

都市水害時の地下浸水の危険性について

A study of risk by inundation in underground spaces in urban flood

戸田 圭一¹・岩村 真理²・間島 真嗣³・石垣 泰輔⁴

Keiichi TODA・Shinri IWAMURA・Shinji AIHATA・Taisuke ISHIGAKI

In a large urban flood, inundation water is likely to flow into underground spaces such as basement, underground mall, and subway. The flooding water mainly flows into underground spaces through a stair, which is used as an evacuation route. So it is anticipated that one cannot take refuge and the accident may happen by the flood.

In this study, a risk of evacuation from underground space through stairs in inundation is studied, using the full-sized hydraulic model of a stair. By the measurement of the velocity and depth of flow, and the human experiment with 49 subjects, the critical overflow depth of evacuation by ordinary adults is found to be about 30cm.

Also, an inundation flow model is developed which can treat both a ground space and an underground space, and it is applied to Hakata area and Tenjin area in Fukuoka City. As a result, it is found that for the flood condition in June, 1999, flow depth becomes higher than 30cm over the wide field on the ground in Hakata area and some underground spaces in the east of JR Hakata station are apt to be dangerous. In addition, the new Tenjin underground mall is likely to be dangerous in inundation by heavy rainfall.

Key Words: urban flood, inundation in underground spaces, human experiment, inundation analysis

1. はじめに

都市部では地下空間の利用が活発に行われている。しかし、地下空間は都市の最深部に位置するため、水害時に氾濫水が流入しやすい。また、容積が小さく水深が急激に増大する可能性があり、避難経路の階段が地上の氾濫水の流入経路と重なるため、水害時の地下空間は危険となりやすい。

そこで本研究では、まず水害時のどのような状況で地下空間が危険になるかを把握するために、実物大の階段模型を用いて水理量の計測や歩行実験を行い、地下浸水時に地下空間の階段部からの避難の限界となる指標

キーワード：都市型水害，地下浸水，体験実験，氾濫解析

¹正会員 京都大学防災研究所 教授

²学生員 京都大学工学部 学生

³学生員 京都大学大学院 修士学生

⁴正会員 関西大学工学部 教授

を求めた。

一方、1999年6月29日の豪雨により、福岡市 JR 博多駅周辺では博多駅より東側にある御笠川と山王放水路の溢水による外水氾濫が、天神では集中豪雨による内水氾濫が起きており、両地区で地下浸水が起こった。そこで、これらの両地区について地上と地下を統合した浸水解析を行った。そして、実験で求めた指標と解析結果をもとに福岡市の博多地区および天神地区の地下空間の危険性について考察した。

2. 実物大階段模型を用いた避難実験

氾濫水の流入によって階段部の避難がどの程度困難になるかを詳しく調べるために、実物大の階段模型を用いて実験を行った。まず、水深と流速の地点別測定を行った。次に、被験者を用いた歩行実験を行い、被験者が階段を上るのに要する時間の測定や、流入時の階段に対する恐怖の感じ方・避難の困難さ・限界などに関するアンケート調査を行った。これらの結果より、地下空間からの避難が限界となる際の指標を作成した。なお、実験は地上の浸水深に相当すると考えられる越流水深を変化させて実施した。

(1) 模型の概要

実物大階段模型は京都大学防災研究所宇治川水理実験所に設置され、踏み面(階段の平面部)がコンクリート製、側面は金属製の骨格とアクリル製の板で構成されている。一般的な階段の形状を参考に、段数 20 段、横幅 1m、蹴上(一段の高さ)15cm、踏み面 30cm とした。模型の概要を図-1 に示す。

(2) 流速・水深の計測

流速・水深の測定は越流水深 10cm、20cm、30cm、40cm、50cm の 5 ケースで行った。それぞれのケースにおいて高水槽の水深(越流水深)を目視で確認している。流速は、各段階においてテニスボールを 10 個前後投下し、固定したビデオカメラで撮影し、画像解析を行うことで求めた。また、水深に関して、階段下段部(下から数えて 11 段目以下)の水深はピトー管を用いて水路中央の流速を求め、それを基に連続式より算出し、階段上段部(12 段目以降)の水深はスケールを用いて実測値を測定した。

(3) 歩行実験

この測定は越流水深 0cm(非浸水)、10cm、20cm、30cm、40cm の 5 ケースで行った。各流下条件のもとで被験者が階段を上る様子を観察し、また、階段を上るのに要する時間を測定した。ただし、女性は越流水深 20cm 以上、男性は越流水深 30cm 以上のケースにおいては、安全のためにヘルメット着用と命綱装着を義務づけた。なお、実験は、「荷物が無い、動きやすい、両手に手すりがある、明るく視界良好」といった理想的な条件のもとで行われている。実験の様子を写真-1 に示す。

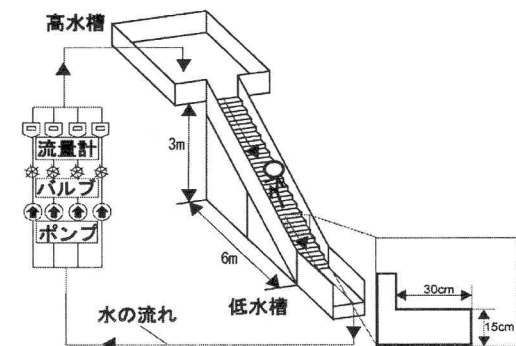


図-1 実物大階段模型の概要

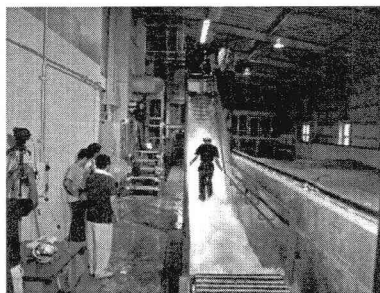


写真-1 階段を用いた歩行実験

終了後にアンケートを実施し、各越流水深における階段の上りにくさ、地下浸水からの避難が限界となる越流水深の予想に関して調査した。

(4) 結果および考察

まず、流速・水深の測定結果に関して述べる。越流水深 30cm および 40cm における u と h の関係を図-2 に示す。ただし、流速を u [m/s]、水深を h [m] としている。また、図中の曲線は館¹⁾が求めた避難限界である $u^2h = 1.5$ [m³/s²] を表している。今回計測した水理量を館¹⁾が求めた避難限界の指標と照らし合わせると、越流水深 30cm で避難の限界に達し、越流水深 40cm では完全に避難が不可能となっている。これより、避難の限界は越流水深 30cm 付近にあると考えられる。

次に、歩行実験の結果を表-1 にまとめる。表中の「不安定」とは、ふらつきや転倒が確認された人、または手すりを利用した人を表している。

越流水深 30cm のケースでは女性の半数近くが手すりを持ち、不安定となった。さらに、越流水深 40cm のケースでは階段を上れない女性が現れ、男性にも不安定になるものが現れた。

次に、アンケートの結果を図-3、図-4 に示す。体験後の感想を聞いたところ、図-3 より越流水深 30cm のケースで男性、女性あわせて最多の人が「上りにくい」と感じており、越流水深 40cm のケースでは約半数が「非常に上りにくい」と感じていることがわかる。また、避難限界となる越流水深の予想では、図-4 より多くの人が越流水深 30cm 前後が避難の限界と感じていることがわかる。

今回の実験は理想的な状況で行われており、実際の現場では「子供を連れている、動きにくい服装をしている、停電などにより暗くて何も見えない、群衆で混雑する」など、実験が行われた状況よりも階段を上ることが難しくなると予想される。以上の結果および考察より、地下浸水時における階段からの避難の限界は越流水深 30cm 程度であると考えられる。

なお、年齢の違いによる実験結果の差について若干説明を加えておく。越流水深 40cm のケースにお

表-1 歩行実験の結果

男性				
越流水深(cm)	10	20	30	40
難なく上る(人数)	33	33	33	30
不安定(人数)	0	0	0	3
上れない(人数)	0	0	0	0
計33名				
女性				
越流水深(cm)	10	20	30	40
難なく上る(人数)	14	13	9	5
不安定(人数)	2	3	7	8
上れない(人数)	0	0	0	3
計16名				

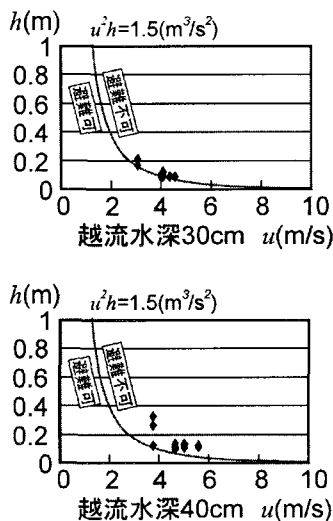


図-2 流速と水深をもとにした避難の限界

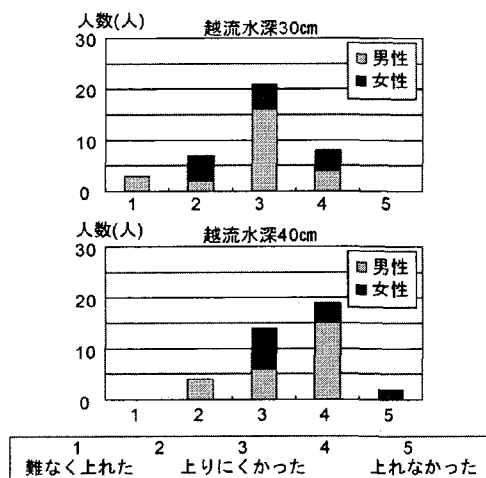


図-3 体験後の感想

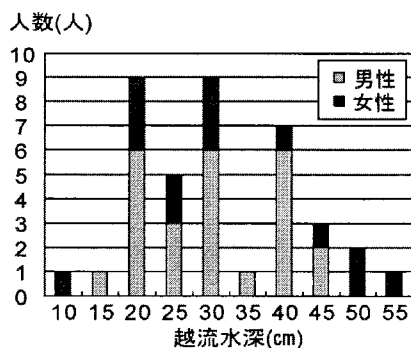


図-4 避難限界となる越流水深予想調査結果

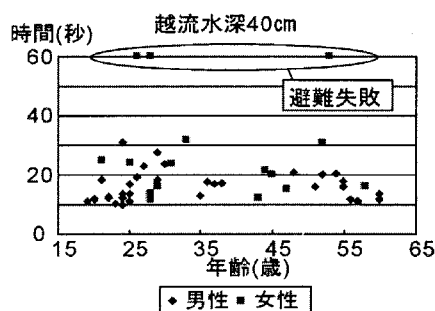


図-5 年齢と階段を上るのに要した時間の関係

ける各被験者が階段を上るのに要した時間を年齢別に分けたものを図-5に示す。この図より、今回の被験者の成人において、年齢と階段を上るのに要した時間との間に相関関係は特にないことがわかる。

3. 地上・地下空間を統合した浸水解析

ここでは、地上と地下空間を統合した浸水解析モデルについて述べ、次にこのモデルを博多地区および天神地区に適用して1999年6月29日に福岡で発生した水害を解析した結果を示す。

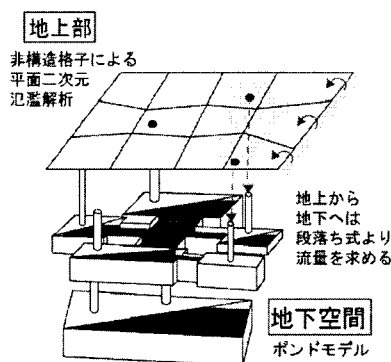


図-6 解析モデルの概念図

(1) モデルの概要

浸水解析は、より信頼性の高い解析を行うために間畠ら²⁾のボンドモデルを発展させることを考え、図-6のように地上に非構造格子モデル³⁾、大規模地下空間にボンドモデルを適用した。以下に基礎式および解析手法を簡単に示す。

a) 地上部の解析手法

地上部の解析に用いた基礎式は、以下の連続式および計算時間短縮のために移流項を省略した運動量式を用いる。

<連続式>

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

<運動量式>

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 M \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 N \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (3)$$

ここで、 x, y : 平面二次元座標、 t : 時間、 M, N : x, y 方向の流量フラックス、 r : 降雨量、 h : 格子水深、 H : 格子水位、 g : 重力加速度、 n : マニングの粗度係数、 u, v : x, y 方向の流速である。

b) 地下空間の解析手法

地下空間の解析には、以下の連続式および運動量式を用いる。まず、連続式を示す。

<連続式>

$$A \frac{dh}{dt} = \sum_{i=1}^m Q_i + Q_{in} \quad (4)$$

ここで、 A ：貯留槽の有効底面積、 h ：水深、 t ：時間、 Q_i ：貯留槽が有する i 番目の接面から流入する流量、 m ：流量の出入りが行われる接面数、 Q_{in} ：地上や地下街の他の階層など外部からの流入流量である。

次に、貯留槽間の運動量式は、次式を用いる。

<運動量式>

$$\frac{L}{gA_b} \frac{dQ}{dt} = \Delta H - \alpha L Q |Q| \quad (5)$$

ここで、 ΔH ：水位差、 Q ：流量、 L ：隣接した貯留槽の図心間の距離、 A_b ：接面の断面積である。また、隣接した貯留槽の番号をそれぞれ i, j 、貯留槽 i, j の平均水深を h_i, h_j 、接面の幅を B 、貯留槽 i, j の天井高を D_i, D_j として接面の断面積 A_b 次式のように表す。

$$A_b = B \frac{\min(h_i, D_i) + \min(h_j, D_j)}{2} \quad (6)$$

ここに、 $\min$ は括弧内の小さい方の値を表す。また、 α は損失係数であり、マンニングの粗度係数 n を用い、次式のように表す。

$$\alpha = \frac{n^2 s^{4/3}}{A_b^{10/3}} \quad (7)$$

ここで、 s は接面の潤辺である。

c) 上層と下層の接続

地上部から地下空間への接続、地下街と地下鉄空間、地下 1 階と地下 2 階などの接続箇所は、上層から下層への氾濫水の落ち込みが考えられる。

上層から下層へ氾濫水が流入する場合、下層への流入流量を以下の段落ち式で求める。

$$Q = B_e \mu h \sqrt{gh} \quad (8)$$

ただし、 B_e ：流入口の流下幅、 h ：上層の水深、 μ ：段落ち流れの流量係数である。また、地上と地下空間の接続に関しては、越流水深を上層の水深としている。なお、一つの貯留槽内に含まれる開口部の形状や数はさまざまであるため、開口部の諸元は開口部を含む貯留槽ごとに算定した。

(2) 浸水解析条件

このモデルを用いて 1999 年 6 月 29 日の福岡水害の浸水解析を行った。対象領域を図-7 に、両地区の地盤高を図-8 に示す。また、博多駅地下空間の概要および地盤高を図-9 に示す。天神地区は 7 時から 9 時にかけての集中豪雨による内水氾濫を、博多地区は 9 時以降に起きた御笠川と山王放水路溢水による外水氾濫を解析する。御笠川と山王放水路から市街地への流入流量⁴⁾(博多地区の流入条件)および福岡水害時の時間降雨量(天神地区の流入条件)を図-10 に示す。解析では、博多地区の地下空間入口には 30cm の段差が、天神地区の地下街入口には 15cm の段差があるものとしている。また、地上の対象領域

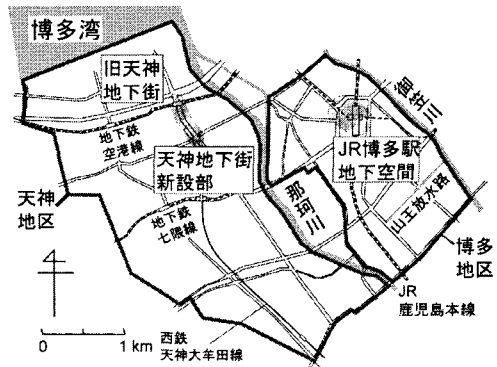


図-7 地上の対象領域

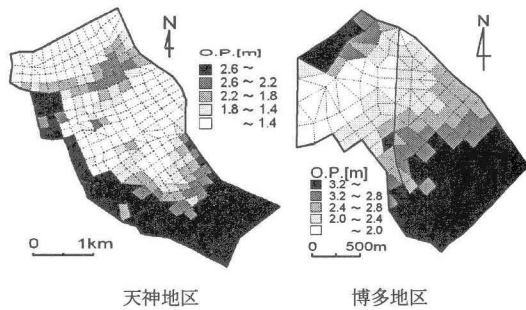


図-8 対象領域の地盤高

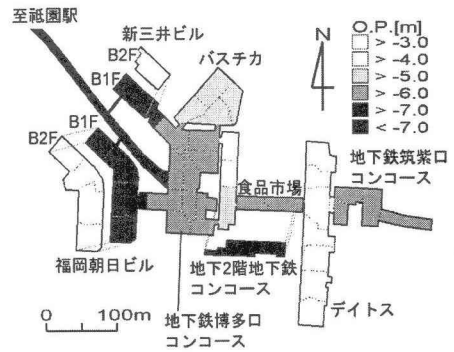


図-9 博多駅地下空間の概要および地盤高

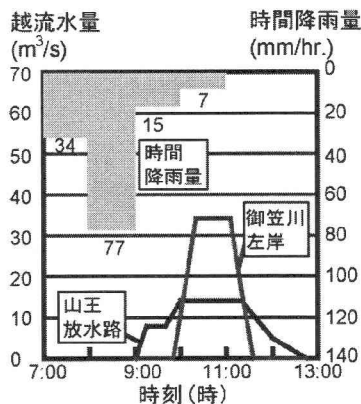


図-10 流入条件

内は時間降雨量 52mm に相当する雨水を排水できる下水道が張り巡らされている(末次⁵⁾)⁵⁾が、下水道が常に最大能力で氾濫水を排水するとは考えにくい。そこで、下水道が最大能力の 7 割で稼働、つまり時間降雨量 36.4mm に相当する雨水を排水できるとし、横流出流量として処理した。なお、天神地下街に関しては、従来の部分を旧天神地下街、2005 年 2 月に新しく開業した部分を地下街新設部とし、この解析では当時存在した旧地下街のみを対象としている。

(3) 浸水解析結果

図-11 に博多地区および JR 博多駅地下空間の最大浸水深の解析結果を示す。博多地区の外水氾濫計算結果の浸水域と実績値はおおむね一致した。JR 博多駅の地下空間内の浸水計算結果も、浸水実績とほぼ一致している。一方、天神地区の内水氾濫計算では旧地下街に氾濫水が流入しなかった(最大浸水深を図-12 に示す)。豪雨当時、地下街浸水が起きているが、この浸水は工事箇所から発生し、階段入口から流入したのではない模様である。

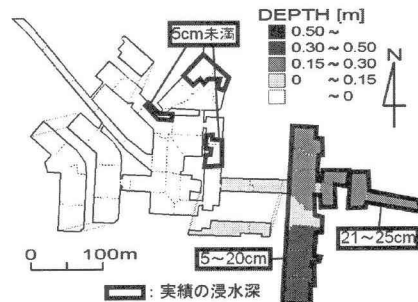
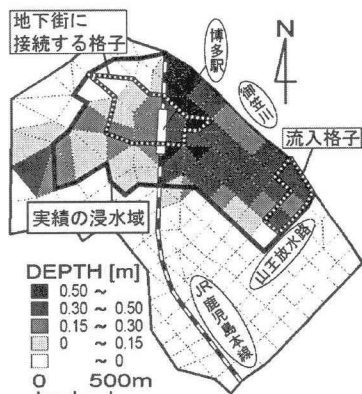


図-11 博多地区および JR 博多駅地下空間の最大浸水深図

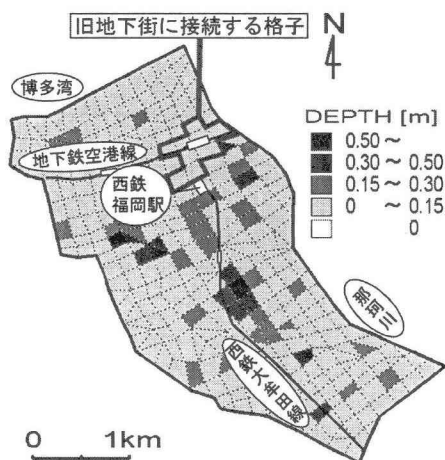


図-12 天神地区の最大浸水深図

4. 地下浸水時の危険性

階段実験より越流水深 30cm を地下浸水時の地下空間からの避難限界とした。また、前章で福岡市の天神地区と博多地区を対象として、1999 年 6 月 29 日に発生した水害の浸水解析を行った。本章ではこれらの結果を統合し、福岡市の地下浸水時における地下空間の危険性について検討する。

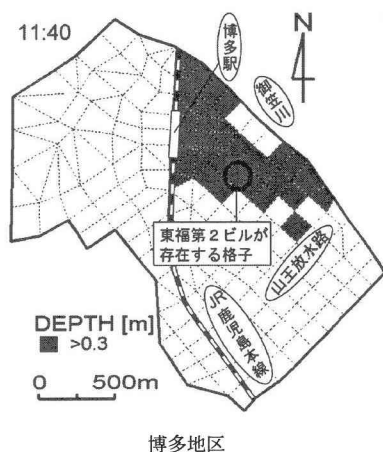
(1) 評価方法

地下空間は地下街だけでなく、多くの建物地下階にも存在する。これらの地下空間は地下街とは違い、避難できる出口が少ない。また、床面積が小さく、流入した氾濫水の出口もない場合が多いため、浸水深が急激に上昇しやすい。実際に 1999 年 6 月の福岡水害では、博多駅と御笠川の間ほどにあるビルの地下空間で水死事故が発生した事例⁶⁾がある。そこで、避難の限界となる越流水深 30cm に達した地上の格子に色を付けて表示することによって、地下浸水による危険性が高まる建物の位置を調べる。なお、今回は博多・天神の両対象領域とも建物地下階は車の出入り口が多いことを考慮し、地上の浸水深を越流水深と考えている。

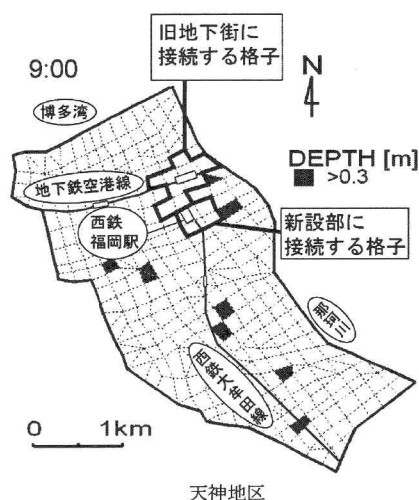
(2) 検討結果

検討結果を図-13 に示す。博多地区で最も危険な箇所が多くなったのは 6 月 29 日 11:40 であった。これより、山王放水路より北側、JR 線より東側の地下空間は、浸水時は危険な状況であった可能性が高いと考えられる。なお、図中の東福第 2 ビルは水死事故が起きた場所である。一方、天神地区で最も危険な箇所が多くなったのは 9:00 であったが、御笠川の外水氾濫に比べ、危険な領域はごくわずかであった。

参考までに、天神地下街新設部を考慮して同様の計算を行ったところ、15cm の段差を考慮しても地下街新設部入口から少量であるが氾濫水が地下街に流入する可能性があることがわかった。また、東海豪雨(計算での総降雨量 440mm, 最大時間雨量 93mm)を想定して同様の計算を行い、地下街新設部に接続する入口があ



博多地区



天神地区

図-13 地下空間の危険性

る格子のうち、もっとも地盤高の低い格子の水深時間変化を調べた結果、図-14 のようになった(計算開始時刻を 0hr.としている)。この結果より、天神地区で内水氾濫が起きた場合、地下街新設部の入口から氾濫水が流入する可能性があることが明らかとなった。

5. おわりに

結論を以下にまとめる。

- 実物大の階段模型を用いて流速・水位の測定および避難時間の測定、アンケート調査を行った結果、越流水深(地上の水深)30cm 程度が階段部からの成人の避難の限界となることが知られた。
- 上記の指標を用いて博多地区および天神地区の地下空間の危険性を評価した結果、博多地区では、1999 年 6 月の御笠川の氾濫時に地上の広い範囲で水深が 30cm を超えるとともに、JR 博多駅より東側の地下空間が危険な状態であったことが知られた。また、天神地区では、豪雨による内水氾濫時に新設地下街部から氾濫水が流入する可能性があることが明らかになった。

謝辞: 実験に協力いただいた京都大学防災研究所ならびに(株)日本工業試験所の関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 舘 健一郎, 武富一秀, 水草浩一, 末次忠司, 吉谷純一: 階段を通じた地下空間への氾濫水流入に関する実験, 土木技術資料 43-2 pp.22-27, 2001.
- 2) 間嶋真嗣, 戸田圭一, 大八木 亮, 井上和也: 都市域の地上・地下空間を統合した浸水解析, 水工学論文集 第 49 巻 pp.601-606, 2005.
- 3) 川池健司, 井上和也, 戸田圭一: 非構造格子の都市域氾濫解析への適用, 水工学論文集 第 44 巻 pp.461-466, 2000.
- 4) 橋本晴行, 朴 埵臻, 渡辺政広: 1999 年 6 月福岡水害時に発生した博多駅周辺の洪水および氾濫流の再現計算, 自然災害科学 21-4 pp.369-384, 2003.
- 5) 末次忠司: 都市型地下水害の実態と対策, 雨水技術資料 Vol.37 pp.7-18, 2000.
- 6) 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.

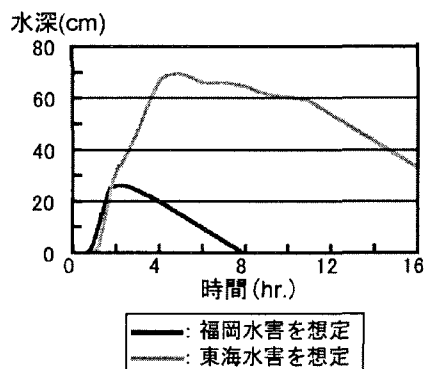


図-14 天神地下街新設部に接続する格子の水深