

DOI: 10.11779/CJGE2020S1033

# 沥青混凝土心墙坝抗震加固离心机振动台试验研究

焦 阳<sup>1</sup>, 任国峰<sup>2, 3</sup>, 彭卫军<sup>1</sup>, 顾行文<sup>2, 3</sup>, 王年香<sup>2, 3</sup>

(1. 新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029;

3. 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘 要:**通过 2 组土工离心机振动台模型试验, 对比研究了设计地震条件下某沥青混凝土心墙坝抗震加固效果。试验模拟了无抗震加固措施和采用土工格栅加固 2 种坝体条件。试验监测了坝体的地震反应、坝顶变形、心墙动应力、地震变形情况。试验结果表明: 在抗震措施加固范围以下, 有抗震措施和无抗震措施坝体的加速度放大效应大体一致; 在抗震措施加固范围内, 有抗震措施坝体的加速度放大效应略强于无抗震措施坝体; 无抗震措施坝体坝顶沉降率为 0.442%, 有抗震措施坝体坝顶沉降率为 0.366%; 地震引起心墙的最大动拉应力大约在 2/3~4/5 坝高范围, 抗震措施能够显著减小心墙动应力; 大坝的地震破坏模式主要是堆石料沉降致使护坡与堆石料分离, 从而引起护坡开裂、破损、坍塌、甚至滚落; 有抗震措施坝体则未见明显破坏。从地震引起的坝顶沉降、心墙应力、地震变形情况分析, 所设计的抗震加固措施能够有效抵御设计地震。

**关键词:**沥青混凝土心墙坝; 地震; 抗震措施; 离心机振动台; 土工格栅

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S1-0167-05

**作者简介:**焦 阳(1985—), 男, 陕西延川人, 高级工程师, 从事水利工程设计工作。E-mail: 13999944007@qq.com。

## Aseismic measures for asphalt concrete core dams by dynamic centrifuge modelling tests

JIAO Yang<sup>1</sup>, REN Guo-feng<sup>2, 3</sup>, PENG Wei-jun<sup>1</sup>, GU Xing-wen<sup>2, 3</sup>, WANG Nian-xiang<sup>2, 3</sup>

(1. Xinjiang Water Conservancy and Hydropower Survey Design Institute, Urumqi 830000, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute,

Nanjing 210029, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Dynamic centrifuge modelling tests are carried out to study the effectiveness of aseismic measures for a sand-gravel dam with asphalt concrete core wall under design earthquake. 2 models are used to simulate 2 dams without and with aseismic measures. The acceleration response, deformation, core wall stress and stability are analyzed. For the 2 dams, the acceleration amplification is almost the same below the reinforced region. In the reinforced region, the amplification effect is stronger than that of the dam without aseismic measures. The crest settlement rate is 0.442% and 0.366%, respectively without and with aseismic measures. The maximum seismic stress is recorded in the core wall of 2/3~4/5 dam height. The aseismic measures reduce the stress on the core wall obviously. The failure mode is mainly the separation between upstream revetment and rockfill material induced by settlement, causing revetment to crack or even collapse. But no evident failure is observed on the reinforced dam. The designed aseismic measures are solid under design earthquake according to test results.

**Key words:** asphalt concrete core dam; earthquake; aseismic measure; centrifuge shaking table; geogrid

## 0 引 言

某 II 等大(2)型水电站工程, 拦河坝采用碾压式沥青混凝土心墙堆石坝, 最大坝高 128.8 m。坝址区基本地震烈度为 VIII 度, 设计烈度为 IX 度。工程具有河谷狭窄、高坝、高地震区等特点, 设计过程中经分析认为: 坝体必须进行抗震加固处理, 拟在坝体上部铺设土工格栅的抗震措施。但所设计的抗震措施加固效果如何, 有必要开展离心机振动台模型试验, 研究设

计地震情况下大坝有、无抗震措施时坝体的地震反应、坝顶变形、心墙动应力、地震变形情况, 分析抗震措施的处理效果, 为工程抗震安全设计提供技术支撑。

**基金项目:** 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室开放基金项目(2019D23); 国家重点研发计划项目(2017YFC0404900); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y319001, Y319002)

**收稿日期:** 2020-06-05

**\*通信作者** (E-mail: xwgu@nhri.cn)

## 1 动力离心模型试验原理和方法

离心机振动台模型试验是近年来迅速发展起来的一项高新技术,因其能够模拟原型自重应力场,被认为是研究岩土工程地震问题最为有效、最为先进的研究方法和试验技术<sup>[1]</sup>。该技术已在土石坝地震破坏机理、抗震设计计算、数值模型验证等方面显示出巨大的优越性,并取得良好的效果<sup>[2-5]</sup>,已成为验证检验计算理论、计算模型、计算方法的主要手段。

### 1.1 离心模型试验相似理论

根据相似理论第三定律,原型和模型动力相似的充分必要条件是它们的动力学物理过程的单值性条件相似,并使单值量组成的相似准则相等。具体到离心机振动台模型试验,应满足几何条件、运动条件、物理条件、动力平衡条件和边界条件。上述的条件进行原型和模型之间的相似变换,就可得到离心机振动台试验模型相似律<sup>[6]</sup>。

### 1.2 试验设备

试验在南京水利科学研究院 NHRI400 gt 大型土工离心机和离心机振动台(图1)上开展。NHRI400 gt 大型土工离心机建于1992年,并于2017年完成了升级改造<sup>[7]</sup>,其容量为400 gt,最大加速度200g,最大负荷2000 kg,最大半径5.5 m,吊蓝平台1100 mm×1100 mm。离心机振动台的技术指标:离心加速度为80g,最大振动加速度为20g,最大位移为5 mm,最大有效负载为500 kg,最大振动时间为3 s,频率为20~200 Hz,激振波型为正弦波,地震波,随机波。振动方向为水平振动。试验采用的模型箱内部长×宽×高尺寸为700 mm×350 mm×650 mm。

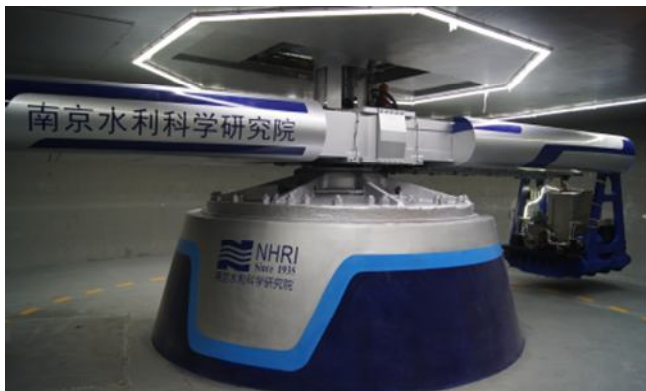


图1 装载了振动台的 NHRI 400 gt 大型离心机

Fig. 1 NHRI 400 gt centrifuge with shaking table

## 2 试验方案

离心机振动台试验方法相似性好、理论基础先进,但由于所模拟的坝高128.5 m,最大底宽约600 m,从

目前的设备能力来看,世界上最大的离心机振动台也不可能等比尺模拟全部的坝体。因此,本文采用不等比尺的模拟方法,即模型几何比尺 $\eta_l$ 小于加速度比尺的倒数 $1/\eta_g$ 。

### 2.1 模型设计

取大坝标准剖面,按平面问题考虑,对马道、填料、覆盖层进行合理简化,受限于模型箱尺寸,对上下游坝坡进行截取,并在模型箱侧壁粘贴橡皮垫以消除边界反射波。模型几何比尺 $\eta_l = 1:450$ ,离心加速度比尺 $\eta_g = 40$ 。模型布置见图2,3是模型照片。

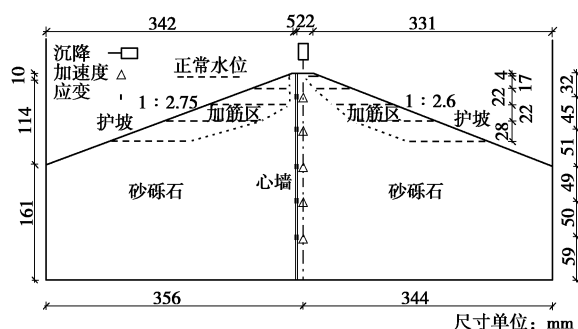


图2 模型布置图

Fig. 2 Model setup



图3 模型照片

Fig. 3 Model on shaking table

针对相同的模型布置和地震条件(设计地震,50年超越概率2%,峰值加速度516.5 gal( $1g=9.81$  gal)),开展了2组试验:没有采用抗震措施模型M1和进行了抗震加固模型M2。

### 2.2 筑坝材料的模拟

坝体填筑分区从上游至下游分为上游砂砾堆石区、上游过渡区、心墙防渗体、下游过渡区、下游砂砾堆石区、下游堆石利用料区。筑坝材料种类较多,模型试验中要全部模拟是很困难的,根据试验目的,选择对影响坝体变形和稳定起决定作用的砂砾石料进行模拟。考虑粒径效应<sup>[8]</sup>,离心振动台模型堆石料的限制粒径取为40 mm。采用《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[9]</sup>的“粗颗粒土的试样制备”混合法制备。

### 2.3 心墙和护坡的模拟

大坝沥青砼心墙厚700~1400 mm,弹性模量约

为 500 MPa。试验中, 采用有机玻璃板来模拟, 弹性模量约为 2.3 GPa, 按抗弯刚度相似条件确定其厚度, 以保证其受力条件与原型基本一致。模型有机玻璃离心墙厚度为 1.2 mm, 沿高程两侧粘贴应变计组成全桥电路测量动态应变响应 (以下游侧受拉为正)。

实际工程中, 上游坝坡采用 C30 砼护坡, 厚 300 mm, 下游坝坡, 约 1/4 坝高以上, 采用钢筋砼护坡, 厚 200 mm, 约 1/4 坝高以下, 采用干砌石护坡, 厚 400 mm。缩尺模型中, 上下游坝坡的砼护坡均采用水泥砂浆模拟。

## 2.4 土工格栅的模拟

在坝内上、下游约 70% 坝高以上至坝顶区域内铺设土工格栅。土工格栅坝高方向层间距为上游 1.6 m、下游 2.4 m, 水平距离范围: 约 70% 坝高处上游长度为上游护坡板向坝内 50 m, 下游护坡板向坝内距过渡料区 50 m 范围; 约 75% 坝高处上游长度为上游护坡板向坝内 60 m, 下游护坡板向坝内距过渡料区 30 m 范围; 约 90% 坝高处上游长度为上游护坡板向坝内至上游过渡料区上边缘, 下游护坡板向坝内距过渡料区 20 m 范围; 约 97% 坝高处上游长度为上游护坡板向坝内至上游过渡料区上边缘, 下游护坡板向坝内距过渡料区 6 m 范围; 接近坝顶处上游长度为上游护坡板向坝内至上游过渡料区上边缘, 下游护坡板向坝内距过渡料区范围; 中间格栅深入坝体长度通过内插获取。

土工格栅采用纱窗模拟, 抗拉强度要求满足相似条件。

## 2.5 地震波的模拟

图 4, 5 给出了模型建基面设计条件和校核条件下的场地波和试验实际输入波时程线。可以看出: 目标波峰值分别为 504.514, -510.21 gal, M1 的实际输入波峰值分别是 501.937, -523.127 gal, M2 的实际输入波峰值分别是 501.726, -501.521 gal; 并且 2 次试验目标波形和实际输入波形的频响特性也较为吻合。试验输入波形较好地再现了目标场地波。

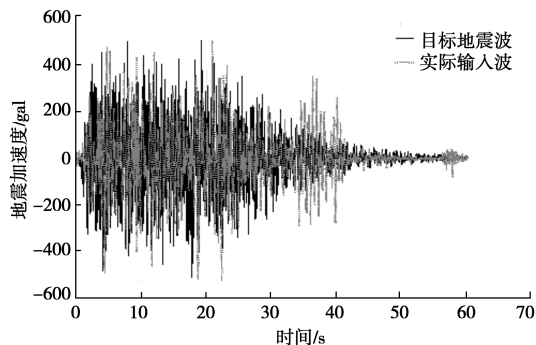


图 4 目标波和输入波 (M1)

Fig. 4 Recorded and aim waves (M1)

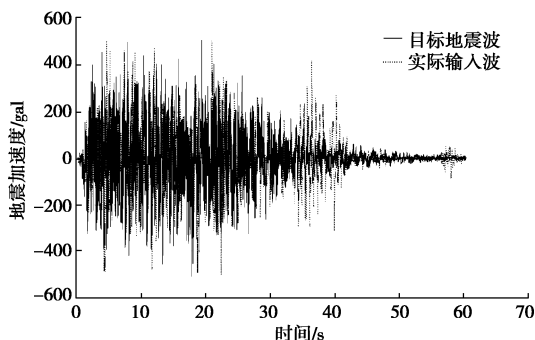


图 5 目标波和输入波 (M2)

Fig. 5 Recorded and aim waves (M2)

## 3 试验结果

本文给出的试验结果均已换算至原型。

### 3.1 坝体地震加速度反应

图 6, 7 分别给出了 2 组试验坝轴线处的最大加速度和放大系数随坝高的变化。(h 为测点距建基面高度, H 为坝高)

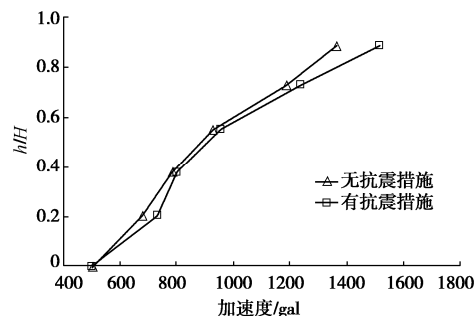


图 6 坝体坝轴线最大加速度分布

Fig. 6 Profile of maximum acceleration at dam axis

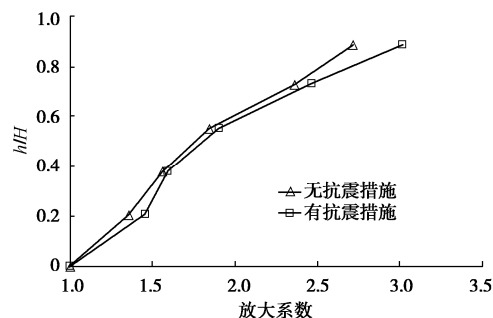


图 7 坝体坝轴线加速度放大系数分布

Fig. 7 Profiles acceleration amplification factor at dam axis

从图中可以看出: ①在基岩输入地震加速度的作用下, 有、无抗震措施坝体地震加速度反应均随着高程的增加而相应增大, 呈现出明显的放大效应。②坝体加速度反应随坝高的变化可以按约 2/3 坝高为界, 大致分成两个线性变化段, 上部的加速度放大效应强于下部。③在抗震措施加固范围以下高程, 有抗震措施和无抗震措施坝体的加速度放大效应大体一致; 在

抗震措施加固范围内,有抗震措施坝体的加速度放大效应略强于无抗震措施坝体。④无抗震措施坝体坝顶地震加速度放大系数约为 2.7~3.0。⑤有抗震措施坝体坝顶地震加速度放大系数约为 3.0~3.4。

3.2 坝顶地震沉降

图 8,9 分别给出了 2 种坝体在地震作用下的坝顶沉降发展过程。从图中的数据可知:①坝顶沉降随着地震过程出现明显的震动变化,总体上逐渐增大并渐趋稳定。②无抗震措施情况下,设计地震引起的坝顶沉降约为 568 mm,沉降率为 0.442%。③有抗震措施情况下,设计地震引起的坝顶沉降约为 470 mm,沉降率为 0.366%。④抗震措施可以明显减小地震残余沉降,有效提高坝体的抗震性能。

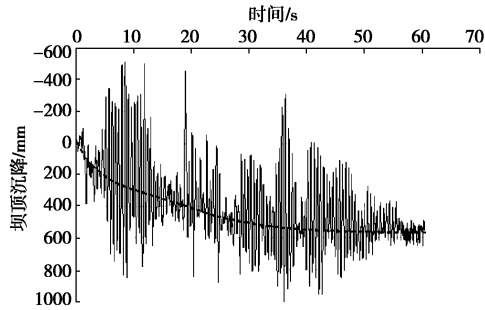


图 8 无抗震措施坝体坝顶沉降过程

Fig. 8 Crest settlements during earthquake (M1)

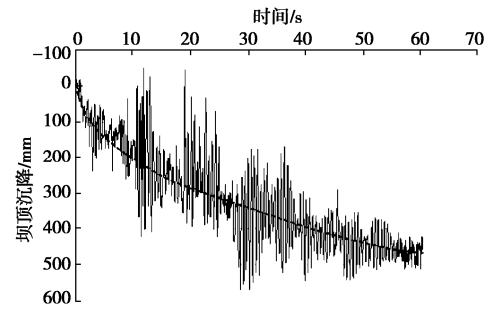


图 9 有抗震措施坝体坝顶沉降过程

Fig. 9 Crest settlements during earthquake (M2)

3.3 心墙动应力反应

通过模型心墙上的 5 组应变计,测试地震引起的心墙动应变,见表 1。图 10 给出了心墙震后拉应力沿坝高的分布。

表 1 心墙震后拉应力数据

Table 1 Core stress data after earthquake (kPa)

$h/H$	无抗震措施	有抗震措施
0.20	1	11
0.38	4	5
0.55	11	4
0.73	192	62
0.89	15	6

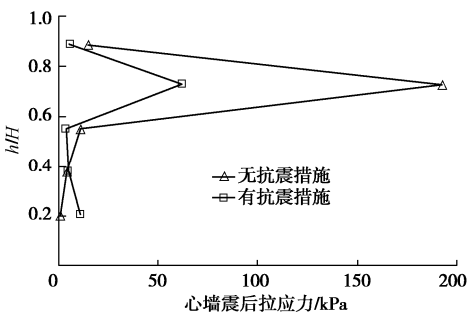


图 10 坝体心墙震后拉应力分布

Fig. 10 Profiles of core stress after earthquake

从数据中可以有以下分析:①地震引起大坝心墙的最大动拉应力大约在 (2/3~4/5) 坝高范围;②无抗震措施坝体在设计地震条件下,震后心墙最大残余拉应力约为 192 kPa。③有抗震措施坝体在设计地震条件下,震后心墙最大残余拉应力约为 62 kPa;④抗震措施显著减小了心墙最大动拉应力,有效提高了心墙的抗震安全性能。

3.4 大坝地震变形情况

图 11,12 展示了无加固措施坝体在设计地震作用下的破坏情况。



图 11 上游护坡及坝顶开裂破坏情况 (无抗震措施模型 M1)

Fig. 11 Cracks in upstream revetment and crest (M1)



图 12 地震后的坝体 (有抗震措施模型 M2)

Fig. 12 Bird view after earthquake (M2)

从这些照片可以看出:①无抗震措施的坝体在设计地震条件下,下游未发现明显破坏,上游出现了一定程度的坝体破坏;在蓄水位处有明显的护坡开裂,靠近坝顶处的堆石料出现了较明显的沉陷,堆石料与

心墙之间未发现明显的分离现象。②大坝的地震破坏模式主要是堆石料沉陷致使护坡与堆石料分离, 从而引起护坡开裂、破损、坍塌、甚至滚落。③有抗震措施的坝体在经历了设计地震后, 坝坡未见明显破坏。④从坝体地震变形情况来看, 所设计的抗震措施可以明显提高坝体的抗震性能。

## 4 结 论

(1) 在基岩输入地震加速度的作用下, 坝体地震加速度反应随着高程的增加而相应增大, 呈现出明显的放大效应。坝体地震加速度反应随坝高的变化可以按约 2/3 坝高为界, 大致分成两个线性变化段, 上部的加速度放大效应强于下部。在抗震措施加固范围以下, 有抗震措施和无抗震措施坝体的加速度放大效应大体一致; 在抗震措施加固范围内, 有抗震措施坝体的加速度放大效应略强于无抗震措施坝体。无抗震措施坝体坝顶地震加速度放大系数约为 2.7~3.0。有抗震措施坝体坝顶地震加速度放大系数约为 3.0~3.4。

(2) 坝顶沉降随着地震过程出现明显的震动变化, 总体上逐渐增大并渐趋稳定。无抗震措施坝体的坝顶沉降约为 568 mm, 沉陷率为 0.442%。有抗震措施坝体的坝顶沉降约为 470 mm, 沉陷率为 0.366%。

(3) 地震引起大坝心墙的最大动拉应力大约在 2/3~4/5 坝高范围。无抗震措施坝体震后心墙最大残余拉应力约为 192 kPa; 有抗震措施坝体震后心墙最大残余拉应力约为 62 kPa。

(4) 设计地震条件, 无抗震措施的坝体在设计地震条件下, 下游未发现明显破坏, 上游出现了一定程度的坝体破坏; 在蓄水位处有明显的护坡开裂, 靠近坝顶处的堆石料出现了较明显的沉陷, 堆石料与心墙之间未发现明显的分离现象。有抗震措施的坝体则未见明显破坏。

(5) 大坝的地震破坏模式主要是堆石料沉陷致使护坡与堆石料分离, 从而引起护坡开裂、破损、坍塌、甚至滚落。

(6) 从设计地震引起的坝顶沉降、心墙应力、地震变形情况分析, 所设计的抗震措施可以明显提高坝体的抗震性能, 确保坝体在设计地震条件下的安全。

## 参考文献:

[1] 王年香, 章为民. 土工离心模型试验技术与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. (WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-min. Geotechnical Centrifuge Technology and

Application[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2015. (in Chinese))

[2] BAZIAR M H, SALEMI S H, MERRIFIELD C M. Dynamic centrifuge model tests on asphalt-concrete core dams[J]. Géotechnique, 2009, **59**(9): 763 - 771.

[3] 王年香, 章为民, 顾行文, 等. 长河坝动力离心模型试验研究[J]. 水力发电, 2009, **35**(5): 67 - 70. (WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-min, GU Xing-wen, et al. Dynamic Centrifuge Model Test for Changhe Dam[J]. Water Power, 2009, **35**(5): 67 - 70. (in Chinese))

[4] 王年香, 王志坚, 姜志贤, 等. 阿尔塔什面板坝抗震措施离心机振动台试验研究[J]. 水利水电技术, 2018, **49**(增刊 1): 58 - 63. (WANG Nian-xiang, WANG Zhi-jian, JIANG Zhi-xian, et al. Centrifuge shaking table test on aseismic measures of concrete face rockfill dam of Altash Water Control Project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, **49**(S1): 58 - 63. (in Chinese))

[5] 张雪东, 李 纲, 魏迎奇, 等. 心墙堆石坝坝顶加筋措施的动力离心模型试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, **16**(6): 591 - 597. (ZHANG Xue-dong, LI Gang, WEI Ying-qi, et al. Examining the performance of geo-grid reinforcement using dynamic centrifuge tests[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, **16**(6): 591 - 597. (in Chinese))

[6] 王年香, 章为民, 顾行文, 等. 高心墙堆石坝地震反应复合模型研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(5): 798 - 804. (WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-min, GU Xing-wen, et al. Combined model for seismic responses of high core rock-fill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(5): 798 - 804. (in Chinese))

[7] CHEN S S, GU X W, REN G F, et al. Upgrades to the NHRI - 400 g-tonne geotechnical centrifuge[C]// Physical Modelling in Geotechnics, 2018, London: 495 - 500.

[8] 徐光明, 章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(3): 80 - 86. (XU Guang-ming, ZHANG Wei-min. Study on scale effect of footings and boundary effect in centrifuge modeling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(3): 80 - 86. (in Chinese))

[9] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)