

DOI: 10.7672/sgjs2026070046

桩锚撑联合支护体系分阶段鲁棒性设计与 施工协同控制

楼恺俊,袁 静,童 磊,何彦承,姚宏波

(浙江省建筑设计研究院有限公司,浙江 杭州 310000)

[摘要] 城市更新背景下地下空间开发面临复杂环境、成本制约等挑战,桩锚撑联合支护体系由于兼具桩撑体系控制变形能力强及桩锚体系施工速度快、造价低、布置灵活等优点,在深大基坑中的应用愈加广泛,然而其安全和经济的平衡受岩土力学指标、水位、活荷载等变化以及施工误差影响等制约,采用可靠度设计方法基于确定的参数统计规律计算支护体系失效概率,易导致设计冗余或风险低估,迫切需要考虑参数不确定性的鲁棒性设计方法,并与施工协同控制来实现安全与成本均衡。提出一种“可量化参数优化-不可量化参数迭代”分阶段鲁棒性设计方法及流程:第1阶段固定水位与活荷载的变异系数,基于 NSGA-II 算法,考虑可量化的岩土力学指标、施工误差等的变异系数获得初始最优支护设计参数;第2阶段通过灰色关联分析迭代水位与活荷载的变异系数,获得其满足关联要求的最优解,并反馈施工协同控制措施落实,以获得最终最优支护设计参数。该方法应用于浙江省之江文化中心工程,桩锚撑联合支护体系经分阶段鲁棒性设计方法优化后,通过止水帷幕与降水联合控制水位、活荷载管理等施工协同控制措施落实,满足不可量化参数最优解要求,获得同时满足安全性、鲁棒性、经济性的支护设计参数。

[关键词] 城市更新;地下空间;支护;桩锚撑;鲁棒性设计;灰色关联分析

[中图分类号] TU473

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)07-0046-07

Phased Robustness Design of Combined Pile-anchor-bracing Support Systems and Construction Collaborative Control

LOU Kaijun, YUAN Jing, TONG Lei, HE Yancheng, YAO Hongbo

(Zhejiang Provincial Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000, China)

Abstract: Under the background of urban renewal, the development of underground space is facing challenges such as complex environments and cost constraints. The pile-anchor-bracing combined support system has the advantages of strong deformation control ability of the pile-bracing system and fast construction speed, low cost, and flexible layout of the pile-anchor system. It is more widely used in deep and large foundation excavations. However, its safety and economic balance are restricted by changes in geotechnical mechanics indicators, water level, live load, construction errors, etc. The reliability design method was used to calculate the failure probability of the support system based on the determined parameter statistical law, which easily leads to design redundancy or risk underestimation. It is urgent to consider the robustness design method of parameter uncertainty. And with the construction of collaborative control to achieve safety and cost balance. A phased robust design method and process of “quantifiable parameter optimization-non-quantifiable parameter iteration” was proposed. In the first stage, the variation coefficient of water level and live load was fixed. Based on the NSGA-II algorithm, the initial optimal support design parameters were obtained by considering the variation coefficient of quantifiable geotechnical mechanics indices and construction error. In the second stage, the variation coefficient of iterative water level and live load was analyzed by grey correlation analysis to obtain the optimal solution that meets the correlation requirements, and the implementation of construction

[作者简介] 楼恺俊,工程师,E-mail: 2654225235@qq.com

[通信作者] 袁 静,教授级高级工程师,E-mail: 2270442033@qq.com

[收稿日期] 2025-10-31

collaborative control measures was fed back to obtain the final optimal support design parameters. This method has been applied to the project of the Zhijiang Cultural Center in Zhejiang Province. After the optimization of the pile-anchor-bracing combined support system by the phased robust design method, the construction collaborative control measures, such as the joint control of water level and live load management by the waterproof curtain and precipitation, are implemented to meet the requirements of the optimal solution of non-quantifiable parameters, and the support design parameters that meet the safety, robustness, and economy are obtained.

Keywords: urban renewal; underground space; supports; pile-anchor-bracing; robustness design; grey relational analysis

0 引言

随着城市更新向地下空间深度拓展,深大基坑工程规模和数量逐年增加,新建工程受周边复杂环境的交互影响日益凸显。深大基坑支护体系及其设计方法至关重要。桩锚撑联合支护体系兼具桩撑体系控制变形能力较强及桩锚体系施工速度快、造价低、布置灵活等优点,在深大基坑中的应用愈加广泛^[1]。然而,该体系失效模式的失效概率受多重不确定性因素耦合影响,包括:岩土力学指标的变异性、地下水位、施工误差及活荷载等,由于可靠度设计方法基于确定的参数统计规律计算支护体系失效概率,导致其常陷入“过度保守”或“风险低估”的两难困境^[2],迫切需要鲁棒性设计与施工协同控制,来实现对周边建筑、管线敏感保护要求、复杂水位波动的控制及精细化施工管理要求。

近年来,国内外学者在支护体系鲁棒性分析方面取得显著进展,Juang 等^[3]将鲁棒性运用于岩土工程,提出考虑岩土力学指标不确定性的设计方法及理论,但其模型未考虑施工误差、水位的动态耦合效应。在水位控制方面,Wang 等^[4]提出设置止水帷幕降低地下水位波动影响的工程措施,但缺乏水位波动与工程措施的定量关联模型。综上所述,鲁棒性分析方法存在 2 个局限:多参数耦合优化维度高、计算复杂;水位、活荷载受施工影响波动大,对支护体系失效概率的非线性作用机制尚未明晰。

为此,本文提出“可量化参数优化-不可量化参数迭代”分阶段鲁棒性设计方法,首先将岩土力学指标/施工误差/恒荷载、水位/活荷载进行变异性分离处理,第 1 阶段固定水位与活荷载的变异系数,降低目标搜索维度,基于 NSGA-II 算法,考虑可量化的岩土力学指标、施工误差等的变异系数获得初始最优支护设计参数;第 2 阶段基于水位与止水帷幕、降水联合控制模型,通过灰色关联分析迭代水位与活荷载的变异系数,获得其满足关联要求的最优解,并反馈施工协同控制措施落实,最终以支护体

系失效模式的失效概率标准差均值为鲁棒性指标,获得安全-成本均衡的帕累托最优支护设计参数解,为工程决策提供量化依据。

该方法成功应用于浙江省之江文化中心深基坑工程,验证了方法的有效性,为地质条件和周边环境复杂的深大基坑工程安全与成本均衡提供了系统性解决策略。

1 桩锚撑联合支护体系的鲁棒性评价

1.1 桩锚撑联合支护体系

典型桩锚撑联合支护体系如图 1 所示。

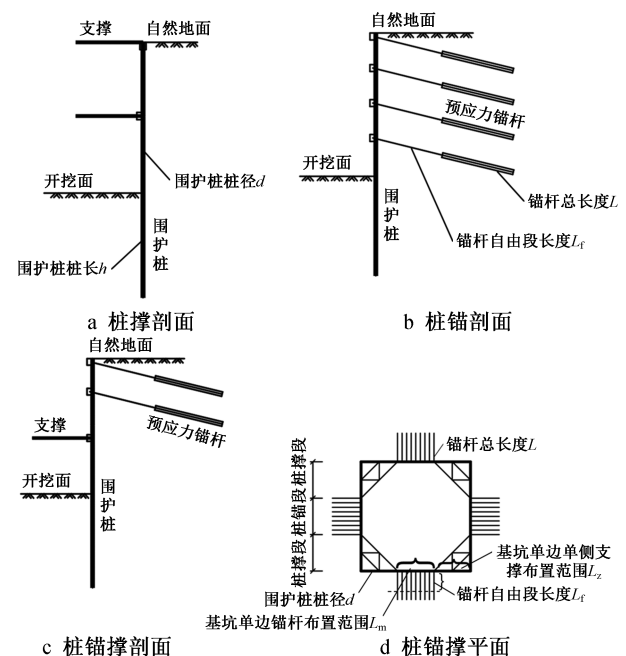


图 1 桩锚撑联合支护体系

Fig. 1 Pile-anchor-bracing support system

桩锚撑联合支护体系的围护设计旨在基于固定的几何尺寸(围护边长、开挖深度等),采用合理的支护设计参数以满足其失效模式的安全性。桩锚撑联合支护体系的失效模式主要包括坑底隆起、墙体倾覆、支护结构侧移超控及锚杆抗拔承载力不足^[2,5-6]。对于支护结构侧移超控失效模式,应考虑

平面空间效应,联合平、剖面计算结果,支护设计参数应包含基坑单边支撑平面布置范围 L_z (布置有支撑范围,包括桩撑剖面及桩锚撑剖面)。

实际工程锚杆(锚索)支护体系中,地下水位通过改变锚固区土体孔隙水压力分布,进而导致锚杆-土体界面摩擦系数下降,引发锚索承载力波动,并最终导致锚杆抗拔安全系数不足。考虑止水帷幕与降水联合控制可实现水位波动控制,本文支护设计参数包含止水帷幕道数 $T^{[4]}$ 。故本文桩锚撑联合支护体系的支护设计参数包括围护桩桩径 d ,围护桩桩长 h ,锚杆总长度 L ,锚杆自由段长度 L_f ,止水帷幕道数 T ,基坑单边支撑平面布置范围 L_z 。

1.2 鲁棒性设计方法

可靠度设计方法将不确定因素的参数设置为某个常值,并通过定义相对应的功能函数,采用失效概率以反映支护体系的安全性,从而优化支护设计参数组合。

通过功能函数计算相应失效概率 p_f :

$$p_f = p[g(x_i) < 0] = \int_D f(x) dx \quad (1)$$

式中: $f(x)$ 为概率密度函数; D 为失效域。

根据冯申铎等对桩锚撑支护体系的分析^[2],支护结构侧移超控及锚杆抗拔承载力不足失效模式可根据 DB33/T 1096—2014《建筑基坑工程技术规程》,依据基坑设计等级,获得相应安全性要求。各类失效模式均为二级延性破坏,其对应的可靠度指标为 3.2,失效概率为 0.000 69。

为充分考虑不确定因素对桩锚撑联合支护体系失效模式的影响,实现安全与成本均衡设计,有必要对其进行鲁棒性设计。鲁棒性设计主要研究失效模式对不确定因素的响应问题,通过调整支护设计参数达到降低失效模式对不确定参数变异敏感性的目的。

调整支护设计参数以减小不确定因素对失效模式的影响,需要量化衡量。本文采用失效模式的失效概率标准差均值来表征支护体系失效模式对

不确定因素的敏感性^[7]。

1.3 不确定因素分析

1)对于岩土力学指标,其不确定性表现为土层黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、重度 γ 的变异系数 COV 及其变异系数的标准差。其变异系数的标准差依据 3- σ 法获得^[3],计算公式如下:

$$\sigma_{cov} = \frac{H_{cov} - l_{cov}}{6} \quad (2)$$

式中: σ_{cov} 为变异系数标准差; H_{cov} 为变异系数上限; l_{cov} 为变异系数下限。

2)对于施工误差,为实际施工情况与支护设计的差异(包括支护设计参数的几何尺寸误差、位置偏移误差、施工质量误差),其变异系数 COV 经验值较低,根据前人经验^[7],变异系数 COV_{Cz} 平均值一般取 0.5%。

3)对于荷载,分为活荷载和恒荷载。对于恒荷载,其 COV 为常量。对于活荷载,在不同的实际工程中,受施工管理影响,其变异系数 COV_q 存在较大的不确定性,可通过活荷载管理限制变异系数波动。

4)对于水位,可用 COV_w 表征地下水水位波动对锚杆性能影响的离散程度, COV_w 取值范围为 1%~10%^[8-9]。另外止水帷幕道数与 COV_w 的最大值 COV_{wmax} 存在一定关系,可通过止水帷幕与降水联合控制的措施以控制地下水水位波动^[4]。

对桩锚撑联合支护体系鲁棒性设计中涉及到的各类不确定因素的影响及控制方式总结如表 1 所示。

2 分阶段鲁棒性设计方法

本文鲁棒性设计的目的是在保证支护体系安全性的前提下优化支护设计参数,并综合考虑鲁棒性和经济成本。基于失效概率标准差和经济成本两个目标,采用 NGA-II 多目标优化算法寻找桩锚撑联合支护体系的支护设计参数最优解。

考虑活荷载、水位的变异系数 COV 值存在随机性,且常规鲁棒性方法同时处理多类不确定因素时计算效率低,总计算量大^[3,7],本文根据不确定因素

表 1 不确定因素分类及控制方法

Table 1 Classification and control methods for uncertain factors

不确定因素类型	不确定性来源	量化方法	施工协同控制措施
岩土力学指标	变异系数 COV, 变异系数标准差	土工试验统计(3- σ 法)	—
施工误差	支护设计参数的几何尺寸误差、位置偏移误差、施工质量误差的变异系数 COV	固定常量	施工管理、工艺标准化
荷载	恒荷载变异系数 COV 活荷载变异系数 COV	固定常量 随机,工程动态监测	— 施工管理限制
水位	水位变异系数 COV	随机,工程动态监测	止水帷幕与降水联合控制

分类及控制方法,分为可量化参数(岩土力学指标、施工误差、恒荷载)及不可量化参数(活荷载、水位),提出分阶段鲁棒性设计方法,降低多目标搜索维度,减少总计算量,流程如图2所示。

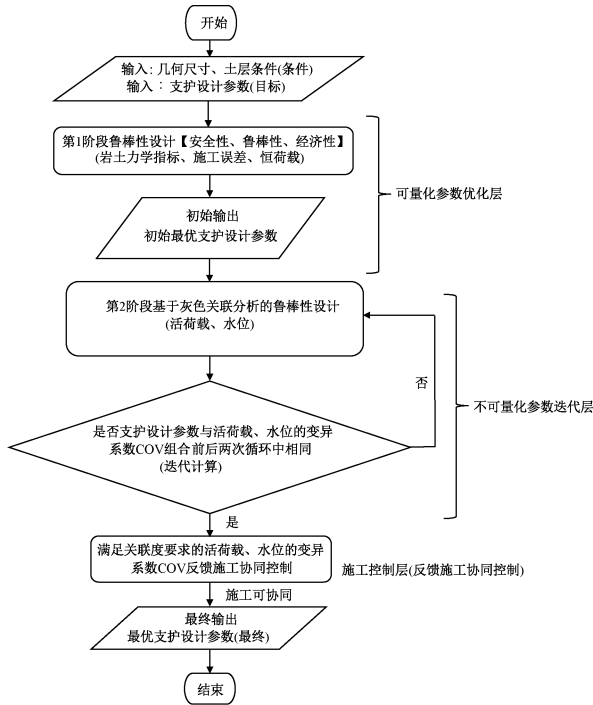


图2 分阶段鲁棒性设计流程

Fig. 2 Flowchart of phased robustness design

第1阶段通过NSGA-II生成初始Pareto前沿,作为第2阶段的输入参数;第2阶段基于灰色关联分析^[10]动态调整不可量化参数,形成闭环优化。第2阶段完整流程分为输入参数、核心迭代计算、输出参数,具体如下:输入参数包括输入初始最优支护设计参数、可量化参数、不可量化参数初始值。

核心迭代计算主要步骤如下:①构建参考序列;②进行灰色关联分析;③评价结果。

2.1 构建参考序列

1)将多目标函数 N 划分为 n 个单目标, n 为优化目标数(目标函数:各失效模式)。

2)对于单个目标,采用本文鲁棒性设计方案求 $f_0(k)$ 值($0 < k < n$)。

3)获得参考序列:

$$R_0 = \{f_0(1), f_0(2), \dots, f_0(k), \dots, f_0(n)\} \quad (3)$$

2.2 灰色关联分析

1)数据标准化处理

$$R_{ij} = (X_{ij} - X_i) / S_i \quad (4)$$

式中: R_{ij} 为标准化数据; X_{ij} 为原始数据; X_i 为算术平均值; S_i 为标准差。

2)计算比较序列与参考序列的绝对值

$$|R_0 - R_i| \quad (i=1, \dots, m, m \text{ 为比较序列的个数}) \quad (5)$$

3)计算相关系数及关联度

获得全局最小差值及最大差值:

$$\min_{i=1, k=1}^m \min_{i=1, k=1}^n |R_0(k) - R_i(k)| \text{ 和 } \max_{i=1, k=1}^m \max_{i=1, k=1}^n |R_0(k) - R_i(k)|$$

再对每个比较序列的相关系数进行计算:

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_{i, k} |R_0(k) - R_i(k)| + \rho \cdot \max_{i, k} |R_0(k) - R_i(k)|}{|R_0(k) - R_i(k)| + \rho \cdot \max_{i, k} |R_0(k) - R_i(k)|} \quad (6)$$

式中: ρ 为关联系数,本文取0.5。

计算关联度:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \zeta_i(k) \quad (7)$$

2.3 评价结果

1)通过关联度计算,获得水文参数关联度 r_w 、活荷载参数关联度 r_q 。

2)参数调整规则:若 $r_w < 0.9$,增加止水帷幕道数 T ,更新 COV_w , $COV_w < COV_{wmax}$;若 $r_q < 0.9$,限制活荷载波动范围,降低 COV_q 至目标值。

3)重复参数调整,直至满足 $r_w \geq 0.9$ 且 $r_q \geq 0.9$ 。

输出参数包括输出水位、活荷载施工协同控制指令及不可量化参数最优解,其中水位、活荷载可通过止水帷幕与降水联合控制、活荷载监测频率要求以达到指令要求。

3 工程案例分析

3.1 工程概况

浙江省之江文化中心基坑总面积约为8.8万 m^2 ,周长约1460m,基坑普遍开挖深度约14.50m。项目工期紧张,须在短时间内完成土方外运130万 m^3 ,为同时期杭州市土方量最大的基坑工程。场地四周均存在既有高层建筑,且需考虑旁侧地铁设施施工影响,周边环境复杂。基坑开挖深度范围内主要为黏质粉土及淤泥质粉质黏土。土层条件不利于基坑变形控制且坑外地下水位控制难度大,临钱塘江边,黏质粉土层渗透系数高且潜水位易发生波动,水文条件不确定性高。

为应对上述难点,项目采用桩锚撑联合支护体系,并通过分阶段鲁棒性设计方法优化支护设计参数。选取典型工程区域进行具体分析,该区域围护采用桩锚撑联合支护体系,局部区域平面几何尺寸约为110m \times 50m,如图3所示。土层参数如表2所示。

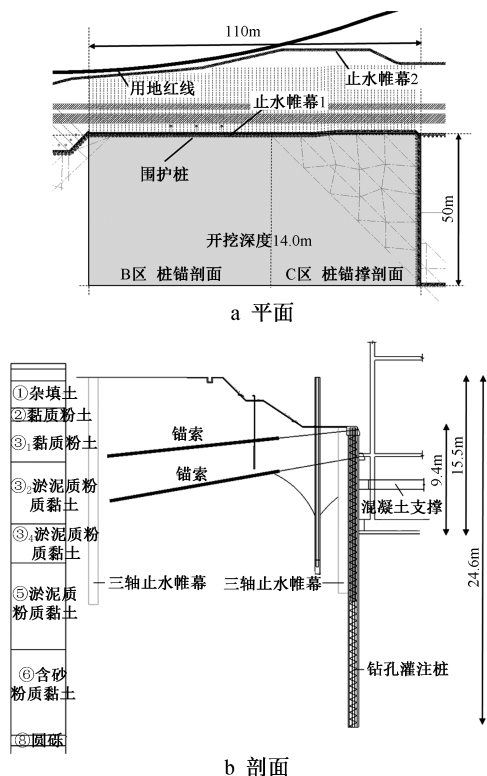


图 3 典型桩锚撑示意

Fig. 3 Typical pile-anchor-bracing system

表 2 土层参数

Table 2 Parameters of soil layer

土层名称	厚度/ m	重度 γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
① 杂填土	2.30	18.0	12.0	10.0
② 黏质粉土	2.80	17.6	7.0	22.0
③ 黏质粉土	0.90	18.8	6.0	23.5
③ ₂ 淤泥质粉质黏土	4.20	18.7	9.0	22.0
③ ₄ 淤泥质粉质黏土	3.50	18.3	10.0	16.0
⑤ 淤泥质粉质黏土	5.40	18.1	16.0	10.0
⑥ 含砂粉质黏土	9.40	17.5	15.0	16.0
⑧ 圆砾	2.90	18.6	23.0	30.0

3.2 参数取值

基于本文对各不确定因素的确定方法,本工程的不确定因素初始取值如表 3 所示,其中岩土力学指标根据 3- σ 法确定。

表 3 不确定参数取值

Table 3 Uncertain parameter values

不确定参数类型	不确定参数	分布类型	均值	变异系数取值范围/%	变异系数均值/%
施工误差	支护设计参数的几何尺寸误差、位置偏移误差、施工质量误差	正态分布	1.0	0.05	0.05
活荷载	q_k (初始)	正态分布	20.0	± 5.0	5.0
水位	δK_{smw} (初始)	正态分布	1.0	± 5.0	5.0

根据失效模式的安全性要求,获得桩撑、桩锚、桩锚撑剖面支护形式的设计参数取值范围,如表 4 所示。

表 4 支护设计参数组合

Table 4 Combination of geometric design parameters

几何设计参数	范围/m	
桩撑剖面	d	{1, 1.1, 1.2}
	h	{28, 28.5, 29, 29.5, 30}
桩锚剖面	d	{1.1, 1.2, 1.3}
	h	{28, 28.5, 29, 29.5, 30}
桩锚撑剖面	L, L_f	{[22,7], [24,7], [26,7]}
	d	{1, 1.1, 1.2, 1.3}
桩锚撑剖面	h	{28, 28.5, 29, 29.5, 30}
	L, L_f	{[22,7], [24,7], [26,7]}

考虑平面支护设计参数,桩锚撑联合支护体系 L_z 取值组合包括 {0, 10, 20, 30, 40, 50}。

对于围护成本,根据工程实际情况,钻孔灌注桩、立柱桩单价取 2 000 元/ m^3 ;止水三轴水泥搅拌桩单价取 350 元/ m^3 ;支撑、压顶梁、腰梁单价取 1 200 元/ m^3 ;锚索单价取 150 元/ m 。

3.3 鲁棒性设计结果

首先采用本文提出的鲁棒性设计方法,对桩锚撑联合支护体系中可能使用的桩撑剖面、桩锚剖面、桩锚撑剖面进行第 1 阶段鲁棒性设计,满足各失效概率安全要求的所有可行设计(桩撑剖面 15 组,桩锚剖面 45 组,桩锚撑剖面 60 组,共 120 组;其中桩撑剖面 4 组,桩锚剖面 4 组,桩锚撑剖面 6 组,共 14 组满足要求)进行优化。利用 Pareto 前沿边界^[3]找到最佳支护设计参数组合,得到桩锚撑联合支护体系初始最优支护设计参数组合。假定 L_z 为 50m, T 为 1,初始最优几何设计参数组合如图 4 所示。

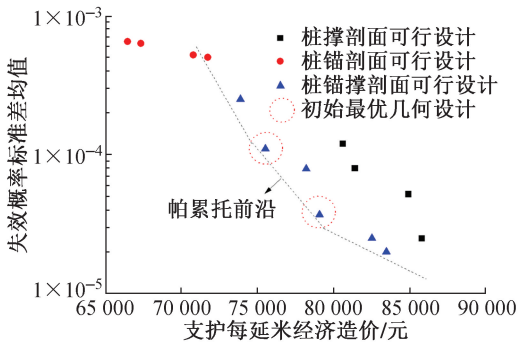


图 4 典型桩锚撑联合支护体系鲁棒性指标与经济指标关系

Fig. 4 Relationship between robustness indicators and economic metrics for typical pile-anchor-bracing support systems

如图 4 所示,在假定的支撑布置范围及止水帷幕道数下,桩锚剖面各可行设计虽每延米经济成本

较低,但其鲁棒性指标也较差;桩撑剖面相较于桩锚撑剖面在相同鲁棒性指标下,其经济成本相对较高。其中桩锚撑剖面中的可行设计组合 $[d=1.1\text{m}; h=30\text{m}; (L, L_f) = (26\text{m}, 7\text{m})]$ 及 $[d=1.2\text{m}; h=30\text{m}; (L, L_f) = (26\text{m}, 7\text{m})]$ 为 Pareto 前沿最优节点,满足鲁棒性与经济成本之间的最优平衡,是该假定下的最优初始支护设计参数组合。

另外当止水帷幕道数 T 为2时,同理得到桩撑剖面中的可行设计组合 $(d=1.1\text{m}; h=30\text{m})$ 、桩锚撑剖面中的可行设计组合 $[d=1.2\text{m}; h=30\text{m}; (L, L_f) = (26\text{m}, 7\text{m})]$ 为 Pareto 前沿最优节点,满足鲁棒性与经济成本之间的最优平衡。

根据本文每延米经济成本计算,考虑单侧支撑布置范围 L_z 不同取值进行分析,结果如图5所示。本文工程实例中可布置最大 L_z 为50m,故角部位置50m范围内宜采用桩锚撑剖面/桩撑剖面,其余角撑无法覆盖区域可采用桩锚剖面。

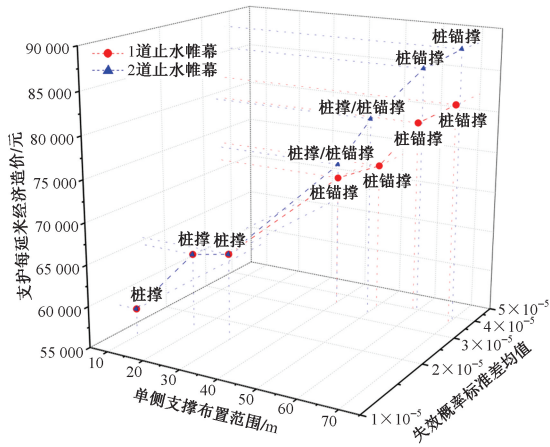


图5 单侧支撑布置范围与桩锚撑联合支护体系鲁棒性设计关系

Fig. 5 Relationship between unilateral bracing layout scope and robustness design of pile-anchor-bracing support systems

基于第1阶段鲁棒性设计获得初始最优支护设计参数组合多解,后采用第2阶段鲁棒性设计方法进行进一步分析。

根据表4取初始活荷载、水位COV值,对应的比较序列与参考序列的最大关联度为 $(r_q = 0.886, r_w = 0.812)$ 。根据算法1对活荷载、水位COV值进行迭代。根据流程图获得最终最优支护设计参数。

对于本工程实例,最终获得满足阈值要求的荷载参数、水文参数的关联度为 $(r_q = 0.912, r_w = 0.956)$;对应的最优荷载参数、水文参数的COV值为 $(2.0, 2.5)$ 。

根据最优水位、活荷载COV值,反馈施工协同

控制指令:本工程采用2道止水帷幕并结合降水联合控制以减少水位波动^[4],现场实时监控浆液配合比,施工时增加2次复搅次数及实时控制下沉/提升速度(下沉速度0.5~1.0m/min、提升速度0.8~1.2m/min)。本工程对基坑四周行走车荷载进行实时自动化影像监测,可满足设计要求。

最终最优支护设计参数最优组合为: $d=1.2\text{m}, h=30\text{m}, (L, L_f) = (26\text{m}, 7\text{m}); L_z=50\text{m}$ 。

现场桩锚撑区域施工协同控制措施后航拍效果如图6所示。

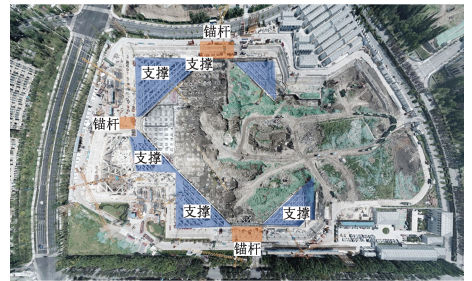


图6 现场施工协同航拍图

Fig. 6 Construction coordination aerial photo

根据以上设计方案及施工协同控制,最终实际桩锚撑区域围护变形约40mm,对周边既有建筑未造成明显影响,有效推进了项目施工进度。典型桩锚撑区域基坑围护变形数据如图7所示。

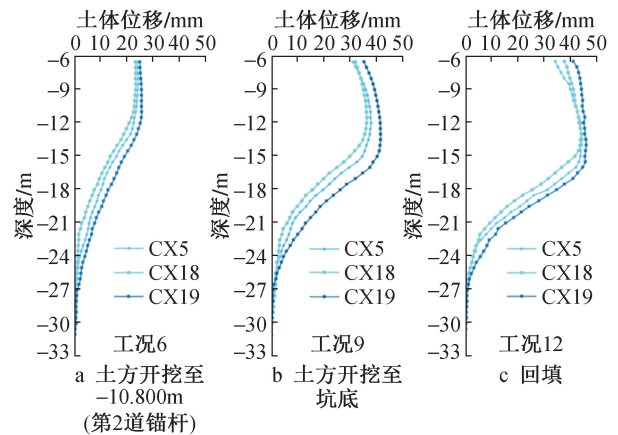


图7 典型桩锚撑区域基坑围护变形数据

Fig. 7 The deformation monitoring data of foundation excavation enclosure in the pile-anchor-bracing composite support zones

可靠度设计方法由于无法准确定量考虑不确定参数对支护体系失效模式的影响,本工程设计可能因此保守采用桩撑支护体系设计,整体造价明显偏高,且无法满足工期需求;或低估水位波动对支护体系安全影响,可能出现安全风险。

本工程实例采用分阶段鲁棒性设计方法结合

表5 鲁棒性设计方法对比

Table 5 Comparative study of robustness design methods

鲁棒性设计方法	NSGA-II 种群规模	迭代次数/ 次	总计算量	鲁棒性 (失效概率标准差均值)	每延米造价/元
常规鲁棒性设计方法 [Gong等(2014)]	200	500	1.0×10^5	6.50×10^{-5}	79 750
本文分阶段鲁棒性 设计方法	第1阶段 100 第2阶段 50	第1阶段 200 第2阶段 100	2.5×10^4	3.20×10^{-5}	72 500

施工协同控制措施,整体桩锚撑支护体系具有更高的鲁棒性及经济性。该方法较常规鲁棒性设计方法具有更优的鲁棒性及经济性,以本工程实例为例,本文鲁棒性设计方法与常规鲁棒性设计方法对比如表5所示,计算量降低75%,失效概率标准差均值降低50%,围护造价节省约10%,这主要源于不确定因素解耦后减少了冗余设计。

4 结语

1)提出了“可量化参数优化-不可量化参数迭代”分阶段鲁棒性设计方法及流程,为桩锚撑联合支护体系在城市更新中的应用提供了系统性解决策略,以应对周边建筑、管线敏感保护要求、复杂水位波动的控制及精细化施工管理要求。通过分阶段鲁棒性设计降低计算维度,计算量较常规鲁棒性设计方法降低75%,鲁棒性提升50%,围护造价节省约10%。

2)对于桩锚撑联合支护体系的鲁棒性设计,单侧支撑布置范围 L_z 受工程土层情况、围护造价等影响,当 L_z 大于某一平面布置范围时,桩锚撑剖面具有更优鲁棒性;小于某一平面布置范围时,桩撑剖面具有更优鲁棒性。

3)对于桩锚撑联合支护体系的分阶段鲁棒性设计,通过灰色关联分析迭代水位与活荷载的变异系数,获得其满足关联要求的最优解,并应反馈施工协同控制措施落实,以获得安全-成本均衡的帕累托最优支护设计参数解,为工程决策提供量化依据。

4)所提出的设计方法及流程在其他既有地下工程改造中使用尚需要进一步研究。止水帷幕施工质量及道数宜根据不同工法差异化分析并结合降水方法细化,活荷载管理措施需结合施工规范细化操作指南。

参考文献:

[1] 李静,李明洋. 内撑式与锚拉式排桩相结合的深基坑支护技术[J]. 施工技术,2012,41(7):31-33.
LI J, LI M Y. Deep foundation excavation support technology of internal bracing row piles combined with anchor row piles[J]. Construction technology, 2012, 41(7): 31-33.

[2] 冯申铨,姜晓光,杨志银,等. “桩(墙)-撑-锚”联合支护技术的工程应用与变形协调探讨[J]. 岩土工程学报,2012,34(S1):456-460.

FENG S D, JIANG X G, YANG Z Y, et al. Application and deformation compatibility of combined support of pile (wall)-bracing-anchor[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2012, 34(S1): 456-460.

[3] JUANG C H, LIU Z F, ATAMTURKTUR H S. Reliability-based robust geotechnical design of retaining walls [C]//San Diego: American Society of Civil Engineers, 2013.

[4] WANG X W, YANG T L, XU Y S, et al. Evaluation of optimized depth of waterproof curtain to mitigate negative impacts during dewatering[J]. Journal of hydrology, 2019, 577: 123969.

[5] 邵权,徐学连,徐松,等. 深基坑桩锚撑组合支护结构变形影响因素的三维数值分析[J]. 岩土工程学报,2014,36(S2): 87-91.

SHAO Q, XU X L, XU S, et al. Three-dimensional numerical analysis of factors affecting deformation of pile-anchor-support composite retaining structures for deep foundation pits [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2014, 36(S2): 87-91.

[6] 郑刚,王若展,程雪松,等. 多道锚杆基坑局部锚杆失效引发连续破坏的机理与控制[J]. 岩土工程学报,2023,45(3): 468-477.

ZHENG G, WANG R Z, CHENG X S, et al. Mechanism and control of progressive collapse caused by failure of local anchors in multiple-level anchored pile excavation[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2023, 45(3): 468-477.

[7] GONG W P, KHOSHNEVISAN S, JUANG C H. Gradient-based design robustness measure for robust geotechnical design [J]. Canadian geotechnical journal, 2014, 51(11): 1331-1342.

[8] 严薇,曾友谊,王维说. 深基坑桩锚支护结构变形和内力分析方法探讨[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2008,31(3): 344-348.

YAN W, ZENG Y Y, WANG W S. Analytic method discussion on deformation and inner force of the pile-anchor structure of deep excavation under construction [J]. Journal of Chongqing University (natural science edition), 2008, 31(3): 344-348.

[9] 杜策,周振,张力,等. 软土地区超深基坑多层承压水控制技术[J]. 施工技术(中英文),2024,53(23): 29-35.

DU C, ZHOU Z, ZHANG L, et al. Control technology of multi-layer confined water in ultra-deep excavation in soft soil area[J]. Construction technology, 2024, 53(23): 29-35.

[10] 陈宏俊. 基于改进的TOPSIS法和灰色关联分析研究盾构管片破损程度[J]. 施工技术(中英文),2022,51(7): 62-68.

CHEN H J. Evaluation of segment damage in shield tunnel based on improved TOPSIS and grey correlation analysis [J]. Construction technology, 2022, 51(7): 62-68.