

地下空間での浸水とその解析法 Flood Inundation in Underground Space and its Simulation Analysis

戸田圭一¹・井上和也²・大八木亮³・栗山健作⁴
Keiichi TODA, Kazuya INOUE, Ryou OHYAGI and Kensaku KURIYAMA

This paper studies underground space inundations caused by recent large urban floods. The underground inundations in Fukuoka in June, 1999, in Nagoya in September 2000 and in Seoul in July 2001 are reviewed in details. The underground inundation is characterized by the quick occurrence after the ground inundation and the long time damage continuation such as subway service suspension. A mathematical model called 'storage pond model' is also introduced for inundation analysis in underground space. This model was applied to Umeda underground mall and adjacent subway spaces. The results show that the location and elevation of subway station and the volume of subway space much influence the inundation behavior in underground mall.

keywords : large cities, underground space inundation, urban flood, numerical simulation

1. はじめに

時間雨量が100mmに迫る降雨強度をもつ集中豪雨の発生により、近年大都市域で大規模な水害が発生している。降雨という外力の大きさに加えて、大都市を含む流域の都市化の進展による流出率（流域に降った雨が河川流量として流出してくる割合）の増大のため、河川の溢水による氾濫（外水氾濫）が生じたり、雨水を下水道や市内河川で処理できずに生じる内水氾濫が大規模化している。

このような洪水氾濫が大都市部で生じた場合、氾濫水は当然地盤の低いところへ流下する。もしも地下室、地下街、地下鉄駅といった地下空間が氾濫域に存在するならば、地下空間への流入をくい止める手だてがうたれないと、氾濫水は当然、そのような地下空間に浸入し、拡がっていく。ビル地階の比較的小規模な地下室を除けば、地下駐車場、地下街、地下鉄駅などの公共の地下空間は多層でかつ互いが連絡している場合が多く、氾濫水の挙動は地上部のそれよりもはるかに予想しにくい。また地下鉄の軌道部を除くと地上に比べてそれらの空間の容積は一般に小さいため、浸水深の上昇が急激に起こり、市民に危険を及ぼす可能性も地上部よりもはるかに高いと推察される。したがって大都市部の地下空間を有効利用するにあたっては、水害による地下空間の危険性をきちんと調べ、適切なハード・ソフトの対策を講じておく必要があろう。

大都市、地下浸水、都市水害、数値シミュレーション

¹正会員 Ph.D., 京都大学助教授 防災研究所水災害研究部門

²正会員 工博, 京都大学教授 防災研究所水災害研究部門

³学生会員, 京都大学大学院工学研究科

⁴正会員 工修, 戸田建設

水害による地下空間の危険性を考えるにあたっては、先ず実際の地下空間の浸水事例から何が起こったのかを学ぶことが重要である。同時に、何らかの方法で地下空間の浸水過程をシミュレーション解析し、考えられる危険性のある程度予測しておくことが必要となる。本報では、このような事由を考慮して、最近発生した大都市域での都市水害時の地下空間の浸水事例を整理し、その特徴を考察している。そして地下浸水の解析法として貯留槽モデルを基にした比較的簡便な数学モデルを提示し、そのモデルを大阪の梅田地下街を含む地下空間に適用した解析事例を紹介している。

2. 最近の地下空間の浸水被害事例とその特徴

2.1 最近の地下空間の浸水事例

洪水による地下空間の被害は、1982年の長崎水害や1993年の鹿児島水害で既に現れている。1982年7月に長崎市およびその周辺で発生した長崎水害は、梅雨前線豪雨の直撃をうけたものであり、市内近郊域での土砂災害が激しかったが、市内中心部でも急流小河川の出水により洪水氾濫が生じた。氾濫水はビルの地下室に流入し、電気系統などに被害を及ぼしている。また、1993年8月の鹿児島水害（8月6日に発生したため、8・6水害とも呼ばれる）では、市中心部でも甲突川などの市内河川が各所で氾濫し、氾濫水は繁華街の地下飲食店やビルの地下室にも流入した。水とともに流入した泥のために被害が増大し、地上部以上に清掃や復旧に困難をきわめた。次に近年発生した福岡市、名古屋市、韓国ソウル市での水害時の地下空間の浸水事例を順次見ていくことにする。

(a) 1999年の福岡市の地下浸水

福岡市では、1999年6月29日午前中に時間雨量77mmを含む集中豪雨に見舞われた。図-1に、福岡管区気象台で観測された降雨分布を示す。福岡市内各地での内水氾濫の発生の後、市内を流れる御笠川が増大してその一部が溢水し、外水氾濫が発生する事態となった。御笠川の氾濫水は、地盤の低いJR博多駅周辺に流下していった。溢水箇所ならびに氾濫域を図-2に示す。

JR博多駅東側の筑紫口には、駅の外に5箇所、駅構内に2箇所、福岡市営地下鉄「博多駅」に通じる地下鉄の入口がある。博多駅の筑紫口まで達した氾濫水は、これら地下鉄入口から、階段を落ちていく段落ち流れとなって改札口のフロア（B1F）に流れ込んだ。氾濫水は地下鉄ホームから地下鉄軌道にまで浸入し、レールが水をかぶったため、地下鉄は午後0時5分から午後3時45分まで博多駅～福岡空港間の運転を見合わせた。排水作業にあたっては、排水能力 $6\text{m}^3/\text{min}$ のポンプを午後3時30分まで動かし続けた。また駅構内の天井部の破損やエスカレーターのモーター部分の損傷といった被害も発生した。筑紫口では、地下鉄構内に隣接する地下1階の商店街にも、複数の階段、エスカレーターから氾濫水が流入した。天井からの漏水も加わり、商店街の一部では浸水深が25cmにも達した。また筑紫口周辺のホテルでは、地下室への浸水の影響で電気設備（空調設備、発電機など）や電話回線の故障が発生した。

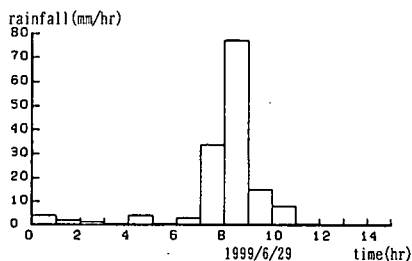


図-1 福岡の降雨分布

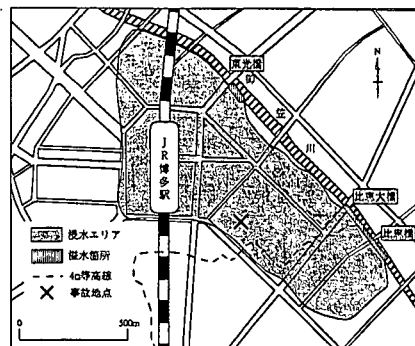


図-2 溢水箇所と氾濫域

さらに、御笠川の比恵橋～比恵大橋の溢水区間と JR 博多駅の中間に位置する博多駅東 2 丁目のビルで、地下の飲食店にいた女性従業員が、流れ込んできた氾濫水により水死した。このビルの地階全体の床面積は約 730m²、天井高は約 3m である。飲食店のとなりは駐車場となっており、スロープのある駐車場入口と地表近くに位置する通気口から短時間のうちに氾濫水が流入し、地下空間がすぐに満杯となり避難できなくなった模様である。

(b) 2000 年の名古屋市の地下浸水

2000 年 9 月 11 日午後から 12 日午前にかけて、愛知県を中心とする東海地方では、図-3 に示すように名古屋地方気象台で最大時間雨量 93mm、総雨量 567mm に達する集中豪雨が発生した。その結果、名古屋市内を流れる庄内川、庄内川の放水路の機能を有する新川、名古屋市の東部および南部を集水区にもつ天白川などにおいて大きな洪水が生じた。新川では破堤のため広い範囲で外水氾濫が発生し、天白川では雨水が排水しきれず大規模な内水氾濫が発生した。

集中豪雨の影響で、名古屋市営地下鉄の桜通線の野並駅、鶴舞線の塩釜口駅、名城線の平安通駅で、9 月 11 日午後 7 時少し前から 9 時にかけて氾濫水が地下鉄の軌道に流入し、運行に支障が生じた。図-4 に地下鉄路線図、図-5 に被害が生じた地下鉄駅の位置をそれぞれ示す。この影響で、11 日午後 8 時頃から午後 9 時 30 分頃にかけて各路線で運休区間が生じはじめ、桜通線、鶴舞線が全線復旧したのはそれぞれ、12 日午後 6 時、12 日午後 6 時 30 分、名城線が全線復旧したのはそれより 1 日経った 13 日午後 3 時で市民の足に大きな影響を与えた。

野並駅、塩釜口駅では、地上の氾濫水が駅構内に繋がる出入口から駅構内に流入し、そこを経て地下鉄軌道まで流下した。軌道上の最大浸水深は野並駅、塩釜口駅でそれぞれ 2m、1.5m に達した。軌道内の氾濫水は約 2.5m³/min の排水能力のポンプにより下水に排水された。一方、北区の平安通駅では、駅周辺で道路が冠水し、地下鉄駅出入口から氾濫水が駅構内に流入した。それにくわえて、地下鉄駅に隣接する工事現場が水没し、その水の相当量が排水口より地下鉄軌道内に流入した。また西区新川沿いの上小田井駅では、ホームが地上にあるため軌道の冠水は免れたが、新川の破堤による氾濫水の浸入により改札口の自動改札口が動かなくなった。

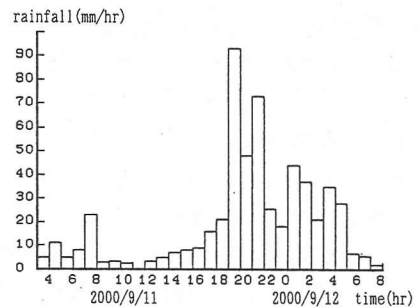


図-3 名古屋の降雨分布

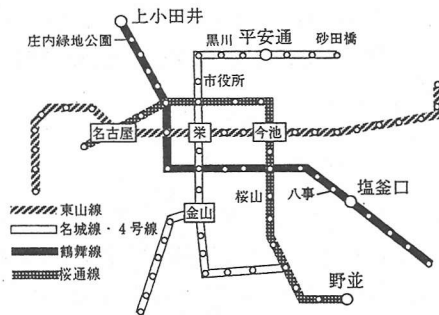


図-4 地下鉄路線図



図-5 地下鉄駅的位置

(c) 2001 年の韓国ソウル市の地下浸水

2001 年 7 月 14 日の深夜から 15 日早朝にかけて、韓国ソウル市は、発達した梅雨前線の影響で激しい集中豪雨に襲われた。ソウル市内の鐘路区気象観測所では、15 日午前 2 時から 3 時までの時間雨量 90mm を記録し、14 日午後 2 時から 24 時間雨量が 310mm に達した。降雨量の分布を図-6 に示す。

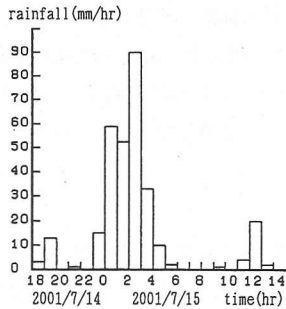


図-6 ソウルの降雨分布

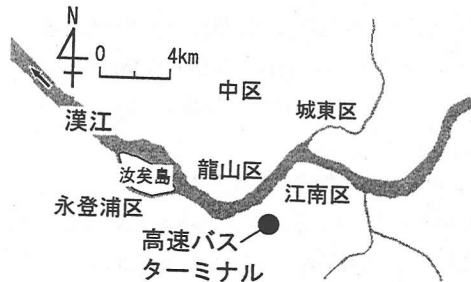


図-7 浸水した駅の位置

この豪雨により、ソウル市内のいたるところで洪水氾濫が発生した¹⁾。60,000 世帯以上が浸水被害を受けたが、その多くは住宅密集地の地下あるいは半地下タイプの住宅に住む世帯と見られている。また地下鉄駅やバスターミナルの浸水のため、公共交通機関にも多くの混乱が生じた。地下鉄 7 号線江南高速バスターミナル駅付近（図-7 参照）では、近隣のホテルの駐車場およびバスターミナルで発生した浸水の影響により、地下 1 階の駐車場や地下鉄駅に氾濫水が流入した²⁾。地下 1 階の駐車場の最大浸水深は 1.5m 程度であった。また、地下鉄駅に流入した氾濫水は地下鉄軌道にまで達し、氾濫水が滞留した軌道区間は 1.3km にわたった。バスターミナル駅の建物および地下空間に流入した総水量は約 28,000m³と推定されている。高速バスターミナル駅を含む 7 号線の一部の区間は、7 月 15 日午前 2 時から 17 日午後 6 時まで運休した。

2.2 地下浸水の特徴

(a) 浸水の拡がりの急激さ

大都市の地下浸水の特徴として、きわめて短時間のうちに地下浸水の被害が発生・拡大するということが挙げられる。福岡水害の場合、御笠川が溢しはじめたのが 1999 年 6 月 29 日午前 10 時過ぎであり、午前 10 時 30 分には JR 博多駅の構内、隣接する地下街、福岡市営地下鉄博多駅、駅周辺のビルの地下室が浸水している。またビル地下での女性従業員の死亡事故では、女性従業員が経営者に危険を知らせる電話を入れたのも午前 10 時 30 分頃である。また 2000 年の名古屋の水害時には、地下鉄の野並駅、塩釜口駅、平安通駅で、地上の氾濫水の浸入がはじまってから 20～70 分後には地下鉄が運休する事態となっている。急激な集中豪雨によって生じる内水氾濫の場合、事前の浸水予測が非常に難しい。また地上の氾濫が地下空間の近隣で発生すると、きわめて短時間で地下空間を襲うこととなり、浸水対策を講じる時間的余裕がないことが多い。

(b) 浸水被害の長期化

地下浸水のもう一つの特徴は、復旧に時間がかかり、被害が長期化することである。福岡水害の場合、JR 博多駅筑紫口周辺のホテルでは、地下にある電気設備などの故障の復旧作業が長引き、1 週間以上営業を休んだところもあった。また地下鉄軌道まで氾濫水が浸入した場合には、漏水処理のためのポンプ（福岡の場合は約 6m³/min、名古屋の場合は約 2.5m³/min の排水能力）による排水しか手だてがなく、流入総水量のわりには復旧に手間取る傾向にある。

3. 貯留槽モデルを用いた地下空間の浸水解析

福岡市の JR 博多駅周辺の地下空間のように大都市域の地下空間には立体的で複雑なものがある。そのため、そ

こでの浸水予測は地上の場合と比べて困難を伴う。これまで地上の氾濫解析手法を地下空間に適用することが試みられてきたが⁽³⁾、地形に関する資料の作成に多大な労力を要してきた。そこで今回、地形データの作成が容易で比較的簡便に実際の地下空間に適用でき、流入水の拡がりの概略を把握できる貯留槽モデルを構築した。

3.1 地下鉄空間の浸水解析

地下鉄空間へ浸入した氾濫水は、地下鉄軌道面の地盤高が低い方へと流れ落ち、窪地（下に凸）の部分から次第に溜まっていく。そして窪地に溜まった氾濫水の水位が軌道面の山（上に凸）の部分より高くなれば、氾濫水は山の部分を乗り越えて、より遠くへ拡がっていくと考えることができる。そこで、図-8 に示すように、地下鉄空間を、両端に接続穴を有する V 字型の貯留槽が一次的に連結して構成された空間と考える。そして、貯留槽間を移動する流量を求めれば、氾濫水の拡がりが表現できる。以上のような連結貯留槽モデルに、管路状態への対応を考えてスロットを組み込む。基礎式は以下に示す連続式と流量式である。

<連続式>

$$\frac{dV}{dt} = A(H) \frac{dH}{dt} = Q_{in} - Q_{out} + Q_{ins} \quad (1)$$

ここに、 V : 貯留槽内の水量、 $A(H)$: 水位 H のときの貯留槽の底面積、 Q_{in} : 隣接した貯留槽からの流入流量、 Q_{out} : 隣接した貯留槽への流出流量、 Q_{ins} : 地上など外部からの流入流量である。また A は、 H が天井高を超えたときはスロット面積 A_s となる。

<流量式>

h_{up} , h_{dn} : 穴口の地盤高を基準とした高さからの上流側、下流側の水深、 D : 穴口の高さ、 B : 穴口の横幅とすると、用いる越流公式とオリフィスの流量式は以下のとおりである。（図-9 参照）

(1) $D \geq h_{up} \geq 0$ のとき、

$$Q = \mu B h_{up} \sqrt{2g h_{up}} \quad , h_{dn}/h_{up} < 2/3 \quad (2)$$

$$Q = \mu' B h_{dn} \sqrt{2g(h_{up} - h_{dn})} \quad , h_{dn}/h_{up} \geq 2/3 \quad (3)$$

ここに μ , μ' は流量係数である。

(2) $h_{up} > D$ のとき、

$$Q = C' B D \sqrt{2g(h_{up} - h_{dn})} \quad , h_{dn} \geq D \quad (4)$$

ここに C' は流量係数である。なお、 $h_{dn} < D$ のときは、大型矩形断面オリフィスの流量式あるいは不完全潜りオリフィスの流量式を適用する。

3.2 地下街の浸水解析

地下街は、商業スペース・広場・地下鉄改札口・隣接ビルの地階などがつながって形成されている。そこで地下街を複数の領域に分割し、各領域を固有の容積を有する貯留槽と見たてれば、地下街はそれらの貯留槽が立体的に連結している空間としてとらえることができる（図-10 参照）。そして貯留槽間を移動する流量を求めること

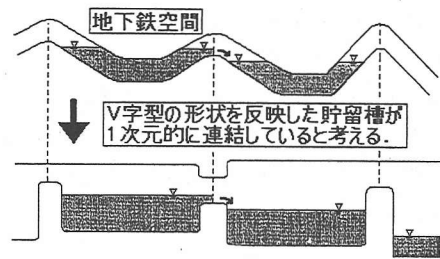


図-8 地下鉄空間の貯留槽モデル

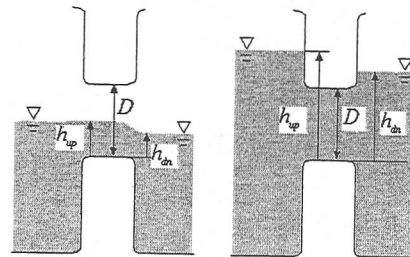


図-9 貯留槽間の流れ

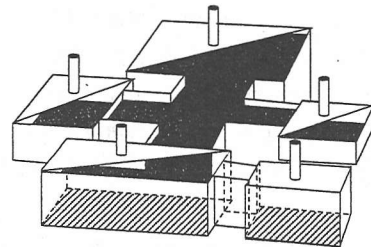


図-10 地下街の貯留槽モデル

で、地下街での浸水の拡がり表現することができよう。以上のような貯留槽モデルに、管路状態への対応を考えてスロットを組み込む。基礎式は以下のとおりである。

<連続式>

$$A \frac{dH}{dt} = \sum_{i=1}^m Q_i + Q_{in} \quad (5)$$

ここに、 A ：貯留槽の有効面積、 H ：水位、 t ：時間、 Q_i ：貯留槽が有する i 番目の界面から流入する流量、 m ：流量の出入りがおこる界面数、 Q_{in} ：外部からの（横）流入流量である。 A は貯留槽の水位が天井高を超えるとスロットの面積となる。

<運動量式>

$$\frac{L}{gA_b} \frac{dQ}{dt} = \Delta H - \alpha LQ|Q| \quad (6)$$

ここに、 ΔH ：隣接する貯留槽間の水位差、 Q ：流量、 α ：損失係数、 L ：隣接した貯留槽の図心間の距離である。また A_b は接面の断面積であり、隣接する貯留槽内の水深をもとに定める。地表から地下街への流入部、あるいは地下街が多層のところで、上層から下層へ氾濫水が落ち込む場合には、以下に示す段落ち式を用いる。

$$Q = B_e \mu_0 h_e \sqrt{gh_e} \quad (7)$$

ここに、 B_e ：流入口の有効幅、 μ_0 ：段落ち流れの流量係数、 h_e ：上層の貯留槽の水深である。なお、下層が満水状態のときは(6)式を準用する。

4. 梅田地下空間への適用

4.1 梅田地下空間

貯留槽に基づく浸水解析モデルを大阪梅田地下街およびこれに接続する地下鉄（地下鉄御堂筋線、谷町線、四つ橋線、JR東西線、阪神電鉄）に適用した。

まず、地下鉄の対象路線および区間を図-11に示す。対象区間は、地上からの引き込み口がある地点、または淀川の堤防天端高T.P.5.78mと地盤高が同じ地点までとした。これは、仮に市中で洪水氾濫が発生しても、その地盤高より高いところまでは氾濫水が拡がらないと考えたからである。対象区間をV字状の複数の貯留槽に分割した。駅の天井高、駅以外の天井高を、それぞれ一律に5.5m、5.0mと設定した。底面積全体に対するスロット面積の割合を0.02とした。図-12に解析の対象とした梅田地下街の領域、地盤高および地下鉄との接続箇所を示す。また、図-13は地下街の貯留槽モデル図である。スロットの面積の割合は地下鉄と同様とした。貯留槽毎の天井高や面積の有効率（底面積に対して実際に水が貯まる部分の面積比）は、市販の地図や現地調査の結果を基に設定した。地下街のマニングの粗度係数 n は上下層間で0.10、平面場で0.03とした。表-1に各地下空間の容積を示す。

4.2 解析結果とその考察

一定流量の氾濫水を流入箇所を変えて地下街に流入させた。地上の外水氾濫を想定して、北側に位置するNo.3,4,5,7の貯留槽に15m³/sずつ、計60m³/s流入させる場合を「ケース1」、南側に位置するNo.25,26の貯留槽に30m³/sずつ、計60m³/s流入させる場合を「ケース2」とした。計算時間ステップ Δt は0.05sを用いた。

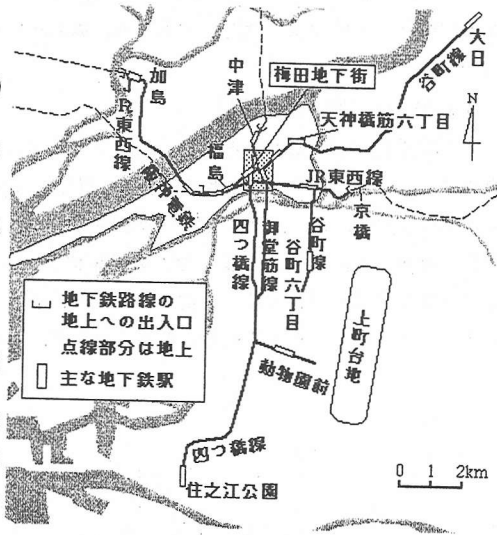


図-11 対象地下鉄路線図

表-1 各地下空間の容積

地下空間	容 積
梅田地下街	650 × 10 ³ (m ³)
御堂筋線	710
谷町線	1,192
四つ橋線	739
JR 東西線	751
阪神電鉄	102

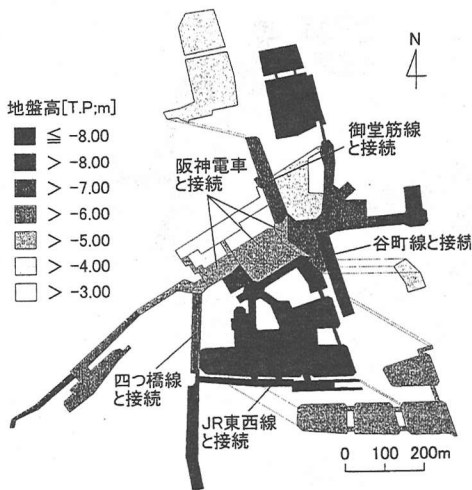


図-12 梅田地下街の概要

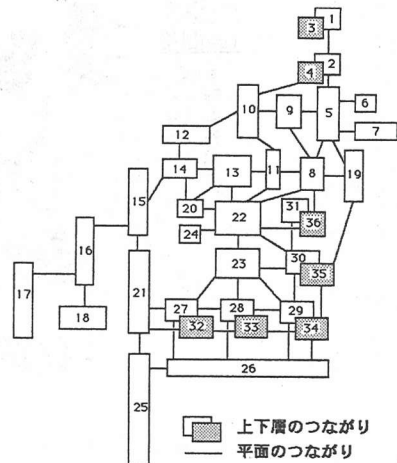


図-13 梅田地下街の貯留槽モデル

図-14、図-15 にそれぞれ、梅田地下街、地下鉄の浸水状況を示す。また図-16 に地下鉄の路線別貯留量を示す。

ケース1では、浸水開始1時間後に地下街の浸水域はディモール大阪や大阪駅前ビルにまで拡大する。その後、4時間後まで浸水域、浸水深はほぼ一定のままである。地下鉄へは、東梅田駅から谷町線へ集中的に流れ込んでおり、4時間後には東梅田駅から約10km離れた守口駅北部まで浸水区間が広がっている。一方、ケース2では、浸水域の短時間での拡がりが見られなかったケース1とは対照的に、4時間後でもディモール大阪までしか浸水は広がらない。これは図-12からも明らかのように、流入地点に近いディモール大阪や大阪駅前ビルが梅田地下街の中で最も地盤が低く、浸水域がその付近から広がらなかったためと考えられる。また地下鉄では、北新地駅からJR東西線へ集中的に流れ込んでおり、JR東西線は浸水開始4時間後ではほぼ水没している。

このように、氾濫水の流入地点によって地下街や地下鉄の浸水状況が大きく異なることがわかった。これは、地下街特有の構造とともに地下鉄の構造（地下街との連結位置と地下鉄空間の貯留容量）が地下空間全体の浸水過程に大きな影響を及ぼすからである。

5. おわりに

得られた知見を要約すると以下のとおりである。

- (1) 近年の大都市地下空間の浸水の特徴は、地上の氾濫からきわめて短時間で地下空間への氾濫水が浸入し、たいていどこに地下空間内に広がることと、地下鉄を中心に復旧に時間がかかり、被害が長期化することである。
- (2) 貯留槽に基づく地下空間の浸水解析モデルを構築して、地下鉄空間を含む大阪梅田地下街に適用した。その結果、対象とした地下街特有の構造だけでなく、連結する地下鉄の構造も浸水過程に大きな影響を及ぼし、地表からの流入箇所が変われば氾濫水の挙動も多様に変化することが明らかとなった。

参考文献

- (1) 朴崎鎬・橋本晴行・朴崎燦：2001年7月韓国ソウル地方において発生した都市水害、九州大学西部地区自然災害資料センターニュース、No.25, pp.41-43, 2001.
- (2) Jong-Tae Lee: Characteristics of Flood Disasters in Urban Areas -Concentrating on the Flood event of Seoul in July, 2001, Proc. of Workshop on the Development of Integrated Disaster Reduction Systems on Compound

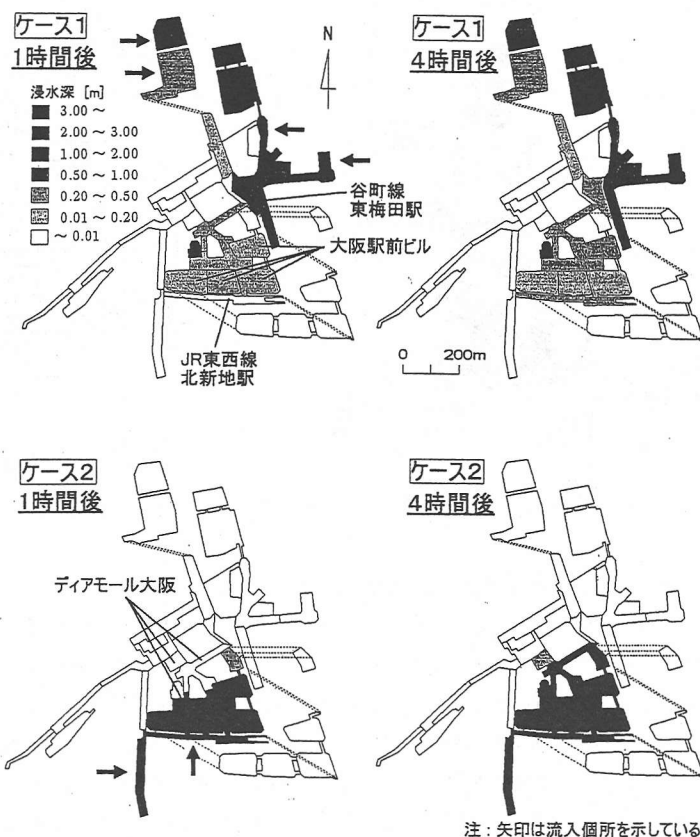


図-14 梅田地下街の浸水状況

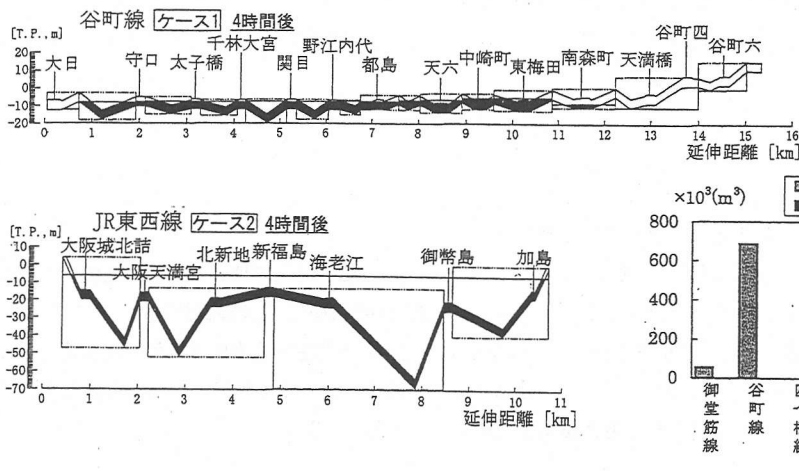


図-15 地下鉄の浸水状況

図-16 地下鉄の路線別貯留量

Urban Floodings, Kobe, Japan, (organized by Research Center for Disaster Reduction Systems, DPRI Kyoto Univ.) pp.47-52,2001.

(3) 戸田圭一・井上和也・前田修・谷野知伸：大都市の地下空間の氾濫浸水シミュレーション，地下空間シンポジウム論文・報告集，第5巻，土木学会，pp.209-216，2000.