

基于等效固结压力的强夯有效加固深度及地基沉降计算方法研究

林明臻¹, 刘文彬^{2,3}

(1. 福建省湄洲湾港口发展中心东吴港务站, 福建 莆田 362804; 2. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 3. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461)

摘要: 针对强夯加固地基的有效加固深度和地基沉降计算困难及费用成本高等问题, 将强夯时土体受到的冲击荷载等效为前期固结压力, 推导了采用卡萨格兰德法获得前期固结压力计算强夯有效加固深度和地基沉降量的方法, 通过算例验证了方法的合理性和有效性。主要结论如下: 1) 可采用卡萨格兰德法计算强夯加固地基形成的等效前期固结压力, 可以此计算强夯形成的硬壳层厚度和对地基的有效加固深度; 2) 提出了基于等效前期固结压力计算强夯加固后地基沉降的改进计算方法; 3) 提出的有效加固深度和地基沉降计算方法仅需通过室内土工试验计算指标, 应用方便。研究成果可为强夯的设计施工提供指导和借鉴参考。

关键词: 动力固结; 前期固结压力; 有效加固深度; 地基沉降

中图分类号: U6; U655; TU447

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2026)02-0068-05

doi: 10.7640/zggwjs202602011

Calculation method of effective reinforcement depth and foundation settlement of dynamic compaction based on equivalent consolidation pressure

LIN Ming-zhen¹, LIU Wen-bin^{2,3}

(1. Dongwu Port Affairs Station, Fujian Meizhou Bay Port Development Center, Putian, Fujian 362804, China;
2. Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222;
3. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: In view of the difficulties in calculating the effective reinforcement depth and foundation settlement of dynamic compaction for ground reinforcement, as well as the high cost, the impact load on the soil during dynamic compaction is equivalent to the preconsolidation pressure. A method for calculating the effective reinforcement depth and foundation settlement of dynamic compaction using the Casagrande method to obtain the preconsolidation pressure is derived. The rationality and effectiveness of the method are verified through numerical examples. The main conclusions are as follows: 1) The Casagrande method can be used to calculate the equivalent preconsolidation pressure formed by dynamic compaction for ground reinforcement, which can be used to calculate the thickness of the hard shell layer formed by dynamic compaction and the effective reinforcement depth on the foundation; 2) An improved calculation method based on equivalent preconsolidation pressure for calculating foundation settlement after dynamic compaction reinforcement is proposed; 3) The proposed method for calculating effective reinforcement depth and foundation settlement only requires calculation indicators through indoor geotechnical tests, making it convenient to apply. The research results can provide guidance and reference for the design and construction of dynamic compaction.

Key words: dynamic consolidation; preconsolidation pressure; effective reinforcement depth; foundation settlement

0 引言

动力固结法是地基加固最直接有效的方法之

一, 其中有效加固深度和加固后地基沉降的计算方法是动力固结法的关键问题。对于动力固结的

有效加固深度和地基沉降计算方法,研究人员开展了大量的研究工作。厉超等^[11]分析了强夯孔压和变形的现场试验数据及数值模拟结果,揭示了超孔压累积变化规律及强夯作用下土体扰动区的划分方法。王建平等^[12]根据 8 000 kN·m 能级强夯的现场实测结果提出了基于梅拉公式计算结果的修正系数。姚占勇等^[13]采用帽盖模型结合有限元分析揭示了强夯过程中土体的应力应变特征及有效加固范围的变化规律。蔡新等^[14]根据静力等效原理和分层沉降计算原理推导了强夯接触力和地基沉降的计算公式。水伟厚等^[15]基于现场实测数据建立了夯沉量与击实度间的定量关系,结合工程实例验证了方法的有效性。王俊林等^[16]采用考虑了土体非线性的大变形分析,通过 ALE 自适应技术分析了冲击荷载下土体的沉降变形及隆起特性。赵家琛等^[17]基于数值分析及实测数据提出了 10 000 kN·m 高能级强夯的有效加固深度估算公式。董天文等^[18]考虑夯坑深度、压密壳深度、压密壳影响区深度等因素建立了饱和砂土地基有效加固深度计算方法。许国一等^[19]考虑了竖向动应力分布及静荷载下弹性理论,提出了一种拟静力强夯作用下夯沉量的实用计算方法。徐平等^[10]结合实测数据拟合了填石高路堤强夯有效加固深度的修正系数,建立了考虑加固横向与竖向作用效应的有效加固深度优化计算公式。吴怵华等^[11]分析了冲击荷载下土体结构变化及强度增长,提出了针对海砂的密实度与内摩擦角增量经验计算方法。王燕等^[12]结合现场数据与理论分析,提出了针对湿陷性黄土的强夯有效加固深度计算方法。目前,强夯有效加固深度及地基沉降计算方法多基于现场实测数据及仿真分析反演得到,计算成本较高且在施工后开展分析,施工适宜性与时效性较差。

本文针对强夯法加固地基的有效深度与沉降计算问题,基于室内试验与土体前期固结压力分析给出了强夯有效加固深度与地基沉降改进计算方法,结合工程实例开展算例验证,为工程实践提供借鉴指导。

1 基于前期固结压力的强夯有效加固深度与地基沉降确定方法

1.1 强夯有效加固深度计算方法

在工程中地基沉降计算常采用分层总和法,根据地基土应力历史的不同,土体的固结变形常分为正常固结土、超固结土和欠固结土 3 种状态

进行计算。土体的超固结可能有各种原因,包括前期受到超过地基应力的超载作用、地下水变化、强夯等。强夯加固地基沉降可按荷载等效的方法计算超固结土的沉降,即根据强夯后地基的 $e-\lg p$ 曲线,求出地基的等效前期固结压力 p_c (即将强夯的加固效果等效为前期固结压力的作用效果)。由 $e-\lg p$ 曲线求等效前期固结压力 p_c ,土工试验规程推荐卡萨格兰德经验图解法来求等效前期固结压力 p_c 的近似值,求解 p_c 的方法见文献[13]。

强夯荷载对于地基的加固效果,类似于地基受到了等效的某种前期固结压力作用。为了求出等效前期固结压力,可采用卡萨格兰德方法^[13]。卡萨格兰德求解前期固结压力的过程可采用数学方法进行处理,计算简图如图 1 所示。

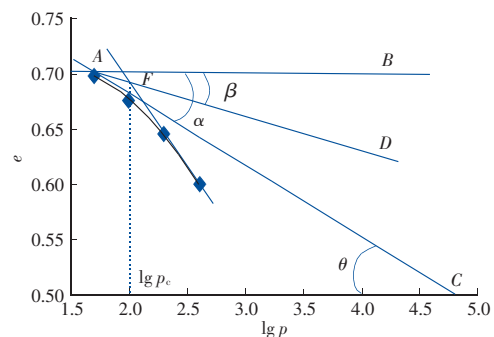


图 1 卡萨格兰德法求解地基等效前期固结压力 p_c 的计算简图

Fig. 1 Calculation diagram for solving the equivalent preconsolidation pressure p_c of foundation using the Casagrande method

假定 $e-\lg p$ 曲线可以用二次方程描述:

$$y=ax^2+bx+c \quad (1)$$

式中: y 为孔隙比 e ; x 为固结压力 $\lg p$; a 、 b 、 c 为常数,可由试验数据确定。

在该点的 y 数值可由式(1)确定。

该处的切线斜率为:

$$y'=2ax+b \quad (2)$$

假定 $e-\lg p$ 曲线曲率半径最小的点的坐标为 $A(x_1, y_1)$,由几何关系(图 1)可知:

$$\theta=-\arctan(y'_{x=x_1}) \quad (3)$$

$$\alpha=\theta \quad (4)$$

令

$$\beta=\frac{\alpha}{2} \quad (5)$$

所以过 A 点的 α 角平分线 AD 的方程为:

$$y=(x-x_1)\tan(\pi-\beta)+y_1 \quad (6)$$

整理后,得到:

$$y = -x \tan \beta + x_1 \tan \beta + y_1 \quad (7)$$

$e-\lg p$ 曲线的直线段可由过 $e-\lg p$ 曲线上曲线段最后一点的切线表示:

$$y = (x - x_5) y'_{x=x_5} + y_5 \quad (8)$$

联立式(7)和式(8)可得:

$$\lg p_c = [y_5 - y_1 + x_1 \frac{y'_1}{2} - x_5 y'_5] / (\frac{y'_1}{2} - y'_5) \quad (9)$$

用 $e-\lg p$ 曲线上直线段上另外 2 点 (x_4, y_4) 和 (x_5, y_5) 的连线作为曲线的直线段, 该直线段公式见式(10)。

$$\lg p_c = [x_4 + \frac{(x_5 - x_4)(-x_1 \frac{y'_1}{2} + y_1)}{y_5 - y_4}] / (1 - \frac{y'_1(x_5 - x_4)}{y_5 - y_4}) \quad (10)$$

式中: x_4 和 x_5 为 $e-\lg p$ 曲线直线段上另外 2 点的横坐标, 具体意义为 $e-\lg p$ 曲线直线段上 2 点的荷载值 $\lg p_4$ 和 $\lg p_5$; y_4 和 y_5 为 $e-\lg p$ 曲线上另外 2 点的纵坐标, 具体意义为 x_4 和 x_5 两点处的荷载 $\lg p_4$ 和 $\lg p_5$ 所对应的孔隙比 e_4 和 e_5 , 可根据 x_4 和 x_5 通过式(1)计算得到; y'_1 和 y'_5 可由 x_1 和 x_5 根据式(2)计算得到; $\lg p_c$ 可由 $x_1, x_4, x_5, y_1, y_4, y_5, y'_1$ 和 y'_5 根据式(9)一式(10)计算得到。

1.2 强夯加固地基沉降计算方法

左名麒和朱树森在《强夯法地基加固》一书中提出了通过计算强夯处理地基前期固结压力来计算其变形特性, 是公认的计算经强夯处理的地基在附加荷载作用下沉降变形的的方法。本文在此基础上进行了改进, 并用于本工程的沉降计算。

某地基在大面积均布荷载 ΔP 作用下的沉降计算公式有以下 4 种。其中, C_{ei} 为第 i 层土的回弹指数; C_{ci} 为第 i 层土的压缩指数; P_{si} 为第 i 层土的自重应力; P_{ci} 为第 i 层土的前期固结压力; ΔP_i 为第 i 层土的附加应力; e_{0i} 为第 i 层土的初始孔隙比; e_{ci} 为第 i 层土的前期固结压力对应的孔隙比; $S_{oc1}, S_{oc2}, S_{oc3}$ 为同一地基根据 P_{si} 和 P_{ci} 划分不同深度范围土体的沉降, 可由式(11)一式(13)计算得到; S

为地基的总沉降; h_i 为第 i 层土层的厚度。

1) 对于 $P_{si} + \Delta P_i \leq P_{ci}$ 的各层土, 计算公式为:

$$S_{oc1} = \sum \frac{h_i}{1 + e_{0i}} C_{ei} \lg \frac{P_{si} + \Delta P}{P_{si}} \quad (11)$$

2) 对于 $P_{si} < P_{ci}$ 且 $P_{si} + \Delta P_i > P_{ci}$ 的各层土, 计算公式为:

$$S_{oc2} = \sum h_i (\frac{C_{ei}}{1 + e_{0i}} \lg \frac{P_{ci}}{P_{si}} + \frac{C_{ci}}{1 + e_{ci}} \lg \frac{P_{si} + \Delta P}{P_{ci}}) \quad (12)$$

3) 对于 $P_{si} \geq P_{ci}$ 的各层土, 计算公式为:

$$S_{oc3} = \sum h_i (\frac{C_{ci}}{1 + e_{ci}} \lg \frac{P_{si} + \Delta P}{P_{si}}) \quad (13)$$

4) 联合式(11)一式(13)得到总沉降计算公式为:

$$S = S_{oc1} + S_{oc2} + S_{oc3} \quad (14)$$

2 算例验证

2.1 强夯加固地基有效加固深度算例验证

1) 算例 1

对天津港欧亚北侧智能化集装箱码头工程的 A 区钻孔进行了地基土室内压缩试验, 以确定强夯后等效前期固结压力。以 A1-3 钻孔的试验结果为例给出分析结果。图 2 给出了不同深度土样的压缩试验结果, 由图 2 可知, 强夯区土体压缩性较高, 但未见明显的曲线转折点, 表明地基土体灵敏度较小。该孔土体的物理力学指标见表 1, 可见取土范围内地基土均为高含水率、高孔隙比的饱和黏土或淤泥质黏土, 土体压缩性很大, 强度较低。

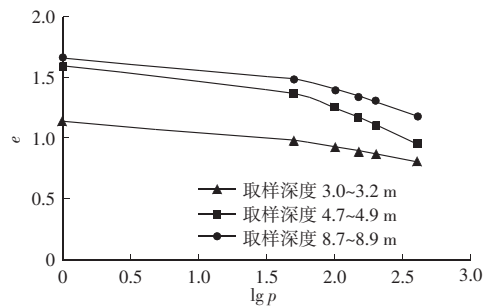


图 2 钻孔 A1-3 不同深度土层的 $e-\lg p$ 曲线

Fig. 2 The $e-\lg p$ curve of each soil layer in borehole A1-3

表 1 钻孔 A1-3 的土体物理力学指标

Table 1 Physical-mechanical indicators of soil mass in borehole A1-3

土样编号	土样类型	含水率/%	湿密度/($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙比	压缩系数/ MPa^{-1}	压缩指数	回弹指数	等效前期固结压力/kPa	自重应力/kPa
A1-3-1	黏土	40.0	1.80	1.139	0.55		0.02	113.69	54.0
A1-3-2	淤泥质黏土	46.3	1.73	1.334	0.95	0.29	0.03	100.02	55.5
A1-3-3	淤泥质黏土	52.1	1.68	1.499	1.07	0.34	0.01	101.76	62.4
A1-3-4	淤泥	55.5	1.65	1.601	1.30	0.42	0.01	100.14	69.2
A1-3-5	黏土	47.2	1.74	1.335	1.11	0.35	0.01	99.93	76.6
A1-3-6	黏土	43.8	1.75	1.268	0.85	0.28	0.01	101.23	91.6
A1-3-7	淤泥	58.2	1.65	1.656	1.26	0.32	0.01	99.64	98.1
A1-3-8	黏土	51.5	1.70	1.460	1.21	0.41		100.52	212.2

等效前期固结压力 p_c 为前期土体的自重应力 σ_z 与地基处理引起的土体应力增量 $p_c - \sigma_z$ 之和,可由式(9)一式(10)计算得到。通过计算地基处理引起的土体应力增量 $p_c - \sigma_z$ 沿土体深度的分布,可以判断强夯的加固深度,即不同深度的 $p_c - \sigma_z$ 曲线分布。根据工程现场情况,计算得到强夯引起的基础中应力增量 $p_c - \sigma_z$ 沿埋深的分布如图3所示。由图3可知,强夯形成的有效加固深度(硬壳层)在3.2 m左右,然后随深度增加 $p_c - \sigma_z$ 逐渐减小,其影响逐渐减小,在6 m以下影响基本消失,表明采用等效前期固结压力与土体自重应力之差确定强夯加固土层的方法是合理可行的。

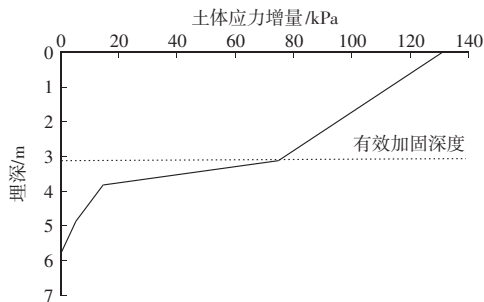


图3 由土体应力增量确定的强夯有效加固深度

Fig. 3 Effective reinforcement depth of dynamic compaction determined by soil stress increment

2) 算例2

为了验证分析计算的结果,对相邻的相似工程宝湾二期进行了验证。图4为不同深度处土体的压缩曲线,可见不同深度土层的 $e - \lg p$ 压缩曲线均无明显转折,表明各层土样的灵敏度较低,无明显屈服点。宝湾二期工程中强夯对地基的影响通过等效前期固结压力与土体自重应力之差 $p_c - \sigma_z$ 得到,由图5可知,强夯加固对地基土的应力提高主要在地基的浅层,最大值接近90 kPa,之后随深度增加逐渐减少,最终强夯的有效加固深度为11 m左右。

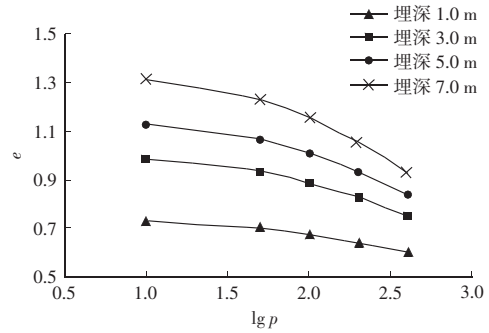


图4 强夯后不同深度土层的 $e - \lg p$ 曲线

Fig. 4 The $e - \lg p$ curve of each soil layer after dynamic compaction

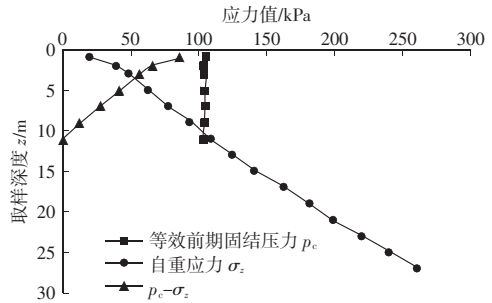


图5 钻孔S1强夯有效加固深度

Fig. 5 Effective reinforcement depth of borehole S1 by dynamic compaction

2.2 强夯加固地基沉降计算方法算例验证

对天津港欧亚北侧智能化集装箱码头工程进行算例验证,根据表1和图2中的压缩指标及压缩曲线,采用式(11)一式(14)进行计算,附加荷载分别按40 kPa和60 kPa取值,计算结果如表2所示。当附加荷载为40 kPa时,强夯加固后表层累计沉降为7.80 cm;当附加荷载为60 kPa时,强夯加固后地基的表层累计沉降为19.76 cm,与现场实测沉降23.25 cm较为符合,均小于港口工程道路堆场设计使用年限的地基沉降限值30 cm,满足地基加固要求。

表2 天津港欧亚北侧智能化集装箱码头工程A区地基沉降计算结果

Table 2 Foundation settlement calculation results for Area A of the Tianjin Port Eurasia North Intelligent Container Terminal Project

项目	等效前期固结压力/kPa	土层厚度/m	自重应力/kPa	孔隙比	压缩指数	回弹指数	(自重应力+附加荷载 40 kPa)/kPa	(自重应力+附加荷载 60 kPa)/kPa	压缩量/cm	
									附加荷载 40 kPa	附加荷载 60 kPa
A1-3-1	113.69	3.0	54.0	1.139		0.02	94.0	114.0	0.70	0.95
A1-3-2	100.02	0.7	55.5	1.334	0.29	0.03	95.5	115.5	0.21	1.75
A1-3-3	101.76	1.0	62.4	1.499	0.34	0.01	102.4	122.4	0.13	2.22
A1-3-4	100.14	1.0	69.2	1.601	0.42	0.01	109.2	129.2	0.68	3.68
A1-3-5	99.93	1.0	76.6	1.335	0.35	0.01	116.6	136.6	1.07	4.13
A1-3-6	101.23	2.0	91.6	1.268	0.28	0.01	131.6	151.6	1.96	2.72
A1-3-7	99.64	1.0	98.1	1.656	0.32	0.01	138.1	158.1	1.80	2.51
A1-3-8	100.52	1.0	212.2	1.460	0.41		252.2	272.2	1.25	1.80
合计									7.80	19.76

3 结语

1) 可采用卡萨格兰德法计算强夯加固饱和软土地基形成的等效前期固结压力,并根据该等效前期固结压力与土体自重应力之差 $p_c - \sigma_z$ 来判断强夯形成的硬壳层厚度即强夯对软土地基的有效加固深度。

2) 提出了基于强夯加固软土地基的等效前期固结压力来计算强夯加固软土地基的沉降变形的办法。

3) 提出的基于前期固结压力计算强夯有效加固深度和地基沉降的办法,仅需通过室内土工试验获得土体物理力学和压缩指数、回弹指数及前期固结压力等指标即可应用。

参考文献:

- [1] 厉超,张宏博,陈晓光,等.强夯加固粉土地基孔压及变形特性研究[J].公路,2015(10):40-46.
LI Chao, ZHANG Hong-bo, CHEN Xiao-guang, et al. Pore pressure and deformation characteristic of silt foundation under dynamic compaction[J]. Highway, 2015(10): 40-46.
- [2] 王建平,张露露,李鹏,等.8 000 kN·m能级强夯处理填土地基有效加固深度试验[J].煤田地质与勘探,2016(5):113-116,121.
WANG Jian-ping, ZHANG Lu-lu, LI Peng, et al. Test on effective reinforcement depth of filled foundation improved with 8 000 kN·m high energy level dynamic compaction[J]. Coal Geology & Exploration, 2016(5): 113-116, 121.
- [3] 姚占勇,周冲,蒋红光,等.基于帽盖模型的强夯地基应力-应变特征与有效加固范围分析[J].岩石力学与工程学报,2018,37(4):969-977.
YAO Zhan-yong, ZHOU Chong, JIANG Hong-guang, et al. Stress-strain characteristics and effective range of improvement under dynamic compaction based on capped yield hardening model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(4): 969-977.
- [4] 蔡新,范文超,唐彤芝,等.基于功能原理强夯接触力与地基沉降计算[J].水利水电科技进展,2018(5):22-26,85.
CAI Xin, FAN Wen-chao, TANG Tong-zhi, et al. Calculation of dynamic contact force and foundation settlement based on principle of work and power[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018(5): 22-26, 85.
- [5] 水伟厚,胡瑞庚,时伟,等.基于夯击能和夯沉量的强夯参数优化分析[J].工业建筑,2018(9):117-122,180.
SHUI Wei-hou, HU Rui-geng, SHI Wei, et al. Optimization parameters of dynamic compaction based on compaction energy and compaction settlement[J]. Industrial Construction, 2018(9): 117-122, 180.
- [6] 王俊林,许琨.冲击荷载作用下地基土变形及动力特性[J].科学技术与工程,2020(6):2411-2416.
WANG Jun-lin, XU Kun. Deformation and dynamic characteristics of foundation soil under impact loads[J]. Science Technology and Engineering, 2020(6): 2411-2416.
- [7] 赵家琛,吕江,赵晖,等.高能级强夯处理抛填路基的有效加固深度[J].土木与环境工程学报(中英文),2021(5):27-33.
ZHAO Jia-chen, LÜ Jiang, ZHAO Hui, et al. Effective reinforcement depth of high energy dynamic compaction for filled subgrade[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021(5): 27-33.
- [8] 董天文,高建华,刘伟,等.强夯饱和砂土地基的有效加固深度计算方法[J].地下空间与工程学报,2023(4):1244-1249,1269.
DONG Tian-wen, GAO Jian-hua, LIU Wei, et al. Calculation method of effective reinforcement depth of saturated sand foundations by dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023(4): 1244-1249, 1269.
- [9] 许国一,冯锦艳,OBONGO O J,等.强夯作用下夯沉量实用计算方法研究[J/OL].北京航空航天大学学报,2025:1-10.[2025-09-30].https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0848.
XU Guo-yi, FENG Jin-yan, OBONGO O J, et al. Research on practical calculation method for settlement under dynamic compaction[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025: 1-10. [2025-09-30]. https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0848.
- [10] 徐平,侯伟琦,乔世范,等.考虑变形及应力响应的填石路堤强夯有效加固深度研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2025(5):141-153.
XU Ping, HOU Wei-qi, QIAO Shi-fan, et al. Research on effective reinforcement depth of dynamic compaction of stone-filled embankment considering deformation and stress response[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2025(5): 141-153.
- [11] 吴怿华,徐子邦,李宗龙,等.邻海铁路海砂路基强夯效果的评估方法研究[J].铁道勘察,2025(6):70-75.
WU Yi-hua, XU Zi-bang, LI Zong-long, et al. Research on evaluation method for the dynamic compaction effect of sea sand subgrade in coastal railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 2025(6): 70-75.
- [12] 王燕,姚斌,马云龙,等.基于实测数据的强夯有效加固深度计算方法[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2025,57(4):538-543.
WANG Yan, YAO Bin, MA Yun-long, et al. A method for calculating the effective reinforcement depth of dynamic compaction based on measured data[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition), 2025, 57(4): 538-543.
- [13] GB/T 50123—2019,土工试验方法标准[S].
GB/T 50123—2019, Standard for geotechnical testing method[S].