

地下空間における浸水対策ガイドライン

同 解説＜技術資料＞

技術資料

「地下空間浸水時避難安全検証法試行案」 の解説及び計算例とその解説

1.地下空間浸水時避難安全検証法試行案	G-2
1.1 地下空間への浸水状況を想定する	G-2
1.2 地下空間の浸水時における避難行動を想定する	G-5
1.3 地下空間からの避難行動の安全性を判定する	G-6
1.4 想定浸水速度の設定	G-8
1.5 避難行動における限界条件の設定	G-11
2.地下空間浸水時避難安全検証法試行案 を適用した検討事例	G-15
2.1 検討対象施設の概要	G-15
2.2 検討計算条件	G-16
2.3 検討結果一覧	G-18
2.4 地下空間浸水時避難安全検証法試行案の計算手順について	G-21

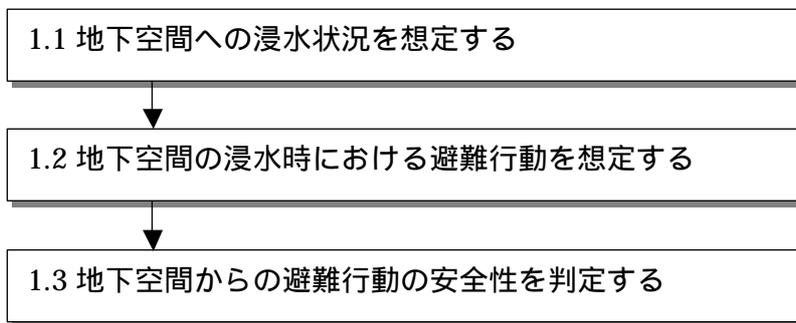
1. 地下空間浸水時避難安全検証法試行案

「地下空間浸水時避難安全検証法試行案」は、洪水等により地下空間が浸水した際の避難安全性を検証するための一手法として紹介するものである。本手法は、火災を対象とした避難安全検証¹⁾を参考にして設定しており、本検証を実施する際には、「2001 版避難安全検証法の解説及び計算例とその解説、平成 13 年 3 月、国土交通省住宅局建築指導課他」を参照して検討していただきたい。

浸水時の避難安全検証の考え方

地下空間浸水時の避難安全検証は、地下空間の浸水状況が避難行動に重大な影響を及ぼすと考えられるときまでに、地下居室から地上への避難が完了できるかどうかを検証する。

地下空間浸水時の避難安全検証は、以下の手順で実施する。



1.1 地下空間への浸水状況を想定する

(1) 地下空間への出入口を有する地上部での浸水状況を想定する

地下空間への浸水状況を推定するには、地上部の浸水状況、すなわち最大浸水深と浸水速度が重要な要素となる。このうち、最大浸水深に関しては、地下空間への流入防止対策の判断には有効であるが、地下空間に流入し始めてから湛水する速度などの浸水状況を推定するためには、地上部の浸水速度を想定することが重要である。

地下空間浸水時の避難安全検証では、地上部の想定浸水速度を外力条件に設定する。なお、想定浸水速度の設定に関しては「1.4 想定浸水速度の設定」を参照されたい。

(2) 地下空間への流入状況を想定する

地下空間への各流入口について、位置、標高、規模などを整理する。先に設定した想定浸水速度を条件として、各流入口から地下空間に流入する流量を算出するとともに、それを時間積分することで時刻毎の地下空間への流入容量を算出する。

なお、地下空間への流入量は、外力である地上浸水深と共に、時刻毎に変化するが、ある時刻の浸水深に対する流入量は、国土技術政策総合研究所で実施された実験式²⁾を適用して算出する。

$$Q(t) = 1.59BH(t)^{1.65}$$

Q(t) : t 時刻の地下空間への流入量 (m³/s)

B : 流入幅 (m)

H(t) : t 時刻の地上の浸水深 (流入口敷高からの水深)

¹⁾ 平成 12 年建設省告示第 1441 号「階避難安全検証法に関する算出方法等を定める件」

²⁾ 土木技術資料 43-2 (2001) の「階段を通じた地下空間へのはん濫水流入に関する実験」

地下空間への流入量算定表(例)

時刻	地上部の 浸水深	出入口 1		出入口 2		.....	出入口 n		合計
		H ₁	Q ₁	H ₂	Q ₂		H _n	Q _n	
1	HH(1)	0	0	H ₂ (1)	Q ₂ (1)	.....	0	0	Q _i (1)
2	HH(2)	0	0	H ₂ (2)	Q ₂ (2)	.....	H _n (3)	Q _n (3)	Q _i (2)
3	HH(3)	H ₁ (3)	Q ₁ (3)	H ₂ (3)	Q ₂ (3)	.....	H _n (3)	Q _n (3)	Q _i (3)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
t	HH(t)	H ₁ (t)	Q ₁ (t)	H ₂ (t)	Q ₂ (t)	.....	H _n (t)	Q _n (t)	Q _i (t)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

- ・ 上表で、出入口水深 H_n が 0 というのは、地上部の深水深が流入口の敷高を下回っている場合である。
- ・ t 時刻での地下空間への流入ボリュームは、t 時刻まで流入量を積分した値である。

$$V(t) = \int_0^t \sum_{i=1}^n Q_i(t) dt$$

(3) 地下空間の居室等への湛水状況を想定する

地下空間への流入量の時間変化状況から地下空間に存在する居室等の浸水深の時間変化を算出する。

計算手法としては、流入した水が瞬時に水平に湛水すると仮定して算出することでよいが、通路などの特定の区画のみが最初に湛水することもあるので、地下空間の構造をよく調査をし、地下空間の構造が大規模で複雑な場合など、必要に応じて別途、流入口の高低差、流入口での流入防止措置、地下空間の床の高低差等を考慮して解析を行うこととする。

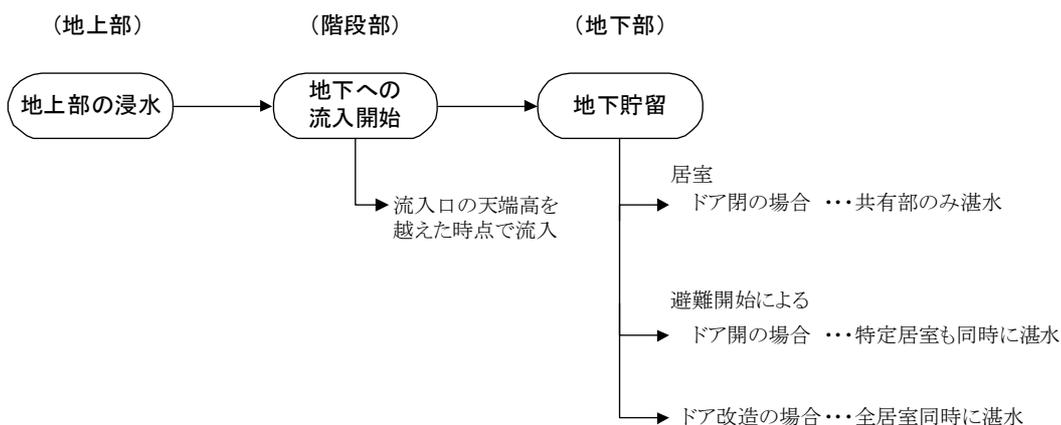
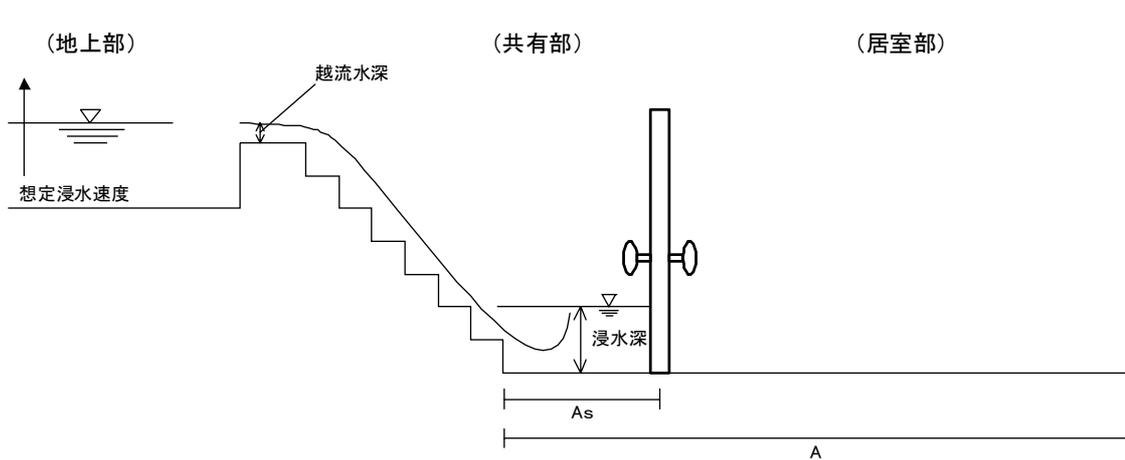
$$h(t) = V(t)/A_s$$

$h(t)$: t 時刻の地下空間浸水深

$V(t)$: t 時刻の地下空間に流入した容量

A_s : 流入水が湛水する地下空間の床面積

この床面積は、地下フロア全域を対象とするのではなく、ドアの状況や居室の区画割などを勘案して設定することが重要である。ドアが閉鎖しており流水が塞ぎ止められる場合には、非常に早い速度で湛水するので注意が必要である。



1.2 地下空間の浸水時における避難行動を想定する

(1) 管理者等が地下空間への浸水の危険性を認知する時刻を想定する

地下空間管理者等が、地下空間への浸水の危険性を認知する方法としては、以下の状況が考えられ、状況に応じて設定することとする。

地下の居室が浸水を始めており、居室者が異変を認識する場合

管理者等が地上部の浸水状況で異変を認識する場合

地上や地下の設置した浸水センサーなどの計器により異変を認識する場合

洪水情報などを収集することにより異変を認識する場合

(2) 地下空間に存するものが避難行動を開始するまでの時間を設定する

地下空間の浸水の危険性を認識してから、それが地下空間に存する全員に伝達され、避難行動を開始するまでの時間を設定する。

行動を開始するまでの時間は、「火災時の避難安全検証法」に準ずることとし、口コミによる情報伝達時間と行動を起こすまでの意思決定および準備時間を併せたものである。

$$t = \frac{\sqrt{A}}{30} + 3 \quad (\text{単位: min})$$

A: 地下フロア面積

(3) 地下フロア出口まで移動するために要する時間を算出する

避難行動を起こしてから地下フロアの出口まで移動する時間は、歩行距離と歩行速度を設定して算出する。

なお、歩行速度は「火災時の避難安全検証法」における平坦部の歩行速度を基本とするが、浸水による歩行速度の割引を考慮する。浸水時の歩行速度は、浸水深 30cm を想定し、無浸水時の 57% とすることも一つの考え方である。これは、浸水深 70cm を平坦部の歩行限界水深（歩行速度 0）とし、浸水深 30cm 時の歩行速度を直線補間で設定したものである。

$$t = \lambda / v \quad (\text{単位: min})$$

ここで λ : 歩行距離、 v : 平坦地の標準歩行速度 (60m/min)、 v : 浸水時歩行速度割引係数 ($1 - \frac{30}{70} = 0.57$)

(4) 地下フロアの出口を通過するために要する時間を算出する

地下フロアを避難するものが出口を通過するために要する時間は、「火災時の避難安全検証法」に準ずることとする。

$$t = \frac{PA}{NB} \quad (\text{単位: min})$$

ここで P: 在館者密度 (人/m²)、A: 居室の種類による、A: 床面積 (m²)

N: 有効流動係数 (=90)、B: 有効出口幅 (m)

(5) 地下フロアから地上に脱出するまでに要する時間を算出する

地下フロアから地上に脱出するまでに要する時間は、歩行距離と歩行速度を設定して算出する。

なお、歩行速度は「火災時の避難安全検証法」における階段昇りの歩行速度を基本とするが、浸水による歩行速度の割引を考慮する。浸水時の歩行速度は、階段踏面での浸水深 20cm を想定し、無浸水時の 33% とすることも一つの考え方である。これは、浸水深 30cm を階段昇りでの歩行限界水深（歩行速度 0）とし、浸水深 20cm 時の歩行速度を直線補間で設定したものである。

$$t = \lambda / v \quad (\text{単位: min})$$

ここで λ : 階段距離 (m)、 v : 階段昇りの標準歩行速度 (27m/min)、 v : 浸水時歩行速度割引係数 ($1 - \frac{20}{30} = 0.33$)

1.3 地下空間からの避難行動の安全性を判定する

地下空間からの避難行動の安全性の判定は、地下空間利用者が地上まで避難する想定ルート上の主要地点において、避難行動に重大な影響を及ぼすと考えられ状況になるまでに、その地点を通過することができるかで判断する。

避難行動に重大な影響を及ぼすと考えられる浸水状況とは、

- ・ 地下フロアにおいては、ドアが開かなくなる可能性があり、歩行が困難となる浸水状況（たとえば浸水深 30cm）
- ・ 地上への階段部においては、階段を昇るのが困難になる浸水状況（たとえば階段踏面上の越流水深 20cm）

などが考えられる。これらについては「1.4 浸水行動における限界条件の設定」に示す。

避難ルート上の主要地点において、これらの状況になる時間（危険到達時間）とその地点まで到達する時間（避難行動所要時間）とを比較し安全性を検証する。ここで、主要地点は浸水形態が異なると想定されるドア地点や階段地上部など、地下空間の浸水特性に応じて設定することとする。

- 危険到達時間を避難行動所要時間で除した値を“安全率”、危険到達時間から避難行動所要時間を差し引いた時間を“避難行動余裕時間”と定義付ける。

$$\text{安全率} = \frac{(\text{危険到達時間})}{(\text{避難行動所要時間})}$$

$$\text{避難行動余裕時間} = \text{危険到達時間} - \text{避難行動所要時間}$$

- 安全率は、地上の浸水が始まってからの時間で評価する場合（A）と異変認識後からの時間で評価する場合（B）の二ケースが考えられる。

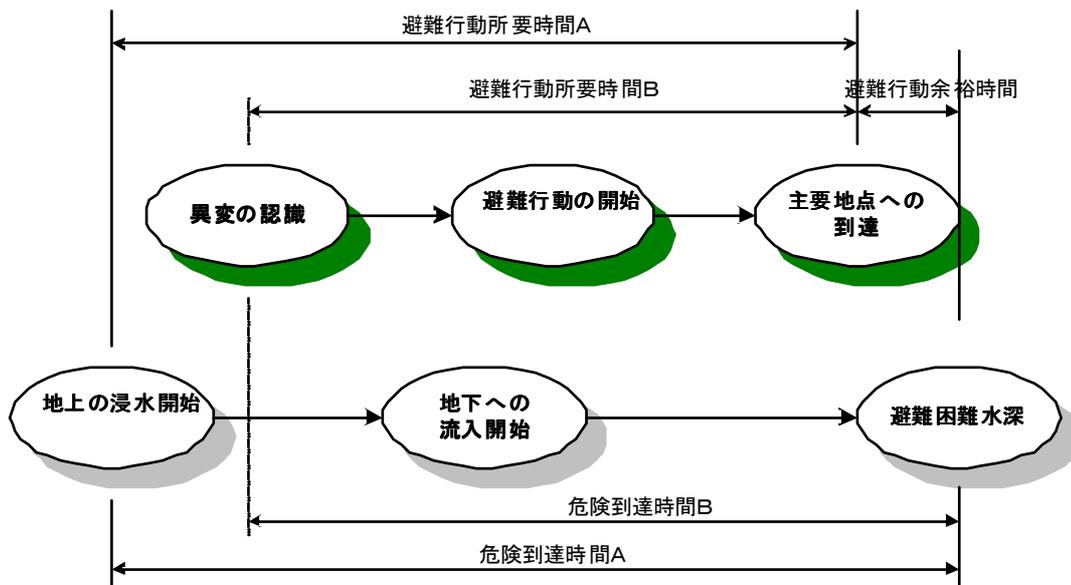


図 G-1 避難安全の判定方法

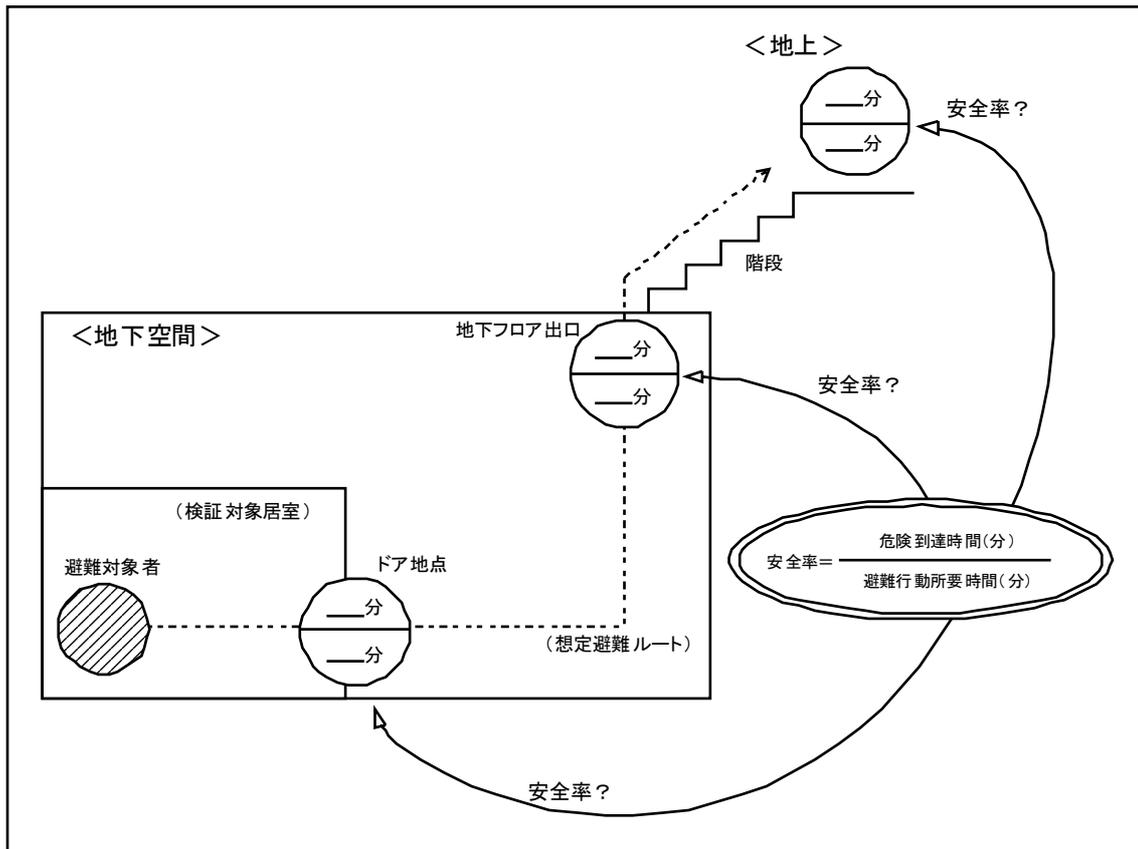


図 G-2 避難行動安全性の検証結果表示例

1.4 想定浸水速度の設定

地上部における浸水深及び越流水深の上昇速度は地形特性を考慮して設定した速度とする。ただし、河川のはん濫又は高潮による浸水が想定される区域で、当該浸水による影響を勘案する必要がある場合においては、この浸水の特性を踏まえた速度とする。

(1) 基本的な考え方

当該地点における地下空間の浸水対策を計画・設計する際の想定外力は、外水はん濫や内水はん濫など洪水の種類によらず設定することとする。

これは、地下空間の浸水深の増え方が非常に大きく、洪水が地下に侵入してから数分ないし30分程度でおおよそその避難行動を完了させておく必要があるためである。このため、避難計画に関わる想定外力としては、想定浸水速度のみとする。

当該地域で想定される浸水深は、地下空間の資産を守る浸水防御施設設計の際の判断材料となるので、既往洪水による浸水深や想定される最大の浸水深についても整理しておくものとする。

(2) 想定浸水速度の設定方法

想定浸水速度は窪地などの地形特性により設定することを基本とするが、河川のはん濫又は高潮による浸水が想定される区域では、適切な手法で設定する。

想定浸水速度は、浸水想定区域図等の水深により推定する方法や、窪地の判定による方法などがあり、それらの最大値を当該箇所の想定浸水速度とするなど、地下空間の用途の重要性を勘案して設定する。

(3) 浸水想定区域図等による設定方法

過去の浸水実績やはん濫計算結果などから整理してみると、想定浸水速度は最大浸水深と比例関係にあることがわかる。

図 G-3 は、既往洪水の浸水実績やはん濫解析結果から浸水開始から30分の平均想定浸水速度（30分以内に最大水深となるものはピーク時間で平均）を整理したものであり、全体の傾向から、最大深水深に対する想定浸水速度を以下のように参考として示すことができる。

浸水想定区域図による地上の想定浸水速度の参考値		
水深	0.0～0.5m	想定浸水速度 2cm/min
水深	0.5～2.0m	想定浸水速度 3cm/min
水深	2.0m～	想定浸水速度は別途設定

このような関係を適用すれば、「浸水想定区域図」はランク別の水深が表示されているため、当該箇所の浸水速度を想定することができる。

水深が 2.0m 以上の箇所については、想定浸水速度も大きいと考えられるため、地下空間について浸水対策上必要な措置を十分検討する必要がある。

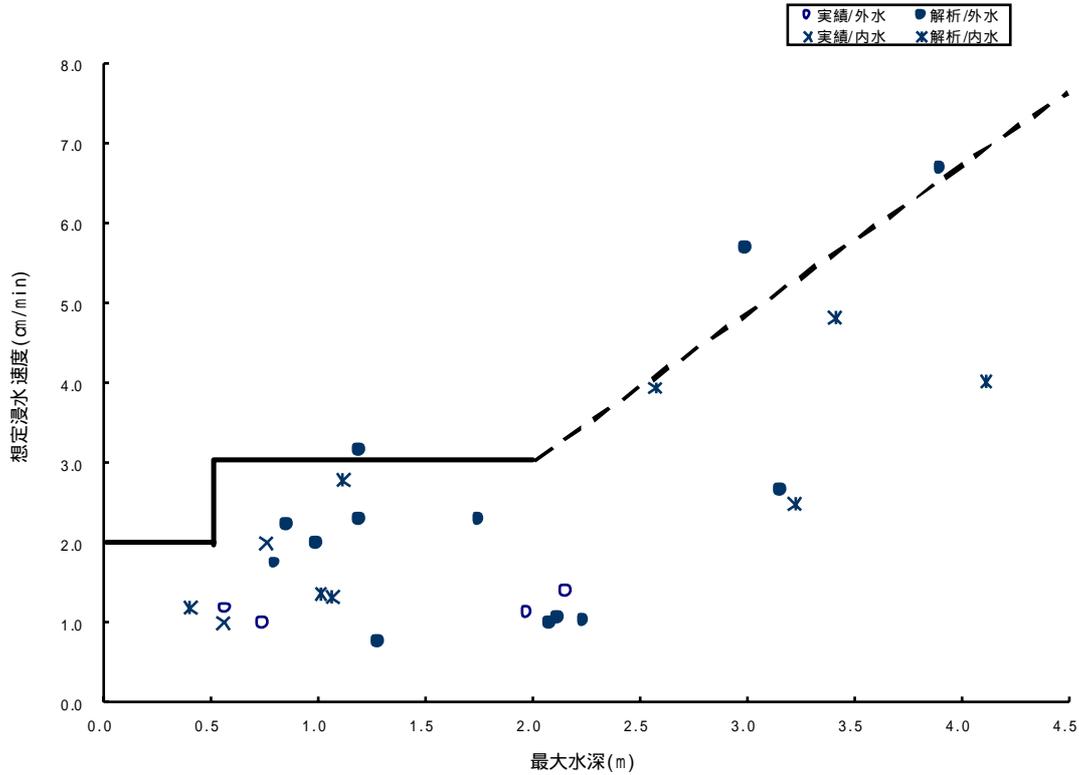


図 G-3 想定浸水速度と最大浸水深の関係

(4) 窪地判定による設定方法

周囲より地盤高の低い窪地では、水が集まりやすいので、想定浸水速度は大きくなると考えられる。

ここでは窪地の度合いと想定浸水速度の関係をあるモデル流域を例に検証した。

都市部のあるモデル流域において、50m メッシュの平均地盤高データを用いて算出した窪地率と、そこに東海豪雨相当の降雨があった場合の想定浸水速度の関係をプロットすると図 G-3 のようである。なお、窪地の判定方法については、本ガイドライン第 2 第二号に示したものを参考としており、当該メッシュを中心とした 1km 四方内の 50 メッシュ平均地盤高の低い方から順番に順位をつけ、次式により求める。

$$\text{窪地率} = \frac{\text{当該メッシュの低い方からの順位数}}{\text{全メッシュ数}}$$

窪地率が小さければ、すなわち窪地の程度が大きければ大きいほど、想定浸水速度は大きくなる傾向があり、これらから窪地制定による想定浸水速度を以下のように設定することも可能である。

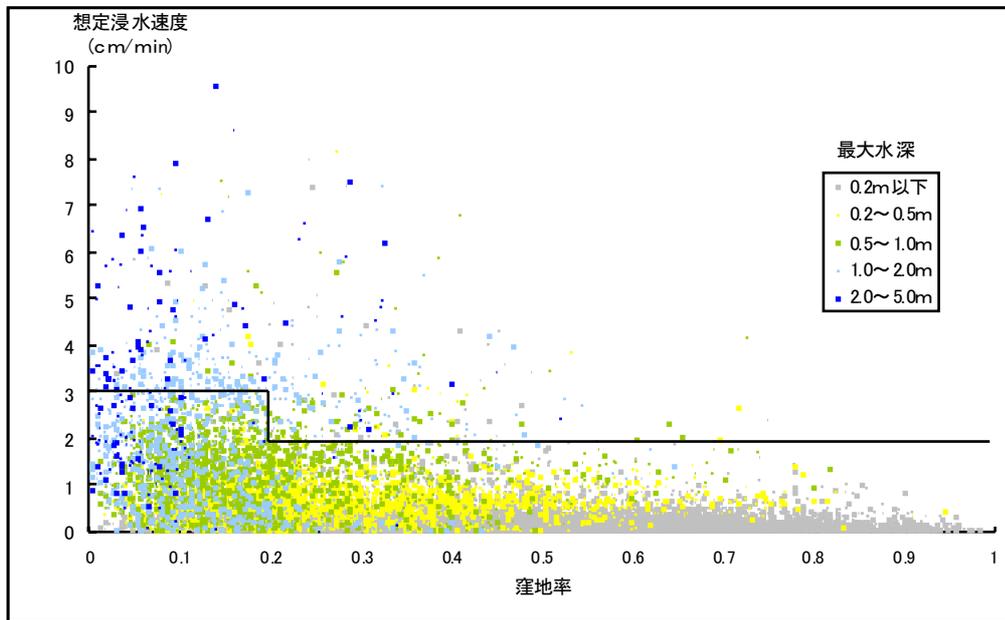


図 G-4 窪地率と想定浸水速度の相関分布図

窪地の判定結果と想定浸水速度の関係は、図 G-4 に示す相関分布図より、

窪地判定による想定浸水速度の設定

窪地率が 20%以下の場合、想定浸水速度 3cm/min

窪地率が 20%以上の場合、想定浸水速度 2cm/min

ここで、想定浸水速度が設定範囲外となるものも見られるが、97%が設定範囲内であり、判定手法として適用可能と判断できる。

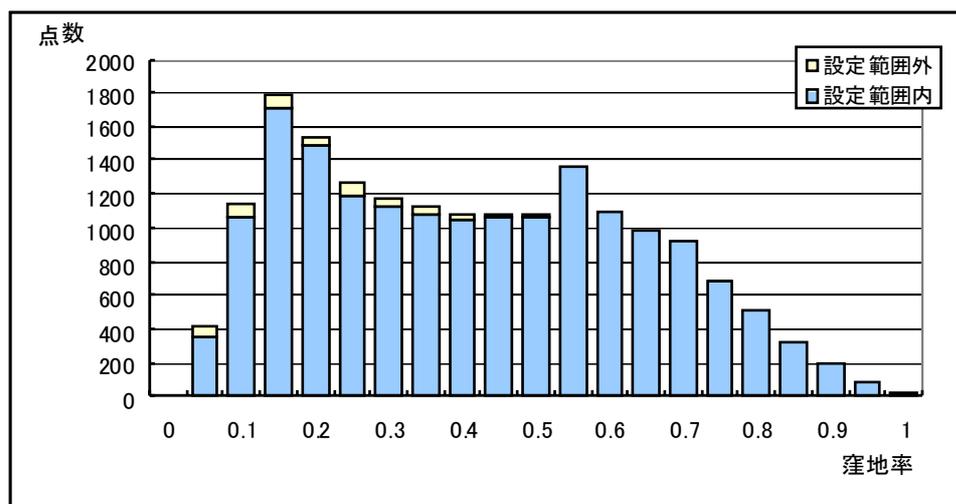


図 G-5 窪地率とのヒストグラム

1.5 避難行動における限界条件の設定

廊下や居室等、地下フロアを避難する際の歩行限界水深及び地上に脱出するための階段を避難する際の歩行限界水深は、避難安全検証を行う上で最も重要な指標である。

地下空間の構造等により異なると考えられるが、以下に考え方の一例を示す。

1.5.1 浸水している廊下・居室等を避難する際の限界条件

地下空間の浸水時における廊下や居室等を避難する際の行動限界水深は、歩行困難水深及び水圧でドアが開かなくなる水深などから 30cm と設定できる。

(1) 歩行困難水深

伊勢湾台風の際に、避難した人のアンケート結果より大人で 70cm 以下、女性では 50cm 以下の場合が避難可能な浸水深となっている。また、小学校 5～6 年生では、水深 20cm 以上になると避難が困難になるというデータもある。

洪水時に避難行動を安全に行うためには、洪水の程度（浸水深と流速）と歩行の危険性との関係をあらかじめ知っておく必要があり、実際の避難行動に近い状況を想定した水中歩行実験が行われている。流水の大きさと歩行の安定性については、成年男子の場合、水深が膝程度（40～50cm 程度）の時には、流速がある程度あったとしてもゆっくりであるが安定して歩け、水深が股下程度（80cm 程度）の時には、大きく影響を受け歩きづらくなっている。これらの結果が下図である。

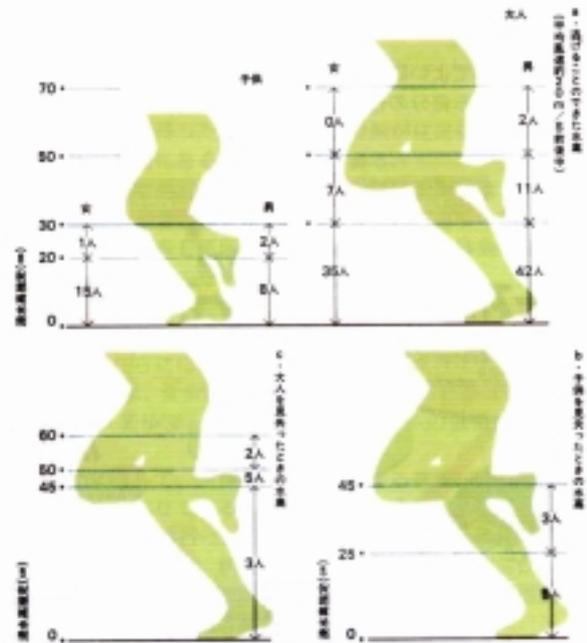


図 G-6 洪水中に逃げることできた水深

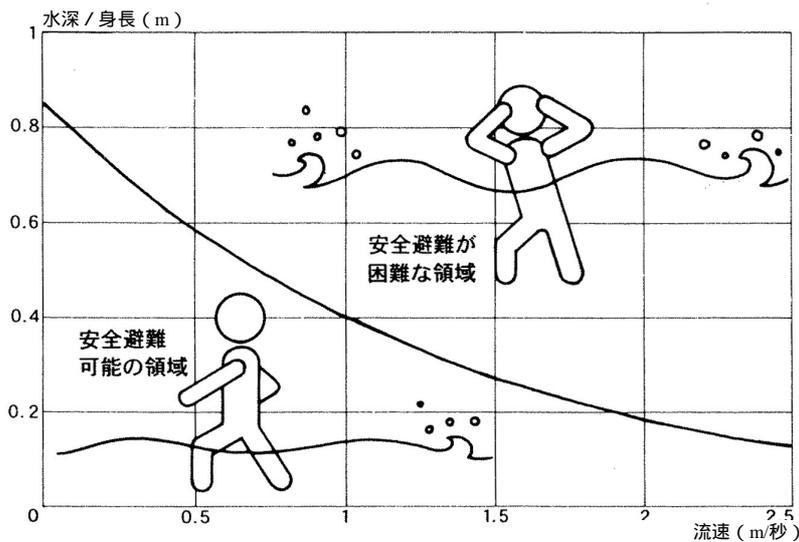


図 G-7 洪水避難時に水中歩行できる領域

(2) 水圧でドアが開かなくなる水深

浸水によって地下空間への入口前の狭い空間に水が溜まり、その部分が所定の深さになる時間は、地下空間全体が同じ深さになる時間に比べてきわめて短くなる。それに伴い、そのドアの内外に水位差が生まれドアが開かなくなる。

ドアが開かなくなる水深は、以下の検討結果より外開き扉の場合（26cm）内開き扉の場合（47cm）である（健常者で設定したものであり、身体に障害を持った人の場合はそれを勘案する必要がある）。

(1) 外開き扉の場合

例えば、図9のように外開きの扉の場合を考えましょう。流入してくる水が扉の外側の前室に溜まり、部屋の中との間に水位差 h （前室の水位 h_1 、内部の水位 h_2 、 $h=h_1-h_2$ ）があるとし、地下室から避難するためには水圧に抵抗してドアを押し開けなければなりません。この場合には、少なくとも下式で計算される以上の力を加えて扉を開ける必要があります。

$$f = \frac{w \cdot d \cdot (h_1^2 - h_2^2)}{4}$$

- f : 扉を開けるために必要な力
- w : 水の重量 (= 1000kg重/m³)
- h_1 : 前室の水位
- h_2 : 建物内部の水位
- d : 扉の幅

人間が扉を開放するために押すことのできる力は、成人で10～20kgf、老人・子供では最低4～6kgf程度とされています。仮にこの力を15kgfと仮定し、建物内部に浸水がない（ $h_2=0$ ）ものとして上式から計算すると、この力で押しても外開きの扉が開かない水位差は、26cm程度となります。

前に説明した水の流入時間に関する計算例を応用して、外部につながる扉の前室に流入する水深が26cmになる結露を前と同じ条件（水面の上昇速度：10分間あたり20cm、ステップ高さ：0m、前室の面積と地下室への入り口の幅の比：10m）で計算してみると4分強となります。地下に浸水が始まってからわずか4分程度で、外開きの扉を開けることができなくなるのです。

(2) 内開き扉の場合

では、図10のように内開きの扉であれば水圧に逆らって扉を開ける必要がないため、扉は開けられるでしょうか？ 答えは外開き扉と同様、浸水が始まってから比較的早い段階で“ノー”となってしまいます。その理由は、水位差によって発生した扉にかかる水圧によって扉の閉鎖を制しているデッドボルト・ラッチボルトに大きな力がかかるため、デッドボルトを開閉するサムターン、ラッチボルトを開閉するドアノブを人の力で回すことができなくなるためです。デッドボルトなどの用語は図11を参照して下さい。

例えば、水圧によってデッドボルト部分に横から50kgfの力が加わったとすると、デッドボルトを開けるためにサムターンを50～60kgf・cmの力で回す必要がありますが、女性の場合、一般にはサムターンを回す力は10～20kgf・cm程度といわれています。

また、デッドボルトによる機能がされていない場合でも、ドアノブを回転させてラッチボルトを抜かなければ扉は開きませんが、ラッチボルト部分に水圧によって横から50kgfの力が加わると、ラッチボルトを開けるためにはドアノブを40～50kgf・cmの力で回す必要があります。女性の場合、ドアノブを回す力は一般的に20～30kgf・cm程度といわれています。

いずれにしても、ドアノブ部分に50kgfの力が加わると、内開きの扉であっても開けることは困難です。外開き扉のところでも示した式を用いると、建物内部の水位がないものとした場合、ドアノブ部分に50kgfの力がかかるのは扉の前後の水位差が47cm程度となりますから、外開き扉の場合と同じ浸水ケースを考えると、水の流入に要する時間は5分強程度しかありません。

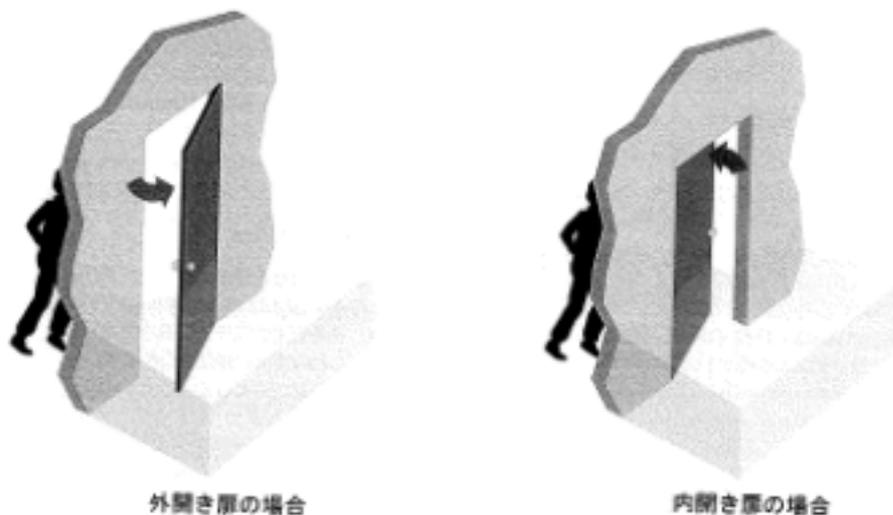


図 G-8 外開き、内開きの特徴

(財)日本建築防災協会「浸水時の地下室の危険性について」パンフレット

1.5.2 はん濫水が流入する階段を避難する際の限界条件

地上からはん濫水が流入する階段を避難する際の行動限界水深は、以下に示す実験式より設定している。

国土技術政策総合研究所（旧建設省土木研究所）が実施した実物大模型による歩行実験結果によれば、階段踏面の u^2h が $1.5(\text{m}^3/\text{s}^2)$ 程度以上になると足をとられ、歩行が困難になることが報告されている。

ここで、 u^2h は流体力をあらわす指標である。

$$\text{流体力} = u^2h$$

：水密度 ($0.102\text{ts}^2/\text{m}^4$)

u ：階段断面上の流速 (m/s)

h ：水深 (m)

また、図 G-9 に示されるように階段上の u^2h が 0.5 から 1.0 の間で、被験者の歩行の様子が「容易に歩く」から「おずおずと歩く」に移行している。

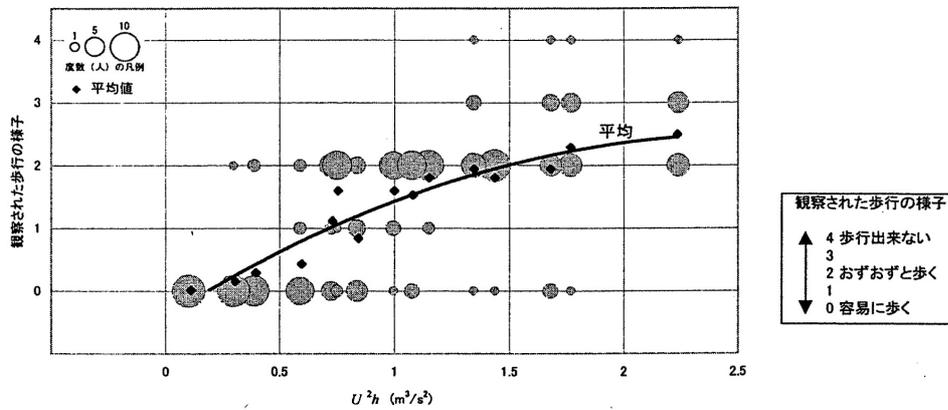


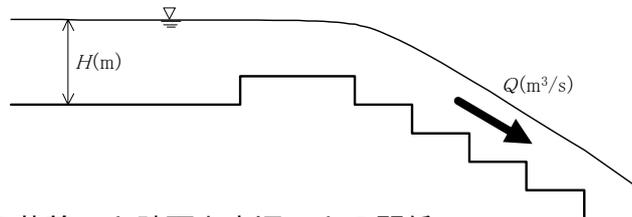
図 G-9 階段上の u^2h と観察された被験者の歩行の様子との関係
(国土交通省国土技術政策総合研究所の実験結果による)

一方、地上から地下への流入量と階段上の流れは、模型実験結果によれば以下の関係式で表すことができる。

地上浸水深 H と流入量 Q との関係

$$Q = 1.59BH^{1.65}$$

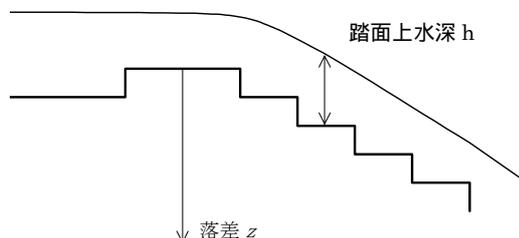
(B は階段出入口の幅、地上出入口にステップ有)



階段最上階からの落差 Z と踏面上水深 h との関係

$$h = 0.2305q^{0.9728}Z^{-0.4021}$$

ただし、 q は単位幅流量 (m^2/s) である。



以上より階段最上部の越流水深、階段最上階からの落差および u^2h の関係を図 G-10 に示すが、これらから行動限界水深および行動困難水深をそれぞれ 30cm、20cm と設定する。

- 行動限界水深（足をとられ歩行が困難となる）
 u^2h 1.5 以上 ... 越流水深 30cm
- 行動困難水深（おずおすと歩くようになる）
 u^2h 0.5 ~ 1.0 ... 越流水深 20cm

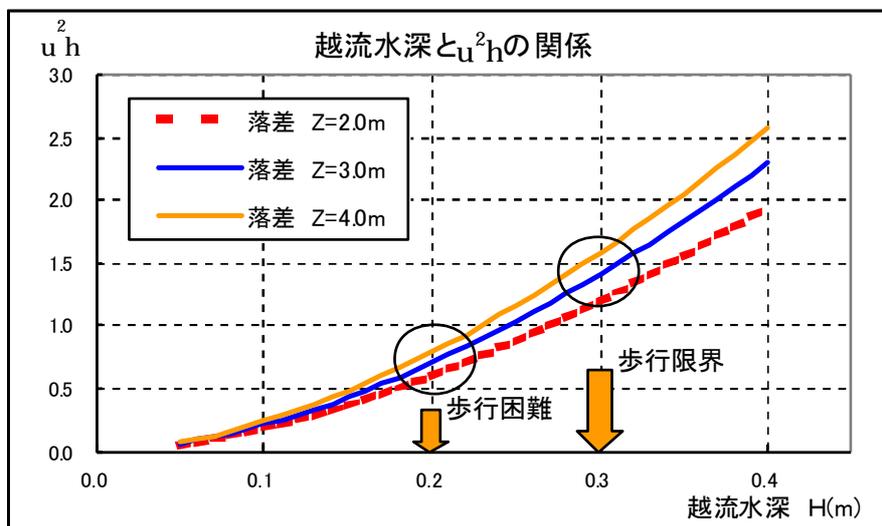
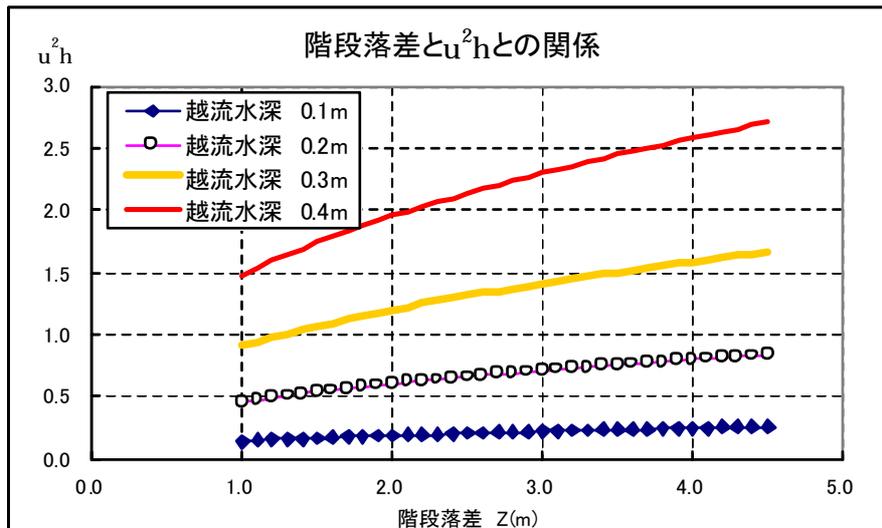


図 G-10 越流水深・階段落差・ u^2h の関係図

2. 地下空間浸水時避難安全検証法試行案を適用した検討事例

「地下空間における浸水対策ガイドライン」において分類しているそれぞれの地下空間についてモデル施設を設定し、地下空間浸水時避難安全検証法試行案を適用してみることにする。ここで、「5．不特定又は多数の者が利用する地下空間」の事例として、小規模商業施設ビルと大規模商業施設ビルを、「6．特定少数の者が利用する地下空間」の事例として小規模個人ビルをモデル施設として設定する。

検討では、地下空間の浸水状況を想定し、避難行動困難水深に達するまでの時間と地上へ脱出するまでの避難行動時間とを算出し、それぞれを比較することで避難に対する安全性を検証することとした。

各タイプの地下施設の検討結果を「2.3 検討結果一覧」に示す。また、これら検討手順を「2.4 地下空間浸水時避難安全検証法試行案の計算手順」に示す。

2.1 検討対象施設の概要

種 別	床面積	外部階段	内部階段	管理者	利用者
小規模商業施設ビル	470m ²	2 箇所 総幅：3m	なし	無	不特定少数
大規模商業施設ビル	8,400m ²	2 箇所 総幅：10m	11 箇所 総幅：24.8m	有	不特定多数
小規模個人ビル	31.8m ²	1 箇所 総幅：1m	なし	無	特定少数

(1) 小規模商業施設ビル

共有部面積	82m ²
店舗面積	266m ²
機電室面積	122m ²



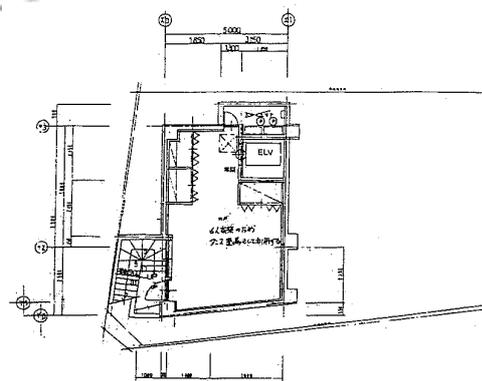
(2) 大規模商業施設ビル

売場面積	7,400m ²
事務所面積	1,000m ²



(3) 個人ビル

床面積	25.65m ²
階段部面積	6.15m ²



2.2 検討計算条件

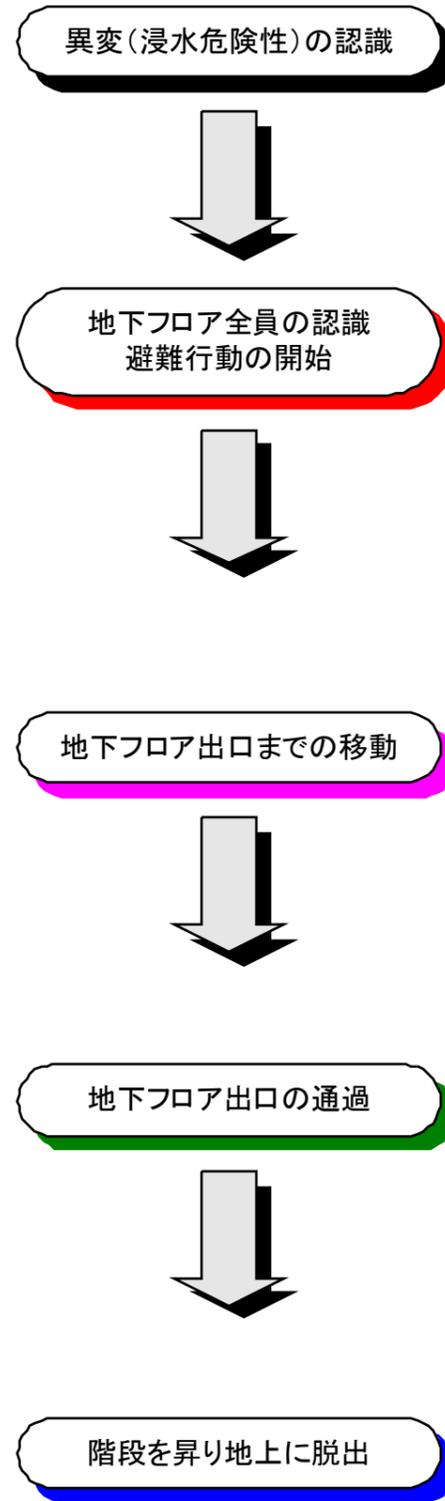
地下空間浸水時避難安全検証試行案の考え方に従い、以下の計算条件で各タイプの地下施設の検討計算を行った。条件設定値は、考慮したケースごとに設定した参考値である。また、避難行動所要時間の設定手順については、pG-17で概説している。なお、試算を行う際には、「2001版避難安全検証法の解説及び計算例の解説、平成13年3月、国土交通省住宅局建築指導課他編集」を参照されたい。

1.1 地下空間における浸水状況の設定	設定項目	設定値	設定理由
(1) 地上の浸水状況を想定	地上の想定浸水速度	2cm/分	流入口の幅員については2.1で設定
(2) 地下空間への流入状況を想定			国土技術政策総合研究所の実験式より流入量と地下空間の湛水深を算出
(3) 地下空間の浸水状況を想定			対象施設の構造については2.1で設定
1.2 地下空間における浸水時の避難行動の設定	ケース分類	設定値	設定理由
(1) 異変(浸水危険性)の認識	無対策	居室部： 浸水深 3cm	足の甲が浸水する程度で知覚
		廊下等共有部： 浸水深 10cm	地下空間滞在者が居室にいるとし、廊下と居室の浸水遅れを考慮
	管理者による地上監視	地上部 浸水深：10cm	地上の浸水位を監視できるとして管理者が地下空間滞在者を避難させる水深
	浸水センサーの設置	地上型： 地上浸水深：3cm	センサーの感知水深
地下型： 地下浸水深：3cm		センサーの感知水深	
(2) 地下フロア全員の認識、避難開始(行動開始までの時間)	無対策		情報伝達時間と意志決定・準備時間は火災時と同様と設定
	管理者あり、センサー設置	一律3分	管理者・通報者による避難情報の一斉伝達が行われるものとし、火災避難安全検証の面積に起因する時間を未考慮
(3) 地下フロア出口までの移動			歩行速度に浸水(30cm)による歩行割引率を考慮
(4) 地下フロア出口の通過			居室の出口を通過する際の滞留の解消時間は火災と同様と設定
(5) 階段を昇り地上に脱出			流水の中を歩行する際の割引率を考慮

：「2001版避難安全検証法の解説及び計算例の解説」に準ずる

：「2001版避難安全検証法の解説及び計算例の解説」を参考として設定

◆地下空間における避難行動所要時間の設定手順



【無対策の場合】

- 地下部の浸水で異常認識
 - ・居室部・・・浸水深3cm(足の甲が浸水する程度で知覚)
 - ・廊下等共有部・・・浸水深10cm(地下空間滞在者が居室に在るとし、廊下と居室の浸水遅れを考慮)

【管理者による地上監視】

- 地上部の浸水実態で異常認識
 - ・地上部浸水深・・・10cm
- 地上の浸水位を監視できるとして管理者が地下空間滞在者を避難させる水深

【浸水センサーの設置】

- 地上型
 - 地上部浸水深・・・3cm
- 地下型
 - 地下部浸水深・・・3cm
- センサーの感知水深

【洪水情報の収集】

- 洪水情報を収集することによる効果は大きいですが、避難安全検証法では取り扱わない

- ロコミによる情報伝達
- 避難行動までの意志決定・準備

行動開始までの時間は火災時の『避難安全検証法』に準ずる。

$$t = \frac{\sqrt{A}}{30} + 3 \quad (\text{単位: min})$$

A: 地下フロア面積

○情報伝達時間と意志決定・準備時間は火災時と同様と設定

- 居室部で異常に気づいた場合
- 管理者・通報者による避難情報の一斉伝達・誘導

行動開始までの時間は一律3分と設定する。

○管理者・通報者による避難情報の一斉伝達が行われるものとし、火災避難安全検証の面積に起因する時間を未考慮

- 歩行速度は火災時の『避難安全検証法』を基本とするが、浸水による歩行速度の割引を考慮する。なお浸水による割引率は、浸水深30cmを想定し、無浸水時の $(1 - \frac{30}{70}) = 57\%$ とする。(70cm時に歩行速度0と仮定)

$$t = \lambda / v \quad (\text{単位: min})$$

ここで λ: 歩行距離、v: 平坦地の標準歩行速度 (60m/min)、: 浸水時歩行速度割引係数 $(1 - \frac{30}{70} = 0.57)$

○歩行速度に浸水(30cm)による歩行割引率を考慮

- 出口を通過するために要する時間は火災時の『避難安全検証法』に準ずる。

$$t = \frac{PA}{NB} \quad (\text{単位: min})$$

ここで P: 在館者密度(人/m²)・・・居室の種類による、A: 床面積(m²)
N: 有効流動係数(=90)、B: 有効出口幅(m)

○居室の出口を通過する際の滞留の解消時間は火災と同様と設定

- 階段を昇る歩行速度は、火災時の『避難安全検証法』を基本とするが、流水中の歩行の割引を考慮する。なお割引率は流入水深20cmを想定し、無浸水時の $(1 - \frac{20}{30}) = 33\%$ とする。(流入水深30cm時に歩行速度0と仮定)

$$t = \lambda / v \quad (\text{単位: min})$$

ここで λ: 階段距離(m)、v: 階段昇りの標準歩行速度 (27m/min)、: 浸水時歩行速度割引係数 $(1 - \frac{20}{30} = 0.33)$

○流水の中を歩行する際の割引率を考慮

2.3 検討結果一覧

■小規模商業施設ビル

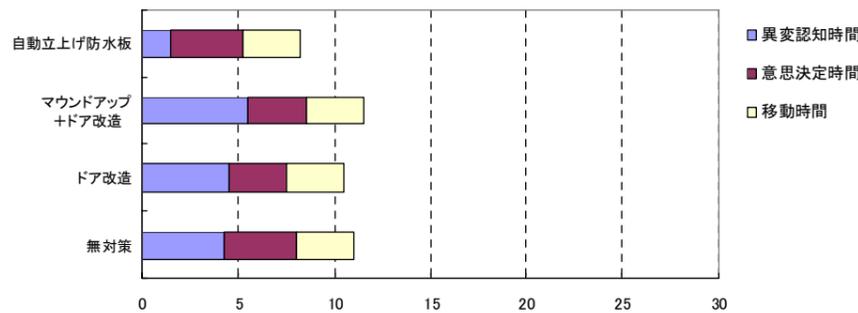
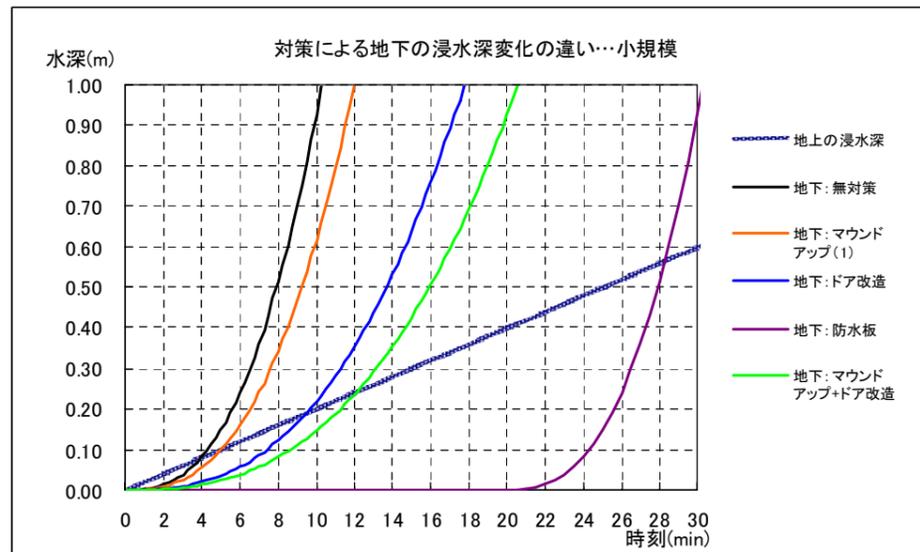
ケース名	マウンドアップ	防水板	ドア改造	浸水センサー	警備員の配備	対策費用(千円)	①	②	③	④	⑤	⑥	避難行動余裕時間(分)	安全率A	安全率B	評価	備考
							浸水深30cmまでの時間(分)	越流水深20cmまでの時間(分)	異変認知時間(分)	意思決定時間(分)	移動時間(分)	避難行動時間(分)						③+④+⑤
1 無対策						0	6.5	10.0	4.3	3.7	3.0	10.9	▲ 4.41	0.60	0.34	×	
2 マウンドアップ(1)	1箇所のみ 30cm UP					100	7.8	25.0	5.0	3.7	3.0	11.7	▲ 3.91	0.66	0.41	×	
3 ドア改造			防水対策型戸(全室)			800	11.3	10.0	4.5	3.0	3.0	10.5	▲ 0.46	0.96	0.92	×	対策効果は高いが単独では不足
4 地上浸水センサー(2)				地上浸水センサー		400	6.5	10.0	1.5	3.7	3.0	8.2	▲ 1.66	0.80	0.75	×	
5 マウンドアップ(1)+ドア改造	1箇所のみ 30cm UP		防水対策型戸(全室)			900	13.3	25.0	5.5	3.0	3.0	11.5	1.79	1.16	1.30	△	ドア改造により非常脱出が可能と判断できれば○と判断できる。
6 マウンドアップ(1)+地上浸水センサー	1箇所のみ 30cm UP			地上浸水センサー		500	7.8	25.0	1.5	3.7	3.0	8.2	▲ 0.41	0.95	0.94	×	
7 マウンドアップ(1)+地上浸水センサー+警備員の配備	1箇所のみ 30cm UP			地上浸水センサー	配備	500	7.8	25.0	1.5	3.0	3.0	7.5	0.29	1.04	1.05	△	浸水の危険性を広報する人がいるかどうかで浸水センサーの効果が異なる。
8 自動立上げ防水板(センサー付き)		防水板: 40cm、2箇所		地上浸水センサー		4,000	26.5	30.0	1.5	3.7	3.0	8.2	18.34	3.25	3.75	○	安全性は高いが、防水板設置費用が高く、資産被害の面も考慮して検討の必要あり。
9 マウンドアップ(1)+ドア改造+地上浸水センサー	1箇所のみ 30cm UP		防水対策型戸(全室)	地上浸水センサー		1,300	13.3	25.0	1.5	3.7	3.0	8.2	5.09	1.62	1.76	○	ケース5に対してさらに安全性を高めることとしたケース

* 地上が浸水し始める時間を0分とする

避難行動余裕時間: 避難限界時刻-避難完了時刻 = ⑥-min(①, ②)

安全率A: 地上浸水開始時刻からの所要時間の比率 = min(①, ②)/⑥

安全率B: 異変認知時刻からの所要時間の比率 = (min(①, ②)-③)/(⑥-③)



対策メニューと対策効果

	異変の早期認知	地下浸水深上昇速度の低下	安全な避難口の確保
マウンドアップ	地下浸水深10cmで認知 地下浸水深の上昇が遅くなるため、無対策時より認知時刻は遅れる。	地下浸水深15分間は、一つの出入口(b=1m)において30cmのマウンドアップの流入となるため、無対策時より水位上昇は遅くなる。	一つの出入口(b=1m)において30cmのマウンドアップ 地上浸水後15分間は、マウンドアップした出入口からは水が浸入しない。
ドア改造	地下(居室)浸水深3cmで認知 居室への浸水によって認知するため認知浸水深は小さくなる。ただし、想定浸水速度が遅いため、認知時刻は無対策時より若干遅れる。	防水対策型戸の設置 ドアを改造した部屋にも同時に漏水するため、浸水深の上昇は遅くなる。	ドア部で浸水深の差がつかなくなるため、ドアが開かず部屋に閉じ込められることはなくなる。
地上浸水センサー	地上浸水深3cmで認知 地上の浸水深で認知することとなるため、地下想定浸水速度を低下させる対策(マウンドアップなど)の効果を減ずることがない。ただし、センサーが感知し警報が鳴ったとしても、すぐに避難行動に移るかどうかは疑問。	-	-
自動立上げ防水板(センサー付き)	地上浸水深3cmで認知 自動立上げの場合にはセンサーが設置されているため、それにより認知されると考える。ただし、すぐに避難行動に結びつくかどうかは疑問。	自動立上げ式の防水板(h=40cm)を設置 想定浸水速度は変わらないが、地下への流入開始時刻が20分遅れるため、それだけ避難行動のための時間が確保できる。	地上浸水後20分間は、出入口から水が浸入しないが、越水を始めたばあいは落水水のため歩行が困難になることが想定される。

総括 : 地下空間の一次貯留面積が小さいため、地下想定浸水速度が非常に大きく、その抑制が重要な対策となる。浸水面積を拡大するドア改造と出入口の嵩上げが有効であり、ドア改造は非常脱出機能も併せ持つことから安全性は一層高まるものと考えられる。異変を早期に認知するための対策も有効であり、浸水センサーの効果が期待されるが、管理者がいないため維持管理面に不安がある。同様に、自動立上げ式の防水板に関しても、高い効果が認められるものの、高い設置費用と共に維持管理面への不安が残る。このように、地下空間管理者のいない小規模商業施設ビルに関しては、ある限定された施設に依存した対策ではなく、様々な対策を組合せリスクを分散しておくことが重要と考える。

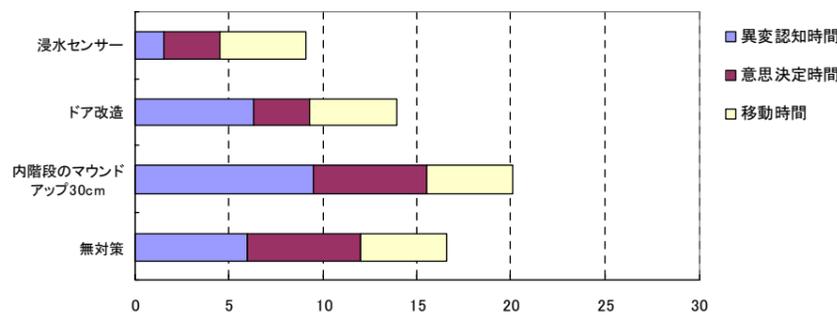
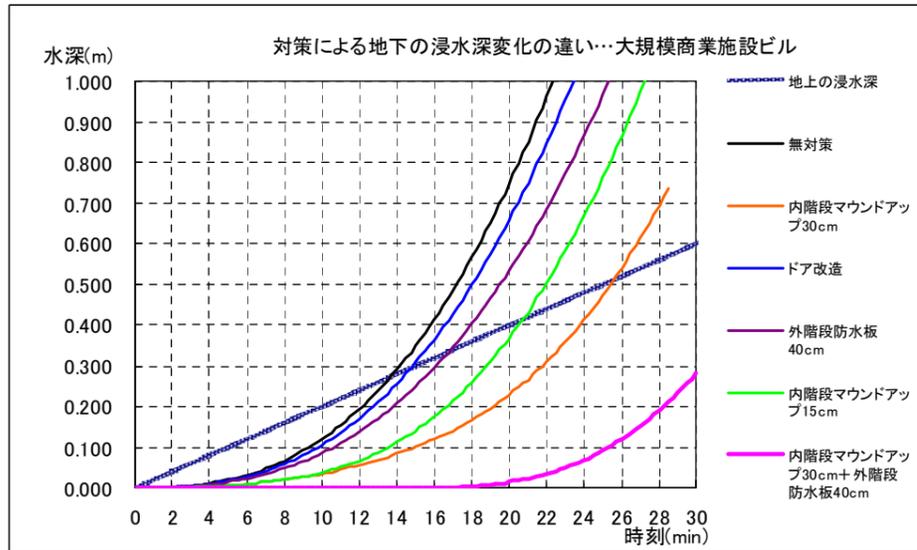
■大規模商業施設ビル

ケース名	マウンドアップ	防水板	ドア改造	浸水センサー	一斉通報	対策費用(千円)	①	②	③	④	⑤	③+④+⑤	避難行動余裕時間(分)	安全率A	安全率B	評価	備考
							浸水深30cmまでの時間(分)	越流水深20cmまでの時間(分)	異変認知時間(分)	意思決定時間(分)	移動時間(分)	避難行動時間(分)					
1 無対策						0	14.3	10.0	6.0	6.0	4.6	16.6	▲ 6.60	0.60	0.38	×	
2 マウンドアップ(内階段)	内階段のみ 30cm UP					10,000	22.0	25.0	9.5	6.0	4.6	20.1	1.90	1.09	1.18	△	
3 ドア改造			防水対策型 戸:事務室			600	15.0	10.0	6.3	3.0	4.6	13.9	▲ 3.85	0.72	0.49	×	ドア改造の効果は少ない
4 地上浸水センサー(4)				地上浸水 センサー	一斉通報	800	14.3	10.0	1.5	3.0	4.6	9.1	0.90	1.10	1.12	△	異変を早く知ることの効果は大きい
5 自動立上げ防水板(外階段)(2)		外階段 40cm UP		地上浸水 センサー	一斉通報	4,000	16.3	10.0	1.5	3.0	4.6	9.1	0.90	1.10	1.12	△	内階段からの避難とする
6 自動立上げ防水板(外階段) … 外階段からの避難誘導		外階段 40cm UP		地上浸水 センサー	一斉通報	4,000	16.3	30.0	1.5	3.0	8.4	12.9	3.40	1.26	1.30	○	外階段からのみの避難とするため、移動時間が大きくなる。
7 マウンドアップ(内階段1/2)+浸水センサー	内階段 15cm UP			地上浸水 センサー	一斉通報	5,800	19.0	17.5	1.5	3.0	4.6	9.1	8.40	1.92	2.11	○	浸水センサーによる早期認知と浸水位の上昇を抑制する対策を組み合わせると効果が大きい。
8 マウンドアップ(内階段1/2)+ドア改造	内階段 15cm UP		防水対策型 戸:事務室			5,600	19.5	17.5	9.8	3.0	4.6	17.4	0.15	1.01	1.02	△	
9 マウンドアップ(内階段)+自動立上げ 防水板(外階段)	内階段 30cm UP	外階段 40cm UP		地上浸水 センサー	一斉通報	14,000	30.5	25.0	1.5	3.0	4.6	9.1	15.90	2.75	3.09	○	地下への浸水が始まる前に避難が完了する。

*一斉通報は対策費用に含んでいない

*地上が浸水し始める時間を0分とする

避難行動余裕時間: 避難限界時刻-避難完了時刻 = ⑥-min(①, ②)
 安全率A: 地上浸水開始時刻からの所要時間の比率 = min(①, ②)/⑥
 安全率B: 異変認知時刻からの所要時間の比率 = (min(①, ②)-③)/(⑥-③)



対策メニューと対策効果

	異変の早期認知	地下浸水深上昇速度の低下	安全な避難口の確保
マウンドアップ(内階段)	地下浸水深3cmで認知	内階段全て(b=24.8m)について30cmのマウンドアップ	地上浸水後15分間は、一つの出入口だけからの流入となるため、無対策より水位上昇は遅くなる。
ドア改造	地下浸水深3cmで認知	防水対策型戸の設置(事務室と売場の境のドア)	ドア部で浸水深の差がつかなくなるため、ドアが開かず部屋に閉じ込められることはなくなる。
地上浸水センサー	地上浸水深3cmで認知	地上の浸水深で認知することとなるため、地下想定浸水速度を低下させる対策(マウンドアップなど)の効果を増やすことがない。管理者がいて避難誘導や館内放送設備などがあることを前提とすれば、センサーが感知した時点で、すぐに避難行動に移ると仮定。	
自動立上げ防水板(外階段)	地上浸水深3cmで認知	外階段(b=10m)に自動立上げ式の防水板(h=40cm)を設置	内階段を避難出口にしている場合には効果はない。外階段を避難口として誘導をすれば地上浸水後20分間は、出入口から水が浸入しないが、避難行動時間は多く要する。

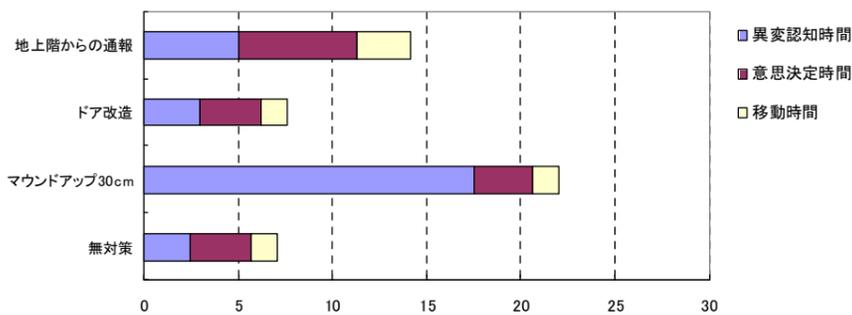
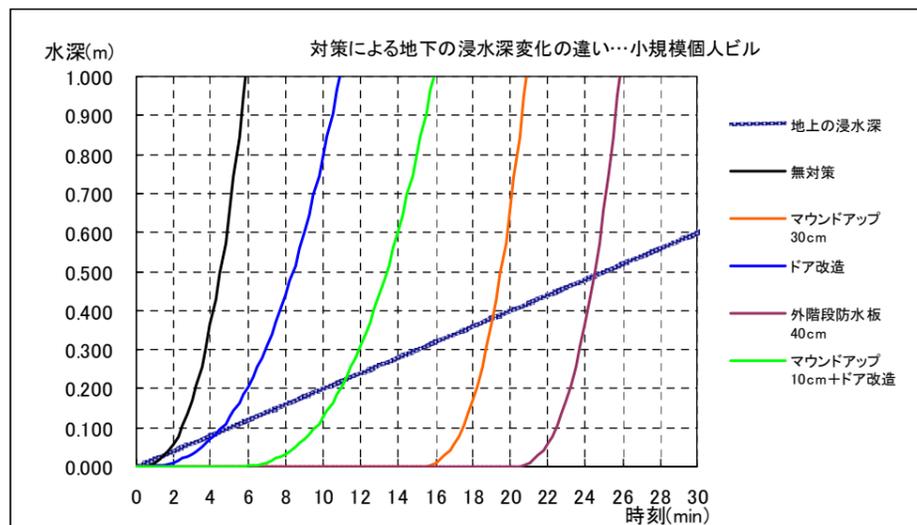
総括 : 無対策では避難行動を起こすまでの時間(異変認知時間+意思決定時間)が大きいため、異常を早く知り、早く行動を起こすための対策が有効である。地下空間管理者が存在しているため、地上浸水センサーなどで察知し、警報による一斉避難が可能と考える。このタイプの地下空間には、不特定多数の利用者が存在しているため、洪水情報を収集することにより、事前に避難することができれば、より安全性が増すことができ、重要な対策と位置付けられる。また、出入口の敷高を高くすれば、浸水している中での避難をできるだけ避けることができ、マウンドアップや防水板の設置も有効な対策となる。特に出入口数の多い内階段での対策が重要である。

■小規模個人ビル

ケース名	マウンドアップ	防水板	ドア改造	浸水センサー	通報	対策費用(千円)	①	②	③	④	⑤	③+④+⑤	避難行動余裕時間(分)	安全率A	安全率B	評価	備考
							浸水深30cmまでの時間(分)	越流水深20cmまでの時間(分)	異変認知時間(分)	意思決定時間(分)	移動時間(分)	避難行動時間(分)					
1 無対策						0	3.8	10.0	2.5	3.2	1.4	7.1	▲ 3.33	0.53	0.27	×	
2 マウンドアップ	外階段 30cm UP					50	18.8	25.0	17.5	3.2	1.4	22.1	▲ 3.33	0.85	0.27	×	マウンドアップによって浸水時間は遅れるが、異変認知時刻も同じだけ遅くなる。
3 ドア改造			防水対策型戸			100	7.0	10.0	3.0	3.2	1.4	7.6	▲ 0.58	0.92	0.87	×	ドア改造による効果は大きい安全性は不足している。
4 地上浸水センサー(1)				地上浸水センサー		200	3.8	10.0	1.5	3.2	1.4	6.1	▲ 2.33	0.62	0.49	×	
5 マウンドアップ+浸水センサー	外階段 30cm UP			地上浸水センサー		250	18.8	25.0	1.5	3.2	1.4	6.1	12.67	3.08	3.77	○	マウンドアップによる浸水時間遅延効果が浸水センサーによって活かされている。
6 自動立上げ防水板(センサー付き)		外階段 40cm UP		地上浸水センサー		2,000	23.8	30.0	1.5	3.2	1.4	6.1	17.67	3.91	4.86	○	安全性は高いが、機器のメンテナンス面や設置費用など総合的に検討する必要がある。
7 マウンドアップ+ドア改造	外階段 30cm UP		防水対策型戸			150	22.0	25.0	18.0	3.2	1.4	22.6	▲ 0.58	0.97	0.87	×	
8 ドア改造+浸水センサー			防水対策型戸	地上浸水センサー		300	7.0	10.0	1.5	3.2	1.4	6.1	0.92	1.15	1.20	△	安全性は若干低いものの、部屋に閉じ込められるという最悪の状況は回避できる。
9 マウンドアップ+ドア改造+地上階からの通報	外階段 30cm UP		防水対策型戸		地上階からの通報	150	22.0	25.0	5.0	6.4	2.8	14.2	7.80	1.55	1.85	○	浸水センサーはメンテナンス面で不安があるため、地上階からの通報があった場合を想定し

* 地上が浸水し始める時間を0分とする
 * 地上階からの通報の場合には、行動パターンを考え、意思決定時間及び移動時間を通常の2倍とカウントした。

避難行動余裕時間: 避難限界時刻 - 避難完了時刻 = ⑥ - min(①, ②)
 安全率A: 地上浸水開始時刻からの所要時間の比率 = min(①, ②) / ⑥
 安全率B: 異変認知時刻からの所要時間の比率 = (min(①, ②) - ③) / (⑥ - ③)



対策メニューと対策効果

	異変の早期認知	地下浸水深上昇速度の低下	安全な避難口の確保
マウンドアップ	地下浸水深10cmで認知 浸水時刻が遅れるが、その分だけ認知時刻も遅れ、効果はない。	出入口(b=1m)においてマウンドアップ マウンドアップの高さまでは流入しないが、そこからの上昇速度は無対策時と同様。	マウンドアップの高さまでは出入口から水が浸入しない。
ドア改造	地下(居室)浸水深3cmで認知 居室への浸水によって認知するため認知浸水深は小さくなる。ただし、想定浸水速度が遅いため、認知時刻は無対策時より若干遅れる。	防水対策型戸の設置 ドアを改造した部屋にも同時に湛水するため、浸水深の上昇は遅くなる。	ドア部で浸水深の差がつかなくなるため、ドアが開かず部屋に閉じ込められることはなくなる。
地上浸水センサー(地上階からの通報)	地上浸水深3cm(10cm)で認知 地上の浸水深で認知することとなるため、地下想定浸水速度を低下させる対策(マウンドアップなど)の効果を減らすことがない。ただし、設備の維持管理面に不安が残る。地上階からの通報を考えた場合には、行動時間が増えるが確実性は増す?	-	-
自動立上げ防水板(センサー付き)	地上浸水深3cmで認知 自動立上げの場合にはセンサーが設置されているため、それにより認知されるが、浸水センサーと同様、設備の維持管理面に不安が残る。	自動立上げ式の防水板(h=40cm)を設置 想定浸水速度は変わらないが、地下への流入開始時刻が20分遅れるため、それだけ避難行動のための時間が確保できる。	地上浸水後20分間は、出入口から水が浸入しない。

総括 : 地下空間の一次貯留面積が非常に小さいため地下水位上昇速度が早く、あっという間に水位が上昇するため、地下の浸水を遅らすための措置と危険性を早く知らせるための対策を併用していく必要がある。
 なお、出入口が外階段一箇所のみなので、部屋に閉じ込められる危険性が高いため、ドア改造のような非常脱出機能をもつ対策を併用することが重要と考える。
 また、個人管理となるため、メンテナンスの重要な設備に頼った対策ではなく、リスク分散が可能な対策としていくことが重要と考える。

2.4 地下空間浸水時避難安全検証法試行案の計算手順について

2.4.1 検討事例の概要

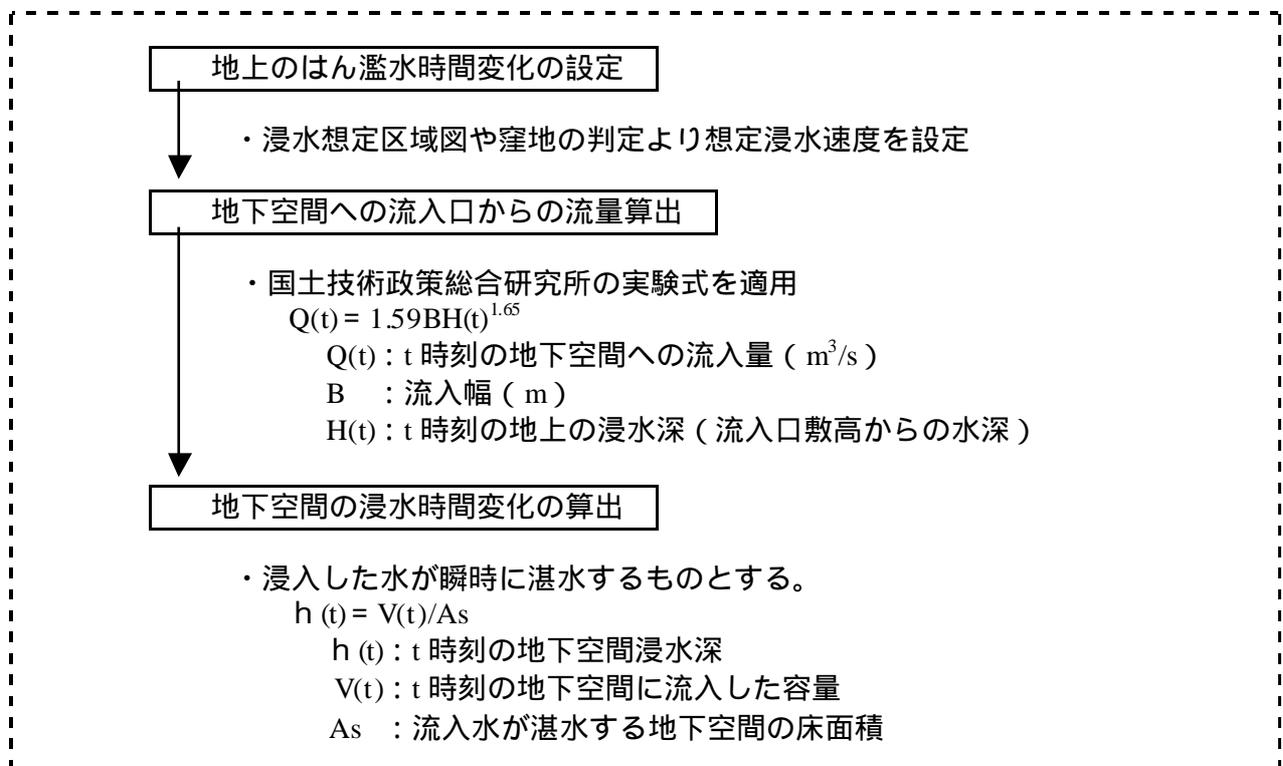
小規模商業ビル地下の事例を用いて算出方法の概要を解説する。

- 地上の水位上昇速度は標準値である 2cm/min に設定する。
- 小規模商業ビル地下、管理者無し、利用者不特定少数
- 全体床面積：470m²
- 階段：2 箇所、幅員 2m、1m

2.4.2 地下空間の浸水状況の解説

・地下空間の浸水深算出

地下空間へのはん濫水の流入による地下浸水深の算出については、国土交通省国土技術政策総合研究所の土木技術資料 43-2(2001)の「階段を通じた地下空間へのはん濫水流入に関する実験」にある実験式を適用することにする。



[参考]地下空間の浸水深計算例

「1.1 地下空間への浸水状況を想定する」の考え方に示した数式を用いて表計算ソフトにより地下空間の浸水深の時間変化を算出した例を以下に示す。

係数 c1	1.59
係数 c2	1.65
想定浸水速度1:(cm/min)	2
折れ点水深(m)	1
折れ点時間(min)	50
想定浸水2:(cm/min)	0

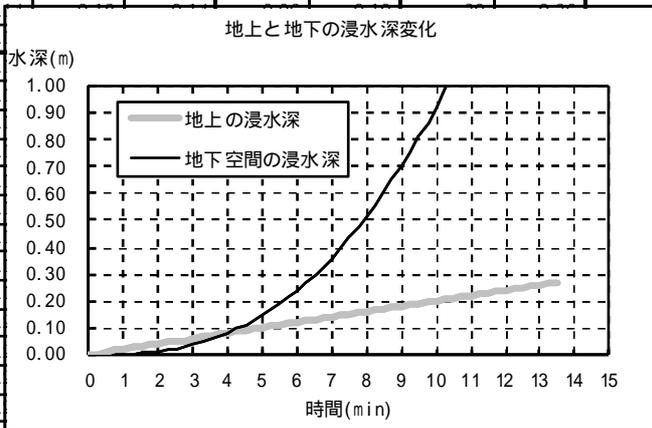
任意変更

ステップ高さ(m)	
流入口幅(m)	
地下空間想定浸水面積	82

流入口(1)	0.00	0.00
	2	1

計算時間ピッチ(min) 0.25

時刻	HH	H1	Q1	H2	Q2	ΣQ	V	地下空間
t(min)	地上水深	水深(1)	流量(1)	水深(2)	流量(2)	合計流量	容量	水深
								(m)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00
0.25	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0	0.00
0.5	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0	0.00
0.75	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0	0.00
1	0.02	0.02	0.01	0.02	0.00	0.01	0	0.00
1.25	0.03	0.03	0.01	0.03	0.00	0.01	0	0.00
1.5	0.03	0.03	0.01	0.03	0.00	0.01	1	0.01
1.75	0.04	0.04	0.01	0.04	0.01	0.02	1	0.01
2	0.04	0.04	0.02	0.04	0.01	0.02	1	0.01
2.25	0.05	0.05	0.02	0.05	0.01	0.03	1	0.02
2.5	0.05	0.05	0.02	0.05	0.01	0.03	2	0.02
2.75	0.06	0.06	0.03	0.06	0.01	0.04	2	0.03
3	0.06	0.06	0.03	0.06	0.02	0.05	3	0.04
3.25	0.07	0.07	0.03	0.07	0.02	0.05	4	0.05
3.5	0.07	0.07	0.04	0.07	0.02	0.06	5	0.06
3.75	0.08	0.08	0.04	0.08	0.02	0.07	6	0.07
4	0.08	0.08	0.05	0.08	0.02	0.07	7	0.08
4.25	0.09	0.09	0.05	0.09	0.03	0.08	8	0.10
4.5	0.09	0.09	0.06	0.09	0.03	0.09	9	0.11
4.75	0.10	0.10	0.07	0.10	0.03	0.10	11	0.13
5	0.10	0.10	0.07	0.10	0.04	0.11	12	0.15
5.25	0.11	0.11	0.08	0.11	0.04	0.12	14	0.17
5.5	0.11	0.11	0.08	0.11	0.04	0.12	16	0.19
5.75	0.12	0.12	0.09	0.12	0.04	0.13	18	0.21
6	0.12	0.12	0.10	0.12	0.05	0.14	20	0.24
6.25	0.13	0.13	0.10	0.13	0.05	0.15	22	0.27
6.5	0.13	0.13	0.11	0.13	0.05	0.16	24	0.30
6.75	0.14	0.14	0.12	0.14	0.06	0.18	27	0.33
7	0.14	0.14	0.12	0.14	0.06	0.18	27	0.33
7.25	0.15	0.15	0.12	0.15	0.06	0.19	27	0.33
7.5	0.15	0.15	0.12	0.15	0.06	0.19	27	0.33
7.75	0.16	0.16	0.12	0.16	0.06	0.20	27	0.33
8	0.16	0.16	0.12	0.16	0.06	0.20	27	0.33
8.25	0.17	0.17	0.12	0.17	0.06	0.21	27	0.33
8.5	0.17	0.17	0.12	0.17	0.06	0.21	27	0.33
8.75	0.18	0.18	0.12	0.18	0.06	0.22	27	0.33
9	0.18	0.18	0.12	0.18	0.06	0.22	27	0.33
9.25	0.19	0.19	0.12	0.19	0.06	0.23	27	0.33
9.5	0.19	0.19	0.12	0.19	0.06	0.23	27	0.33
9.75	0.20	0.20	0.12	0.20	0.06	0.24	27	0.33
10	0.20	0.20	0.12	0.20	0.06	0.24	27	0.33
10.25	0.21	0.21	0.12	0.21	0.06	0.25	27	0.33
10.5	0.21	0.21	0.12	0.21	0.06	0.25	27	0.33
10.75	0.22	0.22	0.25	0.22	0.13	0.38	92	1.12
11	0.22	0.22	0.26	0.22	0.13	0.39	98	1.19



地下空間の浸水状況の把握

[ケース別の検討]

(1) 無対策

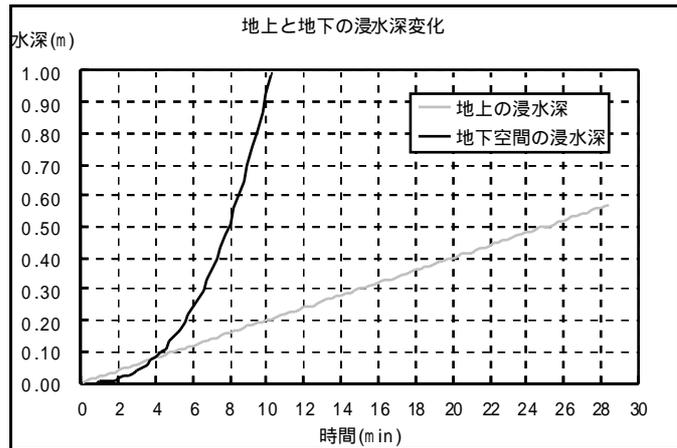
通常、居室部のドアは閉まっていると仮定すると、無対策では廊下等の共有部が浸水することとなる（1次貯留面積 82m²）。その場合、地上の水深が 10cm となるのが 4 分 45 秒、地下の浸水が 10cm になるのが、4 分 15 秒であるので、浸水危険性の認知時間は、4 分 15 秒である。また、水深 30cm となってドアが開かなくなるまでの時間は、6 分 30 秒である。

階段ステップ部の越流水深が 20cm となって階段を使用した避難が困難になるのは、10 分後であるので、避難行動が困難になる時間は、6 分 30 秒である。



地階 平面

==== : 想定浸水面積（1時貯留面積）



(2) マウンドアップ

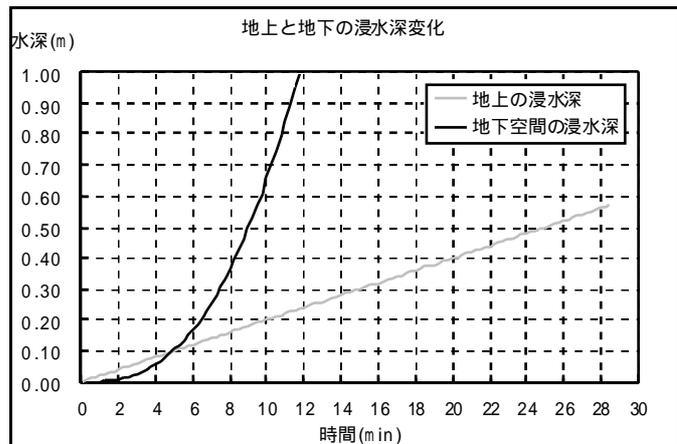
避難口(出口)が2つあるなかで、幅員 1m の階段(右)のみを 30cm マウンドアップする。地下への流入量が減少し、地下の水位上昇速度は低下するので、避難の余裕時間は増加することになる。

地下の水深が 10cm になる（浸水危険性を認知する）のに 5 分。浸水が 30cm になり避難が困難になるのに 7 分 45 秒。階段を上るのが困難になる越流水深が 20cm になるは 25 分かかる。



地階 平面

==== : 想定浸水面積（1時貯留面積）



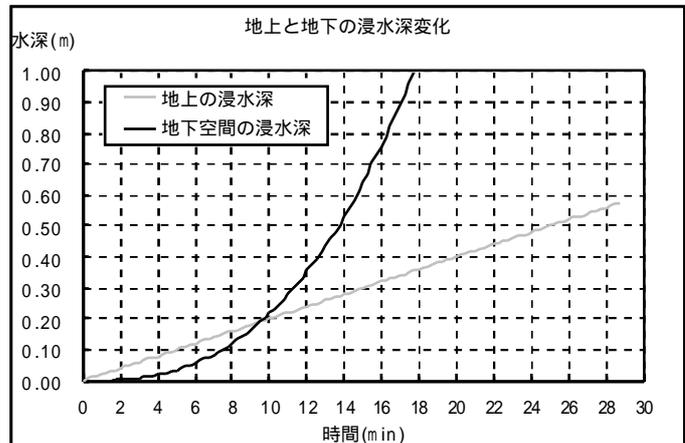
(3) ドア改造

ドアを浸水対策型防火戸にし、戸の内外の水位差をなくす。これにより扉が開かなくなることはないが、廊下と同時にポンプ室、機械室、電気室以外の室内も一斉に浸水することになる。室内にいる人も直接浸水を実感するので水深 3cm で浸水危険性に認知することになると、4分 30秒。水深 30cm になるのは、11分 15秒であるが、その前に 10分で入口の越流水深が 20cm を超えてしまう。



地階 平面

—: 想定浸水面積 (1 時貯留面積)



(4) 浸水センサー

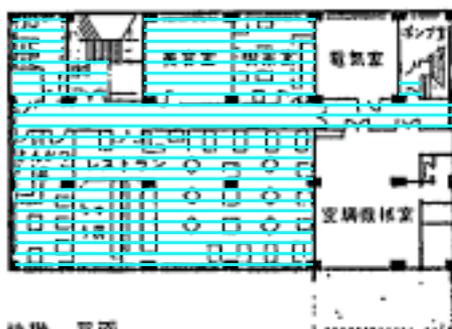
浸水センサーを設置した場合、浸水危険認知時間は地上の水深 3cm より 1分 30秒である。避難時にドアを開けるので室内も浸水するが、どの居室が浸水するかわからないので、このケースにおいても 1次貯留エリアは廊下等の共有部だけとする。地下空間の水位上昇速度は、ドア改造の場合より早くなる。水深 30cm までの時間は 7分 30秒である。

水位変化のグラフは (1) と同様である。

(5) マウンドアップ+ドア改造

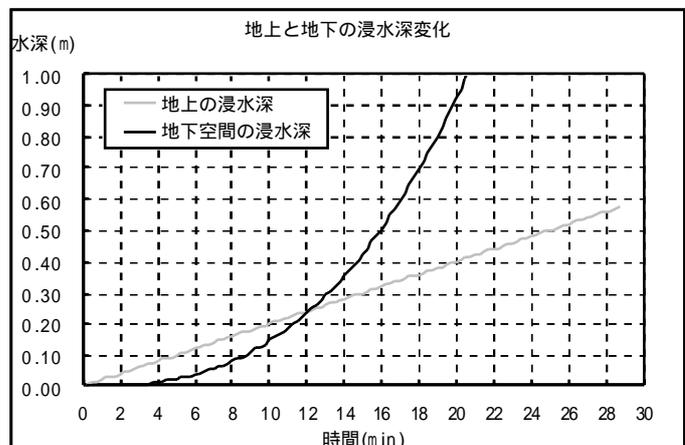
(2) と (3) を併せたケースである。マウンドアップとドア改造 (浸水面積大) による地下の水位上昇速度低下の効果により、さらに避難行動余裕時間は増加する。

ドア改造で居室まで浸水するので浸水危険性の認知時間は、水深 3cm までにかかる時間で 5分 30秒である。また、水深 30cm となるのは 13分 15秒である。



地階 平面

—: 想定浸水面積 (1 時貯留面積)



(6) マウンドアップ+浸水センサー

出口の2つのうち1つ(右)を30cmマウンドアップした場合、マウンドアップされている階段から流入するまでは、全体の流入量が無対策より減るので、地下の水深が30cmになるのに7分45分かかる。また、階段を上るのが困難になる越流水深20cmまでには25分かかることになる。

水位変化のグラフは、(2)と同様である。

(7) マウンドアップ+浸水センサー+警備の整備

(6)に警備員が配備されると、意思決定時間が3分となる。

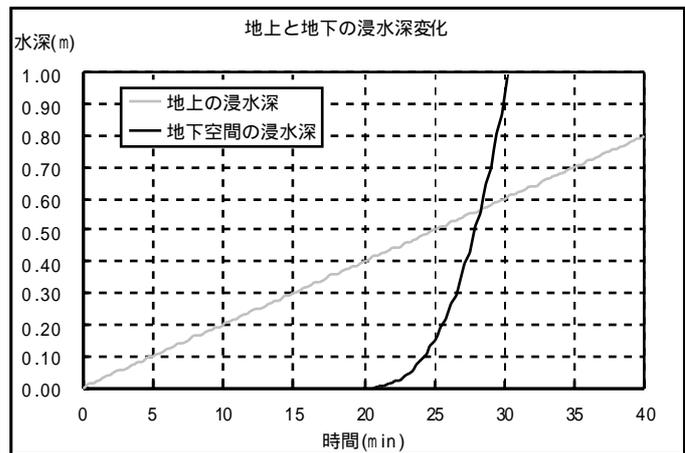
水位変化のグラフは、(2)、(6)と同様である。

(8) 自動立ち上げ式防水板(センサー付)

階段2箇所を自動立ち上げ式防水板(高さ40cm)を設置することで、地下浸水まで20分猶予ができる(地上の水位上昇速度が2cm/minの場合)。地下の浸水深が30cmになるのは26分30秒である。また、越流水深が20cmを超えるのが30分である。



地階 平面
: 想定浸水面積(1時貯留面積)



(9) マウンドアップ+ドア改造+地上浸水センサー

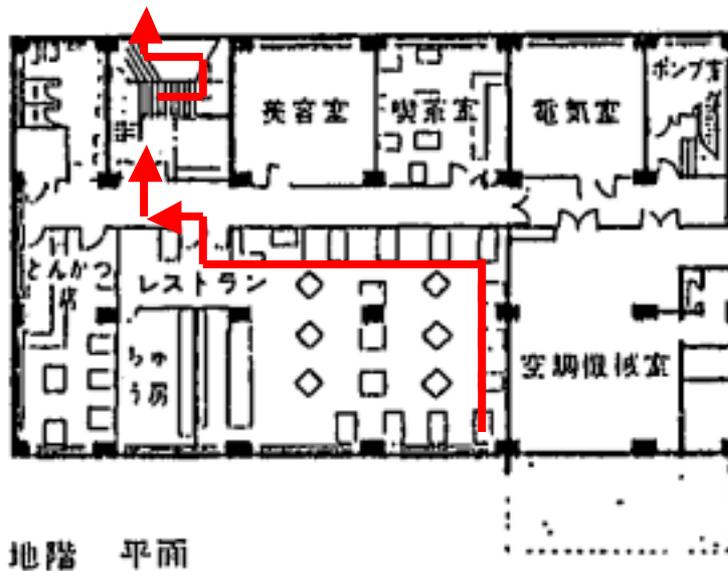
(5)において、異変認知時間が1分30秒、意思決定時間が3分になったケースである。水位変化グラフは、(5)と同様である。

2.4.3 避難行動時間の解説

・算出方法

地下空間の浸水時における避難行動の各段階を以下のように設定する。これらの総和がある地下空間から地上へ避難する際に要する時間である。

- 異変（浸水危険性）の認識
- 地下フロア全員の認識及び避難行動開始
- 地下フロア出口まで移動
- 地下フロア出口の通過
- 階段を上り地上へ脱出



このとき、については、火災における避難計画として検討されている建築基準法令の避難安全検証法による避難行動時間算出方法を参考にすることにする。次項より事例を用いて具体的に各段階の算出方法について説明する。

・算出事例による解説

(1) 異変（浸水危険性）の認識

地下空間の浸水の危険性を認知するまでの時間とは、地上の降雨状況等により地下空間が浸水する危険性があると判断するまでに要する時間（危険性認知時間）である。このとき、危険性認知時間を

$$T_1 = \min(t_1, t_2, t_3)$$

ここで、

T_1 ：危険性認知時間

t_1 ：地上が浸水し、地上の物音やざわめきによって地下空間利用者が異変に気が付く時間 本検討では、地上の浸水深が 10cm 以上となる時間とする（管理者が地上監視を行っている場合）。

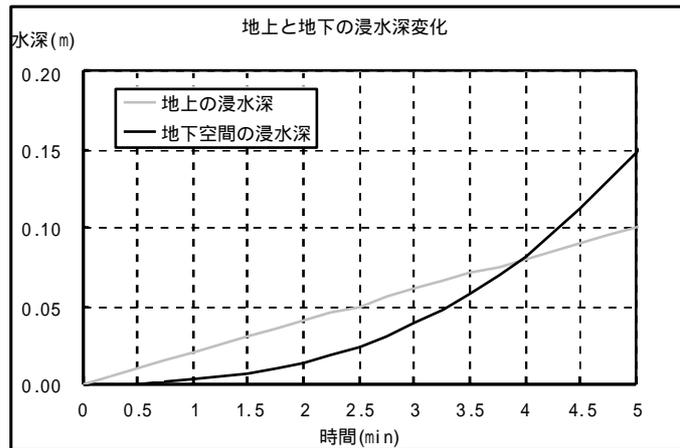
t_2 : 地下に水が流入し、自ら浸水したことを体感して異変に気が付く時間 地下空間の水深が 10cm 以上 (廊下等共有部) または 3cm 以上 (居室部) となる時間に浸水危険性に気が付くこととする。

t_3 : 浸水センサーが設置されている場合、浸水深が 3cm で異変 (浸水危険性) に気が付くものとする。

この t_1 、 t_2 、 t_3 の早い時間で地下空間が浸水する危険性に気が付くこととする。これをもって避難の意思決定や避難準備の行動に移行する。

事例での危険性認知時間 T_1 は、

$$T_1 = \min (4.75、 4.25) \\ = 4.25 \text{ 分} = 255 \text{ 秒}$$



(2) 地下フロア全員の認識及び避難行動開始

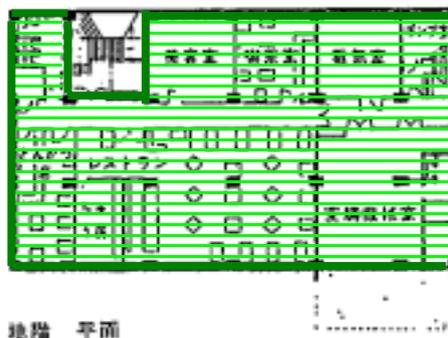
避難安全検証法の「火災が発生してから階に存する者が避難を開始するまでに要する時間」を参考にする。避難開始時間は建築物の用途に応じ計算式が掲げられている (建告第 1441 号 第 5 参照)。本事例では「共同住宅、ホテル以外の用途」の場合とし、以下の式を用いる。

$$T_2 = \frac{\sqrt{A_{floor}}}{30} + 3 = \frac{\sqrt{445}}{30} + 3 = 3.70(\text{分}) = 222 \text{ 秒}$$

T_2 : 浸水の危険性に気づいてから階に存する者が避難を開始するまでの時間 (単位 分)

A_{floor} : 当該階の各室及び当該階に設けられた直通階段への出口を通らなければ避難する事ができない建築物の部分の床面積の合計 (単位 m^2)

$$A_{floor} = 445 \text{ m}^2$$



A_{floor}

(3) 地下フロア出口まで移動

避難安全検証法の「階に存する者が当該階の各室等の各部分から直通階段の1に達するまでに要する時間」を参考にする。火災の場合は、

$$t_{travel} = \max\left(\sum \frac{l_i}{v}\right) = \frac{24}{60} = 0.40(\text{分}) = 24(\text{秒})$$

この式において、 t_{travel} 、 l_i 、 v はそれぞれ次の数値を表す。

t_{travel} : 階に存する者が当該階の各室等の各部分から直通階段の1に達するまでに要する歩行時間(単位 分)

l_i : 当該階の各室等の各部分から直通階段への出口の1に達する歩行距離(単位 m) $\max l_i = 23.2\text{m}$

v : 歩行速度(単位 m/分) $v = 60\text{ m/分}$

となるが、浸水時の避難行動としては、水深による歩行速度の割引率を考慮することにする。避難困難となる水深としてドアが開けなくなる水深30cmがあげられている。安全側の計画を考慮して、ここでは、水深30cmの場合の歩行速度割引率を設定することにする。

歩行速度の割引率は、西原らの検討により、

$$1 - \frac{h}{70}$$

とする。よって、地下空間浸水時の階段出口までの避難時間は、

$$T_3 = \max\left(\frac{\lambda}{Vh}\right) \quad Vh = v\left(1 - \frac{h}{70}\right)$$

$$= 0.7(\text{分}) \quad h = 30\text{cm}$$

$$= 42(\text{秒})$$

となる。

(4) 地下フロア出口の通過

避難安全検証法の「階に存する者が当該階の出口を通過するために要する時間」の算出方法を採用する。

$$T_4 = t_{queue} = \frac{\sum pA_{area}}{\sum N_{eff} B_{st}} = \frac{0.7 \times 445}{90 \times 2 + 90 \times 1} = 1.15(\text{分}) = 69(\text{秒})$$

この式において、 t_{queue} 、 p 、 N_{eff} 、 B_{st} はそれぞれ次の数値を表すものとする。

t_{queue} : 階に存する者が直通階段に通ずる出口を通過するために要する時間(単位 分)

p : 在館者密度(単位 人/ m^2) $p = 0.7\text{ 人}/\text{m}^2$ (3と同じ)

N_{eff} : 有効流動係数(単位 人/(分・m)) $N_{eff} = 90$ (3と同じ)

B_{st} : 当該階の直通階段への出口の幅(単位 m) $B_{st1} = 2\text{m}$ 、 $B_{st2} = 1\text{m}$



(5) 階段を上り地上へ脱出

浸水時に階段を上る速度について研究されている事例は少ない。ここでは、(3)と同様の考え方より、避難安全検証法に定められている階段の歩行速度に水深による歩行速度割引率を考慮して算出することにする。階段を上る際の避難限界水深を 30cm、避難困難水深を 20cm と設定することにより、

$$T_5 = \max \frac{\lambda}{V_k} \qquad V_k = v_k \left(1 - \frac{h}{30}\right)$$
$$h = 20^{cm}$$

となる。ここでは、階段の延長を 10m として、

$$T_5 = \frac{10}{27 \times \frac{10}{30}} = 1.11(\text{分}) = 66.6(\text{秒})$$

(6) 避難行動時間

以上(1)~(5)より、避難行動時間は、

$$T = \sum_{k=1}^5 T_k$$

であり、本事例は、

$$T = 10.91(\text{分}) = 654.6(\text{秒})$$

と算出できる。