

【新技術とコスト】制振構造

① 制振構造のすすめ

東京工業大学建築物物理研究センター
教授・工学博士
和田 章

1. 従来の耐震設計

「エネルギーの釣り合いに基づく建築物の耐震設計」秋山 宏著に述べられているように、建築物の耐震能力は、構造物が吸収できるエネルギー量と地震による入力エネルギーの大小関係で決まる。構造物の耐震設計は地震による入力エネルギーを構造物のどの部分へ吸収させるかということで置き直せる。

この考え方によると、構造物全体に亘って安定して大きな塑性変形を起こすことが出来れば、構造物をそれほど強く作らなくてもよいことになる。しかし、どの様な地震が来るか分からない条件のもとで、建物の全層に亘って一様に塑性変形を起こさせるように設計することは難しい。兵庫県南部地震の被害でも明らかになったように、特定の層に塑性変形が集中することが起きうる。それぞれの層についてある程度、塑性変形が集中することを考えて、吸収エネルギーを確保できるように部材の耐力を決めなければならない。言い換えると、一つの地震動に対しすべての部材の塑性変形能力とその総吸収エネルギーを期待するのは難しい。

これら靱性型建物が本格的な地震を受けたときを想像してみる。骨組は塑性変形を起こしても、

崩壊しないで残るであろう。しかし、窓ガラス、天井、間仕切り壁、ドア、エレベータ、机、椅子、書棚、食器棚のように建物に付いたり載っているものが健全でいられるとは考えにくい。兵庫県南部地震の前には、このように構造本体は塑性変形が生じるだけで問題はなく、構造以外の部分、たとえば、ガラスカーテンウォール、間仕切り壁などに問題が起こると思われていた。ところが、鉄骨純ラーメン構造の多くの建物で、構造本体である柱・梁の溶接接合部に何箇所もひび割れが発見され、問題となった。また、鉄筋コンクリート構造では、梁の端部や接合部に多くのひび割れが入り、これを補修するのが大変なため、取り壊された例もあった。このように構造本体に大きな塑性変形を期待した耐震設計法は、人命保護の観点では問題ないが、財産価値の保全、補修性、さらには機能維持などの面から見直しが必要であることがはっきりした。

壁式構造のように塑性変形に頼らず構造物を十分強く作り、強度抵抗型によって建物を作った場合はどうであろうか。阪神地震でも、壁の多い建物の被害が少なかったことが報告されていて、この面では問題ない。しかし、建物に生じる加速度が非常に大きくなるため、建物内部は騒然とした状態になる。阪神地震の際、数階建ての壁式アパートの上層階で、家具などが飛び散って大きな問

① 制振構造のすすめ

題となった。たとえば、建物が病院、計算センターであったとすると、その機能を維持することは出来なくなる。強度抵抗型建物の場合、建物としての財産価値の保証には問題が少ないが、建物の機能を維持するという面で十分とは言えない。

2. 構造計算上の難点

大地震に見舞われ多くの構造物に被害が起きる度に、鋼構造では筋違の有効性、鉄筋コンクリート構造では耐震壁の有効性が報告される。しかし、新しい建築物の設計にあたって、筋違、耐震壁などを組込まない純ラーメン構造が好まれる傾向が強い。

第1の理由は、筋違、耐震壁を組込むと建築設計の自由度が狭められることであろう。これについては、設計の早い段階から計画、意匠、設備、構造の専門家が相談すれば十分に解決できることである。

第2の理由は筋違、耐震壁を持つ構造物の計算が面倒になることであろう。これについては幾つかの問題がある。鋼構造骨組の場合、筋違の弾性限の層間変形はラーメン骨組の弾性限層間変形に比べ小さいため、筋違が許容耐力に達する時点において、その他のラーメン骨組は耐力に対し充分余裕があることになる。無駄のない筋違付き骨組を許容応力度設計を用いて設計することは難しい。終局強度に基づいた設計を行う場合には、筋違の座屈現象が問題になり、ラーメン骨組と筋違の耐力を有効に使う設計は難しい。

鉄筋コンクリート構造の場合は耐震壁を組込む

ことになるが、鋼構造骨組の場合と同様に、耐震壁の剛性は鉄筋コンクリート造のラーメン骨組に比べても圧倒的に大きく、耐力に達するときの層間変形も小さいため、弾性計算を行うとほとんどの水平力が耐震壁に分担されてしまう。実際には、水平荷重の増加とともに耐震壁にはせん断ひび割れが生じ、連層耐震壁では曲げひび割れも生じるため、水平力の分担は徐々にラーメン骨組に移行していく。このことを考慮し、構造計算にあたっては、耐震壁の水平力分担率が過大にならないように、耐震壁の剛性にせん断剛性低下率を乗じて弾性計算することが良く行われる。しかし、適切な剛性低下率を決めるのは難しい。耐震壁の偏在が原因となって、建物の剛性の中心と重心位置が一致せず、建物がねじれ変形を生じることも問題であるが、耐震壁の剛性の評価によって偏心距離が異なってくるため、せん断剛性低下率の設定は難しい。

第3の理由として構造特性係数 D_s が他の構造形式に比べ大きいことがあげられる。ラーメン構造では0.25または0.30が使われているのに対し、筋違の座屈、耐震壁のせん断破壊などは靱性の少ない壊れ方であるため、 D_s として0.40から0.55のように大きな値が使われている。設計荷重を大きくすることは不経済な設計になると考えられ、筋違、耐震壁が好まれなくなる。

以上、耐震性向上のために骨組中に組み込むことが有益な筋違、耐震壁が、有効に用いられない理由を述べた。後に述べるパッシブ制振構造、損傷制御構造は、変形能力の大きな筋違、エネルギー吸収能力の大きな制振壁などの開発により、こ

ここで述べた問題点が解決されたため、日の目を浴びるようになったと言える。

3. 制振構造

特に、兵庫県南部地震の後、制振構造または制震構造の応用は免震構造と同様に盛んである。地震による振動を制御する仕組みを持った構造を制震構造と呼び、風による振動を制御することに重点を置いた構造を制振構造と呼ぶ場合が多い。しかし、制震構造と言っても建物の揺れを制御していることになり、地震そのものを制御するわけではないので、ここでは両者を含めて制振構造と呼ぶことにする。

制振構造は、コンピュータ制御による動力を用いたアクティブ制振と、このような制御を行わないパッシブ制振に大きく分けられる。アクティブ制振は、高層建築の風による応答を制御するためには非常に有効である。しかし、地震動に対する応答を制御するのはまだ試験段階と言える。中小地震動に対しての有効性は示されているものの、大地震動に対して有効な制振装置を実現するのは、現段階では難しい。

都市の耐震性、経済活動の継続性を考えると、建物が大きな地震を受けた後の補修性を考えた耐震設計法の確立が必要である。天変地異と呼ばれるように、極めて稀に起こる地震に対しては従来と同じように再利用はあきらめるとしても、一般の設計で考えている大地震動のレベルに対しては、柱、梁などの主体構造を弾性範囲の挙動に押さえ、エネルギー吸収を意図して組み込んだ弾塑性ダンパーなどに損傷を集中させる考え方が有効である。このような設計は損傷部位限定設計、損傷制御設計と呼ばれ、パッシブ制振の中の一つの考え方である。兵庫県南部地震後、高層建築の耐震設計にこのような考え方が多く採用されるようになってきている。

表-1に示すように、多くの制振部材「ダンパー」が開発されている。鋼材の弾塑性変形を応用したもの、粘性体、粘弾性体を用いたものなどがある。これらは、建物の層間変形に対して抵抗する形で骨組の中に組み込まれる。

ここで、柱梁で作られる骨組の中に45°の角度で配置された筋違を考える。骨組に生じるせん断変形量に比べ、筋違の伸縮は $1/\sqrt{2}$ となる。筋違の長さは梁の長さの $\sqrt{2}$ 倍であるから、筋違に生じる軸歪みは、骨組のせん断変形角の1/2となる。筋違端部の接合部分は剛性・耐力が高く塑性化しないことを考慮し、鋼材の降伏歪みは0.1%強であることから換算すると、筋違が降伏に入るのは層間変形角が1/500前後の小さな変形角である。

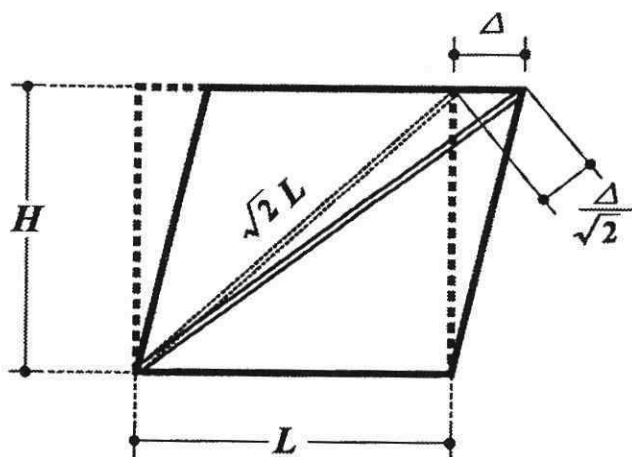


図-1 筋違の変形

① 制振構造のすすめ

表-1 エネルギー吸収装置

No.	タイプ	装置・部材	名称(商品名)	製作・販売
1	履歴減衰	鋼製弾塑性ダンパー	制振用アンボンドブレース	新日鐵
2	履歴減衰	鋼製弾塑性ダンパー	低降伏点鋼制振パネル	新日鐵
3	履歴減衰	鋼製弾塑性ダンパー	NKK制震ダンパー (Aタイプ)	NKK
4	履歴減衰	鋼製弾塑性ダンパー	NKK制震ダンパー (Bタイプ)	NKK
5	履歴減衰	鋼製弾塑性ダンパー	クロスHブレース (XHB)	住友金属
6	履歴減衰	鋼製弾塑性ダンパー	鋼製アンボンドブレース (SUB)	住友金属
7	履歴減衰	鋼製弾塑性ダンパー	極軟鋼二重鋼管ブレース	川崎製鉄
8	履歴減衰	鋼製弾塑性ダンパー	低降伏点鋼ハニカムダンパ	小堀鐸二研究所
9	履歴減衰	鋼製弾塑性ダンパー	極低降伏点鋼パネルダンパー	フジタ
10	履歴減衰	鋼製弾塑性ダンパー	TO・HDC (J TM 田式複合制震柱)	戸田建設
11	履歴減衰	鋼製弾塑性ダンパー	エネルギー吸収型ブレース架構	前田建設工業
12	履歴減衰	鋼製弾塑性ダンパー	制震用低降伏点鋼せん断パネル	三井建設
13	履歴減衰	鋼製弾塑性ダンパー	制震用RC被覆型 アンボンドブレース	三井建設
14	履歴減衰	鋼製弾塑性ダンパー	アンボンドブレースダンパー	清水建設
15	履歴減衰	鉛ダンパー	F L R (Flat Lead plug Rubber)	住友建設
16	摩擦減衰	摩擦ダンパー	エネルギー吸収制振装置	三菱重工
17	摩擦減衰	摩擦ダンパー	摩擦制御型圧着接合	オリエンタル建設
18	粘(弾)性減衰	オイルダンパー	ハイダンパ (ODBシステム)	カヤバ工業
19	粘(弾)性減衰	オイルダンパー	高減衰オイルダンパー	三和テッキ
20	粘(弾)性減衰	オイルダンパー	トキコ制震用オイルダンパー	トキコ
21	粘(弾)性減衰	オイルダンパー	高減衰オイルダンパー	日立機材
22	粘(弾)性減衰	オイルダンパー	高減衰オイルダンパー HiDAM	小堀鐸二研究所
23	粘(弾)性減衰	オイルダンパー	フルード粘性ダンパー	明友エアマチック
24	粘(弾)性減衰	粘性ダンパー	粘性制震壁	オイレス工業
25	粘(弾)性減衰	粘性ダンパー	粘性制震壁	免制震デバイス
26	粘(弾)性減衰	粘性ダンパー	住友粘性壁 (SD-WALL)	住友建設
27	粘(弾)性減衰	粘性ダンパー	P S A (Preeminent Shock Absorber)	住友建設
28	粘(弾)性減衰	粘性ダンパー	減衰独薬	住友建設
29	粘(弾)性減衰	粘弾性ダンパー	粘弾性制震ブレース	新日鐵/住友3M
30	粘(弾)性減衰	粘弾性ダンパー	スコッチダンプリ印 V E M構造用粘弾性ダンパー	住友スリーエム
31	粘(弾)性減衰	粘弾性ダンパー	粘弾性ダンパー	昭和電線電纜
32	粘(弾)性減衰	粘弾性ダンパー	B R Cダンパー	三菱製鋼
33	粘(弾)性減衰	粘弾性ダンパー	粘弾性ダンパー	東洋ゴム
34	粘(弾)性減衰	粘弾性ダンパー	粘弾性ダンパー (ブレースタイプ)	鴻池組
35	粘(弾)性減衰	粘弾性ダンパー	仕口ダンパー (Tri-Damper)	鴻池組
36	粘(弾)性減衰	粘弾性ダンパー	MU-Wダンパー (壁型)	三和シャッター, 清水建設
37	粘(弾)性減衰	粘弾性ダンパー	MU-Sダンパー (間柱型)	三和シャッター, 清水建設
38	粘(弾)性減衰	粘弾性ダンパー	ビンガムダンパー	オイレス工業
39	粘(弾)性減衰	高減衰ゴムダンパー	高減衰ゴムダンパー (間柱型)	横浜ゴム/大林組
40	粘(弾)性減衰	高減衰ゴムダンパー	(仮称) 高減衰ゴムダンパー	横浜ゴム/清水建設
41	粘(弾)性減衰	高減衰ゴムダンパー (P.Lタイプ)	円筒型ダンパー 角型ダンパー	ブリヂストン

ることが分かる。筋違を弾塑性ダンパーとして使うためには圧縮力を受けても座屈しないように座屈が補剛されていなければならない。座屈補剛筋違の発祥はプレキャストコンクリート構造の壁の内部にフラットバーを挿入し、フラットバーの軸方向変形は拘束せずに、面外変形だけを補剛することから始まり、現在では多くの方法が提案されている。

鋼板耐震壁の場合、降伏せん断応力度は軸方向の降伏応力度の $1/\sqrt{3}$ であり、せん断弾性率はヤング係数の $1/2.6$ であるから、せん断降伏歪みは軸降伏歪みの約 1.5 倍 ($=2.6/1.732$) となる。これは層間変形角として $1/600$ 程度となり、筋違の場合とほぼ同様の小さな層間変形角で塑性化することが分かる。

筋違・鋼板壁について、使用する鋼材に極低降伏点鋼を用いる、または、塑性変形する部分を局部的に集中させるなどの方法により、塑性変形開始の層間変形角をさらに小さくすることも可能である。

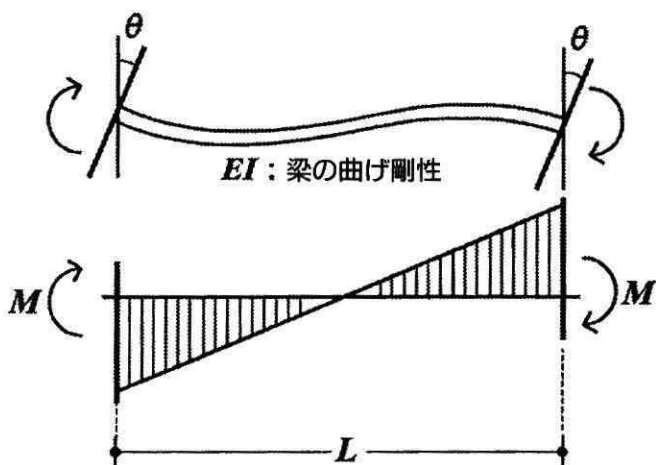


図-2 梁の変形

柱と梁でできる剛節ラーメンの降伏変形角について考える。鋼構造骨組の場合、梁に生じる曲げ変形が構造物の変形の半分近くを占めるので、逆対称曲げモーメントを受ける梁の端部に生じる回転変形に注目して考察する。梁のスパン、成をそれぞれ L, D とし、梁の両端部のフランジの応力度が降伏点 σ_y に達する変形角を求めると、 $(\sigma_y/3E) \cdot (L/D)$ で表せる。骨組のスパン L は決まっているとし、ヤング係数 E は一定値なので、降伏点 σ_y の高い鋼材、従来より小さな成 D の部材を用いることにより、骨組の降伏時変形は自由に大きくできることが分かる。

以上述べてきたように、ラーメン骨組は材料と断面の選択で降伏変形を自由に決めることができるのに比べ、筋違・耐震壁などの制振部材は全体の形状と材料の選択で降伏変形は決まってしまう、板厚・部分的な形状の調節では降伏変形は動かせない。先にも述べたように、筋違の座屈問題、耐震壁のせん断破壊などの問題をそのままにして、ラーメン骨組と組み合わせた場合には、耐力が発揮される変形がラーメン骨組より早すぎ、その後に耐力劣化を起こすため、両者の抵抗力を合理的に加算することは難しい。

筋違については座屈拘束筋違の開発、鋼板耐震壁については座屈による耐力低下を防ぐためのリップの設置法の研究が行われ、早期に降伏する制振部材の変形能力を大きくすることができ、これに地震時のエネルギー吸収を期待することが可能となった。

① 制振構造のすすめ

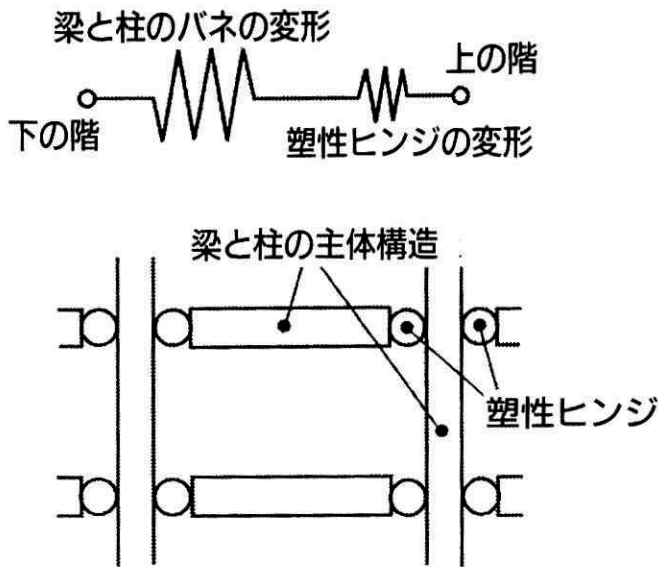


図-3 ラーメン構造（直列システム）

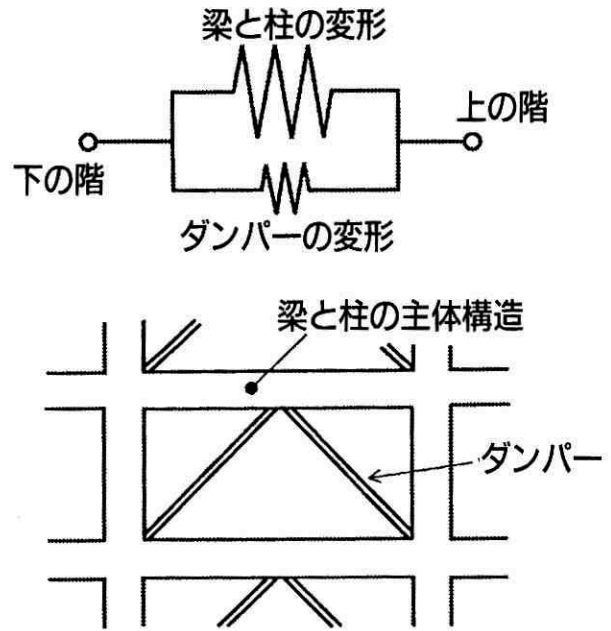


図-4 制振構造（並列システム）

4. 直列システムと並列システム

柱は鉛直荷重を直接支持しているため、出来れば壊さず、梁を柱より弱く作り、梁の端部の塑性回転能力に期待して靱性骨組を成立させる方法は、日米ともに最も望ましい耐震設計法であると言われてきた。特に鋼構造の場合、ラーメン骨組の弾性剛性が小さいため、弾性域でも骨組の変形はかなり大きい。この骨組の梁端に塑性ヒンジが出来ると、層間変形は骨組の弾性変形にヒンジの回転角の分だけ加算した大きさになる。これを図示したのがFig. 3であり、梁降伏型骨組は直列システムであると言える。変形が加算されるため、大地震時の層間変形角がかなり大きくなることを覚悟する必要がある。

これに対し図-4に示すように、筋違状の制振

部材をラーメン骨組中に組込む、制振壁を骨組に組込むなどの方法によって作られる損傷制御構造、パッシブコントロール構造などはラーメン骨組と制振部材を並列に設置する方法と考えられる。秋山 宏が柔剛混合構造として提案した構造システムである。鋼構造骨組だけでなく鉄筋コンクリート構造は使用する構造材料の強度が高まるに連れ、弾性変形限界が大きくなっている。これに対し、小さな変形から効果を発揮する筋違状、壁状の制振ダンパーを並列に設けることにより、地震時のエネルギー吸収は制振ダンパーに集中させることが出来る。大地震時においても弾性変形するラーメン骨組部分は弾性ひずみエネルギーとして一時的に振動エネルギーを蓄える役目を果たす。ラーメン骨組の弾性剛性は制振ダンパーが塑性化した後にも層剛性を維持し、その層への変形集中を防ぐ役目も果たす。

梁降伏型のラーメン構造が直列システムであるのに対し、損傷制御構造は並列システムであるところに優位性がある。

5. 構造解析

構造設計を進めていくにあたり柱軸力の計算を行う。普通の場合、拾いの軸力と言って、柱の支配する床面積上にある荷重を上層部分から加算して求める。耐震壁が取付く柱についても、耐震壁には鉛直荷重は負担させないのが長年用いられてきた方法である。しかし、最近では鉛直荷重時の応力計算にマトリックス変位法が使われる。立体解析を行うと制振部材にも鉛直軸力が負担されてしまう。実際に大きな地震に見舞われたときには、制振部材は大きな繰り返し塑性変形を起こし、そのうちに鉛直軸力を負担することはできなくなり、両側の柱にその鉛直荷重は再配分されてしまう。このことは、再配分された軸方向力も負担できるだけの能力を柱に持たせる必要があることを示している。要するに耐震壁には鉛直軸力を負担させない昔からの方法が良いことになる。実際の施工の過程で制振部材にも鉛直荷重が受け持たれてしまう。このことを気にして、制振部材の接合部のボルト締めを上層部の工事が進むまで行わない方法もとられる。制振部材にはいろいろな種類があるので、このような方法が必要な場合もあるが、塑性論の「下界の定理」に基づき考察すると、締めつける時期はいつでも良いことになる。先にも述べたように、制振部材が大きな塑性変形を受けると鉛直荷重は両側の柱に再配分され

てしまうからである。

制振部材を取り込んだ骨組の設計は従来の静的計算による許容応力度設計法となじまない点がある。弾塑性ダンパーを制振部材として用いる場合、これは早期に塑性化してしまうため線形計算によっては骨組計算を行うことはできない。柱・梁などのように変形に比例して力を発揮する構造部材と、速度に比例して力を発揮する粘性ダンパー、粘弾性ダンパーなどの制振部材は、動的現象として捉えると、同時には最大値を生じていない。これを同時に最大値が発生するとして、静的外力を定め骨組解析を進めるためには工夫が必要である。これは応答最大せん断力の定義にも関係してくる。

すべての場合に必要とは考えないが、動的解析を用いてその性状を把握しながら設計を進めることになる。これには等価せん断モデルがよく使われるが、高層建築では等価曲げせん断棒モデルが有効であろう。制振部材が局部的に配置される時、その周辺の梁、柱に生じる変形は制振効果を鈍らせることになる。これらを正しく評価するためには立体骨組モデルに制振部材を組込んだ動的解析が必要になる。

柱、梁などの部材を弾性にとどめる設計が行われている場合には、地震応答解析の際、制振部材の非線形挙動だけを時々刻々に追跡し、骨組の全体剛性マトリックスは初期のものを最後まで使い続ける解析法が考えられる。設計の考え方が明快なため、それに合わせた解析法も単純明快にすることができる。

制振部材の安全性の確認については、一般の部

① 制振構造のすすめ

材のように発生応力、塑性率などだけでなく、塑性変形の疲労つまり累積損傷に対する確認が必要になる。これについても多くの研究が発表されている。

6. まとめ

寺田寅彦は昭和8年に「鎖骨」と言う随筆を書いている。「子供が階段から落ちてけがをした。」から始まり、人間の構造、仕組みと建物の耐震問題について書いている。「鎖骨というものはこういう場合に折れるためにできているのだそうである。これが、いわば安全弁のような役目をして気持ち良く折れてくれるので、その身代わりのおかげで肋骨その他のもっとだいたいなものが救われるという話である。」と書いた後、「それで自分の素人考えでは、いっその事、どこか『家屋の鎖骨』を設計施工しておいて、大地震が来れば必ずそこが折れるようにしておく。しかしそのかわり他のだいたいな致命的な部分はそのおかげで助かるというようにすることはできないものかと思う。こういう考えは以前からもっていた。時々その道の学者達に話してみたこともあるが、だれもいっこうに相手になってくれない。」と述べている。これこそ損傷部位限定構造、制振構造である。

設計の意図、研究の方針に関して勝手に位置付けをすることは許されないであろうが、高層建築の始まりと言われている霞が関ビルディングの

400シリーズの広幅Hを柱として構成した柔らかいフレームにスリット耐震壁を組み合わせた構造、その少し前に建設されたプレキャスト壁の接合部分の塑性変形を利用してエネルギー吸収させたホテルニューオータニの構造は本格的な制振構造の始まりと言える。この考え方は高層建築だけでなく一般の構造にも応用することができる。現状では、これらの考え方は高層建築への応用が盛んであるが、中低層建築、工場建築、大空間構造などへの応用に範囲が広がることが期待される。

このことについて、我々エンジニアにとって朗報がある。平成12年建設省告示1461号「超高層建築物の構造耐力上の安全性を確かめるための構造計算の基準を定める件」の第四号口に「イに規定する稀に発生する地震動によって建築物の構造耐力上主要な部分が損傷しないことを運動方程式に基づき確かめること。」と、中小地震動（レベル1）に対して許容応力度設計を行うように示されている。ここまでは特に新しいことではないが、これに続いて「ただし、制振部材にあつては、この限りではない。」とただし書きが書かれている。これは、中小地震動（レベル1）に対して、制振部材の塑性化を認めた画期的な部分である。十分な変形能力のある制振部材を開発することにより、合理的な耐震設計がますます可能になるからである。最後になるが、この考え方が超高層建築だけでなく一般の建築物へも適用されることを期待する。