

DOI: 10.11779/CJGE201808009

砾石土心墙料水力劈裂试验研究

凌 华^{1, 2}, 王 伟^{*3}, 王 芳^{1, 2}, 傅 华^{1, 2}, 韩华强^{1, 2}

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029;
3. 绍兴文理学院, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 在改进的三轴仪上开展了两种不同级配砾石土心墙料的水力劈裂试验。根据试验结果得到了以下结论: 砾石土心墙料的自身性质与围压是影响劈裂压力的关键性因素, 水力劈裂破坏主要表现为击穿破坏; 相同试验条件下, 随围压、固结比和水压加荷速率的提高, 水力劈裂试验的流量降低; 对于砾石土心墙料, 当粉粒与黏粒含量较高时, 由于颗粒间的胶结力更强, 相同围压、固结比和加载速率条件下试样的破坏劈裂应力要更高, 但不同级配砾石土的劈裂压力随围压的增长幅度变化不大; 固结比或轴向应力对砾石土心墙料的劈裂压力影响不大, 在文中试验条件下, 加荷速率对破坏劈裂压力影响也不大。

关键词: 砾石土; 水力劈裂; 试验研究

中图分类号: TV16 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)08-1444-05

作者简介: 凌 华(1977-), 男, 江苏盐城人, 博士, 高级工程师, 主要从事粗粒土力学特性研究工作。E-mail: hling@nhri.cn。

Experimental study on hydraulic fracture of gravelly soil core

LING Hua^{1, 2}, WANG Wei³, WANG Fang^{1, 2}, FU Hua^{1, 2}, HAN Hua-qiang^{1, 2}

(1. Geotechnical Engineering Department of Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China)

Abstract: The hydraulic fracture tests on two kinds of graded gravelly soils are carried out by using the improved triaxial apparatus. For the hydraulic fracture pressures on the gravelly soils, the soil properties and confining pressure are the key influence factors. The hydraulic failure mode of gravelly soils is always shown as breakdown. The flow capacity in the tests decreases with the increase of the confining pressure, consolidation ratio and injection pressure rate. The hydraulic fracture pressure increases with the fine particle content of the gravelly soils because of the self-cohesiveness. However, the effect on the fracture pressure with the increasing confining pressure is similar for different graded gravelly soils. The consolidation ratio or axial stress has the slight effect on the fracture pressures, and so does the hydraulic pressure rate.

Key words: gravelly soil; hydraulic fracture; experimental study

0 引言

水力劈裂是指由于水压力增加在岩体或土体中引起裂缝发生和发展的一种物理现象^[1]。上世纪中叶, 数座土石坝发生了水力劈裂破坏^[2-3], 其后许多学者对其破坏机理^[4]、发生条件、物理试验、数值分析^[5-7]等方面开展了相关研究。但由于堆石坝心墙的水力劈裂问题非常复杂, 到目前为止, 尚无很好的方法进行预测和计算模拟, 其发生条件并不十分清楚, 判定准则也是初步的, 很不成熟^[4]。

水力劈裂试验模拟复杂、试验难度较大, 目前关于水力劈裂的室内试验成果还不太丰富, 且主要针对黏土料开展, 如 Nobari 等^[8]采用三轴仪对匹兹堡砂质

黏土试样进行了水力劈裂试验, 研究了水力劈裂破坏方式、劈裂面方向及裂缝的扩展方式; Jawoski 等^[9]采用 Teton 坝原状土和重塑土 203 mm 的立方体试样研究了土的组成、密度、含水率、抗拉强度和试验历时等对土中水力劈裂的影响; 丁金粟等^[10]在改装三轴仪中对斜墙壤土中空圆柱试样进行了水力劈裂试验, 研究了产生水力劈裂的必要条件; 张丙印等^[11]对 200 cm 立方体糯扎渡心墙土料, 设置厚 0.5 cm, 长 10 cm

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404800); 国家自然科学基金面上项目(51679149)

收稿日期: 2017-07-17

*通讯作者(E-mail: wellswang@usx.edu.cn)

的水平砂层进行模拟渗透软弱面, 进行了水力劈裂试验; 袁俊平等^[12]采用两河口水电站黏土心墙土料 140 mm×60 mm 试样, 构造初始裂缝, 进行了水力劈裂试验, 研究了初始裂缝和加压速率对水力劈裂的影响。曾开华^[13]采用真三轴仪对南京下蜀黏土进行了试验研究, 研究了中主应力、加压速率等对水力劈裂起裂压力的影响。沈珠江等^[14]、冯晓莹等^[15]分别采用小浪底重粉质黏土和某心墙坝土料, 通过离心模型试验研究了心墙坝的水力劈裂现象。

对于砾石土, 刘令瑶等^[16]进行了卓有成效的研究, 其成果表明水力劈裂破坏形式随含砾量(>5 mm)变化而变化。含砾量小于等于 15% 时, 其破坏形式为水力劈裂, 含砾量大于 20% 时, 破坏形式转变为水力击穿。但试验未能考虑砾石土的复杂应力状态。

目前中国心墙堆石坝愈建愈高, 已达到 300 m 坝高级别, 如澜沧江如美达到了 315 m, 大渡河双江口 314 m, 雅砻江两河口 295 m, 这些高坝为使坝体变形协调和减少心墙拱效应均采用了砾石土作为心墙料, 这些高坝内砾石土心墙料的应力高、应力状态复杂, 研究相应应力及其它复杂条件下砾石土的水力劈裂特性, 从而采取相应措施以避免水力劈裂的发生, 这已经成为目前高土石坝建设的关键技术问题。本文对某高心墙堆石坝的砾石土心墙料开展了水力劈裂试验, 研究了土体侧向压力、轴向压力、不同级配、加载速率等复杂条件对水力劈裂的影响。

1 水力劈裂试验

1.1 试验级配与密度

某高心墙堆石坝土料场设计级配平均线与下包线级配最大粒径均为 60 mm, 根据土工试验规程(SL237—1999), 采用等量替代法缩制得到了最大粒径为 20 mm 的试验模拟级配, 在中型三轴仪上开展了水力劈裂试验研究, #1 平均线试样和#2 下包线试样的设计级配与试验级配见表 1。

表 1 原级配与试验级配

Table 1 Natural and test gradations

编 号	级配	小于某粒径质量百分含量/%									
		60 mm	40 mm	20 mm	10 mm	5 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.075 mm
#1	平均线 原级配	100.0	93.6	82.2	72.3	63.6	57.5	54.2	50.6	45.8	24.4
	试验级配				100.0	80.6	63.6	57.5	54.2	50.6	45.8
#2	下包线 原级配	100.0	79.4	55.3	50.1	45.0	41.1	38.4	35.7	32.4	17.4
	试验级配				100.0	72.2	45.0	41.1	38.4	35.7	32.4
											8.0

对表 1 中的级配试样开展了重型击实试验, 击实筒内径为 152 mm, 单位体积击实功能为 2687.9 kJ/m³, 取 0.98 密实度确定试验干密度, 击实试验结果和试验密度见表 2。

表 2 击实试验结果与试验密度

Table 2 Results of compaction tests and test densities

编号	级配	击实试验		试验干密度 /(g·cm ⁻³)
		最大干密度 /(g·cm ⁻³)	最优含水率/%	
#1	平均线试验级配	2.28	5.7	2.23
#2	下包线试验级配	2.29	5.2	2.24

1.2 试验方法与设备

水力劈裂试验在改进三轴仪上进行, 试验装置与试验方法与文献[16]类似, 设备示意图见图 1。试样为外径 100 mm, 内径 4 mm, 高 180 mm, 壁厚 48 mm 的空心圆柱体, 为保证中心孔过水通畅, 在孔内填塞适当粗细的铜丝细管, 见图 2。试验时利用中心孔施加水力压力, 观察试验现象、测量水压力和流出水量以判别试样是否劈裂破坏及其破坏形式。

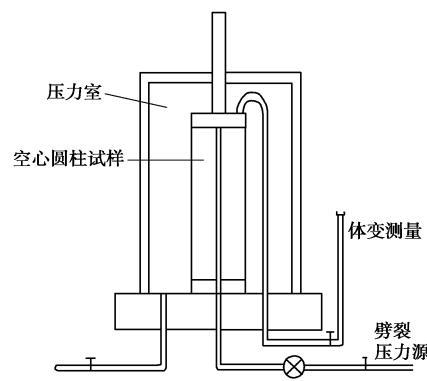


图 1 三轴仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of triaxial instrument



图 2 试样及中心孔

Fig. 2 Sample and central hole

采用人工击实法分层制样, 抽气饱和法进行试样饱和。在饱和好的试样两端涂防水胶, 然后将试样放置于三轴仪底座上, 套上橡皮膜, 装上加压帽, 两端扎紧后, 再安装压力室。试验时, 先按预定的主应力比进行排水固结。待固结完成后, 打开底部进水阀门通水, 检查注水孔是否堵塞, 确认中心孔通畅后, 关闭顶部排水阀。

为了观察试样的破坏形式, 在注水中加蓝墨水。由底部进水口按照一定加压速率施加注压力水, 进行水力劈裂试验。试验过程中, 随着注水压力 P_0 增高,

注水量不断增加, 当发现注水压力突然停止增高、注水量大量增加、并伴随着试件与橡皮膜之间大量漏出蓝色注水时, 表明试样已发生破坏, 此时的注水压力即为水力劈裂压力或水力击穿压力 P_{of} 。

本次试验围压三级: 300, 600, 900 kPa; 固结比 3 种: 1.0, 1.5, 3.0; 水压加载速率为 25, 50, 100 kPa/min。

1.3 试验结果与试验现象分析

^{#1} 平均线试样和^{#2} 下包线试样在不同围压 σ_3 、不同固结比 K_c 和不同加压速率条件下的破坏劈裂压力 P_{of} 见表 3。

表 3 水力劈裂压力

Table 3 Hydraulic fracture pressures

固结 压力 /kPa	固结 比	加压 速率 /(kPa·min ⁻¹)	#1		#2	
			破坏压 力/kPa	P_{of} σ_3	破坏压力 /kPa	P_{of} σ_3
300	1.0	25	337	1.12	315	1.05
	1.0	50	357	1.19	321	1.07
	1.0	100	350	1.17	313	1.04
	1.5	25	352	1.17	336	1.12
	1.5	50	332	1.11	310	1.03
	1.5	100	343	1.14	332	1.11
	3.0	25	372	1.24	321	1.07
	3.0	50	347	1.16	343	1.14
	3.0	100	358	1.19	332	1.11
	1.0	25	634	1.06	613	1.02
600	1.0	50	641	1.07	605	1.01
	1.0	100	663	1.11	614	1.02
	1.5	25	654	1.09	627	1.04
	1.5	50	725	1.21	605	1.01
	1.5	100	647	1.08	615	1.03
	3.0	25	696	1.16	618	1.03
	3.0	50	665	1.11	609	1.02
	3.0	100	681	1.14	660	1.10
	1.0	25	911	1.01	889	0.99
	1.0	50	925	1.03	892	0.99
900	1.0	100	918	1.02	883	0.98
	1.5	25	925	1.03	906	1.01
	1.5	50	918	1.02	901	1.00
	1.5	100	955	1.06	900	1.00
	3.0	25	957	1.06	909	1.01
	3.0	50	943	1.05	902	1.00
	3.0	100	971	1.08	929	1.03

试样级配对劈裂压力的影响。^{#1} 平均线试样小于 5 mm 粒径颗粒含量为 63.6%, 小于 0.075 mm 粒径颗粒含量为 24.4%, 小于 0.005 mm 粒径颗粒含量为 10.2%, ^{#2} 下包线试样小于 5 mm 粒径颗粒含量为 45.0%, 小于 0.075 mm 粒径颗粒含量为 17.44%, 小于 0.005 mm 粒径颗粒含量为 8.0%。由表 3, 在相同的围压、固结比和加载速率条件下^{#1} 平均线试样破坏劈裂应力均要高于^{#2} 下包线试样, 这主要是因为^{#1} 试样颗粒偏细、粉粒与黏粒含量较高, 颗粒间的胶结力更强, 抗拉强度更大导致的。

破坏形式。对于本次试验平均线试样和下包线试样, 水力劈裂试验主要表现为击穿破坏, 这与文献[13]结论一致, 破坏后的试样见图 3。试验试样粗颗粒含

量达到了 45.0%~63.6%, 由于颗粒间通过咬合和黏结连接, 无论是现场碾压还是室内制样, 土料均会形成或多或少的潜在内部孔隙通道, 这些内部孔隙通道是薄弱环节, 当水楔入这些通道并在水压力作用下顶破细颗粒胶结面, 就形成了贯穿整个试样的集中渗流通道, 导致水力击穿破坏。但值得注意的是, 少量试样会在外壁能观察到裂缝或裂纹, 但剖开试样, 却表现为与集中渗流通道连通, 只不过由于制样或拆样等因素导致试样表面产生了裂缝, 这种破坏也应为击穿破坏。



图 3 破坏后试样

Fig. 3 Sample after hydraulic fracture tests

流量分析。点绘固结比 1.0, 不同围压和不同加压速率条件下^{#1} 平均线试样的渗流量与注水压力 P_0 的关系曲线, 见图 4; 点绘围压 600 kPa、不同固结比和不同加载速率条件下的流量与 P_0 的关系曲线见图 5。图中编号 300-1-25 表示: 围压为 300 kPa, 固结比为 1.0, 水压加载速率为 25 kPa/min。

由图 4, 对于相同固结比、相同注水加载速率条件下水力劈裂试验, 随围压的增大流量减小, 这主要是因为随围压的增大, 固结后的试样孔隙减少、渗透系数逐渐降低导致的; 其次, 相同围压、相同固结比条件下, 随加载速率的增加, 试样渗流量降低, 这主要是因为加载速率越大达到同等劈裂压力所需时间越短, 因此其流量也越小。由图 5, 当围压、加载速率相同时, 随固结比的提高, 相同水压条件下试样的渗流量逐渐降低, 这主要是因为固结比越大, 试样承受的轴向应力越大, 试样趋密, 过水面积更小导致的。

流量 - 压力曲线形态分析。由图 4, 5 可知, 对于完整的水力劈裂试验, 初始注水阶段随压力的增大, 流量逐渐增大; 其后随注水压力的增大, 流量增长并非等比率增加, 有减缓的趋势, 这是因为在水力作用下试样内部细小颗粒移动并淤塞孔隙导致的。当压力接近破坏压力时, 流量 - 压力曲线往往形成了拐点, 此时的渗流已不稳定, 试样内部裂隙或集中渗流通道初步形成, 流量增大; 随后, 由于渗流通道的扩展, 流量急剧增加, 试样已不能承受预定施加的注水压力, 甚至由于水量供应不足而产生了压力降低现象。

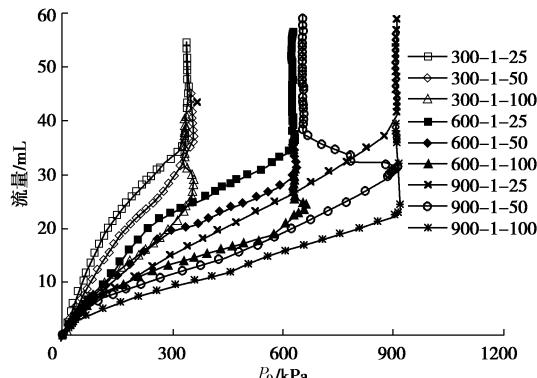


图4 固结比为1时流量随注水压力的变化

Fig. 4 Change of flow capacity with injection pressure under consolidation ratio of 1

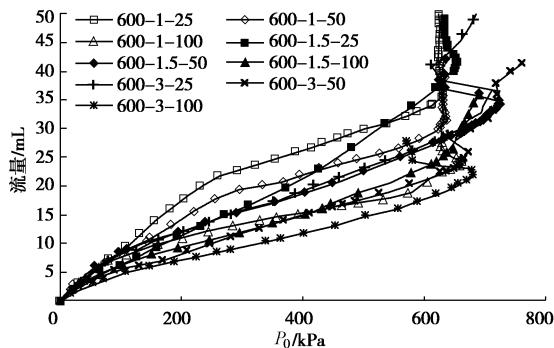


图5 围压600 kPa条件下流量随注水压力的变化

Fig. 5 Change of flow capacity with injection pressure under confining pressure of 600 kPa

2 砂石土心墙料水力劈裂特性

2.1 围压对水力劈裂的影响

研究表明, 水力劈裂试验结果表明劈裂压力 P_{0f} 与水平应力或围压 σ_3 密切相关, 随围压的增大劈裂压力提高, 可用线性关系式描述^[9], 即

$$P_{0f} = A\sigma_3 + B \quad (1)$$

式中, A 为直线斜率, B 值围压为 0 kPa 时的劈裂压力, 可视为抗拉强度。

点绘#1与#2试样破坏劈裂压力与围压的关系, 见图 6。

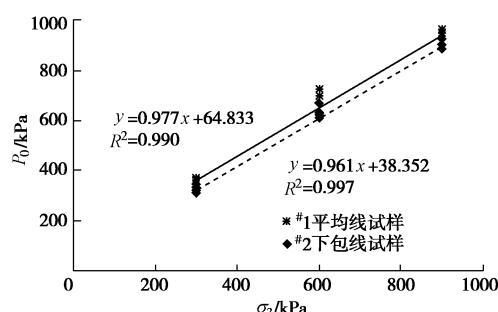


图6 劈裂压力随围压的变化

Fig. 6 Change of fracture pressure with confining pressure

#1 试样 A 值为 0.977, B 值为 64.8 kPa; #2 试样 A 值为 0.961, B 值为 38.4 kPa。试验结果表明, 由于#1

试样细粒含量较高, 因此其抗拉或抗裂强度较高, 即 B 值要高。但两种级配试样的 A 值相差不大, #1 试样仅略高。表明了对于本文不同级配的两种试样, 随围压的增大, 劈裂压力的增长幅度相差不大。

2.2 固结比对水力劈裂的影响

点绘 2 种掺砾心墙料的 $P_{0f}/\sigma_3 - K_c$ 的关系曲线, 见图 7。

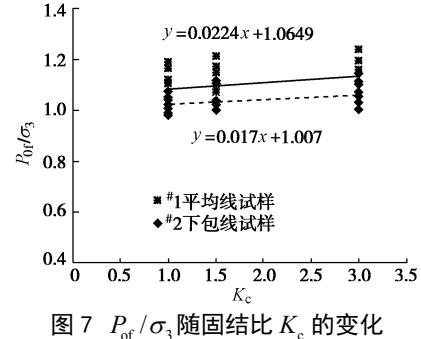
图7 P_{0f}/σ_3 随固结比 K_c 的变化

Fig. 7 Change of P_{0f}/σ_3 with consolidation ratio

用线性表达式描述劈裂压力随固结比的增长时, 斜率分别为 0.017 和 0.022, 相差不大, 因此对于文中 2 种级配土料, 固结应力比 K_c 由 1.0 提高至 3.0 时 P_{0f}/σ_3 仅略有增加, 但未发生明显变化。表明掺砾土料的自身性质和围压是劈裂压力的决定性因素, 固结比或轴向应力对劈裂压力影响不大。

2.3 加载速率对水力劈裂的影响

点绘 2 种掺砾心墙料的 $P_{0f}/\sigma_3 -$ 加载速率的关系曲线, 见图 8。

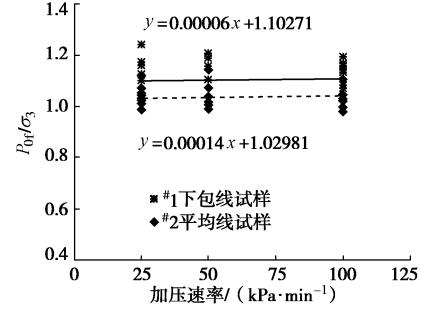
图8 P_{0f}/σ_3 随加压速率的变化

Fig. 8 Change of P_{0f}/σ_3 with injection pressure rate

由图 8 可知, 随加压速率的提高, 劈裂压力略有增加的趋势, 但对于本文试验劈裂压力增加不明显(按线性表达式, #1 试样斜率仅为 0.00006 和 #2 试样斜率为 0.00014), 表明加压速率对劈裂压力影响不大。这主要是因为, 本次试验试样为壁厚 48 mm 的空心圆柱体, 试样渗水路径较小, 在文中加压速率条件下水压能从试样中心孔非常迅速地传递至整个试样, 因此加压速率对劈裂压力影响不大。

3 结论

在改进的三轴仪上开展了两种不同级配掺砾心墙

土料的水力劈裂试验, 分析了级配、围压、固结比、加载速率等因素对破坏劈裂压力的影响, 根据试验结果得到了以下 4 点结论。

(1) 砂石土心墙料的水力劈裂主要表现为击穿破坏。掺砾土料的自身性质与围压是影响劈裂压力的关键性因素。

(2) 相同条件下, 随围压、固结比和水压加载速率的提高, 水力劈裂试验的流量降低。试验过程中由于在水力作用下试样内细小颗粒移动并淤塞孔隙, 流量~压力曲线上存在斜率减小的试验段。

(3) 对于砂石土心墙料, 当粉粒与黏粒含量较高时, 由于颗粒间的胶结更强, 相同围压、固结比和加载速率条件下破坏劈裂应力要高, 但文中不同级配砾石土的劈裂压力随围压的增长幅度变化不大。

(4) 在文中试验条件下, 固结比或轴向应力、加载速率对砾石土心墙料的劈裂压力影响不大。

参考文献:

- [1] 黄文熙. 对土石坝科研工作的几点看法[J]. 水利水电技术, 1982(4): 23~27. (HUANG Wen-xi. Some comments on research works related to rock-fill dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1982(4): 23~27. (in Chinese))
- [2] SEED H B. The Teton dam failure: a retrospective review[C]// Proc 10th ICSMFE. 1981: 219~238.
- [3] VAUGHAN P R, KLUTH P P, LEONARD M W, et al. Cracking and erosion of the rolled clay core of Balderhead dam and the remedial works adapted for its repair[C]// Proceedings 10th ICOLD Congress. Montreal, 1970: 73~93.
- [4] 朱俊高, 王俊杰, 张 辉. 土石坝心墙水力劈裂机制研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 487~492. (ZHU Jun-gao, WANG Jun-jie, ZHANG Hui. Study on mechanism of hydraulic fracturing in core of earth rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 487~492. (in Chinese))
- [5] 陈五一, 赵颜辉. 土石坝心墙水力劈裂计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1380~1386. (CHEN Wu-yi, ZHAO Yan-hui. Study of calculation method of hydraulic fracturing for core dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1380~1386. (in Chinese))
- [6] 王俊杰, 朱俊高. 堆石坝心墙抗水力劈裂性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 2880~2886. (WANG Jun-jie, ZHU Jun-gao. Investigation on ability of rockfill dam core to resist hydraulic fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 2880~2886. (in Chinese))
- [7] NG A K, SMALL J C. A case study of hydraulic fracturing using finite element methods[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(7): 861~875.
- [8] NOBARI E S, LEE K L, DUNCAN J M. Hydraulic fracturing in zoned earth and rockfill dams[R]. Berkeley: University of California, 1973.
- [9] JAWOSKI W, DUNCAN J M, SEED H B. Laboratory study of hydraulic fracturing[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1981, 107(6): 713~732.
- [10] 丁金粟, 杨 斌. 击实黏性土水力劈裂性能研究[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(3): 1~15. (TING Chin-su, YANG Bin. The study of hydraulic fracturing on compacted cohesive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(3): 1~15. (in Chinese))
- [11] 张丙印, 李 娜, 李全明, 等. 土石坝水力劈裂发生机理及模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1277~1281. (ZHANG Bing-yin, LI Na, LI Quan-ming, et al. Mechanism analysis and model test of hydraulic fracturing in embankment dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1277~1281. (in Chinese))
- [12] 袁俊平, 王启贵. 水力劈裂楔劈效应试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 36(12): 3360~3364. (YUAN Jun-ping, WANG Qi-gui. An experimental study of wedge splitting effect of hydraulic fracturing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 36(12): 3360~3364. (in Chinese))
- [13] 曾开华. 土质心墙水力劈裂机理及其影响因素的研究[D]. 南京: 河海大学, 2001. (ZENG Kai-hua. Factors affecting hydraulic fracturing of high earth core dams[D]. Nanjing: Hohai University, 2001. (in Chinese))
- [14] 沈珠江, 易进栋, 左元明. 土坝水力劈裂的离心模型试验及其分析[J]. 水力学报, 1994, 25(9): 67~77. (SHEN Zhu-jiang, YI Jin-dong, ZUO Yuan-ming. Centrifuge model test of hydraulic fracture of earth dam and its analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 25(9): 67~77. (in Chinese))
- [15] 冯晓莹, 徐泽平. 心墙水力劈裂机理的离心模型试验研究[J]. 水力学报, 2009, 40(10): 1259~1263. (FENG XIAO-ying, XU Ze-ping. Centrifugal model study on mechanism of hydraulic fracturing of clay core-wall in rockfill dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(10): 1259~1263. (in Chinese))
- [16] 刘令瑶, 崔亦昊, 张广文. 宽级配砾石土水力劈裂特性的研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 10~13. (LIU Ling-yao, CUI Yi-hao, ZHANG Guang-wen. The property of hydraulic fracture of wide grading gravelly soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(3): 10~13. (in Chinese))