

水道管等による空洞保持に関する検討

平成15年4月19日

土木学会海岸工学委員会

大蔵海岸陥没事故調査小委員会

．まえがき

土木学会海岸工学委員会は、平成13年12月に発生した大蔵海岸の陥没事故について大蔵海岸陥没事故調査小委員会を組織し、工学的な観点から事故の原因究明と今後の対策の提言を平成14年6月に「大蔵海岸陥没事故調査報告書」としてとりまとめたところであるが、時間的制約により調査報告に盛り込まれなかった、水道管等の空洞保持に与える影響を検討するため、大蔵海岸陥没事故調査小委員会にワーキンググループを設け実験による検討を行った。

「大蔵海岸陥没事故調査報告書」においては、縮尺1/10の模型を用いて波浪による砂層内における空洞形成に関する実験を行っている。そこで、まず、同じ縮尺で設置された水道管が空洞の発達に与える影響を確認するための追加実験を行った。ついで、現地の養浜砂を用いた実物大の実験が必要であるという観点から、水道管等が空洞の保持に与える影響を把握するための実物大実験を行った。

．水道管が空洞の発達に与える影響を確認するための追加実験

1．実験目的

水道管が空洞の発達に与える影響を確認する。大蔵海岸陥没事故調査小委員会に報告されている「砂層内における空洞形成に関する実験」で使用した現地比1/10スケールの模型に水道管模型を埋設し実験を行う。水道管がある場合、無い場合について実験を行ない、空洞の形状・大きさを把握する。

2．実験方法

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、縮尺は1/10である。実験装置は、写真2、図2に示すようにケーソン模型（アクリル製）2基を10mmの隙間を空けて設置し、その上に上部コンクリート模型（アクリル製）を固定し、隙間の上部を塞いだ。ケーソン模型間の隙間を塞ぐように防砂板模型（アクリル製）を、ケーソン模型および上部コンクリート模型に取り付けた。防砂板模型には損傷状況を模してスリットを設け

た。スリットは、事故現場の防砂板の損傷が平均潮位から下方へ約 30cm の亀裂となっていることから、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。スリット幅は、ケーソン間の隙間の約 1/2 (5mm) とした。

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) までを礫層 (単粒度砕石 5 号: 粒径 13~20mm), その上部に砂層を設置した。礫層・砂層の厚さは現地の 1/10 の 30cm, 25cm とした。

砂層については、現地砂の中央粒径は約 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、含水比分布が現地と著しくことなることが予想されるため、実験では中央粒径 0.35mm の東北珪砂を用いた。

砂層中には水道管を模したプラスチック製の管を埋設した。管の直径は実物の 1/10 の 5mm とした。水道管は、現地ではケーソンより 14cm 離れた位置に水平に設置されていたことから、ケーソン模型より 14mm 離れた位置に水平に設置した。水道管は、現地では砂層下端より 169cm の位置に埋設されていたことから、水道管の中心高さは砂層下端より 169mm とした。

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 離れた箇所反射吸収装置を設置した。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必要に応じて観察した。

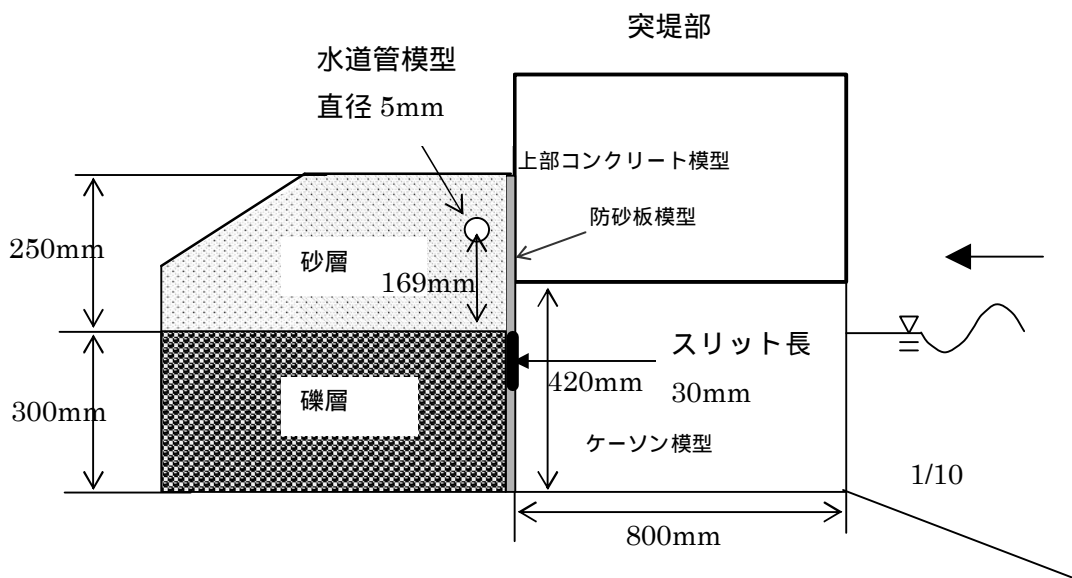


図 1 実験施設概要



波

写真1 実験施設

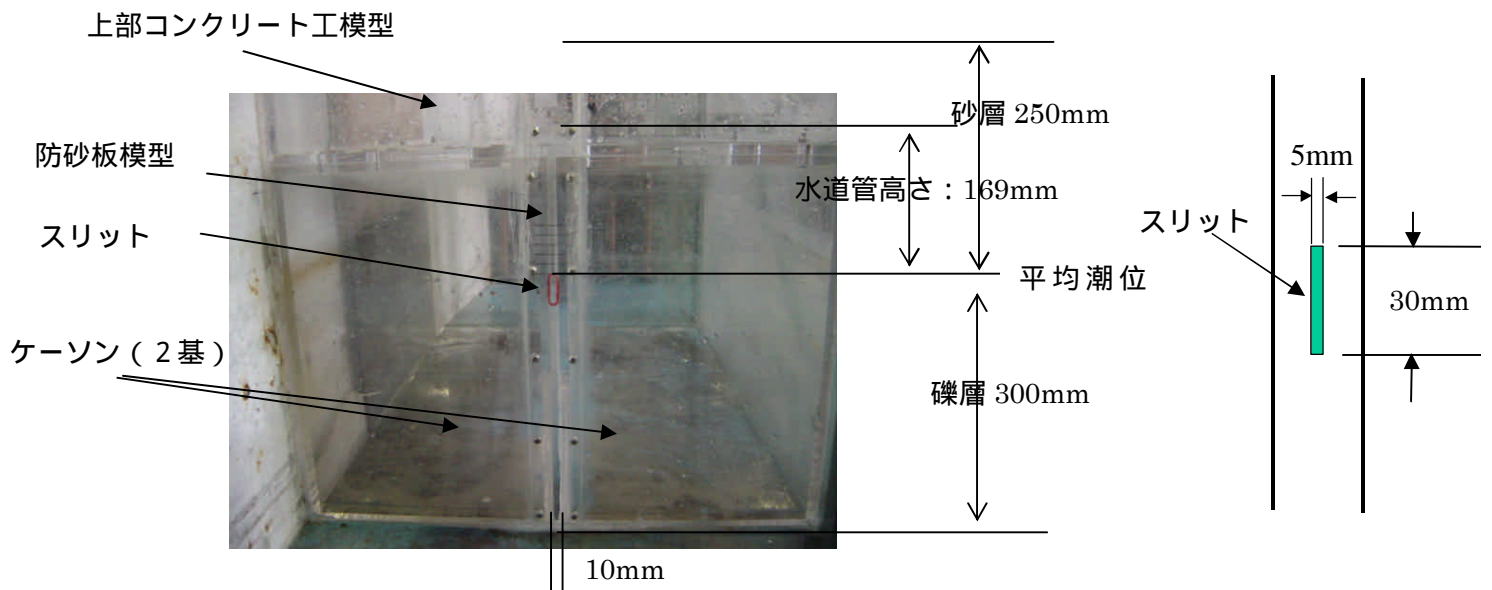


写真2 突堤部模型概要(陸側より)

図2 防砂板模型

3. 実験ケース

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 5cm 周期 1.5 秒とした。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。

砂に関する実験では，含水比・密度のわずかな変化が，結果のばらつきに影響を与えるおそれがあるため，この影響を取り除くため「水道管がある場合」(ケース1)を3回，「水

道管が無い場合」(ケース2)を2回実施した。実施にあたっては、5回とも実験の都度、砂・礫の層を造り直した。

なお、「水道管が無い場合」(ケース2)については、大蔵海岸陥没事故調査小委員会に報告された「砂層内における空洞形成に関する実験」において、同じ条件で実験が行われている。

4. 実験結果

(1) 既往の実験と同様、今回実施した5回の実験のいずれも、防砂板模型に設けたスリットから、波の作用により断続的な砂の流出が観察された。

(2) 既往の実験と同様、今回実施した5回の実験のいずれも、縦長の空洞が発生したが、陥没には至らなかった。

(3) 図3にケーソンから空洞の奥行き方向に空洞の高さを測った結果を示す。

ケース1の空洞最大高さの平均は9.7cm。そのばらつきは3cm。

ケース2の空洞最大高さの平均は9.5cm。そのばらつきは1cm。

なお、ケース2に、同じ条件で実施した既往の実験を含めると、最大高さの平均は10.0cm。そのばらつきは2cm。

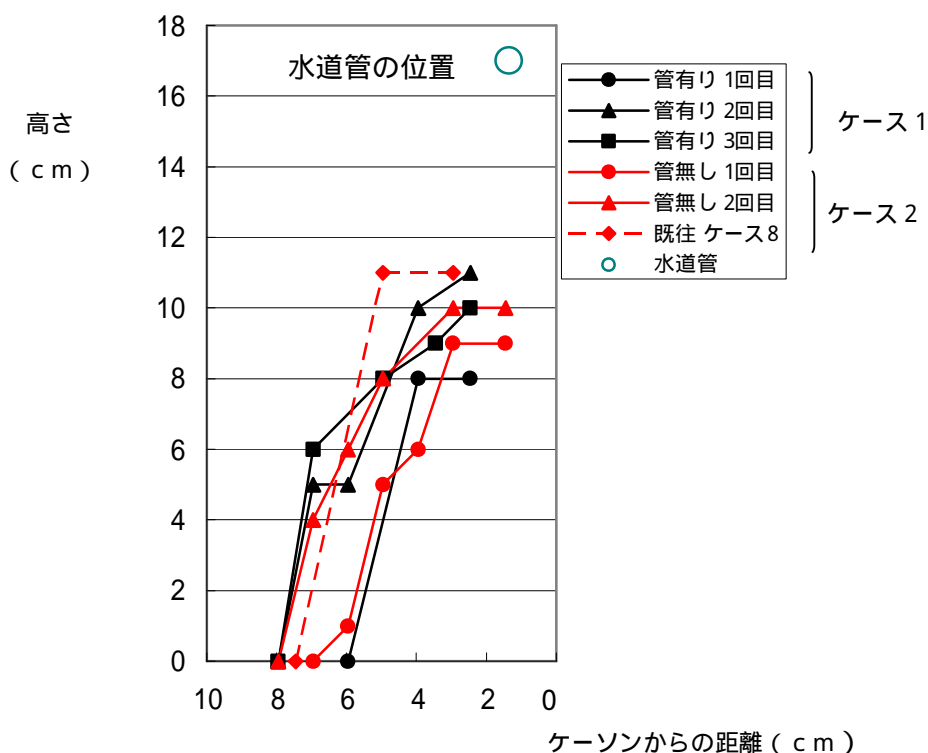


図3 空洞縦断面図

5 . 考察

既往の実験と同様，波の作用により縦長に空洞が発達することがあらためて確認された .

(結果 (1) , (2))

発生した空洞の高さはばらつきを示すものの，水道管の有無にかかわらず同程度の高さであるため，「水道管の有無により空洞の発達に有意な差が生じる」とは言えない . (結果 (3))

・水道管等が空洞の保持に与える影響を把握するための実験

1. 目的

水道管等の有無が空洞の保持に与える影響を把握するため、大蔵海岸の養浜砂を現場土質条件に近い条件に調製した砂および現地で使用されていたものと同じ水道管および標示テープを用いて実物大実験を行い、形成された空洞の形状の把握、および空洞が形成された場合の地盤の耐荷力測定を行う。

2. 方法

(1) 実験手順

実験の手順は以下の通りである。

砂層内に空洞を発生させるため、箱（3側面と底面は木製、上面は氷製、他の1側面はガラス面）をあらかじめ砂層中に設置する。箱上面の氷の中央部を加熱することにより、氷を溶かし割る。箱の中に上部の砂が落下することにより、空洞が形成される（図1）。なお、本実験の空洞形成過程は、現地を再現していることを保証するものではない。

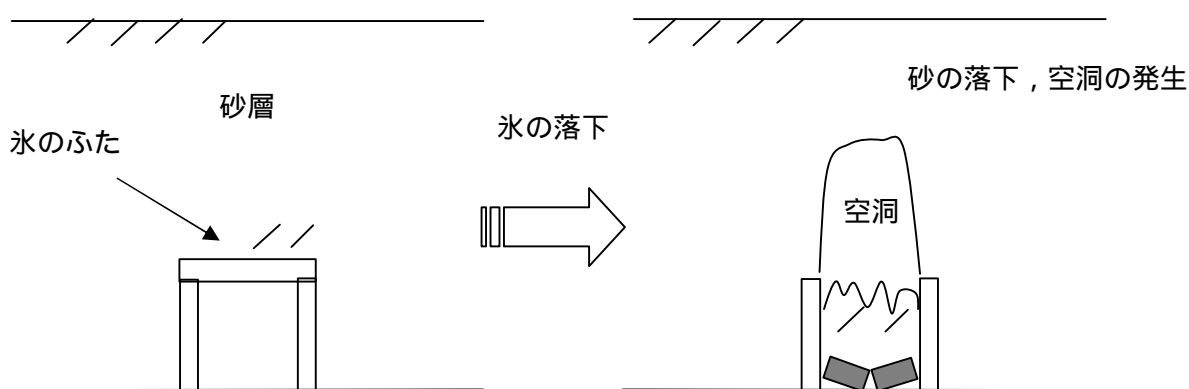


図1 空洞の形成

空洞が形成・保持された場合には、大きさ・形状等を観察し、その最大耐荷力を計測するとともに、水道管の有無が保持力に与える影響を把握する。空洞の保持力については、空洞上方の砂の上に縦15cm 横24cmの鉄製の載荷板を設置し、その上に載荷して測定した（図2）。荷重と歪みの関係、陥没が発生する載荷量をロードセルにて把握した。最大載荷重は100kgを目安とした。

なお、図2で示すようにガラス面での砂の厚さを空洞上方砂層厚とした。

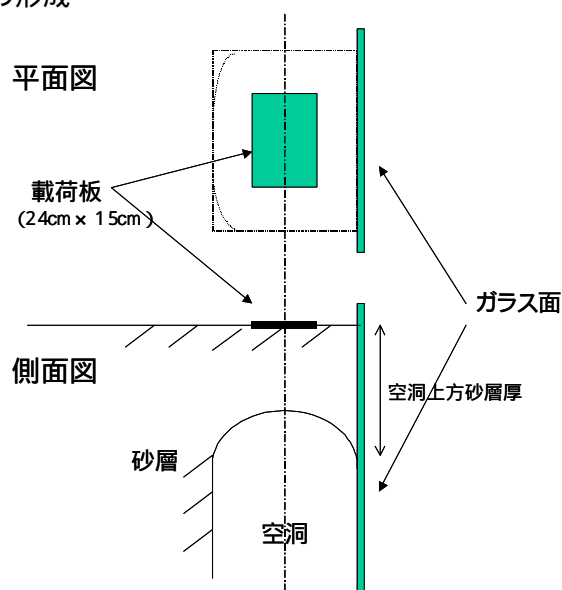


図2 載荷試験

(2) 実験装置

実験装置の概要を図3に示す。縮尺は実物大となる。

実験砂は、図4に示す位置で採取された大蔵海岸の養浜砂を用いた。水道管は、大蔵海岸に埋設されていた水道管（直径4.8cm、塩化ビニール製）を1.9mの長さに切り取り、両端を固定しない状態で埋設した。水道管の上方21cmの標示テープ（幅15cm）は、地中で切断されないよう熱圧着により折り込まれた状態（写真1）で設置されていたので、本実験でも現地に埋設されていた標示テープを折り込み、熱圧着し設置した。

空洞を発生させるため予め砂層中に設置する箱は、大蔵海岸で事故後発見された半円状の空洞を基に幅×奥行きが50cm×30cmと90cm×50cmとし、土砂が落下する空間として高さ50cmとした。空洞上方の砂層厚を変化させるため、箱を設置する高さを変化させた。

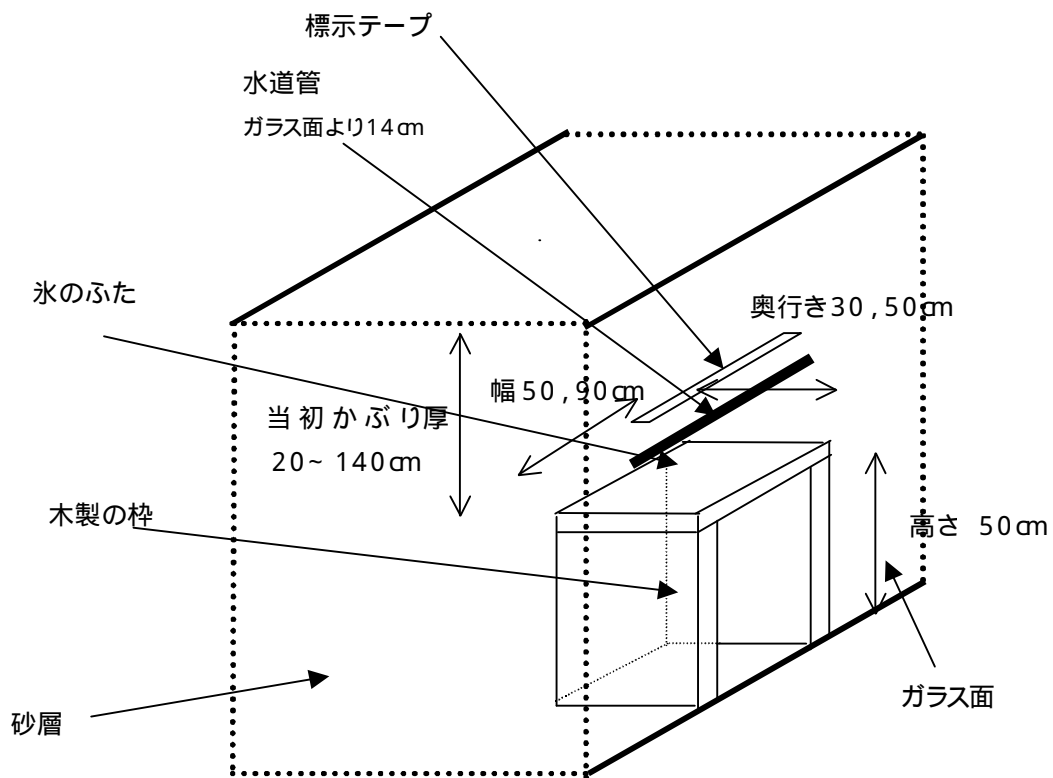


図3 実験装置概要

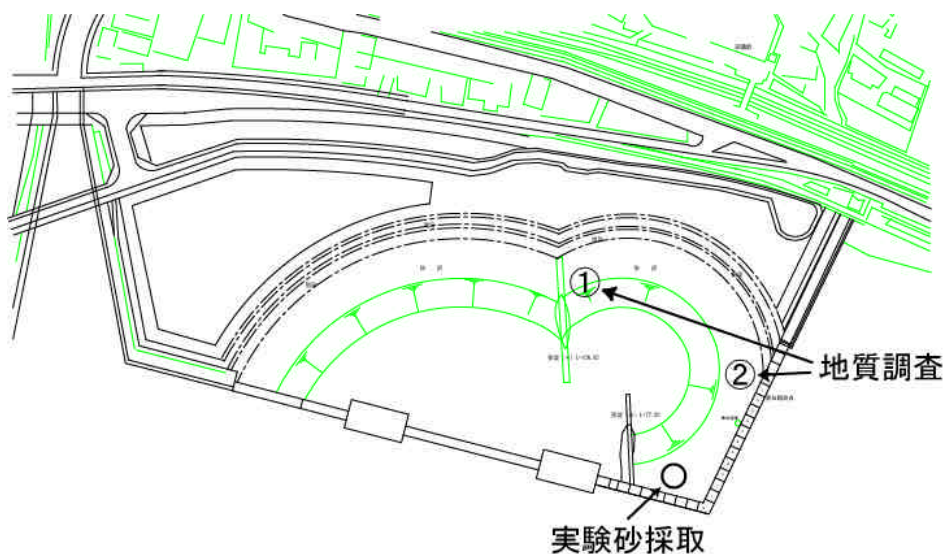


図4 実験砂採取，地質調査位置

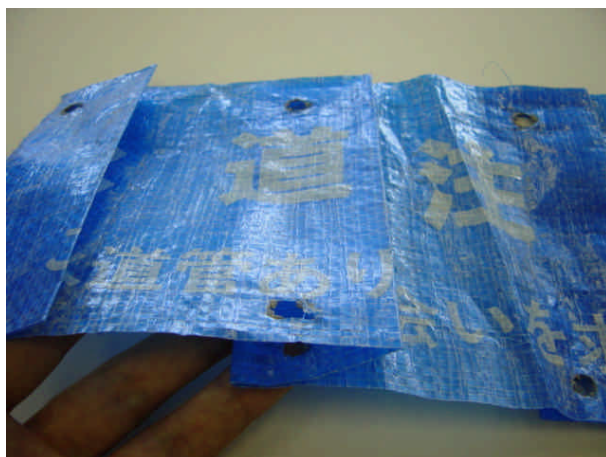


写真1 標示テープ

(3) 土質条件

湿潤密度は、現地調査(平成14年4月実施、位置は図4の、参照)では $1.54 \sim 1.69 \text{g/cm}^3$ の範囲で平均 1.60g/cm^3 (図5)であることから、目標湿潤密度を 1.60g/cm^3 として砂層を20cm積み上げることによりタンパー(60kg)で締め固めた。締め固めにあたっては事前に、タンパーで2回締め固めるとそれ以上締め固めても体積に変化がないこと、このときの湿潤密度が概ね 1.60g/cm^3 であることが確認されたため、締め固めはタンパーで2回締め固めることとした。また、砂層の密度の影響を確認するため、砂層がゆるい状態(タンパーでの締め固めに際して、砂層上に幅90cmの板を敷き、その板の上から砂層を2回締め固めた。タンパーの幅は30cm)での実験も行った。

含水比は、現地調査では 4.8～6.3%の範囲で平均 5.4% (図 6) であるため、目標含水比 5.4%とした。(なお、図 5、図 6 の は各ケースの平均である。)

実験後、表面より概ね 50cm ごとに含水比・密度を測定した。

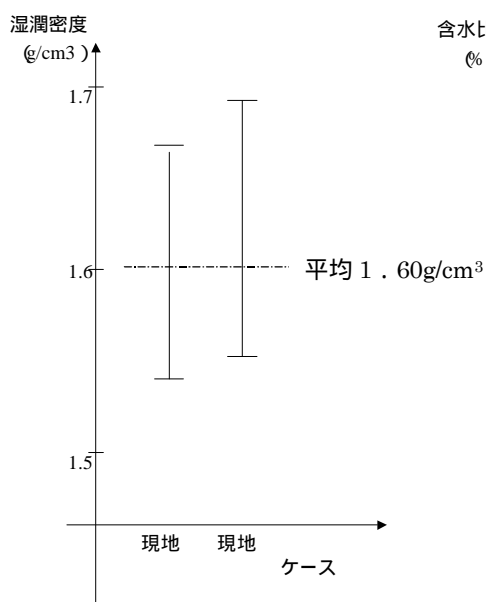


図 5 湿潤密度 (現地)

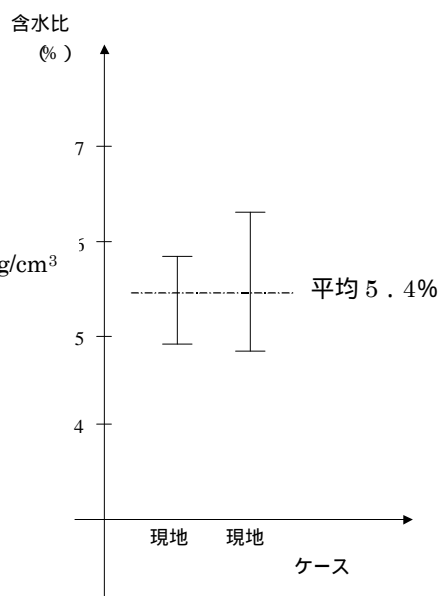


図 6 含水比 (現地)

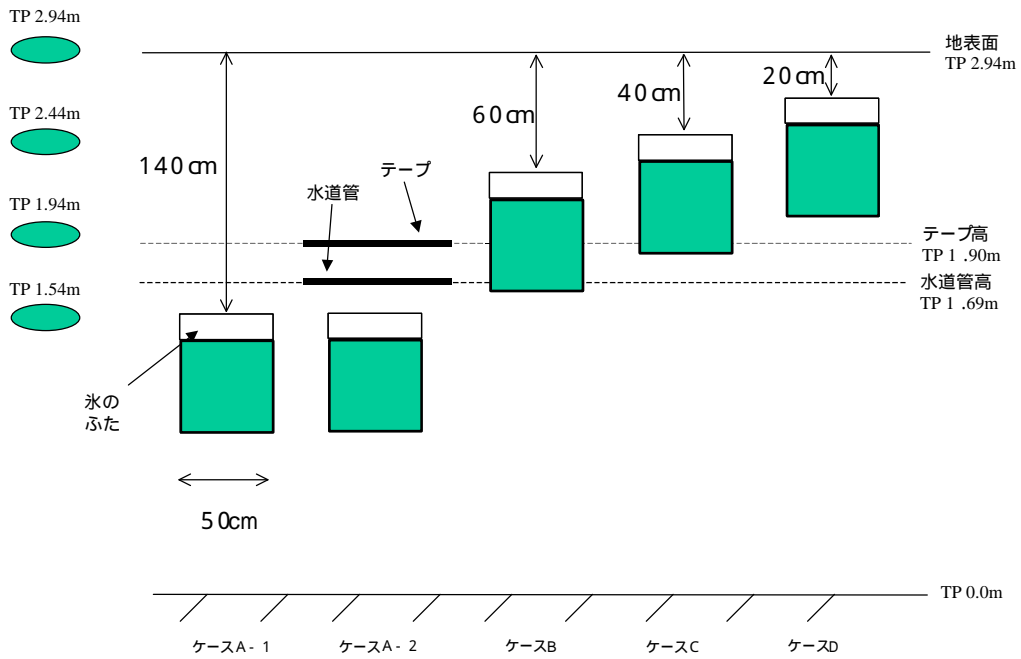
3. 実験ケース

実験ケースは、設置する箱の高さ、水道管の有無、箱の大きさ、砂の締め固め状態を組み合わせて 9 ケースを設定した。各ケースの諸元は表 1、図 7 の通りである。

表 1 実験ケース

ケース	当初かぶり厚 (cm)	水道管の有無	空洞の幅 (cm)	締め固め状態
ケースA-1	140	無	50	現地
ケースA-2	140	あり	50	現地
ケースB	60	無	50	現地
ケースC	40	無	50	現地
ケースD	20	無	50	現地
ケースE-1	140	無	90	現地
ケースE-2	140	あり	90	現地
ケースF-1	140	無	50	ゆるい
ケースF-2	140	あり	50	ゆるい

表面より50cmごとに
空洞下端まで密度・含水比把握



表面より50cmごとに
空洞下端まで密度・含水比把握

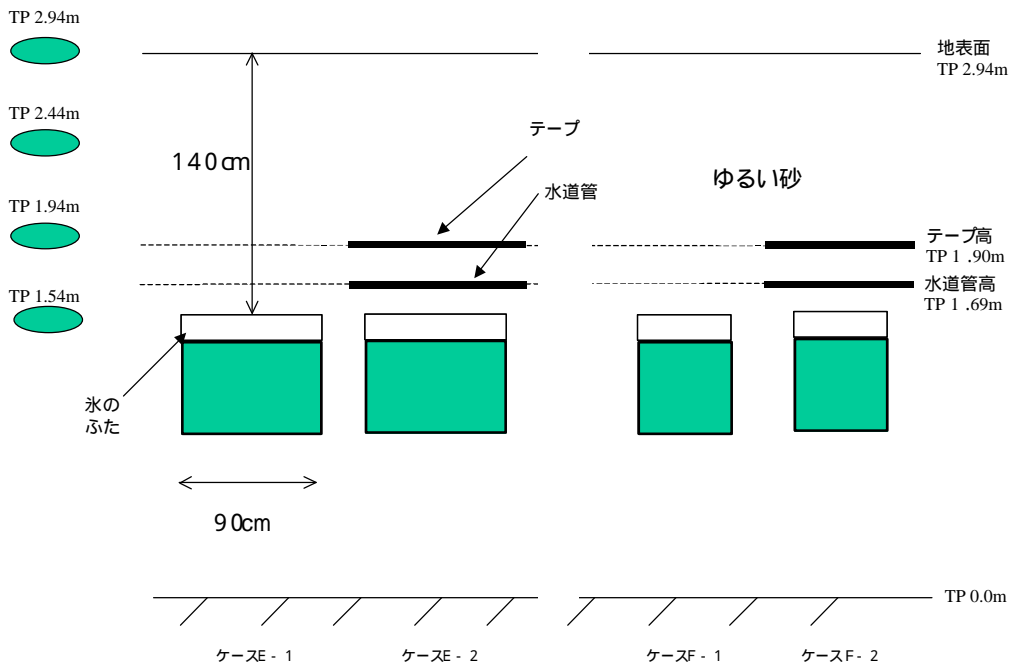


図7 実験ケースのイメージ

4. 実験結果

(1) 実験後測定した湿潤密度は目標 1.60 g/cm^3 に対して $1.57 \sim 1.63 \text{ g/cm}^3$ の範囲で平均 1.61 g/cm^3 (図8), 含水比は目標 5.4% に対して $4.6 \sim 5.5\%$ の範囲で平均 5.1% であった(図9). 含水比は目標よりやや低めではあるが, ほぼ均一な状態であった.
(なお, 図8, 図9の は各ケースの平均である.)

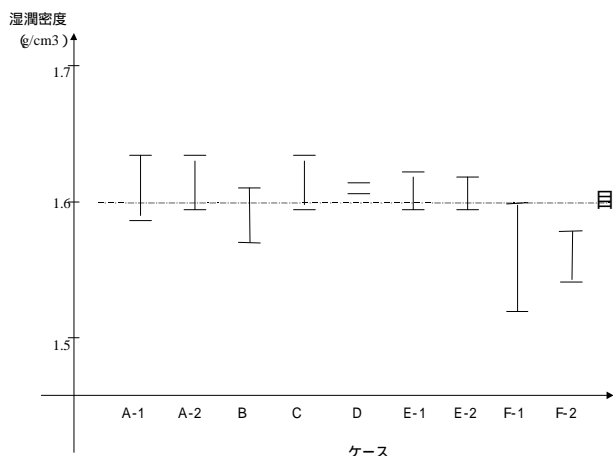


図8 湿潤密度 (結果)

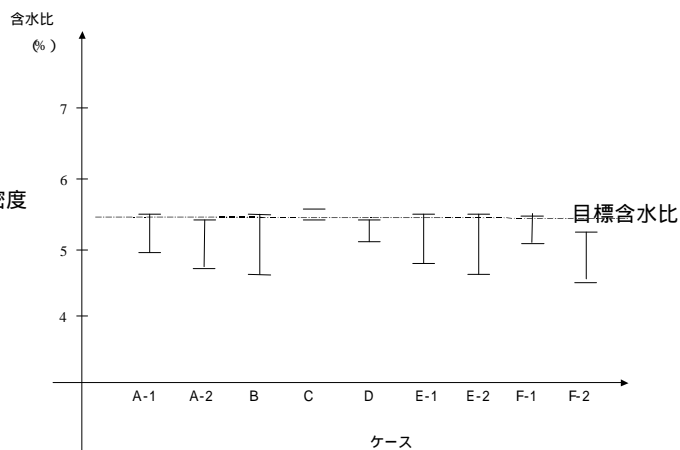


図9 含水比 (結果)

- (2) 氷が落下する前に氷が溶け, 変形するとともにすべり面が形成された.
(3) ケースA - 1, A - 2, B, C, E - 1, E - 2では砂層内に空洞が保持された.
ケースD, F - 1, F - 2では陥没した.
空洞が形成, 保持されたケースについて
(ケースA - 1, A - 2, B, C, E - 1, E - 2)

a) 箱の幅が 50cm のとき

水道管がない場合(ケースA - 1, B, C)では, すべり面はアーチ状であった. 氷の落下とともに氷面上の砂が落下し, すべり面に沿って高さ 24cm のドーム状の空洞が形成された.(参考写真1)

水道管がある場合(ケースA - 2)では, すべり面は水道管位置で高さを抑えられ, 台形状であった(参考写真2). 氷の落下とともに氷面上の砂が落下し, 高さ 15cm の, 水道管を支点とする上端が眼鏡橋状の空洞が形成された.(参考写真3)

b) 箱の幅が 90cm のとき

すべり面はアーチ状であった. 氷の落下とともに氷面上の砂が落下し, すべり面に沿って高さ 108cm (水道管がない場合: ケースE - 1), 95cm (水道管がある場合: ケースE - 2) のドーム状の空洞が形成された.(参考写真4)

陥没したケースについて(ケースD, F - 1, F - 2)

ケースDでは, すべり面は地表面に達し, すべり面に沿った陥没が発生した(参考写真5). ケースF - 1では氷面上 60cm, F - 2は氷面上 15cm の高さにすべり面が形成され(参考写真6), 氷の落下とともに陥没した(参考写真7).

なお、ケースF - 1では陥没孔の壁面が自立しているが、衝撃などにより壁面が直ちに崩壊し、実現象ではケースF - 2の状態に達するものと考えられる。
 上記の実験結果は、図10に要約される。

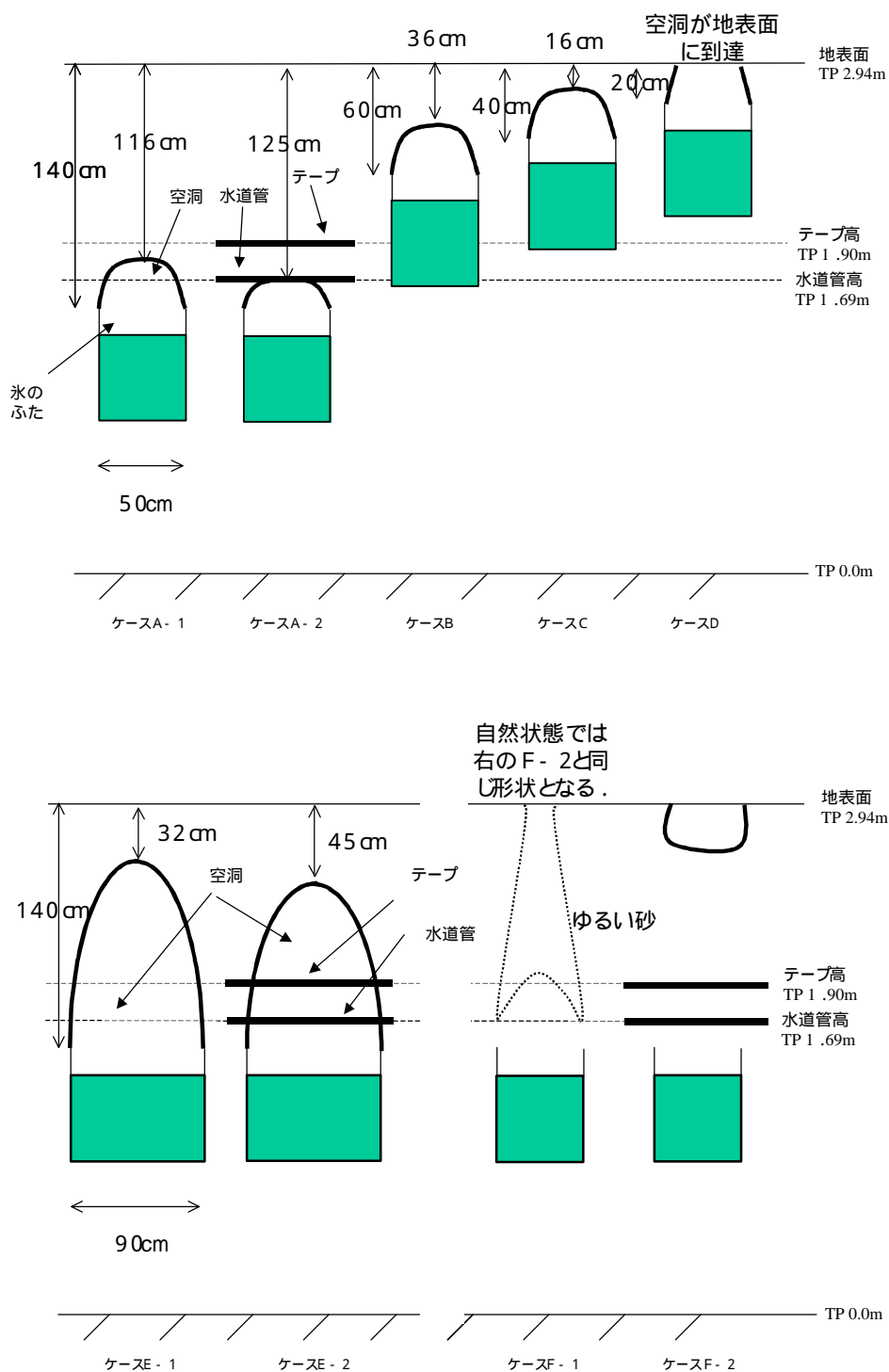


図10 空洞の形状のイメージ (実験結果)

(4) 空洞が保持されたケース(ケースA-1, A-2, B, C, E-1, E-2)で載荷試験を行った。

空洞上方に 30cm 以上かぶり厚があるケース(ケースA-1, A-2, B, E-1, E-2)では, 100kg の載荷では空洞は保持されままであった。

空洞上方の砂層厚が 16cm の空洞(ケースC)は, 70kg の荷重で崩落した。また, 崩落は空洞天端のみで発生している(参考写真8)。なお, 空洞上方の砂層厚が 32cm の場合(ケースE-1)は, 140kg の荷重で崩落している。

表2 実験結果の総括表

ケース	当初かぶり厚(cm)	水道管の有無	空洞の幅(cm)	締め固め状態	地表面の状況	空洞(すべり面)高さ(cm)	空洞上方砂層厚さ(cm)	最大耐荷重(kg)	平均密度(g/m ³)	平均含水比(%)
ケースA-1	140	無	50	現地	保持	24	116	100以上	1.62	5.2
ケースA-2	140	あり	50	現地	保持	15	125	100以上	1.61	5.0
ケースB	60	無	50	現地	保持	24	36	100以上	1.59	5.0
ケースC	40	無	50	現地	保持	24	16	70	1.62	5.4
ケースD	20	無	50	現地	崩落	(20)	-	0	1.61	5.2
ケースE-1	140	無	90	現地	保持	108	32	100以上	1.61	5.1
ケースE-2	140	あり	90	現地	保持	95	45	100以上	1.60	5.0
ケースF-1	140	無	50	ゆるい	崩落	(60)	-	0	1.57	5.2
ケースF-2	140	あり	50	ゆるい	崩落	(15)	-	0	1.56	4.9

(5) 空洞が, 水道管・標示テープを通過する際にどのような状態となるか確認するため, ケースA-2の終了後, 地表面よりタンパー(60kg)で振動を与え, 強制的に空洞を上方へ拡大させ観察した。

水道管の挙動

水道管により砂層が眼鏡橋状に保持されている。

水道管に直接載っている砂層は水道管の幅(約5cm)程度である(参考写真9)。

標示テープの挙動

標示テープは, 折り込みがはずれ弛んだ状態で伸びている(参考写真10)。

5. 考察

(1) 現場で発見された空洞の状況

近接するケーソン目地部の空洞についての調査結果(図11)(たとえば東側突堤ケーソン15-14の間に形成された空洞の上層砂層厚さが0.6mであったこと),ならびに事故後の調査で被害者の靴が地表より2.2mの深さすなわち雑石層上面より概ね0.8mの高さで発見されたことより,事故現場では,空洞上方砂層厚は0.8m程度より薄い状態で保持されていたと推定される(図12).なお,この時の空洞の上端は水道管等より上方であることから,水道管等の有無にかかわらず,空洞は上方に成長することが推察される.

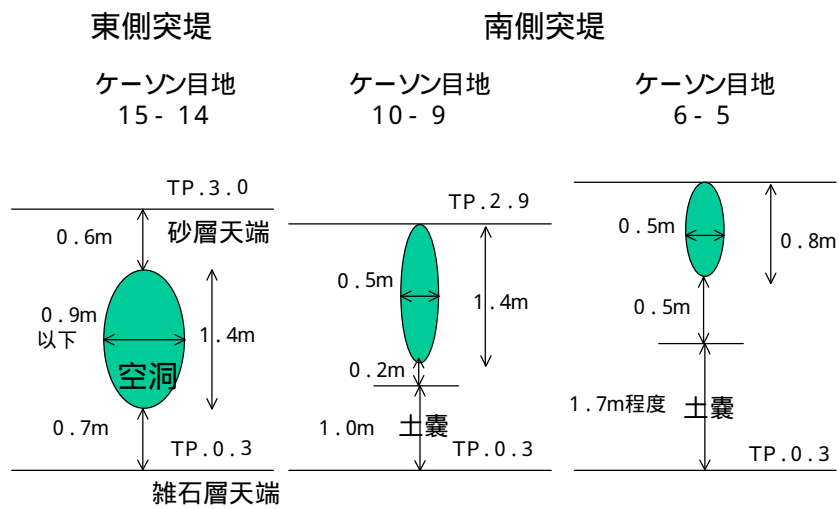


図11 空洞の概要図

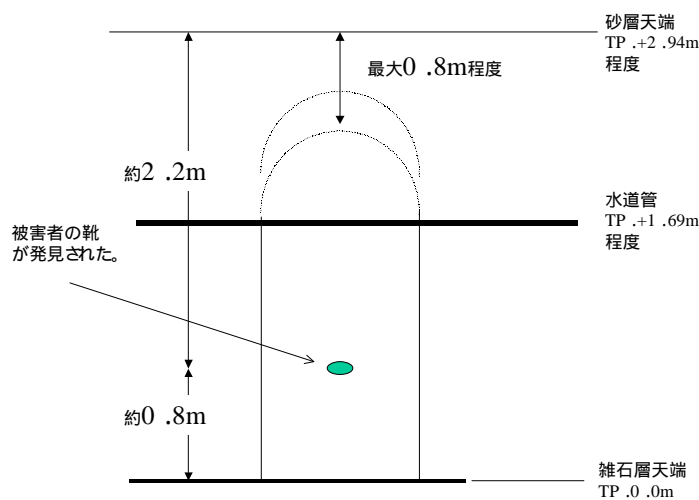


図12 事故箇所模式図(推定)

(2) 耐荷重について

実験では空洞上方の砂層厚が 16cm の場合 ,70kg の荷重で地表面が陥没した(ケース C) . 空洞上方の砂層厚さが 32cm 以上の場合 , 人の重み程度の荷重 (100kg) では地表面は陥没しなかった (ケース A - 1 , A - 2 , B , E - 1 , E - 2) . このことから , 事故現場では表層に乾いて支持力を持たない砂があるものの , 事故箇所の空洞は陥没することなく水道管の高さを越えて比較的地表に近い位置まで成長することが可能である .

(3) 水道管等の与える影響について

載荷による空洞の崩壊時に , 土砂の崩壊は空洞天端部のみ生じており , 空洞の側壁では発生していない (参考写真 8) . このことから , 地表面近くまで成長した空洞の崩壊には , 空洞壁面の鉛直長さは影響していないことが推察できる .

なお , 振動により空洞を上方に拡大させた観察結果から , 水道管の上部に直接接している砂層の幅が狭いことからこの部分の空洞保持力は大きくないこと , 標示テープはテープの自重以外の張力が発生していない状態であることから空洞保持に影響していないことも推察される .

従って事故現場では , 空洞壁面に貫通する水道管等は空洞の保持に影響していないこと , 空洞は地表面に近い高さに成長するまで人の重みでは陥没しないことが確認でき , 水道管等は空洞の崩壊に影響しなかったと推察できる .

(4) 留意すべき事項について

実験ケース A - 1 , A - 2 あるいは E - 1 , E - 2 では , 水道管が無い場合に比べて水道管が有る場合 , 空洞は水道管により小さくなっていること ,

また , 砂の密度がわずかに低い場合 (F - 1 , F - 2) は空洞を維持することができないこと ,

さらに , 事故箇所そのものの土質条件および空洞の形状に関する情報が取得されていないこと ,

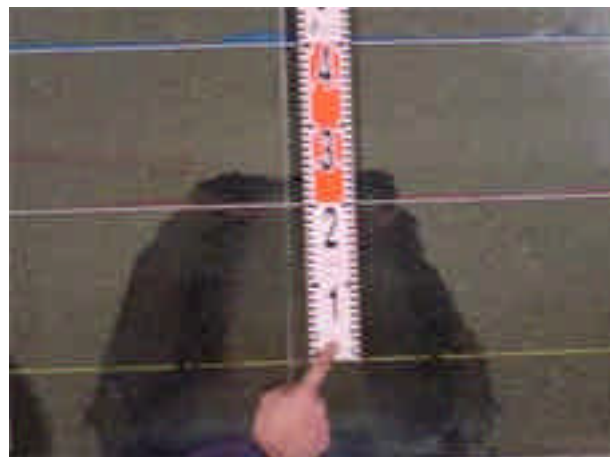
一般的に土質実験では不均一性を再現することは困難であることから , 実験ではほぼ均一な土質条件を目標としていること ,

などの点から , 実験による調査手法には限界があることは事実である . したがって事故現場において水道管が空洞の保持に影響した可能性は完全には否定されるものでないことを付記する .

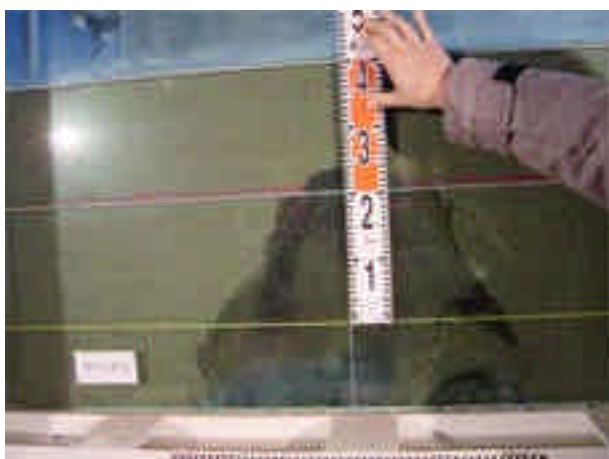
参考写真集



ケース A - 1



ケース B

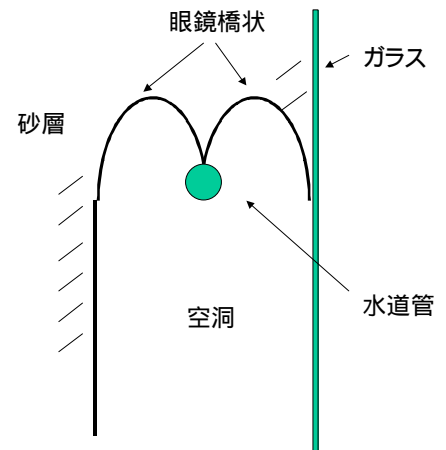


ケース C

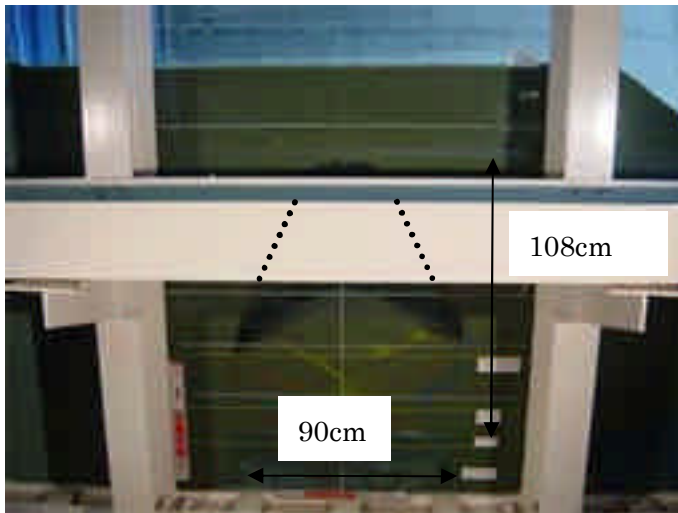
参考写真 1 空洞の形成



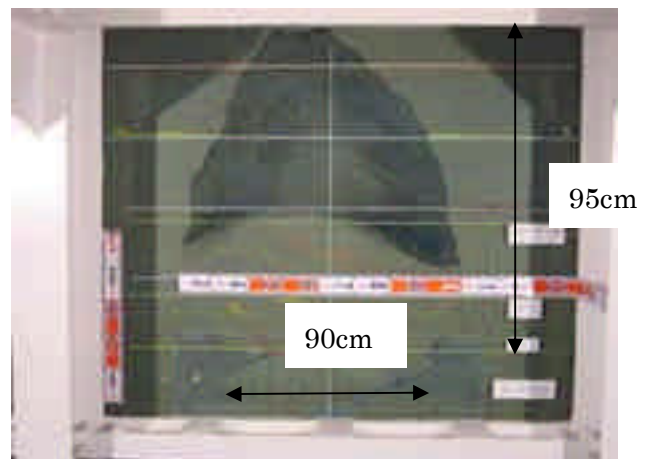
参考写真 2 空洞の形成 (ケース A - 2)



参考写真3 空洞の形状 (ケース A - 2)



ケース E - 1



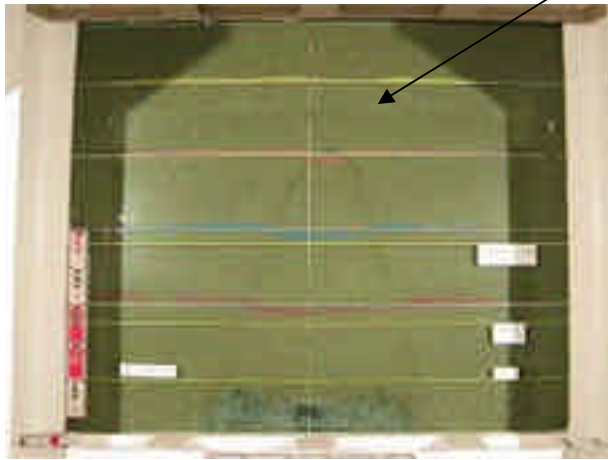
ケース E - 2

参考写真4 空洞の形成 (空洞幅 90cm)



参考写真5 空洞の形成 (ケース D)

すべり面



ケース F - 1



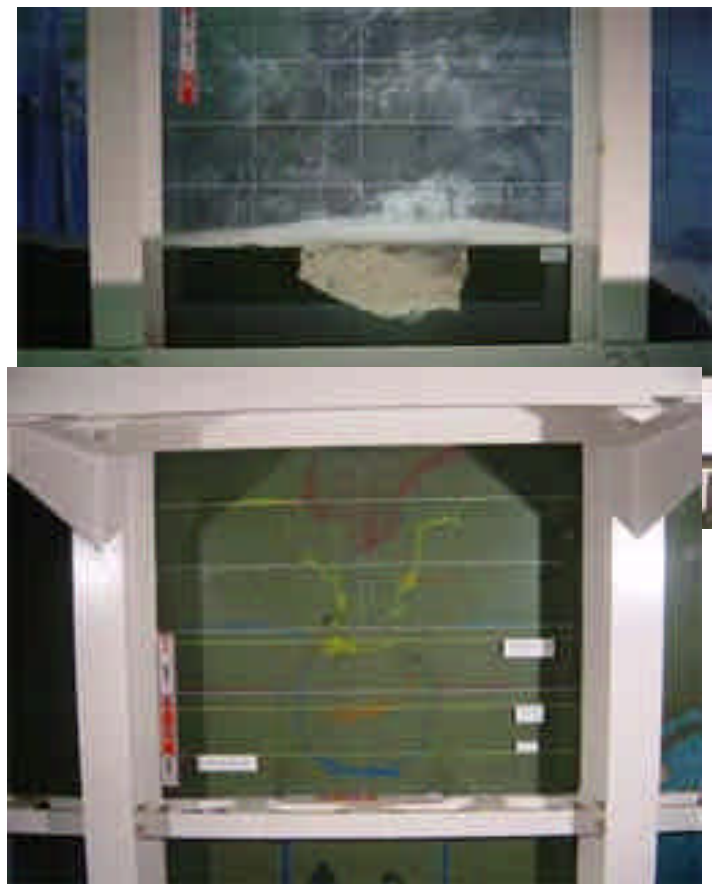
ケース F - 2

参考写真6 すべり面の形成

海岸では波などの荷重が作用するため右の状態に達する。



ケース F - 1



ケース F - 2

参考写真7 陥没の発生



ケースC



ケースE - 1

参考写真8 荷重試験による空洞の崩落



参考写真9 水道管の状態



参考写真10 標示テープの状態