

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656278

研究課題名(和文) RC部材の曲げ降伏後のせん断耐力劣化挙動の評価

研究課題名(英文) Evaluation of Shear Strength Degradation after Flexural Yielding of RC Member

研究代表者

中村 光 (NAKAMURA, HIKARU)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60242616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：繰返し荷重を受けるRC部材の曲げ降伏後のせん断破壊のメカニズム把握とせん断耐力低下の定量的な評価を実験および解析的に行った。

数値解析手法としては3次元剛体バネモデルを用い、曲げ降伏後のせん断破壊が適切に解析できることを確認した。次に曲げ降伏後のせん断耐力劣化曲線を求める方法を提案し、その有効性を既往の統計的に求めた経験式との比較から示した。提案した方法を用いて、帯鉄筋比・軸力・主鉄筋比の相違がせん断耐力劣化曲線に及ぼす影響を評価した。また、実験的にせん断耐力低下曲線を求める方法を提案し、その有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：The degradation process of shear strength after flexural yielding of RC member subjected to cyclic loading was evaluated numerically and experimentally.

Regarding numerical method, 3D Rigid Body Spring Model (3D RBSM) was used. Firstly, shear failure after flexural yielding of RC beam subjected to cyclic loading was simulated and applicability of 3D RBSM was confirmed. Then, a method which can evaluate the degradation process of shear strength after flexural yielding was proposed. It was shown that the strength degradation curve obtained by analysis shows similar behavior with the equation obtained by statistical procedure. Moreover, the effects of web reinforcement ratio, axial force and tensile reinforcement ratio on shear degradation curve were evaluated. On the other hand, a method to evaluate shear strength degradation experimentally was proposed and the effectiveness of the proposed method was confirmed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：せん断破壊 繰返し荷重 曲げ降伏 変形性能 耐震性能 せん断耐力劣化曲線

### 1. 研究開始当初の背景

阪神大震災や東日本大震災のように、設計時の設定を越える地震動がしばしば観測されている。コンクリート構造物は、このような過大な地震動に対しても、急激に破壊が生じないような構造とすることで、その安全性を担保する考え方が取られている。しかしながら、コンクリート部材では、曲げ降伏後の領域において繰り返し荷重をすると、急激に荷重が低下する「曲げ降伏後のせん断破壊」が生じる場合があることが知られている。静的荷重下では生じない破壊形態が、繰り返し荷重下で生じる理由としては、繰り返し荷重を受けることで塑性変形量に従ってせん断耐力が低下するとの説明が一般にされる。しかしながら、「なぜ低下するのか」というメカニズムは未だに明確にされておらず、「どの程度低下するか」という耐力低下の定量的な評価もされていないのが現状である。阪神大震災以降、曲げ降伏後のせん断破壊が生じないように、設計法は変更され、既設構造物では耐震補強もされてはいるが、いまだ多くの構造物で曲げ降伏後のせん断破壊が生じる可能性は残っていると考えられる。

以上の背景により、曲げ降伏後のせん断破壊挙動を精度よく評価可能にし、設計法に反映させることが、早急に望まれている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、曲げ降伏後のせん断破壊に対し、以下の2点を明らかにすることである。

- (1) 繰り返し荷重下で曲げ降伏後のせん断破壊が生じるメカニズムを数値解析により明らかにする。
- (2) 繰り返し荷重下で塑性変形量に従い低下するせん断耐力を定量的に評価する。

### 3. 研究の方法

本研究の方法は、大きくは以下の3つに分類される。

#### (1) RBSMによる曲げ降伏後のせん断破壊挙動の評価

申請者により開発されたコンクリートのような不連続体を解析する剛体バネモデル(RBSM)(図-1)を繰り返し荷重下に適用できるように拡張を行い、曲げ降伏後のせん断破壊が精度よく評価可能にするための検討を行う。

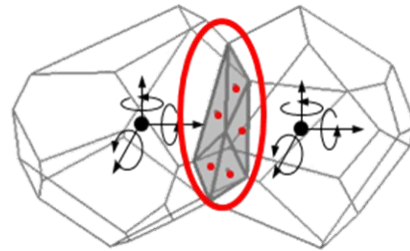


図-1 剛体バネモデル

#### (2) 数値解析手法による曲げ降伏後のせん断耐力評価

曲げ降伏後のせん断破壊が発生する理由は、曲げ耐力よりもせん断耐力が初期において高いが、曲げ降伏後に繰り返し荷重を受けることで、せん断耐力が低下するためと説明されている。曲げ降伏後のせん断破壊を定量的に評価するためには、せん断耐力の低下を定量的に評価する必要がある。しかしながら、実験においてはせん断破壊が生じることで始めて、せん断破壊荷重が曲げ破壊荷重よりも低下したということが分かるのみであり、破壊に至るまでのせん断耐力の低下の程度を明らかにすることは困難である。したがって、曲げ降伏後のせん断破壊を定量的に評価するためには、実験的に直接求めることができない、繰り返し荷重時におけるせん断耐力の低下を解析的に評価する方法を考案し、せん断耐力劣化曲線の算出を行う。

図-2 にせん断耐力の算出方法の概念図を示す。図中の黒線に示すような繰り返し荷重において、青線で示すせん断耐力の低下により、曲げ降伏後にせん断破壊するケースを考える。この場合、1サイクルした後のせん断耐

力は、荷重が曲げ耐力に対応する  $P_u$  までしか増加できないため、分からない。しかし、図に示すように、橙色のプロット点において、軸方向鉄筋の降伏強度を上げ、数値解析上の曲げ耐力を  $P_u$  からせん断耐力を上回る  $P_u'$  に変更し、赤線に示すように破壊に至るまで一方向静的荷重を行うことで、その時点でのせん断耐力を算出する。この方法は、せん断耐力に影響を与えない鉄筋の降伏強度を大きくすることで、せん断耐力より小さい曲げ耐力を、任意の変形時にせん断耐力以上にしてせん断破壊させ、その時点でのせん断耐力を求めようと試みるものであり、実験ではできない仮想状況を考慮可能な数値解析のメリットを活用した方法といえる。

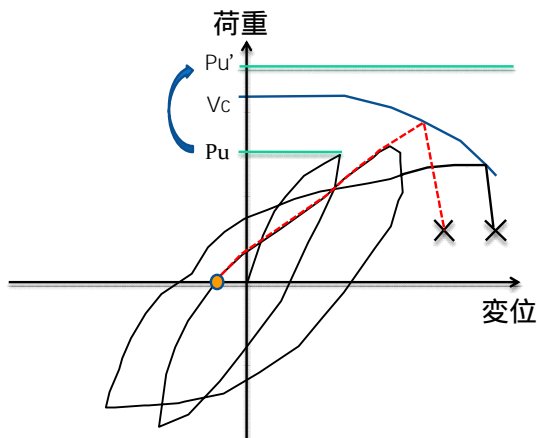


図-2 せん断耐力の算出方法 概念図

(3) 実験による曲げ降伏後のせん断耐力評価

実験による曲げ降伏後のせん断破壊の評価については、数値解析でのアイデアのように直接そのせん断耐力を求めることができないが、軸方向鉄筋位置にシースを配置しておき、繰返し載荷実験を行い、ある変位でシーす内に軸方向鉄筋を追加し、曲げ耐力を増加させて、せん断破壊実験を行うことで評価を行う。軸方向鉄筋量を変化させることでせん断耐力を変化させてしまうが、せん断耐力の低下は捉えられる可能性が高く、数値解析を補完的に用いることで、曲げ降伏後のせん

断耐力低下現象を実験的に捉えられる。

4. 研究成果

(1) RBSM による曲げ降伏後のせん断破壊挙動の評価

図-3 の諸元を持つ既往の実験供試体を、図-4 に示すようにボロノイ分割して解析を行った。供試体は示方書に基づいて設計されたものであり、比較的大型であることが特徴である。荷重変位関係の実験値と解析値の比較を図-5 に示す。解析値は実験値を非常に精度よく再現しており、曲げ降伏後の繰返し荷重下で急激に荷重が低下する時点の変位や荷重低下後の挙動もよく一致している。また、荷重変位関係では一方向載荷をした場合の結果も示しているが、荷重が低下せず曲げの挙動が支配的になることも示された。

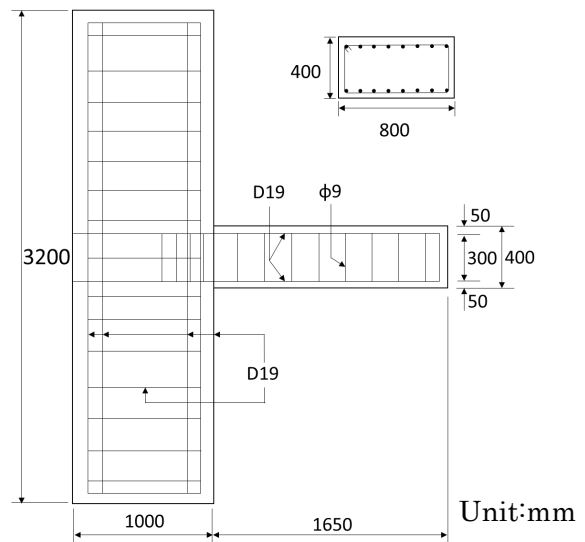


図-3 実験供試体概要

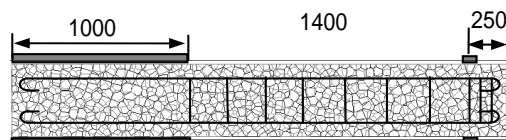


図-4 解析モデル

図-6 に 1 y 時と 3 y 時の変形図を示す。1 y 時では曲げひび割れが支配的な結果が

得られた。一方、3 y では斜めひび割れが発生し、せん断的な挙動が支配的なことが分かる。以上のように、申請者が開発した剛体バネモデルによるコンクリートの構造解析手法を、繰り返し荷重に拡張することで、曲げ降伏後繰り返し荷重下で生じるせん断破壊挙動に対し、荷重変位関係のみならずそのひび割れ性状まで精度よく再現できることを示された。

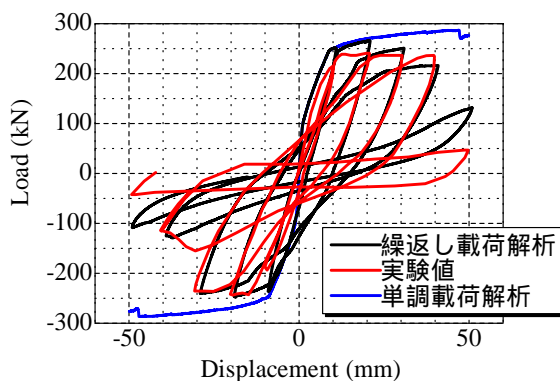
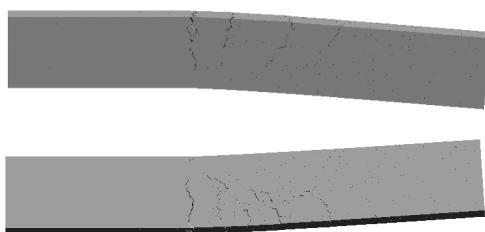
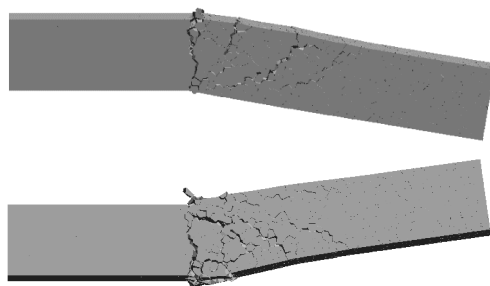


図-5 荷重 - 変位関係



(a) ±10 $\delta_y$ 時の変形図(上：正載荷，下：負載荷)



(b) ±30 $\delta_y$ 時の変形図(上：正載荷，下：負載荷)

図-6 変形図係

## (2) 数値解析手法による曲げ降伏後のせん断耐力評価

研究方法で示した、今回提案した曲げ降伏後のせん断耐力を求める手法を、剛体バネモ

デルにより検証した。解析は要素分割、材料特性値、境界条件は、(1)と同様のモデルとした。鉄筋の降伏強度の変更は、正側載荷時のせん断耐力を検討することを念頭に置き、負側の載荷において所定の変位に達した後に除荷し、荷重が0となった点で行った。なお、降伏強度は、初期値 365.5N/mm<sup>2</sup> から 900N/mm<sup>2</sup> へと変更した。

図-7 に解析により得られた荷重 - 変位関係の第一象限部を示す。なお、凡例は、各サイクル後に降伏強度  $f_y$  を上げたものを便宜上、「サイクル後」と示す。

図より、曲げ降伏後の繰り返し荷重を行った場合、変位の増加とともに、明らかにせん断抵抗が変化していくことが分かる。18 $\delta_y$ 後に降伏強度を増加させた場合のせん断耐力は、初期のせん断耐力に対して若干の低下がみられるものの、図-5 中の単調荷重解析結果の降伏荷重よりも大きいことが分かる。この結果、18 $\delta_y$ 後においてはせん断破壊は生じなかったものと考えられる。一方、36 $\delta_y$ 後に降伏強度を増加させた場合においては、せん断耐力の低下が著しく、曲げ降伏荷重に達する以前にせん断破壊が生じる結果となった。58 $\delta_y$ 以降においては、降伏強度を増加する如何にかかわらず、せん断破壊が生じる結果が得られている。

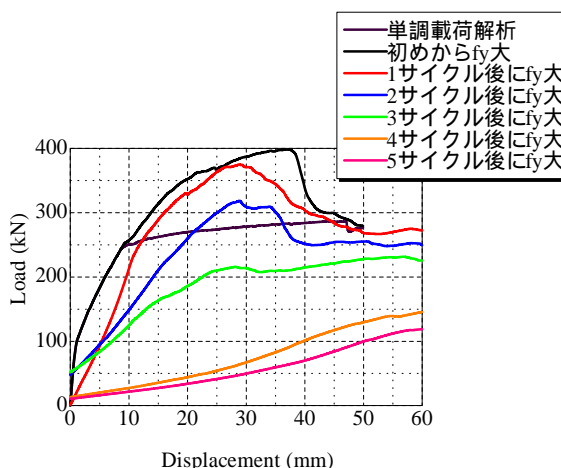


図-7  $f_y$  を変化したときの荷重変位関係

各サイクル後のせん断耐力を、図-7 に示す



荷重 - 変位関係中の最大荷重とし、この値から帯鉄筋の負担分  $V_s$  を引いたものを、その時点でのせん断耐力  $V_c$  と定義した。なお、帯鉄筋の負担分は、初期状態から軸方向鉄筋の  $f_y$  を大きくして単調解析した帯鉄筋有のものから帯鉄筋無のものを引いて求めたものである。各  $V_c$  を、損傷していないせん断耐力(初めから  $f_y$  を上げてせん断破壊させたもの)の値で除したものを低減係数  $\alpha$  とし、降伏強度を上げたサイクル数を便宜的に解析結果の靱性率とする。低減係数  $\alpha$  と靱性率  $\mu$  との関係を図-8 に示す。低減係数  $\alpha$  と靱性率との関係は既存の多数の実験結果を統計的に処理して得られた式が提案されており、それらも図中に示す。

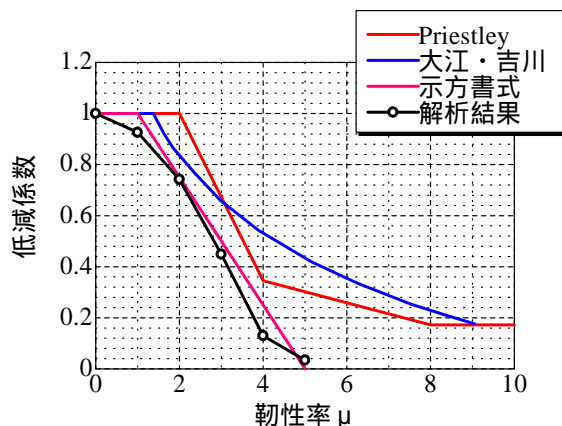


図-8 せん断耐力劣化曲線

提案式と解析結果を比較すると、靱性率増加に対して低下する傾向は、既往の提案式と概ね一致する結果を得た。既往の提案式は多数の実験結果を統計的に処理してせん断耐力の低減係数を推定したものだが、本解析で示した、直接せん断耐力を求めた結果と概ね一致する結果となった。

以上の結果から、提案した手法を用いれば、曲げ降伏後の繰返し荷重下でのせん断耐力の低下を定量的に評価できることが示された。したがって、本手法を用いれば、数値解析的に、せん断耐力の劣化曲線を定量的に評価できるようになると考えられる。

(3) 実験による曲げ降伏後のせん断耐力評価

RC はりを繰返し荷重後に曲げ降伏した後に、事前に設置しておいたシースに PC 鋼材を配置してせん断破壊させる実験のアイデアを検証した。

実験は、図-9 に示す諸元の RC はりに対し、無損傷ならびに 1 y, 2 y, 3 y, 4 y, 5 y までそれぞれ正負繰返し载荷を行って損傷を入れた 6 体に対して行った。

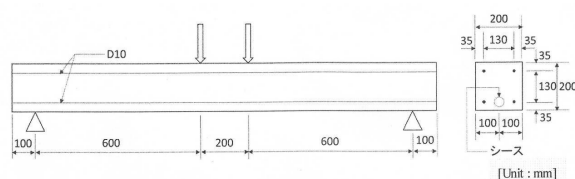


図-9 実験供試体の諸元

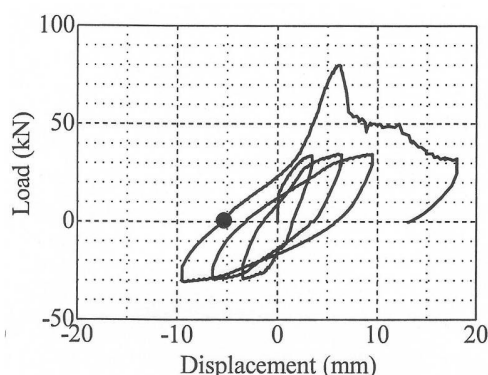


図-10 3 y 損傷供試体の荷重変位関係



図-11 3 y 損傷供試体の破壊状況

図-10 に 3 y まで損傷を入れたときの荷重変位関係を図-11 にその供試体の最終的な破壊状況を示す。荷重変位関係においては、3 y 損傷後に PC 鋼棒を追加することで明らかに耐荷力が向上する。また、破壊性状は、斜めひび割れが支配的であることが分かり、当初の予定通り、考案したアイデアによって曲げ降伏した供試体をせん断破壊モードに移行させることに成功した。ただし、斜めひび割れの位置は繰返し载荷で入った損傷領域

と異なっている。

図-12 に損傷段階を変えた全ての供試体のPC鋼棒追加後の荷重変位関係を示す。いずれも耐力が増加するとともに急激に荷重が低下する挙動を示した。破壊性状も図-11 で示したものと同一であり、全ての供試体でせん断破壊に移行させることに成功した。ただし、最大耐力はせん断破壊は損傷の違いにより大きく変化することはなかった。これはいずれの場合も斜めひび割れ発生位置が初期の損傷位置と異なってしまったためである。このように、考案した方法で曲げ降伏後の供試体をせん断破壊にさせることについては成功し、基本的なアイデアが間違いがなかったことが確認された。ただし、せん断耐力劣化挙動は、最終的な破壊位置の問題で実験的に再現できることができなかったため、供試体の再設計などの課題は残った。

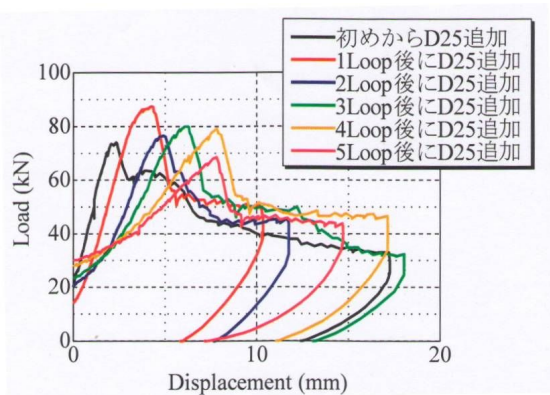


図-12 損傷供試体のせん断破壊挙動

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2件)

1. Yamamoto, Nakamura, Kuroda, Furuya : Crack propagation analysis of reinforced concrete wall under cyclic loading using RBSM, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2014.2
2. 古橋宏紀, 中村 光, 山本佳士, 国枝稔 :

曲げ降伏後に繰返し荷重を受けるRC部材におけるせん断耐力低下挙動の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.67-72, 2013

[学会発表](計 3件)

1. H.Furuhashi, H. Nakamura, Y. Yamamoto: Numerical Study on Shear Strength Degradation After Flexural Yielding of RC Member Subjected to Cyclic Loading, The Thirteenth East Asia- Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 2013
2. 古橋宏紀, 中村光, 国枝稔, 上田尚史: 繰返し荷重を受けるRC部材におけるせん断耐力低下挙動の数値解析的評価, 平成24年度土木学会次学術講演会, 2012

[図書](計 0件)

[産業財産権]

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

[その他]

ホームページ等

<http://concrete-lab.civil.nagoya-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

中村 光 (NAKAMURA HIKARU)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 6 0 2 4 2 6 1 6

### (2)研究分担者

上田 尚史 (UEDA NAOSHI)

関西大学・工学部・助教

研究者番号: 2 0 4 2 2 7 8 5

### (3)連携研究者 なし