

長良川現地観測から推定される河岸侵食のシナリオ

Estimation of bank erosion process through field observation during flood in the Nagara River

辻本哲郎*・長田信寿**・富永晃宏***

関根正人****・清水義彦*****・庄 建治朗*****

Tetsuro TSUJIMOTO, Nobuhisa NAGATA, Akihiro TOMINAGA,

Masato SEKINE, Yoshihiko SHIMIZU and Kenjiro SHO

1. はじめに

新しい河川計画の方向としては、社会的要請あるいは動植物の生息・生育環境の保全・回復の観点から、柔軟な手法での対応が求められている。そのような中、河道計画では、河岸前面はできる限り剛な構造物を設置せず、河岸侵食をある程度まで許容しながらも必要な防御ラインでは確実に堤防の安全を確保するという考え方で、河川の管理・整備を行うことも考えられている。このような場合には精度の高い河岸侵食の予測技術が必要である。

予測精度の向上のためには、現地河岸の侵食過程ならびにその機構の把握が必要不可欠と考えられる。しかし、河岸侵食の現地調査は、これまで主に洪水前後の河岸を対象に行われており、河岸侵食現象を解明する上で重要と考えられる出水時の河岸およびその周辺土砂の挙動は、計測の困難さ等の理由で、報告例が極めて少ない。

このような現状において、平成8年度より、土木学会・建設省共同研究の枠組みの中で、木曽川上流工事事務所と著者らのグループで、木曽三川をフィールドに河岸侵食に関する研究に取り組んで来た。特に平成9年度、長良川において河岸侵食調査を行い、洪水中の河岸侵食過程を考察する上で、興味深いデータを得ることができた。ここでは、現地河岸の侵食進行過程、各過程で生じた現象及びその要因等について、本共同研究により得られた長良川 42.4km 付近左岸での河岸侵食データを中心に考察を行う。

2. 長良川における河岸侵食の概要

ここでは、土木学会・建設省共同研究により、木曽川上流工事事務所が行った調査結果¹⁾をもとに、長良川 42.4km 付近左岸の河岸侵食について、侵食形状及び侵食過程の概要を述べる。なお、考察に用いた資料は、河岸近傍横断形状（平成9年6月～10月の洪水後）、河岸崩落時刻及び侵食幅、水位、河岸近傍流速、河岸近傍河床高、洪水中のビデオ画像（以上、平成9年9月17日出水）である。

2.1 河岸侵食形状の特徴

図-1 に長良川 42.4km 付近左岸の横断形状の時間変化を示す。また、これと比較するため、図-2 に著者

キーワード： 河岸侵食過程，現地調査，河岸崩落，平面流況

* 名古屋大学 助教授 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町, ttsujimoto@genv.nagoya-u.ac.jp)

** 京都大学 助手 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町, nagata@kasen2.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

*** 名古屋工業大学 助教授 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町, tomi@suikol.ace.nitech.ac.jp)

**** 早稲田大学 助教授 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1, sekine@mn.waseda.ac.jp)

***** 群馬大学 助教授 (〒376-8515 桐生市天神町 1-5-1, shimz@ce.gunma-u.ac.jp)

***** 名古屋工業大学 助手 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町, show@suikol.ace.nitech.ac.jp)

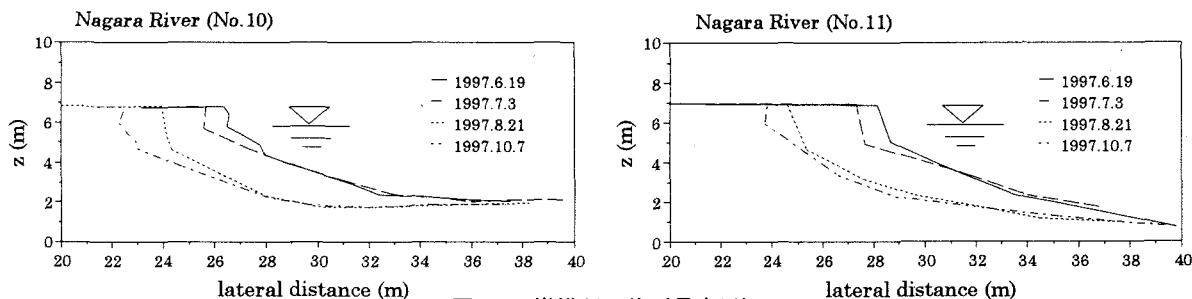


図-1 河岸横断形状（長良川）

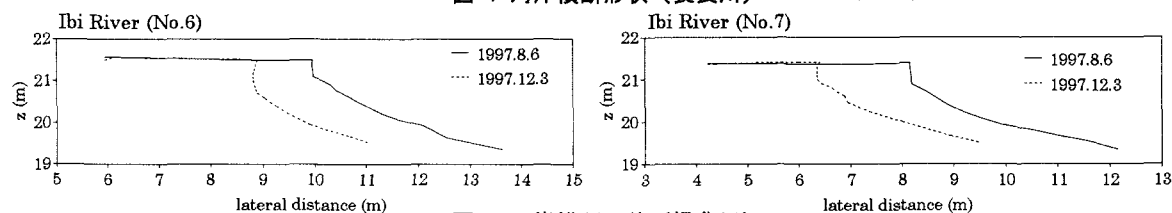


図-2 河岸横断形状（揖斐川）

らのグループで測量を行った揖斐川 51.2km 地点左岸の河岸形状を示す。なお、図-1 中の水位は、9 月 17 日洪水の調査地点における最高水位である。長良川、揖斐川ともに、河岸天端から鉛直に近い急勾配の斜面を有しており、それがあある点を境界に約 25° の安息角程度の斜面に接続されている。時間変化については、河岸形状が相似性を保ちながら、侵食が進行しているのが特徴である。これらの形状および時間変化の特徴については、従来より室内実験等で指摘された点と同様である^{2), 3), 4)}。

長良川と揖斐川の河岸侵食形状を比較すると、鉛直壁の高さに相違が見られる（長良川が 1.5m～2m、揖斐川が 50cm 程度）。この鉛直壁は粘性を有する河岸の崩落により形成されたものであり、その高さは河岸の土質特性に影響されると考えられる。揖斐川 51.2km 地点の河岸と比較して、長良川 42.4km 付近は、微細な粒径の河岸材料を多く含んでおり、これが上記のような鉛直壁高さの相違を生じさせたと考えられる。このような鉛直壁の高さの相違は、一回の河岸崩落土砂量に違いを生じさせ、これが河岸の侵食過程にも影響を及ぼすと考えられる。

2.2 河岸侵食過程

ここでは、平成 9 年 9 月 17 日洪水の河岸侵食の計測結果より、侵食過程の概要について述べる。図-3(a)に調査地点の水位、図-3(b)に河岸近傍流速、図-3(c)に河岸近傍の河床高の時間変化を示す。なお、図-3(b)における計測位置は、position A が水際より 1m の位置であり、position C は同じく水際より 1m で A より 6m 下流に位置する。position B は初期河岸天端肩より 5m の位置である。また、図-3(c)に示す調査地点は、position 1 が初期河岸天端肩より 7cm の位置であり、position 2,3,4 は position 1 より 1m 間隔で河岸中央に向かって配置されている。なお、河床変動調査は 9 月 18 日 0:00 より計測を開始した。

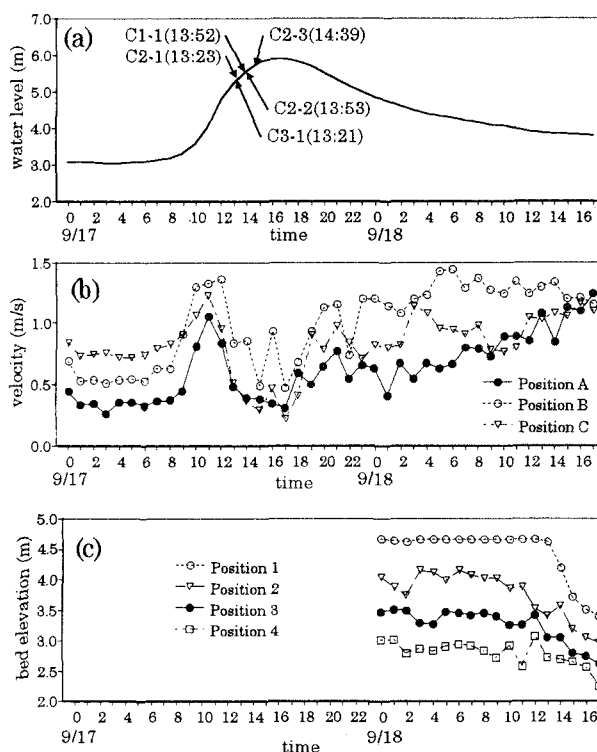


図-3 長良川河岸侵食現地調査結果

表-1 河岸崩落時刻及び侵食幅

CH1			CH2			CH3		
	観測日時	侵食幅		観測日時	侵食幅		観測日時	侵食幅
C1-1	9/17 13:52	10cm	C2-1	9/17 13:23	10cm	C3-1	9/17 13:21	10cm
C1-2	9/23 1:52	10cm	C2-2	9/17 13:53	10cm	C3-2	9/19 9:18	30cm
C1-3	9/23 20:33	20cm	C2-3	9/17 14:39	20cm	C3-3	9/23 13:25	20cm
			C2-4	9/23 20:34	40cm	C3-4	9/23 20:34	30cm

表-1 に光ファイバーを利用した計測¹⁾により把握された洪水時の河岸崩落の時刻と侵食幅を示す。表-1においてCH2,CH3は同じ横断面内にあり、CH2の方がCH3より鉛直上方に設置されている。CH1はCH2,CH3より2m下流にあり、CH2と同じ高さに設置されている。

図-3(a)には、水位の時間変化とともに9月17日0:00～9月18日17:00の間に計測された河岸崩落を付記している。同図より、洪水期間中の河岸の崩落は、増水期のみで生じていることが分かる。一方、流速は水位がピークを示す時刻より以前に最大値(1m/s～1.3m/s)となり、水位ピーク時には減少する(0.3m/s～0.6m/s)。その後再び徐々に流速が増加し、これに伴い9月18日13:00頃より河岸近傍河床の低下が顕著となる。また、表-1より、河岸の崩落は図-3(a)で示した洪水期間中に計測された5回の崩落以降は、9月19日に1回、9月23日に5回と、かなり時間が経過して生じている。

以上の計測結果を踏まえ、今後の議論を容易にするため、今回の長良川で計測された洪水を、河岸侵食の観点から図-4に示すように、Stage 1

～Stage4の4つの期間に区分する。次節でそれぞれのStageで生じている現象について考察を行う。

3. 河岸侵食の各過程で生じている現象および考えられる要因

3.1 Stage 1

Stage 1は水位ピークまでの増水期であり、洪水期間中の河岸崩落(CH1～CH3で5回計測)は、そのすべてが、このStage 1で生じている。一回の崩落幅は10cmが4回、20cmが1回と比較的小さい。崩落時間間隔は、河岸崩落が複数回生じたCH2の計測結果では30～50分である。また、同じ断面にあるCH2,CH3の崩落と水位との関係については、CH2が水面上、CH3が水際付近にある時に崩落が生じたC2-1, C3-1(表-1参照)を見ると、水際付近のCH3が侵食された直後にCH2で崩落が発生している。その後、CH3が水面下となってからは、CH3では崩落がまったく生じず、水面上のCH2でのみ崩落が発生(C2-2, C2-3)する。このことは、Stage 1での崩落が、水面下の河岸近傍河床を含めた河岸全体の滑りとして生じているのではなく、水際部の局所的な洗掘に起因する小規模な崩落と考えることができる。

次に、この水際部での洗掘の原因について考える。図-3(b)に示した流速の時間変化を見ると、例えば、崩落C2-3が生じた時刻では、かなり流速が小さくなっており、流下方向の流れによる河岸近傍河床の低下

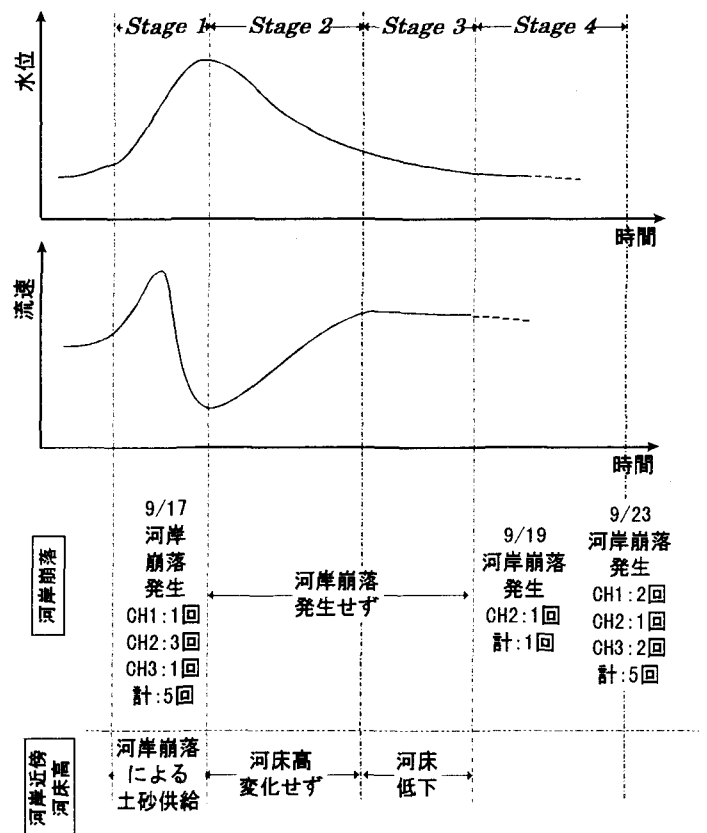


図-4 長良川9月17日洪水の概要

が生じたとは考えにくい。洪水中に撮影したビデオ映像を参考にすると、Stage 1 で河岸崩落が生じたとき水際は鉛直壁面にあり、鉛直壁面上では河岸材料は水面の擾乱により容易に離脱する。従って、Stage 1 の河岸崩落の直接の原因は、水際部での水面の擾乱による河岸材料の流出により局所的な洗掘が生じ、それより上部の土塊が小規模に崩落したものであると考えられる。

以上の考察を参考に Stage 1 で生じた河岸崩落過程について検討する。河岸侵食過程は、従来より、「河岸近傍土砂の洗掘→河岸上部土塊が不安定となり崩落→崩落土砂の堆積→崩落土砂の流送」のサイクルで、河岸の後退が進行すると言われており⁵⁾、現地実験によってもこのサイクルに従う河岸侵食過程が報告されている⁶⁾。しかし、今回対象とした長良川 42.4km の

河岸侵食については、崩落時間間隔が短く、また撮影されたビデオ映像から判断しても、堆積土砂が流送されてから次の崩落が生じているようではなく、前述の侵食サイクルには従っていないと考えられる。また、河岸崩落は、増水期のみで生じ、減水期では生じない。以上より判断して、長良川 Stage 1 で生じた河岸崩落は、以下のような進行過程であったと考えられる。図-5 に河岸崩落過程の概念図を示す。

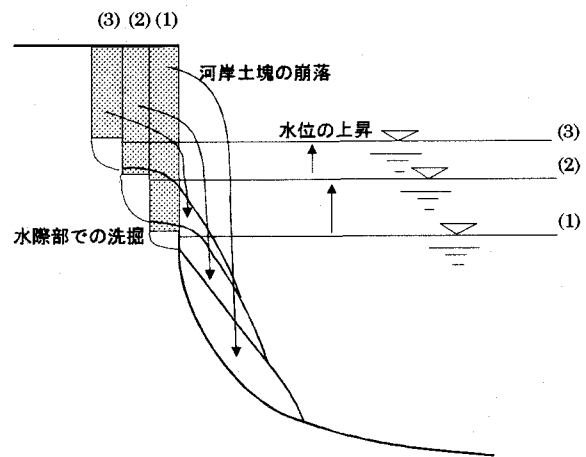


図-5 Stage 1 での河岸崩落過程概念図

- ① 水位が上昇し、鉛直壁が水際部となる。
- ② 鉛直壁水際部では水面の擾乱により、容易に河岸材料が抜け出す。
- ③ ある程度側方侵食が進行すると、上方の河岸土塊が不安定となる。
- ④ 水際より上部で河岸崩落が生じる。
- ⑤ 崩落土砂が堆積する。
- ⑥ 水位がさらに上昇すると、崩落土砂が堆積していない鉛直壁面が、再び水際部となる。

この①～⑥の過程を繰り返すことで河岸侵食が進行したとすると、水位が上昇する場合、崩落土塊が流送されなくても、次の崩落が生じる。一方で、水位が下降する場合は、上昇期に堆積した土塊により、水際は鉛直壁ではなく、安息角程度の傾斜を持っていると考えられる。したがって、減水期には、水際は鉛直壁である増水期と比較して、水際部における河岸材料の抜け出し量が小さい。また、河岸土塊が不安定となるには、まず、増水期に堆積した土砂をすべて流送しなくてはならない。このような理由で、減水期に河岸崩落が生じなかったと考えられる。

3.2 Stage 2, Stage 3

Stage 2 は、水位のピーク時及びその直後であり、この期間は前述したように流速が減少し、河岸近傍の河床材料を流送させるほどの掃流力がなく、また、河岸崩落による土砂供給もないことから、河岸近傍の河床はほとんど変動していないと考えられる。その後時間の経過とともに、流速が徐々に大きくなり、図-3(c)に示すように河床の低下が見られるようになる。この期間が Stage 3 である。

水位ピーク付近で流速が減少する理由としては、①通常言われているように、洪水時の水面勾配の時間変化により、水位のピークと比較して流速のピークの方が早く現れる、②水位上昇によって対岸にある砂州の上にも流れが生じるようになり、これに伴い流況が変化する、③河岸崩落により生じた堆積土砂による局所的な河床形状の変化が影響する、等が考えられる。対象区間の上下流に位置する忠節、墨俣の水位データより①の影響があったことは十分に考えられるが、この理由だけで図-3(b)に示すほどの急激な流速の変化があったとは考えにくい。また、ビデオ映像から判断すると流速の減少は③で述べた局所的な範囲に限定された現象ではない。そこで②の影響を調べるために、当区間を対象に流れの数値解析を行った。数値解析モデ

ル⁷⁾の基礎式は、平面 2 次元流れの連続式、運動方程式であり、実河川への適用を容易にするため一般座標系で表示されている。計算条件は下流端に水位、上流端に流量を与えた。計算は 2 ケース行い、Case 1 が Stage 2 (水位ピーク時) に対応した流量 $1300\text{m}^3/\text{s}$ 、下流端の水位 T.P.+5m であり、Case 2 は Stage 3 の流速増加期 (9 月 18 日 14:00) に対応した流量 $400\text{m}^3/\text{s}$ 、下流端の水位 T.P.+3m である。計算対象区間は長良川 39km~45km であるが、計算結果は、本研究の計測区間とその周辺の領域について示す。

図-6 は、Case 1, Case 2 の流速ベクトル、河床コンター図である。なお、同図において河床コンターは 1m 間隔であり、河床の濃淡は濃いほど高い標高を表わす。当区間の河岸侵食に大きな影響を与えていると考えられるのは、長良川 42.4km 付近右岸に存在する砂州である。Case 1 ではこの砂州が冠水しており、流速分布の計算結果を見ると右岸側が主流となっている。一方、Case 2 では流れが砂州の影響を強く受け、左岸側へ主流が寄っている。これをより明確に示すために、図-7 に左岸近傍の摩擦速度 u_{*L} 、及び潤辺平均摩擦速度 u_{*A} の縦断分布を 42.0k ~ 42.8k 区間について示す。潤辺平均摩擦速度の分布は、流量の大きい Case 1 の方が、Case 2 と比較してすべての断面で大きな値を示している。しかし、左岸近傍の摩擦速度に着目すると、42.4km 付近では、流量の小さい Case 2 の方がむしろ摩擦速度が大きくなる。これは平面流況で見たように 42.4km 右岸の砂州により流れが偏倚したことが原因と考えられる。Stage 3 では上記のような理由により、流れが河岸に集中したことが、河岸近傍の河床低下の要因となったと考えられる。

3.3 Stage 4

河岸崩落は増水期 (9 月 17 日) に複数回生じてから以降は、9 月 19 日に CH2 で一回崩落が見られた後、Stage 1 から 6 日経過した 9 月 23 日に再びまとまった回数の崩落が計測された。規模は Stage 1 が崩落幅 10cm が主であったのに対し、Stage 4 の崩落は、崩落幅 10cm:1 回、20cm:2 回、30cm:2 回、40cm:1 回と崩落規模が大きくなっている。また、この時、水面は低い位置にあり、水際部は鉛直壁面上に存在しない。以上より考えて、Stage 4 の河岸崩落原因は、Stage 1 と異なると考えられる。9 月 18 日の 18:00 以降は詳細な計測を行っておらず、Stage 4 の崩落について原因を明確にすることは難しいが、墨俣・忠節の水位データより、9 月 18 日以降水位はゆるやかに減少しており、河岸崩落が生じた 9 月 23 日には、水位変動はほとんどなく、河岸崩落に河川水が与えた影響は小さいと考えられる。従って、原因は、Stage 3 での河岸近傍河床の低下で河岸侵食に対する安全率が減少した河岸が、洪水後時間が経過することにより、河岸材料の含水比等の土質特性に変化が生じ、それに伴い河岸の土質強度が低下し、崩落に至ったのではないかとと思われる。しかし、この考えの妥当性については、今後の調査の必要がある。

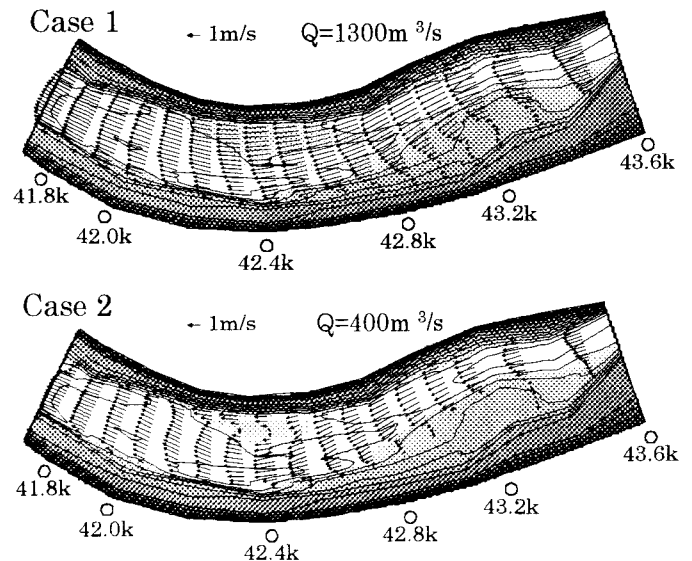


図-6 流速ベクトル及び河床コンター

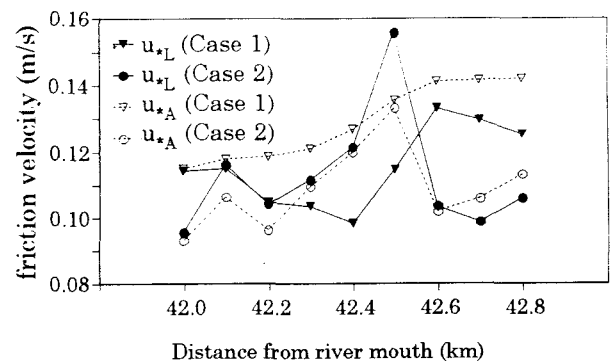


図-7 摩擦速度縦断分布

また、平常時に見られる鉛直壁は、この Stage 4 の河岸崩落で形成されたと考えられる。2.1 で述べた鉛直壁の高さの相違は、この時の土質強度に応じたものと考えられる。

4. 河岸侵食量を決定する要因

洪水時の河岸崩落の直接的な原因は、Stage 1 で述べたように水際部での河岸材料の抜け出しと考えられる。しかし、これが河岸侵食の総量を決定するものとは考えられない。なぜなら、Stage 1 で述べたものが主要因であれば、水際の存在する部分（すなわち全区間）で、河岸侵食が生じるはずである。しかし、実際の河岸侵食は、砂州の対岸あるいは蛇行の外岸等で生じており、掃流力分布と密接に関係している。この点について、今回の調査結果を踏まえ、以下に検討を行う。

Stage 1 で崩落した土砂は、水際近傍に堆積するが、この崩落土砂が堆積した状態が保持されれば、河岸侵食の進行には限界が生じる。堆積土砂が流送され、さらに河岸近傍河床の低下により、河岸が不安定となるのは、Stage 3 で述べたように砂州等の影響により流れが河岸に集中する水位低下時、あるいは小洪水時であると考えられる。流れが偏倚し河岸近傍流速が大きくなる流量は、河道特性により異なると考えられるが、このような流量を有する洪水時の河岸近傍河床の低下量が河岸侵食量を決定するものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、長良川 42.4km 地点の河岸侵食計測結果及び対象区間の流れの数値解析結果をもとに考察を行い、これまで十分に把握されていなかった洪水期間中の侵食過程にある河岸の土砂の挙動を明らかにすることができた。しかし、今回の調査は一地点、一洪水についてのものであり、ここでの結果をもって河岸侵食一般を論じることはできない。特に河岸の侵食過程は河岸材料で異なり、より微細な粒径の材料を多く含む粘性の大きい河岸の侵食過程⁶⁾、2.1 で示したような微細砂がほとんど含まれていない揖斐川の侵食過程は、ここで述べた Stage 1 の河岸崩落過程とは異なると考えられる。

また、今回の検討を通して、ここで行った調査以外に重要と思われる調査項目としては、①対象河岸を含めた広い領域での平面流況の把握、②洪水後、数日間の河岸周辺土質特性の変化の把握である。以上の点を調査項目に加えて、出水特性、河岸材料特性の異なる場合の河岸侵食調査を行い、現象の解明に寄与したいと考えている。

謝辞：本研究は冒頭にも記したとおり、土木学会・建設省共同研究により行われたものであり、資料の提供、現地計測、またその結果に対する議論を通してご協力いただいた木曽川上流工事事務所の関係諸氏、ならびに共同研究を実施するにあたってお世話頂いた建設省河川局治水課小俣篤氏、土木学会磯崎ひろ子氏に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 柿崎恒美・廣瀬昌由・酒井佳治：長良川における河岸侵食の現地観測（中間報告）、第 4 回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集、1998.
- 2) 藤田裕一郎：直線流路の側岸侵食機構、京都大学防災研究所年報、第 22 号、B-2, pp.537-552, 1979.
- 3) 長谷川和義：非平衡性を考慮した側岸侵食量式に関する研究、土木学会論文報告集、第 316 号, pp.37-50, 1981.
- 4) Ikeda, S: Self-Formed Straight Channels in Sandy Beds, *J. Hydraulic Div.*, ASCE, 107(4), pp.389-406, 1981.
- 5) 芦田和男・村本嘉雄・奈良井修二：河動変動に関する研究(2)、京都大学防災研究所年報、第 14 号、B, pp.275-297, 1971.
- 6) 福岡捷二・木暮陽一・佐藤健二・大東道郎：自然堆積河岸の侵食過程、水工学論文集、第 37 巻, pp.643-648, 1993.
- 7) 長田信寿・細田 尚・村本嘉雄・Rahman M.M.：河岸侵食過程における流砂の非平衡性を考慮した流路変動の数値解析、水工学論文集、第 41 巻, pp.889-894, 1997.