

都市地下空間の浸水被害シミュレーションの試み —新宿地下街を対象として—

NUMERICAL SIMULATION OF INUNDATION DAMEGE IN UNDERGROUD SPACE

関根正人¹・前川桂恵三²

Masato SEKINE and Keizo MAEKAWA

¹正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

²正会員 株式会社 大林組 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

The expanding process of inundation damage in underground space was investigated in the present study. Simplified numerical simulation model was constructed on the basis of diffusion wave approximation to understand the process hydraulically. The model was applied to the real underground space in Shinjuku. As a result, it was found that the stairs between level 1 and level 2 of underground space influence the magnitude of damage considerably. The model was also found to work reasonably.

Key Words : *underground space, inundation damage, numerical simulation, Shinjuku*

1. 序論

都市化が進んだ地域では、建物や道路等の舗装により雨水が浸透しにくいために、局地的な集中豪雨が発生すると内水氾濫を起ししやすい。一方、都市域では、限られた土地の有効利用の観点から、多くの地下空間が開発され、利用されてきている。近年、この都市化の進行に伴う雨水の透水性の低下に加えて、その影響が懸念されている「ヒートアイランド現象」との関係から、これまで想定されることのなかった規模の豪雨がゲリラ的に都市を襲うようになってきている。そのため、都市域での内水氾濫の危険性は高まり、あわせてこれが標高の低い地域にある連絡口から地下空間へ進入することで、深刻な浸水被害が発生する可能性が増大してきている。ところで、このような地下空間の浸水被害の事例を調べてみると、1980年代には既に大都市圏で発生しており、たとえば、1981年夏に東京新宿地下街において発生した被害がその典型といえよう。その後、この20年間にその被害の発生頻度ならびに規模が増大してきている。たとえば、1998年6月に福岡で発生したケースでは、豪雨の影響から博多駅周辺の地下空間が深刻な浸水被害を受け、不幸なことに人命まで失われる災害へと発展した。規模は異なるものの

同年7月には新宿で個人住宅の地下室で同様の人命に関わる災害が発生したほか、同8月には東京都千代田区の地下鉄、渋谷区の地下鉄と地下街の一部に浸水被害が出ている。そして、記憶に新しいところでは2000年9月に東海集中豪雨が発生し、予想を越えた多量の降雨によって洪水氾濫や土砂崩壊が生じ、大規模な都市型水害を引き起こした。このように、都市の豪雨災害に対する脆さが再認識させられるようになり、あわせて地下空間の安全性の議論が高まってきている。

このような浸水被害に対しては、その被害を軽減することを目指した行政による対策が並行して講じられつつある。あらかじめ地上にある連絡階段の上端を道路路面より高くしておくこと、豪雨発生時に地上の状況を監視し、状況に応じて止水板を設置したり防水扉を閉めること、排水ポンプ等を備え付けておくこと、避難経路を確保することとあわせて利用者の浸水被害に対する意識を高める啓蒙活動をすること、などがそれにあたる。

一方、これに関連する研究としては、このような地下空間への浸水被害の拡大過程を水理学的に理解し、これを予測する試みが行なわれている。たとえば、高橋・中川・野村¹⁾は1990年の時点でこの現象の模型実験と数値計算モデルの構築に着手し、その後、井上・

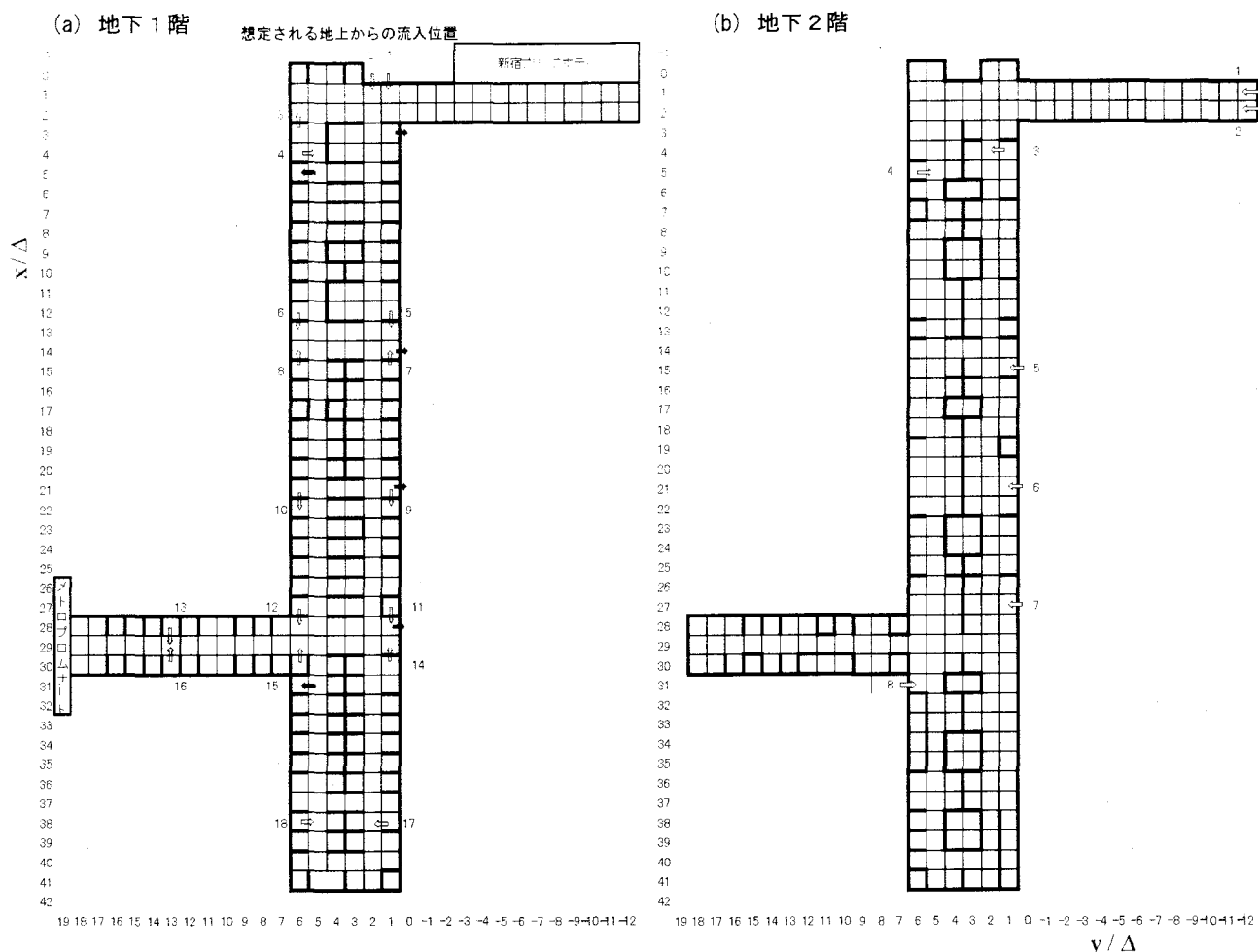


図-1 モデル化された新宿サブナードの平面図：

図中の白抜き矢印は上階からの流入を、黒矢印は階下への流出を、数字は各階毎に付した流入口番号を、それぞれ表す。

中川・戸田・溝田²⁾は、同様のモデルを大阪堂島地下街に適用し、浸水の進行過程と前述の止水板の効果に関する有益な知見を報告している。

本研究では、1981年に浸水被害のあった東京都新宿区にある「新宿サブナード」という地下街を検討の対象とし、前述の高橋・中川らの数値解析モデル¹⁾を参考にしつつ、より簡易的かつ実用に供し得るモデルの開発を試みている。なお、従来の解析モデル^{1), 2)}では、地上から地下空間へ進入・伝搬していく雨水の流れを再現することに主眼がおかれ、地下1階から2階への伝搬といった地下空間内の鉛直方向の水の伝搬についてはほとんど触れられていない。しかし、「新宿サブナード」の場合には、主として、地下1階に商業用の店舗が、地下2階には地下駐車場が、それぞれ存在するような構造となっている。このような地下空間の水防災を考えるためには、こうした2層構造の水理特性を理解し、相互を結ぶ連絡階段が浸水被害拡大に及ぼす影響を明らかにしておくことが重要である。このような点を簡易的なモデルを用いて検討することが本研究の目的である。

2. 数値解析の概要

本解析では、地下空間というシステムの中に進入した水が連絡階段を通して階下へと伝播し、結果としてこのシステムの中で浸水被害がどのように広がっていくかを数値解析する。そこで、ここでは敢えて地上の氾濫水の挙動を解析することなく、地上から地下へ通じる連絡口周辺の地表流の水深を既知量として与えることにした。これは、計算の対象となる時間内に限りこの地表水の水位が近似的に一定であるという仮定をしたことに他ならない。

計算では、対象とする地下街の各階をx-y座標面上に展開し、対象領域を等間隔に配置された格子網で覆いつくし、格子点上の諸量を求めることにする。図-1に解析の対象となる新宿サブナードの平面図を示す。図中の1つの格子の大きさ Δ は、そこにある店舗の基本的な大きさに等しくとることにし、 Δ を8 mとした。なお、新宿サブナードの規模その他の概要を表-1にまとめて示した³⁾。

さて、解析の基礎となる支配方程式として、ここで

表-1 新宿サブナードの概要

構造	鉄骨鉄筋コンクリート造り地下2階建
建物用途	地下1階：店舗、地下2階：駐車場
建物長さ	靖国通り 39.34 m x 340 m
	柳通り 19.00 m x 114.34 m
	西武駅前通り 9.20 m x 106.00 m
建物高さ	地下1階：6 m、地下2階：4 m、 排水層部分：4.5 m、建物全体：14.5 m
天井高さ	地下1階：2.5 m、地下2階：2.1 m
階段	地下1階：16箇所、地下2階：6箇所 最長歩行距離 各 30 m以内
地上ビルとの接続	地下1階：12棟、地下2階：5棟
給水設備	給水：保有水量 260 t 排水：集水槽29箇所、排水ポンプ68台
電気設備	一般電源：6600V 8450 KVA 非常電源：6600V 1250 KVA

はできるだけ簡易でしかも実用に供し得る精度を確保することを考慮して、いわゆる「拡散波近似」に従うものとした。このとき、 x および y 軸方向への単位幅当たりの流量 q_x および q_y は、Manningの平均流速公式から、次式のように表される。

$$q_x = \frac{1}{n} h^{5/3} \left(i_0 - \frac{\partial h}{\partial x} \right)^{1/2}, \quad q_y = \frac{1}{n} h^{5/3} \left(i_0 - \frac{\partial h}{\partial y} \right)^{1/2} \quad (1)$$

ここに、 n はManningの粗度係数(=0.2)を、また i_0 は地下街の各空間の床勾配をそれぞれ表わす。本解析では、各階の床が水平であるとして、この勾配を0とする。また、これらと連立して解く連続式は次の通りである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

境界条件としては、壁(図-1の太線)を通過する流れはなく、また壁面上ではノンスリップ・コンディションを適用することにした。さらに、地上から地下1階へあるいは地下1階から2階への流入量については、各階の階段近傍の格子点における水位差 ΔH と平均水深 $\bar{h}$ との関係で次のように与えることにした。

$$q_{in} = \frac{1}{n_s} \bar{h}^{5/3} \left(\frac{\Delta H}{\ell} \right)^{1/2} \frac{B_{step}}{\Delta} \quad (3)$$

ここに、 n_s は階段の流水抵抗を表すManningの粗度係数である。また、 ℓ および B_{step} は連絡階段の上端の計算点から下端の点までの総水平距離ならびにその幅を表す。この流入量に関しては、前出の研究^{1), 2)}では段落ちの公式を用いて評価している。また、これに関連して多田ら⁴⁾が直階段を対象とした実験的な研究を行うなど、この評価法についての理解は徐々に深まりつつあるが、未だそれが確立されたとは言い難い。そこで、ここでは式(1)との関係から式(3)の関係を用いること

にした。そして、これを将来、定量的に優れた関係式に置き換えることは容易であり、今後の課題としたい。ただし、ここでの目的である現象の定性的な理解については、この程度のモデルでも十分可能であると考えている。

ここでは、地下に繋がる地上連絡口付近の氾濫水の水位と、連絡階段の粗度係数 n_s とを系統的に変化させた一連の数値実験を試みた。その結果を踏まえて、次章では、地表における流入口付近の氾濫水の水深を0.5 m、 $n_s = 0.5$ とした場合の解析結果を中心に説明する。また、地上から地下への流入発生場所は、1981年の被害の際に主たる流入口となった図-1(a)の上端中央に示された白矢印No. 1と2とし、その他の地点からの流入については原則として考慮していない。これは、この地点が鉄道路線下を通る幹線道路のいわゆるガード下にあり、地形的に窪地になっているために、雨水が最も集まり易い最大の弱点と考えられるからである。計算時間刻みについては0.001秒とした。

3. 浸水被害の進行過程

ここでは、一連の数値解析結果に基づき、地下空間に進入した氾濫水の挙動とそれに伴う浸水被害の拡大過程について考察する。図-2および図-3は、地下1階および地下2階における計算結果を時間の経過とともに示したものである。それぞれの図には、その上段に水深の等値線図が、下段に流速ベクトル図がそれぞれ示されている。なお、水深の等値線図に関しては、時間とともにその最大値が増大していくため、その変化過程をわかりやすく表すことに留意して、時間毎に凡例を変えて示してある。また、地下街の構造についてはさらに詳しく説明すると、地下1階については、図-1よりわかる通り、図の上下方向には中央に左右2本の通路が延び、また左右方向には1本の通路が延びている。そして、その左右を格子規模(あるいはその2倍)の商業用店舗が連なっており、店舗はそれぞれが壁で仕切られている。地下2階については、主として駐車場として利用され、構造上単純な幾何学的形状となっている。

さて、計算結果に基づき、以下に考察を加えていくことにする。

まず、全般的な傾向として、流水の先端部の流速がかなり大きく、局所的には0.30 m/secを越えるところもある。たとえば図-2(a)の10分後の結果を見ると、浸水区域の水深は既に4～5 cmを越えており、この時点における避難行動としては、氾濫水の流入口方向へ移動するよりもその反対方向に移動する方がはるかに容易であると推察される。また、仕切の壁が各所に

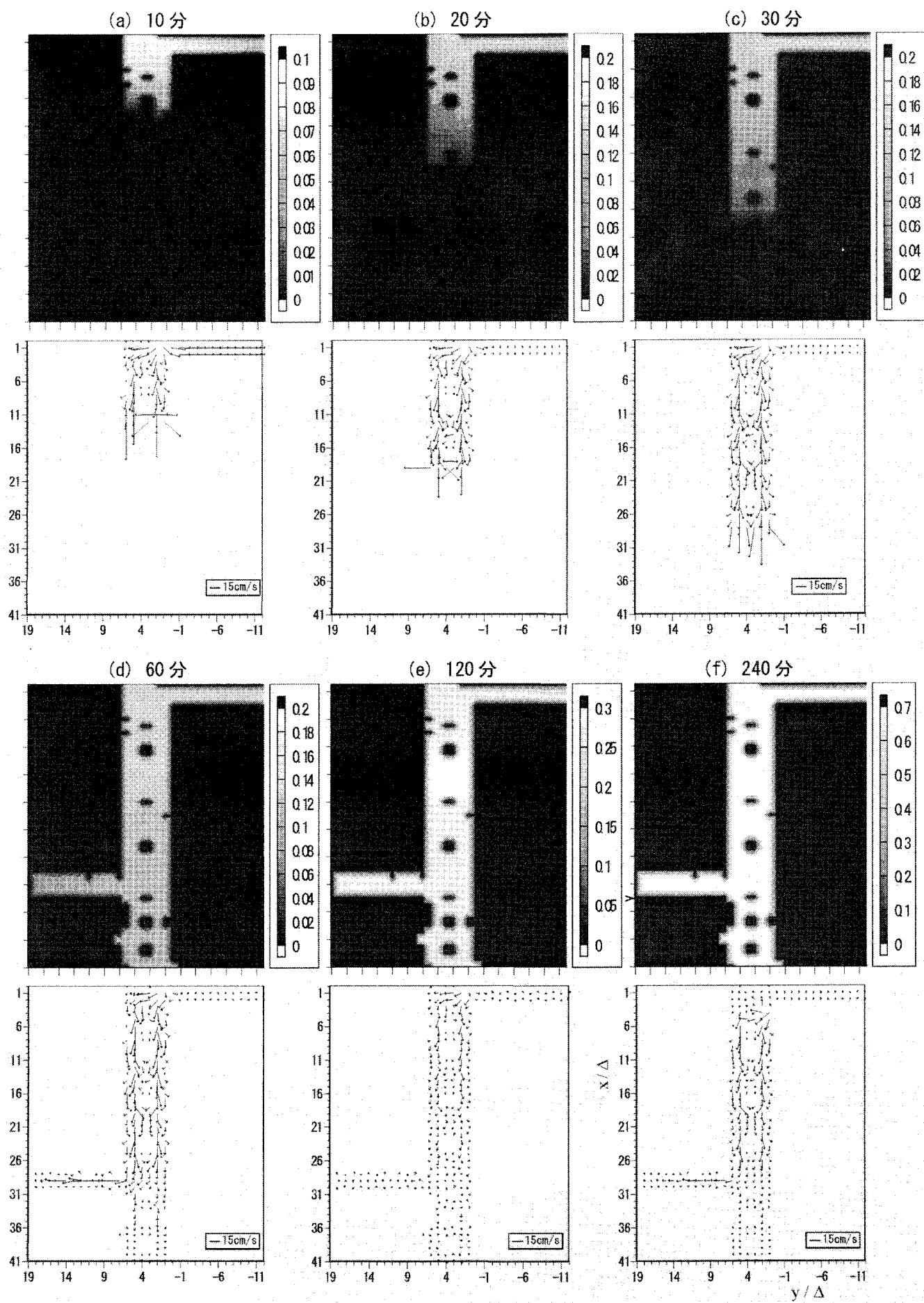


図-2 地下1階浸水被害状況図

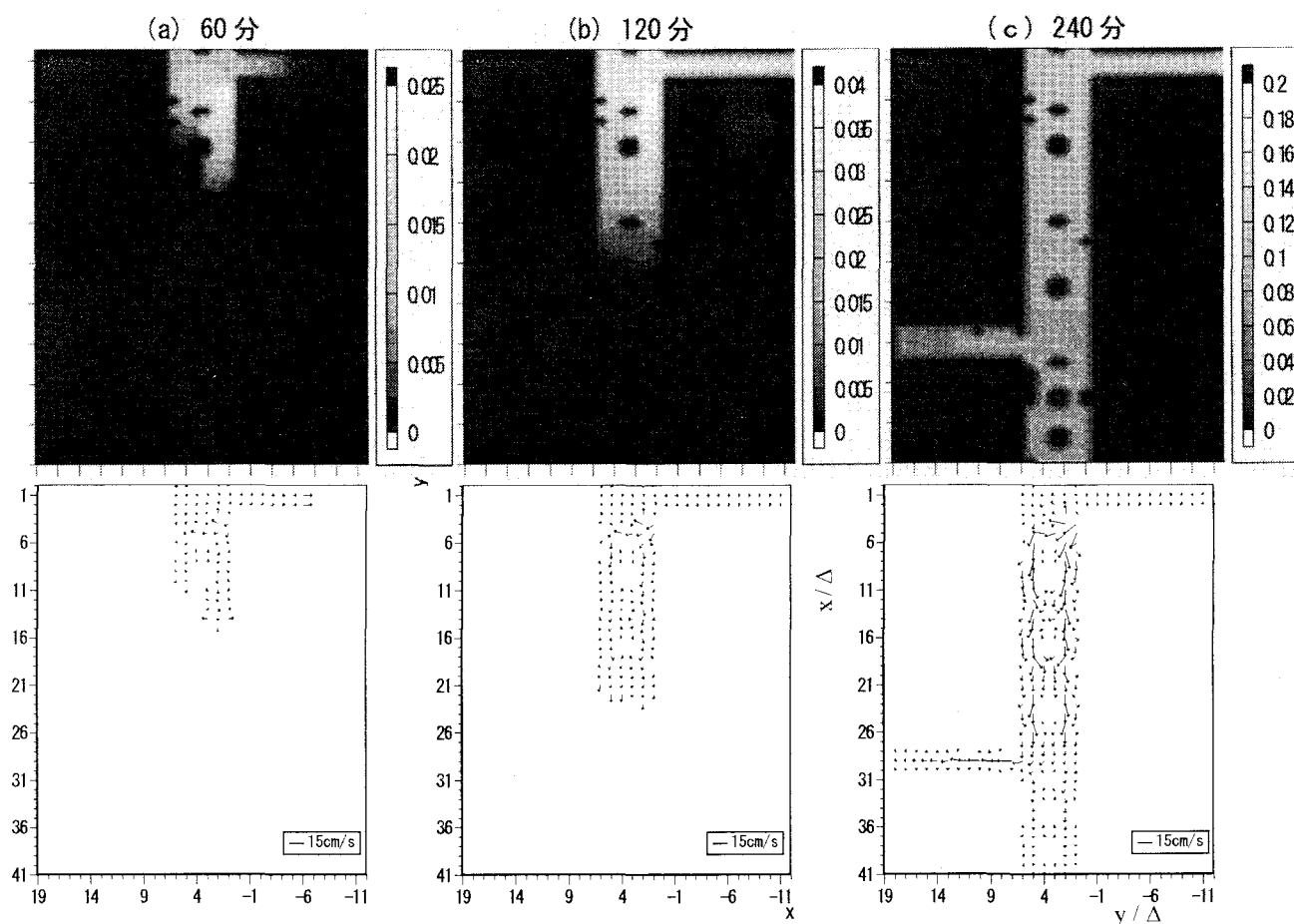


図-3 地下2階浸水被害状況図

あるため、流れは必ずしも一方向とはならず、所により複雑な様相を呈する。このことは避難行動に少なからず影響するものと考えられる。

また、浸水過程について見てみると、図-2より次のことがわかる。まず、地下1階の浸水の過程については、浸水開始後30分で全体の1/3が7～8 cm程度となり、60分後にはほぼ全域に及ぶことがわかる。参考までに1981年7月21日の浸水被害との対応を見ておくことにする。降雨は午後4時頃始まり、7時までの3時間の間にその総雨量が80 mmにも上った。また、浸水被害は午後4時50分頃始まったとされ、地下1階における最大浸水深は30 cm程度であったと報告されている。図-1(d)の120分後の計算結果を見ると、最大浸水深は25 cm程度であることから、上記の実被害の最大浸水時は、概ねこの程度の時間(厳密には130～140分後)における結果に対応していることになる。本計算の場合にはいくつかの仮定を設けており、その結果と実被害とを直接比較して議論するには自ずと限界があるが、この「約120分後の計算結果と実被害とが概ね一致する」ということは、本計算が実現象と大きく隔たったものではないことを表している。また、図-3に示される地下2階の浸水の過程については、次のようなことが理解された。まず、連絡階段の配置の関

係で、図-1(b)においてNo.3の番号がついた地下1階から2階への連絡階段が、地上からの水の流入口である図-1(a)のNo.1とNo.2の直下ともいえるべき位置にあるため、地上からの流入が始まるとまもなくその水の一部がこの階段を通過して地下2階に到達する。しかし、図-3(b)を見てもわかるように120分が経過してもその被害はそれほど急激には進行しない。ただし、地下1階全体の浸水が進み、図-1(b)に示されるいくつかの連絡階段からの流入が顕著になり始めると、地下2階の被害は加速度的に増大することになる。図-3(c)の240分後の結果がこれを表している。

次に、地下1階から2階へ繋がる連絡階段の有無が地下1階の浸水被害の規模に与える影響について議論する。ここでは、前出の計算例と同一の条件下で、地下2階への流出を起こさせないものとして計算を行い、この結果と前出のものとの比較を行った。ここでは、浸水の規模を表す指標として、成人男子が外向き扉を開けられなくなる水深である25 cmと、内向き扉を開けられなくなる水深である50 cmをとり、地下1階の最大浸水深がこの水深に到達するのに要する時間の大小を比較することにした。なお、後者の場合にはひざ上浸水となり、歩行困難な状態を表す。検討の結果は次の通りである。まず、連絡階段がある場合には120

分程度で25 cmとなり、約200分後に50 cmとなるのに対して、連絡階段がない(あるいは閉鎖した)場合には前者が110分程度、後者が180分後という結果となった。このように、地下2階への連絡階段により、地下1階の浸水被害は軽減されることがわかる。この結果を踏まえて水理学的に考えるならば、店舗が集中する地下1階の浸水被害の拡大を軽減させることを第一と考えるならば、その有効な方法として、地下2階へ水を効率よく誘導することが考えられ、これは地下2階へ通じる連絡階段の幅を広げる、流水抵抗を低下させるあるいはその平面配置を変更することで実現できるものと推察される。

4. 結論

本研究では、東京都新宿区にある新宿サブナードを検討の対象として、簡易的な数値シミュレーション・モデルを作成し、地下空間に進入した氾濫水によって浸水被害が拡大していく過程を水理学的に検討した。後述するような課題を残してはいるものの、その結果は1981年に発生した被害状況にある程度再現していることがわかった。さらに、本論文では、対象地下街は地下1階と2階とからなる2層構造となっているため、これらを結ぶ連絡階段がこの地下空間全体の被害状況に及ぼす影響に焦点を当てて検討を行った。

本研究を踏まえて、次の段階としては、以下のような課題を解消していくことが必要となる。(1)地上にある連絡口周辺の氾濫水の水位を、降雨によって引き起こされる地表流の計算の結果として評価すること、

(2)連絡階段における水流の評価法を検討すること、などである。

今後は、このような水理学的な検討を進め、その結果が都市地下空間の防災対策に有効に活用されていくよう努めていきたい。そのためには、こうした問題に取り組む研究者と実務者との間でより活発に意見交換がなされるなど連携をはかっていくことが望まれる。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、東京都建設局河川部計画課の土方隆氏には様々な資料の提供と、各種機関への紹介など、ひとかたならぬご協力を戴いた。また、新宿サブナードに関しては、新宿地下駐車場株式会社の飯田竝彬氏、栗林広明氏に構造図面や防災対策概要などの資料の提供を含むご協力を戴いた。上記の方々ならびに関係機関に対し、ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献:

- 1) 高橋 保, 中川 一, 野村 出: 洪水氾濫に伴う地下街浸水のシミュレーション, 京都大学防災研究所年報, 第33巻B-2, 427-442, 1990.
- 2) 井上和也, 中川 一, 戸田圭一, 溝田敏夫: 地下空間への氾濫浸水の解析, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第2巻, 95-102, 1997.
- 3) たとえば, 飯田竝彬: 新宿サブナード地下街の浸水対策, 雨水技術資料, Vol. 37, 49-54, 2000.
- 4) 多田彰秀, 井上啓由, 本田洋平, 古本勝弘: 直階段から地下空間へ流入する流量の評価に関する実験的研究, 水工学論文集, 第45巻, 901-906, 2001.

(2001. 4. 16 受付)