

## 建築構造力学 (5)

### 第1回 建築耐震設計の小史

#### 1.1 はじめに

我が国の建築構造学は、地震から建物をどのように守るかという命題を中心に発達してきたといっても過言ではない。耐震構造は即ち、我が国の建築構造の主題である。本講座では、構造力学や構造解析の手法を用いて、実際の建築物は（それは、低層建物から超高層建物まで幅広い）どのように耐震的な構造物として設計すればよいのか、その考え方を解説することが目的である。

設計法とは法律の体系であり、法律は物理学とは違うが、日々の構造設計業務を行うためには、建築基準法に準拠する必要がある。そこで、法律で定められている様々な数値や言葉の意味（物理的な意味）を、客観的に解説することが本講座の目的でもある。

この講座では、現在用いられている耐震設計法の基本的な考え方と、どうして、1. 保有耐力設計法、2. 限界耐力計算法、3. エネルギー法、の3つの設計体系があるのか？それぞれは、どのように違い、どのように用いられているのかについて解説したい。

地震が起きると建物構造物は大きく振動する。振動現象には、振動数と減衰率という2つの物理定数が重要であり、この2つが決まれば地震動が具体的に与えられれば、建物構造物の振動の大きさも自動的に決まる。よって、建築物の耐震性能は振動数と減衰率で決まると言っても過言ではない。3つある設計法では、特に減衰性能の評価方法が違うのである。

そのため、本講座は建築構造物の減衰性能評価について解説することが主たるテーマとなった。本講座の第1回目の講義では、建物構造の減衰性能評価について、過去50年ほどの間に、建築構造物の減衰性能評価と減衰性能を向上させる技術がどのように発達してきたかを概観することから始めようと思う。

#### 1.2 1980年以前の耐震工学における減衰の考え方

現行の建築基準法に規定されている保有耐力設計法は、日常的に行われている構造設計法であるが、施行されたのは昭和56年（1981年）のことである。この設計法の概要について述べることは、ここでの目的ではないので割愛するが、この設計法の中で唯一、建築構造物の減衰性能について規定されている部分が「構造特性係数」、あるいは通常、「 $D_s$  値」と呼ばれている係数である。 $D_s$  値は、構造物の減衰性能などを勘案して大地震（二次設計）の際に、計算上の地震力を低減する係数として理解されている。

例えば、減衰性能や塑性変形能力がほとんどない弾性構造物の場合は、 $D_s$  値は1.0である。一方、柱や梁の塑性変形能力に十分な余裕があり、大地震の際にも倒壊しないときは、その変形能力や減衰性能の大きさに応じて、 $D_s$  値は小さくなる。 $D_s$  値の具体的な値

は、建築基準法に規定されているが、最低値は鋼構造では 0.25、鉄筋コンクリート構造でも 0.30 である。この値は、一次設計の地震外力の 1 階部分における設計用せん断力の比率（これをベースシア係数と呼ぶ）の最低限が 0.2 であることと関係している。

以上のように、1981 年よりも古い建築構造工学においては、振動工学においてさえ、減衰性能を定量的に評価することは行われていなかった。そして、構造工学（耐震工学）の主要テーマである保有耐力設計が施行されてからは、新しい研究分野を求める気運が少しずつ蓄積されていったのである。

### 1.3 1986 年から 1995 年までの減衰装置の状況

建築基準法の大規模な改定後の建築耐震工学分野の状況を一変したのが、1986 年から突如として始まった「制震構造」の研究開発であった。京都大学名誉教授であった故小堀鐸二博士が、鹿島建設の研究室に副社長として移籍した後、振動制御理論を応用した建築構造物の能動型制御システムの研究論文を発表した[1]。これが端緒となって、日本中でアクティブ動吸振器の研究とパッシブ型制震構造システムの実用化研究開発が始まった[2, 3, 4, 6]。当時の日本建築学会の年次大会における制震構造関係論文の急増は、免震構造の研究論文を凌ぐものがあった。時を同じくして、1988 年東京と京都で第 9 回世界地震工学会議が開かれ、制震構造については、Special Theme Session が開かれ小堀博士による基調講演が研究開発を加速することとなった。当時は、建築振動工学においては 2 階常微分方程式（多質点系）で、材料非線形のみを考慮して地震応答解析することが普通に行われていた。減衰については剛性マトリクスあるいは質量マトリクスに比例した減衰項でモデル化することが何の疑いもなく行われていた。このため、減衰装置（オイルダンパーやシリコンダンパー、あるいは金属摩擦を利用した減衰装置）は数多く考案され、その多くは実建物に設置されて具体化されていった。シリコン系の材料を用いた制震壁、オイルダンパーを筋交いの代わりに用いた減衰装置などが超高層建物などに盛んに応用され、設置された[5, 7, 8]。当時は、新規プロジェクトが実用化された後は、地震観測や竣工後の自由振動実験などを行うことが普通で、解析で予想された 10%を超えるような減衰性能が得られると期待されていた。ところが、竣工後に行われた実験や観測結果を見ると、固有周期周辺には明確なピークがあり、減衰性能は極めて小さかった。例えば、同じ建物の東西方向と南北方向を比較して、減衰装置を設置していない構造構面の方が伝達関数のピークが低い場合さえあったのである。これに対して、「主たる原因は摩擦の影響によってオイルダンパーが作動するレベルに達していないからであり、大きな地震が発生すれば必ず減衰性能が上昇する」という論文が数多く執筆された。結局、学問的な原因究明が行われることなく、高減衰パッシブ型制震構造という分野が確立していった[7, 9, 10]。

#### 1.4 1995 年から 2010 年までの減衰技術と解析技術

1995 年 1 月 17 日の阪神淡路大震災（兵庫県南部地震）後、アクティブ型制震構造の研究は急速に終息していった。一方で、パッシブ型制震構造は大地震に有効な技術として、実用化が加速されていった[12]。鋼材の塑性化に伴うエネルギー吸収を利用した鋼材ダンパーは、低降伏点強度の鋼材が開発されたこともあって、急速に普及していった[11, 13]。しかし、初期の制震構造が地震観測装置を設置することで性能の検証を行っていたのと対照的に、1995 年以降の実用化研究では解析によって応答低減効果が確認できれば、実証研究を省略することが普通に行われていった。このため、「初期の研究開発段階で疑問に思われた減衰効果が解析上の期待値を大きく下回ることは、別に気にすることも無い。大地震が発生すると必ず解析と同じような高減衰効果が得られる」と、多くの構造関係者が信じるようになっていった[12, 13, 14]。こうした状況下で、減衰率が 50%を超えるような「高性能な減衰装置」が開発され、数多くの実施建物に適用されていったのである[9, 10, 12, 13]。西村研究室では、減衰装置を有する建築構造物の減衰性能評価について疑問を感じ、もしも大地震の際にも減衰性能が発揮されなかったならば、我が国に多数建築されている超高層建物の耐震性能が大きく損なわれることを危惧し、20 年以上前に観測事実と解析モデルの相違についての理論研究を始めた。その後の西村研究室での理論研究活動の結果、「大型の建築構造物に小型の減衰装置を設置することで減衰効果を高めることは、極めて困難であること」等、重要な解析的予想を行った。また、減衰装置を建物構造物に設置することで達成することのできる減衰効果には上限があり、その値は減衰率にして約 18%であること、2 階の常微分方程式のモデルでは振動解析モデルとして妥当ではなく、少なくとも 3 階の常微分方程式を用いるべきであることなども指摘している。特に、減衰率の増大と固有振動数の変化には一定の関係があり、振動数の変化を伴わずに減衰率のみを 50%も増大させることは不可能であることが理論的に明らかとなった。これらの研究成果は文献 16, 18 にまとめられている。しかしながら、減衰装置を設置しても効果が少ないという文献 16, 18 の学術論文の結果は、ほとんど顧みられることがなかった[14]。そして、2011 年 3 月 11 日を迎える。

#### 1.3 2011 年以降の耐震工学における減衰装置の現状と課題

2011 年の東北大地震では、東京は震源域からは 500km 以上も離れていたにもかかわらず、大きな地震動が到達している。新宿地区における超高層建物にも、レトロフィットで減衰装置を多数設置した超高層ビルがあった。しかし、どの超高層ビルも大きく振動したことは報道機関の動画や Youtube でも確認することができる。結局、減衰装置は大きな地震動でも解析予想どおりの効果が、全くと言っていいほど、得られなかったのである。減衰装置を設置して耐震補強を行った建物の中には、構造体が大きく損傷した建物も多い。しかし、残念ながら詳細なデータは公開されていないのが事実である。

この地震以降、減衰装置を設置して減衰率が 10%を超えるような解析予想をした論文は皆無である。今後、プレートの沈み込みによる巨大地震の発生や首都直下型地震の発生が危惧されており、減衰性能の高い建築構造システムの技術開発が求められている。

## 参考文献

- [1]小堀鐸二、その他、他、“ダイナミックインテリジェントビルの試みー可変剛性を有する D. I. B.”、日本建築学会大会梗概集、構造 B-I、pp. 839~841、1986 年
- [2]福元敏之、小堀鐸二、石井孝二、山田俊一、前田祥三:ハニカム開口を有する鋼板ダンパーに関する研究 (その 1: 静的加力実験)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 643~644、1989 年
- [3]畑田朋彦、栗野治彦、倉田成人、他“高減衰構造の研究”、日本建築学会大会梗概集、構造 I、Vol. B、pp. 1007-1012、1992 年
- [4]浅野清昭、伊藤嘉朗、“粘弾性体を利用した制振構法に関する研究”、日本建築学会大会梗概集、構造 I、Vol. B、pp. 1023-1026、1992 年
- [5]横田治彦、岡田敬一、他“粘弾性ダンパーを設置した高層建物の振動特性 (その 1)から (その 2)”、日本建築学会大会梗概集、構造 I、Vol. B、pp. 1019~1022、1992 年
- [6]倉田成人、小堀鐸二、他“高減衰構造の実験的研究ー3層試験体の振動実験ー”、構造工学論文集、38 (B)、pp. 235~244、1992 年
- [7]田上淳、栗野治彦、畑田朋彦、その他、“高減衰構造の実用化研究”、日本建築学会大会梗概集、構造 I、pp. 657-662、1993 年
- [8]浅野清昭、伊藤嘉朗“粘弾性体を利用した制振構法に関する研究”、日本建築学会大会梗概集、構造 I、pp. 631~632、1993 年
- [9]西山正三、他“減衰増幅装置を用いた構造物の応答制御に関する研究”、日本建築学会大会梗概集、構造 I、pp. 651-652、1993 年
- [10]西山正三、可児長英、他:減衰増幅装置を用いた構造物の応答制御に関する研究 (その 3、実施適用建物の振動実験)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 651-652、1993
- [11]三山剛史、田中清、平澤光春:極低降伏点鋼を用いた制振構造に関する研究 (その 1~2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 I、Vol. B、pp. 593~196、1993
- [12]石原和男、鈴木良秋、他、“高減衰オイルダンパーによる高層建物の制震”、日本建築学会大会梗概集、構造 B-2、pp. 851-856、1996 年
- [13]加藤貴志、岩田 衛、和田 章:損傷制御構造における座屈拘束ブレースの性能評価、日本建築学会構造系論文集、第 552 号、pp. 101~107、2002. 2
- [14]パッシブ制振構造設計・施工マニュアル、日本免震構造協会、2005. 9
- [15]西村功、“非定常不規則外乱下における能動型ブレースのエネルギー吸収応答”、日本建築学会構造系論文集、第 567 号、pp. 55~62、2003 年 5 月
- [16]西村功、“構造物内部に設置された減衰装置の性能評価”、日本建築学会構造系論文集、第 579 号、pp. 23~30、2004 年 5 月
- [17]笠井和彦、伊藤浩資:弾塑性ダンパーの剛性・降伏力・塑性率の調節による制震構造の応答制御手法、日本建築学会構造系論文集、第 595 号、pp. 45~52、2005. 9
- [18]西村功、“構造物内部に設置された完全弾塑性型履歴減衰装置の性能評価”、日本建築学会構造系論文集、第 606 号、pp. 89~96、2006 年 8 月