

論文 せん断破壊を生じる RC はりおよび柱のエネルギー吸収と破壊プロセス

上田 尚史^{*1}・伊藤 睦^{*2}・中村 光^{*3}・田邊 忠顕^{*4}

要旨：RC 部材のポストピーク領域における破壊プロセスを探ることを目的として，せん断破壊を生じる RC はりおよび柱を対象とした数値解析を行い，エネルギー吸収量ならびに吸収領域について検証を行った。その結果，斜め引張破壊には，斜めひび割れの発生，ひび割れの進展に伴う主鉄筋に沿う領域の損傷というプロセスが存在することを明らかにした。また，各プロセスにおいて，部材のエネルギー解放量が吸収量を上回る場合があり，Snapback 挙動を示すことを確認した。さらに，軸力が作用する RC 部材の解析を行った結果，作用軸力が増加するに従いエネルギー吸収能が高くなり，Snapback 挙動が起こりにくくなることを確認した。

キーワード：せん断破壊，エネルギー吸収，破壊プロセス，Snapback，制御点選択型弧長法

1. はじめに

構造物の合理的な設計を行う場合，あるいは耐震性能を考える場合には，耐荷力はもとよりポストピーク挙動までをも評価する必要がある。特に，RC 部材のせん断破壊は，破壊が材料と構造の複合的な破壊であり，様々な要因が相互に影響を及ぼし合うとともに，破壊メカニズムが極めて不明確であるため，ポストピーク領域における挙動に対する明確な考えが確立されるには至っていないのが現状である。

近年，RC 部材のポストピーク挙動の実験的研究として，内田らはせん断破壊する RC はりのポストピーク挙動を計測することに成功している。実験は 4 体の同一のはりを用いたにも拘らず，それぞれの破壊モードが異なり，また，終局状態において RC 部材が Snapback 挙動を示したことが報告されている¹⁾。破壊時に Snapback 挙動を示すような構造物は，荷重の低下とともにエネルギーを解放し，構造物の運動エネルギーを増大させるため，極めて危険であり，十分な検証が必要である。Snapback 挙動は，実験的な観察が困難であるため，

解析的な評価が望まれるが，成功例はほとんど公表されていない。

RC 構造物は，部材のエネルギー吸収能がポストピーク挙動に対して直接影響を及ぼす。故に，部材のエネルギー吸収状態に注目することは，部材内部の力学的挙動，破壊の局所領域，耐荷機構など，構造物の終局挙動を予測するための重要な情報が得られ，非常に有益である。

本研究では，収斂過程に弧長法の一種である制御点選択型弧長法を用いることで，Snapback 挙動の評価を可能にする。さらには，一定荷重が作用するような状態，すなわち Non-Proportional loading 状態の解析を行うため，弧長法の拡張を行い，軸力が作用する RC 部材のせん断挙動を解析する。解析結果に基づいて，せん断破壊を生じる RC はりおよび柱のエネルギー吸収状態を評価することによって，破壊の局所領域，破壊プロセス，軸力の影響などを明らかにする。

2. 解析概要

解析は 2 次元アイソパラメトリック要素を用い

*1 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 助手 工博 (正会員)

*3 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 助教授 工博 (正会員)

*4 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 教授 工博 (正会員)

た有限要素法により行った。また、鉄筋はトラス要素でモデル化し、完全付着とした。RC 構成則には、名古屋大学で開発された格子等価連続体モデル²⁾を用いた。収斂過程には弧長法の一つである、制御点選択型弧長法を採用し、Non-Proportional loading 状態に対応できるように拡張した。以下にこれらの概要を述べる。

2.1 格子等価連続体モデル²⁾

格子等価連続体モデルは、不連続体である RC 要素の挙動を空間的に平均化したモデルである。RC 構成式は、コンクリートと補強筋による耐荷機構をモデル化した Main lattice 成分と、ひび割れ面におけるせん断伝達をモデル化した Shear lattice 成分を、ひび割れ面座標系に想定することにより構築される。各種一軸の応力 - ひずみ関係の組み合わせで構成され、簡便で収斂性の良いモデルである。詳細は文献 2)を参照されたい。

2.2 Non-Proportional loading の定式化

弧長法における支配方程式は増分形式で定式化されるため、Non-Proportional loading 状態の解析では増分ベクトルのみを弧長制御し、一定荷重ベクトルは以下のように考慮する必要がある。

柱などに作用する一定軸力などの外力ベクトルを $\{P_{ef}\}$ 、水平荷重などの載荷荷重ベクトルを $\{P_e\}$ とすると、荷重ベクトル $\{P_e\}$ は、

$$\{P_e\} = \{\overline{P_{ef}}\} + \lambda\{P_{ef}\} \quad (1)$$

で表すことができる。ここに、 λ は荷重レベルパラメーターである。故に、収束計算時における解

の収束方向は、次式を満たす方向となる。

$$\{R(\{d\}, \lambda)\} = \{\overline{P_{ef}}\} + \lambda\{P_{ef}\} - \{Q(\{d\})\} = 0 \quad (2)$$

ここに、 $\{R\}$ は不平衡力ベクトル、 $\{d\}$ は変位ベクトル、 $\{Q\}$ は内力ベクトルである。

3. Snapback を生じる RC はりの解析

Snapback 挙動を示す構造物は、エネルギーを解放しながら破壊するため、極めて危険である。それにも拘らず、Snapback 挙動を扱った研究は、これまでほとんど行われていない。

しかしながら、内田らが実験的に明らかにしたように、RC 部材は破壊時に Snapback 挙動を生じる可能性を内在している。本章では、Snapback を生じる RC はりの数値解析を行い、エネルギー吸収の視点から Snapback 挙動を評価する。

3.1 実験概要

解析の対象とする実験は、内田らにより行われた RC はりのせん断破壊試験¹⁾である。試験体寸法および配筋詳細を図 - 1 に、材料諸元を表 - 1 に示す。試験体はせん断補強筋を配筋したスパン ($a/d=1.7$) とせん断補強筋のないスパン ($a/d=2.9$) を有しており、後者のスパン(以下、対象スパン)を破壊させることを意図している。実験は、同一の試験体 4 体(S-1~S-4)に対して行われ、全て異なる結果が観察されている。文献 1)によれば、破壊モードはそれぞれ「せん断圧縮破壊」(S-1)、「曲げ降伏後のせん断破壊」(S-2)、「せん断圧縮破壊」(S-3)、「斜め

表 - 1 材料諸元

Concrete				Reinforcement			
f_c	f_t	G_f	E_c	f_y	E_s	Diameter	
[MPa]	[MPa]	[N/m]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	Axial	Stirrup
54	4	187	3.12×10^4	362	2.0×10^5	D16	D6

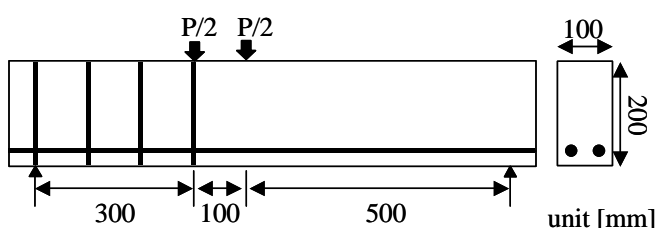


図 - 1 試験体寸法および配筋詳細

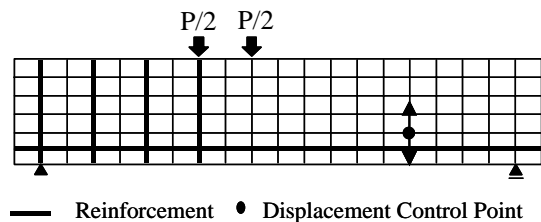


図 - 2 解析モデル

引張破壊」(S-4)であり、S-3、S-4 試験体において、Snapback 挙動が計測された。

3.2 解析モデル

解析に用いた要素分割を図 - 2 に示す。図中の印は、制御点選択型弧長法により制御した点である。この点を選択した理由は、予備解析において急激な増分変位を示す点であったからである。

3.3 解析結果

解析により予測された、荷重と載荷点中央の変位との関係を図 - 3 に示す。なお、図中には S-4 試験体の実験結果を併せて示している。本解析では、斜めひび割れの発生とともに、Snapback 挙動が予測され、最も耐力力の低い S-4 試験体と類似した傾向が得られた。また、最大荷重後から Snapback 挙動を示している間、荷重低下 50% 程度の領域において、最初の釣合点を得ることに成功しており、Snapback が 2 つのプロセスにより生じていることが確認できる。以下、ポストピーク領域におけるエネルギーの吸収量および吸収領域を示すことで

Snapback 時の破壊プロセスならびに耐荷機構を明らかにする。

3.4 エネルギー吸収量に基づく破壊プロセスの評価

ピーク荷重から中間の釣合点までの領域を Snapback-State1、釣合点から荷重がほぼ一定値となるまでの領域を Snapback-State2 とする。各領域におけるエネルギーの吸収量(エネルギー吸収量 - 変位関係)ならびに吸収領域を図 - 4、図 - 5 に示す。

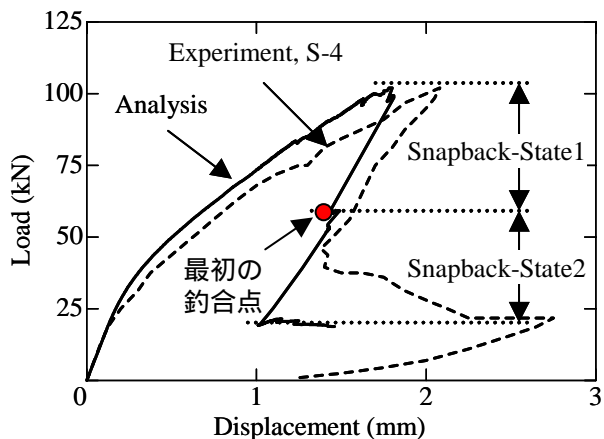


図 - 3 荷重 - 変位関係

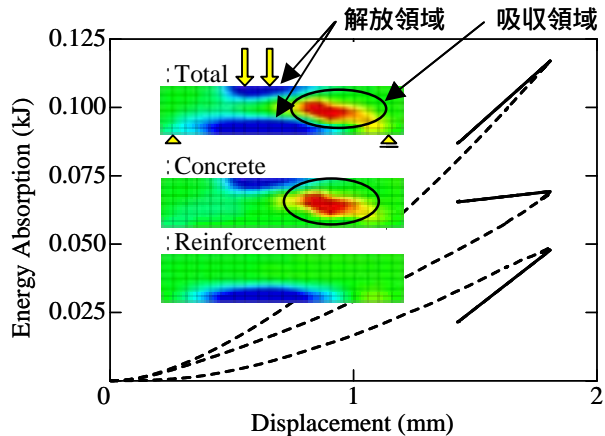


図 - 4 Snapback-State1 におけるエネルギー吸収

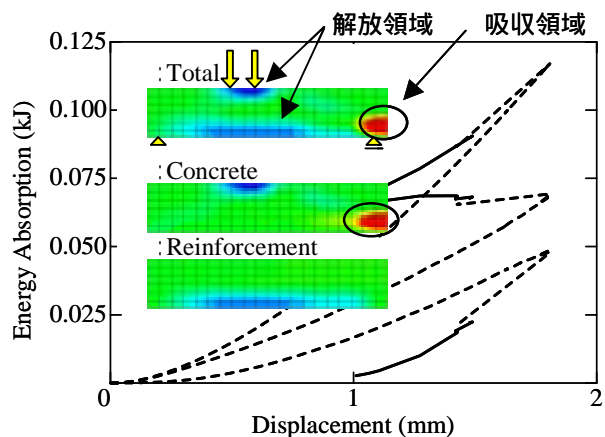
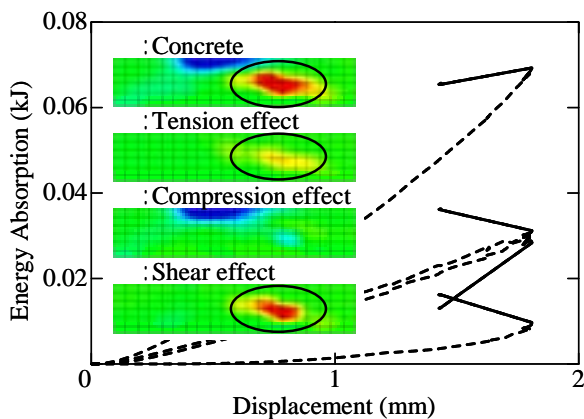


図 - 5 Snapback-State2 におけるエネルギー吸収

なお、エネルギー吸収量は各ガウス点ごとのひずみエネルギーを積分することで算出した。それぞれの図において左図は部材の全エネルギー吸収量、コンクリートの吸収量、鉄筋の吸収量を示し、右図はコンクリート内部の応力状態、すなわち圧縮、引張、せん断それぞれの作用によるエネルギー吸収量を示している。なお、図中の実線部は各領域に対応した吸収量であり、また、エネルギー吸収領域図は、色が濃くなるにつれて吸収量、解放量が大きいことを示し、吸収領域は丸で囲んである。

図 - 4 から Snapback-State1 では、エネルギーの吸収は対象スパンウェブ部に集中し、解放はコンクリートの圧縮領域およびスパン中央部の主鉄筋に集中している。コンクリート内部の状態は、圧縮耐荷機構はエネルギーを解放し、引張およびせん断耐荷機構は吸収している。以上から、破壊の局所領域は対象スパンウェブ部の斜めひび割れ進展位置であると予測できる。また、破壊にはせん断応力による作用が大きいことが確認できる。

同様の議論から Snapback-State2 ではエネルギー吸収は部材端部に集中しており、破壊の局所領域は主鉄筋に沿う領域であると予測できる。ここでも、せん断応力が大きく影響している。なお、エネルギー解放領域は Snapback-State1 と同様である。

Snapback-State1, 2 より、Snapback 挙動を示す斜め引張破壊には、破壊領域の違いによる 2 つの段階があることが解析的に予測された。各プロセスにおいて、エネルギーを吸収している領域は異なり、Snapback-State1 では対象スパンのウェブ部であり、Snapback-State2 では支点近傍の主鉄筋に沿う領域に集中している。このように、部材のエネルギー吸収状態を示すことは、破壊領域の推定と破壊進展の予測を行うことが容易となり、構造物のポストピーク挙動の評価と安全性評価、補強対策を行う上で、非常に有益な情報を得ることができる。

4. ポストピーク領域における軸力の影響評価

軸力を受ける RC はりは、作用軸力が斜めひび割れの発生に直接影響を及ぼすため、せん断耐力が

増加することは周知のことであるが、ポストピーク領域の耐荷機構を始めとする部材のエネルギー吸収能においても、軸力の影響を受けることが考えられる。

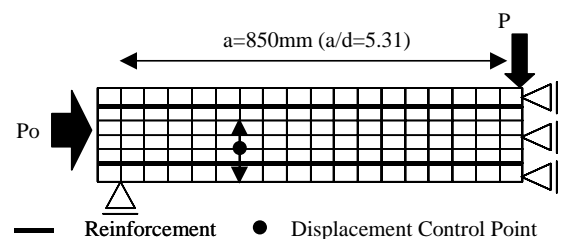
軸力を受ける RC 部材の研究として、山谷らの実験は、軸方向圧縮力とせん断スパン比をパラメータとして行われており、充実したデータがそろっている³⁾。しかしながら、山谷らの実験はせん断耐力についての検討が行われており、ポストピーク領域の挙動については議論されていない。本章では、軸方向圧縮力を受ける RC はりのポストピーク挙動を探ることを目的とし、山谷らの実験を対象とした数値解析を行う。また、解析によって予測されるせん断耐力を、デコンプレッションモーメント法によるせん断耐力と比較することで、解析の妥当性を示す。なお、デコンプレッションモーメント法には、コンクリート標準示方書の原式⁴⁾と山谷らの提案式³⁾を用いた。

4.1 解析対象

本解析では、山谷らの実験の試験体 No.1~No.4 を対象とした。解析モデルと材料諸元を図 - 6 に示す。解析は試験体の対称性を考慮に入れて 1/2 モデルで行った。なお、作用軸力は、0.0(MPa)、0.98(MPa)、2.45(MPa)および 4.90(MPa)である。

4.2 解析結果

解析により予測された荷重点の荷重 - 変位関係を図 - 7 に、せん断耐力の解析値とデコンプレッションモーメント法による計算値との比較を図 - 8 に、Snapback 挙動時のはりのエネルギー吸収領域を図 - 9 に示す。



コンクリート圧縮強度 : 30 MPa
 鉄筋ヤング率 : 178 GPa(引張), 180 GPa(圧縮)
 鉄筋降伏強度 : 395 MPa(引張), 376 MPa(圧縮)
 鉄筋比 : 3.17 %
 軸圧縮応力 : 0.0, 0.98, 2.45, 4.90 MPa

図 - 6 解析モデルおよび材料諸元

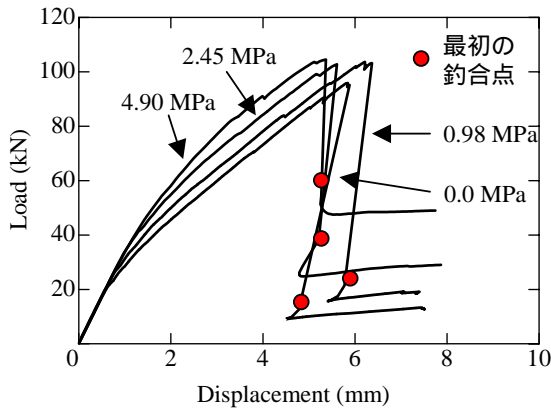


図 - 7 荷重 - 変位関係

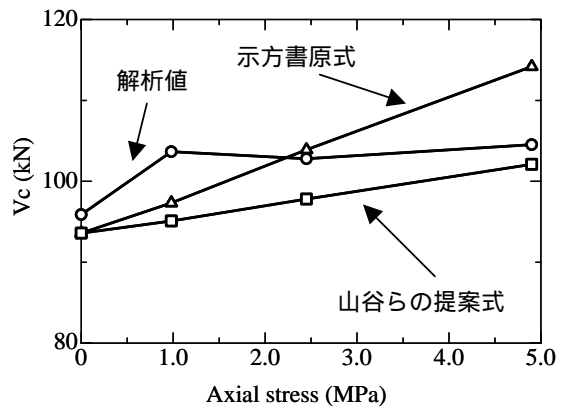


図 - 8 解析値と計算値の比較

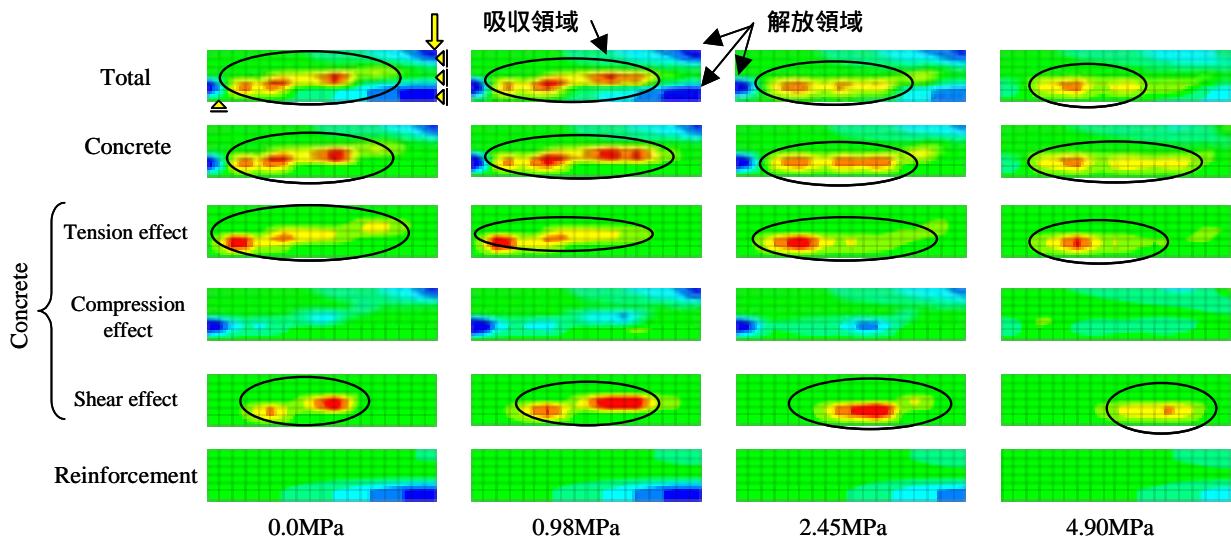


図 - 9 エネルギー吸収領域図

図 - 7 から、作用軸力は最大耐力のみならずポストピーク領域のエネルギー吸収能に影響を与えることが確認できる。すなわち、低軸力のはりでは Snapback 挙動を示すのに対し、軸力の増加に従い Snapback が生じにくくなる傾向がある。また、図 - 9 から Snapback 時には、斜めひび割れに伴うエネルギーの吸収と圧縮コンクリートと主鉄筋のエネルギー解放が確認できる。さらに、高軸力状態になるほど、エネルギーの吸収量、解放量とも少なくなる傾向があり、エネルギーの吸収量が少ないことから、部材の損傷が軽度であることが予測できる。これは、図 - 7 において荷重低下の割合が小さいことからいえる。なお、図 - 7 に Snapback 経路上で最大荷重後最初に得られた釣合点を示しているが、この釣合点を境として 3 章で示したような Snapback 挙動の 2 つのプロセスを確認している。

図 - 8 から、作用軸力 0.98MPa を除けばせん断耐力をある程度予測できているといえる。また、山谷らが指摘しているように、示方書原式が、軸圧縮力が大きくなる場合に危険側の耐力を与えるという傾向は、本解析でも示された。

なお、作用軸力 0.98MPa の場合は、耐力の増加量ならびに最大荷重時の変位が他の場合と比較して大きく予測されているが、この点に関しては、今後詳細な検討を行う必要があると考えている。

5. せん断破壊を生じる RC 柱の解析

高架橋や長大橋に代表されるように、RC 柱は構造物の要の部材である。仮に、RC 柱がせん断破壊を生じるようなことになった場合、Snapback 挙動のように破壊時にエネルギー解放するような破壊モードを示すようであれば、極めて危険である。

本章では、せん断破壊を生じる RC 柱を対象とし

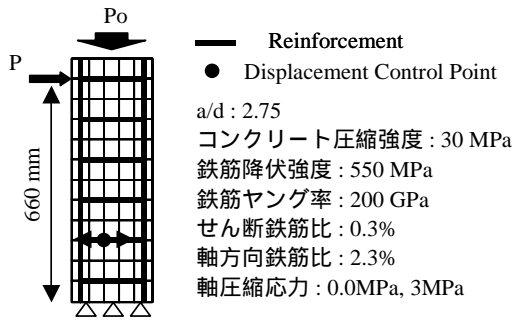


図 - 10 解析モデルおよび材料諸元

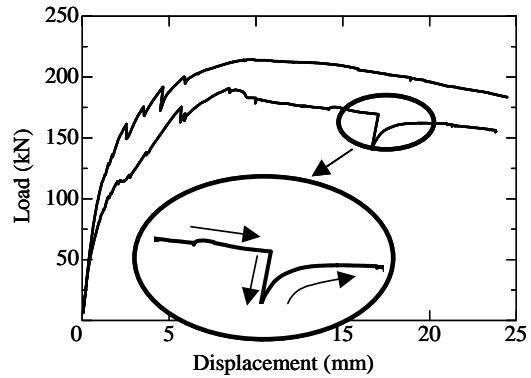


図 - 11 荷重 - 変位関係

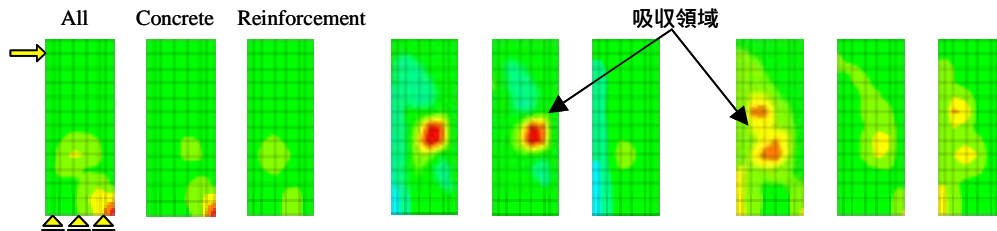


図 - 12 エネルギー吸収領域図

た解析を行い、Snapback 挙動の有無を確認する。解析には一般的な RC 柱を仮想し、Pushover 解析を行った(図 - 10)。なお、軸力の有無による挙動の違いを探るために、軸力を作用させる場合とさせない場合の、2つのケースについて解析を行った。

図 - 11 に解析により予測された荷重 - 変位関係を示す。全体的には、どちらも緩やかな軟化型の荷重 - 変位関係であったが、局所的な範囲で見ると、軸力の作用していない場合にはポストピーク領域において、わずかながら Snapback 挙動が確認できる。この前後のエネルギーの吸収状態を図 - 12 に示す。図中の数字は図 - 11 の数字に対応している。荷重の低下は斜めひび割れの発生によって生じており、その後の耐荷機構は圧縮コンクリートのアーチ機構と鉄筋のトラス機構であることが確認できる。

6. 結論

RC 部材の Snapback 挙動も含めたポストピーク挙動と、ポストピーク領域のエネルギー吸収状態を評価することにより以下の知見を得た。

1. エネルギー吸収状態から、破壊領域および耐荷機構を明らかにすることが可能である。

2. エネルギーの吸収量と解放量を比較することで、Snapback 挙動を生じるかどうかを判断することが可能である。
3. Snapback 挙動には、斜めひび割れの発生と主鉄筋に沿う領域の破壊の2つの段階が存在する。
4. 軸圧縮力の増加に伴い、部材のエネルギー吸収能は増大する。

参考文献

- 1) 内田裕市・森本博昭・塚本健雄：せん断破壊を生じる RC はりのポストピーク挙動, 土木学会第 56 回年次学術講演会, v-443, pp.886-887, 2001.10
- 2) 舟田武・田邊忠顕：格子等価連続体化法によるひび割れ面のせん断伝達モデル, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.1003-1008, 2001
- 3) 山谷敦・檜貝勇・中村光：軸方向圧縮力を受ける RC 梁のせん断挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, v-54, No.697, pp.143-159, 2002.2
- 4) 土木学会：2002 年度制定コンクリート標準示方書構造性能照査編, pp.67-70, 2002