

論文 多軸載荷を受ける RC 柱の履歴特性と損傷評価法に関する研究

藤本 良^{*1}・河野 進^{*2}・西山 峰広^{*3}・渡邊 史夫^{*4}

要旨:変動軸力下において水平二方向外力を受ける鉄筋コンクリート柱の履歴復元力特性を柱脚部モデル試験体を用いて実験的に導いた。また、ファイバーモデルを用いて柱脚部塑性ヒンジ領域の断面解析を行い、塑性ヒンジ長さとの歪勾配が有る場合の拘束コンクリートの応力-歪関係を定量化することで、塑性ヒンジ領域の履歴復元力特性をモデル化した。履歴計算の途中で記録した断面各点における応力と歪の履歴を用いて、塑性ヒンジ領域における損傷指標を計算し、指標の変化と実際の損傷の進行程度の相関関係について考察した。

キーワード: 損傷評価, 塑性ヒンジ, 柱脚, 多軸載荷, 拘束コンクリート, 歪勾配

1. はじめに

性能設計においては、地震等による損傷を定量的に評価し、構造体の残存性能を適切に把握する必要がある。鉄筋コンクリート柱の保有性能は繰り返し荷重を受ける拘束コンクリートの応力-歪特性によるところが大きいと考えられるが、一様圧縮下における実験から得られた応力-歪特性を歪勾配のある柱脚部ヒンジ領域の断面解析に適用できるか疑問が残る。また、柱脚部の塑性ヒンジ長さを求める式が提案されているものの、変動軸力などの影響は未だに明らかにされていない。

本研究では変動軸力と水平二方向外力を同時に受ける載荷方法を基本とした鉄筋コンクリート柱脚部モデル8体の実験結果を用い、塑性ヒンジの長さを決定し、歪勾配が拘束コンクリートの応力-歪関係に与える影響をモデル化して、塑性ヒンジ領域のモーメント曲率に関する履歴復元力特性を導出することを第一の目的とした。また、このモデルを用いて塑性ヒンジ領域の断面解析を行い、同領域の劣化挙動を、コンクリートの性能劣化に基づいた簡単な損傷指標を用いて表現することを第二の目的とした。

また、本論分は、文献1), 2)をまとめ新たな考察を加えたものである。

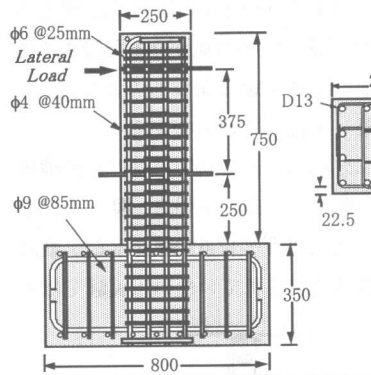


図-1 供試体詳細

2. 実験概要

詳細については、文献1)及び2)に掲載されているので、ここでは概要のみを示す。実験に使用した供試体の詳細を図-1に示す。また、表-1には、試験体の材料特性を一定軸力下の実験と変動軸力下での実験に分けて示す。

実験では、図-2に示す載荷装置を用いて軸方向力と二方向水平力を加えた。図では、水平方向に一つだけジャッキが示されているが、実際はこれと直交する方向にもジャッキが配されている。水平方向の載荷履歴は二種類用意した。一つは水平一方向にのみ正負交番繰り返しを行うもので、部材回転角にして1/400, 1/200, 1/100, 3/200, 1/50, 3/100, 1/25 毎に2サイクルづつ載荷を行った。もう一つは、水平二方向に載荷を行うも

*1 三菱重工業株式会社

*2 京都大学大学院工学研究科 助手・PhD

*3 京都大学大学院工学研究科 助教授・工博

*4 京都大学大学院工学研究科 教授・工博

表-1 供試体の諸定数

	供試体名	試験体の実験における諸元							解析結果			
		コンクリート	軸鉄筋		横補強筋		軸力比	水平方向	M-N関係	拘束係数	塑性ヒンジ長さ	
		f'_c (Mpa)	名称	f_y (MPa)	名称	f_{yh} (MPa)	ρ_h (%)	$N/D^2f'_c$	傾きk *	α	L_p (mm)	
変動軸力	D1NvA	26.8	D13	467	φ4	604	1.39	変動	1方向	1.39	2.7	250
	D1NvB									2.79	2.0	250
	D2NvA								2方向	1.04	2.6	250
	D2NvB									1.66	2.5	250
一定軸力	D1N3	37.6	D13	461	φ4	486	1.53	0.3	1方向	0.0	2.6	230
	D1N6										0.6	4.9
	D2N3							2方向	0.3		3.8	170
	D2N6								0.6		7.1	230

ので、同様の部材回転角で柱頭が円軌道を二周づつ描くように変位を与えた。

軸力を変動させる場合の軸方向載荷履歴は、軸力-モーメント関係が図-3で表される直線となるように荷重を制御し、軸力比が0または0.6に達した後は、軸力比を一定に保つものとした。なお、kの値は表-1に示す通りである

変動軸力と二方向水平力を同時に受けた試験体D2NVAの水平荷重-水平変位関係を、図-4に示す(水平ロードセルと水平変位計の値を示し、垂直ジャッキの影響は考慮されていない)。実験では各

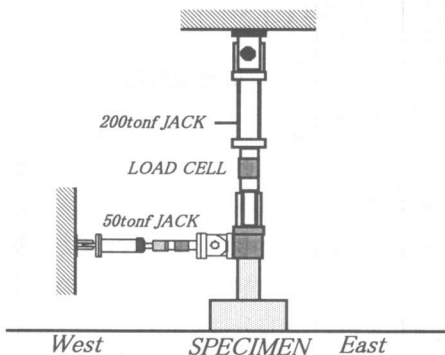


図-2 載荷装置図

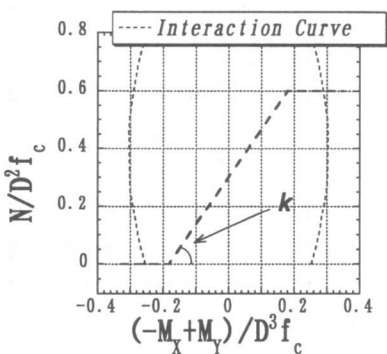


図-3 変動軸力の載荷履歴

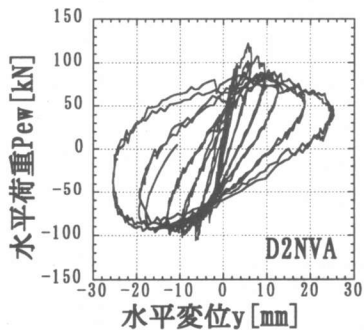


図-4 水平荷重-水平変位関係

* 図-3 参照

試験体とも水平変位が増えるに従い、耐力が徐々に落ちていく傾向が見られた。しかし図-4が示すように変動軸力を受ける試験体では変位の正負によって、耐力の低下する度合いに違いがあるのが特徴であった。

3. 断面解析と損傷指標の計算

損傷指標を求めるには、損傷を受けた断面におけるコンクリートと鉄筋がどのような載荷履歴を受けたかを明らかにする必要がある。そこで、柱脚部塑性ヒンジ領域の断面解析を行うこととした。断面解析では、平面保持を仮定したファイバーモデルを用いた。

準備段階の解析では、250mmの柱脚部検長領域で測定されたモーメント-曲率関係及び軸歪-曲率関係が、解析結果と一致しないことが分かった。この原因を、用いた塑性ヒンジ長さ250mmと拘束コンクリートの応力-歪関係にあると考え、ヒンジ領域の長さと同位置における拘束コンクリートの応力-歪関係を実験結果から逆に求めることにした。

さらに、こうして求めた塑性ヒンジ領域のコンクリートと鉄筋の応力-歪履歴を用いて損傷指標を計算する方法を紹介する。

3.1 断面解析における変数の設定

本断面解析において、最適化手法を用いてその値が決定される、拘束係数 α と塑性ヒンジ長さ L_p について考察を加える。

3.1.1 応力-歪モデルの修正

解析に用いた拘束コンクリートの応力-歪関係 NewRC モデル³⁾ は、本来中心軸圧縮を受ける拘束コンクリートを対象とするモデルで、断面に歪勾配がある場合に適用すると、解析値のモーメント耐力が低過ぎることが準備計算で分かった。そこで式(1)に示す NewRC モデルの係数 κ に、割増係数 α を乗じて式(2)のように表し、歪勾配の影響を表現した。(記号の説明は文末に記す。)

$$f'_{cc} = f'_c + \kappa \rho_h f_{hy} \quad (1)$$

$$\kappa = 11.5\alpha \left(\frac{d'}{C} \right) \left(1 - \frac{s}{2D_{core}} \right) \quad (2)$$

NewRC モデルでは、式(1)で最大強度が決まれば応力歪関係の包絡線が自動的に定まる。図-5に α を1から3まで変化させた時の応力-歪関係の変化をコンクリート強度が26.8MPaの場合について示す。 α が大きくなるに従って、ピーク時の耐力と歪が上昇し、ピーク以降の下り勾配が緩やかになる。

3.1.2 塑性ヒンジ長さについて

準備段階の解析では、検長領域を塑性ヒンジ長さとして仮定して計算をおこなったが、実験後の試験体を観察すると、スタブ付近にひび割れが発生していない領域があることや、コンクリートが剥落している領域にばらつきがあることが確認できた

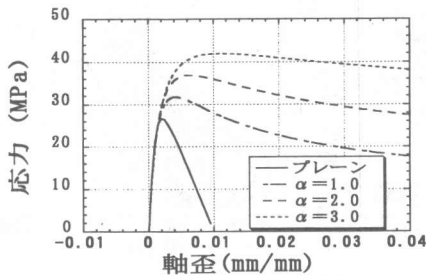


図-5 α による応力-歪関係の変化

ので、この仮定も実情とは異なると考えられる。そこで検長領域(長さ L_g)を、スタブによって拘束され弾性的挙動を示すと考えられる領域C(長さ L_c)、塑性ヒンジ領域P(長さ L_p)及びその他の領域E(長さ L_e)に分離した。領域Cは、健全なコンクリートが存在する領域を目視により決定し、その長さ L_c を実測した。残る変数は L_p と L_e のみなので、ここでは L_e は L_p に従属とし、最適化により L_p を決定することにした。

3.2 α と L_p の同定方法

3.1項から、塑性ヒンジ領域の履歴復元力特性を求めるには、 α と L_p を決定すれば良いことになる。ここでは、評価関数を用いて最適化を行うことで、これらの値を各供試体ごとに求めた。

解析では、まず L_p を仮定して L_e を決める。次に領域C、Eが弾性であるとの仮定から、これらの部分の曲率および軸ひずみを計算する。最後に塑性ヒンジ領域Pの曲率及び軸ひずみを、検長領域において計測された曲率及び軸ひずみから領域C、Eにおける成分を除いて求め、これをもって実験から得られた曲率及び軸歪とした。また、領域Pにおけるモーメントは、 $L_c \cdot L_p \cdot L_e$ と外力からその実験値が簡単に求まる。

まず、部材回転角が正負の载荷方向で極大となる点に着目する。ここでは、14サイクルの正負で計28点である。各点における軸ひずみの実験値と解析値の誤差 ϵ_i を求める。この誤差の二乗に、各点の曲率 ϕ_i の第一番目の曲率 ϕ_1 に対する比の二乗で重み付けをして足し合わせたものを評価関数Dとした。解析と実験のモーメントの誤差に関しても同様の評価関数を考えたが、値Dの変化が小さかったので評価関数には適さないと考えた。

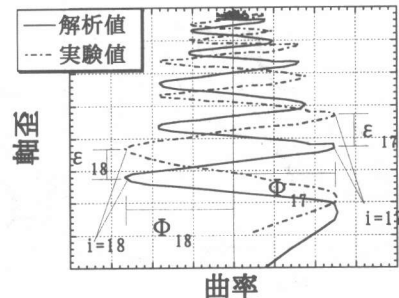


図-6 評価関数

$$D = \sum_{i=1}^{28} \left(\frac{\phi_i}{\phi_1} \cdot \varepsilon_i \right)^2 \quad (3)$$

評価関数Dが最小となる最適値 α , L_p を, 各供試体ごとに表-1に示す。また, こうして決められた α , L_p を用いて行った断面解析で得られたモーメント-曲率関係, 軸歪-曲率関係を試験体D1N3, D2N3, D2NVAについて図-7に示す(P- Δ 効果を考慮にいれたモーメントを算出した)。

3.3 解析結果についての考察

3.3.1 塑性ヒンジ長さについての考察

Paulay等⁴⁾の式(4)によると塑性ヒンジ長さ L_p は約180mmになる。各供試体の塑性ヒンジ長さと比較すると, 一定軸力の場合, はほぼ一致するが, 変動軸力の場合, 式(4)による予想よりも長くなる傾向があることがわかった。

$$L_p = 0.08L + 0.022d_b f_y \quad (4)$$

3.3.2 今後の課題

最適化をおこなった結果, 実験と解析のモーメント-曲率関係, 軸歪-曲率関係は, よく適合するようになったが, まだ以下のような問題が残され

ている。

- ・変動軸力下での試験体で, 高軸力側と低軸力側で曲率が対象ではないことから, 塑性ヒンジ長さが異なると考えられるが, 解析においては一定としている。
- ・引張及び圧縮を交互に受けるコンクリートの疲労による耐力低下や, 鉄筋の座屈による耐力低下を考慮していないため, モーメント-曲率関係において, 解析値の値が低下しにくい。

3.4 損傷指標の計算

3.2項で求められた α と L_p を用いると, 塑性ヒンジ領域のコンクリートと軸方向鉄筋の応力-歪履歴が分かることになる。ここではコンクリートの履歴を用いて計算される損傷指標である, 残存モー

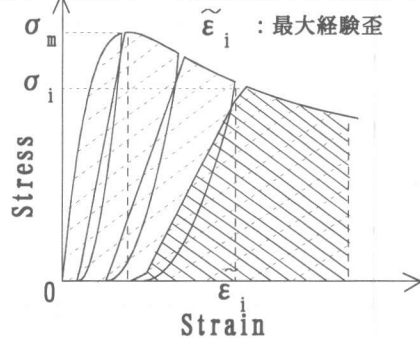


図-8 σ_i , σ_m の定義

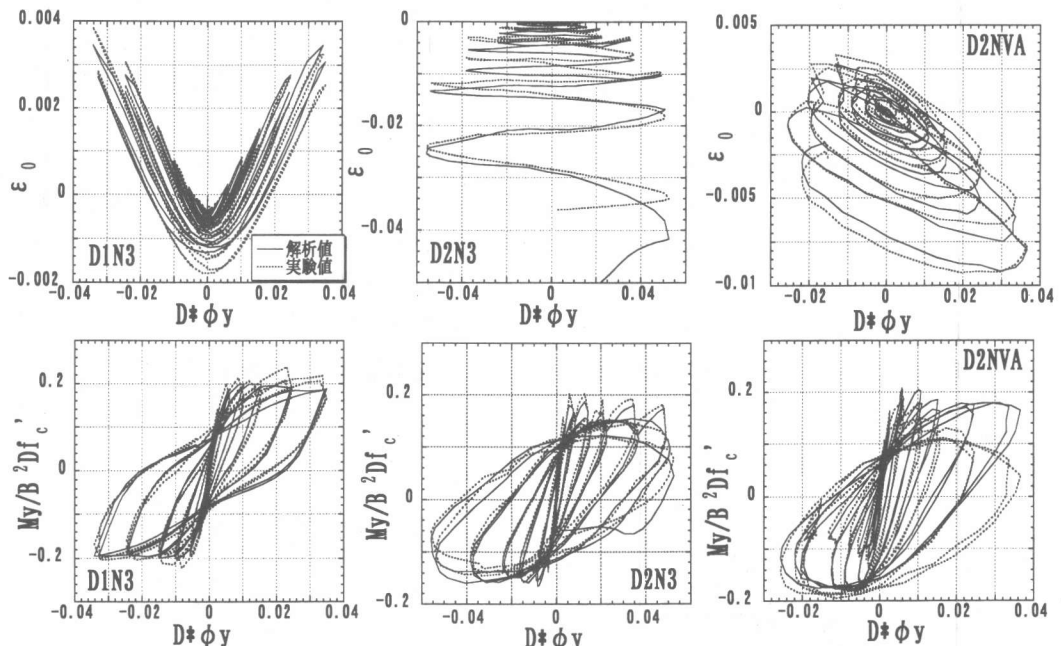


図-7 解析結果

ント耐力指標(指標M)を次のように定義する。

分割された柱断面の任意の要素の最大耐力を σ_m 、今後負担する最大耐力を σ_i として、以下のよう表されるある載荷履歴を受けた柱部材が有する残存する曲げ耐力を表す指標として指標Mを提案する。ただし変動軸力下では、一サイクルにおいて各断面要素が経験する歪が断面の図心を通る対称軸に関して対称にはならないと考えられるので断面を直交する二本の対称軸で4つのエリアに分割して、それぞれのエリアについて指標Mを考慮した。

$$M_{ind,X1} = \sum_{area1} A_i \sigma_i |y_i| / M_{max,X} \quad (5)$$

$$M_{max,X} = \frac{1}{4} \sum_{all} A_i \sigma_m |y_i| \quad (6)$$

(エリア1, 他のエリアについても同様)

4. 損傷指標と実際の挙動の比較

ここでは、既往の損傷モデルと筆者等が提案するモデルを用いて、損傷との相関関係を調べる。

4.1 既往の指標による損傷評価

Park等⁵⁾やRao等⁶⁾によって提案された損傷指標が解析のモーメント耐力の低下をどの程度表して

いるかを確かめる。図-9に示すのは、ParkやRaoの損傷指標の変化とモーメント耐力が低下する様子を、2つの試験体について示したものである。モーメント耐力低下率は各サイクルの正負の最大モーメントを、それぞれ正負の最大モーメントで割った値で、最大モーメントに達するまでのサイクルでは1とする。ParkやRaoの損傷指標は、耐力が最大耐力から15%低下する点で値が1になるように設定されている。図-9(b)に示すように指標が1になると耐力が85%に低下したものもあるが、図-9(a)のように指標は1になっているものの耐力はそれ程低下していないものも多く見受けられた。また、図-9(b)に示す試験体は変動軸力を受けるために正側と負側で耐力の低下率が異なるが、これらの指標は部材全体に対して定義される為、載荷方向によって異なる損傷を表すことができない。また、図-9(a)及び(b)では、最初の数サイクルは、最大モーメントに達していないため損傷は進行していないと考えられるが、損傷指標は徐々に大きくなっており、実際の損傷過程を示しているとは考えにくい。

4.2 指標Mによる損傷評価

図-10に指標Mの変化とモーメント耐力低下率を、図-9の2体について示す。指標Mは、耐力

低下率と同様に履歴に伴って低下するが、両者の値は一致しない。しかし、実験ではカバーコンクリートの剥落・ひび割れの進展等によりコンクリート部分の損傷は確実に進んでいることが観察されている。そこで、こうした物理現象をより表すものとして、コンクリートのみが負担するモーメントを計算により求めた。これを図-11に実線で、断面全体のモーメントを点線で示す。これらの図より、曲率が増加するに従い、全体のモーメントはそれ程変化しないがコンクリートの負担するモーメントは減

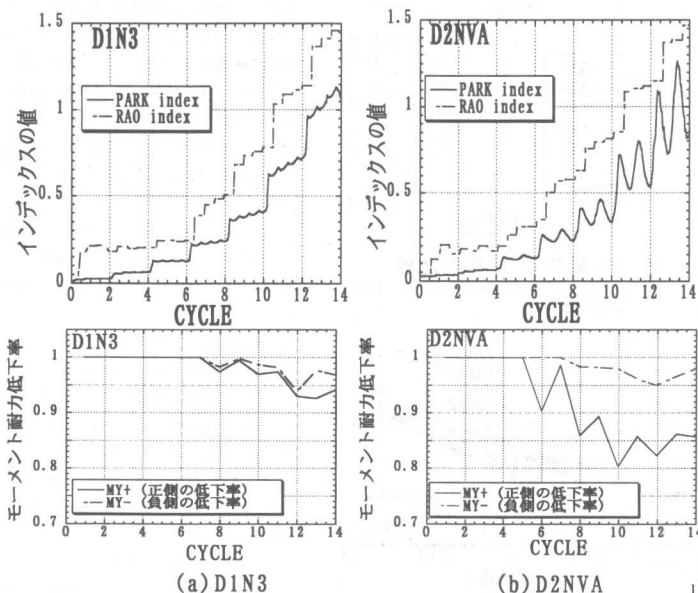


図-9 既往の指標とモーメント耐力低下率の比較

少することが分かる。こうしたコンクリートのモーメント負担分の変化を図-10にCMYとして示した。CMYの変化は、前述したような実験中に観察された物理的損傷の進行をある程度表していると考えられる。これを、指標Mと比較してみると2つの試験体で、CMYが低減する様子を指標Mは良く予想していることが分かる(D2NVAでは、CMY+とMY1, CMY-とMY3)。指標Mは、もともと載荷履歴中に経験した最大歪にのみ依存する値であり、コンクリートの受けた応力と歪の履歴をもとに計算されたCMYとは独立した物理量である。つまり、部材におけるコンクリートが受けた最大歪のみから部材の損傷が推定できることになる。また、ParkやRaoの指標で説明できなかつた、初期の載荷段階の無損傷の状態をも表現していることが分かる。

5. まとめ

(1) 載荷履歴中に経験した最大歪にのみ依存する関数として得られる損傷指標である、残存モーメント耐力指標を提案した。実験中に観察された物理的損傷の進行を表していると考えられるモー

メントのコンクリート負担分と提案された損傷指標は、載荷履歴に従って同じように低減することが確かめられた。この損傷指標を用いると、載荷初期の無損傷の状態や、変動軸力のもとで載荷方向によって耐力が異なる状態をうまく表すことが出来る。

(2) 従来のファイバーモデルによる断面解析を改良して、多軸載荷を受ける柱脚部モデルの塑性ヒンジ領域の履歴復元力特性を導く方法を示した。改良点は、断面内の歪勾配が拘束コンクリートの応力-歪特性に与える影響と、試験体ごとに異なる塑性ヒンジ領域の長さの2つの物理量を定量化したことである。

記号の説明

f'_c : プレーンコンクリートの圧縮強度, f_y : 軸鉄筋の降伏強度, f_{by} : 横補強筋の降伏強度, ρ_b : 横補強筋の体積比, N : 軸力, D : 柱幅, f'_{cc} : 拘束コンクリートの圧縮強度, d' : 横補強筋の直径, C : 非拘束長さ, s : 横補強筋の配筋間隔, D_{core} : 拘束コンクリートの断面幅, A_i : 分割した断面の面積, y_i : 分割した断面のY座標, L : 柱のせん断スパン, d_b : 軸鉄筋の直径

参考文献

- (1) 黒山哲也・池内敏浩・渡邊史夫: 残存性能インデックスによるRC柱の損傷評価法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), C-2構造IV, pp. 413-416, 1998.9 (2) 藤本良・池内敏浩・河野進・渡邊史夫: 変動軸力下でのRC柱の損傷評価法, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), C-2構造IV, pp. 809-810, 1999.9 (3) 崎野健治・孫玉平: 直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集第461号, pp. 95-104, 1994.7 (4) Paulay, T. and Priestley, M.J.N.: SEISMIC DESIGN OF REINFORCED CONCRETE and MASONRY BUILDINGS (5) P. Srinivasa Rao, B. Sivarama Sarma, N. Lakshmanan, and F. Stangenberg: Damage Model for Reinforced Concrete Elements under Cyclic Loading, ACI Structural Journal, V95, No. 6, pp. 682-690, 1998 (6) Park, Y.J and Ang, A.H.S.: Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, ASCE Journal of Structural Engineering, VIII, ST No. 4, pp. 722-757, 1985

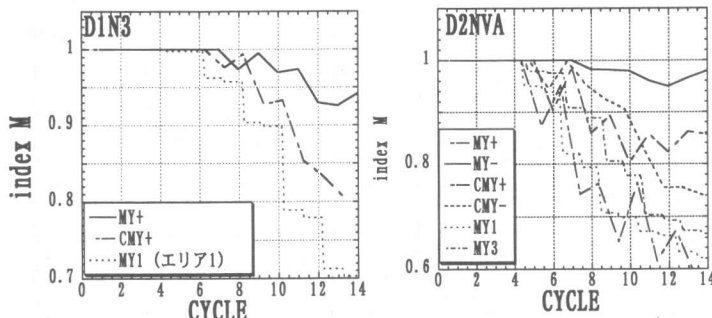


図-10 指標Mとモーメント耐力低下率の比較

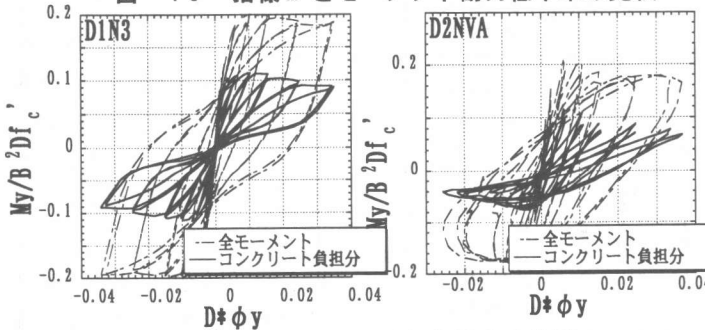


図-11 モーメント耐力の分離