

論文 構造物劣化予測としての膨張量試験の適用性検討

幸左 賢二*1・矢野 佑輔*2

要旨: 膨張試験中の RC 供試体から $\phi 68, 100\text{mm}$ の 2 種類のコアを採取して促進膨張試験を実施した。 $\phi 100\text{mm}$ の促進膨張試験においては、劣化初期コアは 0.652% の膨張量となり、劣化度大では 0.180% の膨張量となった。またコアの全膨張量は供試体残存膨張量に対して 0.72~1.29 の比率となり、 $\phi 100\text{mm}$ ではコアの全膨張量から ASR の劣化進展の予測が可能な結果となった。一方 $\phi 68\text{mm}$ においてはコア比を考慮してもコアの全膨張量は供試体残存膨張量に対して 0.51~1.41 の比率となり、差異の大きな結果が得られた。これはコア体積が小さいため、アルカリ量の溶脱の影響が大きく、膨張量の絶対値が小さいためと考えられる。

キーワード: ASR, 長期暴露, 外観ひび割れ, 内部ひび割れ, 残存膨張量

1. はじめに

ASR が発生した構造物の劣化状況を適切に評価し、今後の ASR の劣化進展を予想していくことは極めて重要である。現在まで、著者らの促進膨張試験結果などを基に、 $\phi 100\text{mm}$ や $\phi 68\text{mm}$ の残存膨張量の評価が行われている^{1), 2), 3)}。一方、この供試体は、促進養生環境であり、実構造物と同様の環境条件ではない。

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、屋外暴露を実施することで ASR による劣化の進展について検討した。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、残存膨張量試験や供試体の変形量計測を行っている。本論文では、暴露開始から、28, 629, 1568 日暴露供試体から $\phi 100, 68\text{mm}$ 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 法の適用性の検討を行った。

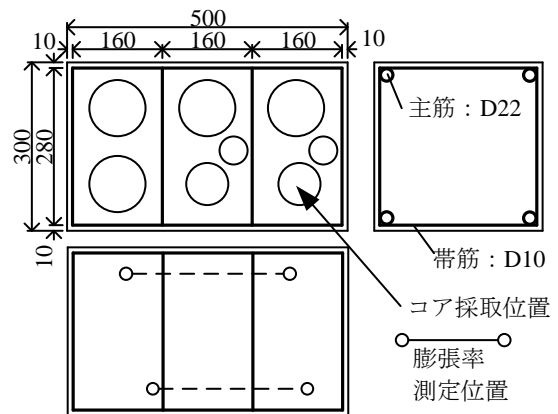


図-1 供試体形状 (単位: mm)

2. 代表的既往の研究

著者らにより 1988 年度実施された残存膨張量試験について以下に概説する¹⁾。図-1 に示す通り、供試体形状は 300x300x500mm 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 $\phi 100, 75, 50\text{mm}$ の 3 種類である。母材膨張量は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

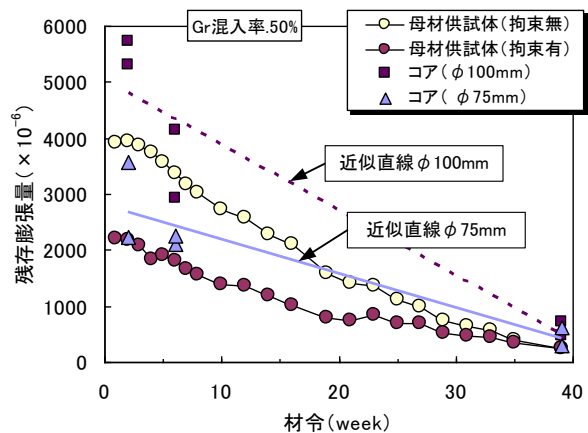


図-2 残存膨張量の適用性評価 (供試体)

*1 九州工業大学 工学部建設社会工学科 名誉教授 Ph.D. (正会員)

*2 九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻 (学生会員)

施している。

残存膨張量の適用性評価結果として、図-2にGr(反応性粗骨材率50%)の母材供試体の膨張量とコアの残存膨張量の経年変化の対応を示す。各材齢で39週の最終計測値より母材供試体の膨張量を差し引いた値を残存膨張量としてプロットし、コアの残存膨張量との対応を比較できるようにプロットした。図-2の近似直線に示されるとおり、母材供試体の残存膨張量は材齢の経過に伴って低下しており、同様にコアの残存膨張量も採取材齢が後期のものになるにつれて小さくなる傾向が一致している。したがって供試体実験の結果からは、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ことが示唆された。しかし注意する項目としては、コア径によって膨張の絶対値が異なるため、コア径の大きなφ100mmで評価を行う方が劣化進展を把握しやすいと指摘されている。

3. 供試体概要

表-1に実験ケースについて示す。これらの供試体についてはASRに関する報告書⁴⁾を参考に、ひび割れ幅0.2mm以上の外観ひび割れ密度0~2m/m²を劣化度小、2~5m/m²を劣化度中、5m/m²以上を劣化度大、28日養生試験体を劣化度初期と定義した。本稿では、過年度実施されたcase1, 2, 3に対して新たに残存膨張量試験を行ったcase11, 14, 16供試体を中心に検討を行う。

供試体形状は図-3に示すようにシリーズI~IIIは供試体長さを670mmとし、シリーズIV, V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=0.46, 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は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, VではNaCl, シリーズIIIではNaOHを添加した。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。また鉄筋破断を模擬しD16の帯鉄筋は昭和60年以前に建設された構造物よりはつ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。供試体は底のない屋外に自然暴露している。

4. 供試体劣化状況

図-4にcase11, 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の経時変化は、概ね同じような増加傾向となっている。計測時最終ひび割れ密度はcase11供試体では7.80m/m²,

表-1 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		1150	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		暴露中		
IV	10	2012/11/2	28	初期	シリーズIIの追加実験 残存膨張量
	11		1568	大	
	12		暴露中		
	13		暴露中		
	14		629	小	
	15		1246	中	
V	16	2016/10/19	28	初期	シリーズIの追加実験 残存膨張量
	17		139	小	
	18		暴露中		
	19		暴露中		
	20		暴露中		

□ : 検討供試体

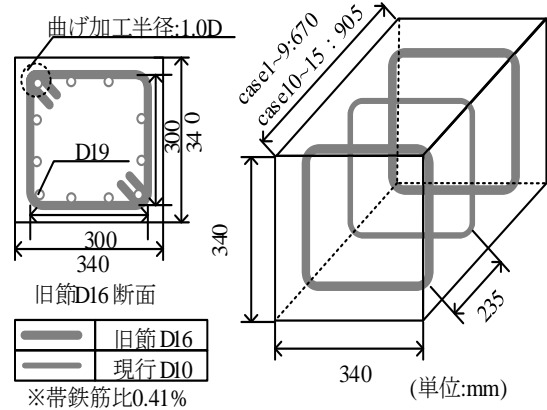


図-3 供試体形状

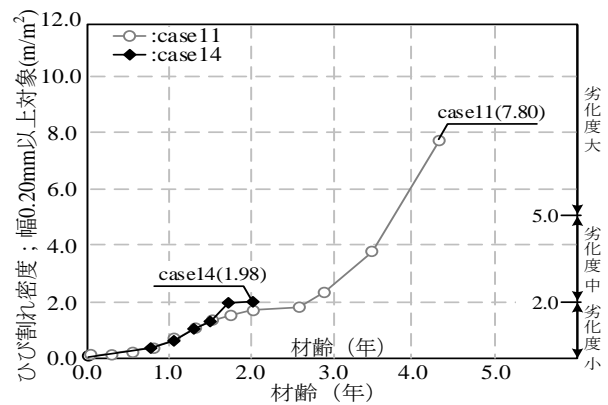


図-4 ひび割れ密度の経時変化

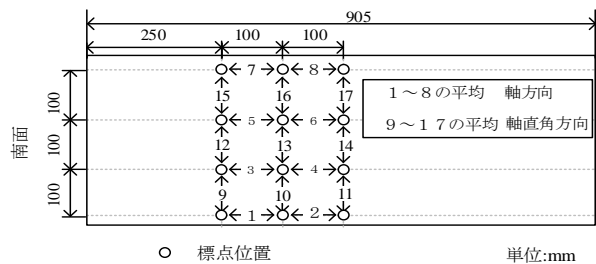


図-5 膨張量計測方法(case14 東面)

case14 供試体では 1.98m^2 であった。膨張量の計測は、case11, 14 供試体の東面、上面、西面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。図-5 に東面を代表とした膨張量計測位置を示す。軸方向は 1 から 8 の区間、軸直角方向は 9 から 17 の区間を平均することで算出している。図-6 に case14 の最終ひび割れ状況を示す。図-7 には case11 の最終ひび割れ状況を示す。まず鉄筋拘束の少ない端部周辺にひび割れは発生し、その後中央部の橋軸方向にひび割れが発生することが分かる。

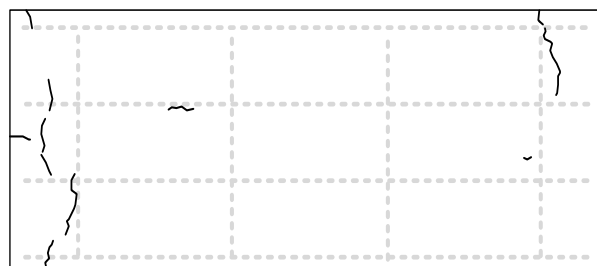


図-6 ひび割れ状況 (Case14)

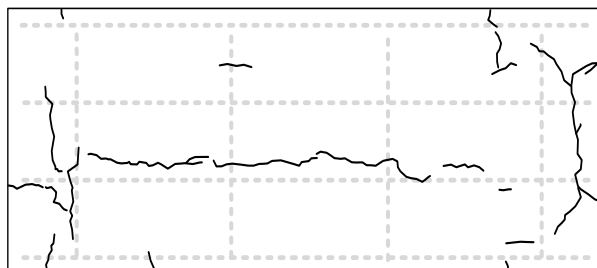


図-7 ひび割れ状況 (case11)

次に case11, 14 の膨張量の橋軸直角方向の経時変化を図-8, 橋軸方向の経時変化を図-9 に示す。図-8 に示すとおり、軸直角方向の最終的な膨張量は case11 では暴露日数 1558 日で 5497μ , case14 では 629 日で 2618μ となり、その後、コア採取を実施した。図-9 に示すとおり、軸方向の最終的な膨張量は case11 では暴露日数 1558 日で 1212μ , case14 では暴露日数 629 日で 1094μ となる。

軸直角方向と軸方向の膨張量を比較すると、直角方向は 5497μ となり軸方向 1212μ の 4 倍程度の膨張量を示した。これは帯鉄筋比が 0.4% であることに対して、主鉄筋比は 3.0% であることから、軸方向の膨張は軸直角方向よりも鉄筋拘束の影響が大きく受けたためと考えられる。

5. 膨張量試験

図-10 (a) に case11, 16 供試体のコアの採取箇所について示す。case11, 16 供試体は、まず供試体両端部から 350mm 位置において切断し、供試体を 3 つのブロックに分割し、各コアを採取した。図中より、片端部①から $\phi 68 \cdot 350\text{mm}$ のコアを 5 本採取し、片端部②から $\phi 68 \cdot 350\text{mm}$ のコアを 4 本採取し、中央部から $\phi 100 \cdot 250\text{mm}$ のコアを 5 本採取した。これらのコアの内訳としては、圧縮強度試験用に $\phi 68\text{mm}$ のコア 5 本を用い、促進膨張試験用に $\phi 100\text{mm}$ のコア 3 本、 $\phi 68\text{mm}$ のコア 3 本、アルカリ量測定用に $\phi 68\text{mm}$ のコア 1 本を用いた。

図-10 (b) に case14 の実験概要図を示す。まず、供試体両端部から 230mm 位置において切断し、供試体を 3 つのブロックに分割し、各コアを採取した。図中より、片端部①から $\phi 68\text{mm} \cdot 230\text{mm}$ のコアを 2 本、 $\phi 100 \cdot 230\text{mm}$ のコアを 1 本採取し、中央部から $\phi 190 \cdot 445\text{mm}$ のコアを 1 本採取した。ついで片端部②から $\phi 68\text{mm} \cdot 230\text{mm}$ のコアを 2 本採取した。これらのコアの内訳としては、圧縮強度試験用に $\phi 190\text{mm}$ のコアを 1 本、 $\phi 68\text{mm}$ のコア 2 本を用い、促進膨張試験用に $\phi 100\text{mm}$ のコア 2 本、 $\phi 68\text{mm}$ のコア 2 本を用いた。

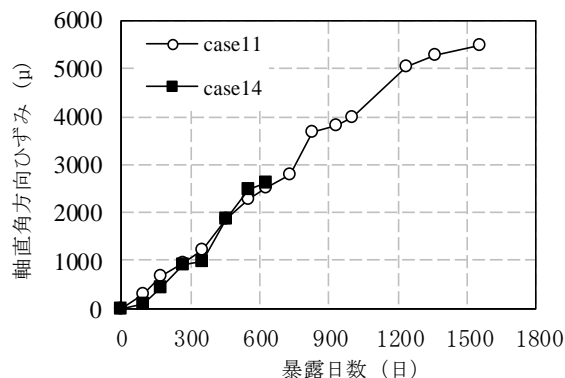


図-8 軸直角方向ひずみ

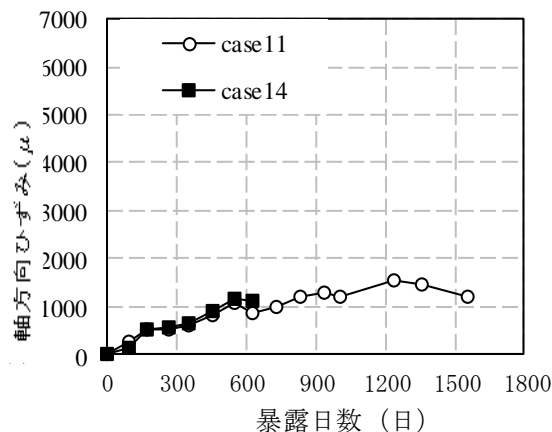


図-9 軸方向ひずみ

まず図-11 に劣化度初期 (材齢 28 日) の case16 について説明する。養生 8 ~ 17 週間において、膨張率が急激に増加しており、その後、緩やかに増加している傾向が確認された。これらの傾向は ASR の劣化傾向である進展期と収束期を表している。最終膨張率は養生期間 26 週間目において $\phi 100\text{mm}$ で 0.652%, $\phi 68\text{mm}$ で 0.308% となった。よって、 $\phi 68\text{mm}$ は $\phi 100\text{mm}$ に対して 47% の膨張率となり、コア径が大きいほど、膨張率が大きいことが確認された。これは、後述するが、コア径が小さいほどアルカリ溶脱が大きくなり、膨張量が小さくなったためと考えられる。

図-12 に劣化度小の case14 について説明する。図中(a) に示すように養生 6 ~ 8 週において、膨張しはじめていることが確認された。劣化度初期の case16 よりも養生早期に膨張が開始した要因は、ゲルの生成時期の影響と考えられる。劣化度初期のケースでは材齢 28 日で実験を行ったため、促進膨張試験時よりゲルが生成され吸水膨張をはじめますが、劣化度小のケースでは供試体の暴露試験時においてすでにゲルの生成がはじまり、case14 においては 5 ~ 6 週において膨張が確認された。case14 では $\phi 100\text{mm}$ は養生期間 17 週で 0.254%, $\phi 68\text{mm}$ は養生期間 17 週で 0.107% となったが 17 週以降も膨張すると予想されるため補正を行った。具体的には膨張率は 16 ~ 17 週において 0.07% 増加が確認された。この増加率を用いて、簡便的に 17 ~ 26 週まで延長させ、最終膨張量は 0.335% ($0.254 + 0.07 \times 9$) となった。また、劣化度小においても、劣化度初期と同様に、コア径が大きいほど、膨張量が大きくなることを確認され、case14 の $\phi 68\text{mm}$ は $\phi 100\text{mm}$ に対して 42% ($0.107 / 0.254$) の膨張率となった。

ついで図-13 に劣化度大の Case11 について説明する。case11 では養生期間 4 ~ 6 週において膨張しはじめていることが確認された。これは、前述と同様に、供試体暴露試験時から既にゲルが形成され、膨張が開始されたためであると考えられる。case11 では養生 17 週で $\phi 100\text{mm}$ は 0.144%, $\phi 68\text{mm}$ は 0.061% となった。26 週の予想膨張量は $\phi 100\text{mm}$ で 0.22%, $\phi 68\text{mm}$ で 0.11% となった。劣化度大においても、劣化度初期および劣化度小と同様に、コア径が大きいほど、膨張量が大きくなることを確認され、case11 の $\phi 68\text{mm}$ は $\phi 100\text{mm}$ に対して 17 週養生期間において 42% ($0.061 / 0.144$) の膨張率となった。

6. 供試体膨張と全膨張量の関係性について

図-14 に $\phi 100\text{mm}$ に対する供試体残存膨張量と採取コア全膨張量の関係について示す。実験供試体の最終膨張量は暴露日数 1500 日の膨張量 5500μ が暴露日数 1800

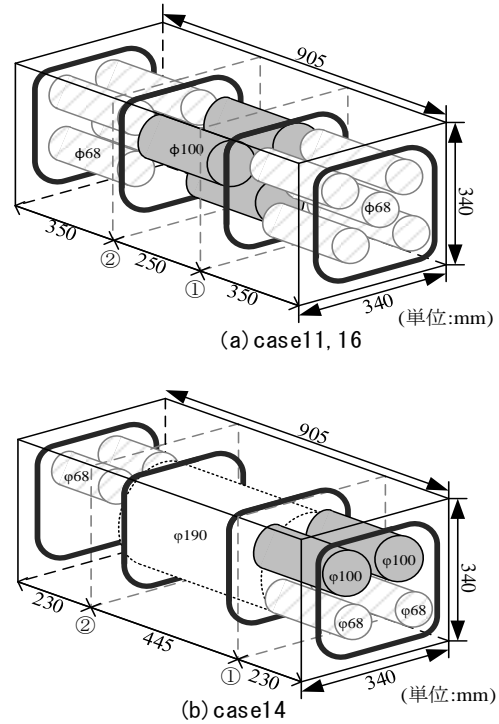


図-10 コア採取位置

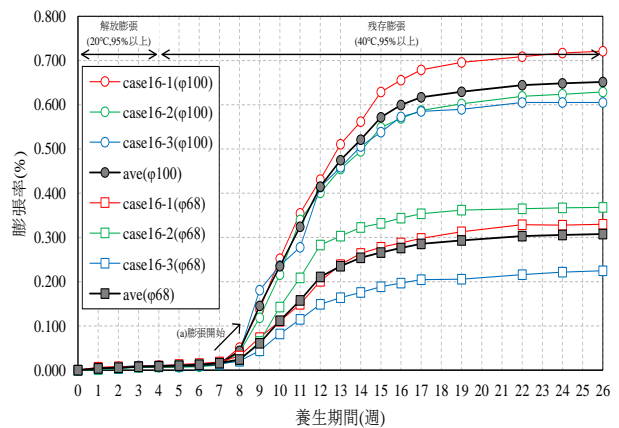


図-11 膨張量試験結果 (Case16)

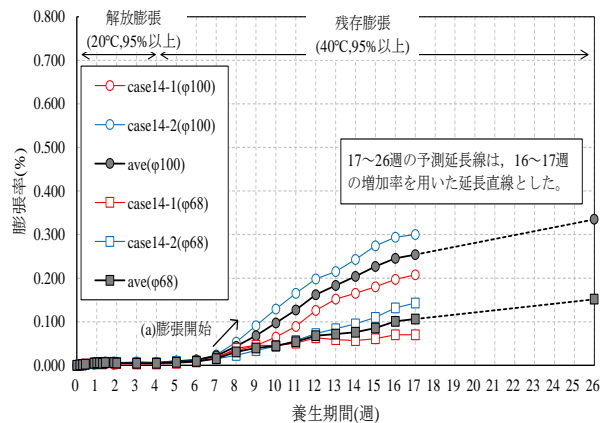


図-12 膨張量試験結果 (Case14)

日まで増加するとして 7200μ と仮定した。ついで、**図-14** の供試体残存膨張量（直線 A）は、膨張量 0.72% 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。なおこの値は劣化度初期の Case16（材齢 28 日）の全膨張量の最大値と一致した値となっている。

図中に示すとおり、コアの全膨張量は供試体残存膨張量に対して、case16(0.65/0.72=0.90), 17(0.97), 14(0.72), 11(1.29)の比率になっており、両者の関係は傾向としては一致している。特に、後述の $\phi 68\text{mm}$ に比較して $\phi 100\text{mm}$ においては、コアの全膨張量から ASR の劣化進展が予測可能と考えられる。

図-15には $\phi 68\text{mm}$ に対する供試体残存膨張量と採取コア全膨張量の関係について示す。**図中**の直線 B は、コア $\phi 68\text{mm}$ の全膨張量と比較するため、直線 A に対して $\phi 100\text{mm}$ と $\phi 68\text{mm}$ のコア体積比の 0.46 を乗ずることで算出した。**図中**よりコアの全膨張量は供試体残存膨張量に対して、膨張が見られなかった case2 以外では case16(0.94), 17(1.41), 1(0.48), 14(0.68), 3(0.51)の比率となっており、 $\phi 100\text{mm}$ より両者の差が大きくなった。これは、 $\phi 68\text{mm}$ ではコア体積が小さいため、アルカリ量の溶脱の影響が大きく、膨張量の絶対値が小さくなり、またばらつきが生じやすいため、 $\phi 100\text{mm}$ よりも両者の差が大きくなったと考えられる。よって $\phi 68\text{mm}$ ではばらつきが $\phi 100\text{mm}$ と比較して大きいため、コア 3 本で適切な評価を行うことは比較的難しいと考えられる。

7. 溶脱について

図-16に case16 $\phi 100\text{mm}$ の促進膨張試験実施前後の水溶性アルカリ量分析結果を示す。**図**に示すとおり、促進膨張試験前においてアルカリ量分析を実施した結果、アルカリ量は 6.7kg/m^3 となり、打設時から 1.3kg/m^3 のアルカリ量の溶脱が確認された。これは供試体の暴露試験中において、ASR が進行したことによるゲルの固定化や雨天などによるアルカリの溶脱による影響が考えられる。さらに促進膨張試験後においてアルカリ量分析を実施した結果、アルカリ量はコア中央部 4.1kg/m^3 、中間部 3.5kg/m^3 、表面部 1.4kg/m^3 となり、促進試験前よりも中央部で 39% 低下、中間部では 48% 低下、表層部では 79% 低下している。この結果からアルカリはコンクリート表面から溶脱してゆく傾向となっている。

図-17は $\phi 68\text{mm}$ の水溶性アルカリ量分析結果を示す。**図**より促進膨張試験前においてアルカリ量分析を実施した結果、アルカリ量は 6.2kg/m^3 となり、 $\phi 100\text{mm}$ と概ね一致している。その後、促進膨張試験後においてアルカリ量分析を実施した結果、アルカリ量はコア中央部

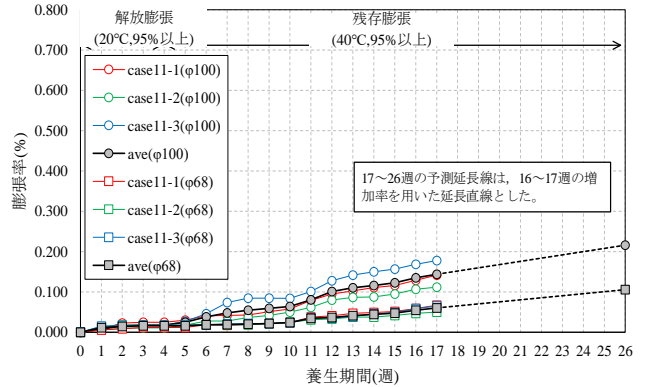


図-13 膨張試験結果 (Case11)

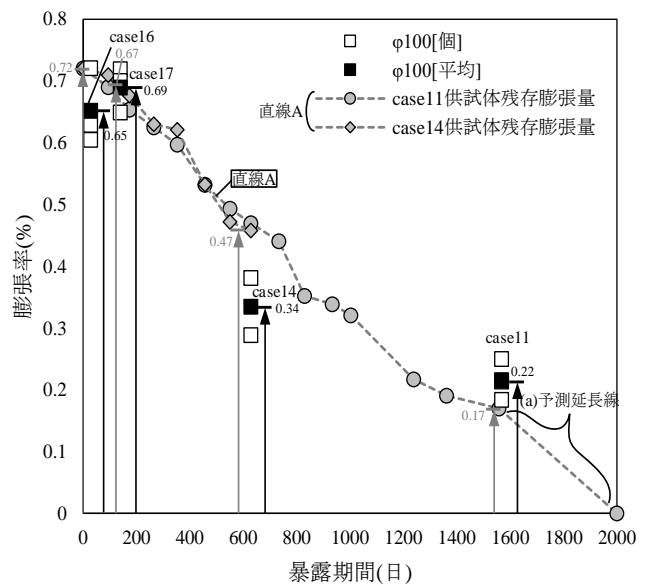


図-14 残存膨張量と採取膨張量 ($\phi 100\text{mm}$)

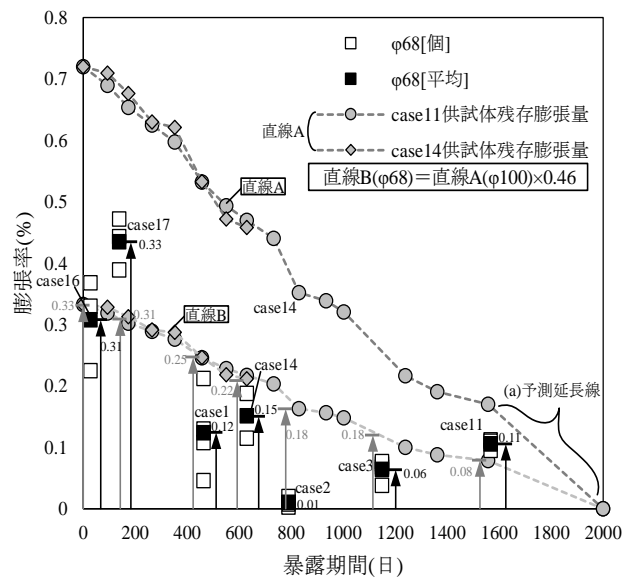


図-15 残存膨張量と採取膨張量 ($\phi 68\text{mm}$)

3.2kg/m³, 表層部 1.2kg/m³ となり, 促進膨張試験前よりも中央部は 48%低下, 表層部では 81%低下していることが確認された。

φ 68mm と φ 100mm のアルカリ量の溶脱は平均値と比較すると, φ 68mm は 65%低下, φ 100mm は 55%低下となり, φ 68mm の方が溶脱の影響が大きいことが確認された。さらに, 中央部のみのアルカリ量の溶脱の影響を比較した結果, φ 68mm は 48%低下, φ 100mm は 39%低下と, φ 68mm の方が溶脱の影響が大きいことが確認された。

このことから, アルカリはコンクリート表面から溶脱していく傾向があると考えられ, コア径が大きいほどコア中央部のアルカリ量の溶脱は小さくなると推定される。したがって, 促進膨張試験後における φ 100mm のアルカリ量は 3.0kg/m³, φ 68mm のアルカリ量は 2.2kg/m³ となり, φ 68mm は φ 100mm に対して約 70%のアルカリ量となった。

促進膨張試験においては, φ 68mm の膨張量は φ 100mm の約 46%の膨張量となり, アルカリ量の比率とはやや異なるが, アルカリ量が少ない φ 68mm で膨張量が小さい傾向の整合性が確認された。

8. 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。劣化度大, 中, 小, 初期の ASR 供試体に対して, 径の違うコアで全膨張量試験を行い, 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) 代表的な case14 試験体 (劣化度小) は暴露期間 629 日でひび割れ密度 1.98m², case11 試験体 (劣化度大) は暴露期間 1568 日で 7.80m² であり, 暴露日数の経過とともにひび割れの進展が確認された。
- 2) 膨張日数 629 日の case14 供試体から φ 68mm, φ 100mm コアを 2 本ずつ採取し JCI-DD 法によって全膨張量試験を実施した。φ 68, φ 100mm コアの膨張量の平均値はそれぞれ養生期間 17 週で 0.107%, 0.254% となり φ 68mm は φ 100mm よりも小さくなっていた。
- 3) 同様に φ 100mm コアの全膨張量はコンクリートゲージにより計測された供試体の残存膨張量に対して 0.72~1.29 の比率になっており φ 100mm 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

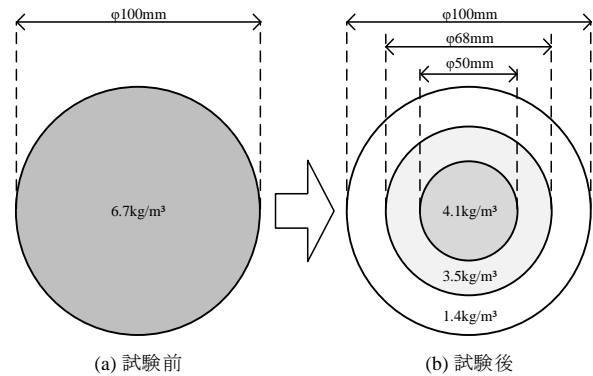


図-16 φ 100mm の水溶性アルカリ量分析結果

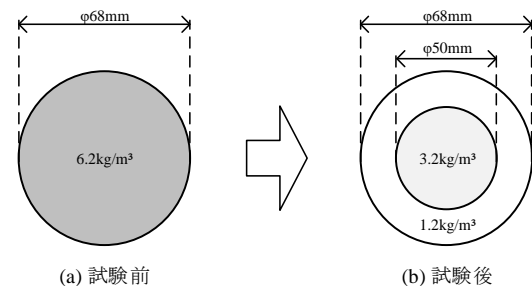


図-17 φ 68mm の水溶性アルカリ量分析結果

験では φ 68mm コアは, φ 100mm コアよりも, アルカリ溶脱による膨張量の低下の影響を大きく受け, 膨張量の絶対値が小さくなり, またばらつきが生じやすい結果となった。

参考文献

- 1) 富田譲, 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) 三浦正嗣, 幸左賢二, 久利良夫, 川島恭志, ASR 構造物より採取したコアの残存膨張量の適用性評価 第 15 回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.101-106, 2006.
- 3) 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想, コンクリート年次論文集, Vol.12, No.1, pp.811-814, 1990.
- 4) 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.