

河道内樹木の流失限界に関する水理実験 及び河床変動解析モデルの適用

FLUME TESTS ON UPROOTING CONDITIONS OF TREES AND BED DEFORMATION ANALYSIS CONSIDERING UPROOTING OF TREES

桑原正人¹・竹林洋史²・岡部健士³・浅見ユリ子¹・森下祐¹

Masato KUWAHARA, Hiroshi TAKEBAYASHI, Takeshi OKABE,
Yuriko ASAMI and Yuu MORISHITA

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 大阪本社水工技術部
(〒541-0052 大阪市中央区安土町2-3-13)

²正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所流域災害研究センター
(〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

³正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

Fine sediment tends to deposit in and around trees on bars during small and medium scale floods. On the other hand, trees are flowed away by large scale floods and the deposited fine sediment in and around trees are transported again. The transported fine sediment deposits at water intakes, weirs, river mouth and so on. In order to manage trees in river considering disaster prevention, water utilization and environmental conservation, the spatiotemporal change of sediment transport characteristics due to invasion, growth and removal of trees should be clarified. In this study, uprooting of a tree is introduced in horizontal two dimensional bed deformation analysis model and reproduce the sediment transport characteristics during large scale floods. Furthermore, the management method of trees in rivers is discussed with focusing on sediment transport characteristics.

Key Words : *uprooting of trees, two dimensional bed deformation analysis, non-uniform sediment, management method of trees, willow*

1. はじめに

近年、我が国の多くの河川では、高水敷や砂州上で樹木の繁茂が顕在化している。こうした樹木は、河道内の自然環境を確保する上で存在する意義は大きい反面、治水上の制約からそのまま放置することはできない。そのため、自然環境の保全と治水の両目的をバランス良く満足させる河道内樹木の管理技術が必要となっている。

また、河道内樹木を有する河川では、河道内樹木の形成と、流水や流路の時空間的な変化が、相互に影響を及ぼし合っている。洪水時には、砂州上の樹林内及び周辺において、土砂が堆積して砂州が固定・発達し、さらに植生が繁茂しやすい生育基盤が形成される。また、洪水により樹木が流失する場合は、流失地点付近の流下能力が向上する一方で、捕捉されていた細粒土砂が下流に大量に流出し、結果として横断構造物での集中捕捉・堆積や河口閉塞等のレスポンスが現れることが予想される。

なお、樹木の流失抵抗は、樹木周りの流砂環境や根茎の摩擦抵抗等によって生み出される。このため、抜根せずに伐採管理する場合には、残った根鉢により土砂が流出しにくい。洪水により樹木が根こそぎ流失する場合は異なった流砂特性が予想される。

従来の河道内樹木の管理では、頻繁に伐採すれば維持管理コストが嵩むこともあり、河道内樹木が生長して大きくなり過ぎた場合に、治水安全度の確保が必要な箇所において実施されることが多かった。しかし、河道内樹木とどのように折り合いをつけて、共生していくかが問われている中で、河道内樹木の管理を考える場合、相互に関連して影響を及ぼし合っている流砂特性を考慮することが不可欠といえる。

以上のことから、本研究では、樹木の流失限界を考慮した平面二次元河床変動解析モデルを構築し、流砂特性を踏まえた樹木管理方式の構築への情報を提供することを目的とする。

2. 検討対象区間の概要

(1) 河道特性

兵庫県を流れる加古川は、河口から古新堰堤（3.9km 付近）までが感潮区間であり、それより上流は、加古川堰堤（6.0km 付近）、加古川大堰（11.8km 付近）による湛水区間が断続的に分布し、比較的小さな角度で蛇行する河道内に、砂州が形成されている。これらの砂州には河道内樹木が繁茂しており、高木化が進んでいる。平成元年に竣工した加古川大堰の建設に伴い中州はほとんど消失し、高水敷が造成され複断面化が進んでいる。加古川大堰より上流では大きく蛇行する区間が続き、部分的な直線区間で交互砂州が形成されている。さらに上流の闘竜灘（34.0km 付近）まではみお筋が固定化し、岩が露頭した区間も見られる。

(2) 河道内樹木の概要

平成16年10月台風23号による大規模出水では、加古川は加古川大堰竣工後の最大流量を記録した。国道2号の橋梁等の構造物や中州、河道内樹木が集中している区間において洪水水位がH.W.L.を上回り、治水上、危険な状態となった。この一要因として、堆積土砂や河道内樹木による洪水水位の堰上げが考えられた。

この大出水により加古川の多くの河道内樹木が流失しており、流失しなかった樹木の大半は、倒伏していた（図-1）。この大出水による加古川での河道内樹木の流失状況を把握するため、平成14年5月と平成17年1月の樹木調査結果から次のように推測した。この2回の河道内樹木調査の内、直接比較が可能な区間（古新堰堤付近から加古川堰堤付近までの約2.2km、図-2）について、樹高ランク別の樹木数を比較した。この調査結果を比較する際に、約2年8ヶ月の期間が経過していることから、後述する樹齢と樹高の関係（約0.8m/年）を適用して、平成14年5月調査時点の樹高に経過期間の生長量を加えることにより、平成16年台風23号時点の樹高と樹木数を推測した。ここで、新たに萌芽する樹木を考慮する必要があるが、今回は平成14年5月調査時点の3m以下の樹木が毎年コンスタントに発生すると仮定した。以上による推測値と平成17年1月実測値の差が「平成16年台風23号により倒伏し流失した樹木数（流木数）」と仮定すると、流木数は5m以下が最も多く、次いで5～10m、10m以上の順となり、約7割が流木化したと考えられる（図-3）。

また、平成17年1月調査では倒伏した樹木を対象に、同定調査、および枝張り、枝下高、根元周り、倒伏角度、樹齢・生長量等も調査¹⁾した。その結果、河道内樹木の優占種は、オオタチヤナギ、アカメヤナギ、ジャヤナギ等のヤナギ属であり、樹高区分0～5mの倒伏角度区分45～90°（完全倒伏が90°）が最も多く、低樹高の樹木ほど倒伏傾向が強いことが分かった（図-4）。



図-1 平成16年台風23号による加古川の倒木状況（4.6km 付近）

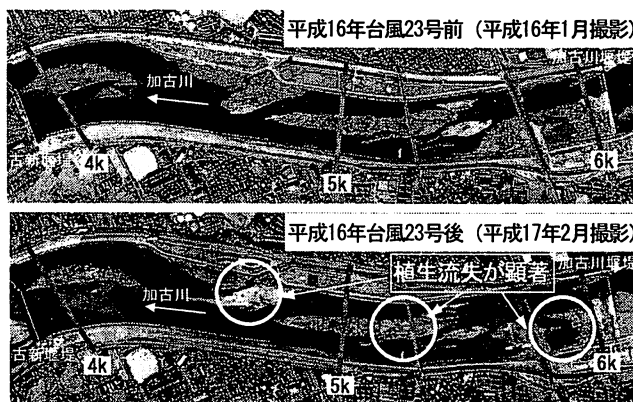


図-2 加古川空中写真比較（古新堰堤～加古川堰堤付近）

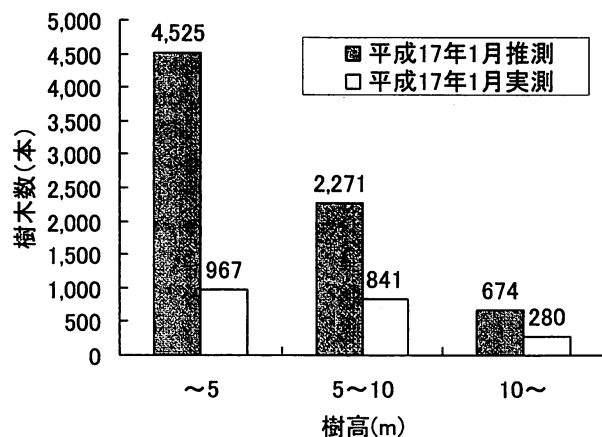


図-3 樹高の度数分布（古新堰堤～加古川堰堤付近）

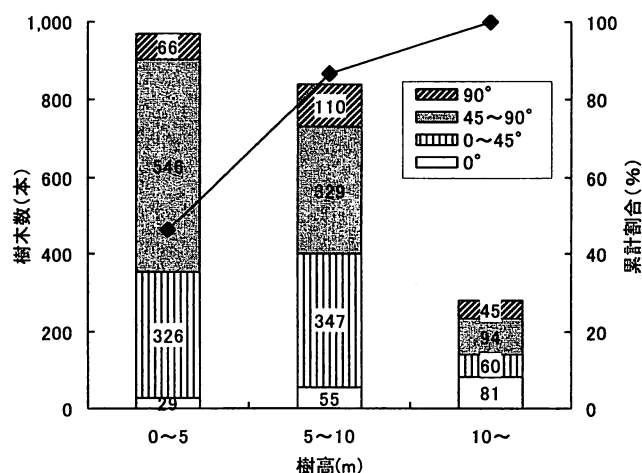


図-4 樹高別の倒伏角度（平成16年10月台風23号）

3. 河道内樹木の流失限界に関する水理実験

(1) 実験水路

実験には、幅1m、長さ8m、高さ0.4mの直線水路を用いた（図-5）。河床材料は、加古川4～6k付近の粒度分布と同程度になるように実験縮尺を考慮して設定した平均粒径3mm程度の混合砂である。

(2) 実験条件

加古川の優占種であるヤナギを模したモデル樹木（図-6）を湿潤状態の実験水路に設置し、その抗力をバネばかりを用いて計測した。このモデル樹木は、現地調査から得た樹高、胸高直径、枝張り、枝下高等の平均的な値を採用し、比重を生木の値と同様の1程度になるように、高木・深根型²⁾樹木の1/20縮尺として制作した。バネばかりによるモデル樹木の引き倒し実験は、河床変動と倒木との関係を検討するため、モデル樹木周りの侵食深を-0.5m（堆積）、0.0m、0.5mの3通りに変化して実施した。また、バネばかりによるモデル樹木の引き倒し実験結果を検証する意味で、モデル樹木の根が露出する高さを変えて、表-1に示す通水実験を実施した。モデル樹木に作用する合成抗力 F および外力モーメント M は次式で表される。

$$F = \frac{1}{2} \alpha \rho A C_d u^2 \quad (1)$$

$$M = \int_0^h F(z+e) dz \quad (2)$$

ここに、 ρ は水の密度、 A は樹木の流水中の投影面積、 C_d は抗力係数、 u は流速、 α は面積遮蔽率（0.5）、 e は破壊の中心からの高さ（初期河床位からの高さ）、 z は侵食深0を基準に鉛直上向を正とする座標軸、 h は水深である。

(3) 実験結果

バネばかりによるモデル樹木の抗力からモーメントを求めると（図-7）、いずれの侵食深の場合も、全国河川の実木の引き倒し試験より求めたヤナギの倒伏限界モーメント³⁾とほぼ同等である。このことから、モデル樹木の倒伏・流失特性は妥当であると判断できる。

また、図-8にはモデル樹木の通水実験風景を示す。図-9には、先に得たモデル樹木の倒伏限界モーメントと侵食深の関係と通水実験結果を示す。同図中のCase1～Case3を見ると、実験流速が17.5cm/sと遅いため、露出する根の高さが5cmの場合、すなわち現地樹木の周りが1m（実スケール）侵食された条件でも流失しない。一方、実験流速28.1cm/sを与えたCase4～Case6を見ると、Case6のみモデル樹木が流失しており、この程度の流体力では現地樹木の周りが0.5m以上侵食されていなければ流失し

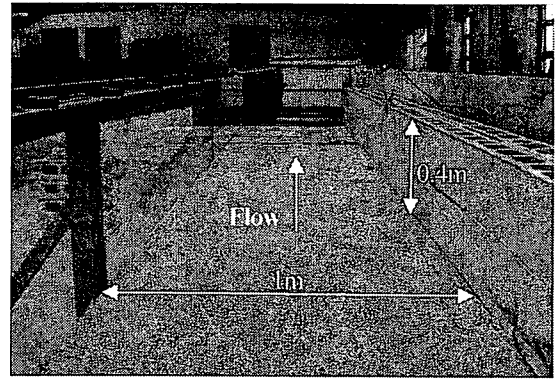


図-5 実験水路

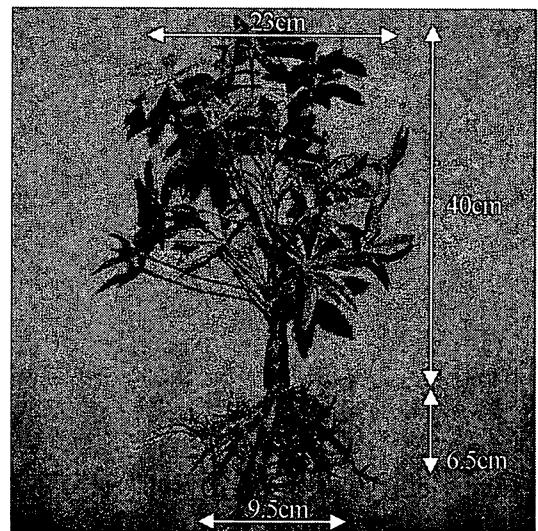


図-6 モデル樹木（寸法は実験スケール）

表-1 通水実験条件

	露出する根 の高さ(cm)	実験流量 (l/s)	実験流速 (cm/s)	換算流速 (m/s)
Case1	0.0	50	17.5	0.78
Case2	2.5	50	17.5	0.78
Case3	5.0	50	17.5	0.78
Case4	0.0	80	28.1	1.26
Case5	2.5	80	28.1	1.26
Case6	5.0	80	28.1	1.26
Case7	0.0	100	35.1	1.57
Case8	2.5	100	35.1	1.57
Case9	5.0	100	35.1	1.57

ないことが推測される。さらに、実験流速35.1cm/sを与えたCase7～Case9を見ると、Case8, Case9でモデル樹木は流失しており、この場合は現地樹木の周りが0.5m程度侵食されれば流失する可能性が推測される。

4. 河道内樹木の流失を考慮した河床変動解析

(1) 解析方法^{4),5)}

流れの計算には、水深平均された平面二次元流れの支

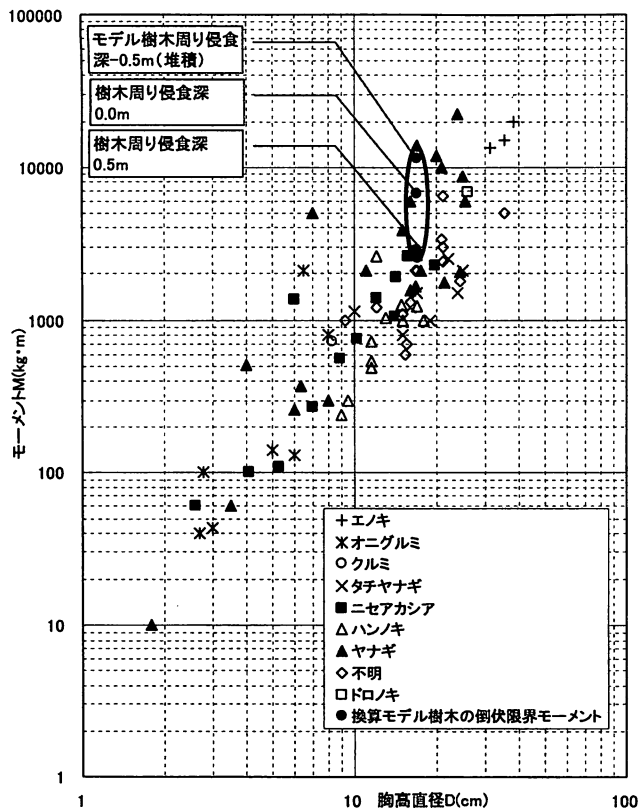


図-7 全国河川樹木とモデル樹木の倒伏限界モーメント
(モデル樹木の侵食深およびモーメントは実スケール換算値)

配方程式を用いる。河床近傍の流速は、水深平均流速の流線の曲率より予測し、予測式中の二次流の強度に関する係数値はEngelund⁹⁾と同様の7.0を用いている。河床材料は非粘着性の混合砂として扱う。流砂形態は、掃流砂のみを考慮する。掃流砂量は芦田・道上式⁷⁾に河床の局所的な勾配が流砂ベクトルに及ぼす影響を考慮した芦田・江頭・劉の式⁸⁾により算出する。局所的な河床勾配は、安息角よりも小さくなるように補正する⁹⁾。

植生については、清水・辻本¹⁰⁾を参考に、植生を流体抵抗として考慮している。流体抵抗の評価には、植生高さを考慮しており、水位が植生の高さよりも高い時は、流体抵抗がそれ以上増加しない。また、密度については、解析メッシュ内の植生の繁茂面積率を考慮して平面的に変化させている。さらに、前章で得られた知見を参考に、植生の流失を考慮した。つまり、式(1)と式(2)より得られる流水による樹木への外力モーメントが、図-9で得られた倒伏限界モーメントよりも大きくなったときに樹木は流失したと考えた。さらに、現地観測より、根鉢深が樹高の15%程度であったため、初期河床よりも河床が植生高さの15%低下した場合、植生は流失したと考えた。樹木を含む植生域内の掃流砂量は有効掃流力を用いて算出する。なお、河道内に流路が形成されて表面流の無い浮州が形成される場合は、表面流と浸透流の両方を計算し、浮州域の土中の流れの解析も行う。

(2) 解析条件

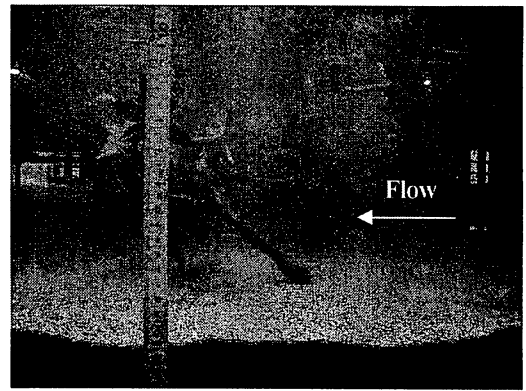


図-8 モデル樹木の通水倒伏実験風景 (Case5)

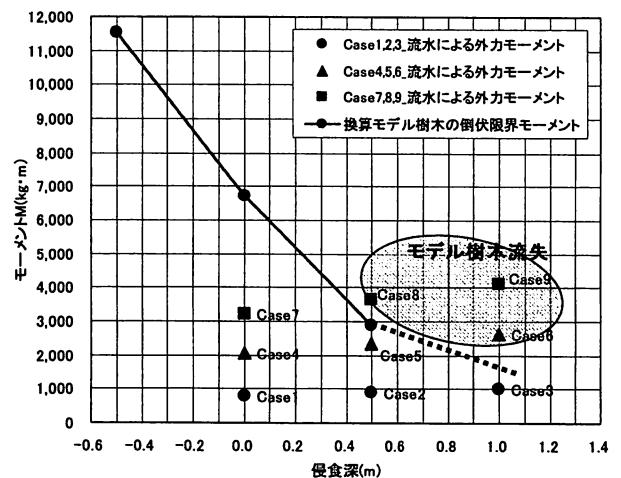


図-9 モデル樹木の流失限界

初期河床形状は、平成15年度に実施された横断測定の成果を用いる。解析メッシュ内の植生の面積存在率は、平成16年1月に撮影された航空写真を基に設定する。さらに植生の高さは、平成16年度に実施されたレーザー測量から得られる植生頂部の高さと同河床位データを基に設定する。図-10に解析メッシュとメッシュ上における植生の平面分布を示す。

解析対象範囲は、古新堰堤付近(河口から4.3km)から加古川大堰付近(河口から11.8km)までの約7.5kmとする。境界条件は、平成16年10月台風23号時の実測データとして、上流端には加古川大堰からの放流量ハイドロを、下流端には実測データが存在しないため等流計算により推定した値を与える。裸地におけるManningの粗度係数は0.025とする。解析に用いた粒径加積曲線を図-11に示す。

解析ケースはRun1～Run3の3ケースである。Run1は、河床変動による樹木の流失を考慮している。Run2は、河床変動解析は行うが、樹木の流失を判定するときに河床変動の影響を無視している。つまり、Run1とRun2を比較することにより、河床変動が樹木の流失に与える影響を検討する。さらに、Run3では樹木の流失を無視したものであり、Run1との比較により、樹木の流失が河床変動に与える影響を検討する。

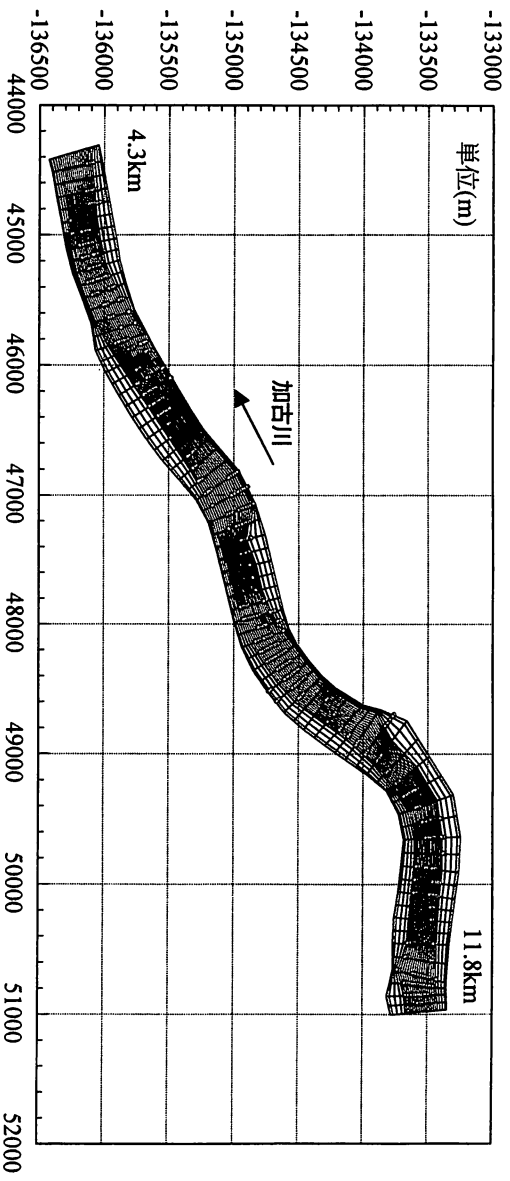


図-10 解析メッシュ及び植生の平面分布 (○印：植生メッシュ)

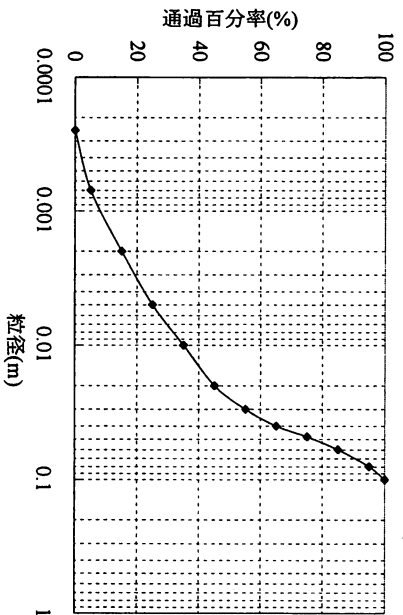


図-11 河床材料の粒度分布

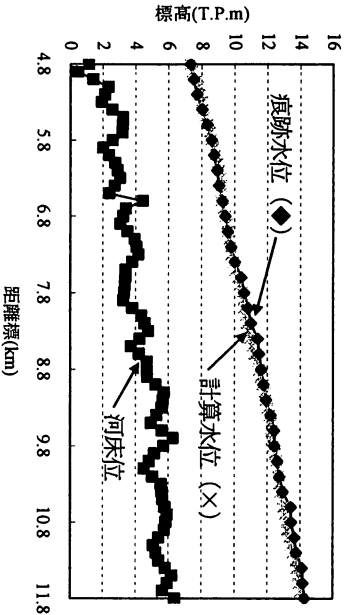
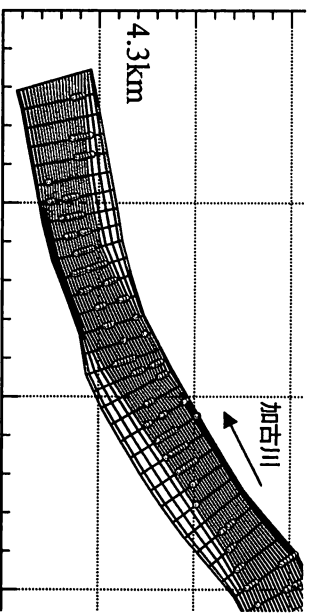


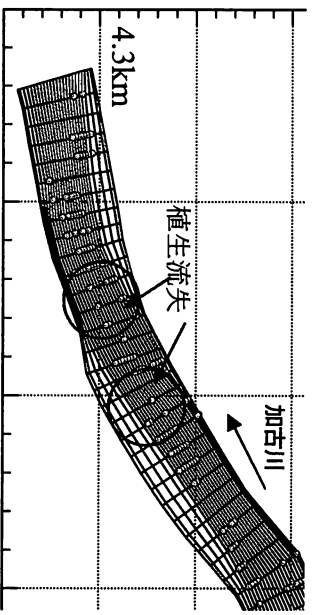
図-12 痕跡水位比較縦断面図

(3) 結果と考察

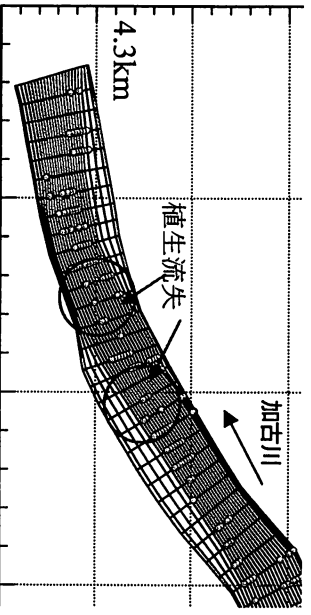
図-12に本解析による計算水位と痕跡水位との比較を示す。特に計算対象区間の下流側では痕跡水位の再現性は良好である。図-13にRun1とRun2の出水後の下流域の樹木分布を示す。図-2と比較すると、植生の流失は表現しているが、全体の流失量は、実河川の状況に比べて非常に少ない結果となった。これは、河床材料調査がみお筋周辺を中心としたものであり、解析で用いた河床材料を大きく見積もり過ぎたため、河床変動による植生の流失が少なく見積もられたことが原因と考えられる。また、実河川において、解析に用いた河床材料よりも細かい土



(a) 初期



(b) Run1



(c) Run2

図-13 出水後の下流域の樹木分布

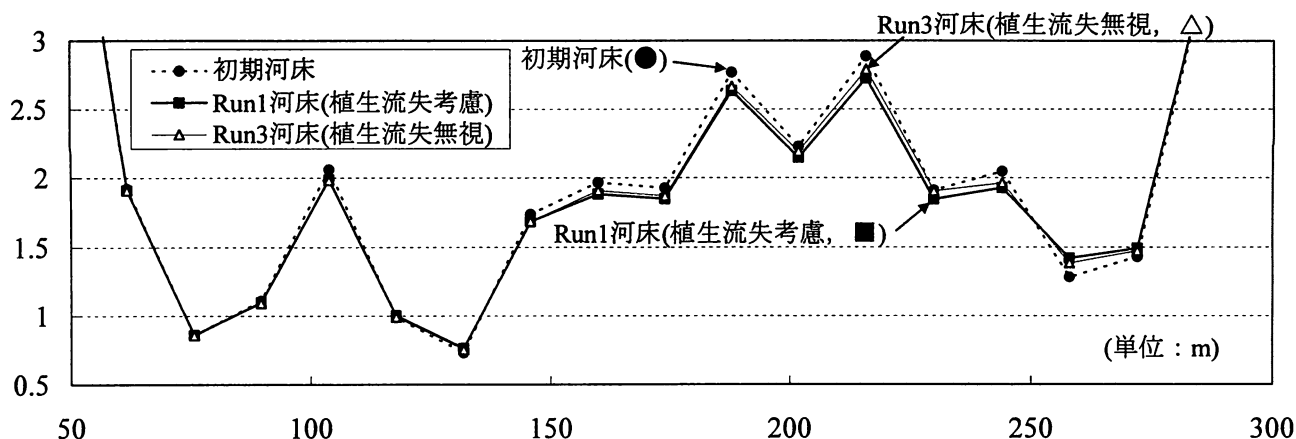


図-14 植生の流失が河床変動に与える影響 (5.4km断面)

砂成分が多い場合、本解析で浮遊砂を無視していることによる河床変動量の減少が、植生の流失量を少なくしていると考えられる。しかしながら、図13-(b)と図13-(c)を比較すると、Run1では植生が流失しているにもかかわらず、Run2では植生が流失していない箇所が見られ、河床変動が植生の流失に寄与していることは分かる。

図-14にRun1とRun3から得られた出水後の5.4km断面の低水路内の河床横断形状を示す。これを見ると、右岸から150m～240mの地点において、Run1ではRun3よりも河床低下している箇所が見られる。つまり、Run1では、出水により河床低下傾向にある地点において植生が流失したため、植生抵抗による流速低減効果が無くなり、流砂量が増え、河床低下がさらに進んだことが分かる。

5. おわりに

河道内の樹林化が著しい加古川下流を対象として、樹木の流失条件を水理実験から設定した上で、その条件を取り入れた平面二次元河床変動解析を実施し、その適用性について検討した。本研究で得られた成果をまとめると以下ようになる。

- ・ 水理実験の結果、河床侵食深と樹木の倒伏・流失状況に応じた外力モーメントの関係から、バネばかりで計測した倒伏限界モーメントが、流水により根の周りが侵食され倒伏・流失する限界モーメントとして妥当であることが得られた。
- ・ 樹木の流失条件を取り入れた平面二次元河床変動解析を実施した結果、河床変動が植生の流失に寄与していることが分かった。しかしながら、解析で得られた樹木の流失量は、実河川の状況に比べて非常に少ない結果となった。この理由は河床変動量の減少等が考えられるため、今後は、細かい土砂成分や浮遊砂成分を考慮した解析を行う予定である。
- ・ 樹木の流失を考慮することにより、樹木周辺では河床低下が助長されることが得られた。このことから、

樹木管理と土砂管理の強い相関が挙げられる。

今後は、浮遊砂成分を考慮して平面二次元河床変動解析モデルを改良することに加えて、抜根せずに伐採する場合を想定した解析検討を行う予定である。残された根鉢により土砂が流出しにくくなり、樹木が根こそぎ流失する場合とは異なった流砂特性が予想される。

謝辞：本研究を行うに際し、国土交通省近畿地方整備局姫路河川国道事務所より各種調査データ等の貴重な資料を提供頂いた。ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 桑原正人, 藤堂正樹, 小笠原豊, 石尾年光, 石井克尚, 犬丸潤, 中村敬司: 加古川の河道内樹木の生長特性を考慮した管理方法, 河川技術論文集, 第12巻, pp.461-464, 2006.
- 2) 荻住昇: 樹木根系図説, 誠文堂新光社, 1987.4
- 3) 財団法人リバーフロント整備センター: 河川における樹木管理の手引き, 山海堂, 1999.
- 4) 竹林洋史: 河川中・下流域の河川地形, ながれ, Vol.24, pp.27-36, 2005
- 5) 夏見祐介, 竹林洋史, 岡部健士: 植生抗力特性の時空間分布が流れと河床変動に与える影響, 河川技術論文集, 第13巻, pp.183-188, 2007.
- 6) Engelund, F.: Flow and Bed Topography in Channel Bends, Jour. of Hy. Div. ASCE, Vol.100(1974), No. HY11.
- 7) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第206号, pp.59-69, 1972.
- 8) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義: 蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析, 水工学論文集, 第35巻, pp.383-390, 1991.
- 9) 永瀬恭一, 道上正規, 檜谷治: 狭窄部を持つ山地河川の河床変動計算, 水工学論文集, 第40巻, pp.887-892, 1996.
- 10) 清水義彦, 辻本哲郎: 植生帯を伴う流れ場の平面二次元解析, 水工学論文集, 第39巻, pp.513-518, 1995.

(2009. 4. 9受付)