

資 料 編

○ 各種委員会活動

	委員会名	団体	委員
1	ICT 導入協議会	国土交通省総合政策局	神矢 弘
2	国立保健医療研究会議 委員	厚生労働省	今本 博臣
3	規格基準委員会 委員	公益社団法人 地盤工学会	市川 滋己
4	規格基準委員会 現場密度試験 WG6 委員	公益社団法人 地盤工学会	市川 滋己
5	建設マネジメント委員会	公益社団法人 土木学会	神矢 弘
6	トンネル技術委員会	公益社団法人 土木学会	神矢 弘
7	岩盤力学委員会 委員	公益社団法人 土木学会	白川 信之
8	岩盤力学委員会「岩盤力学」改訂委員会 ダム編作業 WG メンバー	公益社団法人 土木学会	松尾 達也
9	農業土木技術管理士研修委員会 委員	公益社団法人 土地改良測量設計技術協会	吉久 寧
10	ダム工学会賞選考委員会 第V類 その他部門査読 委員	一般社団法人 ダム工学会	佐藤 信光
11	企画運営委員会 委員	一般社団法人 ダム工学会	武田 浩一
12	学術研究発表会小委員会 小委員長	一般社団法人 ダム工学会	武田 浩一
13	コンクリートダム研究部会	一般社団法人 ダム工学会	國居 史武
14	企画委員会 委員	一般社団法人 日本大ダム会議	神矢 弘
15	技術委員会 委員	一般社団法人 日本大ダム会議	神矢 弘
16	国際大ダム会議「ダム安全」技術委員会 (兼日本大ダム会議 国際分科会) 委員	一般社団法人 日本大ダム会議	小牧 健二
17	国際分科会 論文査読 WG 委員	一般社団法人 日本大ダム会議	小牧 健二

	委員会名	団体	委員
18	ダム設計基準調査分科会 委員	一般社団法人 日本大ダム会議	松枝 修治
19	ダム設計基準調査分科会 WG (3. 既設ダム WG) 委員	一般社団法人 日本大ダム会議	松枝 修治
20	ダム設計基準調査分科会 WG (1. 地震 WG) 委員	一般社団法人 日本大ダム会議	佐藤 信光
21	ダム設計基準調査分科会 WG (2. 新型式のダム WG) 委員	一般社団法人 日本大ダム会議	佐野 貴之
22	「日英ダム技術用語辞典」改訂分科会	一般社団法人 日本大ダム会議	藤田 将司
23	コンクリートダム委員会 国際協力委員	一般社団法人 日本大ダム会議	國居 史武
24	ダムコンクリート凍害実験研究分科会 委員	一般社団法人 日本大ダム会議	國居 史武
25	技術展示企画運営委員会 委員	一般社団法人 日本大ダム会議	國居 史武
26	ダム貯水池水質保全対策研究会 委員	一般社団法人 ダム水源地環境センター	今本 博臣
27	ダム工事総括管理技術者認定事業	一般社団法人 日本ダム協会	青木 成幸
28	理事	一般社団法人 国際建設技術協会	尾島 知
29	ISRM2019&REIF2019 合同組織委員会・運 営幹事会	一般社団法人 岩の力学連合会	白川 信之
30	会誌委員会 副幹事	一般社団法人 日本計算工学会	藤岡 奨

外部投稿論文等（令和元年度）

・令和元年度 外部投稿論文等の実績

No	論文題名	投稿先	掲載・発表時期
1	Development of new simulator for training of dam operation and its future outlook	2019年 ICOLD第87回年次例会	2019年6月
2	衝撃弾性波法を用いたコンクリートダム堤体の水平打継目調査	日本非破壊検査学会 2019年度 衝撃弾性波法のコンクリート構造物への適用に関するミニシンポジウム	2019年6月
3	気泡循環対策の施設規模指標に関する理論構築における予備的考察	土木学会水工学委員会 環境水理部会研究集会	2019年6月
4	供用中のコンクリートダム堤体における弾性波伝播速度の特性	コンクリート工学年次論文集 Vol.41, No.1	2019年7月
5	水資源機構ダムの水質保全の現状と課題	鹿児島大学 水質環境改善研究会 第1回シンポジウム	2019年7月
⑥	地震観測記録に基づくロックフィダム堤体の速度構造の推定	ダム工学 Vol.29, No.3	2019年9月
7	Analysis of pressure fluctuation in a pipeline under seismic conditions	E-proceedings of the 38th IAHR World Congress	2019年9月
8	東北地方太平洋沖地震時における管路内動水圧変化の再現	令和元年度(第68回) 農業農村工学会大会講演会	2019年9月
9	地震時における長距離管路内の動水圧変化に関する再現性検証	令和元年度(第68回) 農業農村工学会大会講演会	2019年9月
10	収縮低減タイプのAE減水剤が硬化コンクリート特性に与える影響	令和元年度土木学会全国大会 第74回年次学術講演会	2019年9月
11	早明浦ダムにおける選択取水設備の運用	令和元年度土木学会全国大会 第74回年次学術講演会	2019年9月
12	地震観測記録に基づくNIOM解析によるロックフィルダム堤体の速度構造の推定	令和元年度土木学会全国大会 第74回年次学術講演会	2019年9月
13	実測地震記録および解析による重力式ダムクレストゲート部動水圧の発生要因分析	令和元年度土木学会全国大会 第74回年次学術講演会	2019年9月
14	GPSによるフィルダム堤体変位計測の対流圏遅延補正に用いる気象データについて	令和元年度土木学会全国大会 第74回年次学術講演会	2019年9月
15	現地実用条件における気泡循環対策のシミュレーションによる効果評価手法の開発:修正二重プルームモデルのJWAモデルへの導入	令和元年度土木学会全国大会 第74回年次学術講演会	2019年9月
16	徳山ダムにおける微小地震観測(第3報)	2019年 日本地震学会秋季大会	2019年9月
17	ダムの地震被害実態に基づく耐震性能の考察と今後の課題	日本地震工学会 第14回年次大会	2019年9月

・ 令和元年度 外部投稿論文等の実績

No	論文題名	投稿先	掲載・発表時期
18	ICOLD2019第87回年次例会報告(オタワ) (H;ダム安全委員会)	大ダム No.249	2019年10月
19	地震による重力式ダムクレストゲートの振動および動水圧の発生要因の分析	土木学会地震工学委員会 第39回地震工学研究発表会	2019年10月
20	谷地形解析によるゆるみ岩盤斜面の抽出に関する検討	令和元年度 日本応用地質学会研究発表会	2019年10月
21	気泡循環対策の必要施設規模指標に関する考察	土木学会水工学委員会 第64回水工学講演会	2019年11月
22	利水ダム(調整池等)の安全管理に関する取組み	日本水道協会令和元年度 全国会議水道研究発表会	2019年11月
23	地震時における管路内動水圧変化による空気弁破損要因の分析ー東北地方太平洋沖地震での再現ー	日本水道協会令和元年度 全国会議水道研究発表会	2019年11月
24	地震時における管路内動水圧変化による空気弁破損要因の分析ー観測データの再現計算ー	日本水道協会令和元年度 全国会議水道研究発表会	2019年11月
25	徳山ダムにおけるGPS変位計測と対流圏遅延補正	令和元年度 ダム工学会研究発表会	2019年11月
②6	ダム防災操作支援システムの開発と運用 ースーパー台風への対応ー	令和元年度 ダム工学会研究発表会	2019年11月
27	弥富送水システムのリスクマネジメントについて ～fail safeを目指した対策～	第76回農業農村工学会 京都支部研究発表会	2019年11月
28	Tropospheric delay correction in GPS displacement monitoring: Case study of Tokuyama Dam in Japan	第5回若手研究者国際岩の力学シンポジウム&革新的未来のための岩盤工学シンポジウム	2019年12月
②9	ダム防災操作能力向上！ 実践型シミュレータの運用	第11回 全国河川・ダム管理技術検討会	2020年1月
③0	地震時における管路内動水圧変化の再現	水土の知 88巻, 2号	2020年2月

○ は掲載論文

○ 掲載論文等リスト

1. 地震観測記録に基づくロックフィダム堤体の速度構造の推定 31
茂木秀則・曾田英揮・荒井大輝・佐藤 信光

2. ダム防災操作支援システムの開発と運用 41
～スーパー台風への対応～
田村 和則・宮本 和樹・草薙 智弘・小森谷 哲夫・今川 新
※ ダム工学会研究発表会 優秀発表賞 受賞

3. ダム防災操作能力向上！ 実践型シミュレータの運用 47
田村 和則・武田 浩一
※ 第11回 全国河川・ダム管理技術検討会 ダム部門 最優秀賞 受賞

4. 地震時における管路内動水圧変化の再現 49
伊藤 俊輔・佐藤 信光・坂本 大樹・吉村 英人・眞鍋 尚

論文

地震観測記録に基づく ロックフィルダム堤体の速度構造の推定

茂木 秀則¹ 曾田 英揮² 荒井 大輝³ 佐藤 信光⁴

Velocity Structure of Rockfill Dam Body Inferred from Earthquake Records

Hidenori MOGI Hideki SODA Daiki ARAI Nobuteru SATO

本研究では阿木川ダム（独立行政法人水資源機構・岐阜県恵那市）における地震記録に NIOM 法を適用して、堤体内の地震波伝播速度を検討した。その結果、地震計間の平均的な S 波速度は、(1) コアゾーン上部で 420~450 m/s、下部で 520~540 m/s、(2) 上流側ロックゾーンでは 480~500 m/s と推定され、水平 2 成分間の偏向異方性がみられること、一方、(3) 下流側ロックゾーンでは 580 m/s 程度で比較的大きい値を示し、偏向異方性も認められないこと、(4) 推定された P 波速度と S 波速度の分布は 1999 年に実施された PS 検層結果と整合することなどを示した。

キーワード: ロックフィルダム, 阿木川ダム, 堤体の速度構造, NIOM 法

1. はじめに

土は非線形化する歪みレベルが小さく、間隙水圧の変化やセメンテーションなどによる時間的な剛性変化も生じるため、室内実験や理論解析だけから土構造物の地震時の挙動を正確に推定することは難しい。したがって、地震観測記録に基づいてフィルダム堤体の剛性などの物性値を把握していくことが望ましい。強震記録に基づいて堤体の剛性やその変化を論じた研究として、佐々木ら¹⁾、Yasuda and Matsumoto²⁾、また、近年では、大町、田原^{3,4)}、佐藤ら⁵⁾、黒田ら⁶⁻⁸⁾、茂木ら^{9,10)}などが行われている。例えば、大町らは、荒砥沢ダムにおける 2008 年岩手・宮城内陸地震とその前後のダム堤体内の地震観測記録の位相差から堤体内の伝播速度を求め、(1) コアの S 波速度が本震以前の値である 500 m/s から本震時には 200 m/s (上下流方向成分)~300 m/s (ダム軸方向成分) まで低下したこと、(2) 本震以前の S 波速度に回復するまでに 1 年以上を要したことなどを明らかにしている^{3,4)}。また、このような地震観測記録に基づく堤体内の地震波の伝播時間や伝播速度のモニ

タリングによってフィルダム堤体の維持管理にも有効な情報が得られるものと考えられている⁶⁻¹⁰⁾。一方で、さまざまな堤高や形式が存在するフィルダムのバリエーションに比べて検討例はごく限られており、今後とも同様の知見の蓄積が必要である。

本研究では、川上らによる NIOM 法^{11,12)}を用いた地震波の伝播速度解析をフィルダムの維持管理手法の一つとして展開することを目的に、阿木川ダム（独立行政法人水資源機構・岐阜県恵那市）¹³⁾における地震観測記録に NIOM 法を適用して、堤体内の P 波と S 波の伝播時間を求めた。また、得られた伝播時間から堤体内の速度構造を推定するとともに、阿木川ダムにおいて湛水前の 1988 年と湛水後の 1999 年に実施された PS 検層結果と比較した。

2. 阿木川ダムの地震観測記録と PS 検層

阿木川ダムは 1990 年竣工、堤高 101.5 m、堤頂長 362.0 m の中央コア型ロックフィルダムである。図-1 に、阿木川ダムの標準断面図と縦断面図¹³⁾を示す。本研究

¹ 埼玉大学 理工学研究科 准教授

² (独)水資源機構 総合技術センター チーフ

³ 前田建設工業株式会社

⁴ (独)水資源機構 総合技術センター 次長

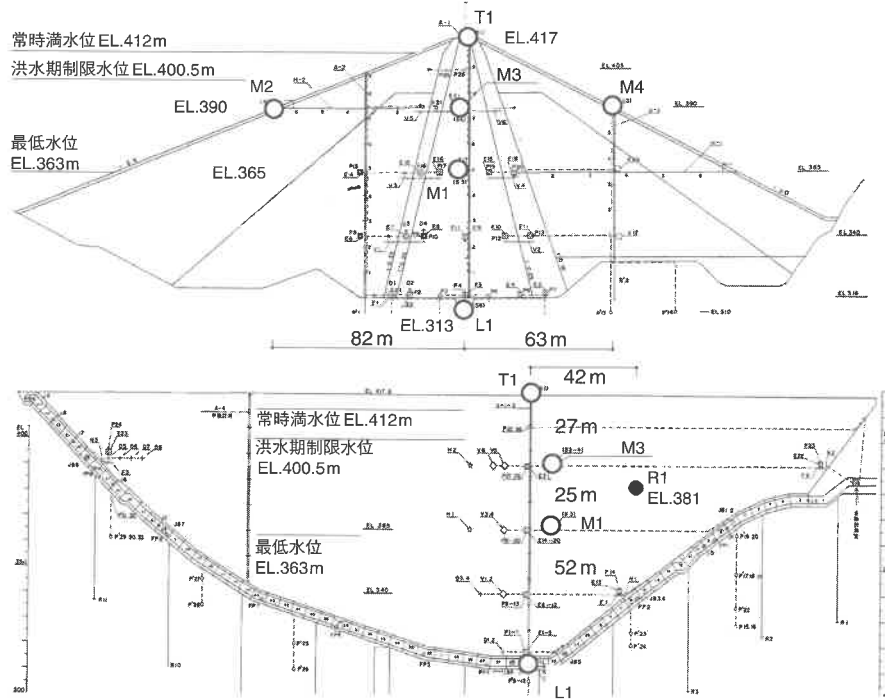


図-1 阿木川ダムの標準断面図と縦断面図¹³⁾



図-2 右岸岩盤の掘削状況。写真右手（上流側）の地山の頂上部分に岩盤地震計 R1 が設置されている。

では、堤体中央部の監査廊 L1 (EL.313 m)、コア内 M1 (EL.365 m), M3 (EL.390 m), 堤頂 T1 (EL.417 m) の 4 点, 上流側法面 M2 (EL.390 m), 下流側法面 M4 (EL.390 m), 岩盤部 R1 (EL.381 m) の計 7 点の地震計による地震記録を解析した。図-2 に, 施工時の右岸地山の掘削状況を示す。岩盤部 R1 (EL.381 m) は写真右側（上流側）に掘削せずに残された地山上に位置している。

表-1 に, 解析を行った 2001/3/24~2004/1/6 までの地震記録の地震諸元¹⁴⁾ と貯水位を示す。阿木川ダムでは, 5 月に貯水位が最も高くなり (例年 EL.405~410 m), 9 月下旬に水位が最も低くなるのが一般的な貯水位のパターンである。最低貯水位は年によって異なるが, 本

論文の解析期間中の最低貯水位は 2002 年 10 月 1 日の EL.386.89 m であった。

阿木川ダムでは堤体 PS 検層調査のための観測孔 (塩化ビニル管) が上流側ロックゾーン (H-1・孔口標高 EL.401 m), 下流側ロックゾーン (H-3・EL.396 m), コアゾーン (H-2・EL.417.5 m) に設けられており, 盛立段階 (1987 年 2 月, EL.370 m, 堤高の 53%), 盛立完了後湛水前の 1988 年 2 月ならびに 1999 年 10 月にダウンホール法による PS 検層が実施されている^{15,16)}。加振はロックゾーンがカケヤ, コアゾーンでは重錘を用いた水平/鉛直打撃によるもので, 1 m ごとの P 波と S 波の伝播速度が計測されている。これらの結果は堤体の動

表-1 解析を行った地震記録の地震諸元¹⁴⁾と貯水位

地震発生日時 (JST)		深さ (km)	M	震央距離 (km)	震央地名	L1 最大加速度 (cm/s ²)			貯水位 EL. (m)
年月日	時刻					上下流	ダム軸	鉛直	
2001/03/24	15:27:54.50	46.5	6.7	455.6	AKINADA SETONAIKAI	0.2931	0.2752	0.3967	403.47
2001/04/03	23:57:12.43	30.3	5.3	75.0	CENTRAL SHIZUOKA PREF	3.3130	3.1265	3.2866	404.22
2001/04/04	00:04:33.23	31.3	4.1	75.0	CENTRAL SHIZUOKA PREF	0.6809	1.0091	0.3688	404.27
2001/04/16	19:05:18.03	13.6	4.2	137.1	WESTERN FUKUI PREF	0.2626	0.2620	0.3984	404.59
2001/04/25	23:40:08.39	39.3	5.8	551.9	HYUGANADA REGION ?	0.0500	0.0421	0.0381	404.38
2001/05/19	00:35:51.76	9.6	3.7	44.2	WESTERN NAGANO PREF	0.5430	0.7693	0.4626	401.79
2001/05/31	01:52:00.28	30.5	4.3	77.9	CENTRAL SHIZUOKA PREF	0.4876	0.5103	0.3463	400.14
2001/06/01	00:41:45.83	30.3	5.0	78.0	CENTRAL SHIZUOKA PREF	2.9130	2.6350	1.3395	400.01
2001/06/01	11:16:42.04	29.8	4.3	76.4	CENTRAL SHIZUOKA PREF	0.9346	0.8756	0.5100	*
2001/06/03	11:33:43.18	29.8	4.5	77.2	CENTRAL SHIZUOKA PREF	1.2198	1.2327	0.6266	399.59
2001/06/03	21:01:06.41	29.2	3.9	77.5	CENTRAL SHIZUOKA PREF	0.3663	0.5357	0.2307	*
2001/07/20	06:02:36.23	55.2	5.0	229.9	SW IBARAKI PREF	0.1580	0.1168	0.1384	398.51
2001/08/25	22:21:25.12	8.2	5.4	163.5	Near KYOTO PREF	0.3761	0.3562	0.3973	400.03
2001/09/22	18:10:57.02	38.2	4.0	61.0	CENTRAL AICHI PREF	0.5806	0.6221	0.4788	399.22
2001/09/27	18:14:50.40	15.8	4.3	67.8	MIKAWA BAY REGION	1.2354	1.2089	1.2529	398.46
2001/12/08	04:07:39.75	24.4	4.6	155.9	EASTERN YAMANASHI PREF	0.1772	0.2496	0.1718	402.98
2001/12/09	13:06:30.77	6.9	4.7	196.5	NEAR NIJIMA ISLAND	0.2011	0.3569	0.2278	402.87
2002/04/11	23:16:08.95	39.9	4.1	61.2	MIKAWA BAY REGION	0.2484	0.2759	0.3278	406.19
2002/04/28	10:34:22.88	55.6	4.1	146.6	NORTHERN MIE PREF	0.2700	0.2207	0.2449	406.67
2002/05/12	18:17:43.21	36.7	3.9	55.7	NE AICHI PREF	0.6317	0.6738	0.3615	404.05
2002/06/29	02:19:33.01	589.0	7.0	1036.1	NEAR VLADIVOSTOK	0.0976	0.0801	0.1691	398.38
2002/07/06	06:58:35.57	45.0	4.1	59.1	SW GIFU PREF	0.8755	0.9102	1.0731	398.51
2002/07/24	05:05:30.35	30.0	5.9	481.4	E OFF FUKUSHIMA PREF	0.1208	0.1139	0.1306	400.01
2002/08/03	08:11:40.43	448.9	6.2	706.2	NEAR TORISHIMA IS ?	0.0307	0.0522	0.0321	399.94
2002/08/11	07:56:18.42	41.4	4.1	78.3	HAMANAKO LAKE REGION	0.3221	0.3223	0.1832	399.63
2002/08/18	09:01:01.82	11.5	4.7	137.5	CENTRAL FUKUI PREF	0.2596	0.1590	0.1991	399.62
2002/08/19	20:01:01.19	580.0	6.7	7741.6	FIJI REGION ?	0.0255	0.0285	0.0556	399.64
2002/08/19	20:08:24.31	675.0	7.0	7720.5	SOUTH OF FIJI ?	0.0242	0.0283	0.0523	*
2002/09/04	18:06:13.41	38.5	4.3	98.3	SHIGA GIFU BORDER REGION	0.5442	0.5044	0.5127	394.17
2002/09/16	10:10:49.86	9.6	5.5	334.5	EASTERN TOTTORI PREF	0.1201	0.1165	0.0752	390.93
2002/09/22	09:36:23.95	49.2	4.0	19.4	SE GIFU PREF	0.7552	0.8117	0.7088	389.42
2002/11/03	12:37:43.62	45.8	6.3	568.1	KINKAZAN REGION ?	0.1116	0.1240	0.0888	392.39
2002/11/04	13:36:00.02	35.2	5.9	612.4	HYUGANADA REGION	0.0625	0.0428	0.0507	392.40
2002/11/17	13:53:56.11	496.0	7.0	1516.9	SOUTHERN SEA OF OKHOTSK	0.0931	0.0773	0.1562	392.43
2002/12/04	08:09:34.70	7.8	4.5	51.8	WESTERN NAGANO PREF	0.3590	0.4612	0.3396	391.18
2003/01/19	04:50:26.45	44.6	5.6	173.0	SE OFF KII PENINSULA	0.1216	0.1247	0.1695	393.38
2003/02/07	13:06:44.04	38.3	4.1	55.7	CENTRAL AICHI PREF	0.2974	0.2594	0.2678	395.11
2003/03/04	23:43:33.55	34.1	3.9	56.8	NE AICHI PREF	0.1190	0.0915	0.1065	399.95
2003/03/13	21:04:56.02	14.2	4.2	132.2	WESTERN FUKUI PREF	0.2390	0.2807	0.3408	401.24
2003/03/27	14:53:34.96	41.5	3.8	38.6	CENTRAL AICHI PREF	0.7931	0.7745	0.6352	402.47
2003/05/12	00:57:06.08	46.9	5.3	244.9	SOUTHERN IBARAKI PREF	0.1298	0.1536	0.0866	404.04
2003/05/18	03:23:25.10	7.2	4.7	51.4	WESTERN NAGANO PREF	0.8182	0.7316	0.8062	402.86
2003/05/26	18:24:33.42	72.0	7.1	531.3	NORTHERN MIYAGI PREF	0.3892	0.3631	0.3608	401.26
2003/07/26	07:13:31.52	11.9	6.4	469.3	NORTHERN MIYAGI PREF	0.0763	0.0634	0.0735	400.03
2003/07/27	15:25:34.26	487.0	7.1	1274.7	SOUTHERN SIBERIA	0.0500	0.0462	0.0718	400.00
2003/10/05	00:29:15.49	12.6	4.5	66.2	NORTHERN GIFU PREF	0.6535	1.0723	0.5470	400.05
2003/10/31	10:06:30.67	33.4	6.8	540.5	SE OFF MIYAGI PREF ?	0.1668	0.1529	0.1463	399.97
2003/11/12	17:26:42.63	395.5	6.5	253.8	SE OFF KII PENINSULA	0.0859	0.1210	0.1634	400.04
2003/11/15	03:43:51.64	48.4	5.8	354.4	E OFF IBARAKI PREF	0.0772	0.0368	0.2873	399.97
2003/12/23	14:34:40.65	9.3	4.4	104.4	SHIGA GIFU BORDER REGION	0.2320	0.2057	0.2339	401.43
2004/01/06	14:50:52.04	37.5	5.4	149.4	SE OFF KII PENINSULA	0.4558	0.4629	0.4883	401.79

的物性に関する基本情報として耐震照査などに活用されている¹³⁾。本研究では、地震記録の NIOM 解析から推定される伝播速度と 1988 年 2 月 (湛水前) と 1999 年 10 月の PS 検層結果を比較した。

3. 解析手法

本研究で用いた NIOM 法^{11,12,17)} について概要を記す。同時観測されたアレーの 2 点の観測記録を $f(t)$, $g(t)$ とする。ここで、 $f(t)$ を下方の地震計の記録、 $g(t)$ を上方の地震計の記録とする。この 2 つの記録の振動数領域の

関係は、伝達関数 $H(\omega)$ を用いて以下のように関連づけることができる。

$$G(\omega) = H(\omega)F(\omega), \quad F(\omega) = H^{-1}(\omega)G(\omega) \quad (1)$$

ここで、 ω は角振動数、 $F(\omega)$, $G(\omega)$ は、それぞれ $f(t)$, $g(t)$ のフーリエ変換である。

$y_g(t)$ を下の点の波形を単純化された入力パルス波形 $x(t)$ に置き換えたときの上の点の波形、 $y_f(t)$ を上の点の波形を $x(t)$ に置き換えたときの下の点の波形とし、それぞれのフーリエ変換が次式を満たすものとする。

$$Y_g(\omega) = H(\omega)X(\omega), \quad Y_f(\omega) = H^{-1}(\omega)X(\omega) \quad (2)$$

以降では、上記のように入力として置き換えに用いる別の波形 $x(t)$ とそのフーリエ変換 $X(\omega)$ を「入力モデル」、また、式(2)で算定される出力 $y_g(t)$, $y_f(t)$ とそのフーリエ変換である $Y_g(\omega)$ と $Y_f(\omega)$ を「出力モデル」と呼ぶ。このとき、入力パルス波形として時刻 0 で単位振幅 ($x(0) = 1$) をとる条件の下、より単純化されたパルス形状の入力モデルとそれに対応する出力モデルを求めるために、入力モデル $x(t)$ と出力モデル $y_f(t)$, $y_g(t)$ ならびにこれらの時間微分である $dx(t)/dt$ と $dy_f(t)/dt$, $dy_g(t)/dt$ のフーリエ振幅の自乗和を最小化する $X(\omega)$ を求めると次式が得られる。

$$X(\omega_i) = \frac{1}{\Delta\omega \sum_{i=0}^N \frac{\varepsilon_i}{(1+k\omega_i^2)(1+|H(\omega_i)|^2+|H^{-1}(\omega_i)|^2)}} \quad (3)$$

$$Y_g(\omega_i) = H(\omega_i)X(\omega_i), \quad Y_f(\omega_i) = H^{-1}(\omega_i)X(\omega_i)$$

ここで、 $\varepsilon_0 = 1$, $\varepsilon_\ell = 2$, ($\ell \neq 0$), ω_i は離散フーリエ変換における i 番目の角振動数、 $\Delta\omega$ は角振動数の増分、 N は角振動数の総数を表す。また、 k は $x(t)$, $y_g(t)$, $y_f(t)$ に対する $dx(t)/dt$, $dy_g(t)/dt$, $dy_f(t)/dt$ の重み係数で、本研究では $k = 0.0001 \text{ s}^2$ とした。なお、式(3)にみるように、観測記録の持つ波動論的な特性は 2 点間のスペクトル比 $H(\omega)$ として入出力モデルの算定に用いられている。

式(3)をそれぞれフーリエ逆変換すると、時間領域の入出力モデル (すなわち、単純化されたパルス波形) として、 $x(t)$, $y_g(t)$, $y_f(t)$ が得られる。なお、本アレー観測記録の時間ステップは 0.01 s であるが、 $X(\omega)$, $Y_g(\omega)$, $Y_f(\omega)$ に、それぞれ 0 の値を付加してデータ数を 16 倍に増やしてからフーリエ逆変換することで、得られる入出力モデルの時間ステップを 1/16 (6.25×10^{-4} s) に内挿した。これは、時刻歴波形のスペクトル解析において用いられる「後続の 0」と同様の算法である。

4. NIOM 解析結果

4.1 入出力モデル

図-3 に、NIOM 解析によって得られた入出力モデルの例を示す。用いた地震記録は 2002/9/22 9:36:34、岐阜県南東部 M 4.0、深さ 49.2 km、震央距離 19.4 km によるもので、(a) 堤頂 T1-コア内 M3 (鉛直距離 27 m)、(b)

上流側法面 M2-監査廊 L1 (鉛直距離 77 m)、(c) 岩盤部 R1-監査廊 L1 (鉛直距離 68 m) の結果である。図の左から順に上下流方向成分、ダム軸方向成分、鉛直成分の結果を示す。図中、太実線が下の観測点の波形を入力モデル $x(t)$ (図中、細実線) に置き換えたときの上の観測点の出力モデル $y_g(t)$ 、細破線が上の観測点の波形を入力モデル $x(t)$ に置き換えたときの下の観測点の出力モデル $y_f(t)$ を示す。

たとえば、図-3(a)の上下流方向成分の結果では下の観測点 (M3) に時刻 0 で単位振幅をもつ入力モデル $x(t)$ (図中細実線) が現れるとき、上の観測点 (T1) では太実線のような波形が生じることを示しており、M3 から T1 までの波動伝播に 0.0694 s を要することが読み取れる。同様に、ダム軸方向成分では伝播時間が若干小さく 0.0638 s、鉛直成分では 0.0275 s を要することが分かる。なお、鉛直成分は波動の進行方向の振動成分であるため、主に P 波による波動伝播を表している。また、(a) T1-M3 間の入出力モデル $y_g(t)$ には、負の時間にも比較的明瞭なピークが見られる。 $y_g(t)$ は下の点の波形を時刻 0 で単位振幅となるパルス波形に置き換えた場合の上の点の波形を表しているため、負の時間のピークは下の点よりも上の点に早く波動が伝播していることを示す。このことから、負の時間のピークは下向きに伝播する反射波を表すピークと考えられる。また、(b), (c) では負の時間のピークが明瞭でないことから、T1-M3 間の地震波形には他の区間と比べて反射波が多く含まれているものと考えられる。また、出力モデル $y_f(t)$ では、(a) 堤頂 T1-コア内上 M3 の上下流成分で明瞭なピークを示さないのに対し、ダム軸方向成分 (図中破線) では、 $y_g(t)$ のピークを与える時刻 0.0638 s に対応する負の時刻付近にピークを示していることが分かる。 $y_f(t)$ の正の時刻のピークに対応する $y_g(t)$ の負の時刻のピークにおけるそれぞれの振幅の比 $y_{f\text{peak}}/y_{g\text{peak}}$ はパルスの増幅特性を表す¹⁷⁾ ことから、ダム軸成分よりも上下流成分の方が、M3 地震計の位置と比べて堤頂 T1 における地震動がより増幅されることを示唆するものと考えられる。

上流側法面 M2 地震計ならびに岩盤部 R1 地震計は L1 地震計に対して鉛直線上にない (水平距離は、それぞれ L1 地震計から 82 m, 42 m) が、図-3(b), (c) にみるよう

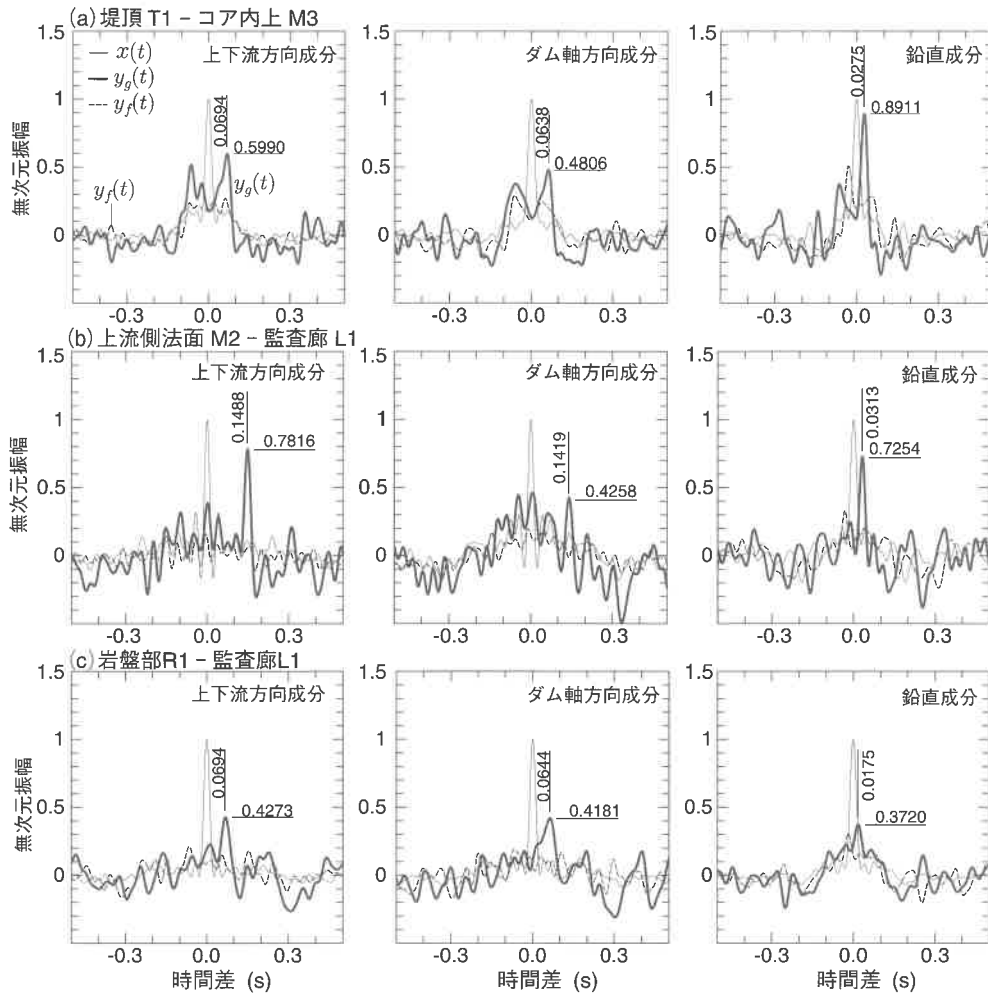


図-3 NIOM 解析によって得られた出力モデルの例。解析地震は 2002/9/22 9:36:34, 岐阜県南東部 $M4.0$, 深さ 49.2 km, 震央距離 19.4 km。

に監査廊 L1 間との入出力モデルにおいても、出力モデルには明瞭なピークが見られ、伝播時間の読み取りには問題がないことが分かる。なお、このように鉛直線上にない地震計間の地震波の伝播速度（後述）についても、2点間の最短距離ではなく、鉛直距離を求められた伝播時間で除して求めた（すなわち、鉛直方向の波動伝播を仮定している）。

4.2 伝播時間

図-4 に、2001 年から 2004 年までの地震記録の解析から得られた伝播時間を示す。伝播時間は出力モデル $y_g(t)$ (図-3 中の太実線で示す出力モデル) から読み取ったものである。(a)~(c) が堤体中央の鉛直アレー部分の 3 区間、(d), (e) が法面の記録を用いたロックゾーンの結果、(f) が岩盤部の結果である。図中の●, ■, ▲の記号は、それぞれ上下流方向成分、ダム軸方向成

分、鉛直成分のもので、図中の横線は伝播時間の平均値を示す。図中、ピークの明瞭でないものについては白抜の記号で示している。阿木川ダムの観測記録には比較的遠地の地震記録が含まれており、このような地震では明瞭なピークを示さない傾向が認められた。このような明瞭でないピークや他の地震の結果と大きく外れたピークの伝播時間が平均値に影響しないようにするため、平均値の算定にはピークの振幅が 0.02 よりも大きくかつ適当な範囲（例えば T1-M3 間では水平成分が 0.05~0.08 s, 鉛直成分では 0~0.05 s）にあるデータのみを用いた。なお、遠い地震で特に明瞭なピークを示さない原因として、阿木川ダムにおける主要動が表面波による場合が多いためと考えられるが、震源深さとの兼ね合いもあるため、この条件を単純に震央距離だけで与えることはできない。

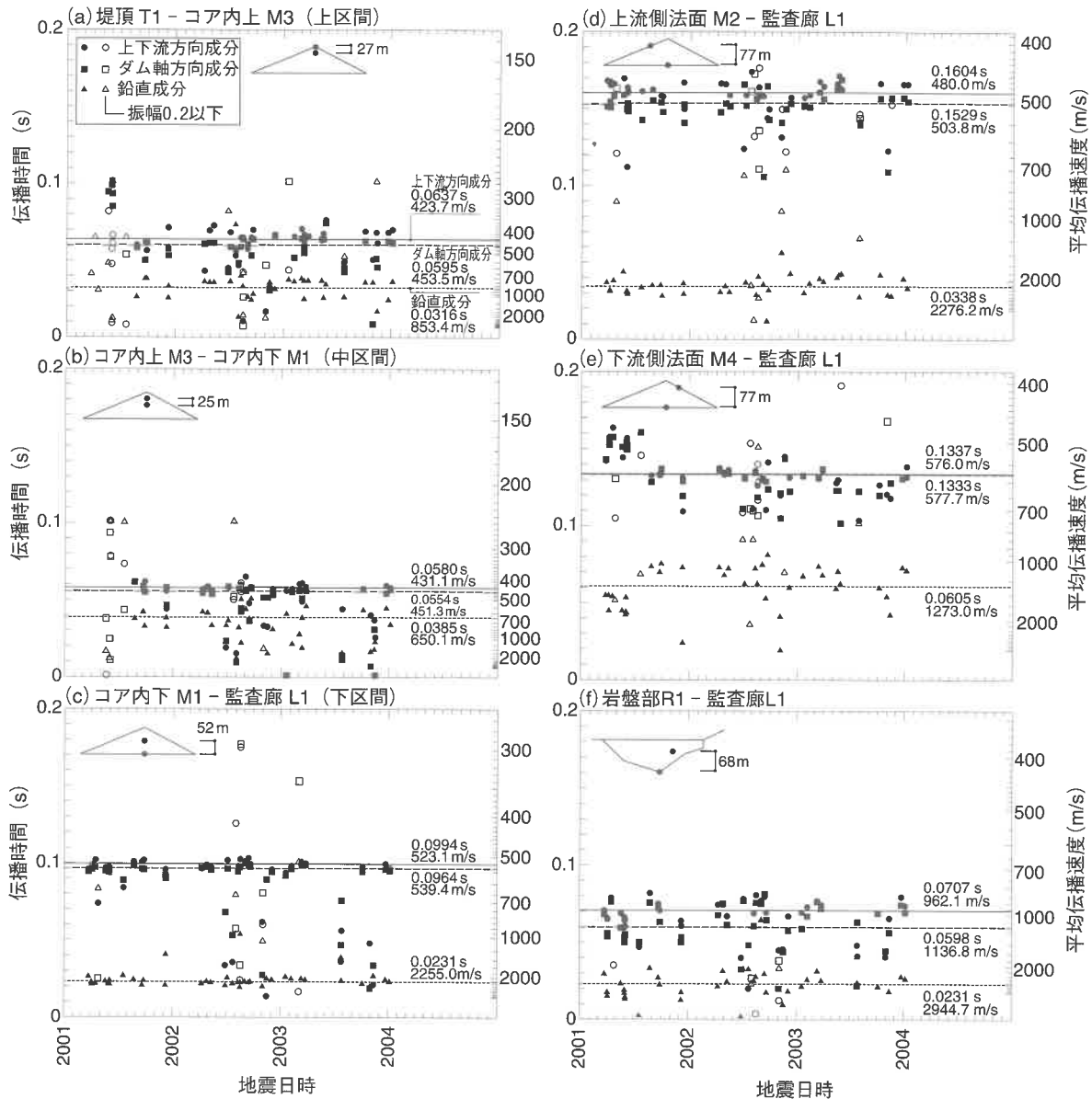


図-4 NIOM 解析による地震波の伝播時間と区間平均伝播速度

平均的な S 波速度を見ると、図-4(a)~(c)のコア内の結果では上区間で上下流方向 424 m/s、ダム軸方向 454 m/s となり、上下流方向に振動する S 波の伝播速度が小さい偏向異方性が見られる。また、下区間では上下流方向 523 m/s、ダム軸方向 539 m/s となり、堤頂からの深さが増加（すなわち、上に載る土量が増加）することによる拘束圧の上昇に伴う S 波速度の増加が見られる（なお、著者らは深さの変化に伴う密度の変化はほとんどないものと考えており、多少の密度変化がある場合であっても、拘束圧の増加に対する密度変化の影響は無視しうるものと考えている）。一方、中区間は上区間と比べて拘束圧が大きいため S 波速度は上区間よりも

大きくなるものと考えられるが、上区間とほぼ同じ S 波速度が得られた。これは、NIOM 解析の結果のばらつきが大きいことを第一に考慮すべきであるが、コアゾーンの上区間は幅が狭く、伝播速度が大きいフィルタゾーンの影響を受けている可能性があり、今後、コアおよびフィルタゾーン内の波動伝播性状について検討する必要もあるものと考えられる。

図-4(d), (e)に示す法面の結果では、上流側では上下流方向 480 m/s、ダム軸方向 503 m/s で、コアの伝播速度より多少大きい程度であるが、下流側では上下流方向 576 m/s、ダム軸方向 578 m/s と比較的大きい値を示すこと、水平 2 成分の伝播速度がほぼ同じであること

が指摘できる。下流側ロックゾーンに比べて上流側ロックゾーンの S 波速度が小さい理由として、上流側ロックゾーンの飽和による剛性低下等が推定されるが、今後の詳細な検討が必要である。

コアゾーンや上流側ロックゾーンにおいて、ダム軸方向成分よりも上下流方向成分の伝播速度が若干小さい値を示す偏向異方性がみられる。コアゾーンの偏向異方性は徳山ダムの地震記録の NIOM 解析結果にもみられる²⁰⁾。解析結果のばらつき等も踏まえ、今後とも偏向異方性について検討していく必要がある。

なお、供用中のロックフィルダムにおけるコアゾーンや上下流ロックゾーンや振動の方向による伝播速度の違いについては地震記録の NIOM 解析により初めて検出された事情があり、同様の事象が他ダムにおいてもみられるか、今後とも検証していく必要があるものと考えている。

また、P 波速度については下流側の 1,273 m/s に対して、上流側で 2,276 m/s と非常に大きい値を示すが、これは間隙水による圧縮剛性の増加によるものと考えられる。(f)岩盤部では S 波速度は 960~1,150 m/s で、ロックフィルダムサイトの基礎岩盤の物性値として妥当と考えられる値が得られた。

5. 速度構造の推定

5.1 コアゾーン

堤体中央部の鉛直アレーにおける伝播時間に基づいて、コアゾーンにおける S 波速度と P 波速度の深さ方向の分布を推定した。澤田式¹⁸⁾などの回帰式では堤体の S 波速度などが深さの関数として表されること、また、室内実験の結果に基づき土のせん断弾性係数 G が

$$G = AF(e)(\sigma'_0)^{1/2} \quad (4)$$

の形式でモデル化(ここで、 A は定数、 $F(\cdot)$ は間隙比 e の関数、 σ'_0 は拘束圧)される¹⁹⁾ことが多いことを考慮し、せん断弾性係数 G が簡易的に $G \propto z^\beta$ と書けるものと仮定した。ここで、 z は直上の堤体表面までの鉛直距離、 β は未知定数である。このとき、 $G = \rho V^2$ (ρ は密度)より、伝播速度 V は未知定数 α 、 β を用いて次の形式で表すことができる。

$$V(z) = \alpha z^{\beta/2} \quad (5)$$

式(5)を用いると、堤頂からの深さ Z_2 から Z_1 ($Z_2 > Z_1$)

までの地震波の伝播時間 t は次式で表される。

$$\begin{aligned} t(Z_2, Z_1; \alpha, \beta) &= \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{1}{V(z)} dz \\ &= \frac{2}{\alpha(2-\beta)} \{Z_2^{(2-\beta)/2} - Z_1^{(2-\beta)/2}\} \end{aligned} \quad (6)$$

阿木川ダムのコアゾーンの部分では 3 区間の伝播時間が求められているため、次式の残差 R を最小にする α 、 β を求めた。

$$\begin{aligned} R = \{T_1 - t(Z_2, Z_1; \alpha, \beta)\}^2 &+ \{T_2 - t(Z_3, Z_2; \alpha, \beta)\}^2 \\ &+ \{T_3 - t(Z_4, Z_3; \alpha, \beta)\}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $Z_1 \sim Z_4$ は堤頂からの地震計の設置深さ、 $T_1 \sim T_3$ はそれぞれ地震記録の NIOM 解析による上区間、中区間、下区間における伝播時間の平均値(図-4)である。なお、S 波の伝播時間は上下流方向成分の伝播時間を用い、また、上区間の Z_1 は地震計の埋設深を考慮し 0.3 m とした。式(7)における最適解を $100 \leq \alpha \leq 500$ 、 $0.01 \leq \beta \leq 1$ の範囲を探索した結果、S 波速度、P 波速度として、それぞれ次式が得られた。

$$V_S(z) = 318.0z^{0.221/2} \quad (R = 0.36 \times 10^{-4}) \quad (8)$$

$$V_P(z) = 351.0z^{0.717/2} \quad (R = 0.45 \times 10^{-3}) \quad (9)$$

得られた速度の分布式と NIOM 解析による地震計間の平均伝播速度との比較を図-5 に示す。なお、図-5(a)に示されるように、コアゾーンの P 波速度の区間平均伝播速度は中区間で小さい値が推定されており注意を要する。

5.2 ロックゾーン

上流側法面の M2 地震計ならびに下流側法面の M4 地震計と監査廊 L1 地震計間の伝播時間に基づいてロックゾーンの速度分布を推定した。速度分布は鉛直アレー部分と同様に式(6)で表されるものと仮定した。

ロックゾーンでは 1 区間の解析となるため、2 つの未知数 α 、 β を決定することができない。このため、澤田式¹⁸⁾の $z=0$ での値を α の値とし、得られた伝播時間から、深さの影響を表す β を推定した。なお、澤田式の $z=0$ での値を α の値とすることは、法面からの深さ 1 m における伝播速度を澤田式の $z=0$ での値とすることに相当するため、それ以浅の 1 m 間はこの値の一定値とし、この 1 m を伝播するのに要する時間を NIOM 解析による伝播時間から差し引いて β を算定した。P 波速度の $z=0$ での値は澤田式による S 波速度とポアソン比から

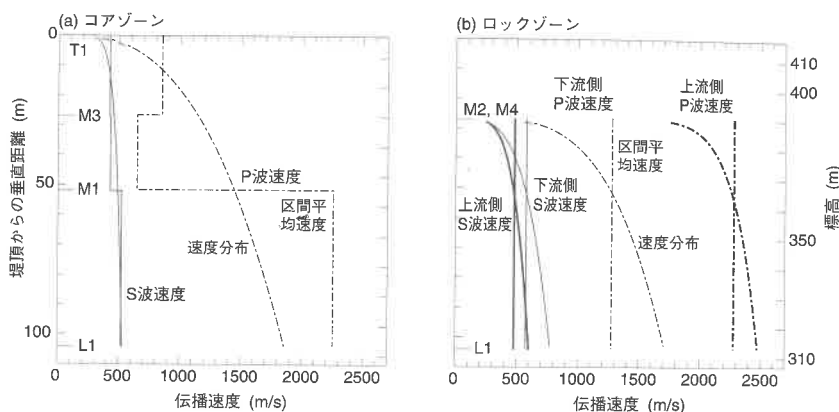


図-5 NIOM 解析による区間平均伝播速度と速度分布式の関係

算出した。

上記の手順により、上流側、下流側ロックゾーンの速度分布として、それぞれ次式が得られた (図-5(b))。

$$V_S(z) = 245.0z^{0.4132/2} \quad (\text{上流側}) \quad (10)$$

$$V_P(z) = 1749.6z^{0.1590/2} \quad (\text{上流側}) \quad (11)$$

$$V_S(z) = 245.0z^{0.5308/2} \quad (\text{下流側}) \quad (12)$$

$$V_P(z) = 547.8z^{0.5237/2} \quad (\text{下流側}) \quad (13)$$

なお、式(11)では下流側の結果と比べて上流側の P 波速度が著しく大きいですが、これは施工上の問題ではなく、4.2 節で述べたように上流側のロック材の間隙が非圧縮性の貯水により満たされているためである。

5.3 PS 検層結果、澤田式との比較

前節で導いた地震波速度の分布式と阿木川ダムにおける PS 検層結果 (湛水前の 1988 年と湛水後の 1999 年に実施) ならびに澤田式による推定値との比較を図-6 に示す。なお、(a) コアゾーンの比較では参考のため、徳山ダムにおける堤頂、コア中段、監査廊における地震記録の NIOM 解析に基づく伝播速度の分布²⁰⁾ も示している。

図-6(a) のコアゾーンの結果を見ると、S 波速度、P 波速度はともに竣工から 10 年を経過した 1999 年に実施されたコアゾーンの PS 検層と整合する結果が得られている。一方、澤田式と比べると S 波速度は堤体上部で大きく、下部では小さい傾向がみられる。また、徳山ダムの解析結果は阿木川ダムの結果と比べて伝播速度が大きいですが、これは主に堤体材料の違いによるものと考えられる。

図-6(b) のロックゾーンの結果では、図-4 で述べたように、下流側と比べて上流側の S 波速度が小さく P 波

速度が大きい特徴が見られるが、この特徴は 1999 年の PS 検層の結果にも見られ、NIOM 解析による結果と PS 検層の結果が一致した傾向を示すことが確認できる。一方で、上流側の S 波速度は PS 検層の値と比べて全体的に若干小さい値を示していることが分かる。この点に関しては、図-4(d) に関して指摘したように、上流側の S 波速度はダム軸方向成分よりも上下流方向成分の方が 5% 程度小さくなっていることも考慮する必要がある。

6. 結論

本研究では、阿木川ダム (独立行政法人水資源機構・岐阜県恵那市) における地震観測記録に NIOM 法を適用して、堤体と基礎岩盤における地震波の伝播時間を検討した。また、得られた伝播時間から堤体内の速度構造を推定した。以下に得られた主な知見を列挙する。

1. コアゾーンの平均的な S 波速度は、上区間で上下流方向成分 424 m/s、ダム軸方向成分 454 m/s、また、上下流方向成分の S 波の伝播速度が小さい偏向異方性が見られた。一方、下区間では、上下流方向成分 523 m/s、ダム軸方向成分 539 m/s を示し、拘束圧の上昇に伴う S 波速度の増加が見られた。
2. 上流側ロックゾーンの平均的な S 波速度は、上下流方向成分 480 m/s、ダム軸方向成分 503 m/s で、コアゾーンの伝播速度より多少大きい値を示し、コアゾーンと同様に偏向異方性が見られる。また、P 波速度は 2,276 m/s と非常に大きな値を示すが、これは貯水の非圧縮性の性質によるものと考えられる。

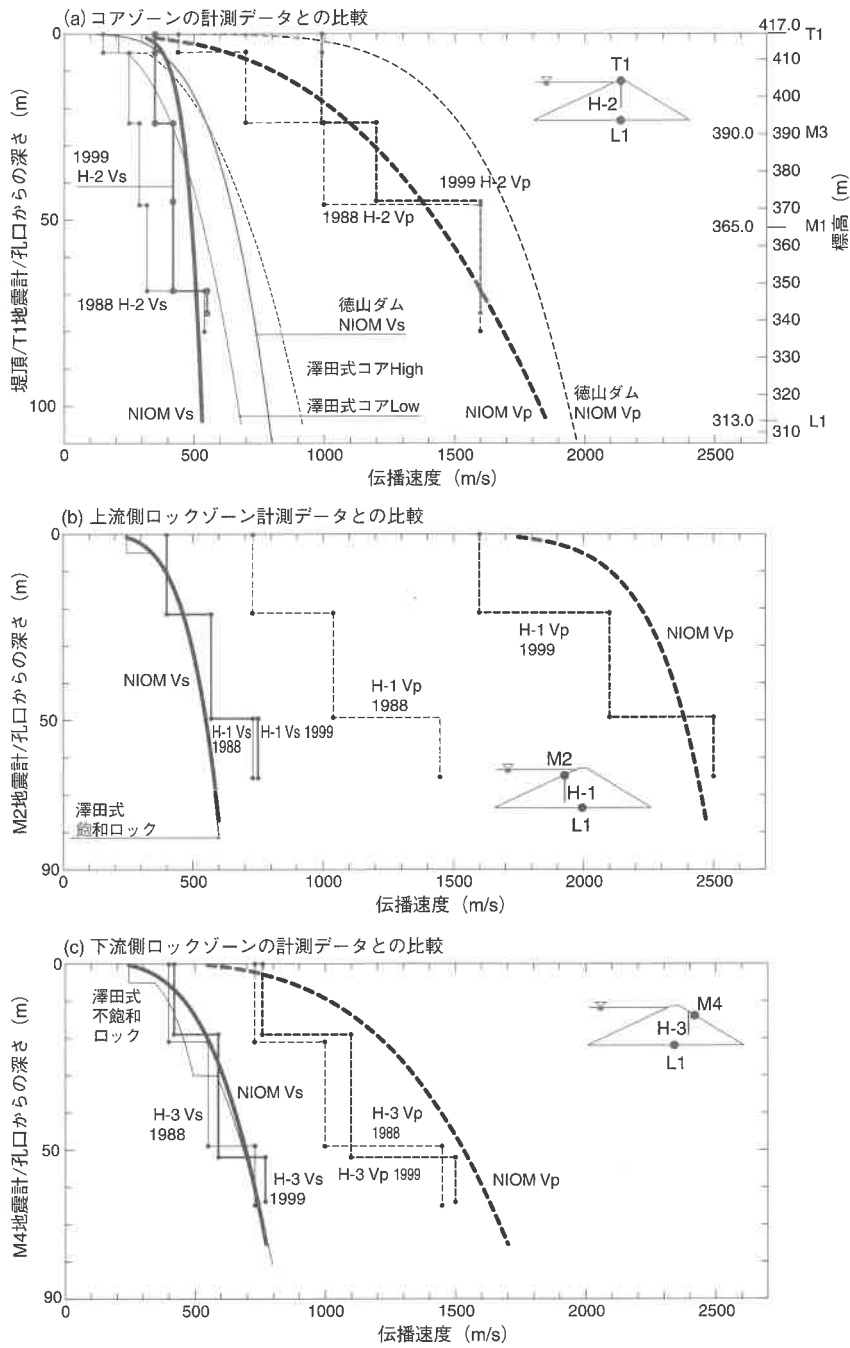


図-6 本研究で得られた速度分布と PS 検層結果，澤田式との比較。(a) コアゾーンの比較では参考として徳山ダムにおける NIOM 解析による速度分布²⁰⁾も示す。

3. 一方，下流側ロックゾーンの平均的な S 波速度は，上下流方向成分 576 m/s，ダム軸方向成分 578 m/s と比較的大きい値を示すとともに，偏向異方性を示さない特徴があることを指摘した。
4. 得られた伝播時間に基づいて P 波速度と S 波速度の深さ方向の分布式を求め，得られた分布式が 1999 年に実施された PS 検層結果と整合することを指摘した。

本研究の実施に際し，独立行政法人水資源機構阿木川ダム管理所稲木敏行所長，宮本和樹所長代理，総合技術センター情報グループ佐野貴之チーフより貴重なご助言とご協力を賜った。記して深謝の意を表す。平成 30 年度ダム工学会研究発表会において有益なご指摘を賜った黒田清一郎博士に深謝の意を表す。本研究では埼玉大学工学部建設工学科川上研究室による NIOM 解析プログラムを使わせていただいた。ご教示，ご助言を頂いた川上英二教授（現名誉教授）ならびに開発に携わられた学生諸氏に深謝の意を表す。

参考文献

- 1) 佐々木康, 西村正夫, 栗原徹郎: 千葉県東方沖地震の加速度記録から推定した長柄ダム堤体の動的物性, 土木研究所資料, 第 2702 号, 1989
- 2) Yasuda, N. and Matsumoto, N.: A study on dynamic deformation and strength properties of rockfill materials and their applicability to the seismic analysis of the embankment dams, *Journal of Research, PWRI*, **32**, 1997
- 3) 大町達夫, 田原徹也: 直下地震の観測記録に基づくロックフィルダムの非線形地震応答特性, 第 54 回地盤工学シンポジウム, 2B, No.039, 2009
- 4) Ohmachi, T. and Tahara, T.: Nonlinear earthquake response characteristics of a central clay core rockfill dam, *Soils and Foundations*, **51** (2), 227–238, 2011
- 5) 佐藤信光, 曾田英揮, 太田垣晃一郎: 実測地震記録による既設ダム堤体の動的特性および物性値の推定と適用, *ダム技術*, **321**, 40–47, 2013
- 6) 黒田清一郎, 増川 晋, 田頭秀和: 土構造物の地震波伝播特性評価と経年変化監視への適用性, *水土の知*, **81** (8), 19–22, 2013
- 7) 黒田清一郎, 田頭秀和, 増川 晋: 農業用フィルダム既設地震計の微小振動観測記録への地震波干渉法の適用と地震波伝播特性の監視, 平成 27 年度ダム工学会研究発表会, 15–20, 2015
- 8) 黒田清一郎, 田頭秀和, 増川 晋, 渡部大輔, 影浦弘樹: 地震観測記録群への繰り返し地震波干渉法の適用に基づく農業用ダムへの地震動の影響評価の試み, 平成 30 年度ダム工学会研究発表会, 6–11, 2018
- 9) 茂木秀則, 曾田英揮, 川上英二, 大町達夫: アースダムにおける長期間にわたる地震観測記録の NIOM 解析と堤体の物性評価, *ダム工学*, **25** (3), 139–149, 2015
- 10) 茂木秀則, 川上英二, 小田優介, 大町達夫: ロックフィルダムにおける長期間にわたる地震観測記録から推定した地震波伝播時間の経時変化, *ダム工学*, **25** (4), 218–219, 2015
- 11) Kawakami, H. and Haddadi, H. R.: Modeling wave propagation by using Normalized Input-Output Minimization (NIOM), *Soil Dyn. Earthq. Engng.*, **17**, 117–126, 1998
- 12) Haddadi, H. R. and Kawakami, H.: Effect of liquefaction on ground motion during the Hyogoken-nanbu earthquake, 1995, in Japan by using NIOM method, *The Effect of Surface Geology on Seismic Motion*, Balkema, **2**, 1015–1022, 1998
- 13) 独立行政法人水資源機構総合技術センター: 平成 28 年度耐震照査 (変形) - 阿木川ダム - 報告書, 総合技術センター報告書, 第 162050 号, 2017
- 14) 気象庁: 地震月報 (カタログ編), <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/hypo.html>
- 15) 瀬古育二, 柏木 順, 青木美樹, 塚本康二, 向後和広: PS 検層調査によるロックフィルダムの堤体材料の動的変形物性の測定, 水資源開発公団試験所報告書, 第 88204 号, 1989
- 16) 応用地質株式会社: 阿木川ダム堤体 PS 検層業務報告書, 1999
- 17) 茂木秀則, 川上英二: ロックフィルダムの地震観測記録に基づく地震波の伝播速度の検討, *日本地震工学会論文集*, **18** (4), 91–110, 2018
- 18) Sawada, Y. and Takahashi, T.: Study on the material properties and the earthquake behaviors of rockfill dams, *4th Japan Earthquake Engineering Symposium*, 695–702, 1975
- 19) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, 1976
- 20) 茂木秀則, 曾田英揮, 田那部直也, 佐藤信光: 長期間の地震観測記録に基づくロックフィルダムの動的物性評価, *ダム工学*, **27** (4), 254–264, 2017

(2019 年 1 月 18 日 受理)

Normalized Input-Output Minimization (NIOM) analysis was conducted for the earthquake records observed at Agigawa Dam in Gifu prefecture, Japan, operated by the Japan Water Agency, and the propagation velocities of the seismic waves in the dam body were closely investigated. The results revealed that (1) the S-wave velocity in the upper and the lower parts of the core zone were 420–450 m/s and 520–540 m/s, respectively, (2) the S-wave velocity in the rock zone on the upstream side was 480–500 m/s, and S-wave polarization anisotropy was found in these results, whereas (3) the S-wave velocity in the rock zone on the downstream side showed larger value (580 m/s), and the polarization anisotropy was not seen, and (4) the distributions of the P- and S-wave velocities obtained in this study were consistent with those observed by the PS logging held in 1999.

Key words : rockfill dam, Agigawa Dam, velocity structure in dam body, NIOM analysis

ダム防災操作支援システムの開発と運用 ～スーパー台風への対応～

Development of New Support System for Dam Discharge Operation in the Event of a Super Typhoon

田村 和則* 宮本 和樹** 草苺 智弘*** 小森谷 哲夫**** 今川 新*****

1. はじめに

近年、平成 29 年 7 月九州北部豪雨や平成 30 年 7 月豪雨、令和元年 8 月の前線に伴う大雨、令和元年台風 15 号、19 号など激甚な気象災害が頻発している。洪水被害、浸水リスクを軽減するために、ダム管理者にはダム運用を高度化して施設の機能を最大限に発揮する防災操作が求められている。このため（独）水資源機構（以下「水機構」という）では、的確な防災操作を実施するため「ダム防災操作支援システム」を開発した。本システムは、ダム諸量、予測雨量及び流出予測情報を自動で取込み、各種ダム放流方式による操作の予測結果を提示し、ダム管理者の最適な防災操作方針の決定を支援するものである。

2. システムを開発した背景

水機構が管理する多目的ダムでは、ダム機能を最大限活用する洪水調節方法の導入可能性について、「ダムの機能を最大限活用する洪水調節方法の導入に向けたダム操作規則等点検要領及び同解説（平成 29 年 7 月国土交通省）¹⁾（以下、点検要領という）」に基づき、「事前放流」、

「異常洪水時防災操作」、「特別防災操作」について、操作規則等の点検を平成 29 年に実施した。

この点検結果を反映し、ダム防災操作の高度化を図るには、時々刻々と変化する予測降雨と実際の降雨状況、ダム下流河川の降雨等による水位の変化、洪水調節容量の活用状況等を総合的に勘案し、関係機関と十分な調整を図りながら、数十時間先を見据えた最適な放流方式を選定し、ダム機能を最大限活用する操作方針を短時間かつスムーズに決定する必要がある。

一方で、ダムの防災業務は、防災計画・防災操作、ダム下流河川への警報、下流河川巡視や関係者へのダム防災操作に関する情報提供・共有等、多岐にわたる。本システムは限られた人員・時間の中、防災業務において最適なダム操作方針の決定を支援するツールとして、単独ダムを対象に開発したものである。

3. 実装したダム

本システムを実装した阿木川ダム（平成 3 年完成、水機構管理）は、木曾川河口から約 110 km 上流で合流する木曾川左支川の阿木川に建設

* 独立行政法人水資源機構 総合技術センター

** 独立行政法人水資源機構 阿木川ダム管理所 所長代理 *** 同 副参事

**** パシフィックコンサルタンツ(株) 国土基盤事業本部 河川部 設計保全室 チーフコンサルタント

***** 同 交通基盤事業本部 情報システム部 統合情報室

された多目的ダムである。阿木川ダムから木曾川合流点までの約9km区間の阿木川は、約2万4千人²⁾が居住する恵那市街地を貫流する(写真-1)。



写真-1 阿木川ダム下流航空写真

阿木川ダムの計画高水波形を図-1に示す。ダム洪水調節は、100年確率降雨に対して、計画高水流量850m³/sのうち730m³/sをダムに貯留し、120m³/sの一定量放流を実施する計画である。

阿木川ダムは、平成3年の管理開始以降28年が経過しており、この間に26回の洪水調節を実施している。

このうち、平成12年に発生した東海豪雨では、ダム流入量約750m³/sを記録し、計画高水流量と同程度の洪水も経験しているが、管理開始以降、阿木川における浸水等被害は発生していない。

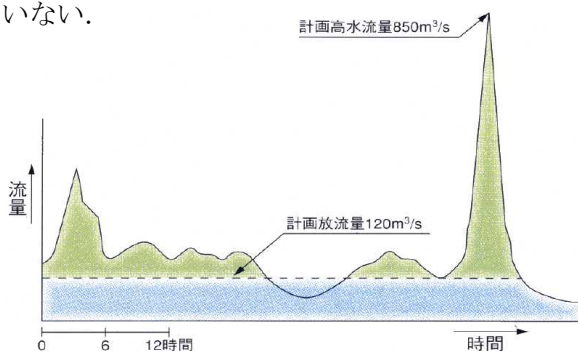


図-1 阿木川ダム計画高水波形

4. 操作支援システムの仕様

本システムは、水機構が開発・運用している分布型流出予測システムから得られる予測雨量・流出予測(72時間先まで)、ダム貯水位や

流入量・放流量などのダム諸量実績データを10分間隔で自動取得(図-2)し、ダム放流計画の提案、計画説明資料及び放流通知・連絡書類作成を実施するシステムである(図-3)。

表-1に本システムの基本機能一覧を示す。

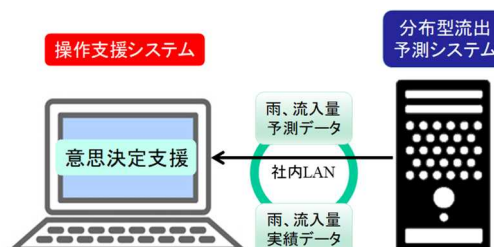


図-2 システム概念図

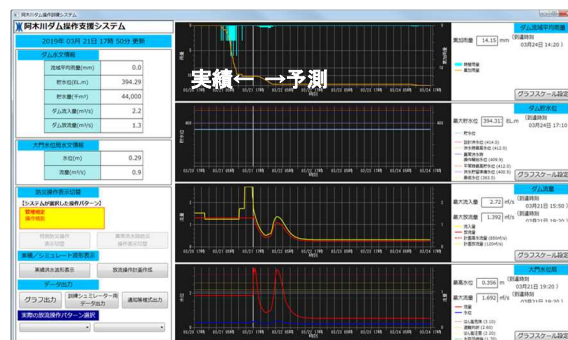


図-3 システムイメージ図

表-1 基本機能の一覧

操作支援機能	異常洪水時防災操作支援機能(7方式)
	特別防災操作支援機能(4方式)
	事前放流支援機能
	施設管理規程に基づく操作の支援機能
データ管理機能	任意目標貯水位・放流量による計算機能
	流入予測システムデータ連携機能(ダム諸量データ・流出予測)
	データ蓄積機能
	訓練シミュレータ用データ出力機能
	グラフ出力機能(ハイト・ハイドログラフ)
	帳票出力機能(放流ステップ(放流量)出力機能: csv形式)
放流通知・連絡書類出力機能	

5. 操作支援システムの機能

(1) 異常洪水時防災操作支援機能

異常洪水時防災操作は、記録的な豪雨によりダムの洪水調節容量が一杯となることが予想される場合に、ダム流入量と放流量を等しくする操作である。

阿木川ダムの異常洪水時防災操作は、「阿木川ダムただし書操作要領」に基づき貯水位に対して放流量を決定する操作が基本であるが、洪水の規模等によっては、洪水調節容量を十分に活用できない場合がある。

本システムの異常洪水時防災操作支援機能は、72時間先までの予測雨量・流出予測情報と24時間前までの実績ダム諸量を自動取得し、点検要領に示されている7方式（表-2）の放流方式を自動的に計算する。

表-2 計算可能な方式一覧

①	異常洪水時防災操作(8割相当水位)
②	異常洪水時防災操作(9割相当水位)
③	異常洪水時防災操作(10割相当水位)
④	必要最小放流方式
⑤	VR方式
⑥	放流曲線逐次見直し方式
⑦	限界操作方式

手法	大門最高水位 (m)	大門最大流量 (m ³ /s)	最大放流量 (m ³ /s)	最高貯水位 (EL,m)
現行異常洪水時の災害操作方式 (操作開始水位E.L.409.9m)	3.2	484	466	411.3
現行異常洪水時の災害操作方式 (操作開始水位E.L.410.9m)	3.1	448	431	411.9
現行異常洪水時の災害操作方式 (操作開始水位E.L.412.0m)	3.0	397	382	412.6
必要最小放流方式	2.4	251	240	414.0
VR方式	3.1	430	412	412.0
放流曲線逐次見直し方式	3.0	411	396	411.7
限界操作方式	3.7	655	633	408.1

図-4 計算結果の表示切替画面

計算結果は、図-4のとおり、方式毎にダム下流河川基準地点の最高水位・最大流量、ダムの最大放流量・最高水位が明瞭に示される。一覧表にすることによって、スムーズな判断がで

き、ダム機能が最大限に発揮される放流方式を選択できる。また、関係機関へ情報共有するための各放流方式におけるハイトグラフ及びハイドログラフ、放流操作に用いる放流ステップ（放流量）は、Excel形式により出力可能な仕様としている（図-5）。

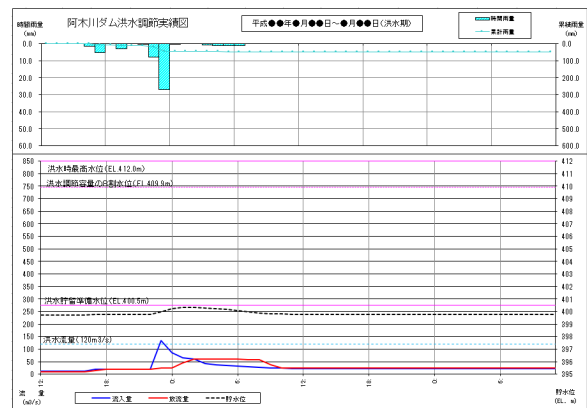


図-5 出力グラフのイメージ

(2) 特別防災操作支援機能

ここでいう特別防災操作は、下流河川で洪水被害が発生した又は発生するおそれがある場合において、洪水の終わりの見通しが相当程度確実と考えられる場合のみに実施するオーバーカットの操作である。

特別防災操作支援機能においても、異常洪水時防災操作支援機能と同様の機能を具備している。なお、放流方式は、点検要領に示されている、適応操作（ピーク前）、適応操作（ピーク後）、必要最小放流方式、VR方式の4方式を採用した。

(3) 事前放流支援機能

事前放流は、予測雨量情報等に基づいて洪水の発生を予測した場合に、事前にダム貯水位を低下させ、利水容量を一時的に治水容量として活用し、ダムの洪水調節機能を向上させるものである。

阿木川ダムでは、「阿木川ダム事前放流実施要領（以下、実施要領という）」を平成23年に制定しており、実施要領に基づき事前放流を実施している。事前放流支援機能は、実施要領に基づく放流操作等を支援し、予測雨量及び流出予測情報を用いて事前放流開始時刻、累計雨量及び予測雨量の変化に応じた貯水位低下・限度水位の提示、これらに係る放流の原則に基づく放流計画を作成する。また、他の支援機能と同様に、ハイエト・ハイドログラフをExcel形式にて出力する機能も具備した。

(4) 施設管理規程に基づく操作の支援機能

異常洪水時や特別防災操作時だけでなく、計画規模以内の洪水時の操作支援機能として、施設管理規程に基づく操作計画も作成できるシステムとしている。この機能は、流出予測情報を基に、放流の原則に従い放流計画を作成するだけでなく、後期放流や予備放流を考慮して、任意の時間の目標貯水位又は目標放流量を設定することにより、貯水位低下操作を支援する機能も具備している（図-6）。

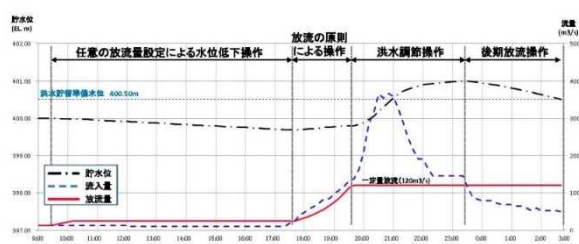


図-6 自動計算される放流計画のイメージ

(5) 付加機能

出水による防災時には各段階において、関係機関への通知・報告が必要となる。本システムでは、関係機関への通知等の様式に、ダム諸量等の数値が自動的に入力され出力できる機能を追加した（図-7）。

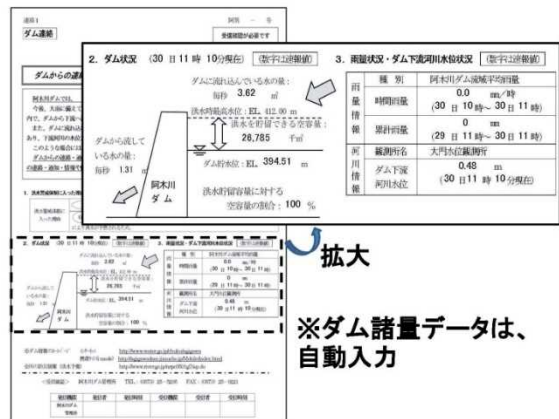


図-7 関係機関への通知

この機能により、防災時の事務的な作業の一部を合理化できる。

また、実洪水における本システムで示されたダム操作データを、先に水機構が開発したダム防災操作訓練シミュレータ³⁾へ出力できる機能も具備しており、本システムが防災操作訓練シミュレータを用いた訓練を向上させる役割も担っている。

(6) 各支援機能の統合的運用

これまで紹介したように、本システムは点検要領に基づいたさまざまなパターンに対応した放流操作支援機能を具備しており、放流計画を複合的に組合せて統合的に運用できる仕様とした。

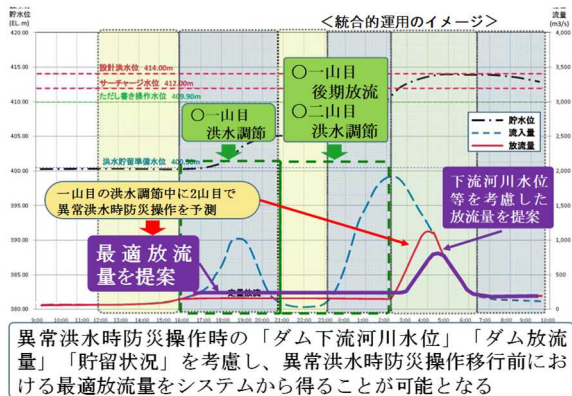
図-8に2山洪水における統合運用した放流計画のイメージ図を示す。

本システムを活用した場合、1山目の洪水調節①を実施している時に、72時間以内に2山目で異常洪水時防災操作を行う予測があれば、異常洪水時防災操作時のダム下流河川水位、ダム放流量・貯留状況を考慮し、洪水調節①における最適放流量をシステムから得ることが可能である。

また、後期放流①時に2山目を考慮した貯水

位低下放流計画，後期放流②における今後の降雨を考慮した貯水位低下放流計画もシステムから得ることが可能である。

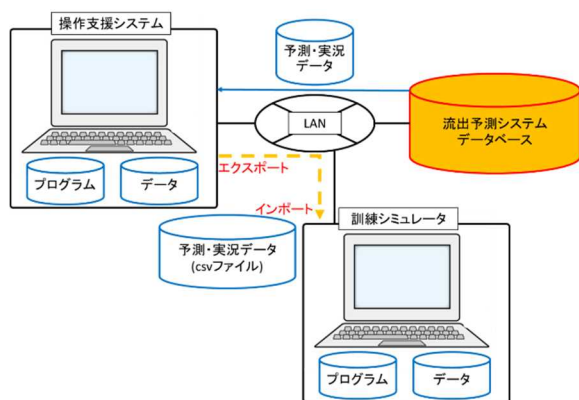
これらの操作についての説明資料も Excel 形式での出力が可能となっている。



図－8 自動計算される放流計画イメージ

6. 防災操作訓練シミュレータとの連携

今回紹介した防災操作支援システムは，水機構が平成 30 年度に開発し，現在職員の訓練に活用している「ダム防災訓練シミュレータ」とも統合を図っている。図－9 に示す形で本システムと防災操作訓練シミュレータが連携することで，さらに高度で効率的なダム管理支援ができるシステムを構築した。



図－9 既存システムとの連携

この連携の利点は，本システムから訓練シミュレータにデータを送信することで，実際の出水前に実務的な訓練が実施出来ることにある。これにより，実際の出水時の操作におけるさまざまな課題を予め職員が確認でき，防災操作時のミスなどを未然に防ぐ効果も期待できる。

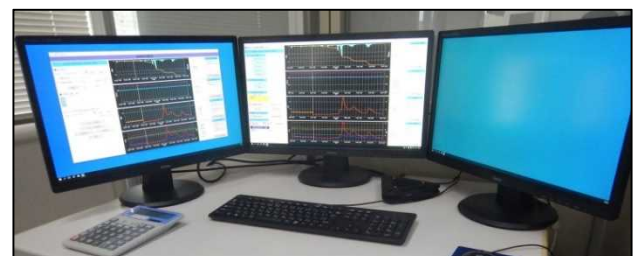
7. 操作支援システムの実用状況

本システムは平成 30 年度に開発し，令和元年度より阿木川ダムの防災操作において実用している（写真－2，写真－3）。現時点において，洪水調節は実施しておらず，洪水に至らない水位維持操作における活用実績のみであるが，改良が必要となる課題等は発生していない。

今後も運用していく中で，実績データを蓄積するとともに，改良点等を見出し，検討する計画である。



写真－2 ダムコンと操作支援システム

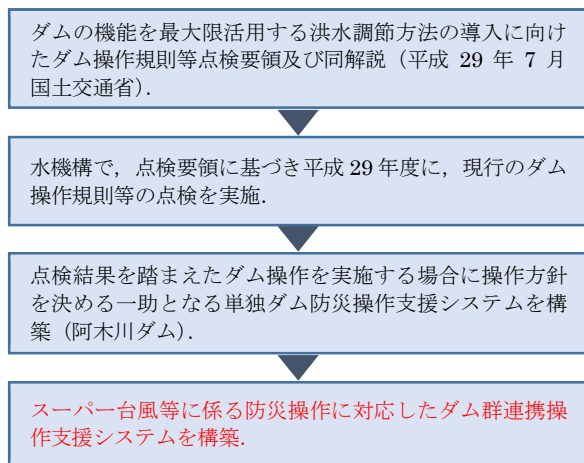


写真－3 ダム操作支援システム

8. 激甚災害防止のための今後の展望

本報告では、単独ダムで活用する防災操作支援システムについて紹介したが、水機構においては、今回開発したシステムをベースとして、より複雑な流域の複数のダムを連携させて洪水調節効果を高める支援システムの開発を現在進めている（図－10）。

このシステムは、降雨予測技術と防災操作の組合せの最適化技術によるもので、スーパー台風等を起因とした想定を超える豪雨に対し、これまでにない長時間のアンサンブル降雨予測情報を活用⁴⁾して洪水調節効果と利水リスク（渇水）をリアルタイムで評価し予測精度を高め、それにより、早い段階から長時間の「事前放流」を実現する。さらに防災操作の組合せの最適化技術によりダム群の連携操作で流域の既設ダム群の有限な貯水容量を最大限に活用することを可能にし、洪水対策を強化することができる。



図－10 激甚災害に備えた今後のダム防災操作支援の展望

開発後は、洪水調節の目的を有する多目的ダムから実装を進め、将来は発電等の利水専用ダムへも展開できるシステムとして効果を高めていきたいと考えている。この技術により長時間先を見通したダムの運用が可能となり、発電の

増電などにも寄与することができる。

9. おわりに

開発したダム防災操作支援システムは、現時点で洪水調節に適用した実績は無いものの、ダム管理者の目線で開発したシステムであり、ダム運用の高度化によるダム機能の最大活用の一助になると考える。また、訓練シミュレータへの出力により、防災操作訓練が容易となり、防災操作の高度化や職員の操作技術向上が図れる。

今後、ダム群連携操作を実施しているダムも含め、本システムの導入ができるよう技術開発に取り組んでいく予定である。

参考文献

- 1) ダムの機能を最大限活用する洪水調節方法の導入に向けたダム操作規則等点検要領及び同解説、国土交通省・国土技術政策総合研究所 河川研究部 水循環研究室、平成 29 年 7 月
- 2) 住民基本台帳、恵那市、平成 31 年 4 月
- 3) 田村和則，加納茂紀，Development of new simulator for training of dam operation and its future outlook，ICOLD-CIGB 2019 SYMPOSIUM
- 4) 木谷 和夫，増田 有俊，野原 大督，角 哲也，ECMWF アンサンブル予測雨量の予測特性及びダム運用への活用方法に関する基礎的検討，水工学論文集 2018

謝辞

本開発は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」（管理法人：防災科研）によって実施された。記して謝意を表する。

第11回 全国河川・ダム管理技術検討会

ダム防災操作能力向上！ 実践型シミュレータの運用

田村 和則* 武田浩一**

* 独立行政法人水資源機構 総合技術センター (発表者)
** 独立行政法人水資源機構 総合技術センター 情報グループ長

Japan Water Agency

■ダム防災操作訓練シミュレータ開発の背景

近年の事例:平成29年7月九州北部豪雨や平成30年7月豪雨、令和元年8月の前線に伴う大雨、令和元年台風15号、19号など異常な豪雨災害が増加

減災のために
柔軟で高度なダム防災操作が求められている。

- 基本的なダム防災操作を冷静に実施するためには実践による判断と操作の豊富な経験が重要。
- 異常洪水時の高度なダム防災操作の技術の習得には、高度な防災操作の場数を踏むことが重要であるが、その機会は限られる。

高度なダム防災操作を短期間で繰り返し習熟できる
新たなダム操作訓練シミュレータを開発

Japan Water Agency

■ダム防災操作シミュレータに実装した機能

- 1 ダム管理用制御処理設備の再現
- 2 過去の出水を再現
- 3 事前放流、特別防災、異常洪水時防災操作等の訓練が可能
- 4 テーム訓練機能
- 5 指揮官モード(タイムライン放流計画立案)
- 6 放流操作方法のガイド機能(未経験者の操作支援)
- 7 放流に伴う貯水位変動と下流河川への影響を反映
- 8 アシスト機能(水位・操作規則違反お知らせ)
- 10 データ出力機能(操作訓練記録レビュー)
- 9 水機構分布型流出予測システムとの連携(事前訓練)
- 11 リアルな出水対応の再現(予測雨量の変化)
- 12 ダム防災操作支援システム(水機構別途開発)と連携

Japan Water Agency

■シミュレータ メイン画面 (PC単体でも出来るようメイン画面に集約)

過去の洪水を再現や異常洪水時防災操作や特別防災操作等、高度な判断が求められる訓練が可能

Japan Water Agency

■ダム管理用制御処理設備の再現 (臨場感のある画面で訓練)

講師が防災操作を指南
議論・計画・操作

チーム訓練状況

Japan Water Agency

■指揮官モード(防災操作タイムライン—高度な操作に対して計画的な放流を策定)

防災操作タイムラインの計画と記録

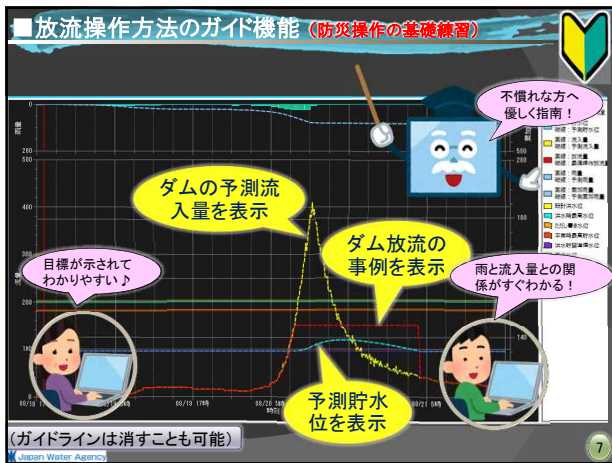
どのような態勢で、いつから放流するかなどの計画を立てて、チーム内で情報を共有する

- 時に注意態勢発令
- 時に通知
- 時に放流警報
- 時に放流

マウスで選択
防災操作計画をチーム内で情報共有

防災操作の計画・実施のタイミングを立案・共有

Japan Water Agency



■導入効果

★さまざまなシチュエーションを繰り返し訓練することで、**高度なダム操作のノウハウを短期間で習熟**

例えば: 2日間の出水を4時間で体感し、**防災操作のノウハウを習得**
 操作内容→事前放流、特別防災、異常洪水時防災操作等を訓練

★異常洪水時防災操作や特別防災操作等、高度な判断が求められる**ノウハウを習得**できる

★**チーム訓練**では、操作方針、判断のタイミング、関係機関の連絡等、**議論しながら実践レベルのノウハウを習得**

★**ダム防災操作支援システム(水機構別途開発)**との連携により、**防災操作の高度化**。

Japan Water Agency

■研修・訓練のアンケートの結果

- 受講満足度 **9割以上が「満足」と回答**
- 受講者の声:
 - **リアルなシミュレーション**で経験したことがない防災操作を体感。**非常に有意義な訓練。**
 - **異常洪水時防災操作の経験が非常に有効。**
 - **チームの中で話し合いながら防災操作の計画を練ることは防災操作のスキルアップに非常に有効。**

Japan Water Agency

第11回 全国河川・ダム管理技術検討会

ダム防災操作能力向上！ 実践型シミュレータの運用

田村 和則* 武田浩一**

* 独立行政法人水資源機構 総合技術センター(発表者)
 ** 独立行政法人水資源機構 総合技術センター 情報グループ長

ご清聴ありがとうございました。

Japan Water Agency

地震時における管路内動水圧変化の再現

Analysis of Hydrodynamic Pressure Changes in a Pipeline during Earthquake

伊藤 俊輔* 佐藤 信光* 坂本 大樹**
 (Ito Shunsuke) (Sato Nobuteru) (SAKAMOTO Daiki)
 吉村 英人** 眞鍋 尚**
 (YOSHIMURA Hideto) (MANABE Takashi)

I. はじめに

水資源機構が管理する霞ヶ浦用水施設は、パイプラインで用水供給を行っている。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震において、霞ヶ浦用水施設の基準点では、最大震度6強を観測し、空気弁（口径φ200mm, 150mm）等の施設が破損した（図-1）。

この破損原因の一つとして地震の揺れに起因する管路内の動水圧変化が考えられるが、長距離管路を対象とした地震時における動水圧の詳細な実測データはほとんど計測されておらず、その現象を再現計算により検証した例は見当たらない。本報では、地震時における管路内動水圧を計測し、その挙動を次元管路流れ解析により再現検証した結果について報告する。なお、今回の報告は2019年度（第68回）農業農村工学会大会講演会で発表したものを再編したものである¹⁾。

II. 管路内動水圧の再現方法

1. データの計測方法

管路内動水圧データの計測は、図-2に示す霞ヶ浦揚水機場から吐出水槽までの区間を対象とした。全長約21km、管内径2.2m、高低差約50mのポンプ圧送区間である。管路内動水圧は、圧力センサー（100Hz）を用いて1号制水弁、1号サージタンク、17号および18号空気弁の4カ所で計測した。また、1号制水弁では地震加速度（EW, NS, UD成分）を計測した。これらの計測期間は2015年11月から2016年10月までの1年間とし、計測時間間隔は地震時の最大加速度を捉えられるよう0.01秒で行った。なお、計測期間中に震度3以上の地震を計測した回数は16回であった。

2. 管路モデルの作成

地震時の動水圧計算では管軸方向に地震加速度を作用させるため、管路の向きが重要となる。そのため、



図-1 空気弁の破損状況

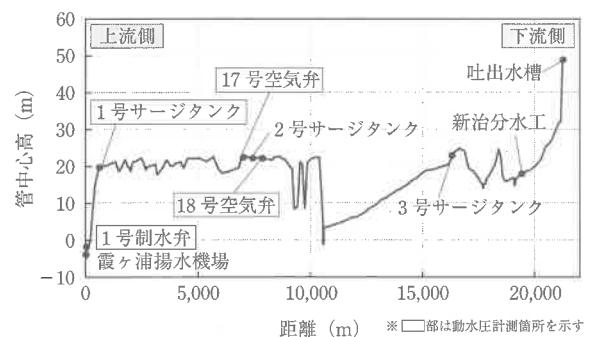


図-2 動水圧計測区間の縦断面図

平面縦断面図から読み取った配管の曲がり箇所を節点を設け、管路モデルを作成した。また、管路モデルの対象区間における揚水ポンプおよびサージタンク等の付帯施設も流体要素としてモデルを設定した。

III. 管路内動水圧の再現

再現計算の対象とした地震は、地震加速度が最大であった2016年5月16日の茨城県南部を震源とするマグニチュード5.5の地震とし、計算時間は、地震発生後200秒間とした。地震動は、1号制水弁で計測した地震加速度データから管路モデルの各節点の管軸方向成分を算出し、モデル全体に同時に作用させた。

解析には管路系水撃解析プログラム u-FLOW[®]/WH²)を用い、特性曲線法により行った。基礎方程式は1次元圧縮性流体の質量保存式と運動方程式であ

* (独)水資源機構総合技術センター
 ** みずほ情報総研(株)

キョウゴロ パイプライン, 地震, 動水圧, 再現, 特性曲線法

り、それぞれ以下の式 (1) および式 (2) に示す。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + V \left(\frac{\partial H}{\partial x} - \sin\theta \right) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \left(V \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} \right) + \frac{f}{2gDA^2} Q|Q| + \frac{\alpha}{g} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

H : 圧力水頭 (m), t : 時間 (s), a : 圧力伝播速度 (m/s), g : 重力加速度 (m/s^2), A : 管断面積 (m^2), Q : 流量 (m^3/s), V : 管断面平均流速 (m/s), θ : 管勾配, f : 管摩擦損失係数, D : 管内径 (m), α : 管軸方向に作用する加速度 (m/s^2) である。

ここでは、4カ所で計測した動水圧のうち、東北地方太平洋沖地震で破損した18号空気弁における地震加速度(管軸方向成分)、計測値、計算値を図-3、動水圧のパワースペクトルを図-4に示す。

地震加速度は、計算開始後10秒過ぎに揺れはじめ、20秒付近で最大となった後に減衰していくが、計測値では計算開始約30秒後に最大となり、地震加速度よりも遅れてピークが現れることが確認できた。計算

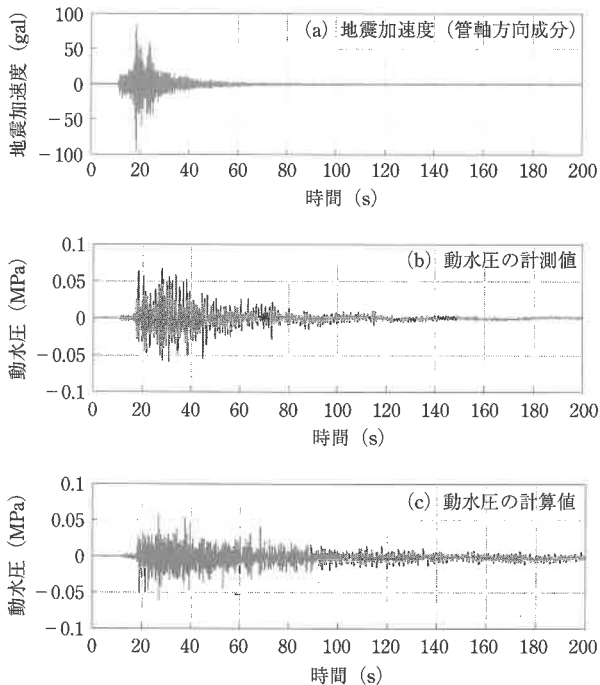


図-3 18号空気弁における地震加速度と動水圧

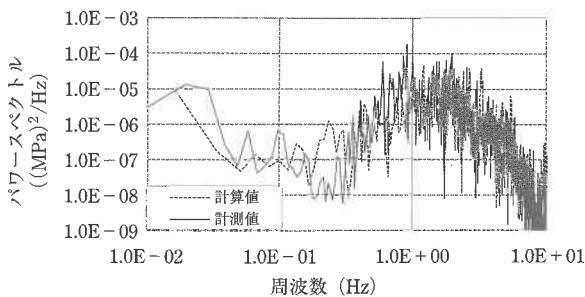


図-4 18号空気弁における動水圧のパワースペクトル






値も計測値と同様の変化が確認でき、その最大値は計測値および計算値ともにほぼ一致した。また、パワースペクトルは、1~2 Hz 付近で最大値となり、計測値および計算値ともにおおむね一致した。

IV. おわりに

今回の再現計算では、地震時の動水圧変化の特徴である増幅の様子が再現できていることが示せた。今後は、首都直下型地震が発生した場合の管路内動水圧の再現などにも活用できるよう検討していきたい。

引用文献

- 1) 坂本大樹, 吉村英人, 眞鍋 尚, 伊藤俊輔, 佐藤信光: 地震時における長距離管路内の動水圧変化に関する再現性検証, 2019年度(第68回)農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp.74~75 (2019)
- 2) 富士総合研究所: 管路内の流れのシミュレーションプログラム, 丸善 (1995) [2019.12.13.受理]

伊藤 俊輔 (正会員)	略 歴
	2016年 (独)水資源機構総合技術センター水路グループ 現在に至る
佐藤 信光	
	2009年 (独)水資源機構総合技術センター 現在に至る
坂本 大樹 (正会員)	
	2016年 みずほ情報総研(株)サイエンスソリューション部 現在に至る
吉村 英人	
	2008年 みずほ情報総研(株)サイエンスソリューション部 現在に至る
眞鍋 尚	
	1993年 (株)富士総合研究所 (現みずほ情報総研(株))サイエンスソリューション部 現在に至る

総合技術センター年報 (令和元年度(平成 31 年度))

令和 2 年 7 月 発行

編集兼発行者 独立行政法人 水資源機構
総合技術センター
〒338-0812 埼玉県さいたま市桜区大字神田 936
TEL<048>853-1785(代)
FAX<048>853-1787

<https://www.water.go.jp/kanto/sougicenter/>
