

(38) コンクリート構造物の履歴特性のデータベースに関する一考察

横浜国立大学工学部 正会員 梶 龍哉

1. はじめに

コンクリート構造物が地震力のような繰り返し荷重を受ける場合の挙動については、これまでに実験的に多くの研究がなされており、部材あるいは構造物レベルの履歴特性に関して、数多くの実験データが蓄積されている。コンクリート構造物の履歴特性のデータからは構造物の損傷程度やその力学特性を推定するために必要な種々の指標を求めることができる。本研究では、履歴特性のデータからコンクリート構造物の損傷の進行にともなう耐力と剛性の低下等を表す指標を検討する場合に必要な実験データ項目について、既往の実験結果から作成したモデル・データベースをもとに考察する。

2. コンクリート構造物の履歴特性に関する指標

コンクリート構造物が繰り返し荷重を受ける場合、その損傷の程度を定量的に把握するためには、損傷度を示す適切な指標が必要になる。これまでに提案されている種々の指標には、変位の比率を用いる指標(じん性率)、荷重変位曲線に示される剛性の比率を用いる指標(勾配比、損傷比)、塑性回転角を用いる指標(累積塑性回転率)、散逸エネルギーを用いる指標(損傷指数、散逸エネルギー指標)等がある。コンクリート構造物の履歴特性を特徴づけるためにはこれらの指標が有効であると考えられる。以下にこれまでに提案され、あるいは用いられている指標の主なものをまとめる。なお、以下の記述に用いられる変位、荷重、剛性、散逸エネルギーに関連する主な変数は、図-1 および図-2 に示される。

(1) じん性率

変位の比率を用いて構造物の損傷度を表す指標としては、次式で表されるじん性率がある。

$$\mu = \delta_u / \delta_y \tag{1}$$

ここに、 δ_u は終局変位、 δ_y は降伏変位である。

(2) 勾配比 (Toussi-Yao-Chen モデル)[1]

勾配比は、構造物の損傷度を表すために、荷重変位曲線から求められる剛性をもとに次式で与えられる指標

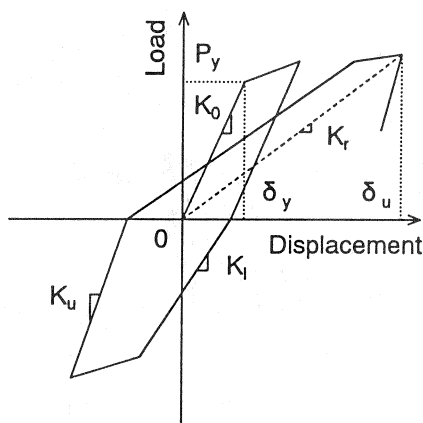


図-1 荷重変位曲線

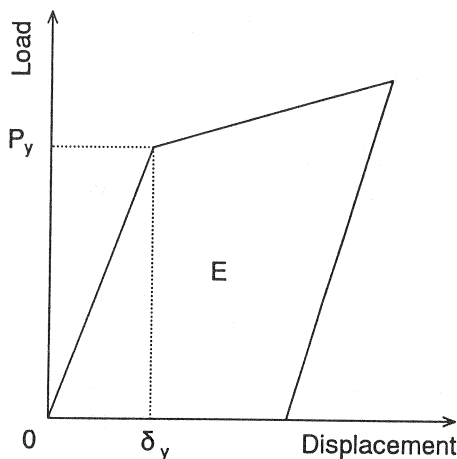


図-2 散逸エネルギー

である。

$$SR = K_\ell / K_u \quad (2)$$

ここに、 K_ℓ は低荷重時における部材の負荷剛性、 K_u は除荷時の初期の剛性である(図-1 参照)。

(3) 損傷比 (Lybas-Sozen モデル)[2]

荷重変位曲線から得られる剛性の比率を用いる指標としては、初期剛性を用いる次のような損傷比がある。

$$DR = K_0 / K_r \quad (3)$$

ここに、 K_0 は初期の剛性であり、 K_r は最大変位時における割線剛性である。

(4) 累積塑性回転率 (Banon-Veneziano モデル)[2]

塑性回転率を用いる指標としては、累積部材塑性回転角を正規化した累積塑性回転率 NCR がある。

$$NCR = \frac{\sum |\theta_0|}{\theta_y} = \frac{\sum |\delta_0|}{\delta_y} \quad (4)$$

ここに、 θ_0 、 δ_0 は荷重による部材塑性回転角と塑性変位、 θ_y は降伏時の部材回転角である。

(5) 損傷指数 (Park-Ang モデル)[3]

構造物の散逸エネルギーを用いた指標としては、次のような損傷指数がある。

$$D_e = \frac{\delta_{max}}{\delta_{u0}} + \frac{\beta}{Q_y \delta_{u0}} \int dE; \quad \beta = (-0.447 + 0.73 \frac{l}{d} + 0.24n_0 + 0.314p_t)0.7^{\rho_w}; \quad n_0 = \frac{N}{f'_c b d} \quad (5)$$

ここに、 δ_{max} は最大変位、 δ_{u0} は単調荷重時の終局変位、 Q_y は降伏耐力(計算値)、 dE は散逸エネルギー増分である。また、 l/d はせん断スパン比、 n_0 は正規化された軸力 N 、 p_t は軸方向鉄筋比(引張側)、 ρ_w は拘束比(帯鉄筋の体積を2本の帯鉄筋がはさむコンクリートの体積で除した比)、 f'_c はコンクリートの圧縮強度、 b 、 d は部材断面の幅と有効高さである。

(6) 散逸エネルギー指標 (Darwin-Nmai モデル)[4]

$$E_i = E \left[0.5P_y \delta_y \left(1 + \left(\frac{A'_s}{A_s} \right)^2 \right) \right]^{-1} \quad (6)$$

ここに、 E は散逸エネルギーの総量、すなわち、各荷重サイクルの最大荷重 $P_m \geq 0.75P_y$ となる荷重サイクルでの全散逸エネルギー、 A_s は引張鉄筋の断面積、 A'_s は圧縮鉄筋の断面積、 P_y は降伏荷重、 δ_y は降伏変位であ

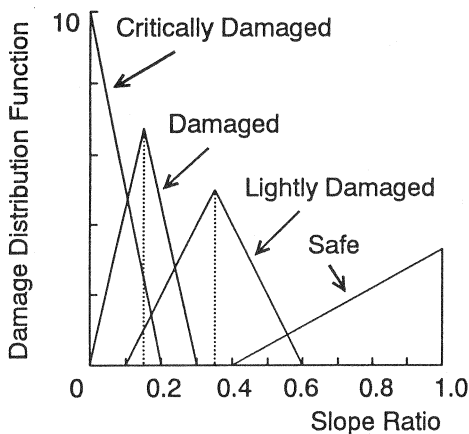


図-3 勾配比による損傷の分類

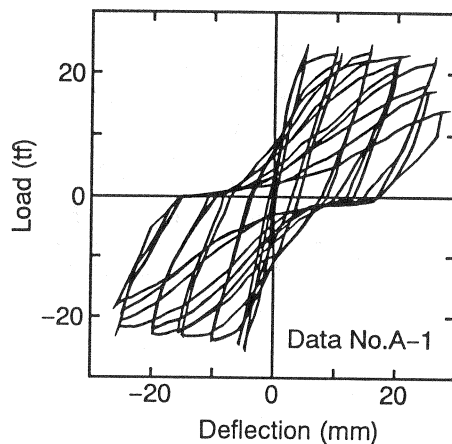


図-4 荷重変位曲線の例(データ番号 A-1)

る。

(7) 散逸エネルギー指標 (Banan-Veneziano モデル)[2]

$$E_n = \frac{2}{M_y \theta_y} \int_0^t M(\tau) \frac{d\theta_0(\tau)}{d\tau} d\tau = \frac{2}{P_y \delta_y} \int_0^t P(\tau) \frac{d\delta_0(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (7)$$

ここに、 M は曲げモーメント、 θ_0 は部材塑性回転角、 t は時刻、 $M_y \theta_y / 2$ は弾性的に蓄えられる最大エネルギーである。

表-1 データベースに用いたデータ一覧

データ名	文献番号	部材タイプ	データ番号	文献の図・供試体番号	実験要因
A	5 (尾坂ほか)	RC 柱	A1-A6	図-5(A1-A6)	せん断スパン比 軸方向鉄筋比 横方向鉄筋量
			A7-A10	図-6(B1-B4)	載荷パターン
			A11-A13	図-6(B5-B8)	載荷速度
B	6 (Hwang et al.)	RC 片持ち ばり	B1	Fig.6(S3-2)	載荷パターン
			B2	Fig.7(S3-2)	
			B3	Fig.8(S3-1)	
			B4	Fig.8(S3-2)	
			B5	Fig.8(S3-3)	
			B6	Fig.8(S3-4)	
C	7 (Wight et al.)	RC 柱	C1	Fig.4(40.033A)	帯鉄筋の鉄筋径 と間隔, 載荷パターン
			C2	Fig.4(00.033)	
			C3	Fig.4(40.048)	
			C4	Fig.4(00.048)	
			C5	Fig.4(40.147)	
			C6	Fig.4(00.147)	
D	8 (Scribner et al.)	RC はり 柱接合部	D1	Fig.7(a)(spec.3)	横方向鉄筋, 帯鉄筋 の鉄筋径と間隔
			D2	Fig.7(b)(spec.4)	
E	1 (Wilby)	RC フレーム (6 層)	E1	Fig.5	載荷パターン
F	1 (Bertero et al.)	RC 片持ち ばり	F1	Fig.6	載荷パターン (高せん断力)
G	1 (Fenwick et al.)	RC はり柱 接合部	G1	Fig.7	載荷パターン
H	1 (Popov et al.)	RC 片持ち ばり	H1	Fig.8	載荷パターン (高せん断力)

3. コンクリート構造物の履歴特性に関するデータベース

コンクリート構造物が繰り返し荷重を受けたときの履歴特性をデータベース化することにより、構造物の損傷度が定量的に表される種々の指標が計算できる。たとえば、勾配比を用いると、図-3に示すように、損傷の程度を損傷分布関数を定義することにより、健全、軽微な損傷、中程度の損傷、かなりの損傷という4つの段階に分類することができる[1]。図-3では、各損傷分布関数はその面積が1になるように正規化されている。以下では、具体的な繰り返し荷重を受けるコンクリート構造物に関する実験データをモデル・データベース化することを通して、データベースに必要なデータ項目を検討することを試みる。データベースには、実験データを特徴づけるパラメータと、図-4に示すような荷重変位曲線のデータをデジタル化して入力する。

表-2 データベースのデータ項目

データ番号	データ項目	記号	データ番号	データ項目	記号
1	データ・タイトル	-	13	断面高さ	h
2	降伏荷重	P_y	14	部材断面に作用する軸力	N
3	降伏変位	δ_y	15	コンクリートの圧縮強度	f'_c
4	終局荷重	P_u	16	引張鉄筋断面積	A_s
5	終局変位	δ_u	17	圧縮鉄筋断面積	A'_s
6	最大変位	δ_{max}	18	横方向鉄筋断面積	A_w
7	荷重比	P_u/P_y	19	帯鉄筋間隔	s_w
8	変位比-1	δ_u/δ_y	20	帯鉄筋1本の断面積	A_{w0}
9	変位比-2	δ_{max}/δ_y	21	上下帯鉄筋間の距離	h_w
10	部材長	ℓ	22	左右帯鉄筋間の距離	b_w
11	断面有効高さ	d	23	帯鉄筋の体積	V_w
12	断面幅	b	24	帯鉄筋間のコンクリートの体積	V_c

表-3 データの詳細

データ番号	部材長 ℓ (mm)	有効高さ d (mm)	断面積 A (mm ²)	軸方向鉄筋比 p (%)	せん断 スパン比 ℓ/d	軸力 N/A (N/mm ²)
A-1~A-3	875.0	350.0	160000.0	1.74~2.98	2.5	1.0
A-4~A-6	1400.0	350.0	160000.0	2.15~3.99	4.0	1.0
A-7~A-13	1400.0	350.0	160000.0	2.15	4.0	0.0
B-1~B-6	635.0	247.0	61940.0	3.25	2.6	0.0
C-1~C-6	876.0	254.0	46450.0	2.44	3.4	0.0
D-1~D-2	1054.0	257.0	61940.0	2.34~2.80	4.1	0.0
E-1	305.0/層	25.0	2580.0	2.43	12.2	0.0
F-1	1980.0	737.0	280000.0	3.23	2.7	0.0
G-1	1250.0	300.0	60000.0	3.12	4.2	0.0
H-1	1981.0	737.0	280600.0	2.76	2.7	0.0

繰り返し荷重を受けるコンクリート構造物の挙動に関する実験的研究として、ここでは、尾坂ら [5], Hwang ら [6], Wight ら [7], Scribner ら [8], Wilby, Bertero ら, Fenwick ら, および Popov ら (以上文献 [1] より) のものを取り上げ、それらに示されている荷重変位曲線および実験パラメータをモデル・データベースとしてまとめた。データベースの資料とした文献の一覧は表-1 に示される。モデル・データベースに入力されたのは、計 31 体の供試体に関するデータである。部材のタイプとしては、RC 柱, RC 片持ちばり, RC はり柱接合部, RC フレームが含まれる。RC 柱が 19 体, RC 片持ちばりが 8 体, RC はり柱接合部が 3 体, RC フレームが 1 体である。実験の主な要因は、せん断スパン比, 軸方向鉄筋比, 横方向鉄筋の量, 鉄筋径, 間隔, 荷重パターン, 荷重速度, および軸力の影響である。また、データベースに入力されたパラメータの項目およびその詳細の一部は、表-2, 表-3 に示される。表-2 のパラメータの項目には、上記の種々の損傷度を表す指標を計算するために必要となるものを含めている。すなわち、荷重および荷重比, 変位および変位比, 部材長, 部材断面諸量, 作用する軸力, コンクリートの圧縮強度, 軸方向鉄筋量, および横方向鉄筋の諸量等である。これらのパラ

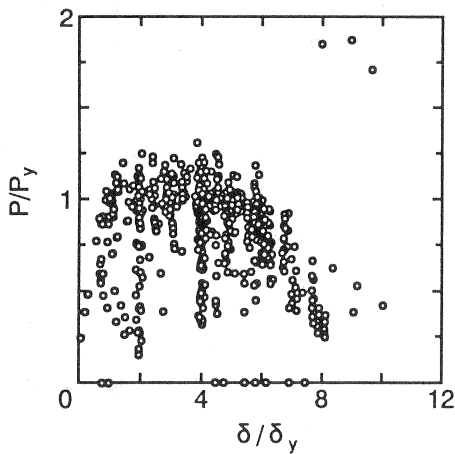


図-5 最大荷重比と変位比の関係

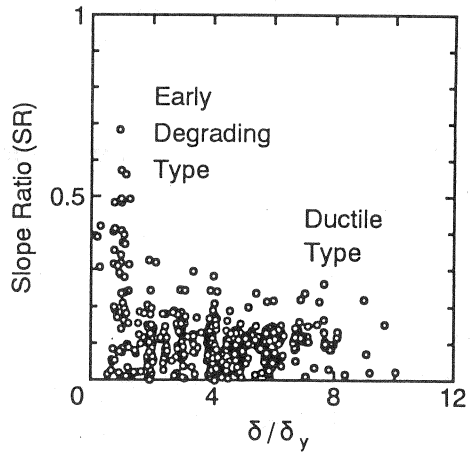


図-6 勾配比と変位比の関係

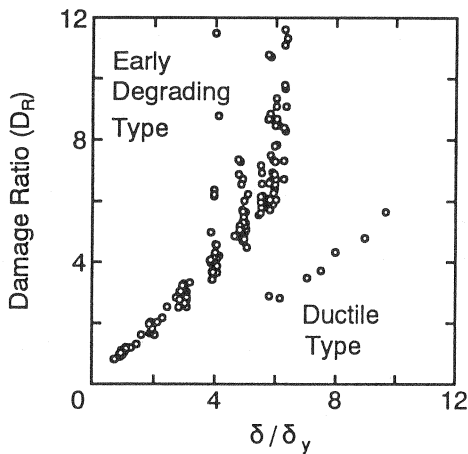


図-7 損傷比と変位比の関係

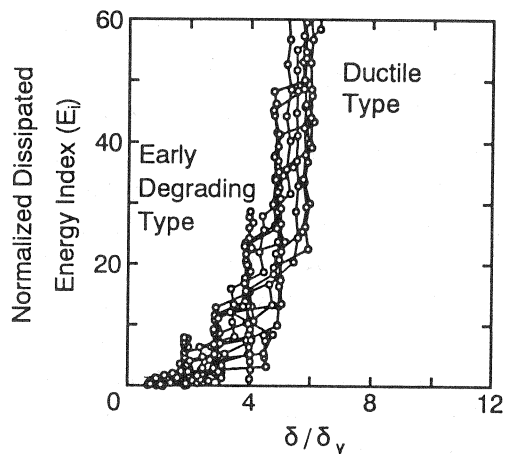


図-8 散逸エネルギー指標と変位比の関係

メータは、繰り返し荷重の作用方向に応じた値が入力される。これらのパラメータの他にも、損傷度を載荷速度の影響を含めて検討する場合はパラメータとして載荷速度が必要になる。また、断面形状が複雑な場合は断面形状を定義するパラメータが必要である。

以上のように作成されたモデル・データベースを用いて、履歴特性を表すと思われる主な指標のいくつかを計算した結果が図-5～図-8に示される。図-5には、各荷重サイクルにおける最大荷重比(P/P_y)と変位比、すなわち各荷重サイクルにおける最大変位と降伏変位の比(塑性率)(δ/δ_y)の関係がプロットされている。変位の増加とともに、部材の各荷重サイクルにおける最大荷重が減少する様子が確認される。図-6には、勾配比(SR)と変位比の関係が各荷重サイクルごとにプロットされている。変位が比較的小さいときに破壊が起こる早期劣化型と変位が大きくなった段階で破壊するじん性型の分布が確認される。図-7には、損傷比(D_R)と変位比の関係がプロットされている。また、図-8には、正規化された散逸エネルギー指標(E_i)と変位比の関係がプロットされている。これらの図においても、早期劣化型とじん性型の分布があることが確認される。

以上のように、コンクリート構造物の履歴特性に関するデータベースは、構造物の損傷を定量化するための適切な指標を定めることなどに有効であることがわかる。プレストレストコンクリート構造物を含めて種々の構造物の履歴特性をデータベース化することによってその適用範囲と有効性が拡大するものと思われる。

4. まとめ

繰り返し荷重を受けるコンクリート構造物の履歴特性に関する実験データをもとに、モデル・データベースを構築し、必要なデータ項目について検討した。また、モデル・データベースをもとに、コンクリート構造物の損傷度を表す主な指標のいくつかについて計算し、それらの指標の特徴を検討することを通してデータベースの有効性を確認した。

謝辞

上記のモデル・データベースの作成にあたっては、伊藤和重氏(当時、本学卒業研究生)のご協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Toussi, S., Yao, J.T.P. and Chen, W.F.: A Damage Indicator for Reinforced Concrete Frames, *ACI Journal*, Vol.81, No.3, pp.260-267, 1984.
- 2) Chung, Y.S., Meyer, C. and Shinozuka, M.: Modeling of Concrete Damage, *ACI Structural Journal*, Vol.86, No.3, pp.259-271, 1989.
- 3) Park, Y.-J. and Ang, A.H.-S.: Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, *Journal of Structural Engineering*, Vol.111, No.4, pp.722-739, 1985.
- 4) Darwin, D. and Nmai, C.K.: Energy Dissipation in RC Beams under Cyclic Load, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.112, No.8, pp.1829-1846, 1986.
- 5) 尾坂芳夫・鈴木基行・蟹江秀樹: RC柱の履歴復元力特性に及ぼす載荷速度と載荷パターンの影響, *構造工学論文集*, Vol.34A, pp.911-922, 1988.
- 6) Hwang, T.-H. and Scribner, C.F.: R/C Member Cyclic Response during Various Loadings, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.110, No.3, pp.477-489, 1984.
- 7) Wight, J.K. and Sozen, M.A.: Strength Decay of RC Columns under Shear Reversals, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.101, No.ST5, pp.1053-1065, 1975.
- 8) Scribner, C.F. and Wight, J.K.: Strength Decay in RC Beams under Load Reversals, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.106, No.ST4, pp.861-876, 1980.