

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289184

研究課題名(和文)制振床システムの実用化をめざした構造性能・環境性能・生産性に関する総合的検証

研究課題名(英文)Comprehensive verifications on structural performance, environmental performance and productivity of seismic floor system for practical realization

研究代表者

聲高 裕治 (KOETAKA, YUJI)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80343234

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,800,000円

研究成果の概要(和文)：建物の地震応答の低減と解体作業性能の向上を意図した「制振床」を実用化する際の課題のうち、以下の6項目を検討した。高分子材料の選定、地震応答予測法の構築、多層弾塑性骨組への適用性検証、床組の面内剛性と面内耐力の確認、床の鉛直振動性状の確認、施工性・解体性の確認。以上の総合的な検証の結果、制振床を実用化するための技術的資料が蓄積され、特に～については設計時に用いる評価法の構築または設計時の留意点の確認を達成することができた。

研究成果の概要(英文)：Comprehensive verifications as following for practical realization of seismic floor, which has the advantages that seismic performance and productivity under dismantlement are superior to that of the conventional floor slab, were conducted; (1) Selection of polymeric material for seismic floor, (2) Formulation of prediction method of maximum responses of building structure with seismic floor, (3) Experimental verification of multi-story elasto-plastic structures with seismic floor, (4) Verification of in-plane stiffness and in-plane strength of floor, (5) Verification of vertical vibration characteristics of seismic floor, and (6) Verification of productivity of seismic floor. As a result, useful technical data and knowledges were obtained from these verifications. In particular, for the purpose of the design of seismic floor, the evaluation methods were proposed and points to notice were revealed about tasks from (1) to (4).

研究分野：建築構造・材料

キーワード：建築構造・材料 防災 鋼構造 床スラブ 制振

## 1. 研究開始当初の背景

建物の床には、構造的な性能・環境性能・生産性など多様な性能が求められる。多くの建物で用いられている RC 床スラブは、このような要求性能を包括的に満足するものであるが、その負担重量は建物全体の 5~7 割程度と比較的大きく、地震時の慣性力を生じさせる主因となっている。また、鋼構造建物の RC 床スラブは、頭付きスタッドや焼抜き栓溶接によって梁に結合されており、解体する際、床スラブと梁の分離作業に多くの労力を要するだけでなく、解体後の梁の損傷が避けがたく、鋼部材のリユースの妨げとなっている。

このような問題点に対して、研究代表者らは鋼構造建物に用いられる従来の RC 床スラブの施工性を確保しつつ、鋼部材のリユースに対応し、地震時に骨組に作用する慣性力を減らす機能を併せ持った床システムを提案している。この床システムは、図 1 に示すように、高分子材料の両面に鋼板を接着し、これを鋼梁と床スラブの間に挿入するものあり、高分子材料のエネルギー消費(減衰)によって地震応答を低減することができるため、本研究では「制振床」と呼んでいる。

これまで(平成 24 年度以前)の検討では、高分子材料にアクリル系粘弾性体を用いた 1 層小型模型の建物を対象とし、時刻歴応答解析と振動台実験によって応答低減の効果を確認した。また、粘弾性体に床重量を負担させた場合、面圧の増大に伴い応答低減効果が減少するため、面圧による等価剛性の変化が小さい高分子材料の使用が望まれることを指摘した。

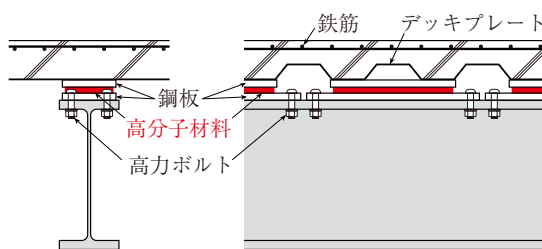


図 1 制振床

## 2. 研究の目的

以上の背景に基づいて、本研究では以下に示す 6 項目の課題を検討し、制振床の実用化に向けた技術的資料を蓄積することを目的とする。

### (1) 高分子材料の選定と圧縮特性の評価

高分子材料に床重量を負担させた場合でも安定したエネルギー吸収性能を発揮するものを選定する。また、高分子材料の圧縮変形の算定法を構築し、床重量の大きさに応じて高分子材料の詳細を決定する手法を検討する。

### (2) 制振床を適用した応答評価法の構築

これまでの検討では、時刻歴応答解析や振動台実験によって応答低減効果を確認しているが、応答低減のメカニズムの把握につい

ては不十分な点が見られる。時刻歴応答解析を用いずに制振床を適用した建物の最大応答を把握できる手法を構築することで、応答低減効果を理論的に明らかにする。

### (3) 多層弾塑性骨組への適用性検証

これまでの検討では 1 層小型模型の建物モデルに対して振動台実験を実施してきたが、実ディテールを有する場合の挙動や課題については明らかではない。2 層鋼構造建物を対象とした振動台実験を通じて、制振床を適用する際の課題を確認する。

### (4) 床組の面内剛性と面内耐力の確認

制振床を適用した鋼構造建物では剛床仮定が成立しないため、床組の面内剛性や面内耐力の評価が必要となる。制振床の面内剛性や面内耐力を確認するために、静的載荷実験を実施する。

### (5) 床の鉛直振動性状の確認

床スラブの鉛直振動性状を確認するために鉛直方向の振動実験を行い、制振床と従来の床の鉛直振動特性を比較する。

### (6) 施工性・解体性の確認

制振床の施工性・解体性を確認するために、上記(3)の試験体の製作時と解体時に作業性を確認する。

## 3. 研究の方法

### (1) 高分子材料の選定と圧縮特性の評価

高分子材料としては、せん断特性はこれまで用いてきたアクリル系粘弾性体と同様で、圧縮特性だけを向上させることが望ましい。そこで本研究では、アクリル系粘弾性体を薄いシート状にして、その間に薄鋼板を挿入した積層粘弾性体を新たに開発した。

このような積層粘弾性体を対象として、以下の 2 つの検討を行った。

#### ① 粘弾性体の圧縮特性の評価

まず、粘弾性体に圧縮力を作用させる実験を実施し、短期的な圧縮歪(静的歪)と長期的な圧縮歪(クリープ歪)を測定した。実験パラメータは、粘弾性体の 1 次形状係数、辺長比、面圧である。

図 2 に、静的歪から求めた静的圧縮剛性  $E_c$  と 1 次形状係数  $S$  との関係を示す。縦軸には、粘弾性体の製造ロットや実験時の温度による影響を除去するために、静的圧縮剛性  $E_c$  を貯蔵せん断剛性  $G'$  で無次元化した値を採用している。図中のプロットは辺長比が 1 の場合の実験結果、実線は本研究で構築した静的圧縮剛性の計算結果である。

また、辺長比が 1 以外の場合の補正係数を、姫野ら(2004)の手法に基づいて検討し、任意の辺長比に対して図 3 に示すように、実用が想定される範囲において実験結果と計算結果がよい対応を示すことを確認した。

さらに、約 2 年間にわたる長期圧縮実験より、クリープ歪と静的歪の比(クリープ係数)を求め、実験値の最大値を包含するにはクリープ係数に 2 を用いればよいことを確認した。

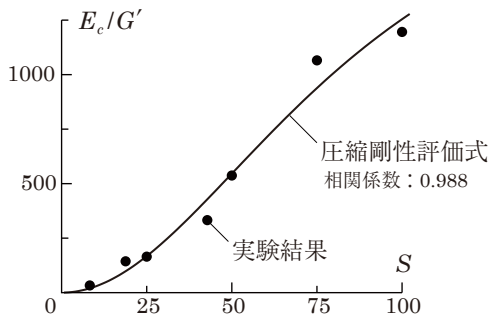


図2 静的圧縮剛性と1次形状係数の関係

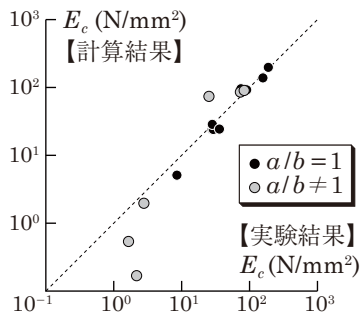
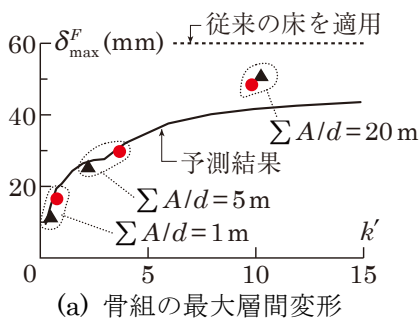


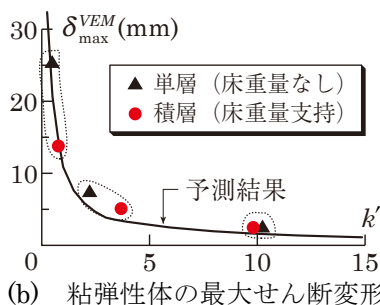
図3 静的圧縮剛性の実験結果と計算結果の比較



図4 1層小型模型による振動台実験



(a) 骨組の最大層間変形



(b) 粘弾性体の最大せん断変形

図5 1層小型模型の振動台実験結果

## ② 1層小型模型によるせん断特性の確認

図4に示す1層小型模型による振動台実験を行い、床重量を支持した状態での積層粘弾性体のせん断特性を確認した。比較のため、積層にしていない(単層)粘弾性体で、床重量を支持させない場合の実験も実施した。

その結果、図5に示すように、剛性比 $k'$ が小さい場合を除き、積層粘弾性体に床重量を支持させた場合の応答は、単層粘弾性体に床重量を支持させなかった場合の応答と比べて、ほとんど差がないことを確認した。

さらに2方向加振を行い、骨組と粘弾性体が線形を保つ範囲であれば、2方向入力時の応答が、直交1方向に投影した応答の重ね合わせで求められることを示した。

## (2) 制振床を適用した応答評価法の構築

制振床を適用した1層建物を図6に示す解析モデルで表現し、振動台実験結果と比較することで解析モデルの妥当性を検討した。実験結果より同定された試験体の構造特性を解析モデルに適用することで、実験結果を精度良く追跡できることを確認した。

さらに、図6の解析モデルに基づいて運動方程式を構築し、複素固有値解析結果を利用した応答スペクトル法によって、骨組が弾性を保つ範囲における最大応答の予測法を提案した。図7は最大応答の予測手順の概要を示したものである。

図5中の実線は、提案した最大応答予測法による結果であり、剛性比 $k'$ を適切に評価することで予測結果と実験結果が良い対応を示すことを確認した。このほかにも、骨組の固有周期、床重量と全体の重量の比、剛性比などをパラメータとした広範な時刻歴応答解析結果と予測結果を比較し、両者が概ね合致することを示した。

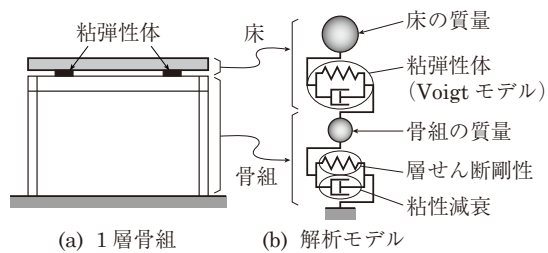


図6 1層建物の解析モデル

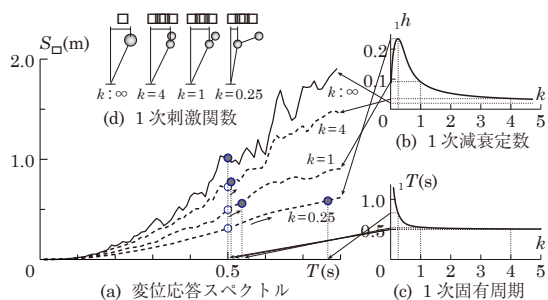


図7 最大応答予測法の概要



### (3) 多層弾塑性骨組への適用性検証

実ディテールを有する鋼構造建物を対象として、制振床を適用した場合の挙動を図 8 に示す振動台実験によって確認した。試験体は、2 層 1×1 スパン骨組で、各層の柱の反曲点位置で取り出したものである。RC 床スラブと梁を頭付きスタッドで緊結した合成梁試験体と、RC 床スラブと梁を分離して、その間に積層粘弾性体を挿入した純鉄骨梁試験体の 2 体を用いた。純鉄骨梁試験体では、ストッパーを設置して梁と床スラブの相対変形（粘弾性体のせん断変形）を拘束した非制振タイプと、ストッパーを除去した制振タイプの 2 つを実施した。

実験パラメータは上述した試験体の種類の他に、地震動の入力方向と入力レベルである。入力方向は、長辺方向に対して  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  の 3 種類を選定し、BCJ L2 を原波に対して 25%~150% まで徐々に入力レベルを増加させながら、試験体の損傷状況や応答の差異を確認した。



図 8 2 層骨組による振動台実験

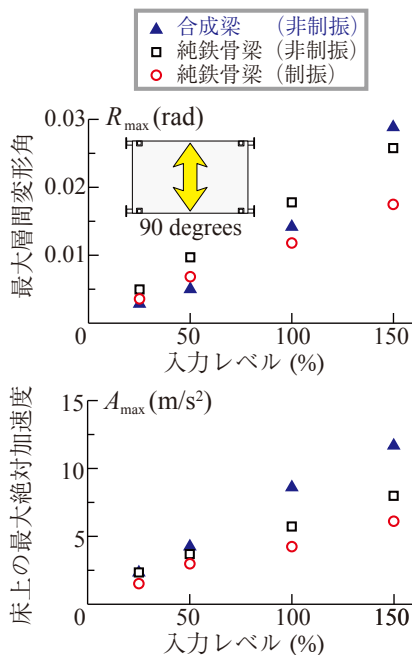


図 9 振動台実験結果

図 9 に実験結果の一例を示す。入力レベルが小さい範囲では、合成梁の最大層間変形角が最も小さいが、入力レベルの増大に伴って床スラブの損傷が進むと、合成梁の挙動は純鉄骨梁の非制振の挙動に近づき、制振の最大層間変形角が最小となる。また、床上の絶対加速度応答は、常に制振の応答が最小であり、これらの両者の応答を低減するという観点から、制振床が最良であることがわかる。

梁の塑性変形や柱周囲の床スラブのクリアランスなど、実ディテールを

### (4) 床組の面内剛性と面内耐力の確認

上記(3)で使用した試験体を再利用し、床組の面内剛性と面内耐力を確認するための静的載荷実験を行った。図 10 に実験状況を示す。

実験結果より、合成梁試験体では高い面内剛性と面内耐力が確認されたが、既往の文献で報告されている剛性や耐力よりもかなり低い値が得られた。一方、純鉄骨梁試験体では、合成梁試験体と比べて極めて小さな面内剛性と面内耐力が得られた。鉄骨梁の弱軸まわりの曲げ剛性だけを考慮したときの面内剛性は、実験結果と概ね対応していることを確認した。

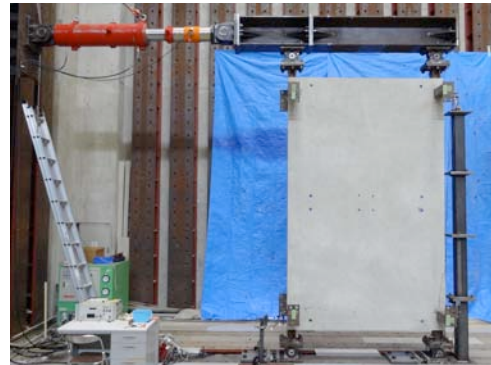


図 10 面内挙動確認実験

### (5) 床の鉛直振動性状の確認

上記(3)で使用した試験体を再利用し、床の鉛直振動性状を確認するための実験を行った。実験では、図 11 に示すように、床上に起震機を設置し、鉛直方向に定常振動を与えることによって卓越する固有振動数や固有モードを確認した。合成梁と純鉄骨梁（制振）の 2 種類の試験体に対して実験データを取得し、今後詳細な分析をふまえて、両試験体の比較・考察を行う。

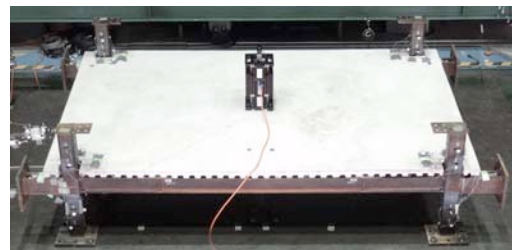


図 11 鉛直振動性状の確認実験

#### (6) 施工性・解体性の確認

上記(3)の試験体の製作時に、従来の構法である合成梁と、新たに提案した制振床の施工性を比較した。鉄骨製作工場において粘弾性体を梁の上にあらかじめ設置しておくことで、現場での作業時間や作業性はほとんど変わらないことを確認した。

また、(3)～(5)のすべての実験が完了した後には制振床を梁から分離する作業を試みた。梁上フランジと粘弾性体下部の鋼板を接合している高力ボルトを除去することで、非常に短時間かつ容易に床スラブを撤去できることを確認した。

#### 4. 研究成果

設定した6つの課題に対して、以下に示す成果を得た。

(1) 粘弾性体の圧縮剛性は、1次形状係数が大きくなるほど増大し、本研究で考案した積層粘弾性体を用いることで、床重量を支持した場合の粘弾性体の圧縮変形を大幅に低減することができる。圧縮変形のうち短期的な変形（静的変形）は、本研究で提案した静的圧縮剛性  $E_c$  を用いて、1次形状係数と辺長比の関数として算定することができる。また、静的変形にクリープ変形を加えたトータルの圧縮変形は、静的変形のおよそ3倍と見なすことができる。

(2) 制振床を適用した1層建物の解析モデルを構築し、複素固有値解析に基づく最大応答予測法を提案した。骨組が弾性を保つ範囲の応答を精度良く予測できることを確認した。

(3) 実ディテールを有する2層鋼構造建物の振動台実験より、制振床は層間変形角と床上の絶対加速度をともに低減させることができることを確認した。また、

(4)～(6) 上記(3)の試験体を有効利用することで、床組の面内剛性と面内耐力、制振床の鉛直振動性状、制振床の施工性と解体性を、それぞれ確認した。以上より、本研究の当初の目的である実用化に向けた技術的資料の蓄積を十分に達成することができた。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

① 聲高裕治, 矢野康, 松本圭太: 制振床を適用した1層鋼構造骨組の弾性地震応答, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第703号, pp. 1259-1269, 2014.9

〔学会発表〕(計 5 件)

① 坂本洋平, 松本圭太, 聲高裕治, 吹田啓一郎: 積層粘弾性体を用いた制振床による1層鋼構造骨組の地震応答低減効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp. 805-806, 2014.9

② 松本圭太, 聲高裕治, 吹田啓一郎: 制振床を適用した1層鋼構造骨組の弾塑性挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp. 1025-1026, 2014.9

③ 坂本洋平, 聲高裕治, 吹田啓一郎: 制振床を適用した2層鋼構造骨組の振動台実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp. 1259-1260, 2015.9

④ 坂本洋平, 聲高裕治, 吹田啓一郎: アクリル系粘弾性体の圧縮特性, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第56号・構造系, pp. 201-204, 2016.6

⑤ Koetaka, Y. and Sakamoto, Y.: Shaking table test of two-story steel moment frame with seismic floor system, 16WCEE, 2017.1 (採用決定)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.suita-lab.archi.kyoto-u.ac.jp/2-ResearchTopics/index.html>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

聲高 裕治 (KOETAKA, Yuji)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 80343234

##### (2) 研究分担者

吹田 啓一郎 (SUITA, Keiichiro)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 70206374

倉田真宏 (KURATA, Masahiro)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号: 70624592

##### (3) 連携研究者

なし