大変形繰り返し载荷を受ける RC 梁部材の曲げ降伏後のせん断破壊の発生メカニズムに関するエラー・カタストロフィの視点からの考察

CONSIDERATION ON FLEXURAL SHEAR FAILURE MECHANISM OF RC BEAM SUBJECTED TO LARGE DEFORMATION CYCLIC LOADING IN TERMS OF ERROR CATASTROPHE

衣笠 秀行*, 野村 設郎**

Hideyuki KINUGASA and Setsuro NOMURA

Based on cyclic loading tests of RC beams which failed in flexural shear failure without yielding of the transverse reinforcement, the following flexural shear failure mechanism, which is associated with 'Error Catastrophe' known as a theory of aging, was observed in the hinge region.

A shear-resisting system formed in the hinge region of RC beam subjected to monotonic loading. Under reversed cyclic loading, the shear-resisting system of monotonic loading repeated temporary disappearance and rebuilding due to opening and closing of cracks, each time the loading direction was reversed. The flexural shear failure occurred due to malfunction of the rebuilding after the temporary disappearance. What inhibited the rebuilding and caused the malfunction was errors in the rebuilding. The errors accumulated each time the shear-resisting system is rebuilt, and when the errors exceeded a certain tolerance, the failure due to the malfunction of the rebuilding occurred.

Keywords: flexural shear failure, failure mechanism, ductility, large deformation cyclic loading, error catastrophe

曲げ降伏後のせん断破壊, 破壊メカニズム, 靱性, 大変形繰り返し载荷, エラーカタストロフィ

1. はじめに

RC 構造物の靱性設計を行う上で、部材の終局耐力並びに、曲げ降伏ヒンジを計画する柱や梁部材の変形能力を適切に評価することは重要である。RC 曲げ破壊部材は、単調载荷時には十分な変形能力を有する場合でも、曲げ降伏後の繰り返し载荷を受けることにより、せん断変形成分の増加を伴った急激な耐力低下を示すことが知られている。この曲げ降伏後のせん断破壊の変形能力評価法については、多くの提案がなされているが、その推定精度は終局耐力のそれと比較し依然として明らかに低いのが現状である。

この原因の一つとして、せん断破壊発生時の極度に劣化したヒンジ領域の崩壊挙動について詳細に検討した研究はほとんどなく、大変形繰り返し载荷時の崩壊メカニズム自体に不明な点を多く残していることが上げられる。

これまで、曲げ降伏後のせん断破壊は、曲げ変形増加によって引き起こされるせん断抵抗機構の強度低下が原因で引き起こされると考えられてきた。これに対して著者らは、梁部材を対象に、大変形繰り返し载荷を受けるコンクリート構造物にはひび割れ開閉に起因する新しい概念の破壊モードが存在する可能性のあること述べてき

た 1),2),3)。

正負繰り返し载荷を受けるコンクリート構造物にとって、ひび割れの開閉を繰り返すことによって応力伝達が行なわれることは非常に特徴的なことである。文献 1,2 では実験結果を基に、ヒンジ領域に形成されるせん断抵抗機構が、载荷の方向を変えることによるひび割れ開閉により、一時的消滅と再形成を繰り返していること及び、曲げ降伏後のせん断破壊は、一時的に消滅した抵抗機構が再形成不能となることで引き起こされうることが明らかにした。

しかしながら、ヒンジ領域の横ひずみ（材軸垂直方向のひずみ）の増加がこの破壊の発生と何らかの形で関係している可能性を指摘したもの、このような再形成不能を引き起こすメカニズムはどのようなものか、また、これの発生条件はどのように定義されるのかについては明らかにすることは出来なかった。著者らは、追加実験を行いデータ蓄積を行うと同時に、横方向ひずみの増加挙動について詳細に検討を行うなど 4)、この問題に引き続き取り組んできた。また、最近、曲げ降伏後のせん断破壊の発生が、ヒンジ領域の材軸方向ひずみの増加に起因するせん断抵抗機構の強度低下により引き起こされるとする研究が発表され 5)、曲げ降伏後のせん断破壊の発

* 東京理科大学理工学部建築学科 助教授・工博

** 東京理科大学理工学部建築学科 教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

図1 エラーカタストロフィ

生メカニズムを明らかにする上で、ヒンジ領域に蓄積されるひずみ(材軸方向および横方向ひずみ)

に着目することが重要であることが認識されるようになりつつある。

本論文は、実験結果を基に、繰り返し载荷によってヒンジ領域に蓄積されるひずみが先に述べた抵抗機構の再形成不能により引き起こされる破壊において果たす役割について考察を行うことにより、加齢学説の一つとして最近、注目を集めている「エラーカタストロフィ」の視点から、この破壊の発生メカニズムと、その本質を明らかにしたいと考えている。

本研究の目的は、梁部材の靱性評価法の向上だけにとどまるものではない。ここで議論する破壊モードは複雑な力の流れをもつRC構造物が繰り返し载荷を受けたときに発生する可能性が高くなるものであり、部材よりむしろフレームや壁が混在する構造物全体の破壊挙動を考えると重要となる可能性がある。例えば、仮想ヒンジ、梁の軸方向伸び、フレーム中の連層耐震壁の曲げ降伏、など、繰り返し载荷時の力の流れを複雑にする要素は多く存在する。本論文の大目標は、このような複雑な力の流れを有する構造物の大変形繰り返し载荷下の破壊性状の解明にある。

2. エラーカタストロフィにより引き起こされる破壊

本論文の目的は曲げ降伏後に大変形繰り返し载荷を受けるRC梁部材に、エラーカタストロフィを連想させる、あるせん断破壊モードが存在することを実験的に示すことにある。

エラーカタストロフィは加齢学説の一つであり、次のように要約される⁸⁾(図1参照)。

- ①体内の細胞は再成を繰り返している。
- ②再生の際にエラーが発生し、これが再生機能に損傷を与える。
- ③エラーは細胞の再生の度に蓄積される
- ④エラー量がある限界を超えたとき、再成不能に起因する細胞の急激な破壊が進行する(老化による死に至る)。

本論文で述べる破壊モードは次のようなものである。

- ①正負繰り返し载荷下のせん断抵抗機構は、ひび割れの開閉のた

図2 ヒンジ領域における曲げ降伏後のせん断破壊の発生メカニズム

めに一時的消滅と再形成を繰り返している(図2中の①→②→③)。

②再形成の際にエラーが発生し、このことが再形成機能を低下させる。

③再形成エラーはせん断抵抗機構が再形成されるたびに発生し徐々に蓄積される。

④エラー量がある許容値を超えたとき、再形成不能に起因する急激な破壊が発生する(図2中の②→⑤)。

正負繰り返し载荷時に曲げ降伏後のせん断破壊が発生しないために、RC梁部材は次の2つの条件を満たす必要がある。条件1: 逆方向载荷の度に、一時的に消滅したせん断抵抗機構が再形成されること(図2中の②→③)。条件2: 作用せん断力が再形成されたせん断抵抗機構の強度を上回らないこと(図2中の③→④)。従来の曲げ降伏後のせん断破壊が条件2を満足しないために発生する(図2中の③→⑥)のに対して、観察された破壊モードは条件1を満足しないために発生するものである(図2中の②→⑤)。

本論文は従来の破壊モードの存在を否定するものではない。本論文は、大変形繰り返し载荷を受けるRC部材に特有な新しい破壊モードの発生の可能性を示そうとするものである。

本論文では、3章で大変形繰り返し载荷実験について述べ、4章で耐力低下が再形成不能で引き起こされうること、5章では再形成過程には再形成エラーが発生し、これが再形成不能を引き起こす原因となっていること、6章では再形成エラーの増加メカニズム、7章では再形成不能の発生条件(すなわち、この破壊の発生条件)がどのように定義されるのかについて述べることにする。なお、第4章は既に文献1において論じた部分ではあるが、本論文の議論を展開する上でまた、本論文の信頼性を判断する上で必要不可欠な部分であることから、最近行った新しい実験データを加え主張を明確にした。

図3 試験体形状及び配筋

図4 载荷装置

図5 計測装置

図6 荷履歴

表1 使用鉄筋の材料特性

	Yield Strength	Tensile Strength	Young's Modulus
6φ	366	463	2.04×10^5
D10	361	509	2.02×10^5
D13	352	510	2.06×10^5
D16	402	559	2.02×10^5

(N/mm²)

図7 水平荷重 P-変形角 R 関係

3. RC梁部材の大変形繰返し荷重実験

図3に示す2種類の試験体Aと試験体Bを作成した。荷重装置を図4に、計測装置を図5に示す。試験体の形状および荷重条件は、大変形繰返し荷重時の複雑な破壊性状を明らかにするために、できるだけ簡単なものとした。使用鉄筋の材料特性を表1に、各試験体のコンクリート強度を図7中に示した。

試験体Aは曲げ破壊がせん断破壊に先行して起こるよう、せん断耐力が曲げ耐力の約2倍となるように設計してある。一方、試験体Bは試験体Aと比較し、主筋量を多くし、かつ、せん断補強筋量を少なくすることによりせん断耐力を曲げ耐力に近づけ、曲げ降伏直後にせん断補強筋の降伏によるせん断破壊が発生するよう設計した。

試験体Aには図6に示すように、単調荷重および3種の異なる荷履歴の繰返し荷重実験を行った。これら試験体名をそれぞれ、試験体 Am, A1, A2, A3 と呼ぶことにする。この実験の目的は正負繰返し荷重を受ける試験体A、すなわち、試験体 A2, A3 の破壊メカニズムを明らかにすることである。これら2体の試験体はほぼ同じような破壊性状を示したことから、以下の考察では主に試験体 A2 の破壊挙動に基づき行うこととした。一方、試験体Bは比較の目的

図8 正負繰返し荷重を受ける試験体Aの

典型的な横補強筋 ST1 のひずみ

で作成されたものであり、試験体 A2 と同じ荷履歴の繰返し荷重を行った。

実験の結果得られた荷重P—変形角R関係を図7に示した。なお、荷重Pと変形角Rの定義は図4中に示してある。図7(1)から明らかに、試験体Aは単調荷重時には非常に大きな変形能力を有しているが、正負繰返し荷重を受けた場合、同図(3)(4)の▼に示すように曲げ降伏後のせん断破壊による急激な耐力低下が発生しており、明らかに単調荷重時と比較し変形能力が低下していることが分かる。なお、単調荷重時の加力終了は荷重装置のストロークの限界

図9 回転角 θ と水平変位D 図10 せん断破壊によって引き起こされる
 θ -D関係の傾きの低下

図11 単調載荷時の変形挙動

図12 正負繰返し載荷下の変形挙動 (試験体A2)

図13 一方繰返し載荷時の
変形挙動 (試験体A1)

で決まったものであり、少なくともこれ以上の変形能力を単調載荷時に試験体Aは有している。

図7(2)は逆方向載荷なしの一方への繰返し載荷を行ったものである。やはり、載荷装置のストロークの限界のために実験は打ちきられたが、多くの繰返し回数にもかかわらず、単調載荷時と変わらない大きな変形性能を示していることが分かる。このことから、試験体A2,A3に見られた変形能力の低下が逆方向載荷を行ったことと密接に関係していることが推察される。

図8は正負繰返し載荷を受けた試験体A2,A3における横補強筋のひずみの典型的な増加挙動を示している。このひずみは、損傷の集中したヒンジ領域に配筋されていた横補強筋ST1(図17参照)で観測されたものである。図8から、ヒンジ領域の激しい損傷にもかかわらず横補強筋のひずみは小さく抑えられており、明らかに横補強筋の降伏は発生していないことが分かる。なお、後で述べるように横補強筋には図20に示すような、軸変形によるひずみだけでなく曲げ変形に起因するひずみも発生する。ひずみの計測は、この横補強筋の曲げ変形の影響を排除するため図5に示した横補強筋の位置の上下面にひずみゲージを貼り付けることによって行っている。

実験から得られた試験体Bの荷重P-変形角R関係を図7(5)に示した。曲げ降伏直後の第4サイクルに急激な耐力低下が発生していることが分かる。第4サイクルでは端部より15cmの位置の横補強筋ST1(図3(2)参照)に降伏が観察された。

4. 単調載荷時抵抗機構の

再形成不能により引き起こされる耐力低下

4.1 繰返し載荷時における単調載荷時抵抗機構の

一時的消滅と再形成

ヒンジ領域の破壊挙動を考察することを目的に、図9に示す点Oの回転角 θ と水平変位Dの計測を行った。線形な θ -D関係は曲げ変形成分とせん断変形成分の比率が一定に保たれていることを示し、図10に示すような θ -D関係における傾きの低下はヒンジ領域のせん断変形成分の増加を意味する。ヒンジ領域に形成されるせん断抵抗機構を直接観察することは難しい。ここではこの θ -D関係を通してヒンジ領域に形成されるせん断抵抗機構について考察することにした。

図11は単調載荷時の θ -D関係を示している。 $\theta \approx D/150$ で表されるほぼ直線の関係となっていることが分かる。このことは、 $\theta \approx D/150$ の関係を生じさせるせん断抵抗機構がヒンジ領域に形成されたことを意味しており、以下では、この抵抗機構を「単調載荷時抵抗機構」と呼ぶこととする。言い換えると、 θ -D関係において $\theta \approx D/150$ の関係が得られた場合、この「単調載荷時抵抗機構」が形成されていると考えることが出来る。

図12は正負繰返し載荷時における θ -D関係と対応するP-R関係を、耐力低下前の1サイクルについて抜き出したものである。この図から分かるように、 θ -D関係には $\theta \approx D/150$ の直線が現れており(図中の②→③、⑤→⑥)、正負繰返し載荷時においても「単調載荷時抵抗機構」の形成が確認できる。しかしながら、逆方向載荷直後の低荷重域(図中の①→②、④→⑤)では、 θ -D関係の傾きは低下し $\theta \approx D/150$ の関係が消滅してしまっている。この領域は、主筋に生じた引張残留ひずみが原因で載荷の方向を変えた直後に両載荷方向のひび割れが一時的に同時に開き、せん断剛性が低下することによって生じるものであり、一般に「スリップ域」として知られている。すなわち、「単調載荷時抵抗機構」は、載荷の方向が変わることによるひび割れ開閉により、一時的消滅と再形成を繰り返す

図 14 荷重過程における変形挙動 (試験体 A2)

図 15 荷重過程における変形挙動 (試験体 A3)

ていると見ることができる (図 2 ①→②→③)。

図 13 は一方向への繰り返し荷重を行った試験体 A1 の θ -D 関係である。この図から分かるように、試験体 A1 の θ -D 関係はほぼ $\theta \approx D/150$ の線形関係となっており、単調荷重時抵抗機構の一時的消滅は起こっていないことが分かる。試験体 A1 では逆方向荷重を行わないため、スリップ域の発生はなく、このことが「単調荷重時抵抗機構」の消滅が発生しなかった理由であると考えられる。

4.2 単調荷重時抵抗機構の再形成不能により引き起こされる耐力低下

図 14 と 15 は、正負繰り返し荷重を受けた試験体 A2 と A3 の、荷重過程における θ -D 関係と対応する P-R 関係を示したものである。耐力低下前 (▼の前) では、各サイクルのピークにおいて $\theta \approx D/150$ の関係が見られ、単調荷重時抵抗機構が形成されていることが分かる。しかしながら、耐力低下発生後 (▼の後) は、各ピーク付近において $\theta \approx D/150$ の関係が消滅してしまっており、単調荷重時抵抗機構は形成されなくなっていることが出来る。

図 16 には試験体 B における横補強筋の降伏した第 4 サイクルと続く第 5 サイクルの θ -D 関係と対応する P-R 関係が示されている。図 16(1) に示した θ -D 関係のピーク付近では、せん断変形成分の増加を示す、図 10 に示すような傾きの低下が明確に現れている。作用せん断力によってせん断抵抗機構が破壊した場合 (図 2 ③→⑥)、せん断剛性の低下が発生し、このような傾きの低下が荷重ピーク付近におい

て必ず観測されるはずである。

これに対して、図 14(1)、15(1) に示した試験体 A2 と A3 の θ -D 関係の耐力低下発生後 (▼の後) の一本一本の曲線のピーク付近では、図 10 に示した荷重過程における傾きの低下が見られない。特に試験体 A3 では、耐力低下後の一本一本の曲線の傾きはむしろ増加の傾向にあり、各荷重の過程ではせん断変形成分は減少傾向にあるといえる。

図 16 荷重過程における変形挙動 (試験体 B)

図 17 横方向ひずみ ϵ_t

図 18 軸方向ひずみ

図 20 横補強筋の「軸降伏変形」と「曲げ変形」による横方向ひずみの増加

図 21 試験体 A2 における横方向ひずみ ϵ_t の増加挙動

つまり、試験体 A2、A3 の耐力低下は、せん断抵抗機構が作用せん断力によって破壊した（図 2③→⑥）ために発生したのではなく、載荷の方向を変えたことによって一時的に消滅した単調載荷時抵抗機構が、再形成されないため（図 2②→⑤）に発生したと考えることができる。

5. 単調載荷時抵抗機構の再形成時に発生するエラー

繰り返し載荷時には、両載荷方向のひび割れが交差して起こりひび割れ面の噛み合いが劣化することにより残留ひび割れ幅を生じたり、主筋の引張残留ひずみが断面内の全主筋に発生するなど、単調載荷時と異なる塑性残留ひずみがヒンジ領域には発生する。このようなことを考えると、単調載荷時抵抗機構と繰り返し載荷時に再形成された抵抗機構は完全に同じものとはならず、少しずつ繰り返し載荷の度に両者が異なってくることは十分考えられることである。ここでは、繰り返し載荷時に再形成された抵抗機構と単調載荷時の抵抗機構との差を再形成エラーと呼ぶことにする。再形成時には多少なりとも再形成エラーが発生し、これが蓄積されることにより再形成の不能が引き起こされることは十分考えられることである。再形成エラーは次の特徴を有しているはずである。

- ① 単調載荷時にはほとんど存在しないか、あるいは小さく抑えられている。

図 19 横方向ひずみ ϵ_t の増加挙動 図 22 スリップ域（一時的消滅域）に発生するせん断変形量 Dd 図 23 スリップ域（一時的消滅域）のせん断変形 Dd が 3 次元変形挙動となることによって引き起こされる横方向ひずみ ϵ_t

② しかしながら、正負繰り返し載荷時には、単調載荷時抵抗機構が再形成される過程において増加し、再形成の度に蓄積される。
③ 再形成不能が起こる耐力低下発生時には、急激な増加を示す。
ここでは、試験体 A における再形成エラーとは具体的に何であるのかを明らかにすることにより、前章で述べた再形成不能によって引き起こされる破壊モードの本質について考えることにする。

ヒンジ領域の破壊挙動を明らかにする目的で、図 5 に示した計測器機を用いて図 17 及び図 18 に定義した横方向ひずみと軸方向ひずみの計測を行った。横方向ひずみは、図 17 に示す試験体の端部に配された横補強筋 ST1 と ST2 において計測を行った。これらは、図から分かるように、損傷の集中したヒンジ領域のほぼ中心に位置し、もっとも大きな損傷を受けたと思われる横補強筋である。なお、計測の結果、ST1 の横方向ひずみの値は、ST2 の値と比較し、同じか多少大き目の値となっており、以下では横補強筋 ST1 の値を用いて考察を進めることとした。

ヒンジ領域の破壊メカニズムを考察する上で、コアコンクリートの変形挙動を明らかにすることは重要である。しかしながら、ひび割れを伴う激しい損傷のために、これを直接計測することは非常に困難である。このようなことから本研究では、これら 2 つのひずみ（横方向ひずみと軸方向ひずみ）を通して間接的に、コアコンクリ

ートの変形挙動を考察することとした。

図 19 は横方向ひずみ ε_t を単調載荷時と正負繰返し載荷時と比較したものである。横方向ひずみは図 20 に示すように、横補強筋の軸降伏変形によるものと曲げ変形によるものから成っている。既に述べたように、試験体 A では横補強筋の軸降伏は発生しておらず、横方向ひずみのほとんどは横補強筋の曲げ変形によるものと考えられる。実際、実験終了時の横補強筋には、図 20 に示した横補強筋の曲げ変形がはっきり確認された。

図 19 から分かるように、正負繰返し載荷を受けた試験体の横方向ひずみは、単調載荷時のものと比較し大きく増加する傾向にあり、とりわけ耐力低下発生時には急激な増加挙動を示している。単調載荷を受けた試験体の横方向ひずみは徐々に増加するものの、大きな変形角となった後も急激な増加を示すことはなく、正負繰返し載荷を受けたものと比較してかなり小さく抑えられている。

横補強筋の降伏のない試験体 A と、降伏した試験体 B の横方向ひずみの増加挙動をそれぞれ、図 21(1) と図 16(3) に示した。図 21(2) と図 16(2) はそれぞれ、対応する荷重・変形角関係である。図 16(3) から、横補強筋の降伏した試験体 B では荷重が増加するにつれて横方向ひずみの増加勾配は大きくなっていることが分かる (図 16(3) ②③、⑤⑥)。このことは、試験体 B の横方向ひずみの増加が荷重増によるせん断抵抗機構の破壊 (横補強筋の降伏) によって引き起こされたことを考えると当然のことと思われる。

これに対して、図 21(1) から分かるように試験体 A では、逆方向載荷直後の低荷重域であるスリップ域 (図 21(1) ①②、④⑤) において大きく増加し、その後、荷重が大きくなるにつれて増加が抑えられてしまっている (図 21(1) ②③、⑤⑥) ことが分かる。最大値の更新もこのスリップ域の増加によってなされており、横方向ひずみの増加がスリップ域で起こっていることは疑う余地がない。試験体 A における横方向ひずみの増加挙動は試験体 B のものとは全く異なっており、試験体 A の横方向ひずみは試験体 B のような単なるせん断抵抗機構の破壊によって生じたものではないことは明白である。

先に述べたように、スリップ域は単調載荷時抵抗機構が一時的に消滅し、再形成される領域である。以上の考察から横方向ひずみは先に述べた再形成エラーの 3 つの特徴を有していると考えることが出来る。

すなわち、横方向ひずみは、単調載荷時抵抗機構の再形成時に発生する一種のエラーであると考えることができ、これが大きくなることにより徐々に再形成を困難にし、ついには再形成不能を引き起こしたと推察される。

6. 再形成エラーの増加メカニズム

前章までに述べた破壊のメカニズムを理解するためには、再形成エラーの増加挙動を明らかにすることが必要である。本章では、再形成エラーである、横方向ひずみの増加挙動について詳しく考察を行う。

前章で述べたように、試験体 B の横方向ひずみは高荷重領域 (図 16(3) ②③、⑤⑥) において増加するのに対して、試験体 A の横方向ひずみは載荷の方向を変えた直後の低荷重域 (スリップ域) で発生している (図 21(1) ①②、④⑤)。図 20 に示したように横方向ひずみは、横補強筋の軸降伏によるひずみと横補強筋の曲げ変形によるものから成っている。試験体 B には横補強筋の降伏が観察されており、試験体 B の横方向ひずみは主に、横補強筋の軸降伏によって生じたと考えられる。これに対して、先に述べたように、試験体 A では横補強筋の降伏は観察されておらず (図 8 参照)、試験体 A のスリップ域で発生する横方向ひずみは主に、横補強筋の曲げ変形によって引き起こされたと考えられる。

スリップ域は、載荷の方向を変えたことによるひび割れの開閉によってせん断抵抗機構が消滅し、一時的に非常に大きなせん断変形が生じている領域である。実際、 θ —D 関係の 1 サイクルを抜き出した図 22 からはスリップ域 (一時的消滅域) において Dd で示される量の単調載荷時直線 ($\theta \approx D/150$) の水平シフト (せん断変形) が発生していることが確認出来る。上に述べた試験体 A の、スリップ域における横補強筋の曲げ変形 (図 20 参照) に起因する横方向ひずみの増加は、スリップ域で生じているせん断変形 Dd が図 23 に示す 3 次元的なものであったと考えれば説明できる。部材内のせん断ひび割れの進展は、3 次元的なものであることが市之瀬らの研究^{9,10)}によって実験的にまた解析的に明らかにされており、スリップ域における、極度にせん断剛性の低下したヒンジ領域のせん断変形挙動が 2 次元的なものでないことは十分考えられることである。

図 24 は、横方向ひずみの各サイクルにおける増分 $\Delta \varepsilon_t$ と図 22 で定義された Dd の関係を示している。この図から、横方向ひずみは、 Dd が大きくなるほど大きく増加し、ある程度の値に Dd が達すると非常に急激な増加挙動を示すことが見て取れる。 Dd が大きくなることは、スリップ域におけるヒンジ領域のせん断剛性低下が大きくなることを意味し、図 23 に示した 3 次元的なせん断変形挙動を誘発しやすくなることを示している。図 24 に示した Dd の増加に伴う横方向ひずみ増分の増加は、図 23 に示した横方向ひずみの増加メカニズムを裏付けるものである。

図 24 Dd の増加に伴う横方向ひずみ ε_t の増加

図 25 体積ひずみ ε_v に伴う Dd の増加

図 26 体積ひずみ $\varepsilon_v (= \varepsilon_t + \varepsilon_a)$

Dd はせん断抵抗機構が一時的に消滅したために発生するせん断変形量であり、この大きさは一時的消滅域の大きさ、および、消滅時のせん断剛性の低下度を表すものと考えることができる。そして、横方向ひずみは、このDd の増加（一時的消滅域の拡大）によって引き起こされることを述べた。次に、Dd の増加が何によって引き起こされるのかについて考えることにする。

図25はDdとヒンジ領域の体積ひずみ ϵ_v の関係を示したものである。なお、体積ひずみ ϵ_v は、図17と図18に定義されている横方向ひずみ ϵ_t と軸方向ひずみ ϵ_a の和である。図25から、Ddは体積ひずみにほぼ比例して増加していることが分かる。

体積ひずみの増加はヒンジ領域が膨張していることを示しており、この増加は主に、主筋の引張残留ひずみによる残留曲げひび割れ幅の増加や、図20に示す横補強筋の曲げ変形に起因する残留せん断ひび割れ幅の増加によって引き起こされると考えられる。体積ひずみの増加、すなわち、残留ひび割れ幅の増加は、ひび割れ面の骨材インターロッキング効果を低下させ、一時的消滅後の単調載荷時抵抗機構の再形成を困難にし、一時的消滅域（スリップ域）の拡大、すなわち、Ddの増加を引き起こしたと考えられる。

以上のことをまとめると次のようになる。

- ①横方向ひずみの増加量は、一時的消滅域（スリップ域）のせん断変形量Dd）が大きくなるほど大きくなる。
- ②Dd の増加（一時的消滅域の拡大）は、ヒンジ領域の体積ひずみ（横方向ひずみ+軸方向ひずみ）の増加によって引き起こされる。

7. 再形成エラーが引き起こす耐力低下のメカニズム

ここでは、再形成エラーの増加メカニズムとこれが耐力低下を引き起こすメカニズムについて考察を行う。

図26は体積ひずみに占める横方向ひずみと軸方向ひずみの割合を、サイクル数を横軸に取り示したものである。初期の体積ひずみの値は主に、軸方向ひずみにより与えられているが、徐々に横方向ひずみの増加が顕著となり、耐力低下の発生する第12サイクルでは、軸方向ひずみの増加が停止し、体積ひずみの増加は全て横方向ひずみによって与えられていることが確認できる。

この体積ひずみの増加挙動と前章の2つの考察を考え合わせると

図28 Dd と ϵ_t の増加挙動の比較 図29 スリップ域の拡大により発生する耐力低下

- ①初期のDdは主に軸方向ひずみによって引き起こされる。
- ②発生したDdは横方向ひずみを発生させ、この横方向ひずみがDdを発生させる。
- ③耐力低下発生時は、軸方向ひずみによるDdの発生はなくなり、Ddの増加は横方向ひずみによってのみ引き起こされる。

軸方向ひずみは、主に曲げ降伏による主筋の残留ひずみによって生じることを考えると、図27(1)に示す横方向ひずみの増加サイクルの存在が推察される。すなわち、まず最初に、曲げ降伏によって軸方向ひずみが発生し、これがDdを発生させる。Ddは横方向ひずみを発生させ、発生した横方向ひずみはDdを増加させる。これにより、Ddと横方向ひずみの間で増加サイクルが形成される。このDdと横方向ひずみの間の増加サイクルが繰り返されることにより、再形成時エラーである横方向ひずみは増加したと考えられる。図28はDdと横方向ひずみの増加挙動を横軸にサイクル数をとり比較したものである。この図からDdと横方向ひずみは同様の増加挙動を示しており、これらが図27(1)に示した増加サイクルによって生産されたことを示唆するものとなっている。

軸方向ひずみはこのDdと横方向ひずみの増加サイクルを活性化させる役割を負っていると考えられる。図26で考察したように、耐力低下時には軸方向ひずみの増加が停止しているにもかかわらず、横方向ひずみの増加が急激に発生している。このことから、図27(2)に示すように、軸方向ひずみによる活性化なしに増加サイクルが活動する、Ddと横方向ひずみの連鎖反動的な増加が進行することが、耐力低下の発生条件となっていることが推察される。

単調載荷時抵抗機構の一時的消滅は荷重変形関係上に、剛性が一時的に低下したスリップ域として現れることを述べた。一時的消滅後の再形成不能により引き起こされる耐力低下は、図29に示すようなスリップ域の異常拡大として荷重・変形関係上に現れる。この破壊の発生条件は、スリップ域の大きさ（Dd）が、図中に示した部材最大変形振幅Raよりも大きくなった時であると見ることもできる。

軸ひずみは曲げ塑性変形によってもたらされることから、軸ひずみの増加のためには部材最大変形振幅Raの増加が必ず必要となる。すなわち、図27(1)に示した軸ひずみの増加を必要とするDdの増加では、スリップ域の拡大（Ddの拡大）のために、部材最大変形振幅Raの拡大が必要ということになり、部材最大変形振幅Raに対するスリップ域の異常拡大は起こりにくい。しかしながら、図27(2)に示したような、軸ひずみの増加なしにDdの急激な増加が起こる状態というのは、つまり、最大変形振幅Raの増加がなくても、ス

リップ域が増加する状態を示しており、図 29 に示したスリップ域の異常拡大が始まる条件に達していることになる。

号、pp.161-168、2002.10

8)世界大百科事典（全 31 巻）、平凡社、1988

（2004年12月 8 日原稿受理、2005年 4 月12日採用決定）

8. まとめ

横補強筋が軸降伏することなしに曲げ降伏後のせん断破壊を起こすRC梁部材の大変形繰り返し載荷試験をもとに、次のような破壊性状が確認された。

(1)繰り返し載荷時のヒンジ領域には、単調載荷時の抵抗機構が載荷の方向を変えたことによるひび割れの開閉によって、一時的消滅と再形成を繰り返している。曲げ降伏後のせん断破壊がこの一時的消滅後の再形成不能により起こりうる。

(2)この再形成不能を引き起こすのは、再形成時に発生するエラーの蓄積である。この再形成エラーの蓄積は再形成を阻害し一時的消滅域の拡大を引き起こす。そして、拡大した消滅域はさらに多くの再形成エラーを発生させる（再形成エラーの増加サイクルの形成）。

(3)再形成エラーがある限界値を超えた時、一時的消滅域と再形成エラーの連鎖反応的な急激な増加が発生し、このことが再形成不能による急激な耐力低下を引き起こす。

(4)横補強筋の曲げ変形に起因する、ヒンジ領域の横方向ひずみ(図 20)は、再形成エラーの一種であり、最終的にこれの増加によって再形成不能による耐力低下が発生している。

(5)横方向ひずみは、逆方向載荷直後に発生する一時的消滅域（いわゆるスリップ域）において、図 23 に示すような3次元的なせん断変形挙動が生じることによって引き起こされる。

(6)部材の曲げ変形によって発生するヒンジ領域の軸方向ひずみは、上の(2)で述べた横方向ひずみ（再形成エラー）の増加サイクルを活性化する役目を果たしており(図 27(1))、特に初期の段階における横方向ひずみ増加に重要な役割を果たしている。

(7) この破壊モードは、軸方向ひずみによる活性化なしに横方向ひずみの増加サイクルが回転を始める(図 27(2))ことにより引き起こされると考えられる。この破壊の発生を定義するためには、再形成エラーの増加サイクル(図 27)をモデル化する必要があるがこれについては今後の課題としたい。

参考文献

- 1)衣笠秀行・野村設郎：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、第 5 巻第 2 号、pp.21-32、1994.7
- 2)衣笠秀行・野村設郎：正負繰り返し履歴破壊とせん断破壊の破壊メカニズムの相違の検証、コンクリート工学論文集、pp.85-97、1995.7
- 3)衣笠秀行・野村設郎：曲げ降伏後の大変形繰り返し載荷を受ける 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、第 538 号、pp.147-153、2000.12
- 4)李植允・渡邊史夫：繰り返し曲げせん断を受ける RC 梁の変形能力予測法、日本建築学会構造系論文集、第 520 号、pp.93-100、1999.6
- 5)伊藤朋・市之瀬敏勝：横補強筋が十分に強い RC 梁のせん断強度と立体破壊面、日本建築学会構造系論文集、第 526 号、pp.133-139、1999.12
- 6)半谷公司・市之瀬敏勝：立体破壊面を考慮した RC 梁のせん断強度、日本建築学会構造系論文集、第 467 号、pp.105-113、1995.1
- 7)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 梁部材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、第 560