

都市域における洪水氾濫に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON FLOOD INUNDATION IN URBAN AREA

黄 光偉¹・渡辺 正明²・泉宮 尊司³

Guangwei HUANG, Masaaki WATANABE and Takashi IZUMIYA

¹正会員 工博 新潟大学助教授 工学部建設学科 (〒950-2181 新潟市五十嵐2の町8050番地)

²非会員 新潟大学 工学部建設学科 (〒950-2181 新潟市五十嵐2の町8050番地)

³正会員 工博 新潟大学教授 工学部建設学科 (〒950-2181 新潟市五十嵐2の町8050番地)

In this study, laboratory experiments concerning flood inundation in urbanized area are carried out. The purpose is two-fold. One is to see how the equivalent Manning coefficient would be affected by the layout of buildings. It is also intended to examine how the inundation depth might change when the flooding water flows into houses. As a result, better understanding on the behavior of the Manning n is achieved and a modification is proposed with regard to the resistance law for simulation in urban area.

Key Words : Inundation, urban area, laboratory experiment, Manning n , resistance law

1. はじめに

都市域における洪水氾濫の危険性を行政および住民が正しく認識し、災害時にあつては適切な避難等を行うには、高精度な洪水ハザードマップの作成と公表が重要である。これまで多くの研究者や技術者により氾濫解析が行っており、連続式と運動式に基づく二次元不定流モデルを用いた氾濫解析手法が普及されてきた。しかし、都市域に適用するにあつて建造物の影響を取り扱う必要がある。現在一般的に使用されている洪水氾濫数値解析は、市街地の扱いに関しては以下のように分類できる。

1. デカルト座標モデルでは、住宅地における粗度係数を大きくしている。0.067を与えるケースが多い¹⁾。
2. デカルト座標モデルで、建造物の敷地面積の割合を占有率というパラメータで表し、占有率から導かれる通過率により、建造物が氾濫水に及ぼす影響を考慮している⁶⁾。
3. デカルト座標モデルで、建造物の占有率と浸水深から等価粗度係数を求めている⁴⁾。
4. デカルト座標で、マニング式による底面摩擦抵抗に加えて家屋の付加抵抗を考慮している⁷⁾。
5. 街路ネットワークモデル²⁾。
6. 一般曲線座標モデル⁹⁾。
7. 非構造格子モデル¹⁾。

1、2、3および4ともに、密集市街地における氾濫状況を正確に表しにくいと考えられる。5、6および7を用いた場合、家屋などの構造物を適切に表現できるが、実務に応用する際、高分解能の土地利用

データが不可欠であり、格子生成にかなりの時間と労力が必要である。現在国土地理院が公表している細密な土地利用情報は、首都、中部、近畿3大都市圏に限られることを考えれば、2、3もしくは4の改良は実務的ニーズがあると考えられる。

洪水氾濫は時間の経過とともに被害が進行していく災害であり、水害の発生予測や水害進行の状況把握、情報提供・共有をリアルタイムで行うことは、被災地における被害軽減や救援活動・応急復旧等につながる。リアルタイム氾濫予測技術の開発にあつて、浸水範囲と浸水深を正確に予測することだけではなく、浸水深上昇・下降過程を正確に再現することも求められている。従つて、一部家屋の浸水による周辺地の水深変化を予測モデルに考慮する必要がある。また、どの地点で氾濫が始まると洪水流はどのように動くのか、どのくらいの時間でどのような経路で住宅地に迫り、滞留、流下するかなどの動的情報は、詳細な避難計画の立案に不可欠である。

福岡⁸⁾らは市街地モデルを用いた水理実験を行い、氾濫水の主流は道路に沿って流れることを明らかにした。末次⁴⁾らは大型水理模型実験より、建物の占有率、水深を考慮した等価粗度係数の計算式を提案している。中川⁵⁾らは京都市鴨川右岸地域を対象に、縮尺1/100の市街地モデルを用いた氾濫実験を行った。本研究では、家屋の占有率と配置を変化させて氾濫実験を行い、また床上浸水を考慮した実験も実施した。家屋の配置と床上浸水が氾濫水の挙動に与える影響を検討することを目的とする。さらに市街地における流れの抵抗について、取り扱い手法の改良を検討している。

2. 氾濫模型実験

(1) 均等に配置した直方体を用いた実験

図-1に示すように、建物（ブロック）群の抵抗による等価粗度係数を調べる実験を実施した。流量を定常的に与え、デジタルポイントゲージで模型群の上流側、下流側からそれぞれ模型間隔の半分離れたライン上で水深を計測した。横断方向の計測点はそれぞれ3点とした。等価粗度係数は、上流側と下流側の平均水深および単位幅あたりの流量を用いて連続式と不等流式より求めた⁴⁾。建物の占有率と配置を変化させて、9パターンの実験を行った。

図-2には、等価粗度係数と建物占有率との関係を示す。流量が大きくなるにつれて、等価粗度係数と占有率の関係に非線形性が現れる傾向が見られた。

図-3には、流量およびフルード数の変動に対する等価粗度係数の感度を示す。フルード数に対する感度は流量に対する感度の百分1くらいことが分かった。実験のフルード数範囲は約0.2~0.9であった。また、占有率が大きくなると、流量変動に対する感度が大きく上がることが図-3に示された。

同じ占有率でブロック数が異なる場合、等価粗度係数の変化を調べた。図-4に示すように、ブロックが12個から20個に変化した場合、等価粗度係数の変化は大きかった。

流下方向の模型間隔を変化させた場合の結果を図-5に示す。ブロック間隔をブロック幅の半分からブロックの幅まで大きくすると、等価粗度係数は減少し、間隔をブロックの幅の1.5倍にすると、今度は粗度係数が大きくなった。間隔がブロック幅の半分からブロック幅に変わったとき、ブロック背後で流れの乱れが少なく、流水を加速させるような働きがあり、ブロック群の抵抗が減少した。つまり、この時、ブロック群が流体に対して抵抗の少ない流線型に近い形となったことが水位の上昇をある程度緩和したのではないかと考えられる。一方、間隔がブロック幅を超えると、ブロックの背後に流れの乱れが大きくなり、大きな圧力低下が生じることにより抵抗が増大となったと思われる。このとき、発達した後流渦の様子が撮影したビデオで確認された。なおブロック間隔をさらに大きくしていくと、おおよそ線形の上昇する傾向が見られた。しかし、この変化パターンは横断方向の間隔にも影響されかねない。

家屋の占有率や配置によって氾濫水流下時間の変化を検討するために、浮子を住宅に模した模型群の中を通過させ、流下時間や流下の様子の差異を調べた。同じ占有率でブロック数が12個から20個に変わると、流下時間は約4倍となったことが分かった。避難計画を策定するために、正確な氾濫水到達時間の予測が求められている。本実験より、氾濫水流下時間は建物数密度に大きく依存することが分った。従って、占有率を考慮しただけで、浸水深が精度よく再現されても、洪水到達時間の推定精度が不十分なことあり得ると考えられる。

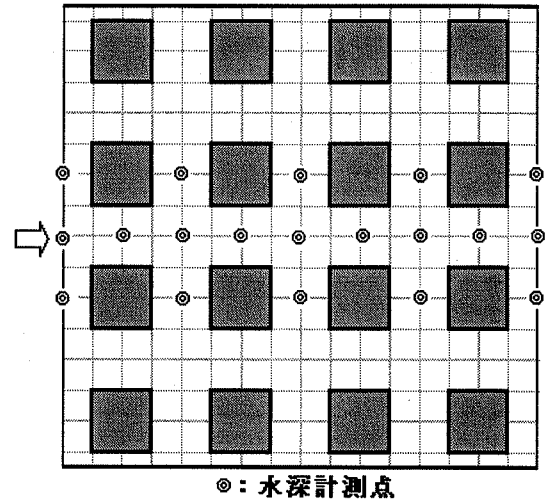


図-1 氾濫実験模型図

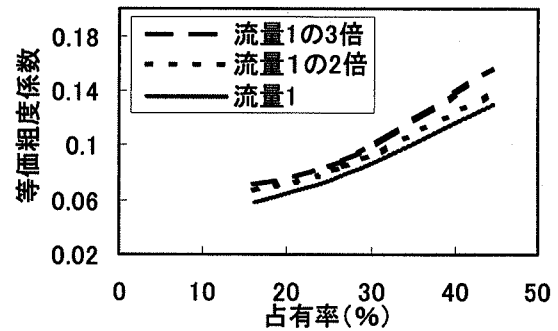


図-2 等価粗度と占有率の関係

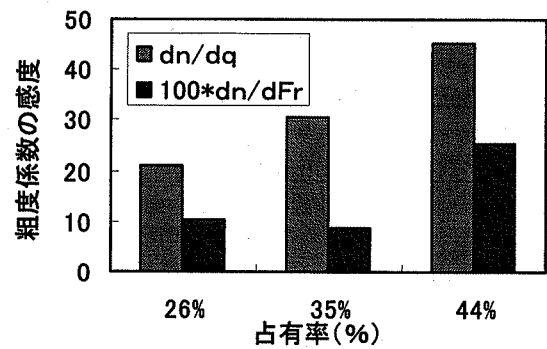


図-3 各占有率における流量とFr数に対する感度

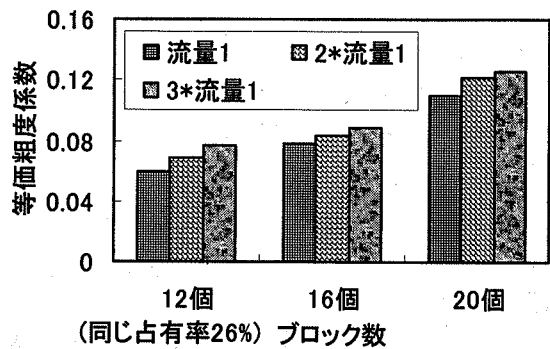


図-4 建物数の影響

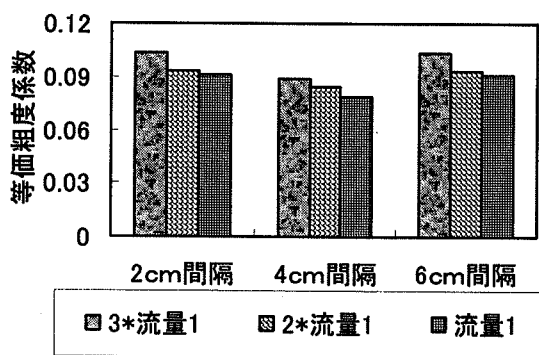


図-5 建物間隔の影響

(2) 実市街地を模擬した模型を用いた実験

新潟市寺尾あたりに実在する住宅区の家屋の形状、配置を模した模型を使用することで、より現実に近い形で洪水氾濫における住宅群の影響や水の挙動の検討を試みた。特に、住宅群に対する氾濫水の流れの向きと粗度係数 n との関係や、浸水家屋が水位上昇に及ぼす影響を調べることを目的とした。

実験手順：

(1) 開水路中に図-6 に示す新潟市寺尾にある実際の住宅群に模した模型を配置し、図-7 に示すように、模型群の前後における流れの横断方向で10cm間隔の9点の水深を測り、模型群前後の水深測定値を横断平均して、住宅群の等価粗度係数 n を算定した。

(2) 図-6 に示す4つの方向から水を流し水深計測を行い、流れ方向の違いが住宅群の粗度係数に及ぼす影響を調べた。

図-8 には、家屋群の上流側水深、流れ方向と等価粗度係数との関係を示す。流れ方向による上流側水深が多少異なり、等価粗度係数の値も若干変わることが分った。図-6 の中央付近に太い道路が方向2, 4の向きに走っているが、2, 4方向の流れは若干他の向きより抵抗が小さかったことはこの道路が水路の役割を果たしたためだと考えられる。

次に上流側フルード数、流れ方向と等価粗度係数との関係を調べた。図-9 に示すように、方向2と方法4が他と比べ Fr 数の値が大きく出ている。やはり先ほども述べたように模型中央を走る太い道路が水路の役目を果たして水が流れやすくなり、結果、流速が上がり水深も下がり Fr が若干大きくなったと考えられる。これにより粗度係数の値がやや小さくなっていることも説明がつく。

図-10 には、流量、流れ方向と等価粗度係数との関係を示す。流量が大きくなるにつれ粗度係数の流れ方向の依存性が顕著に現れた。

(3) 家屋浸水が浸水深変動に及ぼす影響

図-11 のような床上浸水は、日本各地で繰り返して発生したことである。床上浸水1mの報道もあった。昭和33年の信濃川流域の洪水氾濫により床上浸水4, 429棟、床下浸水7, 7723棟が記録された。図-12 には、東海豪雨による新川流域家屋浸水状況を示す。

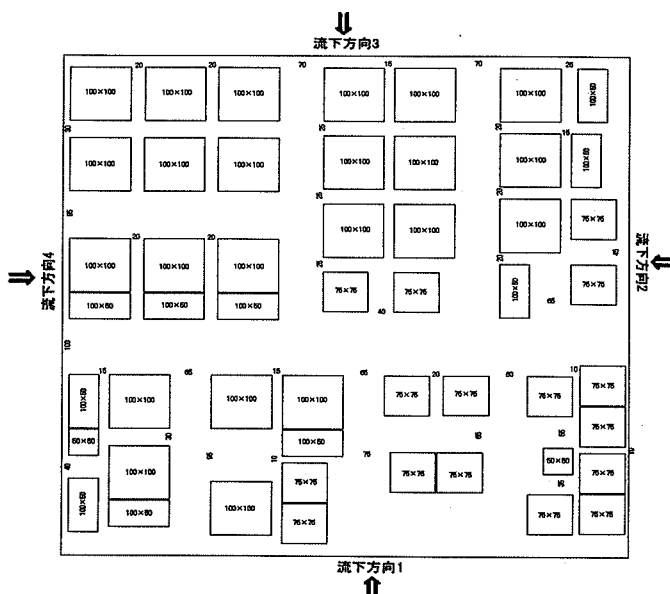


図-6 実市街地を模擬した模型図 (縮尺1/100)

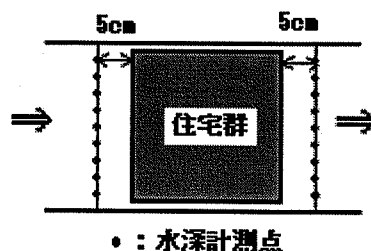


図-7 横断方向における水深測定点位置

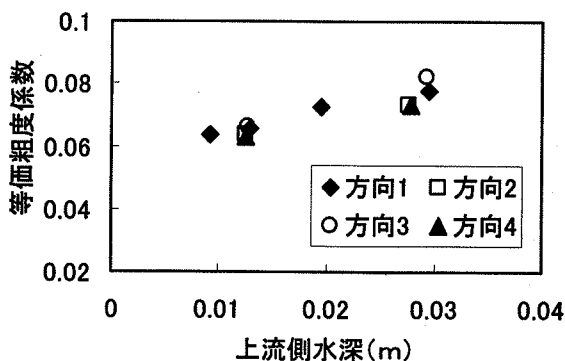


図-8 水深、流れ方向と等価粗度係数との関係

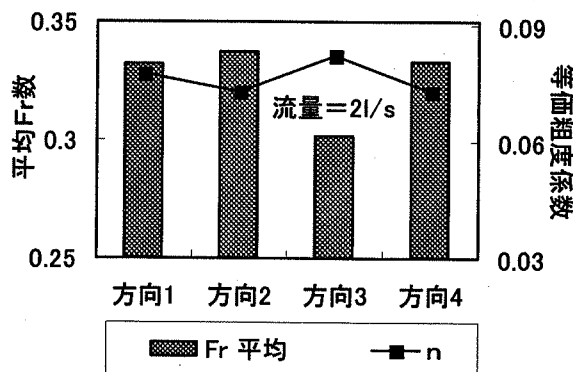


図-9 フルード数、流れ方向と粗度係数との関係

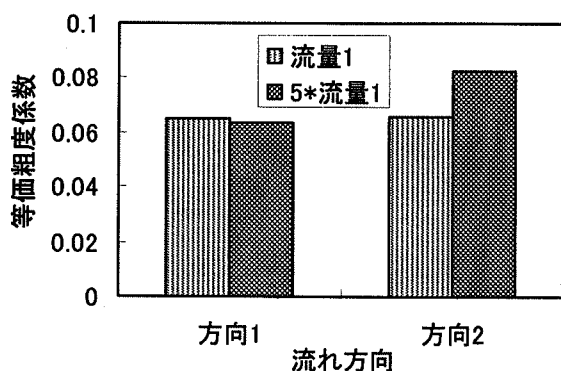


図-10 流量、流れ方向と等価粗度係数との関係

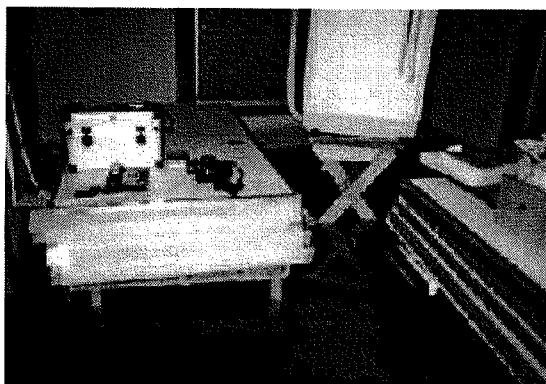


図-11 床上浸水事例 (水深30cm)

このような大規模な家屋浸水が発生する場合、周辺の水深分布にも影響を与えることが予想される。しかし、今までの氾濫解析において、家屋浸水による浸水深の局地的変化の検討はまだ行われていないようである。本研究では、模型実験を使って、氾濫水が家屋に浸入する場合、周囲水深変動の様子を調べた。まず、家屋群の上流側と下流側での水位上昇の様子をビデオカメラを使い記録し、家屋内への氾濫水の浸水がない不透過家屋群における水深変動のデータを取った。次に、図-13 に示した開口部がある家屋模型を使って、床上浸水があったときの水深変動様子を録画し、画像解析より水深データを読み取った。

図-14、15 には、それぞれ模型住宅群の上流側、下流側の水深測定結果を示す。上流側、下流側ともに水位上昇時では不透過家屋群と浸水家屋群との間に確実に差が生じていることが分かった。上流側において水位上昇初期では、不透過家屋群と浸水家屋群は同じ速度で水位が上がっているが、家屋中への水流入量が大きくなるにつれ浸水家屋群の水位上昇が遅れが見られた。家屋への流入が最大になった後、浸水家屋群の水位上昇曲線が再び不透過家屋群の水位上昇曲線と一致している。また、下流側において、上流側と比べ早い時間から水位上昇に差異が現れ始めたことが明らかとなった。実スケールに換算すれば床上浸水のありなしにより家屋群前後の浸水深の変動は最大10cmである。本実験の流量が小さいにも関わらず床上浸水が家屋周辺水深に与える影響が確

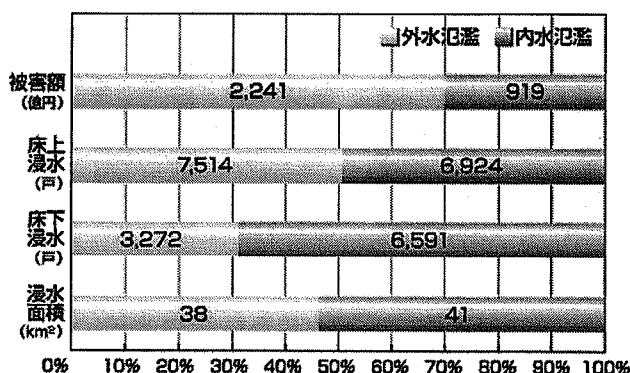


図-12 東海豪雨による新川流域の家屋浸水状況

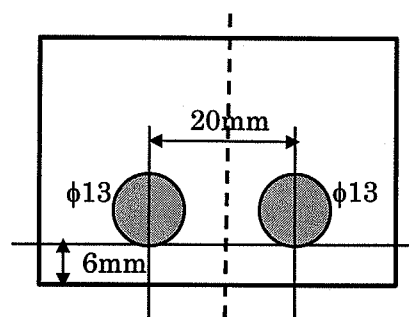


図-13 透過家屋模

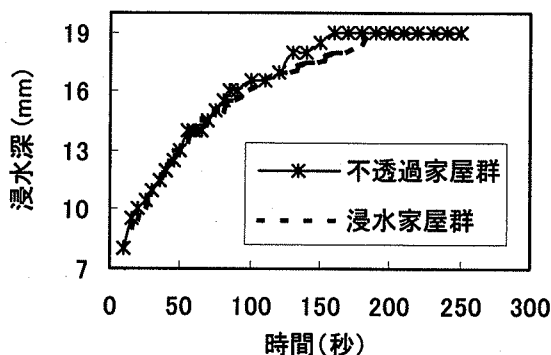


図-14 住宅群の上流側の水深変動

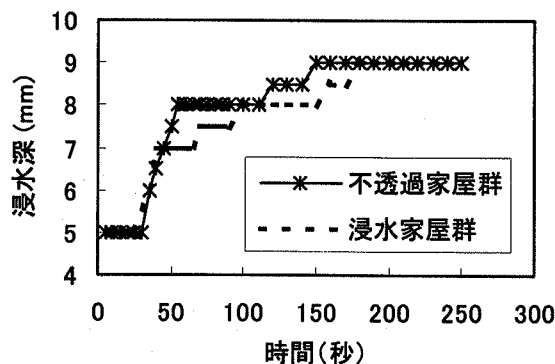


図-15 住宅群の下流側の水深変動

認されたことから、流量および住宅群の規模が大きくなるにつれ床上浸水の影響がもっと顕著に現れると考えられる。家屋浸水による背後地の水深上昇遅れに関する検討は、避難計画策定に重要な情報となるものである。

4. 抵抗項の評価

氾濫計算における抵抗力の評価は、マニング式のみで抵抗を代表させる方法と、建物の形状抵抗をも考慮する方法である。すなわち
評価法1

$$\begin{aligned}\tau_x &= \frac{\rho g n^2 U \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{1/3}} \\ \tau_y &= \frac{\rho g n^2 V \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{1/3}}\end{aligned}\quad (1)$$

評価法2

$$\begin{aligned}\tau_x &= (1-\lambda) \frac{\rho g n^2 U \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{1/3}} + N_d D_x \\ \tau_y &= (1-\lambda) \frac{\rho g n^2 V \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{1/3}} + N_d D_y \\ D_x &= C_D \frac{\rho U A}{2} \sqrt{U^2 + V^2} \\ D_y &= C_D \frac{\rho V A}{2} \sqrt{U^2 + V^2}\end{aligned}\quad (2)$$

ここに、 τ_x 、 τ_y は抵抗力のx、y成分、 U 、 V はx、y方向の流速成分、 λ は建物の面積密度、 N_d は建物の数密度、 D_x 、 D_y は建物の流体力のx、y成分、 A は流れに直角な建物の浸水断面積、 C_D は抗力係数、 n は等価粗度係数である。実務的には評価法1が広く使われている。建物の影響を考慮した等価粗度係数は次式のように関数化されている¹⁰⁾。

$$n = n_0 + 0.02 \times \frac{\theta}{100 - \theta} \times h^{4/3} \quad (3)$$

ここに、 θ は建物占有率(%)、 h は浸水水深である。

図-16(a)、(b)に示したケースでは、建物の占有率が同じであるが、建物の向きの違いにより全く異なる流れが形成される。ケース(a)におけるy方向の流量フラックスがほとんどゼロとなり、ケース(b)の場合にはx方向の流量フラックスがほとんどゼロである。しかし、デカルト座標で既存の抵抗則(1)、(2)を用いた計算では、ケース(a)、(b)ともに、x、y両方向の流量フラックスが算出されてしまい、明らかな流動差異が反映されない。この問題を解決するために、計算メッシュ内の建物群の配置情報を抵

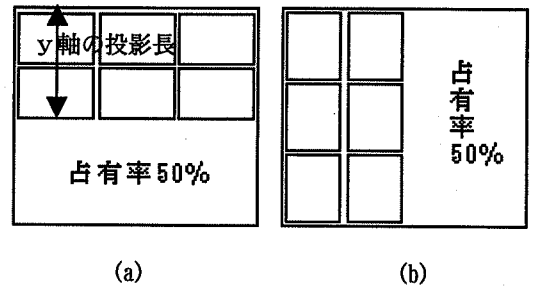


図-16 住宅群の配置による計算し難い例

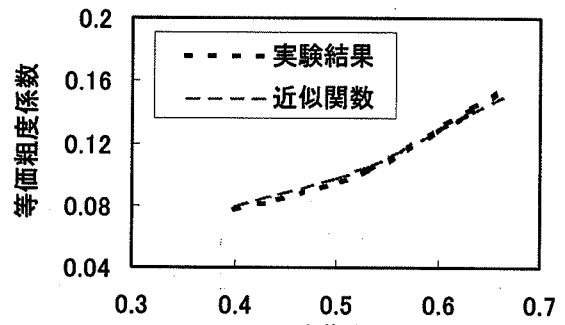


図-17 等価粗度係数と遮蔽率との関係

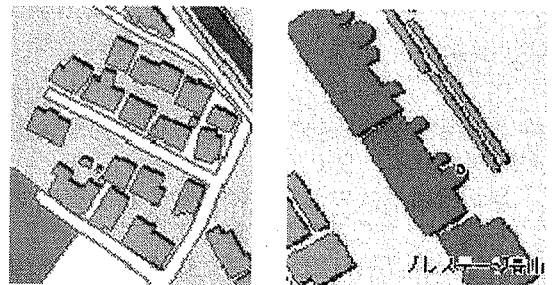


図-18 家屋群配置事例

抗則に取り入れることが必要である。

本研究では、x、yそれぞれ方向における建物群の遮蔽率の導入を考案した。メッシュサイズをB、メッシュ内の建物群のy軸への投影長をLとすれば、x方向の流れに対する遮蔽率Sは次のように定義される。

$$S = \frac{L}{B} \quad (4)$$

等価粗度係数と遮蔽率との関係に関する基礎的実験結果を図-17に示す。この実験結果により、等価粗度係数と遮蔽率との関係を次式で近似出来ることが分かった。

$$n = \frac{n_{03}}{a(1-S)^b} \quad (5)$$

ここに、 n_{03} は遮蔽率が0.3ときの等価粗度係数である。パラメータ a , b の値はそれぞれ1.7と1.1である。しかし、 a , b の値を一般化するためにはより多くの実験が必要である。

以上の結果に基づいて、建造物の配置を考慮した抵抗則を以下のように提案する。

$$\begin{aligned}\tau_x &= \frac{1}{\gamma(1-S_x)^\beta} \frac{\rho g n^2 U \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{1/3}} \\ \tau_y &= \frac{1}{\gamma(1-S_y)^\beta} \frac{\rho g n^2 V \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{1/3}}\end{aligned}\quad (6)$$

ここに、 S_x , S_y はそれぞれ x 、 y 方向の遮蔽率とする。

図18(a)に示すような配置に対して、以上の提案を用いて計算するのは特に問題がない。図-18(b)のようにメッシュ対角線に建物が占められる場合には(6)による抵抗が無限となり、氾濫水が流れなくなる。しかし、メッシュの上三角と下三角領域において、流動が形成され得るので、更なる改良が必要と思われる。これについては今後詳細な検討を行っていきたい。

5. まとめ

洪水氾濫模型実験結果を通して得られた知見と今後の課題を以下にまとめる。

1. 等価粗度係数の流量変動に対する感度はフルード数に対する感度より大きい。
2. 等価粗度係数は建物間隔に依存する。間隔が建物幅を超えると、建物の背後に流れの乱れが大きくなり、抵抗が増大になる。
3. 氾濫水流下時間は建物数密度に大きく依存することを明らかにした。従って、占有率のみを考慮した氾濫解析では、洪水到達時間を正確に計算できないことがあり得ることを指摘した。
4. 住宅群の粗度係数は方向性を持つことが明らかになった。特に、流量が大きく場合、粗度係数の流れ方向の依存性が顕著に現れる。
5. 床上浸水による住宅群周辺の水位上昇に時間遅れがあったことを示した。リアルタイム氾濫予測モデル構築に示唆を与えた。
6. 既存の抵抗則の欠点を議論し、各方向における建物の遮蔽率を抵抗則に考慮することを検討した。

今後の課題として下記のような項目が挙げられる。

- ✧ より大きな流量範囲とより複雑な建物配置で氾濫実験を行う。
- ✧ 市街地における抵抗則について、詳細な検討を行う。
- ✧ 床上浸水を考慮した洪水氾濫解析モデルを構築する。
- ✧ 新潟市の氾濫解析に適用する。

謝辞：本研究は、土木学会水理委員会河川懇談会の平成15年度開始テーマの1つとして進められたものである。

参考文献

- 1) 井上和也・川池健司・戸田圭一：非構造格子による氾濫解析モデル，京都大学防災研究所年報，第42号B-2，pp.539-544，1999。
- 2) 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，土木学会論文集No.698/II-58，pp.1-10，2002。
- 3) 清宮洋・片田敏孝・真野明：東海豪雨による新川破堤氾濫の数値解析，土木学会水工学論文集，第47巻，pp.925-930，2003。
- 4) 末次忠司・栗城稔：改良した氾濫モデルによる氾濫流の再現と防災への応用に関する研究，土木学会論文集，No.593/II-43，pp.41-50，1998。
- 5) 中川 一・石垣泰輔・武藤裕則・井上和也・戸田圭一・多河英雄・吉田義則・辰巳賢一・張浩・八木博嗣：都市における洪水氾濫—大規模な洪水氾濫模型装置を用いた実験と解析—，京都大学防災研究所年報，第46号B，2003。
- 6) 中川 一：洪水および土砂氾濫災害の危険度評価に関する研究，京都大学学位論文，1989。
- 7) 橋本晴行・Park, Kichan・加藤修二・山崎一彦・天方匡純：1996年6月福岡水害における博多駅周辺の洪水氾濫解析，河川技術論文集 第8巻，pp.127-132。
- 8) 福岡捷二・川島幹雄・松永宜夫・前内永敏：密集市街地の氾濫流に関する研究，土木学会論文集，No.491/II-27，pp.51-60，1994。
- 9) 福岡捷二・川島幹雄・横山 洋・水口雅教：密集市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の研究，土木学会論文集，No.600/II-27，pp.23-35，1998。
- 10) 水理公式集：土木学会編，1999。
- 11) Xanthopoulos, T. and Koutitas, C.: Numerical simulation of a two dimensional flood wave propagation due to dam failure, Journal of Hydraulic Research, Vol.14, No.2, pp.321-330, 1976。

(2004. 4. 7受付)