

論文 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

古橋 宏紀*1・中村 光*2・山本 佳士*3・国枝 稔*4

要旨: 曲げ降伏後に繰返し荷重を受ける RC 部材のせん断耐力低下挙動の評価を数値解析的に試みた。数値解析手法としては、3次元剛体バネモデルを用い、まず、繰返し荷重を受ける RC 部材の曲げ降伏後せん断破壊の破壊進展挙動を再現した。次に、実験的に直接求めることのできない曲げ降伏後の繰返し荷重下のせん断耐力低下挙動を数値解析的に算出する方法を考案し、変形の増大に伴うせん断耐力の低下挙動を評価した。その結果、数値解析により得られたせん断耐力劣化曲線が、統計的に求められた既往の提案式と概ね一致し、同一の傾向となることが示された。

キーワード: 曲げ降伏後せん断破壊, せん断耐力劣化, 3次元剛体バネモデル(RBSM), 繰返し荷重

1. はじめに

コンクリート構造物は、兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震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にすることで、その安全性を担保する考え方が取られている。すなわち、兵庫県南部地震以降のコンクリート構造物の耐震設計の基本は、急激な荷重低下を生じるせん断破壊を起こさせないことであり、この基本概念により、過大な地震動が生じた場合も致命的な被害が生じないようにしている¹⁾。コンクリート部材では、一方向荷重する場合には曲げ破壊する部材を曲げ降伏後の領域において繰返し荷重をすると、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ことが知られている。特に、せん断スパン比が3~4程度の部材では、斜め引張型の破壊モードが生じ、そのような破壊モードを生じさせないことが重要である。

一方向荷重下では生じない破壊形態が、繰返し荷重下で生じる理由としては、図-1に示す荷重変位関係中の概念図のように、曲げ耐力よりもせん断耐力が初期においては高いが、曲げ降伏後に繰返し荷重を受け

ることで、低下するためと説明されている^{2),3)}。しかしながら、せん断耐力が「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、また、「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。

そこで本研究では、3次元剛体バネモデル(3-D RBSM)を用いて繰返し荷重を受ける RC 部材の曲げ降伏後せん断破壊を数値解析により再現し、実験では直接求めることのできない繰返し荷重下でのせん断耐力の低下挙動を、数値解析により求めることを試みた。

2. 解析手法

2.1 3次元剛体バネモデル(3-D RBSM)

本研究では、ボロノイ分割を用いたランダムな要素形状を有する3次元RBSM⁴⁾により解析を行った。本研究で用いたRBSMでは、図-2(a)に示すように、各要素内の任意点(本研究では要素重心)に6自由度の3次元剛体変位を設定し、要素境界面上には、表面力の評価点としての積分点を設定した。積分点は、境界面を境界面重心と境界面頂点からなる三角形に分割し、

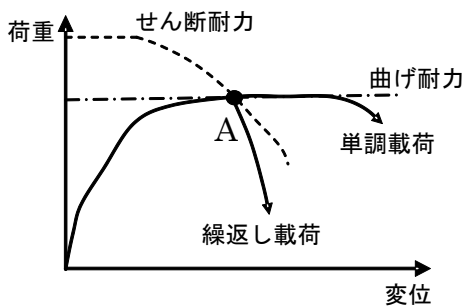
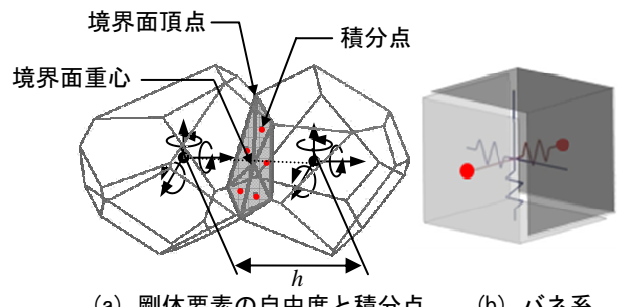


図-1 曲げ降伏後のせん断破壊



(a) 剛体要素の自由度と積分点 (b) バネ系

図-2 剛体要素

*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (学生会員)

*2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博(工) (正会員)

*3 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科助教 博(工) (正会員)

*4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻准教授 博(工) (正会員)

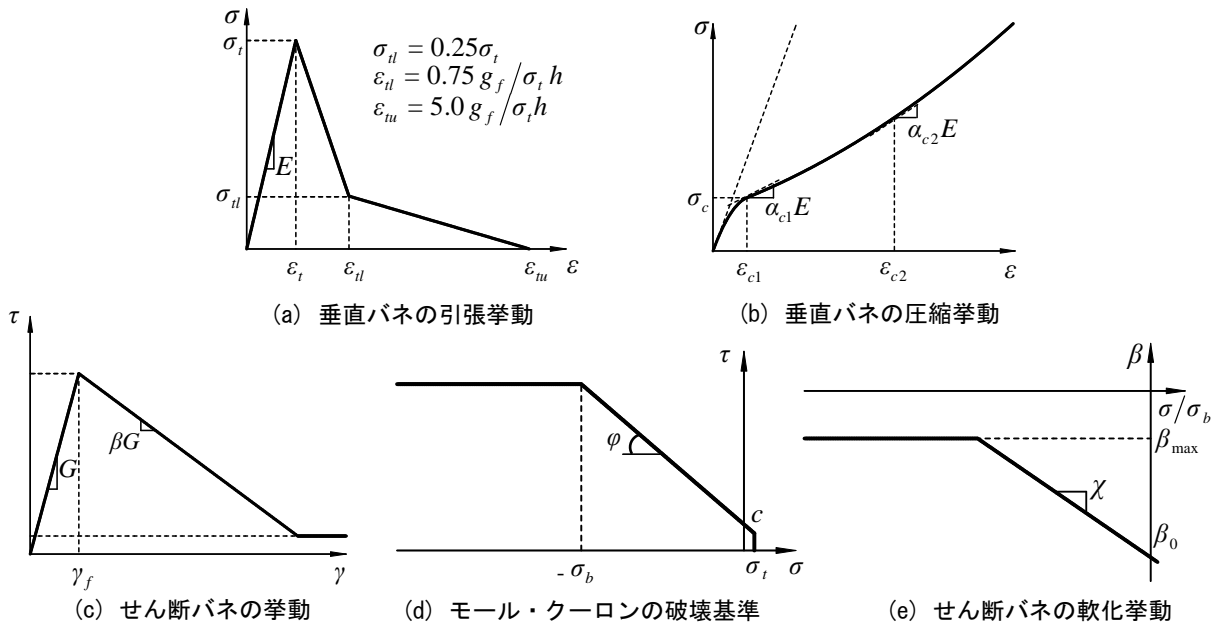


図-3 コンクリートの構成則

その三角形の重心に設定した。積分点には、境界面法線方向および接線方向に、垂直バネおよびせん断バネからなるバネ系を配置した（垂直バネが1個、せん断バネが2個）。図-2(b)にバネ系の配置を示す。

2.2 コンクリートの構成モデル

コンクリートの材料特性は、垂直バネに圧縮・引張挙動、せん断バネにせん断すべり挙動をモデル化することで表される。RBSMにおいて、バネのひずみは積分点において算出される隣接要素の相対変位を特性長さ h で除したものと定義される。

垂直バネの引張挙動は、図-3(a)に示すように1/4モデルでモデル化した。図において縦軸 σ は引張応力、横軸 ε は引張ひずみを表し、図中の σ_t は引張強度を表す。圧縮挙動は、図-3(b)に示すようにコンクリートの静水圧圧縮挙動を再現できるように、2つの2次関数を用いた逆S字曲線でモデル化した。図において縦軸 σ は圧縮応力、横軸 ε は圧縮ひずみを表す。

せん断バネは、図-3(c)に示すようなせん断応力-せん断ひずみ関係でモデル化した。図において縦軸 τ はせん断応力、横軸 γ はせん断ひずみを表している。

せん断強度は、図-3(d)に示すモール・クーロン型の破壊挙動で、せん断強度以降の軟化勾配係数 β は、図-3(e)に示す関係を用いた。本解析で用いた図中のパラメータを表-1に示す。表中の上付き*は、材料試験により得られる材料特性値であることを示しており、 E^* : ヤング係数、 f_t : 引張試験、 Gf^* : 破壊エネルギー、 f_c^* : 圧縮強度である。

図-4に垂直バネの正負交番荷時の履歴曲線を示す。引張域の除荷経路は、圧縮荷過程で応力 $\sigma = -0.02f_c^*$ となる点に向かうよう仮定し、再負荷の経路は、除荷し始めた点に向かうよう仮定した。圧縮域の除荷剛性は、初期剛性 E と同じとなるように仮定した。

次に、図-5にせん断バネの正負交番荷時の履歴曲線を示す。除荷剛性と再負荷時の剛性は、初期剛性 G と同じとなるように仮定した。加えて、除荷過程において応力が0に近づくとき、応力は、ひずみが異符号の残留ひずみに達するまで0を保つよう仮定した。この節において、パラメータの同定法やその他のパラメータに関しては参考文献⁴⁾⁵⁾を参照されたい。

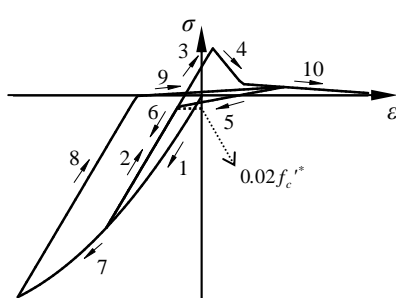


図-4 垂直バネの履歴曲線

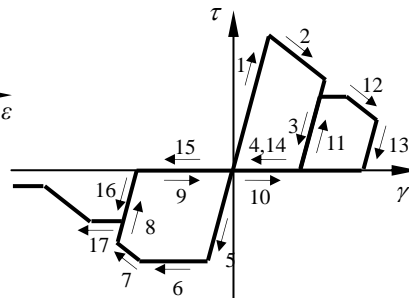


図-5 せん断バネの履歴曲線

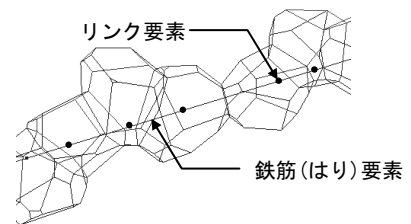


図-6 離散鉄筋モデル

表-1 材料パラメータ

ヤング率	垂直バネ						せん断バネ							
	引張領域		圧縮領域				弾性係数	破壊基準			軟化挙動			
E N/mm ²	σ_t N/mm ²	g_f N/mm ²	σ_c N/mm ²	ε_{c2}	α_{c1}	α_{c2}	G N/mm ²	c N/mm ²	φ degree	σ_b N/mm ²	β_0	β_{max}	χ	κ
$1.4E^*$	$0.8f_t$	$0.5G_f^*$	$1.5f_c^*$	-0.015	0.15	0.25	$0.35E$	$0.14f_c^*$	37	$0.65f_c^*$	-0.05	-0.02	-0.01	-0.3

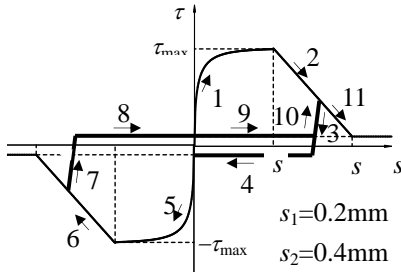


図-7 付着応力-すべり関係

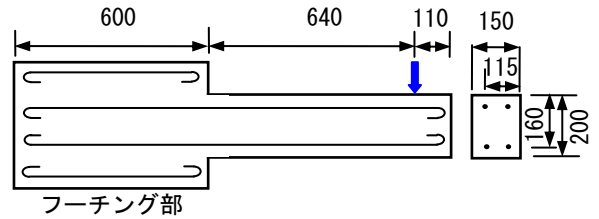


図-8 実験供試体概要

2.3 鉄筋の構成モデル

鉄筋の要素は、コンクリート要素と関係なく自由に設置したはり要素でモデル化した。図-6 に示すように鉄筋要素はコンクリート要素と長さ 0 であるリンク要素でつながっている。このリンク要素が、コンクリート要素と鉄筋要素間の荷重伝達を担う。鉄筋要素には、bilinear の構成則を適用した。降伏後の硬化係数は 1/100 とした。鉄筋軸方向リンク要素には、図-7 に示す付着応力-すべり関係を与えた。付着応力-すべり関係は、最大強度および最大強度以降の挙動を仮定した菅らが提案したモデル⁹⁾である。また、荷重履歴は図に示すとおりである。

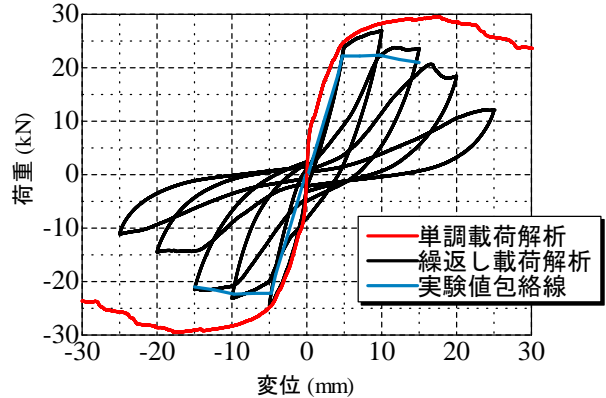


図-9 荷重-変位関係

3. 繰返し荷重を受け曲げ降伏後にせん断破壊する RC 部材の挙動評価

3.1 解析対象

本解析では、既往の繰返し荷重実験⁷⁾を対象とした。実験の供試体概要を図-8 に示す。図中の左側 600mm は非試験区間であり、以降フーチング部と記述する。供試体は断面 150×200mm、シアスパン 640mm であり、せん断スパン比は 4 で、主鉄筋は D13 を 2 本配筋している。曲げ耐力とせん断耐力の比である曲げせん断耐力比は 1.16 である。ここで、曲げ耐力とせん断耐力は土木学会コンクリート標準示方書¹⁾に従って算定した。図-9 に実験で得られた荷重-変位関係の包絡線を青線で示す。部材は、 δ_y ごとに各サイクル 10 回の繰返しを行って漸増荷重したものである。実験では、変位 20mm の $4\delta_y$ 荷重時に曲げ降伏後のせん断破壊により荷重が低下している。

3.2 解析モデル

解析モデルを図-10 に示す。コンクリート要素はボロノイ分割により、平均要素寸法は 20mm とした。解

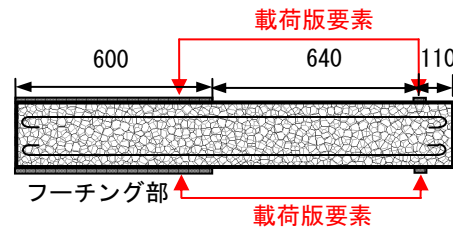


図-10 解析モデル

析モデルは、フーチング部も含めて一様の断面部材としてモデル化した。ただし、フーチング部には荷重板要素をモデル化して変形を拘束した。鉄筋は、はり要素により離散的にモデル化している。フーチング内の軸方向鉄筋の付着を考慮することで、伸出しも評価可能としている。コンクリートの材料定数は実験の圧縮強度 40.5N/mm²を用い、この圧縮強度からヤング係数を 31000N/mm²、引張強度を 2.7N/mm²、引張破壊エネルギーを 0.084N/mm と算定して用いた。鉄筋の材料定数は降伏強度を 380N/mm²とした。解析は、荷重板要素の変位を制御し、降伏変位 ($\delta_y=5.0$ mm) の整数倍毎に、正負 1 サイクルずつ交番荷重した。また、繰返し荷重解析と比較するため、単調荷重解析も行った。

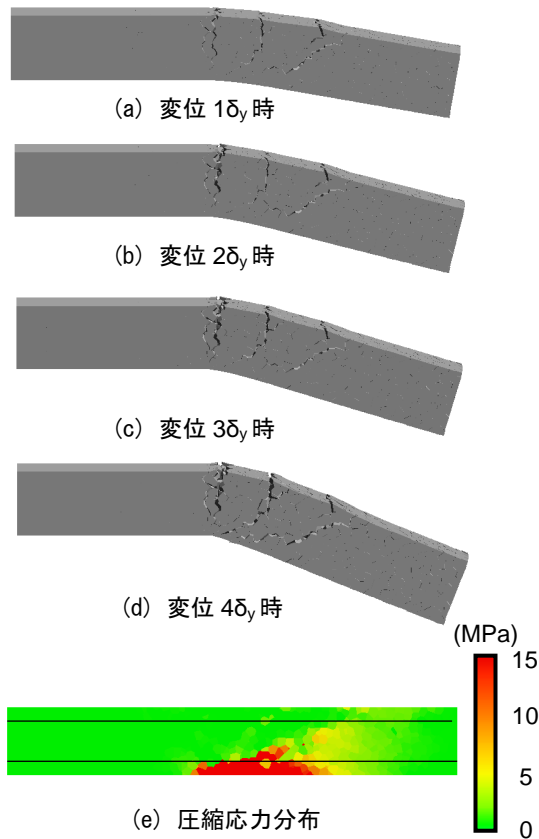


図-11 各変位における変形図
および変位 4 δ_y 時の応力分布

3.3 繰返し荷重を受け曲げ降伏後せん断破壊をする RC 部材の挙動評価

図-9 に解析で得られた荷重-変位関係を実験で得られた包絡線とともに示す。また、比較のために、単調荷重解析の結果を赤線で示す。

繰返し荷重解析の結果は変位が増大するとともに、荷重変位関係の形状が紡錘型から逆 S 字型に変わり、3 δ_y から 4 δ_y にいくサイクルで荷重が急激に低下する挙動を示し、実験と同様の傾向が得られた。単調荷重解析の結果と比較すると、繰返し荷重の影響により、荷重が低下していく結果となった。その差は、変位が増加するほど大きくなり、明らかに単調荷重とは異なる結果が得られた。

図-11 に単調荷重解析で得られた変形図と圧縮応力分布を示す。図より、降伏時の変位 1 δ_y の時点で離散的に発生した曲げひび割れが観察できる。その後の変位の増加に伴い曲げひび割れが進展・開口していき、終始曲げが支配的な挙動を示していることが分かる。また、変位 4 δ_y 時の圧縮応力分布からも、曲げにより圧縮部のコンクリートの応力が大きくなる典型的な曲げ挙動であることが分かる。

図-12 に繰返し荷重解析で得られた各 δ_y の時点での変形図を示す。また、図-13 に+4 δ_y 時の圧縮応力分

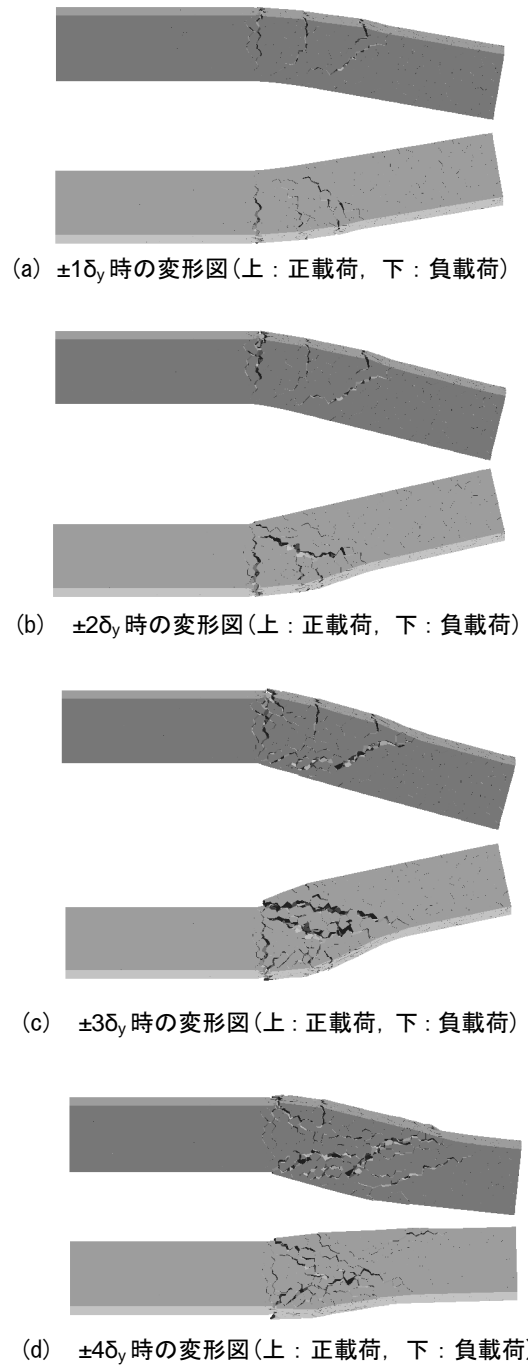


図-12 各 δ_y 時の変形図

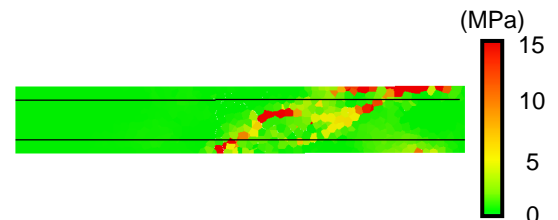


図-13 +4 δ_y 時の圧縮応力分布

布を示す。変形図より、1 δ_y 時では単調荷重と同様の曲げひび割れが発生していることが分かる。-2 δ_y において斜め方向のひび割れが生じていることが分かる。+3 δ_y においては、反対方向にも斜めひび割れが生じ、

X字状のひび割れ性状となっていることになる。X字状のひび割れ性状は、繰返し荷重による曲げ降伏後せん断破壊の特徴の一つである。その後の荷重では、曲げひび割れは拡大せず、斜めひび割れのみが進展し、 $\pm 4\delta_y$ においては、荷重点におけるたわみ角が小さくなり、変形の大部分がせん断変形に移行した様子がわかる。また、図-13の圧縮応力分布からは、単調荷重時と異なり、斜めひび割れに沿って圧縮応力が分布していることが分かり、このことから、明確にせん断破壊した結果、荷重が低下したといえる。

4. 曲げ降伏後繰返し荷重を受ける RC 部材のせん断耐力評価

4.1 曲げ降伏後のせん断耐力の評価方法

曲げ降伏後のせん断破壊が発生する理由は、1章で示した通り、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^{2),3)}。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せん断耐力の低下を求める方法を考案する必要がある。そこで、本研究では、繰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以下の方法を考案した。図-14にせん断耐力の算出方法の概念図を示す。

図-14中の黒線に示すような繰返し荷重において、青線に示すせん断耐力の低下により、曲げ降伏後にせ

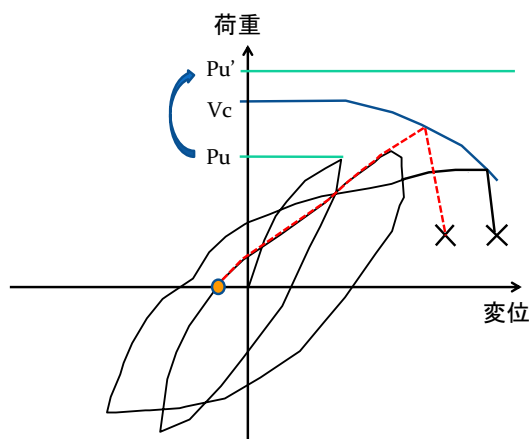


図-14 せん断耐力の算出方法 概念図

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、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手法を考案した。

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。

4.2 解析概要

3章で検討した実験⁷⁾を対象として数値解析を行った。要素分割、材料特性値、境界条件は、3章と同様のモデルとした。鉄筋の降伏強度の変更は、正側荷重時のせん断耐力を検討することを念頭に置き、負側の荷重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 380N/mm^2 から 900N/mm^2 へと変更した。

4.3 繰返し荷重を受ける RC 部材のせん断耐力評価

図-15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。 $1\delta_y$ 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-9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、 $1\delta_y$ 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。

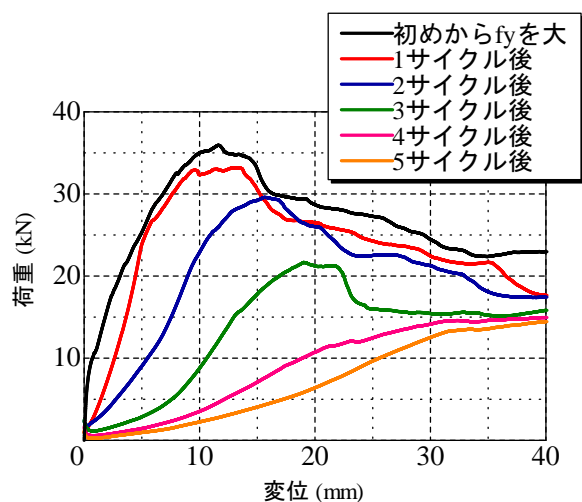


図-15 荷重-変位関係

一方、 $3\delta_y$ 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。 $3\delta_y$ 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。それらのせん断耐力は、3章で得られた荷重-変位関係の最大荷重と概ね一致した。

5. せん断耐力劣化曲線

5.1 解析結果

各サイクル後のせん断耐力を、図-15に示す荷重-変位関係中の最大荷重とし、その時のせん断耐力 V_c を求めた。この各 V_c を、損傷していないせん断耐力(はじめから 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 α 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 α と靱性率 μ との関係を図-16に示す。また、各数値を表-2に示す。低減係数 α 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^{2),3)}が提案されており、それらも図中に示す。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、せん断耐力の低下を定量的に評価できていると考えられ、今後数値解析的に、せん断耐力の劣化曲線を求めることの可能性が示された。

表-2 μ , V_c , α の値

μ	0	1	2	3	4	5
V_c (kN)	35.93	33.18	29.58	21.66	14.59	13.54
α	1.000	0.923	0.823	0.603	0.406	0.377

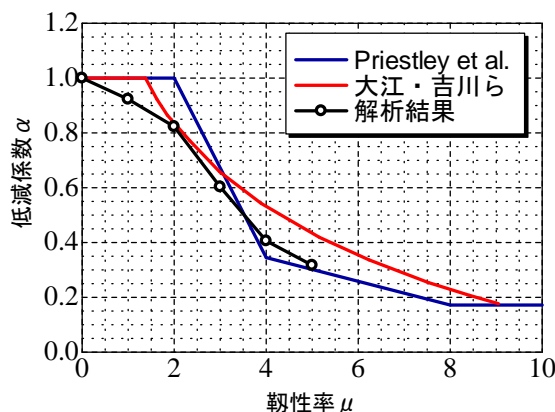


図-16 低減係数 α - 靱性率 μ 関係

6. 結論

本研究では、3次元剛体バネモデル (3-D RBSM) を用いて、RC 部材において、繰返し荷重下での曲げ降伏後のせん断破壊現象を検討し、以下の結論を得た。

- (1) 曲げ降伏後せん断破壊挙動を数値解析的に妥当に評価でき、本解析手法 (3D-RBSM) のこの破壊形式への適用性が示された。
- (2) 曲げ降伏後の繰返し荷重によって低下したせん断耐力を算出する手法として、繰返し載荷中にせん断耐力に影響しない鉄筋の降伏強度 f_y を仮想的に大きくして曲げ耐力のみを増加させ、数値解析によりせん断耐力を直接算出する手法を提案した。
- (3) 数値解析によりせん断耐力の低下挙動を定量的に評価した結果、既往の統計的処理により求められた提案式の傾向と概ね一致する結果が得られ、数値解析的にせん断耐力の劣化曲線を求めることの可能性を示した。

謝辞

本研究は、学術研究助成基金助成金「挑戦的萌芽研究 (課題番号 24656278)」(代表者: 中村 光) により実施したものである。ここに付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2007
- 2) 大江亮二, 吉川弘道: 繰返し大変形を受ける鉄筋コンクリート単柱のせん断強度劣化の評価に関する研究, 土木学会論文集, Vol.56, No.711, pp.59-71, 2002
- 3) Priestley, M. J. N., Seible, F. and Carvi, G. M. : Seismic Design of Retrofit of Bridges, A Wiley-Interscience Publication, 1996
- 4) 山本佳人, 中村光, 黒田一郎, 古屋信明: 3次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.4, pp.612-630, 2008
- 5) Yamamoto, Y., Nakamura, H., Kuroda, I. and Furuya, N. : Simulation of Crack Propagation in RC Shear Wall Using a 3D Rigid-Body-Spring Model with Random Geometry, FraMCoS-8, 2013
- 6) 菅満宣, 中村光, 檜貝勇, 齊藤成彦: RC はりの力学挙動に及ぼす付着特性の影響, コンクリート工学年次論文集 Vol.23, No.3, pp.295-300, 2001
- 7) 豊田和彦, 睦好宏史, 町田篤彦: RC 部材の終局変位定量化に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集 Vol.29, No.3, pp.805-810, 1985