

越流による破堤進行に及ぼす堤内地条件の影響

THE EFFECT OF INUNDATED AREA CONDITIONS TO LEVEE BREACH PROCESSES BY OVERFLOW

鷲見哲也¹・岸本雅彦²・辻本哲郎³

Tetsuya SUMI, Masahiko KISHIMOTO, and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 博(工) 名古屋大学工学研究科講師 社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²非会員 修(工) 奥村組(〒545-8555 大阪市阿倍野区松崎町2-2-2)

³正会員 工博 名古屋大学工学研究科教授 社会基盤工学専攻

Hazard maps for flood disasters, which can be used to estimate damage under a variety of scenarios, are made based on modeled levee breach processes. But actually, the conditions of inundated area vary and it is possible that they affect the levee breach processes and their migration speed. In this study, numerical analysis of levee breach process including flow and sediment transport phenomena in inundated area. The effects of inundated area conditions, e.g. pavement cover, wood cover or building-urbanized condition, to levee breach processes and temporal change of flow and the shapes of levee and land are demonstrated. Wider wood area in front of levee makes progress of levee breach process about several minutes slower. Density of wood affects to progress speed of breach strongly.

Key Words : Levee breach, wood for flood disaster reduction, densely urbanized condition, progress speed of levee breach, numerical prevention

1. はじめに

氾濫シミュレーションは、水災危機管理のための情報提示の一つのツールとして重要な位置をしめるようになり、洪水ハザードマップ作成や避難計画検討・水防活動基礎情報等の基礎資料として用いられ、水防法改正¹⁾による浸水想定区域図の作成の際には必ず用いられる手法である。破堤による外水氾濫のシミュレーションにおいては、その破堤部での取り扱いが重要である。「浸水想定区域図作成マニュアル」²⁾でのその部分の扱いは、必ずしも破堤の物理過程そのものを反映したものでない。

「マニュアル」に示されている「破堤直後に、最終破堤幅の半幅を与える」「その後1時間で最終破堤幅にいたる」という時間スケールとは、辻本ら³⁾の数値解析的検討では、破堤プロセスうち、流入流量が増え始め落掘が形成される時点と、そこから流量が増え切った時点までの時間帯に対応するものと説明している。この検討は、藤田ら⁴⁾の実験と比較を行った上で2000年東海豪雨水害で破堤した新川での条件で行っているが、堤体条件がそ

の破堤の進行に与える影響としては、堤体の断面積が支配的であることを示すとともに、堤内側の舗装も破堤口拡大の最終段階での時間進行を遅らせることを示した。

一方で、堤内地での利用形態によっては、破堤過程の進行を遅らせる場合が考えられる。その一つとして考えられる堤防に沿った「樹林帯」は、河川法(平成9年改正)において「河川管理施設」と規定され、治水上の効用を持つものと定義された。その機能として、①越流時の堤防の安全性の向上、②破堤部の拡大抑制、③氾濫流量の低減、④流木・土砂堆積の防止・表土流亡の低減、が挙げられる⁵⁾。物理的には、①流水抵抗となり、流れを抑制する、②底面せん断抵抗の抑制により土砂輸送を減らし、地形変化を遅らせる、という2つが相互に作用しながら上記の機能をもたらしと考えられるが、どれが支配的になるのか、時間進行および地形変化にどの要素が効いているのか、という点まで整理されていない。

本研究では、密に都市化された場合も含め、破堤口前面の氾濫域の条件によって、破堤過程の進行がどのように変化するのかについて、移動床水理モデルによる数値計算によって示し、整理することを目的とする。

2. 破堤・氾濫の数値シミュレーション

破堤・氾濫の数値計算手法は、辻本・北村ら³⁾が行った以下の方法を踏襲した。流れは、水深平均2次元解析とし、①非直交境界適合格子⁷⁾で、②有限体積法による支配方程式の離散化⁷⁾を行うとともに、③Fractional step methodの応用による時間発展型解法を採用した。

河床変動については、掃流砂のみを対象とし、掃流砂量式に芦田・道上式⁹⁾を用いて、流砂連続式を離散化した。河床の傾きはLane¹⁰⁾の式で限界掃流力に組み込むとともに、流砂量ベクトルへの曲がりの効果はNakagawa et al¹¹⁾の方法、を、流線の曲がりの効果についてはEngelund¹²⁾による方法で算定した。斜面安定については、後藤ら¹³⁾と同様の手法で、水中安息角となるように質量保存を保持しながら地表高さを計算した。

この計算方法の検証については、辻本・北村ら³⁾が、藤田ら⁴⁾の実験の条件で、その妥当性について確認している。

3. 樹林帯の破堤プロセスへの影響

(1) 樹林帯の治水上の効果

堤防周辺の樹林帯（水防林）は、堤防技術の発達により衰退してきたが、平成9年の改正河川法では、環境と調和のとれた治水・利水施設として位置付けられた。治水上の機能のうち、破堤時に発揮するものについて、物理的に解釈すると、粗度増加がもたらす効果として、

(a) 樹林帯前面水位が上がり裏法尻部にウォータクッションを形成することによる、流速（流量）低減効果。

(b) 掃流力低下による法尻侵食や破堤部および樹林帯内における土砂輸送量の軽減。

(c) 根による侵食防止効果。

が挙げられる。(a)は、その時刻毎の流入流量を減らすことに直結するが、(b)(c)は破堤口周辺の地形の時間変化、つまりは流入流量等の変化の時間スケールを支配する事となる。

構造例施工規則等¹⁵⁾¹⁶⁾では、樹林帯の幅は堤防から概ね20m以内、通常の樹木では単位面積あたりの樹木の本数 $n/A \geq 0.1$ 本/m²、植生密度 $\lambda = nD/A \geq 0.03$ m⁻¹（標準の胸高直径 $D=0.3$ mに対して）としている。直接流水抵抗として流入流量を減ずる効果については、上記数値での条件で8%程度の効果であるとしている⁹⁾。しかし、破堤の時間進行に対する影響については明らかにされていない。そこで本研究では、樹林帯密度と樹林帯幅の変化が、破堤の進行の特に時間的特性に与える影響を考察した。

(2) 樹林帯での計算条件

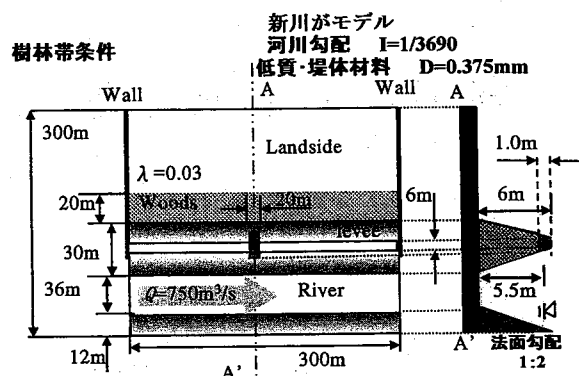


図-1 条件設定図（樹林帯条件）

表-1 樹林帯に関する解析条件

解析内容	植生密度 λ (単位:m ⁻¹)	樹林帯の幅 (m)
基本条件	0.0	0.0
樹林帯条件（法令を参考）	0.03	20
植生密度2倍	0.06	20
植生密度3倍	0.09	20
樹林帯の幅が2倍	0.03	40

上記の(a)(b)の点および、時間進行への影響を見るために、以下の条件で破堤・氾濫計算を行った。空間グリッドは4m、時間刻みは0.05秒とした。

基本条件として、堤防は砂質とし、地盤・路床も含め、0.375mmとした。2000年9月に破堤した新川の条件を参考に図-1の様な堤体・氾濫域の条件を設けた。河道上端には750m³/sを与え、下流端は5.5mでの一定水位（破堤後水位低下時は逆流を許さない条件）とした。堤体は法面を2割勾配とし、天端幅を6mとした。破堤部には予め幅20m、越流水深0.5mの切り欠き部を設ける。氾濫域は、河道方向上下流側は不透過、堤内側は段落ち条件とした。堤内地での粗度は粒径からManning-Strickler式によって $n_0=0.011$ とした。また樹林部での抗力係数 C_d は1.2とした。これらにより、破堤部周辺でのプロセスを見ることとする。

樹林帯については、表-1のような条件の変化を考えた。ここでの「樹林帯条件」とは、法令を参考にした、植生密度・樹林帯幅の値での条件である事を示している。植生密度2倍および3倍は、100m²当たり100本で生えている直径6cmおよび9cmの竹林と等価のイメージとなる。

(3) 計算結果と考察

図-2に樹林帯密度を変化させた時の、氾濫流入流量・破堤幅・天端中心での最深河床高の時間変化を示す。氾濫流入流量が600m³/sとなる時刻で見ると、基本条件との比較では、法令に近い条件で7分程度、竹林に近い条件で20分程度以上遅い時刻に達することがわかる。破堤形状は、深さ・幅共に影響を受けている。流入流量が振動するのは、河道部での水面の物理的な振動に伴うもの

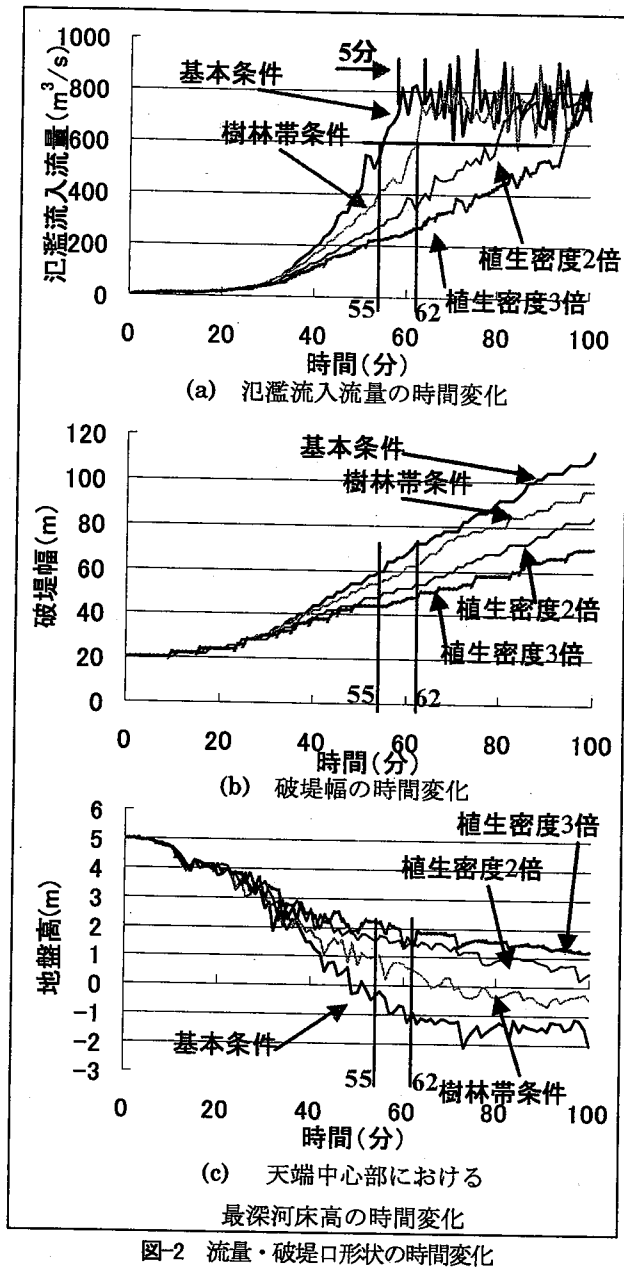


図-2 流量・破堤口形状の時間変化

であり、下流端境界条件の逆流防止条件がこれを励起しているものと考えられる。しかしこの振動は、破堤口からの流入が十分に発達してから起こっていることがわかっており、発達段階では影響が小さい。

樹林帯域に入る手前の堤体部では、Froude数が1を超えていることから、ウォータクッションによる流量制御が働いているとは言えないことがわかった。図-3(a)(b)は破堤部の横断面図であるが、樹林帯内での掃流力抑制が樹林帯堤外部付近で土砂堆積を促し、結果として堤体全体の土砂の持ち出しを抑制することがわかる。これが、地形の時間変化を遅らせ、流量上昇に影響している。樹林帯条件での62分時の地形の様子を図-4に示すが、落掘部を形成することなく比較的平坦な形状を維持している。図-5は樹林帯幅を2倍の40mとした場合との、氾濫流入流量の時間変化の比較であるが、大きな影響はなく、上記の植生粗度の抵抗の程度では20m程度まででよいことが

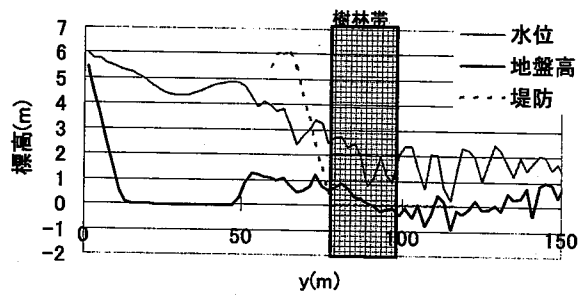
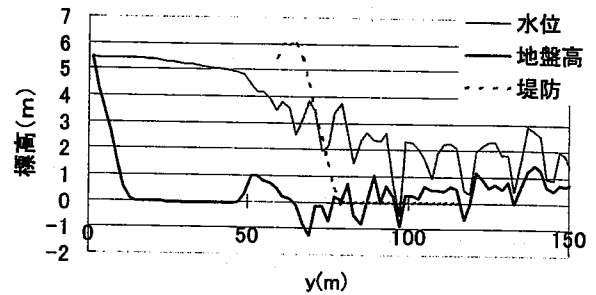
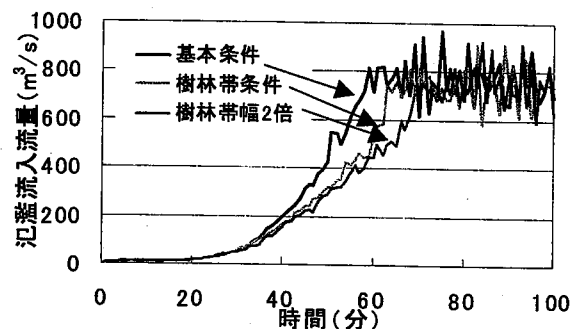
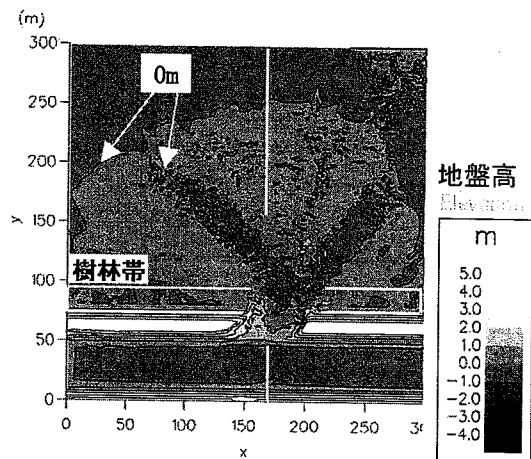


図-3 $x=170\text{m}$ 横断 (62分後)



わかる。

4. 堤内地の市街地利用による破堤過程への影響

(1) 市街地利用と破堤の進行への影響

堤内地が市街化している場合、そこが裸地である場合との違いは、①舗装により、落掘などの洗掘が起これにくく、②建物が密集していると、氾濫水の拡大の阻害となり、条件によっては、破堤部でのウォータクッションの形成の可能性が考えられる。ここでは、堤内地側（堤体部・河道部を除く）が平坦な舗装条件（初期地盤高からの非洗掘条件）の場合の破堤部の挙動への影響と、建物密集に伴う抵抗としての影響について、検討を行った。

(2) 計算条件

(a) 舗装条件

舗装条件での氾濫域での粗度は、基本条件と同じ $n_f=0.011$ とした。また、市街地利用（建物）の条件については、次の2つのモデルを適用した。

(b) 市街地モデル1

市街地においては、建物密度の影響が大きくなるので、建物占有率 θ （メッシュに占める建物面積の割合）に応じて、建物区域の粗度係数を設定し、他の土地利用の粗度係数と合成する方法がある。氾濫原粗度係数を底面粗度係数、建物占有率 θ 、浸水深 h の関数として表現する次式となる。

$$n^2 = n_0^2 + 0.020 \cdot \frac{\theta}{1-\theta} \cdot h^{4/3} \quad (1)$$

$$n_0^2 = \frac{n_1^2 A_1 + n_2^2 A_2 + n_3^2 A_3}{A_1 + A_2 + A_3} \quad (2)$$

ここに A ：占有面積、 A 及び n の添え字 1, 2, 3：それぞれ、農地、道路、その他の土地利用とし、 $n_1=0.060$ 、 $n_2=0.047$ 、 $n_3=0.050$ である。「浸水想定区域図作成マニュアル」²⁾ などでは、このモデルを用いて、建物に与える影響を評価している。家屋などの建築物により水深が上がることを考慮して、連続式を次のようにして解析を行った。

$$(1-\theta) \frac{dh}{dt} + \text{div} \mathbf{q} = 0 \quad (3)$$

ここに、 $\mathbf{q}$ は線流量ベクトルである。本検討では、2000年に破堤地点付近の地図から、建物占有率を40%とした。

(c) 市街地モデル2

堤内地に建築物に見立てた非侵食の長方形の地形配置する方法である。本検討では、 x 方向（河道方向）36m、 y 方向50m、高さ6m（屋上は冠水しない）、建物間距離は x 方向20m、 y 方向は36mとした。これにより建物占有率はほぼ40%となる。建物間の粗度は上記と同じとした。

表-2 市街地モデル解析条件の特徴

解析条件の特徴	
舗装条件	堤内地非洗掘
市街地モデル1	建物占有率と水位の関数で合成粗度係数が変化する場合
市街地モデル2	堤内地に同じ建物占有率の建築物モデルを並べた場合

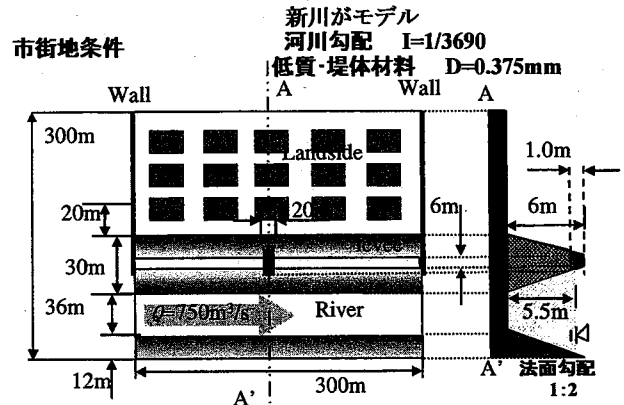


図-6 市街地モデル2

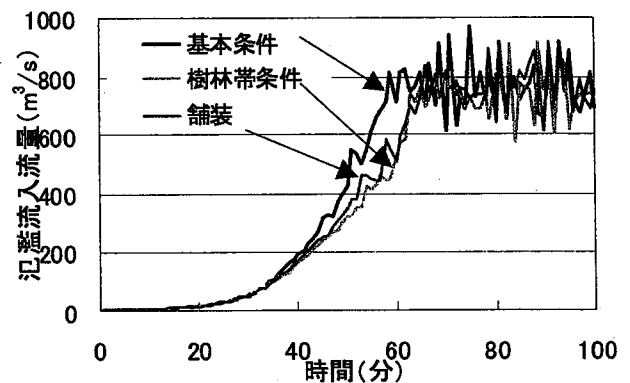


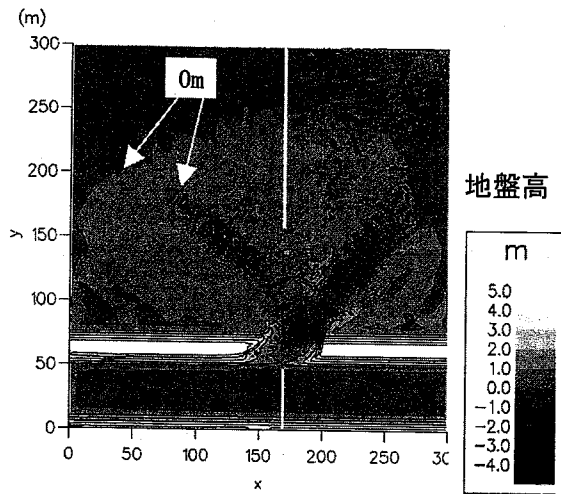
図-7 舗装条件との比較（流入流量）

(3) 計算結果と考察

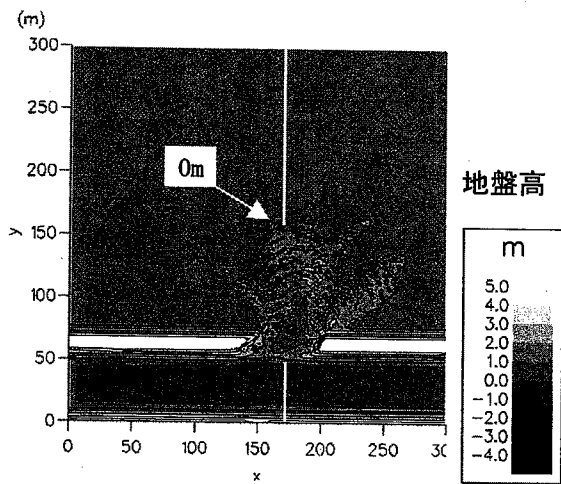
(a) 舗装条件

図-7は、舗装条件と基本条件・樹林帯条件を流入流量で比較したものである。これで見える限り、時間変化の基本条件からの遅れは数分程度で、樹林帯とあまり変わらないことがわかる。

図-8は地盤高分布であるが、非洗掘の方は、同心円状に堆積があることがわかる。これは破堤直後から形成されるが、拡散的な流れが形成され、破堤口から離れた部分で同心円状の限界掃流力を下回って形成される。図-9の横断地形・水位分布から、非洗掘の方が堤内地側地盤・水位共に高く、堰上げられた水位は掃流力を減らし、土砂堆積は砂面勾配を減らす（あるいは逆勾配の）効果があり、結果として土砂の輸送を減ずるような現象となり、洗掘部での地形の変化も遅れたと考えられる。このように、非洗掘条件は、破堤点を囲むようにマウンドを

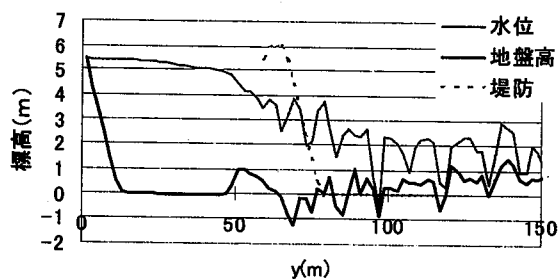


(a) 基本条件 (55分後)

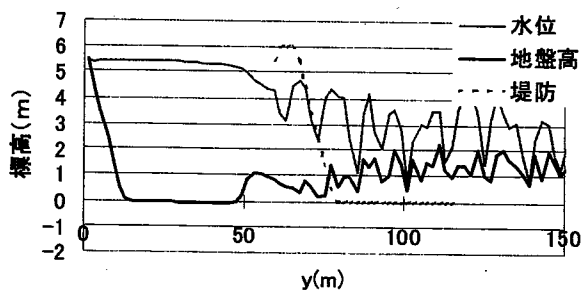


(b) 舗装 (非洗掘) 条件 (62分後)

図-8 洗掘条件による地形の違い



(a) 基本条件 (55分後)



(b) 舗装 (非洗掘) 条件 (62分後)

図-9 横断地形と水位分布

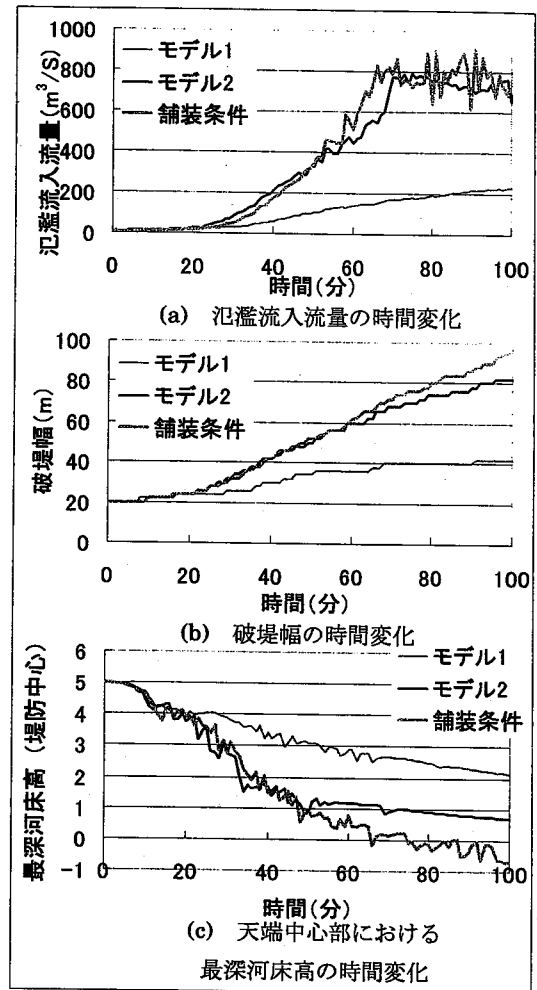


図-10 市街地モデルによる違い

作ることによって自らその破堤進行を遅らせる効果がある。

(b) 市街地モデル

図-10は、市街地条件による、氾濫流入流量と破堤口形状特性の時間変化の違いを示す。モデル1は他のものとは全く異なる結果となり、少なくともモデル2とは等価であるとは言えない。モデル2で設定している条件に対して、よく用いられているモデル1での抵抗係数が大きすぎるのか、この点は確認できていない。平均化して扱うモデル1と、建物を避けて流れるのを計算するモデル2との整合を今後取ってゆく必要がある。

モデル2の方に着目すると、舗装条件に比べて、最後に進行が数分程度遅れている。その時間的対応を見ると、破堤部の下刻の進行 (図-10(c)) が50分後以降遅くなっている。

図-11は、68分後の流れと地形の平面図であるが、流れの強いところに土砂が堆積している。図-12にFr数の分布を示しているが、50分以降は破堤部周辺では常流となっており、道路部分での土砂堆積が堰上げを引き起こし、破堤部での流速・掃流力ともに低下させたことが良く分かる。土砂輸送も考慮することで初めて、氾濫流量の一時的な抑制を示せるのである。

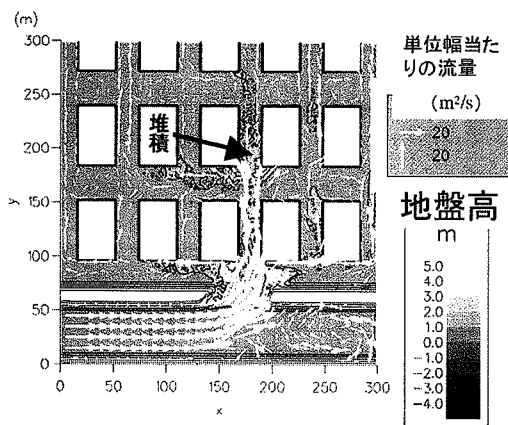
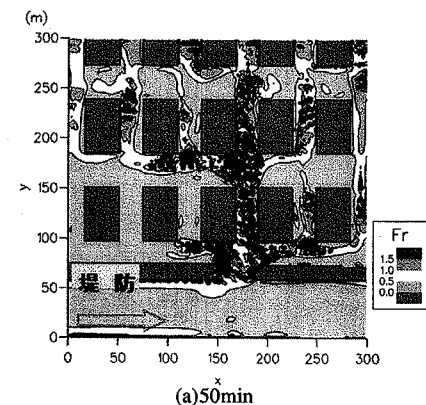
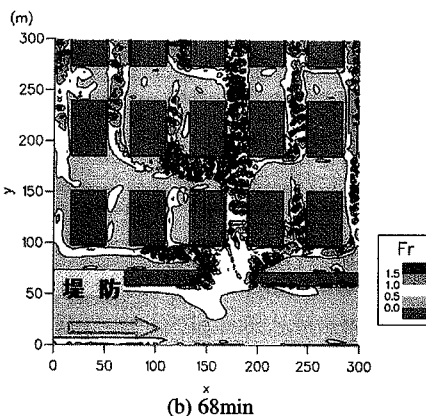


図-11 市街地モデル2での流れと地形



(a) 50min



(b) 68min

図-12 Fr数分布

5. おわりに

本研究では、樹林帯や市街地利用が破堤過程の進行に与える影響について、数値計算を用いて示した。樹林帯の幅よりは密度の方がその効果として重要であり、密な竹林程度であればその効果は大きい。非洗掘条件や密な市街地は、土砂堆積のあり方が破堤進行速度を支配している。本解析条件では、流量で見た際の時間特性の変化は数分程度少ないが、河床高・地盤高の差などの基礎条件を変化させた場合については効果をもつ可能性もある。このように、時間も考慮した形で見ると、移動床での

シミュレーションが重要であることを示唆している。

謝辞：本研究での数値解析手法は、北村忠紀氏（元名古屋大学講師，現パシフィックコンサルタンツインターナショナル）によるところが大きい。ここに深く謝意を表す。また，本研究は平成15年度河川整備基金助成事業を得て実施した。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局治水課・水防法令研究会：改正水防法の解説，ぎょうせい，2001.
- 2) 国土交通省河川局河川課：浸水想定区域図作成マニュアル，2001.
- 3) 辻本哲郎・北村忠紀・岸本雅彦：砂質堤防の破堤口拡大過程のシミュレーションと破堤水理，河川技術論文集Vol8，31-36，2002.
- 4) 藤田裕一郎・田村多佳志・村本嘉雄：河川堤防決壊口の拡大過程に関する実験的研究，京都大学防災研究所年報第27号B-2，pp.369-391，1984.
- 5) 藤田裕一郎・田村多佳志・村本嘉雄：河川堤防の決壊に伴う外水と土砂の流入について，京都大学防災研究所年報第30号B-2，pp.527-549，1987.
- 6) 河川環境管理財団編：堤防に沿った樹林帯の手引き，山海堂，2001.
- 7) Ferziger, J. H. and M. Peirc : Computational method for fluid dynamics, Springer, 364p, 1997.
- 8) Rhie, C. M. and W. L. Chow : A numerical study of the turbulent flow past an isolated airfoil with trailing edge separation, AIAA J., 21, pp.1525-1532, 1983.
- 9) 芦田和男・道上正規：混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究，京都大学防災研究所年報，第14号，B2，pp.259-273，1971.
- 10) Lane, E. W. : Design of stable channels, Trans. ASCE, Vol.120, pp.1234-1260, 1955.
- 11) Nakagawa, H., T. Tsujimoto and S. Murakami : Non-equilibrium bed load along side bank, Proc. 3rd Int. Sym. River Sedimentation, Jackson, Mississippi, pp.1029-1065, 1986.
- 12) Engelund, F. : Flow and bed topography in channel bends, Journal of Hydraulic Division, ASCE, 100(11), pp.1631-1648, 1974.
- 13) 後藤孝臣・北村忠紀・辻本哲郎：上・下流境界条件の変化による直線砂礫流路の側岸侵食を伴う河床低下に関する研究，土木学会論文集，684/11-56，pp.35-46，2001.
- 14) 河川法施工規則
- 15) 河川管理施設等構造例施工規則

(2004. 4. 7受付)