論文　ASR により損傷した部材の長期促進試験および静的・疲労載荷試験

木野　淳一*1・松田　芳範*2・田附　伸一*3

要旨：ASR により損傷した実構造物から切り出した梁部材に対して長期促進試験を行った。また，長期促進試験後にコア供試体の圧縮試験，梁部材の静的せん断試験，せん断疲労試験を行い，長期促進試験前の結果と比較した。長期促進試験の結果，試験開始後 900 日程度まで膨張傾向が継続し，膨張量は 1%弱の膨張となった。圧縮強度はコア採取方向によっては低下する傾向が見られた。静的せん断耐力はやや小さい値となったが，これは支点部付近の付着破壊が影響している。疲労試験の結果は，促進前後ともせん断疲労強度予測式の誤差の範囲内であった。また静的せん断耐力，せん断疲労強度とも基準試験体より大きい結果となった。

キーワード：ASR，圧縮強度，せん断，疲労

1. はじめに

アルカリシリカ反応（ASR）によるコンクリート構造物の損傷が問題視され，多くの ASR に関する研究が行われている。その中には，ASR を生じた構造物の耐力評価に関する研究も少なくない。それらの研究では，ASR を生じた構造物においても，鉄筋が配置されることで部材としての耐荷力の低下はそれほど発生しないとの報告がなされている [1]。しかし，それらの研究は ASR 反応性骨材を用いて試験体を作成した研究であり，ASR を生じた実構造物に対する耐荷性能評価を行った例は少ない。

著者らは完成後約 24 年経過した，ASR による損傷を受けた鉄道構造物より取り出した RC 部材について，材料強度，静的せん断耐力，せん断疲労強度，押抜きせん断疲労強度について検討を行った。その結果，材料強度としての圧縮強度は低下するものの，静的せん断耐力やせん断疲労強度については大きな低下を示さないことを確認した [2]。本論文では，ASR による損傷がさらに進展した場合に部材強度に悪影響を及ぼすかどうかを確認するため，同一の構造物から切り出した試験体について長期促進試験を行い，その後圧縮試験，静的せん断載荷試験，せん断疲労載荷試験を行った結果について報告する。

2. 長期促進試験

2.1 試験概要

試験体は，**図-1** に示す RC ラーメン高架橋のスラブ（t=250mm）から切り出した後，寸法約 2000mm×375mm×250mm に加工した梁試験体である。鉄筋は，軸方向に D19 が配置されているが，梁中央断面で上側が 1 本，下側が 3 本と異なっている（**図-2** 参照）。促進養生方法としては，デンマーク法に準拠し，温度を 50℃に保った NaCl 溶液に浸漬した。長さ変化は，梁上面に標点を設置したほか，同じピッチで切り欠き溝を配置し，ノギスにてそれぞれの長さ変化を測定した。なお，配置ピッチは軸方向に 240mm，軸直交方向に 275mm である（**図-2**）。

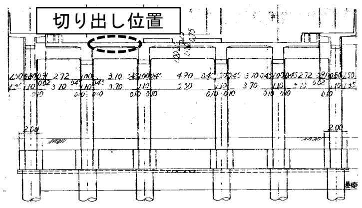


図-1　試験体切り出し位置図

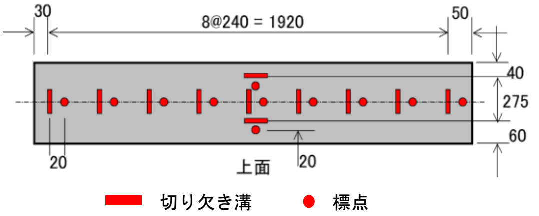


図-2　長期促進試験体概要

2.2 長期促進試験結果及び考察

試験を行った結果として，膨張率測定結果を**図-3** に，長期促進試験前後のひび割れ状況を**図-4** に示す。なお，軸方向の値は各測点間で計測した値の平均値である。

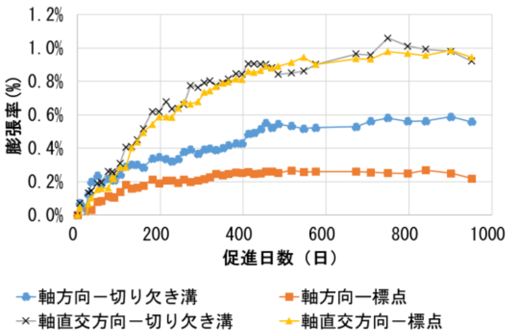


図-3　促進養生による膨張率

*1 東日本旅客鉄道（株）　構造技術センター課長　博士（工学）　（正会員）
*2 東日本旅客鉄道（株）　構造技術センターマイスター　博士（工学）　（正会員）
*3 東日本旅客鉄道（株）　東北工事事務所仙台工事区長　博士（工学）　（正会員）

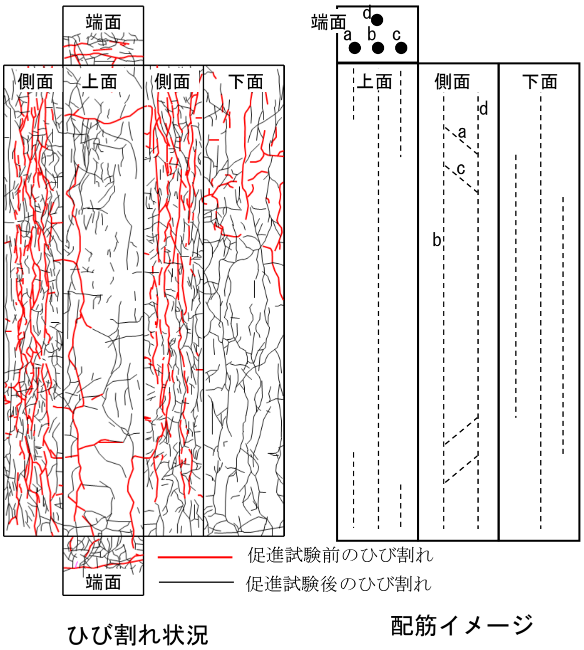


図-4　長期促進試験前後のひび割れ状況と配筋イメージ

梁の膨張率は最大で 1%に達しており，実構造物の ASR による損傷は今後も進行する状況にあることが分かった。梁の軸直交方向の膨張率が軸方向の膨張率を上回っているが，これは軸方向鉄筋の影響で軸方向の膨張が拘束されているためと考えられる。長期促進試験による膨張は促進日数 400～500 日程度で伸び率が低下し，おおむね 900 日を超えたところですべての測定データが増加しない傾向となった。ひび割れ状況に関しては，長期促進試験前より，梁水平方向に多くの層状ひび割れが入っていた。これは，試験体がラーメン高架橋のスラブ部材から切り出したものであったため，ASR による膨張の拘束が小さい上下方向に部材が膨張したことに起因するものと考えられる。また，長期促進試験後にはさらに多くのひび割れが発生したが，このひび割れは，水平方向のみならず鉛直方向にも多く発生した。これは，長期促進試験の試験体は梁の形状に加工されており，側面や端面が解放面になったこと，また軸方向鉄筋が底面側に多く入っていたため部材が反る変形をしたことなどが要因であると考える。

3. コア試験体の圧縮試験

3.1 試験概要

長期促進試験の前後における圧縮強度および静弾性係数の変化を把握するため，長期促進試験後の試験体から直径約 100mm のコア試験体を採取し，圧縮試験を実施した。コア試験体の採取は**図-5** に示す方向から行った。ここから採取された試験体に対し，圧縮試験（JIS A 1108），静弾性係数試験（JIS A 1149）を行った。

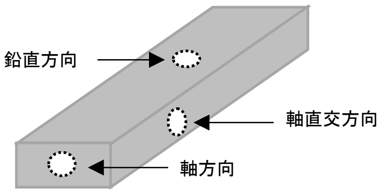


図-5　コア試験体の採取方向

3.2 試験結果及び考察

表-1 に採取したコアによる圧縮強度および静弾性係数の試験結果をそれぞれ示す。また，表には長期促進試験を実施する前に別の試験片からコア採取をして圧縮試験をした結果 [2]を併記する。なお，コアによっては長さが直径の 2 倍に満たないものがあったことから，寸法による強度補正（JIS A 1107）を行ったものを含んでいる。また，表の（　）内には当該構造物の施工記録から判明している 28 日圧縮強度およびその 28 日強度から推定される静弾性係数に対する割合を示す。

表-1　コア試験体の圧縮強度および静弾性係数

コア採取方向		長期促進前試験体		長期促進後試験体	
		圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)
鉛直方向		17.6	1.9	19.9	13.9
		19.6	2.2	16.2	8.0
		14.7	1.5	15.5	7.7
				16.6	9.3
				21.4	11.0
				19.5	14.0
				14.4	8.8
				15.3	8.7
				17.4	10.5
	平均値	17.3 (0.50)	1.9 (0.06)	17.4 (0.50)	10.2 (0.35)
軸方向		24.6	16.2	17.3	3.5
		30.1	14.4	20.6	4.2
		21.8	16.3	22.0	3.3
				20.8	1.3
	平均値	25.5 (0.73)	15.6 (0.53)	20.2 (0.58)	3.1 (0.10)
軸直交方向		26.8	22.0	17.8	7.6
		19.0	19.1	17.0	6.4
		21.4	12.1	18.1	10.2
	平均値	22.4 (0.64)	17.7 (0.60)	17.6 (0.50)	8.1 (0.27)

圧縮試験の結果については，長期促進試験前試験体のうち，28 日強度比が小さかった鉛直方向を除いて，20%程度強度が低下する結果が得られた。これは，長期促進試験前は水平ひび割れが多く，試験体の採取方向として軸方向，軸直交方向は比較的ひび割れの影響が少ないものであったが，長期促進試験後は鉛直ひび割れも多く発生したため，軸方向，軸直交方向のコアもコアを横断するひび割れの影響を受けて強度低下が発生したものと考えられる。つまり，ASR の進行以上に ASR 発生下での拘束条件が変わったことによる影響が大きいことになる。一方，静弾性係数についても軸方向，軸直交方向において低下した。これもコアに対するひび割れの発生状況が

影響し，軸方向，軸直交方向はコアを横断するひび割れの影響を受けて静弾性係数が低下したものと考えられる。

4. 静的せん断載荷試験 [3)]

4.1 試験概要

ASR の損傷進行度が静的せん断耐力に及ぼす影響を確認するため，新規に製作した基準試験体（材齢 28 日における配合強度 27N/mm^2），現地から切り出した部材を加工した ASR1 試験体，2.の長期促進試験と同じ位置から切り出した部材を加工し，さらに長期促進養生を行った ASR2 試験体の 3 試験体について，静的せん断載荷試験により比較した。

表-2 に試験体の諸元を，**表-3** に材料強度をそれぞれ示す。基準となる寸法は長さ 2000mm, 断面高さ 250mm, 断面幅 375mm であるが，現地から切り出した部材は特に断面高さ方向について不陸があること，鉄筋位置についても当時の施工誤差があることから，**表-2** の寸法は梁各辺や端部断面での測定値を平均した値を記載している。また，ASR2 の寸法は長期促進試験前の値となっている。引張鉄筋は**図-4** 中央付近のから試験体を切り出しているため，D19 が断面内に 3 本配置されている。基準試験体の引張鉄筋位置は，実構造物の設計時点の値となるよう，公称直径に対する純かぶりが 30mm となるよう鉄筋を配置した。**表-3** の材料強度はすべて試験値である。

表-2　静的せん断試験　試験体寸法

試験体	長期促進試験	長さ (mm)	断面高さ (mm)	断面幅 (mm)	有効高さ (mm)
基準	－	2001	250	375	211
ASR1	なし	2084	262	375	220
ASR2	あり	2000	250	370	227

表-3　せん断疲労試験体　材料強度

試験体	コンクリート圧縮強度 (N/mm^2)	鉄筋引張降伏強度 (N/mm^2)
基準	19.2	368
ASR1	24.0	390
ASR2	18.9	390

図-6 に載荷装置を示す。なお，図中の寸法の単位はすべて mm である。せん断スパンは，載荷点と支点間の距離で 600mm, 載荷板と支点支圧板間の距離では載荷板および支点の支圧板に幅 100mm の鋼板を使用していることから 500mm となっている。

4.2 試験結果及び考察

試験体ごとの最大荷重時点での破壊状況を**図-7～9** にそれぞれ示す。また，各試験体の荷重変位関係を**図-10** に示す。なお，**図-10** の荷重はアクチュエータ位置での計測値であることから，発生せん断力はこの 1/2 となる。

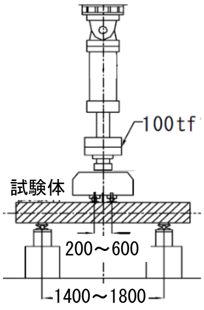


図-6　載荷装置全体図

試験体は全て斜めひび割れが卓越したせん断破壊を呈した。しかしながら，基準試験体は**図-7** に示す通り中立軸付近で約 45 度の角度を持った斜めひび割れを形成したのに対し，ASR により損傷した試験体は長期促進試験前後とも斜めひび割れの角度が水平に近くなっている。これは，構造物から切り出した時点で水平方向のひび割れが存在したことにより，斜めひび割れが水平方向に誘導されたためである。

荷重－変位関係については，基準試験体が荷重 50kN 程度より剛性低下が発生している。これは，試験体中央付近に曲げひび割れが発生したことに起因する。一方，ASR により損傷した試験体はいずれも剛性低下の発生

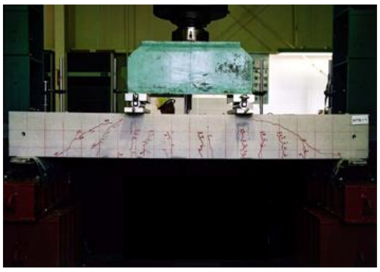


図-7　基準試験体の破壊状況

図-8　ASR1 試験体の破壊状況

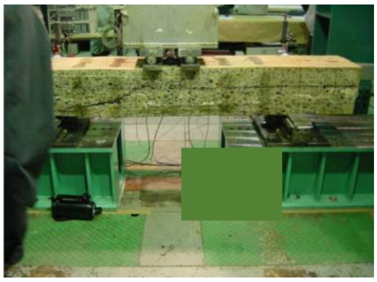


図-9　ASR2 試験体の破壊状況

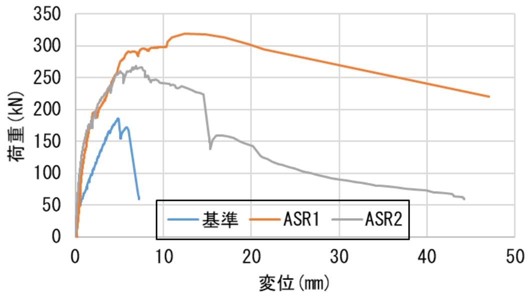


図-10　静的せん断試験の荷重－変位関係

がそれより遅く，おおむね 150kN 載荷程度で同程度の剛性となっていた。これは，ASR により損傷した試験体は，ASR によるコンクリートの膨張を鉄筋が拘束することでケミカルプレストレスが導入された状態になっていることに起因するものと考えられる。この状況は，既往の報告と同様である[4)]。

表-4 に梁試験体のせん断耐力の実験値と計算値を示す。なお，せん断耐力の実験値はアクチュエータ位置で計測した荷重を 1/2 にしたものである。また，計算値の軸力を考慮しない値は石橋らの提案式[5)]のうち軸方向鉄筋比，有効高さの影響の項を修正した[6)]以下の式で算出した。

$$V_c = 0.76(a/d)^{-1.166} \cdot \sqrt[3]{f'_c} \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot b_w \cdot d \qquad (1)$$

ここで，

V_c：せん断補強筋を用いない棒部材のせん断耐力

a：支持部前面から載荷板前面までの距離(mm)

d：検討断面の有効高さ(mm)

f'_c：コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)

β_d ：$\sqrt[4]{1000/d}$

β_p ：$\sqrt[3]{100p_c}$

p_c：せん断引張鋼材比

b_w：腹部の幅(mm)

軸力（ASR によるケミカルプレストレスの影響）を考慮した計算値については，式(1)に$\beta_n = 1 + 2\,M_0/M_u$[7)]を乗じて算出した。

ここで，

M_o：設計曲げモーメント M_d に対する引張縁において，軸方向力によって発生する応力を打ち消すのに必要な曲げモーメント

M_u：軸方向力を考慮しない純曲げ耐力

（ ）内の数字は実験値を計算値で除したものである。

表-4　せん断耐力の実験値と計算値

試験体	実験値 (kN)	計算値 (kN)	
		軸力なし	軸力あり
基準	92.5	89.3 (1.04)	
ASR1	159.5	102.8 (1.55)	124.4 (1.28)
ASR2	134.0	98.9 (1.35)	144.4 (0.93)

せん断耐力の実験値については ASR により損傷した試験体がいずれも基準試験体より大きな結果となったが，長期促進試験前後で差が生じている。また，実験値を計算値で除した値を比較すると，基準試験体はほぼ 1 程度で実験値と計算値が一致したが，ASR により損傷した試験体では軸力を考慮しない状態で 1.35～1.55 と，実験値がかなり大きな値となっている。この要因が ASR による軸力の影響であると考え，軸力を考慮したせん断耐力の計算値を算出したが，ASR1 では実験値を計算値で除した値が 1.28 となり，コンクリート標準示方書[7)]で示されている軸力の影響以上にせん断耐力が向上している。この要因としては，ひび割れの発生角度が考えられる。前述の通り，ASR により損傷した試験体は構造物から切り出した時点で水平ひび割れが生じており，その結果斜めひび割れが水平方向に誘導された。そのため，**図-8** の ASR1 試験体破壊状況のように斜めひび割れが載荷点下へ潜りこむような状態となり，アーチ機構が形成され耐荷機構が変化したためであると考えられる。一方，ASR2 についても ASR1 と同様に斜めひび割れの角度が水平方向に誘導されたにもかかわらず，軸力を考慮したせん断耐力の計算値が実験値を上回っている。この要因としては，**図-11** のように載荷中に支点付近で軸方向鉄筋に沿った付着破壊が発生し，アーチ機構での耐荷機構が形成されなかったためである。付着破壊が発生した要因は，長期促進試験の影響も考えられるが，当該試験体の軸方向鉄筋位置が側面かぶりが小さい（10mm 以下）位置にあったことも影響していると考えられるため，ASR の進行によりせん断耐力が低下するという判断は今回の試験結果からは判断できなかった。

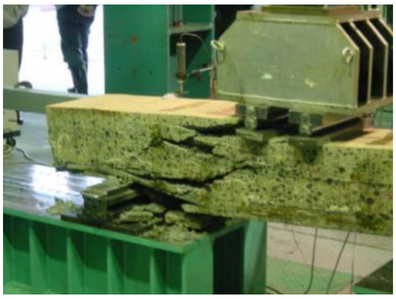


図-11　ASR2 試験体破壊時の支点付近の状況

5.せん断疲労載荷試験

5.1 試験概要

ASR の損傷進行度がせん断疲労強度に及ぼす影響を確認するため，静的せん断載荷試験と同様に，新規に製作した基準試験体，現地から切り出した部材を加工した ASRF1 試験体，同じく現地から切り出した部材を加工し，さらに長期促進養生を行った ASRF2 試験体の 3 試験体について比較した。

表-5 に試験体の諸元を，**表-6** に材料強度をそれぞれ示す。試験体の基本寸法や引張鉄筋の配置状況は静的せん断載荷試験と同様である。また，表の諸寸法や強度についても，静的せん断載荷試験の試験体と同様の条件で記載している。

表-5　せん断疲労試験　試験体寸法

試験体	促進試験	長さ (mm)	断面高さ (mm)	断面幅 (mm)	有効高さ (mm)
基準	－	2000	250	375	211
ASRF1	なし	2023	253	380	220
ASRF2	あり	2076	250	367	219

表-6　せん断疲労試験体　材料強度

試験体	コンクリート圧縮強度 (N/mm^2)	鉄筋引張降伏強度 (N/mm^2)
基準	25.4	383
ASRF1	24.0	390
ASRF2	18.9	390

試験装置は静的せん断載荷試験と同様である。また，せん断疲労試験の荷重載荷条件は**表-7** に示す通りである。ここで，上限荷重せん断強度比は，載荷荷重の上限値 P_{max} を静的せん断載荷試験の実験結果から得られた最大荷重（実験せん断耐力 V_{cu} の 2 倍）で除したものである。下限荷重は，本試験が実構造物（スラブ）から切り出した試験体を対象にしているため，試験体の鉄筋発生応力度が実構造物において発生している永久作用時の鉄筋応力度と同程度になる値として 30kN とした。基準試験体の上限荷重は，せん断耐力の計算値の約 70%程度となるように設定した。ASR 試験体の上限荷重は，静的せん断試験の実験値から得られたせん断耐力の 70%程度となるように設定した。

表-7　せん断疲労試験の載荷荷重

試験体	上限荷重 (kN)	下限荷重 (kN)	上限荷重せん断強度比 ($P_{max}/2V_{cu}$)
基準	120	30	0.61
ASRF1	200	30	0.63
ASRF2	200	30	0.75

5.2 試験結果及び考察

各試験体が破壊したときの破壊形態と載荷回数を**表-8** に，各試験体の破壊時のひび割れ状況を**図-12～13** に示す。

基準試験体は初期載荷時点で曲げひび割れが発生し，その後の載荷において曲げひび割れから斜めひび割れが進展し始め，約 199 万回繰返し載荷により**図-12** に示すような支点と載荷点を結ぶ斜めひび割れが卓越したせん断破壊となった。ASRF1 試験体も同様の試験進捗により，

表-8　せん断疲労試験結果

試験体	試験結果	
	破壊形態	繰返し回数
基準	コンクリート破壊	1,998,132
ASRF1	コンクリート破壊	39,348
ASRF2	コンクリート破壊	4,585

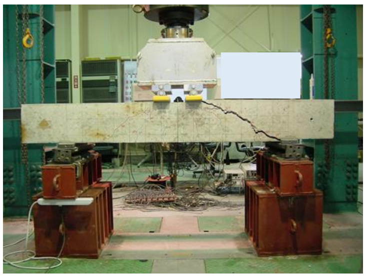


図-12　基準試験体の破壊状況

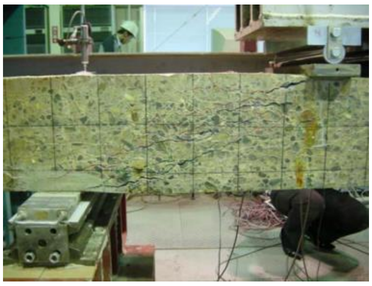


図-13　ASRF2 試験体の破壊状況

約 3.9 万回の繰返し載荷により支点と載荷点を結ぶ斜めひび割れが卓越したせん断破壊となった。ASRF2 試験体についても同様の経緯であり，約 4.5 千回の繰返し載荷により**図-13** に示すように支点と載荷点を結ぶ方向に複数の斜めひび割れが卓越してせん断破壊した。以上のように，今回の試験体は全てコンクリート部分の斜めひび割れが卓越した破壊形態となった。

図-14 に，載荷回数と試験体中央変位の関係を，**図-15** に各試験体の載荷回数と上限荷重せん断強度比の関係を示す。なお，**図-15** には既往の研究における載荷回数と上限荷重せん断強度比の関係式と既往データにおけるばらつきの範囲を示す。載荷回数と上限荷重せん断強度比の関係式は，以下の(2)式により表される [8]。既往の研究は ASR 損傷のない試験体での検討であるが, 今回は ASR 損傷した試験体での関係式の適用性を確認した。

$$\log_{10} V_{max}/V_{cu} = -0.035 \log_{10} N \quad (2)$$

ここで,

V_{max}：試験体の作用せん断力(kN)

V_{cu}：試験体のせん断耐力(kN)

N：載荷回数

載荷初期変位は上限荷重の大きさの違い，ASR による損傷の有無の違いにより，ASRF 試験体 2 体は基準試験体より大きくなっている。しかし，載荷回数の増加による変位の増加は ASR の損傷有無による違いが見られなかった。また，長期促進試験による影響は，上限荷重が

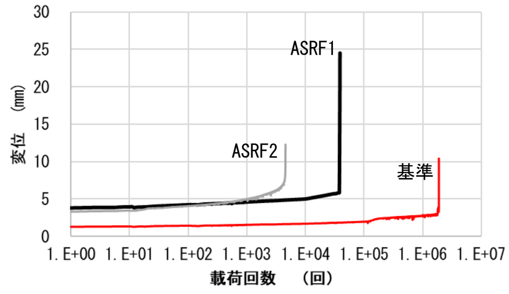
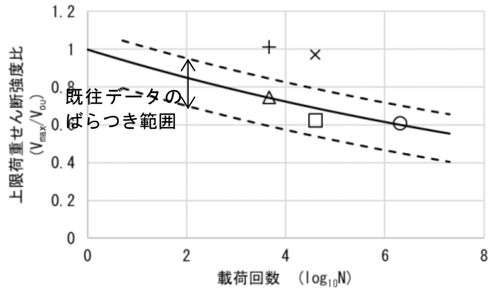


図-14　載荷回数と試験体変位の関係



○：基準試験体　□：ASRF1　△：ASRF2
×：ASRF1（V_{cu}計算値）　＋：ASRF2（V_{cu}計算値）

図-15　載荷回数と上限荷重せん断強度比の関係

基準試験体より大きかったこともあり，破壊時点での載荷回数の違いがあるが，長期促進試験を行った ASRF2 試験体の破壊前に変位の増加が著しくなるまでは同程度であった。また，載荷回数と上限荷重せん断強度比の関係については，全ての試験体が既往のせん断耐力算定式検討時のデータばらつきの範囲内であった。長期促進試験によるせん断強度への影響は，静的せん断載荷試験では耐力低下が発生したが，疲労試験においては影響がなかった。この要因は，静的せん断載荷試験では長期促進試験後の試験体が支点付近で鉄筋の付着破壊発生により長期促進試験前の試験体と破壊形態が異なったが，せん断疲労載荷試験では長期促進試験前後で破壊形態が変わらなかったことであると考えられる。また，V_{cu}の値に軸力を考慮しない計算値を用いた場合，既往の研究の予測式の範囲より大きな繰り返し回数まで荷重を維持できたことになる。すなわち，設計時点の荷重条件と比較すると，ASR により軸力が導入されるため，せん断疲労強度は基準試験体より向上したということが言える。

6.結論

ASR 長期促進試験をした部材の載荷試験を実施したところ，ASR によるケミカルプレストレスの影響により静的せん断試験，せん断疲労試験で ASR のない基準試験体と比較して強度が向上する結果を得た。その他，本試験による主な結果を以下に示す。

(1) ASR で損傷した経年 24 年程度の構造物から切り出した試験体の長期促進試験により，1%程度の膨張が発生した。膨張は約 900 日程度で収束した。

(2) 長期促進試験によりコア圧縮強度，静弾性係数は低下した。これは，ひび割れが新たにコアを横断する方向で発生する試験体で低下したものである。

(3) 静的せん断載荷試験の結果，長期促進試験した試験体では軸方向鉄筋の付着破壊により長期促進試験前よりせん断耐力が低下した。ただし，側面鉄筋かぶりが小さい試験体であったため，長期促進試験により付着破壊が誘発されたかどうかは不明である。基準試験体と比較した場合，せん断耐力は増加した。

(4) せん断疲労載荷試験の結果，静的せん断試験の結果を考慮したせん断耐力を使用することで，長期促進試験前後の試験体はいずれも健全な部材のせん断強度算定式で評価可能な結果となった。ASR の影響を考慮しないせん断耐力の計算値を使用した場合，繰り返し回数は式(2)より算定される回数より大きくなり，せん断疲労強度が想定より大きい結果となった。

参考文献

1) 棚橋　和夫，岩永　武士，小柳　治，浅野　幸夫：ASR によって劣化した RC はりおよび柱の力学挙動について，コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.1，pp.843-848，1996

2) 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.1，166-177，2007.3

3) 依田　佐知子，田附　伸一，大庭　光商：ASR により損傷を受けた RC 部材のせん断耐力試験，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.62，5-442，pp.883-884，2007

4) 村角　保行，細川　高志，松本　直樹，光木　史朗：アルカリ骨材反応が生じた鉄筋コンクリート部材の物性確認試験と部材試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.1-6，2005

5) 石橋　忠良，松田　好史，斉藤　啓一：少数本のくいを用いたフーチングのせん断設計について，土木学会論文集，Vol.337，pp.197-204，1983.9

6) 二羽　淳一郎，山田　一宇，横沢　和夫，岡村　甫：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，Vol.372/V-5，pp.167-176，1986.8

7) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書（設計編），2018.3

8) 上田　多門，岡村　甫，Sabry A. Farghaly，榎本　松司：せん断補強鉄筋のないはりのせん断疲労強度，コンクリート工学，Nol.20，No.9，pp.89-98，1982