

伊勢湾台風によせて

—防災科学技術のあり方について—

花井正実

1. まえがき

災害が起こるとやれ天災だ人災だ、予算がないのだ、いや政治が悪いのだと騒ぎだす。こういったことをわれわれはもう何十年も繰り返して来ているのである。なんとかして早くこのような騒ぎをしなくて済むようにしたいものである。

どうして災害が起きるのかを知るにはまず防災科学技術の現状を説明することから始めるのが一番わかりやすいように思える。現在高潮に対して絶対に安全である堤防は一つもない。堤防というものははじめからそのような造り方はされていないのである。同様なことがすべての防災技術についていえる。地震に対して絶対に安全なビルはないし、どのように立派な橋でも地震や風で絶対に落ちないといえるものは一つもない。ただ丈夫な橋は壊れる確率が小さいといえるだけであり、絶対に安全な構造物は経済的採算上造り得ないのである。現に福井地震では大きなビルも壊れているし、多くの橋が落ちている。鉄道のレールに至ってはグニャグニャになり、これが東京・大阪等の大都会であつたらどんなに悲惨な災害をひき起こしたかも知れないと思われる。文明の発達が人口および諸機能の都市集中化という形をとる限り災害も大きくなって行くことはやむを得ないことなのである。このたびの伊勢湾台風における名古屋は不運にもその不幸な例となつてしまつたのである。完成された堤防を頼りにして水が来るまで安心してテレビを見ていたといった話を聞くにつけ、防災科学技術の現状を一般に認識させることは災害を少なくするためにさらには防災政策を下からおし進めるためにも必要なことに思われる。科学への過信が不信に変わることを恐れるのである。技術者も自分のなした設計が経済的採算上完全に安全ではあり得ないのだということを卒直に述べる必要がある。そしてそうすることが結局自己の技術を一般に理解してもらえ一番の近道であると考え。

われわれはこの40年足らずの短い期間でも関東・北丹後・鳥取・東南海・三河・南海道・福井といった大地震を経験している。関東地震以上の地震が再び東京や名古屋を襲うことがないとは限らない。数年のうちにそれが起こる確率は非常に少ないのであるが、いずれは必ず起こると考えざるを得ない。昭和9年9月大阪湾一帯に高潮の惨害をもたらした室戸台風は世界最大級の台風であり、これ以上の台風は来ないのではないかと考えていた技術者も現にいたのである。しかるにこのたびの伊勢湾台風が起こり、しかもそれがかつてあまり災害の経験

のなかつた名古屋を襲つてしまつたことは、不運といえば全く不運なことであつた。

このようにこのたびの伊勢湾台風の惨事は、いろいろな意味で現在の防災科学技術の諸問題とその進むべき方向を示しているように思えるのである。

2. 災害防御の道

災害の防御に関してわれわれは人命の問題と経済的問題とは分けて考えなければならない。人命は現在の防災技術の及ぶ範囲で絶対に安全でありたい。その損失は取返しがつかないからである。防ぎきれぬ台風が来たら安全な場所に避難することが、生命を護るためにとり得る唯一の方法である。そしてこれを適切に行なうためには台風の災害予報を適確にすることと、避難対策を平時から完全にしておくことが必要である。名古屋の悲劇は堤防の高さが足りなかつたために起こつたのではなく、堤防を越える高潮が来たときの対策が全然たてられていなかったためである。都市の災害避難対策はそれが困難だからといって放棄してよい性質のものでは決してない。高潮の来襲に対する東京の危険性はすでに各方面から警告のあつたとおりである。もちろん台風が来てしまつてからでは避難は不可能であらう。しかしながら適確な災害予報によって事前にこれを行なうならば、そんなにむずかしいことではないと思われる。

このように災害予報は人命の安全を保証する上で重要な役割を持っている。予報を適確にするため現在の組織を強化拡充することは今後来襲する幾多の台風による悲劇からまぬがれ得るかどうかのカギとなるものである。地震についても同様のことがいえるが、現在地震の予知にはまだこれといった適当な方法がみつかつていない。このために土木・建築構造工学は暗夜に敵の襲撃を待つように、 unnecessary 努力を繰り返し、不当な心配をしょい込む結果になっている。その無駄は大変なものである。その上惨事が起こる危険性はどこまでもつきまとうのである。このような意味から地震予知の方法はなんとかして完成されなければならないのである。

避難することによって、たとえ生命の安全が保証されたとしても、そうしばしば財産がおびやかされるようなことがあつても困る。市民の財産を護るためには堤防は高いほどよいのは当然である。しかしながらその土工工事費も急激に増大するのでどこか適当なところで折り合はなければならないわけである。このような問題を処理するのが、オペレーションズ・リサーチ(Operations Research)の仕事である。オペレーションズ・リサーチ¹⁾は

第 2 次世界大戦中米軍が対日作戦に盛んに用いた方法であり、限られた戦力を使って最大の効果をあげるために数理的解析を行なうのである。その結果は一般的にいて当然のことではあるが、大都市のように保護すべき経済的価値の大きいところでは、工事費が少々かさんでも堤防は高くする必要があるし、農村のようなところでは堤防の高さは大都市のに較べて低いものになる。名古屋の堤防は過去数十年間に記録された最高潮位を規準として設計されたと聞くが、それだけでは不十分であり、必ずその堤防が保護している経済的価値を考慮した設計でなければいけないのである。鉄塔や鉄道の架線なども全く同様に考えられる。国鉄総裁が、このたびの台風による東海道線の被害がひどかったので、今後この線の架線は風速 65 m 以上の風にも耐えるようなものにするという発表を行っていたが、前述の考察からも日本経済の動脈たる東海道線が他の線よりも丈夫につくられることは国家経済上当然であるという結果になる。ただし、65m の風に耐えるようにすることが経済上最も適当であるかどうかは十分に検討さるべきことであって簡単に決められることではないはずである。

伊勢湾台風の悲劇はもう繰り返したくないものである。災害対策が復旧であるかぎり悲劇はなくなる。総合的な防災計画を進めるためには各界統一の防災計画協議会をつくってこれに計画遂行の全責任を負わせると同時に強い権限を与える必要がある。そしてこの協議会は年々防災白書を提出して防災計画の現状を国民に知らしめるとともに、その批判をおおぐというふうにしてはどうであろうか。わたくしの夢としては災害予報と避難の組織を確立するとともに、国家経済的に検討されて造られた堤防を越える高潮による災害に対しては、国家的な保険によってその財産を保証する制度がまず大都市あたりからでも始められるようになれば、人命・財産とも完全に保証することができると思うのであるが、これが実現するまでにはまだ大分時間がかかりそうである。災害を制御するには、災害を科学的に分析して防災の布石を一つ一つ行っていくより外に方法がないのである。

3. 建物の安全の確率とその応用

さてまえおきがずいぶんながくなってしまったが、わたくしが構造設計について日頃から考えていたことは上述の文にだいたい託したつもりである。すなわち建造物の設計に関しては、人命の安全を保証する規準はどこからも出てこないのであって、結局経済的条件が現在の建造物を規定しているのであると考えるのである。今からの建造物の安全の確率の解析も、その経済的条件を数理的にアプローチする手段にすぎないのである。

建造物の安全の確率の解析は荷重解析 (Load Analysis) と構造解析 (Structural Analysis) とからなる。

荷重解析 ある地点にたつ建造物を設計するときその地

点の荷重の記録が必要となるが、一般にはこれを付近の気象台の記録から推定することになる。それには気象台とその地点との関係を推定することによって、気象台の記録の統計の結果、得られた荷重密度分布を変形する方法が最も簡単であり、かつ十分有効であると思われる。気象台の記録からその地点の荷重を推定する方法は、気象庁斎藤博士らによってなされた種々の方法があり、また重要な建物であれば事前の予備調査がなされることも必要なことであると考えられる。荷重の統計は現在風雪荷重について実際に行ないつつあるが、その考え方は要するに観測期間中に得られた記録が母集団 (その地点に過去から未来まで全期間について起こる荷重のすべてを含めた仮想の集団) の性質を最もよく代表しているものであるとして、母集団から単位時間に荷重が生起することが期待される確率密度函数を推測するのである。いま x_1 を風荷重, x_2 を雪, x_3 を地震, x_4 を積載荷重とすれば x_1 と x_2 の間だけは相関があり他は互いに独立であるので全荷重に関する確率密度函数 $\varphi_{1,2,3,4}(x_1, x_2, x_3, x_4)$ は

$$\varphi_{1,2,3,4}(x_1, x_2, x_3, x_4) = \varphi_{1,2}(x_1, x_2) \cdot \varphi_3(x_3) \cdot \varphi_4(x_4)$$

と表わせるから風荷重と雪荷重以外は独立にデータをとって来てかけあわせて全荷重の確率密度函数を決定するのである。

構造解析 ある一つの建物を仮想すると一意的にそれに対応する荷重安全域 (Load Safety Domain) A がさきほどの荷重確率密度空間に決定されるはずであり、これを解析するのが構造解析の役割である。ここに荷重安全域というのはその中に含まれる荷重に対してその構造物は安全であるという範囲である。Limit Analysis の安全定理などもここで活用されるわけである。構造解析に関する一般的な記述は周知のとおりであるので省略する。いま $x_0(t)$ を建造物の材料強度, x_{00} を時刻 0 における材料の強度, $R_0(t)$ を材料強度が時間とともに減少してゆく割合を示す函数とすれば

$$x_0(t) = x_{00}(R_0(t))$$

とかくことができ、時刻 t における荷重安全域は

$$A_{\alpha, \beta, \dots, \nu}(x_\alpha(t), x_\beta(t), \dots, x_\nu(t), \dots, x_\nu(t))$$

で表わせる。

建造物の安全の確率 上式を使って時刻 t における Δt 時間内で建造物が崩壊する確率 $\Phi(x_\alpha(t), x_\beta(t), \dots, x_\nu(t)) \Delta t$ を次のようにして求めることができる。

$$\begin{aligned} \Phi(x_\alpha(t), x_\beta(t), \dots, x_\nu(t)) \Delta t \\ = \Delta t \int \int \dots \int_{D(\text{outside of } A)} \varphi_{1,2,\dots,n}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 \cdot dx_2 \cdot \dots \cdot dx_n \end{aligned}$$

時刻 t における建造物の安全の確率を $P_T(t)$ とすれば、時刻 $(t + \Delta t)$ において建造物が安全である確率 $P_T(t + \Delta t)$ は時刻 t まで安全であり、かつ次の $(t, t + \Delta t)$ 時間でも安全である確率であるから、荷重が時間に独立であると

仮定すれば次のような式が成り立つことになる。

$$P_r(t+dt) = \dot{P}_r(t) \{1 - \phi(x_\alpha(t), x_\beta(t), \dots, x_\nu(t)) dt\}$$

上式は次のように導かれる。

$$\lim_{dt \rightarrow 0} \frac{P_r(t+dt) - P_r(t)}{P_r(t)} = \frac{d\{P_r(t)\}}{P_r(t)} \\ = -\phi(x_\alpha(t), x_\beta(t), \dots, x_\nu(t)) dt$$

$$\therefore P_r(t) = e^{-\int_0^t \phi(x_\alpha(t), x_\beta(t), \dots, x_\nu(t)) dt}$$

$x_{\alpha_0}, x_{\beta_0}, \dots, x_{\nu_0}$ に確率の変動 $g_\alpha(x_{\alpha_0}), g_\beta(x_{\beta_0}), \dots, g_\nu(x_{\nu_0})$ があるとすれば

$$P_r(t) = \iiint \dots \int e^{-\int_0^t \phi(x_\alpha(t), x_\beta(t), \dots, x_\nu(t)) dt} \\ g_\alpha(x_{\alpha_0}) dx_{\alpha_0} \cdot g_\beta(x_{\beta_0}) dx_{\beta_0} \dots g_\nu(x_{\nu_0}) dx_{\nu_0}$$

となる。上式は建物の安全の確率を求める一般式であるが実際の問題には次のように応用される。

例題として利益を得るために建築に投資することを考える。 $F(t)$ を時刻 t において建物が単位時間における利潤 E を建物の建設費 r を銀行利子(投資の基準となるべき数字であり、また銀行から資金を借りることも考えられる)とすれば、時刻 t までにあげる収益は、 $\int_0^t F(t') e^{r(t-t')} dt'$ であり、見込の損失は Ee^{rt} であるから建時から期待される利益 Z は次のようにかける。

$$Z = \int_0^\infty \left[\int_0^t F(t') e^{r(t-t')} dt' - Ee^{rt} \right] d\{-P_r(t)\} \\ = \int_0^\infty \left[F(t) + \int_0^t rF(t') e^{r(t-t')} dt' - rEe^{rt} \right] P_r(t) dt \\ - E$$

Z を max にするような E が最も合理的な建築費になるのである。倉庫、送電鉄塔などはこのような経済問題だけを追求して設計できる建造物であるが、投資の対象として選ばれる他の種類の建物——例えばテレビ塔、貸事務所、アパートなども本質的には同様であると考えられる。そして上記の一連の取扱いと考え方がオペレーションズ・リサーチの思想に似ているので、わたくしはこれを構造設計に関するオペレーションズ・リサーチとよぶことにしたのである。

最後に理論の結果に若干の考察をくわえてこの項を終えたいと思う。現在の建物の安全の解析は構造解析だけに力が注がれ、荷重解析はほとんど行なわれていないような状態であるが、これについて A.M. Freudenthal 教授は彼の論文“Safety and the Probability of Structural Failure”²²⁾ に次のように述べている。“構造解析はその基礎になる荷重解析よりもよくなることは決してないから、荷重解析が粗雑であれば構造解析を立派にすることはできない。そしてこの自明の理が構造設計において往々にして忘れられているようである”

この言葉はまったく現在の構造設計の弱点をついたも

のであるが、このことは上述の理論の中で荷重解析と構造解析は、まったく対等に取り扱われているということからも明快に説明できるのである。

われわれ構造設計技術者の仕事は、結局適当な形と適当な大きさの荷重安全域を持つ建物を設計することにあるが、前者の適当な形とは一定量の材料の最も効果的な使用を意味し、後者の適当な大きさというのは合理的な建築費の決定を意味している。しかしながら個々の技術者が O.R. を実施してこれを見出すようなことは一寸不可能なことであって、どうしても研究所や大学の研究室で標準的な構造物をいくつか選んでそれらについて O.R. を行ない、他はその結果から類推して行くといった方法がとられるようになると思われる。

設計荷重と許容応力度を与えれば構造物の設計はできるのであるが、それらの決定のときにはすでにその構造物のもつすべての性質が加味されていなければならないのである。すなわち設計荷重や許容応力度(許容強度のときもあるが)というものは構造物の使用目的・荷重・構造材料・構造形式²³⁾ および構造解析の方法によって決められるべきものであって実際荷重とは異質なものである。そして設計荷重および許容応力度を国の法規で決めて構造物の設計を規正しようとすることは本質的には国家経済的にみて最も合理的な構造を推奨しようということであって人命の安全を保証しようという意味ではなさそうである。人命の安全をどこまで保証すべきであるか規準のとりようがないのである。

4. あとがき

今日ほど技術者の構造設計の目的があいまいになっている時期はないように思われる。これは構造計算規準のなした悪い面の作用である。規準の功罪はともに大きい。それだけに構造設計のスジを明確にする必要があると思われる。一口に構造設計の O.R. といっても基本的データから整えて行かなければならないので、なかなか大変な仕事になることが予想される。しかしながらこういった Analysis を続けていくうちに適正断面の構造が見出されて行くのではないかと考えるのである。

(1959. 11. 1)

文 献

- 1) P. M. Morse & G. E. Kimball: Methods of Operations Research, The Technology Press of Massachusetts Inst. of Technology and John Wiley & Sons, Inc., New York, 1951. 7
- 2) A. M. Freudenthal: Safety and The Probability of Structural Failure, Proc. of A.S.C.E., 1954. 8.
- 3) H. Tanaka & M. Hanai: The Probability of Safety of Structures, Proc. of the 9th Japan National Congress for Appl. Mech.