

【工程应用】

云南红河综合交通枢纽膨胀土地基 复杂岩土工程设计

吴江斌, 罗 岚, 黄昱挺
(华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200002)

摘 要: 西部地区大型交通枢纽项目往往面临复杂的地形地貌及特殊工程地质条件。红河综合交通枢纽是云南省十三五规划四大交通枢纽之一, 项目位于我国典型的膨胀土发育地区, 涉及复杂的土石方、地基处理、边坡支护等岩土工程设计内容, 挖填方处理面积约 16 万 m^2 , 土方开挖量 111 万 m^3 , 土方回填量 35 万 m^3 ; 挖方边坡长度约为 1 055 m, 挖方最大高度约 17 m; 填方边坡长度约为 1 100 m, 最大填方高度约 13 m。本文综合考虑了原始地形地貌、功能需求、膨胀土地基处理工艺、周边料源及弃土条件等因素, 采用了尽量少填方、适当多挖方的地势设计策略, 将场地由全场整平调整为双台地方案, 更契合现状地形, 减少土方工程量 107 万 m^3 ; 针对边坡支护高度变化剧烈, 与建构筑物关系复杂, 工况关系复杂的特点, 因地制宜采用了加筋土边坡、重力式挡墙、悬臂式挡墙、扶壁式挡墙、锚拉式桩板挡墙等多类型边坡支护组合设计方案, 对于外部接口采取了永临结合处理对策, 并对膨胀土抗剪强度指标、锚杆锚索与膨胀土粘结力进行了试验研究, 实现了膨胀土高边坡的合理设计。上述设计方案与技术成果, 保证了工程的顺利实施, 取得了显著的社会与经济效益。

关键词: 红河综合交通枢纽; 岩土工程设计; 地势设计优化; 膨胀土地基处理; 多类型边坡支护
中图分类号: TU471 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7195(2022)S-0159-08

Complex geotechnical design of expansive ground in Yunnan Honghe comprehensive transportation hub

WU Jiang-bin, LUO Lan, HUANG Yu-ting
(East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: Large transportation hub projects in Western China often face complex landform and special engineering geological conditions. Honghe comprehensive transportation hub is one of the four transportation hubs in the 13th Five-Year Plan of Yunnan Province. This project is located in a typical expansive soil area, which involves complex earthwork, ground treatment and slope support design. The area related to excavation and filling treatment in this project is about 160 000 m^2 . The volume of excavation is 1 110 000 m^3 and the volume of fills is 350 000 m^3 . The length of the excavation slope is about 1 055 m, and the maximum height of excavation is about 17 m; the length of the filling slope is about 1 100 m, and the maximum height of filling is about 13 m. This paper comprehensively considers the restrictive conditions such as terrain condition, function objectives, expansive soil treatment, soil source and spoil ground, which results in the terrain design strategy of less filling and more excavating. The original same ground level was replaced by two different levels, to fit the current terrain and reduce the earthwork of 1 070 000 m^3 . Multitype support systems were used based on the real situation of different areas, which including reinforced soil slope, gravity retaining wall, cantilever retaining wall, counterfort retaining wall, and pile plate retaining wall with anchors, et al. For the external exit, a combination of permanent and temporary countermeasures was adopted. Through the study on shear strength of expansive soil and interfacial bond strength between expansive soil and anchors, rational design of expansive soil high slope with expansive soil was adopted. The combination of various targeted treatment methods fully meets the requirements of both construction period and economic benefits.

收稿日期: 2021-12-19

作者简介: 吴江斌(1974—), 男, 四川垫江人, 博士, 教授级高级工程师, 注册岩土工程师, 主要从事建筑地基基础工程、地基处理工程及地下工程的设计研究。E-mail: jiangbin_wu@ecadi.com。

Key words: Honghe comprehensive transportation hub; geotechnical design; terrain design optimization; expansive soil ground treatment; multi type slope support

0 引言

云南地处“承接国内,连接国外”的独特区位,是国家“面向西南开放的桥头堡”战略的重要组成部分。作为云南省十三五规划四大交通枢纽之一,以红河综合交通枢纽项目为契机,红河将成为辐射滇南、滇西南,融入滇中的区域性中心,进一步促进蒙自内通云南省各地,外通东南亚各国的承内启外的作用,成为面向东盟的国家级门户。

大型交通枢纽集合了航空、铁路、汽车等多种交通出行方式,需要大面积的平缓场地。不同于我国中、东部地区的平原地貌,西部地区常常出现山地、丘陵地貌,相对平缓的既有土地面积往往不能满足大型综合交通枢纽建设的需要。受上述条件的限制,西部地区大面积场地平整常常涉及到大体量场地填、挖方处理及边坡支护、高差处理等岩土工程。

除地形地貌复杂外,西部地区工程地质及水文地质条件也较为复杂^[1],大型交通枢纽项目建设面临突出的岩土工程问题。特别是以红河蒙自为代表的强膨胀土发育地质条件,具有遇水膨胀、强度指标急剧减小、膨胀力大、失水收缩干裂的特点^[2],给工程安全带来了巨大挑战。

对于复杂地形条件下膨胀土地区的大面积场地形成,如何在经济性与安全性上找到平衡点,采取合适的岩土工程设计方案是关键。本文从土方平衡与场地地势设计、地基处理工程、边坡工程多角度介绍了红河综合交通枢纽项目岩土工程设计,针对膨胀土场地采取了一系列针对性措施,充分满足了使用要求,且兼顾了工期与经济性。

1 项目概况及工程地质条件

红河综合交通枢纽项目位于“滇南中心、国家门户”红河哈尼族彝族自治州首府蒙自市,地处规划的蒙自机场与高铁站之间,总用地面积约20万m²。本项目以空运、高铁、公路长途客运三大对外交通方式的终到与联乘为核心,集合了社会车辆、出租车、中运量有轨电车、城市公交、长途及旅游巴士等多种交通方式,联合打造滇南区域性综合交通枢纽,完成效果图如图1所示。

项目现状场地位于蒙自盆地,原始地貌为盆地

地貌,地形总体西高东低,地面标高介于1303.1~1344.6m之间,相对高差为41.5m,平均地形坡度约7.5°,属缓坡地形,场地原始地形高程分析云图如图2所示,东侧为填方区、西侧为挖方区。北侧蒙自机场地坪标高为1332m,南侧高铁站地坪标高为1315m,机场与高铁站间存在17m高差,且现状场地地形为坡地,因此在交通枢纽场地形成中存在挖填方处理及边坡高差处理。场地挖填方处理面积约16万m²,挖方边坡长度约为1055m,挖方最大高度约17m;填方边坡长度约为1100m,最大填方高度约13m。

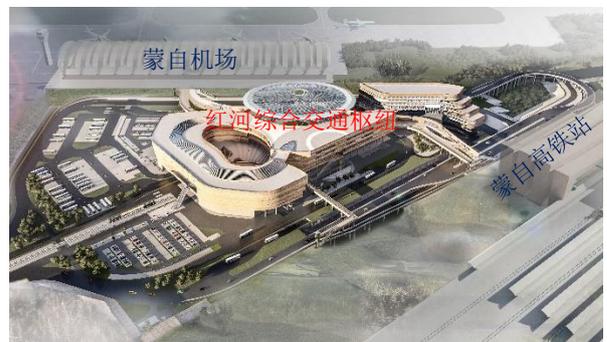


图1 红河综合交通枢纽效果图

Fig. 1 Design sketch of Honghe comprehensive transportation hub

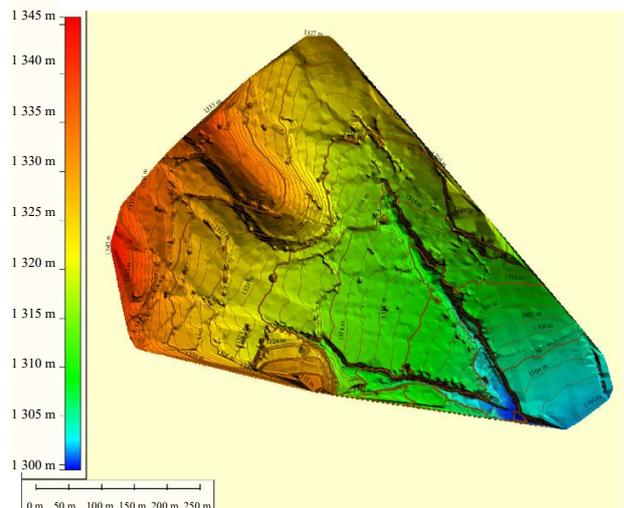


图2 场地原始地形高程分析云图

Fig. 2 Elevation analysis map of construction site

土层物理力学参数如表1所示,典型地层剖面如图3所示。②层黏土、③层黏土、④层全风化泥灰岩属于膨胀岩土。其中②层黏土大部分具弱-中膨胀潜势,局部具强膨胀潜势;③层黏土大部分具中-强膨胀潜势,局部具弱膨胀潜势;④层全风化泥

灰岩大部分具中-强膨胀潜势, 局部具弱膨胀潜势, 大气影响深度范围 5.0 m, 急剧层深度 2.4 m, 构成膨胀土地基。上述 3 层膨胀土具有自由膨胀率高、膨胀力大、遇水后抗剪强度指标显著降低的特点, 在强膨胀土发育地区进行场地平整、边坡支护设计以及建筑设计时应考虑各膨胀土地层的不利影响。表 2 为膨胀土层主要胀缩指标。

表 1 典型土层物理力学参数
Table 1 Typical soil mechanical parameters

土层名称	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	压缩模量 E_{s1-2}/MPa	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	地基承载力特征值 f_{ak}/kPa
②黏土	17.7	7.71	35	7.5	160
③黏土	18.2	10.05	44	9.0	180
④全风化泥灰岩	18.1	9.57	42	8.5	200
⑤强风化泥灰岩	18.4	11.75	51	10.0	250

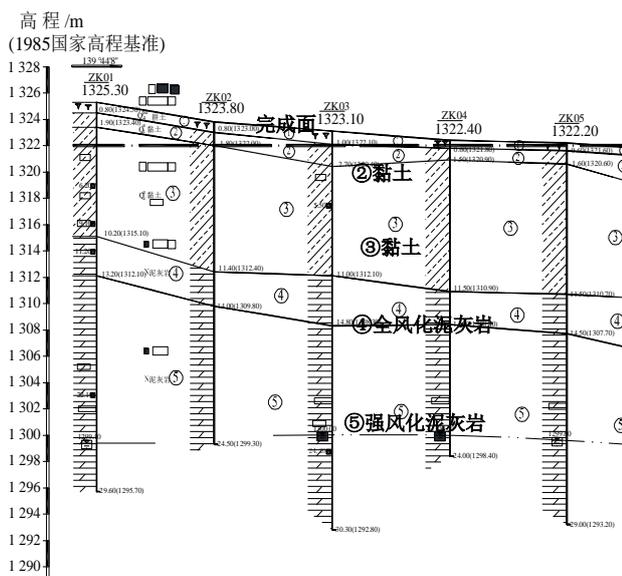


图 3 典型土层剖面
Fig. 3 Typical soil profile

表 2 膨胀土主要胀缩指标

Table 2 Main expansion and contraction indexes of expansive soil

土层名称	天然含水率 $w/\%$	自由膨胀率 $\delta/\%$	水平膨胀力 kPa	收缩系数 λ
②黏土	37.1	12~91	35	7.5
③黏土	34.8	4~109	44	9.0
④全风化泥灰岩	36.6	1~104	42	8.5

2 工程特点及主要岩土工程问题

根据场地地形地貌、工程地质条件及交通枢纽的使用功能要求, 本项目主要具有以下工程特点及主要岩土工程问题。

(1) 场地与交通枢纽主体建筑、外围高铁站及航站楼关系复杂

本项目位于蒙自盆地, 原始地形西高东低, 相对高差为 41.5 m, 平均地形坡度约 7.5°, 属缓坡地形。综合交通枢纽主要功能是连接南侧蒙自高铁站及北侧蒙自机场, 高铁站与机场间存在 17 m 高差。为了满足枢纽的功能使用要求, 场地地势设计为多级台地(如图 4 所示), 存在较大的土方工程量及高差区域坡顶、坡脚与建筑主体结构、高架桥结构、场内地面道路的相互影响, 对整个项目的设计带来挑战。

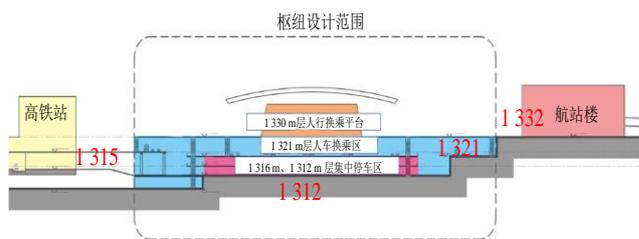


图 4 场地与建构筑物关系典型剖面图
Fig. 4 Profile of construction site and buildings

(2) 膨胀土地基

场地地基土具有弱-强膨胀潜势, 膨胀土具有吸水膨胀, 失水收缩的变形特性, 吸水膨胀后产生膨胀力, 抗剪强度指标大幅度降低等显著特点。需根据膨胀土地层的特点及不利影响, 对全场地势设计、土方工程、边坡支护设计等采取针对性的措施, 特别需要考虑大面积膨胀土对高边坡、建筑地基等长期使用稳定性的不利影响。

(3) 大体量多类型边坡支护工程

场地最大填方边坡高度达到 13 m, 最大挖方边坡高度达到 17 m, 总延长米达到 2 240 m, 边坡高度高, 高度变化剧烈(见图 5), 不同区域的设计条件差别大, 需要针对不同区域的特点采取经济合理的边坡方案, 涉及的边坡支护结构种类多, 不同边坡支护形式之间过渡关系复杂, 设计难度大。

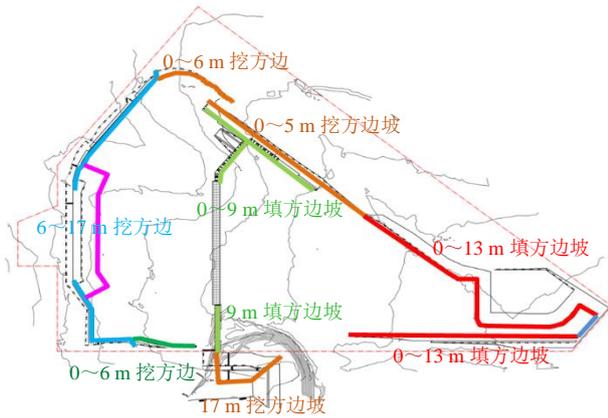


图5 边坡支护高度分布平面示意图

Fig. 5 Height distribution of slopes

3 土方平衡与地势设计优化研究

3.1 土方平衡分析因素

在填挖方场地中,土方工程所占的工程量较大,直接影响整个项目的经济性指标,也是场地地势设计中的主要内容之一。土方平衡分析的目的是在满足枢纽使用要求的前提下,寻找合理场地竖向设计方案,在尽量满足填、挖方量平衡的同时还需力求做到填、挖方工程量最小,土方工程综合费用最低^[3],确保在经济合理的工程造价及工程安全的前提下,实现土地利用的最大化。

除了土石方工程量,地势设计还受到多因素的制约。合肥滨湖新区丘陵地势设计综合考虑了不同功能地块的高程控制、道路竖向规划、防排洪要求及城市景观多方面因素^[4];黑龙江某丘陵地区水泥厂^[5]采用台地式地势设计方案,在土方平衡优化设计中同时考虑了边坡支护工程的影响,首先确定合理稳定的边坡挖填比及关键性土方工程控制单元,再将开挖总量,挖填平衡,控制相邻台阶面高差等作为目标函数进行优化。

对于本项目,除上述因素外,土石方平衡分析还需考虑膨胀土的影响。由于挖方区土料主要为膨胀土,不能直接用作填方区填料,需进行改良后再进行使用,需要考虑膨胀土改良增加的工程费用;如果不采用挖方区的膨胀土作为填方区填料,则需要考虑挖方区弃土费用以及外购非膨胀土填料的费用。因此本项目膨胀土地基处理方案对土石方平衡及地势设计具有重要影响,应作为重点分析因素加以考虑。

3.2 膨胀土地基处理及换填深度

膨胀土地基常用的处理方法包括换填法、压实

法、改良法等^[6]。对于大面积膨胀土地基处理,工程实践中常采用掺入6%以下石灰^[7-8],但石灰改良膨胀土多见于具有弱-中膨胀潜势的膨胀土,对于强膨胀土,掺灰量^[9]或掺水泥量^[10]需要达到12%甚至更高才能达到改良为非膨胀土的效果。由于本项目膨胀土膨胀潜势为弱-强,自由膨胀率变化剧烈,如果采用掺入石灰、水泥等改良方法,较难在确保改良效果的同时确定经济合理的改良剂掺入比。

经现场走访调研,本项目邻近料场料源条件好,外购非膨胀土的价格相对较低。采用换填法可以完全消除膨胀性风险,填筑效果好,同时可以在确保施工效果的情况下缩短工期,从工期角度降低造价。综合考虑场地安全性、施工工期、经济性等一系列因素,采用换填法对膨胀土地基进行处理。

膨胀土地基处理深度可根据原位膨胀力、大气影响深度、地区工程经验等确定^[11]。《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)^[12]建议,当非膨胀土换填深度不小于2 m时,下部膨胀土含水率、强度的变化非常小。根据计算,本项目在对上部2 m膨胀土进行换填处理后,虽然未达到大气急剧影响深度2.4 m,但地基平均胀缩变形可由处理前的73 mm减小至处理后的44 mm,可满足道路、室外地坪的使用要求。相比于换填至大气急剧影响深度,可减少换填量6.4万方。换填料采用无膨胀性的土夹石填料,换填范围为挖方及填方高度小于2.4 m的道路路基、建筑地坪区域,换填深度为2 m。绿化等无具体使用功能要求的区域及填方较厚的区域不进行换填处理。本项目膨胀土换填平面如图6所示。

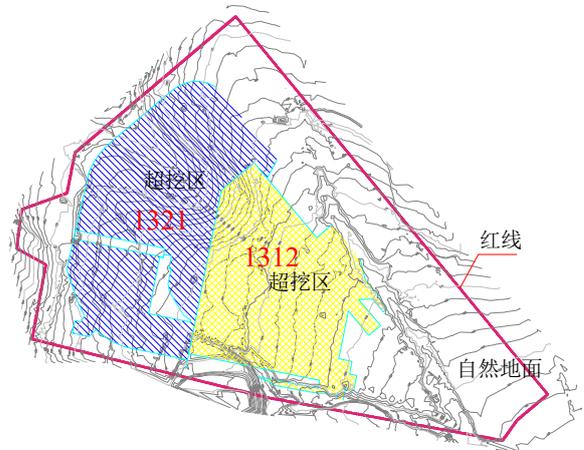


图6 膨胀土换填平面图

Fig. 6 Replacement area of expansive soil

3.3 地势设计方案优化

本项目初步设计时采用的地势设计方案为全

场整平至 1 322 m, 如图 7 (a) 所示。在确定采用换填处理膨胀土地基后, 土方平衡分析中还需考虑以下几点因素。

(1) 对于现状地势, 地面标高最高为 1 344.6 m, 而综合交通枢纽连接的机场完成面标高为 1 332 m, 高铁站完成面标高为 1 315 m。从满足使用功能的角度出发, 地势设计宜从西北机场侧到东南高铁侧逐渐降低。

(2) 在满足建构筑物使用要求的前提下尽量降低相邻台地间高差, 降低边坡支护工程的难度及工程造价。

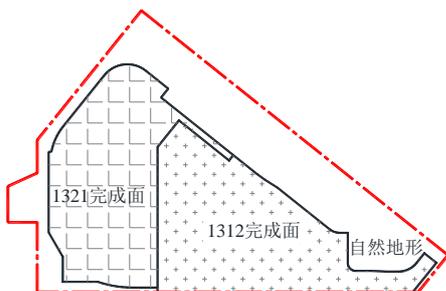
(3) 附近弃土区域邻近本项目, 无使用功能要求、库容大、弃土条件好、弃土费用较低。

(4) 采用膨胀土换填的地基处理方式, 场内填方量均为外购非膨胀土, 应尽量减小填方量, 降低工程造价。

综合分析以上几点因素, 本项目采取了尽量少填方、适当多挖方的地势设计策略, 根据全场现状地形由西向东逐渐降低的总体趋势, 最终将场地地势设计方案由全场整平至 1 322 m 标高调整为西侧 1 321 m 和东侧 1 312 m 的双台地方案, 如图 7 (b) 所示, 更契合现状地形, 填方量由 94 万方减少至 35 万方, 挖方量由 159 万方减少至 111 万方, 土石方工程量共减少 107 万方, 在满足枢纽使用要求的前提下大大减少土方工程量, 节约投资。土石方现场施工照片如图 8 所示。



(a) 初步设计方案



(b) 优化方案

图 7 场地完成面分区平面图

Fig. 7 Partitioned plan of ground surface



图 8 土石方现场施工照片

Fig. 8 Construction of earthworks

4 复杂条件边坡支护设计

4.1 多类型边坡支护组合设计

本工程边坡包括填方边坡、挖方边坡两大类, 总延长米达到 2 240 m, 高度变化剧烈, 部分区域与建构筑物紧密结合, 且面临膨胀土地基, 设计难度较大。经过多方案比选, 本项目根据不同区域的实际情况, 因地制宜采用了多种支护形式, 包括坡率法、加筋土边坡、悬臂式挡墙、扶壁式挡墙、重力式挡墙、锚拉式桩板挡墙、锚杆框架梁等, 针对不同位置、工况采用了最优边坡支护方案, 满足了项目对使用功能、安全性及经济性要求。本项目采用的边坡支护形式平面分布图如图 9 所示, 各类型支护信息如表 3 所示。

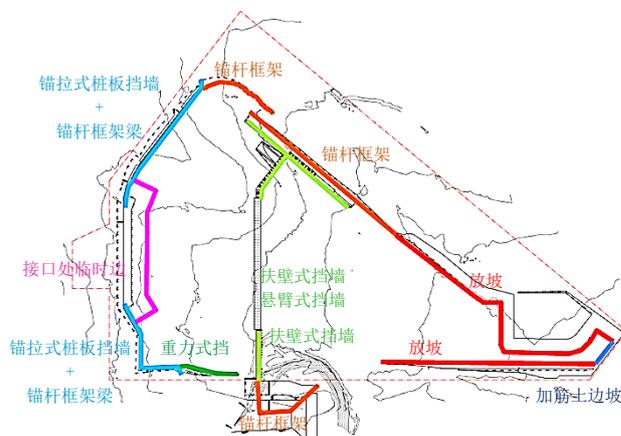


图 9 边坡支护类型分布平面图

Fig. 9 Supporting structures

表 3 边坡支护信息表

Table 3 Information of support structures

成因	支护形式	边坡高/m	延长/m
挖方	锚拉式桩板挡墙+锚杆框架梁	6~17	318
	重力式挡墙+锚杆框架梁	0~17	514
	放坡	13	223
填方	扶壁式挡墙、悬臂式挡墙	0~9	355
	加筋土边坡	12	36
	放坡	0~13	709

4.2 膨胀土高边坡桩锚支护设计

本工程挖方边坡岩土层为膨胀土，挖方边坡设计时需重点考虑膨胀土的不利影响。对于无建构筑物空间要求的区域，采用重力式护脚挡墙结合锚杆框架梁进行支护。当边坡支护空间受到限制时，采用上级锚杆框架梁结合下级锚拉式桩板挡墙支护形式，最大支护高度为17 m，如图10所示。

膨胀土吸水膨胀后抗剪强度指标降低幅度及墙后膨胀力取值直接关系到锚拉式桩板挡墙支护结构的安全性及经济性，取值不合理可能会造成过于保守或安全度不够的情况^[13]。本项目为此开展了膨胀土吸水饱和膨胀后的抗剪强度专项试验研究，通过试验结果确定膨胀土抗剪强度指标折减系数，最终确定黏聚力折减30%，内摩擦角折减40%作为膨胀土边坡支护强度设计参数；并充分考虑了膨胀力随膨胀变形衰减的特点，采用完全侧限条件膨胀力折减20%作为锚拉式桩板挡墙膨胀力设计参数。在确保工程安全的情况下提高了支护结构设计经济性。

虽然在边坡支护设计中考虑了膨胀土吸水后的不利影响，本项目也采取了一系列防排水针对性处置措施，包括生态袋、两布一膜组成的防水体系以及截排水沟、坡体排水管的排水体系。上述针对性处理措施可大大减小水对膨胀土边坡的影响，确保工程安全。

此外，由于勘察提供的锚杆（索）锚固体在土层中的承载力较低，同时需考虑膨胀土的不利影响，初步设计计算时所需的锚索长度较长，锚固段最长超过30 m。正式施工前进行17组锚杆（索）基本试验及蠕变试验，杆体类型包括全长粘结型锚杆、拉力型锚索、拉力分散型锚索，锚固土层包括③层黏土、④层全风化泥灰岩及⑤层强风化泥灰岩。试验结果表明，土层实际极限承载力超过勘察提供值的2倍，锚固段最大长度优化至20 m左右，共减少锚索长度4 800 m。同时考虑到锚索长度较长的情况，采用了拉力分散型锚索，在减小锚索工程量的同时可以获得更好的锚索受力性能。

4.3 永临结合的外部接口处理对策

本工程外部需连接多条进出场道路。由于道路规划及设计方案相对滞后，为保证枢纽的正常使用，接口处需设置边坡支护措施。采用与邻近区域相同的永久支护方案对于本项目设计及施工而言相对简单，但支护措施需在未来道路接入时破除，增加道路接入施工难度的同时带来不必要的浪费。因此本工程设计时采用了永临结合的边坡支护方案，在道路接口预留位置采取临时放坡支护的方案，两侧采用永久锚拉桩板挡墙支护方案，平面位置见图9，并考虑了多标高道路接口的可能性，为外部道路接入时提供了更大的灵活性。

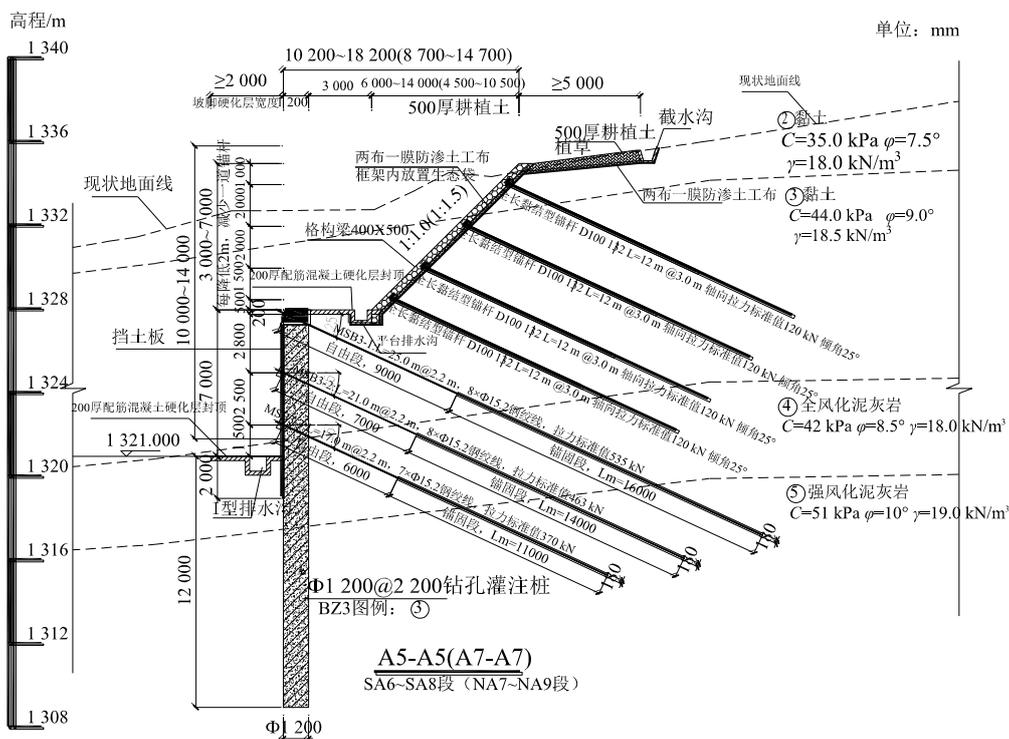


图10 挖方边坡典型剖面图
Fig. 10 Typical section of excavation slope

永临结合的边坡支护设计方法共减少锚拉式桩板挡墙约 130 m, 方案兼顾了经济性与灵活性。永临结合边坡现场施工照片如图 11 所示。



图 11 永临结合边坡现场施工照片

Fig. 11 Slope support with permanent and temporary combination

5 结 论

红河综合交通枢纽项目是云南省重点打造的国家级门户, 也是云南省“十三五综合交通发展规划”中的重点项目。工程场地现状地形条件复杂, 膨胀土发育, 大面积土方工程、地基处理、边坡工程的工程量大、设计难度高。该项目结合地形和地质条件特点, 基于相关的试验研究与计算分析, 采取了多种针对性的优化策略和技术措施, 实现了工程的合理设计, 取得了显著的社会与经济效益。

(1) 在复杂地势设计优化设计方面, 考虑了原始地形、功能需求、膨胀土地基处理工艺、周边料源及弃土条件等多方面因素的影响, 通过膨胀土地基处理工艺比选、土方平衡分析等, 采用了尽量少填方、适当多挖方的地势设计策略, 将场地由全场整平调整为双台地方案, 更契合现状地形; 在满足枢纽功能使用需求的前提下, 实现了土石方综合工程造价较优的目标, 减少土方工程量 107 万 m^3 。膨胀土地区大面积地势设计应充分考虑膨胀土处理工艺对土方工程量的影响。

(2) 在复杂地形和地质条件下边坡设计方面, 针对边坡支护高度变化剧烈, 与建构筑物关系复杂的特点, 因地制宜采用了坡率法、加筋土边坡、悬臂式挡墙、扶壁式挡墙、重力式挡墙、桩板式挡墙、锚拉式桩板挡墙、锚索框架梁等多种支护形式。在道路接口预留位置, 采用永临结合的外部接口设计策略, 将临时放坡支护与两侧永久锚拉桩板挡墙支护相结合, 减小永久支护的长度和工程造价, 也降低了后期外部道路接入难度。

(3) 针对膨胀土高边坡, 基于优先治水的膨胀

土边坡设计思路, 采取了膨胀土边坡防排水针对性设计措施。还对膨胀土抗剪强度指标、锚杆锚索与膨胀土黏结力进行了试验研究, 优化了锚索长度, 将锚固段长度由最大 30 m 减少至 20 m, 同时采用拉力分散性锚索, 在确保支护结构安全的前提下减小了施工难度及施工工期, 降低了工程造价。

参考文献

- [1] 奚家米, 杨更社, 徐坤. 西部地区地质灾害分布规律评价初探[J]. 西安科技大学学报, 2008, 28(3): 461-464.
XI Jia-mi, YANG Geng-she, XU Kun. Appraise of distribution law of geological disasters in the western China[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2008, 28(3): 461-464.
- [2] 李志清, 李涛, 胡瑞林, 等. 蒙自重塑膨胀土膨胀变形特性与施工控制研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1855-1860.
LI Zhi-qing, LI Tao, HU Rui-lin, et al. Expansion characteristics and construction control of remolded mengzi expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1855-1860.
- [3] 周虎鑫, 周立新. 高填方机场岩土工程技术指南[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017: 20-21.
ZHOU Hu-xin, Zhou Li-xin. Technical Guidelines for Geotechnical Engineering of High Filling Airport[M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2017: 20-21.
- [4] 周善霞. 合肥滨湖新区竖向设计和土方平衡的研究[J]. 中国市政工程, 2010, 29(10): 101-103.
ZHOU Shan-xia. A study of vertical design & earthwork balance in hefei binhu new area[J]. China Municipal Engineering, 2010, 29(10): 101-103.
- [5] 姜清华, 程江涛, 蔡清, 等. 台段式场平建设项目土方平衡优化设计的研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(1): 85-91.
JIANG Qing-hua, CHENG Jiang-tao, CAI Qing, et al. Earthwork balance optimization design for stepped leveling project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(1): 85-91.
- [6] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 869-872.
GONG Xiao-nan. Manual for Ground Treatment[M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2008: 869-872.
- [7] 崔伟, 李华鑫, 穆乃敏. 石灰改性膨胀土工程性质的试

- 验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 606-609.
- CUI Wei, LI Hua-luan, MU Nai-min. Experimental research on engineering character of improved expansive soil with lime[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 606-609.
- [8] 余晓彦, 游鹏, 周谈, 等. 石灰改良膨胀土的试验研究[J]. 湖北工业大学学报, 2014, 29(5): 110-112.
- YU Xiao-yan, YOU Peng, ZHOU Tan, et al. Experimental study on the lime-treated expansive soils[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2014, 29(5): 110-112.
- [9] 雷瑜, 李世新, 廖靖云. 蒙内铁路路基填料膨胀土改良适用性研究[J]. 路基工程, 2019(2): 5-10.
- LEI Yu, LI Shi-xin, LIAO Jing-yun. Study on applicability of expansive soil improvement for mombasa-nairobi railway subgrade filler[J]. Subgrade Engineering, 2019(2): 5-10.
- [10] 赵春吉, 赵红华, 常艳, 等. 水泥改性强膨胀土理化试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2014, 54(6): 604-611.
- ZHAO Chun-ji, ZHAO Hong-hua, CHANG Yan, et al. Physical-chemical experimental investigation on cement-treated highly expansive soil[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2014, 54(6): 604-611.
- [11] 黄星, 丁国洪. 蒙自地区膨胀土路基特征与处理[J]. 城市道桥与防洪, 2006(5): 161-163.
- HUANG Xing, DING Guo-hong. Characteristics and treatment of expanded soil roadbed in mengzi region[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2006(5): 161-163.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for Design of Highway Subgrades: JTG D30—2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [13] 张颖钧. 挡墙后裂土膨胀压力分布与设计计算方法[J]. 铁道学报, 1995, 17(1): 93-101.
- ZHANG Yin-jun. Distribution of lateral swelling pressure and the method if design and computation of retaining wall in expansive soil area[J]. Journal of the China Railway Society, 1995, 17(1): 93-101.