

2019年度

東京都市大学・東急建設株式会社 産学連携共同研究開発事業

共同研究最終報告書

16TC07

高減衰・制震構造システムの研究開発

2020年 4月10日

東京都市大学 工学部 建築学科 教授	西村 功
東急建設株式会社 技術研究所	豊嶋 学
東急建設株式会社 建築設計 構造設計部	宮崎 嘉生

はしがき

本報告書は、平成29年度より平成31年度まで、東急建設株式会社と東京都市大学の共同研究課題として採択された「高減衰・制震構造システムの研究開発」の3年間の研究成果を纏めたものである。

本研究課題は、平成23年度から3年間に渡り科学研究費の研究助成を受けた「部分免震構造」の実用化を目指したものである。また、平成24年度から平成26年度まで3年間に渡り国土交通省建設技術助成研究課題として行われた「限界耐力設計法に対応した免震構造の開発」研究により、実大の積層ゴム支承で安定に高い軸力を支持することのできる部材開発に目途が立った。この研究成果を応用することにより、高減衰制震構造システムの理論を実用化することが可能となった。以上のように、本研究は、長年にわたる基礎研究と理論研究成果を建物構造の耐震性向上技術として結実する直前の実証実験と、位置付けられている。3年間の研究開発では、まず、初年度に振動台実験用鋼構造骨組みモデルを設計し、製作することならびに、実施設計用積層ゴム支承のプロトタイプを検討することが目標であった。2年目である2018年度は、製作した鋼構造骨組みモデルによる大型振動台地震波加振実験を行い、約10%の減衰効果を確認した。また、初年度に解析検討したプロトタイプ積層ゴム支承の性能確認実験を部材メーカ（株式会社モルテン）に委託し、実用化に向けた部材開発も行った。振動台実験は、2018年8月31日に西村研究室を中心として定期的に行っている研究会にて公開実験を行い、同日、プレス発表を行った。また、振動台実験と解析による事前検討結果については、2018年11月10日より3日間に渡り開催された、日米設計協議会（日本建築構造技術者協会主催、ニュージーランド、クイーンズタウン）にて論文発表を行った。

最終年度である2019年度は、高減衰構造を実現する圧縮型オイルダンパーの技術開発を行った。試作品は株式会社三和テッキに委託し、仕様を決定する事前解析を行い、工場試験を実施した。2020年3月13日には、同社宇都宮事業所において公開の性能確認実験を実施した。東急建設の共同研究担当者のみならず、三菱地所設計、大建設、鹿島建設構造設計部、大林組構造設計部、戸田建設技術研究所、奥村組技術研究所、など主要な建築構造分野の専門家が多数、見学会に参加しダンパーの性能と今後の適応に向けたディスカッションを行った。

さらに、開発した積層ゴム支承と減衰装置を組み合わせることにより、実施設計（試設計）を行った。具体的な3階建事務所棟の建築計画を対象として、ダンパーの配置計画、減衰性能の解析評価、地震時の時刻歴応答解析など実施設計に必要な全ての検討を行った。解析検討結果については、東京都市大学大学院修士課程の学生諸君が修士論文としてまとめており、今後の参考資料として役立つと期待している。一連の試設計を行うに際し、東急建設株式会社と東京都市大学はクロスアポイントメント業務契約を締結し、解析ソフトの移植、サーバコンピュータの構築、構造設計部員への技術指導などを同時並行的に行った。

3年間の研究開発プロジェクトは、当初の目的を十分達成する成果を上げた。ハード面の技術開発は、新型のオイルダンパーと高軸力積層ゴム支承の2部材を開発した。ソフト面では、解析用ソフトの開発にとどまらず、ダンパー配置の最適化、実施設計への応用、構造計画の立案など重要な設計ノウハウを共同開発者である東急建設建築設計本部構造設計の担当者に技術指導を行った。

この技術開発の成果は、我が国の建築耐震構造を大きく向上させることができる実用化直前の技術である。今後は、是非とも本学の研究成果として、安心安全な社会の実現のために社会還元してほしいと強く希望するものである。

2020年4月10日

東京都市大学 工学部 建築学科
研究代表 西村 功

目 次

第一章 研究背景と研究目的

1.1 研究背景

- ・ 1980 年以前の耐震工学における減衰の考え方
- ・ 1986 年から 1995 年までの減衰装置の状況
- ・ 1995 年から 2010 年までの減衰技術と解析技術
- ・ 2011 年以降の耐震工学における減衰装置の問題点

1.2 研究目的

- ・ 本研究課題の目的
- ・ 「部分免震構造」の研究成果と本研究課題の位置づけ
- ・ 3 年間の研究計画、初年度、二年度、最終年度の研究経過

第二章 研究成果

2.1 初年度（2017 年度）の研究成果

- ・ 4 層鋼構造試験体の設計と事前解析
- ・ 4 層スチレンボード試験体による小型振動台実験
- ・ 実施設計に用いる積層ゴム支承の解析検討

2.2 2 年度（2018 年度）の研究成果

- ・ 1/3 スケール 4 層鋼構造試験体を用いた地震波振動台実験の実施
- ・ プロトタイプ積層ゴム支承の性能確認実験の概要
- ・ 国際会議における研究論文の発表
- ・ 新聞発表等のマスメディアへの発表

2.3 最終年度(2019 年度)の研究成果

- ・ プロトタイプ油圧ダンパーの設計、製造、性能確認実験
- ・ フィードバックを考慮した時刻歴応答解析
- ・ クロスアポイントメント業務と解析指導
- ・ 3 階建事務所建築を対象とした実施設計

第三章 技術開発

3.1 実用化の現状

- ・プロトタイプ積層ゴム支承の試作と品質管理（株式会社モルテン）
- ・オイルダンパーの試作と実験の委託（株式会社三和テッキ）
- ・3階建て事務所棟の実施設計への適用検討

3.2 実用化への展望

- ・新型免震構造研究会（コンソーシアム）の概要と協力企業

結 び

添付資料 （第三者が追試を行うために必要な資料）

- ・資料1：鋼構造4層柱梁骨組み工作図
- ・資料2：東急建設技術研究所 振動台実験報告書
- ・資料3：株式会社モルテン 積層ゴム支承実験報告書
- ・資料4：積層ゴムの非線形解析報告書 愛知工業大学 鈴木研究室
- ・資料5：株式会社三和テッキ 高減衰オイルダンパー実験報告書
- ・資料6：高減衰オイルダンパーの性能確認報告書 愛知工業大学 鈴木研究室
- ・資料7：「フィードバックを考慮した制震構造解析プログラム」ソースコード
- ・資料8：東京都市大学大学院工学研究科 修士論文（宗形武弥君）
- ・資料9：東京都市大学大学院工学研究科 修士論文（倉持大悟郎君）
- ・資料10：知的財産権「部分免震構造」明細書
- ・資料11：国際会議発表論文（第17回日米設計協議会ワークショップ）
- ・資料12：建築学会構造系論文「構造物内部に設置した減衰装置の性能評価」
- ・資料13：プレスリリース

第一章

研究背景と研究目的

1.1 研究背景

・1980年以前の耐震工学における減衰の考え方

現行の建築基準法に規定されている保有耐力設計法は、日常的に行われている構造設計法であるが、施行されたのは昭和 56 年（1981 年）のことである。この設計法の概要について述べることは、本報告書の趣旨ではないので割愛するが、この設計法の中で唯一、建築構造物の減衰性能について規定されている部分が「構造特性係数」、あるいは通常、「Ds 値」と呼ばれている係数である。Ds 値は、構造物の減衰性能などを勘案して大地震（二次設計）の際に、計算上の地震力を低減する係数として理解されている。

例えば、減衰性能や塑性変形能力がほとんどない弾性構造物の場合は、Ds 値は 1.0 である。一方、柱や梁の塑性変形能力に十分な余裕があり、大地震の際にも倒壊しないときは、その変形能力や減衰性能の大きさに応じて、Ds 値は小さくなる。Ds 値の具体的な値は、建築基準法に規定されているが、最低値は鋼構造では 0.25、鉄筋コンクリート構造でも 0.30 である。この値は、一次設計の地震外力の 1 階部分における設計用せん断力の比率（これをベースシア係数と呼ぶ）の最低限が 0.2 であることと関係している。

以上のように、1981 年よりも古い建築構造工学においては、振動工学においてさえ、減衰性能を定量的に評価することは行われていなかった。そして、構造工学（耐震工学）の主要テーマである保有耐力設計が施行されてからは、新しい研究分野を求める気運が少しずつ蓄積されていったのである。

・1986年から1995年までの減衰装置の状況

建築基準法の大規模な改定後の建築耐震工学分野の状況を一変したのが、1986 年から突如として始まった「制震構造」の研究開発であった。京都大学名誉教授であった故小堀鐸二博士が、鹿島建設の研究室に副社長として移籍した後、振動制御理論を応用した建築構造物の能動型制御システムの研究論文を発表した[1]。これが端緒となって、日本中でアクティブ動吸振器の研究とパッシブ型制震構造システムの実用化研究開発が始まった[2,3,4,6]。当時の日本建築学会の年次大会における制震構造関係論文の急増は、免震構造の研究論文を凌ぐものがあつた。時を同じくして、1988 年東京と京都で第 9 回世界地震工学会議が開かれ、制震構造については、**Special Theme Session** が開かれ小堀博士による基調講演が研究開発を加速することとなった。当時は、建築振動工学においては 2 階常微分方程式（多質点系）で、材料非線形のみを考慮して地震応答解析することが普通に行われていた。減衰については剛性マトリクスあるいは質量マトリクスに比例した減衰項でモデル化することが何の疑いもなく行われていた。このため、減衰装置（オイルダンパーやシリコンダンパー、あるいは金属摩擦を利用した減衰装置）は数多く考案され、その多くは実建物に設置されて具体化されていった。シリコン系の材料を用いた制震壁、オイルダンパーを筋交いの代わりに用いた減衰装置などが超高層建物などに盛んに応用され、設置された[5,7,8]。当時は、新規プロジェクトが実用化された後は、地震

観測や竣工後の自由振動実験などを行うことが普通で、解析で予想された 10%を超えるような減衰性能が得られると期待されていた。ところが、竣工後に行われた実験や観測結果を見ると、固有周期周辺には明確なピークがあり、減衰性能は極めて小さかった。例えば、同じ建物の東西方向と南北方向を比較して、減衰装置を設置していない構造構面の方が伝達関数のピークが低い場合さえあったのである。これに対して、「主たる原因は摩擦の影響によってオイルダンパーが作動するレベルに達していないからであり、大きな地震が発生すれば必ず減衰性能が上昇する」という論文が数多く執筆された。結局、学問的な原因究明が行われることなく、高減衰パッシブ型制震構造という分野が確立していった[7,9,10]。

・ 1995 年から 2010 年までの減衰技術と解析技術

1995 年 1 月 17 日の阪神淡路大震災（兵庫県南部地震）後、アクティブ型制震構造の研究は急速に収束していった。一方で、パッシブ型制震構造は大地震に有効な技術として、実用化が加速されていった[12]。鋼材の塑性化に伴うエネルギー吸収を利用した鋼材ダンパーは、低降伏点強度の鋼材が開発されたこともあって、急速に普及していった[11,13]。しかし、初期の制震構造が地震観測装置を設置することで性能の検証を行っていたのと対照的に、1995 年以降の実用化研究では解析によって応答低減効果が確認できれば、実証研究を省略することが普通に行われていった。このため、「初期の研究開発段階で疑問に思われた減衰効果が解析上の期待値を大きく下回ることは、別に気にすることもない。大地震が発生すると必ず解析と同じような高減衰効果が得られる」と、多くの構造関係者が信じるようになっていった[12,13,14]。こうした状況下で、減衰率が 50%を超えるような「高性能な減衰装置」が開発され、数多くの実施建物に適応されていったのである[9,10,12,13]。本研究代表者は、減衰装置を有する建築構造物の減衰性能評価について疑問を感じ、もしも大地震の際にも減衰性能が発揮されなかったならば、我が国に多数建築されている超高層建物の耐震性能が大きく損なわれることを危惧し、20 年以上前に観測事実と解析モデルの相違についての理論研究を始めた。その後の理論研究活動の結果、「大型の建築構造物に小型の減衰装置を設置することで減衰効果を高めることは、極めて困難であること」等、重要な解析的予想を行った。また、減衰装置を建物構造物に設置することで達成することのできる減衰効果には上限があり、その値は減衰率にして約 18%であること、2 階の常微分方程式のモデルでは振動解析モデルとして妥当ではなく、少なくとも 3 階の常微分方程式を用いるべきであることなども指摘している。特に、減衰率の増大と固有振動数の変化には一定の関係があり、振動数の変化を伴わずに減衰率のみを 50%も増大させることは不可能であることが理論的に明らかとなった。これらの研究成果は文献 16, 18 にまとめられている。しかしながら、減衰装置を設置しても効果が少ないという文献 16, 18 の学術論文の結果は、ほとんど顧みられることがなかった[14]。そして、2011 年 3 月 11 日を迎える。

・ 2011 年以降の耐震工学における減衰装置の問題点

2011 年の東北大地震では、東京は震源域からは 500km 以上も離れていたにもかかわらず、大きな地震動が到達している。新宿地区における超高層建物にも、レトロフィットで減衰装置を多数設置した超高層ビルがあった。しかし、どの超高層ビルも大きく振動したことは報道機関の動画や Youtube でも確認することができる。結局、減衰装置は大きな地震動でも解析予想どおりの効果が、全くと言っていいほど、得られなかったのである。減衰装置を設置して耐震補強を行った建物の中には、構造体が大きく損傷した建物も多い。しかし、残念ながら詳細なデータは公開されていないのが事実である。

この地震以降、減衰装置を設置して減衰率が 10%を超えるような解析予想をした論文は皆無である。本研究代表者は、減衰装置が解析通りの性能を発揮できなかった理由を明らかとした[16,18]。それは、解析モデルが実際の建物モデルと異なっていたからである。正しい解析モデルは、大型の建物構造と小型の減衰装置の相互作用を考慮することで初めて得られる。正確な振動現象を再現することのできる解析モデルを使って、減衰性能を高める構造システムの研究を進めているうちに、積層ゴムと減衰装置を組み合わせると、大きな減衰効果を得ることができると分かってきた。この理論研究は、2011 年から 2014 年にかけて、科学研究費の研究助成を受けた理論研究の成果である。理論研究成果は、東京都市大学西村功が発明者となり、五島育英会が職務発明として継承し、出願人となって知的財産権の特許申請を行った (2014 年)。この発明の名称を「部分免震構造」と呼び、2017 年には特許として登録されている。

以上が 2017 年 4 月までの研究背景である。

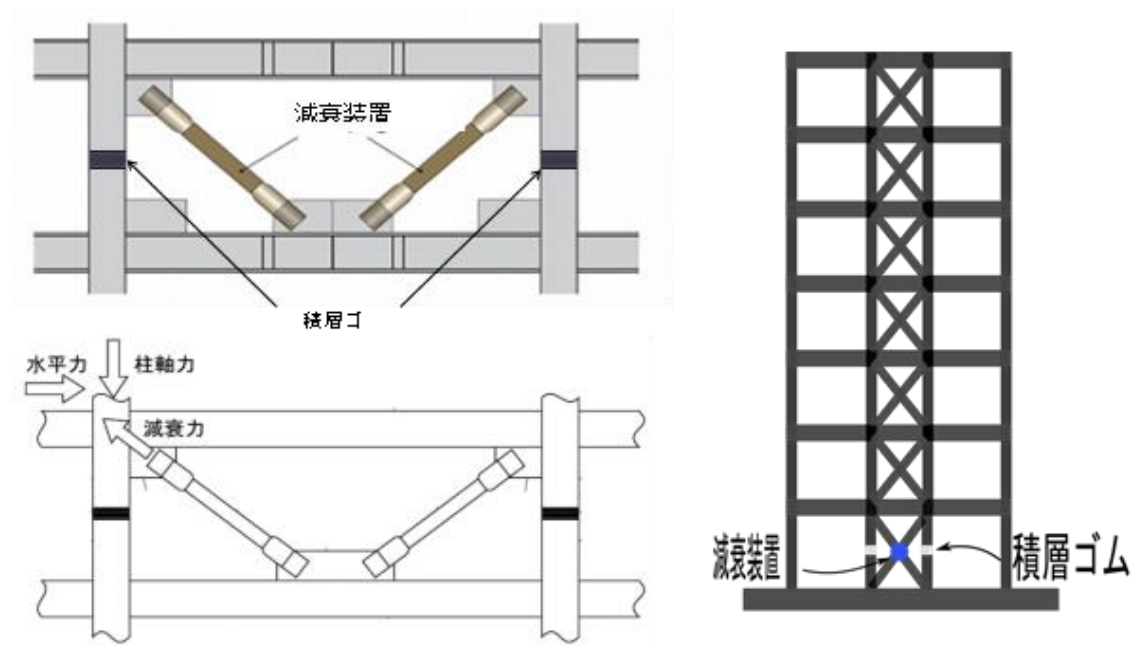


図 1 部分免震構造の概念図

参考文献

- [1]小堀鐸二、その他、他、“ダイナミックインテリジェントビルの試みー可変剛性を有する D. I. B.”、日本建築学会大会梗概集、構造 B-1、pp. 839～841、1986 年
- [2]福元敏之、小堀鐸二、石井孝二、山田俊一、前田祥三：ハニカム開口を有する鋼板ダンパーに関する研究（その 1：静的加力実験）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 643～644、1989 年
- [3]畑田朋彦、栗野治彦、倉田成人、他“高減衰構造の研究、”、日本建築学会大会梗概集、構造 I、Vol. B、pp. 1007-1012、1992 年
- [4]浅野清昭、伊藤嘉朗、“粘弾性体を利用した制振構法に関する研究”、日本建築学会大会梗概集、構造 I、Vol. B、pp. 1023-1026、1992 年
- [5]横田治彦、岡田敬一、他“粘弾性ダンパーを設置した高層建物の振動特性（その 1）から（その 2）”、日本建築学会大会梗概集、構造 I、Vol. B、pp. 1019～1022、1992 年
- [6]倉田成人、小堀鐸二、他“高減衰構造の実験的研究—3 層試験体の振動実験—”、構造工学論文集、38 (B) , pp. 235～244、1992 年
- [7]田上淳、栗野治彦、畑田朋彦、その他、“高減衰構造の実用化研究、” 日本建築学会大会梗概集、構造 I、pp. 657-662、1993 年
- [8]浅野清昭、伊藤嘉朗“粘弾性体を利用した制振構法に関する研究、” 日本建築学会大会梗概集、構造 I、pp. 631～632、1993 年
- [9]西山正三、他“減衰増幅装置を用いた構造物の応答制御に関する研究”、日本建築学会大会梗概集、構造 I、pp. 651-652、1993 年
- [10]西山正三、可児長英、他：減衰増幅装置を用いた構造物の応答制御に関する研究（その 3、実施適用建物の振動実験）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 651-652、1993
- [11]三山剛史、田中清、平澤光春：極低降伏点鋼を用いた制振構造に関する研究（その 1～2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 I、Vol. B、pp. 593～196、1993
- [12]石原和男、鈴木良秋、他、“高減衰オイルダンパーによる高層建物の制震、” 日本建築学会大会梗概集、構造 B-2、pp. 851-856、1996 年
- [13]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、pp. 101～107、2002. 2
- [14]パッシブ制振構造設計・施工マニュアル、日本免震構造協会、2005. 9
- [15]西村功、“非定常不規則外乱下における能動型ブレースのエネルギー吸収応答、” 日本建築学会構造系論文集、第 567 号、pp. 55～62、2003 年 5 月
- [16]西村功、“構造物内部に設置された減衰装置の性能評価、” 日本建築学会構造系論文集、第 579 号、pp. 23～30、2004 年 5 月
- [17]笠井和彦、伊藤浩資：弾塑性ダンパーの剛性・降伏力・塑性率の調節による制震構造の応答制御手法、日本建築学会構造系論文集、第 595 号、pp. 45～52、2005. 9
- [18]西村功、“構造物内部に設置された完全弾塑性型履歴減衰装置の性能評価、” 日本建築学会構造系論文集、第 606 号、pp. 89～96、2006 年 8 月

1.2 研究目的

・本研究課題の目的

2017年度より開始された、東急建設株式会社と東京都市大学の連携研究課題である「高減衰制震構造システムの研究開発」は、20年に渡る理論研究、実験研究、ならびに登録知的財産権を活用した実用化技術の開発プロジェクトである。研究背景については、詳細な歴史的な研究経過を既に述べた。

3年間の研究期間内に、理論研究成果を応用した鋼構造4層柱梁骨組み構造（1/3スケール）を試設計し、東急建設技術研究所の大型振動台にて性能確認実験を行う。この振動台実験は、新理論による建築振動工学モデルを実証する初めての実験研究である。既往の振動理論では、短周期（5Hzの高振動数）の構造物に10%を超えるような減衰率を付与することは小型振動モデルでも不可能であった。4層の高振動数（3Hz以上）の構造物に10%を超える減衰率を実装できれば、新理論の正しさを実証することができる。実証実験の後、実用化を目的とした部材開発（積層ゴム支承と高減衰オイルダンパー）をメーカーと共同で行い、さらに東急建設構造設計部と実施設計を行い、実際の建築物に適用することが最終的な目標である。

・「部分免震構造」の研究成果と本研究課題の位置づけ

研究背景で述べたように、本研究課題の最終的な目的は、西村研究室で長年にわたり行ってきた減衰装置に関する理論研究成果を、実用化することである。理論研究成果は、職務発明として五島育英会が知的財産権「部分免震構造」を継承しており、この発明を実用化することでもある。「部分免震構造」を実用化することは、実施設計用建物に適用することを意味している。このためには、部分免震構造で必須の構造部材である、積層ゴムと減衰装置を実用化することが必要条件となる。理論研究成果を実用化するには、どのような学術研究成果であっても、大きな障壁が存在するものである。特に、実用化の技術開発は、製造技術を有するメーカーの信頼を得ることが重要であり、東急建設、東京都市大学、協力企業、各参加組織の相互理解と協力が是非とも必要である。

西村研究室では、4年前（本研究課題の開始前）より、私的な研究会を定期的に開催し、新型の免震構造、高減衰の制震構造について、理論研究と実験研究を実用化する試みを続けてきた。その研究会では、大手設計会社、建設会社、機械メーカー、材料メーカー、大学研究者など、建築構造分野の専門家を招聘し、理論研究成果を実用化するための情報の共有と会員相互の信頼を構築するための活動を行っている。現在も定期的に研究会を開催している。

この研究会活動を通じて、協力企業を募り、本研究課題で実用化を目指す建築構造を実現するための「積層ゴム」の試作を委託する製造メーカーを選定することとなった。本年度の研究成果である積層ゴム支承の実用化を目的とした試作と工場での性能確認実験は、この研究会活動を通じて行われたものである。

・3年間の研究計画、初年度、2年度、最終年度の研究経過

本研究課題の当初に作成した研究計画（研究工程）、ならびに、初年度、本年度、最終年度の研究計画工程表を示す。3年間の共同研究を終了した2020年3月現在、実証研究、構造部材（積層ゴムと減衰装置）の技術開発、実施設計、解析プログラムの整備、など当初予定していた全ての技術開発（振動台実証研究を含む）が終了した。

当初の研究開発計画では、最終年度に開発したダンパーと積層ゴム支承を用いて実施設計（試設計）を行うこととなっていた。そこで、具体的な3階建事務所建築を対象とした実施設計案を取りまとめた。開発したダンパー、積層ゴム支承は、いずれも、この事務所建築棟に応用できるスペックを満たしている。試設計を行うことにより、免震構造以外の構造形式でも、15%の減衰定数を有する本格的な「高減衰制震構造」が実現可能であることが示された。

研究開発工程表

1. 計画表（3年間の研究計画）

大項目	中項目	H29年度		H30年度		H31年度		H32年以降
		H29.6	H30.3	H30.4	H31.3	H31.4	H32.3	H32.4
I 振動台実験 1.1 試験体の検討	1: 解析	●	●					
	2: 設計	●	●					
	3: 製作	●	●					
I 振動台実験 1.2 実験の実施	1: 計画	●	●					
	2: 実施	●	●	●	●			
	3: 検討		●	●	●			
	4: 発表				●	●		
II 部材開発 2.1 基本性能の解析	1: 仕様	●	●					
	2: 解析	●	●					
	3: 選定	●	●					
II 部材開発 2.2 試作と製品化	1: 試作		●	●	●	●	●	
	2: 製品化		●	●	●	●	●	
	3: 評定		●	●	●	●	●	●
III 実用化検討 耐震補強実施設計	1: 選定		●	●	●	●	●	
	2: 検討	●	●	●	●	●	●	
	3: 解析	●	●	●	●	●	●	
	4: 実施		●	●	●	●	●	●

研究開発工程表

2. 計画表 (平成 31 年度の計画)

大項目	中項目	H31 年度											
		4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月		
I 振動台実験 1.1 実験の実施 (東急建設技術研究所)	1 : 準備 2 : 実験実施 3 : データ整理												
I 振動台実験 1.2 実験結果の検討 (西村研究室)	1 : 結果の検討 2 : 解析との比較 3 : 部材開発 4 : 発表												
II 部材開発 2.1 積層ゴム支承の 製造・委託実験 (株式会社モルテン)	1 : 仕様 2 : 解析 3 : 委託実験												
II 部材開発 2.2 オイルダンパーの 基本性能検討 (西村研究室) (株式会社三和テッキ)	1 : 仕様打合 2 : 製作 3 : 性能確認試験	ダンパの仕様検討 → ●	製造メーカーの選定作業 → ●		ダンパの仕様決定 ●		ダンパの設計・製作 ●			工場試験 ●	改良 → ●	確認試験 ●	報告書提出 ●
III 実用化検討 耐震補強実施設計 (東急建設構造設計部 ・西村研究室)	1 : 選定 2 : 検討 3 : 解析 4 : 実施	実施案件の選定 → ●	3 階建研究棟に決定 ●	ダンパ配置位置の検討 ●		時刻歴応答解析 ●	実施設計(試設計)と減衰性能の解析予想 ●	最適減衰係数の算定 ●			性能解析 → ●		報告書提出 ●

第 二 章

研究成果

2.1 初年度（2017年度）の研究成果

・4層鋼構造試験体の設計と事前解析

初年度は、2018年度の振動台実験の実施に向けて、4層鋼構造試験体の設計を行った。目標とする減衰効果を10%以上とすると、減衰装置の設置後の固有振動数の変化は25%以上必要となる。これを実現するためには、固有値解析を行って事前に解析検討をする必要がある。鋼構造試験体では固有振動数が4~5Hz前後となることが通常であり、このような高振動数の構造物に10%を超える減衰率を付与することは通常の試験体では不可能である。この意味でも、本実験研究における振動台実験は実証実験として適切な実験研究となった。試験体の形状は、図1に示すような4層の柱梁骨組みであり、全接合部は高力ボルト接合とし、柱梁の部材には同サイズの溝形鋼を用いた。試験体の詳細については、添付資料（英文論文ならびに宗形君の修士論文）を参照されたい。振動台実験を行う東急建設技術研究所の大型振動台では、積載荷重20トンが限界である。そこで、試験体総重量を15トン前後として、固有振動数が4Hz前後となるように試験体の水平剛性を決定した。また、実用化を目指した研究であるため、4層程度が多層骨組みを想定した。これらの必要事項を満足するように、試験体の形状をスタディし、かつ、「部分免震構造」としての積層ゴム支承と減衰装置についても検討を行った（図2）。

実験で用いる積層ゴム支承についても、別途、事前解析検討と株式会社モルテンにて工場出荷試験を実施して、性能を確認している。図4には、本実験で用いた積層ゴム支承の形状、ならびに仕様を記載する。一方、減衰装置については、KYB製のバッファ型オイルダンパーをカタログから選定した（図3）。

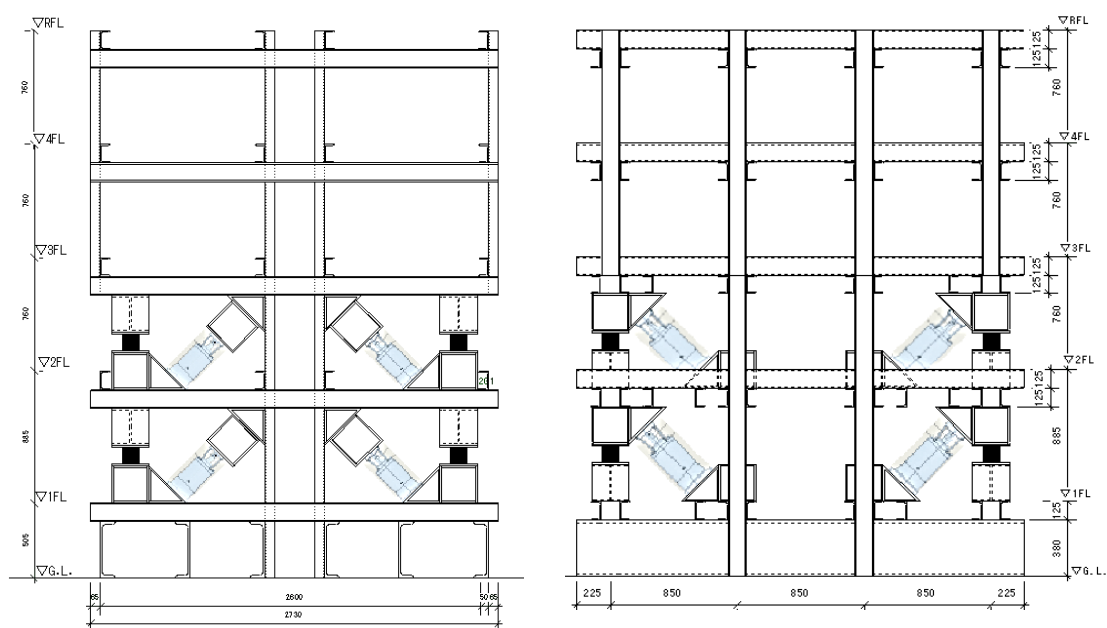
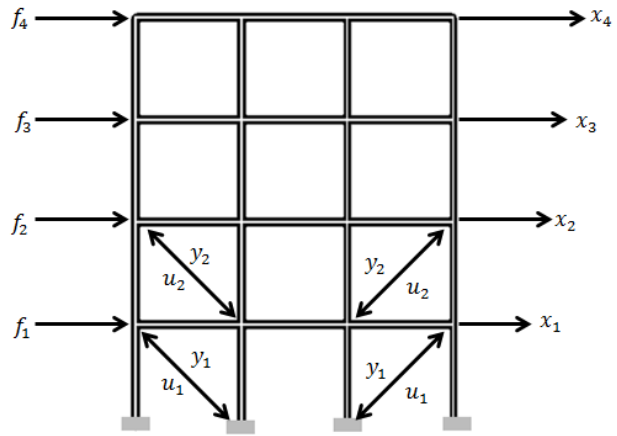
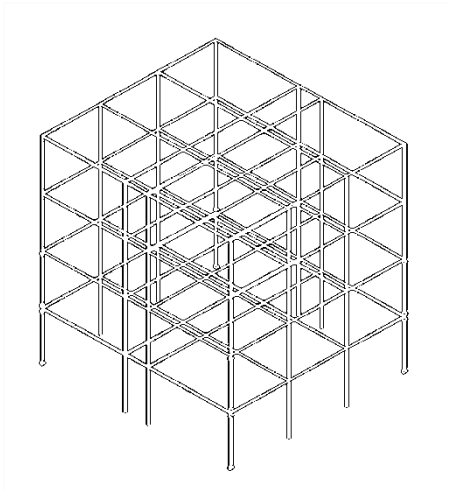


図1 4層鋼構造試験体の軸組



D_F : 水平力 f による建物変位 x
 D_{FU} : 装置からの制御力 u による建物変位 x
 D_U : 制御力 u による装置の変位 y

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_F & D_{FU} \\ D_{UF} & D_U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ u \end{bmatrix}$$

4層鋼構造試験体の事前検討用フィードバックモデル

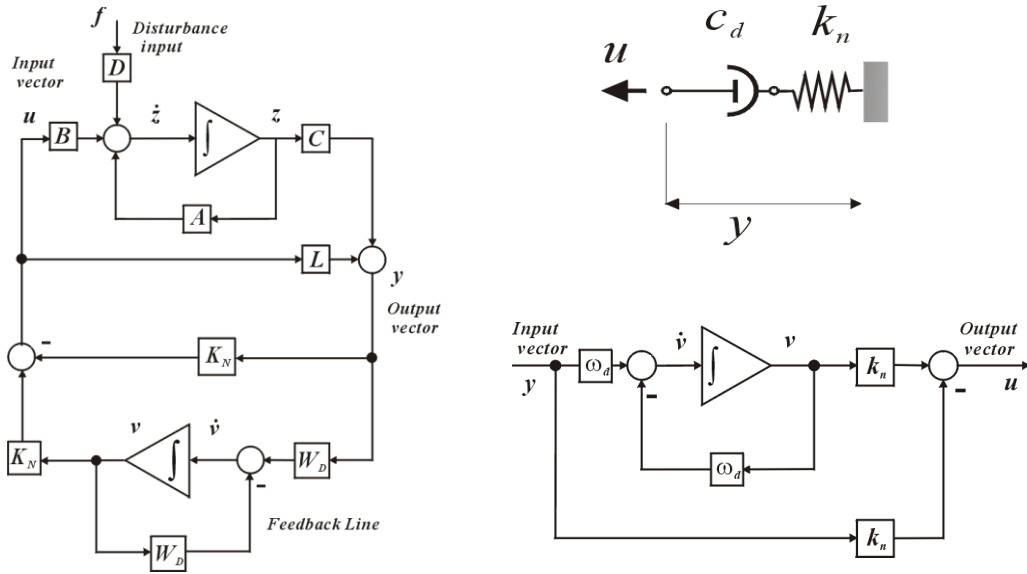


図 2 フィードバック制御を応用した解析検討

仕様

型式	ストローク (mm)	(高頻度用)		(普通頻度用)		(低頻度・非常用)	
		最高衝突回数6回/分以下		最高衝突回数1回/分以下		最高衝突回数1回/日以下	
		最大吸収 エネルギー kJ (tonf·m)	最大発生 油圧抵抗 kN (tonf)	最大吸収 エネルギー kJ (tonf·m)	最大発生 油圧抵抗 kN (tonf)	最大吸収 エネルギー kJ (tonf·m)	最大発生 油圧抵抗 kN (tonf)
KB 30	— 40	40	0.4 (0.04)	9.8 (1.0)	0.6 (0.06)	14.7 (1.5)	0.8 (0.08)
	— 80	80	0.8 (0.08)		1.2 (0.12)		1.6 (0.16)
KB 50	— 50	50	2.5 (0.25)	49.0 (5.0)	3.7 (0.38)	73.5 (7.5)	4.9 (0.50)
	—100	100	4.9 (0.50)		7.4 (0.75)		9.8 (1.00)
KB 80	— 75	75	7.4 (0.75)	98.0 (10.0)	11.1 (1.13)	147.0 (15.0)	14.7 (1.50)
	—150	150	14.7 (1.50)		22.1 (2.25)		29.4 (3.00)
KB120	—100	100	24.5 (2.50)	245.0 (25.0)	36.8 (3.75)	367.5 (37.5)	49.0 (5.00)
	—200	200	49.0 (5.00)		73.5 (7.50)		98.0 (10.0)
KB160	—150	150	58.8 (6.00)	392.0 (40.0)	88.2 (9.00)	588.0 (60.0)	117.6 (12.0)
	—250	250	98.0 (10.0)		147.0 (15.0)		196.0 (20.0)

外形図

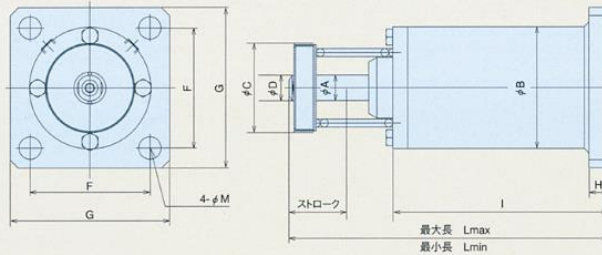
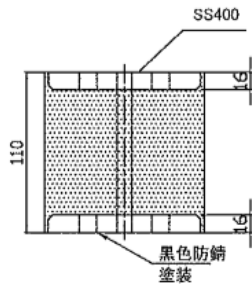
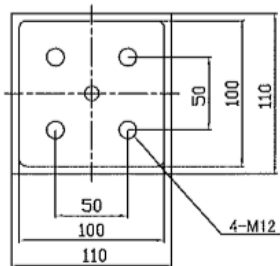


図 3 KYB 製 オイルバッファの仕様 (KB50-100)



上下鋼材16mmSS400 100×100 2枚
 内蔵鋼材4.5mmSS400 100×100 14枚
 NR G10 1mm×15層

□110積層ゴム8ヶ 鉛直500kN せん断試験

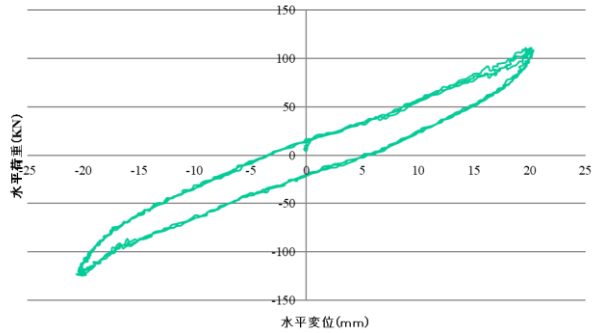


図 4 小型積層ゴム支承の形状 (特注品)

・ 4層スチレンボード試験体による小型振動台実験

4層鋼構造試験体を振動台実験する前に、同じ形状の4層スチレンボードの小型試験体を用いた小型振動台実験を実施した。この小型モデルによる実験の目的は、ダンパーの減衰係数を変化させることで固有振動数も変化することを、振動実験によって検証することである。「部分免震構造」では減衰率と固有振動数の変化が独立ではなく、一定の関係をもって変化することが解析的に予測されていた。高減衰制震構造を実現するためには、この原理を応用することが前提条件となる。すなわち、減衰率を高めるためには、固有振動数の変化を大きくする必要があるのである。この原理がスチレンボードの小型モデルでも実現できなければ、4層の鋼構造モデルであっても高減衰を達成することはできない。スチレンボード製のモデルは、全部で3体製作し、減衰係数の異なるモデルダンパーを取り換えることにより、共振曲線の違いを実験によって確認した。得られた共振曲線は、新理論で予測した変動を実証するものであった。これらの結果を図6に示す。共振振動数の変化は減衰率の変化は、新理論で予測した理論式によって説明できることも実証された。

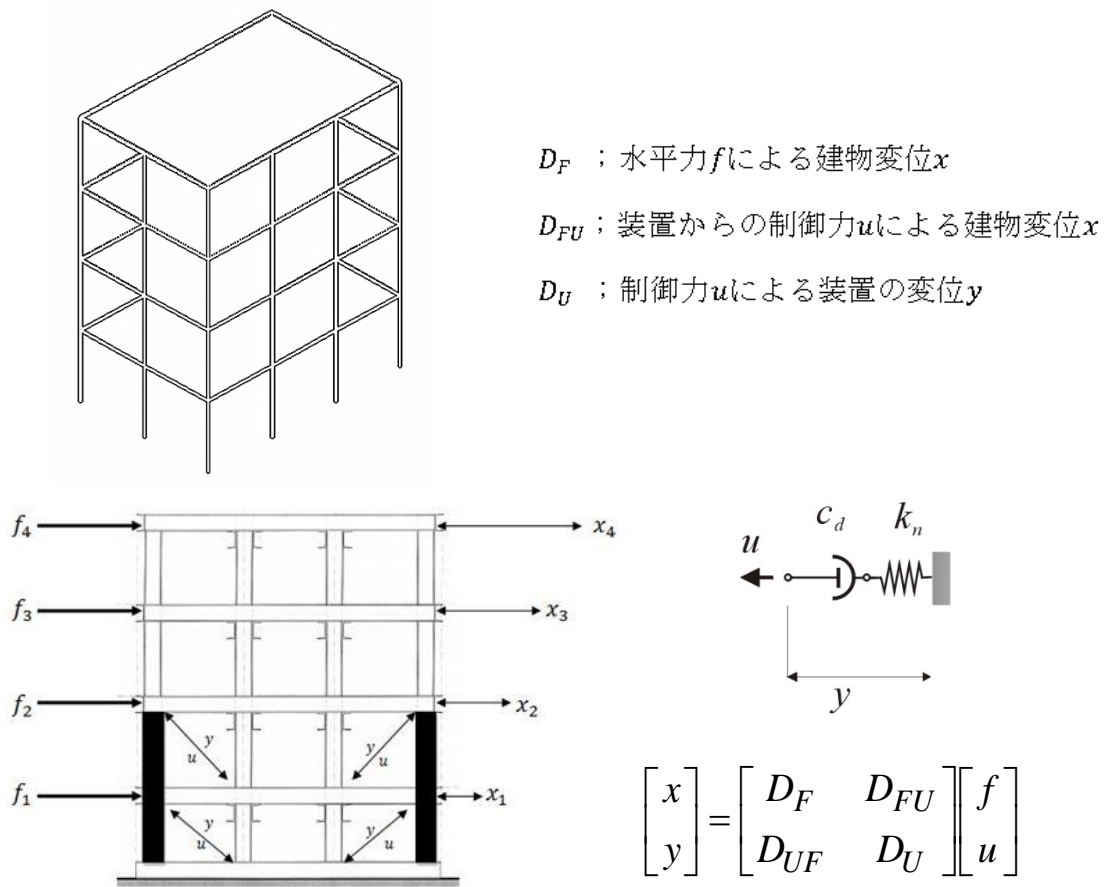


図 5 4層鋼構造試験体に対応した4層スチレンボードモデルの事前解析



写真 1 スチレンボード製 スタディモデルと模型減衰装置

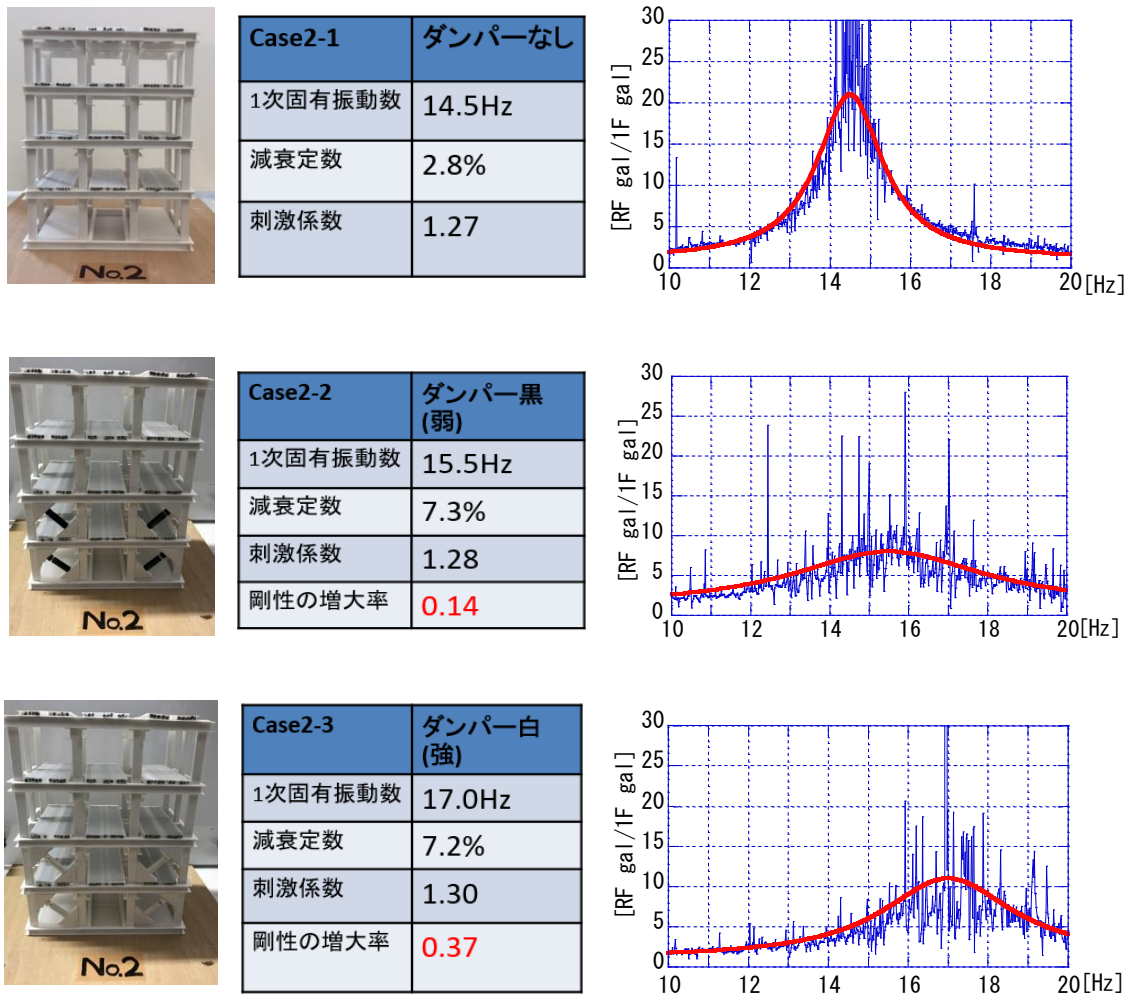


図 6 減衰係数をパラメータとした場合の固有振動数と減衰率の変化

・実施設計に用いる積層ゴム支承の解析検討

本研究課題は、新理論に基づく高減衰建築構造の実用化を目的としている。従って、理論解析を振動台実験で検証することは研究目的の最終目標ではない。実証研究と同時に、実用化に必要な部材の開発も行う必要がある。特に、大きな鉛直軸力を支持しながら、水平剛性は極めて小さい積層ゴム支承の開発が必須である。しかし、高性能の積層ゴム支承（低価格でもある）を開発するには、まず、解析検討を行う必要がある。愛知工業大学の鈴木研究室には、解析検討を委託し、幾何学的非線形を考慮した積層ゴム支承のプロトタイプについて多数のパラメータスタディを行った。その解析データを基に、最適な形状の積層ゴム支承を選定し、部材開発を行う製造メーカーの選定作業を行った。

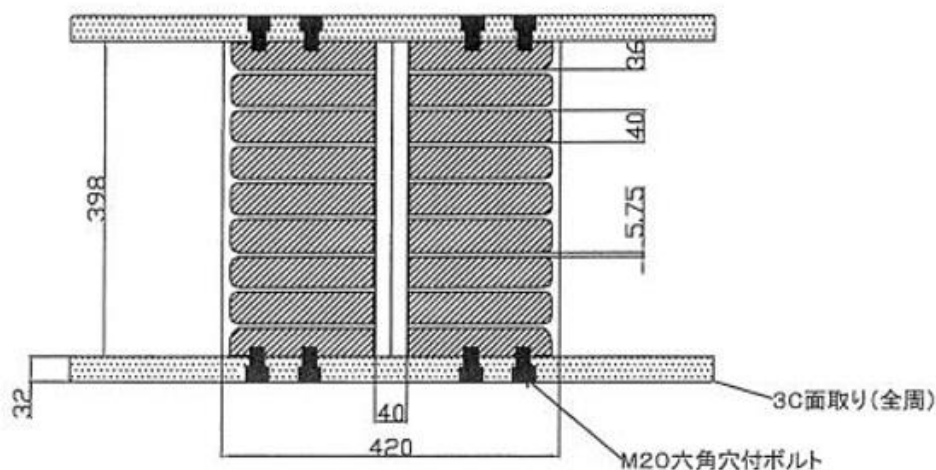


図 7 事前解析検討による積層ゴム支承の形状検討

2.2 2年度(2018年度)の研究成果

・1/3 スケールの4層鋼構造試験体を用いた地震波振動台実験の実施

平成29年度に設計ならびに解析検討を行った4層鋼構造試験体を平成30年度は東急建設技術研究所大型振動台を用いて実証試験を行った。この振動台実験の目的は、提案している高減衰・制震構造システムが解析通りの性能を発揮するかどうかを確認することが第1の目的である。また、理論解析で提案した「フィードバック理論を応用した時刻歴応答解析結果は、実験結果を高精度で検証できるのか？」を実験により実証することも第2の目的である。

実験は、平成30年8月、予定通り東急建設技術研究所にて実施された。実験結果の詳細は、参考資料（東急建設技術研究所の実験報告書）を参照されたい。また、解析検討による実験結果とフィードバック制御理論を応用した解析検討結果との整合性については、参考資料（本学大学院修士論文：宗形武弥君）に検討結果が纏められている。振動台実験による加速度応答データは、事前に行った理論解析通りの結果であり、解析手法の妥当性と新理論を基にした「部分免震構造」の減衰性能が実証された。



写真 2 東急建設技術研究所で行われた4層鋼構造新型制震構造システム振動台実験

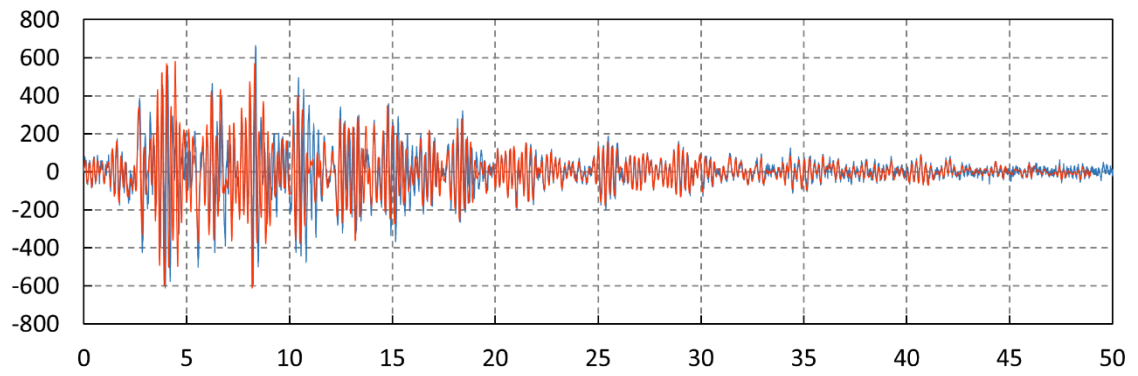


図 8 加振実験の一例 (RFL階、加速度、タフトEW,25cm/sec 入力)
解析結果と実験結果の比較 (赤：解析、青：実験結果)

・プロトタイプ積層ゴム支承の性能確認実験概要

本研究課題では理論研究成果を実建物の構造システムとして実用化することが最終的な目的である。そのためには、実大建築物を対象とした部材開発を行う必要がある。必要な部材は2種類である。1つは、高軸力を支持することのできる積層ゴム支承であり、2つ目は高減衰オイルダンパーである。

本年度は、高い軸力を支持し、 $\pm 100\text{mm}$ の水平変形能力を十分に満足する小型高性能の積層ゴム支承を開発した。この部材開発に先立ち、平成29年度は、愛知工業大学での解析検討を行っている。多数の非線形座屈を含む復元力特性の解析検討結果を参照し、プロトタイプ積層ゴム支承の形状を決定した。実際のプロトタイプ積層ゴム支承の形状を図7に示す。

研究代表者が主宰している新型免震構造研究会に参加している協力企業である「株式会社モルテン」に試作品の製造と実験の委託を行った。同社の広島県にある高陽工場にて、500トンの鉛直軸力を載荷した状態における水平方向の加力実験を実施した。実験結果は、昨年度の解析検討結果どおり、十分に実用化に適した性能であることが実証された。実験の結果、鉛直軸力500トンを載荷した状態で、水平変形量 $\pm 100\text{mm}$ の繰り返し載荷後も部材の損傷は全く認められなかった(写真3)。実験結果は、参考資料(株式会社モルテン、実験報告書)を参照されたい。



水平100mm-5MN圧縮

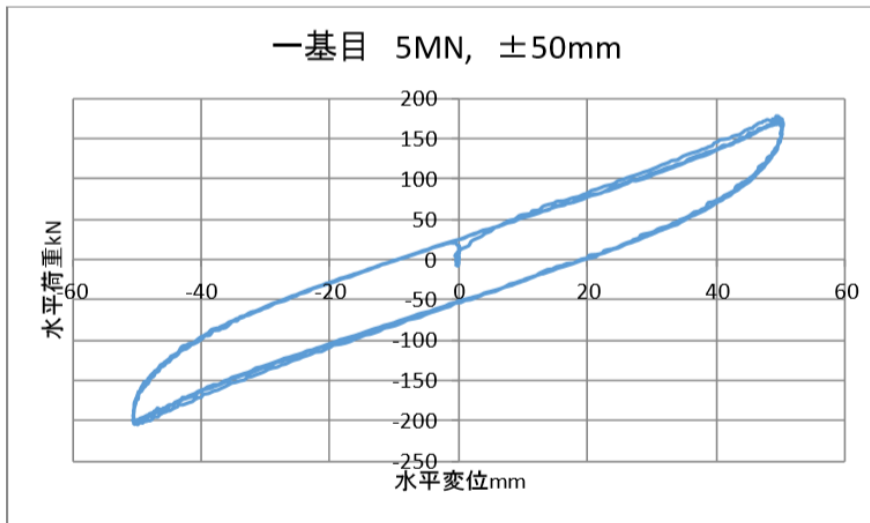


図 9 プロトタイプ積層ゴム支承の性能確認実験

・国際会議における研究論文の発表

本研究開発課題は、既往の高減衰制震構造と一線を画す理論体系に基づいており、教科書的な振動解析モデルでは建築耐震構造の正しいモデルを作ることができないという認識に基づいている。減衰装置という規模の小さい装置が、建築構造のような大規模な構造物内部に設置されたときには、両者の相互作用を考慮したフィードバック理論に基づく解析モデルを構築する必要がある。

この点を理論的に詳細に解析し、この理論モデルを今回の共同研究課題である 4 層鋼構造試験体に応用した場合の解析検討結果を、2018 年 11 月にニュージーランドにて開催された第 17 回日米-NZ 構造設計協議会にて発表した。この国際会議の日本側事務局は、日本建築構造技術者会議が当初より行っており、米国の ATC (Applied Technology Council) が米国側の窓口である。発表論文は、本報告書の参考資料として添付した。

小職は、日本建築学会 和田元会長、国土交通省建築研究所 緑川教授のセッションチェアを務めた。(図 10)

TUESDAY, NOVEMBER 13, 2018

Location: Von Room, Rydges Lakeland Hotel

8:30 am – 8:45 am: **Opening Remarks**

**Session III: Resilience- and Performance-Based Engineering:
Progress and Developments
Chairpersons: Nishimura (Jp), Mar (US)**

8:45 am – 10:10 am: Presentations (7 presentations @ 10 minutes; 2 additional QA minutes per presenter)

P3-1 Stronger Mega Cities for the Next Major Earthquake; A. Wada (Jp)*

P3-2 Resilience Challenges and Opportunities; M. Comerio (US)*

P3-3 A Time-Dependent Model for Seismic Risk Reduction Policy Analysis; D. Lallemand (US)*

P3-4 A Seismic Building Rating System – the New Zealand Experience; H. Ferner (NZ)*

P3-5 Applying Resilient Rating Systems for Predicting Continued Operability of Hospitals After Earthquakes; M. Boston (NZ)*

P3-6 Research and Development on Safety of Buildings Against Natural Disasters and Urban Fires at the Building Research Institute; M. Midorikawa (Jp)*

P3-7 Resiliency Evaluation of Reinforced Concrete Buildings; S. Kono (Jp)*

図 10 第 17 回日米設計協議会国際会議のセッションにて研究成果を発表

- ・新聞発表等のマスメディアへの発表

東京都市大学広報を通じて、東急建設技術研究所の大型振動台実験の内容をプレス発表した。多くの業界紙に取材を受け、本研究課題の実用化を数年後に行う予定で、実用化を加速していること、従来技術を大きく上回る減衰性能を実現し、長周期地震動に対する有効な技術となること、など現在の技術開発状況をマスコミで紹介した。本報告書冒頭で述べたとおりである。プレスリリースの詳細は、本報告書の添付資料に掲載した。

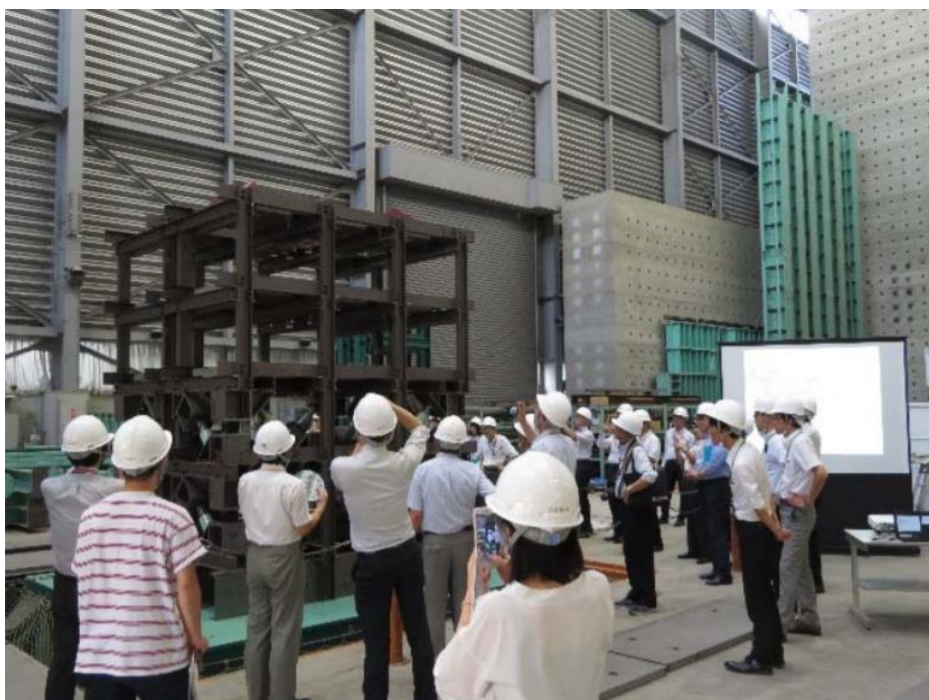


写真 4 2018年8月31日 技術研究所における公開実験の様子

2.3 最終年度（2019 年度）の研究成果

・プロトタイプ油圧ダンパーの設計、製造、性能確認実験

本研究課題の高減衰制震構造を実現するためにもう一つ重要な部材である高減衰オイルダンパーの開発を、最終年度である 2019 年度に行った。理論研究の結果、従来のパッシブ型オイルダンパーとは全く異なる性能が必要であることが判明している。それは、次の 2 点である。

1. オイルダンパーに必要な軸剛性 k_d は、3 階以上の建物規模であれば、固有周期によらず、500 KN/mm 以上が必要である。
2. オイルダンパーの最適減衰係数 C_{opt} の値は、建物規模、ダンパーの配置、ダンパーの設置個数などに影響されず、もっぱら構造物の一次固有振動数 ω_o のみに依存しており、その値はほぼ次式で推定できる。

$$\omega_o C_{opt} = k_d \quad (1)$$

低層建物の場合、オイルダンパーに必要な軸剛性と減衰係数は、それぞれ 500 KN/mm と 50 KN sec/mm 程度である。この値は、建物規模、ダンパーの配置計画、ダンパーの個数、等には影響されないため、工場出荷試験は、建物形状や規模と無関係に実施することができる。この点は、ダンパーなどの製品検査を客観的に行うために極めて重要な発見であった。従来は、建物規模やダンパーの配置計画によって、減衰係数は大きく影響されると考えられており、工場出荷試験には構造設計者の指示や図面で示された仕様を守って生産管理をしなければならなかったからである。

さらに、第 2 項目は従来のパッシブ型制震構造で使われてきたオイルダンパーの最適減衰係数が超高層建物の場合 50 KNsec/mm 程度であったことを考えると、500 KNsec/mm という値は極めて大きいと言わざるを得ない。これは、本研究課題である高減衰制震構造システムに限ったことではなく、普通のパッシブ型減衰装置でも成り立つ条件である。

パッシブ型減衰装置が解析予想された性能を発揮できなかった最大の理由は、最適減衰係数と実際に設置されたダンパーの減衰係数には 10 倍ほどの開きがあったためである。この違いは、建物構造物に減衰装置を設置したときの数学モデルが、実際の構造モデルと大きく異なっていたために生じた。本年度の研究成果である「フィードバックを考慮したパッシブ型制震構造理論」を基にした時刻歴応答解析プログラムでは、この問題を克服することができる。

本研究課題で試作した圧縮型オイルダンパーの形状を図 1 1 に示した。圧縮型のオイルダンパーを採用した理由は、施工性の高さにある。引っ張り軸力と圧縮軸力の両方を扱うダンパーの場合、クレビスやユニバーサルジョイントなどの工夫が必要であり、必然的に施工精度を高める必要があった。しかし、圧縮ダンパーの場合は、接合部は存在せず、面

と面の圧縮力のみで応力伝達が行われる。1 ループで消費するエネルギーが等しくなれば、エネルギー消費量は同じであり、両効きの通常ダンパーと比較して、圧縮片効きダンパーを使用しても減衰効果には何も変わらないことが数値解析結果から判明している。

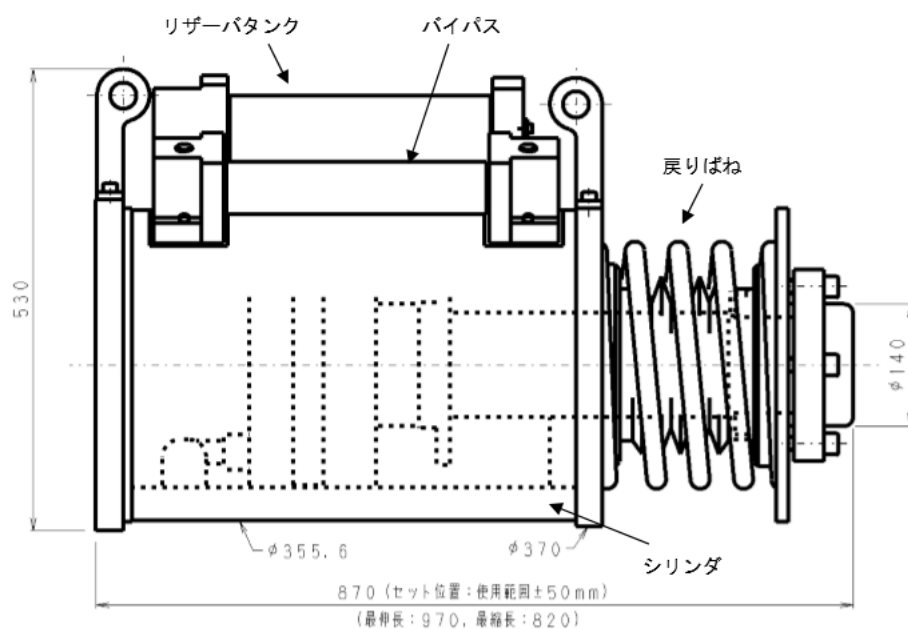


図 1 1 圧縮型オイルダンパーの原理図

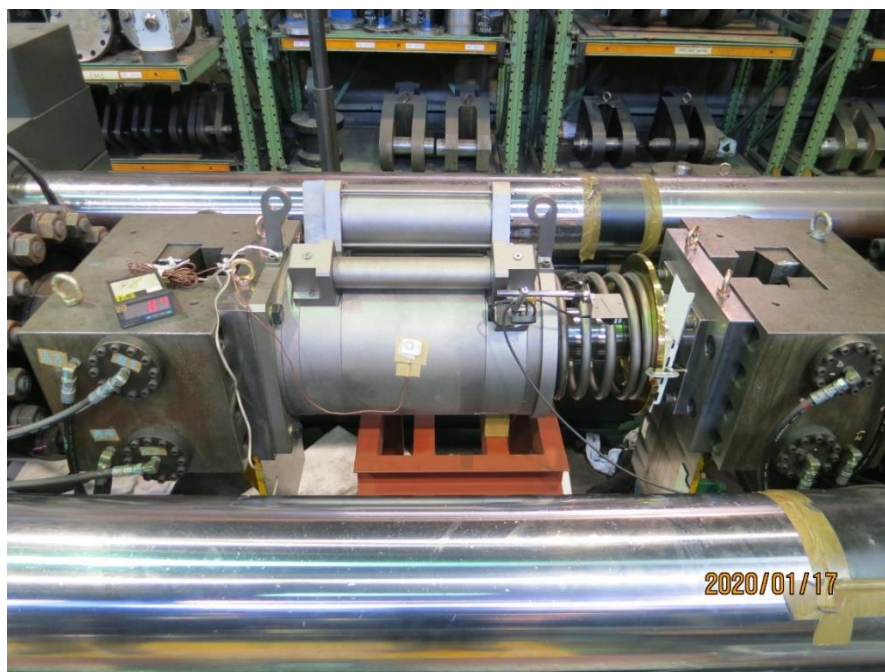


写真 5 圧縮型オイルダンパーの工場試験

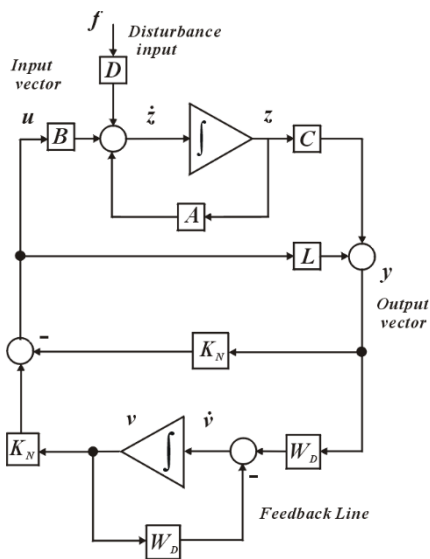
・フィードバックを考慮した時刻歴応答解析

本研究課題では、積層ゴム支承とオイルダンパーという 2 つの構造部材を技術開発した。しかし、実施設計を行うためにはソフトの開発も必要である。既往研究では、アクティブ型制震構造とパッシブ型制震構造は、全く無関係の技術と考えられてきた。しかし、パッシブ型制震構造のモデル化を正しく行うためには、構造物の動特性を正しくモデル化する必要があることが明らかとなった。従来の数学モデルでは、建築振動を正しくモデル化できていなかったのである。

研究成果の重要な項目の一つは、解析プログラムである。「フィードバックを考慮したパッシブ制震」の理論的な解説は、第 1 章、第 1 節、文献 16, 18 に詳しく述べている。これらの理論を基に作成した時刻歴応答プログラムの全ソースファイルを添付資料に示す。Linux 系の OS で起動する PC に Fortran のコンパイラをインストールし、ソースファイルをコピーすれば、誰でも正しい数学モデルで時刻歴応答解析ができる。

東急建設建築設計本部の構造設計部員を対象として、解析プログラムの使用方法、ダンパーの最適配置検討方法などについて、技術指導を行った。実施設計建物を対象とした具体的な計算方法や、構造計画方法などを指導し、その他の建物形状でも柔軟に、制震構造技術を用いることができるように、現在も技術指導を継続している。

図 1 2 には、Linux 系 OS を用いた計算ソフトの出力の一例を示す。「フィードバックを考慮したパッシブ制震」の理論モデルは、図 12 に示すブロックダイアグラムを具体的にプログラム化したものである。建築構造解析のプログラムに現代制御理論の考え方を導入したもので、今後は研究会（著者が独自に開催している研究会、第三章参照）を通じて、広く情報を開示する予定である。



```

Nishimura Research Laboratory:
Earthquake Engineering / Structure Dynamics
Department of Architecture, Faculty of Engineering
Musashi Institute of Technology

Data Set : elcen.4
Program : Damper
Execution Date : 2006/02/24 13:30:00

=====
Address # : 1
System Disp. response (Point : 1 )
  Max : 1.176 Min : -0.877
  Maxstep : 127 Minstep : 121

Address # : 2
System Disp. response (Point : 2 )
  Max : 0.613 Min : -0.466
  Maxstep : 127 Minstep : 121

Address # : 3
System Vel. response (Point : 1 )
  Max : 28.160 Min : -26.701
  Maxstep : 124 Minstep : 130

Address # : 4
System Vel. response (Point : 2 )
  Max : 14.161 Min : -13.857
  Maxstep : 124 Minstep : 129

```

図 1 2 フィードバックを考慮した解析プログラムの出力例

・クロスアポイントメント業務と解析指導

2019年11月より東急建設株式会社と東京都市大学は、本研究成果を実用化するための継続的な技術開発活動として、クロスアポイントメント業務契約を締結し、研究成果の実用化を加速することとなった。本研究代表者である西村は、定期的に（月2回のペース）で東急建設技術研究所に出向き、解析ソフトのサーバーコンピュータへの移植作業、解析ソフトの使用手法と高減衰制震システムを用いた構造計画の具体的な手順に関する技術的な指導、実施設計における注意点など、実用化に向けた具体的な技術支援を開始した。

写真6は、クロスアポイントメント業務の一環として、上記の技術支援を行っているところである。



写真 6 クロスアポイントメント業務による技術支援

・3階建事務所建築を対象とした実施設計

具体的な3階建て事務所建築を対象として、構造計画と実施設計レベルの解析検討を行うこととなった。想定した建築計画を表1に示す。想定建物の建築計画コンセプトを図1-3に示す。この建築計画（建物規模、ダンパー配置検討、必要性能、など）を基に、構造計画の概要を立案した。詳細な検討については、添付資料（大学院修士論文：倉持代梧郎君）を参照されたい。また、第三章に構造図面、具体的なダンパー配置などの抜粋を記載した。研究成果の具体的な内容は、第三章と添付資料を参照されたい。

表 1 想定建物概要

用途	事務所ビル
階数	地上3階
建築面積	720m ²
延べ面積	2160m ²
建物高さ	12.0 m
建物重量	3000 ton
構造種別	RC造
基礎種別	べた基礎

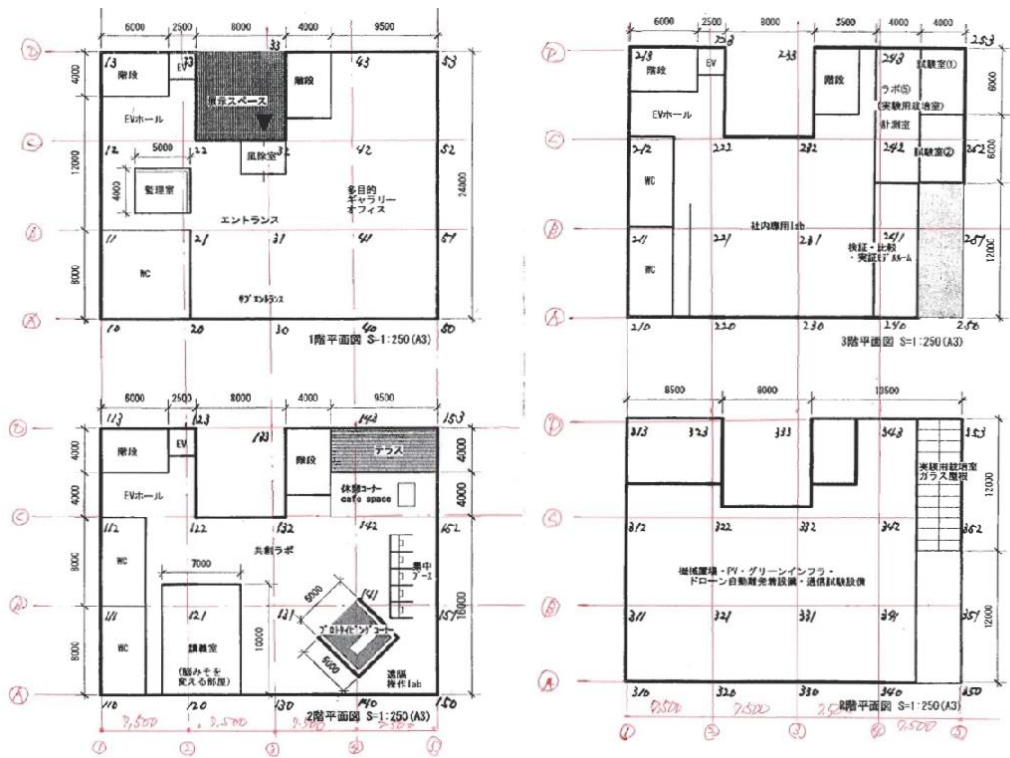


図 1-3 建築計画概要（コンセプト）

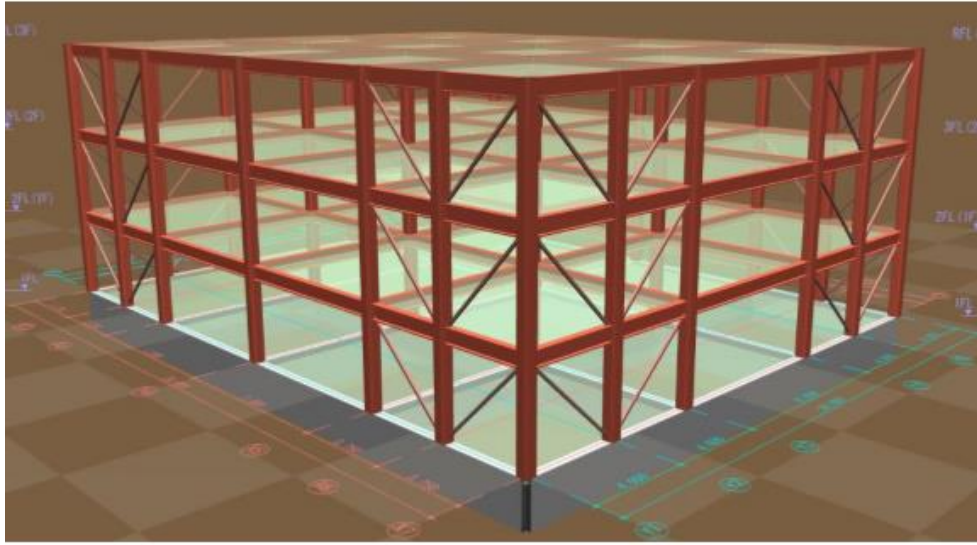


図 1 4 高減衰制震構造システムを組み込んだ 3 階建事務所棟構造計画

第三章

技術開発

3.1 実用化の現状

・プロトタイプ積層ゴム支承の試作と品質管理（株式会社モルテン）

第2章の研究成果で述べたように、既に、製品化を目標としたプロトタイプの試作に成功している。来年度以降の実設計段階にあるため、株式会社モルテンとは既に、積層ゴム支承の実施販売前に知的財産権を持つ五島育英会と実施許諾契約を締結した。現在、制震構造の減衰装置については品質管理が社会問題化している。本プロジェクトで開発している積層ゴム支承あるいは、減衰装置については建物の設計ごとに異なる部品を調達するという過去の設計手法を見直し、オイルダンパーや積層ゴム支承などの主要な部品については、一種類の製品のみを大量生産したうえで、品質管理を徹底するという方法を提案している。品質管理の手法を簡素化する以外に、品質管理を徹底する方法が無いと考えているからである。

株式会社モルテンと東京都市大学は既に、本技術に関する知的財産権の通常実施許諾契約を締結しており、高減衰制震構造システム用の積層ゴム支承についても実用化に対応した契約関係が既に構築されている。

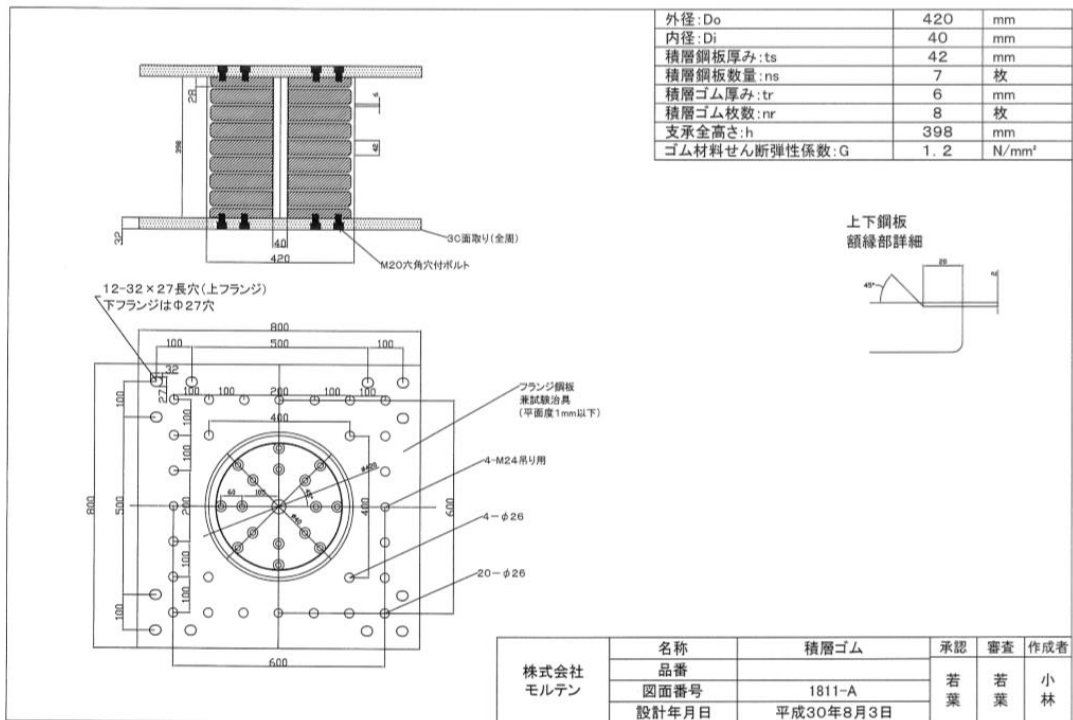


図 1 製品化された高軸力積層ゴム支承の詳細（1000 トンの耐荷重がある）

- ・オイルダンパーの試作と実験の委託（株式会社三和テッキ）

最終年度の2019年度には、三和テッキ株式会社の宇都宮事業所にて、高減衰制震構造システムに特化した、圧縮型オイルダンパーの技術開発を行った。このダンパーは比較的低層（建物固有周期が1秒以下）の建物を対象とした汎用性のある非線形オイルダンパーである。図2には、開発中のオイルダンパーの外形図を示す。図3には、圧縮型オイルダンパーの概念図を示す。最終的な仕様を表1に示す。

このダンパーの特徴は、軸剛性が高いことである。目標とした軸剛性は500 KN/mmである。これに対して、2020年1月に行った工場試験結果を、愛知工業大学鈴木研究室にて解析検討した。（添付資料に報告書を掲載している。）その結果、軸剛性は実験を行った全振動数領域において、800KN/mmを超える値を確認している。

これに対し、最適な減衰係数は目的の建物固有振動数領域であれば、ほぼ100KNsec/mm程度となる。1月の工場試験結果については、減衰係数（1次）の値についても愛知工業大学鈴木研究室で解析しており、目標の100KNsec/mm程度の値を確認している。

型式	SD2000kN-160・特型	ストローク	100mm [±50 (mm)]
最大速度	20 (cm/s)	ダンパー剛性	500kN/mm以上
最大減衰力	2000 (kN)	作動油	シリコンオイル [16.8 (L)]
リリース速度	2 (cm/s)	製品質量	約500 (kg)
リリース減衰力	1500 (kN)		

<外形図>

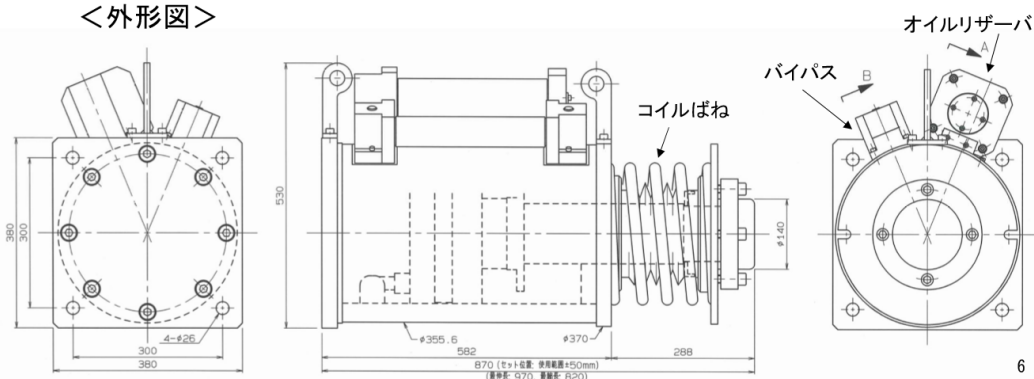


図 2 ダンパーの基本特性

表1 試作を行った圧縮型ダンパーの目標性能

高減衰制振構造システム用オイルダンパーに対する要求仕様

- ①圧縮力最大値 2000 (kN)
- ②減衰係数の初期値 1000 (kN・sec/cm)
- ③ダンパー剛性 500 (kN/mm)
- ④ストローク ±50 (mm)
- ⑤戻り速度 0.05 (秒) で30 (mm)
- ⑥オイル量 10 (リットル) 以上

圧縮時は、圧力弁が開き、流路を制限することで作動油の圧力を生じさせて、減衰力を発生する。

伸長時は、逆止弁が開き、広い流路を確保することで、作動油をスムーズに流し、減衰力の発生を抑止する。(ばね力での戻りを早くする。)

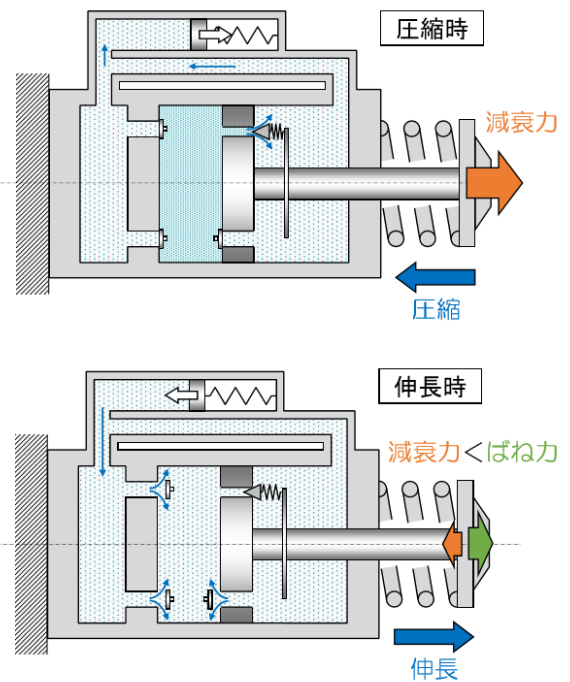
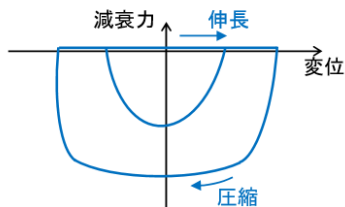


図3 圧縮型オイルダンパーの作動状況

・ 3階建て事務所建築を対象とした実施設計への適応検討

技術開発した「高減衰・制震構造システム」を実際の建築建物に適応した場合の具体的な設計例があると、今後の実用化に道筋をつけることができる。本研究開発の最後の目的も、最新の研究結果を社会還元することにある。

3階建て事務所建築を想定し、この建物に本技術開発の成果を応用し、試設計を行った。概要をここに記載するが、本学建築学専攻修士論文（倉持大梧郎君）に詳細な検討結果が記載されている（添付資料参照）。

表2 建物概要（3階建て事務所ビル）

用途	事務所ビル
階数	地上3階
建築面積	720M2
延べ面積	2160m2
建物高さ	12.0 m
建物重量	3000 ton
構造種別	RC造
基礎種別	べた基礎

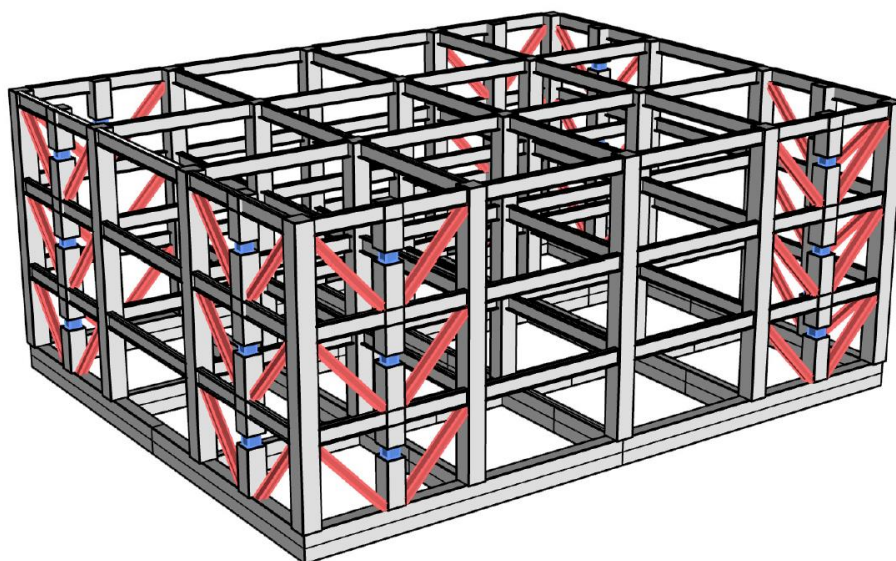


図4 ダンパーと積層ゴムの配置計画

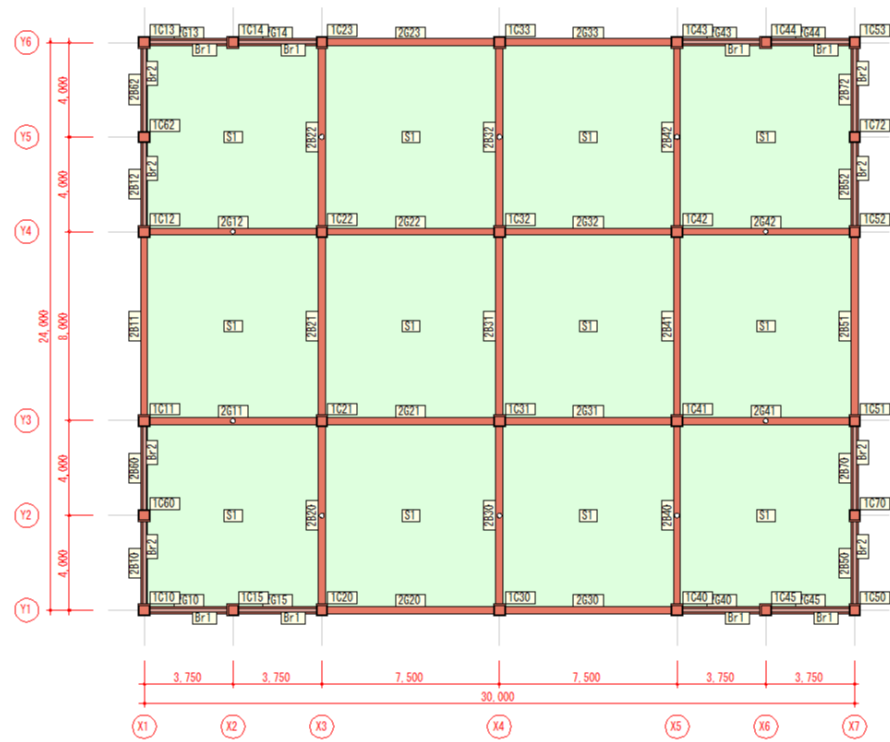


図 5 基準階平面図 (梁伏せ図)

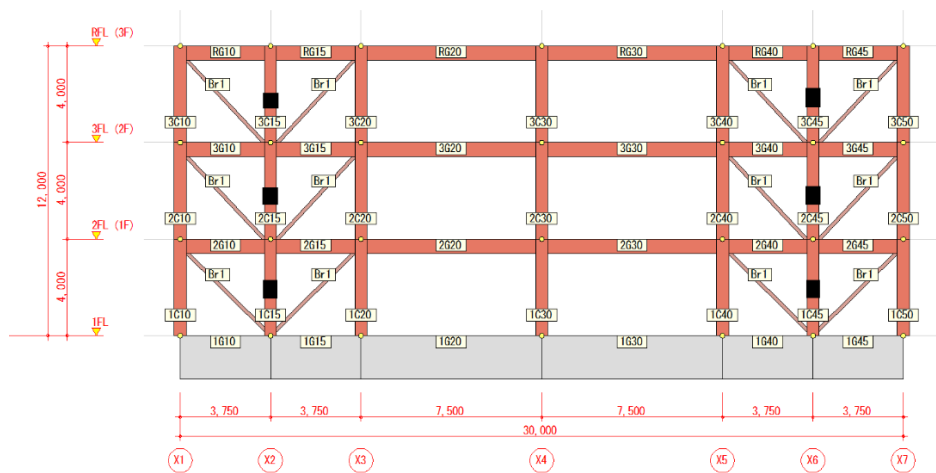


図 6 Y1 通り 軸組図

3.2 実用化への展望

・新型免震構造研究会（コンソーシアム）の概要と協力企業

西村研究室では、基礎研究成果を実用化するために、大学、製造メーカ、建築設計事務所、建築会社、を主たる構成団体とする研究会を組織し、活動を行ってきた。この研究会の活動目的は、大学における基礎研究成果の社会還元であり、図7に示すような相互の信頼と情報の共有を円滑に行うことを目的としている。

表 3 コンソーシアムに参加している企業と参加者（一部）

- ・ 東急建設株式会社 技術研究所 所長
- ・ 鹿島建設株式会社 建築設計本部 構造設計統括グループ 部長
- ・ 株式会社 大林組 技術研究所 所長
- ・ 株式会社 奥村組 技術研究所 所長
- ・ 戸田建設株式会社 技術研究所 主幹
- ・ 三菱地所設計株式会社 構造設計部 部長
- ・ 大建設株式会社 代表取締役
- ・ 鉄建建設株式会社 専務取締役
- ・ 住友化学株式会社 技術研究所
- ・ 株式会社モルテン 広島高陽工場
- ・ 愛知工業大学 工学部建築学科 鈴木研究室

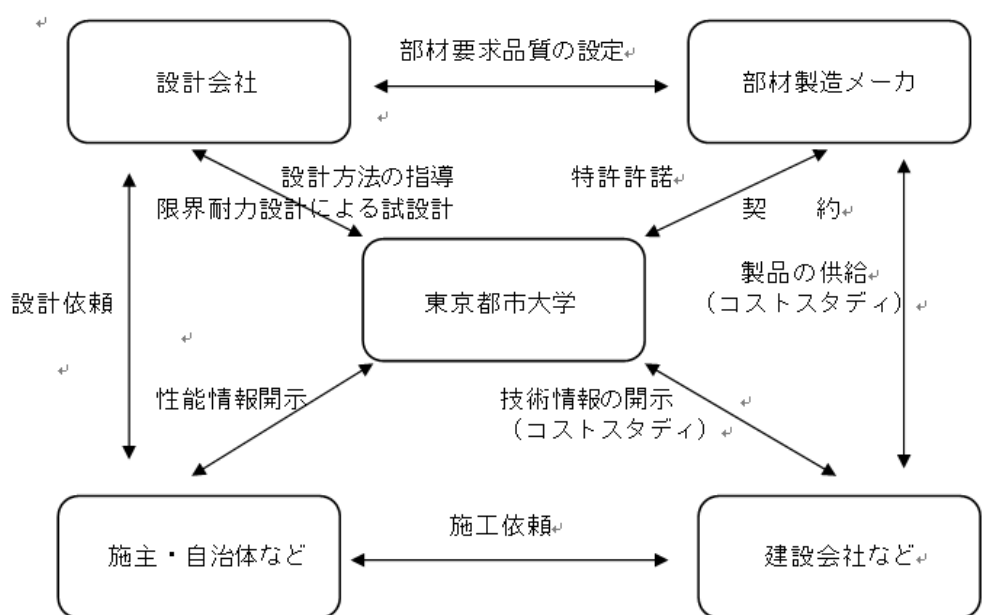


図 7 コンソーシアム（西村研究室主催）の活動目的

この研究会を通じて、三和テッキで行われた高減衰オイルダンパーの性能確認実験を公開で実施し（2020年3月13日、宇都宮事業所）、研究会委員多数の参加のもと技術説明会ならびに工場実験を実施した。



写真 1 三和テッキ宇都宮事業所にて行われた高減衰オイルダンパーの公開実験説明会



写真 2 公開実験に参加した研究会員 集合写真

結 び

本研究課題である「高減衰・制震構造システム」の研究開発は、当初の計画通り全て終了した。本報告書の第1章において制震構造技術の歴史的発展経過を俯瞰したが、我が国における耐震構造技術の歴史は、必ずしも一直線で発達したわけではなく、むしろ遠回りをして漸く現在のレベルにまで達したと考えることができる。先人の様々な挑戦と失敗の繰り返し、そして、経験と知見の蓄積により、建物構造物に減衰性能を付与することが如何に困難であるかが、やっと理解されるようになってきた。結果として、『減衰性能を付与させるためには振動数も同様に変化させなくてはならない』という一般的な原理が認知されるようになったのである。

本研究の成果を応用すると、免震構造にも最適な固有周期が存在し、その固有周期に設定したとき減衰率が20%程度となり、長周期地震動にも対応することのできる免震構造が実現できる。このように、本研究開発の意義は、「部分免震構造」という特殊な構造形式を実現するにとどまらず、もっと広い意味で建築構造の減衰性能を正しく評価することが可能な「一般的な解析手段と技術的な手段」を確立した点にある。近い将来、高減衰制震構造が実現されて、我が国の耐震構造そのものが大きく進歩することを期待して、3年間の研究開発を締めくくりたいと思う。

最後に、本プロジェクトを実施するにあたり、物心ともに多大なご支援をいただいた東急建設技術研究所 沼上清所長に深甚の謝意を表します。また、振動台実験の実施に当たり様々な技術的支援をいただいた豊嶋学グループリーダーに御礼申し上げます。さらに、実用化部材である積層ゴム支承の非線形解析検討と圧縮型油圧ダンパーの実験データ解析を担当した、愛知工業大学建築学科講師 鈴木敏志氏には、詳細かつ正確な解析検討を実施していただいた。本研究プロジェクトは、鈴木研究室の研究協力がなければ、これだけ短期間に実用化部材の開発は実現できなかった。ここに記して、その労を多としたい。

構造部材の開発においては、株式会社モルテンの全面的な協力を得た。広島高陽工場における1000トンの鉛直荷重が載荷可能な二軸加力装置によって、高軸力積層ゴム支承の性能確認実験が行われた。実用化プロジェクトにおいて、特に構造部材の場合は縮小モデルによる性能確認が普通である。実施設計に用いることのできるフルスケールの部材を製品開発するとともに、性能確認実験も含めた委託研究をご担当いただいた。本研究開発へのご理解と多大なご協力をいただいた株式会社モルテンの小林俊彦取締役には、この場を借りて感謝を申し上げたい。

高減衰の非線形圧縮型オイルダンパーの実用化研究開発では、株式会社三和テッキの全面的なご協力をいただいた。三和テッキ株式会社 新谷啓三執行役員には、技術開発の意義と実用化に向けた取り組みを高く評価していただいた。同社宇都宮工場の技術陣の創意工夫によって、通常よりも一段と高い目標性能を持つ高減衰オイルダンパーの新規開発を1年弱という短時間にて実現することができた。株式会社三和テッキの関係各位に御礼申し上げます。

小職が主催し、定期的で開催している研究会「淡広会」に参加し、多くの助言と指摘をいただいた研究会会員の諸兄にも謝意を表したい。本研究の公開実験、工場試験、定期開催の研究会でのディスカッションなどを通じ、多くの有益なアドバイスや知見をいただいた。特に、三菱地所設計元専務取締役 深澤義和氏、株式会社奥村組技術研究所 川井伸泰所長、鹿島建設株式会社 栗野治彦部長、株式会社日本設計 小林秀雄執行役員、各氏には技術的に高い視点より有益なご意見を何度となく頂戴した。多くの指摘と厳しいご意見は、本技術開発の様々な点に生かされている。多忙な業務の間、時間を割いて研究会にご参加いただいた諸兄には、お礼の言葉もない。今後、技術開発成果の水平展開と普及に向け、研究会を通じてさらなる情報発信を継続したい。

最後に、東京都市大学建築学科に在籍し、小職の研究室で、スチレンボードの模型製作と小型振動台実験を担当した、多くの研究室学生諸君にも謝意を表したい。本研究課題の3年間にわたり修士課程に在籍した 宗形武弥君、倉持大梧郎君、の二名は、本研究課題の実施に当たり多大な貢献をした。その研究成果は本学大学院修士論文にまとめられている。両君の修士論文は、実施設計の視点からも多くの示唆に富んでおり、実用化と水平展開を希望する多くの構造技術者にとって有益な情報源となることを確信している。

令和 2 年 4 月 10日

東京都市大学 建築都市デザイン学部
建築学科 教授 西村 功