

粘性系ダンパーによる耐震性能設計促進への期待

早稲田大学理工学術院 曾田五月也



はじめに

1995年阪神淡路大震災を契機にして建築物の耐震性能の評価指標が見直されて来ている。高い耐震性能を保有させるために各種のエネルギー吸収装置(ダンパー)を設置する事例も増加しているので、それにも柔軟に対応できる、エネルギーの概念に基づく評価方法を整備する事の重要性が増して来ている。耐震性能評価法におけるエネルギー概念の適用は新しいものではなく、1935年に棚橋諒が論文(日本建築学会建築雑誌、1935年5月、pp.578~587)の中で「構造物の耐震力を決定する処のものは、水平力によって構造物に変形してこれが破壊までに貯え得るポテンシャルエネルギー量にあると考えられる」との考えを示した事がはじまりであろう。1981年より施行されて来たいわゆる新耐震設計法(現行建築基準法施行令の許容応力度等計算)においては、構造物本体の塑性変形による吸収エネルギーが地震入力エネルギーを上回る事を必要としている。この時に注意すべき事は、従来の一般構造ではこのエネルギー吸収性能を構造本体の損傷を代償として得ていた点である。最近の強い地震において、震度6前後の本震に続いて同等の強さを有する余震が繰り返し発生した事や、近年では建築物の長寿命化が社会的な要請になっている事などにより、強い地震時にも構造本体には大きな損傷を生じさせない設計法の一般化が必要となってきている。したがって、建築物の構造耐力上主要な部材に大きな損傷が生じることを防止するためにダンパーを設置し、さらにそのダンパーも取替えが不要である事が好ましい。この点において粘性系のダンパーは変形の繰り返しによる損傷の無いのが一般的であり、温度上昇などによる軽

微な性能低下も時間の経過により治癒される特性を有するなどの利点を持っている。そこで、本稿では粘性系ダンパーを建築物の耐震性能設計に有効利用するためのポイントについて記してみたい。

ダンパー利用の難しさ

筆者らは上記の阪神淡路大震災をきっかけとして、粘性系ダンパーの一種である粘弾性ダンパーを、新築・既存を問わず、建築物の耐震性能向上のために積極的に利用するためのプロジェクト研究「粘弾性ダンパーによる建築物の耐震設計・耐震補強に関する研究(早稲田大学理工学総合研究センター、1996~1999年)」を行なった。振動理論の応用技術である制振技術は機械工学の分野を中心にして長い開発・応用の歴史があるので、当初はその技術を直接応用することを試みたが、以下に記すような種々な要因により、その一般化を急速には進める事が出来なかった。

- ①制御対象の重量が大きい場合、大容量のダンパーが必要である。
- ②地震動(小・中・大)、風、車両交通、機械振動など、特性の異なる外乱に対して一様に効果を発揮させる必要がある。
- ③多くの建築物は大地震に際しては構造本体の一部に塑性変形が生じることを許容して設計されるため、非線形システムを対象とする制振が必要である。
- ④一般の建築物で50年~60年、特別の建物では100年以上の供用期間を想定するため、ダンパーが長期耐久性を有する事が必要である。

- ⑤新築用・耐震補強用の区別、建物用途の区別などによらず配置・美観などで建築計画との矛盾を避けねばならない。
- ⑥一般的な建築物は個別に設計・施工されるため、個々の建物特性に応じた多様な設計自由度が必要である。
- ⑦粘性系のダンパーでは変形と抵抗力との間に位相差が生じるので、一般的には両者が同相である主要構造部材の関係との単純和は耐震性能の正確な評価指標にならない。

制振構造設計の原則

上記の制約条件を考慮しながら、一般的には複雑な地震応答性状を發揮する建築物の加速度・変形を程よく低減させる事が必要であるので、制振技術（免震技術も含む）を建築構造に無理なく適用するための幾つかの原則を明らかにしておくのが良い。構造システムが複雑であればあるほど、複雑な地震動に対する応答の予測精度は減少するので、ここでいう「原則」とはこのような複雑さを排除することに他ならない。そのためには先ず、構造モデルの自由度を低減出来ることが有効である。この観点から見て中低層の免震構造は近似的に1自由度系に見なし得るといふ大きな利点を有している。一般の多層建物の制振においても、粘性系のダンパーはその抵抗力が速度に依存（比例に近い）するので高次の振動形を抑えて各層の変形分布を一様化する効果が高い。原則に加えるべきもう一つの事項は複雑な非線形性の排除である。これに関しては、ダンパーを利用した高減衰化による変形抑制効果で主要構造をほぼ弾性範囲に留める事が極めて有効であるが、これを既存不適格建物、耐震補強の場合も含む全ての建築物で実現する事は難しい。そこで、次善の策として、構造全体の荷重変形関係を擬対称で安定な物に変換する仕組みの併用が考えられる。この面においても、粘性系の力学特性は線形モデルとして近似できるものが多い事が利点になる。特にオイルダンパーでは、オイルの流路に設けるオリフィス機構の工夫による圧効き・引効き機構による構造各部の安定性の確保、原点復帰機構による応答履歴の安定性確保、さらには複数のダンパーを連結したリンク機構による変形分布の一様化（損傷集中の防止）などを比較的容易に

行なえる事が利点となる。

エネルギーに立脚した耐震性能評価法

上記のような構造モデルの単純化（1自由度系としての近似）を全ての建築物において行なうのは困難なので、対象とする建築物の基本構造に対しても原則を定める必要があるだろう。都市建築の大半は戸建住宅を含む中低層の建築物であり、先の阪神淡路大震災において多くの人命が損なわれたのもそれらの建築物の崩壊が主たる原因であった。そこで筆者は、これらの建築物の耐震安全性向上の促進が急務であると考え、比較的規模の小さな建築物においては、仕様規定（構造詳細の規定では無く基本性能の規定）を定める事で複雑な耐震計算を免除できる仕組みを導入する事が良いと考えている。具体的には、近似的に1自由度系と見なされる基本構造を備えていることが検証された建築構造システムでは、1自由度系に対する限界耐力計算、あるいは一般的な地震応答スペクトルにより変形・加速度の最大値が制限値以内であることを確認すればOKとする簡易判定ルートを設ける事になる。この場合に注意すべき事は、先に記したとおり、粘性系のダンパーでは最大変形と最大抵抗力それぞれの発生時間に同時性が保障されないため、力（荷重）と力（強度）との関係で安全性を評価するのは合理的ではない。例えば、木質系の住宅などに粘性系ダンパーを設置する場合には、壁率計算による評価においては効果が不足となりがちであるが地震応答計算では十分な効果を確認出来る場合が多いので、やはり、地震入力エネルギーと建築物のエネルギー吸収能力とのバランスをチェックする評価法がより合理的である。なお、建築物内におけるエネルギー吸収の実体は、建築物に生じている力と変形の関係が囲む面積として表現されるが、このエネルギーはさらに二通りに分けて考える事が出来る。一つが地震の全継続時間として得られるもので、総地震入力エネルギーに対応する。建築物の安全性を最大変形よりもむしろ繰り返し変形による損傷の累積により構造の劣化の度合を評価する場合に重要な指標となる。一方、建築物の応答の半サイクルや1サイクルに相当する比較的短い時間内の入力エネルギーとして定義することも出来る。このばあい、建築物の応答により正負対象に近い荷

重変形関係が得られるならば、その間の地震入力エネルギーと荷重変形関係の面積に相当する吸収エネルギーとのバランスにより最大変形が決まる事になる。鉄筋コンクリート系や木質系の構造ではその限界変形能力に応じた耐震安全性評価が重要である。一般的には両エネルギーの概念を併用する事が望ましいと思われるが、粘性系のダンパによる高減衰化の効果として主要構造部材をほぼ弾性範囲に留めるような設計であれば、後者のみでも安全性の評価には十分と言える。

むすび

建築物の耐震性能を飛躍的に向上させるために建築物を高減衰化することは既に実用化も進んでいる。各種の制振装置による合理的な耐震補強法が提案される中で、エネルギー吸収装置の信頼性が保障されるようなものの適用については、徒に煩雑な計算法を強いるようなことでその普及を阻害してはならないと考える。粘性系の装置は抵抗力が速度に依存することから、必要性能と保有性能との関係を従来の「力対力」として捉える考え方が馴染みにくいですが、「エネルギー対エネルギー」の関係に基づく計算法によれば明快に安全性の説明がつく。この優位性は構造システムが1自由度系として近似される基本構造を有するようにすることで、免震構造あるいは制振構造として有効に活かす事ができる。

付記

粘性系ダンパーを設置した建築物の数は確実に増えてきているが、それら建築物のダンパーによる付加減衰性能を振動の実測に基づいて定量的に評価した例は極めて少ない。粘弾性ダンパーに関しては、かつて建築研究所を拠点とするプロジェクト研究「新技術による既存建築物の耐震性向上技術の開発(1996~1998年)」の一環として、既存不適格鉄筋コンクリート造の制振補強が有効である事を実大振動台実験により実証した例が有るが、その後、強震動時の挙動予測を目的とした検証例は戸建住宅の振動台実験を除いて殆ど例が無い。筆者も、この間各種の粘性系ダンパーを設置した実建物の減衰性能評価実験の幾つかに関わって来ているが、大地震を想定してダンパーが設置されている建物では、常時微動や人力加振などの外乱に対して、設計において想定されるような大きな減衰効果が検出されない場合が多い。粘性系に限らずとも、パッシブ制振構法を適用する事で建築物の地震時安全性を高める事への期待が大きいので、関係諸氏があらゆる機会を見出してそれら建築物の減衰性能評価を行い、その成果を公表して行かれることにも期待したい。

