

伏木富山港人工海浜の海浜変化予測 (1)

——海浜変形の相似則、とくに底質の選定——

木本 照智*・浅地 数馬**・永松 宏一***・海原 敏明****

1. はじめに

移動床実験では、適確な相似則が確立されていないために、実験底質の粒径を決定することは困難である。現地が砂浜海岸で漂砂の動態がわかっておれば、海浜変形の再現実験が可能である。ところが、新たに現地の底質と異なる砂を投入して砂浜を造成する伏木富山港の人工海浜(図-1 参照)の場合には、再現する事象がないために、既往の相似則に関する研究成果を活用して現地の底質(砂)粒径に対応する実験の底質粒径を決定する必要がある。

本研究は、再現事象の得られない場合の移動床実験の方法を確立するための第一歩として、底質粒径の選定に対する方法を提案すること、および模型縮尺の異なる二次元および三次元海浜変形予測実験結果をもとに、冬期風浪の作用に対して安定な人工海浜の条件を見出すことを目的とする。

2. 底質粒径の選定

海浜変形を調べる手段として、移動床実験による方法が用いられてきた。しかしながら、海浜変形の模型実験には、縮尺効果が介入するため、フルードの相似則に従って底質粒径を縮尺すると、現地と模型とで海浜変形が相似にならないことが、Saville (1957) や岩垣ら (1961)

によって古くから指摘されている。現地の漂砂の動態がわかれば、模型の海浜変形を現地と相似にするように、底質や波の諸元を試行的に変化させたり、場合によっては模型の縮尺に幾何学的な歪を与えるなどして、海浜変形の再現が試みられてきた。ところが、突堤群と人工リーフによって構成される本人工海浜の海浜形成過程においては、波の屈折および回折、さらにはリーフによる波高減殺などの波浪の変形過程が重要になるので、歪模型を用いることはできない。したがって、海底地形、構造物諸元および波特性に対しては、フルードの相似則を適用し、種々提案されている海浜変形の相似則から、海浜変形を相似にするための底質粒径を決定する必要がある。

従来の研究を基礎にして、現地の海浜変形と相似にするための実験の底質粒径を決定する場合、つぎの3つの要素を考慮する必要があると考えられる。①海浜断面形状、汀線の移動および底質の移動限界水深が個別に評価された研究でなく、これらが総合的に評価された研究を対象とする必要がある。とくに、海浜断面形状を相似にすれば、汀線の移動および底質の移動限界水深も相似になるものと解釈される。②現地あるいは実験データだけを用いるのではなく、両者が考慮された研究を対象とする必要がある。③現地データと実験データの両者が考慮されているだけでなく、現地と実験データとの差異、すなわち縮尺効果が考慮された研究を選ぶ必要がある。

本研究では、海浜変形の相似則として、これら3つの要素が満足されていると考えられる Dean (1991) および土屋・伊藤 (1981) の研究に着目する。Dean は平衡海浜断面形状を表す次式を示している。

$$h = Ay^{2/3} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 h は水深、 y は汀線からの沖方向距離、および A は平衡海浜断面形状の係数で、図-2 によって推定される値である。

河田ら (1992) は、軽量骨材として石炭粉のような砂に近い性質を持つ材料は、模型の底質としてある程度適用できるが、軽量骨材の種類によっては、底質の移動形態が砂と大きく異なることを示している。本研究では、漂砂移動および底質同士の摩擦関係を現地と相似とする

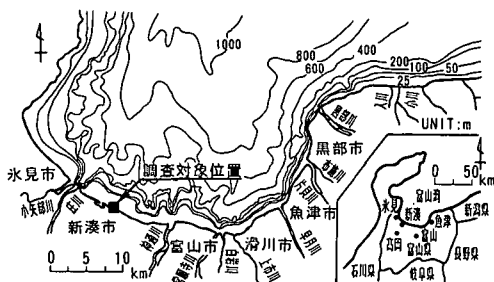
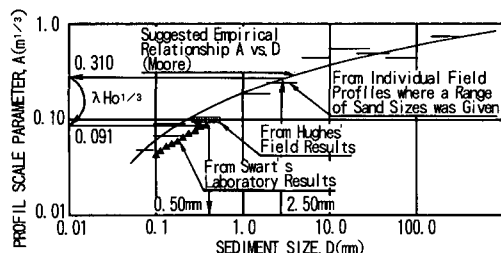


図-1 伏木富山港海岸の位置図

* 正会員 工修 (財)沿岸開発技術研究センター 調査研究部
 ** 富山県 土木部 港湾課
 *** 正会員 工修 (株)エコー 横浜事務所 技術課
 **** (株)エコー 横浜事務所 技術課



図—2 平衡海浜断面形状の係数Aの算定法

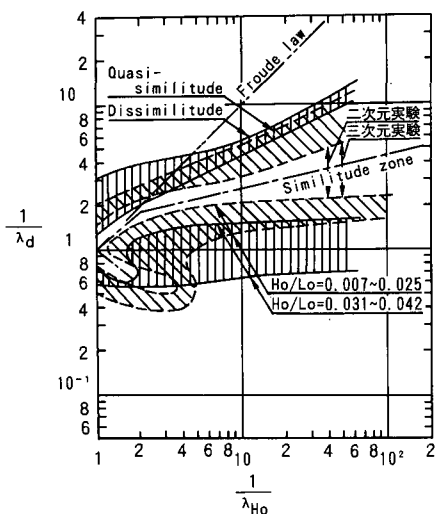
ように、底質として砂を用いる。

本研究では、前述した縮尺効果を考慮して、つぎのように底質粒径を求める。すなわち、現地で用いる養浜砂の粒径 2.5 mm に相当する平衡海浜断面形状の係数 A を現地曲線から求め、これを模型縮尺 λH_0 に従ってフルード相似則で縮尺し、縮尺効果を考慮して実験曲線から模型の底質粒径を求める。本実験の研究における二次元および三次元実験の模型縮尺は、それぞれ 1/40、1/50 であるが、二次元実験では図—2 に示すように、底質粒径 0.50 mm が求められる。

一方、土屋・伊藤は、波や海底地形の諸量にフルード相似則を適用し、漂砂現象における縮尺効果を底質(砂)特性で表現することとして、海浜変形の相似則を図—3 のように表示している。これは、海浜変形の相似領域、擬相似領域および非相似領域として区分されており、相似則が成立する領域の中央値は、模型縮尺の逆数 $1/\lambda H_0$ が 2.2 以上の場合には、次式で与えられる。

$$1/\lambda d = 1.7 \cdot (1/\lambda H_0)^{0.2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 λd は模型と現地との底質粒径比である。



図—3 縮尺効果を考慮した相似領域の表示（伊藤ら、1985）

図—3 から、相似則が成立する領域を考慮すれば、二次元実験における底質粒径は 0.50~1.0 mm となり、Dean の研究から求めた粒径とほぼ同一となることが示される。また、海浜変形の相似則の実験データは、二次元実験結果にもとづくものであるが、三次元実験にも同じ相似則を適用する。したがって、本研究では、実験砂の粒径を表—1 のように決定した。

表—1 実験砂の粒径

実験種類	模型縮尺 λH_0	相似則から求めた粒径		実験砂の粒径
		Dean	土屋・伊藤	
二次元	1/40	0.50 mm	0.50~1.00 mm	0.50 mm
三次元	1/50	0.40 mm	0.45~1.00 mm	0.43 mm

3. 実験条件および方法

本研究では、まず二次元実験で海浜断面の安定性を確認したあと、三次元実験を行って、最終的に安定な人工海浜の条件を見出すことにする。さらに、それぞれの実験では、固定床模型を用いて砂の安定に必要な境界条件を見出したうえで、移動床模型によって検討する。

（１）二次元実験

長さ 50.0 m、幅 1.0 m、高さ 1.3 m の二次元造波水路を用い、模型縮尺 1/40（無歪）として実験を行った。実験では、まず海底地形をモルタル固定床で作り、波高および水位の測定を行い、人工リーフの水理特性を調べた。つぎに、粒径 $d_{50}=0.50$ mm の砂を用いた海浜断面を水槽に作り、海浜断面の変化を調べた。

作用させた波浪は不規則波および規則波である。不規則波は富山湾で発生する寄り廻り波とし、年 2 回程度発生する波浪諸元（沖波波高 $H_0=3.50$ m、周期 $T_0=12.0$ s）として、現地観測記録波形をもとに実験室で再現した。規則波は、寄り廻り波と同一の波浪諸元およびエネルギーフラックスが不規則波と同じになる次式に示す条件（加藤ら、1985）を適用した。

$$H_{irreg}=1.34 H_{reg} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 H_{irreg} は不規則波の波高を、 H_{reg} は規則波の波高を示す。式（3）より、沖波波高 $H_0=2.6$ m となる。なお、いずれの波浪条件でも潮位を H.W.L.=D.L.+0.5 m とし、海浜断面の変化を調べる実験では、平衡海浜断面が得られるように、10~20 時間にわたって波を作用させた。実験断面は人工リーフを設置した海浜とこれを設置しない自然海浜との 2 つであり、リーフの有無による海浜安定化効果を比較することにした。

（２）三次元実験

長さ 40.0 m、幅 30.0 m、高さ 1.2 m の三次元造波水槽

に、安定海浜を形成させるための境界条件として必要な海岸施設構造物を模型縮尺 1/50 (無歪) で水槽に設置した。まず海底地形をモルタル固定床で作製し、波高および海浜流の平面分布を詳細に測定して、人工リーフの平面配置を決定した。そして、養浜砂に対応する粒径 $d_{50} = 0.43 \text{ mm}$ および現状の砂に対応する $d_{50} = 0.18 \text{ mm}$ の砂を海岸施設構造物の沖側に用いた海浜地形を水槽に作り、作用する波浪による海浜地形および汀線の変化を調べた。作用させた波浪は不規則波であり、二次元実験と同じ諸元の寄り廻り波および修正 Bretschneider・光易型のスペクトルを有する通常時化程度の波浪 (沖波波高 $H_0 = 1.75 \text{ m}$, 周期 $T_0 = 8.0 \text{ s}$) の2条件とし、いずれの条件でも波向を NNE, 潮位を H.W.L. とした。また、海浜形成過程を調べる実験では、それぞれ 10 時間波を作用させた。

4. 海浜安定化工法の効果

対象海域では、富山湾特有の寄り廻り波が発生する。寄り廻り波は、日本海北部で発生した風波が伝播して、うねりとして富山湾に侵入し、さらに富山湾の複雑な海底地形により局所的に高い波となって来襲する現象と考えられている。寄り廻り波発生時の気象パターンは、顕著な冬型 (西高東低型) の気圧配置である。そして、日本海を通過した低気圧が北海道東方海上で発達・停滞した時、間宮海峡から北海道西方海上にかけて気圧傾度が大きくなって北～北東の強風が連吹し、この風により発生した風波がうねりとなって日本海を南下し、富山湾に侵入してくるものと考えられている。したがって、波向は NNE (能登半島と佐渡島の間の方向) であり、周期は比較的長くなる。

このような富山湾の波浪特性や $d_{50} = 0.20 \text{ mm}$ 程度の砂浜に、侵食対策としての離岸堤群が存在する伏木富山港海岸の現状を考慮すると、冬期風浪の作用に対する安定海浜の造成を考える必要がある。そのため、4基の突堤群と人工リーフによって海浜を構成し (図-7 参照)、現状よりも大きな粒径 2.5 mm の養浜砂によって新たに砂浜を造ることを計画した。

(1) 人工リーフによる波浪制御 (二次元実験)

人工リーフの有無による波高伝達率 K_t および平均水位と沖波波高比 $\bar{\eta}/H_0$ を図-4 に示す。作用させた波浪は、図-5 に示す波群を有する寄り廻り波であり、造波機前面の一樣水深部で測定した波形記録である。

寄り廻り波は、大きな波が数波連ら成るのが特徴であるが、人工リーフを設置することによって波浪制御効果が現れ、リーフ岸端に向って、有効に消波されることがわかる。水位の上昇量は、リーフ岸端で沖波波高の 5% 程度であり、比較的周期の長い寄り廻り波の作用に対し

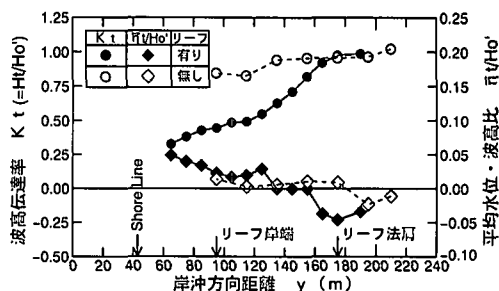


図-4 寄り廻り波の作用による波高・水位分布

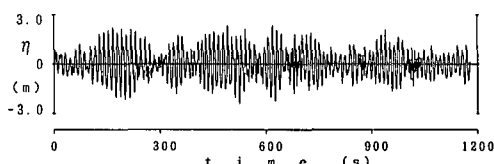


図-5 実験で再現した寄り廻り波の波形記録

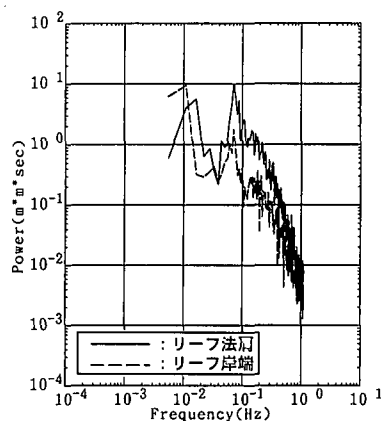


図-6 リーフ法肩および岸端における波のパワースペクトル

でも、リーフの効果が確認された。ただし、図-6 のパワースペクトルに示すように、リーフ岸端では有義波周期に相当する 0.08 Hz 付近のエネルギーは消去されるが、 0.01 Hz 付近の長周期波に対する波浪制御は困難なため、海浜変形実験で、海浜安定に対するリーフの効果を再検討する。

(2) 人工海浜の波高、海浜流 (三次元実験)

図-7 には、4基の突堤群および人工リーフによって構成される2つの砂浜に、寄り廻り波を作用させたときの波高および海浜流の平面分布を示す。海浜流は、電磁流速計によって測定した水深方向に底層の平均流であり、波高分布を等波高線で示している。

波の質量輸送によって、表層から海浜内へと流入した

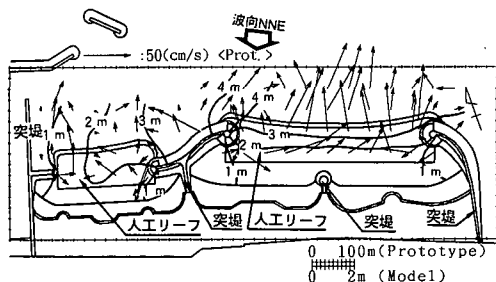


図-7 波高および海浜流の平面分布

水が、底層流となって沖側に流出すると、砂が沖に運ばれることになるため、人工リーフ岸端の沖向き流速を減少させる工夫が必要になる。このため、東側海浜のリーフは凹型形状として突堤と自然にすりつけ、さらに突堤の堤頭部に沿う局所的な流速増大を避けるように、リーフを突堤方向に緩やかな勾配をつけた。このリーフ配置により、流れはあまり集中することなく、波高も平面的にほぼ均一にすることができた。西側海浜では、沖側の小規模な防波堤による回折波のため、西側に向って波高が減少し、これに伴って沿岸流が生じ、西側の突堤の先端から沖向きの流れが発生する。この流れによって砂の沖方向への流出が予想されるので、リーフの隅角部は自然になじませるように円弧型にし、リーフを突堤方向に緩やかな勾配をつけることで、沖向き流速をある程度制御することができた。なお、流況から西向きの漂砂が考えられるため、海浜変形実験での初期汀線形状をあらかじめ突堤方向に前進させた。

5. 海浜変形予測実験結果

(1) 波浪特性による海浜断面の比較 (二次元実験)

底質粒径を選定する際に用いた研究の実験データは、規則波実験によるものである。したがって、不規則波と規則波を作用させた場合の断面変化の差異を調べ、不規則波の作用による研究成果の適用性を把握する必要がある。図-8には、2種類の規則波と不規則波を作用させたときの海浜断面の変化を示す。地形変化速度などの海浜形成過程については、波浪特性による相違が生じたが、平衡海浜断面形状は、細部を除けば比較的良好に対応しているといえる。このことから、不規則波の作用に対しても、海浜変形の相似則は適用可能と考えられる。

(2) 人工リーフによる海浜断面の変化 (二次元実験)

図-9には、人工リーフを用いた断面に、寄り廻り波を作用させた場合の海浜断面の変化を示す。海浜断面は、砕波により打ち上げられた漂砂が堆積してバームを形成し、波作用時間の増加とともに、平衡断面形状に近づく。この断面変化は、図-8に示すリーフの無い断面と相似

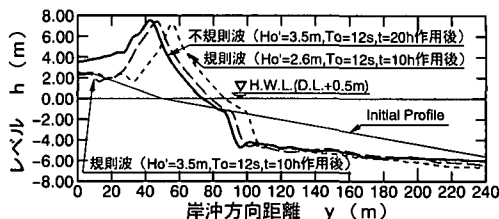


図-8 規則波と不規則波の作用による海浜断面の形成

形であるが、当然リーフの無い断面の方が地形変化の範囲および量が大きく、両者の底質の移動限界水深の相違に依存している。このことから、砂の沖方向への流出を防止するには、リーフの設置が効果的であることがわかった。長周期波の存在による海浜形成への悪影響も懸念されたが、現状よりも大きな粒径とすることによって海浜の安定性が確保されることがわかり、バームの形成が越波をも防ぐことから、背後地の防災上の安全性も確保された。

(3) 突堤群と人工リーフによる海浜の形成 (三次元実験)

計画初期の海浜断面に、通常時化程度の波浪および寄り廻り波を作用させた後の地形変化の平面分布および最終汀線形状を図-10に示す。汀線の変状はなく、初期汀線形状をほぼ維持しており、前浜に漂砂が堆積してバームを形成する海浜断面の変化である。また、沖向きの流れによる砂の流出も生じていない。すなわち、冬期風浪の作用に対して、4基の突堤群と人工リーフによって海浜の変形を抑止し、かつ砂の流出を防ぐ安定な海浜が得られた。

6. 実験結果の適用性の検討

Deanによる式(1)を用いて、 A の値を0.05~0.15の範囲で3段階に変化させて海浜断面形状を計算した結果と、自然海浜に寄り廻り波を作用させた二次元実験より得られた平衡海浜断面形状との比較を図-11に示す。なお、図中の値はすべて模型における値で示してある。

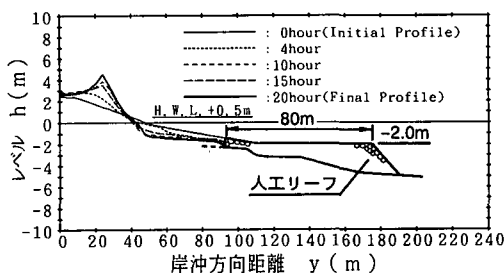


図-9 人工リーフの有無による海浜断面変化の比較

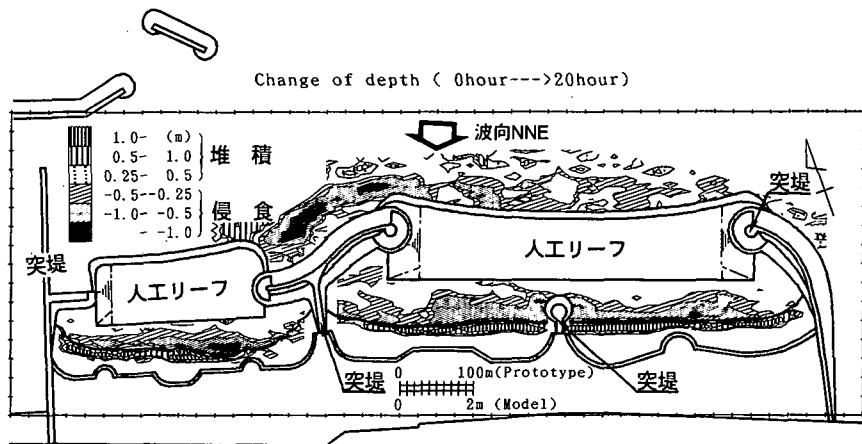


図-10 突堤群と人工リーフによる海浜の形成

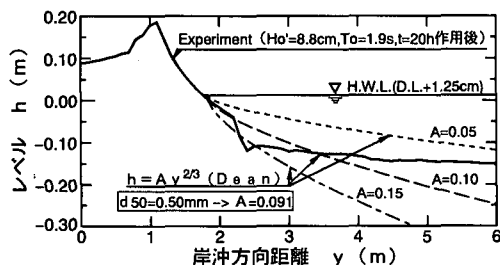


図-11 平衡海浜断面の計算値と実験値の比較

実験砂の粒径に対応する平衡海浜断面形状の係数は $A=0.091$ であり、実験値と計算値とは比較的よく一致している。いいかえれば、現地で 2.5 mm の砂で養浜した場合に、実験から得られた海浜断面形状が現地でも同じに得られる可能性を示している。三次元実験での人工リーフ背後の海浜断面の変化は、模型縮尺および実験砂の粒径が異なる二次元実験と同じであったことから、三次元実験に対する適用性が確認され、本研究で提案した底質粒径の選定法の妥当性が示されたといえよう。

7. あとがき

人工海浜のように、海浜変形の再現現象が得られない場合の移動床実験の方法を確立するために、縮尺効果を考慮して、底質粒径の選定の方法を提案し、海浜変形の

予測実験にもとづく安定な人工海浜の施設配置を検討した。これらは、実験データによる結果であり、現地でのデータが考慮されていない。したがって、現地観測結果との比較については、続報として発表する予定である。

なお、伏木富山港海岸は、「ビーチ利用促進モデル地区制度」に指定された人工海浜であり、本研究を進めるにあたっては、土屋義人京都大学名誉教授を委員長とする人工海浜整備検討委員会において、貴重な御指導、御助言を賜った。ここに、委員各位をはじめ、関係諸機関に感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 伊藤政博・土屋義人 (1985): 二次元海浜変形の相似則について, 土木学会論文集, 第 357 号, pp. 177-186.
- 岩垣雄一・野田英明 (1961): 海浜変形に及ぼす scall effect の研究, 京都大学防災研究所年報, 第 14 号, pp. 210-220.
- 加藤一正・近藤隆道・入江 功 (1985): 浚渫底泥を覆砂して造成する人工干潟の安定性に関する二次元実験, 港湾技研資料, No. 527, pp. 24-25.
- 河田恵昭・西根秀平・内海泰幸・井上雅夫 (1992): 海浜断面の領域区分と相似則, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 326-330.
- 土屋義人・伊藤政博 (1981): 海浜変形の相似則に関する実験的研究, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 315-319.
- Dean, R. G. (1991): Equilibrium beach profiles: Characteristics and applications, J. Coastal Research, 7(1), pp. 53-84.
- Saville, T. Jr. (1957): Scale effects in two dimensional beach studies, Proc. 7th General Meeting, I.A.H.R., pp. A3. 1-8.