JCI-DD2法の適用性について検討した。以下に本研究で得られた知見について以下に示す。

- 1) case14供試体は暴露期間629日、ひび割れ密度 1.95m^2 (劣化度小)、case6供試体は、同じく1538日で 5.98m^2 (劣化度大)であり、暴露日数の経過ともにひび割れの進展が確認された。
- 2) 暴露日数629日のcase14供試体からφ75mm, φ100mmコアを2本ずつ採取しJCI-DD2法によって残存膨張量試験を実施した。φ75mm, φ100mmコアの膨張量の平均値はそれぞれ、 1065μ , 2540μ となりφ75mmはφ100mmよりも小さくなっていた。
- 3) 終局としたcase6供試体の膨張量から、case14供試体のコア採取時の膨張量を引いた値を供試体の残存膨張量とすると、供試体の残存膨張量とcase14供試体から採取したφ100mmコアの残存膨張量は同等な値を示しており、φ100mmコアによって膨張量予測できると考えられる。また、今回の実験では、φ75mmコアは、φ100mmコアよりも体積-表面積比が小さくなり、アルカリ溶脱による膨張量の低下の影響を大きく受け、φ75mmはφ100mmに対して体積の割合は約0.6倍になるため、0.6で除す補正によって供試体の残存膨張量を評価できることが確認された。

参考文献

- 1) 富田穰, 幸左賢二, 中野錦一, 中上明久: コア採取法によるASR変状構造物診断の基礎的研究, セメント技術年報42, pp. 335-338, 1988.
- 2) 岡田清, 中野錦一, 小野紘一, 松村誠: 大型コンクリートモデルによるASRひびわれの再現, コンクリート年次論文集, vol. 9, No. 1, pp. 567-572, 1987.
- 3) 鈴木宏信, 小林茂広, 中野錦一, 中上明久: 反応性骨材を用いたコンクリート膨張におよぼす養生条件および供試体形状の影響, セメント技報41, pp. 395-398, 1987.
- 4) 高田潤, 立松英信, 立屋敷久志, 今泉裕隆: コアの膨張特性と構造物の劣化予測, コンクリート工学年次論文集, vol. 12, No. 1, pp. 811-814, 1990
- 5) 立屋敷久志, 窪山潔, 高田潤, 中村亨: 大型供試体によるアルカリ骨材反応の劣化特性, コンクリート工学年次論文集, vol. 12, No. 1, pp. 801-806, 1990.
- 6) 阪神高速道路公団: コンクリート構造物の健全度に関する調査研究業務(その3)報告書, (財)阪神高速道路管理技術センター, 1985. 9.
- 7) 九州工業大学: アルカリ骨材反応(ASR)を生じた阪神高速道路橋脚の調査データ分析報告書, 2009.