

掺砾心墙料的中三轴渗透试验

吴珺华^{1,2}, 杨松³, 卢廷浩⁴

(1. 南昌航空大学土木建筑学院, 江西 南昌 330063; 2. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3. 云南农业大学水利学院, 云南 昆明 650201; 4. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要:为获得掺砾心墙料在复杂应力状态下的渗透性能,采用改进的中三轴仪进行了掺砾心墙料的渗透试验,研究了不同围压、土石比和水头差对掺砾心墙料渗透系数的影响。试验结果表明:土体围压越大,掺砾心墙料渗透系数越小,呈负指数形式递减;当围压增大到一定值时,土体很难被进一步压密,掺砾心墙料渗透系数基本不变;土石比越小,掺砾心墙料渗透系数越大,当砾石含量超过某一值时,掺砾心墙料渗透系数迅速增大;水头差较小时,不同的水头差对掺砾心墙料渗透系数几乎没有影响。

关键词:掺砾心墙料;土石坝;渗透系数;渗透试验;中三轴仪

中图分类号:TV443 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)04-0090-05

Permeability tests on middle triaxis of core wall mixed gravel//WU Junhua^{1,2}, YANG Song³, LU Tinghao⁴(1. College of Civil Engineering and Architecture, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 4. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to obtain the permeability of core wall mixed gravel under complex stress conditions, permeability tests on core wall mixed gravel are carried out by modified middle triaxial apparatus. Thereafter, the effects of different confining pressures, soil-rock ratios, and water head differences on the permeability coefficient of core wall mixed gravel are studied. The test results show that the larger confining pressure is, the smaller permeability coefficient of core wall mixed gravel is, that is, the relationship between them is shown as a negative exponential function. When the confining pressure increases to a certain value, the permeability coefficient almost keeps unchanged because the soil particles are difficult to be further compressed. In addition, the permeability coefficient has a negative correlation with the soil-rock ratio and it increases rapidly when the gravel content exceeds a certain value. Moreover, when the water head difference is small, it has little or no effect on the permeability coefficient.

Key words: core wall mixed gravel; embankment dam; permeability coefficient; permeability test; middle triaxial apparatus

土石坝工程中,心墙料的渗透性能影响着坝体的防渗效果。诸多学者对不同土体的渗透性能进行了大量研究:朱国胜等^[1]研究了等宽级配粗粒土渗透试验中存在的尺寸效应及边壁效应,提出了渗透仪尺寸的选择原则;雷红军等^[2]利用改进的三轴渗透试验装置,对心墙黏土进行了剪切过程中的渗透试验,分析了围压、渗透压力、渗透方向等对土体渗透性的影响;蒋玉坤等^[3]利用改进后的三轴仪对黏土进行了室内渗透试验,研究了深部黏土渗透的各向异性原因;李成全等^[4]设计了自压式三轴渗透仪,可适用于现场大型渗透试验;廖春芳等^[5]采用

自制现场渗透试验装置,进行了单、双环渗透试验,研究了含裂隙的红黏土渗透性能;王建秀等^[6]进行了大理岩的常规和控制轴向应变、围压先升后降的三轴渗透试验,研究了复杂应力路径下渗透率的变化规律;郭鸿等^[7]对不同黄土地区的试样进行了常规变水头和三轴渗透试验,研究了围压产生的应力场对饱和黄土渗透特性的影响规律;俞缙等^[8]采用岩石伺服三轴试验系统,利用稳态法对砂岩全应力应变过程进行渗透率试验研究,分析试样渗透率随其脆性、延性变化的特点;朱俊高等^[9]采用大型三轴仪,对掺砾心墙料进行了三轴固结排水剪切试验,

基金项目:国家自然科学基金(51408291);江西省教育厅科技研究项目(GJJ14547);重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心暨水利水运工程教育部重点实验室开放基金(SLK2014B01)

作者简介:吴珺华(1985—),男,江西吉安人,讲师,博士,主要从事非饱和土研究。E-mail:wjh0796@163.com

研究了剪切速率对掺砾心墙料应力-应变关系和强度特性的影响;陈志波等^[10]对某宽级配砾质土分别进行了中型和大型三轴固结排水剪试验,研究了不同条件下宽级配砾质土的强度和应力应变特性;邹玉华等^[11]归纳了砾石土心墙料-反滤料联合抗渗方面的研究成果;雷红军等^[12]在传统三轴仪的基础上,研制了三轴多向渗透试验装置,可测定不同剪切方向上的渗透系数;柯瀚等^[13]对埋体饱和和渗透系数影响因素开展了大量的室内试验研究。上述研究成果主要集中在土体的渗透性能方面,而对掺砾心墙料的渗透性能研究不多。由于掺砾心墙料具明显的不均匀性,且其中的颗粒粒径较大,采用常规渗透仪很难制取试样;现场测试方法较复杂,影响因素较多,初始和边界条件不易掌控。此外,心墙不同位置的应力状态、孔隙水压力及土体级配等参数不尽相同,其渗透系数亦有差异。本文利用改进的中三轴仪,对掺砾心墙料进行不同条件下的三轴渗透试验,以研究掺砾心墙料在复杂应力状态下的渗透性能。

1 试样制备与试验方案

试验用料取自某实际工程,土体基本参数如下:最大干密度 1.76 g/cm³,最优含水率 18.3%,孔隙比 0.53,相对密度 2.69,粒径分布曲线见图 1。砾石质量组分为:20~10 mm 占 47%,10~5 mm 占 30%,小于 5 mm 占 23%。试样设计干密度为 1.98 g/cm³,分别进行了不同试验围压 σ_c 、土石比 R_{\pm} 、水头差 H 等条件下的三轴渗透试验。本文借用水电工程中常用的土石比概念,将此处的土石比定义为试样中土的质量与砾石质量之比。参照 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》,根据不同土石比制备中三轴圆柱试样,尺寸为直径 10 cm、高 20 cm。试样制备完成后,对试样进行抽气饱和,完成后静置水中不少于 48 h。试样顶部采用带槽线的透水板代替透水石,保证水流能均匀、快速地流出。试验方案见表 1,除了不同土石比方案(方案②)的试样需单独制取外,其余方案的试样只需制取 1 个。如方案①中,当试验围压为 200 kPa 的试验结束后,只需将围压升至

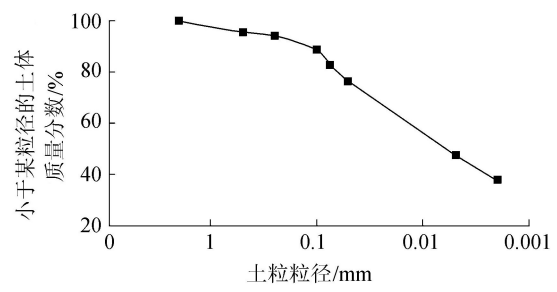


图 1 土体粒径分布曲线

300 kPa,待固结稳定后再进行渗透试验即可,无须重新制样。这样不仅避免了重复烦琐的制样过程,而且也避免了不同试样之间的差异性。

表 1 三轴渗透试验方案

方案编号	σ_c /kPa	R_{\pm}	H /m
①-1	100	1 : 1	变水头
①-2	200	1 : 1	10
①-3	300	1 : 1	20
①-4	400	1 : 1	30
②-1	100	1 : 0.5	10
②-2	100	1 : 0.75	10
②-3	100	1 : 1.25	10
②-4	100	1 : 1.5	10
③-1	100	1 : 1	15
③-2	100	1 : 1	20
③-3	100	1 : 1	25
③-4	100	1 : 1	30

2 试验装置与试验方法

试验装置是在传统三轴仪的基础上改造制成的,如图 2 所示。方案①中的变水头试验方法主要改进如下:原排水管作为进水管,灌满水后悬挂一定高度,原反压孔作为出水口。试样固结完成后,打开反压阀和进水阀,按照土工试验标准中的变水头试验方法进行试验。其余方案的试验方法主要改进如下:原反压装置改装为施加水头差的进水口装置,用以提供试验所需的额定水头差,反压管里充满水,且需保持水源不断;围压装置中采用标有刻度(精度 0.1 mL)的内管,用来测量围压施加过程中压力室内水量的变化,以间接测量试样体积的变化;出水口的高度应与进水口高度相同,用 25 mL 量筒(精度 0.5 mL)盛取出水量,用来判断是否处于稳定渗透状态。为避免排出水的蒸发,在水面上覆盖一层薄煤油。试样安装完成后,打开围压阀和排水阀,施加某级围压并记录内管读数,待固结稳定后(不小于 48 h)再记录内管读数,两者之差即为试样固结过程

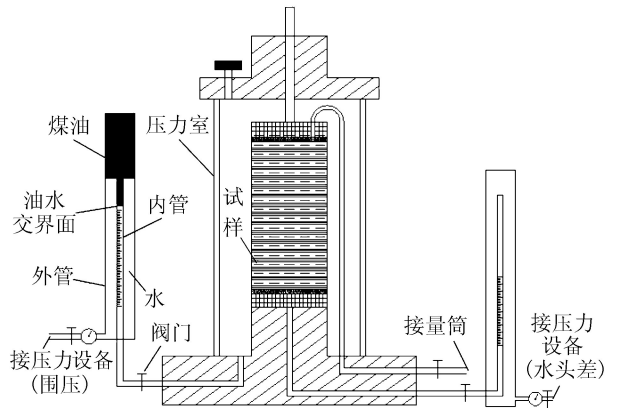


图 2 中三轴渗透试验装置示意图

中的体积变化量。固结完成后,打开反压阀施加水头差,待出水口有水流时开始记时,记时间间隔原则上为60 s。当出水量稳定后,持续一段时间再关闭反压阀和出水阀。对于方案①,可继续施加下一级围压(或水头差),参照上述方法再次进行试验,不需重新安装试样;对于方案②,需重新安装试样进行试验。

变水头试验可参照 GBT 50123—1999《土工试验方法标准》进行,渗透系数按下式计算:

$$k_T = \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2} \quad (1)$$

式中: k_T 为水温为 T 时的渗透系数, cm/s; a 为变水头管的断面面积, cm²; t_1 、 t_2 分别为测读水头的起始和终止时间, s; L 为固结后试样高度, cm; A 为固结后试样断面面积, cm²; H_1 、 H_2 分别为起始水头和终止水头, cm。

由于试验的水头差是个定值,故该试验可认为是常水头渗透试验,可通过绘制排水量 V 与历时 t 关系曲线来判断渗透是否稳定,标准如下:当排水量与历时关系曲线斜率基本保持不变时,即可认为试样处于稳定渗透状态。渗透系数按下式计算:

$$k_T = \frac{V}{t} \frac{L}{AH} = \frac{mL}{AH} \quad (2)$$

式中: t 为历时, s; V 为排水量, cm³; H 为施加的水头差, cm; m 为排水量与历时关系曲线斜率, cm³/s。

3 试验结果与分析

图3为不同围压条件下,水头差为10 m时的排水量与历时关系曲线。可以看出,试验刚开始时,由于试样内部的不均匀性、黏粒含量的不同以及排水管内有气泡等因素的影响,排水量较小,存在滞后性。随着时间的增长,排水量逐渐增大,排水量与历时逐渐呈现为线性关系。其他围压条件下的曲线亦有此规律。试验围压越大,试样内部越紧密,因此单位时间内的排水量越小,排水量与历时关系曲线的斜率越小。

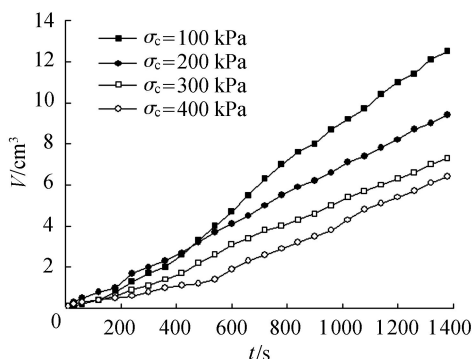


图3 不同围压下排水量与历时关系曲线

为准确求取系数 m , 这里统一选取历时 780 s 后

的数据进行拟合。限于篇幅,仅将水头差为 10 m 的拟合结果列于表 2, 同时根据固结后试样的实际断面面积和高度(表 3), 代入式(1)或(2)中, 即可求解出不同围压下试样的渗透系数, 结果见图 4。为简单起见, 假设试验过程中试样保持不变。可以看出, 不同水头差条件下, 随着围压的增大, 试样的渗透系数迅速减小, 并趋向稳定。由于同一水头差下的试样是相同的, 并不存在不同试样之间的差异性, 故该结果表明不同围压下的渗透系数明显不同, 试验围压越大, 试样内部越紧密, 排水通道越窄, 单位时间流过的水量越少。

表 2 排水量与历时关系曲线拟合结果

σ_c /kPa	$m / (\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
100	0.009 1
200	0.006 2
300	0.005 3
400	0.004 7

表 3 试样固结后尺寸

σ_c /kPa	V/cm^3	L/cm	A/cm^2
100	26.7	19.90	77.60
200	37.2	19.86	77.20
300	48.1	19.83	76.78
400	57.8	19.82	76.34

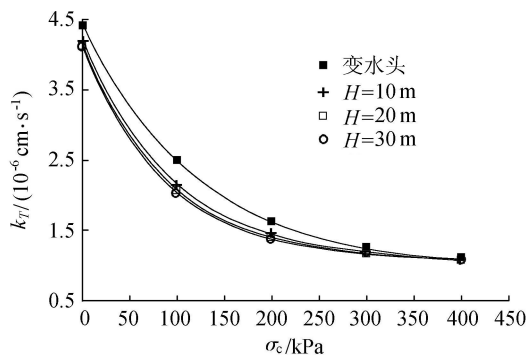


图 4 渗透系数与围压关系曲线

根据渗透系数与围压关系曲线特征, 可采用负指数函数(式(3))进行拟合, 拟合结果见表 4。

$$k_T = (k_0 + f e^{p\sigma_c}) \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中 k_0 、 f 、 p 为常数。当 σ_c 趋于无穷时, $k_T = k_0$, 表明试样渗透系数有一个极小值。当围压增大到一定值时, 土体颗粒几乎完全处于紧密状态, 不会被进一步压实(前提是保证土体颗粒不被压碎), 渗透系数并不会随着围压的持续增大而减小。

表 4 渗透系数与围压关系拟合结果

H/m	k_0	f	p
变水头	0.945	3.503	-0.008 3
10	1.070	3.070	-0.011 5
20	1.067	3.081	-0.011 2
30	1.062	3.144	-0.010 5

从图4可以看出,不同围压条件下试样的渗透系数数量级均为 10^{-6} cm/s,与黏性土的渗透系数数量级比较接近。由于所选土体级配较好,可有效充填砾石之间的孔隙,整个试样的孔隙比较小。此外在围压作用下,试样内部土体颗粒之间接触更为紧密,孔隙进一步被压缩,导致渗透系数的数量级与黏性土的结果较为接近。

试验相同围压下,采用变水头试验测得的渗透系数比常水头条件下的渗透系数要略大,而不同水头差条件下的渗透系数基本相同。由于变水头试验时温度较高(气温 31°C ,相对湿度 60%),进水管中的水未采取措施避免蒸发,且持续时间较长,使得进水管中的水有部分蒸发, H_2 偏小,导致渗透系数偏大。为验证上述推断,在围压为 300 kPa 和 400 kPa 的试验过程中在进水管水面上覆盖一薄层煤油,测得的渗透系数与常水头的基本一致。

图5是不同土石比下的渗透系数。需要指出的是,假定每份土的颗粒分布完全符合图1曲线,且砾石组分也完全相同,那么可根据不同土石比的大小,通过计算获得相应的级配曲线。可以看出,随着砾石含量的增加,试样内部孔隙数量和规模不断增大,单位时间内通过的水量越多,渗透系数越大,呈现快速增长的趋势。当砾石含量超过某一值时,土体的渗透系数迅速增大。这表明土石比对心墙料的渗透性能有显著影响。

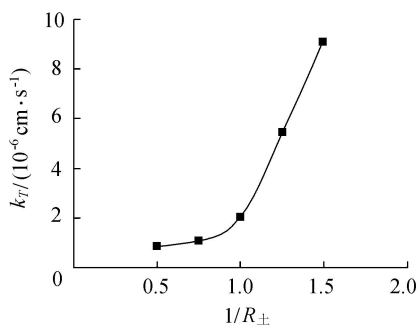


图5 渗透系数与土石比关系曲线

图6是不同水头差作用下的渗透系数。可以看出,由于试验过程中的试样并未改变,水头差的变化并不能有效地改变试样内部的结构,渗透过程仍服从达西定律,故水头差的大小对土体的渗透系数几

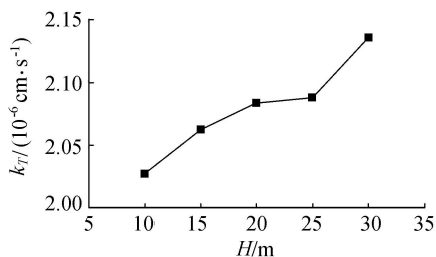


图6 渗透系数与水头差关系曲线

乎没有影响,实际应用时可认为渗透系数为常数。但对于高土石坝,当水头差较大时,可能会对土体的内部结构带来较大影响,导致渗透性能发生改变。此外由于试验条件的限制,本文试验中采用的最大围压为 400 kPa ,相当于坝高约 40 m 土石坝的工况。对于更大围压的试验,将另文讨论。

4 结论

a. 掺砾心墙料所在位置的围压越大,其渗透系数越小,呈负指数形式递减。当围压增大到一定值时,土体很难被进一步压密,其渗透系数基本不变。

b. 土石比越小,掺砾心墙料渗透系数越大,当砾石含量超过某一值时,掺砾心墙料的渗透系数迅速增大。

c. 水头差较小时,其对掺砾心墙料的渗透系数影响不大;但对于高土石坝而言,过大的水头差可能对土体结构带来较大影响,从而导致渗透性能发生变化,应予以关注。

参考文献:

- [1] 朱国胜,张家发,陈劲松,等. 宽级配粗粒土渗透试验尺寸效应及边坡效应研究[J]. 岩土力学,2012,33(9): 2569-2573. (ZHU Guosheng, ZHANG Jiafa, CHEN Jinsong, et al. Study of size and wall effects in seepage test of broadly graded coarse materials[J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33(9):2569-2573. (in Chinese))
- [2] 雷红军,卞锋,于玉贞,等. 黏土大剪切变形中的渗透特性试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(4):1130-1133. (LEI Hongjun, BIAN Feng, YU Yuzhen, et al. Experimental study of permeability of clayey soil during process of large shear deformation [J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(4):1130-1133. (in Chinese))
- [3] 蒋玉坤,孙如华. 深部黏土渗透特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2012,34(2):268-273. (JIANG Yukun, SUN Ruhua. Experimental study on permeability of deep clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(2):268-273. (in Chinese))
- [4] 李成全,唐巨鹏,董子贤,等. 自压式三轴渗透仪的研制[J]. 辽宁工程技术大学学报,2006,25(增刊1):124-125. (LI Chengquan, TANG Jupeng, DONG Zixian, et al. Development of self-pressure triaxial osmotic instrument [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25 (Sup1):124-125. (in Chinese))
- [5] 廖春芳,刘永贵,吴胜军. 干缩开裂红黏土路基的现场渗透试验研究[J]. 中外公路,2010,30(5):39-41. (LIAO Chunfang, LIU Yonggui, WU Shengjun. Field tests of permeability on roadbed of red clay with drying shrinkage cracks[J]. Chinese and Foreign Road,2010,30

- (5);39-41. (in Chinese))
- [6] 王建秀,胡力绳,叶冲,等.复杂应力路径下大理岩三轴渗透试验研究[J].岩土力学,2010,31(8):2389-2394. (WANG Jianxiu, HU Lisheng, YE Chong, et al. Triaxial permeability test of marble under complex stress path[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2389-2394. (in Chinese))
- [7] 郭鸿,骆亚生,郭靖.考虑应力场作用的饱和黄土渗透特性研究[J].水土保持通报,2010,30(1):131-133. (GUO Hong, LUO Yasheng, GUO Jing. Infiltration characteristics of saturated loess by considering the role of stress field[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(1): 131-133. (in Chinese))
- [8] 俞缙,李宏,陈旭,等.渗透压-应力耦合作用下砂岩渗透率与变形关联性三轴试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(6):1203-1213. (YU Jin, LI Hong, CHEN Xu, et al. Triaxial experimental study of associated permeability-deformation of sandstone under hydro-mechanical coupling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1203-1213. (in Chinese))
- [9] 朱俊高,龚选,周建方,等.不同剪切速率下掺砾料大三轴试验[J].河海大学学报:自然科学版,2014,42(1):29-34. (ZHU Jungao, GONG Xuan, ZHOU Jianfang, et al. Large-scale triaxial tests on behavior of gravelly soil at different shearing rates [J]. Journal of Hohai University; Natural Sciences, 2014, 42(1): 29-34. (in Chinese))
- [10] 陈志波,朱俊高.宽级配砾质土三轴试验研究[J].河海大学学报:自然科学版,2010,38(6):704-710. (CHEN Zhibo, ZHU Jungao. Triaxial tests on widely graded gravelly soil [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(6): 704-710. (in Chinese))
- [11] 邹玉华,陈群.砾石土心墙料-反滤料联合抗渗研究进展[J].水利水电科技进展,2009,29(5):89-94. (ZOU Yuhua, CHEN Qun. Progress in research on anti-permeability properties of gravelly soil core material and filter material[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(5): 89-94. (in Chinese))
- [12] 雷红军,孙逊,卞锋,等.土的三轴多向渗透试验装置的研制[J].实验技术与管理,2009,26(6):55-57. (LEI Hongjun, SUN Xun, BIAN Feng, et al. Development of triaxial seepage test equipment for soil [J]. Experimental Technology and Management, 2009, 26(6): 55-57. (in Chinese))
- [13] 柯瀚,王文芳,魏长春,等.填埋体饱和渗透系数影响因素室内研究[J].浙江大学学报:工学版,2013,47(7):1164-1170. (KE Han, WANG Wenfang, WEI Changchun, et al. Experimental study on saturated hydraulic conductivity of MSW under different conditions [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2013, 47(7): 1164-1170. (in Chinese))

(收稿日期:2014-05-04 编辑:熊水斌)

(上接第79页)

- [9] 周创兵.水电工程高陡边坡全生命周期安全控制研究综述[J].岩石力学与工程学报,2013,32(6):1081-1093. (ZHOU Chuangbing. A prospect of researches on life-cycle safety control on high-steep rock slopes in hydropower engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1081-1093. (in Chinese))
- [10] 李喆,谭德宝,张穗,等.水利工程项目管理系统的设计与开发[J].长江科学院院报,2014(1):66-71. (LI Zhe, TAN Debao, ZHANG Sui, et al. Design and development of management information system for water project construction [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014 (1): 66-71. (in Chinese))
- [11] 马开远,万飏,高仕春,等.统一平台下大坝安全评价系统设计及开发[J].水利水电技术,2014(2):126-128. (MA Kaiyuan, WAN Biao, GAO Shichun, et al. Design and development of unified platform based dam safety evaluation system [J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2014 (2): 126-128. (in Chinese))
- [12] 陈桂洪.水利水电工程施工质量评价方法[J].黑龙江水利科技,2012(10):220-222. (CHEN Guihong. Construction quality evaluation method of water resources and hydropower engineering [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2012 (10): 220-222. (in Chinese))
- [13] 雷用,刘长林.边坡工程质量事故:设计原因分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2011,30(增刊1):576-579. (LEI Yong, LIU Changlin. Design reasons about quality accident of slope engineering [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2011, 30 (Sup1): 576-579. (in Chinese))
- [14] LU Wenbo, HU Yingguo, YANG Jianhua, et al. Spatial distribution of excavation induced damage zone of high rock slope [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, 64: 181-191. (收稿日期:2014-04-10 编辑:熊水斌)

