

論文 ASR が生じる RC 梁の膨張挙動と力学特性に及ぼす先行曲げひび割れの影響

小川 森平*1・高橋 佑弥*2・前川 宏一*3

要旨: 予備荷重によって先行曲げひび割れを導入した RC 梁試験体のアルカリシリカ反応(以下, ASR)促進試験を実施し, 膨張の三次元挙動と力学特性の変化を測定した。先行ひび割れ周辺では, 鉄筋非拘束方向への膨張が増大する傾向が観察された。また, 後発の ASR 膨張ひび割れがせん断ひび割れの進展を抑制し, RC 梁の破壊モードがせん断破壊から曲げ破壊へ変化する事例を示すと共に, 先行ひび割れを有する RC 梁の曲げ剛性が, ASR 膨張によって先行ひび割れの無い RC 梁と同等まで回復する結果を得た。

キーワード: アルカリシリカ反応, RC 梁, 膨張, 先行ひび割れ, 破壊モード

1. はじめに

アルカリシリカ反応(以下, ASR)による膨張が発生したコンクリート構造部材の膨張量予測や, 膨張挙動への周辺環境や拘束条件の影響について, 国内外で盛んに研究が行われている(例えば 1), 2)。しかし供用環境下では ASR と同時に乾燥収縮や外力によるひび割れが進展する場合も少なくなく, ASR 進行とひび割れ進展の相互作用の複雑さから, 正確な挙動推定が困難な面もある。

上記背景のもと, 著者らは ASR 膨張発生前の外力によるひび割れ(先行ひび割れ)が後の RC 部材の膨張挙動に与える影響を, 数値モデルを基に検討している 3)。先行ひび割れが ASR 膨張挙動に与える主な影響として, ひび割れを通じたゲル流出による膨張圧解消 4), 外部からの水分・アルカリ供給促進による膨張量増加, 材料損傷により三次元拘束状況が変わることによる膨張異方性の変化が考えられ, それらが混成することで ASR 膨張挙動が有意に変化する可能性があることを示した 3)。

本研究は先行ひび割れが ASR 膨張挙動と, ASR 発生前後の力学性能変化へ与える影響を実験的に検討するものである。先行曲げひび割れを有する RC 梁試験体を作成し, 先行ひび割れの無い試験体と三方向に展開する膨張を比較した。また ASR 促進前後に荷重試験を行うことで ASR 発生に伴う RC 梁の力学特性の変化を観察した。

2. 実験条件

2.1 コンクリートの配合

本実験で使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。粗骨材 G1 および G2 は共に反応性粗骨材であるが産地が異なっており, G1 は化学法にて「無害でない」(溶解シリカ量 $S_e = 166\text{mmol/L}$, アルカリ濃度減少量 $R_e = 156\text{mmol/L}$)と判定され, モルタルバー法では「無害」(3 ヶ月後の膨張率=0.047%, 6 ヶ月後の膨張率=0.051%)と判定された安山岩砕石である。G2 は化学法, モルタルバー法ともに「無害でない」と判定された安山岩砕石である。異なる ASR ゲル生成・膨張速度環境下で先行ひび割れが ASR 膨張進展に与える影響を検討するために, 反応性が異なる粗骨材を用いた試験体シリーズ(No.1~3 と No.4~6)を用意した。細骨材には非反応性の砕砂を用いた。ASR 促進を目し, 練り混ぜ水中に NaOH を 12.9kg/m^3 (Na_2O 当量で 10kg/m^3)外割添加した。

2.2 試験体概要

試験体シリーズを表-2 に示す。No.1~No.3 は粗骨材 G1 を用いた試験体, No.4~No.6 は粗骨材 G2 を用いた試験体である。このうち No.1, No.4 の試験体を用いて ASR 発生前の静的耐力を計測した。No.2, No.5 の試験体は予備荷重によって先行曲げひび割れを導入し, その後 ASR 促進環境に供した。No.3, No.6 の試験体は, 予備荷重を行わずに ASR 促進環境に供した。試験体諸元を図-1 に

表-1 コンクリートの配合

試験体	W/C (%)	単位量(kg/m ³)						Admixture (C×%)	
		W	C	S	G1	G2	NaOH	減水剤	AE 剤
No.1~3	65	175	269	827	988	0	12.9	1.6	0.004
No.4~6	65	175	269	827	0	1034	12.9	1.6	0.004

C : 普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm^3), S : 砕砂(密度 2.64g/cm^3)

G1 : 安山岩砕石(密度 2.58g/cm^3), G2 : 安山岩砕石(密度 2.70g/cm^3)

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (学生会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科講師 (正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科教授 (フェロー会員)

示す。下筋に D6 鉄筋を用いてかぶり厚を 10mm と小さくし、先行曲げひび割れ間隔が小さくなるようにした。試験体内の各点について、最も近いひび割れからの距離が小さいほど、ひび割れを通じた水分・アルカリ供給やゲル流出の影響が、それぞれ大きくなると考えられる。ひび割れ間隔を小さくすることで、先行ひび割れが局所的な ASR 膨張に及ぼす影響がより観察しやすくなると考えた。荷重は梁の中心から両方に 250mm の位置を載荷位置とした四点載荷とした。

2.3 実験手順

(1) 静的耐力計測および予備載荷

材齢 20 日時点で No.1, No.4 試験体の静的耐力計測と No.2, No.5 試験体の予備載荷(曲げひび割れ導入)を荷重制御で行った。図-2 に荷重-変位関係を示す。No.1, No.4 の静的耐力は共に 80kN 程であり、せん断破壊により終局に至った。予備載荷による先行曲げひび割れ導入は、等曲げ区間の下面からのひび割れが目視で RC 梁の半分程の高さに到達するまで行った。結果として No.2 は静的

耐力の 60%にあたる 48kN まで、No.5 は静的耐力の 54%にあたる 42kN まで載荷を行った。図-3 および図-4 に予備載荷後の No.2, No.5 試験体のひび割れ分布の様子を示す。等曲げ区間においてひび割れ間隔はおよそ 3~8cm 程度であった。除荷後に再載荷を行うことで No.2 と No.5 のひび割れ導入後の剛性を調べた。図-2 に再載荷曲線を併せて示している。予備載荷による曲げひび割れ導入によって梁の曲げ剛性は低下していることがわかる。

表-2 試験体シリーズ

試験体	粗骨材	材齢 20 日 載荷	ASR 促進	材齢 200 日 載荷
No.1	G1	○	—	—
No.2	G1	○(予備載荷)	○	○
No.3	G1	—	○	○
No.4	G2	○	—	—
No.5	G2	○(予備載荷)	○	—
No.6	G2	—	○	—

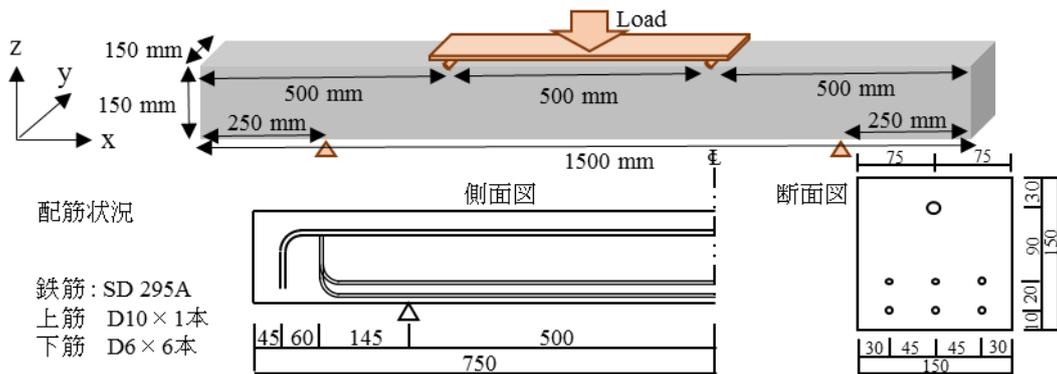


図-1 試験体概要

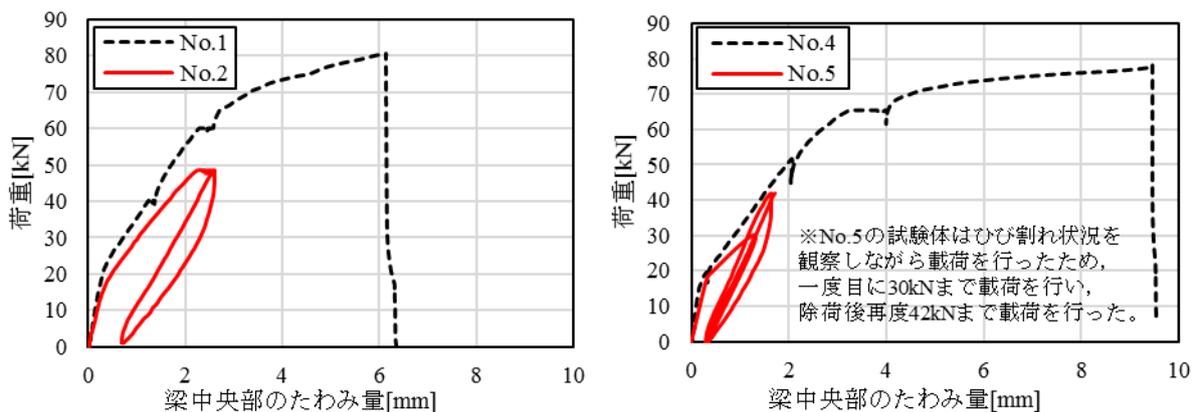


図-2 粗骨材 G1 を用いた供試体(左)と粗骨材 G2 を用いた供試体(右)の荷重-変位関係図



図-3 予備載荷後のひび割れ分布(No.2)の側面



図-4 予備載荷後のひび割れ状況(No.5)の側面

(2) ASR 促進と膨張量測定

材齢 20 日時点で試験体 No.2 と No.5 に予備荷重を行った後、40°C 一定の 3%NaCl 水溶液中に試験体 No.2, 3, 5, 6 を浸漬し、ASR 膨張を促進した。ASR 促進に伴う試験体表面の長さ変化をコンタクトゲージ法により測定した。長さ変化の測定位置を図-5 に示す。等曲げ区間に相当する範囲の長軸方向(x 方向)、奥行き方向(y 方向)、高さ方向(z 方向)の長さ変化を複数箇所で測定すると共に、等曲げ区間以外の箇所でも比較計測を行った。基長の測定は材齢 20 日の ASR 促進開始の直前に行った。ASR 促進期間中に 4 週間おきに促進環境から RC 梁を取り出して室内に 24 時間静置した後に長さ変化測定を行い、測定終了後に促進環境に戻した。試験体 No.2, 3 は材齢 189 日まで、No.5 は材齢 140 日まで、試験体 No.6 は材齢 85 日まで膨張量測定を行っている。

(3) ASR 促進後の荷重試験

粗骨材 G1 を用いた No.2 と No.3 の試験体を材齢 200 日時点で ASR 促進環境から取り出し、同日中に荷重試験を行った。荷重方法は 2.3(1)に示した方法同様、荷重制御による四点荷重で RC 梁が降伏するまで荷重を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 長さ変化測定結果

(1) 粗骨材 G1 を用いた試験体の長さ変化

図-6 に試験体 No.2 と No.3 長さ変化測定結果を示す。図には等曲げ区間の鉄筋による拘束を受ける x 方向と非拘束方向である y, z 方向、また等曲げ区間から外れた位置の x, z 方向の膨張推移をそれぞれ別のグラフに示しており、表面ひずみの値は上面、側面、下面の各方向で複数ある測定値を平均した値を示している(例えば図-6

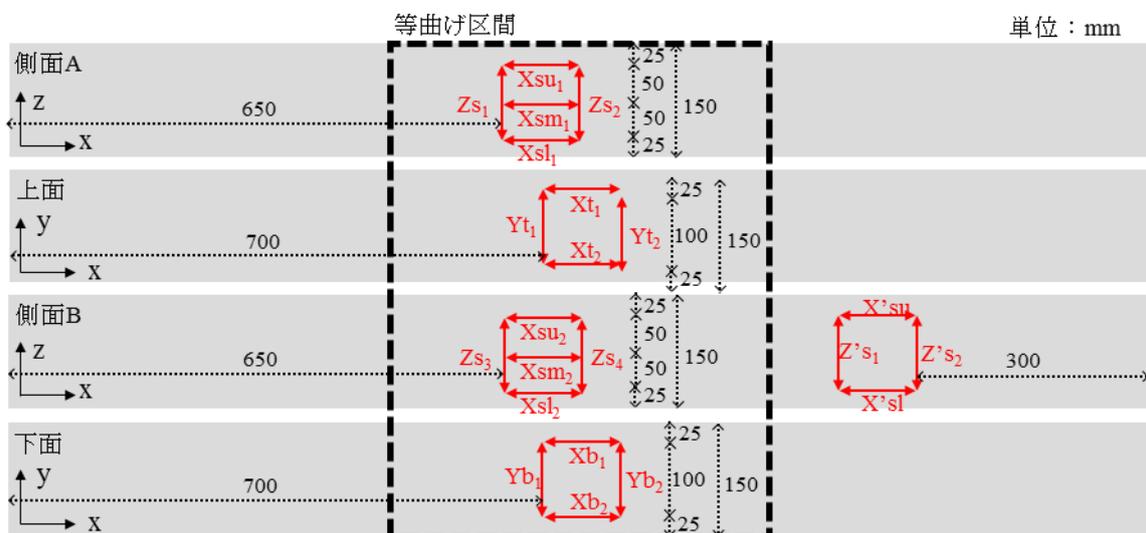
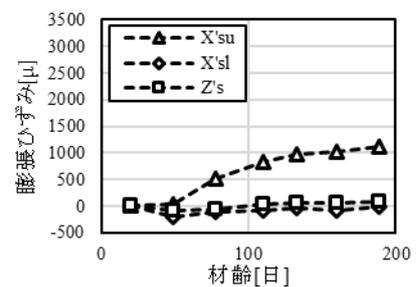
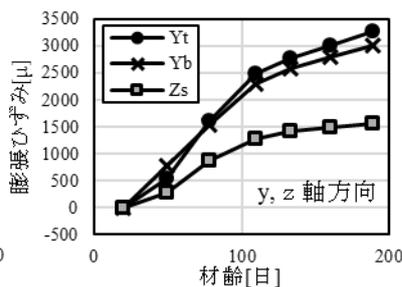
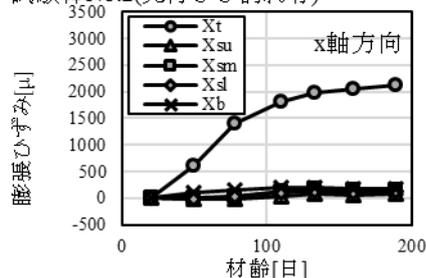
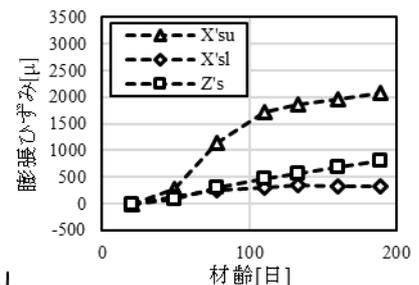
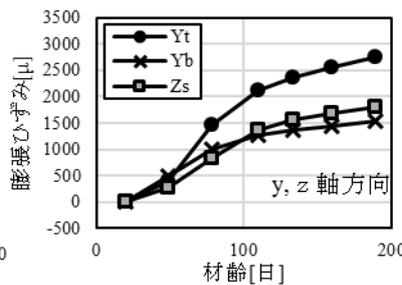
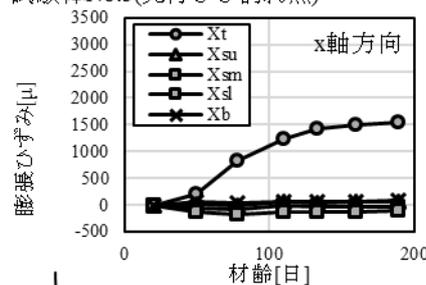


図-5 長さ変化測定位置

試験体No.2(先行ひび割れ有)



試験体No.3(先行ひび割れ無)



等曲げ区間
図-6 試験体 No.2 と No.3 の長さ変化測定結果

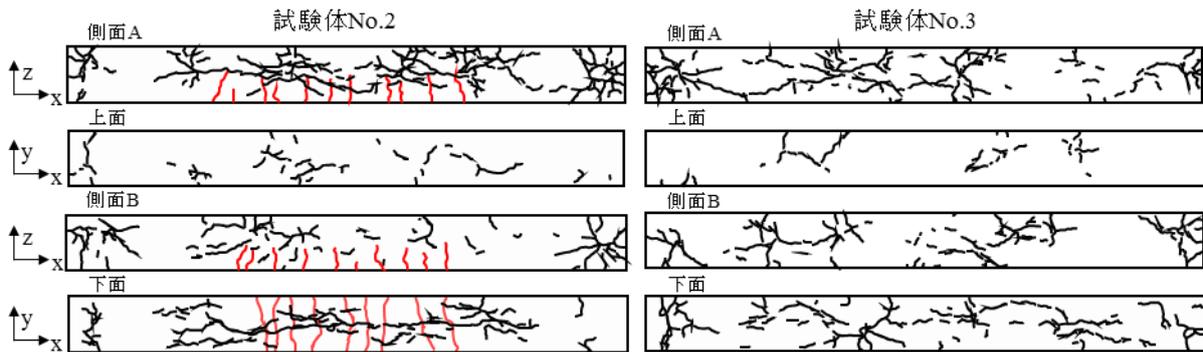


図-7 試験体表面のひび割れ状況(材齢 200 日)

中の Z_s は図-5 中 Z_{s1} , Z_{s2} , Z_{s3} , Z_{s4} の平均値を表している)。また、図-7 に No.2, No.3 それぞれの材齢 200 日時点の目視ひび割れ状況を示す。図-7 中 No.2 の赤線で示されたひび割れは、予備荷重により生じた先行ひび割れを表している。

図-6 中の先行ひび割れの無い No.3 の試験体について三方向の膨張挙動を見ると、x 方向に対して y, z 方向の膨張量が大きい結果となっている。鉄筋により x 方向の膨張が拘束されたために、膨張の異方性が見られたものと思われる。また、試験体の高さ方向での膨張量の違いを見ると、 X_t や Y_t といった梁上面の膨張量が他の面の膨張量よりも大きい結果となった。上下の鉄筋比の違いと、後述する上部と他の部分のコンクリートの品質差異によるものと思われる。

予備荷重による先行ひび割れを有する試験体 No.2 の測定結果を No.3 と比較すると、下面の y 方向(Y_b)のみ No.3 よりも明確に大きな値を示しており、ここに先行ひび割れによる膨張挙動の差異が明確に表れた。他の箇所・方向については本試験の観察期間では明確な差異は見られなかった。下面 y 方向でこのような差異が見られた要因としては、ひび割れによって外部からの水分・アルカリ供給が促進されて ASR ゲル生成量が增大したことや、予備荷重により主に損傷を受けた下面においてコンクリートの材料剛性が低下したことが考えられる。しかし、底面の x 方向(X_b)は先行ひび割れが存在しても膨張量は明確には増大していない。底面で導入されている y 方向の先行ひび割れによって x 方向には ASR による膨張圧が生じにくい状態にあると思われる。その一因には ASR ゲルのひび割れ部分への流出と膨張圧解消が可能性として考えられる。

図-7 に示す試験体表面のひび割れ分布をみると、側面ならびに下面で x 方向に生じるひび割れが多く、前述の膨張量の異方性と整合しているといえる。また端部の鉄筋曲げ上げ部付近にひび割れが集中している様子が確認できる。既往の研究^(例えば 5)と同様に、配筋に沿ったひび割れと、隅角部に集中するひび割れが観察された。試験

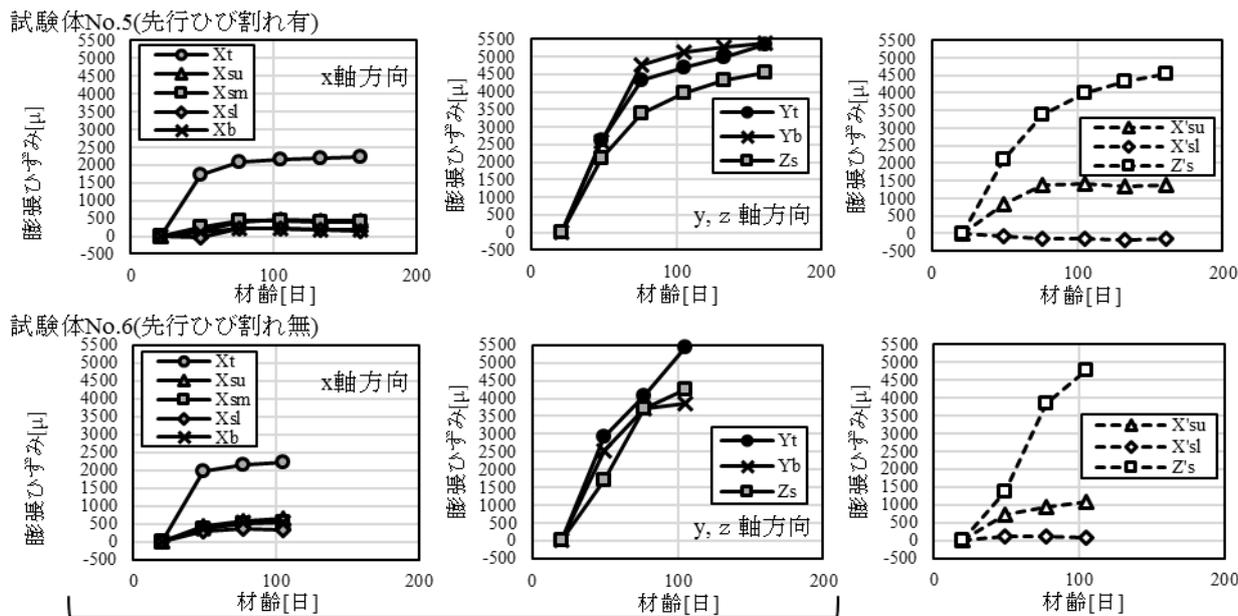
体 No.2 の下面に着目すると、No.3 に比べて明確な x 方向に連続したひび割れがあり、先行ひび割れの他に ASR によって y 方向に新たにひび割れが生じている様子は確認できない。この傾向も図-6 に示す下面の膨張状況と合致する。以上、試験体 No.2 と No.3 の比較により、先行ひび割れがひび割れ面と平行方向への膨張量を増大させ、ひび割れ面直交方向への新たなひび割れ発生を促す可能性が示された。

但し、試験体上面の可視ひび割れの量は他の面に比べて少なく、長さ変化の測定値とは整合しない。2,000~3,000 μ 程度膨張しているにも拘らず、可視ひび割れが少ない状況は、試験体上面付近に微細な損傷が多いことを意味していると考えられる。この要因については後述の荷重試験結果と併せて検討を行いたい。

(2) 粗骨材 G2 を用いた試験体の長さ変化

図-8 に試験体 No.5 と No.6 の長さ変化測定結果を示す。結果を概観すると、試験体 No.2, No.3 に比べて膨張曲線の立ち上がり早く、膨張量も大きい傾向にある。No.2, No.3 と同様、x 方向鉄筋の拘束によって y, z 方向へ膨張が卓越する膨張の異方性も見られる。但し、その異方性の度合いが大きい。このような傾向は反応性の高い骨材 G2 を用いたために生じたと考えられる。ASR の反応早期の Na や K の割合が多い流動性の高い ASR ゲルが多く、ゲル移動や圧力発生方向の変化が活発なために、異方性が大きく出るものと思われる。また上面で膨張量が大きい傾向も No.2 ならびに No.3 と同様であった。

先行ひび割れの影響に着目すると、粗骨材 G1 を用いたシリーズと同様、先行曲げひび割れを有する試験体で下面の y 方向(Y_b)の膨張が大きくなっている。異なる反応性骨材でも、先行ひび割れによって下面の非拘束方向の膨張が促進されることが示された。また、等曲げ区間の x 方向膨張のうち、底面 X_b や底面に近い X_{s1} を見ると、No.6 では 500 μ 程度膨張しているのに対し、No.5 では 100 μ 程度しか膨張していない。先行ひび割れによって x 方向の膨張圧が解消される事象(前述)が、より明確に示されているものと考えられる。



等曲げ区間
図-8 試験体 No.5 と No.6 の長さ変化率測定結果

3.2 RC 梁の荷重試験結果

図-9 に荷重試験により得られた荷重-変位関係を示す。材齢 20 日時点の No.1 の結果、No.2 の除荷後再載荷の結果、材齢 200 日時点の No.2 と No.3 の結果を比較している。表-3 に各試験体の終局荷重の値と破壊モードを示す。2.3(1)で述べた通り、No.1 の破壊モードはせん断破壊であったが、ASR 促進後に載荷した No.2 ならびに No.3 は曲げ引張破壊であった。またこの時、鉄筋の降伏前に梁上部の表層コンクリートが圧壊・剥離する様子が見られた。ASR 膨張により場合によっては梁の破壊モードが変化し得ることが示された。なお、破壊モードは変化したものの、終局荷重にはほぼ違いが見られなかった。No.1 と No.3 の間で破壊モードが異なったのは、ASR 膨張ひび割れによって梁のせん断耐力が向上し、同時に梁上部のコンクリート圧縮強度発現不良と低下によって曲げ耐力が変化した結果であると考えられる。ASR 膨張によるせん断耐力の向上は、既往の実験⁹⁾でも報告されているように、ASR 膨張による多方向ひび割れが貫通するせん断ひび割れの形成を抑制した結果と考えられる。ASR 膨張圧によるせん断ひび割れ拡大抑制も考えられるが、その影響度は不明である。

図-10 に試験体 No.3 の破壊後の側面の様子を示す。試験体表面に貫通したせん断方向のひび割れは無く、曲げによって破壊に至っていることがわかる。本試験体は曲げ引張破壊により破壊に至ったが、鉄筋の降伏前に梁上部のコンクリートが一部圧壊・剥離する様子も見られた。本試験の寸法と鉄筋条件で、鉄筋降伏前に上部の圧壊が起こる圧縮強度の条件を算出すると、8MPa 程度以下となる。ここで比較参考のため別途供試体を用意し、

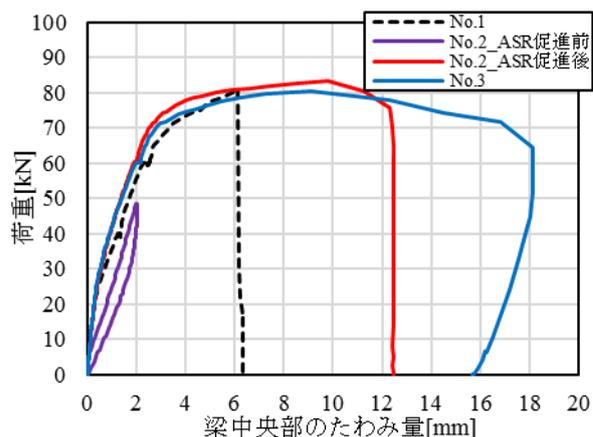


図-9 梁荷重試験の荷重-変位関係
表-3 荷重試験結果

試験体	試験材齢 [日]	終局荷重 [kN]	破壊モード
No.1	20	80.7	せん断破壊
No.2	200	83.3	曲げ引張破壊
No.3	200	80.4	曲げ引張破壊



図-10 試験体 No.3 の破壊後の損傷状況写真

圧縮試験を行った。φ10×20cm の円柱供試体を本実験と同配合で6本作製し、材齢 57 日まで封緘養生を行い、基

長を測定した後、3本は引き続き封緘養生、残り3本は梁と同様40°C一定の3%NaCl水溶液中に浸漬した。膨張量がNo.3試験体の上面と同様に2,000~3,000 μ 程度となった時点(材齢103日)で強度試験を行った結果を図-11に示す。図の凡例は試験時の供試体の膨張量を示している。結果を見ると、膨張量が3,000 μ 程度に達すると剛性は大きく低下するものの、圧縮強度は1-2割程度低下するに留まっている。これら梁試験体の挙動と円柱供試体の試験結果の比較より、本研究で用いた試験体は意図せず上部のコンクリートの強度発現が不十分で圧縮強度が低かったことが推察される。現時点で不明瞭であるが、施工の過程で材料分離が生じた等の可能性が考えられる。ASR膨張前は曲げ圧縮破壊が先行する程に低強度ではないが、膨張過程で8MPa以下程度まで強度が低下したと考えられる。局所的な低強度のコンクリートにあたって、3.1(1)で示したような、膨張しているものの、可視ひび割れが少ない状況が生じていたものと考えられるが、これらの状況の詳細については、現在膨張計測を続けているNo.5およびNo.6試験体を用いて継続的に検討を行っていきたい。

RC梁試験体載荷時の初期剛性に着目すると、ASR膨張ひびわれが生じたNo.3の初期剛性がNo.1の初期剛性と同等か、それ以上に大きい結果となっている(図-9)。ASR膨張によるケミカルプレストレスの導入と、20日から200日の材齢経過による水和進展の影響によるものと考えられる。No.2の剛性は、予備載荷により低下した状態から、ASR膨張によって、先行ひび割れの無いNo.3と同等まで向上する結果となった。ひび割れに充填されたASRゲルが梁下部の曲げ引張力を負担しているような機構が想像される。ASR膨張が場合によってはコンクリート構造の力学性能を回復させるような働きを持つ可能性があることを示唆している。今後、本研究で導入した力学的ひび割れのみならず、乾燥収縮など他の要因によるひび割れとASR膨張挙動の相互作用についても検討を進めることが必要であると考えている。

4. 結論

本研究ではRC梁を用いた実験によって先行ひび割れの有無によるASR膨張挙動の差異ならびに力学的特性の変化について検討した。得られた結果を以下に述べる。

(1) 先行ひび割れを有するRC梁について、先行ひび割れに直行する方向の膨張量が增大する傾向にあることが示された。先行ひび割れの周囲では、先行ひび割れが無い部分と比較して、水分・アルカリ供給によるASRゲル生成量の増大や、材料損傷による剛性低下、ひび割れへのゲル流出による膨張圧の解消などが生じていると考えられる。

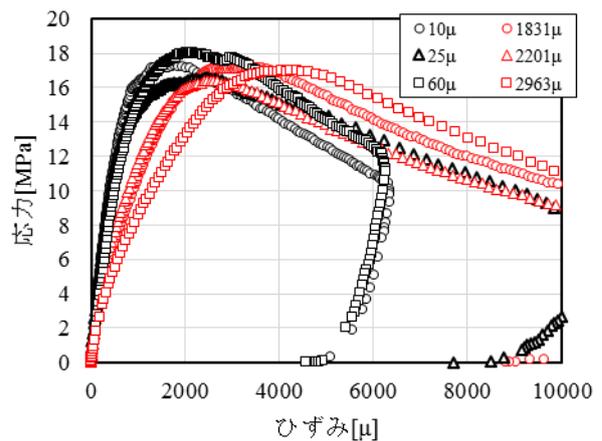


図-11 円柱供試体の圧縮試験結果

- (2) ASR膨張によりRC梁の破壊モードがせん断破壊から曲げ圧縮破壊へと変わる事例が示された。せん断ひび割れ進展抑制によるせん断抵抗性の向上とコンクリートの圧縮強度低下による曲げ圧縮耐力低下が起きていると思われる。
- (3) ASR促進により先行ひび割れ導入の際に低下した曲げ剛性が回復した。回復の要因としてケミカルプレストレスならびにひび割れを充填したASRゲルの引張負担機構が考えられる。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 15H05531 の助成を受けたものです。また、本研究を進めるにあたり、田中泰司特任准教授(東京大学生産技術研究所)より有益なご助言を賜りました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Saouma, V.: Numerical modeling of AAR, CRC press, 2014
- 2) Multon, S. and Toutlemonde, F.: Effect of applied stresses on alkali-silica reaction-induced expansions, Cement and Concrete Research, Vol.36, No.5, pp.912-920, May.2006
- 3) Ogawa, S., Tanaka, Y., Takahashi, Y. and Maekawa, K.: Effect of preceding cracks on ASR expansion of concrete and its poro-mechanical modeling, Sixth Biot Conference on Poromechanics, pp.778-786, July 2017
- 4) Takahashi, Y., Ogawa, S., Tanaka, Y. and Maekawa, K.: Scale-dependent ASR expansion of concrete and its prediction coupled with silica gel generation and migration, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.14, No.8, pp.444-463, Aug. 2016
- 5) 田附伸一, 津吉毅, 石橋忠良, 松田芳範, 今井勉: ASRにより損傷したRC部材の耐荷力に関する実験的研究, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.1, pp.166-177, 2007.3.