

张心欣,任晓磊,王永亮,等. 水利工程建设中压实质量高效检测方法对比[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 166-174. ZHANG X X, REN X L, WANG Y L, et al. Comparison of efficient testing methods for compaction quality in hydraulic engineering construction[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(1): 166-174. (in Chinese)

水利工程建设中压实质量高效检测方法对比

张心欣,任晓磊,王永亮,曹林宽

(河北省水利科学研究院, 石家庄 050057)

摘要: 为提高压实度检测效率、保证测量精度,运用压实质量快速检测技术,在某防洪治理工程中,对某段堤防进行碾压试验,将压实质量检测技术中运用较为广泛的环刀法同普氏贯入法、核子密度仪法和谐波法等快速检测方法进行对比分析,得到各种方法同环刀法的相关关系。结果表明:随碾压次数的增加,环刀法所测压实度结果呈上升趋势,振动碾压2~3次后,基本达到本工程填筑设计压实度的要求,随碾压次数的增加土体压实度基本稳定,压实度会出现小幅波动;普氏贯入法试验结果与环刀法相差不大,其相对误差可控制在 $\pm 10\%$ 以内;普氏贯入法和谐波法的压实度检测结果可与环刀法建立良好的相关关系,其线性方程的相关系数 R^2 均大于0.95,而核子密度仪法在试验中表现一般,所建立线性方程的相关系数 R^2 仅为0.37。试验结果可为压实质量的快速检测以及智能碾压技术在水利工程中的应用提供技术支撑。

关键词: 压实度;环刀法;普氏贯入法;核子密度仪法;谐波法

中图分类号: TV22 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0017

在大坝和堤防等水利工程的填筑施工中,需满足一定压实要求,避免因碾压强度不足产生工后沉降及结构开裂^[1-2]。压实度是反映施工质量的重要指标,在工程建设中压实度检测方法主要分为直接检测法和间接检测法^[3]。直接检测法是较为传统的检测方法,其检测结果准确性较高,在实际检测中广泛应用,常用的有环刀法、灌水法和灌砂法等^[4]。传统检测方法主要基于测试点原位进行破坏试验,存在检测手段落后、效率较低等问题^[5]。间接检测法主要有核子密度仪法、瞬态瑞雷波法、便携式落锤弯沉仪法和瞬态冲击频谱分析法等^[6],相比直接检测法具有检测效率高、操作步骤简便、对施工区域损伤小、所需人工少等优点。间接检测法突破了传统压实度检测速度慢、结果反馈滞后等问题,可满足水利工程现代化发展的需求。利用高效的检测方法快速、准确地反映工程中的施工质量并结合物联网、互联网信息化技术,提升水利工程建设的管理水平,已成为今后的发展趋势^[7]。

为验证间接检测方法的准确性与直接检测方法

构建相关关系,国内外许多专家对此进行了研究:王亚晓等^[8]对比核子密度仪法和灌砂法的差异,建立了两者相关性关系;赵桂娟等^[9]利用环刀法、核子密度仪法、落锤频谱式快速测定仪法与灌砂法进行对比,并建立了相关关系;王志成^[10]对比传统检测方法和无核密度仪法的结果,分析了两者的差异,并探讨了影响试验结果精度的因素。现有的压实度快速检测方法^[11-15]大多应用于公路、铁路等路基的施工现场,在大坝、堤防等水利工程的建设中应用较少。基于此,利用普氏贯入法、核子密度仪法和谐波法与环刀法进行对比并建立相关关系,以期高效、准确地反映土壤压实度,并利用谐波法实现碾压过程中压实情况的实时反馈,为智能碾压技术的应用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验在某防洪治理工程施工现场进行,工段区域内填土的土壤类型为壤土。根据试验需求及施

收稿日期: 2023-09-28 修回日期: 2023-11-09 网络出版时间: 2024-01-15

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240112.1703.002>

基金项目: 河北省水利科研计划项目(2019-07)

作者简介: 张心欣(1974—),男,河北保定人,高级工程师,主要从事大坝安全管理研究。E-mail: 619001986@qq.com

工现场实际情况,选择面积为 $1\ 000\ \text{m}^2$ ($10\ \text{m}\times 100\ \text{m}$)的试验场地,利用RTK测量仪确定试验区域范围,对试验区域边界4个顶点的坐标进行测量和记录,利用石灰粉画出试验区域边界,试验场地见图1。



图1 碾压试验场地
Fig. 1 Rolling test site

1.2 试验设备与仪器

碾压机械选用XS203S全液压单钢轮压路机,振动轮的直径为 $1.5\ \text{m}$,宽度为 $2.13\ \text{m}$,碾压机械的激振力为 $370/255\ \text{kN}$ 。普氏贯入法采用型号为ZXL-12的智能填土密实度现场检测仪,核子密度仪法采用型号为ZN-2000的表面型核子水分-密度仪,谐波法中加速度传感器采用型号为CS200的振动传感器,环刀法所需的环刀若干。

1.3 压实质量检测方法

试验区域采用静碾2次后振碾6次的施工工艺,对试验区域进行碾压作业。每振动碾压1次后,对碾压区域进行1次采样,共15个采样点;当碾压次数增加时,沿碾压轨迹的轴线方向偏移 $0.5\ \text{m}$,并在取样边界处画线做出标记。分别使用环刀法、普氏贯入法、核子密度仪法以及谐波法测量采样点附近土体的压实情况。

1.3.1 环刀法

环刀法具有操作简单、试验结果准确性较高等优点,在压实度检测中使用较为广泛。

环刀取样前需用铁锹铲除表面 $10\ \text{cm}$ 厚的土体,将土体表面平整为一个 $0.5\ \text{m}\times 0.5\ \text{m}$ 的正方形后把环刀砸入填土中,并利用削土刀去掉多余土体。对取得环刀中的土样,采用烘干法对土样含水率进行检测,依据土样最大干密度求得填筑土体的压实度。

1.3.2 普氏贯入法

普氏贯入仪是基于土体的贯入度与土体的含水率、干密度之间存在一定的关系,借助高精度测力传感器与所测土体的密实度率定出贯入阻力

与填土干密度间的相关曲线^[16]。检测时清除表面 $10\ \text{cm}$ 厚的表土,在贯入时向下平稳、连续用力,保证仪器匀速贯入相同深度的土体中^[17]。在操作过程中,随时观察仪表的读数,并借助贯入仪干密度数据对照表,得出相应位置处土体的干密度。

1.3.3 核子密度仪法

核子密度仪主要利用放射源中 Cs_{137} 伽玛源和 $\text{Am}_{241}/\text{Be}$ 中子源所释放出来的伽马射线(对总密度敏感)和中子射线(对含水量敏感)在穿透被测压实体后会产生散射衰减,以引起能量的减少。由以上2种射线通过压实土体后能量变化得出土体密度和含水率,从而确定压实体的压实度。其中,用 Cs_{137} 伽玛源所辐射的伽马射线进行密度测量,用 $\text{Am}_{241}/\text{Be}$ 中子源所辐射的中子射线进行含水率测量^[18-19]。在开展现场试验前,需对核子密度仪进行标定^[20-21],然后对表面 $10\ \text{cm}$ 以下位置进行打孔和定位后进行测量记录。

1.3.4 谐波法

土体压实程度不同,其反作用给碾压轮上的作用力不同,可借助安装在碾压轮上的加速度传感器,捕捉相应的加速度信号。捕捉得到的加速度信号往往以正弦波的形式存在(图2),经过滤波和傅里叶变换后,可将时域信号(时间与振幅的关系)转换为频域信号(频率与振幅的关系),见图3。加速度传感器的采样频率 $f_s=512\ \text{Hz}$,每秒可采集512次加速度信号。频域信号中二次谐波(基波频率两倍时对应的波幅, A_2)与基波波幅(A_1)的比即 C_{Mv} 值作为评价压实度的指标。

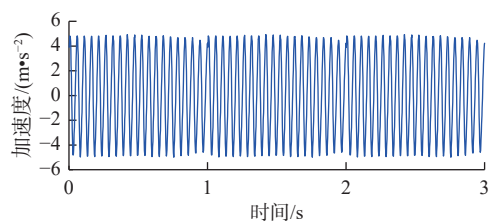


图2 振动轮加速度时域曲线

Fig. 2 Time domain curve of vibration wheel acceleration

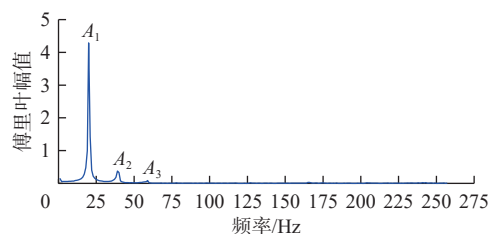


图3 振动轮加速度信号频谱分析

Fig. 3 Spectrum analysis of vibration wheel acceleration signal

1.4 土壤击实曲线

压实度是指压实后土体的干密度与同类的土体的最大干密度的比值。在压实度检测前,可通过相关的击实试验得到所供试验土体的最大干密度以及最佳含水量,随后试验均按照最佳含水量进行试验的前期准备。试验土体的击实曲线见图 4。

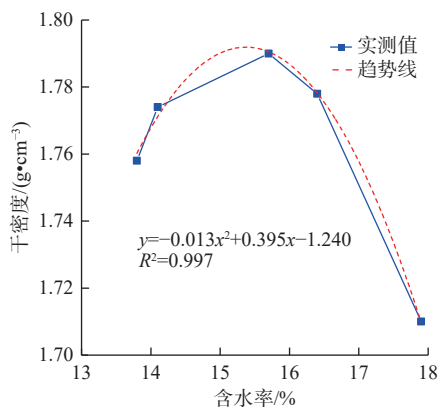


图 4 试验土体的击实曲线
Fig. 4 Compaction curve of test soil

由击实试验结果可知,试验区域填土的最大干密度为 1.79 g/cm³,最优含水率为 15.3%。

2 结果及分析

2.1 不同压实度检测方法的结果

2.1.1 环刀法

使用环刀法测得不同碾压次数下各测点填土的压实度见表 1 和图 5。结果表明,在试验过程中,相同碾压次数下环刀法测得土体压实度结果较为稳定,数值整体波动在±2% 以内,压实度整体上随碾压次数的增加而增大。根据相关规范要求:堤防^[22]和土石坝^[23]填筑设计压实度应不小于 96%,在完成 2~3 次振动碾压时,基本满足本工程填筑设计压实度的要求;完成第 5 次碾压后,试验土壤基本达到充分压实的状态;在第 6 次碾压完成后,土体压实度基本不再增加。

2.1.2 普氏贯入法

使用普氏贯入仪测得出不同碾压次数下各测点填土的压实度见表 2 和图 6。

结果表明,在相同碾压次数下普氏贯入法测得土体压实度结果也较为稳定,数值整体波动在±2% 以内。压实度随碾压次数的增加而增大,但是当完成第 5 次振动碾压时,试验土壤压实度还会随碾压次数增加而增大。

表 1 不同碾压次数下环刀法检测压实度值
Tab. 1 Compaction degree measured by cutting ring method at different compaction passes %

检测位置	碾压数/次					
	1	2	3	4	5	6
1号	94	95	97	99	99	99
2号	94	96	97	98	99	99
3号	94	96	97	97	98	98
4号	95	96	98	100	100	100
5号	97	98	96	97	100	100
6号	97	97	98	99	100	99
7号	92	95	95	97	99	99
8号	94	95	96	97	97	98
9号	96	96	96	98	101	101
10号	95	97	99	100	101	100
11号	97	98	98	100	100	100
12号	92	95	97	98	101	100
13号	96	96	97	99	101	101
14号	93	97	97	98	98	99
15号	90	95	98	98	99	100
平均	94±2	96±1	97±1	98±1	100±1	99±1

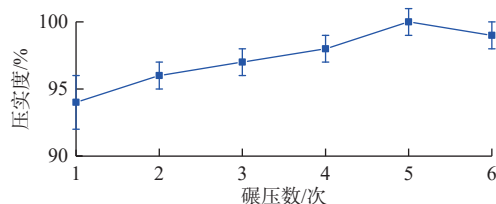


图 5 环刀法检测压实度随碾压次数变化

Fig. 5 Change of compaction degree with compaction passes detected by cutting ring method

2.1.3 核子密度仪法

使用核子密度仪测得不同碾压次数下各测点填土的压实度见表 3 和图 7。

结果表明,核子密度仪法测得土体压实度结果波动性较大,数值整体波动在±2%~±8%。核子密度仪法测得压实度平均值随碾压次数的增加而增大,但碾压 3 次后检测值存在 4 个超过 100% 的异常值,导致平均压实度过大,剔除 4 个过大的异常值后,平均压实度为 92%,与普氏贯入法所测压实度随碾压次数增加而增大的规律相同。

表2 不同碾压次数下普氏贯入法检测压实度值
Tab. 2 Compaction degree measured by Platts penetration method at different compaction passes %

检测位置	碾压数/次					
	1	2	3	4	5	6
1号	93	93	94	94	97	98
2号	89	92	93	97	98	98
3号	89	93	96	97	96	97
4号	91	93	94	98	97	97
5号	94	92	96	97	98	98
6号	93	91	92	98	97	98
7号	93	95	97	95	99	97
8号	88	95	92	97	97	99
9号	92	91	94	96	97	100
10号	91	91	96	96	99	98
11号	89	93	96	98	98	98
12号	93	93	94	96	96	97
13号	89	94	94	99	98	98
14号	92	95	96	98	98	99
15号	92	93	97	97	97	99
平均	91±2	93±1	95±2	97±1	97±1	98±1

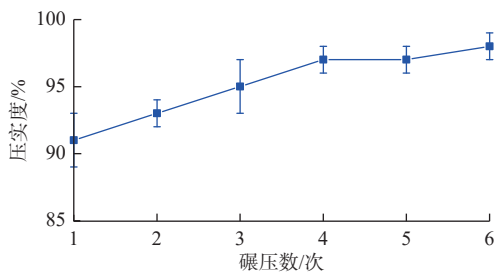


图6 普氏贯入法检测压实度随碾压次数变化

Fig. 6 Change of compaction degree with compaction passes detected by Platts penetration method

2.1.4 谐波法

经滤波和傅里叶变换后,可利用二次谐波和基波的比值(C_{MV})反映填土的压实度,具体数据见表4和图8。

结果表明, C_{MV} 值随碾压次数的增加而增大,并且变化幅度越来越小,在碾压第6次时出现负增长。压实质量自动监测技术测得 C_{MV} 值与环刀法检测压实度趋势相同(图5),在振动压实过程中,随着碾压次数的增加, C_{MV} 值均值、压实度均值都在逐渐增大,并且碾压小于4次时增长速率较快,之后增长速率较慢。这是因为在碾压前期试验路段土质较松,随着压路机的振动压实,土体的压实效果较明

显。但是到压实后期,土体已得到进一步压实,此时变化速率较为缓慢,并且在碾压第6次时,压实度和 C_{MV} 值不增反降。

表3 不同碾压次数下核子密度仪检测压实度值
Tab. 3 Compaction degree measured by nuclear densitometer at different compaction passes %

检测位置	碾压数/次					
	1	2	3	4	5	6
1号	90	89	97	89	91	100
2号	87	91	90	92	90	93
3号	86	87	89	88	90	93
4号	90	90	87	94	89	95
5号	90	91	91	90	93	90
6号	92	87	97	91	92	96
7号	84	94	99	88	97	97
8号	88	87	103	92	89	97
9号	89	87	93	91	90	94
10号	87	92	95	94	95	98
11号	90	92	94	95	90	99
12号	82	87	90	91	89	96
13号	92	90	109	87	97	98
14号	91	91	93	94	90	94
15号	88	88	114	93	97	95
平均	88±3	90±2	96±8	91±2	92±3	96±3

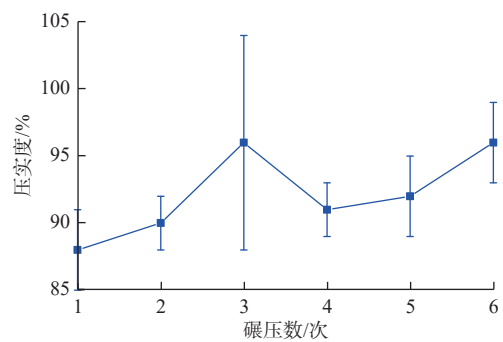


图7 核子密度仪法检测压实度随碾压次数变化

Fig. 7 Change of compaction degree with compaction passes detected by nuclear densitometer method

对不同碾压次数下压实质量自动监测技术测得 C_{MV} 值与环刀法检测的平均压实度进行分析(图9),可以看出,当 C_{MV} 值大于23时,试验土体已基本达到充分压实的程度。因此在实际施工时,可重点检测 C_{MV} 值小于23处的压实度,其他压实位置可进行适度抽测,在减少检测工作量的同时,达到更好的控制压实质量均匀性的目的。

表 4 不同碾压次数各测点的 C_{MV} 值
Tab. 4 C_{MV} values of each measuring point with different compaction passes

检测位置	碾压数/次					
	1	2	3	4	5	6
1号	15.3	20.9	20.8	24.1	24.5	23.6
2号	15.6	20.0	20.5	24.0	24.3	23.0
3号	16.2	21.0	21.5	22.9	25.1	23.3
4号	15.4	21.0	19.8	24.2	24.3	23.0
5号	17.3	18.9	20.9	24.1	23.8	23.6
6号	16.4	20.2	20.2	23.7	23.9	23.5
7号	15.9	18.7	19.8	24.5	24.1	23.3
8号	16.2	19.4	21.3	23.3	24.9	23.1
9号	16.7	19.9	20.1	23.4	25.1	23.0
10号	16.4	19.2	21.2	23.9	24.2	22.9
11号	16.2	18.4	20.8	23.3	25.4	23.4
12号	17.1	20.7	19.8	22.8	24.7	23.8
13号	15.5	20.7	21.1	22.9	24.5	23.8
14号	16.5	19.6	20.5	22.4	24.2	22.9
15号	15.6	18.7	21.1	23.2	24.6	23.2
平均	16.2±0.6	20.5±0.9	21.6±0.6	23.4±0.6	24.5±0.5	23.0±0.3

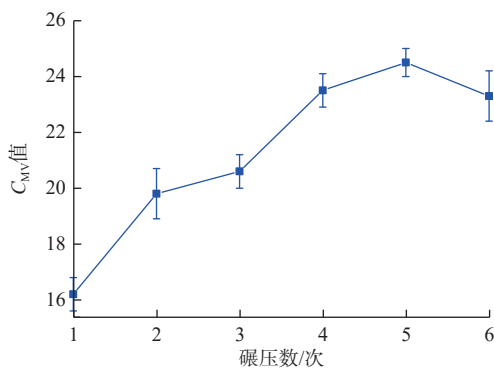


图 8 C_{MV} 值随碾压次数变化
Fig. 8 Change of C_{MV} value with compaction passes

2.2 不同检测方法结果与环刀法关系

2.2.1 与环刀法结果对比

环刀法与普氏贯入法、核子密度仪法、谐波法在不同碾压次数下的平均压实度对比结果见图 10。其中,谐波法在与环刀法对比时,借助了归一化的方法提高对比性。由图 10 可知,普氏贯入法检测得出的压实度略小于环刀法的检测结果,两者压实度数值相差 2~3 个百分点,两者间压实度相对误差较小,整体控制在±10% 以内。使用核子密度仪法检

测得出的压实度皆小于环刀法,两者压实度数值上相差 4%~8%,整体误差大于±10%。谐波法与环刀法相比,整体误差在±10% 左右。

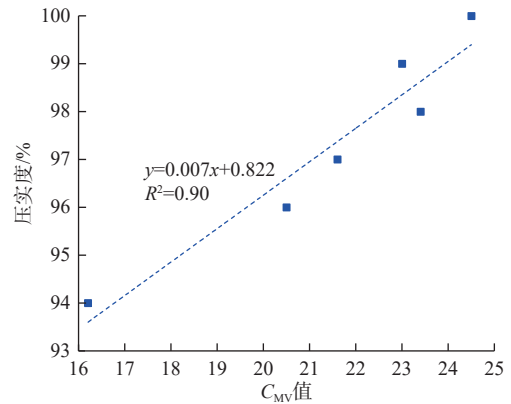


图 9 环刀法检测的平均压实度与 C_{MV} 值之间关系
Fig. 9 Relation between cutting ring method with C_{MV} value

将普氏贯入法、核子密度仪法和谐波法的实测值与环刀法测量压实度的结果进行了比较,计算了平均相对误差(E_{MR})、标准化均方根误差(E_{NRMS})、决定系数(R^2)以及一致性指数(I_A),计算公式为

$$E_{MR} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|P_i - O_i|}{O_i} \right) \quad (1)$$

$$E_{NRMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} / P \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (P_i - P)(O_i - O) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2 \sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \quad (3)$$

$$I_A = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (4)$$

式中: P_i 为普氏贯入法、核子密度仪法或谐波法所测压实度, P 为其平均值; O_i 为环刀法所测压实度, O 为其平均值; n 为试验所测的数量。 E_{MR} 用来衡量两者之间的相对误差,反映其拟合程度:当 E_{MR} 值越大时,数据的拟合程度越低;相反,当 E_{MR} 值越小时,数据的拟合程度越高。 E_{NRMS} 表示模拟性能好坏:当 $E_{NRMS} < 10\%$,表示模拟性能极好;当 $10\% \leq E_{NRMS} < 20\%$ 则表示模拟性能较好;当 $20\% \leq E_{NRMS} < 30\%$,则表示模拟性能一般;如果 $E_{NRMS} \geq 30\%$ 则认为模拟性能较差。 R^2 越接近于 1,表示相

关程度越好。 I_A 越接近 1 说明两数据间的变化趋势和一致性程度越高。

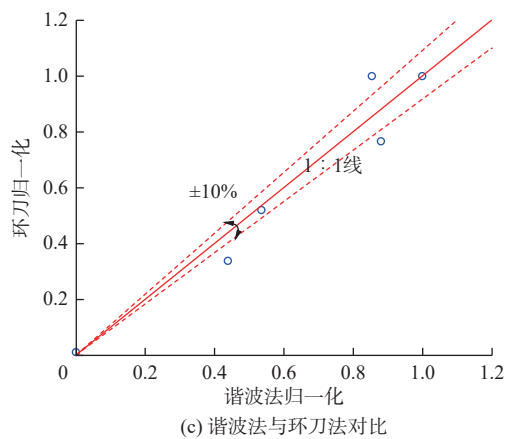
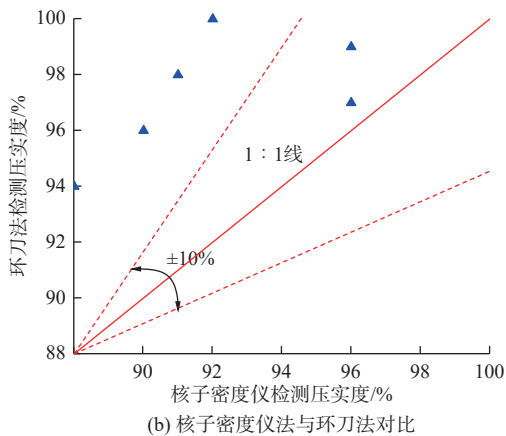
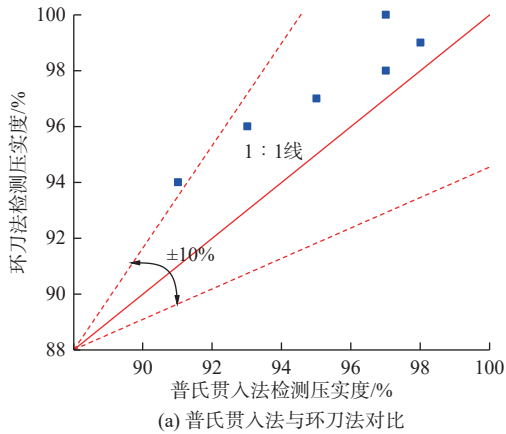


图 10 压实度检测结果对比

Fig. 10 Comparison of compaction degree detection

由表 5 得知: 普氏贯入法与核子密度仪法的相对误差、标准化均方根误差较小, 说明两者与环刀法结果的拟合程度和性能较好; 普氏贯入法与谐波法的决定系数、一致性指数较大, 说明两者与环刀法结果的相关程度较好、变化趋势和一致性程度较高。核子密度仪法和谐波法与环刀法在实际数值间存在一定差异, 还需利用线性方程进一步建立相关关系。

表 5 不同方法的评价分析

Tab. 5 Evaluation analysis of different methods

检测方法	评价指标			
	E_{MR}	E_{NRMS}	R^2	I_A
普氏贯入法	2.4%	2.5%	98.0%	76.1%
核子密度仪法	5.5%	6.3%	37.2%	27.7%
谐波法	27.1%	14.0%	94.4%	98.4%

2.2.2 建立不同方法与环刀法关系

将普氏贯入法、核子密度仪法和谐波法的结果(x)与环刀法得到的压实度(y)建立数学关系, 利用一元一次方程 $y=ax+b$ 进行线性回归计算, 分别得出 a 、 b 值和相关系数 R^2 , 结果见表 6。

表 6 不同方法与环刀法结果关系

Tab. 6 Relationship between the results of different methods and cutting ring method.

方法	关系方程	相关系数
普氏贯入法	$y = 0.734x + 0.276$	$R^2 = 0.98$
核子密度仪法	$y = 0.394x + 0.612$	$R^2 = 0.37$
谐波法	$y = 0.006x + 0.852$	$R^2 = 0.95$

结果显示除核子密度仪法得到的相关性较小 ($R^2=0.37$) 外, 普氏贯入法和谐波法同环刀法建立线性方程的相关系数 R^2 均大于 0.95。基于关系方程, 可利用普氏贯入法和谐波法得到的结果准确计算出填土的压实度。

3 讨论

在碾压 5 次以后, 随碾压次数增大, 环刀法和谐波法的压实度结果出现了负增长情况, 碾压次数的增大可能会造成已成型的土壤表层的破坏^[24] 以及大粒径土壤颗粒的破碎^[25-27], 影响了其压实效果。此外, 环刀法和谐波法所测压实度为表层土下 10 cm 位置处的情况, 而普氏贯入法和核子密度仪法所测压实度为表层土下 10 cm 及更深位置处的平均压实度, 进而出现压实度结果趋势不同。

在测量结果中出现了几组压实度超过 100% 的情况, 出现这种现象的主要原因: 一是为了追求施工质量, 往往利用增加碾压次数, 以减小孔隙率, 导致出现“过碾”现象^[28]; 二是压实度为检测点的干密度与最大干密度的比值^[29], 所采用的最大干密度可能不能真正代表整个施工段干密度的最大值^[30]。

核子密度仪法是目前回填压实的普遍应用方法。徐阳等^[31] 利用核子密度仪与环刀法建立了相关关

系,在南水北调中线京石段渠堤填筑质量检测中取得应用。薛卫军等^[32]在南水北调中线漳古段,将核子密度仪法与环刀法进行了对比并建立了该段填料的回归方程式。然而在本研究结果中存在核子密度仪法检测出压实质量与环刀法相差较大的情况,其原因为在利用核子密度仪进行测量前需利用土壤参数对仪器进行标定^[33],较大的土壤各向异性可能造成所选点的土壤参数不能代表整个路段的土壤性质,并且测试段温度与试验段温度不一致是导致测量误差较大^[8];而且土体含水量分布的不均匀性也会影响仪器测量结果的准确性^[34]。

按照智慧水利的发展要求,实现回填土的快速检测以及利用无人驾驶和智能碾压技术提高压实效率、提升压实精度和准确性将成为今后应用的重点。

4 结论

以某防洪治理工程施工现场为例,利用直接检测的环刀法同间接检测的普氏贯入法、核子密度仪法、谐波法进行了对比分析,建立了环刀法与各方法所测结果的相关关系,结果表明:

随碾压次数的增加,环刀法所测的压实度呈上升趋势,当振动碾压 2~3 次后,基本达到本工程设计压实度($\geq 96\%$)的要求,之后随碾压次数的增加土体压实度基本稳定,会出现小幅度波动。

普氏贯入法和核子密度仪法得到的结果与环刀法结果相比普遍偏小,并且前者相对误差较小,而后者相对误差整体大于 $\pm 10\%$ 。归一化后得到谐波法与环刀法检测结果的误差整体在 $\pm 10\%$ 左右。

普氏贯入法和谐波法均能与环刀法建立良好的相关关系,其线性方程分别为 $y = 0.734x + 0.276$ 和 $y = 0.006x + 0.852$,并且相关系数 R^2 均大于 0.95;核子密度仪法与环刀法建立的线性方程为 $y = 0.394x + 0.612$,在试验中表现一般,相关系数 R^2 仅为 0.37,在今后研究中还需进一步完善。

参考文献:

[1] 王钊,胡海英,邹维列.路堤压实的影响因素和压实度要求[J].公路,2004(8):91-96. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2021.05.01.
[2] 吴优.沥青混凝土心墙堆石坝摊铺及压实质量实时控制研究[D].天津:天津大学,2018. DOI: 10.27356/d.cnki.gtjdu.2018.000118.

[3] 李鹏.道路路基压实效果评价方法研究进展[J].科技创新与应用,2019(23):136-137.
[4] 董海文,李嘉.瞬态面波法检测路基压实度的研究与探讨[J].湖南城市学院学报(自然科学版),2004(2):24-26.
[5] 李青山,张献民,李红英.路基压实度的瞬态瑞雷波检测法[J].河北工业大学学报,2003(5):27-30. DOI: 10.14081/j.cnki.hgdx.2003.05.006.
[6] 汪学斌,王宇峰,刘洪海.压实在线检测技术的发展现状及前景[J].筑路机械与施工机械化,2011,28(3):46-48,55.
[7] 李斌,杨斌,韦国虎,等.碾压施工质量实时监控系统在南水北调工程中的应用[J].南水北调与水利科技,2012,10(2):30-33,123. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.02030.
[8] 王亚晓,王来硕.核子密度仪法与灌砂法检测路基压实度的相关性分析[J].公路与汽运,2022(6):68-70,74. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2022.06.015.
[9] 赵桂娟,郭平.高速公路路基压实度检测方法相关性分析[J].西安科技大学学报,2006(2):179-183. DOI: 10.13800/j.cnki.xakjdx.2006.02.009.
[10] 王志成.无核密度仪法压实度检测影响因素与压实质量评价[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2019.004057.
[11] 范娟,宋晓东,田利锋,等.高速铁路路基连续压实质量检测指标CMV影响因素分析[J].铁道科学与工程学报,2015,12(3):463-467. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2015.03.002.
[12] 唐庆永,李强,聂志红.土石混填路基连续压实质量检验研究[J].武汉大学学报(工学版),2020,53(7):605-610. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2020-07-006.
[13] 田利锋.路基连续压实质量评价方法研究[D].成都:西南交通大学,2016.
[14] 薛马峰,刘微.路基压实质量连续同步检测可行性试验研究[J].国防交通工程与技术,2010,8(5):31-33,37. DOI: 10.13219/j.gjgyat.2010.05.004.
[15] 杨维威.连续压实控制在铁路路基填筑中的应用[J].筑路机械与施工机械化,2013,30(11):71-75,80.
[16] 于永堂,郑建国,刘争宏,等.基于贯入阻力与含水率联测的黄土填方压实度检测方法[J].长江科学院院报,2018,35(3):129-134,143. DOI: 10.11988/ckyyb.2017.1073.
[17] 张建,梁小璇.普氏贯入仪在水库除险加固工程中的

- 的应用[J]. 水利技术监督, 2010, 18(2): 65-66.
- [18] 孙俊峰. 核子密度仪检测压实土密度的应用分析[J]. 水利技术监督, 2016, 24(3): 3,16. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1305.2016.03.002.
- [19] 王婧红, 王利英, 董卫, 等. 胶凝砂砾石质量控制方法[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(2): 393-399. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0042.
- [20] 李昆鹏, 陈书奎, 马怀宝. 核子密度仪在河工模型地形制作中的应用[J]. 人民黄河, 2011, 33(6): 20-21. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2011.06.009.
- [21] 朱永涛, 徐阳, 张玮, 等. 南水北调中线工程京石段S7标渠堤填筑现场碾压试验参数分析[J]. 南水北调与水利科技, 2007(S1): 167-169. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2007.s1.054.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 堤防工程设计规范: GB50286—1998[S]. 北京: 中国计划出版社.
- [23] 中华人民共和国国家能源局. 碾压式土石坝设计规范: SL 274—1998[S]. 北京: 中国水利水电出版社.
- [24] 文畅平. 路基填方过度碾压开裂的力学分析[J]. 交通科技与经济, 2006(4): 1-3. DOI: 10.19348/j.cnki.issn1008-5696.2006.04.001.
- [25] H H K. Manual of Soil Laboratory Testing [M]. London: Pentech Press, 1980.
- [26] 邹维列. 路堤压实及路基土工复合材料排水层的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [27] 邹维列, 王协群, 金亚兵, 等. 高路堤过度压实的负面影响[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(6): 81-85. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2009.06.021.
- [28] 陈青兰. 沥青混凝土路面“过碾”现象浅探[J]. 公路交通技术, 2004(6): 30-31.
- [29] 董卫军, 沈林栋, 陈凤振, 等. 填筑土体压实度快速检测试验[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 34-36,39. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.02034.
- [30] 孙连忠. 压实度超百的原因及其避免措施[J]. 交通标准化, 2007(10): 133-135.
- [31] 徐阳, 张玮, 肖伟华. 核子密度仪在南水北调中线渠堤填筑质量检测应用效果分析[J]. 南水北调与水利科技, 2007(S1): 155-157. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2007.s1.030.
- [32] 薛卫军, 张小刚, 张玲刚. 核子密度水分仪在堤防工程中的标定方法[J]. 华北水利水电学院学报, 2011, 32(4): 129-131. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2011.04.034.
- [33] 张华, 王炎中, 张涛. 核子密度仪在麻湾灌区节水改造工程中的应用[J]. 节水灌溉, 2005(1): 53-54.
- [34] 马志远, 赵荣, 娄立军, 等. 核子水分密度仪在水利工程建设中的应用[J]. 人民黄河, 2000(5): 13-14, 20.

Comparison of efficient testing methods for compaction quality in hydraulic engineering construction

ZHANG Xinxin, REN Xiaolei, WANG Yongliang, CAO Linkuan

(Hebei Institute of Water Science, Shijiazhuang 050057, China)

Abstract: The drawbacks of traditional compaction quality testing methods include expensive operations, limited detection efficiency, and filling soil damage. These methods are no longer enough to satisfy the demands of high-quality water conservancy projects. The application of effective detection techniques to rapidly and precisely represent engineering building quality has emerged as a trend for future development.

The cutting ring method was compared with the Platts penetration method, the nuclear densitometer method, and the harmonic method in Juma River flood control project in the south of Xiong'an New Area (Rongcheng section). The harmonic approach captures the equivalent acceleration signal using an acceleration sensor positioned on the rolling wheel, which is then filtered and Fourier transformed into a frequency domain signal. The test area adopts the construction technology of static rolling twice and vibration rolling six times to roll the test area. After each vibration rolling, the rolling area is sampled once, with a total of 15 sampling points. When the number of rolls increases, shift 0.5 m along the axis direction of the rolling track and draw a line at the sampling boundary to make a mark. On the same number of rolling paths, along the axis direction of the rolling trajectory, the compaction degree of the fill near a certain point was measured every 6 m using the cutting ring method, Platts penetration method, nuclear densitometer method, and harmonic method. The average relative error (E_{MR}), standardized root mean square

error (E_{NRMS}), determination coefficient (R^2), and consistency index (I_A) were used to evaluate the differences between various methods with the cutting ring method, and a linear equation was used to establish the relationship between various methods with the cutting ring method.

The results showed that with the increase in rolling times, the compaction degree by the cutting ring method showed an increasing trend. After 2 or 3 times of vibration rolling, the compaction degree of the soil has reached the project's specification requirements for the filling design. With the increase in rolling times, the soil compaction degree was stable, and the compaction degree would fluctuate slightly. The results of the Pratt penetration method were not much different from those of the cutting ring method, and the relative error was controlled within $\pm 10\%$. The Platts penetration method and harmonic method could establish a good correlation with the cutting ring method, and the correlation coefficient R^2 of the linear equation was greater than 0.95, while the nuclear densitometer method had poor performance in the test, and the correlation coefficient R^2 of the linear equation was only 0.37. The results could provide technical support for the rapid detection of compaction quality and the application of intelligent rolling technology in hydraulic engineering.

Key words: compaction quality; cutting ring method.; Platt penetration method; nuclear densitometer method; harmonic method



摄影|曲帅超