

氾濫流量の評価と堤内物体群の影響

ESTIMATION OF OVERFLOW DISCHARGES BY SIMULTANEOUS ANALYSIS OF FLOOD AND INUNDATION FLOWS

秋山 壽一郎¹・重枝 未玲²・津崎 周平³

Juichiro AKIYAMA, Mirei SHIGE-EDA and Shuhei TSUZAKI

¹フェロー会員 Ph. D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550北九州市戸畑区仙水町1-1)

²正会員 博士(工学) 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (同上)

³学生会員 九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻 (同上)

The overflow discharges, under the overflow as well as submerged overflow conditions, from a river with or without retarding plantations into a flood plain are investigated experimentally and numerically. The analysis is directed toward the examination of the overflow discharges by the overflow discharge formula as well as the numerical analysis, simultaneously solving flows in a channel and inundation flows in a flood plain. The dynamic inundation analysis model used in the analysis comprises the finite volume method on unstructured grid using flux-difference splitting(FDS) technique. We found that the model is much superior to the formula in predicting the overflow discharges with or without retarding plantations.

Key words: *inundation, overflow discharge, retarding plantations, dynamic flood simulation*

1. はじめに

観測史上最大あるいはそれに近いような集中豪雨が近年頻発し、甚大な豪雨災害が毎年のように発生している。新川(2000年東海豪雨災害)、刈谷田川・稚児清水川・中之島川(2004年新潟・福島豪雨災害)、円山川・出石川(2004年兵庫・京都豪雨災害)、六田川(2005年宮崎豪雨災害)など、整備の遅れが目立つ中小河川を中心として破堤氾濫も見られるようになってきた。

このような外力の増大などの自然的背景と限られた投資余力などの社会経済情勢の変化を受け、2005年には、“防災(洪水氾濫の防止)”から“減災(洪水氾濫による被害最小化)”への転換が、わが国の治水対策の基本方針として打ち出されている¹⁾。

“減災”では、計画高水を超える洪水を危機管理として捉え、効果的にハード・ソフト両面の減災施策を講じることになる¹⁾。具体的にこれを計画・実施していくためには、対象とする河川とその流域の特性を踏まえた上で、そこでの洪水・氾濫プロセスを事前に、それもできる限り正確に把握することが求められる。とりわけ、貴重な人命や資産などが失われる危険性が高い破堤氾濫では、このことが重要になる。

さて、現行の外水氾濫解析では、河道での洪水流と氾

濫原での氾濫流を別々に解析し、河道と氾濫原との間の雨水のやり取り(氾濫流量)を取扱うための内部境界条件を設け、氾濫流量を越流公式などの流量式で評価する方法が標準とされている²⁾。以下では簡単のため、外水氾濫をこのような方法で解析するモデルを「接続モデル」と呼ぶこととする。

接続モデルでは、その再現精度は洪水・氾濫流モデル、標高データ、氾濫流量の各精度および破堤の取扱いで概ね決まってくる。洪水・氾濫流モデルについては精度の高いモデル³⁾⁴⁾⁵⁾も登場しており、標高データについてはレーザプロファイラや航空写真測量により、±0.2m程度のかかなり詳細な標高データを取得することが可能になってきている。破堤の取扱いについては、現行では過去の事例に基づき経験的に処理する方法が取られているが²⁾、その一方では破堤プロセスを取扱った数値モデル⁶⁾も登場しており、越流破堤箇所の特定制も可能となりつつある⁴⁾。実破堤では、堤体の質や裏法の植生の状態などによって破堤状況が異なってくるので、その取扱いに関しては今後の進展を待つところが大きであるが、総じて外水氾濫解析の信頼度向上に向けた環境は整いつつあるといえよう。

氾濫流量については、通常、正面越流を対象とした本間公式⁷⁾で評価する方法が取られている。一般に、河道から溢れた洪水流は、河道に対して横越流状態で堤外地

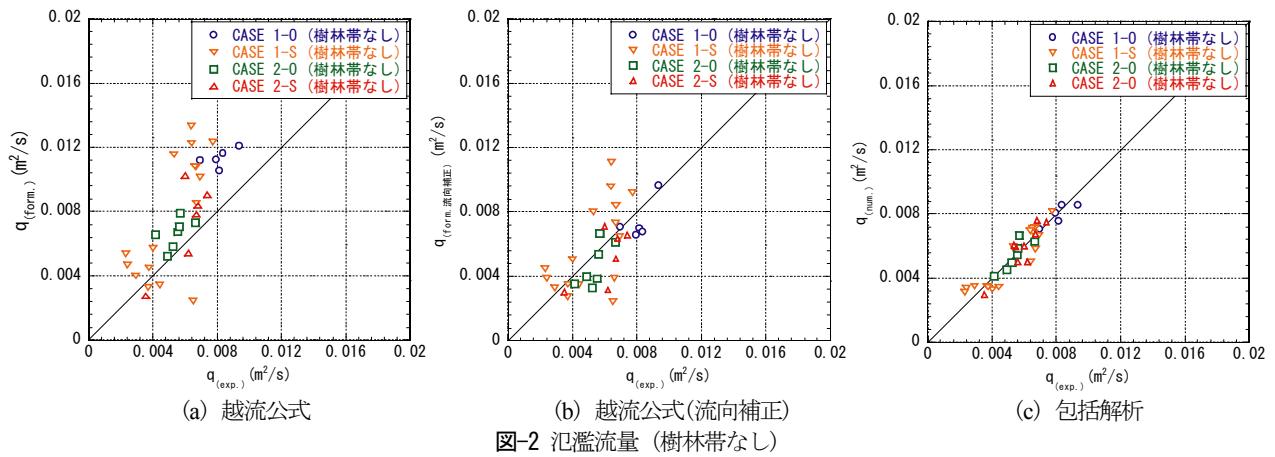


図-2 氾濫流量 (樹林帯なし)

である。また、全体的な流量収支を把握する目的で、河道部下流端での流出流量 Q_{out} も測定した。実験条件を表-1にまとめて示す。

3. 解析の概要と考察

越流式に基づく氾濫流量の評価では、本間式を用いた。本間式では、単位幅当たりの越流氾濫流量 q_0 (m^2/s)は式(1)で与えられる。

$$\begin{aligned} \text{完全越流: } h_2/h_1 < 2/3 \text{ では, } q_0 &= C_1 h_1 \sqrt{2gh_1} \\ \text{潜り越流: } h_2/h_1 \geq 2/3 \text{ では, } q_0 &= C_2 h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 h_1 と h_2 はそれぞれ堤防天端を基準として高い方と低い方の水位(m)であり、本間式の流量係数は堤防の法面勾配及び上流水深/堤防高に依存し、完全越流では $C_1=0.31\sim 0.33$ 程度の値を取る。氾濫シミュレーション・マニュアル(案)²⁾では、堤防断面形を長方形としたときの流量係数が規準とされており、その値は $C_1=0.35$ と $C_2=0.91$ である。また、掘り込み河道からの溢水氾濫流量についても越流氾濫と同様に評価され、この場合、 h_1 と h_2 はそれぞれ破堤部敷高を基準として高い方と低い方の水位(m)となる。

なお、完全越流式は、築堤河川からの完全越流、破堤区間あるいは掘り込み河川から支配断面を経て射流で越流する場合に、一方潜り越流式は、築堤河川からの潜り越流、破堤区間あるいは掘り込み河川から常流で越流する場合に適用できる。

包括解析に基づく氾濫流量の評価では、著者らの「洪水氾濫・浸水対策シミュレータ」^{3,4)}(以下、「シミュレータ」という)を用いた。

シミュレータは、都市域での内水・外水氾濫の予測と減災諸策の評価・検討手段を目的とした、いわゆる統合型氾濫解析モデルであるが、その中核モデルをなす洪水流・氾濫流サブモデル^{8,9)}(以下、「サブモデル」という)は、非構造格子を用いた有限体積法に基づき、空間平均操作された2次元浅水流方程式を離散化し、空間積分に

流束差分法(FDS)を用いた高精度・高解像な平面2次元不定流モデルである。著者らは、河道に沿って非構造格子を配置し、洪水流と氾濫流をサブモデル^{8,9)}で包括的に解く解析法を包括解析と呼んでいる。

包括解析では、洪水流と氾濫流を一体的に解析するので、河道特性と氾濫原特性を考慮した上で、両者間の複雑な雨水のやり取りを評価できる。氾濫流量は、流向に沿った流速と越流水深の積として評価される。また、FDSに基づいているので、常・射流が混在するような破堤氾濫を含む外水氾濫を的確に評価することができる。併せて、樹木群に代表されるような計算格子より小さな物体群を空間平均された抗力として処理するので、越流式ではその取り扱いが難しい状況、つまり河道と氾濫原の境界に位置する樹林帯などを取り扱う上でもたいへん都合がよい。なお、完全越流状態では堤防の裏法肩近傍で静水圧分布に従わない流れとなるが、サブモデルは2次元浅水流方程式に基づく平面2次元モデルであるので、これに起因した誤差は含んでいる。

以下では、堤内地に何も設けられていない状況、堤内地に構造物群が設けられた状況、および堤内地に樹林帯が設けられた状況での氾濫流量について検討を加える。なお、本解析に用いた計算メッシュは、河道部については0.05(m)、堤防については0.02(m)、氾濫原部については0.06(m)を基準にした三角形メッシュで、その総数は7541個であった。また、解析結果は、水深、流速のいずれも最大で1割程度の誤差があるものの概ね実験値を再現していた。

(1) 氾濫流量(堤内地に何も設けられていない状況)

本実験のように水路床勾配=0の場合では、先述した氾濫流量式²⁾は本間式と同じになる。したがって、ここでは標準的に用いられている評価法、つまり式(1)と標準とされている流量係数($C_1=0.35$, $C_2=0.91$)²⁾を用いて単位幅当たりの氾濫流量を評価した。流向補正は、実験から得られた流向に基づき行った。なお、越流式における水位の取り方は、堤外地では河道中央の水深、堤内地では堤防の裏法尻の水深とした。

図-2は、堤内地に何も設けられていない状況について、

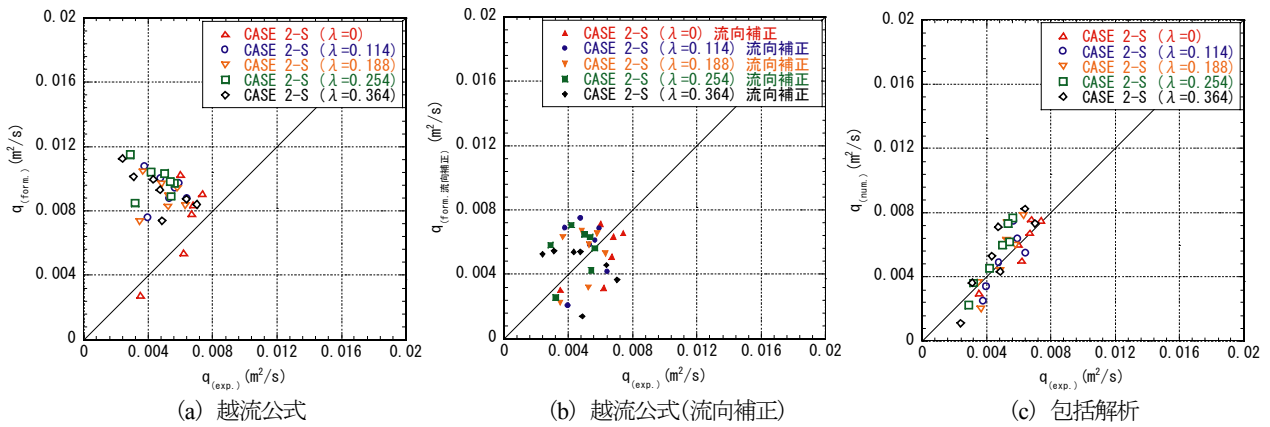


図-3 堤内地構造物群が氾濫流量(潜り越流)に及ぼす影響

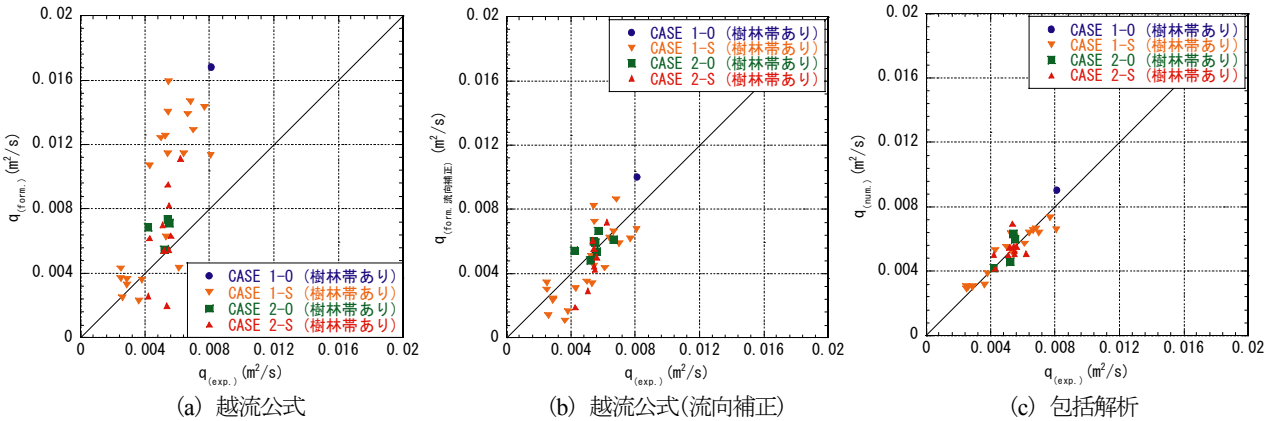


図-4 氾濫流量(樹林帯あり)

実験結果と予測結果との比較を示したものである。図-2aが越流公式、図-2bが越流公式に流向補正を施したもの、および図-2cが包括解析の結果である。

これより、河道の形態や越流の状態にかかわらず、包括解析はほぼ正確に氾濫流量を算定できることが確認できる。一方、越流公式では、築堤河川からの完全越流氾濫および掘り込み河川からの射流状態での溢水氾濫のように射流状態で氾濫する場合については、用いた流量係数が上記した標準値であるので、掘り込み河道ではやや誤差が大きいものの、それなりの予測結果となっている。しかしながら、築堤河川からの潜り越流状態および常流状態での溢水氾濫のように常流状態で氾濫する場合については、全体的に過大に評価する傾向が認められる。特に、掘り込み河道では、溢水の状態にかかわらず、約2倍も過大に評価されている。

図-2aと図-2bで用いた堤外・堤内地水位は、実験から得られた水位なので、河道の状態と氾濫原の状態の影響はそれなりに反映されている。このことを踏まえれば、次のようなことがわかる。すなわち、越流公式に流向補正を施すと、全般的に予測精度が向上する。射流状態で氾濫する場合は、氾濫流量は堤外地水位だけで決まるので、流向補正を施すことで予測値がかなり改善される。一方、常流状態で氾濫する場合は、流向補正してもさほど改善されない場合が生じる。常流状態での氾濫流量は、堤内地と堤外地の両水位から決まってくるので、堤内地水位の取り方に起因してこのようなことが起こって

くると考えられる。

(2) 氾濫流量(堤内地に構造物群が設けられた状況)

図-3は、CASE 2-Sの状況を対象として、堤内地構造物群が潜り越流状態での氾濫流量に及ぼす影響について調べたものであり、図-3aが本間公式、図-3bが流向補正、および図-3cが包括解析の結果である。

包括解析では、河道特性と氾濫原特性を踏まえた堤外・堤内地水位と流向が適正に評価されているので、氾濫流量も適正に評価されている。一方、越流公式による評価では、構造物占有率 $\lambda=0$ では最大でも1.5倍強程度の過大評価であったものが、 $\lambda=0.254$ と 0.364 では最大で約4倍弱も過大評価されている。流向補正では全体的に改善が見られるが、潜り越流状態なので堤内地水位の取り方に起因した誤差が残っていると考えられる。

この検討から次のようなことがわかる。すなわち、氾濫流量モデルは市街地構造などの堤内地の諸条件を考慮した上で、水位を的確に評価できることがまず重要である。しかしながら、仮に100%堤内地水位が正しく評価できたとしても、潜り越流状態では堤内地の諸条件によって流向が変わってくる可能性があり、堤内地の状態と流向との関係を把握しない限り、越流公式では氾濫流量を適正に評価することは難しい。

(3) 氾濫流量(堤内地に樹林帯が設けられた状況)

樹林帯の氾濫流量抑制効果について定量的に論じた研

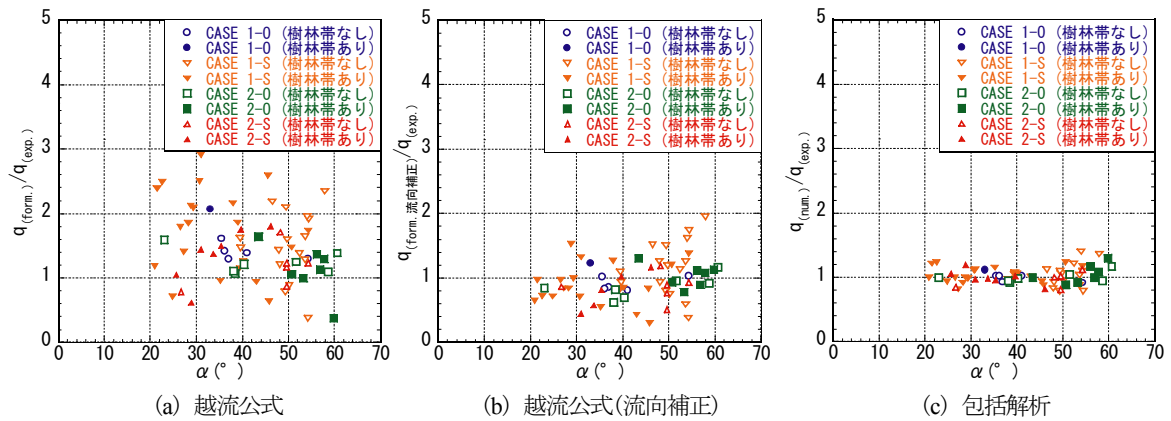


図-5 氾濫流量と流向との関係

究や技術資料は極めて少ないが、樹林帯の密度と幅が大きくなるにつれて氾濫流量が低減されるとの報告がなされている¹⁰⁾。その詳細は報告書¹¹⁾としてまとめられている。そこでは、模型実験を介して樹林帯の氾濫流量抑制効果などについて多面的に調べられており、また越流公式と透過係数に基づく樹林帯の氾濫流量抑制効果についても検討されており、減災の視点から樹林帯を取扱った貴重な資料となっている。

樹林帯は河道と氾濫原の間にあるので、氾濫流量に対する樹林帯の影響を越流公式の枠組みの中で考慮しようとすると、報告書¹¹⁾にあるように実験を介して流量係数として評価することになる。ここでは、氾濫流量を越流公式で評価しようとしているわけではなく、またそれゆえに越流公式を用いた評価では実験から得られた堤外・堤内地水位を用いているので、報告書¹¹⁾のように流量式で評価する方法は取っていない。

図-4は、堤内地に樹林帯が設けられ状況について、実験結果と予測結果との比較を示したものであり、図-4aが越流公式、図-4bが越流公式に流向補正を施したもの、および図-4cが包括解析の結果である。

これより、次のことがわかる。包括解析は樹林帯が設置された状況に対しても氾濫流量をほぼ正確に評価できる。一方、越流公式による評価では、射流状態で氾濫する場合については、流向補正をすることでほぼ正しく完全越流状態の氾濫流量を評価できる。常流状態で氾濫する場合では、やはり過大に評価する傾向が認められる。実験から得られた水位を用いて評価しているため、このような誤差は樹林帯によってもたらされた堤外・堤内地水位の変化に起因したものではない。また、流向補正では予測値が大幅に改善されていることが確認できる。これは樹林帯無設置の場合と比べ、樹林帯により水位が空間的に一様化されるため、堤内地水位の取り方の影響がより少なくなっているためである。以上のようなことから、樹林帯が流向に影響を及ぼす可能性も含めて、誤差を生む主因はやはり流向であると考えられる。

図-5は、樹林帯が設置あるいは無設置の状況での氾濫流量比(=予測値/実験値)と流向 α ($^{\circ}$)との関係を示したものであり、図-5aが越流公式、図-5bが流向補正、

および図-5cが包括解析の結果である。

包括解析では、流向にかかわらず、氾濫流量比 ≈ 1.0 周辺の値を取っている。一方、越流公式では、全体的に氾濫流量比 $\approx 0.5 \sim 2.5$ 程度の範囲で大きくばらついている。流向補正をすると、氾濫流量比 $\approx 0.5 \sim 1.5$ 程度の範囲に収まり、特に完全越流の場合にかなり改善される。なお、図は省略するが、堤内地構造物群がある場合も同様な傾向が得られた。

以上の(1)～(3)検討から明らかなように、氾濫流量式は流向が考慮されたものでなければならない。ただし、堤内地水位が空間的に一様でないような常流状態で氾濫する場合では、越流公式を適用する際に必要な堤内地水位の取り方に任意性があるので、流向を考慮しても氾濫流量が正しく評価されない可能性が残る。

接続モデルでは、流向の影響は氾濫流量式において考慮されるが²⁾、流向は洪水氾濫流の特性のひとつであるので、対象とする堤外地と堤内地の諸条件によって規定されている。このため、流向を考慮して氾濫流量式を一般化することはほぼ不可能に近いと考えられる。堤内地水位の取り方についても、何某かの根拠に基づいて一律に決められるようなものではない。結局のところ、氾濫流量式で氾濫流量を正しく評価することは不可能に近い。このようなことから、氾濫の状態や堤外・堤内地の状態にかかわらず、氾濫流量を的確に評価できる包括解析は、“減災”に資する有効な水理解析法と考えられる。

(4) 樹林帯の氾濫流量抑制機能

数値実験に基づき、包括解析は樹林帯が設けられた河道から溢れながら流下する洪水流と堤内地での氾濫流の挙動を評価できる水理解析法であることを示す。

図-6は、樹林帯の設置による氾濫流量の変化について調べたものであり、図-6aと図-6bはそれぞれ射流状態と常流状態での溢水・越水を示している。図-6a中の■記号は、樹林帯の設置によって氾濫流の状態が変化したものである。

これより次のことがわかる。築堤河道からの完全越流については、支配断面の水理から明らかなように、樹林帯は氾濫流量に何ら影響を及ぼすことはない。築堤河道

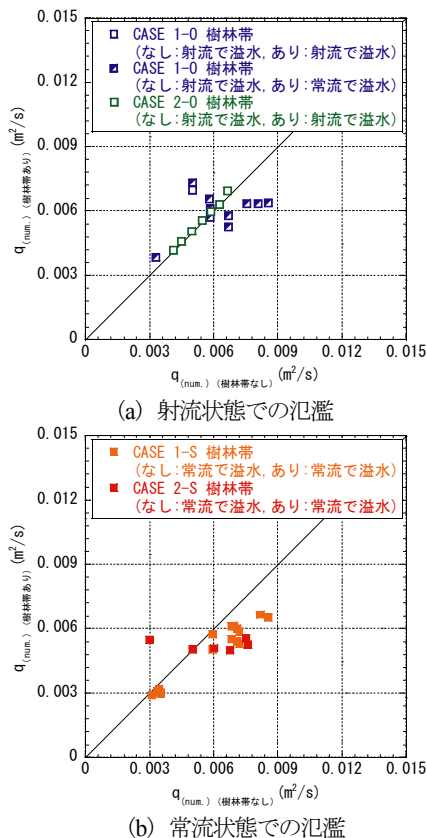


図-6 樹林帯の有無と越水・溢水氾濫流量

から潜り越流する場合と掘り込み河道からの射流あるいは常流で溢水する場合には、氾濫流量の低減あるいは増加が見られる。築堤河道から潜り越流する場合に氾濫流量が低減しているのは、樹林帯が流水抵抗として作用し、堤内地水位が上昇するためである。逆に増加しているのは、樹林帯の設置により河道部の中下流での氾濫流量が抑制され、そのため上流側での堤外地水位が上昇するためである。一方、掘り込み河道から射流で溢水する場合に氾濫流量が低減しているのは、樹林帯無設置の状況では射流状態で溢水していたものが、樹林帯により氾濫流が堰上げられ常流状態になるためである。逆に増加しているのは、築堤河道から潜り越流する場合と同様に、樹林帯の設置により上流側での堤外地水位が上昇するためである。

一般に樹林帯の氾濫流抑制機能および堤防の補完・強化機能は、河道横断的な状況、つまり正面越流状態として論じられている¹⁰⁾。しかしながら、包括解析の結果は、樹林帯が洪水・氾濫流に及ぼす影響は局所的ではなく、河道縦断方向の堤外・堤内地水位に影響を及ぼし、その結果、河道と氾濫原との雨水のやり取りも縦断方向に複雑に変化することを示している。このことは、樹林帯が洪水・氾濫流に及ぼす影響を縦・横断的に捉えた上で、減災施設として適正に整備・管理していく必要があることを意味している。また、このことは“防災”と“減災”では堤外樹林帯の整備・管理の仕方が異なってくる可能性があることも示唆している。減災施設としての堤外樹林帯の整備・管理法については今後の課題としたい。

4. まとめ

外水氾濫の浸水規模を規定し、堤防の安全性とも深く係わっている氾濫流量について検討を加えた。氾濫流量の評価は、越流公式を用いた評価法が規準とされている。しかしながら、ここで指摘したように、必ずしも適正な氾濫流量を与えるわけではない。“減災対策”と“防災対策”では視点が異なるので、水理解析法にも違いが生じてこよう。そのような立場から、ここでは河道・氾濫原包括解析を紹介し、河道と氾濫原の境界に位置する樹林帯の取扱いも含め、包括解析がいくつかの氾濫状況に対して氾濫流量を適正に算定できることを示した。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金 基盤研究B(課題番号：17360237、研究代表者：秋山壽一郎)の助成を受け実施したものである。また、国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部河川研究室より、樹林帯に関する貴重な研究資料の提供を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 社会資本整備審議会河川分科会、豪雨災害対策総合政策委員会：総合的な豪雨災害対策の推進について(提言)、http://www.mlit.go.jp/river/link/link_kanren/index.html.
- 2) 栗城 稔・末次忠司・海野 仁・田中義人・小林裕明：氾濫シミュレーション・マニュアル(案)ーシミュレーションの手引き及び新モデルの検証一、土研資料第3400号、1996.
- 3) 秋山壽一郎・重枝未玲：飯塚市を中心とした都市域のダイナミック氾濫解 -2003年7月遠賀川豪雨災害を対象として-、水工学論文集、第49巻、pp.619-624、2005.
- 4) 秋山壽一郎・重枝未玲：河道特性と市街地構造を考慮した越水・破堤氾濫シミュレーション、水工学論文集、第50巻、pp.691-696、2005.
- 5) 川口広司・末次忠司・福留康智：2004年7月新潟県刈谷田川洪水・破堤氾濫に関する研究、水工学論文集、第49巻、pp.577-582、2005.
- 6) 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、Vol.8、pp.31-36、2002.
- 7) 末次忠司：河川の減災マニュアル、山海堂、2004.
- 8) 秋山壽一郎・重枝未玲・浦 勝：非構造格子を用いた有限体積法に基づく1次および2次精度平面2次元洪水流数値モデル、土木学会論文集、No.705/II-59、pp.31-43、2002.
- 9) 重枝未玲・秋山壽一郎：市街地構造を考慮した氾濫解析モデルの総合的な検証、水工学論文集、第48巻、pp.577-582、2004.
- 10) 国土交通省河川局治水課監修：堤防に沿った樹林帯の手引き、山海堂、2001.
- 11) 坂野 章：樹林帯による破堤後の減殺効果に関する検討、国土交通省国土技術政策総合研究所：河川研究部河川研究室資料、2002.

(2006. 9. 30受付)