

被災建物の目視点検を補助する変形記憶型の制振デバイス

倉田真宏，京都大学防災研究所

1. はじめに

大地震への備えとして，制振構造に代表されるように損傷を抑制する工夫が重要であることは言うまでもない．加えて，地震時の混乱を低減するためには，避難が必要か，また継続して建物を使用しても良いか，といった判断を素早く下せる環境づくりが肝要である．南海トラフ巨大地震の経済的な被害推定（中央防災会議，平成25年3月）では，生産活動の低下による損失は30兆円と試算されている．特に，2004年の新潟県中越地震のように大きな余震が続いた場合には，施設や設備の総点検を何回も繰り返すこととなり，その後の復興に大幅な支障を来す．

現在開発が進む構造ヘルスマニタリング技術では，従来の建築構造になじみがないセンサー類を配備し運用しなければならず，初期・維持コストの面も含めて一般的な建物への適用には課題が多い．そこで著者らは，一般的な構造物に用いられる制振部材にセンサーとしての機能を付与し，建物の最大層間変形角を地震後に目視で素早く察知するデバイスの開発に取り組んできた．本稿は提案デバイスの検証試験について報告する．

2. 変形記憶型の制振デバイス

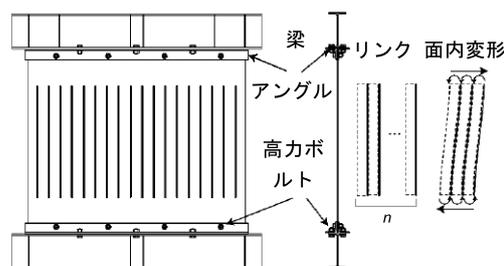
スリット入りせん断鋼板壁

既存建物への適用例が多いエネルギー消費部材として，スリット入りせん断鋼板壁がある．図1に示すように，鋼板壁は上下の梁に接合され，せん断変形により地震力に抵抗する．スリットに囲まれた鋼板短冊（ここでは，リンクと呼ぶ）を連続形成することで，板の全体座屈を抑制し，大変形に至るまで安定な履歴性状を確保したものである．

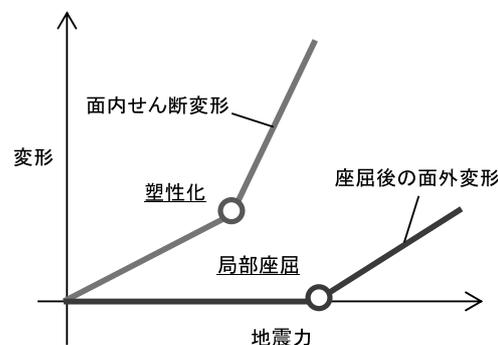
変形記憶機能

図2に地震力を受けたリンクの変形を模式する．鋼板壁にせん断力が作用すると，各リンクは柱のように面内にせん断変形し，大きな地震力ではリ

ンクの端部が塑性化する．さらに大きな地震力では，塑性化部に局部座屈が発生し，リンク全体が急激に面外に回転を始める．面内変形は弾性域から連続的に進行するという点でアナログ（連続的）な指標であり，損傷度を推定するためには残留した変形量を正確に計測しなければならない．一方で，面外変形は残留する変形がゼロの状態から急激に大きくなるという点で，デジタル（離散的）に評価できる可能性があり，本研究ではこの特性を変形記憶機能として利用する．



(a) スリット入りせん断鋼板壁

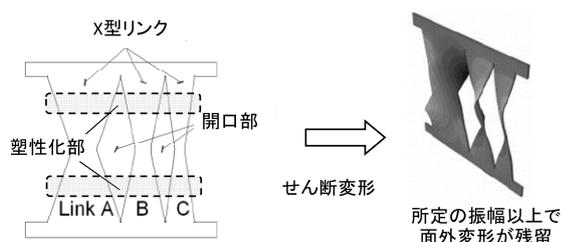


(b) 地震力による変形の進行

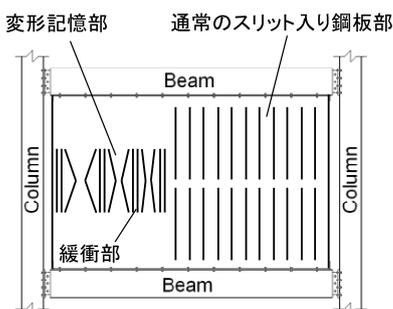
図1 スリット入りせん断鋼板壁

X型リンクへの展開

先述のスリット入りせん断鋼板壁では，1) 大変形でリンク端部が破断する，2) 面外変形の量が限定的である，という問題があった．そこで本研究では，図2aに示すように開口部の形状を工夫することで塑性化領域をリンク中央と端部の中間部に集中させた，X型リンク付き鋼板壁を開発した．1枚の鋼板にひし形の開口部をレーザーカ



(a) 開口部を設けた鋼板の面外変形



(b) 取り付けイメージ図

図2 変形記憶型の制振デバイス

ットすることで、幅の異なる複数のX型リンクの集合体としている。また図2bに示すように、一枚の鋼板に変形記憶部と通常のスリット入り鋼板部を組み込むことで、変形記憶機能を有しながら高エネルギー消費機能も保持した制振デバイスが可能となる。

設計要件

有限要素法を用いた数値解析により、局部座屈の発生に伴う面外変形が顕著になるせん断変形角は、リンクの幅厚比により制御できることを突き止めた。したがって、図2aのように幅厚比の異なるリンクを組み合わせることで、変形の増大とともに幅の大きなリンクから順に面外に座屈する制振デバイスができる。局部座屈は塑性化部に発生するため面外変形は除荷後も残留する。ただし、リンクのアスペクト比が極端に大きい場合には、リンクの座屈モードが異なり（全体座屈が局部座屈に先行）、幅厚比による制御はできない。

3. 検証試験

本助成を受けて、変形記憶型の制振デバイスの性能について、これまでに獲得した知見を実験により検証した。

載荷装置と基準試験体

載荷装置を図3に示す。同一の鋼板試験体を二

つの図のように設置し、鉛直方向に設置した油圧ジャッキにより試験体にせん断変形を与えた。リンクの形状や高さなどをパラメタとして実験を実施した。本稿では、図4に示す基準試験体の結果を報告する。試験体は実大の約1/5の寸法（壁部高さ360mm）とし、鋼板には板厚4.5mmのSS400材を使用した。幅の大きい順にLink 1, Link 2, およびLink 3の目標せん断回転角を2%, 3%, および4%として、有限要素法解析の結果に基づき各リンクの幅（幅厚比）を決定した。リンク中央部が回転し、隣り合うリンク同士に隙間ができた時点（中央羽出し部端部の相対変位が板厚を超えた時点）を面外変形の発生確認の指標とした。

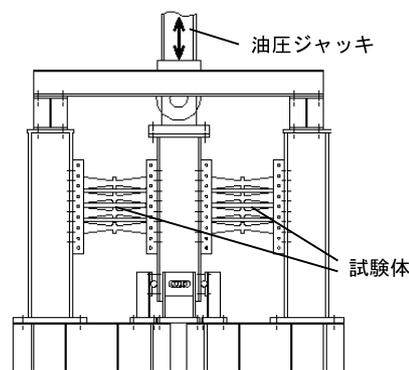
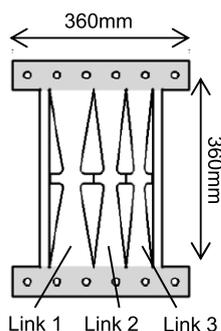


図3 載荷装置



(a) 形状 (b) 繰り返し載荷時の面外変形

図4 基準試験体

載荷履歴には、漸増繰返しと地震応答の2種を使用した。前者では、試験体のせん断変形角（面内変位をリンク高さで除したもの）が5%に達するまで振幅を漸増させ、各振幅において載荷を2回繰返した。後者では、地震型応答履歴として広帯域地震動に対する1質点系の弾塑性応答変位を入力波として与えた。

漸増繰返し载荷の結果

漸増繰返し载荷を与えた試験体での面外変形履歴を図5に示す。図の横軸はせん断変形角、縦軸は各リンク中央部の面外への回転角を示している。各リンクは所定の目標せん断変形角で順に面外に急激に回転した。回転角が板厚分に達したせん断変形角は2.5%、3.5%、4.5%となり、解析に基づく設計に比べて0.5%ずつ遅れたが、これは試験体端部の固定度が解析に比べて低かったことに起因する。鋼板端部の固定度については、解析モデルの境界条件の設定法の工夫や変形角への補正係数の導入などを考えている。

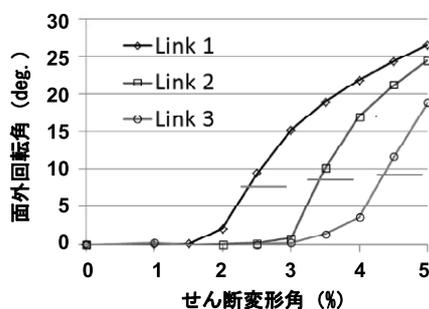


図5 繰返し载荷下の変形

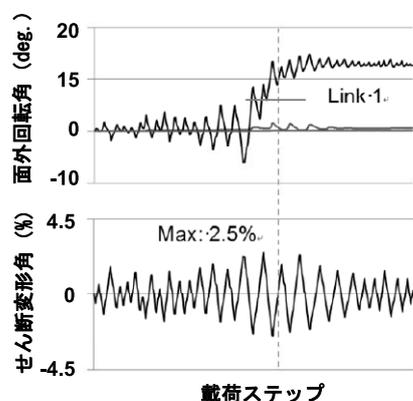


図6 地震応答载荷下の変形

地震応答载荷の結果

前節の結果に基づいて、最大せん断変形角を2.5%、3.5%、4.5%に調整した地震応答変位を载荷履歴として採用した。入力とする地震応答を2.5%とした場合には、Link 1のみが面外に回転した。図6に入力（せん断変形角）とLink 1中央部の面外回転角の履歴を例として示す。Link 1は入力の最大値を経験した後に面外に変形を始め、所定の回転角に到達した。Link 2とLink 3については、同試

験体を用いて入力の最大値を3.5%と4.5%としたときに、同じく面外変形が確認された。

エネルギー消費性能

試験体のせん断力-せん断変形角関係を図7に示す。図の横実線は最大耐力の理論値を表す。せん断変形角0.75%で塑性化した後、2%前後で理論値に対し97%の最大耐力に至った。その後の耐力は面外変形が進行した2%以降徐々に減少したが、5%に至っても最大値の83%を保持した。また面外座屈の発生以降はピンチングが発生するが相応のエネルギー消費性能を有している。大変形においてもより大きなエネルギー消費性能を確保するためには、図2bで示したように、通常のスリット入り鋼板部との併用が考えられる。

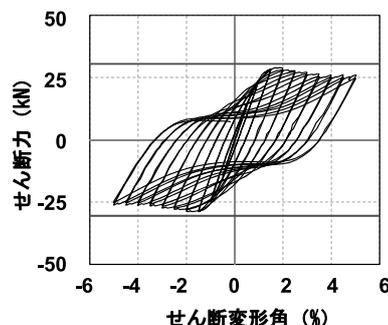


図7 せん断力-せん断変形角関係

4. まとめ

地震時に被った最大変形を記憶する制振デバイスとしてX形のリンクを有するせん断鋼板壁を提案し、実験においてその性能を検証した。有限要素法解析の結果からX形リンクが面外に座屈するせん断変形角は幅厚比に依存することを確認し、異なる幅厚比を持つリンクを連成した試験体を設計した。繰返し载荷および地震応答载荷の2種類の試験を実施し、リンクが面外に座屈する変形角は履歴に影響されず、主として最大変位にのみ依存することを実証した。

謝辞

本稿は、日本免震構造協会の2013年度「免震構造・制振構造に関わる研究助成」を受けて実施した。京都大学工学研究科の和留生氏、吹原慧氏、東郷拓真氏においては、本研究の遂行に大変なご助力をいただいた。ここに深く感謝の意を表す。