

須磨海岸の漂砂に関する模型実験

佐藤 昭二*・入江 功**

1. 緒 言

漂砂に関する模型実験のための相似法則がまだ明らかにされていない現在では、現地と模型ができるだけ相似となるように底質の比重、粒径や波の特性を試行的に選択して実験を行なう方法が通常とられている^{1)~5)}。著者らは、底質として砂を用いた場合の模型実験を、鹿島港、その他^{6),7)}の港をモデルとして行ない、模型再現性についても検討を加えてきたが、ここでは、それらの経験も加味して、近年浸食されつつある須磨海岸の漂砂に関する模型実験を行なったので、その結果を報告する。まず、試行的に実験条件を定め、それらの条件の下での漂砂に関する模型再現性を、深淺測量、蛍光砂調査に関する現地資料と、それらの模型水槽内での測定結果とを直接比較して調べた。次に、須磨海岸を積極的に利用するため養浜工が施工された場合、時化の波に対して養浜された浜をもっとも効果的に維持する工法について、比較実験により検討を加えた。

2. 実験装置と方法

実験には、運輸省港湾技術研究所内の縦 30 m、横 50 m、深さ 80 cm の漂砂実験用平面水槽を用いた。図-1

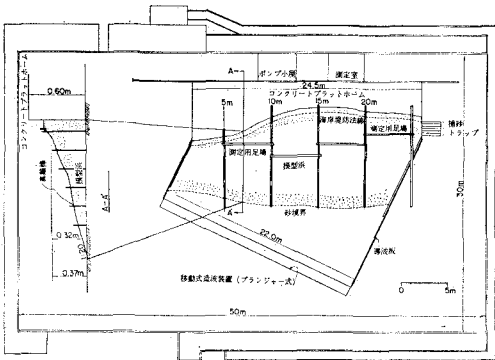


図-1 実験施設

に示すように、水槽の中に平均粒径 0.22 mm の実験砂を敷きならして模型浜をつくり、15馬力の移動式プランジャー型造波装置により波を作用させた。実験および測

定方法の詳細については、文献⁸⁾を参照されたい。

3. 実験条件の決定

模型の幾何学的縮尺や波の諸元を試行的実験により定めるわけであるが、漂砂現象を支配する要素は非常に多いので、これらすべての要素について実験を行なうことは、通常困難である。

ここでは、波の周期以外のすべての要素をできるだけ模型再現性をよくするように定めておき、最後に試行的実験を行なって模型再現性をもっともよくする周期を求めることにした。以下、これについて述べる。

模型縮尺

実験には図-2 の点線で囲まれた範囲を対象としたので、模型水槽の大きさを考慮して水平縮尺を 1/100 とした。模型底質として砂を用いたので、模型縮尺にはひずみを与える必要がある。これは実験的に定めるべきものであるが、今回は検討する余裕がなかったので、一応、ひずみは 2、すなわち縦縮尺を 1/50 とした。

波の諸元および潮位

須磨海岸は、50% 未超過確率の波高が 30 cm 足らずという、通常は静穏な海岸である。しかし、海浜変形に支配的なのは時化時の波であることを考えると、模型波としては通常の時化時に見られる波高をとることが適当と思われる。これは、須磨海岸の場合、 $H_{1/3}=1.5\text{ m}$ 程度と思われるが、模型底質が砂であったのでその移動をより大きくするために、波高 2 m を対象とした。したがって、模型波高は 4 cm となる。須磨海岸での波浪観測によれば、波向きは SSW~WSW が卓越方向であったが、SW あるいは WSW では沿岸漂砂が顕著になり過ぎると思われたので、結局波向きは SSW とした。潮位としては、海岸浸食等の現象が長期的なものと考えて、平均潮位 + 1 m をとることに、したがって、模型内の潮位は + 2 cm となる。さて、最後に残された波の周期は現地の現象をできるだけよく模型内に再現するよう試行的実験により決定した。まず、図-2 の点線で囲まれた範囲を 図-1 の水槽内に、水平縮尺 1/100、鉛直縮尺 1/50 でつくり、波高 4 cm、波向 SSW、潮位 + 2 cm として、波の周期が現地で $T=6, 8, 10\text{ sec}$ 、模型内で $T=0.85, 1.13, 1.41\text{ sec}$ の場合についての模型海浜形状の変化を調べてみた。波の作用時間は全部で 4 時間と

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所

** 正会員 運輸省港湾技術研究所

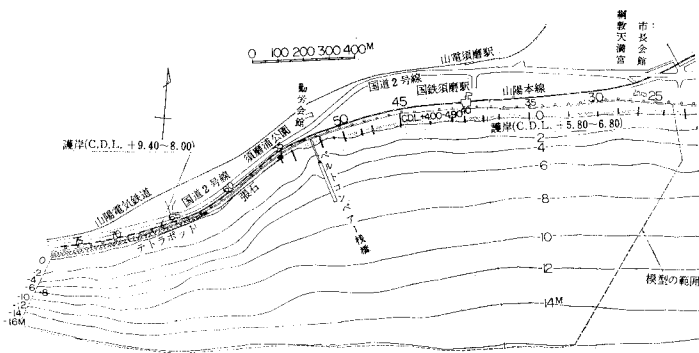


図-2 須磨海岸平面図

し、波を作用している間、模型浜の上手が著しく洗掘されないよう砂を補給した。その量は、5分間に1リットルの割合であった。海浜形状としては、図-1に示すように、模型浜の5, 10, 15, 20mの4測線での海浜断面、および平面的にみた汀線形状を測定した。これらの項目の波作用前後における変化を、3つの波の周期の場合について現地調査資料と比較し、互いにもっとも相似である場合の波の周期を求めた⁸⁾。たとえば、汀線変化についての模型実験、および現地調査の結果を、図-3および図-4に示す。図-4に見られるように、現地では測点 No. 50~55 での汀線の前進が著しく、また測点 No. 50 以東では後退が著しい。これを実験結果の図-3 でみると、 $T=0.85$ sec の場合は全体的に汀線が

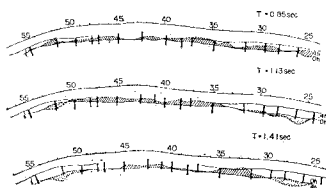


図-3 模型内での汀線変化



図-4 須磨海岸での汀線変化図(昭和43年5月と昭和44年6月との比較)

後退しており、現地の再現性にとぼしいが、 $T=1.13$ sec, 1.41 sec の場合は、測点 No. 50~55 での汀線の著しい前進、測点 No. 50 以東での後退がよく再現されている。そして、どちらかといえば、 $T=1.13$ sec の場合の方が、測点 No. 50 以東での汀線後退がよくでているようである。また、海浜形状の変化に関する実験結果も加味して、結局模型波の周期としては $T=1.13$ sec より少し長い $T=1.2$ sec と決定した。

模型浜で波が砕波するときの波のエネルギーの沿岸方向成分の分布を波の屈折も考慮して電子計算機で計算した結果を、図-5 に示す。図から、 $T=1.13$ sec, 1.41

secのときに測点 No. 50~55 で波のエネルギーが急速に減少しており、この区間での砂の堆積が著しいことを示している。しかし、 $T=0.85$ sec の場合には、この区間での波のエネルギーの著しい減少はなく、砂の堆積が生じないことを示しているが、これらの事実は図-3の汀線変化についての実験結果とよく一致している。

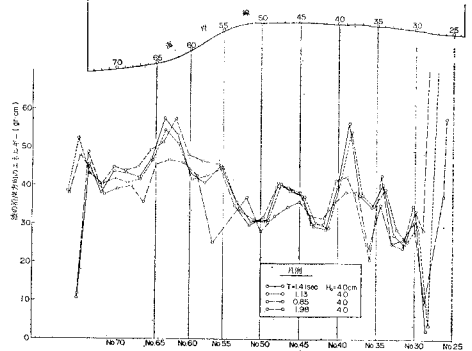


図-5 電子計算機による沿岸方向の波のエネルギー分布計算結果

4. 現地観測資料に基づいた模型再現性の検討

前述のようにして選定された実験条件をとりまとめる次のとおりである。

模型縮尺：水平 1/100, 鉛直 1/50

波：波高 4 cm, 周期 1.2 sec, 波向 SSW

潮位：+2 cm

そこで、こうして定められた須磨海岸の移動床模型が現地をどの程度再現しているかを深浅測量、蛍光砂調査等の現地観測結果と、それらの項目の模型内での測定結果とを直接比較してみた。実験は、まず上のような条件で模型浜をつくり、現地の蛍光砂投入点に相当する場所に蛍光砂を投入し、波を作用させた後、蛍光砂の分布、海底地形を詳細に測定した。以下、各項目についての再現性を比較検討してみる。

海底地形の変動

模型浜の初期の地形から、波作用 30 分, 1 時間, 4 時間の地形変動量を図示すると図-6 のようになる。図中点線で囲まれた領域は浸食を示し、実線は堆積を示す。さらに現地における海底変動量は、図-7 のようである。ここで海岸線をいくつか区切って両者を比較してみる。測点 No. 65 より以西は、模型境界の影響があるものとして、ここでは一応除外して考えることにする。

(1) No. 65~No. 55

模型では、現地より岸側寄りではあるが、張石護岸一

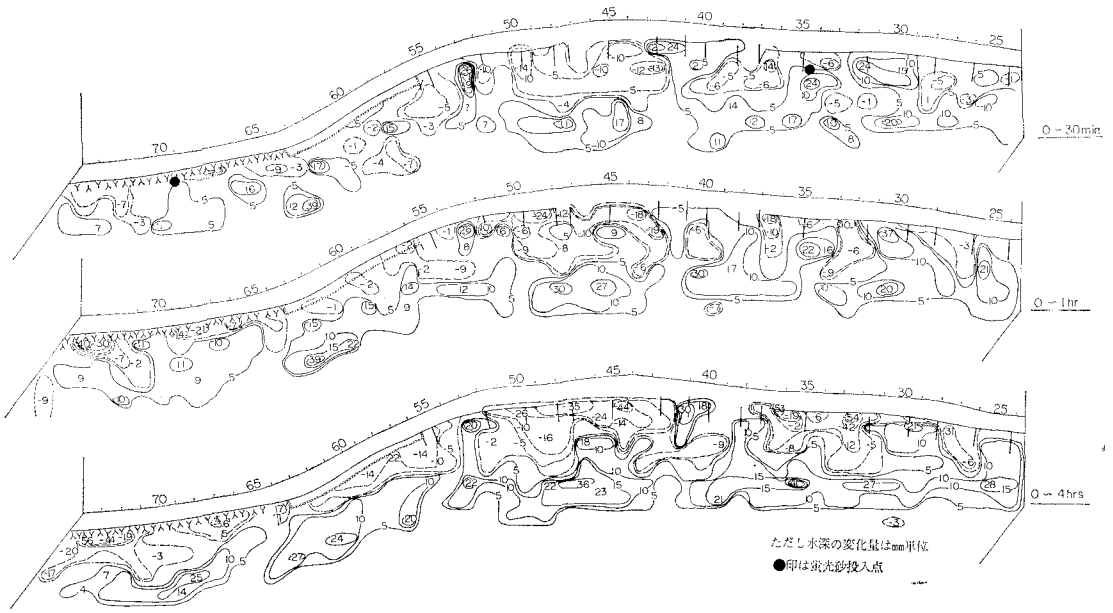


図-6 模型浜の浸食堆積平面図

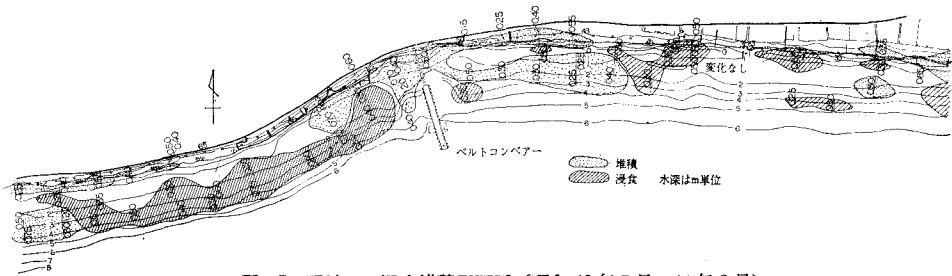


図-7 現地での浸食堆積平面図（昭和42年7月～44年6月）

帯が浸食されている（現地とほぼ一致）。沖に著しい堆積がある（現地と不一致）。

(2) No. 55～No. 51

幅は狭いとはいえ、この区間では著しい堆積がみられる（現地とほぼ一致）。

(3) No. 51～No. 42

汀線付近は一帯に浸食され、沖に著しい堆積がある（現地と不一致）。

(4) No. 42 以東

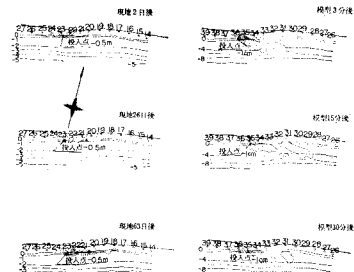
浸食、堆積の場所が東へ行くにつれて交互に表われる（現地とほぼ一致）。

以上のように、模型内での浸食堆積の様子は、現地と一致するところもあるが、不一致のところもかなりあった。その主な違いは模型の方が汀線付近が浸食され沖で堆積する傾向が強いことである。これは底質移動を容易ならしめるために波高を大きくとったことが大きな原因と思われるが、模型ひずみを変えることにより、ある程度は改善されたかも知れない。また、現地の深浅測量

図が静穏時のものであることも一原因であろう。

蛍光砂の移動

現地では No. 69 と No. 23 の測線上水深 -0.5m の位置に同時に蛍光砂が投入された。そこで模型内でも、No. 69 測線上 -1cm 、および模型の大きさの限界から No. 23 の代りに No. 35 測線上 -1cm の位置に蛍光砂を投入しその移動を調べた。図-8、図-9 は、それぞ


図-8 現地と模型での蛍光砂移動の比較
(No. 69 測線)

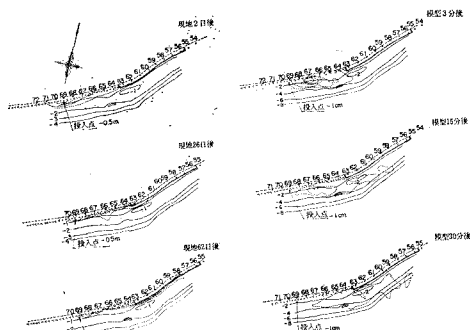


図-9 現地と模型での蛍光砂移動の比較

れ No. 69 および No. 23 (模型では No. 35) に投入された蛍光砂の移動を現地と模型で比較してみたものである。このような直接比較は、蛍光砂の各観測の時間間隔の比が、現地と模型でほぼ同じであるから妥当なものと考えてよいであろう。これらの図から、現地での No. 69 付近の沿岸漂砂が No. 23 (模型では No. 35) 付近に比較してはるかに早いことが模型内でもよく再現されている。ただし、模型での蛍光砂分布が現地にくらべて沖側へ広がる傾向にあるが、これは先にも述べたように、現地に比較して浸食性が強かったことによるものと思われる。これらの蛍光砂分布の重心位置の沿岸方向への移動距離を現地と模型について図示すると図-10、図-11 のようになる。図-10 では、その間の波高および風向の記録も同時に示してある。図-10 のように、現地では No. 69 での砂移動速度が No. 23 にくらべてはるかに速く、その速度の比はほぼ 1:5 となっている。このことは、図-11 に見られるように模型内にもかなり忠実に再現されており、No. 69 と No. 35 での砂移動速度の比も 1:5 となっている。

以上のように、深浅測量や蛍光砂調査によりくわしく再現性を調べてみると、沿岸方向の砂移動の再現性はかなりよいが、沖方向については、模型が現地より浸食性が強かったことがわかる。

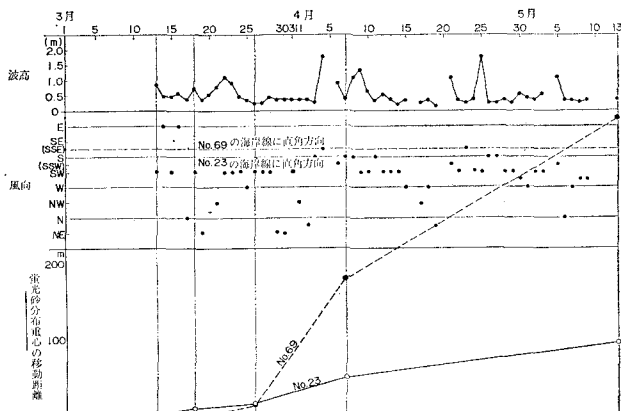


図-10 現地における蛍光砂分布の重心の移動

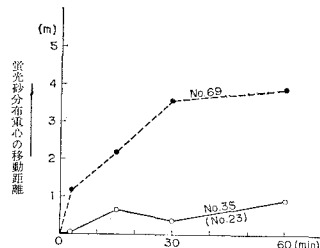


図-11 模型における蛍光砂分布の重心の移動

5. 模型時間縮尺の推定

沿岸漂砂量に関する資料を得るため、須磨海岸の No. 54 の位置に、先端天端高 +2.5m、先端水深±0m の突堤が新設され、この突堤上手の土量が、沿岸方向が突堤より西側 No. 56 まで約 90m、沖方向が突堤基部から水深-2m までの約 120m の範囲について行なわれた。この範囲での土量変化の計算結果は図-12 のようになり、約半年間で 2105m³ の堆積があった。そこで、この突堤を模型縮尺にしたがって模型浜に設置し、現地と同じ範囲で深浅測量を行なって得られた模型浜での土量変化を図-13 に示す。図のように模型内では、最初の 30 分で増加したが、その後はむしろ徐々に浸食されている。これは、前節の再現性の検討において明らかであったように、模型浜が現地より浸食性を帯びていたためと思われる。しかし、浸食の影響が海浜形状に強く現われなかつ

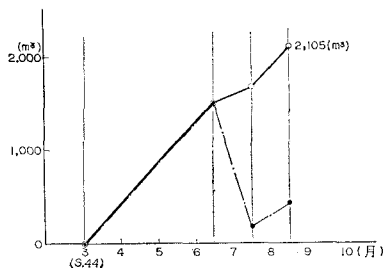


図-12 現地突堤堆積土量

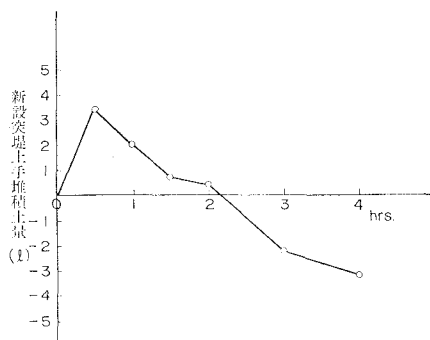


図-13 模型突堤堆積土量

た最初の 30 分間での堆積を一応沿岸漂砂が突堤により止められてできたものと考えて、現地における突堤上手の土量変化率、 $2105 \text{ m}^3/6 \text{ カ月}$ と模型における値 $3.5 \text{ l}/30 \text{ 分}$ を用いて沿岸漂砂による海浜の侵食堆積に対する時間縮尺を推定してみる。ここで、まず注意すべきことは、現地では漂砂現象が季節的に変化していることである。しかし、長期的にみれば、これらの季節的变化は年ごとにくり返されていることになる。したがって、侵食問題等の長期的現象に対する時間縮尺を決定するには、年単位の変化を考えねばならない。年間当たり平均の土量変化率は、これが波のエネルギーに比例すると仮定して、次のようにして求めた。まず、昭和 43 年 11 月から昭和 44 年 10 月までの 1 年間の波の資料を用意し、図-15 の 2105 m^3 の堆積があった昭和 44 年 3 月から 8 月までの波のエネルギーの総和と、それ以外の期間における波のエネルギーの総和とから、比例配分法により年間平均の土量変化率を計算した。結果は $3392 \text{ m}^3/\text{年}$ となった。沿岸漂砂による海浜の侵食堆積に対する時間縮尺は、次のようにして得られる^{3), 6)}。

いま、X 軸を海岸線に平行、これに直角に Y 軸をとり点 (x, y) における水深を h とする。さらに、単位時間、単位幅あたりの漂砂量の X, Y 方向の成分をそれぞれ q_x, q_y とし、空げき率を ε とすれば、漂砂に関する連続の式は、

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\varepsilon} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (1)$$

現地と模型が相似であるためには、 $\varepsilon_m = \varepsilon_p$ として (m は模型、 p は現地を表わす)、

$$\frac{h_m/h_p}{t_m/t_p} = \frac{q_{xm}/q_{xp}}{x_m/x_p} = \frac{q_{ym}/q_{yp}}{y_m/y_p} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、水平縮尺を l_m/l_p 、鉛直縮尺を $k \cdot l_m/l_p$ (k は模型のひずみ) とすれば、式 (2) より、

$$(q_m/q_p) \cdot (t_m/t_p) = k(l_m/l_p)^2 \dots\dots\dots (3)$$

また、海岸線に直角な一測線を通過する全漂砂量は、 L を碎波帯の幅として、

$$Q_p = L_p q_p, Q_m = L_m q_m \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

$$p_r = q_m/q_p, t_r = t_m/t_p, l_r = l_m/l_p = L_m/L_p, \\ Q_r = Q_m/Q_p$$

とおけば、式 (3) は、

$$t_r = k \cdot \frac{l_r^3}{Q_r} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

$$Q_m = 3.5 \text{ l}/30 \text{ min} = 60.5 \text{ m}^3/\text{年}, Q_p = 3392 \text{ m}^3/\text{年} \\ l_r = 1/100, k=2,$$

したがって式 (5) より、

$$t_r = 2 \times \frac{(1/100)^3}{60.5/3392} (\text{年}/\text{年}) \div 1.0 (\text{時間}/\text{年})$$

すなわち、現地での 1 年間が、模型内の 1 時間に相当

することになる。

6. 養浜実験

侵食性の須磨海岸には、養浜することも考えられている。そこで、その一案として、図-14 の最上段に示した

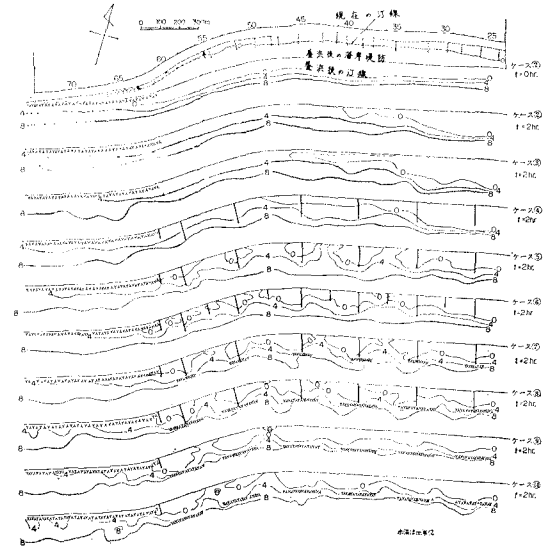


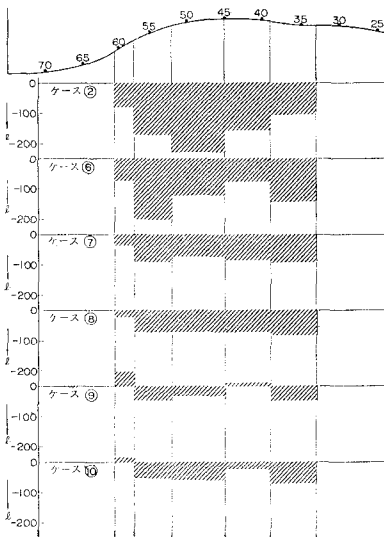
図-14 養浜実験の結果

ように、養浜により現在の汀線から約 100m 沖に新たな海岸堤防をつくり、それより沖側を人工海浜とした場合、暴風時の波に対しても効果的に侵食を防止する工法に関する実験を行なった。現地条件としては、波高 3m、周期 10 sec、波向 SSW、潮位としては台風時の高潮に相当する +3m をとった。模型縮尺は、前節までの場合と同様に、水平縮尺 1/100、鉛直縮尺 1/50 としたので、模型内での諸条件は、波高 6cm、周期 1.41sec、波向 SSW、潮位 +6cm となる。この養浜実験では、波高が高くなっているの、前節までの模型再現性をそのままこれに適用することはできない。ただし、現況を再現する波高 4cm から波高 6cm に高めたということは、定性的には暴風時を再現する方向へ近づいたことになるのは明らかである。前節の時間縮尺も直接には適用できないので、ここでは波を 2 時間だけ作用させた後の人工海浜の侵食状況を各対策工法について比較することにより、それらの優劣を検討した。まず図-14 のケース②、 $t=0$ の場合のように養浜し、それに何ら対策工法をせずに直接波を 2 時間作用させた場合 (ケース②、 $t=2 \text{ hr}$)、さらに表-1 に示すように、種々の対策工法を施工して 2 時間波を作用させた場合についての人工海浜の侵食状況を、図-14 の 2 段目以下に示す。これらの侵食状況をさらに正確に知るため、突堤先端より岸側の範囲で、各突堤間での土量変化を各ケースに対して計算す

ると図—15 のようになる。対策工法に対するプライオリ

表—2

ケース	諸 対 策 工 法 の 条 件
2	海岸堤防あり、測点 No. 64 以西養浜せず（以下のケース同じ）、突堤等なし
3	ケース 2 で、波 2 時間作用後欠損個所に砂を補給して復元する
4	突堤先端から岸側へ 33 cm の区間：天端高 +2 cm，中間 17 cm：+4 cm，陸側端 50 cm：+6 cm
5	ケース 4 に対して、天端高を全体的に 2 cm だけ嵩上げする。
6	ケース 5 の突堤の中間に長さ 50 cm，天端高 8 cm の中間堤施工
7	ケース 5 の突堤先端に、沿岸方向の長さ 1 m，天端高 +4 cm，天端幅 7 cm のテトラ堤（割石、空けき率 43~45%）施工
8	ケース 7 においてテトラ堤の沿岸方向の長さ 2 m にする。
9	ケース 8 に対して、テトラ堤の天端高を +12 cm とし、さらに陸側から出た突堤を取り除く。
10	ケース 9 に対して、テトラ堤の天端高を +6 cm にする。



図—15 突堤先端より岸側領域の土量変化

リティーは、観点によって異なることはもちろんであるが、もし

- (1) 汀線より陸側の部分をできるだけ広く残すこと。
- (2) 建設費が安価であること。
- (3) 2 時間という波の作用時間は非常に長く、図—14 に見られるように顕著な侵食を起こすように時化が続くことはないであろう。

ことを考えると、これらの工法の中では、突堤の間に短い中間堤を置いたケース⑥が、高いプライオリティーをもつといえることができるであろう。しかし、土量変化の

みから見れば、離岸堤形式のケース ⑨ が最も有効である。この場合は、波が離岸堤の天端を越えなかった。なお離岸堤は表—2 に示したように透過堤であった。

7. 結 語

以上、模型底質として砂を用いたときの実験結果について述べた。砂は、安価で、比較的一様な粒径のものを得やすいから用いたわけであるが、そのため模型をひずめる必要性が生じた。また砂を用いた場合、適切な模型条件が選定されればかなりの程度まで再現性を高めることができるものと思われるが、縮尺効果の関係からこれにはおのずから限度があるはずである。粒径が一樣で、比重が砂より軽い模型底質を多量に得ることができれば、模型再現性はさらに改善されるものと思われる。

この研究に使用した現地資料は、運輸省第三港湾建設局調査設計事務所、および港湾技術研究所の協力のもとに主として神戸市開発局が行なった現地調査の結果であり、ご協力いただいた各機関の諸氏に感謝の意を表する次第である。また、実験の実施、資料の整理にあたり、港研水工部の天坂三明技官、浅川 昭技官（現在運輸省第三港湾建設局調査設計事務所）の協力を得た。ここに記して感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 東京大学工学部土木工学科港湾研究室：昭和 44 年度新潟海岸養浜模型実験報告書，1970. 3.
- 2) R. Reinalda : Scale effects in Models with Littoral Sand-Drift, Proc. 7 th Conf on Coastal Eng, 1961, Vol. 1.
- 3) 野田英明：海岸の模型実験，水理学水文学における最近の進歩，昭和 42 年 3 月，土木学会関西支部
- 4) I. R. P. White : Newcastle Harbour Entrance Shoal Wave Model Investigation, Hydraulic and Soils Laboratory, Dept. of Public Works N. S. W (Australia) Report No. 113, 66~8.
- 5) 橋本 宏：欧州での海岸侵食防止に関する研究の動き，土木技術資料，Vol. 12, No. 3, 1970.
- 6) 佐藤昭二・田中則男・入江 功・平原淳次：港湾埋没に関する移動床模型の再現性，港湾技術研究所報告，第 9 巻第 1 号，1970.
- 7) 佐藤昭二ほか：マルデルプラタ港の漂砂に関する模型実験，1969（未刊）.
- 8) 佐藤昭二・入江 功・天坂三明：須磨海岸の漂砂に関する模型実験，港湾技研資料，No. 106, 1970.