

仁淀川模型における河口砂州の崩壊と再形成に関する相似性の検討

Similitude on Flushing and Reformation of Sand Bars in Niyodo River Mouth

建設省土木研究所 福岡捷二 S.Fukuoka

〃 〇高橋 晃 A.Takahashi

1. はじめに

河口部における水理機能の解明,あるいは河口処理計画の妥当性を検討する手法としては,現地観測資料,他河川からの類推,模型実験などが現在用られている。とくに河口部は,川と海の異質な作用を受け,そこに生ずる現象は個々の河川ごとの特殊性も強く,非常に複雑であり,このような場合の水理現象を比較的容易に知り得る有力な手段として,模型実験が重要な役割を果している。

模型実験により河口部の計画について検討する場合,現地現象の再現性を確かめるための検証実験は極めて重要であり,この過程で多くの実験的工夫がなされる。とくに洪水流による河口部の河床変動に関しては,流砂に対する相似条件および模型時間縮尺がどの程度現地の砂州フラッシュを再現するか,河口砂州の形成に関しては,どのような波を模型上で与えるべきかが重要となる。このような河口部の洪水流を含む地形変化の再現については,多くの場合地形変化状況を検討しつつ実験条件に修正を加えながら,最終的に相似性の得られる実験条件が決定されている¹⁾²⁾。波による二次元汀線変化の相似に関しては,尾崎・曳田³⁾によって,侵食堆積領域の境界,および碎波帯相似パラメータと相対粒径による汀線変化との関係が得られているが,三次元現象への適用にはまだ問題が残されている。

本研究では仁淀川河口部を対象とし,従来とは若干異なる観点から,河口砂州の崩壊と再形成に関する相似性の検討を行った。すなわち,河口砂州の形成に関しては,現地底質粒径と模型縮尺から模型河床砂の粒径を決め,底質の主要な移動範囲と海浜の横断形状,砂州高などが相似となるための波浪条件を選定した。河口砂州のフラッシュに関しては,河床変動に対する相似性と模型時間縮尺について検討した。これらの検討に基づいて実施した実験手法と検証結果についての具体例を示し,その手法の妥当性を明らかにした。

2. 仁淀川河口周辺の状況と海象特性

2.1 河口周辺の状況

仁淀川は,標高1500~2000mの四国山地から高知平野西部を貫流して,土佐湾に注ぐ流域面積1560km²,幹川流路延長124kmの急流河川である。流路は山間部を蛇行し,直轄区間(河口から15.0km間)においてようやく平野が見られ,流域における平地面積はわずかに3%である。下流部河道は,図-1に示すように,単列砂礫堆と湾曲部に生ずる固定砂州が形成され,みお筋もほぼ固定された状態となっている。河床勾配は,河口から2.0km間で約1/2000,2.0~9.0km間付近が約1/1000である。

仁淀川的主要な洪水は,台風に起因するものが多く,近年では昭和50年8月の台風5号によって未曾有の大災害をもたらした。その後も昭和51年,昭和57年に約8000m³/s前後の洪水が発生している。現在改修事業は,計画高水流量を基準地点の伊野(12.2km)で12000m³/sとした工事実施基本計画により,低水および高水護岸,河床掘削等が順次

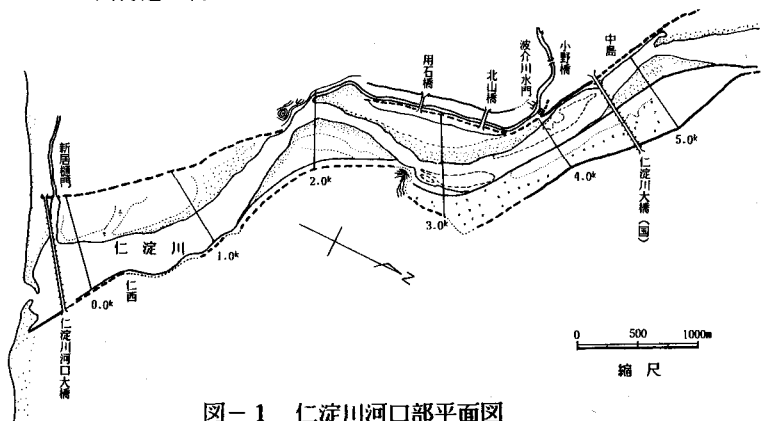


図-1 仁淀川河口部平面図

進められている。

いっぽう、河口部の砂州形状は図-2に示すように、右岸側に高い砂州が形成され、左岸方向に伸びる状況となっている。このような河口砂州の発達には、海域の漂砂の卓越方向を推定する一つの材料とすることができ、傾向としては東向きの漂砂が卓越しているものと考えられる。この河口砂州部から海側沖合い方向の海浜形状は、図-3に示すように、前浜勾配が約1/8、外浜勾配が約1/70となっており、河口周辺では汀線の後退がやや顕著である。

2.2 河道および海部の底質粒径

仁淀川下流部河道の河床材料粒径は、混合粒径分布を示し、その平均粒径は12~20mmの礫で構成されている。この河口部河道の代表平均粒径としては約17.0mm程度である。また、図-4は河口砂州および海部における平均粒径分布である。底質の粒径は、ほぼ海底の等深線と平行するように沖に向かうにつれて小さくなっている。汀線から水深7~8m付近までは礫が分布し、水深が10m付近では中砂ないし細砂が分布する。これより海床変化の大きい海部汀線付近および河口砂州部の平均粒径は、1.5~6.0mmの範囲に分布しており、河道内の粒径よりは小さく、その平均は約4.0mm程度と考えられる。

2.3 波浪特性

図-5は住吉波浪観測所（水深10.43m）における昭和54~56年の波高、周期出現率図である。観測資料によると波高0.25~1.0m、周期7~9秒の波が最も卓越し、最大の波高では6.0~6.5mの波が生じ、

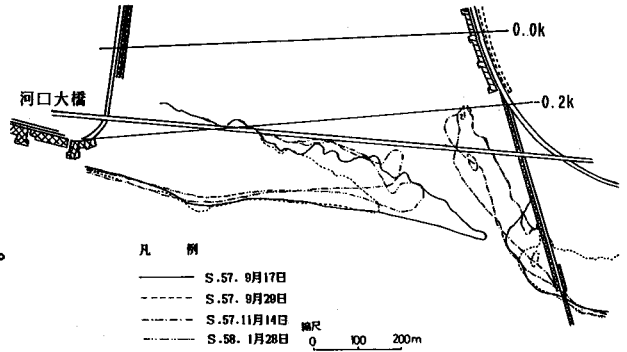


図-2 河口部砂州形状図

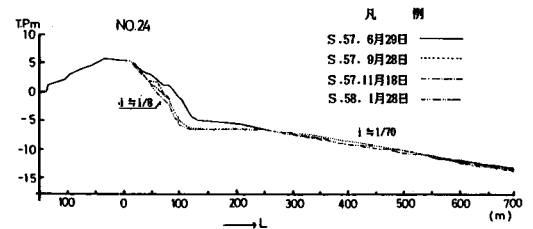
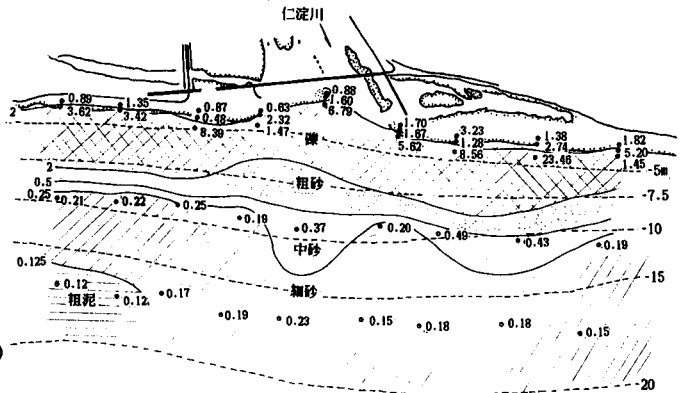


図-3 海浜横断面図



昭和58年1月調査

単位mm

図-4 底質分布図

表-1 年間の平均波、月最大波の平均および有義波高

	平均波 ($H_{1/3}$)	月最大波の平均($H_{1/10}$)		有義波($H_{1/3}$)	
		波高(m)	周期(sec)	波高(m)	周期(sec)
1979年	0.82m	4.11	9.4	3.26	9.1
1980年	0.62	3.23	9.0	2.59	9.0
1981年	0.69	3.65	9.1	2.86	8.6

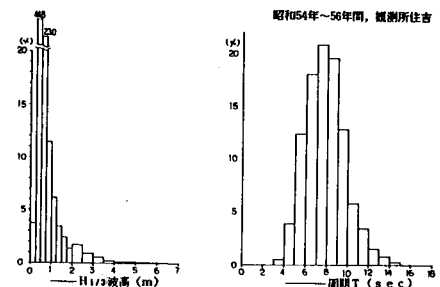


図-5 波高・周期出現率図

周期の長いものでは14～16秒の波も来襲する。これら年間の平均波、月最大波の平均値およびその有義波高を表-1に示す。また、波向の発生頻度は、いずれの波高においてもSおよびSSW方向が圧倒的に多い。

3. 模型縮尺と相似性の検討

3.1 模型の概要

模型は現地の底質粒径および実験施設、造波装置の能力等より総合的に判断して縮尺 $1/80$ ($x_r = h_r = 80$)とした。模型対象範囲は、河道部と海浜部とにより構成され、河道部3.2km、海浜部沖合1.6km、汀線方向は2.8km (うち河口幅を含む造波可能海浜部幅約2.0km)である。実験に用いた河床砂の平均粒径は $d_m = 0.18\text{mm}$, $\sqrt{d_{84}/d_{16}} = 1.4$, 沈降速度 $w_0 = 2.3\text{cm}$ を選定した。なお、海浜部の整形においては、T.P-15mまで現地と相似に整形し、約 $1/30$ の勾配で平面水槽床版 (T.P-28.8m) にすりつけられている。

河川流量は、河道部上流端に設けられた量水槽に高水槽から送水することにより供給され、また潮位は、河口と対面する側壁に設けられた潮位調節用ゲートおよび平面水槽用給水管からの補給により調整されている。波浪実験に使用される造波装置は、幅8mの造波板を有するベンジラム形式の可動型平面造波機であって、この実験では3基連結して用いられる。

3.2 洪水による河床変動、砂州フラッシュに関する相似性

移動床模型では、現地の河床砂の粒径が小さい場合、その河床材料の入手が困難であるだけでなく、粒径が微細となるため、水の粘性の影響を受け、現象の相似を得ることが難しい。このような場合には河床形態、流砂量、流砂形態などのうち、最も重要となるものだけでも相似となるように模型の河床材料を選定する。これらのうち流砂量に関しては、河床変動が相似となるように時間縮尺を変えることによって調整することができる。残りの河床形態と流砂形態のうち、河床形態を重視する場合には、現地と模型における無次元掃流力 τ_* を一致させ、流砂形態を重視する場合には、現地と模型における摩擦速度と河床砂の沈降速度との比 u_* / w_0 を一致させることがそれぞれ重要な条件となると考えられる。よって、無次元掃流力 τ_* および摩擦速度と河床砂の沈降速度の比 u_* / w_0 の現地と模型の比は、現地河道部の平均粒径を17mm、河口砂州部付近を4.0mmとすると

$$\tau_{*r} = u_{*r}^2 / (\rho_s / \rho - 1) \cdot g_r \cdot d_r = h_r^2 / s_r \cdot g_r \cdot d_r \cdot x_r = 0.85 \text{ (河道部)} \sim 3.6 \text{ (河口砂州部)}$$

$$(u_* / w_0)_r = h_r / x_r^{1/2} \cdot w_{0r} = 0.46 \text{ (河道部)} \sim 0.95 \text{ (河口砂州部)}$$

ここに $u_{*r} = \sqrt{g_r \cdot h_r \cdot I_r} = h_r / \sqrt{x_r}$, $s_r = (\rho_s / \rho - 1)$ である。これより $\tau_{*r} = 1$ となるためには $h_r = s_r \cdot d_r$ という条件が必要となる。このため流砂の移動に関する無次元掃流力は、河口砂州部では模型の方が小さい。しかし、河口砂州部の u_* / w_0 は現地と模型とではほぼ一致しており、砂州フラッシュ時の河口から出た土砂の堆積に関する相似性は得られると考えられる。

いっぽう、模型と実河道における河床変動量が相似となるためには、河床変動の連続式から求まる時間縮尺で洪水を流す必要がある。このとき流砂量の多い場合には、 τ_* の違いは時間縮尺の中にある程度くりこんだ形で解決しうる。ここで無次元流砂量が現地と模型で近似的に一致すると考えた場合、フルードの時間縮尺と同一となり、 $t_{or} = h_r^{1/2} = 8.9$ となる。また、河口砂州部の河床変動に対する時間縮尺を全流砂量を対象としたBrown式から求めると $t_{or} = 2.6$ である。したがって、時間縮尺は、両者の範囲で検証実験を行い、その相似性を検討することによって妥当な時間縮尺を求めることにした。

3.3 河口砂州の形成に関する相似性

河口砂州部の波による底質の主要な移動範囲と海浜形状等が現地と相似となるための波浪条件について検討を行った。まず、図-3の海浜形状図および河口砂州の変動状況より、砂の移動している範囲の砂州高をT.P4.0mとした。これより前浜勾配を $1/8$ とし、その変化点 (水深T.P-6.0m) で碎波し、T.P4.0mまで打ち上げる波浪条件を選定した。なお、潮位は平均潮位とし、打ち上げ高はSavilleの仮想勾配法により、碎波条件は合田による波形勾配と碎波水深との関係から波高と周期を求めた。このときの波浪条件は、沖波波高 $H_0 = 3.4\text{m}$, 周期 $T = 13.3\text{sec}$, 波形勾配 $H_0 / L_0 = 0.012$ が得られ、先に述べた年間の月最大波の平均値に

近い結果となる。また、砂州部の現地平均粒径4.0mmを用い、この波浪条件に対して、Swartの式により侵食型の海浜変形の顕著でなくなる深さを求めると約6.3mとなる。

いっぽう、この現地波浪条件より模型縮尺を1/80、模型河床砂の平均粒径0.18mmを用いたときの模型における砂の打ち上げ高、および前浜勾配がどの程度になるかその概略を求めた。最終的に平衡となる砂州高 H_R は、これまでに得られている研究成果⁴⁾より現地換算の砂州高を求めると約T.P4.0m～T.P6.0mの範囲となる。前浜勾配も実験資料⁵⁾によれば約1/6～1/7となり、現地より若干急勾配になると予想される。また、模型での海浜変形に対する限界水深は、現地換算で約7.9mとなり、移動範囲は模型の方が大きい傾向となる。しかし、現地底質粒径は沖に向かって小さくなることなどからほぼ相似性は得られるものと考えられる。なお、海床変化の相似性は H_0/L_0 とともに $\sqrt{gH_0}/w_0$ を現地と模型で一致させることが望ましいとされている。この関係は、 $(\sqrt{gH_0}/w_0)_r=0.95$ となり、概略一致する。

以上の検討より、ここでは沖波波高 $H_0=3.4$ mに対する波形勾配の変化についての検証実験を行い、河口砂州形成の相似性を検討することにした。

4. 洪水流による河床変動検証実験

実験は図-6に示す昭和57年9月洪水($Q_p \approx 8000 \text{ m}^3/\text{s}$)を通水して、洪水後の現地の河床変動結果に適合する時間縮尺を決定する。また、砂州開口幅と砂州上流の水位観測所(仁西約0.3km左岸)の資料との相似性の検討を行った。時間縮尺は、フルード則による $t_{er}=8.9$ 、Brown式より砂州部の河床変化に対して求めた $t_{er}=2.6$ 、および前2ケースの結果から判断した $t_{er}=5.0$ の3ケースについて実施した。この実験結果の水位変動状況は、図-7に示すように実績値と比較すると流量増加時には、実験では実績より急に立ち上がる。これは流量の増加に砂州部開口河積の拡大が追いつかないためである。その後砂州フラッシュの進行によって、水位は一旦下降傾向となり再び上昇する。なお、 $t_{er}=5.0$ のケースの初期水位が高いのは、砂州開口部河床高が他のケースのT.P-5.0mに対し、T.P-2.5mとしたためである。実績値のピーク水位は、流量ピーク時に生ずるのに対し、 $t_{er}=8.9$ のケースでは流量ピーク以前に水位ピークとなり、相似性はよくない。また、 $t_{er}=2.6$ 、および $t_{er}=5.0$ ではほぼ流量ピーク時に水位ピークとなるものの、実験値の水位はいずれも高い傾向となっている。これは河道内において河床抵抗に大きく関係する小規模河床波が卓越することが原因している。しかし、河口砂州部付近ではフラッシュ時の掃流力が大きいことにより、河床抵抗は小さく、現地粗度係数とほぼ一致することが確かめられ、流量ピーク時に水位がピークとなっていれば、砂州フラッシュ状況は再現されていると考えられる。

いっぽう、河床変動状況は、各断面とも現地洪水前後であまり大きな変化は見られず、模型においても河口砂州部や水衝部を除けばその変動は少なかった。しかし、通水時間の長い $t_{er}=2.6$ のケースでは、堆積傾向部分および水衝部の洗掘が過大となり、 $t_{er}=8.9$ では反対に若干少なく、図-8に示すように $t_{er}=5.0$ がほぼ相似となる結果が得られた。河口砂州部の開口形状は、図-9のように通水時間の長い t_{er}

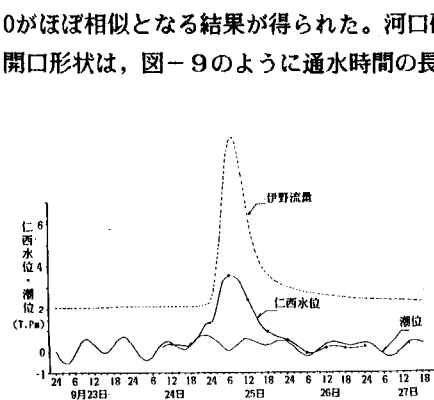


図-6 S57年9月洪水ハイドログラフ

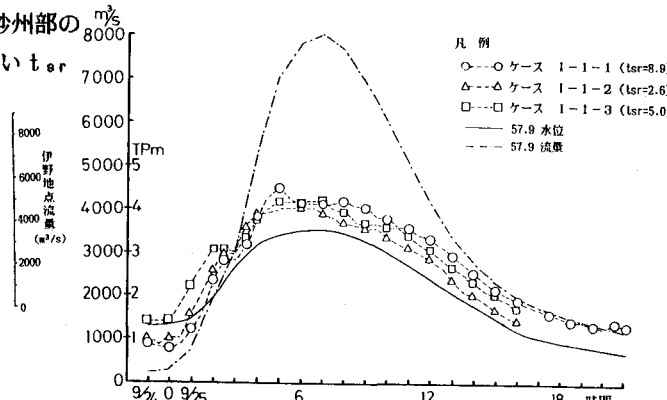


図-7 水位時間変化図

=2.6がやや開口幅が広い。しかし、いずれも上流の右岸高水敷延長線上近くまでフラッシュされている。海部沖合いの堆積形状は、砂州フラッシュ直後の現地資料が得られておらず、昭和57年11月の地形によると、沖合約450m付近まで舌状に堆積している。これに対し、 $t_{er}=8.9$ の実験では沖合いの堆積領域が少なく、反対に $t_{er}=2.6$ で過大であり、 $t_{sr}=5.0$ がほぼ相似となっているものと判断される。

以上の結果より、水位変化も含め、河床変動および河口砂州フラッシュ状況が相似となる時間縮尺は $t_{er}=5.0$ がほぼ妥当な値と判断し、計画案実験等に採用して検討を行う方針とした。

5. 河口砂州形成に関する検証実験

現地の海浜形状から選定した沖波波高 $H_0=3.4m$ を用い、波形勾配の変化による河口砂州形成の相似性について実験を行った。このときの初期海床形状は、洪水流検証実験結果より相似性の得られた河口砂州フラッシュ後の形状である。河川流量は平水流量を与えるべきであるが、河口部の下層には海水が侵入し、表層流速が大きくなることを想定して豊水流量を与え、潮位は遡望平均満潮位T.P0.77m一定とした。図-10は現地の卓越波向S方向での波形勾配 H_0/L_0 の違いによる河口砂州形状比較図である。河口砂州は、右岸側から河口大橋にほぼ平行に発達し、いずれのケースも現地形状とほぼ相似となる結果が得られる。また、このとき波による底質の移動が顕著な範囲は、約T.P-6.0mより浅い所であり、海浜変形はこの外浜および前浜領域で生じている。とくに砂州は、河口近傍のフラッシュ土砂および右岸側の汀線後退による土砂の供給で発達、形成する。なお、この河口砂州がほぼ安定形状となる実験時間は約20時間を要した。

各波形勾配と前浜勾配および砂州打ち上げ高とその関係は、それぞれ図-11、12に示すとおりである。前浜勾配は、既存の砂州および新たに形成された砂州前面の勾配の平

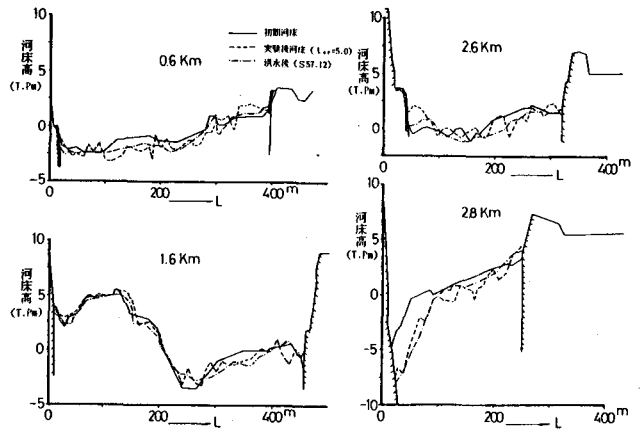


図-8 河床変動横断比較図

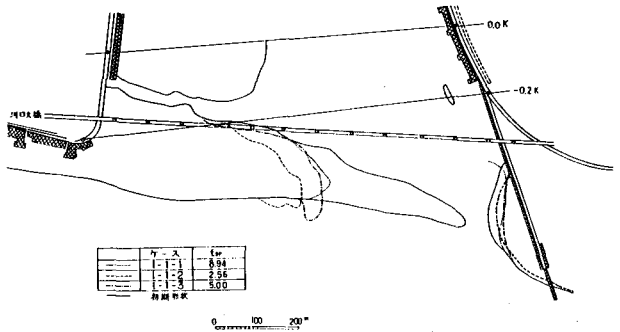


図-9 河口砂州形状比較図

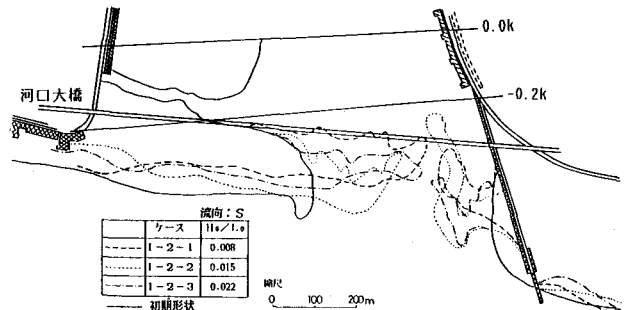


図-10 河口砂州形状比較図

均値を用いた。これによると前浜勾配の違いによる顕著な傾向はあまり見られないものの、 H_0/L_0 の増加に伴って若干急となる。しかし、その勾配は約 $1/5 \sim 1/6$ の範囲であり、現地よりやや急勾配となる結果であった。いっぽう、砂州高は波形勾配が増すと小さくなる傾向となり、現地砂州高にほぼ相似となる波形勾配は約 0.015 付近と考えられる。したがって、砂州高および左岸側砂州形状等も含め、比較的相似性の得られる波形勾配 H_0/L_0 は約 0.015 がほぼ妥当と考えられた。なお、図-13は現地の砂州フラッシュ後に形成された砂州形状との比較図である。洪水4日後の砂州形状は模型の約10時間後の形状とほぼ同じであり、これはフルードの時間縮尺と同程度となっている。

6. まとめ

仁淀川河口部を対象とし、模型の底質に砂を用いた場合の河口砂州のフラッシュ、および河口砂州の形成について、現地と模型の相似性に関する検討を行った。本研究では従来とは異なった観点から、河口砂州の形成に関する波浪条件を選定した。これに基づいた相似性と砂州形成過程を模型上で検討し、その実験手法が妥当であることを示した。

参考文献

- 1) 関川河口模型実験報告書：土木研究所資料第2055号，S59.
- 2) 加藤一正：移動床模型による河口周辺の地形変化の再現，第1回河川・海岸シンポジウム，土木学会，PP.68-78, 1986.
- 3) 尾崎晃・曳田信一：波による二次元汀線変化の相似に関する実験的研究(続)，第24回海講論文集，PP.167-169, 1977.
- 4) 吉川秀夫：流砂の水理学，丸善株式会社，PP.409, 1985.
- 5) 山本晃一：河口処理論 [I]，土木研究所資料第1394号，S53.

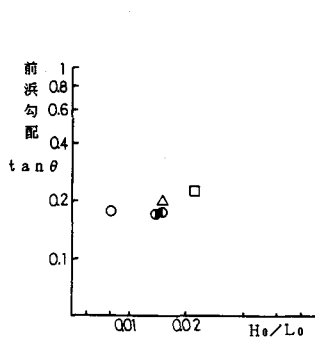


図-11 前浜勾配と波形勾配

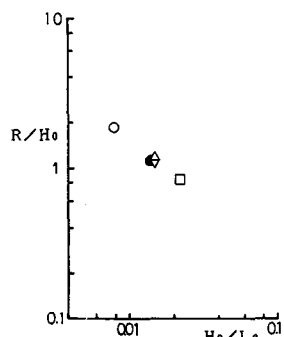


図-12 打上げ高と波形勾配

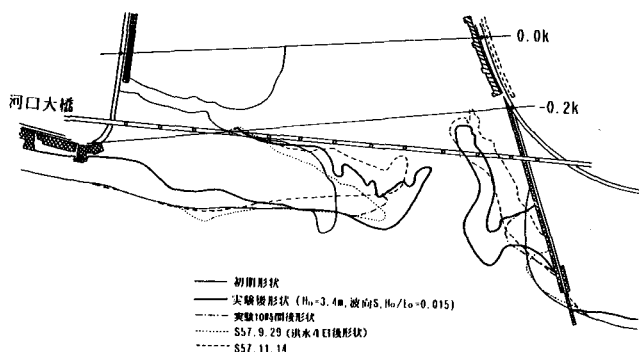


図-13 河口砂州の現地と模型の形状の比較