

# 地下增层托换桩-柱置换节点薄弱区应力分析

杨 予,俞 峰,徐超晔

(浙江理工大学建筑工程学院,杭州 310018)

**摘 要:**地下室下扩增层工程常需进行“桩变柱”结构置换,承台节点成为关键部位。为分析节点薄弱区的应力变化状况,首先建立了一桩一柱承台节点的力学分析模型;然后采用有限元方法和单元生死技术,对某高层建筑在不同施工阶段的承台节点应力分布状况进行求解;最后根据求解结果分析薄弱区产生的原因及其应力变化规律。研究表明:当承台节点置换为梁柱节点时,核心区应力水平大幅增加;不同施工工序将影响核心区的应力路径。

**关键词:**节点薄弱区;结构置换;地下室增层;单元生死

**中图分类号:** TU932

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2016) 03-0469-05

**引用页码:** 051101

## 0 引 言

随着我国城市化的发展,地面空间不足造成的停车难和交通拥堵问题日益凸显。在此背景下,对既有建筑物做地下室增层近年来逐渐成为一种拓展空间的新思路,此类工程的典型施工案例有加拿大蒙特利尔市中心的地下空间扩建工程<sup>[1]</sup>和济南商埠区历史建筑地下增层工程<sup>[2]</sup>等。

常见的增层托换方案按原理可分为两类。一类为桩梁(板)式托换<sup>[3]</sup>,其原理为:通过托换梁(板)将上部结构荷载转移到新的桩基上,建成后原建筑与新增地下室相对独立,托换梁实际起结构转换层的作用,典型案例有济南商埠区历史建筑地下增层工程<sup>[2]</sup>和深圳地铁百货广场桩基托换工程<sup>[4-5]</sup>。这类托换方法的优点是托换桩设置位置较灵活,且无需对原有基础进行补强;缺点是新基础变形不易控制,且增层开挖深度应计入托换梁的高度,还应考虑地下室与原有建筑连接部位的缝隙处理以及施工工况在构件上产生的附加弯矩<sup>[6]</sup>。第二类为基础原位托换,其原理为:采用静压桩直接在原有基础下方补桩<sup>[7]</sup>,改造时基础节点成为结构转换节点,改造后成为新增地下室顶板或新增柱结构的一部分,典型工程案例有中国工商银行某办公

楼的地下增层工程<sup>[7]</sup>。这类托换方法的优点是开挖深度无需考虑托换梁高度,原建筑与新增地下室直接连接;缺点是结构转换过程中节点受力复杂,且基础外缘占用建筑空间,如需做节点外形修整时必须分析其关键部位的应力路径以免发生事故。

本文以杭州某高层饭店工程地下增层方案论证为例,运用数值模拟的手段,研究原位托换条件下桩-柱结构置换和外形修整时节点关键位置的应力路径与施工工况之间的关系,以期为类似的工程设计和施工提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 工程条件分析

杭州某高层饭店为框剪结构形式,地上十三层地下一层。该建筑计划在原有地下室下方增设停车库,剖面尺寸如图1所示,施工拟采用桩基承台原位托换方法,地下室增层所增加的荷载通过增设锚杆静压桩来满足相应的桩基承载力要求。为满足三层停车库的净空要求,在新承台、截桩和新浇柱施工完成后拟对原有承台边缘做修整凿除,由于承台保留部分有可能随着施工进度逐步削弱形成薄弱区,需要对其做重点分析。

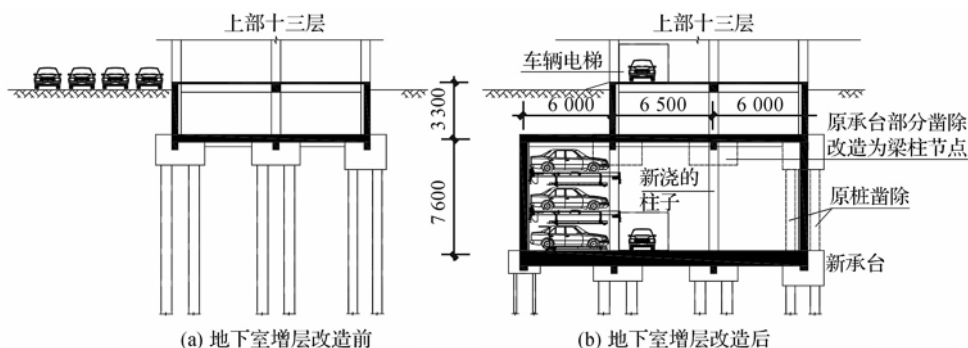


图1 某高层地下室增层工程案例改造剖面

分析该工程的具体条件可知,在承台的改造过程中有两个方面的问题需要注意:

a) 桩-柱结构置换在上部恒活荷载不变或仅减少部分活荷载的条件下进行,考虑到辅助顶撑设备很难在狭窄的地下空间展开,施工工况可能导致节点区域应力水平急剧上升形成薄弱区,从而引起建筑结构的整体破坏;

b) 新增地下室的新浇柱混凝土与原有基础凿除剩

余部分的混凝土共同工作,从而形成竖向叠合构件,根据《GB 50010—2010 混凝土结构设计规范》第9.5.5条要求,尚需考虑新旧混凝土的共同工作问题,即在设计中需考虑承载历史(应力路径)和施工支顶情况。

### 1.2 桩柱节点模型

以该工程中大量出现的一桩一柱承台节点为例,按其所在位置的不同可分为:角节点、边节点、中间节点,如图2所示。

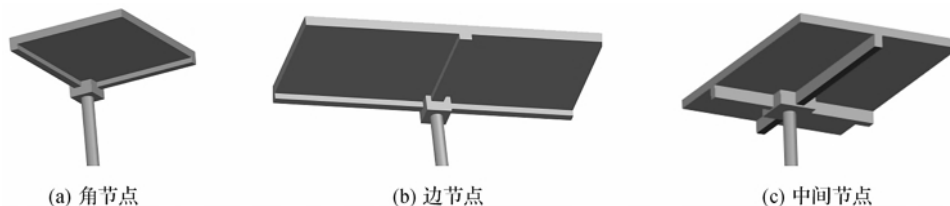


图2 3种节点实体示意

在对该节点进行结构置换和外形修整时,对节点混凝土所进行的体积施工按性质可分为两类:

a) 体积增加,例如在原承台底部以原有桩基为中心浇筑新混凝土柱以支撑原有底板。在这类施工中,边缘新增部分混凝土的初始应力状态取零值。

b) 体积移除,例如对原承台的边缘做修整以获得足够的建筑空间。在这类施工中,节点的体积和外边界形状将发生改变,并可能因此产生应力集中。

可见,所研究节点的体积域和外边界均应视为时间和空间坐标的函数,考虑到施工中混凝土核心区不允许开裂,可将其归结为弹性边界非线性问题<sup>[9]</sup>。显然对该问题采用解析方法得出通用解答的难度很大,可通过建立有限元模型和单元生死<sup>[9]</sup>方法来分步求解。

### 1.3 有限元模型与施工步骤

有限元建模求解的思路为:先绘制承台节点的实体,然后针对需要进行体积加工的部位做分块和编组,最后应用有限元软件的单元生死功来模拟每一施工步骤引起的边界变化,得出承台节点在不同施工工况下的应力路径。

以该建筑的边承台节点分析为例,假定如下两种理想化的施工方案:方案一是先将承台下方的钻孔灌注桩截面增大为方形后,再将承台多余部分分一层两块凿除,如图3所示;方案二是将承台多余部分,分两层四块凿除,如图4所示。显然两种方案的区别是方案二的凿除步骤相对方案一多分了一层。为方便对比,将方案一的施工步骤记为一二三四,而方案二记为一二三(四)(五)(六)。

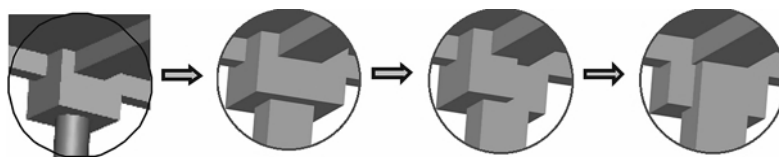


图3 方案一施工步骤

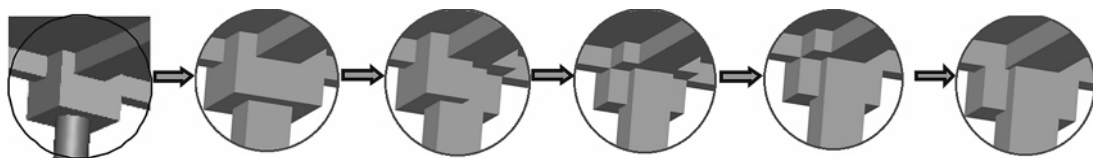


图4 方案二施工步骤

实体建模和网格划分采用 Ansys 中的 10 节点四面体单元和 20 节点六面体单元,在不同类型单元的界面上采用金字塔单元过渡,如图 5 所示。根据工程原始设计资料采用的几何参数:承台尺寸为  $1.2\text{ m}(\text{长}) \times 1.2\text{ m}(\text{宽}) \times 1.2\text{ m}(\text{高})$ ,下部钻孔灌注桩直径  $0.6\text{ m}$ ,底板厚度  $0.5\text{ m}$ ,取改造后的柱截面尺寸为  $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ ;分析中采用的力学参数:混凝土容重取  $25\text{ kN/m}^3$ ,弹性模量取  $3.25 \times 10^4\text{ N/mm}^2$ ,泊松比取  $0.24$ ,重力加速度取  $9.8\text{ m/s}^2$ 。

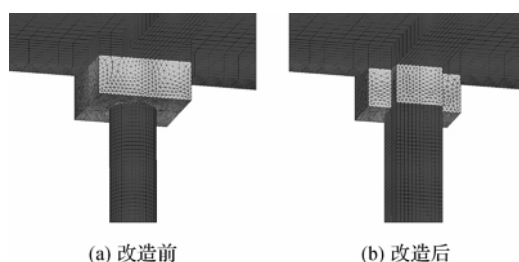


图5 边节点改造网格划分示意

求解时,柱底部采用固定端约束条件,而梁远端采用对称位移约束条件。在模拟施工方面,首先将

施工中拟凿除的体积区域通过节点与拟保留部分的自由度耦合在一起,然后在分析中选择相应体积区域利用单元生死功能来模拟承台凿除与新浇柱等施工步骤引起的材料增减。

施加在承台节点的上部结构柱底反力通过对上部结构建模求得,三维建模情况如图 6 所示,求解采用 PKPM 软件中的 SATWE 模块。在有限元分析中采用的柱底弯矩、剪力和轴力数值见表 1。

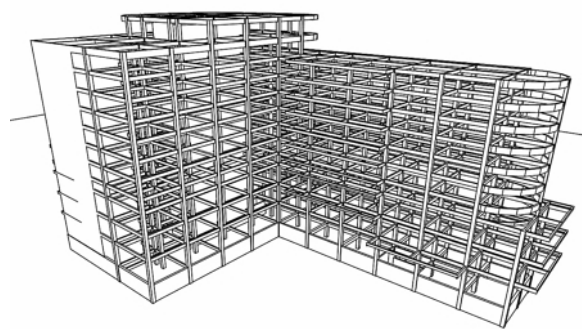


图6 上部结构三维建模情况

表1 上部结构柱底反力

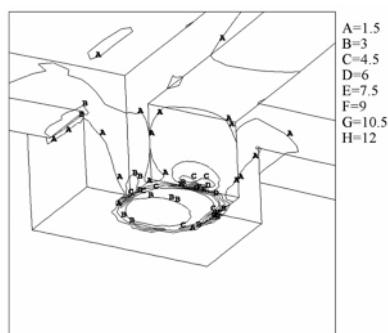
类型	$x$ 向剪力 $V_x/\text{kN}$	$y$ 向剪力 $V_y/\text{kN}$	轴力 $N_{\text{max}}/\text{kN}$	$x$ 向弯矩 $M_x/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$y$ 向弯矩 $M_y/(\text{kN} \cdot \text{m})$
角节点	12.2	14.4	-540.9	-22.7	19.0
边节点	3.9	23.6	-559.1	-37.1	6.1
中间节点	-5.0	44.1	-3577.5	-68.9	-7.6

## 2 薄弱区分析

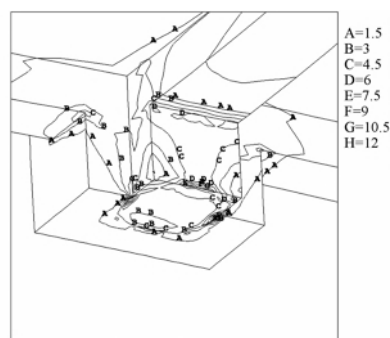
### 2.1 等效应力等值线

求解时采用弹性小变形假定,对该工程中的边

节点、中间节点和角节点分别进行了数值分析。以边节点在施工方案一中的分析结果为例,结构改造前与改造后的核心区 Von Mises 等效应力等值线图见图 7。



(a) 改造前状态



(b) 改造后状态

图7 核心区等效应力等值线图

由图 7(a) 中的等值线可见, 原承台核心区域 (即图中梁端下方区域) 总体等效应力水平较低, 约为 1.5~3.0 MPa, 而图 7(b) 中改造后对应区域的应力水平显著升高, 约为 4.5~6 MPa, 这说明结构置换和外形修整施工对节点核心区域的应力影响显著。

## 2.2 施工工况应力分析

实际工程中梁端、核心区等关键位置的拉、压、剪切等应力状态起控制作用, 通过对比分析不同施工方案在各个工况下结构的关键部位 (如图 8 中的 1—7 点) 的应力变化曲线, 还可为提供选择合理施

工方案的依据。以图 8 中的核心区中央处的 5 号节点为例, 可绘制施工步骤—应力关系曲线, 如图 9 所示。

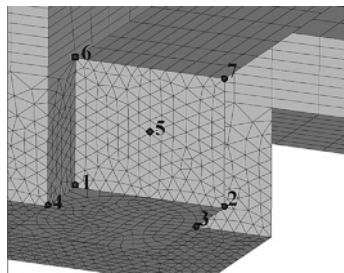


图 8 关键节点位置示意

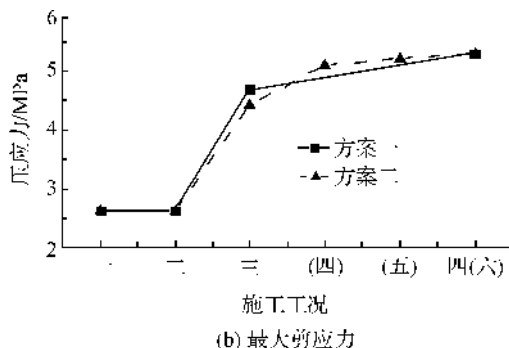
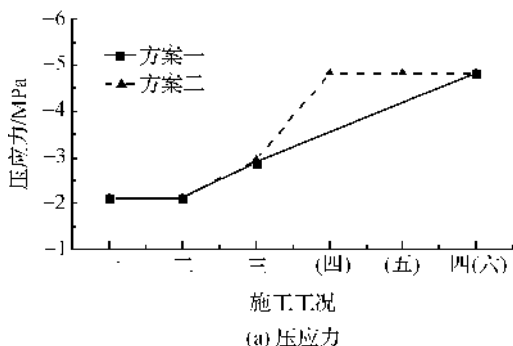


图 9 不同施工方案的应力对比

由图 9 可见, 在改造过程中随着承台核心区周边混凝土被移除, 处于核心区的 5 号点压应力从工况一的 2.13 MPa 跃增到工况四(六)的 4.83 MPa, 增幅为 127%, 而最大剪应力则由工况一的 2.64 MPa 跃增到工况四(六)的 5.31 MPa, 增幅为 101%。

此外, 由图 9 还可知, 施工方案对应力路径有很大影响, 仍以 5 号点为例: 这两个点在方案一中均经历 4 个工况, 在第 4 工况达到最大应力, 然而若按方案二多分一层凿除则须经历 6 个工况, 其中增加的第(四)(五)两个工况的凿除步骤所产生的压、剪应力, 由于局部应力集中效应的影响反而要比方案一更高, 由此可判定方案一在该节点处为较优施工方案。

## 2.3 薄弱区成因分析

对照上述部位的有限元应力分析结果, 并依据相关国家设计规范和图集的具体条款分析可知, 导致薄弱区产生的可能原因如下:

a) 核心区受剪能力不足, 在最大剪应力大幅增加的情况下, 核心区容易发生剪切破坏, 其原因是梁柱节点与承台节点的水平箍筋设计有较大差异, 例如在《11G101-1 混凝土结构施工图平面整体表示方法制图规则和构造详图》中, 柱底插筋范围对应的水平箍筋一般仅要求其间距小于等于 500 mm 和不少于两道, 而按《GB 50010-2010 混凝土结构设计

规范》第 11.6.8 条, 梁柱节点及端部加密区须满足最小体积配箍率要求。

b) 梁端截面受弯能力不足或钢筋锚固长度不足, 其原因是基础梁在设计时须考虑土体反力和地下水浮力作用, 一般将支座负弯矩钢筋配置在节点下部, 但下部土体挖空后基础梁转变为承受自重和楼板重量的框架梁, 则未按上下对称通长配筋的梁易出现截面纵筋面积不足, 此外净跨增加使梁端向核心区移动易导致钢筋锚固长度不足。

c) 核心区混凝土局部受压能力不足, 在最大压应力大幅增加的情况下, 核心区容易发生局部受压破坏, 其原因是按《GB 50007-2011 建筑地基基础设计规范》中 8.5.17 条第 4 款, 承台混凝土等级要求为大于 C20 即可, 施工中为降低水化热倾向于采用强度较低的混凝土等级, 如在改造时为缩小柱截面 (以满足建筑空间要求) 采用了比原强度更高的混凝土等级, 则改造后形成的节点核心区将存在强度等级低于柱身的安全隐患。

综上所述, 原位托换时桩-柱结构置换和外形修整施工引起的应力水平变化容易使原有承台节点产生薄弱区, 须采用一些补强措施来满足规范中节点核心区的配筋率、锚固长度和混凝土局部受压抗力等要求, 并应避免施工中的冲击力使之产生脆性破坏。

### 3 结论与建议

本文对地下增层原位托换桩-柱置换节点区域的应力变化与施工步骤之间的关系进行了研究,并结合规范条文对薄弱区产生的原因进行了系统分析。根据数值分析结果,可得如下结论:

a) 在承台节点结构置换和外形修整过程中核心区混凝土形成新的梁端和柱端,其应力水平显著升高,且由于承台和梁柱节点在设计规范上的差异,容易形成节点薄弱区;

b) 不同施工工序将影响关键部位的应力路径。

根据上述结论,施工设计中建议:

a) 研发有针对性的补强方案与施工方法来满足规范中配筋率和锚固长度等要求,并避免施工中的冲击力使节点产生脆性破坏;

b) 在施工前应通过对比应力峰值来判定较优施工方案,考虑到施工中的不确定性,也可采用设置传感器的方法对关键部位进行实时监控。

### 参考文献:

- [1] 汤永净. 蒙特利尔地下空间扩建中的古建筑保护技术[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(4): 672-676.
- [2] 贾强, 张鑫, 夏风敏, 等. 济南商埠区历史建筑地下增层工程设计与施工[J]. 山东建筑大学学报, 2014, 29(5): 464-469.
- [3] 高俊合, 张澍曾, 柯在田, 等. 大轴力桩基托换梁-柱接头模型试验[J]. 土木工程学报, 2004, 37(9): 62-68, 91.
- [4] 韦廷彦. 高层建筑物桩基托换的受力分析与接头强度试验[J]. 石家庄铁道学院学报, 2004, 17(3): 84-87.
- [5] 贾强, 张鑫. 板式基础托换法开发地下空间施工过程的数值分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1989-1994.
- [6] 赵来顺, 邢强, 常鹏飞. 预压托换桩在楼房增层改造中的应用[J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39(4): 177-179.
- [7] 文颖文, 刘松玉, 胡明亮, 等. 地下增层工程中既有结构变形控制技术研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1914-1921.
- [8] 江见鲸, 陆新征. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 236-237.
- [9] 章惠冬. ANSYS单元生死技术软件在结构设计及施工中的应用[J]. 建筑施工, 2008, 30(9): 824-825.

## Stress Analysis on Weak Area Generated in Pile-Column Replacement in Basement Extension

YANG Yu, YU Feng, XU Chaoye

(School of Civil Engineering and Architectural, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The “pile-to-column” structural replacement is usually required in basement extension project and the pile cap joint becomes a key part of the reconstruction. In order to analyze stress variation of weak area of pile cap joint, a mechanical analysis model for one-pile-one-column pile cap joints is established. Then, Finite Element Method and the element birth and death technology are utilized to solve stress distribution of pile cap joint in different construction phases of a high-rise building. Finally, causes of the weak area as well as its stress variation pattern are analyzed according to the solving result. The following conclusions are drawn through this study: stress level of core area increases significantly during the replacement beam-column joints; the stress path in the core area is affected by different construction steps.

**Key words:** weak area of joint; structural replacement; basement extension; element birth and death

(责任编辑: 张祖尧)