

R C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

EFFECTS OF LOADING RATE AND LOADING PATTERN ON
BEHAVIOURS OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS

尾坂芳夫・鈴木基行・蟹江秀樹

by Yoshio OZAKA, Motoyuki SUZUKI and Hideki KANIE

This study was intended to investigate experimentally influences of loading rate and loading pattern on the behaviours of reinforced concrete columns. Each column had a comparatively large cross section (40×40cm) and was reinforced with web reinforcements in order to avoid shear failure. As a result, it was found that the loading pattern greatly affects the envelop of the P- δ curves and shapes of loops, and that the loading rate has influences on the plastic hinge range and maximum load but hardly any on hysteresis loop shape. Furthermore, a model of force-displacement relationship taking into consideration of load reduction due to repetitions was proposed.

1、まえがき

R C柱の履歴復元力特性に関し、数多くの実験データの累積がなされてきており、解析に用いるモデルもいくつか提案されてきている。これらの実験においては、部材降伏変位を載荷の際の尺度とし、その整数倍の変位で各々数回～10回程度の静的交番繰り返し載荷を終局に至るまで行っている。

しかし、R C構造物が地震時に受ける作用は決して静的なものではなく、また変位が徐々に増加するような挙動をとるわけでもない。実際、R C橋脚の動的応答解析例¹⁾によると、地震時に部材がその降伏変位を越える回数は、最大入力加速度が同じであっても入力地震波や構造物の振動特性等の違いにより、数回の場合から20回を越える場合までさまざまである。このような例から判断しても、地震の作用を受けるR C構造の挙動は、速度（正確にはひずみ速度というべきであろう）や載荷パターンあるいは繰り返し回数等の影響を大きく受けるものと思われる。

本研究は、主として載荷速度や載荷パターンがR C柱の履歴復元力特性に及ぼす影響を実験的に調べようとするものである。

* 工博 東北大学教授 工学部土木工学科 (〒980 仙台市荒巻字青葉)

** 工修 東北大学助手 工学部土木工学科

*** 工修 清水建設㈱

2、既往の研究と本研究の目的

(1) 載荷速度が材料特性に及ぼす影響

載荷速度が構造材料の力学的特性に影響を及ぼすことは比較的早くから知られている。たとえば、コンクリートの圧縮強度や引張強度はひずみ速度の対数に比例して増加することが畑野ら²⁾、竹田ら³⁾、若林ら⁴⁾により明らかにされている。また、Dilgerら⁵⁾により横方向拘束筋が多い場合には、コンクリートの応力-ひずみ曲線は載荷速度の影響をほとんど受けないことも明らかにされている。鉄筋についても、その降伏点強度や引張強度はひずみ速度の影響を大きく受けることが、若林ら⁴⁾、青木ら⁶⁾、町田ら⁷⁾により明らかにされている。

(2) 載荷速度が部材特性に及ぼす影響

a) 破壊性状：動的荷重下と静的荷重下とでは、部材に生じるひびわれパターンや破壊性状に違いが見られ、動的荷重下では発生するひびわれ本数が少なく、損傷は狭い領域に集中すること^{8) ~11)}、また載荷速度により部材の破壊形式に違いが生じる可能性があること^{7) 12)}、等が指摘されている。

b) 荷重-変位関係：町田ら⁷⁾は曲げ降伏型RC柱の実験を行い、動的荷重下での部材降伏荷重や耐力の上昇は、ひずみ速度の影響により鉄筋の降伏点強度が増加することで説明づけられること、および載荷速度の影響は大変形下では認められないことを実験的に明らかにしている。さらに、静的荷重下で得られた荷重-変位曲線を基に、鉄筋の力学的特性におよぼすひずみ速度の影響を考慮してRC柱の履歴復元力特性のモデル化の方法を提案している¹³⁾。また、森田ら¹²⁾は、RC短柱のせん断ひびわれ発生荷重や初期剛性は、動的荷重下では大きくなり、付着割裂耐力も上昇することを報告している。

c) 変形性能：曲げ破壊型のRC柱では、載荷速度が速くなると塑性変形能力が低下することが指摘されている^{10) 14)}。荒川らは、 $a/d=1.5$ の短柱を対象に載荷荷重の速度や周波数が同一の場合、変位振幅ビッチの減少によって変形性能が低下すること^{15) 16)}等を明らかにしている。

(3) 本研究の目的

以上の研究は、部材のせん断スパン比が7以上の供試体を対象に、主として載荷速度の影響について検討されてきたものであり、載荷パターンや繰返し回数が部材挙動に及ぼす影響について調べた研究はほとんど見当たらない。

本研究は、これら既往の研究を踏まえ、鉄道構造物として多用されているRCラーメン高架橋の柱を念頭におき、断面寸法が40cm×40cmと比較的大きなRC柱を対象に、載荷速度と載荷パターンとがRC柱の履歴復元力特性に及ぼす影響を実験的に調べ、さらにそれらのモデル化の方法を提案しようとするものである。

なお、供試体の変動要因は軸方向主鉄筋比、帯鉄筋比、せん断スパン比さらに側面鉄筋量とした。ここで、側面鉄筋とは曲げが作用する断面の中立軸に対し、直角方向に配筋した軸方向主鉄筋をいう。また軸方向鉄筋の代わりにH鋼を埋めこんだSRC柱の挙動についても検討した(供試体A6)。

3 実験概要

(1) 供試体諸元

供試体諸元を表-1に、載荷方式(載荷パターン、速度等)を表-2に示す。実験はA、Bの2シリーズに大別できる。Aシリーズの変動要因はせん断スパン比、軸方向主鉄筋比、側面鉄筋量である。Bシリーズの変動要因は載荷パターン(供試体B1~B4)および載荷速度(供試体B5~B7)である。

帯鉄筋は、A4供試体を除いて終局曲げ耐力の1.2倍の荷重に相当するせん断力を受けても帯鉄筋が降伏しないよう配筋した。なお、A6供試体はSRC供試体で、断面中央にH鋼(250×110×9×14mm、SS41材)を配置してある。全供試体とも断面寸法は全て同じである(幅b、高さhは共に40cm、有効高さdは35

cm)。表-1 で軸方向引張（圧縮）主鉄筋とは、引張側（圧縮側）最外縁に配置した鉄筋をいう。A6では、引張側最外縁にある鉄筋及びH鋼引張側フランジの和でもって表した。また、軸方向主鉄筋（鋼材）比とは、軸方向主鉄筋全断面積（A6については、さらにH鋼断面積を加えたもの）をコンクリート断面積（ $b \cdot h$ ）で除したものである。なお、Aシリーズでは供試体頂部に軸力として10kgf/cm²の圧縮応力を加えた。一般に、東北新幹線等に用いられているRCラーメン高架橋の柱には死荷重によって10kgf/cm²程度の軸方向圧縮応力が作用している。

図-1 に配筋の一例を示す。

(2) 使用材料

使用したコンクリートの示方配合を表-3に示す。供試体載荷時のコンクリート圧縮強度は、柱供試体と同一養生（コンクリート打設後50℃、5時間蒸気養生）した円柱供試体（φ100×200mm）による測定値として、Aシリーズでは344～420kgf/cm²、Bシリーズでは302～342kgf/cm²、引張強度はAシリーズでは32.0～37.5kgf/cm²、Bシリーズでは32.2～36.2kgf/cm²であった。軸方向主鉄筋として用いたD13、D16、D19は横フシ異形鉄筋（SD35）、帯鉄筋として用いたD6、D10は共にSD30、A6に用いたH鋼は共にSS41材である。鉄筋およびH鋼の引張試験結果を表-4に示す。

(3) 載荷及び測定方法

図-2 に、載荷方法の模式図を示す。制御は載荷点にセットした差動トランス式変位計により行った。B5～B7の動的載荷実験では、供試体に作用する復元力は、ロードセルで検出した供試体の反力から供試体（質量は柱部の33/140を考えた¹⁷⁾）と治具の慣性力を差し引いたものとした⁷⁾¹¹⁾。供試体載荷点に作用する速度はその箇所に取り付けた加速度計から求めた。なお、生じた加速度は最大で50gal程度であった。図-3 に、測定方法の模式図を示す。

表-1 供試体諸元一覧表

供試体 No	軸方向引張主鉄筋 本数 鉄筋径	側面鉄筋 鉄筋比 ¹⁾ $P_t(\%)$	側面鉄筋 本数 鉄筋径	軸方向鉄筋(鋼材)比 ²⁾ $P_{to}(\%)$	帯鉄筋 鉄筋径 間隔 (cm)	鉄筋比 $P_u(\%)$	せん断比 a/d	軸力 (kg/cm ²)
A1			0	1.74	D10	8.9	0.40	
A2	7 D16	0.87	$\frac{2}{(D16)}$	2.23	D10	8.0	0.45	2.5
A3			$\frac{5}{(D16)}$	2.98	D10	7.0	0.51	
A4	6 D19	1.07	0	2.15	D6	14.0	0.11	4.0
A5			$\frac{4}{(D19)}$	3.58	D10	9.9	0.36	
A6	2 D16 1 D13	1.29	$\frac{1}{(D13)}$	3.99	D10	13.5	0.26	4.0
B1～B8	4 D19	0.72	$\frac{2}{(D19)}$	2.15	D10	8.0	0.45	4.0
								0

(注) 1) $P_t = A_{st}/bh$ 2) $P_{to} = A_s/bh$

表-2 載荷方式

供試体 No	載荷パターン () 内の数字は繰り返し数	周波数 (Hz)	速度 (cm/sec)
A1 ～A6	1δy→2δy→3δy→4δy→5δy→6δy→ (5) (5) (5) (5) (5) (5)		静的
B1	1δy→2δy→3δy→4δy→5δy→6δy→ (5) (5) (5) (5) (5) (5)		
B2	1δy→3δy→5δy→7δy→8δy (5) (5) (5) (5) (5)	0.01	静的
B3	1δy→5δy→6δy→7δy→8δy (5) (5) (5) (5) (5)		
B4	1δy→2δy→1δy→3δy→2δy→4δy→3δy→5δy (3) (3) (2) (3) (2) (3) (2) (3)		
B5		X	10
B6	1δy→2δy→3δy→4δy→5δy→6δy→ (5) (5) (5) (5) (5) (5)	X	5
B7		X	1
B8	静的→一方単調増加		

X 周波数 f は次式より求める。 ○ B5～B7はSin波入力
 $f = v/2\pi(n\delta y)$ (Hz) ○ δy は部材降伏時の載荷点変位
 ここに
 v : 変位0での速度 (cm/sec), $n\delta y$: 変位振幅 (cm)

表-3 コンクリート示方配合表

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランパ の範囲 (mm)	空気量 の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				配合比 W:C:S:L
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
25	12±2.5	3±1	58	44	173	298	806	1069	3.3

表-4 鋼材引張試験結果

シリーズ名	呼び径	規格	降伏点 応力 (kg/cm ²)	降伏歪 (μ)	引張強さ (kg/cm ²)	伸び (%)	弾性係数 (kg/cm ²)	備 考
A	D 6	SD 30	3775	2120	5630	16.2	1.78 ¹⁰⁾	非加工品
	D 10	SD 30	3450	2000	5520	13.8	1.81	
	D 13	SD 35	3750	2180	5470	19.6	1.74	
	D 16	SD 35	4080	2400	5630	18.3	1.75	
	D 19	SD 35	3740	2400	5490	20.4	1.61	
B	D 10	SD 30	4160	2170	6000	15.0	1.90	非加工品
	D 19	SD 35	3790	2070	5610	16.9	1.90	
	D 10	SD 30	4385	2230	6120	19.4	1.99	加工品
	D 19	SD 35	4140	2010	5900	18.7	2.05	
A	H型鋼 ウェブ フランジ	SS 41	3650	1930	4940	28.5	1.93	加工品 (平板)
			3110	1600	4660	36.3	1.96	

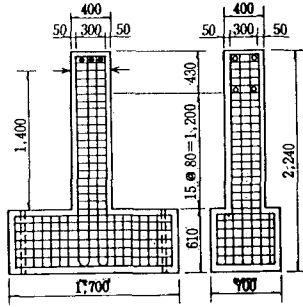
A 非加工品：鉄筋を加工せず。鉄筋断面積は公称断面積を用いた。

B 非加工品：鉄筋重量、長さ、密度(7.853g/cm³とする)から求めた断面積を用いた。

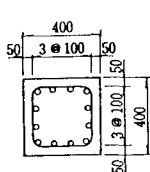
4. 実験値

表一五 に部材降伏

時、最大荷重時の水平荷重 P_y 、 P_u および同載荷点水平変位 δ_y 、 δ_u として最大変位時の載荷点水平変位 δ_{max} を載せる。部材降伏時は、柱付け根部最外縁の引張鉄筋が降伏した



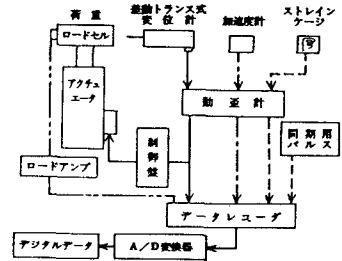
図一 供試体寸法、配筋例



図二 載荷模式図

時とした。また、最大変位時とは荷重－変位（載荷荷重 P －載荷点水平変位 δ ）曲線の下降域において部材降伏荷重と同じ荷重値になった時とした。部材の履歴特性に及ぼす載荷速度の影響を調べた B5～B7 供試体の各変位振幅での周波数および柱付け根部の引張鉄筋に生じたひずみ速度を表一六 に示す。

側面鉄筋が付加されることにより部材降伏荷重は増加し、降伏後の荷重の増加も顕著になる。すなわち、A1 では降伏後の荷重の増加がほとんど無いのに対し、A2、A3 では、およそ 14% の増加を示している。しかし、ダクティリティ δ_u/δ_y 、 δ_{max}/δ_y は、側面鉄筋量の影響をほとんど受けないようである。なお、A4 に比べ A5 のダクティリティが高いのは帯鉄筋量の違いによるものと思われる。



図三 測定模式図

表一五 実験結果一覧表

供試体 No.	正負	部材降伏時 荷重 $P_y(t)$	変位 $\delta_y(mm)$	最大荷重時 荷重 $P_u(t)$	変位 $\delta_u(mm)$	最大変位時 変位 $\delta_{max}(mm)$	P_u/P_y	δ_u/δ_y	δ_{max}/δ_y
A1	+	23.6	5.1	23.9	15.4	27.4	1.01	3.02	5.37
	-	25.3	4.6	25.3	4.6	25.7	1.00	1.00	5.59
A2	+	25.9	4.6	29.5	9.0	27.3	1.14	1.96	5.93
	-	26.5	4.6	29.3	9.1	28.2	1.11	1.98	6.13
A3	+	33.8	5.3	38.6	10.7	32.3	1.14	2.02	6.09
	-	29.5	5.3	33.5	10.2	31.9	1.14	1.92	6.02
A4	+	17.9	8.1	22.7	16.2	32.8	1.27	2.00	4.05
	-	18.5	8.0	20.5	31.2	33.4	1.11	3.90	4.18
A5	+	22.8	9.1	30.7	27.2	54.7	1.35	2.99	6.02
	-	19.6	8.9	30.0	37.2	55.1	1.53	4.18	6.19
A6	+	19.2	8.1	25.6	28.9	56.5	1.33	3.57	6.98
	-	19.4	8.4	27.1	48.7	56.3	1.40	5.80	6.70
B1	+	13.7	10.1	15.2	13.1	64.0	1.11	1.30	6.34
	-	12.7	8.6	13.6	19.3	65.0	1.07	2.24	7.56
B2	+	13.8	11.0	16.0	30.2	66.0	1.16	2.75	6.00
	-	13.4	11.6	13.8	55.1	66.0	1.03	4.75	5.69
B3	+	13.8	8.5	16.6	31.3	71.0	1.20	3.68	8.35
	-	14.0	13.5	14.6	44.5	73.0	1.04	3.30	5.41
B4	+	14.4	12.3	15.0	22.7	71.0	1.04	1.85	5.77
	-	12.8	10.2	13.9	69.0	73.0	1.09	6.76	7.16
B5	+	13.7	10.1	16.4	13.1	69.0	1.20	1.30	6.83
	-	12.7	8.6	14.8	17.8	69.5	1.17	2.07	8.08
B6	+	13.8	10.2	16.8	23.9	61.2	1.22	2.34	6.00
	-	13.1	7.4	14.2	26.2	61.0	1.08	3.54	8.20
B7	+	13.8	9.3	15.6	14.9	60.0	1.13	1.60	6.45
	-	12.9	8.6	13.6	54.1	60.0	1.05	6.29	7.00
B8	+	13.8	10.5	17.4	167.0 以上	167.0 以上	1.26	15.90	15.90 以上

δ_u/δ_y 等に及ぼす載荷速度の影響はほとんど認

められなかった。

5、 ひびわれ状況

最終ひびわれ状況を図-4 に示す。

(1) Aシリーズ供試体

A 1～A 3 の供試体のひびわれ状況は、1 δy の1サイクル目の正負の繰り返しで、ほぼ全てのひびわれパターンが決定され、斜めひびわれも1 δy の載荷で生じた。この時の平均せん断応力度(せん断力/柱断面積)は、A 1～A 3でそれぞれ、14.8、16.2、21.2kgf/cm² と側面鉄筋量の増加と共に増加している。このことは、秋元ら¹⁸⁾ もせん断スパン比4の柱を対象に軸方向主鉄筋の配筋を柱状(側面鉄筋のあるもの)とはり状(側面鉄筋のないもの)とに変化させた実験結果から指摘している。4 δy で縦ひびわれが発生し、5 δy で柱基部でのコンクリートの剥落、6 δy で斜めひびわれの幅が拡がり終局に至った。側面鉄筋は曲げひ

表-6 動的載荷実験周波数及びひずみ速度

供試体 No.	項目	実験条件								
		1 δy	2 δy	3 δy	4 δy	5 δy	6 δy	7 δy	8 δy	9 δy
B 5	f (Hz)	8.71	5.95	4.40	3.54	2.95	2.56			
	$\dot{\epsilon}$ (μ/s)	2430	10660	18510	13240	7900	3070			
B 6	f (Hz)	8.70	4.39	2.98	2.21	1.77	1.47	1.25	1.11	0.988
	$\dot{\epsilon}$ (μ/s)	1610	5000	10230	10870	7320				
B 7	f (Hz)	1.80	0.886	0.590	0.442	0.354	0.295			
	$\dot{\epsilon}$ (μ/s)	1820	7010	5370	4190	8500				

(注)・ f : 周波数、 $\dot{\epsilon}$: 軸方向主鉄筋の歪(柱とフーチング部との境界での歪)速度。

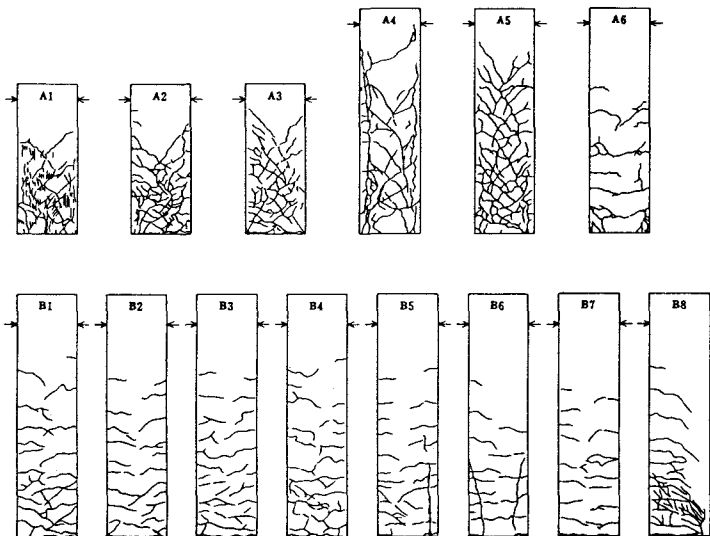


図-4 ひびわれパターン

びわれ間隔にも影響を与え、側面鉄筋量が多いと曲げひびわれ間隔が狭くなるようである。実際、供試体A 1、A 2、A 3で曲げひびわれ間隔はそれぞれ約20cm、15cm、12cmであった。

A 6の曲げひびわれ間隔は20～25cmで、A 4、A 5に比べ広くなっており、しかも軸線に対する斜めひびわれ角度は60°以下とならずせん断破壊は進行しなかった。3 δy でコンクリート圧壊が始まったが、変形が増大しても耐力の低下は認められず縦ひびわれも発生しなかった。

(2) Bシリーズ供試体

B 1～B 4において終局状態でのひびわれ性状に違いは認められず、本実験で採用した載荷パターンの違いが、曲げ破壊型のRC部材の最終ひびわれ性状に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。また、B 5～B 7の破壊性状より、塑性ヒンヂ領域(斜めひびわれが交差し、コンクリートが剥落する部分をいう)は、既往の研究と同様、載荷速度が速くなるに従い狭くなる傾向があった。B 7でのヒンヂ領域はおよそ部材の有効高さに相当する長さであったのに対し、B 5では有効高さの1/2～2/3程度にまで短くなった。

なお、既往の研究^{8)～11)}において、載荷速度が速くなると発生するひびわれ本数が少なくなる傾向を指摘しているが、本実験ではそのような傾向は認められなかった。これは既往の研究においては比較的小断面を有する供試体を用いていること、使用鉄筋本数が少ないこと等が原因と考えられる。また、載荷速度が速いB 5、B 6では軸方向主鉄筋に沿った縦ひびわれの発生が認められたことは特筆すべきことであろう。

6、 荷重-変位曲線(P- δ 曲線)

(1) 側面鉄筋の影響

Aシリーズ供試体のP- δ 曲線を図-5(a)~(f)に示す。いずれの供試体においても各変位での、2サイクル目の最大荷重は1サイクル目の最大荷重の90%程度に低下した。側面鉄筋の入っていないA1では1 δ_y で最大耐力を示したが、側面鉄筋が配筋された場合には最外縁の引張鉄筋から順次降伏するため、2 δ_y 以降の最大荷重は降伏荷重以上に上昇した。また、側面鉄筋量の違いによりループ形状が紡錘形から逆S字型へ移行する際の変位が異なるようである。A1では3 δ_y 、A2では(3~4) δ_y 、A3では(4~5) δ_y で紡錘形から逆S字型へ移行しており、側面鉄筋量が多くなると逆S字型に移行する際の変位が大きくなる。このようなことから、側面鉄筋は柱躯体部の水平方向のズレに対し有効に働き、ループ面積の減少やスリップ化を抑える働きがあると考えられる。 $a/d=4$ の供試体についてはA、B両シリーズとも、P- δ ループは終局に至るまで紡錘形かほぼ平行四辺形を描いており、せん断補強筋を十分配筋すればエネルギー吸収能の大きい部材を確保できるといえる。なお、SRCのA6は $\delta/\delta_y=7$ に至っても耐力が下がらなかった。

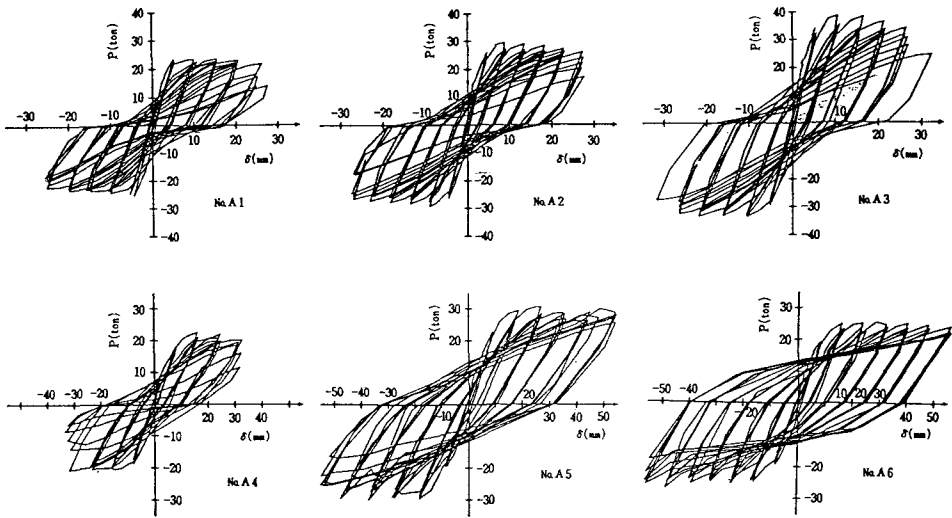


図-5 P- δ 曲線 (Aシリーズ)

(2) 載荷パターンの影響

Bシリーズ供試体のP- δ 曲線を図-6(a)~(h)に示す。Bシリーズ供試体のP- δ 曲線は終局に至るまで安定した紡錘形を示した。載荷パターンは、P- δ 曲線の各変位振幅での1サイクル目の包絡線に大きな影響を与えている(図-7 参照)。B1、B4は、ほぼ同じパターンで載荷したものであるが、その包絡線は2 δ_y で最大値をとり、その後下降している。一方向単調増加載荷を行ったB8のP- δ 曲線と比べて比較的早い変位段階で違いが生じているのがわかる。これに対し、B2の包絡線は3 δ_y まで上昇を続け、5 δ_y においてもほぼ同じ耐力を維持し、B8のP- δ 曲線とほぼ同じ軌跡をたどっている。B3においても、5 δ_y まではB8のP- δ 曲線とほぼ同じ軌跡をたどり6 δ_y で荷重が最大となり、それ以降耐力が減少しB1、B4とはほぼ等しくなっている。このような事実から判断して、一方向載荷時のP- δ 曲線は、正負交番繰り返しを受けた場合の包絡線の上限值であり、どのような繰り返し載荷(変位あるいは繰り返し数)を受けたかにより、描かれる包絡線に違いが生じるものと思われる。ある変位に到達するまでの変位履歴および繰り返し数が少ないほど、その描かれる包絡線は大変位レベルまで一方向載荷時のP- δ 曲線とほぼ一致しているといえる。

履歴ループを囲む面積は、それまでに受けた履歴の少ないものほど、より広くなるようである。例えば、

B2の3 δy 、B3の5 δy のループ面積は、B1やB4の同一変位のループよりはるかにその面積は大きい。各変位での繰返し数を3回と2回とに分けて載荷したB4での4サイクル目と5サイクル目のループは、1～3サイクル目のループに比べ小さく、荷重0付近でスリップ現象が現れている。

このことは、ある変位の繰返しを受け、その後その変位より小さい変位で繰返しを受けた場合のP- δ 曲線は、同一変位で所定の回数繰返しを受けた場合とで大きく異なる

ことを示しており、RC部材や構造物の交番荷重に対する履歴は、それらが過去にどの程度大きな変位の繰返しを受けたかにより、大きく変わりをうることを物語っている。

(3) 載荷速度の影響

載荷速度が速くなると部材降伏荷重および各変位振幅での最大荷重が大きくなる傾向がみられた(図-8参照)。今回の実験において部材降伏強度や最大荷重

が上昇したのは、主として軸方向主鉄筋が載荷速度の影響を受けたためと思われる。

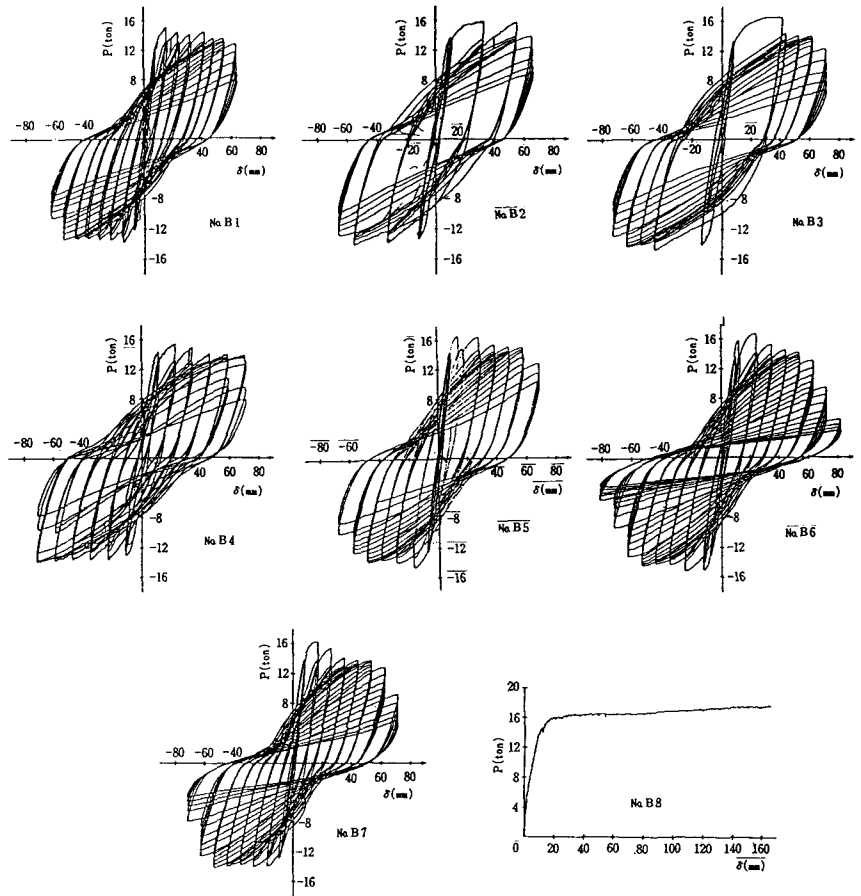


図-6 P- δ 曲線 (Bシリーズ)

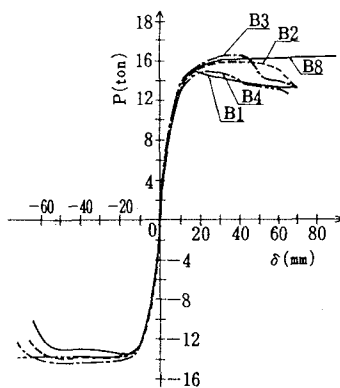


図-7 P- δ 包絡線

(載荷パターンの影響)

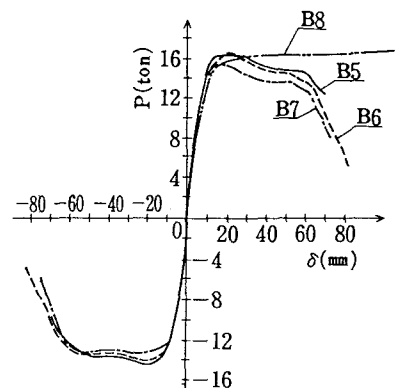


図-8 P- δ 包絡線

(載荷速度の影響)

既に述べたように、本実験の載荷速度の範囲内では、載荷速度はひびわれ状況や塑性ヒンチ領域および各変位での最大荷重に影響を及ぼすものの履歴ループ形状にはほとんど影響を与えていない。

静的・一方向載荷を行ったB 8は、非常に優れたダクティリティを示しており部材降伏変位の20倍の変位に至っても耐力は低下していない。これに対し交番繰り返しをうけたB 1～B 7では部材降伏変位の6～8倍の変位で耐力が低下した。耐力が低下する時の変位に及ぼす載荷速度の影響は特に認められなかった。なお、後の考察において仮定する履歴ループ基本曲線は、B 8のP-δ曲線とする。

(4) 交番繰り返しによる荷重低下

図-5、図-6のP-δ曲線をみてもわかるように、同一変位で交番繰り返し載荷が行われると、各サイクルでの最大荷重は繰り返し回数の増加につれ低下する。BシリーズのうちB 8を除く7本の供試体の2δy以降のデータをもとに荷重低下率を求めたものを図-9に示す。縦軸は繰り返しが行われた時の荷重低下率 P_2/P_1 (P_1 :前の載荷での最大荷重、 P_2 :今回の載荷での最大荷重)をとり、横軸には、 P_1 の基本曲線の荷重 P_{max} に対する比 P_1/P_{max} をとっている。ここで、 P_{max} は静的・一方向載荷を行ったB 8のP-δ曲線を参考にして、2δyで最大荷重を示し、その後は一定とした。この図より P_{max} に近い荷重からの繰り返しでは荷重低下率が大きく、 P_{max} から離れた荷重から繰り返す場合荷重低下率は小さくなることがわかる。 P_2/P_1 と P_1/P_{max} の関係を線形とし最小自乗法で整理し次式を得た。

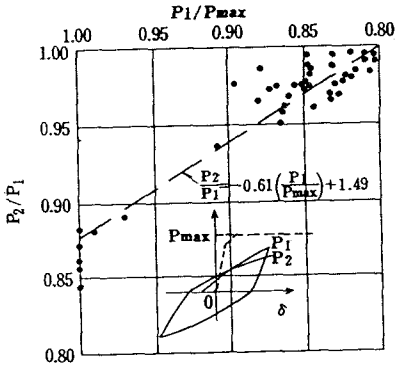


図-9 荷重低下率

$$P_1/P_{max} \geq 0.80 \text{ のとき}$$

$$P_2/P_1 = -0.61(P_1/P_{max}) + 1.49 \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$P_1/P_{max} < 0.80 \text{ のとき}$$

$$P_2/P_1 = 1.00 \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

供試体諸元が決定し、 P_{max} が決定できれば履歴ループの最大荷重が P_1 を示した時、次のサイクルでの最大荷重 P_2 は上式で予測可能となる。

7、履歴復元力特性のモデル化

(1) 包絡線

RC構造の応答解析に用いることを目的としたRC曲げ部材の履歴復元力ループは武藤モデル¹⁹⁾、深田モデル²⁰⁾、武田モデル²¹⁾等いくつか提案されてきている。いずれのモデルにおいても部材降伏後の包絡線は降伏荷重と同じ荷重、あるいは、それ以上の荷重をたどるように設定されている。また、繰り返しを受けると、荷重0からの載荷においては、過去の最大荷重点を指向する履歴をとることも共通点である。しかし、太田²²⁾は橋脚を対象に行ったRC部材の履歴復元力ループと武藤モデルとを比較した結果、3δy以降両者の適合性が悪くなることを指摘している。また、図-7にみられるように静的・一方向載荷を行った場合(B 8)の包絡線は、部材降伏後はほぼ一定値をとるが、繰り返しを受けると載荷パターンの影響を受け、変位振幅ビッチが部材降伏変位と同等である載荷パターンの場合には、包絡線はδyないし2δy以後下降し、一方向載荷の場合と異なる挙動をとることが明らかとなった。さらに、図-8からわかるように、同一載荷パターンでも載荷速度に応じて特に部材降伏後の包絡線は、ほぼ上下に平行移動することが明らかとなった。このようなことから、静的・一方向載荷により得られた包絡線を応答解析のための包絡線として用いる

ことは、危険側の選択となる場合もありうるといえる。しかし、本実験での供試体の数は少ないため、履歴ループのモデル化に際し、包絡線をどのように設定すればよいかは結論付けられない。

本実験で採用した載荷速度では、静的・一方向載荷の下で得られた部材降伏荷重を動的荷重の下での降伏荷重とみなしても誤差は少なく、かつ安全側の選択と思われる。このような観点から、ここでは従来のモデル化の方法と同様、静的・一方向載荷で得られた包絡線を動的載荷の際の包絡線とみなしモデル化を図った。

履歴ループのモデル化にあたっては、6. (4) でみたように荷重低下の現象を取り入れた。

(2) 剛性評価

交番繰返し荷重をうけるRC部材の荷重-変位の履歴ループは、図-10に示したように半サイクルの履歴を3本の直線の組み合わせにより近似した。すなわち、①最大荷重点より除荷する時に描く直線（その傾きを K_m とする）、②荷重0より載荷する時に描く直線（その傾きを K_α とする）、③変位0から最大荷重点をめざす直線の3本である。前に述べた3種のモデル化の方法では、いずれも2本の直線で近似されているのに対し、本研究では得られたループをより忠実にモデル化するため3本の直線で近似した。

塑性率の増加につれ、 K_m 、 K_α は急に低下することは他の実験からも明らかである。ここでは、これら3直線の傾きの特性を以下に述べる。

a) 除荷剛性 K_m

$n\delta y$ の変位の時、除荷剛性 K_m が初期剛性 $K_0 = P_y / \delta y$ に比べてどのような関係になっているかを調べた結果の一例を図-11に示す。両者の関係を、 $K_m / K_0 = a_1 (1/n)^{b_1}$ と置き、各供試体毎に a_1 、 b_1 の値を求めた結果を表-7に示す。

なお、実験で得られた $P-\delta$ 曲線の除荷ループにおいて、最大荷重点とその10%点とを結ぶ直

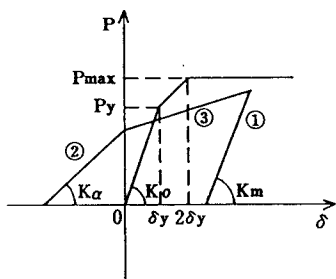


図-10 ループのモデル化

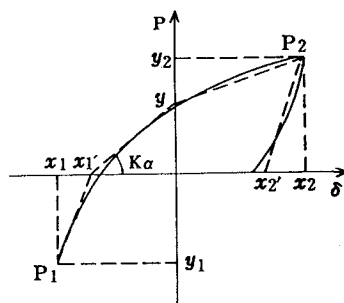


図-12 K_α の算定

線の傾きを除荷剛性とした。本実験で得られた a_1 、 b_1 の値の変動範囲では、載荷速度、載荷パターンが履歴ループに与える影響は少ないと考えられるので、 a_1 、 b_1 の値としてそれぞれ1および0.4を採用した。すなわち、

$$K_m / K_0 = (1/n)^{0.4} \quad \dots\dots\dots (3)$$

b) 載荷剛性 K_α

応答解析において部材の履歴ループのモデル化の違いにより結果が大幅に相違することが指摘されている¹⁾。この原因として、モデルにより部材剛性ばかりでなく履歴減衰特性が相違してくることが挙げられる。そこで本研究ではこの点に注意し、載荷剛性 K_α は半サイクル分の履歴ループが囲む面積と、モデル化した履歴ループの囲む面積とが等しくなるように求めた(図-12参照)。

このようにして求められた K_α の K_0 に対する比 K_α / K_0 と塑性率 $n = \delta / \delta y$ との関係の一例を図-13に示す。ここで、 $K_\alpha / K_0 = a \times 10^{b/n}$ と仮定し、最小自乗法により各供試体毎にこの関係を求めたものを表-7に示す。 K_α は履歴ループの形を表す指標となり、 K_α / K_0 が n に対して急激な低下を示せばループは逆S字形に移行することを表し、低下が緩やかであれば紡錘形を保つことを表す。また、側面鉄筋量が増すに従い K_α の低下は緩やかになっている。 a/d と側面鉄筋量とを考慮して次式を得た。

$$K_\alpha / K_0 = 1.4 \times 10^7 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$r = (0.8 + 0.24 A_{ds} / A_t) (d/a) n$$

ここに、 A_{ds} は側面鉄筋総断面積、 A_t は両最外縁軸方向主鉄筋総断面積を表す。

c) 直線③について

変位0より載荷が行われた場合、直線③の指向する点は6、(4)で述べた荷重低下率に従う。

(3) 履歴ループのモデル化

本実験の範囲から、履歴は既に述べた点を含め次の規則に従うと仮定できる(図-14 参照)。

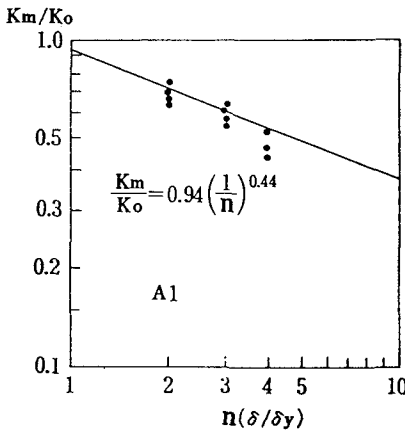


図-11 $n-K_m/K_o$

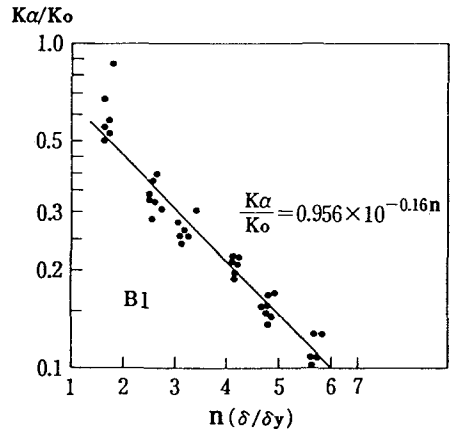


図-13 $n-K_\alpha/K_o$

1) 部材降伏荷重を越えない間は、基本曲線上を移動する。

2) 初めて部材降伏点を越え載荷が行われる場合、基本曲線上を進み、除荷は傾き K_o の直線に沿うものとする。荷重0から逆方向への載荷を行う場合には、部材降伏点をめざし、降伏点を越えた後は基本曲線上を進み、除荷時は傾き K_o の直線に従う。(初めて降伏点を越えて載荷が行われる場合には、部材の損傷が小さく、除荷時剛性は2サイクル目以降より大きい。)

3) 部材降伏点を越えた繰り返しの2サイクル目以降の場合、

(i) 荷重0点からの載荷は7、(2)b)で評価された剛性 K_α に従い変位0点まで行われる。変位0点を越えてさらに載荷が行われる場合は6、(4)で求められた次期荷重点を指向する。

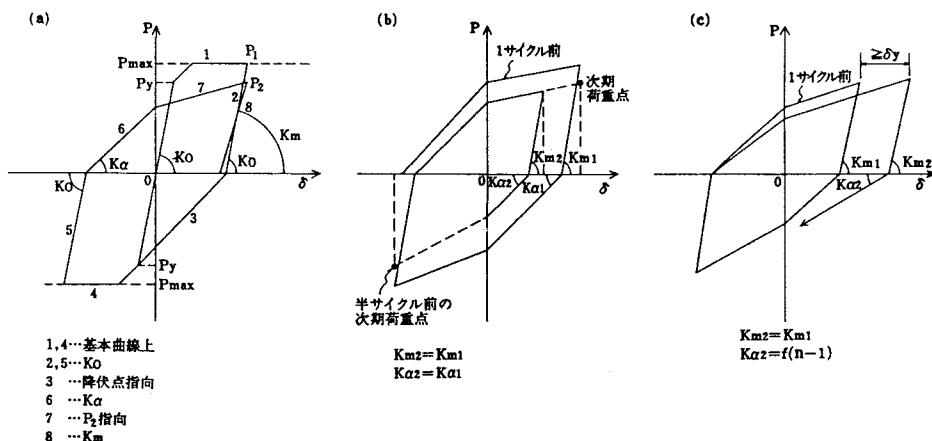
(ii) 除荷は7、(2)a)で評価された剛性 K_m に従って行われる。

(iii) 荷重反転が1サイクル前の最大変位を下回って行われる場合、 K_m と K_α は1サイクル前の K_m と K_α に等しく、変位0からの載荷は半サイクル前のピーク荷重の次期荷重点をめざす。

(iv) 荷重反転が以前の最大変位を部材降伏変位以上越えて行われる場合は、除荷は1サイクル前の除荷剛性に等しい。荷重0点からの載荷は、式(4)に塑性率 $(n-1)$ を代入した時の載荷剛性 K_α に従う(4)基本曲線は曲げひびわれ発生後の剛性低下は考慮せず、降伏点までの剛性は一定する。また、 P_{max} (終局曲げ理論から求まる値)は $2\delta_y$ で生じるものとする。

表-7 除荷剛性と載荷剛性

供試体	降伏剛性 $K_o(\text{ton/m})$	除荷剛性 K_m/K_o	載荷剛性 K_α/K_o
A1	5070	$0.940(\frac{1}{n})^{0.44}$	$1.822 \times 10^{-0.31n}$
A2	5740	$0.976(\frac{1}{n})^{0.41}$	$0.738 \times 10^{-0.16n}$
A3	5960	$0.965(\frac{1}{n})^{0.38}$	$1.619 \times 10^{-0.24n}$
A4	2260	$1.015(\frac{1}{n})^{0.47}$	$1.296 \times 10^{-0.20n}$
A5	2370	$0.997(\frac{1}{n})^{0.37}$	$1.339 \times 10^{-0.16n}$
A6	2390	$0.983(\frac{1}{n})^{0.28}$	$0.433 \times 10^{-0.07n}$
B1	1410	$0.921(\frac{1}{n})^{0.40}$	$0.956 \times 10^{-0.16n}$
B2	1200	$1.090(\frac{1}{n})^{0.35}$	$0.888 \times 10^{-0.13n}$
B3	1270	$1.000(\frac{1}{n})^{0.36}$	$1.567 \times 10^{-0.18n}$
B4	1210	$1.170(\frac{1}{n})^{0.38}$	$1.110 \times 10^{-0.15n}$
B5	1410	$1.240(\frac{1}{n})^{0.52}$	$1.500 \times 10^{-0.19n}$
B6	1530	$0.965(\frac{1}{n})^{0.36}$	$1.454 \times 10^{-0.20n}$
B7	1500	$1.028(\frac{1}{n})^{0.48}$	$0.882 \times 10^{-0.16n}$



図一 14 履歴ループのモデル化

8. 結 論

比較的大きな断面を有し、曲げ降伏後、曲げ破壊する RC 柱を対象に側面鉄筋量、載荷パターンおよび載荷速度が RC 柱の履歴復元力特性におよぼす影響について実験的に検討した結果、以下の結論が得られた。

(1) 帯鉄筋が十分配筋されている RC 柱の終局は、柱付け根部の圧壊により生じる。帯鉄筋が少ない場合には軸方向主鉄筋に沿った縦ひびわれの発生を伴う付着せん断破壊が見られた。

(2) 斜めひびわれと部材軸線とのなす角度は、帯鉄筋量が多くなると大きくなる。

(3) 側面鉄筋は曲げおよび斜めひびわれを分散させ、部材降伏後の耐力の増加に寄与する。 a/d が小さな部材に対しては、 $P-\delta$ ループが紡錘形から逆 S 字型へ移行する時の変位が大きくなる。また、水平方向へのズレに対し有効に働く。

(4) 本実験で採用した載荷パターンは、ひびわれ性状に影響を及ぼさないが、 $P-\delta$ 曲線の各変位水準での 1 サイクル目の最大荷重点を結んだ包絡線に大きな影響を与える。ある変位に到達するまでの変位履歴および繰り返し回数が少ないほど、その描く包絡線は一方単調漸増載荷時の $P-\delta$ 曲線に近い。しかし、2 サイクル目以降の包絡線にはほとんど影響を与えない。

(5) 載荷パターン、特に変位振幅ピッチの減少によって変形性能が低下する。

(6) 本実験の載荷速度範囲では、載荷速度は塑性ヒンジ領域および各変位での最大荷重に影響を与えるものの履歴ループ形状にはほとんど影響を与えない。

(7) 同一変位での繰り返しによる荷重の低下割合 P_2/P_1 は P_1/P_{max} の 1 次の関数で表すことができる。

(8) 交番繰り返しを受ける RC 柱の包絡線の形状は載荷パターンの影響を受ける。また、同一載荷パターンであっても、特に部材降伏以後の包絡線は載荷速度により、上下に平行移動する。

(9) 交番繰り返し荷重を受ける RC 部材の $P-\delta$ 履歴ループは、最大荷重点より除荷する時に描く直線、荷重 0 より載荷する時に描く直線、そして変位 0 から最大荷重点をめざす直線の 3 本によりモデル化できることを示した。除荷剛性は、塑性率 n の関数として $(1/n)^{0.4}$ に比例し、載荷剛性は、元のループ面積とモデル化した履歴ループの面積とが等しくなるよう、 a/d と側面鉄筋量とを考慮して定めた。

参 考 文 献

1) 尾坂芳夫、柳田 力、太田 実、小寺重郎：鉄筋コンクリート橋脚の弾塑性応答解析と設計への応用、土木学会論文報告集、第 297 号、pp. 71~85、1980 年 5 月

- 2) 畑野 正、堤 一：地震荷重を対象としたコンクリートの動的圧縮変形ならびに破壊、土木学会論文報告集、第67号、pp. 19～26、1960年 3月
- 3) 竹田仁一、立川博之：高速圧縮荷重をうけるコンクリートの力学的諸性質とその基本的関係式、日本建築学会論文報告集、第78号、pp. 1～6、昭和37年10月
- 4) 若井 哲、吉田 望、中村 武、若林 実：構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究、日本建築学会論文報告集、第 314号、pp. 102～111、昭和57年 4月
- 5) W. H. Dilger, R. Koch, R. Kowalczyk : Ductility of Plain and Combined Concrete Under Different Strain Rates, ACI Journal, Vol. 81, No. 1, pp.73-81, Jan. / Feb., 1984
- 6) 青木博文、加藤 勉、難破恒夫、佐藤亘宏：変断面鋼板引張材の変形能力に及ぼす試験温度、ひずみ速度の影響、日本建築学会論文報告集、第322号、pp. 11～17、昭和57年 2月
- 7) 睦好宏史、町田篤彦：動的外力を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究、土木学会論文集、第 354号/V-2、pp. 81～90、1985年 2月
- 8) 町田篤彦：鉄筋コンクリート橋脚の動的破壊に関する基礎実験、第2回J C I 年次講演会論文集、pp. 429～432、1980
- 9) 睦好宏史、町田篤彦：動的外力を受ける鉄筋コンクリート橋脚の力学的特性に関する研究、第4回J C I 年次講演会論文集、pp. 373～376、1982
- 10) 遠藤孝夫、加藤 治、田辺忠顕：鉄筋コンクリート柱部材の動的特性に関する研究、第5回J C I 年次講演会論文集、pp. 481～484、1983
- 11) 遠藤孝夫、加藤 治、田辺忠顕：動的な外力を受ける鉄筋コンクリート柱部材のせん断性状に関する研究、第6回J C I 年次講演会論文集、pp. 689～692、1984
- 12) 大上 実、森本久雄、藤井 栄、森田司郎：動的水平荷重下でのR C短柱の付着せん断破壊挙動、第7回J C I 年次講演会論文集、pp. 549～552、1985
- 13) 睦好宏史、町田篤彦、鶴田和久：動的正負繰り返し外力を受けるR C部材の復元力特性と動的反力モデル、第7回J C I 年次講演会論文集、pp. 345～348、1985
- 14) 睦好宏史、町田篤彦：動的重荷を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性及び破壊性状、第6回J C I 年次講演会論文集、pp. 693～696、1984
- 15) 荒川 卓、荒井康幸、藤田 豊、江頭恵一：鉄筋コンクリート柱の耐力と靱性に及ぼす繰り返し載荷速度の影響、第4回J C I 年次講演会論文集、pp. 325～328、1982
- 16) 荒川 卓、荒井康幸、江頭恵一、大久保繁昌：鉄筋コンクリート柱の繰り返し挙動と塑性変形性能の評価、第5回J C I 年次講演会論文集、pp. 309～312、1983
- 17) 小坪清真：土木振動学、森北出版
- 18) 秋元泰輔、結城正浄：高応力繰り返し荷重を受ける橋脚の耐力に関する基礎的実験(その3)、土木学会第33回年次学術講演会概要集、第5部、pp. 331～332、昭和53年 9月
- 19) 武藤 清：構造物の動的設計、丸善、昭和52年 1月
- 20) 深田泰夫：鉄筋コンクリート造建物の復元力特性に関する研究(その1)、日本建築学会関東支部学術研究発表会梗概集、昭和44年11月
- 21) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N.N. : Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, ASCE, Vol.96, No. ST 12, Dec., 1970
- 22) 太田 実：繰り返し荷重下における鉄筋コンクリート橋脚の挙動に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第 292号、pp. 65～74、1979年12月

(1987年10月16日受付)