

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.06.018

基于改进型动力锥贯入仪的路基强度评估

张朋磊, 卜凡涛, 杜志贞, 哈立科, 王乃超

(山东东方路桥建设有限公司, 山东 临沂 276002)

摘要: 在动力锥贯入仪(DCP)的锥尖安装一个荷载传感器和一个加速度计对其进行改进, 将 3 种不同干密度的风化土在模型箱中进行压实, 分别采用标准 DCP 和改进型 DCP 进行动力锥贯入试验, 得到动力锥贯入指数 I_{DCPI} , 并基于改进型 DCP 锥尖的动态响应和能量守恒原理提出路基强度评估新指标——动力锥阻力 q_d ; 分析改进型动力锥指数 $I_{DCPI, 改进}$ 与标准动力锥指数 $I_{DCPI, 标准}$ 的关系、动力锥阻力 q_d 与承载比 R_{CBR} 的关系, 结果表明, 动力锥阻力 q_d 随贯入深度的增大而增大, 动力锥阻力 q_d 比动力锥贯入指数 I_{DCPI} 更能准确反映路基强度。

关键词: 公路; 路基强度; 动力锥贯入仪(DCP); 动力锥阻力; 加州承载比(CBR)试验

中图分类号: U418.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)06-0091-04

通常通过加州承载比(CBR)试验或路基回弹模量试验评估路基强度^[1-3], 但该方法存在操作过程复杂、测试时间周期长、实施条件苛刻等缺点^[4]。动力锥贯入仪(DCP)操作简单快捷、便于携带、检测精确且高效^[4-7], 还可测定土体的强度剖面^[5-8]。DCP 试验根据落锤锥尖贯入土体的难易程度评价路基强度^[9-12]。在标准 DCP 试验中, 锥尖贯入的难易程度通常用动力锥贯入指数 I_{DCPI} 来表征, 并将其作为评价路基强度的指标, 评价指标较单一, 且由于落锤与导轨之间存在摩擦, 能量传递过程中会产生损耗^[13]。为此, 本文对 DCP 进行改进, 在锥尖安装一个荷载传感器和一个加速度计, 根据锥尖的动

态响应和能量守恒原理提出一个新的路基强度评价指标——动力锥阻力 q_d 。

1 改进型动力锥贯入仪

标准 DCP 由锥尖、驱动杆、锤台、落锤和导轨组成, 锥尖顶角为 60° , 锥尖与一根长约 1 m 的驱动杆相连。在标准 DCP 试验中, 质量为 7.85 kg 的落锤从 575 mm 的高度自由落下, 导轨长度需满足该落距的要求。改进型 DCP 同样由锥尖、驱动杆、锤台、落锤和导轨组成, 但两者参数不同(见表 1), 且锥尖安装有加速度计和荷载传感器(见图 1), 该处产生的动态响应可用于表征原位土体强度。

表 1 标准 DCP 与改进型 DCP 参数对比

DCP 类型	圆锥直径/mm	驱动杆直径/mm	驱动杆形式	落锤质量/kg	落距/mm	势能/(N·m)	测量方式	评价指标
标准 DCP	20	16	实心	7.85	575	45	穿透/打击	动力锥贯入指数 I_{DCPI}
改进型 DCP	24	24	实心杆+空心锥头	7.85	575	45	穿透/打击、力、加速度	动力锥贯入指数 I_{DCPI} 、动力锥阻力 q_d

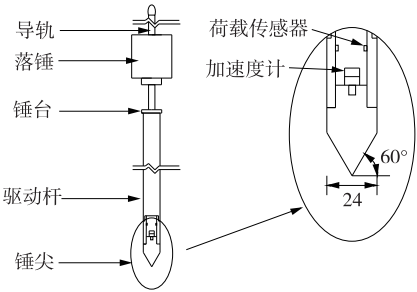


图 1 改进型动力锥贯入仪的结构(单位:mm)

2 试验用土性质

2.1 物理指标

采集济潍(济南—潍坊)高速公路某施工段的风化土, 并采用筛分法进行颗粒分析, 获得其级配组成。根据 JTG 3430—2020《公路土工试验规程》对土类型的划分标准, 该风化土为级配良好的砂土, 其物理指标见表 2。

表2 风化土的物理指标

指标	指标值
相对密度	2.65
对应质量百分比的粒径/mm	
D_{10}	0.16
D_{30}	0.57
D_{60}	1.75
不均匀系数	10.94
曲率系数	1.16
土壤类别	SW

2.2 力学指标

对试验土样进行击实试验,落锤的质量为4 500 g,落距为450 mm,分5层进行,每层锤击27次。根据试验结果绘制试样在5种不同含水率状态下的击实曲线,得到试样的最优含水率与最大干密度分别为9.1%、2.02 g/cm³。

通过改变击实次数的方式制备干密度分别为1.72 g/cm³、1.77 g/cm³与1.81 g/cm³的试样,对击实后的试样分别进行CBR试验和抗剪强度试验,得到表3所示试样强度指标。

表3 试验土样的承载比 R_{CBR} 和抗剪强度

干密度/(g·cm ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	$R_{\text{CBR}}/\%$
1.72	6.0	51.2	12.0
1.77	5.2	53.1	15.7
1.81	9.8	55.1	20.5

3 动力锥贯入试验研究

选取干燥的土样,在矩形容器中制备干密度 ρ_d 分别为1.72 g/cm³、1.77 g/cm³、1.81 g/cm³的3种击实试件,击实过程中保持每层填土量相同。土样击实完成后,分别使用标准DCP与改进型DCP对试件进行动力贯入试验。

3.1 动力锥贯入指数 I_{DCPI}

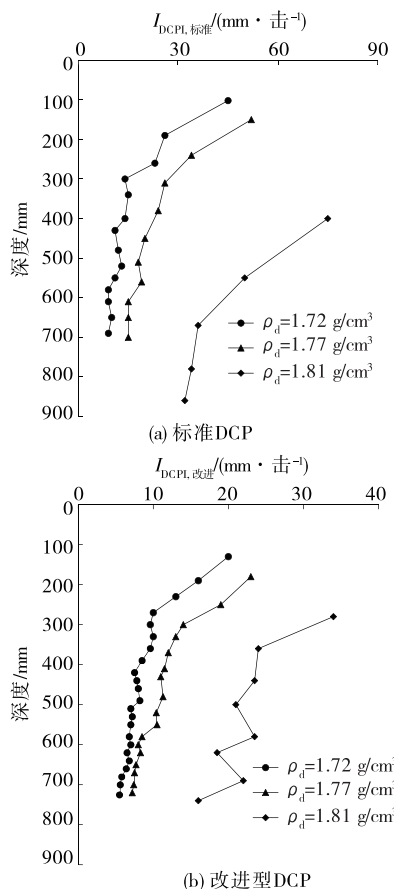
第 n 次击打的动力锥贯入指数 I_{DCPI} 按下式计算:

$$I_{\text{DCPI}} = P_n - P_{n-1} \quad (1)$$

式中: P_n 、 P_{n-1} 分别为第 n 次击打和第 $n-1$ 次击打时的贯入深度。

I_{DCPI} 随深度的变化见图2。从图2可以看出:随着贯入深度的增加,标准DCP的 $I_{\text{DCPI,标准}}$ 和改进型DCP的 $I_{\text{DCPI,改进}}$ 逐渐下降,特别是在第一次贯入

期间,由于侧压力增加, I_{DCPI} 随着深度的增加而急剧下降;相同深度处, $I_{\text{DCPI,标准}}$ 均大于 $I_{\text{DCPI,改进}}$,改进型DCP对土层的区分度更清晰。

图2 击实状态下不同深度处的 I_{DCPI}

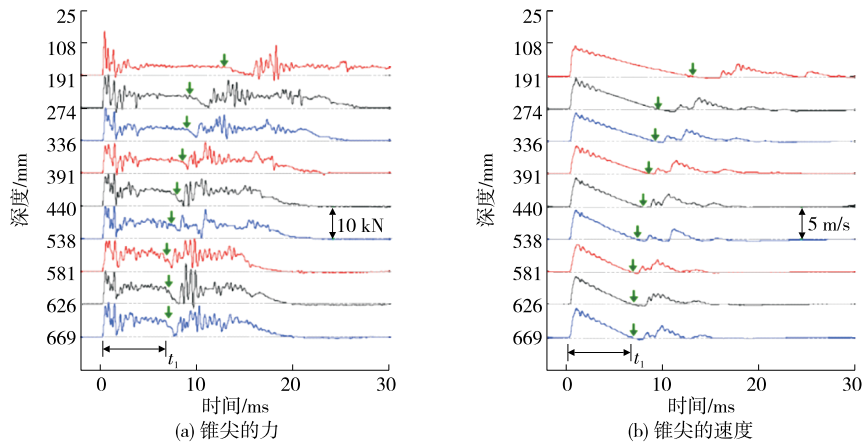
3.2 动态响应

通过改进型DCP锥尖上的荷载传感器、加速度计获得锥尖处的力和加速度,并对加速度在持续时间区间内进行积分,计算得到锥尖的速度。锥尖处力和速度随深度的变化见图3。从图3可以看出:动力锥受锤击后,不同深度处均会出现两次以上贯入和回弹,每次贯入和回弹可看作一个振幅。记第一个振幅持续时间的最后时刻对应第一个零速度时间 t_1 ,在 $[0, t_1]$ 内,随着深度的增加,锥尖的力和速度先减小后趋于稳定。

在动力贯入试验中,常用力 F —速度 v 积分法估算传递到驱动杆顶端的能量。 F 和 v 均是时间的函数,土体阻力所做的功 E 为:

$$E = W = \int_0^{t_1} F(t)v(t)dt \quad (2)$$

式中: t 为纵波首次传播到锥尖所经历的时间; t_1 为对应积分区间内达到第一个零速度结束的时间; F 、

图3 干密度为 1.72 g/cm^3 的土中锥尖沿贯入方向的动态响应

v 分别为由荷载传感器、加速度计数据计算出的力和速度。

通过对加速度进行时间上的积分来计算速度,位移则通过对速度进行时间上的积分来获得。

3.3 动力锥阻力

根据能量守恒原理,在贯入过程中锥尖处传递的能量 E 完全转化为对土体阻力所做的功 W 。假设存在平衡力 F_e 与位移 d_e ,则每一击土体阻力所做的功为:

$$W = F_e d_e = q_d A d_e \quad (3)$$

式中: A 为锥尖截面积; q_d 为动力锥阻力, $q_d = F_e / A$ 。

在动力锥贯入试验中,从杆头向下运动的压缩

波和向上反射到杆尖的拉伸波会使 DCP 锥尖处的速度叠加,故平衡位移与由锤击产生的贯入量是不同的。利用式(2)和式(3),根据传递的能量与锥尖处的动态响应确定动力锥阻力 q_d 为:

$$q_d = \frac{W}{A d_e} = \frac{\int_0^{t_1} F(t) v(t) dt}{A \int_0^{t_1} v(t) dt} \quad (4)$$

根据以上公式计算所得 3 种不同干密度风化土的动力锥阻力 q_d 见图 4。从图 4 可以看出:动力锥阻力随着贯入深度的增加而增大,随着试样干密度的增大而增大。动力锥阻力剖面可反映土体的击实层数,干密度为 1.81 g/cm^3 的风化土的动力锥阻力波动最显著,而 I_{DCPI} 随贯入深度的变化较稳定。

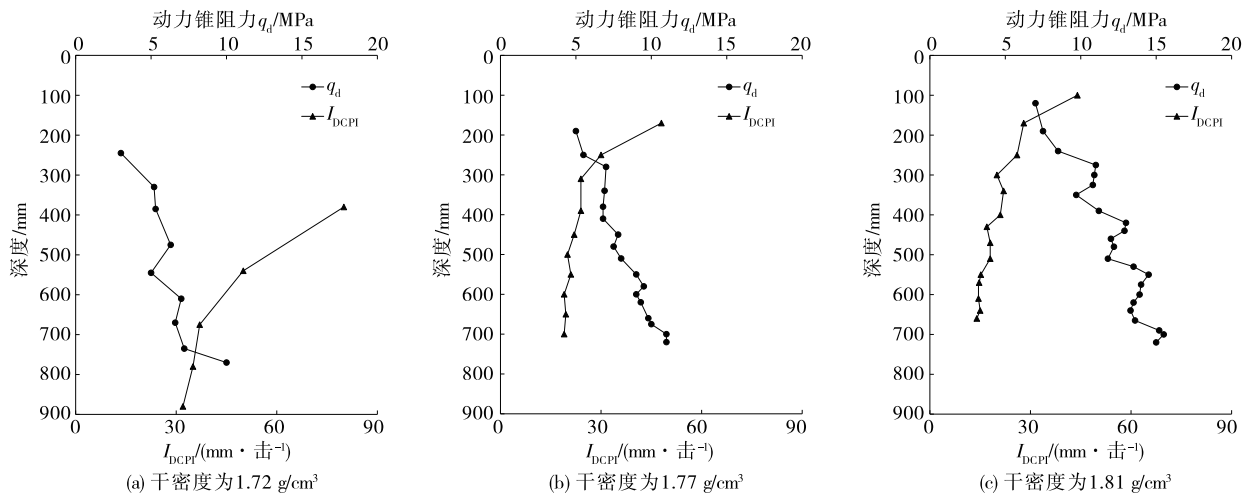


图4 3种不同干密度土体的动力锥阻力剖面

4 讨论

4.1 $I_{\text{DCPI,改进}}$ 与 $I_{\text{DCPI,标准}}$ 的关系

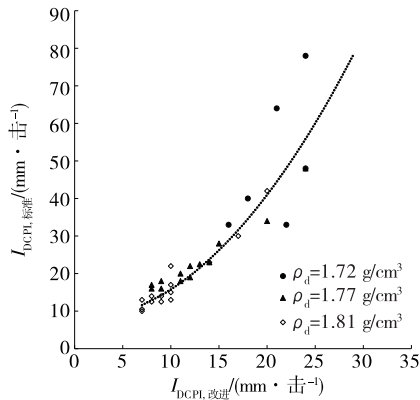
由于改进型 DCP 的圆锥直径大于标准 DCP 的

圆锥直径, $I_{\text{DCPI,标准}}$ 通常大于 $I_{\text{DCPI,改进}}$ 。鉴于 I_{DCPI} 可表征路基现场强度,将 $I_{\text{DCPI,改进}}$ 与其对应的 $I_{\text{DCPI,标准}}$ 进行回归分析,得到 $I_{\text{DCPI,改进}}$ 与 $I_{\text{DCPI,标准}}$ 之间存在幂函数关系(见图 5):

$$I_{\text{DCPI,标准}} = 0.92 I_{\text{DCPI,改进}}^{1.27}$$

$$R^2 = 0.93$$

(5)

图5 $I_{\text{DCPI,标准}}$ 与 $I_{\text{DCPI,改进}}$ 的关系

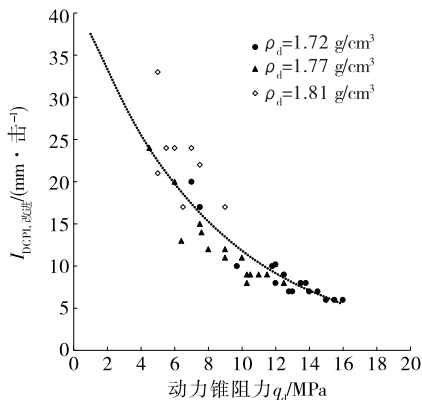
4.2 $I_{\text{DCPI,改进}}$ 与 q_d 的关系

$I_{\text{DCPI,改进}}$ 与动力锥阻力 q_d 的关系见图6。由图6可知:3种不同干密度试样在每个贯入深度处的 $I_{\text{DCPI,改进}}$ 与 q_d 均存在幂函数关系:

$$I_{\text{DCPI,改进}} = 218.8 q_d^{-1.31}$$

$$R^2 = 0.92$$

(6)

图6 $I_{\text{DCPI,改进}}$ 与动力锥阻力 q_d 的关系

4.3 q_d 与 R_{CBR} 的相关性

承载比 R_{CBR} 可用于评估路基的稳定性,估算路面设计回弹模量。考虑到 DCP 试验比现场 CBR 试验更容易进行,采用相同质量的干试样土分别制备 CBR 和 DCP 试件,CBR 试验中对试件施加 2.5 kPa 的垂直应力。根据试验结果,得到 3 种不同干密度试样在 2.5 kPa 垂直应力作用下的 R_{CBR} 与对应动力锥阻力 q_d 的关系如下:

$$R_{\text{CBR}} = 1.606 q_d + 4.355$$

(7)

与 R_{CBR} 相比,以应力为单位的 q_d 可以为路基强度提供更有意义的信息。由于土的动力锥阻力 q_d 比 I_{DCPI} 对土体强度变化更敏感,将动力锥阻力应用

于路面结构分析更具有优势。

5 结论

本文提出一种改进型动力锥贯入仪,在锥尖安装荷载传感器和加速度计采集锥尖端的动态响应。分别采用标准 DCP 和改进型 DCP 进行动力锥贯入试验,获得反映路基强度的动力锥贯入指数 I_{DCPI} 和锥尖加速度,并进行对比分析。结论如下:采用改进型 DCP 能获得可靠的路基强度剖面;土样在每个深度处的动力锥贯入指数 I_{DCPI} 与采用改进型 DCP 测出的动力锥阻力 q_d 存在幂函数关系; q_d 比 I_{DCPI} 对土体强度变化更敏感,具有更高的分辨率,对路基强度评估具有重要意义。

参考文献:

- [1] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司.公路路基设计规范:JTG/T D30—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [2] 交通运输部公路科学研究院.公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [3] 交通运输部公路科学研究院.公路路基路面现场测试规程:JTG 3450—2019[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [4] 占样烈,赵翀.动力锥贯入仪 DCP 在砂类土路基检测中的应用研究[J].工程勘察,2021,49(6):34—37.
- [5] DU Y J,JIANG N J,LIU S Y,et al.Field evaluation of soft highway subgrade soil stabilized with calcium carbide residue[J].Soils and Foundations,2016,56(2):301—314.
- [6] HONG W T,BYUN Y H,KIM S Y,et al.Cone penetrometer incorporated with dynamic cone penetration method for investigation of track substructures[J].Smart Structures and Systems,2016,18(2):197—216.
- [7] HONG W T,KANG S,LEE J S,et al.Characterization of railroad track substructures using dynamic and static cone penetrometer[C]//International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.Fifth International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization(ISC'5).International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering,2016.
- [8] HONG W T,KIM S Y,LEE S J,et al.Strength and stiffness assessment of railway track substructures using crosshole-type dynamic cone penetrometer[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2017,100:88—97.

(下转第 113 页)

5 结语

本文结合徐圩港区架管桥工程实例,对钻孔灌注桩泥浆传统处理方案进行改进,结论如下:

(1) 采用机械分离与机械外运的方法处理泥浆,可以有效保护环境,减少施工现场的平面布置,且具有施工工艺简便、操作便利、安全性高等优势。

(2) 泥浆循环利用是降低施工成本最直接的方法。采用泥沙分离器处理泥浆,分离后的砂石骨料可用于配置泥浆,最大化利用有限资源,具有较高的经济效益和社会效益。

参考文献:

- [1] 田亚洲,刘俊杰,杨琴,等.建筑废弃泥浆绿色处理系统设计及应用[J].科技创新与应用,2021(4):112-114.
- [2] 刘建华,侯世全,李刚,等.废弃泥浆无害化处理技术研究进展[J].铁道劳动安全卫生与环保,2009,36(1):10-13.
- [3] 武亚军,周振,王栋,等.药剂真空预压法处理宁波废弃泥浆试验研究[J].大连理工大学学报,2017,57(2):157-163.
- [4] 杨琴,田亚洲,吴建福,等.绿色环保循环处理泥浆施工工法研究[J].建筑节能(中英文),2022,50(6):139-143.
- [5] 江建斌,祝宏文,张云达.上海地区钻孔灌注桩废弃泥浆处理工艺研究[J].建筑施工,2016,38(6):770-772.

- [6] 魏雁冰,陈良向,范明桥,等.固化法处理建筑泥浆池的试验研究[J].中国港湾建设,2016,36(4):26-29.
- [7] 郭立贤,任彦飞,邱冰,等.C35 机制砂路面混凝土的制备及性能研究[J].公路与汽运,2022(5):44-46+73.
- [8] 冉德钦,孔令菡,卢林果,等.某滨海公路升级改造生态环保验收调查与评价[J].公路与汽运,2019(5):166-168.
- [9] 应荣华,黎凯,胡恒武.水泥稳定碎石搅拌方式研究[J].公路与汽运,2018(5):61-64+68.
- [10] 中华人民共和国水利部.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [11] 张瑞云.工程泥浆的再生调制与废弃处理[J].铁道建筑,2003,43(3):42-43.
- [12] 李腾腾.水上钢平台灌注桩施工泥浆处理方式[J].珠江水运,2022(6):95-98.
- [13] 王新新,吴小建.钻孔灌注桩泥浆处理技术研究现状综述[J].建筑施工,2015,37(3):313-314+324.
- [14] 赵东生,黄民,王啸宇.浅谈桩基用泥浆分离器的使用及改进[J].地质装备,2020,21(5):31-35.
- [15] 胡培强.泥浆固化处理施工技术在桥梁桩基工程中的应用[J].交通世界,2019(35):105-106+109.
- [16] 中交一公局集团有限公司.公路桥涵施工技术规范:JTG/T 3650—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.

收稿日期:2022-11-01

(上接第 94 页)

- [9] 周树华,周绪利.PANDA 动力贯入仪在路面基层强度检测中的应用[J].公路,2000,45(7):74-77.
- [10] 姜景山.动力锥贯入仪在路基检测中的应用综述[J].路基工程,2011(6):136-140.
- [11] 张雨勤.动力贯入仪/锚沉贯过程的数值模拟[D].大连:大连理工大学,2018.
- [12] 郭涛,何森.动力锥贯入仪 DCP 在路基拼接中的应用研究[J].公路交通科技(应用技术版),2009,5(2):114-117.
- [13] SADREKARIMI J, SEYYEDI S. Lessons learned during regular monitoring of in situ pavement bearing capacity conditions[C]//Bearing Capacity of Roads, Railways & Airfields, Two Volume Set: Proceedings of the 8th International Conference (BCR2A'09).

2009.

- [14] 李宝.基于高速公路路基承载力检测的动力锥贯入法实证研究[C]//中国公路学会.中国公路学会高速公路运营管理分会 2011 年度年会暨第十八次全国高速公路运营管理工作研讨会论文集.北京:人民交通出版社,2011:292-295.
- [15] 王辉.高速公路砂土路基压实度测试方法研究[J].黑龙江交通科技,2014,37(10):3-4.
- [16] 吴重林.道路施工中使用动力锥贯入试验确定地基承载力方法简介[J].路基工程,1991(6):16-19.
- [17] 常爱国,杜蓉华,范鹏飞.PANDA 动力贯入仪在公路中的应用[J].山西交通科技,2001(增刊 2):53-54+66.

收稿日期:2022-07-07