

# 大地震から学んだこれからの建築とまち

わだ あきら  
和田 章

東京工業大学名誉教授／日本学術会議会員

## 1 東日本大震災

2011年3月11日午後2時46分、恐ろしい地震と津波が起きた。3年が過ぎ、復興の兆しはようやく見えてきたが、東日本大震災の影響は東北地方だけでなく、日本全体に広がっている。東北地方太平洋沖地震(M9.0)と名付けられ、世界の大きな地震の10%は日本の周辺で起きているという中で、明治以来の最大級の地震である。

歴史上東北日本を襲った津波は、貞観11(869)年 M8.3, 正嘉元(1257)年 M7.5, 慶長16(1611)年 M8.1, 延宝5(1677)年 M8.0, 明治29(1896)年 M8.5, 昭和8(1933)年 M8.1などがあり、貞観地震では仙台市の近郊の当時国府がおかれていた多賀城にまで津波がきて、溺死者1,000人の記録があるとされている。明治三陸地震では21,959人の尊い命を失い、1933年3月の昭和三陸地震では3,064人の尊い命を失っている。

明治の震源はこの度と同じプレート上のより遠くで起き、昭和の震源はさらに遠い太平洋側の別のプレート上で起きたと言われ、この度の地震は規模が大きく、さらに近くで起きた。

## 2 忘れられていた大津波

「天災は忘れた時分にやってくる」の言葉で有名な寺田寅彦(1878-1935)は、昭和三陸地震の起きた1933年の5月に随筆「津浪と人間」を書いている。始めの部分に「(地震)学者の方では『それはもう十年も二十年も前にとうに警告を与えてある



写真 東日本大震災を象徴する津波による被害(気仙沼)

のに、それに注意しないからいけない』という。するとまた、罹災民は『二十年も前のことなどこのせち辛い世の中でとても覚えてはられない』という。これはどちらの云い分にも道理がある。つまり、これが人間界の『現象』なのである。」と書いている。78年が過ぎ、防潮堤も作ってきたし、子供達には津波の怖さを教育し、避難の指示も出された。それでも、全体として明治の三陸地震以上の被害を起こしてしまった。

最近では2004年12月のスマトラ島沖地震(M9.3)で非常に大きな津波が起き、23万人近い死者が出ているから、津波の怖さを知らなかったわけではない。きちんと対策をしてこなかったのである。津波の恐ろしさは「波というより100kmにもわたる奥行きで海面全体が高くなり数十分以上の間続けて押し寄せてくる」ことにある。防潮堤の高さを越える津波に襲われると、陸地側の広さは有限だから防潮堤内部も外部と同じ海面高さに

なってしまう。津波に勢いがあると、陸地の幅が狭くなるところでさらに海水面は高くなるから恐ろしい。

### 3 東日本大震災の被害

明治三陸地震でも昭和三陸地震でも、建築物の被害は少なかったと言われる。上に述べたが、明治の地震も昭和の地震も、2011年3月の地震よりさらに遠くで起きていたからであろう。日本の建築の耐震性は、建設された時代、構造設計者、構造の種類などによって異なるが、2008年5月に起きた四川省汶川地震とほぼ同じ午後3時前の時間帯に、非常に大きな地震動が東北・関東の地域を襲ったにもかかわらず、構造そのものの倒壊が少なかったことは、せめてもの救いである。

M9.0の大地震であったため、揺れの時間が長かったことによる恐怖感を感じた人が多い。千葉県浦安などで起きた地盤の液状化は大問題であり、エレベータの停止、外壁や天井の被害が非常に多かったことも大きな問題であり、工法を改善しなければならない。これらの被害も揺れの時間が数分以上と長かったことが大きな原因と言われている。

### 4 復興の考え方

住宅・学校・病院・公共施設・事務所・工場などの一般的な建築に関係する、我々がここで考えなければならないことは、大きな津波で流されてしまった被災地の復興である。住むところだけでなく産業の復興が必要である。

寺田寅彦の先の随筆に「津浪に懲りて、はじめは高い処だけに住居を移していても、五年たち、十年たち、十五年二十年とたつ間には、やはりいつともなく低い処を求めて人口は移って行くであろう。そうして運命の一万数千日の終りの日が忍

びやかに近づくのである。」と言い、「これが、二年、三年、あるいは五年に一回はきっと十数メートルの高波が襲って来るのであったら、津浪はもう天変でも地異でもなくなるであろう。」と書いている。この度の津波の規模は数百年から千年に一度と言われている。これに対処できる人々の住み方と生き方を考えなければならない。当分はよいだろうとしてまちづくりを続ければ、数百年後に同じ災難に襲われる。

これは、日本人がどこに住み、どこで仕事をすればよいかという国土利用の問題であり、津波の恐ろしさだけを考えたら低いところには建築を建てないのが正しい判断である。ただ、衛星写真を見て分かるように、津波の被害を受けた地域は居住に適した平地であり、被災した土地にも私有権の問題があるから、実行には大英断が必要である。大都市に住んでいるコスモポリタンとしては申し上げにくいですが、すべての小さな湾に元のように小世帯で住むことはあきらめて、無理な防潮堤の建設を極力止めて自然に戻して欲しい。そのかわり高台またはもう少し山の手の良い土地を探して、ある規模の漁村として暮らす方法を考えていただきたい。

三陸や仙台の入江や湾には山から川が流れている。津波はここを遡上していくから、単純に海岸線を高い防潮堤で護っても意味はない。狭い川なら水門を設け警報後に閉めることもできるが、広い川の場合は川の両岸にも内陸に向かって高い堤防が必要になる。中程度の防潮堤でよいとして、町の中に緊急避難のための鉄筋コンクリート造の避難棟を建てることも行われている。

木造住宅や鉄骨の工場は流されることを覚悟で作るのか、このような建築は建てないことにするのか、簡単に結論は出ない。百年に一度、千年に一度のためにコンクリートの防潮堤で固めるだけ

では、人々の日々の生活、美しい景観や素晴らしい自然を台無しにしてしまう。

海洋の研究者である北里 洋は次の貴重な文章を書かれている。

「国土の防災・減災は、人が住む陸上環境の保全を主に議論している。その結果、日本の海岸線のほとんどはコンクリートの防潮堤によって取り囲まれ、陸と海との物質循環が阻害される。3.11以降、東北地方太平洋側の沿岸の多くの場所で、コンクリートの防潮堤が壊れ地盤沈下が起こったところに塩性湿地が生まれ、多くの野生生物が戻ってきている。また、海と陸との物質循環もよりスムーズになり、沿岸の海は豊かさを取り戻しているように見える。こういった沿岸の自然が戻っている時に、国土をコンクリートで囲んでしまってもよいのだろうか？もちろん、国民の安全を護ることは何より大事である。ただ、それとともに、豊かな日本の自然をも護る、複合的な視点を持っていたいと思う。日本学術会議は、人文・社会科学、生命科学、理工学工学分野にまたがる、科学者の集まりなのである。」

全く同感であり、そのためにも、防潮堤でまちを護るのでなく、住宅や学校やまちを津波の来ない高台に作るべきと心底から考える。

適切な高台がなく、元の地に住宅地を復興せざるを得ない場合は、低層の木造住宅を建てるのではなく、思い切って10階建て以上の鉄筋コンクリート構造のしっかりした建築を建てて欲しい。この方法によれば、将来の津波にも耐えることができ、高い防潮堤の建設や大規模な地盤の嵩上げ工事も不要になる。

## 5 極めて稀に起こる自然の猛威に対する減災の考えによる対処

極めて稀ではあるが起こらないとは言えない非

常に大きな自然の猛威があり、これに襲われた場合の被害が極めて甚大なとき、災害の危険性はこれら2者の積で表せるから、絶対値としては大きくなることがある。ただ、東日本大震災のような悲惨な災害は避けねばならず、このような場合への対処の方法を考えなければならない。これには、次の4段階で考えると分かりやすい。防災ではなく、減災の考え方に属するが、この考え方は、災害を極力減らすように努力するが、被災の可能性を考え、これに対処する方法である。

### *Locations*

国土計画、都市計画、道路、建築の用途に応じた設置位置、安全なところに住宅やまちを作り、工場などの設置場所を考える。

### *Structures*

防波堤、防潮堤、堤防、建築物などの構造物を丈夫に、長持ちするように作る。耐震性・耐風性の確保。

### *Operations*

地震学の研究、地震速報、津波予測、警報、避難経路の整備、避難訓練、敏速な避難、その他のソフト対策。

### *Risk transfer*

国内の異なる地区に生産施設を複数配置して生産停止を避ける、港湾施設・工場・船舶などの被害額を保険によって他者に転嫁する。

## 6 文明が進むほど自然災害はその劇烈の度を増す

寺田寅彦は、先にも引用したが、防災・減災に関わる多くの貴重な随筆を残している。その一つ「天災と国防」は関東大震災から11年後の1934年に書かれており、80年後の今にも通じる記述である。ここに、重要と思う部分をそのまま引用させていただく。

「しかしここで一つ考えなければならないことで、しかもいつも忘れられがちな重大な要項がある。それは、文明が進めば進むほど天然の暴威による災害がその劇烈の度を増すという事実である。

人類がまだ草昧の時代を脱しなかったころ、がんじょうな岩山の洞窟の中に住まっていたとすれば、たいいていの地震や暴風でも平気であったろうし、これらの天変によって破壊さるべきなんらの造営物をも持ち合わせなかったのである。もう少し文化が進んで小屋を作るようになって、テントか掘っ立て小屋のようなものであっても見れば、地震にはかえって絶対安全であり、またたとえ風に飛ばされてしまっても復旧ははなはだ容易である。とにかくこういう時代には、人間は極端に自然に従順であって、自然に逆らうような大それた企ては何もしなかったからよかったのである。

文明が進むに従って人間は次第に自然を征服しようとする野心を生じた。そうして、重力に逆らい、風圧水力に抗するようないろいろの造営物を作った。そうしてあつた自然の暴威を封じ込めたつもりになっていると、どうかした拍子に檻を破った猛獣の大群のように、自然があばれ出して高樓を倒壊せしめ堤防を崩壊させて人命を危うくし財産を滅ぼす。その災禍を起こさせたもとの起こりは天然に反抗する人間の細工であると言っても不当ではないはずである。災害の運動エネルギーとなるべき位置エネルギーを蓄積させ、いやが上にも災害を大きくするように努力しているものはたれあろう文明人そのものなのである。

もう一つ文明の進歩のために生じた対自然関係の著しい変化がある。それは人間の団体、なかならずくいゆる国家あるいは国民と称するものの有機的結合が進化し、その内部機構の分化が著しく進展して来たために、その有機系のある一部の損

害が系全体に対してはなはだしく有害な影響を及ぼす可能性が多くなり、時には一小部分の傷害が全系統に致命的となりうる恐れがあるようになったということである。

単細胞動物のようなものでは個体を切断しても、各片が平気で生命を持続することができるし、もう少し高等なものでも、肢節を切断すれば、その痕跡から代わりが芽を吹くという事もある。しかし高等動物になると、そういう融通がきかなくなって、針一本でも打ち所次第では生命を失うようになる。」

80年も前に、寺田寅彦は現在の地震災害が人々の命を奪い構造物を壊すだけでなく、大規模化と集中に向けて進んだ社会システム、平常時の効率と便利さを追求した社会そして経済活動に及ぶことを予言している。

## 7 構造物の設計と実際の施工に必要な塑性変形能力

鋼構造、鉄筋コンクリート構造などの設計及び実際の施工を成り立たせているのは、これらの構造物に適度な塑性変形能力を持たせるように作っていることにある。

ガラス細工で構造物をつくる場合を想像してみる。例えば、現場で梁の長さとその両側の柱の内法間隔が合わないとき、柱の弾性変形を利用して無理に梁を接合するなど、構造物の完成後に設計どおりの応力が作用していないことが、至るところで起こり得る。別の言葉で言えば、過大かつ不確定な内部釣合い応力が多くの部材に生じていることになる。強風や地震動を受けて構造物に生じる応力に、上記の不確定な内部応力が加算されるため、塑性変形能力のないガラス細工のような構造物では、一部の部材が早期に破断してしまうことになり、構造物全体の強さは設計者の意図どお

りの大きさには達しない。非常に危険である。

このような構造物が地震動を受ける場合には各個撃破現象、ドミノ倒し現象、連鎖破壊、ジッパー・フェイル現象(衣服のボタンの代わりに用いられるジッパーを開くときのように、一部の破壊が次々に伝播して行く現象、カスケード・フェイルとも言う)が生じやすくなると言える。一方、部材、接合部及び構造物に塑性変形能力がある場合、たとえ不確定な内部応力が存在していても、応力は再配分され、外力に対してすべての構造物部材が一致団結して協力して抵抗するので、実際の構造物の強さは設計者の思いどおりの値に達する。この考え方を支えているのが塑性変形能力のある部材、接合部、骨組の場合に成り立つ構造物の「塑性理論」である。この考え方は社会システムの強さ、複雑な人工構造物や人工システムの安全性確保にまで、すべてに使える重要な原理である。

Jacques Heyman は、人工物の成り立ちに材料、部材、骨組の塑性変形能力が必要であることを長年訴えてきた。“The Science of Structural Engineering” 1999, Imperial College Press に書かれた分かりやすいお話があるので、ここに、引用し和訳する。

### 「三本脚のスツールと四本脚のスツールの話」

ミルクメイドが三本脚のスツールに座って、牛の乳を搾っている。ミルクメイドの体重が600N (61kg) のとき、各脚はいくらの力に対して設計すべきであろうか。スツールは対称に支持され、メイドはスツールの中心に座っているとす。答えはもちろん200N となる。

同じミルクメイドが今度は四本脚の正方形のスツールに座り、スツールの形は対称、荷重は中心に作用しているとす。このとき各脚はいくらの力に対して設計すべきか。四本脚なので150N と

なるが、これは必ずしも正しい答えではない。粗野につくられ剛なスツールが小屋の堅い床に置かれると、三本の脚は接地し、ミルクメイドの体重を支えるが、四本目の脚は床から離れるはずである。その隙間がたとえ1mm より小さくても、この脚に生じる力はゼロである。静的な釣合を考えると、対角にあって接地している二本の脚の中央に荷重が作用しているから、浮いている脚の対角にある接地している脚にも力は作用しないことになる。結果として、ミルクメイドは接地している対角の二本の脚によって支えられ、脚に働く力は300N になる。

スツールの置き方は自由であり、四本のうちどの二本の脚が初めに接地するかは分からない。すべての脚は300N の力を伝えるとして設計しなければならない。四本脚のスツールは静定構造(Statically determinate Structures)を超えた冗長な不静定構造(Statically Indeterminate Structures)である。釣合式は三つしかないから、釣合式だけで各脚に生じる力を求められるのは、静定構造の三本脚のスツールだけである。ナヴィエは四本脚の問題を解く方法、つまり弾性論を示した。この問題を解くためには、脚の軸剛性はもちろん、座る部分の板の曲げ剛性などの弾性に関する情報が必要になる。問題は非常に複雑になる。しかし、この難しい方程式は電子計算機を用いれば、簡単に解くことができる。結果として四本の各脚にかかる力はどれも150N となるはずである。もちろん、構造技術者が用いる弾性解析のプログラムでは、床は平らで、四本の脚の長さは同じという仮定条件が使われる。弾性解析を行うために、このように単純な仮定を設けることになる。平らでない床に粗野に作られたスツールを置くとし、さらにその置き方は自由とすると、ナヴィエの弾性論に基づいた方法では脚に働く本当の力を求められ

ないことが分かる。

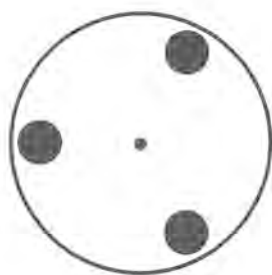
ここで、スツールの設計に弾性設計法を用いるとし、各脚に作用する軸力は150Nとしてスツールが製作されるとする。許容応力度設計を進めるためには、適当な荷重係数が必要になり、これを3とすると、各脚はここで計算された力の3倍の強さを持つようにつくられる。脚は軸方向に変形能力を持っているとする。各脚の強さが450Nで作られたスツールの中心に徐々に荷重を作用し、その変化の様子を調べる。上に述べてきたように、始めのうちは、二本の脚が荷重を伝達する。荷重が900Nに達したとき、これらの脚は縮み始め、残りの二本の脚が効いてくる。そして、各脚に450Nの力が作用したとき、荷重は1800Nに達する。

弾性解析結果では各脚に150Nの力が作用するとされているにもかかわらず、実験によると、全荷重が600Nのとき、二本の脚の力はゼロで、残りの二本の力は300Nであるとなる。それにもかかわらず、荷重係数3に相当する1800Nの荷重に達したときには、各脚の力は均等化される。塑性、変形能力が弾性計算の持つ欠点を助けてくれることが分かる。

構造物に塑性変形能力があるときのみ、弾性設計の持つ問題点は解決される。構造要素の中に不安定または急激に強度を失う性質があることを脆性というが、もし始めに力を受け持っていた脚が安定して縮む代わりに、座屈して急激に耐力低下

を起こすとスツール全体は壊れてしまう。設計法の基本として弾性解析が使われ、各脚が荷重係数3として、 $3 \times 150\text{N}$ の強さでちょうど設計されているとすると、設計者は荷重係数3を信じているから、1800Nの大男が載ることもできると考える。しかし、実際には、荷重が900Nのとき、スツールの対角にある二本の脚が450Nに達し、これらの脚は座屈してしまう。このときの荷重係数は $900/600$ 、または1.5となり、これは非常に危険で小さく、スツールは92Kgの男が載ると壊れてしまうことになる。

構造物の設計において重要なことは、構造部材が予想外の力を受けたとき、それまで負担していた力を保持したまま塑性変形できる能力、靱性をそれぞれの部材や骨組に持たせることである。鋼材の脆性的な引張破断、急激に耐力低下を起こす座屈現象、コンクリートのせん断破壊、圧壊などが起きないように設計すべきである。一方、鋼構造の梁のフランジ、超高層ビルの柱、航空機の翼に使われるストリンガーなど、部材に靱性を持たせることが難しい場合は、その構造部材にとって最も厳しい荷重状態、応力状態を考えることが必要である。上に述べた例で言えば、四本脚のスツールの各脚には、全荷重の半分の力が作用することを考えるように。部材断面をこの状態に対し十分に強く設計すれば、部材の座屈、柱のせん断破壊など、危険な壊れ方の可能性はなくなる。



三本脚のスツール



四本脚のスツール