

文章编号: 1005-0523(2010)05-0028-06

软土层中管棚法施工某地下通道中的数值计算

石景山, 陈娟, 代仁平

(同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要:管棚法的设计多依赖于经验和工程类比,常用的设计理论多用于定性分析。数值模拟可以对管棚法设计进行量化分析。鉴于此,结合软土地区某浅埋地下通道工程,采用数值计算分析管棚和格栅在 CRD 法施工中的内力和弯矩,并提出针对危险工况采取相应的措施。

关键词:地下通道;浅埋暗挖;管棚法;格栅;有限元

中图分类号:U455.49

文献标识码:A

软土地区土层具有强度低、开挖变形大等特点,因此其地下工程施工常采用明挖法和顶管法施工。对于城市地下通道工程,明挖法占用场地大、影响城市交通;顶管法适用通道的距离较长,开挖断面形式较单一。因此,20 世纪 70 年代引进的管棚法被广泛的应用于城市地下洞室开挖^[1]。管棚法通过向拟开挖土层中打入钢管并注浆,以提高土层自稳能力,稳定土拱并且减少开挖引起地层损失;同时,钢管与围岩形成钢管棚架体系,可以有效控制围岩的变形^[2]。管棚法配合小导管注浆应用于城市地下工程具有交通干扰小、施工便捷、造价低、沉降小等优点^[3],在国内软弱土层地区的地下工程中应用广泛。常州文化广场^[4]、南京地铁珠江路一鼓楼软流塑区间^[5]、杭州武林广场^[4]等均采用 $\Phi 108$ 管棚超前支护,实际使用效果较好。

管棚法的设计缺乏完整的理论,主要依赖经验和工程类比,因此只能做定性分析^[2]。管棚分析理论主要包括将管棚作为静定简支梁或超静定梁的梁理论、基于 Winkler 地基模型的弹性地基梁理论和壳体理论^[6]。管棚法的数值模拟主要采用二维有限元法、快速拉格朗日有限差分法等^[7-8]。针对国内应用最广泛的小直径($\Phi 108$)管棚,结合上海市静安寺愚园路地下通道工程实例,根据土体与棚架体系的相互作用理论,采用 Winkler 地基模型的弹性地基梁理论分析在地下通道开挖工况转换过程中,管棚支护体系与格栅相互作用的受力转换及特征,实现了管棚法的量化计算。同时,针对危险工况提出相应措施,为管棚设计和施工提供重要参考。

1 工程概况

上海市静安寺愚园路地下通道工程包括过街通道、换乘通道和平顶通道三个部分,平面布置见图 1。通道上部地面交通量较大,通道两侧分布多栋高层建筑,下部开挖面附近分布有燃气、雨水等管线。受场地限制,不适合采用明挖法施工,故采用浅埋暗挖法。通道平均埋深 3 m,主要穿越③层灰色淤泥质粉质粘土,土层参数及性质见表 1。

收稿日期:2010-08-02

作者简介:石景山(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向为浅埋暗挖。

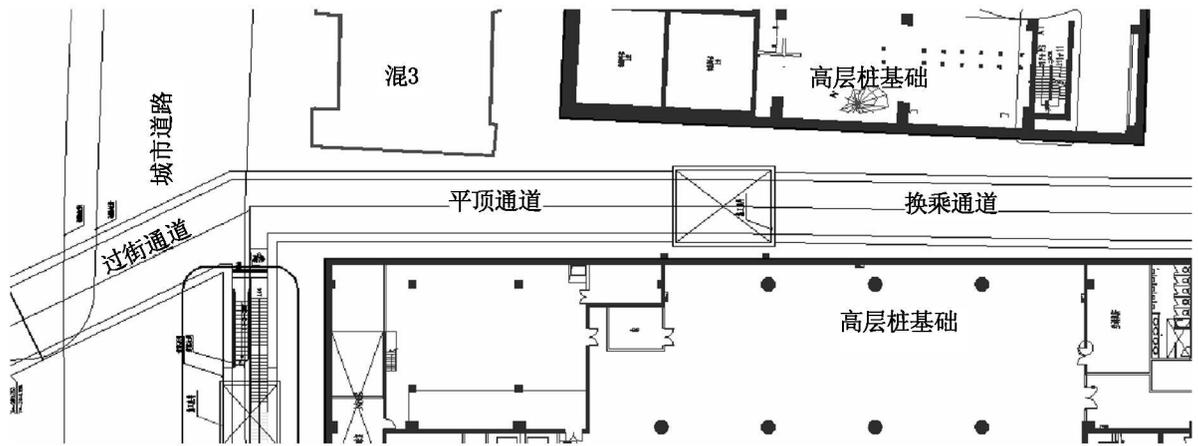


图 1 地下通道几何平面图

表 1 土层参数表

土层层号	土层名称	密度 /g·cm ⁻³	含水量 /%	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /°	平均层厚 /m	孔隙比	渗透系数 kv /10 ⁻⁷ cm·s ⁻¹
①1	杂填土					1.24		
①2	素填土					0.87		
②	灰黄色粉质粘土	1.83	35.4	6.0	28.5	1.65	0.998	1.46
③	灰色淤泥质粉质粘土	1.75	40.7	11.0	11.0	3.99	1.141	2.23
④	灰色淤泥质粘土	1.69	48.3	14.0	11.0	8.90	1.362	1.07
⑤1a	灰色粘土	1.72	40.4	16.0	11.0	8.90	1.417	8.36

2 通道支护设计方案

根据管棚的直径, 将管棚法分为小管棚、中管棚和大管棚等 3 类。小管棚主要起加固围岩和扩散围岩压力的作用; 大管棚可以近似为刚性结构; 而中管棚则介于两者之间。小管棚支护体系的形成是动态的, 其支护机理为柔性的棚架体系, 对应的沉降控制指标为棚架体系的变形和施工中的地层损失^[2]。因此, 管棚作用下的软土层中形成的微拱可以扩散围岩应力。同时不同的开挖荷载作用下, 微拱的形式也会发生相应的变化, 形成动态的拱支护体系。

该地下通道采用小管棚加小导管注浆超前支护, 开挖面采用管棚加格栅联合。通道拱部采用 Φ108 管棚和 Φ46 小导管注浆进行联合支护, 管棚环间距 40 cm, 管壁厚 8 mm。格栅支护采用间距 0.5 m 的格栅钢架结合 40 cm 单层 C20 网喷混凝土。通道各部分超前支护及开挖参数见表 2。通道各部分支护示意图见图 2。通道各部分的开挖顺序见图 3。

表 2 通道各部分基本信息

	超前支护	格栅支护	截面尺寸	开挖方法
过街通道	Φ108 管棚 20 根 Φ46 小导管	格栅钢架 间隔 0.5 m 单层 C20 网喷混凝土	6.2 m×3.1 m	CRD 法, 六步
平顶通道	Φ108 管棚 16 根 Φ46 小导管	格栅钢架 间隔 0.5 m 单层 C20 网喷混凝土	4.5 m×3.1 m	CRD 法, 四步
换乘通道	Φ108 管棚 16 根 Φ46 小导管	格栅钢架 间隔 0.5 m 单层 C20 网喷混凝土	4.5 m×3.1 m	CRD 法, 四步

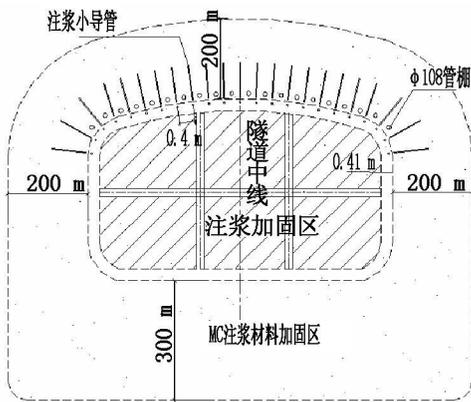


图2 通道超前支护示意图

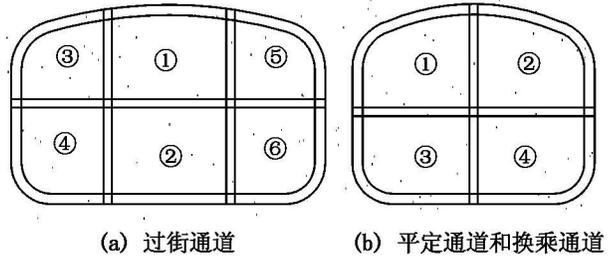


图3 开挖顺序示意图

3 支护方案数值计算与分析

利用有限元软件,根据管棚和格栅支护的设计方案,模拟开挖过程管棚受力和格栅受力状态,验证设计方案的安全性,并对危险工况进行分析。

3.1 模型简化

根据管棚作用下隧道开挖过程的施工经验和施工现场分析以及现有的管棚设计方法,将模型进行以下简化^[9]:

- (1) 取开挖完毕,施工初衬之前,只有钢管、格栅拱架支撑围岩作为最不利工况进行考虑;
- (2) 考虑土层较软,土体自稳能力差,认为钢管或管棚格栅联合支护承受上部所有土体自重以及地面荷载;
- (3) 对于管棚支护,钢管采用梁单元模拟,不考虑自重,开挖端视作固定端支座,开挖支护段视作弹性支座,用 Winkler 弹簧代替,管棚模型采用变系数弹性地基梁模型;
- (4) 对于格栅支护,采用自由变形荷载结构模型,将管棚和混凝土钢格栅组成的支护体系作为研究对象。混凝土钢格栅支撑采用梁单元模拟,不考虑自重,格栅底部的支撑土体看做弹性体,利用 Winkler 弹簧代替;
- (5) 格栅与管棚之间的传力杆采用 Frame 中的梁单元模拟;格栅拱架之间没有连接,整个体系即用钢管作为传力体系,将顶部荷载传给格栅拱架,格栅拱架通过钢管和上部土体相互作用。

基于以上分析,将单根管棚抽出,建立管棚计算简化模型见图4;管棚格栅支护体系三维有限元模型见图5。

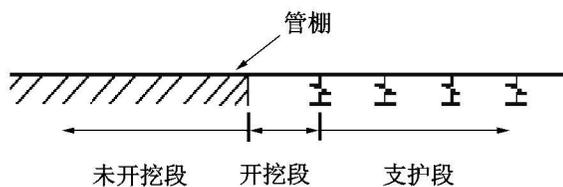


图4 管棚计算模型

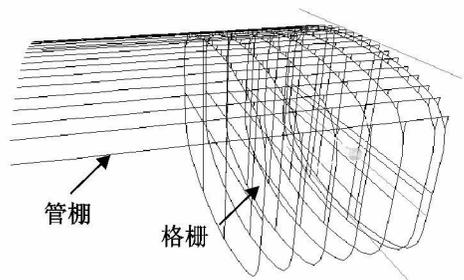


图5 格栅计算模型

3.2 管棚内力验算分析

根据通道覆土厚度以及上部人群荷载确定管棚受力。通道平均上覆土厚度 3 m,上部的覆土荷载为

$58.2 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$, 道路车辆和行人荷载取 $20 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-12}$, 管棚承受总的上部荷载为 $78.2 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$, 因此按照单位间距换算, 单根管棚承受上部荷载为 $31.28 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。格栅间距为 0.5 m , 刚度 $200\,000 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 土体系数^[10]取 $10\,000 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。当单环进尺取 0.5 m 时, 以整根管棚作为分析对象, 计算管棚内力, 计算结果见图 6。

计算结果表明管棚承受的最大弯矩为 $7.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。Q235 钢的强度设计值为 215 MPa ^[10], 管棚的抗弯强度设计值为 $15.64 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 抗弯强度极限值为 $25.46 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 考虑最不利因素组合下的管棚安全系数为 2.2, 因此设计安全。

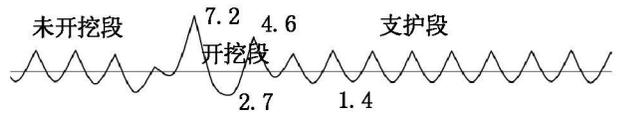
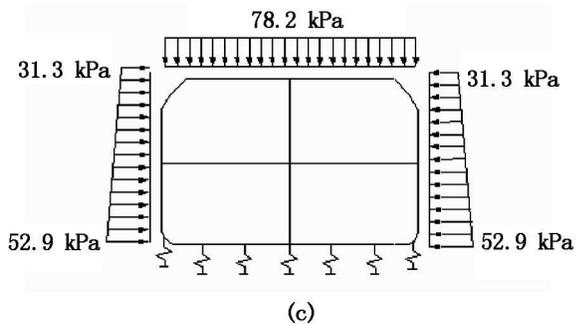
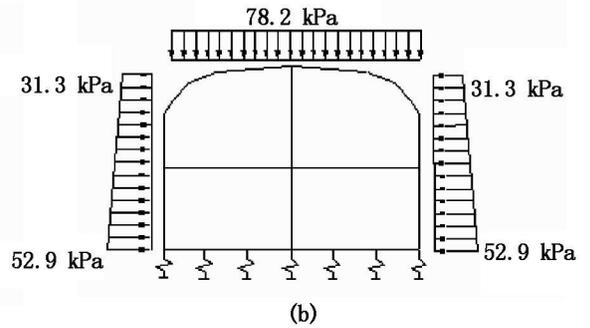
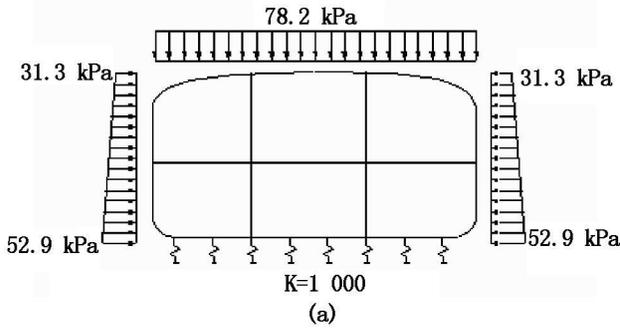


图 6 管棚弯矩分布图(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

3.3 格栅内力验算分析



格栅承受管棚传递下来的应力。格栅间距为 0.5 m , 格栅刚度 $20 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 土体系数^[6]取 $10\,000 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。因此, 地下通道各部分受力见图 7。

3.3.1 过街通道计算内力分析

采用荷载结构模型, 计算得过街通道断面各步开挖的结构轴力和弯矩见表 3, 开挖完成后格栅支护结构的弯矩和轴力分布见图 8, 图 9。

图 7 地下通道计算模型受力分析

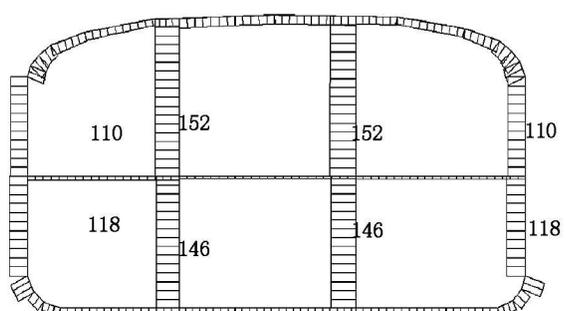
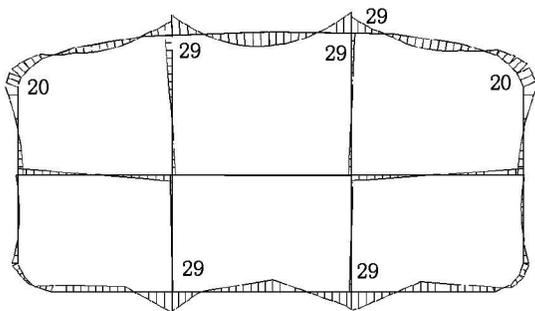


图 8 弯矩图(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

图 9 轴力图(单位: kN)

表 3 过街通道分步开挖计算最大弯矩及轴力

	第一步	第二步	第三步	第四步	第五步	第六步
最大弯矩/ $\text{kN} \cdot \text{m}$	24	26	34	32	41	29
最大轴力/ kN	88	88	165	148	182	152

从表 3 可知, 最大弯矩和轴力出现在第五步开挖, 分别为 $41 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 和 182 kN 。该部分支护结构的格栅

采用 20 a 工字钢,设计弯矩和轴向抗压强度为 50.96 kN·m 和 763.25 kN,通过计算,格栅结构抗弯和抗压的安全系数分别为 1.3 和 4.2。因此,该部分格栅设计满足要求。

3.3.2 换乘通道计算内力分析

采用荷载结构模型,计算得平顶通道断面各步开挖的结构轴力和弯矩见表 4,开挖完成后格栅支护结构的弯矩和轴力分布见图 10,图 11。

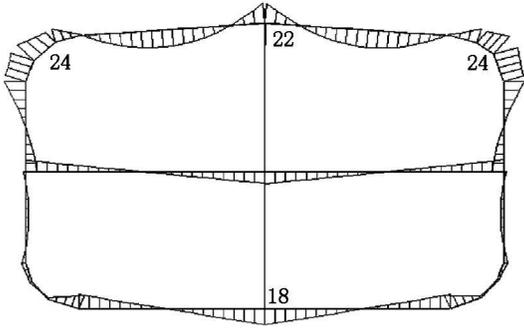


图 10 弯矩图(单位:kN·m)

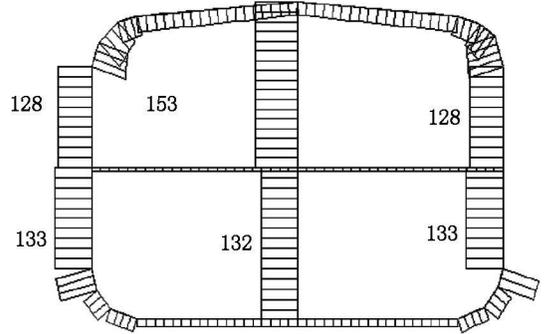


图 11 轴力图(单位:kN)

表 4 换乘通道分步开挖计算最大弯矩及轴力

	第一步	第二步	第三步	第四步
最大弯矩/kN·m	25	33	35	24
最大轴力/kN	84	177	184	153

从表 4 可知,最大弯矩和轴力出现在第三步中分别为 35 kN·m 和 184 kN。该部分支护结构的格栅采用 20 a 工字钢,设计弯矩和轴向抗压强度为 50.96 kN·m 和 763.25 kN,通过计算,格栅结构抗弯和抗压的安全系数分别为 1.5 和 4.2。因此,该部分格栅满足设计要求。

3.3.3 平顶通道计算内力分析

采用荷载结构模型,计算得换乘通道断面各步开挖的结构轴力和弯矩见表 5,开挖完成后格栅支护结构的弯矩和轴力分布见图 12,图 13。

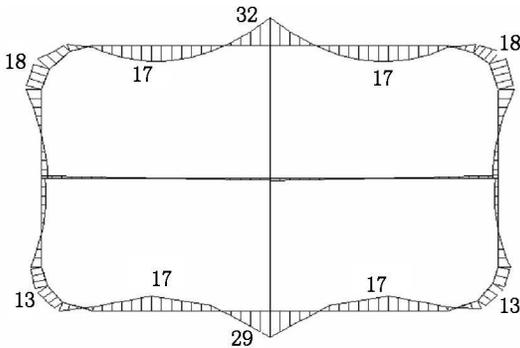


图 12 弯矩图/kN·m

图 12 弯矩图(单位:kN·m)

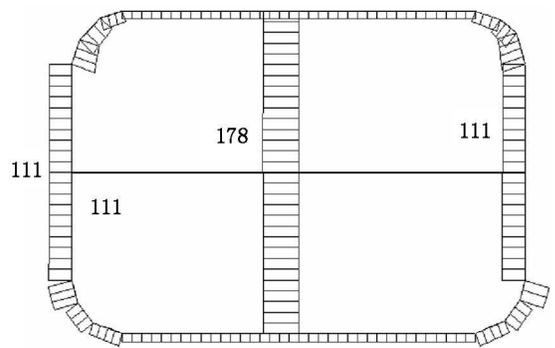


图 13 轴力图/kN

图 13 轴力图(单位:kN)

表 5 平顶通道分布开挖计算最大弯矩及轴力

	第一步	第二步	第三步	第四步
最大弯矩/kN·m	24	33	39	32
最大轴力/kN	87	181	187	170

由此,格栅最大弯矩和轴力出现在第三步中分别为 $39 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 和 187 kN 。该部分支护结构的格栅采用 20 a 工字钢,设计弯矩和轴向抗压强度为 $50.96 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 和 763.25 kN ,通过计算,格栅结构抗弯和抗压的安全系数分别为 1.3 和 4.1。因此,该部分格栅设计满足要求。

4 结论

通过采用有限元方法对管棚设计方案和格栅设计方案进行了量化分析,模拟管棚受力并分析了分步骤开挖条件下管棚格栅体系的受力及机构安全性。结果表明:(1) 地下通道三个部分的序棚和格栅设计均满足要求,结构安全。(2) 管棚支护安全系数为 2.2,格栅支护其抗弯安全系数为 1.3~1.5,此设计较为经济。(3) 过街通道的第五步开挖和换乘通道的第三步开挖格栅弯矩较大,施工过程中应加强监测,针对不利情况及时采取注浆加固补强措施。

参考文献:

- [1] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥:安徽教育出版社,2004.
- [2] 周顺华. 软弱地层浅埋暗挖施工中管棚法的棚架原理[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(14):2 566-2 570.
- [3] 王梦恕. 北京地铁浅埋暗挖施工法[J]. 岩石力学与工程学报,1989,8(1):52-62.
- [4] 周顺华,董新平. 管棚工法的计算原理及应用[M]. 上海:同济大学出版社,2007.
- [5] 周顺华,张先锋,余才高,等. 南京地铁软流塑浅埋地层浅埋暗挖施工法施工技术探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(3):526-531.
- [6] 关宝树,杨其新. 地下工程管棚法[M]. 成都:西南交通大学出版社,1996.
- [7] 雷升祥,周晓军. 彭水隧道出口不良地质大跨段的施工技术[J]. 铁道工程学报,2002(3):70-75.
- [8] 伍振志,傅志锋,王静,等. 浅埋松软地层开挖中管棚注浆法的加固机理及效果分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(6):1 026-1 029.
- [9] 董新平,胡新朋,周顺华. 软弱地层管棚作用特性判别与分析[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(4):641-634.
- [10] 上海市建设委员会. DBJ08-61-97 基坑工程设计规程[S]. 1997:47-50.

Numerical Calculation of Pipe Roof Method Applied in a Soft Ground Subway Tunnel Construction

Shi Jingshan, Chen Juan, Dai Renping

(School of Transportation, Tongji University, Shanghai, 203806, China)

Abstract: The design of pipe roof method mostly depends on experience and engineering analogy, while the usual design theory is employed in the qualitative analysis. Numerical simulation can make quantitative analysis for pipe roof method. Thus, combining with a soft ground subway tunnel project, numerical calculation is adopted to analyze the internal forces and moments of pipe roof and grids in the CRD construction. Some measures against dangerous working conditions are taken.

Key words: subway tunnel; shallow-buried under excavation; pipe roof; grids; finite element analysis; site element analysis

(责任编辑 王全金)