

大都市の地下空間の氾濫浸水シミュレーション (その2)

Numerical Simulation of Overland Flood Flow Intrusion into Underground Space in Urban Area(2)

戸田圭一¹・井上和也²・栗山健作³・前田修⁴

Keiichi TODA, Kazuya INOUE, Kensaku KURIYAMA and Osamu MAEDA

This paper treats a numerical analysis of inundation flow intrusion into underground space in an urban area. The inundation flow model used here is based on the network model called "The Street Network Model" which can express spread of inundation flow along streets. In the model, the effect of underground space is also considered. This model is applied to the northern part of Osaka and the volume of inundation water flowing into each underground space is examined. The detailed inundation flow analysis in Umeda underground mall is also executed. The obtained results emphasize the danger of underground space in inundating.

「Key Words」 *street network model, inundation flow analysis, underground space, urban area, Umeda*

1. 緒言

わが国の大都市には、地下街や地下鉄など多くの地下空間を利用した都市施設が存在するが、このような大都市域で洪水氾濫が生じた場合、氾濫水が地下空間に流入し、浸水被害を増大させる危険性は高い。著者らは、都市域の水防災研究の一環として、大阪市北部の「梅田地下街」を対象として外水氾濫時の氾濫水の地下への拡がり方をシミュレーション解析しており、その成果の一部は前報¹⁾で報告している。

都市の中心部で洪水氾濫が生じると、氾濫水は建造物にしゃ断され、かつ街路を伝って流れることが予想される。前報の解析では、地上部の氾濫解析をデカルト座標系で行っており、氾濫水が街路網や建造物の影響を受けることを考慮できていなかった。また前報では、地下空間は梅田地下街だけを取り扱い、地下鉄や地下駐車場は考慮していなかった。対象としている大阪市北部の地域内には多くの地下鉄路線が走っており、また地下鉄、地下街、地下駐車場も互いに連絡しており、梅田地下街だけを抽出して解析を行うのは現実的でないと考えられる。

以上の点を踏まえて、今回の氾濫解析では、街路網に沿って流れると考えられる、市街地の氾濫水の挙動を適切に表現できる街路ネットワークモデル²⁾を導入し、地上の氾濫水が流入する地下空間については、その容積および位置関係を考慮している。これにより、各地下空間に流入する氾濫浸水量の変化を詳しくとらえている。また、上で述べた解析で得られた結果を境界条件として用いる梅田地下街内の氾濫解析もあわせて実施している。

「キーワード」 街路ネットワークモデル, 氾濫解析, 地下空間, 都市域, 梅田

- 1 正会員 Ph.D. 京都大学助教授 防災研究所
- 2 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
- 3 学生員 京都大学大学院
- 4 正会員 工修 東京電力株式会社

2. 街路および地下空間を考慮した氾濫解析

2-1 解析の概要

ここで用いた氾濫解析の流れを図-1に示す。まず、淀川の洪水解析を特性曲線法を用いた一次元解析法により行う。淀川左岸で破堤が生じると仮定し、越流公式³⁾を用いて氾濫原である市街地へ氾濫水を流入させ、地上部の氾濫解析に接続させる。地上部の氾濫解析には後述する街路ネットワークモデルを用いる。氾濫水は階段など地上部から地下に連絡する箇所に達すると地下空間に流入するが、その流入量は段落ち式⁴⁾を用いて算出する。また各地下空間はそれぞれ固有の容積をもつ槽とみなし、その容量まで氾濫水は流入するものとする。

2-2 街路ネットワークモデル

市街地の街路では、横断面の高低差が無視できるとし、さらに一つの街路では街路幅が一定であると考えれば、氾濫水は街路と平行な方向へ一次的に流れると考えられる。さらに街路が網状に構成されていることを考慮すれば、道路をリンク、交差点をノード、それ以外の領域を住区と定義して、市街地は図-2のようにリンク・ノード・住区からなるネットワークを形成すると考えることができる。

次に、実際の地形をモデル化し、リンク内部、リンクとノード、リンクと住区の流れに一次元解析を適用する。また、リンクは一つの街路をさらにいくつかの格子に分割する。一つのリンク内でリンク幅を一定に保てば、リンクにおいて以下に示す一次元の不定流計算と同様の式を用いることができる。

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = \frac{q_m}{B} \quad (1)$$

ここに、 h ：水深、 u ：流速、 M ：流量フラックスで、 $M = uh$ 、 H ：水位、 n ：Manningの粗度係数、 q_m ：(住区からの)横流入流量、 B ：リンク幅である。

リンクの端点であるノードとの間の流れ、およびリンクに並行する住区との間の流れについては、運動量式として(2)式の左辺第2項である、移流項を省略した次の式を用いる。

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - gn^2 \frac{M|M|}{h^{7/3}} \quad (3)$$

次にノードと住区の連続式は、それらに出入りする流量より以下のように表現される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^m Q_i \quad (4)$$

ここに、 A ：ノードまたは住区の面積、 Q_i ：ノードまたは住区の周を構成する格子辺からの流入流量、 m ：格子を構成する辺の数である。なお、解析手法の詳細は文献(2)を参照されたい。

3. 大阪市北部への適用

3-1 計算領域

図-3に解析の対象とした淀川および地上部の領域を示す。淀川では、河口より26km上流の枚方を上流端、

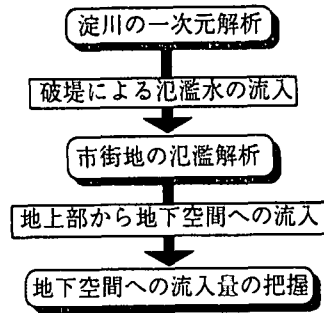


図-1 氾濫解析の流れ図

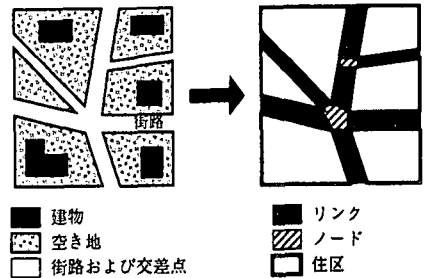


図-2 街路ネットワーク

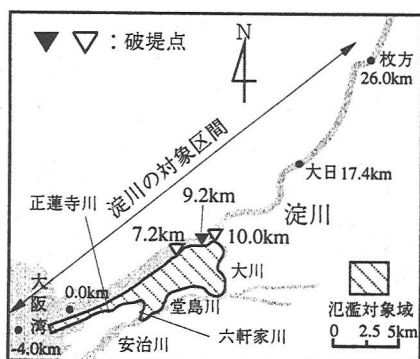


図-3 対象領域図

河口より 4km 下流の地点（-4.0km 地点）を下流端と設定した。河口から -4.0km 地点までは河口の断面をそのまま延長している。破堤点については、氾濫水が梅田へ到達して地下街に流入することを念頭におき、予備検討結果から図-3 中の▼の地点（河口より 9.2km 地点）を選定した。また破堤点の変化が氾濫水の地下空間への流入にどのような影響を及ぼすかを検討するため、さらに▽の地点（河口より 7.2km, 10.0km 地点の 2 カ所）を破堤点として追加した。地上部の対象領域は淀川左岸と、大川、堂島川、安治川、六軒家川、正蓮寺川の右岸に囲まれた約 15km² の領域である。対象領域を街路ネットワーク化したものが図-4 である。図-4 には地盤高および破堤点も併せて示している。

図-5 に梅田地下街、地下鉄路線など、今回の解析で対象とした地下空間を示す。また、地下空間相互の位置関係は図-6 に示すとおりであり、梅田地下街はその下層に位置する地下鉄御堂筋線、谷町線、四つ橋線、JR 東西線、阪神電鉄、大阪駅前駐車場と連絡している。

地下鉄の容積は、各路線の地下区間の断面積および延長距離の資料をもとに、断面積に延長距離を乗じて算出した。また、梅田地下街および地下駐車場の容積は、天井高を 3m と仮定し、これに床面積を乗じて算出した。各地下空間の容積は表-1 のとおりである。

3.2 計算条件

淀川をピーク流量 12,000m³/s（計画洪水流量）の洪水が流下し、破堤点での水位が計画高水位に達したときに破堤が生じるものとした。破堤条件は、破堤幅 374m、破

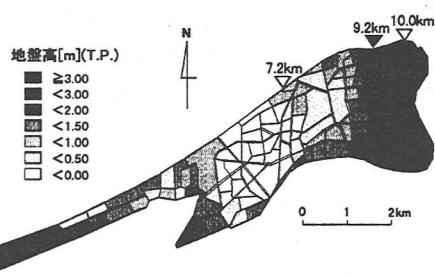


図-4 ネットワークおよび地盤高

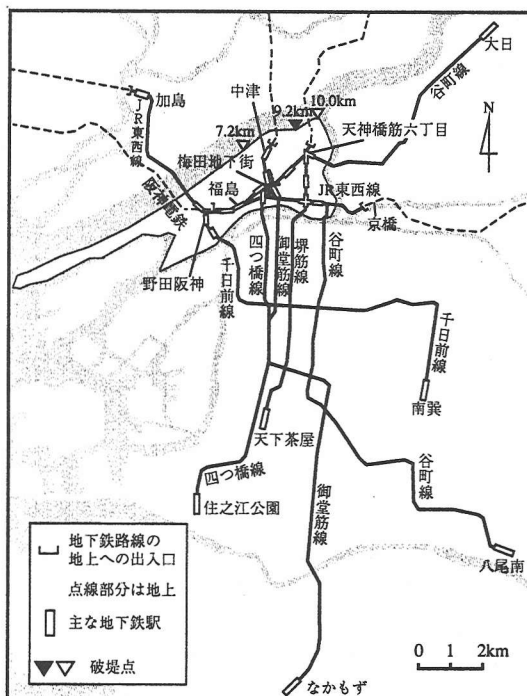


図-5 対象とした地下空間

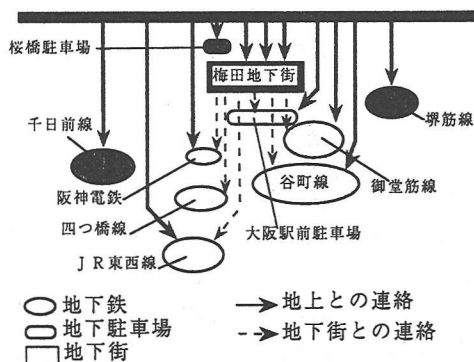


図-6 地下空間の位置関係図

堤敷高は破堤点での堤内地盤高と設定した。なお、堤防は5分間かけて上記の最大破堤条件に至るものとし、破堤幅および破堤高さは時間に比例して進行するものとした。淀川の洪水解析では $\Delta t = 0.05$ 秒、 $\Delta x = 400\text{m}$ 、Manningの粗度係数 n は $n = 0.03$ を用いた。

地上から地下空間へ流入する流量は、地下へ流入する箇所を含む格子において段落ち式により算出した。梅田地下街では地表からの氾濫水の流入と同時にその下層に位置する地下空間への流出が起こるが、ここでは下層の地下空間がその貯留量の限界に至るまで流出は継続し、その間、梅田地下街で氾濫水の貯留はないものと仮定した。地上部の計算では $\Delta t = 0.05$ 秒、リンクの分割格子長は $\Delta x_l = 50\text{m}$ 程度になるように設定した。 n はリンクおよびノードでは $n = 0.043$ 、住区では $n = 0.067$ を用いた。

3-3 結果および考察

まず、破堤点が河口より9.2kmの位置にある場合をとりあげ、氾濫水が対象領域内でどのように拡がるかを見てみた。図-7は破堤後1時間および2時間経過時の地上部の浸水状況を示したものである。梅田より東側の地盤が比較的高いため、氾濫水の大部分が地盤の低い西および南西方向に向かって流下する。氾濫水は地下空間への流入口に達すると、地下へ流入する。図-8は破堤後2時間経過時の各地下空間の浸水量の分布を示したものである。図中の各地下空間の大きさは、実際の各地下空間の容積と対応している。流入口の位置およびその地盤高の影響により、各地下空間の浸水状況に差が生じている。

破堤点から市街地へ流入する氾濫水の流量の時間変化および対象としたすべての地下空間への流入流量の時間変化を図-9に示す。図より市街地への流入流量は破堤後3時間まで約 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ でほぼ一定である。一方、地下への流入流量は破堤後2時間30分の時刻に約 $1,300\text{m}^3/\text{s}$ の最大値を示した後急減し、破堤後3時間ではほとんど流入しなくなる。これは図-10に示すように、その時刻には大部分の地下空間が満杯となり、かつ余裕のある地下空間への流入口には地上の氾濫水が存在しない状態になったためである。

次に破堤点の位置によって地下空間の浸水状況がどのように変化するかを見てみた。破堤点異なる3ケースの地下空間への流入流量の時間変化を比較して示したものが図-11である。破堤点の位置により計画高水位や堤内地盤高が異なるため破堤条件も変化し、河川から市街地への流入流量も変化する。また破堤点が変われば当然のことながら氾濫水の拡がり方にも差違が生じ、地下空間への氾濫水の流入量も変化してくる。図-12は、5つの地下鉄路線における破堤後2時間経過時の浸水量である。対象領域内の東縁、西縁に位置する堺筋線、千日前線では破堤点により浸水量が大きく変化していることがわかる。その他の路線でも程度の差はあるが浸水量の変化が見られ、大都市の中心部に位置する地下空間への氾濫浸水現象の複雑さが窺える。

表-1 地下空間容積

地下空間名称	容積 $\times 10^3 [\text{m}^3]$
千日前線（野田阪神～南巽）	1030
四つ橋線（西梅田～住之江公園）	740
御堂筋線（中津付近～なかもず）	1270
谷町線（大日～八尾南）	2060
堺筋線（天神橋筋六～天下茶屋）	680
JR東西線（加島付近～京橋付近）	750
阪神電車（阪神梅田～福島付近）	110
大阪駅前駐車場	270
桜橋駐車場	30
梅田地下街	800
計	7740

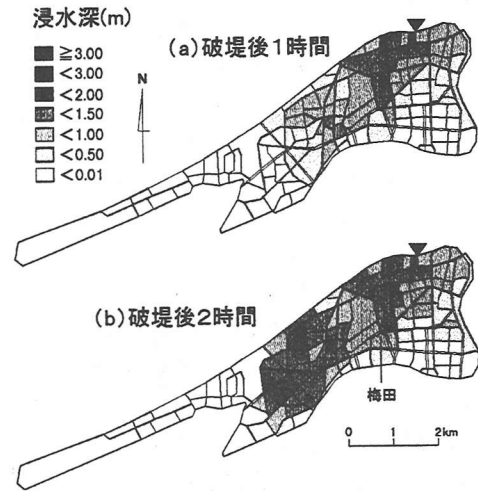
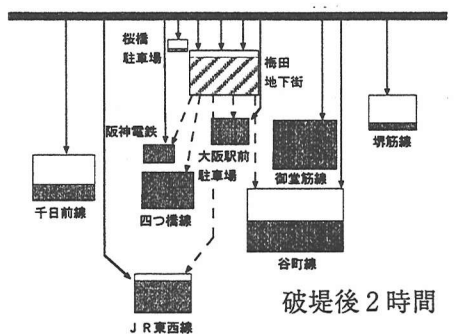
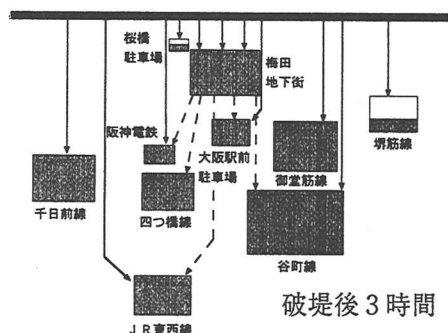


図-7 地上部の浸水状況



注；図形の大きさは空間の容積に対応している
図-8 地下空間の浸水状況 (破堤後 2 時間)



注；図形の大きさは空間の容積に対応している
図-10 地下空間の浸水状況 (破堤後 3 時間)

4. 梅田地下街内の浸水解析

4-1 今回の解析の概要

図-13 に示すように梅田地下街を複数の平面で構成される場としてとらえ、各平面において一次元の水路ネットワークに基づく解析を行った。地下街のネットワークを図-14 に示す。ハワイティ梅田、ディアモール大阪、大阪駅前ビル地下 2 階、堂島地下街は一つの平面上に存在するとみなしているが、地下街の地盤高は大阪駅前ビル地下 2 階が最も低くなっている。解析モデルには、浸水が天井に達することも考慮して開水路・管路共存状態を扱えるスロットモデルを組み込んでいる。解析モデルは前報¹⁾と同様であるが、今回の解析の前報との違いは、対象領域に大阪駅前ビルの地下 1 階、ハービス大阪への地下通路および地下街と連絡する地下駐車場を追加したこと、および第 3 章で得られた解析結果を、梅田地下街に関わる流入・流出の境界条件として用いたことである。その他の計算条件は前報と同様である。

4-2 計算結果

図-15 に浸水状況の時間変化を示す。氾濫水は破堤点に近い地下街北側から流入し始め、地下街全体へと浸水は広がっていくことがわかる。このような氾濫水の広がり方は、前報で示したものと同様である。破堤後 30 分経過すると、一部で浸水深が天井高である 3m に達している。さらに、破堤後 50 分で大阪駅前ビルの地下

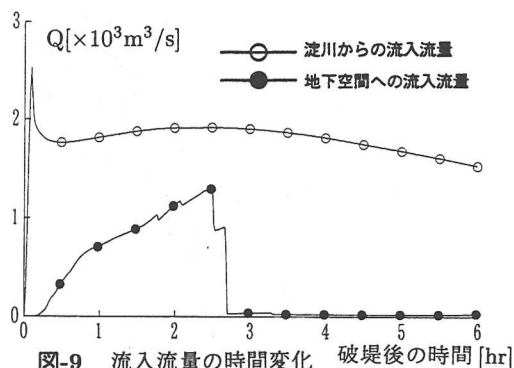


図-9 流入流量の時間変化 破堤後の時間 [hr]

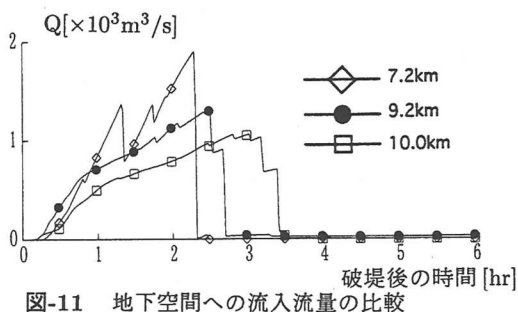


図-11 地下空間への流入流量の比較

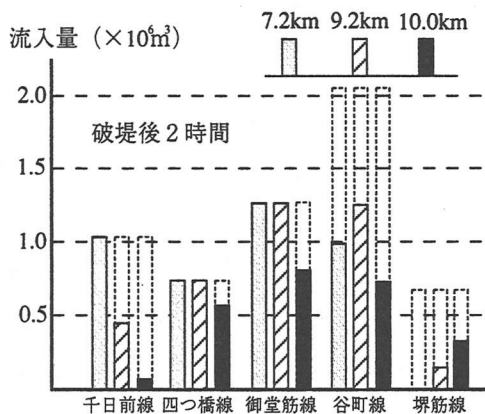


図-12 地下空間の浸水状況の比較

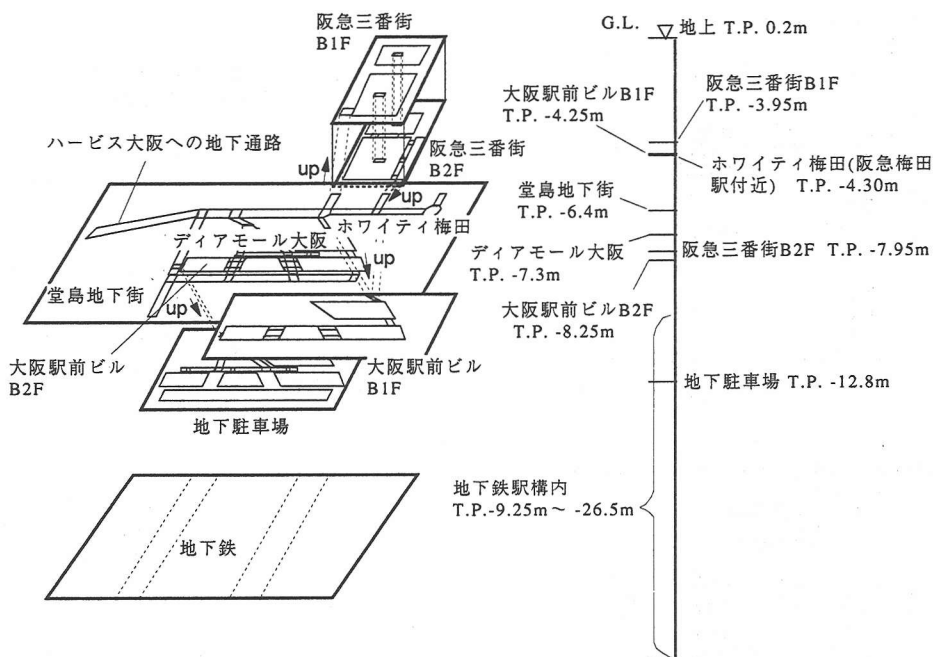


図-13 梅田地下街の構造

1 階および堂島地下街を除く地下街のほとんどで浸水深が 0.5m 以上となる。大阪駅前ビルの地下 1 階および堂島地下街の浸水深が小さいのは、両地下街に連絡している大阪駅前ビル地下 2 階付近に多くの地下鉄連絡口があり、そこから氾濫水が流出していく影響が大きいためと考えられる。浸水深が 0.5m に達すると、人間が避難行動をとるのは困難と考えられる。図-16 は地下街の全床面積に占める浸水深 0.5m 以上の面積の割合を示すパラメータの時間変化を表したものであるが、破堤後 30 分を過ぎると、地下街全体で急激に浸水が進む傾向が読みとれる。このように、地下街は浸水深が短時間のうちに増大する傾向があり、その構造の複雑さも手伝って、地上部以上に避難行動をとるのが難しい。

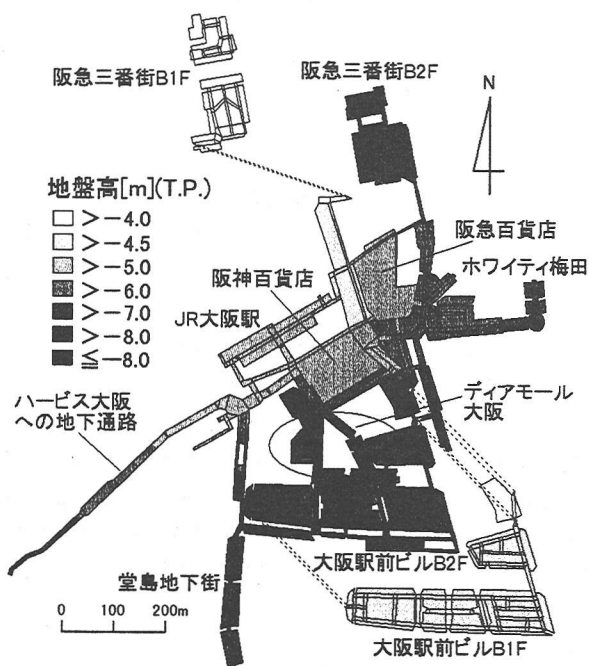


図-14 梅田地下街のネットワーク

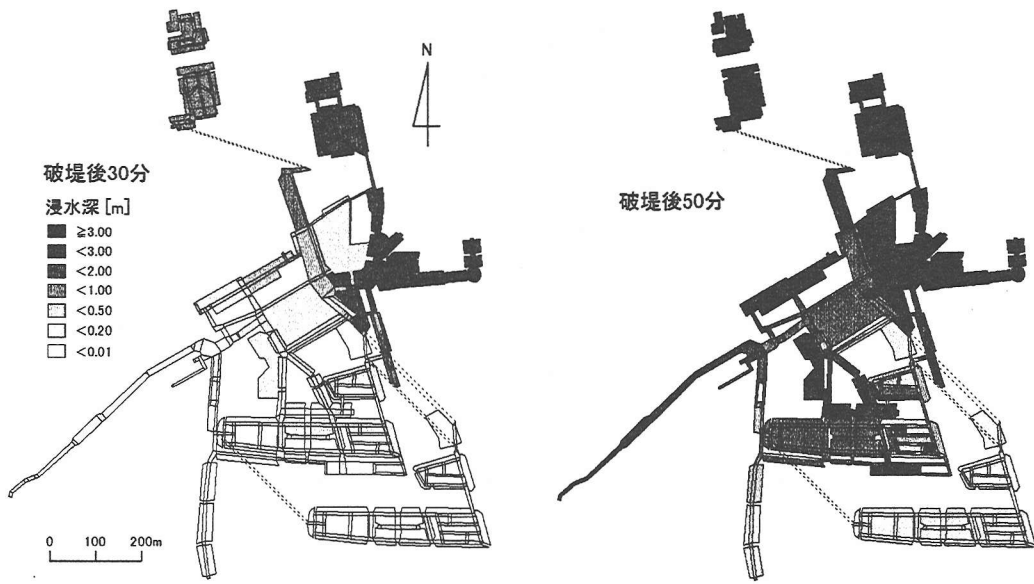


図-15 梅田地下街の浸水状況

5. 結言

都市域の氾濫解析法の高度化を図り、氾濫水の挙動ならびに地下空間への浸水過程を詳細に把握することができた。各地下空間への浸水量の分布は、破堤点の変化により大きく変化した。また梅田地下街の浸水解析結果は、地下街の洪水氾濫に対する危険性をあらためて強調する結果となった。今後は、近年頻発する豪雨による内水氾濫を想定した解析も進めていく必要がある。

謝辞：本研究を進めるにあたり、資料をご提供いただきました関係各位の皆様方に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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B2-2，pp.209-216，1999.
- 2) 井上和也，戸田圭一，林秀樹，川池健司，坂井広正：市街地における氾濫解析モデルの考察，京都大学防災研究所年報第41号B-2，pp.299-311，1998.
- 3) 土木学会編：水理公式集，昭和46年改訂版，p.265，1971.
- 4) 高橋保，中川一，野村出：洪水氾濫に伴う地下街浸水シミュレーション，京都大学防災研究所年報第33号B-2，pp.427-442，1990.

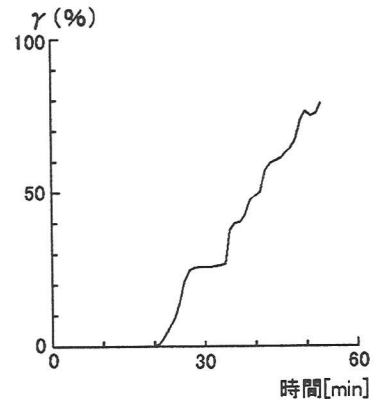


図-16 浸水域の拡がり