

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

令和 2 年 3 月 9 日

下関競艇場護岸被災原因究明等委員会

目 次

はじめに.....	1
1. 委員会の調査・検討経過.....	2
1-1 委員会の設置.....	2
1-2 委員会の概要.....	2
2. 下関競艇場護岸被災の概要.....	3
2-1 被災の概要.....	3
2-2 下関競艇場護岸について.....	5
2-3 下関港海岸直轄海岸保全施設整備事業の概要.....	7
2-4 工事の概要.....	8
3. 護岸被災に至る誘因と素因.....	12
3-1 護岸被災の形態.....	12
3-2 誘因.....	12
3-3 素因.....	17
4. 護岸被災要因及び被災メカニズムの推定.....	25
4-1 浸透流解析による護岸被災要因の推定.....	25
4-2 護岸天端高を越える越流水の評価.....	33
4-3 被災メカニズムの推定.....	34
5. 護岸被災の原因について（まとめ）.....	37

はじめに

令和元年 8 月 29 日 13 時頃、山口県下関市長府扇町に位置する「ボートレース下関」（管理者：下関市ボートレース企業局）において、競艇場水面と海を隔てる護岸が約 33m にわたり被災する事案が発生した。

九州地方整備局では、下関港海岸における高潮対策のため、競艇場護岸近傍において、水門を建設するための基礎工事に着手していた。護岸被災を受け、下関競艇場護岸の被災に対し、今後の下関港海岸工事を安全かつ確実に実施するため原因究明等を行うことを目的として、令和元年 9 月 13 日、「下関競艇場護岸被災原因究明等委員会」を設置した。

委員は 7 名の有識者からなり、これまでに 2 回の委員会と 1 回の現地調査を行った。委員会では、関係者から提供された資料をもとに、護岸被災の誘因と素因について分析を進めるとともに、浸透流解析を行い、護岸被災メカニズムの検討を行った。

本報告は、本委員会として当該護岸被災に関して現時点までに得られた情報を分析・検討した結果をとりまとめたものである。

1. 委員会の調査・検討経過

1-1 委員会の設置

下関競艇場護岸被災について、今後の下関港海岸工事を安全かつ確実に実施するため、有識者で構成する「下関競艇場護岸被災原因究明等委員会」が令和元年9月13日に設置された。

委員名簿

	氏 名	所 属	役 職
委員長	善 功企	九州大学	名誉教授
委 員	秋山 壽一郎	九州工業大学	名誉教授
	笠間 清伸	東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系	准教授
	佐々 真志	海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 地盤研究領域	動土質研究 グループ長
	園田 佳巨	九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門	教授
	森川 嘉之	海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 地盤研究領域	領域長
	山本 康太	国土交通省 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋・防災研究部 沿岸防災研究室	沿岸防災 研究室長

事務局 九州地方整備局 港湾空港部、下関港湾事務所

1-2 委員会の概要

第1回委員会 令和元年9月13日（金）（被災現場調査も併せて実施）

第2回委員会 令和2年2月10日（月）

2. 下関競艇場護岸被災の概要

2-1 被災の概要

(1) 被災の概要

令和元年8月29日（木）13時頃、山口県下関市長府扇町4-70地先に位置する「ボートレース下関」（管理者：下関市ボートレース企業局）において、競艇場水面と海を隔てる護岸（以下「下関競艇場護岸」という）約96mのうち、中央部約33mが被災した（図2-1-1、2）。



図2-1-1 被災施設位置



被災前の状況



被災後の状況



図2-1-2 被災状況写真

（２）被災状況の時系列

令和元年8月29日13時頃、下関競艇場護岸の近接する位置で実施している工事「平成31年度下関港海岸（山陽地区）護岸（改良）工事（新川水門）」（以下「工事」という）の作業員が、捨石撤去工事の作業を開始するため現場に向かった所、護岸の水叩きが一部沈み込んでいることを発見。

その後、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。その後護岸上部が下に沈み込んだ（図２－１－３）。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２－１－４）。



図２－１－３ 護岸被災の時系列写真



図２－１－４ 被災直後の航空写真

2-2 下関競艇場護岸について

(1) 護岸構造

護岸は基礎地盤の上をコンクリートで被覆した構造であり、護岸延長は約96m、護岸天端高はD.L+2.96mである。

才川の河口から水路を通して流入する海水と、潮位の変動に応じて海から護岸天端を越えて競艇場内へ流入する海水により、競艇場内水面の水位が定まっている。

競艇場側には、競艇場内水面の静穏度を確保するためにフィルターユニットが設置されており、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2-2-1）。

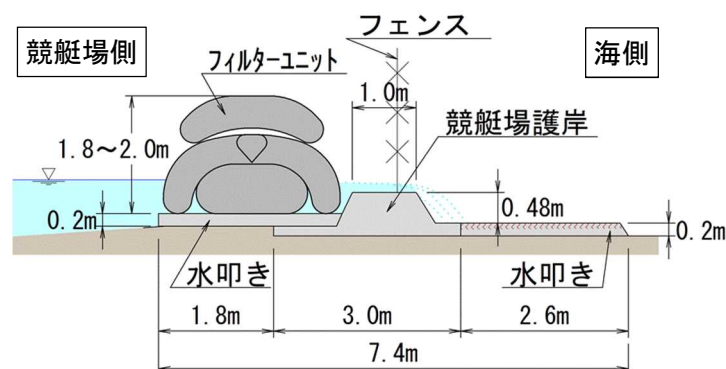


図2-2-1 競艇場護岸の構造

※フィルターユニット：合成繊維を使用した網材に中詰め石（今回の場合は碎石）を充填したもの。

※水叩き：波浪や水流から構造物の下部の材料（土砂や石）を保護するためのコンクリート床版。

※海側水叩きの幅は場所によって0.7m~3.7mとなるが、被災箇所の水叩き幅を記載している。

(2) 護岸の築造時期・修復履歴

競艇場護岸は、下関市ボートレース企業局が管理している。護岸の正確な築造時期は不明であるが、昭和40年代には現在の護岸の形になっていたとされ、概ね築造後60年程度経過している施設と推測される。建設当時の資料は確認されていない。

また、修復履歴については、漏水修繕工事としてコンクリート補修及び袋詰めコンクリートの設置が行われている（図2-2-2）。

平成8年：漏水修繕工事として、水中コンクリート打設、土のう設置

平成9年：漏水改修工事として、袋詰コンクリート設置、コンクリート補修

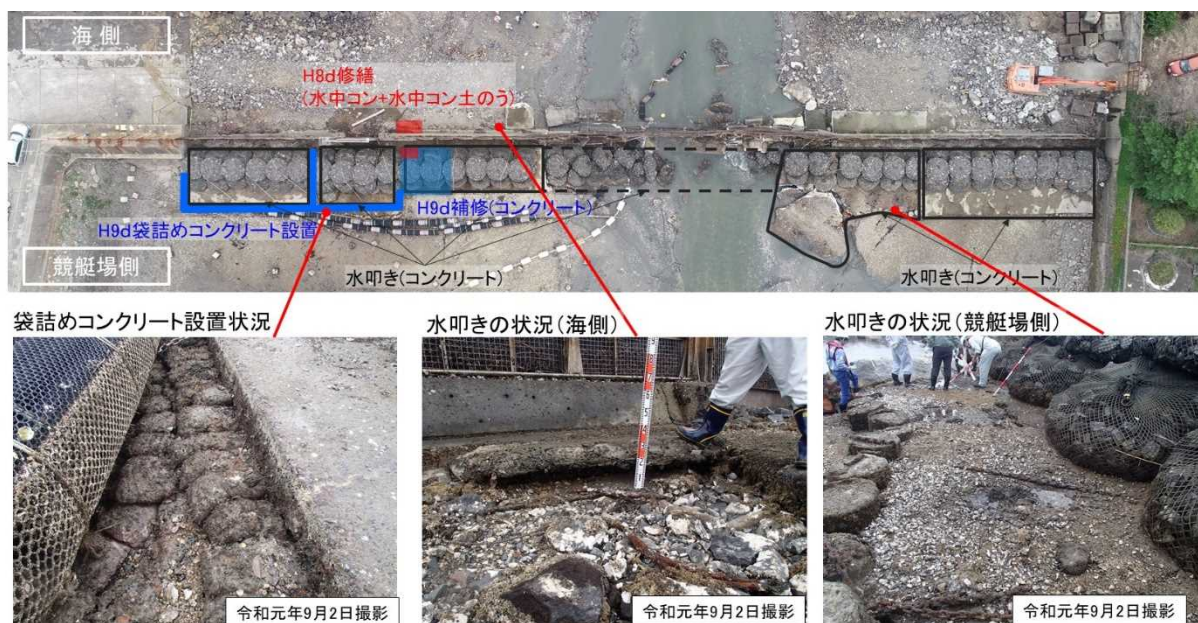


図 2 - 2 - 2 競艇場護岸の修復位置と内容

2－3 下関港海岸直轄海岸保全施設整備事業の概要

(1) 事業の目的

周防灘に面する下関市の南側に位置する下関港海岸は、その地形特性から台風来襲に伴う高潮による家屋の浸水や高波による国道の通行止めが発生しており、住民や立地企業に大きな被害をもたらしてきた。

特に、平成11年に発生した台風18号では、大規模な浸水被害が発生し、企業活動や市民生活に甚大な被害をもたらした。

このため、平成20年度より、長府・壇ノ浦地区から山陽地区にまたがる約13kmの範囲について、直轄事業による高潮対策を実施しているものである（図2－3－1）。



図2－3－1 下関港海岸直轄海岸保全施設整備事業の概要

(2) 事業の内容

事業着手：平成20年度

事業内容：長府・壇ノ浦地区：延長4.9km、護岸改良

山陽地区：延長7.8km、護岸改良、水門（5基）、陸閘（11基）

九州地方整備局下関港湾事務所では、下関港海岸における高潮対策事業を実施しており、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。工事内容は以下のとおり。

工事件名：平成31年度下関港海岸（山陽地区）護岸（改良）工事（新川水門）
 工期：令和元年5月28日～令和2年3月25日
 発注者：九州地方整備局
 受注者：東亜建設工業株式会社
 内容：仮設工、仮締切工、地盤改良工、調査工

工事内容及び工事手順は以下のとおり（図 2-4-1）。

- ① 捨石撤去 : 鋼矢板打設に先立ち、既設護岸の一部の捨石を撤去。
- ② 仮棧橋設置 : 建設機械が移動する道として仮棧橋を設置。
- ③ 仮締切設置 : 鋼矢板を打設し、地盤改良を行うための仮締切を設置。
- ④ 盛土（埋め戻し） : 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。

①捨石撤去

②仮栈橋設置

③仮締切設置

④盛土（埋め戻し）

⑤地盤改良

8

(3) 護岸被災時までの工事作業の時系列整理

【令和元年7月22日(月)～26日(金)】

- ・ 競艇場護岸の構造が不明瞭であるため、試掘を実施(図2-4-2)。
- ・ 試掘に先立ち、撤去断面における安定計算(円弧すべり^a計算)を実施。すべり破壊に対する最小安全率 $F_s \min$ が1.129となり、仕様規定の1.1を上回ることから、安全基準を満たしていることを確認(図2-4-3)。
- ・ 水叩きのない箇所では層厚や埋設物の有無を確認。
- ・ 潮待ち作業で試掘し、試掘後は埋め戻し。



図2-4-2 試掘位置及び試掘状況

競艇場護岸の安定検討(仕様規定 $F_s \geq 1.1$)
水位: LWL+0.06m

縮尺: 1/300

最小安全率 $F_s \min = 1.129$

円弧の中心 X = -5.00 (m)

Y = 4.50 (m)

半径 R = 7.10 (m)

抵抗モーメント $M_R = 1601.6$ (kN・m)

起動モーメント $M_D = 1418.7$ (kN・m)

層番号	飽和重量 (kN/m ³)	湿潤重量 (kN/m ³)	内部摩擦角 (度)	粘着力 (kN/m ²)	粘着力の 一次係数	水平変位
1	20.00	18.00	40.00	0.00	0.00	0.000
2	20.00	18.00	34.00	0.00	0.00	0.000
3	16.90	16.90	0.00	9.91	3.00	0.000
4	20.00	18.00	30.00	0.00	0.00	0.000
5	20.00	18.00	31.00	0.00	0.00	0.000
6	20.00	18.00	32.00	0.00	0.00	0.000
7	20.00	18.00	30.00	0.00	0.00	0.000
8	20.00	18.00	0.00	1000.00	0.00	0.000
9	20.00	18.00	30.00	0.00	0.00	0.000
10	17.20	17.20	0.00	1.97	4.81	0.000
11	20.00	18.00	32.00	0.00	0.00	0.000
12	20.00	18.00	32.00	0.00	0.00	0.000
13	20.00	18.00	35.00	0.00	0.00	0.000
14	20.00	18.00	38.00	0.00	0.00	0.000
15	20.00	18.00	38.00	0.00	0.00	0.000

粘着力の基準γ座標 = 0.000 (m)

水の単位体積重量 = 10.10 (kN/m³)

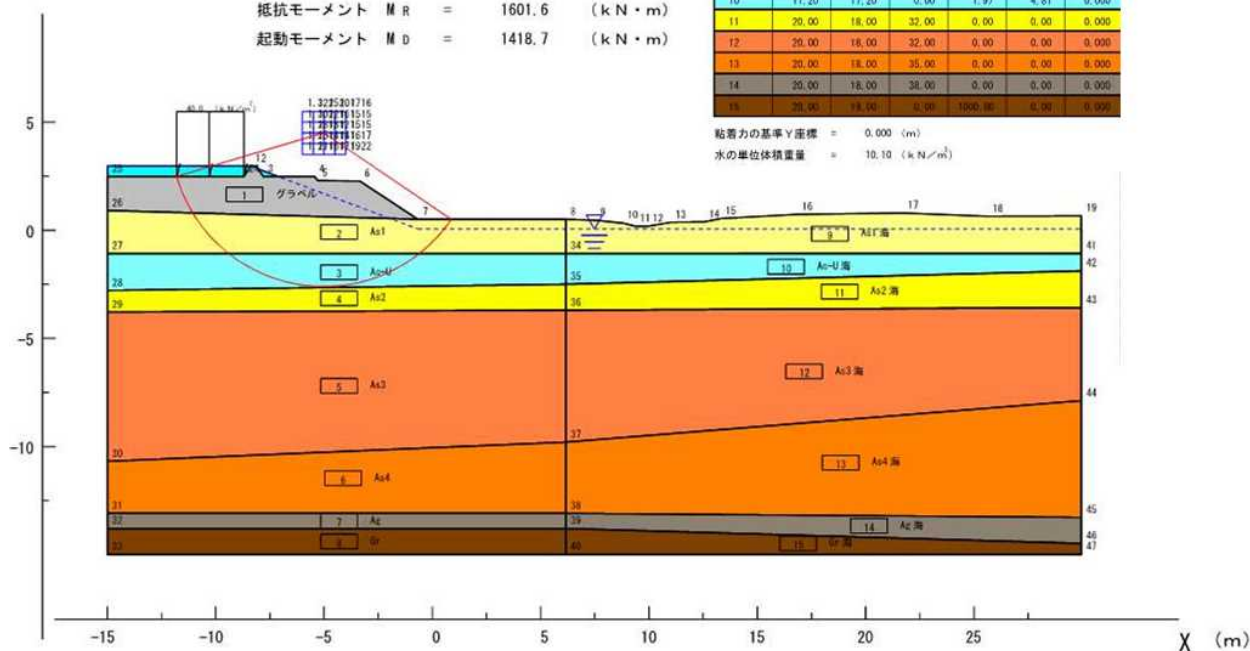


図2-4-3 円弧すべり計算結果

^a 円弧すべりとは、斜面等が円弧状のすべり面によって破壊する現象

【令和元年 8 月 22 日（木）～28 日（水）】

- ・ 競艇場護岸の被災箇所前面にて、捨石撤去を実施。
- ・ 既設護岸の一部の捨石（岩塊、玉石）をバックホウ（0.7m³級）で掘削し、護岸の両脇に仮置き（図 2-4-4、5）。



図 2-4-4 現地写真（左：8 月 26 日 11 時、右：8 月 28 日 11 時）

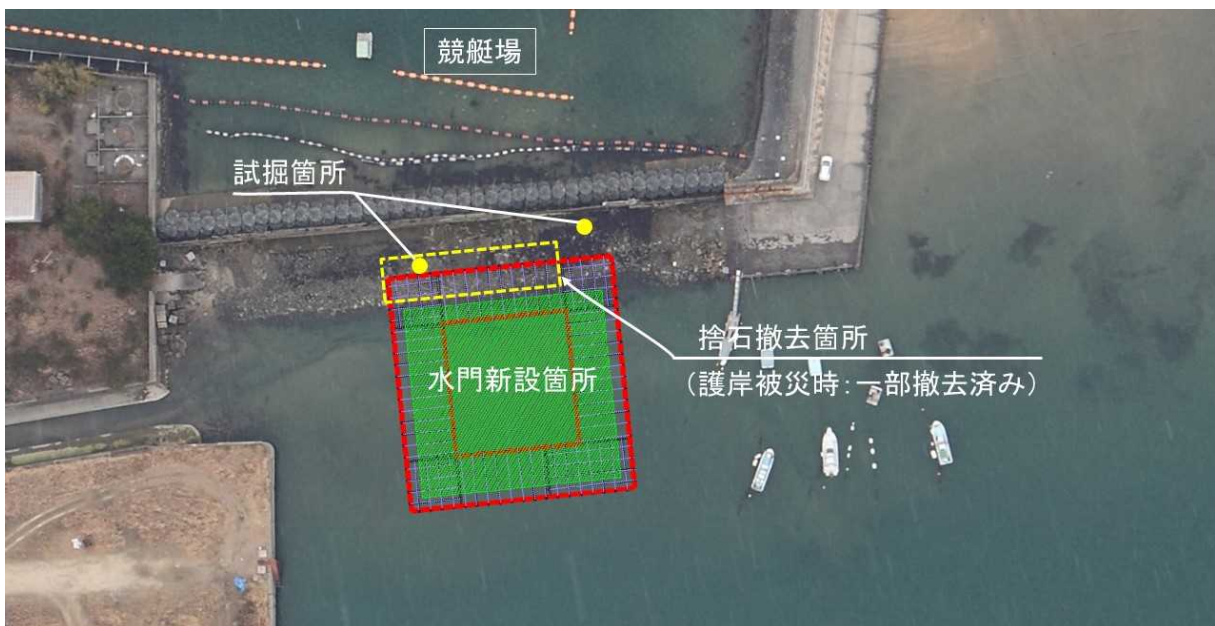


図 2-4-5 捨石撤去箇所及び水門新設箇所の位置

【令和元年 8 月 29 日（木）】

- ・ 午前中は、潮位が高かったため潮待ちのため待機。
- ・ 13 時、作業員が現場に向かったところ、護岸被災を発見。

(4) 被災当日までの捨石撤去状況と位置

捨石撤去作業は、令和元年8月22日から28日にかけて、競艇場護岸から海側に約5m～13m離れた位置で、延長約30m程度、撤去深さは40cm～90cm実施した。

捨石撤去作業の詳細位置図及び被災した護岸位置と捨石撤去範囲の関係は図2-4-6、7のとおり。

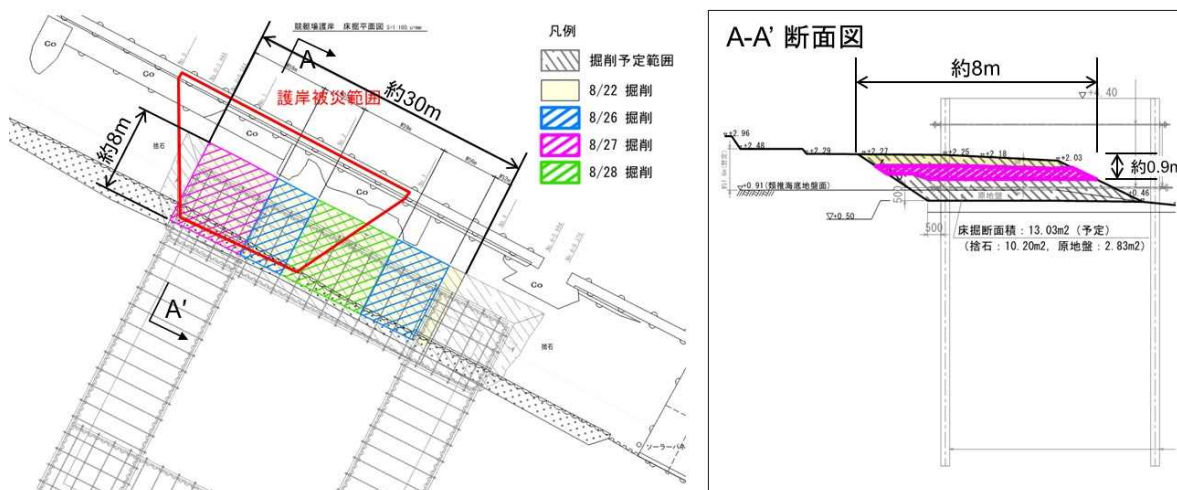


図2-4-6 捨石撤去位置(8月22日～28日)

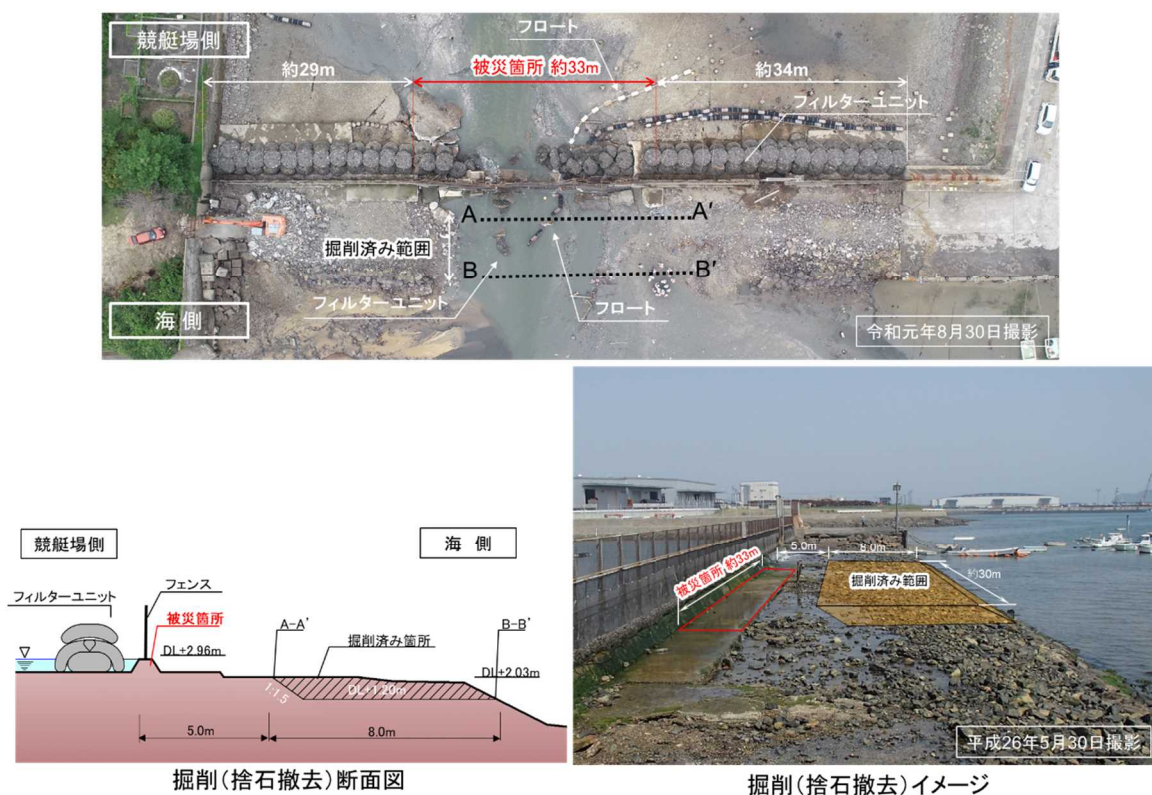


図2-4-7 護岸被災位置と捨石撤去位置との関係

3. 護岸被災に至る誘因と素因

3-1 護岸被災の形態

被災後の写真及び動画^bから、被災直後においては、護岸上部は護岸法線を保った状態を維持したまま、護岸下部が先に押し流され、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ている。その後、護岸上部が真下に崩落したことが確認できる（図2-1-3）。

以上から、護岸被災の形態は、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る。また、護岸の被災は、写真及び動画から、護岸の水叩き端部から発生したことが推測される。

次に、競艇場護岸被災において、なぜ浸透破壊が生じたか原因を究明するため、被害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。

本事案における「誘因」としては、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（捨石撤去）が考えられる。

「誘因」「素因」それぞれについて、以下で考察する。

3-2 誘因

（1）競艇場内外の水位差

競艇場内外の水位差について、競艇場内に設置されていた水位計、長府検潮所による潮位、及び被災箇所近傍の阿内雨量局のデータを使用し分析した。なお、競艇場内に設置されていた水位計のデータは、保存されている平成30年10月1日以降のデータを使用した。

被災当日の競艇場護岸の水位は、3日前（令和元年8月27日1時）からの降雨により、護岸天端高を越える高い水位が継続しており、被災前日の令和元年8月28日21時には、水位が護岸天端高より67.4cm高いDL+3.634mとなり、その後も護岸天端高より約20～50cmの高い水位が継続した。

被災当日は大潮であり、潮位が満潮（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（令和元年8月29日13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3-2-1）。

なお、競艇場内外の水位差は、平成31年2月21日に3.554mを記録しており、2.634mを超える事象は過去にも発生している。

^b 護岸が被災した直後（令和元年8月29日13時頃）に作業員が撮影した動画

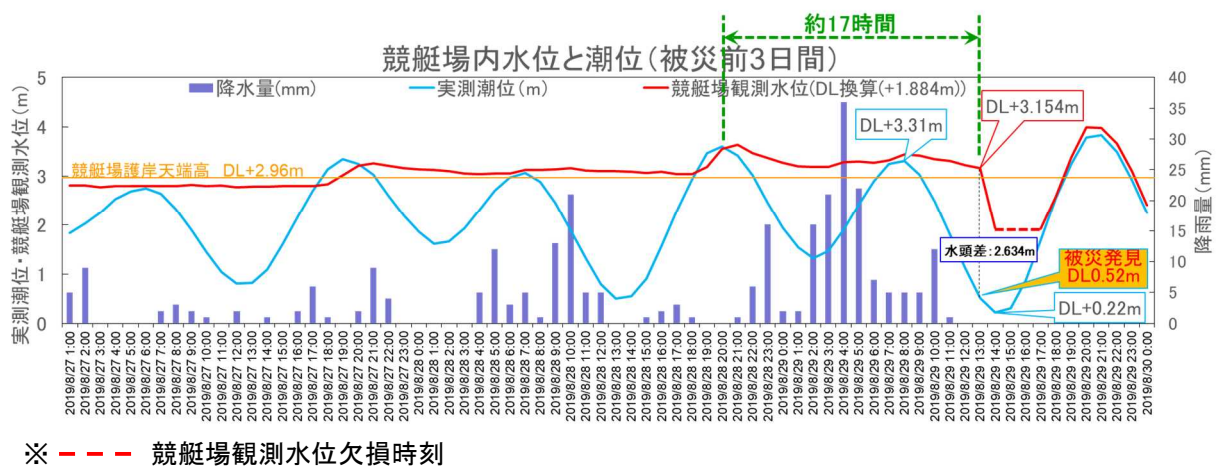


図 3 - 2 - 1 潮位及び競艇場内水位



図 3 - 2 - 2 被災前後における競艇場内水位の越流状況

(2) 降雨量

被災箇所近傍の阿内雨量局で観測を開始した平成25年（2013年）3月から護岸被災時までには発生した豪雨の総雨量を比較すると、護岸被災時の総雨量は283.0mmで過去最大であった（図 3 - 2 - 3）。

なお、護岸被災直前までの降雨は、被災3日前から続いており、最大時間雨量は令和元年8月29日4時の36.0mm/hであった（図 3 - 2 - 1）。

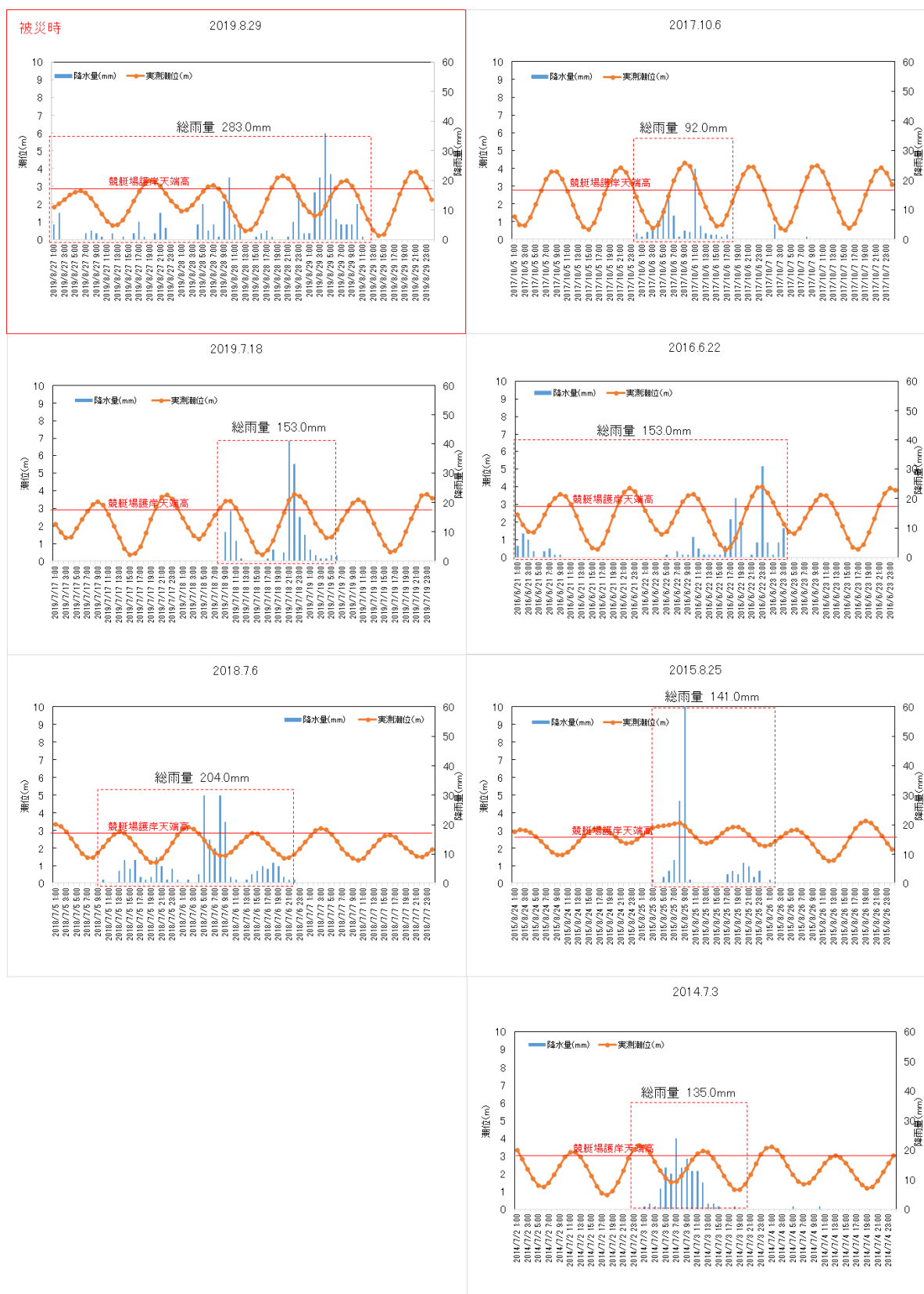


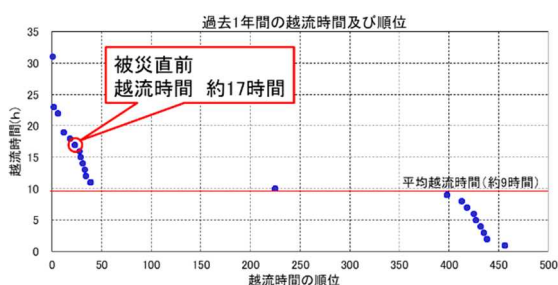
図 3-2-3 護岸被災時及び過去の豪雨時における降雨量の比較

(3) 競艇場護岸からの越流

被災3日前からの降雨により、約17時間にわたり競艇場内水位は潮位を上回り、競艇場内から海側へ越流した。

競艇場内水位が競艇場護岸天端を越える平均越流時間は9時間程度であり、護岸被災時に発生した約17時間の越流時間は、過去最大ではないものの、平均越流時間より長い(図3-2-4)。

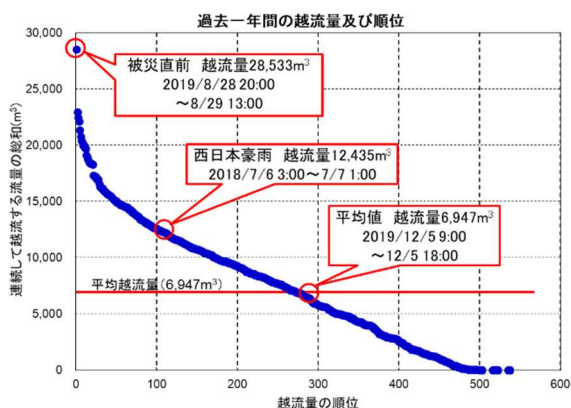
一方、約17時間に発生した越流量について、完全越流として本間の提案する実験式から算定した値^cは28,533m³であり、過去1年間で突出した量であった(図3-2-5)。参考として、平成30年西日本豪雨の際の越流量は12,435m³であり、護岸被災時の半分以下の流量である(図3-2-6)。



※越流時間の順位には同一の越流時間が複数含まれる。

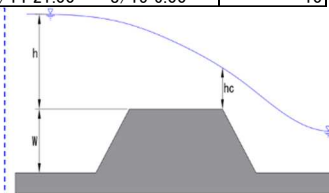
越流時間(h)の順位			
越流時間の順位	越流時間(h)	越流期間	(参考) 越流量(m ³)
1	31	2019/8/8 3:00 ~ 8/9 9:00	5,780
	23	2019/6/8 1:00 ~ 6/8 23:00	12,818
2	23	2019/6/9 2:00 ~ 6/10 0:00	11,070
	23	2019/5/22 0:00 ~ 5/23 22:00	10,857
	23	2019/7/24 2:00 ~ 7/24 20:00	5,190
	22	2019/6/22 1:00 ~ 6/22 22:00	15,189
	22	2019/7/23 2:00 ~ 7/23 23:00	9,453
6	22	2019/6/23 2:00 ~ 6/23 23:00	9,098
	22	2019/8/27 21:00 ~ 8/28 18:00	8,735
	22	2019/5/10 1:00 ~ 5/10 22:00	6,824
	22	2019/6/12 6:00 ~ 6/13 3:00	2,906
	...	...	...
23(被災直前)	17	2019/8/28 21:00 ~ 8/29 13:00	28,533

図3-2-4 護岸被災時における競艇場護岸の越流時間と順位



越流量(m ³)の順位			
順位	越流量(m ³)	越流期間	(参考) 越流時間(h)
1(被災直前)	28,533	2019/8/28 21:00 ~ 8/29 13:00	17
2	22,929	2019/6/6 0:00 ~ 6/7 9:00	10
3	22,434	2019/8/6 13:00 ~ 8/6 23:00	11
4	22,097	2019/7/5 0:00 ~ 7/6 9:00	10
5	21,343	2019/8/15 9:00 ~ 8/15 19:00	11
6	20,427	2019/7/18 22:00 ~ 7/19 8:00	11
7	20,243	2019/8/1 22:00 ~ 8/2 7:00	10
8	19,783	2019/7/4 23:00 ~ 7/5 8:00	10
9	19,692	2019/8/2 23:00 ~ 8/3 8:00	10
10	19,119	2019/8/14 21:00 ~ 8/15 6:00	10

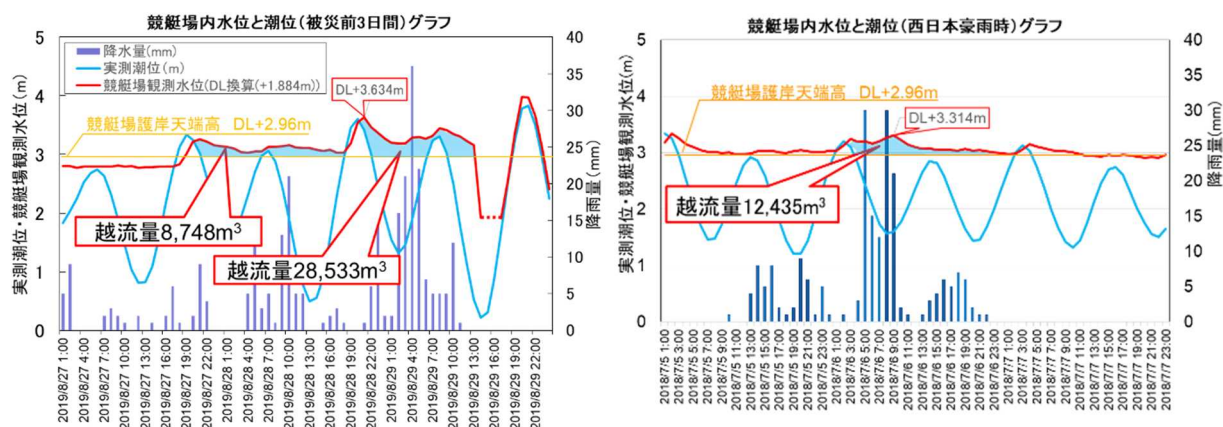
台形せきの越流量 本間の提案する実験式
[完全越流条件での算定式]
 $Q = CBh^{3/2}$
ここに、
流量係数 $C = 1.24 + 1.64(h/W)$
競艇場内水深 h (m)
護岸基礎天端高さ W (m)
単位幅 B (m)



護岸天端の越流量算定

図3-2-5 護岸被災時における競艇場護岸の越流量と順位

^c 越流量の算定は、もぐり越流になる時間がわずかであるため、完全越流として本間の提案する実験式から算定した。



※ --- 競艇場観測水位欠損時刻

図 3 - 2 - 6 競艇場護岸の越流量（護岸被災時と西日本豪雨時との比較）

なお、越流量が護岸に与える影響については、4 - 1（7）に後述する。

（4）誘因のまとめ

以上で述べた誘因の分析結果を図 3 - 2 - 7 に整理した。

項目		整理結果		考察
水位差	競艇場内水位と潮位の差 (m)	2.634m	283位	過去最大ではなかったが通常よりは大きい (平均値: 1.129m)
越流量	競艇場内水位が潮位を上回り 護岸天端高を越流した量 (m³)	28,533m³	1位	過去最大の突出した越流量 (平均値: 6,947m³)
越流時間	競艇場内水位が潮位を上回り 護岸天端高を越流した時間 (h)	約17時間	23位	通常より長い時間にわたり越流 (平均値: 9.4時間)
降雨量	阿内雨量局の観測結果 (mm)	283mm	1位	過去最大の特異な豪雨

イメージ図

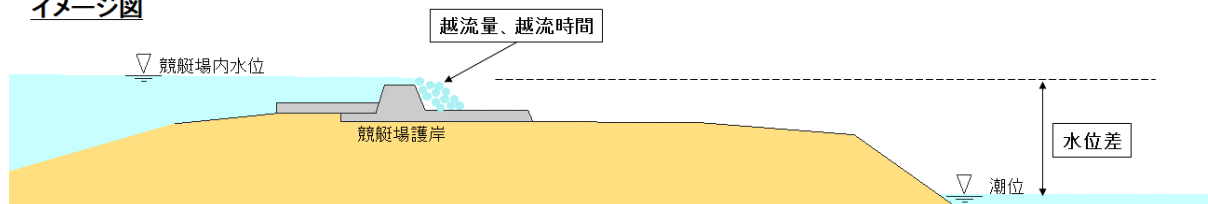


図 3 - 2 - 7 護岸被災にかかる誘因のまとめ

※各項目は、競艇場内の水位、長府検潮所の潮位、及び阿内雨量局（被災箇所近傍）の降雨量のデータを使用し分析した。

（競艇場内の水位は、保存されている平成30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平成25年以降のデータを使用。）

3-3 素因

(1) 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、ボーリング、室内試験を含む土質調査を行った。調査位置は、委員の意見を踏まえ、以下の観点から決定した。

- R1-11 : 競艇場内側で、競艇場護岸に近い位置の土質特性の確認
R1-12、R1-13 : 競艇場護岸直下でかつ水叩きが残る位置での土質特性の確認
試料採取A～D : 競艇場内の土砂等の堆積状況の確認

また、試験項目については、浸透流解析に必要なデータ取得のため、土質試験を実施した。調査位置及び試験項目の詳細は、図3-3-1、2のとおり。

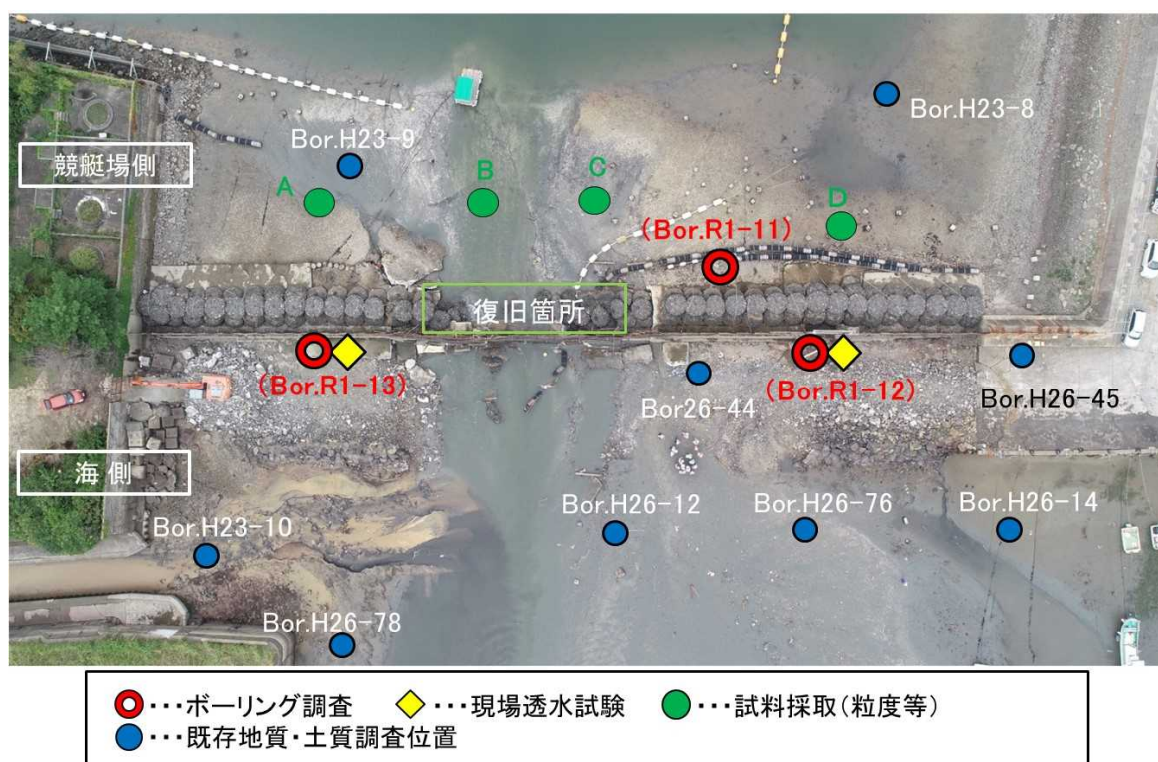


図3-3-1 土質調査・試験位置

		試料採取・原位置試験					室内試験(◎:不攪乱試料)					
		標準貫入試験	試料採取			現場透水試験	密度検層	粒度	土粒子の密度	含水比	湿潤／乾燥密度	液性限界・塑性限界
		攪乱	不攪乱	表層部※2								
■ボーリング※1												
R1-11	As-1	○		○			○	○	○	◎		
	Ac-U			○			○	○	○	◎	◎	
	他	○	○				○	○	○			
R1-12	水叩	○	○									
	B(G)	○	○			○	○	○	○	◎		
	As-1	○		○		○	○	○	○	◎		
	Ac-U			○		○	○	○	○	◎	◎	
	他	○	○				○	○	○			
R1-13	水叩	○	○									
	B(G)	○	○			○	○	○	○	◎		
	As-1	○		○		○	○	○	○	◎		
	Ac-U			○		○	○	○	○	◎	◎	
	他	○	○				○	○	○			
■試料採取												
A				○			○	○	○			
B				○			○	○	○			
C				○			○	○	○			
D				○			○	○	○			

※1 ボーリングは岩着まで実施(標高DL-15m前後)
 ※2 試料採取は表層0.5m程度の箇所を潜水土により採取(機乱試料アクリルサンブラー等)
 ※3 埋土層(B(G))は、サンプリング不可のため現場密度試験を実施

図3-3-2 土質試験調査項目

ボーリング調査結果から、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。水叩き直下には空洞が確認され、Bor. R1-12は厚さ7cm、Bor. R1-13は厚さ4cmであった(図3-3-3)。

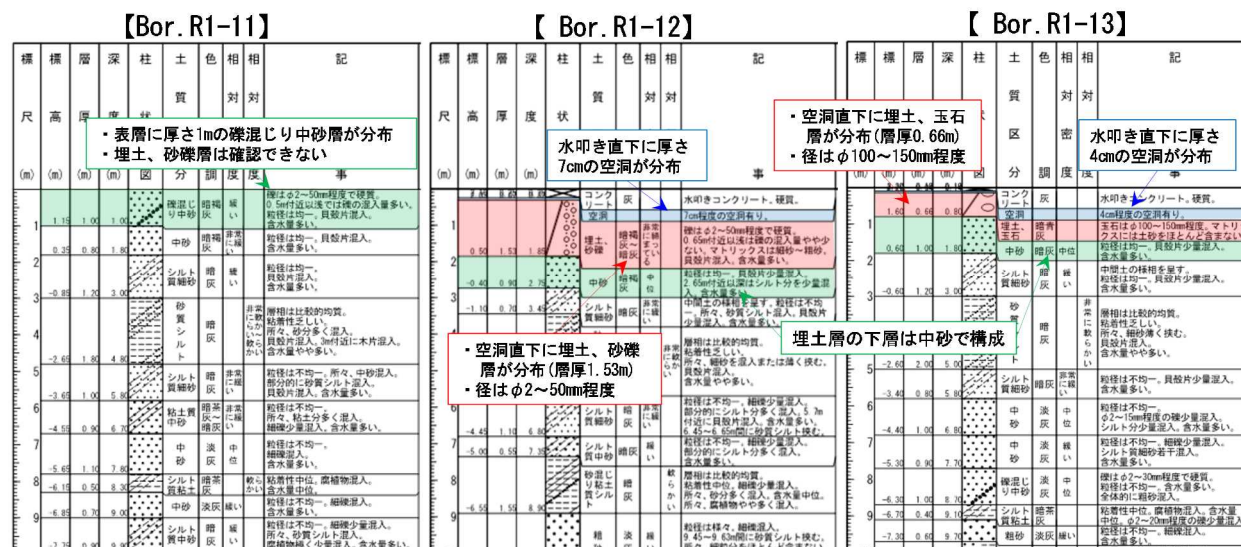


図3-3-3 ボーリング柱状図

（２）競艇場護岸下部の空洞

4箇所でファイバースコープによる空洞化調査を実施した。

この結果、護岸海側の調査位置Bor. R1-12では、水叩きの下部に厚さ7cm程度の空洞が確認された。また、空洞に水産無脊椎動物（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。同じく海側の調査位置Bor. R1-13では、水叩きの下部に厚さ4cm程度の空洞が確認された（図3－3－4）。

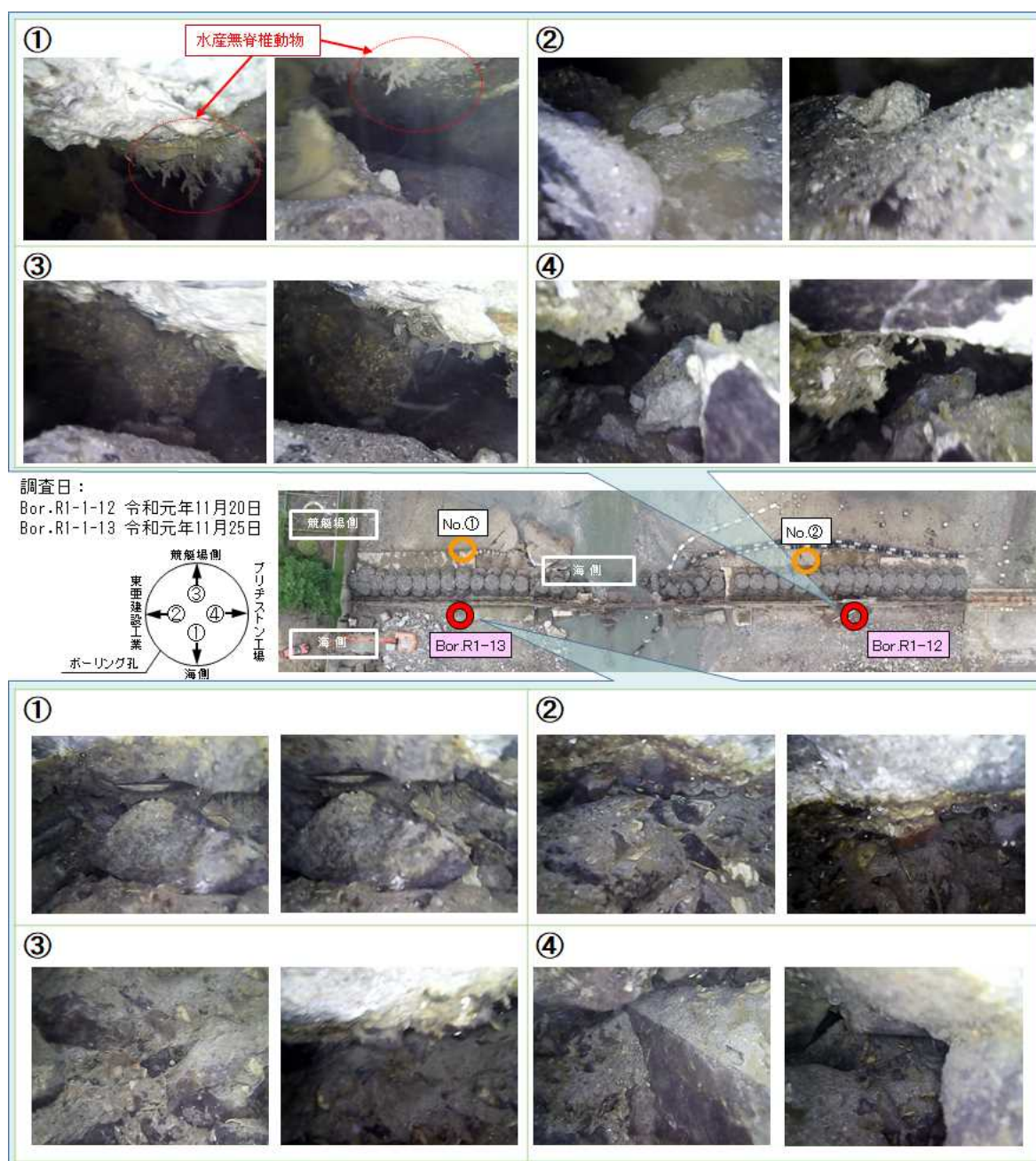


図3－3－4 護岸海側の空洞化調査写真（Bor. R1-12、Bor. R1-13）

また、調査位置No. ①、②では、水叩きの下部の空洞が奥行き70cm迄確認された。また、空洞に水産無脊椎動物（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（図3-3-5）。

調査日：令和元年11月5日

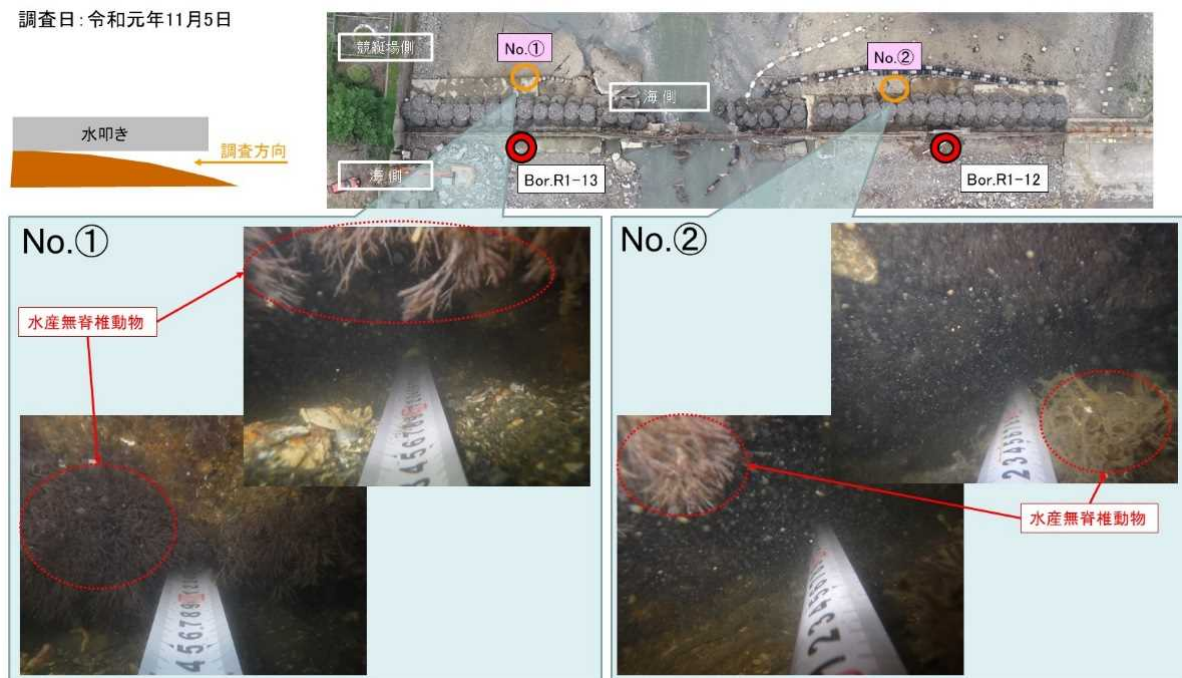


図3-3-5 護岸競艇場側の空洞化調査写真

（3）競艇場護岸の劣化

被災前に撮影した水叩き写真から、水叩きの幅は一様ではなく、所々欠損している箇所が確認された。また、亀裂や空洞、段差、護岸と水叩きの間に目地の開きも確認された。それぞれの状況は下記のとおり。

- ・ 水叩き2BLでは、段差や空洞が確認された（図3-3-6）。
- ・ 水叩き3BLと4BLでは、段差や亀裂、目地の開き、空洞からの流水が確認された（図3-3-7）。
- ・ 水叩き5BLでは、目地の開きや欠損、空洞からの流水が確認された（図3-3-8）。
- ・ 水叩き6BLでは、護岸下部の空洞から流水が確認された（図3-3-8）。
- ・ 水叩き7BLでは、欠損が確認された（図3-3-9）。

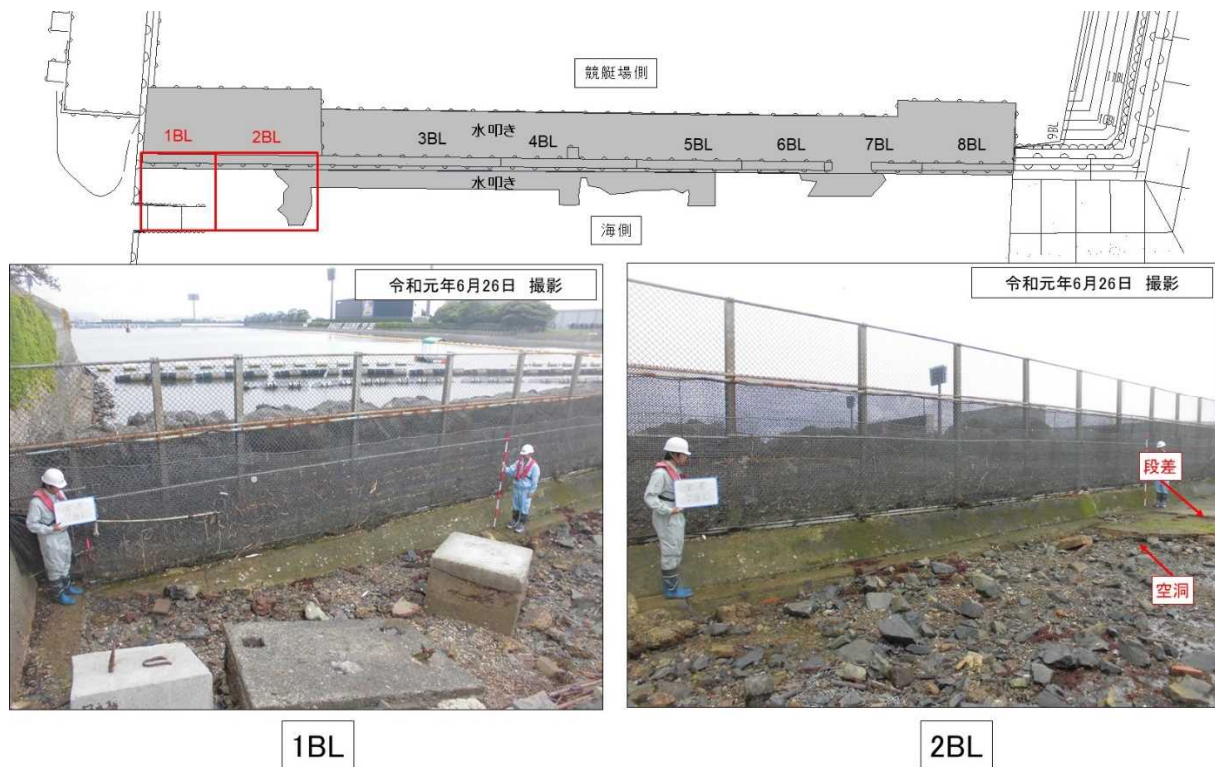


図 3 - 3 - 6 競艇場護岸水叩きの状況①（被災前）

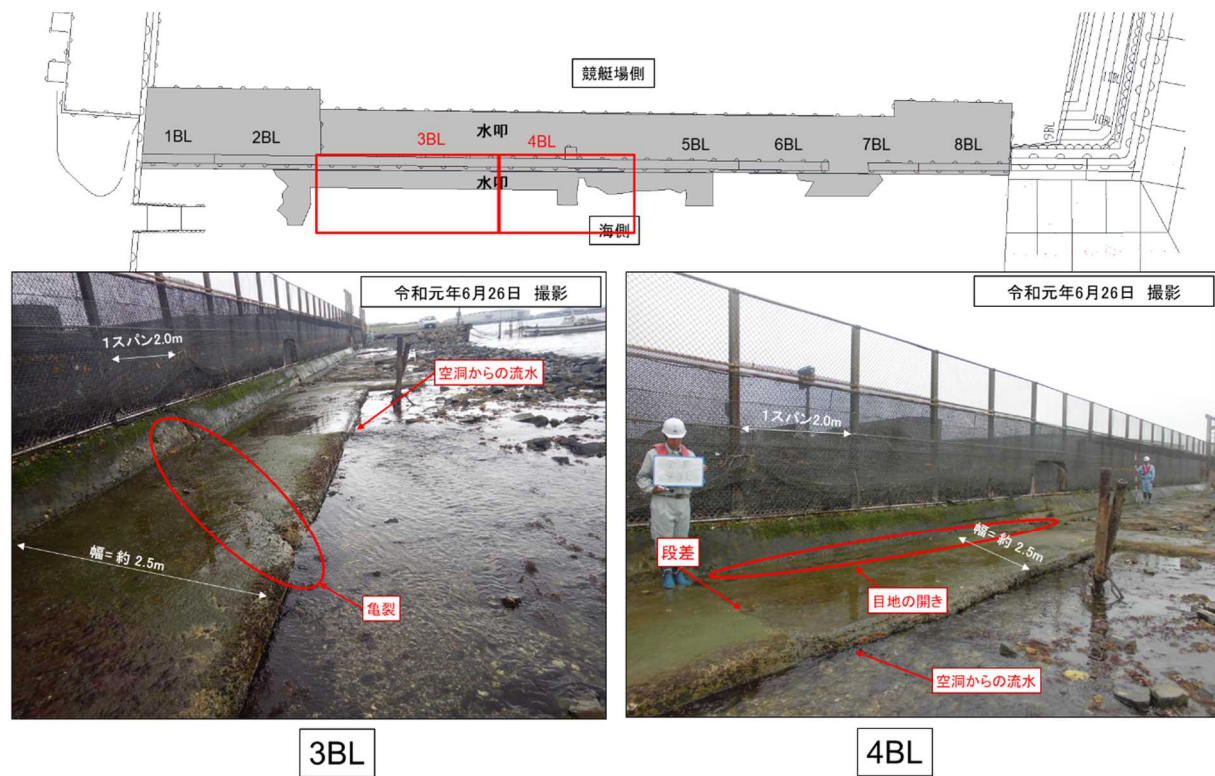


図 3 - 3 - 7 競艇場護岸水叩きの状況②（被災前）

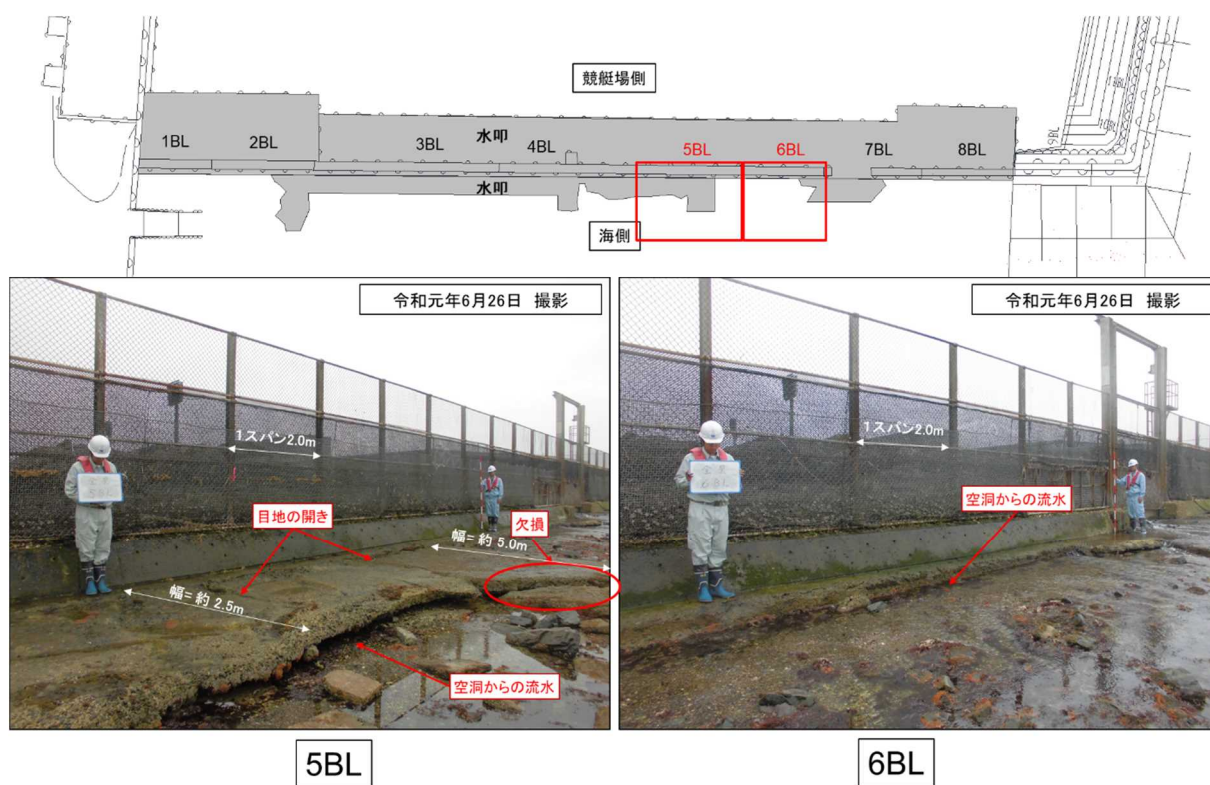


図 3 - 3 - 8 競艇場護岸水叩きの状況③（被災前）

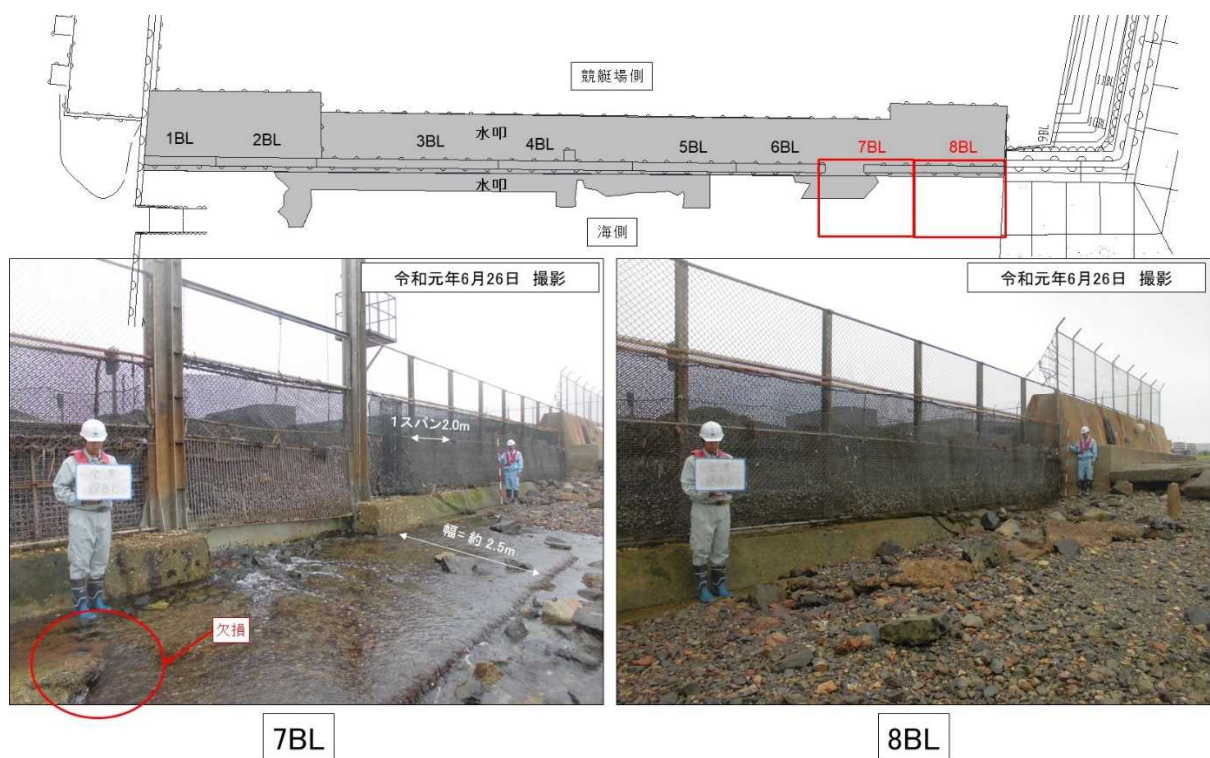


図 3 - 3 - 9 競艇場護岸水叩きの状況④（被災前）

被災前後の写真を比較すると、護岸の特徴的な傷及びフェンスのへこみから、被災発生箇所の位置（4BL）が推測される。この箇所では全域にわたり、被災前から段差や亀裂、目地の開き、空洞からの流水があることが確認された。更に、被災前後の写真を詳細に比較すると、被災直後に無くなった水叩きの箇所は、護岸との間に目地の開きが生じていたことが確認された（図3-3-10）。

また、工事関係者の目撃情報によると、被災直前に、水叩きがグラグラしていたとの証言が得られている。

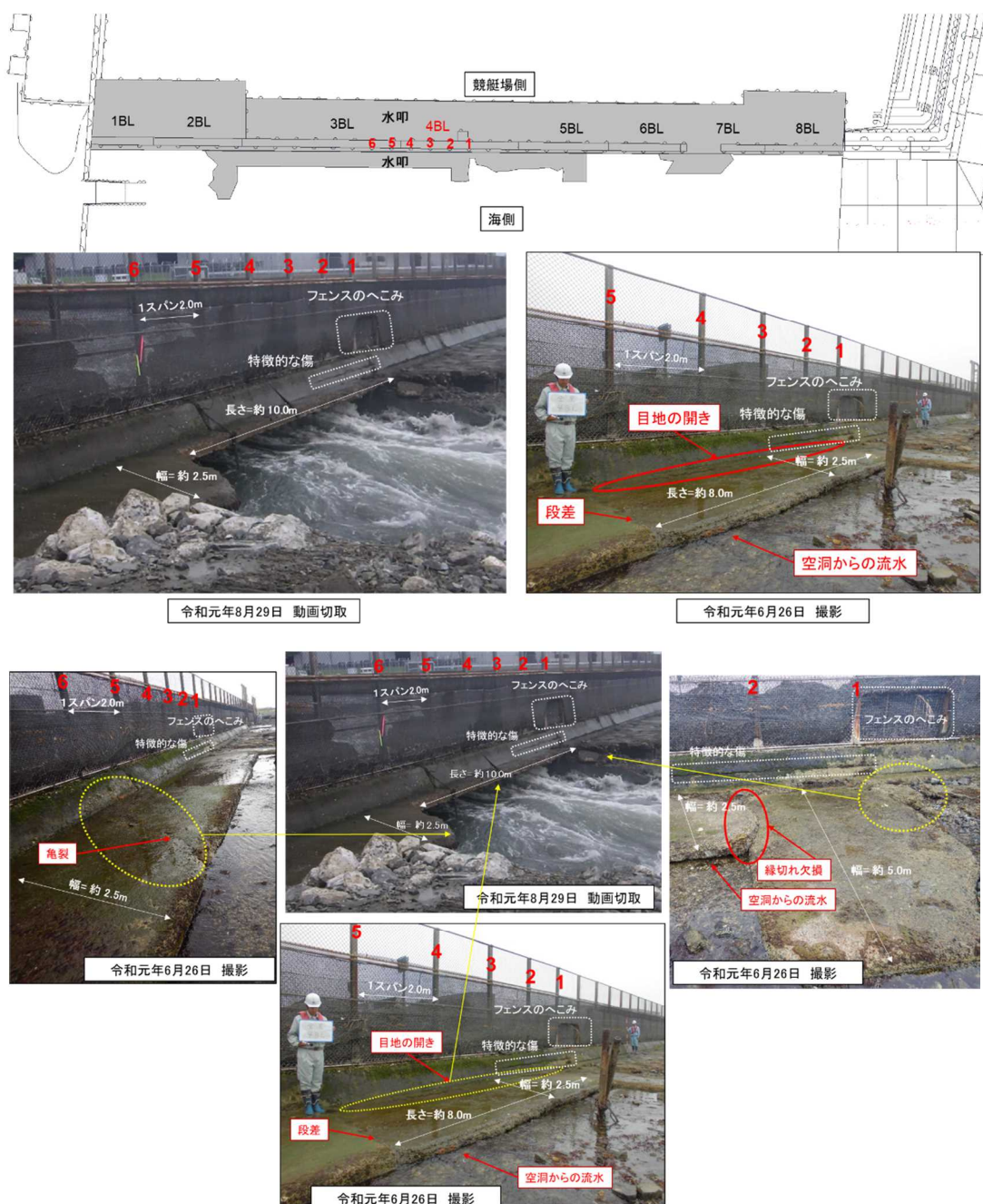


図3-3-10 被災護岸前面の水叩きの状況

(４) 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２－４参照。

4. 護岸被災要因及び被災メカニズムの推定

4-1 浸透流解析による護岸被災要因の推定

護岸被災要因を検証する上で、今回の被災形態が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（3-1参照）、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。

（1）浸透流解析の条件

土質調査により得られたデータを使用し想定した被災地点（図4-1-1の緑線）において、浸透流解析断面を決定し解析モデルを構築した。解析モデル及び解析条件は図4-1-2のとおり。

なお、解析モデルに用いた競艇場内地盤高は、被災後に実施した深浅測量（マルチビーム）結果から、被災箇所の東側及び西側の等深線を結合し、被災前の等深線を再現して設定した（図4-1-3）。

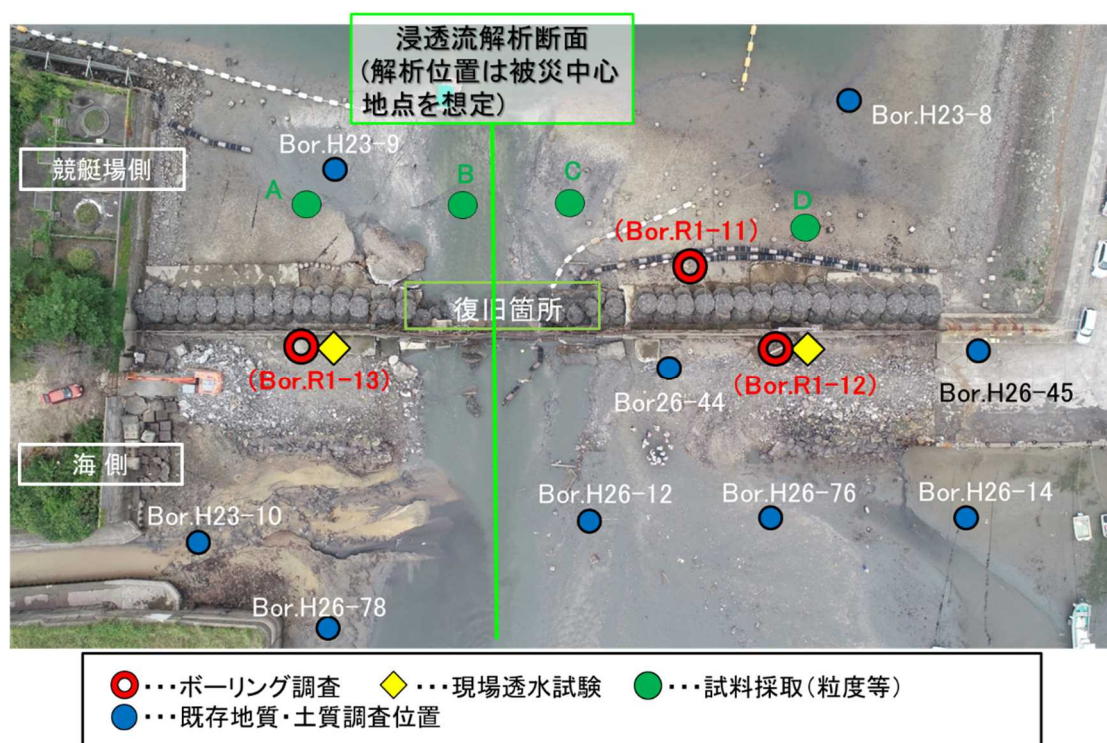
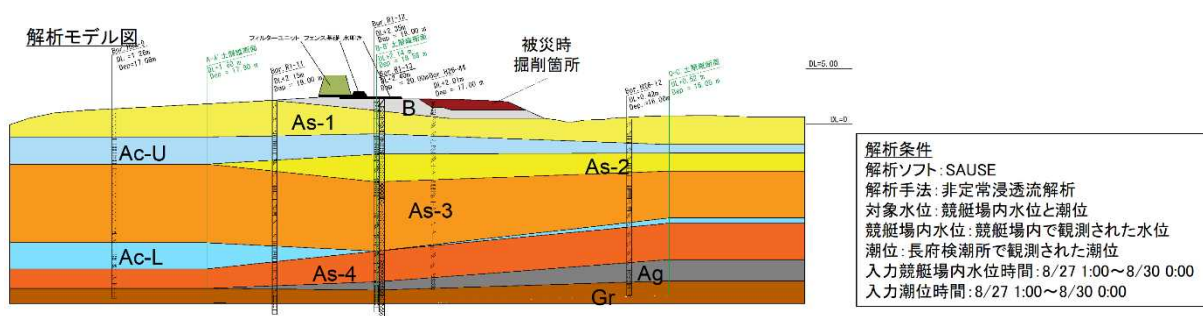


図4-1-1 浸透流解析断面



土質定数採用値一覧表 (BorR1-11, 12, 13考慮)

地層	粘着力 c (kN/m ²) ※ z は標高D.L. (m)	内部摩擦角 ϕ (°)	湿潤単位体積 重量 γ (kN/m ³)	飽和単位体積 重量 γ (kN/m ³)	透水係数 k (cm/s)		比貯留係数 (1/m)	不飽和浸透特性
					k_x	k_y		
被災時掘削箇所	0	35.0	18.0	20.0	1.00. E+00	1.00. E+00	1.00. E-04	礫質土・砂質土
フィルター ユニット	0.0	40.0	18.0	20.0	2.00. E+01	2.00. E+01	1.00. E-04	礫質土・砂質土
水叩き・ 競艇場護岸	1000.0	0.0	22.6	22.6	9.95. E-42	9.95. E-42	1.00. E-03	粘性土
B	0.0	30.0	18.0	20.0	3.52. E-03	3.52. E-03	1.00. E-04	礫質土・砂質土
As-1	0.0	34.0	18.0	20.0	5.03. E-04	5.03. E-04	1.00. E-04	礫質土・砂質土
Ac-U	-3.0 $\times$ z + 9.91	0.0	16.9	16.9	6.09. E-05	6.09. E-05	1.00. E-03	粘性土
As-2	0.0	30.0	18.0	20.0	3.09. E-04	3.09. E-04	1.00. E-04	礫質土・砂質土
As-3	0.0	31.0	18.0	20.0	9.63. E-03	9.63. E-03	1.00. E-04	礫質土・砂質土
Ac-L	36.7	0.0	17.8	17.8	1.14. E-05	1.14. E-05	1.00. E-03	粘性土
As-4	0.0	32.0	18.0	20.0	5.69. E-04	5.69. E-04	1.00. E-04	礫質土・砂質土
Ag	0.0	36.0	18.0	20.0	1.33. E-02	1.33. E-02	1.00. E-04	礫質土・砂質土
Gr	1000.0	0.0	18.0	20.0	1.00. E-06	1.00. E-06	1.00. E-04	礫質土・砂質土
空洞	0.0	0.0	0.0	0.0	1.00. E+00	1.00. E+00	1.00. E-04	礫質土・砂質土
目地の開き箇所	0.0	0.0	0.0	0.0	1.00. E+00	1.00. E+00	1.00. E-04	礫質土・砂質土

図 4 - 1 - 2 下関競艇場護岸被災に係る浸透流解析モデル

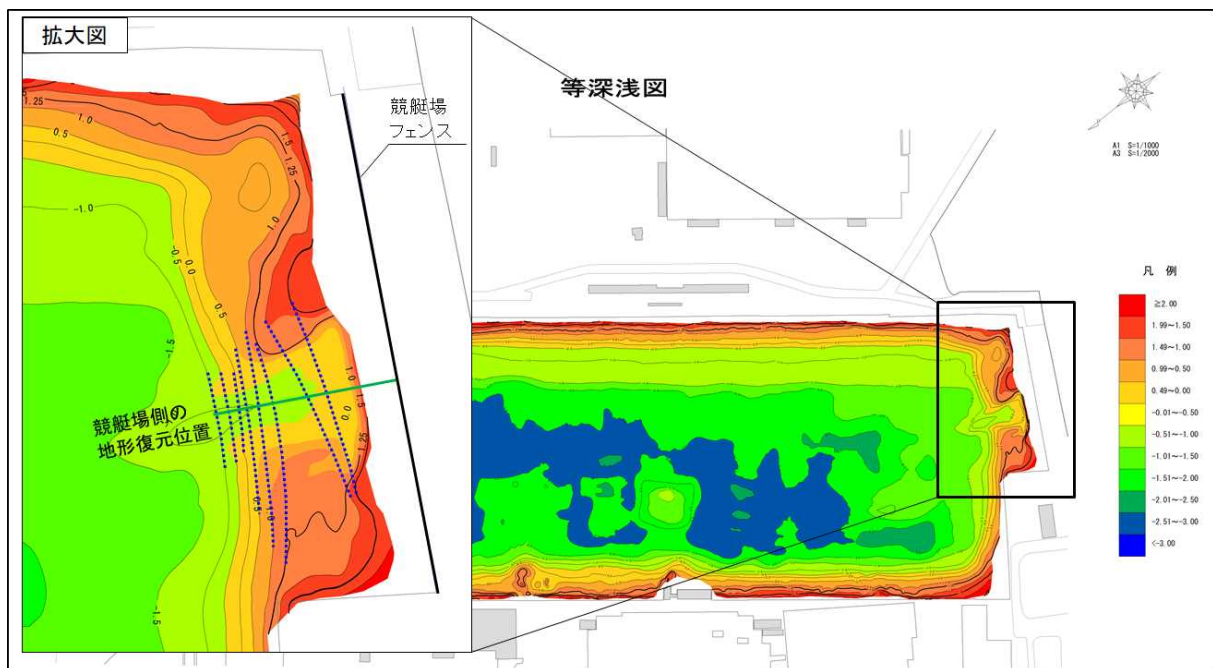


図 4 - 1 - 3 下関競艇場内の等深浅図

(2) 浸透流解析のケース

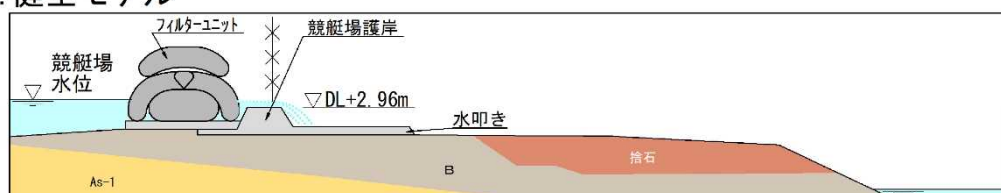
解析にあたっては、競艇場護岸が健全である場合と劣化（空洞化や護岸と水叩きの間に目地の開き）がある場合を比較し、浸透破壊に対する評価結果を考察した。また、それぞれのケースに対し、掘削（捨石撤去）による影響の評価結果を考察した（図4-1-4）。

ケースA：競艇場護岸が健全である場合。

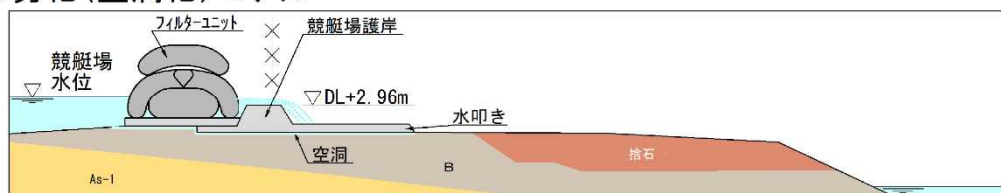
ケースB：競艇場護岸に空洞化状況を反映させた場合。空洞の厚さは、Bor. R1-12, 13の平均値を取り、厚さ5.5cmの空洞^dが水叩き直下に均一に広がるよう設定。

ケースC：競艇場護岸に空洞化及び護岸と水叩きの間の目地の開きを反映させた場合。ケースBの空洞条件に加え、目地の開きとして水叩きの根元部分を空洞とし、水が流れるよう設定。なお、目地の開きの幅は空洞と同様厚さ5.5cmに設定した。

ケースA：健全モデル



ケースB：劣化(空洞化)モデル



ケースC：劣化(空洞化+目地の開き)モデル

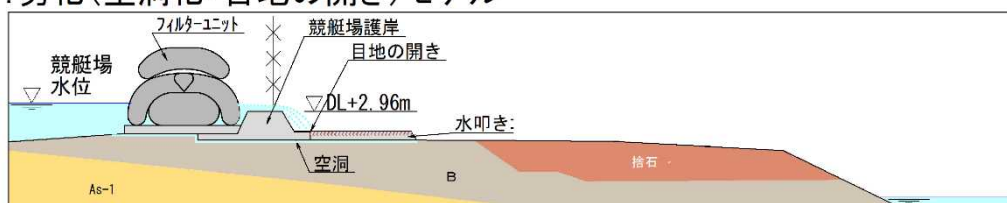


図4-1-4 解析ケース

(3) 浸透流解析による各評価項目

評価項目として、掘削による影響を確認するための局所動水勾配とG/W（水叩き部を押し上げる圧力比）、被災メカニズムを検証するための基礎地盤内流速の3項目で評価した。

^d Bor.R1-12 で確認された空洞の厚さ 7cm と Bor.R1-13 で確認された空洞の厚さ 4cm の平均値 (3+3(1)(2))

1) 局所動水勾配

- ・局所動水勾配とは全水頭の勾配。
- ・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0.5以上であるか否かを判断する。0.5の値はオランダで設定されている安全率を考慮した値であり、日本もこれに準拠している。なお、0.5以上になれば浸透破壊に対する安全性に課題があると評価される。

2) G/W (水叩きを押し上げる圧力比)

- ・G/Wとは水叩きの重量 (G) と上向きの水圧 (W) の比。
- ・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1.0以上であるか否かを判断する。1.0を下回れば、下からの圧力水頭が鉛直荷重を上回る結果となるため、水叩きに対する安全性に課題があると評価される。

3) 基礎地盤内流速

- ・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。
- ・基礎地盤内に発生する流速を浸透流解析結果から算出し、基礎地盤内の土粒子限界流速と比較して土粒子の流亡を判断する。基礎地盤内流速が限界流速より速くなれば、土粒子は動く と評価される。

(4) 浸透流解析による検討位置 (評価位置)

護岸被災に係る浸透流解析では、被災発生箇所であると考えられる、図4-1-5《検討地点①》の解析を基本とするが、参考として、水叩き端部である《検討地点②》、掘削地点である《検討地点③》、掘削前の断面において急勾配になる《検討地点④》も合わせた計4カ所で解析を行う (図4-1-5)。

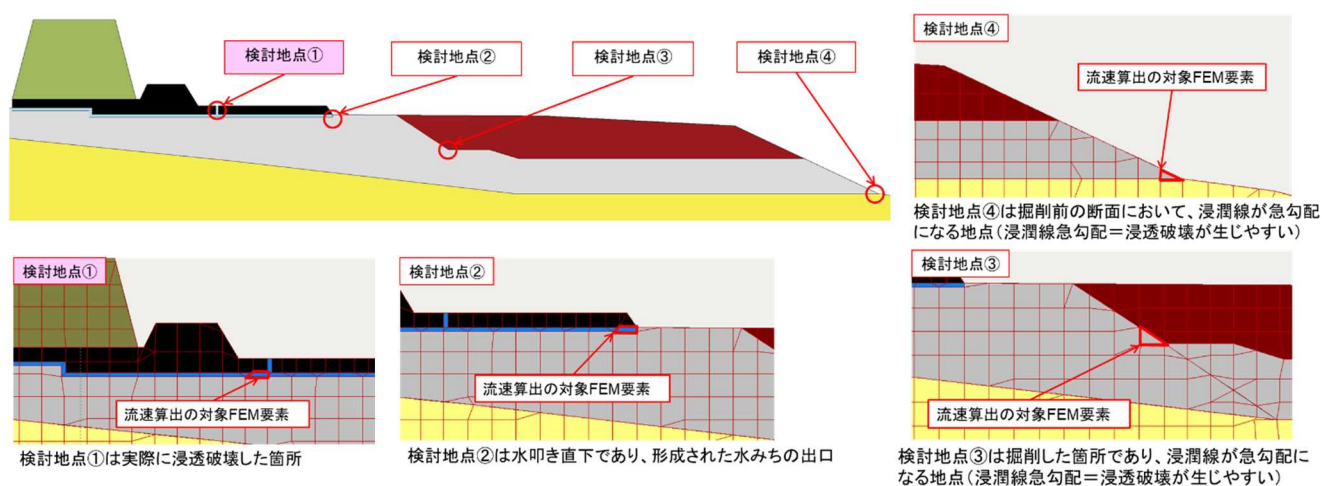


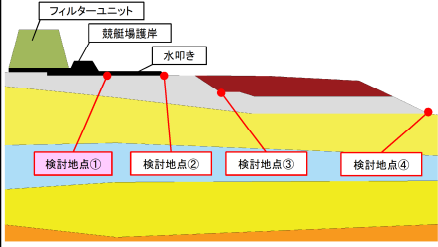
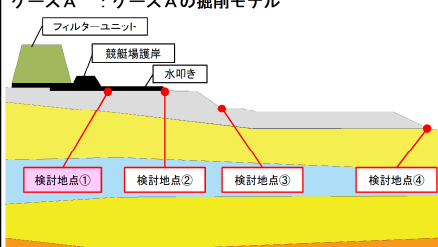
図4-1-5 浸透流解析の検討地点

(5) 浸透流解析結果

1) ケース A

ケース A では、競艇場護岸が健全であること（空洞化や目地の開きが発生していない状態）を想定した解析を行った。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と結論できる。

なお、《検討地点④》（掘削無し）の結果では、わずかであるが土粒子の限界流速より速い流速が生じており、基礎地盤内の土粒子が流亡している可能性がある（図 4-1-6）。

解析ケース 概要	検討 地点	水平方向		鉛直方向		G/W
		最大局所動 水勾配 i_h	基礎地盤内流速 (m/s) +: 右向き -: 左向き	最大局所動 水勾配 i_v	基礎地盤内流速 (m/s) +: 上向き -: 下向き	
ケース A : 健全モデル 	①	0.153 < 0.5 OK	5.41. E-06 < 1.81. E-03 OK	0.007 < 0.5 OK	1.56. E-07 < 1.81. E-03 OK	1.031 > 1 OK
	②	0.152 < 0.5 OK	3.84. E-06 < 1.81. E-03 OK	0.084 < 0.5 OK	1.88. E-06 < 1.81. E-03 OK	—
	③	0.077 < 0.5 OK	2.72. E-06 < 1.81. E-03 OK	0.072 < 0.5 OK	3.84. E-06 < 1.81. E-03 OK	—
	④	0.244 < 0.5 OK	2.44. E-03 > 1.81. E-03 NG	0.117 < 0.5 OK	-3.67. E-04 < -1.81. E-03 OK	—
ケース A' : ケース A の掘削モデル 	①	0.148 < 0.5 OK	5.21. E-06 < 1.81. E-03 OK	0.102 < 0.5 OK	3.52. E-06 < 1.81. E-03 OK	1.031 > 1 OK
	②	0.152 < 0.5 OK	3.84. E-06 < 1.81. E-03 OK	0.084 < 0.5 OK	1.88. E-06 < 1.81. E-03 OK	—
	③	0.424 < 0.5 OK	1.49. E-05 < 1.81. E-03 OK	0.222 < 0.5 OK	-4.28. E-06 < -1.81. E-03 OK	—
	④	0.174 < 0.5 OK	1.74. E-03 < 1.81. E-03 OK	0.092 < 0.5 OK	-2.61. E-04 < -1.81. E-03 OK	—

※検討地点①は、実際に被災した箇所

※基礎地盤内流速の符号は、水平方向右向きが+、左向きが-を表す。鉛直方向流速の符号は、上向きが+、下向きが-を表す。

図 4-1-6 解析結果（ケース A）

2) ケースB

ケースBでは、空洞調査結果を反映したモデルで解析を行った。

浸透破壊に直接結びつく「最大局所動水勾配」や「基礎地盤内流速」は基準を満たしており、浸透破壊には至らないと結論できる。また、G/Wが基準を満たしていないことから、コンクリート厚が十分でなく、水叩きを上向きに押し上げる圧力が優位な結果となっていることを示している。

なお、《検討地点④》（掘削無し）の箇所で土粒子の限界流速より速い流速が生じており、基礎地盤内の土粒子が流亡している可能性がある（図4-1-7）。

解析ケース概要	検討地点	水平方向		鉛直方向		G/W
		最大局所動水勾配 i_p	基礎地盤内流速 (m/s) +: 右向き -: 左向き	最大局所動水勾配 i_v	基礎地盤内流速 (m/s) +: 上向き -: 下向き	
ケースB 劣化(空洞化)モデル 	①	0.142 <0.5 OK	1.42. E-03 <1.81. E-03 OK	0.000 <0.5 OK	3.26. E-09 <1.81. E-03 OK	0.881 <1 NG
	②	0.141 <0.5 OK	1.37. E-03 <1.81. E-03 OK	0.031 <0.5 OK	1.33. E-04 <1.81. E-03 OK	—
	③	0.098 <0.5 OK	3.47. E-06 <1.81. E-03 OK	0.094 <0.5 OK	4.93. E-06 <1.81. E-03 OK	—
	④	0.249 <0.5 OK	2.49. E-03 >1.81. E-03 NG	0.12 <0.5 OK	-3.75. E-04 < -1.81. E-03 OK	—
ケースB' : ケースBの掘削モデル 	①	0.142 <0.5 OK	1.42. E-03 <1.81. E-03 OK	0.000 <0.5 OK	2.62. E-09 <1.81. E-03 OK	0.881 <1 NG
	②	0.142 <0.5 OK	1.38. E-03 <1.81. E-03 OK	0.031 <0.5 OK	1.33. E-04 <1.81. E-03 OK	—
	③	0.459 <0.5 OK	1.61. E-05 <1.81. E-03 OK	0.255 <0.5 OK	-2.38. E-06 < -1.81. E-03 OK	—
	④	0.176 <0.5 OK	1.76. E-03 <1.81. E-03 OK	0.093 <0.5 OK	-2.65. E-04 < -1.81. E-03 OK	—

※検討地点①は、実際に被災した箇所

※基礎地盤内流速の符号は、水平方向右向きが+、左向きが-を表す。鉛直方向流速の符号は、上向きが+、下向きが-を表す。

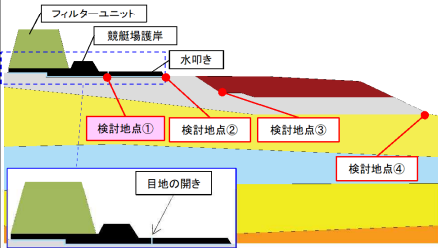
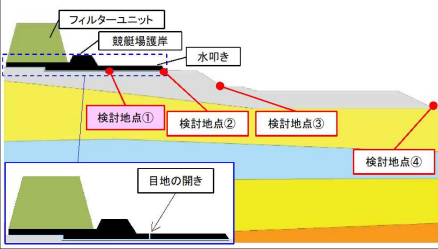
図4-1-7 解析結果（ケースB）

3) ケース C

ケース C では、空洞化調査結果に加え水叩きの目地の開きを反映したモデルで解析を行った（実際の調査結果に近いモデル）。

被災発生箇所と思われる《検討地点①》では、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。このことは、空洞及び水叩きの目地の開きによって、基礎地盤内の土粒子が流亡し、水みちの形成に繋がることを示している。

なお、《検討地点①》では、護岸と水叩きの間の目地の開きから圧力が開放されるため、G/Wは検証できない（図 4-1-8）。

解析ケース 概要	検討 地点	水平方向		鉛直方向		G/W
		最大局所動 水勾配 i_h	基礎地盤内流速 (m/s) + : 右向き - : 左向き	最大局所動 水勾配 i_v	基礎地盤内流速 (m/s) + : 上向き - : 下向き	
ケース C : 劣化 (空洞化+目地の開き) モデル 	①	0.191 < 0.5 OK	1.88. E-03 > 1.81. E-03 NG	0.028 < 0.5 OK	1.15. E-04 < 1.81. E-03 OK	—
	②	0.085 < 0.5 OK	8.29. E-04 < 1.81. E-03 OK	0.019 < 0.5 OK	8.37. E-05 < 1.81. E-03 OK	—
	③	0.096 < 0.5 OK	3.39. E-06 < 1.81. E-03 OK	0.091 < 0.5 OK	4.83. E-06 < 1.81. E-03 OK	—
	④	0.249 < 0.5 OK	2.49. E-03 > 1.81. E-03 NG	0.119 < 0.5 OK	-3.75. E-04 < -1.81. E-03 OK	—
ケース C' : ケース C の掘削モデル 	①	0.191 < 0.5 OK	1.88. E-03 > 1.81. E-03 NG	0.027 < 0.5 OK	1.11. E-04 < 1.81. E-03 OK	—
	②	0.085 < 0.5 OK	8.29. E-04 < 1.81. E-03 OK	0.019 < 0.5 OK	8.40. E-05 < 1.81. E-03 OK	—
	③	0.456 < 0.5 OK	1.60. E-05 < 1.81. E-03 OK	0.253 < 0.5 OK	-2.53. E-06 < -1.81. E-03 OK	—
	④	0.175 < 0.5 OK	1.75. E-03 < 1.81. E-03 OK	0.093 < 0.5 OK	-2.63. E-04 < -1.81. E-03 OK	—

※検討地点①は、実際に被災した箇所

※基礎地盤内流速の符号は、水平方向右向きが+、左向きが-を表す。鉛直方向流速の符号は、上向きが+、下向きが-を表す。

図 4-1-8 解析結果（ケース C）

なお、同じ地盤条件で、平成30年7月の西日本豪雨時における浸透流解析を行った結果、いずれのケースも基準を満たしており、浸透破壊が生じない結果となった。

(6) 浸透流解析結果のまとめ

- ・ 競艇場護岸が健全である場合、浸透破壊には至らないことが確認された（ケースA）。
- ・ 競艇場護岸に空洞がある場合、G/Wが基準を満たしていないことが確認された（ケースB）。
- ・ 空洞に加えて、護岸と水叩きの間に目地の開きがある場合は、被災発生箇所《検討地点①》において基礎地盤内流速が速くなり、浸透破壊を引き起こす可能性があることが確認された（ケースC）。
- ・ 現地調査結果から、護岸内部や水叩きに空洞が発生していることに加え、護岸と水叩きの間に目地の開きが発生していることが確認されていることから、護岸被災の検証ケースとしては、ケースCが最も近いモデルであると考えられる。
- ・ 以上から、今回の豪雨に伴う競艇場内水位及び潮位の条件下において、護岸内部や水叩きに存在する空洞や亀裂、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、工事（掘削）により局所動水勾配の値は上昇するが、基準値である0.5を上回る結果ではないことから、掘削によって護岸被災を導いたとは考えにくい。

4-2 護岸天端高を越える越流水の評価

3-2 (3) において、競艇場内水位が潮位を上回り護岸天端高を越流した量は 28,533 m³ にのぼり、過去1年間で突出した量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、水叩き上面に衝突する摩擦速度は2.27m/sと算出できる。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（図4-1-9）。

3-3 (3) において、競艇場護岸は所々欠損しており、空洞や亀裂、護岸と水叩きとの間に目地の開きが確認されていることから、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。

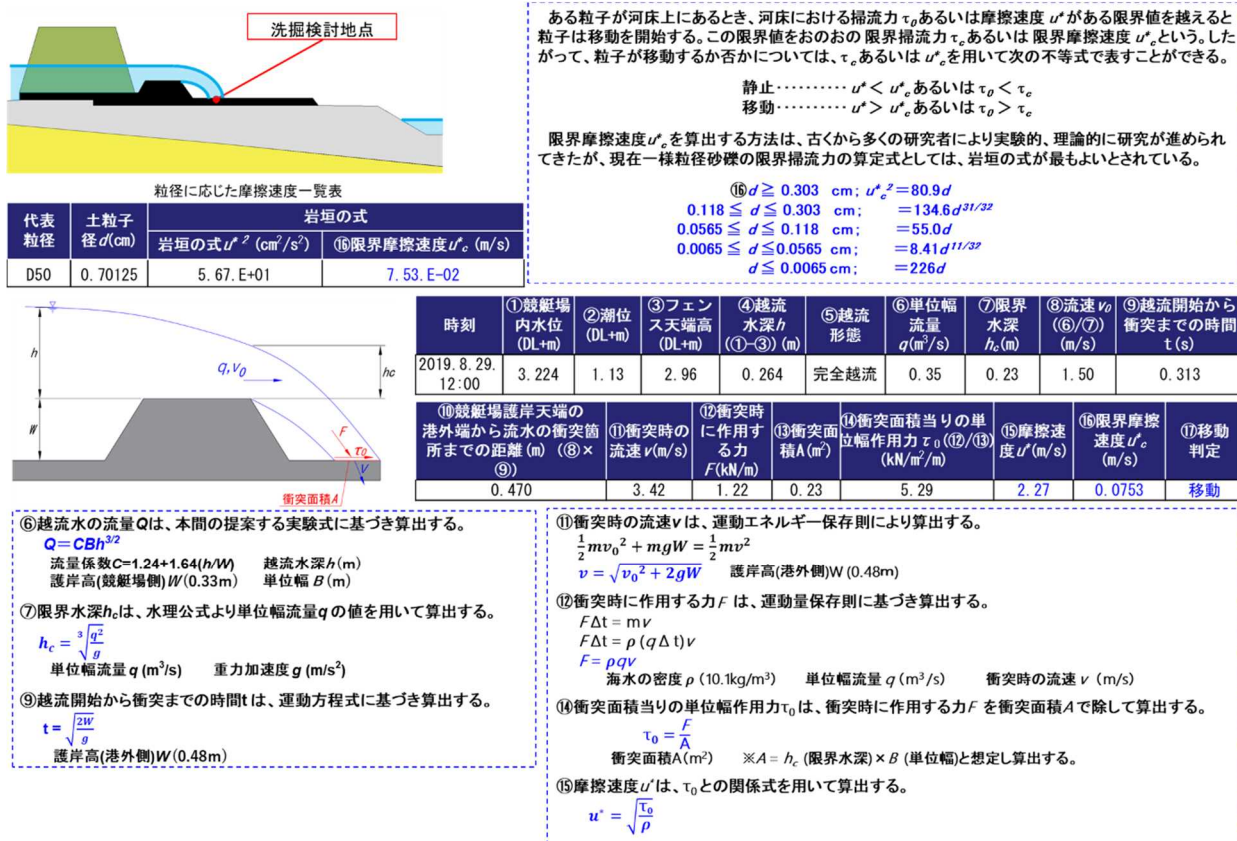


図4-1-9 護岸天端を越える越流水の評価

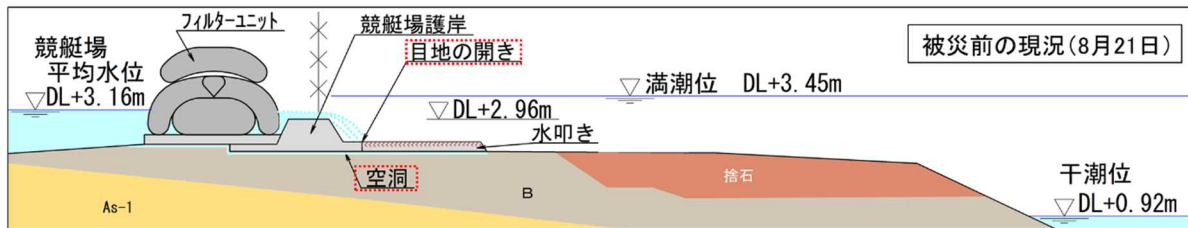
4-3 被災メカニズムの推定

これまでの現地調査や解析結果を踏まえると、護岸被災に至ったメカニズムは、以下が考えられる。

- ・ 競艇場護岸は、空洞や亀裂、護岸と水叩きの間の目地の開き等、劣化が進んでおり、潮位の変動による競艇場内水位の上昇とそれに伴う護岸から海側への越流により、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にあり、水叩きの浮き上がりも発生していたと考えられる。
- ・ 被災当日（令和元年8月29日）の10時頃には、豪雨によって競艇場内水位が上昇し、高い水圧が水叩きに生じ、水叩きの浮き上がりが発生（図4-2-1③）。その後、競艇場内水位が高い水位を保つ中、潮位が下がり、潮位と水位差に起因する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（同図④）。12時頃には、さらに土粒子の流亡が進み、水みちが拡大するとともに、護岸直下の空洞が大きくなる。また、競艇場側から護岸を越えて海側へ流れ出る越流水が、水叩きの端部を押さえ、水叩きが動き始める。（同図⑤）。
- ・ 被災時刻である13時頃には、競艇場側から護岸を越えて海側へ流れ出る越流水により水叩きコンクリートの端部が押さえられ移動し、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（同図⑥）。これにより、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（同図⑦）。水圧により、水叩き及び土砂が流出し、競艇場内に設置されていたフィルターユニットが、護岸下部の水みちを通して海側へ押し流される（同図⑧）。

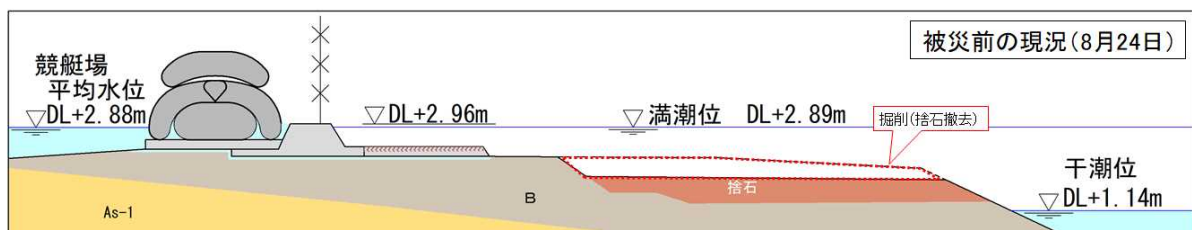
以上について、図4-2-1に被災メカニズムのイメージを図示する。

①被災前の状況



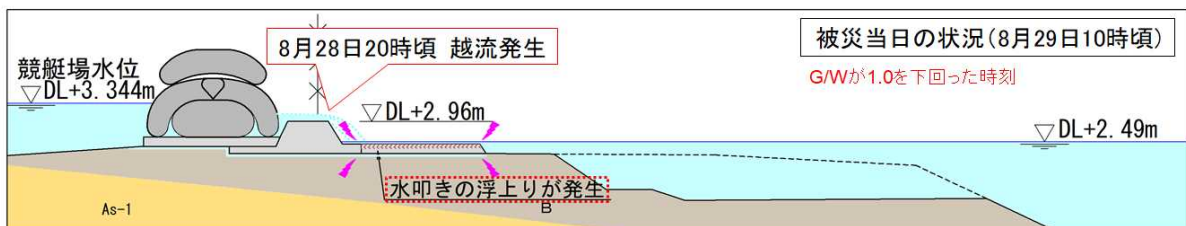
- ・競艇場護岸は、経年劣化により護岸内部や水叩きに水みち発生の要因となる空洞や目地の開きが発生していた。

②掘削(捨石撤去)を開始



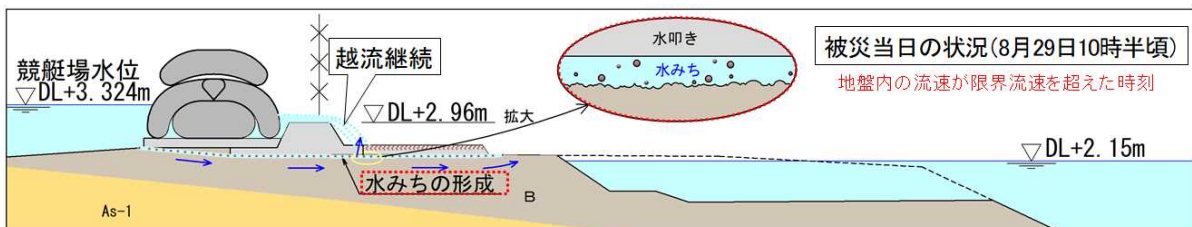
- ・工事に伴い、8月22日から28日にかけて、段階的に掘削(捨石撤去)を実施(破線部分)。

③水叩きの浮き上がり



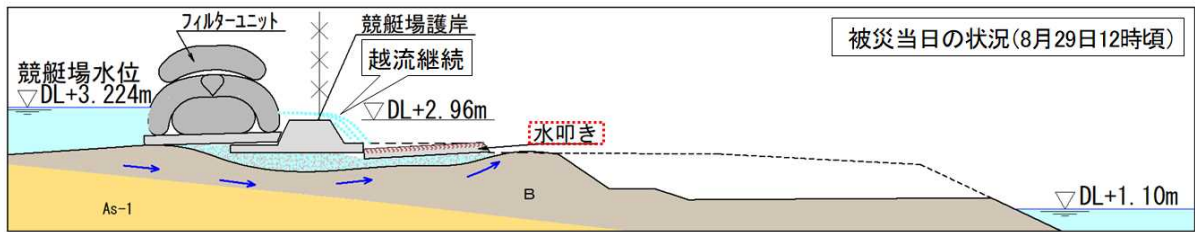
- ・被災当日(8月29日)10時頃、豪雨によって競艇場内の水位が上昇し、高い水圧が水叩きが発生。
- ・G/Wが1.0を下回り、水叩きが浮き上がる。
- ・なお、越流は8月28日20時頃に発生した。

④護岸下部に水みちが形成



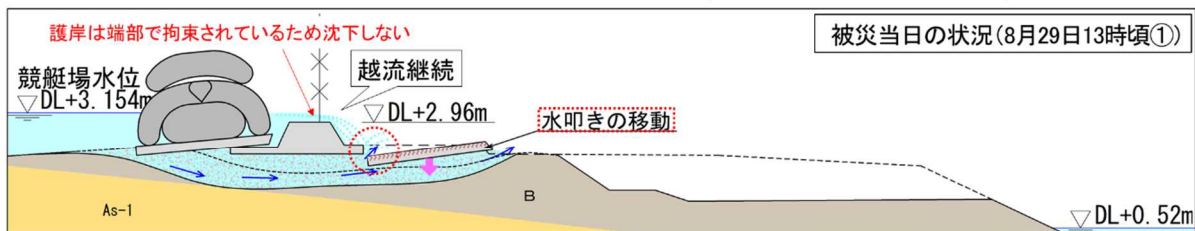
- ・同日10時半頃、競艇場内の水位が高い水位を保つ中、潮位が下がり、潮位と水位差に起因する浸透流が通常より長い時間作用。
- ・地盤内の流速が限界流速を超え、土粒子が流亡、水みちが形成。

⑤護岸直下の空洞拡大



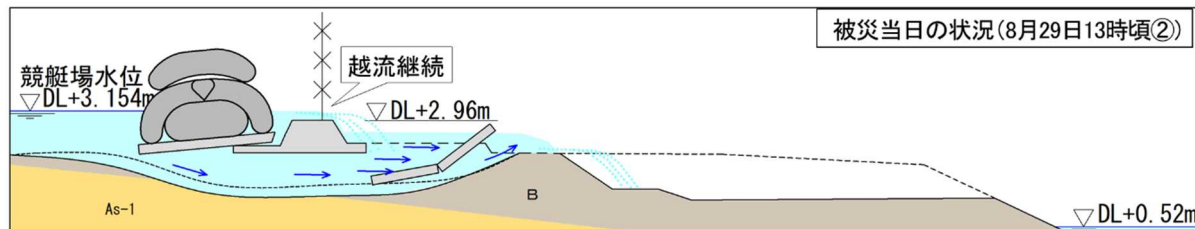
- ・同日12時頃、さらに地盤内の土粒子が流亡し、水みちが拡大、護岸直下の空洞が大きくなる。
- ・競艇場側から護岸を越えて海側へ流れ出る越流水が、水叩きの端部を押さえ、水叩きが動き始める。

⑥越流水により水叩きが移動し上向きの水みちが形成(動画や写真による推測)



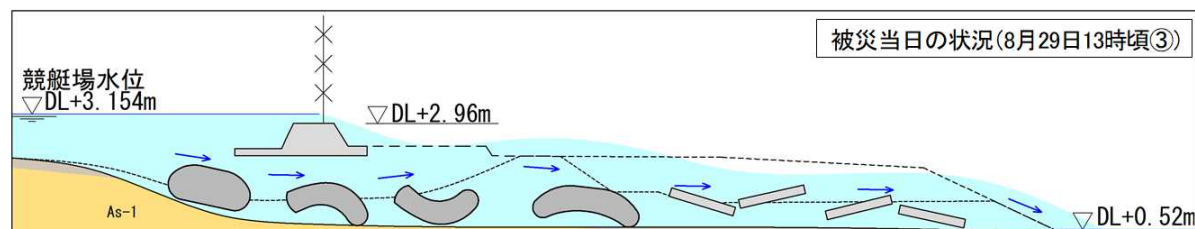
- ・同日13時頃、競艇場側から護岸を越えて海側へ流れ出る越流水が、水叩きの端部を押さえ、水叩きが移動し、水みちの拡大を促進。
- ・また、水叩きの移動により上向きに水みちが形成される。

⑦空洞の拡大、移動した水叩きに水圧が作用(動画や写真による推測)



- ・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する。

⑧水叩き、土砂、フィルターユニットの流出(動画や写真による推測)



- ・水圧によって、水叩き及び土砂が流出し、競艇場内に設置されていたフィルターユニットが、護岸下部の水みちを通して海側へ押し流される。

図4-2-1 推定される被災メカニズム

5. 護岸被災の原因について（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。

- ・ 今回の被災直前まで降り続いた豪雨は、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特異な豪雨であり、その豪雨により競艇場の護岸において発生した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、特異な豪雨により競艇場内の水位が上昇し、潮位との水位差に起因する浸透流により護岸内部の空洞に水みちが形成された。さらに、通常より長い時間にわたり浸透流が基礎地盤に作用したことに加えて、突出した越流量により水叩きの移動が発生し、水みちの拡大が促進され、浸透破壊が生じたと考えられる。
- ・ 工事（掘削）による護岸被災への影響については、掘削前後で局所動水勾配の値を検証した結果、基準値を超過していないことから護岸被災との因果関係はないと考えられる。

（了）