地下空間における氾濫から満水状態までを連続的に計算できる数値解析モデルの提案

国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター水害研究室　　正会員　○伊藤弘之

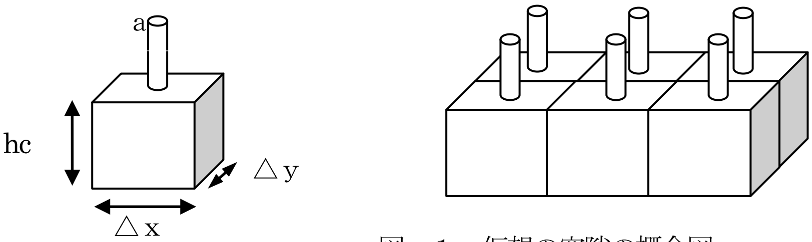
１．目的

我が国の都市圏においては地下空間が大規模に開発され、不特定多数の人々が利用し、大規模な資産が集積している。その一方で、地下空間は洪水等による浸水に対して極めて脆弱であり、大規模な氾濫水の浸入が発生した場合は、多くの犠牲者等の被害が生じることが予想される。さらに、気候変動とも見られる局地的豪雨の頻度の増加、大雨の規模の増大等により、ますますリスクは高まっている。

このため、地下空間の浸水は水害対策上重要な課題となっており、戸田等(1999)は複雑な形状の地下空間について、地下通路のネットワークと店舗・ビルからなる住区の組み合わせと見なすとともに、地下通路についてはスロットモデルを適用した一元不定流計算を適用することにより、開水路・管路状態の共存・遷移の過程を連続的に解析している。これに対し本研究では、二次元的な広がりを有する地下空間においても自由水面を有する流れの状態と天井に拘束される流れの状態を連続的に解析する必要があると考え、フロア天井に仮想の細長い空隙管を設けたモデルを提案し、地下空間の氾濫計算を試みたものである。

２．計算方法

地下空間の浸水過程においては、自由水面を有する氾濫・貯留と、天井に接する圧力管の３種類の状態が現れるが、これらを連続的に計算することを考える。このため、メッシュ毎にフロア天井に図－１に示すような細長い空隙管を仮想し、水没状態でも空隙管内で自由水面が形成されるものとした。従来のスロットモデルと異なるのは、個々の空隙管は連続しておらず空隙管同士の間の水の移動は生じないことである。空隙内の水位は地下空間天井から受ける圧力に等しいと考えられ、この水位を用いることにより、水没状態においても従来の二次元氾濫計算が連続的に適用できると考えられる。



△ｘ：ｘ方向メッシュ幅
△ｙ：ｙ方向メッシュ幅
ｈc：天井高さ
ａ：空隙面積率
（空隙断面積／△ｘ△ｙ）

図－１　仮想の空隙の概念図

この方式を下記の二次元氾濫計算モデル(1),(2),(3)を差分化したものに組み込むと下記の点で改良が必要となる。連続式については、ｈ＞hc の場合、λ＝ａとする。また、流量のフラックスについては水が移動する範囲としてｈを hc に置き換える。運動方程式についてはｈ＞hc の場合、天井の粗度の影響が考えられる。ここでは、天井の粗度を床面の粗度と等しいとし、径深としてｈを hc／2 に置き換えた。

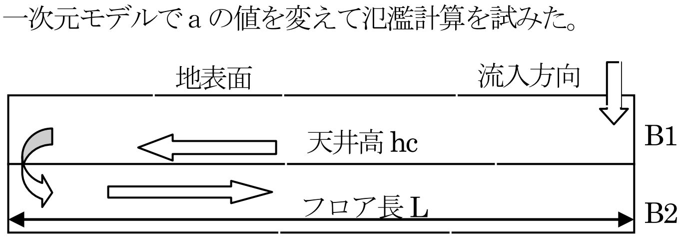
$$\lambda \partial h/\partial t+\partial(uh)/\partial x+\partial(vh)/\partial y=q \quad (1)$$

$$\partial u/\partial t+u\partial u/\partial x+v\partial u/\partial y+g\partial(h+z)/\partial x+n^2u|u|/h^{4/3}=0 \quad (2)$$

$$\partial v/\partial t+u\partial v/\partial x+v\partial v/\partial y+g\partial(h+z)/\partial y+n^2v|v|/h^{4/3}=0 \quad (3)$$

ｈ：水深、ｕ：流速、ｚ：フロア高さ、ｑ：流入量、ｎ：粗度係数(床面、天井とも同じ値とする)

本方式では、ａが小さければ連続式上の計算誤差が小さくなるが、一方で空隙管内の振動が大きくなり、計算に不安定を生じる可能性がある。このため、図－２に示す地下１，２階（以下、B1、B2 とする）の２段階に構築された一次元モデルでａの値を変えて氾濫計算を試みた。

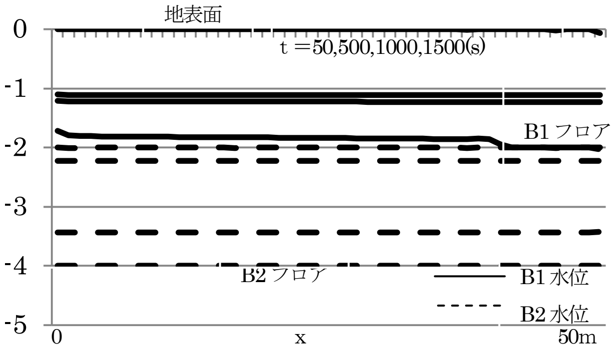


図－２　地下空間モデル

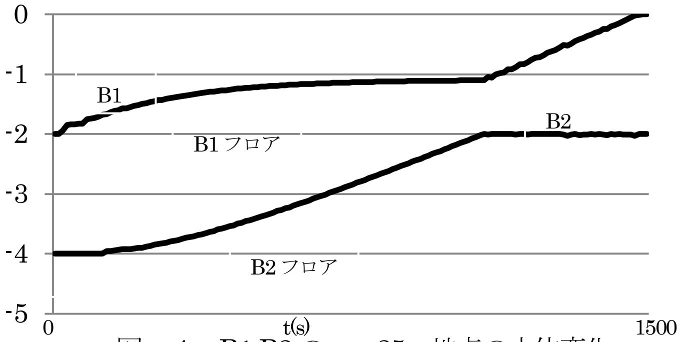
L＝50m、hc＝2m、ｎ＝0.015（B1,B2 とも同じ）
Leap-frog 法（△ｘ＝１ｍ、△ｔ＝0.01ｓ）
地表面には 10ｃｍの浸水があり、越流式に基づき流入
B1,B2 の間も水位差に応じて越流式に基づき流出・流入を設定

キーワード　　氾濫解析、地下空間、仮想空隙管
連絡先　　〒305-0804　茨城県つくば市旭１　国土技術政策総合研究所水害研究室　TEL029-864-2932

当該条件においては、空隙の断面積率を１%にした場合は、B1、B2 ともに完全に水没するまで安定して計算が行われたが、0.5%にした場合には計算が途中で発散した。0.5%の場合は空隙管内の水位変動が大きく、不安定を生じたと考えられる。断面積率１%の場合について地表からの流入量と空隙管内の水量を考慮しない地下空間内の水量を比較したところそれぞれ 201m³/m、200ｍ³/mであり、空隙管が連続式に及ぼす誤差は僅かであった。



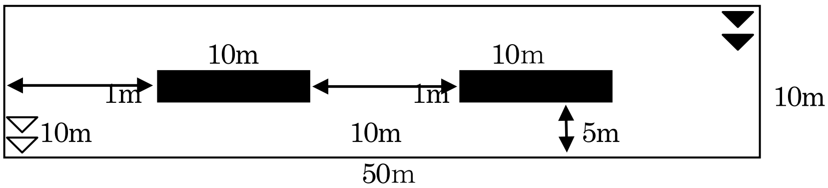
図－３　B1,B2 の水面形の変化



図－４　B1,B2 のｘ＝25m地点の水位変化

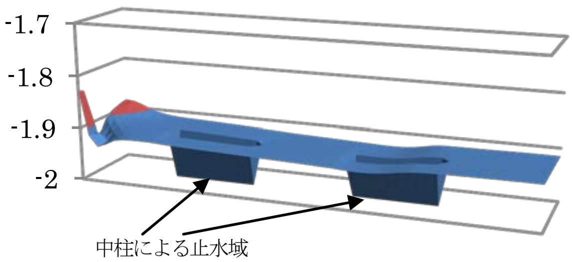
３．２次元計算

次に、図－５に示す空間モデルに対して２次元の氾濫計算を試みた。B1、B2 が完全に水没するまで不安定を生じることなく計算ができた。計算結果の一例としてB1、B2 の水面形及び歩行困難度の目安として水深×流速^{2}を図－６及び図－７に示す。二次元の氾濫特性を概ね表すことができたと考えている。

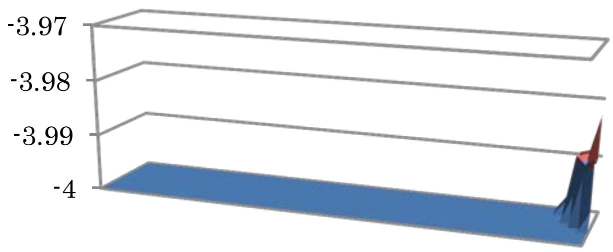


■：中柱、▽：流入箇所、▼：流出箇所
B2 についても平面図は同じであるが、B1 の▼の位置が流入箇所となる。
△ｙ＝１ｍ、その他、図－２のモデルと同様の条件

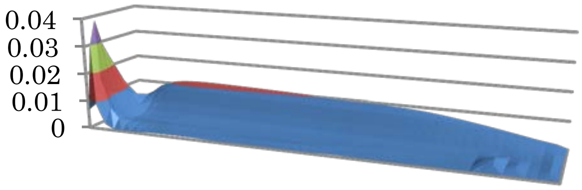
図－５　B1、B2 の平面図



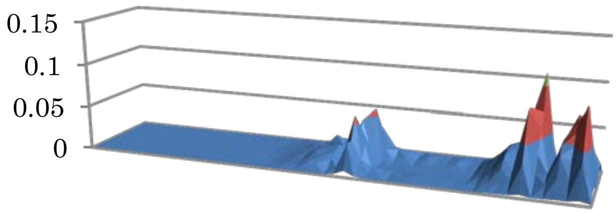
図－６(1)　B1 の水面形（ｔ＝150ｓ）



図－６(2)　B2 の水面形（ｔ＝150ｓ）



図－７(1)　B1 の歩行困難度（ｔ＝1250ｓ）



図－７(2)　B2 の歩行困難度（ｔ＝1250ｓ）

４．まとめ

スロットモデルを仮想の空隙管に置き換えることにより、自由水面と圧力管状態が共存する地下空間の氾濫計算を二次元に拡張して連続計算することを提案した。これにより、地下空間の氾濫・浸水計算が簡素化されると考える。

参考文献

1）戸田圭一・井上和也・前田　修・谷野知伸(1999)：大都市の地下空間の氾濫浸水解析，水工学論文集第 43 巻，土木学会水理委員会，pp.539-544.