

名古屋駅前地下街の入口調査と 地下空間の浸水解析

INVESTIGATION OF ENTRANCE OF UNDERGROUND SHOPPING CENTER IN FRONT OF NAGOYA STATION AND INUNDATION ANALYSIS OF THE UNDERGROUND SPACE

武田 誠^{1*}・久野智弘²・中村正司³・松尾直規⁴

Makoto TAKEDA^{1*}, Tomohiro KUNO², Shoji NAKAMURA³
and Naoki MATSUO⁴

Recently, the risk and the measures of water disaster of underground space in urban areas has been evaluated. For the discussion of the measures, not only inundation situation of overland area but also information of entrance of underground space is important. In this study, the information of entrance, for example, height of step, height of wall of entrance and length of wall, are surveyed by means of moving motor survey system. From survey results, the information of entrance is collected and the height of wall is almost 1.2m. As the water depth from 1m to 3m is forecasted in the case of inundation due to dike break, it is thought that the water inflows to the underground space in this case. Moreover, the numerical simulation model for the analysis of water behavior of overland, stairs and underground space is developed. In this study, the validity of analysis model is shown by the conservation of water volume and situation of inundation water behavior.

Key Words : *Underground space, Entrance, Field survey, Inundation analysis*

1. はじめに

近年, 大雨や洪水による浸水被害が多くみられる. 特に, 都市には地下街・地下鉄が存在し, そのエリアでひとたび浸水が生じれば被害は多大になることが容易に想定される. 平成25年に改定された水防法でも, 地下街における浸水対策が明記されており, その対策立案の重要性が示されている.

戸田・石垣・尾崎ら¹⁾, 関根ら²⁾など, 近年, 地下空間の浸水被害を扱った研究は盛んに行われている. これらの研究では, 大阪や東京に位置する地下街を対象に, 豪雨に伴う内水氾濫や避難シミュレーションを実施しており, 地下空間の浸水特性や現実的な浸水対策, 避難対策を報告している. さらに, 最近では, 津波による地下浸水特性の評価³⁾, 内水モデルによる広域の洪水氾濫解析⁴⁾

など, 広域浸水およびそれによる地下空間の浸水特性が議論されている.

地下浸水を考える場合には, 入口情報が最も重要であるが, その情報の整理は十分でない. 本研究では, 名古屋駅前地下街を対象に, 移動体測量を用いて, 入口情報(入口の形状, 高さ, 幅など)を整理した. また, 水位を仮定した場合の流入流量を見積もり, その特性を明らかにした. さらに, 地表面と階段, 地下空間を対象にした浸水現象を表す解析モデルを開発した. 地表面に一定水量がある場合の浸水の様子を対象に, 質量保存や地表部の浸水の変化, 階段の流れの様子, 地下空間における水輸送に着目してモデルの定性的な妥当性評価を行っている. なお, 本研究では簡単のために, 地下空間の床高は一定として, 階層構造は考慮していないが, 現実近づけるためのこれらのモデル化は今後の課題としている.

キーワード: 地下空間, 入口, 現地調査, 浸水解析

¹正会員 中部大学教授 工学部都市建設工学科 Professor, Faculty of Engineering, Chubu University, (E-mail:mtakeda@isc.chubu.ac.jp)

²学生会員 中部大学大学院工学研究科 Graduate school of Engineering, Chubu University.

³正会員 株式会社 テイコク Teikoku International Corporation

⁴フェロー 中部大学教授 工学部都市建設工学科 Professor, Faculty of Engineering, Chubu University,

2. 名古屋駅前地下街の入口調査

(1) 移動体測量の調査概要

図-1, 図-2に対象領域を示す。本図のピンク色が地下街の入口のある道路、青色はそれ以外の道路である。また、赤色、青色の点は街区多角点（基準点）であり、赤色は写真測量で見えると想定した点である。一方、青色は見えないと想定した点であり、測量時にポールを持って立った。測量には移動体測量を用い、図-2に示す車体で計測した。また、GPSの基地局を中部大学鶴舞キャンパスの屋上に設置し、その情報を活用しながら車体もGPS測量を実施している。

平成26年6月16日8時に集合し、6グループに分かれて、基準点が目立つようにガムテープでマークし、その間にGPSの基地局を設置した。スマートフォンアプリのLINEを用い測量の工程を連絡しながら、写真では見えない恐れのある基準点の測量時にはポールを持って立ち、10時から14時まで測量を行った。

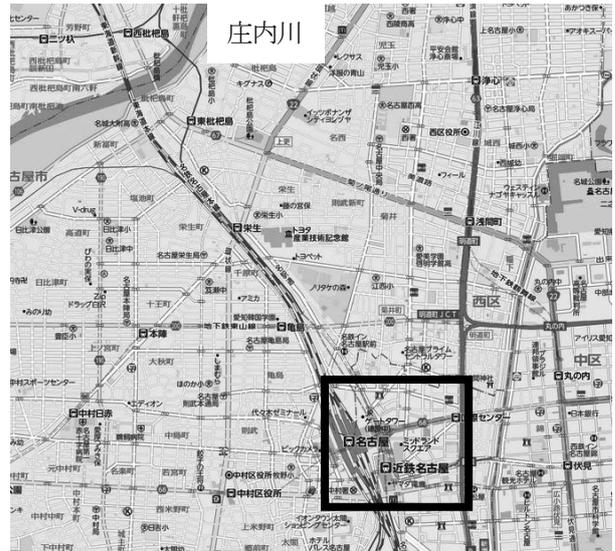


図-1 調査対象領域

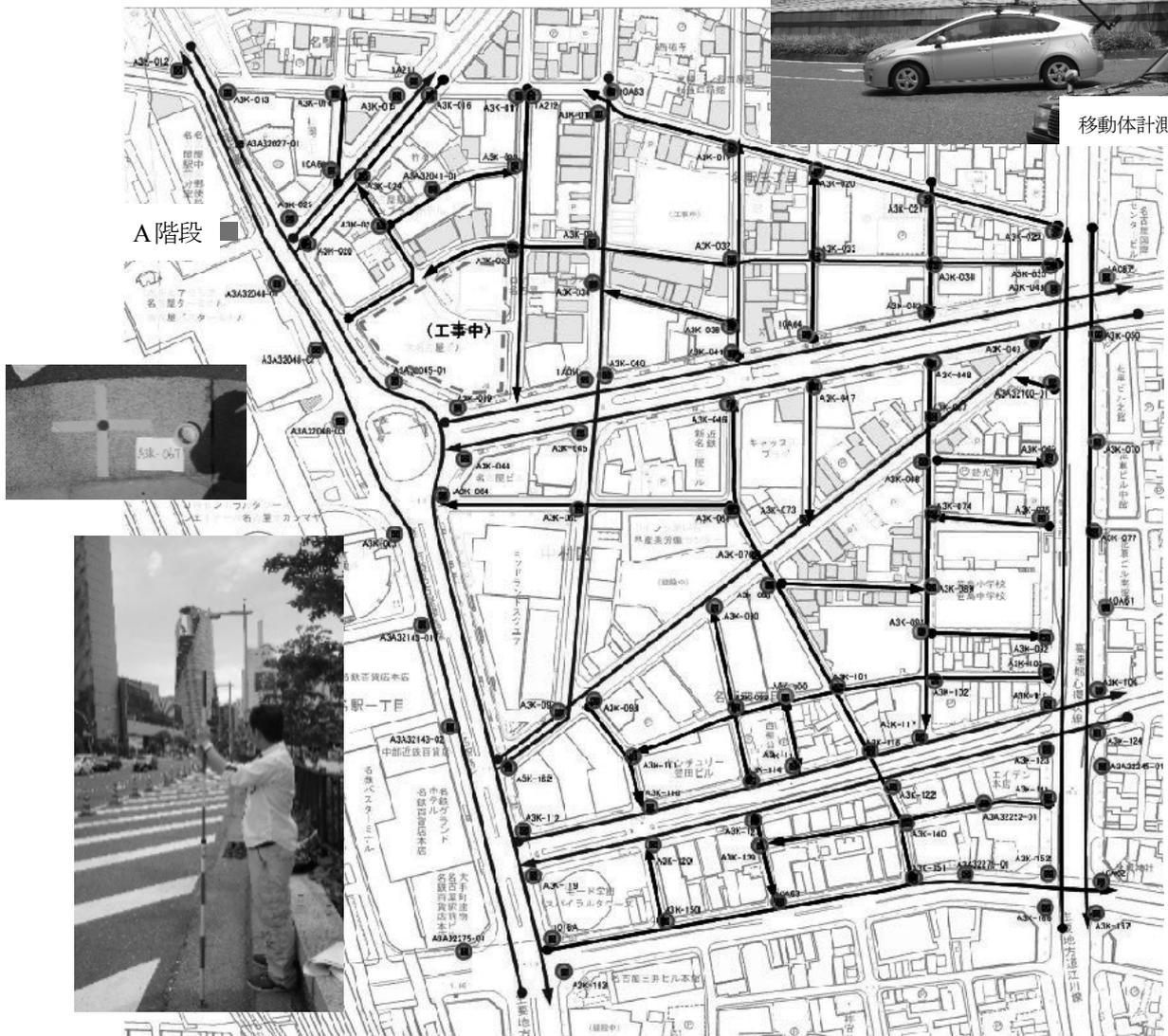


図-2 調査地域および調査の様子

(2) 測量結果

測量結果から54個の名古屋駅前地下街への入口情報を求めた。名古屋駅前地下街の入口は、図-3に示す側壁の低いタイプと屋根がついて壁に覆われたタイプに分けられる。図-4の定義に従い情報を整理したものが表-1である。幅1.8m、側壁の高さ0.75m、奥行6.8m、2段の入口が最も多かった。段の高さが0.15m、道路から歩道の高さが0.15mであったので、一般的な壁面高は道路から概ね1.2m程度となる。一方、名古屋駅周辺の地域は、内水氾濫で0.5m~1.0mの、外水氾濫で1.0m~3.0mの浸水が予想されている。このことから、内水氾濫では側壁を利用した止水板で地下への流入を防ぐことが可能であろうが、大規模な浸水では、止水板や側壁を乗り越えて浸水が地下空間へ流入することが容易に想定できる。したがって、洪水などの外水氾濫を対象とする場合には、地下空間への浸水を十分に検討する必要がある。

(3) 水位を仮定した場合の流入流量の評価

地下空間の入口情報が整理できたことから、水位を仮定して、ステップの越流流量 $Q1 (= \sqrt{gh_1} B_1 h_1 ; g : \text{重力加速度}, h_1 : \text{ステップ高の水深}, B_1 : \text{幅})$ 、側壁の越流流量 $Q2 (= \sqrt{gh_2} B_2 h_2 ; g : \text{重力加速度}, h_2 : \text{側壁の越流水深}, B_2 : \text{側壁の長さ})$ を求めた。水位は、ステップ高の最低値 1.6m より 0.1m 毎に増加させ 3.6m までとした。図-5 に 2.1m (最低ステップ高の場所(入口番号 4)の越流水深 0.5m)、3.1m (同様に越流水深 1.5m) の場合の流入流量を示す。また、図-6 に水位毎の総流入流量を示す。これらの図から、水位 2.1m の場合、浸水による流入の

有無が現れており、水位 3.1m の場合、すべての入口から浸水が生じていることが分かる。また、場所によっては、補講通路の入口よりも壁を乗り越えて流入している入口もあり、場所によっては、壁を乗り越える流入流量 (Q2) が入口の流入流量 (Q1) よりも多いところもあ

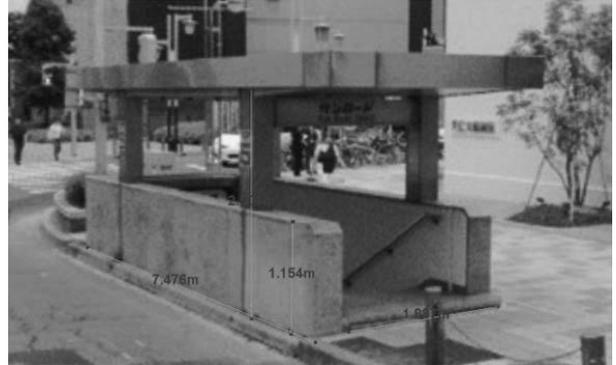


図-3 地下入口のタイプ

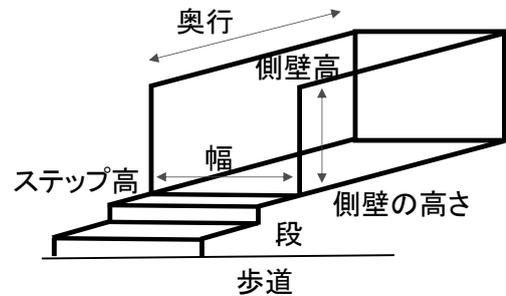


図-4 入口情報の定義

表-1 入口情報の整理

	幅(m)	側壁の高さ(m)	奥行(m)	段(個)
平均値	1.8	0.91	7.3	1.9
最頻値	1.8	0.75	6.8	2
最大値	3.0	2.45	15.5	3
最少値	1.0	0.55	5.0	1

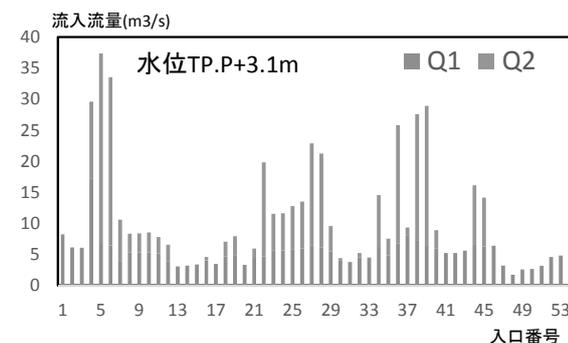
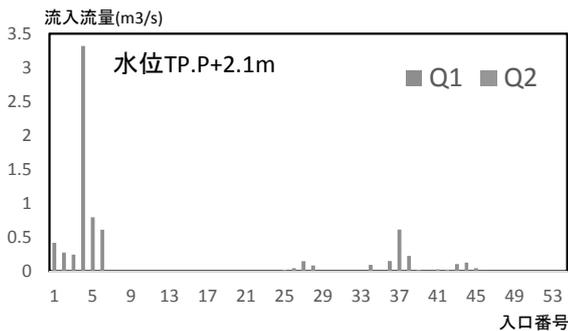


図-5 入口毎の越流流量

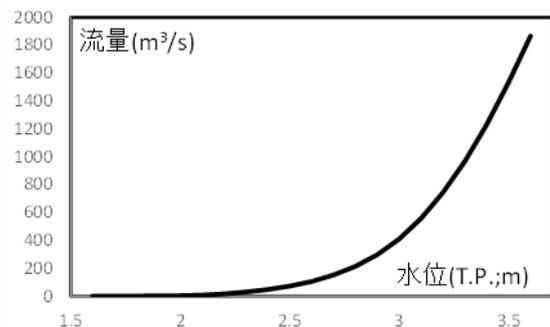


図-6 入口毎の越流流量

る。また、全体の流入流量を見れば、水位が 3m を越えたところから、水位による流入流量の増加が大きくなっていることが分かる。このことから、入口の壁面を超えるような大規模な浸水の場合には、通常の入口からの流入流量よりも大きな水量が地下空間に流れ込むことが明らかとなった。これにより、一気に地下の浸水水量や水位が増大するので、大規模浸水の場合には、地下空間の被害が大きくなることが改めて想定された。

3. 地下空間の浸水解析

(1) 解析モデルの概要

本研究では、地表面浸水と、地下空間の入口からの流入、流入流量の階段の流下と地下空間の浸水を表す解析モデルの構築を行った。水輸送の支配方程式は以下のとおりである。

a) 地表面の浸水のモデル化

地表面では、平面 2 次元の不定流解析モデルを用いる。使用した浅水方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial h_a}{\partial t} + \frac{\partial M_a}{\partial x} + \frac{\partial N_a}{\partial y} = -q_{cu} \quad (1)$$

$$\frac{\partial M_a}{\partial t} + \frac{\partial u_a M_a}{\partial x} + \frac{\partial v_a M_a}{\partial y} = -gh_a \frac{\partial(z_{Ga} + h_a)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{xa} \frac{\partial M_a}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{ya} \frac{\partial M_a}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bxa}}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_a}{\partial t} + \frac{\partial u_a N_a}{\partial x} + \frac{\partial v_a N_a}{\partial y} = -gh_a \frac{\partial(z_{Ga} + h_a)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{xa} \frac{\partial N_a}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{ya} \frac{\partial N_a}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bya}}{\rho} \quad (3)$$

ここに、 u, v はそれぞれ x, y 方向の流速(m/s)、 h は水深(m)、 M, N はそれぞれ x, y 方向のフラックス($M = uh, N = vh$)(m^2/s)、 v_o は単位面積当たりの流出流量(m/s)であり、 $v_o = \sum q_n / \Delta x \Delta y$ (q_n : 地下への落ち込み流量(m^3/s), $\Delta x \Delta y$: 格子の面積(m^2))、 z_G は地盤高(m)、 τ_{bx}, τ_{by} はそれぞれ x, y 方向の底面のせん断応力(Pa)、 ρ は水の密度(kg/m^3)、 g は重力加速度(m/s^2)、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ はそれぞれ x, y 方向の渦動粘性係数(m^2/s)であり、本研究では 0 とした。添え字 a は地表面の領域を意味し、 x, y は平面の座標、 t は時間である。

底面のせん断応力は、マニングの粗度係数を用いて、以下の式で表される。

$$\tau_{bxa} = \rho g n^2 M \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (4)$$

$$\tau_{bya} = \rho g n^2 N \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (5)$$

b) 地下空間の浸水のモデル化

地下空間でも、地表面と同様に、平面 2 次元の不定流解析モデルを用いる。ただし、水で満たされる場合を想定し、スロットモデルを考慮して、コントロールボリュームで積分した(5)式の連続式と、(6)式、(7)式の流量に関する運動量方程式を用いる。

$$\frac{\partial h_b}{\partial t} A_b + |Q_{xb}|_i^{j+1} + |Q_{yb}|_j^{i+1} = q_{cd} \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q_{xb}}{\partial t} + \frac{\partial u_b Q_{xb}}{\partial x} + \frac{\partial v_b Q_{yb}}{\partial y} = -g A_{xb} \frac{\partial(z_{Gb} + h_b)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{xb} \frac{\partial Q_{xb}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{yb} \frac{\partial Q_{yb}}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bxb}}{\rho} \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q_{yb}}{\partial t} + \frac{\partial u_b Q_{yb}}{\partial x} + \frac{\partial v_b Q_{yb}}{\partial y} = -g A_{yb} \frac{\partial(z_{Gb} + h_b)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{xb} \frac{\partial Q_{yb}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{yb} \frac{\partial Q_{yb}}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{byb}}{\rho} \quad (8)$$

ここに、 Q_x, Q_y はそれぞれ x, y 方向の流量 (m^3/s)、 q_{cd} は階段からの流入流量(m^3/s)であり、渦動粘性係数は 0 とした。また、添え字 b は地下空間を意味する。

水深が地下空間の天井を越えない場合は格子面積 $A_b = \Delta x \Delta y_b$ 、天井を超える場合は $A_b = \Delta x \Delta y_b \times \alpha$ (ここで、 $\alpha = 0.1$) とした。また、天井より上部の面積 A_b を考慮してスロット幅 $B_b = (1 - \sqrt{1 - \alpha}) \Delta s$ (ここで、 Δs は格子幅) を求め、その長さを考慮して流水面積 A_{xb}, A_{yb} が計算されている。

底面のせん断応力は、マニングの粗度係数を用いて、以下の式で表される。

$$\tau_{bxb} = \rho g n^2 Q_x \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (9)$$

$$\tau_{byb} = \rho g n^2 Q_y \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (10)$$

c) 階段の浸水のモデル化

地表面と地下空間は階段で接続している。その水理は、スロットモデルを考慮し、以下に示す連続式と運動量方程式を用いる。

$$\frac{\partial h_c}{\partial t} A_c + |Q_{xc}|_i^{j+1} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q_{xc}}{\partial t} + \frac{\partial u_c Q_{xc}}{\partial x} = -g A_{xc} \frac{\partial(z_{Gc} + h_c)}{\partial x} - \frac{\tau_{bxc}}{\rho} \quad (12)$$

ここに、添え字 c は階段を意味する。また、底面せん断応力 τ_{bxc} は(9)式で求められる。

水深が地下空間の天井を越えない場合は格子面積 $A_c = B_c \Delta x_c$ 、天井を超える場合は $A_c = B_c \Delta x_c \times \alpha$ とした。ここに、 B_c : 階段の幅、 Δx_c : 計算格子幅である。また、スロット幅 $B_b = \alpha B_c$ を考慮して、流水面積 A_{xc} が計算されている。

また、階段部最上流の 1 番目の格子に、対応する地表面の水位から換算される水深を与え、2 番目の格子に

入口のステップ高を地盤高として与えて、流量の計算を行いその量を q_{cu} としている。また、階段最下流の格子に、対応する地下空間の水位から換算される水深を与え、最下流の計算格子の流量を求めて、その量を q_{cd} としている。 q_{cu} と q_{cd} は、それぞれ地表面および地下空間の計算に用いられて、質量保存が満足される。

d)数値解析法
数値解析法として陽的な差分法を用い、時間項には前進差分、移流項には風上性を考慮した DONOR スキーム、その他の項には中央差分を用い、底面のせん断応力には陰的な取り扱いを行った。

(2) 計算領域および計算条件

地表面の計算格子の地盤高および地下空間の計算領域を図-7に示す。地下空間の床高は地表面の最低地盤高から3m低いところに位置し、水平であると仮定した。また、入口の階段の設定として、2.で求めた入口のステップ高から接続先の地下空間まで25cmの高さを持つステップでつながり、高さの端数を最上段で受け持つとした。階段の幅は2の測定値を用いた。構築した解析モデルの妥当性評価を目的に、氾濫域に一定水量がある場合（初期水位 TP+3.5m）の浸水の時間変化を求めた。なお、対象とする地域のハザードマップでは、庄内川が破堤した場合の浸水深が1m~3mと想定されている。初期水位における地表面の浸水の様子を表2に示す。これにより、初期水位 TP+3.5mは外水氾濫の場合とみることができる。

(3) 計算結果および考察

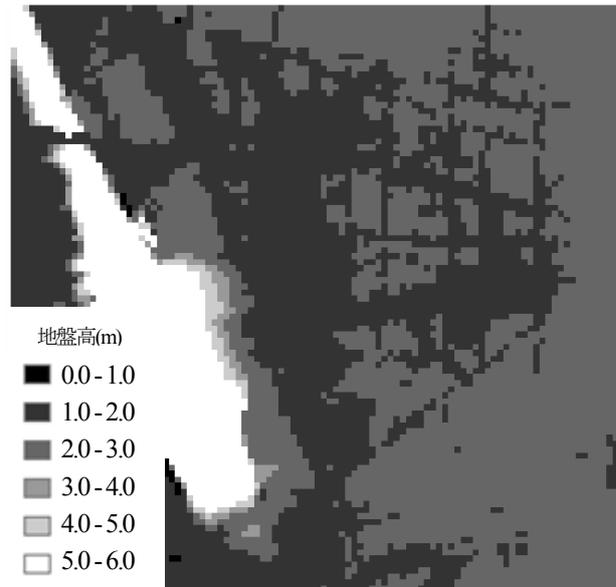
地表面と地下空間の浸水深の分布と階段における浸水の様子を図-8に示す。本図から時間と共に地表面の浸水が地下空間へ流入し、地表面の浸水深は低下し、地下空間の浸水深が増加していることが分かる。また、階段部分も適切に計算されており、スロットモデルにより満水の流れも計算されている。ただし、計算初期に階段の水位の大きな変動が現れている。これは、初期水位が低い場合には見られなかったが、初期水位 TP+4.0とした場合も見られた。この結果は射流の発生に伴う解析上の数値的な振動の可能性もあり、数値解析法の検討が必要と考える。また、計算実行時に総水量を求め、計算中に水量が保存されていることを確認している。本結果から、地表面と地下空間を接続させた浸水解析モデルの定性的な妥当性が示された。

4. おわりに

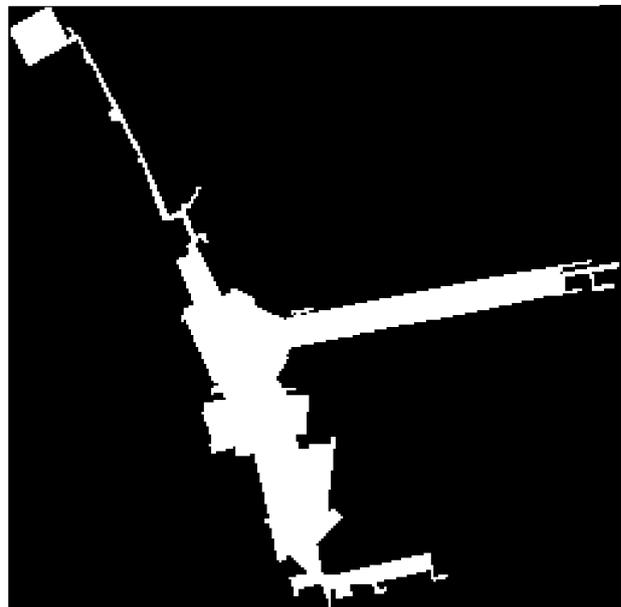
本研究で得られた知見をまとめれば以下のようなものである。

表-2 初期水位による浸水深毎の計算格子数と浸水面積

初期水位(m)		TP+3.5
浸水深	0m~1m	347
	1m~2m	7760
	2m~3m	514
面積(m ²)		862100



(a) 地表の地盤高



(b) 地下街の計算格子

図-7 計算領域

1) 移動体測量を用いた名古屋駅前地下街の入口の調査を行った。その結果、それぞれの入口情報が整理され、特に1.2m程度の壁面を乗り越える場合の浸水の危険性が指摘された。これは外水氾濫の場合に相当する。また、

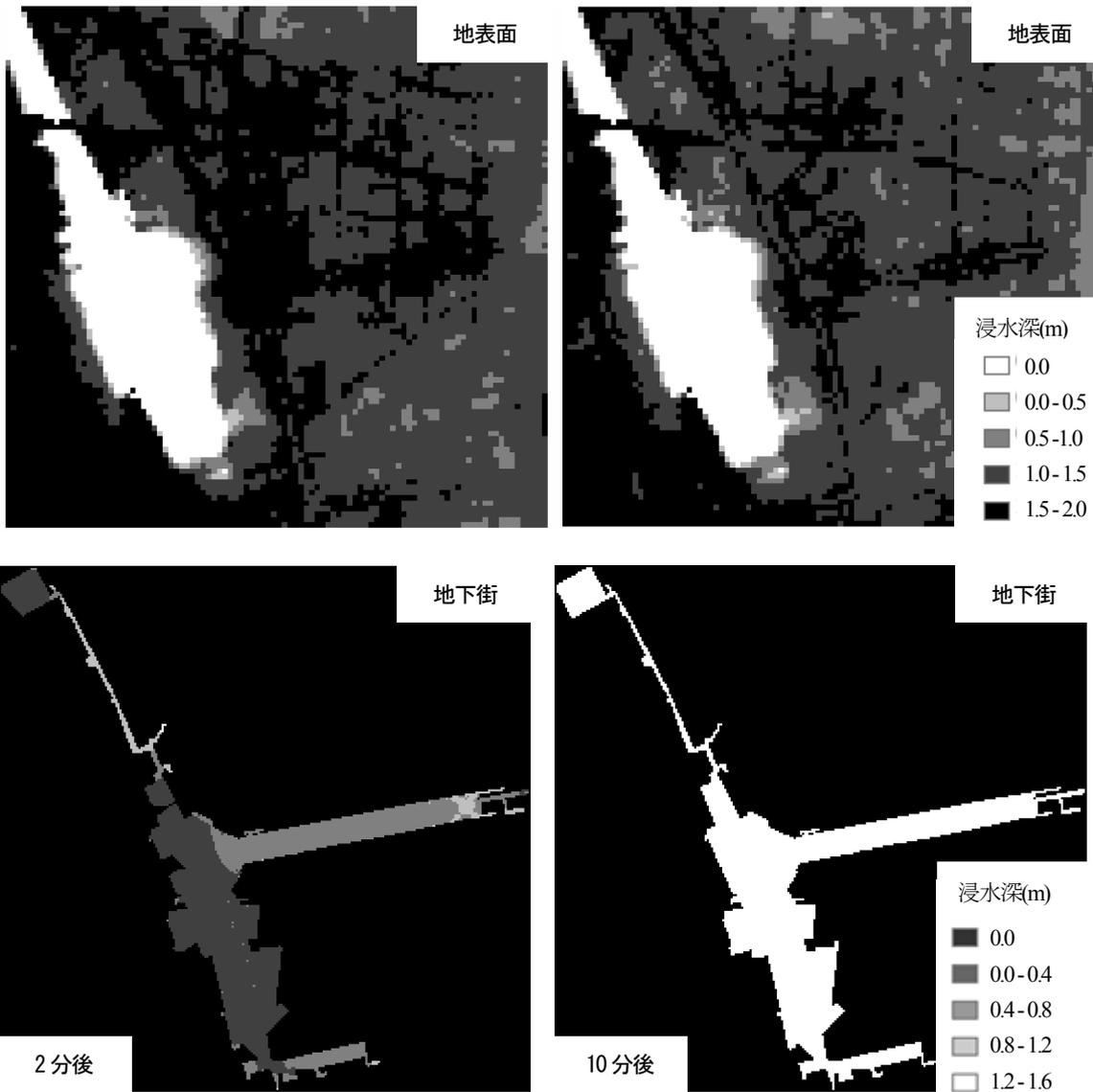


図-8 浸水深の分布

整理された情報を用いて、水位を仮定した場合の流入流量を見積もった。水位が高い場合は、壁面からの流量が加わり、多大な水が地下空間へ流入することが示された。2) 地表面、階段、地下空間の浸水を解析するモデルを構築した。質量保存や水の流れの定性的な観点から、モデルの妥当性を評価した。しかし、地下空間の詳細な床高や階層、地下鉄駅を考慮していないので、それらの詳細化、モデル化を行う必要がある。

参考文献

- 1) 井上知美, 川中龍児, 石垣泰輔, 尾崎 平, 戸田圭一: 内水氾濫による大規模地下街の浸水過程と避難の安全性に関する検討, 土木学会水工学論文集, 第 55 巻, pp.967-973, 2011.
- 2) 関根正人・大野龍馬: 集中豪雨により発生する地下空間の浸水と利用者の避難誘導に関する数値解析, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.1, 30-43, 2013.

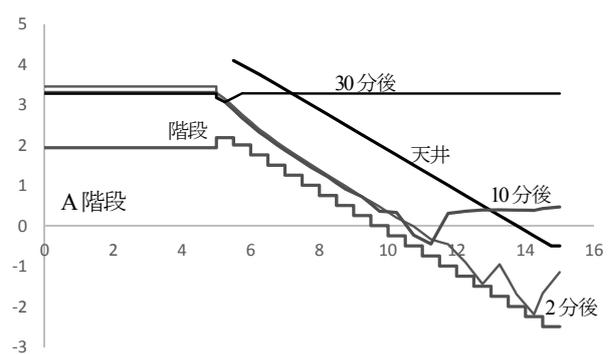


図-9 階段の浸水の様子

- 3) 浅野統弘, 尾崎平, 石垣泰輔, 戸田圭一: 南海トラフ巨大地震による津波来襲時の大規模地下空間の浸水予測, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.70, No.4, I_1435-I_1440, 2014.
- 4) 関根正人, 池田遼: 東京東部低平地を対象とした浸水・氾濫の数値解析, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.70, No.4, I_1429-I_1434, 2014.