

柔床立体建物に対する合理的な連結制震装置の設計法

Study of Rational Design Method for Connecting Vibration Control System for Soft Floor Building

吉富信太¹・中西裕也²

Shinta Yoshitomi and Yuya Nakanishi

¹立命館大学教授 理工学部建築都市デザイン学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Department of Architecture and Urban Design, College of Science and Engineering, Ritsumeikan University

²NTTテクノクロス株式会社 (〒220-0012 神奈川県横浜市西区みなとみらい4-4-5)

NTT TechnoCross Corporation

This study examines the application of a connected vibration control system to traditional wooden buildings, which can suppress seismic response with little modification to the interior or main structure of the building. In this study, a new method is proposed to determine the optimal damper performance and placement for structural model with soft floor. By using this method, the effect of the floor stiffness on the optimal performance and placement of connected damper is examined through two numerical example models which have substructures inside or outside of the main building.

Keywords: *connected vibration control system, 3D shear model, soft floor, optimization, traditional construction method*

1. はじめに

日本に多く存在する伝統工法木造建築では、文化的価値を保存することが重視されるため、耐震補強が必要な場合にも建物に極力手を加えたくないという要請がある。建物内部に手を加えることなく地震時の応答を低減できる構法として、振動特性の異なる複数の独立した構造物を制振ダンパーで連結する連結制振構法がある。連結制振構法はこれまではビル建物への適用事例が多いが、近年では木造住宅への適用事例も見られる¹⁾²⁾。本研究は伝統構法木造建物に対して連結制振構法の適用を検討し、合理的な連結ダンパーの設計法を提案するものである。

連結制振構法に関する既往研究の多くでは、構造物のモデル化として多層建物を1質点モデルに置き換えた平面せん断モデルを用いるものが多い³⁾⁴⁾。単純化されたモデルを用いることで、伝達関数を数式で陽に表現して、そのピークの値を最小にする連結ダンパーの性能を理論的に求めることが可能である。こうしたモデル化は、建物の床の剛性が十分に大きく一体化して挙動する剛床モデルを前提としている。RC構造の床の変形を考慮した柔床モデルを用いた研究も見られるが、どこをどのように制振ダンパーで連結するのが効果的かについて十分な検討はなされていない⁵⁾。

伝統構法木造建物はRC造やS造と比べて床や屋根面の剛性が低く、柔床としての立体的な挙動が顕著である⁶⁾。本研究では伝統構法木造建物を想定した柔床立体建物に対する連結制振ダンパーの性能及び設置位置を決定する最適配置法を提案する。本稿では対象とする立体解析モデル構築に際して、現存する茅葺屋根の古民家を対象とした振動計測により得られた立体的な振動特性を参考にする。さらに床剛性を変化させることで、柔床的な挙動をする場合と剛床的な挙動をする場合での連結制振による応答低減効果の比較を行う。

2. 立体架構モデルを用いた検討

(1) モデル概要

現存する大分県中津市の茅葺屋根の古民家を参考に、構造解析ソフトSNAPを用いて、柔床挙動を示す立体架構モデルを作成する。立体架構モデルでは古民家の実測調査に基づいて各部材寸法を与え、木造建物の主たる耐力要素として土壁や小壁を表すばねや、柱梁の仕口部や天井の交差部分の柔らかさを表現するばねを使用する⁷⁾。土壁は基準サイズ試験体の実験データに基づいて、壁の幅に比例、高さに反比例するように性能を調整してばねの特性として与える。仕口についてはほぞの復元力特性を与えた回転ばねとし、ずれや抜けは生じないよう並進方向のばねには大きな剛性を与える。上記のように作成したモデルを柔床モデルとして、小屋レベルで剛床を仮定した立体架構モデルを、剛床モデルとする。

二種類のモデルの振動特性と、建物の振動を多点同時計測した結果を比較する。図2にCh6とCh13の交差部分でY方向にスイープ加振した振動挙動と加速度伝達関数を示す。伝達関数のピークより柔床モデルの方が実建物の固有周期に近いことが分かるが高振動数部分では伝達振幅の差が見られた。定性的な振動性状は柔床モデルの方が剛床モデルに比べて実建物にみられる柔床の挙動を表現できているといえる。

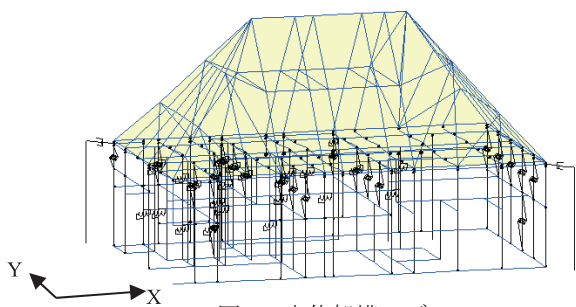
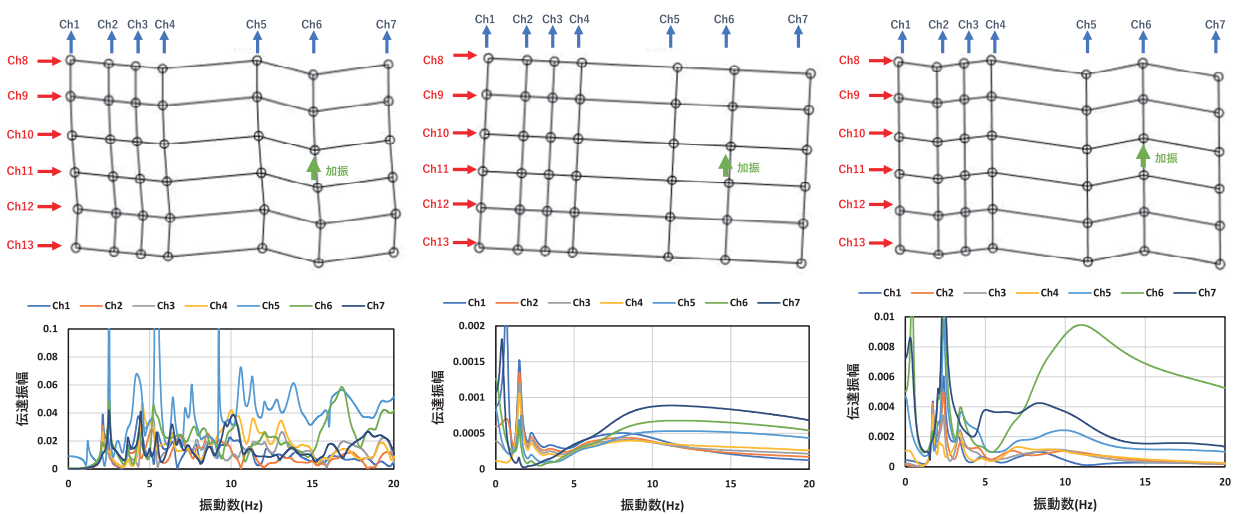


図1 立体架構モデル



写真1 茅葺屋根の古民家



(a) 実測

(b) 解析 (剛床モデル)

(c) 解析 (柔床モデル)

図2 振動性状比較

(2) 応答低減効果の検討

図3、4に示す二本のコンクリートの連結柱を建物外部に設け、小屋梁のレベルで建物と連結ダンパーにより連結し、減衰係数 C_e を0.2、2、40、80(kNs/m)に変化させた場合の応答低減効果を確認する。

図5はY方向にEl Centro 1940 NSを加えたときの応答低減率を示したもので、剛床モデルでは連結制振を用いた場合全体的に応答が減少しているのに対して、柔床モデルでは連結している両側の応答が大きく減少し、非連結部分の応答は連結部分ほど低減していないことが分かる。床剛性の違いから連結制振効果に差が生じるため、柔床建物に連結制振を用いるためには、床剛性を考慮した合理的な制振手法について検討する必要がある。

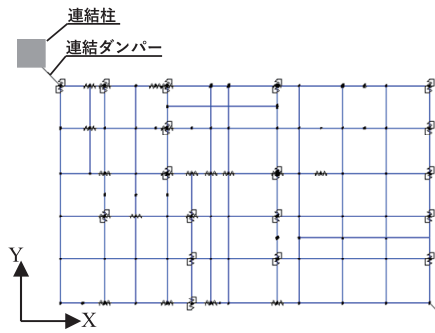


図3 モデル平面図 (小屋梁レベル)

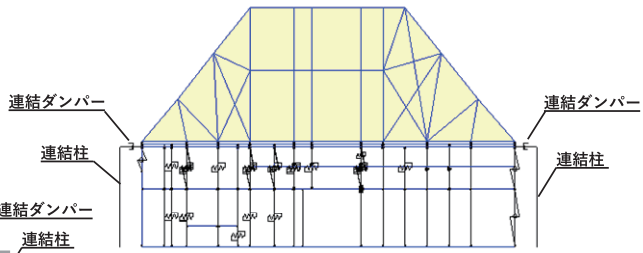
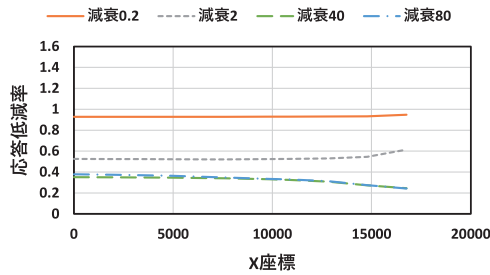
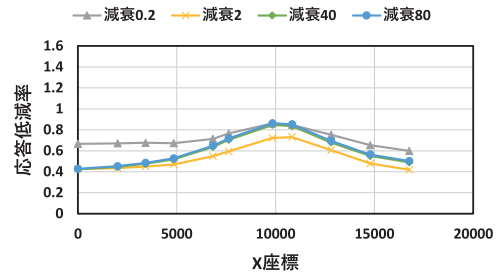


図4 モデル立面図



(a) 剛床モデル



(b) 柔床モデル

図5 応答低減率

3. 柔床立体建物の連結制振ダンパーの配置法

(1) 連結ダンパーの配置と性能の合理的決定法

立体架構モデルによる連結制振の検討では、ダンパーの位置を固定して行ったため、連結箇所を検討が不十分である。そこで柔床的な挙動を再現したモデルによって、適切な連結箇所とダンパーの減衰量について検討する。本研究ではコンクリートの連結柱と建物をダンパーで連結する連結制振構法を想定している。図6は連結柱の位置とダンパーの挿入箇所を示しており、外部連結柱の場合は18箇所、内部連結柱の場合は72箇所をダンパーの挿入箇所として設定している。

総量の指定されたダンパーを、地震時最大層間変位が最小になるように配置する問題に対し、以下の解法アルゴリズムを提案する。手順の概略は、最も応答低減効果の高い箇所に微量のダンパーを逐次付与するものである。

(step1)ダンパー量0から最適化を開始する。

(step2)現最適化ステップにおけるダンパー配置に、微量のダンパーを付与した候補解を作成する。付与する箇所は、全てのダンパー配置可能な個所のうち1か所とし、ダンパー付与箇所の異なる全ての候補解から最大層間変位が最小となる解を選択する。ここでの最大層間変位は、全構面の変位の中で最大のものである。

(step3)選択した候補解を保存し、step2に戻る。

この手順を任意のステップ数だけ繰り返すことで、各ダンパー総量レベルに対応した最適ダンパー配置を連続的に追跡可能である。なお本手法はダンパー総量レベルの変化に対して最適性条件が連続することに基づく手法のため、減衰係数の増分は解の連続性が保たれるよう適切に設定する。

(2) モデル概要

上記アルゴリズムは、2章のような立体架構モデルや、より簡便なせん断モデルなど任意のモデルに適用可能である。以下では、立体架構モデルよりも計算負荷が小さく、床剛性を考慮したモデルである立体せん断モデルを用いて検討する。

柔床立体せん断モデルは壁の剛性に相当する鉛直構面と、床の剛性に相当する水平構面から構成される。鉛直構面については、前項で対象とした茅葺屋根の古民家の耐力要素配置を基に設定する。水平構面は柔な

構面であるため、4辺がそれぞれ独立した変形を示す。図8は水平構面の変形を示しており、例としてy1flame側のX方向変位による復元力 Q_x は以下のような式で定義される。

$$Q_x^{[y1]} = (L_x/L_y)Gk(u^{[y2]} - u^{[y1]}) \quad (1)$$

また、Y方向変位による復元力 Q_y はモーメントのつり合いから以下のように表せる。

$$Q_y^{[x1]} = Gk(u^{[x2]} - u^{[x1]}) \quad (2)$$

本研究では床せん断剛性 GK を100、1000、10000、100000(kN/rad·m)に変化させることで、最適なダンパー配置における床剛性の影響を確認する。図9はX6、Y2地点からY方向にスイープ波を加えた時の振動挙動を示したものである。 $Gk=100$ の時は加振部のみが大きく揺れる柔床的な挙動を示しているのに対して、床剛性を大きくした $Gk=100000$ の時は一体化して揺れる剛床的な挙動を示していることが分かる。

(3) 解析結果

床剛性を変えたモデルを対象に、図6の外部連結柱と内部連結柱のケースについて連結ダンパーの最適配置を行った結果を示す。なお、解析にはEl Centro 1940 NSの地震波を使用し、X方向とY方向に同時に加振する。

図10は床剛性の違う立体せん断モデルに、ダンパーの最適配置を行った結果を示している。図10の最大層間変位の比較では、外部連結柱の場合は床剛性の違いによって最大層間変位に差が生じているのに対して、内部連結柱の場合には最大層間変位に差がほとんど生じていない。すなわち、外部連結柱の場合は、制振効果を高めるには床剛性を大きくする必要があるのに対し、内部連結柱の場合は床剛性を大きくすることなく同様の連結制震効果が得られている。

連結柱の設置位置による最大層間変位の違いについて考察するために、床剛性が最も小さい $Gk=100$ モデルの構面毎の変位について確認する。図11、12は $Gk=100$ モデルの各構面の最大層間変位を表している。X方向に関してはY2構面が、Y方向に対してX5構面が最大応答を示している。図11、12の比較から外部連結柱の場合は内部連結柱の場合に比べて、X、Y方向の最大層間変位が大きいことが分かる。

図13、14はダンパーの配置を表しており、連結部の線の太さはダンパーの減衰量、建物部の線の太さは壁剛性を表している。図12の(a)と(b)を比較すると、(a)はX5構面の外壁にダンパーが集中しているのに対して、(b)は外壁の端にダンパーが集中している。これは床剛性が小さい建物の場合、壁剛性の小さく応答が大きい構面に耐震補強を加えることが効果的であるためだと考えられる。また、図13と図14の(a)を比較すると、図13ではX5構面とY2構面の交差部にダンパーが集中していることが分かる。このことから $Gk=100$ モデルのX方向の最大応答に差が生じたのは、外部連結柱ではX5構面とY2構面に同時に耐震補強を加えることができなかったためだと考えられる。また、Y方向の最大応答の違いは、連結ダンパーの角度によるY方向への低減効果の違いだと考えられる。上記より、床剛性が小さい柔床的な挙動を示す建物では、応答の大きい構面にダンパーを設置することで、剛床の建物と同様の連結制震効果が得られることが分かった。

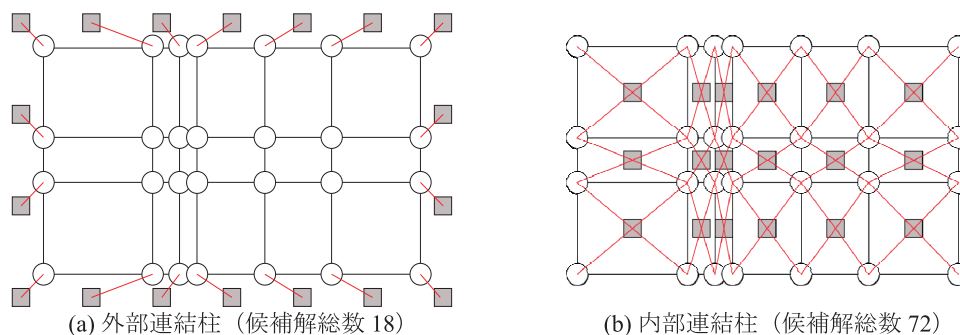


図6 ダンパーの候補解

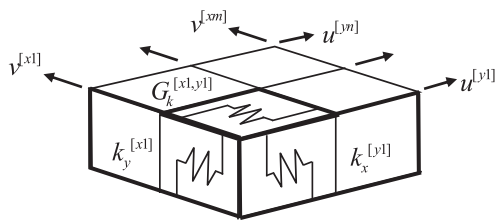


図7 立体せん断モデル

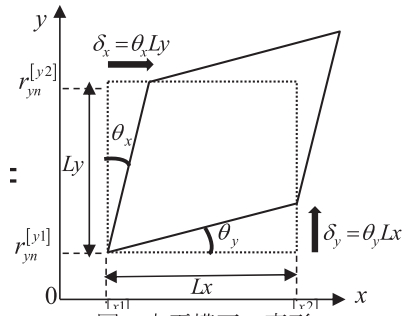
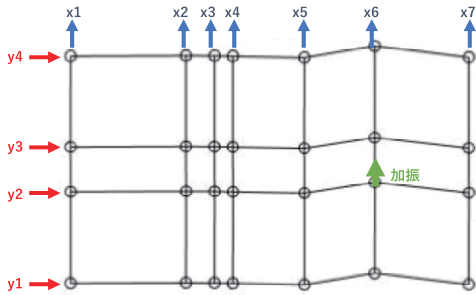
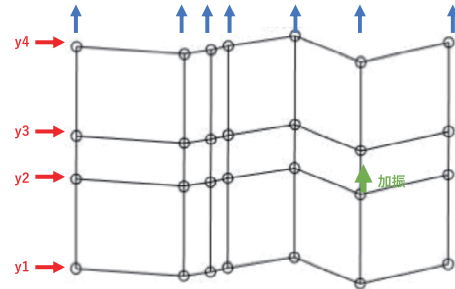


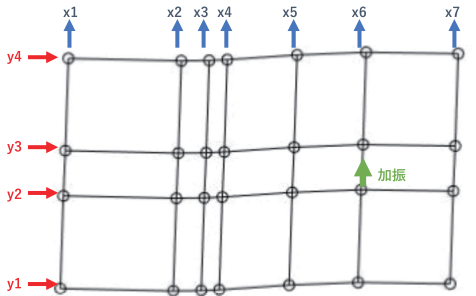
図8 水平構面の変形



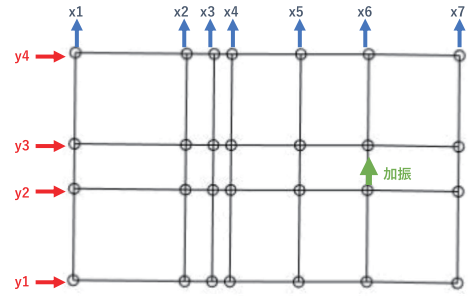
(a) $Gk=100$



(b) $Gk=1000$

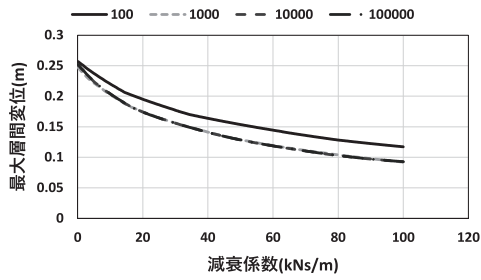


(c) $Gk=10000$

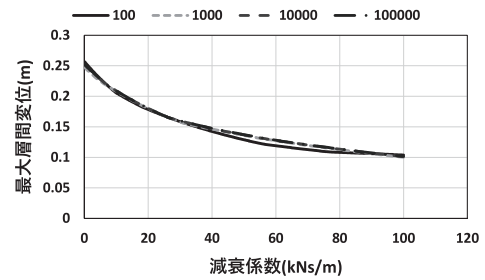


(d) $Gk=100000$

図9 立体せん断モデルの振動挙動

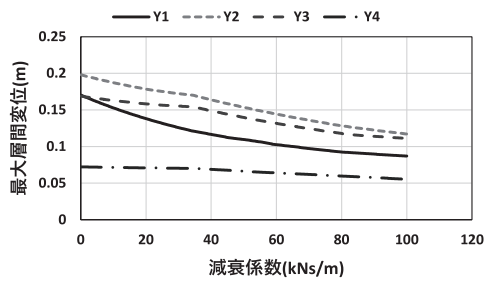


(a) 外部連結柱

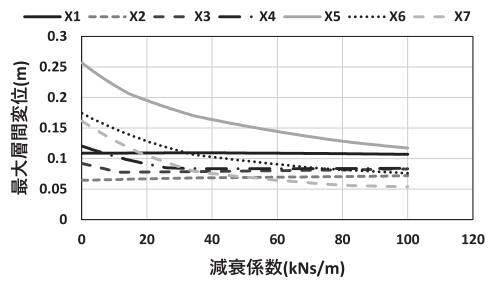


(b) 内部連結柱

図10 最大層間変位

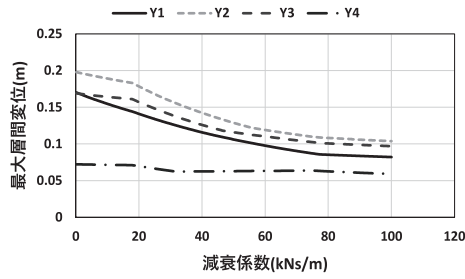


(a) X方向応答

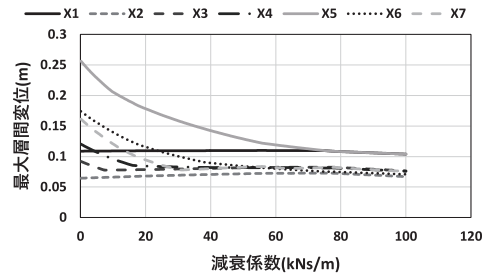


(b) Y方向応答

図11 $Gk=100$ モデルの各構面の最大層間変位(外部連結柱)

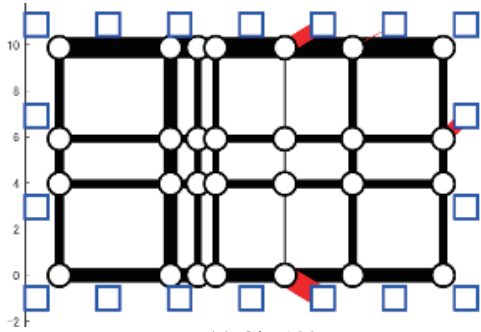


(a) X 方向応答

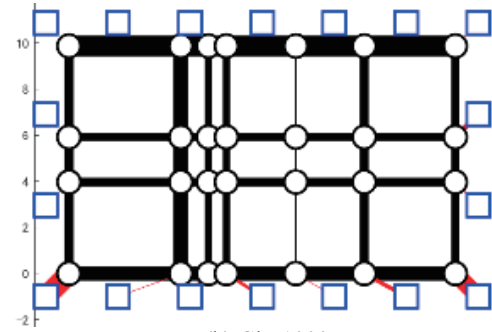


(b) Y 方向応答

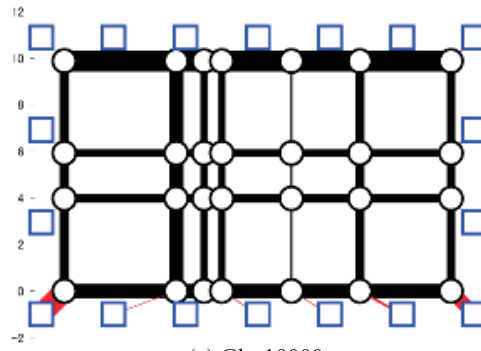
図 12 Gk=100 モデルの各構面の最大層間変位(内部連結柱)



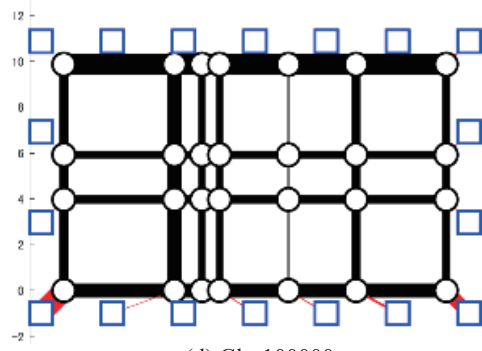
(a) Gk=100



(b) Gk=1000

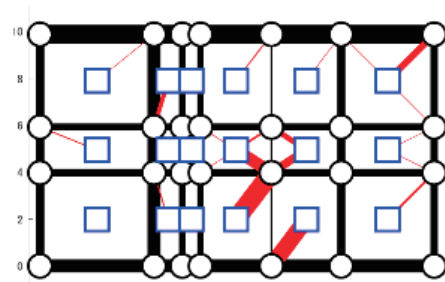


(c) Gk=10000

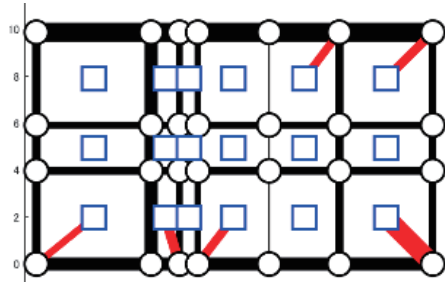


(d) Gk=100000

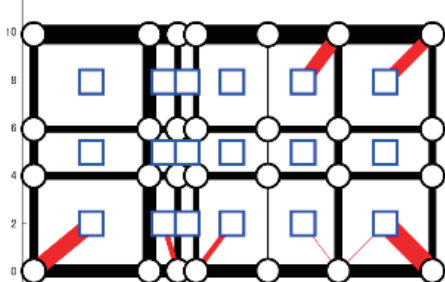
図 13 ダンパーの配置図 (外部連結柱)



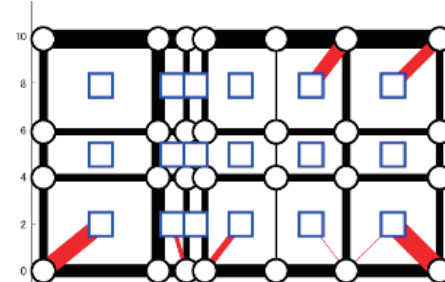
(a) Gk=100



(b) Gk=1000



(c) Gk=10000



(d) Gk=100000

図 14 ダンパーの配置図 (内部連結柱)

4. 連結柱本数の違いが制振効果に及ぼす影響

前章では18本の連結柱を設置することで十分な候補解を設定していたが、実際の建物に18本もの構造物を追加するのは現実的ではない。そこで、最もダンパーの連結数が多かった二本の連結柱のみを設置した状態で、新たに最適配置を追跡する。図15に床剛性の違う二種類のモデルの最大層間変位を示す。外部連結柱の場合は、床剛性が大きいモデルは連結柱の本数に関わらず最大応答を低減することが出来たが、床剛性が小さいモデルでは最大層間変位に差が生じた。このことから、少量の連結柱を外部に設置して応答を低減するためには、十分な床剛性が必要であることが分かる。

内部連結柱の場合には、床剛性に関わらず、少量の連結箇所により応答低減効果が見込める。以上のことから少量の構造物との連結による制振手法が柔床建物に対しても適用できることが分かった。

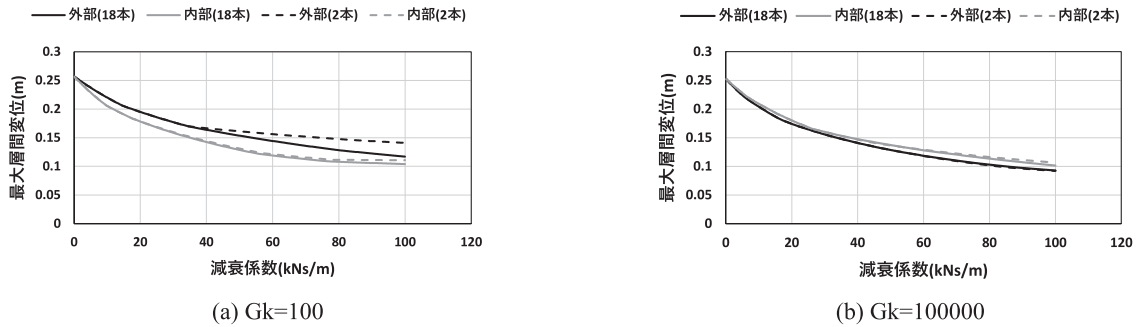


図 15 最大層間変位

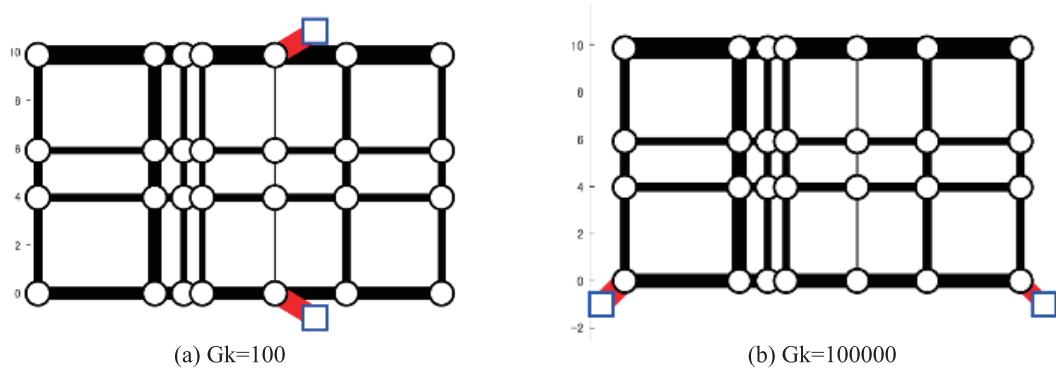


図 16 ダンパーの配置図 (外部連結柱)

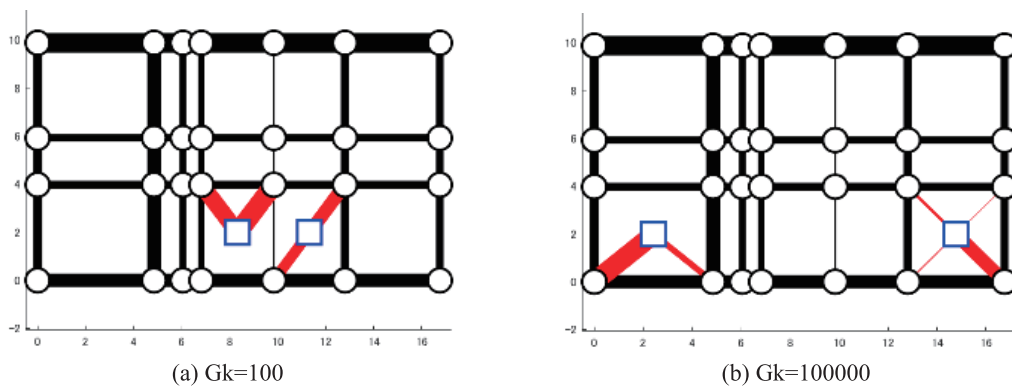


図 17 ダンパーの配置図 (内部連結柱)

5. まとめ

柔床的な挙動をする伝統構法木造建物を想定した連結制振構法について検討し、以下の成果を得た。

(1) 床剛性の異なる立体架構モデルの振動特性及び、連結制振の応答低減効果の比較を行い、床剛性が連結制振の効果に影響を及ぼすことが示された。

- (2) 立体モデルの連結制振構法の連結ダンパーの性能と配置の合理的決定法を提案し、数値例題で妥当性を示した。
- (3) 提案した手法を用いて、柔床立体せん断モデルの床剛性の違いや、連結柱の位置を建物外部と内部に変えた場合や、連結柱の本数を変えた場合について、連結制振による応答低減効果について検討した。

謝辞：本研究を実施するにあたり、元立命館大学学生の酒井陽太氏、青木幸大氏の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 福本義之, 西村勝尚, 笹本克紀, 片岡大：連結制振構造を利用した超高層RC造建物の構造設計, コンクリート工学, Vol.56, No.4, 2018.4
- 2) 服部梨沙, 辻聖晃：鋼製独立柱とのダンパー連結による木造住宅の耐震性能向上法（2階補強と併用する場合の設計手順）, 鋼構造論文集, 第24巻, 第94号, pp.23-34, 2017.6
- 3) 蔭山 満, 安井 譲, 背戸 一登：多モード連結制振を対象とした連結バネとダンパーの最適配置に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 65 巻, 538 号, pp.79-86, 2000.
- 4) 村瀬充, 竹脇出：慣性質量ダンパーを用いた連結制振構造の最適慣性質量ダンパー量, 日本建築学会構造経路文集, 第86巻, 第784号, pp912-923, 2021.6
- 5) 竹内 徹, 廣重 圭一, 前原 航, 柴田 恵実, 塚本 由晴, 能作 文徳：コア壁と柔架構を制振部材で連結した低層建物の構造設計-東京工業大学地球生命研究所棟-, 日本建築学会技術報告集, 第22巻, 第51号, pp.549-554, 2016.6
- 6) 新谷謙一郎 吉富信太：木造建物を想定した柔床多層多構面モデルのシステム同定法、日本建築学会学術講演梗概集、2016.
- 7) 木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会：伝統工法を生かす木造耐震設計マニュアル、学芸出版社、2004.