ロックフィルダムの長い管路における動水圧の卓越振動数による圧力伝播速度の推定

(独)水資源機構　　正会員　○佐藤　信光
冨田　尚樹
阿曽　　浩

１．はじめに

ロックフィルダムの耐震照査では，地震後の緊急放流のために地山トンネル内に設置された放流用のゲートの耐震性を確認する必要がある。このゲートの耐震照査ではゲートに作用する管内動水圧の影響が大きく，長い管路では圧縮性流体により行う必要がある。この手法として Weiland が提案する動水圧算定[1)]があるが，管路内水体の圧力伝播速度を適切に設定しなければならない。本稿は，管路内の動水圧の波動モード系に着目して，管路内の動水圧の常時微動計測記録から卓越振動数を算出し，管路内の波動モードと卓越振動数の相関関係を分析し，管路内の圧力伝播速度を推定したものである。

２．動水圧の波動モード による圧力伝播速度の算定

動水圧の波動モードから圧力伝播速度を算出する方法の概念を図１に示す。動水圧の反射端を考慮した波動モードとして，(a)下端閉塞による下端反射モードや(b)屈曲などによる両端反射モード，(c)両端拡大の両端解放モードなどがある。この波動モードを前提条件として，固有周期（T）と管路長（L）より管路内の動水圧の圧力伝播速度（C）を求めることができる。

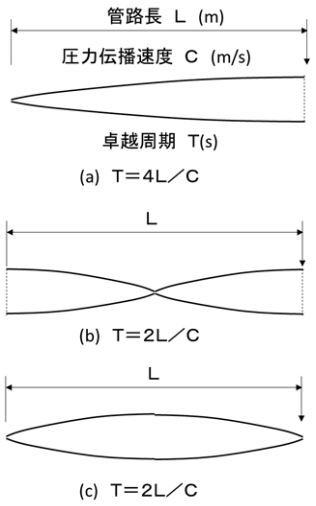


図１　動水圧の波動モード

３．管路内の常時微動動水圧の測定

管路内のゲートの上流側には，一般に管路内の圧力を確認するために圧力計が設置されている。この圧力計を動水圧計に交換して，常時における動水圧の微動計測を行った。動水圧計の適用周波数を考慮して，表１に示す２基の動水圧計でそれぞれ 10 分間計測した。

表１　動水圧計の仕様

	No.1(1CH)	No.2(2CH)
動水圧計	PWF-2MPB	PW-2MPA
最大圧力	2MPa	2MPa
適用範囲	100Hz	1Hz
収録装置	DH-14A	
サンプリング	100Hz	
計測時間	10min	

４．ロックフィルダムの地山内管路における動水圧計測と圧力伝播速度の算定

表２にMダム（型式：ロックフィルダム，堤高：140m）における地山内管路の諸元を示す。貯水池側に独立取水塔があり，ゲートまでの管路延長は 471.1m で，途中２号トンネルを放流管路に転用している。1～2 区間は鋼管無の鉄筋コンクリートライニングトンネルである。3 区間はプラグ区間で，鋼管を埋設しコンクリートで閉塞されている。プラグ区間の下流にフィックスドコーンバルブ（φ1700）が設置され，このゲートの上流側で常時微動の動水圧計測を行った。

常時微動計測した動水圧(kPa)のフーリエスペクトルを図２に示す。

表２　Mダムにおける地山内管路の諸元

区間		取水部	1区間	2区間	3区間
名称		取水塔	接続トンネル	2号トンネル	プラグ
管路長	m		471.1		
区間長	m		142.9	248.5	79.7
内径	m		4.00	5.50	1.70
外径	m		5.20	8.50	8.50
厚さ	m		0.60	1.50	
構造			RC(0.6)	RC(0.5)	RC
鋼管			無	無	t=19mm
転用			専用	2号トンネル	2号トンネル
断面図			B－B	C－C	D－D
縦断図					

キーワード　　ダム，管路，耐震，動水圧，圧力伝播速度
連絡先　〒338-0812　埼玉県さいたま市桜区神田 936 番地　(独)水資源機構　総合技術センター　TEL 048-853-1785

Mダムおける全区間ならびに各区間の圧力伝播速度の算定結果を表３に示す。全区間は，波動モード(a)（４Ｌ・f）として卓越振動数 f1 から圧力伝播速度 C0=1228m/s を算出した。２区間は断面が急変しており，両端反射の波動モード(b)（２Ｌ・ｆ）として f2 から C2=1175m/s を算出した。１区間は両端が拡大しており，波動モード(c)として f3 から C1=1220m/s を算出した。３区間は片側閉塞，片側断面拡大の波動モード(a)となるが，最もフーリエが高い f4 から圧力伝播速度を推定すると C3=1287m/s となり，プラグ区間としては低い値となった。３区間は動水圧上の断面拡大の境界が明確でなく，水の体積弾性係数（K=2.07×10^6kPa）の理論上の最大値から C=1440m/s を算出した。なお，f5 は２区間の４／３波長が推定された。

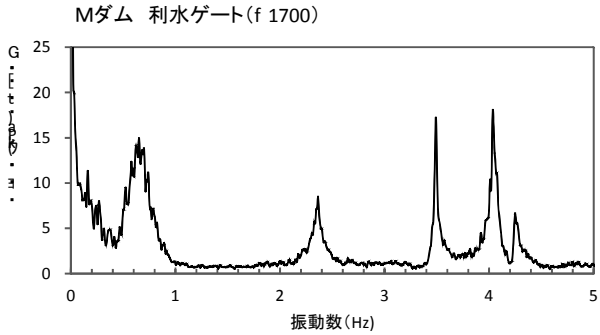


図２　動水圧のフーリエスペクトル

表３　管路内の圧力伝播速度の算定（Mダム）

区間	単位	全区間	1区間	2区間	3区間
		C0	C1	C2	C3
圧力伝播速度 C	m/s	1228	1,220	1,175	1,440
算出方法		4L･f ≪	2L･f ≪≫	2L･f ≫≪	(K/ρ)^0.5
振動数 f	Hz	f1 0.6516	f3 4.268	f2 2.364	
波動長 L	m	471.1	142.9	248.5	79.7

５．各ダムの長い管路内の圧力伝播速度

各ロックフィルダムの長い管路において，同様に常時微動の動水圧を計測し，フーリエスペクトルから卓越振動数を求め，各波動長から圧力伝播速度を算出した結果を表４に示す。鋼管の無いＲＣ区間では圧力伝播速度は C=1101～1279m/s 程度，鋼管ＲＣ区間では圧力伝播速度は C=1300m/s 強程度となった。

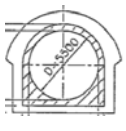
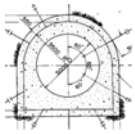
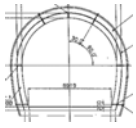
表４　各ダムの管路内の圧力伝播速度

ダム	ゲート／管路長	単位	全体	1区間	2区間	3区間
Mダム	利水ゲート(φ1700)	m/s	1228	1220	1175	1440
	471.1m			RC	RC	プラグ
Nダム	利水ゲート(φ2100)	m/s	1295	1316	1257	1440
	453.1m			鋼管RC	RC	プラグ
Tダム	利水ゲート(φ1900)	m/s	1326	1326	1279	1437
	375m			鋼管RC	RC	プラグ
Tダム	水低ゲート(B1800)	m/s	1141	1101		1437
	535.5m			RC		プラグ

RC:鉄筋コンクリートライニングトンネル
鋼管RC:鋼管埋設型鉄筋コンクリートライニングトンネル

Ｎダムの１区間の鋼管 RC の圧力伝播速度は，計測値では C=1316m/s である。この区間を鋼管埋設の鉄筋コンクリートライニングトンネルの圧力伝播式[2]で算出すると，静弾性係数（Ec=20,E_R=5GN/m²）では C=1094m/s となり，動弾性係数(Ec=34,E_R=26GN/m²）で算出すると C=1302m/s で，動水圧の常時微動計測から算出した圧力伝播速度は，コンクリートや岩盤の動的弾性係数から求めた値に近いことを示した。

表５　各ダムの RC 構造(鋼管無)の圧力伝播速度

ダム	Mダム	Nダム	Tダム（利水）	Tダム（水位低下）
内径(m)	5.50	5.00	5.10	7.90
外径(m)	8.50	8.10	6.70	9.50
厚さ(m)	1.50	1.55	0.80	0.80
構造	RC(0.5)	RC(1.0)	RC(0.8)	RC(0.6)
鋼管	無	無	無	無
転用	2号トンネル	2号トンネル	専用	2号トンネル
断面				
圧力伝播速度 (m/s)	1,175	1,257	1,279	1,101

RC:鉄筋コンクリートライニングトンネル

６．おわりに

表５に示すようにロックフィルダムの２号トンネルを転用した鋼管のない RC 構造のライニングトンネルの圧力伝播速度は常時微動計測では C=1101～1279m/s 程度であることを示した。今回の動水圧の計測結果は，常時の微動計測結果であり，地震時においてどのような卓越振動数が発生するかは確認されていない。今後は，地震時における管路内の動水圧の発生状況や圧力伝播速度の計測を行っていく必要があると考えられる。

参考文献

1)　Martin Wieland: “Hydrodynamic Pressures,” International Water Power & Dam Construction, pp18-24, 2005

2)　土木学会：水理公式集, 1971