2024 年 8月

Aug. 2024

岩土力学

基于支护构件强度折减法的超期深基坑加固设计研究

Research on Reinforcement Design of an Overdue Deep Foundation Pit based on the Strength Reduction Method of Supporting Components

田鹏刚^{1,3},牛建辉^{1,3},杨永林²,王明皎²,王勇华²,卜崇鹏²,蒲 靖^{1,3}

(1. 陕西建工控股集团未来城市创新科技有限公司,陕西西安712000;2. 机械工业勘察设计研究院有限公司,陕西西安710021;3. 未来城市建设与管理创新联合研究中心,陕西西安712000)

摘 要:随着城市化快速发展和土地资源的日益紧张,城市建设中深基坑工程日渐增多。而工程延期、方 案变更和施工困难等导致的基坑超期服役问题也伴随出现,这不仅增加建设成本,还带来环境与安全风险。因 此,实施有效的二次加固设计至关重要。依托西安某超期深基坑工程实例,采用支护构件强度折减法对锚拉桩、 复合土钉墙及悬臂桩三个支护形式的断面进行加固设计,建立深基坑的有限元模型,模拟分析该深基坑加固前 后的稳定性及位移。结果表明:采用支护构件强度折减法进行基坑加固设计后,数值模拟结果与实测值吻合较 好,基坑的整体稳定性、水平变形及竖向变形均符合规范要求。支护构件强度折减法加固超期地基合理有效。 关键词:超期深基坑:支护构件:强度折减法:Midas GTS;基坑加固设计

中图分类号: TU473 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 04-0067-07 **DOI**:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.04.012

TIAN Penggang^{1,3}, NIU Jianhui^{1,3}, YANG Yonglin², WANG Mingjiao², WANG Yonghua², BO Chongpeng², PU Jing^{1,3}

(1. Future City Innovation Technology Co., Ltd., Shaanxi Construction Engineering Holding Group, Xi'an 712000, China; 2. China Jikan Research Institute of Engineering Investigation and Design Co., Ltd., Xi'an 710021, China; 3. SCEGC-XJTU Joint Research

Center for Future City Construction and Management Innovation, Xi' an 712000, China)

Abstract: With the rapid development of urbanization and the increasing scarcity of land resources, the deep foundation pit projects are increasing in the urban construction. The problems of foundation pit services extension caused by projects delay scheme and construction difficulties also occur, which not only increases construction costs but also poses environmental and safety risks. Therefore, implementing an effective secondary reinforcement design is of utmost importance. This paper, based on a case study of an over – service deep foundation pit project in Xi' an, uses the strength reduction method of support components to reinforce the sections of three types of support forms: anchor piles, composite soil nail walls, and cantilever piles. A finite element model of the deep foundation pit is established to simulate and analyze the stability and displacement before and after reinforcement. The results indicate that after the reinforcement design of the foundation pit using the strength reduction pit using the strength values, and the overall stability, horizontal deformation, and vertical deformation of the foundation pit all comply with the regulatory requirements. The reinforcement of the over – serviced foundation using the strength reduction method of support

components is rational and effective.

Keywords: overdue deep foundation pit; support components; strength reduction method; Midas GTS; reinforcement design of the foundation pit

0 引言

深基坑工程支护是为了保证地下结构安全施工 及基坑周边环境的相对稳定,而对基坑采用支挡、 加固、保护与地下水控制的临时性措施,基本都是 按照临时结构一年的使用期限进行设计的^[1-2]。而在 实际工程建造过程中,由于建设资金短缺、不符合 法律法规、业主方案变更及合同纠纷等原因导致深 基坑处于长期搁置状态的现象,使其支护结构超过 服役期限,安全性及稳定性大打折扣,对周围的建 (构)筑物、道路、管线、地铁、管廊等其他地上地 下结构的稳定造成很大的安全隐患^[3]。

因此,深基坑具备复工条件后,如何对其支护 结构进行进一步加固,从而延长基坑支护结构的使 用年限,以降低发生意外的风险,成为建设者们需 要思考的实际问题。针对以上问题,有学者和工程 师针对不同地区、不同地质,在原支护结构已经设 置完成的情况下,对支护结构进行加固设计,并对 加固方案的稳定性、变形规律等方面进行了研 究^[4-8]。例如:吴铭炳等^[3]研究了基坑加深后的加固 措施,并对其效果进行了跟踪监测,得出了充分利 用现有旧桩,采用后排增加稀疏长桩,满足了抗隆 起、抗倾覆等稳定性要求;高美玲等^[4]对超期服役 基坑桩锚结构检测评估及加固措施进行了研究,得 出了一套可复制的超期基坑桩锚结构检测、评估及 加固处理方案。

以西安某超期深基坑工程为依托,基于"支护 构件强度折减法",对分别采用锚拉桩、复合土钉墙 及悬臂桩支护形式的三个断面进行加固设计;同时, 运用有限元软件分析,通过对比加固前后的安全系 数和断面位移等重要指标,分析开挖过程中基坑的 稳定性及变形规律,并结合基坑监测结果,验证该 设计方法的合理性。

1 工程概况

1.1 基坑概况

场地位于陕西省西安市未央区,复建后新建筑

方案分为南北两侧。南侧为三层地库区域,基坑周 长约为624.00 m,既有基坑深度为10.50~12.20 m, 该基坑已于2014~2015 年开挖并进行支护施工,基 坑支护构件已超期服役5~6年。项目复建后自现地 面起算基坑绝对支护深度约为12.22~14.00 m,需 在现有旧基坑基础上下挖1.50~1.80 m。分别选取原 设计方案中锚拉桩、复合土钉墙和悬臂桩三个不同 支护体系的典型断面进行基坑支护加固方案的研究, 三个断面加固前的支护设计如图1所示。

基坑周边环境复杂。东侧为市政道路,基坑开 挖底边线距道路红线最近约11.30 m,路面下敷设 弱电等管线,经现场实际踏勘及复核相关资料,支 护结构不会对地下管线产生影响;北侧情况与东侧 基本相同;西侧北段紧邻多层建筑,距基坑开挖底 边线最近处5.50 m,西侧南段临坑边建有3层售 楼部;基坑南侧西半段邻近建筑物距基坑边最近 距离13.90 m。



(b) 复合土钉墙体系



1.2 工程地质条件

场地地貌单元属渭河 II 级阶地。场地自上而下 依次由①杂填土 Q4^{ml}、②黄土 Q3^{eol}、③黄土 Q3^{eol}、 ④古土壤 Q3^{el}、⑤粉质黏土 Q3^{al}、⑥细中砂 Q3^{al}、⑦ 粉质黏土 Q2^{al}、⑧中砂 Q2^{al}、⑨粉质黏土 Q2^{al}等地层 构成,根据地勘报告,主要地基土物理力学参数见 表1。

	5		F		
土层名称	重度 / (kN/m ³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /°	压缩模量 /MPa	液性指数 I _L
①杂填土	14.5	12	12	2.7	0.05
②黄土	14.5	19	24.5	3.8	< 0
③黄土	17.0	25	23.5	9.4	0.21
④古土壤	18.1	28	23	8.8	0.31
⑤粉质黏土	19.9	35	21	8.1	0.35

表1 土层物理力学参数 Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layer

设计期间场地地下水稳定水位埋深为 9.12 m, 地下水位年最大变幅约 2.0~3.0 m,场地地下水属 潜水类型。

根据工程基坑开挖深度、地质概况、周边环境 及其自身特点,该基坑工程属于深基坑。基坑安全 等级为一级,重要性系数为1.1^[9]。

2 支护构件强度折减法的提出

强度折减法是 Zienkiewicz 等人在 1975 年首次 提出的,工程中安全系数考虑的是在材料本身强度 一定情况下,将荷载倍数提高,相当于人为增大荷 载;而强度折减是保持荷载不变,降低材料强度。 传统强度折减法是通过折减系数将土体强度参数进 行折减,得到新的黏聚力与内摩擦角,然后带入有 限元进行计算,当符合临界状态破坏条件时,对 应的折减系数则称为边界最小安全系数^[10]。计算 公式为:

$$c' = \frac{c}{F} \tag{1}$$

$$\varphi' = \arctan \frac{\tan \varphi}{F}$$
 (2)

式中: $c = \varphi$ 分别为边坡土体的黏聚力和内摩擦角; $c' = \varphi'$ 均为折减后的强度参数; F 为折减系数。

在实际工程中,此方法显然更适用于分析原始 的未经处理的边坡、基坑工程。而文中所述基坑前 期开挖过程中已经进行了支护施工,基坑边坡侧壁 布满了锚索、土钉与土体形成的复合注浆体,类似 于土体的注浆加固,此时的边坡土体实质上是进行 了增强,其综合物理力学指标显然是优于原始地层 中的岩土体,采用对原始岩土体进行强度折减的方 法求得安全系数显然不符合工程实际。

基于此,在基坑周边边界条件不发生变化的前 提下,考虑到基坑超期服役过程中安全系数降低实 际是各种支护构件包括土钉、锚索、护坡桩、型钢 腰梁及锚头装置等构件老化、锈蚀及应力松弛造成 的,故在原有强度折减法原理下提出超期服役基坑 中既有支护构件强度折减的理论分析方法。以此方 法为依据,以 Midas GTS NX 为依托进行详细的分析 计算,对既有旧基坑进行加固设计。

3 模型构建与结果分析

3.1 模型建立

①模拟中,基坑开挖的实际结构尺寸、施工工 法等均按实际情况考虑。土层采用 MC (摩尔 - 库仑 本构模型)模拟,土层计算参数主要依据项目岩土 工程勘察报告并参考西安地区典型土层的物理力学 参数指标选取;

②边坡模型采用二维断面进行分析,根据平面 假定原则,土体及混凝土桩、结构框架采用平面应 变单元^[10-11];土钉、锚索等构件在软件中采用桁架 单元模拟,材料使用钢材结构单元。结构单元截面 特性见表2;

岩土力学

岩土力学

表 2 支护结构类型及参数 Table 2 Support structure types and parameters

结构单元	本构模型	天然容重 / (kN/m ³)	单元类型	弹性模量 /MPa	泊松比
护坡桩及桩顶	弹性	25.0	平面应变	3.0×10^4	0.25
钢绞线/钢筋	弹性	78.5	桁架	2.0×10^{5}	0.30
混凝土面层	弹性	25.0	梁单元	2.55 $\times 10^4$	0.25

③二维整体模型的边界条件为:模型底部约束 X、Y两个方向位移,模型左右两面约束 X 方向位 移。荷载条件包括重力荷载,软件中可直接定义, 考虑周边结构和施工机械等对边坡的影响,根据实 际情况对三个不同断面施加压力荷载;

④采用有限元计算不收敛作为不稳定性的判别 标准。根据有限元求解收敛性确定不稳定状态,即 给定非线性迭代次数和极限,当最大位移或者不平 衡力的残余数值不能满足所需的收敛条件时,确定 此时的折减系数为边坡的安全系数。

根据以上考虑建立二维整体有限元计算模型, 三种支护体系的断面模型如图2所示。



Fig. 2 Two dimensional integral finite element calculation models for three different support systems

3.2 加固方案及稳定性评估

锚拉桩体系断面中外部荷载考虑三层售楼部的 均布荷载,作用长度为基坑开挖深度2倍距离。在 原有支护体系下考虑基坑加深,得到安全系数及潜 在滑动面,如图3所示。针对原有支护稳定性分析 可知,基坑加深后原有支护的基坑边坡稳定性系数 为1.15 < 1.35,所以原有支护的稳定性不足以满足 规范要求,需要进行二次加固设计。滑动面呈现近 似圆弧形,发生滑动位置主要在框架结构的桩基右 侧,近似在3:7 灰土垫层的位置,经对比验证与极 限平衡的计算结果大体类似。



图 3 锚拉桩断面基坑加深后原有支护稳定分析图 Fig. 3 Analysis of the stability of the original support after the deepening of the anchor pile section foundation pit

方案一为基于土体强度折减法的边坡二次加固。 首先,通过对土体抗剪强度参数折减的不断试算, 得到安全系数接近1时的抗剪强度指标,具体土体指 标变化见表3。此时边坡稳定性系数为1.009,接近 边坡的极限临界状态。折减后的边坡稳定性云图如 图4所示,与折减前相比,此时的边坡滑移曲线更加 偏离基坑一侧,潜在滑动面的范围有所扩大,边坡 滑移所产生的影响也有所扩大。为了满足临界状态 参数下边坡稳定性的要求,通过对边坡进行二次加 固措施的反复计算,得到了此状态下边坡满足规范 要求的支护措施,需要添加6道长度为20.0m的锚 索构件。此加固作用下,边坡稳定性云图如图5所 示,此时边坡安全系数为1.49,满足规范要求。

表 3 土体抗剪强度指标折减前后参数对照表 Table 3 Comparison of parameters before and after reduction

of son shear strength indicators							
土层名称	天然容重 / (kN/m ³)	c∕kPa	φ	c′∕kPa	arphi'	弹性模量 /MPa	泊松比
①杂填土	14.5	12.0	12.0	10.0	10.0	9.0	0.30
②黄土	14.5	19.0	24.5	13.5	14.0	12.0	0.31
③黄土	17.0	25.0	23.5	14.3	14.6	30.0	0.32
④古土壤	18.1	28.0	23.0	18.1	15.0	27.0	0.30
⑤粉质黏土	19.9	35.0	21.0	19.3	14.5	32.0	0.33









方案二为基于支护结构强度折减法的边坡二次 加固。与上述土体强度折减分析流程类似,首先对 支护结构进行折减,得到边坡处于临界状态下的折 减参数,并且按照最不利设计原则,在进行二次加 固时仅考虑原有支护结构折减后的支护作用力,分 析新支护措施对于整体稳定性的影响。首先针对原 有支护进行折减,折减原则为锚索锚固段进行长度 折减,自由段不进行长度折减。经过不断地试算、 调整,得到既有旧锚索锚固段的长度为2m时,边 坡的稳定性系数接近于1。折减后的边坡稳定性云图 如图6所示。此时旧锚索的支护效果可以认为是极为 有限的,在新的基坑深度以及原有支护结构性能有 限发挥的最不利工况下进行加固设计,新增3道锚 索,具体加固措施及指标见表4。对加固后的边坡进 行稳定性分析,安全系数及潜在滑动面如图7所示。 由图可知,二次加固后滑动面在建筑物后侧,基坑 整体稳定性安全系数为1.787,大于1.35,符合相关 规范标准的要求。

	表 4 新加固措施具体参数
Table 4	Specific parameters of new reinforcement measures

加固措施	自由端 ∕m	锚固段 /m	钢绞线	设计承 载力/kN	锁定力 /kN
锚索	9	13	$4 \times \phi s15.2$	280	180
锚索	8	17	$4 \times øs15.2$	350	230
锚索	7	17	4 ×øs15.2	380	250









复合土钉墙体系和悬壁桩体系在原有支护条件 下及两种方案加固后的稳定性分析过程与锚拉桩体 系一致。三种支护结构体系在两种加固方案下的具 体措施和安全系数对比见表5,方案一基于土体强度 折减法,方案二基于支护结构强度折减法。由表可 知,基坑的三个断面在原有支护体系下的安全系数 均小于规范要求,需要对其进行加固。三种不同支

		ruble e comparison tuble of	the remotection	it schemes	
士拉住王	原有支护下	方案一		方案二	
文护体系	安全系数	加固措施	安全系数	加固措施	安全系数
锚拉桩	1.15	新增6道长度为20m的锚索构件	1.49	新增3道预应力锚索,长度分别 为22.0、24.0、25.0m。	1. 79
复合土钉墙	1.17	新增7道长度为15~20 m的锚索 构件	1.48	新增3道15m长预应力锚索及1 道9.0m长土钉。	1.46
悬臂桩	1.15	新增4道长度为22 m的锚索构件	1.46	新增2道预应力锚索,锚索长度 分别为20.0、21.0m。	1.50

表 5 两种加固方案对照表 Table 5 Comparison table of two reinforcement schemes

岩十力

岩土力学

护体系采用两种方案加固后边坡的安全系数均能达到 规范要求,采用加固方案一需要的锚索量近乎方案二 的2倍,而采用方案一后断面安全系数模拟结果却普 遍小于方案二。基于土体强度折减法计算得出二次加 固时需要的锚索数量大,成本高,并且锚索构件实际 布设后锚索之间的间距很小,施工难度大;基于支护 结构强度折减法的加固方案更为经济,所用锚索数量 小,现场施工方便,安全系数更高,加固效果更好。

3.3 断面位移分析

为进一步验证基于支护结构强度折减法的加固方

案的可行性,对三种不同支护体系二次加固后的断面 位移进行有限元模拟分析,以验证模型建立的准确性。

锚拉桩断面水平位移、竖向位移分析结果分别 如图8所示。由于篇幅有限,其他两种支护体系断面 的位移云图不再展示。三种支护体系断面加固后的 最大水平和竖向位移结果见表6。由表6可知,三个 断面的水平位移均满足规范中2.5%*H*(*H*为坑深) 的要求,竖向沉降均在规范要求的25 mm范围之内, 证明基于支护构件强度折减法进行二次加固后的结 果从理论计算角度是合理可行,科学有效的。





表 6 加固后基坑位移模拟结果汇总表 Table 6 Summary of simulation results of foundation

pit disp	lacement after reinforcen	ient /mm
支护体系	水平最大位移	竖向最大位移
锚拉桩体系	7.65	12.83
复合土钉墙体系	5.90	6.80
悬臂桩体系	2.70	10.10

4 加固方案的施工检测验证

有限元分析结果证实了以"支护构件强度折减 法"为理论基础进行基坑侧壁的二次锚固加固的可 行性,该方案既可以确保基坑整体稳定性,又可以 有效控制基坑变形,基坑土体水平与竖向位移、围 护体系等的变形均在相关规范标准要求范围内。因 此,采用该方案对原有基坑进行现场加固施工,并 进行现场实际监测数据与有限元数值模拟结果的对 比分析,主要对比指标为基坑的水平和竖向位移, 以进一步验证加固方案的可行性。

以复合土钉墙体系监测数据为例进行分析,其 水平及竖向变化量如图9。由图可知,复合土钉墙体 系的水平及竖向位移随时间的变化均呈现先增长后 趋于稳定的趋势,基坑水平最大位移值为11.1 mm, 竖向最大位移值为 7.7 mm,与模拟值吻合较好。其他两种支护体系的水平位移及竖向位移随时间变化趋势与复合土钉墙体系相似。

三种支护体系在数值模拟与现场监测下的水平、 竖向位移数据对比如图 10。由图可知,数值模拟结 果与实测数据存在一定差异,但变化趋势相同,这 反映了利用数值模拟来分析基坑支护结构安全系数、 预测基坑周边沉降趋势的可行性;现场实测变形均 小于规范要求的基坑变形限值要求,证明了基于"支



岩土力学



护构件强度折减法"进行二次基坑加固的方案是合 理有效的,是能够有效指导实际工作的;数值模拟 结果整体略小于现场实测数据,其中悬臂桩体系水 平位移差异较大,经分析其主要原因在于数值模拟 为理想工况,并未完全考虑到现场实际施工时的开 挖工况、荷载的变化以及雨水对基坑的不利影响。

5 结论

采用"支护构件强度折减法"对超期服役深基 坑进行加固设计,运用 Midas GTS NX 有限元软件分 析了开挖过程基坑稳定性及变形规律,并结合基坑监 测结果,验证该设计方法的合理性,得出以下结论: (1)与基于土体强度折减法的加固方案相比,基于支护结构强度折减法的加固方案更为经济,所用锚索数量小,现场施工方便,安全系数更高,加固效果更好,有效地保证了基坑复建后增深开挖的安全性。

(2)二维有限元模型分析时考虑了支护结构与 土体间的相互耦合作用,数值模拟结果整体略小于 现场实测数据。整体计算结果及趋势基本吻合,可 以证明模拟过程中模型选择、地层及支护参数选取 合理,达到预期效果。

(3)通过计算结果与监测结果对比,整体稳定 性、水平变形及竖向变形均符合相关规范标准中的要 求,这说明基于"支护构件强度折减法"的基坑二次 加固支护结构选型及设计思路是合理可行的。

参考文献

- [1] 张兆龙. 超期服役深基坑的变形特性分析及稳定性评估 [J].
 水利与建筑工程学报, 2019, 17 (2): 74-78, 90.
- [2] 李庆伟,党昱敬.北京地区既有深基坑超期使用检测鉴定分析[J].建筑结构,2016,46(增刊1):914-918.
- [3] 吴铭炳,戴一鸣,林颖孜,等. 基坑加深的加固措施及其效果 [J]. 岩土工程学报,2010,32 (2):459-462.
- [4] 高美玲,刘大鹏. 超期服役基坑桩锚结构检测评估及加固措施[J]. 工程勘察, 2019, 15: 14-19.
- [5] 张钦喜,吴浩,晁哲.超期服役基坑的监测及数值分析 [J].
 岩土工程技术,2017,31 (4):186-191.
- [6] 刘浩,杨锐,张大军,等.广州某工程基坑变形监测及分析研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13 (1):167-170.
- [7] 王超,朱勇,张强勇,等. 深基坑桩锚支护体系的监测分析与
 稳定性评价 [J]. 岩石力学与工程学报,2014,33 (增刊1):
 2918-2923.
- [8] 张宇. 超期服役粉细砂基坑支护稳定性研究 [D]. 西安: 西安 理工大学, 2021.
- [9] 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012 [S]. 北京:中国建筑 工业出版社, 2012.
- [10] 何杨,张志强,向勇,等. 李家岩水库城乡供水洞进水口边坡 稳定三维有限元分析 [J]. 水利规划与设计,2019 (3):6.
- [11] 张兆龙. 超期服役深基坑的变形特性分析及稳定性评估 [J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17 (2): 75-78.