

(7) 安全を目的とするための基準や制約の意義

安全の対象になる事柄の種類は多いが、安全対策の有効な方法の1つは、法律や基準を定めて、危険になるような行動に制限を加えることである。これは、危険を予防するのに効果があるが、危険が具体的な現実になった場合やその後の処理までは含まれていないことが多い。それというも、安全の認識が危険の想定の上で成り立ち、また危険を意識することも、いまだ実際に損害が生じていない状態での話であるから、もう1つ上の、安全の対策上の制限を定めることについて、納得づくで理解してもらうには相当の努力が必要になる。つまり、その制限を守らなくても、当面危険にならないとすれば、その制限は権利の侵害になり兼ねない。

この意味からすれば、安全対策上の法や基準は、少なくとも、それ以前に発生した事故や災害に教訓を得ているわけであるから、新しい種類の事故や災害の発生に対して、対応の取れない場合がある。実際のところ、科学技術の発達に伴って、公害といわれる新しい災害が頻発し、大きな社会問題になっているのは周知のことである。

事故や災害の被害者は、加害者に対して賠償責任を追及することになるが、民法上の原則が過失責任を建前としていることから、法律上の論争を引き起こすことになった。というのは、従来の法や基準を正しく守っていたにもかかわらず予測できなかった要因によって生じた事故や災害に対しては無過失であり責任がないという事例がふえてきたのである。それではあまりにも被害者がみじめである、ということから、現行の法理論の範囲での解決に加えて、無過失責任賠償の考え方が生まれるとともに、公害法が注目されているのである。

* 名古屋大学工学部助教授

法律に関する議論はこれ以上省くが、土木構造物を安全に設計し、施工するという技術的な課題に対して、われわれは設計示方書、基準、規格、標準というような制限を持っている。建築基準法のように法律の形になったものもあるが、大部分は発注者と受注者との間の契約条件として使われている。これらの基準類は、構造物の破壊事故に教訓を得て定められたものが多く、常に検討が加えられ、時代とともに変遷している。構造物の崩壊事故が発生すると、法律上の過失責任がこれらの基準に照らして調査されるが、無過失であっても破壊事故が生じた例は少なくない。

注意しなければならないことはこの点である。つまり、法律上の過失の有無にかかわらず、技術の問題においては、従来から破壊や事故は稀ではない、という事実である。品物の規格は、それが正しく使用されるための安全の限度を示すものと考えられるが、程度の差はあるにせよ、誤差が存在するのは1つの常識であり、確率的に不良品はいるのもまた稀でないと考えている。品物と人とのかわり合いを民事的に考えれば、品物に過失があって人に損害を与えたことになる。品物と人との間に取かわした安全上の取り決めが、いわば設計基準、仕様、規格に含まれていると考えることができる。

これらの基準は人が定めるものであるから、基準に不備があった、という原因による損害は過失責任に相当する賠償の対象になるが、多くの場合、偶然もしくは確率的に生ずる損害に過失の追及は行なわれず、賠償責任だけに限定する。つまり、技術上の問題においては、従来から無過失責任賠償が存在するのは1つの常識である(不良品の無料交換など)。

ある品物を安全に製作する場合の合理的な解決方法は、安全を確保させるための出費と、故障や事故の発生による損失との比較で考えられることが多い。安全性を経済的な面からとらえることは、安全を相対的に評価し

ているから、絶対的な安全を要求される場合には損得勘定で割り切れない問題が起こる。この例として2つの重要な課題がある。1つはアポロの宇宙計画にみられるような、高度の信頼性が品物に要求される場合であり、他の1つは、人の生存にかかわる水、空気、環境の保全である。

そのどちらも、仮に現行の法律や基準に照らして過失がないとしても、事故や災害になれば、その時点で破滅を意味するほど重要なものである。この立場からの制約や基準が最近の重要な課題になっている。

絶対的安全を確保するための考え方の過程を説明しよう。たとえば、火災に対する安全のため、燃えやすいものの取り扱いに基準を設けることは、いわば最も直接的なものである。具体的な理解をするうえでは、石油ストーブを考えてみるとわかりやすい。火災の直接原因は火の取り扱いにあるからで、この意味からすれば、取り扱いに注意しろというのは基本的な制約である。しかし、万一火がついたとしても、火災が広がらなければ、災害を最小限に抑えることができる。そこで、火災の予防とか、火災の類焼や延焼を防止する基準が考えられるが、これは防衛的な性格をもっている。もう少し進めて、火がついても燃えなければ火事にならない、不燃化に基準

を設ける考えは、積極的な安全保障を意味している。しかし、さらにもう一步考え方を進めよう。そもそも、石油ストーブがなければ、そのことに関連する安全基準を必要としない、ということは、石油ストーブを必要とする背景はなんであるかを考え、まったく異なったように見える対策に基準を定めるべきではないか、というところまで進める。一種の水平思考である。地域冷暖房を進める、などの考え方はほんの一例の思いつきに過ぎない。

安全について、基準が不備であった、ということの問題にする限り、どうしても場あたりの処理しかできないし、同種の事故や災害を防止するのに役立たない。流行語でいえば、原点に帰って考えるような、基本理念に相当する安全基準が必要になる。これは法律として具体的な形にすることが非常に困難な面を持っている。

東京都の公害防止条例は、この見方からすると非常に異色あるもので、基本原則を条例の前文にもってきているのが注目になる。つまり、法や基準には抽象的な表現を避けるものであるが、なおかつこのような前文をもつことが新しい感覚であるといえよう。

(8) 基準はだれが定めるべきか

いま、個人の集合体である社会で、個人個人が安全について節度を守り、これが社会全体の安全につながり、再びこれが個人の安全を保障することにつながる、という認識をもてば、そこに秩序が必要になり、約束ごとが定まってくる。安全といっても種々の対象があるから、個人の集合には種々の協同体が考えられる。寄合いか、組合のような形もある。いずれにしても、その協同体に加入することは個人になにかの形で制約を課し、それを遵守する義務が生ずると同時に、その協同体の保護の対象に組み込まれる。

安全についての制約や基準が、協同体の取り決めたものであるならば、個人に義務を課したと同時に、事故や災害があった場合の救済について、その協同体は責任をもつのだと宣言したことに同じである。なぜかという点、損害が発生した場合、その協同体のあずかり知らぬことで、当事者だけの話であるとするならば、なんのために基準や制約を個人に守らせるか、ということになるからである。過失があったか否かは、原因の追及や、罪や罰を定める場合に必要であるが、そもそも、危険が現実になったこと、それ自体が救済を発動させるべき根拠になる。

安全の基準を定めた当事者が損害の補償や救済に責任をもつ、という論は現実問題としてむずかしいが、原則的には正しい。しかし、安全の基準の中に、このことを明言していることは稀である。常識的に考えれば、国が安全について法を定めたならば、国が補償について責任

《資料》 東京都の新公害防止条例 野間久生

(ジュリスト 458 号 昭和 45 年 8 月 10 日 p. 266 抜粋)

2. 新条例の概要と特色

(1) 新条例の概要 前文及び5章 68 条からなり、概要は次の通りである。

① 前文 条例に前文を付するのは異例のことであるが、今後の都公害行政の基本理念を示すためとくに設けたものであり、第1章と合わせて本条例の憲章たる性格を示すものである。

前文は、人間は、文明をつくり、自然の与える恩恵をうけてその用に供してきたが、一方でこの文明が自然を破壊し、公害をもたらしたとし、したがって公害の発生原因は文明の集中的表現である都市と産業に内在し、社会的災害であると規定している。そしてそれを憲法が保障する健康で文化的な最低限度の生活を営む権利、すなわち基本的人権に対する侵害として捉えている。そしてこの公害を防止絶滅するために、都民が次の3原則を宣言している。

〔第1原則〕 すべて都民は、健康で安全かつ快適な生活を営む権利を有するのであって、この権利は、公害によってみだりに侵されてはならない。

〔第2原則〕 すべて都民は、他人が健康で安全かつ快適な生活を営む権利を尊重する義務を負うのであって、その権利を侵害する公害の発生原因となるような自然及び生活環境の破壊行為を行ってはならない。

〔第3原則〕 東京都民の自治組織体である東京都は、都民の健康で安全かつ快適な生活を営む権利を保障する最大限の義務を負うのであって、この義務を果たすため、あらゆる手段をつくして公害の防止と絶滅をはからなければならない。

をもつと考えるし、会社内で私的に安全のための規約や基準を定めれば、社員に義務を課すると同時に、会社が事故や災害のさいに補償や救済を行なうことを宣言したと考えられる。

われわれの生活の場において、最も規模が大きく、かつ個人のすべてを含む協同体は国家である。好むと好まざるにかかわらず、われわれは国の定めた法のもとに制約され、同時にわれわれは国の保護下に組み込まれる。しかしながら、国が定めた安全に関する法律は、指導、取り締まり、禁止、許可の基準という形になるものが多く、補償や救済について親切であるとはいえない面をもっている。これは政治や経済の構造とも関係があるが、欧米における権利、義務の観念が日本では低いことにも原因がありそうである。従来、日本の産業の発達は資本主義経済によるところが大きい、それは国という協同体に参加している構成要素が企業を主に考えていたことによっている。

国と企業とか癒着しているという批判は、上に述べた協同体の考え方からもわかるように正しい。しかし、国家の構成の重要な要素である個々の住民は、当然のことながら国家の保護の対象にはいるべきであるから、企業の発生する公害は理由のいかんにかかわらず国が補償と救済にあたるべきだという論が成立する。これは公害の悪質化、広域化と同時に、住民側の権利意識の向上があずかっているが、必ずしも住民側に安全を守ることの義務意識は育っていない。

ところで、土木構造物の安全を目標とした設計上の示方書、基準、標準などは各種の学会や協会で作案されたものが多いが、注意すべきことは、これらの学・協会は、加入している個人や企業体の経済上の保護や救済を目的としていないことである。安全設計のための基準を示してはいるものの、それは会員に拘束力をもっていない。土木構造物の場合、施主は大部分が国をはじめとした公共企業体であるので、先の示方書や基準を施主側が借用し、責任を引き取った形で受注者に提示していることに注意しなければならない。つまり、示方書や基準に不備があって生じた損害は、いわば自損である。

ところが、構造物は必ずしも公共機関が施主であるとは限らない。公共機関にしても、財政的に資力の小さい企業体である市町村などが、予算規模の大きい構造物に関係して、万一損害にあえば財政的に破産する。もし設計上の基準に誤りがあった場合、損害賠償の責任を学会や協会が負うことがありうるであろうか。大学人にとって他人ごとでないのは、学識経験者が提案した安全についての基準が、仮に判断を誤った場合、過失責任はその個人にも及ぶであろうか、という点である。

大学人や学識経験者が好き勝手なことを発表できるのは、道義的な場合を別に、社会的に免責されている

からである。もし正論であって世間の喝采を受ける場合も、また逆に判断の誤りを非難されようとも、過失責任による賠償が学識経験者に及ぶことはない。これは学問の自由という面からの保証ではあるが、責任が追求されない苦勞知らずから、補償とか救済についての認識が薄い。

安全について学会や協会が基準を定めながら、補償や救済に責任をもたないならば、なにか別の方法を講じなければならない。これは1つは民間の保険を利用することであり、もう1つは国に訴えるのである。日本では欧米に比べて保険の普及が遅れているといわれているが、その理由の1つに国家保険が多いことがあげられている。いわば、なんでも国につけ回すのである。なにかの事故や災害が発生した場合、国や役所が指導や取り締まりをしなかったからだ、という論調は、当事者の自由な話し合いに国が介入しろということと同じである。

もちろん、国は大局的な立場から総合的な安全について基準を定め、かつ補償や救済に最終的な責任をもつことに異論はないが、個人の自由な活動を妨げないためには、安全基準とともに保険制度の充実が必要になる。国が定めた法律で、土木構造物の建設と深い関係をもつものは差しあたり労働基準法と労働安全衛生法である。この中には最低限度の補償と救済とが織り込まれているが、個々の工事に伴う多種多様な危険のすべてを網羅することはできない。

保険について注意すべきことはいくつかある。保険が制度として成り立つための要件については、第1章の4節のところで簡単に触れておいた。しかし、いくら保険があったとしても、全体が破滅したのでは保険にならない。つまり、保険の受け取り者も消滅したのでは話にならない。部分的に損害が生じても、それを経済的に補うことで全体の破滅が救えるときに保険は有効である。

(9) 保護制度は安全対策に有効か

一口に保険といっても、その内容はかなり複雑であり、多くの専門書や参考書を参照しなければ理解できない面もあるが、安全の問題と関係のあるものは損害保険に含まれる。損害保険のうち、火災保険、海上保険、運送保険を除いた残りを新種保険というが、その中には実にさまざまな保険がある。自動車保険や航空保険のような一般的なもののほかに、原子力保険、労働者災害補償保険(いわゆる労災)、賠償責任保険、建設工事保険、風水害保険、地震保険、などがわれわれの安全問題と密接にかかっている。ごく最近建築家保険というものもできて、町の建築設計事務所などを対象としている。

保険の考え方の底には、ある程度の損害の発生を予測することに始まっているから、危険そのものの直接防止を目的とするものではない。しかし、保険会社にすれ

ば、危険を防止するように努力する活動が利益につながるから、その見方からすれば安全対策に役立つ。たとえば、火災保険会社が火災防止の施設や機器を作ったり普及させたりするのがこれにあたる。また、保険があるということで信用が高まり、心理的な負担を軽くし、後で説明する人間的、心理的要素による事故要因を減らす効果がある。

しかし、経済問題の性質上、保険を悪用して、わざと事故を起こして保険金を詐取しようとする弊害を伴うことがある。また、保険で保証されていると感違いして責任の重さを深く考えない場合もある。過失ということの法律的な定義は専門外のわれわれに難解なところがあるが、要するに常識的に見て当然注意すべきところをうっかりした、という心理状態をいっている。損害賠償の問題が起こる民事の裁判では故意も過失も同じ扱いであり、故意、過失があったことを条件にして賠償責任が成立するとしている。

とかく紛糾するのが賠償責任保険の支払いの認定のときに起こる。つまり、契約条項の中に故意、過失を条件にしている、天災や戦争のときのような不可抗力の場合の免責事項がはいっていることがある。保険による救済を受けるためには、だれかが過失をかぶる不名誉に甘んじなければならない。

土木技術者にとっても関心の高かった事例として飛騨川のバス転落事故の裁判は非常に象徴的である。事故の直接原因は素人眼に見て天災である。天災であるとするれば、自動車損害賠償責任保険の対象からはずれる。救済を受けるためには、自動車の運転手に毛ほどでもよい、過失を認めねばならないのであった。

バスの乗客の遺族にしてみれば、その賠償額はなんとしても低額であり過ぎた。仮に航空機事故であったならば、補償額がもっと高額であり得たわけであるから、そもそもバス輸送を業務とするバス会社が、航空機事故と同程度の危険を本来考えていてもよかったわけである。しかし、遺族団の損害賠償の訴えが、バス会社を通り越して、道路管理者の国に対して行なわれたことが特異である。実は似たような事例として、タクシーの乗客が交通事故で死亡し、その遺族がタクシー会社に対して損害賠償の訴えを起こした、ということを知人から聞いたことがある。たまたまその事故は、無謀なダンプカーにぶつけられたためであって、タクシーの運転手も重傷を負った気の毒な事件であるが、乗客の遺族にしてみればなんともあきらめかねることからの訴えであったのである。

飛騨川バス事故の乗客の遺族も同様の感情であったと思われるが、国に対して訴えたということが、前の(7)でも触れた住民の権利意識と無関係ではない。国が賠償の責任を持つためには、国側に過失がなければ成立しない。

い、天災であることも認めながら道路管理者側にも過失あり、とした判決は、技術者の立場になって考えてみれば、なんともいいようのない不名誉を押しつけられた感情を抱く。そして、これは安全対策に努力する技術者にとってマイナスに作用するヒューマンファクターにならないかと恐れるのである。

(10) 人間の役割りとその限界

事故や災害の直接原因の中に、人が誤って動作や思い違いをしたことによるものも多い。仮に原因が天災であったとしても、天災を予測しなかった無知があるわけであるし、悪意や犯罪的な行動や幼児の無知によるいたずらであっても、そこまで深く考慮していなかった、ということの責任が考えられるから、こじつけようとするれば全部人災に原因を見つけることができる。

一方、大きな事故を未然に防ぐ行動も、危機一髪で危険から回避する動作も、人間でなければならないことがあるから、安全対策における人間の役割りを十分に考える必要がある。そして、これを工学的に考えるならば、材料における強度の限界や、装置の性能と同様に、人間としての能力の限界を認識したうえで適切な使用方法が必要になる。

まず、人間の肉体的、物理的な限界を知ることが大切である。身体の数値に合わない器具や装置は余計な負担を操作のときに必要とするから、健康や衛生の管理上不都合である。しかし、逆に非常に危険な操作を伴うものは、子供が簡単に手に触れないようにしたり、少々の乱暴な扱いに耐えるようにすることは必要である。人間は機械ではないから、疲労の回復に必要な時間の、適正な配分も必要である。仮に、どのように急を要する仕事であっても、安全を確認するための時間的な余裕が見込まれていなければ、安全の対策が役に立たないこともある。

時間の要素が人間の行動と密接にかかわり合っている事例は非常に多い。高速道路を走行するときの車間距離が、時速 100 km/h であれば 100 m 以上の間隔を取れということの理由は、ブレーキを踏んでも停止までに 5~60 m ぐらい走って止まる、ということと同時に、人間の眼が危険を察知して行動に移るまでに、わずかでも時間の遅れを伴い、その間に相当の距離を移動するからである。

速度の早い新幹線や、ジェット航空機になると、次第に人間の判断が物理的生理的に間に合わなくなってくる。人間の訓練によって、危険を回避するような行動を手際よくできるようにすることは、ある限度まで可能であるにしても、神わざ的な熟練を要することを期待することは誤っている。巧遅よりも拙速を高く評価する風習があるが、これは安全を至上の目的とする立場からみ

れば迷惑な話である。

分秒単位の危険と安全との判断に比べて、もう少し長い単位での時間的な要素を必要とするものには、計画や設計の段階のときに、十分な検討のできる余裕を持たせることがあげられよう。設計時のミスとか、感違いに起因する事故や破壊は、もし作業を急がなければ発見できたであろう検討の省略によることが多い。ということは、事故や破壊を発生させる背景を改善しなければならない。

人間の熟練や経験は安全を確保するのにきわめて重要な働きをするが、よく考えてみるがよい。これには時間の積み重ねが必要であることがわかる。年令、経験年数、航空機の場合には搭乗回数など、いずれも時間の客観的な尺度に使用されている。しかしながら、どの線をもって初心者であり、どこからベテランであるかの区別は相対的なものである。ベテランは、初心者に比べて心理的な余裕があるというものの、安全確保のための基本的な手順、手続き、操作をベテランといえども省略することは許されない。もし、熟練者になってはじめて安全に信頼がおけるならば、初心者が熟練するまでの間の危険を放置することになる。つまり、初心者、ベテランの区別なく、安全確保の手段は具体的でなければならない。

定められた規則に忠実であること、几帳面であること、場合によっては融通のきかないくらいに自分の職務に忠実であること、このような性質の人に信頼がおけるのは1つの常識である。しかし、人間には感情の波があり、肉体的な条件の差があり、早い話、その職業に適さない場合も少なくない。最近では人権問題がむずかしいこともあって、不適格と判断された人が十分に納得するとは限らないし、規則を厳しく守らせることは管理されるということで反発感をもつというわけで、人事管理の面での複雑な人間模様を織りなしている。

人間は感情の動物であるから、事故のうちのいくつかは、あきらかに事故を起こした本人に原因のある場合がある。以下に示す例は、リーダーズダイジェスト誌(1947.6月号)「君に事故癖ありや」(ローレンス・ゴルトン)からの引用である。

第1の例。ある大工場に5年間勤めたある女子従業員は、年間平均16回の怪我をした。特別に調査研究したところ、当人も短気な性質だが、父親もまけず劣らずかんしゃく持ちで、年中娘と父親と衝突していた。そこで会社の方でその従業員に、怪我の原因はそのような家庭環境に基づく感情の乱れに原因があるかもしれない、と話して聞かせた。本人は思い切って、自分だけ別のアパートに引越したところ、その後は1度も怪我をしなくなった。

第2の例。ある会社に勤めていた男は、肉体的に欠点

はなかったが事故を重ねていた。しかし、彼の頭を悩ましていたのは、高利の借金であった。これも、会社が適切な処置をして解決して以来、彼の事故はなくなった。

タクシー会社や運送会社などでも、その本人だけ奇妙に事故が多い、という事例を聞くことが多い。ある特定の人が普通以上に事故を起こしやすい性質を持っていることを証明する資料は少なくとも1929年頃から集められはじめたといわれている。日本においても自動車運転免許の条件に精神病理学的な診断書を必要とした一時期があったが、世論の不評をあびて中止されてしまった。

感情の乱れは、先天的な性格によるものもあるが、失恋、借金、恐怖、不幸、などで普通人でも一時的になることがある。潜在意識下で絶えず作用している原因があって、本人は忘れていたが子供のときの異常な経験が深層心理に作用していることもある。この原因を見つけるには、優れた精神病理学者に診断してもらうのがよいが、どんな些細なトラブルであっても、それを好意的に解釈して資料に積み上げれば、大きな事故を起こす前に適切な処置がとれることが多い。このためには、事故を起こした当事者に対して、まるで罪人を見るような扱いをすることや、過失の追求だけに敵しい態度をとる習慣を改めねばならない。というのは、事故を起こしてはならない、という強迫観念が、かえって悪い結果を引き続いて起こす引き金になるものだからである。

さて、人間の方には責任が薄く、機械や装置の方がどうも工合がよくない、ということが原因となる事故もある。たとえば、これは事故とはいえないが、子供が時計の読み方を習得するまでの長い期間、1時50分を2時50分や11時10分と読むことが多い。われわれの実験においても、メータの読み間違いは年中起こす。航空機の墜落事故の原因にも、高度計の読み間違いによるものがあった。原因は、パイロットが高度計を見誤って、1万2000フィートと思っていたが、実は2千フィートしかなかったからといわれている。つまり、1万フィートの目盛りが読みにくかったのである。

錯覚を起こしやすい表現方法は、説明文などにもよくある。何度読んでも意味がわからない、という類の文章もあるし、法律の条文は説明してもらわないとわからないことが多い。運転免許の試験に出てくる学科試験の文章は、まるでクイズである。機械の操作を説明する文章の中には、あきらかに手順が前後して書いてあるのがある。たとえば、「操作ボタンAを押して下さい。ただしその前にスイッチBが入っているのを確かめて下さい」というのがある。たしかに論理的には誤りがないにしても、間違えた人をせめるよりも、間違いやすいということのほうがずっと罪つくりである。

人間は機械とは異なって、人間特有の生理的機能と関連づける研究をしなければわからない面も少なからずあ

る。人間工学的な分析は興味があるが、最近では環境医学という分野でも多くの研究がなされている。たとえば高速運転をする運転者の動体視力の低下や、加速度を受ける場合に頭を急に動かすと三半器管が錯覚を起こす、といった事実を、安全対策のさいに考えるようになっていく。現実には交通安全のテキストなどには人間の生理的能力という章を設けているほどである。

ところで、いままで説明したことは、人間を個別に考えていた。人間の集団は、個々の人間の性質とは異なることが当然考えられる。人間の集団と安全とのかかわり合いを組織的に研究した例を筆者は知らないが、集団までいかなくて、2人以上の人間の組み合わせと安全とのかかわり合いに限ってみても、国鉄の列車運転手の2人乗務と1人乗務との安全比較が論争を引き起こしたように、内容は複雑である。

教育においても、個人レッスンと集団で教育するのは異質である。1クラスの定員が何人であるのが適正規模であるとか、バス、電車の安全定員の根拠とか、ずっと広く考えれば、都市の適正規模についても安全の考え方からの見方がありそうである。人間の組織構成においても、機能麻痺を起こさない、いわば安全であるための検討が必要であるが、これには体系的な見方を必要とする。

人間の集団そのもの、つまり群衆であるが、群衆であることによって考えねばならない人間の行動がある。興奮した群衆が押し合いへし合いして、圧死者を出した悲劇は、弥彦神社の事故、皇居参賀者の事故が有名であるが、人気歌手のファンの殺到で怪我人が出たという事例もよく聞く。新潟の万代橋では橋の高欄を押し倒し、多くの人が信濃川に転落した。

関東大震災のときの朝鮮人虐殺事件は、異常事態のときの人間行動の恐ろしさの例として引き合いに出される。もし関東大震災の規模の地震が現代の東京を襲ったならば、大混乱になるであろうと心配はするものの、具体的な対策はむずかしい。しかし、大きな災害に直面すると、人間は比較的冷静に行動できて、異常なパニックは起きない、という事例も多く報告されている。しかしながら、その場合においても適切な情報が流されていることによるとされている。

もし群衆であっても、個人個人が自制心を持ち、平常心を失わないならば、群衆心理は生まれない。付和雷同、弥次馬根性、人の尻馬に乗る、おだてにすぐ乗る、流行に敏感、孤独に対する恐怖、などなど、いくつかの要因はあるが、決定的なことは普段の教育や訓練があれば冷静に行動できるとされている。

個人ではなかなか勇気が必要であっても、集団になることで、いわゆる連帯感に酔い、少々無理なことも通そう、という、いわば祭りの喧嘩みこしの乱暴さも群衆

の行動にある。大学紛争のさいの大衆団交や、ストライキの騒ぎのときの、一部の過激な行動などはそのような面がある。そして、このような行動を見る見方に、もっと心理学的な分析があってよいようにみえる。これを治安とか、取り締まりの立場からだけとらえるのも片手落ちのように思われる。

人間は感情の動物でもあるから、精神活動の好・不調は人間的なミスが発生に影響があるし、ストライキ、サボタージュ、意識的な妨害、言語の障害、人種問題など、あらゆる要素がはいってくる。広い意味で、これらは安全の環境ともいえる。日本は長い間単一言語、単一民族で過ごしていたこともあって、われわれの生活習慣では常識であることが、より広い視野に立つとき不都合になる例も非常に多い。たとえば、言語の相違は、仮にどのように詳細に記述されていても、読めなければ役に立たない。工場や作業場で、安全標語が書かれているが、この習慣は日本を離れたら役に立たない。絵や記号、漫画、色による区別などは、適切に計画されていれば非常に効果がある。万国共通の交通標識は、言語を超越している。同じような理由になるが、精神主義、大和魂、なせば成る、などの精神訓話は、具体的な安全の裏づけを伴わないと第三者から眺めれば不思議に見える。事故の責任を精神のたるみだと非難するのは、やはり情緒的であって、具体的な説得力を持っていない。

精神の集中力や感情の起伏が安全と密接にかかわり合いをもつのは、それが生命と直接に結びつく場合や、競争や闘争、ひいては戦争などの異常の状態であることが多く、平常時に精神の高揚を要求して安全を期待するのは基本的に誤っている。ただし、人間には精神的にも肉体的にも周期的なリズムがあるから、水泳の前の準備体操のようなウォーミングアップの目的に沿うものは理にかなっている。

精神の集中を長時間持続させる必要のある機械的操作では、適度の休養と刺激が必要である。これは広い意味で考えたリクリエーションや週5日制、フレックスタイム制、職場の環境の整備、BGM（バックグラウンドミュージック）など多くの試みがされている。ただし、これらが作業の能率という面でなく、安全の目的であることを願いたいものである。

(11) 監視と信頼

安全を達成させるには、教育と訓練とが必要であることはこの章の最初にも触れておいたが、その目的とするところは、表面には現われていない背景を理解させるのにも必要である。たとえば、自動車のブレーキ操作を十分に体得するには、ブレーキの構造や機能を知っておくことが大切である。もしその装置が不調になったとして、それを警告するランプやメータがあれば、不調がす

ぐにわかる。原理的にはこの方法はよいが、装置が複雑になってくると、ランプやメータの数がふえて、それを確認する操作や動作が大きな労力を占めるようになってくる。

古い昔の自動車では、メータの数はそれほど多くはなかった。機械の操作は人間の五感を頼りに行なっていたから、よい意味で、人間と機械とがなじんでいた。自動車が大衆化するとともに、一般の人が、従来扱えなかった高級な機械に手が届くようになったが、面白いことに、航空機のコックピットのように、たくさんの計器や操作レバーのついたものを扱うことに、一種の専門家気取りの満足感を覚えるようになってきている。しかし、もう少し専門に徹してくると、必要最少限のメータ類以外をなくした、サッパリした形を望むようになると同時に、各部を信頼のおけるように完全に整備することで安全を確保するようになる。

似たような事例は、自動制御を導入した初期の工場やプラントに見られたし、家庭のステレオやテレビにも見られる。最初の頃は、操作の種類が多いことが高級であるような自己満足を与えていたが、そのうち必要最少限のもの以外は表面に現われないようになって、全体として信頼性を上げるようになってきている。

ここで注意しなければならないことがある。それは、一見して簡単で無駄がないように見える合理化は、一度あらゆる複雑なシステムを経験したうえで、高度な専門的知識のうえに乗っていることであって、途中の過程を知らなければ理解できないことも多い。しかし、教育と訓練によって専門家を養成するような場合、すでに完成された合理的なシステムに合わせて行なうことが起こる。途中の個別の内容は、いわばブラックボックスであって、なにもわからない。本人の意志に無関係に、途中になにかの誤りが発生しても、その本人は理解することができない。

この問題は、設計業務においても最近深刻な課題になってきている。設計という作業は、従来、設計者が順を追って確めながら行なうものであったが、コンピュータの普及によって、面倒な手続きなしに、条件が与えられれば結果が出てしまう。つまり、設計の途中がブラックボックス化したわけである。ということは、最初からコンピュータを使用して設計することを教育された技術者は、はたして専門に詳しい技術者といえるであろうか。つまり、システムが高度化、合理化するにつれて、専門の幅も厚みも、個別に小さく細分化され、互いに相手の内容を知ることが困難になってくる。そこで、全体を見わたす職分として、システムエンジニアが要望されるとともに、個々の細部ごとの信頼性の向上が必要になるわけである。また、仮に誤りが発生しても、それが危険にならないような、二重、三重の FAIL SAFE のシステ

ムが必要になる。

ところで、いま述べたシステム・エンジニアであるが、土木工学においても例外ではなく、土木工学全般を見わたして判断のできる技術者の要望が高くなっている。広い専門分野に万遍なく知識を持ち、全体を総合的に、システムのとりえらえることの必要性は、特に計画の段階で必要である。したがって、土木計画の分野が世間一般から要望され、大学教育においても、この面が期待されているのであるが、この方面の技術者の育成は進んでいない。

人間社会の組織において、監視体制をあらゆる個所に配置し、強力に統制することは安全対策のうえで望ましいことには違いない。しかし、監視している情報を常時中央に集めていたのでは大変である。異常な状態のとき、次から次にはいってくる異常の警報のため、どれに対応してよいかの判断ができなくて、適切な処置の時間を空費することも多い。

現代のように社会が高度にいりこんでいるとき、どこかの不都合の解決を急ぐため、苦情を最高責任者にもち込むことが多い。たとえば、会社では社長であり、国では政府の最高責任者が首脳に上がる。しかし、前に説明したように、コントロールが強力であればあるほど、また情報が多くなればなるほど、結果的には最高責任者は具体的な対策を取ることができない。その理由はいくつかあるが、1 個所の対症療法を施すと、どこかのシステムに支障をきたすからで、連鎖的に次つぎと処理することに追い込まれるからである。

官公庁の機構は、この面からみると非常に合理的であるようにみえても、異常に対する対応にきわめて反応はにぶい。小さな市や町程度の規模では、システムの規模が小さいこともあって、市長にすべての情報が集中しても弾力的な判断が可能になる。行政府の長、たとえば知事や市長には、従来行政の専門家が就任するのが普通であった。それはいわば、システムの内容を知ったうえでシステム・エンジニアと考えてもよい。しかしながら、最近では知事や市長が選挙で選ばれることもあって、早い話が初心者がいきなりベテランの椅子に座することも稀ではなくなった。当然のことながら、もし初心者にすべての専門情報の判断をさせていれば、たちまちのうちに機能麻痺を起こしてしまう。つまり、信頼のおけるシステムが不必要な監視の情報をカットするように動くことで、システムがバランスを取って動作する。

日本に民主制度が持ち込まれて、実はまだそれほど年月は経っていない。行政の組織や役所の機構は、第三者が悪口をいうほどひどくもないのであるが、一般の庶民から見れば、ブラックボックスのようなものである。電子計算機のように、使い方が適正であれば問題がないが、誤った命令は受けつけない。つまり役所的なのであ

る。庶民の立場からみると、ちょうどブレーキの構造を説明してもらって納得するように、一度は必ず行政組織や役所の機構をくまなく調べて監視することを希望するものである。いわゆる市民の参加がこれにあたる。

しかしながら、複雑なシステムにたくさんのパイロットランプや制御がついていることが混乱の源となるように、しだいに合理的な方法を探しだし、各部署ごとの信頼のおける活動を期待するようになる。常にこのように進むとは限らないが、民主主義社会が健全に育つのはシステムの考えれば時間がかかるものだといえよう。

さきほどの説明にも述べたように、仮にテレビのタレントが知事や市長に当選しても、行政のコントロールが麻痺しないようにするには、逆に考えれば、全体のシステムが信頼のおける自己補償形でなければならない。いい換えれば、役所の機構が、より強力なものになっていて、多少のミスジャッジで混乱することがないようにする。これは知事や市長がよく話をしているように、国をはじめとした行政の壁が厚く、知事や市長の権限で自由になる範囲が限られている、ということと無縁ではな

い。民主主義が定着すればするほど、役所の機構はしだいにシステムのみにれば信頼性の高いものが必要になってくる。

人間の組織においても、信頼性を高めることは監視が強力になることと同じである。システムの管理者が素人で、システムの内容に暗ければ人間社会の組織では、当然のことながら不満の源になる。政治家に対する不満や不評の原因の1つは、彼らにシステムエンジニア的な教養を期待しているにもかかわらず、そこら中の制御ボタンを操作したがることに素人くささを感じていることにありそうである。

航空機のパイロットになるには教育と訓練とを必要とするが、複雑なシステムの細部にわたって専門的に詳しいとは限らない。機長になるには、その職分にふさわしい教育や訓練があるわけである。知事や市長などに限らず、社長や工場長などのようにシステムの責任者になる職務には、帝王学とまでいかなくとも、なにかの教育が考えられよう。それと同時に専門に対する相互の尊敬と信頼とが育つことが必要になる。(つづく)

(12) 検査と処置

検査と監視とは安全を確保するために取られる行動を示す言葉であるが、その現われ方は幾分かちがっている。監視のほうは、動作が進行中で、刻々の状態を観察したり試験したりすることを意味している。英語でいうモニターである。検査のほうは、動作の始まる前とか、終わった後のような停止状態、もしくは正常な動作を行なわせる前の試運転などの状態で、異常の有無を調べるときに使われる言葉である。しかし、監視は、広い意味で検査に含まれると考えてよい。

一口に検査といっても種々の内容があるが、ここでは安全を確かめるための検査に限るとしよう。そして、その検査は、原則として実際のまま、もしくは実際に近い状態で確かめるのが正しいのである。つまり、やってみなければわからないのである。構造物の安全性の検査も同様のことがいえて、最も正しい判断は、設計荷重を作用させて破壊しないことを確かめるのが理にかなっている。しかし、この方法はいつでも可能であるとは限らない。体力検査をして、急に走らせたために心臓マヒを起こすこともある。検査の方法が適切でないと、検査したために装置をダメにした例も少なくないのである。構造物を破壊させないで検査をしようすることを非破壊検査 (Non-Destructive Testing) というが、この具体的な方法には種々ある。これについては後の章で補足することにしてしよう。

さて、検査を行なって、正常と判断された場合はよいとして、好ましくないと判断された場合にどうすればよいのか。つまり、逆に考えてみるとよい。検査して、何もしなければ、そもそも検査は無意味であるから、何かの処置を前提に検査する必要がある。ただし、研究が目的であるならば、検査の結果を対策に反映させなくても

よい場合がある。検査は、その結果次第で、修理、補修、取り替え、変更、中止、停止、などのように、相当に大きな処置を伴う。構造物が完成した後での完工検査で、その構造物が安全上好ましくない、と判断された場合、その及ぼす影響は深刻である。検査は、このように非情な面をも持つが、それを放置することによって、生ずるおそれのある危険に比べれば、ずっとましである。

検査は、あらかじめ定められた許容値、基準、標準と比較したうえで是非を決定する。これはシステムの動作の途中に設けられた関門や関所であって、そこで必ず論理的な判断を必要とする。設計において、断面を仮定して応力を計算し、許容応力と比較する作業は、実は最も基本的な検査の手法である。もし不都合であれば、修正操作を施して、再び同じ作業を繰り返す。これを流れ図に描くと、図-1 のようになる。

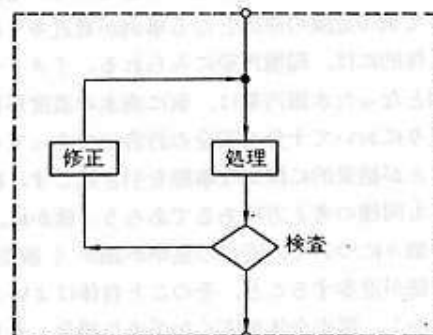


図-1

この図は、点線内を1つの独立なシステムと考えると、1つのフィードバック回路を持ち、一種の自己補償形のシステムを形造っている。

幾つかの検査項目を含む場合、そのシステム構成はいろいろと考えられている。チェック・リストによる照合は並列の検査方法であって、一通り全部検査してどれか

• 名古屋大学工学部助教授

1つでも不合格であると次の処理に進めない。直列の検査システムは、1つ1つを確実にパスして次に移る。抽象的な説明であるけれども、例は幾らでもある。大学生の試験と進級の判定は並列で、会社内での決済について、係長、課長、部長とサインを必要とする流れは直列である。役所に提出する書類が不備で突き返されるのは、多くの場合並列のチェックに引っ掛かるのであるが、説明が不十分で不親切であると、何度も書き直しになる。これは直列のチェックになっている。

安全を確かめるための検査が、全体でどのようにシステム化されているかを知ることは大切である。安全についての制約や基準が互いに矛盾するものがあっては混乱のもとになる。しかし、最も重要なことは、個別の検査がすべて合格であったとしても、全体で総合的に判断してはたして安全であるか否かである。

構造物の崩壊事故においても、全体での安全性の検査が盲点になって起こった事例が非常に多い。よく起こることは、部分部分の柱などで座屈に対して十分に検討した設計が、全体の構造系でみると不安定になっている、というものである。具体的な事例については構造物の各論にはいったところで説明したい。

細かい部分ごとに安全性を検討すると同時に、あるまとまりごとの全体の安全性の検討は非常に重要である。会社や企業での管理の機構が、部・課・係という区切りごとの検査を持つのは、段階的により大きいループでの検査をする機構と考えることもできる。検査部門が独立の権限を持って全体の動静をながめることがある。官公庁などの経理には会計検査院が眼を光らしているが、これもいわば大きいループでの検査を代表するものであろう。

個々ではほとんど取るに足らないことであっても、集中化によって別の危険の原因となる事例が最近多くなっている。具体的には、環境汚染にみられる。イタイタイ病の原因となった水銀汚染は、仮に廃水の濃度が薄くて、その限りにおいて十分の安全の許容値であっても、量の多いことが結果的に深刻な事態を引き起こす。都市の過密化にも同様の考え方はあるであろう。確かに、建物や道路の個々について、安全の基準が細かく検討され、設計方法が進歩すること、そのこと自体はよいことである。しかし、都市全体を広くながめた場合、もしくは全地球的な規模でながめた場合、安全についてはたして十分であるかの検査と、それに対応する処置のフィードバックが安全対策の最も重要な論点になる。

大きなシステムで考える安全は、実は非常に小さな個別の安全を検査する小規模のフィードバックのループから始めて、ループの輪を段階的に広げるように網の目をかぶせるのがよい。これは一種の経験的な知識である。この問題を数学的に取り扱う理論は、実は信頼性理論と

してシステム機器の設計には実用されている。この考え方をさらに一般的に拡張して、安全という問題に応用しよう、という研究や考え方はまだ育っていない。しかしながら、手探りではあるが、その方法を模索する動きはでている。

その1つの現われは、適正規模という考え方である。また数学的には、必要十分条件とでもいえるものである。たとえば、われわれの生活空間としての住居は、どの程度が適当な規模であるか、を考えてみる。小人数家族で、部屋数の多い住宅も住みにくいし、大家族で小さいアパートは困る。ただし、これを物理的に1人あたり4.5畳が適当な規模である、と決めることも検査項目として必ずしも適当とは思えない。またさらに大きい規模として、家族単位の集合は町や団地などであるが、これにもおのずから適正な規模は考えられる。さらに広げて、都市という立場でみたとき、団地そのものがどのように理想的な集団であったとしても、それが都市機能からみて、必要十分条件を満たしているか否かは別問題である。

この問題に取り組むとき、最初の出発点である住居というものの適正規模の検査を外してしまうとする。それは結果的には、都市の過密化やスラム化の遠因になるであろうし、仮に都市全体を考えた大きな規則を含む検査のループをもってしても、よい解決を望むべくもない。

図-1のような基本的なフィードバックを持つシステムでは、検査と処置とをきわめて弾力的に処理することができ。しかし、少し複雑になると、システムの機能は、このシステムの組み立て方によって機能の能率に大きな差が出てくる。この方面の研究が、つまりシステムズアナリシスといわれ、オペレーションズ・リサーチをはじめ多くの最近の計画科学の課題になっているものである。

しかしながら、このシステムズアナリシスの無批判的な導入は、主として経済性や能率という面に重きを置いて考えられることが多く、システムの巨大化や能率の向上、単価の引き下げなどに利用されることがしばしばである。いわば、大きいことはよいことだ、という神話を生み、適正規模の考え方を育てることにならなかった。

安全という立場からシステムを見直してみると、何かの不都合や事故がみつかった場合、弾力的な対応の取れないシステムは、もはやシステムとしての名に値しない。最近では下火になったものの、数年前の大学紛争は、大学の機能をマヒさせたが、これは、いみじくも大学がシステムの的にはなはだ機能的でないことを世間一般に知らせることになった。大学の規模の適正さはどこにあるかという議論はついぞ現われることはなかった。予算とか制度上の制約というフィードバックでなしに、研究や教育の面でのフィードバックが大学内でみられな

いのは、大学人の1人として筆者は悲しく思っている。

さて、土木の分野では、古代から多くの巨大プロジェクトと関係がある。エジプトのピラミッドや、中国の万里の長城、日本では仁徳天皇の陵などにみられるように、現代の感覚で考えれば、けた外れの巨大な工事である。近世、現代においても、形を変えた巨大なプロジェクトが幾つも行なわれている。最近までの目玉商品の代表的なものは、黒部ダム、東名・名神高速道路、新幹線、若戸吊橋、関門吊橋というところであろうか。

しかし、よくよく考えてみると、これらのプロジェクトは新幹線を除けば、ほとんど外国に例のあった、いわば輸入の技術であることに注目する必要がある。ダムにおいてはTVA、高速道路ではアウトバーン、吊橋ではアメリカの金門橋が、それぞれ御手本である。日本人の発想によって計画され、実施された成果ではないことに注意しなければならない。今でこそモータリゼーションの時代であって、自動車の運転がほとんど常識にまでなっているが、名神高速道路の建設の当初では、自動車の運転のできる道路技術者がほとんどいなかったのである。

これは、安全という見方からすれば、何を意味するかである。つまり、これらの巨大プロジェクトは、それ以前にあった幾つかの必然の結果生まれた計画から段階的に発生したものではなく、われわれの生活空間の中に、ある日突然現われた、非常に異質なものである。

高速道路を例とすれば、もしわれわれの町中にある道路が、いかにあるのが安全上理想であるかのイメージがすでにあって、その延長上に高速道路の計画が理想の極値として生まれたのであれば、高速道路は、もっと異なった形になったかもしれない。

多くの巨大プロジェクトは、その計画がより規模の小さい計画の、段階的な拡大の極限として計画されないことによる矛盾を多く抱えている。この悲劇の最大のものは、検査によって判明した不都合さを適切に処理できる弾力性を失っているか、もしくは最初から処理の不可能な、フィードバックのないシステムになっていることである。環境の破壊は、まさに、この後者によって引き起こされている。巨大プロジェクトの計画者は、この考えからわかるように、理想を大きくするのはよいとしても、外国の技術の性急な輸入や移植を考える前に、自分の身の回りに根づく計画を拡大する考え方に進むべきであろう。そうでなければ、考え方は独裁者の発想と何の差異もないものとなるであろう。

(13) 異常の場合の救済

台風が襲来して大きな風水害が生じた、地震が発生して各地に被害が生じた、火災が発生した、航空機が墜落した、交通事故が起きた、機械装置が回復不能の事故に

なった、等々、異常になった場合、平常の作業の流れと全く異なった事態になる。もし、そのときの対策が適切に施されていなければ、異常はさらに次の異常を引き起こし、連鎖的に被害が拡大する危険がある。

もし一部のシステムが破壊され、それが全体の崩壊につながるならば、その一部がどのように高度の信頼があるといっても、万に1つの危険を考えなくてはならない。その場合の対策には、次の3通りの方法が考えられる。

(1) 同じ機能を果たすものを2重もしくは3重にして並列システムにしておく。

(2) 異常のときに即応できるシステムをあらかじめ組み立てておく。

(3) 異常のときに、それに対応するシステムを応急に編成する。

第1番目の安全対策は、ごくありふれた方法である。たとえば、部屋の照明に、電球を2つ以上使っておけば、1個が切れても全体が暗くならない。その間に十分の修理ができる。2つよりも3つがより安全であり、多いほうが統計的によい理屈であるが、多ければまた別の問題、たとえば経済性がからんでくる。何重にしておくのが最適か、という判断はむずかしいが、幾つかの例を説明しておこう。

コンクリートの強度は、3本の試験体の平均値を採用する。リベット継手では、少なくとも3本のリベットを使用しなければならない。洋上を航行する航空機は、エンジン3基以上のものでないかと許されない。自動車のブレーキには独立な2系統が必要である。

全く同じものを2つ以上並列にするのではなく、機能として並列であるのは幾らもある。たとえば、測定において、原理の異なる2種以上の測定を行なうことは、測定の正しさを相互に確かめ合うのに必要である。測定装置の計画においても、1台の高級機を購入するよりも、できるだけ2台以上にしておくようにすると、故障のときにあわてなくてよい。アメリカのNASAがアポロ計画を実行した際の複数システムの基本は3であったといわれている。乗員が3名、各種の装置は2重の自動システムに加えて、手動があるので、原理的には3重になっている。コンピューターは2組みあるが、人間の頭脳を加えて3になっている。

2重にするか3重にするか、それとも、もっと多重にするかを合理的に決定する理論はほとんどないに等しい。つまり、安全のために予備を設けるのが2重で、念のためもう1つというのが3重である。仮に、いくら多重の安全を計画しても、個々のものがそれぞれ信頼性が高くなければ、役に立たないのは明らかであろう。

次に、2番目の安全対策であるが、これは1番目と似ているところもある。つまり、平常のときは別の仕事

か、任務についていて、異常のときに主役に取って替る。人間の場合には、正副 2 人の長が勤務したり、停電になった場合の非常電源装置などはこれである。筆者の研究室では測定器の電源に交流の 100V、200V、バッテリー電源、電池電源の 3 通りに対応できる態勢で臨むことが多い。

会社や企業体の組織では、部長、課長、係長のように命令の伝達や情報の流れがシステム化されているが、本人が不在であった場合の代行者の権限を定めておかないと、本人が何かの故障になったときの混乱が大きい。工場や作業所では、安全管理のための連絡方法や処置をあらかじめ決めておくのは異常のときのシステム構成を定めておくことである。

一方、消防署や、とかく問題となっている自衛隊や機動隊は、最初から異常の場合だけ出動することを目的として編成されているシステムということができる。

構造物の場合、破壊する寸前になって有効に動作するような部材の設計には、幾つかの例がある。鉄筋コンクリートの引張り鉄筋は、むしろこの作用である。というのは、通常の鉄筋コンクリート構造では、引張り側のコンクリートにはほとんどき裂は生じていないからである。また、柱の帯鉄筋やらせん鉄筋にも同様の目的がある。座屈防止のための補剛材やストラットなどは、ある程度の変形が生じない限り応力は無視できるほど小さいものである。

地震のときにけたが落橋しないように、支点上で隣接するけたをつなぐ部材は、落橋する寸前にならなければ効いてこない。また、橋の支承では、コンクリートとの接触面に凸形のヘソをつけているし、支点の浮き上がりの防止の構造などを持っているのは日本の橋りょう技術の大きな特徴である。

3 番目の対策は、むしろ事故の災害が起こった後で作られるシステムである。むしろ、あらかじめこのような異常を想定して、その場合のシステム構成を考えておかねばならない。災害対策本部とか、事故調査班のような臨時編成のシステムは、他の部分を犠牲にして当面の処理を行なうのであり、先の 2 番目の対策とは少し趣きが異なっている。野球でいえば、ヒットを打たれた後で、自分の持ち場を離れてカバーに回るようなものと考えればよい。

いま会社や企業体において、非常に機能的、かつ能率的にシステムが組み立てられていた場合、応急対策のために人員を割く必要があるとする。このとき、本来のシステムが多少の能率低下になるのはやむをえないとしても、そのシステムがマヒを起こすことになれば、それは基本的にそのシステム構成が誤っている。官公庁などの組織は、一般に定められた職務があるので、何か別の職務が割り込むのは混乱のもとになるし、また機能的に処

理できない。「すぐやる課」という愉快な名称の機動的な部署が非常に好評であるのは弾力的な活動ができるからであるが、応急対策のシステムを構成する考え方としてよい参考になる。

☆ ☆ ☆ ☆

安全というのは、つまるところ、最後の判断が人間に任される。安全の対策も人間の判断による。事故や破壊が起きなかったのは、その対策が成功したことである。しかし、だからといって、その対策を進めた人に世間が高い評価を与えるとは限らない。むしろ、対策に失敗した事例を研究し、それに鋭い評論を加える人のほうが世間の注目するところとなりやすい。安全を公平に評価するには、自由で相互に相手の立場になって考える信頼のある人間関係が必要になってくる。そして、そのことまではこの文の範囲を越えることではある。

さて、次章からは、ずっと専門的な力学的な面から、安全性について論を進めていくことにしたい。

《参考資料》その 1

以下に示した参考文献は、リーダーズダイジェスト誌に集録されていた読物の中から、事故とか安全に関係のあるものを抜粋した目録である。実は筆者の思い違いかも知れないが、「安全第一」という標語、英語でいう Safety The First を最初に誰が言い出したか、の物語りがあったように思う。結局、その記事は発見できなかったが、安全に関連のある豊富な読物を探すことができた。

目録は、英文誌と邦訳誌との両方の出典を記しておいた。リーダーズダイジェスト誌はいわば抄訳誌であるから、記事の原本がもちろん別にあるが、日本の図書館では利用できないものが大部分である。また、リーダーズダイジェスト誌そのものも普通の図書館では保存の対象から外されていることが多い。したがって、この目録の調査は、日本リーダーズダイジェスト社の図書室のお世話になったものである。ここに記して感謝したい。

A. 地震

1. Earthquake at Messina ; Wayne F. Palmer Aug '48
メシーナの地震 ; ウェイン F. パーマー Sep. '48 p. 20-24
2. Those Awesome Explosions Called Earthquakes ; Ira Wolfert Sep. '58 p.144-149
地震という暴れもの ; アイラ・ウォルファート Nov. '58 p. 21-27
3. When The Earthquakes Struck Chile , James H. Winchester Dec. '60 p. 246-250
大地震がチリを襲ったとき ; ジェームズ H. ウィンチェスター Feb. '61 p. 134-137

4. The Miracle of Skopje ; Leland Stowe
スコピエの奇跡 ; リーランド・ストー Apr. '66
p. 48-55
 5. Earthquake! The Horror That Hit Pern ; Joseph
P. Blank Oct. '70 p. 77-83
戦慄のペルネ大地震 ; ジョセフ・ブランク Nov.
'70 p. 43-52
 6. Will be Able to Predict Earthquakes ; George
A. W. Boehm
地震は予知できるか? (力武常治あとがき) ; ジ
ョージ A. W. ボーム Oct. '68 p. 35-43
- B. ダム災害**
1. The Dam with Feet of Clay ; William F. French
Apr. '51 p. 97-100
大ダム決壊の悲劇 ; ウィリアム F. フレンチ
Jun. '51 p. 145-149
 2. Super Dams : The Perils of Progress ; Claire
Sterling Jul. '72 p. 95-98
大ダムに思われ欠陥 ; クレア・スターリング
Sep. '72 p. 61-66
- C. 流土・雪崩**
1. Quicksand-Nature's Terrifying Death Trap ;
Max Gunther Dec. '64 p. 140-144
流砂-自然界の恐ろしい死のわな ; マックス・ガ
ンサー Dec. '65 p. 71-77
 2. The Night the Mountain Fell ; Gordon Gaskill
May. '65 p. 59-67
山つなみの襲ったあの夜 ; ゴードン・ギアスキル
Aug. '65 p. 45-58
 3. Avalanche! ; Edwin Muller Dec. '50 p. 108-110
雪崩! ; エドウィン・ミュラー (デンヴァーポス
トより要約) Feb. '51 p. 87-92
 4. Beware of Avalanche ; James H. Winchester
Mar. '71
これが雪崩だ ; ジェームズ・ウィンチェスター
Mar. '71 p. 41-49
- D. 橋梁・鉄塔**
1. The Epic Human Story of Brooklyn-Bridge ;
Edwin Muller Jan. '48 p. 75-80
ブルックリン橋にまつわる雄壮な人間物語 ; エド
ウィン・ミュラー Mar. '48 p. 53-59
 2. The Bridge That Guido Built ; Maria Chiap-
PELLI, George Kent Nov. '52 p. 70-72
渡し守が独力で造った鉄橋 ; マリア・キャペ
リ, ジョージ・ケント Jan. '53 p. 82-86
 3. Biggest Bridge Ever-The Verrazano-Narrows
Bridge— ; John W. Frazier Nov. '64 p. 266-
270
世界最長の新しい橋—ベラザノ・ナローズ橋— ;
ジョン W. フレージャー Feb. '65 p. 152-158
 4. The Day the Great Bridge Fell ; Anthony M.
Paul Aug. '72 p. 86-91
ウェストゲート・ブリッジが落ちた日 ; アンソニ
ー M. ポール Oct. '72 p. 186-194
 5. Monsieur Eiffel and His Wonderful Tower ;
Frederic Sondern. Jr. June '54 p. 119-125
エッフェル塔物語 ; フレデリック・ソンダー
ン Jr. July. '54
- E. 航空機事故**
1. The Death of the Hindenburg ; A. A. Hoehling
Dec. '56
ヒンデンブルグ号の劇的な最期 ; A. A. ヘー
リング Mar. '57 p. 58-63
 2. Supersleuths of the Skyways ; Blake Clark Oct.
'52 p. 35-39
安全な空の交通を求めて ; ブレイク・クラーク
Sep. '54 p. 25-30
 3. The Case of the Exploding Comets ; George
Kent May '55 p. 131-135
コメット機墜落の原因をつきとめる ; ジョー
ジ・ケント Jul. '55 p. 94-100
- F. 船舶火災・爆発, 海難**
1. The Great Iron Ship ; James Dugan Feb. '54
大鉄船のロマンス ; ジェームズ・デューガン
Apr. '54 p. 141-175
 2. The Titanic is Unsinable ; Hanson W. Bald-
win Mar. '34
タイタニック号は沈まず ; ハンソン・ボールドウ
ィン Oct. '46 p. 49-55
 3. A Night to Remember ; Walter Lord Jan. '56
巨船タイタニック号の沈んだ夜 ; ウォルター・ロ
ード Mar. '56 p. 139-178
 4. Disaster at Texas City ; Morris Markey Jan. '51
p. 38-40
テキサス市の大惨事 ; モリス・マーキー Mar.
'51 p. 11-13
 5. Death in the East River ; Victor Boesen, Fair-
fax Downey Oct. '54 p. 117-119
遊覧船で死んだ一千人 ; ヴィクター・ボーゼン,
フェアファックス・ダウニー Dec. '54 p. 71-75
 6. Disaster in Bombay Harbor ; Jhon Ennis Apr.
'58 p. 173-180
ボンベイ港内の大爆発惨事 ; ジョン・エニス
Jun. '53 p. 113-118
 7. What Really Happened to the Thresher ; Robert
Gannon May. '64 p. 111-116

- スレッシャー沈没の真相; ロバート・ギャノン
Jun. '64 p. 34-41
8. Trouble off Bergen Point! ; Thomas Gallagher
Aug. '71 p. 58-62
ニューヨーク港があぶない! (オイル・タンカー
爆発事故); トマス・ギャラガー Oct. '71 p.
210-217
9. Must Ship be Built to Barn? ; Poal W. Kear-
ney Feb. '50
なぜ燃える船を造るのか? ; ポール W. カーニー
Jul. '50 p.53-58
10. They Remembered the Birkenhead ; Keith Mon-
roe Aug. '54 p. 83-86
海難に会ったら; キース・モンロー Oct. '54 p.
76-81
11. How Soon, the Next Ship Disaster? ; Howard
Whitman Jun. '57 p. 73-78
次の沈没事故はいつ起る; ハワード・ホイットマ
ン Aug. '57 p. 36-45
- G. 海洋構造物
1. Tragedy on Tower Four ; Evan M. Wylie Apr.
'62 p. 94-102
海に吞まれた人工レーダー島の悲劇; イワン M.
ウィリー June. '62
2. Holocaust on Platform B ; Joseph P. Blank
Nov. '71 p. 80-84
B油井炎上す; ジョセフ P. ブランク Jan. '72
p. 156-164
- H. 大気汚染
1. The Great London Fog ; Edwin Muller May.
'53 p. 25-28
四千人を殺したロンドン空前の霧; エドウィン・
ミュラー Jul. '53 p. 63-68
- I. 安全性, その他
1. Are You Accident-Prone? ; Lawrence Galton
Apr. '47 p.103-105
君に事故癖ありや? ; ローレンス・ゴールトン
June '47 p. 35-37
2. Are Machines Getting Smarter Than Men? ;
U. S. News & World Report May '64 p. 122
-124
機械は人間より利口か? ; U. S. ニューズアンド
ワールドレポートより要約 Jul. '64 p.56-60
3. TÜV, The Consience of The West German
Technology ; Stanley Englehardt
TÜV-西ドイツ工業技術の良心; スタンレー・エ
ングルバード Jul. '71 p. 83-88
4. Just How Safe Is a Nuclear Power Plant? ;
James N. Miller Jun. '72 p. 95-100
本当に安全か, 原子力発電; ジェームス・N. ミ
ラー Aug. '72 p. 109-123
5. How People Really Behave When Disaster St-
rikes ; E. L. Quarantelli' Russell R. Dynes p.
130-132
災害と人間の行動; E. L. クァランテーリ, ラッ
セル・R. ダインズ Sep. '72 p. 145-148
6. When the Grain Elevator Exploded ; Norman
Spray Apr. '61 p. 93-98
穀物倉庫が爆発したとき (粉体爆発); ノーマン・
スプレー Jun. '61 p. 103-109

〔IV〕 破壊と安全率とのかかわり合い

（１） 破壊の定義と認識

物が壊れるということは、どのような状態をいうのか、と聞き直されると、これが随分あいまいであることに気付く。物理的な感覚では、ガラスの破壊のように、一体となった物が形を崩すような現象をいうが、抽象的な言葉づかいとして、機能が回復できない故障におちいった場合にもいっている。たとえば生活の破壊、環境の破壊、などである。ガラスや瀬戸物の食器が壊れるのと、鉄棒が曲がるのと、粘土細工をつぶすのとでは、質的にも異なった現象である。腐食や変質などの化学変化や、結晶、分子、原子の単位まで考えたミクロの内部構造の変化も、破壊現象というものと関連がある。

破壊は一種の非可逆的な現象を指すが、材料科学の分野では、変形が元にもどらない現象を指している。変形が元にもどらなくて、新しい別の状態になっても、必ずしも全体の破壊に結びつかないことも多い。構造物の破壊は、部分の材料や部材の破壊が一原因となって、全体の構造物の社会的な機能が失われる現象と考えることができる。したがって、その構造物に与えられている機能に支障を来すような非可逆的な変形が生ずることをもって、破壊と定めることになる。

針金やロープを引張って切断する現象は、誰の目にも明瞭な破壊を示す。しかし、細かいことをいうならば、切断する兆候が現われた時点が、その材料の機能的な破壊であって、破断はそれによって生じた２次的な現象であることに注意しなければならない。崩壊という言葉は、実は結果論的な破壊現象を指すことになる。構造物の崩壊に対する安全と、材料や部材の破壊の安全とは考え方に大きな差があることがわかる。

* 名古屋大学工学部助教授

仮に構造物の構成要素の細部において、応力が小さく抑えられていても、部材の構成が不安定であることは構造物の崩壊になる。また逆に、部材の局部で過大な応力が作用していても、構造物として健全である例はいくらかもある。つまり、構造物の安全というのは、材料の合理的な使い方と、その組み合わせの結果得られるもので、個別の材料の破壊の安全と１対１で関連しているのではない。

構造物の構成要素である部材、もしくは材料が、非可逆的な変形を起こさない限度を知ることは、基本的に大切なことである。これを材料の使用限界と呼ぶことにしよう。材料では、鋼材料の降伏点、比例限、弾性限などがこの部類にはいる定義である。この与え方は必ずしも応力の大きさだけで与えるとは限らない。伸びや変形がある大きさになったら使用を中止したり、機械部品などでは一定期間の使用後、新品と交換するなどの考えはこれである。電球の寿命なども、完全に断線する状態ではなく、最初にくらべて光量が、ある一定値に低下した時期をもって１つの限界を設定する。

材料は定められた使用の限界を越えても、ただちに材料の崩壊に進むとは限らない。変形が進むことによって、最初と異なった状態に移行することもある。それが新しい環境になることも少なくない。鉄鋼材料の加工はこの応用であるし、塑性的な土材料では頻繁に見られる。非可逆的な変形に移行しているが、それがまだ致命的な破壊に達していない状態が続き、それが済んで破滅に向かう。もっとも、常にこのようになるとは決まっていない。たとえば、軟鋼の太くて短い柱を圧縮すると、圧縮してつぶれて、だんだんと断面が大きくなって、結果的には耐力がどんどん増加する。したがって、実用的な見地からは、変形がある程度の大きさ以上になれば、その材料は破壊したと定義する必要がある。

構造物の安全を工学的に取り扱うには、まず最初に破

壊の定義を定量的に定めておく必要がある。また、同時に、その材料の破壊に進まない限界を定義することも必要になる。鉄鋼材料では、この2種類は強度と降伏点との2つで与えられている。前者は、その材料の耐え得る最高値であり、後者は非可逆的な変形の起こる始点である。ただし、注目しなければならないことが1つある。それは、鋼の引張り材は、その強度まで耐えることができるが、その強度で破断することを意味しない。破断という現象は、力を加えて引きちぎる過程が必要なのであって、このときに伸びを抑えれば破断を免れる。つまり、破断は崩壊の1つの形であって、破壊に引き続いて生じた別の現象と考えねばならない。

工学的な破壊の定義は、その材料に与えられていた機能が失われる状態と考えるほうが種々の面からみて妥当である。その条件を応力と与えるか、変形と与えるかは場合によって定めればよい。疲労とか、摩耗のように、表面で観察した限りでは致命的な欠点が見つからない場合であっても、それを放置して結果的に崩壊に結びつくものであれば、定量的な限界を定めて、そこを破壊と定義することが許されよう。

この定義に従うならば、材料は破壊した後でも、いくらかの余力を持っていて、崩壊という取り返しのつかない別の状態にはまだ達していない。もし、この時点で適切な処置がとられれば、その材料を含む全体のシステムの安全対策上、きわめて効果的である。この、システムの考え方が設計の基本的な背景というものである。つまり、強度だけに注目し、どのように高い安全率を選ぼうとも、安全率の高いことが必ずしも全体からみれば安全と結びつかない。そこを工夫することが設計の重要な思想というものであろう。

破壊と崩壊とを区別して考えるならば、構造物の設計において、かなり重要な方針決定を行なうことができる。それは、構造物は、その部材や構成要素を含めて、絶対に崩壊してはならない、という使命を持たせる必要があるが、必ずしも絶対に破壊してはならない、という使命を持たせなくてもよい。破壊することもあると認めることによって、維持、補修、交換、修理、監視などの考えを必然とするのである。もし、いかなる場合にも破壊しない、ことを設計の基本的な仮定に取り入れるならば、どのように高い安全率を提案したとしても、すべての人に納得できる説明は与えられない。

(2) 設計理論と破壊のモデル

構造物を安全に設計することの最も基本的な態度は、実物を作って、実際に破壊させてみて、その知識をもとに破壊しない範囲で使用するすることである。紙の上でどのように詳細に検討を加えて設計したとしても、実物は実物固有の強さを持ち、理論の予測と一致するとは限らな

い。構造物のように巨大な品物では、実物強度試験をやたらにたためることができない。したがって、個々の細部の材料の破壊の性質をもとに、全体の構造物の安全を保証できるような方法を研究する必要がある。これが、そもそも設計理論とか、設計法とか呼ばれる考え方の基本である。

実物でたためることができたならば、その破壊までの性質が既にわかっていると考えてよい。言い換えれば、どの状態になったら破壊と判断してよいかの約束なり定義なりを定めておくことができるから、使用の限度を定める判断はむしろ利用者の好みに左右される。安全率をどの程度に定めたらよいかを決定するのは、この場合むしろ経済性の立場から考えられることが多い。

一般に、同じような品物が数多く作られる場合、当然のことながら品物にムラができる。つまり、破壊の強さには統計的なばらつきができる。平均的な強さを基準に考えれば、その強さに達する前に半数が破壊してしまう。したがって、使用の限度は平均の強さより低めに抑えるのがよく、ここに安全率の考えが生まれるのである。

さて、問題は構造物である。多種類の材料が組み合わせられ、使われ方も一様ではない。構造物の中の局部で材料が部分的に破壊したとしても、構造物として健全である例がいくつもある。たとえば、コンクリートに細かなきれつがはいること多いし、鋼材料では部分的に降伏しているような応力状態が各所にある。構造物が崩壊してしまうのはまさに極限での話である。したがって構造物の崩壊のきっかけになるような変形の増加や部分での部材の破壊があったときをもって、その構造物の破壊を定義するか、約束する必要に迫られる。設計の出発はここである。そして、想定する破壊の成り行きを破壊のモデルと名づけることにしよう。

最も初歩的であり、かつ基本的な破壊のモデルは、破壊までの途中の経過を抜きにして、終局の最高強度だけを注目する考え方である。この考えに基づく設計には立派な名称、極限設計という呼び方がついていて、現実にはコンクリートの柱の設計などに応用されている。ところで、この考え方によれば、想定する最高強度の定め方に幾分あいまいさがある。鋼材料では応力が降伏点に達すると変形が元にもどらない非可逆的な挙動を示すから、設計上の最高強度をこの降伏点で考えるが、材料の一部が降伏点に達したからといって、構造物がこの時点で崩壊することにならないことが多いのである。

構造物に構成されている全体を考えて、破壊するまでの途中の経過を追跡してみると、個々の構成要素である材料の破壊モデルと幾分異なった性質がみられる。これは材料自身の破壊モデルと、その組み合わせ方法や寸法とに関係する問題である。

できるだけ現実に使用される寸法に近い部材を使って強度試験をすることの意義は、この節の最初に述べたように理論の予測が必ずしも現実と一致しないからである。しかし、常に実物試験が可能ではないから、材料の性質をもとに理論的に部材や構造物の破壊モデルを予測する必要に迫られる。この場合、材料の破壊モデルとして、弾性範囲と塑性範囲とを含めた広い見方が必要になる。これがつまり塑性設計法の基本的な考え方である。

なるべく実物に近い寸法の部材を使って強度試験をし、それを根拠にして設計しようという考え方の代表的な例は圧縮材の座屈を考えた許容応力がある。座屈現象には、オイラーの古典理論がある。それゆえにこの理論を拡張して、あらゆる材料に応用できるような統一理論を探ることが構造力学の研究者の長年の研究課題であった。しかし、どのように精密に観察しても、予測された理論式と実際の柱の挙動とは一致すべくもない。そもそも理論式に乗るような法則性のないことこそ現実の姿なのであるということが最近では次第に認識されるようになってきている。

そこで、実験の事実をもとに、なるべく使いやすい破壊の式（つまり、これが破壊のモデルである）を求めて設計に利用しようという考えに移ってきている。ただし困ったことも出てくるのである。というのは、提案された設計方法は、あくまでも実験の対象となった部材と条件が同じ場合の破壊モデルであって、その考えを拡張することは思想として矛盾する。面倒なことに、条件が異なればそのたびごとに設計式が変わるというやっかいなことになってしまう。そして、仮に一部の実験が可能であったにしても、構造物のすべての要素について破壊モデルが求められることは望めない。また組み合わせられた全体の構造系の破壊モデルも推定の域を越えるものではない。

つまり、設計という作業は、構成要素の持つ固有の性質を組み合わせ、全体でつり合いの取れた安全性を持たせる技術である。組み合わせが悪ければもちろん破壊につながる。

材料や構造物の破壊モデルを求めるには、実験による説明こそが基本的な態度であるが、その研究方法には大別すると2通りの進め方がある。第1の方法は、およそ考えられる条件をすべて変数と考え、片っ端から実験によってデータを取り、得られた結果から法則性を見つけ出す方法であって、いわばしらみつぶしに調べる。その昔、性病の薬に606号というのがあったが、これは606番目の組み合わせの薬品がヒットしたという意味で使われたが、よくも組織的に辛抱強く数多い実験をしたものだ、と感心したことを覚えている。

もう少し能率的にやるには、あらかじめ予測を立てて、その近所を重点的に調べるのである。理論的に予測

された性質と実験とが近似していると、実験の効率がよい。これが第2の方法である。どちらの方法がよいか、を一概には断定できない。というのは、もし、あらかじめ予測を立てたり、先入観を持ってしまうと、重要な性質が隠されていて、見過してしまうおそれがある。新しい発見はしらみつぶしに調べる方法が適しているからでもある。

あらゆる実験上の要因を考え、それを変数にして組み合わせを考えれば、その数はたちまちのうちに天文学的な数になってしまう。そこで、どのようにすれば効率的な実験ができるかの手法の研究が必要になる。これは実験計画法と呼ばれている。また条件を整理することがパラメータの数を減らすことにつながるから、試験方法の標準化が必要になるのである。

具体的な例はコンクリート材料の試験がまさにこの方法を応用している。コンクリートの性質は、材料の選択から始まって、配合、練り混ぜ、打ち込み、養生、硬化、を経て強度が発現するまでの過程に、何と多くの要因があるかを数えてみるとよい。そして、あらゆる問題について、すべて莫大な量の実験の裏付けで説明がされているのを確かめてみると驚くほかはない。

日本のコンクリート工学の進歩は、吉田徳次郎（敬称略）に負うところが大きい。その研究に対する態度は事実上のみ立脚するという基本的な研究方法であった。ただし、ハイカラ趣味の研究者からみれば、理論的な背景が少なく、泥くさくみえるが、実験による裏付けの持つ重みは素晴らしい説得力を持っている。コンクリートに限らず、江崎ダイオードで有名になったトンネル効果の発見においても、莫大な量の実験の中での法則性の発見であるわけで、最初から紙と鉛筆での思考からは生まれてこない。

一度誰かが法則性を見つけ出した後では、先に説明した第2の研究方法が効果的であるし、労力が少なくすむ。従来の日本の研究者は、欧米で行なわれた研究を追試する形で実験することが多かったため、実験を盲目的に積み上げる、という努力をいっくら軽く見る風習がある。設計という業務の最も基本的な態度が、事実の積み上げのうえに立つべきだという原則を忘れ、理論のうえだけで安全性を吟味する技術を研究するのは誤っている。

（3）荷重の意味

構造物を安全に設計するには、それに先立つ計画の段階で考えねばならぬいくつかの評価があるが、そのことを抜きにして、純粋に技術的な問題として構造物の設計が課題として与えられた場合、寸法その他の条件とともに、荷重が指定される。ところで、荷重という概念は、いみじくも危険を数量化したものにはかならないのであ

る。

常識的な考えでは、荷重は物の重さである。しかし、構造物の設計においては、構造物に応力や変形を起こさせる外的な要因をすべて荷重という概念に含ませるのである。橋の上を通行する自動車や列車のようなもの、自動車上の積荷などは荷重として抵抗感はない。しかし、構造物自体の重量を扱う場合には、構造物本体の骨組みには重さがなくて、自分の重量が荷重として骨組みに作用するのだと考えるのである。

風の影響、気温の影響、地震の取り扱い、衝撃の作用、集団となったときの人間の破壊力、などのように危険の要因となるもので、荷重に換算できるものはすべて荷重として与える（風荷重、雪荷重、高欄などに作用させる水平荷重など）。また、危険を割増しにして考えるように、比率を与えることもある。たとえば地震の影響は震度を与えるが、これは自重に乗ずる比率を定めたものであり、衝撃は移動荷重に乗ずる比率を与える。温度の影響は、間接的に構造物に力を発生させるという意味で危険の要因であり、広い意味に考えた荷重に含まれるとしてよい。

危険の予測を誤った、つまり荷重として考えなかったか、考えていても過少な評価しかしていなかった、という原因による構造物の破壊には、ある歴史的な事故がからんでいることが多い。とりわけ有名な事件は、風荷重の認識を呼び起こした、Tay 河橋の落橋（1877）である。その当時まで風が静荷重として大きな力を与える、ということはあまり深くも考えられていなかった。この事故をきっかけに、水流や気流の中に置かれた物体の受ける力について多くの学者や技術者が研究を始めたのである。

風荷重がわれわれの設計概念の中で、何の違和感もなく受け入れられている、その歴史的な背景には、強風の観測の積み重ね、物体の形によって異なる風力の影響の測定、風洞の開発と、それを利用する研究設備の工夫などの研究があったのである。パリのエッフェル塔で有名なエッフェル（G. Eiffel 1832-1923）は構造物設計の技術者であるが、同時にエッフェル形風洞の考案者であって、風洞を使用した多くの研究がある。また彼はアメリカの自由の女神像の設計者でもあることを知っていてよい。

さて、危険の予測といっても、すべてが荷重の形に置き換えられるとは限らない。温度の影響はその代表的なものであるが、最近の問題には振動がある。風による振動、地震による振動、自動車が通行することによる振動は、やはり一種の危険な要因であるが、いままでのわれわれの設計思想では処理できない、新しい概念なのである。例として風の動的な作用を示そう。

1940 年、当時世界第 3 位の長支間の吊橋であった Tacoma 吊橋が、風にあおられて落橋した。その当時には、風力についてすでに十分な認識があったので、風荷重は設計のときに考慮されていた。しかし、Tacoma 吊橋を振動させ、落橋させるような危険な力が風にあるとは夢にも考えられなかったのである。つまり、風荷重には相違ないが、その荷重の大きさや、それをどのような形で設計に反映させたらよいのか、皆目方針が定まらないのである。

この困惑は現在でも続いている。実験による研究、理論に基づく提案などは数多くなされているが、設計という技術的な課題に、便利で使いやすい考え方はまだ生まれていない。

(4) 寸法効果と相似性

設計という作業は、いわば使う材料とその寸法とを定めることと考えてよい。材料の性質を知ること、その材料がどのような破壊モデルを持つかを知ることと同じである。材料の重さは前節にも触れたが、荷重のほうに考えている。そのため、非常に初歩的な錯誤を柱の設計で冒すことがある。つまり、柱に作用する軸力だけを注目して、柱自身に重量があることを忘れる失敗をみたことがある。

材料の破壊のモデルは、最善が実物の実験で得られるものであるが、寸法の小さい試験片や試験体、もしくは模型などで得られた破壊モデルが使われる。当然のことながら、部分で得られた知識を全体に拡張することの是非が問題になる。これを寸法効果と呼ぶことにする。たとえば、コンクリートの強度を試験する標準の供試体 ($\phi 15 \times 30$) と相似のものを同じコンクリートで製作して試験すると、寸法の小さいほうが見掛けの強度が大きいし、同じ材質の鋼板の引張り強さにおいても板厚の小さいほうが大きい強度を示すのである。

寸法効果を考えて設計することの具体的な例は圧縮力を受ける部材の許容応力の考え方である。部材の長さ、部材の回転半径とから計算した細長比が、寸法効果を考えに入れるパラメータである。後の節でも説明するが、橋の上を走行する車両の衝撃を与える衝撃率の実用式には、橋の長さをパラ

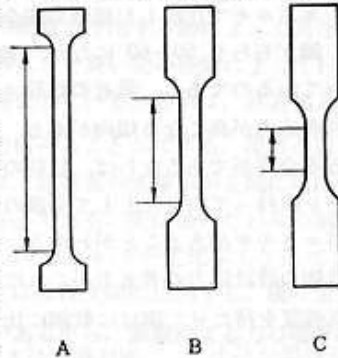


図-1

名古屋大学工学部助教授

メータに含んでいる。弾性学や材料力学で扱う理論では、変形が微小であるという仮定のもとに理論と実際とが相似であると考えているから、寸法が変わると破壊の性質が変わることは混乱の元になる。

寸法の大小が、そのまま破壊の性質に関係を持つ最も基本的な例を、図-1 に示すような引張り部材の破壊について示そう。部材 A, B, C は、いずれも最小断面の断面積は同じであり、静的な引張り強さはまったく同じである。しかし、引張り材として有効な部分の長さは、A, B, C の順に短くなっている。もし、強度だけを考えれば、A, B, C に優劣はないはずであるが、耐久性を考えると A が最も永持ちするのである。

この理由は、部材 A, B, C のそれぞれが、破壊するまでにどれだけのエネルギーを吸収できるかを比較すればわかる。つまり種々の荷重条件にさらされていれば、衝撃的な大きい応力が作用することもあるが、エネルギーの吸収能力の小さい部材は、小さい衝撃エネルギーで破壊されるからである。

図-1 の例では誤解される面がなくもないが、要するに、部材 (応力に有効な) の長さが長いほど破壊されにくい。つまり、経済性を考えて材料を節約することは耐久性の面では劣る、という常識的な経験を説明できるのである。引張り部材では特にこの性質が重要である。プレストレスコンクリートにおける PC 鋼線は長さを長く使うほうが成功するし、ワイヤーケーブルも長めに使うほうが信頼が置ける。

応力だけに注目し、破壊のエネルギー

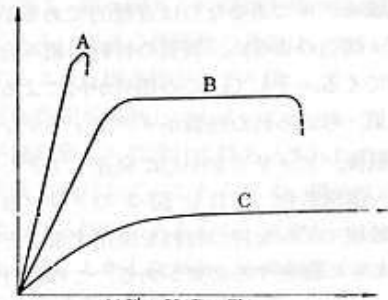


図-2 材料の破壊モデル

ギについて考慮を欠いたために生じた失敗の例には高張力ボルトの開発がある。高張力ボルトは、銅板の継手部分に従来使用されていたリベットに代わるものとして使用されるようになってきた。大きい締め付け力をボルトで与えれば、摩擦によって接合面のすべりが止められ、効率のよい継手が得られる。強度の高いボルトが要望されたのは人情であろうが、残念なことにあまりにもボルトの長さが短い、おまけに強度が高いものほど、伸びの性能が悪く、破壊に要するエネルギーが小さい。そのため高張力ボルトの破損事故が一時期頻発したのである。

この事故のさい、高張力ボルトの破損上の欠陥などを調査もしたが、本質的な問題は応力ではなく、破壊のエネルギーにあることに注意しなければならない。そしてボルトで効率よく締めつけたいならば、長いボルトを使えという常識的な結論が得られた教訓であった。

(5) 伸び性能 (ダクティリティ)

構造物の安全性には、材料の強度だけに注目することは正しくない。破壊するまでのエネルギーを考えることも大切であるのは前節でも触れた。ただしそこでの説明は同じ材料で長さ (寸法) を大きくすることがエネルギーの吸収能力を増す、という見方で説明した。材質が異なれば、エネルギーの吸収能力にも差がある。そこで、材料そのものの破壊までの性質 (破壊のモデル) が問題になるのである。

構造物を構成する材料の破壊モデルとして代表的なものは、図-2 に示すような3種類である。Aは脆性材料といわれ、コンクリートや石材で代表される。Bは軟鋼に代表される性質で、降伏点を1つの限界値として持つ材料である。Cは土や粘土に代表されるような塑性体である。構造物は大きなり小なり、この3種の材料が組み合わさって構成されているから、これらの材料が、いずれも破壊に対して同等の責任を持つような使い方をしたい。

材料が耐え得る最高の応力を目安にする考えは設計において最も基本的な考え方である。つまり、ある安全率を考えて、最高の応力をこの安全率で割った値を許容応力にすればよい。しかし、これは、材料がすべて同一の破壊モデルであるならば合理的であるが、鉄筋コンクリート構造のように、異質の材料の組み合わせでは疑問が出てくる。そして、この相異が何によるものかの模索の結果、考えられた性質がダクティリティなのである。

戦後、アメリカを中心に発達してきた塑性設計方法は、鋼構造物、それも図-2のグラフBで示されるような破壊モデルを持つ材料を使用することを前提にしていることに注意する必要がある。この設計思想を盲信して、破壊モデルの異なるコンクリート構造に適用することは正しくない。そして、この意味での教訓を与えた破

壊の事例が、十勝沖地震での鉄筋コンクリート校舎の崩壊と、サンフェルナンド地震時のいくつかのコンクリート構造物の崩壊である。ダクティリティの認識は、この破壊を1つのきっかけにしているのは事実である。

ところで、コンクリート材料は、どんなに製造のときに工夫をこらしたとしても、鋼材料のような良好な塑性変形能力を持たせることはできない。構造を工夫して、どこかにエネルギーの吸収が可能であるような、クッション部材を設けることも真剣に研究されている。しかし、この問題の正しいとらえ方は、むしろ破壊のエネルギーに根拠を持つほうがよいのである。これは、従来、最高応力と許容応力との比だけでとらえていた安全率の概念を、許容応力下での弾性エネルギーと、その材料の破壊に要するエネルギーとの比で考えてみるとよい。

脆性材料においては、塑性伸びがほとんど無視できるとすると、エネルギーの比で考えた安全率は、応力の比で与えられた安全率の2乗で与えられる。仮に従来の安全率が3であれば、エネルギーで考えた脆性材料の安全率は9ということである。軟鋼は、許容応力を降伏点の1/2で使うことが多いが、破壊時の伸びが20%もあるので、エネルギーで考えた安全率は、なんと130くらいになる (図-3)。

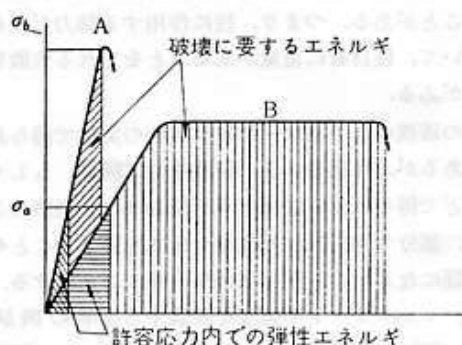


図-3

ところで、古典的な鉄筋コンクリートの設計方法によれば、コンクリートの許容応力は圧縮強さの1/7~1/8程度である。その当時の鉄筋は伸びも大きくなかったから、エネルギーで比較した破壊の安全率は、コンクリート、鋼どちらも50~60になり、実にうまくつり合いが取れているのである。最近の鉄筋コンクリート構造物では許容応力が高くなる傾向がある。仮に従来の考え方による安全率があるのであれば、鉄筋の許容応力を降伏点スレスレに持っていったとしても鋼のほうにはまだ十分の余裕エネルギーがあることがわかる。これはプレストレス構造物の設計応力の考え方がこれにちかい。

高強度を持たせた鋼材は軟鋼に比べると相対的に塑性伸びの部分が小さい。弾性範囲が大きいから、破壊するまでの変形は大きい。破壊モデルは塑性材料にちかくなる。高張力鋼材と軟鋼との組み合わせの構造物ではダ

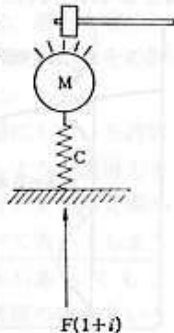
クティリティーを合わせるような適正な許容応力の決め方がむずかしいし、構造的に材料を組み合わせる方法（ハイブリッド構造という）も模索の段階にある。

最近、建設時期だけの仮設建造物の安全率を検討する機会があったが、普通の鋼構造の安全率に比べて、ワイヤケーブルの安全率が7とか10のように際立って高いことが不相応ではないか、という論議がでた。確かに破断の応力で検討すれば過大にみえるが、ケーブルの素線の破壊モデルが図-2のAのような性質であることを考えてみると、必ずしも不当に高いとはいえないという見方になるのである。

（6） 衝撃率とたわみ制限との関係

自動車の乗り心地は、軟かいばねのついた車がいち、積み荷が重いと相対的にクッションがよくなることは誰でも経験的に知っている。この力学的なモデルは、簡単な質点とばねとで構成される振動系に、外から衝撃の運動量（力ではない）を作用させたもので考えることができる。

衝撃のエネルギーは頂点にある初速を与え、これがばねの作用によって、ある程度の変形が起こってそれが質点に力を及ぼす。力の大きさは、質量が大きいほど、また、ばねが弱いほど小さくなる。



なぜこのような例をあげるか、というと、この考え方は橋の上を通過する列車や自動車、その他の移動荷重の及ぼす衝撃力の大きさを見積もるとき、基本的な考え方だからである。橋はそれ自身、大きな重量を持っている。程度の差はあるが、たわみやすさも持っている。橋の設計のさいに、橋の上を通行する車両の重量と、その車両が与える衝撃の大きさを、上乗せするような衝撃率の形で与え、静的な荷重に換算するのが便利である。容易にわかるとおり、重量の大きい橋で、たわみやすい橋では衝撃の見積りを小さく考えてよい。

危険の要素を数量化して考えるという見方に立つとき、衝撃の影響はその衝撃が作用する物によって異なるものだといえる。このことを長い間の経験によってわれわれがどのように実用化しているかの例は、鉄道橋と道路橋との衝撃の与え方にみることができる。現行の橋りょうの示方書によれば、活荷重の衝撃率が支間にはほぼ逆比例するような式で与えてある。実は橋のたわみの制限が支間の500～1000分の1という一定比率で与えてあるから、たわみやすさはほぼ支間に比例する。橋の重量は支間の増加に関係があるから、衝撃による力の増分は支間の増加とともに減る。

一方、橋の重量と考えると、鉄道橋は道路橋に比べ

ると、通行する車両の重量が大きい。たわみの制限は鉄道橋のほうが小さいから、許容応力も鉄道橋の規定がより厳しく制限されている。つまり、危険の見積もりの過程が多少異なっているが、応力の最危険状態の予測は、ほぼ同じ結果になっている。

衝撃的な外力を受ける建造物の設計においては、適度なしなやかさを建造物に与えることは望ましい。丈夫さを願うあまり、ガチガチに剛な構造にすると、結果的に衝撃による応力の増加を招来し、もろく、耐久性に劣る場合もある。逆に衝撃に対して甘くしておくと、振動しやすくなるが、これがまた別の問題を引き起こすこともある。

衝撃による危険の見積りに、建造物の寸法の要素を入れて考えるが、このときにたわみの制限の規定と対になっているという取り扱い、設計という技術問題の場においては、きわめて合理的な解決方法である。というのは、たわみやすさ（フレキシビリティ）の度合いは建造物全体の剛性（スティフネス）と1対1の関係にあり、これは建造物の振動性状と同じく1対1で対応するからである。

荷重の見積もりはあるが、たわみの制限を含んでいないため、振動しやすいという苦情は初期の横断歩道橋の設計に多くみられた。また通常の道路橋においても、支間の比較的長いアーチ橋などで、風が吹くと橋が横方向に相当の大きい振動を起こす例を筆者は2、3観察している。

建造物の設計において、危険の見積もり（荷重）と許容応力（これは破壊モデルから導かれたもの）との指定はあるが、フレキシビリティの指定は比較的重要視されていない。しかしながら、直接の指定はないが、設計上の細かな習慣や作法の中に、適正なフレキシビリティを持たせることが隠されていることがある。たとえば、トラスを構成する弦材の長さは、短か過ぎると不経済であるし局部応力や2次応力の問題がある。長いほうは最大の細長比で制限が加えられている。つまり、応力で余裕があるとしても、適当な断面2次モーメントを持たせるように規定されている。

たわみやすさを設計上の重要な注目点に考えるようになった設計方法の例は、霞ヶ関ビルに端緒を持つ超高層ビルの耐震設計である。従来の建築物の常識は、たわみを生じたり振動するような建造物をあまり扱っていない。ところが、居住空間が振動してもよいのだという、考え方の大転換が超高層ビルの設計に持ち込まれたのである。衝撃的な地震力に対して、たわみやすい構造は応力のピーク値を柔らげる作用があるから、適度なフレキシビリティは望ましい。しかしながら、どの程度であれば適度であるかの目安はまだ立てられていない。

一般に、橋の設計を例にすると、たわみ制限を厳しく

すると断面の剛性を増さなければならず、これは重量の増加とともに経済性に劣る。一方、たわみを大きく許容できれば、経済的になるとともに振動しやすくなる。この微妙はかね合いは、結局人間が振動に対して、どの程度の寛容を示すかにかかってくるわけで、新しい意味での危険の見積りの課題になっている。

(7) 疲労の見積り

材料の破壊モデルを仮定する中で、最もむずかしい要素は疲労とか耐久性に関するものである。これらは、時間の要素がからんでくるので、実物試験をやろうにも設計時までに結果が判明しないことも多い。つまり、耐久性の知識は歴史の試練によって得られるわけであるから、過去にある事例を研究するのが最も正しい。しかしながら、設計は疲労や耐久性を量的な概念に置きかえて見積る必要があることから、短期間にデータが得られるような促進試験が考えられる。これが疲労試験や寿命試験と呼ばれるものである。

たびたび説明したように、材料の試験で得られた法則性は、その条件が満足された場合に意義があって、他の条件に適用すると相似性が必ずしも成り立たない。疲労や耐久性のデータはその最も極端な場合であって、実物の破壊事例の中で、これこそ典型的な疲労であると断定できるものを見つけることはまれである。また、外見を眺めただけで、内部的に進行している疲労の度合いを量的に指摘することも不可能にちかい。

材料学的には、疲労はやはり材料の破壊現象である。コンクリートが疲労して、行きついた極限は風化した花崗岩のように砂と砂粒の混合体である。鋼材の場合においても、疲労しきった鋼材は製鋼炉で溶解させて作り直さない限り使いものにならない。古い材料はそれなりに質は低下する。

材料を静的に破壊する場合にも、破壊にはそれ相応のエネルギーを必要とするから、疲労破壊にも同様な破壊エネルギーを必要とするのではなかろうか。これは筆者の仮説であるが、もし破壊に一定量のエネルギーが必要であるならば、周期的にくり返される応力によって、少しずつエネルギーが加えられ、一定の量に達したときに破壊するような破壊モデルが提案できる。それというのも、コンクリートや鋼材の疲労には生物体のような回復機能がないからである。

また、疲労の進んだ材料は一般にもろくなってくる。ぜい性の試験は破壊に要したエネルギーをもって数値化しているから、静的な強さも、疲労強さも、また衝撃強さも同一の基準において考えるには、破壊のエネルギーに注目することが便利であるように見える。この見方に立って疲労試験をまとめた報告を、筆者は残念ながら知らない。

疲労強さには、時間の要素だけでなく、腐食の作用、温度の影響などが複雑にからみ合ってくるが、寸法効果も微妙に影響してくる。多くの実験から得られた経験的事実は、疲労破壊の出発点は、材料のミクロの構造に関係があり、確率的な要素に支配されていることである。ある応力値以下であれば、無限回数の応力のくり返しでも破壊には至らないが、それ以上の応力であれば、材料内部に破壊の核が発生する。くり返しの回数につれその核がふえ、ある限界値に達すると破壊してしまう。

ところで、確率統計的な見地に立って破壊現象をとらえる見方には、最近の信頼性工学が図-5のようなグラフを例示しているのを見受ける。このグラフは、大量に製造されて使用されている電気部品のようなものが、時間の経過とともに発生する故障を統計的に認識するための例図として示されたものである。品物には強度のばら

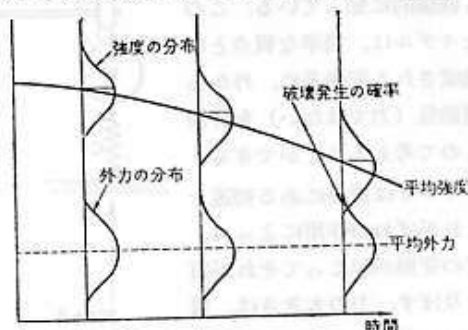


図-5

つきがあり、外力にも統計的なばらつきがあると考えるとき、強度分布と外力分布とのグラフが重なってくると故障がある確率のもとで発生する、という考え方である。

この破壊モデルでは、実は構造物の疲労による破壊を説明するのに少し無理がある。つまり、材料の平均強度が、なぜ時間とともに減少するかには触れていない。強度の低下は疲労の蓄積の結果によるのであるから、たまたま局部的に材料の応力が過大になる事例が確率的に起こる可能性があっても、それはただちに破壊を生ずる可能性を示すことにならない。

材料は、ミクロに観察すれば微細な結晶や粒子の集合であると考えることができるから、個々の粒子の破壊には上述の破壊確率の考えが適用できるかもしれない。しかし、部材の破壊は、個々の粒子の破壊がある一定量になるまで生じない蓄積効果があるから、破壊の発生確率は、故障率を時間的に積み上げたもの、つまり積分された形で考えるほうが妥当である。

鋼材、コンクリートなどの破壊には非可逆性がある。疲労の回復は望めない。しかし、土や粘土などの材料では、材料が乱されても、時間とともに新しい安定状態を作るから、疲労の回復を考えてもよさそうである。すなわち、地盤などの土工事においては、それ以前の荷重の履歴を考慮することなく、常に現在の時点での応力

と変形とを吟味すれば、破壊に対して適切な対策を立てることができるのである。

(8) 信頼性と安全率

構造物の設計を合理的に進めたいという希望は、要するに不必要に過大な安全を持たせることもなく、危険にも片寄らず、経済的に部材の材質や寸法を決定したい、ということと考えてよい。何かの数量的な値でこれが得られれば、安全を客観的にとらえることが可能である。数量化の手法は、危険の数量化(荷重)、危険の見積り(応力計算や解析)、および評価という3段階の過程を通る。

荷重の予測が大き過ぎても小さ過ぎても困る。荷重の作用によって生じる応力や変形は、適当な精密さで求めておくのが最善である。そして、この応力や変形が、材料や構造物の破壊モデルと比較のうえで、適当と定めた許容値にはいることで安全を評価する。従来からその評価の基準は許容応力にのみ依存していた。

しかしながら、応力の大小だけを問題にしている許容応力は必ずしも大多数の人に納得できるような説得力を持たなくなっている。ただし、設計の実務の立場からは許容応力という判断の寄り所をすべて省いてしまうのは正しくないが、何か別の形の安全率があってもよい、と考えている人が多い。信頼性や破壊の確率という考え方が注目されているのはこの面からである。ただし、確率論や統計的手法から得られた結論が、そのまま事象の再現性を保証するものでないことも最初にわきまえておく必要がある。

たとえば、サイコロを振って1の目が出る確率が1/6であるといっても、これは正確に6回目ごとに1の目がでることを保証するものではない。破壊の確率が1%であるということも、同様な意味合いがあっても、もし同じ条件の構造物が数多くつくられるならば、100に1つは破壊するかもしれない、という推定を下している。物は考えようであって、計算上、破壊確率が1%であるものは、2%のものより安全であると考えようとするにすぎない。

というのも、構造物の破壊のメカニズムは相当に複雑であるから、応力がたまたま降伏点を越える部材があっても、ただちに全体の破壊と結びつかないからである。電球の寿命のように、ある日突然切れてしまう、という

ような、明瞭な状況変化で破壊が生じるのはむしろ例外である。

確率論的な手法の出発は、荷重も、また材料の強度もともに限定された常数ではなく、確率論として扱うことにある。これは、いわば光の粒子説と波動説、古典力学と統計力学のように、現象のとらえ方の相違にあるわけで、どちらが正しいとか、合理的であるとかの相互評価はできない。従来、設計において安全率を2とか3として設計した考え方のほかに、信頼性が99%で設計するという考え方もあるというわけである。ただ感覚的には99%の信頼性というものが安全率0.99と誤解されやすいところに判断の混乱が起こるのである。

そもそも、頻繁に荷重が作用する部材と、めったに大きな力が発生しない部材とで、同じ許容応力を考えるのは不経済だ、という感覚がある。これは、橋の場合を例にとると、1等橋、2等橋という橋格が考えられ、荷重のほうを操作している。また主要な荷重と、非常時での応力(たとえば、構造物の架設時期とか、風荷重、地震力など)とが同時に作用するならば、許容応力を割増しして考えてよいことになっている。

そこで、2つの重要な問いかけがでてくるのである。第1は、荷重のほうも、また材料の強さもともに確率量と考えて、両方の性質が生かされ、重要な部材も、2次部材も、ともにほぼ等価な安全性を保てるようにするにはどうするか。第2は、万一の部材の破壊が確率的に0ではないならば、致命的な崩壊を防ぐ対策が評価できるか、である。どちらも問題も、信頼性工学の主要な研究対象であるが、特に後者の対策上の寄り所に関しての研究が今後望まれている。

たとえば、電気でいえばヒューズや警報器のような部材があって、全体の崩壊に先立って、その部材が破壊を予告するような対策ができないものか。また、仮に一部材が突然破壊しても、全体の崩壊につながらないような、部材の組み合わせ方法があるか。さらに危険であると判断された構造物を補強するとして、補強前と補強後の安全性の向上を何によって判断するか、構造物の寿命とか、耐荷力をどのように判定したらよいか。

このような工学的・技術的な問いかけに対して、具体的な解決はまだ与えられていない。筆者は、あらゆる機会に実在の構造物の調査や測定を行なっているが、決定論的な手法はまだ見つかっていない。(つづく)

橋りょうの進歩と破壊の歴史(1)

はじめに

構造物のなかでも、橋は多くの人に親しみをもたれているものはない。それは、多くの人が橋を利用し、橋を眺め、橋を建設することのもつ創造と造形の喜びを、橋を架ける技術者とともにわかち合うからであろう。

一般に、橋は離れた2箇所をつなぐだけの装飾的な構造物ではなく、その上を人や車両が通行する、つまり荷重を支えることに目的がある。このことは橋が力学的に安全であることを至上の使命とするから、結果として力学的に無理のない、無駄の少ない材料の使い方を必然とし、それが優美な造形美をつくりだす。

橋がいかに苛酷な荷重にさらされているかを、一般の人が実感するのはなかなかむずかしい。たとえば鉄道の蒸気機関車1台の重量はD51で約150t、これが空間に支えられている状態を想像してみるとよい。150tの重量は、ダンプカーに荷を満載したものが約10台分、乗用車では約150台、人間ではざっと3000人の重さが空間に浮いている。われわれの生活空間の中で、このような大きい重量を実感としてとらえることはできない。つまり、橋の設計は経験を積み重ねることで進歩したのではなく、力学原理を応用した理論の裏づけを伴って進歩してきたのである。

多くの橋りょう技術者が気にしていることは、紙の上に描かれた図面や計算結果と、それが実現された場合に抱く感覚とが離れ過ぎていることである。そして、歴史的に有名な橋の破壊事故のほとんどは、日常感覚では想像もできない原因によって起こったのである。それも、1つは風によるもの、もう1つは座屈である。橋りょう

★名古屋大学工学部助教授

界では世界の3大落橋事故というものがある。ティ橋、ケベック橋、そしてタコマ橋である。これらの事故は単なる橋の崩壊現象としてみるのではなく、その当時の技術の歴史とも引き比べないと本質的な理解が得られないので、次にこれを説明することにしよう。

(1) ティ橋の落橋

この事故は1879年の12月、最後の日曜日午後7時ごろに起きたのである。イギリスのティ橋は、単線の鉄道橋で、スパン245ft(73m)の背の高いトラス橋が13連あった。設計はトーマス・バウチ(Sir Thomas Bouch)で、当時の金額で35万ポンドの建設費で、事故の1年前に架設され、当時としては技術の成果として注目をあびていたようである。橋は、その上を列車が進行中に橋もろとも下の河に転落したのであるが、誰もその事故をつぶさに観察したわけではない。たまたま落橋の時刻、風が強くなってきたときに、セントフォート駅を列車が出発するのを見送った信号手が、列車のテールランプが橋の上で強風とともにふっと消えてしまったのを目撃しただけであった。

その当時の技術的な背景という点、設計示方書はまだできておらず、風荷重の考え方は1世紀の前の1759年ジョン・スミートン(John Smeaton)が提案した表が参考にされている程度であった。その値といっても最強の風荷重として、 12 lb/ft^2 (59 kg/m^2)の程度である。

トーマス・バウチは、事故の後で風的作用についてはまったく考えもしていなかったと証言したのであるが、事実、橋には対風構も設けられていず、橋自身の横の転倒には 145 kg/m^2 の風荷重にしか耐えられなかったのである。列車が通過することで暴露面積がふえることを考えると、事故当時の風圧に橋が抵抗できなかったことが明らかになった。

もっとも、このような設計上の不備にとどまらず、事

故の1年前、橋が完成した直後から、どうも工合が悪かった。トラス組の主材は錬鉄であるが、橋脚上の柱は鋳鉄であった。施工が悪く、斜材であるタイはゆるんでいて、列車が進行すると騒音を発していた。落橋の直接原因は鋳鉄製のポストとブレイス組のタイが破壊したからであると報告されたが、事故調査報告書を書いたハッチンソン将軍の批評は手厳しいものであった。「この橋は最悪の設計であり、最悪の施工がなされ、最悪の保守管理がされた。落橋は遅かれ早かれ避けられないものであった」。

トーマス・パッチは、この落橋が大きな精神的打撃となって、1年後に死んでいる。

ティ橋の落橋は、橋りょうの発達史からみると1つの大きな転換期である。1891年には鋳鉄製の鉄道橋が落橋した事故が同じくイギリスであり、さきほど名前のでたハッチンソン将軍の事故調査委員会が活躍した。そして橋りょう用には鋳鉄を使わないようにできるだけ錬鉄もしくは鋼を採用するように提案したのである。この提案はすぐに実行に移され、ほとんどの鋳鉄製の鉄道橋が数年以内に架け替えられ、ここに鋳鉄橋の時代が終わるのである。

さて、イギリスの誇る巨大なフォース橋は1890年に完成した鉄道橋であるが、この橋の当初計画には1873年にさきほどのトーマス・パッチの設計が採用され、現実に工事が開始されていたのであるが、ティ橋の事故によって当然のことながらその計画は完全に破算になった。現在のフォース橋はジョン・ファウラーとベンジャミン・ベイカー (John Fowler, Benjamin Baker) の設計になるゲルバー橋である。

この橋の主要な部材の断面は円形である。これはティ橋の落橋を教訓として、なるべく風圧の影響を少なくする配慮にあるのは周知の事実である。もっとも、現代においては、円形の断面が必ずしも風に対して最善であるとはいえなくなってきたが、これについては後で触れることにしたい。

ティ橋の事故がきっかけとなって、風や水流が物体に及ぼす力についての研究が盛んになったのであるが、初期の流体力学の研究は大部分が構造物の技術者が必要としたものがテーマとなっている。風洞を使う研究では、バリのエッフェル塔(1889年)を設計したエッフェルが有名であり、現実に彼の名を冠したエッフェル形風洞が現在でも呼ばれている。風洞を使う研究はその後、航空機の研究に利用されて進歩したが、後に説明する Tacoma 吊橋の落橋を機に、構造物の研究者に利用されるようになって現在に至っている。

(2) ケベック橋の崩壊

橋りょうの歴史のなかで、カナダのケベック橋(1917)

は現在においても世界最大のゲルバー橋(549m 支間)であるとともに、建設のときに2度も大きな事故を起こしたことで有名である。この橋の建設は1904年に開始されたのであるが、最初の計画が支間1600ft(488m)であったのを、当時ニューヨークの著名なコンサルタントエンジニアであるセオドール・クーバ(Theodore Cooper)の助言を入れて支間を1800ftに広げたのである。もちろんこの提案はフォース橋(1700ft)を意識したのであるが、基礎部分の高さが低くなるという現実的な利点にも結びついていて、

設計は変更されたが、部材の強度を増すことは行われなかった。当時クーバは、すでに70歳、健康をそこねていたこともあって、橋の建設現場を1度も訪れることができなかった。しかし工事は順調に進行し、1907年8月には中央の吊げた部分の架設に着手するところまできていた。しかし、中央径間の橋脚に近い下弦圧縮材のウェブに座屈の兆候が現われたのである。もちろん、この時点ではまだ橋が崩壊するには至っていない。もともとこの圧縮材は工場から現地に到着した時点で、すでに19mmの波状の変形がウェブプレートにあったこともあって、とかく問題にはされていた。

クーバーはこの知らせを聞いて、これはたいへんなことだと感じたらしく、ただちに工事を中止してウェブの曲がりを修正すべきだと指示を与えたのであるが、あにはからんや工事はそのまま進み、架設用のクレーンがさらに1パネル進んだころには、ウェブの波状の変形は50mmの高さになってきていた。

悲劇的な崩壊は8月29日の朝発生した。まずアンカーアーム、つまりゲルバーの本体が真中で折れ、次いで橋脚上の主塔は、「まるで氷柱が下から急速にとけるように」崩壊したとこの事故を目撃した人が証言している。86人の作業員の中で11人しか助からなかった。事故調査のためにヘンリー・ホルゲート(Henry Holgate)を委員長とし、ケリー(J. G. G. Kerry)とガルブレイス教授(J. Galbraith)からなる3人委員会が構成され、生き残った作業員から事故のようすを聞き出すことから始まった。

調査の結果わかったことは、圧縮材のリベット添接が部分的にしかリベット打ちがなされていなかったこと、レーシングバーの強度が小さく、座屈の変形を防止できなかったことが直接の原因であることがわかったが、驚くべきことに、この巨大な橋の死荷重の見積もりが小さ過ぎていたし、あまつさえ許容応力も極端に高められていた。もし橋が完成したとしても、予定された複線の鉄道荷重を通すことは不可能だったろう。

ケベック橋の再建については、したがって残存している橋りょう部材を利用することはできず、まったく新しく設計された部材によることとなり、ラルフ・モジエス

キー (Ralph Modjeski) がこの橋の完成までの責任者として指名されたのである。

2番目のケベック橋の架設は順調に進み、1916年5月には中央の吊げた部分の組み立てが橋の約5km下流で始まった。この吊げたはポンツーンで現場に運び、ジャッキシステムで吊り上げようというものである。最初のケベック橋では吊げたの部分もカンチレバー方式で張り出し架設をしていたので架設工法は変わっている。

2度目の崩壊、というよりも吊げた部分の破壊事故は、1916年9月16日に起こっている。この吊上げ工事に先だって、吊げた部分の水上輸送に障害となる気象の観測は継続的に行なわれ、現地にはトロントの気象台から直接通信回線で気象情報が送られてきていた。当日の気象は無風の絶好の条件であった。

早朝から始まったポンツーンからの切り離しによる最初の吊上げ作業は順調に行なった。ただし断っておくが、この吊上げはケーブルを使う方式ではなく、はしご状のリフトをジャッキで押し上げ、ピンで固定し、再びジャッキをもう変えるというものである。

最初の吊上げに気をよくし、後の作業は単なる機械的な作業のくり返しであると考え、ジャッキのもう変えの作業が始まった。この瞬間、吊げたの荷重はジャッキを離れ、一時的に張り出しげたにあずけられるが、事故はこのときに起こった。つまり、あずけた端がすべて外れたのである。吊げたのトラスは使いものにならないほどに変形して水中に没した。

事故の原因の究明については、当然のことながら慎重をきわめた。今度の事故に関しては、直接の原因はわかっているが、吊げたを水平方向に引き出して支持の杓から外すような水平力の起こる可能性がわからなかった。もっともらしい推論は次のようなものである。つまり、ジャッキのもう変えが吊げたの左右で同じ速度でなかったり、左右のハンガの弾性的な伸びが急に開放されるような状態が起こると、支えの部分が急激な上下振動を引き起こす。このほかに、現在では常識となっている死荷重応力による部材の変形の影響を過少に評価していたというのである。また吊げたそのものの設計もかんばしいものではなかった。

吊げたの再建はそれから2年の研究期間において製作されたが、鋼材も許容応力の40%大きいニッケル鋼が採用された。そしてケベック橋の完工は1917年、工事の開始から13年後であった。

ケベック橋の事故は、橋りょう、それも長大橋りょうの建設というものにいくつかの教訓を与えてくれた。その最大のものは座屈現象の恐ろしさであるけれども、もう1つ見逃してはならない事実がある。それはたわみの影響である。

橋は、完成した状態に荷重が作用した時点ではじめて

初期の設計の寸法や形状に落ち着く。架設のときや製作のときはそれを見越して、いわば引きつった状態につくられる。しかし、このようにつくと、初期の架設段階では幾何学的に大きな食い違いが起こって、部材の結合ができないことがある。そのため、部材の結合を仮にしておいて、完成ちかくなって固定しようという架設工法は現実にくらかも行なわれている。ケベック橋の最初の崩壊は、まさにこの部分が発火点になったのである。

ケベック橋の事故の後、橋りょう界では圧縮部材の耐荷力、それも組み立て圧縮材の座屈に関する実験が非常に重要視されてきている。それは溶接が主体になった現在でも変わらないし、製鉄メーカーが製造しているそのまま圧縮材として使用できる大形の形鋼においても同様である。座屈による崩壊が非常に恐れられているのは、この崩壊に関する限り、あきらかに設計の過ちが第1の原因だとして指摘できるからである。

(3) ブルックリン吊橋と潜函病

ニューヨークのブルックリン吊橋の完成は1883年であるが、その架設は親子2代のローブリング父子によって建設された苦闘の記念物である。ジョン・ローブリング (John A. Rohbling) は橋の建設半ばで、破傷風のため死亡し、伴のワシントン・ローブリング (Washington Rohbling) は35歳のときにちんばになった。橋は安全に架設されたが、建設工事の安全に関して2人の技術者が大きな犠牲を払ったという意味で説明をしたい。

ジョン・ローブリングは1831年、25歳でドイツからアメリカに移住した技術者であるが、1842年ワイヤーロープの特許をとったのである。吊橋の歴史のなかで世界最初の鉄道吊橋をナイアガラ峡谷に架設したのもローブリングである。

さて、問題のブルックリン橋の計画であるが、1857年、彼はニューヨークのブルックリン地区を結ぶ支間1600ft (487m) の支間を渡る吊橋工事が可能である、という報告書を作成しているが、実際にその工事に着手できる決定がなされたのは10年後の1867年である。

建設工事の最大の難関は、イーストリバーの河底泥深い所に基礎をつくる工事である。この工事のため、世界で初めてニューマチックケーソンによる工法が計画されたのである。息子のワシントン・ローブリングは、この研究に2年をヨーロッパで費している。1869年、彼の父は測量のときに事故にあい、32歳の息子が、それから苦闘の基礎工事を続行することになった。

100年前のケーソン工事は、今から想像もできない、すさまじい作業であった。ケーソン内での火事騒ぎや、爆発の事故もあったにせよ、工事は少しずつ進んでいき、ケーソンが次第に沈下していった。圧力の高い気圧の中で作業することはまったく新しい経験であったが、

とうとう 1872 年最初の潜函病の犠牲者が出たのである。ワシントン・ローブリング自身も潜函病にやられ、それから一生、回復することができなかった。

ローブリング自身が潜函病の後遺症で健康にすぐれず、工事の資金にも不足をきたしたり、また訴訟ざたが起こったりで、作業は何度か中止されたが、これから彼の妻の大活躍が始まったのである。彼の妻は、現場の技術者とローブリングとの仲介をするうちに次第に専門にくわしくなり、またローブリング自身が彼女に力学をはじめとした専門教育を伝授したこともあって、最後にはほとんど毎日架設現場で指揮をふるったと伝えられている。ローブリングが潜函病に倒れて 10 年を要している。

(4) タコマ吊橋の落橋

タコマ吊橋の落橋ほど、橋の技術者にとって衝撃的なできごとはおそらく今後もほとんど起こり得ないであろう。この事故は 1940 年に起きたのであるが、落橋のありさまが 16 mm フィルムに撮影されたこともあって、現在に至っても鮮烈な印象を与えつづけている。そして多くの研究者がこの吊橋の落橋のメカニズムに興味を示し、多くの発表がなされている。ここでは、この事故に至るまでの歴史的な背景と、その後の吊橋技術の発達という見方でまとめてみようと思う。

タコマ吊橋が架設された 1940 年は、アメリカにおいては、すでに吊橋の建設において円熟した技術が確立されたと考えられていた。というのも、先のブルックリン吊橋の建設までは、吊橋の計算には古典理論が使われていたのであるが、1888 年、メランが吊橋の撓度理論を発表し、古典理論による計算よりも吊橋の補剛げたを軽量にできるようにした。モイセイフは、最初の撓度理論を応用した吊橋をマンハッタンに架設している。

吊橋の支間が急速に広がったのはこの撓度理論のおかげであるが、この方法による計算を応用すると、奇妙なことに補剛げたの剛性（たわみに対する強さ）を減らすほど断面に作用する応力が減る性質がある。吊橋の構造的な形には昔からの定型や習慣があったから、一挙に斬新な設計には進まないが、当時の世界最長吊橋であるゴールデンゲイト橋（1937）などの成功からみて、実際に正しいことが証明されたのである。

タコマ吊橋は、モイセイフの理論に忠実な設計であるが、この橋は補剛げたにトラス構造を使うのをやめて、背の低いプレートガーダを採用したのである。つまり、理論上、このべらべらのガーダでも十分な耐荷力がある。

しかし、この橋は建設工事の初めから、始末の悪い振動をするので、現場の技術者の間では、お転婆娘というようなあだ名をつけられていた。完成してからも、この

吊橋はよく振動するので、ワシントン大学のファーカーソン教授が暇をみては観察していた。落橋の当日も、風が強いというので現地観察をしていたのであるが、午後になって橋の振動は、いままでの上下の振動が急にねじれ振動に変わり、風にはためくりボンをスローモーションで見るように振動し、わずか 19 m/sec の風のなかで崩壊、落橋したのである。

近代的な吊橋が、まさか風にあふられて落橋しようとはほとんど夢想だにしなかったのであるが、実は調べてみると、古い吊橋で、風が原因で落橋した事例がかなりあることがわかったのである。この章の最初にティ橋の落橋が風圧によるものであると説明したが、1940 年の時代では風圧の算定はもちろん常識であって、この種の風力にはほとんどなんの問題もないように設計されていた。しかし、タコマ吊橋を落橋させた風の力はいままでの常識ではなんとも説明のできない現象だったのである。

流体力学の高名な学者であるカルマン (Th. Von Kármán) は物体が風の流れに置かれているとき、その後ろに発生する周期的な渦によるものだ、と説明したが、これでかたづくほど簡単な現象でないことは、実験を試みるとすぐに理解できた。多くの研究者が、吊橋が風を受けて振動する現象を、なんとか理論的に説明したいと努力をしたのであるが、これは具体的な吊橋の設計をするのにきわめて切実な問題だからである。しかし、多くの努力にもかかわらず、吊橋が風を受けて動的に不安定になる現象を統一的に説明する理論はみつかっていない。

理論的な研究はそれでよいとしても、実際に橋を建設する技術者にとって、安全な橋の設計がどうあるべきかを決定する明確な根拠が欲しい。そして、この方法は実験によるもの以外には考えられない。しかしながら、吊橋そのものの実物試験が不可能であることから、模型を使う実験技術が急速に開発されたのである。縮尺 100 分の 1 の吊橋モデルがすっぽりとはいるような大形の風洞が必要になったのはこのためであるが、現在では都市の風の分布を調べるという目的にも大形の風洞が利用されたりしている。

さて、タコマ吊橋がなぜ落ちたかの証明は、この種の風洞による模型実験によって得られたが、それは吊橋断面の形が流体力学的にみて振動しやすいからだとわかった。そして、その後の長大吊橋の設計においては、構造的な計算とともに、吊橋断面が流体力学的に安定であるという風洞実験の裏づけを必要とするようになって現在に至っている。なお、タコマ新橋の完成は 1949 年である。

(つづく) 次号は「最近の橋りょう事故の展望」

橋りょうの進歩と破壊の歴史(2)

(5) 最近の橋りょう事故の展望

大きな橋りょうが落橋するような事故は幸いなことに最近はなくなったけれども、中規模の橋が架設中に落橋した事例が、この数年欧米において目立った。もちろん、日本においても、大きな声ではいえないが、と前置きされて、いくつかの失敗を聞かされることが存外少なくないのである。事故の中には、橋りょう技術と直接結びつくものでない、いわゆる管理・運営の不備に基づくものが非常に多い。その典型的な事例として、ウエストゲート橋の架設中の落橋がある。

ウエストゲート橋はオーストラリアのメルボルンに建設されていた、全長2490mの8車線道路橋である。事故が起きたのは1970年10月15日午前11時50分。死者が35人も出た。落橋したのは支間120mの巨大な箱げた部分であるが、直接の落橋原因はなんともお粗末極まりないことにあったのである。

橋げたの架設は、地上で上下の本線それぞれを支える2本の箱げたを独立に組み立て、それぞれを橋脚上に引き上げた後で左右のけたをボルトで横につないで一体にしようと計画された。ところが、組み立ててみると左右のけたは支間中央で11.5cmものたわみ差が出てしまって、横につなぐことなどではしなかった。困った現場の技術者は、手っ取り早い方法を考えついた。それは、上がり過ぎたけたの上に重さ8tのコンクリートブロックを7つほど作用させて抑えつけようというものだった。しかし、これはうまく行く前に継手の部分が局部変形を起こしてしまった。

それから約1カ月の間検討した結果、継手の部分のボ

* 名古屋大学工学部助教授

ルトを何本か抜いて左右のけたを揃えるまで変形を起こさせようということになった。事故の当日、支間のほぼ中央にあたる部分の継手のボルトが37本抜き取られたところで、左右のけたのたわみ差は11.5cmから3cmにまで下がって、計画はうまく行くかに見えた。しかしこのときにはもうボルトを抜かれたけたの生命は終わっていた。そのけたはゆっくりと沈み出し、かろうじてもう一方のけたに寄りかかっている状態であった。

橋全体が落橋するのはそれから約50分ぐらいかかるのであるが、橋りょう上の技術者は橋が刻一刻と破壊に向かう兆候を正しく認識できなかったようである。もっとも、これがわかるぐらいならば、最初からボルトを抜く作業などを考えつくはずはない。巨大な応力によって圧縮座屈が継手の部分に起こり始め、鋼板のさびや黒皮が粉のように落ち、ジリジリと変形が進み、そして最後に破壊が襲ったのである。

さて、ケベック橋の落橋のときにも説明したが、橋が座屈で落橋するときには、実はかなりの時間的余裕があるものなので、適切な判断による弾力的な対策が行なわれれば、少なくとも人命の損失も最小限に抑えられる。この意味では、ウエストゲート橋の事故は、なにからなにまで人災によるものだと思われても致しかたのない事故であった。それも、建設本部、設計者、請負業者、それに作業員のすべてにわたって、なんとも始末の悪い無責任ぞろいであったといわれている。

設計はロンドンの世界的に有名なコンサルタンツフリーマン・フォックス社であるが、建設現場の技師には設計に詳しい技術者はいなかったし、複雑な問題の解決には、いちいちロンドンに問い合わせる始末であった。また、現場の労働者も自分達の権利の主張に強硬で、全体の工事のバランスに無関係に、ストライキをくり返したり、職場放棄も稀ではなかったという。

一般に欧米では設計と工事との職業が明瞭に独立して

いることが多い。仮に設計上のミスがあっても工事は設計どおりに進められてしまう。これは設計という職業に対して正当な権利を認めていることであるが、反面、設計上のミスによる事故は設計者に対して厳しく追及される。しかし、設計の業務はいつでも紙の上での作業であるから、実物に対する感覚はほとんどないといっていよい。確かに、理論計算のうえから安全であると計算されても実物がそれに合わない場合が少なくない。このことは1969年ごろから目立って多くなった箱げた橋の事故を分析してみるとわかるのである。

箱げた橋の設計においては、ドイツの橋りょう技術が世界的に模範とされ、ドイツにおける座屈の基準 DIN 4114 はいわばそのバイブル的な役割を果たしてきた。しかし、この規定はどうも甘過ぎるのではないか、という指摘は以前からなされていた。国際的な橋りょう設計入札などになると、重量の大小は直接に工事費に関係するが、ドイツの示方書に従うと際立って軽量に設計できる利点があったのである。橋が落ちる事故は大部分が偶然と不運との組み合わせだった。個々には特別のケースであるが、統計的に共通の相関性のある事故の場合には、あきらかに設計上の考え違いに帰属するものである。

現在までのところ、座屈に対する設計上の再検討と平行して既往の箱げた橋の安全点検が欧米においては行なわれ、その幾つかは補強工事がなされている。日本においては幸いにこの種の事故が発生した事例はないが、2、3の橋りょうにおいては架設時期に座屈の兆候を発見し、補強によって事なきを得た例を聞いたことがある。

制度や習慣の異なる欧米と日本とを同じ基準で考えるのは誤解をまねくが、一般論として欧米の習慣は、自己の責任範囲を越えることには手を出さない。よい面があるけれども、橋の建設のように危険を伴う工事では、全体の安全に不釣合に独走することはたちまち大きな事故に結びつく。日本では幸いなことに全体の教育水準が高いこともあって、仮に設計が誤っていても建設技術者がそれを指摘して修正する能力を持っていることが多い。

しかし、この利点は反面、責任の所在をあいまいにしてしまうことが多い。というのは、仮に非常に未熟な設計であっても、また優秀な設計であっても、それが建設のさい一度洗い直されるということは、設計者に対する基本的な権利の侵害になる。つまり設計という頭脳労働に対して正当な評価を与えることができなくなってしまう。設計というのは、本来、構造物の形と寸法とを決めることにあるが、構造物の製作とか架設に経験の少ない技術者は、いつのまにか構造計算をすることが設計の重要な業務であるように錯覚してしまっている。複雑な理論式を扱い、コンピュータを応用し、部厚い計算書を作れば、それがよい設計であると思ってしまう。

しかし橋りょうを安全に架設する使命を持つ、特に現

場の技術者からは、現行の橋りょう示方書は理解であって役に立つ代物ではない。彼らが望んでいるものは、いままでの数々の失敗を教訓とした、安全のための虎の巻に相当するような示方書なのである。現在土木学会では架設基準を作製しようという委員会が持たれ、筆者もその末席に連なっているが、幹事会の討議は熱を帯びている。少々宣伝めくがこの誌面を借りて多くの読者からの助言をお寄せ頂くことをお願いしたいと思っている。

コンクリート構造物の破壊

(1) コンクリートの進歩の歴史

近代的な構造物の建設を考えると、鋼材とセメントとの2大材料を除くことはほとんど不可能であるが、これらの材料が実用された歴史、特に近代的な意味での鉄筋コンクリート構造やプレストレスコンクリート構造のそれは、まだ100年にもなっていない。これは表-1を見ていただくとわかる。

そもそも、日本においてコンクリートの組織的な研究が始まったのは1920年代からであるが、これは第1次世界大戦(1914~1919)の直後である。つまり、良きにつけ悪しきにつけ、戦争を含めた破壊力全般に抵抗力の強い構造物を建設することの要請が、コンクリート構造物に科せられてきている。関東大震災(1923)はきわめて象徴的に鉄筋コンクリート構造物の優秀さを示すことになったが、それは、煉瓦造りの浅草十二階の無残な崩壊と対照的に、旧丸ビルの健全さで証明されたのである。

日本のコンクリート工学の基礎は、ほとんど故吉田徳次郎博士(1888~1960)に負うと言って良いが、ちょうどコンクリート工学がめざましい進歩をしている(1919~1921年)に博士はアメリカのイリノイ大学、タルボット研究室に学んだのである。つまり、その頃から数えて近代的なコンクリート構造物の歴史は、まだやっと50年しか経っていない。プレストレスコンクリート構造物に至っては第2次世界大戦の後からであるので、やっと20年の経験しか得られていない。エジプトのピラミッド、中国の万里の長城、ローマの水道橋のように、長い歴史を生き延びることができるか否かは、これから永久に続く課題なのである。

コンクリートが実用されてきた過程は、いわば失敗の積み重ねである。現在ではごく普通の常識となった知識であっても、それはなにかの失敗の事例*を教訓として改良されたことが契機になっているものが多い。この点に関しては、末尾の参考書に詳しいので、次節は示方書の背景について説明をしておきたい。

*事例研究資料 事故例抄(参考資料3からの孫引き)

① I形のポストテンションけたで、けたの緊張作業中