

引用本文:曾 亮,肖建庄,陈立浩,等. 建筑旋转平移的基本方法探究[J]. 建筑科学与工程学报,2021,38(4):57-64.

ZENG Liang, XIAO Jian-zhuang, CHEN Li-hao, et al. Research on Basic Methods of Building Rotation and Moving Technology[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(4): 57-64.

DOI:10.19815/j.jace.2020.12080

建筑旋转平移的基本方法探究

曾 亮¹, 肖建庄¹, 陈立浩¹, 蓝戊己²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海天演建筑物移位工程股份有限公司, 上海 200336)

摘要:在梳理分析建筑拆除和改造的概念、工作原理的基础上,结合绿色施工理念和关联度辨识方法,深化建筑移位技术,并通过工程实例予以验证。结合建筑旋转平移理论的运动学特征,分析移位加速度、托盘梁应变、不均匀沉降和倾斜控制等关键旋转平移技术要点。通过分析移位路径,推导出径向位移的理论计算公式,实现了对移位曲线、移位进程的定量分析,并计算出最大建筑移位距离。分析托盘梁受力状态和应变规律,结合钢筋混凝土的材料本构关系进一步推导出托盘梁容许应变值计算方法。最后结合工程实例分析了移位建筑典型观测点的布置,实时监测移位加速度、托盘梁及上部结构材料应变、不均匀沉降和倾斜等数据。从整体移位技术方案、工艺方法、移位与纠偏控制等多角度,总结出上部结构荷载的应变特征、倾斜和不均匀沉降与移位进程的关联规律。结果表明:建筑旋转平移技术可降低环境影响,实现整体资源化,为深化可持续研究提供有价值的参考。

关键词:建筑拆除与改造;旋转平移技术;拆除关联度分析;移位曲线理论;应变规律

中图分类号: TU746

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2021)04-0057-08

Research on Basic Methods of Building Rotation and Moving Technology

ZENG Liang¹, XIAO Jian-zhuang¹, CHEN Li-hao¹, LAN Wu-ji²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Tianyan Building Shift Engineering Co., Ltd, Shanghai 200336, China)

Abstract: Based on combing and analyzing the concepts and working principles of building demolition and renovation, combined with green construction concepts and relevance identification methods, the basic theory of building rotation and moving technology was deepened and verified through one engineering case. Combined with the kinematic characteristics of building rotation and moving theory, the key points of rotation and moving, such as displacement acceleration, support beam strain, uneven settlement and tilt control were analyzed. The moving path was analyzed and the radial displacement theoretical formula was derived, the quantitative analysis of displacement curve and process were realized, and the maximum building displacement distance was calculated. The force state and strain law of the tray beam were further analyzed, and the formula of the allowable strain value of the tray beam was derived based on the constitutive relationship of reinforced concrete materials. Finally, the layout of typical

收稿日期:2020-12-21

基金项目:国家自然科学基金项目(52078358)

作者简介:曾 亮(1979-),男,江西上饶人,高级工程师,工学博士研究生,E-mail:liangzeng@tongji.edu.cn.

通信作者:肖建庄(1968-),男,山东沂南人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jzx@tongji.edu.cn.

observation points of the building was analyzed based on engineering cases, and the displacement acceleration, support beam and super-structure material strain, uneven settlement and tilt were monitored in real time status. From the perspectives of the overall displacement technical plan, process method, displacement and correction control, the strain characteristics of the super-structure load, the correlation law of tilt and uneven settlement and displacement process were summarized. The results show that the building rotation and moving technology can reduce the environmental impact and realize the overall resource utilization, and provide valuable reference for deepening the sustainability research.

Key words: building demolition and renovation; rotation and moving technology; correlation analysis for demolition; moving curve theory; strain law

0 引言

随着过去 10 年中国城镇化率由 48.32% 快速增长到 60%, 因道路规划、旧城改造、文物保护等原因带来的大拆大建, 造成人力、物力和时间等经济损失巨大, 建筑材料高度消耗的同时, 也对环境造成高负荷的影响^[1]。在绿色施工和可持续发展背景下, 传统建筑拆除和改造的发展理念、管理方式和技术手段亟需完善^[2]。

建筑固废资源化利用最高层级的表现形态是对整体建筑结构直接资源化。在建筑拆解工程学理论基础上^[3], 探究建筑旋转平移技术的移位曲线、工艺技术方案、典型构件的应变特征以及建筑物沉降和倾斜控制, 整体或局部建筑结构在合理改造或技术拆除后能够最大程度延续建筑历史文化价值, 为可持续研究提供有价值的参考。

1 建筑拆除与改造

传统的建筑拆除往往使建筑及其部件出现不可逆的破坏, 而建筑拆除与改造被认为是综合建筑拆除和建筑改造 2 种手段实现建筑物整体或局部结构再利用的特殊性建筑拆除。拆除改造所保留部分越忠实原结构, 产生的环境效益就越好, 相对纯粹的建筑拆除再重建, 在节约施工成本、减少资源浪费和降低环境负担方面均具有显著优势。

建筑结构改造包括整体或局部结构改造, 其中局部改造保留原有主要结构形式, 在预先拆除部分结构后, 完成建造和加固, 主要类型包括在原有建筑结构基础上的扩建, 因结构安全性问题导致的加固及顺应建筑功能调整的结构改造; 整体结构改造需要先拆除原建筑物主体结构, 用新结构体系代替原有结构, 通常仅保留原建筑外立面或部分结构。

1.1 建筑拆除与改造的影响因素

建筑结构体系及其周边因拆除与改造承载力呈现频繁的动态变化, 常出现较明显刚度及内力重分布^[4], 多种影响因素常同时并存于拆除与改造过程中, 不可避免存在安全风险。

表 1 将建筑拆除与改造的影响因素以安全性与可靠度为基础进行评估, 从拆除的目标层级、原建筑结构的属性、拟采用的施工方法 3 个不同层次 D_{ij} 因素类型进行关联分析。

1.2 对关键影响因素的辨识

为辨识和评估各项影响因素对建筑拆除与改造的关联重要性 $K(x)$, 表 2 对出现问题几率性 P_r 和产生相应的后果严重性 C_r 进行设计与定义, 帮助确认建筑拆除与改造的关键影响因素 D_{ij} , 以期对受影响的结构组件实时监测或及时做出正确的调整。 $K(x)$ 可表示为

$$K(x) = g(D_{ij}, P_r, C_r) \quad (1)$$

对所识别的影响因素关联度 $K(x)$ 进一步深化设计模型[式(2)], 确认建筑拆除与改造的关键控制点。

$$K(x) = D_{ij} [1 - (1 - P_r)(1 - C_r)] = D_{ij} (P_r + C_r - P_r C_r) \quad (2)$$

P_r 和 C_r 的值通常可根据专家检索和调查的方法获得, 采用层次分析法降低各层级相关因子共性数据的分析复杂程度, 使原始变量内部关系归结为少量综合因素, 使得同层次内变量之间相关性提高, 而不同层次的变量相关性降低, 这并不是对原有变量的取舍, 而是重新组合以确定各种影响因素的关联重要性。

2 建筑旋转平移技术

建筑旋转平移技术是指将建筑平移和建筑旋转相结合的一种综合技术, 基本实现方式是通过将建

表 1 建筑拆除与改造的关联影响因素

Tab. 1 Related Parameters for Building Demolition and Renovation

因素类型	影响因素	置信设计值	组成成分
拆除 目标层级 D_1	结构级 D_{11} (极限即整体再利用)	0.8~1.0	增加特殊构造,使上部结构和基础分离,实现整体再利用
	子结构级 D_{12}	0.6~0.8	以模块化为单位从原建筑结构中分离
	构件级 D_{13}	0.2~0.6	尽量保持构件完整性的拆除,部分构件可进行二次再利用
	材料级 D_{14}	0.0~0.2	拆除后的建材分类,部分具有可循环使用条件的材料经加工后再利用
拆除 结构属性 D_2	传统拆除设计 D_{21}	0.8~1.0	传统拆除设计方案
	结构类型 D_{22}	0.6~0.8	原建筑结构属性的拆除难易程度
	拆除力学分析 D_{23}	0.4~0.6	确保拆除过程结构稳定、避免倾斜
	建筑构件 D_{24}	0.2~0.4	在拆除过程中可能产生的材料应变
	其他 D_{25}	0.0~0.2	其他子项
拆除 施工方法 D_3	传统施工方法 D_{31}	0.8~1.0	传统拆除施工与方法
	移动形态控制 D_{32}	0.6~0.8	行径路线优选、不均匀沉降分析与控制
	安全施工辅助措施 D_{33}	0.4~0.6	安全措施及辅助设施
	损伤鉴定、加固 D_{34}	0.2~0.4	对建筑结构本体损伤鉴定、必要加固
	其他 D_{35}	0.0~0.2	其他子项

表 2 影响因素几率性与严重性设计值

Tab. 2 Design Values of Probability and Consequence of Influence Factor

置信设计值区间		几率性 P_r		严重性 C_r	
1	0.8~1.0	P_1	非常高几率	C_1	非常严重破坏,结构体系破坏
2	0.6~0.8	P_2	大概率会出现问题	C_2	很严重,关键位置或承重件破坏
3	0.4~0.6	P_3	一般性情况	C_3	一般性破坏,非关键位置结构被破坏
4	0.2~0.4	P_4	小概率存在问题	C_4	轻微损坏,非关键的材料和构件损伤
5	0.0~0.2	P_5	几乎不会出现问题	C_5	基本完好,材料和构件的表面损伤

筑物上部主体结构与地基分离,重新承接在托换体系上,利用在原址和新址之间的轨道来实现移位^[5-6]。该技术包括在建筑物原址的纠偏、竖向空间位置调整、建筑物与地基基础分离后转运、建筑物分区切割分离后移位到新址再组装以及移位到新址后与新(扩)建结构再连接等多种工艺。

建筑移位技术在建筑拆除和改造目标层级中被视为结构级 D_{11} ,是建筑上部结构拆除后整体资源化利用的表现。以结构稳定性和安全性作为控制属性,对全流程的不同移位形态 D_{32} 、建筑构件 D_{24} 等项次分别予以监测和研究。

建筑旋转移位技术结合多项相关科学研究,丰富了绿色施工工艺与方法^[7-10],基于各材料层次(材料、构件、结构)组合分析不同建筑结构类型^[8],拓展梁柱以及梁梁节点的连接和可拆装性设计^[11-12],为绿色拆除与改造提供理论基础^[13-14],促进了建筑物资源化再利用,可有效消纳建筑废弃物,降低环境污染和减少碳排放^[15-16]。

2.1 移位曲线

建筑的旋转平移路径理论上可以存在无穷多个

解(图 1),被认为是由多个平移小段构成完整的旋转平移段,旋转平移过程中存在发生径向位移的可能性,理论上可推导径向位移量等于平移小段长度与前后平移小段夹角 θ 正切值的乘积。

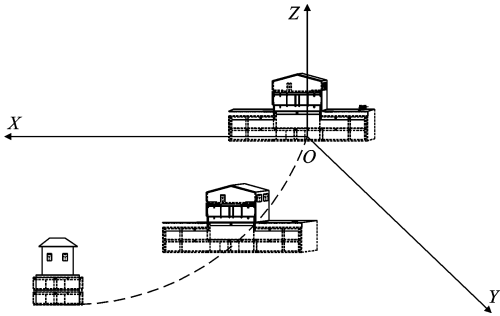


图 1 建筑旋转平移技术

Fig. 1 Building Rotation and Moving Technology

以建筑物在水平面上的重心点或几何中心点作为研究对象,以初始时刻所在点为坐标原点,初始速度方向为 X 轴,垂直方向为 Y 轴,经移位进程时间 t 后,建筑物在 X,Y 方向上的位移 F,G 与时间 t 的关系为

$$\left. \begin{aligned} X &= F(t) \\ Y &= G(t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

进一步推导出旋转位移长度 L 、位移速度 v 、位移加速度 a 和旋转角速度 ω 、旋转角加速度 α 的数据组,如式(4)所示。

$$\left. \begin{aligned} L &= \sqrt{[F(t)]^2 + [G(t)]^2} \\ V &= \sqrt{\left[\frac{dF(t)}{dt}\right]^2 + \left[\frac{dG(t)}{dt}\right]^2} \\ a &= \sqrt{\left[\frac{d^2 F(t)}{dt^2}\right]^2 + \left[\frac{d^2 G(t)}{dt^2}\right]^2} \\ \omega &= \arctan\left[\frac{dF(t)}{dt} / \frac{dG(t)}{dt}\right] \\ \alpha &= \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

旋转平移与直线移位相同之处在于,位移加速度 a 是主控性指标,位移速度 v 在建筑移位过程中仅为辅助指标,并未对工程安全性起到控制性作用。不同于直线移位的是旋转平移除了切向的位移加速度 a_t ,还有径向的旋转角加速度 a_n ,两者均会产生惯性力。角加速度过大或持续叠加会使建筑物在垂直于移位方向上出现较大的累积径向位移,最终导致出现偏离预定轨道的可能。

在旋转平移过程中常伴有旋转角加速度,因此径向位移量必然增加,当累计超过预设值时应当对移位建筑物施加侧向作用力进行纠偏,可通过预先布置的限位轨道设计进行控制。

建筑物旋转平移过程中,由 AB 向 BC 过渡期间(图2),原速度 v 和加速度 a 会保持在 AB 方向继续前行,速度 v 和加速度 a 均可被正交分解为平行于 BC 方向的切向速度 v_t 和切向加速度 a_t 及垂直于 BC 方向上的径向速度 v_n 和径向加速度 a_n 。

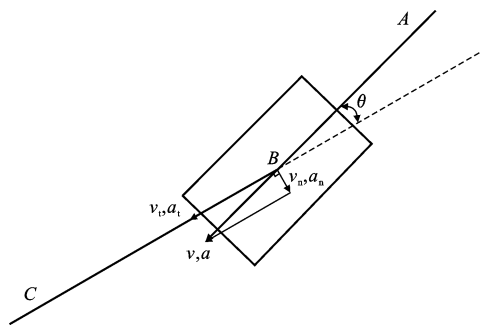


图2 建筑物移位曲线变化

Fig. 2 Variation of Building Moving Curve

假设建筑物由 B 点移位到 C 点需要时间 t ,则

$$L_{BC} = v_t t + a_t t^2 \quad (5)$$

此时建筑物的径向位移量 L' 为

$$L' = v_n t + a_n t^2 \quad (6)$$

当 AB 方向与 BC 方向夹角为 θ 时,通过三角函数换算可得

$$L' = v_n t + a_n t^2 = v_t \tan(\theta) t + a_t \tan(\theta) t^2 = L_{BC} \tan(\theta) \quad (7)$$

根据公式(4)可知,旋转平移过程中径向位移量取决于每个平移小段的长度和前后2个平移小段的夹角,平移小段长度由前后2个小段的夹角直接决定。平移小段距离越长,相邻2个小段的夹角往往越大,而相对于夹角变化较大的平移段,单次平移小段就越短。通过控制单次平移小段的长度来避免径向位移量积累过大。

2.2 托盘梁分析

托盘梁是设计在建筑物底部的水平截面结构,通过梁与加强支撑等结构连接,形成托住上部结构并与其共同移位的支撑体系。托盘梁在建筑旋转平移过程中主要承担两方面的作用,承担上部结构传递的荷载以及移位的顶升和顶推作用力。顶升和顶推过程中的作用力均属于动态作用,托盘梁的应力随着移位进程而变化。

平行于顶推方向的托盘梁抵抗平面内弯矩和轴向压力,垂直于顶推方向的托盘梁抵抗平面内和平面外弯矩,2种情况的托盘梁端部均承载竖向冲切作用,其中平面内弯矩和竖向冲切由上部建筑结构柱体传递,平面外弯矩和轴向压力是顶推作用力传递的动荷载结果。平行于顶推方向的托盘梁是弯矩和压力复合受力的构件,本质上属于偏心受压构件,其中弯矩由建筑结构柱体传递,轴向压力在顶推过程中产生。相关试验与理论研究表明,偏心受压构件按照破坏方式可以分为大偏压构件和小偏压构件,按照构件长度可以分为长柱和短柱。图3为典型偏心受压混凝土构件的轴力-弯矩相关曲线^[17],对于小偏压构件而言,随着轴向压力提高,抗弯承载力逐渐减少;对于大偏压构件而言,随着轴向压力提高,抗弯承载力会有所增大^[18-19]。

托盘梁所受到轴向压力或平面外弯矩作用是一种持续变化的额外作用力,不断改变托盘梁的钢筋和混凝土内部的应变。确保上部结构相对运动较小的前提下,托盘梁在移位过程中不再处于完全受力平衡状态,而是呈现非匀速的运动状态,同时伴随着混凝土的徐变,这种现象的宏观表现就是材料应变的持续增大。混凝土应变可通过对混凝土和钢筋2种材料的应力-应变曲线的理论分析获取^[20-21]。托盘梁混凝土和钢筋应变量的相关影响因素主要为移

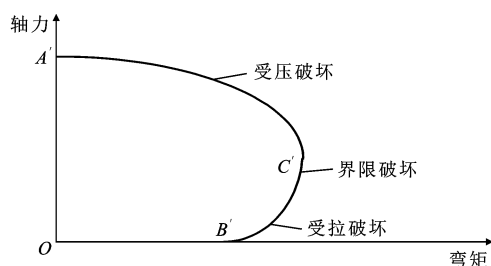


图3 偏心受压构件的轴力-弯矩相关曲线

Fig. 3 Axial Force-bending Moment Correlation Curve of Eccentric Compression Specimen

位过程中顶推力的大小、移位过程的稳定性和单位移位距离的顶推次数。

2.3 不均匀沉降和倾斜

托盘梁作为建筑物在旋转平移过程中的承载基础,应尽可能保持水平稳定,以控制不均匀沉降量。在建筑物移位过程中的沉降量除受到过渡段滑道梁下地基土的应力、应变影响外,还会受到移位施工稳定性的影响,这种随机性影响使这类建筑物的沉降量和不均匀沉降量也具有一定的随机性。对建筑物移位过程中的沉降量和不均匀沉降量进行实时监测,通常通过监测托盘梁上预先布设的2个观测点间的沉降差来测算倾斜度,当倾斜度超过 $1/150$ 时存在破坏可能性,控制标准通常设为视觉可观察度 $1/250^{[22]}$,当不均匀沉降量或沉降量超过预设的规定值就应当及时检查、分析和调整。

3 实例论证

3.1 工程实例背景

某地一级长途客运汽车站因交通规划最终决定通过旋转平移技术将该客运站主站房及2层地下室同时整体移位至新址,避免大体量建筑的拆除和重复建设。该车站需移位的建筑占地面积 $5\,000\text{ m}^2$,建筑面积共 $21\,000\text{ m}^2$,总质量约 $30\,000\text{ t}$ 。地下2层,深度为 8.85 m ;地上2层,建筑高度 19.00 m 。

该建筑在移位前坐东朝西,移位后为坐南朝北,移位距离经实测为 288 m 。本次所采用建筑旋转平移技术的主要工艺流程包括移位段的基础施工、滑道梁和限位梁设计、托盘梁施工、PLC液压控制系统顶推移位以及移位后与新址的连接。

本次移位工程在旋转平移前先将主站房及2层地下室切割、顶升,使地下二层与地面处于同一水平面。在旋转平移路径上预先完成基础施工和轨道铺设,采用交替步履式设备将建筑物托起并实施旋转平移。PLC控制液压泵站的变频调速油泵驱动移

位,通过已安装的位移传感器组成闭环式调速控制。

3.2 关键影响因素的控制

根据现行结构耐久性的规范要求,整体结构的再利用属性包括安全性和施工难易程度。这要求建筑在移位后的结构体系及相关构件的尺寸、承载力、连接节点等属性能够满足专业工程师对新址重新设计的要求。通过对关键影响因素的关联度判断,在移位曲线分析基础上,对主要承重结构托盘梁的材料应变进行监测,控制不均匀沉降和建筑的倾斜,确保建筑移动形态和结构稳定性。

托盘梁是建筑物旋转平移过程的关键承载部件,基本应变规律是因上部荷载产生的初始应变,内部损伤随移位进程持续积累且不断增大,通过理论分析确定最大容许材料应变,计算得出理论的最大移位距离。托盘梁受上部建筑荷载和移位过程中顶升和顶推的叠加作用,平行于顶推方向的托盘梁是偏压构件,垂直于移位方向的托盘梁是同时受到平面内外弯矩的构件,托盘梁与框架柱的连接节点属于抗冲切节点。

不均匀沉降和倾斜问题会对旋转平移过程中的建筑物造成负面影响,在移位过程中实时监测并量化建筑物的不均匀沉降和倾斜的数据。

3.3 旋转平移效果

大体量建筑物的旋转平移应避免旋转平移过程中径向偏移量超限。上部结构通过调节竖向千斤顶升高和下降来适应滑道梁的水平度,避免因滑道不平整导致建筑物出现强制位移而发生不可逆破坏。旋转平移过程中连续顶推产生的位移应与到旋转轴心的距离呈正比,最大限度确保不出现侧向变形超限。

预设2条限位梁限制建筑物的径向位移,累计最大径向位移偏差为 50 mm ,且控制与新址地下结构连接前的纠偏误差在 $\pm 5\text{ mm}$ 以内。经对图4径向位移理论模型分析,位移 $l=L\tan(\theta)=R\theta\tan(\theta)$, R 为半径,可确定最大理论平移每小段长度值为 2.986 m ,相邻2个平移小段最大夹角为 0.959° 。不均匀沉降和倾斜的数据监测结果表明,移位过程中的沉降量变化幅度可通过移位设备进行调整。对托盘梁混凝土应变的数据分析结果表明,随着移位距离的增加,托盘梁传力均匀,在旋转平移过程中未出现局部应变不协调的情况。应变计算公式拟合后可得到初始应变量和距离换算系数的拟合值,测算出最大理论移位距离为 $1\,212.44\text{ m}$,满足行程控制要求。

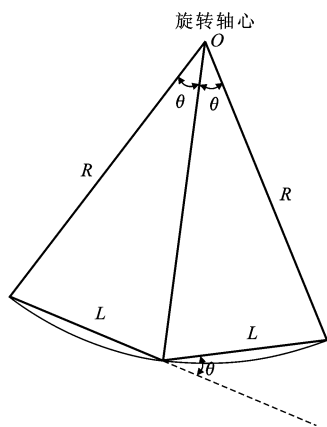


图4 径向位移理论模型

Fig. 4 Model of Radial Displacement Theory

3.4 监测与监控

该工程实例建筑物外形狭长且体量大,因此平面内刚度相对较弱,建筑旋转移位监控需要在不利工况下对施工进度中的结构体系最薄弱部位进行监测。

经辨识关键影响因素,利用远程移位监测系统和物联网技术,主要对托盘梁和上部结构大跨度梁的移位加速度、应变、不均匀沉降和倾斜等关键影响因素监测。

对加速度监测分为纵轴、横轴和竖直3个方向,型号GTSP-Z1光栅光纤加速度传感计被布置在托盘梁的跨中位置,精度达到总量程的0.05%,同时上部结构内部一层楼板也设置了纵向和横向的补充监测点;应变监测主要针对托盘梁混凝土应变的监测,由于同时受到竖向柱体轴力及柱底弯矩的作用,型号GTSP-FBG-330光栅光纤应变传感器分别被最优布置在托盘梁跨中、千斤顶上部位置、靠近立柱,精度达到总量程的0.3%;不均匀沉降是通过监测布置在托盘梁上表面靠近立柱的静力水准仪的沉降量数据,以此推算移位建筑不同测点间的沉降差,量化不均匀沉降的程度;倾斜是通过观测典型结构上指定部位的相对位移量来确定。在旋转平移过程中通过移位量监测结果调整推力,使建筑物结构始终处于线弹性变形范围内,控制移位量在容许偏差 $\pm 2\text{ mm}$ 以内。

托盘梁应变规律理论分析结果表明,托盘梁上部结构荷载的应变值随着移位距离变化,托盘梁在顶推力持续作用下因损伤积累出现应变值逐渐变大,总体上呈增长态势。实例所观测的应变值规律符合理论分析结果。

4 讨论

4.1 关键技术与分析

(1)建筑旋转移位技术理论及基本工艺方法

建筑物移位主要有牵引式和顶推式2种方式,牵引式适用于小型建筑,优点是施工操作相对简单,方向性强;顶推式适用于多高层及大型建筑物移位,顶推节点设计相对简单,但方向性稍难控制。该实例属于大体量建筑,基于旋转平移技术基本理论分析,控制托盘梁应变、移位路径的不均匀沉降、建筑物移位稳定性,最终实现平稳旋转移位。

(2)移位技术同步性的精确度

液压同步控制移位技术是保障建筑物整体移位工程顺利实施的核心技术,目前大部分建筑物的平移采用滚动或滑动2种机制,其中滚动行走机制的摩阻力远小于滑动机制,当前国内外已实施的平移工程中大部分采用滚动机制。该案例通过托盘梁的专有设计,结合使用液压步履式移动机组,实现对各位移步骤的同步精确控制。

(3)动态的实时监测

移位过程的实时监测是施工控制体系的关键,主要包括测点布置的参数与方法、数据处理和技术修正以及预警评估。移位全过程的实时动态监测对象主要包括两方面:应力与应变、侧向位移。为了探索托盘梁在移位过程中的受力变化情况,对梁体应变和受力监测数据提取和分析,结果表明位移实测值与计算值的相对误差处于合理范围内。

4.2 有待解决的难题

(1)关键监测参数选取与布设

当前大部分的工程监测是以选取最大应力、最大位移或最大振动效应作为监测目标参数,这显然不够全面。结构的安全状态还与温度、风荷载、支座反力等环境参数或状态参数直接相关联,大型复杂建筑结构的移位过程中还需要额外关注结构失稳,这些均需在确定关键监测参数时特别考虑。

(2)监测数据的最佳布设原则有待更新完善

现有技术监测理论的关键参数选取并没有完善的共性理论规则,结构测点的布置应经济合理,通过相对少的测点获得足够多的信息。现有的研究文献多针对某个特定的结构提出优化布置方案和方法,缺乏该方面的共性研究。移位建筑结构的受力状态与荷载情况的几何或边界条件往往存在数据缺失,需要建立系统性的测点布置评判准则、优化算法。

(3)缺乏系统性的结构安全预警体系

结构安全是建筑移位过程的安全控制核心,目前移位工程预警多基于对局部构件或节点的应力和变形监测结果来判断结构安全与否,还缺乏对移位结构整体性能评估的深入研究。对建筑移位进程的监测最重要是要掌握和优化大量实时监测数据,及时评估移位建筑物的安全状况,并对下一步移位程序做出合理预判和修正动作。

5 结 语

(1)探究了建筑旋转平移技术的基本理论,评估与建筑拆除和改造的关联影响因素,并给出一种关联度辨识方法。结合建筑旋转平移理论的运动学特征,分析移位进程、移位加速度、托盘梁应变、不均匀沉降和倾斜控制等关键旋转平移技术要点,实现了对移位曲线、移位进程的定量分析,进一步推导出建筑物最大平移距离的理论计算公式。

(2)以对大体量建筑拆除改造项目的实时监测与监控为例,通过对托盘梁受力状态和各技术控制要点的分析,找到主体结构承载体系的混凝土应变影响因素,上部建筑物荷载的初始应变特征量规律是呈阶梯式增长;倾斜监测和不均匀沉降数据分析结果表明,沉降量出现大幅波动的情形通常发生在较短时间内,可通过移位调整的措施控制沉降量变化。多角度验证建筑旋转平移技术可实现整体资源化,为可持续研究提供有价值参考。

(3)对建筑拆除或改造的研究还应当建立合理的力学模型,通过力学分析探究托盘梁应变规律、不均匀沉降的机理、移位路径与地基沉降之间的差异。结合可靠度理论分析建筑结构及构件在移位各阶段的失效模式,进一步通过确定托盘梁等支撑结构的极限荷载和临界强度,得到相应的失效概率、可靠度指标,从而达到对整个建筑旋转平移技术的准确评估。

(4)实时监测在大型复杂项目中的应用已越来越广泛,但现有文献多局限于对具体监测结果做陈述,对关键构件或部件的局部监测尚缺乏相关建筑移位施工的专项动态监测理论与研究。

(5)随着类似工程实践项目的增多,建筑移位技术的关联影响因素将得到更全面、更深刻的分析。将现有基本方法与建筑旋转平移理论的实践成果相结合,以建筑拆除改造与环境相容同时作为目标,将工程可持续性作为控制属性参考,可进一步丰富建筑生命周期理论。

参考文献:

References:

- [1] 肖建庄. 可持续混凝土结构导论[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
XIAO Jian-zhuang. An Introduction to Sustainable Concrete Structures[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [2] 肖建庄, 陈立浩, 叶建军, 等. 混凝土结构拆除技术与绿色化发展[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(5): 1-10.
XIAO Jian-zhuang, CHEN Li-hao, YE Jian-jun, et al. Technology and Green Development of Demolition for Concrete Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(5): 1-10.
- [3] 肖建庄, 曾亮, 夏冰, 等. 拆解工程学理论架构与基本方法[J/OL]. 建筑结构学报, 1-13[2021-07-09]. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2020.0578>
XIAO Jian-zhuang, ZENG Liang, XIA Bing, et al. Theoretical Framework and Fundamental Method for Deconstruction Engineering[J/OL]. Journal of Building Structures: 1-13[2021-07-09]. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2020.0578>
- [4] 肖建庄, 夏冰, 肖绪文. 工程结构可持续性设计理论架构[J]. 土木工程学报, 2020, 53(6): 1-12.
XIAO Jian-zhuang, XIA Bing, XIAO Xu-wen. Theoretical Framework for Sustainability Design of Engineering Structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(6): 1-12.
- [5] 陈菁, 余芳强, 杨杰, 等. 基于BIM的工程计量与数据交换应用研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2018, 10(3): 80-85.
CHEN Jing, YU Fang-qiang, YANG Jie, et al. Research on Application of Engineering Measurement and Data Exchange Based on BIM[J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2018, 10(3): 80-85.
- [6] 张亮. 建筑物整体平移的理论研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
ZHANG Liang. Research on the Theory of Building Monolithic Moving[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [7] 贡小雷, 张玉坤. 物尽其用—废旧建筑材料利用的低碳发展之路[J]. 天津大学学报: 社会科学版, 2011, 13(2): 138-144.
GONG Xiao-lei, ZHANG Yu-kun. To the Best of Its Use — Road to Low Carbon Development of Used Building Materials[J]. Journal of Tianjin University: Social Sciences, 2011, 13(2): 138-144.
- [8] 叶建军, 陈飞, 肖建庄, 等. 钢筋混凝土结构绿色爆

- 破拆除技术[J]. 爆破, 2019, 36(3): 90-97.
- YE Jian-jun, CHEN Fei, XIAO Jian-zhuang, et al. Green Blasting Demolition Technology of Reinforced Concrete Structures[J]. *Blasting*, 2019, 36(3): 90-97.
- [9] 肖建庄, 胡茂昂, 王 婉. 基于 BIM 的混凝土结构构件再利用构架[J]. 结构工程师, 2017, 33(3): 8-15.
- XIAO Jian-zhuang, HU Mao-ang, WANG Wan. Basic Frame on Reuse of Concrete Structural Component Based on BIM[J]. *Structural Engineers*, 2017, 33(3): 8-15.
- [10] 肖建庄, 张青天, 余江滔, 等. 混凝土结构的新发展—组合混凝土结构[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2018, 46(2): 147-155.
- XIAO Jian-zhuang, ZHANG Qing-tian, YU Jiang-tao, et al. A Novel Development of Concrete Structures: Composite Concrete Structures[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2018, 46(2): 147-155.
- [11] XIAO J Z, DING T, ZHANG Q T. Structural Behavior of a New Moment-resisting DfD Concrete Connection[J]. *Engineering Structures*, 2017, 132: 1-13.
- [12] DING T, XIAO J Z, ZHANG Q T, et al. Experimental and Numerical Studies on Design for Deconstruction Concrete Connections: An Overview[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2018, 21(6): 2198-2214.
- [13] 田 卫. 旧工业建筑(群)再生利用决策系统研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- TIAN Wei. Research on Old Industrial Buildings (Group) Recycling Decision[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [14] 张建华, 刘 武, 谭光宇, 等. 近现代保护建筑湘江宾馆中栋移位工程设计[J]. 建筑结构, 2020, 50(3): 40-44.
- ZHANG Jian-hua, LIU Wu, TAN Guang-yu, et al. Moving Engineering Design of Modern Protective Architecture of Middle Building of Xiangjiang Hotel[J]. *Building Structure*, 2020, 50(3): 40-44.
- [15] 夏 冰, 肖建庄, 吕凤梧, 等. 结构拆解力学分析基础与基本方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2020, 48(8): 1083-1092, 1198.
- XIA Bing, XIAO Jian-zhuang, LÜ Feng-wu, et al. Mechanical Analysis and Fundamental Philosophy for Deconstruction of Structures[J]. *Journal of Tongji University Natural Science Edition*, 2020, 48(8): 1083-1092, 1198.
- [16] XIA B, DING T, XIAO J Z. Life Cycle Assessment of Concrete Structures with Reuse and Recycling Strategies: A Novel Framework and Case Study[J]. *Waste Management*, 2020, 105: 268-278.
- [17] 孙南昌, 林 巍, 何 萌, 等. 悬浮隧道横断面结构轴力-弯矩-曲率曲线特性分析[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(2): 82-87.
- SUN Nan-chang, LIN Wei, HE Meng, et al. Characteristic Analysis of the Axial Force-moment-curvature for Cross Section Structure of the Submerged Floating Tunnel[J]. *China Harbour Engineering*, 2020, 40(2): 82-87.
- [18] 张维秀, 张元琦, 孟桂萍. 中美规范钢筋混凝土大偏压柱配筋比较[J]. 石油化工设计, 2014, 31(1): 10-13.
- ZHANG Wei-xiu, ZHANG Yuan-qi, MENG Gui-ping. Comparison Between Column Reinforcement Calculated with Chinese and American Codes[J]. *Petrochemical Design*, 2014, 31(1): 10-13.
- [19] 方忠年, 吕恒林, 吴元周, 等. 煤矿工业环境中 RC 小偏压柱力学性能时变规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(5): 800-807.
- FANG Zhong-nian, LYU Heng-lin, WU Yuan-zhou, et al. Study of the Time-varying Mechanical Performance of Reinforced Concrete(RC) Columns Under to Small Eccentric Loading in Coal Mining Industry Environment[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(5): 800-807.
- [20] 马伟斌, 王志伟, 张千里, 等. 混凝土本构关系研究进展及发展趋势[J]. 中国铁路, 2018(6): 10-18.
- MA Wei-bin, WANG Zhi-wei, ZHANG Qian-li, et al. The Research Progress and Development Tendency of Concrete Constitutive Relation[J]. *China Railway*, 2018(6): 10-18.
- [21] 杨 红, 谢 琴, 张吉庆, 等. 考虑屈曲影响的钢筋本构修正模型及试验验证[J]. 土木工程学报, 2015, 48(10): 21-29.
- YANG Hong, XIE Qin, ZHANG Ji-qing, et al. A Modified Constitutive Model of Reinforcing Bars Considering Buckling Effects and Its Experimental Verification[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(10): 21-29.
- [22] 贾红学. 基于不同模型的超高层单侧倾斜建筑结构施工模拟分析[J]. 建筑结构, 2019, 49(增 2): 246-250.
- JIA Hong-xue. Construction Simulation Analysis of Unilateral Inclined Super High-rise Building Based on Different Models[J]. *Building Structure*, 2019, 49(S2): 246-250.