

東海豪雨を対象とした氾濫解析

ANALYSIS OF FLOODING DUE TO HEAVY RAINFALL IN TOKAI AREA

大坪郁宜¹・武田 誠²・松尾直規³

Ikuyoshi OHTSUBO, Makoto TAKEDA and Naoki MATSUO

¹正会員 工修 一宮市役所 (〒491-8501 愛知県一宮市本町2-5-6)

¹正会員 工博 中部大学講師 工学部土木工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

²フェロー 工博 中部大学教授 工学部土木工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

In this study, overland flood flow due to The Tokai Heavy Rainfall in September 2000 is numerically analyzed in order to clarify the actual conditions of the flooding and find out its feature. The flooding caused by the dike break in the Shin River is firstly analyzed. In this analysis, the flood flows of inner water and river water in the flooded area are simultaneously simulated by 2D plane model. The realization of flooding process and the inundation phenomena due to the flood area discussed through the results. The inner water flooding in Nagoya City is also calculated. The obtained results suggest the importance of interior drainage capacity for the heavy rainfall.

Key Words : Tokai Heavy Rainfall, Overland flood flow, Sewerage system, Numerical simulation

1. はじめに

平成12年9月の東海豪雨では、名古屋市内外各地で外水や内水氾濫による浸水が発生した。本報では、その浸水状況を再現し、その実態と特徴を把握するとともに、今後の対策樹立に寄与しうる知見を得ることを目的として氾濫解析を行った。まず、新川の破堤による名古屋市西区及び西枇杷島町の氾濫の再現では、新川からの外水に加え、内水を考慮した氾濫解析を行った。次に、名古屋市内を対象に内水氾濫解析を行い、当時の雨量分布による地域ごとの浸水状況の比較及び浸水危険地域を検討した。

2. 氾濫解析モデル

氾濫解析にはデカルト座標による平面二次元不定流モデル¹⁾を用い、以下の浅水方程式を基礎式とする。

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

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial (h+z_b)}{\partial x} - \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial (h+z_b)}{\partial y} - \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (3)$$

ここに、 x, y : 平面の空間座標、 t : 時間、 h : 水深、 u, v : それぞれ x, y 方向の流速、 M, N : それぞれ x, y 方向の流量フラックス ($M = uh$, $N = vh$)、 z_b : 地盤高、 g : 重力加速度、 n : マニングの粗度係数である。

数値解析は基礎式を差分法による表示に改め、Leap-Frog法を用いて陽的に計算を進める。差分化は、時間項には前進差分、移流項にはDONORスキーム、その他の項には中央差分を用いた。ただし、地盤高と水位との関係により、遡上(図-1)となる場合

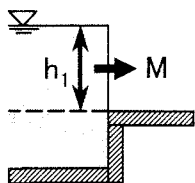


図-1 遡上の場合

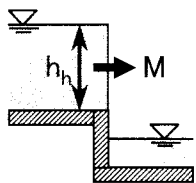


図-2 断落ちの場合

には式(4)の本間の越流公式²⁾を用い、段落ち(図-2)となる場合には式(5)の段落ちの式³⁾を用いて流量フラックスを求める。

$$\text{遡上の場合} : M = \mu h_1 \sqrt{2gh_1} \quad (4)$$

$$\text{段落ちの場合} : M = \mu' h_2 \sqrt{gh_2} \quad (5)$$

ここに、 μ には0.35を、 μ' には井上⁴⁾に従い $(2/3)^{3/2}$ を用いている。

氾濫水の先端の取り扱い、岩佐・井上・水鳥¹⁾に従い、移動限界水深(0.001m)を採用する。

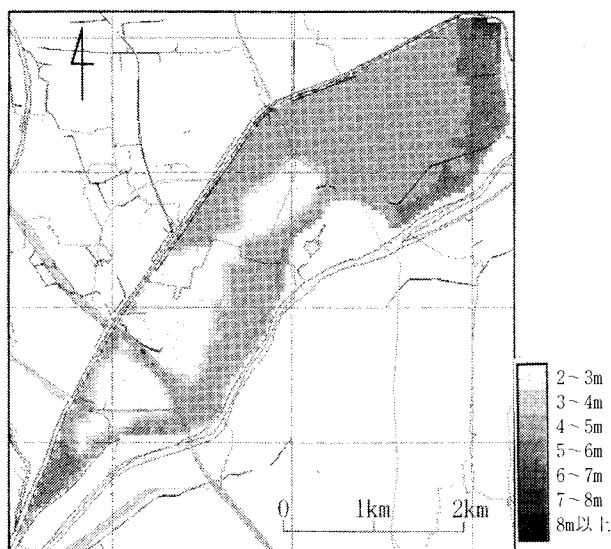
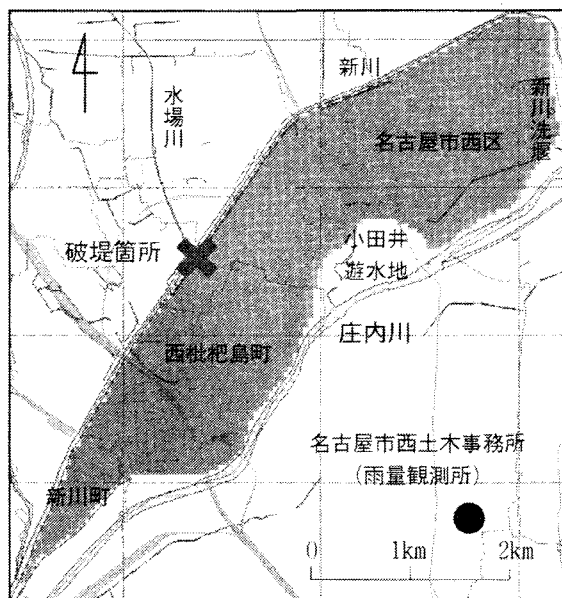


図-3 計算領域と地盤高(T.P.基準)

3. 新川の破堤を対象とした氾濫解析

(1) 計算条件

ここでは、新川の破堤により甚大な浸水被害が生じた名古屋市西区、西枇杷島町及び新川町が含まれる庄内川と新川に挟まれた領域(図-3)を対象とする。破堤した9月12日3:30以前に、西枇杷島町で内水氾濫による床下浸水が発生していた⁵⁾ので、本計算では、外水氾濫に加え内水氾濫も考慮に入れて氾濫の再現計算を試みた。

対象領域は、庄内川、新川及び両川を結ぶ治水緑地の堤防で囲まれる範囲とし、50m四方の格子を用い、地盤高には数値地図50mメッシュ(標高)を用いた。地盤高の分布を図-3に示す。なお、これらのデータ作成には著者らで構築したGISを用いた氾濫解析システム⁶⁾を適用している。

次に、外水氾濫に関する計算条件を記す。破堤箇所からの流入量は、氾濫現象の全体像を考察するためには新川の洪水流を解析すべきであるが、ここでは、新川破堤による氾濫に焦点を絞り、破堤箇所対岸の水場川合流地点で観測された水位データを境界条件として外水氾濫の流入流量を算出することとし

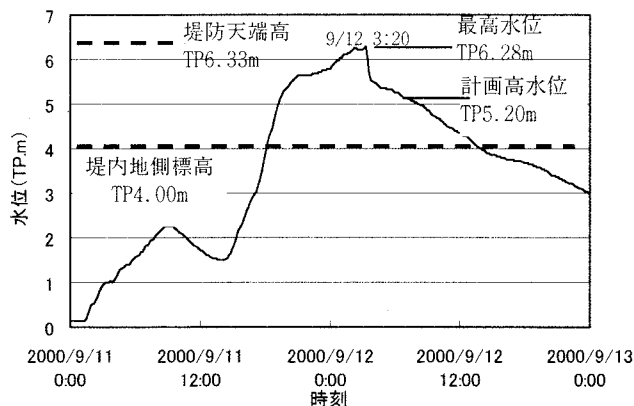


図-4 破堤箇所(水場川合流地点)における新川水位の時間変化

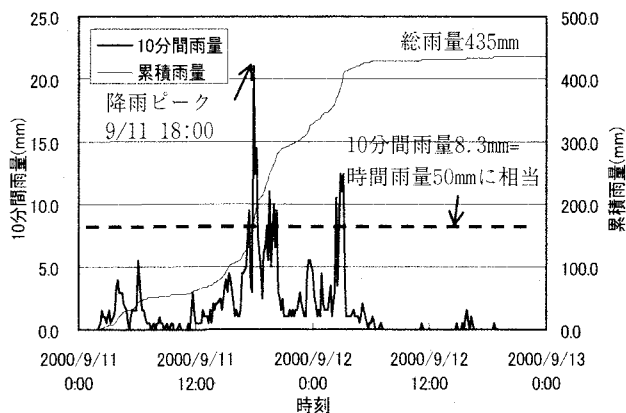


図-5 名古屋市西土木事務所の10分間雨量

た。これは、新川で観測された水位データは、新川河口から3.25kmの下之一色地点、同16.00kmの水場川合流地点、同20.08km地点の久地野地点しかなく、仮に下之一色と久地野を上下流端の境界条件としても、区間の途中で合流する水場川や五条川などの河川及び今回の豪雨で問題となった排水ポンプからの流入量に関するデータが入力資料として必要であり、河川水位・流量の再現精度を考慮すると、上述の条件設定の方が本研究の目的からは適切と考えたからである。すなわち、氾濫解析は破堤箇所からの氾濫水量を算出して行う方法ではなく、破堤時において破堤箇所に隣接する堤内地格子に、図-4に示す水場川合流地点の水位データを与えることで、外水氾濫の流入流量のモデル化を行った。水位を与える格子は、破堤幅が約100m、計算格子のスケールが50mであることを考慮して、破堤した堤防を境界とする2つの格子とした。また、水位を与える期間は破堤した9月12日3:30から水位が堤内地地盤高以下になる9月12日14:00までとした。なお、水位の観測データは10分ごとの記録である。図-4から、破堤した9月12日3:30の10分前である3:20に最高水位を記録していることが分かり、また堤防天端高との余裕も5cmしかなく、非常に危険な状態にある中で堤防が決壊したことが推察される。

内水氾濫は、対象領域に近い図-3に示した名古屋市西土木事務所において観測された雨量データを用い、対象域全体に一定の降雨を与えた。本研究では、雨量データとして図-5に示す10分間雨量を用いている。この図から、9月11日18:00にピーク雨量21.0mmを記録しており、時間雨量に直すと126mmという未曾有の豪雨であったことが分かる。なお、2日間の総雨量は435mmとなった。

名古屋市では、総合排水計画に基づき、時間雨量50mmに対応する治水施設整備を平成12年の完成を目標として進められてきた。そこで、この東海豪雨時に、対象域の名古屋市外も含む全域において、時間雨量50mmに対応する排水施設が一様に整備されていると仮定し、計算上、各格子に溜められた氾濫水に対して、時間雨量50mmに相当するボリューム分を瞬時に差し引くという簡便なモデルを考え、適用した。この方法を用いると、図-5に示した時間雨量50mmのラインを上回る降雨では、完全排水されず、浸水が発生することになる。また、排水先の河川が洪水時の場合、排水不良を生じたり、ポンプ排水ができないことがある。今回の豪雨では、対象域でもそうした事態が生じていたことを考え、ここでは図-4に示した新川破堤地点の水位が、計画高水位TP5.20mを超える場合は対象域全域の排水機能を停止させるという条件を加えた。計画高水位を超え、排水が停止する期間は、図-4より9月11日19:40から9月12日

6:30までとした。

なお、計算期間は平成12年9月11日0:00から9月13日0:00までの48時間である。氾濫解析における計算時間間隔は1秒としており、前述した降雨量及び排水量は、この計算時間間隔あたりの値に直して用いている。また、建造物占有率は名古屋市外のデータ整備ができないことから、Xanthopoulosらによる土地利用に応じた粗度係数⁷⁾を参考に、市街地の場合の粗度係数0.067を全域に与えた。

(2) 計算結果と考察

最大浸水深の分布を図-6に示す。本図より、最高浸水深は西枇杷島町での2.25mとなり、実績の最高浸水深が2mを超えていたことと一致する。本来ならば、詳細な下水道配置やポンプ運転状況を含めて現実の諸条件を正確にモデル化し、解析する必要があるが、データ収集・整備が不十分な状況下で実施したここでの結果でも、浸水深分布の定性的な傾向は把握できるものと考えられる。

つぎに、時間経過に伴う浸水状況変化を図-7に示す。排水を停止する期間は、9月11日19:40から9月12日6:30までであることから、9月11日19:00の浸水は、時間雨量50mmを上回る降雨に伴うものである。次の20:00以降では、19:40に排水を停止しているため、時間雨量50mm以下ながらも降り続く雨水が排水できず、浸水域が拡大する傾向にあった。西枇杷島町中心部では、破堤する直前まで、おおむね1時間あたり5～10cm程度、浸水深が増加し続けており、9月12日3:00の段階では58cmの浸水深となった。片田⁵⁾の調査結果（以降、調査結果と記す）では、12日3:00に床下浸水が調査区域（主に西枇杷島町を中心とする領域）内の半分以上で発生しており、また一部で床上浸水になっていたと報告されている。図-7の12日3:00の図では、浸水域はそれ以上に及んでい

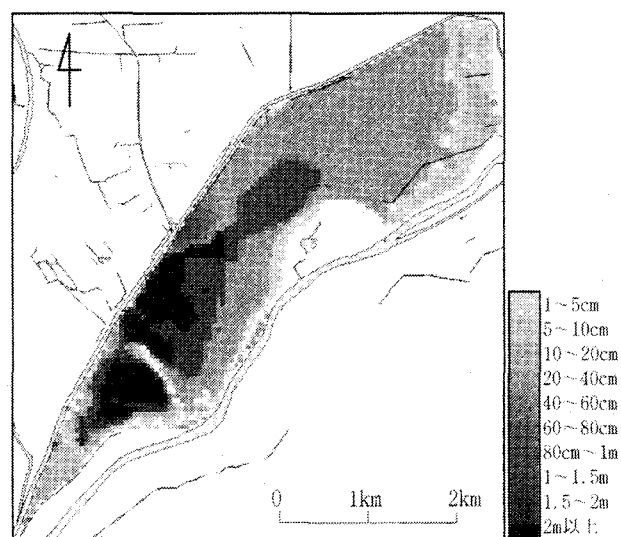


図-6 最大浸水深

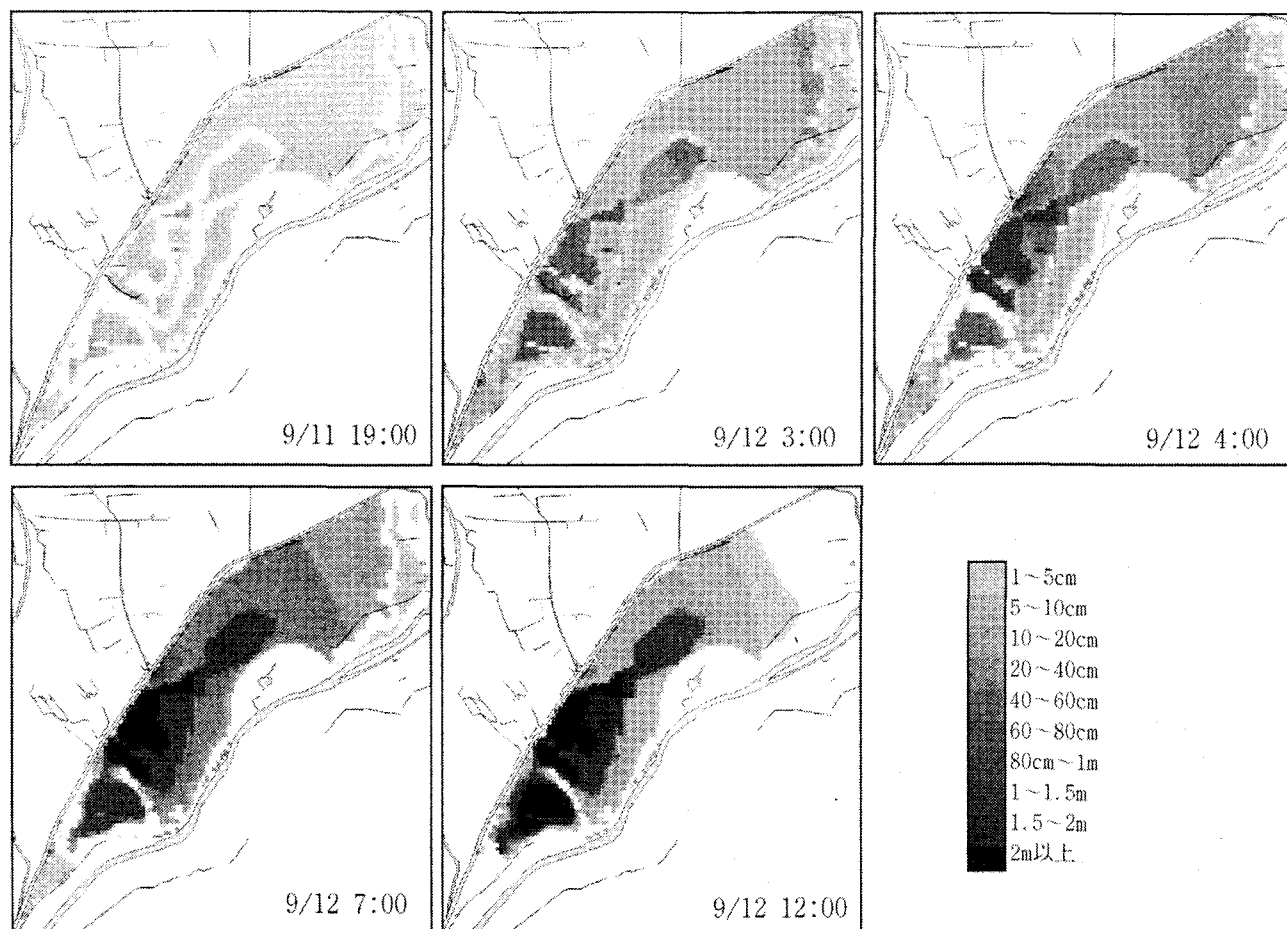


図-7 浸水深の時間変化

るような分布であるが、西枇杷島町中心部が50cm程度の浸水深であるほかは、その周辺は10cm未満の浸水である。したがって、計算結果は実績をよく表しているといえる。さらに、調査結果では、12日3:00において西枇杷島町中心部の一部と破堤箇所東部の名古屋市西区あし原町で床上浸水が発生していると報告されている。図-7の場合も、前者の地区で58cmの浸水深、後者の地区で最高72cmの浸水深と算出され、床上浸水に至っていると考えられ、この点でも一致しているといえる。このことから、内水氾濫による浸水の傾向として、図-7の結果は、東海豪雨時の浸水状況が比較的良好に再現されているものと考えられる。この結果は、河川水位が計画高水位以上の時にポンプ排水を停止するという条件設定が現実の排水不良の実態を表わすのに概ね妥当であったことを示唆し、豪雨時の内水氾濫の計算では、排水機能の取り扱いが重要であることを示している。

次に、破堤後の12日4:00における結果から、西枇杷島町中心部一帯では1.3m前後の浸水深となっていた。この浸水深ならば床上浸水に至るが、調査結果では、この時刻に床上浸水はまだ一部でしか発生していなかった。また、西枇杷島町中心部では、12日7~8時頃に最高の浸水深2.25mに達すると計算され、12日6:30にポンプ排水を再開するため、それ以降の

浸水面積は減少する傾向にある。外水氾濫の再現性を調査結果との比較から確認することは難しいが、床上浸水が生じた地域の時間的変化と図-7の浸水深のそれとを比べると、浸水深の増大傾向と床上浸水が拡大する傾向とが比較的良好に一致しており、計算結果は浸水の拡がりを定性的には再現しているものと考えられる。なお、浸水深の増加とその拡がりは、破堤箇所からの流入量に依存していることから、この精度が解析結果に大きく影響すると思われる。本計算では、破堤後、新川の水位と堤内地の地盤高との差を水深として、堤内地側の格子に与えている。新川の水位に関しては精度的に大きな問題はないと考えられるが、堤内地の地盤高に関しては実際に堤防が地盤高までは決壊していないこと、数値地図による標高値が1m単位という精度面などの問題がある。

4. 名古屋市を対象とした内水氾濫解析

(1) 計算条件

東海豪雨時には、名古屋市内で排水不良に伴う内水氾濫が広範囲に発生した。とくに、地下鉄駅構内が浸水する例が目立った。本解析では、名古屋市内を対象に内水氾濫のみの解析を行い、地域ごとの浸

水状況の把握を試みた。

名古屋市のうち庄内川と矢田川の左岸側のみを計算対象とした。ただし、東部の境界に関しては流域単位で考える必要性から、天白川流域である日進市も含まれている。流域区分は、名古屋市流域データベース（10mメッシュ）に基づくものとした。

格子スケールは50mとし、対象領域の格子属性データ及び地盤高データは、名古屋市の細密数値情報修正データによる10mメッシュ標高値を用い、50mメッシュ中心の座標と一致するデータを適用した。

内水氾濫の解析には雨量観測所の10分間雨量を用いた。しかし、本計算のような広大な領域では、雨量に地域的な分布が見られることから、各地の雨量観測所のデータを地域ごとに与えたり、あるいは補間により雨量分布を推測したりする必要がある。そこで、本計算では、後者の方法として、観測所間の距離の2乗に応じて各格子の雨量を推測した。雨量は、対象域内に位置する28観測所で計測されたデータを用い、式(6)により各格子の雨量を推測した。

$$R_{i,j} = \sum_{k=1}^{k_{\max}} \frac{RO_k}{L_{i,j,k}^2} \bigg/ \sum_{k=1}^{k_{\max}} \frac{1}{L_{i,j,k}^2} \quad (6)$$

ここに、 i, j ：格子の平面座標、 k ：雨量観測所番号、 $k_{\max}$ ：雨量観測所数、 R ：雨量推測値、 RO ：観測所の雨量データ、 L ：格子中心と観測所間の距離である。観測所の雨量データは、10分ごとにその間の10分間雨量を記録しているため、氾濫解析では10分ごとに式(6)により、各格子の雨量を推測した。

次に、降雨に対する排水条件は、新川の破堤を対象とした解析と同様に時間雨量50mmに相当する水深を全域において瞬時に差し引く簡便なモデルを用いる。下水道システムでの排水不良やポンプ排水機能が停止することも考慮に入れるべきであるが、これらを考慮するには、データが十分に整っていないこと、本計算では名古屋市全体という大きな視点での把握が目的であることから、詳細な排水条件の設定は用いないこととした。しかし、排水の程度による影響を比較するため、時間雨量50mmの排水のほかに、同40mmと60mmの場合も計算した。40mmは排水機能が低下した場合、60mmは名古屋市の緊急雨水整備計画での計画目標値であることから用いた。

計算期間は平成12年9月11日0:00から9月13日0:00までの48時間であり、解析における計算時間間隔は1秒とした。また、粗度係数は0.067を全域に与えた。

(2) 計算結果と考察

全期間、全域で時間雨量40mm分を排水させた場合の最大浸水深の結果を図-8に、同50mmの結果を図-9に、同60mmの結果を図-10に示す。これらの図から、降雨量の多かった東部地域で、浸水深の高い箇所が

広く発生していることが分かる。とくに、天白川に沿って浸水深の高い箇所が発生している。これは、勾配の急な丘陵地では、河川周辺に流れてくる雨水流出水が、ここで仮定している排水量を上回り、排水が追いつかないために浸水深が増加した結果と考えられる。このような時に、ポンプ所の排水が停止すれば、天白区野並地区のように甚大な浸水被害が生ずることは十分に予想される。本計算では、河川は考慮していないが、丘陵地では基本的に河川に向かって雨水が流れており、河川周辺の浸水危険性を示しているといえよう。

一方、西部の低平地地帯では、浸水はあるものの、その深さは10cm未満であり、東部のような50cm以上の浸水域は見られない。これは、降雨量が東部と比較して少ないことが第一の原因といえる。また、勾配が緩やかな地域にあり、ある箇所に集中して雨水が流れ込むということが少なく、排水可能な程度であったと考えられる。

これらの図と浸水実績⁵⁾とを比較すると、市南部の天白区、南区での浸水は、とくに天白川に沿って発生しているという点では計算結果は浸水実績をある程度説明している。また、実績では北区一帯で浸水していたが、計算ではとくに浸水深、浸水面積が大きいとは判断できない。しかし、大曾根付近で浸水深の高い地域が見られる。さらに、計算では浸水被害の小さかった西部は、実績によると、広範囲で浸水が発生している。この地域はゼロメートル地帯であることに加え、庄内川の増水もあって実際には排水が不十分であったことが推察される。

次に、排水条件を時間雨量40mm、50mm、60mmの3通りで行った図-8、図-9、図-10をそれぞれ比較する。時間雨量40mm分を排水させた図-8では、浸水面積とともに、浸水深の高い箇所が多く発生している。時間雨量50mm分を排水させた図-9では、とくに浸水深が小さくなっていることが分かる。図-8の結果は、時間雨量40mmすなわち10分間雨量では6.6mmを超える降雨は、9月11日18:00から12日0:00過ぎまで、ほぼ連続して発生しているため、排水が追いつかないことによるものと考えられる。一方、時間雨量50mmすなわち10分間雨量では8.3mmを超える降雨は、長くて1~2時間しか連続せず、その後に降雨が弱くなった際に、それまでに溜められた雨水も排水が可能となるため、図-9では、それほど浸水深が大きくならなかったものと考えられる。さらに、時間雨量60mm分を排水させた図-10になると、より浸水深は小さくなる。これらのことから、これまで主な都市で実施されてきた時間雨量50mmを想定した排水施設整備計画は、ポンプ排水が計画通り機能するならば、床上浸水という重大な被害をある程度防ぐことが可能なレベルと考えられる。

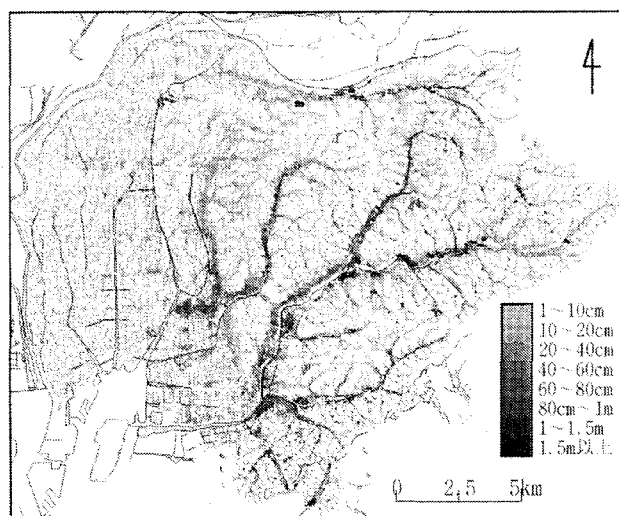


図-8 時間雨量40mm排水の最大浸水深

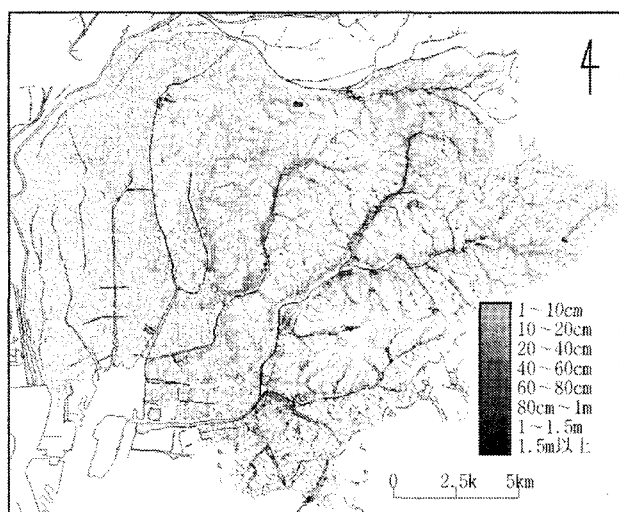


図-9 時間雨量50mm排水の最大浸水深

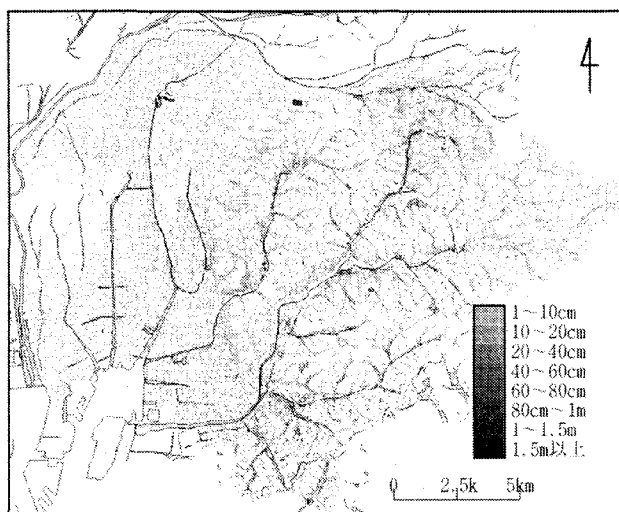


図-10 時間雨量60mm排水の最大浸水深

ところで、図-8～図-10の結果は、想定する時間雨量に基づく排水施設が、豪雨時にすべて有効に機能したとみなした机上の結果でしかない。しかし、実際には、東海豪雨時の野並ポンプ所のように、故

障や浸水あるいは排水側の河川の増水により、排水が設計通りに行われなかった施設が数多くある。名古屋市の総合排水計画で、時間雨量50mmに対応する排水施設が、目標としていた平成12年度に完成していて、かつそのすべてが機能していたならば、一時的な道路冠水を見放すと図-9の結果に近い内水氾濫状況になっていたと予想される。しかし、実際には浸水域の分布や浸水深を考えると、図-8の結果が、実際の浸水状況に最も近いと考えられ、この結果を踏まえた上で、重点地区の設定や排水能力のレベルアップなどの内水対策を進める必要がある。

5. おわりに

本研究では、平成12年9月に発生した東海豪雨を対象として氾濫解析を行った。ここで用いた氾濫解析法や外水・内水氾濫モデルは簡便なものであるが、実績と比較することで定性的な浸水状況のある程度再現できたものと考えられる。より精度良く再現しようとするならば、より詳細な地盤高データの整備に加え、雨水貯留施設を含めた下水道施設やポンプ排水施設の機能を氾濫解析システムに取り入れて解析する必要がある。また、本研究で得られた結果から河川洪水時のポンプ停止等による排水不良を考慮に入れるとともに、外水氾濫と内水氾濫を同時に取り扱うことが、氾濫解析の精度向上とハザードマップ作成や氾濫対策など解析結果の現実問題への応用には不可欠であることが改めて示されたといえよう。

参考文献

- 1) 岩佐義朗・井上和也・水鳥雅文：氾濫水の水利の数値解析法，京都大学防災研究所年報，第23号B-2，pp.305-317，1980.
- 2) 土木学会編：水理公式集，昭和46年改訂版，土木学会，p.265，1971.
- 3) 土木学会編：水理公式集，昭和60年版，土木学会，p.288，1985.
- 4) 井上和也：開水路非定常流の数値解析法とその水工学への応用に関する研究，京都大学学位論文，pp.172-177，1986.
- 5) 片田敏孝：住民の災害対応についてのアンケート調査，2000年9月東海豪雨災害に関するミニシンポジウム，2000.
- 6) 大坪郁宜・櫻井耕史・武田 誠・松尾直規：GISを用いた氾濫解析システムに関する研究，水工学論文集，第45巻，土木学会，pp.877-882，2001.
- 7) 土木学会編：水理公式集，平成11年版，土木学会，p.131，1999.
- 8) 建設省中部地方建設局（現国土交通省中部地方整備局）庄内川工事事務所・愛知県建設部河川課：平成12年9月12日出水 庄内川・新川出水状況 第2報，2000.

(2001. 4. 16 受付)