

DOI: 10.11779/CJGE2016S2003

坝基覆盖层工程特性试验新方法研究与应用

程展林, 潘家军, 左永振, 胡胜刚, 程永辉

(长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 中国西南地区正在或即将建设的高土石坝工程中, 很多都涉及深厚覆盖层。在深厚覆盖层上建高土石坝, 覆盖层坝基变形受力状态对坝体安全起重要作用。针对深厚砂砾石覆盖层取样困难而无法准确合理确定其天然密度, 进而影响室内力学和渗透试验的开展, 提出了利用旁压或动探试验间接推求天然砂砾石覆盖层密度的新方法, 成功应用于乌东德深厚覆盖层工程特性研究, 获得了覆盖层天然密度, 较好的解决了深厚覆盖层工程特性测试难题。同时, 针对新方法中存在的两个技术难题, 基于室内模型试验验证了动力触探杆长修正系数的演化规律符合牛顿弹性碰撞理论, 研制了一种的新型旁压仪的探头, 实现了深厚覆盖层中旁压试验全过程测量。上述研究成果为进一步提升深厚覆盖层上高土石坝坝基变形预测与设计水平提供了重要技术支撑。

关键词: 覆盖层; 砂砾石; 旁压试验; 动力触探; 模型试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2016)S2 - 0018 - 06

作者简介: 程展林(1963 -), 男, 湖北武穴人, 教授级高级工程师, 主要从事土力学研究。E-mail: chengzhl@mail.crsri.cn。

New experimental methods for engineering properties of overburden of dam foundation and their applications

CHENG Zhan-lin, PAN Jia-jun, ZUO Yong-zhen, HU Sheng-gang, CHENG Yong-hui

(Yangze River Scientific Research Institute, Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of The Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)

Abstract: For many high rockfill dams, which are constructed or will be constructed in Southwest China, deep overburden is one of the most complex engineering problems. The deformation and stress status play an important role in the safety of dams. For the traditional methods, because it's almost impossible to collect gravel overburden layer samples, the original density cannot be determined exactly. Thus, it is very difficult to get the reliable mechanical and seepage properties of overburden layer in laboratory tests. A new method that indirectly calculates the original density of overburden gravel using pressuremeter tests (PMT) or dynamic penetration tests (DPT) is proposed. In the construction period of Wudongde, this method is successfully applied to the determination of the density of overburden layer. Furthermore, based on the indoor model tests, it is verified that the correction factor of rod length in DPT follows the description of Newton elastic collision theory. Therefore, a new pressuremeter probe with high pressure and side expansion is developed in order to conduct the whole-process pressuremeter tests on deep overburden. The proposed whole set method provides an important technical support for further studies on the engineering properties of deep overburden of dam foundation.

Key words: overburden layer; gravel; pressuremeter test; dynamic penetration test; model test

0 引 言

中国已建水库大坝 9.8 万多座, 其中约 90%以上为土石坝。随着国家西部大开发战略的加快实施, 我国西部地区正在或规划建设一批调节性能好的高土石坝, 但通常情况下坝基覆盖层一般深达几十米, 最深的达 500 多米, 工程所在地的地形地质条件复杂、气候条件恶劣。

对于修筑于深厚覆盖层上的高土石坝, 坝基覆盖层的变形受力状态对坝体安全起重要作用, 如何合理

准确地获取覆盖层工程特性参数直接关系到工程造价和坝体安全^[1]。

对于河床覆盖层而言, 目前国内外对其工程特性的试验研究主要采用在现场进行大型力学试验, 并通过开挖深槽、竖井、沉井及大直径钻孔等手段, 测定

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379021); 长江科学院创新团队项目(2015051/YT); 中央级科研院所基本科研业务费项目(CKSF2015046/YT)

收稿日期: 2016 - 05 - 19

一定深度和部位的土层的天然密度、含水率和级配等原始数据, 并取回土样进行室内相应的土力学系列试验, 以获得表层和中浅部土层的土力学指标, 对于较深部和深部的土层只能采取类比和经验的方法推测确定, 不能准确掌握土层客观性质, 或通过声波、触探、钻孔旁压等物探手段对土层性质进行定性的了解。例如, 汪小刚等^[2]提出了一套根据实测瑞利波特征曲线反演覆盖层结构特征参数的分析方法, Palmer 等^[3]采用地震波反射法开展了河床覆盖层层析反演分析, 结果表明地震波速度随深度而变化, 且通常为线性梯度, 但层析反演的局限性在于存在结果非唯一性的问题。

针对上述问题, 本文采用现场原位试验和室内模型试验, 建立砂砾石覆盖层的旁压模量或动探击数与其密度的相关关系, 提出了一种推求河床砂砾石深厚覆盖层现场密度的试验方法; 提出了一种推求天然砂砾石覆盖层密度的新方法, 成功应用于乌东德深厚覆盖层工程特性研究, 获得了覆盖层天然密度, 较好的解决了深厚覆盖层工程特性测试难题。同时, 针对新方法中存在的两个技术难题, 基于室内模型试验验证了动力触探杆长修正系数的演化规律符合牛顿弹性碰撞理论, 研制了一种的新型旁压仪的探头, 实现了深厚覆盖层中旁压试验全过程测量。

1 砂砾石覆盖层密度确定方法研究

砂砾石覆盖层的密度是确定其在天然状态下的密实状态以及合理确定室内试验制样标准的重要前提。砂砾石作为一种非黏性散体材料, 取原状试样难度较大, 浅表试样采集尚可通过探坑探槽的方式采集, 对于深层试样, 传统钻机采样扰动太大且试样采集率低, 更是极难采取原状试样服务于室内试验^[4]。

目前工程中, 通常是粗略确定砂砾石级配, 后大致估算确定试样密度, 进而半定量推求其力学特性。因此, 以往的大坝工程设计中, 受勘探技术的限制, 往往只对覆盖层表层砂砾石料进行详尽研究^[5], 对深部砂砾石料, 多采取经验类比的办法推测有关参数, 难以真实获得客观地质体的物理力学特性指标。

为此, 基于长期工程实践, 笔者提出了一种推求河床砂砾石深厚覆盖层现场密度的试验方法。

1.1 基本思路

推求河床深厚覆盖层砂砾石料现场密度的试验方法的主要技术思路是: 根据室内模型(旁压、动探)试验所得关系曲线, 结合现场试验(旁压、动探)测试数据, 推测深厚覆盖层砂砾石的密度参数, 从而进一步进行制备试样, 进行室内相关试验, 确定不同地质层位的砂砾石覆盖层的工程设计参数, 为设计提供数

据基础。

1.2 工程应用

(1) 工程概况

乌东德水电站位于云南省昆明市禄劝县和四川省会东县交界的金沙江干流上, 水电站正常蓄水位 975 m, 总库容 $76 \times 10^9 \text{ m}^3$, 装机容量 10200 MW, 为 I 等工程。上游围堰部位河床覆盖层一般厚 52.4~65.5 m, 最厚 72.75 m, 基岩面高程一般 733.6~756.3 m。自下至上分为 3 层: 第 I 层为卵、砾石层夹碎块石, 一般厚 4.44~13.84 m; 第 II 层为含细粒土砾(砂)层夹碎石、卵石, 一般厚 11.23~36.80 m; 第 III 层为砂砾石层夹卵石及少量碎块石, 一般厚 23.81~35.89 m。第 III、II 层的级配线如图 1, 2 所示。

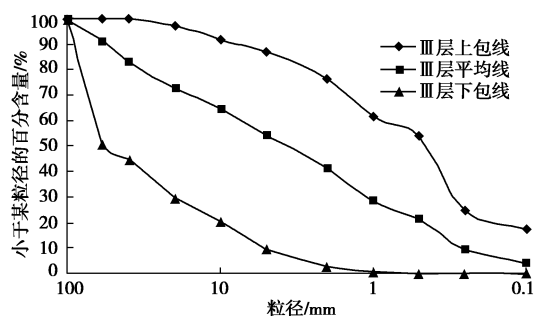


图 1 乌东德覆盖层第 III 层砂砾石级配曲线

Fig. 1 Gradation curves of gravel overburden samples collected from Wudongde

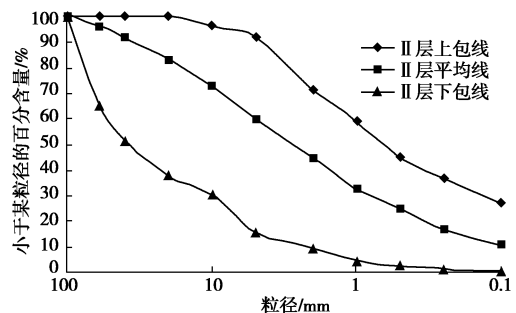


图 2 乌东德覆盖层第 II 层砂砾石级配曲线

Fig. 2 Gradation curves of gravel overburden samples collected from Wudongde

(2) 室内模型试验成果

自行开发设计了室内模拟深厚覆盖层旁压试验和动力触探试验的模型箱^[6-7], 箱体尺寸为 $0.82 \text{ m} \times 0.84 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ 。模型试验的级配采用覆盖层 II, III 层的平均级配。模型料密度的选取是在对乌东德河床覆盖层天然密度的估计基础上确定的, 第 II 层室内模型试验密度初步选择 2.21, 2.26, 2.31 g/cm^3 3 个试验密度。第 III 层的平均级配的砂砾石试验密度初步选择为 2.116, 2.16, 2.21 g/cm^3 3 个试验密度。

为了模拟现场砂砾石层的压力条件，需要在模型上方施加一定的上覆压力，上覆压力的取值为对应覆盖层平均深度处的自重压力值。乌东德覆盖层的III层厚度为 21.5~35.0 m，II层厚度为 7.6~13.0 m，因此模型试验中确定II层的平均深度为 38.55 m，换算上覆压力 490 kPa。III层的平均深度为 28.25 m，换算上覆压力 360 kPa。

采用覆盖层模型试验系统，针对不同密度和级配的乌东德河床覆盖层砂砾石料在室内制作了一系列河床覆盖层模型，在模型上进行旁压试验和动力触探试验，得到旁压（动探）模量与试验密度的关系曲线，如图 3，4 所示。

(3) 现场试验成果

对乌东德水电站坝址区内河床覆盖层共进行了 8 孔 56 点旁压试验。经统计分析后，坝址区河床覆盖层部分旁压试验成果列于表 1。对乌东德水电站坝址区覆盖层进行了 8 孔 76 点的动力触探试验，部分试验成果统计如表 2 所示。

表 1 深厚砂砾覆盖层现场旁压试验成果统计表

Table 1 Statistics of in-situ pressuremeter tests on deep gravel overburden

分层序号	试验深度范围/m	统计点数	旁压模量/MPa
II	37.36~57.62	9	$\frac{18.89 \sim 43.23}{32.40}$
III	5.23~15.24	8	$\frac{10.36 \sim 26.02}{15.17}$

注：(6.59~47.12)/17.47 (14.17) 代表的含义是（最小值~最大值）/平均值。

表 2 砂砾石覆盖层原位动探试验成果统计

Table 2 Statistics of in-situ dynamic penetration tests on deep gravel overburden

分层序号	试验深度范围/m	试验点数	动探击数 N_{120} /击		
			最小值	最大值	平均值
II	25.72~43.36	7	15.25	25.17	20.3
III	2.70~16.07	16	0.67	11.33	6.02

(4) 覆盖层密度确定

a) 以旁压模量推求原状砂砾石覆盖层密度

根据现场旁压试验成果，利用室内旁压试验密度与旁压模量关系曲线推求现场旁压模量对应的砂砾石密度。本次试验第II层现场旁压试验平均模量为 32.4 MPa，推算密度为 2.261 g/cm³；第III层现场旁压试验平均模量为 15.17 MPa，推算密度为 2.12 g/cm³，见图 3，4。

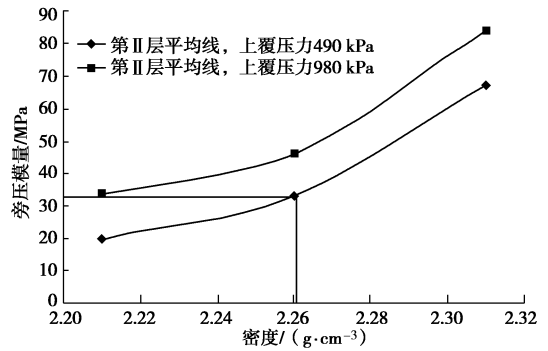


图 3 室内旁压试验成果推求现场砂砾石覆盖II层密度

Fig. 3 Original densities of gravel overburden deduced by indoor pressuremeter tests

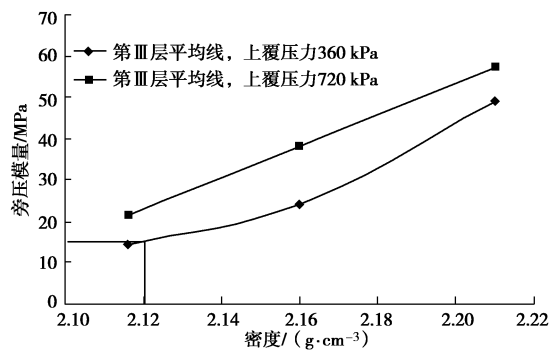


图 4 室内旁压试验成果推求现场砂砾石覆盖III层密度

Fig. 4 Original densities of gravel overburden deduced by indoor pressuremeter tests

b) 利用动探击数推测现场覆盖层密度

根据现场旁压试验成果，利用室内动探试验密度与动探击数关系曲线推求现场动探击数对应的砂砾石密度。本次试验第II层现场试验超重型动探击数为 20.3 击，推算密度为 2.281 g/cm³；第III层现场试验超重型动探击数为 6.02 击，推算密度为 2.149 g/cm³，见图 5，6。

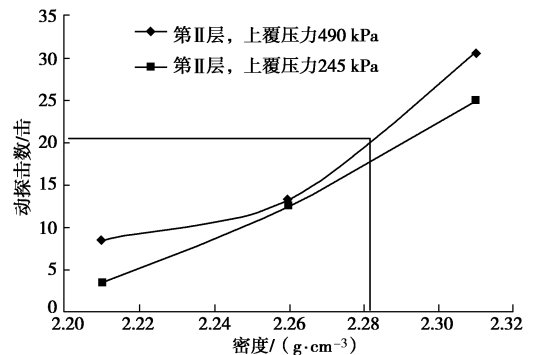


图 5 室内动探试验成果推求现场砂砾石II层密度参数示意图

Fig. 5 Original densities of gravel overburden deduced by indoor dynamic penetration tests

因此，根据乌东德水电站覆盖层室内模型试验和现场原位测试成果，推测现场深厚覆盖层第II层的密

度值为 2.261~2.281 g/cm³, 推测现场深厚覆盖层 III 层的密度值为 2.120~2.149 g/cm³。

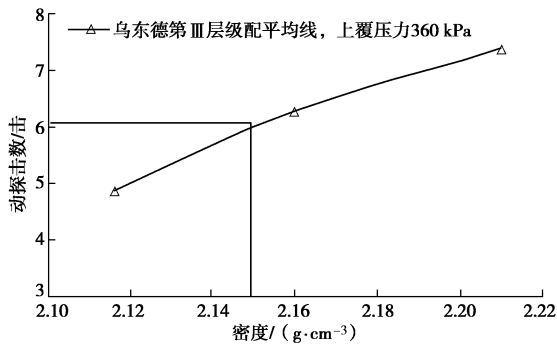


图 6 室内动探试验成果推求现场砂砾石 III 层密度参数示意图
Fig. 6 Original densities of gravel overburden deduced by indoor dynamic penetration tests

2 动力触探杆长修正方法

在深厚覆盖层中进行动力触探试验, 随着勘探深度的增加, 所得锤击数 N 实际上受到了动力触探杆的长度影响, 动力触探杆长度不同, 锤击的效果不同, 因此, 有必要进行锤击数的杆长修正^[8]。

长期以来, 对于动力触探杆长修正, 一直是以理论为基础通过计算得到。一种是以牛顿碰撞理论为基础, 代表性的修正系数有《公路工程地质勘察规范》(JTJ064—98)^[9]和《建筑地基基础设计规范》(GBJ7—89)^[10]提到的上海顾季威有效能修正公式。另外一种是以弹性杆波动理论为基础, 代表性的修正系数有美国 ASTM《动力触探试验应力波能量量测的标准试验方法》(D4633—1986)^[11]、第一届贯入试验国际会议 (ISOPT—1, 1988) 推荐的 SPT 试验规程。

然而, 通过上述两种理论计算得到的修正系数截然不同, 弹性杆波动理论的杆长修正系数却随杆长的增长而增大, 牛顿弹性碰撞理论的杆长修正系数随杆长的增大而减小。

2.1 试验方法

为了解决目前深厚砂砾石覆盖层动探试验中存在的上述技术问题, 笔者采用自行研制的室内模拟原位测试装置进行动力触探杆长修正理论适用性的验证性试验研究。该试验装置由原位测试系统和模型系统两大部分组成。为保证触探杆足够长, 原位测试系统布置在 24 层楼房的楼梯间, 模型系统放置在 1 楼地面处, 动力触探杆沿楼梯布置, 动力触探锤击点布置在不同楼层之间, 共计选取了 8 个测试杆长, 依次为 2, 8.9, 16.4, 23.4, 30, 36, 62, 83 m, 具体试验过程参考文献[9] (该文献杆长为 36 m)。

试验土样为砂砾石料, 颗粒最大粒径 60 mm, 曲

率系数 $C_c=5.5$, 不均匀系数 $C_u=44$, 试验密度为 2.12 g/cm³, 压实度为 92%。

2.2 试验成果及分析

对 8 个杆长条件进行了若干试验, 统计成果如表 3 所示。以杆长 2 m 时的锤击数 $N_{63.5}$ 作为基准值, 即把杆长 2 m 时对应的锤击数与杆长 i 对应锤击数之比作为不同杆长条件下的杆长修正系数, 经统计如表 3 所示。

由上表可知: 同样贯入 100 mm 深度对应的锤击数随触探杆长的增加而增加, 例如杆长为 2 m 时的锤击数 $N_{63.5}$ 为 15.0, 而当触探杆长增至 83 m 时, 锤击数 $N_{63.5}$ 达 34.9, 增加约 133%, 表明动探杆长对锤击数 $N_{63.5}$ 有显著影响。

表 3 砂砾石动力触探试验成果

Table 3 Dynamic penetration test results for gravel sample

杆长/m	动探击数 $N_{63.5}$	杆长修正系数
2.0	15.0	1.00
8.9	17.7	0.85
16.4	20.3	0.74
23.4	21.7	0.69
30.0	25.2	0.60
36.0	27.3	0.55
62.0	31.5	0.48
83.0	34.9	0.43

将表 3 统计成得到的杆长与修正系数之关系绘制成曲线图, 并同时分别将基于牛顿弹性碰撞理论和弹性杆波动理论计算得到的修正系数绘制于其中, 如图 7 所示。可见修正系数规律整体上符合牛顿弹性碰撞理论, 而与弹性杆波动理论的修正系数规律相反。系数修正方法基本符合《建筑地基基础设计规范》(GBJ7—89)^[10]和《公路工程地质勘察规范》(JTJ064—2011)^[9]提到的上海顾季威有效能修正公式。

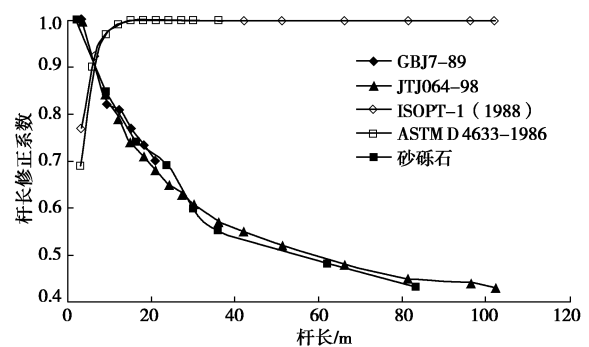


图 7 砂砾石杆长修正系数与杆长关系

Fig. 7 Relationship between correction factor of rod lengths and rod length for gravel samples

3 新型旁压仪探头

旁压试验是岩土工程中常用的原位测试手段之一，广泛应用于岩土体的勘察和试验研究中^[12]。旁压探头是依靠弹性橡胶膜套的鼓胀而对地层施加压力，因此，要求旁压试验孔的孔壁光滑、孔径略大于旁压探头且不宜过大等（孔径过大会导致接触压力对应的体变太大，而旁压探头的总体变是有限的，则因体变超限而无法测得临塑压力或极限压力）。

砂砾石覆盖层属松散颗粒堆积体，进行旁压试验时，普遍存在以下问题：①孔形成旁压试验孔的孔径偏大，导致接触压力对应的体变偏大，且砂砾石覆盖层的临塑压力和极限压力较高，从而导致无法测得临塑压力和极限压力；②孔形成旁压试验孔的孔壁并非光滑，存在较多石块棱角，在试验过程中，会刺破旁压探头上的橡胶膜，而导致试验失败。③有的旁压探头采用了两侧完全固定、中部由弹性橡胶膜套组成压力腔的结构型式，现场大量试验数据表明：当旁胀量达到 500 mL 且腔体压力超过 1 MPa 时，橡胶膜套固定端与中部压力腔的过渡部位，会因局部拉伸应变过大而产生鼓胀破裂，导致试验中止。总之，在粗颗粒岩土体中进行旁压试验时，因目前的旁压探头不能适应高压和大旁胀量的要求，而无法测得临塑压力和极限压力，只能依靠接触压力和施加的最大压力估算旁压模量；且橡胶膜套被刺破现象屡屡发生，导致试验成功率很低。

3.1 旁压仪探头的研制

为了克服目前深厚砂砾石覆盖层旁压试验中存在的上述技术问题，笔者研制了一种新型的旁压仪探头。该探头包括中心轴、模胶外膜套、模胶内膜套、弹性保护钢片、滑移式固定件、水气管路和快速接头，如图 8 所示。



图 8 新型旁压仪探头

Fig. 8 New developed pressuremeter probe

3.2 试验成果及分析

为了验证所研制的新型旁压仪探头的适用性，在室内进行了砂砾石模型试验，如图 9 所示。模型箱尺寸为 0.84 m×0.86 m×1.20 m，试验采用的砂砾石相对密度为 0.95；旁压探头置于模型中心，根据相对密度逐渐填至模型顶面，盖上模型盖子，并施加 400 kPa 的荷载，以模拟 20 m 深度的地层；连接旁压仪，进

行砂砾石物理模型的旁压试验，试验获得的旁压曲线如图 10 所示，该模型的极限压力为 3.80 MPa，对应的体变为 935 mL。



图 9 新型旁压仪探头和旁压模型试验

Fig. 9 New developed pressuremeter probe and pressuremeter model tests

以上试验结果表明，该旁压探头完全满足高压和大旁胀量的测试要求，解决了粗粒土旁压试验的难题，不仅可测得极限压力，而且可保证试验的成功率在 90% 以上，可广泛应用于各类岩土体的原位测试中，具有很好的推广和应用前景。

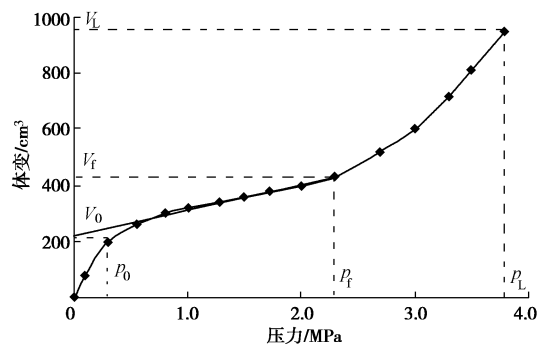


图 10 砂砾石全过程旁压试验曲线

Fig. 10 Whole-process pressuremeter curve of gravel

4 结 论

(1) 利用自行开发并设计的室内深厚覆盖层旁压试验和动力触探试验模型试验系统，提出了根据室内模型试验建立覆盖层的旁压模量和动探击数与其上覆压力、级配、密度的相关关系，控制模型试验的上覆压力和级配，并根据与现场试验成果完全一致的原则下，间接推测砂砾石覆盖层天然密度的新方法，为合理确定深厚覆盖层天然密度提供新途径，较好的解决了深厚覆盖层工程特性测试难题。

(2) 通过最大杆长达 83 m 的模型试验否定了现行规范中基于波的传播原理确定的动力触探杆长系数修正方法，证明了动力触探杆长修正系数符合碰撞原理，解决了现行国内外规范中杆长修正方法相互矛盾的问题。

(3) 研制了一种的新型旁压仪探头, 采用该旁压探头进行试验, 不仅可测得砂砾石覆盖层的极限压力, 而且可保证试验的成功率在 90% 以上, 可广泛应用于各类岩土体的原位测试中, 具有很好的推广和应用前景。

参考文献:

- [1] 党林才, 方光达. 深厚覆盖层上建坝的主要技术问题[J]. 水力发电, 2011(37): 24 - 29. (DANG Lin-cai, FANG Guang-da. Technical problems of constructing dam on deep overburden[J]. Hydraulic Power Generation, 2011(37): 24 - 29. (in Chinese))
- [2] 汪小刚, 刘小生, 陈 宁, 等. 深厚覆盖层力学特性测试技术研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011. (WANG Xiao-gang, LIU Xiao-shen, CHEN Ning, et al. Researches on testing techniques for mechanical properties of deep overburden[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2011. (in Chinese))
- [3] PALMER D, NIKROUZ R, SPYROU A. Statics corrections for shallow seismic refraction data[J]. Exploration Geophysics, 2005, 36: 7 - 17.
- [4] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 4 版. 中国建筑工业出版社, 2007. (Engineering Geological Manuals Committee. Engineering geological manual[M]. 4th ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007. (in Chinese))
- [5] 李树武, 张国明, 聂德新. 西南地区河床覆盖层物理力学特性相关性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(3): 119 - 123. (LI Shu-wu, ZHANG Guo-ruing, NIE De-xin. Research on correlation of physics—mechanics characters in river bed overburden layer in southwest area[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22(3): 119 - 123. (in Chinese))
- [6] 胡胜刚, 左永振, 饶锡保, 等. 基于模型试验的河床砂砾石层基本特性研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(11): 55 - 58. (HU Sheng-gang, ZUO Yong-zhen, RAO Xi-bao, et al. Model test on the physical property of riverbed sand-gravel layer of dam foundation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(11): 55 - 58. (in Chinese))
- [7] 石修松, 程展林, 左永振, 等. 坝基深厚覆盖层密度辨识方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2073 - 2078. (SHI Xiu-song, CHENG Zhan-lin, ZUO Yong-zhen, et al. Density identification method of dam foundation deep overburden[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2073 - 2078. (in Chinese))
- [8] 左永振, 程展林, 丁红顺, 等. 动力触探杆长修正系数试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1284 - 1288. (ZUO Yong-zhen, CHENG Zhan-lin, DING Hong-shun, et al. Study of modified coefficient of dynamic penetration rod length[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5): 1284 - 1288. (in Chinese))
- [9] JTJC20—2011 公路工程地质勘察规范[S]. 2011. (JTJC20—201 Specifications for survey of highway engineering geology[S]. 2011. (in Chinese))
- [10] GBJ7—89 建筑地基基础设计规范[S]. 1989. (GBJ7—89 Code for design of building foundation[S]. 1989. (in Chinese))
- [11] ASTM D4633—86. Standard test method for stress wave energy measurement for dynamic penetrometer testing systems[S]. 1986.
- [12] 黄熙龄. 旁压试验及粘性土形变模量的测定[C]// 第一届土力学及基础工程学术会议论文选集. 北京, 1964: 4 - 6. (HUANG Xi-ling. Determination of pressuremeter test and clay soil deformation modulus[C]// Proceedings of the First Symposium on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Beijing, 1964: 4 - 6. (in Chinese))

(责任编辑 胡海霞)