

下関港海岸整備における 護岸被災メカニズムについて

中村 泰貴¹・古家 雅彦²・中島 秀樹³・民部 久雄³・大久保 貴仁³

¹九州地方整備局 下関港湾事務所 保全課 (〒750-0066 山口県下関市東大和町 2-29-1)

²九州地方整備局 下関港湾事務所 工務課 (〒750-0066 山口県下関市東大和町 2-29-1)

³九州地方整備局 下関港湾事務所 海岸課 (〒750-0066 山口県下関市東大和町 2-29-1)

2019年8月29日に「ボートレース下関」(山口県下関市)において、競艇場水面と海を隔てる護岸(以下「競艇場護岸」という)が被災する事案が発生した。下関港湾事務所で開催している高潮対策工事箇所の近傍であった事から、競艇場護岸の被災に対し、今後の工事を安全かつ確実に実施するため被災メカニズムを検討し、原因究明を行った。

原因究明のため「下関競艇場護岸被災原因究明等委員会」(委員長 善功 九州大学名誉教授)を設置し有識者等の意見をもとに、被災の誘因と素因について分析を進め、浸透流解析による護岸被災メカニズムの検討を実施した。その結果、豪雨により護岸下部に浸透破壊が生じたことで、競艇場護岸の被災が発生したと考えられることが示された。

Key Words: 浸透流解析, 浸透破壊, 水みち

1. はじめに

下関港海岸は、山口県の周防灘に面した関門海峡沿いに歴史的な景観資源を多く有するところで、海岸線及び臨海部には住宅、観光拠点並びに工業地帯が立地するなど、地域経済を支える産業活動の拠点や市民の暮らしを支える重要な場所が多くある。(図-1)

しかしながら、これまで来襲した台風による高潮や越波により、護岸高さの不足から家屋への浸水、工場や商

業施設の停止、隣接する幹線道路の通行規制などが頻繁に発生し、住民や地域産業は甚大な被害を受けている。

特に、1999年に山口県を直撃した台風18号では、国道9号の遮断、護岸倒壊のほか、住宅・企業・工場の密集地における大規模な浸水等の被害が発生している。

(図-2)

このため下関港湾事務所では、2008年度より、長府・壇ノ浦地区及び山陽地区の約13kmを対象に、「下関港海岸直轄海岸保全施設整備事業」として、高潮や高波に対する防護機能確保のための整備に取り組んでいる状況にある。

本報告は、新川水門整備箇所近傍で発生した競艇場護岸被災に対し実施した被災に至るまでのメカニズムの検討について報告するものである。

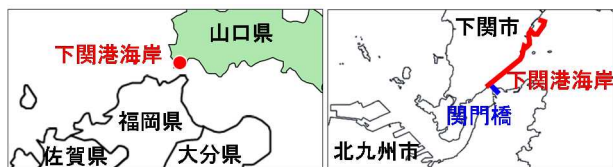


図-1 下関港海岸の位置



図-2 1999年台風18号による浸水区域

2. 下関競艇場護岸被災の概要

(1) 下関競艇場護岸の概要

「ボートレース下関」は山口県下関市長府扇町に位置し、下関市ボートレース企業局が管理している。被災した護岸は延長約96m、天端高DL+2.96m、基礎地盤の上をコンクリートで被覆した構造で、干潮時でも競艇場内の水位を一定程度以上に保つための施設である。

競艇場側には、競艇場内水面の静穏度を確保するためのフィルターユニットが設置されているほか、護岸天端の上には漂流物等の流入を防止するためのフェンスが設置されている(図-3)。競艇場護岸の正確な築造時期は不明であるが、概ね築造後60年程度経過している施設と推測され、現在までに複数回補修が行われている。

(2) 被災の概要

2019年8月29日13時頃、競艇場護岸の中央部約33mが被災した(図-4)。

競艇場護岸の水叩きがグラグラ揺れ、移動するとともに護岸下部が押し流された後、護岸上部が下に沈み込んだ。さらに、競艇場側に存在していたフィルターユニットやフロートが海に流出した(図-5)。

(3) 近傍の高潮対策工事の概要

護岸被災前日まで、競艇場護岸に近接する位置において、新川水門を設置するための捨石撤去工事に着手していた。

工事内容は図-6及び以下のとおり。

① 捨石撤去：鋼矢板打設に先立ち、競艇場護岸の一部

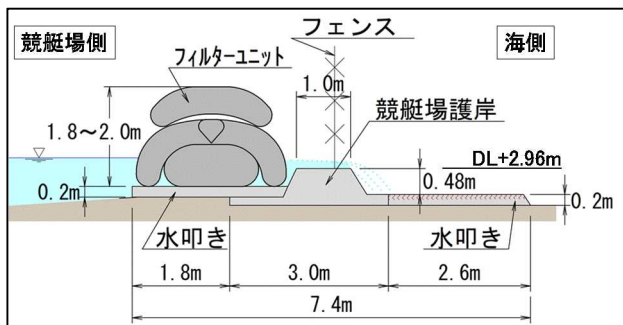


図-3 下関競艇場護岸



図-4 被災状況位置関係

の捨石を撤去。

② 仮栈橋設置：建設機械移動用の仮栈橋を設置。

③ 仮締切設置：地盤改良を行うため鋼矢板を打設し、仮締切を設置。

④ 盛土（埋戻し）：仮締切内の水を排出し、盛土を実施。

⑤ 地盤改良：地盤改良（CPG工法）を実施。

被災は①捨石撤去時に発生し、8月22日から被災前日の28日にかけて競艇場護岸の被災箇所前面にて、既設護岸の一部の捨石をバックホウ（0.7m³級）で掘削した。掘削は海側に護岸法線から約5~13m離れた位置で、延長約30m程度、撤去深さ40~90cmにわたって実施した。

競艇場護岸の構造が一部不明確であることから、捨石の掘削前に図-7で示す地点にて試掘を実施し、撤去断面における安定性を確認した。

被災当日の8月29日午前中は、潮待ち待機後の13時頃に作業員が護岸被災を発見した。

3. 競艇場護岸被災に至る誘因と素因

(1) 護岸被災の形態

被災後の写真及び被災直後の動画から、被災直後、護



図-5 被災箇所及び被災前後の状況

岸上部は法線を保っていたが、護岸下部が先に押し流され、続いて、その抜けた空間を通して競艇場内のフィルターユニットやフロートが海側に押し流され、その後、護岸上部が真下に崩落したことを確認した。

以上から、被災は、水の流れにより護岸下部の基礎地盤が破壊された浸透破壊によるものと考えられ、被災が護岸の海側の水叩き先端部から発生したことが推測された。

浸透破壊が生じた原因を究明するため、被災を引き起こした外力（誘因）と、外力を受け止める耐力である地盤や施設の特性（素因）に分けて考察する。

「誘因」として、①競艇場内外の水位差、②降雨量、③競艇場護岸からの越流が考えられる。

また、「素因」としては、①競艇場護岸の基礎地盤条件、②競艇場護岸下部の空洞、③競艇場護岸の劣化、④工事による掘削（捨石撤去）が考えられる。

「誘因」「素因」それぞれについて、詳細に考察する。

(2) 誘因

a) 競艇場内外の水位差

競艇場内外の水位差は、競艇場内の水位計及び長府検潮所のデータを整理した。なお、競艇場内の水位計は、保存されている2018年10月1日以降のデータを使用した。

被災当日の競艇場内の水位は、2日前（8月27日1時）から続く降雨により、護岸天端高を越える高い水位が継続しており、被災前日の8月28日21時には、水位が護岸天端高より0.674m高いDL+3.634mとなり、その後も護岸天端高より約0.2~0.5mの高い水位が継続した。

被災当日は大潮期で、満潮（DL+3.31m）から干潮（DL+0.22m）へ大きく変動する間に護岸が被災した。

被災時の競艇場水位は、DL+3.154m、潮位はDL+0.52mであり、競艇場内外の水位差は2.634mであった（図-8）。なお、競艇場内外の水位差は、2019年2月21日に3.554m

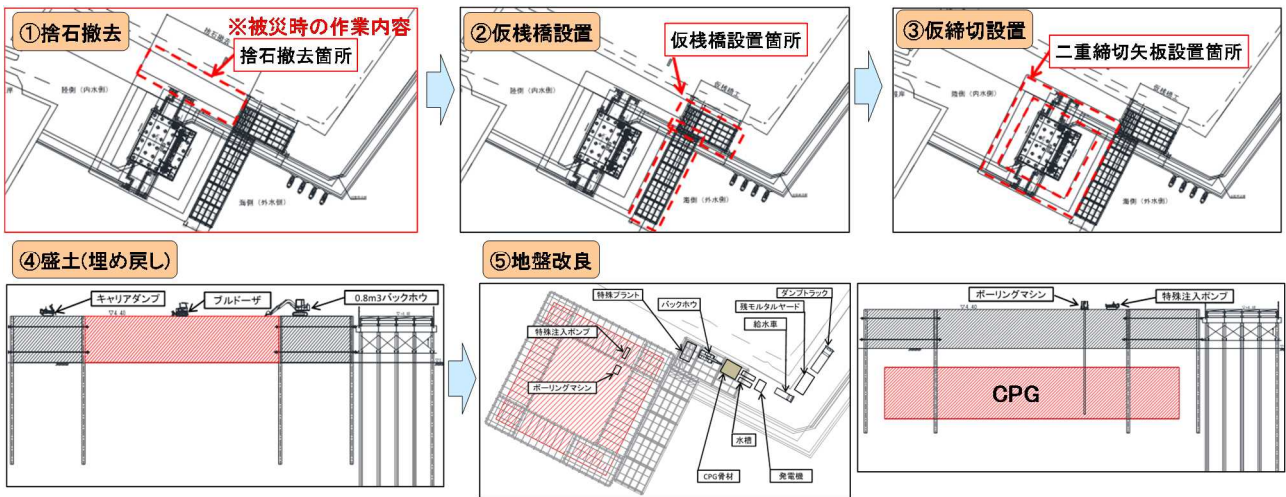


図-6 施工手順

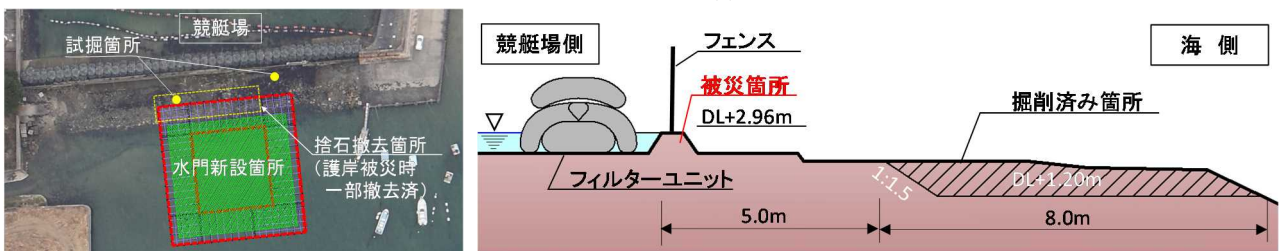


図-7 水門新設箇所及び捨石撤去箇所の位置関係

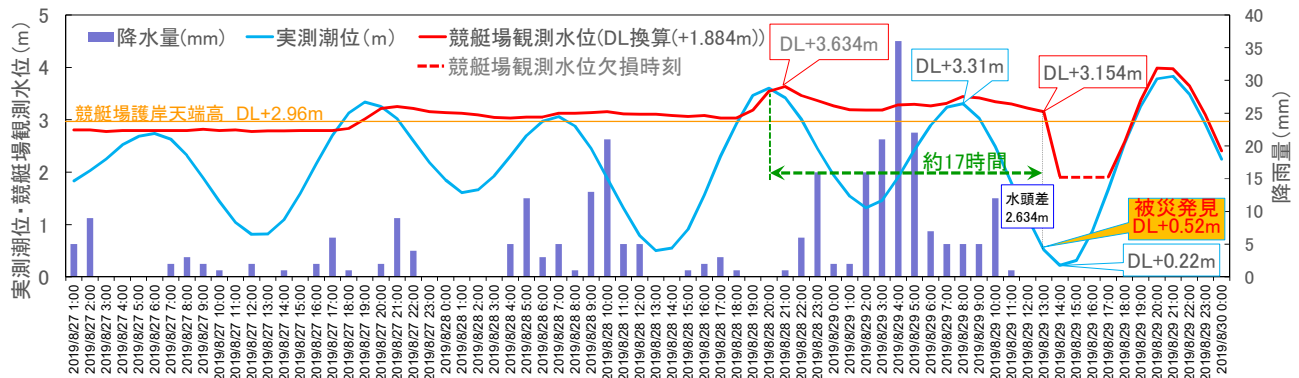


図-8 競艇場内水位と潮位

を記録しており、2,634mmを超える事象は過去にも発生している。

b) 降雨量

被災箇所近傍の阿内雨量局で観測を開始した2013年3月から護岸被災時迄に発生した豪雨の降り始めからの総降雨量を比較すると、護岸被災時の総降雨量は283.0mmで過去最大であった。

c) 競艇場護岸からの越流

被災2日前からの降雨により、連続約17時間にわたり競艇場内水位が潮位を上回り、競艇場内から海側へ越流した。この越流時間は、過去最大ではないものの、平均越流時間の9時間程度より長い。

また、約17時間に及ぶ越流を、完全越流と仮定して本間の提案する実験式から算定した場合の越流量は28,533m³となり、過去1年間で最大となる突出した量であった。これは、同条件で算定した2018年西日本豪雨の際の越流量12,435m³の倍以上の流量である。

d) 誘因のまとめ

以上で述べた誘因の分析結果を表-1に整理した。

(3) 素因

a) 競艇場護岸の基礎地盤条件

競艇場護岸の基礎地盤を把握するため、土質調査を行った。調査位置は図-9のとおり。その結果、競艇場護岸直下の基礎地盤は、比較的粒径の小さい礫が分布していたことが確認された。

b) 競艇場護岸下部の空洞

図-10に示す4箇所ファイバースコープによる空洞化調査を実施した。その結果、Bor.R1-12では、水叩き下部に厚さ7cm程度の空洞が確認され、空洞内に水産無脊椎動物(コケムシ類)が確認された。個体の大きさか

表-1 誘因の分析結果

項目	整理結果	考察
水位差	競艇場内水位と潮位の差 2634mm (283位)	過去最大ではないが平均(1,129mm)より大きい。
降雨量	阿内雨量局観測結果 283mm(1位)	過去最大
越流時間	競艇場内水位が潮位を上回り護岸天端を越流した時間 約17時間 (23位)	平均(9.4時間)より長時間越流
越流量	競艇場内水位が潮位を上回り護岸天端を越流した量 28,533m ³ (1位)	過去1年間で最大(平均:6,947m ³)

※競艇場内水位、長府検潮所潮位、及び阿内雨量局降雨量のデータを使用。
※競艇場内の水位は、保存されている2018年10月1日以降のデータを使用。降雨量は観測を開始した2013年以降のデータを使用。

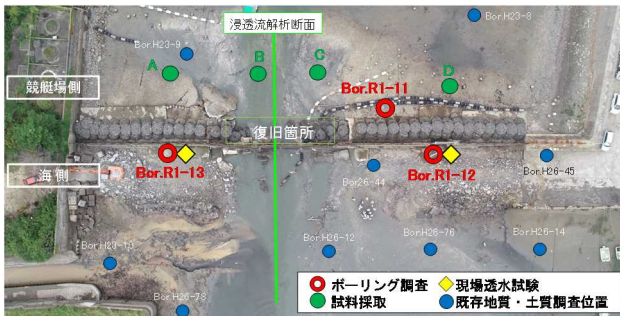


図-9 調査位置と浸透流解析断面位置

ら1年以上は生息していると考えられ、被災前から空洞状態であったことが推察できる。Bor.R1-13では、水叩き下部に厚さ4cm程度の空洞が確認された。No.①, ②では、水叩きの下部の空洞が奥行き70cm迄確認され、空洞内にはBor.R1-12同様水産無脊椎動物(コケムシ類)が確認された。

c) 競艇場護岸の劣化

被災前の写真から、護岸全域にわたって水叩きの一部欠損のほか、亀裂や空洞、段差、護岸と水叩きの間の目地の開き、空洞からの流水も確認されており、被災箇所ではこれらが顕著であった(図-11)。

d) 工事による掘削(捨石撤去)

競艇場護岸の近傍では、捨石撤去工事を実施していた。詳細は2.(3)のとおり。

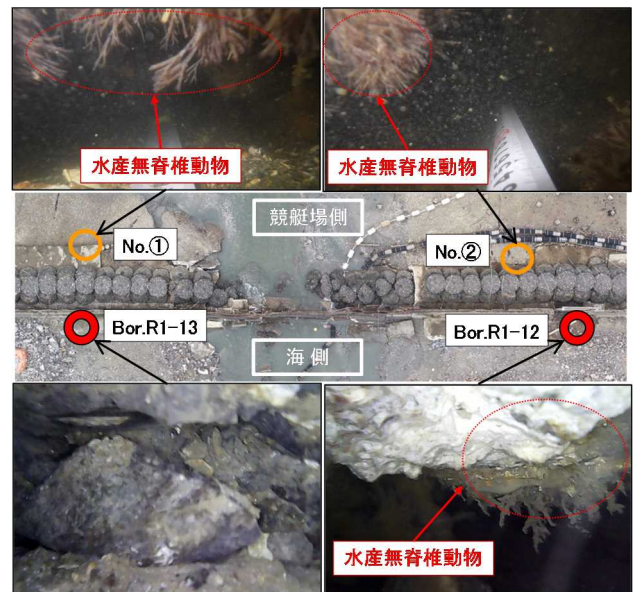


図-10 空洞化調査位置と空洞化状況

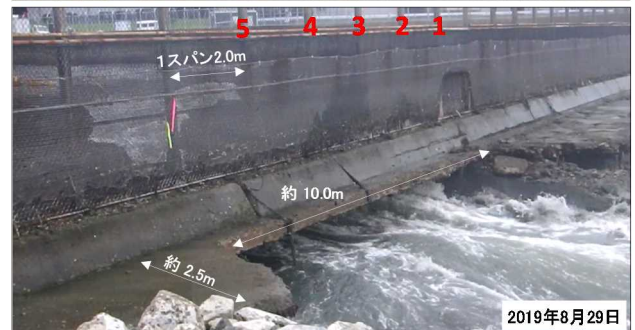


図-11 被災前後の護岸の状況

4. 護岸被災要因及び被災メカニズムの推定

(1) 浸透流解析による護岸被災要因の推定

今回の被災形態から水の流れにより護岸下部の基礎地盤が破壊された浸透破壊であることが推測されることから、土質試験で得られたデータを使用し浸透流解析を行った。

a) 浸透流解析の条件及びケース

被災地点(図-9の緑線)を浸透流解析断面として解析した。

解析は以下のケースとし、図-12に示す解析モデルで行い、浸透破壊に対する評価結果を考察した。また、それぞれのケースに対し工事による掘削(捨石撤去)による影響の評価結果を考察した。

- ケースA: 競艇場護岸が健全である場合
- ケースB: 競艇場護岸の空洞化を反映させた場合
- ケースC: 競艇場護岸の空洞化に加え護岸と水叩きの間の目地の開きを反映させた場合

b) 浸透流解析による評価項目

評価は、工事による掘削の影響を確認するための局所動水勾配、水叩き部を押し上げる圧力比であるG/W、被災メカニズム検証のための基礎地盤内流速の3項目で行った。

局所動水勾配とは全水頭の勾配のことで、河川堤防の浸透安全性に用いられる照査項目であり、限界動水勾配が浸透破壊に対する安全性に課題があると評価される0.5以上であるか否かを判断する。

G/Wは水叩きの重量(G)と水叩きを押し上げる上向きの水圧(W)の比のことで圧力比を表す。河川堤防の川裏法尻に薄層の粘性土が分布している場合の照査項目であり、G/Wの値が水叩きに対する安全性に課題があると評価される1.0を下回るか否かを判断する。

基礎地盤内流速とは水頭差が生じる場面での基礎地盤内に発生する流速のことで、基礎地盤内に発生する流速を浸透流解析から算出し、基礎地盤内流速が土粒子限界流速を上回り、土粒子が動き流亡するかを判断する。

c) 浸透流解析による検討位置(評価位置)

浸透流解析では、被災発生箇所であると考えられる図-12の地点①の解析結果に着目するが、参考として、水叩き端部(地点②)、掘削地点(地点③)、掘削前の断面法

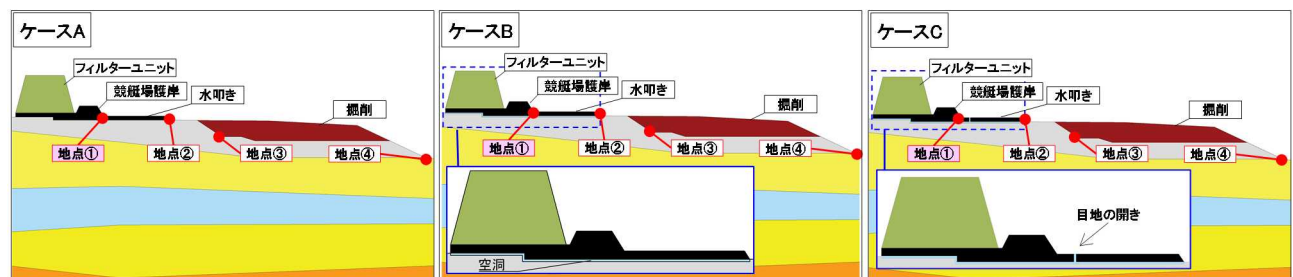


図-12 解析ケースと検討地点

尻(地点④)も合わせた計4カ所で解析を行う。

d) 浸透流解析結果

浸透流解析の結果を表-2に示す。

ケースAではいずれの評価項目も基準を満たしており、浸透破壊に至らない。

ケースBでは、G/Wが基準を満たしていないことから、コンクリート重量が十分でなく、水叩きを上向きに押し上げる水圧が優位となる結果になった。

ケースCでは、地点①で、水平方向の基礎地盤内流速が基準を満たさない結果となった。

被災時の護岸の状況はケースCのモデルに最も近いことから、護岸内部や水叩きの空洞や亀裂、護岸と水叩きとの間の目地の開きによって土粒子が流亡し、護岸下部に水みちが形成する可能性が高いことが確認された。

なお、いずれのケースでも工事(掘削)により局所動水勾配の値は上昇するが、0.5を下回ることから、掘削によって護岸被災を導いたとは考えにくい。

(2) 護岸天端高を越える越流水の評価

3.(3)c)において、越流量が過去1年間のうちで最も多い28,533m³であったことが確認された。

越流が長時間護岸に作用する場合、水叩きがなければ基礎地盤が洗掘される可能性があり、特に目地の開きや欠損箇所に越流水が直接作用すれば、基礎地盤の力学特性は失われ、浸透破壊を助長するおそれがある。

越流水が護岸に与える外力(水叩き上面の摩擦速度)は、越流水深から導くことができ、土粒子が移動を開始する限界となる摩擦速度と比較することにより、越流水が護岸に与える影響を評価できる。

護岸被災直前(12時頃)の越流水深は0.264mであり、流速は越流量から逆算して3.42m/s、水叩き上面に衝突

表-2 解析結果(地点① 水平方向)

ケース	掘削	最大局所動水勾配 ih	基礎地盤内流速 (m/s) + 右向き	G/W
基準値				
		<0.5	<1.81E-03	>1.00
A	無	0.153	5.41E-06	1.031
	有	0.148	5.21E-06	1.031
B	無	0.142	1.42E-03	0.881 NG
	有	0.142	1.42E-03	0.881 NG
C	無	0.191	1.88E-03 NG	—
	有	0.191	1.88E-03 NG	—

する摩擦速度は 2.27m/s と算出できる。基礎地盤の平均粒径から土粒子の限界摩擦速度は 0.0753m/s であると推測され、水叩き上面に衝突する摩擦速度を大きく下回っているため、基礎地盤に越流水が作用すれば土粒子は移動し、洗掘されると評価できる。

このことから、越流水が水叩きの亀裂や目地の開き部分から直接地盤に衝突し、地盤の洗掘が加速され、水叩きの移動を引き起こした要因になったことが推測される。

(3) 被災メカニズムの推定

現地調査や解析結果を踏まえ、護岸被災に至ったメカニズムを推定する(図-13)。

競艇場護岸は、空洞や亀裂、目地の開き等、劣化が進んでおり、干満差により基礎地盤内の空洞に水の行き来が生じる状況にあったと考えられる。

被災当日の10時頃には、豪雨による競艇場内水位の上昇により、高い水圧が水叩き下側に生じ、水叩きの浮き上がりが発生。その後、潮位が下がるが競艇場内水位が高い水位を保っていたため浸透流が通常より長い時間作用。10時半頃に地盤内の流速が限界流速を超え、土粒子が流亡、水みちが形成。

12時頃までに土粒子の流亡が進み、水みちが拡大するとともに、越流水が水叩きの端部を押さえ、水叩きが動き始める。

被災時刻である13時頃に、水叩きが移動し、水みちの拡大が促進される。加えて、水叩きの移動により上向きに水みちが形成されることで護岸下部の水みちがさらに大きくなり、移動した水叩きに水圧が作用。水圧により水叩き及び土砂が流出し、被災に至ったと推定される。

5. まとめ

これまでの検討結果を総合すると護岸被災の原因は以下のとおり考えられる。

今回の被災直前の豪雨は、近傍の観測所で観測した2013年以降で最大の雨量を記録した豪雨で、その豪雨による競艇場護岸からの越流量は過去と比較しても突出した量であった。

競艇場護岸は、空洞や亀裂、護岸と水叩きの間に目地の開きが確認されており、劣化が進行しつつある状況であった。

競艇場護岸は干満の影響により内外水位の逆転現象が常に生じる環境の中、空洞箇所を通じて基礎地盤内も水の行き来が生じる状況であった。そのような中、4.(3)のメカニズムの推定の通り浸透破壊に至ったと考えられる。

今回の被災は8月29日に発生、9月13日に下関競艇場護岸被災原因究明等委員会を設置・開催し、原因究明のための検討方針を決定し、方針に従って調査やシミュレーションを実施した。翌年2月10日の第2回委員会にて本被災原因が浸透破壊であることが結論づけられたことから、現在は工事を再開したところである。

謝辞: 本検討を進めるにあたって、(国研)海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所の森川嘉之地盤研究領域長及び佐々真志動土質研究グループ長に、検討方針等についての貴重なご意見を頂きました。ここに記して、深くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 下関競艇場護岸被災原因究明等委員会：下関競艇場護岸被災における原因究明等とりまとめ報告書、2020。

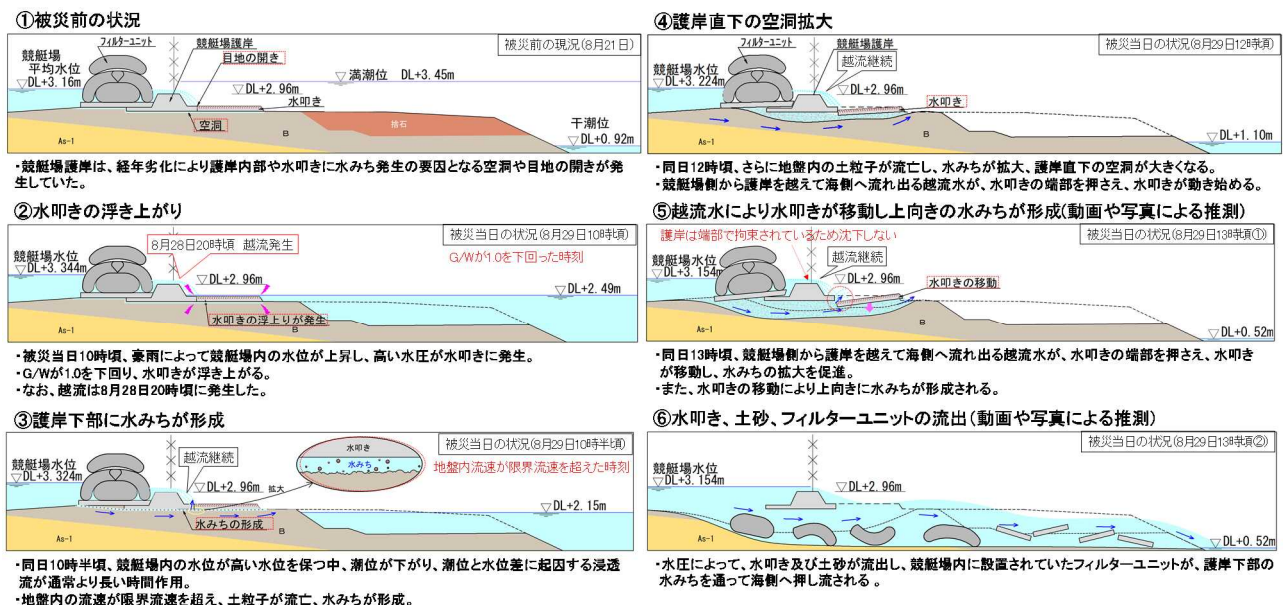


図-13 被災メカニズムイメージ