

砂層内における空洞形成に関する実験

国土交通省国土技術政策総合研究所

河川研究部 海岸研究室

1. 目的

2001年12月30日、明石市大蔵海岸の人工海浜において、砂浜が陥没し女児が生き埋めとなり死亡に至る事故が発生した。現在、土木学会海岸工学委員会に大蔵海岸陥没事故調査小委員会が設置され、事故原因の解明が行われているところである。

小委員会の審議により、「防砂板に生じた損傷から養浜砂が流出し、砂のアーチアクションとサクションによって空洞が維持された。」ことが解明されつつある。しかし、砂層内の空洞の形成過程については、各段階の形跡が残されていないため解明が進んでいないのが現状である。

本水理模型実験は、空洞の形成過程の解明の一助となることを目的とする。ただし、砂の挙動を対象とした水理模型実験では、相似則を満足させることができないため、砂層内の空洞の形成過程を定性的に把握することを主目的とする。

2. 実験概要

(1) 模型および観測計器の配置

実験装置を図-1、写真-1に示す。

模型は、大蔵海岸を模しており、模型縮尺は1/10である。ケーソン模型（アクリル製）2基が10mmの隙間を空けて設置され、その上に上部コンクリート模型（アクリル製）がネジで固定され、隙間の上部を塞いでいる（写真-2）。ケーソン模型間の隙間には、防砂板模型（アクリル製）がネジによってケーソン模型および上部コンクリート模型に取り付けられている。防砂板模型には損傷状況を模してスリットを設けてある（写真-3）。また、ケーソン模型および上部コンクリート模型にはハンドホールが設けられており、内部からも観察できるようになっている（写真-4）。

陸側については、平均潮位相当（模型ではケーソン模型の天端より12cm低い位置）までを単粒度碎石5号（粒径13～20mm）、その上部に

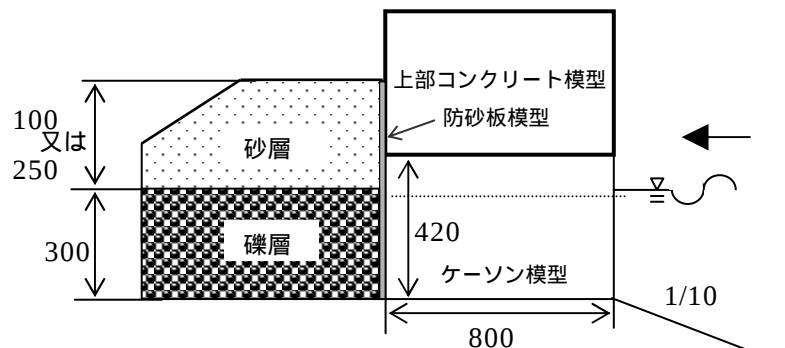


図-1 模型概要（単位：mm）



写真-1 実験装置側面

砂を設置した

海側については，前面の海底勾配を 1/10 とした．また，造波中にケーソン模型からの反射波により水路内に重複波が発生するため，ケーソン模型より 90cm 離れた箇所に反射吸収装置を設置した（写真 - 5）．波高を計測するため，ケーソン模型の前面および沖側に波高計をそれぞれ 1 本ずつ配置した．

また，ケーソン模型内に設置したビデオカメラで防砂板模型背後の砂層の状況を観察した．

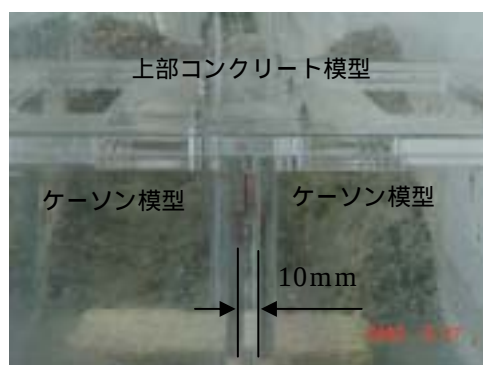


写真 - 2 実験装置（海側）

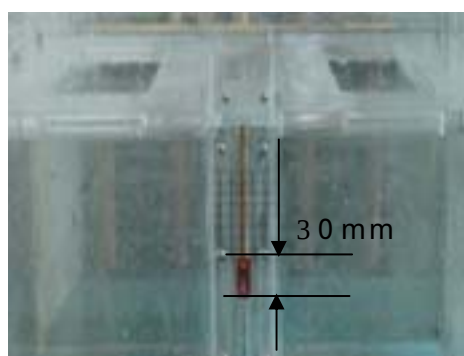


写真 - 3 実験装置（陸側・砂礫設置前）

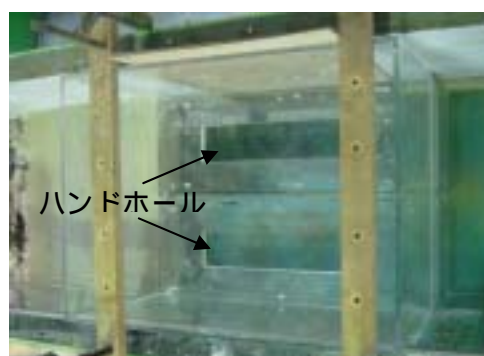


写真 - 4 実験装置（ハンドホール）



写真 - 5 実験装置（反射吸収装置）

（ 2 ） 実験 ケース

実験ケースの一覧を表 - 1 に示す．

波浪条件は，現地の常時来襲波波高 50cm，周期 5 秒をもとに波高約 5cm 周期 1.5 秒とした．また，現地の東突堤には消波工が設置されており，防砂板に常時作用する波力はこれよりも小さいと考えられるので，比較のため波高約 2cm，周期 1.5 秒の場合を設定した．ケーソン模型海側前面より 40cm の地点で設定波高となるように造波を行ない，砂の流出がほぼ止まった時点で造波を停止した．表 - 1 には，実測された波高の平均値を示す．なお，空洞の形成には，波浪及び潮位変動が関係していることが考えられるが，今回の実験では

波浪による空洞形成のみを対象とし、平均水位を平均潮位相当で一定とした。

防砂板模型は、図 - 2 の通り 2 タイプを用いた。事故現場の防砂板の損傷は、平均潮位から下方へ約 30cm の亀裂となっており、他の個所に設置された防砂板の亀裂より短い。そこで、事故現場の防砂板の損傷状況を模して、スリット上端の位置を平均水面に合わせ、スリットの長さを現地スケール 30cm に相当する 3cm とした Type-A と、スリットの上端の位置を平均海面より 1.5cm（現地スケールで 15cm）高くした Type-B 3，B12（添字 3，12 は図 - 2 に示すスリットの長さ：cm）とした。また、防砂板の亀裂は縦長であり、波浪による海水の流入・流出時に最大値としてはケーソン間の隙間程度まで広がっていた可能性もある。しかしそれを証明するデータがないため、ここではスリット幅をケーソン間の隙間の約 $1/2$ （5mm）と仮定した。また、砂の流出を抑制したケースとでは更に狭い 3mm を選択した。

礫層上部の砂層については、養浜砂の中央粒径は約 1mm であり $1/10$ に縮小すると 0.1mm となるが、粒径を小さくするとサクションが大きくなって水位が上昇し、含水率分布が現地と著しくことなることが予想されるため、中央粒径 0.35mm の東北硅砂を用いた。ただし、礫層を砂で充填した場合、砂の初期流出以降、空洞の成長が見られなくなったケースがあるので、スリット幅が 3mm の場合、中央粒径 0.5mm の粗砂を用いて比較した。なお、砂層厚は、空洞の内空の測定を目的とした場合には 25cm（現地 2.5m）、その他は 10cm とした。

礫層については、現地に比べて砂が礫より相対的に粒径が大きいので礫層内を砂で充填しないものとし、比較のためあらかじめ上層の砂で充填して砂の礫層への流出を抑制したケースを設定した。

表 - 1 実験ケース

ケース No	波高 (cm)	砂礫内 の充填	砂層厚 (cm)	砂質	防砂板模型	
					タイプ	幅(mm)
1	4.1	無	25	硅砂	B3	5
2	4.9	無	25	硅砂	B12	5
3	5.6	無	10	硅砂	B12	5
4	5.4	無	10	硅砂	B3	5
5	1.8	無	10	硅砂	B3	5
6	5.2	無	10	硅砂	A3	5
7	2.3	無	10	硅砂	A3	5
8	5.0	無	25	硅砂	A3	5
9	5.4	有	10	粗砂	B3	3
10	4.9	有	10	粗砂	A3	3
11	5.2	有	10	硅砂	A3	5

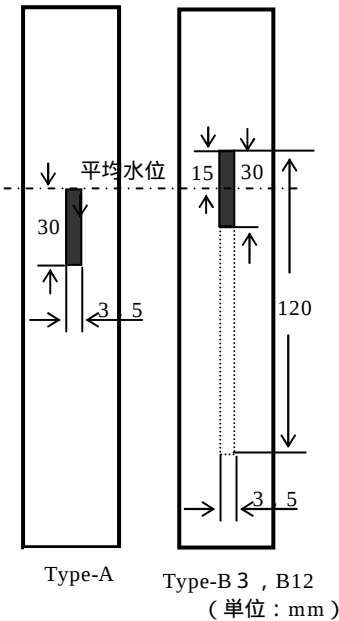


図 - 2 防砂板模型タイプ

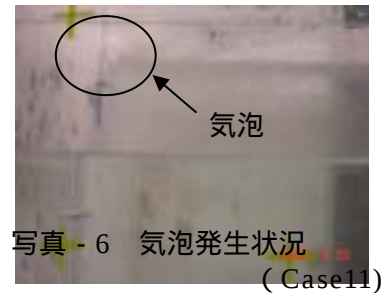
3．結果

- (1) 砂層厚が 25cm の場合 (ケース 1 , 2 , 8) および礫層内を砂で充填した場合 (ケース 9 , 10 , 11) では空洞が発生したが , 陥没は生じなかった . 礫層内を充填しない場合 (ケース 3 , 4 , 5 , 6 , 7) では , 空洞が発達し陥没が起きた (表 - 2) .
- (2) 礫層内を珪砂で充填した場合 (ケース 11) では , 引き波時に防砂板模型に設けたスリットから気泡が発生するとともに , 初期段階で砂の流出が停止し , 砂層中には顕著な空洞が発達しなかった (写真 - 6) .
- (3) ケース 11 以外の場合には , 防砂板模型に設けたスリットから , 断続的な砂の流出が観察された (写真 - 7) .
- (4) 事故現場の防砂板の損傷を再現した Type-A では , 縦長の空洞が形成された . また , Type-A で陥没が発生する場合には , 図 - 3 , 写真 - 8 に示すように短時間で発生した .
- (5) 空洞が形成された場合には , その側壁はほぼ鉛直な壁面を形成している (写真 - 9) .
- (6) 水は押し波時に , Type-A では鉛直上向き流れとなって水が流入し , Type-B では水平方向に噴き出すように流入していた (写真 - 10) .

表 - 2 空洞形成 , 陥没 , 砂流出の有無

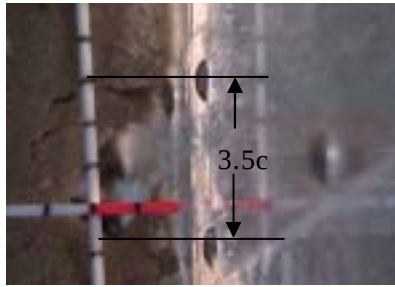
Case No.	砂層厚 (cm)	防砂板模型 Type	空洞形成	陥没	砂流出
1	25	B3	○		○
2	25	B12	○		○
3	10	B12	○	○	○
4	10	B3	○	○	○
5	10	B3	○	○	○
6	10	A3	○	○	○
7	10	A3	○	○	○
8	25	A3	○		○
9	10	B3	○		○
10	10	A3	○		○
11	10	A3			

：造波初期段階から防砂板模型のスリットから気泡が発生し , 空洞の成長が停止した .

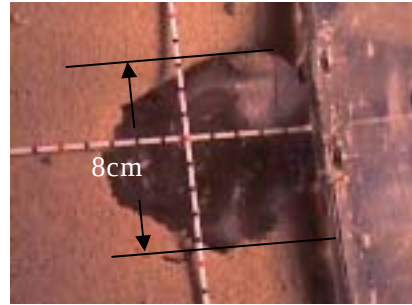




Case3(6 分後)



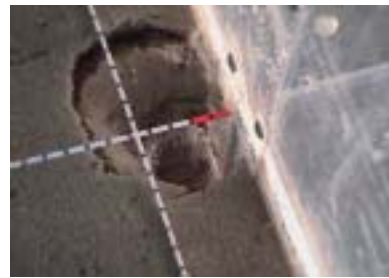
Case6(2 分後)



Case4(18 分後)



Case7(3 分後)



Case5(30 分以上)

a)Type-A

b)Type-B

写真 - 8 陥没状況 (括弧内は陥没発生時刻): 左側に Type-A , 右側に Type-B

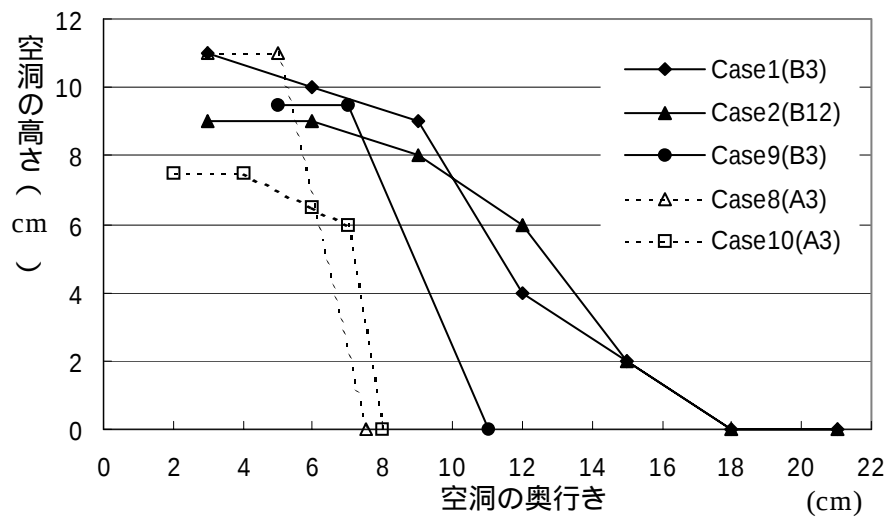


図 - 3 陥没しない場合の空洞断面図 (ケーソン模型面に鉛直な面)

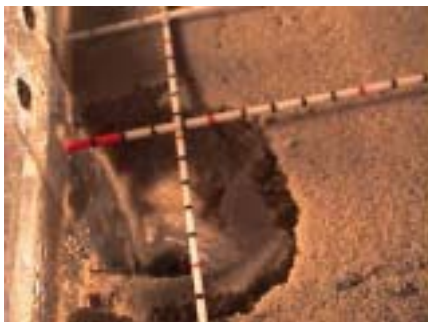


写真 - 9 空洞の側壁 (Case5)



写真 - 10 水の流入状況 (Type-B)