

地下空間の水害リスク評価手法の検討

STUDY ON FLOOD RISK ASSESSMENT IN UNDERGROUND SPACE

武富一秀¹・館健一郎²・安田浩保³・金木誠⁴・飯田進史⁵・平川了治⁵・谷岡康⁵・高木茂知⁵

Kazuhide TAKEDOMI, Kenichiro TACHI, Hiroyasu YASUDA, Makoto KANEKI,
Shinji IIDA, Ryouji HIRAKAWA, Yasushi TANIOKA, Shigenori TAKAKI

¹正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所水害研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭一番地)

²正会員 国土交通省四国地方整備局那賀川河川事務所 (〒774-0011 徳島県阿南市領家町室の内390)

³正会員 独立行政法人北海道開発土木研究所河川研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34)

⁴正会員 国土交通省中部地方整備局中部技術事務所 (〒461-0047 愛知県名古屋市中区大幸南1-1-15)

⁵正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社水工技術本部河川部 (〒163-0730 新宿区西新宿2-7-1)

Recently, flood inundation in urban areas caused by localized torrential rains occur frequently. Underground spaces are highly utilized in urban areas and possibility of inundation in such spaces is very high. Although human lives and assets are at high risk, appropriate measures to prevent flood inundation are not taken in most underground spaces. In order to promote measures against underground space inundation, flood risks must be understood by users and managers of underground spaces. For that purpose, flood risks of underground space inundation must be shown. Thus, a study to understand inundation risks of underground spaces is done. As a result, one method was shown for evaluating the flood risk of the underground space. And the process of that the large underground space was flooded was shown.

Key Words : Inside water inundation, risk assessment, underground space

1. はじめに

平成11年の福岡水害における浸水事故を契機として、地下空間の水害に対する浸水特性の解析¹⁾、その対策のガイドライン等の策定²⁾や検討が進められている。しかし、地下空間の位置や周辺の地表・地形の状況、地下空間の構造等により、地下空間の浸水危険性は千差万別である。地下空間管理者や利用者がその危険性を認識・判断することが困難である。そのため、現状では多くの地下空間で、浸水対策の実施が遅れており、ひとたび内水・外水氾濫が発生すると、地下街やビルの地下室などの地下空間が浸水する危険性は高く、人命・資産が大きな危険に晒される可能性が高いといえる。

適切な対策を促進するには、地下空間の浸水危険性の理解や地下空間利用者及び管理者の意識の啓蒙が不可欠である。そのためには、地下空間が位置する場所での地上の浸水危険性や、地上が浸水した場合に起こりうる地下空間の浸水状況を示すことが重要であろう。

一方、大規模地下空間は、商業施設として利用されている場合も多く、不特定多数の利用者が多数存在し、公共性が極めて高いため、水害による適切な

避難計画が重要となるが、地下空間の存在する地表の浸水特性や浸水リスク、それによる地下空間の水害特性や避難活動時の障害についての適切な想定と避難計画が策定されていないのが現状である。例えば地下空間に浸水が起これば、氾濫水によって歩行できない、階段を昇れない、ドアが開かないなどの侵入水による直接的な避難困難要因のほか、電気設備機器等が浸水により動作しなくなることによって停電になる³⁾こと等の間接的に避難を困難にする危険性も考えられる。実際に、2003年2月18日、韓国大邱(テグ)市都心の地下鉄中央路駅構内で発生した火災では、構内が停電となり避難の妨げとなったことなどが指摘されている⁴⁾。

このようなことから、大規模地下空間において、浸水で引き起こされる直接的・間接的な避難障害は、検討すべき重要課題であり、その検討には、地下空間の経時的な被災状況と、それに伴い発生する避難困難要因を明らかにする必要がある。

本検討では、地下空間の水害に対するリスクの適正な評価手法およびリスク指標を一般に公表するための検討を行い、今後の地下空間の水害対策を促進するうえでの基礎情報を提示することを目的としている。また、大規模地下空間での浸水により発生しうる被害を経時的に把握し、その被害の進展に伴い発生する避難困難要因の把握を行う。

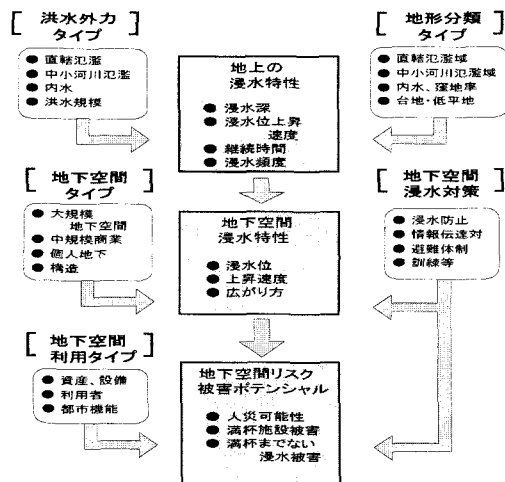


図-1 地下空間水害リスクに係わる要因

2. 地下空間水害リスクの評価手法と指標

地下空間水害リスクに係わる要因を図-1に示す。まず東京都区部を解析の事例とし、地下空間の危険度を把握するため、確率の異なる降雨を地表に降らせ、地表の浸水発生確率および地表の想定外力（最大浸水深、浸水深の上昇速度）の把握を行う。次に、窪地などの地形分類毎に地表の浸水特性を把握し、この地表浸水特性に対する、地下空間の規模、構造等の特性をふまえた地下空間の浸水特性とその想定被害（資産被害など）とを関連付けることで、年平均被害想定額等の地下空間水害リスクを表現する指標を試算する。

(1) 解析エリア

本検討では、大都市を代表する規模を有し、多種多様な地下施設、高度に発達している地下鉄等が多数存在する地下空間が発達しており、また、都市化に伴う内水氾濫の発生可能性がある東京都区部を解析エリアとする。

(2) 地表の浸水発生確率と想定外力の把握

ここでは、解析エリアについて、地表の氾濫解析を実施し、地盤高メッシュ毎の経時的な浸水特性を把握する。

a) 外力条件

外力条件は、降雨継続時間を24時間とし、中央集中型の1/3, 1/5, 1/15, 1/30, 1/50, 1/75, 1/100の確率降雨を用い、10分間隔で雨を与えた。

b) 解析モデル

検討に使用したモデルは、東京都都市型水害対策検討委員会⁵⁾で検討された神田川水系他の浸水予想区域作成で使用されている解析モデルを用いた。なお、このモデルでは、下水道の排水能力相当の氾濫水を地上湛水から除くという方法で下水道を簡易に考慮しながら、外水氾濫解析と同様の方法で地表の

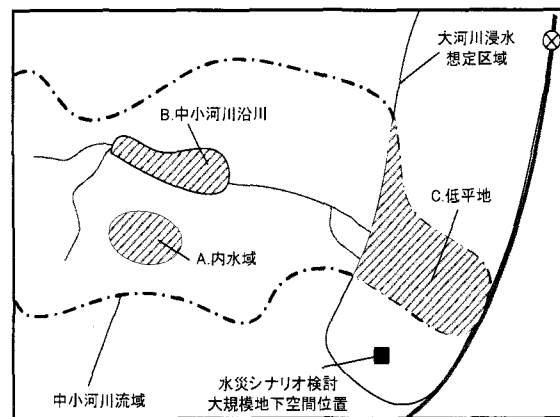


図-2 氾濫形態によるエリアの分類

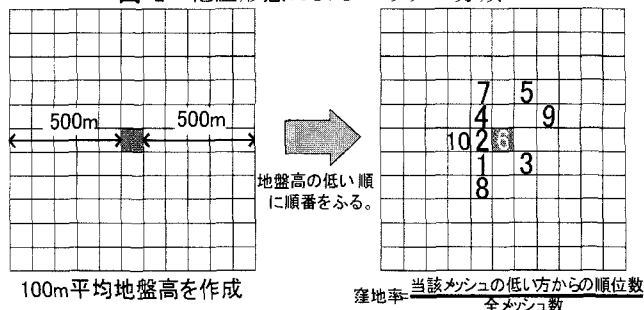


図-3 窪地率の考え方²⁾

氾濫水の流れを二次元不定流により解析している。

c) 地表の浸水発生確率に基づく浸水特性の指標

上記a), b)の外力条件および解析モデルを用いることで計算を行い、降雨確率毎の地表の浸水発生確率に基づく浸水特性を把握した。地表の浸水特性の把握は、地盤高メッシュ毎に経時的な浸水深の変化を把握することで行った。浸水特性の指標は、地表の最大浸水深、浸水想定速度（地上の浸水深の上昇速度：地表の道路上浸水深が20cmになってから30分間の平均水位上昇速度としている²⁾）とした。

(3) 地形特性と浸水特性の関係の把握

ここでは、解析エリアについて、氾濫形態の異なる地域の分類を行い、3つの検討対象地域を選定した。さらに、その対象地域について、窪地率を用いた地形の特性の把握を行った。最後に、浸水特性の指標を用いて、対象地域毎に、地形特性と浸水特性の関係を把握した。

a) 検討対象地域の選定

地形特性と浸水特性の関係を把握するため、解析エリア内の氾濫形態の異なるA～C地域を選定した。検討対象地域を図-2に示す。検討対象地域の分類は、A：内水域（大河川、中小河川の外水氾濫域から、離れており、特に窪地などの微地形により湛水被害が発生する地域）、B：中小河川沿川域（中小河川の沿川で、中小河川の外水氾濫が及ぶと想定される地域）、C：低平地域（地形の起伏に乏しく平らな地域）とした。

b) 地形特性の把握

内水による浸水区域では、細かな地形の起伏が浸水特性に大きく影響を与えられと考えられる。そこで、細かな地形の特性（周りの地形と比較して、高い地

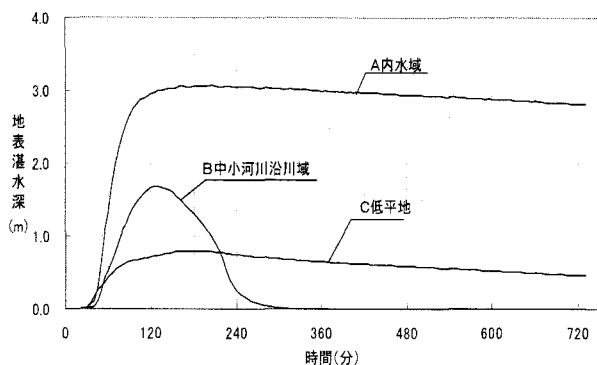


図-4 異なる氾濫形態毎の地表の浸水特性

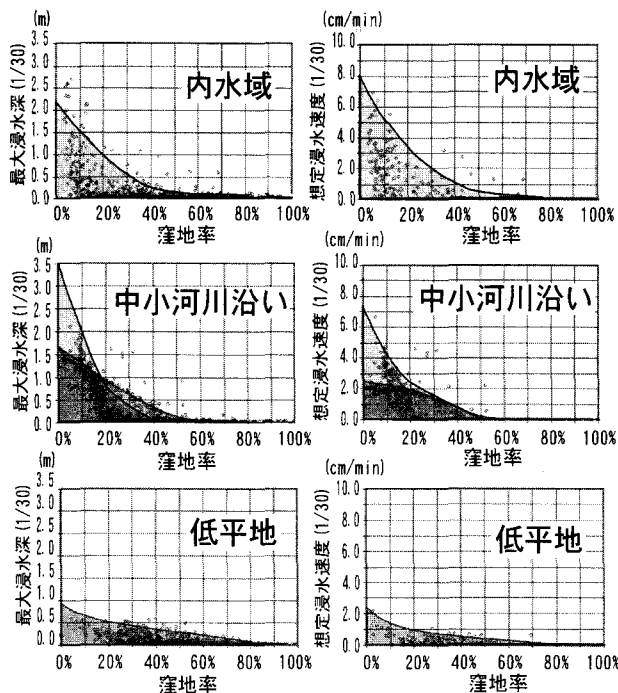


図-6 最大湛水深・想定浸水速度と窪地率の関係

形か低い地形か)を把握するため、窪地率²⁾を用いて微地形の判定を行った(図-3)。このくぼ地率による判定を全てのメッシュに対して、実施することで地形特性を把握した。なお、くぼ地率による判定とは、任意の一つのメッシュが周りのメッシュ(約1km×1km範囲の全メッシュ)に比べ、何割(%)になるかで、そのメッシュの高低を判断する方法である。

c) 氾濫形態の異なる地域毎の地形特性と浸水特性の関係

検討対象地域毎の地表の浸水特性を図-4に示す。この図から、A)内水域は、他の地域に比べ、浸水深が急激に上昇し、さらに、その浸水位が継続する傾向にあることがわかる。また、B)中小河川沿川域は、河川水位の上昇に伴い、地表の浸水位が上昇し、その後、河川水位の低下により、浸水位も低下することがわかる。また、C)低平地においては、氾濫水が広域に広く分布することで、浸水位の上昇が遅く、かつあまり上昇しない傾向があることがわかる。

検討対象地域毎に、前述の地表の想定外力(地表の最大浸水深、想定浸水速度)と窪地率の関係を把握した(図-5)。また、確率降雨毎の最大浸水深、

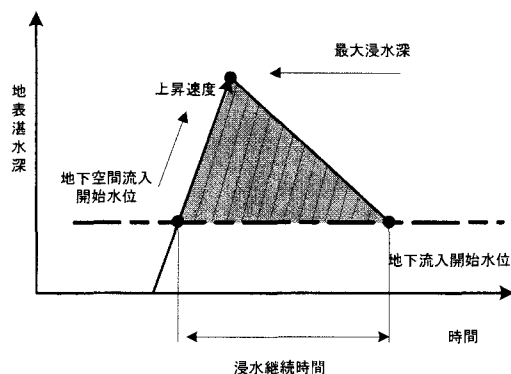


図-5 地表の浸水特性の指標

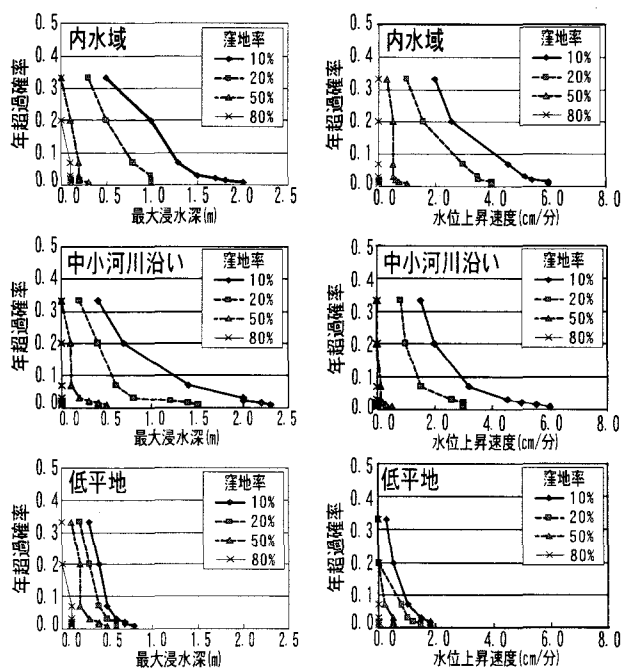


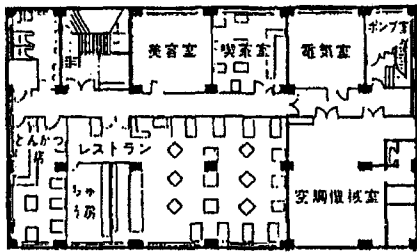
図-7 最大湛水深・想定浸水速度と年超過確率

想定浸水速度の関係を窪地率毎に把握した。

図-6は、検討対象地域毎に、全てのメッシュのくぼ地率と地表の最大浸水深、想定浸水速度をそれぞれプロットし、その点に対して包絡線を引いたものである。図-6中の地表の最大浸水深図をみると、B)中小河川沿川域は、A)内水域に比べ、窪地率が20%以下の場合に高い水位となる傾向があることがわかる。また、低平地では、他の地域に比べ、低い浸水深となっていることがわかる。

図-7は、確率降雨毎に図-6の図を作成し、図中の包絡線に対して、それぞれ、くぼ地率が10%、20%、50%、80%の時の最大浸水深、想定浸水速度の値をプロットしたものである。図-7中の最大浸水深図をみると、B)中小河川沿川域では、A)内水域に比べ、確率降雨が小さくなると、最大浸水深が急激に大きくなる傾向がある。また、低平地域は、確率降雨が小さくても最大浸水深は急激に上昇しない傾向がみられる。

一方で、水位上昇速度をみると、A)内水域は、B)中小河川域に比べ、確率降雨が小さくても、想定浸水速度が急激に大きくなる傾向があることがわかる。



地階 平面							
床面積	外部階段	内部階段	管理者	利用者	共有部面積	店舗面積	機電室面積
470m ²	2箇所 総幅：3m	なし	無	不特定少数	82m ²	266m ²	122m ²

図-8 検討対象とした地下施設規模

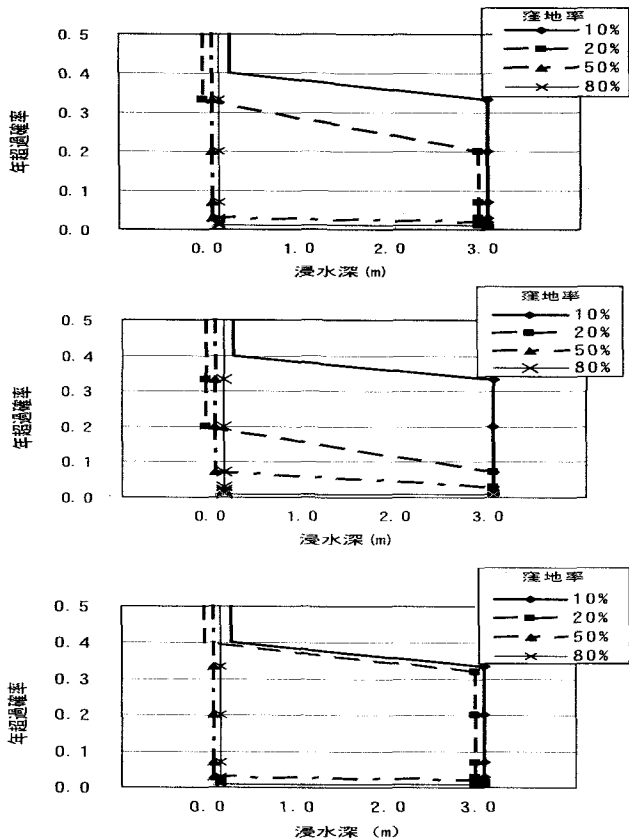


図-9 地下空間の浸水深と年超過確率の関係

また、C) 低平地域については、他の地域と比べて、確率降雨が小さくなくても想定浸水速度は急な上昇がみられない。

以上のことから、地上の氾濫形態の違いによる地下空間への浸水について、以下のことが考察できる。

内水域では地表の浸水深が急激に上昇することが予測される。そのため、地下空間では地表の浸水位の上昇に気が付かない（又は、気が付くことが遅れる）場合があり、地下空間への浸水情報の把握には注意が必要となる。

中小河川沿川域では、河川水位の上昇に伴い、浸水深が高くなることが予測されるため、地下空間の浸水対策の実施（管理者による防水板の設置や土嚢積みなど）においては、河川の水位を把握しておくことが重要になると考えられ、また、浸水対策を講じる場合も高い浸水深を想定しておく必要がある。

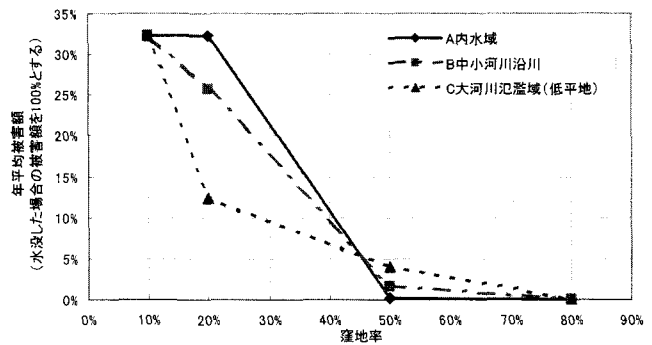


図-10 窪地率と年平均被害額

（小規模商業施設規模の場合）

低平地域では、最大浸水深や浸水深の上昇速度が他の地域に比べ、一様に小さく、他の地域に比べ、安全であると思われる。しかし、低平地は元来より氾濫原に位置している場合が多く、ひとたび河川の破堤が起こると長期間に渡って、甚大な被害が生じる。そのため、低平地においては、河川の破堤に注意する必要がある。

(4) 検討の対象とした地下施設

地下空間は、その規模、用途に応じて、多種多様の構造のものが存在する。そこでまず、今回は、最も数が多いと思われる小規模商業施設をモデル施設として設定した。施設概要を図-8に示す。

(5) くぼ地率を用いた浸水危険度評価の一試案

ここでは、検討対象地域における想定外力と小規模地下商業施設モデルを用いて、小規模地下商業施設における地下の浸水深と地表の窪地率の関係を把握する。また、危険度評価では、検討対象地域毎に、各確率降雨時の地下の浸水深と地表の窪地率による危険度の評価を行った。

a) くぼ地率と小規模地下商業施設における浸水深の関係

図-9は、降雨の年超過確率毎に、地下へ氾濫水が流入した場合の地下の浸水深を示したものであるが、小規模地下商業施設においては、氾濫水の流入があると地下が満水になるため、この図では満水が空かという結果となっている。くぼ地率10%では、全ての降雨確率・検討対象地域において、小規模地下商業施設は氾濫水で満杯となる。また、内水域はくぼ地率20%でも、全ての確率降雨において地下空間が満杯となっており、内水域では他の地域に比べ、浸水が発生すると地下施設が満杯になる危険性が高いことがわかる。

小規模地下商業施設では、地形特性・確率降雨にかかわらず、一旦浸水が開始するとすぐ満杯になるため、浸水対策は洪水を流入させない手段、例えば防水板などの設置とその実施体制などが重要となると考えられる。

b) くぼ地率を用いた浸水危険度評価の一試案

図-9をもとに、検討対象地域毎のくぼ地率が10%、20%、50%、80%時に地下が満水になる場合の被害額

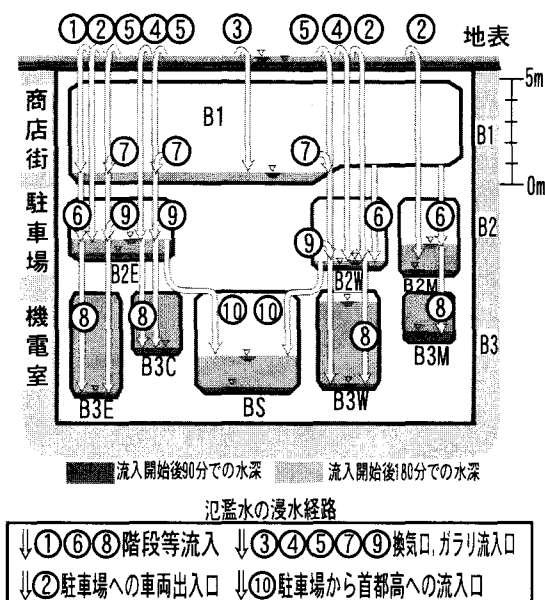


図-11 地下街の浸水解析モデル概念図

の割合を1として、その被害額の割合に降雨の年超過確率を乗じた数を算出し、その数を累積した値を年平均被害割合とした。各くぼ地率10%、20%、50%、80%時の年平均被害割合を図-10に示す。

図-10より、くぼ地率が10%の場合は、どの検討地域においても年平均被害割合が非常に高い。一方で、くぼ地率が20%となると、検討対象地域において年平均被害割合に違いがでており、内水域では特に年平均被害割合が高く、中小河川沿川域では約半分程度の年平均被害割合となっている。また、くぼ地率が50%となると、年平均被害の割合が10%以下となり、年平均被害割合が低い結果となった。

この結果から、浸水危険度の評価に、くぼ地率が適用できる可能性があると思われる。

3. 大規模地下空間の水災シナリオ

公共性が高く、浸水により被害が甚大となる大規模地下空間の中で、特に浸水の流入経路が複雑な多層構造の地下空間に対し、簡易な浸水解析モデルを構築し、各個所での浸水深の変化を解析した。

特に機電設備などへの被害の発生に伴って予想される現象を経時的に把握した。

(1) 地下空間の浸水解析

ここでは、地表の浸水により引き起こされる地下への浸水深・流入量を算出する際の解析方法、外力条件を記述し、それらを用いて算出された解析結果について考察する。

a) 解析方法

地下空間が浸水した際の避難安全性を検証する手法として、「地下空間浸水時避難安全検証法試行案」²⁾を用いた。検証方法は、まず、想定浸水速度を外力条件として設定する。次に、地下空間への各流入口について、前述の外力を用いて、地下への流入量を算出するとともに、時刻毎の流入容量を算

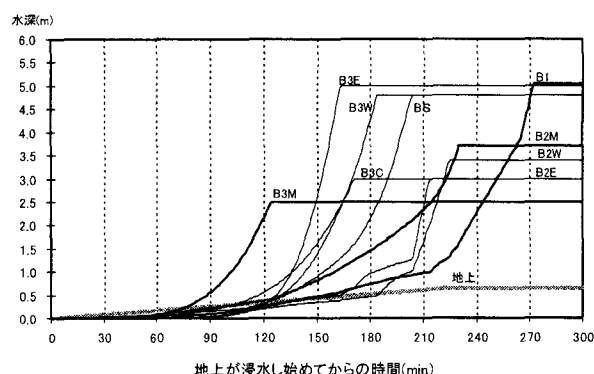


図-12 各空間の水没までの浸水深変化

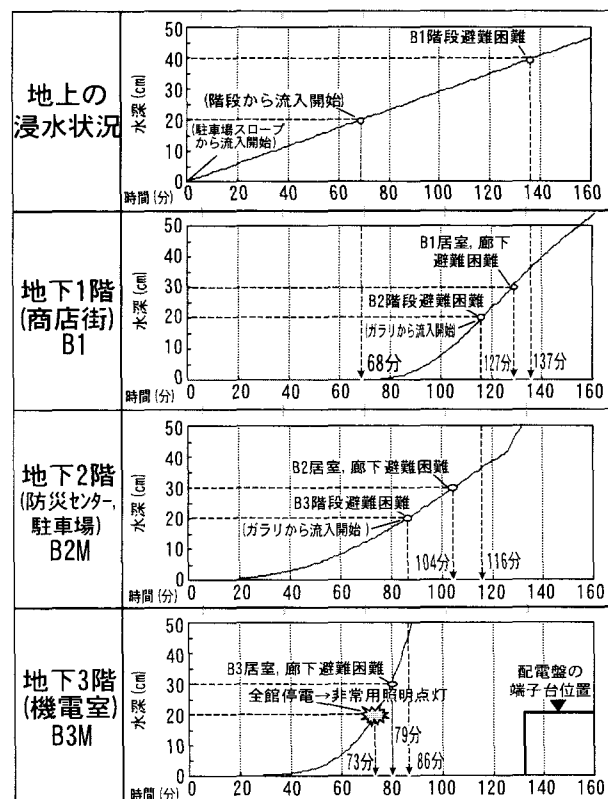


図-13 地下街の浸水経時変化

(ガラリ：建物内に外気を取り入れるための開口のこと)

出する。最後に、地下への流入量の時間変化状況から地下の部屋、通路などの浸水深の時間変化を算出する。以上の方法により、地下空間への浸水状況を想定する。

b) 大規模地下空間のモデル化

大河川の浸水想定区域内に存する地下街をモデル化した。地下街モデルの概念図を図-11に示す。矢印は地表の氾濫水が地下空間へ浸入する経路を表している。また、地下のB1、B3Wなどの名称は施設構造から浸水箇所が同じになるエリアをグルーピングした空間のことである。なお、地下空間の用途を大きく分類すると地下1階は商店街、2階は防災センター及び駐車場、3階は機電室となっており、ターミナル駅やオフィスビルと隣接する国内でも有数な大規模地下空間である。

c) 想定外力条件

地下空間の浸水状況は、地上の想定浸水速度に大きく影響し、その値は、地形（くぼ地など）特性や

氾濫特性（内水、外水、最大浸水深など）によって異なるため、それらを十分に考慮した設定が必要である。本ケースでは、大河川の氾濫シミュレーション結果より、想定浸水速度0.3m/min、最大浸水深0.7mと設定した。

d) 浸水解析結果

地下空間が水没するまでの浸水深変化は図-12のとおりであり、地上から地下1階に入った氾濫水の一部は、地下1階から2階もしくは直接地下3階へ流入する。地下空間の流入口構造や地上の浸水状況による流入量の移動関係から、地下2階への流入が少ないことによって地下1階の浸水が早い場合もあれば、本ケースのように地下3階のある空間の浸水が早い場合もあり、水移動の関係によって地下3階から一様に浸水していくわけではないことがわかる。大規模な地下空間では、地上の流入口が異なる場所に複数あることから、流入口ごとの想定浸水速度（浸水特性）や地表の標高などによっても地下各階、各空間への流入量が変化するため、地下空間の構造と水の流れのモデル化の際に注意が必要である。なお、今回の解析では浸水防止対策を行わなかったケースを想定して検討を行った。

(2) 大規模地下空間における水災シナリオ

ここでは、大規模地下空間への氾濫水の流入に伴う浸水位の経時的な変化を把握し、避難行動の障害要因と引き起こされる水災シナリオを把握する。

a) 浸水による避難困難要因

避難困難要因としては、1) 居室や廊下の浸水深が30cm以上となると、歩行困難になるとともに水圧でドアが開かなくなる、2) 階段に氾濫水が流入し、階段最上部の浸水深（越流水深）が20cm以上となると、流体力で階段を昇ることが困難になることが考えられる⁵⁾。また、避難障害要因として、浸水で電気設備関係が機能しなくなり、停電することが考えられる。機電室では浸水深20cmで受変電設備が、水による絶縁の劣化を起こし、短絡・漏電の発生後、配線用遮断機などの作動により回路が遮断され、停電となることが想定される。

b) 大規模地下空間における水災シナリオ

氾濫水の流入開始時刻から、地表、地下1階、地下2階、地下3階の各地点における経時的な浸水深の変化を図-13に示す。

各階の地下空間の経時変化（図-13）をみると、地下3階は、最初の氾濫水の流入開始から73分後に配電盤の浸水により全館停電となり、非常用の照明が点灯する。また、79分後に地下3階の移動が通路や部屋の浸水により困難になり、86分後には地下3階から地下2階への避難が困難になる結果となった。このため、地下3階からの避難は最初の氾濫水の流入開始から86分以内に行う必要があることがわかる。

地下2階は、最初に駐車場のスロープから氾濫水の流入が開始されるが、その氾濫水は階段を通り、地下3階に流入する。そのため、地下2階内の移動が困難になるのは、氾濫水の流入から104分後となっ

ている。また、116分後には地下2階と地下1階を結ぶ階段が氾濫水の流入による影響で避難が困難になる。このため、地下2階からの避難は116分後以内に行う必要があることがわかる。

地下1階は、最初の氾濫水の流入開始から、68分後に、階段から流水が流入し始め、127分後には、地下1階内の移動が困難になる。また、137分後には地下1階と地上を結ぶ階段が氾濫水の流入による影響で、避難が困難になる。このため、地下1階からの避難は137分以内に行う必要があることがわかる。

本ケースを考えると、最初に、地下3階から氾濫水が湛水していき、流入開始後約120分で地下3階が水没することから、全館停電となる（図-12）。地下空間で停電が起これば、完全に暗闇となることから、避難行動は著しく困難になる。このため、停電までに安全に避難行動を終えていること、もしくは機電室等の耐水対策が必要となるといえる。

4. まとめ

東京都区部を事例として、地下空間における水害リスク評価の算定手法、指標の一試案を示した。その結果、地下空間の水害危険度の評価に、くぼ地率が適用できる可能性があることがわかった。今後の課題として、くぼ地率による危険度評価手法を一般的・客観的な指標とするために、様々な地形や氾濫形態の異なる地域、様々な地下空間タイプでくぼ地率の適用性を検証する必要があると考えられる。

本検討では、大規模地下空間の仮定した構造を用いて検討を行うことで、大規模地下空間浸水時の経時的な浸水被害の被災過程を明らかにし、浸水による避難困難要因を把握した。その結果、大規模地下空間では、階段からの氾濫水の流入以外にも換気ダクト、ガラリからの流入が相当あることがわかり、それらの対策が必要であることがわかった。また、地下の最深部から浸水していく傾向がみられ、地下最深部に機電室がある場合は対策を講じる必要があると考えられる。今後は、その地域、地形に存在する地下空間毎に、地表の浸水特性を用いた検討を行うことで、その地下空間に対応した浸水対策を考慮していくことが重要である。

謝辞：地下街のモデル化に際して各方面の方々にデータ提供やヒアリング調査にご協力頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 館健一郎他、階段を通じた地下空間への氾濫水流入に関する実験、土木技術資料43-2、2001
- 2) 地下空間における浸水対策検討委員会、地下空間における浸水対策ガイドライン同解説、平成14年3月
- 3) 財)日本建築防災協会・建築物防災推進協議会、浸水時の地下室の危険性について-地下室を安全に使うために-、平成12年6月
- 4) 共同通信他ニュースより
- 5) 東京都都市型水害対策検討会、東京都の都市型水害対策～水害に強い安全な都市づくりをめざして～、平成13年11月

(2003. 4. 11受付)