

地下空間浸水を考慮した都市型洪水氾濫計算モデル 「構造格子モデルと街路ネットワークモデル」の検証 FLOOD SIMULATION IN UNDERGROUND SPACE WITH NUMERICAL MODELS ; STRUCTURE GRID MODEL AND STREET NETWORK MODEL

屋敷 朋宏¹・益戸 宏²・石垣 泰輔³・島田 広昭⁴
Tomohiro YASHIKI・Hiroshi MASUDO・Taisuke ISHIGAKI・Hiroaki SHIMADA

Underground spaces are utilized, such as the subway, the underground shopping mall and the basement parking lot in Japan. And the new type disaster called urban flood menaces the spaces. When flood water flows into an underground space, it is necessary for the people there to evacuate through safe routes as soon as possible. In this study, the urban flood was simulated with two kinds of the numerical models called the structure grid model and the street network model. The experimented results conducted in Kyoto University and the calculated data were compared. The results show that the two models were able to simulate the experimented results. A big difference of two numerical models is calculation time. The time for the structure grid model is about fifty times of it for the street network model. Then, the specific force per unit width was calculated, and the safety evacuation routes were examined by using the criterion of safe evacuation which is the specific force per unit width, 0.125m^2 . At 15 minutes from the beginning of the inundation, evacuations through a lot of stairs became difficult in this studied area.

Key Words : flood simulation, underground space, inundation in underground, urban flood, street network model, structure grid model

1. はじめに

都市部を訪れると地下へと続く階段が多く見られる。地下鉄は都市部を移動する際の1つの交通手段として欠かせないものであり、それらの駅を結ぶ地下通路は自動車を通ることがなく、信号も存在しないため目的地まで安全でスムーズに移動することができる。地下通路と接続している周辺のビル群や地下街はその地域の活性化に役立っている。このように、地下空間の利用は身近になってきており、今後もさらに拡大していくことが予想される。

日本は国土の約70%が山地であり、元来、利用しやすい土地は多くなかった。限られた土地で経済が発展してきた結果、地上部では高層ビルのような上方向へと土地を有効利用する手段が取られ、同時に地下空間施設といった下方向へも範囲は拡大していった。しかしながら、経済発展の結果、負の影響も出てきている。地球温暖化等の影響により下水道の処理能力を超える集中豪雨が都市部に降っている。道路は利便性の向上のためにアスファルトで舗装されているため、保水・排水が十分に機能しなくなり、雨水が地上部に溜まってしまいうという結果となった。溜まった雨水はより低い場所に流れようとするため、地下空間施設が存在すると必然的にそこへ流れ込んでしまう。地下空間施設は地上部と違い面積が限られており、面積が小さい分、一度氾濫水が流れ込んでくると水深の上昇が早く、利用している人の避難が遅れてしまい、中に取り残されてしまうこともある。実際に1999年および2003年の福岡、1999年の東京、2000年の東海地方でも同様の被害があり、犠牲者も出ている。都市型水害と呼ばれるこれらの水害は地下空間施設が多く存在する中で、今後も発生する可能性があると考えられる。都市型水害から身を守るには普段から地下空間施設を利用している時には地下浸水があるということを意識し、万一大雨が降ってきたならば地下空間施設を利用しないという自助の意識を持つことが必要である。しかしながら、大雨が降ってきたとしても地下にいれば、

キーワード：洪水氾濫計算，地下空間，地下浸水，都市型水害，街路ネットワークモデル，構造格子モデル

¹ 学生員 関西大学大学院工学研究科ソーシャルデザイン専攻

² 正会員 中央コンサルタンツ株式会社 設計部

³ 正会員 関西大学環境都市工学部都市システム工学科 教授

⁴ 正会員 関西大学環境都市工学部都市システム工学科 専任講師

その現象に気付くのが難しい。足元に氾濫水が溜まってきた時に危険を知るといことになる。そこから早急に安全な経路を通って避難を開始しなければならない。そのため、氾濫水が地下に流入してきた際に、どのような迂回を見せ、どのような箇所から危険となるのかを把握し、安全に避難できる通路・階段を選択できるようにする必要がある。

本研究では、まず地上部を対象に河道の外水氾濫を想定した氾濫計算を構造格子モデルと街路ネットワークモデルという2つのモデルで行い、それらのモデルの特性を検証した。さらに地下部を対象に同様の氾濫計算を行い氾濫水の挙動を明確にし、避難困難度を示す指標として単位幅比力¹⁾を用いて安全に避難できる経路の確保の可能性について検証した。氾濫計算の結果の妥当性については、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーにて行われた地上部と地下部の水理模型実験の結果を使用し、氾濫計算の結果と比較した。

2. 地上部の水理模型実験について

(1) 対象地域

京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーにて行われた地上部の水理模型実験²⁾の対象地域の概要を示す。対象地域は図-1に示す京都市内の鴨川右岸地区である。南北方向に2000m、東西方向に1000mであり、この地域には東西方向に御池通、四条通という2本の大きな道路が通っている。御池通の地下にはゼスト御池と呼ばれる地下街・地下駐車場・地下鉄の駅からなる地下空間施設が、四条通の地下には私鉄の地下駅とそれに付随する地下道が存在する。2つの道路沿いには写真-1に示すような地上と地下空間施設を接続する階段が計48箇所設置されている。対象地域内は南北方向に1/200の勾配を有しており、東側を流れる鴨川は掘り込み河川で堤防がないため外水氾濫の恐れがある。

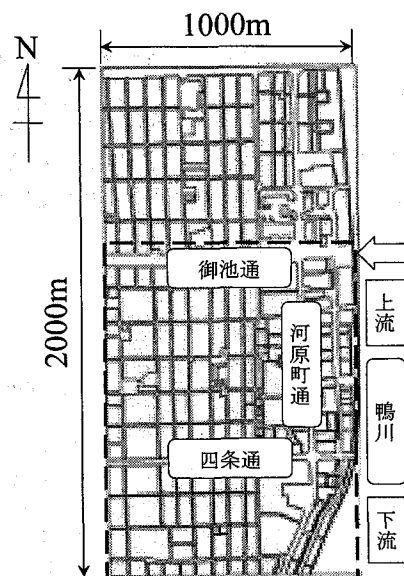


図-1 対象地域



写真-1 地下への階段

(2) 実験概要

水理模型の縮尺は1/100である。なお、以後に示す実験の数値はフルードの相似則を用いて原型量に換算したものである。対象地域内に計48箇所設置されている地下への階段については、模型上の対応する位置に穴をあけ、そこから氾濫水を排水している。実際の階段出入口の向きと同じになるようにコの字形の囲いを用いて、1方向からのみ氾濫水が流れ込むように再現されている。対象地域の東側を流れる鴨川からの氾濫地点は図-1の矢印で示す箇所であり、毎秒100m³の流量が氾濫すると想定している。実験では氾濫水の挙動、水深、対象地域の外へ流出する流量、階段から地下へ流入する流量を計測している。

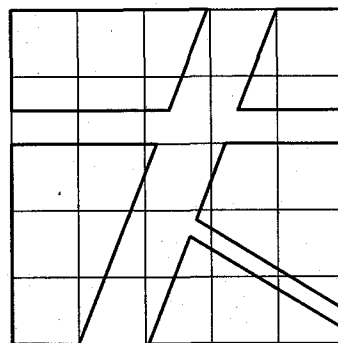


図-2 構造格子モデルの概念図

3. 地上部の氾濫計算について

(1) 氾濫計算モデル

氾濫計算モデルには構造格子モデルと街路ネットワークモデルという2つのモデルを使用した。以下に2つのモデルの概要を示す。構造格子モデルは図-2のように対象地域を正方形の格子に分割し、それぞれの格子に粗度係数や地盤高の値を与え、以下の浅水方程式を基礎式とした武田ら³⁾の手法を用いて計算を行った。

<連続式>

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

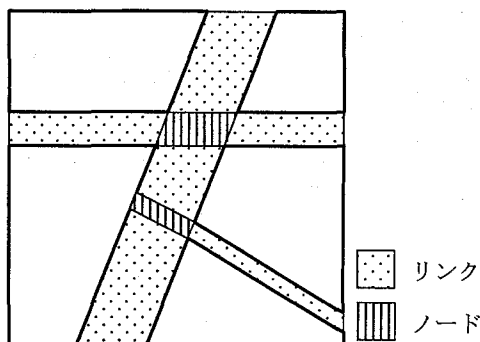


図-3 街路ネットワークモデルの概念図



図-4 氾濫水の拡がり

<運動量式>

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

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

ここに、 h は水深、 u 、 v は x 、 y 方向の流速、 M 、 N は x 、 y 方向の流量フラックス（ $M = uh$ 、 $N = vh$ ）、 H は水位、 τ_{bx} 、 τ_{by} は水底面でのせん断応力の x 、 y 方向成分である。

街路ネットワークモデルでは、図-3のように対象地域内の道路をノード部分とリンク部分からなるネットワークとみなす。ノードは道路の交差点部分のことであり、リンクは交差点を結ぶ道路部分のことである。計算においては川池ら⁴⁾の手法を用いた。リンクは長方形断面水路とみなした1次元解析法を適用し、ノードは面積を有する1つの格子とみなし連続式から水深を求めた。用いた基礎式は以下のとおりである。

<リンク>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = \frac{q_{in}}{B} \quad (4)$$

ここに、 u は x 方向の流速、 M は x 方向の流量フラックスであり、 q_{in} は横流入流量、 B はリンク幅である。

<ノード>

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m Q_k \quad (5)$$

ここに、 h はノードの水深、 A はその面積、 Q_k はノードの外周を構成する格子辺からの流入流量、 m は格子を構成する辺の数である。

(2) 氾濫計算の初期条件

対象地域は南北方向に勾配を有しており、北側は地盤高が高く、南側は低くなっている。そのため、氾濫水は南側へ流下する。本計算では計算条件の入力作業の手間を省き、計算時間の短縮を図るために氾濫計算の対象地域を図-1で示す破線で囲んだ範囲とした。粗度係数は実験模型表面の値が0.01という結果が得られたため、氾濫計算では原型量に換算した0.0215を用いた。

4. 地上部の氾濫計算の結果

構造格子モデル⁵⁾および街路ネットワークモデル⁶⁾による氾濫計算の結果と水理模型実験の結果を氾濫水の拡がり、水深の値で比較する。図-4は氾濫開始から30分後の実験での氾濫水の拡がりを示した写真に構造格子モデルおよび街路ネットワークモデルの結果を重ね合わせたものである。実験では氾濫水を着色し

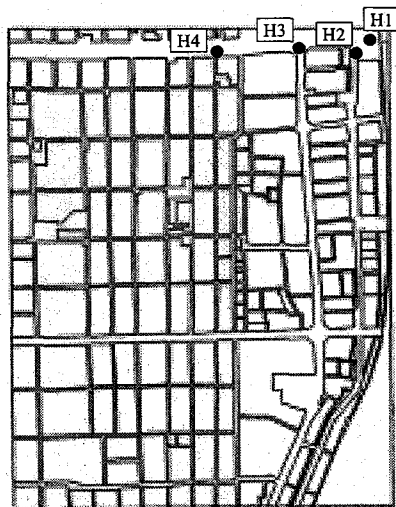


図-5 水深計測地点

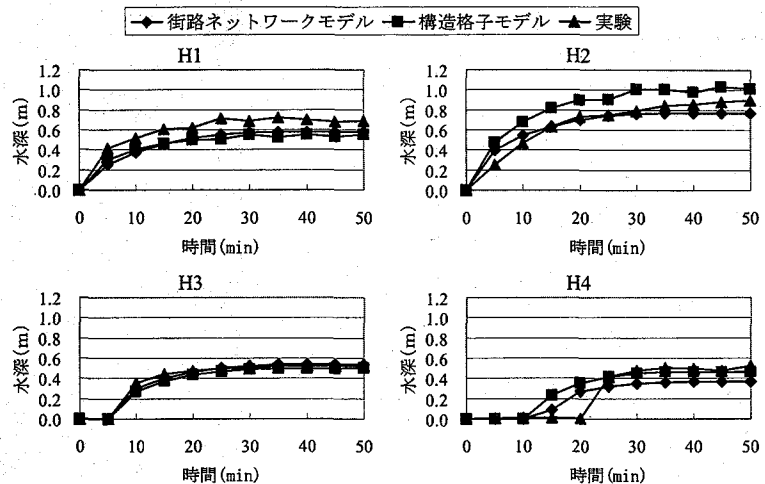


図-6 水深の時間変化

ているため、道路部分の色が濃くなっている箇所まで氾濫水が広がっていることを示している。その結果と計算の結果を比較してみると、街路ネットワークモデルが構造格子モデルよりも実験結果に近くなっている。特に北側に位置する御池通において、東西方向への氾濫水の広がりを見ると、2つの計算モデルの結果に大きな差がある。

次に、図-5に示すH1～H4の4箇所の地点において得られた実験と計算の水深の値を比較する。それぞれの計測箇所における水深の時間変化を図-6に示す。H2において構造格子モデルの値が実験の値よりも大きくなっているが、他の点においては氾濫水が計測箇所到達する時間や、30分後以降の安定時の水深の値は実験結果とほぼ一致している。H4において氾濫水が到達する時間が計算結果の方が10分程早くなっているが、これは氾濫水の広がり度で示したようにH4が位置する対象地域の北側において、東西方向の流れが計算結果では卓越していることが理由として考えられる。

地上部分の氾濫計算の結果は、構造格子モデルおよび街路ネットワークモデルのいずれでも水理模型実験の結果を再現しているといえる。これらの2つのモデルを用いた際の大きな違いは計算に要した時間である。同じ条件で計算に要した時間を示したのが表-1であり、街路ネットワークモデルは構造格子モデルの約1/50の時間で計算を行うことができた。そこで、次章に示す地下部の氾濫計算には街路ネットワークモデルを用いることとした。

表-1 計算時間の比較

モデル	街路ネットワークモデル	構造格子モデル
差分時間		
0.05秒	38秒	30分51秒

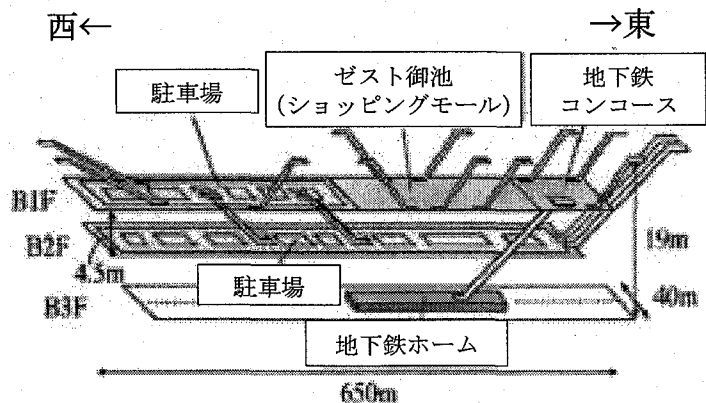


図-7 ゼスト御池の構造図

5. 地下部の水理模型実験について

(1) 対象地域

地上部と同様に地下部も京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーにて水理模型実験⁷⁾が行われている。対象地域は地上部の対象地域で示した御池通の地下にあるゼスト御池と呼ばれる地下街・地下駐車場・地下鉄の駅からなる地下空間施設である。ゼスト御池の構造は図-7のように地下1階から地下3階までの3層構造になっており、地下1階は東側がショッピングモール、西側が駐車場になっている。地下2階は

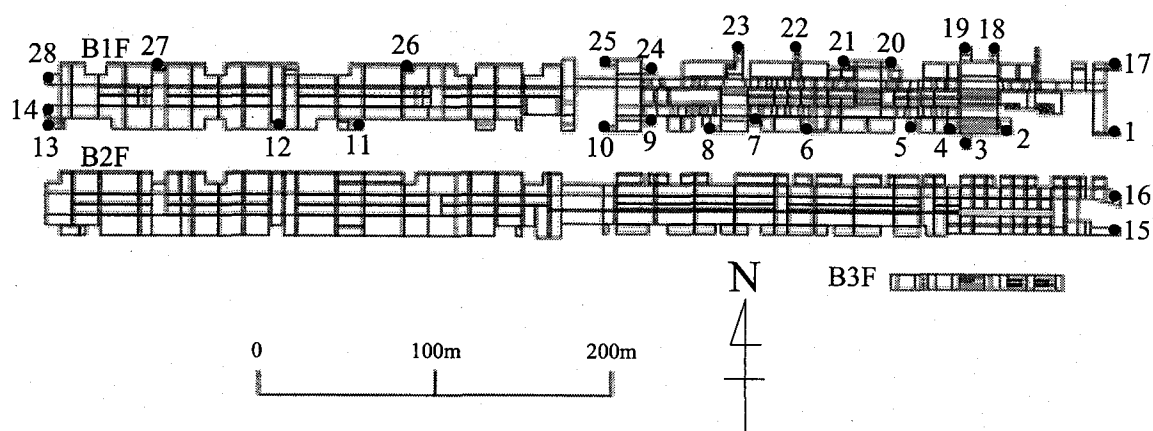


図-8 御池地下街の出入口

全面駐車場で、地下3階は地下鉄のホームであり、地下1階の地下鉄改札口と地下3階はエスカレータで接続している。地下1階の駐車場部分と地下2階も車両専用のスロープで接続しており、氾濫水が流入してきた場合、接続箇所を通して異なる階層が浸水する恐れがある。地下1、2階は東西方向に650m、南北方向に40mの長方形で、地下3階は東西方向に100m、南北方向に8mの長方形である。地下1、2階は中央部分に段差があり、西側は東側より1.5m高くなっている。

表-2 流入条件（実験）

入口No	流入開始時間	流入量(m ³ /s)
1	0	1.58
15+16	10分18秒	14.08
3	10分03秒	1.32
5	10分14秒	2.13
4	10分30秒	1.88
2	10分47秒	2.63
18	10分25秒	0.38
6	11分53秒	1.31
17	12分42秒	2.00
7	14分09秒	1.08
9	23分06秒	1.10
10	24分01秒	0.54
8	24分28秒	0.94
11	27分18秒	0.67
計		31.63

表-3 流入条件（計算）

入口No	流入開始時間	流入量(m ³ /s)
15+16	0	12.43
17	1分40秒	0.91
1	1分50秒	1.24
2	3分00秒	1.08
3	4分50秒	1.40
4	4分50秒	1.32
5	5分10秒	1.32
18	5分30秒	0.47
6	7分30秒	1.07
7	7分50秒	0.87
8	10分20秒	0.89
9	10分40秒	0.84
10	13分20秒	0.66
11	17分30秒	0.83
計		25.33

(2) 実験概要

地下部の水理模型の縮尺は1/30であるが、以後に示す実験の数値は原型量に換算したものである。地上部と地下部を接続する階段が対象地域内には図-8に示す計28箇所あり、それぞれの箇所からの流入条件を表-2に示す。流入条件については、地上部の水理模型実験の際に地上に接続されている階段から地下へ流入する流量を計測しているため、その実験結果の値を用いている。図-8の1番の階段から流入が開始する時間をt=0秒とし、時間差をおいて他の階段からも順次流入を開始させている。

6. 地下部の氾濫計算について

地下部の氾濫計算には街路ネットワークモデルを用いる。実際の洪水氾濫は、地上部で氾濫水が溢れ、道路上を流れて、地下出入口に到達し、地下空間施設へと流れ込み、地下の異なる階層へも浸水が進むという過程であるように、本研究でも今後は地上部と地下部を一体化した氾濫計算を行っていく予定であるが現段階では独立した計算を行った。そのため、地下部の氾濫計算の流入条件には実験での値を用いずに地上部の氾濫計算から得られた結果を使用し、地上部と地下部が連続した条件の元で氾濫計算を行った。その際に用いたのが表-3に示す氾濫計算の流入条件である。

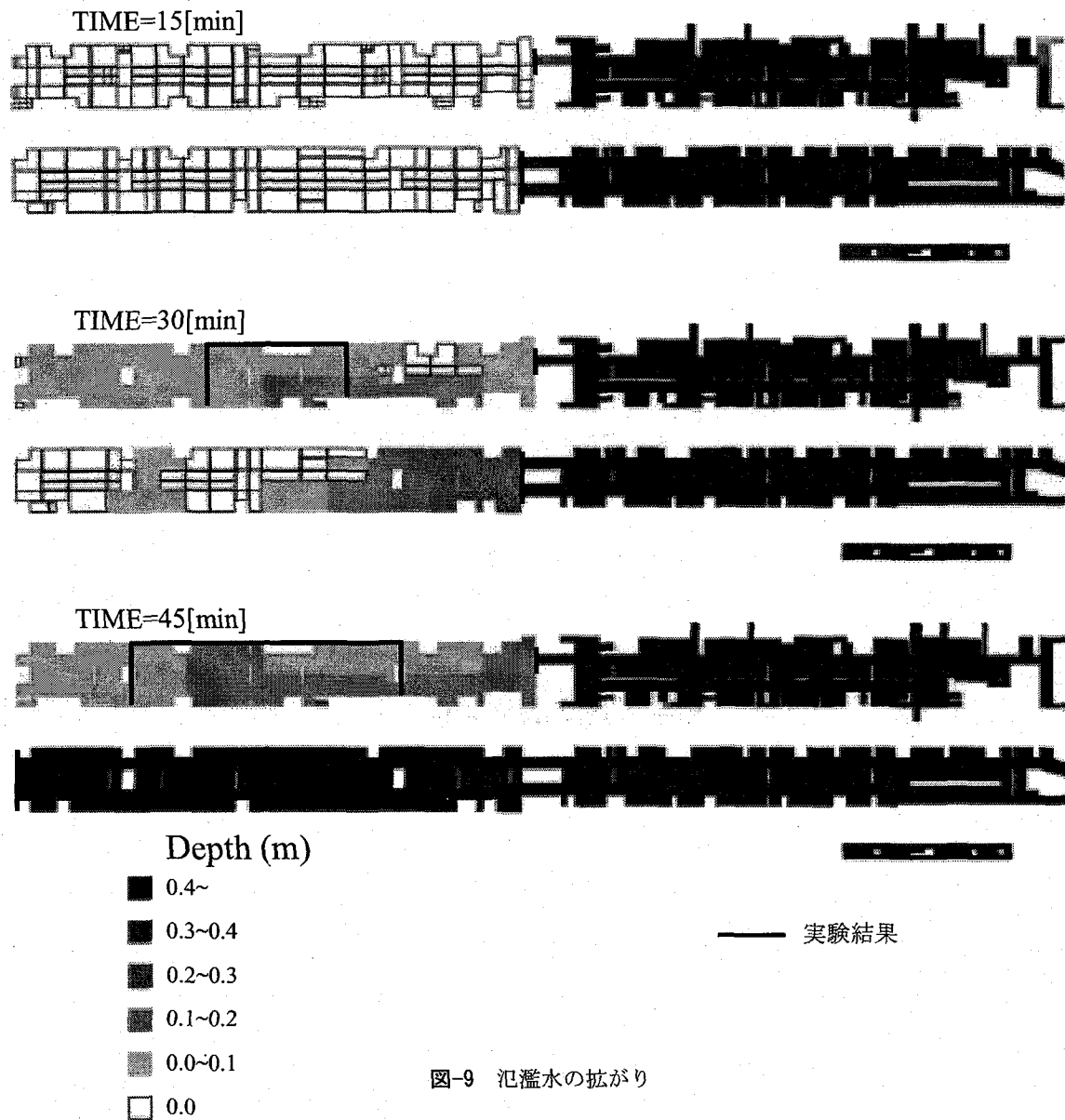


図-9 氾濫水の拡がり

7. 地下部の氾濫計算の結果

街路ネットワークモデルによる氾濫計算の結果と水理模型実験の結果を氾濫水の拡がりで見比べる。図-9は氾濫開始から15分後、30分後、45分後の計算での氾濫水の拡がりを示したものである。図の実線は実験での氾濫水の先端にあたる箇所である。15分後には地下1、2階の東側が浸水してしまっている点では、実験結果と計算結果が一致している。西側は東側より1.5m高くなっているため氾濫水が東側に溜まっており、時間が経過して水深が1.5mを超えると西側も浸水が始まる。30分後以降は計算結果が実験結果よりも拡がりが大きくなっており、45分後には計算では氾濫水が対象地域全面に浸水しているのに対し、実験では地下1階の西側の一部が浸水していない。

8. 避難経路の確保の可能性について

浸水時の避難限界として、階段・通路という2つの避難経路について同時に評価できる指標として単位幅比力が提案されている。大西ら¹⁾によると避難限界は単位幅比力が 0.125m^2 であるとしている。そこで、氾濫開始から5分後、10分後、15分後の単位幅比力の値を計算結果から算出し、地上部と地下部を接続する階段部において単位幅比力の値が 0.125m^2 を超える箇所を避難困難としたものが図-10である。氾濫開始から5分後には東端の階段部は避難困難となっている。10分後は避難困難である階段部は2箇所増えただけで

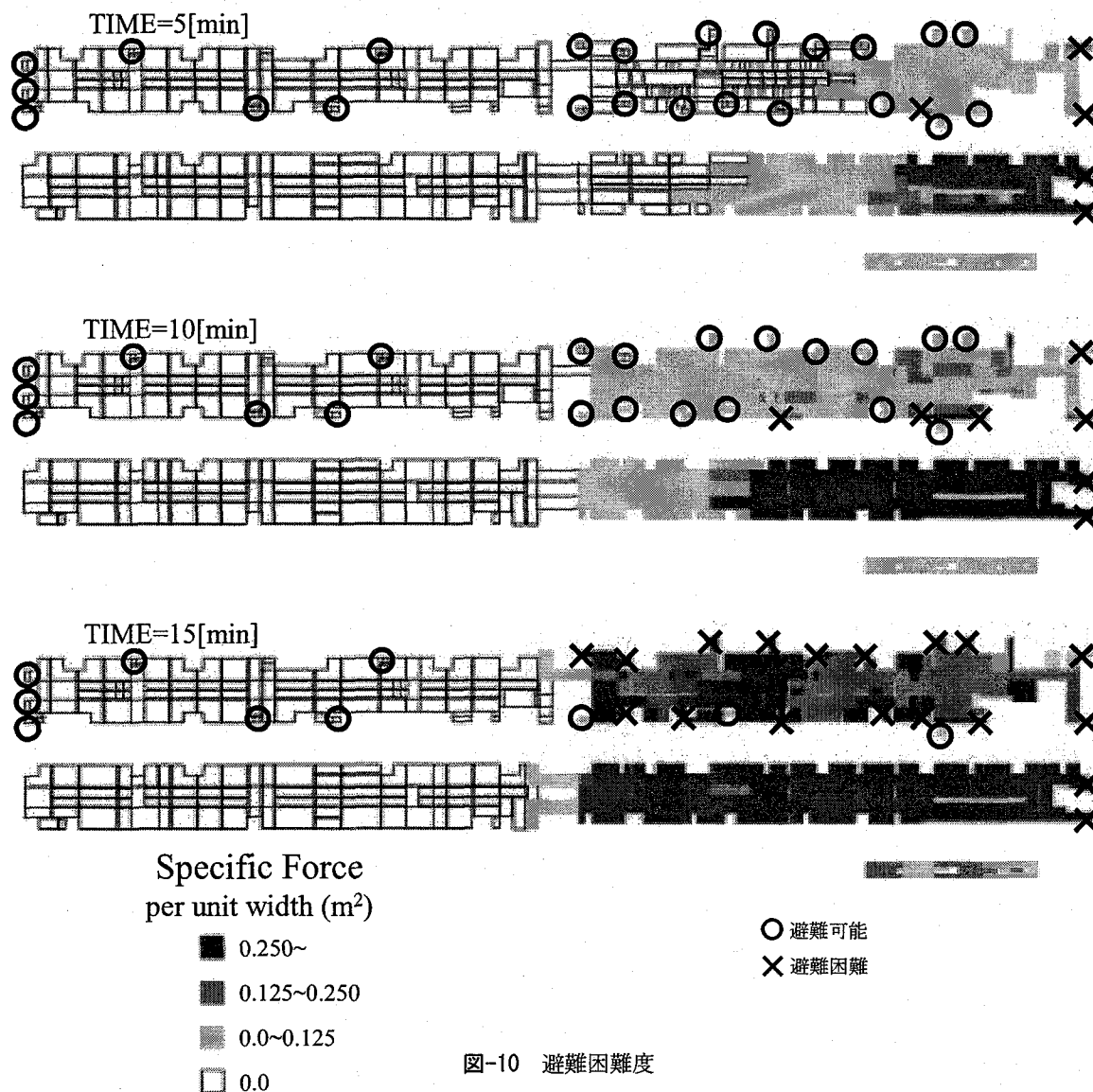


図-10 避難困難度

が、15 分後には一気に増加し、東側のほとんどが避難困難となっている。地下空間の浸水時には早期の避難が必要であることがわかるが、同時に対象地域の西側のように比較的避難する時間に余裕のある箇所も存在する。そのような箇所へ浸水開始時から誘導できるような対策を取ることができれば、地下空間施設のような狭い場所であっても浸水による被害が軽減できると考えられる。

9. おわりに

本研究ではまず、地上部を対象に京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーにて行われた水理模型実験の結果を用いて、構造格子モデルと街路ネットワークモデルの特性を検証した。その結果、2つのモデルは実験結果を同程度の精度で再現することができたが、街路ネットワークモデルが構造格子モデルよりも計算に要する時間が格段に少ないことがわかった。さらに、街路ネットワークモデルを用いて地下部の氾濫計算を行い、単位幅比力の値を用いることによって地下浸水時の避難困難度について検証することができた。

謝辞：最後に、本研究を遂行するにあたり貴重なコメントを頂いた京都大学防災研究所 戸田圭一教授、氾濫計算のモデルを提供してくださった京都大学防災研究所 川池健司准教授、終始研究について助言を頂いた関西大学大学院工学研究科総合工学専攻 川中龍児氏に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 大西良純, 川中龍児, 石垣泰輔, 馬場康之, 戸田圭一, 島田広昭: 地下空間浸水時の避難困難度評価法に関する検討, pp.435-436, 第 62 回年次学術講演会講演概要集, 2007.
- 2) 石垣泰輔, 中川一, 馬場康之, 技術室氾濫模型実験グループ: 地下空間を含む都市洪水氾濫に関する水理模型実験, pp.527-544, 京都大学防災研究所年報, 第 47 号 B, 2004.
- 3) 武田誠, 井上和也, 上塚哲彦, 松村貴義: 高潮解析における数値解析モデルおよびその境界条件に関する検討, pp.1089-1094, 水工学論文集, 第 40 巻, 1996.
- 4) 川池健司, 井上和也, 林秀樹, 戸田圭一: 都市域の氾濫解析モデルの開発, pp.1-10, 土木学会論文集, No.698/II-58, 2002.
- 5) 屋敷朋宏, 石垣泰輔, 島田広昭, 川中龍児: 地下空間浸水を考慮した正方格子洪水氾濫計算モデルの検証, 平成 18 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, II-38, 2006.
- 6) 益戸宏, 屋敷朋宏, 川中龍児, 石垣泰輔, 島田広昭, 中川一: 地下空間浸水を考慮したネットワークモデルによる洪水氾濫解析, 平成 19 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, II-34, 2007.
- 7) 戸田圭一, 井上和也, 大八木亮, 中井勉, 竹村典久: 複雑な地下空間の浸水実験, pp.583-588, 水工学論文集, 第 48 巻 (1), 2004.