

実建物における連結制振構法の検証

Verification of Coupled Vibration Control Structures by Vibration Test of Actual Buildings

井川 望^{*1} 北中 勉^{*2} 安居院 徳重^{*2}
Nozomu Ikawa Tsutomu Kitanaka Norishige Aguin
伊藤 真二^{*1} 浅井 純^{*3}
Shinji Ito Jun Asai

要旨

振動性状の異なる隣接する建物をエネルギー吸収能力の高い部材で連結し、互いの振動を制御する連結制振は地震に対して効果的な構法であり、当社においても数件の設計・施工実績がある。今回、隣接する複数の建物をオイルダンパーで連結した旧鴻池本社ビルの解体にあたり、連結制振の効果の確認を行うために実建物での振動実験を行った。その結果、ダンパーで連結することにより振幅が急速に低下することが確認された。また、解析結果ともよく一致した。さらに、今回の実験結果をもとに解析モデルを作成し、地震観測記録の検証を行い、ダンパーで連結することにより、建物応答が低減し、耐震性能を向上させていたことが確認された。

キーワード：振動実験 連結制振 オイルダンパー 地震観測 エネルギー吸収

1. はじめに

振動性状の異なる隣接する建物をエネルギー吸収能力の高い部材で連結し、互いの振動を制御する連結制振は地震に対して効果的な構法である。古くから研究が行われており、当社においても高層建物など数件の設計・施工実績がある¹⁾²⁾。今回、隣接する複数の建物をオイルダンパーで連結した旧鴻池本社ビルの解体にあたり、連結制振の効果の確認を行うために実建物での振動実験を行った。以下にその実験の概要を紹介する。また、実験結果をもとに地震時についての解析を行い、地震時のダンパーの効果について検討を行ったのでその概要を紹介する。



写真1 建物外観

(写真中央のA棟とその右側のB棟で実験を実施)

2. 建物概要

旧鴻池本社ビル(写真1)は大阪市中央区にあり、9～12階の4棟からなる事務所ビルである。1995年の兵庫県南部地震(大阪で震度IVを記録)後に耐震改修が行われ、棟間に19個のオイルダンパー(写真2)が設置された。ダンパーのエネルギー吸収により耐震性能を向上させ、また、建物同士の衝突を防いでいる³⁾。建物配置図と断面図を図1に、建物概要、ダンパーの設置状況を表1、表2に示す。



写真2 ダンパー取付状況

*1 技術研究所 建築技術研究部門 *2 大阪本店 建築部 *3 大阪本店 建築設計部

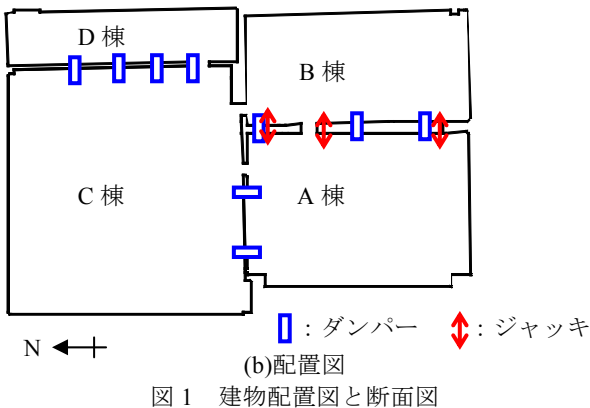
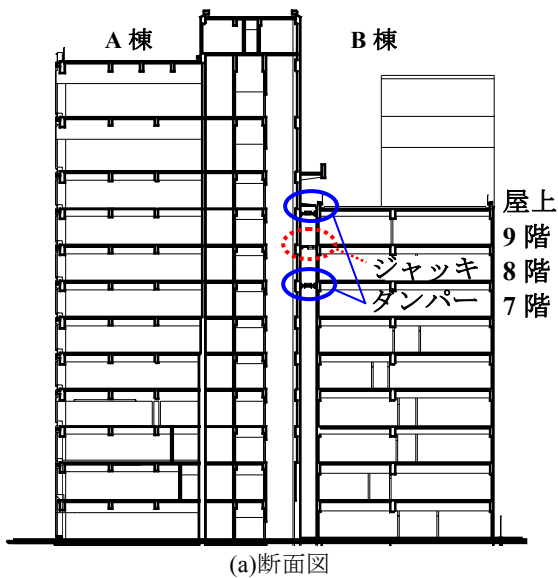


図1 建物配置図と断面図

表1 建物概要

| | 階数 | | | 構造 | 竣工年 | 延床面積 (m^2) |
|----|-----|----|----|------|-------|-------------------|
| | 地上 | 塔屋 | 地下 | | | |
| A棟 | 12階 | 1階 | 2階 | SRC造 | 1978年 | 12,444 |
| B棟 | 9階 | 3階 | 2階 | SRC造 | 1968年 | 6,840 |
| C棟 | 9階 | 3階 | 3階 | SRC造 | 1968年 | 17,814 |
| D棟 | 9階 | 2階 | — | RC造 | 1989年 | 2,619 |

表2 ダンパー設置状況

| 場所 | 階 | 能力 | 個数 |
|-------|------------|--------|-------------|
| A棟-B棟 | 8階, 屋上 | 50ton用 | 3(8階1, 屋上2) |
| | | 35ton用 | 2(各階1) |
| A棟-C棟 | 7階, 8階, 9階 | 50ton用 | 6(各階2) |
| C棟-D棟 | 7階, 9階 | 35ton用 | 8(各階4) |

3. 実験概要

実験対象は12階建てのA棟と9階建てのB棟とし、解体開始直後の時期に実験を行った。急速開放油圧ジャッキ(最大荷重1800kN、ストローク150mm、写真3参照)3台を9階床レベルの建物間に設置し、東西方向に押し広げた

後、急速に除荷し、建物を自由振動させた。ダンパーの取り付けられた状態と取り外した状態で実験を行い、実験結果を比較することにより、ダンパーの効果を確認した。なお、3台のジャッキは荷重が等しくなるように制御し、最大1500kN(3台で4500kN)の荷重を与えた。また、荷重レベルを変えた実験も行った。A棟-C棟間、C棟-D棟間のダンパーは実験前に取り外した。

実験では、建物屋上などで加速度8成分、レーザー変位計により棟間変位10成分を200Hzのサンプリングで収録した。

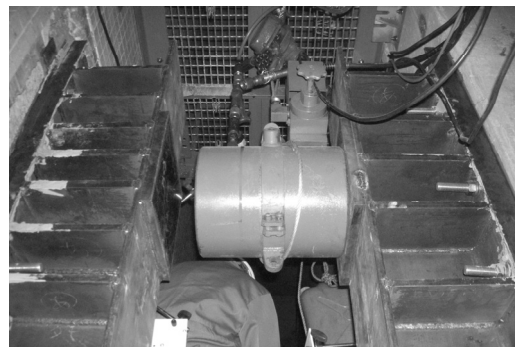


写真3 ジャッキ取付状況

4. 実験結果

ダンパーの取り付けられた状態(以下、「ダンパーあり」とダンパーを取り外した状態(以下、「ダンパーなし」)について、A棟-B棟の棟間変位、A棟、B棟の加速度を図2に示す。A棟10階床、B棟屋上上床レベル(建物中央付近)の東西方向(加力方向)のものである。棟間変位は、ジャッキ除荷時が最大であり、その後、振動を繰り返しながら減衰していく。ダンパーなしと比べダンパーありの場合、振幅が早く減衰していることが分かる。なお、ダンパーの有無にかかわらず、建物は幾分ねじれが生じており1500kN加力時には南側端部で最大28mm、北側端部では最大16mmの棟間変形(回転角で0.0004程度)が生じた。D棟が加力の影響により変形しなかったものとする、A棟、B棟北側端部でのそれぞれの絶対変形(D棟に対する相対変形)は7mm(西向き)、9mm(東向き)であった。

加速度は、除荷直後に瞬間的に増大し、やや短周期の波が現れ、その後、固有周期と思われる振動数で振動している。B棟では除荷直後に $200cm/s^2$ を超える加速度が発生している。ダンパーなしと比べダンパーありの場合、振幅が早く減衰していることが分かる。ダンパーありの場合の各ピーク点での最大加速度値のダンパーなしの場合のピークでの値に対する割合(最大加速度比)を図3に示す。横軸は

除荷からのピークの数である。最大加速度比は時間とともに小さくなり、B棟では5ピーク目(3サイクル目)で0.4程度まで低下している。A棟はB棟に比べればダンパーによる加速度低減効果は小さいが7ピーク目(4サイクル目)で70%に、15ピーク目(8サイクル目)で60%程度に低減されている。なお、減衰定数ではB棟のダンパーを取り外した状態で9%であるが、ダンパーが取り付けられることにより13%に増大している。A棟においても4%が5%に増大している。B棟はA棟と比べ、延べ床面積で半分程度であり、重量が軽く、ダンパーの効果が良く現れたものと思われる。

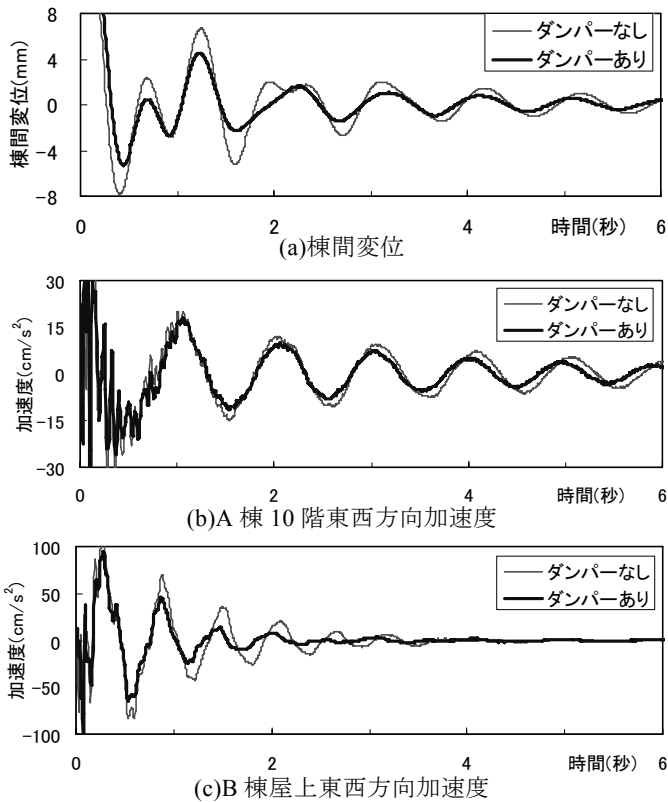


図2 実験結果

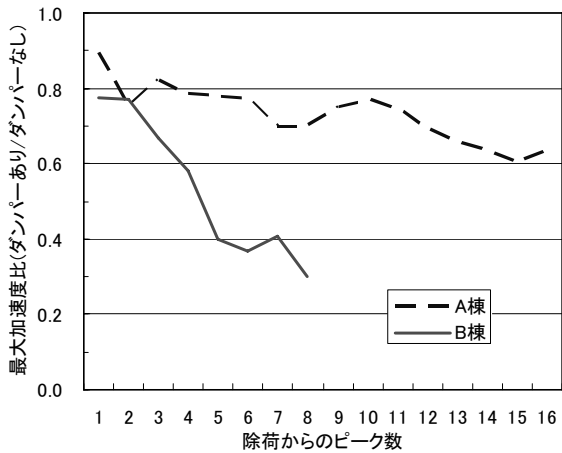
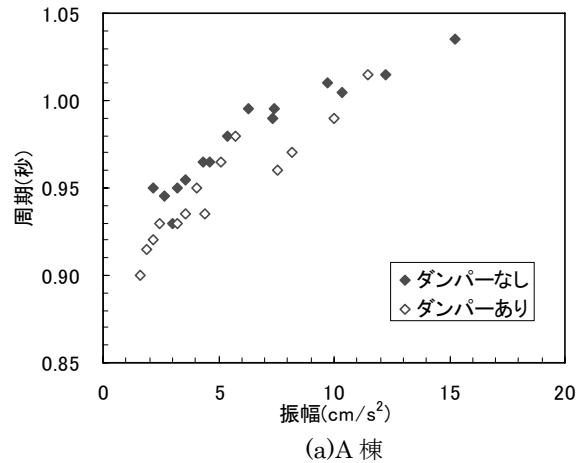
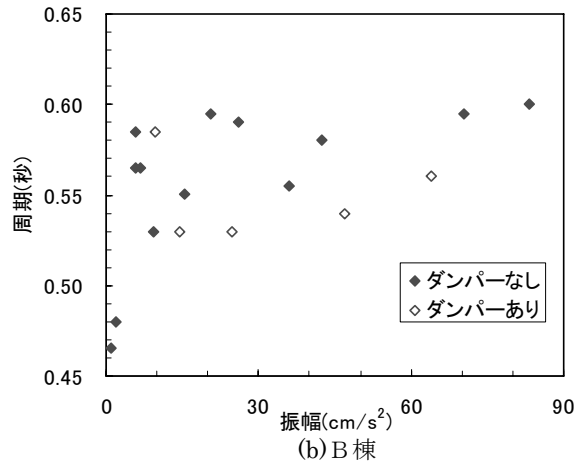


図3 ダンパーによる最大加速度の低減効果

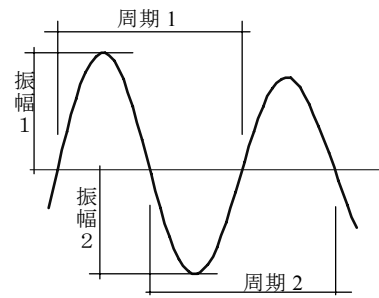
加速度波形から読み取った加速度振幅と周期の関係を図4に示す。A棟では振幅により周期が変化しており、振幅が大きくなると周期が長くなる傾向が分かる。ダンパーの影響はあまりないことが分かる。B棟ではA棟ほど顕著な振幅依存性は見られない。なお、加力実験前後に行った微動測定(10階最大加速度 $0.2\sim 0.3 \text{ cm/s}^2$ 程度)より得られた固有周期はA棟、B棟それぞれ0.79秒、0.37秒であり、振幅が小さい微動時の周期は加力実験時の微小振幅時(1cm/s^2 程度)の周期より短い。



(a)A棟



(b)B棟



(c)振幅と周期の決め方

図4 振幅と周期の関係

A棟、B棟の地下2階でも加力方向の加速度を測定した。ダンパーの有無にかかわらず、ともに最大 3cm/s^2 程度でほぼ同じ位相であり、同じような振動をしていたものと思われる。

5. 実験結果の検証

耐震改修時に、各棟ごとに各階を1質点としたモデルにより時刻歴解析が行われている。この時の解析モデルをもとに、実験結果について数値解析を行った。今回の解析ではA棟とB棟の東西方向(加力方向)について検討した。まず、ダンパーを取り外した状態での解析を行い、モデルを修正し、実験結果と一致するモデルを作成した。次に、ダンパーを速度に比例した減衰力で評価し解析を行った。ダンパーが取り付けられている状態での解析結果を実験結果とともに図5に示す。加速度に見られる除荷後の短周期成分の波は表現できていないが、解析結果は実験結果とよく一致しているものと思われる。

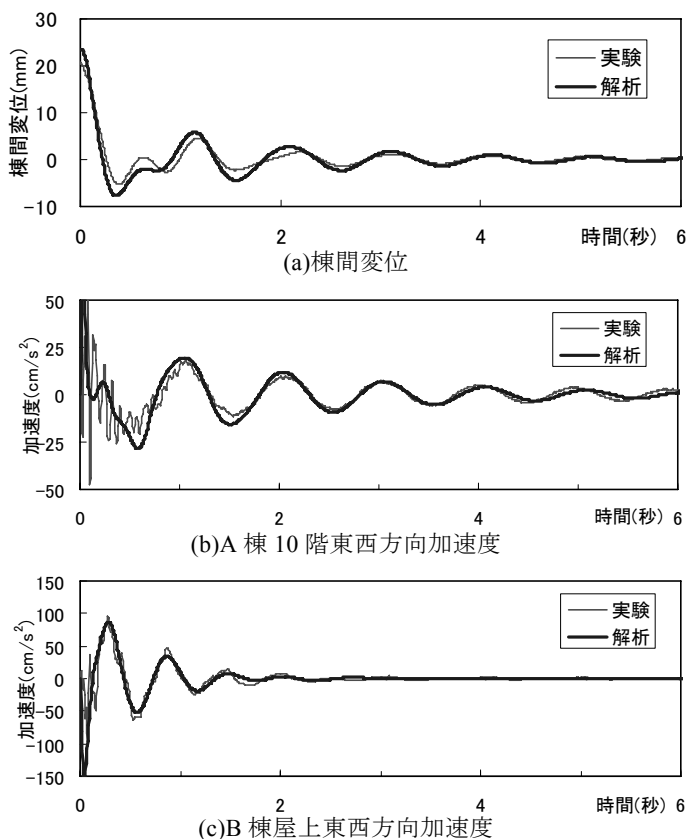


図5 解析結果と実験結果の比較(ダンパーあり)

6. 地震観測記録の検証

この建物では耐震改修後地震観測を行っており、多くの記録が得られている。今回の実験結果をもとに地震時につ

いての解析を行い、地震時のダンパーの効果について検討を行った。

6.1 地震観測概要

本建物ではA棟とB棟の9階、C棟の地下2階で水平2方向と上下方向の加速度を、また、A棟-B棟間のダンパー(屋上床レベル3個のうちの中央のもの)の変形量を測定していた。耐震改修後の1999年3月から2007年末までの間に90を超える地震記録が観測された。2001年8月25日の京都府南部の地震(マグニチュード5.1、震央距離54km)で全記録の最大となる最大 58.8cm/s^2 の加速度がB棟9階(東西方向)で得られている。この地震時の最大加速度一覧を表3に、東西方向の加速度波形を図6に示す。この地震でのダンパーの最大変形量は 5.27mm であった。

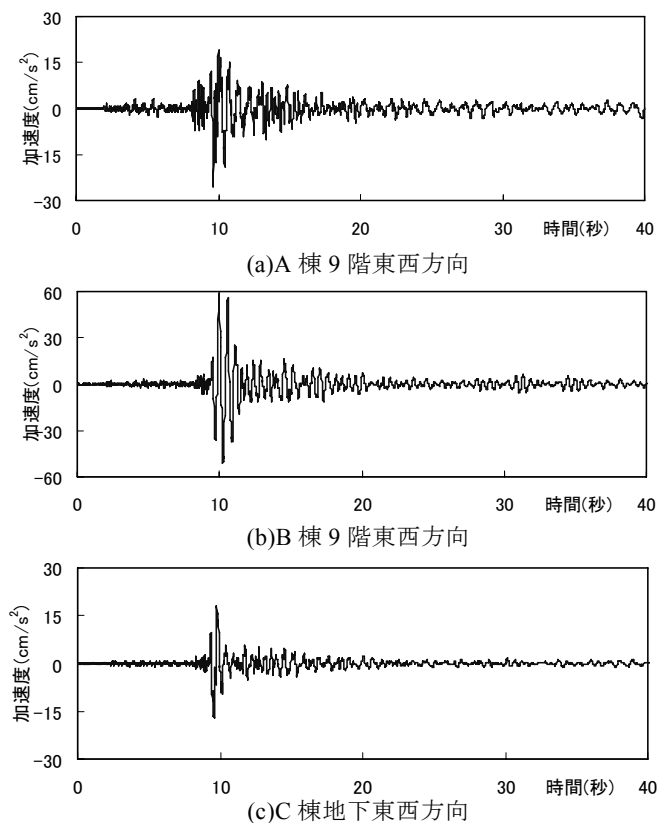


図6 地震時の加速度波形(観測)

表3 最大加速度一覧(単位: cm/s^2)

| | 南北 | 東西 | 上下 |
|------|------|------|------|
| A棟9階 | 39.9 | 25.8 | 24.8 |
| B棟9階 | 35.2 | 58.8 | 14.7 |
| C棟地下 | 12.7 | 18.0 | 10.6 |

6.2 観測記録の検証

耐震改修の検討時に用いられた解析モデルを用いて観測記録の検証を行った。解析モデルは4棟地上部各階を1質

点とし、水平2方向とねじれの3自由度を考慮した。A棟、B棟については今回の実験結果をもとに、C棟、D棟については微動測定の結果や地震時観測記録を参考に解析モデルを修正した。ダンパーは速度に比例した減衰力で評価した。最大の加速度記録が観測された2001年8月の京都府南部の地震での地下階での観測記録を入力として解析を行った。図7に9階の地震計設置位置での東西方向加速度の解析結果を示す。観測記録(図6)を概ね再現できているものと考えられる。

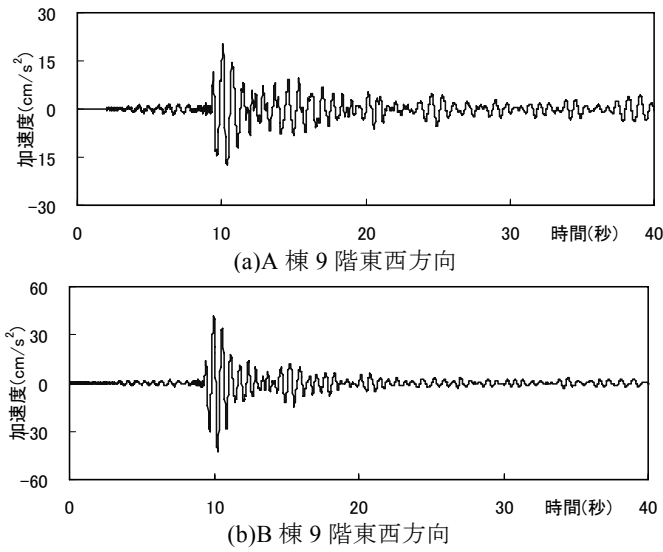


図7 地震時の加速度波形(解析結果)

ダンパーの効果を確認するため、ダンパーを取り外したモデルにより、同じ地震波を入力して解析を行った。9階の地震計設置位置での東西方向加速度波形を図8に示す。9階加速度の最大値をダンパーの有無について表4に示す。

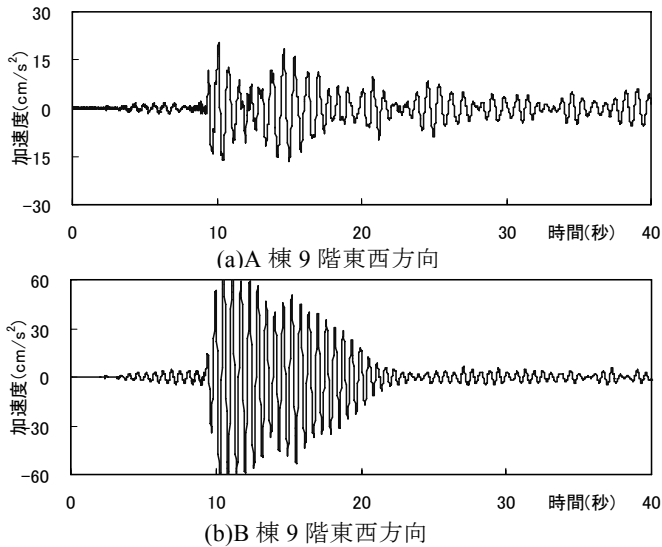


図8 ダンパーを外したモデルによる地震時加速度波形

表4 解析による最大値(単位: cm/s²)

| | A棟 | | B棟 | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| | 南北 | 東西 | 南北 | 東西 |
| ダンパーあり(a) | 21.94 | 20.21 | 38.65 | 42.93 |
| ダンパーなし(b) | 20.44 | 20.52 | 39.02 | 68.71 |
| 比(a/b) | 1.07 | 0.98 | 0.99 | 0.62 |

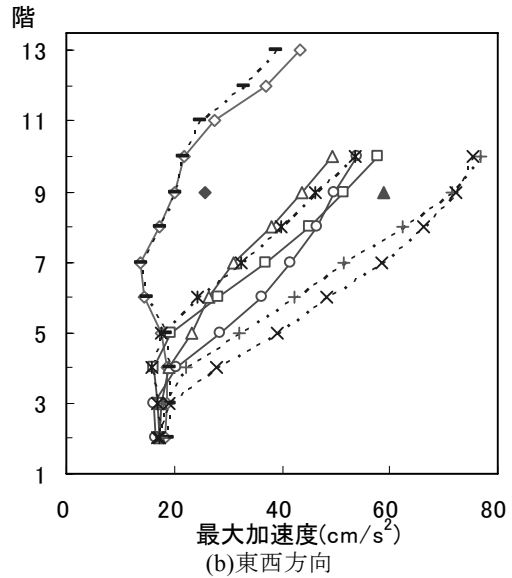
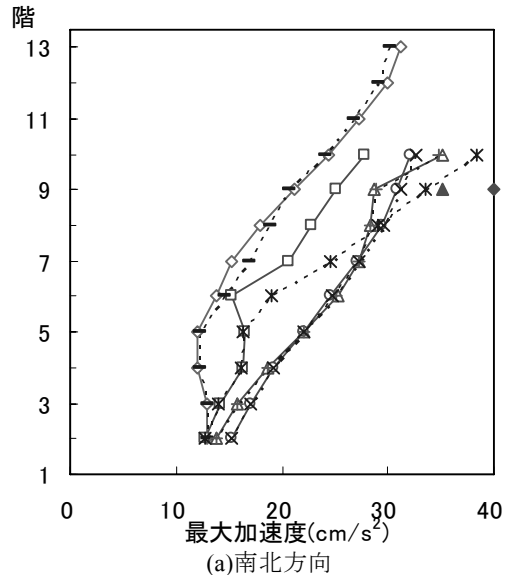
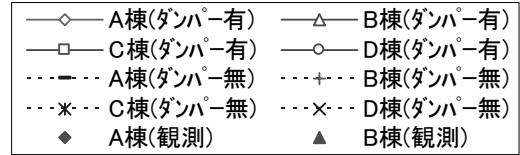


図9 最大応答値分布

9階加速度の最大値ではB棟東西方向ではダンパーにより40%程度小さくなっているが、それ以外の結果はあまりダンパーの効果が見られない。4棟各階の応答加速度の最大値分布を図9に、RMS値分布を図10に、屋上(A棟10階)

の最大棟間変位を表5に示す。建物、方向によりダンパーの低減効果には違いが見られる。東西方向のみダンパーが取り付けられているB棟、D棟では、南北方向でダンパーによる違いはあまりないが、東西方向ではダンパーで連結することにより応答値は大幅に減少している。A棟では2方向ともダンパーの有無による違いが最大値ではあまり見られないが、RMS値で見ると20~30%小さくなっている。なお、ダンパー設置場所の棟間変位についてはどの点においてもダンパーが取り付けられることにより大幅に減少している。

表5 最大棟間変位(単位: mm)

| | A棟-B棟 | A棟-C棟 | C棟-D棟 |
|-----------|-------|-------|-------|
| ダンパーあり(a) | 4.87 | 2.10 | 3.53 |
| ダンパーなし(b) | 8.96 | 5.28 | 11.71 |
| 比(a/b) | 0.54 | 0.40 | 0.30 |

7. まとめ

複数の建物にダンパーで連結した旧鴻池本社ビルで強制振動実験を行い、実建物による連結制振効果の確認を行った。その結果、ダンパーで連結することにより振幅が急速に低下することが確認された。また、解析結果ともよく一致し、設計法の妥当性が検証された。さらに、今回の実験結果をもとに解析モデルを作成し、地震観測記録の検証を行った。ダンパーで連結することにより、応答は低減し、耐震性能を向上させていたと考えられる。

今回のような実建物による振動実験の実施例は少なく、貴重なデータを得ることができた。今後、より詳細な検討を行い、複数の建物による連結制振やアウトフレーム連結制振⁴⁾の設計・施工に役立てていきたい。なお、建物に設置されていたオイルダンパーの一部を回収し、出荷時と同じ条件で振動試験などの検査を行い、性能確認を行う予定である。

最後に、今回の実験を行うにあたり、ご理解・ご協力いただきました関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 檜原健一ほか：連結制振構法を用いた事務所ビルの耐震改修、第3回粘弾性ダンパーの開発と耐震設計・耐震補強への応用に関するシンポジウム(早稲田大学理工総研プロジェクト研究)、pp.82-87、1999
- 2) 古城豊光ほか：粘弾性体をジョイントダンパーとして使用した高層建物の設計、日本建築学会大会学術講演懇談集、B-2分冊、pp.857-858、1998.9
- 3) 黒木安男ほか：連結制振構法を用いた事務所ビルの耐震改修、鴻池組技術研究報告、Vol.10、pp.75-81、2000.3
- 4) 黒木安男ほか：アウトフレーム連結制振構法による耐震補強(その2)、鴻池組技術研究報告、Vol.17、pp.25-28、2007.6

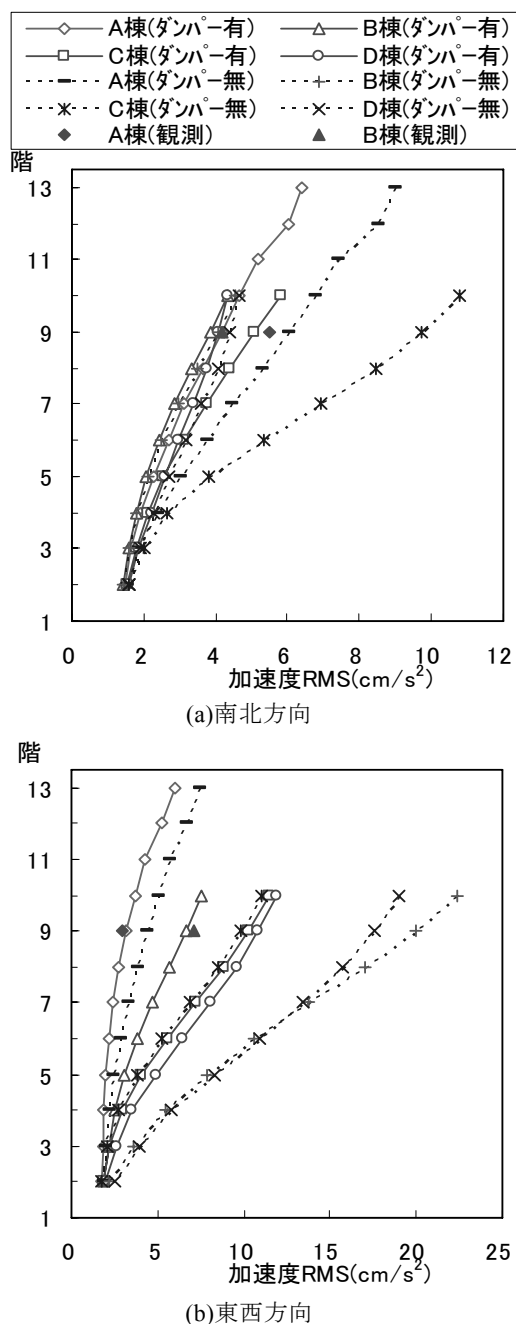


図10 加速度RMS値分布