論文 アラミド繊維で補強したRC柱の変形と内部ひび割れ性状

ルクマン*1・武田 三弘*2・大塚 浩司*3・市之瀬 敏勝*4

要旨:アラミド繊維を外周に巻いて補強した鉄筋コンクリート柱がせん断破壊するときの変形性状を調べる実験を行った。載荷終了後にX線造影剤を注入し,目視およびX線撮影により内部ひび割れを観察した。 無補強の試験体は,加力方向に平行に膨らんでいた。アラミド繊維を施した試験体は,補強量が多いほど 柱断面が樽型に膨らんでいた。また,せん断ひび割れに加えて,主筋から放射状に発生するひび割れが顕 著であった。さらに,アラミド繊維の近傍で,微細なひび割れが広く発生した。これは,アラミド繊維近 傍での圧縮主ひずみ度が大きかったことと対応している。

キーワード:アラミド繊維、せん断補強量、せん断ひび割れ、X線撮影

1. はじめに

現在,高層鉄筋コンクリート(以下 RC とする)建物 では高強度せん断補強筋が多用されており,既存建物 の柱においても,炭素繊維,アラミド繊維などの高強 度材料がせん断補強のために使用されている¹⁾。特に アラミド繊維は施工性に優れ,大幅な工期短縮が期待 できるので,アラミド繊維による既存 RC 柱のせん断 補強方法に関して多くの研究がなされている²⁾。その 結果,せん断耐力の向上,コンクリートの圧縮靭性の 増大,変形性能の向上などの効果が挙げられる。しか し,高強度材料がせん断補強のために多用されるなか, コンクリートに生じるひび割れとせん断伝達機構のメ カニズムの研究が少なく,そのメカニズムはまだ解明 されていないのが現状である。

そこで本研究では、アラミド繊維で補強した RC 柱の変形および部材に生じる内部ひび割れ性状の関連性



を把握するために基礎的な実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体形状

試験体はせん断補強量をパラメータとする合計3体 であり、全試験体ともせん断破壊が先行するように計 画した。本実験で使用した試験体の形状を図−1に示 す。主筋にはD16を、横補強筋には φ4を使用し、横 補強筋の間隔は120mmとした。コンクリートおよび鉄 筋の材料特性は表−1、表−2に示す。また、今回RC 柱の補強に用いたアラミド繊維AK40およびAK90の 材料特性を表−3に示す。

2.2 試験体の補強方法および算定強度

試験体の補強方法を図-2に示す。試験体 SL は無 補強とし,試験体 SM には幅 40mm のアラミド繊維 AK40 を 60mm ピッチで巻き付けた。試験体 SH はアラ ミド繊維 AK90 を試験体 SM と同様の方法で巻き付け

圧縮強度	弾性係数	材齢	最大骨材寸法
(N/mm^2)	(N/mm^2)	(日)	(mm)
20.6	2.4×10 ⁴	55	20

表-1 コンクリート材料特性

表一2 鉄筋材料特性

 断面積 (mm²)
 降伏強度 (N/mm²)
 引張強度 (N/mm²)

 主筋(D16)
 198.6
 861
 994

 横補強筋(\$4)
 12.6
 325
 382

表-3 アラミド繊維材料特性

繊維名	引張強度 (N/mm ²)	弹性係数(N/mm ²)	設計厚さ (mm)
AK 40	2670	1.33×10 ⁵	0.19
AK 90	2800	1.34×10 ⁵	0.43

*2 東北大学院大学 工学部環境土木工学科准教授 博士 (工学)(正会員)

*4 名古屋工業大学 工学部建築・デザイン工学科教授 工博 (正会員)

^{*1} 名古屋工業大学大学院生 (正会員)

^{*3} 東北大学院大学 工学部教授 工博 (正会員)



た。

試験体の算定強度を表-4に示す。また、表中の算定 1 および算定式2はそれぞれ文献^{3),4)}による算定式であ る。

2.3 載荷方法および測定方法

載荷は図-3に示す載荷装置を用いて単調載荷とし 210~220kNの一定軸力下において実験を行った。なお, 本実験では最大耐力前のひび割れ性状を調べることを 目的とするため,試験体 SL は全体変形が 5mm,試験体 SM, SH は 10mm のところで載荷終了とした。

測定方法を図-4に示す。アラミド繊維のひずみを測 定するため、柱脚より2本目と3本目の横補強筋の上下 に巻かれたアラミド繊維の加力方向両面に計8枚のひず みゲージを貼り付けた。中段および下段においては、図 -4(c)のように加工したピアノ線を用いてプレートと 試験体を接着し、変位計に繋いで測定した。また、試験 体の柱頭回転角θを測定し、図-4(d)のように曲げ変 形成分を求めた。

3. 実験結果

3.1 水平荷重一変形関係

荷重-変形関係を図-5に示す。水平荷重は試験体 の変形によって生じる軸力の水平方向成分を考慮した。

無補強の試験体 SL は、変形が 0.5mm のときせん断ひ び割れが生じて荷重が低下した。その後、変形の増加に 伴い再び荷重が増加したが、変形が 3.7mm のとき 2本 目のせん断ひび割れが入ることにより荷重が低下した。

少量のアラミド繊維を施した試験体 SM は,変形が 3.2mm でせん断ひび割れが生じることにより若干荷重 の低下が見られたが,再び荷重が増加した。

多量のアラミド繊維を施した試験体SHでは、せん 断ひび割れが生じることによる荷重の低下は見られな かった。

3.2 ひずみー変形関係

図-4の対となる左右2個の変位計の測定値の和を コンクリートのはらみ出し量とする。その値を断面せい 250mm で除したものを内部ひずみε_xとする。内部ひ



ずみの side は前後2点の平均をとった値である。また, アラミド繊維ひずみの値は各段の横補強筋の上下に巻か れたアラミド繊維に貼られた4枚のひずみゲージの測定 値の平均値である。

中段におけるひずみ ϵ_x 一変形関係を**図**-6に示す。 3 体とも変形が 0.6 mm(図中↓印), つまり**図**-5 での 剛性低下開始点からひずみが生じ始めた。試験体 SL で は, side 値と center 値で最後まで差が見られなかった。 一方, 試験体 SM では変形 3.2 mm(図中〇印), つまり せん断ひび割れ後に3つのひずみに差が生じ始めた。最 大変形時には, side 値が center 値の78%, 繊維ひずみ は center 値の42% であった。試験体SHでは,最大変 形時の side 値が center 値の70%, 繊維ひずみは center 値の33% であった。すなわち, せん断補強量が多いほ ど柱断面が樽型に膨らんでいることが言える。

下段におけるひずみ ε_x - 変形関係を図-7に示す。 中段と比べて下段の内部ひずみおよびアラミド繊維ひず みの発生が遅い。このことから、せん断ひび割れは最初



図-9 内部ひび割れの描写位置

に中段付近の高さで発生し、その後上下に進行したこと が分かる。

試験体 SM, SH は,荷重-変形関係では同様な耐力 曲線を示したが,補強量が少ない方が内部ひずみおよび 繊維ひずみが大きいという結果が得られた。

3.3 モールのひずみ円

モールのひずみ円を描くため,全体変形から曲げ変形 成分を差し引いた残りをせん断変形成分と考える。こ の値を柱の全長 500 mm で除したものを, せん断ひずみ 2 γ_{xy} と定義する。材軸方向のひずみ度 ϵ_y は, 図-6 の ϵ_x に比べて非常に小さいため ϵ_y をゼロと仮定する。 最大変形時,中段位置でのひずみ円は図-8のようにな る。試験体 SL の場合, center, side のひずみ円は一致する。 試験体 SM, SH はアラミド繊維近傍でのひずみ円の中 心が原点に近くなり,圧縮ひずみ度が大きくなる。SM の場合,アラミド繊維近傍の圧縮ひずみの方向は,材軸 に対して約 30°, SH では約 35°であった。

3.4 目視によるひび割れの観察

試験体の最大変形時に補修剤(X線造影剤入り⁵)を注入し,硬化後に試験体を切断し,下段および中段における内部ひび割れを目視で描写した。描写した各断面の位置を図-9に示す。図中の下段および中段は,柱脚より2本目と3本目の横補強筋の高さである。

試験体表面ひび割れ(載荷終了後)を図-10に示す。 図中にクラックスケールを用いて測定したひび割れ幅を 示す。試験体 SL には鮮明な2本のせん断ひび割れが表 れている。一方,試験体 SM,SHでは、アラミド繊維 がコンクリート表面から浮き上がるようなひび割れが顕 著であった。これは、コンクリートのひび割れにアラミ





図-13 下段における水平断面の内部ひび割れ

ド繊維のひずみが追従できず,アラミド繊維と接着され たコンクリートとでズレが生じることによって発生し たと考えられる。ひび割れ幅の測定は非常に困難であっ たが,加力方向の開口幅は0.1~0.2 mm 程度であった。

鉛直断面の内部ひび割れを図-11 に示す。試験体 SL は試験体表面ひび割れ(図-10)と同様であった。試験 体 SM, SH ではせん断ひび割れが細かく複雑な形状で 生じており,右側の主筋近傍においてはそのひび割れ性 状が特に顕著である。

中段における水平断面の内部ひび割れを図-12に示 す。試験体 SL の 2 本のせん断ひび割れは,外側と中央 で同じ幅であった。一方,試験体 SM では中央でひび割 れ幅が大きく,繊維に近づくにつれて細くなり見えなく なった。中央の太いひび割れが細かく複雑に分かれる現 象も見られた。なお,繊維とコンクリートの界面に描い た水平方向の太線は,繊維の浮き上りによるものであ る。試験体 SH では,上記の現象がより顕著であった。

下段における水平断面の内部ひび割れを図-13に示 す。試験体 SL では、せん断ひび割れが中段よりも左 側に平行移動して発生していることが分かる。試験体 SM, SH では、ひび割れが左に移動するだけではなく、 右側主筋位置でのひび割れが残っているのが特徴的で ある。

3.5 X線撮影によるひび割れの観察

図-9に示した位置で切断した試験体からコア抜き により主筋を取り除き,さらに図-10,図-11,図-12で囲った位置で10mm×125mm×125mmのスラ イスを作り,X線撮影を行った。撮影条件は文献⁵⁾と同様である。ただし,試験体SM,SHでは,細かいひび割れ(0.3mm程度以下)に造影剤が入っていなかったため,再度造影剤に浸してから撮影を行った。

X線撮影による水平断面の内部ひび割れを図-14に 示す。試験体 SL では、せん断ひび割れが骨材を避ける ように湾曲して進展していることがわかる。ただし、別 の断面では、せん断ひび割れが骨材を貫通している場合 も見られた。

試験体 SM, SH では,目視では見られなかった多数の ひび割れが観察できた。せん断ひび割れに加えて,主筋 から放射状に発生するひび割れが顕著である。このひび 割れがせん断ひび割れにつながっている。このような現 象は,図-14以外の撮影位置でも顕著であった。これは, 図-6,図-7で議論したような樽状の膨らみと対応し ている。さらに,試験体 SM,SH は,アラミド繊維の近 傍10~20 mm(図-14(b)(c)の領域 A)で,微細なひび 割れが無数に発生している。このことは,図-8のモー ルのひずみ円で,アラミド繊維近傍でのひずみ円の中心 が原点に近く,圧縮主ひずみ度が大きかったことと対応 している。すなわち,これらのひび割れは圧縮破壊に伴 うものだと思われる。

- 4. まとめ
- (1) アラミド繊維を施した2体の試験体は、補強量に差があるが、同様な水平荷重-変形曲線を示した。しかし、補強量が少ない方が内部ひずみおよびアラミド繊維のひずみが大きいという結果を得た。



図-14 X線撮影による水平断面の内部ひび割れ

- (2) 無補強の試験体の内部ひずみは、外側の値と中央の 値は同じであった。つまり、試験体は加力方向に平 行に膨らんでいた。一方、アラミド繊維を施した試 験体は、補強量が多いほど外側より中央の値の方が 大きいという結果を得た。これにより、アラミド繊 維によるせん断補強によって柱断面が樽型に膨らん でいることが分かった。
- (3) アラミド繊維を施した試験体の内部は、繊維近傍の ひび割れの形状が細かく複雑で、中央では太いひび 割れが生じていた。X線撮影により、せん断ひび割 れに加えて、主筋から放射状に発生するひび割れが 顕著であった。さらに、繊維の近傍10~20mmで、 微細なひび割れが無数に発生していることが分かっ た。これは、アラミド繊維近傍での圧縮主ひずみ度 が大きかったことと対応している。

参考文献

- 日本建築防災協会:連続繊維補強材を用いた既存鉄 コンクリート造及び鉄骨鉄筋コンクリート造建築物 の耐震改修設計・施工指針,1999
- 朝倉晃,岡本直,谷垣正治,小田稔:高強度繊維巻 付けによる既存 RC 柱のせん断補強,コンクリート 工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.1061-1066, 1994
- 3) AF工法研究会:AF工法設計·施工指針,2007
- 日本建築防災協会:既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説,2001
- 式田三弘,大塚浩司:X線造影撮影によるコンクリー ト劣化の数値化と凍結融解抵抗性の判定,土木学会 論文集 E Vol.62, No.4, pp.728-738, 2006.11