

鋼製ダンパーを用いた伝統木造軸組建物における傾斜復元力特性の改善

Improvement of tilt restoring force characteristics in traditional wooden frame column bases using steel dampers

B.構造-2.構造-10.鉄骨構造

伝統木造軸組 柱脚 鋼製ダンパー
傾斜復元力

○小出 孟* KOIDE Hajime
井戸田秀樹** IDOTA Hideki
同 藤川 大輝*** FUJIKAWA Daiki

1. 序

寺社や神社などに見られる伝統木造軸組で用いられる柱の径は 300mm 程で木造軸組住宅と比較すると太径である。柱の断面が十分に大きく、柱頭・柱脚の納まりが柱の剛体回転を許す場合であれば限界耐力計算において柱の傾斜復元力が見込める。

しかし、限界耐力計算において傾斜復元力は損傷限界である層間変形角 1/120rad 時の耐力を最大耐力として、その後は幾何学的性質より低下する。また、繰り返し変形の際、逆行型の履歴を有するため、エネルギー吸収がないという性質がある。

そこで、本研究では、傾斜復元力を有する伝統木造軸組の柱に対し、柱脚部にエネルギー吸収デバイスとしてせん断型スリットダンパーを提案し、実験を行い、その傾斜復元力の改善効果を検証する。

2. 既存の伝統木造軸組の復元力特性

限界耐力計算では、各耐震要素ごとに耐力を算出し、それらを足し合わせることで、建物の耐震性能を評価している。図 1 は一般的な伝統木造軸組の平面図であり、耐震要素の復元力地特性を図 2 に、損傷限界の変形角 1/120rad、安全限界付近の変形角 1/20rad での各耐震要素の全体に占める割合を図 3 に示す。

伝統構法で用いられる柱は 1 章で述べた通り太径であり、既往の研究¹⁾より、柱の剛体回転を許す場合であれば、傾いたときに元に戻ろうとする傾斜復元力を考慮することができる。しかし、その傾斜復元力は限界耐力計算上での損傷限界に当たる変形角 1/120rad を過ぎると減少しはじめ、図 4 に示すような重力 mg の作用点が、回転中心の鉛直軸を超えするという幾何学的条件より柱径以上の層間変形では負に転じ $P-A$ 効果を進めることになる。柱径 300mm、柱高 6000mm の場合、層間変形角 1/20rad

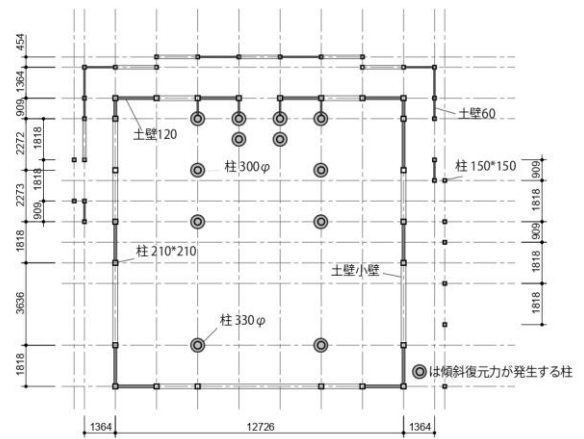


図 1 伝統木造軸組 平面図

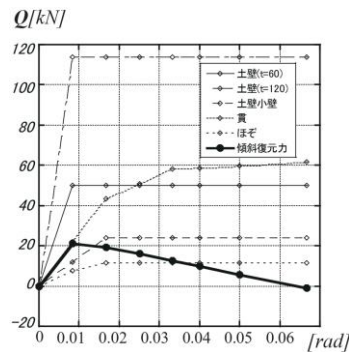


図 2 耐震要素別復元力特性

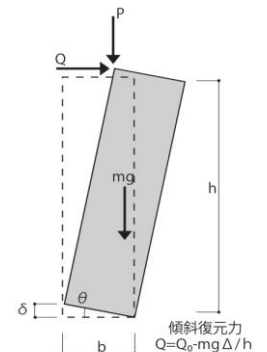
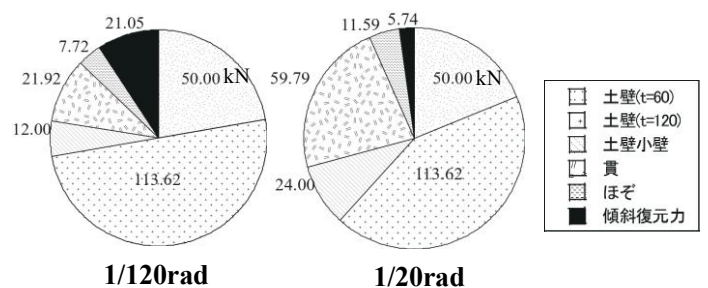


図 4 傾斜復元力



1/120rad 1/20rad
図 3 各変形角における耐震要素の割合

* 名古屋工業大学 工学部 社会工学科 学部生

** 名古屋工業大学大学院社会工学専攻 教授・工博

*** 亀山建設(株) 修士(工学)

* Undergraduate Student, Nagoya Institute of Technology

** Prof, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

*** Kameyama Construction

では復元力はほとんど見込めないことが分かっている。

さらに、繰り返し変形を受ける場合では、逆行型の履歴のため履歴による振動エネルギーの吸収が見込めない。ゆえに等価粘性減衰定数は、柱の傾斜復元力以外の軸組架構の復元力特性から求め、等価周期は柱の傾斜復元力を加えた復元力特性から求める扱いとなっている。

3. 鋼製ダンパーの提案

大変形角時での耐力保持が少なく、履歴によるエネルギー吸収も乏しい伝統構法の柱の傾斜復元力に対し、本研究では柱脚部にダンパー性能を持たせたデバイスを提案する。石場立てである伝統構法の柱はロッキング運動と呼ばれる回転を伴う挙動を示す²⁾。よって面外方向外力による曲げに対しての抵抗を示さない従来の軸方向ダンパーよりも、鋼板を切削しただけの鋼製のスリットダンパーが望ましい。これは損傷を受けた後でもこのダンパー部のみの取り換えで済むので経済的合理性にも適う上、柱脚なので建物の上部構造に影響しない。すなわち新築だけでなく耐震改修においても利用が可能で、建物の表面に現れないことから意匠的にも優れていると言える。スリットダンパーに関して既往の研究³⁾⁴⁾ではスリットの形状に注目して、平行部の長さ、スリットのRの大きさ、プレートの厚さにパラメータを置きその影響は明らかにされている。しかし、これらのダンパーを軸方向変形に適応させた研究は少ない。

本研究では、ストラット幅 w 、ストラット本数 n にパラメータを置きその影響を確かめる。スリットダンパーは図5 (a) のように軸部（引張を加える方向）を柱、それによって引き起こされるせん断力が加わる部分を梁と考えたラーメン構造として簡易的に考えることができる。しかし本来せん断変形する箇所を用いる一列スリットダンパーをそのまま適用すると、偏心することが予想されるためスリットを二列に配置した図6のような形状の鋼製ダンパーを提案する。図5 (a) を (b) のように簡易的なラーメン構造として考えることができる。一方のスリット端部の塑性部が他方のスリット端部に及ぼす影響を確かめるため、中心軸のストラット間距離にもパラメータを置くことにした。またスリットの配置についてもスリットの並びを並列にするのと一方をスリット幅の半分の距離だけずらした千鳥形状とでは、(c) のようなラーメン構造としてモーメント図の違いが見られる。ひずみの分布がより一様になると考えられる千鳥形状についてもその影響を確かめることにする。

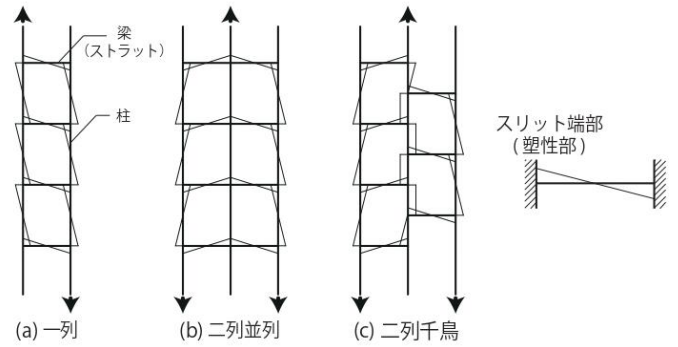


図5 簡易モデル

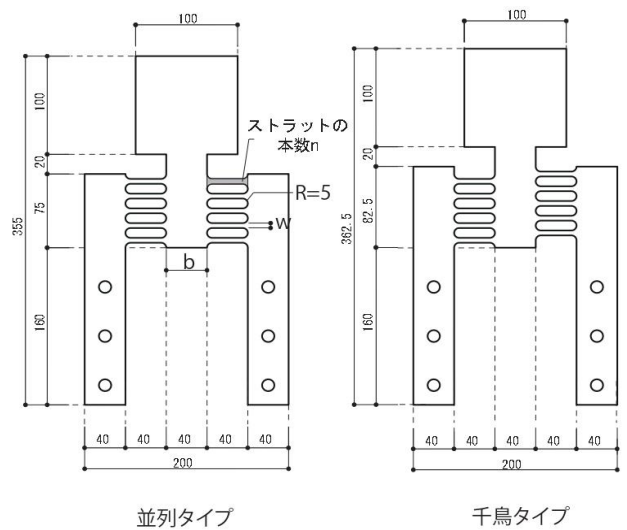


図6 提案する鋼製ダンパー形状

表1 材料特性

| 試験片名 | 板厚t (mm) | 降伏点 σ_y (N/mm ²) | 引張強さ σ_u (N/mm ²) | 降伏比 (%) | ヤング率E ($\times 10^5$ N/mm ²) | 一様伸び (%) | 破断伸び (%) |
|------|----------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------|---|----------|----------|
| 試験片1 | 9 | 305 | 392 | 77.9 | 200342 | 21.7 | 39.2 |
| 試験片2 | | 297 | 388 | 76.7 | 204865 | 21.1 | 38.7 |

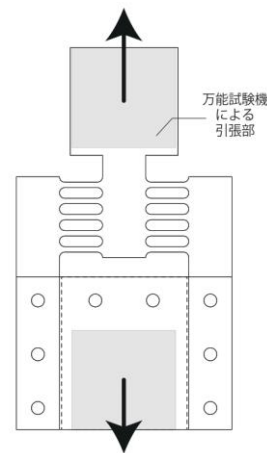


図7 引張部



図8 载荷の様子

4. 引張試験による鋼製ダンパーの特性検証

4.1 単調引張試験

a. 実験概要

試験体に用いた鋼材の機械的性質を表1に示す。単調引張試験に使用した試験体一覧を表2に示す。実在する柱脚金物と同等の荷重で先にスリット部が塑性化するように部材寸法を決めた。これら試験体を図7のように取り付け、図8のように万能試験機により载荷する。

b. 実験結果・考察

図9に単調引張試験の結果を示す。横軸に各変位に相当する変形角を降伏し始めた時の変形に相当する θ_y で無次元化したもの、縦軸に各荷重をスリットを両端固定と考えたときに全スリットの端部が全塑性モーメントに到達したときの荷重 P_u で無次元化したもので整理した。 $\theta/\theta_y=40$ あたりから耐力が急激に上昇していくのは载荷が進むにつれてスリットが軸方向引張に抵抗するようになるからである。

試験体2の最大 P/P_u が他の試験体より低いのは、ストラット幅が大きいことが図5のラーメンモデルにおける梁断面における塑性断面係数が大きくなり他の試験体よりも全塑性時の荷重が大きいためである。

図10に破断の形状の違いを示す。試験体1は左写真のようにスリット部で連続的に破断したが、他の試験体は右写真のように首で破断し、一気に耐力を失った。その様子は図9からもわかるが、**単調载荷の時、首は累積塑性歪を受けないので脆性破壊が生じない。**一方でストラット端部は累積歪を受け、疲労によって耐力が低下することが原因であり、それがこの破壊の違いを生んだ。しかし、どの条件でこれらの破壊形状を決めるのかは検討の余地がある。

4.2 繰返し引張試験

a. 実験概要

実験で用いた試験体は、単調の引張試験で用いた表2と同じである。2回の漸増繰返しのみの試験で、変形角 $1/120, 1/60, 1/40, 1/30, 1/25, 1/20, 1/15, 1/10$ (rad) に相当する変位サイクルで、 $1/10$ までたどり着いたら同振幅で破断するまで繰り返す。

b. 実験結果・考察

図11に各試験体の繰返し試験と引張試験の結果を示す。縦軸、横軸は図9と同様とし、単調と繰返しを比較すると同様の復元力特性を示した。変形角 $1/10$ rad に相当する変位 30mm のサイクルでは、1サイクル目にストラット部に亀裂を生じ、2サイクル目ではそれによる耐力低下がみられる。

試験体1、4を比較したときに繰返しの履歴に差が

表2 試験体一覧

| 試験体 No. | 試験体名 | 板厚t (mm) | スリット長さ (mm) | スリット端部R (mm) | ストラット本数n (本) | ストラット幅 (mm) | スリット間距離 (mm) |
|---------|------------|----------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| 1 | N10W5-40 | 9 | 40 | 5 | 10 | 5 | 40 |
| 2 | N10W7.5-40 | | | | 16 | 7.5 | |
| 3 | N16W5-40 | | | | 10 | 5 | 25 |
| 4 | N10W5-25 | | | | | | |

※N10W5-40
 スリット間距離 θ
 ストラット幅 w
 ストラット本数 n

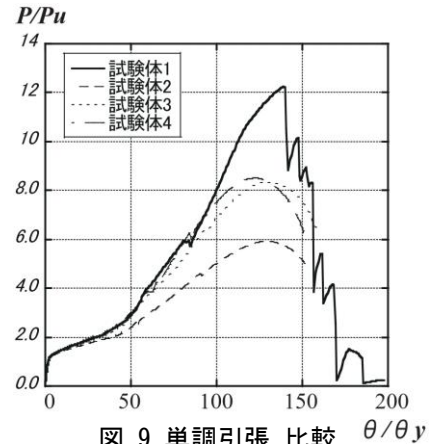
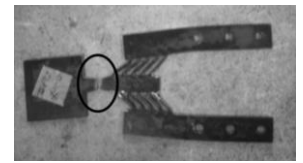
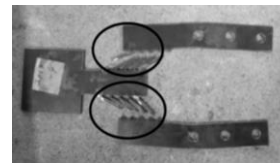


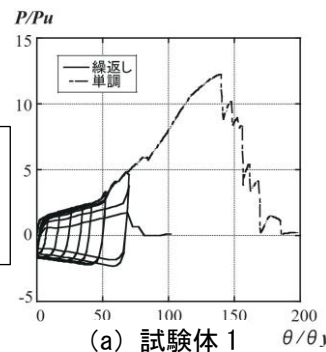
図9 単調引張比較 θ/θ_y



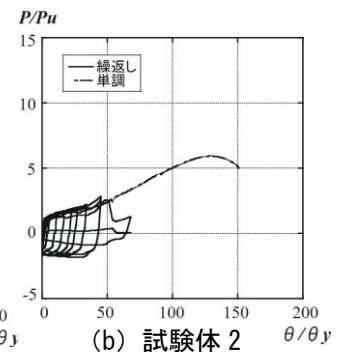
(a) スリット部で破断

(b) 首で破断

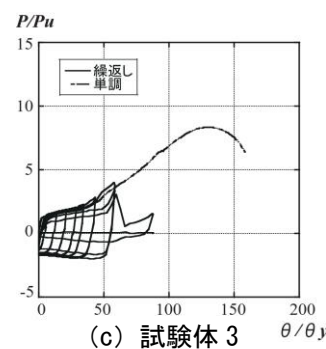
図10 破断形状の違い



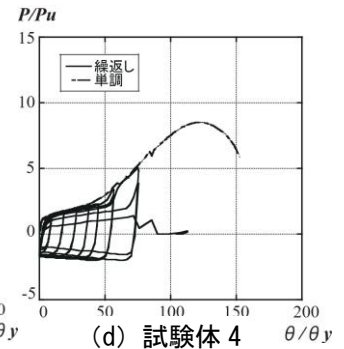
(a) 試験体1



(b) 試験体2



(c) 試験体3



(d) 試験体4

図11 繰返し引張比較

みられないことから、スリット間距離は試験体4の25mm程度あれば各列のスリット端部の塑性部が互いに干渉しないため、繰返しの履歴に関係しないことが分かった。また試験体1、2、さらに試験体1、3を比較したときに、ストラット本数を増やした場合、ストラット幅を大きくした場合で紡錘形が小さくなる。

5. 復元力特性の改善

図12に各試験体の累積エネルギー吸収量の推移を示す。これを見ると大変形時まで安定してエネルギー吸収しているのがわかる。また図13では試験体1の累積エネルギー吸収量E1に対して各パラメータを変化させたときのエネルギー吸収性能を表している。試験体4が $E/E1 \approx 1.0$ を示すことから、スリット間距離はエネルギー吸収性能には関係ないことがわかる。試験体2、3を見るとストラット幅を大きくした試験体2は1.8倍ほどで、ストラット本数を増やした試験体3は1.4倍ほどとなった。総断面積では試験体3のほうが大きい、エネルギー吸収量は試験体2のほうが大きい、エネルギー吸収性能を向上させるにはストラットの幅を大きくするほうが有効だと分かった。

図1の建物の柱65本のうち約2割に当たる12本の傾斜復元力が発生する柱の両面に試験体1を取り付けたとすると、図14のような復元力が加わり、図15より損傷限界付近では、デバイスよりも柱の傾斜復元力が支配的で、 $1/120\text{rad}$ 以降耐力が下がり始める柱の傾斜復元力に対し、デバイスの耐力上昇が起き柱自体の改善傾斜復元力は図のように上昇傾向に改善される。結果安全限界付近では、約50kNの新たな耐力保持が見込め、デバイスとしての機能を果たしていると分かる。

6. 結

本稿では、提案したデバイスによるエネルギー吸収性能と柱の傾斜復元力の改善を確かめた。

1. ストラット間距離は塑性部がスリット端部に広がる範囲が極めて微小なため、25mmもあれば干渉せず、耐力、エネルギー吸収性能に影響しないが、短すぎると相対的にストラットの総断面積より小さくなりストラット部ではなく首で破断するので注意が必要である。
2. 試験体1に対して試験体2、3のエネルギー吸収量を比較したとき試験体2のほうが大きいことから増えた単位断面積当たりのエネルギーはストラット本数を増やすより、ストラット幅を大きくしたほうが大きいことがわかった。

3. 本試験で用いた試験体寸法のデバイスであれば、柱の全本数の2割に当たる傾斜復元力を起こす柱に取り付けた場合、ダンパーとして十分に機能することが確かめられた。

今後デバイスを実際に取り付けた場合、それが建物全体の減衰性能にどう影響するか、どのように柱に取り付けるかは今後の課題にしていきたい。

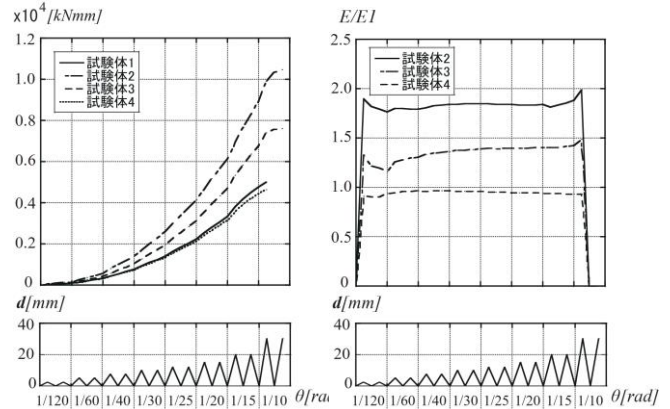


図12 エネルギー吸収量と
 荷重サイクル

図13 パラメータによる
 エネルギー吸収量の変化

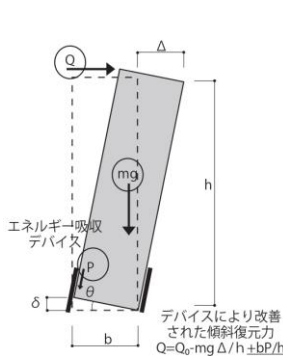


図14 改善した
 傾斜復元力

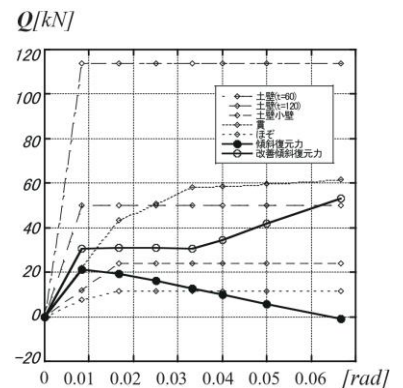


図15 耐震要素別復元力特性

【参考文献】

- 1) 坂静雄：社寺骨組の力学的研究(第1部 柱の安定復元力)、日本建築学会大会論文集、pp.252-258、1941.4
- 2) 前野将輝、西塔純人、鈴木祥之：伝統木造軸組の実大実験による柱に加わる力の釣合関係と柱傾斜復元力特性の評価、日本建築学会構造系論文集、第615号、153-160、2007.5
- 3) 勝山由佳子、焦瑜、河野守：形状の異なる鋼製スリットダンパーの疲労特性に関する実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.847-848、2013.8
- 4) 佐藤彰展、岩田範生、福地博晃、曾田五月也：鋼材ダンパーのエネルギー吸収能力に関する基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.935-936、1999.9
- 5) 伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアル-限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計法