

地下空間への氾濫浸水の解析

Analysis of Overland Flood Flow Intrusion into Underground Space

井上和也¹・中川 一²・戸田圭一³・溝田敏夫⁴

Kazuya INOUE, Hajime NAKAGAWA, Keiichi TODA and Toshio MIZOTA

This paper treats a numerical analysis of overland flood flow intrusion into underground space in urban area. A horizontally two-dimensional mathematical model to express inundation flow in underground space linked with overland flood flows by both storm surge and river bank collapse is developed and applied to Doujima underground market in Osaka city. The results show that the flooded water flows into underground space from several stairs immediately and it is submerged in only about 10 minutes. The effects of flash-board of stairs entrance and draining pumps are also discussed.

keywords : inundation flow, underground space, numerical simulation

1. 緒 言

わが国の大都市は河川河口部の沖積地である沿岸域に位置することが多い。したがって必然的に、洪水、高潮などによる外水氾濫や、高堤防の輪中形成による内水氾濫などの危険性が高い。また、大都市には地下空間を利用した施設が多数存在する。よって、このような都市域において、ひとたび氾濫が生じれば、その氾濫は地上部のみならず、地下空間へも広がるのが危惧される。本報は、人口、資産、情報などが集中している大都市部の水害問題の研究の一つとして、大規模な高潮と洪水が重疊した場合を想定し、地下空間における氾濫水の拡がりについて水理学的な解析を試みたものである。解析結果は、地下空間における氾濫の被害予測、浸水防御策、予・警報や避難誘導システム、復旧対策などに対して、基礎的かつ有用な情報を与えるものと考えられる。

2. 対象とした地下街とその浸水対策の現状

2. 1 対象地下街

本研究の対象としたのは大阪市北区の堂島地下街である。ここは大阪の北の中心地梅田の南に位置し、

¹正会員 工博、京都大学教授 防災研究所水災害研究部門

²正会員 工博、京都大学助教授 防災研究所水災害研究部門

³正会員 Ph.D.、京都大学助教授 防災研究所水災害研究部門

⁴ J R九州施設部

南北約 250m の細長い地下街である。堂島地下街の位置を図-1,2 に、計算の対象とした地下街の領域を図-3 に示す。この地下街を対象地点として選定した理由は、

- ① 大阪市北の繁華街の一部に属し、都市の水防災の観点から見て重要な地域に含まれていること、
- ② 台風と洪水の重畳災害が発生した際に浸水の危険性が高い地域であること、
- ③ 形状が長方形で比較的単純であり、地下街のモデル化が容易であること、

による。この地下街は地下 2 階の構造となっており、地下 1 階は約 70 店の店舗が配置された商店街であり、地下 2 階はポンプ室や非常用発電機室など設備室になっている。また、地下街と地上との接続部は、地上連絡口が 9 箇所、近辺のビル接続口が 4 箇所ある。この他、北端が地下鉄西梅田駅の南端に接続している。

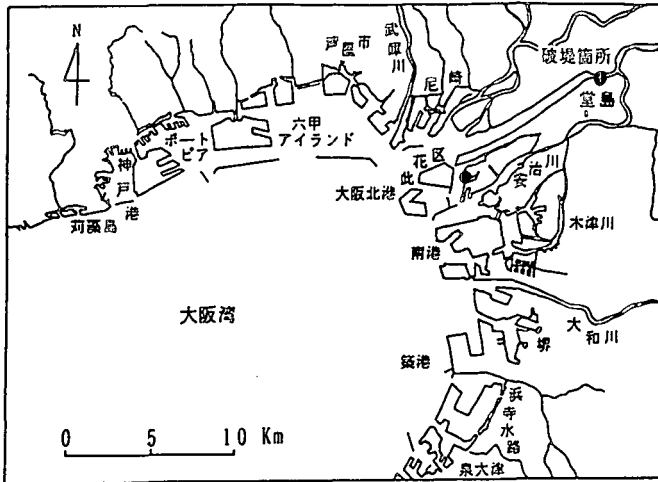


図-1 対象地下街の位置 (1)

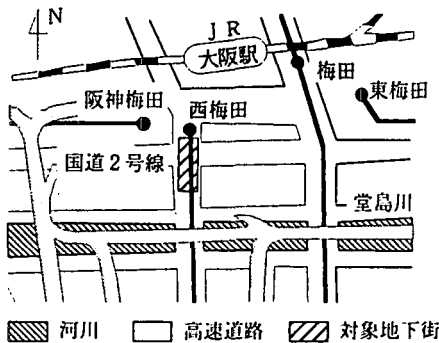


図-2 対象地下街の位置 (2)

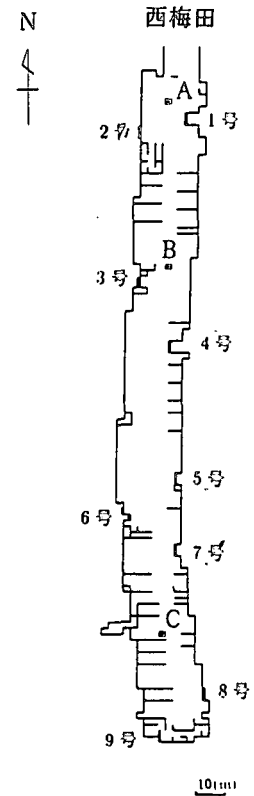


図-3 対象地下街

2. 2 地下街における浸水対策の現状

地下への連絡路の階段のうち、地上からの氾濫水の浸入箇所となる階段(歩道上に独立して存在するタイプのもの)は、入口に 1m 程度の増水には耐えられる止水板が設置できるようになっている。また、階段はいずれもその入口が周囲より 10 数 cm 高くなっており、その前面の水深が大きくなければ地下へは浸水しない構造となっているが、洪水氾濫が大規模で水深が増大した場合は、階段部から浸入が起これるとみなすことができる。

水災害の被害の抑制法について言及すると、ハード面としては排水ポンプが 5 箇所を設置されており、

それらは大阪市の下水道へ直接放流するようになっており、その処理能力は全部で約 $10\text{m}^3/\text{min}$ である。またソフト面としては、災害の発生が予想されるときに、土のう積み作業や非常時の排水準備などが分担して行われる体制となっている。

3. 数値解析法

3. 1 基礎方程式

ここでは、地上における洪水・高潮氾濫と、氾濫水の地下街への流入と流動の解析を同時に取り扱う。すなわち、湾域部の都市の地上部と地下空間への浸水に対して同一の基礎方程式を適用し、適切な初期条件・境界条件を与えることにより、それらを同時に並行して解析する。なお、高潮の計算については、参考文献¹⁾に準じる。

地上および地下空間における浸水を解析する数値モデルには、いずれも以下の浅水方程式を用いる。ただし、ここでは、粘性項および水表面におけるせん断応力項は無視されている。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(Z_b + h)}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(Z_b + h)}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} \quad (3)$$

ここに h : 水深, u, v : それぞれ x, y 方向の流速, M, N : それぞれ x, y 方向の流量フラックスで、 $M = uh, N = vh, Z_b$: 基準水平面から路床までの距離, ρ_w : 水の密度, τ_{bx}, τ_{by} : それぞれ x, y 方向の水底面でのせん断応力, g : 重力加速度である。運動方程式中のせん断応力は、Manning の抵抗則を用いて次式で評価する。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}, \quad \tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (4)$$

ここに、 n : Manning の粗度係数である。ただし、地上部の、地下への階段部を含む計算格子においては、地下空間へ浸水する流量 Q を考慮して (1) の連続式を次の式で評価する。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = -\frac{Q}{\Delta x \Delta y} \quad (5)$$

ここに、 $\Delta x, \Delta y$: それぞれ x, y 方向の地上部における格子の大きさである。なお差分法の詳細は既往文献¹⁾に譲ることとする。

3. 2 計算領域の設定とその接続

数値計算を進めるにあたり重要な問題は、計算領域の設定と、異なったスケールの計算領域の接続である。台風の影響による高潮の計算、大阪市内の氾濫計算、および対象とする地下街への氾濫水の流入・流動の計算と、流れの形態ならびにスケールの異なる現象を同時に取り扱う必要があるため、同一の計算格子を用いて計算を実施することは、計算時間・計算容量とも膨大となり極めて効率が悪い。よってここでは計算領域を地上3種類(広領域、狭領域、地上部)と地下部の合計4種類に分けて設定し、それぞれの計算格子の大きさを変化させて取り扱っている。

まず、高潮およびそれによる氾濫を解析するのに、開境界を外洋に設定した粗い格子の広領域において高潮の発生とその大阪市の沿岸への来襲を計算する。ここで得られた結果を、細かい格子の狭領域の境界条件として与え、湾域部および都市防潮堤周辺までの高潮解析を行う。さらに狭領域計算の結果を、

より細かい格子を用いた地上部の境界条件として与え、都市内部における高潮氾濫を解析する。最後に、地下街に関して、地上部の解析結果に従い、階段からの流入量を境界条件として与えて地下部の流れの解析を実施する。

3. 3 地上部から地下空間への流れの取り扱い

階段を通して地上から地下空間へ流入する流れは、図-4 に示すような段落ち流れとみなして解析することとする。階段の防水用ステップ(図中の黒く塗りつぶした小段)を越える水深を h_0 、階段の有効幅を B とするとき、地下空間への流入水量 Q は次式で求められる。

$$Q = B\mu h_0 \sqrt{gh_0} \quad (6)$$

ここに μ は段落ち流れの流量係数であり、高橋らの実験²⁾によると $\mu=0.8 \sim 1.0$ とされており、今回の解析では $\mu=1.0$ を用いることとする。階段の有効幅については、一つの格子内に複数の階段がある場合、あるいは浸水深が増加した際にはステップ方向以外の壁面の3方向も含み4面から流入する場合も考慮し、すべての場合を足しあわせて有効幅を計算する(図-5 参照)。

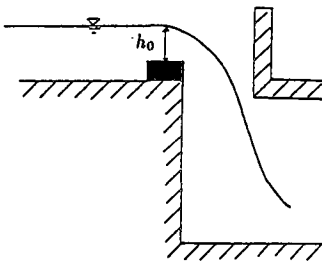


図-4 階段部の取り扱い(1)

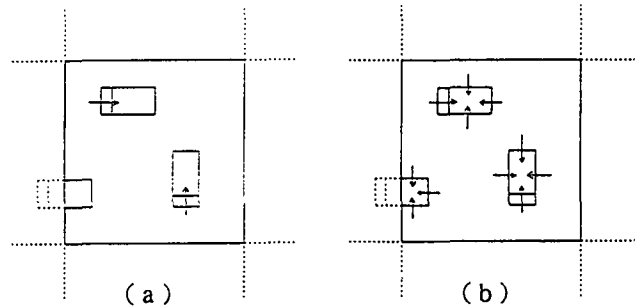


図-5 階段部の取り扱い(2)

以上のようにして求められる流量を、地下空間へ流入する流量フラックスとみなして地下部の計算の境界条件とする。なお、本報では、地下街への浸水の初期の状態把握を解析対象の中心としており、開水路状態で水が流動するものとし、管路状態および開水路と管路の共存状態は考慮していない。また、地下2階への浸水は、止水が完全に行われるとして考慮していない。

4. 数値解析結果

4. 1 計算条件

現状の大阪は、中川ら³⁾の検討にあるように、高潮氾濫に対してはほぼ安全性が確保されており、堤内地への高潮氾濫は先ず起こらないとされている。また、台風による高潮氾濫と台風の降雨による河川の洪水氾濫との間には時間的にずれがあり、2つの氾濫が同時生起するのは非常に希であると考えられている。しかしながら、高潮氾濫と河川の洪水氾濫が同時に発生する可能性もないとは言いきれず、大都市部における水災害・水防災を論じるにあたっては最悪のシナリオを想定して解析を行うこともまた重要であると考えられる。よってここでは、高潮氾濫を想定するために海岸堤防の一部を決壊させるとともに、河川の洪水氾濫も高潮氾濫に合わせて発生するとして淀川の堤防も一部決壊させるという条件を設定した。

高潮氾濫をもたらす台風としては、室戸台風のコースをたどり伊勢湾台風(中心気圧 920hPa)の規模を有する台風を設定し、高潮の最大偏差の発生時刻と大阪湾の満潮時刻とを一致させた。そして台風移動開始時刻を想定時刻 1993 年 9 月 18 日午前 3 時と設定した。また淀川には計画高水流量(12,000m³/s)の洪水が定常的に流下しているものとした。破堤条件としては、図-1 で●で示す海岸堤防と河川堤防を、台風移動開始 4 時間後(午前 7 時)に同時に決壊させるものとした。

4. 2 計算結果とその考察

(1) 止水板が設置された場合

まず地上部において、地上連絡口のすべての階段入口で浸水対策として止水板(高さ 105cm)が設置された条件のもとで解析を行った。狭領域での氾濫状況の一例を図-6、地上部および地下部の浸水状況を図-7,8 にそれぞれ示している。また図-9 には地下部での浸入水の流速ベクトル図を示している。ただし地上部、地下部の計算開始時刻は、狭領域の計算において地上部に相当する 2 つの格子に浸水が始まる時刻であり、その時刻は台風移動開始から 4 時間 25 分後の午前 7 時 25 分である。図-7 より、地上部の氾濫水は道路を通じて拡大し、約 1000 秒で領域全体に浸水が及んでいる。図-8,9 より、地下への浸水は同時に数箇所から生じていることが分かる(例えば図-9 の a,b 点)。地上の氾濫水は北東から浸入するが、地下への浸水は、止水板による閉鎖・遮へいのために止水板を越える程度にまで氾濫水深が上昇してはじめて生じ、それがほぼ領域内で同時発生することが知られる。氾濫水は階段下から地下街内部に扇状に拡がるとともに、店舗などの線状構造物や壁面によって遮られ、通路が通路となり、ここにはかなり大きな流速が生じている。また浸水開始から 10 数分(破堤後約 40 分)という比較的短時間のうちに地下街が水没する結果となっている。

このように、地上への連絡路である階段から氾濫水が流入すること、通路での流速が速いこと、ならびに短時間のうちに水没がおこることより、地下街への浸水が発生してからの避難は地上部のそれと比較して非常に危険でかつ困難を伴うことが容易に予想される。今回の解析における外力の設定条件は極端なものではあるものの、地下街の危険性を念頭に置いた浸水対策、水防体制を考えていく必要があることがわかる。

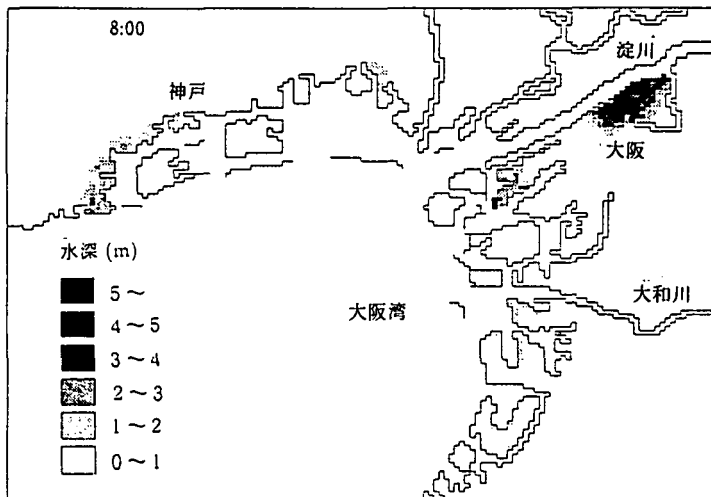


図-6 狭領域の氾濫状況

($\Delta x=286.25\text{m}$, $\Delta y=230.625\text{m}$, $\Delta t=2\text{sec}$)

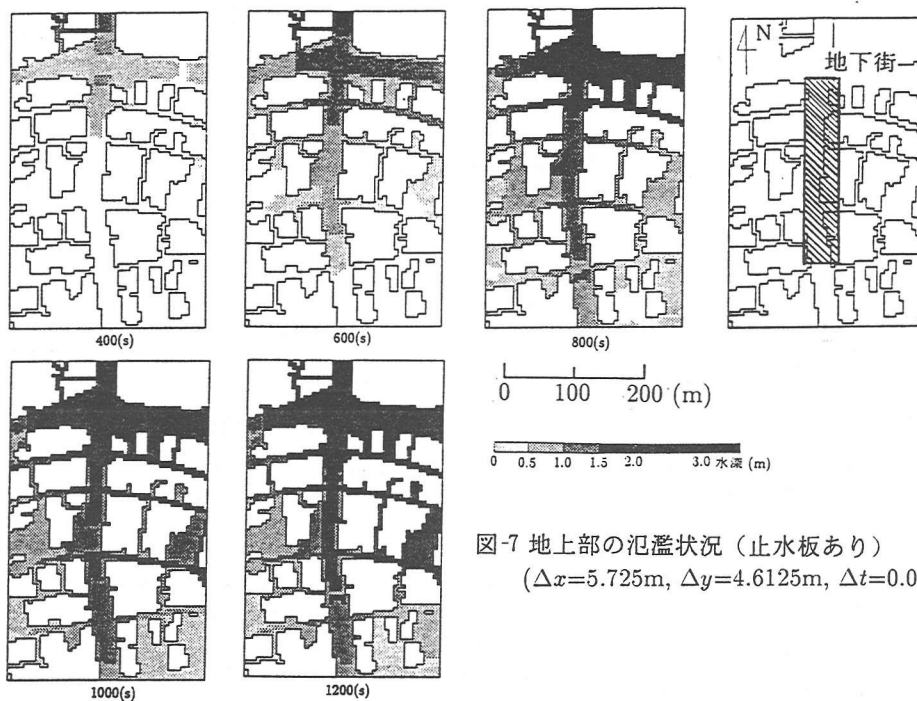


図-7 地上部の氾濫状況（止水板あり）
 $(\Delta x=5.725\text{m}, \Delta y=4.6125\text{m}, \Delta t=0.02\text{sec})$

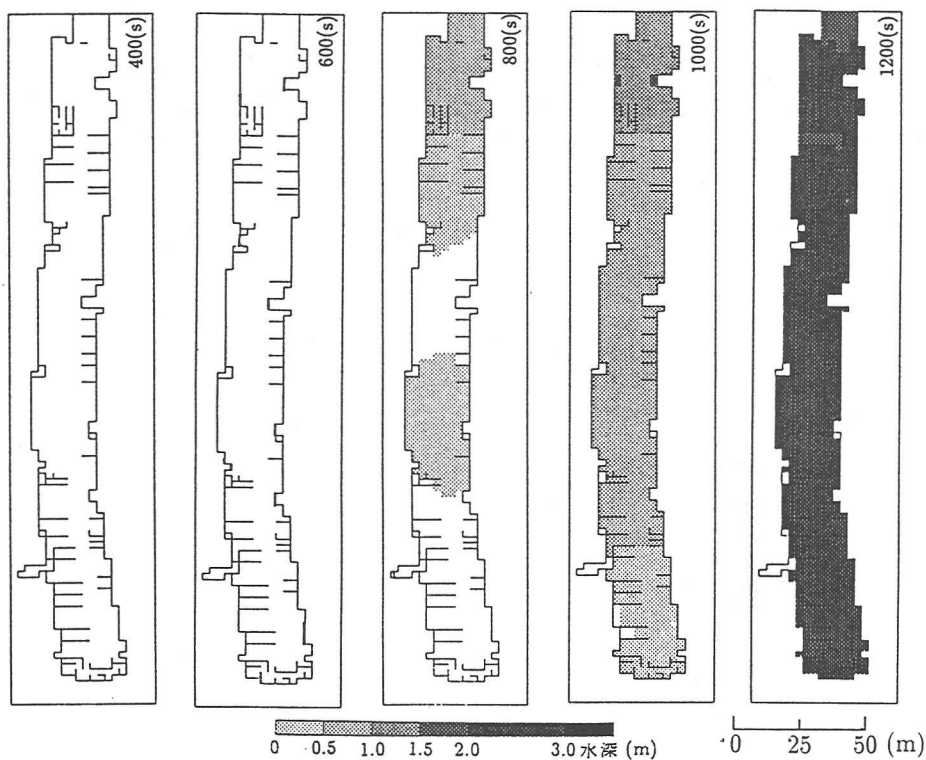


図-8 地下街の浸水状況（止水板あり）
 $(\Delta x=2.8625\text{m}, \Delta y=2.30625\text{m}, \Delta t=0.02\text{sec})$

(2) 止水板が設置されなかった場合
 上記(1)との比較の意味で、浸水対策の止水板が設置されなかった場合、地下街の氾濫状況にどのような差異が生じるかを検討してみた。図-10に地下街の浸水状況を示している。止水板を設置した場合と比較すると、地上部の僅かな氾濫により地下への浸水が生じるので、地上での氾濫状況がそのまま反映され、北の階段から順に地下への浸水が生じている。また、止水板を設置した場合よりも時間的に5分早く浸水が始まり、しかも地下街が完全に水没するまでの時間も短い。この結果から、止水板の設置が地下街の洪水氾濫の抜本的な対策ではないものの、氾濫の軽減に有効であることが再確認される。

(3) ポンプによる排水効果の検討

地下街には浸水被害の軽減策として排水ポンプが設置されている。これらのポンプ本来の目的は、洪水・高潮氾濫時の排水ではないが、どの程度の効力を有しているかを検討しておくことは防災上意義があろう。ここでは既設のポンプが最大能力で稼働(約 $10\text{m}^3/\text{min}$)するとの条件のもとで、階段部の連続式を取り扱った(5)式において、 Q から直接排水流量を差し引いた簡略的な計算を行った。図-11に、止水板を設置した場合のポンプの有無による地下の浸水深の時間変化を示している。なお、この浸水深の位置は図-3に示したA,B,Cの箇所である。

浸水流量と排水能力の差が決定的ではあるが、図より現状のポンプ施設では浸水初期に限ってその効果が現れる結果となっている。洪水・高潮氾濫による浸水対策としては現状の施設は明らかに小規模であり、非常時に備えてより有効な排水方法を考えておく必要があることが示唆される。

5. 結 言

本報では、2次元1層モデルの基礎方程式を用いて、地上での高潮・洪水氾濫と氾濫水の地下空間への侵入を同時に解析できるモデルを開発するとともに、これを大阪市内の堂島地下街に適用して高潮・洪水氾濫の浸水過程の水理特性を見ることにより地下街における浸水対策を評価した。その結果、ここで対象としたような地下空間では、浸水経路となる階段が多いわりに、すなわち浸水流入量が多いわりに地下街の容積は小さく、浸水は急速度で進行し、短時間のうちに水没するとの知見が得られた。また、浸水対策としての止水板の設置は、地下街への浸水開始時刻ならびに完全に水没するまでの時間を遅ら

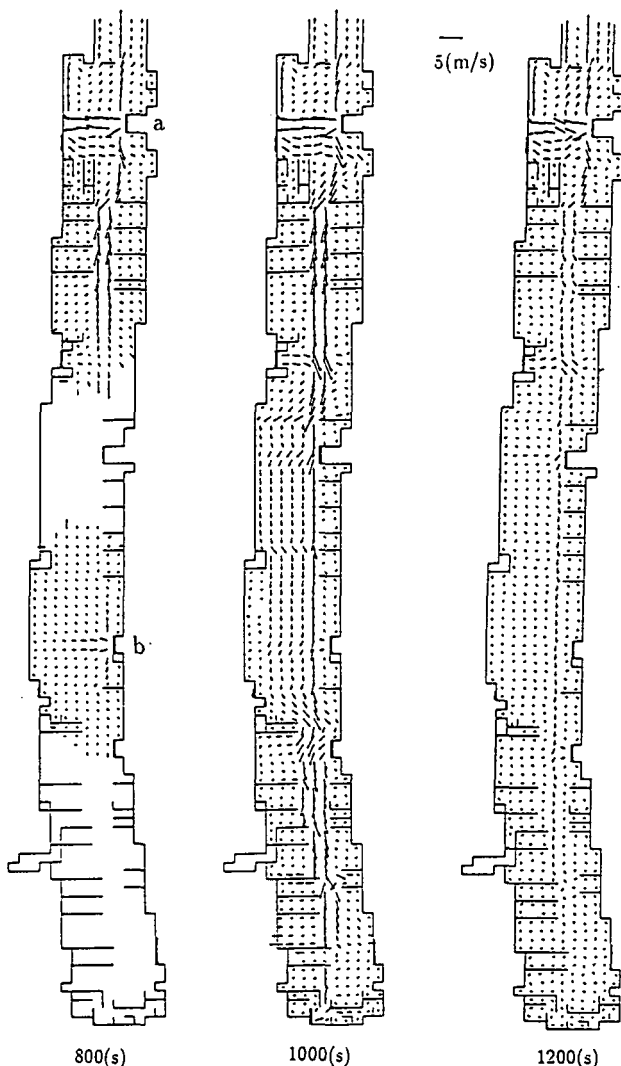


図-9 地下街の流速ベクトル(止水板あり)

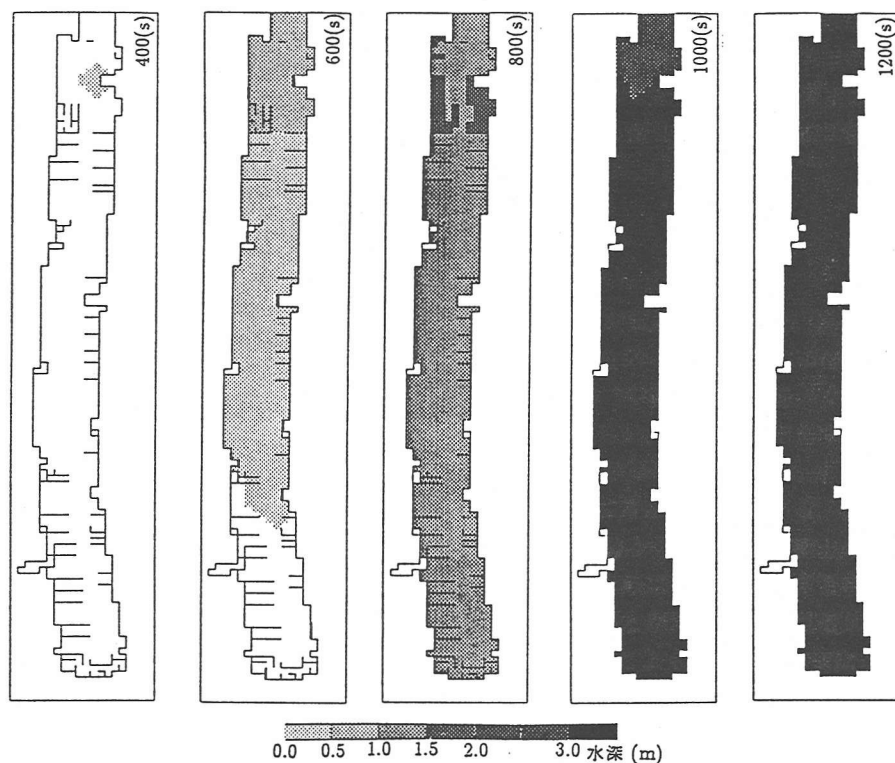


図-10 地下街の浸水状況（止水板なし）

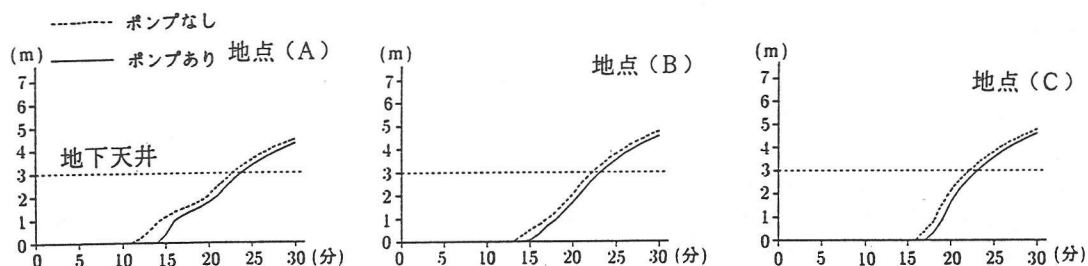


図-11 地下街の浸水深変化（止水板あり）

せる効果があることも知られた。今後の課題としては、解析の条件設定として、外水氾濫より頻度の高い内水氾濫をも考慮すること、ならびに数値解析法として、地下空間特有の管路・開水路共存状態の解析法を確立させることなどが挙げられる。

最後に図面の作成などで協力を惜しまなかった京都大学大学院生武田誠君に謝意を表します。

参考文献

- (1) 中川一：氾濫水・土石流の動態とその解析，水工学シリーズ 92-A-9，土木学会水理委員会，1992。
- (2) 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 号 B-2，pp.427-442,1990。
- (3) 中川一・井上和也・島本和仁・上塚哲彦：台風特性の感度分析による大阪湾域での高潮氾濫域の変化，水工学論文集第 39 巻，pp.453-458,1995。