

招待論文 「建築構造物のアクティブ制震」

井上 豊*1

要旨：構造物の地震や風による応答を低減するための制御技術は、近年大きく注目されて来ている。パッシブ制御は、制御装置を予め構造物内に組み込んでおき、揺れの発生とともに受動的にその効果が発揮されるもので種々のダンパーや免震構造などを指し、この20年間で一挙に広まり多くの実施例を見ている。一方、パッシブ制御をさらに発展させ、動的外乱の作用とともに構造物応答をセンサーで検出し、制御コンピュータの指令に基づいてアクチュエータを駆動させて、時々刻々応答を制御するものをアクティブ制震と呼び、この10年間で急速に進展を見せ、国際的にも大きな関心を集めている。

キーワード：構造制御，アクティブ制震，建物応答，建築構造物，制御アルゴリズム

1. 序

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、多くの貴重な人命の犠牲とともに約20万棟の建物が全半壊した。建築構造物にとって地震は最大の外乱であり、重力の作用に抗しつつ横方向の振動による変形に対して安全となるよう構造物を構築する必要がある。耐震構造の歴

史は約100年にわたりいくつかの変遷を経ながら、現在は建物の動的応答特性を基に構造設計がなされている。しかしながら、非予測性、不確定性の極めて高い強震動に対しては、パッシブな応答制御技術には限度があり、近未来にはアクティブに応答制御を行うことが望まれ、種々のアプローチが始められている。ここでは、建

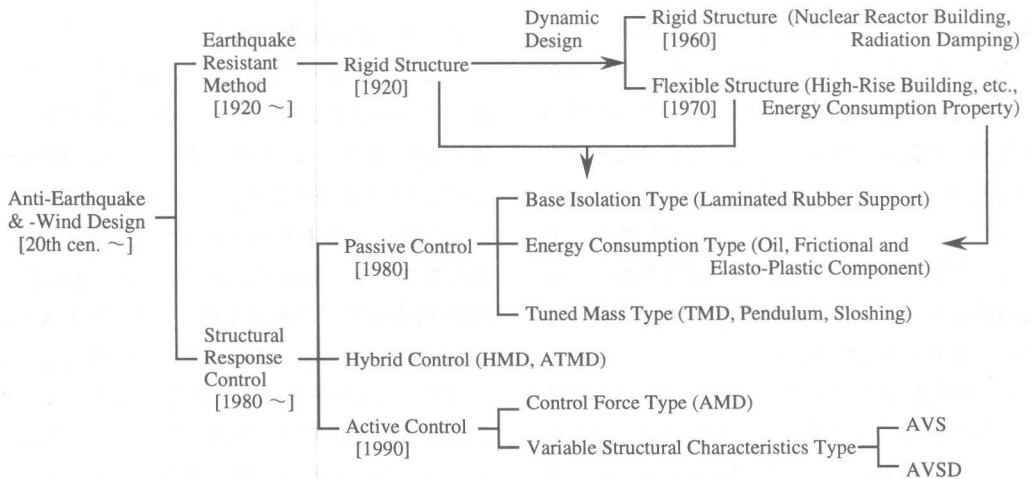


図-1 対地震構造発展の流れ

*1 大阪大学教授 大学院工学研究科建築工学専攻 工博

築構造物を中心にアクティブ制震の研究及び技術開発が如何に進められつつあるかについて紹介することとした。

2. 耐震・制震構造の歩み

建物の耐震性評価に始まり、現在のアクティブ制震技術の実現に至るまでの流れは、概略図-1に示すようになる。

2. 1 震度法と剛構造

建物の耐震構造は、1916年の佐野利器の「家屋耐震構造論」に始まるといえる。彼は、1906年のサンフランシスコ地震の調査により、鉄骨造も良く地震に耐えたが、未だ新しく数少ない鉄筋コンクリート造ラーメン構造が健全であったことから、耐震・耐火・耐久性に富むものとして、これをわが国の建築構造の進むべき道とした。そして、この論文で、地震動による建物への作用力は静的横力で評価でき、これを重力との比で表わした震度をその指標として提案し、大地震における震度は0.3程度であるとしている。これを発展させて、1922年内藤多仲は「架構建築耐震構造論」の中で横力を負担させるために壁を組み込むことを奨めた。その応用例として実施設計例を付録に示したが、その一つに東京丸の内の日本興業銀行が含まれている。翌1923年関東大震災が発生し、大被害を受けた丸の内の建築物群の中で、この建物がほとんど無傷であったことから大きな評価を受け、翌24年に世界で初の建築物耐震規定がわが国に登場し、前述の震度0.3に対して材料安全率3を考慮して設計震度0.1が定められた。

この静的横力の考え方に対して、1926年真島健三郎は振動論の立場から、共振を避けるためには、建物の周期を地震動の周期よりも長い側にずらすのが望ましいとして柔構造を提唱し、静的横力と高い水平抵抗力を主張する剛構造との間に激しい論争が繰り上げられた。また、この論争に刺激され呼応するかのようになり、建物基部にベアリング状に球を用いたり、柱脚部をす

べらせるなどの免震の考え方や、建物屋上に移動する質量を置き、地震時のその衝突反力を応答抑制に利用する制震の考え方も登場していた。

剛柔構造論争は明瞭な決着がつくこともなく終焉に向かったが、1935年に2つの新しい考え方を示す論文が発表された。妹澤克惟・金井清による「震動エネルギーの地下逸散」と棚橋諒による「速度ポテンシャル論」であるが前者についてはここでは割愛する。後者は地震動の破壊力は地動速度の大きさに依存し、建物の耐震力は倒壊までに蓄えうるポテンシャルエネルギーの大きさによるとするもので、それまでの考え方を根底から覆えた。この論文の内容は30年後の高層建物など動的解析による耐震性評価が行われるようになって受け入れられ、現在もとても基本的な考え方となっている。

震度法は戦後の建築基準法に引き継がれ、短期荷重として地震荷重に対する材料安全率が半分になったことから設計震度は0.2へ改められた。その後、地域係数や地盤種別および構造種別の組合せによる係数が導入されて、1981年の新耐震設計法が取って代るまで君臨した。

2. 2 動的解析の成果

剛柔構造論争の間には幸いにも大きい被害の生じる地震は起こらなかったが、皮肉にもその後1943年から46年にかけて、鳥取、東南海、三河、南海と大被害をもたらす地震が続発した。この時期は戦中あるいは戦後の混乱期にあり、被害調査なども全く不十分であった。戦後復興期の48年に福井地震が発生し、局地的ではあるがきわめて激しく、建物がすべて全壊した地域もあちこちに見られた。この地震によって、耐震設計された典型的な鉄筋コンクリート造建物が倒壊したことから、静的横力による耐震設計への疑念と動的検討の気運が芽生え、強震計の開発も進められた。

1952年に棚橋諒・小堀鐸二は「スカイスクレーパーの振動」を発表し構造物の非定常応答解析を、続いて部分的な塑性降伏を考慮した非

線形非定常応答解析を示し、履歴減衰効果と必要な塑性変形能力(靱性)について論じた。サンフランシスコ地震 50 年を記念して、1956 年米国パークレーで開かれた初回の世界地震工学会議では、この棚橋論文と G. W. Housner の耐震終局設計の考え方が大きな反響を呼んだ。同じ 56 年にわが国初の強震記録が得られ、1960 年代に入ると電算機が登場して強震記録を用いた建物の地震応答解析が容易に行えるようになり、多くの成果が発表された。

弾性応答解析として種々の地震記録による応答スペクトラが挙げられる。Housner は 1950 年代から米国の強震記録の分析を行って、平均的には速度応答スペクトラは周期 1 秒付近までは周期とともに増加し、それ以上ではほぼ一定となることを示した。わが国では多く加速度応答スペクトラの形で表わされ、0.2、0.3 秒から 1 秒にかけてピークを有し、長周期側ではおおむね双曲線的に減少することが確かめられた。また、このピークを示す周期は主として記録地点の表層地盤特性の影響が大きく、硬質地盤から軟弱地盤となるにつれてピーク周期が長くなることも分かってきた。弾塑性応答解析では bi-linear 履歴型復元力特性が採用され、弾性系最大応答変位に対して弾塑性系最大応答変位はほぼ等しいこと、最大応答に対応するポテンシャルエネルギーを等置すればおおむね弾塑性応答の上限値が推定出来ることなどが確かめられた。弾性限界変位に対する弾塑性最大変位の比で与えられる ductility factor (靱性率・塑性率)は弾塑性応答を整理・解釈するのに便利で、静的実験による力学特性と対応させやすいことから、要求される靱性の評価尺度として一般に用いられるようになった。

2. 3 高層建築物の出現

1950 年代後半から大都市で土地の高度利用が求められ、高層建物への要請が高まってきた。動的解析の成果を踏まえて高層建築物の可能性が議論され、1963 年に建物の高さ制限を撤廃す

べく建築基準法が改正されて高層建物の建設が可能となった。高層建物ではその 1 次周期が長周期側に移行し、建物重量あたりの地震力は周期とともに減少することが確かめられたからである。そこで、高層建物に限っては動的解析によって耐震安全性を確かめることが採り入れられた。そして、比較的頻度の高い中程度の地震では構造的損傷を生じさせず、きわめて希な大地震でも局部的な損傷に留めて倒壊に至らせないとする、第 1 段では弾性設計、第 2 段では履歴減衰を利用した靱性設計が行われるようになった。架構の弾塑性復元力特性を応答のバラツキの少ない安定履歴型特性 (masing 型) とするために、壁に鋼材を埋め込んだり、スリットを設けたり、K 型ブレースなどエネルギー吸収要素が組み込まれた。この考えはさらに積極的に進められ、鋼材などの弾塑性特性を利用した層間履歴型ダンパーの設置など制震構造化へと広がってゆくことになる。

応答解析において復元力特性とともに重要な要素となる粘性減衰についても実験や計測が実施された。建物の減衰は、第 1 に振動エネルギーの地下逸散が挙げられ、ほかに構造材料の非弾性的性質や非構造部材の関与などが考えられる。これらの効果を等価的に粘性減衰を仮定して減衰定数を評価すると、1 次振動についておおむね 5% 以下で、1% 程度となることもある。この値は建物の構造種別や形式、地盤や基礎形式、内外装など非構造部材、固有周期や振動振幅等々によって異なるが、一般に鉄骨造純ラーメン構造で 1% 程度、鉄筋コンクリート造有壁架構で 2~4% 程度となっている。粘性減衰そのものは建物振動の小振幅時から有効であり、定常的な動的外乱である風による振動や、中小地震による振動、ないし大地震の主要動後の振動の抑制に効果が大きく、これを積極的に構造物の減衰性能として採り入れるべく粘性ダンパーや粘弾性体を利用した装置なども種々開発され、同じく制震ダンパーとして用いられるようになってゆく。

2. 4 パッシブ制震からアクティブ制震へ

1980年代になると建物の地震応答を抑制し、耐震性を向上させるための技術開発はさらに目覚ましく進展した。履歴型や粘性型のダンパーが建物に積極的に設置されるとともに、新たに積層ゴム支承などによる免震構造と、TMDと呼ばれるダイナミックダンパーが登場した。

免震構造は建物の基部に柔らかいバネ特性を持つ免震層を設け、建物全体の1次周期を伸ばすことによって地震入力を高層建物のように低減させ、同時に大きい変形の生じる免震層にエネルギー吸収能力を持たせて上部建物へのエネルギー伝達を抑えようとするものである。積層ゴム支承がわが国に導入されて以来、急速な普及を見せている。TMDは、建物に補助振動系を付設し、その固有周期を建物の1次振動に同調させるとともに、減衰を最適値に調整することにより、建物の1つの固有振動を中心にその近傍の振動数域の応答倍率を低下させるもので、高層建物などタワー状建物の頂部にこれを置いて、卓越する1次振動に対して弾性範囲内の振動抑制に用いられている。

1980年代後半になると建物の応答抑制技術開発は、時々刻々建物応答を検出し、これを抑えるべく制御力を作用させる、あるいは地震動そのものを検出してその入力効果を低下させるべく構造特性を変化させるなどのアクティブ制震へと歩を進めることになってきた。すなわち、建物への付加質量などを制御則に従ってアクチュエータにより効果的に加力し、建物全体の応答抑制を行うアクティブ制震(AMD)システム、あるいはパッシブ制震の効果を高めるべく加力を行うハイブリッド制震(HMD)システムが登場し、さらに、地震動入力に瞬時に対応するアクティブ可変剛性(AVS)システムなども実現して来ている。

3. 制震構造の現況

地震を主とする動的外乱に対して、系(構造物)の応答を抑制するためには、

- (1) 外乱の入力効果を低減させる
- (2) 外乱に系を共振させない
 - a) 入力振動数と系の固有振動数を離す
 - b) 系の復元力を非線形化する
- (3) 系の減衰性を高める
 - a) 粘性や履歴によってエネルギーを消費させる
 - b) 補助振動系にエネルギーを移す

ことが考えられる。これらの応答制御法は、構造物の特性としてあらかじめ付与しておき、外乱の作用に伴って生じる応答について、その効果の出現を受動的に期待するものであり、パッシブ制震と呼ばれている。パッシブ制震をさらに具体的に分類すると、次のように分けられる。

- エネルギー吸収型ダンパー
- 同調振動系(TMD)型ダンパー
- 免震構造

3. 1 エネルギー吸収型ダンパー

パッシブ制震のうちのエネルギー吸収型ダンパーは、構造物系の振動減衰性を高めるもので、一般には構造物各層の層間変形に対応して振動エネルギーの吸収を図る層間ダンパーが設置される。その種類としては以下のようなものがある。

- (1) 履歴型
 - 弾塑性ダンパー(普通鋼、低降伏点鋼、鉛材など)
 - 摩擦ダンパー(摺動子型、すべり面型など)
- (2) 粘性型
 - オイルダンパー
 - 粘性ダンパー、粘性壁
 - 粘弾性材 など

これらは一般に建物各層に複数設置され、個々の容量、能力は小さいが、建物内部に分散配置された多数のダンパーを用いることによって減衰効果を高めるように考えられている。また、これらのダンパーを隣棟との間に用いたり、同一構造物内で相異なる動的特性を有する部分相互間に用いるなどの例もある。

表一 1 免震建築物評定完了件数

APPLICATION BY YEAR	CONDOMINIUM	DORMITORY	RESIDENCE	COMPUTER CENTER	OFFICE	LABORATORY	OTHERS	TOTAL
1985 - 1994	18	5	3	7	20	20	9	82
1995	47	3		3	13	7	13	86
1996	127	2	1	4	36	7	48	225
1997	50	3	9	2	34	5	30	133
1998	32	2	8	3	19	3	46	113
TOTAL	274	15	21	19	122	42	146	639

3. 2 同調振動系ダンパー

同調振動系 (TMD) 型ダンパーは、補助振動系を構造物内に設置することによって、構造物の振動エネルギーを補助系に移し、構造物の固有振動性状を変化させるものである。通常、最も影響の大きい基本振動を抑制するよう補助系の固有振動数を構造物の基本振動数に同調させるとともに、最も減衰効果の高まるようその減衰性が調節される。通常、展望タワー、高層建築物など基本振動が卓越し、減衰性の乏しい塔状構造物の頂部付近に設置して、その基本振動の抑制を図っている。その種類としては、

- ばね-質量型
- 振り子型 (重錐型、倒立振り子型)
- 液体スロッシング型 (角型水槽、円盤型水槽、U字型水槽)

などがあり、質量としては、建物重量の1%程度が必要とされている。また、固有振動数および減衰性の調節に工夫がなされている。

3. 3 免震構造

免震構造は、一般に建物基礎と上部構造との間に免震装置によって構成される免震層が設けられる。免震層の働きとしては、その柔らかいバネ特性によって構造物系基本周期を2~3秒程度のやや長周期域に移すとともに、この部分に大きい減衰性を持たせて地震動による入力エネルギーを吸収し、その上部構造への伝達を低減させることにある。したがって、免震装置は上部構造の支持性能、柔らかいバネとしての変形性能と復元性能、さらにエネルギー吸収性能

(減衰性能) が重要となる。

現在多く用いられている免震装置は支承とダンパーに大別される。支承としては、

(1) 積層ゴム支承

- 天然ゴム系積層ゴム支承 (NRB)
- 鉛プラグ入積層ゴム支承 (LRB)
- 高減衰積層ゴム支承 (HRB) など

(2) すべり支承、転がり支承

- テフロン系すべり支承 (平型、皿型)
- ボールベアリング式転がり支承 (皿型、線状など)
- 偏心ローラ支承

があり、いずれも支持性能および変形性能は有するが、減衰性能あるいは復元性能を持たないものもある。また、主として減衰性能を受け持つダンパーとしては、

(1) 履歴型

- 鋼材ダンパー
- 鉛ダンパー
- 摩擦ダンパー など

(2) 粘性型

- オイルダンパー
- 粘性体ダンパー など

がある。免震層により望ましい復元力特性を与えるために、これらの支承およびダンパーのそれぞれの特徴を組み合わせる免震層が構成される場合が多い。

阪神・淡路大震災によって多数の建築構造物が大被害を受けたことから、免震構造に対する関心が急激な高まりを見せてきている。免震建築物には免震装置が設置されることから、高層

建築物と同様、建築基準法によって建設大臣の認定が必要とされており、その前段階として(財)日本建築センターにおいて個別評定がなされている。免震構造評定委員会は昭和60年に発足し、表-1に示すように日本建築センターの評定案件は、平成6年度までの10年間で82件、86棟が評定を受けたが、阪神・淡路大震災が発生した平成7年度は一挙に86件、96棟に増加し、以後、225件、246棟、121件、133棟、113件、123棟が評定を完了している。

これら免震建築物の用途は、当初は研究所、事務所等のほか居住施設が多かったが、大震災で多くのマンションが大被害を受けたことを反映して、共同住宅が多くなって来た。さらに、病院・老人施設、庁舎・消防署、学校など免震構造としての利点を生かし、多用途に展開する傾向にある。さらに、既存建築物の耐震改修としてのレトロフィットの例も多く登場してきてた。

4. アクティブ制震

地震、強風などの動的外乱による構造物応答を制御しようとする研究は、1960年頃から先導的な研究論文の発表がなされ、1970年代に発展がなされて来たが、1988年の第9回世界地震工学会議を契機に、急速な進展を見せて来ている。すなわち、日米を中心として構造物動的応答の制御アルゴリズムや制御システム、制御デバイスなどについての研究成果の交換が行われてきた。この分野の研究では、米国では理論的展開が主であるのに対して、わが国では理論とともに実構造物への適用について大きな展開を示した。すなわち、1989年に鉄骨造11階建の京橋成和ビルにおいて、屋上階に設置された重錐とこれを油圧アクチュエータで駆動するAMD1およびAMD2の2台の装置を含む制御システムが、世界で初めて登場した。その後、表-2に示すようにわが国のみで高層建築物を中心にAMD、HMD、さらにAVSなど種々のシステムが実現し、地震時および強風時にその制御効果の実証成果が集積されつつある。

表-2 アクティブ制震構造の実用化

	BLDG. NAME	PREFECTURE	SYSTEM	YEAR
1	Kyobashi Seiwa Bldg.	Tokyo	AMD	1989
2	Kajima Res. Inst. No.21 Bldg.	Tokyo	AVS	1990
3	Sendagaya INTES	Tokyo	AMD	1992
4	Applause Tower	Osaka	HMD	1992
5	KIX Control Tower	Osaka	HMD	1992
6	ORC 200 Symbol Tower	Osaka	HMD	1992
7	Ando Nishikicho Bldg.	Tokyo	HMD	1993
8	MM21 Landmark Tower	Kanagawa	HMD	1993
9	Japan Long Term Credit Bank	Tokyo	HMD	1993
10	Polte Kanazawa Bldg.	Ishikawa	HMD	1993
11	Shinjuku Park Tower	Tokyo	HMD	1994
12	Hikarigaoka J-City Bldg.	Tokyo	HMD	1994
13	Hiroshima Riehga Royal Hotel	Hiroshima	HMD	1994
14	Hamamatsu ACT City Bldg.	Shizuoka	HMD	1994
15	MHI Yokohama Bldg.	Kanagawa	HMD	1994
16	Riverside Sumida Bldg.	Tokyo	AMD	1994
17	Osaka WTC Bldg.	Osaka	HMD	1994
18	Hotel Ocean 45 Bldg.	Miyazaki	HMD	1994
19	Dowa Kasai Phoenix Tower	Osaka	HMD	1995
20	Plaza Ichihara Bldg.	Chiba	HMD	1995
21	Hirobe Miyake Bldg.	Tokyo	HMD	1995
22	Rinku Gate Tower N-Bldg.	Osaka	HMD	1996
23	Herbis Osaka Bldg.	Osaka	HMD	1997
24	Itoyama Tower	Tokyo	HMD	1997
25	Japan OTIS Elev. Test Tower	Chiba	HMD	1998
26	JR-Odakyu Com. Bldg.	Tokyo	AMD	1998
27	Bunka Fashion College	Tokyo	HMD	1998
28	Oita Oasis Hiroba 21	Oita	HMD	1998
29	Kajima Shizuoka Bldg.	Shizuoka	AVD	1998
30	Yamaguchi Intl. General Center	Yamaguchi	HMD	1998

5. 結

本稿においては、建築構造物の地震時あるいは強風時などの動的応答を抑制する制御技術について、その発展の経緯とともに現況の分析、また、この十年足らずの間に急速に進展した国際的な研究交流について紹介した。そして、将来へ向けての研究及び技術開発の方向づけについて述べた。構造物のアクティブ制震は、次世紀への重要な技術革新分野として位置づけられ、強く要望されているものであり、より多くの関心が寄せられることを期待している。

参考文献

- 1) 小堀鐸二：普及段階を迎えた制震構造，建築技術，1996年10月号，pp.52-53，1996.10
- 2) 井上 豊：耐震から制震へ，Structure，No.67，pp.23-24，1998.7
- 3) 井上 豊：制震・免震構造の現状と動向，建築技術，1996年10月号，pp.54-56，1996.10