

◆ 特集：災害の軽減をめざして ◆

地下空間の浸水リスク評価に関する検討

武富一秀* 廣木謙三**

1. はじめに

平成 11 年 6 月、同年 7 月には、福岡や東京新宿区で発生した豪雨により、地下室が浸水し、人が死亡するという痛ましい事故が起こった。また、海外においても、平成 13 年 7 月韓国において、集中豪雨により、地下空間が多数浸水し、多数の死者が出た。平成 15 年 7 月には、福岡において、再度地下街やビルの地下室、地下鉄等へ浸水が起こり、大きな被害が発生したことは記憶に新しい。

近年、突発的な集中豪雨が原因となる、中小河川からの溢水や局所的な内水氾濫が頻発している。一方、日本の都市部では、地下街・地下鉄等の発達に伴い、地下空間の高度利用が行われている。このため、全国至るところで、地下空間の浸水被害が発生する可能性があり、浸水対策や避難計画の策定等を早急に行う必要がある。

それらの浸水対策等の推進には、まず、地下管理者や利用者の危機意識の啓発が重要であるが、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り、地下施設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。このため、地下空間の出入口がある位置がどの程度浸水し易いのか、地表が湛水したときに、地下空間にどの程度の浸水が生じるのか、どの程度の時間で避難できなくなるのか等の情報を発信していくことが重要となる。

以上のことをふまえ、国土交通省では、地表の浸水危険性の調査方法及びこれを踏まえた浸水対策上必要な措置等を記述した「地下空間における浸水対策ガイドライン」¹⁾を作成しており、インターネットを通じて、公開している。

一方、地下の構造が大規模な多層的地下施設や地下鉄等のような地下ネットワークについては、こうしたガイドラインを踏まえつつ、更に詳細で複雑な検討が必要になっている。一方で、地下空間の浸水に関する研究は、研究テーマが新しく、特に、地下空間の浸水予測・解析等については、地下空間の構造が複雑になればなるほど困難であ

るため、未だ研究途上であると言える。

このため、構造が複雑な大規模地下空間等においては、適切な浸水対策や避難計画等の危機管理対策の検討を行う必要があるため、地下空間の浸水状況等を予測・解析する技術を早急に確立する必要がある。一方で、最も数が多い小規模な地下施設の管理者・利用者が地下空間の浸水危険性を自己診断できる仕組みも構築し、情報提供することは、浸水対策を促進する上で有用と考えられる。

そこで、国土技術政策総合研究所水害研究室では、平成 14 年度に、大規模な多層的地下空間を対象とした浸水予測等の検討を行った。また、これまでに、地下空間を対象とした水理模型実験を行っており、その成果は、「地下空間における浸水対策ガイドライン」¹⁾に反映している。平成 15 年度には、地下空間の浸水危険度を自己診断できるシステムの構築や地下鉄等の地下ネットワークを対象とした浸水解析を実施することとしている。

本報では、今までに本研究室で実施した研究の成果と、その成果の政策への反映事例、現在の取り組み内容、今後の取り組み等について報告する。

2. 地下空間の浸水被害発生仕組みと研究の方向性

地下空間の浸水被害は、①地下空間を有する施設の立地条件（地下空間周辺の状況、地上の地形特性・浸水特性等）、②地下空間の構造（地上と地下の出入口の構造、地下空間内部の構造等）、③浸水対策の状況（防水板、浸水センサー等）によって規定されと考えられ、地下空間の浸水解析・予測を行うには、これらのメカニズムを適切に捉える必要がある。

また、地下空間の浸水による被害は、資産損失被害と人的被害に分けられると考えられ、それぞれの被害を回避・軽減するための対策は異なるといえる。

本研究室では、人的被害を回避することを主な目的として、避難時の危険性の把握、避難を円滑にするための浸水予測・解析手法、浸水時の避難情報提供方法等の研究を行っている。

3. 今までの研究成果

3.1 地下施設を対象とした水理模型実験

地上と地下施設を結ぶ階段部分の模型を用いて、地下施設への水の流入が人に及ぼす危険性を把握するため、以下の2つの水理模型実験を行った。

(1) 地下空間への氾濫水流入に関する実験²⁾

地下空間の出入口（地上と地下を繋ぐ階段部分）を模擬した縮尺 1/3 の模型（図-1）を実験水路に設置し、それを用いて、地下空間へ流入する際の水の挙動を把握する実験を行った。

模型の地上階段部分から氾濫水を流入させ、地上部分での水深及び流入流量を測定することで、両者の関係から流入量の推定式を作成した。また、その推定式を用いて、地下空間の浸水にかかる時間の検討を行った。さらに、人の足の模型が水が流れる階段上に設置し、階段上の足の模型に加わる力を計測することで、階段上を流れる流水が歩行者に与える影響について検討した。

それらの実験の結果から、以下の3つが明らかになった。

① 地下空間への水の流入量

ここでは、模型実験の実測値を用いて、地下空間の出入口幅、地上の浸水深に基づいて、地下空間への流入量を算出する推定式を求めた。この式により、地下空間の出入口幅を設定し、地表の浸水深を入力することで、地下への流入量を算出することができる。

実験結果より、地上浸水深 H と流入量 Q の関係（図-2）は、次のように表せる。

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

B は、階段出入口の幅である。

② 地下空間の浸水にかかる時間

ここでは、地下空間への流入量推定式を用いて、地下空間の広さ、地下の出入口幅、地表の水位上昇速度等に基づいて、地下室内の水深の時間変化を求める式を求めた。

この式により、床面積 S の地下空間の水深が H_b になるまでの時間を算出することができる。

$$t = \frac{h_s}{V} + \left\{ \frac{(C_2 + 1)SH_b}{C_1BV^2} \right\}^{\frac{1}{C_2 + 1}}$$

t : 地下空間が H_b になるまでの時間

h_s : 出入口ステップ高

S : 地下空間の床面積

B : 階段出入口幅

V : 地表の浸水上昇速度

C_1, C_2 : 係数（前述の実験では $C_1: 1.59, C_2: 1.65$ ）

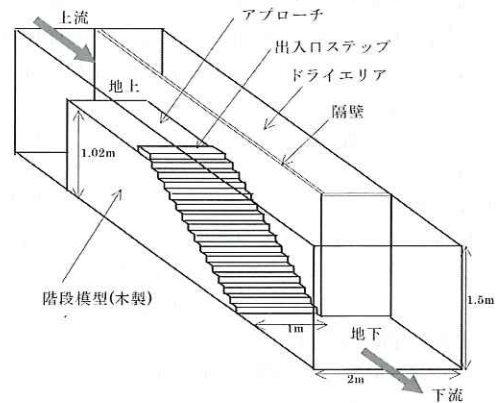


図-1 階段模型（縮尺 1/3）

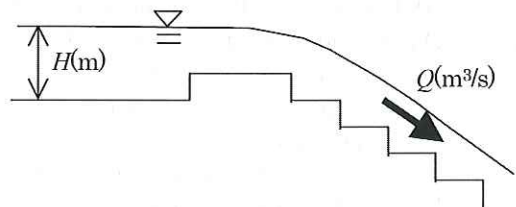


図-2 地上水深 H と流入量 Q の関係

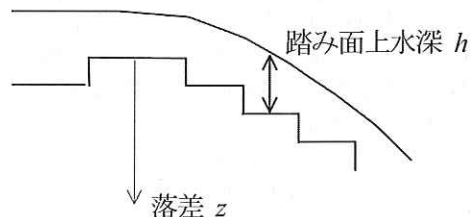


図-3 階段最上段からの落差 z と踏面上水深 h との関係

③ 水が流れる階段上の歩行の危険性

ここでは、階段模型上の水の流れが歩行者の足に加える力を計測し、足裏に働く摩擦力を計算式により求め、それらの抗力を比較することで歩行の可否を検討した。検討では、足の裏に働く摩擦力が足に加わる力よりも大きければ、歩行者が流れに耐えられるものと考えた。

実験結果から、階段最上段からの落差 z （図-3）と足への抗力 F 及び足裏の摩擦力 F_f の関係を求めた。近似式は以下のとおりである。 h は、階段踏み面上の水深である。

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

足裏摩擦力は、水の流入量が増えても概ね 200N となっているのに対し、足に加わる力は、

水の流入量や階段落差が増えるにつれて増加している。図-4では、 $q \geq 0.50 \text{ m}^2/\text{s}$ で落差 z が約2mの場合は、 $F > F_1$ となっており、足裏の抗力に抗しきれない結果となっている。

(2) 水が流れる階段上の歩行実験に基づく歩行危険性²⁾

上記(1)の検討では、あくまでも円柱近似した足に加わる抗力と足裏の摩擦力の比較によるものであり、実際の歩行者の特性が反映されているとはいえない。実際に人が歩行できるかどうかを正確に判断するために、歩行実験を行った。

実験では、地下空間の出入口(地上と地下を繋ぐ階段部分)を模擬した実物大の階段模型(図-5)を実験水路に設置し、その階段上に水を流し、水が流れる階段上を人が歩行する実験を行った。

実験は、地上部の水深を10～50cmの間で、変化させ、20代から40代の人14名(うち女性3名)に階段を上ってもらい、その時の状況について、アンケート調査を行った。また、階段上を上がっているときの歩行の様子を観察した。

それらの結果から、階段最上段からの落差が約3.5mの場合で、地表の水深が約30cm以上になるときに、歩行が困難となることがわかった。

これらの水理模型実験の成果は、「地下空間における浸水対策ガイドライン」¹⁾の地下空間が浸水した場合の避難の安全性を検証するための手法である「地下空間浸水時避難安全検証法施行案」に活用されている。

(3) 地下空間における浸水対策ガイドライン¹⁾

近年、都市で発生している水害では、河川や下水道から溢れた流水が都市の低地部に集まり、そこにある地下室や地下街が浸水することにより重大な災害が発生している。このことから、都市部において、地下空間の利用が進む中で、地下での浸水危険性は、今後さらに高まるおそれがある。

ガイドラインは、これらの状況を踏まえ、主に河川審議会において答申された「構造基準、設計指針等の必要な技術的検討」を行ったものであり、洪水時等に浸水のおそれのある土地で地階に設けられる居室等について、建築物の構造及び維持・管理方法について指針を示すものであり、地階を有する建築物の浸水に対する安全性の確保に資することを目的としている。

ガイドラインでは、対象とする地下空間を、地下街、オフィスビルの地階、地下店舗、地下居室、地下コンコース等を主な対象としており、地下の構造が複雑で大規模な地下施設や地下鉄のような地下ネットワーク等については、更に踏み込ん

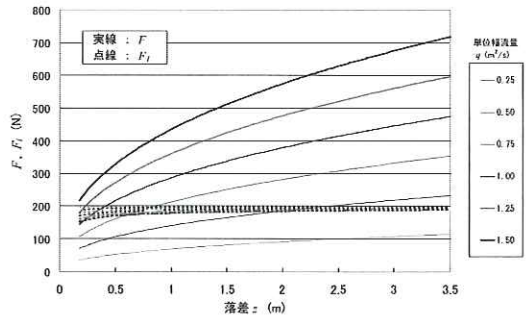


図-4 階段最上段からの落差 z と足への流体力 F 及び足裏の摩擦力 F_1 の関係

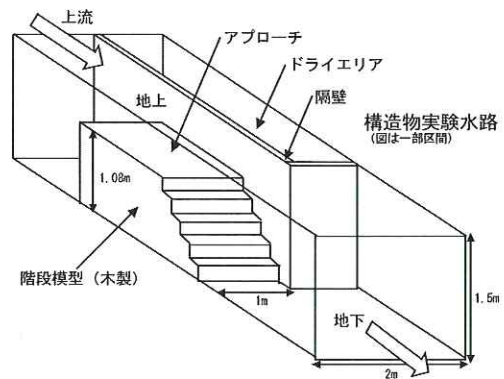


図-5 階段模型(縮尺:実寸)

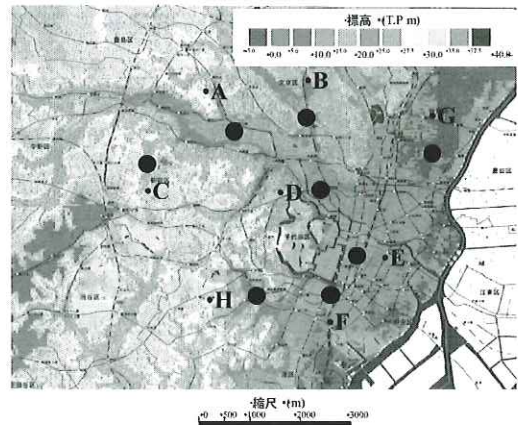


図-6 検討対象フィールド

だ検討が必要であると考えられる。

そこで、本研究室では、構造が複雑で大規模な地下空間や地下鉄ネットワークを対象とした、浸水解析等を行うことを考えている。

3.2 地下施設を対象とした浸水解析³⁾

(1) 地上の地形条件による浸水特性の評価方法及び地下施設の危険度評価方法の検討

地下空間の位置や周辺の地表・地形の状況等により、地下空間の浸水危険性は大きく変わることが考えられる。また、地下空間の浸水対策を実施する場合においても、そのことは、重要な要因となる。

そこで、検討対象フィールド（図-6）に、地表の浸水状況を把握するため、確率の異なる降雨を地表に降らせ、窪地貯留や浸透を考慮した有効降雨モデルと二次元不定流モデルを用いて地表の水の移動を算出し、地表の全ての地盤メッシュの浸水発生確率および地表の浸水深の時間変化（最大浸水深、浸水深の上昇速度等）を把握した。

その結果から、地点毎の時間的な浸水深の変化を見ると、地表の地形条件により、大きな違いがあることがわかる（図-7は、1/100 確率降雨の結果）。このことから、浸水対策の想定外力規模、浸水対策の実施タイミング等が地形条件により異なることがいえ、それぞれの地形の浸水特性に応じた浸水対策を実施する必要がある。

また、様々な地下空間（地下街、小規模商業施設、大規模商業施設、個人ビル）をモデル化し、前述の各地盤メッシュにおける地表の浸水深を外力として用いて、降雨規模別の地下空間の浸水状況を整理した。図-8のマップは、確率降雨毎に雨を降らせた時に、個人ビルが満水になった場合のメッシュを降雨規模別に色付けしたものである。

この成果については、ハザードマップ作成要領の追加事項として、活用することが考えられる。

(2) 多層の大規模地下施設の浸水危険度の評価方法の検討⁴⁾

大規模な多層地下施設では、地下空間の構造が複雑であるため、氾濫水の流入・流下・湛水といった現象が複雑となっている。また、不特定多数の利用者、施設機能を維持するための機電設備等が地下空間に分布している。このため、地下空間が浸水した時に、人的被害、設備被害がいつ、どこで、どのような被災形態で発生するのかが明確になっておらず、具体的な浸水対策の実施、避難計画の作成等が難しい。

そこで、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を対象として、地下空間の浸水シミュレーションを行った。外力には、既存の氾濫シミュレーション結果を用い、地下空間への流入量については、国総研で実施した実験により得られた実験式を適用して算出した。また、地下空間の浸水は、簡易な浸水解析モデル（図-9）を構築し、各箇所（B1,B2M,B3M）での浸水深の変化を把握した。

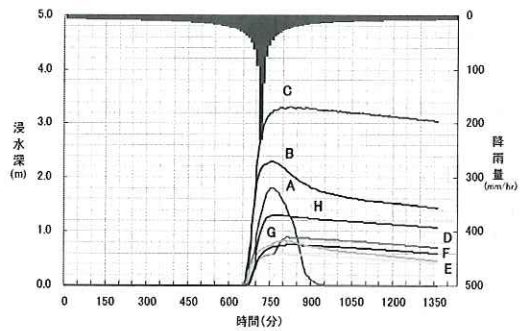


図-7 各地点における地上水深の時間変化

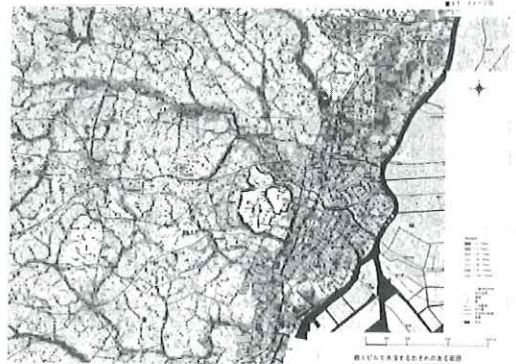


図-8 浸水想定マップ（個人ビルの場合、降雨規模別）

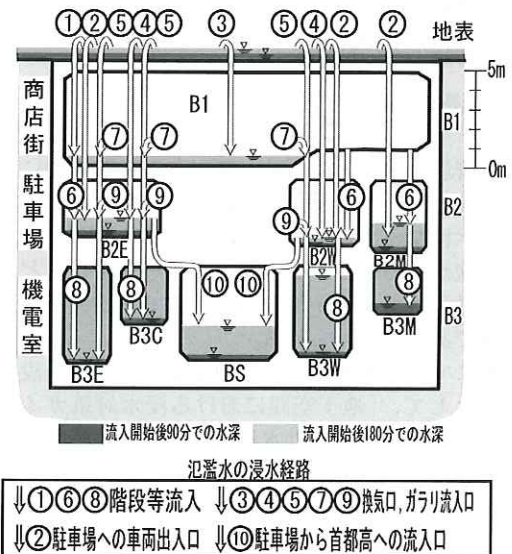


図-9 地下街の浸水解析モデル概念図

その解析の結果、地下空間が水没するまでの浸水深変化は、図-10 のようになった。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、本検討のように地下3階の一部の空間の浸水が早い場合もあり、水移動によって、地下空間の最下層から一様に浸水する訳ではないことがわかる。

また、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-11 に示す。この図から、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。地下空間で停電が起ると、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。

このような検討を行うことで、大規模な多層の地下空間の浸水過程を定量的に把握することができ、効果的な浸水対策実施や避難計画の策定が可能となる。

本成果を活用することで、大規模地下空間に対して、避難に必要な情報の把握ができるようになることで、浸水時の的確な避難計画の策定が可能となる。また、今後の研究を実施する予定である「大規模地下空間を対象とした浸水ハザードマップの検討」に活用していく予定である。

4. 現在の研究内容

4.1 浸水危険度自己診断システム

地下空間の対策の促進を図るには、地下の所有者・管理者が自分の所有・管理する地下施設に水が流入してきた時に、どの程度の時間で地下施設が満水になるのか、また、浸水により、どのような危険があるのか、浸水対策を行った場合にどの程度効果があるのか等を自己診断できる仕組みが有用であると考えられる。

そこで、本研究室では、地下1階の地下施設を対象として、「地下空間における浸水対策ガイドライン」をもとに、外水氾濫時の浸水被害の危険性、浸水対策の効果、運用体制等を簡易的にWeb上で自己診断できるシステム（プロトタイプ）を構築することとしている。また、このシステムの構築方法をまとめた手引き（案）を作成し、全国に適用可能とすることを検討中である。

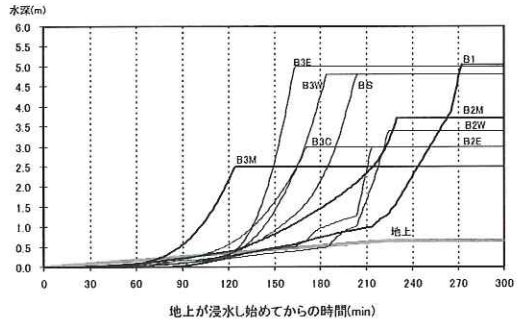


図-10 各空間の水没までの浸水深変化

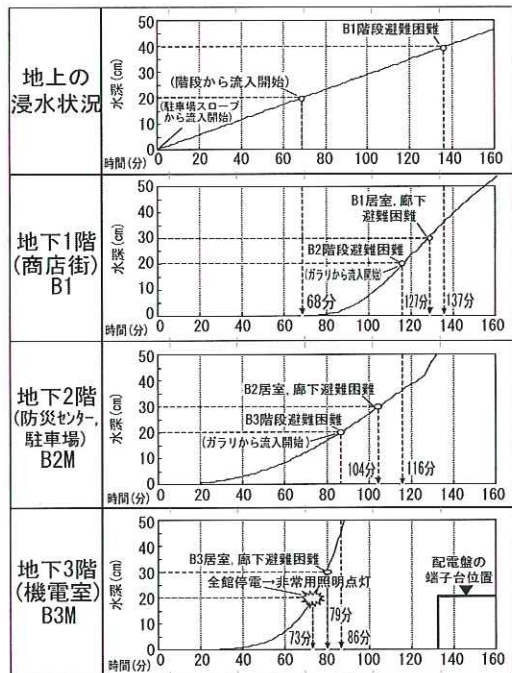


図-11 地下街の浸水経時変化
(ガラリ：建物内に外気を取り入れるための開口のこと)

本成果を用いることで、地下空間の所有者・管理者が容易に自ら所有・管理する地下空間の浸水危険度を認識することができ、適切な浸水対策及び避難計画の策定等を行うことができるようになる。

4.2 地下鉄等の地下ネットワークの浸水解析

地下鉄等の地下に広がるネットワークにおいて、浸水が発生した場合は、どのような経路を通じて、浸水が拡大するのかを想定することが難しく、地下ネットワークに浸水が生じた場合は、思いもよらぬ所から水がくることで、人命等が危険にさらされることが考えられる。

そこで、本研究室では、東京周辺の地下鉄ネットワークを例とし、内外水氾濫による氾濫水がその中に流入した場合に、簡易的に被害予測ができるモデルを構築する。また、そのモデルを用いて、地下ネットワークに浸水した場合のネットワーク内の浸水拡大過程とその状況等の把握及びその浸水状況に応じた浸水対策手法等を検討する。

本成果をもとに検討が進めば、全国の地下鉄ネットワークに対して、避難に必要な情報の把握ができるようになることで、地下鉄ネットワークの浸水における的確な避難計画の策定が可能となり、人的被害の回避につながる事が期待される。

5. 地下に関する今後の研究

5.1 大規模地下空間を対象とした地下浸水ハザードマップの検討

都市部において、大規模な地下商店街等は、多数の人に日常的に利用されているため、河川が破堤し、氾濫水による浸水が発生すれば、深刻な事態となることが予測される。

そこで、大規模な地下商店街等が地下浸水ハザードマップを作成し、普段から、浸水危険性の周知や危機意識の啓発を行うことが重要となる。

しかしながら、地下浸水のハザードマップを作成するためのマニュアルや手引き等は、まだ作成されていない。

水害研究室では、今まで実施してきた地下空間の浸水に関する研究成果や知見を活かし、地下浸水ハザードマップ（案）作成のための技術的な検討を行う予定である。

5.2 地下施設における情報提供・伝達手法の検討

地下鉄や大規模な地下空間においては、地下施設の浸水情報（避難経路や浸水情報等）を的確に伝達する手段や方法がない。また、大規模な地下空間では、浸水により停電が発生することも考えられ、その結果、浸水情報や避難情報等を発信できなくなることが考えられる。また、大規模な地下空間の利用者は、不特定多数であり、あらゆる人を対象とした情報の伝達方法を考慮しなければならない。

そこで、水害研究室では、浸水による起こりうる事態を予測計算・解析により検討した成果等を活用し、地下施設を利用する不特定多数の利用者に応じた、避難経路情報等の情報の在り方や情報提供・伝達の方法について、検討を行う予定である。

6. おわりに

都市部における地下街、地下鉄等の地下空間は、多数の人に日常的に利用されている。また、地下空間は、密閉された空間であるため、浸水発生すると、人命に関わる深刻な被害につながる可能性が高い。このため、地下管理者・利用者が、地下施設浸水時に、即座に避難及び誘導等ができるよう、避難計画の策定や危機意識の啓発を積極的に行う必要がある。

水害研究室では、地下空間の管理者・利用者への情報提供のあり方及び地下空間の浸水危険性を的確に評価できるよう、技術的な支援を行うとともに、積極的に地下空間の浸水危険性に関する情報及び浸水対策の必要性等を発信していくことで、地下空間の浸水危険性の危機意識の啓発、浸水対策の推進に努めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 武富一秀，館健一郎，金木 誠，地下空間の浸水リスク評価のための基礎検討，第 57 回土木学会年次学術講演会概要集 第 2 部
- 4) 武富一秀他，地下空間の水害リスク評価手法の検討，河川技術論文集，Vol.9，311-316

武富一秀*



国土交通省国土技術政策
総合研究所危機管理技術
研究センター水害研究室
研究官
Kazuhide TAKEDOMI

廣木謙三**



国土交通省国土技術政策
総合研究所危機管理技術
研究センター水害研究室
室長
Kenzo HIROKI