

建設技術研究開発助成制度

都市水害時の地下浸水の予測と対策に関する研究

研究代表者：戸田 圭一（京都大学防災研究所）

1. 研究開発の目的：

豪雨により生じる都市水害時の地下浸水に焦点を絞り、地下街・地下鉄・ビルの地下室の浸水過程を精度良く予測できるシミュレーションモデルを開発するとともに、浸水被害を防止・軽減するための効果的な対策を、ハード・ソフト両面から考察して提案するものである。研究・技術開発の内容は大きく次の4つに分けられる（図1参照）。

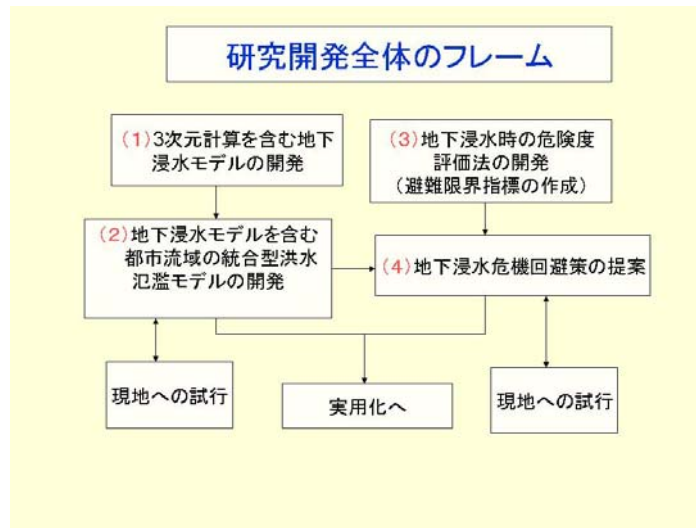


図1 研究開発のフレーム

(1) 3次元計算を含む地下浸水モデルの開発

地下空間の浸水過程を適切に表現できるモデルを開発する。モデルは地下空間の規模や求めたい精度に応じたものとする。地下街や地下鉄空間の浸水過程の把握には貯留槽（ポンド）モデルに基づく氾濫モデルを実用的なレベルに発展させ、階段部を含む小規模な地下空間の高精度の解析にはVOF法（Volume of Fluid法）に基づく3次元モデルの適用を図る。

(2) 地下浸水モデルを含む都市流域の統合型洪水氾濫モデルの開発

都市流域対応の分布型流出モデル、地上の洪水氾濫モデル、下水道モデル、地下浸水モデルを統合した都市水害モデルを構築し、降雨という外力を与えて地下浸水までを予測できる実用的な都市水害予測システムを構築する。

(3) 地下浸水時の危険度評価法の開発（避難限界指標の作成）

実物大の階段部、ドア部、平面通路部の模型を用いた体験型の避難実験を様々な条件下で実施し、信頼性の高い地下浸水時の避難限界指標を作成する。また地下駐車場での浸水を想定し、実物大の車を用いた体験型の脱出実験も実施し、車内が浸水していないという条

件下での避難限界指標を作成する。

(4) 地下浸水危機回避策の提案

都市水害時の地下空間の危機回避策をハード・ソフトの両面から考察して提案する。地下空間の浸水防止策や耐水設計の考え方を提示するとともに、避難行動解析をとおして適切な避難システム、情報伝達システムのあり方を提案する。

2. 3次元計算を含む地下浸水モデルの開発：

地下室のような小規模地下空間での浸水を対象とし、階段部の流れや局所的な場での水の動きを表現できるVOF法ベースの三次元数値解析モデルを開発した。図2に示すような、縮尺1/15の亚克力製の地下室模型を用いた実験を行い、実験結果を用いて計算結果を検証したところ、計算結果は実用性に富む十分な精度を有することが確認された。地下空間の局所的な場での詳細な浸水予測が必要な場合には、水面の変化を適切に表現できる、本手法が効果を発揮する。なお、おおまかな地下浸水の挙動を検討するうえでは、ポンドモデルなどに基づく平面二次元解析でも大きな問題は生じないこともあわせて確認された。

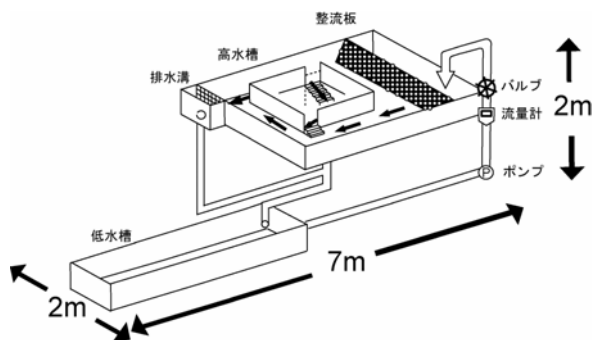


図2 実験に用いた地下室模型

3. 地下浸水モデルを含む都市流域の統合型洪水氾濫モデルの開発

従来の非構造格子を用いた平面二次元の地上の氾濫解析モデルに地下浸水が表現できるポンドモデルを組み込み、外力として降雨を与えて、大都市域での内水氾濫あるいは外水氾濫時の地下浸水までを表現できる統合型の都市水害モデルを構築した(図3参照)。地上の氾濫水の地下空間への流入については、段落ち式を適用している。

構築したモデルを福岡市の複数の地下街ならびに神戸市の三宮地下街に適用した。福岡市のケースでは、1999年6月の御笠川の溢水による福岡水害時の地下街の浸水状況を概ね適切に再現することができた。また三宮地下街のケースでは、止水板を設置す

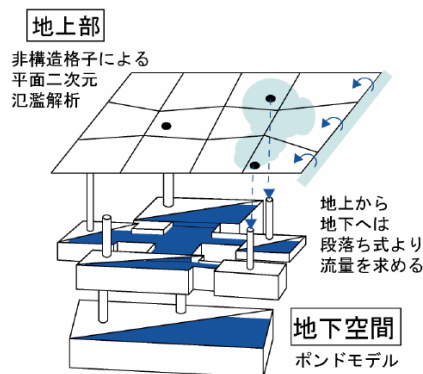


図3 統合型洪水氾濫モデル

る時間的余裕がないような短時間豪雨による内水氾濫時に、地下街の一部で避難に支障をきたすような危険な状況が現われる可能性が明らかとなった。またモデル解析をとおして、このような場合の被害軽減策として、入口部の段差の設置が効果的であることも示した。以下に神戸市三宮地下街の解析事例を示す。

図4（1）は、2005年9月の東京都神田川流域での短時間豪雨（降雨開始から3時間の総雨量が200mmを超える豪雨）を与えたときの、降雨開始3時間後の神戸市中心部の内水氾濫状況、図4（2）はそのときの三宮地下街の浸水状況である。

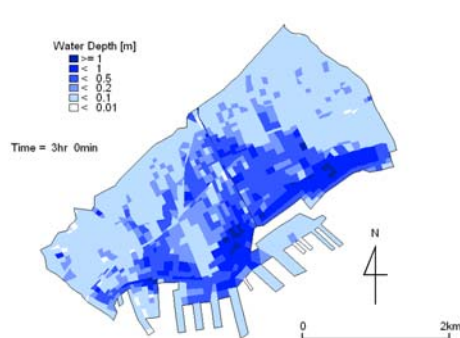


図4（1） 神戸市の内水氾濫状況

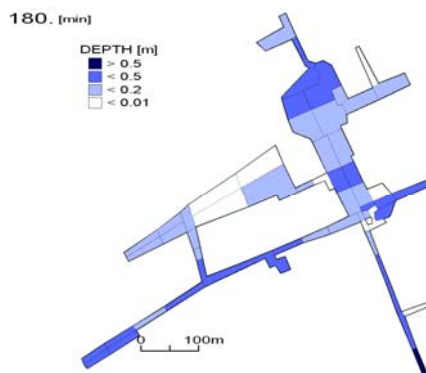


図4（2） 三宮地下街の浸水状況

地上の浸水は短時間で発生し、数多くの地下街入口から水が流入する影響で、地下街は浸水深が20cmを上まわる領域がかなり現われる。これらの領域では小学生以下の子供や高齢者の避難が困難となる。対策として高さ15cmの段差を地下の入口すべてに設置した場合の浸水状況が図4（3）である。段差の設置により地下街の浸水深がかなり低減することが、地上と地下を統合したモデル解析から確認された。

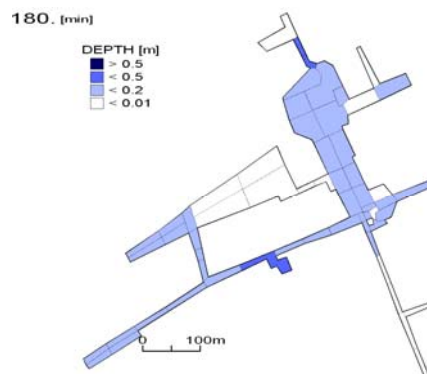


図4（3） 段差を設置したときの三宮地下街の浸水状況

4. 地下浸水時の危険度評価法の開発（避難限界指標の作成）

地下浸水時の危険度を評価するために、実物大の階段模型およびドア模型を用いた体験型の避難実験を、実験条件を変化させて実施し、地下浸水時の避難限界を把握することに努めた。図5は実物大階段模型の概要を示したものである。装置は高水槽とそれに続く地上を想定した平坦部、階段部（20段）、および終端の水路部から構成されている。流量を変化させて地上水深を種々変えた条件下で被験者が階段を上るのに要する時間を計測するとともに、避難の難しさを尋ねるアンケート調査を実施した。実験の様子を図6に示す。

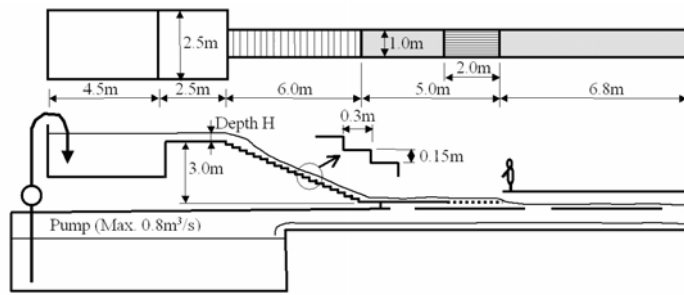


図5 実物大階段模型の概要

階段からの避難では、地上水深（越流水深）0.3mでの流況が避難限界であること、場の明暗、持ち物の有無、服装の違いのなかでは、服装が避難に大きく影響することが明らかとなった。また、水平通路部と階段部をあわせた避難実験も実施し、通路部を含めた避難限界指標として、 $M = h^2/2 + u^2h/g = 0.125m^2$ という関係が得られた。ただし M は単位幅あたりの比力（水圧と運量束の和を長さの2乗の次元で表したもので、 h :水深、 u :平均流速、 g :重力加速度である。

図7は実物大ドア模型の概要であり、ドアの両側に水槽が設置されている。片側の水槽に水を貯め、水深を様々に変化させて、被験者がドアを押し開けることができるかどうかを調べている。実験の様子を図8に示している。押し開けドアの避難実験からは、被験者数を増やすことにより、ドア前面の水深が成人男性では0.35m、成人女性で0.30mを超えると自力避難ができなくなる可能性が高いことが明らかとなった。高齢者や子供の場合は、成人女性の限界値よりも小さくなると予想される。

アンダーパスや地下駐車場での車の浸水を想定して、浸水時の車内からの脱出避難実験を、実物の車の模型（ボディー、タイヤとシートのみを残したもの）と水槽を用いて実施した（図9参照）。車内に浸水が生じていないという条件の下で、水槽の水深を



図6 階段模型による避難実験

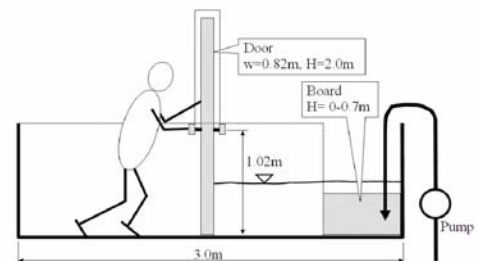


図7 実物大ドア模型の概要



図8 ドア模型による避難実験

様々に変化させて、被験者が運転席のドアを押し開けて脱出できる限界条件を求めた。その結果、成人男性の場合、地上から 75cm～80cm（ドア底部からは 45cm～50cm）の水深が、運転席のドアを押し開けて脱出できる限界であることが明らかとなった。なお、女性や子供、高齢者では、限界となる水深はさらに低下すると予想される。また運転席よりも後部座席からのほうが、ドアの面積が小さいため脱出しやすいという知見も得られた。



図9 車模型による脱出実験

5. 地下浸水危機回避策の提案

都市水害モデルによるシミュレーション解析や体験型避難実験をとおして、地下浸水時の危険性を明らかにするとともに、その危機回避策について考察した。

地下浸水対策としては、まず都市水害モデルを用いて浸水が予想される地下空間、そして流入が予想される地下の入口を識別することが重要である。

次に、ハード対策として、それらの箇所に止水板や段差を設置することが望まれる（図10参照）。地上の浸水深がこれらの高さまでであれば流入が防げるとともに、これらを越えた浸水が生じたとしても、浸水量を減らし、かつ浸水を遅らせる効果が期待できる。とくに短時間豪雨による激しい内水氾濫に対しては、止水板を設置する時間的余裕が無いことが多いため、バリアフリーに配慮した段差（ステップ）の設置が有効である。地下駐車場の入口にハンプを設置することも、同様の効果が期待される。

ソフト対策としては、避難情報の早期発信と迅速な避難行動が重要である。

地下空間では地上で何が起きているかわからないことが多く、災害の観点からは情報過疎になりがちである。地下街や地下鉄では、気象情報や河川情報および地上での状況が一元的に地下にも伝達され、地下施設の管理者・関係者がいち早く対応できるシステムづくりを進めることが急務である。避難については、公共性の高い地下空間では不特定多数の人々が集まっていることを考え、地上の出口までの避難経路図や避難指示機器をわかりやすいものにしておくこと、浸水時の停電に備えて非常用の電源を確保しておくことが重要である。

避難時の時間的余裕がない小・中規模の地下空間では、複数の避難経路の設置や、地階から建物の2階以上への避難経路の設置もあわせて考慮する必要がある。またアンダーパスでは、水難事故防止のため、浸水時に何らかの車両進入防止策を講じる必要がある。

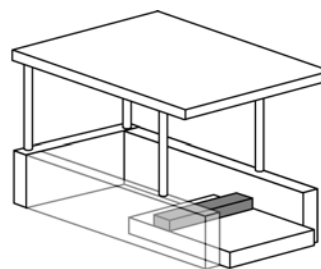


図10 地下入口の段差