

文章编号:1673-9469(2025)02-0046-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.02.006

基于瑞雷面波波速黄土地基挤密桩法处理效果评价

刘鹏宇^{1,2}, 冉赛佳³, 熊保林^{1,2*}, 刘家乐^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

3. 中国铁路南昌局集团有限公司 永安工务段, 福建 永安 366000)

摘要: 为快速检测黄土地基挤密桩法处理效果, 选取澄韦高速一处挤密桩法地基处理区域为试验区, 采用多道瞬态瑞雷面波法进行快速检测。为了区分桩间土与挤密桩的处理效果, 对试验区采用两种布点方式进行现场试验研究, 通过公式将检测数据分区域处理, 得到每一区域平均波速, 分析等值线图可以得出挤密桩处波速较大, 等边三角形布桩形心处波速最小, 这与实际情况相吻合, 并且成桩质量可以得到良好的检验。将波速测量结果与原位试验数据进行拟合对比, 当波速达到 195 m/s 以上则表示地基处理效果合格, 同时得到了波速与承载力、湿陷系数、干密度之间具有良好的相关性, 这为采用瑞雷面波波速预测地基承载力、湿陷系数、干密度提供可能性。

关键词: 黄土; 瑞雷面波法; 挤密桩法; 湿陷性; 地基承载力

中图分类号: U416.03

文献标识码: A

Evaluation of the Treatment Effect of Loess Foundation Compaction Pile Method Based on Rayleigh Wave Method

LIU Pengyu^{1,2}, RAN Saijia³, XIONG Baolin^{1,2*}, LIU Jiale^{1,2}

(1. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao

University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University,

Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 3. China Railway Nanchang Bureau Group Co.,

Ltd., Yong'an Engineering Section, Yong'an, Fujian 366000, China)

Abstract: To quickly detect the effectiveness of the compaction pile method for loess foundation treatment, this article selects a compaction pile method foundation treatment area on the Chengwei Expressway as the experimental area, and uses the multi-channel transient Rayleigh wave method for rapid detection. In order to distinguish the treatment effects of soil between piles and compacted piles, two types of point distribution methods were used for on-site experimental research in the test area. The detection data was processed in different regions using formulas to obtain the average wave velocity in each region. By analyzing the contour map, it can be concluded that the wave velocity at the compacted pile is larger, while the wave velocity at the centroid of the equilateral triangle pile is smallest. This is consistent with the actual situation, and the quality of the pile can be well tested. The results of wave velocity measurement were fitted and compared with in-situ test data. When the wave velocity reached 195 m/s or above, the results indicated that the foundation treatment effect was qualified. At the same time, it was found that there was a good correlation between wave velocity, bearing capacity, collapsibility coefficient, and dry density. This provides a possibility for using Rayleigh wave velocity to estimate the foundation bearing capacity, collapsibility coefficient, and dry density.

Key words: loess; rayleigh surface wave method; compaction pile method; collapsibility; foundation bearing capacity

收稿日期: 2023-12-18

基金项目: 河北省重点研发计划(20375504D)

第一作者: 刘鹏宇(1999—), 男, 辽宁本溪人, 硕士研究生, 研究方向为地基处理研究。

* 通信作者: 熊保林(1977—), 男, 湖北随州人, 博士, 副教授, 研究方向为地基处理与路基稳定性研究。



图3 现场检测图

Fig. 3 On site inspection map

2 现场原位试验

本次水泥土挤密桩检测将钻孔取样垂直度控制在 1.5% 以内,可有效检测桩体成桩质量以及钻孔取芯质量。通过对芯样的初步观察分析喷灰均匀度和水泥含量。每米留取 1 个有代表性的样本,确保封闭完整,避免水分蒸发,留作进一步检验、分析,或送到实验室检测使用。图 4 为现场静态平板载荷测试点位置图,3 条测线从上至下分别为 1、3、5 号测线,图 5 为现场钻孔取芯芯样图。

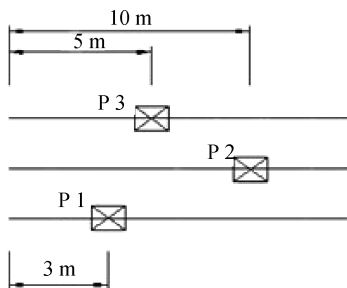


图4 平板载荷点位置

Fig. 4 Location of plate load points



图5 钻孔取芯芯样图

Fig. 5 Sample diagram of drilling and core samples

3 数据处理与分析

3.1 数据提取

采集现场试验数据,通过数据接收、采集软件将原始数据保存到计算机内,并通过 WinSws 面波分析软件进行数据处理^[14-15],处理过程包括 $X-T$ 时

距域、 $F-K$ 频率波数域、 $X-F$ 距离频率域、 $Z-V$ 深度速度域等 4 个处理步骤。通过滤波、人工选择等操作后,进行频散曲线的正反演处理,最后通过 $Z-V$ 深度速度域处理得到直观的深度-波速对应关系。

检测所得的波速通常为各个点所对应的波速,为了研究某一区域范围的波速,利用公式 $V =$

$$\frac{\sum_{i=1}^n S_i \times V_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

计算平均波速,其中 S_i 为各波速对应区

域的面积, m^2 ; V 为对应区域平均波速, m/s ; V_i 为对应区域 S_i 的各个点波速, m/s 。以 3、4 号测线为例,本次将测线剖面进行平均切分,每一区域深度为 1 m,长度为 3 m (全长 12 m),共分为 24 处区域,每一区域面积为 $1 \times 3 = 3 m^2$,即 $\sum_{i=1}^n S_i = 3$,具体结果如表 1、表 2 所示。

表 1 3 号测线各区域平均波速分布表

Tab. 1 Average wave velocity distribution in various regions of line 3

深度 /m	0~3 m 波速 /($m \cdot s^{-1}$)	3~6 m 波速 /($m \cdot s^{-1}$)	6~9 m 波速 /($m \cdot s^{-1}$)	9~12 m 波速 /($m \cdot s^{-1}$)
0~1	231.02	233.22	233.69	232.85
1~2	234.34	237.62	235.83	238.88
2~3	237.82	241.27	242.65	243.74
3~4	246.32	248.97	251.21	248.81
4~5	249.29	253.19	252.18	252.69
5~6	256.11	259.62	258.67	258.74

表 2 4 号测线各区域平均波速分布表

Tab. 2 Average wave velocity distribution in various regions of line 4

深度 /m	0~3 m 波速 /($m \cdot s^{-1}$)	3~6 m 波速 /($m \cdot s^{-1}$)	6~9 m 波速 /($m \cdot s^{-1}$)	9~12 m 波速 /($m \cdot s^{-1}$)
0~1	198.54	193.74	204.21	199.37
1~2	216.10	214.38	217.59	220.64
2~3	221.46	224.91	226.29	227.38
3~4	234.38	237.03	239.27	236.87
4~5	243.94	247.84	246.83	247.34
5~6	254.91	258.42	257.47	257.54

从表 1 可以看出,3 号测线剖面内桩土复合后,每一区域面积内的平均波速基本全部大于 230 m/s ,表 2 则为 4 号测线剖面内桩间土位置(薄弱处)的平均波速,所测数据范围处于 193~260 m/s 之间。根据表 1、表 2 数据可以得出:(1)对地基处理的效果进行评价,只需将测线布置在桩间土位置,观察其所得波速是否满足设计要求即可;(2)本统计方

法将数据点整理为一定区域内的波速,可以直观地观察到各个测线区域内的波速情况,且直接体现出桩土复合波速,对整体进行分析。

3.2 试验数据分析

通过分区域统计方法,可以直观地观察到各

个区域面积内对应的波速,但由于无法区分挤密桩的分布区域,故采用等值线图进一步分析数据,进而得到地层和挤密桩分布情况。

现对所提取数据绘制波速分布等值线图,从而直观地对比波速变化情况,地基处理前后 5 条测线波速检测如图 6 所示。

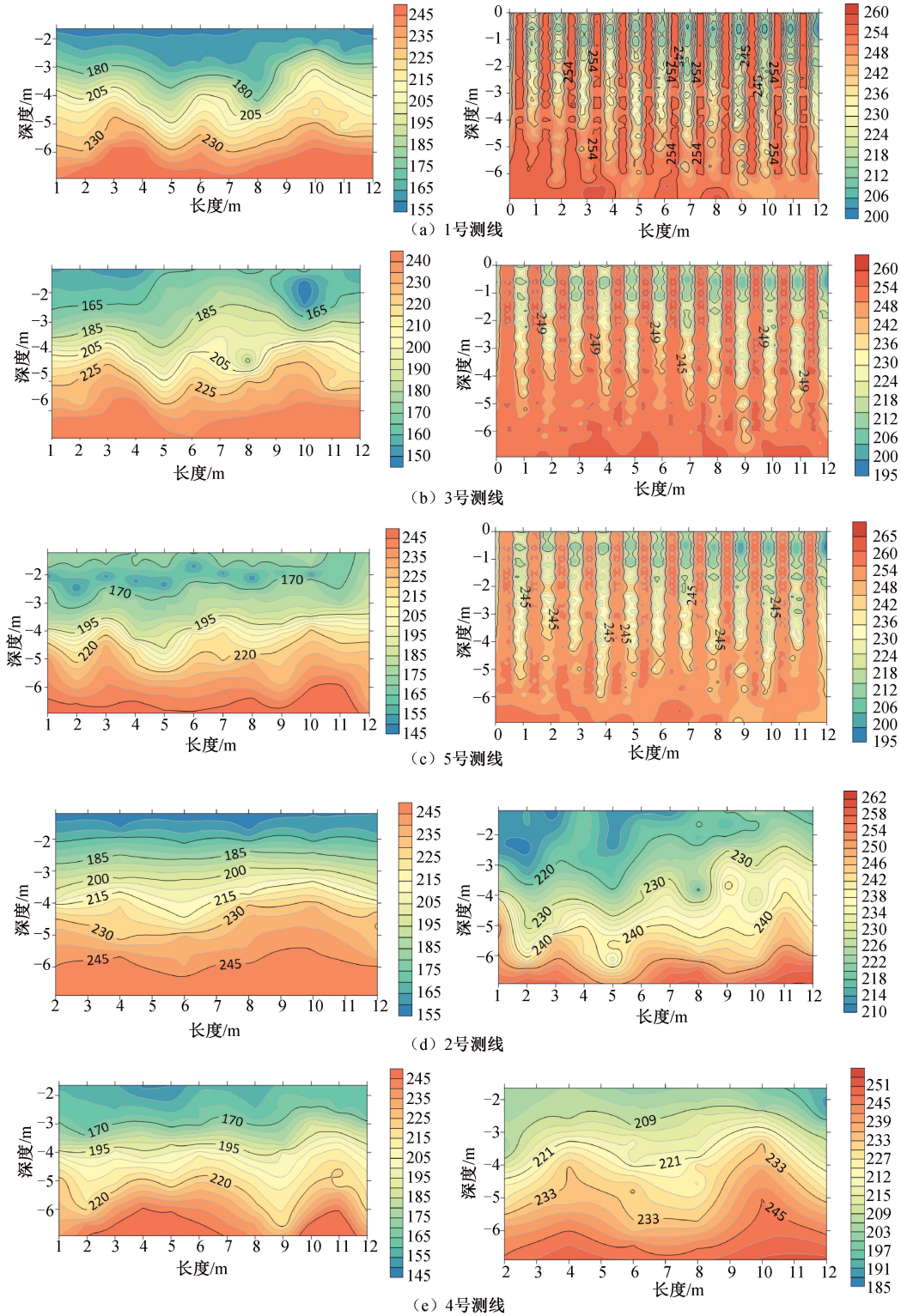


图 6 各测线处理前后波速等值线图(单位:m/s)

Fig. 6 Wave velocity contour maps before and after processing of each measuring line (unit:m/s)

从处理前波速等值线图可以得出,等值线图有着明显的分层,代表着不同密实度的土层。在地基处理前,地下3 m深度瑞雷面波速普遍小于180 m/s,3~6 m深度波速为180~240 m/s。观察图6(a)(b)(c)可知,1、3、5号测线在经过挤密桩处理后波速大幅提升,其中挤密桩波速处于248~260 m/s之间,测试结果表明成桩质量较好。随着桩间土离挤密桩中心距离的增加,波速减小,两桩中间位置波速最小,大概在210~228 m/s之间;随着深度增大,桩间土的波速也随之增大,在6 m处达到245 m/s左右。观察图6(d)(e)可知,经过挤密桩处理后,由于所测测线为检测薄弱处,因此,波速增长幅度较1、3、5号测线小。桩顶下6 m(桩长)范围内影响较大,波速平均值提升比率为14.0%~30.9%;6~6.5 m深度由于施工、加载等原因,波速平均值提升比率为2.2%~14.0%。通过瑞雷波检测可以看出,挤密桩法地基处理的有效影响深度为8 m左右,其中6 m深度内影响效果较好,并且通过2种方法的测线布置可以验证相邻桩间土的波速最大,即密实程度最好,三桩中心处波速最小,即为薄弱处,与实际情况相符。

3.3 原位试验结果分析

基于瑞雷面波法对地基处理效果进行评价,选取试验区原位试验结果进行分析,见表3。

根据表3可知,所测承载力均满足施工要求,桩间土最小波速为207.7 m/s,将所测的波速与地基承载力进行相关性拟合,如图7所示,回归方程为 $f_{ak} = -31.65 + 1.07V$,相关系数 $R^2 = 0.9955$,说明瑞雷面波波速 V 与地基承载力 f_{ak} 之间存在着良好的线性关系。图8为通过回归方程与检测波速反算地基承载力等值线分布图。

表3 试验区承载力与波速

Tab.3 Bearing capacity and wave velocity of experimental area

桩间土波速 /($m \cdot s^{-1}$)	桩间土 承载力/kPa	挤密桩波速 /($m \cdot s^{-1}$)	挤密桩 承载力/kPa
212.5	195	252.0	237.4
217.2	200	254.1	242.3
207.7	193	253.4	239.8

观察图8可知,挤密桩位置(最大)承载力大概处于238.9~241.5 kPa范围内,与实测值最大误差在5 kPa左右,形心处(最小)承载力大概处于

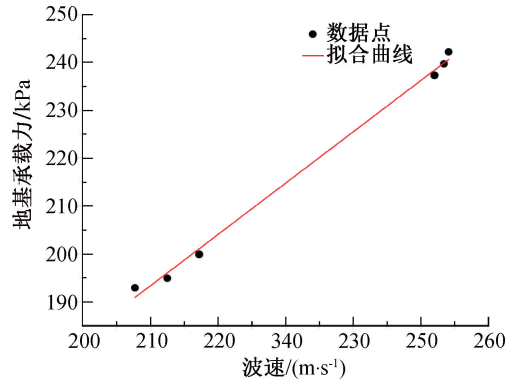


图7 承载力-波速相关性曲线

Fig.7 Load capacity versus wave velocity correlation curve foundation

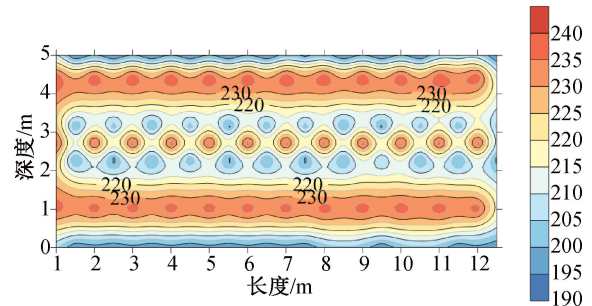


图8 地基承载力分布等值线图(单位:kPa)

Fig.8 Contour map of bearing capacity distribution of foundation (unit:kPa)

197.3~207.3 kPa范围内,与实测值最大误差在7 kPa左右。

室内试验得到处理前后现场的土壤指标、湿陷性与对应位置的波速,如表4所示。

由表4可知,在8.5 m深度检测范围内,挤密处理前平均干密度为1.306 g/cm³,挤密处理后平均干密度为1.426 g/cm³,增长了9.19%;6 m深度以下干密度的增长值较小,往更深处挤密前后干密度值越来越接近,增长幅度可以忽略。在8.5 m深度范围内,挤密处理前平均湿陷系数为0.069,挤密处理后平均湿陷系数为0.012,小于0.015,表明湿陷性已经基本消除。

经过地基处理后原位试验结果均满足相关工程标准,其中表3所示承载力对应最小波速为207.7 m/s,室内试验处理后对应最小波速为196 m/s,结合平均波速分布表与等值线图综合分析,当波速达到195 m/s以上则表示地基处理效果合格。

为了更好地确定瑞雷面波波速与干密度、湿陷系数的关系,应用 $y = axb$ 函数分别进行拟合,拟合后干密度-波速拟合曲线如图9所示,湿陷系数-波速拟合曲线如图10所示。

表 4 试验区挤密桩前后物理指标对比

Tab. 4 Comparison of physical indicators before and after compaction piles in the experimental area

	深度 /m	含水率 /%	天然密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	干密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比重	孔隙比	孔隙度 /%	饱和度 /%	湿陷系数	波速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
处 理 前	0.5	14.4	1.45	1.27	2.71	1.138	53.2	34.3	0.091	172
	2.5	14.2	1.47	1.29	2.71	1.105	52.5	34.8	0.135	158
	4.5	8.5	1.43	1.32	2.71	1.056	51.4	21.8	0.064	194
	6.5	12.6	1.51	1.34	2.71	1.021	50.5	33.4	0.036	222
	8.5	11.8	1.47	1.31	2.71	1.061	51.5	30.1	0.018	253
处 理 后	0.5	16.6	1.74	1.49	2.71	0.816	44.9	55.1	0.012	204
	2.5	16.9	1.72	1.47	2.71	0.842	45.7	54.4	0.015	196
	4.5	21.4	1.69	1.39	2.71	0.947	48.6	61.3	0.007	231
	6.5	18.6	1.68	1.42	2.71	0.913	47.7	55.2	0.01	247
	8.5	17.2	1.59	1.36	2.71	0.998	49.9	46.7	0.017	259

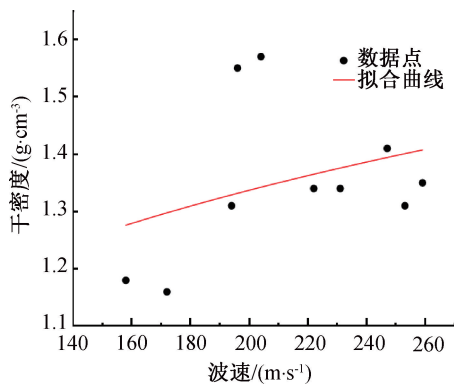


图 9 干密度-波速相关性曲线

Fig. 9 Dry density versus wave velocity correlation curve

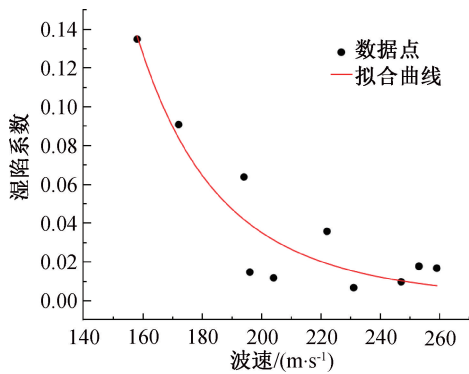


图 10 湿陷系数-波速相关性曲线

Fig. 10 Collapse coefficient versus wave velocity correlation curve

经过拟合后干密度-波速回归方程为 $\rho_d = 3.446V^{0.257}$, 相关系数 $R^2 = 0.690$ 。湿陷系数-波速回归方程为 $\delta = 5.625V^{-5.737}$, 相关系数 $R^2 = 0.878$ 。通过回归分析, 为通过瑞雷面波预测湿陷系数、干密度提供可能性。通过瑞雷波波速与黄土湿陷系数、干密度相关物性指标的回归方程, 可以针对一定区域的土体建立经验关系表达式。

图 11 分别为 2、3 号测线挤密桩处理前后的湿

陷系数分布等值线图。由图可以看出, 经过地基处理后, 湿陷性得到改善, 且试验区湿陷性基本消除; 其中 3 号测线湿陷性相较 2 号测线的湿陷性更小, 验证了实际情况下桩间土在形心处湿陷性较大。

4 结论

本文采用瑞雷面波法对黄土地基挤密桩法地基处理后的效果开展研究, 提出 2 种布点方式并对其进行检测, 并对检测结果进行分析, 得出以下结论:

1) 通过 1、3、5 号测线瑞雷面波法测量结果可以直观看出, 桩周围土体波速较大且两桩间波速最小, 与实际情况相符合, 并且可以直观地验证挤密桩成桩质量, 减少了有损原位检测对地基的损伤。

2) 通过 2、4 号测线瑞雷面波法测量结果可知, 测线所处位置波速相对较小, 因此可以主要测量等边三角形布桩下形心处桩间土处理效果的水平影响范围。

3) 经过试验区原位试验数据观察到黄土的湿陷性基本消除, 湿陷性变化与波速变化相符合, 因此根据结果进行分析, 澄韦高速黄土地区挤密桩法地基处理后瑞雷面波检测波速达到 195 m/s 以上, 表示黄土地基处理效果合格。

4) 通过回归分析得到地基承载力-波速回归方程为 $f_{ak} = -31.65 + 1.07V$, 相关系数 $R^2 = 0.9955$; 干密度-波速回归方程为 $\rho_d = 3.446V^{0.257}$, 相关系数 $R^2 = 0.690$; 湿陷系数-波速回归方程 $\delta = 5.625V^{-5.737}$, 相关系数 $R^2 = 0.878$, 这为通过瑞雷面波法预测地基承载力、湿陷系数、干密度提供可能性, 从而建立了瑞雷面波波速与地基承载力、湿陷系数、干密度经验关系式。

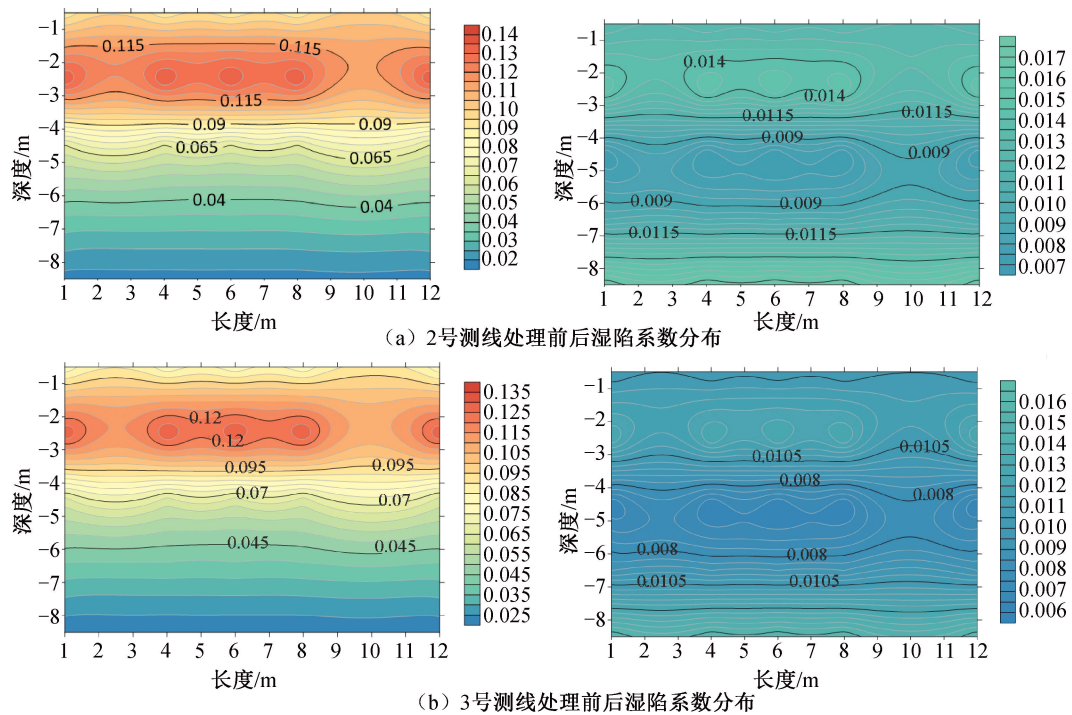


图 11 2、3号测线处理前后湿陷系数分布图

Fig. 11 Distribution of collapsibility coefficient before and after processing of lines 2 and 3

参考文献:

- [1] 米海珍,杨鹏. 挤密桩处理湿陷性黄土地基的现场试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(7):1951-1956+1964.
- [2] 代亚军. 夯扩挤密桩改良强湿陷性黄土地基试验研究[J]. 山西建筑,2018,44(9):53-54.
- [3] 祁生文,孙进忠,何华. 瑞雷波勘探的研究现状及展望[J]. 地球物理学进展,2002(4):630-635+662.
- [4] 杨成林,时福荣,李从信,等. 应用瑞雷波等方法对公路质量进行无损检测[J]. 物探与化探,1996(2):104-115.
- [5] 杨成林. 瑞雷波法勘探原理及其应用[J]. 物探与化探,1989(6):465-468.
- [6] 刘强. 基于瑞雷波理论的公路无损检测方法研究[D]. 西安:长安大学,2012.
- [7] 米素婷,刘丽,黄晓波,等. 瑞雷波在湿陷性黄土地基处理效果评价中的应用[J]. 工程勘察,2017,45(3):74-78.
- [8] 侯征,侯晖,邸龙. 综合地球物理方法在岩土工程勘察中的应用[J]. 西部探矿工程,2018,30(5):147-149+155.
- [9] 吉任,徐欢乐. 水泥土挤密桩处理含盐湿陷性黄土地基施工技术研究[J]. 公路,2020,65(6):118-121.
- [10] 郭士礼,辛酉阳,张学强,等. 相邻道瞬态瑞雷波法在水泥土搅拌桩检测中的应用[J]. 公路,2016,61(10):23-28.
- [11] 李建宁,张平松,郭立全,等. 复杂地表条件对瞬态瑞雷波法探测软弱夹层的影响研究[J]. 地球物理学进展,2018,33(2):830-834.
- [12] 刘远,孙进忠,赵体,等. 强夯地基处理效果的多道瞬态瑞雷波检测[J]. 地球物理学进展,2014,29(6):2910-2916.
- [13] 王愉龙. 高密度电法及瑞雷波法在现役高速公路路基检测中的应用[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2016,47(4):553-556.
- [14] 吴晔. 瞬态瑞雷波法和地质雷达法路基结构检测对比[J]. 铁道建筑,2016(3):108-112.
- [15] 孙家俊,卢松,苏有财. 瑞雷波法在路基岩溶注浆质量检测中的应用[J]. 铁道建筑,2014(2):83-85.

(责任编辑 王利君)