

2017 年度（第 53 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 17-A-3

都市を襲う水災害の防除の現状と課題

関西大学 教授

石垣泰輔

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2017 年 8 月

都市を襲う水災害の防除の現状と課題

Prevention and Its Problem of Extreme Urban Flood

石 垣 泰 輔

Taisuke ISHIGAKI

1. 都市を襲う水災害

1982年7月23日に発生した長崎豪雨災害では、299名の死者・行方不明者に達し、その87.6%が土砂災害によるものであったが、道路冠水や中小河川の氾濫、車の漂流や地下室浸水などの都市で発生する被害が顕著となった¹⁾。その後、1999年と2003年の福岡豪雨災害²⁾、2000年の東海豪雨災害³⁾など大都市での被害が発生した。1993年には赤坂見附駅が浸水、2011年には大阪市で時間雨量77.5mmを記録した豪雨により道路冠水や地下空間浸水が発生している⁴⁾。このように、近年、都市を襲う水災害が頻発している。

東京、名古屋、大阪、福岡など、わが国の都市の多くは河川が運んできた土砂で形成された沖積平野に存在しており、国土の10%の平野に、50%の人口と75%の資産が集中している。そのため、浸水被害が発生すると甚大な被害が発生する。このような都市は水災害を容易に受け入れる素因（場の条件）を有しており、地球規模の気候変動や都市化の影響によって強度をました降雨、台風に伴う高潮や地震に伴う津波が引き起す水災害の誘因（外力）による被害が頻発している。さらに、高度化する社会の要請に伴う地下水の利用に起因する地盤沈下や地下空間の多目的利用など、被害を拡大する要因が存在する。例えば、東京湾、伊勢湾（名古屋）、大阪湾沿岸についてみると、それぞれ4m、1.5m、2m程度の地盤沈下が発生し、平均海面より低いゼロメートル地帯に多くの人々が住んでおり（東京湾：116km²に176万人、伊勢湾：336km²に90万人、大阪湾：124km²に138万人）、そこに地下鉄や地下街などの地下空間が存在している。都市を襲う水災害とは、短時間豪雨による内水氾濫（雨水出水）、河川の氾濫による外水氾濫、台風に伴う高潮氾濫および地震に伴う津波氾濫であり、以下に災害事例を挙げて何が起きているのかを見る。

内水氾濫（雨水出水）および外水氾濫事例から分かること： 1時間降水量のわが国の最高記録は、前述した1982年7月23日に発生した長崎豪雨災害時に長与町で観測された187mmである。近年、“集中豪雨”、“ゲリラ豪雨”、“記録的短時間大雨情報”といった言葉が頻繁に報道されるように、この記録に匹敵する豪雨が発生しており、2008年には岡崎市で1時間雨量146.5mmを観測している。この背景には、地球温暖化による気候変動およびヒートアイランド現象などの影響により集中豪雨の発生回数が増加しているという事実がある。たとえば、時間雨量50mm以上の集中豪雨の年平均発生回数は、1981年から1990年では年平均160回であったのが、2001年から2010年では年平均217回に増え、時間雨量が80mm以上の集中豪雨の発生回数は、1981年から1990年では年平均12.5回であったものが2001年から2010年では平均16.2回に増加している。特に最近の水害を見ると、200mm～300mmの降雨が2～6時間という短時間に集中して降り、下水の能力を越えた内水氾濫や堤防から溢れる外水氾濫が発生している。

都市域では、雨水を排水するために下水道が整備されているが、その排水能力は、1時間に30mm～50mmの雨を対象として設計されている。しかしながら、上に述べたような短時間豪雨が都市域で発生した場合、雨水の排水能力を上回り、内水氾濫が発生する。都市部では、内水氾濫による被害額が外水氾濫による被害額を超えているのが現状である。路上に溢れた水は、写真1のように局所的に地盤の低い区域に溜まる⁴⁾とともに、より低い位置にある地下街や地下鉄などの大規模地下空間やビルの地下室、地下駐車場、鉄道等の下をくぐるアンダーパスなど

の小規模地下空間へと浸入し、甚大な人的・物的被害をもたらす。また、マンホールからの噴出による被害、集水域越境による浸水域の拡大、側溝への転落事故などが発生する。

河川堤防の越水・破堤などによる外水氾濫でも同様の被害が生ずるが、雨水排水を下水道施設と小河川が担っている都市域では内水氾濫と外水氾濫が同時に起こり、これまでに想定していなかったような 1999 年の福岡豪雨災害時の地下鉄浸水や 2000 年の東海豪雨災害時の排水ポンプの機能不全による浸水長期化(写真 2)などの被害が発生した。このような外水氾濫では、土砂を大量に含んだ河川水が溢れることによる被災後の土砂処理、浸水深が深いために床上浸水や家屋流出による大量の瓦礫処理が問題となるとともに、車両の水没や漂流も問題である。



写真1 2011年8月豪雨の浸水状況

津波氾濫事例から分かること： 2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波により沿岸域の市町村が甚大な被害を受けた。大地震による人的被害の主要因は、1923年9月1日の関東大震災では火災、1995年1月17日の阪神大震災では建物倒壊であったが、東日本大震災では津波が主要因であった。この震災を契機として 2012年8月29日に内閣府が南海トラフ巨大地震に伴う津波による浸水計算結果を公表して以来、被災可能性のある都道府県や市町村で津波はハザードマップが作成されて対策が進みつつある。このように都市を襲う水災害に津波氾濫を考慮する重要性が認識されているが、発生後6年を経過した現在、復興の地域格差をいかに解消するかが問題である。



写真2 2000年9月東海豪雨災害

高潮氾濫事例から分かること： 1917年10月1日に東京湾を襲った台風に伴う高潮(最高潮位 T.P.3.0m)による死者・行方不明 1324名、1934年9月21日に大阪湾を襲った台風に伴う高潮(最高潮位 T.P.3.1m)による死者・行方不明者 3036名、1959年9月26日に伊勢湾を襲った台風に伴う高潮(最高潮位 T.P.3.9m)による死者・行方不明者 5095名というように 1000名を超える高潮被害が 3大湾沿岸都市で発生している。いずれも 59年～100年前の都市を襲った災害であり、高度化した構造を有する現在の都市を襲った場合に何が起きるのかを 2012年10月のハリケーン・サンディによる高潮災害が暗示している。この災害では、地下鉄や地下道路トンネルが水没するという被害があったが、タイムラインによる発災前後の対応が功を奏して短期間に復旧した部分もあるが、写真3に示したマンハッタン島南端の地下鉄駅は復旧に数カ月間を要した。この地区の地盤高は海水面より 3m程度高いが、前述したようにわが国の都市ではゼロメートル地帯があり、そこに地下鉄などの地下空間が存在するため、同様の被害が発生した際の被害を推定することは容易である。



写真3 2012年10月のハリケーン・サンディ被害で閉鎖された地下鉄入り口

その他の考慮すべき事項： 以上のように都市を襲う水災害により何が起きているか、また何が起きるかが推定できるが、被害が拡大する要因として、土地利用の高度化と人口集中、高齢化者社会の進展、氾濫流による人や物の漂流といった避難の困難度要因を考慮する必要がある。次章では、都市特有の水災害である地下空間浸水を取り上

げて、その特徴と問題点を紹介する。

2. 都市の地下空間浸水とその問題点

2.1 地下空間浸水事例

都市域には、600以上の地下駅、70以上の地下街、多数の地下駐車場、地下室、地下道、アンダーパスなどの地下空間が存在する。道路冠水した氾濫水はより低いこれらの地下空間に流入する。表1は、海外の事例を含めた近年の地下空間浸水事例の発生年月と発生場所、地下空間の種類と浸水誘因をまとめたものである。表より、種々の地下空間が浸水していること、浸水誘因が内水氾濫、外水氾濫、津波氾濫、高潮氾濫の4種の水災害によることが知れる。地下鉄道は、東京で1927年12月30日に上野・浅草間の開通、大阪で1933年5月20日に梅田・心斎橋間の開通および名古屋で1938年6月に近鉄と1941年8月に名鉄が名古屋地下駅への乗り入れたことから始まり、東京地下鉄道が1930年に延伸したさいに地下駅と商業ビルの地下を接続させたことから、地下鉄駅と民間ビルや地下街と接続される複合構造を有するようになった⁵⁾。このように地下空間が互いに接続されることから、流入した氾濫水が広範囲に広がるため、広範囲での浸水対応が必要となっている。

表1 地下空間浸水事例

発生年月	発生場所	地下空間の種類	浸水誘因
1993.8	東京	地下鉄	内水氾濫（雨水出水）
1999.6	福岡	地下鉄，地下街，地下室	内水氾濫，外水氾濫
1999.7	東京	地下室	内水氾濫
2000.9	名古屋	地下鉄	内水氾濫，外水氾濫
2001.7	ソウル	地下鉄	内水氾濫
2003.7	福岡	地下鉄，地下街，地下室	内水氾濫，外水氾濫
2003.9	釜山・馬山	地下駐車場，地下室	高潮氾濫
2008.7	向日市	アンダーパス	内水氾濫
2009.11	和歌山	地下駐車場	内水氾濫
2010.7	可児市	アンダーパス	外水氾濫
2011.3	宮城	地下鉄	津波氾濫
2011.8	大阪	地下街，地下室	内水氾濫
2011.9	春日井市	地下改札，地下道	内水氾濫
2012.8	京都・大阪	地下鉄，アンダーパス	内水氾濫
2012.10	ニューヨーク	地下鉄，地下トンネル	高潮氾濫
2013.9	京都	地下鉄	外水氾濫

2.2 地下空間の浸水脆弱性

ここでは地下街を例に挙げて浸水脆弱性を示す。

地下街の所在地を見ると、複数存在するのは名古屋市19か所、東京都区内15か所、大阪市9か所、神戸市5か所、横浜市と札幌市4か所、福岡市と岡山市に3か所、京都市2か所、盛岡市・千葉市・武蔵野市・川崎市・小田原市・新潟市・高岡市・金沢市・蒲郡市・姫路市・広島市・松山市に1か所であり、大半が東京湾・伊勢湾・大阪湾沿岸に存在する。これらの地下街について、ウェブサイトやGoogle Earthなどのフリーソフトから得られるデータを用いて地下街の立地状況を調べた。図1は地盤高を図2は河川

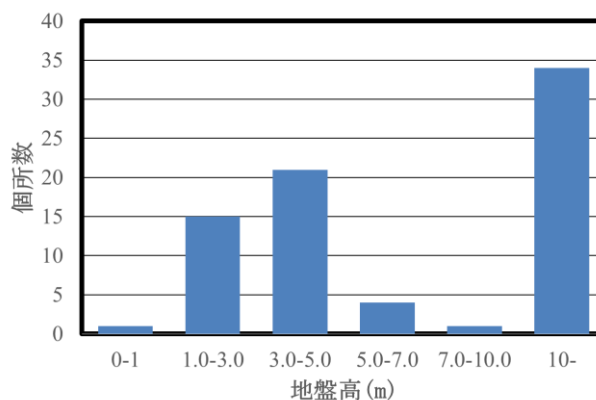


図1 地下街周辺の地盤高

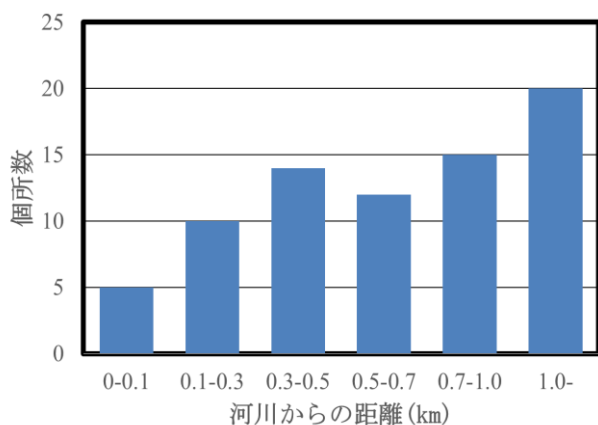


図2 地下街の河川からの距離

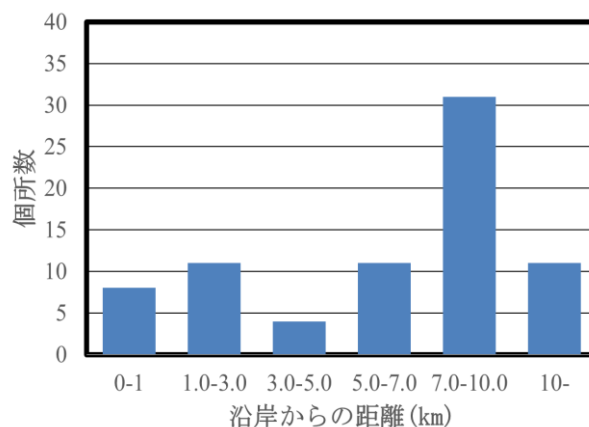


図3 地下街の沿岸からの距離

からの距離の分布を示している。10m 以上の地盤高の高い場所に存在する地下街も多くあるが、図2に示すように近くに河川が存在していることから、浸水の可能性が推測される。また、図3に示す沿岸からの距離の分布をみると、沿岸から離れた位置に存在する地下街が多いものの河川に近いこともあって、河川を遡上して津波や高潮による浸水の発生する可能性のあると言える。この点は、2016年11月時点で、地下街の存在する市域を対象とするハザードマップが、内水氾濫について69.7%、外水氾濫について76.3%、高潮氾濫について7.9%、津波氾濫について47.4%の市のホームページで公表されていることから説明できる。なお、高潮と津波に関するハザードマップは国や都道府県が公表しているものを追加すると、高潮については73.7%、津波については97.4%の市が対象となっていることから、今後、津波と高潮による地下空間浸水への対応が必要となる。また、地下街の存在する地区には地下駅、地下駐車場、地下室、地下道、アンダーパスなどが存在していることから、これらの地下空間の浸水脆弱性への対応も必要である。これまで、東京・名古屋の地下空間を対象とした検討がされているが^{6), 7)}、次節では、著者らの研究グループが対象としてきた4種の水災害についてハザードマップが公表されている大阪市の密集市街地の浸水脆弱性について述べる。

2.3 密集市街地の水災害による浸水

わが国でも最大規模を有する地下空間が存在する大阪の密集市街地(図4)を研究対象としてきた。図に示すように、この地区は四方を河川に囲まれていて、浸水した場合にはポンプによる排水に頼らざるを得ない地区である。この地区の浸水リスクとしては、数年から数十年規模以上の降雨による内水氾濫、200年に1回の洪水に対する洪水防御計画が実施されている河川からの外水氾濫、100年から1000年規模の津波や高潮による氾濫が考えられ、それぞれを対象としたハザードマップが作成され公表されている。そこで、管径200mm以上の雨水排水管と道路冠水のみを考慮したモデル(図5)を用い、以下に示す極端な浸水被害が想定される4つの外力条件で計算した。

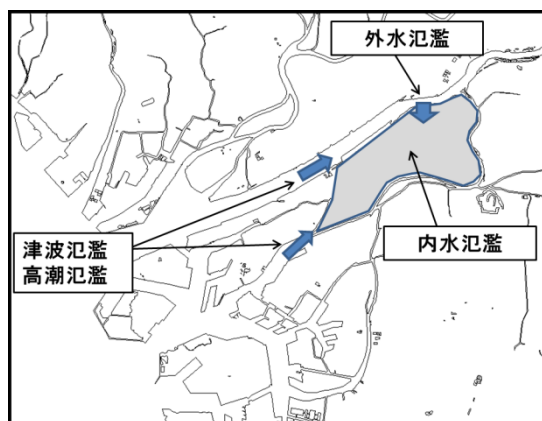


図4 対象地区の浸水リスク



図5 終末処理場とポンプ場の位置

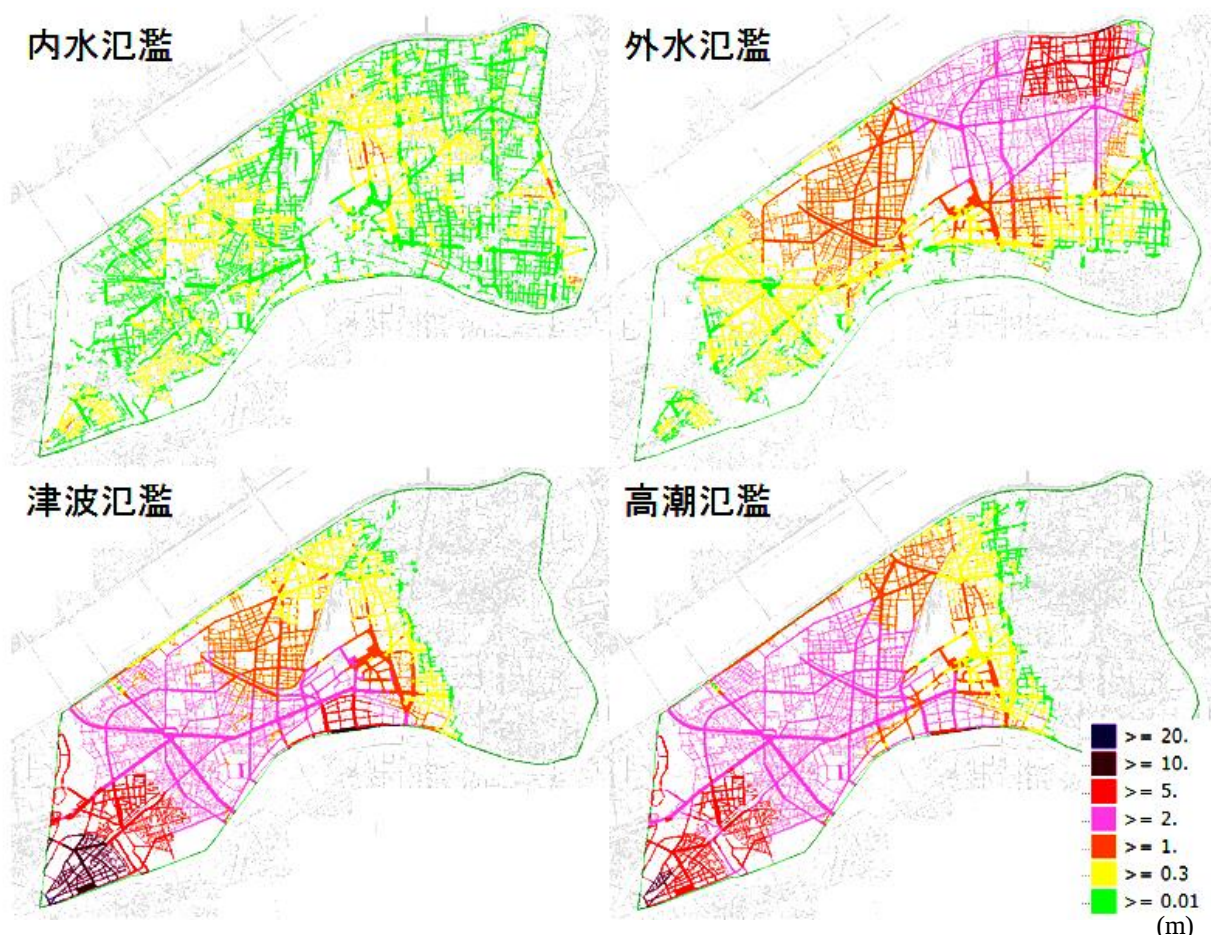


図6 極端な浸水被害が想定される水災害時の最大浸水深分布の計算結果

それぞれの氾濫が発生した場合の浸水計算結果を示し、その特徴と問題点を以下に示す。

1) 内水氾濫による浸水

対象とした地区では、2011年8月27日および2013年8月25日の集中豪雨で浸水被害が発生していて、前述したように2011年の豪雨では観測史上1位タイとなる1時間77.5mmを記録している。このような都市域の内水氾濫を検討するためには、雨水排水施設を考慮することが必要で、図5に示す大規模地下街を含む処理区の雨水排水網とポンプ場を含むモデルを用いた計算を行った⁸⁾。

図6の左上の結果は、2011年8月豪雨の2倍に相当する2008年8月29日に岡崎市で発生した豪雨（以下、岡崎豪雨と呼ぶ：最大1時間降水量146.5mm，総降雨量242mm）を対象に、最大浸水深となる氾濫状況を計算した結果である。図をみると、広い範囲に浸水が発生している。これは、内水氾濫では下水が満杯になってマンホールから溢れ出したり、道路上に溜まったり流れたりするので、周りより少し低ければ、どこでも発生する可能性があるためである。また、地下街のある周辺（図5の○部分）では、1m前後の浸水深となっており、地下街への出入口からの流入が発生している。

2) 外水氾濫による浸水

図6の右上の結果は、昭和28年9月の台風13号による降雨の2倍に相当する豪雨（2000年の東海豪雨級）で淀川左岸9.2km地点の堤防を越えて対象地区に溢れるという条件で計算した最大浸水深分布を示している。図をみると分かるように、対象地区全域が浸水するが、浸水深は広範囲の地区が3m以上となり、内水氾濫の結果とは大差がある。したがって、ほとんどすべての地下街への出入口から浸水するという結果になる。

3) 津波氾濫による浸水

2012年8月29日、内閣府が南海トラフ巨大地震に伴う津波による浸水計算結果を公表している。その中の最

悪ケースと同様の条件で対象地区の最大浸水深を計算すると図6の左下ようになる。津波は、大阪湾のある西から河川を遡上して来て堂島川の堤防を越えて来るので、地区の西側では5mを超える浸水が発生している。浸水範囲は、地下街のある地区まで達している。その津波到達範囲は地盤の高さに依存するので、ほぼゼロメートル地帯の範囲と一致している。地下街のある地区での水深は1m前後であるので内水氾濫と同様だが、地下街へは、短時間に大量の海水が南側と西側の出入口から浸水する。これは、内水氾濫と外水氾濫では東側と北側の出入口から浸水が始まると方向が異なる。

4) 高潮氾濫による浸水

1934年9月21日室戸台風に伴う最高潮位 T.P.3.1m の高潮が大阪を襲い、死者・行方不明者 3036 人という大被害が発生した。80 年前と現在では、都市の状況は大きく異なっている。さらに、地球温暖化の影響による海面上昇や台風の強大化の影響を考慮すると、高潮氾濫による被害が甚大となることが容易に推測される。図6の右下の結果は、地球温暖化の影響で強大化した台風による高潮潮位の条件を用いた最大浸水深の計算結果である。図をみると、津波氾濫と同様に対象地区の西側と南側の浸水深が大きくなっている。したがって、この場合も地下街の出入口から大量の海水が浸水する。

2.4 密集市街地の水災害による地下浸水

ここでは、前述した 4 種の水災害による大規模地下街に関する浸水計算結果を用いて、密集市街地の地下浸水について説明する。

図5の○で囲んだ中に、わが国で最大級の地下街がある。図6に示したように、この地区は、いずれのケースでも道路冠水するので、氾濫水が図7に示す 129 箇所の出入口から流入する可能性がある。なお、ここでは地下街に接続している民間ビルからの浸水は考慮していない。

1) 地下街への浸水⁸⁾

前述した 2008 年岡崎豪雨 (1 時間雨量 146.5mm) が、この地区に降った場合に、出入口での止水対策を行わない条件で図7に示した出入口から地下街に流入する量の時間変化をブロックごとに分けて計算した結果が図8である。図の上側の棒グラフが雨量の、下の波形が流量図の時間変化を表している。図をみると分かるように、地下街への流入は、雨が最も強い時間帯に始まり、そのピークは降雨ピークより約 1 時間遅れている。また、雨が止んだ後も、地下への流入が続いていることが分かる。エリアごとにみると、エリア B での最大量は 20m³/s に達する。これは、小さな川の洪水に相当する量である。このように大量の水が地下街に流れ込み、図9の左上の結果に示すように最大浸水深が 3m に達する箇所が表れる。さらに、地下街に流れ込んだ水の大部分は、5カ所ある地下駅の改札からホームや地下鉄トンネルに流れて行くので、ホームや電車内にいる人は、駅員の指示に従って速やかに避難することが重要である。

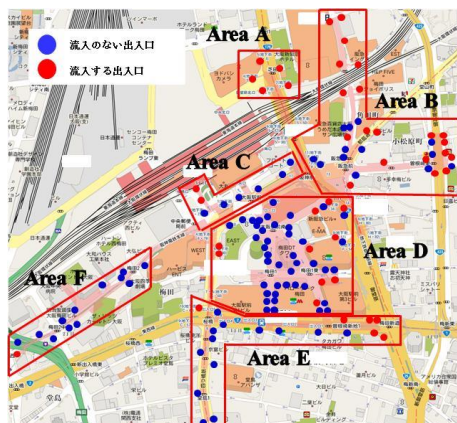


図7 地下空間エリア分けと流入出入口

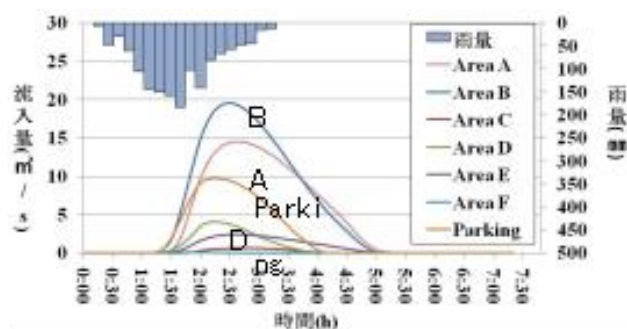


図8 内水氾濫による地下流入量

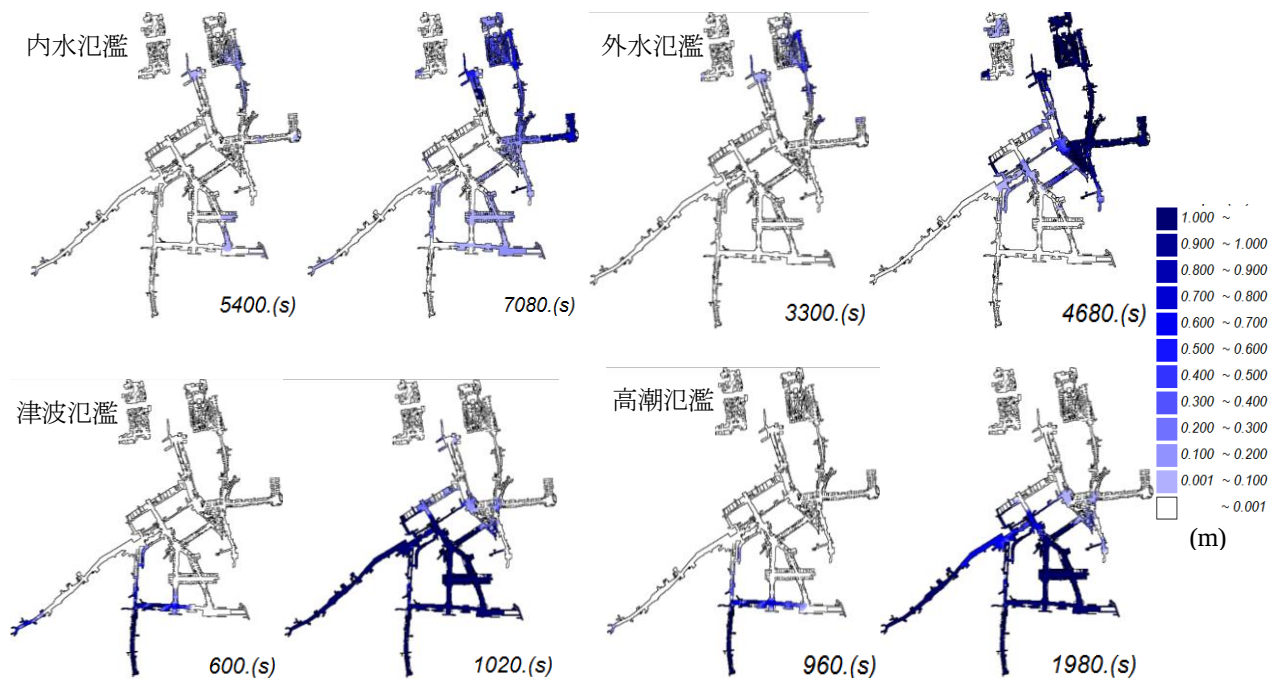


図9 地下街の10%および70%が浸水した時点での浸水深分布の計算結果

内水氾濫と外水氾濫，すなわち，雨水の氾濫と，津波氾濫と高潮氾濫，すなわち，海水の氾濫では，地上の浸水状況が異なることを前節で示した．その大きな違いは，浸水してくる方向であるので，地下街への浸水も出入口の位置に関係する．図9には，内水氾濫，外水氾濫，津波氾濫および高潮氾濫による地下街浸水の違いを示したものである⁸⁾．図は，地下浸水が始まって地下街総面積の10%と70%が浸水する時点の計算結果を示したものである．これをみると，内水氾濫と外水氾濫では地下街の北側と東側から浸水が始まるのに対し，津波氾濫と高潮氾濫では，南側と西側から始まっている．図の浸水範囲をみると大きな違いが分かる．津波氾濫では，短時間に大量の海水が地下街に流れ込むので，急激に浸水深が増加し，天井に達する場所が多数発生するのが分かる．これは，高潮氾濫でも同じで，津波や高潮時には地下街が浸水する以前に避難を完了していなければ，避難時の危険性が非常に高いことを示唆している．なお，地震発生および高潮発生時までには時間があるので，その間にどのようにして安全避難を完了するのが重要な課題である．

以上，4種の水災害時における地下浸水の違いを示したが，これらの結果は災害誘因によって異なる防災・減災対策が必要であることを示唆している．

2.5 問題点

地下空間浸水を防止する方法としては出入口に土嚢や止水板を設置するが，対応できる浸水深には限界がある．通常，出入口は道路面より30cm程度高くしてあり（マウンドアップ），止水板等の高さを加えると1m前後まで対応可能である．しかし，これは内水氾濫では効果的であるが外水氾濫，高潮氾濫，津波氾濫では2m以上の浸水深となることから，出入口を防水型にするか防水扉を設置する必要があるが，一部の出入口で設置されつつある．しかしながら，発災時には利用者の避難誘導が最優先されることから止水板等の設置が遅れることもある．さらに，前述したように地下街は地下駅や民間ビルと接続されており，前節に示した条件では地下街から地下駅へ流入する．止水板等の対策が行われない場合，内水氾濫では地下街に流入した総水量の約78%，外水氾濫では約68%，津波氾濫・高潮氾濫では約82%が地下駅に流入し，内水氾濫時でも地下鉄トンネルを通して氾濫水が地下鉄網を伝播して地上浸水の無い地区に広がって行くことが分かっている⁹⁾．また，接続ビルからの流入についても考慮が必要である．このように，地下空間浸水について解決すべき問題が多く残っているのが現状である．

3. 水災害防除の現状

水災害の防除は、表2に示すような構造物手法（ハード対策）と非構造物手法（ソフト対策）で防災・減災対策で行われているが、特に非構造物手法が機能して住民の資産および人命を守るための前提条件として、水災害危険性認知のためのハザードマップの周知と、防災意識向上のための啓蒙活動と防災教育が必要である。

表2 水災害の防災・減災対策

	構造物手法（ハード対策）	非構造物手法（ソフト対策）
内水氾濫対策	雨水排水設備，増補管，雨水貯留槽，土嚢，止水板，防水扉等	気象予警報，避難情報，避難施設，避難・救助，危機管理，土地利用規制，建物の耐水化，対策レベルの促進施策等
外水氾濫対策	河道拡幅，築堤，遊水地，放水路，地下放水路，ダム，砂防ダム，導流堤，沈砂地等	
津波・高潮氾濫対策	防波堤，防潮堤，防潮水門等	

2. の述べた水災害の誘因は、雨水による内水氾濫と外水氾濫、海水による津波氾濫と高潮氾濫に分けることができる。後者の海水の氾濫については、2011年の東日本大震災の被害を受けて、2014年3月に海岸法が改正されて津波・高潮の防災・減災対策が強化されるようになった。さらに、前述した2012年のハリケーン・サンディの被害調査結果を受けて高潮ハザードマップの策定が促進されている。1.で述べたように、3大湾（東京湾、伊勢湾、大阪湾）などの過去に高潮被害を受けた沿岸では防潮堤や防潮水門などの防護施設が設置されているが、現在、想定される最大規模の外力に対する堤高の不足や老朽化による構造物の強度劣化などの問題点や最大規模の外力設定の問題などが検討されている。著者は、海岸防御の専門家ではないので、ここでは詳細にはついては触れず、以下では内水および外水氾濫の防災・減災対策について防除の現状を述べることにする。

3.1 ハザードマップ

これまで内水氾濫対策の雨水排水施設の計画規模と外水氾濫対策の洪水防御施設の計画規模は、独自の規模の計画降雨を対象として立案されてきた。しかしながら、多くの都市で整備されている内水氾濫および外水氾濫のハザードマップは計画規模を上回る条件での解析結果に基づいているが、2015年5月の水防法の改定により想定される最大規模の外力（雨量）の想定を、流域規模と時間で統一した取り扱いがされるようになったことから¹⁰⁾、さらなる解析が必要となっている。

3.2 内水・外水氾濫に対する構造物手法（ハード対策）

都市域は高度な土地利用がなされているため、河川改修や貯水池のような土地を必要とする施設の設置が困難なことから地下空間を利用する施設の整備が行われている。ここでは、土木学会地下空間研究委員会防災小委員会の調査結果^{11), 12)}を引用して内水・外水対策施設の現状を紹介する。

調査結果では、水害対策を目的として地下に設置される施設を以下のように2種のタイプに分類している。

①流下タイプ：

河川や幹線下水道のバイパス的機能を有するもので、大規模な地下河川、地下放水路、下水道増補幹線などがある。この例として、首都圏外郭放水路、なにわ大放水路、環状七号地下河川（東京都）、大阪北部・南部地下河川、淀の大放水路（大阪市）、土佐堀～津守下水道幹線（大阪市）などを紹介している。

②流出抑制タイプ：

②-1 地下調節地や貯留管などの雨水を一時貯留するもの。この例として、地下河川の暫定運用時の環状七号地下河川（貯留量：全体 540,000m³）、大阪北部・南部地下河川（貯留量：北部 90,000m³、南部 550,000m³）、淀の大放水路（貯留量：50,000m³）、土佐堀～津守下水道幹線（貯留量：90,000m³）、いろは呑龍トンネル（京都府 貯留量：200,000m³）を、その他の貯留施設として、古川地下調節池（東京都 貯留量：135,000m³）、今井川地下調

節池（横浜市 貯留量：178,000m³），大阪国際空港内雨水貯留施設（貯留量：45,000m³），寺畑前川洪水調節池（兵庫県川西市 貯留量：19,400m³）を紹介している。これらは、地下河川の一部を暫定使用する 10 万 m³ オーダーの施設、公共施設等の地下を使用した 1 万～10 万 m³ オーダーの調節池と 1 千～1 万 m³ オーダーの比較的小規模な貯留施設に分類されている。

②-2 雨水を貯留・浸透させて、雨水の河川や下水道への流出を抑制するもの（比較的小規模）で、各家庭に設置するタイプの浸透ますや、透水性舗装、浸透機能をもった側溝やトレンチなどがある。例えば雨水貯留タンクの設置に補助金を出して設置を促進している。

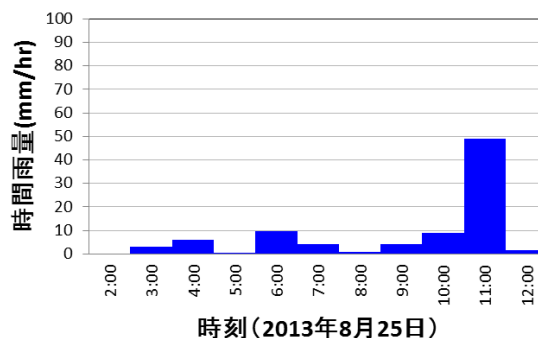
3.3 内水・外水氾濫に対する非構造物手法（ソフト対策）

前述したように表 2 に示した非構造物手法は、住民の資産および人命を守る前提条件として、水災害危険性認知のためのハザードマップの周知と、防災意識向上のための啓蒙活動と防災教育がなされることによって機能する。表 2 に示した項目は、人的および物的被害の防止・軽減を図るための対策であり、とくに人的被害の回避に重要なものは避難に関する対策である。避難時の危険性については、2013 年の水工学に関する夏期講習会の戸田による資料^{1 3)} に示されているので、ここでは、安全避難（事前避難）に必要な降雨に関する対応について述べる。

気象庁は 2017 年 7 月より水害危険度を、「今後の情報等に留意，注意，警戒，非常に危険，極めて危険」の 5 段階に色分けして発表し、それぞれの状況に応じた住民等の行動を例示する気象情報をホームページの地図上で発信する取り組みを始めた^{1 4)}。これは、小河川を含めた全国の河川（約 20,000 河川、従来は長さ 15km 以上の約 4,000 河川を対象）を対象として 1km メッシュ（従来は 15km メッシュ）で計算している。このような詳細な情報は有用であるが、地下空間管理者や利用者がより早期に対応するためにはローカルでパーソナルな情報が必要である。

図 10 は、1. で紹介した 2013 年 8 月 25 日の大阪管区気象台と著者が写真 4 に示すシステムを用いて 1 分毎に雨量のモニタリングしている地点（図 5 の○内）での降雨記録結果である。両地点間の距離は、わずか約 2.8km であるが、モニタリング地点での最大 1 時間雨量は、この地区の雨水排水能力である 60mm/hr を超えている。この降雨を用いて浸水氾濫解析をすると、道路浸水が発生して実際の浸水状況を計算できるが、大阪管区気象台の降雨デー

大阪管区気象台



モニタリング地点(大阪市北区)

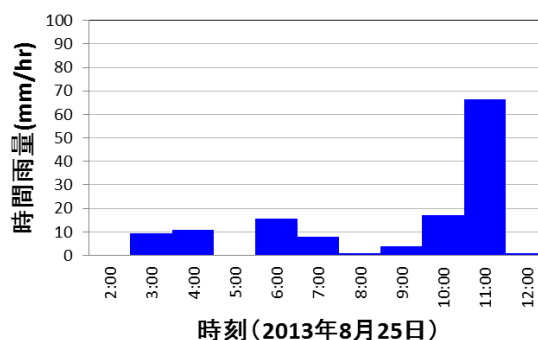


図 10 2013 年 8 月 25 日降雨の比較



写真 4 雨量計および雨量データ配信システム

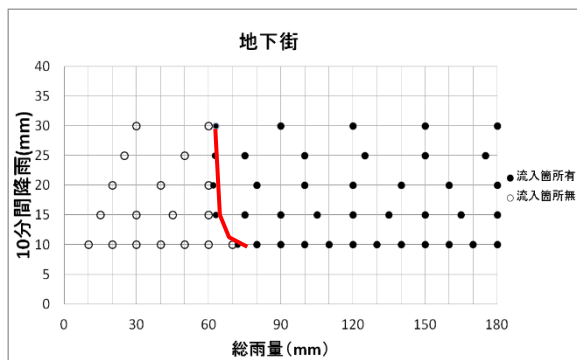


図 11 降雨条件と地下街浸水の有無の関係

2) 水災害に対する構造物手法（ハード対策）について

3.2 で述べた施設以外に、地下空間への氾濫水の流入を防止・軽減する止水板や止水扉の設置、人や物の漂流、特に車の漂流による被害の防止・軽減を目的とした施設の整備が必要である。また、都市域では水平避難のみではなく垂直避難が必要であるとともに、数千~数万人の大規模避難が必要となることから、それに対応するための施設の検討が必要である。また、高齢者や車いす利用者などの災害時要援護者の避難に関連した施設整備についても問題は残されている。

3) 水災害に対する非構造物手法（ソフト対策）について

情報伝達と高齢化社会に関する問題が残されている。気象予警報については内容や予測精度の向上が図られているが、対象者にローカルかつパーソナルな情報をどのように届けるかという問題が残っている。近年は、スマートフォンなどへの一斉メール配信やデジタルサイネージ設備を通してのローカル情報掲示などが行われているが、情報端末などを持たない人々への情報伝達に問題が残されている。また、避難情報が避難行動に結び付かないという問題を解決する方法の検討が必要である。

最近発生した水災害による犠牲者の半数以上が高齢者であるという事実から、ソフト対策として高齢者の避難・救助方策が必要とされているのが現状である。これは高齢化社会が抱える問題であり、解決するためには学際的な視点での検討が必要とされる。

以上、まとめとして残された問題について述べたが、いずれも水災害による被害を防止・軽減するために解決すべき問題であり、今後は新たな視点からの検討が必要である。最後になるが、本稿に記した内容が水災害の防止・軽減に少しでも役立つことを望む。

参考文献

- 1) 高橋和雄 企画・総括：1982年長崎豪雨災害から30年，自然災害科学，31-3，pp.175-205，2012.
- 2) 井上和也・戸田圭一・市川温・多田彰秀：1999年福岡市における都市型水害について，京都大学防災研究所年報，第43号B-2，pp.307-323，2000.
- 3) Inoue, K., Ushijima, M., Ishigaki, T., Toda, K. and Kuriyama, K. : On Heavy Rainfall Disaster in Tokai District in September 2000, 京都大学防災研究所年報，第44号B-2，pp.277-287，2001.
- 4) 尾崎平・石垣泰輔・戸田圭一：高密度商業地域における内水氾濫の脆弱要因に関する考察—2011年8月27日大阪の豪雨を対象として—，土木学会論文集B1（水工学），Vol.68，No.4，I_1009-I_1014，2012.
- 5) 佐藤信之：地下鉄の歴史 首都圏・中部・近畿圏，株式会社グランプリ出版，2004.
- 6) 関根正人・河上展久：地下街を抱える高度に都市化された地域の内水氾濫に関する数値解析，土木学会論文集No.789，II-71，47-58，2005.
- 7) 武田誠・島田嘉樹・川池健司・松尾直規：庄内川の想定破堤氾濫による地下空間への流入水量の検討，地下空間シンポジウム論文・報告集，第20巻，155-164，2015.
- 8) 濱口舜・石垣泰輔・尾崎平・戸田圭一：記録的水災害に対する大規模地下空間の浸水脆弱性に関する検討，土木学会論文集B1（水工学），Vol.72，No.4，I_1363-I_1368，2016.
- 9) 寺田光宏・岡部良治・石垣泰輔・尾崎平・戸田圭一：密集市街地における内水氾濫時の地下鉄浸水に関する検討，土木学会論文集B1（水工学），Vol.72，No.4，I_1357-I_1362，2016.
- 10) 国土交通省 水管理・国土保全局：浸水想定（洪水，内水）の作成のための想定最大外力の設定手法，2015.
- 11) 馬場康之・戸田圭一・実広拓史・井田隆久：地下に設置された治水対策施設に関する調査研究，地下空間シンポジウム論文・報告集，第15巻，133-140，2010.
- 12) 馬場康之・戸田圭一・実広拓史・井田隆久：地下に設置された治水対策施設に関する調査研究（その2），地

下空間シンポジウム論文・報告集，第 16 巻，147-152，2011.

13) 戸田圭一：地下浸水とその備え，土木学会第 49 回水工学に関する夏期研修会講義集，A-3-1－A-3-14，2013.

14) 気象庁 洪水警報の危険度分布，http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/riskmap_flood.html，2017.

15) 西尾信彦・井下泰具・伊藤博幸・森兼政行：地下空間防災システムの高度化に関する検討，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 22 巻，115-122，2017.

16) 浅野統弘・尾崎平・石垣泰輔・戸田圭一：密集市街地における内水氾濫時の歩行避難および車両移動の危険度評価，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.69，No.4，I_1561-I_1566，2013.

17) 戸田圭一・石垣泰輔・岡本香奈・島田広昭：地下駐車場の浸水や地下調節池での雨水貯留を表現できるモデルによる水防災教育，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 19 巻，117-120，2014.

18) 岡部良治・川中龍児・石垣泰輔・戸田圭一：地下浸水及び地下貯留施設の認知度について－防災教育アンケート結果より－，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 21 巻，175-180，2016.