

論文

[2100] 断面性能を考慮した鉄筋コンクリート柱の履歴復元力特性の定量化について

正会員 池田尚治 (横浜国立大学建設学科)

正会員 山口隆裕 (横浜国立大学建設学科)

正会員 〇鶴澤哲史 (大成建設)

正会員 林 秀彦 (横浜国立大学大学院)

1. 緒言

土木の分野でも、近年、鉄筋コンクリート（以下、RCと記す）構造物を対象として復元力特性を求める研究が、実験、又は解析面から数多く行われている[1][2]。しかしながら、RC構造物の変形性能の要因は多種にわたり、また、それぞれの解析における仮定も複雑でかつ異なっており、これらの研究成果を関連づけて復元力特性を定量化するまでには至っていない。

本研究は、材料の非線形特性を既知として簡便な計算のみによって、断面性能に基づくRC柱部材の復元力特性の定量化を行うとともに、それを用いて解析した応答変位と準動的載荷実験より得られた応答変位と比較検討し、定量化の手法の妥当性を検証しようとするものである。

2. 実験方法

RC柱が曲げ破壊を生じる場合の変形性能は、軸方向鉄筋比、せん断支間-断面の有効高さの比(a/d)、および軸圧縮応力度に主に影響を受けると考えられる。本研究では、まずこれらの要因に着目したRC柱供試体を合計8体作製して静的正負載荷及び準動的載荷実験を行い、各供試体の変形性能及び履歴特性を把握することにより、復元力特性の定量化や応答解析値との比較検討を行うこととした。

表-1に実験に使用した供試体の一覧と諸元を、図-1に供試体の一例を示す。なお、各供試体にはせん断破壊が生じないように計算必要量以上のフープ筋がd/2以下の間隔で配置されている。表-2に使用した材料の力学的特性を示す。

図-1に示すように静的及び準動的の載荷には、ともに2本のアクチュエーターを使用し、一定軸圧縮力のもとに水平力または水平変位を作用させた。静的正負載荷の方法は計算降伏耐力時 $P_y$ の変位 $1\delta_y$ から最終載荷まで、柱頭部での変位を $1\delta_y$

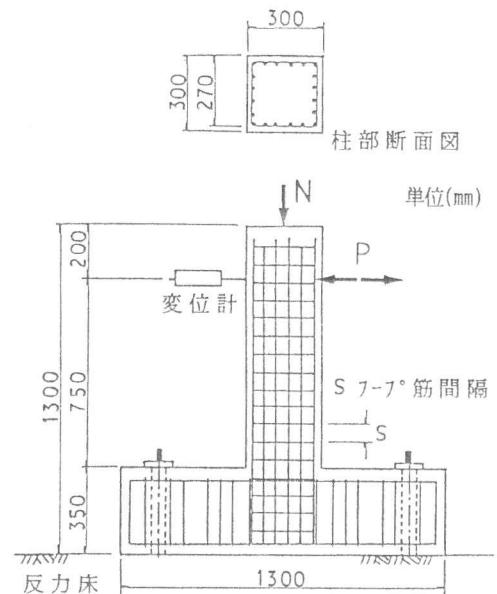


図-1 供試体図の一例(PS-1, PD-1)

表-1 供試体の一覧と諸元

供試体名 *1	軸方向鉄筋			フープ筋			せん断支間有効高さ比	軸圧縮応力度
	呼び径	鉄筋量	鉄筋比	呼び径	間隔	フープ筋比		
PS-1	D 13	25.34cm <sup>2</sup>	2.82%	D 6	7.0cm	0.30%	2.78	10kg/cm <sup>2</sup>
PD-1	D 13	25.34	2.82	D 6	13.0	0.16	4.63	10
PS-2	D 10	11.41	1.27	D 3	2.5	0.19	2.78	10
PD-2	D 13	25.34	2.82	D 6	4.5	0.47	2.78	48

\*1...PS: 静的載荷試験(Static test)、PD: 準動的載荷試験(Pseudo-dynamic test)

ずつ増加させながら、各変位で1回の正負荷荷を行うこととした。準動的載荷においては、作用地震波として El Centro 1940 (NS)波の0.02~16.00 秒を使用した。表-3 に準動的載荷に用いたデータの一覧を示す。各供試体の1自由度系換算仮想重量は地震波の加速度応答スペクトルが最大となる値とした。また、作用地震波の最大加速度の大きさは昭和61年版コンクリート標準示方書(以下、示方書と記す)で示される「かなりの損傷」の被災程度(4 $\delta_y$ レベル)を想定した補正係数 $\nu_4$ の値に相当する値とした。

### 3. 実験結果

図-2(a) に静的正負荷荷実験より得られた正載荷側の荷重-変位曲線の包絡線を示す。PS-1 供試体、及びPS-4 供試体は変位が2 $\delta_y$ 以降柱腹部の曲げひび割れがせん断ひび割れに進展し、PS-1 供試体は主としてせん断破壊に至り、PS-4 供試体は主として圧縮鉄筋の座屈を伴う曲げ破壊に至った。また、PS-2 供試体、およびPS-3 供試体は柱根元部の曲げひび割れが大きく成長し、曲げ破壊した。特に、PS-2 供試体においては $\pm 5\delta_y$  載荷時に圧縮部のコンクリートの広い範囲での剥離が見られた。

図-2(b) に降伏耐力及び降伏変位で除して無次元化した荷重-変位曲線の包絡線を示す。この図より最大耐力後の耐力の低下の割合は、軸方向鉄筋比に大きく影響を受けることが示されており、軸方向鉄筋比の小さいPS-3 供試体は変位が10 $\delta_y$  となってもほぼ最大耐力が保持され、塑性変形性能は最も優れていると言える。なお、全ての供試体においてせん断補強が十分であるため、変形量が示方書で示される「かなりの損傷」に相当する4 $\delta_y$  となっても十分な耐力を保持している。

表-2 使用材料の力学的特性

		鉄 筋		適用
種類	規格	降伏強度	引張強度	
呼び径		(kgf/cm <sup>2</sup> )		
D13	SD30	3640	5290	No.1,2,4の主筋
D10	SD30	3620	5240	No.3の主筋
D6	SD35	4240	5500	No.1,2,4のフ-筋
D3	SD30	3090	4040	No.3のフ-筋
コンクリート				
圧縮強度		引張強度	ヤング係数	
270kg/cm <sup>2</sup>		23kg/cm <sup>2</sup>	2.40 $\times 10^5$ kg/cm <sup>2</sup>	

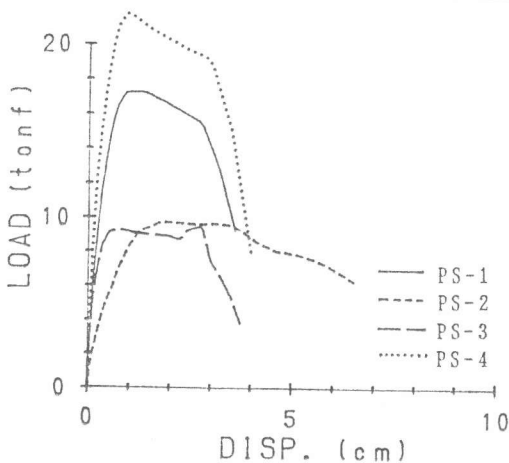
表-3 準動的載荷実験に用いたデータ

供試体名	PD-1	PD-2	PD-3	PD-4
減衰定数 h	0.05			
固有周期 T (sec)	0.5			
初期剛性 $K_0$ (tonf/cm)	30.2	8.7	30.0	36.6
仮想重量 W (tonf)	187.4	54.0	186.2	227.1
被災の程度	作用地震波の最大加速度(gal)			
1 $\delta_y$ レベル	1.0	36.4	72.6	19.8
4 $\delta_y$ レベル	0.4	90.9	181.5	49.4
				98.8

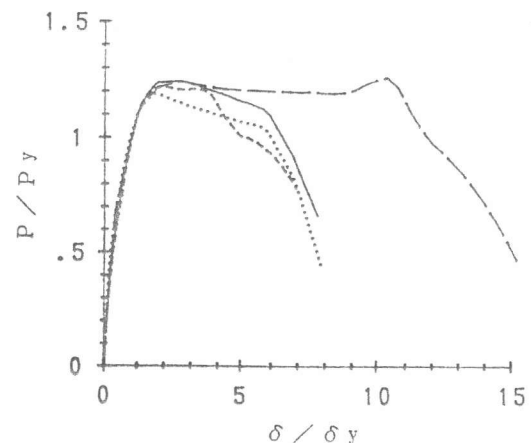
### 4. 復元力特性の定量化

#### 4.1 定量化の概要

復元力特性の定量化は、図-3



(a) 荷重-変位の包絡線



(b) 無次元化した荷重-変位関係

図-2 静的正負荷荷実験の比較

に示すように、3つのブロックに分けて考えることにした。応答計算の正確さに最も大きな影響を与えるAブロックの定量化については、異なる断面性能ごとに計算によりRC柱の荷重-変位関係を求め、その結果を基に復元力特性を設定することにした。計算手法には、部材断面を1次元的にファイバーモデル化し、その断面計算より得られたモーメント-曲率関係を用いて軸方向に積分することにより、RC柱の変形を求めるという簡便な方法（以下、便宜上ファイバーモデルと記す）を採用した。曲げ破壊するRC柱の最大耐力後の変形挙動を解析する場合には、コンクリートの応力低下領域の材料特性を正確に仮定する必要がある。しかしながら、その特性は多くの要因により変化するので特定するには無理がある。そこで、ファイバーモデルで計算するAブロックの変形量の範囲を $2\delta_y$ 以下とし、Bブロックとした $2\delta_y$ 以降の復元力特性の設定、及び、Cブロックの履歴特性は静的正負荷荷実験より得られた荷重-変位曲線から断面性能を考慮して定量化することにした。なお、Bブロックの範囲を $5\delta_y$ までとしたのは、せん断補強鉄筋量が十分に配置されている場合には、その時点まで耐力の急激な低下が生じないと考えられるからである。

#### 4.2 ファイバーモデルによる変形解析とAブロックの定量化

##### (1) 柱部材のモデル化とその検証

ファイバーモデルでRC柱の変形解析をするにあたり、柱の基部の回転のことや、柱の断面の2次元的な大きさを棒部材に置き換えている点を考慮して図-4に示すように柱のモデル化を行った。また、RC部材のせん断変形は主応力方向が $45^\circ$ と成る変形を仮定し計算上せん断変形を考慮した。[3]

図-5にRC供試体の変形解析に用いたコンクリート及び鉄筋の応力-ひずみ関係を示す。

図-6に静的実験で得られた柱根元部の軸方向の鉄筋ひずみの分布の一例を示す。フーチング上面のひずみを基準にして荷点までひずみが直線分布する場合とした計算値（図中の点線）と実験値とを計算降伏荷重時 $P_y$ において比較すると、フーチング上面から $D/2$ 上のひずみ値は実験値の方が大きな値を示している。このことは、反力点の位置がフーチング上面にあるのではなくそれよりも若干高い位置にあることを示しており、提案したモデルで仮定した反力点の位置はほぼ妥当であると思われる。図中にフーチング上面から $D/4$ の位置を基準にした計算値を比較のため一点鎖線で示す。

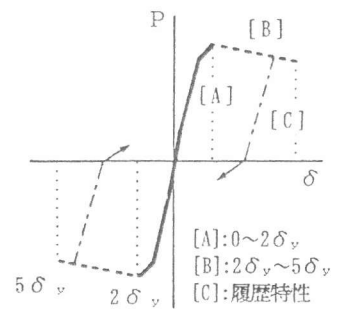


図-3 復元力特性の定量化

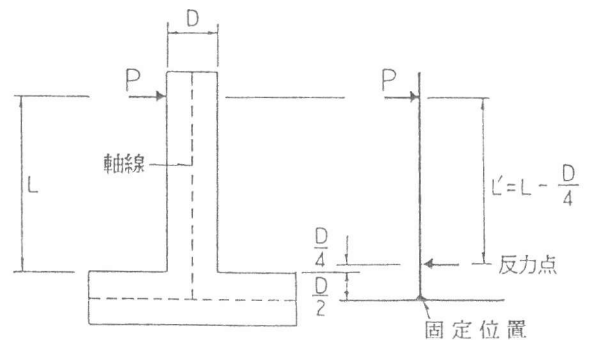


図-4 柱のモデル化

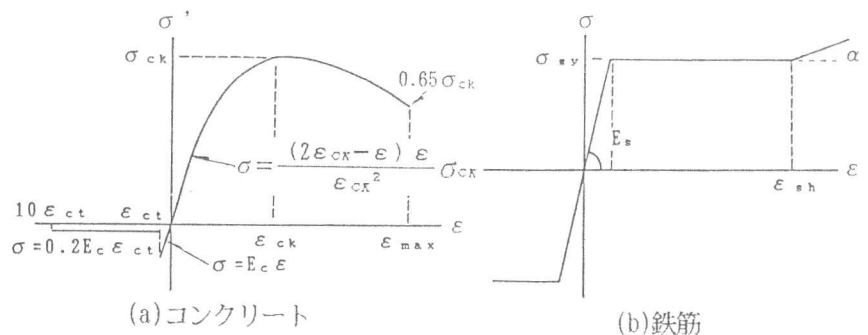


図-5 応力-ひずみ関係

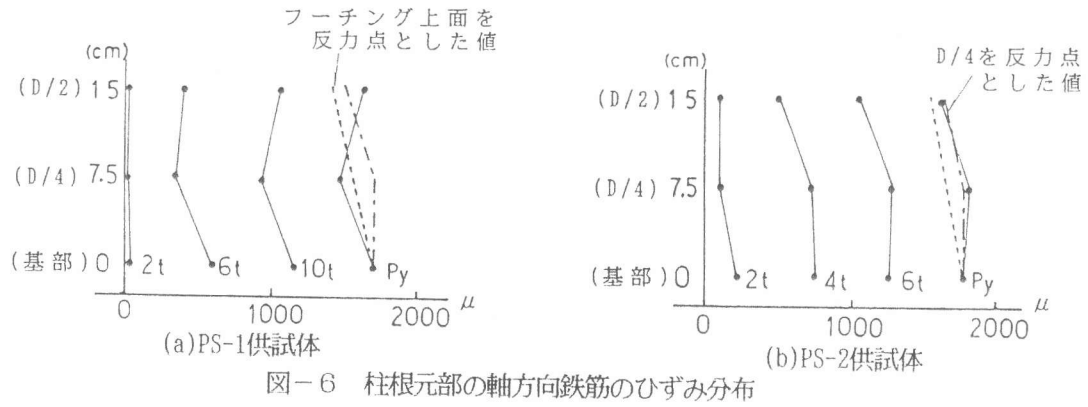


図-6 柱根元部の軸方向鉄筋のひずみ分布

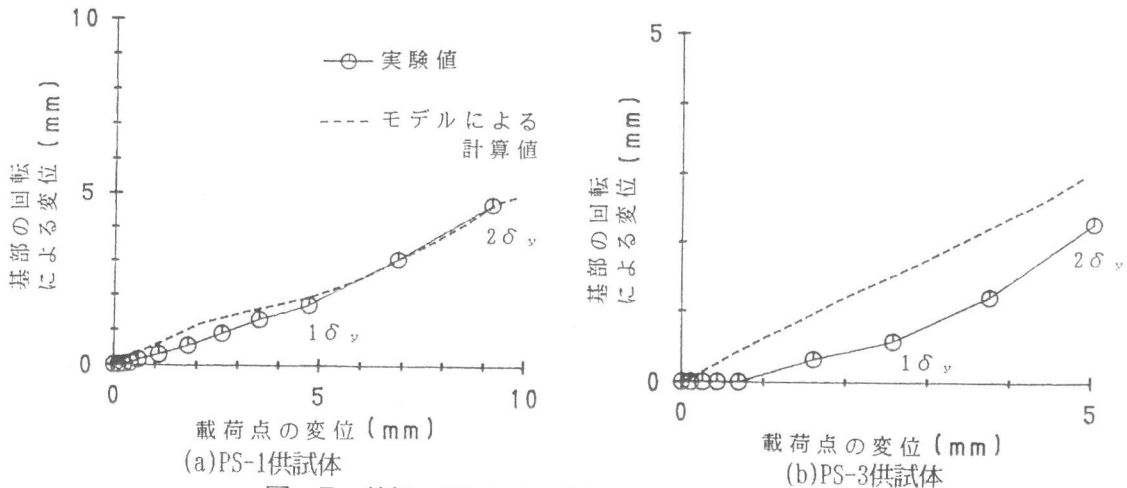


図-7 基部の回転による変位の実験値と解析値の比較

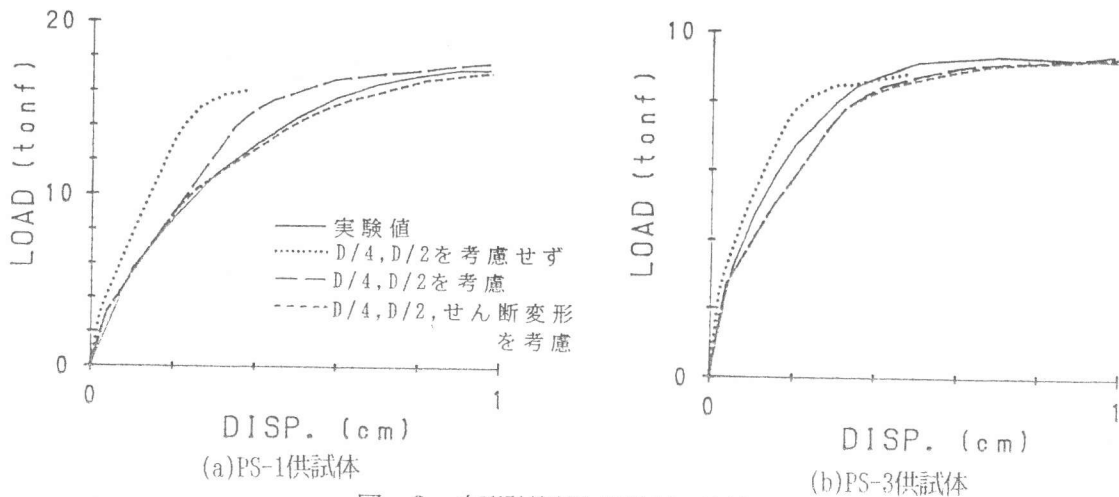


図-8 変形計算値と実験値の比較

図-7にフーチング上面より7.5cm高い位置で測定した柱の基部の回転による変位量の実験値とファイバーモデルで求めた計算値の比較の一例を示す。図に示すPS-1供試体をはじめPS-2、PS-4供試体では計算値は実験値とよく対応しており、柱の計算上の固定位置をフーチング中に仮定するという簡便なモデル化で柱の根元の回転量を表現するという考え方の妥当性が確認された。図に示す軸方向鉄筋比の小さいPS-3供試体では、回転量が増加する傾向をモデルはよく表しているが、計算値は実験値よりもかなり大きい結果となった。このことより、柱の固定位置について

の仮定は軸方向鉄筋比による影響を受けるものと考えられる。

(2) 計算結果とAブロックの定量化

図-8(a)(b)に静的載荷実験より得られた正側の水平力-変位曲線の包絡線と変形計算値の比較の例を示す。柱のモデル化をせずにフーチング付きRC柱をフーチング上面で固定された棒部材に置き換えて計算した結果は実験値より変形量が相当に小さく、特に鉄筋降伏後の塑性変形については全く異なった結果となっている。これに対し、提案したモデルによる計算値は、実験値とよく対応しており、また、PS-1供試体はせん断変形を考慮した計算値が実験値により近い値となっている。

以上の変形計算値と実験値の比較より、提案した柱のモデル化の手法を用いることによりRC柱の変形を簡便に精度良く求めることが確認できた。

そこで、計算より求めた $2\delta_y$ までの荷重-変位曲線をひび割れ発生時、軸方向鉄筋の降伏、及び、 $2\delta_y$ となる点を結んだ直線に置き換え、 $2\delta_y$ までの復元力特性とした。

4.3 BブロックとCブロックの定量化

$2\delta_y$ 以降の復元力特性は、図-2に示されている静的正負載荷実験で得られた荷重-変位曲線の包絡線を基に設定した。無次元化した耐力 $P/P_y$ を軸方向鉄筋比 $p$ 、軸圧縮応力 $\sigma_n$ 、および、 $a/d$ をパラメーターとした $\delta/\delta_y$ の関数として表すこととし、(1)式のように定式化した。

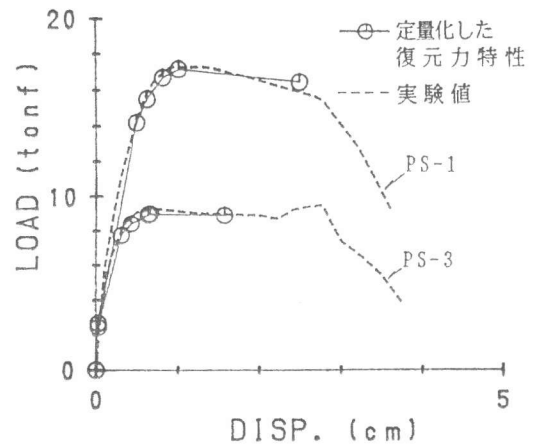


図-9 復元力特性と実験値の比較

$$\frac{P}{P_y} = (a+b+c) \left( \frac{\delta}{\delta_y} - \frac{\delta_z}{\delta_y} \right) + \frac{P_z}{P_y} \quad (1)$$

ここで、 $P_z$  : 変位が $2\delta_y$ 時の耐力                       $a = f(p)$ : 軸方向鉄筋比による関数  
 $b = f(\sigma_n)$ : 軸圧縮応力による関数                       $c = f(a/d)$ :  $a/d$ による関数

なお、今回の実験の範囲では軸方向鉄筋比以外の要因で差があまり見られないので軸方向鉄筋比以外によるパラメーターは零とし、 $a$ の値は $(-0.9p+0.0084)$ とした。図-9に解析的に求めた $5\delta_y$ までの復元力特性と静的載荷実験で得られた水平力-変位曲線の対応の一例を示す。

履歴特性(Cブロック)の定量化は断面性能により区別せずに、曲げ破壊を考慮して(2)式のような除荷時剛性を塑性率 $\mu$ で低下させる剛性低下型モデルとした。

$$K_r = K_y \mu^\alpha \quad (2)$$

ここで、 $\mu = \frac{\delta_m}{\delta_y}$      $\alpha$  : 除荷時の剛性低下係数  
 $K_r$  : 降伏後の除荷時剛性                                       $K_y$  : 降伏時の除荷時剛性  
 $\delta_m$  : 過去最大変位     $\delta_y$  : 降伏変位

除荷時の剛性低下係数 $\alpha$ は図-10で示すように静的載荷実験で得られた各供試体の塑性率 $\mu$ と

降伏後の除荷時剛性の関係より  $\alpha = -0.4$  と設定した。図-11に3つのブロックに分けて断面性能を考慮して定量化した履歴復元力特性の模式図を示す。

#### 4.4 応答解析結果と考察

応答解析は線形加速度法を用いて計算を行い、また、減衰定数は準動的載荷実験の時に使用した値と同じ0.05とし計算上減衰を考慮した。

図-12に  $4\delta_y$  レベルの地震波を準動的に作用させた時の実験値と定量化した復元力特性を用いた応答計算値の比較例を示す。計算値は応答変位、応答周期ともに実験値とよく対応し、また、最大応答変位後の負側への塑性変形も表現できている。以上の計算結果より断面性能に基づくRC柱の履歴復元力特性の定量化を、提案した手法で行うことの妥当性が確認された。

#### 5. 結論

せん断補強鉄筋量の十分な柱を対象とした、本研究の実験および解析より得られた結論をまとめると次の通りである。

- 1) 提案した柱のモデル化の手法を用いることにより、断面性能の異なるRC柱の変形挙動の解析を簡便に行うことができた。また、その結果は実験値とよく対応した。
- 2) 断面性能に基づくRC柱の履歴復元力特性の定量化を、材料の非線形特性を既知として計算のみによって行うことができた。

#### [謝辞]

本研究の実施に当たり森下豊 技官および滝澤晶君の多大な協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。なお、本研究は文部省科研一般研究(B)No.01460174 (研究代表者 池田尚治)の一環として行ったものである。

#### [参考文献]

- [1] 尾坂、鈴木、桑澤、石橋：静的交番繰り返し荷重下でのRC柱の履歴復元力特性に関する研究、土木学会論文集 第372号、pp.45~54、1986
- [2] 中村、二羽、田辺：鉄筋コンクリート柱の終局変位に関する解析的研究、土木学会論文集 第420号、pp.115~124、1990
- [3] 池田、山口、鶴澤：鉄筋コンクリート柱の地震時挙動と耐震設計の評価、コンクリート工学論文集 第2巻第1号、pp.105~113、1991

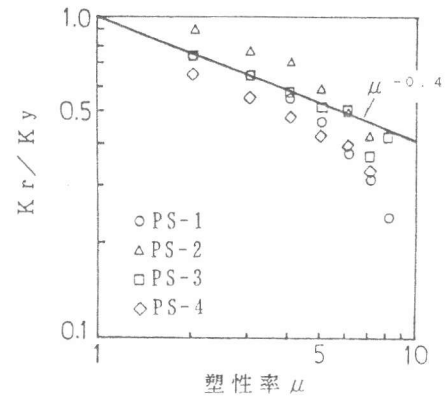


図-10 塑性率と除荷時剛性の比較

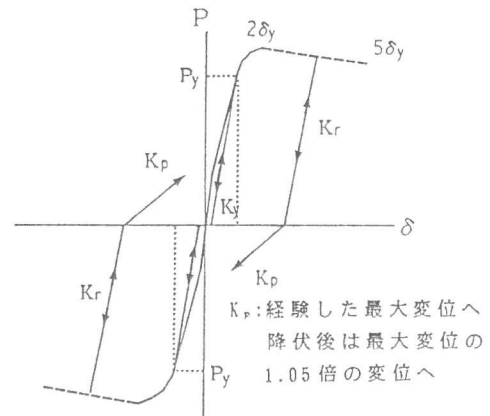


図-11 定量化した履歴復元力特性

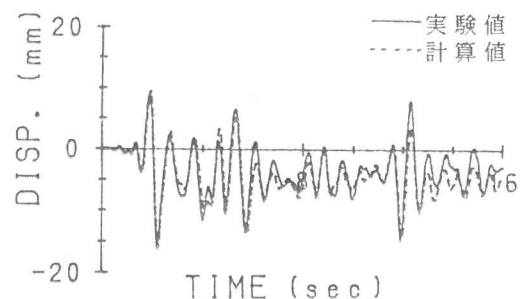


図-12 準動的載荷による実験値と計算値の比較 (PD-1供試体)