

# 巨人の肩にのって

和田 章 ● 東京工業大学教授 建築物理研究センター

シカゴから東にドライブし自動車産業の町・デトロイトに向かう途中にHenry Ford Museumがある。巨大な博物館で、フォードが1908年につくった大衆用乗用車のT型から最新型まで、各年のモデルが順に並べてある。始めは板バネで支えられた馬車にエンジンを付けたような、とても今の乗用車とは似つかないが、100年が過ぎると見違えるような今の乗用車になっている。興味深いのは、年々の改良点はそれぞれわずかであり、隣同士の車はほとんど同じように見えるのに、その蓄積が今にな

ることである。

建築にかかわる多くの学問、技術、施工法などにも同じことがいえると思う。1908年は明治41年であり、今の日本にこの時代の建築はほとんどなく、同じ敷地でも2度ほど建て替えられていることと思う。このようにして、日々建てられている建築の技術の昨日と今日に大きな違いがあるとは見えず、毎日同じことを続けているように感じる。ただ、この100年の変化はやはり大きい。国内外で受ける多くの災害、新しい材料の開発、実験研究、

## 「計算の前に考えること：耐震壁の効果」

世界に冠たる東北大学の耐震工学の研究グループを率いてこられた志賀敏男先生が2009年に亡くなられ、2010年秋に追悼文集が発行された。ここに書かせていただいた耐震壁にかかわる拙文を再録させていただく。

志賀先生が今の我々に最も影響を与えている重要なご研究は、「鉄筋コンクリート造建物の震害と壁率」と思います。志賀先生のご研究により、多くの建物が地震被害から救われ、人々の安全な生活が守られていると思います。低層の鉄筋コンクリート造建物の構造計算はややこしいだけでなく、きちんと計算したからといって正解が求まるわけでもない、これを前提に纏められた志賀先生の耐震設計の考え方は、建築計画の自由度を高めたことでも大きな意義があると思います。

1968年の十勝沖地震の調査をもとに纏められた有名なグラフ（いわゆる志賀マップ）があり、一階の柱断面積（柱量： $A_c$ cm<sup>2</sup>）と一階の壁断面積（壁量： $A_w$ cm<sup>2</sup>）、これらの柱と壁が支えている総床面積： $total A_f$ m<sup>2</sup>および、これに1,000kg/m<sup>2</sup>を乗じて求めた上部構造の全重量： $W$ kgをもとに明快な説明がなされています。志賀先生の教科書「構造物の振動」（共立出版、1976年）には、十勝沖地震時の応答層せん断力係数を0.7から0.8程度として、単位面積あたりの建物重量を1,300kg/m<sup>2</sup>として考えた書かれているので、上記の全重量： $W$ kgは十勝沖地震時の一階の応答最大層せん断力に相当します。

縦軸には柱・壁均しのせん断応力度： $W/(A_c+A_w)$ 、横軸には壁率： $A_w/total A_f$ を示しています。さらに右下がりの曲線として、柱率： $A_c/total A_f$ が0から20刻みで100cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>まで、6本示されています。壁率が0、柱率が100cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>の場合、柱に生じるせん断応力度は10kg/cm<sup>2</sup>となり、柱率が0、壁率が50cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>の

場合、壁に生じるせん断応力度は20kg/cm<sup>2</sup>となるなど、一目で分かるようになっていきます。

ここで重要なことは、柱・壁均しのせん断応力度が12kg/cm<sup>2</sup>を越え、且つ壁のみで水平力に抵抗するとして、そのせん断応力度が33kg/cm<sup>2</sup>以上、つまり壁率が30cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>の縦線の左側の領域にプロットされる建物に、被害が大きいことが説明されています。

このグラフには右上がりの曲線 $SW=12A_c+33A_w$ について、安全係数 $S$ の等高線が0.6から4.0まで12本、示されています。1981年の新耐震設計法のルート1の計算式が $W=7A_c+25A_w$ ですから、1階の層せん断力係数が1.0の場合は $W$ kgを1.3倍しなければならないことを考慮して換算すると、柱量と壁量がほぼ同じ場合、安全係数 $S$ として1.8が考慮されたこととなります。グラフに戻ってよく見ると、 $1.8 \leq S$ より右下側の領域、つまり柱率と壁率の大きなところ、特に壁率の大きな領域ではほとんど被害が出ていないことがわかります。

東北大学をご卒業された方々だけでなく、鉄筋コンクリート造の建物の耐震問題に関係されているすべての方々には常識のグラフですが、本当に素晴らしいご研究だと思います。多くのパラメーターと実際の地震被害を一枚のグラフに纏め上げられたこと、何度見ても感服致します。

「建築物の耐震設計上、耐震壁を活用すべき」というお考えです。関連して思うことをいくつか述べさせていただきます。

1) コンピューターで計算すれば何でも答えが出てくる時代になったからこそ、全体を一度につかむ志賀先生のような考えが重要だと感じます。計算を精緻にすればするほど安全性が高まると思われがちですが、逆に安全でない建物が増えてしまうように感じます。

解析的研究などが糧になり、強い社会の要求に推されて、これらの変化は起きていく。

ニュートンは、アルキメデスやガリレオなどの進めてきたそれ以前の科学の蓄積を巨人にたとえ、巨人の肩ののって次の世界の遠くを見たといっている。現在の学問、技術にも同じことがいえると思う。われわれは過去の蓄積の巨人の肩にのり今と次を考える同時に、蓄積としての巨人をさらに大きく高くしていく使命をもっている。ただ、今の技術者がこれらの大きくなった巨人を理解し、本人の血と肉にするのは簡単ではない。これが教育、勉強、訓練なのであろう。多くのことは技術者自身が経験して身につけるのが最もよいが、建築の安全性、耐久性は自然を対象にしているから難しい。大きな実験にも大きな労力や費用が必要である。

このような過去の蓄積のうち、設計法・施工法に関する規準・基準には、多くの数式と数値が記述されている。

これらには、自然科学、物理学、実験結果などで説明できるものもあるが、その時点ではよくわかっていないが、決めざるを得ずに決められたものもある。この特集は本誌2010年2月号に続く2回目であるが、これらを決めるときの議論に参加されていた先達が貴重な解説を記述してください。通暁していえることは、簡単に決められたように思える多くの数値には深い考察があり、悩みもあることである。コンピュータ時代だから、数式や計算で説明せざるを得ないという辛さもある。人間の住む空間の複雑な建築の良し悪しを、数字で測ろうとするところに無理がある。例えば、中低層建築の鉄筋コンクリート構造にはしっかりと耐震壁が有効である。各階の平面図の中に太い赤鉛筆で耐震壁の位置を塗り、これらを並べて壁に張り、眺めるなどが、今の時代に最も有効な方法のように思う。

(わだ あきら)

2) 柱量と壁量に乗じる係数が12と33、または7と25のように壁の方に大きな数値が使われていることに注目すべきと考えます。柱と壁は形が異なり、柱は棒状で壁は面状ですから、力学的な考察から壁に大きな係数が用いられるのは当然ですが、建物の設計という観点でこの数値を見ると、壁を用いると柱の場合に比べ抵抗力が効率よく増えることを表しており、壁の活用は、構造物の耐震性を高めるのに非常に有効なことが分かります。

3) 柱と耐震壁の基本的な違いを考えてみます。耐震設計では、X方向の計算とY方向の計算をしますが、柱： $A_c$ は両方向の計算に参入されます。要するに一人二役が強要されます。一方、壁はその面に直行方向の抵抗力は無視していますから、それぞれの方向の壁： $x_{Aw}$ または $y_{Aw}$ だけを参入します。要するに一人一役です。負担が楽になります。45度方向に水平力が作用する場合、柱の抵抗力は同じ値 $12A_c$ であるにもかかわらず、壁の抵抗力は

$$\frac{1}{\sqrt{2}} 33(x_{Aw} + y_{Aw})$$

となり、両方向の壁量が同じときは、XまたはY方向に比べ1.4倍に働くことが期待でき、非常に壁の効果が大きいことが分かります。この効果により、壁の多い建物の地震被害が少ないことも説明できるように思いますし、通常の場合、45度方向の計算をしなくても良い理由になります。

4) 壁の多い強度指向型の建物と、壁の少ない靱性指向型の建物の地震被害率を比較してみます。強度型は粘りがないとされ、靱性型に比べ必要な水平耐力を大きく設定しています。ある大きな都市に大地震が襲ったとき、都市全体が震度7になるわけではなく、地図上には震度の等高線が描けます。震度の大きなゾーンでは、強度型建物も靱性型建物も想定した大きな損傷を受けるでしょう。しかし、この周辺には震度が中

程度の地区があり、ここでは強度型建物は強いので無損傷、靱性型建物のみが塑性変形を起こし損傷を受けることとなります。地震後の統計資料では必ず、壁の多い強度型の建物群の被害率が靱性型の建物群に比べ、小さくなる必然があります。我々は2段階設計を行っていますが、一次設計に比べ、二次設計の設計用の地震動は5倍ですが、実際の地震動の強さは場所によって連続的に変化しますから、建物群の被害率は設計法によって異なってくるはずですが。

5) 最近では構造計算を手計算で行う人は少なくなり、鉛直荷重時の応力計算もマトリックス構造解析法を用いるようになっていくかも知れません。従来の手計算では、鉛直荷重を基礎まで伝達するのは柱の役割であり、壁はその階の壁自体の重量を、梁を介さずに両側の柱に伝える程度の剛性と強度はあるとしつつも、上層部の鉛直荷重を基礎まで伝達する役割は持たせていませんでした。大きな地震が起きて、壁に多くのせん断ひび割れが生じたとしても、柱は全鉛直荷重を負担するとしてために設計してあるため、これが支持能力を失わなければ建物の崩壊は防げることとなります。このように、手計算には上手に冗長性を持たせる方法が組み込まれていたといえます。コンピューター時代だからといって、設計している建物を正確にモデル化すれば安全な建物が設計できるわけではありません。従来はこの計算法が、耐震壁の多い建物が大地震を受けても壊れ難いことの理由になっているとも考えられます。

6) 鉄筋コンクリート造建物の耐震性の向上に連層耐震壁の果たす効果も大きいと思います。連層耐震壁が十分なせん断耐力を有する場合、特定層の崩壊を防ぐ効果があり、建物全体が一丸となって地震に抵抗するようになると思います。耐震設計を行う上で考えていることと、実際の建物の挙動が一致しやすいという特徴を持っているようにも思います。