

論文

[2177] 連続繊維補強筋を用いた X 形配筋梁の構造性能

金久保利之^{*1}・藤沢正視^{*2}・園部泰寿^{*3}

1. はじめに

連続繊維補強筋（以下、FRPR と略する）をそのさまざまな特徴を有効に利用し、鉄筋代替の材料としてコンクリートの補強に用いようとする研究が近年盛んに行われている。通常の平行配筋された梁部材に関しては、曲げ、せん断、付着性状のそれぞれについてすでに研究が行われており [1,2,3]、基本的な構造性能は把握されている。いずれの性状についても、FRPR を用いたときの問題点として指摘している項目に、FRPR の破断に起因する部材の脆性的な破壊が挙げられる。

一方、鉄筋コンクリート部材において、主筋を X 形配筋することが部材の強度および靱性を著しく改善させることは周知である。逆対称曲げモーメント下では、X 形に配筋された主筋はせん断力に対して直接抵抗し、通常主筋全域にわたって一様の引張または圧縮力を負担するため、付着性状が問題視されることもない。FRPR を用いた補強コンクリート部材に対しても、部材の脆性的破壊を防止し、かつ、FRPR の一つの利点である高強度性を有効に活用できる方法として、主筋を X 形配筋にすることが考えられる。しかしながら、FRPR を用いた X 形配筋部材の実験例は現在皆無であり、その性状は不明である。

本研究では、FRPR を用いた X 形配筋を有する梁部材の基本的な構造性能を把握することを目的とする。アラミド繊維筋を用いた梁試験体に対して逆対称モーメント加力を行い、その破壊性状、強度等の構造性能を検討する。

2. 実験の概要

2.1 試験体

試験体は計 5 体で、試験体の諸元を表-1 に、断面図および配筋例を図-1 に示す。補強筋に FRPR を用いた試験体は試験

体 APL、AX3L、AX7L の 3 体で、試験体 APL の主筋はすべて平行配筋されており、試験体 AX3L、AX7L は X 形主筋が配されている。また、比較検討用に、試験体 APL、AX7L の補強筋をすべて鉄筋に置き換えた試験体 NPL、NX7L が計画されている。変動因子は X 形主

表-1 試験体一覧

試験体名	主筋			あばら筋		共通事項
	平行筋	X筋	p_t (%)*	配筋	p_w (%)	
APL	3,3-K256S	-	1.69	2-K32@80	0.26	$M/QD = 1.4$ 断面 $b \times D = 240 \times 350 \text{mm}$ コンクリート 設計基準強度 $F_c = 360 \text{kgf/cm}^2$
AX3L	2,2-K256S	2-K256S	1.66			
AX7L	2-K256S	2,2-K256S	1.66			
NPL	3,3-D16	-	1.69	3-D6@120	0.33	
NX7L	2-D16	2,2-D16	1.65	2-D6@80		
試験体名称	a: 補強筋の種類 A = アラミド N = 鉄筋					
A X 7 L	b: 主筋形状 P = 平行配筋 X = X形配筋					
a b c d	c: X筋量の全主筋量に対する割合 3 = 2/6 7 = 4/6					
	d: あばら筋量 L = 0.3% 程度を示す					

*1 筑波大学大学院 工学研究科構造工学専攻、工修（正会員）

*2 筑波技術短期大学助教授 建築工学科、工修（正会員）

*3 筑波大学教授 構造工学系、工博（正会員）

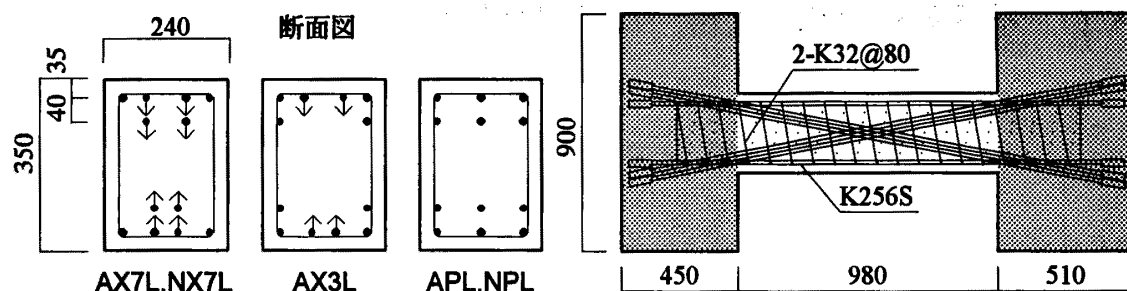


図-1 試験体断面図および配筋例 (AX7L)

筋量の全主筋量に対する割合であり、その値は試験体 AX3L で 2/6、AX7L および NX7L で 4/6 である。あばら筋はすべての試験体において、あばら筋量 (P_w) で 0.3% 程度とした。なお、FRPR を用いた試験体にはスパイラル形状のあばら筋を、鉄筋を用いた試験体には溶接閉鎖型のあばら筋を用いた。

2.2 使用材料

FRPR には、組紐状砂付きアラミド繊維筋 K256S (主筋) および組紐状アラミド繊維筋 K32 (あばら筋) を用いた。比較検討用の鉄筋を用いた試験体には、主筋に D16 (SD490) を、あばら筋に降伏強度 8000kgf/cm² 級の高強度異形鉄筋 D6 を用いた。コンクリートには、粗骨材に 6 号砕石、細骨材に川砂を使用した、設計基準強度 360kgf/cm² の普通コンクリートを用いた。使用材料の力学的性質を表-2 に示す。なお、FRPR の引張試験を独自に行うことは困難であるので、FRPR に関しては公称値を記し、また、文献 [4] による曲げ加工部の強度もあわせて記した。コンクリートの圧縮強度は、加力前後の、気中および封緘養生 3 本ずつの、計 12 本のテストピースによる試験結果の平均値とした。

2.3 加力・計測方法

加力装置には建研式加力装置を用い、正負交番繰返し加力を行った。加力は部材角 (R) を制御することにより行い、 $R = \pm 1/200$ 、 $\pm 1/100$ 、 $\pm 1/50$ 、 $\pm 1/33\text{rad}$ を 2 回行った後、 $\pm 1/20\text{rad}$ を 1 回行い、その後 $+ 1/15\text{rad}$ の加力を行うことを目標とし、急激な耐力の低下があった時点で加力を終了した。試験体の変形は、スタブに固定した治具に変位計を取り付け、スタブ間の相対的なたわみ量と軸方向変形を測定した。また、主筋材端部の位置にストレインゲージを添付し、主筋のひずみ量を測定した。

表-2 使用材料の力学的性質

補強筋	断面積 (cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	0.2% 耐力 (kgf/cm ²)	引張強さ (kgf/cm ²)	曲げ加工部の強度 (kgf/cm ²)
K256S	2.00	0.6×10^6	-	13500	-
K32	0.25	0.6×10^6	-	13500	9600 (=13500 x 0.71)
D16	1.99	1.81×10^6	5380	6970	- [4]
D6	0.32	2.04×10^6	9410	10130	-
コンクリート	圧縮強度 (kgf/cm ²)		割裂強度 (kgf/cm ²)		ヤング係数 (kgf/cm ²)
APL, AX3L, AX7L	413		30.4		2.09×10^5
NPL, NX7L	322		30.0		2.23×10^5

3. 実験結果

3.1 破壊経過

各試験体の荷重 (Q) - 部材角 (R) 曲線および最終ひび割れ状況を図-2に示す。また、試験体 AX7L の最終破壊状況を写真-1に示す。各試験体とも $R=1/200\text{rad.}$ の加力サイクルで、部材端部に曲げひび割れ、ついで曲げせん断ひび割れが順次発生し、その後腹部にせん断ひび割れが発生した。試験体 NPL および NX7L では、 $R=1/50\text{rad.}$ の加力サイクルで平行主筋および X 形主筋の降伏が部材端部でみられた。その後、試験体 NX7L を除く各試験体では、部材角の増大にともなってせん断ひび割れが多数発生し、試験体 NPL では各加力ピーク時の耐力が次第に減少した。一方、試験体 APL および AX3L では $R=1/33\text{rad.}$ の加力サイクルのそれぞれ $1/36\text{rad.}$ 、 $1/37\text{rad.}$ で、試験体 AX7L では $R=1/20\text{rad.}$ の加力サイクルの $1/30\text{rad.}$ であばら筋の曲げ加工部が破断し、急激な耐力の低下が観察された。最終的な破壊形式は、FRPR を用いた試験体があばら筋の破断、試験体 NPL が曲げ降伏後のせん断引張破壊と判断される。FRPR を用いた試験体では、X 筋量の増大にともなう最大荷重の増加が確認できる。

3.2 部材端部の主筋ひずみ

FRPR を用いた試験体の主筋の、部材端部位置での主筋のひずみを、縦軸に荷重 (Q)、横軸

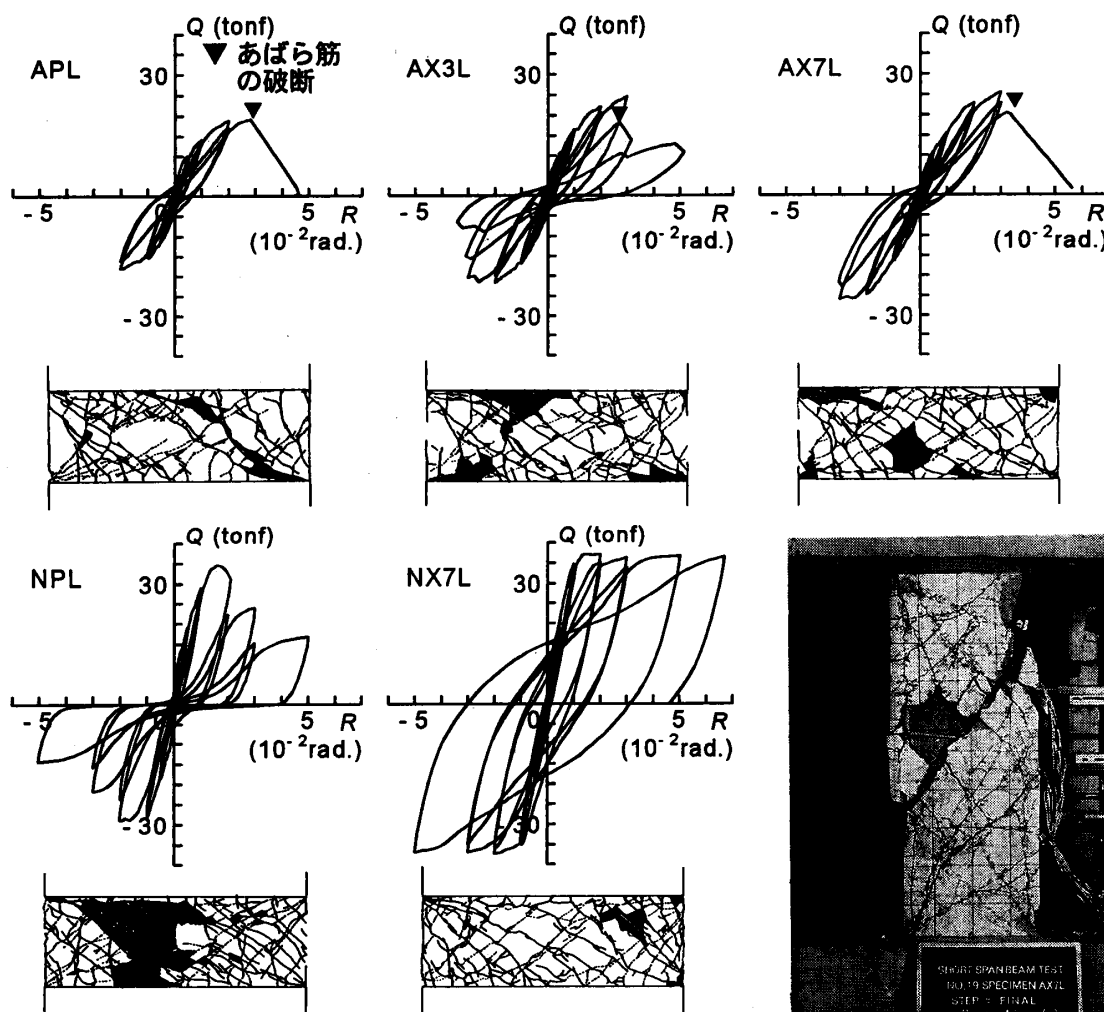


図-2 荷重-部材角曲線および最終ひび割れ状況

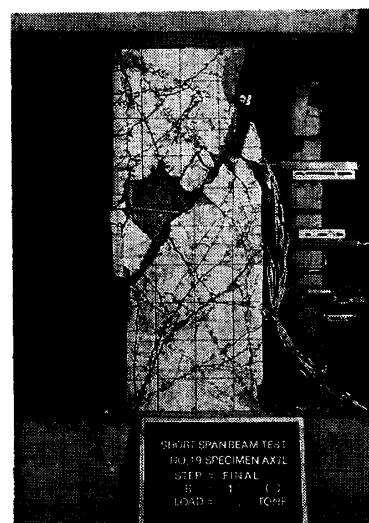


写真-1 AX7L の最終破壊状況

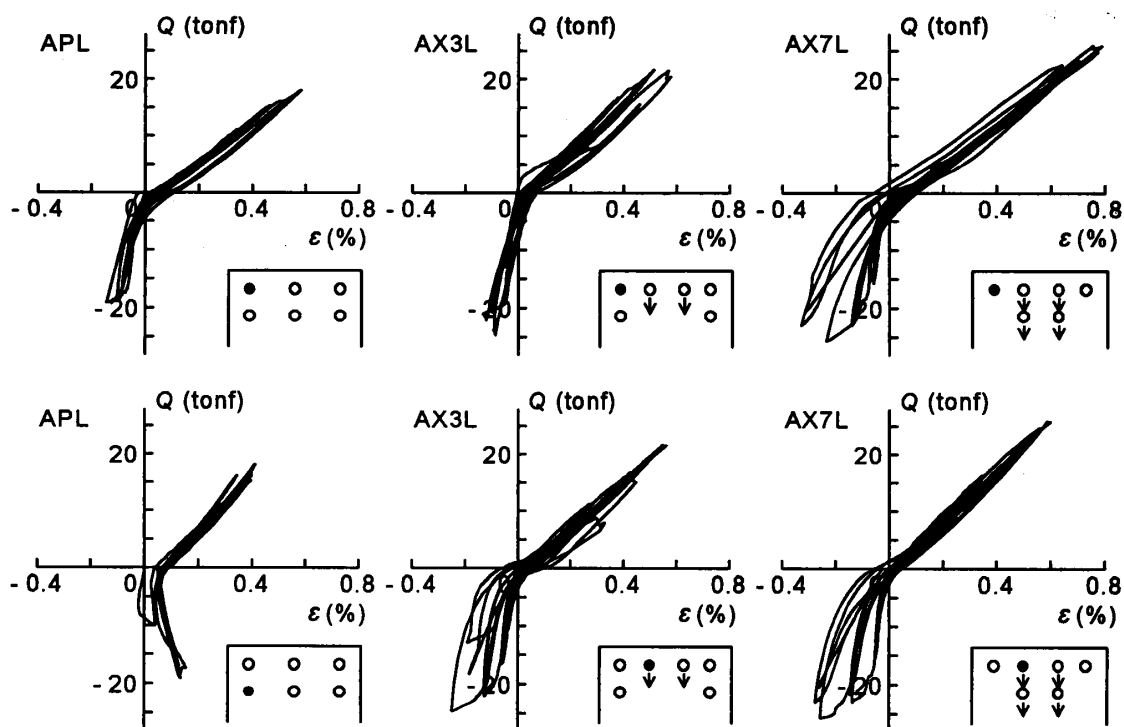


図-3 荷重-端部主筋ひずみ曲線

にひずみ量 (ε) をとり、図-3に示す。試験体 AX3L および AX7L については、上段が平行筋の、下段が X 筋の曲線を示している。いずれの試験体においても主筋が引張力 (正) を担う場合には荷重とひずみがほぼ比例関係にあり、荷重の最大値が大きい試験体の方がひずみの最大値も大きい。この傾向は X 筋でも同様である。最大荷重時の部材端部での主筋のひずみ値の一覧を表-3に示す。なお、試験体 AX7L および NX7L の X 筋 2 段目主筋のひずみ値は得られたデータが不良であったため、それぞれ試験体 APL および NPL の 1 段目と 2 段目のひずみ値の比を用いて、1 段目主筋のひずみ値を補正した値を記した。FRPR を用いた同一試験体で平行筋と X 筋を比較すると、最大荷重時のひずみは試験体 AX3L で 0.6%、AX7L で 0.7% 程度である。試験体端部においては、それぞれの主筋の有効せいが等しければ、曲げモーメントによって発生するこれらの主筋の応力は等しく、X 筋においても平行筋とほぼ同量の応力を担うものと思われる。

表-3 最大荷重時の部材端部での主筋のひずみ (単位: %)

試験体 主筋 加力方向		APL	AX3L		AX7L		NPL	NX7L	
			平行筋	X 筋	平行筋	X 筋		平行筋	X 筋
1 段目	正側	0.635	0.647	-	0.714	-	0.555	0.165	-
	負側	0.561	0.580	0.552	0.758	0.589	0.164	0.275	0.429
	平均	0.598	0.613	0.552	0.736	0.589	0.360	0.220	0.429
2 段目	正側	0.367	0.378			-	0.279		-
	負側	0.391	0.500			-	0.209		-
	平均	0.379	0.439			0.373*	0.244		0.292*

* AX7L, NX7L の X 形 2 段目主筋については、それぞれ APL, NPL の (2 段目 / 1 段目) の比を 1 段目主筋の値に乗じて求めた。

4. せん断強度の評価方法

4.1 既存の算定式との適合性

鉄筋コンクリート X 形配筋梁部材のせん断強度は、通常、式 (1) により評価される。

$$Q_{su} = p Q_{su} + a_{tx} \cdot \sigma_x \cdot \sin \theta_x \quad (1)$$

ここで、 Q_{su} : X 配筋部材のせん断強度、 $p Q_{su}$: 平行筋のみを考慮したせん断強度、 a_{tx} : X 形主筋の断面積 (片側)、 σ_x : X 形主筋の応力度、 θ_x : X 形主筋の部材軸とのなす角度であり、 σ_x には X 形主筋の降伏強度が用いられる。また、 $p Q_{su}$ の算定には、通常の平行配筋に対して提案されている式が使用される。

本研究で用いた FRPR の X 形主筋の場合には鉄筋の降伏に見合う現象はないので、 σ_x に代入する値を考察する必要がある。そこでまず、表 -3 に示した X 形主筋のひずみの実測値を用いて計算を行い、実験値との適合性を試みた。FRPR を用いた試験体の実験値と計算値およびその比較値の一覧を表 -4 に示す。 $p Q_{su}$ の算定には、荒川 mean 式 [5]、日本建築学会靱性設計小委員会式 (以下、小委員会式と称する) [6]、および岡本・永坂らの提案する式 (以下、岡本式と称する) [2] の 3 式を用いた。これらの式の中で、FRPR を用いた部材に対する提案式は岡本式のみである。荒川 mean 式および小委員会式を適用するにあたっては、文献 [4] および [7] の検討にもとづき、せん断補強筋の降伏強度には表 -2 に示した曲げ加工部の破断強度を、引張鉄筋比およびせん断補強筋比には、それに FRPR のヤング係数を鉄筋のヤング係数で除した比を乗じた値を使用して計算を行った。なお、岡本式については、式の導出に用いられた試験体と本研究の試験体とでせん断スパン比が異なっているが、本研究では外挿して用いている。

同表より、平行配筋試験体 APL においては、荒川 mean 式および岡本式が非常によい相関を示している。一方、X 形配筋試験体 AX3L および AX7L ではおおむね計算値が実験値を過大評価する傾向にあるが、これら 3 式の中では荒川 mean 式がもっとも適合性がよい。したがって、 $p Q_{su}$ の算定に FRPR の影響を適宜考慮した算定式を用いれば、FRPR を用いた X 形配筋梁部材のせん断強度は鉄筋コンクリート梁と同様、式 (1) の形で与えられると考えられる。

4.2 X 形 FRPR の影響度

前節の評価法では、X 形主筋の応力度 σ_x に実測値を使用しなければならない。本節では σ_x の評価法を考察し、FRPR を用いた X 形配筋を有するコンクリート梁部材のせん断強度の算定方法を検討する。

実験結果より、最大荷重実験値は、あばら筋の破断により決定されたと考えられる。また、部材端部位置での主筋のひずみ実測値において平行主筋と X 形主筋で大きな差は見られなかった。したがって、最大荷重時の X 筋の応力度は、平行筋のみを考慮した場合のせん断強度負担時に担うべき平行主筋の応力度と等しいと考えられる。試験体 AX3L および AX7L について、平行

表 -4 σ_x に実測値を使用した場合のせん断強度の実験値と計算値の比較

試験体	最大荷重 * (tonf)	荒川 mean 式 (tonf)	小委員会式 (tonf)	岡本式 (tonf)
APL	18.6	18.4 (1.01)**	32.7 (0.57)	18.4 (1.01)
AX3L	23.2	24.4 (0.95)	30.1 (0.77)	26.1 (0.89)
AX7L	25.8	27.9 (0.93)	29.0 (0.89)	29.8 (0.87)

* 正側・負側に得られた値の平均

** 実験値の計算値に対する比

筋のみを考慮したせん断強度計算値、そのときに負担される主筋の応力度から求められるひずみ値、およびその値を用いて計算される X 形配筋試験体のせん断強度計算値等を、表 -5 に示す。なお、平行筋のみを考慮したせん断強度計算値には前節の検討で適合性のよい荒川 mean 式を用い、端部主筋の応力 σ_x （ひずみ値はヤング係数で除した）の計算には式 (2) を用いて逆算した。

$$pQ_{su} \cdot (L/2) = (a_t + a_{tx} \cdot \cos \theta_x) \cdot \sigma_x \cdot j \quad (2)$$

ここで、 L ：内法長さ、 j ：応力中心間距離で $(7/8d)$ （ d は有効せい）とした。③に示されるひずみ値は表 -3 に示される値と若干異なっているが、有効せいを 1 段目、2 段目主筋ともに考慮して算出している影響である。概して実験値

表 -5 X 形配筋梁のせん断強度の評価法

試験体	①	②	③	④	⑤	⑥
	最大荷重 実験値 (tonf)	平行筋の 計算値 (tonf)	②の時の 端部主筋 のひずみ (%)	X筋の負 担する荷 重計算値 (tonf)	②+④ (tonf)	①/⑤
AX3L	23.2	17.2	0.448	5.7	22.9	1.02
AX7L	25.8	16.9	0.443	9.8	26.7	0.97

と計算値はよい相関を示しており、以上のような方法でせん断強度を評価できると考えられる。

5. まとめ

本研究で実験を行った試験体の強度および変形は、あばら筋曲げ加工部の破断により決定されたが、X 筋量の割合が増大するにしたがって、最大荷重の増加がみられた。部材端部位置での主筋のひずみは平行筋と X 筋で大きな差はなく、それらの実測値をせん断強度算定式に代入することで最大荷重実験値は評価された。また、X 筋の負担する応力を、平行筋のみを考慮したせん断強度計算値より求められる値とすることで、FRPR を用いた X 形配筋を有する梁部材のせん断強度を評価することができる。

謝辞 本研究の遂行にあたっては、三井建設（株）岡本 直氏、谷垣正治氏、建設省建築研究所 福山 洋氏にご協力いただきました。ここに深く感謝いたします。また、実験の実施には、筑波大学学類生 青木真一君、宮原実雄君の協力を得ました。

参考文献

- [1] 園部泰寿ほか：連続繊維補強筋を用いたはり部材の繰返し曲げせん断応力下の曲げ性状，日本建築学会大会学術講演梗概集，C 構造Ⅱ，pp.141-144，1992.8
- [2] 岡本 直ほか：繊維補強材を用いたコンクリート梁のせん断耐力に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.455，pp.127-136，1994.1
- [3] 藤沢正視ほか：連続繊維による補強コンクリート部材の付着性状，日本建築学会大会学術講演梗概集，C 構造Ⅱ，pp.839-848，1991.9
- [4] 福山 洋ほか：長繊維補強材の曲げ加工部の引張強度，日本建築学会大会学術講演梗概集，C 構造Ⅱ，pp.801-802，1991.9
- [5] 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，pp.170-173，1988
- [6] 日本建築学会：靱性設計小委員会報告書，pp.78-79，1992.8
- [7] 亀井 隆・永坂具也：長繊維補強材で補強されたコンクリート梁のせん断挙動に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，C 構造Ⅱ，pp.145-146，1992.8