資料10-4

第９回淡広会（2020年3月13日）　　アンケートと回答集

○注意：原文の表現を一部修正させていただいております。ご容赦ください。

◇「ダンパー剛性を高くするために片ロッドタイプとする。」という説明がありましたが、両ロッドであれば断面積を大きくすればよいのではないでしょうか？

→　片ロッドタイプを採用した本来の目的は、施工性をよくすることにあります。また、両ロッドタイプと片ロッドタイプで、時刻歴応答解析すると、ほぼ同じ効果が期待できます（既に、論文発表しております、前回、見学していただいた桜センター14 の連結ダンパーも片ロッドです。）片ロッドタイプのダンパーの反力が両ロッドのダンパーのほぼ 2 倍となるためです。1 サイクルで消費するエネルギー量は、片ロッドタイプも両ロッドタイプもほぼ同じです。このため、（施工上精度が必要なため）高価なクレビスを省くことができ、RC 構造などの建て方精度でも問題なく施工できる片ロッドタイプを採用したのです。結果として、軸断面が大きくなり、軸剛性が高くなるという副産物も生まれました。

◇Copt と Kd の組み合わせで最適値が決まれば、ダンパーの軸剛性をより高めたほうが、効率的であるというところまで理解できました。工場でダンパーの機構から詳しく説明いただいたことで、ダンパーの性能値とダンパー機構との関係がよくわかりました。

→ダンパーの軸剛性をどんなに大きくしても、建物の減衰効果を増大させることには限界があります。局所的な軸剛性を大きくしても、大規模な超高層建物などの場合には、建物の固有周期を変動させることは、難しいからです。結局、超高層ビルの減衰効果を高めるためには、多数のダンパーを設置する必要があります。しかし、多数のダンパーを設置したからと言って、ダンパー１台ごとの減衰係数を小さくし、軸剛性を小さくする必要はありません。逆に、できるだけ大きな軸剛性と減衰係数を維持したまま、設置台数を多くするほうが効果的です。

◇ダンパーの試験を見るのは初めてで、初歩的な質問ですが、ダンパーを繰り返し動かすと発熱します。発熱による特性の変化は無いでしょうか？ダンパー減衰係数を上げる代わりにゴム材料に減衰を持たせて補助することは可能でしょうか？

→　ゴム材料には減衰効果は必要ありません。このシステムは、積層ゴムで鉛直方向のひずみエネルギーを蓄積し（曲げモーメントによって生じる柱軸力で積層ゴムが鉛直方向に変形します）、これを油圧ダンパーの減衰力によって熱エネルギーに変換する原理だからです。積層ゴムと油圧ダンパーの組み合わせがうまく働くことによって、巨大なダンパーを構成していると考えていただいて結構です。動吸振器では、小型の質量体の運

動エネルギーとして建物の振動エネルギーを蓄積します。次に、動吸振器に付属しているダンパーで熱エネルギーに変換しているのです。この高減衰制震構造システムでは、建物の振動エネルギーを積層ゴムのひずみエネルギーとして蓄え、次にダンパーで熱エネルギーに変換しているのです。なお、ダンパーの特性は温度上昇によって若干変化します。建物に入力する総入力エネルギーを考慮して温度上昇からダンパー1 台当たりのエネルギー消費量を計算します。大地震の際に入力する総入力エネルギーについては、ほぼ、想定することができます。その総量をダンパー1 台の消費可能なエネルギー量で除して、必要な総ダンパー個数を算定することができます。

◇試設計の具体的な方法を教えていただけると、理解をもっと深めることができると思います。

→　次回の研究会では、3 階建ての事務所建築を対象として、どのようにダンパー配置を決定するのか、ダンパーの軸剛性はどのように決定するのか、ダンパーの減衰係数はどのように決定するのか、最後の制震効果はどのような数値解析を実施しているのか、時間の許す限り詳細にご説明いたします。次回は、時間をもう少し取りたいと思います。

（現在、東急建設構造設計部の方に、13 階、延べ面積約 5000M^{2}の中規模事務所ビルを対象として、構造計画のスタディと減衰効果、ダンパーコスト、時刻歴応答解析モデルの作成などを行っております。次回の研究会である程度、ご紹介できるかと思います。）

◇Copt ×ωo = Kd で最適な減衰係数はかなり大きな値が必要なことは理解できました。実施設計で例を示していただければ、もっと理解が深まると思います。よろしくお願いします。

→　詳細な検討結果について、次回の研究会で、ご報告いたします。

◇ダンパーの効果について Kd とのバランスにより最適値が決定し、このバランスが建物のωにより一意的に決まるということは、理解できました。超高層の場合は Kd に対して大きな C が必要とのことですが、わざと取り付け部材の剛性 Kd を小さくすると既存のダンパーでも最適値を実現できるという理解で良いでしょうか？

ダンパーの価格と C は比例する気がするのですが、現実的なダンパー数で、既に C の最適値を超えていない限り、Kd を落とすのは効率が悪いように思うのですが、実際に超えているということでしょうか？

→　わざと取り付け部材の軸剛性を小さくすると、建物の 1 次固有周期の変動が小さくなります。つまり、減衰効果が小さくなります。　このように、振動数の変化と減衰率の変化は対応しているのです。2 階の常微分方程式で計算すると、減衰率がどのように高くなっても（20%以上）、振動数は全く変化しません。この数学モデルは今でも、建築振

動工学では普通に用いられておりますが、残念ながら、日常経験する物理現象と矛盾しております。減衰装置を設置すれば、必ず振動数は高くなります。そして、振動数をなるべく高くなるように減衰装置の配置や個数を工夫することで、制震効果を高めることができるのです。なるべく、少ないダンパーの設置個数で建物の 1 次固有振動数をどれだけ高くすることができるか（剛性を高くすることができるか)、これが効率の高いパッシブ制震構造の構造計画となります。

複素固有値解析プログラムは簡単には入手できないので、実固有値解析を行って建物の内部に設置するダンパー配置を検討するのが最も簡単な方法です。減衰性の高い構造物の固有値は、全て、複素固有値となります。従って、減衰性能を正しく評価するためには、複素固有値解析を客観的に、かつ正確に行う必要があります。

しかし、複素固有値解析を客観的に行うことが困難であるため、実固有値解析を 2 度行うことで、結果として複素固有値解析を正確に行ったことと等価な解析を行うことができます。なぜなら、実固有値解析の客観性はある程度保証できるからです。

◇Copt をいくつにするかの議論は、ダンパーの C をどう設定するのかということで良いでしょうか？その時、実際にはリリーフが掛かった場合の最適値の考え方は、どうしたら良いのでしょうか？

→　ご指摘の通りです。　頻繁に発生する中小地震のときは、ダンパー反力がリリーフ荷重を超えることはありません。また、建物の層間変形も小さいので、耐震安全上問題もありません。従って、最適な減衰係数 Copt が解析で求まったとしても、ダンパーの減衰係数 Cd の実際の値は、Copt の 2 倍とか 3 倍ぐらいに設定しておきます。　中規模（25cm/sec)程度の地震が発生した場合は、リリーフ荷重を超える反力がダンパーに作用するようになります。まだ、建物構造は線形範囲です。ダンパーによる減衰効果もあるので、応答変位は小さいと思います。さらに、大きな地震が発生したときは、ダンパーのリリーフ荷重に達します。結局、ダンパーの等価な減衰係数 Ceq は、Cd より低下して、Copt に近づいていきます。結局、地震入力が 1.5 倍になっても、建物応答変位は 1.3 倍程度に抑えられることになります。つまり、大地震の時に最適減衰係数になるように、初期値としての Cd は少し高めに設定しておくほうが、構造設計としては良いと思います。ここには、設計用地震入力の大小による構造設計者の判断が入ります。建物構造の基本的な強度が高い場合は、上記のような議論ができますが、建物のベースシア係数が小さく設定されている場合は、Cd の値をもう少し低くする必要があるでしょう。例えば、耐震補強などでダンパーを設置する場合は、Cd の値を最適かあるいは少し低めに設定した方が良いということになります。

◇建物が非線形挙動するときの最適値（Copt)は、どのように決めますか？

→　上記のご質問の回答とほぼ、同じです。　ダンパーの設置台数にも限りがあります。

また、どのように巨大な地震が発生するかもわかりません。従って、建物が弾塑性状態になる場合も、想定しておかなければなりません。　まず、ダンパーの設置台数が十分にあり、15%を超えるような減衰率が達成される場合は、上記のご質問と同じ考え方でCopt を決めればよいと思います。次に、ダンパーの設置台数が十分でないときは、減衰効果が限られますので、建物構造物が弾塑性状態になります。その場合でも、入力してくる地震エネルギーの総入力量は、ダンパーの効果があってもなくても、変化しません。（秋山先生の研究成果です。）建物の振動数が低下すると、最適なダンパーの減衰係数は低下します。従って、ダンパー設置台数が少なく（費用が不足）減衰効果があまり見込めない場合は、最適値からあえて少し小さめに設定しておきます。すると、建物が壊れ始めたときに、最適な減衰係数に近づくようになります。このように、建物の基本的な耐力のレベルと設置できるダンパー総数から決まる制震効果との関係によって、ダンパーの減衰係数 C の設計値は、若干、変動します。　ただし、現在、一般的に想定されている値（20 KNsec/mm とか 30 KNsec/mm などの値）よりは、何倍も大きな値を設定しなければなりません。　基本的には、超高層ビルなどでは、500KN sec/mm 程度、中高層ビルでは、200～300KNsec/mm、中低層建物（5 階ぐらいまで）の場合は100KNsec/mm 程度、に考えておけばよいと思います。

なぜかというと、超高層ビルでは、長周期地震動による繰り返しによる応答変形の増大が問題だからです。中低層ビルの場合は、直下型振動のように強度が問題となるからです。中低層ビルでの弾塑性化は避けられないでしょう。従って、少し小さめの減衰係数を設定します。超高層では理論通りの高い値を設定すべきです。

◇東急建設殿の試設計モデルでは、積層ゴムが間柱のみに配置されており、本設の柱には入っていないように見えましたが、それで良いのでしょうか？　大変、興味深い内容で次回の勉強会を楽しみにしております。

→　間柱にのみ積層ゴムを設置します。高減衰制震構造システムでは、減衰装置の近傍にある柱にだけ、積層ゴム支承（鉛直剛性が極めて高く、RC 構造の柱と同程度の軸剛性）を配置することで、曲げモーメント反力を受けます。一方、せん断力については柱に積層ゴムが配置されているため、ほとんどの水平力がダンパーに負担されます。このように、積層ゴム支承と減衰装置を組み合わせることによって、はじめて、建物に設置された減衰装置としての働きができるようになるのです。

◇オイルダンパーが実際に動くところを見ることができて大変勉強になりました。また、制震や免震の考え方が今なお発展途上であることにも驚きました。プロトタイプの建築（東急建設殿）も是非、見学してみたいです。

→　私もそう思います。　すでに、20 年近く前に論文を発表し、パッシブ型制振装置の性能評価方法について述べました。　まだ、一般の方々には「ニューマーク β 法による

時刻歴応答では、制震構造の正しい計算結果は得られない」ことは、広く知られていません。免震構造についても、まったく同じことが言えます。減衰率の増大には限界があるので、免震構造といえども、限りなく減衰率を高めることはできないのです。やはり、20%程度が限界となります。

◇最適値 Copt について、少し理解できたように思います。高層建築の場合、2 次、3 次のモードに効かせるような考え方もあるのでしょうか？

→　2 次モードと 1 次モードの減衰率を同時に指定して、最適減衰係数を設定することもできます。その場合は、少なくとも 2 台のダンパーが必要です。3 次モードについても同時に指定したい場合は、少なくとも 3 台のダンパーが必要です。　ダンパー配置を検討することと、減衰係数を変化すること、で実現できます。　しかし、耐震工学的には 1 次モードを中心にして考え、後で、2 次モードや 3 次モードの減衰率がいくつになるかを確かめるというアプローチが現実的だと思います。

◇時刻歴応答解析は、どのような特別な配慮が必要ですか？

→　時刻歴応答解析を行うためには、フィードバックを考慮した現代制御理論に基づくモデル化が必要です。　減衰装置を設置して減衰係数を大きく設定しても、建物振動数が変化しない数値計算結果しか出てこない場合は、その解析プログラムは 10%や 20%ぐらいの減衰率が簡単に実現できるような応答解析結果になると思います。　これは、2 階の常微分方程式を解析しているからなのです。　減衰率が 10%増えれば、振動数も 10%高くならなければなりません。この関係が満足されるような時刻歴応答解析結果は、フィードバックを考慮した現代制御理論に基づくモデル化が必要なのです。

　ニューマーク β 法による解析プログラムの多くが、減衰装置として Maxwell 型モデルを採用していると書かれています。しかし、実際は減衰係数を増大させても固有振動数は殆ど変化しません。これは、減衰の無い剛性マトリクスに、減衰力を外力として作用させて、ニューマーク β 法で逐次積分しているからなのです。減衰装置を設置することで、固有値が変化するモデル化を行っていない場合は、減衰装置の性能評価を客観的に行っていることにならないのです。　現在、時刻歴応答解析プログラムで、この点を客観的にモデル化した市販されているプログラムは、私が知っている範囲で存在しません。