

投稿論文(和文)

PAPERS

基部で曲げ破壊するRC橋脚の エネルギー吸収容量の定式化

滝本和志¹・川島一彦²

¹正会員 工修 清水建設(株)技術研究所(元土木研究所部外研究員)(〒135 東京都江東区越中島3-4-17)

²正会員 工博 東京工業大学工学部土木工学科(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

地震荷重を受けた鉄筋コンクリート橋脚の損傷程度を、履歴吸収エネルギーを用いて評価するための研究の第1段階として、構造物が破壊するまでに吸収できるエネルギー量(エネルギー吸収容量)の定式化を試みた。正負交番水平荷重により基部で曲げ破壊した鉄筋コンクリート橋脚モデルのエネルギー吸収容量を求め、載荷繰り返し回数、せん断支間比、帯鉄筋比および軸応力度の4つの要因がエネルギー吸収容量に及ぼす影響を明らかにし、これらの影響を考慮したエネルギー吸収容量算定式を提案した。その結果、検討に用いた供試体のエネルギー吸収容量に関しては、ある程度の精度で推定することが可能となった。

Key Words : energy dissipation capability, reinforced concrete pier, hysteretic energy, seismic design

1. はじめに

現在、非線形域を考慮した鉄筋コンクリート橋脚(以下RC橋脚)の耐震設計には、じん性率をもとにした地震時保有水平耐力の照査法が用いられている。しかし、側方鉄筋の降伏をどのように降伏変位の定義に考慮するか、エネルギー一定則、変位一定則の精度等、じん性に基づく耐震計算法には今後各種の検討が必要とされている。また、じん性率が同じであっても載荷履歴によって損傷度が異なることをどのように耐震計算に取り入れるかという点に関してもじん性率に基づく耐震計算法の問題点が指摘されている。

これに対して、エネルギーの観点から構造部材の耐震性を評価しようとする研究が盛んになってきている。これは、構造部材が破壊に至るまでに吸収できるエネルギー量と、地震により構造部材に入力されるエネルギー量に基づき非線形履歴特性を考慮した耐震計算を行おうというものである。地震による載荷履歴が作用エネルギーとして取り入れられることから、今後の新しい耐震計算の方向として魅力的な方法である。

こうした考え方はわが国では秋山ら¹⁾を中心に鋼構造物に対して広範囲な検討が行われてきた。吸収エネルギーに基づく耐震計算では、破壊に至るまでに

構造部材が吸収できるエネルギー量は、地震波の種類や載荷履歴によらず構造部材固有の値であるという点が重要な前提になっている。したがって、RC部材が吸収できるエネルギー量が構造部材固有の値と比べてよいか、また、これを部材特性からどのように推定するかに関する研究が必要とされている。このような点を、RC構造物に対して具体的に検討した研究として、Ohno, Nishioka²⁾の研究がある。Ohnoらは、RC柱の繰り返し載荷実験から、破壊までにRC柱に吸収されるエネルギーは部材の断面寸法や鉄筋およびコンクリートの強度によって決まり、帯鉄筋比や軸応力度にはよらないこと、また、吸収エネルギーは1~10回の載荷繰り返し回数の範囲ではこれによらないこと等を報告している。これに基づき、Ohnoらは部材の断面寸法と鉄筋およびコンクリートの強度から吸収エネルギーを推定する算定式を提案している。ただし、この算定式には部材高さの影響は考慮されていない。中田ら³⁾は、RCはりが破壊に至るまでに吸収できるエネルギー量に及ぼす主鉄筋比およびせん断補強筋比の影響を検討し、これらが吸収エネルギーに影響を与えると報告している。これに基づき、吸収エネルギーの定式化を行っており、エネルギーに基づくRC構造物の耐震計算法を展開するために重要な研究といえる。ただし、吸収エネルギーの定式化において、主鉄筋比および

表-1 供試体一覧

供試体番号	供試体高さ h (cm)	コンクリート圧縮強度 (MPa)	主鉄筋降伏点 (MPa)	帯鉄筋降伏点 (MPa)	載荷繰り返し回数 n (回)	せん断支間比 h/d	帯鉄筋比 ρ_w (%)	軸応力度 σ_0 (MPa)
P-10	250	31.3	308.3	272.2	10	5.4	0.10	0
P-11	250	32.1	308.3	272.2	10	5.4	0.20	0
P-13	250	32.8	308.3	272.2	10	5.4	0.31	0
P-17	175	33.1	308.3	272.2	10	3.8	0.10	0
P-19	250	33.3	308.3	272.2	3	5.4	0.10	0
P-20	175	31.8	308.3	272.2	3	3.8	0.10	0
P-22	250	31.4	308.3	272.2	5	5.4	0.10	0
P-56	250	42.5	369.7	370.2	10	5.4	0.10	0.49
P-57	250	40.0	369.7	370.2	10	5.4	0.10	0.98
P-58	250	39.2	369.7	370.2	10	5.4	0.10	1.96

表-2 検討要因と供試体

検討要因			供試体番号	
載荷繰り返し回数 n (回)	10	せん断支間比 h/d 5.4	P-10	
		3.8	P-17	
	5	h/d 5.4	P-22	
		h/d	5.4	P-19
			3.8	P-20
帯鉄筋比 ρ_w (%)	0.1		P-10	
	0.2		P-11	
	0.3		P-13	
軸応力度 σ_0 (MPa)	0		P-10	
	0.49		P-56	
	0.98		P-57	
	1.96		P-58	

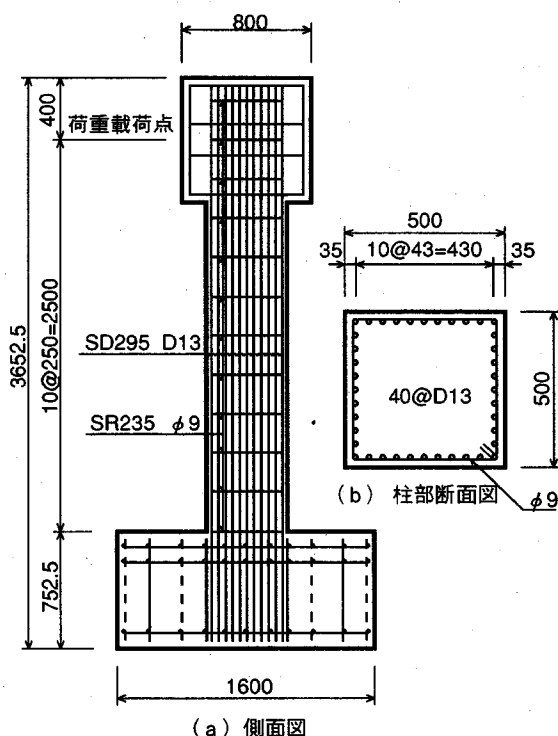


図-1 供試体の形状寸法

せん断補強筋比の影響の定量的な推定式を開発するには至っていない。

RC橋脚の耐震設計を吸収エネルギーに基づいて行おうとすると、以上のように吸収エネルギーの算定法が十分に固まっていないことから、ここでは、RC橋脚の吸収エネルギーがせん断支間比および帯鉄筋比によってどのように増加するのか、また、載荷繰り返し回数や軸応力度の影響を受けないかを中心に検討することとした。本検討には、RC橋脚の動的耐力および変形性能を明らかにするために建設省土

木研究所で行われた一連の動的正負交番水平載荷実験⁴⁾のうち、一定変位振幅変位漸増方式により基部で曲げ破壊した10体の供試体に対する実験結果を用いた。吸収エネルギーは破壊モードにより異なるが、ここでは、基部で曲げ破壊する供試体を検討対象とし、せん断破壊する場合については、今後の検討課題とした。

2. 実験概要

実験には、供試体高さおよび帯鉄筋比を変化させた同一断面および同一主鉄筋を有する10体の供試体を用いた。これらは、橋長30~50m程度の一般クラスの橋に採用されているRC橋脚を想定し、実構造物の約1/5を想定したRC橋脚模型である。供試体断面は50×50cmの正方形で、主鉄筋としてはD13、SD295を用い、側方鉄筋を配した柱状とした。主鉄筋比は2.03%である。また、帯鉄筋としてはφ9、

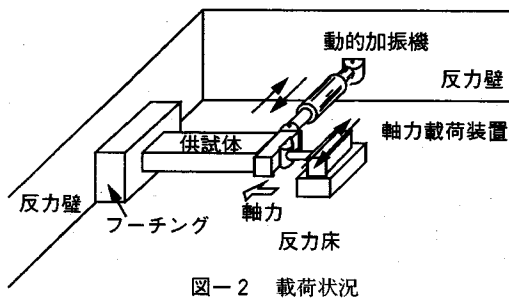


図-2 荷重状況

SR235を使用し、主鉄筋のまわりを取り囲むように配置した。端部は鋭角フックとした。帯鉄筋比は0.1%, 0.2%, 0.3%と変化させた。このときの帯鉄筋の間隔はそれぞれ25cm, 12.5cm, 8cmである。ただし、帯鉄筋比を変化させたのは、供試体基部から50cmの範囲で、これ以上の範囲ではどの供試体においても帯鉄筋比は0.1%とした。

供試体の一例として、図-1に高さ250cm、帯鉄筋比が0.1%の供試体（後述する表-1のP-10, P-19, P-22, P-56~58）の形状寸法を示す。表-1に供試体の一覧を、また、表-2に検討要因と供試体の関係を示す。ここに示すように、同一変位振幅における載荷繰り返し回数（3, 5, 10回）、せん断支間比（3.8, 5.4）、帯鉄筋比（0.1, 0.2, 0.3%）および軸応力度（0, 0.49, 0.98, 1.96MPa）を検討要因としている。なお、供試体番号は土木研究所耐震研究室で実施した一連の動的正負交番載荷実験における番号をそのまま用いている。

供試体には、いずれも変位制御のもとに繰り返し荷重を作用させた。試験機の制約で軸力を作用させない場合には、供試体をフーチング位置で反力床に固定し、反力壁に設置した動的加振機を供試体天端に取り付けて、水平に荷重を加えた。ここで、供試体天端とは、動的加振機の取り付け位置のことである。軸力を作用させる場合には、図-2に示すように、軸力載荷装置の構造から供試体を横に寝かして実験した。

橋脚天端を水平方向に加力し、引張を受ける載荷方向とは直角な面における主鉄筋が降伏ひずみに達する時点を降伏と定義し、この時に橋脚天端に生じる変位を降伏変位 δ_y とする。同一変位振幅の載荷でも、繰り返して載荷すると耐力が低下してくるが、ここではあくまでも第1サイクルの耐力を降伏耐力 P_y と定義する。降伏変位 δ_y までは、荷重制御により正負交番で準静的に段階的に荷重を増加させた。降伏変位 δ_y 以降は、一定変位振幅変位漸増方式に基づき δ_y の整数倍、すなわち、 $m \times \delta_y$ ($m=1, 2, 3, \dots$) の変位振幅で、それぞれ n 回の正負交番載荷を変位制御に

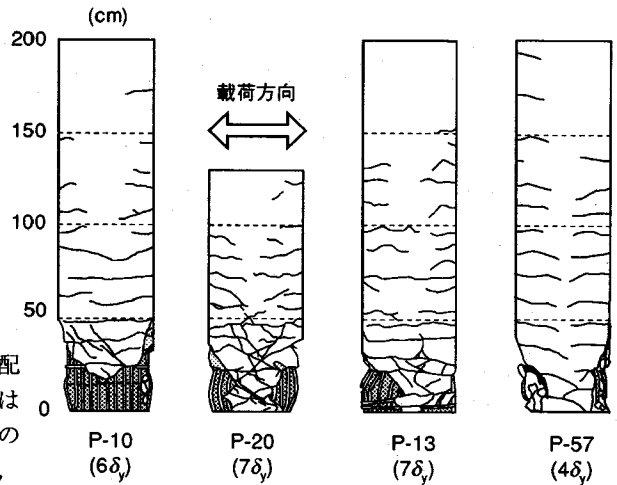


図-3 終局時のひびわれ状況

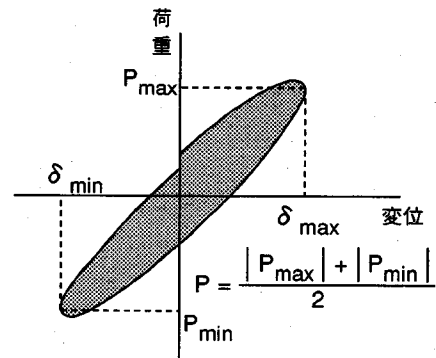


図-4 1サイクルあたりの履歴吸収エネルギー

よって加えた。ただし、P-19, P-22供試体では、終局状態を調べる目的で $9\delta_y$ 載荷を2回繰り返している。

これらの供試体は、いずれも橋脚基部において曲げ破壊した。基部における曲げひびわれの発生からコンクリートのはく離、主鉄筋の座屈、主鉄筋の破断という形で破壊が進行している。耐力の低下は主として主鉄筋の破断により加速される。降伏変位を越える変位振幅を多数回繰り返して受けることにより、主鉄筋に一種の低サイクル疲労による破断が生じたと考えられる。

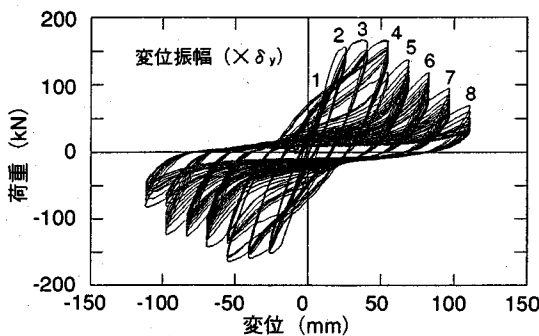
終局時における載荷方向に平行な面のひびわれ状況の一例を図-3に示す。どの供試体も基部からほぼ柱幅に相当する50cm程度の範囲に損傷が集中している。

3. エネルギー吸収容量の定義

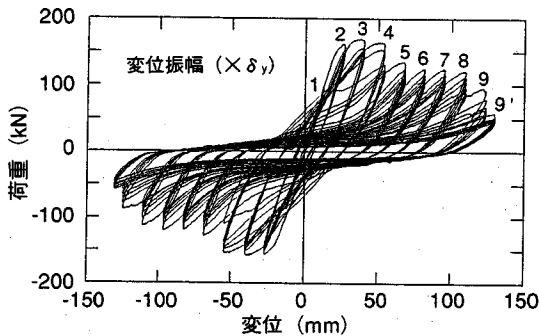
1サイクルあたりの履歴吸収エネルギーは、図-4に示すように荷重-変位曲線によって囲まれる面積

表-3 実験結果

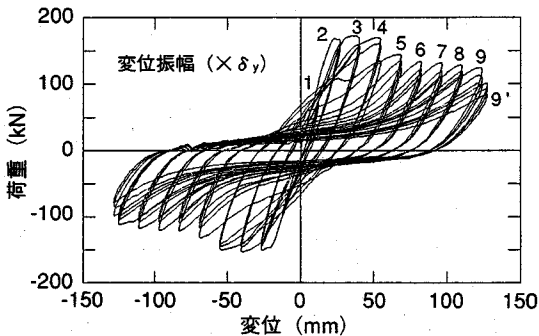
供試体 番号	降伏耐力 P_y (kN)	最大耐力 P_{max} (kN)	降伏変位 δ_y (mm)	終局変位 δ_u (mm)	弾 性 エネルギー $P_y \times \delta_y$ (kJ)	じん性率 δ_u/δ_y	エネルギー 吸収容量 (kJ)
P-10	87.4	161.8	12.41	83.10	1.08	6.7	283.4
P-11	94.8	162.1	12.39	83.17	1.17	6.7	301.1
P-13	88.4	156.3	12.34	96.95	1.09	7.9	359.9
P-17	149.9	231.8	7.83	31.88	1.17	4.1	116.7
P-19	84.3	158.0	12.25	127.94	1.03	10.4	236.3
P-20	157.5	233.9	7.81	55.93	1.23	7.2	119.6
P-22	89.1	159.5	12.19	110.39	1.09	9.1	237.3
P-56	126.9	175.0	14.63	58.31	1.86	4.0	161.8
P-57	127.2	182.6	16.08	64.33	2.05	4.0	166.7
P-58	175.4	194.4	20.13	60.31	3.53	3.0	131.4



(a) P-10供試体 (n=10)



(b) P-22供試体 (n=5)



(c) P-19供試体 (n=3)

図-5 荷重-変位履歴曲線 (h/d=5.4)

から得られる。このサイクルの耐力 P は、+側荷重における最大耐力と、-側荷重における最小耐力の平均として求めた。ただし、最大、最小耐力とは変位が最大もしくは最小となる場合の耐力と定義した。

上述したように、荷重の途中で耐力の低下が生じるため、同一サイクルの繰り返しの中でも履歴曲線の始点と終点が一致しないが、ここでは、変位0から変位0に至るまでの1サイクルの履歴曲線で囲まれる面積を履歴吸収エネルギーと定義する。また、荷重開始後、ある時点までの履歴吸収エネルギーを加え合わせたものは、その時点までに供試体が吸収したエネルギーの総和を与える。これを、ここでは、累積吸収エネルギーと呼ぶ。

繰り返し荷重を受けるRC橋脚の終局の定義は研究者により異なっているが、一般に、最大耐力に達した後、耐力が低下して降伏耐力以下になった時点、もしくは、最大耐力の80%以下になった時点を終局状態と定義する場合が多い。降伏耐力は耐震設計上、ひとつの重要な判断材料となっていることを考慮し、本研究では、耐力が最大耐力をとった後、初めて降伏耐力以下に低下した時を終局と定義する。ただし、上述したように同一変位振幅における荷重の中でも荷重の繰り返しとともに耐力は低下してくるため、その変位振幅における n 回の荷重の中で、耐力が初めて降伏耐力を下回る時の累積吸収エネルギーをエネルギー吸収容量と定義することとする。また、この時の荷重変位が終局変位であり、これを降伏変位で割った値がじん性率である。なお、このように定義した終局変位から、もう1ステップ荷重変位を大きくすると、耐力がもう1度降伏耐力を上回ることもありうるが、ここでは、終局の判定を簡単にするために、前述のように終局変位を定めたものである。

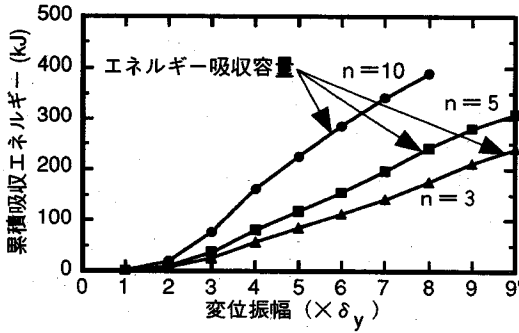


図-6 累積吸収エネルギーと载荷繰り返し回数の関係

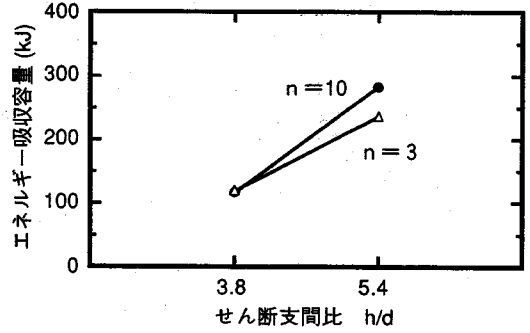


図-9 エネルギー吸収容量とせん断支間比の関係

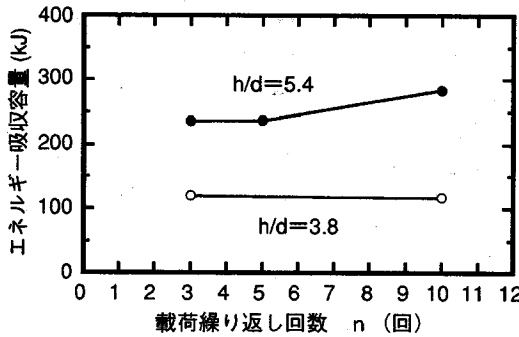


図-7 エネルギー吸収容量と载荷繰り返し回数の関係

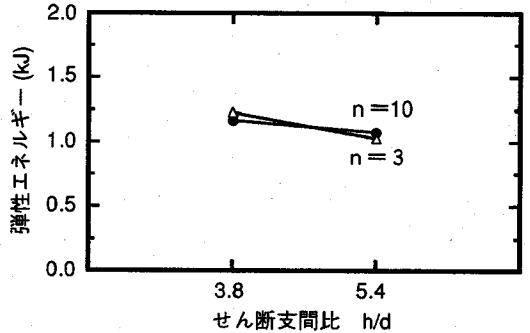


図-10 弾性エネルギーとせん断支間比の関係

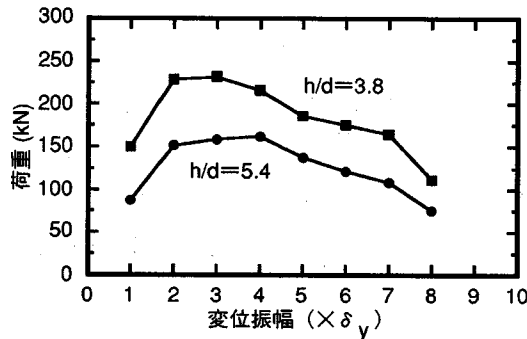


図-8 平均包絡線 (n=10)

4. エネルギー吸収容量に及ぼす各要因の影響

表-3に実験結果を示す。この結果より各要因がエネルギー吸収容量に及ぼす影響について以下に示す。

(1) 同一変位振幅における载荷繰り返し回数 n の影響

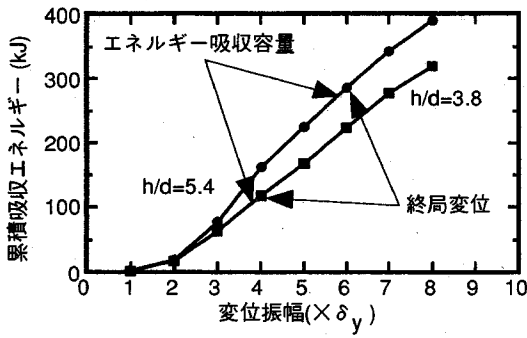
図-5に载荷繰り返し回数 n が異なるせん断支間比5.4の3体の供試体の荷重-変位履歴曲線を示す。 n が多いほど、最大耐力以降の耐力低下の度合いが大きくなっている⁵⁾。

図-6にせん断支間比が5.4の供試体の累積吸収エネルギーと载荷繰り返し回数の関係を示す⁵⁾。前述したように、P-19、P-22供試体は、 $9\delta_y$ 载荷を2回実

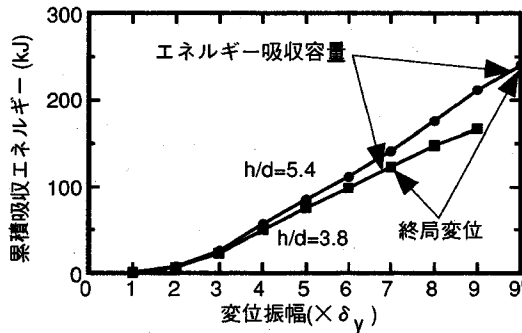
施しており、2回目の $9\delta_y$ 载荷を $9'$ として示している。同一変位振幅における累積吸収エネルギーは、载荷繰り返し回数 n が多いほど大きい。例えば、 $5\delta_y$ 終了時における累積吸収エネルギーを比較すると、 $n=10$ の供試体の累積吸収エネルギーは、 $n=5$ の供試体の1.9倍、 $n=3$ の供試体の2.6倍と、载荷繰り返し回数の比(10/5, 10/3)に近い値を示している。逆に、じん性率は载荷繰り返し回数 n が少ないほど大きく、 $n=10$ の場合が6.7であるのに対して、 $n=3$ の場合は10.4と1.5倍以上になっている。

図-7にエネルギー吸収容量と载荷繰り返し回数 n の関係を示す。3~10回の範囲内においては、载荷繰り返し回数はエネルギー吸収容量に大きな影響を及ぼしていない。例えば、 $h/d=5.4$ の場合を例にとると、エネルギー吸収容量は $n=3$ の場合には236.3kJであるが、 $n=10$ になっても283.4kJと1.2倍程度の差しかない。また、 $h/d=3.8$ の場合には、 $n=3$ の供試体は119.6kJであるのに対して、 $n=10$ の供試体は116.7kJとほぼ同程度となっている。

同一変位振幅における载荷繰り返し回数 n が多くなると、この変位振幅における累積吸収エネルギーは大きくなるが、じん性率は小さくなる。このことがエネルギー吸収容量に対して载荷繰り返し回数あまり影響しない理由と考えられる。



(a) $n=10$ の場合



(b) $n=3$ の場合

図-1 1 累積吸収エネルギーとせん断支間比の関係

(2) せん断支間比 h/d の影響

載荷繰り返し回数 n が10回でせん断支間比が3.8, 5.4と異なる場合の正負の包絡線の平均値を図-8に示す。 $h/d=5.4$ の場合の降伏耐力は, $h/d=3.8$ の場合の降伏耐力の58%であるが、反対に降伏変位は1.58倍になっている。

図-9にエネルギー吸収容量とせん断支間比の関係を示す。せん断支間比が3.8と5.4の場合の2ケースしかわからないが、載荷繰り返し回数にあまりよらず、 $h/d=5.4$ の供試体のエネルギー吸収容量は、 $h/d=3.8$ の供試体の約2倍となっている。表-3に示した結果から、降伏変位と降伏耐力の積、すなわち、正側と負側の弾性エネルギーを $h/d=3.8$ と $h/d=5.4$ と比較すると、図-10のようになる。これよりわかるように、弾性エネルギーはほぼ等しいにも関わらず、 $h/d=3.8$ と $h/d=5.4$ ではエネルギー吸収容量は約2倍異なっている。この原因として2つの理由が考えられる。まず最初は、同一変位振幅における累積吸収エネルギーの違いである。図-11に示すように同一変位振幅における累積吸収エネルギーは、 $h/d=5.4$ の方が大きい。2番目は、じん性率の違いである。 $h/d=5.4$ の供試体のじん性率は、 $h/d=3.8$ の供試体のじん性率の約1.5倍となっている。このような点が、せん断支間比によってエネルギー吸収容量が異なる

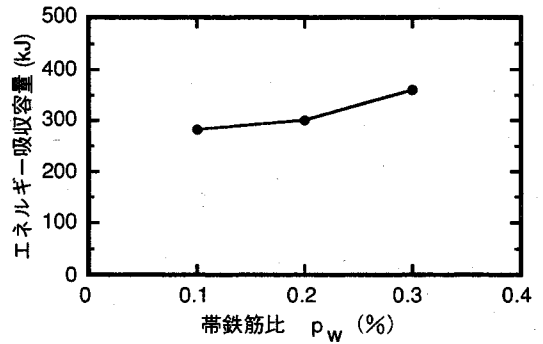


図-1 2 エネルギー吸収容量と帯鉄筋比の関係

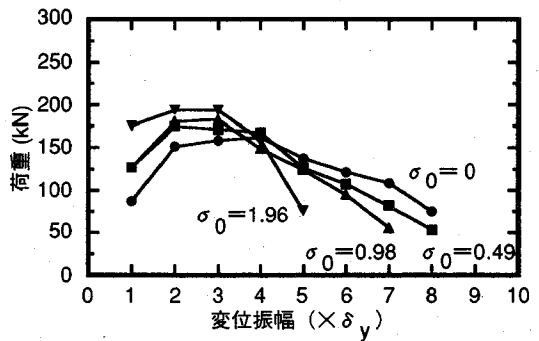


図-1 3 平均包絡線

理由と考えられる。

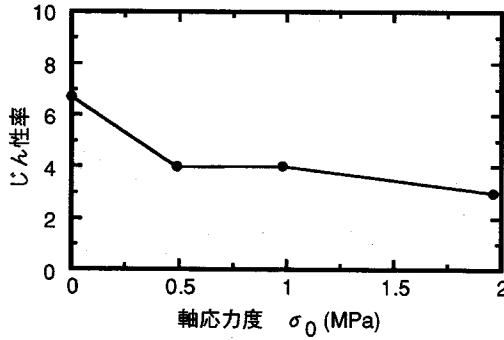
(3) 帯鉄筋比 p_w の影響

図-1 2にエネルギー吸収容量と帯鉄筋比の関係を示す。0.1~0.3%の範囲においては、帯鉄筋比が大きい供試体ほどわずかではあるがエネルギー吸収容量は大きい。スパイラル筋を巻くなど拘束筋量を1オーダー大きくすれば、じん性の大幅な向上が見込まれ、エネルギー吸収容量に対する帯鉄筋比の影響はもっと大きくなる⁴⁾が、0.1~0.3%程度の帯鉄筋比では、これがエネルギー吸収容量に及ぼす影響は顕著なものではない。

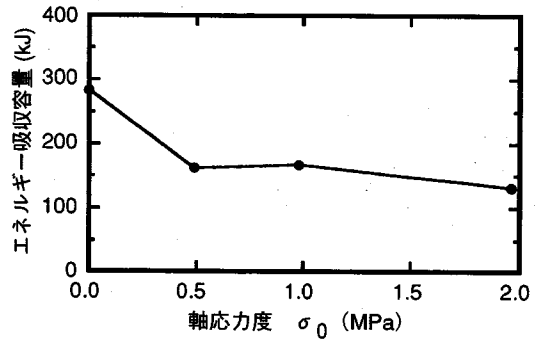
(4) 軸応力度 σ_0 の影響

図-1 3に軸応力度が異なる供試体の平均包絡線を示す。軸応力度が1.96MPa以下の範囲では、軸応力度が大きいほど、最大耐力およびこれに達するまでの耐力は大きい、最大耐力以後の耐力低下も著しい。また、図-1 4より軸応力度が大きいほどじん性率が小さいことがわかる。

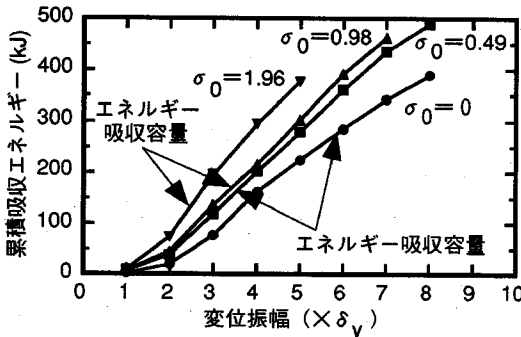
図-1 5に累積吸収エネルギーと軸応力度の関係を示す。同一変位振幅における累積吸収エネルギーは、軸応力度が大きいほど大きい。また、図-1 6にエネルギー吸収容量と軸応力度の関係を示す。軸応力度



図一 14 じん性率と軸応力度の関係



図一 16 エネルギー吸収容量と軸応力度の関係



図一 15 累積吸収エネルギーと軸応力度の関係

が大きい供試体の方がエネルギー吸収容量は小さい。これは、図一 14 に示したじん性率と軸応力度の関係と同様の傾向を示している。ただし、軸応力度が 0.49~1.96MPa の 3 体の供試体のエネルギー吸収容量は 1.3 倍以内の範囲に収まっている。一般の RC 橋脚の軸応力度は 1 MPa 程度であることより、特別に軸力が大きい橋脚を除けば、実際の RC 橋脚のエネルギー吸収容量に及ぼす軸力の影響は著しいものではないといえる。

5. エネルギー吸収容量の定式化

エネルギー吸収容量を定式化するためには、各要因の影響を独立に抽出する必要がある。そこで、エネルギー吸収容量 W_c に及ぼす各要因の影響を表す係数を定めることにより、式(1)によりエネルギー吸収容量を求めることとする。エネルギー吸収容量に全く影響を及ぼさない場合には、影響係数 c_E は 0 である。定式化の検討に用いる供試体は、すべて同一断面を有していることから、ここでは、エネルギー吸収容量の絶対値をそのまま用いて定式化を行う。

$$W_c = W_0 (1 + c_{En} + c_{Eh} + c_{Ew} + c_{Ea}) \quad (1)$$

ここで、 W_0 : 基準とするエネルギー吸収容量(kJ)
 c_{En} : 載荷繰返し回数の影響を表す係数

- c_{Eh} : せん断支間比の影響を表す係数
- c_{Ew} : 帯鉄筋比の影響を表す係数
- c_{Ea} : 軸応力度の影響を表す係数

上述したように載荷繰返し回数はエネルギー吸収容量に顕著な影響を及ぼさないことより、 $h/d=5.4$ 、 $p_w=0.1\%$ 、 $\sigma_0=0$ MPa の供試体、すなわち、P-10、P-19、P-22 の 3 供試体のエネルギー吸収容量の平均値 (252.3kJ) を基準とする。

(1) 載荷繰返し回数 n の影響

前述したように、載荷繰返し回数が 3~10 回の範囲においては、載荷繰返し回数はほとんどエネルギー吸収容量に影響を及ぼさない。 $n=10$ の場合のエネルギー吸収容量を基準とし、この値に対する任意の載荷繰返し回数におけるエネルギー吸収容量の比を求めた結果が図一 17 である。これより、載荷繰返し回数がエネルギー吸収容量に及ぼす影響係数 c_{En} は 0 とみることができる。

(2) せん断支間比 h/d の影響

図一 18 は $h/d=5.4$ の 3 供試体 (P-10、P-19、P-22) のエネルギー吸収容量の平均値を基準とした場合の、 $h/d=3.8$ の P-17 および P-20 供試体で平均した結果のエネルギー吸収容量の比を示したものである。せん断支間比が 3.8 と 5.4 の 2 点しかないため、この実験結果だけからせん断支間比の影響を議論することは十分ではないが、全体の特性を把握するため、ここでは、図一 18 より 2 つのデータを直線回帰することとする。せん断支間比が 5.4 の場合を基準にすると、せん断支間比の影響係数 c_{Eh} は以下ようになる。

$$c_{Eh} = 0.33(h/d - 5.4) \quad (3.8 \leq h/d \leq 5.4) \quad (2)$$

(3) 帯鉄筋比 p_w の影響

図一 19 は $p_w=0.1\%$ の場合のエネルギー吸収容量を基準とし、これに対する任意の帯鉄筋比のエネル

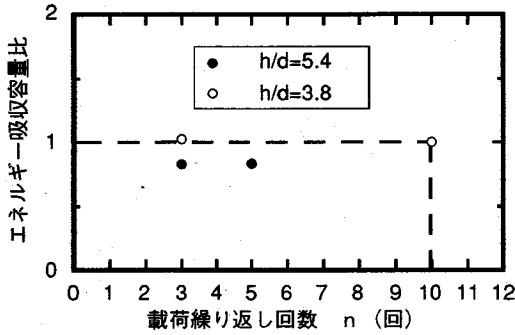


図-17 エネルギー吸収容量比と载荷繰り返し回数との関係

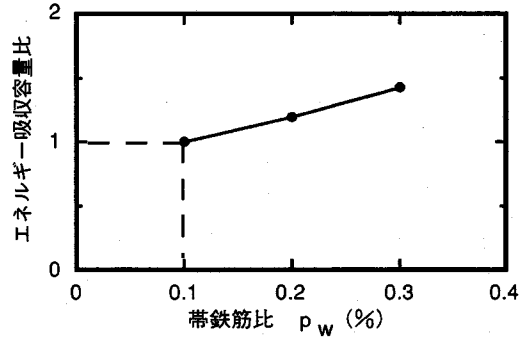


図-19 エネルギー吸収容量比と帯鉄筋比との関係

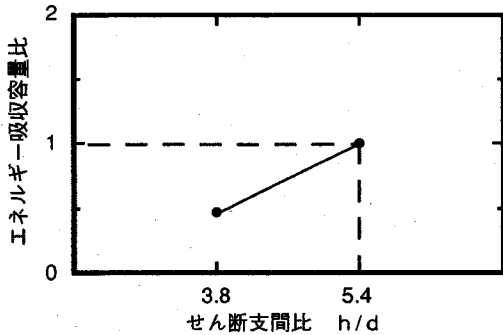


図-18 エネルギー吸収容量比とせん断支間比との関係

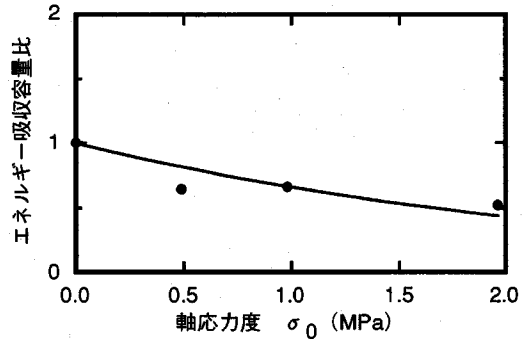


図-20 エネルギー吸収容量比と軸応力度との関係

ギー吸収容量の比として図-12を再整理したものである。エネルギー吸収容量は帯鉄筋比の増加にともない、ほぼ直線的に増加する。そこで、 $p_w=0.1\%$ の場合を基準に、帯鉄筋比の影響係数 c_{E_w} を求めると以下ようになる。

$$c_{E_w} = 2.1(p_w - 0.1) \quad (0.1 \leq p_w \leq 0.3\%) \quad (3)$$

(4) 軸応力度 σ_0 の影響

図-20は図-16に示した関係を $\sigma_0 = 0$ MPaの場合を基準に再整理したものである。エネルギー吸収容量は、軸応力度の増加にともないわずかに減少する。そこで、この関係を指数関数で表し、軸応力度の影響係数 c_{E_a} を求めると以下ようになる。

$$c_{E_a} = e^{-0.42\sigma_0} - 1 \quad (0 \leq \sigma_0 \leq 1.96\text{MPa}) \quad (4)$$

6. エネルギー吸収容量算定式の適用性の検討

以上のようにして求めた各影響係数とその適用範囲をまとめると、以下ようになる。

$$\left. \begin{aligned} c_{E_n} &= 0 & (3 \leq n \leq 10\text{回}) \\ c_{E_h} &= 0.33(h/d - 5.4) & (3.8 \leq h/d \leq 5.4) \\ c_{E_w} &= 2.1(p_w - 0.1) & (0.1 \leq p_w \leq 0.3\%) \\ c_{E_a} &= e^{-0.42\sigma_0} - 1 & (0 \leq \sigma_0 \leq 1.96\text{MPa}) \end{aligned} \right\} (5)$$

式(5)をもとに、式(1)により各供試体のエネルギー吸収容量を求めた。図-21に式(1)の適用性を示す。P-56供試体だけが推定式から $\pm 20\%$ の範囲をわずかに越えるが、全体としてよく実験値の特徴を表している。実験値に対する推定値の比をとると、その平均は1.02、変動係数は11.1%である。

ただし、現状では検討項目が少なく、提案式の適用範囲は式(5)に示す範囲に限られている。このため、提案式の適用範囲を広げ、さらに、実用性を高めていく必要がある。さらに、断面形状や载荷形式が異なる供試体のエネルギー吸収容量を比較するためには、式(1)によるエネルギー吸収容量を何らかの方法で無次元化する必要がある。また、エネルギー吸収容量と地震により入力されたエネルギー量の比較により耐震設計していくためには、ランダムな繰返し荷重に対する検討、任意の载荷履歴に適用可能な終局の定義も必要となる。

7. まとめ

本研究では、一定変位振幅変位漸増方式による動的正負交番水平载荷により、基部で曲げ破壊した10体の正方形断面を持つRC橋脚模型の実験結果をもとに

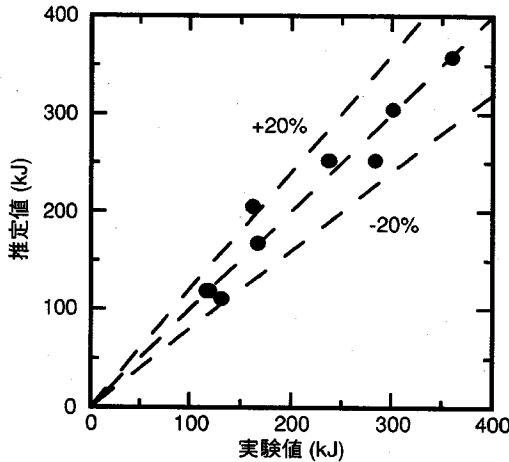


図-2.1 式(1)の適用性

エネルギー吸収容量を求めた。載荷繰り返し回数 (3, 5, 10回), せん断支間比 (3.8, 5.4), 帯鉄筋比 (0.1, 0.2, 0.3%) および軸応力度 (0, 0.49, 0.98, 1.96MPa) の各要因が, どのようにエネルギー吸収容量に影響を及ぼすかを調べ, これをもとにエネルギー吸収容量の定式化を行った。本研究により明らかとなった事項は以下の通りである。

(1) 載荷繰り返し回数が3~10回の範囲内においては, 載荷繰り返し回数がエネルギー吸収容量に及ぼす影響は顕著なものではない。

(2) せん断支間比が大きい方がエネルギー吸収容量は大きい。せん断支間比が5.4の供試体のエネルギー吸収容量は, せん断支間比が3.8の供試体の約2倍である。

(3) 帯鉄筋比が大きいほどエネルギー吸収容量は大きくなるが, 帯鉄筋比が0.1~0.3%の範囲では, その影響は著しいものではない。

(4) 軸応力度が0~1.96MPaまでの範囲においては, 軸応力度が大きいほどエネルギー吸収容量は小さい。ただし, 軸応力度が0.49~1.96MPaに変化したとし

ても, エネルギー吸収容量の差は1.3倍の範囲に収まっている。一般クラスの規模の橋では上部構造死荷重によってRC橋脚に生じる軸応力度は1MPa程度であることから, 特別に軸力が大きい橋脚を除けば, RC橋脚のエネルギー吸収容量に及ぼす軸力の影響は小さいといえる。

(5) (1)~(4)に基づき, 載荷繰り返し回数, せん断支間比, 帯鉄筋比および軸応力度の影響を考慮したエネルギー吸収容量の算定式を式(1), 式(5)のように提案した。この提案式は, 今回の検討に用いた供試体のエネルギー吸収容量をある程度の精度で推定できる。

今後は, エネルギー吸収容量に及ぼす断面形状, 載荷履歴の影響などについて検討を行い, 式(1)~(5)の適用範囲を広げていく必要がある。

参考文献

- 1) 秋山宏: 建築物の耐震極限設計, 東京大学出版会, 1980年9月。
- 2) Ohno, T. and Nishioka, T.: An Experimental Study on Energy Absorption Capacity of Columns in Reinforced Concrete Structures, *Proc. of JSCE, Structural Eng. / Earthquake Eng.* Vol.1, No.2, 1984.10.
- 3) 中田聖志, 服部篤史, 井上晋, 宮川豊章, 藤井学: RCはり部材の累積消散エネルギーの定式化と損傷評価, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, V-372, 1991年9月。
- 4) 川島一彦, 長谷川金二, 長島博之, 小山達彦, 吉田武史: 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査法の開発に関する研究, 土木研究所報告, 第190号, 1993年9月。
- 5) Kawashima, K. and Koyama, T.: Effect of Number of Loading Cycles on Dynamic Characteristics of Reinforced Concrete Bridge Pier Columns, *Proc. of JSCE, Structural Eng. / Earthquake Eng.* Vol.5, No.1, 1988.8.

(1994.6.27受付)

ENERGY DISSIPATION CAPABILITY OF REINFORCED CONCRETE BRIDGE PIERS THAT FAIL IN FLEXURE AT BOTTOM

Kazushi TAKIMOTO and Kazuhiko KAWASHIMA

A method for evaluating seismic damage of reinforced concrete piers is proposed on based on the energy concept. The energy dissipation capability of ten reinforced concrete pier models was evaluated from load-displacement hysteresis loops. Effect of the number of loading cycles, shear span ratio, hoop reinforcement ratio and axial compressive stress on the energy dissipation capability was investigated.

An empirical equation to estimate the energy dissipation capability was proposed. This provides a reasonable estimation for the energy dissipation capability of the test specimens.