

論文 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

柴田 都江^{*1}・久保 善司^{*2}・栗原 慎介^{*3}・宮川 豊章^{*4}

要旨:鉄筋拘束の少ない場合や、過大応力が作用した場合の、ASR により劣化したコンクリート部材の耐荷性状を検討するために、耐荷性状に問題が生じた場合の補強方法として、炭素繊維シートによる横拘束効果を検討した。炭素繊維シートによる横拘束が、最大荷重および最大荷重時のひずみに与える影響は小さいが、最大荷重時以降の靭性はかえって向上することがわかった。また、ASR 膨張は、拘束量が 0.22%程度以上であれば、炭素繊維シート、横拘束筋とともに、拘束量に応じて抑制された。

キーワード:アルカリ骨材反応, ASR 膨張, 炭素繊維シート, 橫拘束効果, 補強効果

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化原因の代表的なものとして、アルカリ骨材反応（日本で被害の実績の多いのはアルカリシリカ反応、以下 ASR と略す）および塩害などによる鉄筋腐食がある。

ASR により損傷したコンクリート部材の耐荷性状については、適切に処置された内部の鉄筋によって ASR 膨張が拘束された場合には健全なものと比べてほとんど低下せず、ASR によって導入されたケミカルプレストレスによって耐荷力が向上したとの報告もある^{1) 2) 3)}。しかし、膨張が過大となった場合には耐荷性状に影響を与えることが予想され、地震時のような過大な正負荷重の繰り返し作用下の耐荷性状の検討は十分には行われていない^{4) 5)}。また、きわめて鉄筋比の低い梁および柱の力学的挙動を検討した結果からは、柱においては剛性および耐荷力が低下し、梁の場合にはケミカルプレストレス効果が発揮されず、耐荷性状に問題が生じるとの報告もある⁶⁾。本研究では、過大応力が作用した場合や鉄筋拘束の少ない場合の ASR によ

る劣化したコンクリート部材の耐荷性状について検討することを目的として、耐荷特性に問題が生じた場合の炭素繊維シートによる補強効果について検討した。

2. 実験概要

ASR により劣化したコンクリート部材の曲げ圧縮部に着目し、角柱供試体（10cm×10cm×40cm）を用いて、一軸圧縮試験によって検討した。

2.1 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材として滋賀県野洲川産の川砂を用いた。粗骨材は、非反応性骨材として土山産の碎石を、反応性骨材として養老産のチャートを用いた。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。混和剤として、AE 減水剤、AE 助剤を用いた。添加アルカリとして、膨張量が大きく、鉄筋の発錆との複合劣化を防ぐ、亜硝酸ナトリウム NaNO₂ を用いた。なるべ

*1 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 金沢大学助手 工学部土木建設工学科 工博（正会員）

*3 ショーポンド建設（株） 補修工学研究所 調査診断研究室室長 工修（非会員）

*4 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 工博（正会員）

表-1 示方配合

コンクリートの種類	粗骨材の最大寸法(mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						減水剤 (cc/m ³)	助剤 (cc/m ³)
				W	C	S	G(非反応性)	G(反応性)	混和材 (NaNO ₂)		
非反応性	10	55	49	168	305	883	945	-	-	763	610
反応性 NaNO ₂	10	55	49	168	305	861	189	742	22.2	763	610
非反応性 NaNO ₂	10	55	49	168	305	861	945	-	22.2	763	610

表-2 コンクリート強度試験結果（材令 14 日）

	圧縮強度	ヤング率	引張強度
非反応性	28.0N/mm ²	4.23×10^4 N/mm ²	1.21N/mm ²
反応性	22.6N/mm ²	4.38×10^4 N/mm ²	1.56N/mm ²

表-3 鉄筋の機械的性質

鉄筋種類	公称直径 (mm)	公称断面積 (mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
異形鉄筋D6	6.35	31.67	310	553	29.4
異形鉄筋D3	3.10	7.55	299	378	28.2

表-4 炭素繊維シートの機械的性質

繊維の種類	繊維目付 (g/m ²)	設計厚さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	引張弾性率 (N/mm ²)
高強度炭素	200	0.111	3479	2.303×10^5

表-5 試験要因

コンクリートの種類	反応性 (添加アルカリNaNO ₂)、非反応性
拘束筋量	無、横拘束筋、横拘束筋+軸筋
シート補強量 (体積比)	無、0.14%、0.22%、0.44%
載荷時期 (補強時期)	養生直後、劣化初期、劣化収束期 (劣化初期補強)、劣化収束期 (劣化収束期補強)
環境条件	促進環境 (40°C, 100%R.H.)

く大きな膨張が得られるようにするため、アルカリは Na₂O 等量で 12.0kg/m³となるように、砂置換により添加した。コンクリートはいずれも目標強度 $f_{ck}=30N/mm^2$ であり、G_{max}=10mm, W/C=55%, s/a=49%とした。示方配合を表-1に示す。また、各コンクリートの標準湿布養生材齢 14 日における強度試験結果を表-2に示す。軸方向鉄筋として市販の D6 の異形棒鋼を用いた。横拘束筋として異形棒鋼 D3 外寸 77.2×77.2mm のフープ筋を用いた。軸筋および横拘束筋の機械的性質を表-3に示す。炭素繊維シートの機械的性質を表-4に示す。

2.2 試験要因

鉄筋拘束の少ないコンクリートの炭素繊維シートによる横拘束効果を見るため、横拘束筋量は、実橋脚レベルで、耐震性を考慮した場合の最低量にあたる 0.28% (配置間隔 7.9cm かぶり 1.4cm) とした。軸筋量は一般的な実橋脚において標準的な量である 1.1% (4 本 かぶり 1.7cm) とした。シート補強量は、1 辻 3m の正方形断面部材に対して 6 層 (目付量 300g/m²) 程度巻き立てる実施工を考慮した、横拘束筋体積比 0.14% (シート: 間隔 10cm, 幅 3cm), アルカリ骨材膨張をシート拘束のみで膨張量を 100 μ 程度に抑制するのに必要な体積比である 0.44% (1 層全面), その中間の 0.22% (シート: 間隔 10cm, 幅 5cm) の 3 種類とした。シートは

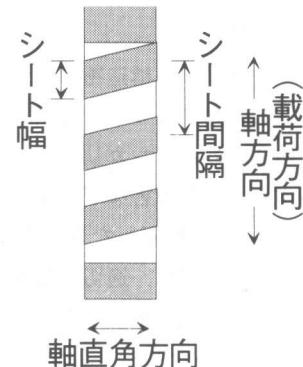


図-1 供試体図

すべて1層巻きである。シート施工後の供試体図を図-1に示す。劣化以前の強度特性を把握するため、養生直後に載荷するものも用意した。収束期に載荷を行うものに関しては、シート拘束が膨張抑制に与える影響を把握するために、劣化初期に補強するものと収束期に補強するものとを用意した。試験要因を表-5にまとめて示す。

3. 実験結果および考察

膨張ひずみが 700μ を越え、ひび割れが確認できた時点を劣化初期とした。収束期に載荷を行うものは、膨張が収束しておらず暴露中である。非反応性の養生直後のもの、反応性の養生直後のものおよび劣化初期のものの載荷試験を行った。現段階までに得られた結果を以下に示す。なお、横拘束量としては横拘束筋と炭素繊維シートを合わせたものを用いている。

3.1 載荷試験結果（養生直後、劣化初期）

3.1.1 初期剛性

応力-ひずみ曲線の、ほぼ弾性範囲と考えられる部分の傾きを初期剛性として求めた。横拘束量と初期剛性との関係を図-2に示す。若干のばらつきはあるが、コンクリートの種類、横拘束の種類にかかわらず、横拘束による初期剛性の違いはないと考えられる。非反応性コンクリートで、軸筋と横拘束筋を配したもののが初期剛性は、他の非反応性コンクリートのものと比べて高くなつたが、それにシートを併用したものの初期剛性は、他の非反応性コンクリートのものとほぼ同程度となつた。また反応性の養生直後のものは非反応性のものと同程度の初期剛性である。コンクリートの劣化による違いが見られ、反応性の劣化初期のものは、反応性の養生直後のものや非反応性のものよりも初期剛性が小さい。ASR膨張により内部に生じたマイクロクラックおよびひび割れによって剛性が低下したものと考えられる。

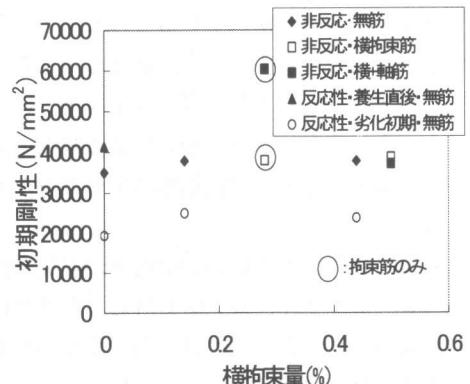


図-2 初期剛性

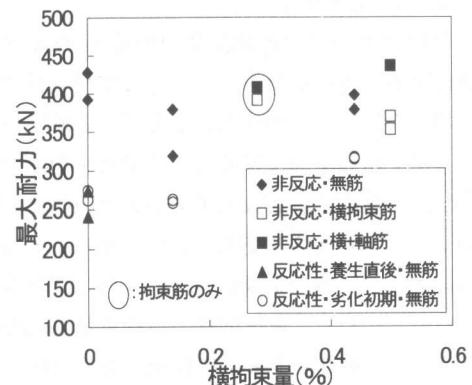


図-3 最大耐力

3.1.2 最大耐力

横拘束量と最大耐力との関係を図-3に示す。コンクリートの種類によらず、横拘束による顕著な影響は認められない。非反応性コンクリートのもので、軸筋を配したものは、最大耐力が若干大きくなつた。反応性コンクリートで、養生直後のものと劣化初期のものでは同程度の最大耐力であり、いずれも非反応性コンクリートの6~8割程度であった。

3.1.3 吸收エネルギー

荷重-変位曲線の最大荷重以降の領域で、荷重が最大時の80%を下回った時点を終局時と定義し、載荷開始時から終局時までの各荷重-変位曲線の囲む面積を終局時の吸收エネルギーとした。吸收エネルギーと横拘束量との関係を図-4に

示す。コンクリートの種類によらず、吸収エネルギーは、横拘束量が大きいものほど大きくなつた。非反応性のものよりも、劣化したものにシート補強を施した方が、吸収エネルギーは大きくなつた。また、シート補強による吸収エネルギー増加の効果も、劣化初期のものの方が大きくなつた。

これは、劣化したものの初期剛性が非反応性のものよりも小さく、最大耐力時およびそれ以降の圧縮変位が大きいことに起因するものと考えられる（図-5 参照）。

3.1.4 最大平均応力

今回の実験では各供試体の荷重-圧縮変位曲線に顕著な違いが見られた。そこで最大耐力以降のじん性をあらわす指標として、等価応力ブロックを求める際に参考となる最大平均応力を求めた。横拘束量と最大平均応力との関係を図-6 に示す。最大平均応力は、コンクリートの種類によらず、横拘束量が大きいものほど大きくなつた。ただし、非反応性の横拘束量 0.14% のもの、横拘束筋とシートを併用したものは、最大平均応力が小さくなつた。これはシートをゼブラ状に巻くことによって生じたねじりに起因するものと考えられる。なお、シートをゼブラ状に巻いたものでも、軸筋を有するものは、軸筋によってねじりが拘束され、シートによる横拘束が適切に発揮されたものと考えられる。

劣化初期のものの最大平均応力は、非反応性のものより小さくなつた。最大平均応力が小さくなつた理由としては、ASR 膨張による初期剛性およびコンクリート強度の低下が原因であると考えられる。しかし、シート拘束による最大平均応力増加の割合は、劣化初期のものの方が大きく、劣化しているものの方が、シートによるじん性向上の効果を得られやすいと考えられ、逆に、コンクリート自身に十分な耐荷力がある場合には、シート補強によるじん性の向上は得られにくいく。

なお、反応性のもので、劣化初期に載荷した

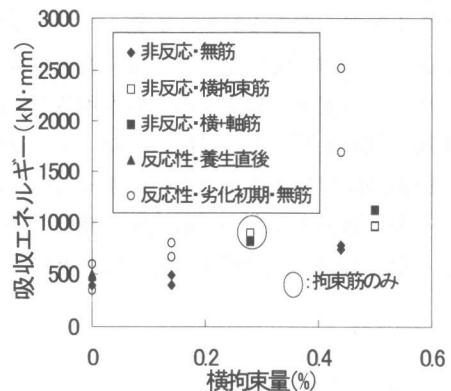


図-4 吸収エネルギー

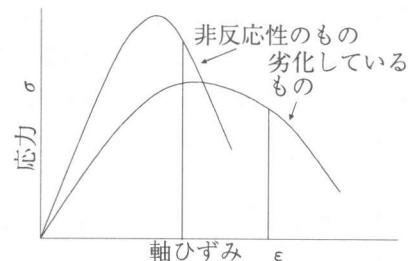


図-5 荷重-変位曲線と吸収エネルギー

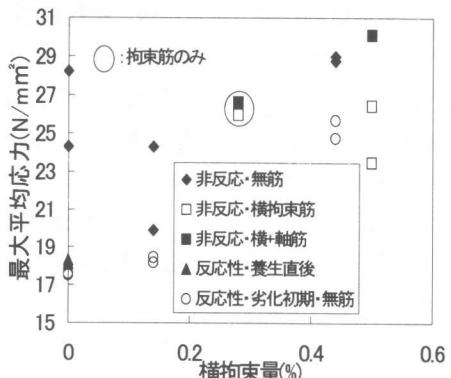


図-6 最大平均応力

ものと養生直後に載荷したものとで、最大荷重、最大平均応力には、ほとんど差が見られず、これら劣化初期のものと非反応性のものとの違いは、反応性骨材および亜硝酸ナトリウムの添加に伴うコンクリート圧縮強度低下に起因するものと考えられる。ただし、初期剛性は劣化による低下が見られ、今後、劣化収束期の載荷試験結果も含めて検討する必要がある。

3.2 膨張挙動

供試体に取り付けたひずみ測定用プラグにより、軸方向膨張を測定した。また、ひび割れ幅の合計と膨張ひずみには線形関係があるとされており、供試体のひび割れ幅を測定して軸直角方向の膨張ひずみの推定を行った。全ての供試体に関して暴露開始時の質量測定を行っていないかったため、データのないものについては平均的な供試体の質量を用いて、暴露開始時の供試体質量とした。暴露後の供試体の質量増分を開始時の質量で除したものと質量増加率とした。

3.2.1 膨張ひずみ（軸方向）

暴露後約1年における軸方向膨張ひずみを図-7に示す。横拘束が大きいものでは、無拘束のものより軸方向の膨張ひずみは小さくなっているものの、横拘束が0.22%以下のものについては、無拘束のものよりもむしろ大きくなつた。軸筋を配したもののは、配さないものよりも膨張ひずみが小さく、軸筋により軸方向の膨張が抑制されたことが認められる。軸筋による抑制の程度も既往の研究⁷⁾とほぼ同程度であり、無拘束のものが3500μ程度膨張しているのに対して、軸筋を配したものでは1000μ程度の膨張に抑制されている。

同一の拘束量であれば、炭素繊維シートを施したものより横拘束筋を配したものの方が、膨張量は小さくなつた。今回採用した炭素繊維シートは繊維方向には大きな剛性を有するが、繊維直角方向には有効でなかったこと、シートを施すことによりコンクリートからの水分逸散が妨げられ、コンクリート中に水分が滞留し、ASR膨張を促進した可能性などが考えられる。

3.2.2 膨張ひずみ（軸直角方向）

暴露後約1年における軸直角方向の膨張ひずみを図-8に示す。横拘束量が0.14%のものを除けば、横拘束されたものの軸直角方向の膨張量は無拘束のものより小さく、横拘束の種類に関わらず、横拘束による膨張抑制効果が認められ

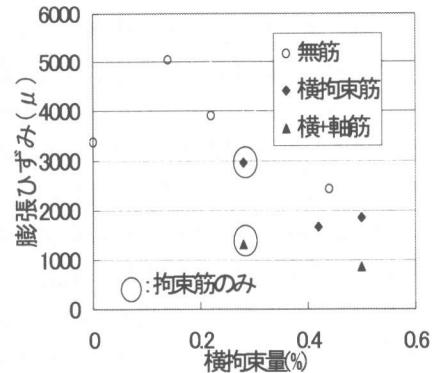


図-7 軸方向膨張ひずみ

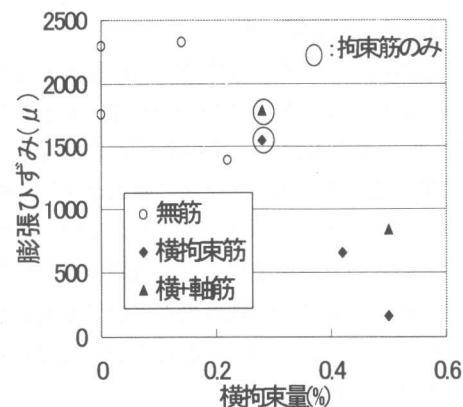


図-8 軸直角方向膨張ひずみ

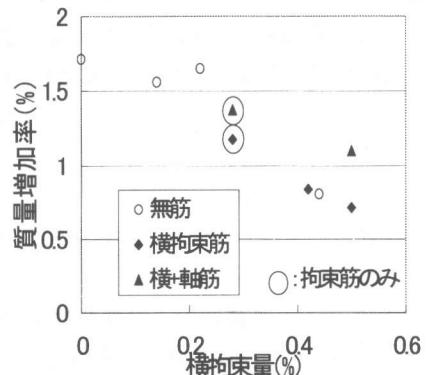


図-9 質量増加率

る。0.14%のものは無拘束のものより若干膨張が大きくなつた。シートによる拘束が十分でなく、シートの存在がASR膨張を促進したため、無拘束より大きな膨張が生じたものと考えられる。

横拘束量と膨張ひずみは、ほぼ線形関係となっている。軸筋と横拘束筋を併用したものについては、同じ横拘束量であれば、横拘束筋のみのものの方が膨張量は小さくなつた。横拘束の種類による、膨張抑制効果の顕著な違いは認められなかつた。今回の横拘束の範囲においては、0.44%程度の拘束量で大幅な膨張抑制効果が見られた。0.22%においては大幅な膨張抑制効果は期待できないものの、無拘束に比べて小さな膨張量となっており、ある程度の抑制効果は期待できるものと考えられる。

3.2.3 質量増加率

暴露約1年後の供試体の質量増加率を図-9に示す。横拘束の種類にかかわらず、横拘束量が0.22%以上のものは、横拘束が大きいものほど質量増加率は小さく、ゲルの吸水が抑制されているものと考えられる。0.22%以下のものは無拘束のものと同程度の質量増加率となっており、横拘束による膨張抑制効果が十分でなく、無拘束のものと同程度のゲルの吸水を生じているものと考えられる。

膨張ひずみの結果からも膨張抑制においては0.22%程度が必要であったことから、今回の実験からは、横拘束による膨張抑制効果が期待できる横拘束量として0.22%以上が必要であるものと考えられる。

4.まとめ

本研究の範囲内で得られた結論を以下に述べる。

- (1)コンクリートの種類および横拘束の種類によらず、横拘束が初期剛性、最大耐力に与える顕著な影響は認められなかつた。
- (2)反応性の劣化初期のものは、反応性の養生直後および非反応性のものに比べて初期剛性が小さい。反応性のものは、非反応性骨材のものに比べて、最大耐力、初期剛性および最大平均応力が低下する。
- (3)非反応性のものよりも、劣化したものにシ-

ト補強を施した方が、吸収エネルギーは大きくなつた。また、シート補強による吸収エネルギーおよび最大平均応力增加の効果も劣化初期のものの方が大きくなつた。

(4)劣化初期のものは、初期剛性が低下して変形が大きくなるので、圧縮力のみが作用する場合に、適切な横拘束を加えれば、じん性向上の効果が得られやすいと考えられる。

(5)今回検討した供試体における横拘束量の範囲においては、横拘束による膨張抑制効果が期待できる目安として0.22%以上の横拘束量が必要であると考えられる。

参考文献

- 1)日本材料学会：アルカリ骨材反応に関するシンポジウムテキスト, pp.113~151
- 2)小林和夫：アルカリ骨材反応を生じた部材や構造物の耐荷重性能—梁部材—, コンクリート工学, Vol.24, No.11, pp.70~78, 1986.11
- 3)小柳治, 六郷恵哲, 内田裕市, 長瀬道雄：著しいAAR損傷を生じたはりの挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.947~952, 1993.6
- 4)日本コンクリート工学協会：兵庫県南部地震に関する耐震技術特別委員会報告書, pp.28~41, 1997.4
- 5)鳥居和之, 奥田由法, 石井浩司, 佐藤健一：PC巻き立てにより補強したASR損傷コンクリート柱の正負交番載荷試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1051~1056, 1999.6
- 6)小柳治, 内田裕市, 岩永武士, 浅野幸男：定鉄筋比のRC部材におけるASRの膨張拘束に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.52, pp.786~791, 1998.12
- 7)矢村潔, 西林新蔵, 田中修一：鉄筋拘束がアルカリ骨材に及ぼす研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.135~140, 1999.6