

淀川水系宇治川の低水路における河岸侵食過程

Bank Erosion in the Low Water Course of
the Uji River, a Main Tributary of the Yodo River

藤田裕一郎* 八尋 裕** 村本 嘉雄***

By Yuichiro FUJITA, Yutaka YAHIRO and Yoshio MURAMOTO

Bank erosion process of a low water course is being observed at a site in the Uji river, a main tributary of the Yodo river, by monitoring retreat of bank edge line and by inspecting survey data of cross sections. The erosion process has been compared with hydraulic conditions estimated from hydrological data of the nearest two gauging stations. Peak values of flood water stages and discharge have not affected clearly the bank erosion process, but bank heights above the adjacent bed proved to have a great influence on the retreat rates, reducing bank slope stability. Stability analysis of bank slopes at the site was conducted and their slip failures were predicted fairly well.

Keywords: river bank erosion, field measurement, bank slope stability, the Yodo river

1. はしがき

河岸侵食の実態の把握は、その水理機構の基礎的な考察とともに、河道災害の防止・軽減にとって重要である。とくに、室内実験では模擬しにくい近傍河床からの比高が大きい河岸の侵食現象については現地観測資料の集積が不可欠である。こうした資料の蓄積は、雨季に水深が容易に10数mを越えるような開発途上国の大河川の河岸侵食が住民にもたらしている問題¹⁾を考える上でも必要である。しかしながら、河川を対象に側岸侵食の観測と検討が続けられてきた例はそれほど多くなく、大きな河岸比高を有する場合はさらに少ない。著者ら²⁻⁶⁾は、河岸比高が局所的に約10mに達する、淀川水系宇治川の43km地点付近の低水路において河岸侵食の観測を継続するとともに、建設省近畿地方建設局淀川工事事務所による測量成果と水文資料の検討を行っており、これまでにその結果について報告してきた。ここでは、新たに蓄積した資料を用いて侵食過程の特徴を述べ、水文観測資料から推定した水理条件と比較する。ついで、河岸斜面の安定性に関する検討を行い、河岸高が側岸侵食の進行に与える影響について考察する。

* 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所
(〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

** 正会員 工修 建設技官 建設省都市局下水道部
(〒100 東京都千代田区霞が関2-1-3)

*** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
(〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

2. 宇治川低水路の概要

淀川水系宇治川の38～45km区間は、写真-1のような様な形状の低水路を有する複断面河道となっていて、低水路の両岸にはほとんどの区間で柳の低木が連続して生えている⁵⁾。そのうちの42～44km区間の左岸側には幅約350mの広い高水敷があり、写真-2に示したように、この区間の大体中央に当たる43km（実距43.601km）地点付近の約150m区間では、低水路左岸が柳の流失していて、河岸斜面は切り立った崖状を呈していた。このような状態から、この区間では、河岸侵食が継続的に発生していると判断し、1980年6月から河岸線の変化を、初めの約8年間は平板を用い、最近の4ヶ年は光波測距儀を用いて追跡してきている²⁻⁴⁾。この光波測距儀の使用によって測量のための伐採作業が軽減され、測定区間を伸ばすことが容易になっている。

この38～45km区間は幅約100m、平均深さ6、7mの類似形状の低水路が続いているにもかかわらず、淀川工事事務所による河道横断面の定期測量成果の検討や現地踏査の結果によると、43km付近の左岸以外では、これに匹敵するような河岸侵食の著しい個所は認められなかった。この地点では、1970年代前半の河床低下とともに、左岸付近に河床の局所洗掘が生じ、同時に河岸が侵食され始めたことが判明している²⁾。しかし、この地点も、その後の侵食で現在では主流線の曲率が増加しているが、平面図によると当初は微かな弯曲の頂部に当たっていた程度であって、これまでのところ、著しい河岸侵食の開始した理由は不明である。

低水路の形状が比較的一様であるので、既報³⁾と同様に、43km地点の横断測量成果に対して、淀（実距39.499km地点）及び向島（同45.533km地点）にある水位流量観測所における水位と流量の観測値から内挿した値、それぞれHとQ、および両観測所間の平均水面勾配 I_w 、さらにそれらを用いて算定した潤辺平均掃流力Tを、この付近における平均的な水理条件として、河岸変化の観測期間について示せば図-1のようである。この9年間では、1981、84及び87年が大きな出水の無かった年であり、とくに、1987年には $500\text{m}^3/\text{sec}$ を越える出水が生じなかったために、平均掃流力も $T < 8\text{N}/\text{m}^2$ の極めて低いレベルに留まっている。一方、大きな出水が発生しているのは1982、86年であり、平均掃流力では、この両年に加えて、水面勾配の大きかった85年、中規模の出水の相次いだ83、88年で長期間 $T = 10\text{N}/\text{m}^2$ 以上の比較的高い値が持続していた。

3. 宇治川低水路における河岸侵食の進行過程

河岸線の後退状況の平板・光波測距儀測量による追跡結果を、当初基準線として設置した10m間隔の8本の杭の位置とともに示せば図-2のようであって、明らかに、この測定区間では、下流側ほど侵食速度が高く、最大の侵食速度を示す位置も下流側に移動しつつあることが判る。この河岸線の平面変化に見られる半円状のくぼみは、測量時の観察によると、つぎに述べる図-4のすべりに対応したものであって、両図から、河岸

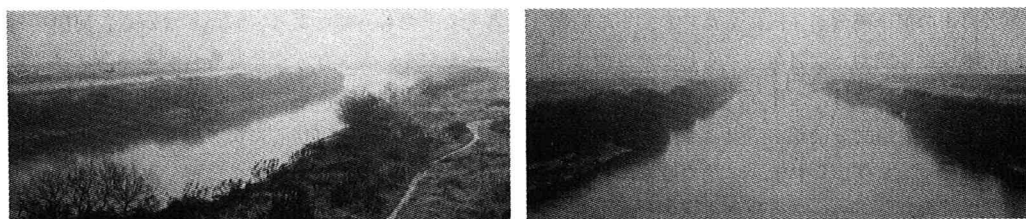


写真-1 宇治川低水路の概況（淀大橋から上(左)・下(右)流を望む）

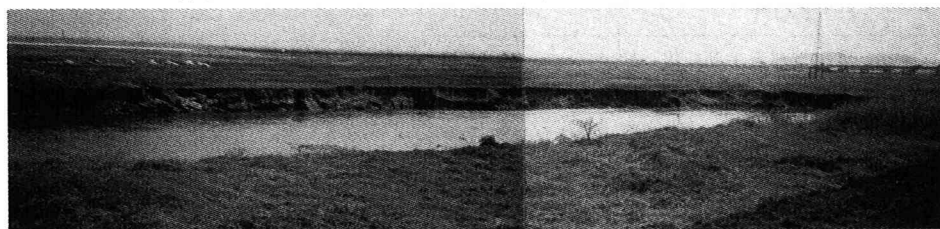


写真-2 宇治川43.0km低水路左岸の河岸侵食箇所（1988年4月11日撮影）

高が8 m以上となっているNo. 6地点よりも下流の区間における斜面すべりは、河岸高と同オーダーの半径5～10mの平面規模で間欠的に生じていると判断される。

図-3には、淀川工事事務所による42.95～43.25km区間の50m間隔低水路横断測量結果に基づいて作成した、1984～88年度における河床形状を基準杭とともに図示している。また、図-4には基準杭の位置における河岸斜面の変化を示した。

これらの図は、河岸比高の増加が河岸近傍の河床洗掘に因っていること、上下流の断面で河岸斜面勾配に差はないが、比高はNo. 0からNo. 7地点までの70mの間に6、7 mから10、11mまで4 m以上も増加して、43.15km地点よりも上流の2倍に近い高さとなっていることを示している。また、既に指摘しているように、河岸高の小さい場合には、河岸上部の土砂が崩落して斜面下部に堆積した状況を、大きい場合には、斜面の中央付近に天端の状況をそのまま残した平坦な段があって、比較的規模の大きな斜面すべりが生じた様相を呈し

- | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| ① ————— June, '80 | ⑦ ————— Dec. 27, '82 | ⑬ ————— Aug. 21, '85 |
| ② - - - - - Mar. 6, '81 | ⑧ - - - - - May 18, '83 | ⑭ - - - - - Mar. 5, '86 |
| ③ - - - - - Jan. 6, '82 | ⑨ - - - - - Aug. 8, '83 | ⑮ - - - - - Mar. 19, '87 |
| ④ - - - - - Apr. 9, '82 | ⑩ - - - - - Apr. 9, '84 | ⑯ - - - - - Apr. 12, '88 |
| ⑤ - - - - - Jul. 23, '82 | ⑪ - - - - - Sep. 3, '84 | ⑰ - - - - - Nov. 17, '88 |
| ⑥ - - - - - Sep. 9, '82 | ⑫ - - - - - Apr. 18, '85 | ⑱ - - - - - Sep. 1, '89 |
| | | ⑲ - - - - - Nov. 11, '89 |

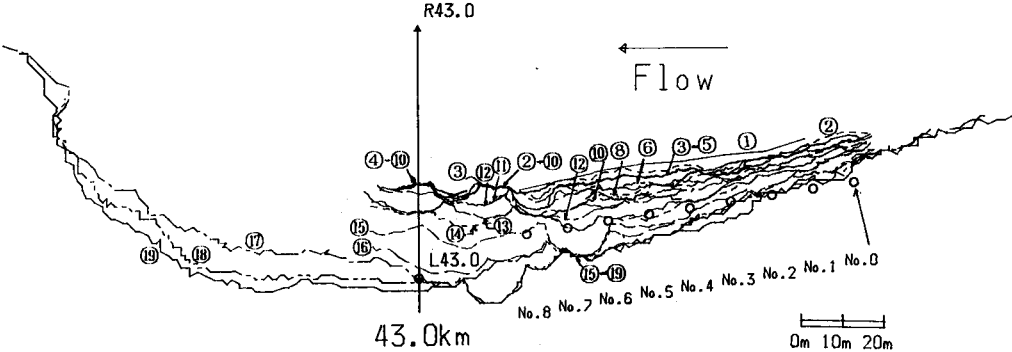


図-2 侵食河岸線の変化

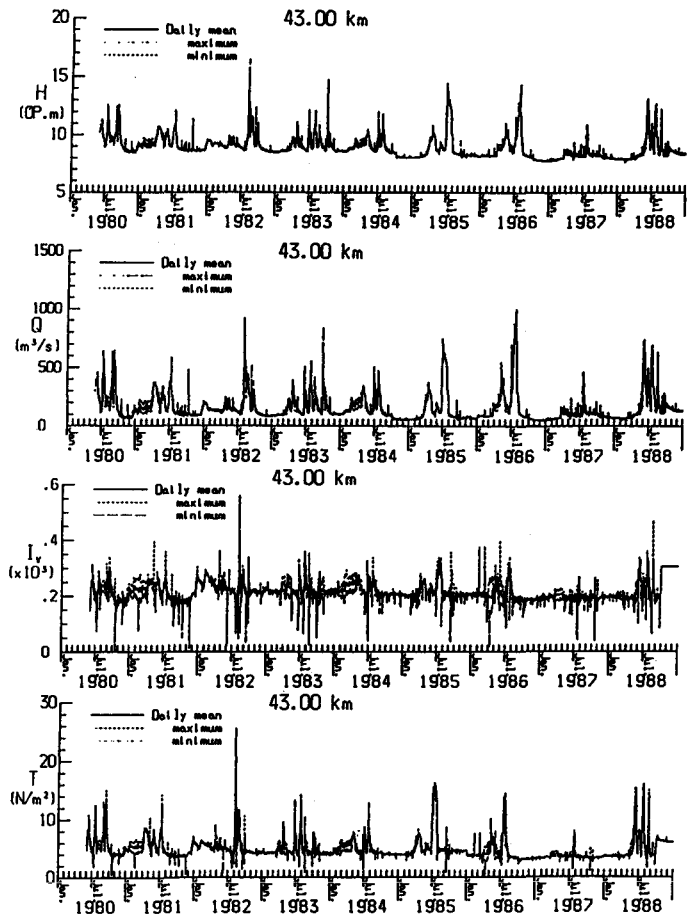


図-1 河岸侵食個所の平均水理量

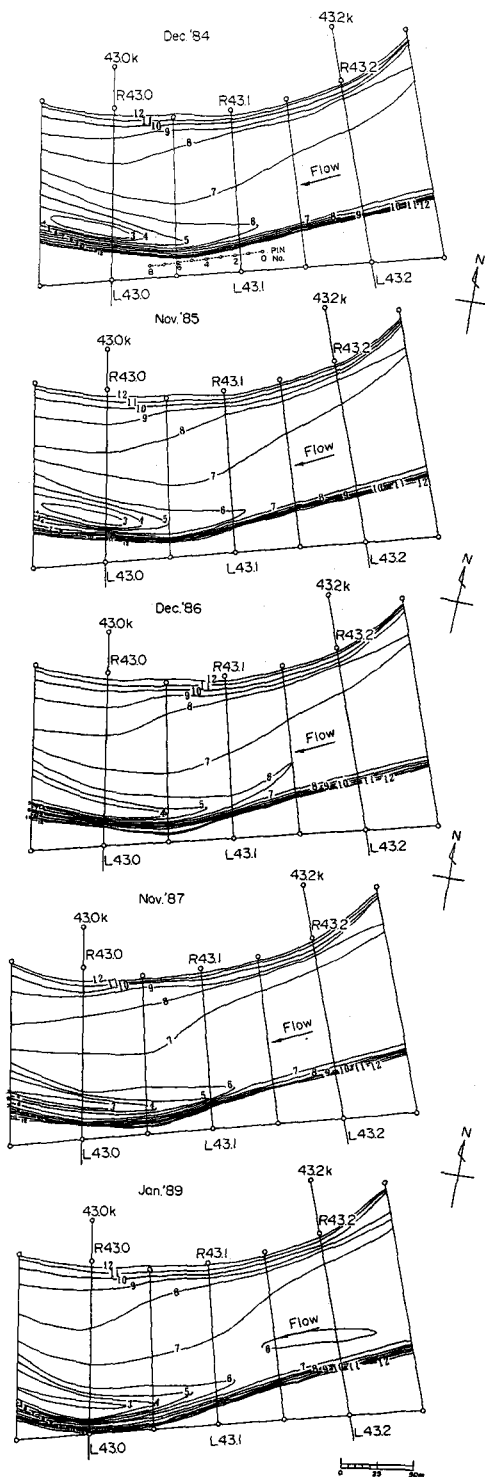


図-3 河岸侵食区間の河床の変化

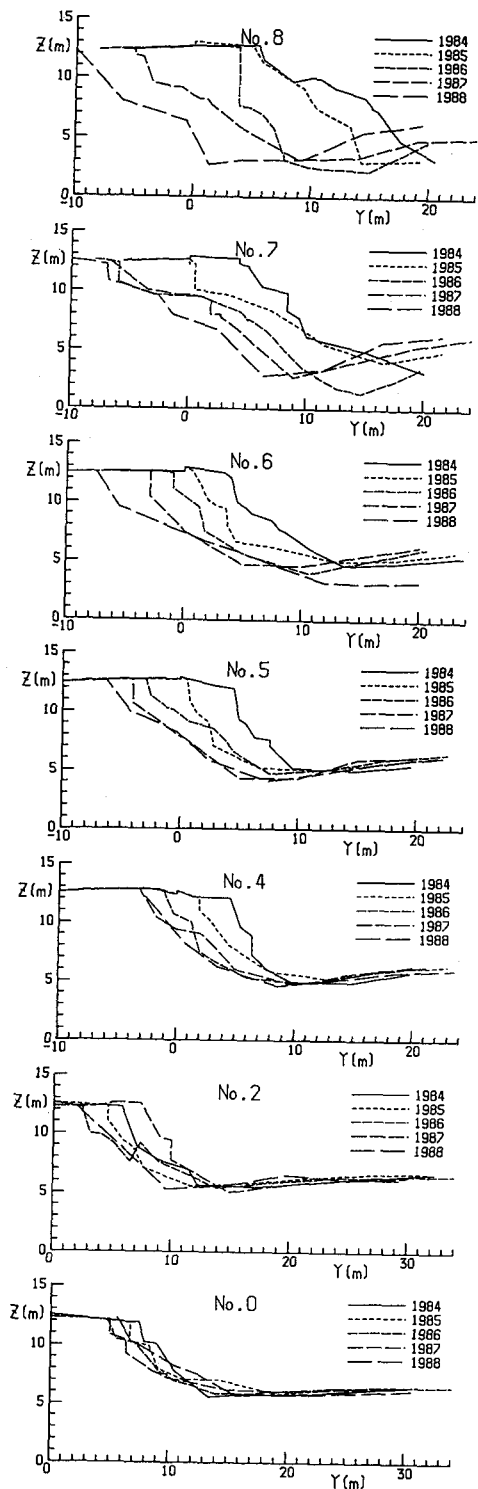


図-4 河岸斜面の侵食状況

ている。一方、河床等高線の形状からは、この4年間で、河岸弯曲の頂部が43.05kmの直上流から43.00kmの直上流まで約50m移動したこと、7mの等高線で表される対岸の砂州も下流側に張り出してきているが、河床最深部の下流への移動は認められないこと、などが判る。このような河床形状は、この区間の上流側でも河岸はかなりの高流速にさらされ、一方、下流側で斜面すべりが生じれば、河岸脚部の破壊された土砂は直ちに流心に近い位置まで到達し、容易に流送されることも示唆している。

つぎに、やはり既報³⁾と同様に、この平面図から河岸線の経時的な後退状況を当初設置した基準杭の線に対して示せば図-5のようである。測の実施間隔が不揃いであるために河岸後退量の急激な変化を厳密には捉えてはいないが、河岸侵食は出水に対応した夏季に多くの断面で生起することが認められる。しかし、1982, 86年のような出水年と、1984, 87年のような非出水年との間で後退量の差は余り明確ではない。

上流側のNo. 0地点～No. 3地点間の河岸後退曲線は、全体に直線的であって全期間を通じた平均後退速度は年間約1mである。一方、No. 6地点よりも下流では、後退曲線が全体的に上に凸の形状であって、河岸侵食が1985年頃から激化したことを示している。とく

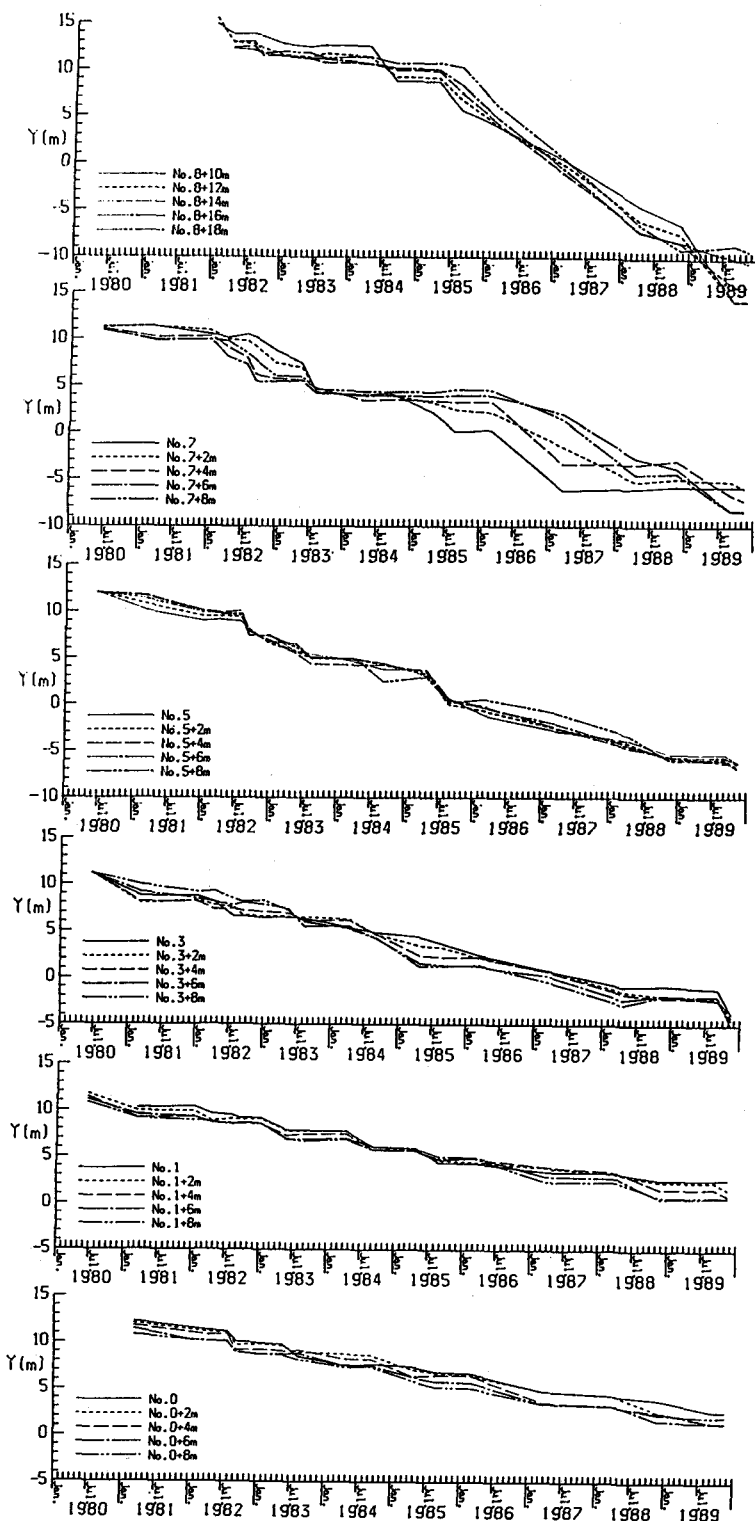


図-5 基線区間の各断面における河岸の後退状況

に、No. 8地点から下流20mの区間の後退量は、1985年以降それまでの年間数10cmから一転して、毎年4m前後となっている。1970年頃から継続的に河岸が後退してきたその下流の43km地点の左岸でも、1980～83年にはほとんど河岸線が変化していないことを考慮すると、この部分の河床・河岸は侵食抵抗の高い材料で構成されていたことが推察される。43km地点左岸の斜面形状の経年変化⁹⁾では、1983年や1984年にはOP. 7～8mの平水位以下でも50'前後の河岸勾配が生じており、法先もOP. 3m以下まで洗掘されていて、斜面が非常に不安定になっていたと思われる。したがって、43km地点とNo. 8地点との間の強固な河岸も、出水時の高掃流力で河床がさらに洗掘されると、不安定になってすべり破壊を生じたと考えられる。

図-2や図-3は、このような強い河岸材料が流送された後には、河岸侵食の著しい個所が容易に下流へ拡大していくことを示している。なお、No. 7地点の付近では間欠的な河岸の後退過程が観察されているが、No. 8地点よりも下流では1986～1987年間の後退量が大きくかつ測定の間隔が空いたためにこのような間欠性は認められない。また、No. 3～No. 6地点間には以上の遷移的な傾向を示しており、その平均後退速度は年間約1.5mである。

このような河岸変化に関連して、図-6には42.95～43.25km区間の50m間隔の河岸斜面における毎年の侵食断面積 A と河岸高 H_B の関係の検討結果を示した。両者には正の相関が明らかであって、とくに、 $H_B > 5$ mの領域の上側の包絡線は、 $A \propto H_B^2$ の関係となっている。また、 $H_B > 8.5$ mの領域では、ほぼ平行に変化する2つのグループに分かれているが、斜面形状と比較すると上部のものはすべり土塊が完全に流送された直後の河岸に、下部は斜面すべり後それほどの時日が経過していないものに対応している。

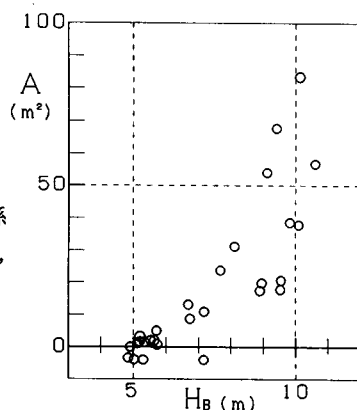


図-6 河岸侵食量と河岸高

以上のように、この区間の河岸侵食量は、出水の流量や水位のピーク値とは直接的な関係が明確ではなく、毎年ある程度の量は流送されているようであるので、ほぼ毎年出水が達している、高水敷表面（約OP. 12.5m）から1.5m下がった、水位OP. 11mについて、簡単に平均河岸侵食量との関係を検討する。観測区間上流のNo. 2地点では河岸高が約7m、後退速度が1m/年、下流のNo. 8地点ではそれぞれ約11m、3m/年であるので、平均の河岸侵食量は、前者で7m³/年、後者で44m³/年となり、後者は前者の約6.3倍である。一方、水面勾配 I_w を出水に対応させて平水時よりもやや急な約 0.25×10^{-3} とすると、それぞれの法先水深5.5m、9.5mを用いた河床掃流力は、前者で13.48N/m²（摩擦速度：0.116m/s）、後者で23.28N/m²（同：0.153m/s）となる。河岸土砂の流送能力を掃流力の3/2乗に比例すると考えると、後者の侵食量は前者の約2.3倍であって、これだけで平均侵食量の差を説明するのは無理のようである。そのためには、やはり局所的な流れの特性や河岸斜面の安定性の影響について検討する必要がある。

4. 河岸斜面の安定性に関する検討^{9, 7)}

河岸侵食の進行に強く影響する斜面の安定性に関して、簡易Junbu法を動的計画法で定式化したYamagami-Ueta⁹⁾の解析法を用いてすべり破壊の可能性を検討した。ここでは、河岸高の影響が明確となるように、1984～88年の50m間隔の測定断面から河岸比高が最大、最小で、侵食速度もそれぞれ最大、最小となっている43.00kmと43.25km地点を選んだ。付近の道路予定地の地質調査資料によれば、高水敷の表面からの深度が約10m以下の層はN値が21～50の洪積砂礫層であり、それよりも上層は、上部からN値が5～10の砂・砂礫層、同0（自沈）～3の粘土層、同10～25の砂・砂礫層、及び同5～11の粘土層となった、砂礫層と粘土層が互層をなしている沖積層である。層厚は最下層の粘土層が1mである以外いずれもほぼ3mと推定されている。このようにやや複雑な地層であるが、簡単のため、ここでは層毎に分けては取り扱わず、全層を代表する土質定数を解析結果と測量成果の比較からパラメトリックに見出す方法をとる。なお、内部摩擦角 ϕ は、砂・

砂礫層のN値から従来の経験式によって $\phi = 30 \sim 35^\circ$ と推定していたが、 $\phi = 20 \sim 40^\circ$ の範囲について行った予備的な解析結果からこれを妥当とみなした。しかし、粘着力cは推定しにくいので、表-1の計算条件の5種類の値を与えて解析を進めた。また、すべり面は強固な洪積砂礫層の内部には及ばないとして探索点はその上部に限定した。水位の設定条件はa)平水時、b)出水中及びc)洪水の減衰直後を想定して表-2の3種とした。

表-2 河岸斜面安定解析の水位

河岸地下水位	年平均水位	河岸高に同じ
河道水位	a) 平水時	c) 洪水直後
年平均水位	a) 平水時	b) 洪水時
河岸高に同じ	—	—

横断形状	建設省横断測量成果
スライス分割	建設省横断測量測点及び内挿点 分割数 17~18
探索点間隔	スライス分割線上 0.5 m
基礎地盤高	OP 0~1 m
γ (tf/m ³)	1.8
c (tf/m ²)	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5
ϕ (°)	30, 35

図-7にはそれぞれの断面についての解析結果の例を最小安全率 F_s の値とともに示している。cの値が大きいほど大きく深い最小安全率のすべり面が得られるが、同時に F_s の値も大きくなる。5ヶ年の測量年次について、全ての解析結果を河岸斜面の変化と比較して、 $\phi = 30^\circ$ 、条件 $c = 1.5 \text{ t/m}^2$ の組み合わせが最も妥当な結果をもたらすものと判断した。同一のc、 ϕ の組み合わせに対する潜在すべり面の長さや奥行きはともに河岸高にほぼ比例しているの、すべり土塊の面積は河岸高の2乗に比例することになり、図-6に示された傾向に一致する。また、河岸高が約5mの43.25kmでは、c)の洪水直後に $c \leq 1.0 \text{ t/m}^2$ とした場合を除いて常に $F_s > 1$ であって、図-3のように河岸がほとんど侵食されなかったことに一致している。つぎに、水位の3条件について、43km地点における1984年と

87年の潜在すべり面を示せば図-8のようである。斜面上に崩落土塊がほとんど残存していなかった1984年では、規模の大きいすべりの発生が予測されており、翌年の85年の河岸形状は予測されたすべり面上に上部からの滑落土塊が残存した状況を示している。一方、斜面脚部に土塊の残存していた87年の場合には、小規模の崩落に近いすべりのみが生じる可能性が示されていて、これは、図-4で説明した半円状の平面形状の大規模な河岸すべりに先行して発生している、薄い三日月型の河岸線の後退に対応している。

以上のように、このような土質条件の河岸では、近傍河床からの比高

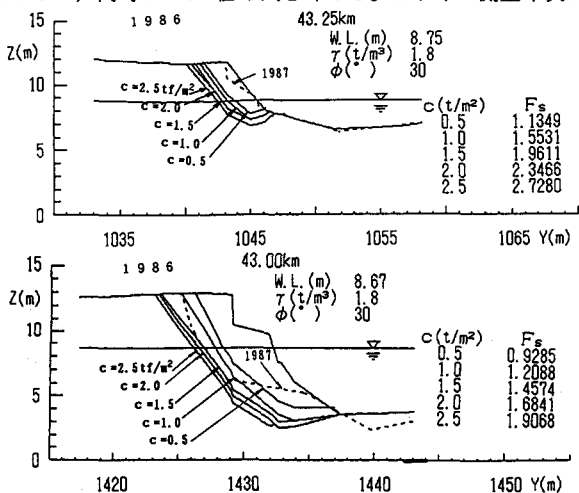


図-7 河岸斜面安定解析結果の例

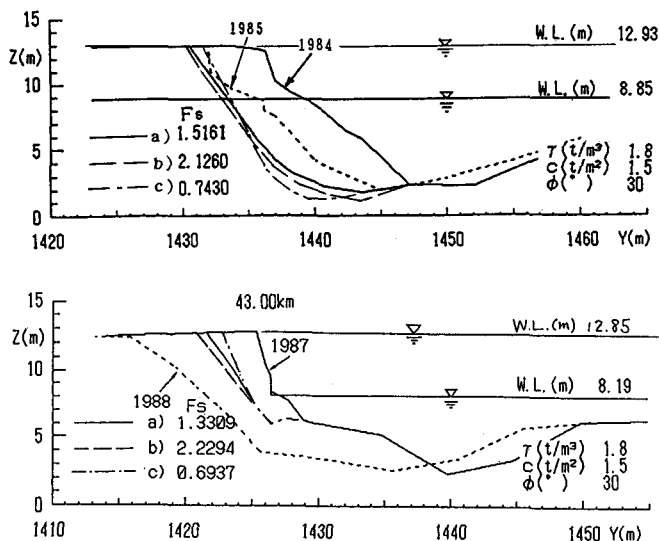


図-8 土砂の流送状況と斜面の安定

以前の崩落やすべり破壊による土塊が完全に流送された後、斜面がさらに侵食を受ければ、かなりの規模の斜面すべりが容易に発生して、それが侵食過程を加速すると考えられる。

5. あとがき

淀川水系宇治川の低水路で局所的に生じている顕著な河岸について、観測結果と既存資料の継続的な検討結果について、周辺の状況及び河岸侵食個所の状況を詳細に述べ、河岸侵食過程に近傍河床からの河岸の比高が大きな影響を与えていることを明らかにした。低水路河岸のように水中に没しやすい斜面では、河岸中の間隙水圧の効果もあって、斜面高が大きの場合安定を失いやすく、それが侵食の進行に支配的な要因の一つになると思われる。実際、本文で示した観測結果や、単純な条件を設定して観測河岸を対象に実施した斜面安定解析の結果もそれを裏付けている。河岸が不安定になって崩落やすべりを生じると、一体であった河岸の構成土砂は、破壊されてある大きさの塊となり、先端部から順次流心に近い流送能力の高い領域に押し出されていく。この土塊は空隙を含んでいるため、見かけの密度が小さくなっていて、流送はより速やかである。すなわち、すべり破壊によって、河岸材料は、河岸にそのまま存在している場合よりも極めて容易に流送されることとなり、全体的な侵食速度が高められて侵食過程は加速される。

従来、多少とも粘性材料を含有した河岸は、流水に対する侵食抵抗を著しく増大することが知られている。しかし、逆にこの侵食抵抗は河岸近傍に深い河床洗掘箇所を誘起する可能性があって、侵食速度を評価するためには、ここで示したような河岸の安定性の検討が必要となってくる。

今後、河岸高を極度に増加させるような河岸近くでの河床の局所洗掘機構とともに、斜面破壊に伴い流心部まで直接供給されてくる土塊の大きさを見積もり、斜面破壊後の流れの状態を推定して、流送過程を解明していくつもりである。このためには、現地における流れ特性に関する観測も必要であると考えている。

最後に、測量成果並びに水文観測資料を提供頂いた建設省近畿地方建設局淀川工事事務所、とくに調査第一課の方々に感謝します。また、河岸線の測量、現地踏査、資料の解析・整理等には中村行雄技官、本学卒業生新川清隆君（現住友生命勤務）をはじめ、京都大学防災研究所河川災害部門の皆様が協力頂いたことを記して謝意を表します。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金重点領域研究(2)自然災害（研究代表者村本嘉雄）の補助を受けて進めたものであることを付記します。

【参考文献】

- 1) K. Maudood Elahi, K. Saleh Ahmed and M. Mafizuddin: River Bank Erosion, Flood and Population Displacement in Bangladesh, River Bank Impact Study, Jahangirnagar Univ., 364p., 1991.
- 2) 藤田裕一郎・村本嘉雄・宮坂裕文：河川における側岸侵食，京都大学防災研究所年報，第26号B-2，1983，pp. 427-444.
- 3) Y. Fujita, Y. Muramoto and H. Miyasaka: An observation of river bank erosion, Proc., 6th Congress, APD-IAHR, Vol. II-1, pp. 123-130, 1988.
- 4) 藤田裕一郎・八尋 裕・村本嘉雄・新川清隆：河岸の侵食と安定について，第9回日本自然災害学会学術講演会要旨集，pp. 104-105，1990.
- 5) Y. Fujita, Y. Muramoto and Y. Yahiro: Processes of river bank erosion during floods, Proc., 2nd US-Asia Conf. on Engineering for Mitigating Natural Hazards Damage, 1992, pp. F03 1-8.
- 6) T. Yamagami, Y. Ueta: Noncircular slip surface analysis of the stability of slopes, J., Japan Landslide Soc., Vol. 23, No. 4, 1986, pp. 8-16.
- 7) 八尋 裕・藤田裕一郎・村本嘉雄：侵食に対する堤体と河岸の安定に関する解析，土木学会第45会年次学術講演会講演概要集第2部，pp. 344-435，1990.