総合都市研究　第8号　1979

大地震後に想定される地下空間水没の確率評価試案（1）

新　井　邦　夫*

要　　約

東京0のメートル地帯を走行する地下鉄トンネルは大地震後浸水被害を受けやすい。本論文は，この種の地下空間水没による被害を想定する方法を確立するための第1段階として，水理現象としてはほぼ同一の地表部における地震水害に関し東京都防災会議が示した決定論的方法に，独立変数の不確定性を分散として考慮した時の従属変数の分散を示した。

すなわち，破堤個所数，破堤幅および溢流深を確率分布として与え，ある長さにわたる堤防の全破堤幅，氾濫拡がり面積，およびある時間後の湛水深の平均，分散（あるいは変動係数）を求める式と，その式による数値計算例を示した。

計算例において，破堤個所数，破堤幅，溢流深の変動係数がそれぞれ0.71，0.57，0.58である時，全破堤幅，全氾濫拡がり面積，1時間後の湛水深のそれらが，それぞれ1.29，1.35，1.58になり，わずか1 km^{2}の仮想上の土地で平均2,724人の死亡者が破堤後に出るが，その変動係数は2.08にも達することが示された。

1.　はじめに

我々は，大地震後，地下空間に浸水する可能性があることを予想し，東京において最もその可能性の強い，江東地区の地下鉄トンネルの現状を論じた（新井他）。そこでは，伏流水が，構築壁面の破壊部からトルネル内に浸入する場合と，地表に湛水した水が海面より低い地表に設置されている駅出入口等から浸入する場合とが考えられることが示され，又これらが確率的性質を極めて強く有していることから，浸水量の時間的変化を直接求めることを避け，トンネル内浸水総量とトンネル内水位の関係を示すことによって，浸水危険性を論じた。そこに示された各種の空間体積と水位の関係を示した図は，万一浸水した場合，緊急対策会議の場において必らず必要とされる。

一方，事前対策を立案するためには，この種の浸水が発生した場合の被害を予測しておくことも必要である。しかしながら，前述したように，構築壁面が崩壊するかどうか，万一崩壊した場合その面積はどれ程になるか，あるいは崩壊時における外水位はどれ程か，等々，浸水量を規定する変量はすべて確率的に定まるから，これを決定論的に論じることは不可能に近いと考えていた。

一方，東京都防災会議は，その報告書（1978）において水理学的には我々が問題としているトンネル内浸水と同質の，破堤による低地の浸水（地震水害）を決定論的に論じ，死者368，負傷者1076という人的被害を想定した。

この想定のための裏付け調査および研究の密度は極めて濃く，それゆえに想定された数値の確度は高いと考えたい。しかしながら報告書自身本文中に「……これ以外の個所が破堤ししないといっているのではない」（p382）又「破堤幅の推定は大変大雑把であって………」（p400）と述べているように，いかに詳細な検討に基づこうと，この想定が，決定論的手法をとっているために，おこりうる多くの事象のうちの唯一の例を示したにすぎないとする考え方も取りうる。おそらく報告書を一片の反故にすぎぬと無視するであろうこの種の人々を納得させるためには，何らかの方法で想定値の信頼度を示しておかなければならない。この信頼度を示すための方法として考えられるひとつに，前提となる独立変数に分散を配慮した時，すなわち独立変数の不確定性を分散で具現した時の従属変数の分散を示しておくことがある。

本論文は直接地下空間の浸水を扱かってはいず，地震を原因とする破堤による浸水に関し，権威ある機関が示した想定値の信頼度を確認する方法を示している。地震

*東京都立大学都市研究センター・工学部

後のトンネル内浸水と地表への浸水は，流水が浸入する場所がトンネル内か平面上かの違いだけであって，水理現象としては同一と考えられる。したがって，上記報告書の想定値の不確定性を論じ，自由度を1ランク上げる方法を示した本論文は，そのまま地下空間確率評価法の基本概念を示すものである。

次節以後では，まず報告書の計算手順の概要を，次いで被害想定のための各要素の分散を求める方法を，最後に簡単な数値計算例を示した。

2. 報告書に示された計算手順と仮定

報告書には，最終の人的被害想定値を算出するまでに，次に示す仮定と計算手順が示されている。

イ）震源，マグニチュード，震度分布および津波の大きさ・伝播は関東大震災並とする。

ロ）地震発生時の潮位は朔望平均満潮位（A. P. +2.10m）とし，干満の差は1.5ｍとする。

ハ）地盤液状化の危険性有無，現況堤防・護岸の安定計算結果および，過去の震災例から得られる天端沈下量から破堤場所を決める。

ニ）破堤によって堤防は，その堤内地盤高に等しくなるとし，破堤幅は過去の例を統計的に整理した結果をもとに，大河川200メートル，中小河川100メートルと固定する。

ホ）溢水量は，矩形断面広頂堰公式によって計算される。すなわち，

$$Q=\alpha \cdot B \cdot H^{\beta} \quad (m^3/sec) \tag{1}$$

ここで，Ｂは破堤幅，Ｈは越流水深，およびα，βは定数である。

へ）破堤直後の氾濫水の拡がりに対しては，有賀（1978）が示した次式が成立する。

$$Y=\gamma \cdot t^{\delta} \cdot g^{\frac{\delta}{2}} \cdot H^{1-\frac{\delta}{2}} \quad (m) \tag{2}$$

ここにＹは破堤口中央から拡がり先端までの鉛直距離，Ｈは越流水深，ｔは時間（秒），ｇは重力加速度およびγ，δは定数である。

ト）堤内一面水没後は，あらかじめ求めた貯水域水位――湛水量曲線から仮想湛水位を算出する。

チ）破堤後5分後までは溢水流によって破堤部近傍で死傷者が出る。

算出される死傷者数は，へ）に示したＹの関数として表現される氾濫水拡がり領域面積，統計的に得る人口密度，および，過去の水害記録の整理から求めた平均溢流深の関数として表現される死傷率とから計算される。

リ）堤内が一面に湛水した後は，家屋密度と，床上浸水以上の家屋1戸当りの死傷率を与えることによって計算する。

3. 各要素の不確定性

ここでは前節に示された手順に伴なう不確定性を考慮していく。

1）破堤箇所および破堤幅

実際には，地盤性状，工法，新旧等によって堤防には強弱があるが，地震時にそのいずれで破堤するかを100％予測することは困難である。しかしながら，過去の震災記録から得られる破堤箇所数と，その時の堤防長，つまり，単位長さ当りの平均破堤箇所数を知ることはできる。そこで堤防が，ある堤防長にわたって一様なこわれ易さを有していると仮定してみよう。この仮定はランダム性の仮定に他ならないから，長さＬの堤防で，ｎケ所破堤する確率は，ポアソン分布とすることができる。すなわち，

$$P(n)=e^{-\lambda L}\,(\lambda L)^n/n! \quad n=0,1,2\cdots \tag{3}$$

ここでλは単位長さ当りの平均破堤箇所数，Ｌは堤防長である。ｎの平均，分散はそれぞれ次のようになる。

$$\left.\begin{aligned} E[n] &= \lambda \cdot L \\ Var[n] &= \lambda \cdot L \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

ここでＥは平均，Varは分散を意味する。

破堤が発生して，はじめて破堤幅が現実のものとなるから，破堤幅の確率分布は条件付となる。この分布についても，過去の震災例の頻度分布から統計的に得ることができる。しかしながら，その一般性は保証されない。したがって，破堤幅の最大値と最小値を推定し，確率分布は一様と考えるのが最も一般的であろう。すなわち，ある破堤箇所における破堤幅の確率分布は，

$$P\{B \mid n=1\}=1/(b_2-b_1), \quad b_1 \leqq b \leqq b_2 \tag{5}$$

と書ける。ここでb_1は破堤幅の推定最小値，b_2はその最大値である。平均，分散はそれぞれ，

$$E[B \mid n=1]=(b_2+b_1)/2 \tag{6}$$

$$Var[B \mid n=1]=(b_2-b_1)^2/12$$

となる。

前述のように，ある堤内を考えると，破堤箇所は1ケ所とは限らないから，破堤箇所が0から最大限n箇所(無限大でもかまわない）まで変化する時の，全破堤幅が問題となる。今，全ての破堤箇所での破堤幅の確率分布が同一で，破堤箇所毎に独立であるとすれば，ｉケ所で破堤した時の全破堤幅の平均および分散は，分布の和の法則に従って，

$$\left.\begin{aligned} &E\,[Bi \mid n=i] = i \cdot E\,[B \mid n=1] \\ &Var\,[Bi \mid n=i] = i \cdot Var\,[B \mid n=1] \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

となる。

したがって，n箇所で破堤した時の全破堤幅の平均と分散は，その1次および2次積率の期待値を求めることによって得ることができる。すなわち，全破堤幅をB_Tとすれば，結局，

$$\left.\begin{aligned} E[B_T] &= \sum_{i=1}^{n} P(i)\cdot E[Bi \mid n=i] \\ &= E[B \mid n=1]\cdot \sum_{i=1}^{n} P(i)\cdot i \\ Var[B_T] &= \sum_{i=1}^{n} P(i)\{Var[Bi \mid n=i] \\ &\quad + E^2[Bi \mid n=i]\} - E^2[B_T] \\ &= \sum_{i=1}^{n} P(i)\{\cdot Var[B \mid n=1] \\ &\quad + i^2E^2[B \mid n=1]\} - E^2[B_T] \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

を得る。

2） 溢流深

溢流深も又不確定である。この場合密度分布は，堤防の天端高と水位の差が0の場合から，破堤又は沈下によって堤内地盤高に等しくなった天端と最高水位（津波等の異常高水位をも含めて）との差まで一様に分布すると考えるべきであろう。すなわち密度分布は，

$$f_H(h) = 1/(h_2 - h_1), \qquad h_1 \leqq h \leqq h_2 \quad (9)$$

であり，平均，分散はそれぞれ，

$$\left.\begin{aligned} &E\,[h] = (h_2 + h_1)\,/\,2 \\ &Var\,[h] = (h_2 - h_1)^2/12 \end{aligned}\right\} \quad (10)$$

となる。ここでh_2は溢流深の最大値，h_1はその最小値である。

3） 破堤直後の氾濫水拡がり面積

破堤後の氾濫水拡がりが(2)式によって表わされるものとすれば，報告書において，氾濫面積，SがYの2乗と定義されているので，結局，

$$S = \gamma^2 \cdot t^2 \cdot g^{\delta} \cdot H^{2-\delta} \quad (11)$$

を得る。この式に破堤幅が含まれていないことは注目すべきである。拡がりには流速のみが関係し，流量は無関係であると理解すべきなのであろう。有賀（1975）の実験によれば，溢流深に対する破堤幅の比，B／Hによって，(11)式のγ，δは変化するが，その変動は極めて小さい。彼の示した関係を表示すると次の通りである。

H／B	γ	δ
67	5.3	0.6
40	5.54	0.563
20	5.6	0.53
4	4.6	0.47

$$E[H/B] = 32.75 \qquad E(\gamma) = 5.26 \quad E[\delta] = 0.541,$$

$$V_{H/B} = 0.72 \qquad V_{\gamma} = 0.075, \quad V_{\delta} = 0085,$$

ここでVは変動係数を意味する。

これだけの数値から速断することはできないが，少なくともB／Hとγの間に何らかの関数関係を仮定することには無理があり，γおよびδの変動係数が，H／Bのそれに比し著しく小さいことから，それを定数としておくことが適当と考える。報告書ではこのγを2.3，δを0.65としている（東京都防災会議，P.477)。とりわけ報告書のγは有賀の実験結果の平均の0.43倍にすぎない。この結果，両者の拡がり面積比は実に約5：1となる。このように破堤直後の人的被害数に影響が大きい係数であり，しかも本来が有賀の実験に基づく新しい関係式であるのであるから，報告書中で採用した数値の根拠は明確に示すべきであろう。残念ながら，これらの数値に関する説明を文中に発見することはできなかった。

この種の水のない領域への浸水問題は，水理学の分野では，ごく最近になって取り上げられ始めたもので，いまだ理論的定説はない。(2)式には上述のように理論式としても又経験式として利用する際にも疑問が少なからずある。しかしながら，不幸にも筆者は今のところ代案を持たず，ここではこれに頼らざるをえない。

さて，溢流深のみの関数である(11)式の平均，分散および変動係数は，近似公式(12)式，（Benjamin, et al 1965 P.184）を使って(13)式のように求められる。

今Y＝g（X₁，X₂………）であるとき，

$$\left.\begin{aligned}&E[Y]\doteqdot g\,(E[X_1],\ E[X_2],\ \cdots\cdots)\\&Var[Y]\doteqdot\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial g}{\partial Xi}\,\Big|\,m\right)^2 Var[Xi]\end{aligned}\right\}\quad(12)$$

ただし，Xiは互に独立であるとする。

$$\left.\begin{aligned}&E[S]=\gamma^2t^{2\delta}g^{\delta}\{E[H]\}^{2-\delta}\\&Var[S]=\{\gamma t^{\delta}g^{\delta}(2-\delta)\,(E[H])^{1-\delta}\}^2Var[H]\\&V_S=(2-\delta)V_H\end{aligned}\right\}\quad(13)$$

これによって１ケ所が破堤した場合のはんらん面積の変動係数は，溢流深のそれの1.5倍前後となることがわかる。

一般には堤防の数個所で破堤した時の全拡がり面積を考えねばならない。この平均と分散は３―１）で示した方法と同じ計算で得ることができる。

ｉケ所が破堤した時の１次および２次積率，すなわち

$$\left.\begin{aligned}&I_1\ (i)=i\cdot E\ [S]\\&I_2\ (i)=i\ Var\ [S]+\ (i\cdot E\ [S]\ )^2\end{aligned}\right\}\quad(14)$$

を求め，全拡がり面積（S_T）の平均，分散を次のように得る。

$$\left.\begin{aligned}&E\,[S_T]=\sum_{i-1}^{n}P\ (i)\ I_1\ (i)\\&Var\,[S_T]=\sum_{i-1}^{n}P(i)\cdot I_2(i)-E^2[S_T]\end{aligned}\right\}\quad(15)$$

4）湛水深

堤内に一面貯水された後は，湛水深が問題となる。今，湛水量（V）と湛水深（Z）の間に次のような関係が成立する堤内地を考える。

$$V=aZ^x \qquad a,\ x\text{は定数} \quad(16)$$

この領域に時間 t の間に入る水の総量は，（１）式を用いて，

$$Q=t\cdot\alpha\cdot B\cdot H^{\beta} \quad(17)$$

である。$V=Q$であるから結局ZはBおよびのH関数として次のようにあらわせる。

$$Z=\left(\frac{t\alpha}{a}\right)^{\frac{1}{x}}B^{\frac{1}{x}}H^{\frac{\beta}{x}} \quad(19)$$

したがって，の平均，分散および変動係数は（12）式を用いて次のように求まる。

$$\left.\begin{aligned}&E\ [Z]\doteqdot\left(\frac{t\alpha}{a}\right)^{\frac{1}{x}}\cdot\{E[B]\}^{\frac{1}{x}}\cdot\{E\ [H_x]^{\frac{\beta}{x}}\}\\&Var[Z]\doteqdot\{E[Z]\}^2\cdot\left[\left(\frac{\beta}{x}\right)^2\cdot V_H^2+\left(\frac{1}{x}\right)^2V_B^2\ \right]\\&V_Z=\sqrt{\left(\frac{\beta}{x}\right)^2\cdot V_H^2+\left(\frac{1}{x}\right)^2\cdot V_B^2}\end{aligned}\right\}\quad(19)$$

理論的にはZの変動係数はHやBのそれより小さくなることがあり得るが，βには，通常1.5が採用され，xは１前後の値であると考えられるので，必然的にHかBのそれのどちらかよりも大きくなる。

5）破堤直後の人的被害

報告書では，破堤直後の人的被害を氾濫水拡がり面積（（11）式），堤内の平均人口密度，および，溢流深の関数として与えられる死者発生率によって，算出している。溢流深と死者発生率の関係が次式によって与えられるとする。

$$d=uH^v \quad(20)$$

報告書の数値から$u=1.32$，$v=2.73$を得る（東京都防災会議　p　）。さて死者数は，

$$N=d\rho S=\rho vH^vS \quad(21)$$

となるから，(12)式を用いてNの平均，分散を求めると，

$$\left.\begin{aligned}&E[N]=u\cdot E[\rho]\cdot\{E[H]^v\}\cdot E[S]\\&Var[N]=\{E[N]\}^2(V\rho^2+V_S{}^2+v^2V_H{}^2)\\&\text{となり，したがって，}\\&=V_N\sqrt{V\rho^2+V_S{}^2+v^2V_H{}^2}\end{aligned}\right\}\quad(22)$$

を得る。ここでρは人口密度，Ｓは氾濫水拡がり面積をあらわす。

常識的には死傷率は溢流深の増大と共に著しく大きくなると考えられるから，vはより大きく，又Ｓの変動係数が，（13）式，あるいは（14）式から得られるものであるから，たとえ$V\rho=0$であったとしてもV_Nは著しく大きくなることが予想される。

6）水害発生後 t 時間までの人的被害

破堤後，ある時間経過すると，湛水が始まるが，報告書では，２時間後まででは，湛水深が1.5ｍ以上で死者が発生し,「その死者発生率は，床上浸水家屋１戸に付き，0.01としている。さらに24時間まででは，湛水深2.0ｍ

以上で死者が出，湛水深1.0 m以上の地域における床上浸水1戸当りの死者数を0.002とした。

これ以上の情報は報告書には記されていず，どのような計算がなされたかを追跡することは不可能であるが，ここでも前項と同様，湛水深の関数として死者率をあらわすことが一般的であろう。今，t時間までの浸水家屋1戸当りの死者発生率を

$$D_t = U_t Z v_t \tag{23}$$

とする。U_t，v_t は破堤後の経過時間によって異なる定数である。

t時間後までの死者数は，

$$\left.\begin{aligned} M_t &= D_t \rho_R A = u_t Z v_t \rho_R A \\ &= U^t\left(\frac{t\alpha}{a}\right)^{\frac{v_t}{x}} B^{\frac{v_t}{x}} H^{\frac{\beta}{x} v_t} \cdot \rho_R A \end{aligned}\right\} \tag{24}$$

とあらわせる。ここで ρ_R は家屋密度，Aは浸水面積である。

(12) 式を用いれば，M_t の平均，変動係数は次のようになる。

$$\left.\begin{aligned} E[M_t] &= U_t (t\alpha)^{\frac{v_t}{x}} \cdot \{E[B]\}^{\frac{v_t}{x}} \\ &\quad \times \{B[H]\}^{\frac{\beta v_t}{x}} \cdot A^{1-\frac{v_t}{x}} \cdot \rho_A \\ V_{Mt} &= \sqrt{\left(\frac{\beta v_t}{x}\right)^2 V_H{}^2 + \left(\frac{v_t}{x}\right)^2 V_B{}^2 + V\rho_R} \end{aligned}\right\} \tag{25}$$

4. 簡単な数値例

前節に示した方法を次に示す堤防について，数値を入れて示そう。

一辺1000 mの正方形に囲まれた堤内地がある。この堤内地は平坦で，その地盤高は外水の干潮位に等しいとする。堤防の地震による平均破堤率が0.0005個所／m，破堤した時の破堤幅は最大200 m，外水位の最高は干潮位+2.5mであるとする。

(3) 式に $\lambda=0.0005$，L＝4000を代入して，P(n)を求めると次のようになる。

n	0	1	2	3	4	5	6
P(n)	0.14	0.27	0.27	0.18	0.09	0.04	0.01

ここで，正しくは，P（n≧6）＝0.01であるが，これをP（n＝6）＝0.01としている。この結果は，平均2個所破堤する堤防であっても，0.14の確率で破堤しない場合があるし，逆に，わずか0.01の確率ではあるが6個所以上破堤することも考えねばならないことを意味する。

(6) 式に $b_1=0$，$b_2=200$ を代入することによって，E〔B｜n=1〕＝100，Var² 〔B｜n=1〕＝3333を得る。又 $V_{B|n=1}=0.58$ である。

以上の結果を（8）式に代入することによって，E〔B_T〕＝197，Var〔B_T〕＝64300 を得る。したがって，変動係数は，$V_{BT}=1.29$ である。つまり，1個所での破堤幅の平均が100 mで，変動係数が0.58であった場合，平均して2個所で破堤すると考えられる4000 mの堤防では，総破堤幅の平均は197 m，変動係数は1.29にもなる。

(10) 式に $h_1=0$，$h_2=2.5$ を代入し，E〔H〕＝1.25，Var〔H〕＝0.52を得る。したがって $V_H=0.58$。

報告書で使われている定数値，すなわち $\gamma=2.3$，$\delta=0.65$，t＝5×60，g＝9.8，および上の水深に関する平均等を（13）式に代入すると，E〔S〕＝5.2×10⁴，Var〔S〕＝16.5×10⁸，$V_S=0.78$ を得る。

これらを（14），（15）式に使って，堤防全体に渡る破堤後の全拡がり面積を求めると，E〔S_T〕＝188.3×10⁸となり，したがって，$V_{ST}=1.35$ である。

この堤内地では，地震による破堤によって，平均して全面積の1割が5分間で水につかると考えられるが，その変動係数は1.35でもある。

報告書で用いられているように，t＝60×60，$\alpha=1.4$，$\beta=1.5$ とし，a＝10⁶，$x=1$（これらは，堤内地を直方体とみなすことから生ずる。。したがって，この場合Aは堤内地面積である。），さらに上に求めた溢流深および全破堤幅の平均等を（19）式に代入すると，

E〔Z〕＝1.39，Var〔Z〕＝4.68，$V_Z=1.55$ を得る。

すなわち，破堤後，1時間で，堤内湛水位は平均に1.39 mなるが，その変動係数は1.55となる。

報告書で用いられた溢流深と死者率の関係から最小2乗近似で求めた $u=1.32$，$v=7.73$，および $\rho=0.111$，さらに上で求めた溢流深と全拡がり面積の平均等を(22)式に代入すると，E〔N〕＝2724，$V_N=2.08$ を得る。ただし $V\rho=0$ としている。

この堤内地の人口は約11000人と考えられるが，平均して，その約25％が破堤後5分以内に死ぬことになる。

破堤後数時間の人的被害は，それを算出するための情報が報告書から得られないので，数値計算はしない。又報告書では水門および排水機場の機能を配慮しているようである。これらの確率評価は3節に示した方法の援用で解決できる。ただし，それによるパラメーターが増えるのでいかにも式が繁雑となり，ここでは示すことを省いたが，これを考慮すればさらに変動係数は増大しよう。

さて，以上の計算結果をまとめると，表―1に示す通りである。はじめ0.71，0.57，0.58であった変動係数が計算を経る毎に増大し，最終の人的被害では2.08にまで

表1 計算の条件および結果の不確定性

変数	平均	変動係数	チエビシエフ式による90%領域範囲	備考
破堤箇所数（箇所）	2	0.71	0〜6	条件
1箇所破堤した場合の破堤幅（m）	100	0.57	0〜200	〃
溢流深	1.25	0.58	0〜2.5	〃
n箇所破堤した場合の全破堤幅（m）	197	1.29	0〜960	結果
1箇所破堤した場合のはんらんひろがり面積（m²）	5.2×10^4	0.78	$0\sim17.3\times10^4$	〃
n箇所破堤した場合の全はんらん拡がり面積（m²）	10.2×10^4	1.35	$0\sim51.5\times10^4$	〃
1時間後の湛水深（m）	1.39	1.55	0〜2.5	〃
破堤直後の人的被害	2724	2.08	0〜11000	〃

注：本計算は，次のような堤内地を仮想している。① 一辺1000mの正方形。② 堤内地盤高は外水の干潮位に等しい。③ 地震による平均破堤率を0.0005箇所／mとする。④ 破堤幅は最大200mとする。⑤ 溢流深の最大は2.5mとする。⑥ 人口密度を0.011人/m²とする。

もなる。ちなみに，表の右にチェビシェフの不等式によって得られる平均のまわりの90%領域を示した。人的被害でいえば，平均想定死者数の2724は，死者が出ない場合から全滅する場合もあるような範囲における値なのであると知ることができる。

今後の課題

はじめに述べたように，本論文は東京都防災会議報告書の地震水害に関する計算法の自由度を上げると同時に，地下空間水没の確率評価法の基本概念を示す目的であらわされた。

筆者の目的が別な所にあるので，ここではあえて示さないが，本文中に示した式を使えば，報告書の水害に関する全ての想定値の不確定性を知ることができる。ただ報告書だけではその計算を完全にフォローするための情報が不足しており，十分な数値を得ることが不可能である場合がある。しかしながら，この種の値を並記することによって想定値がより高度の意味を持つとする考えに異論はあるまい。

地下空間水没では，水の拡がりは問題にならないから，基本となる数式は，駅入口等からの浸水に対しての2節ホ）に示した堰公式と，構築破壊部からの浸水に対してのトリチェリー定理である。これらは，基本的に式の型は同じであるから，3節，4）項がそのまま利用できる。

ただし，構築破壊部が非常に大きい場合には，浸水がトンネル内を段波として進行することが考えられ，2節ヘ）に示された式に類するものが必要である。これについては水理学的に未解明であり，筆者自身展望は明るくないが，丸井等（1979）の研究成果が期待される。

駅入口等からの浸水は，地表が湛水した後に開始され，これと構築破壊部からの浸水との間には，時間的なずれが生じる。したがって，これらを同時に議論すると，結果の分散は，著しく大きくなることが予想される。第3節の結果から地表湛水に関する分散が大きいことが判ったから，地下空間への浸水被害の分散はそれ以上に大きくなることになる。このように極めて大きい分散を有する想定結果が，実用上どれ程有効であるか？ 自由度を上げたがゆえに生じる疑問である。

又，人的被害を考える場合には，浸水の速度と同時に避難速度も考慮しなければならない。つまり浸水速度がいかに速かろうと，それより速く脱出できれば被害はない。逆に浸水速度が遅くても，それ以上に脱出速度が遅ければ確実に被害は発生する。防災会議の地震水害部門がこの避難速度を実際の計算に組み入れたかは文章からは判然としない。地下空間の場合には脱出口が限定され，しかも地表で地震発生直後から浸水が開始される場合には，トンネル内浸水を防ぐために駅入口防水扉は閉ざされる。この時点以後まで内部に取り残された人々は，駅入口天井に設けられたわずか直径60cmの脱出口に頼る以外に脱出法が無くなる。したがって特に地下空間の場合には個々の場合における脱出可能性の程度を知る評価法が必要である。筆者はこれをユール型の死滅過程としてモデル化することを考えている。

いずれにしても，次報ではこれら地下空間特有の問題を解決し，確率論に基づいた地下空間危険度評価法を提示したい。

文献一覧

新井邦夫・丸井信雄
1978 「大地震後に想定される地下鉄トンネルの浸水 —— 東京江東地区の場合 ——」『総合都市研究』第5号，pp. 133～144。

有賀世治
1975 「正方市街区における氾濫水の拡り」『土木学会第30回年次学術講演会講演概要集』第2部 pp. 287～288。

東京都防災会議
1978 『東京区部における地震被害の想定に関する報告書』 東京都。

丸井信雄，安川浩，宇井正和
1980 「ダム・堤防の決壊および物体の落下に伴う波に関する予備的考察」『総合都市研究』第8号 65～71pp.

Benjamin, J. R, and C. A Cornell
1970 Probabilily, Statisics and Decision for Civil Engineers. McGraw-Hill

A TENTATIVE PROBABILISTIC MODEL FOR FLOOD INTO LARGE PUBLIC UNDERGROUND AREAS LIKE SUBWAYS AFTER A STRONG EARTHQUAKE

Kunio Arai *

Comprehensive Urban Studies, No. 8, pp. 57～63

The subways running in the area of Tokyo's downtown may suffer severe water damage which would seep in from cracks on wall or flow in from tunnel entrances in the event of a strong earthquake.

This research was done as the first step in estimating such possible flood damage. The uncertainties of the dependent variables contained in the deterministic model which was proposed by the Tokyo Disaster Prevention Committee as to surface floods due to destruction of levees after a presumable strong tremor were discussed.

First of all, the probability density functions of the number (N) and width (B) of destroyed levees and the depth (H) of overflow were determined. And then the means, variances and coefficients of variation of total width (B_T) of destroyed levees, total area (S_T) and depth of floods (Z) were calculated.

Numerical examples showed that if the coefficients of variation of N, B and H were 0.71, 0.57 and 0.58, respectively, then those of B_T, S_T and Z an hour after an earthquake might become 1.29, 1.35 and 1.55 respectively. Although the mean number of dead was estimated as 2724 in a area of only one square kilometers, its coefficient of variation was 2.08.

* Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University