

砂浜が消失した堤防・護岸基礎の矢板工損傷に伴う空洞発生・倒壊の機構と点検・診断の手法

PROCESS OF SEAWALL CAVITY DEVELOPMENT BY WASHOUT SAND
FROM SHEET PILE DAMAGE, ITS DIAGNOSIS METHOD

諏訪義雄¹・笛岡信吾²・馬場和夫³

Yoshio SUWA, Shingo SASAOKA and Kazuo BABA

¹正会員 國土技術政策総合研究所 河川研究部 海岸研究室長 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 國土技術政策総合研究所 河川研究部 海岸研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

³正会員 北陸地方整備局 信濃川下流河川事務所 海岸課長 (〒951-8153新潟市中央区文京町14-13)

The sandy beaches are very important for foot protection of seawalls. Excess beach erosion exposes sheet piles. They are damaged by wave and sediment action etc; lose its water-sealing function. Eventually, the seawalls are collapsed.

In this study, field survey of seawall cavity and large scale hydraulic experiments are conducted. The boring survey behind sheet pile is effective in diagnosing its damage by monitoring with borehole camera, observing amplitude of water pressure in borehole, tracer test. The large scale hydraulic experiments demonstrate the process of cavity growth and collapse of bank caused by washout sand from sheet pile damages. They show issues of countermeasures against washout sand form sheet pile damages.

Key Words : Seawall cavity development, Sheet pile damage, Washout sand from sheet pile damage, Large scale hydraulic experiment, Boring survey, Observing amplitude of water pressure in borehol

1. はじめに

侵食が進行している海岸の堤防や護岸が倒壊等の被災を受けやすいことは古くから経験的に知られており、大河原ら¹⁾は、堤防・護岸の被災データの分析から、前面地盤高1m以下、砂浜幅10m以下、侵食速度が-1～-3m/年等砂浜が狭く侵食傾向にある海岸堤防・護岸の被災率が高く、堤防・護岸の被災と前面砂浜の状況（幅・侵食傾向か）に強い相関があることを指摘している。最近では2008年2月の下新川海岸における富山湾高波災害で、中村ら²⁾は海岸侵食が進行し砂浜が欠けた状況下で高波が長時間作用したことが海岸堤防の空洞発生・倒壊に至ったメカニズムと推定している。さらに、高波災害対策検討委員会中間とりまとめ³⁾において、「近年、下新川海岸をはじめ、前面の砂浜が著しく侵食した海岸において、堤防基礎からの吸い出し等による堤防・護岸の陥没、倒壊等の災害が頻発している。前面の砂浜があるという前提で設計・施工された堤防等は、波浪が直接堤防に来襲することを想定しておらず、放置しておくと倒壊等のおそれがある。」と前面砂

浜が消失した堤防・護岸に注意が必要なことを指摘している。これらから、前面砂浜が消失した堤防・護岸の空洞化・倒壊等の被災危険性を増大させる機構を考慮した点検・診断、それを改築や予防保全措置につなげる対策が求められている。

わが国の海岸保全施設は、1956年の海岸法制定、1959年に来襲した伊勢湾台風による被災を契機として整備されてきたことから、老朽化による機能低下が懸念される施設が多く、今後も増加するものと考えられる。このため、アセットマネジメントの観点から、海岸保全施設の老朽化対策に対し計画的な取組を進める必要がある。このためには、施設が損傷劣化するメカニズム解明、点検・診断手法の確立、補修工法の開発・評価、損傷劣化の予測、既存施設のデータベースの構築・活用、維持管理計画の策定等の技術的知見やツールを整備していく必要があり、その中で損傷劣化するメカニズム解明や点検診断技術は重要なものである。

2008年2月に「ライフサイクルマネジメントのための海岸保全施設維持管理マニュアル（案）～堤防・護岸・胸壁の点検・診断～」⁴⁾が作成され、海岸堤防・護岸の主としてコンクリート構造部について履歴調査、目視による1次点検、変状が確認され

た箇所について詳細な2次点検を行って健全度を評価する点検・診断手法がとりまとめられた。この中で、砂浜侵食・吸い出し・空洞化に関連する堤防護岸の点検・診断については、1次の目視点検でのり覆工等の変状・砂浜侵食・浜崖の有無、根固工の移動・散乱・沈下・ブロック破損の有無について確認すること、2次点検の簡易計測で1次点検の変状の範囲等を記録すること、詳細な計測で変状箇所の潜水調査により範囲や前面地盤の洗掘・吸い出し等を把握し、洗掘量・空洞の程度・消波工や根固め工の変状の規模等に基づき変状をランク付けして診断することとしている。これらは、堤防・護岸の侵食・空洞・吸出し被災の前兆現象・被災の途中経過をのり被覆工・消波工・根固め工等や前面地盤の変状として捉えることができることを前提にしており、前兆現象や途中経過が目視で発見できないものはスクリーニングから漏れる可能性がある。侵食、空洞、吸い出しの対策に関しては、大がかりな強化工法は事例があるものの対策メニューが少ないこと、診断結果Bランクで予防保全が効果的か検討することとしており、初期対応が可能と考えられるCランクでの予防保全メニューがないこと、以上からライフサイクルコストを比較できる複数案の検討が難しいこと等が課題と考えられる。

本論文では、実際に空洞が発生した堤防・護岸の現地調査結果、空洞の発生・拡大の機構と対策についての大型水理実験検討から、砂浜侵食が堤防・護岸の矢板工の損傷劣化を促し、背後の土砂の吸い出し・空洞の発生拡大に及ぼす影響について述べ、矢板工の損傷・機能低下についての点検・診断手法を提案し、対策工法検討上の留意点を整理する。

2. 空洞発生護岸の現地調査

新潟海岸金衛町工区は、かつては広い砂浜であったが、漂砂供給の減少、地盤沈下の進行により侵食が進行し、現在では護岸前面の砂浜が消失している。この工区では、護岸の倒壊や離岸堤の沈下等侵食に伴う災害が頻発している。平成20年8月に、一部区間の護岸天端下に空洞が発生していることがわかり、その状況を調査することになった。確認された空洞は図-1のとおりである。

空洞がどこまで続いているのか、土砂がどこから抜けたのかは空洞状況だけからは確認できなかった。応急対策としての埋め戻し実施後、空洞の発生が確認された現場護岸前面の矢板工の背後で図-1のように矢板工からの距離を変えてボーリング孔を掘りコアの採取とボアホールカメラによる観察、水圧変動の観測、染料の投入観察、水中カメラによる確認を実施した。

コア採取の結果、護岸基礎の下に厚さ2~7cm程度の隙間が確認された。ボアホールカメラでは隙間で水が流動している様子が確認できた。ボーリング孔

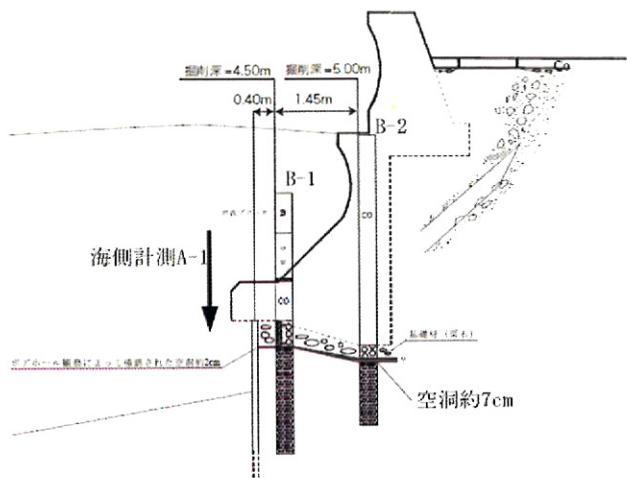


図-1 調査箇所断面図

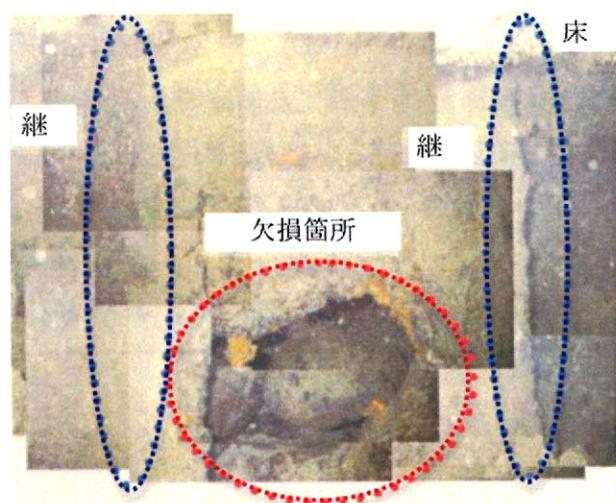


写真-1 矢板損傷状況

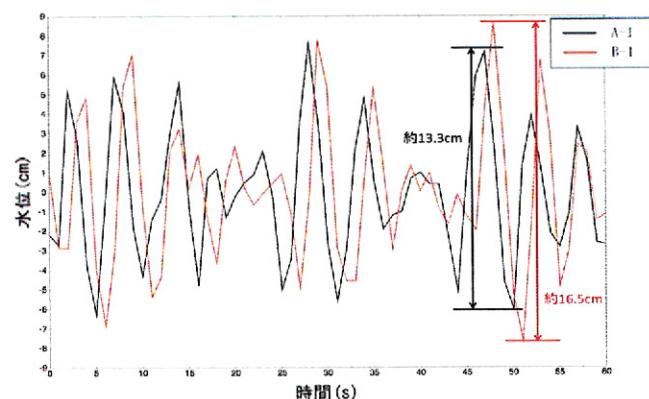


図-2 ボーリング孔水圧変動計測結果

から染料を注入したところ、前面の消波工の隙間に染料がしみ出してくることも確認できた。ボーリング孔内の水圧測定結果は図-2のとおりであり、ボーリング孔内の水圧変動は護岸前面の波浪と同程度であった。これらの調査結果は、矢板工が損傷して前後で海水流動が起きており止水機能を失っていることを示している。確認のため、海側から矢板工の損

傷状況を水中カメラで調査すると、空洞発生箇所の前面から7~12mほど横にずれてはいたが、写真-1のような損傷穴が数カ所発見された（矢板工が露出したことによると腐食が原因と思われる）。損傷穴の大きさは最大径約30cm程度であった。なお、現場の護岸前面には消波ブロックが積み上げられており、矢板工全てを確認することはできない。

3. 大型水理実験

矢板工に損傷で穴が空いた状態の堤防・護岸模型を作成し、波浪を作用させる大型水理実験を行った。実験では、空洞が発生・拡大していく様子の観察、矢板工前面と背後における水圧変動の測定を行った。

幅2m、深さ5m、長さ140mの水路内の側壁がガラス面観測区間部分に、図-3のように矢板工に損傷で穴が空いた状態を再現した高さ1mの堤防・護岸模型を固定して設置した。矢板工前面の海底は地盤変動の影響が出ないよう、現地の地盤高に合わせて平均粒径100mmの栗石で作り、その上に消波ブロック模型を設置した。護岸工や矢板工損傷の大きさ等の諸元は現地の1/5スケールを想定して設定した。消波ブロック模型は、現地と形状が同じ模型を用意できないので、空隙率が現地の消波ブロックとほぼ同じにできる間隔ブロックを使った。なお、護岸模型及び矢板模型を固定し、矢板工前面海底を栗石で作ったのは、空洞の発生拡大過程を把握することに主眼を置いたからである。損傷の大きさは1辺6cmの正方形とし、矢板の損傷位置は基礎工下端の下20~26cmに設けた。

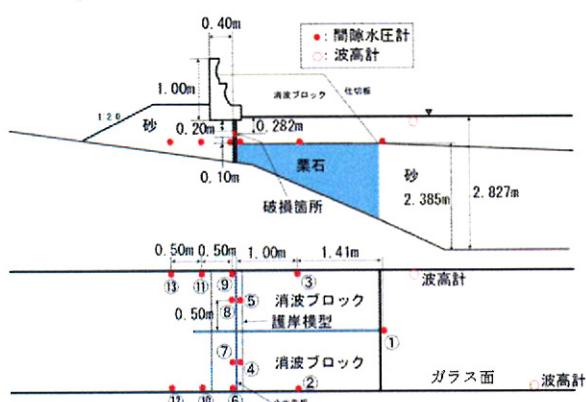


図-3 実験模型断面図

実験時の平均水位は基礎工下端上5.2cmとした。これは、現地の朔望平均満潮位に相当するものである。波高については、新潟海岸の観測結果を参考に冬季風浪を想定し、かつ実験装置の能力から設定し、波高0.4m、周期5sの規則波とした。波高に関しては冬季風浪時（12~3月）の現地の有義波高4m相当を出したかったが装置の性能上0.4m（現地2m相当）とせざるを得なかつた。周期は2007年の冬季風浪時（12~3月）の月最大有義波の周期の平均に相当す

る5s（現地11s）である。なお、今回は、断面実験であり沿岸方向への漂砂の不均衡を再現できないことから、堆積型の実験条件としない（矢板工の損傷穴が埋まらない）ことも重要であり、実験の結果、矢板工前面の砂が沖に移動する条件であることを確認した。底質及び護岸背後の材料については、平均粒径0.3mmの砂を用いた。なお、現地の底質材料調査結果ではd50が0.26~0.39mmであり、ボーリングによるコア採取結果でも護岸基礎工の下は細砂である。背後の土かぶりは、現地では4m程度あるが、実験では準備の作業量等考え0.25m（現地1.25m相当）にとどめた。

表-1 実験条件

ケース	対策工	潮位・波高・周期
ケース1-1	なし	潮位：0.14m（現地の朔望平均満潮位0.71mに相当）
ケース1-1	なし	波高：0.4m（装置の最大波高、現地2mに相当）
ケース1-2	なし	ケース1-2のみ0.8m30分→0.6m25分→0.4m40分
ケース2	消波工間に砂礫充填	周期：5s（2007年冬季風浪期間12~3月最大有義波の平均11sに相当）
ケース2	消波工間に砂充填	すべて規則波
ケース3	地盤改良に隙間あり	
ケース3	地盤改良浅い	

護岸模型部分は、観測区間部分で中央で2つに分け、左右岸で異なる対策工の実験ができるようにした。ガラス面は1面だけなので、波浪をかけている間の観察は、ガラスがない側は上からのみとなる。実験は、表-1のとおり3ケース行った。1ケース目は空洞の発生過程を把握するもので、2ケース目、3ケース目は対策工について検討した。

ケース1ではいずれのケースでも最終的には護岸背後の土砂が抜けて陥没にまで至った。ガラス面からの観察で損傷穴から矢板工背後の土砂が吸い出され、矢板工背面に空洞が発生拡大していく様子が確認できた。ケース1-1では造波後59分まで、ケース1-2では造波後83分まで損傷穴の背後で楔形に土砂が取られた形で維持され吸い出しや空洞化は進まない。その後、急激に楔形の空洞が拡大はじめ、ケース1-1では16分（造波後75分）で、ケース1-2では7分（造波後90分）で背後に陥没が発生した（図-4参照）。ガラス面がない反対側でも、ケース1-1では造波後88分で、ケース1-2では造波後25分で陥没が発生した。ケース1-1、1-2においては、護岸の下・背面の土砂は水締めを行った上で、転圧状況が同じになるよう山中式土壤硬度計で9~10程度を目安に鎌で整形・転圧したが、ケース1-2のガラス面の反対側のみ陥没が早く発生する結果となった。吸い出し・空洞化の進行には造波後ある程度の時間が

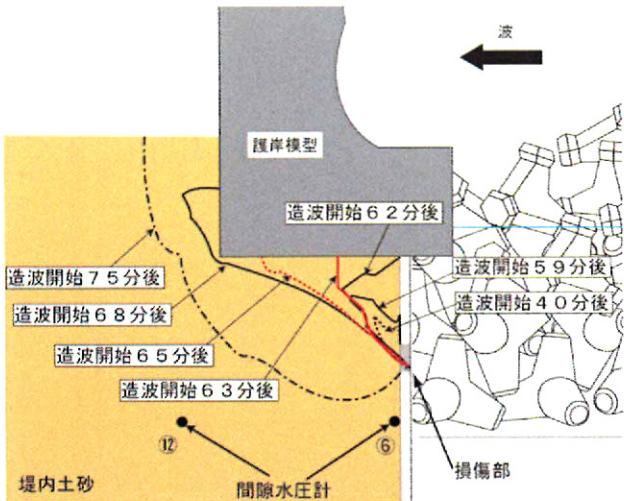


図-4 空洞進行状況

必要なようである。また、消波ブロック群で損傷を覆っても吸い出しによる土砂の流出を止めることはできず、ブロック間の空隙から吸い出された砂が流出していく。消波工や根固め工の移動・沈下・散乱等の変状を伴わなくとも、矢板工の損傷に端を発する空洞の発生・拡大は起りうる。

圧力センサーによる水圧変動測定結果によれば、ケース1-1でガラス面からの観察で楔形の空洞の拡大が確認された時間帯である63分過ぎから、損傷穴の下10cmに設置した間隙水圧計⑥で15cm程度の平均水圧の上昇と7~9cm程度の振幅の水圧変動が生じるようになった(図-5参照)。これは、ガラス面側・反対側ともほぼ同じ時間に生じている。陥没が生じた時間に差はあったが、楔形の空洞が拡大し始めた時間はガラス面側も反対側もほぼ同じであったことを示唆している。ケース1-2ではガラス面の反対側で陥没が発生した造波後30分間が欠測となつたが、ガラス面側で吸い出し・空洞の拡大が進んだ造波後85~90分の間に圧力変動の振幅が5cm以下から15cmまでゆるやかに拡大していく状況が観測された。なお、ケース1-2ではケース1-1で観測された平均圧力の上昇は観測されなかった。

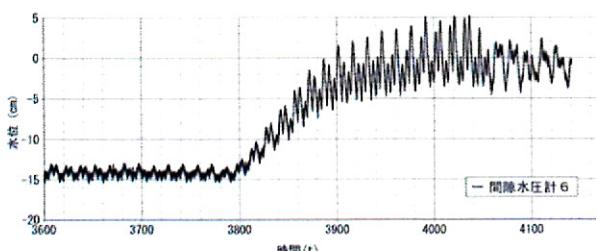


図-5 間隙水圧計⑥計測結果(ケース1-1)

ケース2では、吸い出しの対策工として消波工の隙間に $d_{50}=0.3\text{mm}$ の砂を充填するケース2-2と $d_{50}=3.7\text{mm}, 24\text{mm}, 63\text{mm}$ を1:1:1で混合した砂礫を充填するケース2-1の比較を行つた。ケース2-1がガラ

ス面側である。ケース1-2で空洞と陥没を発生させた後、空洞と陥没に砂を入れて埋め戻し消波工の隙間に砂と砂礫を充填し、最後に水締めのみ行つた。造波開始後23分過ぎに、砂を充填したケース2-2の護岸背後に若干の陥没が発生し、25分過ぎには完全に陥没した。図-6のとおり、消波工の隙間に充填した砂は、造波6分後には7~8割が抜け、陥没が発生した25分後には完全に抜けてなくなつた。陥没の穴は60分まで徐々に拡大し続け、その後は180分まで大きさは変わらなかつた。一方、砂礫を充填したケース2-1では造波直後に少量の砂が砂礫内に抜けたが、その後180分間吸い出しや空洞化が進むことはなかつた。消波工の隙間に充填した砂礫は図-6のとおり最終的に3割程度は抜けたが勾配1/1.25~1/5の斜面を形成して安定し、矢板工を覆つて吸い出し・空洞化の進展を防いでいた。なお、現場では沿岸方向にも漂砂が流れており、充填した砂礫が沿岸方向に抜ける可能性がありその対策を行わないと信頼性のある対策工とはできない。

間隙水圧計による水圧変動観測では、陥没が発生

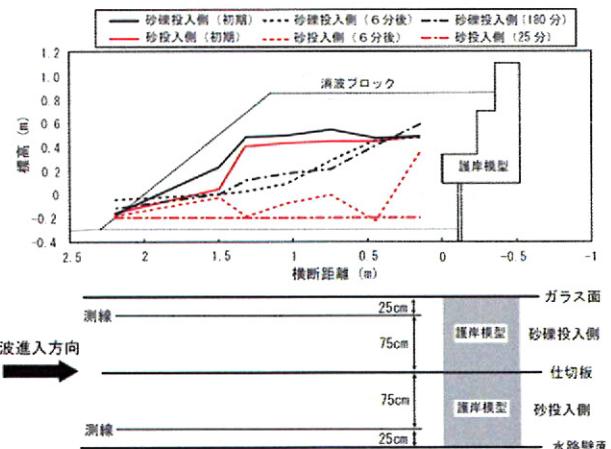


図-6 護岸前面地形変化(ケース2)

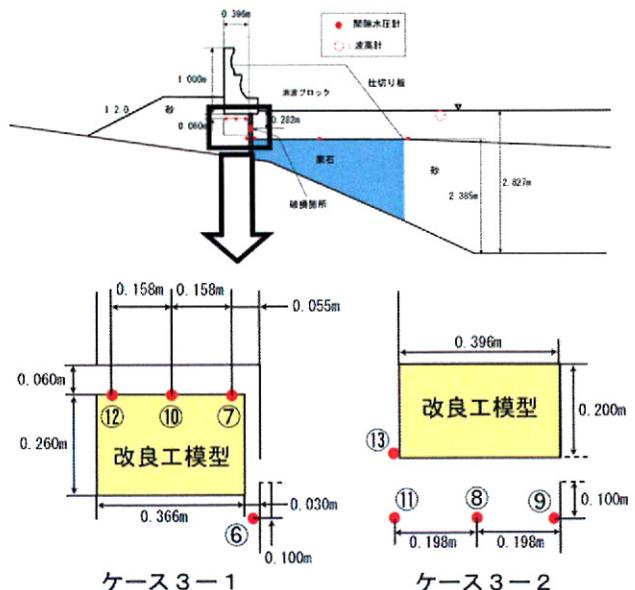


図-7 ケース3断面図

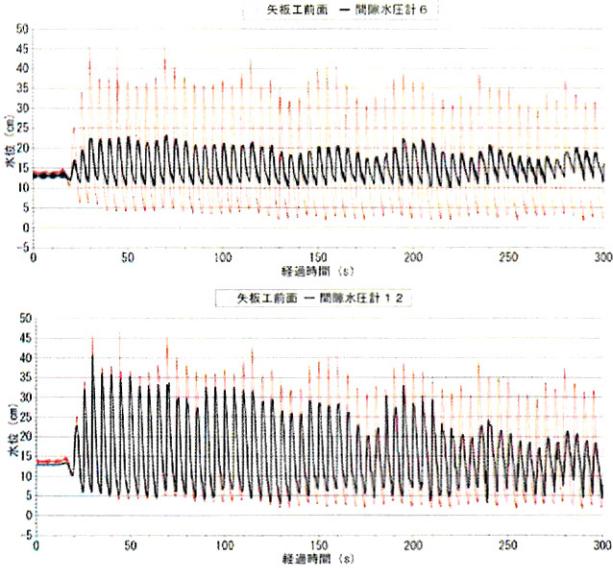


図-8 計測結果（ケース3-1）

したケース2-2の損傷穴下10cmに設置した間隙水圧計⑨の観測結果からは空洞の拡大や陥没と関連した変化は読み取ることができなかつたが、損傷穴から奥行き50cm・損傷穴高さより10cm下に設置した間隙水圧計⑧で、陥没が発生する造波後25分の少し前の造波後23分頃から平均水圧の上昇とこのケースでのみ見られた周期40s程度の水圧変動が観測され始めており、空洞の拡大がこの時間帯に進行していたと思われる。

ケース3では、吸い出し対策工として矢板背後の地盤を改良する際の留意点について検討した。ケース3-1では、地盤改良工と矢板工及び基礎コンクリートの間に隙間が残った場合を想定し、矢板工と地盤改良工の間に3cm、基礎コンクリートと地盤改良工の間に6cmの隙間を開けた（図-7参照）。ケース3-2では地盤改良深さが十分でない場合を想定し、地盤改良工の下端を損傷穴の上端とした（図-7参照）。なお、地盤改良工の奥行き方向の厚さは、ケース3-1、3-2ともに20cmである。

ケース3-1がガラス面側である。造波後7分でケース3-1の護岸背後に陥没が発生し、12分にはケース3-2で護岸背後に陥没が発生した。ケース3-1、3-2とともに造波50分過ぎまで陥没穴が拡大し続けた。ケース3-1のガラス側面からの観察では、地盤改良工と矢板工の隙間の砂は造波開始時には抜けており、空洞は地盤改良工上面と基礎工の隙間、地盤改良工と矢板工の隙間奥行き方向に急激に拡大していった状況が観察された。

ケース3-1、3-2では、地盤改良工まわりに間隙水圧計を配置した。ケース3-1では損傷穴の下10cmと地盤改良工と基礎工の隙間に3つ間隙水圧計を配置し、ケース3-2では、損傷穴の下10cmの位置、同じ高さに岸側に距離を変えて2箇所、地盤改良工の下端岸側の隅に間隙水圧計を配置した。ケース3-1の観測では、造波と同時に隙間3箇所の間隙水圧計⑦、⑩、⑫で矢板工前面と同程度の圧力変動が観測され、

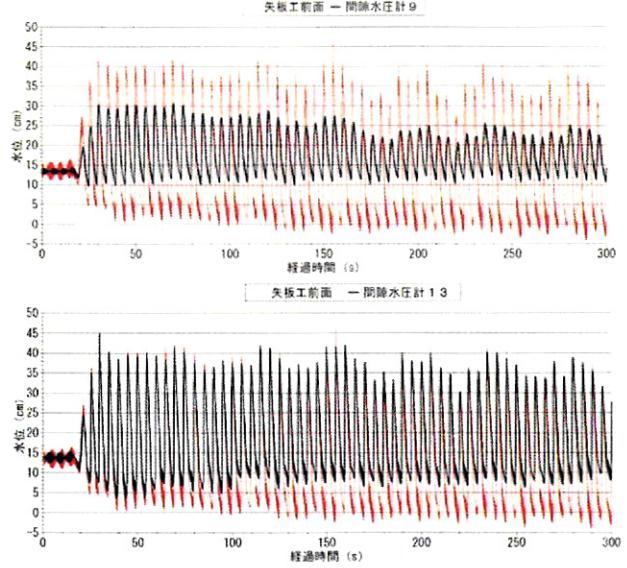


図-9 計測結果（ケース3-2）

陥没の発生後に観測される圧力変動が小さくなっていた（図-8参照）。これは、陥没による土砂が間隙水圧計を埋めたためと考えられる。ケース3-2でも、地盤改良工の下端岸側の隅に設置された間隙水圧計⑬では、造波と同時に矢板工前面と同程度の圧力変動が観測されており（図-9参照），造波直後に損傷穴から地盤改良工の岸側端まで空洞が拡大していたものと考えられる。

侵食により矢板工が露出する状況となり、かつ矢板工に損傷のおそれがある場合に矢板工背後地盤の地盤改良で対策を行う際には、露出のおそれがある深さ・沿岸方向の範囲の地盤について地盤改良工と矢板工・基礎コンクリート工の間に吸い出しが生じる隙間ができないよう施工する必要がある。なお、矢板工に損傷が生じて前面と背後で波浪に伴う海水の流動が常に生じている状態では、しっかりした地盤改良は難しいと考えられる。これらから、地盤改良による補強の効果をあげるには矢板工に損傷が生じて矢板工前面と背後地盤の間で海水流動が生じる前に予防保全として実施することが重要である。

4. 矢板工損傷・機能低下の点検手法

2.において矢板工の損傷や止水機能の低下状況を調べるには、ボーリング調査等が有効であることを述べた。3.の大型水理実験では、矢板工損傷穴から吸い出しが起こり空洞が拡大して背後の土砂が陥没する過程と、それらの状況が水圧変動の観測によってある程度把握できる可能性があることを述べた。ここでは、調査のために掘ったボーリング孔を活用して水圧変動をモニタリングすることにより、矢板工の損傷や止水機能の低下状況を把握する点検手法について検討する。

点検にあたっては矢板工自身の損傷を確認することが重要であるが、矢板工が露出するほど侵食が厳

しい現場では、波あたりが強くなつて消波工が設置され矢板工を直接確認することは困難である場合が多い。外洋に面した護岸では、波浪も大きく水中に潜つて矢板工を確認できる波浪状況となる機会は少ない。また、ボーリング調査を行つた時点で空隙や空洞が確認されなかつた場合でも、矢板工が波浪に晒される厳しい状況下では、矢板工の損傷や空洞化の発生について注意深く監視し続ける必要がある。そのような場合に、点検調査で掘つたボーリング孔を利用して矢板工の機能確認を継続的にモニタリングできれば、再度点検時にボーリング孔を掘るコストも縮減できると考えられる。

図-8、9に示したとおり間隙水圧計が空洞の中に入れば波浪と同程度の水圧変動が観測される一方、間隙水圧計が砂の下に埋まると水圧変動は極端に小さくなる。現地の水圧変動観測から矢板工の損傷や機能低下を診断する方法としては、観測結果と水圧伝搬計算を比較して矢板工前面からの水圧変動の減衰を評価する方法も考えられるが、現地では実験室よりも観測できる項目が少なくならざるを得ないので観測される水圧変動量で診断する方法がわかりやすい。確実な診断を行うには、ボーリング孔を護岸基礎コンクリートの下等空洞が発生し残存しやすい場所に通すことが肝要である。

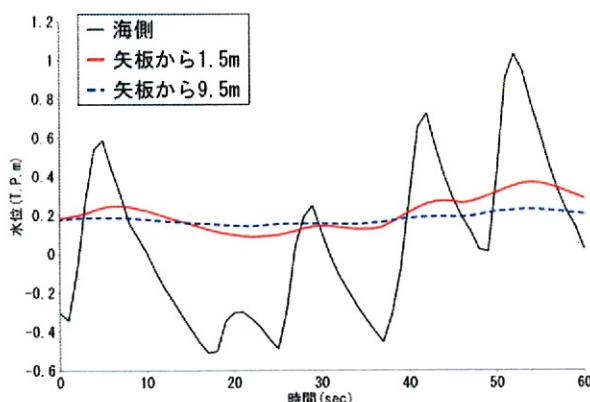


図-10 観測結果

ボーリング孔内での水圧変動観測においても、工夫が必要である。既存のメモリー式小型水圧計は保存できる容量に限りがあり、1s間隔のサンプリングでは8時間で満杯となる。数ヶ月の回収期間をとろうとするとサンプリング間隔が大きくなりすぎ、波浪による圧力変動が把握できない。そこで、既存のメモリー式水圧計を3時間に1回1分間1s間隔で水圧を計測するようサンプリング方法を改良し、回収期間2ヶ月の観測を試みた。

図-10は、現地での観測結果である。この現地観測では図-10のように矢板工から距離を変えて2本のボーリング孔を掘り、水圧変動を観測した。観測結果から、矢板工背後1.5mでも水圧変動が大きく減衰しており矢板工は止水機能を発揮していることが確認できた。矢板工から9.5m離れたボーリング孔で

は変動の減衰が大きいので異常や機能低下を検知しにくい。

そもそも、砂浜があることを前提に建設された堤防・護岸の矢板工は波浪に晒される状況は設計時点では想定されていないので、例えば砂浜幅が10m以下等砂浜が消失するおそれが生じた時点で重点監視区間、矢板工の露出が確実となった時点で予防保全対策区間、矢板工が損傷した時点で更新もしくは事後保全（災害）区間と位置づけるのが望ましい。しかし、予算的制約によりこのように自動的に診断・区間分けすることができず、ケースバイケースで判断せざるを得ない現実がある。

5. 結論

以下に本研究で得られた結論をまとめる。

- ・ボーリング調査・コア採取、ボアホールカメラによる観察、ボーリング孔からの染料の投入、ボーリング孔での水圧変動観測は、矢板工の損傷に伴う吸い出し・空洞の発生を診断する上で有用である。
- ・矢板工が露出して波浪に晒されるようになり損傷穴が空くと、損傷穴から吸い出しが起こって護岸背後で空洞が発生・拡大し陥没に至る。この損傷劣化は、予兆や途中の変状を目視で確認できない可能性がある。
- ・矢板工の損傷穴とつながった空洞では矢板工前面と同程度の水圧変動が生じるので、ボーリング孔をこの空洞を通るよう設けて水圧変動をモニタリングすれば矢板工の損傷や止水機能低下を診断できる可能性がある。
- ・矢板工が損傷して空洞が発生した場所を単純に砂で埋め戻して水締めしても、空洞はすぐに再度発生する。
- ・露出した矢板工損傷穴からの吸い出し対策工としての地盤改良工は基礎コンクリート・矢板工と密着して施工される必要があり、予防保全対策に適する。
- ・粗粒材（小礫）による被覆は、吸い出し・空洞の拡大を防止できる可能性があるが、矢板工前面に粗粒材をとどめておくために沿岸方向等への流出を防止することが課題となる。

参考文献

- 1) 大河原満・橋本宏・斎藤雄三郎：被災事例から見た海岸堤防・護岸に関する一考察、第30回海岸工学講演会論文集、pp. 264-268、1983.
- 2) 中村伸也・西川一ら：平成20年2月24日の高波による下新川海岸の被災実態について、海岸工学論文集第55巻、pp.176-180、2008
- 3) 高波災害対策検討委員会：中間とりまとめ、pp. 8-9、2008.
- 4) 農林水産省・国土交通省：ライフサイクルマネジメントのための海岸保全施設維持管理マニュアル（案）～堤防・護岸・胸壁の点検・診断～、pp. 1-105、2008