

空腔结构上部山体园林景观营建技术研究

A Study on the Landscape Construction Techniques for Mountainous Gardens Atop Cavernous Structures

宫 宾
GONG Bin

(上海申地生态集团有限公司, 上海 200032)
(Shanghai Shendi Ecological Group Co., Ltd., Shanghai, China, 200032)

文章编号: 1000-0283(2025)06-0089-09
DOI: 10. 12193 / j. laing. 2025. 06. 0089. 010
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2025-03-17
修回日期: 2025-04-17

摘 要

在城市核心区域, 建设一座仿自然的人工山林, 对于城市绿地系统的规划具有重要意义。以上海世博文化公园双子山项目为案例, 在传统的土石堆山技法的研究基础上, 深入总结空腔结构上部山体园林景观建造的技术体系。聚焦于解决空腔建筑结构上部荷载控制、山体土壤稳固、树木有效生长等关键问题, 通过配生土研发、交通组织策划、土方回填技术、固土措施、树木固定系统以及排水系统设计等多方面的技术创新, 提出系统性的解决方案。不仅验证了城市山林景观营建的可行性, 还通过长期监测和实证分析, 进一步优化关键技术参数, 为类似项目的设计和实施了科学依据和技术支持, 对城市生态修复和景观优化具有一定的实践指导意义。

关键词

空腔结构; 山体; 园林景观; 关键技术; 双子山

Abstract

Constructing a natural artificial forest in the core area of the city holds substantial significance for planning urban green space systems. Using the Shuangzi Mountain project at the Shanghai World Expo Cultural Park as a case study, the study thoroughly examines traditional techniques for soil and rock mountain stacking. It offers a comprehensive summary of the technical system for creating mountainous landscape over cavity structures. This study emphasizes addressing critical issues such as load control on these cavity structures, soil stability in mountainous areas, and the facilitation of effective tree growth. A systematic solution has been proposed through technological advancements in various domains, including soil research and development, traffic organization planning, earthwork backfilling technology, soil stabilization measures, tree fixation systems, and drainage system design. Also, this study verifies the feasibility of constructing urban forest landscape but also optimizes essential technical parameters through extensive monitoring and empirical analysis. It provides a scientific foundation and technical support for designing and implementing similar projects, serving as a valuable reference for urban ecological restoration and landscape optimization.

Keywords

cavity structure; mountain; landscape; key technology; Shuangzi Mountain

宫 宾

1981年生 / 男 / 山东泰安人 / 硕士 / 高级工程师 / 研究方向为园林景观工程建设及管理

中国人工造山的历史非常久远, 从历史典籍和文献史料研究可知, 最早可以追溯到禹治水的时代^[1]。根据现代规范的定义, 人造山是指在原地面上, 按照一定的技术要求用填料填筑或结构物构筑, 填料或结构物的表层主要用种植土、植被或其他天然材料覆盖, 山体高度高于原地面平均高程4 m及

以上, 形成具有生态、景观、休闲活动等功能的仿自然山体^[2]。

明代计成在《园冶》中, 开篇就提出“园地惟山林最胜”^[3], 可见自然山林景观在传统园林中的重要地位。在此基础上, 地形对于园林设计的重要性也不言而喻: “园林空间的收放变化、地形起伏, 似塞犹通的空间



图1 双子山平面图
Fig. 1 Shuangzi Mountain plan

图2 双子山实景
Fig. 2 Shuangzi Mountain scene

效应根本上得益于山水地形的塑造。”^[4-5]目前,大众较为熟知的传统园林中的自然山林,包括大体量的如颐和园的万寿山^[6]、北海公园的琼华岛^[7],以及小尺度的如苏州古典园林中的掇山叠石^[8-9]。

工业化以来,在城市公园绿地系统中,山体公园和绿地景观的设计和应用涌现出许多令人瞩目的优秀案例,比如北京奥林匹克森林公园^[10]、上海长风公园铁臂山、天津南翠屏公园^[11]、上海辰山植物园^[12]等。北京奥林匹克森林公园南园,以海拔高度86.5 m的主山仰山为主体,在西南、东南方向分别规划了60.2 m的次峰和一系列湖中小岛,形成

连绵不绝的山系,与带状溪流营造出传统堆山理水的意境。天津南翠屏公园,原址为建筑垃圾填埋场,历时4年时间,消纳了现场大量工程废土和建筑垃圾,塑造出天津中心城区最高的山峰。上海辰山植物园,采用排水板、土工格栅结合水泥搅拌桩的填筑方案,成功堆载出总长4.5 km、最宽逾200 m且最高16 m的绿环。在国外也有成功的案例,比如新加坡滨海湾花园^[13],实现了自然景观与建筑的完美融合;美国纽约高线公园^[14],成为城市更新的代表性范例。近些年,学者们对于山体公园的研究,集中在宏观效益研究^[15]、规划设计理论^[16]、应用技术研究^[17]、

山体生态修复研究^[18]等方面。

随着城市化进程的不断推进,受限于土地资源的供应、地域文化的多样性、已建成的基础设施和现有场地条件等因素,传统土石堆山的营建手法面临较多挑战,主要是山体分层填筑、分层压实工艺对于土质和工艺要求很高,施工和检测周期较长,而且自然堆筑的土山在有限场地内堆山高度受到限制,这一点在城市建成区的核心地带尤为明显。为了应对这些挑战,需要探索创新的设计形式,采用新型的营建手法,运用新型的建筑材料,并且不断升级和改进造山的理论与技术。上海世博文化公园双子山位于黄浦江边的核心地段,是在原有世博会场地上再造一片山林,为市民提供一个更加宜居和美好的生活环境,也为在城市核心区建设人工山林提供了实践案例。

1 项目概述

上海世博文化公园双子山项目,位于上海市浦东新区,东至长清北路,西至济明路,南至通耀路,北与世博文化公园北区相连。建设用地面积约30 hm²,总绿化面积约27 hm²,总建筑面积约8.2 hm²,水体面积约1.9 hm²,结构面积近30 hm²。山体空腔内部满足多种功能,设置停车库、隧道管理用房、35 kv开关站及用户站、山体配套服务建筑、空腔展览区、山体配套设备及其他用房等。

双子山主要由东、西两座山峰组成,东侧主峰高度48 m,西侧次峰高度37 m,余脉高程为8~24 m,山体东西长约830 m,南北长约210 m,形成绵延起伏的山脉。景观覆土量近50万m³,乔灌木种植超1.1万株,其中山体种植超7 000株。主要景点包括主峰、次峰、溪流瀑布、中心湖、星光草坪、儿童乐园、静谧林等(图1,图2)。

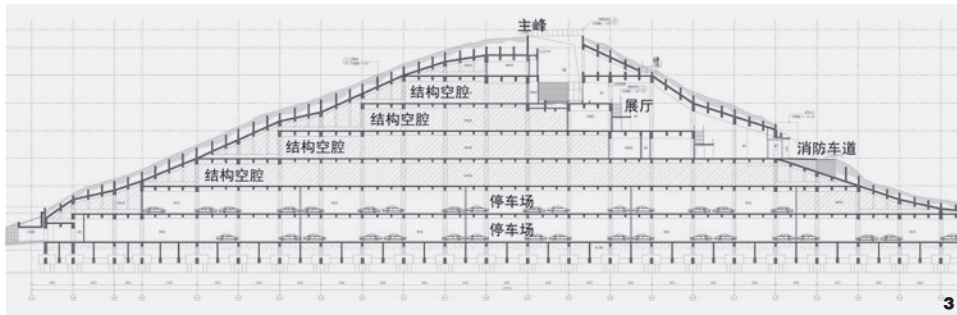


图3 双子山建筑剖面图
Fig. 3 Architectural section of Shuangzi Mountain

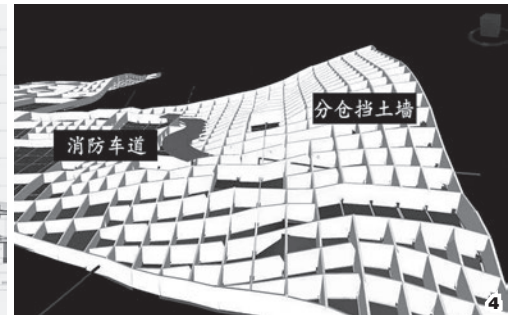


图4 分仓挡土墙BIM模型图
Fig. 4 BIM model diagram of compartment retaining wall

2 项目难点

2.1 荷载控制

双子山主体为空腔建筑结构，结构面积近30 hm²，内部设置停车库、办公附属用房、展厅、开关站及用户站等附属设施(图3)。在主体结构上部建设的景观工程，主要包括绿化种植、溪流瀑布、景石、园路铺装、灌溉系统、消防雨污水、园林小品和路灯照明等工作内容。按照建筑结构荷载的控制要求，恒载标准值为65 kN/m²，活载标准值为12 kN/m²^[19]。

在上部景观施工阶段，恒载控制值需要扣除表皮结构底板、表皮柱梁体系、溪流瀑布底板、分仓挡墙自重等部分，附加恒载不超过45 kN/m²。也就是说种植土、树木、景石、溪流、管材、钢材、木材等景观施工范围内的所有荷载不超过45 kN/m²。同时，山体表皮结构及消防车道的均布荷载要求为35.5 kN/m²，超过限值的车辆禁止通行。

2.2 交通组织

双子山山体表皮混凝土结构为斜屋面和分仓挡土墙的形式，根据不同的坡度分别设置不同间距的柱网体系，表皮板厚度约30 cm，分仓挡土墙高度约2.2 m，局部陡坡采用跌落式平板方式(图4)。在分仓挡土墙的内部，

进行滤水层和回填种植土的工作，确保完成后的土面标高比挡土墙高出大约50 cm。这种设计方式的分仓挡土墙，能够有效地保持土体的稳定性，防止土体发生整体滑移现象。但是在施工过程中，如何顺利地跨越每一个仓室，完成如此大规模的土方回填工作，是一个棘手的难题。这需要进行合理规划的交通组织，并建立一个高效的垂直运输体系，以确保施工的顺利进行。

2.3 预防水土流失

双子山的总绿化面积约为27 hm²，这片山地呈现出起伏变化、连绵不断的地形。尽管通过设置分仓挡土墙，已经成功地固定了约2.2 m厚度的回填土，但是对于表层50 cm左右的种植土，如何在广阔的有效区域内减少水土流失仍然是一个难题。通过对山体的竖向坡度进行详细分析，可以看出除了山脚处的坡度相对平缓，大约为14°(约1:4)，其他部分如山腰、山峰和山谷的坡度则各不相同。双子山并不是简单的堆土造型，而是为了塑造出更加自然的山形，预先运用三维激光扫描技术进行模拟，使得山形随着表皮结构的变化而呈现出不规则的转变^[20]。在一些极陡峭的地方，坡度甚至接近40°

(约1:1.25)，这种情况在主峰、次峰以及园路周边尤为明显。因此，需要根据不同的坡度采取针对性的措施，结合设计优化和施工调整，以确保地表的水土流失能够被控制在可接受的范围内。

2.4 树木固定

在新植树木的初期阶段，尤其是在移植后的头几年，由于其根系尚未完全恢复并重新生长，这些树木无法有效地固结土壤以保持自身稳定。因此，在这一关键时期，必须借助支撑装置来确保树体的稳定性和牢固性。上海作为一个临海的城市，每年平均会遭遇2~3次对城市造成显著影响的台风^[21]。每当台风正面登陆上海，都会对城市道路和公园绿地中的树木带来相当大的冲击和影响。

位于黄浦江南岸的双子山，拥有两座山峰，由于其相对较高的海拔，使得该地区在局部范围内受到风力的影响更为显著。特别是东侧的坡向，常年受到夏季风的吹拂，西北向的坡面则主要受到冬季风的影响。在双子山山体区域，种植了大约7 000株乔木，如何通过有效的固定方式，确保这些树木在台风、暴雨等恶劣天气条件下能够安全平稳地度过，避免对城市环境和公众舆论造成负面

影响，是一个重要的课题。

2.5 山体排水

双子山的设计理念是在建筑的空腔结构之上覆盖土壤，进而进行绿化种植，可以形象地将其视为一个庞大的屋顶花园。在这个设计中，土壤被回填到表层的钢筋混凝土板上，并且分布在无数个分仓挡土墙之间。每一个由分仓挡土墙围合而成的区域，都可以被看作是一个独立的花盆。这些花盆般的空间被山体的混凝土表皮所包围，而这个表皮结构呈现出不规则的异形形态，由分仓挡土墙所围合的区域数量多达数千个。面对这样一个庞大的工程，如何合理规划排水系统，包括永久排水和临时排水，成为了一个极具挑战性的难题。主要需要解决的问题包括如何及时排出土壤中下渗的水分和地表径流，以及如何有效地收集和利用雨水等。

3 营建技术体系

通过对于项目难点的梳理分析，能够直观地发现建造过程中所要应对的挑战，建立系统性的营建技术体系（表1）。这个营建体系涉及土木工程、生态学、景观设计、植物学等多个学科领域，是多学科交叉研究的

场景应用。

3.1 核心目标

空腔结构上部人工山林营建技术体系，聚焦于实现三个核心目标。第一个核心目标为严格控制荷载，确保建筑结构安全。双子山空腔结构承载着多种功能，其顶部的荷载承受能力有严格限制。必须通过精确的荷载计算和合理的荷载分布设计，确保在人工山林建设过程中，建筑结构能够承受新增荷载而不发生结构变形或破坏。这不仅涉及土方回填的重量控制，还包括植被、土壤以及其他景观设施的荷载优化，以实现建筑结构与景观建设的完美融合。

第二个核心目标为控制水土流失，确保山体土壤稳固。水土流失是人工山林建设过程中需要重点防范的问题。在空腔结构上部，一旦发生水土流失，不仅会影响山体景观的美观，还可能导致土壤流失严重，甚至危及建筑结构的稳定性，因此采取有效的固土措施是确保山体土壤稳固的关键。固土的核心因素是植物，利用植物根系的固土作用，增强土壤的抗侵蚀能力。同时，结合工程措施和土壤的持续改良，进一步降低水土流失的风险，实现山体土壤的长期稳固。

第三个核心目标为持续改善土质，有效固定和排水，确保植物生长效果。植物的生长是人工山林景观的核心，而良好的土壤条件是植物生长的基础。在空腔结构上部，由于空间限制和环境条件的特殊性，需要采用轻质土壤，并持续改良。同时，良好的排水系统可以有效排除多余的水分，防止土壤积水。通过配生土研发、植被选择和排水系统设计，强调景观营建的生态可持续性，为城市生态修复和环境改善提供技术支持。

3.2 关键技术

为实现第一个荷载控制的核心目标，需要通过实验和实践，研发出满足植物生长需求且符合结构荷载要求的配生土配方，并建立标准化生产流程。为控制施工过程中的集中荷载，需要结合山体地形和结构特点，规划临时便道体系和吊装点位，解决大规模土石方运输和材料吊装的问题。

为实现第二个土体稳定的核心目标，需要根据山体坡度和地形起伏，设计分层回填、加筋处理等技术，确保土体稳定性和施工效率。同时需要运用GIS分析山体坡度，针对不同坡度区域采用不同的防护措施，并结合植被覆盖，有效控制水土流失。

为实现第三个植物长期效果的核心目标，需要针对沿海城市台风等恶劣天气条件，创新性地改进树木支撑固定方式，确保树木稳定。同时优化山体排水技术，结合自然地形和建筑结构，设计配套排水系统，实现雨水收集、截污和循环利用。

4 关键技术研究

4.1 配生土生产技术

4.1.1 配生土研发

配生土是指人为干预制成并满足植物健

表1 营建技术体系构建
Tab. 1 Construction technology system

序号 No.	核心目标 Core objective	关键技术 Key technology
1	严格控制荷载，确保结构安全	配生土研发和生产
		交通组织策划
		土方回填技术
2	控制水土流失，确保山体土壤稳固	山体固土技术
		山体排水技术
		配生土研发和生产
3	持续改善土质，有效固定和排水，确保植物生长效果	树木固定技术
		山体排水技术

康快速生长条件的土壤^[22]。双子山项目适用的配生土，一方面，在满足园林树木生长要求的同时，要将土壤的容重控制在合理范围内，满足山体结构荷载的要求；另一方面，在保证根系合理水分需求的同时，要适当提高土壤的渗透性，兼顾山体排水的需要。

为解决土壤容重的问题，主要通过筛选配生土的构成材料，包括原土、砂质材料、有机改良材料等，分析各种材料的理化性质，提出初步的配比方案。鉴于项目场地原为世博会场馆旧址，开挖出的原土一部分用于建筑基础回填消纳，一部分用于种植土层下方的素土层使用。结合在上海国际旅游度假区项目和世博文化公园北区的实践应用，展开实验，最终配方根据实验结果确定，基本按照60%原土+30%砂质材料+10%有机改良材料的配比。原土材料选用农田土，要求质地均匀，pH值<8.5，电导率<0.5 mS/cm，有机质含量>5 g/kg。通过砂质材料的添加，提高土壤渗透性和通气性；通过有机改良材料的添加，提高土壤有机质含量。在土壤检测指标中，增加对于入渗率的要求，入渗率>5 mm/h。具体种植土控制指标如表2所示。

为解决土壤有效排水的问题，在原种植土层下方增加一层素土层，厚度约50 cm，减少原种植土的用量。素土采用配生土生产过程中筛分出的大粒径原土，既不会影响根系生长，又是良好的排水层，对于素土层的入渗率指标要求为>10 mm/h。同时根据植物种植区域不同，适当调整种植土标准，以适应不同植物对土壤的需求。

4.1.2 配生土生产

根据最终的配生土改良配方，采购各种原材料，进行正式生产。对于原土的土源

地，因为位置比较随机、分散，无法固定在同一区域。可供取土的面积也大小不同，各个土源地土壤的状况存在差异性。因此对于每个土源地，在开挖取土前，都要进行取样检测。每个土源地为一个批次，检测合格后，才可以作为土源地。对于砂质材料，每1 500 m³为一个批次，进场前进行检测。对于有机改良材料，必须是经过堆制发酵腐熟的产品，保证疏松、无结块、无异臭味、无明显可视杂物等，每1 000 m³为一个批次，进场前进行检测。

对于质地黏重、颗粒较大的原土，需要使用稳定土拌合机进行再次破碎，以便于控制好原土的粒径。待稳定土拌合机进行两次粉碎后，挖掘机进行收集归堆，归堆后原土立即使用自卸车运至生产车间。成品土生产由流水化搅拌设备完成，通过各料仓皮带机传送至主皮带机，经过主皮带机传送至3 m长的连续式搅拌笼，由主皮带机传送至成品储料仓，最后由自卸式卡车驳运至待检测区域。

4.2 交通组织策划

根据山形走向，在结构荷载要求和机械参数的指导下，结合现有的永久道路，规划形成施工临时便道体系。临时便道选线的纵坡要求，应满足《汽车起重机》(JB/T9738-2015)的要求：起重机的爬坡能力不应小于20%(即11.3°)。结合现场实际已完成的便道情况，将便道的纵坡坡度控制在11.3°(1:5)之内，优先选择坡度在8.5°(1:6.7)以内的区域。横坡设计以土壤自然安息角为参照，利用建筑结构模型，优先选择坡度<14°(1:4)的区域，其次选取坡度<23.5°(1:2.3)的区域。对于必须穿越坡度>23.5°的路段，对表层土体进行压实处理，减少放坡的坡度。

在现场已有施工通道、已有消防车道上，停靠100 t、50 t、25 t汽车起重机，进行吊装作业。在铺路钢板便道上，主要停靠25 t汽车起重机和土方自卸载重车。以1.6 t为吊装的载重量，选用汽车起重机的相关参数(表3)。在确保覆盖施工区域的前提下，满

表2 种植土控制指标
Tab. 2 Control indicators for planting soil

序号 No.	指标 Index	要求 Requirement
1	pH 值	< 8.3
2	电导率 / (mS/cm)	0.15 ~ 0.8
3	有机质含量 / (g/kg)	> 20
4	质地	壤土 (粘粒含量 < 20%)
5	入渗率 / (mm/h)	> 5
6	外观	不含有明显的大块土壤杂物

表3 汽车起重机技术参数表
Tab. 3 Technical parameter table of automobile crane

主要参数 Parameter	100 t	50 t	25 t
起重 1.6t 时最大工作半径 /m	48	26	18
起重 1.6t 时最大主臂仰角 /°	50.2	42	33.3



图5 土方回填示意
Fig. 5 Diagram of earthwork backfilling

图6 土方回填鸟瞰
Fig. 6 Aerial view of earthwork backfilling

足最大工作半径要求，大致确定机械停靠点位。根据支撑脚全面打开后的尺寸，确定不同规格汽车起重机撑脚的占地面积和范围大小(表4)。

根据以上吊装半径和吊装场地的规划原则，结合现场实际情况，确定施工便道上吊装点位分布。同时，利用现场搭设的塔吊辅助吊运树木、材料，在塔吊拆除后，则主要依靠施工便道体系。

4.3 土方回填技术

双子山山体的土方回填区域地势起伏较大，为了确保回填工作的顺利进行，需要利用山体的已建消防车道，并结合临时便道系统，构建一个单向的环形道路，作为土方运输车辆上山的主要路径。已建消防车道通过

在路边铺设1 m宽的钢板进行拓宽，使原有车道增加1 m宽度，利于车辆通行。临时便道体系是基于交通组织策划的路径，通过土方依次填筑形成(图5、图6)。

在土方施工过程中，通过山体环形道路将土方运至卸土点，然后由长臂挖掘机从卸土点向山体内侧方向一边回填一边推进，形成土路。卸土点附近配置大型挖掘机进行驳土翻运。土路的高度恰好覆盖表皮挡土墙结构，大型挖掘机沿着土路与长臂挖掘机配合进行驳土回填，从而完成山体环路内侧区域的回填工作。

填土坡度缓于 23.5° 时，分层回填压实后土体自身稳定性较好，一般可直接自然堆筑处理。填土坡度陡于 23.5° 时，分层回填压实后土体自身稳定性一般，需采取加筋措

施，对于一般种植区域采用高韧聚酯有纺土工布水平加筋，土工布竖向间距500 mm。

在不同坡度区域已经设置监测点，定期测量土壤侵蚀量，评估防护网、挡土板、控根板等固土措施的长期效果。从双子山开园到2025年第一季度的监测情况看，土壤整体固结效果较好，没有出现大面积冲刷和防护设备损坏的情况，需要对梅雨季和后续台风暴雨期间的土壤进行持续监测，来分析固土措施的耐久性。

4.4 山体固土技术

双子山的地形坡度起伏变化，运用GIS软件，对山体区域的地形图，进行高程、坡向和坡度的分析(图7)。坡度 $\leq 14^{\circ}$ 、 $14^{\circ} \sim 23.5^{\circ}$ 、 $\geq 23.5^{\circ}$ 的区域分别占比70.16%、22.92%、6.92%。

在坡度 $\leq 14^{\circ}$ 区域，采用临时措施进行固土，比如防护网。在坡度 $14^{\circ} \sim 23.5^{\circ}$ 区域，采用挡土板，间距9 m布置，挡土板选用控根板材料，因其表面有孔洞，既能确保地表水的流过，又能挡住土壤流失。表层土回填完至种植前，根据需要设置横向的防护网，用

表4 汽车起重机吊装点位尺寸表
Tab. 4 Size table of lifting points for automobile crane

型号 Model	吊装点位尺寸(长 × 宽) / m Size (length × width)
25 t	8 × 4.5
50 t	12 × 6
100 t	14 × 8

木桩固定在土体中，底部基脚每隔5 m用铁丝扣固定，以减缓地表径流的冲刷。在坡度 $23.5^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 区域，挡土板间距设置为6 m(图8)。在坡度 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 区域，挡土板间距设置为3 m，重要节点可以做削坡处理。有乔木、大灌木的仓室，做毛竹加筋。如果距绿化种植间隔时间较长，可以在场地内提前播种草籽，待草籽萌发后形成良好的地被覆盖效果，达到防水土流失的作用。

在园路铺装与地被的边界，采用杉木桩、挡水板和不锈钢条的形式，将硬质景观和绿化区域划分开来，避免表层土壤随水流污染路面。在树木的鱼鳞穴上口，铺设半圈矮木桩，能有效固结土壤(图9)。

在关键区域设置土体位移监测设备，比如景石集中区域、陡坡区，长期监测土体的稳定性。当监测到参照物位移超过5 cm后，监控平台会出现预警，管理人员会及时处置。通过数据分析，验证固土措施在长期使用过程中的可靠性。

4.5 树木固定技术

双子山山体区域的乔木、大灌木采用钢

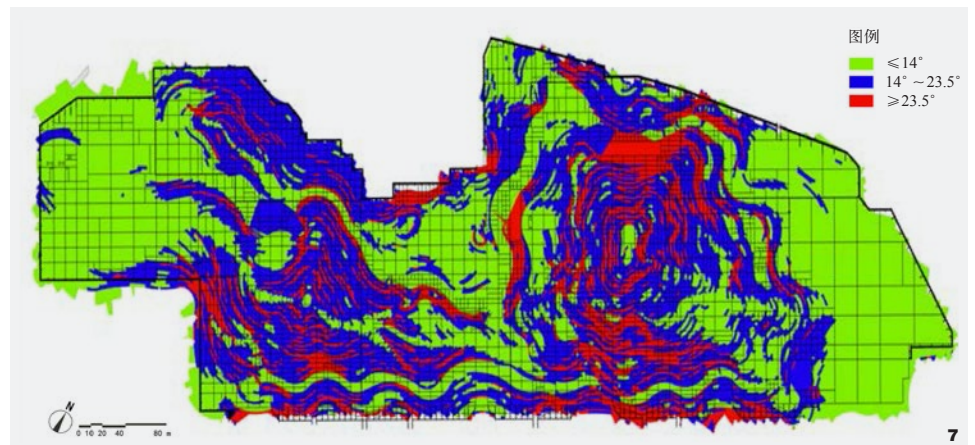


图7 坡度划分图
Fig. 7 Slope division diagram

索制地锚固定系统。在表皮结构的混凝土挡土墙上，每隔3 ~ 5 m距离不等，布置一套固定组件，用于连接树木支撑钢索(图10, 图11)。固定用钢索，采用4 mm多股镀锌不锈钢拉绳。当苗木胸径小于15 cm时采用三根钢索，大于15 cm时则采用4根钢索。在施工过程中，采用通丝止水螺杆的机械连接方式，可以有效地实现结构的稳固连接。具体到每组预埋件的材料构成，包括一根直径为20 mm的通丝螺杆，两个同样直径为20 mm的

六角套筒，以及两个M20规格的镀锌拉环，这些拉环还配有相应的垫片，以确保连接的稳固性和耐久性。在密林区、陡坡区，以及地锚支撑无法覆盖的区域，增加杉木桩四角支撑。四角支撑方式可在一定程度上提高树木的稳定性，而且在环境适应性方面表现出色。针对规格较大的乔木，以及种植在关键位置、对整体景观具有重要影响的乔木，增加钢管桩支撑。

2024年9月16日，台风“贝碧嘉”登陆

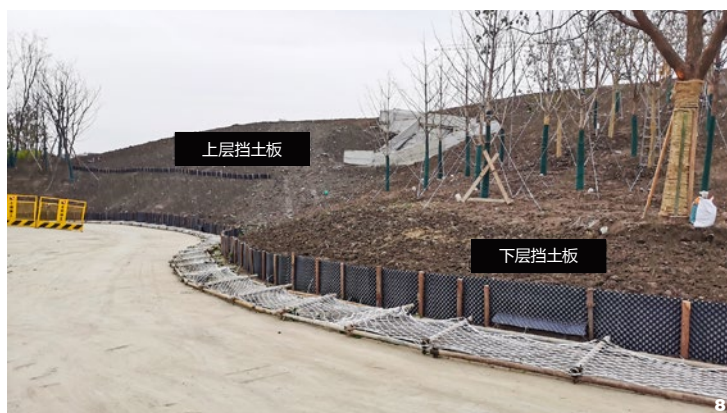


图8 挡土板
Fig. 8 Retaining plate



图9 杉木桩
Fig. 9 Shanmu pile

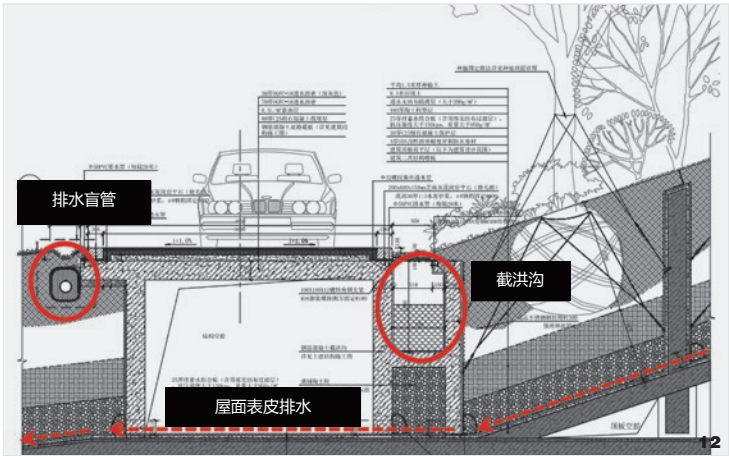
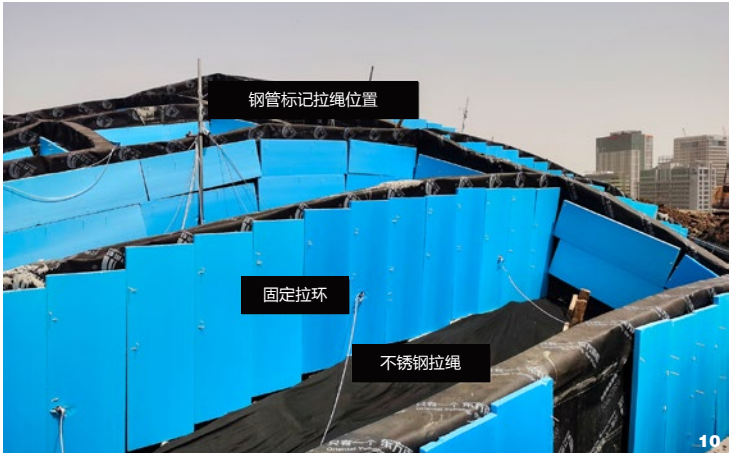


图10 树木支撑钢索
Fig. 10 Steel cable for tree support

图12 排水示意图
Fig. 12 Diagram of drainage system

图11 树木支撑效果
Fig. 11 Tree support image

图13 排水明沟
Fig. 13 Drainage ditch



上海。这一强台风以42 m/s的风速（14级）袭击上海，成为自1949年以来登陆上海的最强台风^[23]。这次台风，给双子山上的树木带来了巨大考验，也为项目如期开园带来了巨大压力。台风“贝碧嘉”过后，统计山体乔木倒伏的情况。结果显示，山体上的乔灌木未发生倒伏的情况，树木整体支撑固定的体系经受住了考验。

4.6 山体排水技术

双子山山体排水，以利用自然山体形成

山沟、山谷自然排水为主。沿山体道路设置植草明沟及排水沟，截留山体排水，同时起到截污作用。山脚下及山上消防通道设置截洪沟，防止雨季集中流量对道路造成冲刷，保证道路安全通行。山体北侧排水汇集后，排至人工湖，进行循环利用。南侧雨水排至管道，连通市政管网（图12）。

表皮屋面的排水结构，主要包括防水卷材、细石混凝土保护层、排蓄水组合板、陶土粒垫层和透水无纺布隔离层，挡土墙每隔3~5 m在底部开槽留洞。在建筑顶板上设置

疏水板，沿山体排放，底部设置盲沟，挡墙内沿外圈内侧底部的陶土粒层中，设置有一圈透水管，并在外侧挡墙上设有排水管，将水排到挡墙外排水系统中。在山体的山腰中设置横向排水沟，收集引导横沟中的雨水，沟底回填小块的溪坑石，更好地截留雨水，减少瞬时地表径流（图13）。

为了监测在不同降雨强度下，排水沟、盲沟、透水管等排水设施的排水效率，在截洪沟的不同部位设置雨量监测点9处，在排水管中设置雨量监测点31处，在土壤中设置

水位监测点48处, 设立预警标准, 评估排水系统长期使用过程中的效能。

5 结论与讨论

针对城市土地资源紧张、地域文化多样性及基础设施限制等挑战, 上海世博文化公园双子山园林景观项目, 在充分分析空腔建筑结构上部荷载要求的基础上, 构建了山体园林景观营建的技术体系, 提出了在空腔结构上部建设人工山林的创新思路和方法, 丰富了城市山林景观营建理论。从配生土研发、交通组织、土方回填、固土防水土流失、树木固定和山体排水等方面提出了系统的解决方案和技术措施。

与传统覆土堆山及其他半地下建筑的屋顶覆土技术相比, 在生态建造理念、建筑空间集约利用和生物多样性方面, 存在多方面的共性。双子山利用内部空腔结构和外部园林景观结合的形式, 将建筑融入了山体, 而且是近似于隐藏式的设计方式, 其生态建造理念与新加坡滨海湾花园异曲同工。同时, 由于其是在原2010年上海世博会场地基址上进行的建造, 结合了场地内的原有设施, 实现了建筑空间的集约利用, 与美国纽约高线公园也有一定类似。另一方面, 由于是在有限场地的空腔结构上部覆土, 在山体分层土壤固结、多线形的山形塑造、场地空间适用性和施工周期等方面, 相较于过往的案例, 具有一定优势。通过优化配生土的配方和生产, 严格控制机械设备选型, 合理规划施工车辆及材料的上山路线, 有效保证了施工过程中的结构安全。通过竖向坡度的技术分析, 运用多层挡土板、挡水板、杉木桩、毛竹、覆盖物等防护措施, 减缓了施工过程中不同坡度表层土壤流失的情况。通过对树木支撑体系螺杆和拉环装置的创新研究, 实现了树

木和山体挡墙结构的有效连接, 既提高了施工效率, 又解决了山体上树木固定的难题。通过优化回填土土层设计, 提高了土壤水分下渗速度; 结合施工临时排水设施和永久设施, 合理有序地组织山体排水系统。一系列基于荷载和结构现状的核心技术和措施, 用于解决城市中心区域人工山林建设中的各种挑战, 是一种景观营建技术和方式的探索, 为未来在城市核心区建设人工山林提供了可借鉴的经验和模式。

注: 文中图表均由作者自绘/摄。

参考文献

- [1] 齐玲. 中国园林筑山设计理法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [2] 人造山工程技术标准DG/TJ08-2358-2021[S]. 上海: 同济大学出版社, 2021.
- [3] (明)计成. 园冶注释[M]. 陈植, 注释. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [4] 成玉宁, 等. 中国园林史(20世纪以前)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [5] 成玉宁. 造园堆山[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [6] 赵迪. 颐和园万寿山西区园林遗址群的研究[C]// 中国风景园林学会2016年会论文集——城市生态园林人民. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 351-358.
- [7] 王子林. 金元两代的皇家园林——北海琼岛[J]. 中国园林, 1995(4): 25-26.
- [8] 卜复鸣. 苏州园林假山评述[J]. 中国园林, 2013, 29(2): 100-104.
- [9] 郑文康. 假山之假环秀山庄假山画意下的掇山法[J]. 新美术, 2015(8): 79-91.
- [10] 胡洁, 吴宜夏, 吕璐珊, 等. 奥林匹克森林公园景观规划设计[J]. 建筑学报, 2008(9): 27-31.
- [11] 王和祥, 韩庆, 宋士宝. 建筑垃圾堆山造景技术初探——天津南翠屏公园建设[J]. 中国勘察设计, 2009(12): 82-84.
- [12] 谢剑刚. 上海辰山植物园绿环堆筑施工技术[J]. 上海建设科技, 2016(4): 52-54.
- [13] 范长越, 张洋洋. 新加坡滨海湾花园设计分析[J]. 山东林业科技, 2016, 46(1): 98-102.
- [14] 廖姜. 城市更新中的公共空间塑造与运营初探——以纽约高线公园为例[J]. 交通节能与环保, 2023, 19(1): 95-98.

- [15] 侯庆贺, 成玉宁, 袁昶洋. 城市山体公园分级调控策略水文效益研究[J]. 中国园林, 2022, 38(09): 69-74.
- [16] 吕菲菲. 生态修复视角下城市山地公园规划设计研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [17] 史雅捷. 基于GIS的风景园林参数化设计研究——以兰州兰山山地生态公园为例[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2021.
- [18] 邓鑫桂, 邱莉淘, 梁庄. “城市双修”背景下喀斯特山地城市山体生态修复与利用研究——以安顺市山体生态修复为例[J]. 中国园林, 2021, 37(S1): 51-55.
- [19] 刘宏欣, 李亚明, 贾水钟, 等. 上海世博文化公园南片区双子山项目主体结构设计[J]. 建筑结构, 2023, 53(01): 109-114.
- [20] 史化稼, 李玮, 张冬梅. 人工构筑近自然山体景观设计方法示范应用——以上海世博文化公园“双子山”项目为例[J]. 园林, 2024, 41(09): 108-117.
- [21] 卢永金. 上海市防御台风战略对策探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2007(4): 29-32.
- [22] 张浪, 韩继刚, 伍海兵, 等. 关于园林绿化快速成景配生土的思考[J]. 土壤通报, 2017, 48(5): 1264-1267.
- [23] 上海市气象局. 台风“贝碧嘉”登陆上海 上海气象部门全力保障人民群众生命财产安全纪实[EB/OL]. (2024-9-18)[2025-3-17]. http://sh.cma.gov.cn/sh/news/qxyw/202409/t20240918_6591150.html