

新型装配式建筑附着式升降施工平台力学性能研究

Research on the Mechanical Properties of the New Type of Prefabricated Building Attached Lifting Construction Platform

吴平川^{1,3}, 陈法军¹, 郝海涛², 齐虎²

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056000; 2. 北京韬盛科技发展有限公司, 北京 100013;
3. 河北省装配式结构技术创新中心, 河北 邯郸 056000)

摘要: 针对装配式剪力墙结构研发一种附着式升降施工平台。为了研究平台在0、0.5、1、1.5、2、3 kN/m²使用工况下力学性能, 进行了室外足尺试验研究和3D有限元模型仿真分析。结果表明: 8 m机位跨度平台活荷载控制在4 kN/m²以内, 平台荷载多由第2步桁架和脚手板承担; 建立的3D有限元模型能够准确模拟试验, 结果准确可靠。

关键词: 装配式; 施工平台; 试验; 有限元

中图分类号: TU731.2

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 02-0158-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.029

WU Pingchuan^{1,3}, CHEN Fajun¹, HAO Haitao², QI Hu²

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056000, China;

2. Beijing Tosun Technology Development Co., Ltd., Beijing 100013, China;

3. Hebei Province Prefabricated Structure Technology Innovation Center, Handan 056000, China)

Abstract: An attached lifting construction platform is developed for the assembled shear wall structure. In order to study the mechanical properties of the platform under the working conditions of 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 3 kN/m², outdoor full-scale test research and 3D finite element model simulation analysis were carried out. The results show that the live load of the 8 m-span platform is controlled within 4 kN/m², and the platform load is mostly borne by the second step truss and the scaffold. The established 3D finite element model can accurately simulate the test, and the results are accurate and reliable.

Keywords: prefabricated; construction platform; test; finite element

0 引言

附着式升降施工平台是一种辅助施工设备, 起

到载人载料和防护作用, 为建筑物施工提供便利。装配式建筑是一种新型建筑形式。目前对于装配式建筑附着式升降施工平台的研究不多, 故参考普通建筑附着式脚手架相关研究, 平京辉^[1]介绍了集成型附着升降脚手架, 并针对装配式建筑施工难点提出了解决措施; 高空亮等^[2]针对不同装配式建筑, 提出不同的附着式脚手架施工方案, 找到最佳方案; 徐明代^[3]提出平台安装和使用的要点, 为解决主体和平台间相互干扰, 对特殊位置进行了处理; 林冰等^[4]对附着式升降脚手架的网片、走道板、附墙支座等构件

作者简介: 吴平川 (1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 结构抗震与工程振动控制。

通信作者: 郝海涛 (1977—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 建筑施工设备。

收稿日期: 2023-05-30

进行了承载力、防倾覆等试验；孙逸凡等^[5]对附着式升降脚手架的造价进行了研究，得出楼高达到一定规模时，架体在材料成本和人工方面有显著优势，维护方面花费略高；金正军等^[6]对于高层建筑的附着式脚手架和悬挑脚手架进行了利弊分析。

鉴于此，研发了一种针对装配式建筑的新型附着式升降施工平台（简称“平台”）。为研究平台力学性能，评估其在使用中的安全性，测试 8 m 机位跨度平台在不同荷载工况下的力学性能，建立平台三维有限元分析模型对比论证，为类似工程提供参考。

1 试验研究

1.1 试验目的

(1) 平台在 0、0.5、1、1.5、2、3 kN/m² 不同荷载下关键部位应力和位移，得到不同荷载下平台力学性能；(2) 分析 8 m 机位跨度平台是否满足结构安全性标准及使用荷载范围；

(3) 验证有限元建模是否符合实际。

1.2 试验平台介绍

平台由走道板、立杆、导轨、内外立杆连接撑、水平桁架、翻板和防护网组成。试验平台的三维模型图、现场实拍见图 1；平台共 4 步，每步高 2 m（从下往上，每 1 层为 1 步），平台总高 8 m，立杆间距 2 m，受建筑物影响，有一处立杆间距 1.4 m，平台总长 12 m，机位跨度 8 m，内外立杆间距 0.6 m，内外立杆由连接撑连接，平台的第 2 步内侧安装水平桁架（简称为“桁架”），平台外侧安装防护网，平台材质均为 Q235 钢材，平台连接多为焊接和螺栓连接，螺栓性能等级为 8.8 级。试验平台尺寸详图如图 2 所示。

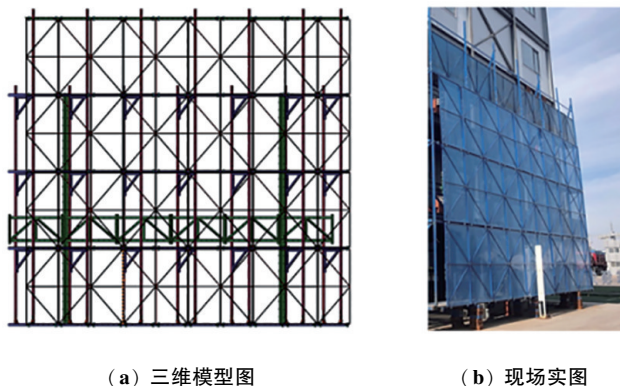


图 1 三维模型图及现场照片
Fig. 1 3D model diagram and on-site real picture

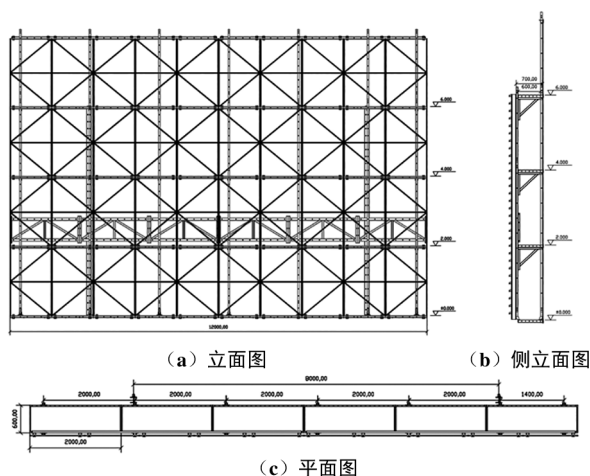


图 2 尺寸详图/mm
Fig. 2 Dimensional details

1.3 平台工作原理

平台顶升动力为液

压油缸，与自主设计的导轨、附墙支座、爬爪一同工作，导轨采用工字钢，上面焊接倒钩型受力点，导轨与平台为螺栓连接；附墙支座连接平台和建筑结构主体，附墙支座也具有导向作用，保证平台竖直移动，下部附墙支座也是油缸的底座，固定油缸，承担上部传来的荷载；爬爪安装在油缸顶部，连接油缸和平台。爬升系统如图 3 所示。

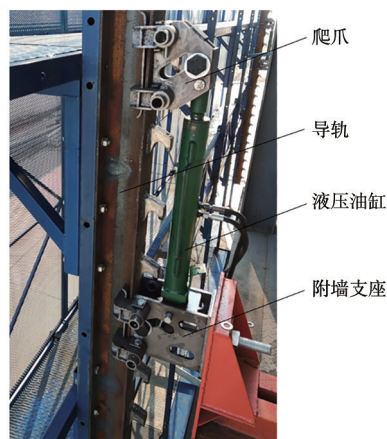


图 3 爬升系统
Fig. 3 Climbing system

在平台顶升时，控制液压油缸出缸，油缸活动端带动爬爪向上移动，当爬爪销轴顶进导轨钩槽中，平台荷载传到爬爪上，上升到位置后，控制液压油缸收缸，平台略微下落，附墙支座的销轴受力，此

研究与应用

时,进入正常使用状态,若超出高度需加装附墙支座和移动油缸。

1.4 加载方式

试验需监测平台在不同荷载下的力学性能,要控制荷载可变,结合现场条件,采用配重块模拟对平台加载,配重块每块重 22 kg,为更好测试平台,所施加荷载为最不利荷载,将配重块放置在平台第 3、4 步,模拟荷载为均布荷载,在放置配重块时,尽可能放置均匀。不同荷载下配重块放置数量见表 1,计算中 g 取 10 N/kg。

表 1 不同荷载下配重块放置数量

荷载/(kN/m ²)	每步配重块数量/块	放置步数/步
0.5	16	3、4
1.0	33	3、4
1.5	49	3、4
2.0	65	3、4
3.0	98	3、4

1.5 采集装置

采用东华 DH3820 静态应变测试系统(采集仪)采集试验数据,采用 BE120-10AA-P150 应变片测量关键部位应力,采用行程 100 mm 位移计测量相关位置的位移。

1.6 测点布置

平台设置 12 个应力测点,2 个位移测点,测点布置在构件的跨中部位。平台测点位置见表 2,平台测点布置如图 4 所示。

表 2 测点位置
Table 2 Measuring point locations

测点编号	测点位置
J17	第二步 1 号机位斜杆
J18	第二步 1 号机位外立杆
J19	第二步跨中斜杆
J20	第二步跨中外立杆
J21	第二步跨中内立杆
J22	第二步跨中桁架上弦杆
J23	第二步跨中桁架斜杆
J24	第二步跨中桁架下弦杆
J25	第三步 1 号机位斜杆
J26	第三步 1 号机位外立杆
J27	第三步跨中斜杆
J28	第三步跨中外立杆
W31	底部跨中部内侧面位移计
W32	底部跨中部外侧面位移计

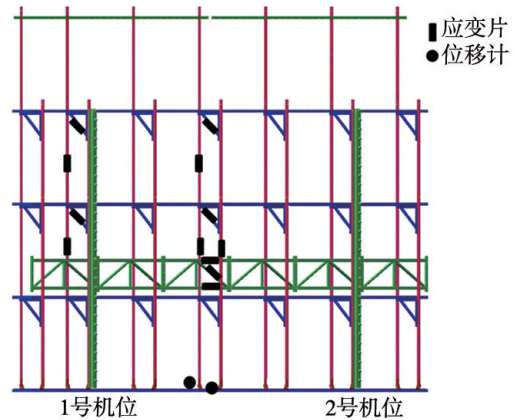


图 4 测点布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measuring point layout

2 有限元计算分析研究

2.1 有限元模型建立

平台属杆系结构,采用 Midas / Gen 进行建模分析,材料特性值中定义了 9 种不同截面和 1 个走道板板厚,平台材料为 Q235 钢材。平台节点连接处为螺栓连接或焊接,为理想刚性连接。防护网和底层翻板未建立在模型中,将其转换成相同的荷载施加在受力部位,定义为恒荷载。防护网以均布荷载形式施加在脚手板外侧龙骨上,4 步全部施加,翻板以均布荷载形式施加在第 1 步脚手板内侧龙骨上。试验时架体离地 1 m 左右,正立面约 5 m 处有一建筑厂房,试验当日处于无风状态,所以不考虑风荷载影响,只考虑荷载效应组合和附加荷载不均匀系数(取 1.3),荷载效应组合设计值计算式:

$$S = \gamma_G S_{CK} + \gamma_Q S_{QK} \quad (1)$$

使用工况的边界条件设置在导轨上。平台在使用时,上下附墙支座受力,下附墙支座承担平台传来的竖向荷载,比上附墙支座多 1 个竖直方向约束力,在下附墙支座的 D_x 、 D_y 、 D_z 上设置约束条件,在上附墙支座的 D_x 、 D_y 上设置约束条件。有限元模型如图 5 所示。

3 平台试验及计算结果对比分析

3.1 应力结果对比分析

通过试验,得到平台 12 处关键部位的应力情况,

研究与应用

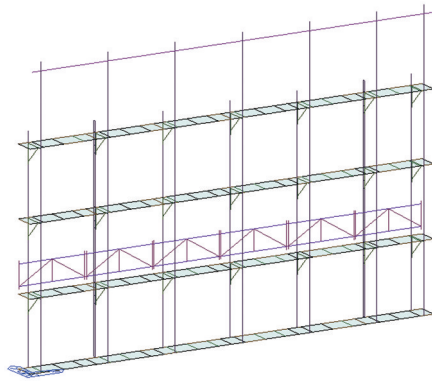


图5 有限元模型
Fig.5 Finite element model

采集仪采集频率为5组/s，采集数据众多，为保证试验数据准确性，各关键部位应力取不同荷载下的平均应力。采用 Midas/ Gen 对平台进行了有限元仿真计算。

平台关键部位试验与计算应力见表3，平台关键部位试验与计算荷载-应力图见图6。

经对比可知，在不同荷载下平台应力计算值及试验值基本符合，差值在合理范围内，有限元模型准确。经对比发现，J18（第二步1号机位外立杆）、J23（第二步跨中桁架斜杆）、J24（第二步跨中桁架下弦杆）、J26（第三步1号机位外立杆）在不同荷载下处于受拉状态，J17（第二步1号机位斜杆）、J19（第二步跨中斜杆）、J21（第二步跨中内立杆）、J22（第二步跨中桁架上弦杆）、J25（第三步1号机位斜杆）、J27（第三步跨中斜杆）在不同荷载下都处于受压状态，J20（第二步跨中外立杆）、J28（第三步跨中外立杆）前期受拉后期受压。监测的关键部位中第二步跨中桁架下弦杆拉应力最大，第二步跨中桁架上弦杆压应力最大。

表3 平台关键部位试验应力与计算应力
Table 3 Test stress and calculated stress of key parts of the platform /MPa

测点编号	0kN/m ²		0.5kN/m ²		1kN/m ²		1.5kN/m ²		2kN/m ²		3kN/m ²	
	试验	计算	试验	计算	试验	计算	试验	计算	试验	计算	试验	计算
J17	-13.93	-15.0	-17.36	-18.5	-20.89	-22.5	-24.97	-26.4	-28.32	-29.4	-33.66	-36.5
J18	4.32	4.6	4.86	5.0	5.02	5.2	4.75	5.1	4.94	5.2	5.48	5.7
J19	-4.54	-4.8	-5.73	-6.0	-6.58	-6.9	-7.24	-7.7	-8.47	-9.0	-10.37	-11.1
J20	1.49	1.6	1.13	1.2	-1.32	-1.4	-2.07	-2.2	-2.88	-3.0	-4.01	-4.2
J21	-25.34	-27.2	-32.29	-34.5	-38.88	-41.7	-45.82	-49.6	-54.09	-56.4	-66.29	-71.7
J22	-42.15	-45.1	-53.57	-57.4	-65.94	-70.4	-80.32	-82.7	-91.78	-95.3	-110.42	-120.1
J23	10.27	11.1	13.04	13.4	14.58	15.6	17.37	18.4	19.60	20.6	24.23	25.2
J24	30.43	33.5	40.82	43.0	49.36	52.8	57.84	62.3	67.44	71.2	85.53	90.4
J25	-3.52	-3.6	-4.24	-4.4	-4.76	-5.0	-5.63	-5.8	-6.08	-6.4	-6.78	-7.6
J26	-2.25	-2.4	-3.16	-3.3	-3.66	-3.9	-4.32	-4.5	-4.71	-5.1	-6.11	-6.6
J27	-3.53	-3.7	-4.33	-4.6	-4.93	-5.3	-5.98	-6.2	-6.62	-7.0	-7.91	-8.6
J28	-1.94	-2.1	-2.73	-2.9	-3.03	-3.3	-3.75	-4.1	-4.27	-4.6	-5.84	-6.0

注：表中带“-”号表示压应力，无“-”号表示拉应力。

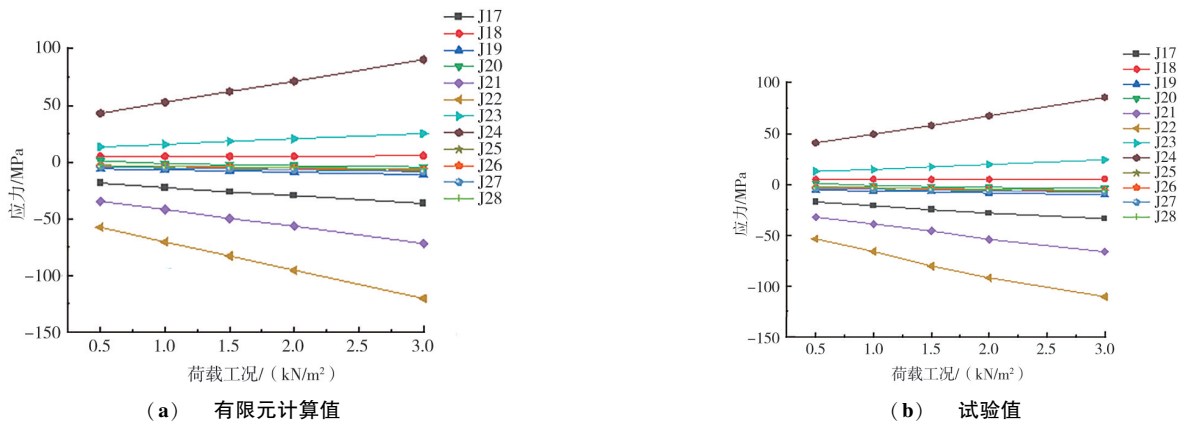


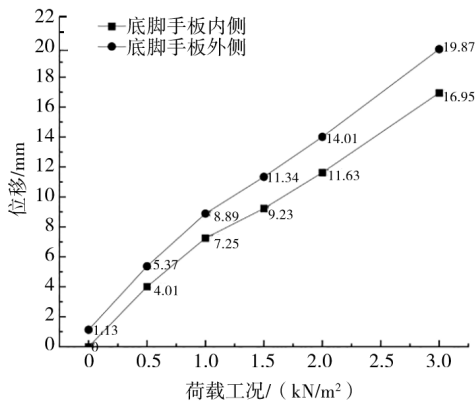
图6 荷载-应力图
Fig.6 Load-stress diagram

研究与应用

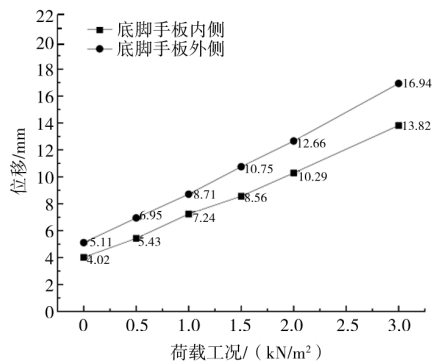
由图 6 可知, 所监测的关键部位应力随荷载工况增大而增大; J22 (第二步跨中桁架上弦杆)、J24 (第二步跨中桁架下弦杆) 的应力随荷载工况变化最明显, J21 (第二步跨中内立杆)、J25 (第三步 1 号机位斜杆) 变化次之, 其他关键部位应力随荷载变化不明显, 第二步桁架、跨中内立杆、机位处内外立杆连接撑对平台承载力有很大影响作用。

3.2 应变结果对比分析

图 7 为平台荷载-位移图。由图可知, 荷载越大, 平台底部位移越大, 同一荷载下, 平台外侧位移始终大于内侧位移, 荷载越大时, 平台内外侧位移差也会变大; 试验中, 3kN/m^2 荷载下平台位移达到最大值, 外侧位移达到 19.87mm , 内侧位移达到 16.95mm , 计算中, 外侧位移最大为 16.94mm , 内侧位移最大为 13.82mm , 两者内外位移差基本相符, 平台位移随荷载变化的趋势相同。



(a) 平台试验



(b) 模型计算

图 7 平台计算荷载-位移

Fig. 7 Load-displacement of platform

4 平台计算模型研究

4.1 平台传力路径

结合试验和计算结果, 得到了平台传力路径, 现只对平台内部传力进行研究。第 4 步荷载作用于第 4 步脚手板上, 第 4 步脚手板将力传到内外立杆和防护网上, 内外立杆和防护网将力传到第 3 步脚手板上, 第 3 步脚手板上荷载也传递给第 3 步脚手板, 第 3 步脚手板将力传到内外立杆和防护网上, 内立杆将大部分力传给了第 2 步桁架上, 其余的力通过内外立杆和防护网传递给了第 2 步脚手板, 并随着内外立杆和防护网传递给了底层脚手板, 为防止平台倾覆, 内外立杆连接撑起抵抗弯矩作用, 研究可得: 平台受荷载多由第 2 步桁架和脚手板承担。

4.2 最大应力

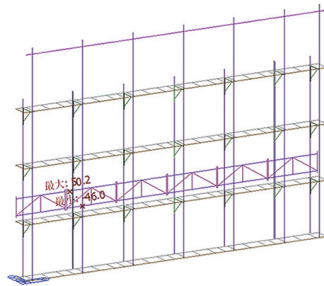
对平台模型进行分析, 研究平台在不同荷载下最大梁单元应力和最大板单元应力。

4.2.1 梁单元最大应力

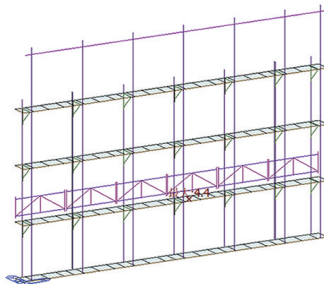
平台连接螺栓除外, 梁单元最大应力处为 2 号机位桁架上下弦杆, 位置见图 8 (a) 所示。不同荷载下梁单元最大应力处均在此处, 0 荷载下最大压应力为 55.1MPa , 最大拉应力为 60.2MPa ; $0.5\sim 2\text{kN/m}^2$ 荷载下最大压拉应力逐级增加; 3kN/m^2 荷载下最大压、拉应力分别为 181 、 195MPa ; 4kN/m^2 荷载下最大压、拉应力分别为 230.9 、 239.9MPa 。平台在荷载 4kN/m^2 时, 桁架上弦杆已超屈服强度值, 不能继续加载^[7]。通过对平台梁单元最大应力研究, 可得出桁架对平台结构承载力起到控制作用, 通过优化改进桁架的截面即可提高平台结构承载力。

4.2.2 板单元最大应力

板单元最大应力在第 2 步跨中脚手板上, 位置见图 8 (b), 不同荷载的板单元最大应力均在此处, 0 荷载下, 板单元最大应力为 5.2MPa ; 0.5kN/m^2 荷载下, 板单元最大应力为 7.7MPa ; $1\sim 2\text{kN/m}^2$ 荷载下最大压拉应力逐级增加; 3kN/m^2 荷载下, 板单元最大应力为 19.8MPa ; 4kN/m^2 荷载下, 板单元最大应力为 24.6MPa 。



(a) 梁单元最大应力处



(b) 板单元最大应力处

图 8 梁、板单元最大应力位置

Fig. 8 Maximum stress position of beam and plate elements

4 结论

对 8 m 机位跨度平台进行试验，建立有限元分析模型，通过试验研究和仿真分析研究不同荷载工况下的力学性能，得到以下结论：

(1) 试验结果与模拟计算结果相差在合理范围以内，可验证本文建立有限元模型的准确性。

(2) 8 m 机位跨度平台多由第 2 步桁架和脚手板承担荷载，荷载应控制在 4 kN/m^2 以内；增大水平桁架截面可使平台承载力增大。

(3) 相对于传统现浇结构的附着式施工平台，装配式建筑施工平台具有自重轻、装拆方便、节约材料、上升快等优势。

参 考 文 献

- [1] 平京辉. 集成型附着式升降脚手架在装配式建筑工程中的应用 [J]. 建设科技, 2020, (22): 45-49.
- [2] 高空亮, 曹珍珠. 附着式升降脚手架用于装配式建筑的附着方案对比分析 [J]. 建设科技, 2020, (22): 50-53.
- [3] 徐明代. 装配式建筑附着式升降脚手架施工及其特殊位置处理技术 [J]. 常州工学院学报, 2021, 34 (5): 5-9.
- [4] 林冰, 张志超, 张连魁, 等. 附着升降式脚手架构件性能试验研究 [J]. 施工技术 (中英文), 2021, 50 (22): 106-110.
- [5] 孙逸凡, 王禹帅, 徐健闻, 等. 浅谈附着式升降脚手架工程造价 [J]. 科学技术创新, 2020, (14): 138-139.
- [6] 金正军, 龚晓果, 蒯青. 高层建筑附着式和悬挑式脚手架的利弊分析 [J]. 山西建筑, 2016, 42 (34): 115-116.
- [7] GB 50017-2017, 钢结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.

(上接第 81 页)

铁道科学与工程学报, 2020, 17(5): 1090-1096.

- [6] 李海洋. 四线叠交小间距盾构隧道下穿桥梁沉降控制案例分析 [J]. 隧道建设, 2020, 40(1): 343-349.
- [7] 张超. 承压水降压引起的高速铁路桥梁摩擦型群桩沉降特性分析 [J]. 铁道建筑, 2021, 61(6): 36-40.
- [8] LIU Z, ZHANG A, XU J, et al. Calculation model and bearing capacity optimization method for the soil settlement between piles

in geosynthetic-reinforced pile-supported embankments based on the membrane effect [J]. PLoS ONE, 2021, 16(8): e0256190.

- [9] 黄崇伟, 郭丹丹, 王德荣, 等. 粗粒土压实特性与高填体沉降规律研究 [J]. 上海理工大学学报, 2020, 42(5): 512-518.
- [10] TAO Y, SUN H, CAI Y. Predicting soil settlement with quantified uncertainties by using ensemble Kalman filtering [J]. Engineering Geology, 2020, 276(6): 105753.