論文 ASR コンクリートの力学的特性と劣化度評価について

久保 善司*1・服部 篤史*2・宮川 豊章*3

要旨:現状の調査・診断技術においては,ASRにより劣化したコンクリート構造物の力学的 性能を定量的に評価する手法は十分には確立されていない現状にある。そこで,横拘束を与 えたASR劣化コンクリートの膨張挙動とその力学的性能を踏まえて劣化度評価手法について 検討した。その結果,炭素繊維シートによる補修・補強を行う場合には,膨張抑制および横 拘束効果の観点から早期に適用することが望ましく,また,精度の向上を含めて今後のデー タの蓄積が必要であるものの,AE法によるイベントレートピーク時の荷重レベルは,ASR構 造物の膨張量推定および劣化指標として有効であることを明らかにした。 キーワード:ASR,横拘束,膨張量推定,劣化度評価,補修・補強

1.はじめに

アルカリ骨材反応(以下,ASRと略する)およ び鉄筋腐食はコンクリート構造物の代表的な劣 化原因として挙げられ,これらに対する補修・補 強を含めた維持管理手法の確立が必要とされて いる。近年では,ASRによる過大な膨張により, コンクリート強度の低下,コンクリートと鉄筋 の付着低下,鉄筋の破断・降伏などを生じ,ASR により著しく劣化したコンクリート構造物も報 告されている¹⁾。そのため,これらの構造物に対 してPC巻立て工法および鋼板巻立て工法などの 補強対策の検討が始められている¹⁾。

一方,ASRにより劣化した構造物の力学的性 能を定量的に評価する手法は十分には確立され ていない現状にある。ASRを生じた構造物内部 の劣化を非破壊的に診断する手法²⁾,あるいは, 実構造物より採取したコンクリートコアをFRP シートにより横拘束し,横拘束コンクリートの 性状からASR劣化度を判定する手法³⁾に関する 検討がなされているものの,今後の更なる研究 が必要とされている。そこで,横拘束を与えた ASR劣化コンクリートの膨張挙動および力学的 性能を把握した上で,従来から用いられている 超音波伝播速度測定法に加えて動弾性係数測定 法およびAE法によるASR劣化度評価手法につい て検討した。 2.実験概要

2.1 使用材料および配合

(1) コンクリート

セメントとして普通ポルトランドセメントを 用いた。細骨材として野洲川産の川砂を用いた。 粗骨材として土山産の砕石を,反応性骨材とし て養老産の砕石(チャート)を用いた。反応性骨 材の粗骨材全量に対する割合はペシマムとなる 80%とした。反応性骨材のアルカリ反応性試験 (化学法 JIS A 1145)の結果は溶解シリカ量が 609mmmol/I,アルカリ減少量が223mmmol/Iとな り、「無害でない」と判定された。ASRを促進さ せるための添加アルカリとして,鉄筋腐食によ る複合劣化の影響を避けるため,防錆効果を持 つ亜硝酸ナトリウムを用いた。アルカリは等価 アルカリ量 12.0kg/m³ に設定し,砂置換により添 加した。混和剤として減水剤およびAE助剤を用 いた。コンクリートの配合を表-1に,コンクリー ト強度試験結果を表-2に示す。

(2) 鋼材および連続繊維シート

軸方向筋としてD6異形鉄筋を用い,横拘束筋 としてD3フープ筋を用いた。軸筋および横拘束 筋の機械的性質を表-3に示す。連続繊維シート として炭素繊維シート(繊維目付:200g/m²,設 計厚さ:0.111mm,引張強度:3479N/mm²,引張 弾性率:2.303×10⁵N/mm²)を用い,貼付にはエ

*1 金沢大学助手 工学部土木建設工学科 博士(工学)(正会員) *2 京都大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 博士(工学)(正会員)

*3 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 工学博士 (正会員)

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a	単位量 (kg/m³)						減水剤	AE助剤
	(%)	W	С	S	Gn ^{*1}	Gr ^{*2}	NaNO ₂	(cc/m³)	(cc/m³)
55	49	168	305	861	189	742	22.2	763	610

*1:非反応性骨材 *2:反応性骨材

表-3 鉄筋の機械的性質

鉄筋種類	公称 直径 (mm)	降伏 強度 (N/mm²)	降伏 ひずみ (µ)	引張 強度 (N/mm²)	弾性係数 (× 10⁵ N/mm²)	伸び (%)
D6異形鉄筋	6.35	362	2100	550	1.892	20.8
D3異形鉄筋	3.10	244	1300	325	1.846	42.0

ポキシ系のプライマーおよび含浸樹脂を用いた。

2.2 実験要因

(1) 拘束量

横拘束筋量として道路橋脚で耐震性を考慮し た場合の最低量に当たる0.28%(配置間隔79mm, かぶり14mm)とした。軸筋量は一般的な道路橋 脚の標準的な量である1.1%(D6異形鉄筋4本配 置,かぶり17mm)とした。

炭素繊維シートによる補強量については,実 構造物での最大に当たる補強量を考慮し,横拘 束体積比を0.14%(シート間隔100mm,幅30mm)のものを用意し,膨張量と拘束量に関する既往 の研究4)を参考に,ASR膨張をシートの拘束のみ で100µ程度に抑制するのに必要な体積比である 0.44%(1層全面),中間程度の0.22%(シート間 隔10 0mm,幅50mm)の計3種類を用意した。な お,シートは全て一層巻とした。無筋のものに シート拘束を行うもの,横拘束筋を配置し,シー ト拘束を行うもの,横拘束筋および軸筋を配置 したものにシート拘束を行うもの3種類の拘束方 法を用意した。

(2) 補強時期

シートによる劣化抑制効果を検討するため, 補強時期として劣化初期および劣化収束期の2種 類を用意した。補修・補強の検討が必要とされる 膨張レベル(目視でひび割れが確認でき,膨張ひ ずみが500~1000µ程度に達した時点)を劣化 初期とし,膨張がほぼ終了した時点を劣化収束 期とした。実験要因を表-4にまとめて示す。

2.3 供試体

供試体は角柱供試体(10×10×40mm,図-1

表-2 コンクリート強度試験結果

圧縮強度 (N/mm²)	弹 (单性係数 N/mm²)	曲げ強度 (N/mm²)			
31.6		3.01	2.75			
表-4 実験要因						
拘束筋		無 横拘束筋 横拘束筋+軸筋				
シート 補強量(%)	無 0.14% 0.22% 0.44%				
補強時期		劣化初期 劣化収束期				

参照)とし、打設1日後脱型 し,2週間湿布養生を行い, 促進環境(40, 100%R.H.)に静置した。所 定の補強時期にシートを 貼り付けた。劣化初期のも のは補強後,再び促進環境 下に暴露した。供試体は全 て劣化収束期まで暴露し, 載荷試験を実施した。



図1 供試体

シート貼付けは,1週間程度乾燥の後,ディス クサンダによる下地処理を行い,エポキシ系プ ライマーの塗布後,炭素繊維シートに樹脂を含 浸させ,シートを貼り付けた。貼付け後,室内に おいて1週間 FRP 層を養生した。

2.4 試験方法

膨張ひずみ測定,超音波伝播速度測定および 動弾性係数測定および載荷試験を実施した。軸 方向の膨張ひずみはコンタクトゲージ(基長 250mm)により測定した。超音波伝播速度は供試 体の端面間(400mm)を測定し,動弾性係数につ いては共振振動法により測定した。膨張ひずみ は暴露開始直後より経時的に測定した。

載荷試験は静的一方向一軸載荷とし,最大耐 力および初期剛性を求めた。また,載荷時のAE をAE測定用センサ(150kHz共振型)によって検 出し,AE解析装置によって記録,解析した。AE の計測条件として,利得をプリアンプ40dB,リ ニアアンプ40dBの合計80dB,ディスクリレベル を1Vに設定した。



- 3. 結果および考察
- 3.1 膨張挙動

横拘束が軸方向膨張ひずみ(暴露終了時)に与 える影響を図-2に示す。横拘束量の小さい0.22% 以下のものを除き,横拘束量が大きいものほど 無拘束のものより膨張ひずみは小さくなった。 本来,横拘束は軸方向の膨張を直接的に拘束す るものではない。しかし,膨張が生じて周方向の ひずみが大きくなると,横拘束力が大きくなり, それが軸方向の膨張作用に対して摩擦力として 働き,軸方向の膨張を抑制したものと考えられ る。そのため,横拘束量の大きいものでは,拘束 量に応じて膨張が抑制された。これに対して,横 拘束量の小さいものでは,この摩擦力による作 用が小さいため,逆に,横拘束力が拘束直角方向 の変形を大きくするように作用し,膨張が無拘 束のものより大きくなったものと考えられる。

横拘束の種類の影響については,同程度の横 拘束量であれば,横拘束筋のものの方が軸方向 膨張ひずみが小さい。横拘束筋が打設時より配 されているのに対して,シートのものは劣化初



期に貼付られていることによる影響が考えられ る。さらに、シートの有無によって水分制御が異 なることによる影響も考えられる。横拘束の種 類にかかわらず、横拘束量の大きいものほど質 量増加は小さくなることを既に報告しており⁵⁾、 横拘束量が同程度の場合には、シートの有無に かかわらず、同程度の水分が内部に存在するも のと考えられる.シートを貼り付けたものでは、 水分の滞留によって ASR 膨張が促進されたもの と推察される.

軸筋を配したものの膨張ひずみは他のものよ リ小さい。既往の研究⁶では,無拘束のものの膨 張ひずみが3000 µ程度の場合に,軸筋を配した ものでは1000 µ程度の膨張となっており,抑制 の程度は,既往の研究と同程度であった。

既往の研究ⁿによれば,ひび割れ幅と膨張ひず みには相関があるとされている。そこで,軸方向 のひび割れ幅と膨張ひずみの相関関係を求め, 測定された軸直角方向のひび割れに,この関係 を適用して軸直角方向の膨張ひずみを推定した。 横拘束が軸直角方向膨張ひずみに与える影響を 図-3に示す。横拘束の種類にかかわらず,横拘 束量が大きいものほど膨張ひずみは小さくなり, 横拘束による膨張抑制効果が認められた。

3.2 耐荷性状

横拘束および ASR 膨張が初期剛性に与える影 響を図-4に示す。初期剛性は荷重-変位曲線の弾 性範囲と考えられる部分の傾きから求めた。横 拘束の種類にかかわらず,横拘束が初期剛性に 与える影響は顕著でないものと考えられる。軸 筋を配したものは、他のものより初期剛性が大 きい。コンクリート自身の剛性が小さくなれば 軸筋を配したものでも剛性の低下が生じると考 えられ、軸筋を配したものの膨張は抑制されて いることから、コンクリート自身の剛性を反映 しているものと考えられる。一方,拘束筋の種類 にかかわらず,膨張ひずみが大きいものほど初 期剛性は小さくなった。シートおよび鉄筋等に よる拘束下にあっても, ASR 膨張が大きくなれ ば,内部のコンクリート自身の剛性は低下する ものと考えられる。

横拘束および ASR 膨張が最大耐力に与える影響を図-5に示す。補強時期にかかわらず,横拘 束が大きいものほど,最大耐力は大きくなった。 ASR 膨張が生じるとコンクリートの変形抵抗性 が低下し,最大耐力時における周方向ひずみは 大きくなるため,横拘束力が大きくなり,最大耐 力に対する寄与が大きくなったものと考えられ る。補強時期の影響については,劣化収束期に補 強したものより劣化初期にシート補強を行った ものの方が,横拘束による最大耐力の増加は大 きくなった。この理由として,補強後に膨張が抑 制されたことともに,シートに引張力が導入さ れ,横拘束力が大きくなったためと考えられる。

横拘束筋は1300 μ程度のひずみで降伏を生じ るため,それ以降は拘束力の向上は期待できな い。これに対して,シートの破断ひずみは15000 μ程度と大きく,周方向ひずみの増加に伴い拘 束力が増加する。このため,同程度の横拘束量で あれば,劣化初期にシート補強したものは横拘 束筋のものより最大耐力が大きくなったものと 考えられる。

ASR 膨張の影響については,補強時期にかかわらず, ASR 膨張が大きいものほど最大耐力は小さくなった。横拘束量にも依存するものの,横



拘束による最大耐力の向上は,膨張による強度 低下に比して小さいと考えられる。一方,同程度 の膨張量であれば,劣化収束期に補強したもの より,劣化初期に補強したものの方が最大耐力 は大きい。したがって,炭素繊維シートによる補 修・補強を行う場合には,早期に補修・補強を行 うことが望ましい。

3.3 ASR 劣化度評価

(1) 超音波伝播速度および動弾性係数

ASR 膨張が超音波伝播速度および動弾性係数 に与える影響を図-6に示す。ばらつきはあるも のの,膨張ひずみと超音波伝播速度には線形関 係が認められ,膨張ひずみが大きいものほど超 音波伝播速度は小さくなった。膨張ひずみと動 弾性係数には,超音波伝播速度よりも良好な相 関関係が認められ,膨張ひずみが大きいものほ ど動弾性係数は小さくなった。いずれの場合に おいても,本研究で対象とした供試体において は鉄筋およびシート等の影響は顕著ではなかっ た。実構造物への適用においては,これらの測定 値は,ASRゲルによるひび割れの充填,水分の存 在,骨材の品質および施工の良否などの影響を 受けるとされており³⁾,さらには,実構造物内の



ばらつきを考慮する必要がある。測定値単独の 評価は難しいものの,ばらつきを考慮した上で の経時的な劣化モニタリングへの利用が可能で あると考えられる。

(2) AE法

AEは応力-ひずみ関係が線形の領域において, 定常的に低いレートで発生し,非線形領域にお いてはAEが頻発するようになり,終局付近でさ らに加速的にAEが発生するとされている。しか し,ASR および凍害により劣化したコンクリー トは,内部に微細なひび割れを多数含み,それら が起点となって比較的低応力の段階からAEが頻 発するとされている8。本研究においても,膨張 ひずみが大きく,劣化が進行しているものと考 えられるものでは,載荷開始後からAEの発生数 は増大し,最大耐力より小さい荷重レベルでAE イベントレートはピークに達した。これに対し て、比較的健全に近いと考えられるものでは、荷 重レベルが大きくなった時点からAEの発生数は 増大し,最大耐力付近においてAEイベントレー トはピークに達した。

シートが,載荷開始時から最大耐力時までに



発生する AE の総数に与える影響を図-7に示す。 拘束筋の有無にかかわらず,シート体積比が大 きいものほど AE 総発生数は増加した。シートの 横拘束によって,ASR 膨張および耐力の低下が 抑制され,破壊時までの変形が大きくなり,その 間により多くの AE を発生したものと考えられ る。他方,シートおよび樹脂の破壊音を検出した 可能性も考えられる。しかし,シート体積比が等 しければシートによる影響は同程度であると考 えられる。シート体積比が同程度の0.14%および 0.22%のもののASR 膨張とAE 総発生数の関係を 図-8 に示す。ばらつきはあるものの膨張ひずみ が大きいものほど AE 総発生数は増加した。

イベントレートピーク時の荷重を最大耐力で 除し、その荷重レベルを求めた。ASR膨張がイベ ントレートピーク時の荷重レベルに与える影響 を図-9に示す。膨張の小さいものほど、荷重レ ベル1(最大耐力)付近にイベントレートのピー クがあり、膨張が大きいものほどイベントピー ク時の荷重レベルは小さくなった。ASRにより 劣化したコンクリートにおいては,膨張が大き いものほど,コンクリート内部の微細なひび割 れの数は増加するため,荷重レベルの低い段階 から多数のAEを発生し,荷重レベルが高くなる と内部の微小ひび割れが連結し,ひび割れの進 展する場所が限られ,イベントレートは小さく なったと考えられる。

イベントレートピーク時の荷重レベルと膨張 ひずみには良好な相関関係が認められ,実構造 物の膨張量推定あるいは劣化指標としての利用 が考えられる。しかし,現時点ではデータの蓄積 が十分でないため,十分な精度が得られている とは言い難く,実用化に向けては更なる検討が 必要である.さらに,劣化指標として用いる場合 には,力学的性能との関連づけも必要とされる。 イベントピーク時の荷重レベルによる評価には, 超音波伝播速度および動弾性係数と同様に,劣 化以外の影響も受けると考えられるものの,一 軸載荷試験時の力学的挙動も同時に評価してお り,実構造物の膨張量推定あるいは劣化指標と しての有効性は高いと考えられる。

5.まとめ

(1) ASR 劣化コンクリートにおいて横拘束による最大耐力の向上はあるものの,最大耐力の向上はあるものの,最大耐力の向上は ASR 膨張による強度低下に比して小さい。

(2) 炭素繊維シートによる補修・補強を行う場合には,膨張抑制および最大耐力の向上の観点から早期の適用が望ましい。

(3) 構造物内でのばらつきを考慮することで, 超音波伝播速度測定および動弾性係数測定は ASR 劣化モニタリングとしての利用が可能であ る。

(4) 精度の向上を含めて今後のデータの蓄積が 必要であるものの,AE法によるイベントレート ピーク時の荷重レベルは,力学的な挙動も同時 に評価しており,ASRを生じた実構造物の膨張 量推定,あるいは劣化指標として有効である可 能性が高い。

参考文献

1) 久保ほか:アルカリ骨材反応によるコンク



リートの劣化損傷事例と最新の補修・補強技術,コンクリート工学, Vol.40, No.6, pp.3-8, 2002.6

- 2) 葛目ほか:アルカリ骨材反応を生じた構造物 に適用する非破壊検査,コンクリート構造物 の補修,補強,アップグレードシンポジウム論 文集, Vol.2, pp.171-178, 2002.10
- 3)山梨ほか:アルカリ骨材反応を生じたコンク リート構造物の劣化評価手法に関する研究, コンクリートの耐久性データベースフォー マットに関するシンポジウム論文集,pp.21-26,2002.12
- 4) K. Y. Lo et.al : Measurements of residual expansion rates resulting from alkali-silica reaction in existing concrete dams, ACI Materials Journal, pp.339-345, May 1999
- 5) 柴田ほか: ASR により劣化したコンクリート における炭素繊維シートの補強効果,コンク リート工学年次論文集, VOI.23, No.1, pp.397-402, 2001.6
- 6) 西林ほか: アルカリ骨材反応に及ぼす鉄筋拘 束の影響に関する研究,コンクリート工学年 次論文報告集,Vol.10,No.2,pp.795-800,1988.6
- 7) 王ほか: コンクリート供試体の ASR によるひ びわれと劣化評価, セメント・コンクリート論 文集, No.47, pp.534-539, 1993.5
- 8)油野ほか:AE発生挙動の確率過程論解析によるコンクリートの劣化度評価研究,土木学会論文集,No.520,V-28,pp.13-23,1995.8