

論文 荷重履歴と軸力がRC部材の耐力低下に及ぼす影響

松澤 敦行^{*1}・伊吉 允^{*1}・梅村 恒^{*2}・市之瀬 敏勝^{*3}

要旨：一方向単調荷重においては韌性に富むRC部材でも、曲げ降伏後の繰り返し荷重を受けると一方向単調荷重に比べ著しく変形能力を損なうことがある。本研究では5種類の荷重方法で実験を行い、実験結果より軸力の有無、荷重履歴の違いが曲げ降伏後のせん断破壊、耐力低下といった現象にどのような影響を与えるか考察した。繰り返しによる耐力低下は、コンクリート内部のひび割れが成長しひび割れ面がずれを起こし、せん断に対しての抵抗能力が減少することが原因であると考えられる。繰り返し耐力低下の起こる要因は、鉄筋の降伏とコンクリートのひび割れのずれのいずれかであると考えられる。

キーワード：耐力低下、繰り返し荷重、RC部材、荷重履歴、軸力

1. はじめに

鉄筋コンクリート造の柱及び梁部材は、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、繰り返し荷重を受けることによって曲げ降伏後にせん断破壊を起こして耐力が低下することが実験^[1]により報告されている。また、繰り返し荷重による耐力低下（以下では、繰り返し荷重によって起こる耐力低下を単調荷重の負勾配による耐力低下と区別するために、「繰り返し耐力低下」と呼び区別する。）には数多くの部材パラメータが影響を及ぼすと考えられる。文献^[2]では特に影響の大きいと考えられるパラメータとしてコンクリート強度、主筋比、軸力比、横補強筋比を挙げている。

一方、荷重履歴や各部材パラメータの違いが破壊性状へ及ぼす影響について述べている報告は数多くあるが、その破壊のメカニズムや履歴形状に与える影響については未解明の部分が多い。

本研究では、柱部材を想定して軸力を与えた状態で繰り返し荷重を行い、内部コンクリートの破壊状況などの実験データから、曲げ降伏後のせん断破壊、耐力低下といった現象のメカニズムについて考察すると共に、繰り返し耐力低下が始まる点に着目し軸力及び荷重履歴がこの点にどのような影響を与えるかを調べる。

2. 実験方法

2.1 試験体

同一パラメータの試験体を5体用いた。形状及び配筋詳細を図-1に示す。試験体は25×25cmの柱部材で、主筋にはD16を用いた（引張鉄筋比1.27%）。また横補強筋には4の丸鋼を用い、横補強筋間隔40mmとした（横補強筋比0.25%）。

使用した鉄筋及びコンクリートの力学的特性を表-1及び表-2に、設計強度を表-3に示す。

2.2 荷重及び計測方法

図-2に示すような装置を用いて、一方向単調載

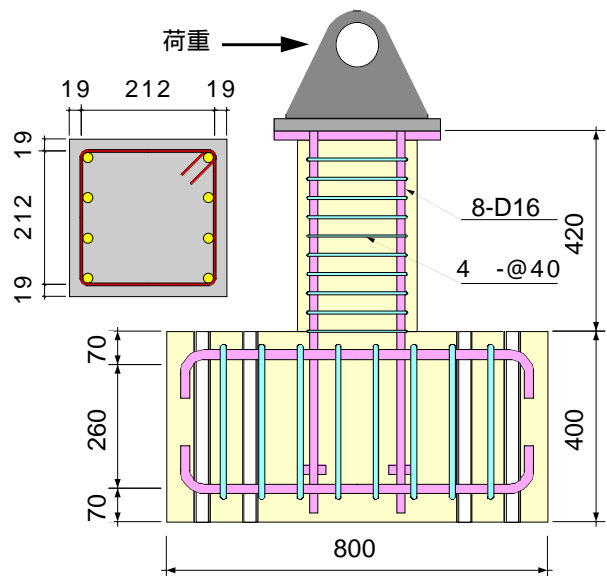


図-1 試験体形状

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻（正会員）

*2 名古屋工業大学助手 工学部システムマネジメント工学科 博士(工)(正会員)

*3 名古屋工業大学教授 工学部システムマネジメント工学科 工博(正会員)

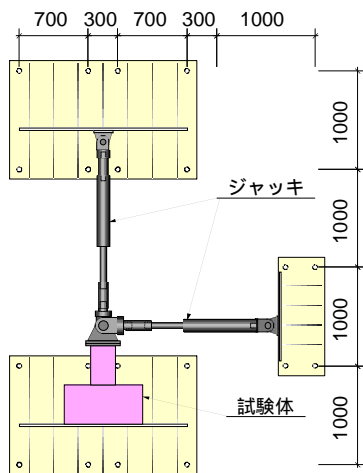


図-2 荷重装置

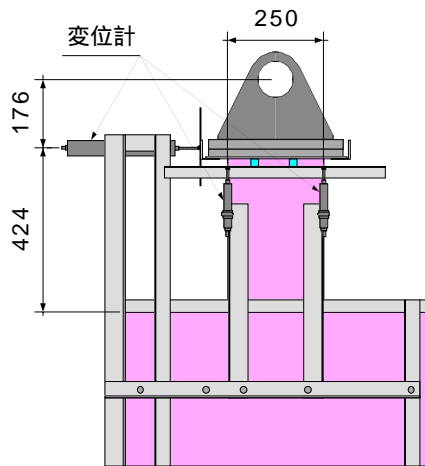


図-3 計測方法

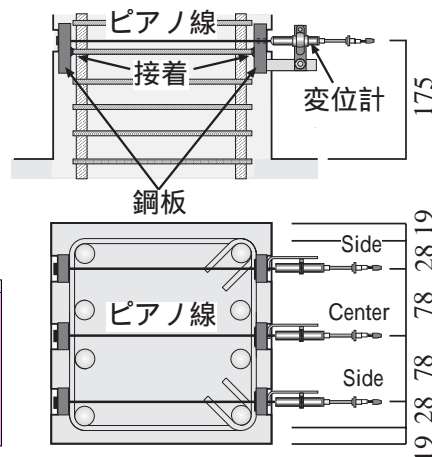


図-4 内部ひずみ測定方法

表-1 鉄筋の材料特性 (N/mm²)

	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	試験体数	材令 (日)
平均値	31.32	2.69	2.33 × 10 ⁴	6	119
標準偏差	1.38	0.31	0.74 × 10 ⁴		

表-2 コンクリートの材料特性 (N/mm²)

	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	試験体数	材令 (日)
平均値	31.32	2.69	2.33 × 10 ⁴	6	119
標準偏差	1.38	0.31	0.74 × 10 ⁴		

表-3 設計強度 (kN)

	曲げ強度 (kN)	せん断強度(kN)	
		靱性保証型 耐震設計指針[4]	建築物の 構造規定[5]
軸力あり	117.6	174.44	122.5
軸力なし	95.06	174.44	112.7

荷(軸力あり,軸力なし),正負繰返し載荷(軸力あり,軸力なし),片側繰返し載荷(軸力あり)の計5種類の方法で荷重を行った。軸力比0.062(軸力ありの場合),繰返し載荷の加力サイクルは4/1000rad(水平変位2.4mm)漸増タイプとした。また,片側繰返し載荷は,初期サイクルに正負繰返し載荷を行って部材を降伏させた後に行った。水平変位及び軸方向変位の計測方法を図-3に示す。

コンクリートの内部ひずみを測定するため中央と,両端からそれぞれ47mmの位置の計3ヶ所

で計測を行った(図-4参照)。

各試験体とも最大耐力の約80%程度に耐力が低下するまで荷重を行った。

3. 実験結果

3.1 荷重-変形関係,荷重-変形包絡線

各試験体の荷重-変形関係を図-5に示す。荷重は全てP-効果の影響を考慮して補正している。以下では,繰返し載荷によって起こる耐力低下を単調載荷の負勾配による耐力低下と区別するために,「繰返し耐力低下」と呼び区別する。また,図中の印は繰返し耐力低下の開始する点(以下,「繰返し耐力低下点」と称す)を示している。

既往の研究^[1]では,繰返し耐力低下は「反転載荷」,「再載荷」,「除荷」により疲労が蓄積し,反対側での剛性回復域で十分に剛性が回復できなくなることによって起こると報告されている。従って反対方向への載荷による疲労が蓄積されない片側繰返し載荷は,両側繰返し載荷よりも大きな荷重で負勾配が生じる事が予測される。しかし,本実験では両側繰返し載荷と片側繰返し載荷の繰返し耐力低下点には大きな違いは見られなかった(図-5(b),(c)参照)。

繰返し載荷と単調載荷を比較すると,軸力あり,なし共に,繰返し載荷時の耐力低下の発生は一方向単調載荷の場合よりも小さな変形で生じ

ている。この結果より、設計指針^[4]では変形量によってせん断耐力を低下させているが、同じ変形量でも載荷履歴によってせん断耐力の低下量は異なる事が分かる。

また、繰り返し載荷の耐力低下後の負勾配は、単調載荷の負勾配とほぼ同程度の角度になっていることが分かる。単調、正負繰り返し載荷のいずれも「軸力あり」の方が降伏耐力が大きく、繰り返し耐力低下点の変位も大きくなっている。また、「軸力あり」の方が繰り返し耐力低下点以降の負勾配の程度が大きい。

3.2 内部ひずみ - 変形関係

内部ひずみ-変形関係を図-6に示す。内部ひずみは図-4に示した装置を用いて得られた相対変位を部材の有効せい212mmで除した値である。「Center」は中央の変位計で計測されたひずみ、「Side」は材端から1/5の位置に設けた2カ所の変位計で計測したひずみの平均値である。単調載荷及び片側繰り返し載荷においては耐力低下前後に

「Center」と「Side」のひずみ量に大きな違いは見られないが、両側繰り返し載荷は「軸力あり」「軸力なし」ともに耐力低下点付近から「Side」に対し「Center」のひずみ量(内部膨らみ)が大きくなっていることが分かる。また、「軸力なし」の両側繰り返し載荷に対し、「軸力あり」の両側繰り返し載荷、片側繰り返し載荷は低変位での内部ひずみが少ない。この事より、軸力はひび割れの拡大を抑制する傾向があると考えられる。

3.3 軸方向ひずみ - 変形関係

図-3に示した測定方法で軸方向の伸びを測定し、試験体の柱部分の長さ401mmで除した値を軸方向歪みとした。試験体の軸方向ひずみ-変形関係を図-7に示す。初期の低変位時では大きな違いは見られないが、軸力ありの図-7(b),(c)を見ると、両図共にある点に至ると軸方向ひずみが減少している事がわかる。これを荷重-変形関係の図と比較すると、軸方向ひずみが減少し始める点は繰り返し耐力低下点とほぼ一致してい

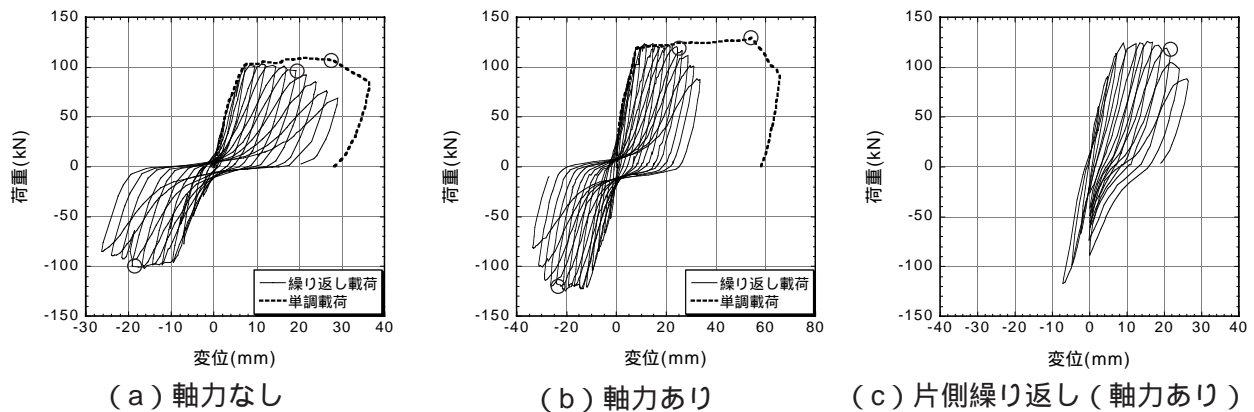


図-5 荷重 - 変形関係

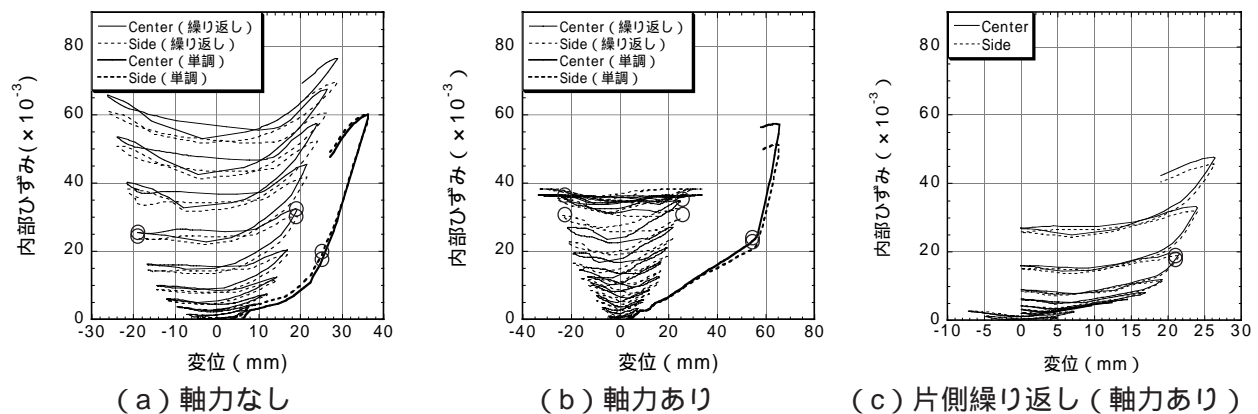
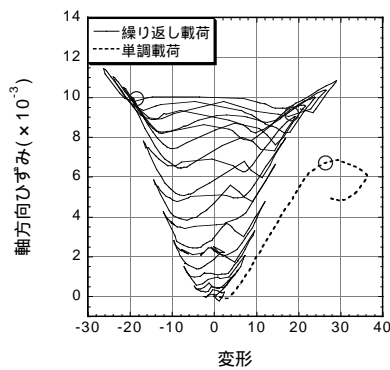
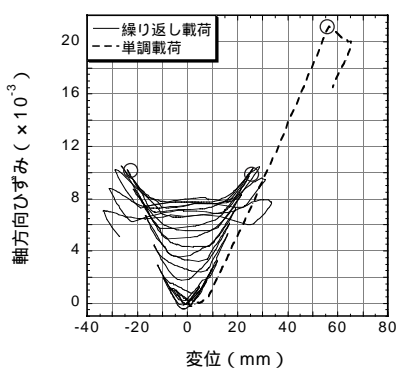


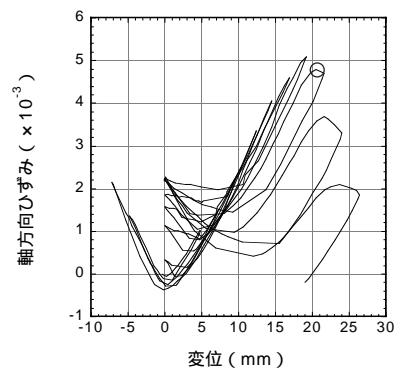
図-6 内部ひずみ-変形関係



(a) 軸力なし

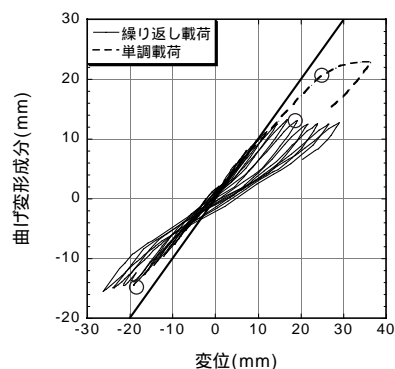


(b) 軸力あり

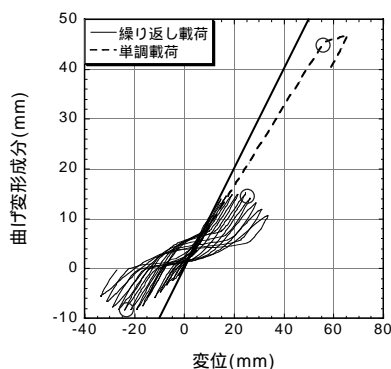


(c) 片側繰り返し (軸力あり)

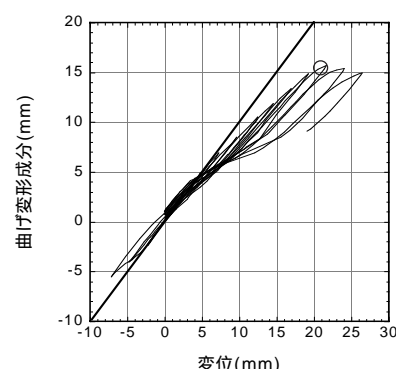
図-7 軸方向ひずみ-変形関係



(a) 軸力なし



(b) 軸力あり



(c) 片側繰り返し (軸力あり)

図-8 曲げ変形成分-全体変形関係

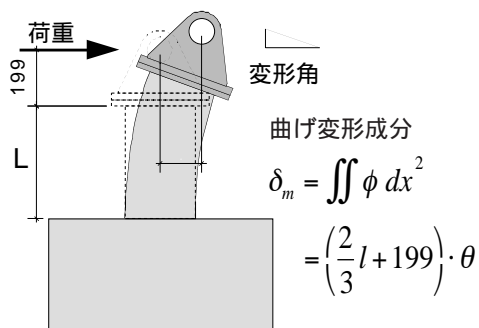
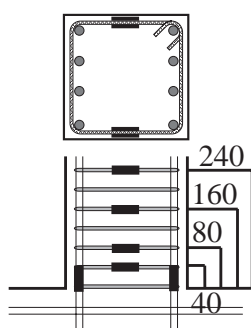
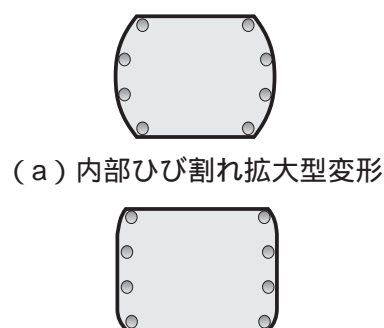


図-9 曲げ変形成分の定義



ひずみゲージ

図-10 ひずみゲージ位置



(a) 内部ひび割れ拡大型変形

(b) 横補強筋降伏型変形

図-11 内部変形のパターン

る。一方軸力なしの図-7(a)においても、耐力低下し始めると軸方向ひずみ増加量が減っている事が分かる。

3.4 曲げ変形成分 - 全体変形

全体変形は曲げ変形成分とせん断変形成分から成ると仮定した。曲げ変形成分の定義を図-9に示す。図中の計算式では曲率が一定の割り合いで増加すると仮定している。正負繰り返し載荷の「軸力あり」と「軸力なし」及び片側繰り返し載荷「軸

力あり」の曲げ変形成分-全体変形関係を図-8に示す。どちらも載荷初期の段階では傾き1(曲げ変形成分100%)に漸近しているが、変形を増加させるにつれ傾きが小さくなっている。これは繰り返しサイクルの増加とともに全体変形に占める曲げ変形成分の割合が減少(せん断変形成分の割合が増加)している事を意味する。

また、どの試験体においても繰り返し耐力低下点を境に、せん断変形成分が著しく増加している事が分かる。

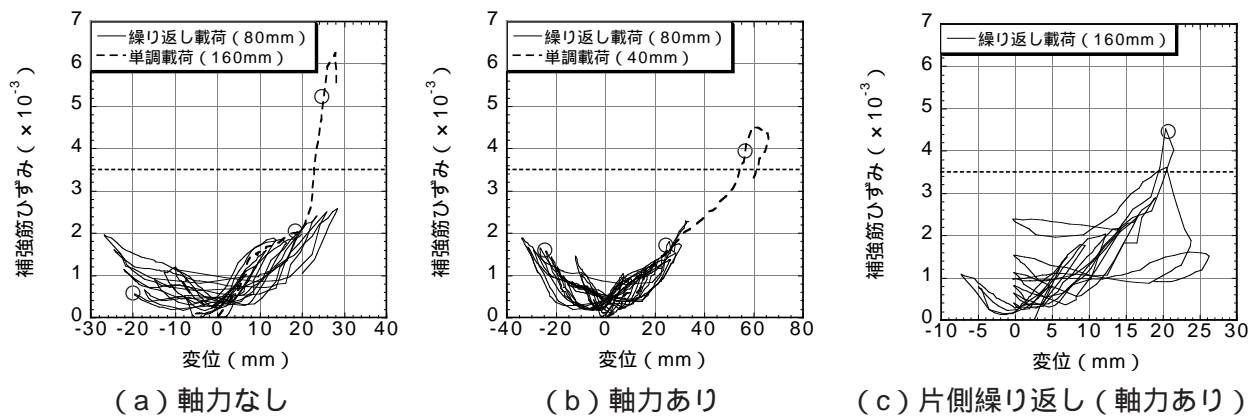


図-12 横補強筋-変形関係

3.5 横補強筋ひずみ-変形関係

測定した4ヶ所(図-10参照)の横補強筋のうち、最もひずみの大きかった位置での横補強筋歪み-変形関係を図-12に示す。図中の点線は降伏ひずみを示している。

文献^[1]では、片側繰返し载荷における繰返し耐力低下時の変位は両側繰返し载荷の2倍程度となっている。一方、本研究では片側繰返し载荷と両側繰返し载荷の繰返し耐力低下時の変位には大きな違いは見られなかった。この2つの実験結果に違いが生じた原因は、本実験ではコンクリート強度に対する横補強筋の強度が低かったことによるものと考えられる。コンクリート強度に対して横補強筋の強度が十分に強い場合、繰返し载荷を受けると内部コンクリートが破壊し、図-11(a)のような変形(「内部ひび割れ拡大型変形」)が生じる。また、片側繰返し载荷や単調载荷は両側繰返し载荷に比べて同変位では内部のひび割れが少なく、図-11(b)のような変形(「横補強筋降伏型変形」)になると考えられる。本研究での片側繰返し载荷においても内部のひび割れが少なく、図-11(b)のような変形になった結果、単調载荷と同様に横補強筋が先に降伏し耐力低下に至ったものと考えられる。図-12(c)を見ると繰返し耐力低下点に至る直前に横補強筋が降伏歪みを超えていることが分かる。

また、図-12(a),(b)より、単調载荷では「軸力あり」「軸力なし」のどちらの場合においても、横補強筋の降伏により耐力が低下していることが確認できる。

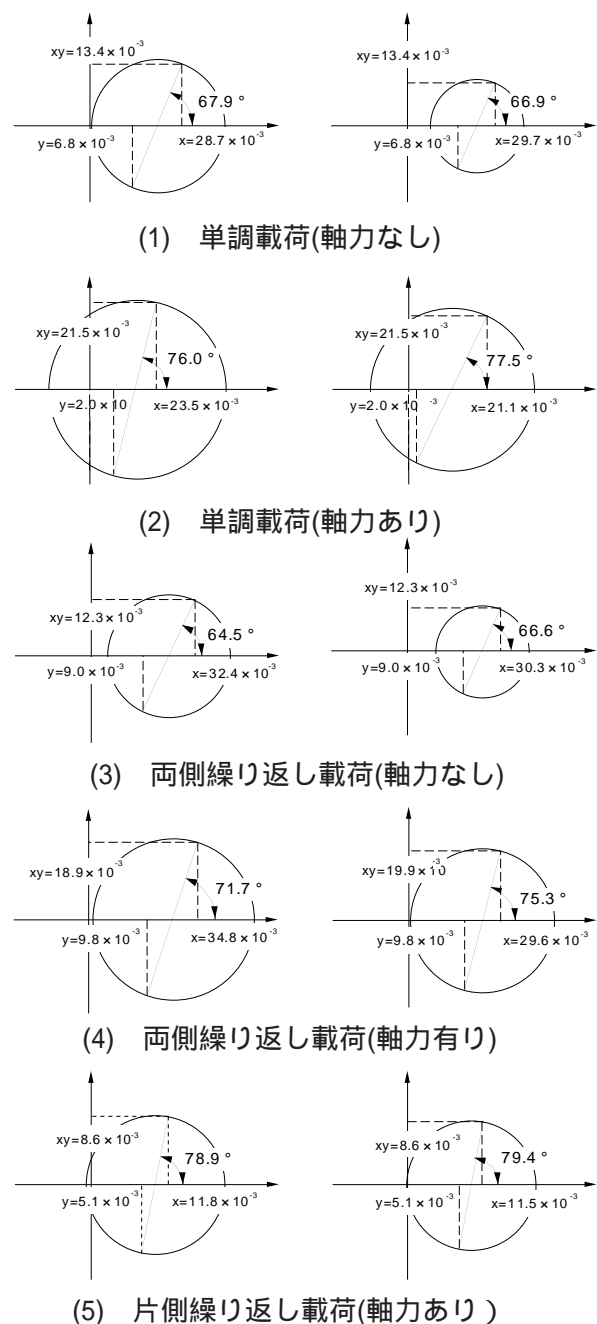


図-13 内部ひずみのモール円

3.6 主歪みのモーダル

繰り返し载荷「軸力あり」の「Center」「Side」における内部ひずみのモーダルを図-13に示す。(x)はそのときの横方向ひずみ、(y)は軸方向ひずみ、(2-xy)はせん断ひずみを示している。「Center」のxは試験体断面の中央部のひずみ、「Side」のxは両側面からそれぞれ柱幅の1/5の位置でのひずみ度を平均したものである。図中の数値は耐力が低下し始めた点の値を使用している。両側繰り返し载荷は「軸力あり」「軸力なし」共に「Center」の方が「Side」に比べて傾きが小さいことが分かる。傾きが小さくなるとxが大きくなるので3.3で述べた「Center」の内部ひずみが「Side」に比べて大きいという結果に対応しており、モーダルからも部材内部の膨らみ変形の発生が確認できたと言える。一方、単調载荷「軸力有り」は横補強筋が降伏しているが「Side」に比べ「Center」のひずみ度が大きくなっている。しかしこの「Side」の片方の値は「Center」とほぼ同じであり、「横補強筋降伏型変形」といえる。

4. 繰り返し耐力低下のメカニズム

3.5で述べたように、耐力低下は横補強筋の降伏とヒンジ領域のひび割れ面のずれの2通りの要因で起こっている事が分かった。

繰り返し载荷によって内部のコンクリートに三次元的なひび割れが発生し、繰り返し回数が増えるに従い幅を増す。このひび割れは、初期の段階では骨材の噛み合や局部接触効果によって力を伝達する事ができるが、ある程度幅が増すと一部のひび割れが拡大または連結してずれを生じる。一方、横補強筋の降伏による耐力低下は、コンクリートに対して鉄筋の強度が低く、内部のひび割れがあまり発生しないような载荷方法で大変形に至るとひずみが大きくなり起こると考えられる。

どちらの場合も、せん断に対する抵抗能力が損なわれる点で共通し、この時点で耐力低下が生じるものと考えられる。従って繰り返し耐力

低下後は曲げ変形の成分は低下し、せん断による変形が増大することになるが、これは本報3.2の結果と対応している。また軸方向ひずみに着目すると「軸力あり」の図が共に繰り返し耐力低下点で軸方向ひずみが減少していることについても軸方向に拡大したひび割れがずれる事によって縮んだことを示唆している。内部歪みでは繰り返し耐力低下点前後での大きな違いはあまり見られないが、両側繰り返し载荷における繰り返し耐力低下点付近では「Center」のひずみが増していることが分かる。

5. 結論

- (1)単調载荷または繰り返し载荷時に試験体に軸力を与えると変形能力は増すが、耐力低下し始めると急激に低下する。また繰り返し耐力低下後の負勾配の角度は単調载荷の耐力低下後の負勾配の角度と同程度である。
- (2)繰り返し耐力低下が発生すると、せん断変形成分が全体変形の大部分を占めるようになり、軸方向ひずみの増加量も低下する。
- (3)同じパラメータの試験体でも、载荷履歴や軸力の有無によって耐力低下のメカニズムが異なる事がある。

【参考文献】

- [1]衣笠，野村：正負繰り返し履歴による曲げ降伏ヒンジの破壊性状，コンクリート工学論文集6(2)，pp.21-32，1994.7.
- [2]伊吉，梅村，市之瀬，松澤：繰り返し载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，コンクリート工学年次論文集23(3) pp.1297-1302，2001.7.
- [3]岡野，今井，市之瀬：RC柱の繰り返しせん断性状に関する研究(その1 実験)日本建築学会東海支部研究報告集 第38号，pp.213-216，2000.2
- [4]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，1999
- [5]建築物の構造規定 - 建築基準法施行令第3章の解説と運用 - ，1994