

doi:10.3799/dqkx.2016.103

动力触探杆长适应性及其修正试验

李会中^{1,2,3}, 郭飞^{3*}, 傅少君⁴, 郝文忠^{1,2}, 李志^{1,2}

1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北武汉 430010

2. 长江三峡勘测研究院有限公司, 湖北武汉 430074

3. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京 211100

4. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北武汉 430072

摘要: 西部地区河床深厚覆盖层勘探取样及工程特性是水电工程地质勘察中常遇技术难题, 动力触探(dynamic penetration test, DPT)因操作简单、适用土类多而成为西部地区河床覆盖层原位测试首选方法。现行规范仅给出了 20 m 杆长范围的修正方法, 但对超此范围重型、超重型动力触探杆长适用性及修正问题, 长期以来业内则颇多争议却少有研究。鉴于此, 利用现场试验与数值模拟相结合, 通过对动力触探试验杆上各测点应变现场实测并得到各测点应力分布, 再利用 LS-DYNA 软件进行反演分析并确定相关计算参数, 而后进行杆长 25 m、40 m、60 m、80 m、120 m 的数值模拟计算得到了杆长适用范围及修正系数。试验研究方法及其成果可供类似问题研究与深厚覆盖层地区工程勘察借鉴或参考。

关键词: 动力触探试验; LS-DYNA 软件; 杆长适应性; 修正系数; 岩石工程; 工程地质。

中图分类号: P64

文章编号: 1000-2383(2016)07-1249-10

收稿日期: 2015-09-30

Adaptation and Correction of Dynamic Penetration Rod Length

Li Huizhong^{1,2,3}, Guo Fei^{3*}, Fu Shaojun⁴, Hao Wenzhong^{1,2}, Li Zhi^{1,2}

1. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd, Wuhan 430010, China

2. Three Gorges Geotechnical Consultants Co., Ltd, Wuhan 430074, China

3. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China

4. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: In the geotechnical investigation of hydropower projects in western China, exploratory sampling and engineering property research are challenging on account of the thick overburden on the riverbed. The dynamic penetration test(DPT) has become the preferred method of in-situ tests for the river overburden layers in western China due to its simple operation and applicability for different soil types. The current standard only provides a correction method for the rod length within 20 m. For the problems of adaptation and correction of heavy and extra-heavy dynamic penetration rod length, there is always much controversy but rare research for a long time. To address this issue, a study is conducted, involving the following procedures. Firstly, combined with the field test and numerical simulation, the stress value of each monitoring point is obtained by monitoring the rod of field DPT. Then, LS-DYNA software is used for inverse analysis and relevant parameters are determined. Lastly, different rod lengths of DPT, such as 25 m, 40 m, 60 m, 80 m and 120 m, are simulated, and the adaptation and correction of rod length are obtained. The research method and results can be used for reference in similar problems and other geotechnical investigation practices in areas with deep river overburden layers.

Key words: DPT; LS-DYNA software; adaptation of rod length; modified coefficient; geotechnical engineering; engineering geology.

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(No.201201039)。

作者简介: 李会中(1964—), 男, 硕士, 教授级高工, 主要从事水利水电(岩土)工程勘察、设计与科研工作。E-mail: lih28@163.com

* 通讯作者: 郭飞, E-mail: ybbnui.2008@163.com

引用格式: 李会中, 郭飞, 傅少君, 等, 2016. 动力触探杆长适应性及其修正试验. 地球科学, 41(7): 1249-1258.

0 引言

西部地区构造活动频繁、河流作用强烈、地质灾害频发,河床覆盖层往往厚度大(一般达数十米乃至上百米)、成因杂、结构松、颗粒粗(李会中等,2008,2015;徐晗等,2008;石修松等,2011;江华军等,2014),致使河床深厚覆盖层钻探取样与原位测试均极为困难.河床深厚覆盖层工程特性研究不仅是工程设计的基础,而且事关工程投资与工程安全,因而是深厚覆盖层上建坝的关键技术问题之一(左永振等,2014).动力触探因操作简单、适用土类多、应用范围广,加之试验成果可与土的物理力学指标建立关系而倍受青睐,成为河床深厚覆盖层地区最常用原位测试方法之一.

然而,根据《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)规定,重型、超重型圆锥动力触探适用范围分别为杆长 20 m、锤击数 50 与杆长 19 m、锤击数 40(中华人民共和国建设部,2009),这已不能适应或满足深厚覆盖层地区原位测试需要.对超出规范适用范围、动力触探杆长适用范围及其修正问题,至今不仅尚无成熟经验借鉴与公认标准可依,而且也鲜有研究.左永振等(2014)进行了杆长分别为 2.0 m、8.9 m、16.4 m、23.4 m、30.0 m、36.0 m 的动力触探室内试验,得到了只考虑杆长的重型动力触探修正系数,并认为超过 21 m 时, $N_{63.5}$ 值仍能有效反映土的力学性质;李会中等(2015)对《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)中杆长、锤击数修正系数进行非线性函数拟合与外延研究(中华人民共和国建设部,2009),得到重型、超重型杆长理论最大适用范围分别为 60 m 和 127 m.因此,对于动力触探杆长适应性及其修正问题研究已成为动力触探试验方法应用扩展亟待解决的难题.

本文以某工程为依托,以动力触探试验实测资料为依据,参照现行规程,应用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA,建立数值分析模型,进行仿真分析计算,反演相关参数,并利用反演参数进行杆长 25 m、40 m、60 m、80 m、120 m 的动力触探试验数值模拟,重点研究了动力触探试验杆长适应性、试验指标与杆长关系等,提出了杆长修正系数建议值.

1 现场试验研究

1.1 试验设计

现场试验选在武汉市阳逻长江大桥堤防旁边



图 1 现场试验场地

Fig.1 The site of field test

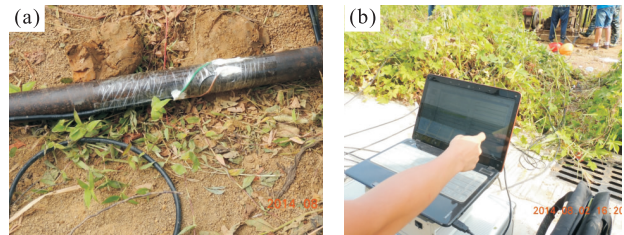


图 2 现场试验应变测试系统

Fig.2 The strain measuring system of field test

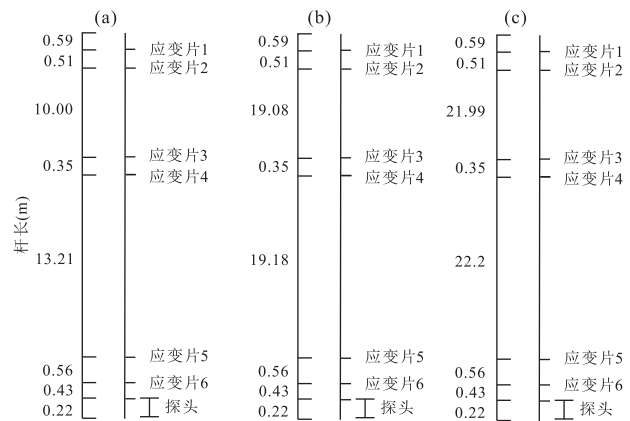


图 3 应变计布置

Fig.3 The distribution of strain gauge

a.25.87 m; b.40.92 m; c.46.85 m

(图 1),土层自上而下依次为回填土—粘土—砂土—砾石,结合工程勘察分别进行了杆长 25.87 m、40.92 m、46.85 m 重型动力触探试验,并通过应变测试系统(沿杆长布置应变计)(图 2 和图 3)来测试试验过程中探杆应力分布情况.

1.2 成果分析

试验过程中,每一锤击各测点应变值均保存在应变测试系统中,应变—应力换算后,可得到应力与时间关系.限于篇幅,这里仅列出各测点部分应力与

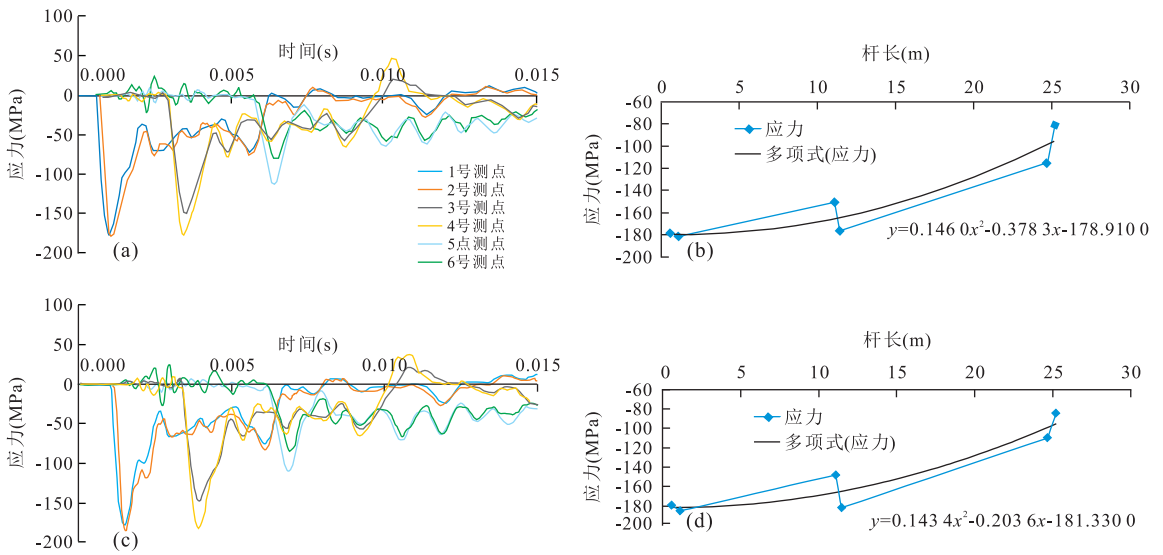


图 4 杆长 25.87 m 动力触探试验过程沿杆应力分布情况

Fig.4 The stress distribution along the rod of DPT, with the rod length of 25.87 m

a.第 18 次锤击时各测点应力-时间曲线;b.第 18 次锤击时应力包络线;c.第 30 次锤击时各测点应力-时间曲线;d.第 30 次锤击时应力包络线

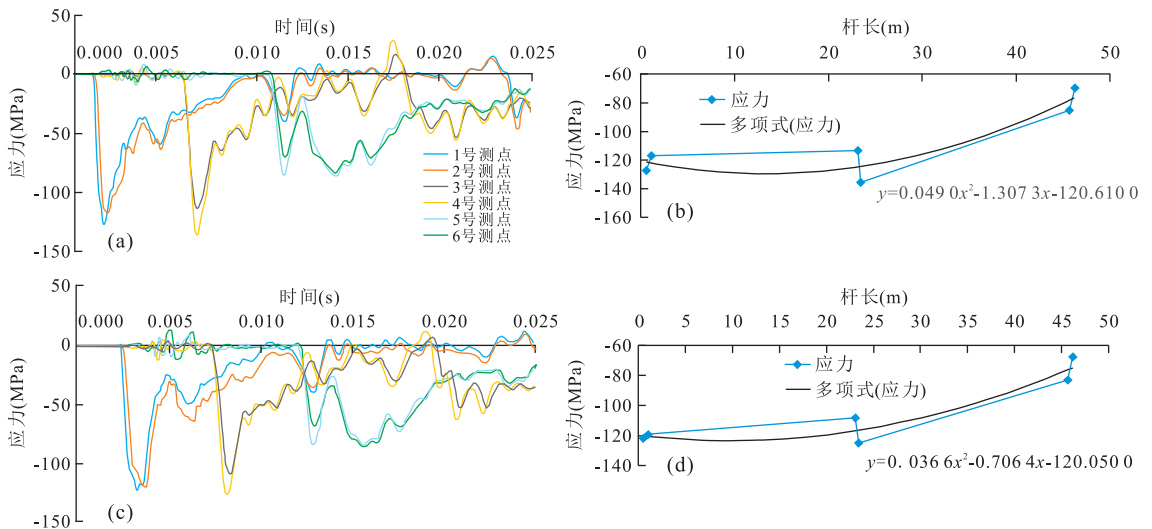


图 5 杆长 40.92 m 动力触探试验过程沿杆应力分布情况

Fig.5 The stress distribution along the rod of DPT, with the rod length of 40.92 m

a.第 21 次锤击时各测点应力-时间曲线;b.第 21 次锤击时应力包络线;c.第 41 次锤击时各测点应力-时间曲线;d.第 41 次锤击时应力包络线

时间关系及应力包络图(图 4~图 6)。

从应力-时间关系(图 4~图 6)可以看出:各测点应力随时间推移呈波动性减小,且最终趋于稳定;每次锤击时,各测点应力峰值均不一样,差异约为 15%,究其原因可能为:探杆在被落锤撞击后,再次锤击时探杆位置发生偏移,即探杆垂直度及接触条件(落锤与探杆顶部接触面,探杆与侧壁接触面)发生变化。从应力包络图可以看出:不同杆长中 1 号、2 号测点接近探杆顶部,应力最大,接近锤击力;沿杆分布的 1 号至 6 号测点,应力逐渐减小,5 号、6 号点

接近探头位置,应力平均值约为杆顶端应力值的一半,即衰减比例约为 50%,且与杆长不呈线性关系。

由应力包络图拟合得到沿杆长应力变化规律如表 1。

2 数值模拟分析

2.1 LS-DYNA 简介

LS-DYNA 是功能齐全的几何非线性(大位移、大转动和大应变)、材料非线性(140 多种材料动态模型)和接触非线性(50 多种)的通用显式动力分析

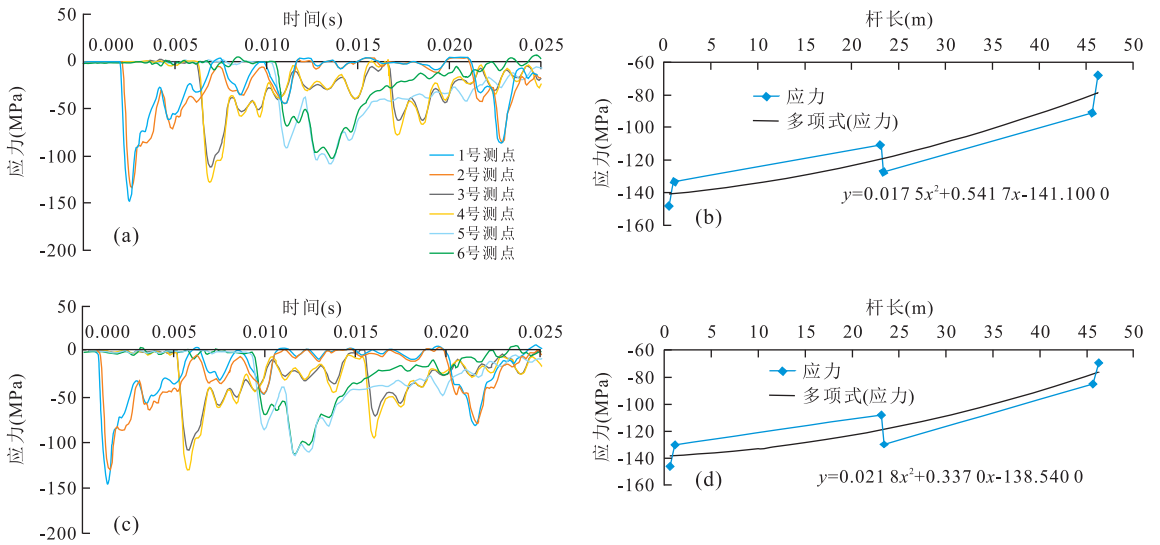


图 6 杆长 46.85 m 动力触探试验过程沿杆应力分布情况

Fig.6 The stress distribution along the rod of DPT, with the rod length of 46.85 m

a.第 20 次锤击时各测点应力-时间曲线;b.第 20 次锤击时应力包络线;c.第 40 次锤击时各测点应力-时间曲线;d.第 40 次锤击时应力包络线

表 1 动力触探现场试验应力沿杆长变化规律

Table 1 The rules of stress among the rod length in the field DPT

杆长(m)	杆顶应力(MPa)	杆底应力(MPa)	衰减比例(%)	沿杆长应力变化规律公式
25.87	160	95	40.63	$y = 0.1434x^2 - 0.2036x - 181.3300$
40.92	140	70	50.00	$y = 0.0485x^2 - 1.0258x - 137.0000$
46.85	140	68	51.43	$y = 0.0218x^2 + 0.3370x - 138.5400$

注:y 为应力;x 为杆长.

程序,能够模拟真实世界的各种复杂问题,特别适合求解各种二维、三维非线性结构的高速碰撞、爆炸和金属成型等非线性动力冲击问题,在工程应用领域被广泛认可为最佳的分析软件包(白金泽,2005;石少卿等,2011),与实验的数次对比证实了其计算的可靠性.

2.2 边界条件分析

通过规程规范与现场试验可知,影响动探试验主要因素有杆长、触探杆垂直度、接头数量与连接程度、贯入器及触探头磨损程度、土体特性等,次要因素为杆径、触探设备、落锤高度、落锤质量、钻进方法及清孔情况、导向杆光滑度等.

从能量角度看,动探落锤锤击能量应包含落锤与探杆的碰撞、探杆的弹性变形、探杆与孔壁土体的摩擦、土体对探头的阻力、探头贯入土体产生的弹塑性变形能等,为使问题简化,数值分析时进行了理想化假定,引入阻尼系数等效综合考虑探杆的实际边界条件和能量耗散效果,主要考虑了探杆的弹性变形能(不考虑接头、探杆垂直度等)、落锤与探杆的碰撞耗散能、探头与土体接触时的弹性变形能、粘性耗散效应和横向惯性引起的弥散效应.

对于边界,土体顶面(即与探杆地面接触的面)为自由面,土体底面为非反射边界,以此减少土的反射波对杆的影响;落锤与探杆、探杆与土的接触均采用自动面面接触.

2.3 模型尺寸及网格模型

重型动力触探落锤落距为 76.0 cm,超重型动力触探落锤落距为 100.0 cm,其模型尺寸见表 2.

落锤、探杆、土体均采用 SOLID164 单元进行离散,单元水平方向尺寸控制在 10 mm 以内,探杆铅直方向控制在 20 倍水平方向尺寸以内,网格模型如图 7 所示,其中模型单元 70 008 个,结点 101 260 个.

2.4 计算参数

影响动力触探的因素很多,且具有非常大的随

表 2 数值试验模型尺寸

Table 2 The model size of numerical simulation

材料(kg)	外径(cm)	内径(cm)	高度(cm)
落锤 63.5	26.0	0.0	15.0
落锤 120.0	28.0	0.0	24.8
土	150.0	0.0	1 000.0

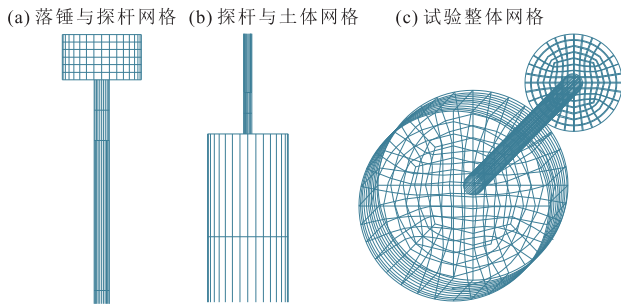


图 7 动力触探数值模拟网格模型

Fig.7 The meshes model of numerical simulation of DPT

表 3 主要计算参数

Table 3 The main calculation parameters

材料	密度(g/cm ³)	弹性模量(Pa)	泊松比
落锤	7.85	2.10×10 ¹¹	0.269
探杆	7.85	2.16×10 ¹¹	0.269
土	1.80	6.00×10 ⁶	0.300

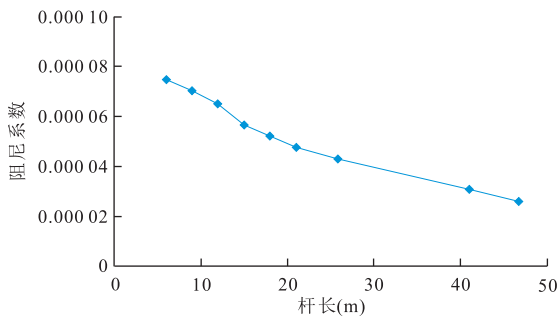


图 8 阻尼系数与杆长关系

Fig.8 The correlation between damping coefficients and rod length

机性.为此,在数值分析模型中引入阻尼系数以等效综合考虑探杆的实际边界条件和能量耗散效果.

杆长 0~20 m 阻尼系数主要根据现场试验成果及现行国标《岩土工程勘察规范》锤击数修正系数反演得到;超过 20 m 杆长且无原位试验数据的阻尼系数,则根据杆长变化规律外延得到.同时反演得到落锤、土与杆的相关参数,均假设为弹性材料,由于土体穿透模型不定,不考虑探头贯入土体,具体计算参数如表 3 和图 8.

为探究探杆底端土体参数的应力影响,特别考虑了不同参数的探杆底端土体,其计算参数如表 4.

2.5 分析工况

数值计算工况如表 5.

2.6 成果分析

2.6.1 与现场试验对比分析 为便于与现场试验

表 4 探杆底端计算参数

Table 4 The parameters of rod at the bottom

序号	弹性模量(Pa)	杆长(m)/杆径(mm)
1	3.00×10 ⁶	40/50
2	6.00×10 ⁶	40/50
3	10.00×10 ⁶	40/50
4	20.00×10 ⁶	40/50
5	30.00×10 ⁶	40/50

表 5 数值计算工况

Table 5 The calculation conditions of numerical simulation

工况序号	重锤(63.5 kg)		超重锤(120.0 kg)
	杆径 42 mm(a)	杆径 50 mm(b)	杆径 50 mm(c)
工况 1	25	25	25
工况 2	40	40	40
工况 3	60	60	60
工况 4	80	80	80
工况 5	120	120	120

进行对比,本文根据现场试验杆长(25.87 m、40.92 m和 46.85 m)建立数值计算模型,采用表 3 计算参数,计算结果如图 9.

图 9 中可以看出:数值计算结果反映了沿杆长应力逐渐减小的规律,衰减比例为 43%~47%,这与现场试验结果基本吻合;应力包络线较现场试验更具规律性,无波动数据,究其原因:现场试验影响因素过多,而传感器较敏感,而数值计算过程,影响因素单一可控.

2.6.2 杆底端土体参数敏感性分析 由图 10 可以看出:土体弹性模量由 3 MPa 变化至 30 MPa 时,传递至杆底端应力变化范围为 48.39~51.54 MPa,即随着土体弹性模量增大,传递至杆底端的应力有所增大,但增加非常缓慢,因而可以认为杆端土体弹模与传递到杆底端的应力衰减关系不大.

2.6.3 杆长敏感性分析 根据表 5 列出工况,进行数值模拟计算,得到不同杆径(42 mm 和 50 mm)、不同重锤质量(63.5 kg 和 120.0 kg)组合条件下杆上各点的应力分布.

为了分析动力触探数值模拟中阻尼系数的影响,特考虑无阻尼系数时各工况组合条件下杆上各点应力分布情况,但限于篇幅,这里仅列出杆径为 50 mm、重锤质量为 120 kg(有阻尼系数与无阻尼系数)时各工况应力包络图,具体见图 11~图 12 和表 6.

从图 11~图 12 和表 6 中可以看出,在数值模拟中,无论是否考虑阻尼系数,落锤锤击探杆后,均反映了应力沿杆长逐渐衰减的变化规律,且同一工况下,随杆长增加衰减幅度逐渐减小;应力随杆长的衰减呈非线性关系,其中考虑阻尼系数衰减幅度远

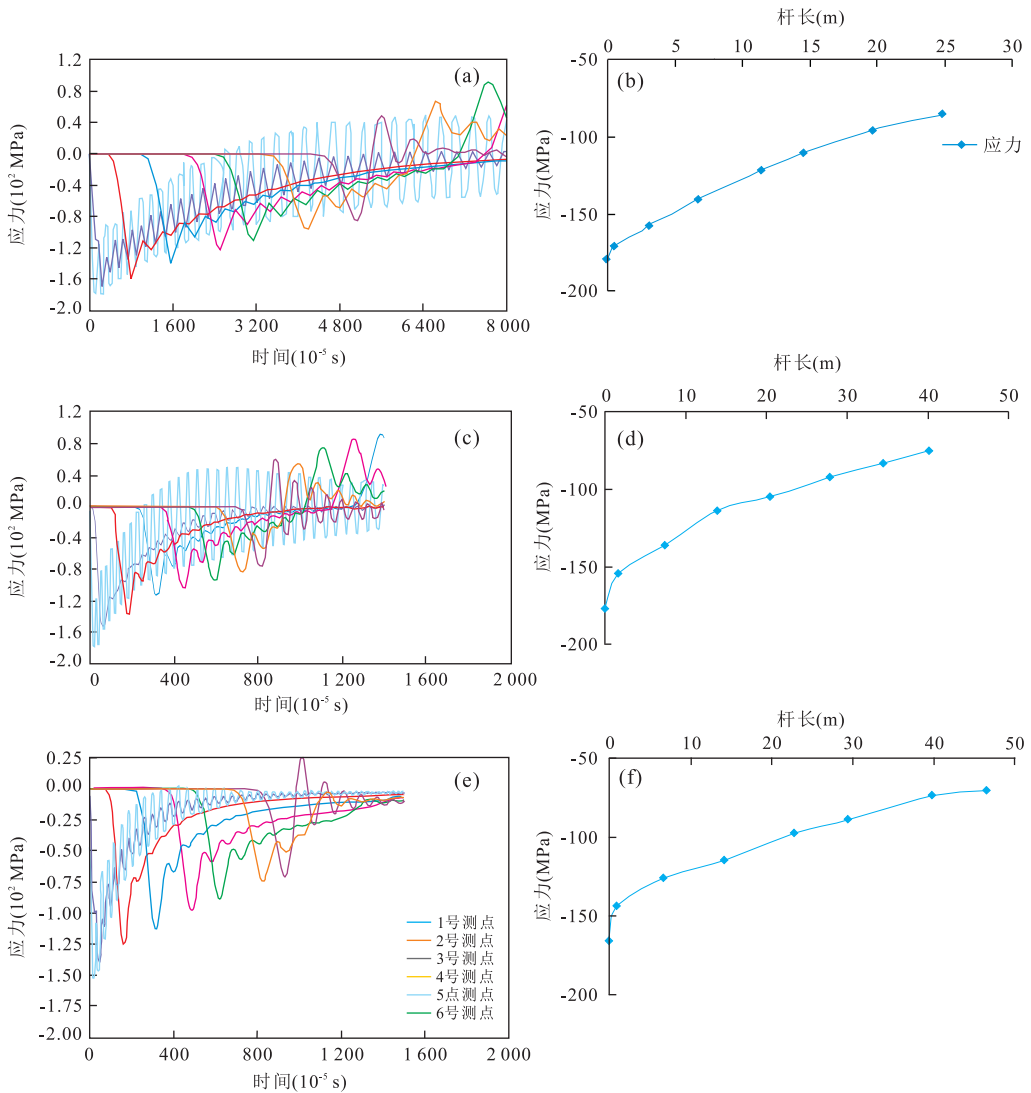


图 9 杆长 25.87 m、40.92 m 和 46.85 m 数值模拟结果

Fig.9 The numerical simulation results of DPT with the rod length of 25.87 m, 40.92 m and 46.85 m

a, c, e 分别代表杆长 25.87 m、40.92 m 和 46.85 m 的各测点应力与时间关系曲线; b, d, f 分别代表杆长 25.87 m、40.92 m 和 46.85 m 应力包络线

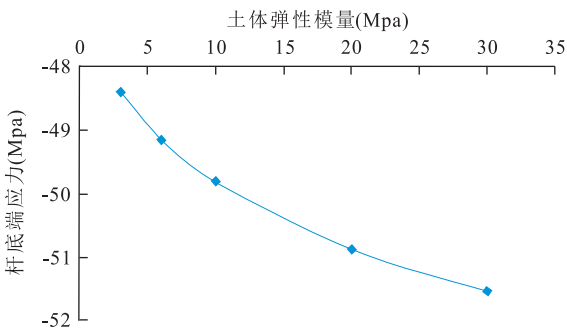


图 10 杆底端应力与土体弹性模量的关系

Fig.10 The relation between stress at the bottom of rod and elastic modulus of soil

3 综合分析探讨

3.1 应力传递规律

由现场试验与数值模拟结果对比分析可知:

(1)落锤锤击探杆后,应力均沿杆长逐渐衰减,而且应力随杆长的衰减呈非线性关系;

(2)杆顶应力传递至杆底应力的衰减幅度(比例)随杆长增加而增大,现场试验较数值模拟更为明显.

3.2 杆长适应性

由于动力触探实际过程相当复杂,为了方便开展科学问题的研究,在进行数值模拟分析时对边界条件进行了大量简化,并引入阻尼系数等效综合考

大于未考虑阻尼系数的情况.其他工况的组合条件反映的变化规律,与此情况一致,这里不再赘述.

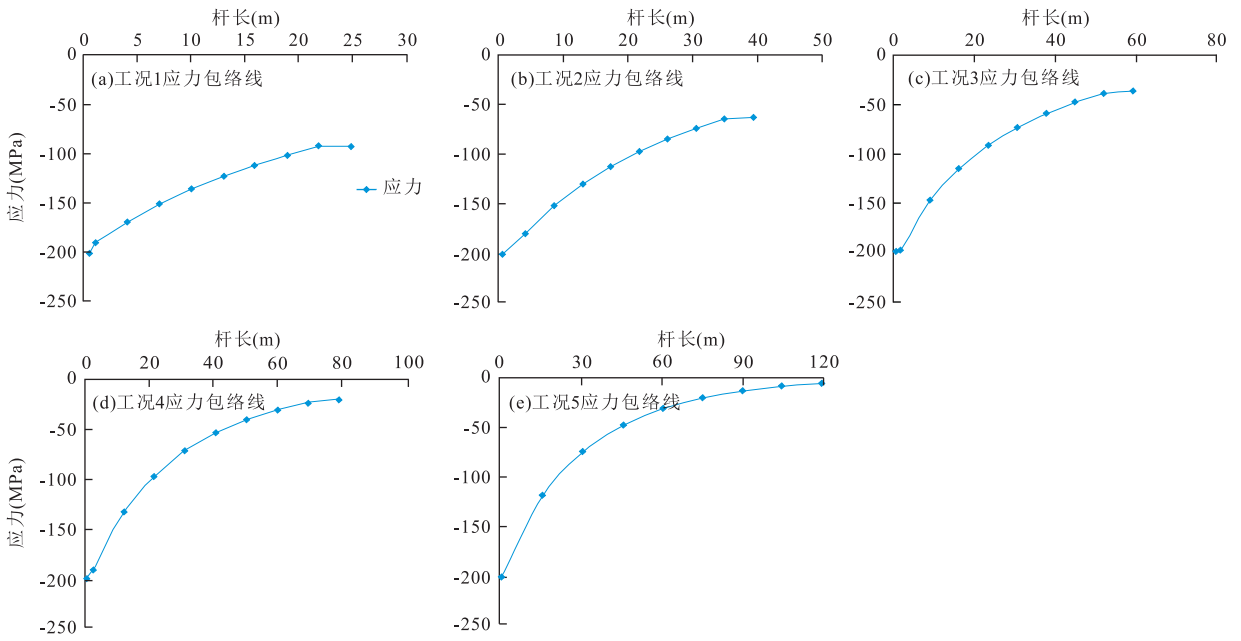


图 11 杆径 50 mm、落锤质量 120 kg 时各工况应力包络线(考虑阻尼系数)

Fig.11 The stress envelope of each condition when the rod diameter is 50 mm and the mass of drop hammer is 120 kg

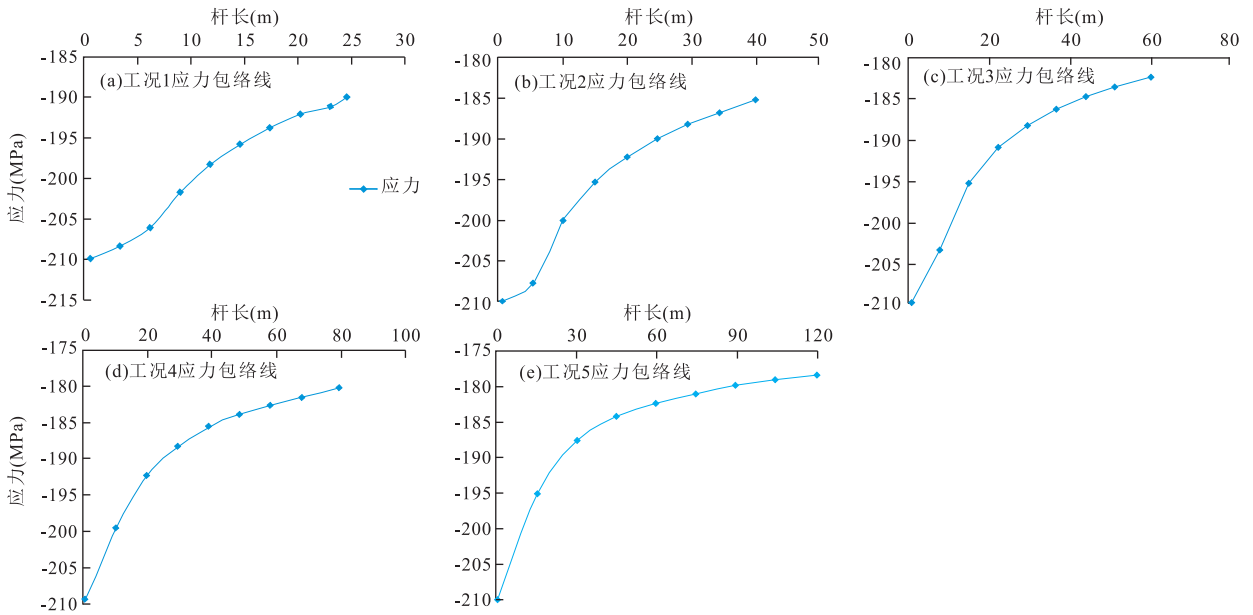


图 12 杆径 50 mm、落锤质量 120 kg 时各工况应力包络线(未考虑阻尼系数)

Fig.12 The stress envelope of each condition when the rod diameter is 50 mm and the mass of drop hammer is 120 kg

考虑探杆的实际边界条件和能量耗散效果,因而数值分析与现场试验结果存在一定差异,但其所反映的规律是完全一致的.

由于土体穿透模型不定,数值分析模型尚不能模拟贯入深度,因而仅能从能量衰减幅度、杆底冲击力贯入土体能力等指标评价杆长适应性.

根据能量衰减规律分析,对于重型动力触探试验,杆长为72 m时,杆底冲击力约为 24 kN,能量衰

减约 73%,参考《建筑桩基技术规范》(JGJ94-2008)(中华人民共和国建设部,2008)关于桩端阻力的取值建议表和《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB10002.5-2005)(中华人民共和国铁道部,2005)关于桩尖极限承载力的取值建议表,取极限承载力为 5 000 kPa,探头截面积为 43 cm²,而此时贯入土体所需要的冲击力为 21.5 kN,即表明杆长超过 72 m后,传至杆底冲击力不易将探头贯入卵砾块石

表 6 动力触探数值模拟应力沿杆长变化规律

Table 6 The rules of stress among the rod length in the numerical simulation of DPT

杆长(m)/杆径(mm)	考虑阻尼系数			未考虑阻尼系数		
	杆顶应力(MPa)	杆底应力(MPa)	衰减比例(%)	杆顶应力(MPa)	杆底应力(MPa)	衰减比例(%)
25/50	201	93	53.9	210	190	9.5
40/50	201	64	68.4	210	185	11.9
60/50	198	36	81.7	210	183	12.9
80/50	201	19	90.0	209	180	14.3
120/50	201	5	97.3	210	178	15.2

注:换算得到的杆底应力为多位小数,这里只作说明,故取整数;两个方案第 1 个监测点选取不同,考虑阻尼系数时,第 1 个监测点距离杆顶 0.7 m,不考虑阻尼系数时,第 1 个监测点距离杆顶 0.6 m.

土中;对于超重型动力触探试验,亦是如此,杆长 114 m 时杆底冲击力约为 24 kN,能量衰减约 83%,杆长超过 114 m 后,24 kN 的冲击力已不易贯入卵砾块石土中.因此,动力触探试验杆长适用性:重型宜控制在 72 m 内,超重型宜控制在 114 m 内.

3.3 锤击数杆长修正系数

锤击数杆长修正是指对某一均匀土层因深度不同引起锤击数变化,将这种变化与某一标准深度的锤击数 $N_{63.5}$ 比较而采取的修正,即:

$$N_{63.5} = \alpha N'_{63.5}, \quad (1)$$

式(1)中: α 为杆长修正系数; $N'_{63.5}$ 为重锤质量为 63.5 kg 修正后的锤击数.

$$\alpha = \frac{\beta_{(L,N)}}{\beta_{(L_0,N_0)}} = \frac{\frac{E(L,N)}{MgH}}{\frac{E(L_0,N_0)}{MgH}} = \frac{E(L,N)}{E(L_0,N_0)}, \quad (2)$$

式(2)中: $E(L,N)$ 为任意动力触探时(深度 L 、锤击数 N)有效锤击能,单位为 J; $E(L_0,N_0)$ 为标准深度 L_0 、锤击数 N_0 (2 m 杆长,5 击/10 cm)时有效锤击能,单位为 J; MgH 为锤击能,单位为 J; $\beta_{(L,N)}$ 为 $E(L,N)$ 与 MgH 比值; $\beta_{(L_0,N_0)}$ 为 $E(L_0,N_0)$ 与 MgH 比值.

根据式(1)和式(2),以及数值计算结果,得到杆长修正系数如表 7 和表 8 所示.

表 7 重型动力触探锤击数杆长修正系数

Table 7 The modified coefficients of rod length of heavy dynamic penetration

杆长(m)	杆底冲击力(kN)	有效能(N·m)	杆长修正系数	水工公式列出的杆长修正系数	有效能公式列出的杆长修正系数
2	90.954	421.231	1.00	1.00	1.00
4	78.137	411.204	0.97	0.97	—
6	70.640	383.320	0.91	0.92	0.94
9	63.143	358.046	0.85	0.86	0.84
12	57.824	345.409	0.82	0.81	0.79
15	53.698	332.772	0.79	0.77	0.74
18	50.327	324.348	0.77	0.73	0.71
21	47.477	311.711	0.74	0.70	0.68
24	45.008	299.074	0.71	0.67	0.65
27	42.830	290.649	0.69	0.65	0.63
30	40.882	278.012	0.66	0.62	0.61
33	39.120	269.588	0.64	0.60	—
36	37.511	261.163	0.62	0.58	0.57
39	36.031	252.739	0.60	0.57	—
42	34.660	240.102	0.57	0.55	0.55
45	33.385	231.677	0.55	0.54	—
48	32.191	223.252	0.53	0.53	—
51	31.071	219.040	0.52	0.52	0.52
66	26.303	181.129	0.43	—	0.48
69	25.481	176.917	0.42	—	—
72	24.694	168.492	0.40	—	—

注:杆长修正系数利用式(2)计算得出;水工公式、有效能公式列出的杆长修正系数见林宗元(2005);—表示未列出.

表 8 超重型动力触探锤击数杆长修正系数

Table 8 The modified coefficients of rod length of extra heavy dynamic penetration

杆长(m)	杆底冲击力(kN)	有效能(N·m)	杆长修正系数	水工公式列出的杆长修正系数	有效能公式列出的杆长修正系数
2	136.777	1 124.803	1.00	1.00	1.00
4	117.584	1 079.811	0.96	0.97	—
6	106.356	1 057.315	0.94	0.92	0.94
9	95.129	1 023.571	0.91	0.86	0.84
12	87.163	978.579	0.87	0.81	0.79
15	80.984	944.835	0.84	0.77	0.74
18	75.936	899.842	0.80	0.73	0.71
21	71.667	877.346	0.78	0.70	0.68
24	67.970	821.106	0.73	0.67	0.65
27	64.708	798.610	0.71	0.65	0.63
30	61.791	776.114	0.69	0.62	0.61
33	59.152	753.618	0.67	0.60	—
36	56.742	719.874	0.64	0.58	0.57
39	54.526	697.378	0.62	0.57	—
42	52.474	674.882	0.60	0.55	0.55
45	50.564	652.386	0.58	0.54	—
48	48.776	629.890	0.56	0.53	—
51	47.098	607.394	0.54	0.52	0.52
66	39.958	584.898	0.52	—	0.48
69	38.728	562.402	0.50	—	—
72	37.549	551.153	0.49	—	—
78	35.333	517.409	0.46	—	—
81	34.288	506.161	0.45	—	0.45
84	33.281	483.665	0.43	—	—
87	32.309	472.417	0.42	—	—
90	31.370	461.169	0.41	—	—
93	30.462	449.921	0.40	—	—
96	29.583	427.425	0.38	—	0.44
99	28.731	416.177	0.37	—	—
102	27.905	404.929	0.36	—	0.43
105	27.102	393.681	0.35	—	—
108	26.320	382.433	0.34	—	—
111	25.556	371.185	0.33	—	—
114	24.808	359.937	0.32	—	—

注:杆长修正系数利用式(2)计算得出;水工公式、有效能公式列出的杆长修正系数见林宗元(2005);—表示未列出。

需要说明的是,对杆长的修正,我国各行业规范或规程不尽相同(林宗元,2005),对于超规范杆长的修正系数,目前尚无成熟经验借鉴与公认标准可依。根据林宗元(2005)列出的杆长 50 m 外修正系数表,如水工公式、有效能公式、日本的宁都一马公式、桩基公式等,考虑到国内的应用情况,将本文数值分析得到的修正系数与水工公式、有效能公式进行比较:对于重型动力触探杆长在 72 m 范围内,以及超重型动力触探杆长在 114 m 范围内,本文所列修正系数值与水工公式、有效能公式修正系数基本一致(表 7 和表 8)。

为便于计算,又将表 7 和表 8 修正系数拟合为如下估算公式:

$$\text{重型: } \alpha = \begin{cases} 1, & L \leq 2; \\ 0.9514e^{-0.012L}, & 2 < L < 72. \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{超重型: } \alpha = \begin{cases} 1, & L \leq 2; \\ 1.0029e^{-0.010L}, & 2 < L < 114. \end{cases} \quad (4)$$

4 结论

(1)现场试验与数值模拟成果均表明,落锤锤击探杆后,应力沿杆传递呈非线性衰减态势,因而对动力触探试验成果进行杆长修正是必要的;

(2)根据土力学地基临界荷载公式,结合数值计算得到的杆底冲击力分析,重型、超重型动力触探杆长适用范围分别为 72 m、114 m;

(3)根据杆长修正系数定义及数值分析成果,得到重型、超重型动力触探锤击数杆长修正系数(表 7 和表 8),并分别可用式(3)和式(4)估算;

(4)经对比分析,本文给出的动力触探锤击数杆

长修正系数与水工公式、有效能公式所得修正系数基本一致,故本研究成果可信度较高,可供类似问题研究与深厚覆盖层地区工程勘察借鉴或参考。

References

- Bai, J. Z., 2005. The Theoretical Basis and Example Analysis of LS-DYNA3D Software. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Jiang, H. J., Li, C. A., Zhang, Y. F., et al., 2014. Origin of Meander Shape-Superimposed Valleys in the Middle Jialing River: Responses to Regional Geological Environment. *Earth Science*, 39(11): 1666—1674 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. Z., Guo, F., Pan, Y. Z., et al., 2015. Study on Extension and Polynomial Fitting of Correction Factors of Heavy Dynamic Penetration and Extra Heavy Dynamic Penetration. *Yangtze River*, 46(1): 30—35 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. Z., Hao, W. Z., Xiang, J. B., et al., 2008. The Study of Sampling and the In-Situ Test and Laboratory Test in the River Thick Overburden Layers at the Wudongde Dam Site Area. *Journal of Engineering Geology*, 16 (Suppl.): 202—207 (in Chinese with English abstract).
- Lin, Z. Y., 2005. Geotechnical Testing and Monitoring Manual. China Architecture & Building Press, Beijing, 238—261 (in Chinese).
- Ministry of Construction of the People's Republic of China, 2008. Technical Code for Building Pile Foundations (JGJ94-2008). China Architecture & Building Press, Beijing, 21 (in Chinese).
- Ministry of Construction of the People's Republic of China, 2009. Code for Investigation of Geotechnical Engineering (GB50021-2001). China Architecture & Building Press, Beijing, 141—142 (in Chinese).
- Ministry of Railways of the People's Republic of China, 2005. Code for Design on Subsoil and Foundation of Railway Bridge and Culvert (TB10002.5-2005). China Railway Publishing House, Beijing, 21—31 (in Chinese).
- Shi, S. Q., Kang, J. G., Wang, M., et al., 2009. Engineering Application of ANSYS\LS-DYNA Software in Explosion and Shock. China Architecture & Building Press, Beijing (in Chinese).
- Shi, X. S., Cheng, Z. L., Zuo, Y. Z., et al., 2011. Density Identification Method of Dam Foundation Deep Overburden. *Rock and Soil Mechanics*, 32(7): 2073—2084 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H., Wang, M. Y., Cheng, Z. L., et al., 2008. Analysis of Effect of Canyon Terrain on Stress and Displacement of Cutoff Wall in Dam Foundation with Deep Overburden. *Rock and Soil Mechanics*, 29(Suppl.1): 64—68 (in Chinese with English abstract).
- Zuo, Y. Z., Cheng Z. L., Ding H. S., et al., 2014. Study of Modified Coefficient of Dynamic Penetration Rod Length. *Rock and Soil Mechanics*, 35(5): 1284—1288 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白金泽, 2005. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析. 北京: 科学出版社.
- 江华军, 李长安, 张玉芬, 等, 2014. 嘉陵江曲流型叠置河谷成因对区域地质环境的响应. 地球科学, 39(11): 1666—1674.
- 李会中, 郭飞, 潘玉珍, 等, 2015. 重型超重型动力触探锤击数修正系数外延研究. 人民长江, 46(1): 30—35.
- 李会中, 郝文忠, 向家波, 等, 2008. 金沙江乌东德水电站坝址河床深厚覆盖层勘探取样与试验研究. 工程地质学报, 16(增刊): 202—207.
- 林宗元, 2005. 岩土工程试验监测手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 238—261.
- 中华人民共和国建设部, 2008. 建筑桩基技术规范 (JGJ94-2008). 北京: 中国建筑工业出版社, 21.
- 中华人民共和国建设部, 2009. 岩土工程勘察规范 (GB50021-2001). 北京: 中国建筑工业出版社, 141—142.
- 中华人民共和国铁道部, 2005. 铁路桥涵地基和基础设计规范 (TB10002.5-2005). 北京: 中国铁道出版社, 21—31.
- 石少卿, 康建功, 汪敏, 等, 2011. ANSYS/LS-DYNA 在爆炸与冲击领域内的工程应用. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 石修松, 程展林, 左永振, 等, 2011. 坝基深厚覆盖层密度辨识方法. 岩土力学, 32(7): 2073—2084.
- 徐晗, 汪明元, 程展林, 等, 2008. 深厚覆盖层 300 M 级超高质量心墙坝应力变形特征. 岩土力学, 29(增刊 1): 64—68.
- 左永振, 程展林, 丁红顺, 等, 2014. 动力触探杆长修正系数试验研究. 岩土力学, 35(5): 1284—1288.