委員会報告　「コンクリート構造物のポストピーク挙動解析研究委員会報告」

中村　光[*1]・野口　博[*2]・田辺　忠顕[*3]

委員長	田辺忠顕	名古屋大学大学院
副委員長	野口　博	千葉大学
幹事長	中村　光	名古屋大学大学院
幹　事	内田裕市	岐阜大学
	柏崎隆志	千葉大学
	金子佳生	東北大学大学院
	森泉和人	日本大学
委員	市之瀬敏勝	名古屋工業大学
	梅原秀哲	名古屋工業大学大学院
	上林厚志	（株）竹中工務店
	佐藤靖彦	北海道大学大学院
	白井伸明	日本大学
	須田久美子	鹿島建設（株）
	田中良弘	大成建設（株）
	二羽淳一郎	東京工業大学大学院
	長谷川俊昭	清水建設（株）
委員	畑中重光	三重大学
	檜貝　勇	山梨大学
（故）	藤井　栄	京都大学大学院
	前川宏一	東京大学大学院
	町田篤彦	埼玉大学
	松本信之	（財）JR 総研
	水野英二	中部大学
	三橋博三	東北大学大学院
	睦好宏史	埼玉大学
	吉川弘道	武蔵工業大学
	米澤健次	（株）大林組
協力委員	石原誠一郎	（株）淺沼組
	梅村　恒	名古屋工業大学
	国枝　稔	岐阜大学
	斉藤成彦	山梨大学
	羽場崎淳	（株）竹中工務店

1.　はじめに

「コンクリート構造物のポストピーク挙動解析研究委員会」は 1999 年 4 月に 4 年間の活動期間で学術委員会内に設置された。活動目的は，(1)「地震力を受けるＲＣ構造物のポストピーク挙動」に関する日米セミナーの実施，(2)JCI と ASCE／ACI447 委員会との共同研究の実施，(3)コンクリート構造物のポストピーク挙動解析に関する研究，である。(1)および(2)の一部については，コンクリート工学年次論文集 Vol.23[1)]に中間報告としてまとめた。(3)については，各種コンクリート構造物のポストピーク挙動，耐荷力とポストピーク挙動を予測するための最新の非線形解析手法ならびにポストピーク挙動の設計への応用について調査・研究を進めてきた。本稿では，(3)の事項の概要を中心にまとめているが，その詳細は本年 8 月 4 日の講習会で報告される予定である。

2.　委員会の海外活動

本委員会の特徴として，日米セミナーの開催ならびに ASCE／ACI447 委員会との共同研究の実施が挙げられる。本委員会が行った海外活動は，以下の通りである。

- 地震力を受けるＲＣ構造物のポストピーク挙動に関する日米セミナーの開催(1999 年 10 月，山中湖)
- ACI 秋季大会での ACI447 委員会との Joint Symposium「Deterioration Analysis of RC Structures under Cyclic Loading」の実施（2000 年 11 月，トロント）
- Seismic loading effects & CAMUS 3 benchmark の共催(2001 年 6 月，パリ）
- ASCE structural congress での US-JAPAN セッション「Analysis of Reinforced Concrete Structures under Earthquake Loading」の実施（2002 年 4 月，デンバー）

これらの海外活動の成果としては，日米セミ

*1　名古屋大学大学院助教授　工学研究科土木工学専攻　博（工）（正会員）
*2　千葉大学教授　工学部デザイン工学科建築系　工博（正会員）
*3　名古屋大学大学院教授　工学研究科土木工学専攻　工博（正会員）

ナーおよびACI秋期大会での発表論文がそれぞれ以下の論文集としてまとめられ，ASCE，ACIから出版されている。

・"Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads"，ASCE Publication，2001

・"Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures"，ACI，SP-205，2001

また，今年度中に，「コンクリート構造システムの崩壊機構の解明と崩壊防止に関する日米セミナー」を開催することが決定している。

3. ポストピーク挙動評価の工学的意義

構造工学の進歩は，コンピュターを利用する数値解析手法の進歩と相まって極めて迅速に進み，コンクリート構造物に非線形解析を用いてより合理的に設計・照査を行う枠組みが出来つつある。これらの技術の進歩に伴い，構造設計の方向性が高度な信頼性設計に基づくようになれば，最大荷重を超えたポストピーク領域の詳細な破壊性状を予測し，破壊による損害量，その破壊の確率あるいは損傷の確率を具体的な数値で与えて，その場合の効用を最大化する設計へと将来的に向かうと考えられる。

ポストピーク領域を，設計上の必要に応じて３段階のレベルに区分すると，それぞれ以下のような意義を見いだすことが出来る。

(1) Postpeak State-1

ピーク値から 10%程度荷重が低下した範囲。この間の値が得られることによって，次のような設計的な意義がある。大型コンクリート構造物で不静定次数が多い複雑な構造物では，最終的な耐荷力，および最大荷重時の変形モードをどの程度の精度で求められるかが問われると，必ずしも十分な答えが用意されているわけではない。しかし，技術の進歩により，最終耐荷力が 15%の誤差内で計算が可能となり，それなりに計算値に信頼性が出てくるとなれば，終局状態に対する安全係数を計算の信頼性という観点から，今の段階から減じることが出来る。それは，直ちに構造物の建造コストに反映されることになる。

(2) Postpeak State-2

ピーク値から 30%～60%荷重が低下した範囲。この範囲までで構造挙動が必要な構造物，あるいはそれが判れば，非常に効果的な構造物として，原子力構造物，ある種の超重要な構造物，都市の災害避難場所，あるいは安全施設等を挙げることが出来る。そして，これらの設計が合理的に行えるようになる。合理的という意味は，安全率などの構造物の余裕度を過度に取らなくても良いと言うことである。たとえば，構造としてスナップバック的な破壊が生じるか否かの判定の問題もこの範疇に含まれる。ここまで，推定が正しくできれば構造物の破壊時の損害をかなり正しく算定できることになる。

(3) Postpeak State-3

ピーク値から 100%近くまで荷重が低下した範囲。この間の値が得られることによって，次のような設計的な意義がある。倒壊する構造物の範囲，倒壊する速度，倒壊が起きうる範囲が判ってその範囲に存在する人的，物的な損害度をほとんど完全に推定できることになる。構造物上の物体，例えば自動車，鉄道車両などあるいは家屋などの付属物が放り出されるときの動的な初速などが与えられて，破壊時の構造物上の動的な挙動の解析が出来るようになる。これは，構造物の破壊に伴う各種被害損害の量的な概算が可能となることを示している。このほかエネルギー吸収能の完全な把握という意義もある。

4. ポストピーク挙動評価と設計への応用

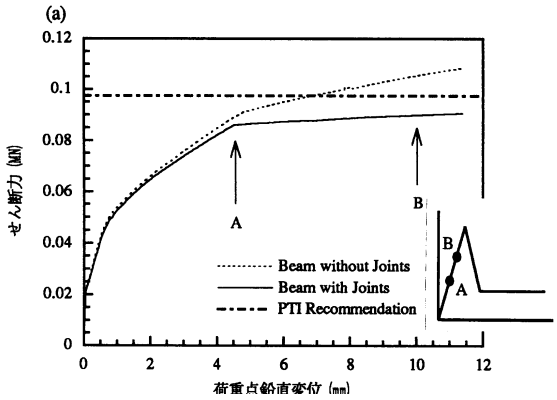
4.1 接合部のポストピーク挙動を考慮した設計[2)]

セグメント構法による構造物を健全に一体化させているシアーキージョイントは，重要な設計要素である。特にこのジョイントの荷重－変位挙動は構造物全体の一体性，変形性能，最大耐力と関連しあっている。

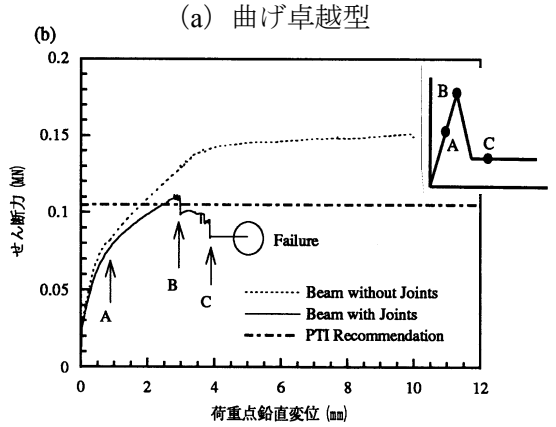
図－1 は，せん断スパン比を変化させ，曲げ

卓越型とせん断卓越型を仮定した２つの単純はりモデルに対する荷重-変位関係の解析値をジョイントの有無を含めて示している。また，図中に PTI[3)] の強度低減係数に基づく最大荷重値も示している。なお，図中の右端図は想定されたシアーキージョイントのせん断応力ーせん断すべり変位関係を示している。図より明らかなように，PTI の推奨値は，常に安全サイドに最大値を与えるわけではない。特に，せん断の卓越する構造物においては，最大荷重到達後の脆性的な変位挙動を考慮した安全率となっていない。例えば, 荷重-変位曲線上のポイント A, B, C に対応した，ジョイント部のせん断応力ーせん断すべり変位曲線上の変位点（図中の右端)は, 第一勾配線上, 最大値点, 第三勾配線上であり, C 点ではすべり変位が破断変位付近にまで達している。

以上に示すように，ポストピーク挙動を含む接合部の荷重-変位特性の考慮の有無により, 破壊機構に大きな違いが見られることは明らかである。そのため，構造物の破壊挙動における接合部のポストピークも含めた荷重-変位特性を評価することが，構造物の変形挙動を予測し性能を明確にするための重要なプロセスであるといえる。



(a) 曲げ卓越型



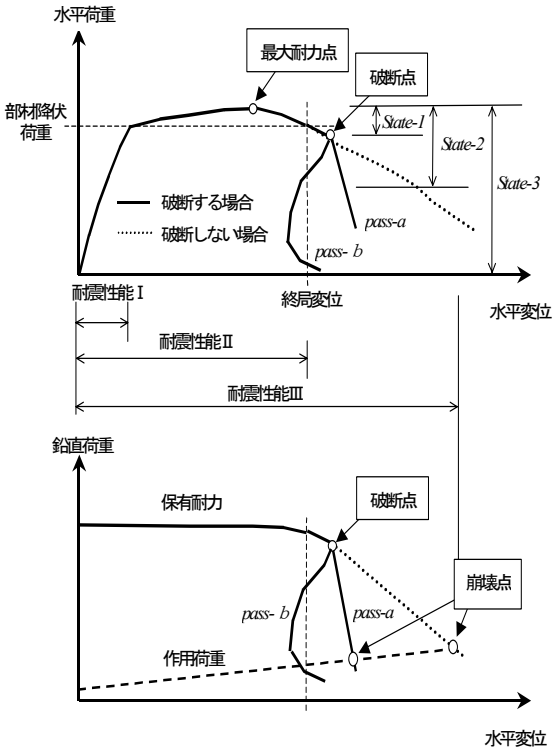
(b)せん断卓越型

図－1　荷重変位関係

4.2　補強工法・材料開発への利用

これまでに剛性，耐力，じん性率（終局変形）の向上を目的に，種々の補強工法および材料が開発されてきたが，Postpeak State-2 や Postpeak State-3 におけるポストピーク挙動の改善を目的した工法や材料を開発するといった視点は持ち合わせていなかった。

図－2 はシート補強を施した部材の荷重－変位曲線の模式図を示す。ここでは，終局変形は等しいが，その後の挙動が異なる 3 つのケースが描かれている。それらは，破断により急激に荷重低下を引き起こすもの（実線の *pass-a*)，破断によりスナップバック現象を呈するもの（実線の *pass-b*)，破断を起こさず徐々に荷重を低下させるものである（点線)。耐震性能 2（地震後に機能が短時間で回復でき、補強を必要としな



図－2　破壊形式とポストピーク挙動

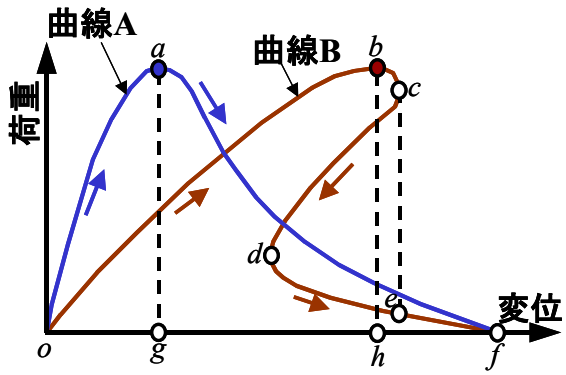
い）を設定した場合，いずれの場合もその性能を満足しているが，破断を引き起こす場合には耐震性能 3（地震によって構造物全体系が崩壊しない）を満足しない可能性が高い。地震力特性の不確実性が高いことを考えると，例え耐震性能 2 までを対象としたとしても，少なくとも Postpeak State-2 の範囲までは安定した荷重低下を引き起こすことを確認しておくことが望ましい。このことは，例えば通常用いられている炭素繊維シートやアラミド繊維シートに比べ，伸び能力が大きなシートを用いれば大変形領域においても破断を起こすことなく，安定した荷重低下を引き起こし，その結果，部材に優れた軸力保持機能を付与することができることを意味する。

以上は，安定的な曲げ破壊を起こす場合を対象としたものであるが，せん断破壊を起こす場合であっても類似の思想を持ち込める。今後，Postpeak State-2 および Postpeak State-3 までのポストピーク挙動を解析により追跡できるようになれば，補強材の強度，伸び能力，剛性，付着特性，さらには異種材料の組み合わせ（ハイブリッド化）方法をパラメータとした数値解析を行い，ポストピーク領域の挙動を改善させるための材料特性および組み合わせ方法を明らかにすることができる。すなわち，今後の工法および材料開発の方向性を，ポストピーク解析を利用することにより見出していくという新しい方法を選択できるようになる。

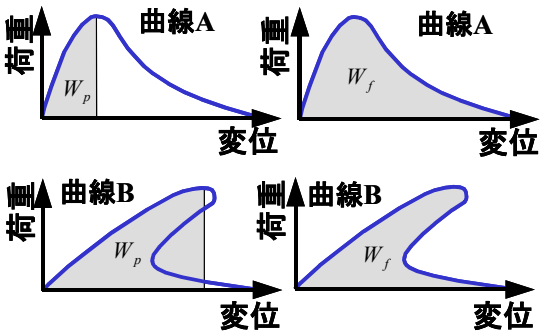
5. 実験によるポストピーク挙動の安定性と安定計測

２体の RC はりの載荷実験を行い，**図－3** に示すような Postpeak State-3 に至る２種類の荷重－変位曲線が得られたとする。曲線 A はピーク荷重あるいは極限点(*limit point*) a の後，荷重の低下に伴って変位が単調に増加する「基本パス(fundamental path)」であり，曲線 B はピーク荷重点 b に到達した後に荷重と変位が共に減少する，いわゆる「スナップバックパス(snap-back path)」である。両曲線とも，点 a あるいは b の後の破壊現象は不安定となる。**図－4** は両曲線のエネルギー量を示したものであり，W_p はピーク荷重点までに蓄えられた「加力エネルギー」，W_f は試験体の破壊による「消散エネルギー」である。例えば，曲線Ｂの場合，試験体を破壊させるのに必要なエネルギー W_f を超えるエネルギー W_p がピーク荷重点においてすでに試験体に蓄えられている。このような試験体を変位速度制御の条件の下で載荷すると，ピーク荷重点の直後に不安定な破壊が起こる。つまり，加力エネルギー W_p は破壊消散エネルギー W_f に変換され，さらに残りのエネルギー（$W_p - W_f$）は試験体を衝撃的に破壊させる運動エネルギーに変換されるのである。

このようなポストピーク領域を含む完全な荷重－変位応答を安定に計測することを目的とした既往の載荷試験の制御法としては，①荷重速度 [4]，②変位速度 [5]，あるいは③消散エネルギー量 [5]を制御パラメータとした載荷法がある。



図－3　荷重－変位応答



図－4　加力エネルギーと消散エネルギー

計測結果の一例として，内田ら[6]が消散エネルギー量を制御パラメータとした負荷・除荷を繰返す載荷法によりせん断破壊する RC はりのポストピーク挙動の計測に成功した結果を示す。試験体はせん断補強筋(D6@100)を配筋したスパン($a/d=1.7$)とせん補強筋の無いスパン($a/d=2.9$)を有しており，後者のスパンをせん断破壊させることを意図している。同一の試験体４体でせん断実験が行われたが，そのうちの S-3 および S-4 試験体の荷重－変位曲線およびひび割れパターンを**図－5 に**示す。いずれも，ポストピーク応答の計測に成功しており，両試験体ともスナップバック挙動を示している。なお，内田らの実験結果で興味深い点は，同一試験体でありながら異なった破壊モード，結果として異なった荷重－変位応答が得られることである。S-3 は「せん断圧縮破壊」，S-4 は「斜め引張破壊」と分類されている。

6.　解析によるポストピーク挙動の安定性

6.1　ポストピークの定義

構造物の増分荷重－増分変位関係を式(1)と仮定すると，一般的にいう最大耐力とは式(2)で定義される極限点を意味すると考えられる。

$$d\mathbf{f}=\mathbf{K}d\mathbf{q} \qquad (1)$$

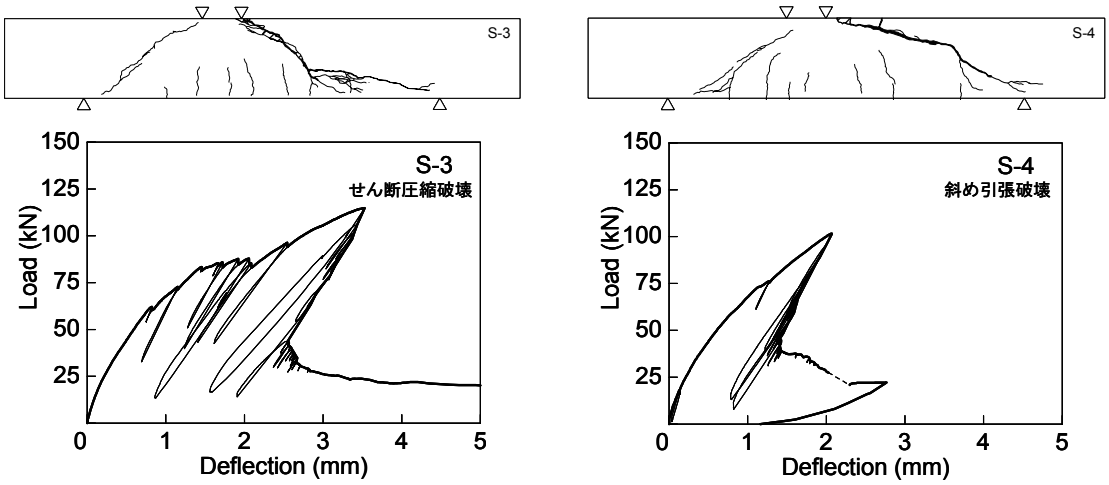
ここで，**f**：釣合力，**K**：接線剛性マトリックス，**q**：変位

$$\det\mathbf{K}=0 \quad : \quad \text{極限点} \qquad (2)$$

一般的にいうポストピークのピークとは最大耐力を意味するものであるが，コンクリート構造物の非線形応答は実験においても数値解析においても最大耐力に至るまでに局所的に耐力低下を生じた後さらに再度耐力増加を起こし以前のピーク荷重を乗り越えていくという過程を経る場合がある。このような局所的極限点はスナップスルー挙動におけるスナップスルー開始点と同様に真の極限点ではないが，数値解析的には式(2)の極限点の条件を満足するものであるため，真の極限点を追跡する際に非常に複雑な問題を生じる。合理的なポストピーク挙動の数値解析においてはこれらの応答を明確に識別することが必要である。

6.2　釣合経路と安定性

コンクリート構造物のプレピークならびにポストピーク領域における挙動を数値解析的に追跡する場合には，一般的な力学問題と同様に質量保存則，運動量保存則，角運動量保存則，エネルギー保存則，構成則などの基礎的な物理法則に基づいて力学解を求めなければならない。コンクリート構造物などの非弾性構造物の場合にはそのようにして得られる釣合解が複数存在しうる可能性すなわち分岐の可能性があり，特にコンクリート構造物のポストピーク領域においてはそのような分岐の問題が顕著化する。非



(a) S-3 試験体　　(b) S-4 試験体

図－5　荷重－変位曲線とひび割れパターン

弾性構造物の釣合経路に関する分岐問題は安定性の観点から議論されることが多いが，コンクリート構造物の実際の力学的数値解析においてそのような安定性解析が実施されることは非常に少なく，現状の多くの場合分岐や安定性などを考慮することがない単なる釣合経路の追跡解析が行なわれている。

6.3　塑性摩擦軟化材料の安定性と破壊局所化現象およびスナップバック現象

コンクリート構造物にポストピーク挙動が生じる主な原因はコンクリートが塑性摩擦軟化材料であるためと考えられる。すなわち，コンクリート材料はその応力状態（特に拘束圧状態）やひずみ状態に応じて摩擦の影響を受けた塑性変形や損傷軟化変形を生じるため，コンクリート構造物はそれらの変形挙動を支配する構成関係に依存し構造的なポストピーク応答を呈するのである。一般に Drucker によれば材料の安定性は式(3)で定義される。

$$\delta\sigma_{ij}\delta\varepsilon_{ij}^{p} > 0 \qquad (3)$$

ここで，σ_{ij}：応力テンソル，ε_{ij}^{p}：非弾性ひずみテンソル

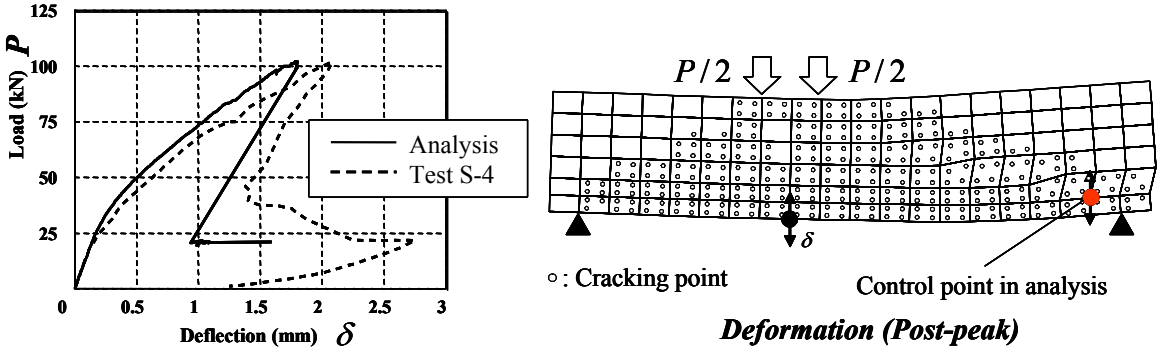
この Drucker の安定性仮説は材料の安定性の条件であるが，摩擦の影響を受けた塑性変形の場合（例えば楔試験）には Drucker の安定性仮説を満足しないでも安定な塑性状態が存在することが知られている。また，局所化したひび割れはコンクリート材料の損傷軟化現象としてとらえることができるが，Drucker の安定性仮説を満足しない材料挙動であるといえる。しかしながらそのように Drucker の安定性仮説を満足しない軟化破壊局所化を生じた部分が存在するコンクリート構造物は全体として安定性を保持することもあり，このような場合にも Drucker の安定性仮説そのものが非弾性構造物の安定性を意味するものではないことがわかる。

ひび割れに代表される破壊局所化現象は，構造物のある部分のみに軟化破壊が集中しその他の部分（除荷領域）では除荷挙動が生じるというものである。破壊局所化現象はコンクリート構造物の極限点すなわち最大耐力を支配しポストピーク挙動と深く関連している場合が多いが，破壊局所化領域での消散エネルギーに比較して，構造物の除荷領域における弾性解放エネルギーや載荷システムの除荷弾性エネルギーが大きい。そのためポストピーク状態で荷重－変形関係が正の剛性を持つスナップバック現象を呈することもある。荷重－変形関係が負の剛性を持つポストピーク挙動は変位制御の条件のもとで安定であるが，スナップバック現象は不安定である。

7.　せん断破壊するはりの共通解析

4 章で述べたせん断破壊する RC はりのポストピーク挙動の計測を目的とした内田らの実験を解析対象として委員会で共通解析を実施した。

2 次元 FE 解析結果の一例を**図－6** に示す。解析の特徴は，コンクリートの構成モデルに，2 方向ひび割れの発生とひび割れ面間のせん断応力の伝達を考慮した格子等価連続体化法 [7] を用い，非線形方程式の求解法に，選点弧長制御を適用している点にある。制御点として選ばれたのは，図中の○印の鉛直方向自由度である。そ



図－6　せん断破壊するはりのポストピーク挙動

の理由は，予備解析でせん断破壊時の節点変位を調査した結果，図中の○印周辺において変化が大きいことが分かったためである。

計算値は，実験と同様の激しいスナップバック挙動を追跡している点が注目されるが，スナップバック中，釣合解を得ることができなかったことが報告されている。また，ピーク後の破壊状態図を見ると，ひび割れが広範囲に分散したが，モデルの大部分の変形は弾性的に戻っていることがわかる。一方，選点弧長法の制御点として選ばれた節点周辺だけが大きな変形を保っている様子がうかがえる。

8. 曲げ圧縮破壊するはりの共通解析

図－7 に示すような曲げ圧縮破壊する RC 片持ちはり [8]を対象に委員会で共通解析を実施した。解析は，２次元，３次元有限要素法，ファイバーモデル，剛体バネモデル等の各種非線形解析手法を用いて行われた。ここでは，圧縮破壊エネルギー[9]を考慮した局所理論ならびに非局所理論を用いて行われたファイバーモデルの結果を示す。なお非局所理論は，Bazant らが提案した積分型非局所損傷理論に基づいて行われている。

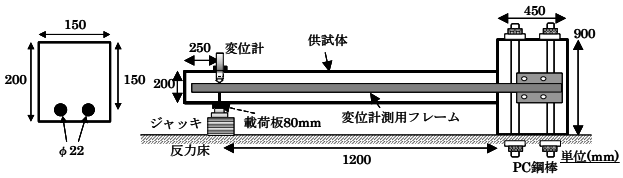
図－8 に解析および実験より得られた荷重変位関係を示す。局所理論に基づく解析では，圧縮破壊エネルギーを考慮しているため，要素寸法に依存しない曲線になる。一方，非局所理論を用いた解析では，唯一の応力―非局所ひずみ関係を用いても要素寸法によらない結果が得られることが分かる。

図－9 にコンクリート圧縮縁上端より 25mm の位置における，最大荷重後 70％での実験値，非局所理論ならびに局所理論に基づく解析で得られた局所軸ひずみ分布を示す。局所理論に基づく解析ではポストピーク領域に入ると局所化が生じ，ひずみの要素寸法依存性が発生し，その分布性状も実験値と明らかに異なることが分かる。一方，非局所理論を用いた解析ではひずみの要素寸法依存性が低減され，ひずみ分布性状も実験値を妥当に評価できることが分かる。

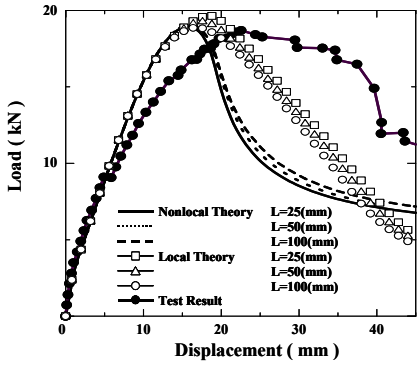
現在，RC 構造の非線形解析におけるコンクリートの構成則には局所モデルが多用されているが, Postpeak State-1～3 でのより信頼出来る解析を行うためにも，非局所モデルの適用も検討していく必要があると考えられる。

9. 報告書および講習会

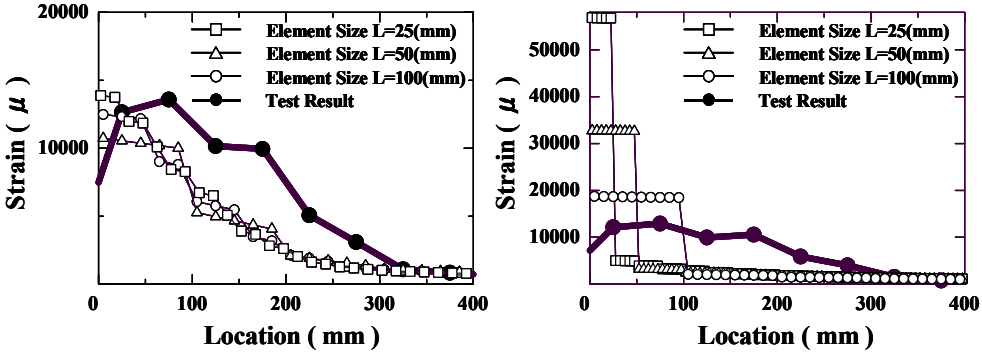
本委員会の成果を報告書としてとりまとめ，講習会を本年 8 月 4 日に行う予定である。



図－7　曲げ圧縮破壊供試体



図－8　荷重変位関係



非局所理論に基づく解析　　局所理論に基づく解析

図－9　最大荷重後 70%における部材軸方向のひずみ分布

本稿の概略に加え，以下の目次で各種コンクリート構造物のポストピーク挙動，耐荷力とポストピーク挙動を予測するための最新の非線形解析手法，ポストピーク挙動の設計への応用について，等がまとめられる。

「コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用」

１．ポストピーク挙動評価の工学的意義
1.1 構造物の耐荷力とポストピーク領域の解析と設計への応用
1.2 信頼性設計への視点
２．ＲＣ構造物のポストピーク挙動に関する実験的検討
2.1 曲げ破壊するはりのポストピーク挙動
2.2 せん断破壊するはりのポストピーク挙動
2.3 繰り返し荷重を受ける柱のポストピーク挙動
2.4 面内荷重を受けるＲＣ板のポストピーク挙動
2.5 面外荷重を受けるＲＣ板のポストピーク挙動
2.6 シート補強した部材のポストピーク挙動
３．材料レベルのポストピーク挙動とそのモデル化
3.1 コンクリートの引張軟化特性と引張剛性効果
3.2 コンクリートの圧縮軟化特性
3.3 コンクリートのせん断軟化特性
3.4 鉄筋の座屈
3.5 付着モデル
４．ポストピーク領域の数値解析法
4.1 はじめに
4.2 コンクリート構造物のポストピーク挙動
4.3 局所解析法と非局所解析法
4.4 釣合経路の追跡手法
4.5 ポストピーク挙動解析の事例と問題点
4.6 まとめ
５．ＲＣ構造物のポストピーク挙動に関する解析的検討
5.1 曲げ破壊するはりのポストピーク挙動解析
5.2 せん断破壊はりのポストピーク挙動解析
5.3 繰り返し荷重を受ける柱のポストピーク挙動
5.4 面内荷重を受けるＲＣ板のポストピーク挙動
5.5 面外荷重を受けるＲＣ板のポストピーク挙動
5.6 シート補強したはりのポストピーク挙動
5.7 ３次元応力下のＲＣ構造物のポストピーク挙動
６．衝撃の問題に対するポストピーク解析の応用
6.1 はじめに
6.2 衝撃応答に及ぼすポストピーク挙動の影響
6.3 鉄筋コンクリート構造の衝撃応答に関する実験的研究
6.4 鉄筋コンクリート構造の衝撃応答に関する解析的研究
6.5 まとめ
７．ポストピーク挙動評価と設計への応用
7.1 変形制御をベースにした性能設計
7.2 ポストピーク挙動評価に基づく耐震補修・補強設計

参考文献

1) 中村光他：コンクリート構造物のポストピーク挙動解析委員会報告，コンクリート工学年次論文集，第 23 巻第 1 号，pp. 61～66 , 2001.

2) 金子佳生：コンクリートシアーキーの破壊モデルとセグメント構法による構造物への適用，コンクリート工学論文集，第４巻，第２号，pp.31-41，1993.

3) PTI：Design and Construction Specifications for Segmental Concrete Bridges, Final Report, Post Tensioning Institute, Phoenix, Arizona,1988.

4) S.H. Ahmad et. al.：An Experimental Technique for Obtaining Controlled Diagonal Tension Failure of Shear Critical Reinforced Concrete Beams, Materials and Structures, 1995, 28, 8-15

5) 小柳洽他：コンクリートの破壊現象の安定性とその計測，コンクリート工学，20(6), pp.83-98, 1982

6) 内田裕市他：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，2001 年，v-443, pp.886-887

7) T. Tanabe and A. Itoh：Capturing the shear failure of reinforced concrete beams with snap-back instability, Finite element analysis of reinforced concrete structures (ACI SP-205), pp.233-250.

8) 立松博他：柱基部におけるコンクリートの圧縮破壊領域に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，第 19 巻第 2 号，pp.897-902,1997.

9) H. Nakamura and T. Higai：Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, 2001.