

【3.1.1 鋼製デバイスの実験および開発】成果

鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレース

—履歴型ダンパーとしての性能評価—

岩田 衛*¹、村井正敏*¹、小林文興*²

(*¹: 神奈川大学工学部建築学科、*²: (株) フジタ)

1. はじめに

軸方向力を伝達するブレースが座屈しないように、拘束材により補剛したものを座屈拘束ブレースと呼ぶ。この座屈拘束ブレースを制振部材として柱梁接合部に組み込み、中地震から塑性化させ、減衰効果を発揮させることにより、大地震を受けても柱梁接合部の塑性歪は、従来の構造に比べて大幅に低減される。これにより、柱梁接合部の損傷を回避することが可能となる。

著者等は、これまで報告されている様々な方式の座屈拘束ブレースを分類し、性能および特徴をまとめ、断面性能などを揃えた試験体により、性能比較実験を行った¹⁾。これらの結果から、拘束材として角形鋼管にモルタルを充填した座屈拘束ブレースは、芯材の 3.0%歪にも安定した復元力特性を示し、累積塑性歪エネルギーなどの結果からみても、高い性能があると評価された。これに比べて、鋼材のみで座屈拘束するブレースは、高歪状態において復元力特性などの性能を十分に発揮しにくいという結果を得た。他方、製造法に関しては、前者は後者に比べて品質管理、両端部ディテールの設計に問題を残していることが分かった。これらの知見を踏まえ、両端部ディテールに自由度があり、品質管理を厳しく行え、高歪状態においても安定した復元力特性を示すような座屈拘束ブレースを着想した。(図1)

本論では、着想した座屈拘束ブレースに関して、鋼モルタル板高さを変化させ拘束力を調整した試験体及び芯材幅厚比を変化させた試験体を製作し、繰り返し軸方向載荷実験を行い、拘束力及び芯材幅厚比の変化が履歴特性に与える影響、累積塑性歪エネルギー、弾塑性性状、補剛性状などについて明らかにする。さらに、これらの結果を考察し、座屈拘束ブレースとしての有効性を確認し、性能評価を行う。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体一覧を表 1 に示す。拘束材の座屈荷重 P_E はオイラー座屈荷重式から算出し、断面 2 次モーメントの算出にあたっては、ブレースが圧縮力を受ける場合、芯材の座屈が圧縮側のモルタルのみで補剛されると考え、モルタルの寄与も考慮し 1/20 を乗じる。座屈長さは鋼モルタル板長さをを用いて算出する。表 1 の座屈荷重及び P_E/P_y 欄の () 内の値は試験体長さをを用いて算出した値で、総重量欄 () 内の値はもっとも重い P7M11 試験体を 100 とした比率である。芯材全周に 1mm 厚のアンボンド材を貼付する。また、芯材強軸方向の隙間へ充填材として $\phi 11$ の丸鋼を取り付け、強軸方向への変形を防止する。芯材の材質は SN400B、拘束材の材質は SS400 とする。

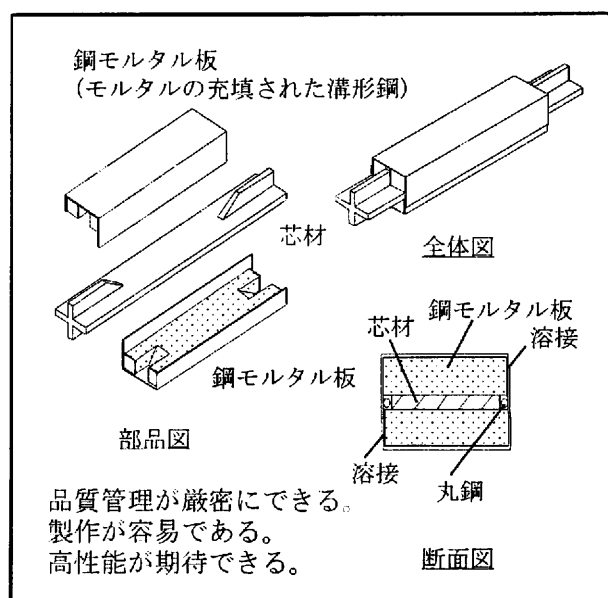


図1 座屈拘束ブレース

表 1 試験体一覧

| 試験体名 | 芯材 | | | | | 拘束材 | | | | 座屈拘束ブレース | | | |
|-------|-----------------|------|----------------------|-----------|----------------------|---------|--|----------------------|----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------|
| | 芯材塑性化領域寸法 mm | 幅厚比 | A mm ² | 素材 No. | P _y kN | h mm | I ×10 ⁴ mm ⁴ | P _E kN | 重量 kg | B | H | 総重量 kg | P _E /P _y |
| | | | | | | | | | | 公称値 mm | 公称値 mm | | |
| P2M11 | PL-176×16 | 11.0 | 2816 | ② | 740 | 25 | 175 | 1379 (642) | 54 | 206.4 | 68.0 | 132 (80) | 1.9 (0.9) |
| P3M11 | PL-176×16 | 11.0 | 2816 | ② | 740 | 35 | 318 | 2505 (1167) | 67 | 206.4 | 88.0 | 145 (87) | 3.4 (1.6) |
| P5S8 | PL-104×12 | 8.7 | 1248 | ① | 368 | 40 | 251 | 1977 (922) | 45 | 134.4 | 94.0 | 93 (56) | 5.4 (2.5) |
| P5S11 | PL-132×12 | 11.0 | 1584 | ① | 467 | 40 | 296 | 2332 (1087) | 55 | 162.4 | 94.0 | 106 (64) | 5.0 (2.3) |
| P5M6 | PL-104×16 | 6.5 | 1664 | ③ | 481 | 42 | 304 | 2395 (1116) | 49 | 134.4 | 102.0 | 105 (63) | 5.0 (2.3) |
| P5M8 | PL-138×16 | 8.6 | 2208 | ③ | 638 | 45 | 425 | 3348 (1560) | 62 | 168.4 | 108.0 | 124 (75) | 5.2 (2.4) |
| P5M11 | PL-176×16 | 11.0 | 2816 | ③ | 814 | 45 | 508 | 4002 (1865) | 78 | 206.4 | 108.0 | 149 (90) | 4.9 (2.3) |
| P5L4 | PL-88×22 | 4.0 | 1936 | ④ | 539 | 45 | 356 | 2804 (1307) | 45 | 118.4 | 114.0 | 107 (64) | 5.2 (2.4) |
| P5L5 | PL-104×22 | 4.7 | 2288 | ④ | 637 | 45 | 396 | 3119 (1454) | 51 | 134.4 | 114.0 | 120 (72) | 4.9 (2.3) |
| P7M11 | PL-176×16 | 11.0 | 2816 | ② | 740 | 50 | 634 | 4994 (2328) | 90 | 206.4 | 118.0 | 166 (100) | 6.8 (3.1) |
| P10M6 | PL-104×16 | 6.5 | 1664 | ③ | 481 | 58 | 603 | 4750 (2214) | 66 | 134.4 | 134.0 | 119 (72) | 9.9 (4.6) |
| P10M8 | PL-138×16 | 8.6 | 2208 | ③ | 638 | 60 | 781 | 6152 (2867) | 82 | 168.4 | 138.0 | 145 (87) | 9.6 (4.5) |
| P10L4 | PL-88×22 | 4.0 | 1936 | ④ | 539 | 60 | 645 | 5081 (2368) | 60 | 118.4 | 144.0 | 122 (73) | 9.4 (4.4) |

2.2 実験パラメータ

芯材板厚を3種類設定し、芯材の補強リブが取り付けられていない平鋼部分(芯材塑性化領域と呼ぶ)の幅寸法を変化させる。座屈拘束ブレースが圧縮力を受け、芯材塑性化領域が微小な曲げ変形を起こすと鋼モルタル板が、その箇所における曲げ変形の局所的な進行を防ぐ。その後、この微小な曲げ変形が芯材塑性化領域全体に伝播していくことで、高次の座屈モード(芯材表面が緩やかに波打つ変形)が得られる。この塑性化領域を変化させた芯材幅厚比 11.0~4.0 の7種類を設定する。鋼モルタル板高さは P_E/P_y の値により決まり、60mm~25mmとなる。板厚は一定で3.2mmとする。

本実験では座屈拘束ブレースが安定したエネルギー吸収をするために必要な拘束力を示す指標として、拘束材のオイラー座屈荷重 P_E を芯材の降伏荷重 P_y で除した P_E/P_y の値に着目し、芯材塑性化領域が同一で P_E/P_y の値を減少させる場合、 P_E/P_y の値が一定で芯材の幅寸法も一定で板厚が異なる場合、次に板厚が一定で幅が異なる場合、芯材幅厚比が一定で幅及び厚さ寸法が異なる場合についての比較を行う。

2.3 実験方法

実験装置を図2に示す。実験は構造物用動的試験装置 1000kN アクチュエータを使用し、試験体を芯材の弱軸が荷重軸面内になるように設置する。荷重は、正負交番漸増繰返し荷重とし、軸方向変位により制御する。計測はレーザー式変位計、電気式変位計を用いて軸方向変位、拘束材弱軸、強軸方向変位について測定する。

3. 実験結果

実験結果を表2に示す。実験終了後、鋼モルタル板を除去して観察を行った。全ての試験体の芯材塑性化領域全体に渡って、高次の座屈モードが確認できる。P10M6、P5L4 試験体を除く試験体は芯材

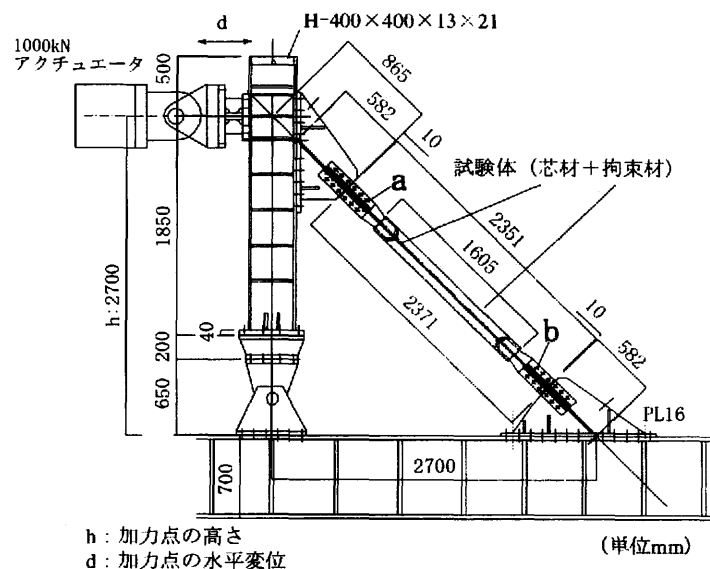


図 2 実験装置

表 2 実験結果及び性能評価指標

| 試験体 | η^+ | Et (kN・m) | η 指標 | | ω | ω 指標 | | P_E/P_y | 芯材 幅厚比 |
|-------|----------|--------------|-----------|------|----------|-------------|------|-----------|-----------|
| | | | L2 | L4 | | L2 | L4 | | |
| P2M11 | 70 | 226 | 1.40 | 0.47 | 147.2 | 1.47 | 0.49 | 1.9 | 11.0 |
| P3M11 | 164 | 667 | 3.28 | 1.09 | 434.4 | 4.34 | 1.45 | 3.4 | 11.0 |
| P5S8 | 242 | 417 | 4.84 | 1.61 | 503.8 | 5.04 | 1.68 | 5.0 | 8.7 |
| P5S11 | 176 | 375 | 3.52 | 1.17 | 347.0 | 3.47 | 1.16 | 4.9 | 11.0 |
| P5M6 | 242 | 585 | 4.84 | 1.61 | 534.2 | 5.34 | 1.78 | 5.0 | 6.5 |
| P5M8 | 182 | 526 | 3.64 | 1.21 | 357.0 | 3.57 | 1.19 | 5.2 | 8.6 |
| P5M11 | 177 | 698 | 3.54 | 1.18 | 362.1 | 3.62 | 1.21 | 5.4 | 11.0 |
| P5L4 | 252 | 661 | 5.04 | 1.68 | 560.2 | 5.60 | 1.87 | 5.2 | 4.0 |
| P5L5 | 320 | 1025 | 6.40 | 2.13 | 725.3 | 7.25 | 2.42 | 4.9 | 4.7 |
| P7M11 | 191 | 778 | 3.82 | 1.27 | 506.7 | 5.07 | 1.69 | 6.8 | 11.0 |
| P10M6 | 548 | 1425 | 10.96 | 3.65 | 1299.7 | 13.00 | 4.33 | 9.9 | 6.5 |
| P10M8 | 331 | 1113 | 6.62 | 2.21 | 755.5 | 7.56 | 2.52 | 9.6 | 8.6 |
| P10L4 | 284 | 752 | 5.68 | 1.89 | 637.8 | 6.38 | 2.13 | 9.4 | 4.0 |

弱軸方向に座屈しており、その部分のモルタルは圧縮破壊を起こしている。P2M11 試験体は加力点側補強リブの溶接部近傍から部材全体の座屈をしており、座屈モード波も他の試験体と比較すると緩やかである。P10M6 試験体は下側端部補強リブ先端付近の溶接熱影響部を起点として芯材が破断している。芯材の幅厚比 4.0(88×22mm)の P10L4、P5L4 試験体は 1.5%歪載荷時から、目視による強軸方向への変形が確認できる。P_E/P_y=10.0 の P10L4 試験体は弱軸、強軸方向ともに、「く」の字に変形している。P5L4 試験体は弱軸方向に座屈モードが確認でき、強軸方向にも大きく変形している。P_E/P_y=10.0 の P10M8 試験体(幅厚比 : 8.6)も同様に弱軸、強軸両方の変形を確認できる。しかし、P5M8 試験体は弱軸方向の座屈モードは確認できるが強軸方向への変形は確認できない。P_E/P_y=5.0 の試験体も同様に弱軸方向に座屈モードが確認できる。強軸方向への変形はでない。

4. 考察

4.1 復元力特性

P_E/P_y の値がもっとも小さい、鋼モルタル板高さが 25mm の P2M11 試験体(P_E/P_y=1.9)でも 0.75%歪まで安定した復元力特性を示している。この試験体は、層間変形角 1/100(レベル 2)相当の 1.0%歪においては、P2M11 試験体は 2 回目まで安定した復元力特性を有している。高さが 35mm の P3M11 試験体は 5 回目まで十分に安定した復元力特性を有している。よって本実験の範囲内においては、鋼モルタル板高さが 35mm 以上であれば、芯材幅厚比の値によらず、層間変形角 1/100 相当の変形に対して十分安定した復元力特性が得られると考える。

1) 芯材塑性化領域が同一で、P_E/P_yが減少する場合

芯材塑性化領域が一定で(176×16mm)、P_E/P_yを減少させた 4 体を比較する。P_E/P_yがもっとも大きい P7M11 試験体が 3.0%歪載荷に達して性能が高い。P5M11、P3M11 試験体はほぼ同一の実験結果(2.5%歪 1 回目圧縮側で局部座屈)となったが、P2M11 試験体は 1.0%歪載荷 3 回目で顕著に性能が低下している。最終状態も他の 3 体と異なり、部材全体が座屈を起こし、芯材は大きく「く」の字に変形している。P_E/P_yが 10.0 と 5.0 の 3 種類の芯材に関しては、芯材塑性化領域の寸法により結果に差が見られる。芯材が 104×16mm の試験体は、P_E/P_y=10.0 の P10M6 試験体では 3.0%歪 12 回目引張側で芯材が破断しているのに対し、P_E/P_y=5.0 の P5M6 試験体は 3.0%歪 2 回目圧縮側で局部座屈が発生し、実験を終了している。芯材寸法 138×16mm では、P_E/P_y=10.0 の P10M8 試験体は 3.0%歪 5 回目圧縮側において局部座屈が

発生している。しかし、 $P_e/P_y=5.0$ の P5M8 試験体は 3.0%歪に達せず、2.5%歪 2 回目圧縮側において局部座屈が発生し実験を終了しており、性能低下が見られる。芯材 88×22mm の 2 体では、 $P_e/P_y=10.0$ の P10L4 試験体は高歪状態での強軸方向への変形が支配的となり、その後 3.0%歪 3 回目圧縮側で耐力低下が起き、実験を終了した。 $P_e/P_y=5.0$ の P5L4 試験体も同様に、強軸方向への変形が支配的となり、3.0%歪 2 回目圧縮側で耐力低下が起き、実験を終了した。ここでは顕著な性能低下は確認できない。

2) P_e/P_y 、芯材の幅が一定で、板厚が異なる場合

芯材の幅(104mm)が一定で、板厚寸法が異なる P5S8(12mm)、P5M6(16mm)、P5L5 (22mm) 試験体を比較する。板厚の厚い P5L5(幅厚比: 4.7)がもっとも性能が高く、3.0%歪 4 回目圧縮側において、強軸方向への変形が支配的となり実験を終了した。P5M6 試験体では 3.0%歪 2 回目圧縮側において局部座屈が発生し、実験を終了した。板厚の小さい P5S8 試験体も 3.0%歪 2 回目圧縮側において局部座屈が発生し、実験を終了しており、板厚 16mm、12mm では顕著な差は確認できない。

3) P_e/P_y 、芯材の板厚が一定で、幅が異なる場合

芯材の厚さ(16mm)が一定で、幅が異なる P5M11(幅: 176mm)、P5M8(138mm)、P5M6(104mm)試験体を比較すると、幅厚比の小さい P5M6 試験体(幅厚比: 6.5)の性能が高い。しかし、他の 2 体は 2.5%歪 2 回目において局部座屈が発生し実験を終了しており、性能に顕著な差は見られない。

4) P_e/P_y 、芯材幅厚比が同じで幅及び厚さが異なる場合

芯材幅厚比が 11.0 の P5S11(132×12mm)、P5M11 試験体(176×16mm)を比較すると、2 体とも 2.5%歪 2 回目圧縮側において局部座屈が発生し実験を終了している。この結果から、芯材幅厚比が同じであれば、幅及び厚さ寸法が異なっても、ほぼ同一の性能を有すると考える。

4.2 塑性変形能力

各試験体についての累積塑性変形倍率と実験終了までの累積塑性歪エネルギーを算出して表 2 に示す。累積塑性変形倍率は歪硬化の影響を考慮に入れ、各繰り返し時の引張側の最大変形を足し合わせて算出する。芯材が破断した P10M6 試験体が η^+ および Et ともにもっとも高い値を示している。芯材塑性化領域が同一の試験体では、 P_e/P_y の値が大きなものほど、 η^+ および Et の値は大きな値を示している。

4.3 性能評価

座屈拘束ブレースの性能評価にあたっては、著者らの既往の研究 2) に則して行う。この研究では、履歴型ダンパーとして座屈拘束ブレースが組み込まれた 10 層 3 スパンの建築物が 5 種類の地震波 (El Centro NS、神戸海洋気象台 NS、Taft EW、八戸 EW、センター波) を受ける場合、各地震動レベルにおいて層方向で最大となる座屈拘束ブレースの累積塑性変形倍率 η およびエネルギー吸収率 ω の解析値とそれらの平均値を算定している。

η の要求性能は、解析上の引張側 (η^+) と圧縮側 (η^-) を足し合わせている。 ω は座屈拘束ブレースの累積塑性歪エネルギー Et を、降伏荷重と弾性限界変形量を乗じて算出した W_y で除して無次元化したパラメータである。座屈拘束ブレースに対する要求性能は、文献 2) の解析による要求性能から定める。すなわち、表 3 に記されている η および ω のレベル 2 およびレベル 4 入力時におけるそれぞれの平均

表 3 文献 2) による要求性能

| 地震動 | $\eta (= \eta^+ + \eta^-)$ | | | | $\omega (= Et / W_y)$ | | | |
|--------|----------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| | L1 | L2 | L3 | L4 | L1 | L2 | L3 | L4 |
| elns | 34.9 | 99.9 | 161.2 | 262.7 | 20 | 84 | 179.1 | 272.9 |
| kobens | 28.2 | 74.4 | 143.5 | 182.1 | 21.8 | 88.8 | 176.9 | 237 |
| taftew | 37.5 | 95.8 | 170.5 | 302.2 | 21 | 88.2 | 185.1 | 275.3 |
| hatiew | 50.1 | 122.1 | 180.2 | 259.9 | 27.1 | 80.7 | 152.2 | 220 |
| center | 92.9 | 153.7 | 304.4 | 450.8 | 50 | 152.8 | 346.3 | 549 |
| 平均値 | 48.7 | 109.2 | 192.0 | 291.5 | 28.0 | 98.9 | 207.9 | 310.8 |
| 要求性能 | | 100 | | 300 | | 100 | | 300 |

値を丸めて「100」、「300」とする。次に、実験から得られた η^+ および ω と要求性能を比較する。 η の要求性能は引張側と圧縮側が足し合わされている値($\eta = \eta^+ + \eta^-$)であるので、実験値と比較するに当たっては、2で除し、「50」、「150」を η^+ の要求性能とする。レベル2入力時に着目すると、 η^+ および ω ともに、すべての試験体が要求性能を満たしている。レベル4入力時で比較すると、 η^+ 、 ω ともにP2M11試験体を除くすべての試験体が要求性能を満たしている。

4.4 性能評価式の誘導

実験から得られた各試験体の η^+ および ω を、それぞれの要求性能で除した値を性能評価指標（以下、 η 指標および ω 指標と呼称する）とし、レベル2入力時とレベル4入力時の P_E/P_y との関係をそれぞれ示す。（図3、図4）レベル4入力時について、弱軸方向に座屈した試験体（P5L5、P10M6試験体を除く11体）に着目すると、 η 指標と ω 指標ともに次の1次式で近似的に評価できる。

$$y = x/4$$

レベル2入力時については、この式を3倍したものになっている。ここで $P_E/P_y = 0$ の座屈拘束ブレースは、拘束材が存在しないブレースである。このブレースは、圧縮力を受けると弾性範囲内で座屈するため、塑性変形がほとんど生じなく、累積塑性変形倍率、累積塑性歪エネルギーは極めて微小である。すなわち各指標は限りなく0に近似すると考え、 η 指標、 ω 指標の評価式は原点を通るものとする。

性能評価式は、芯材塑性化領域、芯材幅厚比をそれぞれ数種類設定して行った実験から導き出された式であり、 η 指標および ω 指標評価式は結果的に同じ式となっていて、累積塑性変形倍率と累積塑性歪エネルギーの間には強い相関があると考え。ただし、高歪状態においての繰り返しにより芯材が破断する場合や強軸方向への変形が支配的になる場合は、性能評価式から安全側に外れる結果が得られている。したがってこの評価式は、鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの性能評価の最小値を示

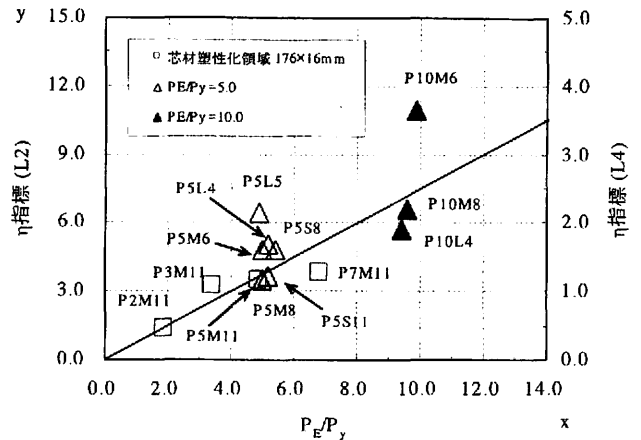


図3 η 指標 $\sim P_E/P_y$ 関係

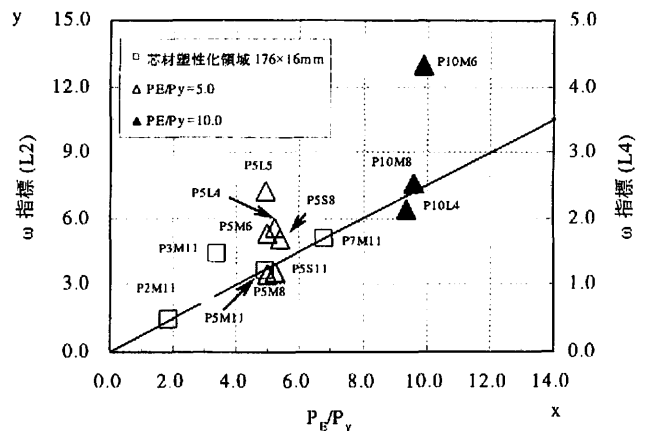


図4 ω 指標 $\sim P_E/P_y$ 関係

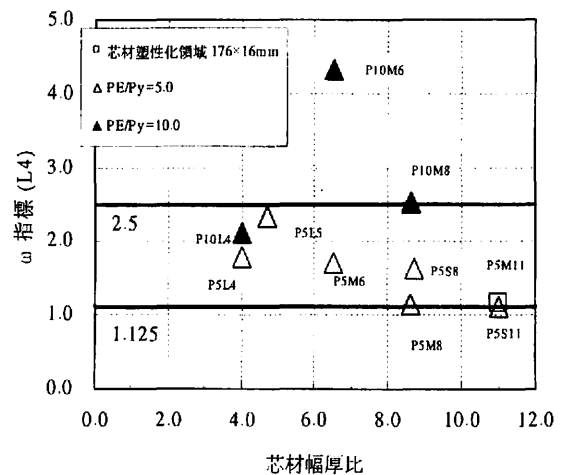


図5 ω 指標 \sim 芯材幅厚比

す式と考える。

4.5 芯材幅厚比の影響

図5に P_E/P_y を 5.0 と 10.0 程度に設定した試験体 10 体について、レベル4入力時の ω 指標と芯材幅厚比関係を示す。図中の実線は $P_E/P_y=10.0$ および 5.0 を性能評価式に代入して算出した ω 指標を示している。

・ $P_E/P_y = 5.0$ の時 ω 指標 = $5.0 / 4 = 1.25$

・ $P_E/P_y = 10.0$ の時 ω 指標 = $10.0 / 4 = 2.5$

$P_E/P_y=5.0$ 程度に設定した試験体は芯材幅厚比が小さくなるにつれ、 ω 指標の値が大きくなるのに対し、 $P_E/P_y=10.0$ の試験体は幅厚比が 6.5 の P10M6 試験体の ω 指標のみが突出し、その他の試験体は 2.5 に近似している。

5. まとめ

鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースを着想し、繰り返し軸方向載荷実験を行い、以下に示す結果を得た。

(1) $P_E/P_y=1.9$ の試験体を除くすべての試験体について、芯材の 1.0%歪まで十分安定した復元力特性を持っていることを実験で確認した。これにより、レベル2地震動に対応する層間変形角 1/100 の変形に対して、十分な性能を有していると考えられる。

(2) 層間変形角 1/100 相当の 1.0%歪では、鋼モルタル板高さが 35mm 以上であれば芯材幅厚比によらず、十分に安定した復元力特性を有する。

(3) 1.0%歪を超えた高歪状態においては、芯材幅厚比の値が座屈拘束ブレースの最終状態に大きな影響を与える。

(4) 座屈拘束ブレースの性能評価として、y 軸に ω 指標もしくは η 指標、x 軸に P_E/P_y をとる場合、両者の関係は、芯材弱軸方向に座屈した試験体については、線形的な関係がある。

(5) 本研究の性能評価では η 指標、 ω 指標の性能評価式は同じ一次式になり、両者の間には強い相関がある。

参考文献

- 1) 岩田衛：座屈拘束ブレースを用いた履歴型ダンパーの性能比較実験、月刊鉄鋼技術、pp34-42、2001年6月
- 2) 加藤貴志、岩田衛、和田章：損傷制御構造における座屈拘束ブレースの性能評価、日本建築学会構造系論文集、第552号、pp101-108、2001年2月
- 3) 小林史興、村井正敏、和泉田洋次、岩田衛：鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究 ―その2 製作簡易化と芯材幅厚比の変化―、日本建築学会構造系論文集、第586号、pp187-193、2004年12月