

# 考虑高堆土作用的软土结构相互作用及结构设计

罗闻捷 李伟 钱耀华  
上海建筑设计研究院有限公司 上海 200041

**摘要:** 本项目为周边不平衡高堆土的大底盘多塔结构。通过分析表明: 回填土在无约束和有较大约束条件下对大底盘基底剪力、变形、水平力传递、整体动力特性的影响均较小。在高度一定的情况下不同坡度回填土会随着坡度放缓, 侧壁的底部剪力会增加, 但地震剪力放大系数可包络回填土产生的总附加地震剪力值。通过对高堆土区域设置隔离桩及承台, 可大幅减少土体对主体结构的影响, 控制主体结构的位移和附加内力。

**关键词:** 软土地基高堆土; 土-结相互作用; 地基处理; 土体约束

## 1 引言

土与结构相互作用 (Soil-Structure Interaction) 是岩土工程和结构工程交叉领域的重要研究课题, 由于力学性质存在巨大差异, 相互作用变得异常复杂, 理论与工程应用长期存在差距。

张博韬等<sup>[1]</sup>梳理了土-结构相互作用影响的研究历史和发展历程, 讨论了各类计算理论和分析方法。刘孟函等<sup>[2]</sup>建立了考虑土-结构相互作用影响的等效单自由度体系模态阻尼比的修正函数以提高模态阻尼比的计算精度。胡静静等<sup>[3]</sup>提出一种新型土-结相互作用分析方法, 实现了大型结构考虑土-结构相互作用的高效地震反应分析方法。

## 2 项目概述

某大型科技企业研发项目A组团位于上海市青浦区, 总建筑面积约25万平方米, 由8栋上部多高层框架、框剪结构塔楼及3层退台式大底盘结构构成。结构底板标高与现状场地标高齐平, 大底盘最大平面尺寸约为400×250米, 周边有平均高度7米堆土紧贴外墙形成人造坡地景观, 仅南侧约134m宽临水面无外墙形成开口。本工程抗震设防类别为乙类, 抗震设防烈度按7度, III类场地, 设计地震分组为第二组,  $T_g = 0.65s$ 。

根据地勘报告, 项目场地范围内的地层由上而下依次为①层填土, ②层泥炭土, ③层淤泥质粉质粘土夹粘质粉土, ⑥层粉质粘土, ⑦层砂质粉土, ⑧层粉质粘土等。

大底盘周边靠近高堆土区域采用抗拔承载力较高的400边长预应力方桩, 以应对高堆土形成的水位上升和抗浮问题, 其余部分采用500和600直径PHC管桩, 另外局部设置700mm钻孔灌注桩。大底盘基础为500mm厚筏基, 局部区域加厚。

**作者简介:** 罗闻捷, 大学本科学历, 高级工程师, 一级注册结构工程师, Email: luowj@siadr.com。

## 3 土-结作用分析

由于本项目堆土对主体结构的嵌固条件不能完全满足。因此①通过不同的土层水平抗力系数 $m$ 值调整, 比较结构在不同土约束下的基底剪力、变形、动力特性等方面的差异性。②分析单榀剖面框架的位移及桩基水平力情况, 采用二维平面模型分析不同坡度的填土在地震作用下对大底盘的附加水平力, 为地震剪力合理放大提供依据。

### 3.1 高堆土约束对基底剪力分配的影响

首先比较回填土对大底盘的墙、柱的基底剪力的分配是否有影响。比较不考虑地下室 $m=0$ 及考虑两层地下室 $m=10$ 两种情况。相关数据汇总详见图1。

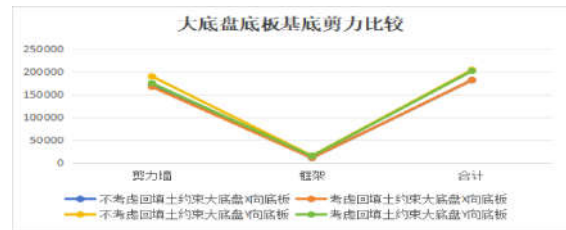


图1 不同土约束条件下底板基底剪力比较

从上面图表可以看出, 有无回填土的约束, 对整个大底盘的楼层剪力总值无明显影响, 对各底盘的剪力墙与框架的剪力分配占比也无明显影响, 前后数值均比较接近。

### 3.2 高堆土约束对大底盘变形的影响

比较 $m=0$ 和10两种情况下大底盘变形的差异。根据结果可知, 不考虑回填土约束的楼层处变形略大于考虑回填土约束的楼层处变形, 但变形趋势一致, 大部分区域差值微小。

### 3.3 高堆土约束对水平力传递的影响

对于四周填土的大底盘, 土的约束作用相当于在大底盘顶板设置了弹簧支座。外墙周边土体的约束作用通常通过对顶板施加只压弹簧来模拟。通过考察风荷载的计算结果, 可以大致对填土的约束贡献有所评价。

分析对比了回填土 $m = 10$ 时的土弹簧力与总风荷载剪力的比值，以下表1为土弹簧约束占大底盘总约束力的比例。

表1 土弹簧承担风剪力比

风荷载方向	总风剪力	土弹簧水平力	所占百分比
X向	13145.7kN	1644kN	12.5%
Y向	17525.2kN	1168kN	6.67%

可见回填土对底盘的约束贡献度不大，即使在 $m = 10$ 情况下，两个底盘土弹簧水平力占风剪力总量也不超过13%，绝大部分水平力是通过墙柱直接传递到底板的。

分析比较考虑回填土约束与不考虑回填土约束两种情况下各主要单塔的周期、基底剪力，总底盘基底剪力见表2。

3.4 高堆土约束对结构动力特性的影响

表2 高堆土约束对整体结构动力特性的影响

指标 楼栋	塔楼第一周期 (s)		塔楼基底剪力 (kN)		总底盘基底剪力(kN)	
	有回填土约束	无回填土约束	有回填土约束	无回填土约束	有回填土约束	无回填土约束
A1	0.9337	0.9442	X:6868 Y:6618	X:7037 Y:6543	X:197474 Y:192812	X:196839 Y:193383
A9	1.9686	1.9739	X:7217 Y:7011	X:7292 Y:7098		

从结果可知有无回填土约束对各上部单体和总底盘的周期、基底剪力等变化基本在5%以内，可认为可不考虑回填土的约束影响。

的水平承载力限值，满足要求。

3.5 不平衡土压力条件下基础抗水平力验算

3.6 回填土对底盘的地震力作用分析

以不平衡土压力较大处24轴线处为例，此处大底盘周边堆土未闭合，形成了不平衡土压力。取该位置单榀框架采用SAP2000进行补充验算，主要计算结果如图2-图3。

通过在SAP2000中创建二维土体梯形模型，拟合大底盘侧高堆土。模拟土体顶面宽度5m，底面宽度按不同坡度分别取45m、30m和20m，土体高度均取为8m。采用等效动黏弹性本构模型，放大模拟大底盘侧墙的线单元刚度，按无限刚状态近似，按主体结构时程分析所取用的反应谱工况分析，阻尼比取0.02。计算填土的剪力结果如下图4所示。

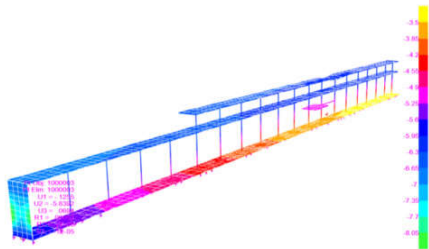


图2 组合工况下桩顶最大位移结果

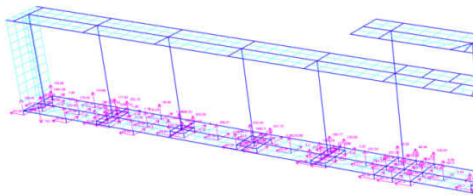


图3 组合工况下桩水平力计算结果

结果表明，临近高堆土4跨内的桩顶最大位移为5.9mm，其中水土压力工况下桩顶最大位移为4.0mm。远离高堆土的桩基顶部位移呈依次减小的趋势，桩水平力最大值为25kN（管桩），均未超过桩顶水平位移限值及桩

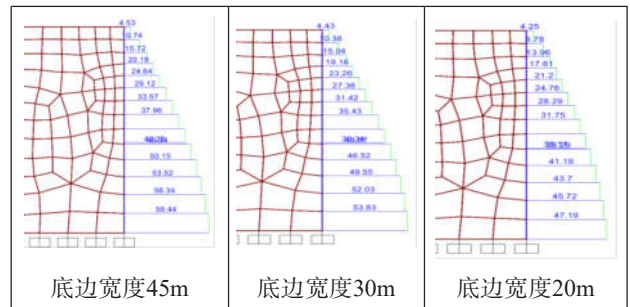


图4 地震作用外墙侧壁剪力分布示意（单位：kN）

分析可知坡度减缓会略微增加底部剪力，但总体差异基本可控。每延米墙体底部剪力约为50-60kN，填土对大底盘的剪力作用约为24000kN，大底盘总的地震基底剪力约为200000kN，地震剪力放大1.15时，可包络填土对底盘的不利作用。

4 高堆土处理分析

4.1 高填土地基处理及内力变形验算

本工程填土如不进行处理，工后沉降量预计将达到

350mm左右。结构桩还会受到一定的侧向挤压力,受力非常不利。拟对高填土土体进行地基处理。处理原则为,当堆土高度大于4m时,相应范围土体下方设置3m×3.5m网格间距的500直径PHC隔离管桩,单桩承载力特征值为750和1100kN。隔离桩沉降变形对比如下图5所示。

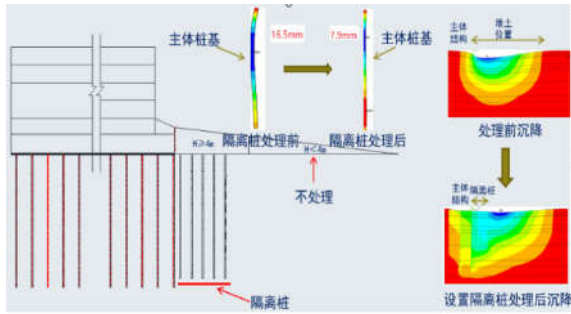


图5 隔离桩处理前后沉降变形对比

设置隔离桩后,大底盘周边的桩水平变形最大值从18mm左右降低到8mm,隔离桩沉降值35mm,满足要求。

#### 4.2 高填土地基处理工程做法

隔离桩采用抗弯能力较好的AB型PHC管桩并进行深填芯,填芯深度不小于3m,回填填土底部设置0.5m的砂石层,形成底部透水层,隔断地下水位上升。隔离桩采用独立承台构造方式,上铺设土工格栅、土工布。对于堆高超过4m位置,采用分级堆土,实现预压,利用地基土有效固结提高其承载力,增加地基土稳定性。

## 5 结语

本项目大底盘外围的地上堆土是局部的土约束,与天然地坪的理想半无限空间的固结土在地震作用下有所差异。通过分析表明:在大底盘不平衡覆土(开口区域)占比不大的情况下,单桩水平承载力和水平位移均可以满足要求。回填土在无约束和有较大约束条件下对大底盘基底剪力、变形、水平力传递、整体动力特性的影响均较小。在高度一定的情况下不同坡度回填土会随着坡度放缓,侧壁的底部剪力会增加,但地震剪力放大系数可包络回填土产生的总附加地震剪力值。通过对高于4m的堆土区域设置隔离桩及承台,可大幅减少土体对主体结构的影响,控制主体结构的位移和附加内力。高填土采用分级分层堆土、控制堆土质量、压实填筑,以满足设计所需要的高填土技术要求。

## 参考文献

- [1]张博韬,苗鑫,刘林顶,等.土-结构相互作用研究综述[J].产业与科技论坛,2025,24(14):42-46.
- [2]刘孟函,潘旦光,付相球.土-结构相互作用影响下结构模态阻尼比计算方法[J/OL].工程力学,1-9[2026-03-02].  
[https:// link.cnki.net/urlid/11.2595.o3.20260130.1055.014](https://link.cnki.net/urlid/11.2595.o3.20260130.1055.014).
- [3]胡静静,余丁浩,李钢,等.考虑土-结相互作用的大型结构高效地震分析方法[J].工程力学,2024,41(03):135-149.