

津波の市街地への氾濫と地下空間への浸水過程の シミュレーション

河田 恵昭*・石井 和**・小池 信昭***

1. はじめに

過去に起こった災害は二度と起こらないと言ってよい。常に新しい顔を見せるのが災害の特徴である。それに対し、現状の防災体制が被害のマルチシナリオを想定していないことは明らかである。例えば、2035 年前後に起こると予想される南海・東南海地震というプレート境界型地震では、阪神・淡路大震災で経験しなかった津波災害が発生する。地震津波が、太平洋沿岸部を襲い、さらには河川を遡上し、破壊された堤防から浸入する。そして、都市の中核機能を有する市街地を浸水させる、というシナリオが十分考えられる。現在、津波による氾濫シミュレーションはかなりの精度で行われるようになった。しかし、市街地においては、水災害の想定外力として内水氾濫程度しか取り扱っておらず、住民は、こういったシナリオの可能性すら疑うであろう。

また、近年、市街地において、地下空間が大規模化、複合化、深層化し、その空間に高度の都市機能を追求する傾向にある。上述したシナリオが起これば、浸水による被害規模ははかりしれない。マルチシナリオ型の被害に備えるためにも、氾濫外力の評価手法を開発しておくことが必要であり、そこでは河川遡上や市街地氾濫、地下空間浸水といった氾濫計算を一連のものとして取り扱うべきである。

そこで本研究では、水防災の立場から、南海地震を想定し、新しいモデル化を含む氾濫シミュレーションにより、津波による地下空間を含む市街地での氾濫被災シナリオを定量的に実証する。

2. 津波の氾濫シミュレーション

2.1 津波の氾濫シミュレーション手法

津波の波源域となる外海における広領域の伝播計算には、一般によく用いられるスタッガードメッシュによるリープフロッグ差分法を用いた。河川遡上等の狭領域の伝播計算と市街地の氾濫計算には、有限要素法を採用し

た。この理由については後述する。さらに、地下空間を考慮できるよう、簡便な手法として越流式と段落ち式を用いたタンクモデル（以下越流タンクモデル）を考案し適用した。計算手法をまとめると以下のとおりである。

- ・広領域津波伝播計算（リープフロッグ差分法）
- ・狭領域津波伝播計算（有限要素法）
- ・市街地氾濫計算（有限要素法）
- ・地下空間氾濫計算（越流タンクモデル）

2.2 市街地氾濫計算手法

a) 有限要素法

有限要素法に関しては、河田ら（1996）の研究に概ね従い計算を行った。基礎方程式を空間方向にはガラーキン法によって離散化し、時間方向には行列の対角項への集中化を行って陽的解法とし、2段階 Lax-Wendroff 法によって離散化している。

b) 初期条件

h_0 として地盤標高を与える。 u_0, v_0 は0とする。

c) 境界条件

計算領域の境界上では、日野の無反射境界条件を用いる。破堤口には狭領域計算から得られた河川水位を与えた。地下空間へ接続する出入口のポイントにおいては、水位と階段踏面との差から段落ち式により求めた流量を差し引いて与えた。

d) 先端条件

氾濫流の先端では、そこを横切る流れは存在しないという条件を与える。その境界の判定には、移動境界条件を用いる。

2.3 地下空間氾濫計算手法

a) 地下空間を対象とした従来の計算手法

従来の計算手法の例を以下に紹介する。

i) 1次元不定流ネットワークモデル

谷野（1998）は地下空間をノードとリンクによる管路網のネットワークとみなし、管路網計算の1次元不定流モデルで解析している。そこでは、開水路、管路の両方の状態を考慮できるように、スロットモデルを用いている。スロットモデルは、鮎川ら（1996）がその適用性を検証しており、下水道管路網などを解析する際に有効なモデルである。

* フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所巨大災害研究センター
** 正会員 工修 三菱総合研究所
*** 学生会員 工修 京都大学大学院工学研究科

ii) 等流管路網モデル

淀川の破堤氾濫を想定し、大阪市北区の地下街および地下鉄網の氾濫計算を近畿地方建設局(1998)が行った際に用いられたモデルである。管路流れを1次元の等流と仮定した手法である。

b) 越流タンクモデルの提案

避難誘導、水防活動など防災対策の観点から、氾濫計算から求めたいものは、詳細な流速等のデータではなく、時間ごとの各地下街の浸水深等であり、地下空間に水が入れば、どの場所が一番危ないのか、どこから逃げるべきか、などを示し得るものであればよい。

そこで、例としてあげた過去のモデルを十分吟味し、ある程度の簡便さを持ち、各地下街等の浸水状況を予測できるモデルをここでは提案する。

地下空間にはビルの地下階、地下街等を結ぶ通路が数多くあり、階層構造はかなり複雑である。また、氾濫流の挙動を考えるにあたり、氾濫流の流入量と地下街の面積、容量などとの関係が地下街における氾濫状況の時間変化を大きく支配するものと考えられる。また、計算の簡便さ、用いるデータの扱い易さから、タンクモデルの概念を利用するのがよいと思われる。

そもそも、タンクモデルの概念は、氾濫流の挙動を「流れ」ではなく、「貯留・浸透」と考えるものであり、各タンクの水圧からそれぞれの浸透量を求めるものである。氾濫流が地下空間に流入し、上階から下階へ水が貯留・浸透されていくという過程になれば、簡単な手法ではあるが、タンクの概念で十分解析しうるものと考えられる。

ここでは、各タンク間の移動流量を越流式・段落ち式等で表現できると仮定した「越流タンクモデル」を提案

する。概念図を図-1に示す。

c) 越流タンクモデル

i) 各地下空間を全てタンクとし、これらをネットワーク化する。ここでは、ビルの地下1階と地下2階等の階層構造は別のタンクとして取り扱う。各タンクに対し、標高、面積、天井高等の諸元を与える。地下街の通路などもタンクと考える。つまり、タンクをつなぐリンクは各接続断面もしくは地下1階と地下2階を結ぶ階段、エスカレーターで定義される。タンク間移動流量を越流式で取り扱うことから、重要なのは各リンク幅となる。リンク幅は実測値で与える。そうすれば、タンク間をつなぐリンクが複数ある場合、管路網モデルとは異なり、断面の大きさの違いによる流量への影響を考慮することができる。

ii) 段落ち式を用いて地上から各タンクへの流入量を計算する。地上からの氾濫流の流入箇所として考えられるのは、各地下街への出入口、地下鉄駅への出入口などである。各出入口における水深と階段踏面との差、階段幅から、段落ち式を用いて地下空間への流入量を計算する。

iii) 各タンク固有の $H-V$ (水深と流入量) 関係を用いて、タンクの水深を計算する。

iv) 各タンクの浸水深が天井高に達すると、本来そのタンクは管路となり、管路網解析に切り替えなければいけないが、タンクの上部にタンク断面積に対して十分小さなスロットを設置する。そうすることで、そのスロット内の流量は無視できる。ここでのスロットは、従来の管路網計算に用いられるスロットモデルとは若干異なり、リンクではなく、タンクにスロットを設定していることが特徴である。エネルギー式である越流式の h は水頭と見なせるから、スロット内の水深 h をそのまま水頭と見なせば、従来通りの自由水面を有する開水路の解析法がそのまま適用できる。

v) 越流式より、各タンク間移動流量を計算する。越流式を用いることにより、等流モデルにおいて議論の難しい等流水深や、水路勾配等を考慮せずに済む。それぞれの場合に応じて、完全越流と潜り越流を考慮する。

vi) 層構造タンクの場合、段落ち式を用いて、下階に流入させる。また、下階が下階層において別のリンクでつながっている場合、下階から上階への水の噴出が起こることがある。この噴出量は、下階のタンクにスロットを設置することにより、その水頭差から越流式を用いて求める。

2.4 有限要素法とGIS

ここで、氾濫シミュレーションとGISとの関係について考察する。

GISを用いる利点の一つに、視覚により数値データを

・ 管路網モデル (流れの解析)



・ 越流タンクモデル (貯留・浸透)

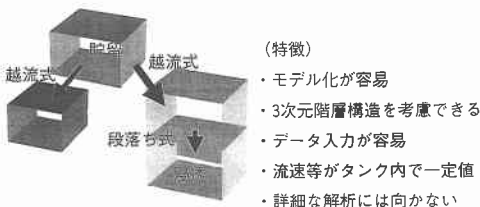


図-1 越流タンクモデル概念図

面的に捉えられるという効果が挙げられる。今回、計算を有限要素法で行った理由の一つはここにある。実際の街区などの形に合わせた有限要素法メッシュによる外力表示を、GISと組み合わせることでリアルな解析が可能になる。

例えば、総務庁統計局が提供するCMS(センサスマッピングシステム)のように、国勢調査のデータを市町村界や町丁目別のポリゴンに入力したデジタル地図が整備されてきている。これと氾濫シミュレーション結果をリンクさせれば、外力と被災人口等の関係を面的に把握することができる。このような作業はGISソフトの統計ツールにより、容易に行える。さらに、避難所までの最適避難路の選定なども、付属機能により可能である。

また、CMS等のデジタル地図を統一フォーマットで整備すれば、任意の場所における氾濫計算用メッシュデータとしても有効利用できる。そうなれば、シミュレーションを行う際の地形および地盤データ作成作業を省力化することが可能となる。

シミュレーション計算技術の向上とともに、これらシステムを進展させ、リアルタイム氾濫シミュレーション等に活かされれば、情報空白期間となる災害初期の段階に、有効な情報提供体制を築くことができる。

3. 現地市街地への適用

本章では、先述した津波氾濫シミュレーション法を、実際の市街地へ適用し、シミュレーションを行う。今回、対象とするのは大阪市北区であり、破堤口の設定地点は、堂島川右岸の渡辺橋下流側である。

3.1 大阪市北区市街地概要

大阪市北区は大阪市の中心に位置し、大阪の都市機能の中核を担う地域である。官公庁舎、オフィス、百貨店、店舗ビルなどが立ち並び、巨大な地下空間、ターミナル等を有する。通勤、通学者をはじめ、休日には買い物客、観光客等が集まる。夜間人口は約8.5万人(1995年)、昼間人口は約46万人(1990年)である。鉄道はJR西日本、大阪市営地下鉄、阪神、阪急の各駅がJR大阪駅を中心に集結している。

3.2 計算条件

M 8.4の南海地震を想定し、地震動により、堂島川右岸堤防(渡辺橋下流側)が約130m崩壊・破堤したと仮定し、H.W.L.という条件の下で、広領域、狭領域伝播計算を行った。堤防の破堤という条件は、阪神・淡路大震災時に西島付近で堤体の沈下、崩壊が見られたように、十分起こりうる現象である。

計算時間間隔は1s、計算時間は3時間とした。破堤口付近における堂島川水位変化を図-2に示す。

津波の第1波が到来し、河川水位が堤内地盤高を上

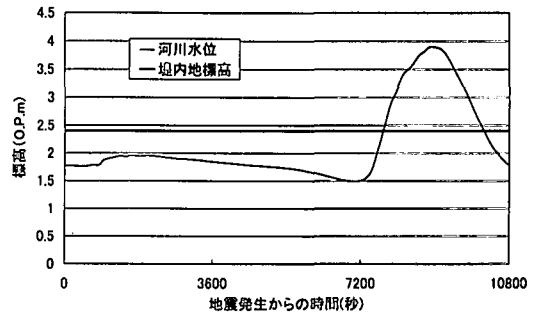


図-2 堂島川河川水位

回るのは、地震発生の2時間10分後から2時間50分後までの約40分間である。

市街地氾濫計算では、有限要素メッシュの破堤口地点にあたるポイントに、伝播計算から求めた堂島川水位を境界条件として与えた。

地形データは大阪市地形図1/2500より、デジタイザーを用いて読みとった。地盤標高は同地形図より補間して与えた。市街地氾濫の計算時間間隔は0.1sとし、計算時間は1時間とした。有限要素法で用いる集中係数は $e=0.90$ を与えた。また今回、計算領域に建物等は含めず、道路部分のみのメッシュ構成であるが、歩道部分や路上の自動車などの存在を考慮し、マンシングの粗度係数 $n=0.040$ を採用した。

3.3 計算結果

堂島川水位がピークを迎えるのは流入開始から20分後(地震発生から2時間30分後)であり、流入開始10分後から20分後の間に大きな浸水域の拡大がみられる。流入開始10分後の浸水面積は0.37km²、1時間後は1.94km²である。破堤口からの総流入量は約50.4万m³となった。破堤口幅1m当たりの市街地への流入量は、約0.4万m³となる。

3.4 大阪市北区地下空間概要

大阪市北区の地下空間は、ディアモール大阪、大阪駅前地下街、ホワイティ梅田、堂島地下街、阪急三番街の5つの大きな地下街と、地下鉄御堂筋線梅田駅、四ツ橋線西梅田駅、谷町線東梅田駅、阪神電鉄梅田駅、JR東西線北新地駅の5つの地下駅コンコースで形成され、飲食店街、ショッピングモール等で構成されている。また、百貨店などのビル地下階や地下駐車場にも連結しており、全国でも有数の巨大な地下空間を形成している。

3.5 計算条件

越流タンクモデルでは、ビルの地下階等の階層構造を考慮する。また、タンク間を結ぶリンク幅には、実測値を用いる。各地下街の床面積、リンク幅等の値は、住宅地図1/3000の地下街地形よりデジタイザーを用いて読みとった。図-3に現地地下空間のタンクモデルのネッ

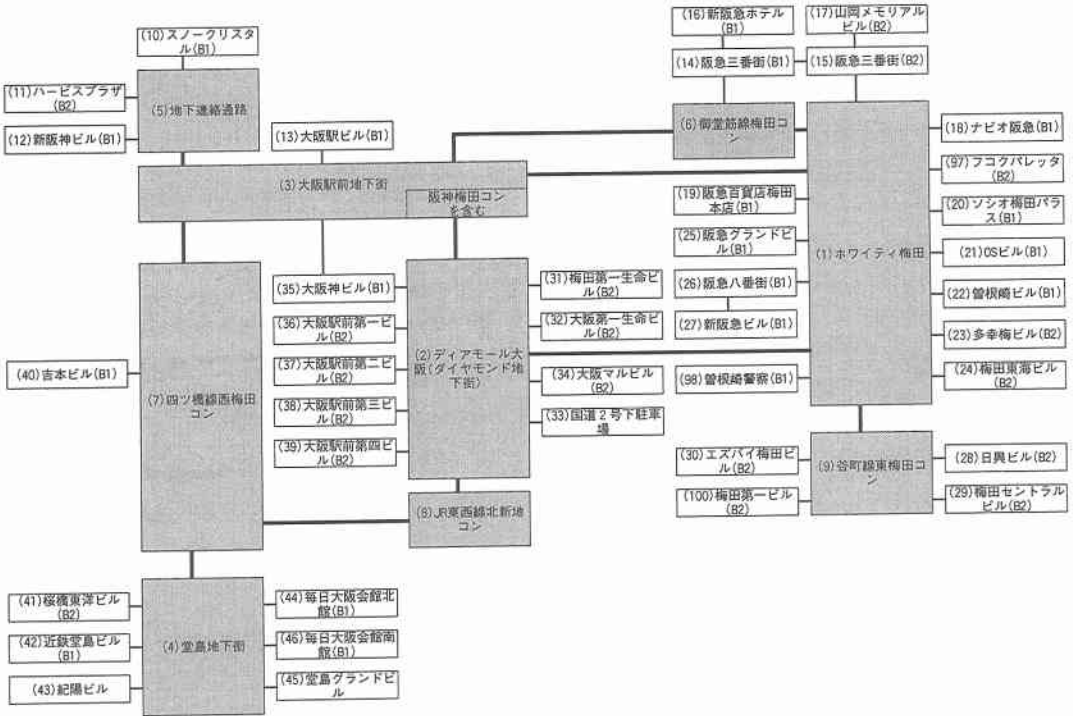


図-3 タンクモデルネットワーク図

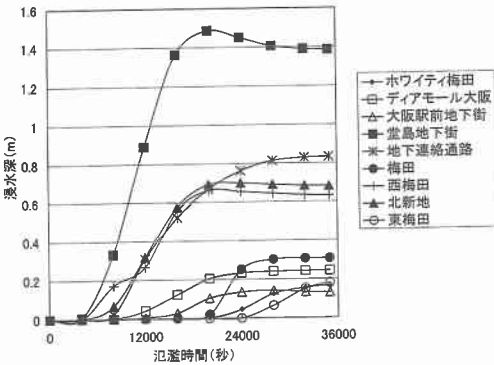


図-4 主な地下空間の浸水深変化

トワーク図を示す。

市街地氾濫計算と同様、計算時間間隔は0.1sとし、計算時間は1時間とする。マンニング粗度係数は、地下街の通路を考慮し、0.025を採用した。

3.6 計算結果

主な地下空間の浸水深変化を図-4に示す。破堤口からの流入開始60分後の浸水深図を図-5に示す。地下空間への1時間総流入量は13.4万m³となる。

3.7 計算結果の考察

a) 市街地氾濫計算における有限要素法
有限要素法により市街地氾濫計算を行ったが、一部の

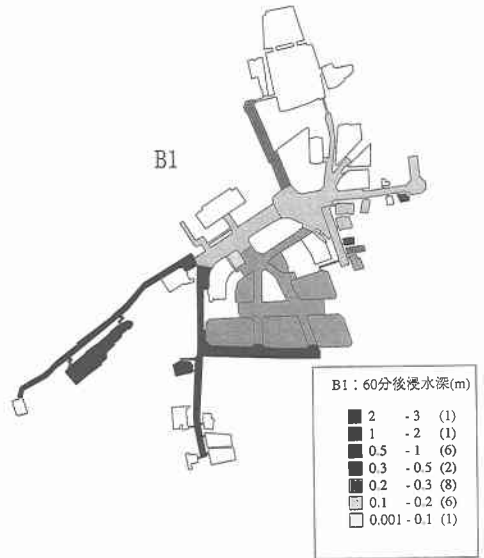
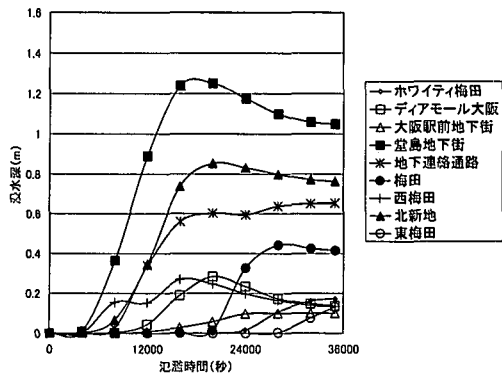


図-5 地下空間浸水深図(60分後)

幅の狭い道路からの出口部分においては、氾濫速度が極端に小さくなる結果となっている。このような現象が起こった原因として以下の3点が考えられる。

i) 有限要素法において、メッシュ構成はできるだけ均等にすべきであり、鋭角三角形や、スケールの違いが



図一6 主な地下空間の浸水深変化 (等流管路網モデル)

計算精度を低くしている。この現象を確認するため、ほぼ同様の地形条件において、要素分割数が多い箇所と少ない箇所に同流量を与え、氾濫状況を比較した。

その結果、明らかに、メッシュ分割数を細かくとった方がスムーズに氾濫が進んでいることが分かる。今回、街区周りの要素メッシュのピッチは約 10 m を採用しているが、幅広の道路や、広場等では、分割が荒くなっている。有限要素のメッシュは、特に地形条件の不連続部分において、形状、大きさともに、スムーズなメッシュ構成としなければいけないことがわかる。

ii) 計算時間間隔の問題である。今回、0.1 s で計算を行ったが、メッシュ形状のばらつきを考えると、もう少し計算時間間隔を短くする必要があるのではないだろうか。しかし、実験的に計算時間間隔 0.05 s として、計算を行ったが、計算精度の向上は見られなかった。

iii) 各要素ポイントへの地盤標高補間方法である。今回 1/2500 地形図から補間して与えたが、ピッチが 10 m と狭いこともあって、何れかのポイント間にその標高差が影響する。差分メッシュにおいては、メッシュサイズが有限要素メッシュよりも数倍大きいのでそれほど影響しない。有限要素各ポイントへの地盤標高補間手法は今後の検討課題である。

b) 従来モデルとの比較

考案した越流タンクモデルと、従来の等流管路網モデルにおいて、比較のため計算を行った。等流管路網モデルによる主な地下空間の浸水深変化を図一6に示す。結果にそれほど大きな違いはみられなかったが、等流管路網モデルは、タンクモデルに比べて水深変化に変動がある。これは、等流モデルの場合、2つのタンク(水位計算点)の標高差がその水路勾配を決定するため、移動流量を過大評価しているためと考えられる。一方、タンクモデルの場合、標高差がある程度大きくなれば、完全越

流式として水位の高い方のタンクの水深のみで流量が決まる。どちらが真の値であるかの議論は難しいが、災害対応の原則は危険側の評価であるから、タンクモデルの計算値が利用できるものとする。

4. 結 語

本研究では、南海地震を想定し、地下空間を含む市街地における津波氾濫シミュレーションを行った。その結果、地下空間を含む現地市街地における被災シナリオを定量的に実証した。その際、有限要素法による氾濫シミュレーションが、GISとの関係を考えると有効であることを示した。計算手法について、得られた結論は、以下のとおりである。

i) 地下空間の氾濫計算法として、越流タンクモデルを提案した。従来のモデルとの比較計算を行った結果、その妥当性が証明された。簡便な手法ながら、防災の観点から、地下空間の氾濫流の挙動を捉えることができるので有用であると言える。

ii) 有限要素法による市街地氾濫計算を行う際、メッシュ構成と計算時間間隔に注意が必要である。有限要素メッシュへの地盤標高補間方法は今後の検討課題である。

また、南海地震 ($M=8.4$) による第1波の津波による氾濫計算結果により、現地市街地において、以下の特性が示された。

iii) 市街地への1時間総流入量は約 50.4 万 m^3 であり、破堤口幅 1 m 当たりの流入量は約 0.4 万 m^3 である。また、地下空間への流入量は約 13.4 万 m^3 である。氾濫流量の約 1/4 が地下空間へ流入する。

最後に、シミュレーションを行ったのは、1地点における単一シナリオであり、これをマルチシナリオに活かすには、ここから得られる数値等の指標を利用し、あらゆる箇所の破堤を想定しておくことである。

参 考 文 献

- 河田恵昭・小池信昭 (1996): 津波の伝播・氾濫特性に基づくハザードマップに関する研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1301-1305.
- 建設省近畿地方建設局 (1998): 淀川洪水氾濫シミュレーション解析報告.
- 銚川 登・栗崎夏代子・富田 強・大淵真志 (1996): 地下放水路の管路状態の非定常流の数値計算, 土木学会論文集, No. 545, U-36, pp. 55-67.
- 谷野智伸 (1998): 都市域における地下空間の耐水性評価に関する研究, 京都大学大学院修士論文.
- 渡辺政広・竹内 明・川裾利雄 (1998): 取付管の超圧効果を考慮した下水道管渠網の雨水流出モデル, 第33回水理講演会論文集, pp. 157-162.