

論文 ASR が RC 供試体の内部コンクリートの圧縮特性に与える影響

矢野 佑輔*1・幸左 賢二*2・合田 寛基*3・古田 早織*4

要旨: 自然暴露を実施した RC 供試体から $\phi 190\text{mm}$ のコアを採取し、圧縮強度試験を実施した。その結果、暴露日数 1845 日が経過した供試体の圧縮強度は健全値に対して 59%の値となり、配筋条件下の内部コンクリートにおいても、強度の低下が確認された。これは、ASR によってコンクリート内部に発生したひび割れが、荷重による破壊線と重なることから、強度が低下したと考えられる。また、コア側面の内部ひび割れ密度が 9m^2 までは、圧縮強度、弾性係数、及び吸収エネルギー面積は健全値に対して、それぞれ約 60, 55, 69%の値まで低下したが、 9m^2 以降はその値を一定に保持する傾向が確認された。

キーワード: ASR, RC, 暴露試験, 力学的特性, 圧縮強度, ひび割れ

1. はじめに

多機関の調査結果から、アルカリ骨材反応 (以下、ASR) による劣化を生じた構造物において、コンクリートの圧縮強度や弾性係数が低下していることが報告されている^{1) 2)}。このような ASR がコンクリートの力学的特性に及ぼす影響について様々な検討を行っているが、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ のシリンダーを用いて、かつ、促進試験下での実験が多い。そのため、自然環境下における経年劣化の進展や、鉄筋拘束を受けた場合の内部コンクリートの力学的特性の変化については、現在まで十分な知見が得られていない。

そこで、著者らは、主鉄筋と帯鉄筋を配筋した供試体を複数作製し、自然暴露を実施することで、ASR による劣化性状について検討を行った。図-1 に研究フローを示す。具体的な検討手法は、まず、自然暴露した供試体の外観ひび割れから ASR が進展した劣化度の判定を行った。次に、暴露が終了した供試体から $\phi 190\text{mm}$ のコアを採取し、内部ひび割れ観察と圧縮強度試験を行い、経年変化による内部ひび割れと外観ひび割れの進展比較、力学的特性の低下と外観・内部ひび割れの関係性について検討を行った。なお、本論文では、暴露開始から 28, 550, 629, 1168, 1523, 1538, 1845 日が経過した 7 つの供試体を対象に検討を行っている。

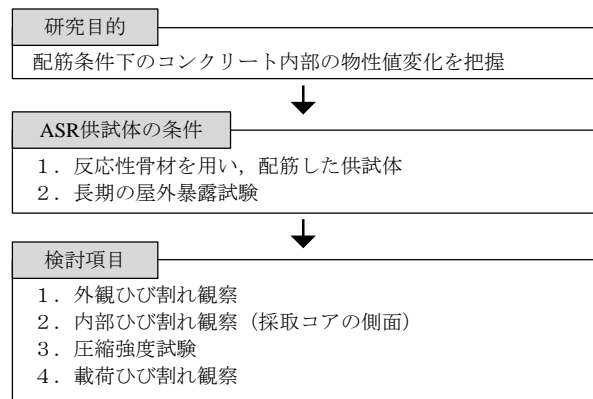


図-1 研究フロー

表-1 供試体一覧

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	
V	15	2016/10/19	1246	中	シリーズ I の追加実験 残存膨張量
	16		28	初期	
	17		139	小	
	18		暴露中		
	19		暴露中		
	20		暴露中		

■ : 検討供試体

2. 実験概要

2.1 供試体概要

表-1 に供試体一覧を示す³⁾。著者らは、これまでに、合計 20 体の実験供試体を作製した。その内訳は、外観損傷と採取コアの方向の違いによるコンクリート物性

値について検討を行ったシリーズ I (case1~3) の 3 体、外観損傷と内部損傷の関係について検討を行ったシリーズ II (case4~6) の 3 体、鉄筋損傷と供試体の劣化性状の関

*1 九州工業大学大学院 工学府 建設社会工学専攻 (学生会員)

*2 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)

*3 九州工業大学 工学部建設社会工学科 准教授 工博 (正会員)

*4 株式会社中研コンサルタント 大阪技術センター 構造部 コンクリートグループ (非会員)

係について検討を行ったシリーズⅢ(case7~9)の3体、シリーズⅡの追加実験及び残存膨張について検討を行ったシリーズⅣの5体、シリーズⅠの追加実験及び残存膨張について検討を行ったシリーズⅤの5体である。なお、各供試体の劣化度の評価については文献³⁾を参考に、ひび割れ幅 0.20mm 以上の外観ひび割れ密度が 0~2m²/m² を劣化度小、2~5m²/m² を劣化度中、5m²/m² 以上を劣化度大と定義している。表-2 に実験ケースを示す。本論文では、case4, 5, 6, 7, 8, 10, 14 の7つの供試体を対象に、供試体からφ190mmのコアを採取し、圧縮強度試験を実施した。ここでNo.7, 8は代表ケースとして詳細な分析を加えている。なお、採取スペースの関係上、載荷本数1本で評価している。また、case6, 7, 8, 10, 14のφ190mmのコアに対しては、コア側面に発生した内部ひび割れの観察を行い、内部・外観ひび割れの関係性、内部ひび割れと圧縮強度の関係性について検討を行った。28日養生供試体を劣化度初期と定義している。

図-2に供試体形状を示す。供試体断面は340×340mmの正方形断面とし、かぶり厚さは20mmを設けた。また、シリーズⅠ~Ⅲの供試体長さは670mm、シリーズⅣ,Ⅴの供試体長さは905mmとした。なお、主鉄筋にはD19、帯鉄筋には鉄筋破断を模擬しD16(旧基準)およびD10(現行)を用いた⁴⁾。

作製した供試体は、約1ヶ月間の室内養生の後、日当たりの良い場所に設置し、屋外暴露試験を実施した。なお、気象庁が公表している過去の気象データから、供試体の暴露期間中の気象環境は、平均気温16.7℃、年平均降水量1703mm、年平均日照時間1783時間(屋外暴露試験を実施した2007年~2016年の期間における北九州市八幡の年平均値)となっている。

表-3にコンクリート配合を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比は46%(=175/381)とした。反応性骨材の岩種はいずれも安山岩とし、細骨材に長崎県産砕砂を60%、粗骨材には北海道産砕石を50%使用した。また、ASRの促進を目的とする添加剤として、コンクリート中における等価アルカリ量を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⁴⁾。

2.2 外観ひび割れ状況

外観ひび割れは、供試体の東面、西面、上面の3側面を対象に、ひび割れ幅、ひび割れ長さの計測を行った。ひび割れ幅の計測は、クラックスケールを用いて行った。ひび割れ長さの計測は、幅0.05mm以上のひび割れを供試体に直接マーキングした後、写真撮影を行い、パソコンのアプリケーション上でトレースすることにより、長さを求めた。

図-3にひび割れ密度の経時変化を示す。ひび割れ密

表-2 実験ケース

case	暴露期間(日)	劣化度	圧縮強度試験	コア側面のひび割れ観察
4	550	中	1本	—
5	1168	大	1本	—
6	1538	大	1本	○
7	1845	大	1本	○
8	1523	大	1本	○
10	28	初期	1本	○
14	629	小	1本	○

■ : 代表ケース

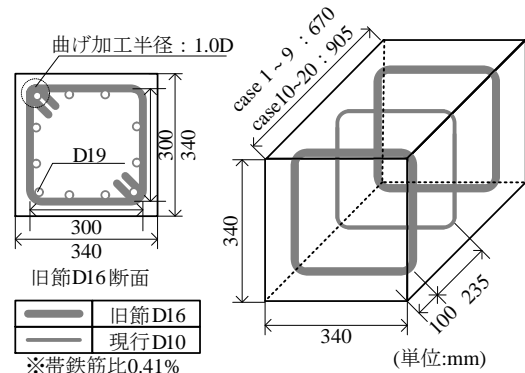


図-2 供試体形状

表-3 コンクリート配合

水	セメント	単位量 (kg/m ³)				ASR促進剤 (Na ₂ Oeq) (kg/m ³)	
		細骨材		粗骨材			混和剤
		反応性	非反応	反応性	非反応		
175	381	431	287	509	509	1.14	8.0

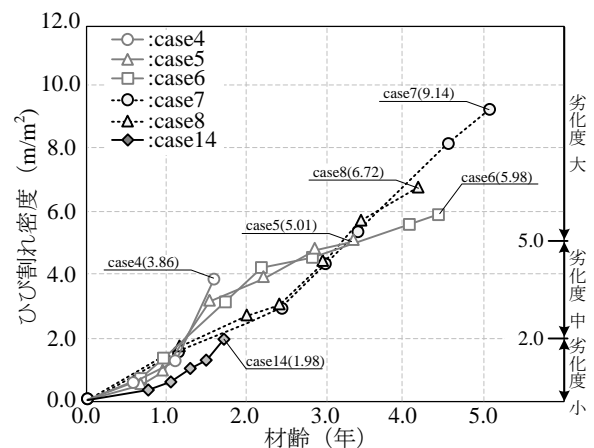


図-3 ひび割れ密度の経時変化

度は、幅 0.20mm 以上のひび割れを対象に、ひび割れ総延長を求め、対象面積で除すことで算出した。

図-3に示すように、それぞれの供試体の経時変化は、材齢約1.5~3.0年において、ひび割れの進展傾向に若干の差が確認された。この要因としては、供試体を作製した時期、季節が異なったため、暴露期間中の湿度等の差が影響を及ぼしたと考えられる。最終的なひび割れ密度は、case14供試体では暴露日数629日で1.98m²/m²、case4供試体では550日で3.86m²/m²、case5供試体では1168日

で 5.01m^2 , case6 供試体では 1538 日で 5.98m^2 , case7 供試体では 1845 日で 9.14m^2 と確認された。

図-4 に暴露試験終了時における供試体の外観ひび割れ状況を示す。ここでは、代表として、劣化度小の case14 と劣化度大の case7 の東面のひび割れ状況を示している。

図中(1)より、劣化度小の case14 供試体では、部分的にひび割れが発生しており、特に、端部にひび割れが卓越している状況が確認された。これは、鉄筋拘束の影響が小さいことから、供試体端部で膨張が先行したと考えられる。一方、図中(2)より、劣化度大の case7 供試体では、全体的にひび割れが進展している状況が確認された。また、劣化の進展に伴いひび割れは軸方向に卓越しており、鉄筋による拘束の影響が確認された。

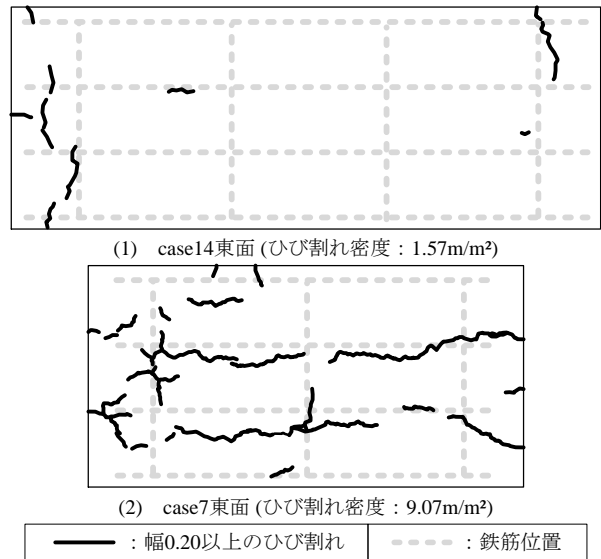


図-4 外観ひび割れ状況

3. 劣化度大の圧縮試験結果

暴露供試体から採取した $\phi 190\text{mm}$ のコアに対し圧縮強度試験を実施し、配筋条件下における内部コンクリートの力学的性能について検討を行った。本章では、劣化度が著しい case7, 8 および健全な case10 を代表ケースとして、説明を加える。

3.1 代表ケースの結果について

図-5 に劣化ケースと健全ケースのコア採取位置を示す。劣化ケースである case7, 8 は、図中(1)より、端部から $\phi 190\text{mm} \times 525\text{mm}$ の大型コアを採取した。一方、健全ケースである case10 (劣化度初期) では、図中(2)に示すように、まず、端部から 145mm 位置において供試体を切断し、2 つのブロックに分割した後に、それぞれのブロックからコアを採取した。採取したコアは $\phi 190\text{mm}$ コア 1 本、 $\phi 68\text{mm}$ コア 5 本となっている。

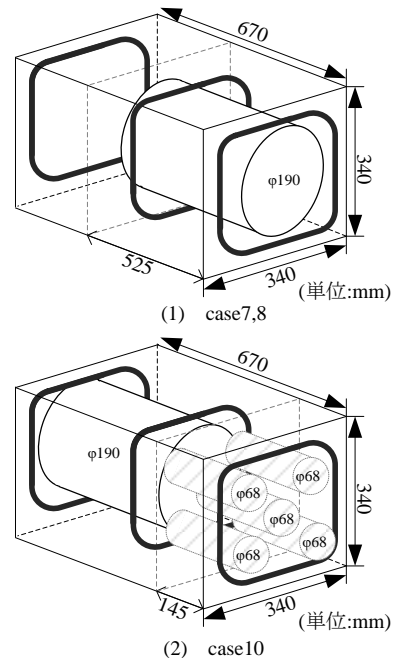


図-5 コア採取位置

図-6 に代表ケースの応力ひずみ曲線を示す。図より、健全ケースである case10 の応力ひずみは、ひずみが約 2300μ で最大応力 46.59N/mm^2 に達し、その後、応力は急激に低下していることが確認された。次いで、劣化ケースである case7, 8 の応力ひずみは、ひずみが約 2100μ で最大応力 $27.60, 27.28\text{N/mm}^2$ に達し、その後、応力は比較的緩やかに低下していることが確認された。以上より、配筋条件下の内部コンクリートの応力ひずみは、図中(A)に示すように、ASR 劣化が進展するに伴って、最大応力は低下し、さらに、初期勾配の傾きも小さくなることを確認された。

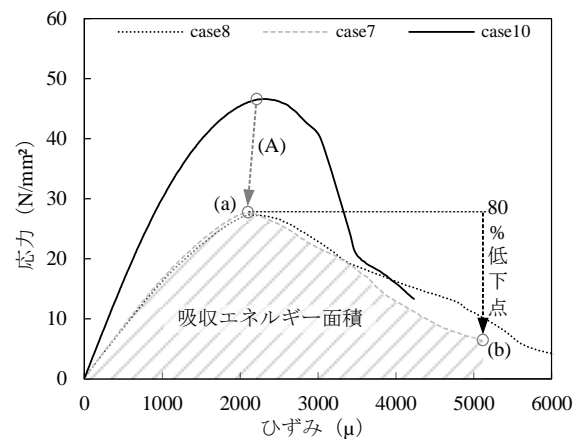


図-6 応力ひずみ曲線 ($\phi 190\text{mm}$)

表-4 に代表ケースの力学特性を示す。表には、圧縮強度、弾性係数、吸収エネルギー面積を示している。弾性係数は、最大応力の 1/3 までの傾きを用いる割線弾性係数とした。また、吸収エネルギー面積は、図-6 に示すように、点(a)である最大応力から 80%低下した点(b)までの応力ひずみ曲線の全面積として評価した。

表より、暴露日数 1523 日の case8 の圧縮強度は 27.28 N/mm²、弾性係数は 16.65 N/mm²、吸収エネルギーは 97×10⁻⁶ kN/mm² となった。これらは健全ケースの case10 に対して、圧縮強度は 59%、弾性係数は 51%、吸収エネルギーは 76%となった。暴露日数 1845 日の case7 の圧縮強度は 27.60 N/mm²、弾性係数は 17.13N/mm²、吸収エネルギーは 85×10⁻⁶ kN/mm² となった。これらは健全ケースの case10 に対して、圧縮強度は 59%、弾性係数は 53%、吸収エネルギーは 66%となった。

3.2 ASR による内部ひび割れの影響

本節では、ASR による内部ひび割れと圧縮強度の関係性について検討を行った。具体的には、コア側面に発生した内部ひび割れと载荷によって発生する载荷ひび割れに着目し、両者の重なる割合から圧縮強度が低下する要因について検討を行った。

図-7 にコア採取直後の内部ひび割れ状況を示す。図には、幅 0.20mm 以下、0.20mm 以上のひび割れを区分し、表記している。図中(1)より、case8 のひび割れ状況は、幅 0.20mm 以下のひび割れと幅 0.20mm 以上のひび割れが全体的に同程度発生していることが確認された。図中(2)より、case7 のひび割れ状況は、case8 と比較し、幅 0.20mm 以下のひび割れと幅 0.20mm 以上のひび割れの両者ともに、増加していることが確認された。また、ひび割れ密度は、case8 では 8.90 m/m² であったが、case7 では 14.19 m/m² と大きく進展しており、外観ひび割れと同様、配筋条件下の内部コンクリートにおいても ASR によるひび割れ進展が確認された。

川島らの研究⁹⁾では、载荷前の内部ひび割れが圧縮強度低下に与える影響を定量的に評価するために、破壊線に重なる内部ひび割れの割合を用いて、検討を行った。川島らは、ASR の膨張初期(1000μ 以下)で微細ひび割れが発生した時の圧縮強度低下率が 10%であったことから、目視可能なひび割れがないコンクリート部でのせん断抵抗の負担率は 0.9 と仮定し、また、健全供試体の载荷試験により、100%のせん断型破壊ひび割れが形成された時点での基準圧縮強度が 0.48 であったことから、ひび割れ部の摩擦による荷重負担係数はこの値を採用し、圧縮強度低下割合を算出した。その結果、各膨張段階による圧縮強度基準比を概ね実測値に近い値で評価することが可能であることを示した。

本実験においても、破壊線に重なる内部ひび割れの割合を用いて、圧縮強度低下割合を算出した。具体的な評価手法は、図-8(1)に示すように、载荷による破壊線から±10mm の範囲内⁴⁾に対して、内部ひび割れが存在する場合、その内部ひび割れの方向性を考慮し、破壊線の進展方向に投影し、両者が重なる割合と重ならない割合を算出した。

表-4 圧縮試験結果

供試体	暴露日数 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	吸収エネルギー面積 (×10 ⁻⁶ kN/mm ²)
case10	28	46.59	32.37	128
case8	1523	27.28	16.65	97
case7	1845	27.60	17.13	85

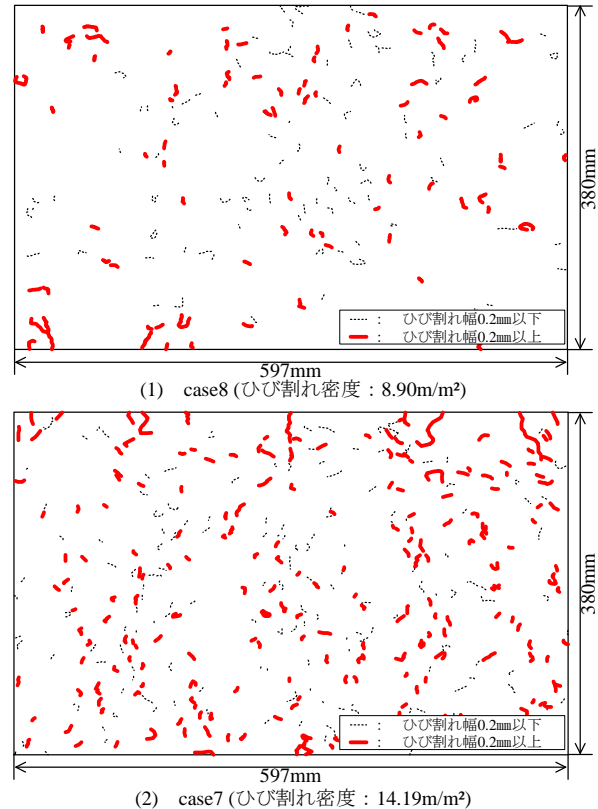


図-7 内部ひび割れ状況 (コア側面の展開図)

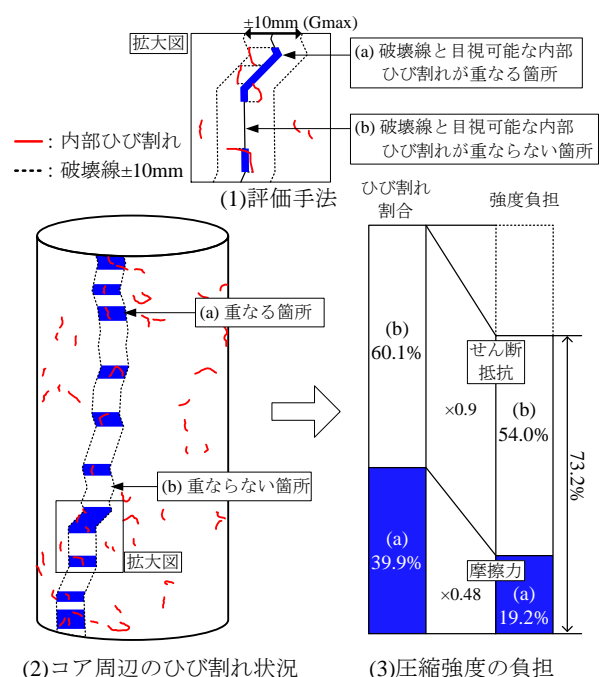


図-8 ひび割れ状況と強度低下率(case8)

図-8 に暴露日数 1523 日の case8 のコア側面ひび割れ状況から推定した強度低下率の結果、図-9 に 1845 日の case7 のひび割れ状況から推定した強度低下率の結果を示す。図-8 より、case8 は内部ひび割れと破壊線が重なる割合は 39.9%となり、重ならない割合は 60.1%となった。前述した既往の評価方法で分析を行った結果、摩擦力が負担する強度は 19.2%、せん断抵抗が負担する強度は 54.0%であり、健全値に対して 73.2% (=19.2+54.0)の強度になると推定される。実際の case8 の強度は健全ケースである case10 に対して、59% (=27.28/46.59×100)の値であり、推定値 73.2%は実験値よりもやや大きくなっている。一方、図-9 より、case7 では case8 よりひび割れ密度が大きいので、内部ひび割れと破壊線が重なる割合は 49.7%となり、重ならない箇所が 50.3%となった。既往の評価方法で分析を行った結果、摩擦力が負担する強度は 24.1%、せん断抵抗が負担する強度は 44.8%であり、健全値に対して 68.9% (=24.1+44.8)の強度になると推定される。実際の case7 の強度は健全ケースである case10 に対して、59% (=27.60/46.59 ×100)の値であり、推定値 68.9%は実験値よりもやや大きくなっており、目視観察困難なマイクロクラックなどの影響も考えられる。

4. 経年劣化評価

本章では、外観ひび割れと内部ひび割れの進展の関係性、また、内部ひび割れが圧縮強度、弾性係数、及び吸収エネルギー面積に与える影響について検討を行った。

図-10 に外観ひび割れと内部ひび割れの関係を示す。図中には、コア側面に発生した内部ひび割れ密度と、過年度実施した供試体を断面方向で切断した面 (以下、切断面) の内部ひび割れ密度を示している。図より、コア側面に発生した内部ひび割れ密度と、切断面に発生した内部ひび割れ密度は、ほぼ同様な増加傾向を示していた。これは、内部ひび割れのほとんどが骨材とモルタル部の境界に沿って発生していることから、明確な方向性が乏しいため切断面の差異の影響が小さかったと考えられる。また、幅 0.05mm 以上のひび割れ密度 (コア側面) は、外観ひび割れが増加するに伴い、急激に増加していることが確認される。さらに、外観ひび割れ密度が 2m/m² 以上になると、幅 0.20mm 以上のひび割れ密度 (コア側面) も増加していることが確認される。以上より、外観ひび割れの増加するに伴い、内部でも同様にひび割れ幅、ひび割れ長さがともに増加していることが確認された。

図-11 にコア側面の内部ひび割れと圧縮強度の関係を示す。図中には最小二乗法による直線 (以下、直線 A) と、実験値とその直線 A の差を表記している。図中より、case14 では直線 A に対し、+3.7N/mm² となっており、圧縮強度の低下が見られなかった。この要因は、図-4(1)

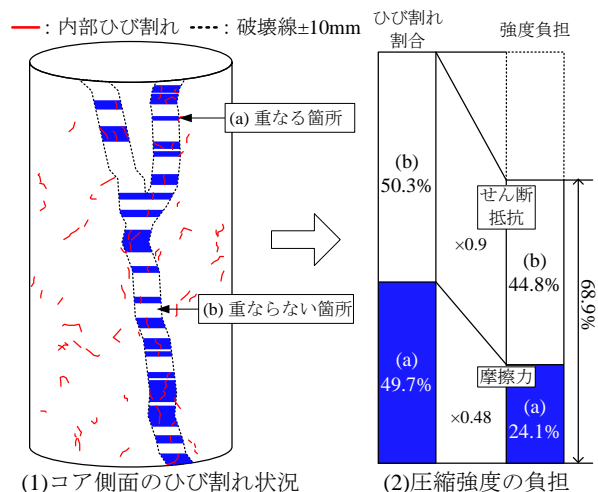


図-9 ひび割れ状況と強度低下率 (case7)

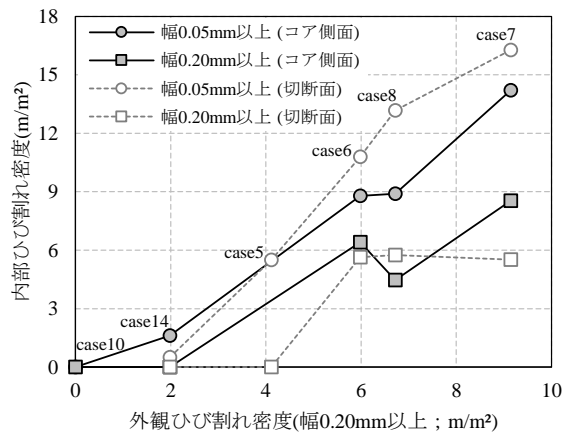


図-10 外観ひび割れと内部ひび割れの関係

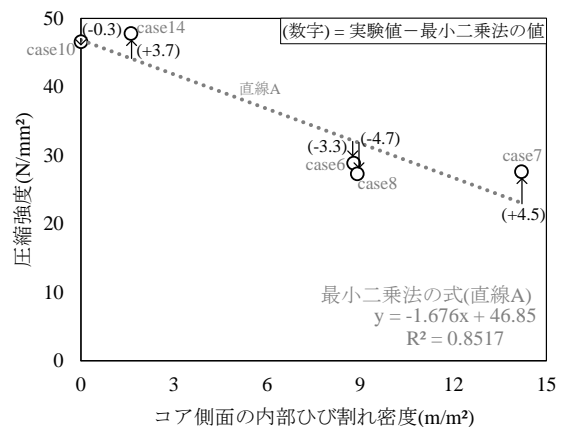


図-11 コア側面の内部ひび割れと圧縮強度の関係

より、コアを外観ひび割れが少ない供試体中央部からコアを採取したため、内部の劣化状況も小さかった可能性が挙げられる。また、内部ひび割れ密度が 9m/m² に達した時、圧縮強度は case10 に対して約 60%の値まで低下し、9m/m² 以降は約 60%の値を保持する傾向となった。この要因としては、内部ひび割れと破壊線が重なる割合が仮に 100%であった場合でも、圧縮強度は健全値に対して

48%の値で留まることから、ひび割れ部における摩擦抵抗の影響は大きく、強度は保持されることが挙げられる。

図-12 にコア側面の内部ひび割れと弾性係数の関係を示す。図中には最小二乗法による直線（以下、直線 A）と、実験値とその直線 A の差を表記している。図中より、case14 では直線 A に対し、 -3.0N/mm^2 となっており、劣化初期から弾性係数の低下が見られた。これは、従来から報告されているように、ASR の劣化初期において、圧縮強度よりも弾性係数の低下が顕著であることと一致している。また、弾性係数も、圧縮強度と同様に、内部ひび割れ密度が 9m^2 以降、概ね一定の値を保持する傾向となった。

図-13 にコア側面の内部ひび割れと吸収エネルギー面積の関係を示す。図中には最小二乗法による直線（以下、直線 A）と、実験値とその直線 A の差を表記している。図中より、吸収エネルギー面積は内部ひび割れ密度が 9m^2 まで直線 A と同様に単調に低下する傾向が確認された。しかし、 9m^2 以降、直線 A (case6 : $95.7 \times 10^{-6} \text{ kN/mm}^2$, case7 : $77.8 \times 10^{-6} \text{ kN/mm}^2$) に対して、case6 では小さくなり、case7 ではやや大きくなっていることが確認され、直線に比べると低下の勾配が異なっている。この要因として、圧縮強度もひび割れ密度が 9m^2 以降、一定の値を保持しており、また、図-11 に示すように、case7,8 の応力ひずみ曲線はほぼ同様な曲線を示しているため、吸収エネルギー面積はほぼ一定の値を保持されたと考えられる。

5. まとめ

著者らは、配筋した ASR 供試体を作製し、0~5 年に及ぶ屋外暴露試験を実施している。本稿では、暴露供試体からコアを採取し、圧縮強度試験を実施し、ASR が配筋条件下の内部コンクリートの力学特性に与える影響について検討を行った。

- 1) 暴露試験より、暴露日数 629 日で外観ひび割れ密度 1.98m^2 (case14)、550 日で 3.86m^2 (case4)、1168 日で 5.01m^2 (case5)、1538 日で 5.98m^2 (case6)、1845 日で 9.14m^2 (case7)と確認され、ASR による外観ひび割れ密度は、暴露日数の経過とともに進展した。
- 2) 暴露供試体から $\phi 190\text{mm}$ コアを採取し、圧縮強度試験を実施した。暴露日数 1845 日が経過した case7 供試体では健全な case10 に対して、圧縮強度は 59%、弾性係数は 53%、吸収エネルギー面積は 66%の値となり、配筋条件下の内部コンクリートにおいても、力学特性の低下が確認された。これは、ASR によってコンクリート内部に発生したひび割れが、荷重による破壊線と重なることから、強度が低下したと考えられる。

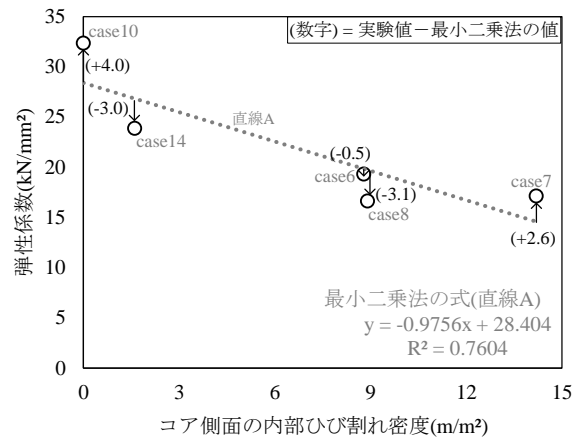


図-12 コア側面の内部ひび割れと弾性係数の関係

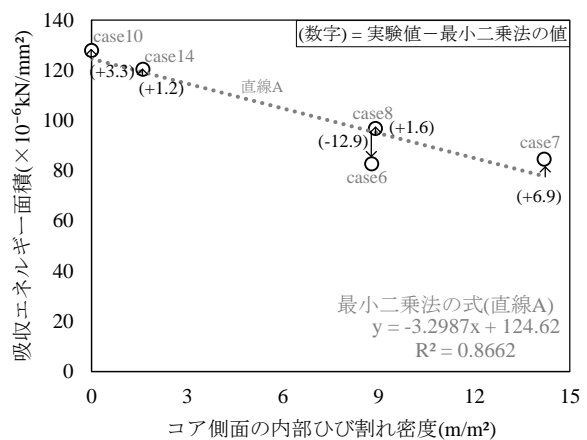


図-13 コア側面の内部ひび割れと吸収エネルギー面積の関係

- 3) コア側面の内部ひび割れ密度が 9m^2 までは、圧縮強度、弾性係数、及び吸収エネルギー面積は健全値に対して、それぞれ約 60,55,69%の値まで低下した。

参考文献

- 1)池富修, 大深伸尚, 久保善司, 鳥居和之: ASR が発生したコンクリート構造物の耐久性調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.1141-1146, 2001
- 2)野村倫一, 松田好史, 葛目和宏: ASR の影響を受けた構造物におけるコンクリートの力学的特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1273-1278, 2009
- 3)増田隆宏, 幸左賢二, 草野昌夫, 合田寛基: ASR 供試体を用いた実構造物の劣化状況に対する内部損傷評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1207-1212, 2009
- 4)九州工業大学: 小型 RC 供試体の ASR 劣化性状評価報告書, 2017
- 5)川島恭志, 幸左賢二, 松本茂, 三浦正嗣: 構造物の調査結果に基づいた ASR 劣化度の定量評価, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.1, pp.103-120, 2011