

動水圧の算定方法がダム洪水吐ゲートの応答に与える影響の比較検討

(株)構造計画研究所 正会員 ○秦 逸平 八木 康仁
中部電力(株) 正会員 櫻井 友彰 亀谷 泰久 森下 和輝

1. はじめに

大規模地震時のダム洪水吐ゲートの耐震性能照査にあたっては、主要な外力である動水圧がゲートの応答に与える影響が大きい。前報では、ゲート位置の動水圧についてセットバックによる影響を考慮した Westergaard 式(以下、「WG 式(SB 考慮)」)、Westergaard 式において提案された近似式(以下、「WG 近似式(SB 考慮)」)および流体要素モデルにおける解析値の違いを確認した。本報では、はじめに堤高の違いによる WG 式(SB 考慮)と WG 近似式(SB 考慮)のゲート位置の動水圧の相違について示し、次にその動水圧の違いがゲートの応答に与える影響についてラジアルゲートの動的非線形 FEM 解析結果の比較を示す。

2. 動水圧の評価方法の影響比較

WG 式(SB 考慮)および WG 近似式(SB 考慮)¹⁾を以下に示す。ここで、WG 式(SB 考慮)は周期 T が小さいほど動水圧が大きくなることから、適用範囲の下限周期 T_0 にて算定した²⁾。また、ゲート位置の動水圧にはセットバックによる影響 $C(z)$ を考慮した³⁾。

$$\text{WG 式(SB 考慮)}: p = C(z) \frac{8\alpha w_0 H}{\pi^2} \cos \frac{2\pi z}{T} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n^2 C_n} e^{-q_n} \sin \frac{n\pi z}{2H}$$

$$C_n = \sqrt{1 - \frac{16w_0 H^2}{n^2 g K T^2}}, q_n = \frac{\pi C_n x}{2H}, T = T_0 = \frac{4H}{c}$$

$$\text{WG 近似式(SB 考慮)}: p = C(z) \frac{7}{8} w_0 \alpha \sqrt{Hz}$$

$$\text{セットバック動水圧比: } C(z) = \left(1 - \sqrt{\frac{H_1}{H}}\right) \exp\left(\frac{-1.4Sz}{H_1^2}\right) + \sqrt{\frac{H_1}{H}}$$

p : 動水圧, z : 任意水深, H : 基礎地盤水深, H_1 : ゲート水深, α : 地震の水平震度
 T : 周期, K : 貯水体積弾性率, w_0 : 貯水単位重量, S : ゲートセットバック量
 T_0 : Westergaard 式の適用範囲下限周期, c : 水中の音速 (1483 m/s)

表 1 に示す 3 ダムについて、WG 式(SB 考慮)と WG 近似式(SB 考慮)を比較した結果を図 1 に示す。水面から水底までの全体の動水圧分布は両者が概ね近似するが、ゲート位置(水面付近)の動水圧分布は基礎地盤水深が深い(堤高が高い)ほど WG 式(SB 考慮)の方が小さい。

表 1 より、いずれの地点においてもゲート位置の全動水圧は WG 式(SB 考慮)が WG 近似式(SB 考慮)

より小さく、基礎地盤水深 $H=117\text{m}$ の X ダムの場合、WG 式(SB 考慮)の全動水圧は WG 近似式(SB 考慮)より 39% 小さい算定結果となった。一方で、 $H=30\text{m}$ の Z ダムでは両者の差異は 8% であり比較的小さい。

全水深に占めるゲートの扉高の割合が小さい(堤高が高い)ほど、WG 式(SB 考慮)による算定結果は WG 近似式(SB 考慮)より小さくなる。

表 1 3 ダムの諸元、ゲート位置の動水圧の算定結果

項目	記号	単位	X ダム		Y ダム		Z ダム	
			WG 近似式 (SB 考慮)	WG 式 (SB 考慮)	WG 近似式 (SB 考慮)	WG 式 (SB 考慮)	WG 近似式 (SB 考慮)	WG 式 (SB 考慮)
扉体幅	B	m	13.600		8.800		10.000	
ゲート下端水深	h	m	7.000		7.000		10.329	
基礎地盤水深	H	m	117.000		50.500		32.000	
ゲート下端静水圧	ps	kN/m ²	68.6		68.6		101.2242	
全静水圧	Ps	kN	3265.4		2112.9		5227.7	
水平加速度	α	m/s ²	9.062		10.089		9.614	
水平震度	K	—	0.924		1.029		0.980	
周期	T	s	—	0.316	—	0.136	—	0.086
ゲート下端動水圧	pd	kN/m ²	132.438	98.601	141.183	127.439	116.065	118.650
全動水圧	Pd	kN	10387.3	6307.9	6174.1	4777.9	8823.6	8091.9
動水圧/静水圧	Pd/Ps	—	3.18	1.93	2.92	2.26	1.69	1.55
動水圧 WG 式/WG 近似式	—	—	0.61		0.77		0.92	

$w_0=9.8\text{ kN/m}^3$, $K=2.2\text{e}+6\text{ kN/m}^2$, $c=1483\text{ m/s}$, $T=T_0$

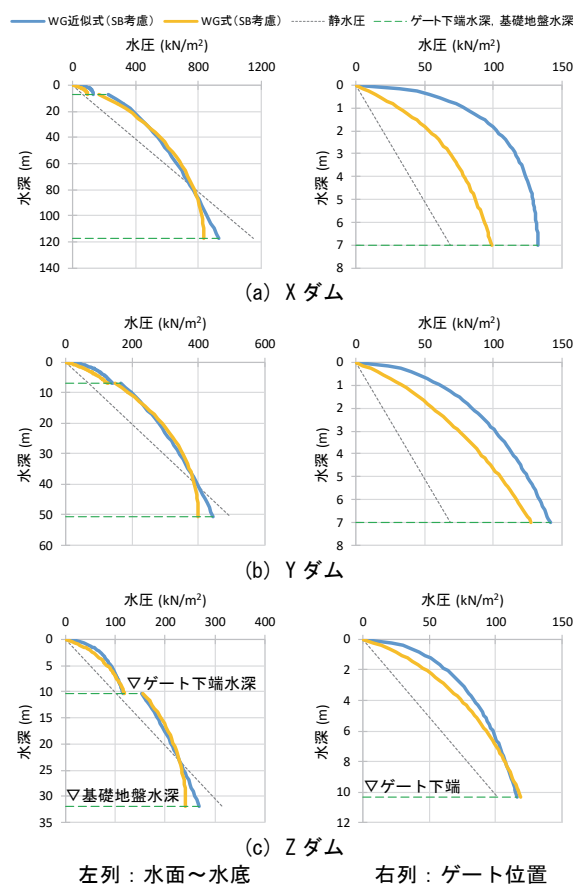


図 1 動水圧分布の比較: WG 式(SB 考慮)と WG 近似式(SB 考慮)

キーワード ダム洪水吐ゲート, 動水圧, Westergaard 式, 三次元動的非線形 FEM 解析

〒164-0011 東京都中野区中央 4-5-3 TEL 03-5342-1138

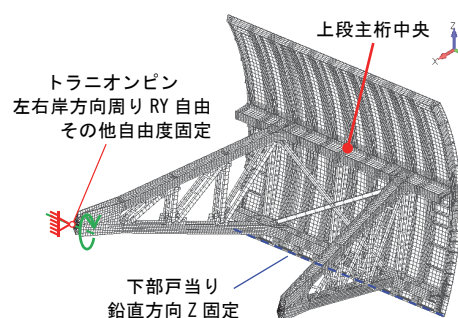


図2 ゲートの解析モデル

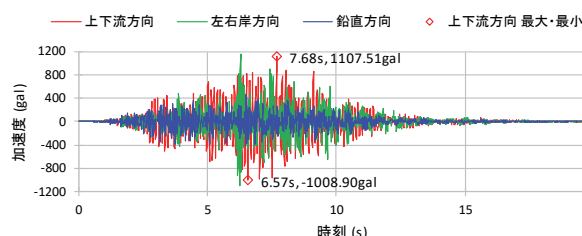


図3 入力地震動

3. ゲートの地震応答解析結果比較

表1に示すYダムの洪水吐ラジアルゲートについて、動水圧の算定方法をWG近似式(SB考慮)とした場合とWG式(SB考慮)とした場合の地震応答解析結果を比較した。解析には汎用FEM解析プログラムADINA 9.4を用いた。

3.1 解析条件

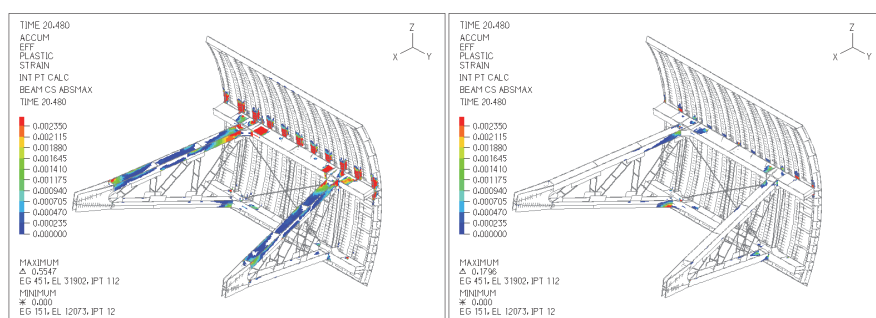
解析モデルを図2に示す。ゲートの構造部材を主にシェル要素を用いてモデル化した3次元詳細モデルである。構造部材には鋼材の材料非線形性を考慮し、解析では幾何学的非線形性を考慮した。

自重および静水圧を載荷する静的解析の後に、地震による慣性力(3方向)および動水圧を載荷する時刻歴地震応答解析を実施した。図3に示す入力地震動はダム堤体全体系モデルの時刻歴応答解析におけるトラニオンピン位置の応答加速度より設定した。動水圧は図1(b)の動水圧分布に上下流方向の入力加速度を乗じた時刻歴圧力荷重とした。したがって、動水圧はゲートを剛体と想定して設定しており、ゲート自身の振動の影響は考慮されていない。表1より、WG式(SB考慮)の動水圧はWG近似式(SB考慮)より23%小さい。

3.2 解析結果

地震応答解析結果の塑性化状況(累積塑性ひずみコンター図)を図4に、最大変位時の変形図を図5に、上段主桁中央の上下流方向変位時刻歴を図6に示す。

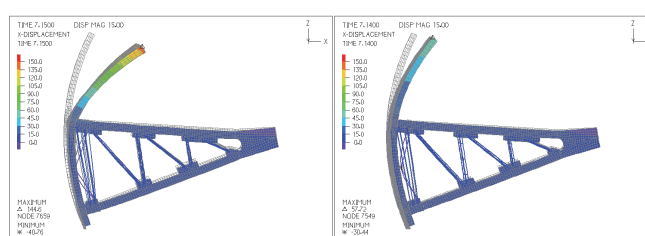
WG近似式(SB考慮)の場合、上段脚柱の大部分、主桁のウェブおよび縦補助桁の上段主桁位置で塑性化しており、縦補助桁の変位が大きく、主桁位置で残留



(a) WG 近似式 (SB 考慮)

(b) WG 式 (SB 考慮)

図4 塑性化状況の比較(無色:弾性, 着色:塑性化要素)



(a) WG 近似式 (SB 考慮)

(b) WG 式 (SB 考慮)

図5 最大変位時の変形図の比較(変形倍率:15倍)

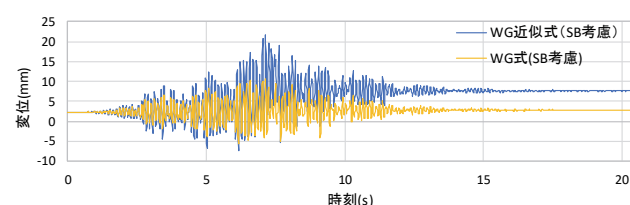


図6 上下流方向 応答変位時刻歴の比較(上段主桁中央)

変位が生じる結果であった。WG式(SB考慮)の場合、塑性化範囲は大幅に減少し、最大変位および残留変位ともに小さくなった。

4. まとめ

動水圧の算定方法が洪水吐ゲートの応答に与える影響検討として、WG近似式(SB考慮)とWG式(SB考慮)の相違に着目し、堤高の違いによる両者の算定結果の相違を確認し、ラジアルゲートの地震応答解析の結果を比較した。

- (1) 全水深に占めるゲートの扉高の割合が小さい(堤高が高い)ほど、WG式(SB考慮)によるゲート位置の動水圧の算定結果はWG近似式(SB考慮)のそれより小さくなる。
- (2) 今回の解析モデルでは、WG式(SB考慮)より算定した動水圧はWG近似式(SB考慮)より23%小さく、主要な外力である動水圧の違いによりゲートの塑性化範囲が大幅に異なる結果となった。

5. 参考文献

- 1) Westergaard, H.M.: Water pressures on dams during earthquakes, Trans. ASCE, Vol.98, pp.418-433, 1933.
- 2) 土木学会: 水理公式集[平成11年版], pp.295-297, 1999
- 3) 中山 義紀, 大町 達夫, 井上 修作: ダムゲートに作用する地震時動水圧の実用的評価式の提案, 土木学会論文集A, Vol.64 No.4, pp.959-969, 2008.11