

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 曾田 五月也
(創造理工学部 建築学科 教授)

1. 研究課題

本プロジェクト研究の目的は、想定を大幅に超えるような地震動が発生した場合にも建物内部や構造体に大きな損傷を与えることなく機能を維持し続けることが可能な構造システムを、パッシブかつ安定した機構を組み合わせてローコストで実現する技術を開発するものである。開発を目指す構造システムは上部構造の高減衰化、損傷集中の抑制、過大応答の防止等の機能を発揮し、大地震動の繰り返しに対しても建物の機能を維持し続けることを可能とするものである。

我が国における戸建て住宅を含む低層建物の建設はそのほとんどが、木造軸組み工法およびツーバイフォー、軽鋼構造(薄板を含む)のいずれかを用いて行われる。これらの建物の構造的な特徴はスリップ型の復元力特性を有していることであり、バイリニア型の復元力特性を発揮する鉄骨ラーメン構造等と比べると、エネルギー吸収能力が低く、繰り返しによる耐力低下が顕著な点にある。一方で、現行の耐震設計法においては建物の耐震安全限界性能を確認する場合の地震動強さは地表面での最大速度 50cm/s が目安とされているが、近年日本各地で記録されている震度 7 クラスの地震動では 100cm/s を超えるものも少なくない。このような過酷な地震動に対しても人や財産に致命的な被害を及ぼすことの無いことはもとより建物の機能を維持出来ることも重要であり、そのためには在来の構造法にとらわれることなく新しい技術を積極的に取り込むことが必須である。

そこで、本研究プロジェクトでは 4-5 階建て程度までの低層建物を主な対象として、単純な機構を構造システムに組み込むことで飛躍的に耐震性能を向上させるローコストな手法の開発を目指した。目指す構造システムでは、摩擦機構を内蔵した耐力壁等を上部構造の耐震要素として組み込むことで靱性とエネルギー吸収能力を大幅に向上させたうえで、層間変形制御装置を設置することで特定の層への損傷集中を抑制すると共に地震エネルギーを建物全体で効率よく消費する。さらに、上部構造と基礎との間に滑り材を挿入する滑り基礎構造を適用することで、過酷な地震動が作用した場合にも、上部構造の応答層間変形及び加速度を頭打ちにするといった 3 種類の異なる機能を組み合わせて構築されるものである。これら 3 種類の異なる要素技術を適切に組み合わせることで、例えば想定を大幅に超えるような地震動が発生した場合にも、建物内部や構造体に大きな損傷を与えることなく機能を維持し続ける構造システムの供給が可能となる。

従来のパッシブ制振構造の多くはダンパもしくは免震部材そのものの機構に工夫を加えることで、意図する振動制御効果を実現することを目指しているが、本プロジェクト研究で開発を目指す構造システムは、摩擦力という安価で安定した力学機構を利用したパッシブデバイス個々の特性を活かし、さらにそれらを組み合わせた構造システムとしてより高度で合理的かつ経済的な「耐震＋制振＋免震」構造の実現を目指すものである。また、本研究では提案する構造システムの理論的な検討に留まらず、具体的かつ実用的なデバイスの開発を行い、実大試験体による性能検証を踏まえた解析手法および構造設計法の構築までを行っている点も大きな特徴である。本研究成果は直

接に低層軽量住宅の耐震安全性向上に資するものであり、社会が求める省資源化に関しても、住宅の長寿命化促進として有効である。また、低層住宅を対象とする実大振動台実験の成果を踏まえて、さらに多様な構造物への応用の途を開き、都市の地震防災体制の強化に寄与する事を目指して実施した。

2. 主な研究成果

■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、バイリニア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ることで、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。今年度は摩擦機構内蔵耐力壁を設置した実寸2層フレームの振動台実験を実施し、種々の地震波入力に対する耐震性について詳細な検討を行った。(図1)

■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

直下型の地震動にともなって発生することの多い指向性パルス波は構造物の相対的に弱層となる層に損傷集中を発生させる可能性が非常に高い。特定層のみが倒壊に至る層崩壊を防止する機構として、油圧式リンク機構を用いた層間変形制御機構の制振効果を検証するために振動台実験を行った。油圧式リンク機構はリンク式流体慣性ダンパにより構成しているため、変形制御だけでなく負剛性制御による絶対加速度の低減効果や粘性減衰効果による応答値の全般的な低減効果にも期待できるシステムである。振動台実験では試験体の耐力分布によらず2層構造物の変形分布を概ね一様化できること実証し、高い制振効果を発揮することを明らかにした。(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接着剤接合を用いた「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。2017年度は接着剤接合部の設計法を提案すべく、単純応力下での接着強さの推定方法、及び組合せ応力が作用した場合における接着強さの評価方法を明らかにすることで、ダンパ取付け用金物における矩形接着面の設計法を提案した。また、接着剤接合の施工方法を提案すべく、接着面の不陸や圧縮圧の影響などを明らかにするとともに、上向き作業などにより実際の施工時に発生する問題点などの検証を行い、施工性に優れ、安定した接着強さが発揮される施工方法の提案を行い、接着剤接合を制振補強工法に取り入れる上での実用性を示した。(写真2)

■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

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。2017年度は、既存の3階建て鉄骨造ラーメンを対象として、粘弾性仕口ダンパを弱層の仕口部にかさ上げ設置することによる制振補強効果を、増分解析や地震応答解析により解析的に示した。(図2)

■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。今年度は各層の半サイクル吸収エネルギーおよび塑性変形時のモード性状を考慮した増分解析手法の提案を行い、これを用いた各層の最大層間変形の予測手法の提案を行った。

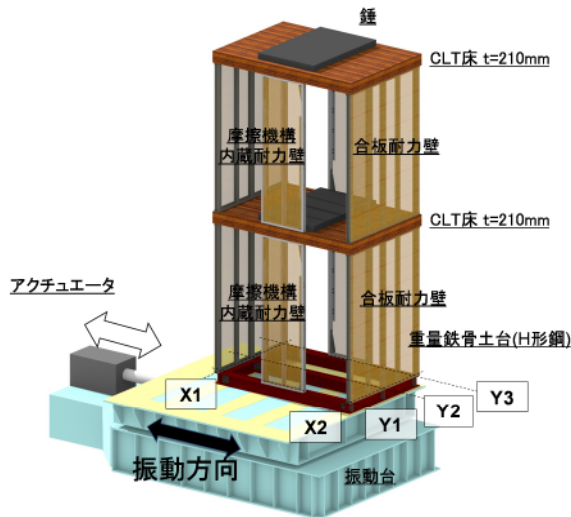


図1 摩擦機構内蔵耐力壁を設置した
実寸2層フレームの振動台実験



写真1 リンク式流体慣性ダンパを設置した
実寸2層フレームの振動台実験



写真2 接着剤接合部の施工試験

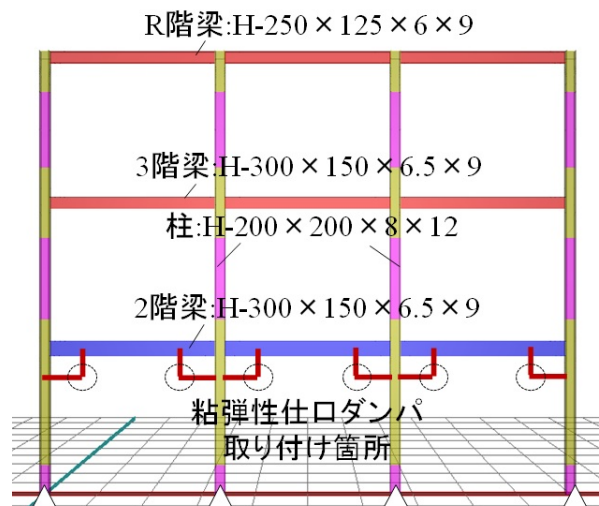


図2 粘弾性仕口ダンパによる軽量鉄骨造の
制振補強の解析モデル図

3. 共同研究者

関谷英一（（株）鴻池組）、袖山博（三和テッキ（株））、細見亮太（（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、品川亙（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）、中村美咲（（株）川金コアテック）、渡辺力（日新製鋼（株））、宮津裕次（広島大学）、脇田健裕、渡井一樹（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

- ・リンク式流体慣性ダンパの性能設計法に関する実験的研究, 渡井 一樹、曾田 五月也, 日本建築学会構造系論文集 Vol82., No.725, pp.991-1001, 2017 年 7 月
- ・高靱性・高減衰薄板軽量形鋼造耐力壁の開発とその基本力学性能, 曾田 五月也、脇田 健裕, 日本建築学会構造系論文集 Vol83., No.743, pp.201-210, 2018 年 1 月
- ・部分空間法による 2 層木造軸組工法住宅の振動特性同定, 宮津 裕次、曾田 五月也, 日本建築学会構造系論文集 Vol83., No.745, pp.409-419, 2018 年 3 月

日本鋼構造協会鋼構造論文集

- ・摩擦機構内蔵耐力壁を適用した薄板軽量形鋼造建築物の構造特性係数に関する検討, 脇田 健裕、曾田 五月也, 日本鋼構造協会鋼構造論文集 第 25 巻第 97 号, pp.39-46, 2018 年 3 月

■学会講演

日本建築学会大会(広島)

- ・滑り基礎構造における基礎の過大滑り防止対策 その 1. 解析的検討, 牟田神遼平、曾田五月也、高橋篤史, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.395-396, 2017 年 8 月
- ・滑り基礎構造における基礎の過大滑り防止対策 その 2.上部 1 層試験体を用いた振動台実験, 高橋篤史、曾田五月也、牟田神遼平, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.397-398, 2017 年 8 月
- ・VDRS Format を用いたエネルギー授受に基づく建築物の最大地震応答変形予測に関する研究 その 3.最大層間変形予測手法の提案, 古島優希、曾田五月也, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅱ, pp.151-152, 2017 年 8 月
- ・高靱性・高減衰・高耐力型薄板軽量形鋼造建築物の開発 その 6. 摩擦力導入に用いるトルシア形高力ボルトの締付軸力管理, 大岩奈央、曾田五月也、脇田健裕、斎藤健寛、菅原良太, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1117-1118, 2017 年 8 月
- ・高靱性・高減衰・高耐力型薄板軽量形鋼造建築物の開発 その 7. 潤滑皮膜を持つ熔融 Zn-Al-Mg 合金めっき鋼板を用いた摩擦機構部の単体性能試験, 渡邊力、曾田五月也、脇田健裕、斎藤健寛、菅原良太、大岩奈央, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1119-1120, 2017 年 8 月
- ・高靱性・高減衰・高耐力型薄板軽量形鋼造建築物の開発 その 8. ボルト締付軸力を变化させた実大耐力壁の静的加力試験と 2 次元フレームモデルによる解析的検証, 脇田健裕、曾田五月也、斎藤健寛、菅原良太、大岩奈央、渡辺力, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1121-1122, 2017 年 8 月
- ・高靱性・高減衰・高耐力型薄板軽量形鋼造建築物の開発 その 9. 摩擦機構内蔵耐力壁を有する 2 層薄板軽量形鋼造の振動台実験, 斎藤健寛、曾田五月也、脇田健裕、菅原良太、大岩奈央、渡辺力, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1123-1124, 2017 年 8 月
- ・高靱性・高減衰・高耐力型薄板軽量形鋼造建築物の開発 その 10. 摩擦機構内蔵耐力壁を適用した 3 階建て建築物の地震応答解析, 菅原良太、曾田五月也、脇田健裕、斎藤健寛、大岩奈央, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1125-1126, 2017 年 8 月

- ・油圧式変位増幅機構を用いたパッシブマスドライバーの開発, 渡井一樹、曾田五月也, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.667-668, 2017 年 8 月
- ・軽量鉄骨造ラーメンの粘弾性仕口ダンパによる制振補強に関する研究 -その 3- 実大振動台実験結果を用いた解析的検討, 渡辺啓太、曾田五月也、袖山博、大入慎也、西川翔太, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1307-1308, 2017 年 8 月
- ・軽量鉄骨造ラーメンの粘弾性仕口ダンパによる制振補強に関する研究 -その 4- 滑り基礎構造の上部構造用制振ダンパとしての応用, 西川翔太、曾田五月也、袖山博、渡辺啓太、大入慎也, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1309-1310, 2017 年 8 月
- ・低層鉄骨造の DIY 制震補強に関する技術開発 その 14 養生期間中の湿度環境の影響に関する実験的検討, 大入慎也、曾田五月也、花井勉、皆川隆之、渡辺啓太、西川翔太, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp. 1311-1312, 2017 年 8 月
- ・低層鉄骨造の DIY 制震補強に関する技術開発 その 15 接着剤の接着強さの寸法効果低減に関する実験的検討, 花井勉、曾田五月也、皆川隆之、大入慎也、渡辺啓太、西川翔太, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1313-1314, 2017 年 8 月
- ・超高層建築物のリンク機構による振動モード制御手法に関する研究, 金井佳吾、曾田五月也、渡井一樹, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.723-724, 2017 年 8 月

日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2017

- ・リンク式流体慣性ダンパによる構造物の層間変形制御システムの動力学特性に関する研究, 渡井一樹、曾田五月也, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2017,USB 論文集 205,2017.8

■シンポジウム

- ・早稲田大学創造理工学部建築学科曾田研究室主催：第 6 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, 2017 年 9 月 22 日

5. 研究活動の課題と展望

今期のプロジェクト研究で取り組んできた制振構造デザイン手法の高度化に関する研究の経過と成果とを要約して記した。いうまでもなく、地震動と建物との組み合わせは極めて多様であり、今回の検討結果を利用して耐震性向上を必要とする全ての事例に対応できるわけではないが、喫緊の課題である低層建物への取り組み方としては整理が進んだと考えている。一方で、他種に対応方法も含めて、過酷な地震動に向けての対応事例が増えない状況にある。これは、対象となる建物の数が余りにも多いことや、人件費を主として工事費用がかさむことが原因であると考ええる。低層・軽量・小型の建物であれば、構造の施工の専門家ならずとも、場合によれば建物所有者自らがダンパ類の設置工事を行う方法も考慮に値すると思う。実際にシンポジウムでは木造や軽量の鉄骨造を対象として DIY 方式による補強工事が実施可能であることを検証した成果を報告してきている。今後も、積極的に取り組むべき課題と思う。