

論文 繰り返し载荷下における RC 梁部材横補強筋の拘束効果劣化性状

田中敬人^{*1}・衣笠秀行^{*2}

要旨： RC 梁部材は単調载荷時においては韌性に富む場合でも、曲げ降伏後の繰り返し载荷を受けることにより耐力低下し、単調载荷時と比較し著しく変形能力を低下させる。繰り返し载荷を受ける RC 梁部材のヒンジ領域の変形挙動を詳細に計測することにより、载荷方向と直交する面のせん断補強筋に、载荷方向に曲げ変形（以下、たわみ出し）が発生することを確認した。たわみ出しは、ヒンジ領域の一時的な剛性低下によって引き起こされるスリップ域で生じており、このたわみ出しが耐力低下を引き起こす要因となっていることが推察された。

キーワード： 変形能力, RC 梁部材, 繰り返し载荷, たわみ出し歪, スリップ域, 耐力低下

1. はじめに

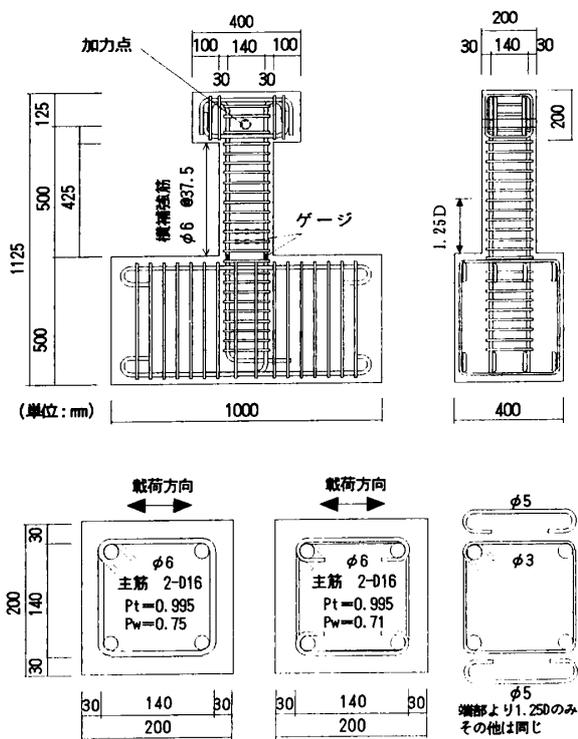
RC 梁部材は、単調载荷時において韌性に富む場合でも、曲げ降伏後の繰り返し载荷を受けることにより耐力低下し、単調载荷時と比較し著しく変形能力を低下させる。このような RC 梁部材の耐力低下は、「コンクリートのせん断圧縮破壊」と「せん断補強筋の降伏」の2つが要因であると考えられてきた。本論文は、曲げ降伏後の繰り返し载荷により発生する耐力低下および破壊のメカニズム解明を試みたものである。

2. RC 梁部材の繰り返し载荷実験

2.1 実験概要

試験体形状、配筋詳細および歪みゲージ位置を図-1に示す。部材断面20×20cm、シアパン比2.5の片持ち形式の RC 梁部材である。試験体 A, B 1, B 2 ともに、曲げ降伏がせん断破壊に対して先行して起こるように引張鉄筋比を0.995%, せん断補強筋比を0.75% (試験体 A), 0.71% (試験体 B 1, B 2) とした。ただし試験体 B 1, B 2 は、端部より1.25Dの範囲のみ、载荷方向と直交する方向のせん断補強筋量を小さくした。その他の部分は試験体 A と同じであ

る。使用した鉄筋の材料特性を表-1に、コンクリート強度を図-8中に示す。载荷装置を図-2に示す。試験体 A, B 1 は、10/1000rad ピッチの正負漸増繰り返しで、各変形角で7回繰り返した後、次の変形角へと移る载荷を、試験体 B 2 は、一方向単調载荷を行った。



試験体 A 断面図 試験体 B 1,2 断面図

図-1 試験体形状および配筋詳細

* 1 東京理科大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (正会員)

* 2 東京理科大学講師 理工学部建築学科 工博 (正会員)

2.2 変形挙動の測定

変位計取り付け位置を図-3に示す。加力点位置に取り付けた4本の変位計の計測結果から図-2中に定義する荷重Pおよび変形角Rを算出した。また、破壊の集中するヒンジ領域の変形挙動を把握するため、主筋の外側に全ネジ棒(φ6)を埋め込み、試験体の両側で相対変位を計測した。その平均により図-5の式(1)から軸方向歪 ϵ_A を算出した。軸方向歪は端部から15cmの区間に集中していることから、この区間から得られた歪でヒンジ領域の軸方向歪を代表させることとした。また、図-6に示す軸伸びによる歪(以下、軸伸び歪)とたわみ出しによる歪(以下、たわみ出し歪)を計測するため、ヒンジ領域の端部から56.3mmと93.8mmに位置する2本のせん断補強筋に、図-3,7に示すように歪ゲージおよび鋼線を取り付けた。これらは、図-4に示すように特に破壊が集中する位置にある。図-7に示すように、それぞれ式(2)から横方向歪 ϵ_L 、式(3)から軸伸び歪 ϵ_H 、式(4)からたわみ出し歪 ϵ_T を算出した。

3. 耐力低下とたわみ出し

図-8に各試験体の荷重P-変形角R関係を示す。試験体A,B1はそれぞれ図-8(a),(b)に示すように、主筋の引張降伏後、繰り返し荷重を受けることにより、50,40/1000rad付近の▼印で示すサイクル以降、急激に耐力を低下させている。一方、試験体B2は図-8(c)に示すように、一方向単調荷重時において曲げ引張降伏後、200/1000rad付近まで達した後に耐力低下を生じている。このことは、試験体がせん断破壊に対して十分な変形能力を有しているが、曲げ降伏後の繰り返し荷重により、変形能力が著しく低下することを示している。

表-1 使用鉄筋の材料特性

試験体名	種類	降伏強度 (N/mm ²)	最大強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
A	φ6	361	480	2.01×10 ⁵
	D16	361	539	2.09×10 ⁵
B1, B2	φ3	604	617	2.09×10 ⁵
	φ5	580	588	2.08×10 ⁵
	φ6	361	480	2.01×10 ⁵
	D16	361	539	2.09×10 ⁵

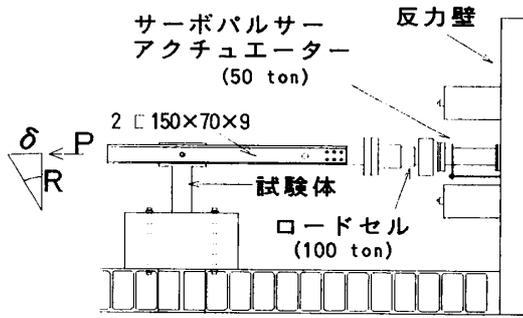


図-2 載荷装置

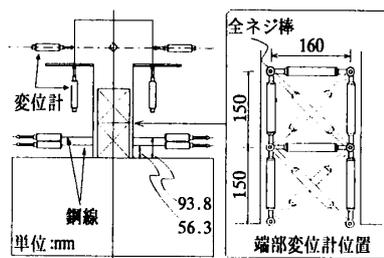


図-3 変位形取り付け位置

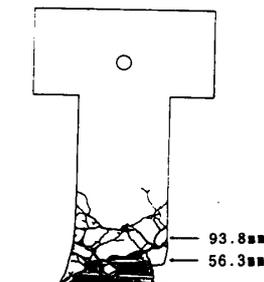


図-4 試験体Aの破壊性状

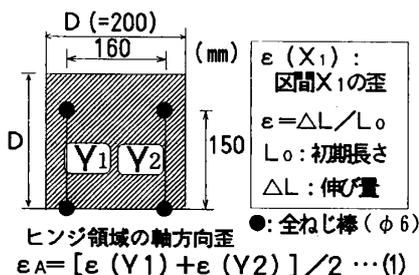


図-5 軸方向歪 ϵ_A

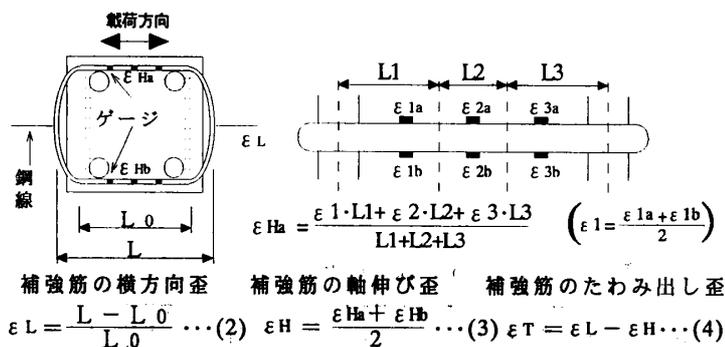
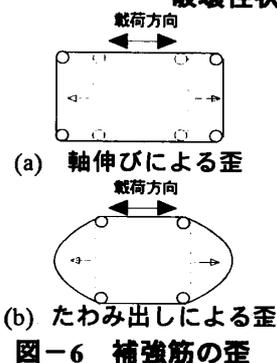
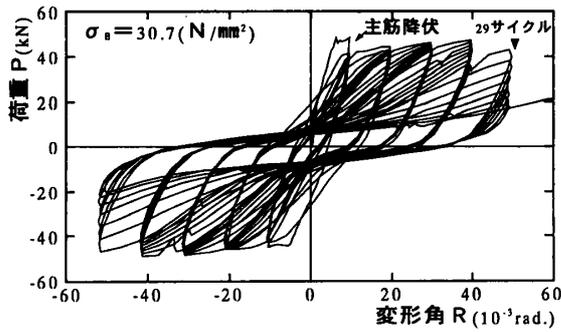
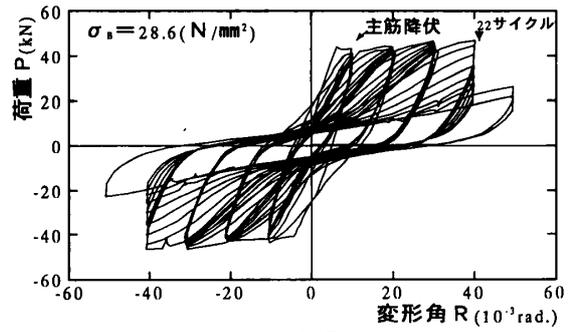


図-7 たわみ出し歪の算出

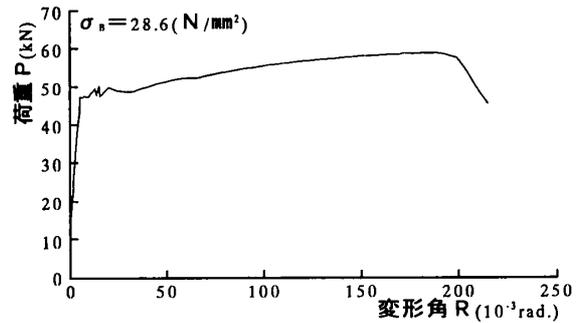


(a) 試験体 A



(b) 試験体 B 1

試験体Aの変形挙動を観察することにより、変形能力の低下原因を考える。図-9 に試験体Aのせん断補強筋の軸伸び歪 ϵ_H - 変形角 R 関係を示す。変形角を増すごとに、軸伸び歪が増加していく様子を観察することができるが、その値は小さく、補強筋の降伏までは至っていない。このことから、耐力低下が補強筋の降伏により引き起こされたものではないことがわかる。



(c) 試験体 B 2

図-8 荷重 P - 変形角 R 関係

図-10に変形の大きかった下側（端部より56.3mm）の補強筋のたわみ出し歪 ϵ_T - 変形角 R 関係を示す。補強筋の軸伸び歪に比べて、たわみ出し歪は非常に大きい値を示している。さらに、耐力低下を示す50/1000rad付近からたわみ出し歪の増加量が大きくなっていることが観察される。また、単調荷重を行った試験体B2のたわみ出し歪も図-10に加えて示す。試験体B2は、試験体Aを単調荷重したものではないが、試験体Aの単調荷重よりたわみ出しに対して不利である。この単調荷重時のたわみ出し歪と比較して試験体Aのたわみ出し歪が大きくなっていることは、たわみ出し歪が繰り返し荷重によって生じたことを示唆している。

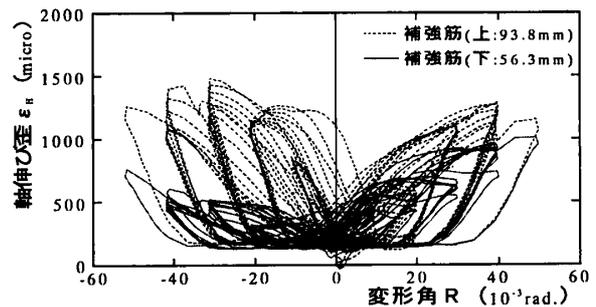


図-9 軸伸び歪 ϵ_H - 変形角 R 関係

また、図-11に試験体Aと試験体B1のたわみ出し歪 ϵ_T - cycle 関係を示す。サイクルの増加にともないたわみ出し歪が蓄積され、耐力低下のはやかった試験体B1の方が、たわみ出し歪の増加がはやい様子が観察される。

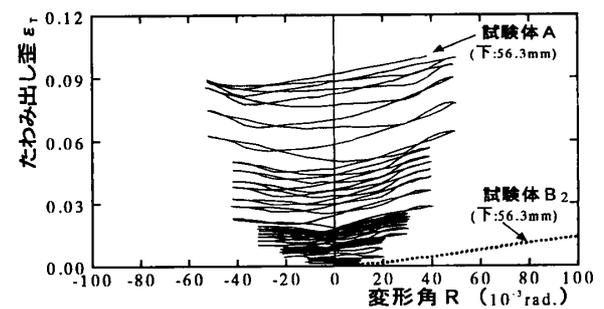


図-10 たわみ出し歪 ϵ_T - 変形角 R 関係

以上のことから、このたわみ出し歪の増加が、耐力低下の発生と密接な関係にあることが推察される。

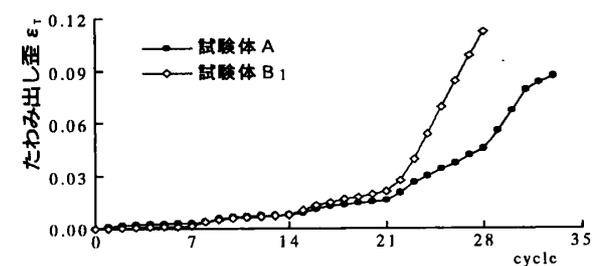


図-11 たわみ出し歪 ϵ_T - cycle 関係

4. たわみ出し歪の増加

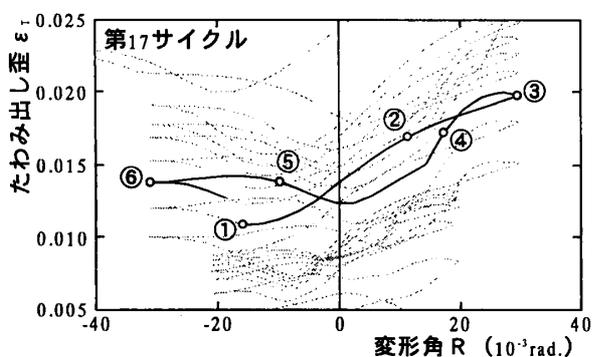
4.1 耐力低下発生前後の増加挙動

試験体Aの耐力低下発生前後のたわみ出し歪 ε_T の増加挙動を比較・考察することにより、この増加メカニズムについて考えることにする。図-10に示した試験体Aのたわみ出し歪 ε_T -変形角R関係から、耐力低下発生前後の各1サイクルを抜き出し、図-12(a),13(a)に示す。また、これら図中に太実線で示したサイクルに対応する荷重P-変形角R関係を抜き出し、それぞれ図-12(b),13(b)に示す。なお、両図(a)(b)中の番号はそれぞれ対応している。耐力低下前の増加挙動(図-12)では、荷重の低いスリップ域(①~②, ④~⑤)に対応する部分においてたわみ出し歪の増加率が上昇する下に凸の増加傾向となっているが、それ以降の剛性回復域(②~③, ⑤~⑥)に対応する部分では、増加傾向にあるものの、その増加率は徐々に減少する上に凸の増加傾向を示している。また、耐力低下後(図-13)では、コアコンクリ

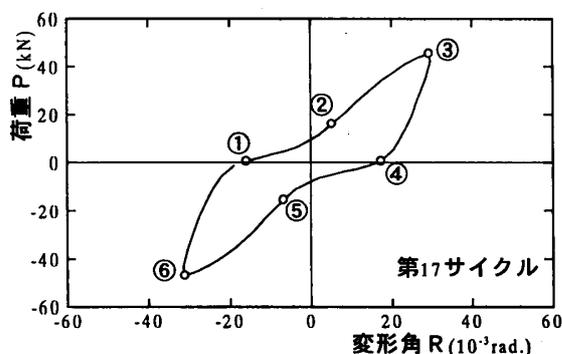
ートの剛性が劣化することによりスリップ域が増大し、剛性回復域が顕著に現れないことがわかる。そのため、耐力低下前に見られた剛性回復域によるたわみ出し歪の増加率の減少は起こらず、単調に上昇する下に凸の増加傾向を示す。したがって、このたわみ出し歪は、繰返し载荷をおこなったことによるコアコンクリートの一時的な剛性低下であるスリップ域において増加していると推察される。

4.2 たわみ出し歪の増加メカニズム

図-14(a),(b)にそれぞれ既往の研究[1]⁹⁾における試験体の横方向歪 ε_L' -変形角R関係と、それに対応する荷重P-変形角R関係を抜き出したものを示す。試験体[1]はせん断補強筋が降伏するせん断引張破壊を目的としたものであり、せん断補強筋比を0.19%と低くし、せん断耐力と曲げ耐力がほぼ同じとなるようにしたものである。計測方法は図-15のように全ネジ棒($\phi 6$)を打ち込み、その相対変位を計測することにより式(5)から横方向歪 ε_L' を算出

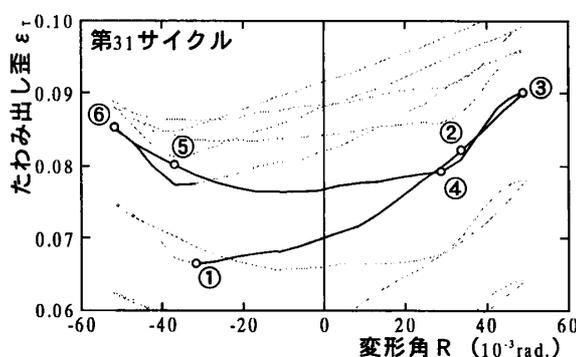


(a) たわみ出し ε_T -変形角R関係

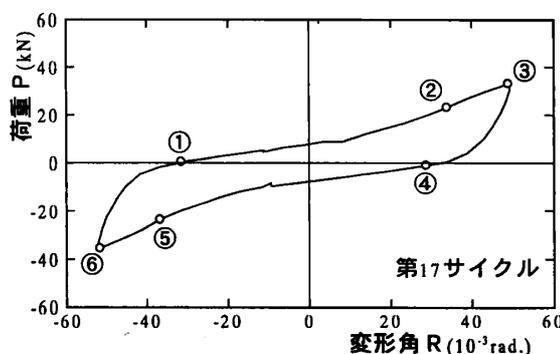


(b) 荷重P-変形角R関係

図-12 耐力低下前の増加挙動



(a) たわみ出し ε_T -変形角R関係



(b) 荷重P-変形角R関係

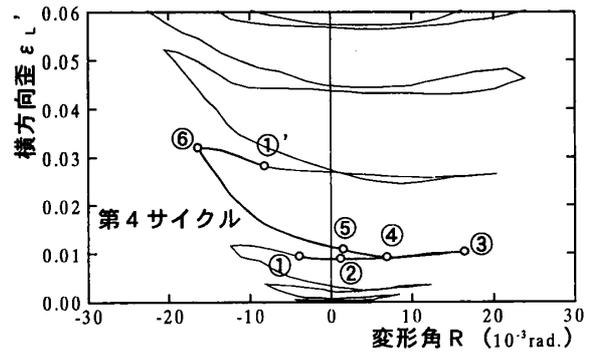
図-13 耐力低下後の増加挙動

したものである。定量的には、損傷の進行にともなう精度低下が予想されるが、本研究の考察範囲ではここで得られたデータは特に問題にならず、定性的に十分信頼できるものと考えられる。

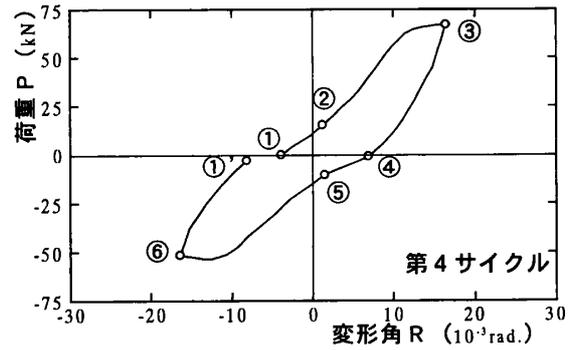
せん断引張破壊した試験体[1]のせん断補強筋の降伏は、第4サイクルの負側載荷時に発生しており、図-14(a)⑤→⑥に示す剛性回復域において横方向歪 ϵ_L' の増加率が徐々に上昇する下に凸の増加傾向を示している。これは、せん断補強筋の降伏により、載荷荷重の増加にともない横方向歪が増加し、耐力低下していることを示している。

同図(a)のように剛性回復域で起こる歪の増加は、作用荷重や変形角の増大によって破壊が発生したことにより生じるものであり、剛性回復域において歪の増加率の上昇が見られることは、十分予想されることである。一方、先に述べたように、試験体Aのたわみ出し歪は、剛性の低下したスリップ域において歪の増加が見られ、剛性回復域では歪の増加が抑えられる傾向にあった。試験体Aのたわみ出し歪が、作用荷重や変形角の増加によるせん断破壊によって引き起こされたとは考えにくい。

図-16に単調載荷を行った試験体B2のたわみ出し歪 ϵ_T -変形角R関係を示す。単調載荷時においてもたわみ出し歪が増加し耐力低下に至っていることが観察される。このとき図-17に示す、せん断補強筋($\phi 5$)の軸伸び歪 ϵ_H -変形角R関係を見ると、補強筋の歪は小さく、降伏していないことがわかる。つまり、単調載荷時での耐力低下は、ヒンジ領域に形成されたコンクリートのせん断圧縮束の圧壊により起きたものであると考えられる。このとき、図-18(a)に示すヒンジ領域に形成されたコンクリートのせん断圧縮束が、作用せん断力によって破壊し、同図(b)のようにコア剛性が劣化することにより、たわみ出し歪が増加したと考えられる。試験体Aがせん断圧縮破壊したものであれば、剛性回復域においてたわみ出し歪が増

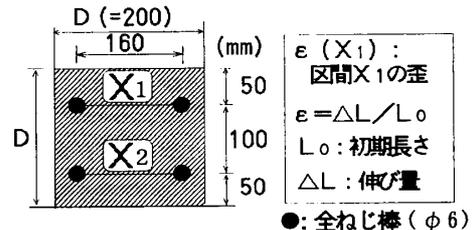


(a) 横方向歪 ϵ_L' -変形角R関係



(b) 荷重P-変形角R関係

図-14 横方向歪 ϵ_L' の増加挙動¹⁾



横方向歪

$$\epsilon_L' = [\epsilon(X1) + \epsilon(X2)] / 2 \dots (5)$$

図-15 横方向歪 ϵ_L' の算出¹⁾

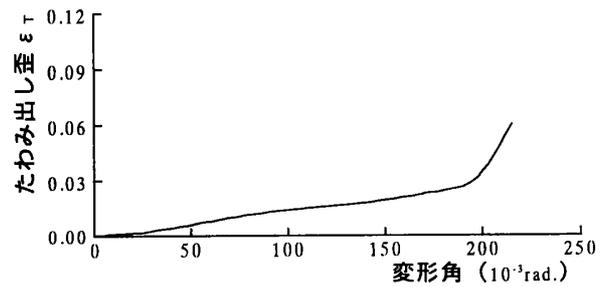


図-16 たわみ出し歪 ϵ_T -変形角R関係

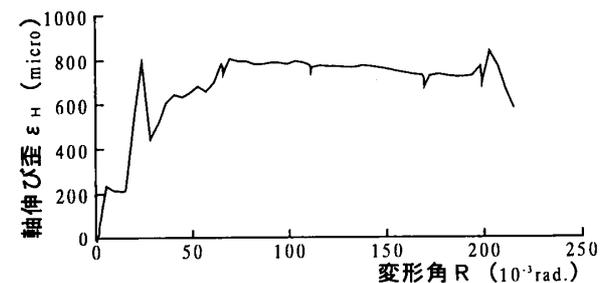


図-17 軸伸び歪 ϵ_H -変形角R関係

加するはずである。しかし、先に述べたように、剛性回復域ではむしろたわみ出し歪の増加は抑えられる傾向にあり、増加は剛性の低下したスリップ域で生じていた。すなわち、同図(a)に示すコンクリート圧縮束が作用せん断力によって破壊したのではなく、荷重の方向を変えたことによって、同図(b)のようにコア剛性の低下が生じることにより、たわみ出し歪が増加したと考えられる。荷重の方向を変えたことにより、一時的にコア剛性が低下したことによって生じるスリップ域は、単調荷重時(試験体B2)の耐力低下のようにコンクリートの圧縮束が破壊して生じたわけではない。繰り返し荷重によるたわみ出し歪の増加は、せん断圧縮破壊とは異なるメカニズムにより増加していると考えられる。

5. 軸方向歪とたわみ出し歪の関係

図-19にヒンジ領域の軸方向歪 ε_A -cycle 関係を示す。先に示した図-11の補強筋のたわみ出し歪 ε_T -cycle 関係と非常によく似た増加傾向を示していることがわかる。荷重ストロークの同じサイクルではヒンジ領域の軸方向歪、たわみ出し歪ともに、増加率が徐々に低下し、階段状の増加挙動を示していることが観察される。たわみ出し歪は、主筋の降伏にともなう軸方向歪によって生じるヒンジ領域のせん断剛性の低下により発生すると考えられ、軸方向歪とたわみ出し歪の増加メカニズムには何らかの関係があると予想される。

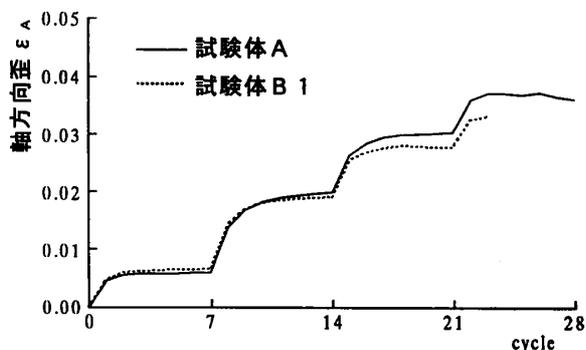
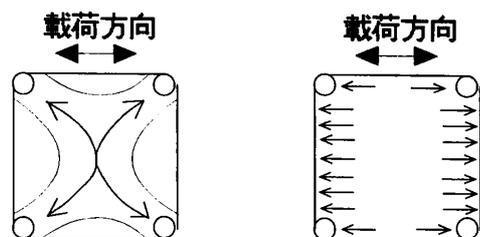


図-19 軸方向歪 ε_A -cycle 関係



(a) コンクリート圧縮束形成時の概念図
コア剛性大 (剛性回復域)
(b) コンクリート圧縮束消滅時の概念図
コア剛性小 (スリップ域)

図-18 コンクリートと補強筋の変形

6. まとめ

曲げ降伏後の繰り返し荷重を行うことにより、単調荷重時には起こらないメカニズムで歪が生じ、これが原因で耐力低下に至る破壊が存在する。

繰り返し荷重により、荷重方向と直交する面のせん断補強筋に、荷重方向にむかってたわみ出し歪が蓄積する。このたわみ出し歪は、繰り返し荷重を行ったことによるコアコンクリートの一時的な剛性低下によって引き起こされるスリップ域において増加している。曲げ降伏後の繰り返し荷重を受ける部材の耐力低下が、このたわみ出し歪が要因となり起こり得る。このたわみ出し歪の増加メカニズムは、単調荷重時には起こらない繰り返し荷重時に特有のものであると考えられる。

これまで、RC梁部材の変形能力劣化の要因が、コンクリートのせん断圧縮破壊とせん断補強筋の降伏の2つであると考えられてきた。しかし、このたわみ出し歪の増加による破壊はこれらの破壊モードとは発生メカニズムが異なっている。

【謝辞】本研究費の一部は平成9年度文部省科学研究費補助金(基盤研究C)[課題番号09650639:研究代表者野村設郎]によりました。

【参考文献】1) 衣笠秀行・野村設郎: RC曲げ破壊部材の繰り返し荷重下におけるヒンジ領域の拘束効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 2, pp. 447-452, 1995