

正, 尾坂芳夫 (東北大学・工学部)

○正 鈴木基行 (東北大学・工学部)

近藤哲直 (東北大学・大学院)

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造は、鉄筋とコンクリートとの複合体であり、コンクリートの最大圧縮歪が鋼のそれに比べて極めて小さいので、塑性ヒンジ部分での回転量が制限されるという特徴を有する。したがって鉄筋コンクリート構造物の簡便で合理的な限界状態設計法や耐震設計法の確立のためには、鉄筋コンクリート部材に生じる塑性ヒンジの形成過程とその回転限界、さらに部材の靱性評価を特に正確に把握しておく必要がある。一般に、これらの諸量は、主鉄筋比、引張主鉄筋比と圧縮鉄筋比との比、コンクリート圧縮強度、鉄筋の降伏強度、せん断力の有無とその大きさ、梁の有効高さ、供試体寸法、横方向拘束筋量、載荷速度、載荷面積、そして支点の拘束条件等により影響を受けると考えられる。

このような見地から、本研究は特に鉄筋コンクリート矩形単純梁を実験対象とし、コンクリート強度(f'_c)、主鉄筋比(P' , P)、横方向拘束筋量(P'')が、モーメント勾配が働いていない曲げスパン部分に生じる塑性ヒンジの回転限界と靱性に及ぼす影響を実験的に調べることを目的としている。なお供試体寸法、鉄筋降伏強度、載荷速度、載荷面積等は同一とし、載荷は2点対称載荷とした。

2. 実験概要

(1). コンクリート

実験に使用したセメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は川砂(比重2.55)、粗骨材は碎石(比重2.87)で混和材料に用いない。なお目標としたコンクリートの圧縮強度は、材令7日で 300 kg/cm^2 および材令14日で 300 kg/cm^2 程度とし、表-1に使用したコンクリートの配合を示す。図-2にコンクリートの応力-歪曲線の一例を示す。

(2). 鉄筋

使用した鉄筋は、主鉄筋用にSD35, D16, D18, D22, D25, D28とし、腹鉄筋用としてはSR24, $\phi 9$ を用いた。図-3に主鉄筋に用いた鉄筋の各径別の応力-歪曲線を示す。この図において初期ヤング率 $E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ とし鉄筋断面積を算定した。この値をもとにして表-2中の鉄筋比等を定めた。

(3). 供試体

供試体は、単鉄筋断面および複鉄筋断面とし、両者とも供試体寸法 $16 \text{ cm} \times 22 \text{ cm}$ 、有効高さ 18 cm 、スパン 150 cm でスパン中央断面には梁が左右対称に変形するように深さ 1 cm のノッチを入れた。支点は両支点ともローラー支承である。図-1に供試体寸法、配筋の一例を示す。表-2に供試体の諸元を示す。単鉄筋断面で $f'_c = 200 \text{ kg/cm}^2$ が4種、うち1種が over reinforcement, 単鉄筋断面で $f'_c = 300 \text{ kg/cm}^2$ が2種で共に under reinforcement, 複鉄筋断面で $f'_c = 200 \text{ kg/cm}^2$ が3種で全て under reinforcement, 複鉄筋断面で $f'_c = 300 \text{ kg/cm}^2$

表-1 コンクリートの配合

目標圧縮強度 f'_c kg/cm ²	粗骨材 最大粒径 mm	スラン の概算 (cm)	セメント 比 w/c (%)	細骨材 比 s/g (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
					W	C	S	G		
								5~10 mm (20%)	10~15 mm (30%)	15~20 mm (30%)
300	20	8±1	49	40	188	384	688	463	347	347
200	20	8±1	55	40	188	342	702	474	355	355

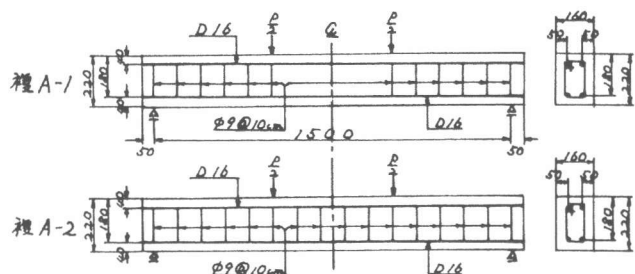


図-1 供試体寸法・配筋例 (単位 mm)

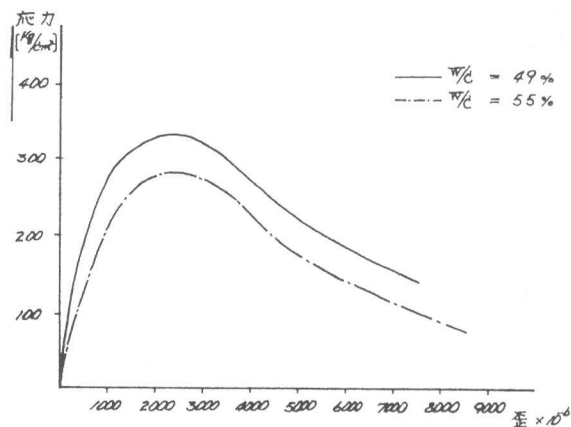


図-2 コンフリットの応力-変位曲線

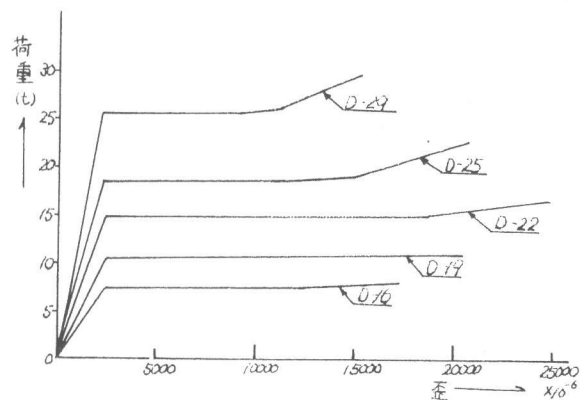


図-3 鉄筋の応力-変位曲線

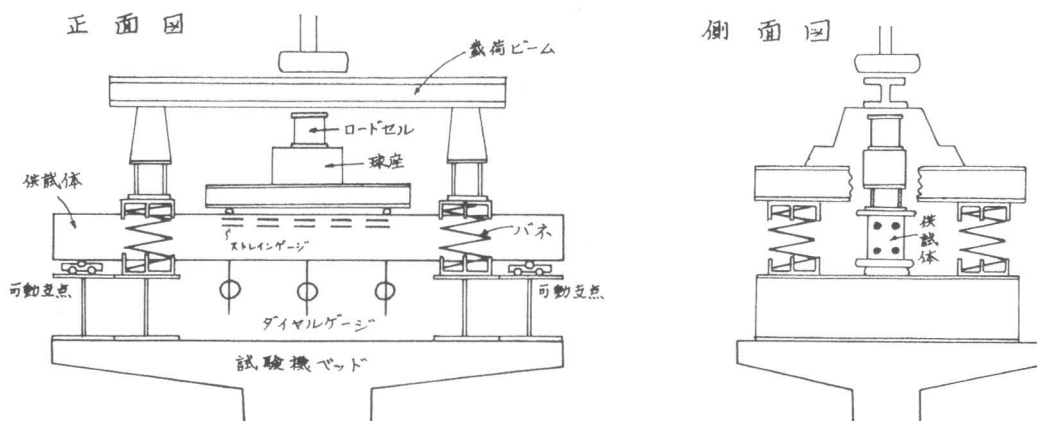


図-4 載荷装置の原理図

表-2 供試体の諸元

供試体 番号	引張主鉄筋		圧縮主鉄筋		横方向拘束鉄筋		コンクリート 強度 f_c (kg/cm ²)	鉄筋 指数 σ_s	つ合い 鉄筋比 P_b (%)	抵抗曲げ モーメント M_y (t-m)
	鉄筋種類	鉄筋比 P_t (%)	鉄筋種類	鉄筋比 P_c (%)	種類-間隔	鉄筋比 (%)				
単 A-1	1D16	0.52	—	—	—	—	191	0.136	1.86	1.242
単 A-2	"	"	—	—	$\phi 9-8cm$	1.36	"	"	"	"
単 B-1	2D16	1.04	—	—	—	—	249	0.209	2.26	2.360
単 B-2	"	"	—	—	$\phi 9-12.5cm$	0.87	"	"	"	"
単 C-1	2D19	1.52	—	—	—	—	220	0.338	2.14	3.093
単 C-2	"	"	—	—	$\phi 9-5.5cm$	1.98	"	"	"	"
単 D-1	2D25	2.93	—	—	—	—	191	0.673	2.23	3.305
単 D-2	"	"	—	—	$\phi 9-6.25cm$	1.75	"	"	"	"
単 F-1	2D16	1.04	—	—	—	—	322	0.162	2.71	2.429
単 F-2	"	"	—	—	$\phi 9-8.33cm$	1.31	"	"	"	"
単 G-1	2D22	2.07	—	—	—	—	327	0.318	2.73	4.313
単 G-2	"	"	—	—	$\phi 9-10cm$	1.09	"	"	"	"
複 A-1	2D16	1.04	2D16	1.04	—	—	206	0	2.68	2.295
複 A-2	"	"	"	"	$\phi 9-10cm$	1.09	"	"	"	"
複 B-1	2D19	1.52	2D16	1.04	—	—	187	0.119	2.63	3.135
複 B-2	"	"	"	"	$\phi 9-16.6cm$	0.66	"	"	"	"
複 C-1	2D25	2.93	2D16	1.04	—	—	177	0.431	2.94	4.879
複 C-2	"	"	"	"	$\phi 9-12.5cm$	0.87	"	"	"	"
複 D-1	2D16	1.04	2D16	1.04	—	—	297	0	3.30	2.382
複 D-2	"	"	"	"	$\phi 9-10cm$	1.09	"	"	"	"
複 E-1	2D22	2.07	2D16	1.04	—	—	286	0.180	3.23	4.380
複 E-2	"	"	"	"	$\phi 9-12.5cm$	0.87	"	"	"	"

が2種で全て *under reinforcement*, 以上のようにし、横方向拘束筋の有無が靱性に及ぼす影響を調べるため各種とも曲げスパン内に横方向拘束筋を付けているものとしていないものがある。なお表-2中の抵抗曲げモーメントと釣り合い鉄筋比は Hognestad の終局強度理論によるものである。せん断力は全て腹鉄筋が受け持つように配筋した。

(4). 載荷装置および試験方法

供試体のある断面が降伏すると変形が急激に進み、最大耐力以降のたわみや歪の測定が困難となる。そこで曲げモーメントと曲率の関係を最大耐力以降まで安定して測定するためには変形制御で載荷する必要があり、本実験では図-4のようにバネ(バネ定数約1ton/cm)を本を供試体と同時に載荷することにより変形制御で載荷した。図-4に示すように供試体にかかる荷重はロードセルで測定し、供試体のたわみはスパン中央と両端スパン両端にセットした変位計で測定した。また、コンクリート圧縮域および主鉄筋にペーパージョイントを貼付して歪を測定した。載荷は断面降伏まではスパン中央のたわみが1mm/分、断面降伏後は2mm/分となるように行った。右たわみ段階で、たわみ、歪、ひびわれの測定を約2分間で行った。

3. 実験結果および考察

表-3に降伏時および終局時の曲げモーメント、スパン中央のたわみ、たわみ測定値から差分法によって求めた曲率とそれらを用いて求めた靱性率、曲げ区間内一様の塑性回転が生じると仮定して求めた平均塑性回転量 Θ_u および実験から求めた梁の単位長さ当りの吸収エネルギー U_{exp} (M- ϕ 曲線の囲む面積) と M- ϕ 関係を完全弾塑性体と仮定して求めた計算値 $U_{cal} = M_u (\phi_u - \frac{\phi_y}{2})$ 等を示してある。

(1). 曲げモーメントと曲率の関係について

図-5、図-6に実験で得られたモーメントMと曲率 ϕ との関係の一例を示す。この図には鉄筋とコンクリートの応力-歪曲線を図-7のように仮定し、平面保持の仮定と力の平衡条件が成り立ち、かつ付着が完全である

表-3 実験結果一覧表

供試体 番号	鉄筋 指数	横方向 拘束筋比 ρ^x (%)	抵抗曲げ モーメント 計算値 $M_{y,cal}(tm)$	抵抗曲げ モーメント 実測値 $M_{y,act}(tm)$	$M_{y,act}$ $M_{y,cal}$	終局曲 げモーメント $M_{u,act}(tm)$	$M_{u,act}$ $M_{y,act}$	降伏時 曲率 $\phi_y(\times 10^{-4}/cm)$	終局時 曲率 $\phi_u(\times 10^{-4}/cm)$	曲率に よるじん性 率 ϕ_u/ϕ_y	降伏時 歪 $\delta_y(mm)$	終局時 歪 $\delta_u(mm)$	たわみに よるじん性 率 δ_u/δ_y	吸収 エネルギー $U_{cal}(kg)$	吸収 エネルギー $U_{exp}(kg)$	平均塑性 回転量 $\Theta_u(rad)$	横方向拘 束筋1mm 当りの Θ_u の増分 (rad/mm)
単A-1	0.136	—	1.242	1.225	0.99	1.850	1.51	2.09	27.61	13.21	4.99	53.97	10.82	491	412	611	—
単A-2	—	1.36	—	1.285	1.04	1.555	1.21	1.84	48.65	26.44	4.99	70.08	14.04	742	734	1161	403
単B-1	0.209	—	2.360	2.376	1.01	2.855	1.20	1.52	11.86	7.80	5.96	24.00	4.03	317	293	251	—
単B-2	—	0.87	—	2.393	1.01	2.689	1.12	1.97	25.55	19.65	5.96	25.94	4.35	661	672	583	380
単C-1	0.338	—	3.093	3.120	1.01	3.130	1.00	3.92	8.69	2.22	9.02	14.02	1.55	211	207	119	—
単C-2	—	1.98	—	3.189	1.03	3.107	0.97	2.69	34.68	12.89	9.02	51.87	5.75	1036	1032	801	344
単D-1	0.673	—	3.305	4.467	1.35	4.467	1.00	2.63	2.63	1.00	17.87	17.87	1.00	—	82	—	—
単D-2	—	1.75	—	4.588	1.39	4.588	1.00	3.24	3.24	1.00	10.96	10.96	1.00	—	103	—	—
単F-1	0.162	—	2.429	2.505	1.03	2.890	1.15	2.18	11.26	5.17	5.96	21.99	3.69	294	297	261	—
単F-2	—	1.31	—	2.435	1.00	3.020	1.24	2.28	14.51	6.36	5.96	29.97	5.03	404	364	292	24
単G-1	0.318	—	4.313	4.270	0.99	4.533	1.06	3.00	3.43	1.14	9.02	9.99	1.11	87	87	12	—
単G-2	—	1.09	—	4.064	0.94	4.377	1.08	4.33	4.89	1.13	9.02	12.00	1.33	119	131	15	3
複A-1	0	—	2.295	2.332	1.02	3.224	1.38	1.16	33.96	46.52	5.96	87.88	14.74	1721	1611	1309	—
複A-2	—	1.09	—	2.337	1.02	3.261	1.40	1.19	36.58	30.74	5.96	79.10	13.27	1173	1075	873	—
複B-1	0.119	—	3.135	3.251	1.04	3.470	1.07	2.80	45.85	16.38	7.01	64.04	9.14	1542	1515	1072	—
複B-2	—	0.66	—	3.247	1.04	3.870	1.19	2.07	67.01	32.37	7.01	97.95	13.98	2533	2425	1614	825
複C-1	0.431	—	4.879	4.596	0.94	4.910	1.07	1.23	4.97	4.04	9.99	15.95	1.60	214	218	92	—
複C-2	—	0.87	—	4.746	0.97	4.710	0.99	2.10	29.32	13.96	9.99	44.06	4.41	1332	1349	681	675
複D-1	0	—	2.382	2.363	0.99	2.801	1.19	3.02	59.94	19.85	6.99	90.44	12.94	1637	1606	1409	—
複D-2	—	1.09	—	2.364	0.99	3.120	1.32	1.83	44.27	24.19	7.01	77.89	11.11	1353	1230	1046	—
複E-1	0.180	—	4.380	4.439	1.01	4.940	1.11	2.55	10.83	4.25	7.97	19.98	2.51	472	454	200	—
複E-2	—	0.87	—	4.627	1.06	4.752	1.03	2.53	53.11	20.99	7.97	63.96	8.02	2464	2447	1263	1218

とした場合の $M-\phi$ 関係の計算値も示してある。ここで鉄筋の応力-歪曲線は完全弾塑性体を仮定し、コンクリートの応力-歪曲線については Kent, Park が提案した横方向拘束筋の影響を考慮したものを利用した。断面降伏までは実験値と計算値がよく一致しているが降伏以後は実験値の方が曲げ耐力が大きい。これは鉄筋の歪硬化によるものであろう。

単鉄筋断面および複鉄筋断面で横方向拘束筋が無い場合は、鉄筋指数 ($\rho = P f_y / f'_c$: 単鉄筋断面, $\rho = \rho_c - \rho_e$, $\rho_e = P f_y / f'_c$, $\rho_c = P' f_y / f'_c$: 複鉄筋断面) の増加と共に部材降伏後の曲げ耐力の増加が少なくなり、最大耐力以後の耐力の減少が急激となることがわかる。しかし鉄筋指数が大きい場合でも横方向拘束筋によって靱性が改善される。

(2). 塑性回転量, 吸収エネルギー, 靱性について

表-3, 図-6において複鉄筋断面の梁については載荷装置の測定最大限度まで載荷してもまだ十分にねばりを有し耐力の減少が見られないものがあった。このように複鉄筋断面の梁は、塑性回転量, 吸収エネルギー, 靱性率いずれもが単鉄筋断面の梁に比べて大きい。また単鉄筋断面, 複鉄筋断面いずれの場合にも、横方向拘束筋が無い場合は、鉄筋指数が大きい程塑性回転量, 吸収エネルギー, 靱性率は小さくなる。横方向拘束筋を入れることにより塑性回転量, 吸収エネルギーが大きくなり靱性も改善される。特に複鉄筋断面の方に効果があるが、これは圧縮鉄筋の圧屈を防ぐためであろう。また単鉄筋断面, 複鉄筋断面共に鉄筋指数が小さい程、横方向拘束筋の効果が大きいことがわかった。コンクリート強度については、圧縮強度が低い程、塑性回転量, 吸収エネルギーが大きくなるようである。

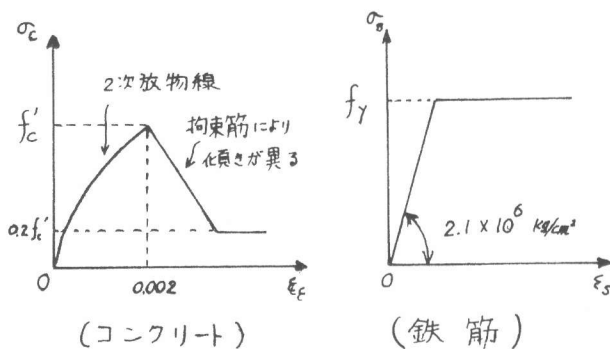


図-7 計算用 応力-歪曲線

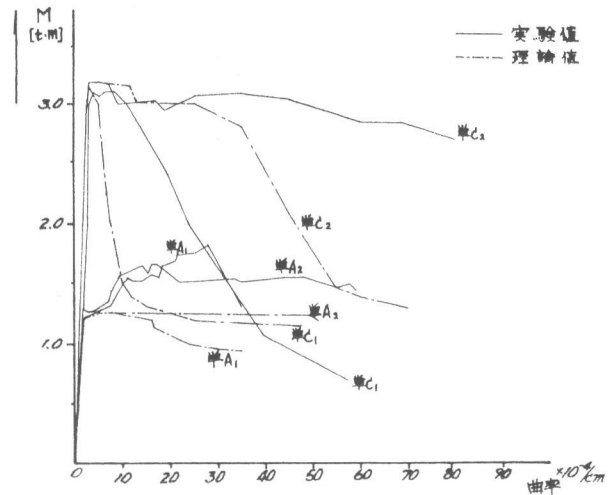


図-5 単鉄筋 A, C における $M-\phi$ の実験値と理論値

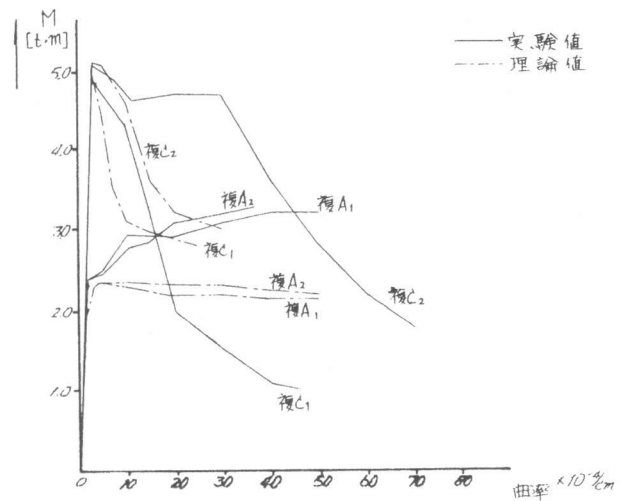


図-6 複鉄筋 A, C における $M-\phi$ の実験値と理論値

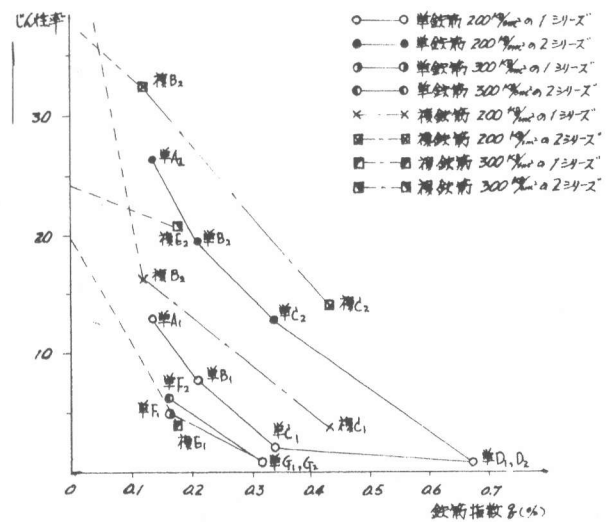


図-8 鉄筋指数と延性率の関係