

DOI: 10.7672/sgjs2026030065

基于监控大数据的差异沉降实时协同调控技术*

胡建南¹, 何义², 李宇航², 李碧卿³, 姜帅³, 李今保³, 张龙珠³, 马江杰³

(1. 南京市公共工程建设中心, 江苏 南京 210019; 2. 中建八局第三建设有限公司, 江苏 南京 210002;
3. 江苏东南特种技术工程有限公司, 江苏 南京 210008)

[摘要] 建筑物差异沉降易引发结构倾斜、构件损坏甚至垮塌, 严重威胁结构使用安全与寿命。针对传统调控技术精度低、安全性差、速度慢、控制难的问题, 研发基于监控大数据的差异沉降实时协同调控技术。该技术通过多传感器监测系统采集竖向承载构件倾斜、沉降、应力变化等多源大数据, 经实时智能纠偏控制系统分析, 精准确定抬升点位、抬升量及封桩压力等参数, 实现差异沉降的动态协同调控与基础加固。加固纠偏完成后, 通过 M10 自流平砂浆压力注浆处理抬升孔隙, 保障筏板基础与地基土可靠传力。工程实践表明, 该技术将建筑物向南最大倾斜率由 4.7‰ 调整至 1.1‰, 向西最大倾斜率由 6.0‰ 调整至 1.5‰, 使其满足相关规范要求, 保障了建筑物在复杂施工环境下的安全稳定。

[关键词] 基础; 钢管桩; 沉降; 倾斜; 加固

[中图分类号] TU47

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)03-0065-06

Real-time Coordinated Control Technology of Differential Settlement Based on Monitoring Big Data

HU Jiannan¹, HE Yi², LI Yuhang², LI Biqing³, JIANG Shuai³, LI Jinbao³,
ZHANG Longzhu³, MA Jiangjie³

(1. Nanjing Public Project Construction Center, Nanjing, Jiangsu 210019, China; 2. The Third Construction Co., Ltd. of China Construction Eighth Engineering Bureau, Nanjing, Jiangsu 210002, China;
3. Jiangsu Southeast Special Engineering & Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210008, China)

Abstract: The differential settlement of buildings is easy to cause structural inclination, component damage and even collapse, which seriously threatens the safety and service life of structures. Aiming at the problems of low precision, poor safety, slow speed and difficult control of traditional coordinated control technology, a real-time coordinated control technology of differential settlement based on monitoring big data is developed. The technology collects multi-source big data such as inclination, settlement and stress change of vertical bearing members through multi-sensor monitoring system. Through the analysis of real-time intelligent correction control system, the parameters such as lifting point, lifting amount and sealing pressure are accurately determined, and the dynamic coordinated control of differential settlement and foundation reinforcement are realized. After the completion of the reinforcement and correction, the uplift pore is treated by M10 self-leveling mortar pressure grouting to ensure the reliable force transmission between the raft foundation and the foundation soil. The engineering practice shows that the maximum inclination rate of the building to the south is adjusted from 4.7‰ to 1.1‰, and the maximum inclination rate to the west is adjusted from 6.0‰ to 1.5‰, so that it meets the requirements of relevant specifications and ensures the safety and stability of the building in complex construction environment.

Keywords: foundation; steel pipe pile; settlement; inclination; reinforcement

* 国家重点研发计划(2022YFE0210500); 江苏省领军科学家项目(BK20222006)

[作者简介] 胡建南, 高级工程师, E-mail: 45283917@qq.com

[通信作者] 李碧卿, 高级工程师, E-mail: umabank@163.com

[收稿日期] 2025-08-28

0 引言

建筑物差异沉降是指地基土层由于密实度不够, 在上部压力作用下发生变形, 从而引发上部结

构随之变化的过程,是不可忽视的重大问题,同时作为建筑物的变形特征之一,是地基竖向变形与建筑物共同作用的结果。由于不同区域地下土层水文特征的差异性、地下岩体抗荷载力的离散性及上部荷载的不均匀性,导致了地基土出现不同程度的压缩、变形,从而导致同一建筑物不同位置的沉降程度不尽相同,由此引起上部结构产生相应的附加内力并使之重新分布,严重时甚至会发生变形破坏。

差异沉降引发的危害一般较大,主要分为建筑物倾斜、结构构件破坏和建筑物下沉,当差异沉降发展到一定程度时甚至会导致建筑物垮塌或大大缩短使用年限,不仅造成人力、材料浪费,也会使人民群众生命财产安全受到威胁。为避免差异沉降对建筑物安全性造成影响,常采取地基基础加固及差异沉降协同调控措施进行处理。

目前已有学者对基于大数据的实时动态监测技术进行了研究及工程应用,但对于建筑物差异沉降的调控,大量实际工程中仅依靠人工读数监测手段,对建筑物实时状态的掌握存在滞后性,无法实现动态调整、精准调控。为解决差异沉降调控量和调控速度不易控制的难题,研发了基于监控大数据的差异沉降实时协同调控技术,通过多传感器监测系统获取竖向承载构件倾斜、沉降、应力变化等多源大数据,采用实时智能纠偏控制系统确定差异沉降调控量和调控速度,提高调控精度与安全性。

1 工程概况

1.1 项目概况

本文依托江苏省南京市某砌体结构地基基础加固纠偏工程,该建筑物建于 1985 年前后,上部结构为 6 层砌体结构,东西向长 71.2m,南北向宽 11.5m,上部结构 6 层层高均为 2.90m,建筑面积为 4 912.8m²,共 7 个单元,上部结构于 4,5 单元之间设有结构缝。上部结构主要采用 240mm 厚实砌砖墙,混合砂浆砌筑,各层均设圈梁、构造柱,结构形

式为砖混结构,采用预制混凝土楼板,屋盖局部现浇。建筑物在使用过程中,1 层普遍由住宅改为商铺,其余楼层仍作为住宅,同时屋顶加建坡屋面。原基础采用墙下钢筋混凝土筏板基础+70mm 厚 C15 素混凝土找平层+450mm 厚 1:1 石屑道渣垫层。建筑物及周边环境如图 1 所示,原基础平面布置如图 2 所示。



图 1 建筑物周边环境

Fig. 1 The surrounding environment of the building

1.2 工程地质条件

根据工程地质勘察报告,建筑物以下地层主要有杂填土、素填土、粉质黏土、粉土夹粉砂、淤泥质粉质黏土夹粉土、粉砂等,各层对应的桩基参数如表 1 所示。

根据工程地质勘察报告剖面图揭示,建筑物范围内主要分布 J28~J31 地质勘察孔,在建筑物结构缝西侧,J28,J29 孔分布淤泥质粉质黏土夹粉土层(灰色,饱和,流塑,局部软塑,夹粉土、粉砂薄层,层厚 1~3mm,呈千层饼状、互层状,分布不均),在建筑物结构缝东侧未见该土层,在相同地质标高处,在建筑物结构缝东侧分布②_{3d1-2}粉砂层。地层分布的差异也揭露该建筑物地基土性质差异较大,建筑物西侧分布较厚的软弱下卧层,受扰动后会产生较大的沉降。

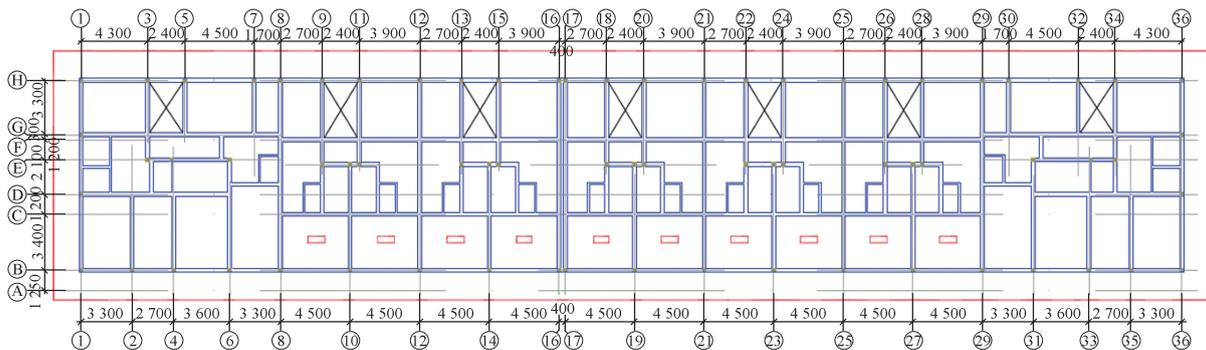


图 2 原基础平面布置

Fig. 2 Original foundation layout plan

表 1 桩基参数

Table 1 Pile foundation parameters

地层 层号	岩土名称	后注浆增强系数		泥浆护壁钻孔桩(桩长 $\geq 30\text{m}$)阻力/kPa		抗拔系数
		侧阻力	端阻力	端阻力标准值	侧阻力标准值	
① ₂	素填土	—	—	—	20	—
① ₃	淤泥、淤泥质填土	—	—	—	16	—
② _{1b2-3}	粉质黏土	1.40	2.20	—	40	0.70
② _{2d-e2-3}	粉土夹粉砂	1.50	2.30	—	45	0.65
② _{2b3-4}	淤泥质粉质黏土夹粉土	1.20	—	—	22	0.70
② _{2' d-e2-3}	粉土夹粉砂	1.50	2.30	—	—	0.65
② _{3b3}	粉质黏土夹粉土	1.40	2.20	350	38	0.70
② _{3d1-2}	粉砂	1.60	2.40	1 000	58	0.65
② _{4b2-3}	粉质黏土	1.40	2.20	700	50	0.70
③ _{1b1-2}	粉质黏土	1.40	2.20	1 200	68	0.72
③ _{2b2-3}	粉质黏土	1.40	2.20	800	52	0.70
③ _{3b1-2}	粉质黏土	1.40	2.20	1 400	80	0.75
③ _{4b2-3}	粉质黏土	1.40	2.20	750	55	0.70
③ _{4d1-2}	粉砂	1.60	2.40	1 200	65	0.65
③ _{4e2}	含卵石中粗砂	2.10	3.00	1 700	85	0.70
④ _{3b1-2}	含卵石粉质黏土	1.40	2.20	1 500	80	0.65
⑦ ₁	全风化泥岩	1.40	2.10	1 400	80	0.65
⑦ ₂	强风化泥岩、砂质泥岩	1.60	2.20	1 700	100	0.65
⑦ ₃	中风化泥岩、砂质泥岩	1.70	2.20	1 900	130	0.65
⑦ ₃₋₁	中风化泥质砂岩、砂岩	1.70	2.20	2 500	180	0.65
⑦ ₃₋₂	中风化泥质砂岩、细砂岩	1.80	2.40	—	400	0.70

注:桩端土端阻力特征值、桩周土侧阻力特征值均取极限标准值的 1/2;⑦₃ 土层天然单轴抗压强度标准值为 0.94MPa,⑦₃₋₁,⑦₃₋₂ 土层饱和单轴抗压强度标准值分别为 5.13,17.23MPa

根据地层分布规律、地基差异沉降规律、上部结构倾斜现状可知,解决软弱下卧层对地基承载力及抗变形能力的影响是该建筑物加固纠偏工作的关键。

2 建筑物沉降现状

建筑物南侧紧邻过江通道,与过江通道北线水平距离为 5~9m,地铁盾构隧道从建筑物东北角穿入,从西南角穿出,与建筑物原筏板基础底垂直距离约为 27m。现因建筑物建造年代较长,地基土存在淤泥质软弱下卧层,在南侧过江通道顶管接收井施工期间,建筑物西南角发生较大差异沉降,向南最大倾斜率达 4.7‰,向西最大倾斜率达 6.0‰。建筑物与周边隧道空间相对位置关系如图 3 所示。

上部结构因结构拆改严重、建筑材料强度低、年久失修及差异沉降等因素,经检测鉴定,该建筑物结构危险性等级评定为 C 级,部分承重结构无法满足安全使用要求,房屋局部处于危险状态,构成局部危房。为保障建筑物结构安全,利用基于监控大数据的差异沉降实时协同调控技术对建筑物差异沉降进行调控,对上部结构进行加固处理。

3 差异沉降实时协同调控工艺流程

1) 在建筑物各竖向承载构件安装振弦式应变计,运用多传感器监测方法实时监测底层各竖向承

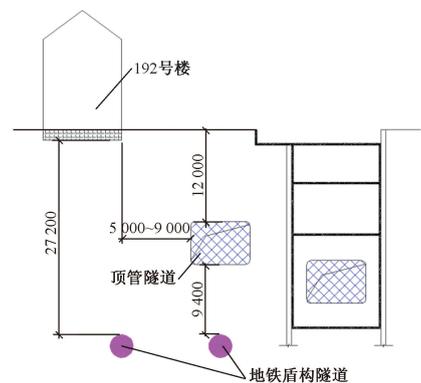


图 3 建筑物与周边隧道空间相对位置关系

Fig. 3 Spatial relative position relationship between buildings and surrounding tunnels

载构件竖向应变、初始竖向荷载与结构材料实际强度,建立各竖向承载构件实时竖向荷载计算系统,并输出实时竖向荷载。

2) 排查建筑物现状,建立分析模型,根据现有恒荷载及活荷载计算各竖向承载构件竖向荷载理论值。

3) 布置沉降、倾斜监测系统,安装卫星定位系统接收机实时接收并解析卫星电波,实现结构三维位移精确测量,实时获取建筑物结构外围水平和垂直监测数据,计算得到建筑物实时倾斜率和沉降量。

4) 根据大数据监测系统中多传感器监测方法所得数据建立实时智能纠偏控制系统。

5) 运用实时智能纠偏控制系统监测建筑物实时沉降及倾斜状态。

6) 利用实时智能纠偏控制系统首先检查建筑物倾斜率是否满足相关规范要求, 如果不满足要求, 根据建筑物倾斜率、沉降量和各竖向承载构件实时荷载与理论计算值之间的差值, 实时智能纠偏控制系统自动确定抬升点位及抬升量, 并控制相应的抬升设备进行抬升力、抬升距离等相关技术参数自动调整, 满足实时智能纠偏控制系统要求后自动停止。

7) 建筑物倾斜率满足相关规范要求后, 实时智能纠偏控制系统检查建筑物各竖向承载构件实时荷载是否与理论计算值相符, 如果不相符, 根据建筑物底层各竖向承载构件实时荷载与理论计算值一致的原则, 实时智能纠偏控制系统自动确定锚杆静压钢管桩封桩压力, 施工人员据此调整锚杆静压钢管桩实际封桩压力。再次检查建筑物倾斜率是否满足相关规范要求, 如果满足要求, 由施工人员进行新增锚杆静压钢管桩永久封桩, 实现新增桩基与原有基础协同受力的加固目的, 完成上部结构纠偏施工。

4 加固纠偏措施

根据检测鉴定报告, 该建筑物结构危险性等级评定为 C 级, 即部分承重结构无法满足安全使用要求, 房屋局部处于危险状态, 构成局部危房。在该建筑物南侧过江通道顶管隧道及下穿地铁盾构隧道施工期间, 为保障建筑物安全稳定, 采取以下加固纠偏措施。

1) 本次加固不考虑既有地基土的承载作用, 采用桩基实现基础形式的转换及上部结构荷载的全托换。

2) 为解决沉降未收敛的问题, 采用锚杆静压钢管桩对地基基础进行加固, 新增锚杆静压钢管桩直径均为 325mm, 壁厚均为 6mm, 钢管强度等级均为 Q235B, 结构缝西侧部分桩长 25m, 结构缝东侧部分桩长 20m, 共新增 234 根锚杆静压钢管桩, 其平面布置如图 4 所示。

3) 新增锚杆静压钢管桩桩端采用袖阀管注浆, 可提高单桩承载力。注浆浆液中水泥采用 P · O 42.5 级普通硅酸盐水泥, 水灰比为 1.0, 掺入 DNTZ008 特种外加剂, 其用量为水泥用量的 0.5% ~ 2.0%, 注浆压力为 0.5 ~ 3.0 MPa。结构缝西侧为桩端 19m 范围注浆, 结构缝东侧为桩端 16m 范围注浆。桩身袖阀管注浆平面布置如图 5 所示, 桩身注

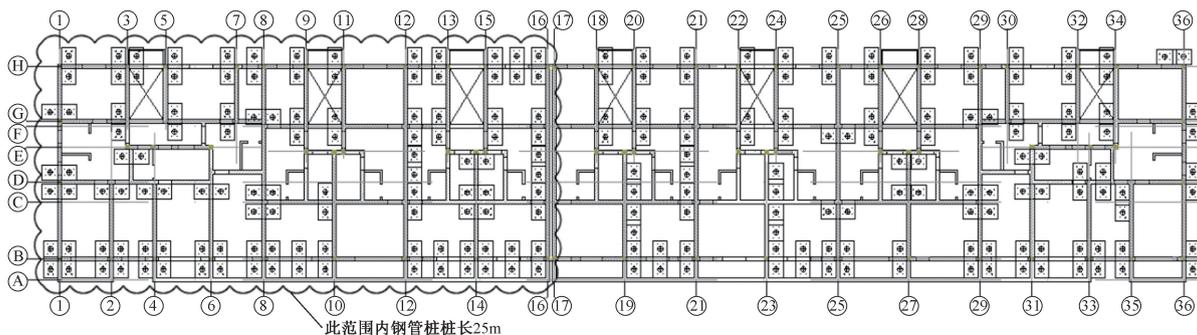


图 4 新增锚杆静压钢管桩平面布置

Fig. 4 Layout plan of new anchor rod static pressure steel pipe piles

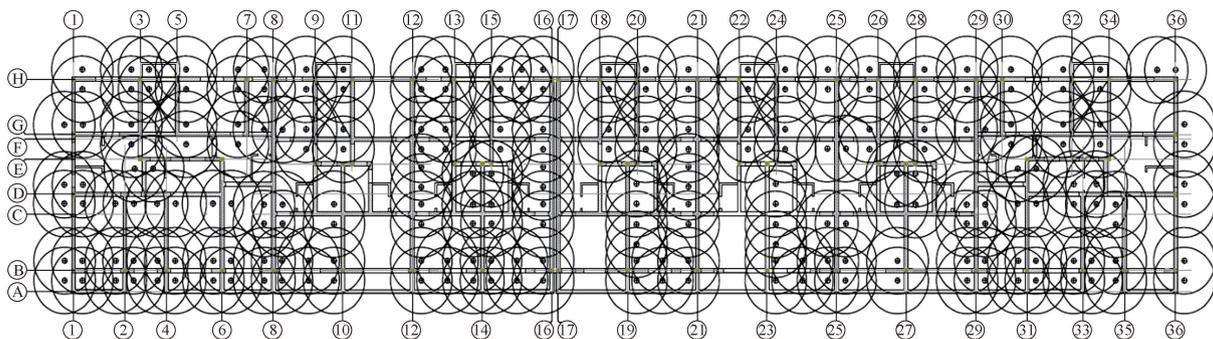


图 5 桩身袖阀管注浆平面布置

Fig. 5 Layout plan of sleeve valve pipe grouting for piles

浆孔开设如图 6 所示。

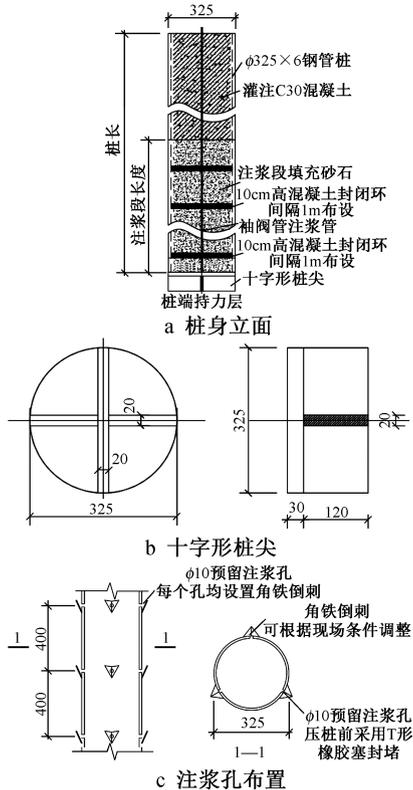


图 6 桩身注浆孔开设

Fig. 6 Opening of grouting holes in the pile

4) 地基基础加固完成后,采用预应力锁桩装置对新增桩基进行锁桩,确保桩基能够立即为上部结构提供抗力,确保结构安全。同时,对建筑物空间状态、预应力锁桩技术控制参数等进行基于云端大数据的综合分析,自主研发新增桩基与原基础沉降自动平衡控制装置(见图 7),利用自动化预应力加载系统输出锚杆静压钢管桩预应力加载值,通过 PLC 系统进行锚杆静压钢管桩预应力加载值实时自动调整,实现对单桩的精准调控,保证桩基承台顶标高保持不变,即保证上部结构标高保持不变,直至隧道施工完成。

5) 经与隧道建设单位充分论证,该建筑物在顶管隧道施工完成后开始上部结构纠偏施工。为解决该建筑物倾斜率超出规范要求的问题,采用本研究提基于监控大数据的差异沉降实时协同调控技术,通过新增锚杆静压钢管桩对建筑物上部结构及基础实现整体抬升纠偏,各抬升点位具体抬升量根据实时智能纠偏控制系统自动计算分析,按照抬升纠偏量线性分布原则,交叉对比确保分析结果无误后,自动控制各抬升千斤顶相关技术控制参数,实现纠偏目的。为保障抬升纠偏过程中建筑物的安全稳定,确保抬升纠偏工作的连续有效,在实时

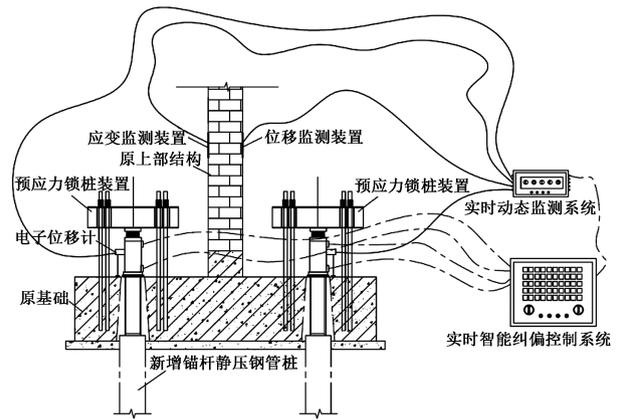


图 7 新增桩基与原基础沉降自动平衡控制装置布设
Fig. 7 Layout of automatic balance control device for settlement between new pile foundation and original foundation

智能纠偏控制系统中设置以下基本原则:①抬升纠偏工作分级进行,单级最大抬升量 $\leq 1\text{mm}$,每级抬升后应有一定间隔时间,每个阶段抬升 10mm,同时对整体抬升量进行复核;②当顶部回倾量与本阶段抬升量协调后进行下一阶段抬升;③抬升时布设统一的监测系统,并将抬升千斤顶轴力及位移监测同步接入多传感器联合工作的结构变形及应力状态实时监测系统,确保千斤顶能够按设计要求同步抬升,实现对抬升力和位移双控的目的。

5 加固纠偏效果

现场实际施工过程中共分 95 个抬升阶段,经实时动态监测系统及第三方监测数据交叉对比,加固纠偏完成后建筑物向南最大倾斜率为 1.1‰,向西最大倾斜率为 1.5‰,满足相关规范要求(见表 2)。

表 2 加固纠偏完成后建筑物倾斜率监测结果
Table 2 Monitoring results of building inclination rate after reinforcement and correction

监测点	东西向 初始倾 斜率/‰	南北向 初始倾 斜率/‰	东西向 最终倾 斜率/‰	南北向 最终倾 斜率/‰
1	向西 5.9	向南 4.6	向西 1.2	向南 0.9
2	向西 5.5	向南 4.4	向西 0.8	向南 0.8
3	向西 4.8	向南 4.1	向西 0.5	向南 0.9
4	向西 3.2	向南 2.9	向西 0.3	向南 0.7
5	向西 4.1	向南 3.2	向西 0.2	向南 0.5
6	向西 4.9	向南 4.4	向西 0.7	向南 0.7
7	向西 5.7	向南 4.5	向西 1.1	向南 0.8
8	向西 6.0	向南 4.7	向西 1.5	向南 1.1

加固纠偏完成后,对抬升孔隙采用 M10 自流平砂浆压力注浆,注浆终止压力为 2.5MPa,确保筏板基础与地基土的可靠传力。

6 结语

本文针对结构危险性等级为 C 级的既有建筑物,在面临周边隧道施工影响及自身差异沉降的条件下,研发基于监控大数据的差异沉降实时协同调控技术,通过多传感器监测系统实时自动采集建筑物竖向承载构件倾斜、沉降、应力变化等多源动态数据,经实时智能纠偏控制系统实时在线分析处理,精准定位结构差异沉降分布及整体倾斜状态,自动计算最优纠偏量与施工参数。通过动态协同调整纠偏施工顺序与纠偏幅值,实现纠偏施工的数字化、可视化、动态化管控,大幅度提升差异沉降调控的精准度、施工效率与结构安全保障水平。采用本技术指导新增锚杆静压钢管桩预加压力永久封桩,使新增桩基与原有基础协同受力,解决了软弱下卧层对地基承载力及抗变形能力的影响。

参考文献:

- [1] 臧园. 不均匀沉降对上部框架受力和变形影响分析[D]. 西安:长安大学,2010.
ZANG Y. Analysis of effect of the differential settlement on force and deformation of frame structure [D]. Xi' an: Chang' an University,2010.
- [2] 赵来柱. 既有工业厂房加固改造技术[J]. 施工技术(中英文),2024,53(21):37-40.
ZHAO L Z. Reinforcement and reconstruction technology of existing industrial plant [J]. Construction technology, 2024, 53(21):37-40.
- [3] 刘斌. 地基基础不均匀沉降的原因分析及应对措施[J]. 河北建筑工程学院学报,2013,31(1):20-21,32.
LIU B. Analysis of the cause of uneven settlement of foundation

and the conespoding countermeasures [J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering,2013,31(1):20-21,32.

- [4] 杜策,张振,张力,等. 桩基托换对邻近深基坑历史建筑的变形影响控制研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(23):23-28.
DU C, ZHANG Z, ZHANG L, et al. Application of pile underpinning in deformation influence control of historic building adjacent to deep excavation [J]. Construction technology, 2024, 53(23):23-28.
- [5] 李今保,徐赵东,李碧卿,等. 一种通过激发振动动力检测既有建筑结构竖向荷载的方法;CN111272586B [P]. 2021-10-08.
LI J B, XU Z D, LI B Q, et al. A method for detecting vertical loads on existing building structures through excitation vibration force; CN111272586B [P]. 2021-10-08.
- [6] 张震,崔军,王鸿运,等. 软土地基构筑物纠倾加固技术研究[J]. 施工技术(中英文),2025,54(11):58-62.
ZHANG Z, CUI J, WANG H Y, et al. Rectification and reinforcement technology for structures on soft soil foundation [J]. Construction technology, 2025, 54(11):58-62.
- [7] 李今保,王爱民,李欣瞳,等. 一种恢复建筑物截桩纠偏后桩承载能力的装置及方法;CN111188373B [P]. 2024-10-15.
LI J B, WANG A M, LI X T, et al. A device and method for restoring the bearing capacity of piles after pile cutting and deviation correction of buildings; CN111188373B [P]. 2024-10-15.
- [8] 李今保,李碧卿,李欣瞳,等. 一种高层建筑物倾斜纠偏加固的实时智能控制方法及系统;CN114809713A [P]. 2022-07-29.
LI J B, LI B Q, LI X T, et al. A real-time intelligent control method and system for inclination correction and reinforcement of high-rise buildings; CN114809713A [P]. 2022-07-29.