

1 はじめに

近年、我が国では都市部において局地的・集中的な豪雨による水害が発生しており、地下空間における短時間集中型の豪雨への対策が求められている。そのような状況を踏まえ、先行研究 [1, 4] では、梅田の地下街を対象として、下水道施設を考慮した内水氾濫解析が行われた。その結果、地下空間に流入する出入口の場所、流入順序、流入時間、流入量を推定することができ、事前に止水活動や避難活動が可能であることが示された。

さらに [3] では、ホワイティうめだを対象とした内水氾濫シミュレーションが行われた。地下街の管理者は十分な対策が取れず、人員を十分確保できないリスクや、止水板の設置途中で浸水が始める可能性を考慮して止水板設置順序や設置タイミングなどが検討された。

一方、馬谷 [2] は、この問題を最適化問題として定式化し、最適化ソルバを用いて解くことで最適な設置順序を算出した。ここでは、各出入口口から水が流入する時間の合計を最小化することを目的としていた。しかし、計算条件にいくつか問題点が見られる。例えば [2] では設置チームの稼働時間に制限が設けられていなかった。しかし、止水板の設置は重労働であるため、設置チームの稼働時間に上限があると考えるのが自然である。また、[2] では梅田地下街全域を対象として最適な設置順序を算出していたが、梅田地下街には複数の管理主体が存在し、豪雨時にはそれぞれの管理施設に存在する流入する可能性のある出入口に止水板を設置することになるはずである。

そこで本研究では、管理主体を考慮しつつ、設置チームの稼働時間に上限を設けた場合の最適な設置順序を算出する。また、稼働時間の変更したり、上限がない場合の最適な設置順序も算出し、これらの比較も行う。

2 時空間ネットワーク

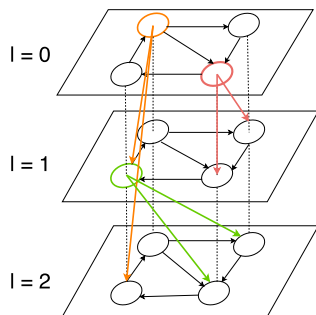


図 1: 時空間ネットワーク

馬谷の研究 [2]、また本研究では、地下空間の広がりや時間の経過を同時に表現する時空間ネットワークを用いて最適化モデルを構築している。

時空間ネットワークは複数のレイヤを持つ。一つのレイヤ内に注目したとき、その上には考察対象の空間を表すグラフが存在する。さらにこれらを重ねることで、時間経過を表現する。空間内の移動は時間経過を伴うから、単一レイヤ内でのフローとしては表現するのではなく、レ

イヤ間のフローとして表現することになる。

本研究では、止水板を設置する各チームの移動回数を $l = 0, 1, 2, \dots$ としたとき、これを時空間ネットワークにおけるレイヤに対応させることで、設置チームの移動を表現している。

3 本研究で用いる最適化モデル

本研究で用いる最適化モデルは、[2] で提案された問題に一部修正、追加を行ったものである (表 1)。以下、最適化モデルの目的関数と制約条件について説明する。

表 1: 先行研究 [2] からの制約条件の訂正と追加

[2] で提案された制約	制約条件 1~7, 9, 10
[2] で提案された制約を修正	制約条件 8
新たに追加する制約	制約条件 11

目的関数 流入開始時刻に間に合わなかった出入口の止水板設置完了時刻と流入開始時刻の差 (= 流入時間) の合計を最小化

制約条件 1 初期状態では、設置チームは定められたスタート地点に位置している

制約条件 2 全出入口にはいずれかの設置チームが訪問し、全出入口に止水板を設置する

制約条件 3 各設置チームはそれぞれの移動の際に高々 1 つの出入口に位置することができる

制約条件 4 1 つの出入口に移動するのは、いずれかの 1 チームのみである

制約条件 5~7 時空間ネットワークにおける枝と接点の関係性

制約条件 8 各出入口の止水板設置完了時刻の計算

制約条件 9 流入開始するまでの時間の設定

制約条件 10 止水板設置完了時刻と流入開始時刻の差の計算

制約条件 11 各設置チームの稼働時間の制限

4 数値実験

4.1 計算環境と実験内容

本実験で用いた計算環境は以下の通りである：

- OS: Microsoft Windows 10 Home
- CPU: Intel(R) Core i7-6600U CPU @ 2.60GHz 2.81GHz
- メモリ：16.0GB
- ソルバ：Gurobi Optimizer

また実験の基本設定は表 2 の通りである。本研究では以下の実験を行った。

- 実験 1: 止水板の設置に必要な設置チーム数の算出
- 実験 2: 設置開始時刻と流入時間の合計の関係 (稼働時間に上限がある場合)
- 実験 3: 設置チーム数と流入時間の合計の関係 (稼働時間に上限がない場合)

表 2: 数値実験の基本設定

計算対象地域	ホワイティうめだ
1 時間当たりの降雨量	120mm
排水用ポンプ	稼動状態
雨水が流入する出入り口の数	21 箇所
止水板設置チームの歩行速度	66 m/分
止水板 1 箇所の世知に要する時間	5 分

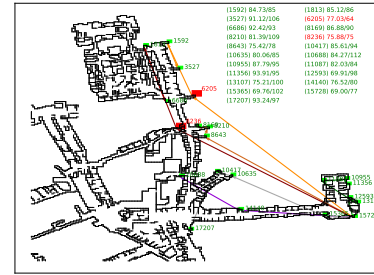


図 2: 設置開始時刻 64 分での最適な止水板設置順序

4.2 実験 1

本節では、止水板設置チームの稼働時間に上限がある状況下で、越水するとされる全ての出入り口に止水板を設置するために必要な設置チーム数を算出する。ここでは、以下の条件で計算を行う：

- 止水板設置開始時刻: 64 分
- 設置チーム数: 2, 3, 4, 5, 6 チーム
- 設置チームの稼働時間の上限: 30, 40, 50, 60 分

ここで、止水板設置開始時刻の 64 分とは、想定する豪雨 (120mm/hr) が降り始めてから、ホワイティうめだの出入り口で最初に越水が始まるとされる時刻である。

表 3: 止水板の設置可能性

チーム数	稼働時間			
	30	40	50	60
6	可能	可能	可能	可能
5	暫定解なし	可能	可能	可能
4	不可能	可能	可能	可能
3	不可能	不可能	暫定解なし	可能
2	不可能	不可能	不可能	不可能

計算結果を表 3 に示す。表 3 での「暫定解なし」となっているのは、最適化計算によって、所定の時間 (3600 秒) 内に暫定解を得ることができず、設置が可能であるかどうか判定できないことを表す。

本実験から、設置チーム数が 6 のときは、稼働時間の上限が (最短の) 30 分であっても、越水する全て出入り口に止水板を設置可能であることがわかった。

4.3 実験 2

設置開始時刻が遅くなれば、各出入り口からの流入時間の合計は大きくなるはずである。ここでは、この関係を定量的に評価するために、以下の条件で計算を行う：

- 止水板設置開始時刻: 43, 57, 64 分
- 設置チーム数: 6 チーム
- 設置チームの稼働時間の上限: 30 分

ここで、止水板設置開始時刻の 43, 57, 64 分は、ホワイティうめだにおいて「水位計より判断」した時間、「地上監視カメラより判断」した時間、「地下への流入が始まった」時間に対応している。

表 4: 設置開始時刻と流入時間の合計の関係

設置開始時刻 (分)	流入時間の合計 (分)
43	0.00
57	6.03
64	13.91

計算結果を表 4 に示す。設置開始時刻が遅くなるにつれ、流入時間の合計が大きくなることを定量的に算出できている。また設置開始時刻が 64 分の場合の最適な設置経路を図 2 に示す。

4.4 実験 3

稼働時間に上限がない場合、設置チーム数が少なくとも全ての出入り口に止水板を設置することができるが、流入時間の合計は大きくなるはずである。本節では、この関係を定量的に評価するために、以下の条件で計算を行う：

- 止水板設置開始時刻: 43, 57, 64 分
- 設置チーム数: 2, 3, 4, 5, 6 チーム
- 設置チームの稼働時間の上限: なし

表 5: チーム数・設置開始時刻と流入時間の合計の関係

設置チーム数	止水板設置開始時刻		
	43	57	64
6	0.00	6.03	13.91
5	0.00	6.03	13.91
4	0.00	6.03	24.21
3	0.00	34.73	138.82
2	66.76	203.70	288.33

表 5 からわかるように、設置チーム数が少なくなるにつれて、流入時間の合計が急激に増加する。すなわち、防災・減災の観点からは、一定以上の設置チーム数を確保しておくことが必須である。しかしながら、例えば夜間などのことを想定すると、設置チーム数が潤沢に準備できない状況も想定される。そのような場合には、本計算で得られた最適な設置順序を用いることによって、被害を最小限に食い止めることができるであろう。

5 おわりに

本研究では、[2] で提案された最適化問題を改良しつつ、設置者の稼働時間や地下街の管理区分を考慮しながら、最適な止水板の設置順序を算出した。

現在用いている最適化モデルでは、表 3 でもあったように、一定の計算時間を確保しても暫定解が得られないなど、計算時間が長くなる傾向がある。これを改良することが今後の課題である。

参考文献

- [1] 井上知美, 川中龍児, 石垣泰輔, 尾崎平, 戸田圭一, 内水氾濫による大規模地下街の浸水過程と避難の安全性に関する検討, 水工学論文集, 55, s973-s978 (2011).
- [2] 馬谷慎太郎, 流入開始時刻を考慮した地下街出入口への最適な止水板設置順序の算出, 関西大学環境都市工学部 2016 年度卒業論文 (2017).
- [3] 武田佑也, 大規模地下空間における内水氾濫による浸水対策の検討, 関西大学環境都市工学部 2015 年度卒業論文 (2016).
- [4] 森兼政行, 石垣泰輔, 尾崎平, 戸田圭一, 大規模地下空間を有する都市域における地下空間への内水氾濫水の流入特性とその対策, 水工学論文集, 55, s967-s972 (2011).