

貴志川堤防における浸透対策としての ウェルドレーン工法の効果について

福島 教之

近畿地方整備局 姫路河川国道事務所 工務第一課 (〒640-8227 兵庫県姫路市北条1丁目250)

紀の川水系貴志川では、2011年台風12号の出水により、堤防法尻部および堤内地の水田や畑等の10箇所超で噴砂跡が発見された。本報告は一連の詳細点検結果を踏まえて、その対策工の検討を行うとともに、対策工の選定については、現地における施工性、経済性および維持管理等を考慮した新工法(ウェルドレーン工法)を適用した。検討にあたっては三次元飽和-不飽和浸透流解析を実施し、対策工の配置検討を行い、対策工費の大幅な削減が可能となった。また対策効果を確認する目的で水位観測井を設置しており、対策後顕著な出水が2回あり水位観測記録とデータ分析を行いウェルドレーン工法の対策効果を確認した。

キーワード 河川堤防, 浸透流解析, 浸透対策, ウェルドレーン工法, 効果モニタリング

1. はじめに

紀の川水系貴志川は和歌山県北部を北流し、紀の川本川19.4k付近で合流する支川であり、合流点から5.2kまでが国管理区間である。

2011年9月に発生した台風12号による出水では、紀の川本川及び支川貴志川においても避難判断水位を超過する水位を観測した。支川貴志川においては、最高水位と堤内地盤の比高差は約2.6mとなった。これにより、堤防法尻部および堤内地の水田や畑等で噴砂跡が発見された。

また、2012年6月の梅雨前線による出水においても同様に噴砂が確認され、地元からは早急な対策を講じるよう要望があがっており、これら被害の防止・軽減に向けた対策が急務となっている。

昨年度、九州の矢部川において出水時法尻のパイピングにより堤防が破堤し、堤内地に浸水被害が発生したことで、堤防の質的強化対策についてさらに関心が高まってきている。本報告は貴志川丸栖地区で実施した「ウェルドレーン工法」について紹介するものである。



図1 紀の川流域概要及び貴志川位置図

2. 貴志川での噴砂

(1)2011年（平成23年）9月の台風12号時の被災状況

台風12号の出水による紀の川流域の2日間平均雨量は船戸地点上流で415mmであり、1959年（昭和34年）9月伊勢湾台風時の2日間雨量313mmを大きく上回り、戦後最大値を更新する雨量であった。また、降り始めから5日間で年間雨量の4分の3が集中している。

紀の川水系の支川である貴志川においても流域平均で334mmの雨量があり、水位は5.65mを観測し、避難判断水位5.50mを超過した。貴志川左岸0.2k付近（紀の川市丸栖地区）においては、内水被害が発生し、排水ポンプ車による排水作業が実施された。¹⁾

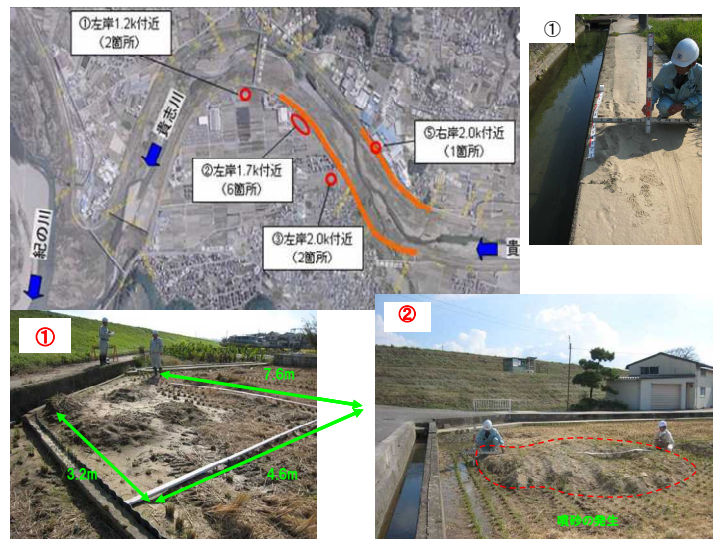


図2 2011年（平成23年）9月台風12号時の噴砂状況

この出水において左岸丸栖地区（1.2k～2.0k）で地盤の隆起、噴砂が確認されたため、稲刈りに実施した現地調査の結果、大きく分けて3点で10箇所の噴砂を確認した。

3. 浸透に対する照査

(1) 土質調査

堤防の浸透流解析にあたり、検討対象地点における土層の堆積状況およびその連続性を確認する目的で土質調査を行った。調査結果より透水性が高い砂礫層が堤防下を横断的に分布し、川裏側では基礎地盤表層にやや透水性の低い中間土（砂質土～粘性土）が分布しており、河川水位上昇時には川裏側の砂礫層が被圧状態になりやすい地盤条件であることが判明した。

(2) 地盤のモデル化

図-3に地盤モデル図を示す。地盤特性値の設定には当該箇所における試験値を採用することを基本とした。

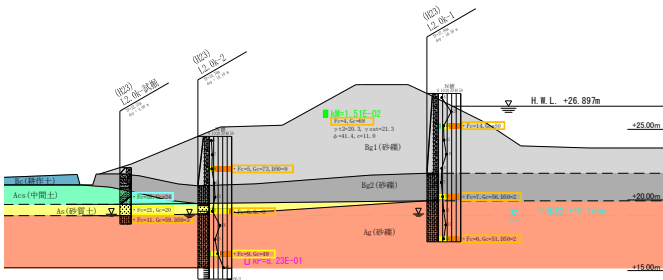


図-3 地盤モデル図

表-1 地盤定数一覧

層区分	湿潤単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	飽和単位体積重量 γ_{sat} (kN/m ³)	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (deg)	透水係数 k (cm/s)
Bg1	20.3	21.3	1.0	41.1	1.51E-02
(Bg2)	Bg1層と粒度分布および平均N値（平均N=10）が類似することから、同等の透水性・力学特性を有すると判断し、Bg1層に含めてモデル化を行う。				
Acs	19.8	20.1	24.0	17.2	1.00E-06
(As)	粒度試験結果より帯水層と判断し、Ag層に含めてモデル化を行う。				
Ag	—	20.0	0.0	34.6	1.63E-01

(3) 詳細点検結果

堤防の浸透に対する安定性検討は「河川構造の構造検討の手引き²⁾」（以下「手引き」）に準じ、降雨・洪水を外力として非定常飽和・不飽和浸透流解析を実施する。詳細点検では、すべり安定性照査と堤内法尻部におけるパイピング破壊に対する照査をそれぞれ行った結果、すべり破壊および鉛直方向の局所動水勾配に対する安全性が確認されたものの、水平方向の局所動水勾配(ih)および、盤ぶくれに対して所要の安全率を満足しない結果となった。

$$\begin{aligned} \text{(鉛直方向)} \quad i_v &= \frac{\Delta \phi}{d_v} = \frac{\Delta \phi - d_v \cdot \rho_w}{d_v} \\ \text{(水平方向)} \quad i_h &= \frac{\Delta \phi}{d_h} = \frac{\Delta \phi}{d_h} \end{aligned}$$

ϕ : 各節点の圧力水頭

パイピング破壊(浸透破壊)に対する安全性	被覆土なし 被覆土あり	$i < 0.5$ i : 裏のり尻近傍の基礎地盤の局所動水勾配の最大値 $G/W > 1.0$ G : 被覆土層の重量 W : 被覆土層基底面に作用する揚圧力
----------------------	----------------	--

図-4 パイピング破壊に対する安全性照査の考え方

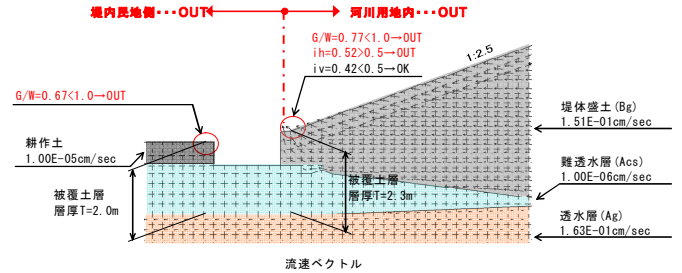


図-5 現況堤防の安全性評価結果

4. 浸透対策工法の検討

(1) 周辺条件

a) 堤内地の地下水利用状況

左岸丸栖地区には農業用水および水道の揚水ポンプが点在しており、地下水位は河川水位と連動してしていることから、浸透対策として遮水矢板を設置すればポンプからの揚水量が低減する可能性が考えられた。

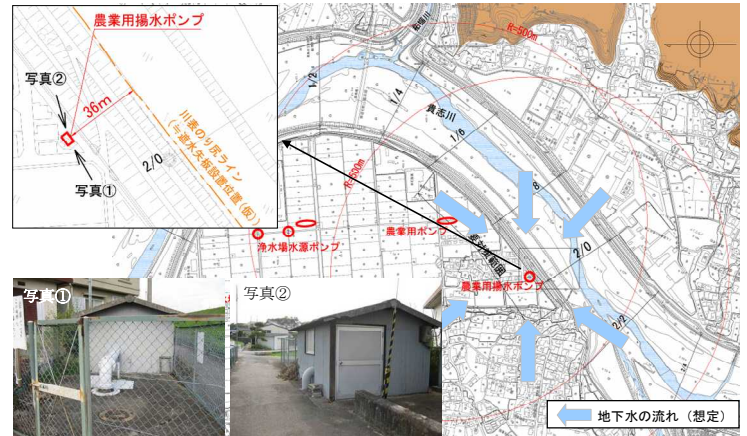


図-6 堤内地の揚水ポンプ位置図

b) 内水被害の発生区域

堤内地の丸栖地区は内水区域で、ドレーン工法を適用した場合には内水流量がどの程度増えるか留意する必要があった。

また、近畿地方農政局により農地浸水軽減を目的とした農地防災事業が実施中であり、対策工として丸栖地区下流域で排水ポンプの設置が計画されており、ドレーン排水量により、農地防災事業計画にどの程度影響を与えるか把握する必要があった。

c) 堤防裏法尻水路

堤防裏法尻には土地改良区のかんがい用水路が存在するが、その運用はかんがい期のみであり、出水時には樋門からの取水が停止されることから、法尻ドレーンから排水する場合、水路規模に問題なければ利用可能と考えられた。

(2) 対策工法の比較

当該対策工における対策工の選定にあたり、対策工の抽出、選定を行った。第3案の遮水矢板工法は揚水ポンプ取水に影響を与えることから非選定とした。第1案のドレーン工法は法尻部をバックホウにより床掘りを行うため、ドレーン断面が大きくなり施工にあたっては相当量の現況堤防の掘削が必要となる。一方、第2案のウェルドレーン工法はケーシングマシンで掘削するため、コストおよび施工性が大幅に改善されることから、当該箇所における対策工として第2案のウェルドレーン工法を採用した。

表2 本検討における対策工の比較

	案1 ドレーン工法	案2 ウェルドレーン工法	案3 遮水矢板工法
図解			
工法概要	ドレーン工を透水性の高い砂礫層まで設置することにより、砂礫層の浸透による被圧(揚圧力)を低減する工法。	案1のドレーン工と同様の機能を有する工法であるが、堤防法線方向に間隔を設けて設置部ドレーンを設置する工法。	川側のり面を不透水材で被覆し、矢板を不透水層まで打ち込むことで遮水する工法。
メリット	・ 浸透による被圧を低減するため、噴砂が抑制される。 ・ 平常時の河川水が堤内側へ供給される。	・ 浸透による被圧を低減するため、噴砂が抑制される。 ・ 平常時の河川水が堤内側へ供給される。 ・ 掘削量は汎用掘削(ケーシングマシン)で対応可能で、施工費は安価である。 ・ 堤内地側のパイピングにも効果が期待できる。	・ 矢板と被覆により浸透を遮断するため、噴砂が抑制される。 ・ 他案と比較して堤体の掘削が少ない。
デメリット	・ 堤体の一部掘削が必要がある。 ・ 砂礫層が高透水10 ⁻¹ オーダー(cm/sec)のため他家より排水量が大きくなる。	・ 堤体の一部掘削が必要があるが、ケーシングマシンでの施工となるため、堤体への影響は比較的小さい。 ・ 砂礫層が高透水10 ⁻¹ オーダー(cm/sec)のため他家より排水量が大きくなる。	・ 川から堤内側への水の供給が遮断される。 ・ 地下水流動への影響が大きい(堤内側に上水の水汲みポンプ有) ・ 噴砂が多く、遮水をすべて遮断しなければ遮水効果が期待出来ない。 ・ 経済性で最も劣る。
評価	○	●	△

(3) ウェルドレーン工法の構造

本工法は杭工法を応用し、オールケーシング掘削機により掘削、排土した後に、図-7に示すウェルドレーン而建て込むものである。ウェルドレーンの径は、オールケーシング掘削機での施工性及び堤体の安定性を考慮し、掘削幅が過大にならないよう1.1mとした。

ウェルドレーンの深さとしては、地下水の通っている砂礫層に十分に貫入させるために、砂礫層に50cm貫入させる深さとした。

(4) ウェルドレーンピッチの算定

ウェルドレーンピッチの算定にあたっては図-7に示すモデルを作成し、三次元飽和-不飽和浸透流解析を行った。基礎地盤の帯水層の被圧水頭に着目して堤体部はモデル化していない。

2本のウェルドレーンの中間点を圧力水頭の照査点としてG/W1.0となるウェルドレーンピッチを算定し、20mピッチのとき、上記照査基準を満足することを確認した。この時の砂礫層上面の圧力水頭を表-3に示す。

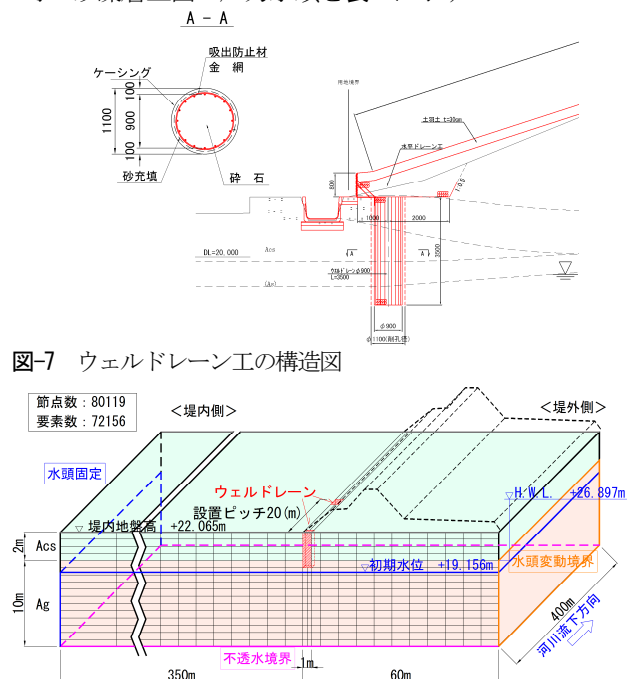
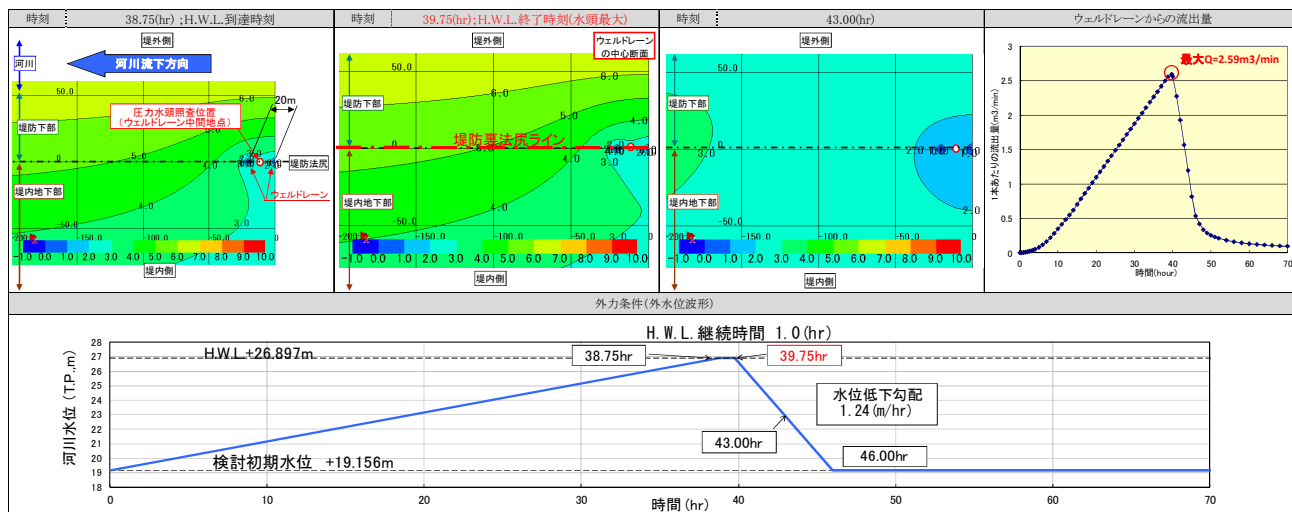


図-7 ウェルドレーン工の構造図

図-8 三次元浸透流解析モデル

表-3 三次元浸透流解析によるAg層上面の圧力水頭コンターとウェルドレーンからの流出量



5. モニタリング計画

ウェルドレーン対策工の効果確認および設計方法の妥当性確認を目的としてモニタリング調査を行う。モニタリング項目は表-4に示す項目について実施する。図-9に示すモニタリング実施位置は噴砂発生箇所近傍となる1.7k付近と2.0k付近の2地点において計画した。

表-4 モニタリング項目一覧

分類	モニタリング項目	使用センサ	設置数量	適用
ウェルドレーン	ウェルドレーンの効果確認と設計妥当性確認	水位計	5点×2箇所（上下流）	・堤防横断方向における河川側堤防内と堤内側法尻部での砂礫層内の被圧水位の比較 ・ウェルドレーン延長方向におけるドレーン間の砂礫層内の被圧水高さ分布の確認
	1本のウェルドレーンの排水能力確認	流量計	1箇所	ウェルドレーン1本あたりの排水量の確認
排水路	全体のウェルドレーンの排水能力確認	流量計	1箇所	対策区間末端部での流量確認

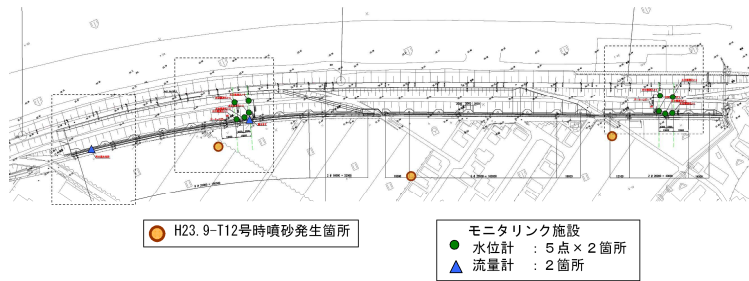
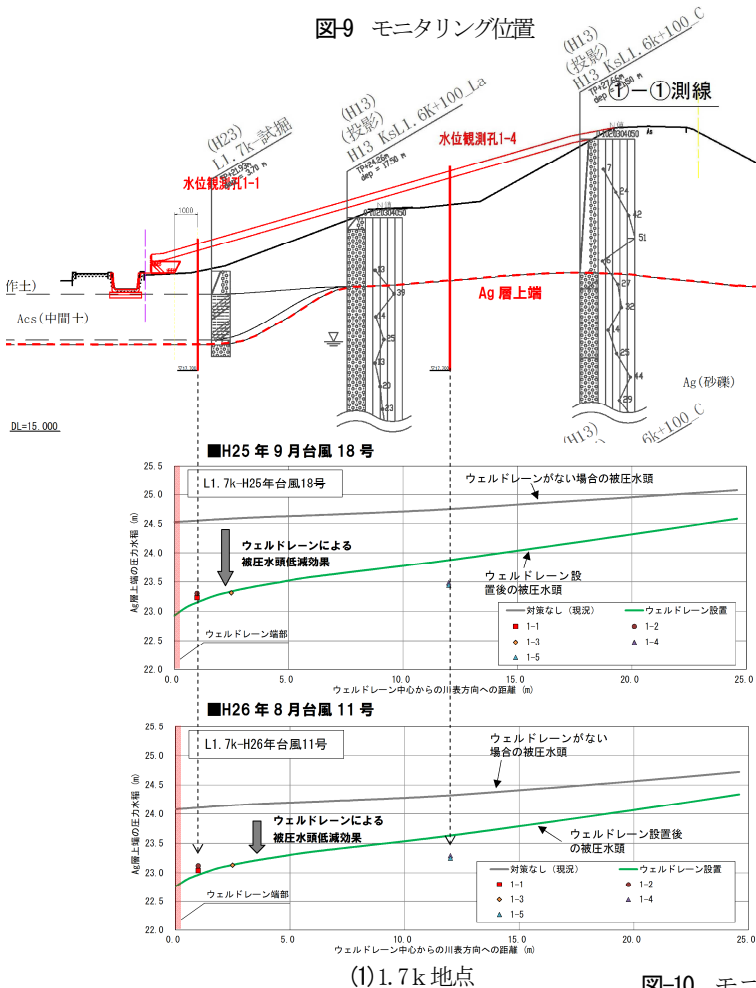


図-9 モニタリング位置



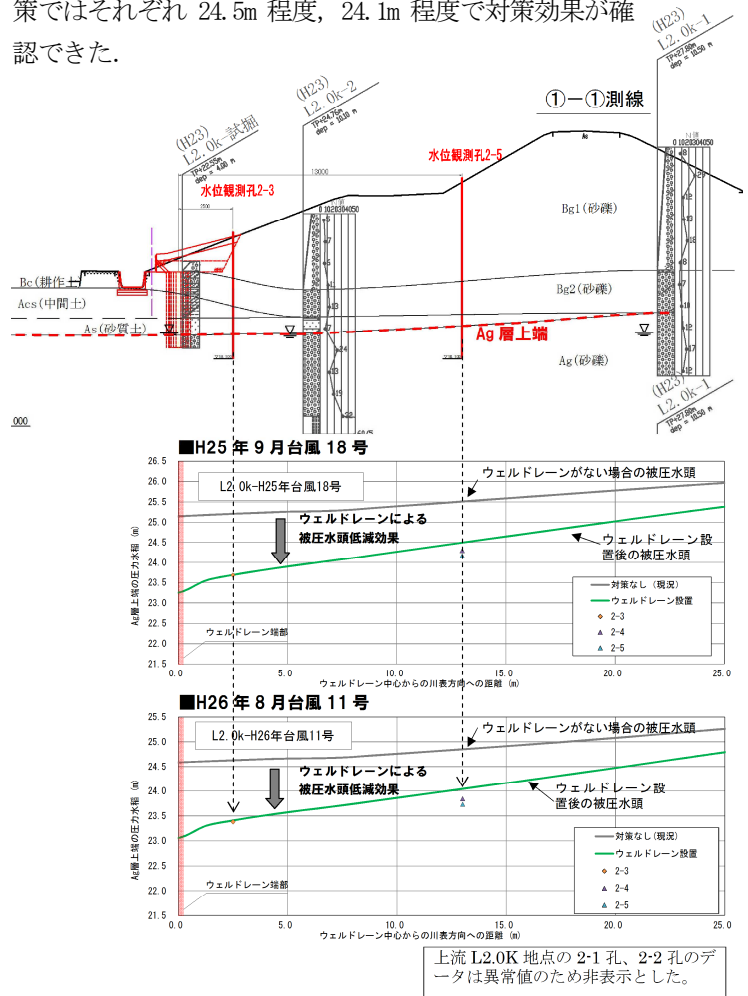
(1) 1.7k 地点

6. モニタリング結果と考察

対策工設置以降、顕著な出水として平成 25 年台風 18 号、平成 26 年台風 11 号がある。モニタリング施設で自動観測したこれら出水時の地下水位変動を整理・分析し、各出水時の河道内水位を外力として、飽和-不飽和浸透流解析により、堤体内水位のシミュレーションを行い、対策工の有無のモデルにより対策効果を確認した。その際対策工を設置した現況モデルにおいて観測された堤体内水位と浸透流解析結果を比較することにより現況モデルの妥当性を確認している。

本検討の結果、2.0k 付近のモニタリング結果より、2-1 と 2-2 の観測孔における計測水位は出水時は示されているものの、その前後の平水位における計測水位が他の観測孔と乖離があるため計測異常として検討から除いた。

1.7k 付近のモニタリングでは H.W.L.=T.P. 26.366m に対し、台風 18 号で 25.65m、台風 11 号で 25.33m の河道内水位となり、堤内法尻付近の地下水位は台風 18 号で 23.3m 程度、台風 11 号で 23.0m 程度となっており、無対策ではそれぞれ 24.5m 程度、24.1m 程度で対策効果が確認できた。



(2) 2.0k 地点

図-10 モニタリング結果

2.0k 付近のモニタリングでは H.W.L.=T.P. 26.897m に
対し、台風 18 号で 26.78m、台風 11 号で 25.97m の河道
内水位となり、堤内法尻付近の地下水位は台風 18 号で
23.6m 程度、台風 11 号で 23.4m 程度となっており、無対
策ではそれぞれ 25.2m 程度、24.6m 程度で対策効果が確
認できた。

7. まとめ

紀の川水系貴志川における河川堤防を一事例として盤
ぶくれに起因する浸透破壊に着目し、その強化対策とし
て近畿地方整備局管内で初めてウェルドレーン工法を適
用した。本検討で明らかになったことを列挙する。

- (1) 三次元の飽和-不飽和浸透流解析より、ウェルドレ
ーンピッチにおける水頭低下量を算出した結果、
当該箇所において必要なピッチは約 20m となるこ
とを確認した。
- (2) 対策工の比較検討より、貴志川丸栖地区の堤防漏
水対策として、ウェルドレーン工法は、掘削機械
に汎用機（ケーシングマシン）を用いるため施工
性、経済性に優れ、また特に維持管理の必要性な
いことから適していることを確認した。
- (3) 出水時における堤体内水位のモニタリングの結果、
堤体法尻付近の被圧水頭が無対策時に比べ低下が
認められ、対策工の効果が確認できた。

8. おわりに

本工法は、川裏部における浸透対策として、その掘削
深が大きくなる場合に有効な工法であることが確認され
た。

直轄河川において堤防質的強化対策工の詳細設計およ
びその施工を実施されているところであり、本工法は他
河川に対しても、十分に適応性があるものと考えられる。

今後、モニタリングを継続しウェルドレーン工の効果
の検証を行うとともに、その結果を関係者で共有し、効
果的な堤防質的整備の技術向上に努めるものとする。

謝辞：本箇所の浸透対策工検討およびモニタリング検証
にあたって、国立研究開発法人行政法人土木研究所の土
質・振動チームには種々指導、助言を頂いた。記して感
謝の意を表します。

参考文献

- 1) 長尾壮治：貴志川における噴砂と堤防の応急対策につい
て、平成 24 年度近畿地方整備局研究発表会論文
- 2) 中野 彩：地下水利用を考慮した貴志川漏水対策につい
て、平成 25 年度近畿地方整備局研究発表会論文
- 3) 河川堤防の構造検討の手引き、財団法人国土技術センタ
ー、平成 24 年 3 月
- 4) 河川堤防の浸透に対する照査・設計のポイント、独立行
政法人土木研究所 地質・地盤研究グループ土質・振動チ
ーム、平成 26 年 7 月