

天神川氾濫災害について ～再現計算による氾濫事象の再現～

杉原 智史¹

¹兵庫県 土木部 河川整備課 (〒650-8567兵庫県神戸市中央区下山手通5-10-1)

2023年5月8日、(二)武庫川水系天神川(以下、「天神川」という。)の堤防強化工事中に洪水が仮締切を越水し、本堤が破堤する大規模な氾濫災害が発生した。本論では、破堤後の現場状況から氾濫原因を特定するという課題に対して、計算により氾濫事象を再現し、破堤に至ったメカニズムを解明した過程で得られた知見を報告するものである。

キーワード 氾濫事象の再現、二次元不定流計算、二次元浸透流計算

1. はじめに

天神川の堤防強化工事中、2023年5月6日～8日の降雨(時間最大29.4mm/hr)によりピーク流量が16.0m³/sに達し、2023年5月8日0時30分頃に本堤が破堤した。

発災直後から、マスメディアやSNS等で状況が伝えられた。また、工事中の出来事であり、被害も甚大であったことから、氾濫原因を特定した上で、当該箇所における残工事の施工方法を整理するとともに、今後の安全な河川工事のあり方を審議する目的で、2023年6月8日に「天神川氾濫災害調査委員会」(以下、「調査委員会」という。)を設置した。

本論では、破堤後の現場状況から氾濫原因を特定するという課題に対して、二次元不定流計算や二次元浸透流計算により氾濫事象を再現し、破堤に至ったメカニズムを解明した過程で得られた知見を報告する。

ると、水位が急激に上昇する河川である。また、天神川の5.2kmのうち2.8kmで河床高が堤内地盤高より高い天井川となっている(写真-1)。

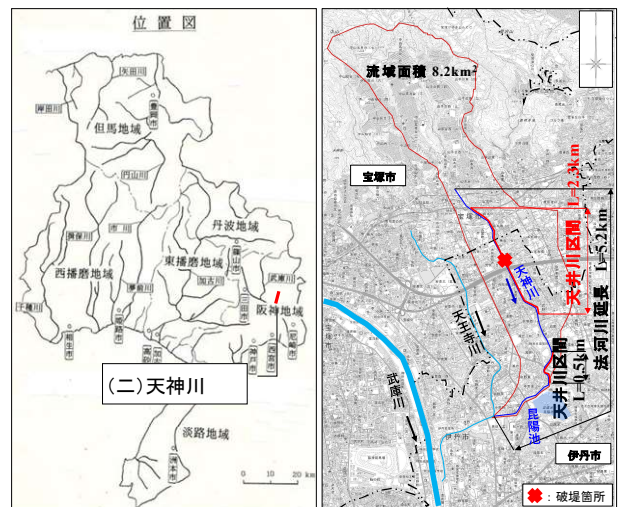


図-1 位置図

2. 天神川の氾濫災害について

(1) 天神川の概要

天神川は兵庫県宝塚市中山五月台にその源を発し、途中、天王寺川と合流し武庫川に合流する、流域面積8.2km²、法河川延長5.2kmの県管理河川である(図-1)。

古くは、奈良時代の高僧である行基により、昆陽上池(現在の昆陽池)に導水するため、昆陽上池溝として整備されたと言われており、その後約1,300年の中で上流から流れてくる土砂による埋塞、浚渫を繰り返し、災害復旧や河川改修事業により現在の天神川となった。晴れた日であれば水が流れない枯れ川であるが、一旦雨が降

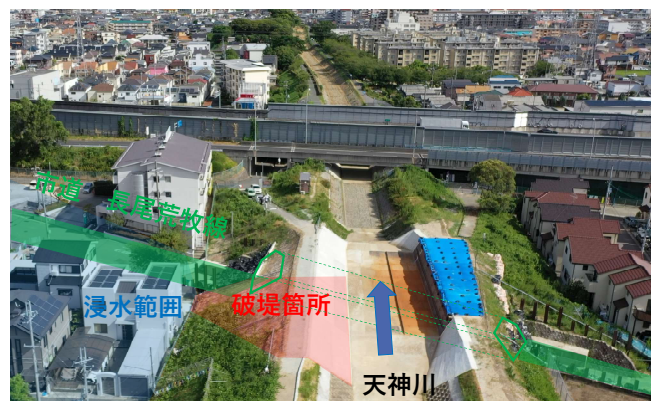


写真-1 天井川区間(手前は破堤箇所)

(2) 事業概要

天井川区間のうち上流側のL=2.3kmでは、河川改修から50年以上経過し、堤体からの漏水が確認されたこともあり、2009年度から老朽化した河床張りコンクリートと護岸の改修を行う堤防強化工事に着手している。今回破堤した箇所以外については堤防強化工事が完了していた。

(3) 今回工事の概要

天神川の河道下を貫く市道長尾荒牧トンネルの改築及び天神川堤防強化の本体工に先立ち本体工で必要となる仮設部分を工事発注していた。

工事内容は、①重機等の荷重によるトンネル崩落を防止するための流動化材を用いたトンネル内充填、②トンネル周辺の土砂を支えるための土留工（親杭横矢板、切梁等）の設置、③工事期間中、河川内の流水を受ける仮設鋼板水路の設置である（図-2）。

これらは、既設トンネルを撤去した後、新たにボックスカルバートを設置する本体工の準備として施工していた。

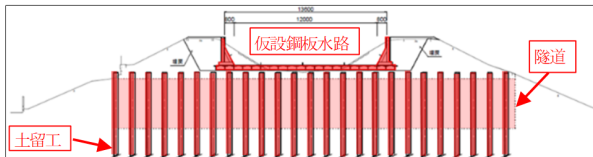


図-2 計画横断面図

(4) 氾濫被害の発生

2023年5月6日～8日の降雨により2023年5月8日の0時30分頃に洪水が仮締切を越え、仮設鋼板水路設置に向けて部分的に開削していた本堤が決壊し、浸水被害が発生した（図-3）、（写真-2,3）。

決壊した堤防延長は約30mであり、浸水面積は約3.3haに広がった。人的被害は負傷者1名、物的被害は床上浸水2棟、床下浸水10棟であった。

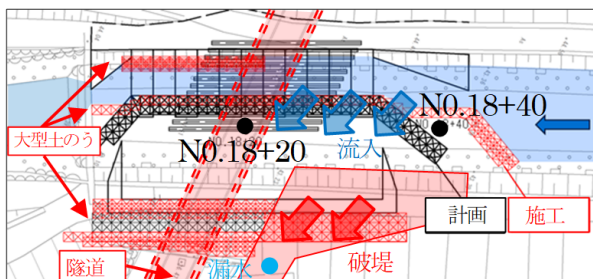


図-3 被災時平面図



写真-2 被災状況（2023年5月8日 2:30）



写真-3 被災状況

3. 被災時の状況整理

(1) 降雨状況

被災箇所周辺にある国、県、市の雨量データを収集し、ティーセン分割により流域平均雨量を算定した結果、時間最大雨量は、5月7日23時00分から24時00分の29.4mm/hr、連続雨量は5月6日20時から5月8日4時までの187.17mmであった。

(2) 目撃情報の収集

氾濫原因の究明にあたり、どのような過程を経て破堤に至ったのか客観的な情報を得る必要があるため、地元住民、工事施工業者から目撃情報を聴聞した（表-1）。

表-1 目撃情報

日 時	目撃情報（図-2参照）
5月7日23時30分頃	No.18+20付近で仮締切工の大型土のうからの越流が始まる。
5月7日23時40分頃	No.18+20からNo.18+40区間で大型土のうからの越流が拡大。
5月8日 0時00分頃	No.18+20からNo.18+40区間で大型土のうからの越流が継続し、左岸側に流水が流れ込み、仮締切内の水位が上昇。（大型土のうの2/3程度、約60cm）
5月8日 0時25分頃	No.18+20、No.18+40付近で大型土のうが転倒していることを確認。 左岸川裏側堤防法面中腹の小段部からの漏水（パイピング）を確認。
5月8日 0時30分頃	トンネルの左岸上流端部付近で堤防の決壊を確認。決壊幅は5cm程度であった。
5月8日 1時15分頃	上流側へ決壊が進み、最終的な決壊幅は約30cm程度となったことを確認。

4. 被災流量の推定

(1) 伊丹市のライブカメラ映像による流量の推定

今回の出水による洪水痕跡を調査したが、明確な痕跡を確認することができなかった。このため、氾濫箇所約300m上流に設置されている伊丹市のライブカメラ(30分毎に静止画を撮影)から水位を確認し(図-4)、等流計算により流量を算出した(図-5)。その結果、ピーク時の流量は5月8日0時00分で $16.0 \text{ m}^3/\text{s}$ (水位 0.87m)と推定した。

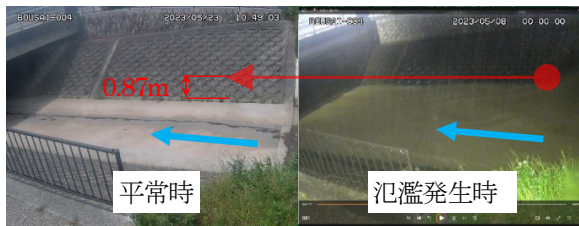


図-4 伊丹市ライブカメラ映像

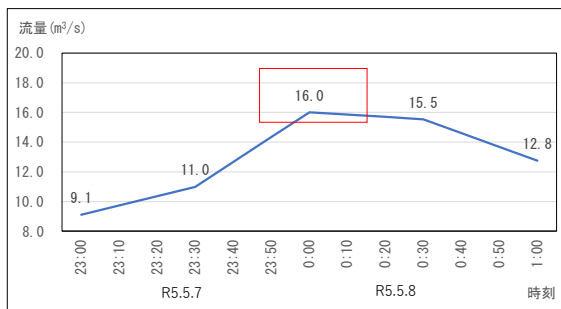


図-5 伊丹市ライブカメラ地点のハイドログラフ

(2) 準線形貯留関数モデルによる流量の推定

4.(1)で算出した流量はあくまで簡易な手法での推定流量であり、ライブカメラ映像が鮮明でないという課題もあることから、解析による流量算出も試みた。まず、被災流量を容易に算出可能な合理式法により算出したところ被災流量は $22.18 \text{ m}^3/\text{s}$ 、被災水位は 1.1m となった。しかし、ライブカメラ映像(水位 0.87m)と大きく乖離した結果となった。そのため、被災流量の確度を高める、別の手法での流量算出を実施した。

天神川流域の上流部には山地を開発した住宅地が広がり(図-6)、防災調整池もあることから、土地利用と貯留効果を考慮できる、「準線形貯留関数モデル」により流量の算出を実施した。ただし、天神川には水位計が設置されていないこと、また、流量観測も行っていないことから、流出解析条件の同定作業を行うことができないため、解析に用いた土地利用の定数は標準値とした。その結果、ピーク流量は5月8日0時00分の $14.65 \text{ m}^3/\text{s}$ (水深

0.82m と推定)と算出した。

この結果は、ライブカメラ映像から推定したピーク時刻、流量とも概ね一致していることが確認できたため、今回の被災ピーク流量は実現象を撮影したライブカメラ映像から算出した5月8日0時00分の $16.0 \text{ m}^3/\text{s}$ と断定した。



図-6 土地利用区分図

5. 氾濫事象の再現

(1) 平面二次元不定流計算モデルによる流況再現

4.で算出した被災ピーク流量を用いて、被災箇所における仮締切の越水状況の再現を試みた。

一次元不等流計算では仮締切を越流した後の流況を再現することができないこと、また、4.(1)で算出した30分毎のハイドログラフの流況(不定流)を再現できないことから、平面二次元不定流計算モデルによる流況再現を実施した。解析メッシュは、土のうの大きさ(約 1m)を考慮して 50cm 程度とした。平面二次元不定流計算による流況計算と各時刻の目撃証言が一致することを確認し、モデルの妥当性を確認した。

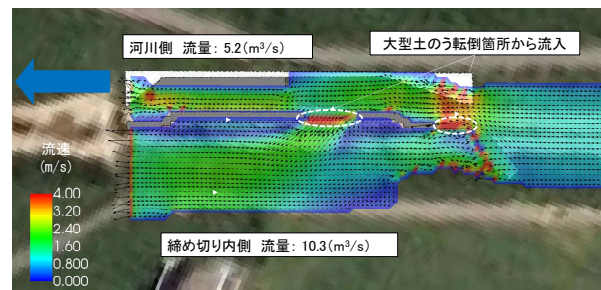


図-7 破堤時の流速コンター図(5月8日00:30二次元不定流計算)

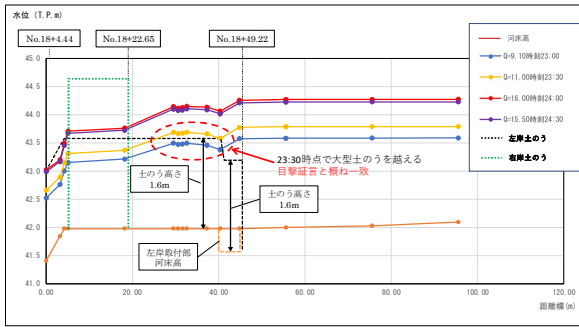


図-8 破堤時の水位縦断面図

(2) 二次元浸透流計算によるパイピング破壊の再現

現場では仮締切を越水した後、堤防が破堤に至った。この現象を再現するため、二次元浸透流計算により浸透破壊について検証を行った。検討位置は、パイピングが生じた左岸堤防部(図-9)及び20m上流側の左岸堤防部(図-10)とした。堤防への外力は、5(I)の二次元不定流計算より算出した仮締切内の水位とした。浸透流計算の結果、左岸堤防部(図-9)において、5月8日0時25分に堤防裏法の小段部の局所動水勾配が限界動水勾配を上回りパイピングが生じる結果となった。

これは目撃証言とも一致しており、モデルの妥当性を確認することができた。

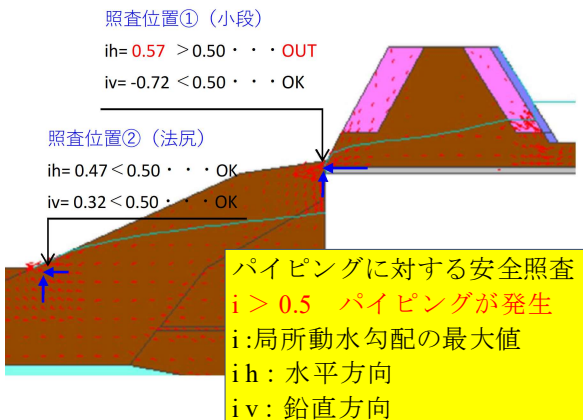


図-9 浸透解析結果(ケース1: No.18+20)

照査位置②(法尻)

$ih = 0.49 < 0.50 \dots \text{OK}$

$iv = 0.29 < 0.50 \dots \text{OK}$

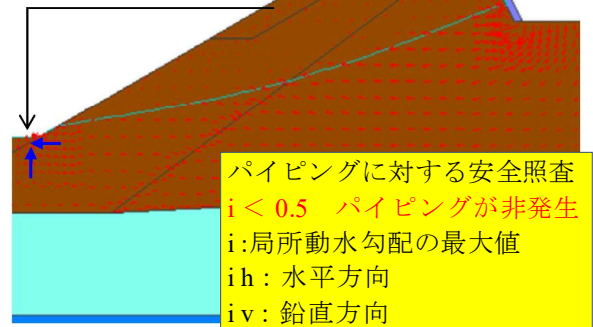


図-10 浸透解析結果(ケース2: No.18+40)

6. 氾濫災害の原因特定

(1) 再現モデルによるケーススタディ

前章の再現モデルを基に、計画と施工で異なる条件に着目し、今回の氾濫原因の絞り込みを行った。設計時の条件と異なる①水路幅、②土のう高さ、③土のうの積み方、④河床の遮水措置の条件を組合せた8ケースにおいてケーススタディを実施した。

結果は表-2のとおりであり、以下①～④結論を導き出した。

- ①水路幅(現場再現とケースB, C, F, Gの比較)では、設計どおり4m確保できていれば決壊に対して安全になるため、水路幅が設計どおり4m確保できていれば破堤しない。
- ②土のう高さ(現場再現とケースAの比較)では、いずれも破堤の可能性がある、土のう高さは破堤に影響がない。
- ③土のうの積み方(現場再現とケースDの比較)では、いずれも破堤の可能性がある、土のうの積み方は破堤に影響がない。
- ④河床の遮水措置(現場再現とケースHの比較)では、河床へ遮水ができていれば破堤しない。

(2) 被災原因の特定

被災時の河道は、クレーンの施工ヤードを確保するため土のうを設置し、水路幅が4m確保されておらず、仮締切工の大型土のうを越水し、仮締切工内に溢水した。

仮締切工内は、既設河床張コンクリートを剥離させた状態であり、容易に仮締切工内に流入した水が河床から堤防へ浸透できる状態であった。仮締切工内に流入後、仮締切工内の水位や堤体内の水位が上昇したことから堤防裏法面中段の小段付近からパイピングが発生し、堤防決壊に至ったと特定した。

一般部門(安全・安心) : No.02
表-2 氾濫シミュレーション

計 算 条 件			現場再現	氾濫要因の洗い出し（シミュレーション）									
				A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
① 対象雨量 (流 量)	既往最大 51.0mm/hr	Q=34.3m ³ /s	29.4mm/hr	29.4mm/hr	29.4mm/hr	29.4mm/hr	29.4mm/hr	29.4mm/hr	29.4mm/hr	29.4mm/hr	29.4mm/hr	51.0mm/hr	51.0mm/hr
	実績 29.4mm/hr	Q=16.0m ³ /s	16.0m ³ /s	16.0m ³ /s	16.0m ³ /s	16.0m ³ /s	16.0m ³ /s	16.0m ³ /s	16.0m ³ /s	16.0m ³ /s	16.0m ³ /s	34.3m ³ /s	34.4m ³ /s
② 仮水路断面	水路幅	計画 w=4.0m	w=1.8～4.0m	W=1.8 ～4.0m	W=4.0m	W=4.0m	W=1.8 ～4.0m	W=1.8 ～4.0m	W=4.0m	W=4.0m	W=1.8 ～4.0m	W=1.8 ～4.0m	W=4.0m
		施工 w=1.8～4.0m											
	土のう高さ	計画 H=2.0m	H=1.6m	H=2.0m	H=1.6m	H=2.0m	H=1.6m	H=2.0m	H=1.6m	H=2.0m	H=1.6m	H=1.6m	H=2.0m
		施工 H=1.6m											
③ 土のうの積み方	計画 上1下2	上1 下1	上1 下1	上1 下1	上1 下1	上1 下2	上1 下2	上1 下2	上1 下2	上1 下2	上1 下1	上1 下1	上1 下2
	施工 上1下1												
④ 河床の遮水措置	有り	無し	無し	無し	無し	無し	無し	無し	無し	有り	有り	無し	
	無し												
考えられる要因	① 雨量の想定	△ 概ね想定内 (実測33mm/hr)	△	△	△	△	△	△	△	△	△	○	○
	② 通水断面の確保	× 不足していた	×	×	○	×	×	×	×	○	×	×	○
	③ 土のうの安定	× 不安定だった	×	○	○	×	×	×	○	○	×	×	○
	④ 河床の遮水	× 遮水できていなかった	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×
破堤危険度（可能性）		× 破堤	×	○	○	×	×	○	○	○	○	○	×

7. 今後の課題

被災流量を推定するため、4.(1)で述べたとおり、当初は合理式法で推定していたが、実現象と大きく乖離が生じる数値となった。

合理式法は簡便に流量を算出できるメリットがある一方、天神川のような流域が小さく、洪水到達時間が1時間も満たない河川であれば、実際の流量より大きい値が算出されると考える。また、天神川上流部には貯留施設があったことで、その貯留効果も考慮するべきであった。このように、適用する流出解析モデルにより河川流量の推定精度が大きく異なるため、流出解析モデル毎の特性を把握した上で適用する必要がある。

河川に関する流出解析モデルは多数存在することから、現場の特性に応じたモデルを選択することは容易

ではなく、我々、河川技術者は常に研鑽し、知識の幅を広げていく必要がある。

8. おわりに

被災に関する再現計算においては、水位計や河川監視カメラがなく、破堤後の壊滅的な現場状況から氾濫原因を特定することは困難を極めた。幸い、周辺のライブカメラや目撃証言により被災流量の算定を行い、被災当時の河川状況の再現を精緻に行うことができた。

本論が、同様の災害のメカニズムを解明する際の一助となれば幸いである。