

防波護岸背後からの土砂吸出しに関する基礎的研究

重村利幸* ・ 滝口和男** ・ 多田 毅***
林 建二郎**** ・ 藤間 功司*****

本研究は吸い出し災害の発生メカニズムを明らかにすることを目指した基礎的な研究であり、防砂シートがかなり損傷を受けた場合、伝搬してくる変動圧の影響を受けて、裏埋砂が「何処から、どれくらい落下し、落下した砂がどのように堆積、移動するか」等について、模型実験を通して検討した。その結果、裏込石内に、ある限界値を越える水位変動が生じると、水位変動が生じる付近に限って、裏埋砂が集中的に落下すること、落下地点の上方に空洞が形成され、やがて表層が崖状に陥没すること、落下した砂はその場に堆積するが、堆積高さがある限界高さを越えるとマウンド内へ移行すること等を明らかにした。

1. 序 論

吸い出し災害に関する本格的な研究は1996年に旧港湾技術研究所で開催された護岸シンポジウムで始まったと言ってよいであろう。同シンポジウムでは1990年代に各港湾建設局管内で発生した吸い出し災害の事例が報告され、発生のメカニズムや対策工法等が論じられた。また、高橋ら(1996)は吸い出しに関する広範な模型実験を行い、変動圧の伝搬により、裏埋砂内に誘起される変動間隙水圧が増大すると、やがて液状化を引き起こし、防砂シートの破損部から裏埋砂が落下を開始し、裏埋砂内に空洞が形成されることを報告した。しかし、吸出しのメカニズムにはいまだ未解明の問題が多々残されている。不幸にして、2001年12月30日、明石市大蔵海岸にある人工海浜で護岸背後の裏埋砂が陥没して人身事故が発生した。この事故が吸出しによるものかどうかは未だ不明であるが、いずれにしても吸い出し災害が事故につながる可能性は指摘された訳であるから、同災害の発生メカニズムが早急に解明され、対策工法が確立されなければならない。本研究は防砂シートがかなりの損傷を受けた場合、護岸背後の裏埋砂が「何処から、どれくらい落下し、落下した砂がどのように堆積、移動するか」等について、模型実験を通して検討を試みるものである。

2. 実験装置及び方法

実験はピストン型の吸収式造波機を備えた長さ20.0 m、幅0.3 m、深さ0.6 mの両面ガラス張り二次元造波水槽で行った。ケーソン式防波護岸の模型には「標準型」、「開放型」及び「冠水型」模型の3種類を基本型として選んだ。ここに、標準型模型とは、過去に吸出し災害にあった防波護岸の断面(港湾技術研究所, 1996)を参考にし、縮尺を1/30として決めた断面形を持つ模型(図-1参

照)を意味し、開放型模型とは標準型模型の裏込石の天端を裏埋砂の表面まで伸長した模型、また、冠水型模型とは標準型護岸が越波によって冠水し、裏埋砂表面に湛水した模型を指す。各護岸模型はマウンド及び裏込石として粒径が10~20 mmの川砂利を、裏埋土砂として福島産の珪砂5号($d_{50}=0.31$ mm, 比重=2.64)を用い、ケーソン模型はアクリル板で作製して、造波板より12.96 mの位置に作製・設置した。なお、裏込石の裏のり上には裏埋砂の落下を助長して観測するため、防砂シートに代えて所定の網目をもつ金網を置いた。

実験は2シリーズ、12ケースについて行った。表-1は12ケースの実験に使用する護岸模型の細部を示す。第Iシリーズの実験は、防砂シートの損傷が軽微であり、変動圧の影響を受けても裏埋砂が落下しない状態を想定した実験であり、各模型には、防砂シートの代わりに珪砂5号の中央粒径とほぼ等しい、網目が0.32 mmの金網を使った。一方、第IIシリーズの実験は、防砂シートの損傷がかなりひどく、変動圧の影響を受けて裏埋砂が損傷部から落下する状態を想定した実験であり、いずれの模型も、防砂シートの代わりに、中央粒径の約4倍にあた

表-1 実験に用いた護岸模型の細部

実験	模型の種類	裏埋砂の投入法	盛土厚 (cm)
I-1	標準型模型	第1投入法	17.5(12.5)
I-2	開放型模型	〃	〃
I-3	冠水型模型	〃	〃
II-1	標準型模型	第2投入法	17.5(12.5)
II-2	〃	第3投入法	〃
II-3	〃	第1投入法	〃
II-4	〃	〃	15.0(10.0)
II-5	〃	〃	12.5(7.5)
II-6	〃	〃	10.0(5.0)
II-7	〃	〃	7.5(2.5)
II-8	開放型模型	第3投入法	17.5(12.5)
II-9	冠水型模型	第1投入法	〃

第1投入法: 水槽の水深を60 cmとし、気乾砂を高さ52.5 cmまで自由落下させた後、水位を35 cmまで下げる。
第2投入法: 水槽水深を35 cmとし、湿潤砂を水面まで自由落下させ、さらに湿潤砂を高さ52.5 cmまで敷く。
第3投入法: 水槽水深を35 cmとし、湿潤砂を水面まで自由落下させ、その上に気乾砂を高さ52.5 cmまで敷く。
盛土厚: 水位35 cmから測った裏埋砂の盛立て厚さ。

* 正 会 員 Dr.E. 防衛大学校教授 建設環境工学科
** 学生会員 防衛大学校 理工学研究科前期課程
*** 正 会 員 工博 防衛大学校助手 建設環境工学科
**** 正 会 員 Ph.D. 防衛大学校助教授 建設環境工学科
***** 正 会 員 工博 防衛大学校助教授 建設環境工学科

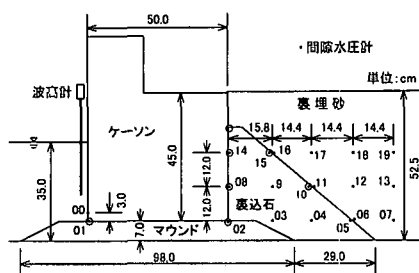


図-1 測定機器の配置図

る、網目 1.27 mm の金網を使った。

第 1, 第 2 シリーズの実験とも冠水深さは 5 cm とした。また、実験水深は 35 cm とし、入射波には周期 2 s, 波高 9.5 cm の規則波を用いた。第 1 シリーズの実験では、模型内における変動圧の伝播特性、すなわち「減衰」及び「位相遅れ」を詳しく計測するため、波高計と 20 個の間隙水圧計を図-1 に示す位置に配置した。

計測は造波を開始後、出力が安定してから、各計器の出力をサンプリング間隔 20 ms で AD 変換し、2048 個の時系列データとして収集した。一方、第 2 シリーズの実験は、変動圧の影響を受けて発生する裏埋砂の落下・移動特性を明らかにすることを主な目的とする実験である。このため、間隙水圧計は図-1 に○印を付して示した 7 箇所とし、代わりに、裏込石内の水位変動と裏埋砂の落下および移動状況を撮影するため、造波水槽の両側にビデオカメラ（撮影速度：30 コマ/秒）を設置した。実験は先に述べた実験波を 12 時間作用させて行い、造波開始直後、30 分、1 時間、2 時間、3 時間及び 12 時間後に、各計測機の出力を前述と同様な方式で収録すると共に、落下した裏埋砂の堆積及び移動状況をビデオカメラで撮影した。ただし、3 時間後も裏埋砂の落下が続く場合には、落下が止まるまで、1 時間毎に計測と撮影を継続した。また、水位変動は造波開始後、2 時間までは 10 分毎にスケールによる計測も行った。

3. 実験結果及び解析

3.1 第 1 シリーズの実験結果及び解析

第 1 シリーズの実験は表-1 に示す 3 種類の護岸模型に対して行った。計測した全ての圧力データには、ゼロアップクロス法を適用して圧力の極大値、極小値、並びに全振幅を定め、それらを平均して各測点における圧力の全振幅 P を定めた。さらに、全振幅 P は、ケーソン下端の“01”点における変動圧の全振幅 P_0 で割って無次元化し、 P/P_0 を定めた。また、各測点における極値の位相については、同じく“01”点で検出した変動圧の極値位相を基準として位相差を求め、それらを平均して、位相遅れ Δt を定めた。 Δt についても、実験波の周期 T で割っ

て無次元化し、 $\Delta t/T$ を定めた。これら 2 つの無次元量の模型内における分布について調べた結果、変動圧の減衰及び位相遅れはマウンド内ではほとんど現れないが、裏込石部と裏埋砂部では、はっきり現れることを確認した。そこで、裏込石内の場合には測点までの伝播距離をケーソン模型の裏面下端（図-1 の“02”点）からの最短距離 x で評価し、裏埋砂内の場合には裏込石の裏のり面からの最短距離 x_n で評価して、各伝播距離に対する伝播特性の変化を検討することにした。ただし、実際には x は実験水深 h で割って x/h とし、 x_n は裏のり面に立てた垂線が水深 h の静水面と交わる点までの距離 l_n で割った x_n/l_n とし、これらを用いて伝播特性の検討を行った。その結果、以下のような成果が得られた。

a) 裏込石内の伝播特性

図-2(a) は裏込石内における P/P_0 と x/h の関係を、また、図-2(b) は $\Delta t/T$ と x/h の関係を、実験ケース毎に符号を変えて示したものである。これらの図から、以下の諸点が明らかになった。

(1) 実験 (I-1) 及び (I-3) の場合、 P/P_0 はマウンド内でほとんど減衰しないが、実験 (I-2) の場合には 0.6 程度にまで減衰する。

(2) 実験 (I-1) 及び (I-3) の場合裏込石内では、 P/P_0 は x/h に対して 0.10~0.20 程度の割合で減衰する。一方、実験 (I-2) の場合には 0.4 程度の割合で、ほぼ直線的に減衰する。ただし、(I-1) ではデータにバラ

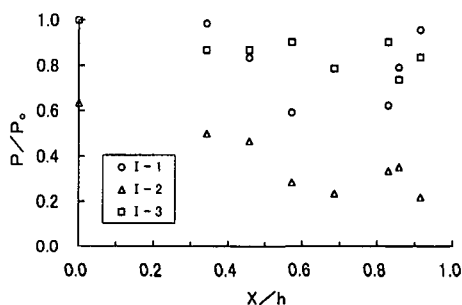


図-2(a) 裏込石内における変動圧の減衰

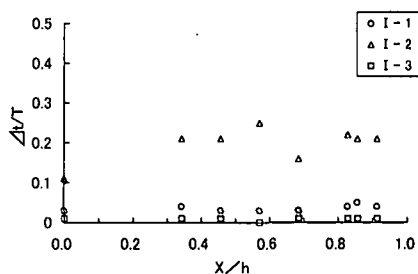


図-2(b) 裏込石内における変動圧の位相遅れ

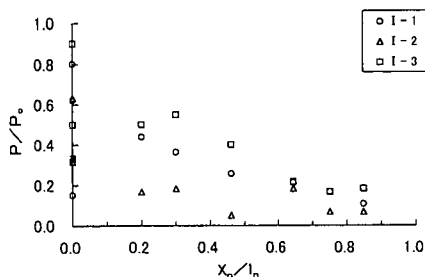


図-3 裏埋砂内における変動間隙率水圧の減衰

ツキがある。

(3) 実験 (I-1) と (I-3) では、 $\Delta t/T$ はマウンド及び裏込石内ではほとんどゼロであるが、実験 (I-2) ではマウンド内では 0.1 程度になり、裏込石内では 0.1~0.2 の範囲の値をとりながら、 x/h と共に増大する。ただし、両者の相関性は低い。

b) 裏埋砂内の伝播特性

図-3 は裏埋砂内における無次元変動間隙水圧 P/P_0 と x_n/l_n の関係を実験ケース毎に示したものである。

この図から、以下の諸点が明らかになった。

(1) 実験 (I-1) 及び (I-2) の場合には、上方開放型垂直 1 次元モデルの場合 (滝口, 2002) と同様に、 P/P_0 は x_n/l_n の増大に伴いほぼ直線的に減衰する。ただし、減衰係数は前者が約 0.5 であり、後者は 0.3 程度である。

(2) 実験 (I-3) の場合には、 P/P_0 は上方閉鎖型垂直 1 次元モデルの場合 (滝口 2002) の場合と同様に、 x_n/l_n の増大につれて、ほぼ指数関数的に減衰する。

なお、位相遅れに関しては、裏埋砂内での変動間隙水圧の出力が減少したこともあり、信頼にたる $\Delta t/T$ のデータは検出できなかった。

3.2 第 II シリーズの実験結果及び解析

第 II シリーズの実験は、表-1 に示した 9 種類の護岸模型を用いて行った。計測データのうち、波高計と 7 個の間隙水圧計の出力は 3.1 節と同じ方法で処理し、データ化した。一方、水槽の両側から撮影した裏込石内の水位変動と裏込石内に落下・堆積した裏埋砂の映像は、全て PC に取り込み、前者からは変動水位の振幅 A_m を定めた。また、後者からは裏込石の中に落下した裏埋砂の全投影面積 S 、最高位の高さ y_s 並びにマウンド内へ流入した裏埋砂の投影面積 S_m を定めた。

図-4 は実験 (II-1) において、造波開始後、3 時間にわたって撮影した映像から求めた裏埋砂の堆積および移動状況の経時変化図である。ただし、図に示す各形状線は、左右両側のビデオ映像から得られた形状線を平均したものである。また、この図には上に述べた堆積及び移動砂の各形状特性項も併せて示した。残り 8 ケースの実

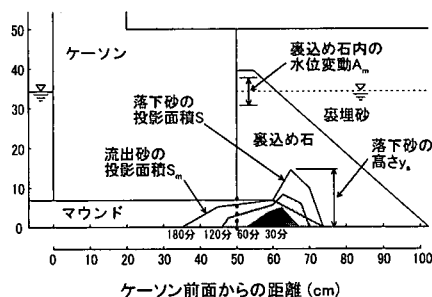


図-4 裏埋砂の堆積および移動状況例 (実験 II-1)

表-2 シリーズ II の解析結果

実験	A_{m0} (cm)	A_m (cm)	S (cm ²)	y_s (cm)	S_m (cm ²)
II-1	3.0	2.5	229.0	12.0	70.0
II-2	2.2	1.9	222.0	13.5	40.0
II-3	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0
II-4	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0
II-5	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0
II-6	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0
II-7	4.0	1.5	302.0	14.0	78.0
II-8	5.5	1.0	451.0	13.0	294.0
II-9	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0

備考: A_{m0} は造波開始直後における水位変動の振幅である。

験に対しても同様な整理を行った。表-2 は、造波 12 時間後の各形状特性項の値をまとめたものである。

これらの解析結果と実験中の目視観測の結果から、以下の諸点が明らかになった。

(1) 実験 (II-3), (II-4), (II-5), (II-6) 及び (II-9) では 12 時間にわたる造波時間中、 A_m の値は常に 1.0 cm 以下であり、裏埋砂の落下は一切、発生しない。

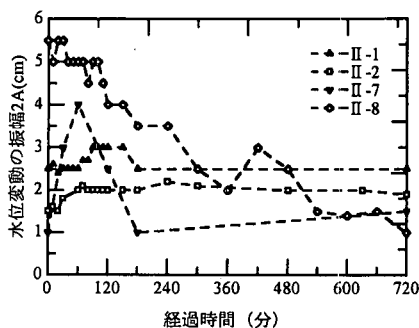
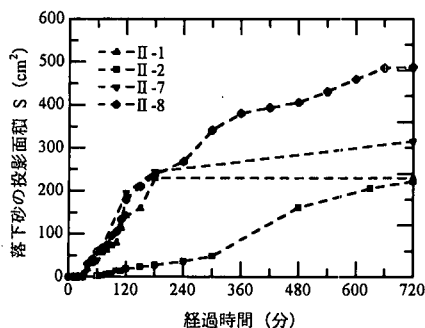
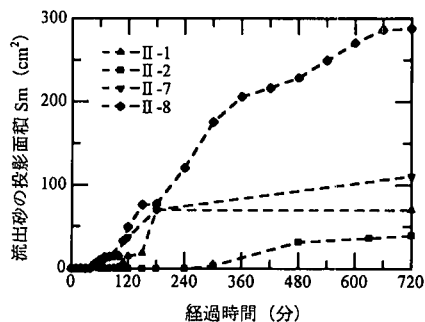
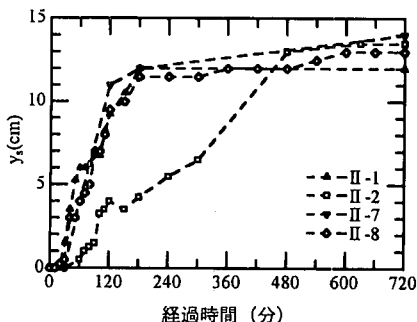
(2) 実験 (II-1), (II-2), (II-7) 及び (II-8) では造波開始直後 ((II-2) では 1 時間後) から、 A_m 値が 2.2 cm より大きく、裏埋砂は水位が変動する付近でのみ落下する。

(3) 裏埋砂の落下に伴い、落下点の上部に空洞が出来、成長するが、やがて表層が急崖状に陥没する。

次に、裏埋砂が落下した上記 4 ケースの実験について、堆積・移動した砂の各形状特性の経時変化を詳細に調べてみる。図-5(a)~(d) は各形状特性の経時変化を、実験ごとに記号を変えて示したものである。これらの図から、以下の諸点が明らかになった。

(1) 実験 (II-1), (II-7) 及び (II-8) では造波開始直後から A_m が 2.5 cm を越え、裏埋砂の落下も始まっているが、実験 (II-2) では、造波開始後 1 時間たつてから A_m が 2.2 cm を越え、裏埋砂の落下が始まっている。

(2) 実験 (II-1), (II-7) 及び (II-8) では、造波開始後から 2 時間の間、 A_m は 2.2 cm 以上の値を保ち、

図-5(a) 裏込石内における A_m の経時変化図-5(b) 堆積砂の総投影面積 S の経時変化図-5(c) マウンド内における S_m の経時変化図-5(d) 堆積砂の高さ y_s の経時変化

S は約 $100 \text{ cm}^2/\text{h}$ の割合で増大する。 S の増大により、実験 (II-7) 及び (II-8) では A_m の値は減少するが、造波

8時間までは、実験 (II-7) を除いて 2.2 cm 以上の値を保つ。

(3) 実験 (II-1), (II-7) 及び (II-8) では造波開始後1時間経過して、 S がほぼ 60 cm^2 に達した頃から S_m が現れるが実験 (II-2) では造波開始後5時間たって初めて S がほぼ 60 cm^2 に達し、 S_m が現れるようになる。

(4) 実験 (II-1), (II-7) 及び (II-8) では y_s は造波開始1時間後に 6 cm になり、3時間後には約 12 cm に達して平衡状態になるが、実験 (II-2) では造波5時間後に y_s が 6 cm になり、8時間後には約 12 cm に達して、成長が止まる。

4. 考 察

3.2節で述べた裏埋砂の堆積量 S 及びマウンドへの流量 S_m は共にカメラの画像から求めた投影面積であり、それらの容積又は質量とは結びつかない。そこで、内径 8.2 cm 、長さ 50.0 cm の透明アクリルパイプに、裏込石として用いた粒径 $10 \sim 20 \text{ mm}$ の砂利を高さ 10.0 , 15.0 , 20.0 及び 25.0 cm の4種類に詰めて水で満たし、その中に気乾状態の珪砂5号を満遍なく落下させ、砂が砂利の表面に達するまで投入したときの質量を計測した。この計測を3回繰り返し、裏込石の間に落下した砂のみかけの密度 ρ_s を決定した。その結果、 ρ_s として 0.55 g/cm^3 を得た。この値を使うと、本実験の場合、造波水槽の幅は 30 cm であるから、堆積砂の投影面積が $S (\text{cm}^2)$ の時の気乾状態の質量 $W (\text{g})$ は次式で予測することができる。

$$W(\text{g}) = 16.5(\text{g/cm}^2) \times S(\text{cm}^2) \dots \dots \dots (1)$$

一方、実験終了後に、裏込石及びマウンド内に堆積した砂を洗い出し、それぞれの気乾状態の質量を測定する作業を5回実施した。図-6は堆積砂の投影面積と測定した質量との関係プロットしたものである。図中、実線は先に求めた(1)式を示す。これから、投影面積を測れば、(1)式を用いて、落下・移動した砂の質量をかなりの精度で推測できることが判った。

次に、裏埋砂の落下に大きな影響を与える裏込石内の

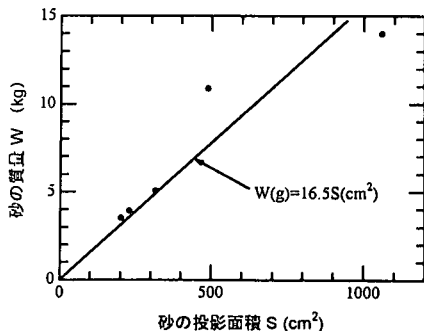


図-6 堆積砂の投影面積と気乾質量の関係

