

正負交番載荷重下におけるRC部材のエネルギー吸収性能

Energy dissipation capability of reinforced concrete members under seismic loading

米元佑介*・石井建樹**・石田博樹***・須賀政彦****

Yusuke YONEMOTO, Tateki ISHII, Hiroki ISHIDA and Masahiko SUGA

*正会員 (株)建設技術研究所 (〒540-0045 大阪市中央区道修町 1-6-7)

**正会員 博(工) 木更津工業高等専門学校講師 環境都市工学科 (〒292-0041 千葉県木更津市清見台東 2-11-1)

***正会員 工博 木更津工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒292-0041 千葉県木更津市清見台東 2-11-1)

****正会員 木更津工業高等専門学校職員 (〒292-0041 千葉県木更津市清見台東 2-11-1)

In order to develop a method for evaluating seismic damage of reinforced concrete members based on the energy concept, the energy dissipation capability of five reinforced concrete specimens were evaluated from seismic loading tests carried out in two stages. First, the effects of the number of shear reinforcements was investigated by means of shear reinforcement ratio or nominal shear strength. This result shows that the energy dissipation capability was correlated with both values. Next, we verified the generality of this result and demonstrated that the energy dissipation capability is correlated with the nominal shear strength.

Key Words : ductility, energy dissipation capability, shear reinforcement, nominal shear strength

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下RC)部材の設計では、静的な荷重に対する耐力のみならず、適度なじん性を持たせる設計が不可欠である^{1)~9)}。現行の道路橋示方書では、間接的ながら変位じん性率を考慮した地震時保有水平耐力の照査が行われている。しかし、終局変位と降伏変位との比で表される変位じん性率は、同じ変位じん性率であっても載荷履歴によって損傷の度合いが異なるという問題点も指摘されている^{4),5)}。

これに対して、エネルギーの観点から耐震安全性を捉えようとする研究が盛んに行われてきた^{3)~6),8),9)}。これらの研究では、部材の断面寸法、せん断補強鉄筋比等の各種要因に対して、部材が破壊に至るまでに吸収可能なエネルギー量(エネルギー吸収容量)についての詳細の考察がなされている。こうした考察に依れば、RC部材のエネルギー吸収容量は、部材の断面寸法や鉄筋およびコンクリートの強度特性に依存すること³⁾、地震波の種類や載荷履歴に依らず部材固有の値を示すこと⁴⁾、せん断補強鉄筋比が大きいほど大きくなること⁵⁾などの詳細かつ重要な知見が数多く報告されている。

しかしながら、エネルギー論的な概念に基づく耐震設計には解決すべき問題も多い。特に重要な問題は、エネルギー吸収容量の推定法である。靱性を定量的に評価するためのエネルギー吸収容量の算定方法については、数々の研究^{3),5),8)}を通して算定式がいくつか提案されている。ただし、各評価式は実験値のフィッティングに基づく式であり、その適用範囲は個々の研究におけるデータにとどまっていて評価式の妥当性についての検証は未だ十分とは言えない。

そこで本研究では、エネルギー吸収容量の算定方法

の構築を目的として、正負交番繰り返し試験結果に基づく考察を報告するものである。まず第一段階の実験として、単純な問題設定に立ち返り、せん断補強鉄筋量のみを変化させてエネルギー吸収容量の変化を明らかにする。その際、設計に応用しやすいように、設計計算時の算出値に着目してエネルギー吸収性能の評価を試みる。このようなデータ整理は、著者の知る限りでは意外にも行われておらず、本研究において従来の研究と最も異なる点である。次に研究の第二段階として、形状の異なる供試体を用いて正負交番繰り返し試験を行い、得られた知見の一般性・汎用性について更なる考察を加える。

2. せん断補強鉄筋のみを変化させる実験

第一段階の実験(シリーズI)として、同一形状・断面の供試体に対して、せん断補強鉄筋比のみを変化させて正負交番繰り返し載荷試験を行った。ここには、その実験概要を記す。

2.1 供試体の概略

ここでの実験には、図-1~図-3に示す3種の供試体を用いた。軸方向主鉄筋はD16, SD295Aを用い、300mm×300mmの正方形断面の上下に3本ずつ配置する。引張鉄筋比は0.66%である。

供試体は、スパン長1500mmとなるように作製して、その中央部に200mmに渡り鋼板を巻き付け、グラウトによって一体化させた。これにより、鋼板端部をフーチング天端とするせん断スパン a が550mmの柱部材として捉えることができる。 a/d は2.1である。

各供試体のせん断補強鉄筋にはD10, SD295Aを用い

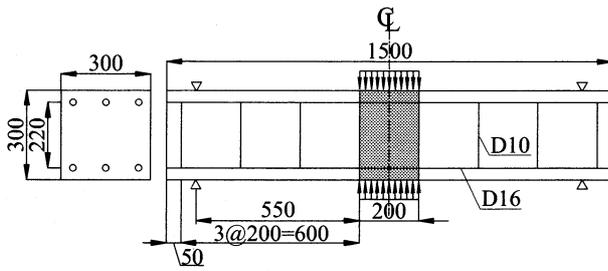


図-1 供試体形状 (No.1:せん断補強鉄筋比 0.24%)

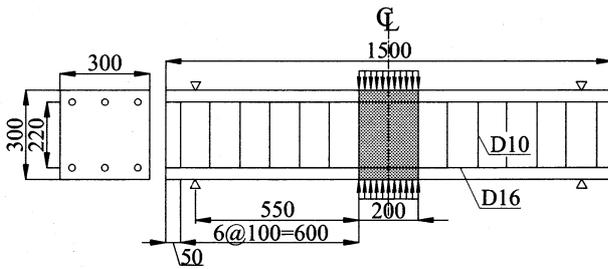


図-2 供試体形状 (No.2:せん断補強鉄筋比 0.48%)

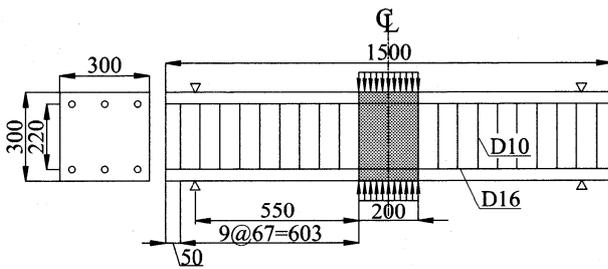


図-3 供試体形状 (No.3:せん断補強鉄筋比 0.72%)

た。せん断補強鉄筋比は、終局曲げモーメントに相当する荷重作用時のせん断力を、修正トラス理論で求めた部材のせん断耐力が上回るせん断補強鉄筋比 0.24%の供試体を基準として、その2倍の0.48%、3倍の0.72%とした。ここで、供試体番号をせん断補強鉄筋比が小さい順に No.1, No.2, No.3 と呼ぶ。

表-1 に使用したコンクリートの示方配合を示す。粗骨材の最大寸法は 20mm、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。コンクリートの配合設計については、設計基準強度を 26.5N/mm² に設定した。水セメント比は 53%、空気量は 5%、スランプは 7.5±1.0cm となるように定めた。

2.2 荷重条件

交番繰返し荷重試験では、変位制御による繰返し荷重を作用させた。鋼板部を鉛直方向に荷重し、最初の荷重時における降伏変位を δ_y とする。降伏以後は、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、図-4 に示すように、 $1\delta_y$, $2\delta_y$, $3\delta_y$ … と変位振幅

表-1 コンクリートの示方配合 (No.1~No.4)

| 粗骨材最大寸法 | スランプ | 空気量 | W/C | 細骨材率 |
|--------------------------|----------|---------|--------|----------|
| 20 (mm) | 7.5 (cm) | 5.0 (%) | 53 (%) | 41.6 (%) |
| 単位量 (kg/m ³) | | | | |
| 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | AE 減水剤 |
| W | C | S | G | P |
| 169 | 319 | 741 | 1036 | 1.6 |

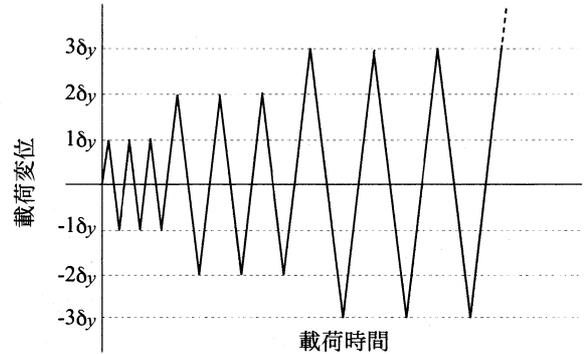


図-4 一定変位振幅変位漸増方式の荷重変位

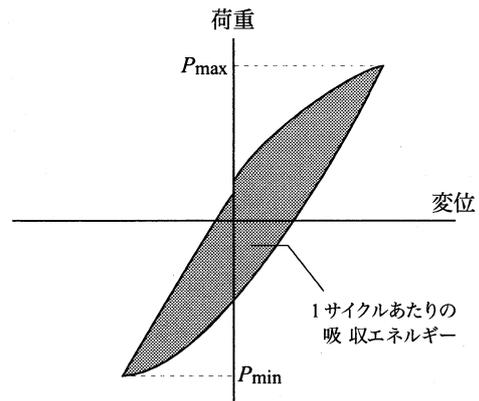


図-5 1 サイクルあたりの吸収エネルギー

を漸増させながら繰返し荷重を行った。一般に、一定変位の繰返し荷重が復元力特性、減衰特性などに及ぼす影響は 3 回程度の繰返しで十分目安がつけられる場合が多いとされており、本研究における各変位振幅における繰返し荷重の回数は 3 回とした。既往の研究では、この一定変位における繰返し荷重の回数がエネルギー吸収容量に及ぼす影響はあまり顕著ではないと報告されている⁵⁾。

3. エネルギー吸収容量の定義

1 サイクルあたりの荷重で、部材に吸収されるエネルギー量は、図-5 に示すように、荷重変位曲線によって囲まれる面積として定義される。この際、荷重の途中で損傷が進行するため、同一サイクル内の繰返し

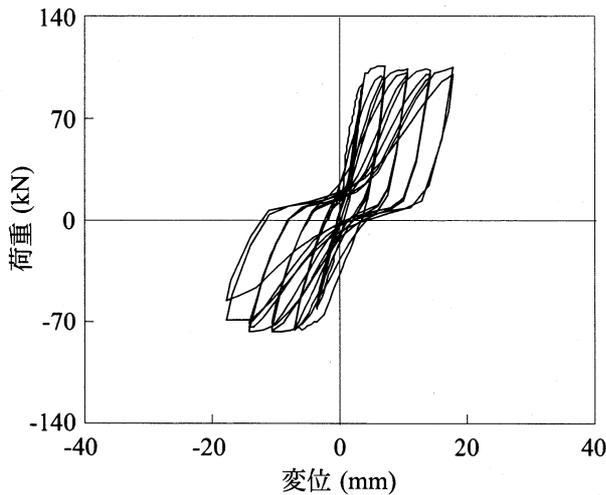


図-6 荷重変位履歴曲線 (No.1)

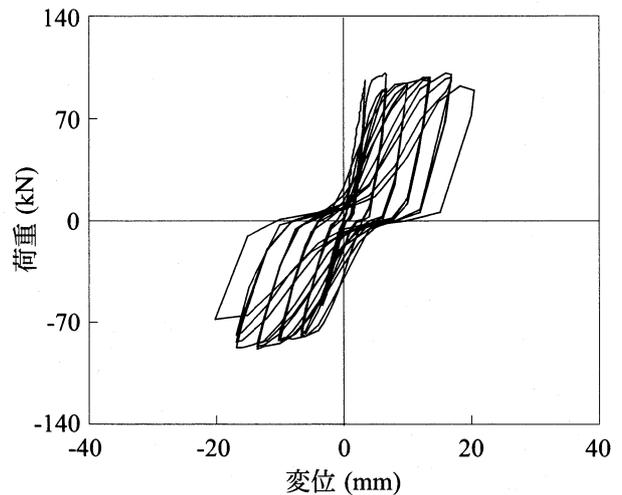


図-7 荷重変位履歴曲線 (No.2)

でも始点と終点が一致しないが、変位0から変位0に至るまでを1サイクルと定義する。そして、載荷開始後からある時点までの吸収エネルギーの総和を累積吸収エネルギーと呼ぶ。

繰り返し荷重を受ける部材の終局は、研究者によりその定義が異なるが、一般に、最大耐力に達した後、耐力が低下して降伏応力以下となった時点、あるいは最大耐力の80%以下となった時点を終局と定義することが多い。本研究では、終局を前者のように定義する。したがって、最大耐力に達した後、耐力が低下して降伏応力以下となったサイクルまでに吸収された累積吸収エネルギーをエネルギー吸収容量と定義する。また、このときの変位が終局変位であり、その値を降伏変位で除した値が変位じん性率である。

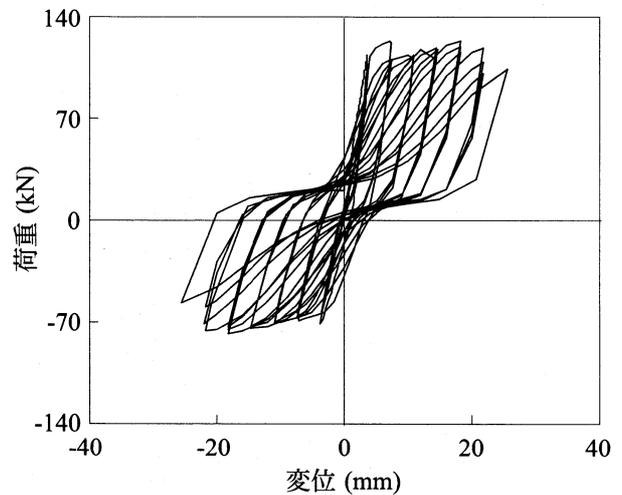


図-8 荷重変位履歴曲線 (No.3)

4. せん断補強鉄筋量の違いによるじん性の変化

4.1 履歴曲線および破壊時の様子

図-6～図-8に各供試体の荷重変位曲線を示す。せん断補強鉄筋量が増加するにつれて、最大荷重の差($P_{max} - P_{min}$)が大きくなり、且つ、終局に至るまでの載荷サイクル数、終局変位が大きくなることが見取れる。したがって、表-2に示すように、終局変位と降伏変位の比である変位じん性率は、せん断補強鉄筋量が増加するに伴って増加する。

図-9～図-11に実験終了後の供試体の様子を示す。せん断補強鉄筋量の違いによって、見た目の損傷度が異なっている。せん断補強鉄筋量の一番小さいNo.1の供試体では、大きな剥離は無くひび割れのみが確認できるが、鉄筋量が増えるにつれて、表面の剥離量が大きくなること確認できる。このことから、せん断補強鉄筋量が多い供試体では、損傷が進行してもある程度

表-2 変位じん性率

| 供試体 | 帯鉄筋比 | 降伏変位 | 終局変位 | 変位じん性率 |
|------|----------|-----------|------------|--------|
| No.1 | 0.24 (%) | 3.57 (mm) | 17.86 (mm) | 5.00 |
| No.2 | 0.48 (%) | 3.37 (mm) | 18.15 (mm) | 5.39 |
| No.3 | 0.72 (%) | 3.64 (mm) | 21.84 (mm) | 6.00 |

の耐力を保持できることを確認した。

4.2 エネルギー吸収容量について

図-12にエネルギー吸収容量(終局までの累積吸収エネルギー)とせん断補強鉄筋比との関係を示す。こうした各要因とエネルギー吸収容量との関係整理は、既往の研究⁵⁾で行われている。図-12においても、既に報告されている知見と同様に、せん断補強鉄筋比とエネルギー吸収容量はほぼ線形関係にあることが確かめられた。このことは、本実験が決して特殊な実験ではな

く、既に報告されている知見^{1)-6),8),9)}が当てはまる十分に一般的な試験であること示すものとする。

滝本ら⁵⁾は、載荷繰り返し回数、せん断スパン比、せん断補強鉄筋比といったエネルギー吸収容量に影響を及ぼす要因を抽出し、それぞれに係数を定めることで、エネルギー吸収容量の推定式を提案している。しかし、RC部材については、膨大な量の実験データに基づいた設計諸量の算定式があり、せん断補強鉄筋量の影響等もそれらの算定式では既に十分に加味されているはずである。

そこで本研究では、せん断補強鉄筋の増加に伴うせん断耐力の向上がエネルギー吸収容量の増加に寄与したと考え、設計せん断耐力に着目する。一般的な鉄筋コンクリートの教科書¹⁰⁾において、最も基礎的な設計せん断耐力 V_u は、次式により表されている。

$$V_u = V_c + V_s \quad (1)$$

V_c は、圧縮部コンクリートのせん断抵抗、かみ合い作用、ダウエル作用といったコンクリート部にまつわるせん断抵抗力であり、

$$V_c = 0.2f'_c{}^{1/3}(100P_t)^{1/3} \left(\frac{10^3}{d} \right)^{1/4} \left(0.75 + \frac{1.4d}{a} \right) b_w d \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 f'_c 、 P_w 、 d 、 a 、 b_w は、それぞれコンクリートの圧縮強度、引張鉄筋比、部材の有効高さ、せん断スパン、有効幅である。これに対して、 V_s は修正トラス理論より求められるせん断補強鉄筋によるせん断耐力であり、

$$V_s = \frac{A_w f_{wy} j_d (\sin \alpha + \cos \alpha)}{s} \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 A_w は区間 s における一組のせん断補強鉄筋断面積であり、 f_{wy} 、 j_d 、 α はそれぞれせん断補強鉄筋の降伏応力度、アーム長、せん断補強鉄筋と軸方向鉄筋とのなす角である。一部の既往研究では、修正圧縮場理論を用いたストラット角も提案されている^{11),12)}が、ここでは一般に多用されている修正トラス理論を用いることとした。こうして求めた供試体 No.1 の設計せん断耐力は、一方向載荷実験の終局荷重 125kN に対して 131kN であった。

図-13 に設計せん断耐力とエネルギー吸収容量との関係を示す。これにより、設計せん断耐力とエネルギー吸収容量の間に強い相関性を有することを確認できた。

5. 構造の異なる部材に対する検討

これまで述べてきたように、エネルギー吸収容量をせん断補強鉄筋比および線形せん断耐力で整理した結果、いずれの場合もエネルギー吸収容量との間に線形関係が得られることを突き止めた。しかし、この結果はあくまで供試体 No.1~No.3 のせん断補強鉄筋量のみが異なる試験体に関する相関性でしかない。そのため、



図-9 実験後の供試体 (No.1)



図-10 実験後の供試体 (No.2)



図-11 実験後の供試体 (No.3)

いずれの知見がより有用であるのかを判断することはできない。そこで構造の異なる供試体を用いて同様の実験(シリーズII)を行い、その結果も含めて考察を加える。

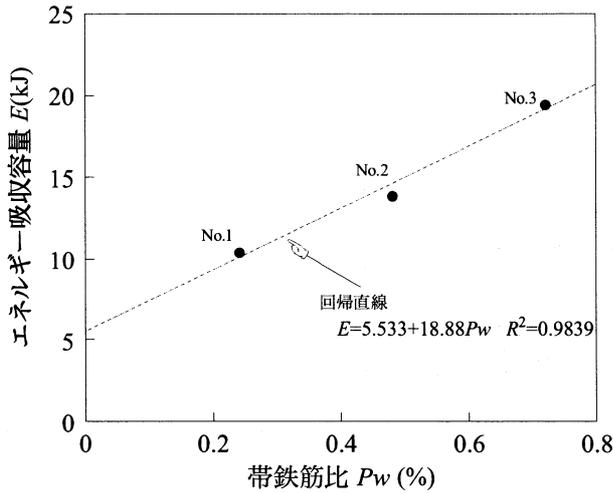


図-12 せん断補強鉄筋比とエネルギー吸収容量の関係

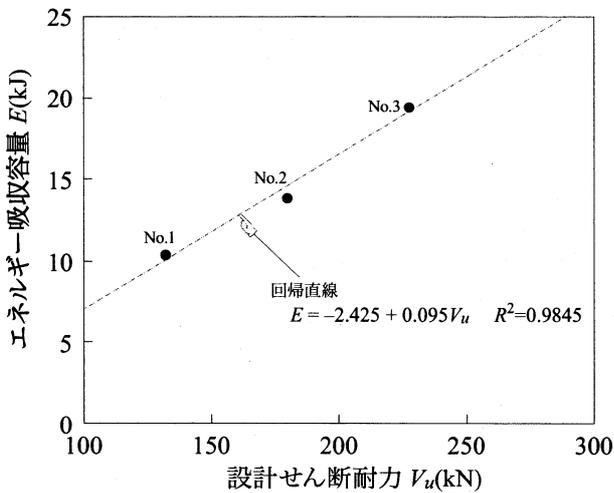


図-13 設計せん断耐力とエネルギー吸収容量の関係

5.1 鉄筋の種類および配筋の異なる供試体

図-14 にシリーズ I の供試体 No.1~No.3 と同一の形状を有しているが、鉄筋の種類および配筋が異なる供試体 (No.4) を示す。この供試体では、軸方向鉄筋に D13, SD295A を用いており、引張鉄筋比は 0.46% である。また、せん断補強鉄筋には D6, SD295A を使用し、95mm 間隔で配筋する。せん断補強鉄筋比は 0.22% である。この供試体は、シリーズ I の供試体 No.1~No.3 に対して、有効高さ、軸方向鉄筋比およびせん断補強鉄筋比が異なっている。

図-15 に供試体 No.4 の履歴曲線を示す。供試体 No.1~No.3 とは異なる構造を有しているため、図-6~図-8 と比べて、終局変位が小さく荷重方向に大きくなったループを描いている。

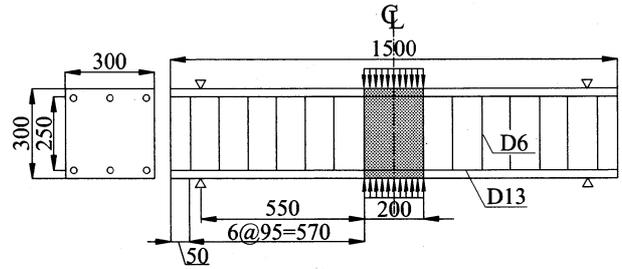


図-14 鉄筋の種類および配筋の異なる供試体 (No.4)

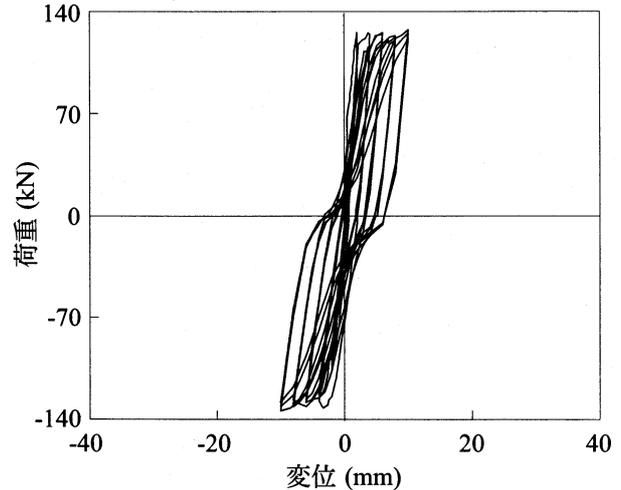


図-15 荷重変位履歴曲線 (No.4)

5.2 形状の異なる供試体

図-16 は、これまでの供試体とは形状の全く異なる供試体である。この供試体は、以前著者らが行った実験¹³⁾ に用いたものの 1 つである。供試体は橋脚を模擬しており、せん断スパン比 $a/d = 2.5$ のフーチング部を有する RC 柱部材である。柱部は幅 283mm、高さ 367mm の長方形断面となっている。軸方向鉄筋は D22, SD345 を使用しており、引張鉄筋比は 0.64% である。せん断補強鉄筋には D6, SD295 を用い、せん断補強鉄筋比は 0.36% である。

表-3 にコンクリートの示方配合を示す。配合設計においては、設計基準強度を 26.5N/mm^2 に設定している。水セメント比は 48.5%、空気量は 4.5%、スランプは $12 \pm 2.5\text{cm}$ である。

図-17 は、供試体 No.5 の荷重変位曲線である。本稿の供試体の中で最も大きな供試体であるため、その履歴曲線は他のそれと比べて荷重、終局変位ともに大きくなっている。

5.3 RC 部材のエネルギー吸収容量

図-18 に供試体 No.1~No.5 までのせん断補強鉄筋比とエネルギー吸収容量の関係を示す。図中に示す直線は、供試体 No.1~No.3 のデータに関する回帰直線であ

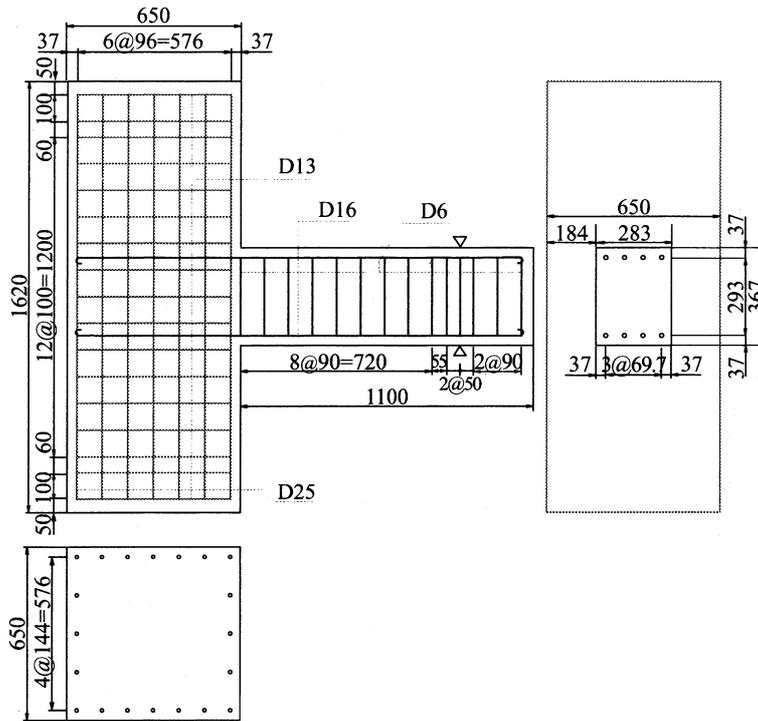


図-16 形状の異なる供試体 (No.5)

表-3 コンクリートの示方配合 (No.5)

| 粗骨材最大寸法 | スラブ | 空気量 | W/C | 細骨材率 |
|--------------------------|---------|---------|----------|---------------|
| 25 (mm) | 12 (cm) | 4.5 (%) | 48.5 (%) | 45.6 (%) |
| 単位量 (kg/m ³) | | | | |
| 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | 混和剤 (ポゾリス) |
| W | C | S | G | |
| 162 | 334 | 822 | 1016 | - |

る。これら3種の供試体と形状が同じであるNo.3についてはほぼ回帰直線に乗るが、形状の異なるNo.5については回帰直線から大きく外れている。これは、せん断補強鉄筋比のように単一の要因のみを抽出した場合、エネルギー吸収容量との関係式を得ることが困難となることを示唆している。そのため、種々の要因についてそれぞれの関係式を求める方法では、その汎用性、一般性が損なわれる可能性があるかと推察される。

図-19には供試体No.1~No.5までの設計せん断耐力とエネルギー吸収容量の関係を示す。図-18と同様に、図中の直線はNo.1~No.3のデータに関する回帰直線である。図-18ではNo.5のデータが回帰直線から大きく外れていたのに対して、図-19では、全てのデータが比較的回帰直線に沿った箇所に得られている。

前述のように、既往の研究成果より、RC部材のエネルギー吸収容量は、部材の断面寸法や鉄筋およびコンクリートの強度特性に依存すること³⁾、地震波の種類や荷重履歴に依らず部材固有の値を示すこと⁴⁾、せん断

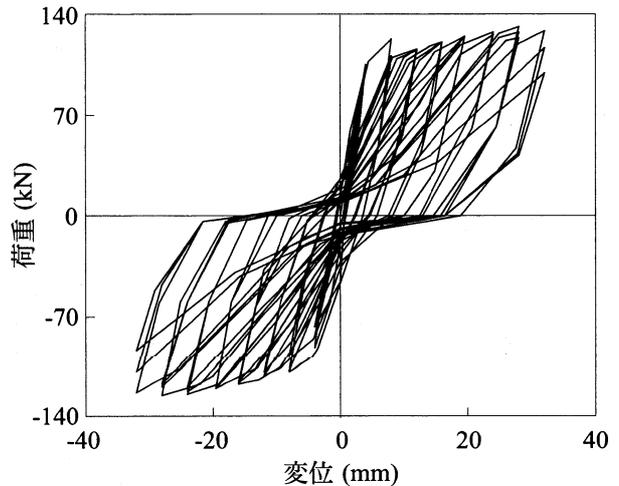


図-17 荷重変位履歴曲線 (No.5)

補強鉄筋比が大きいほど大きくなること⁵⁾等が知られている。これに対して、式(1)~(3)で与えられる設計せん断耐力は、軸方向鉄筋比 P_t 、せん断スパン比 a/d 、寸法効果 d 、有効断面積 $b_w d$ 、せん断補強鉄筋の断面積 A_w 、降伏応力度 f_{wy} および間隔 s などの鉄筋量以外の情報に関する項を含んでいる。そのため、No.1~No.4とNo.5のように全く形状の異なる供試体に対しても、上述したような既往の研究で報告されている種々の要因を加味した評価が可能となったため、図-19のような結果が得られたと考えられる。このことは、エネルギー吸収容量の推定式の構築を試みる場合、個々の詳

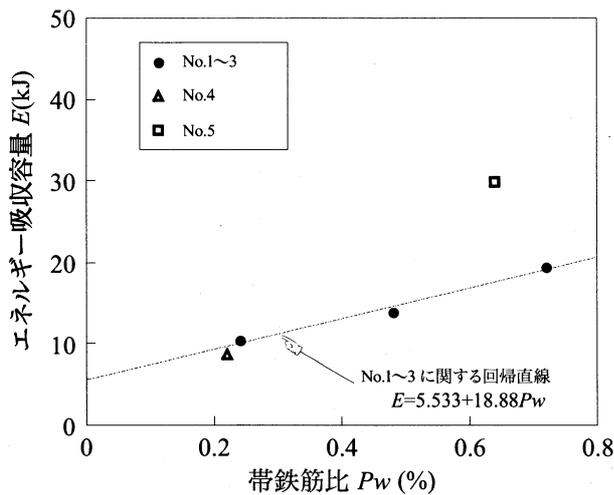


図-18 せん断補強鉄筋比とエネルギー吸収容量の関係

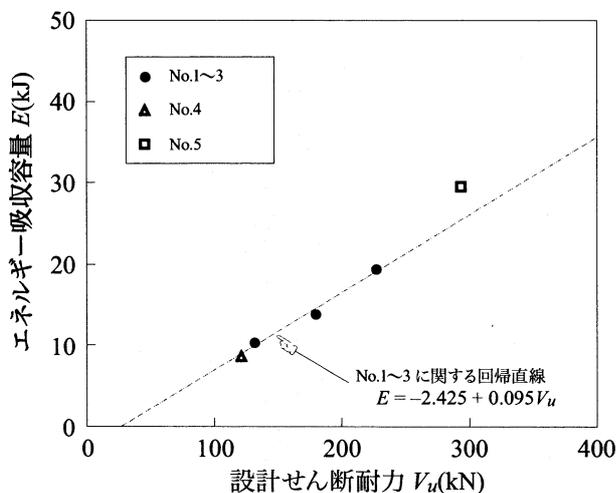


図-19 設計せん断耐力とエネルギー吸収容量の関係

細な要因毎に精緻に関連性を調べて関係式を導くよりも、種々の要因を含んだ既に有用とされている設計せん断耐力のような量との関連性を調べる方が、より一般性および汎用性のある推定式を構築できる可能性が高いことを示唆している。

こうしたアプローチに基づいて構築されたエネルギー吸収容量推定式は、設計時において種々の要因に関する数多くの係数を設定する必要がなくなり、より簡便な耐震設計法の確立に大いに役立つものと考えられる。

6. おわりに

本研究では、エネルギー吸収容量の算定方法の構築を目的として、正負交番繰返し試験を行い、エネルギー吸収容量と関係の深いパラメータの検討を行った。

研究の第一段階として、せん断補強鉄筋比のみ異なる3種の供試体に対して実験(シリーズI)を行い、次

のような結果を得た。

- せん断補強鉄筋量が増えるに伴い、終局時における見た目の損傷は進行しており、損傷が進行してもある程度の耐力を保持できる。
- せん断補強鉄筋量のみが異なる供試体では、せん断補強鉄筋比とエネルギー吸収容量はほぼ線形関係にある。
- エネルギー吸収容量を設計せん断耐力で整理した結果、設計せん断耐力とエネルギー吸収容量には強い相関性が認められる。

第二段階として、シリーズIの供試体とは構造の異なる供試体を用いた実験結果(シリーズII)に基づいて更なる考察を加えた。以下に得られた知見を示す。

- 供試体形状が同じで鉄筋の種類および配筋が異なる供試体のエネルギー吸収容量は、せん断補強鉄筋比および設計せん断耐力で整理した結果、両者ともに先の実験より得られた回帰直線上に乗る。
- 形状の異なる供試体のエネルギー吸収容量は、せん断補強鉄筋比で整理すると上述の回帰直線から大きく外れる。
- これに対して、エネルギー吸収容量を設計せん断耐力で整理すると、全ての供試体においてほぼ同一直線に沿うような結果が得られる。

以上より、エネルギー吸収容量の推定式の構築を試みる場合、個々の要因毎に精緻な関係式を導くアプローチよりも、種々の要因を含んでいる設計せん断耐力のような量との関連性を調べることで、より一般性・汎用性の高い推定式を構築できるものと考えられる。また、設計せん断耐力のように経験的な裏付けが十分になされ、且つ、設計時に必ず算出する重要な量に基づいたエネルギー吸収容量の推定式が構築できれば、より簡便な耐震設計法の確立できるものと期待される。

しかしながら、本研究で行った実験例題は極めて少なく、本研究で得られた知見は十分に一般性のあるものとは言えない。本実験で用いた供試体では、 a/d は2.1~2.5の限られた範囲に収まっている。また柱部材と考えた場合、軸方向鉄筋の配筋は、本実験で用いたものとは異なり、側面にも軸方向鉄筋が配置されることが多い。このような場合、せん断補強鉄筋によって内部のコンクリートがより強く拘束されるために、得られるエネルギー吸収容量が飛躍的に大きくなることは想像に難くない。さらに、本研究では軸力を考慮できていないが、軸力の影響についても検討する必要があるだろう。

今後は、実験や文献調査を進めることでデータ数を増やし、得られた知見の信頼性を高めていきたい。併せて、設計せん断耐力以外の諸量についても検討を進め、簡便で有用性の高いエネルギー吸収容量の推定式の開発を目指していく予定である。

参考文献

- 1) 石橋忠良, 吉野伸一: 鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形能力に関する研究, 土木学会論文集, No.390/V-6, pp.57-66, 1988.
- 2) 幸左賢二, 大塚久哲, 星隈順一, 佐々木協一, 新保弘: RC 橋脚の変形性能向上に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.578/V-37, pp.43-56, 1997.
- 3) Ohno T., Nishioka T.: An Experimental Study on Energy Absorption Capacity of Column in Reinforced Concrete Structures, *Proc. of JSCE, Structural Eng. / Earthquake Eng.*, Vol.1, No.2, 1984.
- 4) 藤掛一典, 大野友則, 西岡隆: 鉄筋コンクリートラーメンのエネルギー吸収容量に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.390/V-8, pp.113-121, 1988.
- 5) 滝本和志, 川島一彦: 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, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.5-13, 1996.
- 6) 堀則男, 井上範夫, 柴田明德: 鉄筋コンクリート造建物の地震時エネルギー応答性状及び応答最大塑性率とエネルギー消費に基づく所要耐力の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 481 号, pp.17-25, 1996.
- 7) 土木学会編: コンクリート構造物の耐震性能照査技術-現状と将来の展望- コンクリート技術シリーズ, No.48, 2002.
- 8) 滝本和志: 鉄筋コンクリート柱のエネルギー吸収容量の推定方法, 土木学会第 60 回年次学術講演会概要集, pp.977-978, 2005.
- 9) 向井智久, 梶原唯史, 野村設郎: 曲げ降伏する RC 造梁部材の地震時損傷とエネルギー吸収性能に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 601 号, pp.129-136, 2006.
- 10) 町田篤彦, 関博, 丸山武彦, 檜貝勇: 大学土木 鉄筋コンクリート工学, 第 1 版第 8 刷, 2003.
- 11) 中村光, 檜貝勇: 拡張した修正圧縮場理論による RC はり断面のせん断耐荷力評価, 土木学会論文集, No.490/V-23, pp.157-166, 1997.
- 12) 幸左賢二, 小林和夫, 安田扶律, 水田崇志: 修正圧縮場理論による大型 RC 橋脚のせん断評価, 土木学会論文集, No.620/V-43, pp.71-81, 1999.
- 13) RC2 層ラーメン高架橋中層ばりのせん断破壊および補修方法に関する実験的研究, 建設工学研究振興会報告書, pp.1-53, 1980.

(2008 年 4 月 14 日 受付)