各種建築物の制振構造デザイン手法の高度化

研究代表者　曽田 五月也
（創造理工学部 建築学科　教授）

１．研究課題

1995 年 1 月に兵庫県南部地震が発生して多大な人的・物的な被害が発生した。これを契機にして、早稲田大学理工学研究所にプロジェクト研究「粘弾性ダンパの開発と耐震設計・耐震補強への応用」を開始し、学外からも多くの実務家に参加頂き大きな成果を上げることができた。

本プロジェクト研究が標榜する「高減衰構造システム」とは、建物の減衰性能を高めることで建物の耐震安全性を高めるための合理的な構造システムに他ならない。減衰とは、変形が繰り返されるたびに建物の内部で、地震動の作用により生じた振動エネルギーが非可逆的に他種のエネルギーに変換されることで振動が低減してゆく現象である。建築構造本体の弾塑性変形の繰り返しによっても地震入力エネルギーの吸収は行なわれるが、構造物の損傷との引き換えになるために、次の大地震における建物の安全性は必ずしも保障されない。したがって、建物への地震入力エネルギーを、自らは損傷する事の無いエネルギー吸収装置（=ダンパ）の変形の繰り返しにより吸収させる構造システムを活用することが必要と考え、そのための要素技術に関する研究を続けてきている。また、これまでの検討を踏まえて、現在のプロジェクト研究では、ダンパによる制振構造デザインのさらなる高度化を目指して以下に記す項目に取り組んでいる。

２．主な研究成果

■過酷な地震動の定量的評価と建物の最大応答予測

建築物の耐震性能評価において最大応答変形を予測することは極めて重要である。本研究では VDRS Format により建物の地震時応答に関わる地震動のエネルギーと建築物の吸収エネルギーとの関係を定量化し、最大応答変形を予測する手法を提案している。今年度は特に同手法を用いた多層建物の地震応答最大変形の予測手法についての検討を行った。

■摩擦式エネルギー吸収機構を内蔵する薄板軽量形鋼造耐力壁による中層建築物の耐震設計

薄板軽量形鋼造耐力壁は履歴ループに強いスリップ性状を有しているため、紡錘型の復元力特性を持つ鉄骨ラーメン構造等に比べるとエネルギー吸収能力が低く、繰り返し振幅による耐力の低下も顕著である。本研究では薄板軽量形鋼造耐力壁に摩擦式エネルギー吸収機構を内蔵すことで、地震時の変形と加速度を同時に抑制し、繰り返しの地震動に対しても高い耐震性を維持し続ける構造システムを提案している。また、近年告示の改定により薄板軽量形鋼造の中層建築物への適用が可能となったことを踏まえ、提案する耐力壁を用いた中層建築物の合理的な設計法についての検討を進めている。(図 1)

■粘弾性仕口ダンパによる軽量鉄骨造の制振補強に関する研究

今後発生が予想される過酷な地震動の作用に対して、靭性に依存して設計されている既存の軽量鉄骨造の多くは応答変形が過大になることが懸念され、その耐震補強が急務であると考えられる。

しかし、一般的な耐震補強の多くはコスト高となることから普及に至っていないのが現状である。本研究では木造軸組構法の耐震補強用に開発された粘弾性仕口ダンパを、かさ上げ用部材を介して鉄骨造建築物の柱梁仕口部に設置することで、低コストながらも高い地震応答低減効果を発揮し、低層鉄骨造建築物の耐震補強促進に極めて有効であることを提案している。(写真 1)

■接着技術の建築構造への応用　- DIY 制振補強に関する研究 -

本研究では低コスト且つ簡易な施工で実現可能な「DIY」制震補強工法の開発を目指しており、非専門家であっても設計、施工可能な簡易マニュアルの提案を行っている。中でも接合方法は簡易な施工法提案に重要な要素で、種々の接合方法を比較検討した結果、母材を加工する必要がない接着剤接合が特に施工性が高いことが確認された。そこで、これまで鉄骨構造に用いられていなかった接着剤接合について、様々な外的要因に対する諸特性について実験的、解析的な検討を行うことで明らかにし、DIY 工法における接着剤接合を確立することを目的とした検討を進めている。

■リンク式流体慣性ダンパによる建築物の制振に関する研究

負剛性を有するダンパを構造物に設置することで、主構造が塑性域に至った後も建物全体の剛性を見かけ上低減し荷重の増加を防ぐことができるため、変位と加速度の低減をより効果的に行うことが可能である。しかし、このような負剛性制御は概念的にはアクティブ・セミアクティブ制御によって容易に実現されるが、外部からのエネルギー供給や複雑な制御装置が必要となるなど多くの問題を伴う。本研究では、パッシブ制御で簡易に負剛性を発現可能な流体慣性ダンパを 2 基連結させることで、損傷集中抑制効果を併せ持つリンク式流体慣性ダンパを提案し、その有効性と高性能化についての検討を行っている。

■外付け式層間変形制御装置に関する研究

地震動による建築物の崩壊機構の一つに、特定の層に変形が集中することによって発生する層崩壊がある。層崩壊は、多大な人命被害を引き起こす直接的な要因となることから、最も避けなければならない崩壊形式である。そこで、本研究では中低層建築物の層崩壊を抑制することを目的とした外付け式層間変形制御装置を提案する。今年度は、小型 3 層鋼製骨組を用いた振動台実験による層崩壊抑制効果の検証の他、外付け装置と主構造との接合部に回転摩擦機構を導入することによる、エネルギー吸収性能の向上方法についての検討を行った。(写真 2)

■すべり基礎構造に関する研究

戸建住宅の免震化は主にコスト面の理由から未だ普及が進んでいない。そこで本研究では、低コストかつ戸建住宅に広く適用できる免震に準じた構造として、滑り基礎構造を提案し研究を進めてきた。滑り基礎構造は上部構造とべた基礎間に滑り材を挿入することで地震エネルギーを摩擦エネルギーとして吸収し応答を低減する構造である。今年度は滑り基礎構造の実用化に向けた具体的な検討として、摩擦材の待機時間依存性が滑り基礎構造の応答に与える影響についての検討と、過大な滑り応答の抑制方法についての検討を行った。

■ツーバイフォー構造の制振補強に関する研究

ツーバイフォー耐力壁の復元力特性は強いスリップ性状を示し、エネルギー吸収能力に乏しいことが知られている。本研究では、ツーバイフォー耐力壁にオイルダンパを設置することで、エネルギー吸収能力を向上させる手法についての検討を行っている。今年度は木造軸組み工法用に開発した圧効きオイルダンパを延長部材を介して耐力壁内に設置することで、最大耐力の向上と剛性低下の抑制、エネルギー吸収性能の大幅な向上が可能となることを実験的に明らかにした。(写真 3)

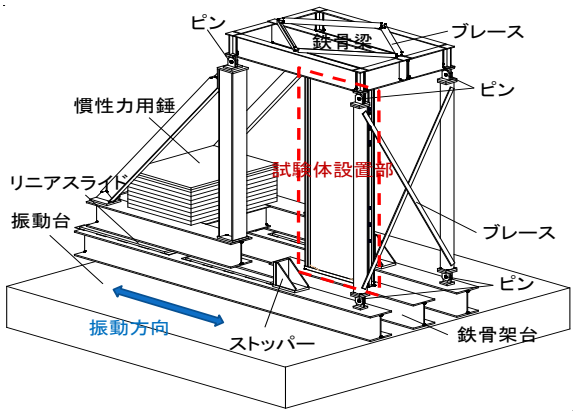

図 1 摩擦機構内蔵耐力壁の
振動台実験システム

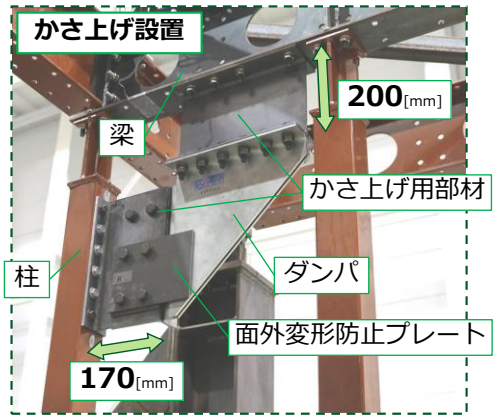

写真 1 粘弾性仕口ダンパによる
軽量鉄骨造の制振補強

写真 2 外付け式層間変形制御装置を設置した
小型 3 層鋼製骨組の振動台実験

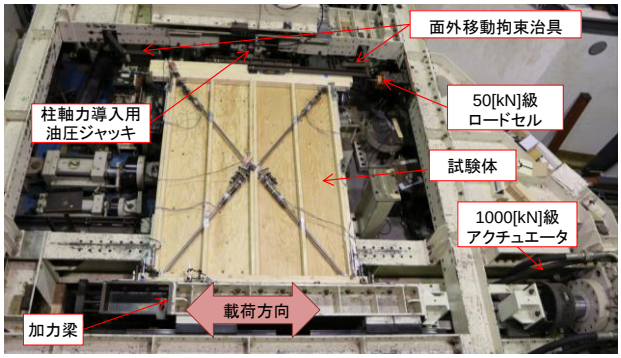

写真 3 圧効きオイルダンパを設置した
ツーバイフォー耐力壁の動的加力試験

3．共同研究者

関谷英一（(株）鴻池組)、袖山博（三和テッキ（株))、齋藤光広（(株）構造計画研究所)、平田裕一（三井住友建設（株))、岡野照美（光陽精機（株))、山崎久雄（ユニオンシステム（株))、武市英博（(株）ハウジングソリューションズ)、鵜野禎史（(株）川金コアテック）岩田範生（近畿大学)、宮津裕次（広島大学)、宋成彬・脇田健裕（早稲田大学)、

4．研究業績

■学術論文

日本建築学会構造系論文集

・外付け式層間変形制御装置を設置した小型 3 層鋼製骨組の振動台加振実験，宮津裕次（広島大)，曽田五月也（早稲田大），構造系論文集 Vol.80，No.716，pp.1505-1514，2015 年 11 月

・外付け式層間変形制御装置による中低層建築物の地震応答制御，宮津裕次（広島大)，曽田五月也（早稲田大），構造系論文集 Vol.80，No.710，pp.561-570，2015 年 5 月

■学会講演

日本建築学会大会(関東)

・高靭性・高減衰耐力壁を用いた薄板軽量形鋼造の中層化に関する研究(その 2. 中層建築物の設計と地震応答解析による耐震性能評価),曽田五月也, 齋藤健寛(早稲田大), 久保和民(竹中工務店)，2015 年，CDROM-22578 構造Ⅲ，pp.1155-1156

・高靭性・高減衰耐力壁を用いた薄板軽量形鋼造の中層化に関する研究(その 1. 実大耐力壁の正負

交番繰り返し載荷試験),曽田五月也（早稲田大），久保和民（竹中工務店），齋藤健寛（早稲田大）,2015 年，CDROM-22577 構造Ⅲ，pp.1153-1154

・低層鉄骨造の損傷抑制用 DIY 制震補強に関する技術開発(その 10. 既存 5 層鉄骨造建物に対する DIY 制震補強工法の施工実験),曽田五月也（早稲田大），花井勉（えびす建築研究所），井上雄貴（清水建設），皆川隆之（えびす建築研究所），佐藤剛生（三菱地所設計），三須基規（昭和電線デバイステクノロジー），井上雄貴（清水建設）,2015 年，CDROM-22501 構造Ⅲ，pp.1001-1002

・低層鉄骨造の損傷抑制用 DIY 制震補強に関する技術開発(その 9. 接着剤接合部の接着強さの疲労耐久性に関する検討),曽田五月也（早稲田大），花井勉（えびす建築研究所），井上雄貴（清水建設），皆川隆之（えびす建築研究所），佐藤剛生（三菱地所設計），神谷佳祐（早稲田大）,2015 年，CDROM-22500 構造Ⅲ，pp.999-1000

・低層鉄骨造の損傷抑制用 DIY 制震補強に関する技術開発(その 8. 接着剤の劣化要因を考慮した接着強さの力学性能検証実験)，曽田五月也（早稲田大），花井勉（えびす建築研究所），神谷佳祐（早稲田大），皆川隆之（えびす建築研究所），井上雄貴（清水建設），佐藤剛生（三菱地所設計）,2015 年，CDROM-22499 構造Ⅲ，pp.997-998

・現場溶接型柱梁溶接接合部における梁端仕口ディテールに関する実験的研究(その 3. 破壊性状),増田開（早稲田大），中込忠男（信州大），曽田五月也（早稲田大），金子洋文（信州大），堤成一郎（大阪大学），的場耕（角藤），嶋徹（戸田建設），鈴木励一（神戸製鋼）,2015 年，CDROM-22413 構造Ⅲ，pp.825-826

・現場溶接型柱梁溶接接合部における梁端仕口ディテールに関する実験的研究(その 2. 変形性能),巻島淳，中込忠男（信州大），曽田五月也（早稲田大），金子洋文（信州大），堤成一郎（大阪大学），内田昌克（アークリエイト），鎌倉和彦（ヤマネ鉄工建設），板谷俊臣（永井製作所）,2015 年，CDROM-22412 構造Ⅲ，pp.823-824

・現場溶接型柱梁溶接接合部における梁端仕口ディテールに関する実験的研究(その 1. 仕口ディテールと施工方法),中村洋一（永井製作所），中込忠男（信州大），曽田五月也（早稲田大），金子洋文（信州大），堤成一郎（大阪大学），中澤好道（ヤマネ鉄工建設），廣重隆明（竹中工務店），藤田哲也（日本設計）,2015 年，CDROM-22411 構造Ⅲ，pp.821-822

・実用的滑り基礎構造に関する研究（その 3. 超高分子量ポリエチレンとフレキシブルボードを用いた滑り基礎の応答低減効果)，曽田五月也（早稲田大）、小田観世（大林組）,2015 年，CDROM-22287 構造Ⅲ，pp.573-574

・多層建物モデルと等価 1 質点縮約モデルにおける最大半サイクル吸収エネルギーの等価性に関する研究,曽田五月也、氏家章宏（早稲田大）,2015 年，CDROM-22194 構造Ⅲ，pp.387-388

・外付け式層間変形制御装置による建築物の地震応答制御に関する研究（その 4.装置の性能改善と時刻歴応答解析による検討),伊藤 彰保，宮津 裕次（広島大）,曽田 五月也（早稲田大），大崎 純（広島大）,2015 年，CDROM-21359 構造Ⅱ，pp.717-718

・外付け式層間変形制御装置による建築物の地震応答制御に関する研究（その 3.小型 3 層鋼製骨組の振動台加振実験),宮津 裕次，伊藤 彰保（広島大）,曽田 五月也（早稲田大），大崎 純（広島大）,2015 年，CDROM-21358 構造Ⅱ，pp.715-716

・リンク式流体慣性ダンパの高性能化に関する研究（その 2.小型リンク式流体慣性ダンパの単体性能実験),曽田五月也、渡井一樹（早稲田大）,2015 年，CDROM-21341 構造Ⅱ，pp.681-682

日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2015

・リンク式流体慣性ダンパを用いた構造物の制振に関する研究, 曽田五月也（早稲田大）、渡井一樹（早稲田大），日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2015,USB 論文集 320,2015.8

■シンポジウム

・早稲田大学創造理工学部建築学科曽田研究室主催：第 4 回　制振構造デザイン技術の高度化に関するシンポジウムー過酷な地震動にどう備えるかー, 早稲田大学西早稲田キャンパス 57 号館 2 階 201 教室, 2015 年 9 月 18 日

５．研究活動の課題と展望

本年度は各研究テーマにおいてこれまでに積み重ねてきた検討内容をさらに発展させると共に、数多くの実大規模の構造実験等も行うことで実用化に通じる重要な研究成果を得ることが出来た。次年度は、既往の研究成果の整理・集約と不足事項の補充に加え、新たな検討も加えることで研究成果の体系化と実施設計への適用に向けた道筋をつける。