

# 論文 下面増厚したRCはりの補強筋剛性と破壊形態に関する研究

佐藤貢一<sup>\*1</sup>・小玉克己<sup>\*2</sup>・加納暢彦<sup>\*3</sup>・前田哲哉<sup>\*3</sup>

要旨：道路橋のRC床版やRCはりの補強工法である、下面増厚工法はRC床版やRCはりの下面に補強筋を配置し、ポリマーセメントモルタルで増厚一体化する方法である。本工法は補強筋の量を増すことにより、耐荷力や曲げ性状の向上を図ることができる。しかし、下面増厚補強を施した部材の破壊性状は、増厚部分の剥離やせん断破壊となる場合があることから破壊性状を把握する必要がある。本研究では補強鉄筋量を段階的に変化させ、補強鉄筋量と破壊形態との関係に関し検討を行ったものである。

キーワード：下面増厚工法、破壊形態、補強、せん断、曲げ破壊

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下RCと略す）構造物は土木建築構造部材のなかで最も多く使用されている構造部材の一つであり、経済性、安全性、耐久性の高いことからこれまで多く採用されてきた。しかし、RC構造物の劣化損傷が顕在化し、補修補強の必要性が高まった。その結果、維持や補修補強に関する研究が盛んに行われるようになり<sup>1) 2)</sup>、特に阪神・淡路大震災以降増加する傾向にある<sup>3)</sup>。

道路橋構造物では平成5年11月の道路構造令第35条「設計自動車荷重の改正」にともない、TL-20tfの設計荷重がB活荷重(25tf)に引き上げられたことにより、設計基準が改定され、所用の性能を満足できず補強が必要となる場合がある。

下面増厚工法はこれまで道路橋のRC床版やRCはりの補強工法として研究及び施工が行われてきた。下面増厚補強したRCはりの研究は主として道路橋のRC床版補強を想定した下面増厚工法の基礎研究として行い。実験により下面増厚補強したRCはりの補強効果を確認し、さらに曲げ性状に関する理論的な解析を行ってきた<sup>4)</sup>

<sup>5)</sup>。しかし、補強後の破壊形態が剥離や脆的なせん断破壊となる場合があることから、本工法の補強鉄筋の量と破壊性状に関し把握する必要がある。本論文では、補強鉄筋量を段階的に増加させ補強鉄筋量と破壊形態に関し研究を行ったものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 下面増厚補強方法

下面増厚工法は道路橋のRC床版やRCはりの下面に補強筋を配置しコンクリートアンカーで固定した後、ポリマーセメントモルタルで一体化する工法である。補強筋は劣化や損傷により耐荷力が低下した場合の不足する鉄筋量や、設計の改訂により必要となった鉄筋量を配置する。

### 2.2 使用材料

#### (1) 補強筋

本研究では軸方向筋としてRCはりの主鉄筋と補強用の補強筋の2種類を使用した。RCはりの主鉄筋は鉄筋D10(SD295A)2本を使用し、補強筋は鉄筋D6を1~4、D102本を各補強はりに使用した。鉄筋の性状を表-1に示す。

#### (2) モルタル

\*1奈良建設(株)技術研究所主任研究員(正会員)

\*2武蔵工業大学教授 土木工学科 工博(正会員)

\*3武蔵工業大学大学院 土木工学専攻(正会員)

表-1 使用した鉄筋の性状

補強材		引張強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)
主鉄筋	鉄筋D10	490 *353	$1.81 \times 10^5$
	鉄筋D6	447 *326	$1.81 \times 10^5$
補強鉄筋		490 *353	$1.81 \times 10^5$

\*印：降伏強度

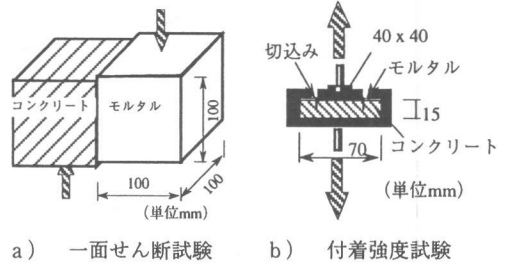


図-1 付着強度試験状況

表-2 コンクリートおよびモルタルの性状

下面増厚材料	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	付着強度 (MPa)	せん断付着 (MPa)	弾性係数 (MPa)
コンクリート (28days)	27.0	2.1*	3.7*	—	—	$2.62 \times 10^4$
ポリマーセメントモルタル アクリル系 (28days)	37.4	2.3	10.0	2.40	2.35	$1.79 \times 10^4$

\*印は圧縮強度からの換算値

付着強度は接着面に直角方向の付着強度JIS K5400

せん断付着強度は一面せん断試験

補強筋をRC梁と一体化させるための増厚用ポリマーセメントモルタルはアクリル系ポリマーセメントモルタルを使用した。弾性係数はコンクリートの約2/3、付着強度は（接着面に対し垂直方向）は2.4MPaの高い付着強度を示した（図-1b）。また、一面せん断試験によりモルタルとコンクリートとのずれ量が0.1mmに達した時をもとにせん断付着強度を求めるとせん断付着強度は、2.35MPaであった（図-1a）。

### 2.3 供試体の種類

#### (1) 下面増厚供試体の製作

RC構造物の損傷を想定し、RCはりにあらかじめ主鉄筋D10の降伏強度の75%（主鉄筋応力度265MPa）、0.3mm程度のひびわれが発生する荷重を載荷した。その後荷重を除荷しRCはりを補強した。補強方法は損傷を与えたRCはりの下面に補強筋を配置しコンクリートアンカー4本で固定した後（図-2）ポリマーセメントモルタル（表-2）で一体化した。増厚後28日間室内養生後に載荷実験を行った。

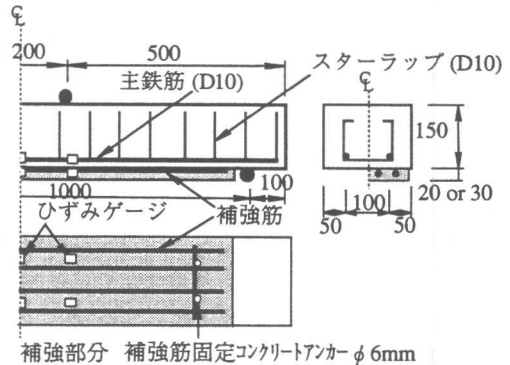


図-2 実験供試体形状

#### (2) 実験の種類

表-3に実験を行った供試体の一覧表を示す。CASE I は本研究の基準となる無補強RCはりの曲げ載荷実験を行った。主鉄筋はSD295A D10 2本を使用し、せん断補強筋として同じくD10を7cm間隔に配置した。

CASE II は補強はりの実験を行い、補強筋としてD6を1~4本、さらにD10を2本配置した5種類のはりを行っている。補強筋比を増加させたことにより、補強筋の補強筋比が0.22から一

表-3 供試体一覧表

CASE	供試体名	補強筋	供試体数	補強鉄筋					補強厚 (cm)
				断面積 (cm <sup>2</sup> )	降伏荷重 (kN/bar)	弾性係数 E <sub>r</sub> (MPa)	補強筋比	本数 N	
I	N	無補強	5	—	—	—	—	—	—
II	II-1	D6	2	0.317	10.3	1.81×10 <sup>5</sup>	0.22	1	2.0
	II-2	D6	2	0.317	10.3	1.81×10 <sup>5</sup>	0.44	2	2.0
	II-3	D6	2	0.317	10.3	1.81×10 <sup>5</sup>	0.67	3	2.0
	II-4	D6	2	0.317	10.3	1.81×10 <sup>5</sup>	0.89	4	2.0
	II-5	D10	2	0.713	25.2	1.81×10 <sup>5</sup>	1.00	2	3.0

補強筋比 = 補強筋断面積 A<sub>r</sub> / 主鉄筋断面積 A<sub>s</sub>

率に1.00へ増加した場合の曲げ性状の変化を検討した。補強筋比とは既設はりの主鉄筋断面積 (D10-2本1.4266cm<sup>2</sup>) に対する補強鉄筋の断面積比とする。

### 2. 4 荷重載荷方法

荷重は、支点間隔100cm, 曲げスパン間隔20cmの2点載荷とした。両支点はピン支持とし、はり軸方向の拘束の影響を避けるため片側の支点下にはローラーを挿入した。計測はロードセルにより載荷荷重, 抵抗ひずみ線ゲージにより主鉄筋および補強筋のひずみ, 変位計によりはり中央点のたわみ量を計測した (たわみ量は支点の変位も計測し支点沈下の影響も考慮している)。

### 3. 終局耐荷力と破壊性状

#### 3. 1 耐荷力と破壊形態

各補強はりは2体載荷実験し, 破壊荷重及び降伏荷重の平均値を表-4に示している。ここで破壊荷重は補強はり最大耐荷力を意味し, 降伏荷重は補強後の既設はり主鉄筋の応力度が降伏応力度に達した時点での載荷荷重を意味することとする。表-4中の ( ) 内は補強筋比を示す。

補強後の補強はりの降伏荷重は補強筋比の増加にともない向上した。D6-1本のII-1補強はりは1.53倍, D6-2本のII-2補強はりは1.62倍, D6-3本のII-3補強はりは1.87倍, D6-4本のII-4補強はりは2.13倍, D10-2本のII-5補強はりは2.56倍となっている。一方破壊荷重比は補強筋比の増加

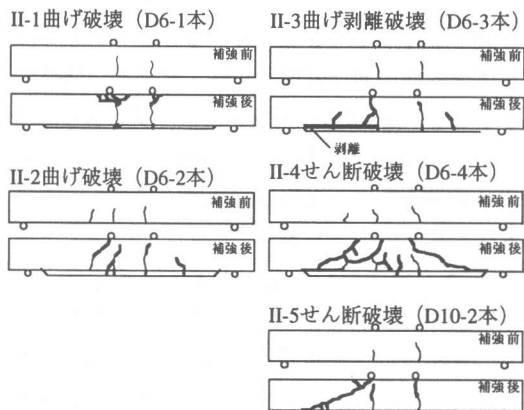


図-3 供試体の破壊形態

にともない, 補強筋比が0.67以下のD6-3本までは比例的に増加しているが, その後補強筋比が増加しても破壊荷重の向上は見られない。すなわち, II-1補強はりは1.43倍, II-2補強はりは1.69倍, II-3補強はりは1.93倍であるが, II-4補強はりは1.76倍, II-5補強はりは1.94倍とII-3と同等以下の向上率である。

補強前のひびわれは載荷点直下に2~3本のひびわれが発生している状態であった。II-1はりの破壊形態は補強前に発生した曲げひびわれが下面増厚部を貫通し, 曲げ破壊した。II-2はりは新たなひびわれが発生したが, 既設ひびわれが進行し曲げ破壊した。II-3はりはII-2はりと同様に曲げひびわれが進行したが, 最大耐荷力以降補強はりが塑性領域に入り, 増厚部分の界面からの剝離が先行し曲げ圧縮破壊した。一方, II-4はり, II-5はりは各々約70kNの載荷荷重状態で支点方向から斜め方向ひびわれが進行し, せん断

表-4 実験結果

CASE	供試体名	補強筋	増厚量 (cm)	破壊荷重	降伏荷重	$F_u/F_{un}$	$F_y/F_{yn}$	破壊性状
				$F_u$ 実測値 (kN)	$F_y$ 実測値 (kN)			
I	N	無補強	—	38.5	26.8	1.00	1.00	曲げ破壊
II	II-1	D6 (0.22)	2.0	55.0	41.0	1.43	1.53	曲げ破壊
	II-2	D6 (0.44)	2.0	65.3	43.4	1.69	1.62	曲げ破壊
	II-3	D6 (0.67)	2.0	74.5	50.0	1.93	1.87	曲げ剥離破壊
	II-4	D6 (0.89)	2.0	67.6	57.1	1.76	2.13	せん断破壊
	II-5	D10 (1.00)	3.0	74.5	68.6	1.94	2.56	せん断破壊

( ) : 主鉄筋に対する補強筋比  
 $F_{un}$  : 無補強はり破壊荷重       $F_{yn}$  : 無補強はり降伏荷重

破壊するものであった(図-3)。この終局的な破壊形態が曲げ破壊からせん断破壊へ移行したことが、II-3はりの補強筋比までは破壊荷重比が比例的に増加しているが、II-4はり以上に補強筋比が増加しても破壊荷重の向上は見られない原因であると考えられる。

### 3. 2 補強筋比と曲げ性能

補強筋比0.44のII-2はりは荷重が増加し主鉄筋、補強鉄筋の降伏後も補強鉄筋ひずみが大きく平面保持が成立している。一方補強筋比が最も大きい補強筋比1.00のII-5はりは載荷荷重の上昇と共に補強筋ひずみが減少し平面保持にずれが生じてきている(図-4)。ここで主鉄筋ひずみが降伏ひずみに達するまでを弾性領域とし、降伏ひずみ以上になった場合を塑性領域とする。補強はりのたわみ曲線は弾性領域内において無補強はりNの上側に位置し、同一載荷荷重におけるたわみ量が低減し補強効果が確認できる。たわみ量の低減効果は、配置した補強筋比の増加に比例し向上している(図-5)。

一方塑性領域での性状は、補強筋比が0.44以下のII-1, 2はりは補強筋と主鉄筋が降伏し補強はりが塑性領域に入った後も載荷荷重の急激な減少もなくたわみ量が増加している。補強筋比が0.67であるII-3はりは最大耐荷力後、補強部の剥離が生じたたわみの増加と共に載荷荷重も減少した。補強筋比が0.89と大きいII-4はりはせん断破壊し、最大耐荷力後に急激な荷重の低下とたわみ量の増加が確認された(図-6)。このことから、補強による降伏荷重及び曲げ破壊荷重

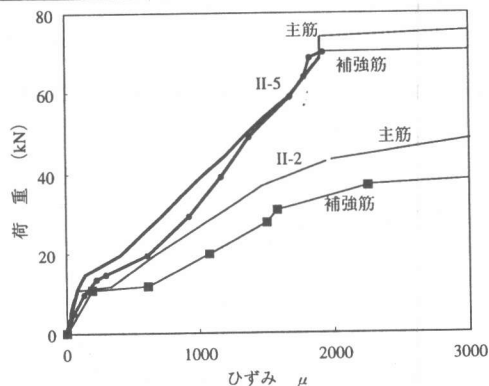


図-4 主鉄筋と補強筋の荷重とひずみの関係

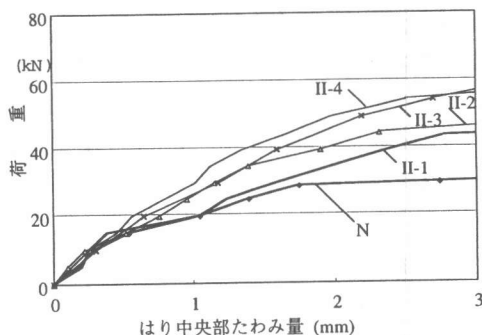


図-5 主鉄筋と補強筋の荷重とたわみの関係 (弾性領域挙動)

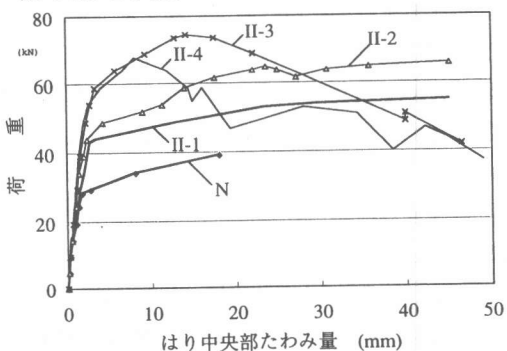


図-6 主鉄筋と補強筋の荷重とたわみの関係 (弾塑性領域挙動)

の増加をせん断耐力以下に抑え、破壊形態を曲げ破壊にし、脆性的な破壊であるせん断破壊形態を回避する必要がある。

#### 4. 破壊荷重の理論的算定

##### 4.1 曲げ耐力の算定

補強後の下面増厚はりのたわみ量や応力性状は弾性的に挙動し、弾性理論により把握できることが報告されている<sup>4) 5)</sup>。このことから本報告でも下面増厚後の断面のひずみ分布は中立軸からの距離に比例するものとして、下面増厚はりの曲げ耐力の算定を行った。算定は図-7に示すようにはりと補強部が合成構造の機能を有し、主鉄筋と補強筋が二段配筋機能するものとした。曲げ降伏荷重は主鉄筋ひずみ量が降伏ひずみ量に達したときの載荷荷重とした。また、曲げ破壊荷重は鉄筋の引張強度を終局状態として代入している。

##### 4.2 せん断耐力

せん断耐力の算定式<sup>6)</sup>を以下に示す。

$$V_{yd} = V_{cd} + k V_{sd} \quad (1)$$

$V_{yd}$  : 棒部材のせん断耐力

$V_{cd}$  : コンクリートが受けもつせん断耐力

$$V_{cd} = \beta_d \beta_p \beta_n f_{vcd} b d'$$

$$\beta_d = \left( \frac{100}{d} \right)^{\frac{1}{4}} \quad \beta_p = (100P)^{\frac{1}{3}}$$

$P$  : 鉄筋比 (補強筋も含む)  $\beta_n = 1$

$f_{vcd}$  : 設計せん断強度  $b$  : はり幅

$V_{sd}$  : せん断補強筋が受けもつ設計せん断耐力

$$V_{sd} = A_w f_{wyd} (\sin \alpha + \cos \alpha) \frac{z}{s}$$

$A_w$  : 区間  $s$  におけるせん断補強鉄筋の総断面積

$f_{wyd}$  : せん断補強鉄筋の設計降伏強度 353MPa

$\alpha$  : せん断補強鉄筋と部材軸とのなす角

$z$  : 圧縮応力の合力の作用位置から主鉄筋

と補強鉄筋の重心位置までの距離

$s$  : せん断補強鉄筋配置間隔

$k$  : せん断補強鉄筋の受けもつせん断耐力係数  $k=0.23$

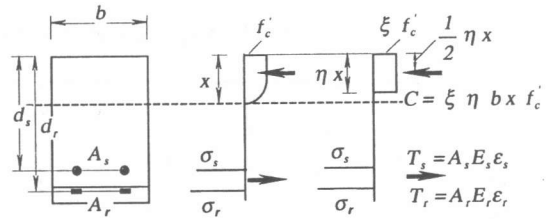


図-7 下面増厚補強はり応力図

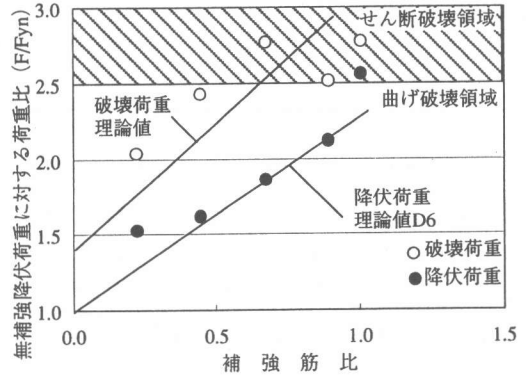


図-8 引張剛性比と破壊形態の関係

本実験に用いたRCはりは圧縮側の軸方向鉄筋を配置していない。したがってスターラップの圧縮側の定着力が低く、せん断破壊した補強はりはスターラップが十分機能する以前にせん断破壊している。せん断破壊した供試体のせん断破壊時点で計測されたせん断補強鉄筋の応力度は約80~100MPaで破壊し、降伏強度の353MPaに達する前に破壊した。このことから本補強はりのせん断耐力算定手法として、式(1)のせん断耐力算定式に補正係数  $k$  を加えた。係数  $k$  はせん断補強筋の降伏応力度に対する比として  $k=80\text{MPa}/353\text{MPa}=0.23$  を使用した。

##### 4.3 補強筋比と破壊形態

補強筋比の増加と破壊形態の関係を示したのが図-8である。補強筋比の増加とともに曲げ降伏荷重が計算値とほぼ一致しながら増加していることが分かる。同様に破壊荷重も補強筋比の増加とともに計算値と同様な形態で増加するが、無補強はりのせん断耐力を越えせん断破壊領域に入り、はりの破壊荷重は増加せず右方向に移動している。このことから補強筋比の増加にともない破壊形態は曲げ破壊形態からせん断破壊形態に移行していることが分かり、計算

表-5 補強筋の引張剛性比と耐荷力（実測値と計算値）

CASE	供試体名	補強筋	増厚量 (cm)	破壊荷重		降伏荷重		せん断耐荷力	Fu/Fy	Fy/Fyn	破壊性状
				Fu 実測値 (kN)	Fucal 計算値 (kN)	Fy 実測値 (kN)	Fycal 計算値 (kN)	Vcal 計算値 (kN)			
I	N	無補強	—	38.5	37.5	26.8	26.8	67.3	1.44	1.00	曲げ破壊
II	II-1	D6 (0.22)	2.0	55.0	48.2	41.0	34.6	73.1	1.34	1.53	曲げ破壊
	II-2	D6 (0.44)	2.0	65.3	58.6	43.4	42.2	77.8	1.50	1.62	曲げ破壊
	II-3	D6 (0.67)	2.0	74.5	68.7	50.0	49.7	81.6	1.49	1.87	曲げ剥離破壊
	II-4	D6 (0.89)	2.0	67.6	78.6	57.1	57.1	85.0	1.18	2.13	せん断破壊
	II-5	D10 (1.00)	3.0	74.5	83.5	68.6	69.1	87.0	1.09	2.56	せん断破壊

により把握することができる。曲げ破壊は補強はり降伏荷重及び曲げを想定した破壊荷重がせん断耐荷力を上回らない場合で生じる。この場合補強はりが降伏荷重を越え塑性領域に入ったあと破壊性状に粘りを生じさせることができる。

補強筋の補強筋比を高くし、補強はりの降伏荷重または曲げを想定した破壊荷重がせん断耐荷力を上回るようになると破壊形態はせん断破壊形態となる。せん断破壊の場合急激な耐荷力の低下を生じ脆性的な破壊を生じる。

曲げ破壊荷重とせん断耐荷力の算定結果を表-5に示す。補強後は補強筋の配置による鉄筋比や有効高さの増加によるせん断耐荷力の向上が期待できる。しかし、II-4とII-5の実測値と計算値を比較して見ると、計算値は実測値より高い値を示している。補強後せん断破壊した供試体のせん断破壊強度は無補強はりのせん断耐荷力計算値を若干上回る程度で、理論上期待できるせん断耐荷力の向上は確認できなかった。この原因として補強筋比が高い場合の荷重増に伴う補強筋のずれ等が考えられるが今後検討を進めていきたい。設計では曲げ破壊荷重及び降伏荷重が無補強はりのせん断耐荷力を上回らないように補強筋量を選定し破壊形態を曲げ破壊性状にする必要がある。

## 5. まとめ

本実験研究より、次のような結論を得た。

- (1) 補強筋比の増加に比例し曲げ降伏荷重、

弾性範囲内のたわみ量低減率の補強効果は比例的に向上する。

(2) 補強筋比の増加に伴い曲げ耐力が向上し、曲げ破壊形態からせん断破壊形態に補強はりの破壊形態は移行する。曲げ破壊の場合は補強はりの塑生後にも粘りをもたせ脆性的な破壊傾向を回避できるが、せん断破壊傾向の場合の破壊は脆性的となる。

(3) 曲げ破壊荷重、せん断破壊荷重、を算定し下面増厚補強したはりの破壊性状を理論的に把握できることを示し、終局的な破壊性状は曲げ破壊となるよう補強筋比を選定することを提案した。補強後のせん断耐荷力は既設はりのせん断耐荷力を採用する。

## 参考文献

- 1) 長瀧重義他：補修した鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.2，pp.1458～1464，1992.6
- 2) 宇治公隆：シート状連続炭素繊維補強材を用いた既設鉄筋コンクリート部材のせん断耐力向上効果に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.3，No.2，pp.37～47，1992
- 3) 例えば辻幸他：鉛直打継目を有するRCはりの鋼板補強に関する基礎研究，土木学会論文集，No.571，V-36，1997.8
- 4) 佐藤貢一・小玉克巳：FRPとポリマーモルタルで補修したRC梁の曲げ性状に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.2，PP.877～882，1991
- 5) 佐藤貢一・小玉克巳：FRPと各種モルタルで補強したRC梁の曲げ性状に関する研究，第46回セメント技術大会講演集，PP.808～813，1992
- 6) コンクリート標準示方書「平成8年制定」，設計編，土木学会，pp60-61