4．構造からの設計的アプローチ2

ダメージ・トレラント構造

Damage Tolerant Structures

和田　章
（わだ　あきら）
東京工業大学　工業材料研究所教授

1．はじめに

大きな自然災害の発生、自然環境の変化、社会や経済の変化などに応じて、われわれの行動の判断基準を示す針は大きく左右に振れる。長い間大きな地震が無く、都市の利便性が追求されていたときには耐震設計への思い込みの針は徐々に小さな値を指すようになり、この度の阪神・淡路大震災のように大きな災害を受けるとその針は大きいほうに振れる。

耐震性のない古い木造住宅について、建築関係者が何も助言や行動をしなかったことを批判する人もいるが、いつ来るかも知れない地震の発生の前に、屋根が重たく壁の少ない木造住宅を地震に弱いから建て直すべきと専門家が言ったとしても、これに耳を貸す住人がどれだけいたか疑問である。われわれ建築構造に関係しているものより、さらに一般の人々は耐震問題への思い込みが少なかったはずであるから、仕方がない。

今、地震災害の怖さをみんなが認識し、東京などの大きな都市の耐震問題について多くの人々が関心をもっているとき、既存の建物、これから建てる建物について、設計上考えるべき地震動の強さ、そのときに建物が受ける損傷，被害の大きさをもう一度考察し、社会にこの2つの間の関係を正しく伝え、われわれだけでなく社会の人々と一緒に今後の耐震問題を真剣に考えなければならない。

2．修復を考えた構造の必要性

この度の震災でも壊された建物の瓦礫の処理が問題になり、言うまでもなく、神戸の都市を再建するためには、多くの資材とエネルギーが必要である。このように耐震問題と地球全体で問題となっている環境問題とは切り離して考えることができない。江戸時代の大火では、町の復興のために必要な木材を集めるために大きな苦労はなく、自然の恵みとして山に育った木々がいくらでもあったと思うが、今の時代に同じ方法は使えない。

現在の耐震設計は、建物の寿命中に1度は受ける程度の中小地震動に対しては建物のひび割れ程度を認め建物の機能を維持させ、極めて稀にしか受けない大地震動に対しては、人命の保護を条件として建物に大きな塑性変形を許容し、建物の機能が失われることを認め地震後の再利用は諦めるという2つの考え方の上に成り立っている。しかし、都市の震災が社会へ与える影響の大きさを考えると、これからはこの考えだけにこだわる必要はないように感じる。

できるならば、大きい地震の後にも建物の機能を維持させることが望まれ、鋼材・石油などの資源がいつまでも無限にあるわけではないから、大地震後に建て直すことを安易に考えるのでなく、初めに建設するときから大地震後に修復できることを考えた構造法の開発が必要である。

3．骨組の塑性変形への過度の期待

構造骨組の強度だけでなく、変形能力にも期待した現在の耐震設計法では、梁降状形の骨組がもっとも変形能力が高いとされている。この骨組に対して、わが国の設計法ではもっとも小さな構造特性係数（D_s=0.25）を与え、米国でも同様にもっとも大きな変形性能（R_w=12）を与え、中高層建築のほとんどの建物がこの考え方に従って耐震設計されている。

この度の地震で被害を受けた建物には古い建物が多いのではっきりしたことは言えないが、鉄筋コンクリート建物について梁降伏形の崩壊モードが実現した建物は少なく、被害はあいかわらず柱に集中して発生しているように思われる。

鉄骨骨組については、阪神の地震ではまだ分からないが、昨年のノースリッジの地震災害では、大きな変形能力が期待

されていたはずの鉄骨梁の端部に大きなクラックが入った例が100棟もあったと報告されている。実際の地震時に、設計の時点で考えた骨組の塑性変形モードを実現させることは簡単ではないことが分かる。

地震力を受け塑性変形を生じている鋼構造骨組の梁に注目すると、H形鋼の梁の断面係数と塑性断面係数の比は1.15程度であるから、梁の全長のうち塑性化する部分の長さは左端、右端それぞれ全長の７％程度の短い部分となる。この部分がひずみ硬化領域に入って応力度が上昇し抵抗モーメントが大きくなったとすれば、この塑性域は長くなるが、材端は溶接部分でありスカーラップなどによる断面欠損があるため、実際には全長のうちのごく短い部分だけしか塑性変形できないと考えたほうがよい。

特に、下端フランジが引張りを受ける場合には上端に床スラブがあり断面としての中立軸の位置が上端フランジ近くになるため、中立軸から下端フランジまでの距離が遠くなり、下端フランジに発生するひずみ量は中立軸が断面の中央にあるとした場合より２倍近く大きくなる。

このようにもっとも変形能力が高いと思われている鋼構造骨組においても、その塑性変形によるエネルギー吸収は、建物全体に用いた鋼材の一部の部材のさらに短い一部分の塑性化に頼っていることが分かる。先に述べたノースリッジの地震災害調査によるとこの梁端部の塑性化ですら思いどおりには進んでいない。

4．ダメージ・トレラント構造

ダメージ・トレラント構造は、大きな地震を受ける構造物の設計にさいし、あらかじめ壊れる部材を特定して、その部分の損傷を許容することによって建物全体を救おうという意味で付けた名称である。高価な電子機器の内部を外部の電気的錯乱から保護するためにヒューズを付けておくのと同じ考えであり、ダメージ・ヒューズ・システムとも言える。

もっとも分かりやすいダメージ・トレラント構造の例が免震構造である。高い鉛直支持能力と前後左右へ数十cmも弾性変形できる能力をもつ積層ゴム支承と、地震のエネルギーを吸収するダンパーの開発によって免震構造は成り立っている。積層ゴムとダンパーによって作られる免震層の上にのせられた建築構造は、大地震を受けても壊れないだけでなく、建築内部の安全性を保つこともできる。地震時のエネルギーは積層ゴム支承の蓄える弾性ひずみエネルギーとダンパーの吸収するエネルギーによって分担され、上部構造は地震のエネルギーを吸収する必要はなく、そこに生じる振動と変形を制限することができる。大地震後の点検の結果、必要があればダンパーを取り替えることもできる。後にPerformance Based Designの考え方を述べるが、免震構造は鉛直荷重の耐荷システム、水平方向の弾性支持システムおよび地震時のエネルギー吸収システムの３者が完全に分離されたシステムになっていることに、設計の合理性がある。

5．重層構造への展開

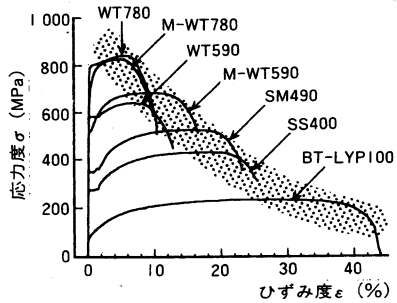
ここで提案しているダメージ・トレラント構造は免震構造の考え方をビルディング形式の構造へ適用したものである。主体構造である鉛直支持架構には、高張力鋼などのもつ大きな弾性ひずみ能力とラーメン構造の柔軟性を利用して大地震時にも弾性的にしなやかに水平変形できる能力を与える。これは免震構造の積層ゴムアイソレータに相当する。この超弾性主体構造の中に弾塑性ダンパーまたは粘性ダンパーを高さ方向に適切に配置する。これらのダンパーは大地震時に大きなひずみをうけ変形し地震のエネルギーを吸収するため、免震構造のダンパーと同じように大地震後に点検し、場合によっては新しいものに取り替えることになる。この場合にも、鉛直荷重を支持している主体構造は健全な状態で残っているので建物は元の形に戻ることができ、継続して用いることができる。

従来の構造設計法では、骨組自身の塑性化を許容し、その部分の塑性変形によるエネルギー吸収に期待して耐震設計を行なっているため、建物の形を元に戻すことは不可能である。この点が従来の方法と大きく異なるところである。

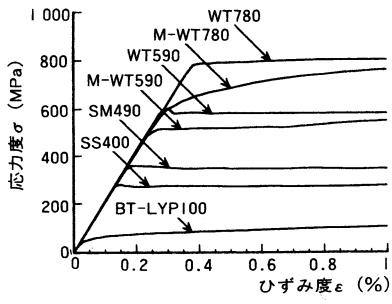
設計として考える地震動の大きさに応じて建物に許容する変形量を設定し、その変形まで主体構造の弾性を保証すればよい。この度の地震のように極めてまれに来る大きな地震動については、若干の塑性化を許容する考え方も採りうる。

鉄骨建築の設計において、部材の強度を確保するためにでなく、変形制限をまもるために部材断面が決まることが多いことを考えると、骨組を従来の設計より若干細くするか、高強度材料を用いることで、弾性変形の範囲を大きくし、この変形の範囲で骨組を用いることの可能性は高い。

地震時のエネルギー吸収を期待する構造部材として、制振壁、耐震間柱、Y字形筋違等多くのデバイスが提案されている。これらのデバイスの開発の主旨はそれぞれ異なるであろうが、地震時のエネルギー吸収を行なわせるためには特別なデバイスが必要であると考えられていることは共通であろう。柱、梁などの鉛直荷重を支持することが第一目的の部材を塑性化させてエネルギーを吸収することには限界があると考えられ始めている。



各種鋼材の応力－ひずみ関係



上図の１％までの拡大図

6．構造材料の開発

建築構造の高さ・規模の拡大は、構造材料の強度・靱性などの力学的性質の向上によってなされたと言ってよい。建設省を中心として1990年代初期に行なわれた２つの総合プロジェクトに、高強度コンクリートと高強度鉄筋を用いたNew RCプロジェクトと高張力鋼材の開発と建築への応用を目指した新素材プロジェクトがある。これらのプロジェクトにより、高強度材料を建築構造へ利用する新しい気運が生まれたと言える。

図に各種の鋼材の応力ひずみ関係を示す。ヤング係数は鋼材の強度に関係なく定数であるので、強度の高い鋼材ほど弾性伸びが大きい。上の図と下の図を同時に見て分かることは、強度の高い鋼材は弾性伸びは大きいものの塑性変形後の伸び能力が小さく、普通強度の鋼材は弾性伸びは小さいが塑性伸び能力が大きいことである。別の言い方をすると、応力ひずみ関係を表す曲線の囲む面積は鋼材の種類によって変化しない一定量である。

鋼材の強度に多くの種類が用意され、建築構造に応用できるようになった現在、これらの鋼材の特長を有効に利用した設計法を開発する必要がある。強度の高い材料を用いて塑性変形能力も高めようとする設計は「二兎を追うもの一兎も得ず」の諺に言われるようなことになってしまう危険性を十分に配慮すべきである。先に提案したダメージ・トレラント構造では、高張力鋼のもつ大きな弾性ひずみを主体構造に応用し、極低降伏点鋼のもつ大きな塑性変形能力を弾塑性ダンパーに用い、それぞれ鋼材の力学的特長を生かした使い方をしている。

7．並列システムと直列システム

主体構造とダンパーの関係には並列システムと直列システムが考えられる。免震構造では主体構造が剛であるので免震層と主体構造の関係は直列システムが適している。主体構造が柔構造の場合には、ダンパーは主体構造に対し並列に取り付ける並列システムが適している。

鋼構造ラーメン構造のように本来柔な構造に対して、接合部にダンパーを仕込んだり、セミリジッド接合部の開発を行なう例があるが、これは柔構造にダンパーを直列システムで取り付けようとしていることになり、さらに剛性が低下してしまうので実用性は少ない。

主体構造が剛であるプレキャスト壁式構造のような場合には、壁と壁の間の接合法を工夫してダンパーを組み込む直列システムが有効であろう。

8．Performance Based Designの考え方

構造設計に限らずすべての設計は、多くの設計変数(Design Parameters)で表される設計性能が要求性能(Design Requirements)を満足するように設計変数を決めることと言える。

Performance Based Designの考え方はこの設計変数と設計要求との間の関係の複雑さに注目したものであり、できるならば設計変数と設計要求がそれぞれ１対１に対応しているほうが、複雑に絡み合っているより合理的な設計ができるという考え方である。Damage Tolerant Structuresの合理性はこの考え方によって整理できる。鉛直荷重の支持機構と地震のエネルギー吸収機構を分離し、それぞれに対して合理的な設計を行なえるようにしたこと。鋼材の利用についても、高強度材には強度と溶接性だけを要求し過度の靱性は要求しないようにしたことなどである。従来の設計では、鉛直荷重に対しても、地震荷重に対しても、柱・梁の剛性、強度、降伏時変形、最終的な変形能力の確保などを同時に満足する解を追及していた。これが設計を混乱させていたといえる。

謝　辞

本文は、Jerome J.Connor(MIT)、川合廣樹（日建設計)、岩田衛（新日本製鐵）と1991年より行なっている研究に基づいて纏めたものであり、この研究は、スリット壁を用いた三井霞が関ビルをはじめ、秋山宏（東京大学）が著書「建築物の耐震極限設計」の中でその特長について論じている柔剛混合ラーメンなど、多くの方々の研究、実験、設計、提案を参考に進めているものである。