

論文 水中繰返し圧縮試験による ASR が生じたコンクリートの低サイクル圧縮疲労特性に関する研究

三木 朋広*1・西川 泰正*2

要旨： ASR が生じたコンクリートの繰返し荷重下における圧縮挙動に関する研究は少ないのが現状である。その中で本研究は特に水の影響に着目し、コンクリート円柱供試体を対象として水中圧縮疲労試験を行い、外部から供給される水が、ASR が生じたコンクリートの低サイクル圧縮疲労試験の結果に与える影響を検討した。供試体の損傷把握のために、載荷試験の前に超音波試験、ならびに表面観測からひび割れ密度を計測し、各供試体のコンクリートの劣化度を定量化し、それぞれの ASR による劣化の程度の経時変化を調べた。また、載荷実験によって、ASR による劣化の程度とコンクリートの低サイクル圧縮疲労特性の関係、特に繰返し載荷に伴う圧縮ひずみの増加量に対する水の影響を実験的に把握することができた。

キーワード： ASR, 水中圧縮疲労試験, 低サイクル圧縮疲労試験, 超音波伝播速度, ひび割れ長さ密度

1. はじめに

アルカリシリカ反応 (ASR) がコンクリート中で生じると、アルカリ成分と骨材中の鉱物との化学反応により骨材の内部やセメントマトリックスとの境界でゲルが形成され、そのゲルの吸水膨張によりコンクリートに有害な膨張や微細なひび割れが発生することがある。この ASR によるコンクリートの劣化が著しくなると、過大な膨張やひび割れなどが生じることによって、圧縮強度、静弾性係数、引張強度の低下がみられるが、特に静弾性係数が著しく低下することが知られている¹⁾。

実構造においては、道路・鉄道構造物の桁やスラブなどの部材では繰返し荷重を受けることになるが、ASR が生じたコンクリートの繰返し荷重下の挙動に関する研究は少ないのが現状である。その中でも宇治らの研究²⁾では、体積膨張率 0% (健全)、ならびに促進養生により 0.1%、0.3% と変化させて、ASR による劣化の進行によるコンクリートの疲労強度の低下を把握している。

ASR の反応進行については水の影響が大きい、既に ASR によってひび割れが生じたコンクリートにおいて、コンクリート内部の水分が低サイクル圧縮疲労試験時のひび割れ進展や破壊特性に影響を与えることが既往の研究³⁾によって明らかとなっている。本研究では、コンクリート外部からの水の供給を想定して、ASR 劣化した無筋コンクリート円柱供試体を対象として、水中と気中で圧縮疲労試験を行い、外部からの水の供給が ASR 劣化したコンクリートにおける低サイクル圧縮疲労特性に与える影響を詳しく検討した。

載荷試験前には、超音波伝播速度、ならびにひび割れ密度を計測し、低サイクル圧縮疲労特性と ASR による劣化の程度の関係について考察した。また材齢の異なる供

試体ごとに計測値を比較することで、ASR 劣化の程度の経時変化についても考察した。

2. 実験概要

2.1 供試体の概要

本研究では、ASR の反応性を有する骨材を用いたコンクリート (以下 ASR コンクリートと称す) の供試体 18 体を載荷試験の対象とした。供試体は断面直径 100 mm、高さ 200 mm の円柱とした。ASR コンクリートの配合表を表-1 に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、混和剤には AE 減水剤を使用した。粗骨材の最大寸法は 20 mm とした。ASR 劣化を再現するため、細骨材、粗骨材ともに、反応性を有する骨材を、反応性を示さない非反応性骨材と体積比 1:1 で混合して使用した。なお、ASR を促進するために、所定量の NaCl を練混ぜ時に添加した。

準備した ASR 促進供試体は、それぞれ材齢 3 ヶ月 (0.25 年) の供試体が 6 体、材齢約 3 年 6 ヶ月の供試体が 6 体、材齢約 7 年の供試体が 6 体である。各供試体は材齢シリーズ毎で異なるバッチで作製した。1 日材齢で脱型し、28 日間水中養生した後、所定の材齢まで屋外暴露した。各材齢シリーズで使用した供試体数を表-2 に示す。

供試体の名称は、後述する低サイクル圧縮疲労試験において、気中で載荷した供試体 9 体 (材齢 3 ケース×3 体) を D シリーズ、水中で載荷した供試体 9 体 (材齢 3 ケース×3 体) を W シリーズとした。それぞれの供試体名には、材齢 3 ヶ月の供試体には 0.25、材齢 3 年 6 ヶ月の供試体には 3.5、材齢 7 年の供試体には 7 とし、シリーズ番号を付している。以下、それぞれ 0.25 シリーズ、3.5 シリーズ、7 シリーズとする。

*1 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

*2 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 修士 (工学)

表-1 コンクリートの配合表 (ASR コンクリート供試体)

G _{max} (mm)	スランブ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
					W	C	S _n	S _r	G _n	G _r	NaCl	AE 減水剤
20	18	63	5.0	48	181	287	427	436	466	476	12.4	0.575

S_n: 非反応性細骨材, S_r: 反応性細骨材, G_n: 非反応性粗骨材, G_r: 反応性粗骨材

2.2 超音波試験の概要

水中圧縮疲労試験に先立って、各供試体の劣化度を把握するために非破壊試験として超音波試験を行った。超音波試験では超音波が円柱供試体を通過する時間を計測し、計測した数値を各供試体の高さで除した伝播速度を算出し、ASR 劣化度を示す指標の1つとした。なお0.25シリーズの伝播速度の平均値 4300 (m/s) を基準として各供試体の伝播速度の割合を算出し、ASR 劣化度として本論文に示すグラフ中に供試体名の最後の () 内に記載する。

2.3 ひび割れ長さ密度測定の概要

ひび割れ長さ密度の計測では、各供試体の側面を4分割し、1区間毎にデジタルカメラで撮影した(0.03mm/pix)。それぞれを平面と仮定して0.05 mm~0.1 mmの目視できるひび割れを下限とし、それ以上の幅のひび割れのみを対象としてMicrosoft Visio 2010を用いてひび割れのスケッチ図を作成した。0.25シリーズの供試体は目視できるひび割れは認められなかったため、それ以外のひび割れが観察できた供試体を対象としてひび割れを観察した。一例として、各材齢シリーズでそれぞれ4体のひび割れ状況を図-1に示す。この図を用いて、ひび割れに沿って描画した線の長さをソフトで計測し、その総延長をひび割れの長さとして求めた。この値を側面の表面積で除してひび割れ長さ密度を算出し、以後の検討でASR劣化度を示す指標の1つとした。

2.4 低サイクル圧縮疲労試験の概要

载荷試験には2000 kN 万能载荷試験機を用いて、载荷速度は10 kN/sec で試験を行った。供試体の圧縮ひずみ度は、供試体対角に2個の変位計を設置し、圧縮変形を供試体全長で除した値の平均値により求めた。

载荷応力について、ASR劣化によって各供試体の圧縮強度にばらつきが生じると考えられるが、統一条件下での疲労特性を把握するため、本研究と同様の配合のASRコンクリートを用いた著者らの研究⁴⁾における材齢約2年の実験値(ASR1200)を参考にして、全ての供試体で载荷試験時の圧縮強度を30 N/mm²と仮定して低サイクル圧縮疲労試験を行った。

载荷試験では、最初に比較的低い応力レベルの荷重として、設定した圧縮強度30 N/mm²に対する応力比25%

表-2 各材齢シリーズで使用した供試体数

シリーズ	超音波試験	ひび割れ密度測定
0.25	6体	ひび割れ無し
3.5	6体	6体
7	6体	6体

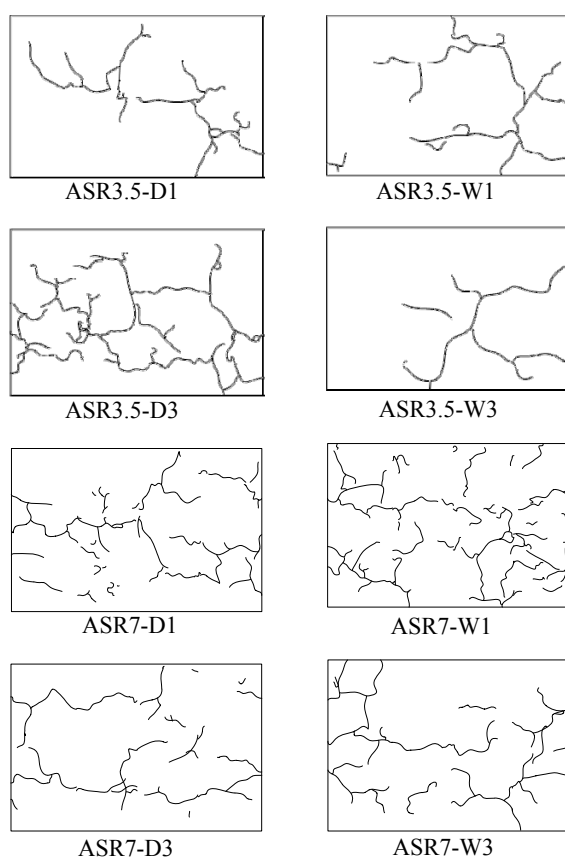


図-1 ひび割れ図 (円柱供試体側面展開)



図-2 水中圧縮疲労試験の様子

表-3 超音波伝播速度とひび割れ長さ密度

供試体名	伝播速度 (m/ssec)	ひび割れ長さ密度 (mm/mm ²)
ASR0.25-D1	4310	—
ASR0.25-D2	4300	—
ASR0.25-D3	4260	—
ASR0.25-W1	4220*	—
ASR0.25-W2	4300	—
ASR0.25-W3	4350*	—
0.25 平均	4290	—
標準偏差	21.5	—
ASR3.5-D1	3810	0.0137
ASR3.5-D2	3970	0.0180
ASR3.5-D3	4050*	0.0280*
ASR3.5-W1	3780*	0.0156
ASR3.5-W2	3910	0.0106
ASR3.5-W3	3980	0.0101*
3.5 平均	3920	0.0160
標準偏差	66.7	0.0027
ASR7-D1	2350	0.0221
ASR7-D2	3150	0.0259
ASR7-D3	3330*	0.0190*
ASR7-W1	1760*	0.0325*
ASR7-W2	3100	0.0292
ASR7-W3	3180	0.0227
7 平均	2810	0.0252
標準偏差	344.7	0.0029

* 各材齢シリーズの測定値の最大値と最小値

～40%の荷重で100回繰返し载荷を行い、一度除荷した後、応力レベルを上げて応力比40%～70%の荷重で200回繰返し载荷を行った。その200回目の载荷終了した後、一度除荷し、軸方向変位を計測した。また、300回の载荷終了までに応力低下しない場合は、301回目の载荷で最大の応力度に至るまで単調载荷した。

使用する供試体は、Dシリーズでは、試験前に24時間、屋内に移して乾燥させた状態の後、気中で载荷試験を行った。一方、Wシリーズの供試体は载荷試験前に24時間水に浸けておき、専用の水槽を用いて水中で圧縮载荷試験を行った。Wシリーズの载荷の様子を図-2に示す。载荷試験で使用した水槽は、直径140mm、長さ180mmの亚克力製の円筒を、厚さ2mm、240mmの正方形の鋼板に接着して作製した。この水槽を用いて供試体の高さ方向に約160mmまで水に浸けた状態で载荷試験を行った。なお、本試験前に模擬試験を実施し、試験中に加力等によって水槽が変形しないことを確認した。

3. 超音波伝播速度とひび割れ長さ密度の測定と考察

超音波伝播速度、ならびにひび割れ長さ密度を表-3に示す。なお、表中に示す各材齢シリーズの平均値は圧縮疲労試験に用いた各材齢シリーズの供試体6体の平均値である。また、標準偏差は6体の供試体の結果のうち、最大値と最小値の供試体(表中で*を付した値)を除いた

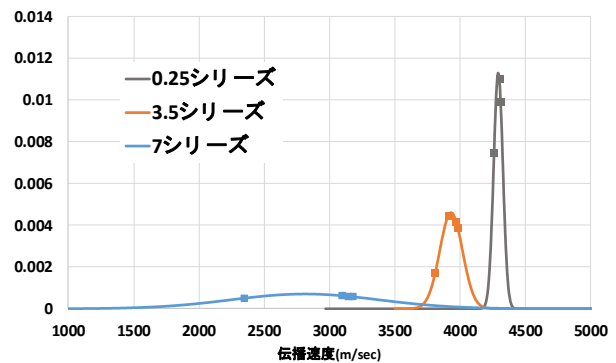


図-3 超音波伝播速度の正規分布曲線

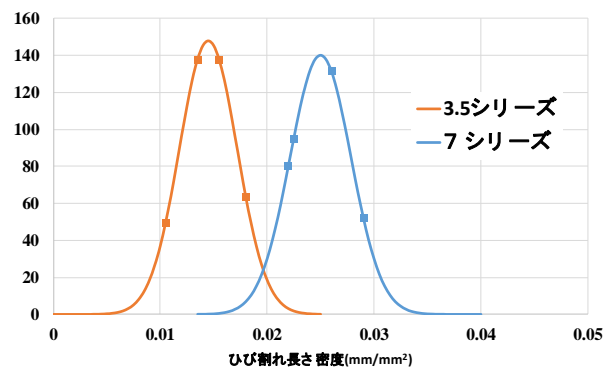


図-4 ひび割れ長さ密度の正規分布曲線

4体の測定値を用いて算出した数値である。ここで、超音波試験の結果では、供試体内部のひび割れの影響が見られ、超音波が供試体を通過する時間が長くなり、伝播速度が遅くなったと考える。

図-3に超音波伝播速度の正規分布曲線を、図-4にひび割れ長さ密度の正規分布曲線をそれぞれ示す。超音波伝播速度に関して、暴露期間が長いと、平均値が低い値を示したことから、超音波伝播速度を指標としたASR劣化は経時的に大きくなるのがわかる。また、材齢が長い7シリーズでは、ASR7-D1やASR7-W1のように極めて小さい値を示すものもあり、3.5シリーズと比較して標準偏差も大きな値を示したことから供試体ごとのばらつきも経時的に大きくなるのがわかる。

一方、ひび割れ長さ密度については、暴露期間が長いと、平均値が大きな値を示したことからひび割れ長さ密度を指標としたASRによる劣化度は、経時的に大きくなるのがわかる。しかし、その標準偏差は、材齢シリーズにかかわらずほぼ同程度の値を示したことから、ひび割れ長さ密度を劣化度の指標とすると材齢3.5～7年の間では供試体ごとのばらつきが経時的に増加しないことがわかった。つまり、ひび割れ長さ密度に比べて、超音波伝播速度のばらつきの材齢に伴う増加量がかなり大きいことがわかる。これは、供試体表面に現れるひび割れの総数がある一定の値以上にはならず、本研究に用いた供

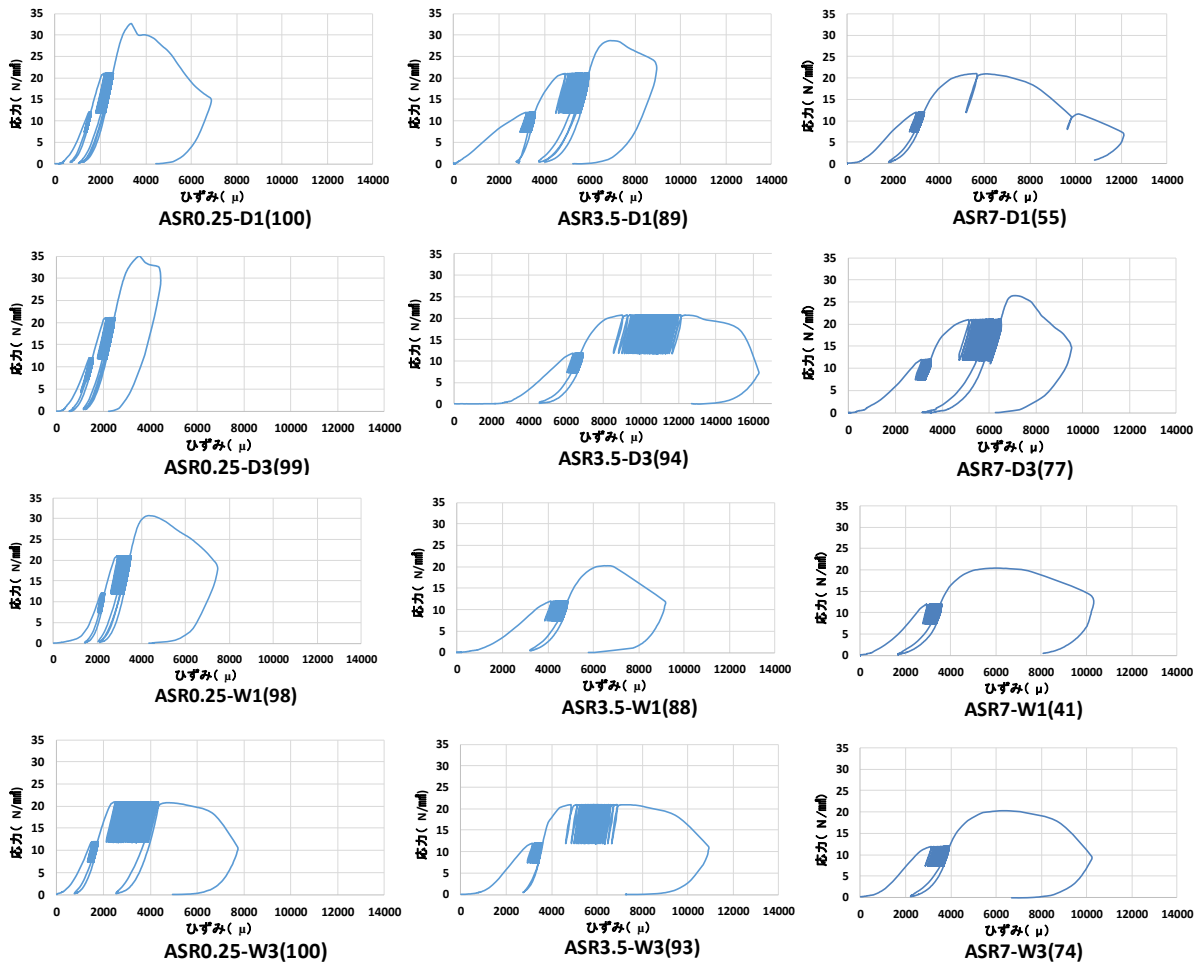


図-5 応力-ひずみ関係

試体の測定値がその値に近づきそれ以上の箇所にひび割れが発生しなかったためであると考えられる。それに対してコンクリート内部のひび割れは、供試体表面と比較して進展していたため、材齢7年の時点でも伝播速度の標準偏差、つまりばらつきが大きくなったと推察できる。

ここで、材齢7シリーズに関しては、超音波伝播速度とひび割れ長さ密度に相関がある測定結果であったが、3.5シリーズに関しては伝播速度とひび割れ長さ密度に相関が認められなかった。このことから、材齢が長くなるほど、超音波伝播速度とひび割れ長さ密度に関する指標が、同様の傾向となることが推察される。

4. 低サイクル圧縮疲労試験の結果と考察

4.1 荷重試験結果

本研究の圧縮疲労試験で得られた各供試体の応力-ひずみ関係で、各材齢の試験結果のうち、超音波試験のASRによる劣化の指標でのASR劣化の大きい供試体と小さい供試体の応力-ひずみ関係を図-5に示す。また、供試体が破壊するまでの荷重回数と最大応力度、最大ひずみ度を表-4に全データをまとめて示す。

(1) 0.25 シリーズ

ASR0.25-W3を除く5体の供試体は所定の繰返し荷重試験中、破壊しなかったため、301回目の荷重で単調荷重し、破壊させた。ASR0.25-W6は40%~70%の200回目の荷重で破壊しなかったため、一度、除荷し、201回目の荷重で上限応力に達する前に破壊した。

(2) 3.5 シリーズ

Dシリーズの供試体においてASR3.5-D3は151回目の荷重で上限応力に達する前に破壊し、ASR3.5-D3を除く2体の供試体は所定の繰返し荷重試験中、破壊しなかったため、301回目の荷重で単調荷重し、破壊させた。それに対して、Wシリーズはそれぞれ、ASR3.5-W1は101回目に、ASR3.5-W2は118回目に、ASR3.5-W3は127回目に上限応力に達する前に破壊した。

(3) 7 シリーズ

Wシリーズの供試体は、全て100回の繰返し荷重後、応力比40%~70%の101回目の荷重の上限応力に達する前に破壊した。一方、Dシリーズの供試体の内、ASR7-D1は応力比40%~70%の102回目の荷重の上限応力に達する前に破壊し、ASR7-D2とASR7-D3は所定の繰返し荷重中、破壊しなかったため、301回目の荷重で単調荷重

表-4 載荷試験によって得られた各種比較パラメータ

供試体名	シリーズ	繰返し回数	最大応力度 (N/mm ²)	初期増加ひずみ(μ)	増分ひずみ(μ)	残留ひずみ(μ)	最大ひずみ(μ)
ASR0.25-D1(100)	0.25	301	32.6	1500	80	670	3380
ASR0.25-D2(100)		301	33.1	1290	185	475	3470
ASR0.25-D3(99)		301	35.0	1410	140	530	3530
ASR0.25-W1(98)		301	30.7	2170	150	1420	4330
ASR0.25-W2(100)		301	32.0	2530	230	1610	4410
ASR0.25-W3(100)		201	20.9	1510	250	755	4730
ASR3.5-D1(89)	3.5	301	28.7	3190	415	2850	7540
ASR3.5-D2(92)		301	26.6	3190	485	3000	6950
ASR3.5-D3(94)		151	20.7	6370	520	4920	12500
ASR3.5-W1(88)		101	20.2	4140	725	3210	6560
ASR3.5-W2(91)		118	20.8	3030	450	2360	7030
ASR3.5-W3(93)		127	20.9	3160	395	2740	7130
ASR7-D1(55)	7	102	20.9	3020	280	1820	6020
ASR7-D2(73)		301	27.3	2700	315	1050	7000
ASR7-D3(77)		301	26.4	3110	325	—	7140
ASR7-W1(41)		101	20.4	2940	665	1670	6100
ASR7-W2(72)		101	18.2	3180	1090	1780	6640
ASR7-W3(74)		101	20.4	3120	800	2220	6260

し、破壊させた。

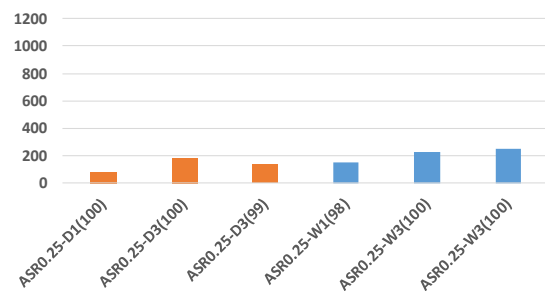
4.2 考察

低サイクル圧縮疲労試験の結果を用いて考察するにあたり、前出の表-4 に示す以下の載荷試験によって得られた比較パラメータに着目して考察する。

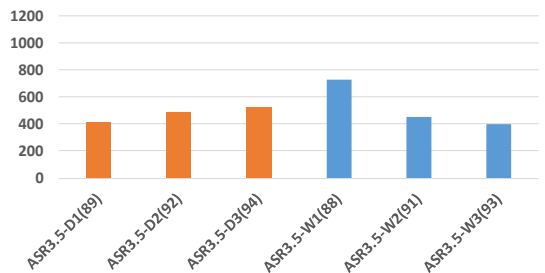
- (1) 初期増加ひずみ: 載荷前の状態から応力比 25%~40% の 1 回目の載荷の上限応力時まで増加したひずみ
- (2) 増分ひずみ: 応力比 25%~40% の 1 回目の載荷の上限応力時から 100 回目の載荷の上限応力時までの繰返し載荷の過程で増加したひずみ
- (3) 残留ひずみ: 応力比 25%~40% の繰返し載荷後、増加したひずみから除荷時に供試体に残留しているひずみ
- (4) 最大ひずみ: 載荷応力の低下開始時を破壊と定義し、その破壊時のひずみ

表-4 の各種比較パラメータを見ると、材齢にかかわらず破壊するまでに繰返し載荷を行った回数が多い供試体ほど、破壊時の最大応力度が大きいことがわかる。最大ひずみ度に関して、7 シリーズにおいては破壊するまでの載荷回数が多い供試体ほど、大きな値であるが、0.25 シリーズ、3.5 シリーズにおいてはその傾向は見られなかった。特に ASR3.5-D3 ではかなり大きい最大ひずみ度を示した。

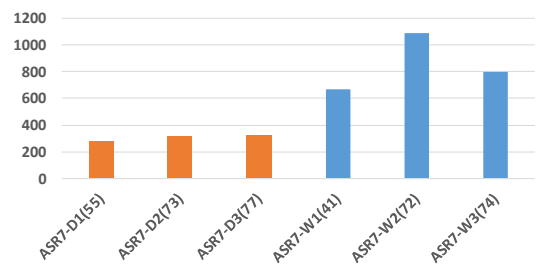
繰返し圧縮載荷による影響を特に詳しく見ていくため、各材齢シリーズの供試体の増分ひずみをまとめ、図-6 に示す。0.25 シリーズにおいて、水中試験を行った供試体と気中試験を行った供試体の増分ひずみ度に大きな違いはなく、同様に、図-6 (b) 3.5 シリーズにおいて



(a) 0.25シリーズ



(b) 3.5シリーズ



(c) 7シリーズ

図-6 材齢シリーズの増分ひずみ

も ASR3.5-W1 が 725μ と比較的大きな値を示すものの、平均すると D シリーズと W シリーズの増分ひずみの差は約 50μ であり、ほぼ差はなかった。

それらに対して図-6 (c) 7 シリーズは、気中で試験した供試体の増分ひずみの平均値が約 300μ であるのに対し、水中で試験した供試体の増分ひずみの平均値が約 850μ であった。つまり、材齢が 7 年と長く、ASR によってコンクリート内部のひび割れが生じているコンクリートにおける増分ひずみは、D シリーズの供試体より W シリーズの方が大きな値を示したことがわかる。ここで、繰返し載荷時に目視により供試体のひび割れから出る気泡を確認したことから、W シリーズの供試体は載荷試験前に 24 時間水に浸けていたが、圧縮載荷を受けた際に ASR による微細なひび割れの内部から空気が抜けて、載荷試験中にも水が侵入したことが推定される。この微細ひび割れ中の水の存在によって、ひび割れの先端に局所的な引張応力が発生し、載荷に伴ってひび割れが進展することによって増分ひずみが大きな値を示したことが推察される。

3.5 シリーズにおいても 7 シリーズと同様に表面にひび割れが見られたが、繰返し載荷試験前にコンクリート内部のひび割れ状態を確認できていないものの、超音波伝播速度の結果からコンクリート内部には著しくひび割れが生じていないことが推測される。そのため、ASR によって生じたコンクリート内部のひび割れに水が浸入しにくく、外部から供給される水が繰返し荷重下におけるコンクリートの圧縮疲労挙動への影響が小さかったと考えられる。

0.25 シリーズと 3.5 シリーズではいずれも W シリーズと D シリーズの増分ひずみの差が小さいことから、上記の点を踏まえると供試体表面のひび割れではなく、超音波試験から予測される供試体内部のひび割れの影響が大きかったと考える。

ただし、いずれの材齢シリーズにおいても初期増加ひずみ、残留ひずみ、最大ひずみについては、W、D シリーズの供試体の試験結果に大きな違いは見られなかったことから、圧縮応力を受けていない除荷状態や破壊時の挙動については、外部から供給される水の影響は小さいものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、ASR 劣化したコンクリートについて水の影響を調べるために、気中と水中で上限応力比 25%~40% ($7.5\sim 12\text{ N/mm}^2$) ならびに 40%~70% ($12\sim 21\text{ N/mm}^2$) の荷重レベルで繰返し載荷を行い、水が低サイクル圧縮

疲労試験における圧縮挙動を実験的に調べた。また、事前に行った超音波試験ならびにひび割れ長さ密度測定によって ASR 劣化度を測定し、ASR による劣化度が低サイクル圧縮疲労試験の結果に与える影響について考察した。本研究における結論を以下に示す。

- (1) ASR 劣化したコンクリートでは、材齢が長くなると、超音波伝播速度とひび割れ長さ密度による ASR 劣化の指標の変化やばらつきは同様の傾向を示した。
- (2) 低サイクル圧縮疲労試験によって、材齢 7 年の ASR 劣化したコンクリートの繰返し荷重下の圧縮挙動に水が影響することがわかった。メカニズムとして、微細ひび割れ中の水の存在によって、ひび割れの先端に局所的な引張応力が発生し、載荷に伴ってひび割れが進展することが推察される。
- (3) 材齢の異なる ASR 劣化したコンクリートの低サイクル圧縮疲労試験の結果を比較して、繰返し載荷時の挙動に与える水の影響は、供試体表面のひび割れの程度ではなく、超音波試験から予測される内部ひび割れの方が与える影響が大きいことがわかった。

以上の結論は、本研究の限られた実験データによる考察によるため、破壊メカニズムの解明には今後さらに実験データを蓄積していく必要がある。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 19H02226 の助成を受けて実施した。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Esposito, R., Anaç, C., Hendriks, M.A.N. and Çopuroğlu, O.: Influence of the Alkali-Silica Reaction on the Mechanical Degradation of Concrete, Journal of Materials in Civil Eng., Vol.28, No.6, pp.1-13, 2011
- 2) 宇治公隆, 梁 俊, 新藤竹文, 王 銳: アルカリシリカ反応による劣化を生じたコンクリートの圧縮疲労条件下における寿命予測, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.2, pp.259-270, 2009.6
- 3) 西川泰正, 三木朋広: ASR が生じたコンクリートの含水状態が低サイクル圧縮挙動に与える影響に関する基礎的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.18, pp.81-86, 2018.10
- 4) 三木朋広, 宮川侑大: アルカリシリカ反応によりひび割れが生じたコンクリートの圧縮破壊挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.73-78, 2014