

東海豪雨による新川破堤氾濫の数値解析

NUMERICAL ANALYSIS ON INUNDATION DUE TO THE SHIN RIVER BREACH CAUSED BY TOKAI HEAVY RAIN

清宮 洋¹・片田 敏孝²・真野 明³

Hiroshi KIYOMIYA and Toshitaka KATADA and Akira MANO

¹学生会員 工修 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉06)

²正会員 工博 群馬大学助教授 工学部建設工学科 (〒376-8515群馬県桐生市天神町1-5-1)

³正会員 工博 東北大学大学院教授 工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉06)

The mathematical model which can simulate inundation process in the urban areas due to heavy rain has been developed. The problems of model are to devise the configuration of the grid and to consider buildings, sewage system, streams etc. In this study, the numerical simulation was conducted to reconstruct the Shin-river breach caused by Tokai heavy rain in September 2000. This model employed the ground elevation as the initial condition and the overflow discharge at breach point as the boundary condition. Governing equations are 2-D continuity and momentum equations to simulate urban overland inundation. The result of the numerical simulation was represented by GIS and compared with the field data obtained by the questionnaire. These results indicate the accuracy of this inundation simulation and are helpful in flood management in the future.

Key Words : inundation simulation, , actual measurement , numerical condition

1. はじめに

2000年9月11, 12日に愛知県を中心とした東海地方を台風14号と秋雨前線の影響による集中豪雨が襲った. この豪雨は総雨量にして567mm, 時間雨量にしても93mmという記録的なものであり死傷10名を出し, 被害総額は愛知県で8500億円にのぼる大惨事となった. この雨の影響により名古屋市を流れる一級河川である新川では, 本流である庄内川から最高で270m³/sの分派を受けたことにより長時間, 長区間において計画高水位を上回りいつどこで破堤してもおかしくないような状況下にあった. そのような中で, 9月12日3時30分に名古屋市西区あし原において新川の左岸が破堤したし, これにより西区はもちろん下流に位置する西枇杷島町の全域においても浸水被害が生じた.

さて, 近年, 河川氾濫ハザードマップを作成し, それを事前に住民に周知させて防災に役立てることが盛んに行われている. ハザードマップを作成するためには通常, 2次元不定流方程式を用いて数値解析を行うが, 河川からの流入条件, 境界条件, 抵抗係数などさまざまな条件を決める必要がある. これらは主に実験的検証から研究が進められているが, 破堤から氾濫する過程を再現するというような実際のハザードマップ作りに必要な全体的

な数値シミュレーションを行った場合に, どの程度その解の精度が保証されるのかは定かでない.

そこで本研究は, 前述した新川の破堤氾濫による浸水被害を数値解析によって再現し, それを実測データと比較することによる氾濫シミュレーションの精度の検証を目的とする. 今回用いた実測データは, 被災後に実施された住民からのアンケート調査から得たものであり, この調査では回答者の居住地に加えて, 床下浸水や床上浸水の開始時刻, 最高浸水時の浸水深や発生時刻など, 浸水過程の各段階における氾濫水の状況について質問しており, 各地域における最大浸水深のみならず, 氾濫の浸水過程など, 刻一刻と変化する氾濫流の挙動を把握することができた. また, これまで新川の破堤氾濫については, 辻本, 松尾, 武田らにより地盤データ(標高)を初期条件とする平面2次元不定流モデルから再現, 検証されてきたが¹⁾実際に各地区で発生した浸水深の定量的変化については十分に検討がなされていない. そこで本研究では, アンケート結果の実測データを補間することにより浸水深の定量的な時系列変化を表し, これを数値シミュレーション結果と比較した. ここでは, GISを用いた破堤後12時間までの平面的な比較に加え, 領域内から任意に選んだ地区における浸水深の定量的な比較を試みた.

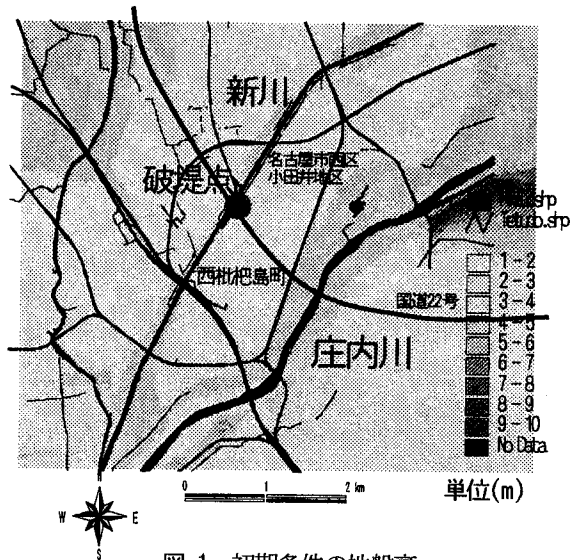


図-1 初期条件の地盤高

計算では、破堤時刻を0時とし、12時間前からの降雨を考慮することにより開始時刻を-12時とした。

2. 数値解析のモデル

(1) 浅水流方程式

数値解析には、以下に示す浅水流方程式を基礎式とする。これらの式は、 x, y を平面の2次元座標とし、鉛直方向に連続式と運動量方程式を積分し、圧力分布に静水圧近似を用いることにより得られる²⁾。式(1)が連続式であり、式(2)および式(3)が運動量方程式である。

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

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial M^2}{\partial x D} + \frac{\partial MN}{\partial y D} = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \tau_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial MN}{\partial x D} + \frac{\partial N^2}{\partial y D} = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \tau_y \quad (3)$$

$$\tau_x = \frac{\rho g n^2 U \sqrt{U^2 + V^2}}{\zeta^{1/3}} \quad \tau_y = \frac{\rho g n^2 V \sqrt{U^2 + V^2}}{\zeta^{1/3}} \quad (4) (5)$$

式中において、 ζ : 基準面から上方にとった水面変位、 $D = h + \zeta$: 水面から水底まで鉛直方向に計った全水深、 h : 基準面から水底までにとった静水深、 $M = UD, N = VD$: x, y 方向の単位幅流量、 U, V : x, y 方向の断面平均流速、 τ : 水底に働くせん断応力で、 x, y の下の添え字はそれぞれの方向の成分、 ρ : 密度、 g : 重力加速度、 n : 汜濫原粗度係数である。また、 $r_e = \max(r - dc, 0)$ であり、 r : 降雨強度、 dc : 下水道の排水能力(50mm/hr)である。

右辺の第1項が圧力項で、重力の効果により水面の高い所から低い所に向けて力が働き、波が伝播する。また、右辺

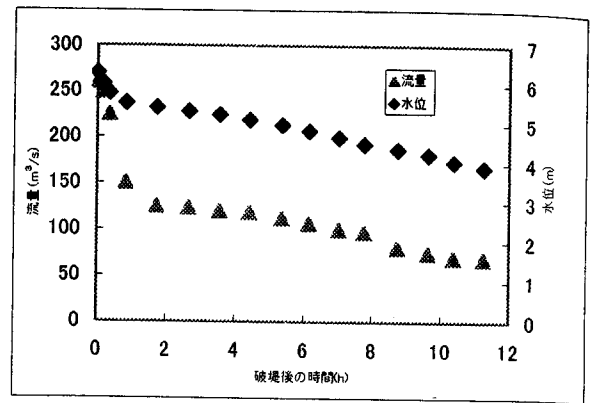


図-2 破堤部における汜濫流量

の第2項は水底に働せん断応力、すなわち摩擦応力の項である。定常流、あるいは波高との相対量として浅いところの現象を扱うときには無視できない量となる。

(2) 本間の越流公式³⁾

数値計算における境界条件としての破堤点での汜濫流量は、以下に示す本間の越流公式が一般的に用いられる。本間台形せきに関する実験から h_2/h_1 (h_1, h_2 : 破堤部において敷高から見て高い方の水位と低い方の水位) の大きさによって完全越流 ($h_2/h_1 \leq 0.45$)、不完全越流 ($0.45 \leq h_2/h_1 \leq 0.8$)、もぐり越流 ($0.8 \leq h_2/h_1$) の3種類の越流状態に分類されることを明らかにし、それぞれの流況について流量式を与えている。今回の計算では、もぐり越流の公式を用いた。ここで、 Q_0 は汜濫流量、 B は破堤幅である。

$$Q_0 = 0.91 B h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (6)$$

3. 計算条件

(1) 初期条件

初期条件には地盤高を設定した。地盤高には数値地図50mメッシュ(標高⁴⁾)を用いたが、現地実測および下水道台帳図面から得た標高データと比べ西区小田井地区の新川沿いにおいて高すぎる箇所があったため、1mから1.5mの補正を行った。図-1にその分布を示す。また、新川堤防、国道22号および鉄道の線路においては比高が2m程度の盛土とした。水路および下水道を考慮に入れた内水汜濫解析は本研究では行っていない。

(2) 境界条件

境界条件には破堤部における汜濫流量をあてはめる。汜濫流量を求めるには2-(2)で述べた本間の越流公式を用いるが、そこに代入する破堤部における河川の水深とその時の汜濫流量の時間変化を図-2に示す。

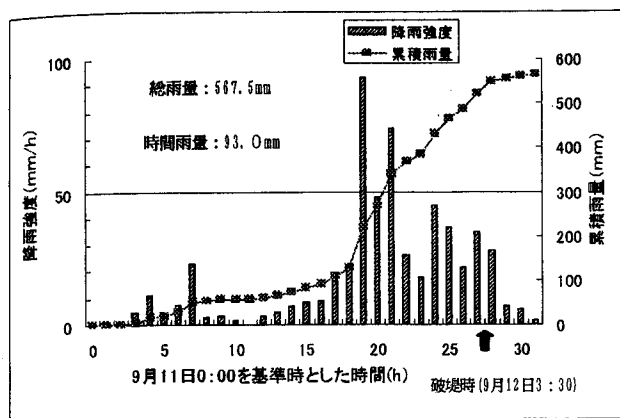


図-3 9月11日0:00から12日7:00における名古屋雨量観測所での1時間おきの降雨強度と累積雨量

(3) 粗度係数

計算領域は主に住宅地であるために建物による摩擦の影響を考慮しなくてはならない。氾濫原粗度係数についてはさまざまな粗度係数が提案されており（例えば Xanthopoulosら⁵⁾, 1976), その他にも建物占有率に応じて粗度係数を決定する方法なども提案されているが(栗城ら⁶⁾, 1996), 今回は氾濫域を一様に市街地とみなして, Xanthopoulosら(1976)にならうこととして $n=0.067$ とした⁷⁾.

(4) 雨水排除システムの考慮

降雨は、破堤以前にピークをむかえた。気象庁の名古屋雨量観測所によると、9月11、12日において、総雨量567.5mm、60分最大雨量93mmという未曾有の降雨であったことがわかる。計算ではこの雨を1時間毎の降雨強度⁸⁾であらわして(図-3)計算領域全体に一定の降雨を与えた。ここでポンプ排水施設や下水道施設の影響についてだが、本研究ではこれらの運転状況を取り込む解析システムが十分に構築できていないことから次のようなモデルを考えた。名古屋市では総合排水計画にもとづき、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-3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。

4. 数値解析の結果

(1) GISによる浸水深の表現

数値解析を行った結果をGISを用いて平面的なグラフにした(図-4)。グラフは、50mメッシュで読み込んだ120

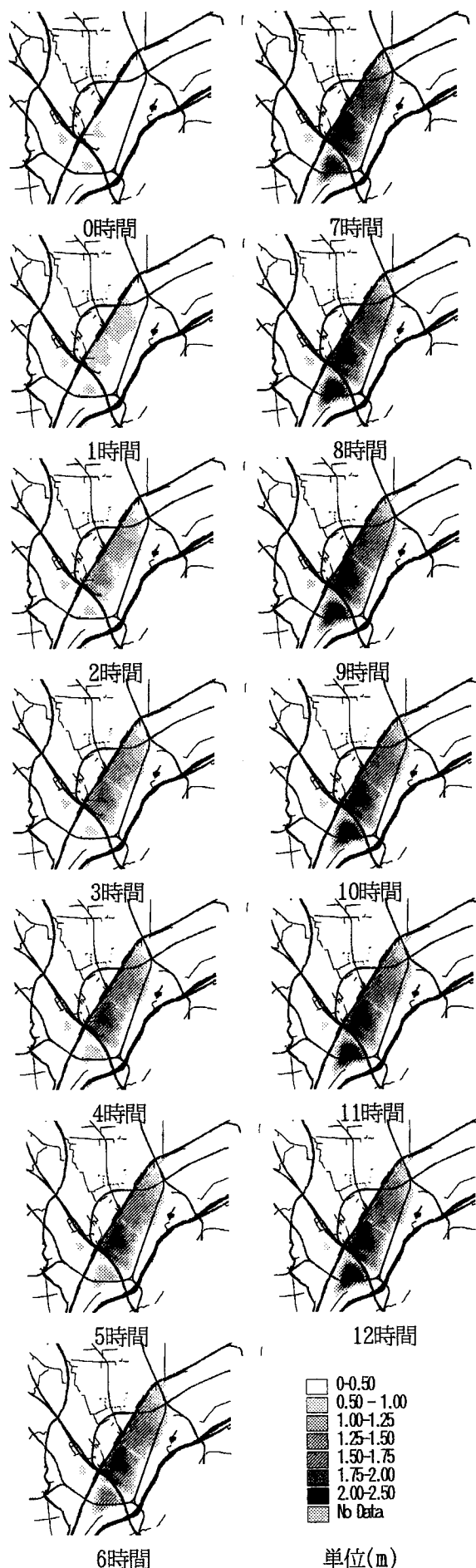


図-4 数値解析の結果の時系列変化

行90列のデータを補間して得たもので、0.25m毎の濃度を变化させることによって浸水エリアにおける浸水深を表した。破堤以前に降った雨による浸水図を始めとして、その後、破堤から1時間おきの浸水図を12時間目まで示す。

(2) 浸水の様子

まず、破堤前の降雨による浸水だが、浸水している箇所は、図-3の地盤高の低い箇所と重なっている。その後、破堤してから一気に氾濫流が流れ込んだ様子がうかがえる。氾濫流も地盤高の低い方へと時間を追うごとに流れ込んでいく。北部においては、時間ごとの浸水深の広がりがよく表れていて、地盤の低いエリアに徐々に流れ込んでいき破堤後5時間で1.5mほど溜まってから、さらに北部一帯の名古屋市西に広がっていった。また、中部においては、全体的区に地盤が低いこともあり、破堤後1時間で1.5mほど浸水した箇所もある。その後、破堤部より少し下流に位置する新川沿いのエリアにおいて時間ごとに急速な浸水の拡大が表れている。

浸水エリアの広がり、破堤後6時間あたりまでで庄内川までは氾濫流は達してはいないが、浸水深においては、破堤後4時間で、すでに2mをこえる浸水も生じていて、その後も流入は続き12時間後には2.5mにも達した箇所がある。また、国道22号線においては最初の1時間目では、浸水を妨げている様子がうかがえるが、その後架橋下の通路を通して浸水が広がっていくように計算では考慮されている。これと同様に南部での浸水においては、西枇杷島町を横切る東海道本線によって、はじめの3時間目あたりまでは浸水が妨げられている。その後、徐々に架橋下の通路から進出していく様子がうかがえる。これによって、南部の地盤高が低いエリアにおいても大きな浸水が生じていて、12時間後には、2.5m近く浸水が生じている。

5. 実測値の集計

(1) 実測データ

氾濫の実測値としては、群馬大学の片田研究室によって集められた被災後の住民からのアンケート結果を集計したものを用いている。このアンケートは、氾濫域における各建物の、床上、床下浸水時、避難時、最大浸水時の4点の時間と浸水深を可能な限り回収したものであり、このデータを補間することによって町ごとに分割したエリアにおける時系列の浸水深の変化を表し、計算値と同様にGISで表した。

(2) 浸水の様子

図-5に示す浸水の様子を見ていくと、はじめのうちは、破堤点のあし原町から新川沿いにおいて広がっていった

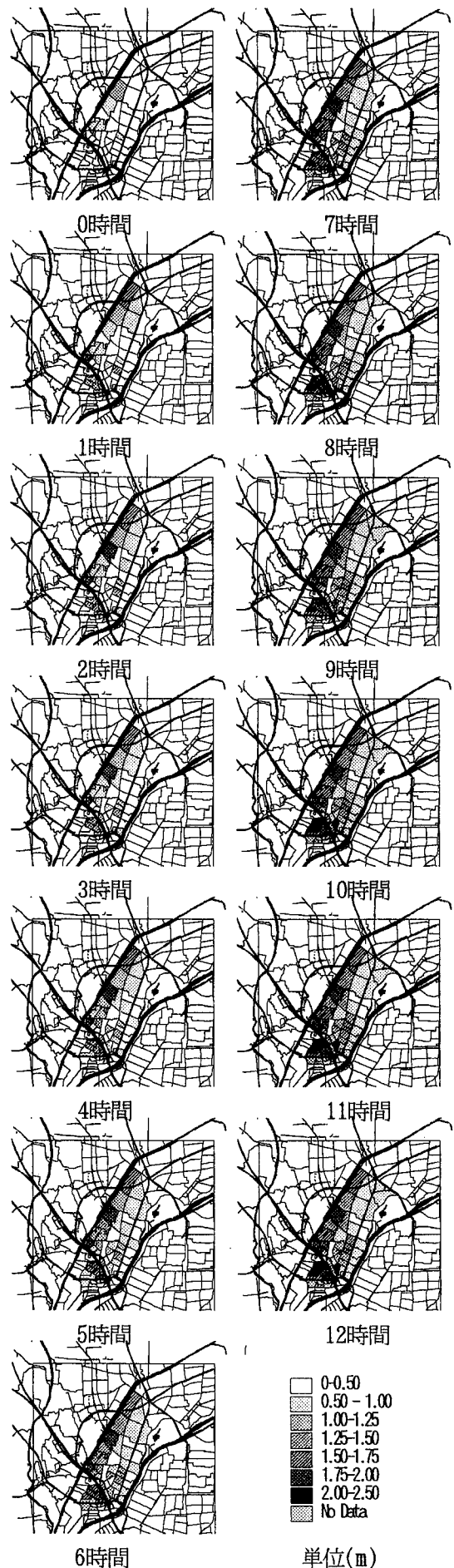
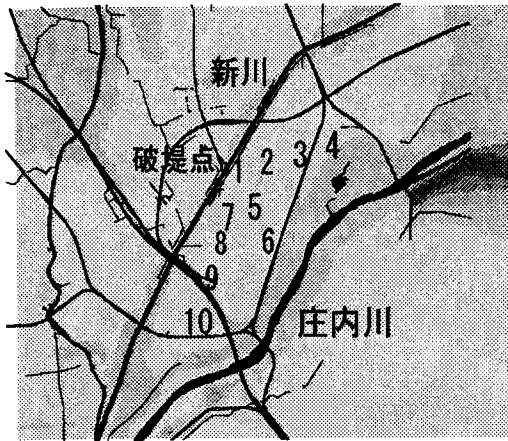


図-5 浸水深実測値の時系列変化



1. あし原 2. 中小田井3丁目 3. 中小田井2丁目
4. 上小田井1丁目 5. 古城2丁目 6. 城並1丁目
7. こも原 8. 地領1丁目 9. 壱反五敏割 10. 芝野新田

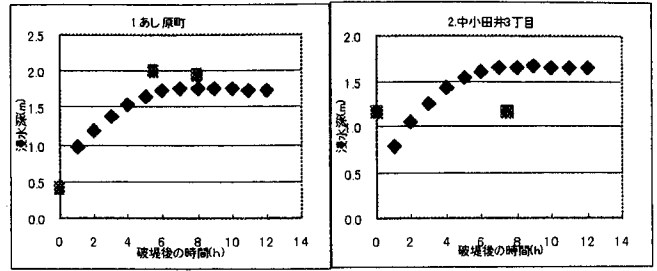
図-6 浸水深の定量的比較箇所

いる。特に上流部の中小田井町では、破堤以前の降雨による浸水の段階からすでに1m前後の浸水があり、破堤から1時間で急激に深くなっている。また、東海道本線の南側の特に地盤高が低い箇所においても破堤してすぐに1m以上の浸水が生じている。その後、徐々に内地へ浸水が広がっていく様子が見られる。浸水深においては、データの補間により時間の経過で比例的に大きくなるようにしているために、それぞれの町では最大浸水深に達する時間までは単調増加している。最終的には、新川沿いのほぼ全域と南部において2m前後の浸水が生じていて、最大浸水箇所は破堤部に近い地領町(図-6参照)で2.4mとなった。

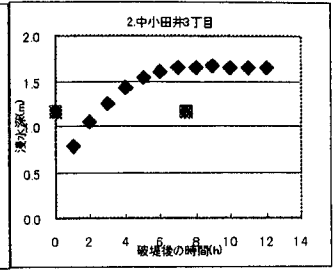
6. 浸水深の定量的比較

4,5によって計算値と実測値それぞれにおける浸水の様子を平面的に表すことができた。この章では、平面的な結果に加え、計算領域内の任意の10点(図-6)において1時間おきの計算値と数点の実測値を定量的にとらえたグラフ(図-7)をまじえて、シミュレーションの精度を検証する。

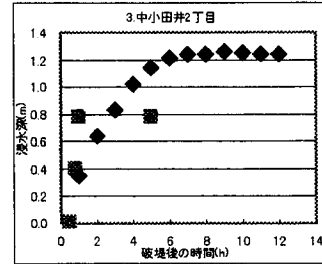
図-7のそれぞれのグラフを見ると、全体的に計算値と実測値は非常によく一致している。生じた誤差も大部分は数10cm以内でありシミュレーションの精度はとて良いといえる。本研究では排水不全による内水氾濫は考慮されていないが、地盤高と氾濫原粗度係数を用いることにより破堤による氾濫流の挙動は良く再現できたといえる。一方で、2. 中小田井3丁目, 3. 中小田井2丁目のように計算値と実測値にずれが生じている箇所もあり、より精度を高めるには内水氾濫の考慮が必要となってくる。



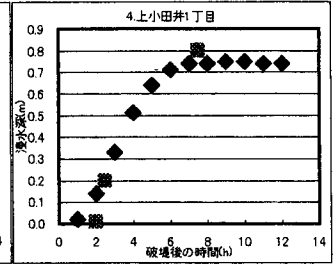
1. あし原町



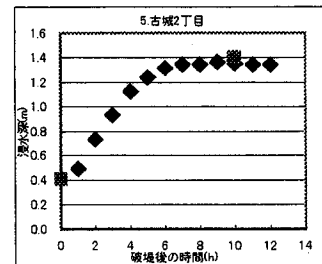
2. 中小田井3丁目



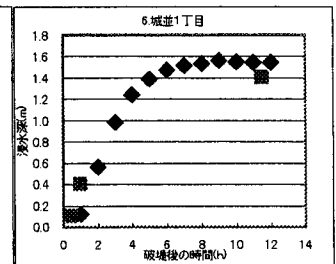
3. 中小田井2丁目



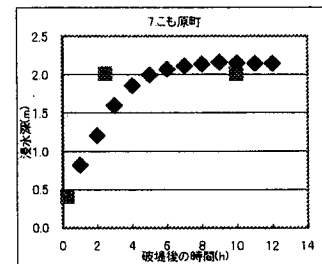
4. 上小田井1丁目



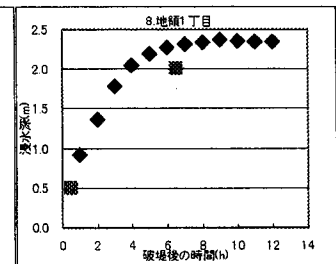
5. 古城2丁目



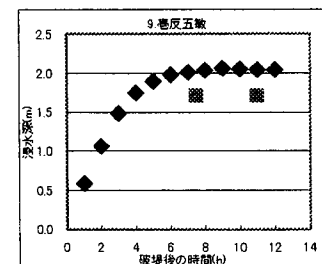
6. 城並1丁目



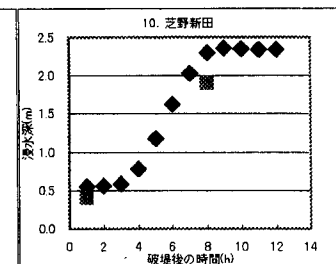
7. こも原町



8. 地領1丁目



9. 壱反五敏割



10. 芝野新田

◆ : 計算値 ■ : 実測値

図-7 浸水深の定量的比較

その他に、誤差の原因として考えられることは、実測値であるアンケート結果の集計方法である。アンケートは、氾濫域内の町ごとに集められており、1つの町内で複数の回答が得られた場合は、最もよく回答されているデータを用いている。しかし、町内でも浸水深に違いがあると思われ、また、回答家屋の正確な位置もわかっていない。その他、家屋の床下は30cmとし、浸水対策として土台が高くされている場合は50cmとして考えたが、実際は各家屋ごとの高さは一定ではない。アンケート結果自体も、浸水時に自宅にいたかどうかにより回答精度は変わると思われることや、被災後に住民から集められたデータであるため、浸水時間、浸水深は正確な値とはいえない。

7. 結論

- ・GIS を用いて計算値および実測値を平面的にとらえ、比較することができた。
- ・地盤高をもとに、破堤による氾濫流および粗度係数、降雨、下水道システムの影響を考慮にいれた数値解析を行い実測値と比較した結果、全体的には非常に精度の高いシミュレーションであることがわかった。
- ・局所的にみると、誤差が大きくなる箇所もあり、原因の細かい解明と、より正確な解析システムの構築が今後の課題である。

参考文献

- 1) 辻本哲郎:2000年9月東海豪雨災害に関する調査研究, pp.91-105, 2001
- 2) 池田駿介:流体の非線形現象—数理解析とその応用—, pp.57-58, pp103-105, 1992
- 3) 土木学会:水理公式集, pp.287-288, 1985
- 4) 国土地理院:数値地図50mメッシュ(標高)—日本II,1997.
- 5) Xanthopoulos, Koutitas: Numerical Simulation of a Two Dimensional Flood Wave Propagation Due to Dam Failure, Jour. Hydraulic Research, Vol.14, No.2, pp.323-330, 1976.
- 6) 栗城稔, 末次忠司, 海野仁, 田中義人:氾濫シミュレーションマニュアル(案),土木研究所資料,第3400号,pp.11-12,1996.
- 7) 東北地域災害科学研究会:東北地域災害科学研究,pp.7-12,2001
- 8) 土木学会水理委員会河川部会:2000年9月東海豪雨災害に関するミニシンポジウム報告書, pp.13-51, 2001

(2002. 9. 30受付)