

1. 2階建て鉄骨造建物の振動計測によるオイルダンパーの有無が 並進およびねじれ振動特性に及ぼす影響

Comparative Study of Vibration Characteristics of a Two-Story Steel Frame Building with and without Oil Dampers

飛田 喜則*1 山内 豊英*1 老藤 慎也*1
宮原 直樹*2 森 浩二*1

要 旨

本報告は、付加制振としてオイルダンパーが取り付けられている2階建て鉄骨造建物を対象に、ダンパーを設置した状態と取り外した状態で加振実験を行い、微小振幅域におけるダンパーの有無が建物の動的特性に及ぼす影響を比較検討した結果を示している。短辺方向のダンパーを段階的に取り外すことで、減衰性能、卓越振動数および振動モードの変化を実建物で評価した。その結果、オイルダンパーは微小変形時においても減衰効果を発揮し、ダンパーを取り外すことで卓越振動数および減衰定数が低下することを確認した。

キーワード：鉄骨造建築物／オイルダンパー／付加制震／減衰定数／振動モード

1. はじめに

地震時の応答低減や居住性向上を目的として、建物にパッシブ制振装置を導入する事例が増えている。特にオイルダンパー（以下、ダンパー）は、鋼材系ダンパーと比較して微小振幅域から減衰効果を発揮することが知られており、風に対する微小振動や中小地震に対しても応答低減が期待されている。しかし、ダンパーの微小振幅域での性能や、建物全体の振動特性に与える影響を実建物で定量的に評価した研究は多くない。

本研究では、オイルダンパーを付加制振として設置した鉄骨造2階建て建物を対象に、ダンパーを段階的に取り外しながら加振実験および常時微動測定を行い、微小振幅域におけるダンパーの有無が建物の減衰性能、卓越振動数および振動モードに与える影響を検証した。また、取り外したダンパーを再度復旧させた状態まで連続的に測定を行い、構造特性の推移と再現性についても評価した結果について示している。これにより、微小振幅域ではあるが、実建物におけるダンパー性能を段階的に検証することが可能であり、今後の制振設計におけるダンパーの配置計画やモニタリング技術の高度化に資する知見を得ることを目的とする。

2. 建物概要

2.1 対象建築物の概要

対象とした建物の全景を写真-1に示し、建物の平面図

および軸組図を図-1に示す。対象建物は、鉄骨造2階建てのラーメン構造である。平面形状は、2階の一部（東側）に吹き抜けを有するものの、長辺方向（Y方向）が約45m、短辺方向（X方向）が約17mのほぼ整形である。スパン割りは、ほぼ均等長さで構成されている。なお、以後、長辺方向をY1～Y5軸、短辺方向をX1～X3軸と呼称する。高さ方向は軒高さが約9.7mである。

2.2 ダンパーの概要

ダンパーの設置位置を図-1に太赤枠で示し、設置しているダンパーの形状および諸元を図-2および図-3に示す。設置位置と方向は、Y1軸およびY3軸のX2-X3間に短辺方向、X1軸およびX3軸のY2-Y3間に長辺方向である。設置基数は、それぞれの位置において2階に1基、1階に2基の計12基である。設置されているダンパーは、



背景をAIにて加工済み

写真-1 建物全景（北西より）

*1 技術研究所建築構造研究グループ *2 大阪本店設計部構造グループ 兼 技術研究所建築構造研究グループ

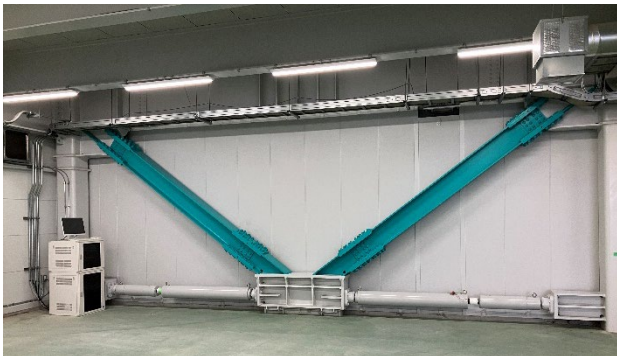
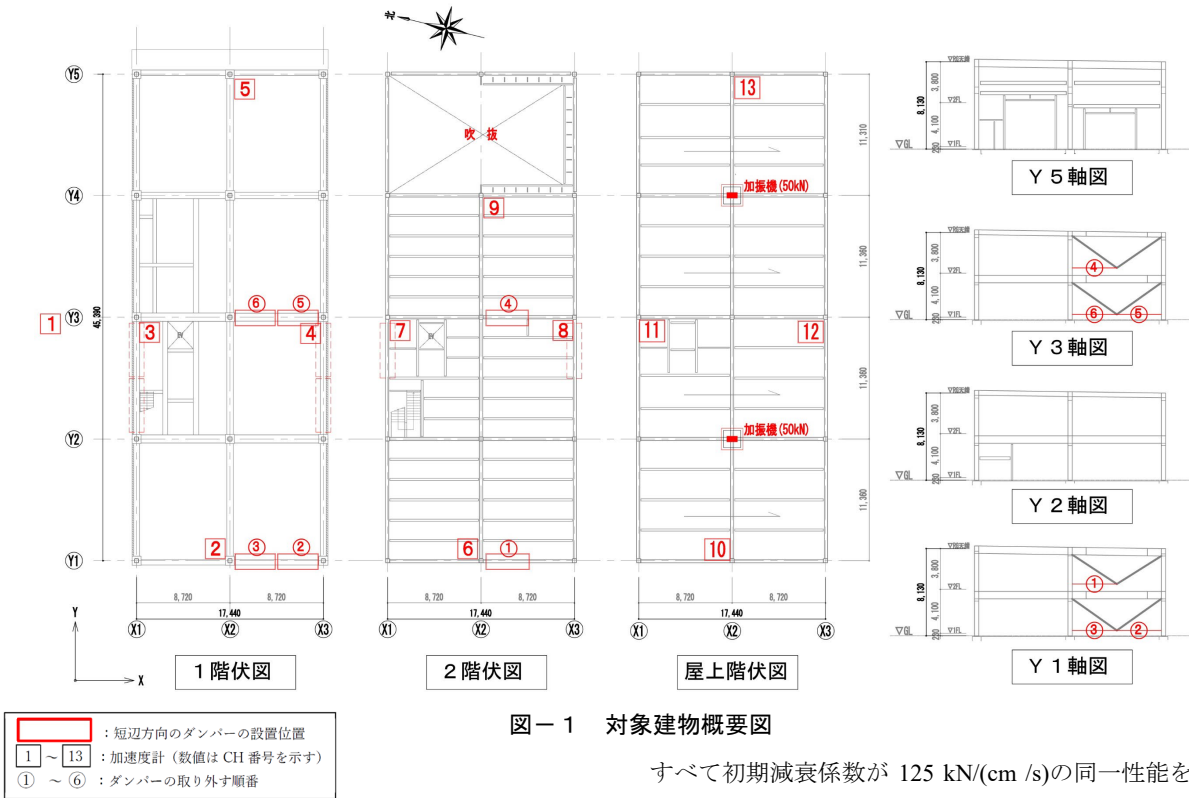


写真-2 オイルダンパーの取り付け状況 (1F Y3 通り)

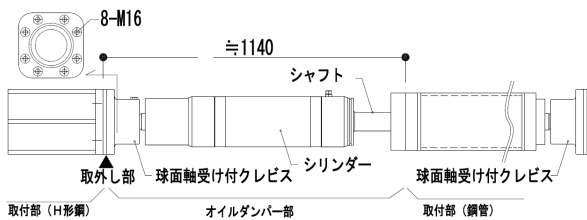


図-2 ダンパー概要図

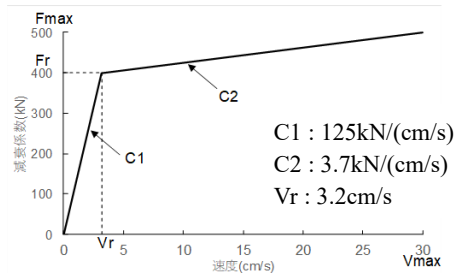


図-3 ダンパーの減衰性能

すべて初期減衰係数が $125 \text{ kN}/(\text{cm}/\text{s})$ の同一性能を有し、写真-2 に示すように構造体とはシアリンク型で接続されている。各ダンパーは、両端に H 形鋼および鋼管が連結され、その端部の球面軸受け型のクレビスを介して柱またはシアリンクブレースに取り付けられている。今回の実験では、このうち短辺方向に配置された 6 基を取り外し (取付部のボルトを緩める)、その継時的な振動数の変化を調べることにした。なお、本報告では主に短辺方向の測定結果について示している。

3. 実験計画

3.1 実験項目

ダンパーの取り外し順および実験項目を表-1 に示す。すべてのダンパーが設置された状態を Case 0 とし、図-1 に示す①~⑥のダンパーを段階的に取り外した状態を Case 1~6、短辺方向のすべてのダンパーを取り外した状態を Case 7 とした。ダンパーの有無が建物の振動特性に及ぼす影響を段階的に評価するため、各段階で常時微動測定を行い、Case 0 および Case 7 では人力加振実験も実施した。また、Case 0 では常時微動測定に加え、加振機によるスイープ加振実験 (以下、加振機実験) を行い、建物の固有振動数を確認した。なお、本実験におけるダンパーの取り外しとは、図-3 に示すようにクレビスと取付部 (H 形鋼) 間のボルト (8-M16) を緩め、ダンパーのシャフトをレバーブロックによってゆっくりと縮めて離間させ、その離間距離を約 10 mm とした状態 (写真-3) とした。

表-1 ダンパーの取外し順、実験項目

Case	取り外すダンパー箇所		実験項目
	階	軸 (位置)	
0	全ダンパーあり		常時微動測定 加振機実験 人力加振実験
1	2F	Y1 軸	常時微動測定
2	1F	Y1 軸 (南側)	
3	1F	Y1 軸 (北側)	
4	2F	Y3 軸	
5	1F	Y3 軸 (南側)	
6	1F	Y3 軸 (北側)	
7	全てのダンパー無し		常時微動測定 人力加振実験
復旧時	Case7→0 と逆の順とする		常時微動測定

3.2 人力加振実験

人力加振実験は短辺方向を対象とし、常時微動測定または加振機実験で求めた建物の 1 次振動数に合わせて実施した。屋上階にて成人約 10 名が加振を行い、加振回数は Case 0 では 60 回、Case 7 では 30 回とした。加振時の様子を写真-4 に示す。加振終了後に速やかに静止し、建物の自由振動波形を取得することとした。

3.3 加振機実験による固有振動数の確認

加振機は、屋上階にある鉄筋コンクリート製の基礎上に、金属系アンカーを用いて固定した。設置位置を図-1 に、設置状況を写真-5 に示す。加振機は 2 基とし、Y3 軸を中心として対称となるように配置した。加振機は、1 基あ

たりの加振力が 500N であり、建物の固有振動数付近 (2 ~ 4 Hz) であれば加振加速度 1G が可能な性能を有する。加振方向は、建物の短辺方向および長辺方向の並進加振、ならびに短辺方向のねじれ加振とした。並進加振時には、2 基の加振機の加振方向を建物の短辺または長辺方向に合わせ、同位相・同加振力で加振した。短辺方向のねじれ加振時には、設置位置は同じだが建物中心 (Y3 通り) に対して逆位相となるように加振した。加振は、建物の各方向の卓越振動数を含むように加振振動数を 6 から 2 Hz 間で徐々に低下させるスイープ加振とした。

3.4 計測計画

振動測定は、図-1 に示す位置 (1 ~ 13)、□内の数値は CH を示す) に加速度計 (ロジカルプロダクト社製・高精度加速度センサー、写真-6) を 13 基配置して実施した。設置位置は、各階の Y1-X2、Y3-X1、Y3-X3、Y5-X2 (2 階は吹き抜けのため Y4-X2) にある柱脚の 4 箇所とし、CH1 を地盤、CH2~5 を 1 階、CH6~9 を 2 階、CH10~13 を屋上階とした。各センサーは水平 2 成分および上下 1 成分の計 3 成分を検出可能であり、サンプリング周波数を 200 Hz とした。Case 0 の人力加振実験では、Y3 軸の 1 階および 2 階に設置されたダンパーのシャフトにひずみゲージを貼り付け、さらにひずみゲージ式変位計を設置して、シャフトのひずみおよび変位を動ひずみ計を介して測定した。設置状況を写真-7 に示す。なお、ダンパーのひずみと軸力の関係が、事前にダンパー単体の動的載荷実験をメーカーで行い、両者がほぼ比例関係であることを確認している。

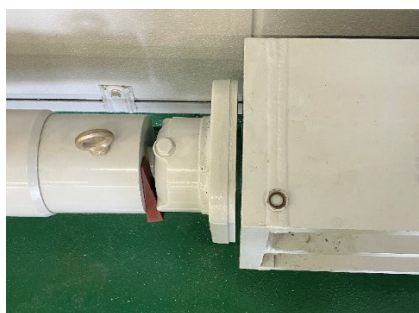


写真-3 ダンパーの取り外し状況



写真-4 人力加振の様子



写真-5 加振機の設置状況



写真-6 測定に使用した加速度計

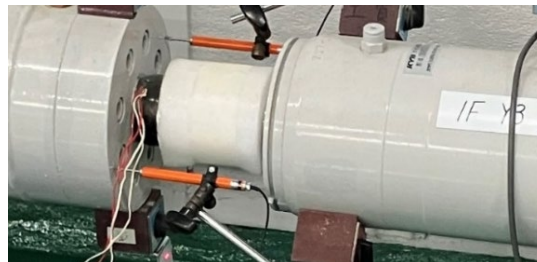


写真-7 ダンパーのひずみ、変位測定の様子

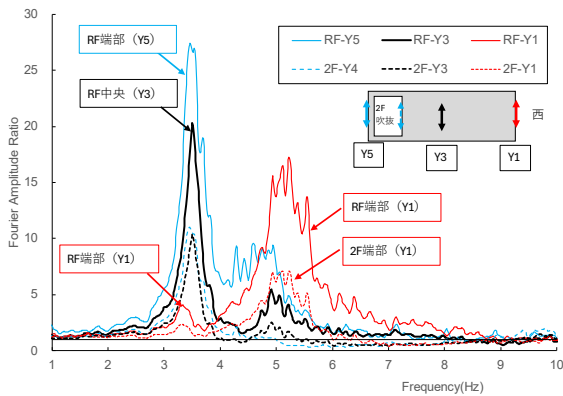


図-4 初期状態のフーリエスペクトル

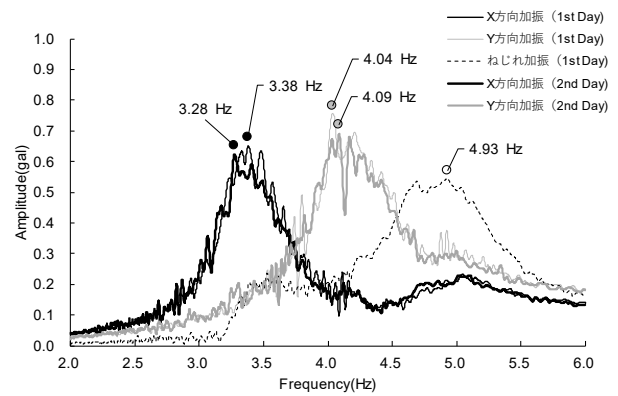


図-5 加振機実験による加速度振幅と加振振動数の関係

4. 振動性状の変化

4.1 初期状態の建物の卓越振動数

(a) 常時微動測定による結果

Case 0 における Y1 軸、Y3 軸および Y5 軸について、それぞれ同軸上にある 1 階の測定点に対する 2 階および屋上階の測定点のフーリエスペクトル比を図-4 に示す。なお、図中の Y3 軸のフーリエスペクトル比は X1 軸および X3 軸の 2 つの測定点の平均を示している。これより、短辺方向では 3.5 Hz 付近および 5.0 Hz 付近に卓越振動数が確認できた。

まず 3.5 Hz 付近の振幅に注目すると、Y1 軸では振幅が小さく、Y3 軸の中央部から Y5 軸の端部にかけて振幅が増大している。一方、同振動数における 2 階の結果では、Y1 軸の振幅が小さく、Y3 軸および Y4 軸はほぼ同程度の振幅であった。これは、2 階の吹き抜けによる Y5 軸の剛性が低いことや Y1 軸に設置されたダンパーの影響により、平面的にねじれ成分の大きい振動モードとなっているためと考えられる。

次に 5.0 Hz 付近に注目すると、Y1 軸の振幅が大きく、Y5 軸ではそれより小さく、さらに Y3 軸では最も小さい結果となった。したがって、5.0 Hz は Y3 軸を中心としたねじれ振動であると推察される。なお、図には示していないが、長辺方向の卓越振動数は 4.0 Hz であった。

(b) 加振機実験による結果

加振機による加振振動数と屋上階の加速度振幅の関係を図-5 に示す。加振は日を変えて 1 回実施し（ねじれ加振は 1 日目のみ）、図では 6 Hz から 2 Hz までを約 6 分間で連続的に変化させたスイープ加振において、屋上階で観測された最大加速度振幅をプロットしている。

これより、最大振幅を示した振動数は、短辺方向が 3.28 ~ 3.38 Hz、長辺方向が 4.04 ~ 4.09 Hz、ねじれが 4.93 Hz

であった。常時微動測定と比較するとやや低い振動数となったが、小型の加振機であっても本建物規模において十分に固有振動数を確認できることが分かった。

4.2 ダンパー取外し時の建物の卓越振動数の変化

段階的にダンパーを取り外した Case 1、3、4、6 および 7 終了時における、屋上階で測定した加速度波形のフーリエスペクトルを図-6 に示す。フーリエスペクトルは、継続時間 163.84 秒間を抽出し、バンド幅 0.1 Hz の Parzen ウィンドウにて平滑化している。左図が Y3 軸 (CH11)、右図が Y1 軸 (CH10) の結果である。これより、Case 3 で Y1 軸のダンパーを取り外した状態では、建物中央部 (Y3 軸) および建物端部 (Y1 軸) の振幅に大きな変化は見られなかった（ただし、本図は 1 階に対する振幅比ではない点に留意する）が、卓越振動数の低下が確認できた。さらに、短辺方向ダンパーをすべて取り外しが終了した Case 7 では、中央部 (Y3 軸) および端部 (Y1 軸) のいずれにおいても卓越振動数がさらに低下し、特に建物中央 (Y3 軸) では振幅が増大する結果となった。このとき、並進およびねじれの卓越振動数は、Case 7 では Case 0 と比較して約 6~12% 低下した。これらの結果には、振動数の変化に加えて、平面的な振動モードの変化が影響していると考えられるが、詳細な検討は今後の課題である。

4.3 ダンパー有無による建物の卓越振動数の変化

ダンパーの取り外し開始から復旧終了までの各段階における卓越振動数の変化（ランニングスペクトル）を図-7 に示す。本図は、Y3 軸上における 1 階に対する屋上階のパワースペクトル比であり、1 セグメント 4096 個 (20.48 s) として 50% オーバーラップさせ、それぞれに Hanning ウィンドウ処理を施したうえで得られたスペクトルをバンド幅 0.2 Hz の Parzen ウィンドウで平滑化している。図では横軸を時間、縦軸を 2.5~4.0 Hz の振動数

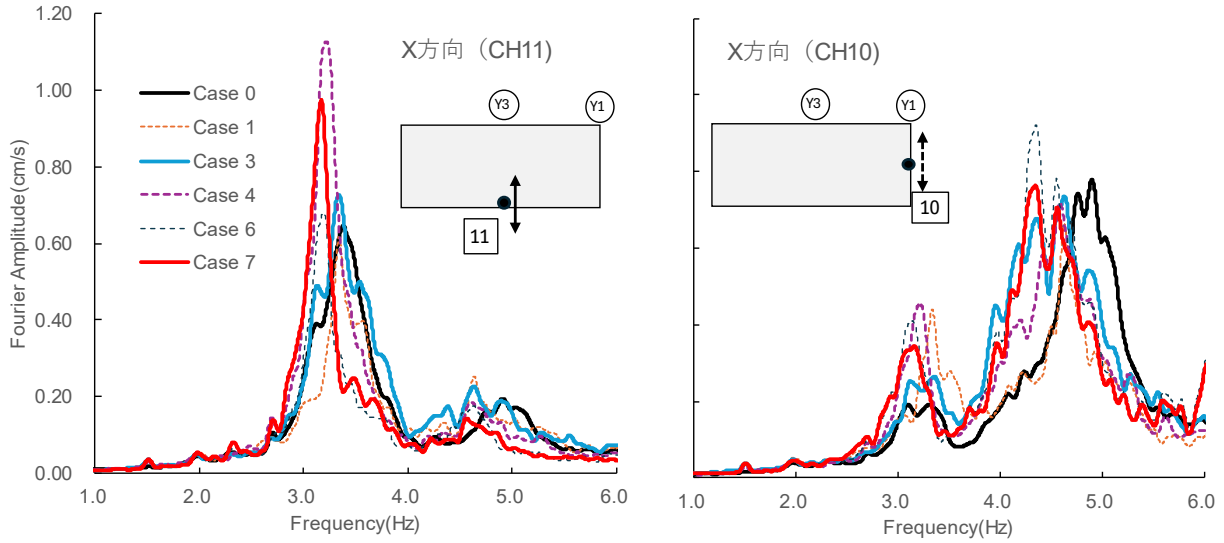


図-6 各ケースでのフーリエスペクトルの変化

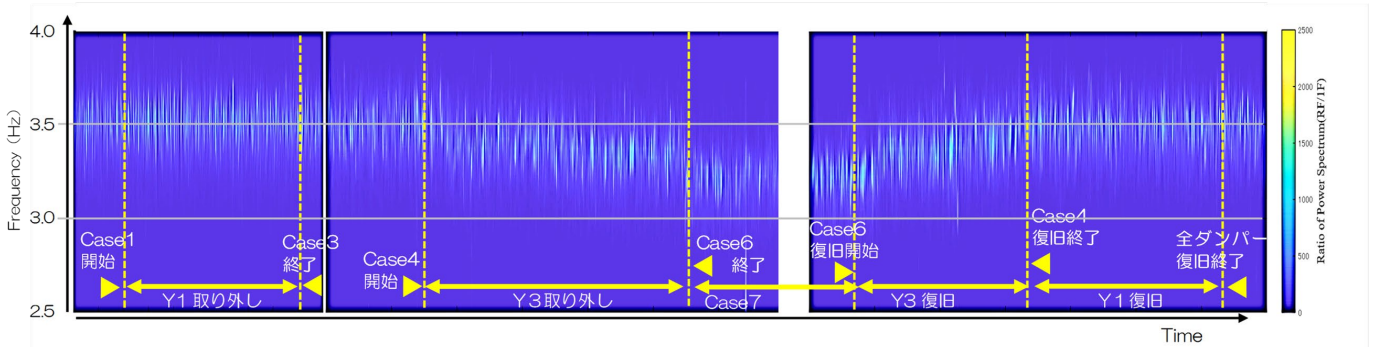


図-7 取外し開始から復旧までの振動数の変化

とし、1次振動数の変化のみを示している。また、図中には取り外し時の Case 1、3、4、6、および復旧時の各段階の目安を黄色線で示している。

これより、初期状態の卓越振動数は、図-4で示したとおり約 3.5 Hz であった。次に、Y1 軸のダンパーの取り外しを開始し、2階および1階のダンパーの取り外しが終了する Case 1～Case 3 の間では、卓越振動数に大きな変化は見られなかった。しかし、Y3 通りのダンパーを取り外す Case 4 開始から Case 6 終了にかけて、卓越振動数が低下していく様子が明確に確認できた。これは図-6で示した傾向と同じであった。また、取り外し後の Case 7 から復旧開始までの間では、卓越振動数の変化はほとんど見られなかった。さらに、復旧時の卓越振動数は、Y3 軸のダンパーを復旧した段階で大きく変化した。Y1 軸のダンパー復旧時には変化が小さく、最終的にすべてのダンパーを復旧した段階でほぼ元の値に戻ることが確認できた。

5. ダンパーの効果

5.1 ダンパーの履歴曲線

Case 0 の人力加振時における1階および2階の Y3 通りに設置されたダンパーの変位一軸力曲線を図-8に示す。各データには 10 Hz のローパスフィルタ処理を施している。図では、加振の立ち上がり時、定常状態および減衰時を区別して描いており、概ね定常状態となった区間を実線で示している。これより、加振開始から徐々に履歴面積が大きくなり、定常状態では最大変位が 0.005 mm と微小であるものの、オイルダンパー特有の安定した履歴曲線を描いておりエネルギー吸収効果が確認できた。

5.2 減衰定数の変化

Case 0 および Case 7 の人力加振時に取得した屋上階中央 (CH11) の加速度波形を図-9に示す。また、自由振動時の変位波形を拡大して併せて示す。いずれのケースでも、加振によって常時微動時より加速度振幅が大きくなり、最大振幅は約 1.5 gal となった。加振停止後には自由振動が確認できた。

自由振動時の対数減衰率(5波の平均)を算定した結果、Case0では5.9%、Case7では4.3%であった。ダンパーを取り外すことで減衰定数が低下した。ためダンパーの影響は比較的小さいものの、その減衰効果が明確に示された。一方、ダンパーなしの状態においても比較的大きな減衰性能を示しており、この理由については、本建物が低層であること、直交方向のダンパーの影響を少なからず受けていること、内壁にCLTなどを多用していることも考えられた。

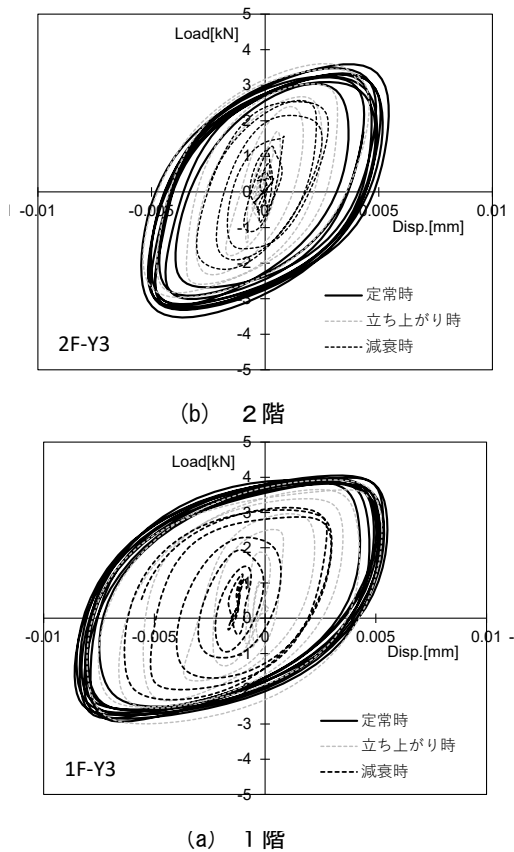


図-8 ダンパー(Y3 通り)の軸力-変位

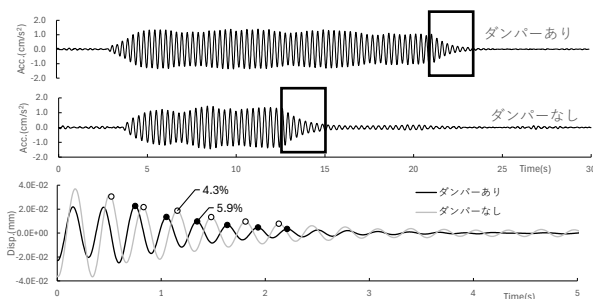


図-9 人力加振時の加速度波形

6. まとめ

本研究では、鉄骨造2階建て建物を対象に、オイルダンパーの有無が振動特性に及ぼす影響を実建物で検証した。短辺方向のオイルダンパーを段階的に取り外した結果、以下の知見が得られた。

- ① 小型の加振機を用いることによって本建物の振動数を特定することができた。
- ② オイルダンパーの取り外しに伴い卓越振動数が低下し、特に中央部に配置されたオイルダンパーの影響が大きい。
- ③ オイルダンパー復旧後には振動特性が元の状態にほぼ回復することが確認できた。
- ④ 微小振幅域においてもオイルダンパーは安定した履歴特性を示し、エネルギー吸収効果を発揮した。
- ⑤ 建物の減衰定数は、オイルダンパーの有無で変化し、その撤去により低下することが確認できた。

以上より、オイルダンパーは微小振幅域においても建物の減衰性能向上に寄与し、動的特性に対して有効に機能することが実建物により確認された。

このようなダンパーの設置状態は振動数および振動モードに影響を及ぼすことやこの変化をより詳細に分析し解析結果と照合を進めることで、将来的にオイルダンパーの配置計画や構造ヘルスマニタリング技術への応用に期待できる。

[謝辞]

本実験では、東京理科大学創域理工学部建築学科永野正行教授、宮津裕次教授、永野研究室の院生の方々にご協力いただいた。ここに記して感謝の意を表します。