

土木研究所資料 第 2584 号（1988）における水理模型実験 非公開データのオープンデータ化に向けた取り組み

土木研究所 清水武志

1. はじめに

土砂災害を引き起こすような現象を実際に検証できるのは稀であるため、砂防分野では水理模型実験が実施されてきた（水山，2015）。砂防における水理模型実験は、1968年頃から河川分野における水理模型実験を参考として土木研究所で開始された（砂防・地すべり技術センター，1990；長井ほか，2015）。水理模型実験では、山地河川の特徴である短時間に流況が時空間的に変化することを踏まえて、短時間に多くの土砂を供給し、時空間的に変化する流況や河床変動・水位変動・流出土砂量の時間変化を定量的に把握する必要がある（長井ほか，2015）。一方、1990年代頃から、土石流や流砂の力学理論や数値計算の発展により、水深平均した浅水流方程式による河床変動計算が標準的な道具として整備されてきた（水山・藤田，1997）。河床変動計算は様々な条件を変更しながら繰り返し検討が可能であるが、自然現象を表現するには必ずしも十分な精度を有さない。水深平均された基礎方程式を用いる河床変動計算で表現できず、水理模型実験で確認されている自然現象として、例えば、構造物まわりの非静水圧の影響（伊藤ほか，2015）などがある。水理模型実験と河床変動計算は、両者を相補的に用いて、解析対象とする複雑な現象の解明を行うものである（水山，2015）。特に災害前後の地形変化では理解が難しい土砂移動の時間変化を見られることに強みがある（水山，2015）。見方を変え、水理模型実験のデータは、既存の数値計算手法や新しい数値計算手法が種々の複雑な土砂移動現象を表現できるか試験するためのデータとなり得ることを表している。

ところで、近年になって数値計算の品質管理の考え方として、数値計算における検証（Verification）と妥当性確認（Validation）、つまり V&V という考え方が広まっている（白鳥ほか，2013）。数値計算の良否を判断するために、物理モデルを表す数式や実装したコードの正しさの確認（検証）や解析対象現象をそのモデルが表現できるか実験データ等による確認（妥当性確認）、を行うという考え方である。V&V は砂防分野における数値計算手法の“質”を他分野の技術者等に説明する際あるいは新旧手法の健全な比較を行うために重要な考え方である。V&V の推進には、基礎方程式の由来を明らかにすることや実装したコードの検証可能性を担保すること（検証）および数値計算結果と比較できるように特徴的な現象毎にしっかりと計測された実験等のデータがオープンデータとして存在すること（妥当性確認）が必要であると考え。筆者らは、「検証」について、基礎方程式の仮定を理解できるように導出を丁寧に記すことやプログラムのオープン化を進めている（清水ほか，2022a,b；山崎ほか，2022）。

本稿では妥当性確認について考える。筆者は、水山ほか（1988）に簡潔に示された水理模型実験データのオリジナルデータが記された「実験報告書」を土木研究所の倉庫で発見した。妥当性確認のためのデータセットの一つになり得る可能性があると考えた。そこで、同「実験報告書」におけるデータを電子化した結果を報告する。

2. 水山ほか（1988）による水理模型実験の概要

焼岳に源を発する岩坪谷における最下流端の日影第一号砂防堰堤の堆砂地は昭和 54 年には満砂し、多量の土砂が流出していた。その後も大量の土砂流出が予想された。水山ほか（1988）は、神通川水系砂防工事事務所による土砂調節のための大暗渠砂防堰堤の計画案を基礎として、要求される砂防堰堤の構造を水理模型実験により検討し、主として実験による検討結果をまとめた。同時に、河床変動計算の発展期と考えられる時期に、同実験による時系列的な計測データにより河床変動計算を評価した。

計画案に示された雨量や河床材料、地形、構造案を参考に、フルード相似則に従って幾何学的な量および水理学的な量をスケールした実験が実施された。模型を図 - 1 に、平面図を図 - 2 に示す。実験条件の詳細は水山ほか（1988）を確認されたい。

3. 電子化した実験データ

水山ほか（1988）では構造物のタイプ 7 種に対する実験結果が示されるが、「実験報告書」では図 - 3 のように実験ケースが設定される。

3.1 模型の CAD 化

「実験報告書」には、堰堤模型の形状や寸法（図 - 1）や三面図、図 - 2 の平面図や水理模型作成の初期に設定する測線（例えば、奥山ほか，2022）の横断測量データが記されていた。これらのデータから、水理模型を CAD データとして作成した。3 次元地形は、横断測線を描いた上で、測線間を TIN で補間した後、図面や写真を確認しながら等高線を引き、手動で TIN の頂点座標が等高線上を通過するように調整した。地形に加え、外枠、固定床、移動床、構造物（流路、副提、本堤など）をそれぞれサーフェスやソリッドとしてモデリングした（図 - 4）。なお、流路、副提などは平面図（図 - 2）からモデリングした。

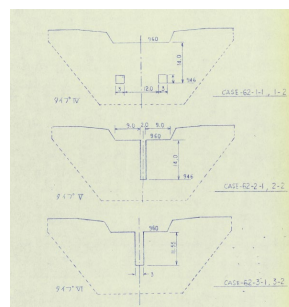


図 - 1 砂防堰堤の形状

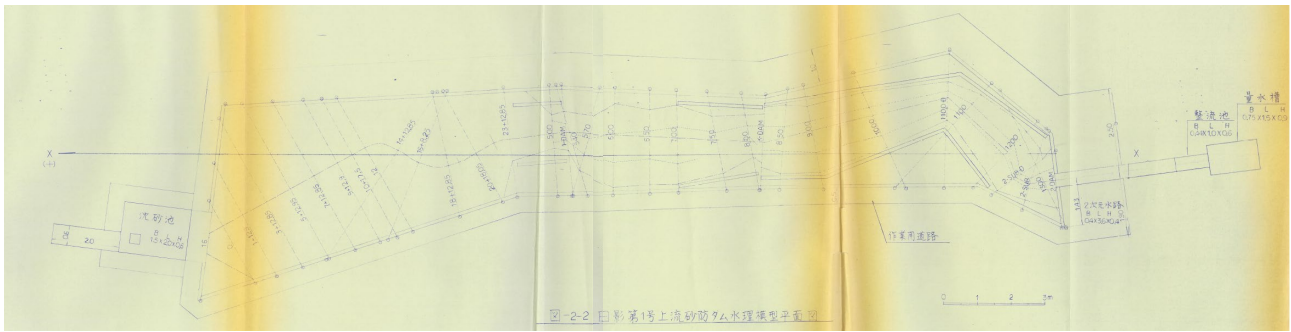


図 - 2 平面図

(1) 実験 ケース の 内 容					
実 験 分 類	ケ ー ス 番 号	実 験 条 件	実 験 時 間	日影第1号上流 砂防ダムの形状	検 討 項 目
実験1	1	1/100年(波形)	7.7% 1.0時間	(計画) 大規模 タイプ IV	日影第1号上流砂防ダム のタイプの検討。
	2	1/2年(定流)	0 0.5	スリット タイプ V	
	3	1/100年(波形)	7.7% 1.0時間	スリット タイプ VI	
	4	1/2年(定流)	0 0.5	スリット タイプ VI	
	5	1/100年(波形)	4.5% 1.0時間	スリット タイプ VI	貯砂量の変化に伴う河床 変動の影響。 フルイ分け作用の検討。
	6	1/2年(定流)	0 0.5	スリット タイプ VI	
	7	1/100年(波形)	7.7% 0.5時間	スリット タイプ VI	流量変化に伴う砂堆の 形状の検討。
	8	1/2年(定流)	0 1.0	スリット タイプ VI	
実験2	9	1/100年(波形)	7.7% 1.0時間	スリット タイプ VI	フルイ分け作用の検討。
	10	1/2年(定流)	0 0.5	スリット タイプ VI	
実験3	11	1/100年(波形)	7.7% 1.0時間	スリット タイプ VI	成本の算出
	12	1/2年(定流)	0 0.5	スリット タイプ VI	
実験4	13	1/100年(波形)	7.7% 1.0時間	スリット タイプ VI	計画砂防ダムの右岸側へ 移動による影響。
	14	1/2年(定流)	0 0.5	スリット タイプ VI	

図 - 3 実験ケース

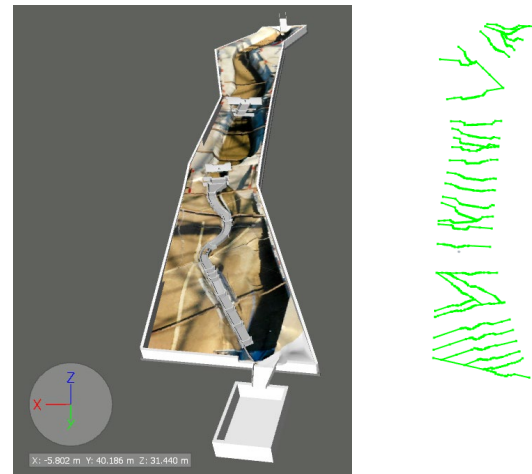


図 - 4 3次元化した模型(左), 同視点での測線配置(右)

3.2 各計測データの例

粒度分布やハイドログラフ等実験条件や縦断的な河床標高などの数表 237 表を電子化し, またケース毎の測線での時系列計測データ(図 - 5)は 1200 図をデジタル化した。

4. おわりに

現代の数値計算手法の開発における V&V の考え方を述べ, その文脈上で水理模型実験の意義を再確認した。妥当性確認を念頭に, 水山ほか(1988)による水理模型実験のオリジナルデータを電子化した結果を示した。データは公開に向けて準備中である。

謝辞

2024 年 3 月に逝去された水山高久京都大学名誉教授に, 同年 2 月上旬頃, 当時の実験データ利用について相談したところ, ご快諾頂いた。また, 水理模型の CAD データ化を(株)CTI リードの長井斎氏と山下剛史氏に, 実験データの電子化をパシフィックコンサルタンツ(株)の片山直哉氏と池内正俊氏にご協力いただいた。土木研究所の伊藤誠記上席研究員や池島剛交流研究員(現日本工営(株))には種々のご助言をいただいた。記して謝意を表する。

参考文献

伊藤隆弘・長山孝彦・水山高久: 種々の透過型砂防堰堤を対象とした土砂流出の制御と促進に関する模型実験, 砂防学会誌, Vol.68, No.2, p.23-34, 2015; 水山高久: 砂防分野における実験, 砂防学会誌, Vol.67, No.6, p.1-2, 2015; 水山高久・阿部宗平・矢島重美: 日

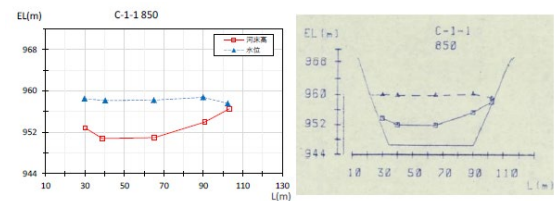


図 - 5 横断測線の河床位と水位の電子化の例(右は元図)

影ダム第1号上流砂防ダム水理模型実験等報告書, 土木研究所資料, 第2584号, 82p., 1988; 水山高久・藤田正治: 河床変動計算のススメ, 砂防学会誌, Vol.50, No.1, p.67-71, 1997; 長井斎・松原智生・村上正人・西口幸希: 砂防水理模型実験の特徴と活用について, 砂防学会誌, Vol.67, No.6, p.49-55, 2015; 奥山遼佑・川崎巧・西口幸希・松原智生: 水理模型実験における計測技術, 砂防学会誌, Vol.75, No.3, p.27-33, 2022; (財)砂防・地すべり技術センター: 目で見える砂防水理模型実験, 山海堂, 1990; 清水武志・山崎祐介・今森直紀・石田孝司: 火山噴火後を想定した土石流氾濫計算オープンソースプログラムの公開, 砂防学会研究発表会概要集, R4-7, 2022a; 清水武志・高橋佑弥・藤村直樹・石井靖雄: 土石流・掃流状集合流動・掃流砂流の氾濫に関する並列計算オープンソースプログラムの開発, 土木研究所資料, 第4415号, 2022b; 白鳥正樹・越塚誠一・吉田有一郎・中村均・堀田亮年・高野直樹: 工学シミュレーションの品質保証と V&V, 丸善出版, 2013; 山崎祐介・清水武志・石井靖雄・石田孝司: 降雨流出解析と連動した土石流の流出・氾濫解析法, 土木研究所資料, 第4419号, 2022