

低弾性係数を有するRCはりの曲げ耐荷性状に及ぼす断面修復補修と CFRPシート接着補強の影響

Influence of Patch Repair and Bonding with CFRP Sheet on Flexural Resisting Characteristics of RC Beams with Low Elastic Modulus

森 川 英 典 川 島 洋 平 西 原 知 彦
Hidenori Morikawa Yohei Kawashima Tomohiko Nishihara

1. はじめに

近年、アルカリシリカ反応（以下、ASR）や塩害、中性化によるコンクリート構造物の早期劣化が多数報告されている。中でもASRは、その劣化機構が極めて複雑であるため、他の劣化機構に比べて研究が十分に進んでいない。ASR劣化構造物の補修・補強を含めた維持管理に対して早急な対策が求められているが、ASRは構造条件、使用材料や供用年数等が同じであっても、温度、湿度、日射等の劣化外力が複合的な影響を及ぼすため、劣化の進行度合いが一律ではない。また、部材寸法の違いによっても劣化程度に差が生じるといった報告もあり^{1), 2)}、いまだ十分な維持管理対策が確立されていない。一方、ASR劣化した構造物に対する補修・補強工法として、断面修復工法とシート接着工法がある。シート接着工法によるASR劣化構造物の曲げ補強では、ASRひび割れと載荷ひび割れに起因するブロック化によるシートはく離が報告されている^{3), 4)}。そこで、断面修復工法を併せて行うことで、ASRの劣化によって発生したひび割れの影響を低減でき、鉄筋との付着性状向上や平滑面の形成によりシートとの付着性状も良好になると考えられる。しかし、これらを併せてASR劣化構造物に適用し、曲げ補強効果を検討した報告は少なく、健全な部材に対して適用した場合における知見も十分ではなく検討の余地がある。

本研究では、反応性骨材を用いて同条件で作製した供試体を屋外暴露により劣化を促進させ、ASR劣化がRC部材の曲げ耐荷機構に与える影響について検討を行った。また、断面修復工法とシート接着工法を併せて適用した場合の補修・補強効果は、断面修復材と母材コンクリートの弾性係数によって異なることが報告されている⁵⁾。そこで、母材の力学的特性が補修・補強効果に及ぼす影響を考慮するため、ASR劣化を想定した低弾性係数RCはり部材と一般的なRC部材の2パターンに対して、同工法を適用した場合の補修・補強効果について検討を行った。その後、ASR劣化供試体に対して同工法を適用し、補修・補強効果を比較検討することによりASR劣化による影響も加味して考察する。

2. 実験概要

2. 1 屋外暴露したRC部材のASR劣化状態と耐荷性能評価（ASR実験）

2. 1. 1 実験要因

表-2.1に劣化供試体の示方配合を示す。供試体は普通ポルトランドセメントおよび反応性骨材（北海道産安山岩）と非反応性骨材を用いて作製した。反応性・非反応性骨材の混合比率は、既往の同一骨材におけるペシマム試験結果を参考にして50%ずつとした。また、アルカリ添加剤としてNaClを等価Na₂O総量で8kg/m³となるように添加した。劣化供試体は打設後2週間湿布養生し、大学内の屋外敷地にて暴露した。このとき、より実環境に近い状態で劣化の促進を行

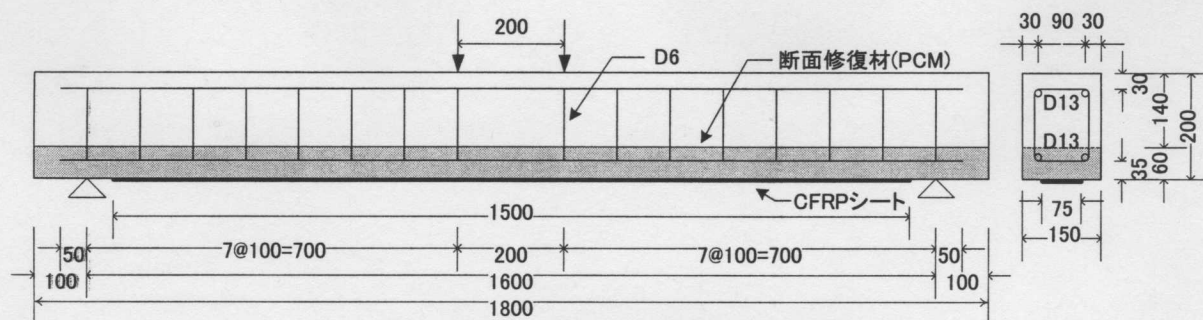


図-2.1 RCはり供試体の側面図および断面図

表-2.1 示方配合 (劣化供試体)

W/C (%)	Gmax (mm)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						AE 減水剤 (kg/m ³)	NaCl (kg/m ³)
			W	C	S1	S2	G1	G2		
63	20	48	181	287	423	431	462	474	5.75	12.40

※ S1: 山砂, S2: 安山岩砕砂, G1: 碎石, G2: 安山岩碎石

うため、引張鉄筋側が上面になるようにして暴露を実施した。

2. 1. 2 供試体概要

表-2.2に ASR 実験における供試体の一覧を示す。本実験では曲げ破壊先行型の健全供試体 1 体, ASR 劣化供試体 4 体を作製した。

ASR 劣化供試体は、無補修・無補強の A 供試体、ポリマーセメントモルタル (以下、PCM) による断面修復補修を施した A-P 供試体、供試体下面に CFRP シートを接着し曲げ補強した A-C

供試体、断面修復工法と CFRP シート接着工法を併用した A-P-C 供試体である。各供試体における補修・補強は屋外暴露後に行った。

図-2.1に RC はり供試体の概略図を示す。供試体は、断面 150mm、高さ 200mm の矩形断面をもつ、スパン 1600mm の RC はりである。配筋は圧縮鉄筋および引張鉄筋ともに D13 を 2 本、スターラップには D6 を用い 100mm 間隔で配置した。補修供試体における補修厚は供試体下面から 60mm であり、PCM を左官工法により塗布した。補強供試体では、CFRP シート (幅×長さ=75×1500mm) を供試体下面に接着した。

2. 1. 3 非破壊検査概要

本実験では ASR がコンクリートの性質変化に及ぼす影響を適切に評価するため、暴露 1 年時と 2 年時において非破壊検査を実施した。測定は、ひび割れ調査、膨張量、鉄筋ひずみ、超音波伝播速度について実施した。ひび割れ調査ではひび割れ長さ密度およびひび割れ面積密度の算出を行った。膨張量および超音波伝播速度は供試体軸方向、軸直角方向、鉛直方向について測定し、膨張量の測定はコンタクトゲージ法 (基長 100mm、精度 1/1000mm) により行った。

2. 2 砂岩骨材を用いた低弾性係数 RC 部材の耐荷性能評価 (砂岩実験)

2. 2. 1 実験要因

示方配合を表-2.3に、使用骨材の物理的特性を表-2.4に示す。N 配合は W/C=55%, 粗骨材として普通骨材を用いているが、S 配合では W/C=95%, 粗骨材には砂岩骨材を用いている。S 配合に関しては既往研究を参考に、配合試験を実施して決定した。供試体は、早強ポルトランドセメント、普通骨材と砂岩骨材を用いて作製した。砂岩骨材の品質は JIS 規格を満足するものであるが、天然骨材に比べて低密度かつ高吸水率という特徴を有している。

2. 2. 2 供試体概要

表-2.5に砂岩実験における供試体の一覧を示す。本実験では N 配合、S 配合ともに 3 体の曲げ破壊先行型の RC はり供試体を作製した。供試体の内訳としては、無補修・無補強の N, S 供試体、PCM による断面修復補修を施した N-P, S-P

表-2.2 供試体一覧 (ASR 実験)

供試体	暴露期間	補修・補強	供試体名
健全	なし	なし	NA
ASR	2 年	なし	A
		断面修復	A-P
		CFRP	A-C
		断面修復+CFRP	A-P-C

供試体、断面修復工法と CFRP シート接着工法を併せた N-P-C、S-P-C 供試体である。各供試体における補修・補強は暴露後に実施した。寸法・配筋状況などは ASR 実験における RC はり供試体のものと同一とした。

2. 3 断面修復施工

補修供試体における断面修復工法では、断面修復材として 28 日圧縮強度が 58.2N/mm^2 と高強度・高弾性係数の PCM を採用した。また、主鉄筋の裏側まで確実に断面修復材が充填されるよう、補修厚は 60mm に設定した。

ASR 実験における施工方法は次のとおりである。断面修復施工箇所のコンクリートを電動ハンマーによりはつり取り、界面清浄後、露出した主鉄筋に対してワイヤーブラシによる除錆を行った。PCM 打設時にはプライマー工として防水防止剤を界面に塗布し、左官工法により PCM を施工した。供試体は 2 日後に脱型し、載荷試験まで湿布養生に供した。

一方、砂岩実験では補修厚が 60mm になるように RC はり供試体を上下逆さに打設し、補修厚を確保した。打設後、凝結始発前に凝結遅延剤を補修界面に散布し、翌日界面の目荒らしを兼ねた洗い出しを実施し PCM と母材との一体性を向上させた。洗い出し後、水浸し状態の界面に対して断面修復材を左官工法により施工し、ドライアウト現象を抑制した。

2. 4 CFRP シート施工

CFRP シートの施工方法は全国上下水道エポキシ工事業協会⁶⁾や阪神高速道路株式会社⁷⁾などが示している方法に準拠し、次のとおりとした。まずシートの接着界面をディスクサンダーにより研磨し、プライマーおよびパテ（塗布厚さ 1mm）を塗布した。パテ硬化後、接着樹脂により CFRP シートを含浸・接着し、上塗りを施した。表-2.6 に接着樹脂およびパテの性質を、表-2.7 に CFRP シートの素材試験結果を示す。なお、CFRP シート接着は載荷試験の 2 週間前に行い、CFRP シートには高強度型のものを用いた。

2. 5 実験方法

載荷は等曲げ区間 200mm の中央 2 点載荷により行った。測定項目は、荷重、中央点変位、鉄筋ひずみ、コンクリートひずみ、シートひずみ、ひび割れ開口変位、ひび割れ発生状況である。ひずみゲージの貼付位置は図-2.2 に示すとおりである。

表-2.6 接着樹脂およびパテの性質

対象	圧縮強さ (N/mm^2)	圧縮弾性率 (kN/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)	引張弾性率 (kN/mm^2)
接着樹脂	92.8	3.20	50.9	3.65
パテ	71.9	5.18	-	-

表-2.5 供試体一覧（砂岩実験）

配合の種類	補修・補強	供試体名
N	なし	N
	断面修復	N-P
	断面修復+CFRP	N-P-C
S	なし	S
	断面修復	S-P
	断面修復+CFRP	S-P-C

表-2.7 CFRP シートの引張試験結果

繊維目付量	(g/m^2)	300
設計厚さ	(mm)	0.167
引張強度	(N/mm^2)	3830
引張弾性率	(kN/mm^2)	262
破断ひずみ	(μ)	14618

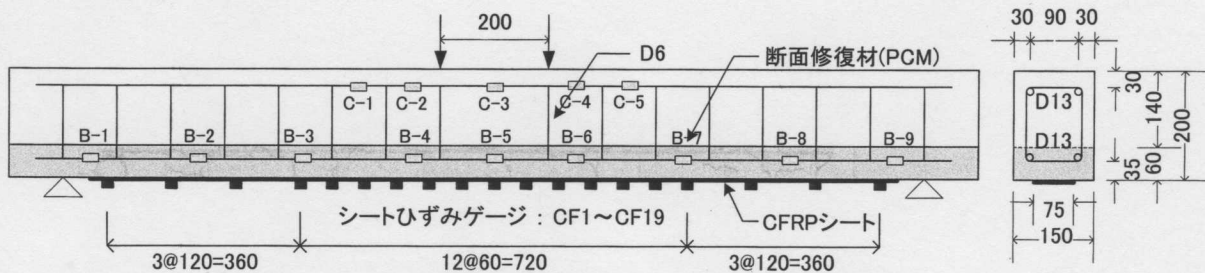


図-2.2 鉄筋およびシートひずみゲージ貼付位置

3. ASRが生じたRC部材の劣化状態評価

3. 1 非破壊検査によるRC部材の劣化状態評価

3. 1. 1 ひび割れ状況

ひび割れ調査結果の一例として、A 供試体のひび割れ状況を 1 年暴露時の結果と併せて図-3.1 に示す。図より、ASR ひび割れは軸方向の鉄筋沿いにおいて顕著に進展していることが確認できる。また、1 年暴露時においてひび割れの進展が少ない下面では、2 年暴露時においても同様の傾向を示し、この傾向は全ての劣化供試体において確認できた。

図-3.2 に各面のひび割れ面積密度を示すが、暴露面である下面のひび割れ面積密度が他面と比較して低く、供試体面により劣化状態が異なっている。これは、供試体下面が日射や降雨などの影響を受けやすく劣化が進行しやすい反面、打設時に下面のコンクリートが比較的密になりやすく、コンクリート強度に差が生じやすいことが原因と思われる。

3. 1. 2 膨張量

図-3.3 に膨張量の測定結果を示す。なお RC はりの拘束鋼材比は、それぞれ軸方向 1.69%、軸直角方向 0.28%、鉛直方向 0.38% である。図より、全ての供試体において鉛直方向の膨張量が大きいことが確認できる。これは、拘束鋼材比の違いによって鉛直膨張量が比較的大きくなったためと考えられる。また軸方向と鉛直方向のバラつきについて比較すると、鉛直方向のバラつきが比較的大きいことが確認できる。鉛直方向ではデータ値が他より大きいことに加えて、引張鉄筋をまたいでコンタクトチップを張り付けていることから、そのひび割れの影響を受けていると考えられる。

3. 1. 3 超音波伝播速度

図-3.4 に超音波伝播速度の測定結果の平均値を示す。なお、図中の「劣化平均」は ASR 劣化供試体の測定結果の平均値を示している。図より、劣化供試体の伝播速度は軸方向が最も速く、軸直角方向、鉛直方向は同程度であった。これは、軸方向の拘束鋼材比が比較的高く劣化しにくいと考えられる。また健全供試体 NA と比較すると、軸方向と軸直角方向では伝播速度が遅く劣化の進展がうかがえた。軸方向に関しては、全ての供試体において下側が上側よりも速い値を示し、暴露面に近い下側より上側で劣化が進行していることがわかる。これは、ひび割れ調査結果で得られた結果と同じ傾向であり、打設時に下側のコンクリートが密になりやすいことや、暴露面の下側は比較的乾燥しにくいことによる影響が考えられる。

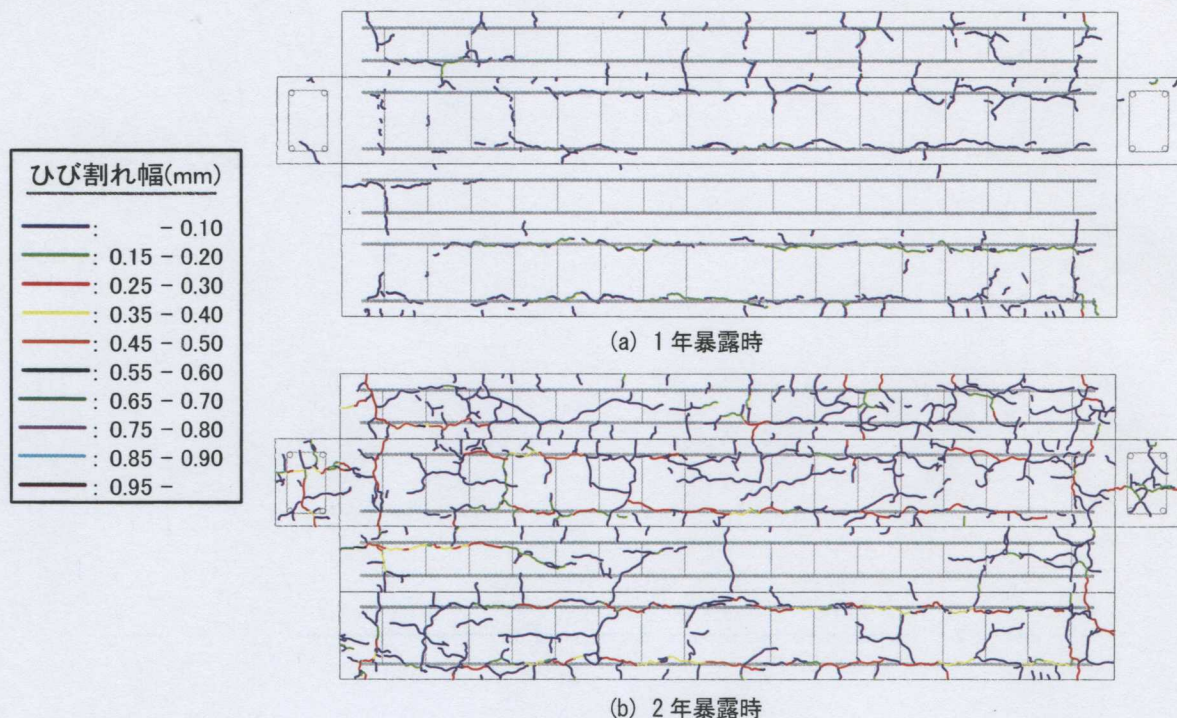


図-3.1 ひび割れ状況 (A 供試体)

3. 2 鉄筋腐食の影響

アルカリ添加剤として使用した NaCl により、ASR と塩害の複合劣化が生じる可能性が懸念される。そこで、断面修復施工を行う A-P、A-P-C 供試体において、引張鉄筋の腐食状況を観察した。写真-3.1 にはつり出した鉄筋の腐食状況および除錆後の様子を示す。これより、ASR 劣化供試体において鉄筋腐食の発生が確認できる。一方、健全供試体 NA においても載荷試験後に鉄筋を観察したが、腐食は生じておらず、鉄筋腐食は NaCl によるものと考えられる。しかし、鉄筋の断面欠損が生じる程の顕著な腐食は生じておらず、腐食が鉄筋の付着性状等へ及ぼす影響は小さいものと考えられる。

3. 3 ASR が生じたコンクリートの性能評価

3. 3. 1 円柱供試体

健全供試体および 2 年間暴露させた ASR 劣化円柱供試体に対し、圧縮試験と引張試験を行った。円柱供試体の寸法は $\phi 100 \times 200$ (mm) である。円柱供試体の強度試験結果を表-3.1 に、圧縮試験結果を図-3.5 に示す。なお、図にはコンクリート標準示方書に示されている普通コンクリートの圧縮強度と弾性係数の関係⁸⁾も併記している。健全に関しては割裂引張試験を実施していないため、同一の配合で同程度の強度特性を示した既往研究の結果³⁾を参考値として示した。

強度試験結果より、健全供試体と比較して劣化供試体では圧縮強度、弾性係数ともに低下している。特に弾性係数の低下が著しく、圧縮強度-弾性係数関係では、示方書の関係式近辺に位置する健全供試体に対して、劣化供試体では大きな乖離がみられる。最大圧縮応力時のひずみに着目すると、健全供試体では約 3000μ であるのに対し、劣化供試体では約 4500μ という大きな値を示しており、ASR 劣化により変形抵抗性の低下とともに変形量自体も大きくなることが考えられる。引張強度については、既往研究の値と比較して僅かであるが低下している。

3. 3. 2 コア試験結果

劣化した RC はり内部の力学的性質の評価を行うため、載荷試験後に各供試体からコア ($\phi=45$ mm) を採取し、超音波

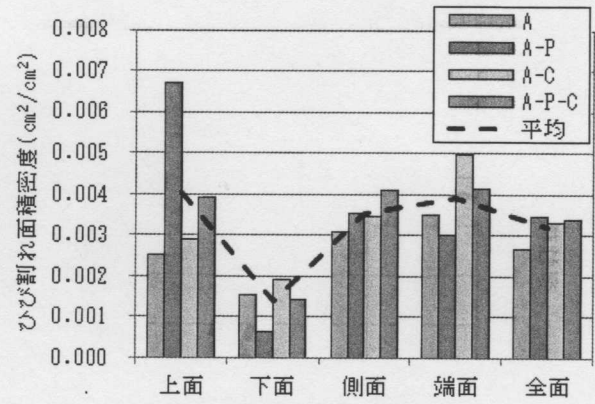


図-3.2 各面ひび割れ面積密度

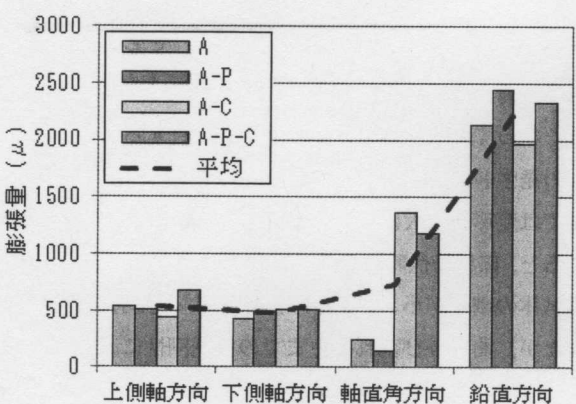


図-3.3 膨張量測定結果

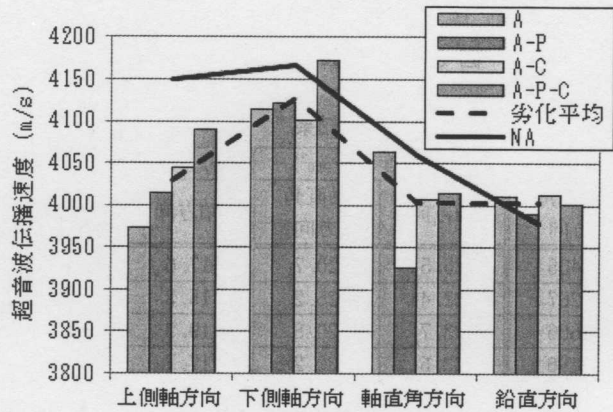
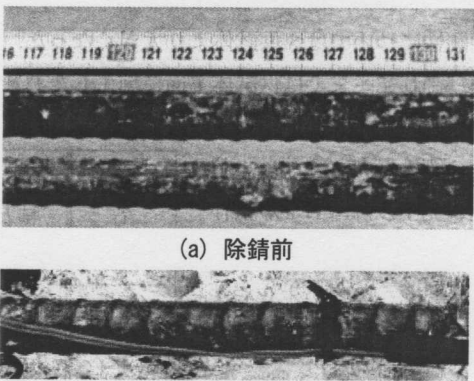


図-3.4 超音波伝播速度測定結果



(a) 除錆前

(b) 除錆後

写真-3.1 鉄筋腐食の影響

伝播速度の計測および圧縮試験を行った。コアは軸方向と軸直角方向で2本ずつ、載荷ひび割れの影響の少ない領域を選定し採取した。表-3.2に採取コアの試験結果を示す。

超音波伝播速度について比較すると、A-C 供試体の軸方向を除き、劣化供試体で伝播速度が低下しており ASR 劣化の影響が見受けられる。方向別に比較すると、劣化供試体では軸直角方向が軸方向より遅く、拘束鋼材比の違いのため軸直角方向において ASR 劣化の影響を大きく受けたと考えられる。圧縮強度に着目すると、健全供試体と比較して劣化供試体で強度が低下する傾向がみられる。弾性係数については劣化供試体で顕著に低下しており、その傾向は軸方向よりも軸直角方向において強い。なお、健全供試体 NA は屋外暴露しておらず、異方性などの性質も現れにくいと考えられるが、全項目において軸直角方向が軸方向より大きく両者間に差が生じている。この原因として、軸方向のコアは載荷による曲げひび割れの影響を受けやすいことが考えられる。

4. 低弾性係数 RC 部材の曲げ耐荷機構と補修・補強に関する検討

4. 1 無補強 RC はり部材の曲げ耐荷性の評価

4. 1. 1 載荷試験結果

載荷試験結果を表-4.1に、荷重-中央点変位関係を図-4.1に示す。コンクリートおよびPCMの強度特性は表-4.2に、鉄筋の材料特性は表-4.3に示すとおりである。

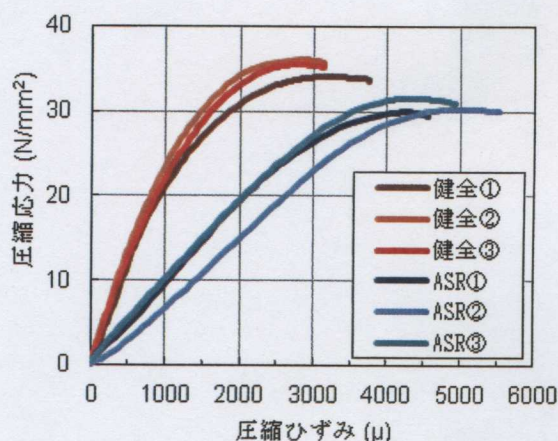
(1) 部材降伏以前における比較

図-4.1より、無補修の基準供試体 N, S を比較すると、部材降伏時の荷重は同程度であるが、剛性は S 供試体が比較的低下している。荷重初期段階に着目すると、曲げひび割れの発生前から剛性に差が生じており、強度特性に劣る S 配合では変形が過大に生じている。補修供試体 N-P, S-P を比較すると、部材降伏時の荷重は同程度であり、S 配合である S-P 供試体の剛性が小さいという基準供試体と同様の傾向がみられたが、曲げひび割れ発生までの初期剛性に差は確認できなかった。補修供試体を基準供試体と比較すると、部材降伏時の荷重が低下しており、耐力比については同程度の値を示した。また、補修供試体では剛性も低下したが、S-P 供試体の初期剛性については S 供試体より大きくなった。これは、曲げひび割れ発生までは供試体下面に施工した PCM の強度特性が母材よりも優れており S-P 供試体の剛性が大きくなったが、ひび割れ発生以降は PCM が粗骨材を含まないためにひび割れが拡幅しやすく、変形が生じやすいために剛性が低下したと考えられる。

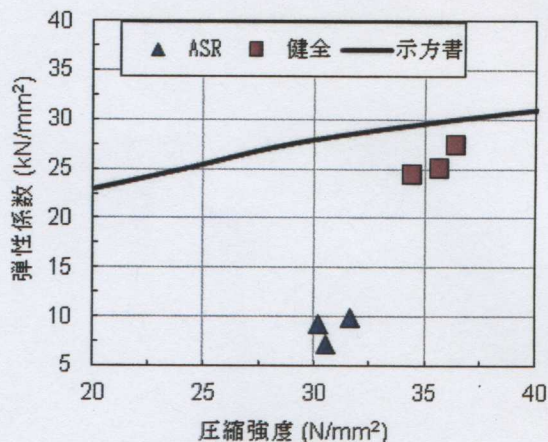
表-3.1 強度試験結果 (円柱供試体)

種類	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
健全	35.5	26.1	2.9※
ASR	30.8	8.3	2.6

※ 既往研究の値



(a) 応力-ひずみ関係



(b) 圧縮強度-弾性係数関係

図-3.5 圧縮試験結果 (円柱供試体)

表-3.2 採取コア試験結果

供試体名	超音波伝播速度 (m/s)		圧縮強度 (N/mm ²)		弾性係数 (kN/mm ²)	
	軸方向	軸直角方向	軸方向	軸直角方向	軸方向	軸直角方向
A	3565	3435	25.5	20.7	17.6	9.2
A-P	3514	3267	22.4	25.2	15.3	10.1
A-C	3919	3666	23.7	20.8	19.3	14.1
A-P-C	3651	3486	33.5	30.2	17.7	9.0
平均	3662	3464	26.3	24.2	17.5	10.6
NA	3747	4046	28.7	31.4	20.8	25.0

(2) 部材降伏以降における比較

無補修供試体 N, S を比較すると, S 供試体において最大荷重および剛性が小さく, 図-4.1(a) より供試体上縁の圧縮ひずみが 3500μ に早期に達していることから, コンクリートの強度特性の差によって生じた耐荷性能の差が確認できる. 補修供試体 N-P, S-P においても, S-P 供試体の最大荷重および剛性が小さく, 基準供試体と同様の関係がみられた.

補修供試体と基準供試体を比較すると, 補修供試体において最大荷重が低下していることが確認できる. 耐力比では N-P, S-P 供試体で同程度となっているが, 部材降伏時の耐力比よりも値が小さいことから, 断面修復が耐荷性能に及ぼす影響は最大荷重時で大きいと考えられる.

4. 1. 2 載荷ひび割れ性状

図-4.2 に供試体の載荷後におけるひび割れ性状を示す. 図中の赤線は, 終局時において支配的なひび割れを示しており, 全ての供試体で曲げスパン内のひび割れが支配的であった.

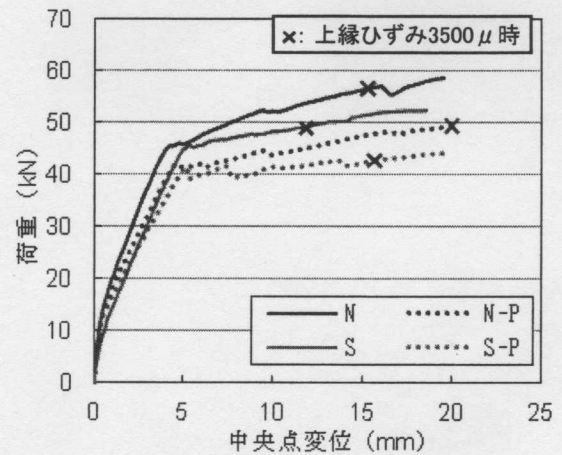
N 供試体と S 供試体を比較すると, S 供試体ではひび割れ発生領域が支点から 200mm 位置までと比較的広く, 既往の研究結果⁹⁾と合致している結果が得られた. また, 載荷試験時において S 供試体には早期にひび割れが確認されたことから, S 供試体にはひび割れが発生しやすいと考えられる. これは, ひび割れ発生領域が広いことや, 荷重-変位関係において早期に剛性が低下している結果と整合性があると考えられる.

補修供試体については, 引張鉄筋に沿った軸方向のひび割れが確認できるが, PCM のひび割れが進展・拡幅しやすい性質によるものと思われる.

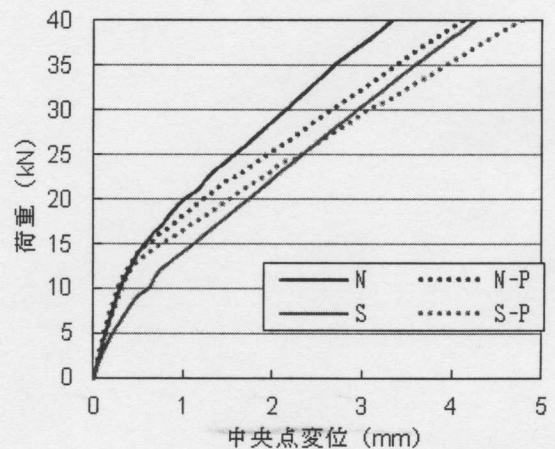
4. 1. 3 鉄筋ひずみ分布

図-4.3 に鉄筋ひずみ分布を示す. なお, 「最大」は最大荷重時を, 「降伏」は部材降伏時を示す. 全供試体において部材降伏に至るまで鉄筋ひずみ分布に明確な勾配が確認でき, 部材降伏以前において付着すべりは生じていないと考えられる.

基準供試体である N 供試体と S 供試体を比較すると, 分布



(a) 全体図



(b) 荷重初期段階時

図-4.1 荷重-中央点変位関係

表-4.2 コンクリートおよびPCMの強度特性

配合種類	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
N (普通)	44.4	30.2	3.7
S (砂岩)	20.9	16.7	2.1
PCM	54.0	23.4	3.3

表-4.3 鉄筋の材料特性

種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
D13	406	591	200
D6	335	515	200

表-4.1 載荷試験結果

供試体名	部材降伏時 ^{※1}				最大荷重時			
	荷重(kN)	変位(mm)	剛性 ^{※2}	耐力比 ^{※3}	荷重(kN)	変位(mm)	剛性 ^{※2}	耐力比 ^{※3}
N	45.1	4.1	11.1	-	58.7	19.5	0.9	-
N-P	41.8	4.5	9.3	0.93	49.5	20.0	0.5	0.84
S	44.7	4.9	9.1	-	52.4	18.6	0.6	-
S-P	41.6	5.1	8.2	0.93	44.3	19.8	0.2	0.85

※1 部材降伏時: 部材剛性が大きく変化した点

※2 (部材降伏時の剛性) = (部材降伏荷重) / (部材降伏時の変位)

(最大荷重時の剛性) = (最大荷重 - 部材降伏荷重) / (最大荷重時の変位 - 部材降伏時の変位)

※3 (耐力比) = (補修供試体) / (基準供試体)

形状に大きな差はみられないが、荷重の増加に伴う鉄筋ひずみの増分に注目すると、S 供試体では N 供試体よりも増分が大きく、10kN 時において既に差が生じている。また部材降伏時を比較すると、N 供試体では中央部の鉄筋ひずみのみが降伏ひずみに達しているのに対して、S 供試体では中央部から±150mm 位置まで降伏しており、鉄筋降伏範囲が広い。これらの差は、S 供試体のひび割れ発生荷重が小さいことに加えて、弾性係数が低く変形抵抗性が小さいため、鉄筋の応力負担分が増加した影響であると考えられる。

断面修復を施した N-P 供試体と S-P 供試体を比較すると、S-P 供試体において荷重の増加に伴う鉄筋ひずみの増分が比較的大きく、基準供試体と同様の傾向が確認できる。しかし、10kN 時点では両供試体間に大きな差異はみられず、基準供試体における比較とは異なる結果を示している。これは、図-4.1 において N-P 供試体と S-P 供試体が 10kN 時点で同様な挙動を示している結果からも妥当であると考えられる。また、補修供試体ではひずみ分布の左右対称性が小さく、左右で分布形状が異なっている。これは、鉄筋ひずみ分布に対してひび割れによる局所的な影響が及んでいる可能性があり、PCM のひび割れが進展・拡幅しやすい特性によるものと推察される。

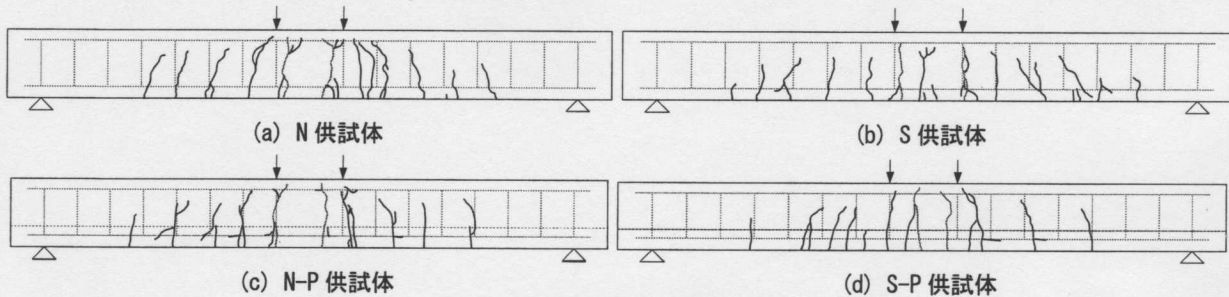


図-4.2 荷重ひび割れ図

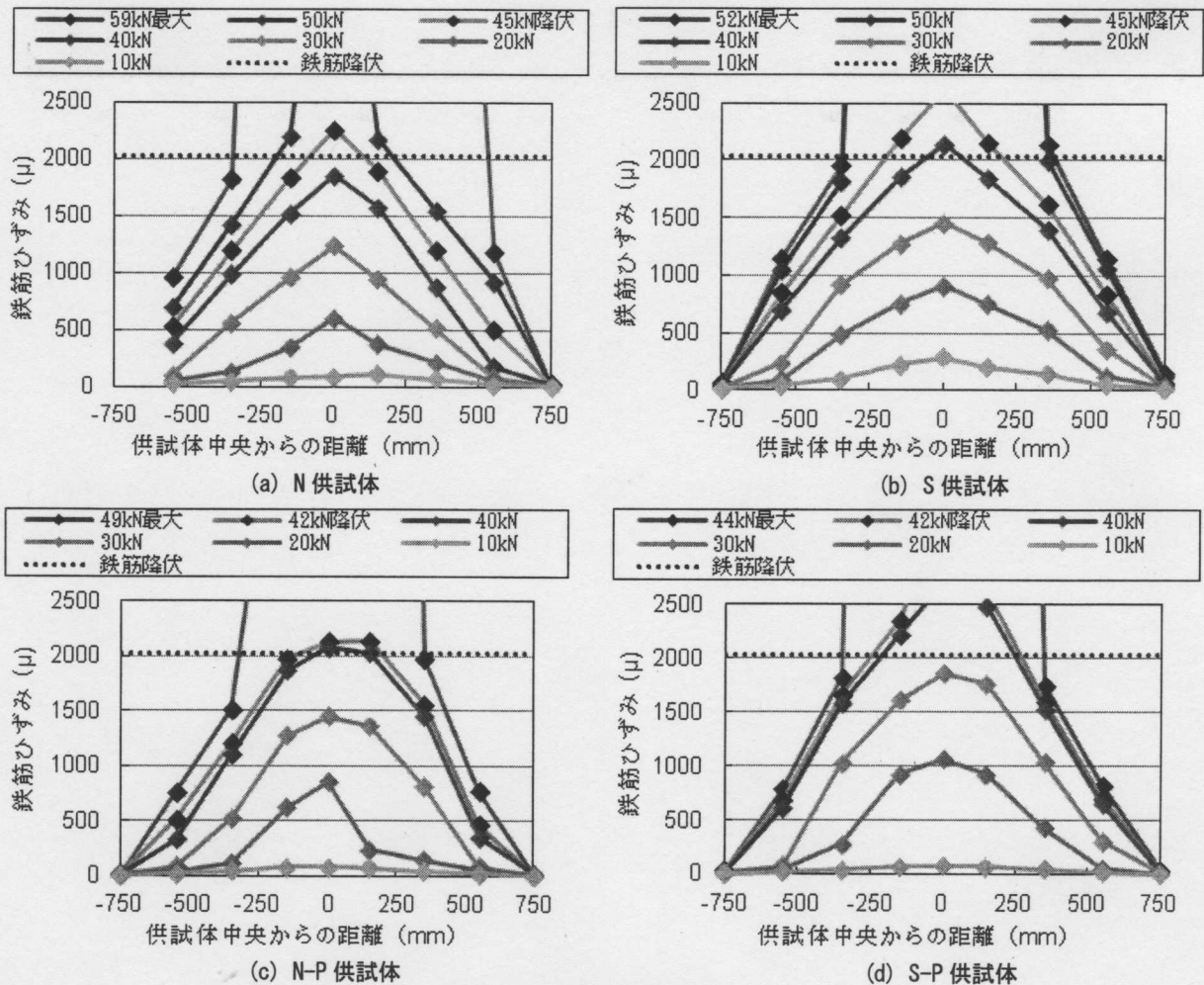


図-4.3 鉄筋ひずみ分布

4. 2 補強 RC はり部材の曲げ耐力性の評価

4. 2. 1 載荷試験結果

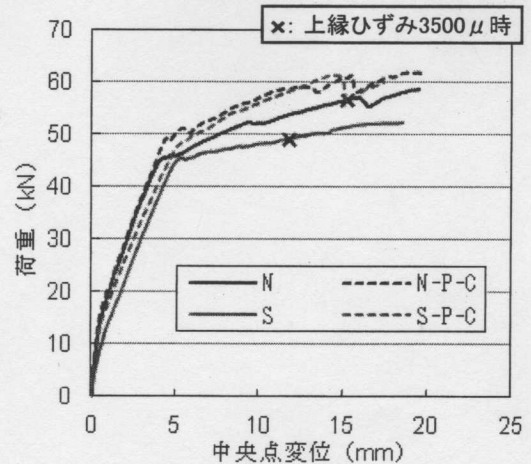
実験結果を表-4.4に、荷重—中央点変位関係を図-4.4に示す。また、図-4.4には基準供試体N、Sの結果も併せて示している。基準供試体と比較して、最大荷重および剛性が増加しており補強効果が確認できるが、N-P-C、S-P-C 供試体の補強効果に大きな差異はみられなかった。部材降伏時の剛性をみると、補修供試体では基準供試体と比較して低下していたが、シート補強により基準供試体と同程度まで向上していることがわかる。初期剛性に関しては、補修供試体と同様の挙動を示しており、シート補強が及ぼす影響は小さいものと考えられる。

4. 2. 2 載荷ひび割れ性状

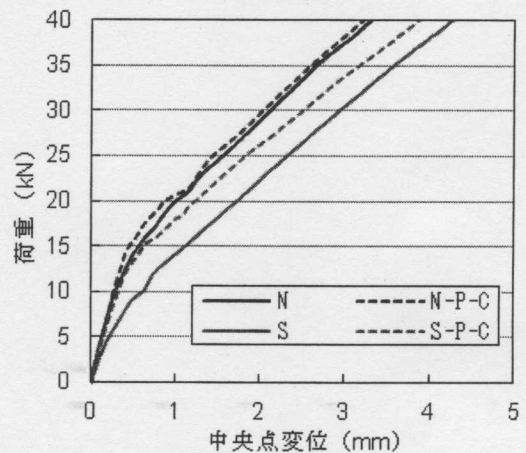
図-4.5に補強供試体の載荷後のひび割れ性状を示す。シート補強供試体は、支配的なひび割れによるピーリングによりシート剥離が生じ終局に至った。基準供試体と補強供試体と比較すると、補強供試体においてひび割れ本数が増加しており、シート補強によるひび割れ分散性の向上が確認できる。S-P-C 供試体では最大荷重に達した後、曲げスパン内において軸方向のひび割れが発生したが、ひび割れ幅が小さく拡幅していないことから、耐力性状に及ぼす影響は小さいと考えられる。

4. 2. 3 鉄筋ひずみ分布

図-4.6に鉄筋ひずみ分布を示す。なお、「最大」は最大荷重時を、「降伏」は部材降伏時を示す。S-P-C 供試体は、鉄筋中央部が最も高いひずみ値を示す一般的なひずみ分布形状を示しているが、N-P-C 供試体は30kN以降において鉄筋中央部ではなく150mm位置の鉄筋ひずみが最大値を示している。これは、支配的なひび割れの影響を受けたことによる局所的な影響と考えられる。また、補修供試体で確認された左右非対称性は、補強供試体でも同様な傾向がみられた。補修供試体では、N-P、S-P間において鉄筋ひずみの増分の差が顕著であったが、補強供試体においては大きな差が確認できない。これは、補修供試体で鉄筋ひずみの増分が大きいS-P 供試体にシート



(a) 全体図



(b) 荷重初期段階時

図-4.4 荷重—中央点変位関係(補修・補強供試体)

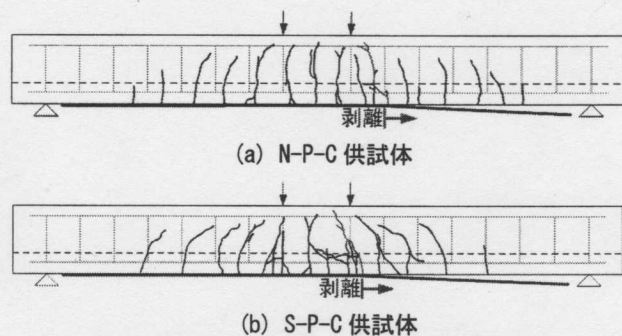


図-4.5 載荷ひび割れ図(補修・補強供試体)

表-4.4 載荷試験結果

供試体名	部材降伏時 ^{※1}					最大荷重時				
	荷重 (kN)	変位 (mm)	剛性 ^{※2}	補強効果 ^{※3}		荷重 (kN)	変位 (mm)	剛性 ^{※2}	補強効果 ^{※3}	
				①	②				①	②
N-P-C	48.5	4.3	11.4	1.08	1.16	62.1	18.9	0.9	1.06	1.26
S-P-C	48.0	5.2	9.2	1.07	1.15	61.5	14.3	1.5	1.17	1.39

※1 部材降伏時：部材剛性が大きく変化した点

※2 (部材降伏時の剛性) = (部材降伏荷重) / (部材降伏時の変位)

(最大荷重時の剛性) = (最大荷重 - 部材降伏荷重) / (最大荷重時の変位 - 部材降伏時の変位)

※3 補強効果①：基準供試体を基準とした耐力比，補強効果②：補修供試体を基準とした耐力比

補強することで、鉄筋の応力負担分が低減されたためと考えられる。N-P-C 供試体においても鉄筋の応力低減効果が確認できるが、S-P-C 供試体よりもその効果が小さく、供試体によって効果の表れ方が異なると考えられる。

4. 2. 4 シートひずみ分布

図-4.7にCFRPシートのひずみ分布を示す。N-P-C 供試体では最大荷重以前に荷重低下を2回生じたため、59.4kN時における荷重低下を荷重低下①として、変位約15mm時における荷重低下を荷重低下②として示した。S-P-C 供試体では最大荷重以後に荷重低下を生じており、この荷重低下を荷重低下①と荷重低下②の二段階に細分化した。また、N-P-C、S-P-C 供試体ともにシート剥離はシートひずみ分布の右側に進展した。

部材降伏後、N-P-C 供試体では供試体中央部近傍におけるシートひずみが比較的変動しておらず凸型分布形状となっているが、S-P-C 供試体では中央部近傍におけるシートひずみに凹凸がみられる。これは、剛性が最も小さいS-P 供試体にシート補強を施したためにひび割れが進展・拡幅しやすく、ひび割れの影響を受けやすいためと考えられる。

5. ASRが生じたRC部材の曲げ耐荷機構と補修・補強に関する検討

5. 1 断面修復時に生じた先行たわみに関する考察

補修供試体A-P、A-P-Cにおいて、載荷試験前に供試体中央部において下面方向へ5~6mm程度の変位が生じた。この先行たわみは、はつり作業時に引張鉄筋によるコンクリートの膨張拘束効果が消失し、母材コンクリートの断面修復界面側が膨張したことで生じたと考えられる。はつり作業の翌日に打設したPCMにおいてもひび割れが発生しており、は

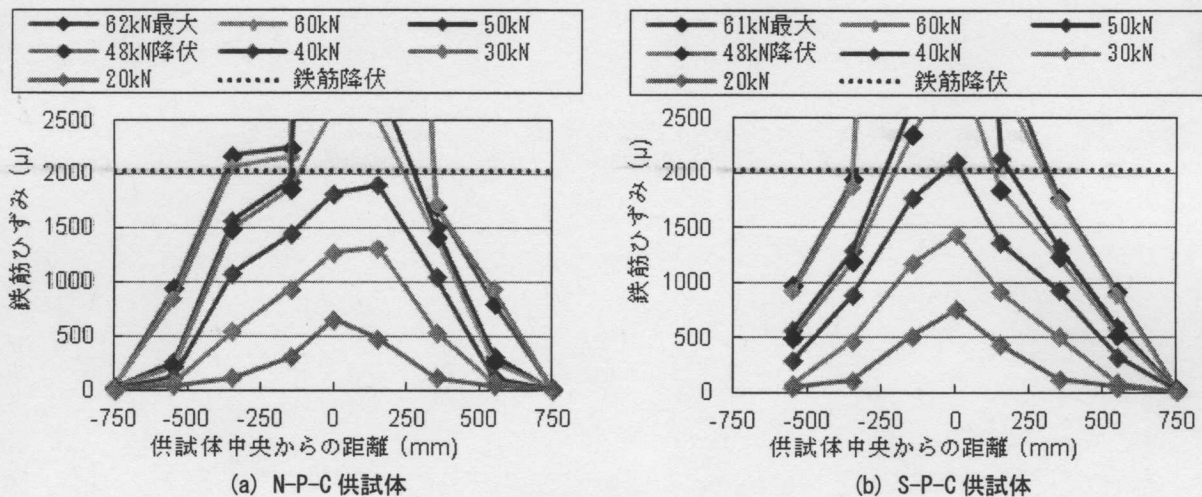


図-4.6 鉄筋ひずみ分布

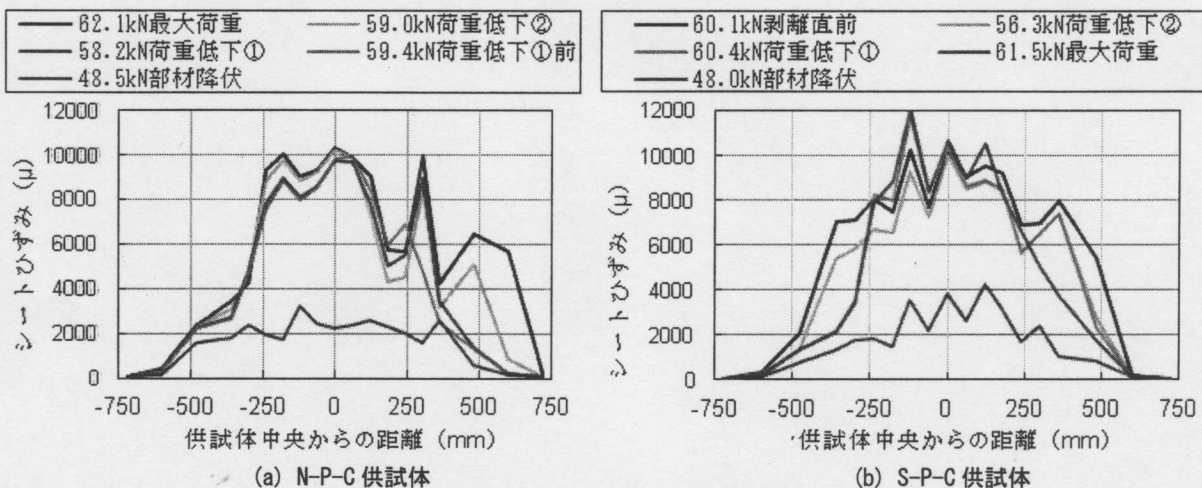


図-4.7 シートひずみ分布

つりを実施した瞬間の変形に加えて、時間経過とともに変形が進行したと考えられる。先行して発生した PCM のひび割れ状況を図-5.1 に示す。PCM 先行ひび割れは軸鉛直方向と軸方向に発生した。軸鉛直方向のひび割れは一定の間隔ごとに発生しており、最大ひび割れ幅は 0.2mm であった。一方、軸方向のひび割れは断面修復材である PCM と母材コンクリートの界面に沿って発生し、最大ひび割れ幅は 0.05mm であった。軸方向のひび割れは 0.05mm 以下であるため、曲げ耐力性能の評価において影響は小さいと考えられる。しかし、軸鉛直方向のひび割れは、最大ひび割れ幅が 0.2mm でありひび割れ本数も多く存在していることから、その影響を無視することはできないと考えられる。

5. 2 実験結果

5. 2. 1 载荷試験結果

ASR 実験における载荷試験結果を表-5.1 に、荷重—中央点変位関係を図-5.2 に示す。母材および PCM の強度特性は表-5.2 に示すとおりである。また、シート補強供試体の耐力比を砂岩実験の結果と併せて表-5.3 に示す。

(1) 部材降伏以前における比較

健全供試体 NA と比較して、ASR 劣化供試体 A では降伏荷重が低下しているが、剛性は増大している。また荷重初期段階では、ASR 劣化供試体において初期剛性では NA 供試体に劣るが、曲げひび割れ発生以降の剛性低下が緩やかな傾向がみられる。これは既往研究^{3), 4)}と同様の傾向であり、劣化供試体には先行ひび割れが発生しており荷重初期段階において変形が生じやすいが、ASR 膨張に伴うケミカルプレストレスが導入されており、曲げひび割れが開口し難いことにより剛性が大きくなったと考

表-5.2 コンクリート、PCM 強度特性

配合種類	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
NA (健全)	35.5	26.1	2.5
ASR	30.8	8.3	2.6
PCM	51.1	24.4	2.8

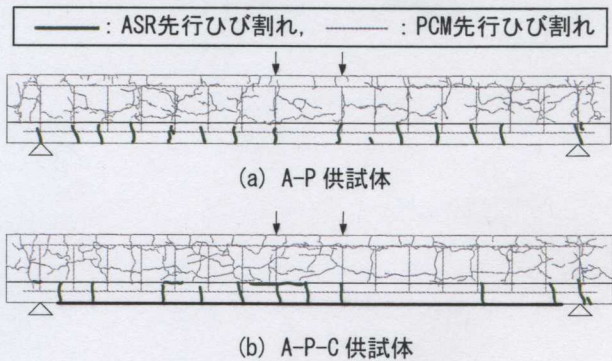
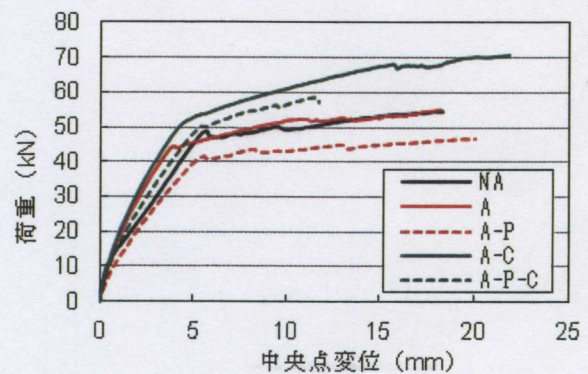
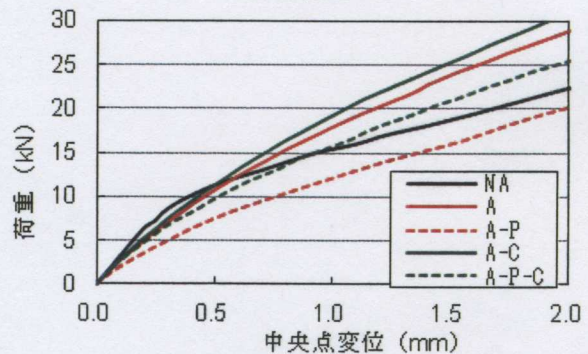


図-5.1 先行 PCM ひび割れ図



(a) 全体図



(b) 荷重初期段階時

図-5.2 荷重—中央点変位関係

表-5.1 载荷試験結果

供試体名	部材降伏時 ^{※1}				最大荷重時			
	荷重 (kN)	変位 (mm)	剛性 ^{※2}	耐力比 ^{※3}	荷重 (kN)	変位 (mm)	剛性 ^{※2}	耐力比 ^{※3}
NA	48.8	5.7	8.6	1.09	54.4	18.2	0.5	0.99
A	44.6	4.0	11.1	1.00	55.1	18.2	0.7	1.00
A-P	41.8	5.6	7.4	0.94	46.9	20.1	0.4	0.85
A-C	51.1	4.4	11.6	1.15	70.7	21.8	1.1	1.28
A-P-C	50.1	5.4	9.3	1.12	58.5	11.5	1.4	1.06

※1 部材降伏時：部材剛性が大きく変化した点

※2 (部材降伏時の剛性) = (部材降伏荷重) / (部材降伏時の変位)

(最大荷重時の剛性) = (最大荷重—部材降伏荷重) / (最大荷重時の変位—部材降伏時の変位)

※3 A 供試体を基準とした耐力比

えられる。また、補修供試体 A-P では A 供試体と比較して降伏荷重、剛性ともに低下がみられる。砂岩実験の結果とも比較すると、耐力比は同等であるが、ASR の補修供試体では剛性の低下が顕著であることが確認できる。これは、断面修復時に生じた先行たわみの影響や母材のケミカルプレストレスの解消により剛性が低下したが、鉄筋のケミカルプレストレスや鉄筋付着性状が改善されたために耐力に顕著な低下がみられなかったためと考えられる。

シート補強供試体を比較すると、降伏荷重が増加しており、シート補強効果がうかがえる。また A-C 供試体と比較して、A-P-C 供試体では降伏荷重が低く剛性も小さいことからシート補強効果が小さくみえるが、表-5.3 の補修供試体 A-P との比較である耐力比②に着目すると 1.20 という高い値を示しており、補強効果は十分に発揮されていると考えられる。

(2) 部材降伏以降における比較

表-5.1 より、A 供試体では最大荷重、剛性において健全供試体 NA と同程度の値を示し、大きな差異は確認できなかった。補修供試体 A-P を A 供試体と比較すると、最大荷重が著しく低下し、耐力比は 0.85 となった。砂岩実験における補修供試体の耐力比も同程度であり、最大荷重の低下程度は母材の性能に関わらず同程度であると考えられる。

補強供試体においては、基準供試体と比較して荷重、剛性ともに増大しており、シート補強効果がうかがえた。特に A-C 供試体では耐力比が 1.28 と著しい補強効果を確認できた。一方、A-P-C 供試体では耐力比は 1.06 と補強効果に差が生じており、また他の供試体よりも早期に終局に至っている。これは、砂岩実験において強度特性に劣る S 配合を用いた S-P-C 供試体と同様の傾向を示している。しかし、表-5.4 の補修供試体 A-P との比較である耐力比②は 1.25 であり、他のシート補強供試体と比較しても遜色ないシート補強効果を示した。

以上から、断面修復による耐荷性能の低下は部材降伏時までの剛性において顕著であり、荷重低下に関しては砂岩実験の供試体と同程度であると考えられる。また、断面修復とシート補強を併せた補修・補強供試体では、CFRP シート補強のみの供試体と比較して、耐荷性能が劣ることが判明した。しかし、補修供試体と比較するとシート補強効果が現れており、断面修復した ASR 劣化供試体に対する CFRP シート補強の適用性が確認できた。

5. 2. 2 載荷ひび割れ性状

図-5.3 に載荷後のひび割れ性状を示す。無補修劣化供試体 A、A-C では健全供試体 NA と比較して顕著にひび割れの分散性が低下しており、供試体中央位置にひび割れが局所化している。一方、補修供試体 A-P、A-P-C においてはひび割れ本数が増加しており、ひび割れ分散性の改善が確認できた。また、A、A-C 供試体では引張鉄筋沿いにひび割れが進展しており、付着すべりが生じた可能性がある。補修供試体では、コンクリート母材-PCM 界面に沿ったひび割れや引

表-5.3 シート補強供試体の比較

供試体名	部材降伏時		最大荷重時		シート剥離性状
	耐力比①※1	耐力比②※2	耐力比①※1	耐力比②※2	
N-P-C	1.08	1.16	1.06	1.26	ピーリング
S-P-C	1.07	1.15	1.17	1.39	
A-P-C	1.12	1.20	1.06	1.25	
A-C	1.15	-	1.28	-	ブロック化

※1 耐力比①：基準供試体との耐力比

※2 耐力比②：補修供試体との耐力比

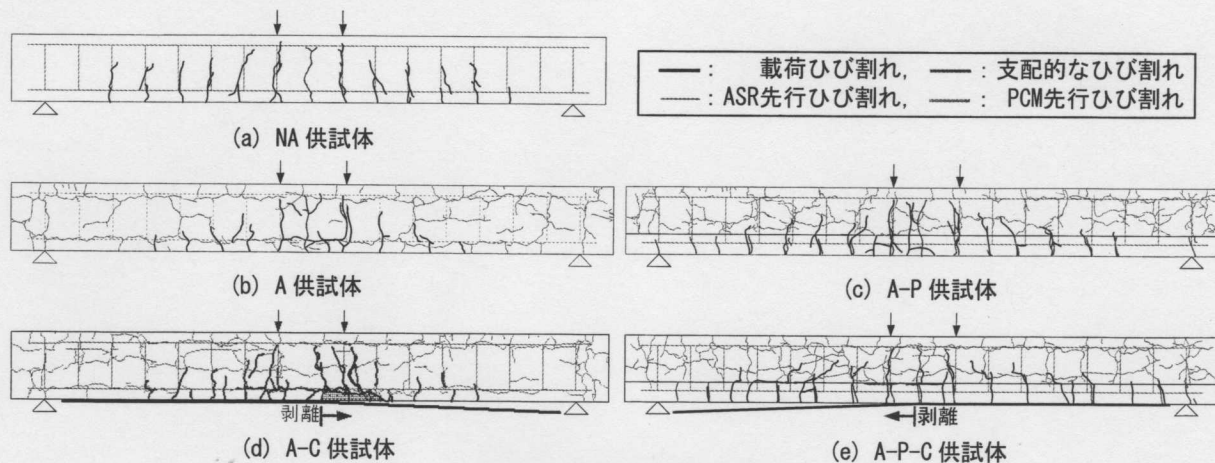


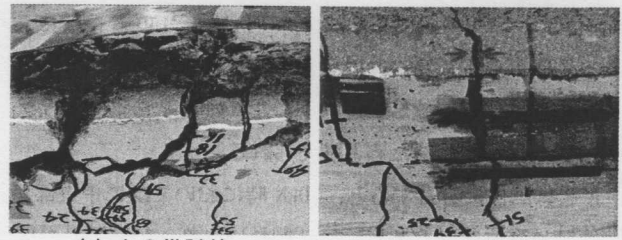
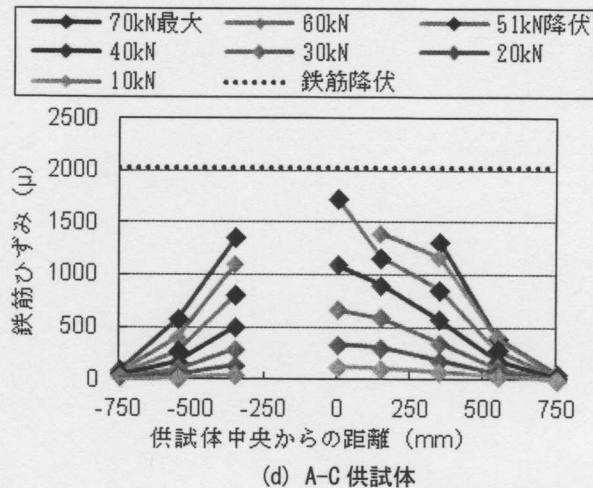
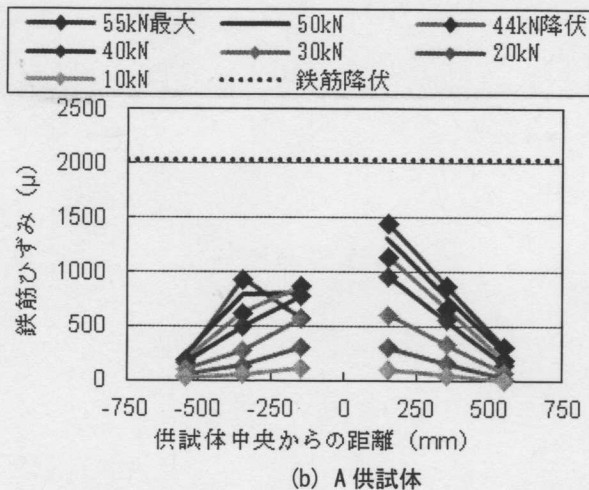
図-5.3 載荷ひび割れ図

張鉄筋に沿った軸方向のひび割れが確認されたが、ひび割れの進展・拡幅が顕著ではなかった。シート補強供試体 A-C, A-P-C については、CFRP シート補強によりひび割れ分散性の向上が見受けられる。

次に、補強供試体の CFRP シート剥離状況を比較する。写真-5.1 に補強供試体における支配的なひび割れを示す。A-P-C 供試体では供試体中央部の曲げひび割れによるピーリングによりシート剥離が生じたが、A-C 供試体では荷重点直下位置におけるブロック化によりシート剥離に至った。荷重点近傍の曲げひび割れが ASR 先行ひび割れに沿うように発達して複雑化し、ブロックを形成したものと考えられる。一方、A-C 供試体の表面では荷重点へ伸びる斜め方向のひび割れの拡幅が顕著であり、シート剥離箇所におけるブロック化は確認されなかった。

5. 2. 3 鉄筋ひずみ

図-5.4 に鉄筋ひずみ分布を示す。なお、「最大」は最大荷重時を、「降伏」は部材降伏時を示す。暴露により損傷を受けた鉄筋ひずみゲージのデータは図から省略して



(a) A-C 供試体 (b) A-P-C 供試体
写真-5.1 支配的なひび割れ (補強供試体)

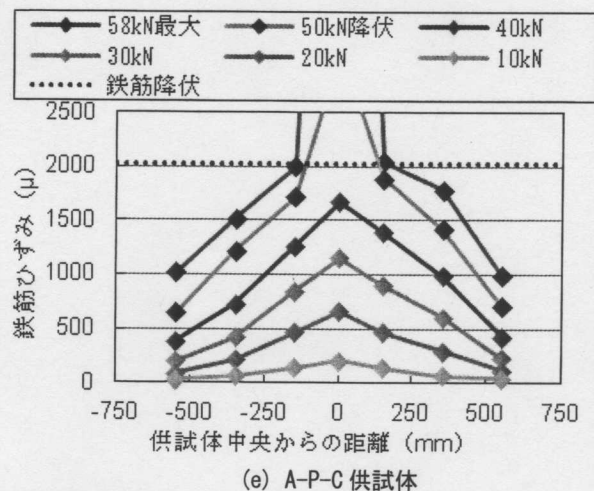
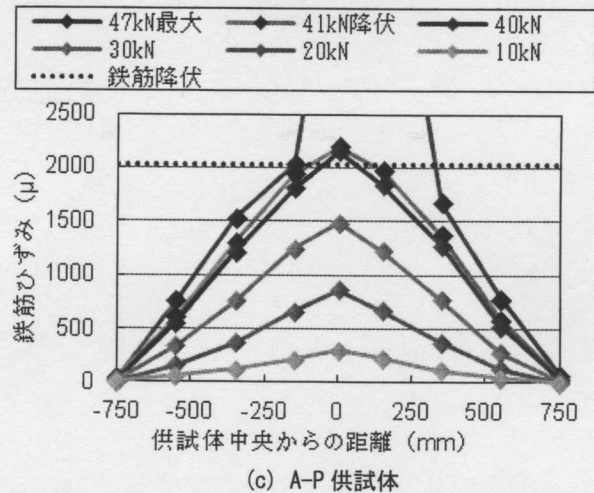
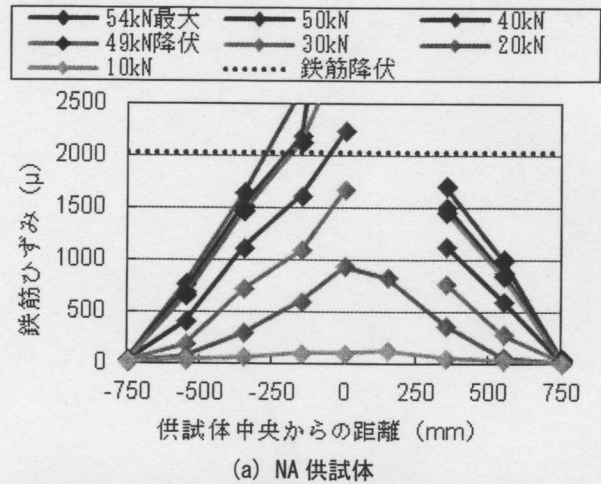


図-5.4 鉄筋ひずみ分布

いる。A 供試体においては部材降伏以降、-150mm 位置において勾配が確認できず、ASR 先行ひび割れと載荷ひび割れが該当位置の引張鉄筋沿いに発生しており、鉄筋すべりが生じた可能性が高い。また、NA 供試体と比較して各荷重段階における鉄筋ひずみ値が小さいが、これは ASR 膨張に伴うケミカルプレストレスにより、ひび割れが開口し難くなり鉄筋の負担分が減少したためと考えられる。

A-P 供試体に着目すると、10kN 時において既に中央部が突出した分布形状を示している。これは、ASR 供試体の断面修復時に発生した PCM 先行ひび割れにより、ひび割れが低荷重時においても拡幅しやすく、鉄筋が早期に応力を負担したためと考えられる。また、A-P 供試体では A 供試体と比較して分布形状の裾が広がっており、ひび割れ分散性が向上していると考えられる。補修・補強供試体 A-P-C においても、中央部が突出した分布形状が確認できた。

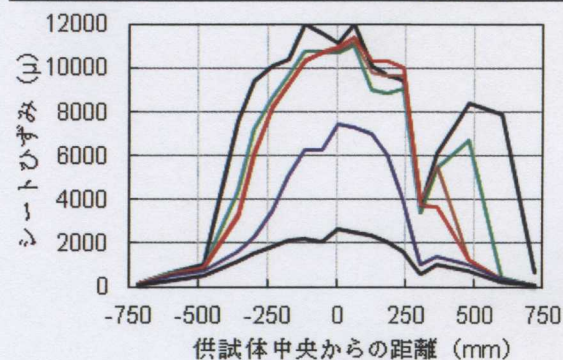
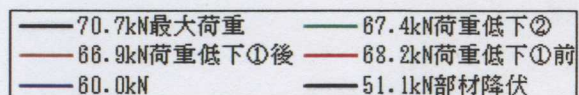
5. 2. 4 シートひずみ分布

図-5.5 に CFRP シートのひずみ分布を示す。A-C 供試体ではシートひずみ分布の右側に、A-P-C 供試体では左側にシート剥離が進展した。A-C 供試体において、荷重低下①までは大きな分布形状の変化はみられず、凸型の分布形状を示している。しかし、荷重低下①前後では支配的なひび割れによるピーリングが発生し、360mm のひずみが急激に増大した。また荷重低下②では、480mm 位置のひずみが急激に増大するとともに、目視においてもシートの浮きが支点側に進展していることが確認された。一方、A-P-C 供試体では部材降伏時において既にシートひずみ分布に凹凸が生じている。これは、PCM のひび割れが生じやすく拡幅しやすい特性により、シートひずみ分布に局所的な影響を及ぼしやすいためと考えられる。荷重低下後には-300mm 付近のひずみが急増し、最大荷重時にはさらに支点側へシート剥離が進展した。

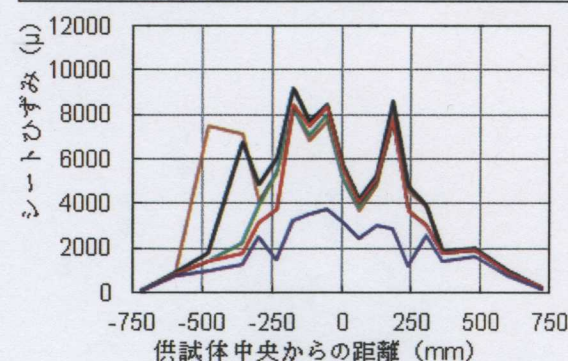
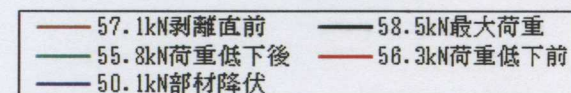
ブロック化を生じた A-C 供試体とピーリングを生じた A-P-C 供試体を比較すると、A-C 供試体では 60kN 時周辺においてシートひずみ分布が供試体中央近傍で幅広い形状をしており、全面剥離時（最大荷重時）には裾の広がった台形状分布となっており、既往研究⁴⁾と同様の傾向がみられた。A-C 供試体では剛性が大きいので、ひび割れ幅が小さく抑えられたためにピーリングによるシート剥離が生じなかったと考えられる。一方、A-P-C 供試体のシートひずみ分布では供試体中央近傍において激しい凹凸が生じている。これは、A-P-C 供試体において断面修復補修をシート補強と併せて施工しているため、PCM が粗骨材を含まないためひび割れが開口しやすく、局所的な応力が生じやすいためと推察される。

5. 3 シート補強効果の考察

砂岩実験の N-P-C、S-P-C 供試体も併せたシート補強供試体において、シート補強効果を比較検討し考察する。図-5.6 に補強供試体の荷重-中央点変位関係を、表-5.3 に実験結果を示す。部材降伏までの挙動に着目すると、部材降伏荷重は 3 体の補修・補強供試体で同様であるが、N-P-C 供試体と比較



(a) A-C 供試体



(b) A-P-C 供試体

図-5.5 シートひずみ分布

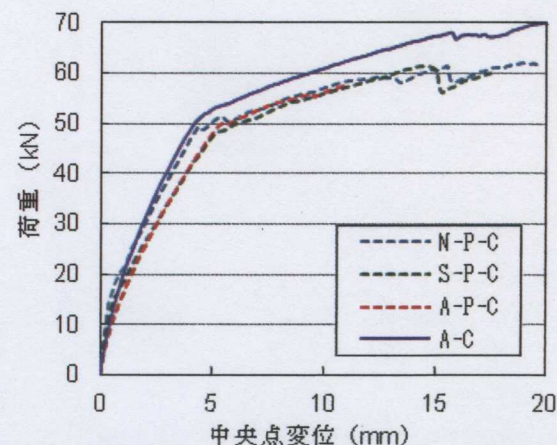


図-5.6 荷重-中央点変位関係（補修・補強供試体）

してS-P-C, A-P-C 供試体において剛性の低下がみられる。また、最大荷重時においてはA-P-C 供試体が比較的早期に終局しているが、これは断面修復時に発生した先行たわみによる影響であると考えられる。ASR 劣化により損傷した構造物に断面修復工法を適用する場合には先行たわみに留意する必要がある、先行たわみによる影響が小さい場合にはより大きな補修・補強効果が得られる可能性がある。

6. 結論

本研究では、反応性骨材を用いて作製した供試体を屋外暴露環境で劣化を促進させ、劣化状態を評価したうえで、ASR 劣化が RC 部材の曲げ耐荷機構に及ぼす影響について評価を行った。また、補修・補強工法として断面修復工法および CFRP シート接着工法に着目し、ASR 劣化供試体に適用しその補強効果を評価した。加えて、ASR 劣化を想定した低弾性係数 RC 供試体に対しても同様の検討を行い、比較検討することで、ASR 劣化が補強効果に及ぼす影響を評価した。以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) 砂岩骨材を用いた S 配合の無補強供試体において、N 配合の供試体と比較して剛性や最大荷重が劣り、耐荷性能に差がみられた。また、補修供試体においては基準供試体と比較して初期剛性が向上し、PCM による補修効果が確認されたが、耐荷性能は低下し、母材コンクリートの強度特性に関係なく低下率は同程度であった。
- (2) 砂岩実験において、補修・補強供試体では剛性や耐荷力、ひび割れ分散性などの耐荷性能において向上が確認された。また、N 配合と S 配合のいずれの供試体においてもピーリングによるシート剥離が生じたが、シートひずみ分布形状より S 配合の供試体の方が供試体中央部近傍における凹凸が大きく、シート剥離に対する抵抗性が低かった。これらより、断面修復工法と CFRP シート接着工法を併せた本工法では、補修・補強効果は母材コンクリートの力学的特性が影響していると推察される。
- (3) ASR 劣化供試体に断面修復工法を適用した際、鉄筋によるコンクリートの膨張拘束効果が消失し、供試体に先行たわみが生じた。また、はつりを実施した翌日に PCM を打設したところ、PCM にひび割れが発生した。ASR 供試体に対して断面修復工法を適用する際には、膨張量や供試体の配筋状況に留意し、先行たわみについて検討する必要がある。
- (4) ASR 劣化供試体の基準供試体において、健全供試体と比較して初期剛性が低下したが、曲げひび割れ発生以降の剛性低下が緩やかであり、部材降伏時の剛性は増大していた。また、本実験における ASR 劣化進行程度では、曲げ耐荷性能の低下はみられなかった。
- (5) ASR 劣化補修供試体では、コンクリートのケミカルプレストレスの消失や先行たわみの影響により、剛性や耐力が低下し耐荷性能は低下する。砂岩骨材を用いた補修供試体と比較して、耐力比は同等であり荷重低下率に差は生じていないが、剛性において低下が顕著であり、ASR 劣化が補修効果に及ぼす影響が見受けられた。また、ひび割れ分散性の向上や鉄筋付着性状の改善がみられた。
- (6) ASR 劣化補修・補強供試体の補強効果は、未補修の補強供試体と同程度であり、優れたシート補強効果が確認できた。また、補修供試体によって低下した剛性が改善された。しかし、先行たわみの影響で早期にシートが剥離したため、先行たわみを抑制することで、より大きな補強効果が得られる可能性がある。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多大な御協力を頂きました国際建設技術研究所、コニシ株式会社、新日鉄住金マテリアルズ株式会社コンポジット社、太平洋セメント株式会社の方々に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 藤井洋介, 山村智, 葛目和宏, 水田真紀, 岡本享久, 児島孝之: 部材寸法が ASR による膨張に及ぼす影響に関する実験的研究, 土木学会年次学術講演概要集 V, pp. 167-168, 2008.
- 2) Leslie. A. Clark: Modeling the Structural Effects of Alkali-Aggregate Reactions on Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, pp. 271-277, 1991.

- 3) 松田豊樹：ASR が生じたコンクリート部材の耐荷性の評価および補強に関する検討，神戸大学大学院工学研究科修士論文，2011.
- 4) 潤靖文，森川英典，岩田卓，彭丰：ASR 劣化が生じた RC 部材における CFRP シート接着による補強効果の検討，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，第 9 巻，pp. 389-396，2009.
- 5) 彭丰，森川英典，小林秀恵：断面修復を考慮した RC はりの連続繊維シート補強効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 29，No. 3，pp. 1489-1494，2007.
- 6) 全国上下水道エポキシ工事業協会：炭素繊維ライニング補強工法，1999.
- 7) 阪神高速道路株式会社：CF シートを用いた RC 床版の補強要領(案)，pp. 8-11，1999.
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，2008.
- 9) 森川英典，竹内翔：砂岩骨材がコンクリートの収縮特性および力学的特性に及ぼす影響，建設工学研究所論文報告集，Vol. 51，pp. 31-41，2009.

著 者

森川 英典	所員，博士（工学），コンクリート工学，材料工学
川島 洋平	神戸大学大学院，学士（工学）
西原 知彦	阪神高速道路株式会社，修士（工学）