天竜川ダム再編事業による流出土砂量の増加が海岸に及ぼす影響

Nourishment Effect of Increase in Sediment Supply to Coast
by Sand-bypassing through Dams in Upper Tenryu River

宇多高明¹・長島郁夫²・古池 鋼³・宮原志帆³・石川仁憲⁴

Takaaki UDA, Ikuo NAGASHIMA, Kou FURUIKE, Shiho MIYAHARA and Toshinori ISHIKAWA

The Enshu-nada coast has been severely eroded due to decrease in fluvial sediment supply from the Tenryu River because of the obstruction of the continuous sand supply from the river by constructing large dams. The effect of sand-bypassing through these dams in the upper basin of the Tenryu River was investigated using the contour-line-change model. Sand supply considering grain sizes was assumed in several cases. In each case, bathymetric changes around the river mouth were predicted by the model. It is predicted that the supplied sand tends to be deposited around the river mouth, while recovering the river delta, and sand supply to coasts far from the river mouth is not so active.

1. はじめに

天竜川河口の両翼に広がる遠州灘海岸は、中部山岳地帯を縦断する天竜川からの流出土砂を起源とする河口デルタとして発達してきた。戦後、電源開発のために佐久間ダムを始めとする発電ダムが多く造られて土砂の流下が阻害されるとともに、河床掘削による砂利採取が行われた結果河川流出土砂量が激減し、河口部汀線の後退が始まった。汀線後退量は1962年から2004年までで270mに達した(長島ら, 2005)。また、従来河川流出土砂が堆積することによって発達しつつあった河口テラスも侵食傾向に変わり、2004年までに消失した。河口部から始まった侵食は両翼の海岸へと広がり、現在では河口西側では馬込川河口以西において、また東部にあっては竜洋海岸以東で侵食が著しい。こうした侵食に対して、海岸管理者である静岡県は養浜や離岸堤建設などの対策を取ってきているが、土砂流入が枯渇状態に近い場合、いずれも短期的な対策とならざるをえず、抜本的には河川流出土砂量を過去の水準にまで戻すことが必要とされる。しかし、流出土砂量を増加させるといっても、実際には河道において土砂を輸送する洪水は間欠的に生じるものであるし、また河口から大量の土砂が流入したとき、その土砂はいかなる形で堆積するのか、また侵食対策上いかなる効果が見込めるのかなど、様々な課題を整理する必要がある。天竜川河口と遠州灘海岸、とくに天竜川河口以西の海岸の海浜変形予測について、宇多ら(2006)は、

天竜川からの土砂流出が枯渇し、かつ浜松五島海岸に現況のように23基の離岸堤が設置された条件のもとで海浜変形予測を行い、養浜効果の検討を行った。この予測には、芹沢ら(2002)の単一粒径を対象としたモデルが用いられた。しかし実際には遠州灘海岸は細砂と粗砂の混合材料でできており、それらの移動特性にも差があることから、宇多ら(2007a)では、粒径を考慮した等深線変化モデルを同じ地域に適用し、細砂・粗砂材を用いた養浜の効果について検討し、最適養浜手法を示した。一方、天竜川ダム再編事業に関して、宇多ら(2007b)は、天竜川から過去1万年間継続的に流入したと考えられている約60万m³/yrの砂供給が復活した場合の海浜変形予測を行った。これによると、土砂流入とともに河口デルタの再発達が進むが、河口から離れた地域では依然として侵食が進んでいくこと、従ってダム再編事業のみではなく、地先ごとの侵食対策とを組み合わせる必要があることが明らかになった。しかしこの予測計算も単一粒径を対象としたものであり、実際の粒度組成を考慮したものではない。本研究では、以上の点を考慮し、実用性が確認されている熊田ら(2003)の粒径分級を考慮した等深線変化モデルを用いて、天竜川ダム再編事業の進捗に伴って河川流出土砂量が増加した場合の河口デルタの復元状況と、遠州灘海岸の侵食軽減効果について検討する。使用したモデルは宇多ら(2007a)と同一である。

2. 天竜川ダム再編事業の効果検討

(1) 基本的考え方と条件

計算は、まず1962年の自然状態、すなわち天竜川河口以西において30万m³/yrの土砂が連続的に流れるという動的平衡状態を与えて2006年の状態を再現する。さらに離岸堤3基の新設と5万m³/yrの養浜を10年間継続するという条件で2016年の状態を予測し、その上でダム再編事

1 正 会 員 工 博 (財)土木研究センター理事なぎさ総合研究室長
兼日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科
2 静岡県建設部河川海岸整備室長
3 海岸研究室(有)
4 正 会 員 工 修 (財)土木研究センターなぎさ総合研究室主任研究員

図-1 毎年の流出土砂量

業により河川流出土砂量が増大した場合の河口部地形変化の予測を行うものである。計算範囲は、宇多ら(2007a)と同様、天竜川河口から静岡・愛知県境まで長さ30kmの海岸である。予測期間は2016年から100年後(2116年)までである。設定外力条件は全て宇多ら(2007a)と同一である。

河川流出土砂量については、ダム再編後の天竜川流出土砂量を一次元河床変動計算モデルにより予測した流砂量(浜松河川国道事務所・(財)ダム技術センター、2008)を与えた。これについては流量データが十分揃っている過去26年間のデータから粒径別に定めた流砂量の計算結果(図-1)を3粒径レンジに再区分して入力した。

河川流出土砂は洪水の発生状況に依存し大きな年変動を有する。しかし天竜川河口にあっては過去の土砂堆積による河口沖テラスは既に消失している。河川流出土砂が復活した場合、この土砂量の欠損を埋め合わせることで、河口デルタが十分発達して等深線が沖向きに突出して初めて沿岸漂砂の作用によって周辺域への砂供給が可能となる。このように考えると、累積堆積土砂量がかなり大きくなり限り沿岸漂砂量は過去の水準に戻らないことになる。また河川からの土砂流入は間欠的に生じる洪水時に起こるが、沿岸漂砂量は個々の洪水による土砂流入に応答するのではなく、流入土砂が累積して河口デルタ全体の規模が復元することによってのみ回復が可能と考えられる。そこで長期の地形変化予測においては、上記の毎年の土砂流入量の変動を考慮するものと、平均流入量を与える計算を行い、両者に大きな差がないことを確認し、その上で長期予測においては100年間の平均値を与えて予測を行った。計算結果は26,52,100年後で比較する。またこの間、浜松篠原海岸で今後予定されている海岸保全事業(2007年から5ヵ年での離岸堤3基の建設と毎年5万m³の養浜を10年間継続)は既成事実としてモデルに取り込んだ。計算は全体で5ケース行った。

天竜川ダム再編事業に伴う流出土砂量については表-1の条件とした。ケース1は現状維持案である。ケース2～5が具体的対策案であり、その内容は表-2のようである。

表-1 流出土砂量一覧表

ケース	単位: $\times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$			
	細粒 0.1<d<0.25mm	中粒 0.25<d<0.85mm	粗粒 0.85mm<d	総量
1	6	10	1	18
2	17	17	2	35
3	22	21	2	45
4	28	22	2	51
5	29	26	2	57

※1,000m³単位は四捨五入

表-2 天竜川ダム再編事業の具体的対策案

ケース	佐久間ダム		秋葉ダム	備考
	バイパス排砂	吸引排砂※	ゲートの改造	
1	—	—	—	現状維持
2	○	○($V=10 \text{ 万 m}^3$)	×	
3	○	○($V=55 \text{ 万 m}^3$)	×	
4	○	○($V=55 \text{ 万 m}^3$)	×	
5	○	○($V=55 \text{ 万 m}^3$)	○	

※V: 吸引ボケットの容量。

流砂量は100年間の平均値であり、細粒、中粒、粗粒ごとの流出土砂量を与えている。天竜川河口ではデルタの縮小と離岸堤の設置により、沿岸漂砂の分岐点が河口右岸側の五島海岸へ移っていると考えられる。したがって、ダム再編による土砂供給を考えない場合、右岸側へ土砂供給はほとんど期待できないことになる。このため、前報では右岸側への土砂供給はないと考えた。一方、本研究は長期予測を目的とするが、長期的に河口デルタが復元すると砂は左右岸に同じ比率で分配されるはずである。したがって土砂供給量は当初から両側に全量の1/2ずつ供給されると仮定した。このようにして設定した供給土砂量を表-1に示す。また河川からの流入土砂は河口の1km区間に一様に供給されると仮定する。また表-3には計算条件を一括して示す。現状維持の計算では18万m³/yrの土砂供給となる。

ところで、浜松五島海岸の離岸堤群が大きく取り残され、汀線が河口より突出している状況から考えると、西向きの沿岸漂砂はほとんど通過できないと考えられる。また河口東側の竜洋海岸にあっては5基の離岸堤の上手側と下手側の汀線に大きな段差が付いており、下手側では堤防が露出している状況から判断して、天竜川からの供給土砂は到達しにくいと考えられる。従って上記流入土砂量は推定された値であって、流砂量のcapacityを示すことは事実であるが、実際には過大な値と考えられる。そこで対策案の検討においては、現状維持案と対策案の差をとることによって対策案の評価を行うことにした。そのほか計算に用いた各種パラメータの値は表-1に一括して示す。また、それらの意味などについては熊田ら

表-3 計算条件

計算モデル	混合粒径砂の分級過程を考慮した海浜変形モデル (熊田ら, 2003) 回折計算: 方向分散法 (酒井ら, 2003)
計算対象区域	天竜川河口～県境: 海岸線延長 30km
計算ケース	ケース 1 (細 6+中 10+粗 1=18 万 m^3/yr): 現状維持 ケース 2 (細 17+中 17+粗 2=35 万 m^3/yr) ケース 3 (細 22+中 21+粗 2=45 万 m^3/yr) ケース 4 (細 29+中 26+粗 2=57 万 m^3/yr) ケース 5 (細 6+中 10+粗 1=18 万 m^3/yr)
初期地形	2006 年再現結果
入射波条件	沖波波高 $H=1.6\text{m}$, 周期 $T=7\text{s}$ (エネルギー平均波) 波向: S 1962 年初期汀線への波の入射角 $\theta_w=20^\circ$, ($S_{\max}=25$) 離岸堤の透過率 $K_t=0.4$
潮位条件	M.S.L.=T.P. $\pm 0.0\text{m}$
計算等深線	$z=+3\text{m}\sim-9\text{m}$ ($h_c=9\text{m}\sim$ バーム高 $h_R=3\text{m}$)
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta X=100\text{m}$, 鉛直方向 $\Delta Z=1\text{m}$
計算ピッチ	$\Delta t=200\text{hr}$
粒径	<ul style="list-style-type: none"> ・粒径数 (3 成分) と平衡勾配 粒径 1: 細粒 $0.1 < d < 0.25\text{mm}$, $d_{50}=0.25\text{mm}$, $\tan\beta=1/100$ 粒径 2: 中粒 $0.25 < d < 0.85\text{mm}$, $d_{50}=0.425\text{mm}$, $\tan\beta=1/40$ 粒径 3: 粗粒 $0.85\text{mm} < d$, $d_{50}=2.0\text{mm}$, $\tan\beta=1/20$ ・交換層厚: 底面長単位幅あたり 勾配 1/100: 0.5m, 勾配 1/40: 1.25m, 勾配 1/20: 2.5m ・初期含有率: 1) 交換層 A 粒径 1: $\mu_1=0.5$, 粒径 2: $\mu_2=0.5$ 粒径 3: $\mu_3=0.0$ 2) 交換層 B (岸沖方向に分布) 粒径 1: $\mu_1=0.0\sim 1.0$, 粒径 2: $\mu_2=0.9\sim 0.0$, 粒径 3: $\mu_3=0.1\sim 0.0$
漂砂量	<ul style="list-style-type: none"> ・沿岸漂砂量係数 粒径 1: $K_x=0.0511$, 粒径 2: $K_x=0.0391$, 粒径 3: $K_x=0.0180$ ※$K_x=A/\sqrt{d_{50}}$ 係数 $A=0.0255$ ・小笹 Bampton 係数: $K_2=1.62K_x(\tan\beta=1/30)$ ・岸沖漂砂量係数: $K_2=0.15K_x$ ・重力係数: 0.2 ・安息勾配 (土砂落ち込みの限界勾配): 陸上 1/2, 水中 1/3
境界条件	<ul style="list-style-type: none"> ・自然状態: 両端部の汀線固定: 全漂砂量が推定値 (30 万 m^3/yr) と一致する係数 A を同定 ・2006 年再現計算: 右端 $q_x=0$ (土砂供給なし) 左端 漂砂量通過境界 (漂砂の流入出自由: 等深線固定) ・将来予測: 右端 沿岸方向に約 1km の範囲で天竜川ダム再編事業の 100 年平均の流出土砂量を投入 左端 漂砂量通過境界 (漂砂の流入出自由: 等深線固定)

(2003)を参照されたい。

図-2 毎年の流出土砂量と平均流出土砂量を与える場合の計算結果の比較

(2) 予測計算の結果

a) 毎年の流出土砂量と平均流出土砂量を与える方法の比較

毎年の流出土砂量を26年間にわたって粒径ごとに与えて海浜変形予測を行った場合と、流出土砂量の100年間平均値を与えた場合の海浜形状の比較を行ったのが図-2である。平均土砂量を与えて26年後の海浜形状を予測した結果と、各年の値を与えた計算結果はよく一致している。このように長期に及ぶ地形変化予測では、各年の流出土砂量を与える代わりに平均流出土砂量を与えても同一の結果となることから、以下の計算では平均値を与えて予測計算を行った。

b) 等深線形状と汀線変化

現状維持と4ケースの対策案について、河口部を中心とする等深線形状の相違と、汀線変化量の相互比較を行った。汀線変化量の比較においては、漂砂供給量が18万 m^3/yr の現状維持分を除き、ダム再編事業の結果として新たに加わる土砂量のみの効果を調べた。このため現状維持の予測結果を、各対策案の予測結果から差し引いてネットの汀線変化量を算出した。図-3(a)には現状維持の場合の等深線形状と、現状維持で18万 m^3/yr の土砂供給がある場合の、初期からの汀線変化を示す。土砂供給量が18万 m^3/yr と本来流れていた沿岸漂砂量30万 m^3/yr と比べて小さいために、河口デルタの回復は悪く、河口部等深線は急勾配を保ったまま1962年と比較して凹んだままである。それでも汀線変化で見れば河口部の約2km区間を中心として最大250m程度の汀線の回復を見込むことができる。

ケース2の総量35万 m^3/yr の土砂を供給した場合には(図-3(b))、等深線形状を見ると、従来等深線が後退することによって波の入射方向とほぼ直角となっていた河口部汀線が前進し、河口デルタの再発達が進み1962年当時の汀線位置までの回復が見られる。このときネットの汀線変化で見ると、100年後には400mまでの汀線前進が起こる。しかし河口から土砂供給を行う効果は浜松五島海岸の離岸堤までで顕著に現れ、現在侵食が著しい馬込川河口付近での汀線前進量は河口前面と比較して相対的に小さい。

ケース3の総量45万 m^3/yr の土砂を供給した場合には

図-3 等深線変化

(図-3(c)), 供給土砂量がケース2と比較して10万 m^3/yr 増加したために河口部での等深線の突出量がそれに応じて著しくなった。同様な効果は汀線変化から見ても確認できる。この場合も、河口から3km付近までの区域では著しい効果が見られるが、馬込川河口付近では効果は出ない。ケース4の総量51万 m^3/yr の土砂を供給した場合(図-3(d)), 供給土砂量がさらに増加した結果、河口部での等深線の突出量が大きくなった。汀線変化にも同様な特徴が見られる。

ケース5の総量57万 m^3/yr の土砂を供給した場合(図-3(e)), 天竜川河口右岸にあっては波の作用で長期的に運ばれうる沿岸漂砂量は30万 m^3/yr であるが、それより多い土砂が供給されると、河口付近に大量の土砂が残され

図-4 100年後までの水深変化量

ることになる。これは結果として河口デルタの発達を促進することになる。河口前面で等深線が大きく前進し、馬込川河口付近まで突出した等深線となる結果、西向きの沿岸漂砂が自然に流れるようになる。

一連の等深線と汀線の変化から、供給土砂量を増加させればいずれのケースにあっても河口デルタの復元が進むことが明らかである。ただ土砂量の急増区域は河口から離れた区域に及びにくいことも分かる。さらに図-3(e)において、河口デルタの等深線形状を詳細に調べると、汀線付近の等深線間隔と比較して沖合部の等深線間隔は相対的に広い。これは現地海岸で一般に観察される特徴であり、細粒分ほど緩い勾配で堆積するという特性を表している。

c) 水深変化量の平面分布の比較

現状維持案(ケース1)を基準とした、対策を実施した場合(ケース2～5)の100年後における水深変化量を算出し、対策の効果を平面的な水深増加量の分布として示したのが図-4である。供給土砂量を増加させればさほど河口部での堆積量は増加し、河口デルタの復元が進む。また供給土砂量の増減にかかわらず26年間で見たとき、馬込川河口以西の現在侵食が著しい場所での堆砂量は大きくなく、大部分の土砂は河口周辺部に溜まったままである。このことは、天竜川ダム再編事業に過大な期待を持つことは危険であり、長年月にわたって緩やかな海浜の復元が進むのみであることから、河口から離れた海岸にあってはダム再編事業とは別に海岸保全の手当てが必要と考えられる。

d) 各ケースの汀線変化の相互比較

各ケースの汀線前進状況を相互に比較するために、図-5には100年後の汀線変化予測の結果をまとめて示す。

図-5 100年後の汀線変化量の比較

図-6 粒径別分布：(細29+中26+粗2=57万m³/yr)

流出土砂量が大きくなればなるほど汀線前進量は大きくなり、河口部への総流入土砂量が大きいほど効果が大きいことが分かる。またいずれの場合も、流入土砂量を大きくしても、あるいは経過時間が長くなっても、汀線が顕著に前進するのは河口近傍に留まり、現況で侵食が著しい馬込川河口以西への効果の波及は大きくない。

e) 流出土砂の粒径別分布

流出土砂の粒径別分布については、水深変化量に100年後の交換層内の含有率を乗じることにより近似的に求めた。例えば図-6にはケース5の計算結果を示す。粗粒分は汀線近傍に沿って移動し、粒径が細くなるほど沖合の広い範囲に広がりながら下手方向へと運ばれており、これらは長島ら(2005)の実測値とも対応している。

3. 結 論

粒径分級を考慮した等深線変化モデルを用いて、天竜川ダム再編事業に伴う河川流出土砂量の増加が河口部地形や海浜地形に及ぼす影響と効果を予測した。計算の結果、流出土砂量が大きくなるほど河口部での堆積量は増

加し、いずれのケースにおいても河口デルタの再発達および海岸保全上効果があるという結果が得られた。このことからダム再編事業により流出土砂量を増加させることができれば、河口部でかなり規模の大きな砂の堆積が期待できることが分かった。また、いずれのケースも粗粒分は汀線付近を移動し、粒径が細くなるほど沖合の広い範囲に広がりながら下手方向へと運ばれること、更に粒径によらず土砂供給量が多いほど河口デルタの発達が良好なことが確認された。一方、流入土砂量を大きくしても、あるいは経過時間が長くなっても、土砂が堆積し、汀線が顕著に前進するのは河口周辺域に集中し、河口から離れた馬込川河口以西には効果が低いことも明らかになった。したがってダム再編事業の効果による天竜川河口部での土砂堆積および河口デルタの復元の如何にかかわらず、馬込川河口西側の海岸ではダム再編事業とは独立に海岸保全を行わなければならないことも明らかになった。

参 考 文 献

- 宇多高明・住谷勉夫・矢澤 肇・大谷靖郎・厚坂祐次(1998)：展開座標を用いた汀線変化モデルによる親沢鼻砂嘴の地形変化予測，海岸工学論文集，第45巻，pp.541-545。
- 宇多高明・石井 隆・内田光一・甲賀 肇・影山安秀・古池 鋼・石川仁憲(2006)：遠州灘海岸における長期的海浜変形予測と養浜の効果検討，海岸工学論文集，第53巻，pp.666-670。
- 宇多高明・吉添高兆・町井 靖・山本剛史・古池 鋼・芹沢真澄・石川仁憲(2007a)：粒径を考慮した等深線変化モデルによる細砂・粗砂養浜の効果検討，海岸工学論文集，第54巻，pp.641-645。
- 宇多高明・吉添高兆・横山卓司・甲賀 肇・古池 鋼・村井健太・石川仁憲(2007b)：天竜川からの供給土砂量の増加と遠州灘海岸の侵食の関係，海岸工学論文集，第54巻，pp.596-600。
- 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄(2003)：沿岸・岸沖漂砂による粒径分級を考慮した等深線変化モデル，海岸工学論文集，第50巻，pp.481-485。
- 酒井和也・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之(2003)：波の遮蔽構造物を有する海岸における3次元静的安定海浜形状の簡易予測モデル，海岸工学論文集，第50巻，pp.496-500。
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之(2002)：海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル，海岸工学論文集，第49巻，pp.496-500。
- 長島郁夫・岩崎伸昭・宇多高明・有村盾一(2005)：遠州灘海岸の天竜川河口以西の侵食実態，海岸工学論文集，第52巻，pp.596-600。
- 浜松河川国道事務所・(財)ダム技術センター(2008)：天竜川ダム再編事業技術工法検討委員会資料。