

# 塑性変形能力、これまでの30年、これからの30年

和田 章

東京工業大学教授・建築物理研究センター長

## 1. はじめに

構造物の安全性を確保するために、構造物には塑性変形能力が必要である。これらは、構造物の設計を実際の施工を経て成立させるために必要な塑性変形能力と、地震時のエネルギー吸収のために必要な塑性変形能力に大別できる。戦後の耐震性向上に関する研究は、構造物の塑性変形能力の向上に向けて進められてきたといえる。しかし、大きな塑性変形はそのまま構造部材の大きな損傷に結びつく。地震時に柱、梁、壁などに大きな塑性変形を許容することは、構造物の再利用を難しいものにする。1981年に施行された新耐震設計法の基本方針は、中小地震動に対しては構造物の若干のひび割れは許容するが建物の継続利用を目指し、大地震動に対しては人命を守るため構造物の倒壊を防止するが、建物の継続使用はあきらめ、場合によっては財産価値を失っても良いという考えである。これまで進められてきた研究が、新耐震設計法でいわれているコンセンサスの上ののっていると考えれば、多くの研究者が行ってきた研究の方向に間違いはなかったといえる。しかし、CO<sub>2</sub>などの温暖化ガスの削減、都市を構成する一つ一つの建築物の耐震性向上、一生に一回の買い物である住宅・集合住宅の財産価値の確保、病院などの緊急時の施設の耐震性向上など、時代の要求は新耐震設計法の基本方針を揺るがすものになっている。大地震後も建築物の継続利用を求め、財産価値を失わない建築構造が望まれるようになってきた。新しい要求を背景に、建築構造物の塑性変形能力について考察する。

## 2. 静的設計および実際の施工に必要な塑性変形能力

構造物が脆弱であることを表すとき、ガラス細工のような構造という。ガラスのヤング係数はアルミニウムと同じで鋼の1/3であり弾性変形追随性は大きい、ガラス表面の傷などの部分的な欠陥を切っ掛けに破壊してしまい、塑性変形能力はほとんどない。このような脆性材料で構成される構造物に塑性理論を応用することはできない。鋼構造、鉄筋コンクリート構造などの設計および実際の施工を成立させているのは、これらの構造物

がガラス細工とは異なり、適度な塑性変形能力を有しているからである。

ここでいう塑性理論とは、下界の定理、上界の定理、解の唯一性定理の3定理を示す。下界の定理は「もし、ある任意の荷重係数において、外荷重に釣り合い、構造物中のどの部分でも降伏条件を満足している曲げモーメント分布が求められれば、その荷重係数は真の崩壊時の荷重係数  $p$  に等しいか小さい」、上界の定理は「もし、ある想定した崩壊メカニズムにおいて、正の荷重係数を持つ荷重によりなされた外部仕事、塑性ヒンジでなされる内部仕事に等しい場合、その荷重係数は真の崩壊時の荷重係数  $p$  に等しいか大きい」、解の唯一性定理は「もし、ある荷重係数において、釣り合い、メカニズム形成および降伏条件の3つの条件を満足する曲げモーメント分布を求めることができれば、その荷重係数は真の崩壊時の荷重係数である」として説明される。

下界の定理は「構造物を弾性と仮定し、与えられた外荷重による応力分布を求め、この応力分布に対し材料安全率を考慮して決めた部材強度が上回るように設計する弾性許容応力度設計の体系」を下支えしている。塑性設計の体系もこの3定理に支えられて成立するが、これを満たすために必要な塑性変形能力は、構造物が整然とした形状であり、施工精度も十分高い場合には、各部材の持っている弾性変形能力とはほぼ同じ量と考えてよく、それほど大きなものではない。

## 3. 耐震設計に必要な塑性変形能力

1981年6月に施行された新耐震設計法においても、2000年6月に施行された限界耐力法においても、構造物に大きな塑性変形能力を持たせた場合ほど、構造物の保有水平耐力は小さくてよいことになっている。これは弾塑性振動解析を行うことによって証明できる間違いのないものである。しかし、はじめににも述べたように構造物の耐力を小さくし、大きな塑性変形に期待することは、建築構造物に大きな損傷を認めることと同じである。これは、建築物の継続使用、再利用を難しいものにし、財産価値を失う可能性も増してくる。大地震後にも継続使

用、再利用、財産価値の維持を求めようとするならば、柱、梁などの構造物本体の塑性変形は小さくする方がよい。非構造壁などへの損傷を防ぐためには、地震時の変形もある程度小さい方がよい。

いうまでもなく免震構造は上部構造に大きな塑性変形を期待しないで設計できるから、上記の要求を満足できる。基礎固定の建物として、以上の要求を満たす耐震構造が、損傷制御構造、パッシブ制振構造である。柱・梁などの主体構造には大きな塑性変形を期待せず、地震時のエネルギー吸収を目的とした部材を別に設け、これらに大きな塑性変形を期待する。エネルギー吸収を目的とした部材はダンパーとも呼ばれるが、長年の間、行われてきた構造物の塑性変形能力の向上に関する研究の成果として、最近では多様なダンパーが開発された。鋼材の塑性化を利用した代表的なものとして、座屈拘束筋違、鋼板耐震壁、間柱型せん断パネルがあり、これらのダンパーの塑性変形能力は非常に大きく、塑性率として20から30を用いることができ、累積塑性変形倍率として1000ほどまでが可能である。粘性体、粘弾性体を利用したオイルダンパー、制振壁なども多く使われている。

柱・梁などの構造物本体の塑性変形を起しにくくする方法として、鋼材、鉄筋、コンクリートなどに高強度材料を用い、断面を従来の設計より若干細いものにし、弾性限域の変形を大きくする方法が有効である。

#### 4. これまでの30年、これからの30年

塑性変形に関する研究、塑性設計の概念は、イギリス・米国東海岸などの地震の無い地方の研究者により始められ、必ずしも耐震設計のために考えられたものではない。耐震設計のために塑性変形能力が重要だと説いたのは、地震国の日本、米国西海岸の研究者である。梅村

魁先生の書かれた研究回想録によると、第2次世界大戦の頃に防爆構造の研究が行われ、これにも塑性変形能力が大きな効果を表すことが明らかにされ、戦後の耐震研究の発展のもとになったといわれている。その後、我が国の耐震工学を飛躍的に進めさせたのは1968年の十勝沖地震の被害である。10年後には宮城県沖地震があり、これら2つの地震を受けて、構造物の変形能力の必要性、建物の剛重比、偏心などが震害に大きな影響をもつことがはっきりした。本格的な鋼構造建築が被害を受けたのは、1995年兵庫県南部地震である。

米国では、十勝沖地震に対応して1971年のサンフェルナンド地震がある。1989年のロマブリエタ地震の頃から、米国では地震に対し人命を守ることはもちろん、建物の機能、財産価値を失わないようにすべきだという声があがっている。我が国において、このような声が大きくなったのは兵庫県南部地震以降である。

稀にくる地震動に対しては建物の機能、財産価値を守り、極めて稀にくる地震動に対しては人命の保護を目指しその他は諦めるのが、現在の建築基準法の考えである。しかし、社会の要求、市民の願いは、兵庫県南部地震のような極めて稀にしか来ない大地震に対しても、機能維持、財産価値の確保を期待している。これらに応える構造として、免震構造、地震時の損傷をダンパーだけに集中し、柱・梁などの主体構造の塑性化は起こさせない損傷制御構造がある。

これからの30年を簡単に言うことはできないが、我々の周りに自然に存在している空気のように、建築構造は自然で安心できる存在になり、大雨のあとの街が次の日になにごとも無く元の状態に戻るように、建築構造が台風、大地震を受けてもきちんと壊れずに建ち続ける日がくるように思う。

#### ＜質問＞募集!!

「本誌」Q & A コーナーでは読者の皆様のご質問を広く募集しています。法令、設計、施工上の問題、その他建築防災に関するご質問をお寄せください。FAXでも結構です。

送り先 〒105-0001 東京都港区虎ノ門2-3-20 虎ノ門YHKビル 8F

(財) 日本建築防災協会Q & A係宛

FAX 03 (5512) 6455