

## 矩形顶管下穿水渠的结构受力研究

柯希潮

成都华丰工程勘察设计有限公司杭州分公司, 浙江 杭州 310000

**[摘要]**顶管法施工是依靠顶管机和顶进装置, 将管节在地下逐节顶进的施工工法。当顶管下穿“V”型水渠引起结构管节的覆土高度差异较大时, 受限于行业标准的局限性, 均按照最大覆土高度进行设计, 对覆土差异较大管节进行精细化配筋具有积极意义。针对覆土较浅管节, 提出相对活荷载的概念, 将差异覆土等效为相对活荷载进行设计。同时借助混凝土自修复技术, 修复临时荷载产生的裂缝, 在确保工程安全的前提下, 实现了管节含钢量的优化, 为同类工程提供借鉴。

**[关键词]**矩形顶管; 差异覆土; 相对活荷载; 低碳; 自修复

DOI: 10.33142/ec.v8i12.18781

中图分类号: TV672

文献标识码: A

### Research on the Structural Stress of Rectangular Top Pipe Passing through Water Channel

KE Xichao

Hangzhou Branch of Chengdu Huafeng Engineering Survey and Design Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

**Abstract:** Pipe jacking construction is a construction method that relies on pipe jacking machines and jacking devices to push pipe sections underground section by section. When the top pipe passes through a "V" - shaped canal and causes significant differences in the soil cover height of structural pipe sections, due to the limitations of industry standards, the design is based on the maximum soil cover height. Fine reinforcement of pipe sections with significant soil cover differences has positive significance. The concept of relative live load is proposed for pipe sections with shallow soil cover, and the differential soil cover is equivalent to relative live load for design. At the same time, with the help of concrete self-healing technology, cracks caused by temporary loads were repaired, and the optimization of steel content in pipe joints was achieved while ensuring project safety, providing reference for similar projects.

**Keywords:** rectangular top pipe; differential soil cover; relative live load; low carbon; self-repair

#### 引言

顶管工程设计尚无住建部发布的国家标准, 目前已发行实施的相关标准有中国工程建设标准化协会《矩形顶管工程技术规程》T/CECS 716—2020、上海市《顶管工程设计标准》DG/TJ08-2269—2019、江苏省《综合管廊矩形顶管工程技术标准》DB32/T 3913—2020、广东省《矩形顶管工程技术规程》DBJT15-229—2021、浙江省《顶管工程技术规程》DBJ33 / T1283—2022 等。在顶管荷载与作用章节中, 针对承载能力极限状态和正常使用极限状态下的永久荷载、可变荷载的代表值、组合系数作出相关说明, 其中作用在顶管上的竖向土压力, 除上海市《顶管工程设计标准》根据覆土深度和土质考虑土体卸荷拱效应外, 其余均按照全覆土考虑, 并且均未提及当差异覆土较大时的管节设计。为响应低碳建筑的口号, 依托工程实际, 遵循规范与前沿创新相结合, 对差异覆土较大管节进行优化设计。

#### 1 工程概况

江西省某项目采取矩形顶管下穿水渠, 该水渠宽约 37m, 深约 6.6m, 二级边坡, 水渠 C15 现浇砼护底 12cm, 砂卵石垫层 15cm, 沟渠上部护坡采用 C15 砼预制块护坡 10cm+砂卵石垫层 10cm。拟采取顶管法下穿该水渠, 顶管埋深 4.4~11.0m, 采用内径 6.5m\*4.3m 预制管节, 管节壁厚 0.5m, 管节长度 1.5m, C55 混凝土。主要利用管节混凝土自防水, 辅以楔形橡胶密封圈+聚氨酯密封胶接口防水。顶管施工采用土压平衡顶管机, 始发、接收洞门加固均采用旋喷桩。本工程平剖面简图如下图 1、图 2 所示:

本场地地层从上往下:

杂填土: 主要由耕植土、碎块石、建筑垃圾、生活垃圾和全风化千枚岩组成, 偶见千枚岩碎石块, 最大粒径 2cm~10cm, 堆积时间短, 土层松散, 成分较杂, 不均匀。

粉质黏土: 可塑~硬塑, 含铁锰质斑点, N=18 击~24 击。

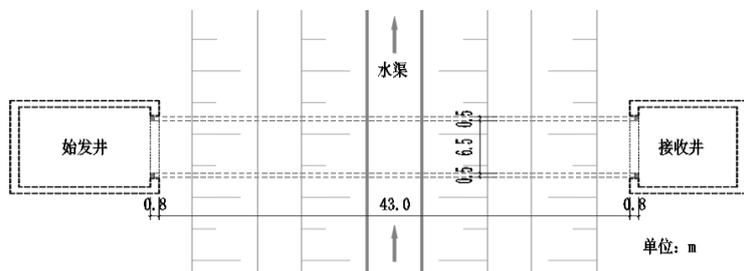


图1 平面简图

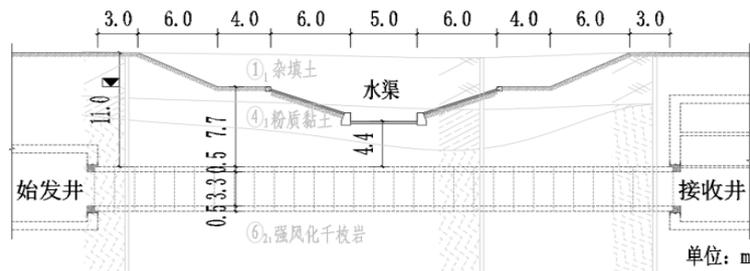


图2 剖面简图

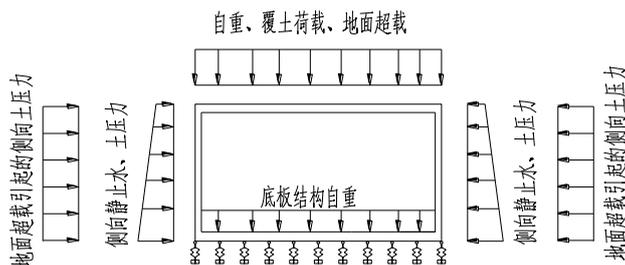


图3 管节计算简图

强风化千枚岩：灰黄、黄褐，千枚状构造，风化裂隙极发育，倾角陡峭，基本呈直立状态，岩体极为破碎，岩芯呈片状，碎块状，半岩半土状，原岩结构部分破坏，岩质极软，手可捏碎，遇水后可捏成团，极难取芯，进尺容易，局部含石英碎块，粒径2~6cm不等，岩体基本质量等级为IV，厚变化较大，风化界面起伏，该层厚度：21.00~39.60m，平均厚度 28.84m。天然单轴抗压强度 0.3~2.0MPa，饱和单轴抗压强度 0.2~2.2MPa，干燥单轴抗压强度 1.6~5.6MPa。

表1 主要参数指标表

土层	重度 KN/m <sup>3</sup>	静止侧压力系数	基床系数 MPa/m	
			水平	垂直
杂填土	17.0	0.65	-	-
粉质黏土	19.9	0.45	30	25
强风化千枚岩	23.0	0.35	90	110

顶管穿越地层土层为强风化千枚岩。

## 2 管节常规设计

本工程始发端管节覆土 11.0m，同时也是最大覆土，由于管节均由始发端顶进，所有管节配筋结算均按最大覆

土考虑比较安全可靠。江西省未下发顶管相关的设计标准，根据中国工程建设标准化协会标准《矩形顶管工程技术规程 T/CECS-716—2020》<sup>[1]</sup>中荷载与作用，管节计算简图如下图3所示：

根据本工程所处的环境作用等级和相关技术要求，预制钢筋混凝土顶管管节裂缝宽度不得大于 0.2mm。采取 SAP2000 软件进行计算，包含承载能力极限状态下的强度验算和正常使用极限状态下的裂缝宽度验算，其中控制（最不利）工况为全水位正常使用极限状态下的裂缝宽度验算。弯矩剪力如下：

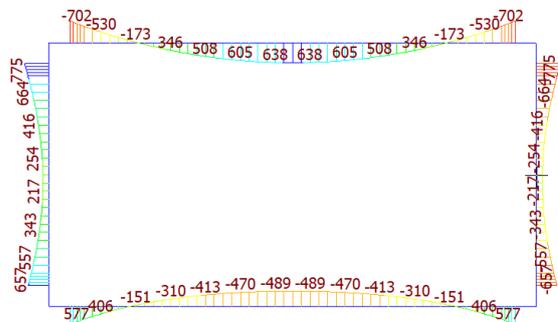


图4 准永久组合弯矩图

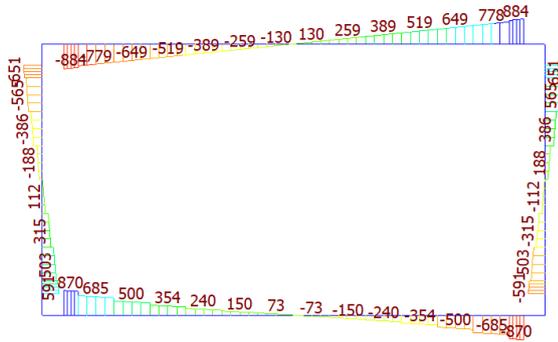


图5 准永久组合剪力图

根据计算结果，顶管管节弯矩和剪力值均很大，进行配筋后统计全部钢筋的含钢量为  $395\text{kg}/\text{m}^3$ ，远超一般管节的含钢量<sup>[2]</sup>。

### 3 管节优化设计

顶管下穿水渠，最大覆土  $11.0\text{m}$ ，最小覆土  $4.4\text{m}$ ，均按照最大覆土进行管节配筋设计虽存在一定的合理性，但忽略了很多客观有利因素，如土体卸荷拱效应、部分管节仅临时覆土较厚，可对其进行精细化设计避免钢筋浪费。

根据上海市地方标准《顶管工程设计标准 DGTJ08-2268—2019》，当顶管埋深较深时，非软土且覆土厚度大于 1 倍管外径时，可考虑土体卸荷拱效应。重新对其进行计算，准永久组合下，弯矩剪力如下图所示：

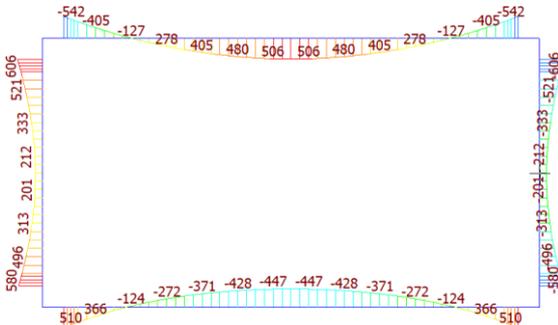


图6 准永久组合弯矩图

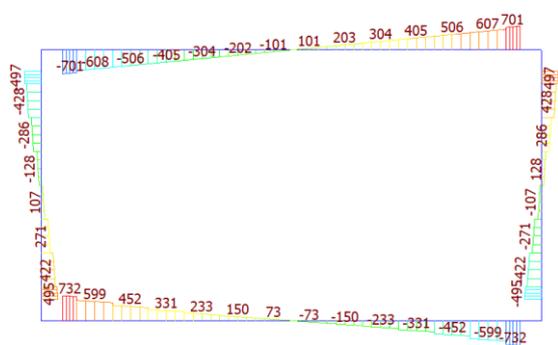


图7 准永久组合剪力图

以上计算结果相较于全覆土工况下，弯矩减少约 20%，剪力减少约 15%，重新对管节进行配筋，全部钢筋含钢

量为  $338\text{kg}/\text{m}^3$ 。相较于全覆土，节约钢筋  $57\text{kg}/\text{m}^3$ 。

考虑土体卸荷拱效应后，依然忽视了一个问题：对于水渠下覆土仅  $4.4\text{m}$ ，因管节均需经过覆土  $11.0\text{m}$  的始发井顶进指定位置，而按照最不利区段进行配筋，是否也造成了不必要的浪费呢？由此我们不妨提出一个概念——相对活荷载：构件相对于固定恒载发生移动，可将固定恒载视为相对活荷载。对水渠下管节，可将  $6.6\text{m}$  水土恒荷载视为相对活荷载，该活荷载相较于设计基准期 100 年而言，非常短暂，持续时间不足  $10\text{d}$ 。目前暂无针对此类临时荷载的相关组合系数，参照《建筑结构荷载规范 GB50009—2012》的相关条文，其准永久组合系数取 0.5。按此进行管节计算，其内力将进一步减小，同时为了保证管节不至于在承载能力极限状态下发生强度破坏，需按照上海标准考虑土体卸荷拱效应下的强度验算。其计算结果如下图所示。

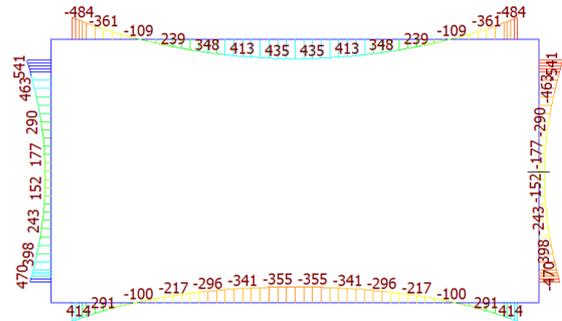


图8 基本组合弯矩图

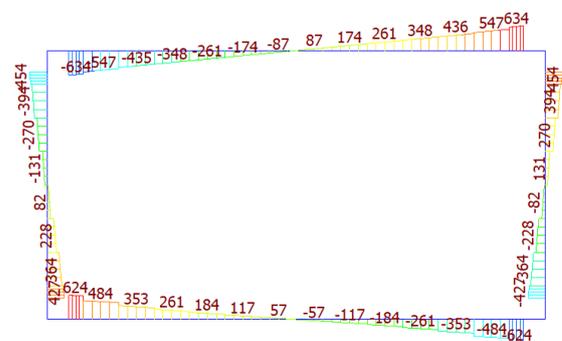


图9 基本组合剪力图

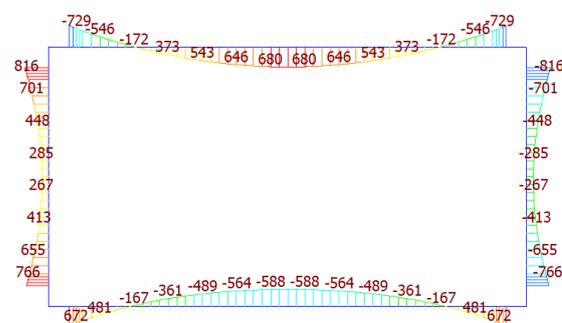


图10 基本组合弯矩图

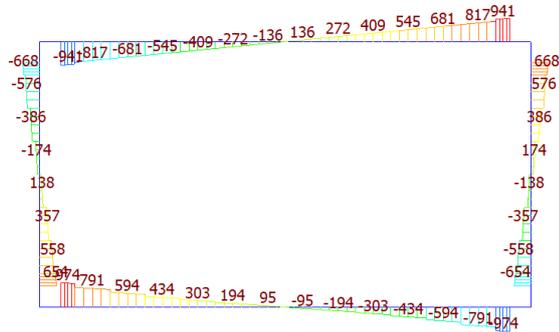


图 11 基本组合剪力图

以上计算结果相较于考虑土体卸荷拱效应下,弯矩减少约 10%,剪力减少约 10%,根据计算结果对管节进行配筋,全部钢筋含钢量为  $301\text{kg}/\text{m}^3$ 。相较于全覆土,节约钢筋  $94\text{kg}/\text{m}^3$ ,相较于考虑土体卸荷拱效应,节约钢筋  $37\text{kg}/\text{m}^3$ 。

为避免管节在施工阶段产生不可逆的损伤裂缝,需对其裂缝进行修补。根据 Abarams 的发现,混凝土裂缝本身是具备自修复功能<sup>[3]</sup>的,其原理为混凝土开裂后,在无外力持续作用下,混凝土中未水化的水泥在接触空气中水和二氧化碳之后形成了新的水泥,填补裂缝达到修复效果。尤其是在前期临时荷载作用下产生的裂缝,修复效果更佳。不过自修复潜力有限,不足以修复较大裂缝,且修复周期较长。

鉴于首次提出相对活荷载,目前尚无可靠的工程实践积累,为安全考虑,我们将引入混凝土的主动愈合或被动愈合相关技术<sup>[4]</sup>。主动愈合技术是指人为设计的一种预修复工艺,其不直接与水泥基材料反应,仅在水泥基材料开裂后通过一定的机理封堵裂缝;被动愈合技术是指修复组分掺入水泥基材料后通过利用水泥水化反应或产物提高抗裂性能,在水泥基材料开裂后亦可修复裂缝。根据张盼盼等人的研究成果<sup>[5]</sup>,利用主动愈合的微生物裂缝修复技术,裂缝宽度为  $0.4\sim 0.6\text{mm}$  时,自修复效果较好,裂缝修复率达 90.3%。本工程可引入混凝土的主动愈合微生物

裂缝修复技术,并考虑 3.0 的修复系数,裂缝修复效果  $0.13\sim 0.20\text{mm}$  (取平均值  $0.16\text{mm}$ ),施工阶段的正常使用极限工况下的裂缝限值不大于  $0.36\text{mm}$ 。相对活荷载消失,管节到达指定位置后,计算裂缝需满足原裂缝控制要求,且需满足任何工况下的承载能力极限状态强度验算。

在相对活荷载的概念下,配合混凝土主动愈合技术,使其具有一定的可行性。综上,采取合理的计算方法对不同覆土管节进行分段配筋来节约钢筋用量,可以达到安全、经济、低碳环保的目标。

#### 4 结论和建议

施工阶段的管节受力随顶进位置变化而变化,选择合适的施工顺序很关键,如由浅及深的推进可避免本文中的问题。同时选择合理的计算方法也可以做到精细化设计。

管节结构配筋参照上海市标准考虑土体卸荷拱效应进行设计,减少钢筋量效果显著。引入混凝土的自愈合技术,在终态满足裂缝控制和承载能力控制要求的前提下,对前期短暂的临时荷载作用下的裂缝进行适当放宽,可进一步减少钢筋量,且使整个工程含钢量更加合理。至于裂缝的放宽量仍需有大量的工程实践积累,本文结合混凝土自修复技术进行理论上的探讨,为类似工程的管节配筋提供一种新思路。

#### [参考文献]

- [1]T/CECS-716—2020 矩形顶管工程技术规程[S]
- [2]DG/TJ 08-2268—2019 顶管工程设计标准[S]
- [3]张猛,王永海,冷发光,等.水泥基材料裂缝自修复技术的研究与进展[J].混凝土,2023(4):149-154.
- [4]钱春香,李瑞阳,潘庆峰,等.混凝土裂缝的微生物自修复效果[J].东南大学学报(自然科学版),2013,43(2):360-364.
- [5]张盼盼,贾冠华,姜晨,等.初始裂缝宽度对混凝土自修复效果的影响[J].中国科技论文,2022,17(7):795-800.

作者简介:柯希潮(1991.9—),男,汉族,湖北省黄石市,大学本科,研究方向:轨道交通结构。