

洪水災害防止における FAIL-SAFE と SAFE-FAIL

石原安雄

FAIL-SAFE AND SAFE-FAIL IN FLOOD DISASTER REDUCTION

By Yasuo ISHIHARA

Synopsis

River levees and reservoirs for flood control are usually constructed under a design criterion decided by reliability idea. Since these are bounded in capacity of prevention of flooding, the flooding in the area where people are living happens certainly at a heavy rainfall over the design criterion.

A variety of measures to decrease the damage of social life or activity should be considered by using safe-fail idea. Also, the comprehensive measures to protect the human life and property from flooding is emphasized to take by applying fail-safe idea.

まえがき

20年以上前のことになるが、人工衛星が地球をまわり始め、月からのテレビ放送を見ていた頃に、「人類が無事に月の世界へ探検に行くことができるほどに科学技術が進歩しているのに、なぜ自然災害を完全に防止することができないのか」と聞かれ、返答に窮したものであった。また、例えば、洪水防御計画をたてるとき年超過確率1/200の大雨を対象としているが、それを越える規模の大雨が降ったときにはどうするのか、あるいはどのように対処すべきかということに関する規範といったものがあるのかということ問い詰められたこともあった。もちろん、自然現象は非常に複雑であって未知の事態がしばしば起こるので対策が非常に難しいとか、災害対策基本法に基づいた地域防災計画に規範が示されているとか、といったその場逃れの返事をしてきた。しかし、これらに対する納得のいく説明ができないまま今日に至ったのである。

自然災害は自然のもつ大きな営力と社会のもついろいろの耐力とが不均衡に相接するところに発生する。したがって、自然災害の防止軽減策を考察するに当たっては、自然のもつ営力の特性を把握するとともに、社会のもつ耐力の特質を分析することが必須条件である。以下、本文は、大雨による洪水災害を対象として、これらについて考察を行ったうえで、洪水災害に関して、何を、どのような手段で、どの程度守るべきかという課題に関して考究したものである。

2. 洪水災害における営力と耐力

大雨ないしは洪水が防災対象地区へ災害を起こす営力として作用をする仕方には、

- a. 本川や支川に生起する出水
- b. 地区内に降った多量の雨水による内水

c. 地区内外に降る豪雨に起因する斜面崩壊と土石流

がある。これらの営力の大きさは結局のところ大雨の規模に支配されることは明らかである。そして、現在のところ、大雨の規模の上限についての理論的根拠はない。因みに、ある時間内の雨量について、世界と日本との比較が試みられているが¹⁾、世界記録の60～80%が日本記録である。また、気象台始って以来の記録的豪雨であったという報道がしばしば聞かれる。これらのことは、洪水、内水、土石流などの大雨による営力には上限が設定しにくいことを示しているのである。

一方、このような営力に対して社会は、ハード面において、公共事業によって

- a. 出水に対しては河川堤防
- b. 内水に対しては排水施設
- c. 土石流に対しては砂防工

を造って対抗している。また、行政指導等による個人的な耐力として、

- d. 各種の耐水施設、防水設備
- e. 危険地区からの逃避

を行っている。さらにソフト面においては、大雨、洪水等の予警報や避難・救助活動などを用意している。

3. 洪水災害防止の目標と fault tree

さて、洪水災害防止の目標は何だろうか。災害対策基本法によると、防災の目的は、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ことであると規定している。しかし、この表現では、何をどう守るかということが必ずしも明確ではない。以前著者はこのことについて論じ、まず住民の生命、財産を守ることであり、そのうえで住民の生活環境を守るといふより高いところに目標がおかれるようになり、もし可能ならば社会全体の生産環境まで守るまでになるだろうことを指摘した²⁾。すなわち、河川防災の第一の目標は住民の生命・財産であったが、最近の傾向として、住民の毎日の生活を守るといふことが強い要望となり、床下浸水はいうに及ばず、道路の浸水も交通が途絶するので防止してくれといった要望にまで高まってきているのである。

さて、生産環境まで守るといふことはひとまずおくとして、生活環境を守るといふ観点からすると、地区内に浸水を生ずることが即災害である。そこで、システムの故障の因果関係を階層構造としてとらえるときに利用される fault tree によって、浸水事象を表現したものが Fig. 1 (a), (b) である。同様の分析は岡田³⁾によって行われているが、一般に外水氾濫は内水氾濫に比して比較にならないほど大きな浸水をもたらすので、ここでは内水型と外水型に分けて図示した。図中、円で囲んだ事象は基本事象を示し、また、OR で示した記号はその下位の事象のうちどれが起こっても上位の事象が生起することを示し、これに対して AND で示す記号はその下位の事象のすべてのものが起こったときにのみ上位の事象が生起することを意味するものとする。

Fig. 1 (a) は内水型浸水被害の fault tree である。排水地区内に設置されている調節池の容量が不足しているとき、あるいは排水路の排水能力が不足していたり、つまっていたりしているときに豪雨があると急な出水となる。また、排水ポンプの故障、ポンプ能力の不足、あるいは外水位の急な上昇のいずれかが生起すると、内水の排水不良が生じてくる。そして、急な出水と排水不良のいずれが生起しても内水型洪水となるのである。しかし、住民側で、土地利用を適正に行っているか、建物等の耐水性を保証するような設備を完備しておれば、浸水被害は起こらないはずである。

Fig. 1 (b) は外水型浸水被害の発生構造を示したものである。外水に対する直接的防護施設は河川堤防である。したがって、本川、支川にかぎらず、降雨の規模が異常に大きくて堤防を越水するような出水があるか、堤防が不完全であったり出水期間が異常に長かったりして破堤するかしたときに外水氾濫とな

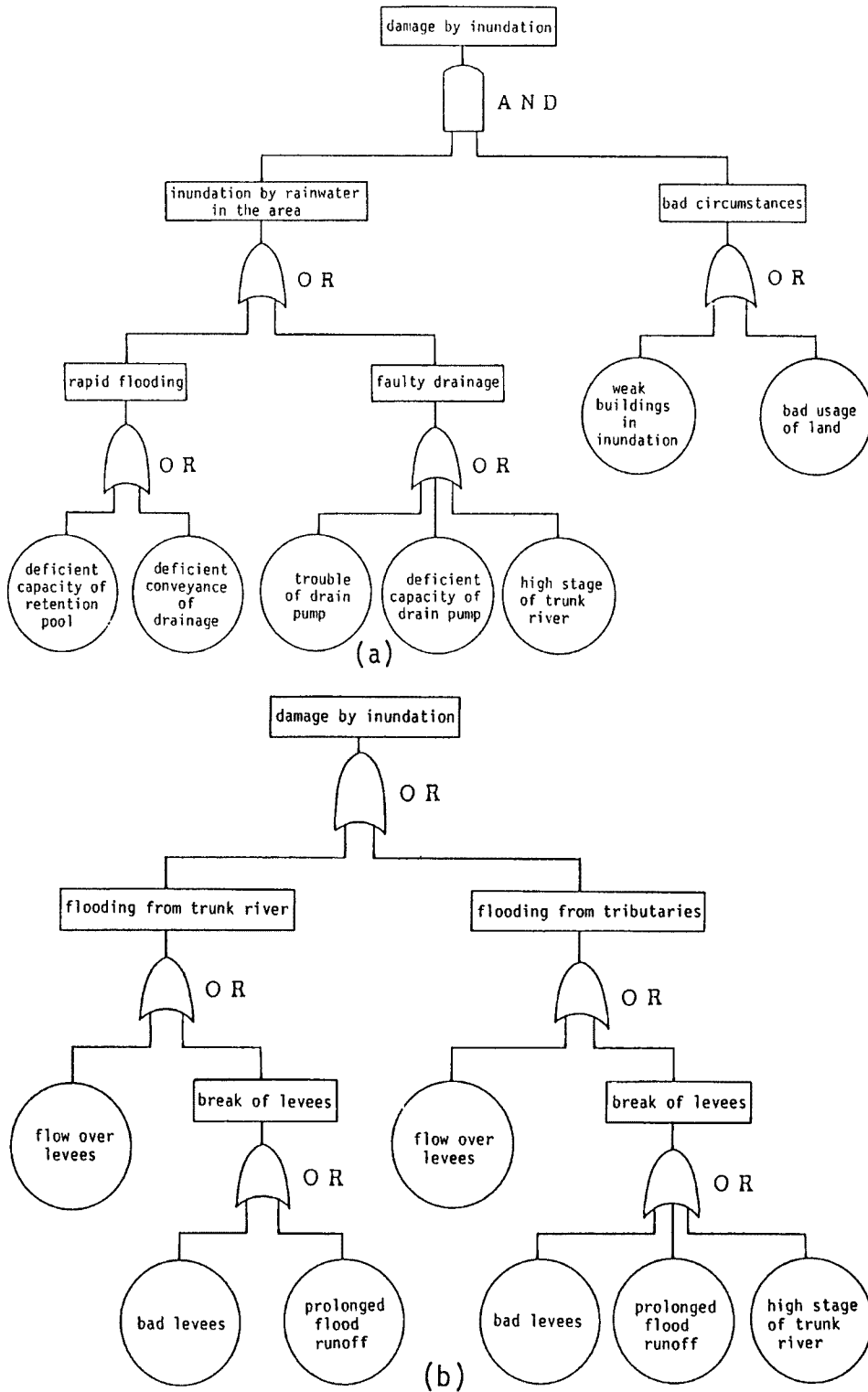


Fig. 1. Fault tree of flooding.
 (a) Caused by heavy rainfall in the area.
 (b) Caused by breaking of river levees surrounding the area.

るが、それが本川で起こっても支川で起こっても大きな浸水被害が生ずることになる。

つぎに、人命損失に関する fault tree を考えるに際しては、Fig. 1 (a) 中の内水型洪水の発生、Fig. 1 (b) 中の本川および支川からの予期せざる洪水氾濫、並びに前述した思わぬ土石流の発生などが基本事象となることはいうまでもない。いま、こうした基本事象を急な出水という言葉で示すことにすると、この場合の fault tree は Fig. 2 のようになる。すなわち、避難の判断は公共機関からの適切な予警報があれば確に行えるが、たとえ予警報が不十分であっても過去の経験等による熟成した災害文化があれば判断を誤らないはずである。つぎに避難の判断は誤らなくとも、急な出水のときには避難に遅れを生じ、さらに、避難は適切な時期に開始したとしても避難路や避難場所が不備であると避難困難ということになる。しかし、たとえ、避難困難となって取り残されるようなことになっても、十分に訓練された救援組織が完璧な状況把握をしておれば人命は救助されるはずである。すなわち、救助システムの不備と避難システムの不良とが同時に起こるときにははじめ人命の安全が損われるのである。

Fig. 1 および Fig. 2 で示した fault tree において注目すべきことは、ハード面での対策に関しては、OR 記号で示されており、下位の事象(故障)のうちいずれのものが生起しても次に続く事象(故障)が起こるという構造であるということである。さらに、ソフト面での対策に関しては、AND 記号も示されて

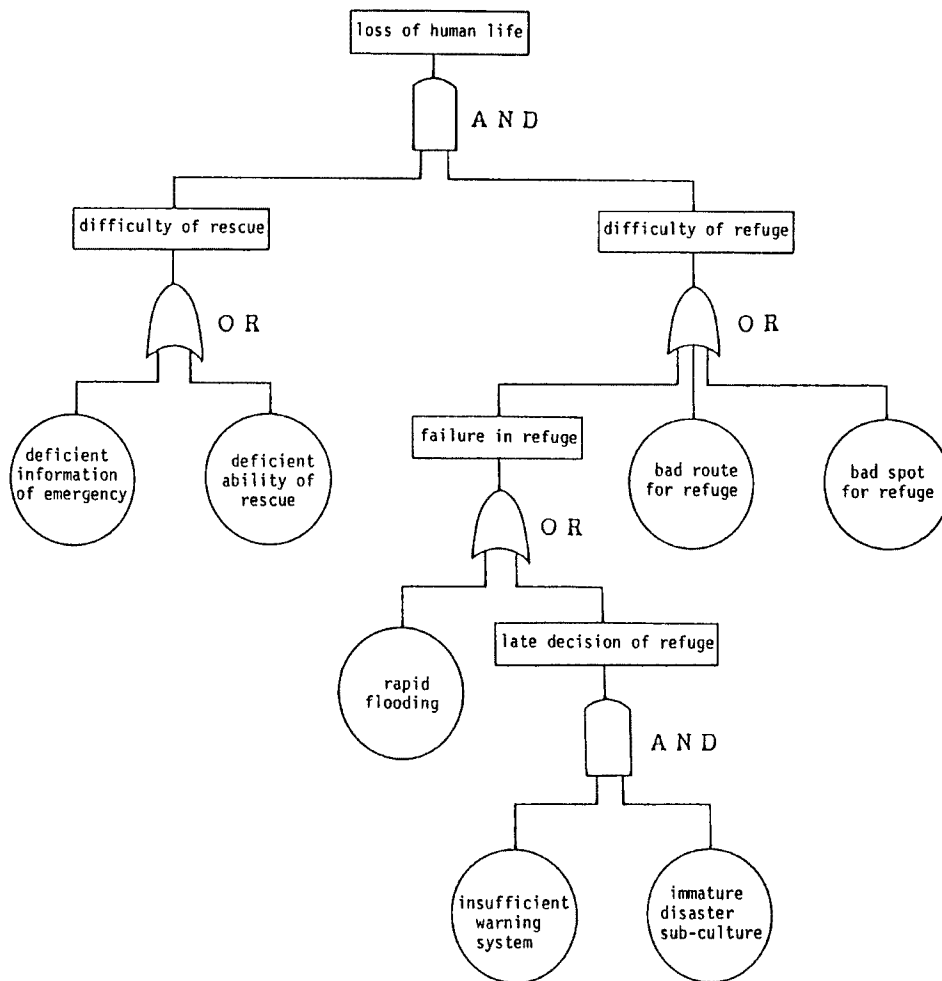


Fig. 2. Fault tree of loss of human life.

おり、下位の事象が同時に生起しなければ次に続く事象が起こらないという構造を含んでいることである。

4. 洪水災害防止システムの特性

以上の fault tree による分析をもとに、洪水災害防止に関するシステム図を構成することができる。**Fig. 3** は豪雨時に人命を守るという防災を、**Fig. 2** に基づいてシステム図で表現したものである。豪雨と人命損失とは並行する2つのサブシステムで結ばれており、その1つは救助に関するもの、他は避難に関するものである。たとえば満足に避難ができない場合でも救助組織がしっかりしておれば人命の安全は守られるし、逆に救助組織が不備であっても満足な避難ができれば安全であることを示している。住民の避難行動に関するサブシステムについてみると、まず適切な予警報があるか、住民自身による豪雨や出水の予見があれば避難の判断を誤らないこと（並列システム）、つぎに、避難の判断の誤り、急な出水の生起、避難路の不備、避難場所の不足のいずれのものがあっても満足な避難はできないことを示している（直列システム）。さらに、**Fig. 2** と **Fig. 3** を比較すればすぐわかるように、fault tree で AND 記号で示されている構造はシステム図では並列システムで、OR 記号は直列システムで表現されているのである。

Fig. 1 (a), (b) の fault tree をシステム図を表現したものが **Fig. 4** (a), (b) である。(a) の内水型浸水被害では並列システムとなっているが、(b) の外水型浸水被害では直列システムとなっており、

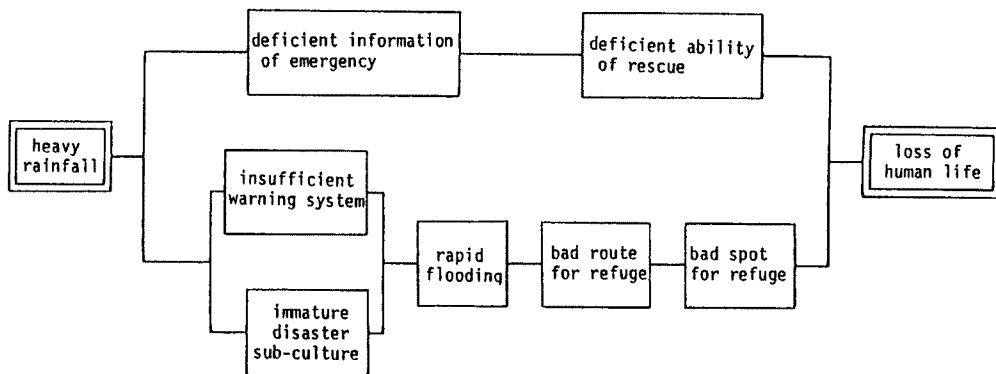


Fig. 3. System diagram of loss of human life.

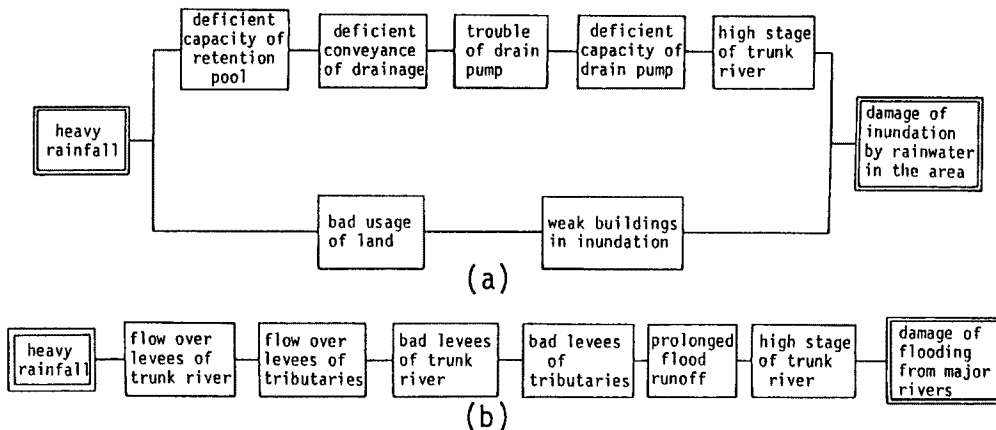


Fig. 4. System diagram of flooding.

(a) Caused by heavy rainfall in the area.

(b) Caused by breaking of river levees surrounding the area.

システムの中のいずれの基本事象（故障）が起こっても浸水被害が発生し防災という目的が達成できないことを示している。

5. fail-safe と safe-fail

fail-safe の設計原理とは、簡単にいえば、システムの一部が故障してもそれに代わるサブシステムが働いて、安全に目標に到達できるようにすることである。故障がなければそのサブシステムは働かないわけで、並列システムで表現される。人工衛星の安全な飛行を確保するためのシステムはその好例である。一方、safe-fail という言葉がある。それはシステムは何らかの故障のため安全に目標に到達することができなくなった場合でも、特定の要素については安全性を保つようにすることをいう。自動車のシートベルトは、自動車が衝突で動かなくなった場合でも、人命の安全性を確保するためのものであり、自動車の運行を目的としたシステムの中における人命保護であって、safe-fail の適例である。

さて、Fig. 3 および Fig. 4 は、現在の河川をとりまく環境を分析してえられた人命損失および浸水被害の生起過程を示すシステム図である。つぎに、これらのシステム図において、上述の fail-safe と safe-fail がどのように対応しているかを検討する。

豪雨時に人命損失を生ずる過程を示した Fig. 3 においては、避難行動を示すサブシステムと救助活動を示すサブシステムが並列システムを構成している。したがって、例えば、避難行動が何らかの原因によって fail の状態（満足な避難ができない状態）になったとしても、適切な救助活動ができれば人命の safe（保護）の状態を確保することができるのである。すなわち、failure in safe である。

Fig. 4 (a) の内水型浸水被害を示すシステムでは、土地利用の適正化、耐水建築といった逃避的対策が考えられており、並列システムとなっている。したがって、fail-safe の対策がとられていると考えてよい。ここでは、地区内に降った降雨だけでは潰滅的な浸水状態は起こらないということを前提としている。問題は Fig. 4 (b) で示した外水型浸水被害の場合である。一見してわかることは、直列システムであって、どの基本事象が起こっても全体のシステムが fail の状態となることである。また、このシステムの中の基本事象はすべて河川堤防からの越水または河川堤防の決潰に関するものである。結局のところ、本川、支川を問わず、堤防からの越水または堤防の決潰が起これば、必ず外水型浸水被害が発生し fail の状態となるのである。こうした状況となっても何かを守ろうとして対策をとるならば、それは safe in failure といえる。各所にある水屋や軒下に吊された舟などは外水型浸水は止むをえないが（fail の状態）、財宝や人命の安全は保つ（safe の状態）という意味で safe-fail の対策といえることができる。

6. 安全性の評価

洪水災害防止軽減のために現在とられている各種の方策を整理分析し、その役割分担といったものが明らかになったが、つぎに危険性、逆にいえば安全性について検討する。

この課題は、Fig. 3, Fig. 4 で示したシステム図において、各要素の故障率、各要素間の相互依存性等が示されれば比較的簡単に評価することができる。しかし、これらのシステムにおいて、各要素の故障率とはどんなものか、相互依存性はどうか、等の厳密な評価はかなり難しい。

いま、Fig. 5 のように、2つの要素からなるシステムを考え、それぞれの要素の故障率を、並列システムにおいて $1/n$, $1/m$, 直列システムにおいて $1/N$, $1/M$ とし、各要素は独立と考えると、システム全体の故障率は、それぞれ、

$$\text{並列システム} : (1/n) + (1/m)$$

$$\text{直列システム} : (1/N) + (1/M) - (1/N) \times (1/M)$$

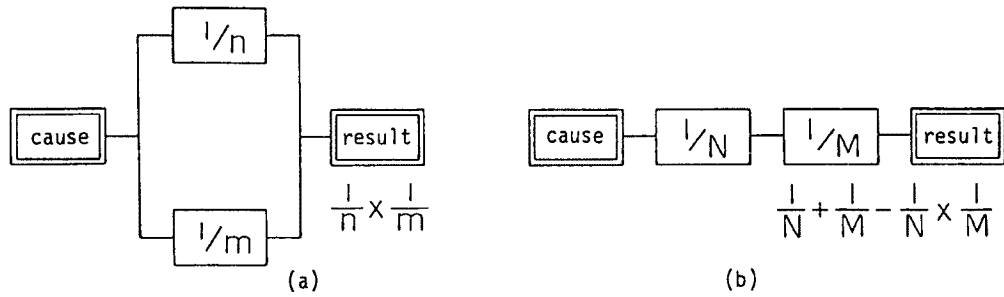


Fig. 5. Probability of system failure.
 (a) Parallel system.
 (b) Serial system.

で与えられる。

Fig. 3, Fig. 4 のシステム図における各要素の故障率とは何か、要素間の相互依存性をどう評価するか、これから研究すべき課題ではあるが、以下では並列システムと直列システムの安全性の比較を目的としてつぎのように考える。すなわち、もっとも簡単に、多くの経験の中で図示の事象がどのぐらいの割合で起こるかという確率でもって故障率が表わされるとし、各要素は互に独立とする。

Fig. 3 の人命損失のシステム図について、各要素の故障率を著者の経験に基づいた概略値として Fig. 6 のように仮定しよう。個々の要素の故障率を $1/2 \sim 1/40$ とかなり大きく仮定しているが、全システムの故障率は $0.0335 \doteq 1/30$ と計算される。これに対して、Fig. 7 は Fig. 4 (b) の浸水被害について仮定した故障率を示したものである。各要素の故障率を $1/50 \sim 1/400$ とかなり小さく仮定しているが、全システムの故障率は、 $0.0491 \doteq 1/20$ と計算され、Fig. 6 の人命損失のその $1/30$ より大きくなっている。

以上の例題からわかることは、並列システムとすると、その中に含まれている要素の安全さが少々劣っていても（故障率が大きくても）、全体としての安全性をかなり高水準に保つことが可能であり、逆に直列システムの場合には高水準の安全性の確保は非常に難しいということである。このことは防災対策や防災規範を樹立するうえで極めて重要な意義をもってくるはずである。

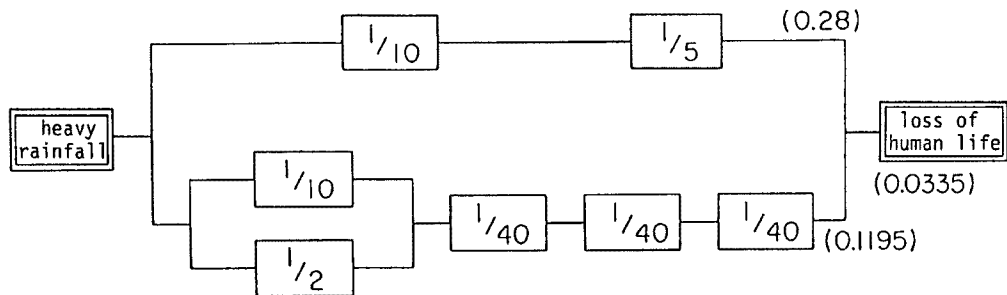


Fig. 6. An example of probability of Fig. 3.

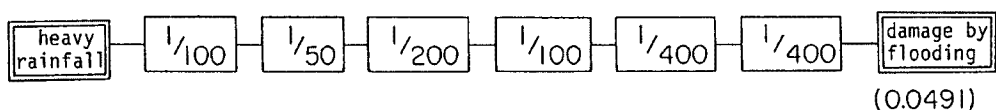


Fig. 7. An example of probability of Fig. 4 (b).

7. 洪水災害防止軽減の規範

以上の分析と考察から、洪水災害の防止軽減に関する目標と方策、換言すると規範についてつぎのような結論を導き出すことができる。

A. 生活環境を護ること

(1) 被害は内水型浸水と外水型浸水によるものに分けられるが、各々の設計外力以下の豪雨や出水によって被害が生ずることがあってはならない。したがって、そうした豪雨や出水がいつ起こっても安全に処理されるように、常時、施設の防災機能が維持されるよう保守、点検、時としては更新をすることも必要である。換言すると、耐用年限は無量大と考えるべきではない。これらの防災施設の中には、排水ポンプ、ゲート、遮水壁など機械的設備があって、人工的に操作されるものがある。Fig. 4のシステム図からわかるように、これらの故障は直ちに浸水に連がるので、その操作システムはfail-safeの設計としておく必要がある。

(2) 昭和62年3月河川審議会が超過洪水対策について画期的な答申を行ったが、大規模な豪雨による浸水被害は必ず生起する。すなわち浸水被害、換言するとfailの状態が起こることになるので、生活環境として何をどの程度護るかが重要な課題となるのである。safe-failの考え方の導入であって、スーパー堤防や二線堤防等の構想はこの考え方に従ったものといえる。なお、この場合、土地利用規制と各戸の耐水対策を並行して行うことができれば効果は倍増するだろう。

B. 人命を護ること

(1) 前項の(1)で記したように、ほとんどの河川では、すでに堤防が建設され、内水排除施設が整備されて、設計基準以下の豪雨や出水に対して生活環境が護られているが、このことは同時に人命も護られていることを意味している。したがって、人命損失が生ずるのは、設計基準を越える豪雨や出水があって、防災施設システムがfailの状態になったときである。そのときに人命を護ろうとするのであるから、防災施設システムからみれば、safe-failの考え方に対応する。しかし、人命保護は何物にもかえがたい防災の第1の目的であるから、絶対にsafeという目標をたてなければならない。すなわち、人命保護を目的としてfail-safeの考え方から諸施策を講じなければならないのである。

(2) 具体的には、豪雨や出水の正確な予警報を住民に提供するとともに、いわゆる新住民に対して、水害についての土地の特性や過去の経験等の知識の周知につとめて、緊急時に逃げおくれをしないようにする。また、避難路や避難場所を整備して、避難行動に関する諸要素の充実をはかる。それと並行して、救助組織の訓練と内容の充実をはかるとともに、被害状況の的確な把握のための手段を講ずる等の救助行動に関する諸要素を完備しておくのである。

(3) 上記の諸施策の実行に際しては、各種の通信システムの利用が必須の要件となる。新しい通信システムほど経験不足のため非常時に故障が多いものである。fail-safeのシステムになるよう十分な検討をしておくことが重要である。

8. む す び

わが国の洪水災害防止対策において、その目標が人命保護、農地保護、都市生活環境保護と、形式的な意味で、変遷してきたように思う。そのためと考えられるが、最近の傾向として生活環境保護が全面に出てきて、人命保護ということが表に出ることが少ないように感じられる。もっとも、ハードな洪水防衛施設を建設すれば、生活環境保護とともに人命も保護されることはいうまでもない。

しかし、豪雨規模の上限が設定できず、しかもハードな洪水防衛施設の防災能力には限界があることを考えると、たとえば超過洪水が発生したときの対策を、生活環境保護という面だけでなく、人命保護につ

いても十分に検討しておくことが極めて重要であると考えられるものである。この場合に、safe-fail, fail-safe の考え方の導入が有用となるのである。

参 考 文 献

- 1) 高棹琢馬：気象災害に関する極値・集中豪雨，土木学会誌，1983. 9，pp. 7-11.
- 2) 石原安雄：土木技術者と自然災害，土木学会誌，1983. 9，pp. 2-6.
- 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，昭和60年.