

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

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、②JCI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、等である。コンクリート構造物のせん断破壊挙動、地震荷重による破壊挙動、ポストピークの挙動などの数値解析を主なテーマとして海外の研究者を含めた幅広い意見交換と研究成果の展開について検討している。

2. ポストピーク挙動の工学的意義

コンクリート構造のポストピーク挙動は複雑な挙動であるとともに、それに至る構造物なら

びに構造を構成する材料の履歴挙動の結果として生じる現象である。RC構造物がポストピーク領域に至るまでは、ひび割れの発生やコンクリートの圧壊・剥離、鉄筋の座屈等、構造特性そのものが初期状態と変化する場合が多い。材料レベルの特性も、弾性域から塑性域へさらには軟化領域に至るとともに、各種材料の挙動のみでなく材料が組み合わさった場合の複合効果も大きく変化することになる。また、ポストピーク領域での終局挙動は、プレピーク挙動からの連続的な変形でなく構造内部の局所化挙動が支配的な要因となる場合もある。

このような複雑な現象であるポストピーク挙動を解明することは非常に困難と思われる。しかし、RC構造物の合理的な設計を行うためには、耐荷力のみでなくエネルギー吸収能力の観点に基づき変形挙動も明らかにする必要がある、

*1 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 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)

その場合にはポストピーク挙動を明確にすることは不可欠である。また、実構造物への適用を考えれば、多様な構造形式や大型構造物を実験的に検討することは不可能であり、ポストピーク挙動の検討も精緻な解析手法に基づいて行う必要性が生じる。

ポストピーク領域に生じる挙動のうち、代表的な例としては繰り返し荷重を受ける RC 柱の挙動がある。曲げ降伏後の繰り返し荷重を受ける RC 柱の挙動は、曲げ変形が支配的となりコンクリートの圧壊や軸方向鉄筋の座屈等により荷重低下が生じる挙動と、斜めひび割れの発達とともに脆性的に荷重が低下するせん断破壊挙動に大きく分類される。両者はその現象も含め全く異なる挙動であり、各々の挙動も複雑な要因が絡みあって生じた結果と言える。また、繰り返し荷重を受ける RC 部材の耐震性能の評価に関しては、エネルギー吸収能力を明確にすることが重要となる。その場合、ポストピーク領域での履歴挙動を明らかにすることではじめて、適切な安全余裕度を有する RC 構造物の設計が可能となる。したがって、各種現象の発生条件ならびに発生後のポストピーク挙動を明確にすることが、耐震性能を含めた合理的な RC 構造物の設計に寄与することになる。

ポストピーク領域でその変形挙動が急変する例として、RC パネルの破壊がある。図-1 は Collins らにより行われた RC パネルのせん断実験¹⁾の一例を示したものである。図を見れば分かるように、ある荷重レベルまでは分散したせん断ひび割れが発生し平均的な挙動を示す。しかしある時点で、いままで生じていたひび割れ方向とは全く異なる方向に、ある幅を持ったダメージ領域を伴い破壊に至っていることが分かる。このような現象が生じた場合、破壊は脆性的に生じるが、その発生条件等はいまだ明確になっておらず、RC パネルのポストピーク挙動の評価が重要となる。

3. 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 27 日から 29 日にかけて、山中湖において「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をおこなった。また日米セミナーに先立ち 10 月 25 日に海外におけるこの分野の最先端の研究を紹介するための特別講演会を行った。

日米セミナーは、材料モデルから設計上の問題点まで以下の 4 つのセッションで行われた。

Session A : Modeling of Concrete

Session B : Modeling of RC Structures

- Finite Element Approach -

Session C : Modeling of RC Structures

- Macro Element Approach -

Session D : Experimental Research and

Design Issues

いずれのセッションも本セミナーの目的である「繰り返し」「終局挙動」をキーワードとした発表がなされ、ポストピーク挙動の重要性ならびにその評価をする場合の問題点や困難さなど、今後の研究の発展に対する意味深い議論が

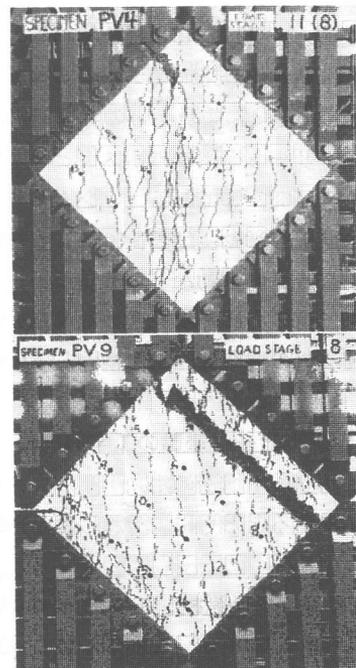


図-1 RC パネルのせん断 2 次破壊

行われた。日米セミナーの概要はコンクリート工学 2000 年 4 月号に詳細に報告をした。

なお、日米セミナーの論文集は、「Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads」と題し ASCE/SEI の Special Publication として刊行されている。

4. ACI Fall Convention でのミニシンポジウムの開催

4.1 シンポジウムの概要

2000 年秋にトロントで行われた ACI 秋季大会で、ACI447 委員会（コンクリート構造物の有限要素解析委員会）主催で「Deterioration Analysis of RC Structures under Cyclic Loading」と題し、本委員会との共同研究の一環としてのミニシンポジウムが行われた。シンポジウムは 2 日間 3 パートにわたり以下のテーマに対して行われた。

Part 1 : Deterioration Analysis, from Material to Structures

Part 2 : RC Column Benchmark Problem : UCSD Experiments

Part 3 : Finite Element Analysis of RC Structures

材料レベルから構造レベルまでの劣化解析と繰り返し荷重下でせん断破壊する RC 柱のベンチマーク解析の結果等 18 編の論文が発表された。このうち本委員会からは 6 編の論文発表が行われた。

なお、シンポジウムの論文集は ACI Special Publication として刊行される予定である。

またシンポジウムの期間中に ASCE/ACI447 委員会とトロント大学で合同打合会を実施し、今後も共同して研究を進める事が確認された。

4.2 RC 柱のベンチマーク解析

シンポジウムの一つのテーマである RC 柱のベンチマーク解析は、カリフォルニア大学サンディエゴ校で実験が行われた繰り返し荷重下で

せん断破壊する 3 体の RC 柱を対象に行われた。本委員会からは 3 件の発表が行われたので、その概要を以下に紹介する。

(1) サンディエゴの実験概要²⁾

サンディエゴで実験された供試体は、図-2 に示す様に 406×610(mm)の矩形断面をもち、主鉄筋比 2.5%、帯鉄筋比 0.12% の RC 柱である。その材料諸元を表-1 に示す。供試体は、一定軸力下で正負繰り返しせん断力を受け、R1 供試体は曲げ降伏後のせん断破壊を、R3,R5 供試体は脆性的なせん断破壊をしたものである。

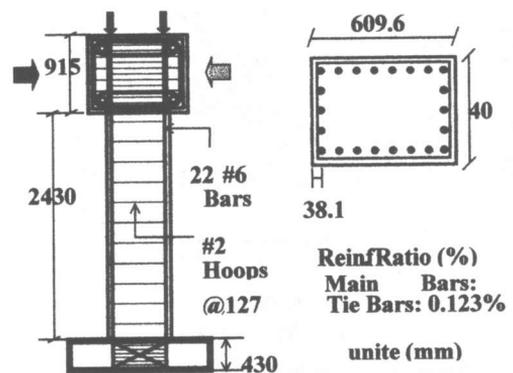


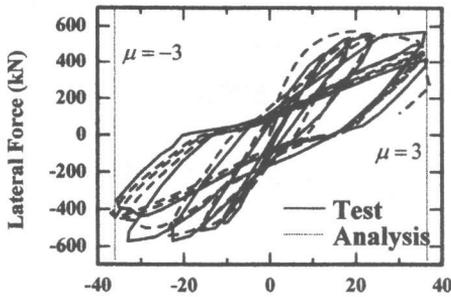
図-2 供試体の概要

表-1 材料諸元

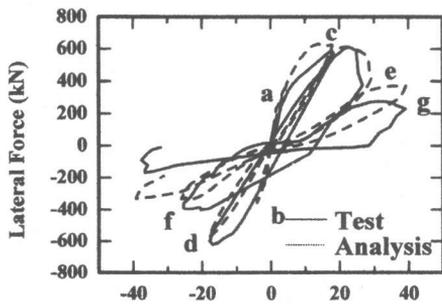
No	Aspect Ratio	Axial Force (MPa)	Strength(MPa)		
			Concrete	Main Bars	Tie Bars
R1	2	2	38	317	360
R3	2	2	34	469	324
R5	1.5	2	33	469	324

(2) 名古屋大学グループの発表

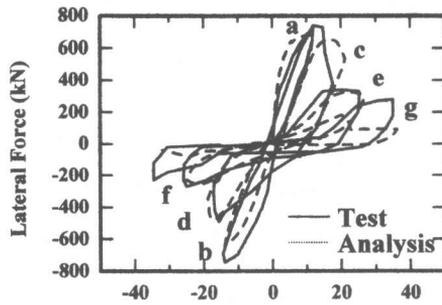
田辺委員長から名古屋大学グループで行われた解析結果の発表が行われた。解析は名古屋大学で提案された Lattice Equivalent Continuum Model³⁾を用いて行われた。このモデルは任意角度を持ち多方向に配置されたコンクリートならびに鉄筋 Lattice を Smeared 化することで、容易に多様な形状を持つ構造に適用可能としたものである。R1~R5 供試体に対する解析値と実験値の比較を図-3 に示す。解



(a) R1 供試体



(b) R3 供試体



(c) R5 供試体

図-3 実験値と解析値の比較

析値は実験値の繰返しによる荷重低下挙動を精度よく評価していることが分かる。また、繰返し挙動を精度よく評価するには、軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出し、コンクリートの剥落、鉄筋とコンクリートの付着効果、境界条件を適切に評価することの重要性が指摘された。

(3) 日本大学グループの発表

白井委員から日本大学グループで行われた解析結果の発表が行われた。解析は白井委員の研究室で提案された曲げとせん断成分を独立に考慮して RC 柱の全変位を評価するマクロ要素モデル⁴⁾により行われた。このモデルの概念を図-4に示す。このモデルでは、曲げ挙動は Layer Element Model により、せん断挙動は平均化した鉄筋と回転ひび割れモデルに基づく単一平面応力 RC 要素である Shear Element Model によりシミュレートされる。この手法により3体の供試体の挙動を妥当に再現出来ることが示されたが、ここではせん断挙動が比較的卓越する R3 供試体の結果を示す。

図-5 は R3 供試体の荷重変位関係の実験値

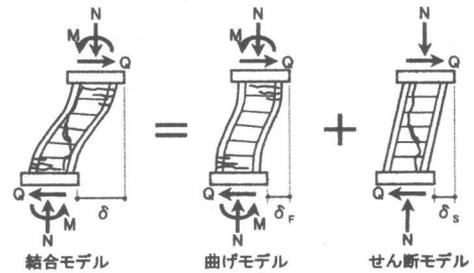


図-4 モデルの概念

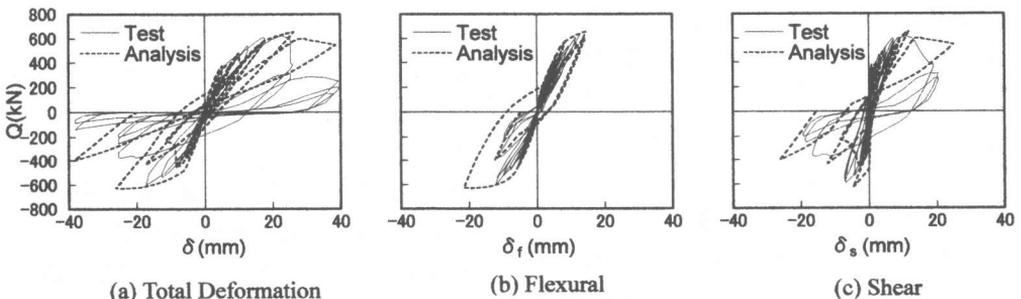


図-5 実験値と解析値の比較 (R3)

と解析値を全変位・曲げ変形・せん断変形に対して比較したものである。繰り返し荷重を受ける際の曲げ変形とせん断変形の挙動の変化を妥当に表しており、対象とした供試体のポストピーク挙動に至る変形挙動ならびに支配的な変形要因が及ぼす影響を明確にしていることが分かる。

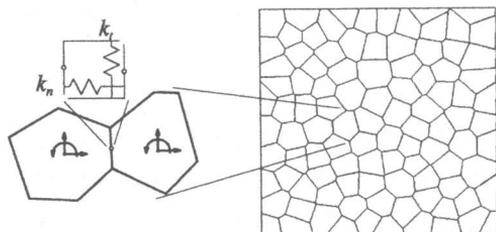


図-6 Spring Network Model

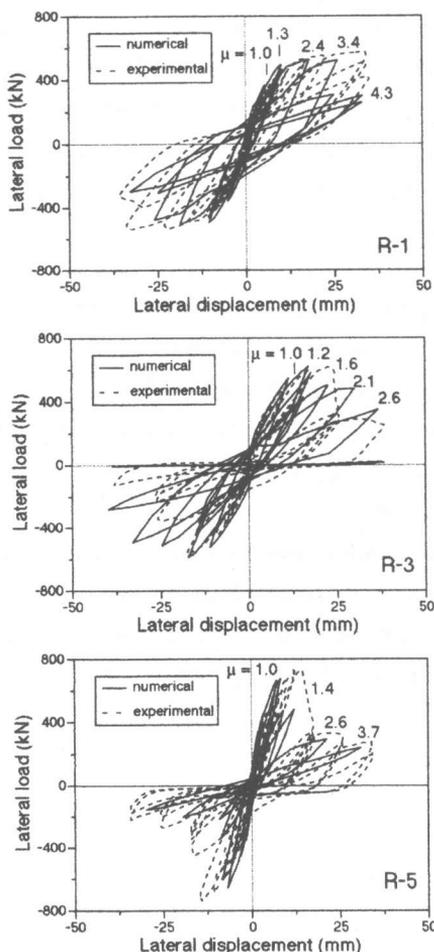


図-7 実験値と解析値の比較

(4) 山梨大学グループの発表

山梨大学の斉藤助手から Spring Network Model⁵⁾による解析結果の発表が行われた。このモデルはコンクリートをランダムな形状を持つ Voronoi 分割した剛体の集合体と扱い、各剛体を3方向のバネ要素により結合したものである(図-6)。Spring Network Model は、材料の不連続性を容易に扱うことが出来るため、ひび割れ挙動等を実現現象と同様に再現することが出来る長所を有している。

図-7 に実験値と解析値の荷重変位関係の比較を示す。繰り返しによる耐荷力の低下現象を精度よく評価していることが分かる。本手法により求められた R3 供試体のひび割れパターンを図-8 に示す。このひび割れパターンは実験値とよく一致するものである。解析結果から急激な荷重低下は、ピーク荷重直後に供試体中央部に生じるせん断ひび割れにより生じることが明らかにされた。

5. 報告書の作成

RC 構造物のポストピーク挙動は、多くの複雑な挙動を含む問題であり、それを解析的に再現することは簡単なことではない。しかしながら近年のコンピュータの進展によりハード的にはかなり高度な計算まで容易に行う事が出来る

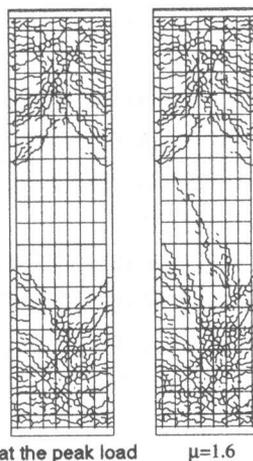


図-8 ひび割れパターン

ようになった。また、材料レベルでのコンクリートならびに鉄筋の挙動や両者の複合効果も徐々に精度のよいモデルが提案されるとともに、様々な研究成果によりマクロレベル、メゾレベルの各種解析理論も提案されつつある。その応用例の一つが、前章で紹介した RC 柱のベンチマーク解析と言える。このような現状をふまえ、委員会では「繰り返し荷重を受けるコンクリート構造のポストピーク挙動解析」と題してポストピーク挙動解析に関する報告書の作成を予定している。現在まで議論されている目次案を以下に示す。

1. 繰り返し荷重を受けるコンクリート構造のモデル化—マイクロレベル—
 - (1) 3次元コンクリートモデル
 - (2) 圧縮場理論
 - (3) 鉄筋のモデル
 - (4) 付着モデル
 - (5) メゾモデル (Lattice モデル等)
2. 鉄筋コンクリート構造物のモデル化—有限要素アプローチ—
 - (1) 有限要素モデルの開発
 - (2) 2次元有限要素法モデル
 - (3) 3次元有限要素法モデル
3. 鉄筋コンクリート構造物のモデル化—マクロモデルアプローチ—
 - (1) ファイバーモデル
 - (2) その他のモデル
4. ポストピーク領域の数値解析
 - (1) ポストピーク領域の数値解析法
 - (2) 剛性マトリクスの特異性
 - (3) 数値解の安定性
5. 実験的研究と解析による評価
 - (1) 曲げ破壊する部材のポストピーク挙動
 - (2) せん断破壊する部材のポストピーク挙動
 - (3) 曲げ降伏後せん断破壊する部材のポストピーク挙動
 - (4) 壁部材のポストピーク挙動
 - (5) スナップバック挙動

6. ポストピーク挙動の意義

- (1) 設計における問題点
- (2) 設計への応用

参考文献

- 1) Vecchio, F. and Collins, M.P. : The response of reinforced concrete to in-plane shear and normal stresses, Publication No.82-03, Univ. of Tronto, March 1982.
- 2) Xiao, Y. et al. : Steel jacket retrofit for enhancing shear strength of short rectangular reinforced concrete columns, Report No.SSRP-92/07, Dept. of Applied Mechanics and Eng. Science, Univ. of California, San Diego, 1993.
- 3) Tanabe Tada-aki and Ahamed Syed Ishitiaq : Development of Lattice Equivalent Continuum Model for Analysis of Cyclic Behavior of Reinforced Concrete, Proc. of Seminar on Post Peak Behavior of RC Structures subjected to Seismic Loads, Vol.2, JSPS and NSF, pp.105-124, Oct, 1999.
- 4) Shirai Nobuaki, Moriizumi Kazuhito and Terasawa Koichi : Cyclic and Ductility Analysis of RC Columns Subjected to Cyclic Loading : Macro-Element Approach, Proc. of Seminar on Post-Peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Loads, Vol.2, JSPS and NSF, pp.195-210, Oct, 1999.
- 5) Saito Sigeohiko and Hikosaka Hiroshi : Numerical analyses of reinforced concrete structures using spring networks with random geometry, Proc. of JSCE, No.627/V-44, pp. 289-303, 1999.