

地下空間の浸水シミュレーションとその減災対策

河田 恵昭*・後藤 隆一**・高橋 智幸***

1. はじめに

わが国の都市の多くは、臨海部の沖積平野上に立地しており、津波や高潮により、大規模な市街地氾濫災害を被る危険性が高い。事実、大阪市や名古屋市など、過去に津波や高潮による大きな災害を経験している都市も少なくない。

一方、これらの都市では、近年、都市空間の高度利用という考えのもと、地下空間の利用が急増している。都市の地下空間は、地下街や地下鉄をはじめとする多くの施設、都市機能が集中する大変重要な空間となっている。

津波や高潮により市街地氾濫災害が発生すれば、当然、地下空間には大量の氾濫水が押し寄せる。都市における地下空間の重要性を考えれば、発生する被害や影響は、大変大きなものとなることは想像に難くない。しかし、地下空間における防災対策は、いままでは火災対策が中心であり、浸水対策、特に津波や高潮などによる大規模な市街地氾濫災害に対する対策は、ほとんどないのが現状である。地下空間の浸水対策を整えることは、早急な課題となっている。

本研究では、地下空間を考慮した津波の市街地氾濫計算を行う。河田ら (1999) は、津波流入箇所が 1 箇所と想定した場合について、地下空間を考慮した津波の市街地氾濫計算を行っている。そこで、本研究では、津波の流入箇所を複数設定し、流入箇所の違いによる被災シナリオの違いや、それぞれの地点から単独で流入した場合と同時に流入した場合の被災シナリオの比較に、特に注目した。そして、1999 年 6 月の福岡市における水害事例について行われた聞き取り調査結果をもとに地下空間の浸水対策、被害軽減対策について考察を行った。

2. 地下空間の浸水シミュレーション

東京や大阪などのわが国の大都市では、地下街や、それらに隣接するビルの地階、地下鉄駅などが、複雑にネットワーク化されている。そのため、地下空間に流入した

氾濫水は、複雑な挙動を示すものと考えられる。本研究では、その挙動の特徴を調べるため、地下空間を考慮した市街地氾濫計算を行った。ここでは、その計算結果について述べる。

2.1 市街地氾濫計算の概要

a) 対象地域と想定シナリオ

市街地氾濫計算の対象地域は、大阪市北区の梅田地区とし、想定外力は M8.4 の南海地震津波とした。想定したシナリオは、南海地震の地震動により河川堤防の沈下が発生し、大阪市内の河川を遡上した津波が、堤防の沈下した部分より市街地に流入した、というものである。津波の流入点（堤防の沈下の発生地点）は、堂島川右岸渡辺橋付近（約 410 m）、及び淀川左岸中津付近（約 270 m）の 2 箇所を設定し、それぞれが単独で生じたケースと同時に生じたケースについて、市街地氾濫計算及び地下空間氾濫計算を実施した。対象地域の概略図を図-1 に示す。

b) 計算手法

外洋における津波の伝播計算は、四国、紀伊半島沖などの水深が深い領域には線形長波理論式を、大阪湾などの浅海領域には非線形長波理論式を適用し、Staggered Leap-frog 差分法を用いて計算した。

市内河川への津波の遡上計算及び、市街地の氾濫計算には、有限要素法を用いた。有限要素法における離散化などの手法については、河田ら (1996) の研究に従って計算を行った。地下空間の氾濫計算は、河田ら (1999)

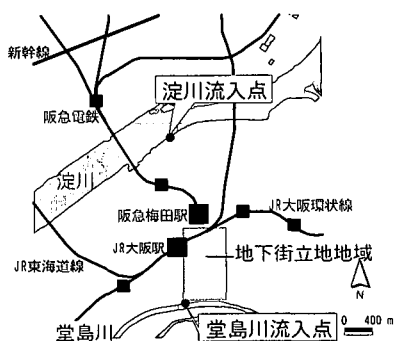


図-1 市街地氾濫計算対象地域

* フェロー 工 博 京都大学教授 防災研究所
** 学生会員 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻
*** 正 会 員 博(工) 京都大学助手 防災研究所

の提案による越流タンクモデルを適用した。

市街地氾濫計算において、津波流入点に対応する節点に河川遡上計算より得られた河川水位を与えることにより、河川遡上計算と市街地氾濫計算を接続させた。また、市街地氾濫計算から地下空間氾濫計算への接続は、地下空間へ接続する出入口のある節点において、段落ち式により地下への氾濫水の流入量を計算し、それを地下空間氾濫計算の入力条件とすることで、行った。

c) 計算条件

表-1に、計算条件の一覧を示す。

津波伝播計算における地震断層モデルは、相田(1981)によって提案された1854年安政南海地震断層モデル(model 20')を採用した。また、市街地氾濫計算及び地下空間氾濫計算における初期条件、境界条件、先端条件の設定、及び地形データ作成は、河田ら(1999)の研究に従って行った。

津波危機管理検討業務報告書(ニュージェック, 2000)によると、大阪天保山における南海地震津波の波高は、第2波が一番高くなっている。そのため、再現時間は、第2波目の影響を充分考慮できる長さで設定した。なお、市街地氾濫計算及び地下空間氾濫計算の再現時間は、堂島川単独流入のケースで、市街地への津波の流入開始から2時間30分、淀川単独及び同時流入のケースで、同3時間とした。これは、堂島川と淀川のケースにおいて、氾濫水が対象地下空間へ到達するまでの時間差を考慮して設定したものである。

2.2 流入地点付近の河川水位の変化

堂島川右岸の津波流入点では、地震発生から約2時間50分後に、河川水位が堤内地位盤高を越え、市街地への津波の流入が始まる。第2波目の流入が終了するのは、地震発生から約4時間10分後(津波流入開始から1時間20分後)である。一方、淀川左岸の津波流入点では、地震発生から約2時間20分後に市街地への津波の流入が始まり、第2波目の流入が終了するのは地震発生から約3時間50分後(津波流入開始から1時間30分後)である。淀川の津波流入点における河川水位の時間変化を図-2に示す。

2.3 流入地点の違いによる被災シナリオの変化

市街地へ流入した津波は、堂島川単独のケースでは、流入開始から10分弱(地震発生から約3時間)で流入地点に一番近い堂島地下街に到達し、地下空間への浸水が始まる。一方、淀川単独のケースでは、流入開始から約1時間30分(地震発生から3時間50分)で地下鉄御堂筋線梅田駅に到達する。

市街地への津波の流入量は、津波流入開始から2時間30分で、堂島川単独ケースで8.0万 m^3 、淀川単独ケースで33.1万 m^3 である。そのうち地下空間への流入量は、そ

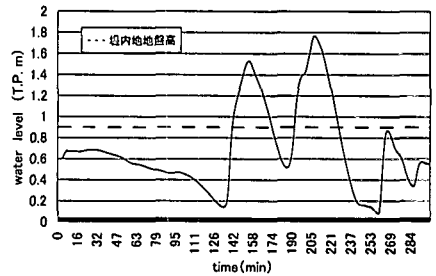


図-2 淀川流入点における河川水位の変化

表-1 計算条件一覧

	津波の伝播計算	河川遡上計算	市街地氾濫計算	地下空間氾濫計算
計算高水位	頻度平均高水位 (T.P.+0.9 m)	頻度平均高水位 (T.P.+0.9 m)	—	—
河川流量	—	無視	—	—
マンニングの粗度係数	0.025	0.020	0.040	—
集中係数	—	0.8	0.9	—
計算時間間隔	0.6 s	1.2 s	0.1 s	0.1 s
再現時間	6 hr (地震発生後)	5 hr (地震発生後)	2 hr 30 min/3 hr (津波流入開始後)	2 hr 30 min/3 hr (津波流入開始後)

れぞれ5.0万 m^3 と4.2万 m^3 である。一方、地下空間への流入が始まってからの経過時間で、地下空間への流入量を比較すると、地下空間への流入開始後1時間で、堂島川単独ケースは0.5万 m^3 、淀川単独ケースは4.6万 m^3 となり、淀川単独ケースの方が大きくなる。

以上の結果をまとめると、淀川単独ケースでは、氾濫水が対象地下空間まで到達するのに時間はかかるものの、地下空間への氾濫水流入開始後の経過時間が同じである場合は、地下空間への氾濫水の流入量は、堂島川単独ケースのそれを上回っている。このことより、氾濫水が地下空間に到達するまでの時間は、津波流入地点との距離が大きく影響するが、地下空間への氾濫水の流入量は、市街地の氾濫流量が多いケースの方が大きくなる場合があることがわかる。

2.4 単独流入ケースと同時流入ケースの比較

複数の浸水シナリオが同時に発生した場合に、個々の浸水シナリオが単独で発生した時の結果が、どのように使えるかを知ることは重要である。例えば、個々のシナリオが単独で発生した時の結果から、複数のシナリオが同時に発生した場合の結果を推定することができるようになれば、大変有用である。そこで、本研究では堂島川と淀川の流入点から個別に流入が生じたケースの計算結果を単純に重ね合わせたもの(以後、重ね合わせケースと呼ぶ)と、同時に流入が生じたケース(以後、同時流入ケースと呼ぶ)の計算結果を比較した。

地下空間への流入量は、淀川から津波が流入開始してから3時間(地震発生から5時間20分)で、重ね合わせケースが12.4万 m^3 、同時流入ケースが13.0万 m^3 であ

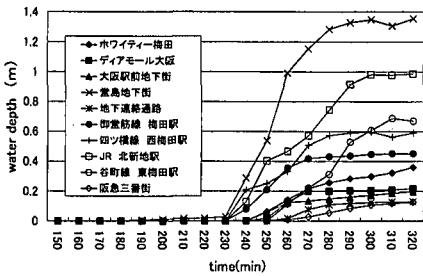


図-3 各地下空間の浸水深（重ね合わせケース）

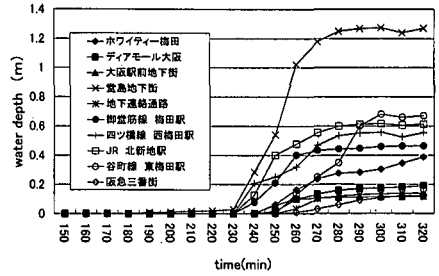


図-4 各地下空間の浸水深（同時流入ケース）

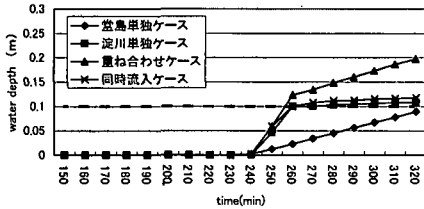


図-5 大阪駅前地下街における浸水深の変化

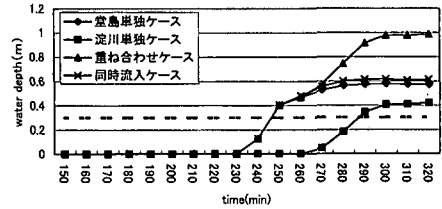


図-6 JR 北新地駅における浸水深の変化

り、ほぼ同じである。堂島川単独のケースと淀川単独のケースでは、地上からの流入が発生する地下街・地下鉄駅は全く別であり、同時流入ケースにおいても、2箇所の流入点からきた氾濫水は、地上ではほとんどぶつかりあっていないことがわかる。

図-3、図-4には、主な地下街・地下鉄駅について、重ね合わせケースと、同時流入ケースにおける浸水深の変化を示す。大部分の地下街・地下鉄駅では、重ね合わせケースと同時流入ケースの浸水深のずれは10%以内である。しかし、大阪駅前地下街やJR北新地駅などでは、同時流入ケースの浸水深が、重ね合わせケースの浸水深を大きく下回っている。大阪駅前地下街とJR北新地駅における浸水深の変化を図-5、図-6に示す。

今回の計算では、越流タンクモデルにおいて、隣接地下空間への流出が生じる最低水深を0.1mと設定した。大阪駅前地下街では、堂島川単独のケースの浸水深が、0.1mに達しておらず、隣接地下空間への流出が生じていない。つまり、重ね合わせケースでは、堂島川単独ケース分の氾濫水は大阪駅前地下街内にとどまり、浸水深を増大させることにのみ寄与している。一方、同時流入ケースでは、淀川からの氾濫水が加わり、浸水深が0.1m以上となる。そのため、堂島川流入分の氾濫水の一部も隣接地下空間へ流出している。その結果、同時流入ケースでは、堂島川流入分が大阪駅前地下街からの流出に寄与した分だけ、浸水深が低減したと考えられる。

このことを確かめるため、淀川単独のケースより、大阪駅前地下街における氾濫水の流入量に対する流出量の割合を求め、堂島川単独ケースについて隣接地下空間へ

の流出があった場合の浸水深を概算し、その概算値と淀川単独ケースの浸水深を重ね合わせた。その結果は、同時流入ケースの浸水深と非常によく一致しており、堂島川単独ケースにおいて大阪駅前地下街内にとどまった氾濫水が、重ね合わせケースの浸水深を増大させていることが確認された。

JR北新地駅のケースについても、大阪駅前地下街と同様の理由が考えられる。ただし、北新地駅の場合は、計算条件として設定した0.1mの影響ではなく、流入した氾濫水の唯一の流出先であるディアモール大阪が、北新地駅より0.3m高いところにあることの影響であると考えられる。

重ね合わせケースと同時流入ケースの浸水深を比較した10個の地下街・地下鉄駅の中には、ホワイティー梅田などのように、片方の流入点からしか影響をうけない地下街もある。また、これらの地下街・地下鉄駅に接続しているビル地階の中には、重ね合わせケースと同時流入ケースの浸水深が大きく違っているところも多く、大きいところでは2倍以上ずれている。同時流入ケースにおいて、堂島川単独ケースと淀川単独ケースがどのように重ね合わさっているのかについては、なお詳細な分析が必要である。

3. 復旧日数を左右する要因についての分析

1999年6月の福岡市を中心とする水害では、JR博多駅周辺の地下街、地下鉄駅、ビル地階が軒並み浸水し、地下空間が浸水するという事象が大きくクローズアップさせることとなった。以下では、この福岡市における水

害を事例として、地下空間浸水災害の被害軽減策についてのいくつかの考察を行う。

3.1 地下利用施設に対する聞き取り調査

1999年6月の福岡市における水害の直後、九州地方建設局(当時)、建設省土木研究所(当時)、福岡県、福岡市は、合同で、博多駅周辺の地下利用施設に対して聞き取り調査を行っている。主な調査項目は、当日の浸水の状況、発生した被害状況、浸水への対策、及び復旧に要した日数などである。調査結果の詳細は、博多駅周辺地下空間浸水状況調査結果(博多駅周辺浸水調査連絡会、1999)に詳しい。

本研究では、この聞き取り調査結果のデータをもとに、特に復旧日数を左右したと考えられる要因についての分析を行った。

3.2 復旧日数の二極分化とその理由の考察

図-7に、ビルの用途が業務用ビル(オフィスビル、金融機関、公共施設など)、及びホテルの場合における復旧に要した日数の分布を示す。業務用ビルの場合、復旧まで1ヶ月以上かかったケースと1週間以内に復旧したケースに二極分化されている。一方、ホテルは大部分が1週間以内に営業を再開できており、営業再開まで1ヶ月以上かかったケースはない。

ホテルの場合、営業を再開しないことには、収入が得られず、復旧資金の調達に大きく影響するので、どのホテルも比較的早期に営業再開したものと考えられる。

業務用ビルにおいて、復旧日数が大きく二極化することとなった理由としては、①外力の大きさの違い、②地下への流入量の違い、③被害額の違い、④地下空間管理者の資金力の違い、⑤地下空間の利用形態の影響、のような原因が考えられる。

地下空間の浸水災害の場合、地下に流入した水を排水してからではないとその後の復旧作業に移れない。排水に要する時間は、流入量とその地下空間における排水能力(排水ポンプの能力など)の関数となる。そのため、地下への流入量は復旧に要する時間を左右する要因になると考えられる。また、地下空間管理者の資金力は、復旧資金をすぐに調達できるかどうかに関係し、地下空間の所有形態は、地下空間の所有者と入居者の間で復旧費用の分担や復旧プロセスに関する合意形成にかかる時間を左右すると考えられる。

3.3 注目した要因と復旧日数との相関

前節で挙げた要因のうち、復旧日数と一番大きな相関をもつ要因を調べるため、業務用ビルを対象に、最大浸水深、地下への流入量(最大浸水深×浸水面積と定義し算出)及び被害額と復旧日数との関係を調べた。最大浸水深は外力の大きさを表す因子として分析対象とした。地下空間管理者の資金力や所有形態については、それら

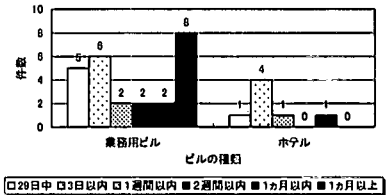


図-7 業務用ビル及びホテルの復旧日数の分布

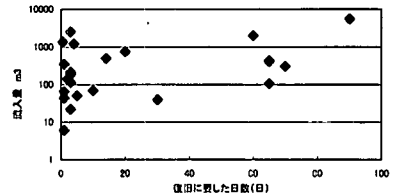


図-8 業務用ビル 流入量と復旧日数の関係

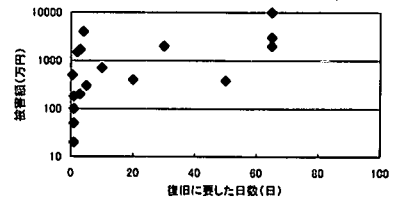


図-9 業務用ビル 被害額と復旧日数の関係

を表す適当な項目が調査項目になかったためその相関は分析できなかった。図-8、図-9に、流入量及び被害額と復旧日数の関係を示す。

図-8より、流入量は復旧日数を大きく左右する因子とはなっていない。最大浸水深についても同様である。被害額については、復旧に2週間以上かかっているケースでは、400万円以上の被害が生じている。しかし、1000万円以上の被害を被りながらも早期に復旧しているケースもあり、復旧日数を左右する因子とはいえない。

これらの結果は、復旧日数には、最大浸水深や流入量はほとんど関係なく、ビル管理者の資金力や、ビルの所有形態などと関係が大きいこと示しているといえる。

4. 被災施設が得た教訓

本章では、1999年6月の福岡市における水害で被災した地下街やホテルに対して行ったヒアリング調査から、それらの施設がこの水害でどのような教訓を得ているのかをまとめ、地下空間の浸水対策について考察を行う。

調査は、2000年8月に行い、当日の浸水の状況や、対応活動、水害経験から得た教訓などについてヒアリングした。ヒアリングの対象としたのは、地下街1箇所とホテル2箇所である。

それぞれの施設の被害状況を簡単に述べると次の通り

である。地下街 A は 10~15 cm 程の浸水深となり、水害当日の 29 日は丸 1 日営業ができなかった。ホテル A は、有効な対策がとれず、地下部分が完全に水没した。営業停止日数 18 日は、被災ホテルの中で最長である。ホテル B は、高さ 30 cm の止水板を地下への入口に設置することにより、地階の浸水深を 10 cm ほどに押さえ、大きな被害の発生を防いだ。なお、ホテル A とホテル B は、道路を一本挟んで向かい合わせに立地している。

地下街 A ではこの水害後、出入口に監視用のカメラを設置する、テナントの従業員に携帯ラジオを持つように指導する、などの情報収集体制を強化する対策をとっている。また、水はけが悪い場所にある出入口付近に土嚢を多く配置するなどの対策もとられている。情報を得ること、自分の地下街の立地条件をよく知っておくこと、の 2 点は、この水害からの教訓として特に強調された項目である。

ホテル A では、止水板が準備してあれば、結果は大きく違っていたかもしれないという意見が聞かれた。また、ホテル B では、大きな被害を被らずにすんだ最大の要因として、止水板の準備がされていたことを挙げる意見が聞かれた。博多駅周辺の浸水深は 40~50 cm 程度であったとされており、止水板が大きな効果を発揮する浸水深であったことからの意見であると考えられる。

止水板による対策は、ある程度の浸水深までは非常に大きな効果を発揮する。しかし、津波・高潮などの大規模な市街地氾濫災害となれば、浸水深が止水板で対応できるレベルを超えてしまう可能性は充分にある。従来からの止水板による対策だけにたよらず、止水板では対応できない場合も想定した地下空間の浸水対策も考えておく必要がある。

5. 結 論

地下空間を含む市街地氾濫シミュレーションの結果からは、次のような結論を得た。

1) 氾濫水が地下空間に到達するまでの時間は、津波流入地点との距離が大きく影響するが、地下空間への氾

濫水の流入量は、市街地の氾濫流量が多いケースの方が大きくなる。

2) 主な地下空間の多くでは、堂島川単独ケースと淀川単独ケースを単純に重ね合わせた場合の浸水深と、2 箇所の流入点から同時に流入したケースの浸水深は概ね一致した。しかし、片方の流入点からの氾濫水の影響しか受けていない場合や、隣接地下空間への流出が生じる最低水深の条件の影響で浸水深が一致しない場合もある。同時流入ケースにおいて、堂島川単独ケースと淀川単独ケースがどのように重ね合わさっているのかについては、なお詳しい分析が必要である。

1999 年 6 月の福岡市における水害事例調査からは次のような結論を得た。

1) 復旧に要した日数は、最大浸水深や地下への流入量などのファクターとはほとんど関係なく、ビル管理者の資金力や、ビルの所有形態などのファクターとの関係が大きい。

2) 被災施設が得た教訓として、情報の収集、自分の施設の立地条件を知っておくことが挙げられ、地下空間の防災対策、特にソフト面における対策として、これらの項目の重要性を示している。

3) 止水板の準備の有無が被害の大ききの明暗をわけたという意見が聞かれ、40~50 cm くらいの浸水深であれば、止水板の効果は非常に大きいことが示された。

参 考 文 献

- 相田 勇 (1981): 南海道沖の津波の数値実験, 東大地震研究所 彙報, Vol. 56, pp. 713-730.
- (株)ニュージェック (2000): 津波危機管理検討業務報告書, 204 p.
- 河田恵昭・石井 和・小池信昭 (1999): 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, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 346-350.
- 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.
- 博多駅周辺浸水調査連絡会 (1999): 博多駅周辺地下空間浸水状況調査結果, 56 p.