

DOI: 10.11779/CJGE2016S2029

基于模型试验的重型动力触探杆长修正系数研究

左永振, 赵 娜

(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: 动力触探试验是西部地区河床覆盖层原位测试最常用的方法之一, 其探测深度最大可达到上百米, 在应用动力触探试验成果时, 锤击数需要进行杆长修正, 而目前岩土工程勘察规范中关于动力触探杆长修正问题, 只给出了20 m范围内的杆长修正系数, 深度超过20 m后的动力触探试验成果应该如何进行杆长修正, 规范并无规定, 规范已经不能满足生产需要, 这也是限制该方法应用的关键问题。针对重型动力触探杆长修正问题, 在室内进行不同杆长的重型动力触探模型试验, 地基土材料为砂砾石和中粗砂两种, 最大杆长达到83 m。通过模型试验, 获得了重型动力触探杆长修正系数, 重型动力触探杆长修正系数符合牛顿弹性碰撞理论, 且与地基土材料特性和上覆压力无关。最后给出了推荐的重型动力触探杆长修正系数。

关键词: 重型动力触探; 杆长修正系数; 室内模型试验

中图分类号: TU413 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S2-0178-06

作者简介: 左永振(1980-), 男, 高级工程师, 主要从事粗粒土力学性质研究。E-mail: zuoyongzh@163.com。

Model tests on modified coefficient of heavy dynamic penetration rod length

ZUO Yong-zhen, ZHAO Na

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

Abstract: The dynamic penetration test (DPT) is one of widely applied in situ test techniques in bed covering of western region in China. The rod length during operation can be as long as hundreds of meters, and it should be modified in practical applications. On the modification of dynamic penetration rod length, the modified coefficient is proposed only in the range of 20 m in China's standard "Code for investigation of geotechnical engineering", but how to modify has no provisions when the depth is more than 20 m. So the standard is unable to meet the production needs, and becomes a major issue that limits its applications. Indoor model tests are carried out for the modification issue, and heavy dynamic penetration model are conducted on sand and gravel soil with series of rod lengths (2.0 m, 8.9 m, 16.4 m, 23.4 m, 30.0 m, 36.0 m, 62.0 m, 83.0 m). The modification coefficient of heavy dynamic penetration rod length is obtained after the tests. It is analyzed and concluded that the modification of heavy dynamic penetration rod length obeys the description of Newton elastic collision theory, and is independent of the material properties and overburden pressure. Finally, the modified coefficient of dynamic penetration rod length is proposed.

Key words: heavy dynamic penetration test; modified coefficient of rod length; model test

0 引言

目前, 中国的水电开发多集中在西部地区, 而西部地区河床覆盖层往往厚度较大(厚度一般深达几十米甚至上百米)、成因复杂、结构松散、颗粒较粗, 因此河床深厚覆盖层不仅成为西部水电开发中的常见工程地质问题, 而且覆盖层深部力学特性的确定也是深厚覆盖层上筑坝的关键技术问题之一, 准确合理地确定深厚覆盖层的力学性质直接关系到大坝安全和工程造价^[1]。

河床深厚覆盖层钻进难、取原状样更难, 其工程

特性研究主要依赖现场原位测试, 然而往往受现场试验条件限制, 适于深厚覆盖层原位测试的方法相对较少。动力触探试验因操作简单、使用方便、直观、适用土类多而倍受青睐, 成为西部地区河床覆盖层原位测试最常用的方法之一^[2], 因此被国内外广泛采用。一般根据动力触探试验指标和地区经验, 可进行力学分层, 评定土的均匀性和物理性质(状态、密实度)、

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309024, 51379021)

收稿日期: 2016-05-19

土的强度、变形参数、地基承载力, 查明土洞、滑动面、软硬土层界面, 检测地基处理效果等。

动力触探试验的影响因素主要有为因素、设备因素、其他主要影响因素^[3]。为了将影响因素降低, 通常采用设备规格定型化、操作方法标准化、限制应用范围等解决。如重型动力触探一般适用于砂土、中密以下的碎石土和极软岩。

在覆盖层中进行动探试验, 随着触探深度的增加, 所得锤击数受到动探杆的长度影响, 因此必须进行杆长修正。关于动力触探试验成果分析中的实测触探锤击数的修正问题, 实测锤击数是否需要修正或采用何种方法进行修正历来有不同的观点, 缺乏统一的认识。国标《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001)^[4]中规定应用重型动力触探试验成果时是否修正或如何修正, 应根据建立统计关系时的具体情况确定。

国外对锤击数的修正包括杆长修正、上覆压力修正、地下水位修正等, 国内长期来着重考虑杆长修正, 如《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001) 和《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2011)^[5]给出了重型动力触探杆长 20 m 范围内的杆长修正系数。目前深厚覆盖层的重型动力触探试验深度已经达到百米级, 但是规范中对超过 20 m 的杆长如何修正并无规定, 规范已经不能满足生产要求。

本文采用水电工程中应用最为广泛的重型动力触探试验技术, 在室内制备均质地基模型, 进行系列不同杆长下的动力触探试验, 依据试验成果获取杆长超过 20 m 后的杆长修正系数, 试验最大杆长达到 83 m, 杆长修正系数基本满足百米级深厚覆盖层重型动力触探杆长修正需求。

1 室内模型试验方法

动力触探杆长修正系数试验的模型箱尺寸(长×宽×高)为 0.84 m×0.86 m×1.20 m, 顶部为 4 个千斤顶, 可以对试样加压以模拟上覆压力。黄龄熙^[6]对旁压试验的边壁效应研究认为, 试验孔与模型壁的距离为 4 倍试验孔径时, 体积压缩为 0.15%, 边壁效应可以忽略不计, 本次动力触探试验孔在模型箱正中部, 试验孔与最小边壁的距离约为最大粒径(60 mm)的 7 倍, 大于常规力学性试验要求的 5 倍关系, 因此可以认为模型侧壁对动力触探模型试验没有影响, 该模型尺寸满足试验要求。

模型箱的边壁厚度为 5 cm, 其自重达到 1.8 t, 填装的试验料重量在 1.0~1.5 t, 因此在动力触探试验锤击过程中, 落锤引起的冲击能不会引起模型箱自身产

生振动, 对试验成果的影响可以忽略。

原位测试系统依托 24 层的楼房楼梯间设置(图 1), 在楼梯间底部放置模型系统, 动力触探杆沿楼梯向上增长, 动力触探锤击点布置在不同高度的楼层间。楼房的总高度 89 m, 试验最大杆长达到 83 m。

落锤提升装置采用快速卷扬机, 提升速率每分钟 35 m, 试验中锤击速率约为每分钟 16 击, 满足规范^[4]中“锤击贯入应连续进行, 锤击速率每分钟宜为 15~30 击”的要求。

试验操作、数据整理等按规范^[4]进行。试验过程图片见图 2。

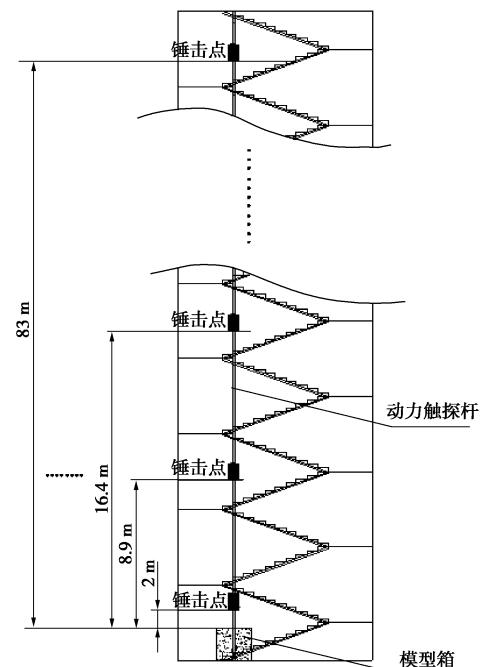


图 1 动探锤击点布置图

Fig. 1 Distribution of hammering points of dynamic penetration



图 2 室内动力触探试验模型箱

Fig. 2 Model box of dynamic penetration

2 试验成果

分别进行地基材料为中粗砂和砂砾石的室内动探模型试验, 中粗砂的粒径为 0.5~2 mm, 干密度为 1.45 g/cm³, 相对密度为 0.50, 砂砾石的最大粒径为 60 mm, 级配良好, 干密度为 2.12 g/cm³, 压实度为 92%。试样均是在最优含水率下制备, 同一组试验的地基土级配、密度、上覆压力、固结时间等试验条件均相同。

重型动探试验的杆长分别为 2.0, 8.9, 16.4, 23.4, 30.0, 36.0, 62.0, 83.0 m, 为保证成果的准确性, 每个杆长均进行平行试验, 试验成果见表 1。

由表 1 可见在重型动探试验中同样贯入 100 mm 深度对应的锤击数随触探杆长的增加而增加, 例如地基土材料为砂砾石的试验中杆长 2 m 时的锤击数是 15.0 击, 杆长增加到 83 m 时的锤击数是 34.9 击, 增量达到 133%, 这说明动探杆长对锤击数的影响是十分显著的。

以动探杆长 2 m 时的锤击数为杆长修正起点, 其杆长修正系数为 1.0, 其它杆长的杆长修正系数为杆长 2 m 时的锤击数与杆长为 i 的锤击数的比值。中粗砂和砂砾石的不同杆长下的杆长修正系数, 见表 1。

表 1 重型动力触探试验成果 (上覆压力 240 kPa)

Table 1 Heavy dynamic penetration results of medium-coarse sands and gravels with overburden pressure of 240 kPa

杆长 /m	中粗砂			砂砾石		
	$N_{63.5}$ 单值	$N_{63.5}$ 平均值	修正 系数	$N_{63.5}$ 单值	$N_{63.5}$ 平均值	修正 系数
2.0	13.9	12.1	1.00	15.2	15.0	1.00
	10.3			14.8		
8.9	13.7	14.1	0.86	18.4	17.7	0.85
	14.6			16.9		
16.4	15.6	15.6	0.78	20.3	20.3	0.74
	15.7			20.2		
23.4	16.6	16.9	0.72	22.2	21.7	0.69
	17.3			21.1		
30.0	18.6	18.9	0.64	24.0	25.2	0.60
	19.2			26.3		
36.0	20.0	20.1	0.60	27.9	27.3	0.55
	20.2			26.7		
62.0	22.6			31.2		
	23.8	23.3	0.52	30.4	31.5	0.48
83.0	23.4			32.8		
	24.9			36.0		
	24.5	25.0	0.48	34.0	34.9	0.43
	25.5			34.7		

3 成果分析

3.1 地基土材料对杆长修正系数的影响

将表 1 中地基土材料分别为中粗砂和砂砾石的杆

长修正系数与杆长关系绘制成曲线图 (图 3), 可见两种地基土材料的杆长修正系数整体规律相同, 均是随杆长的增加, 修正系数越来越小。两种地基土材料的修正系数略有差异, 但差异较小。

3.2 上覆压力对杆长修正系数的影响

表 1 中所列的上覆压力为 240 kPa, 固结时间为 12 h, 为研究上覆压力对杆长修正系数的影响, 对砂砾石地基土进行了上覆压力为 640 kPa 的试验, 其它试验条件均相同, 成果见表 2。将上覆压力 240 kPa 和上覆压力 640 kPa 的杆长修正系数绘制曲线图, 见图 4。可见, 上覆压力对重型动力触探杆长修正系数的差异较小, 在杆长 62 m 和 83 m 时基本重合在一起, 说明上覆压力对杆长修正系数的影响是可以忽略的。

表 2 砂砾石重型动力触探试验成果 (上覆压力 640 kPa)

Table 2 Heavy dynamic penetration results of gravels with overburden pressure of 640 kPa

杆长 /m	砂砾石		
	$N_{63.5}$ 单值	$N_{63.5}$ 平均值	修正系数
2.0	15.4	16.0	1.00
	16.6		
11	18.9	18.5	0.86
	18.1		
20	21.8	22.0	0.73
	22.3		
36	27.2	27.5	0.58
	27.9		
62	32.4	32.9	0.49
	33.5		
83	35.1	36.0	0.44
	36.5		

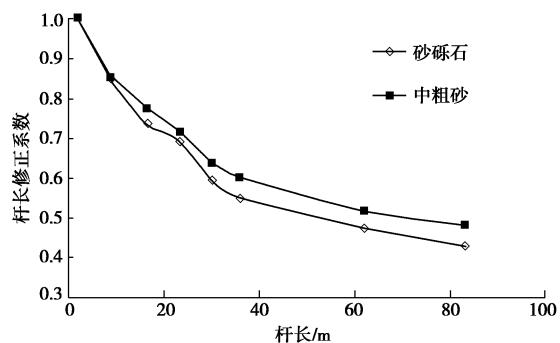


图 3 不同地基土材料的杆长修正系数对比

Fig. 3 Comparison of modified coefficients of rod length under different foundation soil materials

3.3 与规范的对比分析

《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001) 中给出了 20 m 范围内的重型动力触探锤击数修正系数表, 其

修正系数与杆长和锤击数均相关, 见表3。

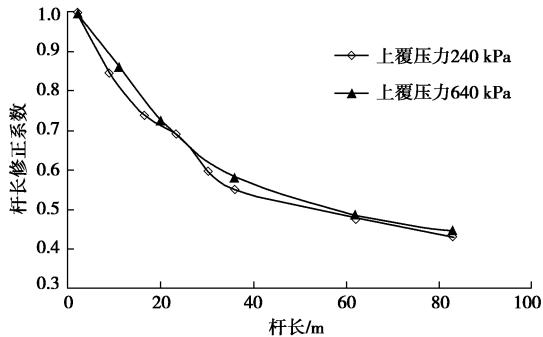


图 4 不同上覆压力的杆长修正系数对比

Fig. 4 Comparison of modified coefficients rod length under different overburden pressures

表 3 规范中动力触探锤击数修正系数

Table 3 Modified coefficients of hammering counts

L/m	$N_{63.5}$								
	5	10	15	20	25	30	35	40	≥ 50
2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4	0.96	0.95	0.93	0.92	0.90	0.89	0.87	0.86	0.84
6	0.93	0.90	0.88	0.85	0.83	0.81	0.79	0.78	0.75
8	0.90	0.86	0.83	0.80	0.77	0.75	0.73	0.71	0.67
10	0.88	0.83	0.79	0.75	0.72	0.69	0.67	0.64	0.61
12	0.85	0.79	0.75	0.70	0.67	0.64	0.61	0.59	0.55
14	0.82	0.76	0.71	0.66	0.62	0.58	0.56	0.53	0.50
16	0.79	0.73	0.67	0.62	0.57	0.54	0.51	0.48	0.45
18	0.77	0.70	0.63	0.57	0.53	0.49	0.46	0.43	0.40
20	0.75	0.67	0.59	0.53	0.48	0.44	0.41	0.39	0.36

将本次试验获得的重型动力触探杆长修正系数和规范中的修正系数进行对比, 见图5, 可见两者存在较大差异, 规范中的修正系数明显低于本次试验获得的修正系数。本次试验当杆长达到83 m时的杆长修正系数为0.45, 规范中当杆长为20 m时的最大修正系数已经达到0.36, 依据规范条文说明中可知, 规范中的修正系数是根据国内59组对比数据经统计得到的, 非实测数据, 经与本次试验对比, 规范中给出的锤击数修正系数过于保守。

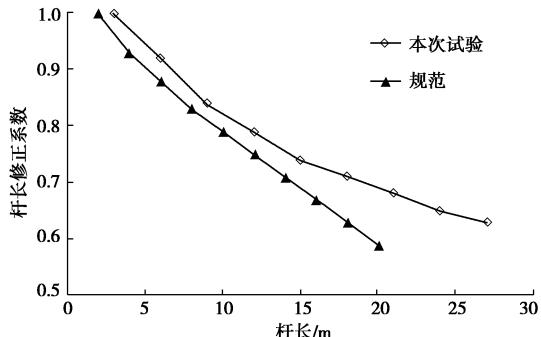


图 5 本次试验与规范中杆长修正系数对比

Fig. 5 Comparison of modified coefficients of rod length in this test and specification

4 成果讨论

对重型动力触探的杆长修正, 国内外的研究有限, 而对标准贯入试验的杆长修正, 研究极多。重型动力触探和标准贯入试验的落锤质量、落距、探杆直径等均相同, 差别在于底部探头不同, 重型动力触探使用实心探头, 而标准贯入试验是贯入器, 因此两者具有一定的可比性。

对于标准贯入试验杆长修正, 长期以来存在两种理论, 即牛顿弹性碰撞理论和弹性杆波动理论。

牛顿弹性碰撞理论, 视落锤和触探器为两个发生碰撞的物体, 随着杆长的增加, 碰撞的能量有一定损失, 不同杆长碰撞前和碰撞后的能量之比有不同的衰减值。代表性的修正系数有下列几种。《建筑地基基础设计规范》(GBJ7—89)^[7], 杆长修正深度限制在21 m; 赵旭东^[7]提出的水工建筑勘察杆长修正以文献[7]为依据, 把钻杆长度与校正系数关系曲线延长, 杆长修正系数扩展到51 m; 龙达平等^[8]结合前人的工作, 推荐了一套杆长修正系数, 修正深度100 m; 顾季威^[9]提出的有效能修正公式, 不考虑杆长的弹性变形、挠曲带来的能量损耗, 修正深度达102 m; 日本宇都-马^[9]公式建议将20 m作为杆长修正界限, 即杆长大于20 m时进行修正, 小于20 m时不修正; 日本《桥梁下部构造设计施工基准》中桩基设计篇^[8]规定的杆长修正系数; 冯铭璋^[10]建议以日本桩基设计法的杆长修正为基础, 另外再考虑探杆弯曲耗能修系数, 修正深度达50 m。

弹性杆波动理论, 根据弹性介质中压缩波的传导原理来解释动力触探撞击能在导杆中的传递, 用波动方程来表示其规律。代表性的修正系数有下列几种。Skempton^[11]给出的与杆长有关的有效能量比, 当杆长小于10 m时修正, 超过10 m后不修正; 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)^[12]提出的理论杆长修正系数, 杆长小于12 m时修正, 超过12 m后不修正。

对上述各种标准贯入试验的杆长修正系数, 绘制杆长修正系数与杆长的关系曲线(图6), 可见各种杆长修正系数之间有较大差异, 牛顿弹性碰撞理论和弹性杆波动理论得到的修正系数截然不同。牛顿弹性碰撞理论的杆长修正系数随杆长的增长而减小, 而弹性杆波动理论的杆长修正系数却随杆长的增长而增大。基于牛顿弹性碰撞理论的各种杆长修正系数也有较大差异, 这主要是因为许多杆长修正系数是理论推导得到, 与实际工程应用存在较大差别。

将本次试验得到的杆长修正系数绘制在图6中(见

图7), 可见重型动力触探的杆长修正系数与标准贯入试验中依据牛顿弹性碰撞理论得到的杆长修正系数具有可比性, 数值上重型动力触探的杆长修正系数基本符合《建筑地基基础设计规范》(GBJ7—89)和《公路工程地质勘察规范》(JTJ064—98)提到的顾季威标准贯入试验有效能修正公式, 也间接证明标准贯入试验是服从牛顿弹性碰撞理论的。

依据本次试验得到中粗砂和砂砾石的重型动力触探杆长修正系数, 结合顾季威标准贯入试验有效能修正公式, 推荐重型动力触探的杆长修正系数, 见表 4。

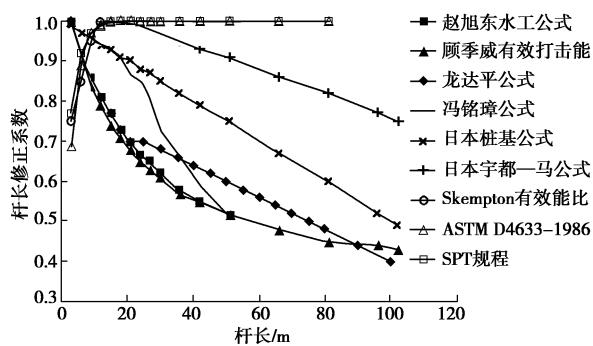


图 6 标准贯入试验的杆长修正系数

Fig. 6 Modified coefficients of standard penetration tests

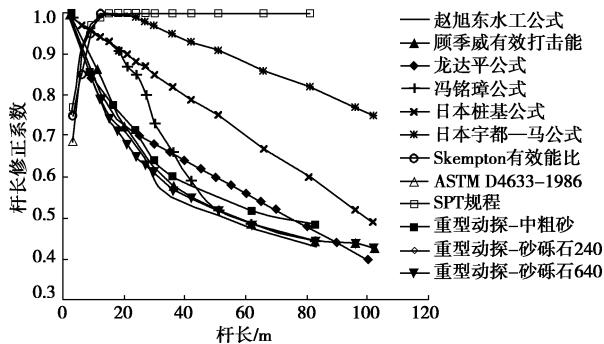


图 7 砂砾石和中粗砂的杆长修正系数与杆长关系

Fig. 7 Modified coefficient of dynamic penetration rod length and rod lengths for medium-coarse sands and gravels

表 4 推荐的重型动力触探杆长修正系数

Table 4 Recommended modified coefficients of heavy dynamic penetration rod length

杆长/m	修正系数	杆长/m	修正系数	杆长/m	修正系数
3	1.00	24	0.65	55	0.51
6	0.92	27	0.63	60	0.49
9	0.84	30	0.61	65	0.48
12	0.79	35	0.58	70	0.47
15	0.74	40	0.56	80	0.45
18	0.71	45	0.54	90	0.44
21	0.68	50	0.52	100	0.43

5 结 论

(1) 重型动力触探的杆长修正系数, 经室内模型试验验证, 整体趋势规律符合牛顿弹性碰撞理论, 杆长修正系数随杆长的增加而逐渐减小。

(2) 重型动力触探杆长修正系数基本符合标准贯入试验有效能修正公式, 并给出了一套重型动力触探杆长修正系数。

(3) 本次试验的重型动力触探试验的最大杆长为 83 m, 超过岩土工程勘察规范中杆长 21 m 的限制, 极大的拓展了重型动力触探杆长修正系数的使用范围, 杆长 83 m 的锤击数仍能有效反映地基土的工程特性。

(4) 地基土材料为砂砾石和中粗砂的重型动力触探杆长修正系数差异性较小, 砂砾石不同上覆压力下杆长修正系数的差异性也较小, 说明地基土材料和上覆压力对重型动力触探杆长修正系数的影响是基本可以忽略的。

参 考 文 献:

- [1] 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))
- [2] 李会中, 郭飞, 潘玉珍, 等. 重型超重型动力触探锤击数修正系数外延研究 [J]. 人民长江, 2015, 46(1): 30 – 35. (LI Hui-zhong, GUO Fei, PAN Yu-zhen, et al. Study on extension and polynomial fitting of correction factors of heavy dynamic penetration and extra heavy dynamic penetration[J]. Yangtze River, 2015, 46(1): 30 – 35. (in Chinese))
- [3] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册 [M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (Editorial board of handbook of engineering geology. Handbook of engineering geology[M]. 4th ed. Beijing: China Building Industry Press, 2011. (in Chinese))
- [4] GB50021—2001 (2009 年版) 岩土工程勘察规范 [S]. 2009. (GB50021—2001. Code for investigation of geotechnical engineering[S]. 2009. (in Chinese))
- [5] GB50007—2011 建筑地基基础设计规范 [S]. 2011. (GB50007—2011. Code for design of building foundation[S]. 2011. (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] 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))
- [8] 龙达平, 姚永华. 深层标贯杆长修正问题的探讨[J]. 工程勘察, 1990, 3: 20 - 23. (LONG Da-ping, YAO Yong-hua. Discussion on the long correction of deep penetration rod length[J]. Engineering Investigation, 1990, 3: 20 - 23. (in Chinese))
- [9] JTJ064—98 公路工程地质勘察规范[S]. 1999. (JTJ064—98 Specifications for survey of highway engineering geology[S]. 1999. (in Chinese))
- [10] 冯铭璋. 关于标准贯入试验杆长修正公式的讨论[J]. 工程勘察, 1986, 2: 15 - 16. (FENG Ming-zhang. Discussion on standard penetration test rod length correction formula[J]. Engineering Investigation, 1986, 2: 15 - 16. (in Chinese))
- [11] SKEMPTON A W. Standard penetration test procedures and the efforts in sands overburden pressure, relative density, particle size, ageing and over-consolidation[J]. Géotechnique, 1986, 36(3): 425 - 447.
- [12] ASTM D4633—86. Standard test method for stress wave energy measurement for dynamic penetrometer testing systems. Annual Book of Standards[S]. 1986.

(责任编辑 胡海霞)