

防衛大学校 学生員○鈴木 真次
 八千代エンジニアリング(株) 正員 下田 義文
 防衛大学校 正員 石川 信隆
 山口大学 正員 古川 浩平

1. 緒言

急流河川域に砂防ダムが土石流防御のために建設されているが、最近、土石流によってコンクリート製砂防ダムの袖部が破壊される例が見られた。土石流は土砂と水の混合体が流動するもので、その流れに多くの巨礫を含んでいることが知られている。著者ら¹⁾は、土石流中の巨礫がコンクリート製砂防ダムの袖部に衝突する際の衝突現象について、模型実験および2質点系モデルにより解明した。

本研究は、この2質点系モデルを用いて、コンクリート製砂防ダム袖部の破壊シミュレーション解析法を開発し、実被害例と比較してその適用性について検討したものである。

2. 巨礫に対するコンクリート製砂防ダム袖部の衝撃破壊シミュレーション解析

(1) 解析の基本式

図-1(a)に示すようなコンクリート製砂防ダム袖部を図-1(c)のような2質点系にモデル化する。この2質点系モデルの運動方程式をNewmark β 法によって解き、最大衝撃荷重 P_{max} をコンクリート袖部底面の最大内力として次式により算定するものとする。

$$P_{max} = k_1 \cdot y_1 \quad (1)$$

また局部バネ係数 k_2 は、水山³⁾によるHertzの接触力の式を改良した式を用いる。

(2) 最適化手法による減衰定数の決定

図-1中の2つの減衰係数 C_1 と C_2 は、最適化手法による同定法により決定するものとし、その基本式は表-1となる。その解法に当っては最適化プログラムADSを用いた。その結果、先の実験¹⁾において衝突点周辺のモ

ルタルが破壊し、大きな残留めり込み量が残ることから判断して衝突面の現象を臨界減衰状態であることを考慮して $h_1 = 0.436$ 、 $h_2 = 1.00$ の値を採用した(ただし、 h_1 は式(1c)参照)。

3. 実被害のあった砂防ダムへの

シミュレーション解析

(1) 最大粒径、土石流速度、打点位置をパラメータとしたシミュレーション解析

表-2に示すように土石流に含まれる巨礫のうち、実被害に影響を与えているのは平均粒径ではなく最大粒径であることがわかる。よって、ここでは、最大粒径 D_{max} (m)、土石流流速 V (m/sec)、打点位置 H (m) をパラメータとして2質点系モデルによる計算結果と実被害との比較を行った。その結果、①最大粒径が大きいと

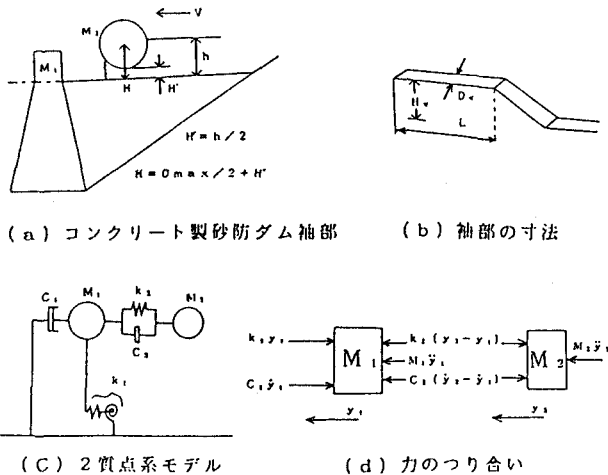


図-1 2質点系シミュレーションモデル

表-1 減衰定数の同定基本式

未知数	h_1, h_2	
目的関数	$Z = (\varepsilon_{max} - \varepsilon_{max})^2$	$\rightarrow \min$ (1a)
制約条件	$1 \geq h_1 \geq 0$	(1b)
	$h_i = C_i / 2 \cdot \sqrt{k_i M_i}$ ($i=1, 2$)	(1c)
ただし、 ε_{max} : 2質点系モデルによる衝撃応答解析から得られる袖部根元部の引張ひずみの計算値、 ε_{max} : 模型実験から得られる根元部の引張ひずみの実験値、 k_1 : 片持ちばりのバネ定数 ($k_1 = (h^3 / 3EI + \beta h / GA)^{-1}$)、 k_2 : 局部バネ定数、 M_1, C_1 : 片持ちばりの換算質量、減衰係数、 M_2, C_2 : 巨礫の質量、減衰係数		

かなり遅い速度 ($V=2.0\text{m/sec}$) でも破壊が生じている。
 ②当然ながら土石流速度が早いと破壊が生じやすい。
 ③打点位置が天端に近いほど破壊が生じやすい、ことなどが判明した。

(2) 雨量強度等による土石流を用いた場合のシミュレーション解析

土石流は、その流れに巨礫を含んでいるが、その土石流量は雨量強度等に大きく影響を受ける。ここでは、高橋ら⁴⁾による流量算定式を用い、またマンニングの公式⁵⁾を用いて、流速、水深を算出した。よって、この流速をもつ土石流のうちの最大粒径が袖部に衝突すると想定してシミュレーション解析を行った。なお、打点位置が不明なため図-1に示すように砂防ダムが満砂で水深の1/2まで巨礫が持ち上げられた状態を仮定して計算した。また袖部の長さ(L)は、流域面積 10km^2 以下では6mブロックで施工しているため、6m以上のものは、 $L=6\text{m}$ とした。

シミュレーション解析の結果、最大ひずみは表-3のように得られた。コンクリートの引張限界である $\varepsilon_u=200\mu$ を破壊とすると一部を除きよくシミュレートしていることが認められる。ただし、No. 13, 14は水深が大きすぎるため越流するまでに、巨礫の衝突が無かったと考えられる。

4. 結論

(1) 簡単な2質点系モデルによりコンクリート製砂防ダムの袖部の破壊をシミュレートする手法を開発し、それを実被害例と比較した結果、かなりよくシミュレートすることが認められた。

(2) 土石流発生時の袖部破壊は、土石流中の最大粒径に大きく左右されることが判明し、流速および打点位置にも大きく影響を

表-2 最大粒径の速度、打点位置をパラメータとしたシミュレーション

(a) 打点位置 $H=2/3 \times$ 袖高

塊体番号	平均粒径	最大粒径	速度	打点位置	破壊	速度	打点位置	破壊	速度	打点位置	破壊	速度	打点位置	破壊	速度	打点位置	破壊
1	0.005	0.005	0.005	0.005	○	0.005	0.005	○	0.005	0.005	○	0.005	0.005	○	0.005	0.005	○
2	0.1	0.1	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○
3	0.01	0.01	0.01	0.01	○	0.01	0.01	○	0.01	0.01	○	0.01	0.01	○	0.01	0.01	○
4	0.05	0.05	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○
5	0.06	0.06	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○
6	0.2	0.2	0.2	0.2	○	0.2	0.2	○	0.2	0.2	○	0.2	0.2	○	0.2	0.2	○
7	0.1	0.1	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○
8	0.1	0.1	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○
9	0.06	0.06	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○
10	0.1	0.1	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○
11	0.04	0.04	0.04	0.04	○	0.04	0.04	○	0.04	0.04	○	0.04	0.04	○	0.04	0.04	○
12	0.12	0.12	0.12	0.12	○	0.12	0.12	○	0.12	0.12	○	0.12	0.12	○	0.12	0.12	○
13	0.3	0.3	0.3	0.3	○	0.3	0.3	○	0.3	0.3	○	0.3	0.3	○	0.3	0.3	○
14	0.3	0.3	0.3	0.3	○	0.3	0.3	○	0.3	0.3	○	0.3	0.3	○	0.3	0.3	○
15	0.2	0.2	0.2	0.2	○	0.2	0.2	○	0.2	0.2	○	0.2	0.2	○	0.2	0.2	○
16	0.05	0.05	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○
17	0.001	0.001	0.001	0.001	○	0.001	0.001	○	0.001	0.001	○	0.001	0.001	○	0.001	0.001	○
18	0.05	0.05	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○
19	0.06	0.06	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○
20	0.4	0.4	0.4	0.4	○	0.4	0.4	○	0.4	0.4	○	0.4	0.4	○	0.4	0.4	○
21	0.03	0.03	0.03	0.03	○	0.03	0.03	○	0.03	0.03	○	0.03	0.03	○	0.03	0.03	○
22	0.1	0.1	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○

(b) 打点位置 $H=$ 天端

塊体番号	平均粒径	最大粒径	速度	打点位置	破壊	速度	打点位置	破壊	速度	打点位置	破壊	速度	打点位置	破壊	速度	打点位置	破壊
1	0.005	0.005	0.005	0.005	○	0.005	0.005	○	0.005	0.005	○	0.005	0.005	○	0.005	0.005	○
2	0.1	0.1	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○
3	0.01	0.01	0.01	0.01	○	0.01	0.01	○	0.01	0.01	○	0.01	0.01	○	0.01	0.01	○
4	0.05	0.05	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○
5	0.06	0.06	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○
6	0.2	0.2	0.2	0.2	○	0.2	0.2	○	0.2	0.2	○	0.2	0.2	○	0.2	0.2	○
7	0.1	0.1	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○
8	0.1	0.1	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○
9	0.06	0.06	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○
10	0.1	0.1	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○
11	0.04	0.04	0.04	0.04	○	0.04	0.04	○	0.04	0.04	○	0.04	0.04	○	0.04	0.04	○
12	0.12	0.12	0.12	0.12	○	0.12	0.12	○	0.12	0.12	○	0.12	0.12	○	0.12	0.12	○
13	0.3	0.3	0.3	0.3	○	0.3	0.3	○	0.3	0.3	○	0.3	0.3	○	0.3	0.3	○
14	0.3	0.3	0.3	0.3	○	0.3	0.3	○	0.3	0.3	○	0.3	0.3	○	0.3	0.3	○
15	0.2	0.2	0.2	0.2	○	0.2	0.2	○	0.2	0.2	○	0.2	0.2	○	0.2	0.2	○
16	0.05	0.05	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○
17	0.001	0.001	0.001	0.001	○	0.001	0.001	○	0.001	0.001	○	0.001	0.001	○	0.001	0.001	○
18	0.05	0.05	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○	0.05	0.05	○
19	0.06	0.06	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○	0.06	0.06	○
20	0.4	0.4	0.4	0.4	○	0.4	0.4	○	0.4	0.4	○	0.4	0.4	○	0.4	0.4	○
21	0.03	0.03	0.03	0.03	○	0.03	0.03	○	0.03	0.03	○	0.03	0.03	○	0.03	0.03	○
22	0.1	0.1	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○	0.1	0.1	○

○破壊しない ×破壊した (引張限界 $\varepsilon_u=200\mu$ を破壊とした。)

表-3 雨量強度等による流速を用いた場合のシミュレーション

塊体番号	H (m)	D (m)	L (m)	Dmax (m)	Dmax (m)	実被害	解析結果	h (m)	V (m/s)	H (m)	ε max (%)	備考
5	1	1.5	6.3 (6.0)	0.06	0.6	○	○	0.33	2.56	0.47	5.25	越流
7	1	1.6	7.5 (6.0)	0.1	0.8	○	○	0.243	3.5	0.422	6.5	越流
10	1.3	1.9	9.6 (6.0)	0.1	1.2	○	○	0.284	1.5	0.542	5.8	越流
11	1	1.5	6	0.04	1.4	○	○	0.269	2.05	0.535	8.1	越流
12	1	1.5	8.5 (6.0)	0.12	1.5	○	○	0.253	1.48	0.726	12.4	越流
13	1	1.5	13.5 (6.0)	0.3	1.6	○	×	0.186	2.01	0.693	19.8	越流
14	1.5	1.6	16 (6.0)	0.3	1.6	○	×	0.342	2.49	0.871	62.6	越流
15	1	1.8	4.5	0.2	1.8	○	○	0.251	3.39	0.825	85.9	越流
17	1.5	2.5	7.2 (6.0)	0.001	2	×	○	0.285	1.4	0.893	36.8	越流
19	1	1.5	8 (6.0)	0.06	2	×	×	0.21	1.9	0.855	50.9	越流
21	1	1.5	9 (6.0)	0.03	3	×	×	2.1	8.59	1	403.6	越流
								1.55	11.57	1	580.4	越流
								1.81	8.29	1.5	546.1	越流
								1.34	11.27	1.47	763.9	越流
								0.374	1.87	0.99	70.4	越流
								0.275	2.55	0.94	97.9	越流
								0.632	3	1.316	86.4	左袖～水通
								0.465	4.07	1.233	116.6	破壊
								0.468	4.16	1	258.3	左袖部一部
								0.345	5.65	1	372.8	破壊
								0.21	1.37	1	149.6	両袖水通
								0.155	1.85	1	202.3	破壊

○破壊しない ×破壊した 上段：土石流先端部 下段：土石流の後続流

受けることが確認された。(3)雨量強度等から予想される土石流速度を用いた場合でも、一部を除きかなり良く被害予想を推定できることが認められた。

参考文献：1) 水山高久、下田義文、石川信隆；コンクリート製砂防ダムに対する巨礫の衝撃模型実験に関する一考察、構造工学論文集、pp.1095～1104、1989年3月 2) 栃木省二、海堀正博；豪雨による土砂移動のあった砂防・治水ダムの堆砂実態、平成二年度砂防学会研究発表会概要集、pp.162～165、1990年5月 3) 水山高久；砂防ダムに対する土石流衝撃力算定とその問題点、新砂防112号、pp.40～43、昭和54年8月 4) 高橋保、水山高久；(講座)土砂災害の予知と対策5、土石流(その1)、土と基礎、pp.59～66、1984年3月 5) 砂防・地すべり技術センター；鋼製砂防構造物設計便覧、昭和62年版