

土木研究所資料

鉄筋コンクリート橋脚のエネルギー 吸収容量定式化に関する研究

平成6年6月

建設省土木研究所
地震防災部耐震研究室

Copyright © (1994) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

鉄筋コンクリート橋脚のエネルギー 吸収容量定式化に関する研究

土木研究所

企画部 地下開発研究官
(前耐震研究室長)

平成6年度部外研究員

川島一彦

滝本和志

要 旨

鉄筋コンクリート構造物が地震を受けた場合、その構造物が健全であるのか、または、補修や取り替えの必要があるのかを判断するために、被災後の構造物の損傷程度を適切に評価する必要がある。

本資料では、地震荷重を受ける鉄筋コンクリート橋脚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）を求め、載荷繰返し回数、せん断支間比、帯鉄筋比および軸力の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、十分な精度で推定できることが確認できた。

キーワード：エネルギー吸収容量、鉄筋コンクリート橋脚、累積損傷度

目 次

1. はじめに	1
2. 既往の研究	2
3. 実験概要	8
3.1 供試体	8
3.2 载荷方法	8
4. エネルギー吸収容量の定義	12
5. 耐力および変形性能に及ぼす各要因の影響	14
6. エネルギー吸収容量に及ぼす各要因の影響	30
6.1 累積吸収エネルギーに及ぼす各要因の影響	30
6.2 エネルギー吸収容量に及ぼす各要因の影響	30
6.3 载荷繰り返し回数とエネルギー吸収容量の関係	31
7. エネルギー吸収容量の定式化	40
7.1 载荷繰り返し回数 n の影響	40
7.2 せん断支間比 h/d の影響	41
7.3 帯鉄筋比 ρ_w の影響	41
7.4 軸応力度 σ_0 の影響	41
8. エネルギー吸収容量算定式の精度の検討	44
9. まとめ	46
参考文献	47

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下RC)構造物が地震を受けた場合、その構造物が健全であるのか、または、補修や取り替えの必要があるのかを判断するために、被災後の構造物の損傷程度を適切に評価する必要がある。この損傷程度は、塑性率や履歴吸収エネルギーに関係があると考えられるが、地震動のようにランダムな繰り返し荷重を受けた場合の損傷程度を定量的に把握するためには、履歴吸収エネルギーによる損傷評価が有効と考えられる。履歴吸収エネルギーを用いて被災構造物の損傷評価を行うためには構造物が破壊に至るまでに吸収できるエネルギー量(エネルギー吸収容量)を把握しておく必要がある。

エネルギー吸収容量は、部材断面、材料強度、主鉄筋比、帯鉄筋比、軸力、載荷速度など多くの要因の影響を受けるものと考えられるが、これらの要因の影響を検討した研究は少ない。土木研究所耐震研究室においては、RC橋脚の動的耐力および変形性能に関する検討のために、載荷繰り返し回数や載荷速度などをパラメータとしたRC橋脚模型による一連の動的正負交番載荷実験^{1) 2)}が実施されてきた。

本研究では、耐震研究室における実験結果より各供試体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、帯鉄筋比および軸力がエネルギー吸収容量に及ぼす影響について検討した。さらに、これらの要因の影響を考慮したエネルギー吸収容量の定式化を行った。

2. 既往の研究

Ohno、Nishioka³⁾ は、RC高架橋脚を想定したRC柱の繰り返し載荷実験と、太田⁴⁾の実験結果より、RC柱のエネルギー吸収容量を求め、耐震安全性を検討する上でエネルギー吸収容量が有効な指標となることを示している。Ohnoらの供試体は5体で断面が40×40cmの正方形断面、水平力載荷点までの高さは160cmである。供試体形状を図-2.1に示す。軸応力度を0.98MPaとして、5 δ_y 、8 δ_y (δ_y は降伏変位)を半振幅とする正負各1回の繰り返し載荷と、降伏変位の整数倍(1、2、3 δ_y 、...)ごとに変位振幅を増大させる正負各1、5、10回の繰り返し載荷、さらに、軸応力度を1.96MPaとして、正負各5回の繰り返し載荷を実施している。帯鉄筋比は0.32%と一定である。太田の供試体を図-2.2に示す。ここでは、供試体B、C、Dの3体について検討している。Ohnoらの実験との相違点は、断面が40×80cmと面積が2倍の長方形断面であること、軸応力度を0.98MPa、載荷繰り返し回数を10回と一定とし、帯鉄筋比を0.08%と0.16%としている点である。これら計8体の供試体の実験結果より、載荷繰り返し回数と軸力がエネルギー吸収容量に及ぼす影響を検討している。終局状態は最大耐力以降、耐力が減少して降伏耐力以下となった時点と定義し、終局状態に達するまでに供試体が吸収したエネルギー量を、その供試体のエネルギー吸収容量と定義している。供試体の諸元とエネルギー吸収容量を表-2.1に、累積吸収エネルギーと変位の関係を図-2.3に示す。検討の結果、部材断面、主鉄筋比、せん断支間比が同じ供試体において、じん性率は載荷繰り返し回数の影響を受けるものの、エネルギー吸収容量は10%以内の差に収まり、繰り返し回数の影響を受けないことを示している。また、実験で用いた軸圧縮応力度(0.98~1.96MPa)と帯鉄筋比(0.08~0.32%)の範囲においては、エネルギー吸収容量に及ぼす軸力と帯鉄筋比の影響も無視できることを示している。さらに、破壊形態が柱基部付近にできる塑性ヒンジに支配されていることに注目して、塑性ヒンジが生じる区間長を柱幅と仮定することにより、部材の断面寸法、鉄筋とコンクリートの材料特性からエネルギー吸収容量を求める算定式を提案している。ただし、算定式には軸力の影響が含まれており、軸力の影響が無視できるとする結論に矛盾している。以下に算定式を示す。

$$M_p = 0.8 a_t \sigma_y D + 0.5ND \left(1 - \frac{N}{bD\sigma_c}\right) \quad (2-1)$$

$$\theta_p = 2 \left\{ \cos^{-1} \frac{l_p}{2x} - \cos^{-1} \left(\frac{l_p + \Delta l}{2x} \right) \right\} \cdot \frac{\pi}{180} \quad (\text{rad.}) \quad (2-2)$$

ここで、

$$N \leq 0.4bD\sigma_c$$

M_p : 柱の降伏曲げモーメント

θ_p : 柱の終局回転角

a_t : 引張鉄筋断面積

σ_y : 引張鉄筋の降伏点

D : 柱の全せい

N : 柱の軸方向圧縮力

b : 柱の幅

σ_c : コンクリートの設計基準強度

l_p : 塑性領域中の引張鉄筋長さ

Δl : 引張鉄筋の伸び量

$$x = \frac{\sqrt{l_p^2 + s^2}}{2}$$

s : 引張主筋と圧縮主筋の距離

Park、Ang⁵⁾は地震により構造物が受ける損傷は、塑性変形による損傷と履歴吸収エネルギーによる損傷の組合せであるとして、繰返し載荷時の最大変位と履歴吸収エネルギーの影響を考慮した損傷評価式を提案している。提案式を以下に示す。

$$D = \frac{\delta_M}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \cdot \delta_u} \int dE \quad (2-3)$$

ここで、

D : 損傷指標($D \geq 1.0$ の場合、破壊)

δ_M : 繰返し載荷時の最大応答変位

δ_u : 単調載荷時の終局変位

Q_y : 降伏強度

dE : 履歴吸収エネルギー

β : 負値でない係数

さらに、変形レベルごとに繰返しの影響を考慮した損傷評価式も提案している。繰返しの影響を考慮した提案式の方が損傷指標のばらつきは若干小さくなるものの、式の単純さから上式の方を推奨している。単調載荷実験ならびに動的繰返し載荷実験のデータより、RC構成要素の損傷指標は対数正規分布に従うことを示している。対数確率紙上にプロットした式(2-3)による損傷指標 D の分布を図-2.4に示す。この図より、損傷指標は0.2から5にかけて大きくばらついていることがわかる。

中田ら⁶⁾はエネルギー吸収容量に及ぼす引張鉄筋比とせん断補強筋比の影響を明らかにし、さらに、繰返し載荷にともなう履歴吸収エネルギーの低下を考慮したエネルギー吸収容量の定式化を行い、エネルギー吸収容量による損傷評価の可能性を示している。供試体は10×20cmの矩形断面のRC単純はりで、曲げスパン20cm、せん断スパン60cmの対称2点載荷としている。引張鉄筋比を1.43%と2.26%の2レベル、せん断補強筋比を0.63%、0.95%、1.26%の3レベル設定し、降伏変位の整数倍の各変位振幅で、載荷繰返し回数を1回と5回の2種類実施している。載荷繰返し回数1回の供試体のエネルギー吸収容量を、引張鉄筋比とせん断

補強筋比の関数として求め、各履歴吸収エネルギーから、載荷繰り返し回数5回の供試体の第1サイクルの履歴吸収エネルギーを推定している。さらに、第2サイクル以降の履歴吸収エネルギーの低下量を載荷繰り返し回数5回の関数で表し、載荷繰り返し回数5回の供試体のエネルギー吸収容量を推定している。この結果、載荷繰り返し回数が1回のAシリーズだけでなく、5回のBシリーズの供試体のエネルギー吸収容量もかなりの精度で推定できることが示されている。実験値と計算値の比較を図-2.5に示す。エネルギー吸収容量に対する各載荷段階における累積吸収エネルギーの比をダメージインデックス(損傷指標)として、ダメージインデックスの変化を図-2.6に示す。この図より、エネルギー吸収容量が求まれば、累積吸収エネルギーを用いた損傷評価が可能であることがわかる。

衣笠、野村⁷⁾は有限要素法解析により、各要素の履歴吸収エネルギー分担率を求め、コンクリート要素のエネルギー分担率よりRC部材の繰り返し疲労損傷評価式を提案している。解析モデルは、 20×20 cmの正方形断面、高さ50cmのRC柱である。単調載荷および正負漸増繰り返し載荷時の荷重-変位関係をシミュレーションしている。履歴吸収エネルギーをコンクリート要素、圧縮鉄筋要素、引張鉄筋要素およびボンドリンク要素が吸収したエネルギー量に分解して、各要素の吸収エネルギー分担率を求めている。ここでは、耐力が前サイクルの耐力より5%以上低下し、かつ引き続き繰り返しによる急激な耐力低下を起こした点を耐力維持限界点とし、この点を部材の破壊と定義している。また、解析対象としたRC部材の耐力維持限界点が、コンクリートの圧壊、はく落により支配されていることから、コンクリートのエネルギー吸収量が直接部材の損傷程度に関係するものとして、コンクリート要素の吸収エネルギー分担率に注目している。繰り返し載荷時における経験範囲内と経験範囲外のエネルギー吸収機構はまったく異なっており、経験範囲外のエネルギー吸収機構は、単調載荷時のものと非常に似通っていることなどから、繰り返し載荷時のコンクリートの履歴吸収エネルギーを、等価な単調載荷時のエネルギー吸収容量に変換することにより、繰り返し疲労損傷評価式を提案している。

本郷ら⁸⁾も有限要素法解析により、各要素の履歴吸収エネルギー分担率を求め、鋼材の低サイクル疲労の概念より鉄筋の破断回数を推定し、エネルギー吸収容量の算定を行っている。解析対象とした供試体は、断面 15×20 cm、全長250cm、載荷区間210cmのRC単純はりで、主鉄筋比、せん断補強筋比、せん断支間比を変化させた3種類である。供試体の諸元を表-2.2および図-2.7に示す。破壊の定義は、載荷中に荷重が0付近まで大きく低下するか、鉄筋が破断した時点としている。衣笠らと同様に各構成要素の履歴吸収エネルギー分担率を求めているが、解析対象とした実験供試体がすべて曲げによる鉄筋の破断により破壊に至っていることより、鉄筋の履歴吸収エネルギー分担率に注目して解析している。この場合、履歴吸収エネルギーの8割以上を主鉄筋が負担しており、そのほとんどが曲げ区間で吸収されている。そこで、低サイクル疲労の概念より鉄筋の破断回数を推定し、1サイクルあたりの平均履歴吸収エネルギーとの積によりエネルギー吸収容量を求めている。その結果、エネルギー吸収容量は変位振幅に関わらずほぼ一定の値を示している。無次元化した最大消費エネルギー量(エネルギー吸収容量)と変位振幅の関係を図-2.8に示す。

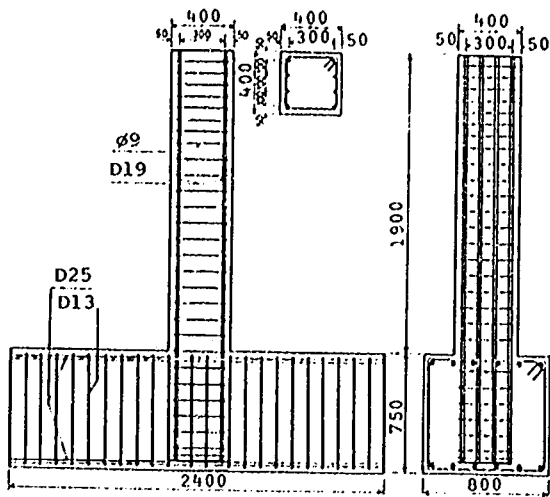


図-2.1 供試体形状

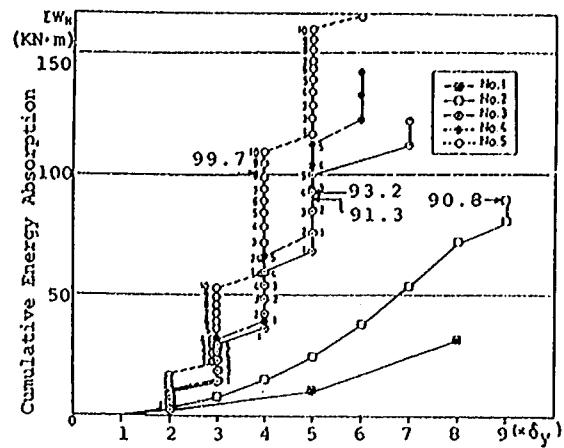


図-2.3 累積吸収エネルギーと変位の関係

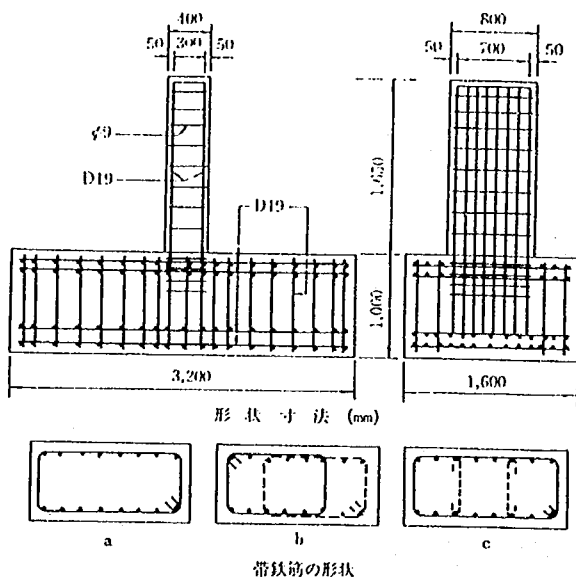


図-2.2 供試体諸元 (太田)

供試体	せん断支間比	帯鉄筋間隔 (cm)	帯鉄筋比 ρ_w (%)	帯鉄筋形状	軸方向鉄筋比 ρ_l (%)	載種類	荷 $\sigma_N = N/A_c$ (kg/cm ²)
A	4.0	20	0.08	a	0.82	II	10
B		20	0.08	a			
C		10	0.16	a			
D		20	0.16	b			
E		20	0.16	c			
F		40	0.04	a			

・ 載荷 I : 一方向繰返し載荷。 $\delta_y, 2\delta_y, 3\delta_y, \dots$ で各 10 回。
 載荷 II : 交番繰返し載荷。 $\delta_y, 2\delta_y, 3\delta_y, \dots$ で各 10 回。

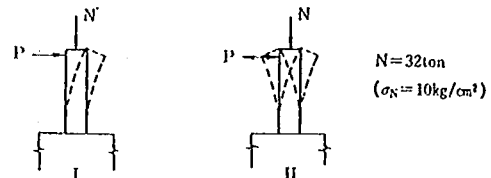
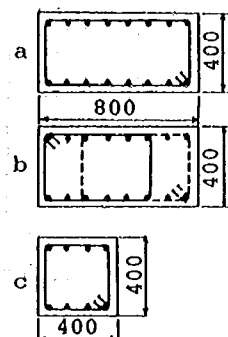


表-2.1 供試体諸元とエネルギー吸収容量

	Specimen	Ratio of Axial Reinforcement (%)	Interval of Ties (cm)	Ratio of Ties (%)	Type of Ties	Axial Unit Stress (MPa)	Energy Absorption Capacity (KN·m)			Loading Types
							①	②	③	
Ohta ¹⁵⁾	B	0.82	20	0.08	a	0.98	191.9	190.5	194.5	$\delta_y, 2\delta_y, 3\delta_y, \dots$ 10 cycles each
	C		10	0.16	a		198.6			
	D		20	0.16	b		181.2			
Author	No. 2	0.32	10	0.32	c	0.98	90.8	93.8	95.8	L-2
	No. 3					0.98	93.2			L-3
	No. 4					1.96	91.3			
	No. 5					0.98	99.7			L-4



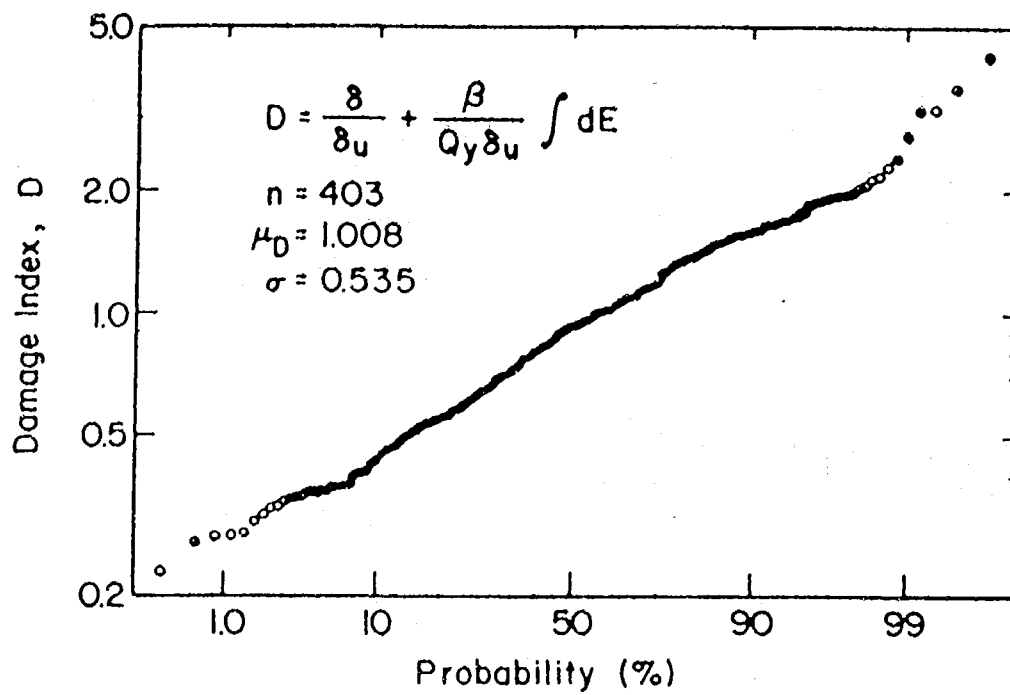


図-2.4 式(2-3)による損傷指標の分布

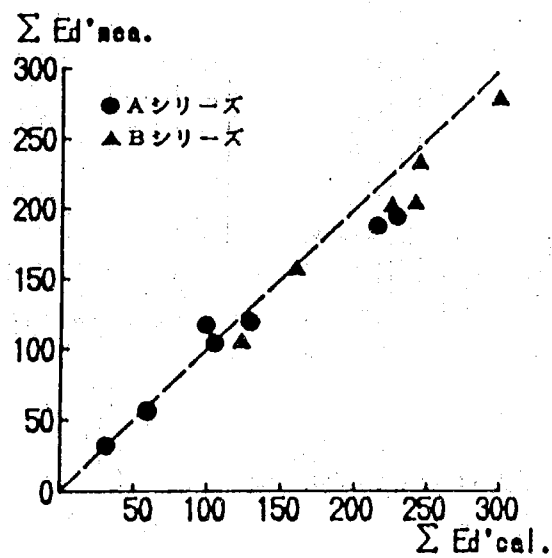


図-2.5 実験値と計算値の比較

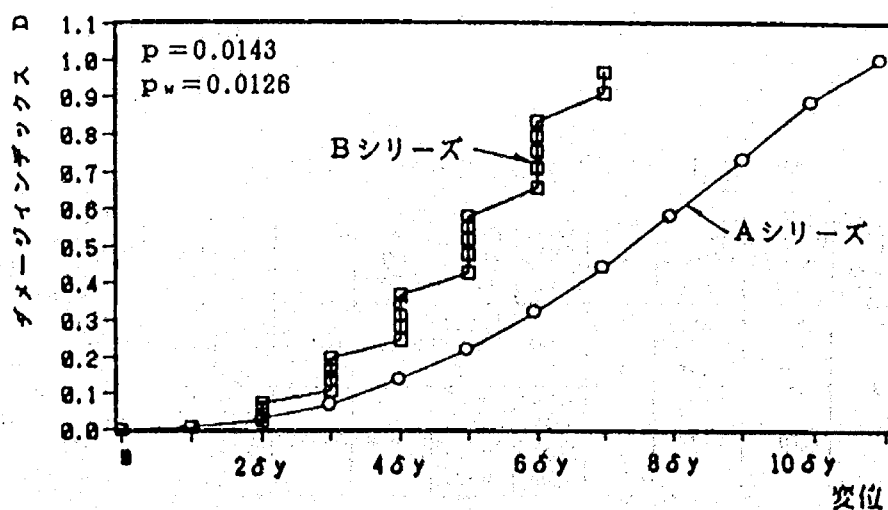


図-2.6 ダメージインデックスの変化

表-2.2 供試体諸元

試験体	主鉄筋比 $P_l = P_l' (\%)$	腹鉄筋比 $P_w (\%)$	せん断スパン比 a/d
T	1.05 (2D13)	0.97	5.16
S	1.05 (2D13)	0.97	3.91
UT	0.59 (2D10)	0.42	5.16

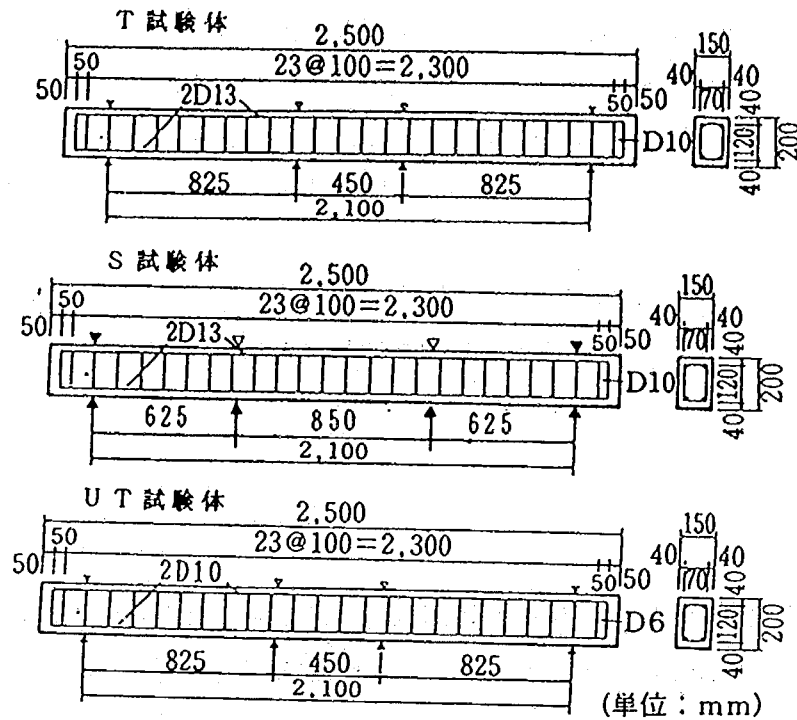


図-2.7 供試体諸元

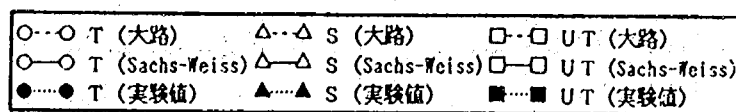


図-2.8 無次元化した最大消費エネルギー量

3. 実験概要

3.1 供試体

供試体は、橋長30～50m程度の一般クラスの橋に採用されているRC橋脚を想定したものであり、実構造物の約1/5のRC柱である。供試体断面は50×50cmの正方形断面で、主鉄筋にはD13(SD295)を、帯鉄筋にはφ9(SR235)を用いている。軸方向鉄筋比は2.03%、載荷速度は25cm/secである。また、主鉄筋としては側方鉄筋を配した配置となっている。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。図-3.1に基準となる供試体の形状寸法を、表-3.1に検討要因ごとにまとめた供試体の一覧を示す。ここでの供試体番号は、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。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。ここでは、実験結果より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)がエネルギー吸収容量に及ぼす影響を調べる。ただし、帯鉄筋比は供試体基部から50cmの範囲内で変化させており、50cm以上の範囲ではすべて0.1%である。

3.2 載荷方法

図-3.2に軸力を作用させない場合の載荷方法を示す。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。ここでの供試体天端とは、動的加振機に取り付け位置のことである。軸力を作用させる場合は、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。図-3.3に軸力を作用させた場合の載荷方法を示す。水平方向地震力の載荷は、引張側最外縁の主鉄筋が降伏ひずみに達するまでは、荷重制御により正負交番で準静的に荷重を段階的に増加させながら加力した。引張側主鉄筋が降伏した時点を降伏と定義し、降伏時の供試体天端の変位を降伏変位 δ_y とした。主鉄筋降伏以降は、降伏変位の整数倍、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よって加えた。ただし、 $n=3$ のP-19供試体と $n=5$ の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回繰り返して実施している。

表－ 3.1 供試体一覧

検討要因	供 試 体 番 号	供 試 体 高 さ h (cm)	コンクリート 圧縮強度 (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_o (MPa)
載荷繰り 返し回数	P-10	250	31.3	10	5.4	0.10	0
	P-22	250	31.4	5	5.4	0.10	0
	P-19	250	33.3	3	5.4	0.10	0
	P-17	175	33.1	10	3.8	0.10	0
	P-20	175	31.8	3	3.8	0.10	0
帯鉄筋比	P-10	250	31.3	10	5.4	0.10	0
	P-11	250	32.1	10	5.4	0.20	0
	P-13	250	32.8	10	5.4	0.31	0
軸応力度	P-10	250	31.3	10	5.4	0.10	0
	P-56	250	42.5	10	5.4	0.10	0.49
	P-57	250	40.0	10	5.4	0.10	0.98
	P-58	250	39.2	10	5.4	0.10	1.96

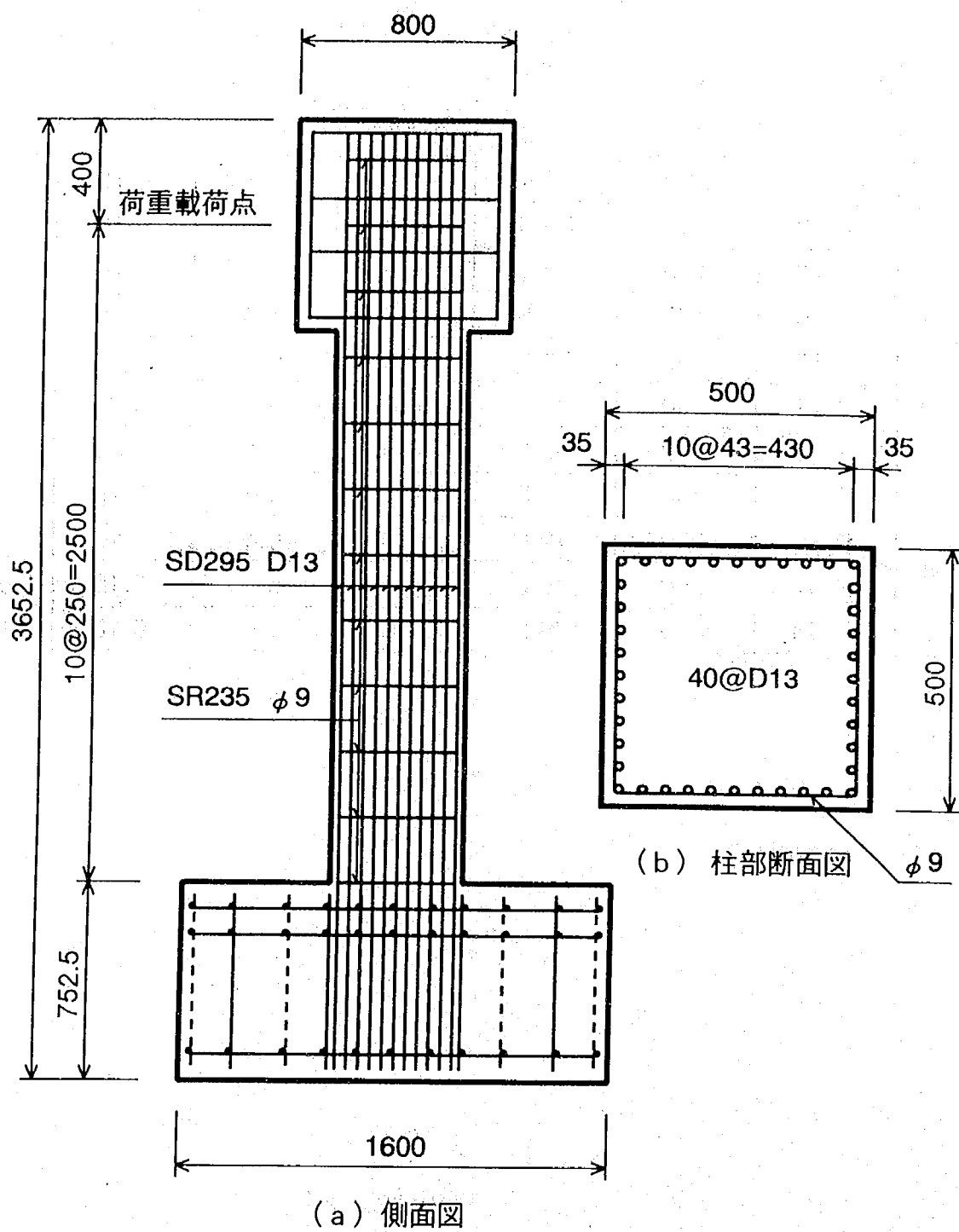


図-3.1 供試体の形状寸法

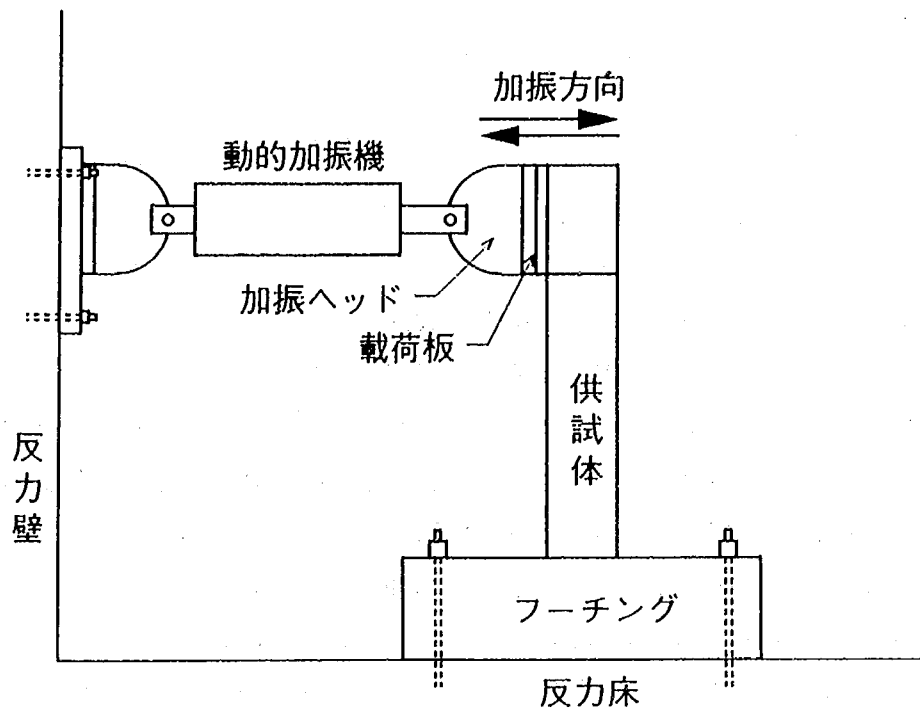


図-3.2 軸力を作用させない場合の載荷状況

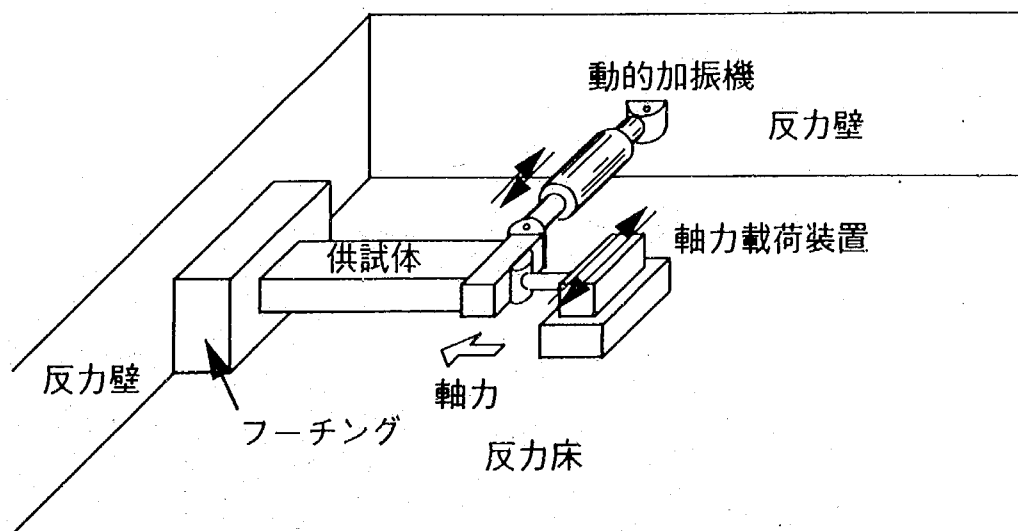


図-3.3 軸力を作用させる場合の載荷状況

4. 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-4.1に示すように荷重-変位履歴曲線によって囲まれる面積から得られる。また、累積吸収エネルギーは当該時点までの履歴吸収エネルギーを加え合わせたもので、その時点までに供試体が吸収したエネルギーの総和である。ここでは、後述する終局状態に達するまでの累積吸収エネルギー量を、その供試体のエネルギー吸収容量と定義する。

繰り返し荷重を受ける構造物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か、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ようである。今回の検討に用いた供試体は、主鉄筋の配置が側方鉄筋を有する柱型配筋であることより、降伏耐力から最大耐力にかけての耐力の増加が大きく、降伏耐力と最大耐力の比率が平均63%と、軸応力度が1.96MPaのP-58供試体を除いて、すべて最大耐力の80%耐力が降伏耐力を上回っている。耐力が最大耐力の80%以下に低下した後も、降伏耐力以下に低下するまでには、かなりの履歴エネルギーを吸収できるものと考えられることより、本研究では、各サイクルの耐力が降伏耐力以下になった時点を終局状態と定義した。耐力としては、各サイクルの正負の最大値の平均をとり、1 δ_y 載荷の第1サイクルの耐力を降伏耐力とした。また、終局状態に達した時点の供試体天端の変位を終局変位とし、終局変位と降伏変位の比率をじん性率と定義した。

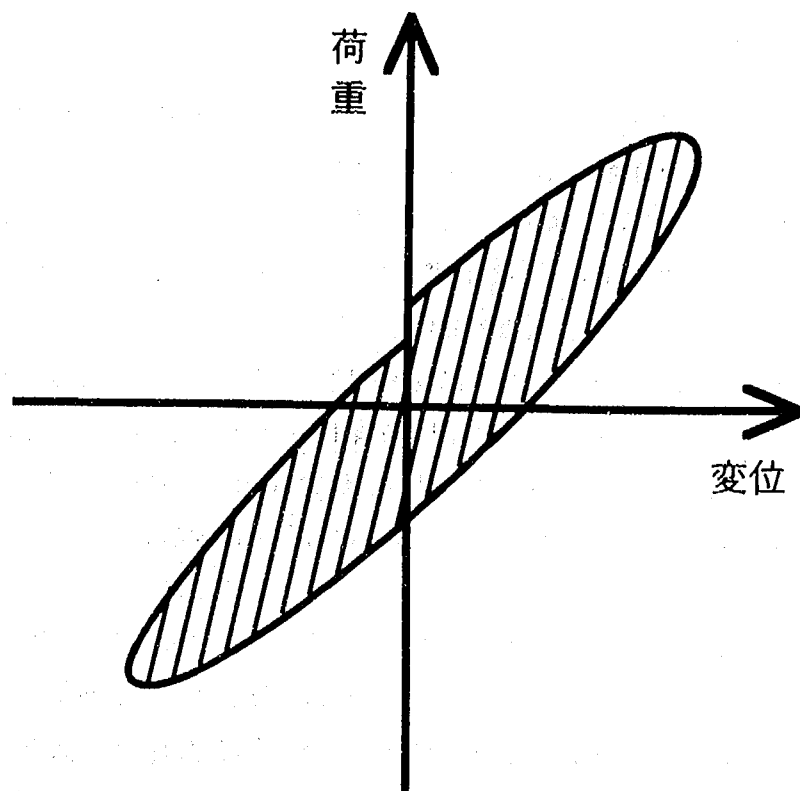


図-4.1 1サイクルあたりの履歴吸収エネルギー

5. 耐力および変形性能に及ぼす各要因の影響

表-5.1には各要因ごとにまとめた実験結果の一覧を、履歴曲線の面積から求めたエネルギー吸収容量も併せて示している。各供試体の荷重-変位履歴曲線を図-5.1に、また、各サイクルの耐力を降伏耐力で無次元化したものを図-5.2に示す。ただし、前述したように、P-19, P-22供試体は $9\delta_y$ 載荷を2回実施しており、2回目の $9\delta_y$ 載荷を $9'$ で示している。図-5.2において、 P_i/P_y が1以下になった時点が終局状態である。図中に最大耐力と終局に達した時点の変位振幅とサイクルを示す。最大耐力に達するまでは、同一変位振幅における繰返しにともなう耐力低下は10%程度と小さいが、最大耐力に達した後は繰返しにともなう耐力低下が大きくなり、第10サイクルの耐力が第1サイクルの耐力の70%以下にまで低下している供試体がある。載荷繰返し回数が3回と5回の供試体は、最大耐力以降の耐力低下が、載荷繰返し回数が10回の供試体に比べて小さい。また、軸応力度が大きくなると、最大耐力と降伏耐力の比は小さくなり、終局時の変位振幅が小さくなっている。

図-5.3に各変位振幅における荷重および変位の正負の最大値の平均を結んだ平均包絡線を、各要因ごとにまとめて示す。載荷繰返し回数の影響をみると、 $6\delta_y$ 載荷終了時までは載荷繰返し回数による影響はみられないが、 $7\delta_y$ 以降においては載荷繰返し回数が多いほど耐力の低下が大きくなっている。せん断支間比の影響については、横軸を降伏変位の倍数で示しているために図では確認できないが、 $h/d=5.4$ の供試体の降伏変位は、 $h/d=3.8$ の1.6倍になっている。逆に、 $h/d=5.4$ の供試体の降伏耐力は、 $h/d=3.8$ の60%程度である。次に、 $0.1 \leq p_w \leq 0.3\%$ の範囲内においては、帯鉄筋比が平均包絡線に及ぼす影響はほとんどない。また、軸応力度が 1.96MPa 以下の範囲では、軸応力度が大きいほど、最大耐力に達するまでの耐力は大きい。降伏耐力から最大耐力にかけての耐力の増加は小さく、最大耐力以後の耐力低下も著しい。

図-5.4にじん性率に及ぼす各要因の影響を示す。載荷繰返し回数が多いほど、じん性率は小さくなる。じん性率 μ と載荷繰返し回数 n の関係は以下のようにになっている。 $h/d=5.4$ の場合も $h/d=3.8$ の場合も、 $n=10$ の供試体のじん性率は、 $n=3$ の供試体のじん性率の60%程度である。

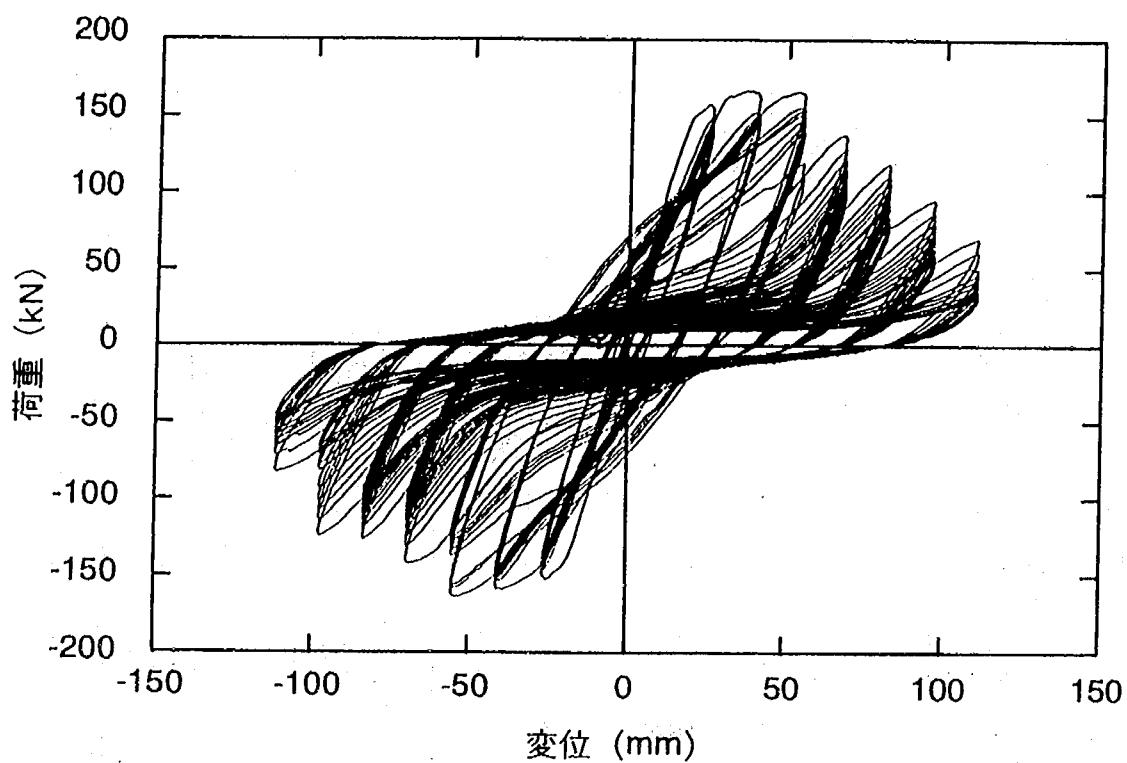
$$\mu = 11.9 - 0.52n \quad (h/d=5.4) \quad (5-1)$$

$$\mu = 8.5 - 0.44n \quad (h/d=3.8) \quad (5-2)$$

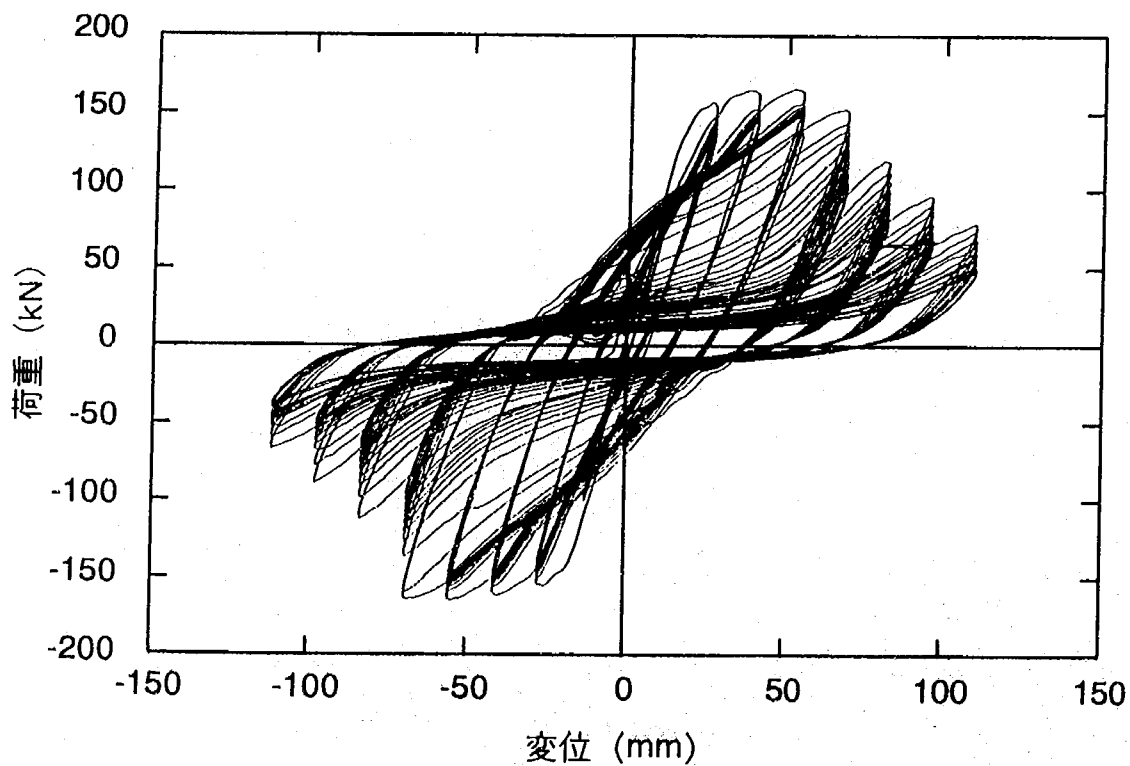
次に、せん断支間比の影響をみると $n=10$ の場合、 $h/d=5.4$ の供試体のじん性率は6.7と、 $h/d=3.8$ の供試体のじん性率4.1の1.5倍以上である。帯鉄筋比とじん性率の関係をみると、帯鉄筋比が大きい方がじん性率が高い。しかし、その影響は小さく、帯鉄筋比が0.3%の供試体のじん性率は、帯鉄筋比が0.1%と0.2%の供試体の1.2倍程度であり、帯鉄筋比が0.1%と0.2%の供試体のじん性率の大きさは同じである。また、軸応力度が大きいほどじん性率は小さい。ただし、 $0.49 \leq \sigma_0 \leq 1.96\text{MPa}$ の範囲内の3体の供試体のじん性率は1.4倍以内の範囲に収まっている。

表－5.1 実験結果一覧

検討要因	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)	じん性率 δ_u/δ_y	エネルギー 吸収容量 (kJ)
載荷繰り 返し回数	P-10	87.4	161.8	12.41	83.10	6.7	283.4
	P-22	89.1	159.5	12.19	110.39	9.1	237.3
	P-19	84.3	158.0	12.25	127.94	10.4	236.3
	P-17	149.9	231.8	7.83	31.88	4.1	116.7
	P-20	157.5	233.9	7.81	55.93	7.2	119.6
帯鉄筋比	P-10	87.4	161.8	12.41	83.10	6.7	283.4
	P-11	94.8	162.1	12.39	83.17	6.7	301.1
	P-13	88.4	156.3	12.34	96.95	7.9	359.9
軸応力度	P-10	87.4	161.8	12.41	83.10	6.7	283.4
	P-56	126.9	175.0	14.63	58.31	4.0	161.8
	P-57	127.2	182.6	16.08	64.33	4.0	166.7
	P-58	175.4	194.4	20.13	60.31	3.0	131.4

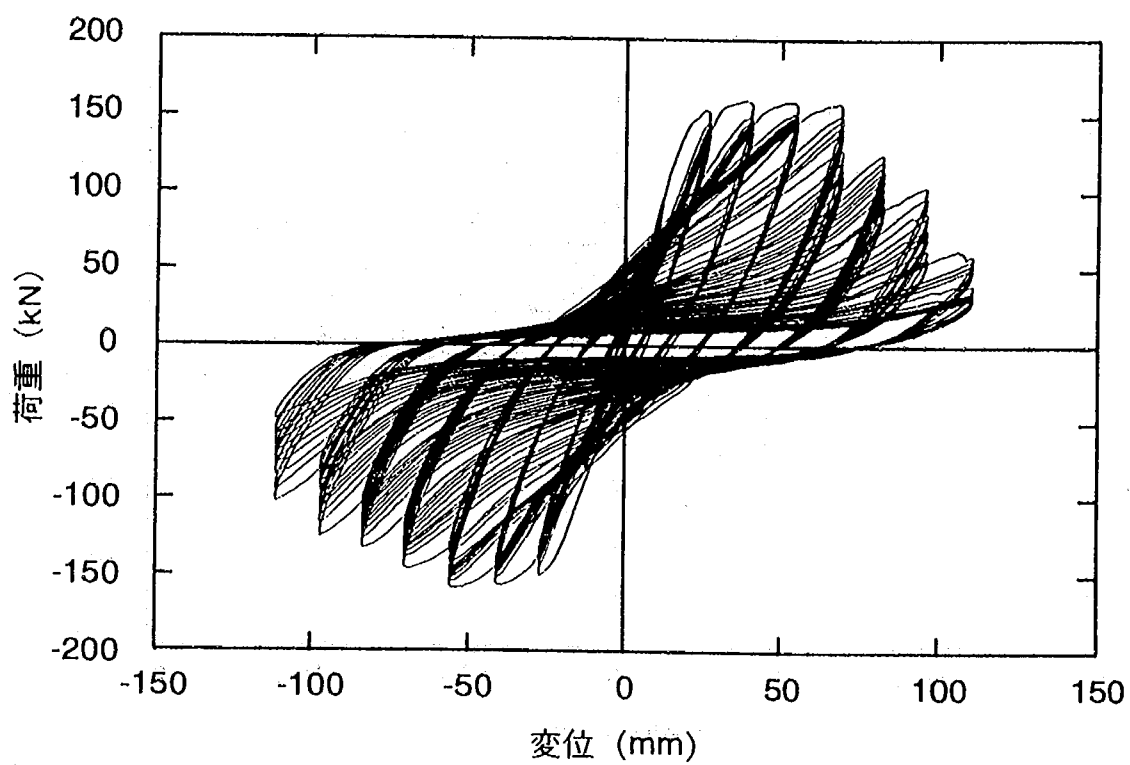


(1) P-10 供試体

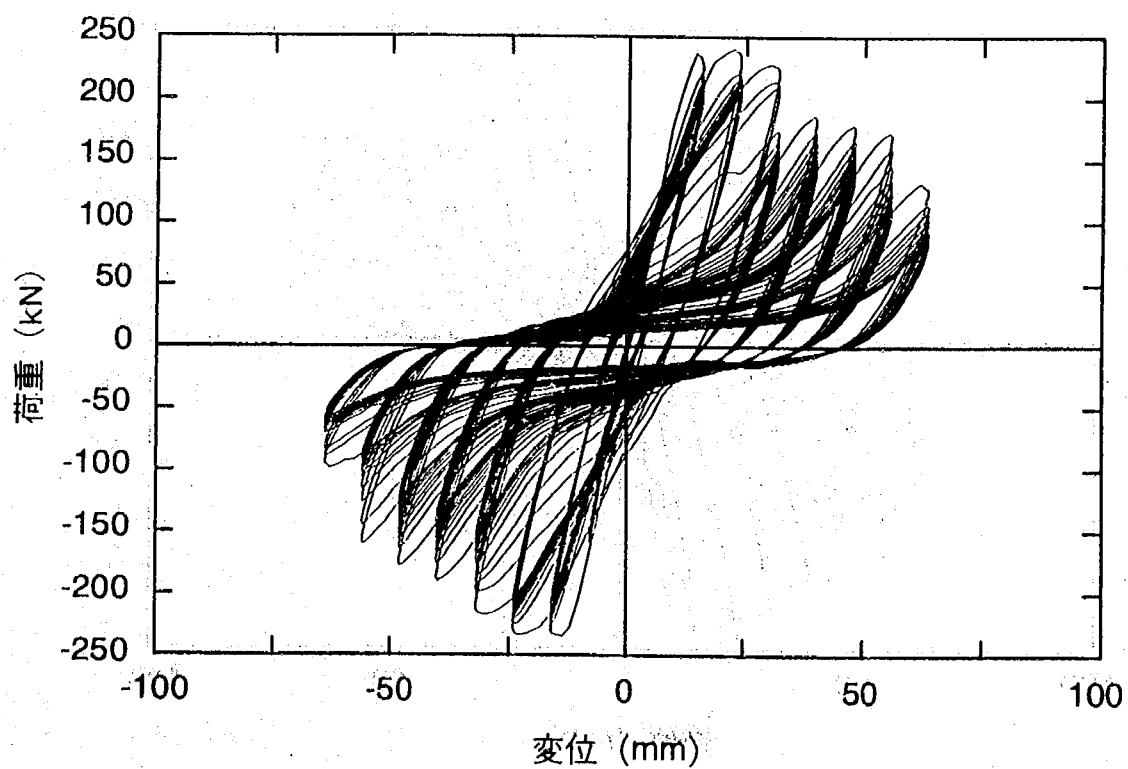


(2) P-11 供試体

図-5.1 荷重-変位履歴曲線

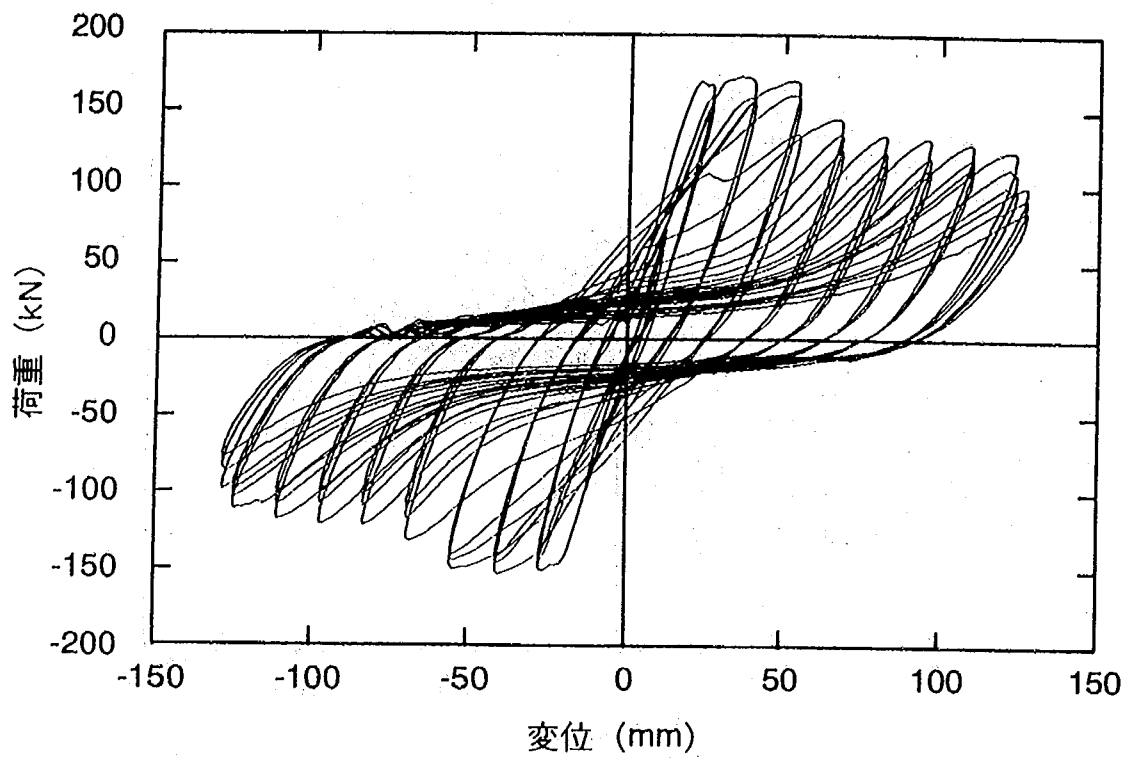


(3) P-13 供試体

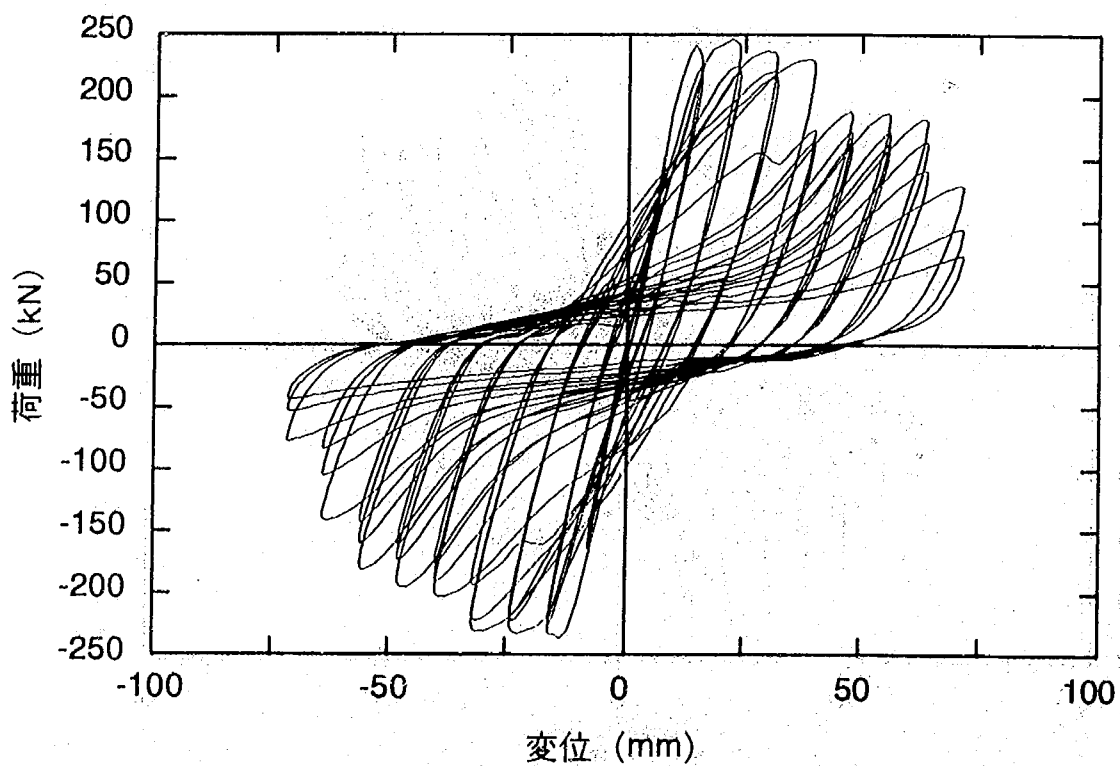


(4) P-17 供試体

図-5.1 荷重-変位履歴曲線

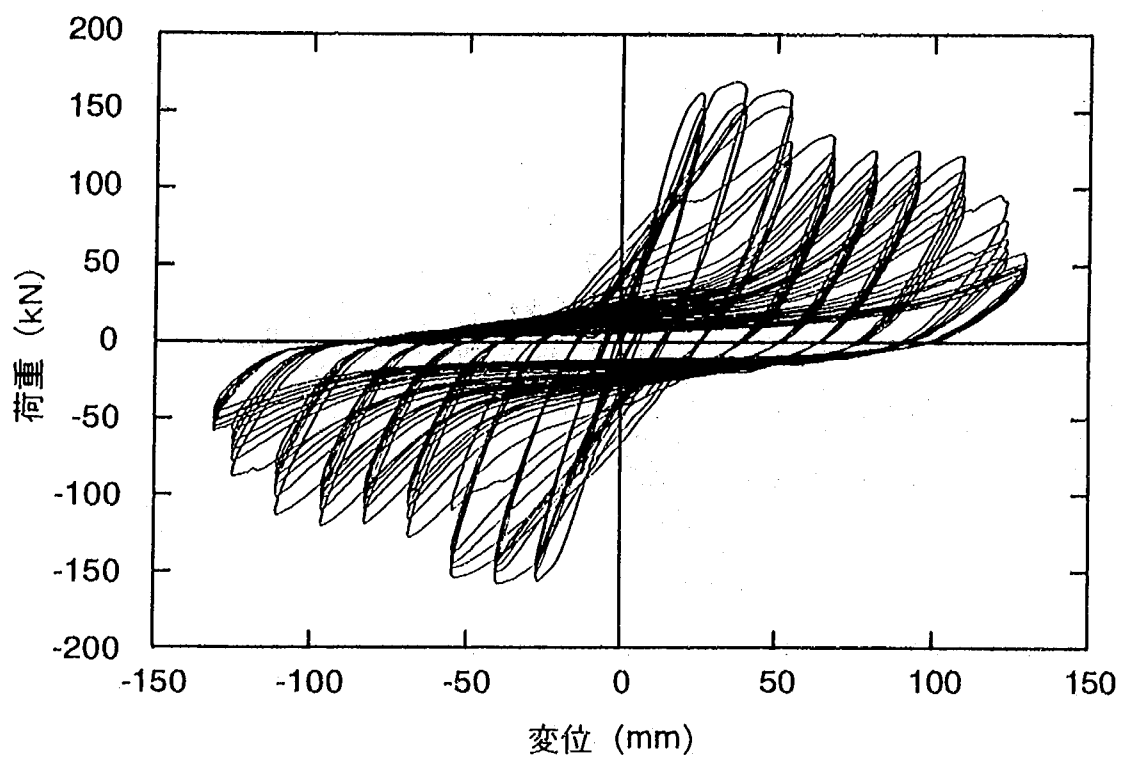


(5) P-19 供試体

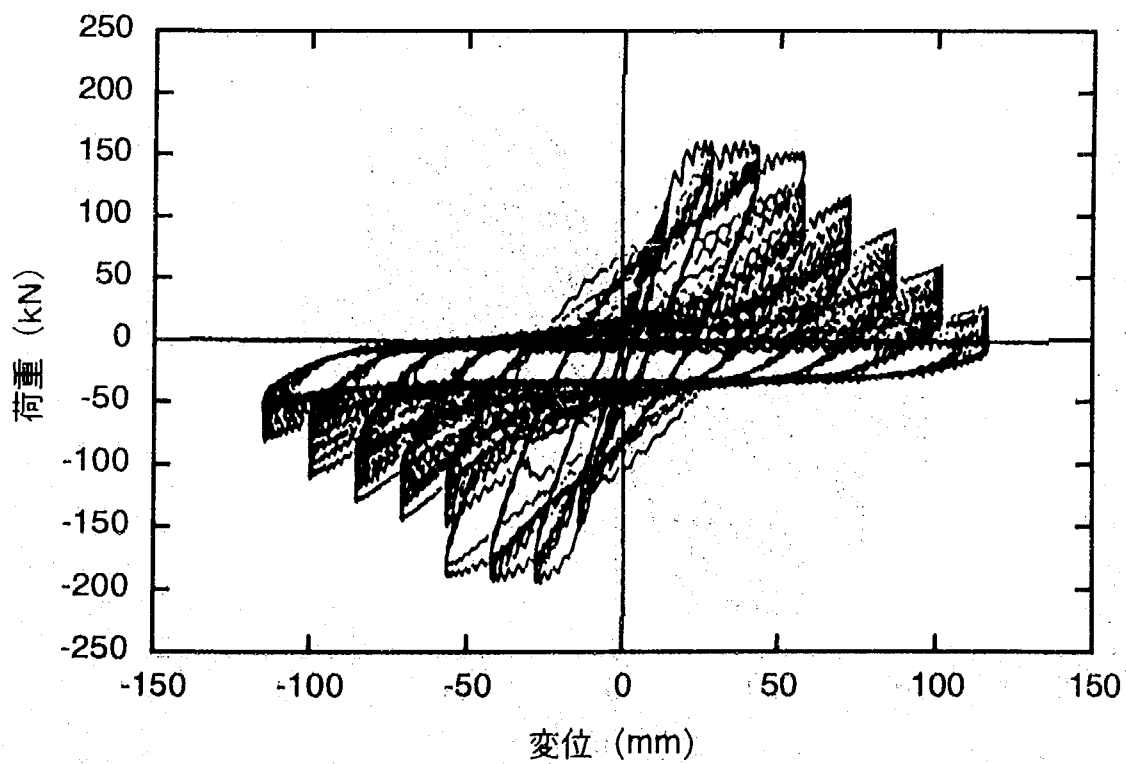


(6) P-20 供試体

図-5.1 荷重-変位履歴曲線

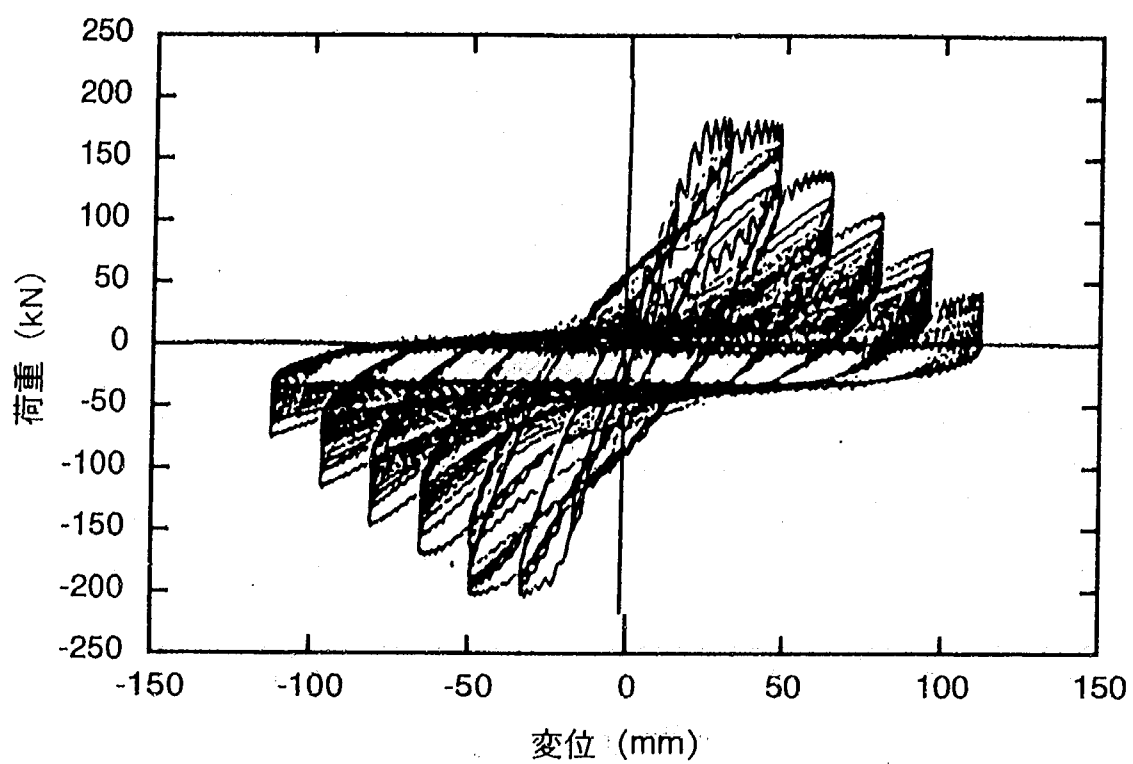


(7) P-22 供試体

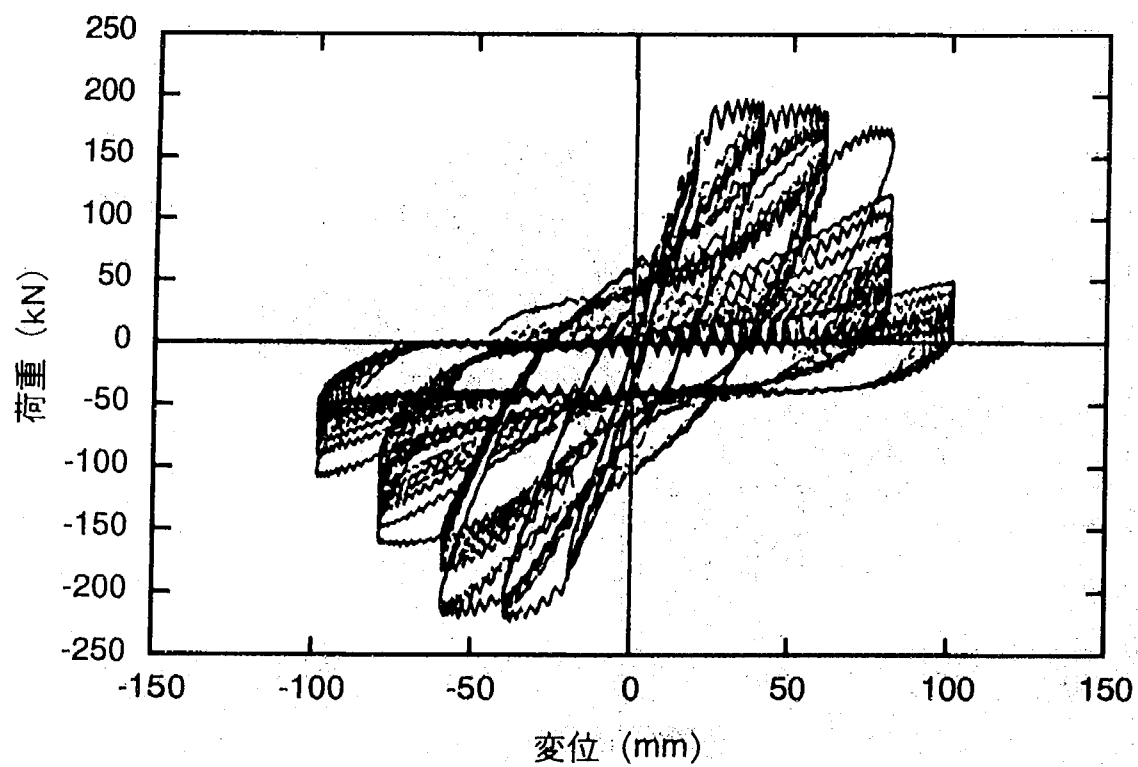


(8) P-56 供試体

図-5.1 荷重-変位履歴曲線

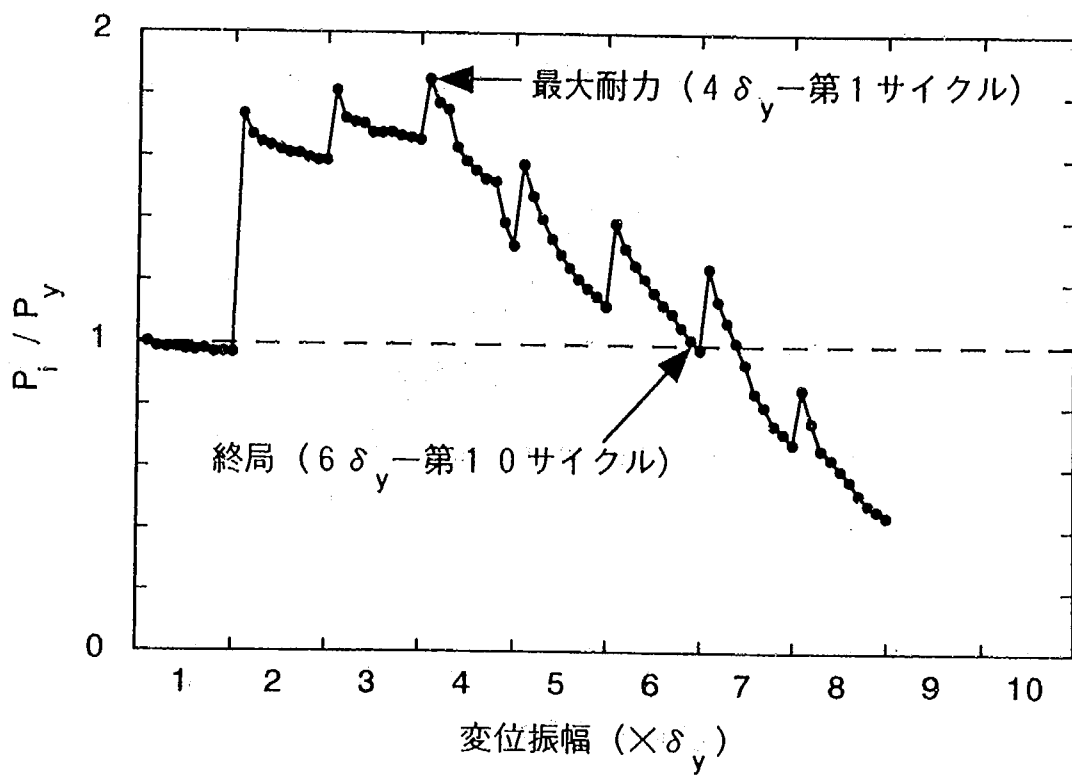


(9) P-57 供試体

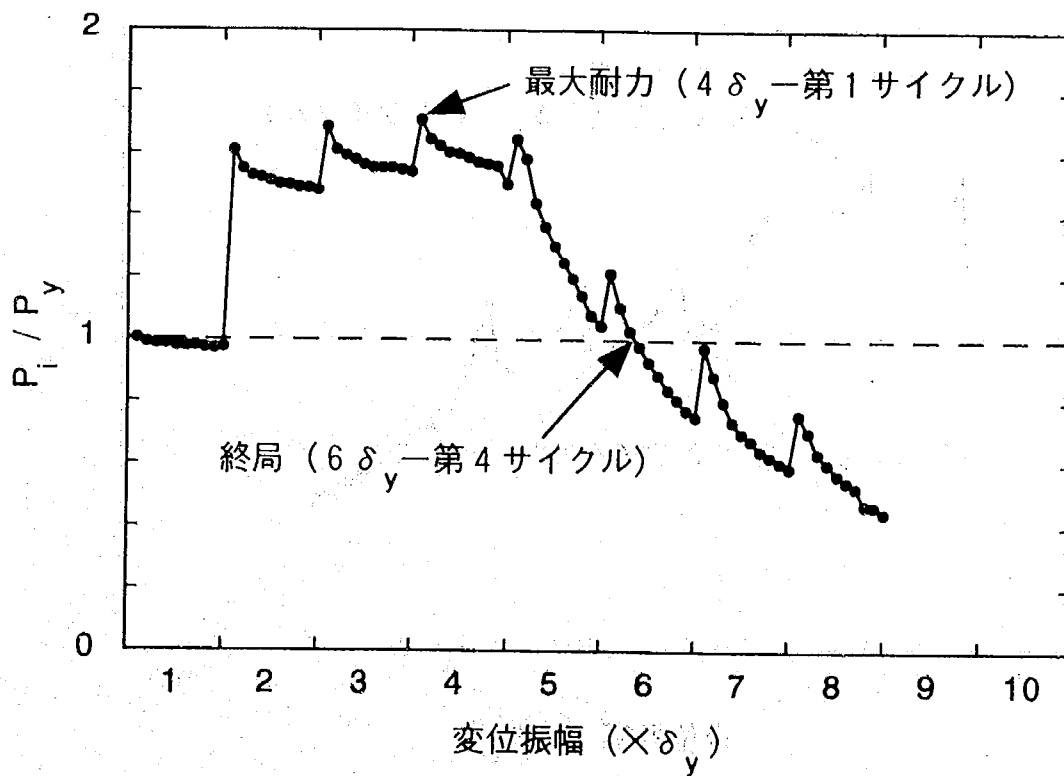


(10) P-58 供試体

図-5.1 荷重-変位履歴曲線

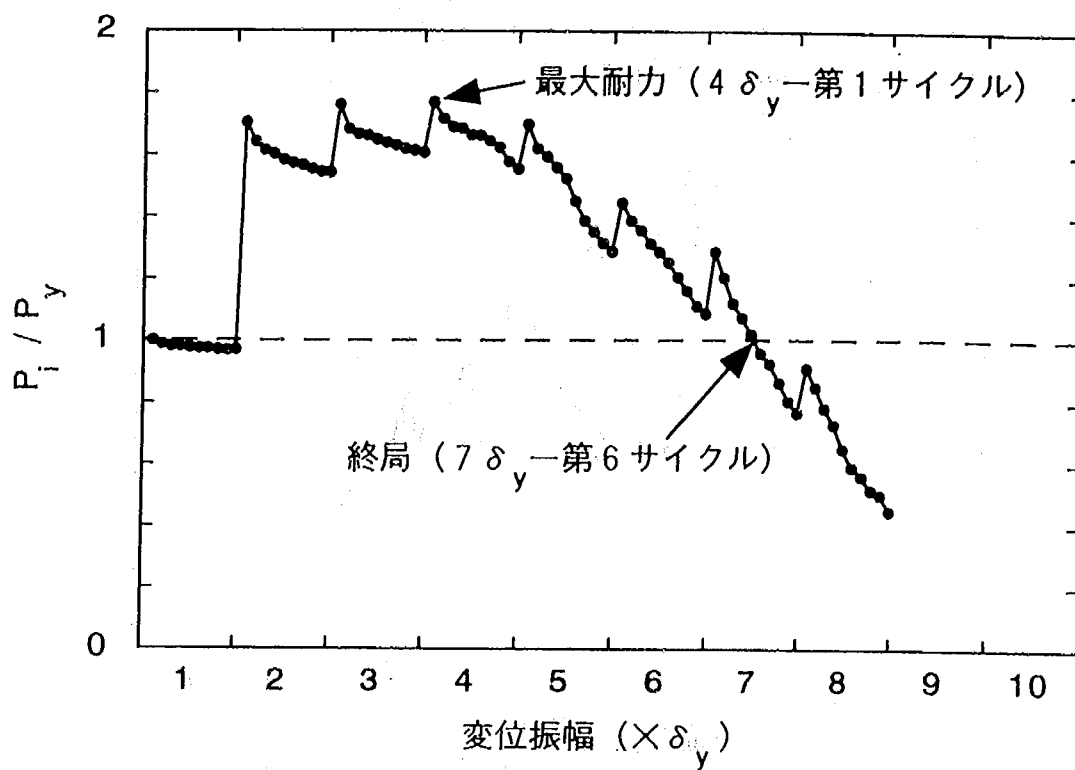


(1) P-10 供試体

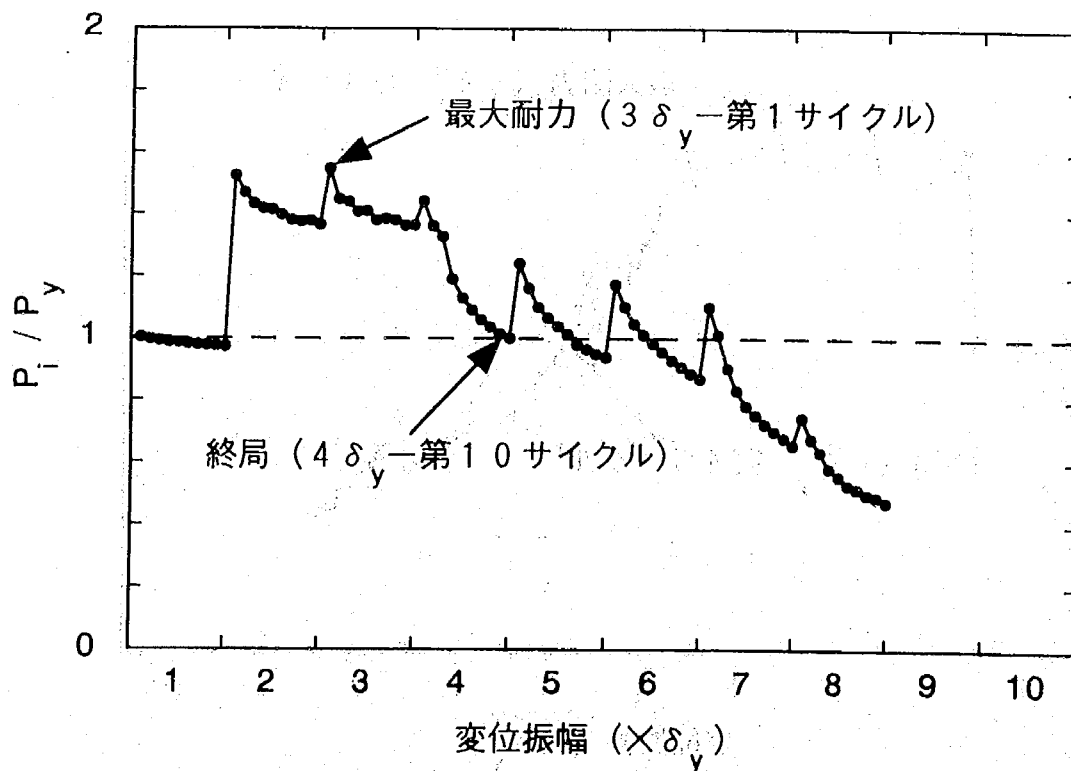


(2) P-11 供試体

図一5.2 サイクルごとの耐力変化

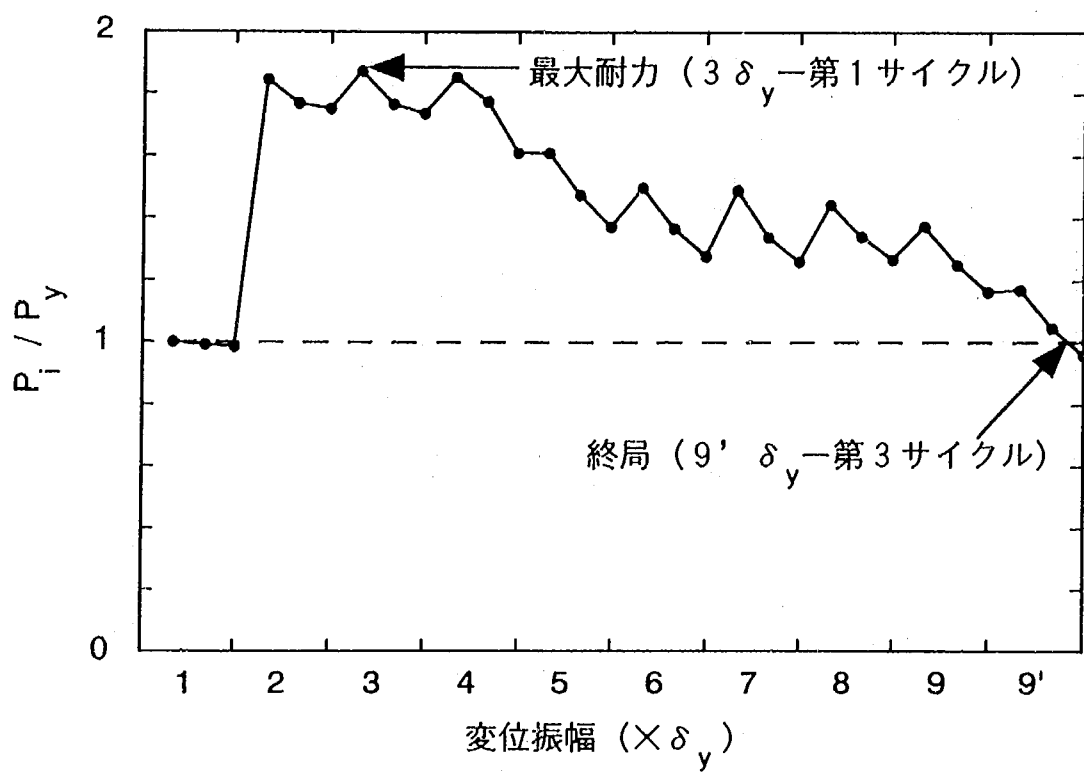


(3) P-13 供試体

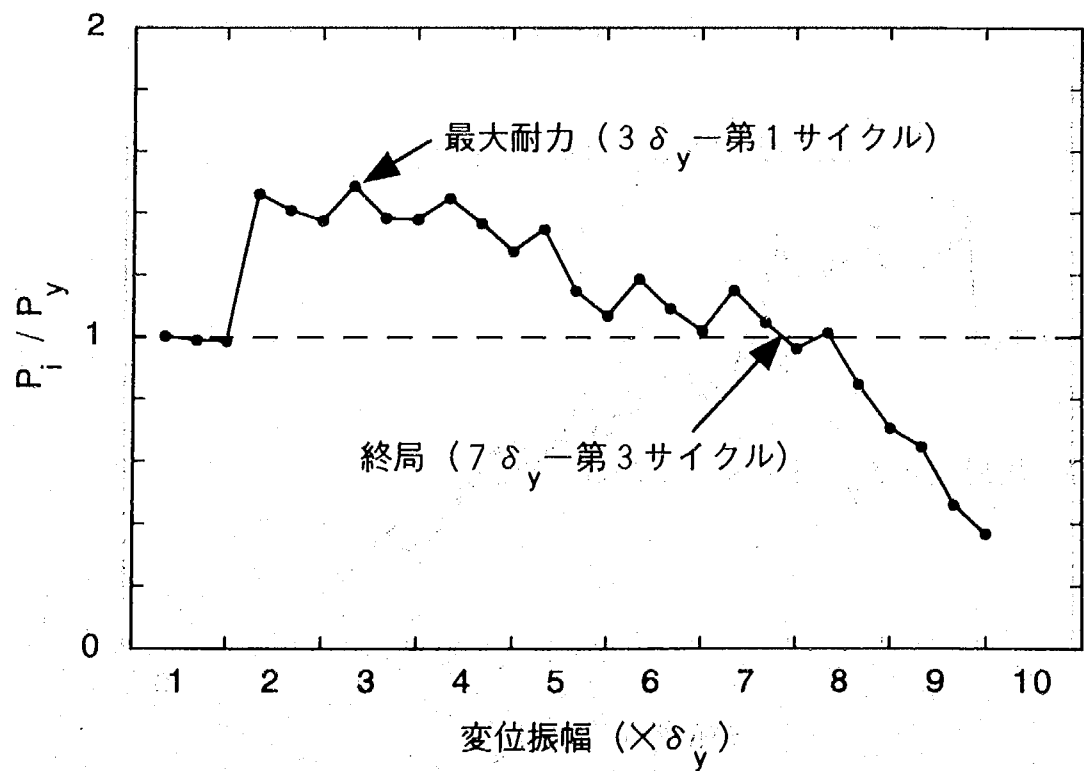


(4) P-17 供試体

図-5.2 サイクルごとの耐力変化

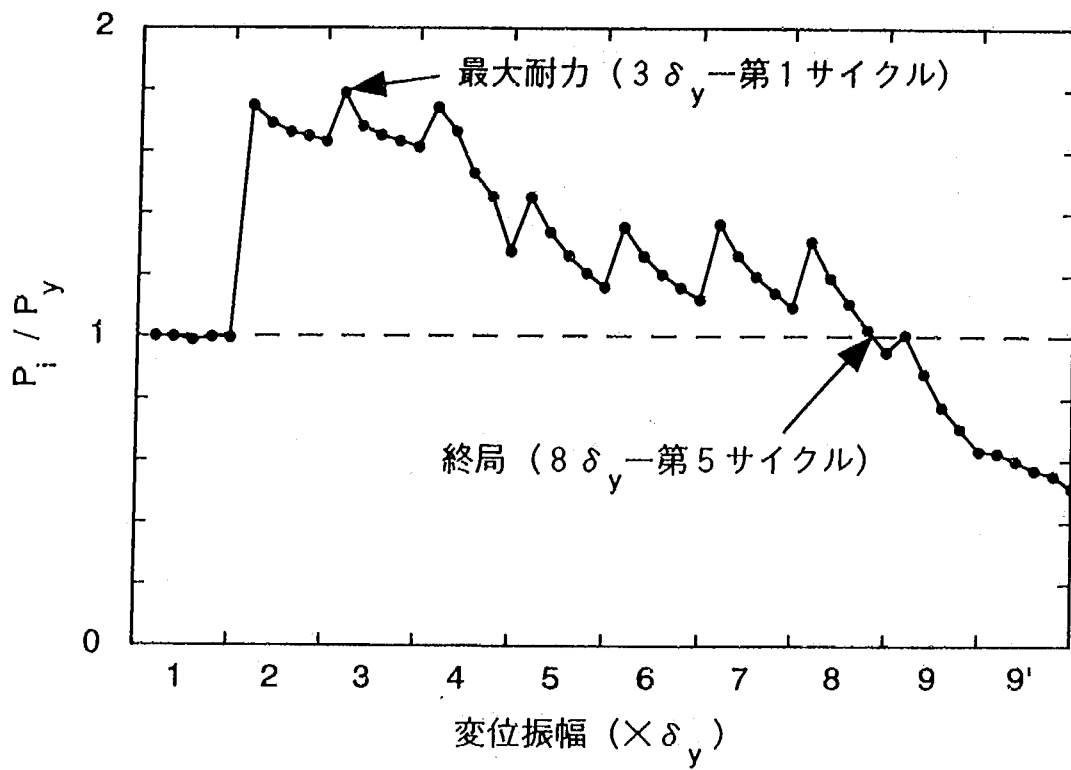


(5) P-19 供試体

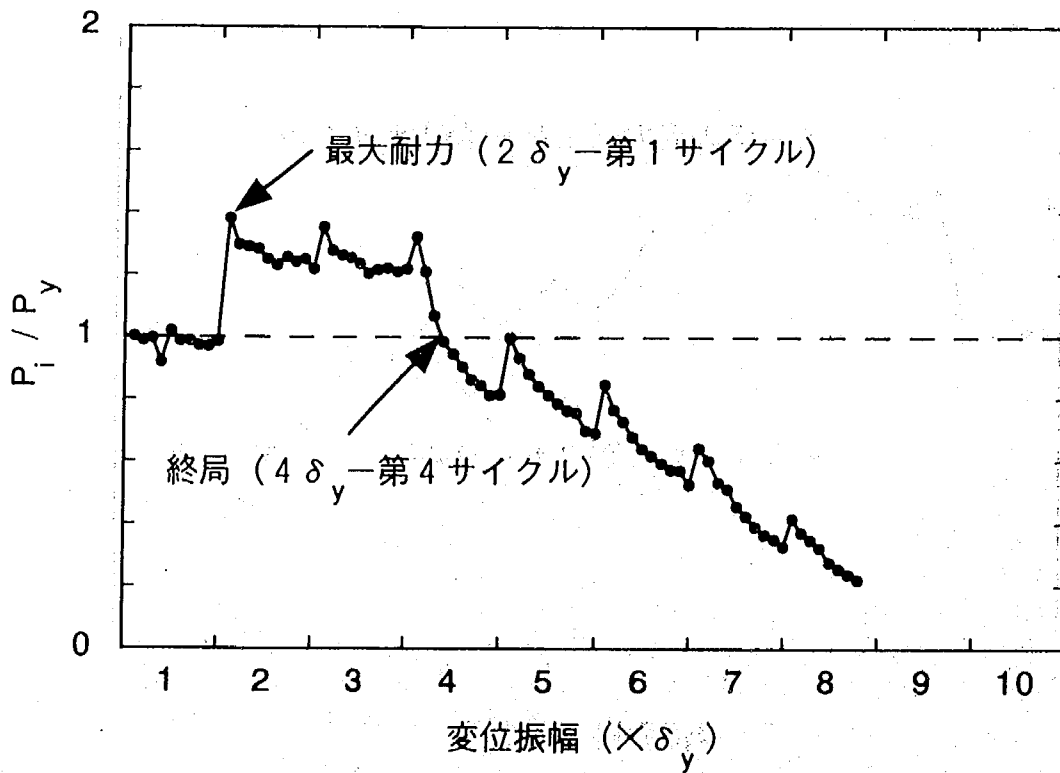


(6) P-20 供試体

図-5.2 サイクルごとの耐力変化

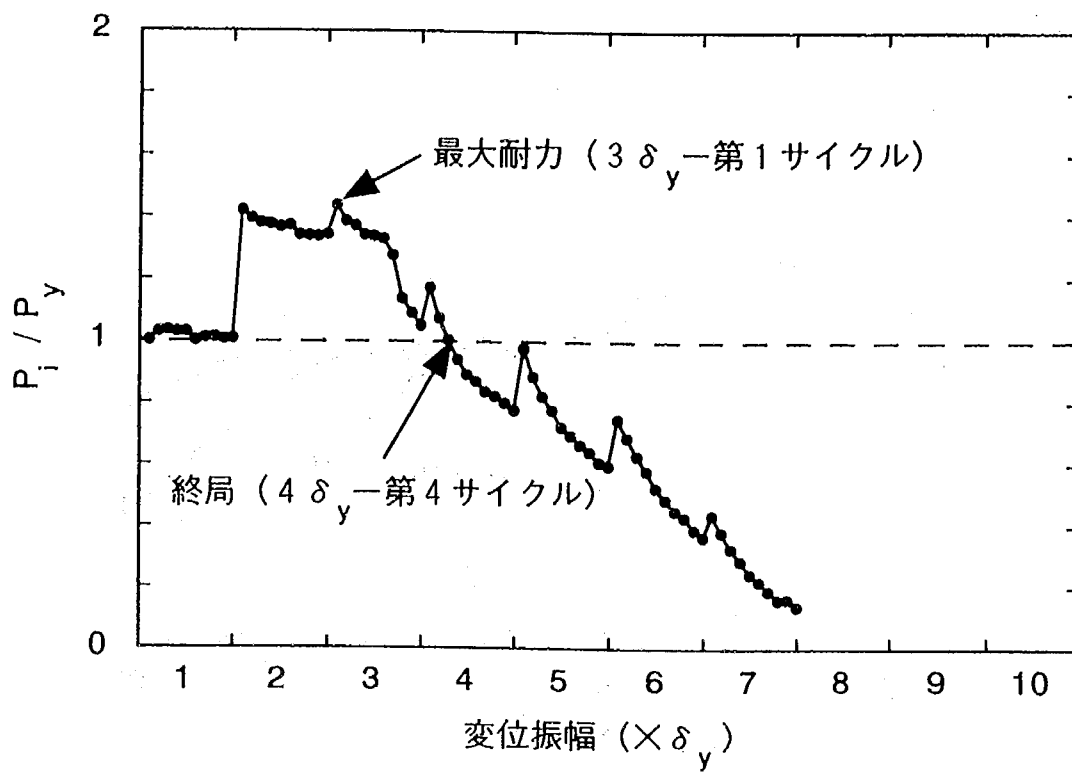


(7) P-22 供試体

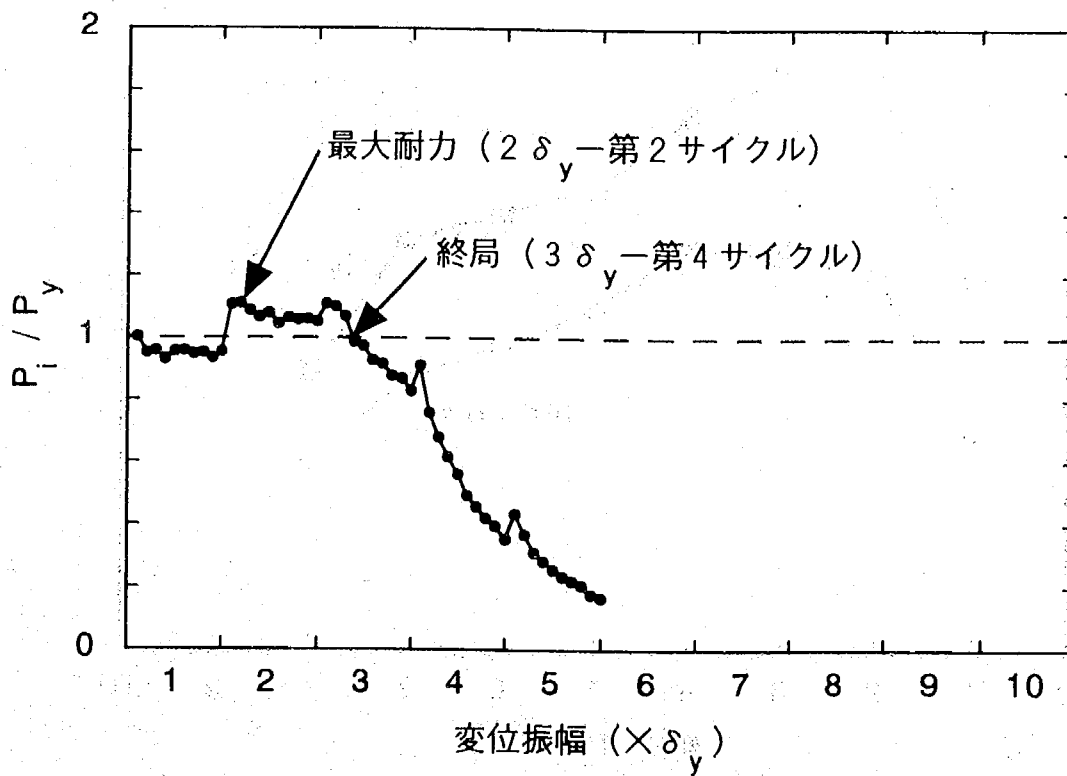


(8) P-56 供試体

図-5.2 サイクルごとの耐力変化

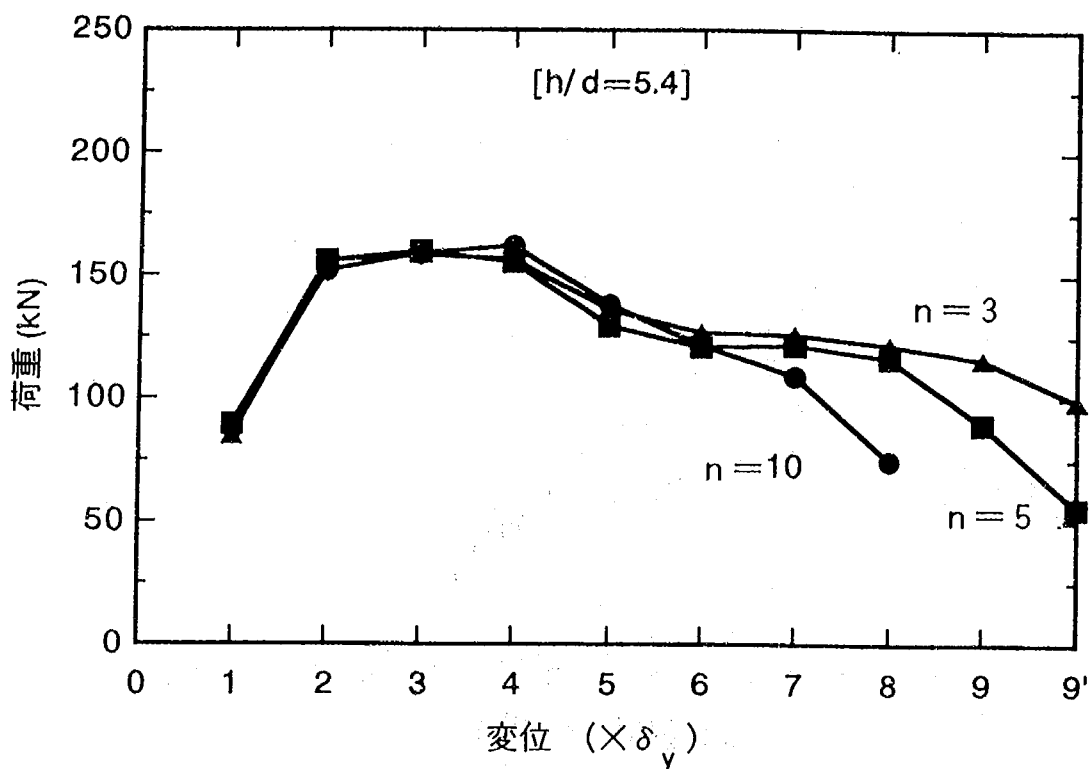


(9) P-57 供試体

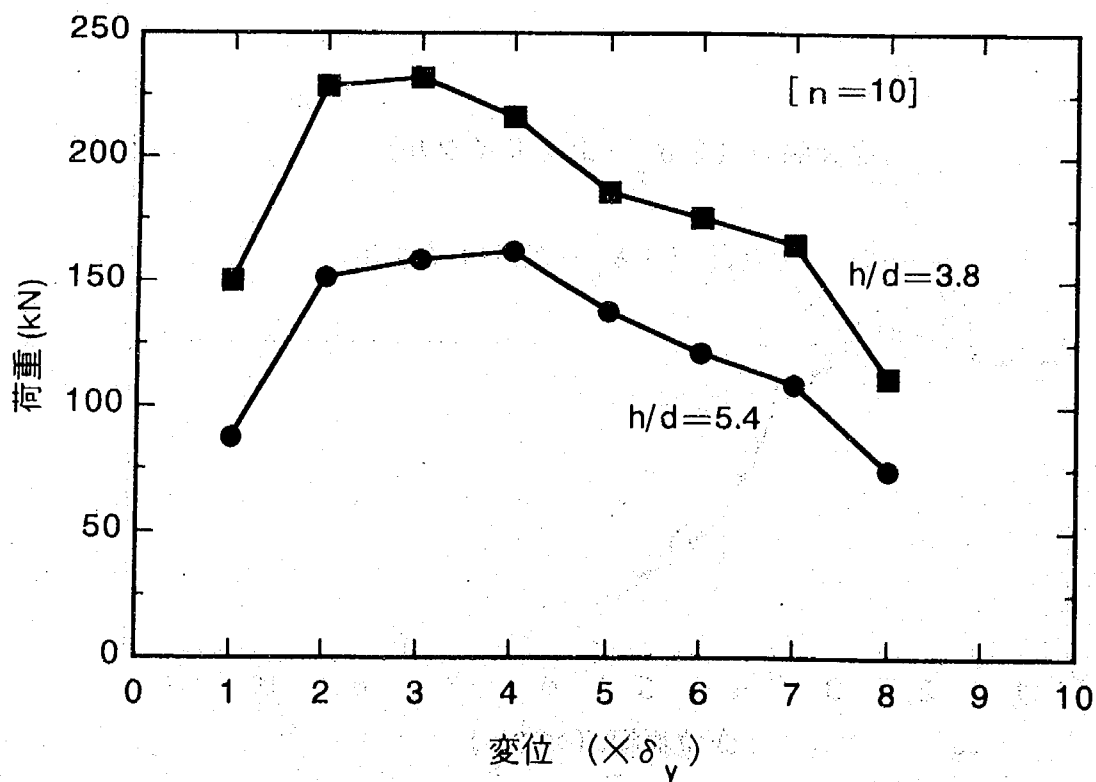


(10) P-58 供試体

図-5.2 サイクルごとの耐力変化

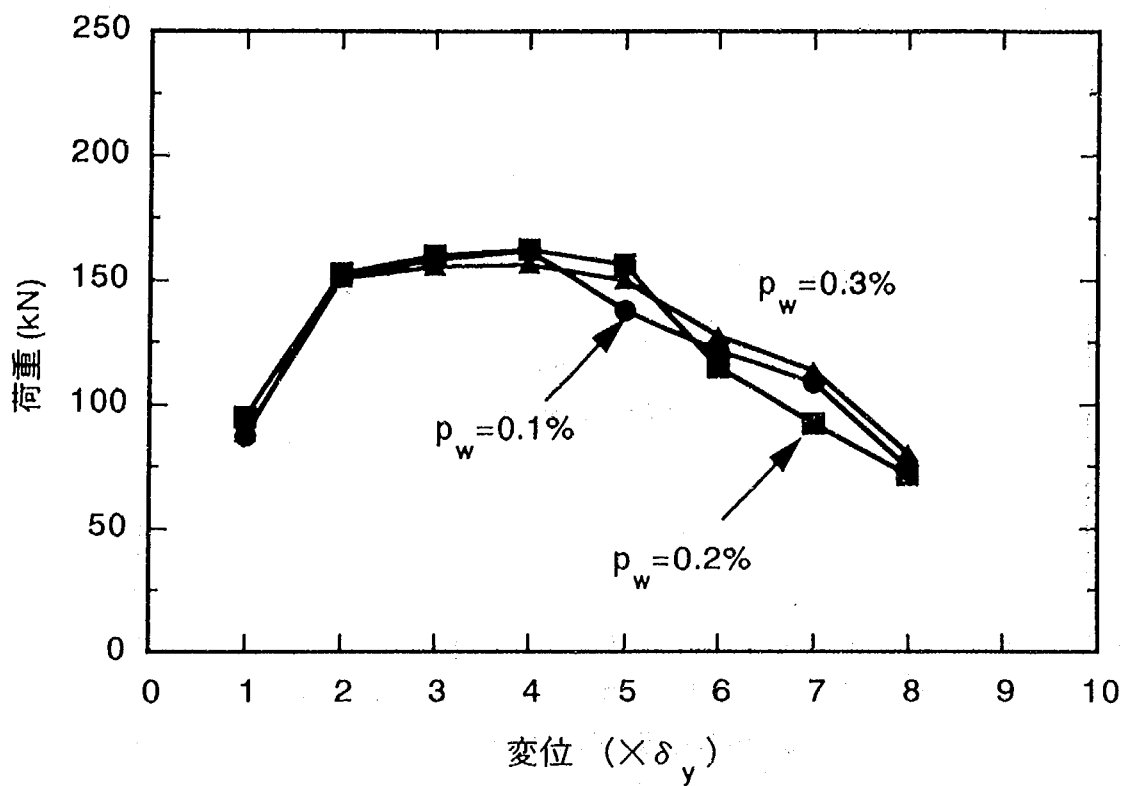


(a) 載荷繰返し回数の影響

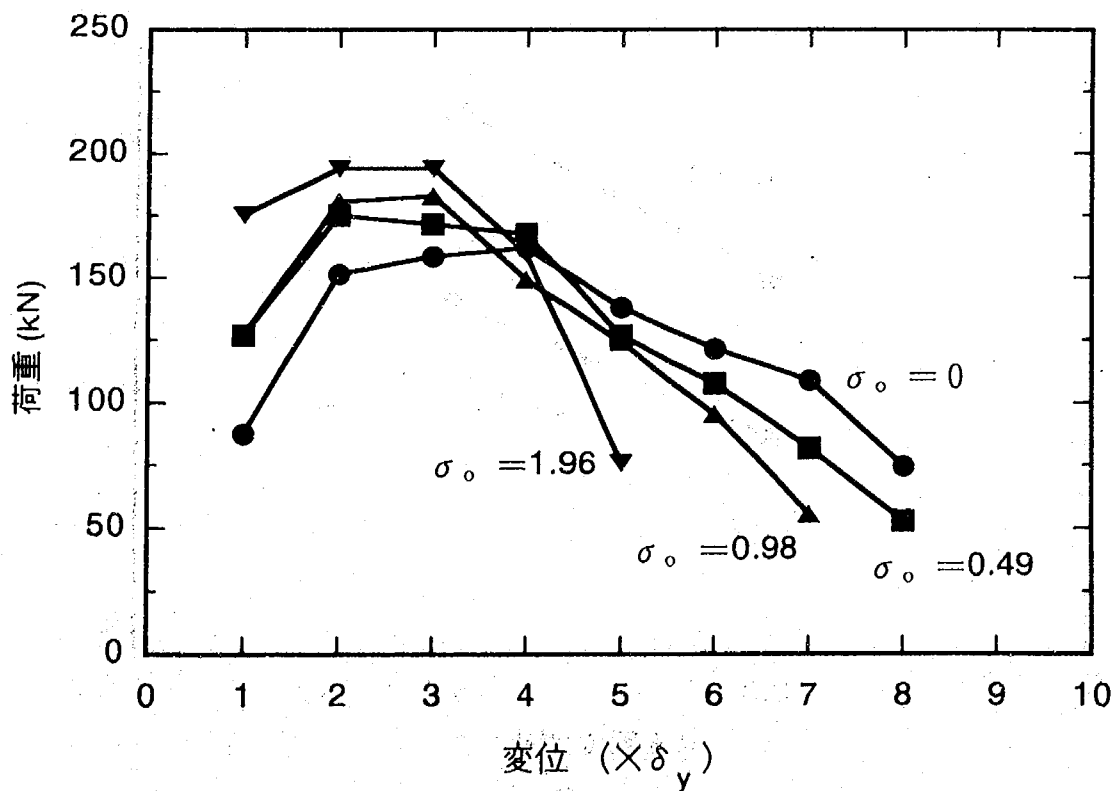


(b) せん断支間比の影響

図-5.3 平均包絡線に及ぼす各要因の影響

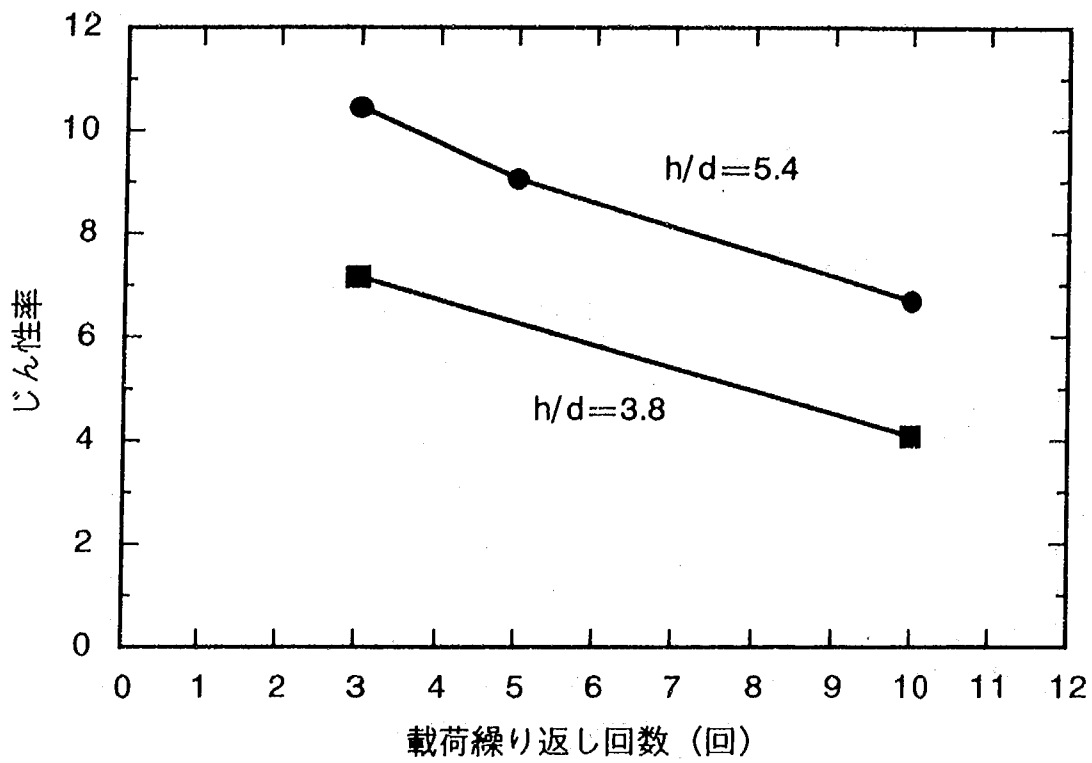


(c) 帯鉄筋比の影響

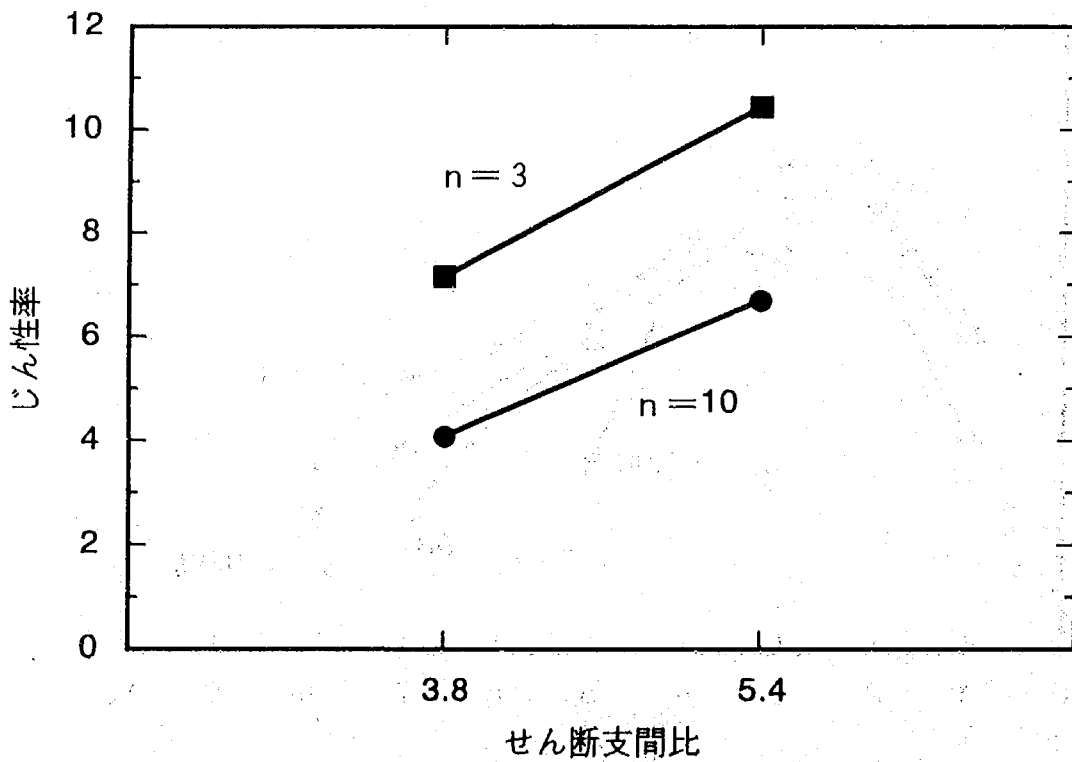


(d) 軸応力度の影響

図一5.3 平均包絡線に及ぼす各要因の影響

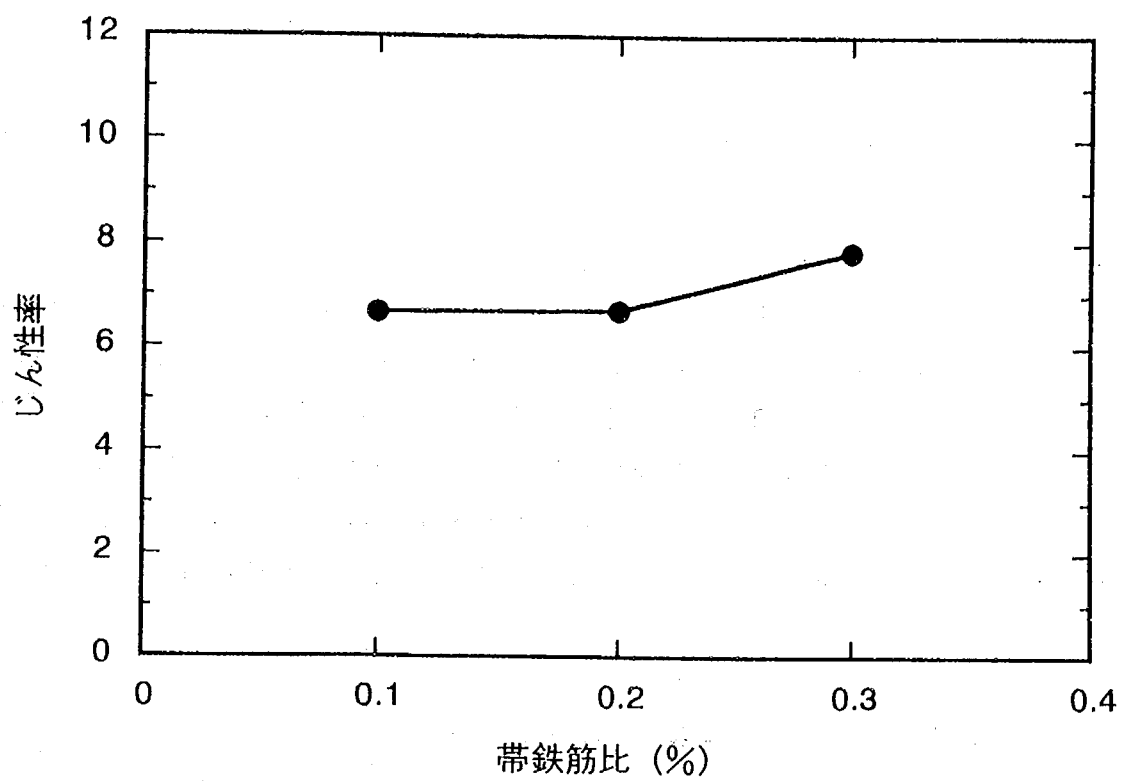


(a) 載荷繰返し回数の影響

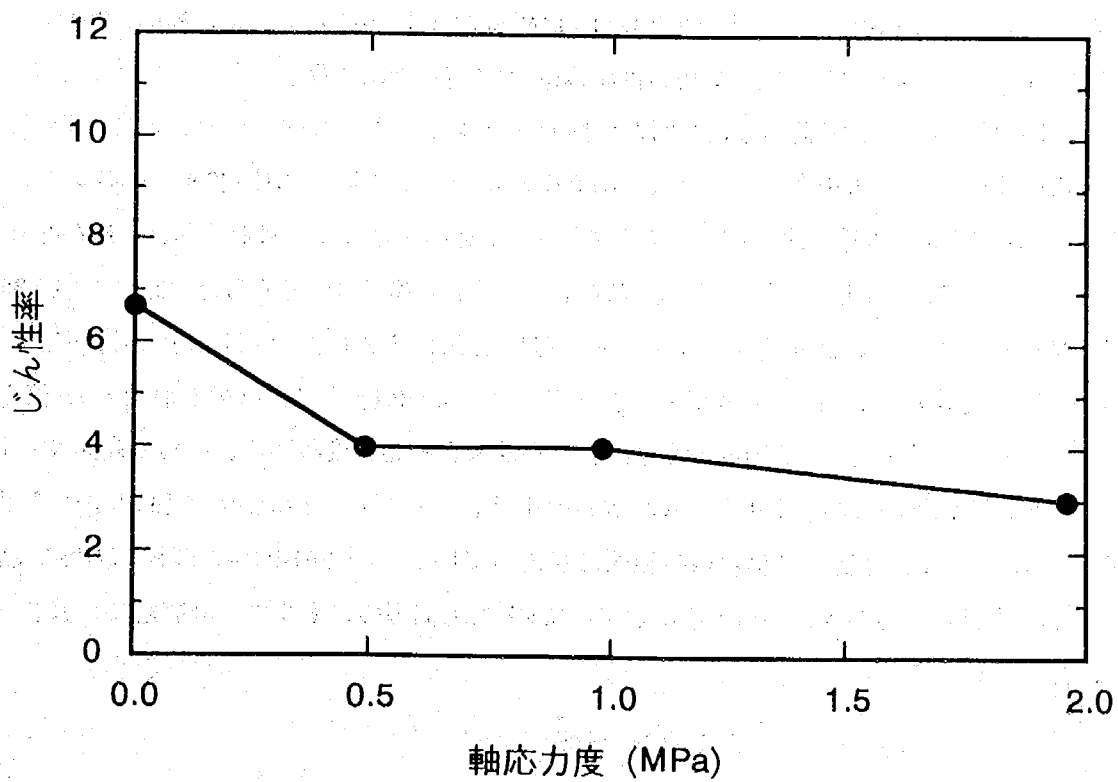


(b) せん断支間比の影響

図一 5.4 じん性率に及ぼす各要因の影響



(c) 帯鉄筋比の影響



(d) 軸応力度の影響

図-5.4 じん性率に及ぼす各要因の影響

6. エネルギー吸収容量に及ぼす各要因の影響

6.1 累積吸収エネルギーに及ぼす各要因の影響

図-6.1に累積吸収エネルギーに及ぼす各要因の影響を示す。同一変位振幅における累積吸収エネルギーは、載荷繰返し回数が多いほど大きい。5 δ 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、載荷繰返し回数の比(10/5、10/3)に近い値を示している。せん断支間比と累積吸収エネルギーの関係をみると、せん断支間比が大きい供試体は降伏耐力や最大耐力は小さいものの降伏変位が大きいために、同一変位振幅における累積吸収エネルギーはよく似た値を示している。また、帯鉄筋比が累積吸収エネルギーに及ぼす影響は、平均包絡線の場合と同様に小さい。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くなっている。

6.2 エネルギー吸収容量に及ぼす各要因の影響

図-6.2にエネルギー吸収容量に及ぼす各要因の影響を示す。3 $\leq n \leq 10$ 回の範囲内においては、載荷繰返し回数はエネルギー吸収容量に影響を及ぼしていない。 $h/d=5.4$ の場合、 $n=3$ の供試体のエネルギー吸収容量は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。このような点から、3 $\leq n \leq 10$ 回の範囲では、載荷繰返し回数に関わらずエネルギー吸収容量は、ほぼ一定とみることができる。せん断支間比とエネルギー吸収容量の関係をみると、せん断支間比が3.8と5.4の場合の2ケースに限られるが、載荷繰返し回数に関わらず、 $h/d=5.4$ 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。帯鉄筋比がエネルギー吸収容量に及ぼす影響についてみると、0.1 $\leq p_w \leq 0.3\%$ の範囲内において、帯鉄筋比が大きい供試体ほどエネルギー吸収容量は大きい。ただし、その影響は小さく、 $p_w=0.2\%$ の供試体と $p_w=0.3\%$ の供試体のエネルギー吸収容量は、 $p_w=0.1\%$ の供試体のそれぞれ1.1倍と1.3倍程度である。エネルギー吸収容量と軸応力度の関係は、じん性率と軸応力度の関係と同様の傾向を示しており、軸応力度が大きい供試体の方がエネルギー吸収容量は小さい。ただし、0.49 $\leq \sigma_o \leq 1.96$ MPaの範囲内の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1MPa程度であることより、特別に軸力が大きい橋脚を除いて、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小さいといえる。

6.3 載荷繰り返し回数とエネルギー吸収容量の関係

載荷繰り返し回数がエネルギー吸収容量に影響を及ぼしていない理由について、累積損傷理論を用いて検討する。今回の検討に用いた供試体は、降伏変位を越える変位振幅を数10回繰り返し受けることにより、鉄筋が破断し耐力が低下したもので、基本的に鉄筋の低サイクル疲労による破壊と考えられる。そこで、これらの供試体に累積損傷理論が適用できるものと考え、載荷繰り返し回数とエネルギー吸収容量の関係について検討する。 $m\delta_y$ 載荷終了時における累積損傷度 D_m を以下のように定義する。

$$D_m = \frac{n \sum_{i=1}^n \Delta W_i}{W_c} \quad (6-1)$$

ここで、

n : 載荷繰り返し回数

ΔW_i : 変位振幅 $i\delta_y$ における履歴吸収エネルギーの平均値

W_c : エネルギー吸収容量

矢島ら⁹⁾は、RCはりを用いた変位制御による同一変位の正負交番繰り返し載荷実験と有限要素法解析により、変位が $2\sim 5\delta_y$ の範囲においては、1サイクルあたりの履歴吸収エネルギーが、変位の増加とともに直線的に増加することを報告している。載荷繰り返し回数のみが異なる3供試体の1サイクルあたりの履歴吸収エネルギーと変位振幅の関係を図-6.3に示す。ここでの履歴吸収エネルギーは、同一変位振幅ごとの平均値とした。 $3\delta_y$ 載荷までは載荷繰り返し回数の影響はみられず、変位振幅の増加にともない履歴吸収エネルギーも増加しているが、 $4\delta_y$ において最初のピークを示した後は、変位振幅が大きくなっても履歴吸収エネルギーはあまり増加せず、減少する場合がみられる。検討に用いた供試体は、変位漸増型の繰返し荷重を受けているために、変位振幅が大きくなるほど累積損傷度も大きくなっている。このように、損傷を受けている供試体の履歴吸収エネルギーは、損傷を受けていない供試体の履歴吸収エネルギーに比べて、減少することが考えられる。

図-6.4に累積損傷度と変位振幅の関係を示す。累積損傷度は図-6.1(a)の累積吸収エネルギーと同様の動きを示しており、同一変位振幅における累積損傷度は、繰り返し回数が多いほど大きい。 $4\delta_y$ における累積損傷度は $n=10$ の場合0.57であるが、 $n=5$ の場合0.34、 $n=3$ の場合0.24となっている。図-6.3において変位振幅が大きくなると、繰り返し回数が多い供試体ほど履歴吸収エネルギーが小さくなっているが、これは履歴吸収エネルギーの減少量が、累積損傷度の大きさによる影響を受けているためと考えることができる。そこで、ある累積損傷度 D における履歴吸収エネルギー ΔW_k は、損傷がない場合の履歴吸収エネルギー ΔW_0 より、累積損傷度に応じた低減量 R_k を減じたものとする。

$$\Delta W_k = \Delta W_0 - R_k \quad (6-2)$$

損傷が全くない場合の履歴吸収エネルギーは、変位振幅 δ_y のみの関数で表すことができるものと仮定し、損傷度が小さい $3\delta_y$ までの履歴吸収エネルギーより次式のように求めた。

$$\begin{aligned}\Delta W_0 &= 4.3\delta_y - 6.5 & (\delta_y \geq 2) \\ \Delta W_0 &= 0.23 & (\delta_y = 1)\end{aligned}\tag{6-3}$$

式(6-3)による損傷がない場合の履歴吸収エネルギーを、図-6.3に破線で示す。

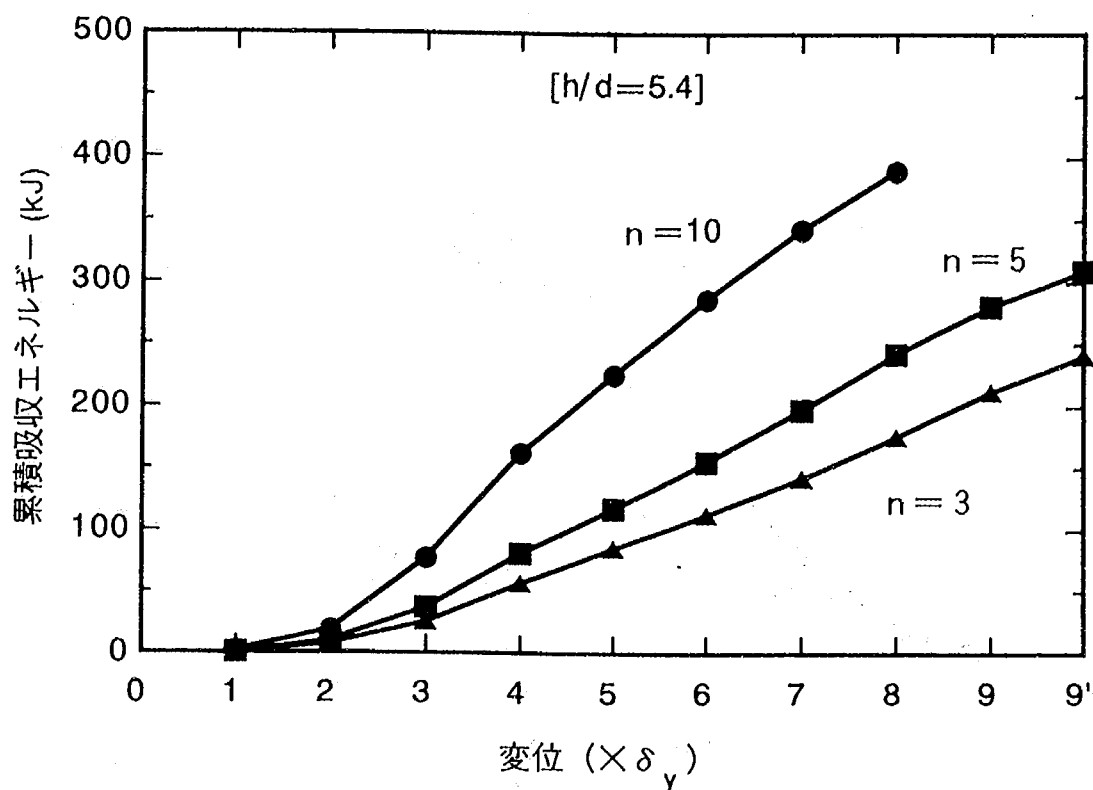
図-6.5は式(6-3)により求めた損傷のない場合の履歴吸収エネルギーと実験値との差を、履歴吸収エネルギーの低減量として、履歴吸収エネルギーの低減量と直前の変位振幅における累積損傷度との関係を示したものである。低減量は直前の変位振幅までに受けた累積損傷度の影響を受けるものと考え、 $1\delta_y$ 载荷時には累積損傷度が0となるように、図-6.4の関係を $1\delta_y$ 分右にずらした。各供試体ともに $3\delta_y$ 载荷終了時までは、低減量はほとんど増加していないが、 $4\delta_y$ 载荷以降、累積損傷度の増加にともない低減量はほぼ直線的に増加している。累積損傷度と低減量 R_h の関係を近似すると以下ようになる。

$$R_h = 23D' - n + 5 \quad (R_h \geq 0)\tag{6-4}$$

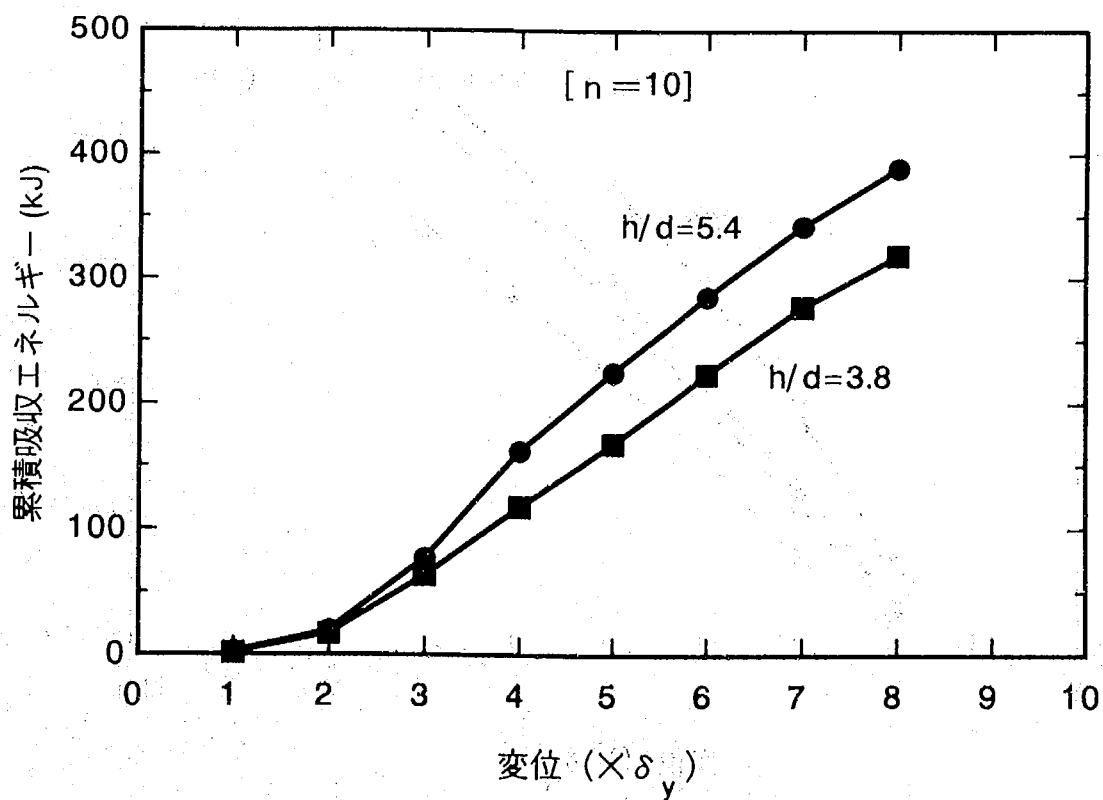
ここで、

D' : 直前の変位振幅における累積損傷度

累積損傷度を考慮した履歴吸収エネルギーより、累積吸収エネルギーを求め、実験値と比較したものが図-6.6である。累積損傷度に応じた履歴吸収エネルギーの低減量を考慮することにより、累積吸収エネルギーを精度よく推定することができた。この結果より、载荷繰返し回数のみが異なる供試体のエネルギー吸収容量は、一定になるとみてもよいと考えられる。

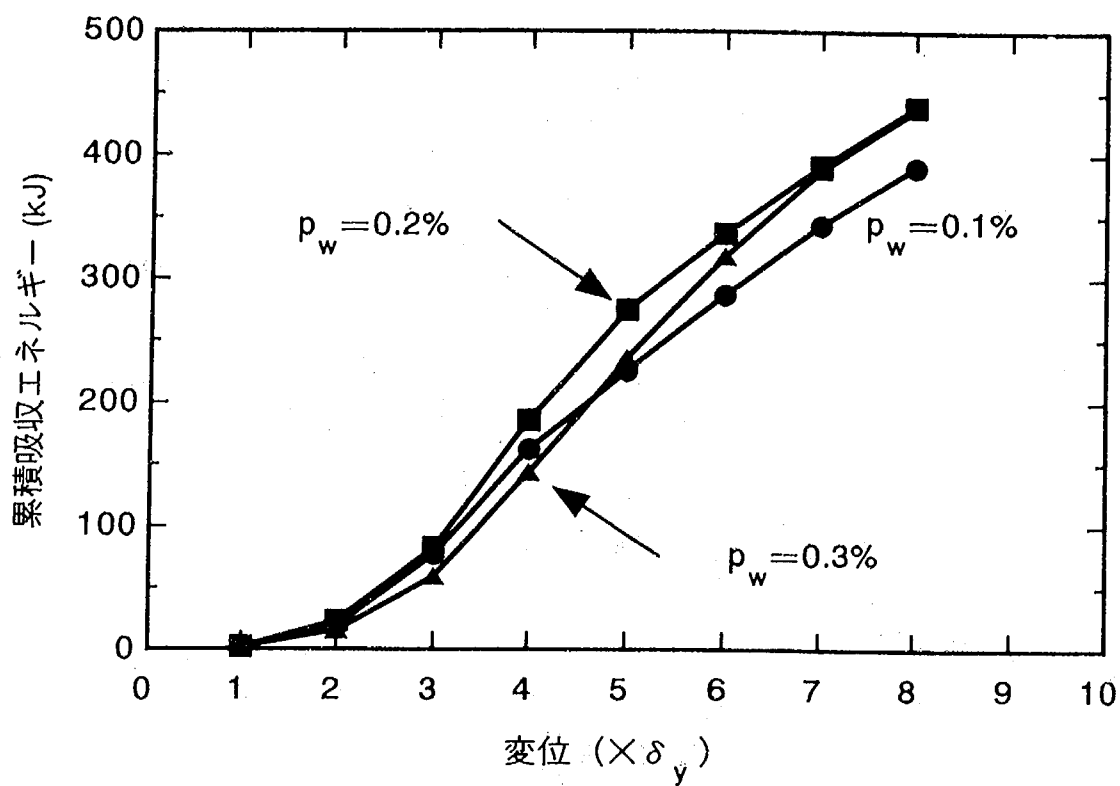


(a) 载荷繰り返し回数の影響

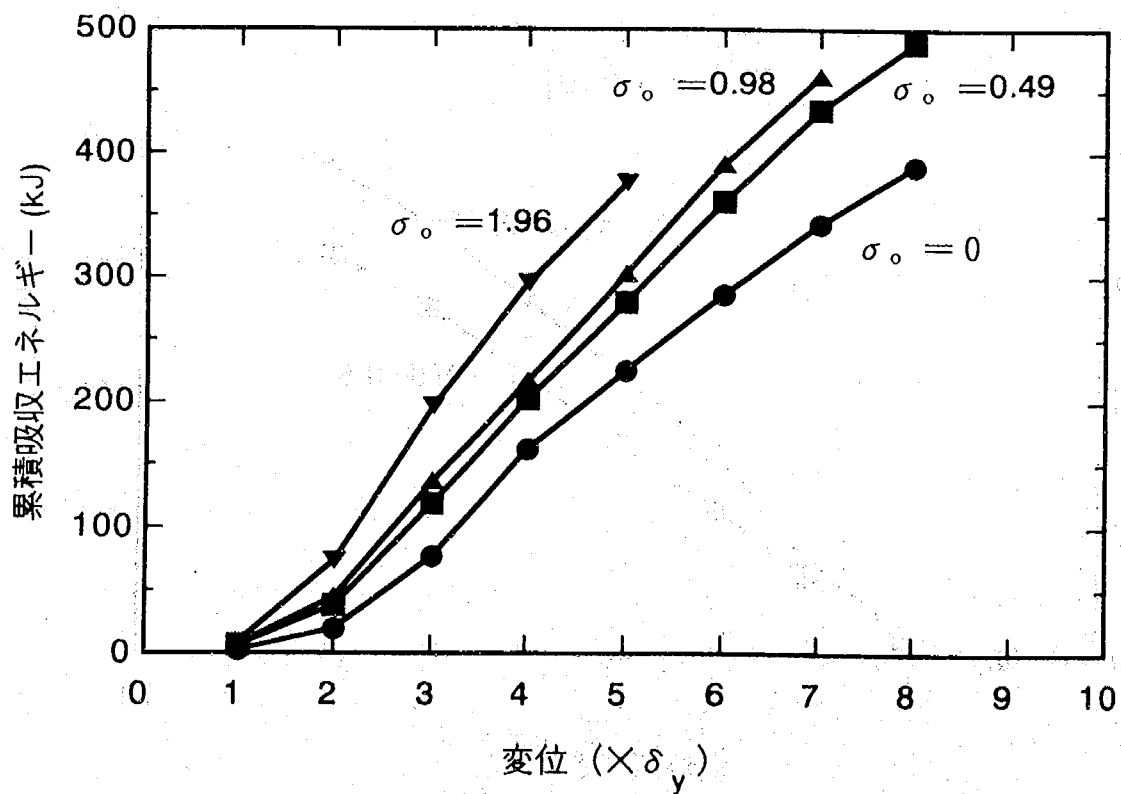


(b) せん断支間比の影響

図一6.1 累積吸収エネルギーに及ぼす各要因の影響

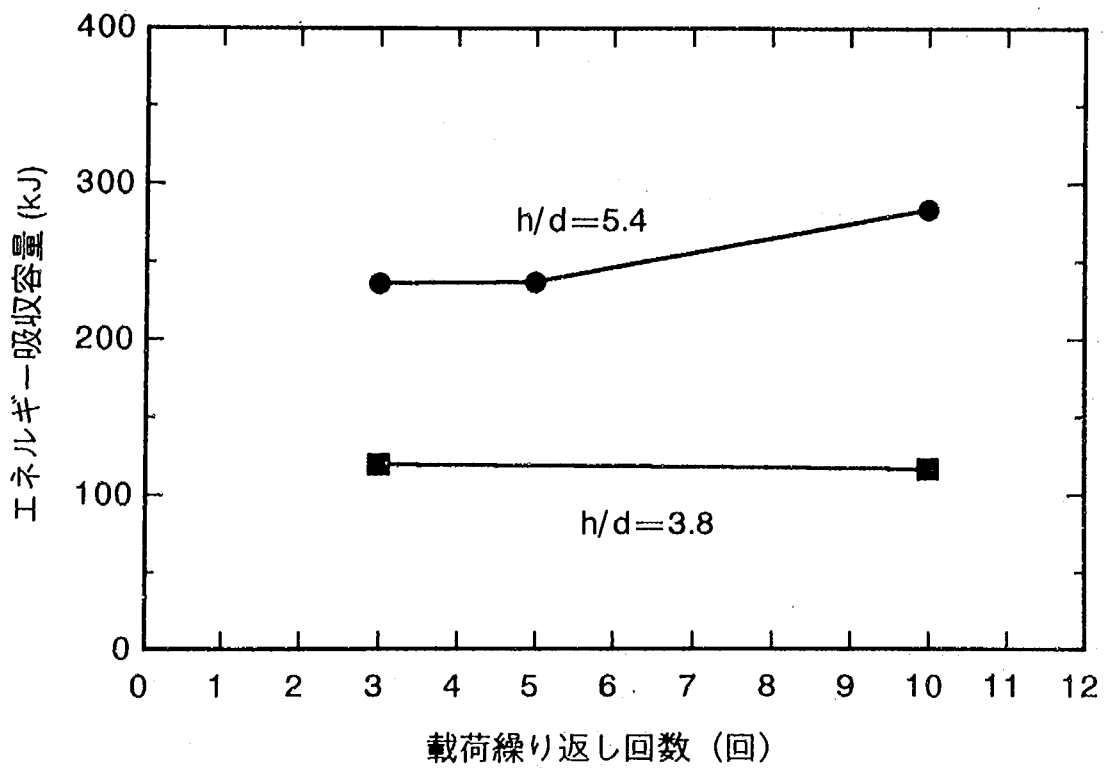


(c) 帯鉄筋比の影響

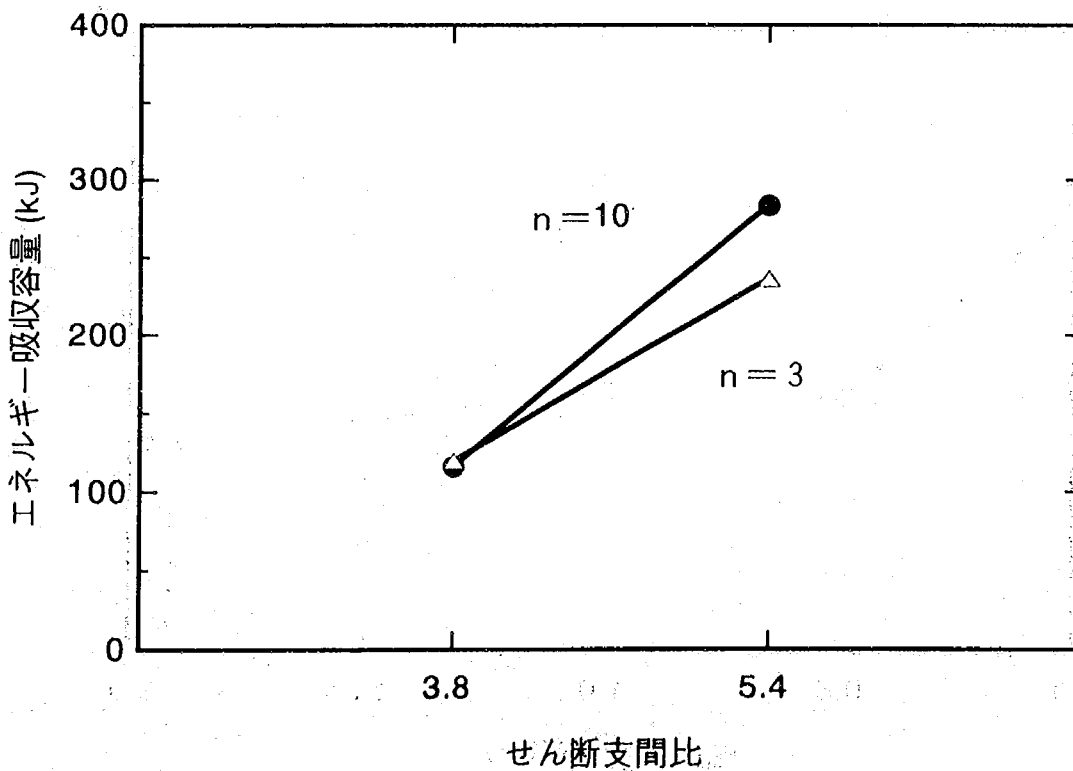


(d) 軸応力度の影響

図-6.1 累積吸収エネルギーに及ぼす各要因の影響

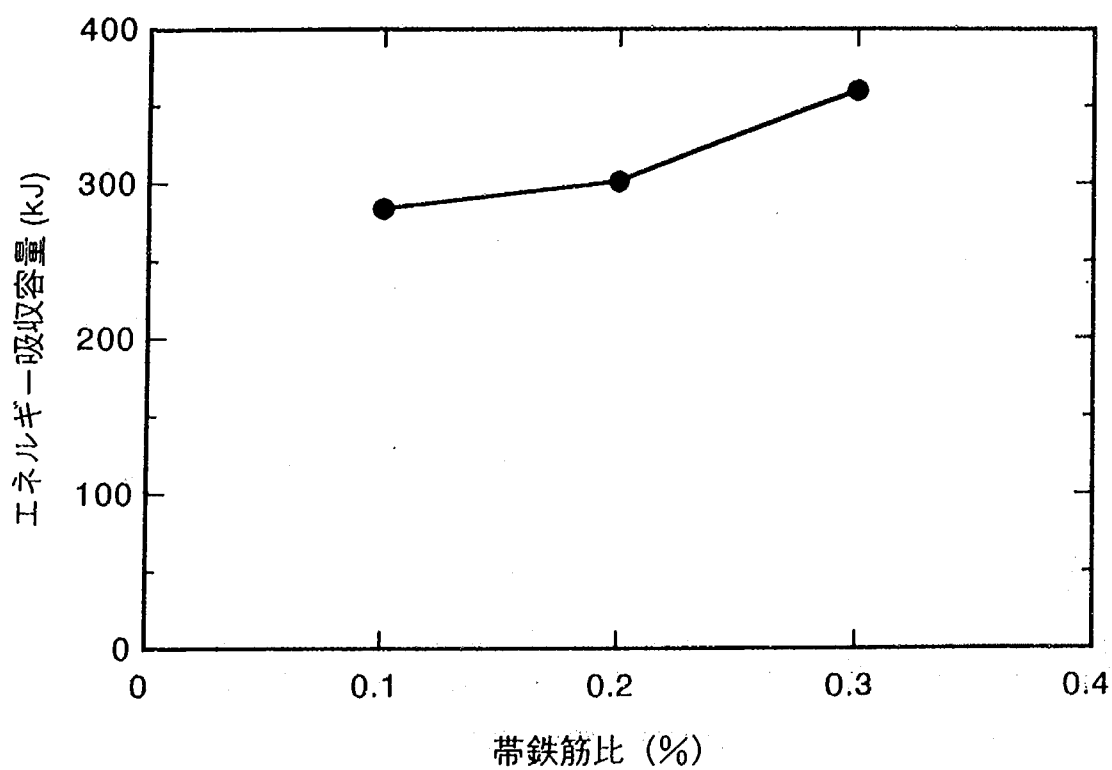


(a) 載荷繰返し回数の影響

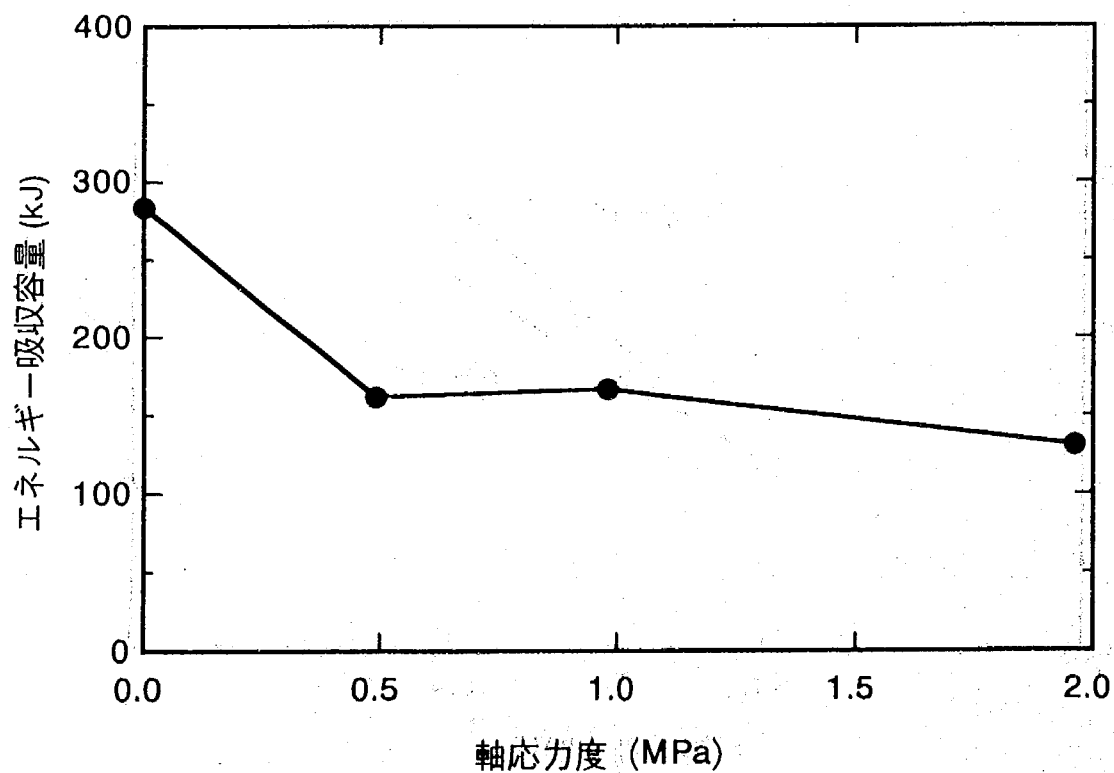


(b) せん断支間比の影響

図-6.2 エネルギー吸収容量に及ぼす各要因の影響



(c) 帯鉄筋比の影響



(d) 軸応力度の影響

図-6.2 エネルギー吸収容量に及ぼす各要因の影響

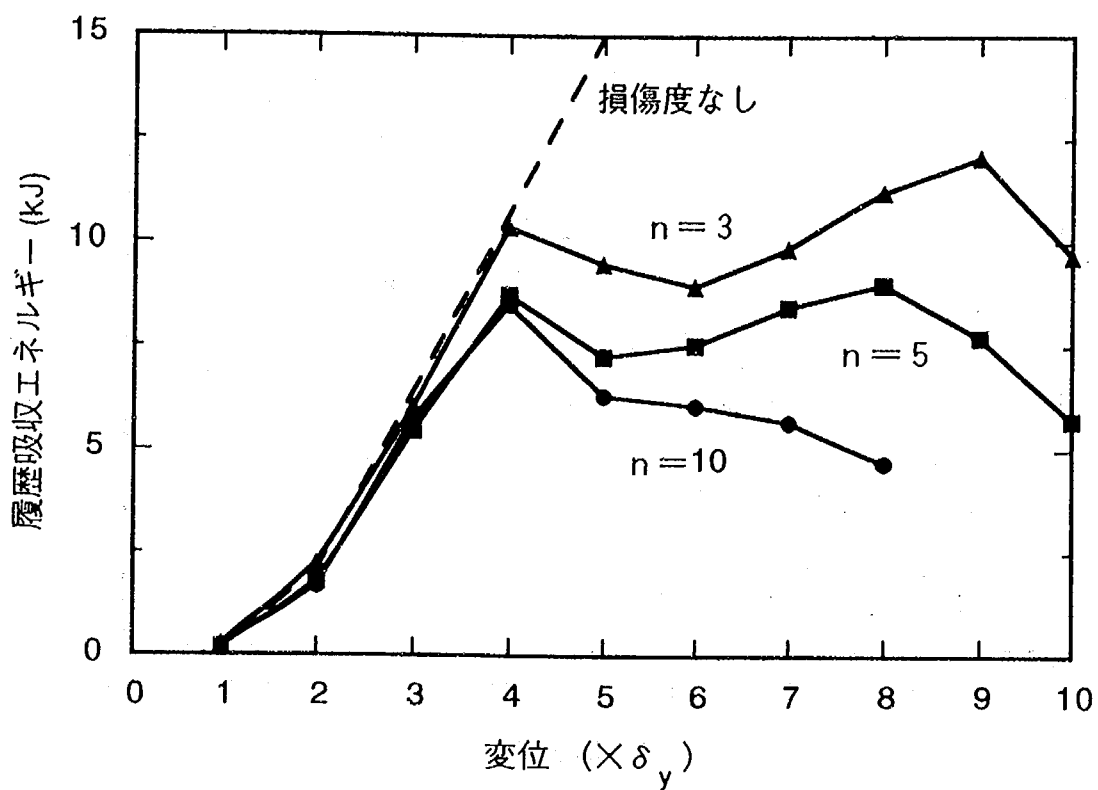


図-6.3 1サイクル当たりの履歴吸収エネルギー量 ($h/d=5.4$)

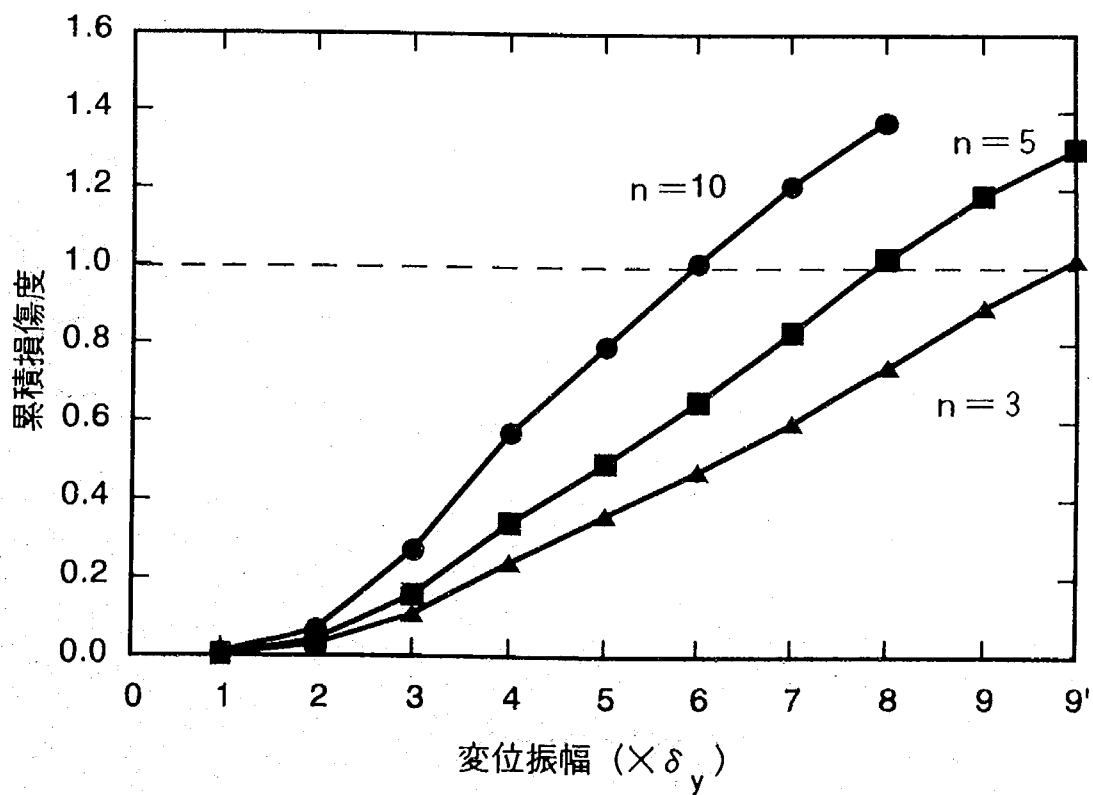
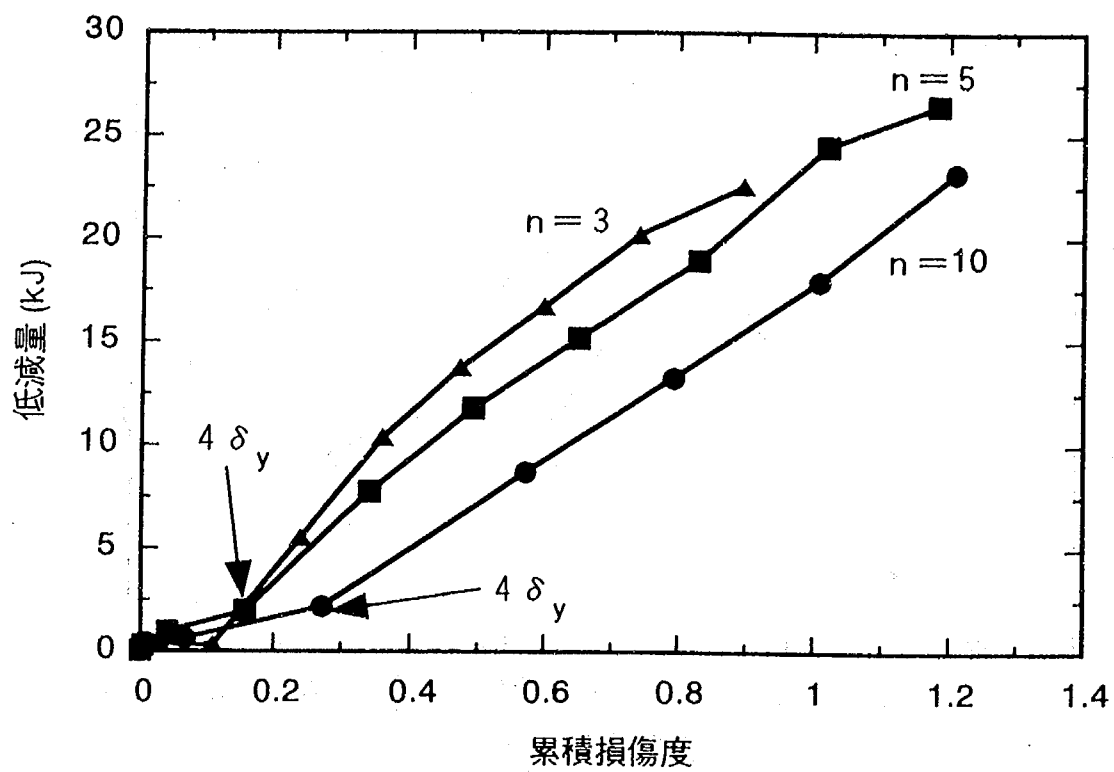


図-6.4 累積損傷度と変位振幅の関係



図一 6.5 履歴吸収エネルギー低減量

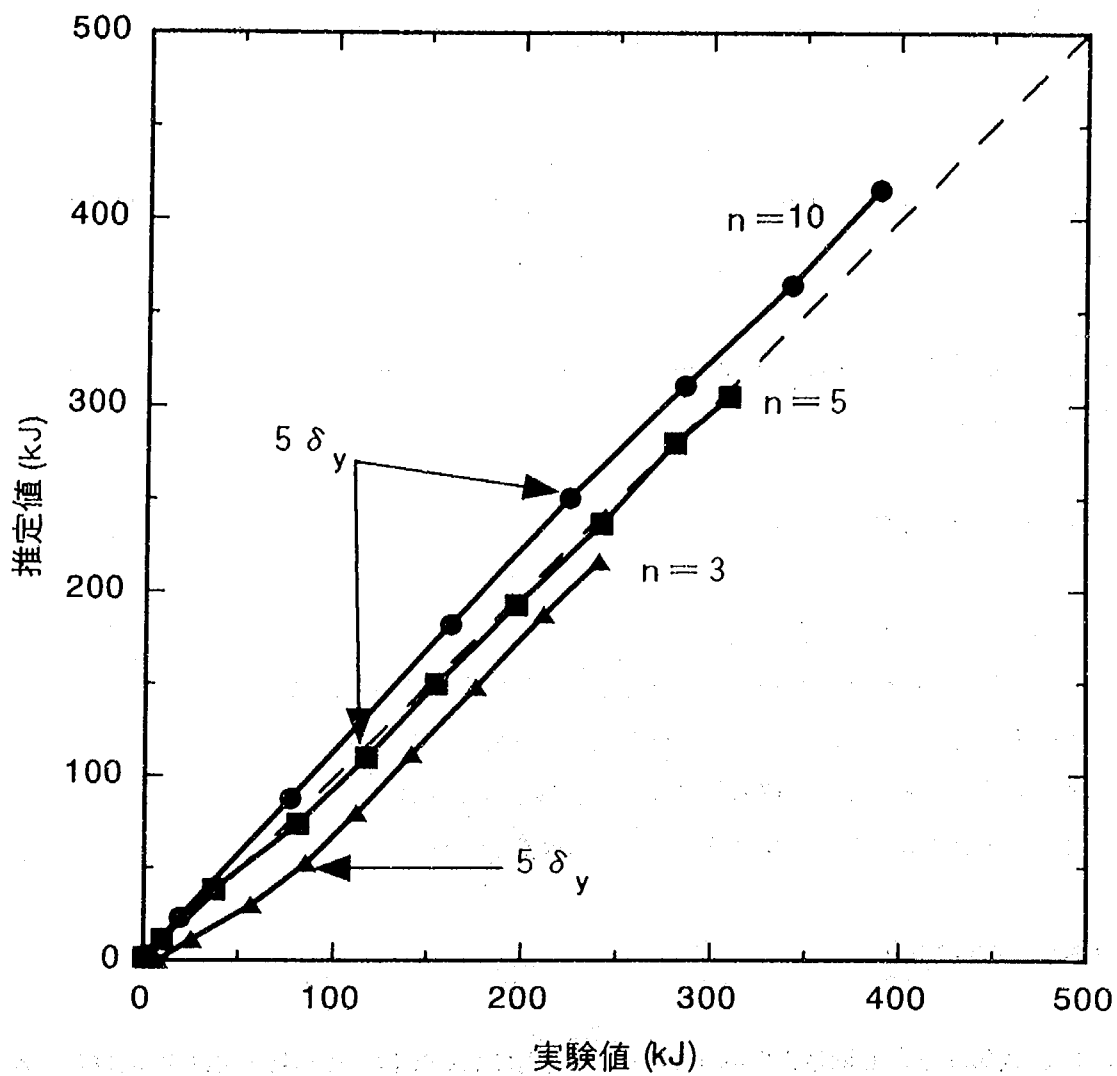


図-6.6 累積吸収エネルギーの比較

7. エネルギー吸収容量の定式化

6章で示したようにエネルギー吸収容量に影響を及ぼす要因は多く、定式化のためには各要因の影響を個々に定量化する必要がある。町田、陸好ら¹⁰⁾は、じん性率に及ぼす各種要因の影響を個々に定量化して、塑性変形能算定式を提案している。ここでは、これと同じ手法を用いて、エネルギー吸収容量の定式化を行うこととする。

まず、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 C_E をもとに、次式のようにエネルギー吸収容量を求めるものとする。

$$W_c = W_0(1 + C_E + C_{En} + C_{Eh} + C_{Ew} + C_{Ea}) \quad (7-1)$$

ここで、

W_0 : 基準とするエネルギー吸収容量

C_{En} : 載荷繰返し回数がエネルギー吸収容量に及ぼす影響を表す係数

C_{Eh} : せん断支間比がエネルギー吸収容量に及ぼす影響を表す係数

C_{Ew} : 帯鉄筋比がエネルギー吸収容量に及ぼす影響を表す係数

C_{Ea} : 軸応力度がエネルギー吸収容量に及ぼす影響を表す係数

7.1 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 $3 \leq n \leq 10$ 回の範囲内においては、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。ただし、せん断支間比によりエネルギー吸収容量が異なるので、 $h/d=5.4$ の場合には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を、 $h/d=3.8$ の場合はP-17、P-20の2供試体のエネルギー吸収容量の平均値を求めた。この平均値をそれぞれのせん断支間比における基準のエネルギー吸収容量とし、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図-7.1に示す。図より、載荷繰返し回数がエネルギー吸収容量に及ぼす影響を表す係数 C_{En} は0とした。

$$C_{En} = 0 \quad (3 \leq n \leq 10 \text{回}) \quad (7-2)$$

載荷繰返し回数がエネルギー吸収容量に影響を及ぼしていないことより、以後の検討においても基準とするエネルギー吸収容量には、すべてP-10、P-19、P-22供試体の平均値(252.3kJ)を用いた。

7.2 せん断支間比 h/d の影響

図-7.2は $h/d=5.4$ のエネルギー吸収容量を基準とした場合の、 $h/d=3.8$ (P-17、P-20供試体の平均)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のは十分ではないが、ここでは、2つのデータを直線で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。

$$C_{Eh}=0.33(h/d-5.4) \quad (3.8 \leq h/d \leq 5.4) \quad (7-3)$$

7.3 帯鉄筋比 p_w の影響

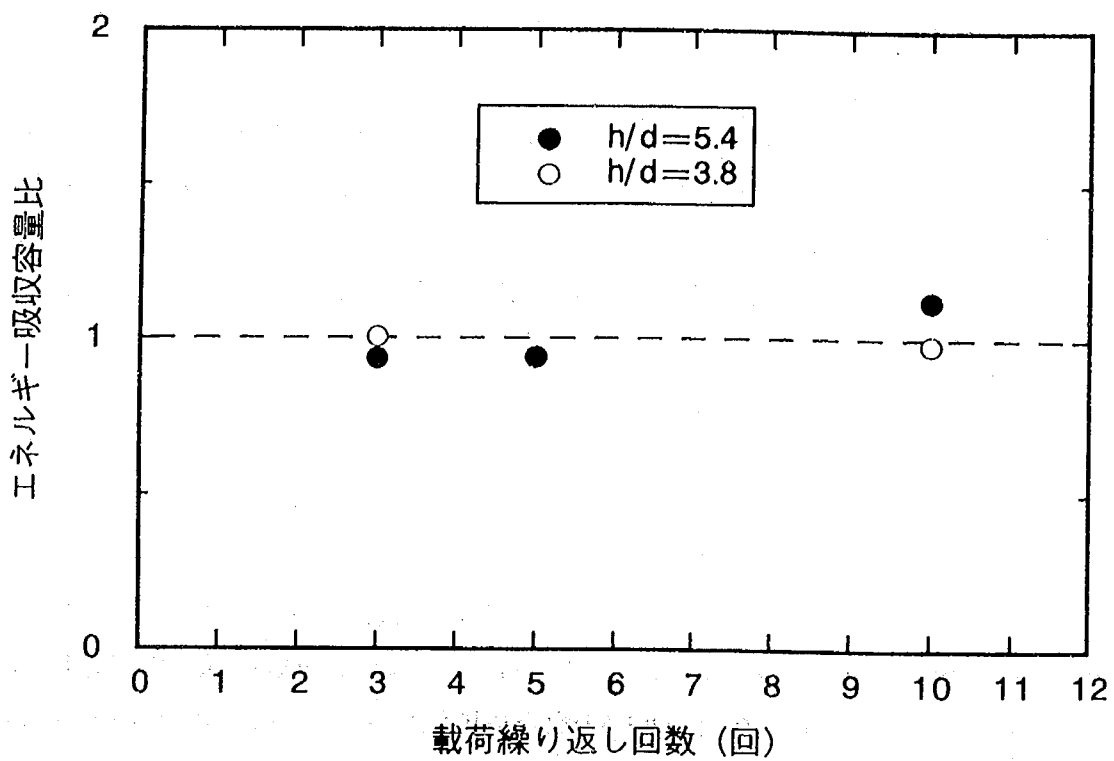
図-7.3は、 $p_w=0.1\%$ の場合のエネルギー吸収容量を基準とし、これに対する任意の帯鉄筋比のエネルギー吸収容量の比として図-6.2(c)を再整理したものである。エネルギー吸収容量は帯鉄筋比の増加にともない、ほぼ直線的に増加する。そこで、 $p_w=0.1\%$ の場合を基準に、帯鉄筋比の影響係数 C_{Ew} を求めると以下ようになる。

$$C_{Ew}=2.1(p_w-0.1) \quad (0.1 \leq p_w \leq 0.3\%) \quad (7-4)$$

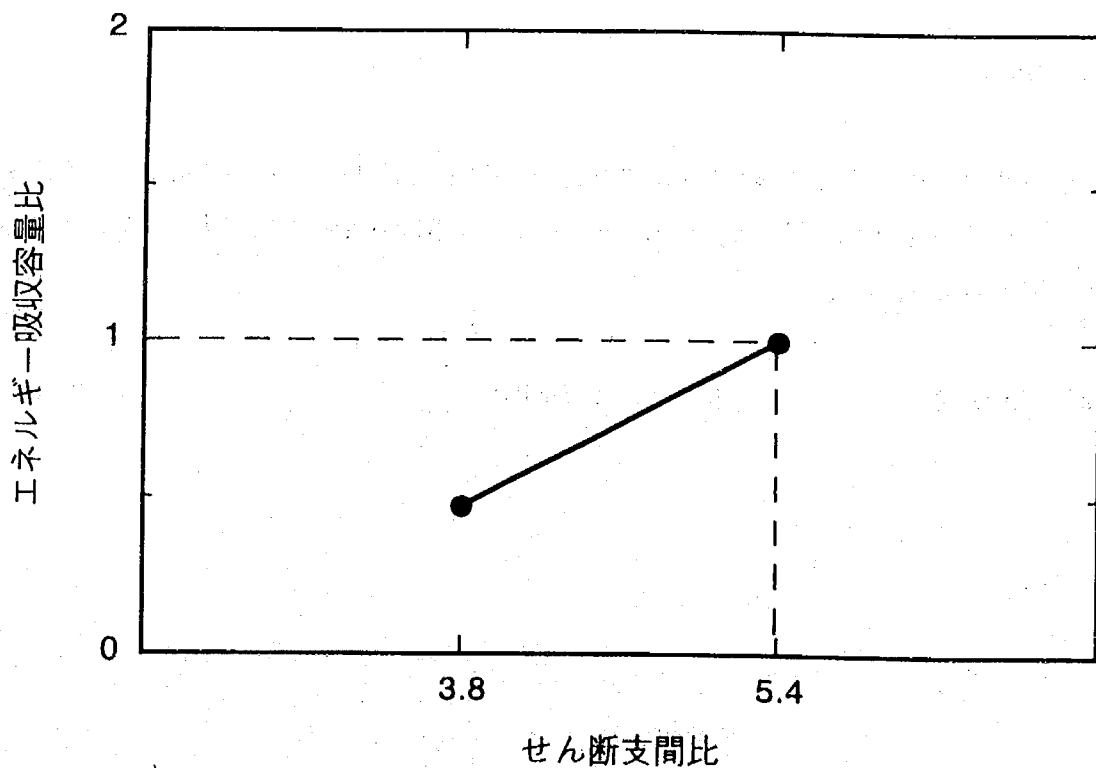
7.4 軸応力度 σ_0 の影響

図-7.4は、図-6.2(d)に示した関係を $\sigma_0=0$ 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減少している。そこで、この関係を指数関数で表し、軸応力度の影響係数 $C_{E\sigma}$ を求めると以下ようになる。

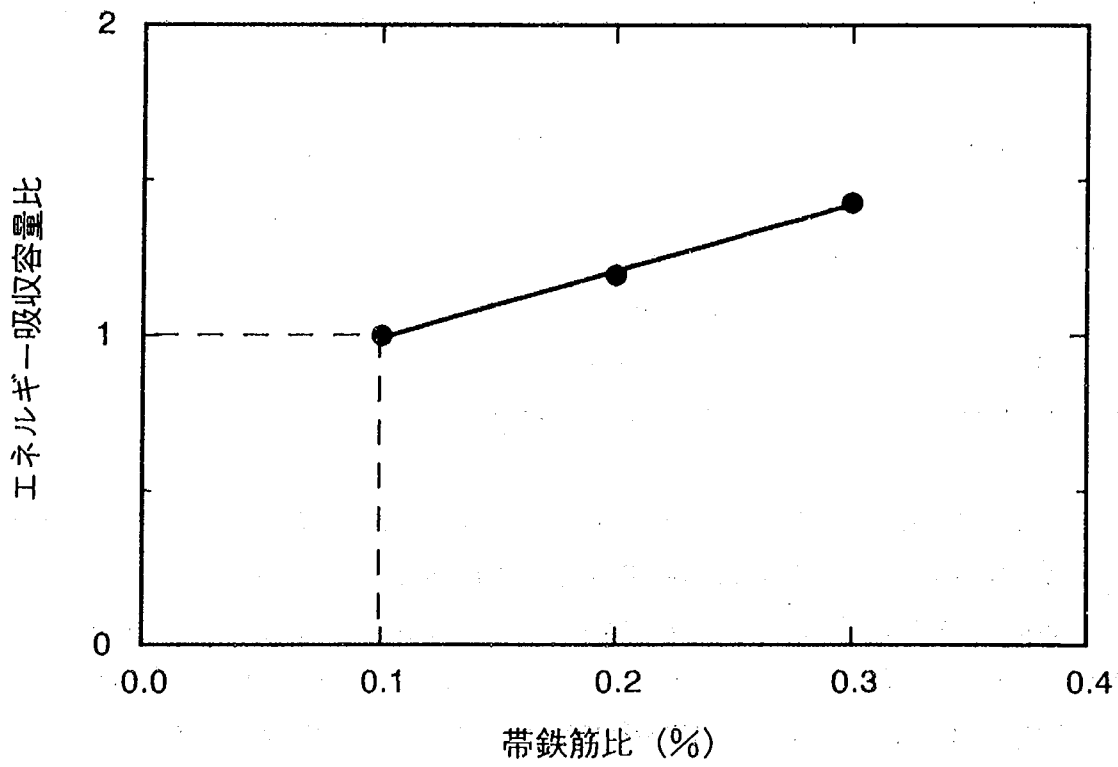
$$C_{E\sigma}=\exp(-0.42\sigma_0)-1 \quad (0 \leq \sigma_0 \leq 1.96\text{MPa}) \quad (7-5)$$



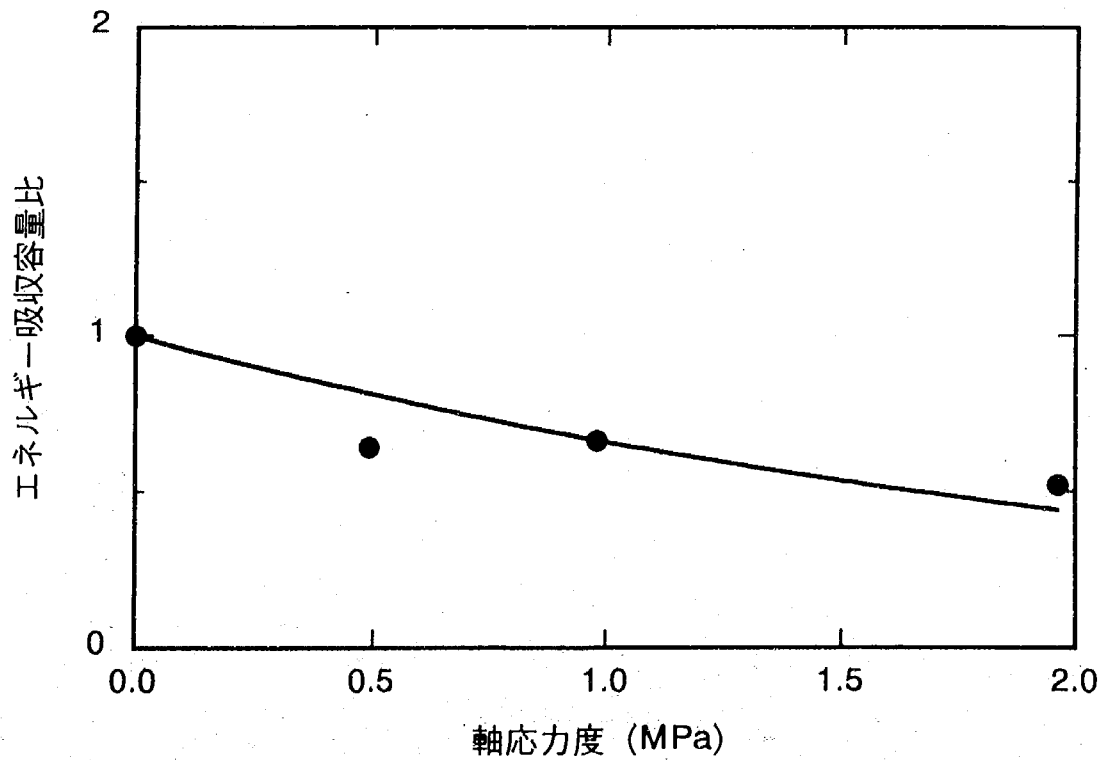
図一 7.1 エネルギー吸収容量比と载荷繰り返し回数の関係



図一 7.2 エネルギー吸収容量比とせん断支間比の関係



図一 7.3 エネルギー吸収容量比と帯鉄筋比の関係



図一 7.4 エネルギー吸収容量比と軸応力度の関係

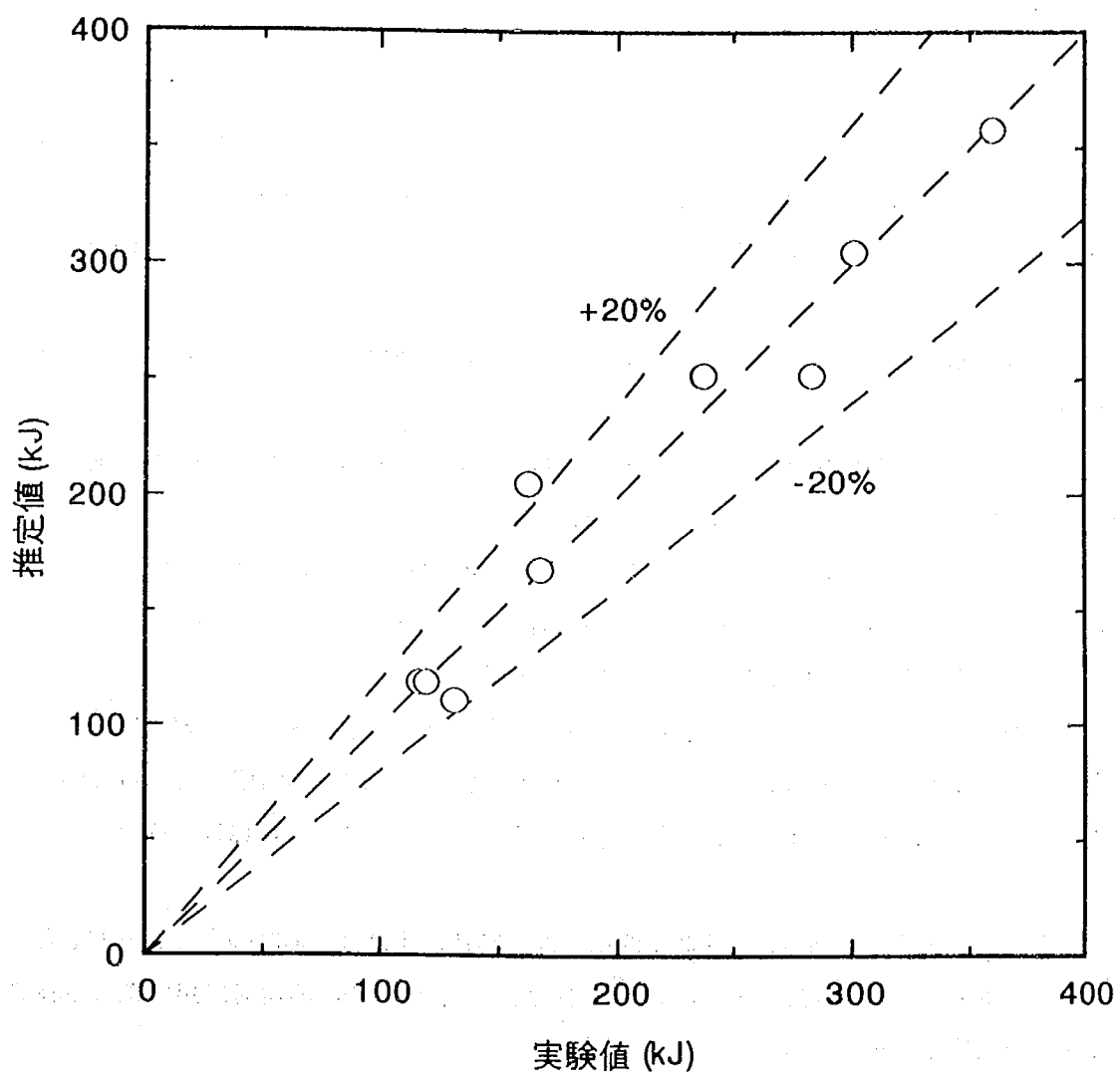
8. エネルギー吸収容量算定式の精度の検討

以上のようにして求めた各影響係数をその適用範囲とともにまとめると、以下のようになる。

$$\begin{aligned} C_{E1} &= 0 & (3 \leq n \leq 10 \text{回}) \\ C_{E2} &= 0.33(h/d - 5.4) & (3.8 \leq h/d \leq 5.4) \\ C_{E3} &= 2.1(P_w - 0.1) & (0.1 \leq p_w \leq 0.3\%) \\ C_{E4} &= \exp(-0.42\sigma_0) - 1 & (0 \leq \sigma_0 \leq 1.96 \text{MPa}) \end{aligned} \tag{8-1}$$

式(8-1)をもとに、式(7-1)によってエネルギー吸収容量を求め、これを実験結果と比較した結果が図-8.1である。基準とするエネルギー吸収容量 W_0 はP-10、P-19、P-22供試体の平均値(252.3kJ)とした。これによれば、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、全体として極め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、主鉄筋比や材料強度などの影響が考慮されていないため、他の実験結果を用いて提案式の精度を検討するまでには至っていない。また、各要因間の相互作用も十分に考慮していない。このため、今回検討していない要因についてもエネルギー吸収容量に及ぼす影響について同様の検討を行い、新たな係数を付け加えることにより、エネルギー吸収容量算定式の適用範囲を広げる必要がある。



図一 8.1 提案式の精度の検討

9. まとめ

本研究では、載荷繰返し回数(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4つの検討項目が、基部で曲げ破壊するRC橋脚のエネルギー吸収容量に及ぼす影響を調べ、これらの要因の影響を考慮したエネルギー吸収容量の定式化を行ったものである。本研究により次のことが明らかとなった。

- (1) 載荷繰返し回数が3～10回の範囲内においては、載荷繰返し回数はエネルギー吸収容量にほとんど影響を及ぼさない。
- (2) せん断支間比が大きい供試体の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) 帯鉄筋比を0.1～0.3%の範囲で変化させた場合、エネルギー吸収容量は帯鉄筋比が大きいほど大きくなるが、その影響は著しいものではない。帯鉄筋比が0.1%の場合を基準にすると、帯鉄筋比を2倍にするとエネルギー吸収容量は1.1倍、3倍にすると1.3倍に増加する程度である。
- (4) 軸応力度が0～1.96MPaまでの範囲において、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の範囲ではエネルギー吸収容量の差は1.3倍以内の範囲に収まっている。実際のRC橋脚の軸応力度は一般に1MPa程度であることを考慮すると、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(7-1)、式(8-1)のように作成した。これは、今回の検討に用いた供試体のエネルギー吸収容量を十分な精度で推定できる。

ただし、現状では適用範囲が限られているために、今回検討していない要因についても、エネルギー吸収容量に及ぼす影響について検討を行い、エネルギー吸収容量算定式の適用範囲を広げる必要がある。

参考文献

- 1) 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
- 2) 太田実 : 単一式鉄筋コンクリート橋脚の耐震設計法に関する研究、土木研究所報告、第153号、1980年
- 3) Park,Y.J. and Ang,A.H.S. : Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.111, No.4, 1985.4
- 4) 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
- 5) 衣笠秀行、野村設郎 : 吸収エネルギー解析に基づくRC構造曲げ破壊部材の繰返し疲労損傷評価、日本建築学会構造系論文報告集、第384号、1988年2月
- 6) 本郷和徳、矢島哲司、魚本健人 : 正負交番繰返し曲げを受けるRCはりの累積消費エネルギー量の算定、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.2、1993年6月
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 矢島哲司、本郷和徳、魚本健人 : 繰返し載荷されたRC梁の累積損傷および破壊特性評価、土木学会論文集、第490号/V-23、1994年5月
- 10) 町田篤彦、睦好宏史、豊田和彦 : 鉄筋コンクリート部材の塑性変形能定量化に関する研究、土木学会論文集、第378号/V-6、1987年2月

鉄筋コンクリート橋脚のエネルギー
吸収容量定式化に関する研究

I S S N 0386-5878
土木研究所資料 第3295号
平成6年6月(1994年)

企画部 地下開発研究官 川島 一彦
(前耐震研究室長)
平成6年度 部外研究員 滝本 和志

要旨

鉄筋コンクリート構造物が地震を受けた場合、その構造物が健全であるのか、または、補修や取り替えの必要があるのかを判断するために、被災後の構造物の損傷程度を適切に評価する必要がある。

本資料では、地震荷重を受ける鉄筋コンクリート橋脚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)を求め、載荷繰返し回数、せん断支間比、帯鉄筋比および軸力の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、十分な精度で推定できることが確認できた。

キーワード：エネルギー吸収容量、鉄筋コンクリート橋脚、累積損傷度

郵便はがき

切手
はって
下さい

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

地震防災部耐震研究室 御中

No. 001

No. 001

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第3295号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印