

# 論文 載荷履歴と配筋がRC柱の耐力低下に及ぼす影響に関する実験的研究

花井 伸明\*1・市之瀬 敏勝\*2・梅村 恒\*3・野田 聡\*4

**要旨**：RC部材は、曲げ強度よりもせん断強度の方が大きい場合であっても、繰り返し載荷を受けることによって曲げ降伏後にせん断破壊を起こすことが報告されている。しかし、その破壊メカニズムは未解明な部分が多い。本研究では、RC柱部材について、載荷履歴と配筋を実験因子として、一定軸力下における繰り返し載荷実験を行った。その結果、片側繰り返し載荷における耐力低下時の変形は、両側繰り返し載荷と比較して1.2～1.8倍程度大きく、内部ひずみに差異が見られた。また、せん断破壊時に横補強筋が降伏する場合は、降伏としない場合と比べて、変形能力のばらつきが大きかった。

**キーワード**：耐力低下、載荷履歴、横補強筋、内部ひずみ、ばらつき、せん断破壊

## 1. はじめに

RC部材は、曲げ強度よりもせん断強度の方が大きい場合であっても、繰り返し載荷を受けることによって曲げ降伏後にせん断破壊を起こすことが実験により報告されている。例えば<sup>1)</sup>また、RC部材は、繰り返し載荷により耐力低下を生じ、その要因に主筋比や横補強筋比等が挙げられている。<sup>2)</sup>さらに、載荷履歴の違いが耐力低下に影響するという報告も多い。<sup>3),4)</sup>

松澤ら<sup>4)</sup>によると、せん断破壊の要因には、内部コンクリートが破壊してせん断破壊に至るケースと、横補強筋の降伏によりせん断破壊に至るケースの2通りがあるとしているが、そのメカニズムは未解明な部分が多い。

一方、RC部材は鋼材、セメント、骨材等といった異質の材料を現場で一体化させるという特徴があり、それ故ばらつきも生じやすい。松澤ら<sup>4)</sup>はまた、同一の試験体について、載荷方法を変えて実験を行い、載荷履歴により耐力低下のメカニズムが異なるとの結果を得ているが、ばらつきの影響について検討の余地がある。

このように、載荷履歴や配筋が破壊性状に及ぼす影響については、さらに検討を要する。本研究では、RC柱部材について、載荷履歴と配筋を実験因子として、一定軸力下における繰り返し載荷実験を行った。また、同一の試験体を同一の方法で載荷した際のばらつきについても検討を行った。本報では、内部コンクリートの破壊性状に着目し、曲げ降伏後のせん断破壊および耐力低下について考察する。

## 2. 実験計画

### 2.1 試験体概要

試験体は、せん断破壊時に横補強筋が降伏す

表－1 試験体概要

試験体名	LY		LN	
b×D (mm)	500×500			
シラスパン比	1.6			
主筋	引張本数・径	2-D32	4-D32	
	引張鉄筋比 (%)	0.72	1.43	
横補強筋	本数・径	φ8@66	U12.6@80	
	横補強筋比 (%)	0.30	0.64	
コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )	26.7			
載荷履歴	両側 繰り返し	片側 繰り返し	両側 繰り返し	片側 繰り返し
軸力 (軸力比)	913kN (0.14)		844kN (0.13)	

\*1 名古屋工業大学大学院 博士後期課程社会工学専攻 修士 (工学) (正会員)

\*2 名古屋工業大学 建築・デザイン工学科教授 工博 (正会員)

\*3 名古屋工業大学 建築・デザイン工学科講師 博士 (工学) (正会員)

\*4 名古屋工業大学大学院修了 修士 (工学)

表－2 鋼材の力学的特性

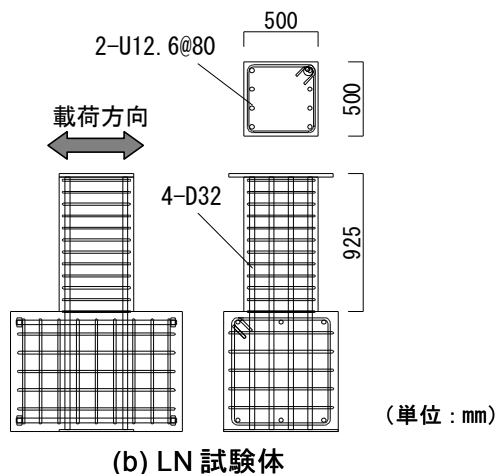
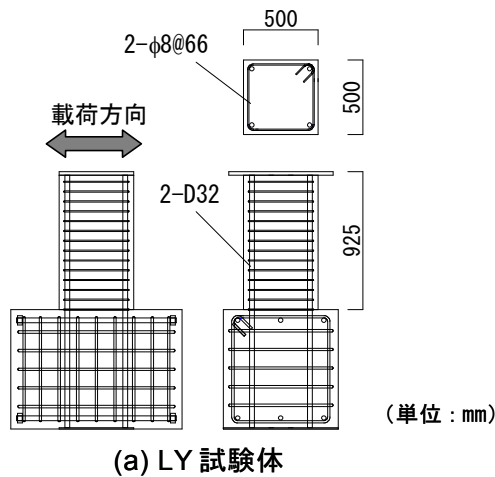
	降伏強度	引張強度	ヤング係数
D32	399.9	601.9	$1.921 \times 10^5$
φ8	442.9	502.0	$2.035 \times 10^5$
U12.6	1305.6	1458.0	$2.159 \times 10^5$

(単位：N/mm<sup>2</sup>)

ることを想定したLY試験体（靱性保証型設計指針<sup>5)</sup>式(6.4.1)）、横補強筋が降伏しないことを想定したLN試験体（同式(6.4.3)）の2種類とし、各4体ずつ製作した。試験体の概要を表－1に、使用鋼材の力学的特性を表－2に示す。また、配筋および形状を図－1に示す。

## 2.2 荷重方法

荷重は図－2に示す荷重装置により行った。荷重方法は、片持ち形式による、定軸力下正負交番漸増繰返し荷重（以下、両側荷重）および片側漸増繰返し荷重（以下、片側荷重）と



図－1 試験体形状

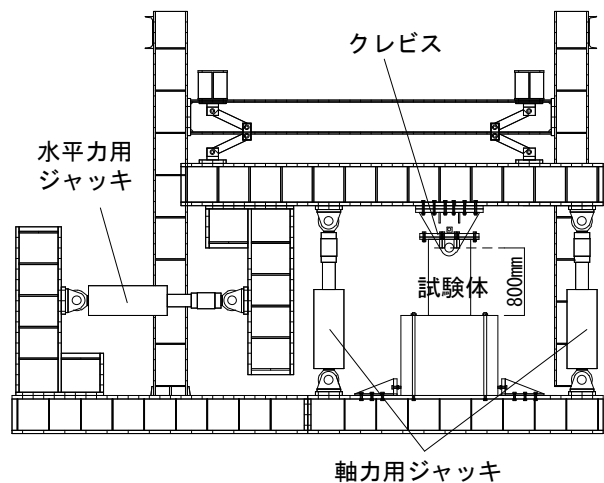
し、反曲点高さが800mmとなるようにクレビスを介して荷重した。軸力は、(曲げ終局強度) / (初期せん断強度) = 85%となるように計算で決定し、LY試験体においては913kN、LN試験体においては844kNとした。荷重サイクルは、両側荷重については3/1000rad、片側荷重については6/1000radずつ漸増させ、最大耐力の80%に耐力が低下するまで荷重した。

なお、軸力を決定するための曲げ終局強度およびせん断強度については、靱性保証型設計指針<sup>5)</sup>により算定した。算定結果を表－3に示す。

## 3. 実験結果

### 3.1 荷重－変形関係

荷重－変形関係を図－3に示す。図中、○印は耐力低下開始点である。ここで、耐力低下開始点とは、最大耐力の90%まで耐力が低下した



図－2 荷重装置

表－3 曲げ終局強度、せん断強度算定結果

試験体名	荷重履歴	No.	算定結果		実験結果 最大耐力
			曲げ 終局強度	せん断 強度	
LY	両側 繰返し	No.1	561	663	622
		No.2			627
	片側 繰返し	No.1			624
		No.2			624
LN	両側 繰返し	No.1	867	1024	891
		No.2			891
	片側 繰返し	No.1			900
		No.2			873

(単位：kN)

点の1サイクル手前（両側載荷については半サイクル手前）のピークと定義した。

載荷履歴について比較する。耐力低下開始時の変形は、LY試験体においては、片側載荷では両側載荷の1.2～1.8倍程度大きかった。LN試験体においては、片側載荷では両側載荷の1.6倍程度大きかった。

同一の載荷履歴において、横補強筋が降伏する場合としない場合について比較する。片側載荷においては、平均するとLY試験体、LN試験体とも耐力低下開始時の変形はほぼ同程度であった。両側載荷においては、耐力低下開始時の変形は、LY試験体ではLN試験体の1.0～1.2倍程度と、違いは大きくなかった。

ばらつきについて検討する。LY試験体の片側載荷で顕著なばらつきが見られた。No.1では第7サイクル途中でせん断破壊したのに対し、No.2では第10サイクル途中でせん断破壊した。

### 3.2 内部ひずみ

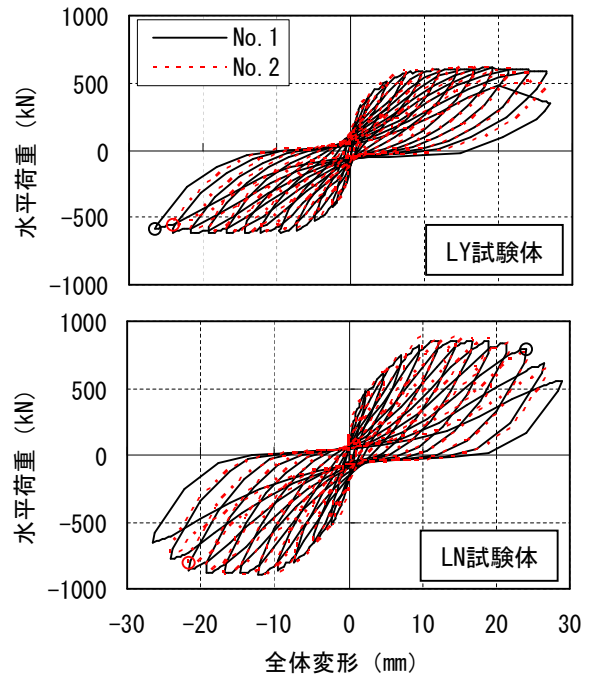
#### (1) 計測方法および定義

内部ひずみは、載荷方向および載荷方向に直交する方向について計測した。LY試験体については、柱脚から高さ132mm、264mm、396mmの点において、LN試験体については柱脚から高さ160mm、320mm、480mmの点において、衣笠らの方法と同様に、横補強筋に固定した鋼線を介して変位計を取り付けて内部変形を測定し、横補強筋外法間隔で除して内部ひずみとした。計測方法を図-4に示す。

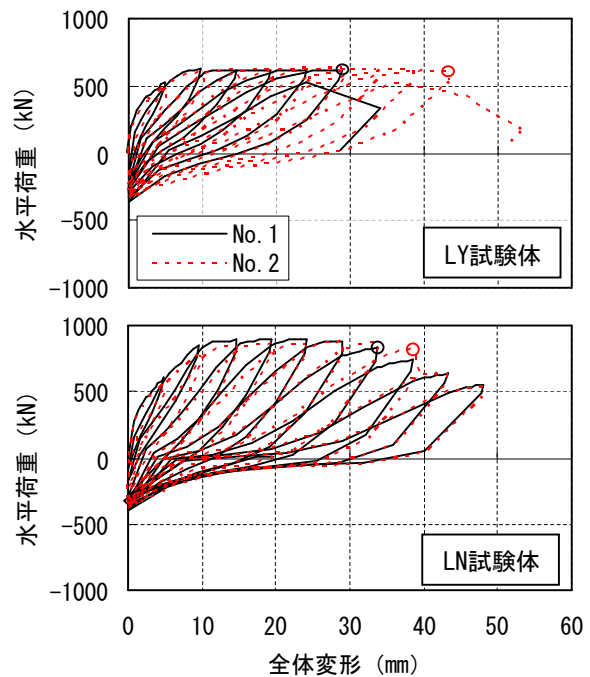
#### (2) 載荷方向内部ひずみ

載荷方向内部ひずみ-変形関係を図-5に示す。測定した3箇所のうち、耐力低下開始時の内部ひずみが最も大きいものをプロットした。なお、考察は3.3節で後述する。

図-5(a-1)と(b-1)、(a-2)と(b-2)をそれぞれ比較すると、耐力低下開始時の内部ひずみは、載荷履歴にかかわらず同程度であるが、このときの変形は、両側載荷では片側載荷と比較して小さい（つまり同変位での内部ひずみは両側載荷の方が大きい）。図-5(a-1)と(a-2)、(b-



(a) 両側載荷



(b) 片側載荷

図-3 荷重-変形関係

1)と(b-2)をそれぞれ比較すると、耐力低下開始時の内部ひずみはLN試験体の方が大きいですが、このときの変形に顕著な差はない。また、LY試験体では耐力低下後に急激に内部ひずみが増加しているのに対し、LN試験体では常に一定のペースで増加している。

内部ひずみの挙動を見ると、LY試験体では、

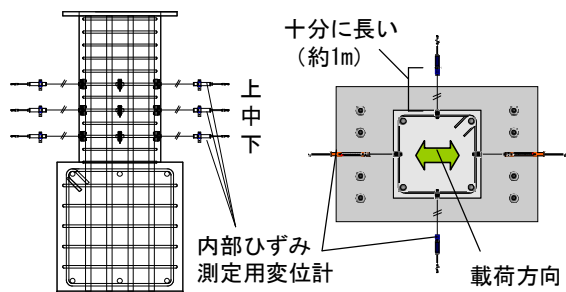


図-4 内部ひずみ計測方法

両側荷重において内部ひずみのばらつきが顕著であり (図-5 (a-1)), 片側荷重においてばらつきが小さくなった (図-5 (b-1))。これは荷重-変形関係のばらつきと逆の傾向であった。また, LN 試験体では, LY 試験体と比較してばらつきが小さかった (図-5 (a-2), (b-2))。

### (3) 直交方向内部ひずみ

直交方向内部ひずみ-変形関係を図-6に示す。測定した3箇所のうち, 耐力低下開始時の内部ひずみが最も大きいものをプロットした。

LY試験体において, 両側荷重では内部ひずみが生じているのに対し, 片側荷重では内部ひずみがほとんど生じないという現象が見られた。また, 荷重方向内部ひずみと同様に, LY試験体では耐力低下後に急激に内部ひずみが増加しているが, LN試験体では常に一定のペースで増加し, 耐力低下開始時の内部ひずみは, LN試験体ではLY試験体と比較して大きかった。

### 3.3 内部破壊状況および考察

荷重終了後, 内部のひび割れ状況を観察するため, LN試験体の両側荷重No.1について, ひび割れにエポキシ樹脂を注入し切断した。切断位置および切断面のひび割れ状況を図-7に示す。また, 他の試験体について, カバーコンクリートをはつり, 内部の破壊状況を観察した。

切断した試験体について, 切断面におけるひび割れ幅を測定した。荷重方向のひび割れ幅の合計の分布を図-8に示す。断面の中心に近い程, ひび割れ幅が大きくなっており, LN試験体では図-9 (a)のように内部コンクリートが破壊し横補強筋を押し広げるように変形していると考えられる。LY試験体の片側荷重では, 前述

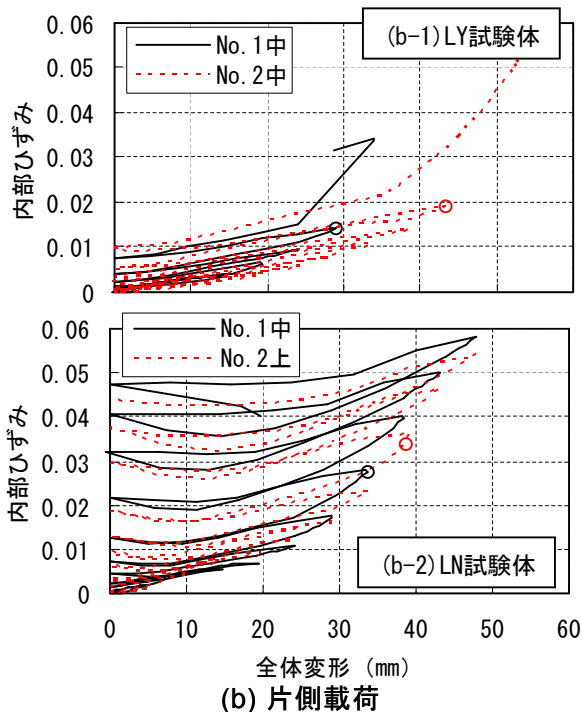
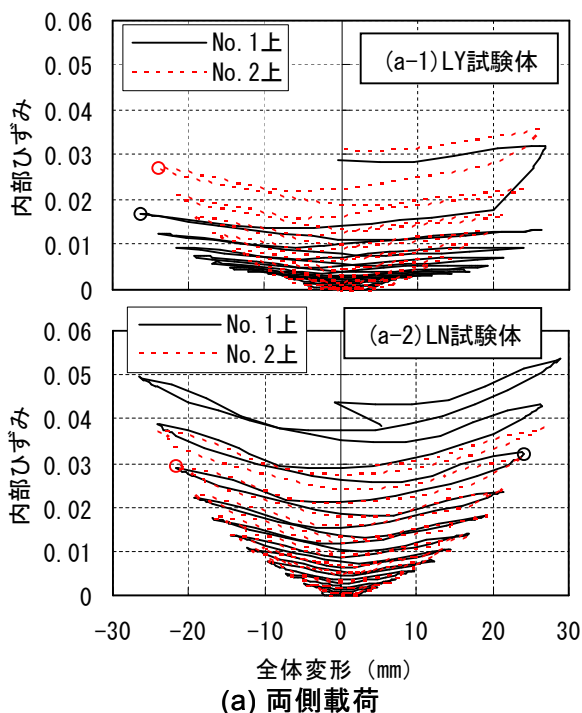


図-5 荷重方向内部ひずみ-変形関係

のとおり, 耐力低下後に急激に荷重方向内部ひずみが増加しているが, 直交方向内部ひずみはほとんど生じていない。すなわち図-9 (b)のように, コンクリートのひび割れが拡大し, 破壊に至っているものと推察される。図-5において, LY試験体の方がLN試験体より小さな内部ひずみで耐力低下が始まった理由も, 図-9

(b)のように断面全体が横方向に膨らんで、かみ合い作用が失われたためであるといえる。また、かみ合い作用には不確定な要素が多く、かみ合い作用の変化が耐力低下に影響するLY試験体では、内部ひずみにばらつきが生じやすくなると考えられる。一方、LN試験体では、横補強筋近傍のコンクリートの斜め圧縮破壊で耐力低下が生じるため、耐力低下や内部ひずみのばらつきが小さかったと考えられる。

カバーコンクリートをはつった状況について、LY試験体の片側載荷No.1およびLN試験体の片側載荷No.2の状況を写真-1に示す。

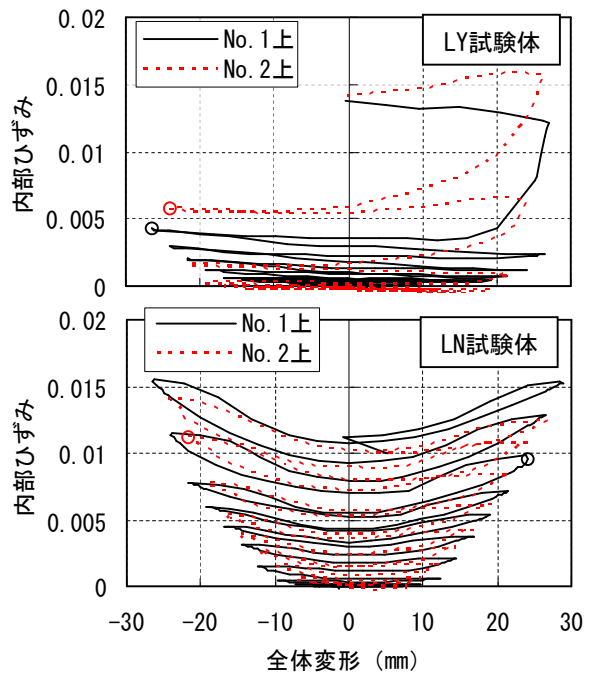
LY試験体の片側載荷では、せん断ひび割れがコアコンクリートに達している部分で横補強筋の破断が見られた。これは片側載荷において図-9(b)のような破壊性状となっていることと対応する。両側載荷では横補強筋の破断は生じていなかった。すなわち、両側載荷では図-9(a)(b)の中間の破壊性状となっていると考えられる。また、同変位における内部ひずみは両側載荷の方が大きい。これは、負方向への繰り返しによりせん断ひび割れが交差し、コンクリート有効圧縮強度が低下するものと考えられる。

LN試験体の片側載荷No.2では、横補強筋が降伏しないことを想定したにもかかわらず、隅角部で横補強筋の破断が見られた。これは、曲げ加工による影響と考えられるが、このことは高強度横補強筋を使用して、横補強筋を降伏させないような設計を行っても、想定外の破断が起り得ることを示唆しており、設計上の注意を要するものである。

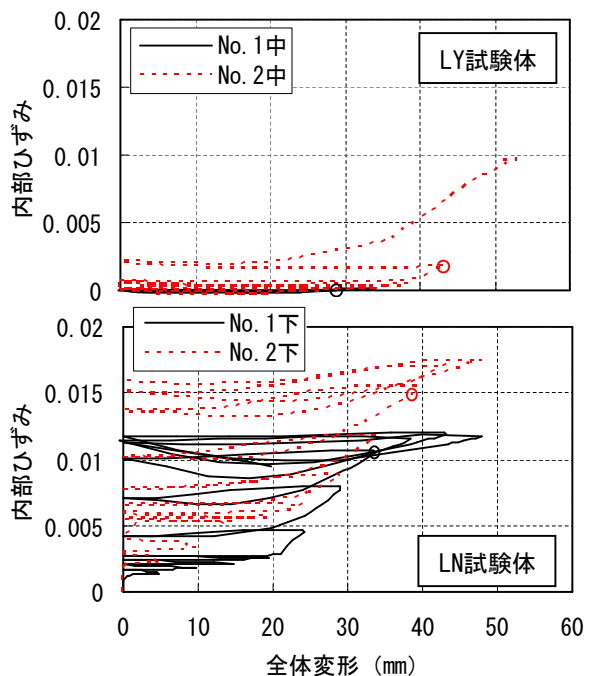
#### 4. まとめ

本研究により、以下の結果が得られた。

- (1) 片側載荷における耐力低下時の変形は、両側載荷と比較して大きかった。また、同変位における内部ひずみは両側載荷の方が大きかった。これは、負方向への繰り返しにより有効圧縮強度が低下するものと考えられる。
- (2) せん断破壊時に横補強筋が降伏する試験体



(a) 両側載荷



(b) 片側載荷

図-6 直交方向内部ひずみ-変形関係

は、図-9(b)のようなメカニズムで引張破壊するため、耐力低下や内部ひずみにばらつきが生じやすく、片側載荷では特に顕著である。

- (3) せん断破壊時に横補強筋が降伏しない試験体は、図-9(a)のようなメカニズムで斜め圧縮破壊するため、耐力低下や内部ひずみの

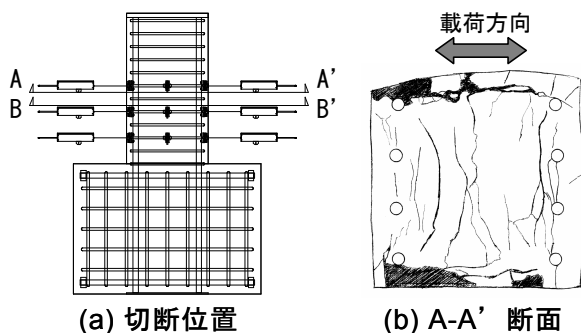


図-7 切断位置および内部ひび割れ状況

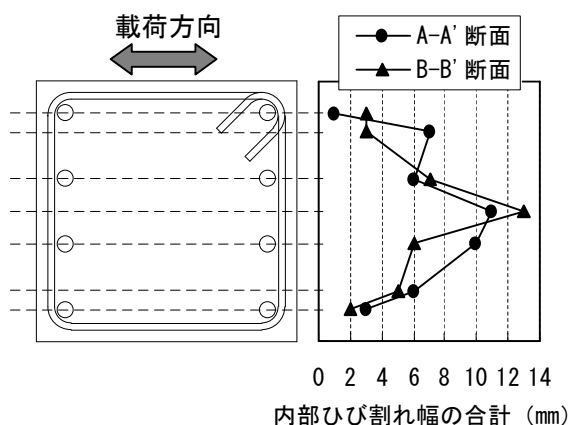


図-8 内部ひび割れ幅の分布

ばらつきが小さかったと考えられる。

(4) 横補強筋が降伏しない試験体においても、終局時に隅角部で曲げ加工の影響によるものと思われる横補強筋の破断が生じた。これは、横補強筋の設計において、注意を要する。

### 謝辞

本実験を行うにあたり、矢作建設工業株式会社ならびに株式会社テクノサポートには、実験施設の提供等、ご協力を頂きました。また、名古屋工業大学大学院生・西村公佑氏、同卒論生・平林聖尊氏には、計画からデータ整理まで、ご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

### 参考文献

1) 渡辺英義, 是永健好, 中野克彦, 松崎育弘: 曲げ降伏後にせん断破壊する RC 柱の靱性評価に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, No.572, pp.155-162, 2003.10  
 2) 伊吉允, 松澤敦行, 梅村恒, 市之瀬敏勝: 繰

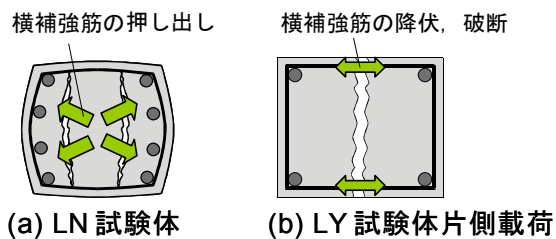


図-9 破壊メカニズムの違い



(a) LY 試験体片側載荷 No.1



(b) LN 試験体片側載荷 No.2

写真-1 横補強筋破断状況

り返し載荷により耐力低下する鉄筋コンクリート部材の復元力特性モデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.689-692, 2001

3) Sozen, M.A., et al.: The Theory of Almost Nothing, The Fifth US-Japan Workshop on Performance-Based Engineering for Reinforced Concrete Building Structures, Sep. 2003  
 4) 松澤敦行, 伊吉允, 梅村恒, 市之瀬敏勝: 載荷履歴と軸力が RC 部材の耐力低下に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.877-882, 2002  
 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999  
 6) 衣笠秀行, 野村設郎: 曲げ降伏後の大変形繰返し載荷を受ける RC 梁部材のスリップ域における横方向歪蓄積により発生する破壊のメカニズム, 日本建築学会構造系論文集, No.538, pp.147-153, 2000.12