

論文 アラミド繊維シート補修・補強した曲げ破壊 R C はりの力学特性に関する研究

澤野 利章^{*1}・木田 哲量^{*2}・阿部 忠^{*3}・水口 和彦^{*4}

要旨：R C はり部材が曲げによって、部分的な破壊状態となった場合に、ひび割れを注入補修と連続繊維シートによる補強を行って本来の機能復元を試み、この補修・補強による機能回復の程度を R C はりの共振振動数から判定した。また、さらなる曲げ破壊を起こさせて共振振動数の変化と破壊状況を考察したものである。

キーワード：曲げ破壊，補修，補強，アラミド繊維シート，共振振動数

1. はじめに

昨今の日本は京都議定書への調印を初めとした地球環境への配慮，バブル経済崩壊後の景気の低迷等が土木構造物に対する考え方に大きな影響を及ぼし始めている。たとえば，地球環境への配慮による新設時あるいは取り壊し時の建設廃材の削減，さらに新設構造物の再検討・再計画，既存構造物の保護並びに補修・補強といった新たな試みが挙げられる。

その中でも既設構造物を永く使用し続けることは，安全性が十分に確保され，本来の機能を損なうことがなければ，経済性の面において最も有効であると考えられる。そのため既設構造物の維持，補修，補強方法の研究・開発が近年盛んに行われている。R C，P C などのコンクリート構造物はマクロ的には半永久的な構造物であるが，ミクロ的には，微細なひび割れ，中性化，使用鋼材の腐食，表面の劣化，剥落などの損傷を生じており，これらに対する対策を講じなければ，さらに劣化が進行して最終的には崩壊に至りかねない。何らかの損傷が発生しているコンクリート部材に対して補修・補強を行った場合の有効性，またその回数に限界について明らかにする必要がある。^{1),2)}

そこで本研究は，R C はり部材が外力により曲げ作用を受けて，部分的な破壊状態となった場合にひび割れの補修とアラミド繊維シートを接着した補強を行い，本来の機能の復元を試み，どの程度までそれを回復させることができるか，また再度の曲げ破壊をした場合，同様の補修・補強を何回まで繰り返して機能を回復させられるかを R C はりの共振振動数から回復状況の判定と外力による破壊進行状況について考察したものである。

2. 供試体概要

2.1 供試体

供試体は別の実験研究³⁾において，単純曲げ作用によって支間中央部付近で曲げ破壊した R C はりである。はりは断面幅 300mm，高さ 210mm の矩形断面，全長は 2800mm，単純曲げ作用区間は支間中央部の 2000mm である。鉄筋は複鉄筋配置であるが，支間中央部への集中荷重载荷により最大たわみ 20mm 以上の変形を被り，引張側の鉄筋は降伏しているものと予想される。同等の初期破壊状況の供試体 3 本を No.1~No.3 とする。また，対比のために荷重の作用を全く受けていない新規の R C はりを曲げ破壊無履歴供試

*1 日本大学 生産工学部土木工学科助教授 工博 (正会員)

*2 日本大学 生産工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

*3 日本大学 生産工学部土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

*4 日本大学 生産工学部ハイテク・リサーチ・センター研究員 博士(工学) (正会員)

体 No.4 として用いる。RC はりに用いた材料の機械的性質を表 - 1 に示す。

表 - 1 RC はり材料の機械的性質

コンクリート 圧縮強度	鉄筋 (SD295A、D16)	
	降伏点	引張強度
N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
35 ~ 38	368.0	568.0

2.2 供試体の損傷状況

初回の補修・補強時の供試体は、曲げ破壊は生じているが、コンクリートの剥落や鉄筋の露出はなく、大小の断面高さ方向のひび割れが曲げ破壊区間に集中的に発生している。残留変形は比較的少量である (図 - 1 (a) 参照)。

2 回目補修・補強時の供試体は、破壊区間のコンクリートの剥離とそれに伴う鉄筋の一部露出が見られた。本研究では初回補修時と 2 回目補修時の前述の損傷を軽度と定義する。一方、損傷が重度のものでは、コンクリートが完全に抜け落ち、圧縮・引張鉄筋とも露出して湾曲している。また、多くのひび割れが縦横に発生し、コンクリートをハンマーで軽く打撃しても、周辺のコンクリートがさらに剥落する状態である。残留変形は大きな曲げ変形に加えて、ねじれ変形を生じている供試体も混在する。さらに、3 回目以降の供試体は全て損傷が重度の状態である。3 回目補修・補強時の破壊状況一例を図 - 1 (b) に示す。

2.3 補強方法

本研究では、RC はりの曲げ破壊の程度に応じて変形の復元、断面修復、ひび割れ補修、アラミド繊維補強を行い、供試体を作製する。

(1) 変形の復元

変形した供試体の引張変形面 (引張鉄筋側) に、油圧式アクチュエータを変位制御として強制的に変位を与えながら復元する。鉄筋が露出した供試体は、すでに鉄筋が降伏して若干伸びていることから、復元すると鉄筋に弛みが発生する。この弛みが補修時に面外に露出しないよう



(a) 軽度の損傷：初回補修・補強時の破壊



(b) 重度の損傷：3回補修・補強時の破壊

図 - 1 損傷状況一例

に内側に押し込むか、波状に曲げて長さを調整する。ねじれ変形の場合は供試体を 90 度回転させて、はり側面に強制変位を与えたり、緩んだ鉄筋の曲げ方向を調整しながら復元を試みる。

(2) 断面修復

断面修復は損傷が軽度の場合には行わない。損傷が重度の供試体は曲げ破壊の生じた区間のコンクリートが完全に抜け落ちているので、この部分に型枠を組み、コンクリートまたはモルタルを打設して修復する。まず、コンクリート欠損部周辺の浮きコンクリートを除去する。ひび割れや鉄筋の周辺もハンマーで十分打撃し、内部鉄筋を露出させる。その後、残ったコンクリート面に沿わせるように型枠を設置して修復用コンクリートをバイブレータで均一に打設する。コンクリートの剥落による深さが、最大骨材寸法より浅い場合にはモルタルの打設のみとする。4 週間の養生後脱型して表面の研磨を行う。修

表 - 2 断面補修コンクリートの配合表

最大粗骨材 寸法	水セメント比 W/C	単位体積重量 (kg/m ³)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
(mm)	(%)	W	C	S	G
20	45	206	458	658	1004

復に用いたコンクリートの配合を表 - 2 に示す。なお、修復用のモルタルは粗骨材を除いた配合とする。

(3) ひび割れ補修

ひび割れのみが発生している供試体および断面修復後に微細なひび割れが残存している供試体はひび割れの状態に応じた二種類の方法で補修を行う。ひび割れがコンクリート表面のみと予想される幅が約 0.2mm 以下の微細なひび割れの場合は、セメント樹脂をすり込みながら被覆する。また、ひび割れが内部まで達していると思われるひび割れ幅が 0.2mm 以上の場合は、エポキシ系注入剤を自動式低速低圧注入工法により注入する。7 日間の養生後に余分なセメント樹脂および注入用パイプ等を除去して研磨する。

(4) アラミド繊維補強

断面修復・ひび割れ補修が完了した供試体をアラミド繊維シートにより補強する。まず、下地処理は、ジェットタガネによりシート貼り付け面のモルタル分を除去して骨材の表面を露出させる。その後プライマーを塗布し、24 時間硬化養生して、アラミド繊維シートを含浸接着剤で貼り付ける。さらに、7 日間の養生を行い完成させる。なお、アラミド繊維シートは RC はりの引張側下面全幅に 1 枚を貼り付けることとし、補強区間は載荷実験等の支点によるシートの拘束を防ぐために長さ 1860mm とする。⁴⁾ 2 回目以降の補強では供試体全面のシートを除去後、断面修復、アラミド繊維補強を施す。アラミド繊維シートの力学特性を表 - 3 に示す。

表 - 3 アラミド繊維シートの力学特性

品番	目付	引張強度	ヤング係数	設計厚
	g/m ²	N/mm ²	kN/mm ²	mm
AK - 60	415	2060	118	0.286

3. 実験方法

本実験では、非破壊試験としての共振振動数測定実験と曲げ破壊のための載荷実験を交互に行い、アラミド繊維シート補強 RC はりの機能

回復状況と繰り返し補強による影響を評価することとする。なお、共振振動数は油圧式二軸振動台（図 - 2）による強制振動実験によって測定し、載荷実験は油圧式アクチュエータによる供試体支間中央への集中荷重載荷である。なお、両実験は供試体が破壊するまで交互に行うこととする。



図 - 2 油圧式二軸振動台と供試体

3.1 共振振動数測定実験

供試体の左右両支点部（支点部間隔 2000mm）に振動台と供試体を固定するための治具を取り付け、振動台に固定する。治具は一端回転、他端可動の単純支持となるように作製している。振動台より加速度 10gal の鉛直方向強制振動を入力振動数 10 ~ 100Hz の間を 0.2Hz 毎に与え、支間中央部側面の応答加速度から共振曲線を得て、共振振動数を特定する。

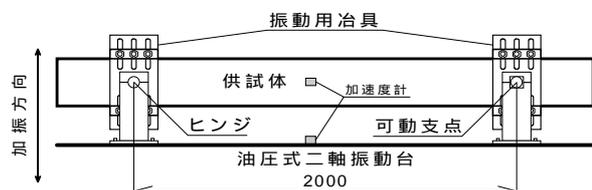


図 - 3 供試体治具および設置図

3.2 載荷実験

供試体支間を 2000mm とし、支間中央に上部から集中荷重を載荷して、同点のたわみを測定する。（図 - 4）なお、荷重は 9.8kN ずつ増減させることとする。また第 1 回目の最大荷重は 9.8kN として共振振動数を測定し、第 2 回目の

最大荷重は 19.6kN として共振振動数の測定を行う。このように供試体が破壊する第 n 回目の最大荷重 (=9.8kN × 第 n 回) までの载荷実験と共振振動数測定を繰り返し行う。

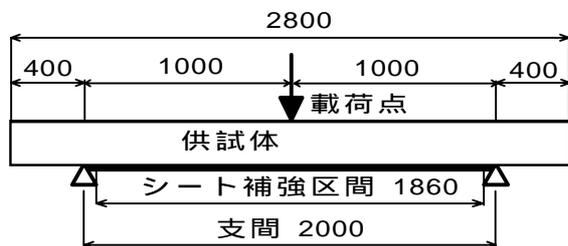


図 - 4 载荷実験概略図

4. 結果および考察

4.1 共振実験結果

表 - 4 は No.1~No.3 の補強完了時と载荷による破壊時の共振振動数である。また、参考に初回破壊時 a, ひび割れ補修時 b, アラミド繊維による補強完了時 c の共振振動数を, さらに No.4 破壊無履歴および初回破壊時の共振振動数を併記する。

図 - 5 は供試体 No.1~No.3 の各補強後に行った载荷実験後に測定した共振振動数である。補強直後は载荷をしていないので载荷重 0 kN であり, この時の共振振動数が補修・補強完了時のものである。補修前, すなわち破壊直後の共振振動数と比較すると, 全ての供試体で, ま

た何回補修・補強を行っても概ね 75Hz ~ 90Hz の共振振動数となっており, 剛性が回復していることが分かる。次に, 補修・補強回数ごとの共振振動数の変移を考察する。共振振動数の変移は大別すると 2 つのパターンに分けられる。まず第一のパターンは, 1, 2 回目の補修・補強では初期の荷重 19.6kN ~ 29.4kN で初期ひび割れ, 次いで引張鉄筋に至るひび割れが発生したことから共振振動数の減少が見られ, その後は急激な変化はなく次第に減少して破壊に至っている。第二のパターンは, 3, 4 回目の補修・補強のように補修・補強完了直後から载荷しても大きな振動数の変化が見られず, 緩やかな減少を示し, 高い振動数を維持したままで突発的な破壊に至っている。この時の破壊荷重は 1, 2 回目の補修・補強の時より小さいものとなっている。このパターンの相違は補修・補修を施した供試体の損傷状況に大きく関係していると考えられる。

1 回目補修・補強を施した供試体は初回の曲げ破壊を被ってはいるが, 損傷はひび割れ程度であり, 変形の復元とひび割れ補修後にアラミド繊維補強を施しただけの損傷の軽微なものであった。しかし, コンクリートはひび割れ補修のみで完全に内部まで完全に補修されたかは不明である。したがって, 初期の共振振動数の低

表 - 4 補修・補強回数および共振振動数の変移

供試体	共振振動数(Hz)											
	破壊無履歴	a	b	c	1回目		2回目		3回目		4回目	
					補強時	破壊後	補強時	破壊後	補強時	破壊後	補強時	破壊後
No.1	/	42.8	52.4	75.8	75.8	44.4	76.2	27.8	77.8	28.6	86.8	28.4
No.2	/	40.4	53.2	76.2	76.2	44.4	84.2	25.8	78.8	30.0	87.6	32.6
No.3	/	/	/	83.8	83.8	49.2	76.4	27.6	77.4	28.2	84.4	28.0
No.4	87.4	38.8	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

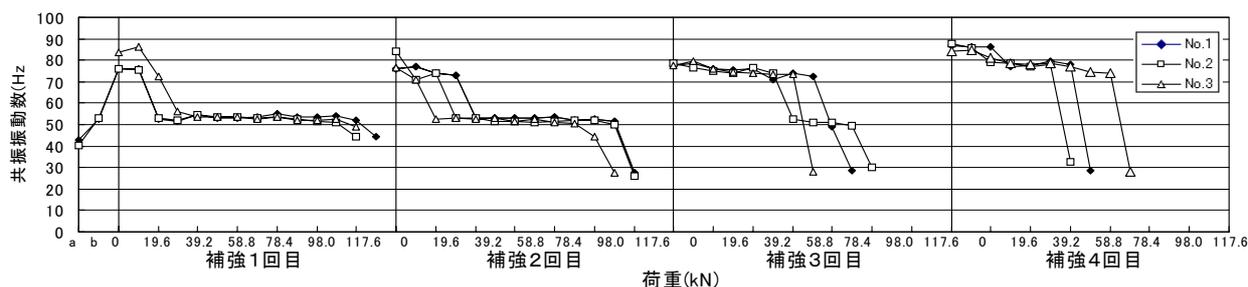


図 - 5 繰り返し補修・補強回数と荷重 - 共振振動数の変移

下はコンクリートが完全に補修されておらず、初期段階からひび割れが発生した後、鉄筋の一部とアラミド繊維シートが抵抗して共振振動数が維持されたものと考えられる。

2回目補修・補強を施した供試体は、部分的なコンクリートの欠落が生じ、鉄筋も一部露出していた。したがって供試体の作製においては、変形の復元および断面修復コンクリートの打設後にひび割れ補修、アラミド繊維補強を施した。しかし、断面修復の範囲が比較的狭かったことから、1回目と同様の補修・補強効果となることが共振振動数の結果より想定できる。

次に、3、4回目補修・補強の供試体はいずれもコンクリートの欠落が多く、断面修復範囲も広がった。特に、鉄筋の変形が大きく、はりの変形を復元する際に、伸びが生じた鉄筋を所定かぶりの位置に戻すことは不可能で、断面内に収まるように波状に湾曲させながら長さを調節する場合もあった。したがって、補修・補強した供試体内部において、鉄筋が有効に抵抗機能を果たすとは考えられない。このように曲げの影響を受ける大部分のコンクリートを打ち換えて断面修復をしたことから、コンクリートの抵抗機能がほぼ完全に修復がなされたこと、鉄筋が抵抗機能を果たさなくなっていることから共振振動数の低下段階が見られなかったものと考えられる。

4.2 曲げ破壊無履歴供試体の共振振動数

図 - 6 に曲げ破壊無履歴の供試体 No.4 の共振振動数と供試体 No.3 の各補修・補強後の共振振動数の変移を示した。

No.4 は 19.6kN において初期ひび割れ発生に伴う振動数の減少が見られ、さらに 49.0kN でひび割れの進展に伴う急激な減少が生じ、最終的に 78.4kN で曲げ破壊した。まず、補修・補強状況を振動数から考察すると、全ての回数において、曲げ破壊無履歴 No.4 の初期共振振動数付近まで戻っており、補修・補強がなされていることがわかる。

次に、補修・補強回数ごとの変移を見ると、

前述の第一のパターンと第二のパターンは No.4 の振動数変移を境界として鮮明に分かれている。特に、第二のパターンではひび割れによる共振振動数の減少がなく、曲げ剛性は初期段階より断面修復コンクリートとアラミド繊維補強に依存しているようである。共振振動数は高いまま維持されているが、破壊時には RC 自体の突発的な曲げ破壊が発生した後にアラミド繊維が破断したものと考えられる。本実験の共振振動数測定による補強効果の判定は補強後の破壊の性質とアラミド繊維の役割を知る上で有効であることが立証できる。

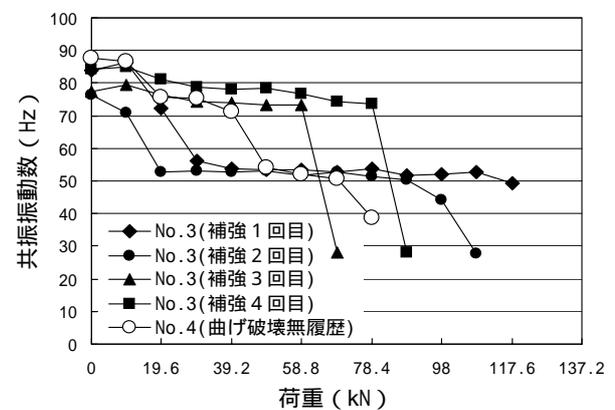


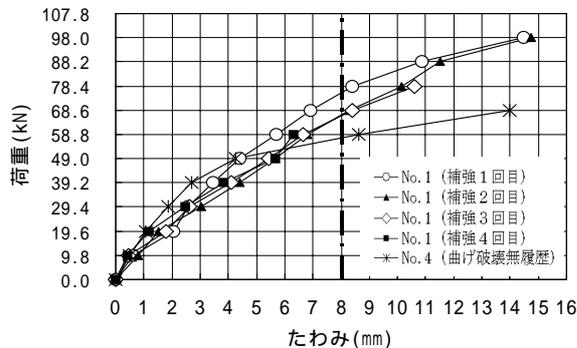
図 - 6 曲げ破壊無履歴供試体の共振振動数

4.3 載荷実験結果

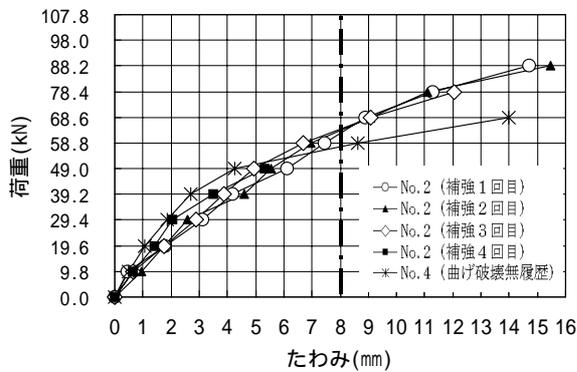
図 - 7 は各供試体の載荷実験における最大荷重とたわみの関係である。同図中にも No.4 の関係を併記した。

いずれの供試体においても、たわみの増加率は補修・補強供試体の方が大きくなっている。また、補修・補強回数に関わらず載荷荷重 49kN までは曲げ破壊無履歴供試体 No.4 のたわみより最大で 1.96mm、平均で 0.82mm 大きくなっていることから、ここでは剛性が完全に回復していないことがわかる。しかし、No.4 の限界荷重を 58.8kN とした場合、その近傍の 8mm をたわみの比例限界値として荷重を比較すると、アラミド繊維補強により耐荷重は確実に大きくなっている。これは、補修・補強した RC はりは健全なものより初期変形は大きくなるが、大きな耐

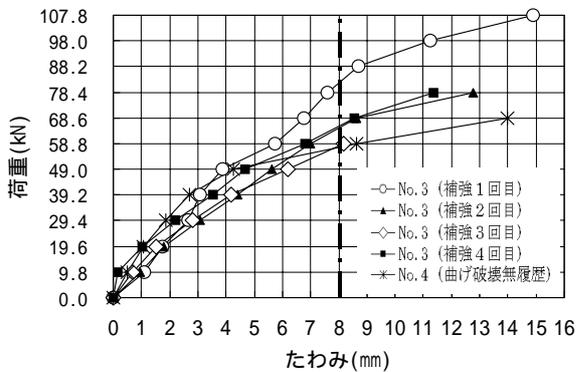
力を持たせることが可能であることを示している。一方、補修・補強が繰り返されると、同じアラミド繊維量では耐力の低下が認められる。



(a) No. 1 供試体



(b) No. 2 供試体



(c) No. 3 供試体

図 - 7 補修・補強回数と荷重 - たわみの関係

5. まとめ

- (1) RC はりの共振振動数からは、ひび割れ補修・アラミド繊維補強によってRC はりを破壊前の状態に復元することが可能である。
- (2) 補強回数増加に伴って補修・補強の範囲とその方法により共振振動数の変化パターンが異なる。補強回数が少ない損傷が軽度の場合には、残存コンクリートや鉄筋の影響が大きく現れると考えられ、新設RC はりに類似し

たひび割れが発生した後にアラミド繊維シートの効果が発揮されて、破壊荷重が大きなものとなっている。一方、損傷が重度の場合には、広い範囲にわたる断面補修であることからコンクリート部分の多くが打ち換えられる。さらにアラミド繊維シート補強によってひび割れが抑制されているために、段階的な共振振動数の低下は見られない。鉄筋の機能は全く期待できず、シート破断による突発的な破壊、共振振動数の低下となる。

- (3) 補修・補強を行うと、その回数に関わらず剛性の低下は免れず、比例限界付近までたわみは破壊無履歴のものより大きくなる。

謝辞

本研究の一部は日本大学学術助成金一般（個人）を使用したものである。また、試料のご提供と施工指導にはショーボンド建設補修工学研究所材料試験室および三井住友建設技術研究所に厚く御礼申し上げます。実験にご協力頂いた日本大学大学院生産工学研究科の新井学院生、金子建未院生に対し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 張 広鋒, 岸 徳光, 三上 浩, 小室雅人: FRPシート曲げ補強RC梁の破壊挙動に及ぼす各種ひび割れの影響に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 2, 2004, pp. 1621-1626
- 2) 高橋義裕, 佐藤靖彦: 初期荷重を受けたCFRPシート補強されたRC梁の曲げ挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 2, 2004, pp. 1699-1704
- 3) 阿部 忠, 木田哲量, 澤野利章, 加藤清志: 走行振動荷重による応力履歴を受けたRCはりのCFRP補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 2, 2004, pp. 1711-1716
- 4) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋裕介, 澤田純之: AFRPシート曲げ補強RC梁の破壊性状に及ぼすシート接着長の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 2, 2004, pp. 1615-1620