

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

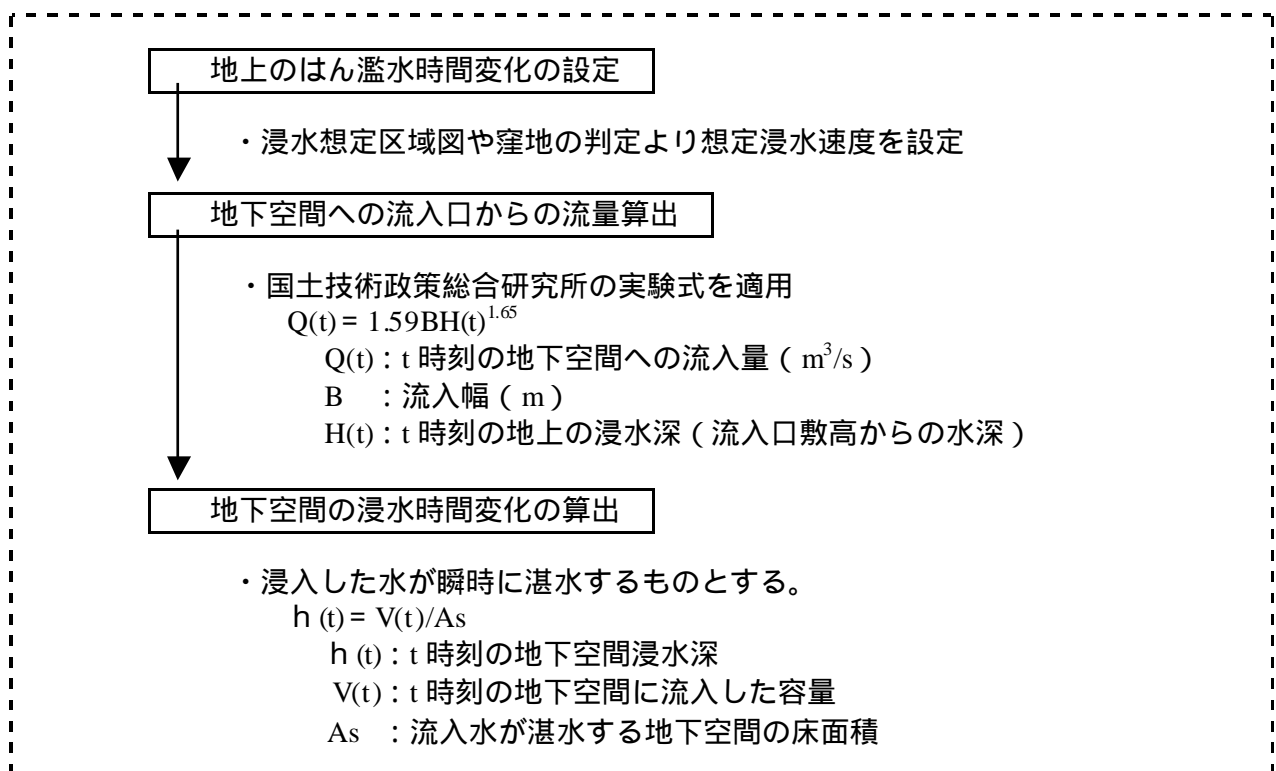
小規模商業ビル地下の事例を用いて算出方法の概要を解説する。

- 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

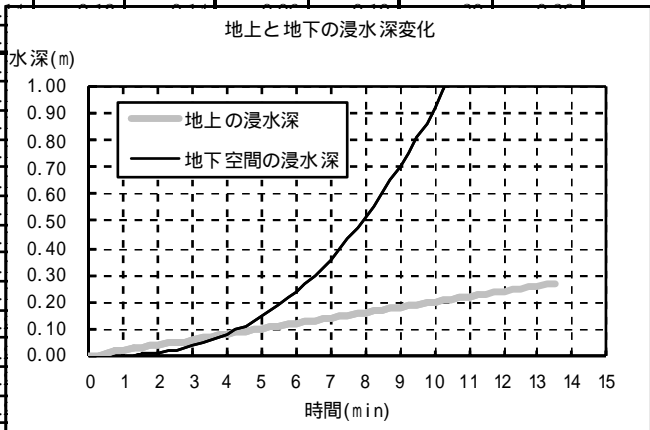
任意変更

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	流入口(2)	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

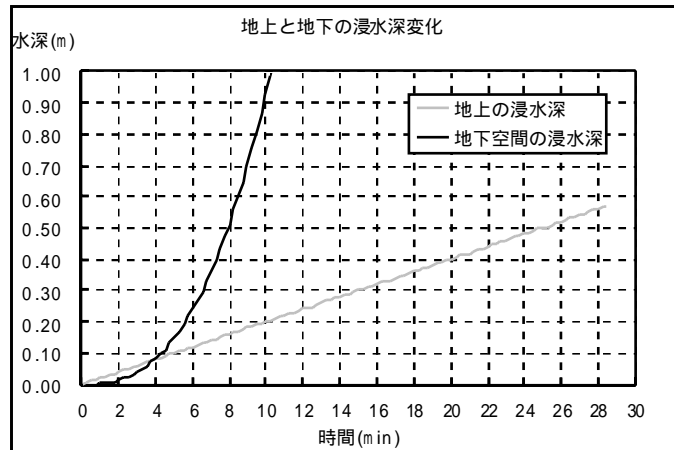
通常、居室部のドアは閉まっていると仮定すると、無対策では廊下等の共有部が浸水することとなる（1次貯留面積 82m²）。その場合、地上の水深が 10cm となるのが 4 分 45 秒、地下の浸水が 10cm になるのが、4 分 15 秒であるので、浸水危険性の認知時間は、4 分 15 秒である。また、水深 30cm となってドアが開かなくなるまでの時間は、6 分 30 秒である。

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

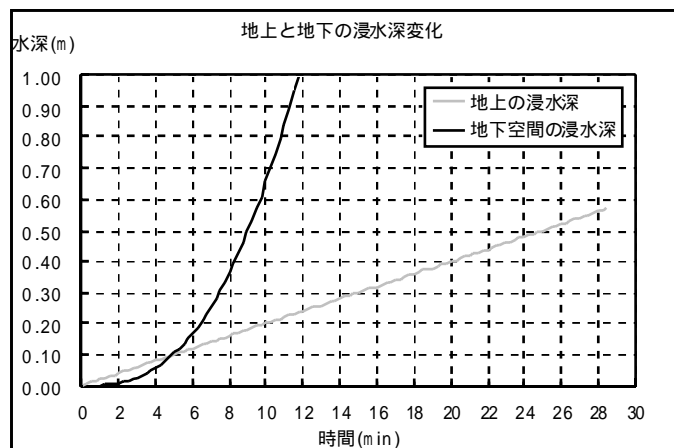
避難口(出口)が2つあるなかで、幅員 1m の階段(右)のみを 30cm マウンドアップする。地下への流入量が減少し、地下の水位上昇速度は低下するので、避難の余裕時間は増加することになる。

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。



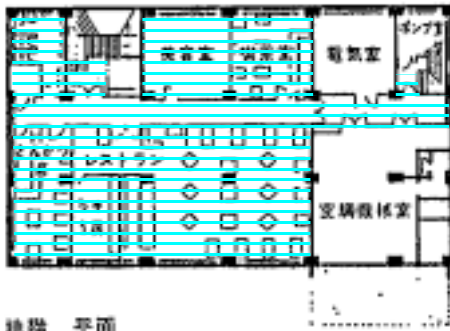
地階 平面

==== : 想定浸水面積（1時貯留面積）



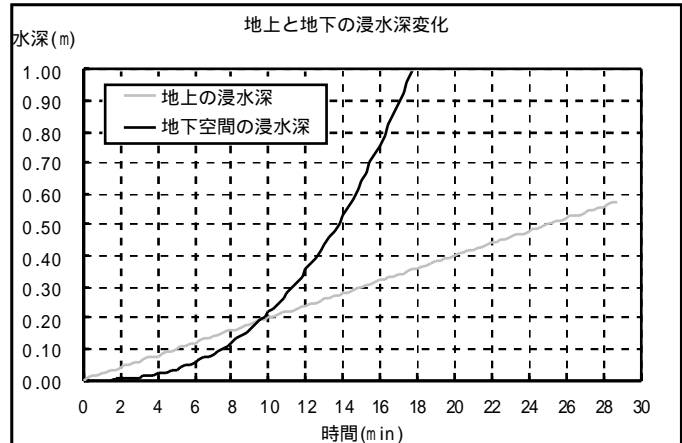
(3) ドア改造

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

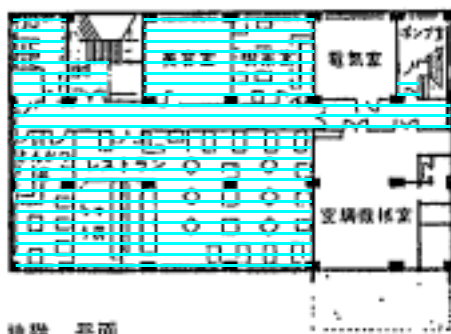
浸水センサーを設置した場合、浸水危険認知時間は地上の水深 3cm より 1分 30秒である。避難時にドアを開けるので室内も浸水するが、どの居室が浸水するかわからないので、このケースにおいても 1次貯留エリアは廊下等の共有部だけとする。地下空間の水位上昇速度は、ドア改造の場合より早くなる。水深 30cm までの時間は 7分 30秒である。

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

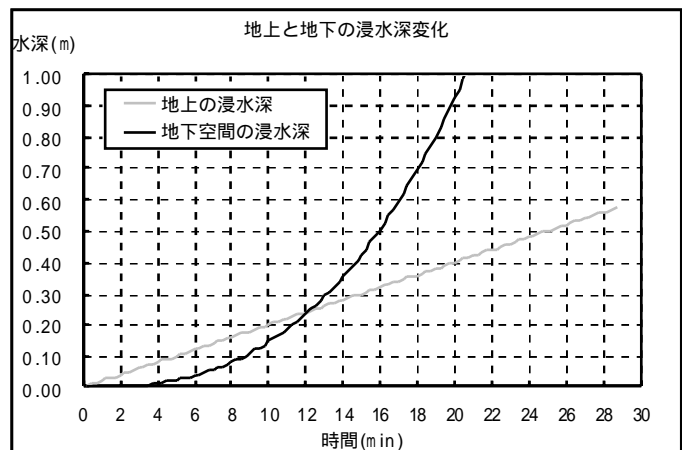
(2)と(3)を併せたケースである。マウンドアップとドア改造（浸水面積大）による地下の水位上昇速度低下の効果により、さらに避難行動余裕時間は増加する。

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。

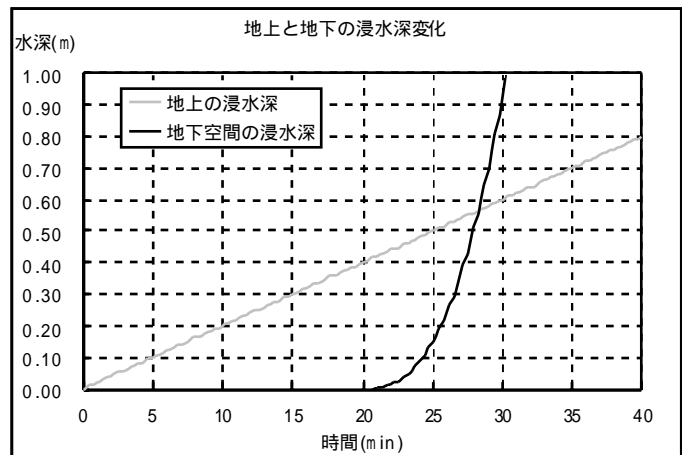
水位変化のグラフは、(2)、(6)と同様である。

(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。



==== : 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、異常認知時間が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）。

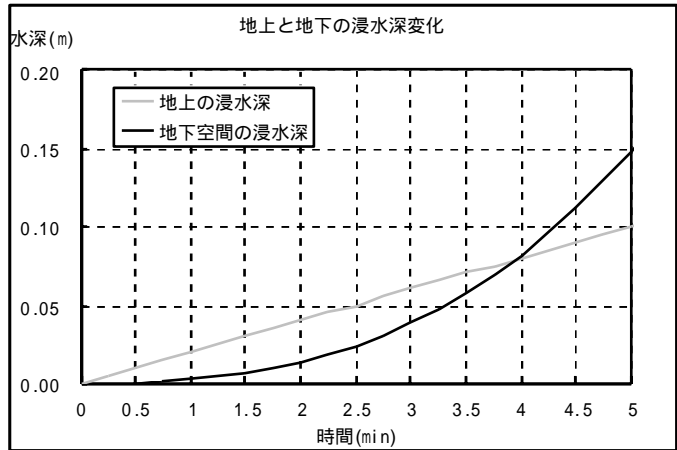
t_2 : 地下に水が流入し、自ら浸水したことを体感して異変に気が付く時間 地下空間の水深が 10cm 以上 (廊下等共有部) または 3cm 以上 (居室部) となる時間に浸水危険性に気が付くこととする。

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

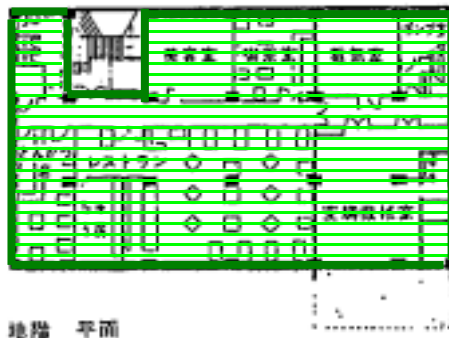
避難安全検証法の「火災が発生してから階に存する者が避難を開始するまでに要する時間」を参考にする。避難開始時間は建築物の用途に応じ計算式が掲げられている (建告第 1441 号 第 5 参照)。本事例では「共同住宅、ホテル以外の用途」の場合とし、以下の式を用いる。

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

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。安全側の計画を考へて、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、

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

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。