

防波護岸の吸い出し災害のメカニズムに関する水理模型実験

高橋 重雄*・鈴木高二朗**・徳淵 克正***
下迫健一郎**・善 功 企****

1. ま え が き

写真-1は、護岸背後の埋立土砂が波浪等により吸い出しを受け、護岸背後が陥没、沈下するという「吸い出し災害」の一例を示すものである。埋立護岸の被災は少なくなく、中でも波浪等による吸い出し災害が問題となっている。特に近年、防波堤を設けず強大な波力を直接受ける「防波護岸」が数多く造られるようになっており、規模の大きな被災が発生している。

防波護岸に主として用いられるケーソン式護岸は、一般に図-1に示すように、捨石マウンド上にケーソンを設置し、ケーソン背後には土圧軽減用の裏込石を投入し、その上に埋立土を投入して造られている。裏込石と埋立土の境界には、埋立土が裏込部に落下することがないように防砂シートが敷設され、ケーソンとケーソンの目地部には防砂目地板が設けられ、裏込石や埋立土の流失を防いでいる。しかしながら、防砂シート、防砂目地板が種々の原因で破れたり、めくれたりして、こうした部分から吸い出しが発生しているものと考えられている。

本研究では、このような現地の吸い出し災害を再現し、メカニズムを明らかにするため水理模型実験を行った。

2. 実験の目的と方法

(1) 実験の目的

実験は大型の造波水路で行い、①防砂シートに穴を開け、吸い出しによる埋立地盤の陥没を再現する実験、②裏込石や埋立土内の間隙水圧を測定し、吸い出しメカニズムに関する基礎データを得る実験、さらに③埋立土のボーリング破壊を調べる実験、④その圧力を低減させる対策工に関する実験を行った。

(2) 実験の方法

実験では、測定水路内に図-2に示すようなケーソン式護岸の模型を設置し、揚圧力計（波圧計）および間隙水圧計を設置した。なお、図-2に示した断面は、本実験における基本断面であり、完成時の標準断面と呼んでお



写真-1 護岸天端の陥没

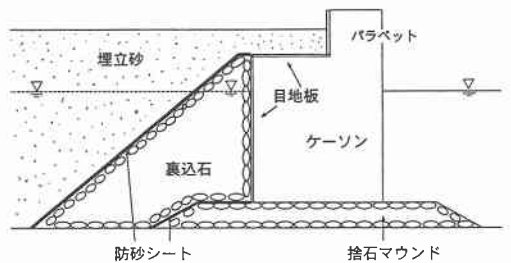


図-1 ケーソン式護岸の断面形状

り、この図にその圧力センサーの設置位置を示している。図-2のケーソンは幅100 cm、高さ112 cmで、この上にパラベットとして高さ30.5 cmの2つの箱を置いている。マウンドの厚さは20 cmであり、裏込部の斜面の勾配は1:1.2となっている。水深 h は104.4 cmであるので、パラベットの天端高が88.6 cmであり、裏込部の天端幅が10 cm、静水面での裏込部の幅が43.1 cmとなる。マウンドと裏込部には碎石、埋立土には砂を用い、防砂シートは厚さ1.5 mmの透水性を有する不織布のシートを用いた。マウンドと裏込部の碎石および埋立砂の諸元は表-1に示している。

このほか、埋立時断面と呼ぶもう一つの代表的な断面がある。この断面の特徴は、埋立砂が裏込石の天端まで達していなく、裏込石の天端が開放されていることであり、またパラベットの天端が58.1 cmと低く越波しやすい断面である。なお、防砂シートとして不透水性の厚さ1 mmのビニールシートを用いている。この断面は、主として被災再現実験において用いている。

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部 耐波研究室長

** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 耐波研究室

*** 運輸省港湾技術研究所 研修生（シバタ工業(株)）

**** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 特別研究官

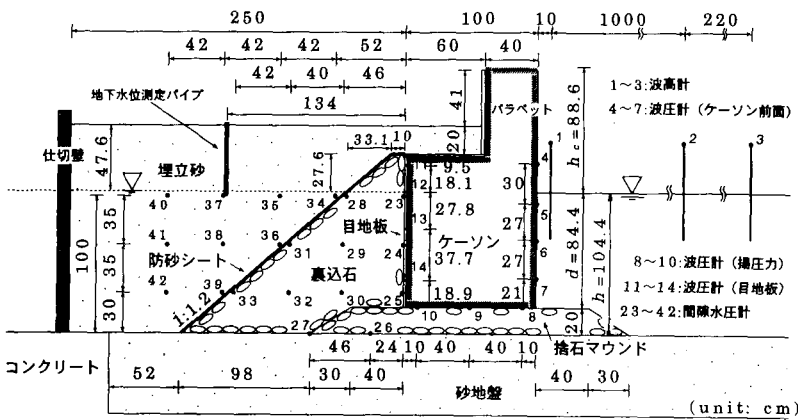


図-2 実験断面と測定器 (完成時標準断面)

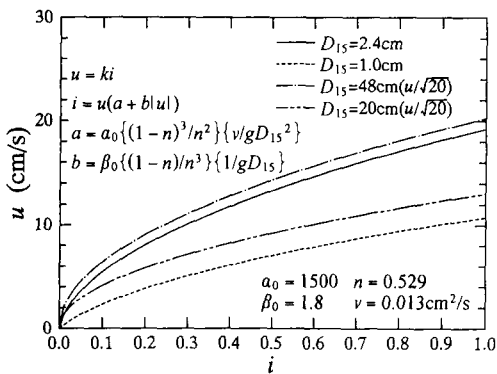


図-3 動水勾配とマウンドおよび裏込石内の流速

表-1 砕石および埋立砂の諸元

対 象	埋立砂	裏込石
空隙率 n	0.445	0.529
湿潤密度 γ_r g/cm ³	1.90	1.74
実質密度 γ_d	1.49	1.21
実質部分の密度 γ_s	2.70	2.58
10%粒径 mm	0.13	
平均重量/個 g		19.5

なお、実験ケースによっては、これらの断面形状やセンサーの配置と異なっているものもある。たとえば、越波や降水による冠水の影響を見る場合には、ポンプで護岸天端上に給水し、冠水高さを一定に保っている。また通常の埋立地では、ケーソン付近は、エプロンとして舗装されていることが多いが、実験では、舗装がない状態を主として対象にしている。

実験において模型に作用させた波は、周期 T が 2.1~3.48 s で波高 H が 23.8~61.9 cm の規則波である。実験波の中で周期 3.04 s、波高 52.4 cm のものを「基準実験波」と呼んでおり、この実験波の結果を中心に解析している。

(3) 実験上の問題点

こうした実験で問題となるのは、相似則であり、特に捨石マウンドと裏込石部における圧力と流れの相似が問題となるため、以下に若干の検討を行った。

図-3 は、横軸を動水勾配にとって流速の計算結果を示したものである。ただし、流速には Darcy 則が適用でき、かつ透水係数は流速によって変化する (Dupuit-Forchheimer 則, Williams et. al.

(1992)) と考えている。模型におけるマウンドや裏込部の石の大きさを考慮して、15% 粒径 D_{15} が 1.0 cm (1.35 g) と 2.4 cm (19.5 g) の場合について計算している。この図から、流速の範囲は D_{15} が 2.4 cm としても最大 20 cm/s 程度であり、動水勾配が大きいと流速が頭打ちになる傾向が認められる。

また同じ図に、模型縮尺を 1/20 と仮定したときの現地の石について流速を計算し、これを $(1/20)^{0.5}$ にした模型量で示している。図中の模型と現地の計算結果はかなり一致しており、これは現地と模型の間にフルードの相似則がほぼ成り立つことを意味している。

なお、埋立砂内の間隙水圧の伝播についても、山本ら (1985) の考え方に基づいて予備的な考察を行ったが、同じ砂を使うためにフルード則に限界があり、実験では圧力の減衰が小さく現れると思われる。このほか、シートの厚さなどにも相似則上の問題点があり、そうした限界をふまえて実験結果の解析を行う必要がある。

3. 被災の再現

(1) シートの穴からの埋立砂の落下

被災再現実験では主としてシートに穴をあけて埋立砂の落下(吸い出し)状況を観察した。その一例としてシートに直径 10 cm の穴を開けた場合について以下に説明する。これは埋立時断面であり、裏込部天端が解放されており、またパラペット天端が低く越波しやすい断面である。なお、穴の中心位置は静水面より 15 cm 下である。

波を作用させる前から裏込石内への埋立砂の落下は顕著で、写真-2 のような大きな空洞 (直径約 25 cm) が発生し、落下した砂は写真の下の方にたまっている。なお、この実験ではケーソンを据え付けた後、裏込石、防砂シート、埋立砂を設置し、その後に水路に水を入れており、この空洞は水路に水を注入する際に発生している。

水路に水を入れ終わった後に、空洞を埋めなおし、波

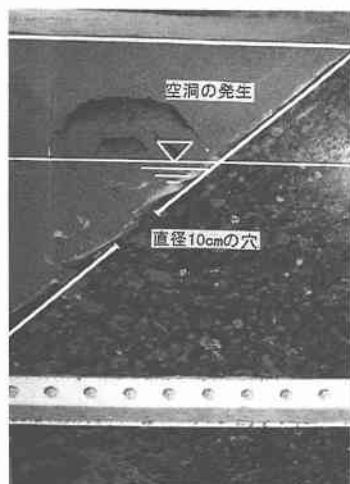


写真-2 防砂シートの上にできた大きな空洞(波作用前, 10 cm の穴の場合)

を作用させる実験を実施した。周期 $T=3.04$ s, 波高 $H=33.3$ cm では、越波は少なく、透過波の作用によって埋立砂が吸い出され再び穴の上に空洞が発生した。波高 $H=42.8$ cm では始めのうち砂が激しく吸い出され空洞が大きく発達したが、しばらくして越波水が埋立天端上にたまと空洞内に上から水が流れだし、空洞上の砂が落ち込むことで空洞はなくなった。その後、越波水の浸透によってシートの穴からの吸い出しが促進され、埋立砂の吸い出しはさらに大きくなった。その結果、シートの穴上部の埋立天端における沈下が大きくなっている。

(2) 被災再現実験の結果

このシリーズの実験では、シートの穴の大きさだけでなく、堤体や埋立砂の天端などを変えた実験を行っている。その結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 防砂シートは、波の作用によって静水面付近がめくれ上がる危険性が高い。また、シートの天端は、越波によってめくれ上がる危険性がある。これらは、現地でも認められている現象である。
- 2) 防砂シートの破損部分から砂は流失する(吸い出される)が、静水面付近(静水面よりやや下)に破損がある場合に砂の流失は大きい。もちろん破損部分が大きいほど吸い出し量は大きくなる。大きな吸い出しが発生すると、埋立砂内に空洞ができ、これが大きくなると地盤の陥没になることが実験でも確かめられた。
- 3) 波による砂の吸い出しは、越波や降水による冠水があると、さらに大きくなる。冠水すると、埋立砂内の水位(地下水位)が上がり、この静水圧の上昇分と流れによって吸い出しは大きくなると考えられる。
- 4) 防砂シートが無いと埋立砂は裏込部の空隙が砂で満たされるまで落下する。ただし、最初は大量に落下す

るが、その後そのスピードはかなり低下する。また、裏込部に入った砂は波の作用によってマウンドを通過して護岸前面に運ばれる危険性があり、吸い出しは必ずしも止まるわけではないようである。シートが静水面付近にしかない場合でも、同様な傾向が認められる。

- 5) 埋立砂天端に舗装板があれば、越波水が埋立砂などを直接破壊する危険性はなくなるが、その目地等からの越波水などの流入の危険性を考える必要がある。
- 6) 目地板が損傷を受けると、ここからも埋立砂の落下(吸い出し)があり、冠水によってこれが促進される。

4. 護岸内部の圧力

(1) 完成時標準断面の実験

圧力(波圧)は、マウンドを透過して裏込部に間隙水圧として伝わり、防砂シートを透過した後埋立砂に伝播する。前掲図-2の断面で基準実験波の場合、水面(裏込部の水面)が全振幅 4~9 cm 程度で変動している。このとき、裏込部の静水面上の部分の空気が動かされるが、埋立砂の中を出入りしていると思われる。こうした圧力や水面の動きが、吸い出しと深く関連していると思われるので、護岸内部の圧力の測定を行った。

図-4は、この時のケーソン前面での波圧(ch 7)およびマウンド内(ch 9)、裏込石内(ch 30)、埋立砂内(ch 38)での圧力(間隙水圧)の時系列波形の例であり、基準実験波の場合である。

ケーソン前面(ch 7)には双峰型の重複波圧が作用している。マウンド、裏込石へと伝播するにつれてこの圧力は減衰するが、第1ピークと比べると第2ピークの減衰が大きい。また、埋立砂内部では静水圧が次第に上昇しているが、これは長周期波成分によるものである。

図-5は基準実験波での正負の圧力分布である。図中の数値は圧力のピーク値を波高で無次元化したもので、上段に示すものが長周期波成分を取り除いた短周期成分の正のピーク値、中段が長周期成分を含む正のピーク値である。よって、長周期成分(静水圧の上昇分)は両者の差となる。なお、矢印は圧力の大きさと位相を表す。

正の圧力はマウンド、裏込石と伝播するにつれて減衰しているがその程度はさほど小さくなく、裏込部ではほぼ全域で $0.6u_0H$ (前面波圧の 70%程度) とかなり大きな値をとっている。ここで、 u_0 は水の単位体積重量である。一方、防砂シートの前後、すなわち裏込石から埋立砂に変わるところ(ch 28 と ch 34, ch 36 と ch 31)では圧力が 10~20%程度減衰しており、さらに埋立砂内部では圧力の減衰率が大きく、25 cm 内部で 75%程度減衰している。埋立砂による圧力減衰はかなり大きいことが分かる。ピーク値の位相を見ると、マウンドや裏込部ではケーソン前面波圧との位相差が少ない。しかし、埋立砂

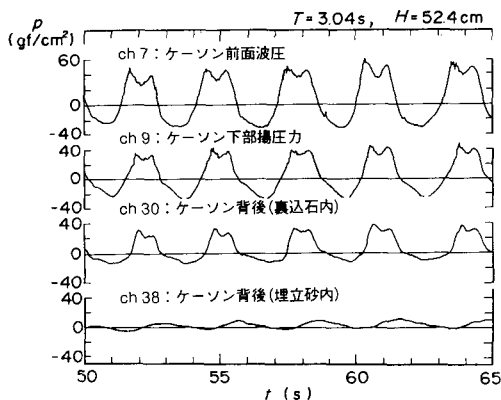


図-4 測定波形 (完成時標準断面)

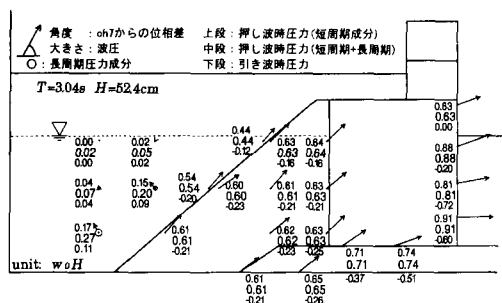


図-5 圧力分布 (完成時標準断面)

内では波形が双峰型でなく滑らかになるため、位相差が大きくなっている。また、埋立砂内ではやはり長周期成分が大きい。

下段の数値が負の圧力の短周期成分のピーク値であり、負の圧力も同様な傾向が認められるが、裏込部の圧力を見ると正の圧力の場合より減衰の割合が大きい。これは、静水面上の空気が圧縮される場合と膨張する場合の様子の違いの可能性がある。正の圧力の時は裏込め上部の水と土によって空気が閉じ込められやすいが、負の時は逆に抜けやすいものと推察されるが、明確ではない。

(2) 越波・雨水で埋立て天端が冠水した場合

前節までの検討によって、裏込部の静水面上の空気が裏込部の圧力に大きく影響し、空気が閉じこめられるほど大きな圧力になると想定される。越波や雨水によって裏込部の天端上の埋立砂が飽和すると、空気が閉じこめられる危険性があり、これについて実験した。すなわち、完成時標準断面で、多量の越波水あるいは雨水がケーソン背後に溜まった場合を想定し、埋立砂上の冠水高が5 cm と10 cm の場合について検討している。

図-6 は基準実験波の実験結果で、正負の圧力のピーク値分布の一例である。ただし、圧力は冠水した状態で造波前の間隙水圧を0として考えている。正の圧力につ

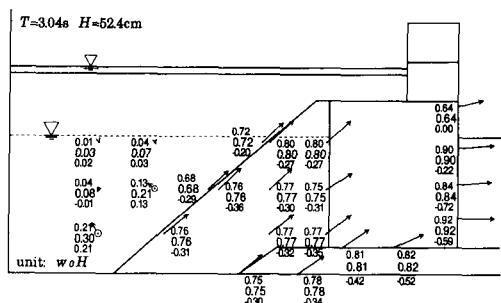


図-6 圧力分布 (冠水時、波作用下)

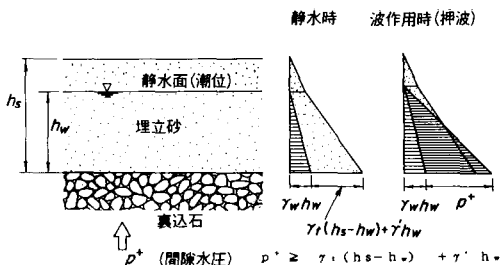


図-7 波による圧力と埋立砂のボイリング

いてみると、裏込石内部では冠水のない場合に比して、全体に2〜3割程度圧力が上昇している。また、埋立砂内でも裏込石に近い部分で圧力が大きい。また、負圧についても冠水のない場合より大きい。冠水がないときと同様に負の圧力の減衰が正に比して大きいことが興味深い。

5. ボイリング

(1) ボイリングの条件

飽和砂に下からの間隙水圧が加わり、この圧力が大きく砂の粒子間応力がゼロとなると、一つ一つの砂粒が浮遊するボイリング状態、すなわち砂が液状化する。ボイリングが発生すると、当然そこでの防砂シートも破壊され、また舗装などを含む上部の構造も破壊される。また、液状化しているためシートなどの隙間から砂が流失しやすい。したがって、ボイリングはこうした護岸の吸い出し災害の一つの原因となっていると思われる。

図-7 は埋立砂に波が作用したときの模式図であり、押し波時に有効応力が減少し、波による間隙水圧がそこの土圧 (水中) に達するとボイリング状態になる。ただし、間隙水圧がこの条件に達しなくても、ある程度近づくと、その埋立地盤の強度が著しく低下することも考慮しなければならない。

(2) 実験断面

ケーソン式護岸でも、埋立砂の施工時や完成時に潮位が高い場合等では、土被り圧が小さく、押し波時の裏込部の間隙水圧によって埋立砂がボイリング状態にいたる

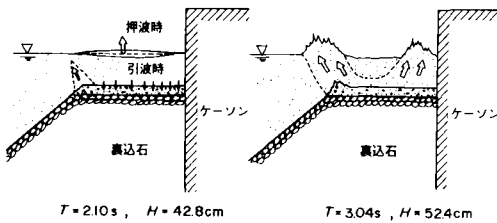


図-8 ボイリングの発生状況

可能性がある。そこでボイリング状態をよりはっきりと再現するため、埋立砂の高さをケーソン前面の水位と同じにし、しかもその厚さが20 cmと比較的薄い断面で実験した。また、防砂シートではなく粒調碎石(粒径5 mm程度の石)を敷いて埋立砂が裏込部に沈下しないようにしている。この断面では土被り高さ $h_s=20.0$ cm, 砂の水中単位体積重量 $\gamma=0.9\text{gf/cm}^3$ であるから、 $g=18\text{g/cm}^3$ が理論上のボイリング発生条件である。なお、 γ_w :水の単位体積重量、 γ_t :砂の乾燥単位体積重量である。

(3) 間隙水圧とボイリング

図-8に示されるように波高を少しずつ大きくしていくと、最初一部でボイリングが発生し始め、大きな波高では全体的に持ち上がるようにボイリングが発生する。どの時点をもって液状化が発生していると判断するか難しいところだが、粒調碎石上の埋立砂が全体に浮き上がるようになる時点を決定的発生限界と考えると、周期 $T=2.1\text{ s}$ では波高 $H=42.8\text{ cm}$ 以上、周期 $T=3.04\text{ s}$ では全てのケースで液状化していた。この時の裏込石内の圧力は $17\sim 21\text{ gf/cm}^2$ で、上述のボイリング発生条件にほぼ一致する。

6. 対策工法 (圧抜き工法)

埋立砂の吸い出しや沈下の危険性を低減する一つの方法は、裏込部の圧力を低下させることである。図-9は、裏込部を幅20 cmで埋立天端上に解放した対策断面(圧抜き工法)の実験結果である。この図は圧力の分布図の一例であり、基準実験波の場合である。裏込石と埋立砂の境界部では正の圧力のピーク値は $0.16u_0H$ まで下がり、ケーソン前面(ch7)の波圧の約20%まで減少している。特に裏込石内部の自由表面に近いch23では圧力の減少が顕著である。冠水した場合はもちろん、そうでない完成標準断面の場合に比しても圧力は大きく低下している。図中、マウンド内部の圧力のピークの位相がケーソン前面波圧のピークの位相とほぼ $1/4$ 周期も違うのはピークの位相が第1ピークから第2ピークへとシフトしたためであり、圧力の低減が大きい場合の圧力波形の特徴である。なお、負の圧力についても低減効果は顕著で

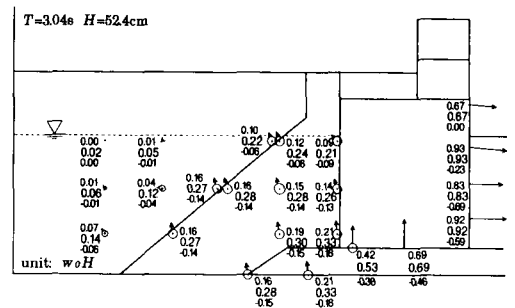


図-9 圧力分布 (圧抜き開口部がある場合)

ある。

なお、圧抜き工法として裏込石の部分ではなく、ケーソンを改良することも考えられる。例えば、ケーソンの後部に圧抜き用の開口部を設けることによって、同様の圧力低減効果が得られることが分かった。

7. あとがき

防波護岸の水理模型実験を行い、吸い出しに関する主要な水理的現象の概要をほぼ明らかにした。吸い出し現象の解明には、こうした水理模型実験だけでなく、数値計算(朴ら(1996))、土質実験や材料実験、さらには現地調査など多くの調査研究が必要であり、総合的に検討することによって解明が進むことが期待される。

実験にあたって、運輸省港湾技術研究所の山崎浩之の主任研究官、山本 悟前研究員、岡村知光研究員の協力を得ている。また運輸省港湾局・第一港湾建設局の方々や運輸省航空局の方々のご指導とご援助を得ている。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 高橋重雄・下迫健一郎・山本 悟・善 功企・山崎浩之(1994): ケーソン式護岸背後の沈下災害に関する一実験, 海洋開発論文集, Vol. 10, pp. 201-206.
- 高橋重雄・鈴木高二朗・徳淵克正・岡村知光・下迫健一郎・善功企・山崎浩之(1996): 護岸の吸い出しに関する水理模型実験, 港研報告(予定)
- 朴 佑善・高橋重雄・鈴木高二朗・姜 閔求(1996): 波-地盤-構造物の相互作用に関する有限要素法解析, 海岸工学論文集, 第43巻.
- 前野賢彦・山本方人・遠藤泰司(1990): 緩傾斜護岸裏込砂の吸出し機構, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 499-503.
- 山元淳史・土屋義人(1994): 沿岸埋立地における地下水位の挙動と護岸設計への応用, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 906-910.
- 山本督夫・高橋重雄(1985): Wave damping by soil motion, ASCE, WW, Vol. 111, No. 1, pp. 62-77.
- Williams AF, Burcharth HF, den Adel H(1992): The Permeability of rubble mound breakwaters. Proc. of 23rd ICCE ASCE, pp. 1720-1733.