

破壊工学のお話

1. 建設と破壊

構造物は、力に抵抗する性質を持った材料を使って建設します。**材料力学**は、強さの性質の解析に力学を応用する学問です。実用科学は、**建設工学**と言います。歴史のある用語は**土木工学**ですが、インテリ人種には語感の評判が悪いようです。学問は、現実には生じている様々な問題を整理して、或る理想状態での性質を調べます。これを、哲学用語では、現象を**抽象**する、または余分な性質を**捨象**する、と言います。実用を目的として構造物を設計し、製作から利用、さらには維持・管理をする段階では、理想通りにならない現実も多く現れます。その一つが破壊現象です。これに正面から向き合う応用科学を、**破壊工学**と括ります。その目的は、破壊が起きないようにする対策提案と、破壊が起きたときの後始末の対策にまで繋がります。学問的な研究にこだわると、**破壊力学**のような用語を使うこともありますが、美味しそうな現象だけのつまみ食いになってしまうことがあります。構造物の設計は、材料の強度を最大限に生かすことを研究します。その反面教師的に見える研究態度が材料を壊す試験です。強さの反対に、最も壊れ易い対極の状態、通常は剪断破壊、を調べて、それを避ける提案に繋がります。

2. 破壊と崩壊の区別

破壊(failure)は、種々の場面で使われる用語です。材料力学では、耐力が低くなるか、変形が大きくなる状態を指します。細長い鋼材に引張や曲げを加え、変形が或る程度大きくなれば破壊とします。破壊は変形が無限大になることですので、力を伝える機能も完全に失われます。これには**崩壊**(collapse)を当てます。崩壊は、応急的な対策も、元に戻す修理すらできない意味を持ちます。一方、石材、コンクリートなどの人工石材は、**脆性**材料（硬いけれど、もろい材料）です。その強さは、圧縮試験で調べます。このときの破壊は**剪断**で起こり、剪断面で材料がズレ、分離します。剪断変形の理解は、材料力学の学習者には難しいところがあります。これは基礎的な力学で習う摩擦のメカニズムの特殊な場合です。傾斜面で二面の接触物体の移動と関係する現象です。このときの破壊は、すべり面を挟んで材料が二つに分かれます。**粉砕**は、この過程の繰り返しですので、全体材料の表面積が増えていきます。粒状に破壊するときは粒の径を指標にします。粉末状に粉砕した材料の粉末度を表すとき、材料の単位重量の表面積を間接的に測定した値と言います。土、その代表としての粘土のような**塑性**材料は、圧縮すると断面積が増え、潰れても、高さ全体が無くなる変形を起こしませんので、崩壊とは言い難いところです。構造物は部材を組み合わせますので、構造システムと見ることもします。どこかの構成部材が破壊したとき、全体システムとして機能の低下で済み、修理が可能な破壊と、機能が失われる崩壊に進む場合とがあります。構造物の安全性を議論するとき、最も恐れられるのが崩壊の方です。

3. 破壊は大きなエネルギーを消費すること

破壊を人為的に行わせる破砕や粉砕では、硬い鋼材に相手の材料を衝撃的にぶつけるようにした衝突原理を使った粉砕機を使います。石臼は石を使い、穀物のような相対的に柔らかい材料を粉末にします。力学原理では、衝突は運動量の保存則が成り立ちますが、運動エネルギーの保存は起こらず、その一部が粉砕に使われ、残りの大部分は熱に変わります。電気エネルギーを使い、電気モータを使う粉砕機は、一般に効率が悪く、単純に位置エネルギーを使って落下の衝撃を利用する破砕が利用されます。粉砕する材料は、なるべく乾燥状態にします。砂粒程度の寸法の粒子では表面水の影響で、別の物理的な性質を示します。海水浴場で、海岸の砂を使って山を造り、トンネルを掘ることができます。これは、水の表面張力が効いている状態ですので、乾燥すると崩壊します。粉体工学には、砂利や砂のような粒子の集合について、動的な運動や静的な力学を研究する分野を含みます。粉体は、水のような流体の性質を持つ場合もあります。砂利や砂の集積場では、材料の取り出しに蟻地獄のような流れができて、そこに吸い込まれる事故が稀に起きます。穴掘りは、注意しないと生き埋めの事故を起こします。このときの死亡事故は、息ができなくなる窒息が原因です。そうかと思うと、石造のアーチ橋やドーム状の構造原理が働いて、粉体の流れが途中でせき止められることもあります。このような現象は、学問の対象としての抽象化には向ききませんし、実用式の提案もできません。しかし応用科学としては、やってみなければ判らないと言う意味で、興味のある課題です。

4. 日本は自然災害が多いこと

日本全体は、自然災害の多い国です。まず、日本の年間雨量は、世界の平均雨量の約2倍もあります。梅雨の長雨、耐風の襲来、冬は日本海側の雪があり、水害も多く発生します。これに加えて、地震と、それに関連して断層、また津波があります。火山による災害もあります。近年の磐梯山の爆発は、明治21年(1888)に起きたので、その記録が詳細に残されています。日本では雨量が多いこともあって、火山帯では温泉に恵まれます。ところが、これが原因となって地盤沈下を起こすことが見られます。地盤沈下は、海岸近く、河川の氾濫域に起こると思いがちですが、案外なことに、内陸部でも深刻な被害を起こすことがあります。日本では、自然災害から身を守るための考え方には、欧米風の、自然と闘って克服すると言う感覚を持ちません。登山の考え方でも、山頂を征服するのではなく、山の神を敬うような態度を取ります。これは欧米から見ればアミニズムとして軽蔑されています。地球の長い歴史からみれば、自然は何を起こすかの将来予測ができません。アルプスの山頂から海の化石が見つかることの説明に、キリスト教などの一神教では神の力を持ちだすのですが、そのもう一つ上の感覚がアミニズムです。日本では、あらゆるものは、自然に帰るとする輪廻の考え方を心の底に持っています。

5. 巨大な破壊現象になることがある地滑りと山崩れ

話が少し脱線しますが、自然災害の一種である山崩れと地滑りの違いが判るでしょうか？ 山崩れは、既に破壊された岩石が斜面の上から転がり落ちる現象です。地滑りは、すべり面が新しく発生して起こる剪断変形です。時間的にゆっくりと起こることもあります。自然の地形だけでなく、人工的な土構造でも起こります。この解析と研究は、土質工学で扱いますが、広い意義での破壊工学に含めています。このような自然災害は、人知を超えて発生することがあります。自然との共生を考えることが重要であるとする認識が育たないと、すべての災害に対して誰かを犯罪者として探し出し、責任の追及と報復、さらには補償の要求に走るようになり、なんとも冷たい社会になるのです。

6. 基本的な建設材料は木材

産業革命以前、主な建設材料は木材でした。自然の風雪に耐えて長い年月をかけて成長しますので、材料力学的に見れば、そのままで細長い柱や梁として利用できる良質の構造部材です。竹は、成長速度が速く、パイプ構造であって、材料力学的に見れば軽量で能率の良い部材です。しかし、木材に比べれば部材寸法の自由度が低く、耐久性も劣ります。近代の材料力学では、竹に学んで、部材全体としてパイプ断面や箱断面にすることの研究が進み、軽量で丈夫な部材構造に構成できることが注目されるようになりました。この断面が扁平に変形して断面積が減少すると、簡単に破壊が起こります。竹構造に学んで、適度な間隔で節をつけて、断面形の変形を抑えます。自然の竹は寒冷地には見られません。名神高速道路の建設時、ドイツから来た技術者は、竹林を見てbamboo bushとして珍しがりました。最近、日本の平均気温が上がったこともあって、竹林が急速に広がっています。伝統的な木材は、森林資源を生産する自然全体を含めた長期間のリサイクルシステムがあれば、安定した供給が得られます。ところが、効率のよい略奪産業が森林の伐採を進め、加えて、近年では石炭の利用が原因となった酸性雨が、このリサイクルシステムの機能を断ち、結果として木材資源の利用が不便になりました。ノアの箱船伝説、トロイの木馬の話があったことは、先史時代、良質で大量の木材資源があったことを示唆しています。13世紀末、蒙古の日本への攻撃が元寇ですが、このときに大量の木造軍艦が作られ、これが朝鮮半島での良質の木材資源のあらかたを使ってしまうました。西ヨーロッパでは、15世紀から17世紀まで続いた大航海時代に、多くの木造帆船が作られました。レバノン杉は、特に帆船のマストとして最適の材料でしたので、大量に伐採され、現代ではレバノンの一部にしか見られなくなっています。わずかにレバノン杉が残存する地域は、世界遺産に登録されています。また、レバノンの国旗のデザインにレバノン杉が描かれています。ロンドンの大火(1666)は、大都会であった当時のロンドンの建物の殆んどが木造であったからでした。大火以降、木造建築が禁止され、従来から実用されていた煉瓦造または石造が進められたのでした。日本でも巨木建築があったことが判ってきました。奈良の東大寺大仏殿の再建(1709)の頃には、元の大仏殿に使ったような巨木が既に見つからない時代に入っていました。杉材の植林は、特に敗戦後は国として積極的に推進されました。これが杉花粉症として季節病の原因になることまでは、予想になかったことです。

7. 石材を扱う技術に経験が不足していたこと

材料にどのような変形をさせれば、次の利用に便利かの準備作業の一つに、破碎や**粉砕**があります。太古から、石材の切り出し、食材の粉末加工などで伝統的に応用されてきました。エジプトのピラミッドのような巨石建造物の建設は、労働力の集約を必要としますので、宗教心を背景とすると共に、権力者の威信を示す目的がありました。現代でも、政治家が箱モノ建設にこだわるのも、考え方の根は同じです。実用を考えた扱い易い寸法の焼成煉瓦は文明開化の近代建物に、また、石壁などに見る自然石の切り石は、リサイクル利用が普通に見られます。現代になって、コンクリートの骨材を生産する工場にはクラッシャーが使われ、既設のコンクリート構造物の人為的な破壊作業も増えました。騒音や塵埃が発生することが多いので、地域の嫌われものになります。実を言うと、積極的に「物の壊し方」を研究することは、「物造りの方法」を研究することと並列に扱う重要な課題ですが、リサイクルができないと、ごみの生産になってしまい、これが地域社会の負の遺産になります。伝統的な日本建築は、組み立て方式になっています。分解して建て替えができます。古い材料をそのまま生かすことも、別構造に利用することも、取り替えることもあります。別の場所にそっくり移築することもあります。木材は、腐食しますし焼失もしますが、後に何も残りません。これは、自然のリサイクルループに乗ることですので、幸いでもあるのです。この木造建築の習慣をコンクリート構造にまで応用できると錯覚することが多いので、問題が発生します。つまり、木造建物のような建て替えの融通性がないのです。したがって、石造また鉄筋コンクリート造で建設する構造物は、計画の段階で半永久的な利用を十分に検討しなければなりません。ヨーロッパの石造の教会建築には、100年以上の単位の長期間にわたって建設工事が進められ、また数百年単位で維持管理されているものが幾つも見られます。イタリアのローマは歴史の古い都市です。このこともあって、現存している石造の町並みは、少し掘ると、遺跡が出土するのが普通に見られます。新しい建造物は、前にあった構造の上に造るからです。現代のように、ダンプカーで残土を別の場所に捨てることができなかつたからです。そこで、なるべく古い材料を再利用（リサイクル）することが図られてきました。戦争で破壊された残骸から、ジグソーパズルの組み立てのように元の場所に復元し利用を継続することは、ヨーロッパの都市では普通に見られました。日本でも、諫早の眼鏡橋の復元などがありますが、元の場所に、元のままで利用することはしていません。

8. 鉄筋コンクリートの歴史は未だ100年もないこと

日本の近代化は、明治維新(1868)以降、駆け足で欧米文化を模倣してきました。随分昔のことのよう
に思うでしょうが、筆者個人で言えば、祖父に始まる三代続いた、身近な、また歴史的に見れば、2013年の時点で約160年の短期間の出来事です。祖父は明治を通して生き、父は1901年生まれで20世紀を丸々経験し、筆者は昭和の激動期、特に、敗戦以降を見てきました。近代化は、産業革命で得られた良い所だけを利用してきました。そのため、欧米が負の対策にも苦勞した経験に学ぶことが多くありませんでした。産業革命は、ロンドン大火の約100年後から始まりました。その牽引になったのはワット (James Watt, 1736 - 1819) が1769年に開発した蒸気機関でした。建設の近代化は、1824年にアスプディン (Joseph Aspdin, 1799-1855) が特許をとった**ポルトランドセメント**と、1855年に特許を取ったベッセマー法 (Henry Bessemer, 1813-1898) による**鋼材**が、共に大量生産されるようになってからであって、さらに100年後からです。象徴的な巨大鋼構造物は、イギリスのフォース鉄道橋(1890)とパリのエッフェル塔(1889)です。鉄筋コンクリート構造の実用化は、1867年に特許を取ったモニエ (Joseph Monier, 1823-1906) から始まりました。関東大震災(1923)までは、欧米の模倣で建設された煉瓦造りの建築が近代化構造物の象徴でした。しかし、構造設計の考え方に耐震性が考えられていなかったことが問題になり、積極的に鉄筋コンクリート構造を利用する方法が研究されるようになりました。したがって、日本では、実用的な鉄筋コンクリート構造物設計施工の歴史は、(2013年の時点では)未だ100年も経っていないです。コンクリートは人工の石材であって、ほぼ永久に利用できるの思い込みがあったのですが、案外なことに、使い方次第では耐久性も低いことが判ってきました。リサイクルで使うことにも、費用を考えると現実的でないことが判ってきました。さらに、積極的に破壊して作り直す需要が増えてきたこと、この二つが社会システムとして問題になってきました。改築や建て替えは、材料の再利用(リサイクル)を考えませんので、結果として破壊作業と、その残骸を捨てるための対策が必要です。スクラップ・アンド・ビルドは、外から観察していると、活発な産業活動と目立ちますが、醒めた眼で見れば、安物の建設があふれ、都市全体を廢墟にすることにまっしぐらに向かっています。

9. 聖橋は近代的な鉄筋コンクリート構造物の象徴である

石造のアーチ橋は、欧米・中国で古くから建設されていました。その技術を日本で模倣することは、江戸時代末期のごく短い年代でした。関東大震災後、東京お茶の水に建設された聖橋(1930)は、鉄筋コンクリート理論を応用して建設した、近代的なアーチ橋としての象徴であって、それまでの経験技術の石造アーチ橋の建設時代に終止符を打ちました。この頃、各地で、鉄筋コンクリートアーチ橋の建設がブームになりました。近代化の象徴として、昭和の始めころから、鉄筋コンクリート構造が学校建物やアパートの建設に利用されるようになりました。敗戦前までは、高級住宅のイメージがありました。敗戦後は、戦災で焼失した都市の木造住宅に代わる鉄筋コンクリート造の、住宅公団の標準的な狭いアパートが多く建設されました。橋の話に戻すと、土橋や木橋に代えて、鋼材と鉄筋コンクリートで架設すれば、ほぼ半永久的に利用できるとの思い込みが生まれました。橋の命名に「永久橋」と付けることが、全国的にも幾つか見られます。

10. コンクリートと水環境とのせめぎ合い

コンクリートは、予想に反して透水性の大きい材料です。欧米は、雨量が少ないこともあって、防水・耐水の対策が重要な課題になりませんし、その文献も多くありません。日本では、水が原因となる障害が多く見られるようになりました。コンクリートが半永久的な材料であるとの思い込みが強くあって、表面を保護する常識が育たず、打ちっぱなしも多く見られます。また、デザインにも取り込まれていません。外壁を打ちっぱなしにしたコンクリートの建物は、表面の汚れが進むと、貧相な外観に落ちぶれて行きます。単純にコンクリートで水槽を造ると、水漏れが普通です。雪の多い寒冷地では、日中解けた雪がコンクリートに浸みこみ、これが夜間に氷結して表面を破壊することが見られます。橋梁の道路面は鉄筋コンクリートの版で施工されますが、浸みこんだ水がコンクリートを溶かし、鍾乳石が見られることがあります。水の浸入は鉄筋を腐食させ、かぶりのコンクリートを押しのかけた破壊が見られます。住宅建築では、風呂場や台所の水回りに苦労が絶えません。屋上が平らな鉄筋コンクリート造の学校建物やアパートでは、屋上からの雨漏りに悩まされるようになり、防水工事が欠かせませんが、どこからともなく雨漏りすることに悩まされます。これに懲りて、屋上を伝統的な瓦屋根にする設計も多く見られるようになりました。ビルの屋上緑化が提案されています。筆者の個人的な感想を言えば、将来、漏水の問題を起こすでしょう。室内では、梅雨のときは結露とカビに悩まされ、冬は加湿器に頼ります。また密閉度が上がって、シックハウス症候群に悩まされることもあります。日本の木造建築は、木材、土壁、畳などの総合で、これらの問題を解消していました。コンクリートは、半永久的な利用を慎重に考えた設計が必要ですが、まだ手探りの状態と言えるでしょう。

11. 古代ローマ帝国はインフラ維持費で破産した

ローマ帝国は、伝承によれば BC27-AD330 の 300 年間、西ヨーロッパを平和的に統治しました。その繁栄を支えた背景は、現代でも通用するような、道路・上下水道・娯楽施設などのインフラストラクチャ (**infrastructure ; インフラ**) の建設技術が高かったことにありました。しかし、広大なローマの支配を維持するため、インフラの維持コストが次第に高まり、その財政負担が軍事力衰退に進み、これが帝国の破産から滅亡へとつながったとされています。例えば、水道橋の建設技術は高かったのですが、水漏れの補修費用が嵩んだのでした。(小林一輔、コンクリートの文明誌、岩波)。インフラの整備は、都市の便利さを進めるために為政者が努力する目標です。しかし住民側が権利意識を主張し、自前の努力で維持・管理のコストも負担することをしないと、結果としてスラム化が進み、都市機能が崩壊します。世界的にみて、超高層ビルは、電気が止まれば、陸の孤島になることが大きな脅威になってきました。都市高速道路網は、どこか一ヶ所でも崩壊して不通になれば、忽ち全体機能を失う危険と隣り合わせです。したがって、選択肢の一つとして、造ることができても、敢えて造らないことの不便さを受け入れる寛容さが必要です。これは、大きな国家的な戦略で取り組むしか実現できないでしょう。

(2013/06/08 版)

中日本建設コンサルタント、ホームページへ戻る <http://www.nakanihon.co.jp/>