

総合防災の研究

石原安雄

1. 緒言

1.1 はじめに

総合防災という言葉は、昭和56年科学技術会議が諮問9号に対する答申の中で使われたのが、公式には初めてのものである。すなわち重点を置くべき研究開発の分野と目標を、①自然現象の解明と予知・予測、②地震災害の防止技術、③気象災害の防止技術、④総合防災に関する科学技術、とし、さらに、総合的な意味での防災対策の充実に資するため、人間の生活に着目して人文・社会科学上の知見もあわせて活用し、総合防災に関する研究開発を進めることとしている。

一方、災害対策基本法第2条によると、防災とは、災害を未然に防止し、災害が発生した場合における被害の拡大を防ぎ、及び災害の復旧を図ることと定義している。人命の損失、資産の損失を極力減らし、災害が発生したときはできるだけ効率的に復旧する等のすべての活動を防災といっているのであって、上記答申中の総合的な意味での防災対策と同義である。

したがって、あらためて総合防災という言葉を使う必要がないのである。しかし、世の中があまりにも専門分野に細分化されて、ややもすると防災の目標を見失ったり、地下街等の防災センターにみられるように、防災という字があまりにも安易に用いられているために、真に防災ということを強調する意味で総合防災という言葉が使われたのである。本文も総合防災の研究という題目としているが、上述したことと同じ意味であることはいうまでもないが、さらに、科学の一分野としての防災の研究のあり方を模索するという意味をもこめているつもりである。

1.2 自然災害の防止、軽減策の変遷

まず、人間が、地球上で生存してから現在までの間に、災害を起こすような自然現象に遭遇したときのように対処してきたかを概観してみよう。話を簡単にするために、日本の場合について調べる。

(1) 土地利用の適正化

異常な自然現象はどこでも同じように起こるものではない。地震が起こり易い地域、火山噴火が発生する地域、洪水氾濫が起こる地域、等さまざまである。そこで、本格的な農耕社会が発達するまでは、災害事象が起こり難い土地をうまく利用して社会を形成していたと考えてよい。

(2) 予警報に基づく避難

人口が増大し、社会が進歩し、農耕活動が盛んになって、とくに米作が活発化してくると、洪水氾濫が起こり易い土地をも利用するようになった。この時代になると、異常な自然現象と直接対決するだけの知識と技術力は発達していないが、異常事態を予測する知恵や経験則をもつようになる。有名な「稲むらの火」は、地震直後に浜辺で海の水がどんと引いていくのを見て津波の来襲を予見した庄屋の五兵衛が、高台にある自分の田に、取り入れるばかりになっている稲束に火を移し、豊年を祝う宵祭りの支度で心を取られた村人を、庄屋さんの家の火事だと、山手に皆が集まってくるように仕向けて、村人の命を救ったという話である。このような話は各地にあり、また異常事態を予見するための言い伝えや古老の話が今日でも数多く存在している。すなわち、異常な自然現象を予知し、被害状況を予測して、一時的な補強を行ったり、難を逃れる行動をとって、損失を最少限に食い止めてきたのである。

(3) 防護施設の整備

異常な自然現象はいつも起こっているというものではない。一般に人間は、気候に関していえば、平均的な季節変化のまわりのある変動幅の中で、それに順応して生活し生産活動を行っている。さらに、生活、生産活動を拡大しようとするときには、より危険な土地を利用したり、上記の変動幅のより大きいところまで安全なように環境づくりをするようになる。そのために恒久的な防護施設の整備が行われてきている。

防護施設の整備が進むと、施設のもつ防災能力以下の自然の営力に対しては完全防災ということになる。それで地域の人口と資産がより一層増大するが、増大とともに安全性の向上へと指向するのであるが、後述するように、どこまでも安全性を高めるといわけにはいかない。今日はこの段階にあると考えられる。

1.3 自然災害の発生

このようにして現在の社会は、各種の防護施設や予警報などによって、異常な自然の営力に対抗しているのであるが、災害は発生している。また、洪水災害、地震災害、地すべり災害、火山噴火災害、高潮災害、台風災害、等々各種の災害があり、災害ごとに発生の仕方が異っているようにみえる。しかし、災害を起こす自然の破壊力の性質と防護施設の防災機能などを検討してみるといろいろと共通する部分を見出すことができる。

(1) 破壊力の特性

異常な自然の営力、すなわち破壊力を来襲の仕方によって分類するとつぎのようである (Fig. 1 参照)。

- ① Fig. 1 において、左から流下してくる洪水や右から押し寄せてくる高潮・津波のように、大量の物質が侵入してくる形式のもので、いわば物質侵入型事象といえるものである。

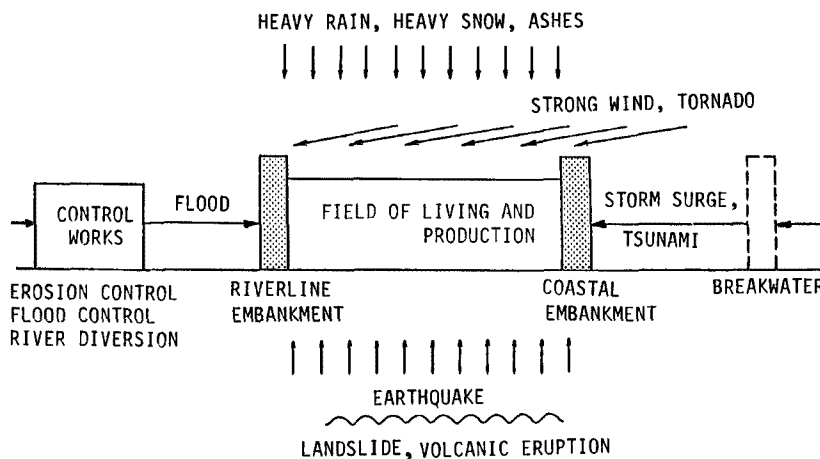


Fig. 1. Extraordinary natural phenomena acted on the domain of human living and production.

- ② 大気圏から地区内に直接降ってくる豪雪や豪雨、また強風のように、さらに地盤を通じて振動として作用する地震動のように、地区内のすべての地物に直接作用する形式のもので、いわば直接作用型事象といえるものである。
- ③ 地すべりや火山噴火時の地盤の変化のように、地盤そのものが変化してしまう形式のもので、いわば地盤変化型事象といえるものである。

(2) 防護施設の防災機能

いま、ある対策によって異常な自然の破壊力に対抗する場合を考えてみよう。破壊力を L 、抵抗力を R とし、その生起確率密度関数をそれぞれ、

$$f = \phi(L), \quad g = \psi(R) \quad \dots\dots(1)$$

とすると、つぎの2つの場合に分けられる。

- (a) 破壊力に上限がないか、現在のところ上限を確定することができない場合。
- (b) 破壊力に上限が確定している場合。

それぞれの場合に対する地物の破壊の確率 μ_a, μ_b は次式で与えられる (Fig. 2 参照)。

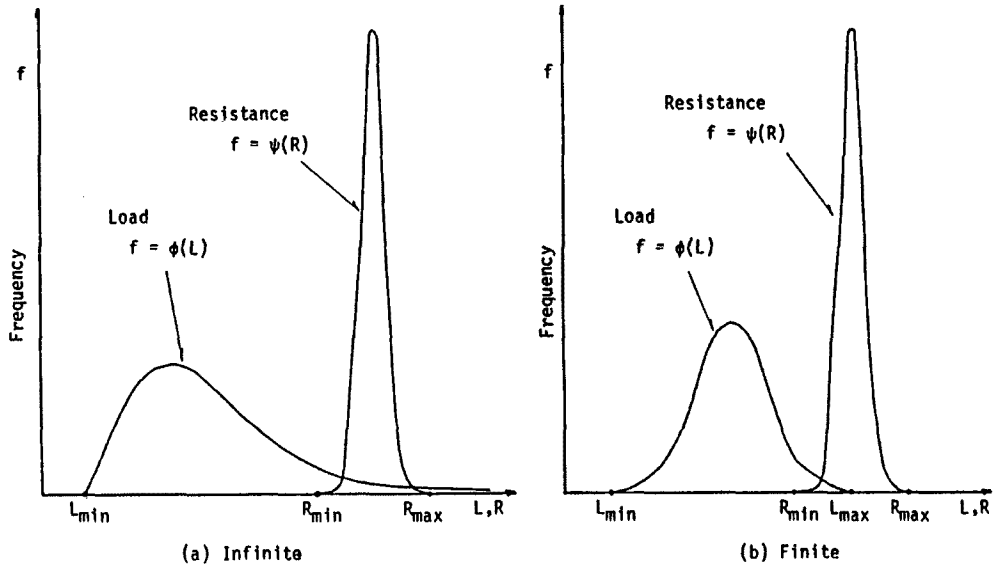


Fig. 2. Relation between natural force and resistant force.

$$\mu_a = \int_{L_{min}}^{\infty} \phi(L) \cdot \int_{R_{min}}^L \psi(R) \cdot dR \cdot dL \quad \dots\dots(2)$$

$$\mu_b = \int_{L_{min}}^{L_{max}} \phi(L) \cdot \int_{R_{min}}^L \psi(R) \cdot dR \cdot dL \quad \dots\dots(3)$$

(b)の場合に対する(2)式において、 $R_{min} > L_{max}$ ならば μ_b の値はゼロとなり破壊は起こらない。このことは作用する破壊力よりも抵抗力が大きい場合には完全に破壊を防止することができることを意味している。逆に、(a)の場合には、 μ_a の値が存在するので、常に破壊を防止することができるというわけにはいかないことを示している。

異常な自然の営力とこれに対抗する防災力との間の関係は上述の関係と全く同様である。(b)の場合のように営力に上限がある場合には、 $R_{min} > L_{max}$ として防災力を整備すれば災害は起こらない。しかし、ほとんどの場合、 $R_{min} < L_{max}$ であるので、常にいわゆる自然災害が発生する可能性があるわけである。このことは、自然災害に関する研究を行う場合にも、また実際の防止軽減対策を考える場合にも、極めて重要なことである。

(3) 発生モデル

さて、物質侵入型事象によって起こる災害に対しては、まず大量の物質が対象地区に近づいてくる過程で制御・調節して破壊的エネルギーをできるだけ分散させ、さらに堤防等の防護工を築造して、物質の地区内への侵入を防ぐという方式がとられる。したがって、これらの制御・調節工や防護工の防災能力を超える事象が発生すると災害となるのである。つぎに、直接作用型事象によって起こる災害に対しては、地区内の地物一つ一つを頑強なものとして対抗するという方式がとられる。すなわち、耐雪性、耐風性、耐震性の地物

とするのである。よって、その設計外力を超える破壊力が起こったときに災害が発生するのである。このときの防災能力と異常事象との関係は上記の防護工の防災能力と異常事象との関係と同じである。最後に、地盤変化型事象によって起こる災害に対しては、地すべり防止工といった対抗策があるものの大規模な事象に対して防止策はないといっても過言ではない。

以上述べてきた関係を一括して図示したものが Fig. 3 である。中心の円内が生活・生産の場であり、周辺が異常な自然現象の発生場である。このように、非常に複雑にみえた自然災害事象が極めて単純な形で表現することができたのである。因に昭和47年度から昭和61年度まで続いた科学研究費の自然災害特別研究の研究項目、①異常自然現象の最大規模、極値、②災害の素因、誘因の予知と制御、③各種の防災機能の破壊限界、④災害拡大のメカニズム、⑤災害の防止・軽減システム、これらは上記の考察に準拠して提案し、設定されたものである。

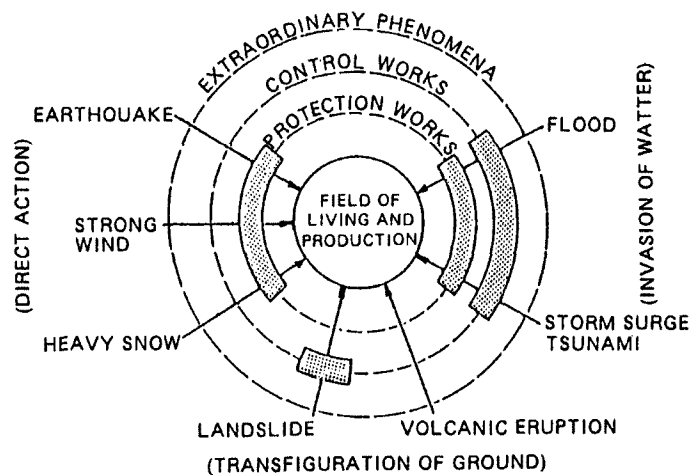


Fig. 3. Natural disaster model.

1.4 防災の目標

いままでは自然災害の防止軽減ということで論議を進めてきたが、どんなものを守り、損失の軽減を図るかという点も必ずしも明確ではなかった。

災害対策基本法第1条には、「国土並びに国民の生命、身体及び財産を災害から保護するため……」とあり、また、有名な大規模地震対策特別措置法第1条には、「大規模な地震による災害から国民の生命、身体及び財産を保護するため……」とある。行政的には上記の目標をもって諸施策が講じられているわけであるが、住民の大多数の共通認識も同じと考えてよいだろう。

しかしながら、社会が進展し、公共の福祉が増進されてくると、防災への住民の要求が高まってきて、最近では、異常時にも日常の生活ができるようにせよ、ということまで要望されるようになった。すなわち、住民としての基本的要求である生命、身体および財産の保護に加えて、交通路、水道、ガス、電気、電話等の保護が強く要望されているのである。さらに、将来は、防災対策が進み、かつ技術的、経済社会的に可能ならば、すべての生産環境まで保護することを考えるようになってくるだろう。よって、公共のもとでの防災の目標が、

- ① 住民の生命、身体、財産の保護
- ② 住民の生活環境の保護
- ③ 住民の生産環境の保護

の順に追加拡大され、それに伴って複雑化してくるのである。これらの要望に応えるために、前述したよう

に、防災施設の整備と安全度の向上、並びに有用な減災方策の確立が図られるのである。ここでとくに指摘しておきたいことは、1.3(2)項で説明したように、防災施設の機能を超える異常自然現象が起こると災害が発生するという事実と、上記の防災の目標のすべてを同時に満足させるような対策はなく、それぞれの目標に対して諸種の対策を組み合わせることによってはじめて満足させられるということである。すなわち、防災の目標をしっかりと定め、いろいろな対策を講じ、安全性を高めるようにしなければ所期の効果は望めないということである。

2. 構造的防災

Fig. 3 の自然災害モデルにおいて、自然の営力を制御・調節する制御・調節工と営力に打ち克つだけの耐力をもつ構造物で譲るための保護工とを総称して、以下構造的防災施設という。

2.1 自然現象の最大規模

異常な自然の営力の最大規模に関する知識が十分にあるなら、構造的防災施設の計画は比較的容易に行うことができる。すなわち、最大規模の事象を設計破壊力とし、これに耐えるような構造物を造れば災害は起こらない。そこで、最大規模ということについて地震と豪雨を例として概観してみよう。

(1) 地震

地震波の大きさを示す尺度としてマグニチュード M が多用されている。この大きさは岩盤の破壊の程度を示す一つの指標であるので、岩石の剛性率と発生した断層の大きさ等によって決まる上限というものがあるように考えられる。事実、これまでの観測結果によると、 $M=8.9$ を超える地震は記録されていないようである。

一方、鈴木らは¹⁾、もし M の値に上限があるとすれば、特定の地域で記録される M の値の頻度分布 $N(M)$ が上限をもつ関数で表現できると考え、Gutenberg-Richter の式を修正した宇津の式、

$$\log N(M)dM = \begin{cases} a - bM + \log(c - M) & M < c \\ 0 & M > c \end{cases} \quad \dots\dots(4)$$

を適用して Fig. 4 に示すように最尤法で a, b, c を求めた。その結果、日本を18の地域に分割し、各地域ごとの c の値（最大マグニチュード）を ϵ とし、実際の生じた最大の地震のマグニチュードを c_0 としたとき、Fig. 5 のように $\overline{\Delta c} = (c_0 - \epsilon)$ の平均値 $= -0.12$ となり、 c_0 および ϵ の値の範囲はそれぞれ 7.1~8.4, 7.01~8.89 であったと報告されている。そして、日本のように、長期間にわたって均質な機械観測の資料があれば、これに基づいて将来起こり得る地震の最大マグニチュードをかなりの精度で推定できるとしている。

このような研究結果をみると、地震の大きさを示す尺度であるマグニチュードの値には上限があるようにみえる。しかし、実際に地物に作用する破壊力は地震動である。ある地点の地震動は、震央の位置と地震の大きさ（断層の形態と大きさ）、周辺地盤の状況、波動を受ける地物の配置と形態等に影響される。よって、たとえば建造物にかかる地震時の破壊力には、實際上、上限があるとは考えにくい^{註)} のが現状のようである。

(2) 豪雨

豪雨について、地点雨量をいろいろの継続時間について世界記録と日本記録を高棹が整理したもの²⁾ が

註) 「實際上、……考えにくい」という意味は、現象論的には上限というものがあるように考えられるが、現在のところ上限の値についての研究はなく、また、その値は現実に使用されている設計地震動、または設計地震荷重の大きさよりかなり大きいと思われる、ということである。

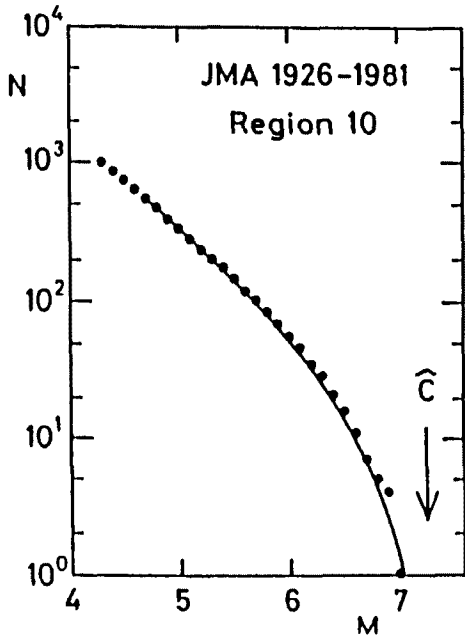


Fig. 4. Frequency distribution $N(M)$ of magnitude of earthquake M .

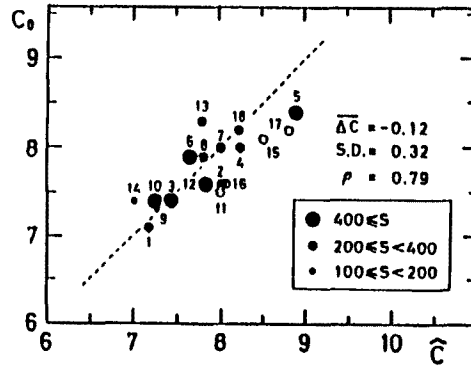


Fig. 5. Relation between \hat{c} and c_0 .

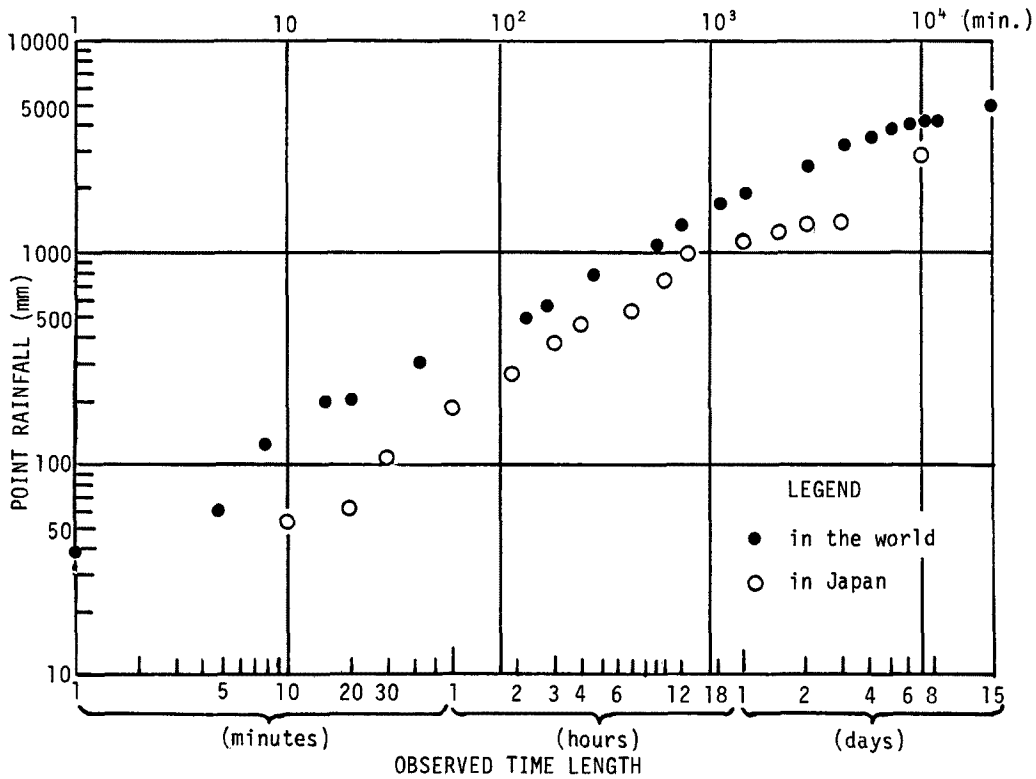


Fig. 6. Maximum records of point rainfall.

Fig. 6 である。例えば、1日雨量についていえば、日本での記録が約 1100 mm であるのに対して世界記録は 2000 mm 程度となっている。全体としては世界記録は日本記録の 5 割増程度となっている。

つぎに、Fig. 7 は長良川流域の4日間連続雨量の年最大値について、1893～1975年の83ケのデータを対数確率紙に Hazen plot で示した図である（図中の右上隅の白丸を除く）。きれいに直線状に点描されている。この状況の後、1976年に約 900 mm/4 days の大雨が降って大出水が生じたのであるが、Fig. 6 の記録からみると 900 mm という降雨は日本記録よりかなり小さい値である。しかし、1975年までの83年間の記録からすると、5割程大きな大雨である。（余談であるが Fig. 7 は、1976年の豪雨が、それまでの83年間の大雨の確率論的特性に準拠してみたとき、どの程度の生起確率に対応するものであったかを推定したときに用いた図である）。

このように、大雨の記録は現実につきつぎとぬり変えられており、また、大出水時にはよく「気象台はじまって以来の大雨であった」ということが報道される。気象学的には大気中の水蒸気の供給量によって降雨量がきまるので、降雨強度ないしは降雨量に上限があるように考えられるが、その大きさは Fig. 6 の世界記録よりかなり大きいだろう。また、Fig. 7 で示されているように、上限のない確率分布関数で大雨の生起確率がかなりよく表現されることが多い。これらのことからして、実際のあるいは防災の意味からは大雨の上限はないと考えてよいといえる。

2.2 構造的防災施設の防災システム

自然力の最大規模が想定されていない現状においては、防護施設はある規模の自然力を設計基準として機能設計と構造設計が行われ設置されているのである。たとえば、洪水調節池は、後述するように、その河川の基本高水の処理計画（安全に河口まで流下させる計画）の一部として、その貯水容量と調節方法をきめ、建設される。河川堤防は、河道を計画高水流量が安全に流下するに必要な規模で築造される。また、建築物は設計地震力に耐えられるだけの強度をもつよう設計され建設される。

これらの構造的防災施設の耐力と自然の破壊力との関係は Fig. 2(a) に示すようになっており、いわゆる設計外力をこえる自然力が発生したときには、防護施設そのものが破損されたり、施設がもつ防災機能が喪失して、災害を発生するのである。

(1) 故障木による分析

こうした場合の防災システムがどんな特性をもっているかを調べるために、どんな場合に災害が発生するかということ、岡田の研究を参考として³⁾、故障木 (fault-tree) を用いて分析してみた。洪水災害の場合と地震災害の場合について分析した結果、故障木はつぎに示すような基本要素で構成されていることが明らかになった。すなわち、河川における洪水による氾濫災害の場合には、Fig. 8(a) に示すように、

- ① 河道の疏通能力をこえる出水で、水が河川堤防を越えて生じる氾濫（越水氾濫）
- ② 現在の技術的水準では不可避な堤防の維持管理上の不備による破堤氾濫
- ③ 長期間の出水等、設計基準（基本高水の設定）で想定することが不可能であった異常現象の出現によ

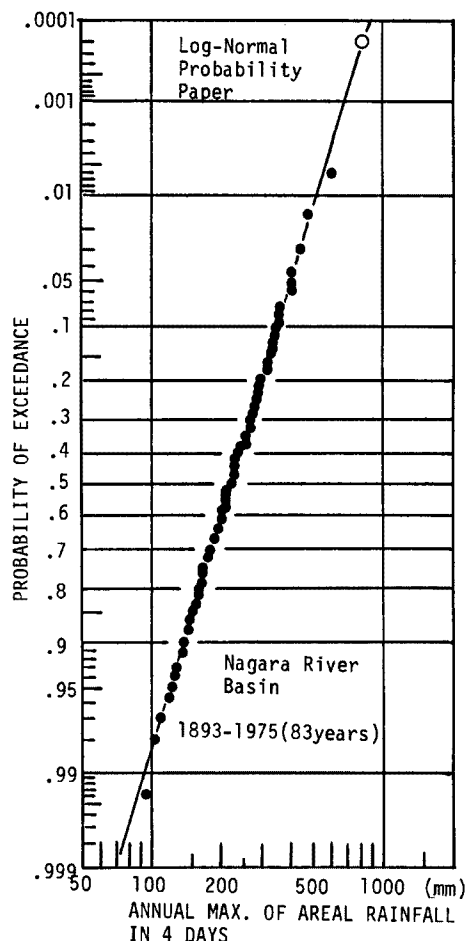


Fig. 7. Hazen plot of annual maximum of areal rainfall in 4 days, Nagara river basin.

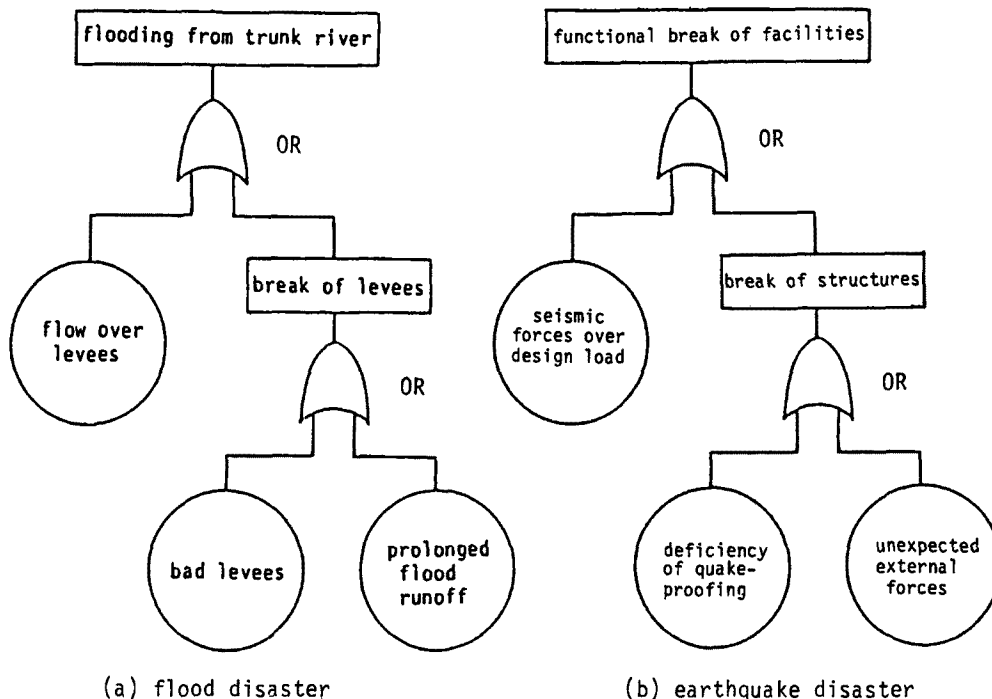


Fig. 8. Elemental fault trees of structural measures.

る破堤氾濫

のいずれが生起しても災害となるのである。Fig. 8(b) は地震時の建築物災害の場合で、

- ① 設計地震動をこえる地震が起こって、建築物として使えなくなる場合
- ② 現在の理論と技術の水準からしても耐震性が不足していて設計地震動以下の地震時に建築物が破損して使えなくなる場合
- ③ 設計地震動が考えていた以外の未知の力が卓越して作用して建築物が破損し使えなくなる場合

のいずれの場合にも災害となるのである。

両図を比較すると、円内で示されている基本事象の内容は異なるが、treeの形状は全く同じで、階層が進むときには下位の事象はORで示した記号で結ばれており、下位の事象のうちどちらが起こっても上位の事象が生起するという特性をもっている。

(2) システムの特徴

こうした構造的防災施設の故障木の特性を考慮しつつ、洪水氾濫災害と建築物の地震災害が生起するときのシステム図、いいかえると防災のシステム図を描くと、Fig. 9(a), (b)となる。(a)図、(b)図は共に直列システムであるので、左端の事象が起こった場合、中間に示されているどの事象が起こっても、また二つ以上の

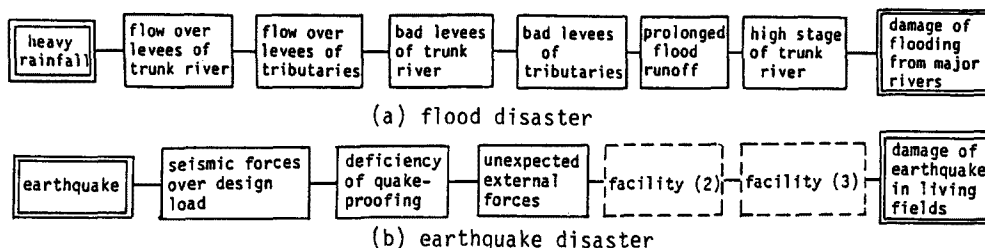


Fig. 9. System diagrams of flooding and earthquake disaster.

ものが同時に起こっても、右端の事象が起こるのである。逆にいうと、豪雨時に氾濫災害が起こらないためには、中間に示したすべての事象が起こらないことが必要であり、また、地震時に建築物の機能障害が起こらないためには、中間に示したすべての事象が起こらないことが必要である、ということを示しているのである。

したがって、Fig. 9 に示したどの基本事象も起こらない程度以下の規模の異常な自然現象が発生しても災害とはならない。しかし、どれか一つでも起こすような異常な自然現象が発生した場合には災害が発生するわけで、システムは failure の状態になる。換言すると、構造的防災施設は、構造物の設計基準をこえる規模の自然現象が発生した場合には、それらが構成する防災システムが failure の状態となることを覚悟しなければならないのである。このことは極めて重要なことであって、往々にして構造的防災施設によって災害が完全に防止されるかの如き表現をされることがあるが間違いである。構造的防災施設を計画設計するときの考え方は、

① failure の状態を許す限界、すなわち通常の意味での設計基準をどこにとるか。

② failure の状態となったときに災害をできるだけ少なくするにはどうすべきか。

ということであり、システム設計でいう safe in failure の設計原理を適用すべきである。

2.3 構造的防災施設の防災基準

(1) 既往最大

異常な自然現象はいろいろの規模で発生する。そこで過去に経験したもっとも大きな規模の自然現象を対象とし、それに耐えるような防災施設を建設すればまず安心だとする考え方である。この裏には、この場合の防災基準を越えるような異常事象が起こればそれは天災であるとする考え方があるように思われる。この場合、経験を特定の地点に限定するもの、広い地域にまで拡大するものがある。

一般には、経験期間が長くなると、Fig. 4 の場合のように、既往最大値が現象の上限値に近づくように考えられるので、昔から各地でいろいろの異常な自然現象に対して既往最大主義が適用されてきている。わが国ではたとえば、高潮や地震津波については対象地区における既往最大のものが考慮されて、防災施設が計画されている。ただし、東京湾、大阪湾、伊勢湾などでは、伊勢湾台風を考慮したモデルの高潮計算により最大潮位偏差を求め、これを台風期の平均潮位に加えた水位をとるのを通例としている。

しかし、既往最大は現象の上限ではないので、構造的防災施設防災システムは必ず failure の状態になる。この場合には、既往最大があたかも現象の上限と錯覚されがちで、failure の状態を天災と諦め、failure の状態の中でできるだけ安全性を保つような方策に対する配慮が欠けるという点に問題がある。

(2) 基本高水

構造的防災施設で洪水処理計画を考えるに当たって、昭和30年頃までは既往最大主義がとられていたが、昭和20年代、30年代に既往最大の記録があいついで破られ、主要河川で大水害が続発したこともあって、昭和40年頃より既往最大をも考慮した生起確率主義ともいえる方式がとられるようになった。構造的防災施設、すなわち洪水調節ダムや河川堤防に対する計画対象の出水の再現期間の標準は、A級：200年以上、B級：100～200年、C級：50～100年、D級：10～50年、E級：10年以下とされ、具体的には、一級河川の主要区間ではA級またはB級、中小河川のうち都市河川は50年程度、水田区間は10年程度であり、河川の重要度を考慮して決定されている。ここでいう計画対象の出水とは、決められた再現期間をもつ雨量がその流域で過去に経験した時空間分布をもって降るとして算出された出水のうちの危険なものであって、これを基本高水という。この基本高水が安全に海まで流れ出ていくように、洪水調節用貯水池、河川堤防、放水路、等の構造的防災施設を考えることが洪水処理計画である。

しかし、この方式によるときには、当然、基本高水をこえる規模の出水に際しては水害の発生が予想される。建設省の河川審議会が昭和61年に答申した超過洪水対策は、上述した被害発生の必然性がようやく世の中で理解された結果であって、絶対安全主義を脱却したという意味で河川行政としては画期的なことであ

る。今後、超過洪水対策をも考慮した洪水処理計画が safe-fail の設計規範によって大いに進展することを期待するものである。

(3) 建築物の耐震設計

建築基準法の耐震設計に関する規則については、昭和56年6月に画期的な改正が行われた。すなわち、第一の基準は、従来のものと同じで、耐用年限中に数回起こる程度の地震動を想定して標準せん断力係数（地震力）を0.2以上とし、これ以下の地震動に対しては建物が損傷しないようにすることである。第二の基準は、耐用期間中に1回あるかないかという激震を想定して標準せん断力係数を1.0以上とし、これ以下の地震動に対しては建物は塑性変形を生じてよいが倒壊は起こらないで、人身に危害が及ばないようにすることとしている。さらに、設計の計算方法、耐力計算法、材料の安全率なども規定されている。実際の建物としての安全基準はそれらの総合的結果によるものであるが、激震時にも人身だけは護ろうとすることが配慮されている点、まさに、safe-fail の設計規範であり、他の災害事象に対する構造的防災施設の設計規範の将来の進むべき方向を示唆するものとして注目すべきものといえる。

2.4 上下流問題

構造的防災施設の設計基準は現在のところ上記のようであり、逐次 safe-fail の設計規範に向っていると考えてよい。しかし、ここでもう一つの問題がある。前項(2)の基本高水に関して、A級からE級までであるのはどうしてであろうか、ということである。また、建築物の本体の設計基準は(3)で述べたとおりであるが、ドアや建具あるいは最近問題になっているライフラインの設計基準はいくらにすべきかという問題もある。

こうした問題については、護るべきものの経済的価値や量などを考慮し、かつそれが被害を受けたときの社会に与える影響をも加味して、いわゆる重要度に従って決定すると説明されることが多い。この考え方は社会的に受け入れられるもので問題はないようにみえるが、別の見方からの解釈はないだろうか。

そこで、河川の上流や支川に沿う地区と、下流部の本川河道に接する地区とを対象として場合を考えてみよう。さて、河道系を Strahler 流の order 解析を行うと、同じ order に属する支川流域は、それが河川流域のどこに位置しようと、地形的にも面積的にもほぼ同じと考えてよい。このことを前提条件として、Fig. 10 に示すように、(a)図の order i の支川にだけ接する上流側の地区 I と、(b)図の order i の支川と order n の本川とに接する下流側の地区 II について検討する⁴⁾。図から明らかなように、下流側の地区 II は地区 I に比して本川に接しているだけ水害の危険が大きい。すなわち、両地区とも支川堤防設計の基本高水の生起確率を同じとすると、下流側の地区 II においては本川からの水害をも防がねばならないので、それに対する基本高水の生起確率をいくら小さくとしたとしても下流側地区の水害の危険が常に大きいということになって、すっきりしない。

さて、沖積平野を流れる河川で、もし堤防がなければ、いわゆる bank-full discharge をこえる出水があると当然浸水被害を生ずる。そこで、われわれの生活体験からすると、それぞれの河道の bank-full discharge の同じ倍数の規模の出水を防災基準にとると、平等であり調和がとれるように思われる。このこ

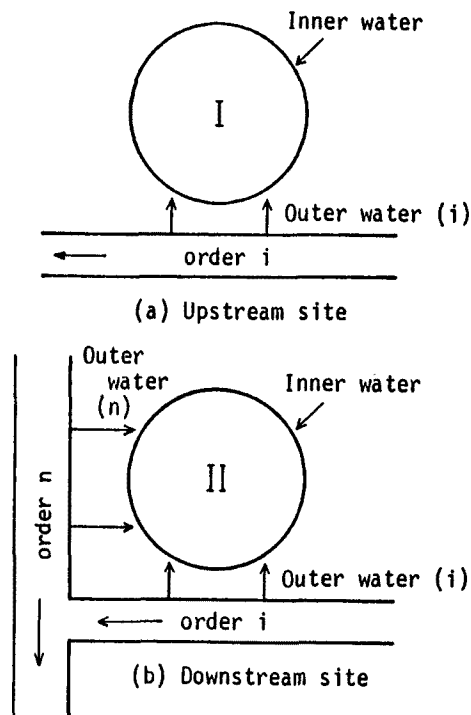


Fig. 10. Patterns of occurrence of flood damage.

とは、bank-full discharge を x_b , 計画高水流量を x_d とすると、すべての地点で次式を満足させることである。

$$x_d/x_b = C_d = \text{const.} \quad \dots\dots(5)$$

ところで、年最大洪水流量 x を対数変換した変量 $y = \ln x$ はほぼ正規分布をすることが知られており、また、bank-full discharge は再現期間 2 年の洪水流量に等しいといわれているから、 $x_b = \exp(\mu_y)$ とする (ただし μ_y は y の平均値) ことができ、かつ、上流 I 地区と下流 II 地区のそれぞれの変量の添字を 1, 2 とすると、次式が成り立つ。

$$F(y_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{Y_1-1}{V_1}} \exp(-t^2/2) \cdot dt, \quad Y_1 = y_1/\mu_{y_1} \quad \dots\dots(6)$$

$$F(y_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{Y_2-1}{V_2}} \exp(-t^2/2) \cdot dt, \quad Y_2 = y_2/\mu_{y_2} \quad \dots\dots(7)$$

また、(5)式を変形して、

$$\frac{Y_2-1}{V_2} = \frac{Y_1-1}{V_2} \cdot \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{\mu_{y_1}}{\mu_{y_2}}, \quad V_1 = \sigma_{y_1}/\mu_{y_1}, \quad V_2 = \sigma_{y_2}/\mu_{y_2} \quad \dots\dots(8)$$

ここに、 σ_y^2 , V はそれぞれ $y = \ln x$ の分散、変動係数である。

たとえば Fig. 11 は年最大洪水流量の対数値の変動係数と流域面積の関係を図示したものであるが、図中の旭川水系 (破線で結ばれている黒丸 2 点) の場合について、上流側での防災基準の確率年を 20 年とすると、 $C_d = 5.77$ となる。下流側の order の高い本川では、同じ $C_d = 5.77$ に対して、確率年が 113 年となる。

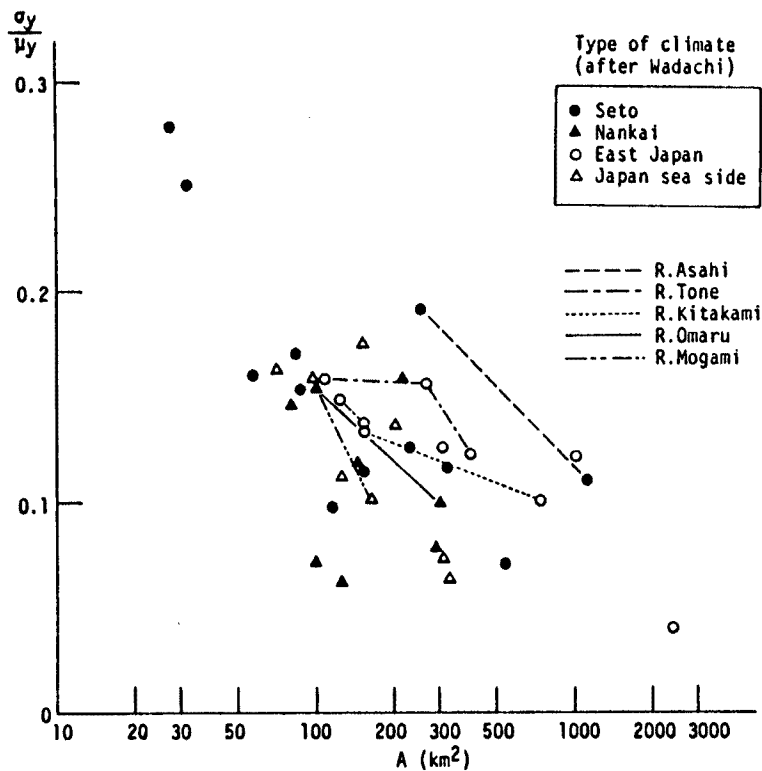


Fig. 11. Coefficient of variation of logarithm of annual maximum floods in different sized basins.

これを本川の防災基準とし、支川については上流側の地区の場合と同じ20年としようというわけである。これは、現象の規模の変動が大きい場合には護り難いが、変動が小さい場合は護り易いという一般的経験則を取り入れたもので、同じ程度の護り方で統一しようとする立場ともいえる。

3. 非構造的防災

3.1 非構造的防災の重要性

構造的防災施設を築造する以前にも、人々は非構造的な手段、たとえば洪水氾濫を起こさないような高台に住み、異常を察したときには避難をし、また被災時には互に協力して救助や救援を行って、被害を最少限に喰い止める努力をしたはずである。今日でも、地盤変化型災害事象に対しては構造的防災施設が考えにくく、たとえば火山噴火に対しては避難と救援が最重要な防災手段である。物質侵入型と直接作用型事象による災害に対しては、上述したように構造的防災施設によって災害防止がはかられているが、構造的防災施設は万能ではなく、防災基準をこえる超過自然力が起こると災害が発生する。したがって、こうしたときの被害をいかにして軽減するかということが重要な課題なのである。

以上のことを総括すると、今日、構造的防災施設が設備されている場合には超過自然力、それがなければ異常な自然力^{註)}が生起すると災害が発生するが、そのときの被害をできるだけ軽減する方策を用意しておかなければならないということである。

被害を最少限に喰い止めるといっても、護るべき目標によって、すなわち、住民の生命・財産か、住民の生活環境か、または住民の生産環境かによって方策が異なるはずである。そこで、防災の目標ごとに構造的防災施設を建設し、そのうえで以下に述べるような非構造的防災手段によって被害を最少限に喰い止める方策を用意してはじめて総合防災が完成したといえるのである。以下では例示的に、もっとも重要な目標である住民の生命の保護について非構造的防災のあり方を検討する。

3.2 人命保護の防災システム

さて、構造的防災施設が設置されている場合の人命保護について検討することにする。この場合の人命保護についてはつぎの2段階に分けて考えなければならない。

第1段階は、構造的防災施設が破壊された直後の事態、たとえば、河川堤防が破堤したときに起こる濁流に巻き込まれたり、建物が倒壊したときその下敷きになるといったような場合で、このときの人命保護の防災システム図は構造的防災施設の場合のそれと同じである。よって、この場合には異常な自然現象を予知し、さらに破堤や倒壊による被害状況を予測して避難をすることが唯一の減災手段となるのである。

第2段階は、構造的防災施設が破壊されたのちの人命被害の軽減策である。今日では、ある程度の危険予報が可能であり、また救助、救援手段も進歩しているので、この段階に対する被害の軽減策を検討し、整備しておくことが非常に重要である。

(1) 故障木による分析

洪水災害と地震災害について、人命保護に関する故障木を描いた結果が Fig. 12 である。図の右枝の下の方から説明するとつぎのようである。

- ① 予警報システム（異常事態発生に対して）が不備で、かつ住民のもっている災害文化^{註)}が未発達の場合には避難が遅れる。しかし、どちらか一方でも正常であれば避難は遅れない。（AND 記号で結合）

註) この場合の異常な自然力とは構造的防災施設がないところで災害を起こすような自然の破壊力を意味する。

註) ここでいう災害文化とは地域での災害経験等によって育まれた知識や知恵をいい、堤防からの漏水が濁ると破堤のおそれがあるといった知識等のことである。

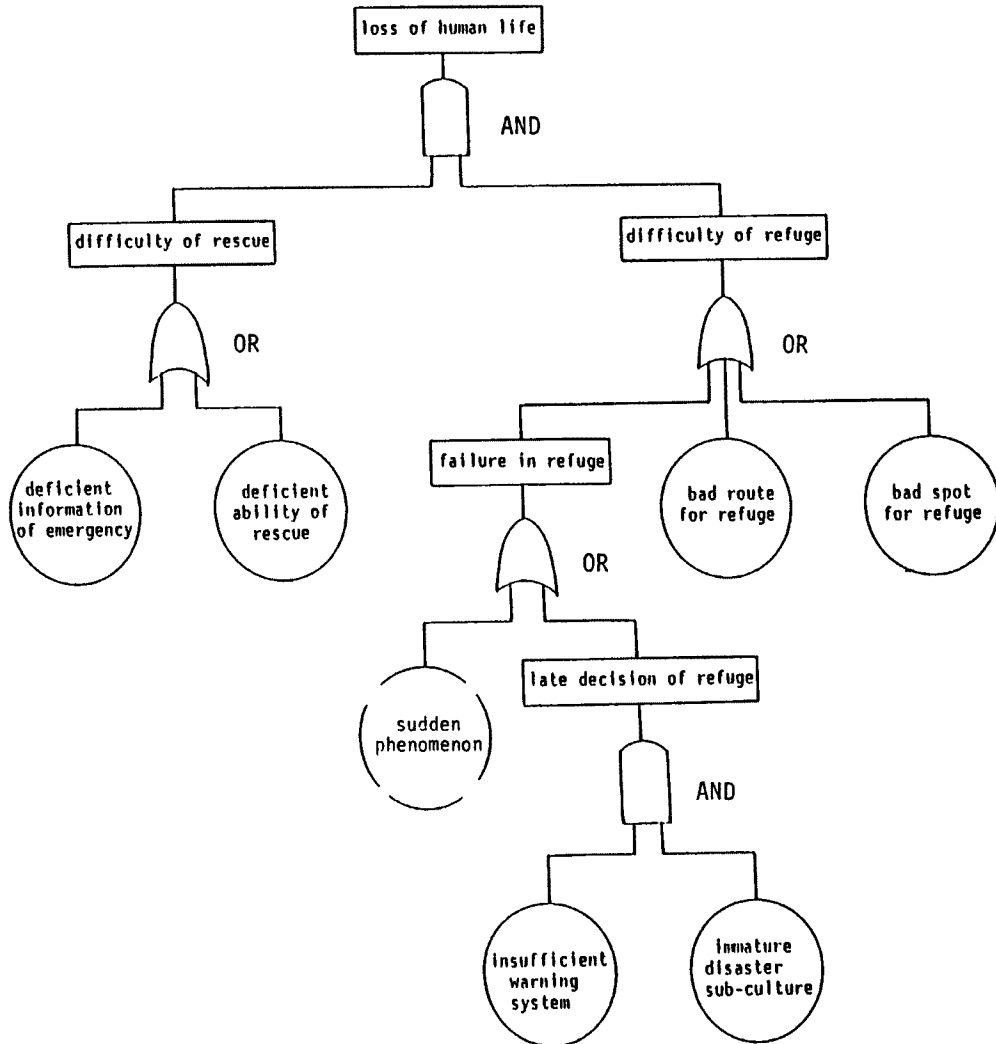


Fig. 12. Fault tree of loss of human life.

② 異常事態があまりにも急に生起し、予警報が間に合わず、かつ災害文化で経験したことがないときは、結果として避難に失敗することになる。(OR 記号で結合)

③ たとえ、避難の態勢が整ったとしても、避難路が不備であったり、あるいは避難場所が悪かったりすると、避難はできないこととなる。(OR 記号で結合)

左枝についてはつぎのようである。

④ 十分な能力をもつ救助組織がなかったり、あるいは組織はあっても有用な情報が入手できなかったりすると、救助活動は困難となる。(OR 記号で結合)

最後に、

⑤ 満足の避難、十分な救助活動のいずれか一方でも有効に作動するならば人命は保護されるが、両者が同時に作動しないときは人命が失われる危険がある。(AND 記号で結合)

ということである。

構造的防災施設の故障木である Fig. 8 と、この場合の Fig. 12 との差異は、後者には AND 記号で示されている結合部が存在していることである。AND 記号は下位の基本要素の全部が同時に起こらなければ上位の事象は起こらないことを示すものであって、いいかえると、下位の基本要素のうち一つでも満足以作動

しておれば、他の基本要素が作動しなくても、上位に示した事態は起こらないことを意味しているのである。

(2) システム図の特徴

Fig. 12 で示した故障木をシステム図で表現したものが Fig. 13 である。構造的防災施設の防災システム図である Fig. 9 と比較してみると、Fig. 13 では並列要素が含まれているという点に特徴がある。

まず、豪雨があったり、地震が起こったとき、満身に避難が行われるか、あるいは避難が行われない場合でも救助組織が十分に活動しさえすれば、人命保護は達成できることを示している。つぎに、そのうちの一つのルートである避難については、予警報システムが正常に作動するか、あるいは地域住民が十分な災害文化をもっており、そのうえ、避難路と避難場所が整備されておれば、避難が満身に行われることを、もう一つのルートである救助活動については、良く訓練された救助組織があり、そのうえ情報収集がうまくいくと、満身の救助活動が行われることを示している。要するに、Fig. 13 の特徴は、並列システムであって、ある要素の故障を他の要素で補償することができるということである。

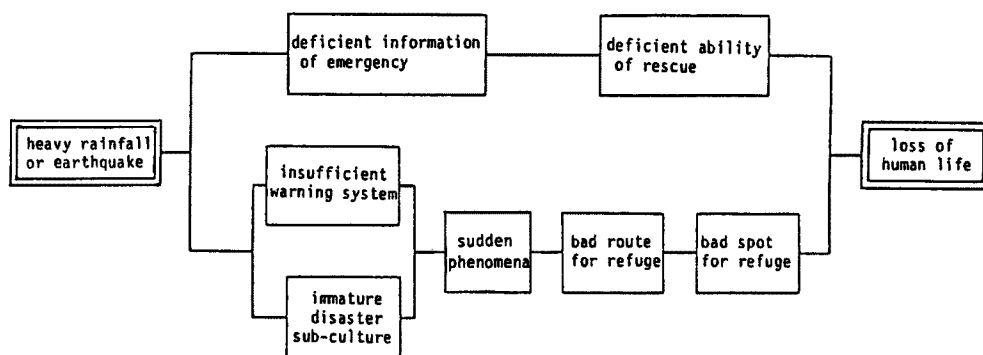


Fig. 13. System diagram of loss of human life.

このように、ある要素が故障した場合でもそれを補償する要素があることは、人命保護という防災の目標を達成するうえで極めて重要なことである。すなわち、システム設計で多用されている fail-safe (fail-safe) の設計規範が適用できるということである。防災の第一の目標である人命保護のためにはいろいろの方策を用意して万全に期することが要求されるがそれに応えることができることを意味するものである。たとえば、急速な都市化に伴って人口の都市集中が起こると、住民の間の災害文化が未発達のまま地震や豪雨を受けることとなる。災害文化が未発達であるので自らの判断で避難をすることが望めないで、たとえば行政組織が科学的根拠に基づいた合理的な予警報を行って、うまく避難行動を誘導するようにしなければならないということを示しているのである。

以上を総括すると、非構造的防災では、その防災システムの中に必ず並列のサブシステムが含まれているので、並列システムの特徴を利用し、防災の目的が必ず達成されるように、fail-safe の設計原理を適用してシステムを設計したうえで、具体的な方策を検討する必要があるのである。

3.3 洪水予報の効用

上述したように、異常な自然現象の予知・予報は非構造的防災のシステムを構成する重要な要素である。そこで、雨水流出の知識を用いて大雨から出水の状況を予知する場合、洪水予報の効用という面からしてどのようなことが問題となるかを検討してみよう。

(1) 河川流域の構成と流出モデル

河川流域は、Fig. 14 に示すように、多くの河道からなる河道網と、それに付着した山腹斜面で構成されているとみることができる。そして、河道をすべての合流点で切り離し、切り離された河道とそれに付着し

ている山腹斜面をもって河川流域を構成する最小単位の要素と考えると（これを単位流域という），河川流域は単位流域が重なってできているとみることができる。さらに，単位流域は，Fig. 14 (b) に示すように流域の内部にあるものも，(a)図に示した最上流端にあるものも，山腹斜面上に降った雨が斜面を流れて河道に入ったのち，河道を流下していくという過程は皆同じであると考えることができる。

そこで，各単位流域での流出過程を Fig. 15 で示すタンクモデルで表現し，各単位流域はいわゆる線形河道で結ばれるものとして，多くの資料によって，流域の表層地質ごとに流出モデルを同定した結果が Table-1 である。なお，このモデルにおいて線形河道を流下する洪水の伝播速度は 4 m/sec である⁵⁾。この同定に際して，長良川 (1072 km²) の資料も用いたが，Fig. 16 は流域図で，区切られた単位流域 (62ヶ，平均 17.3 km²) も示されている。Fig. 17 は流出ハイドログラフの比較であって，かなりの精度で計算されていることが示されている。

この流出モデルを用いて，洪水予報の効用といったものを検討するわけであるが，その前に流出モデルの適合性を検討したものが Fig. 18, Fig. 19 である。Fig. 18 は大戸川の流域図で流域面積は 189 km² で，11ヶの単位流域に分けて上記の流出モデル（この場合は花崗岩流域）を適用した。Fig. 19 はその結果であって，算定結果は観測値と良好な一致をみせている。すなわち，地形図と表層地質という2つの情報のみを使用し，Table 1 の流出モデルパラメータを適用することによって，観測降雨から Fig. 19 に示す程度の精度をもって流出ハイドログラフが算定できるのである。

降雨と流出ハイドログラフとの関係についての研究はこの程度に進展しているのであって，降雨状況さえ観測すればそれによる出水状況は精度よく推算できるのである。

(2) 予報の効用からみた出水予知

非構造的防災において予警報は極めて有用な方策であることはすでに述べたとおりである。避難行動を効

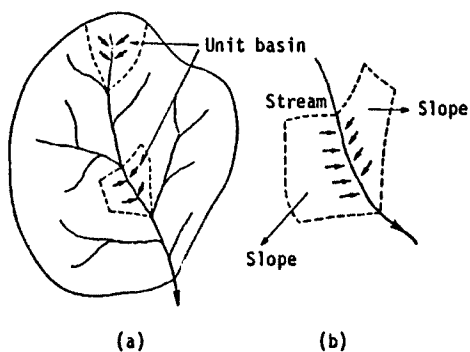


Fig. 14. Constitution of river basin.

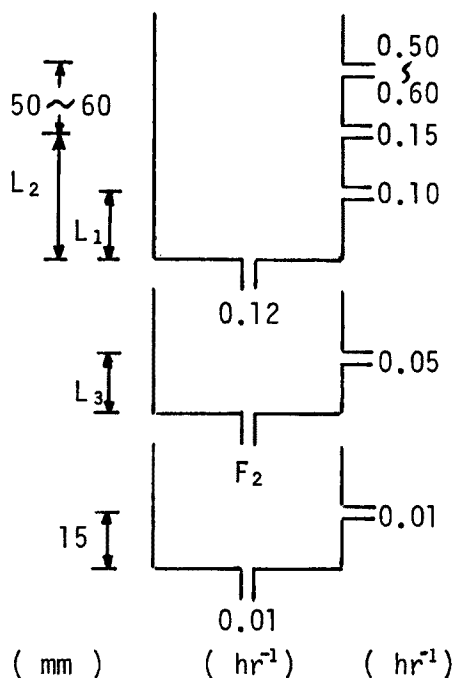


Fig. 15. Tank model of unit basin.

Table 1. Synthetic parameters of the runoff model.

geological feature of basin	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	L ₃ (mm)	F ₂ (hr ⁻¹)	TL (hr)
volcanic rock	30~40	60~75	15	0.08	1
granite	15	60	15	0.05	1
palaeozoic	30	75	5	0.04	1
tertiary	15	40	5	0.04	1

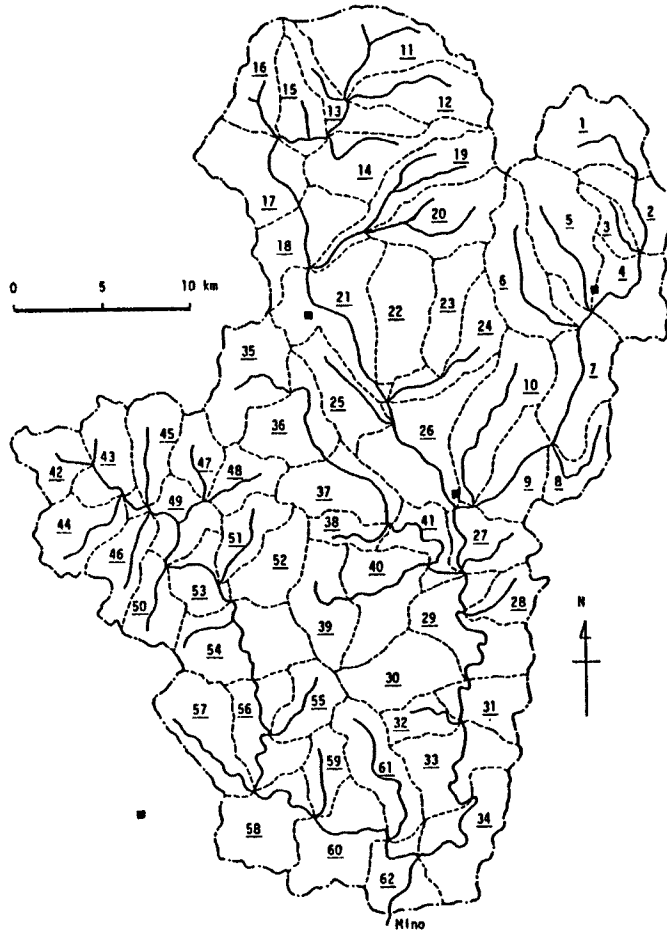


Fig. 16. Nagara river basin at Mino (1072 km²).

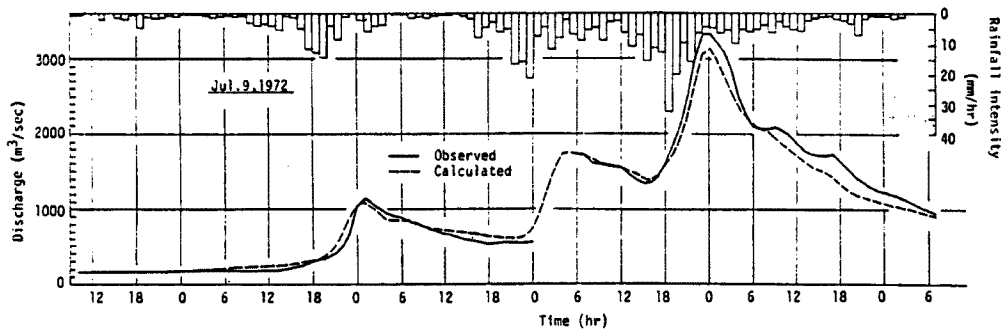


Fig. 17. Result calculated for developing model parameters.

果的に行うためには、異常事態の発現を前もって知る必要がある。さらに、予知時刻と発現時刻との間の時間を余裕時間と呼ぶこととすると、ある程度以上の余裕時間がないと予報の効用はないのである。

ところで、Strahler 流の order 解析を行うと、分岐比、河道長比、流域面積比、などについての地形則が成立することが知られている。5 万分の 1 の地形図を用い、多くの河川流域について地形解析を行った結果から、1st order の単位流域の面積を 2 km²、河道長を 2 km とし、2nd order 以上を Fig. 20 中の表のようにすることによって、いろいろの大きさの河川流域が、平均的な意味において、表現できるとした。たとえ

ば、流域面積 42 km^2 の河川は 3rd order の河道までもち、 682 km^2 の河川は 5th order までの河道をもつと考えたのである。

このような仮想的な河川流域について、Fig. 20 の左側に示した雨が流域全域に降ったとして流出ハイドログラフを計算した。この場合、表層地質を花崗岩とし、Table 1 の流出モデルパラメータを使用した。計算された流出ハイドログラフのピーク流量の発現時刻を各流域ごとに点描した結果が Fig. 20 中の白丸印である。さらに、参考のためにピーク発現時刻より 2 時間前、3 時間前および 4 時間前をそれぞれ白三角印、黒の逆三角印、黒丸印で示してある。

ところで、観測降雨の情報を用いて出水のピーク、換言すると異常事態を予知するためには降雨のピークを確認する必要がある。降雨ピークの確認はピークの降雨後から 1 時間程度の間降雨がピーク時の降雨強度より小さいことを確かめることによって可能である。すなわち、図中の破線で示した 2 本の線間の時間滞において降雨ピークの確認ができるのである。いま、平均的な意味でこの時間帯の中程の時刻で降雨のピークが過ぎたことを確認したとすると、それから出水ピーク（異常事態）の出現までの余裕時間は、3rd order (42 km^2) の河川では 1 時間 10 分、4th order (170 km^2) の河川では 1 時間 50 分、5th order (682 km^2) の河川では 3 時間 10 分、6th order (2730 km^2) の河川では 6 時間 30 分ということになる。

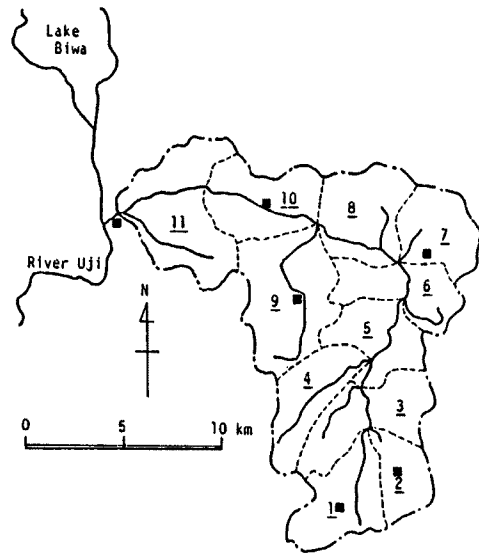


Fig. 18. Daido river basin (189 km^2).

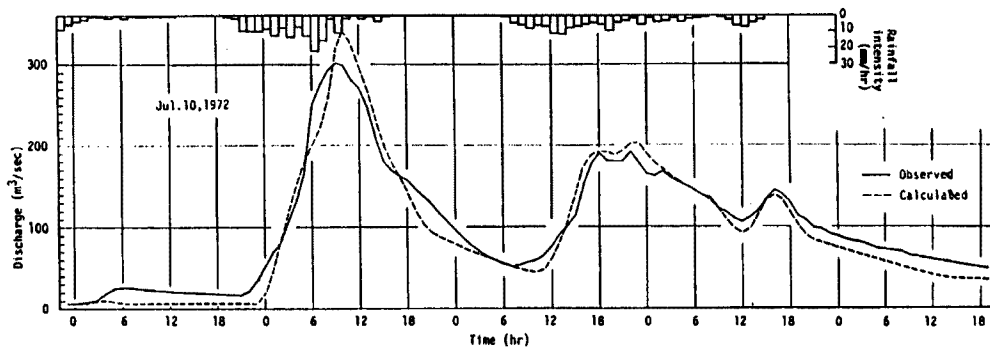


Fig. 19. Verification of the runoff model proposed.

一般的にいて、情報の伝達、避難の準備、避難の行動時間などを勘案すると、余裕時間が 3 時間以下では予報の効用はあまりないといえる。このことを上記の結果に適用すると、流域面積が 600 km^2 程度より大きい河川では、観測降雨を流出モデルに用いて行う洪水予報が有用であるが、これより小さい流域面積の河川では、観測降雨から計算をはじめたのでは余裕時間が少なく予報の効用が小さく、どうしても降雨予測などの工夫を必要とするということがいえるのである。このことは防災という目的から洪水予報の研究をみると、どんな情報から始めるべきかを示唆するものである。

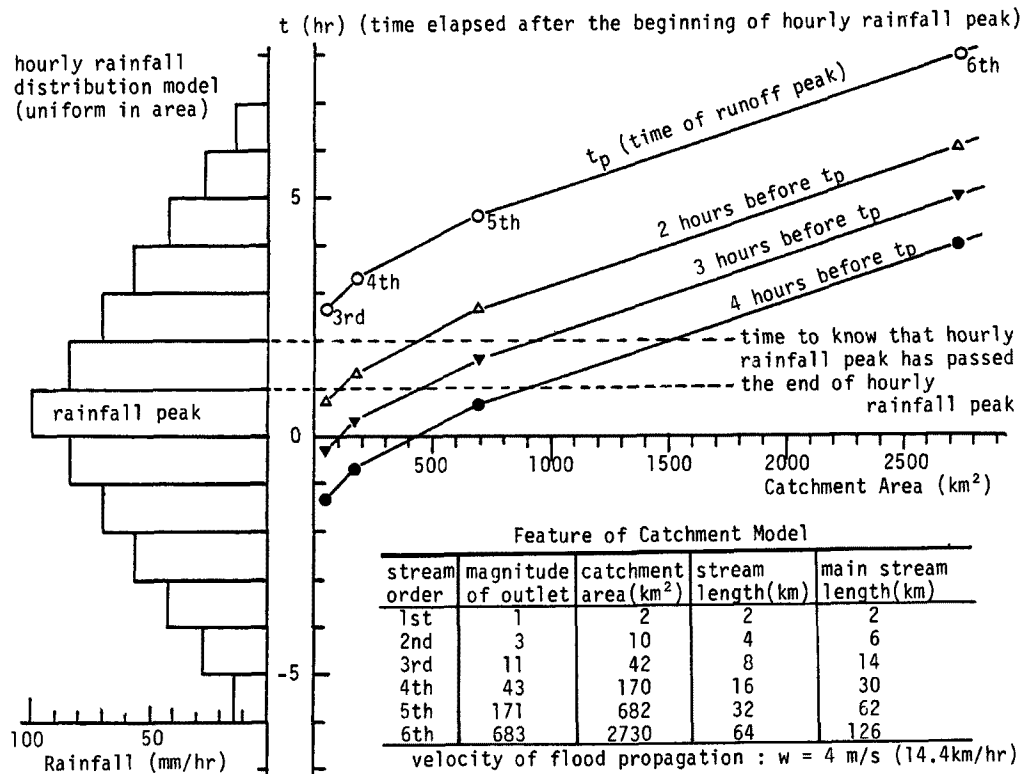


Fig. 20. Relation between lag time of runoff peak and catchment area.

4. 結 語

以上、総合防災の枠組みといったものについて述べ、その枠組みの中の1, 2の要素についての研究結果を説明してきた。はじめに述べたように、総合防災といってもそう新しい定義づけをしたわけでないが、研究というものが細分化され、世の中で防災という言葉があまりにも安易に使われていることもあって、総合的に防災のあり方を再検討してみたいという意味で使ったのである。

検討の結果、防災の目標をきちっと定めようとして、すなわち何を護ろうとするかを明確にしたうえで、まず構造的防災施設を safe-fail の設計規範を適用して設計・構築し、ついで非構造的防災の方策を fail-safe の設計規範を適用して用意しておくことによって、総合防災の実があがることを明らかにした。異常自然現象の特性とわれわれが持っている防災・減災の手段との関係から、総合防災は上記の内容をもたざるをえないのであって、このことを正しく理解することによっていろいろな疑問にも答えられるのである。たとえば、月にまで人類が行ける程に科学技術が発達した今日、何故自然災害は防止できないのかという質問や河川堤防の耐用年限は何年ぐらいかという質問に対する答はどうだろうか。前者に対しては自然のもつ破壊力の上限が大きすぎて現実の設計基準はこれより低いところに設定されているので、超過外力の発生時には災害が生起することはやむをえないということが答である。後者に対しては、洪水は毎年毎年起こるがその際河川堤防は計画された防災基準以下の洪水を常に安全に流下させなければならないので、耐用年限というものは考えられず、いつの時代でも防災基準以下の洪水に対して安全であるように維持管理を怠ってはならないということが答である。

最後に強調したいことは、洪水予報の例で明らかにしたように、総合防災を目的とした場合、どのような観点から研究をすべきかを明確にしておかないと、研究成果があまり役立たない場合があるということであ

る。こうしたことが考慮され、いろいろの角度から総合防災について研究が進み、防災・減災の実が飛躍的にあがることを期待するものである。

参 考 文 献

- 1) 鈴木次郎・望月俊紀：近年の機械観測による資料からある地域に起こり得る最大地震を推定する試み，自然災害科学，Vol. 2, No. 1, 1983, pp. 13～17.
- 2) 高棹琢馬：気象災害に関する極値・集中豪雨，土木学会誌，Vol. 68, No. 9, 1983, pp. 7～11.
- 3) 岡田憲夫：災害のリスク分析的見方，土木学会土と構造物委員会，「土と防災」講習会テキスト，1985.
- 4) 石原安雄：洪水災害の発生と出水予知，京大防災研究所年報，22号-A，1979, pp. 1～17.
- 5) 小葉竹重機・石原安雄：タンクモデルおよび集中面積図を利用した洪水流出モデルの総合化，土木学会論文報告集，337号，1983, pp. 129～135.

STUDY ON INTEGRATED MANAGEMENT OF DISASTER PREVENTION

By *Yasuo* ISHIHARA

Synopsis

After enormous energy produced due to an extraordinary natural phenomenon propagates to the domain of human living, various kinds of things on the earth and social systems are destroyed by such a destructive energy. Against such natural disasters, we have two kinds of measures: structural and non-structural measures. Analyzing these two measures by the method of fault-tree, the characteristics of prevention systems of measures are disclosed.

Because the prevention system of structural measures is characterised by series formation and the upper limits of natural destructive forces can not be defined, it is proposed that the structural measures should be designed by the safe-fail principle. On the contrary, because the prevention system of non-structural measures is characterised by parallel formation, it is also proposed that the non-structural measures should be designed by the fail-safe principle.

Finally, the several researches available for the design of such a system, for example, on the comparison between magnitudes of design floods at upstream reach and downstream reach in a river and on the use of runoff model in flood forecasting, are presented from viewpoint that these are related to some elements of the prevention system.