

文章编号: 1002-0268 (2007) 02-0094-05

浅埋软弱围岩双连拱隧道合理复合衬砌研究

伍振志¹, 王剑军²

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 扬州市市政工程有限公司, 江苏 扬州 225002)

摘要: 结合某隧道出口浅埋软弱段工程, 采用荷载-结构-弹性抗力模式对隧道支护结构承载能力进行了计算与分析, 在此基础上, 采用数值分析方法, 对隧道初期支护结构与围岩的刚度耦合关系进行了研究, 给出了喷射混凝土层不同厚度下的应力变化取值和钢拱架采用不同钢型参数对支护效果的影响取值, 并据此对隧道初期支护设计参数提出修正意见。此外, 论文还对连拱隧道合理二衬参数进行了探讨。

关键词: 浅埋软弱围岩; 双连拱隧道; 复合衬砌

中图分类号: U451⁺. 4

文献标识码: A

Study on Reasonable Composite Lining of Multi-arch Tunnel in Shallow Soft Stratum

WU Zhen zhi¹, WANG Jian jun²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Yangzhou Municipal Engineering Co. Ltd., Jiangsu Yangzhou 225002, China)

Abstract: Combining with the tunneling of exit on certain multi-arch tunnel in shallow and soft stratum, the structure-load-elastic reaction model was employed to analyze the bearing capacity of the tunnel support system. A coupling analysis was conducted with respect to the relationship between the stiffness of surrounding rock and support system using FEM, the stress of shotcrete of various thickness and the relationship between steel frame parameters and its support effect was obtained. Based on the above work, the reasonable initial support parameter was proposed. In addition, the reasonable secondary lining was discussed in the paper as well.

Key words: shallow soft stratum; multi-arch tunnel; composite lining

0 引言

连拱隧道是随着我国公路建设的迅速发展而提出的一种新型大跨度隧道形式, 其线形流畅, 占地面积少, 空间利用率高, 避免了洞口路基或大桥分幅, 与洞外线路连接方便; 同时在适应地形条件、环境保护以及工程数量上都具有优越性^[1]。

但是, 连拱隧道开挖跨度较大, 施工工序繁多, 开挖和支护相互交错, 施工过程中体系需经多次转换, 围岩应力变化和衬砌荷载转换复杂, 尤其是墙受力复杂。目前, 连拱隧道衬砌设计和施工无规范可循, 可供借鉴的施工经验较少, 尤其是复杂地层条件下, 可供参考的工程实例更是寥寥无几。目前, 国内在设计连拱隧道时, 主洞复合衬砌一般参照单洞隧道适当加强。这种设计方法具有一定的盲目性, 显然是

不合理的。

论文结合某隧道出口浅埋软弱段工程, 首先对隧道支护结构承载能力进行了计算与分析, 然后采用有限元模拟分析了支护结构与围岩的耦合关系, 并据以对隧道初始初期支护设计提出了修正意见。同时, 论文还对隧道的二次衬砌设计参数进行了探讨。

1 隧道支护结构承载能力计算与分析

某隧道为上海—银川高速公路襄(樊)—十(堰)段一条地质条件复杂、施工难度较大的双连拱隧道。隧道路面设计宽度 24 m, 设计高度 10 m。隧道出口地层至上而下分为 3 类: (1) 碎石层; (2) 强风化片岩; (3) 弱风化片岩, 为 II 级 (新规范为 V 级) 浅埋围岩 (埋深在 15 m 左右)。

根据某隧道 II 级 (新规范为 V 级) 围岩埋深及荷

载情况, 类比其他工程实例, 按照新奥法原理, 设计出以下复合式衬砌形式, 参数见表 1。

表 1 复合衬砌支护参数表

Tab. 1 Composite lining parameter

衬砌类型	围岩类别	初期支护				二次衬砌
		锚杆	钢筋网	喷射混凝土	钢拱架	
S2	II 类	WTD 锚杆, $L=3.5$	双层 $\phi 8$	C20 喷射混凝土, 28 cm	20b 工字钢间距 75 cm	拱部 50 cm 仰拱 50 cm

文献[2]认为, 对于浅埋软弱地段的衬砌, 作用在支护结构之上的荷载一般以松散荷载为主, 结构的支护作用比较明显, 一般应采用荷载-结构模式设计, 采用基于刚架结构理论的弹性地基梁有限元理论进行结构内力分析与强度校核比较符合实际受力状况。因此, 论文拟根据结构使用条件按照荷载-结构-弹性抗力模式进行内力分析与强度校核, 为支护参数调整提供佐证, 并为支护结构优化设计提供参考建议。

1.1 结构计算原则

传统设计方法都是在特定的参数条件下的强度校核, 将荷载按一定的设计比例分摊到初期支护和二次衬砌上, 然后分别校核在各自荷载作用下结构的强度。由于计算初始参数的不确定性, 其结果的可靠性和合理性都比较模糊: 一方面荷载分配系数的变化会使结构原有的计算条件失去意义, 另一方面计算过程中选用的参数一旦与实际情况相差较大就会影响分析结果的可靠性。本次隧道结构分析计算是通过隧道衬砌各部分在给定波动范围内物理力学参数条件下的承载力曲线来校核衬砌可靠性。这样通过施工过程中的监控量测确定影响结构承载力各项参数的变化后, 就可以准确了解各结构的工作状态, 使隧道结构计算真正落到实处。

支护结构其承载力可以分解成为如下 3 部分^[3]:

- (1) 系统锚杆的承载力: 内力计算按弹性拱计算, 并考虑周边围岩的弹性抗力, 强度校核按砌体结构进行。
- (2) 钢支撑及喷射混凝土的承载力: 考虑由钢拱架与喷射混凝土共同组成柔性支护结构, 按弹性地基上的刚架结构进行内力计算。强度校核按照由钢拱架承受弯矩, 由喷射混凝土衬砌和钢拱架共同承担轴力考虑。
- (3) 二次衬砌的承载力: 由于二次衬砌结构与初期支护之间铺设了防水层, 二次衬砌只考虑承受径向

性抗力荷载。钢筋混凝土衬砌强度校核按照配筋计算方法进行。

1.2 隧道支护结构承载能力计算与分析

隧道开挖后围岩性态变化对支护的作用有重要影响。同时, 支护也以自己的刚度和强度抑制岩体变形和破裂的进一步发展, 而这一过程同样也影响支护自身的受力。于是, 围岩与支护形成一种共同体; 共同体两方面的耦合作用和互为影响的情况称为围岩-支护共同作用^[4]。这里主要考虑承载能力随围岩侧压力系数 λ 和围岩弹性抗力系数 K 两个随机参数变化的影响, 即给出不同支护形式承载能力随 λ 和 K 变化时的曲线。

(1) 系统锚杆承载能力计算与分析

计算结果见图 1。从图中可以看出, 对于 II 类围岩地段的系统锚杆, 当侧压力系数较小 ($0.2 \sim 0.4$) 时, 其承载能力较低, 而且围岩的弹性抗力系数对其承载能力影响相对较大: 弹性系数越高, 其满足结构安全度的承载能力也越高; 当围岩的侧压力系数逐渐升高 ($0.4 \sim 0.6$) 时, 其承载能力逐渐提高, 而且各种弹性抗力系数的承载能力逐渐相同。这表明控制系统锚杆承载能力的主要因素是侧压力。具体到本隧道, 由于为浅埋, 围岩弹性抗力系数与荷载侧压力系数一般偏低, 则系统锚杆的承载能力约为 $40 \sim 48$ kPa, 相当于 $2.5 \sim 3.0$ m 高的土压力荷载。

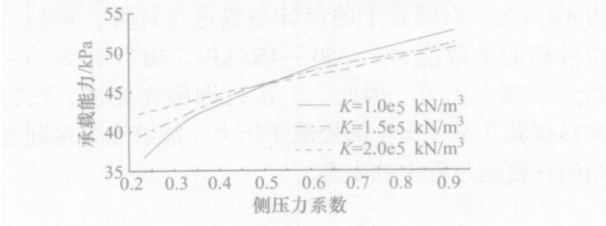


图 1 系统锚杆承载能力曲线

Fig 1 Bearing capacity curve of system anchor

(2) 工字钢拱架承载能力计算与分析

计算结果见图 2。从图中可以看出, 在 II 类围岩地段, 对于钢拱架这种柔性支护结构, 围岩的弹性抗

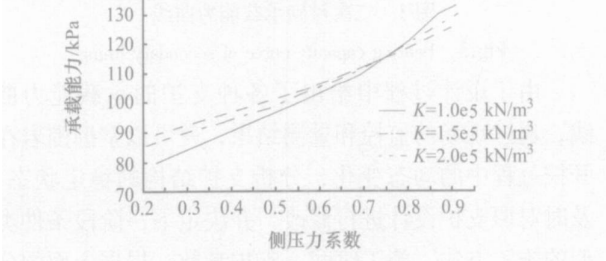


图 2 刚支撑承载能力曲线

力系数的变化对其承载能力的影响较小,不同弹性抗力系数条件下的结构承载能力相差不大,但是侧压力系数的变化对其影响相对较大:随着侧压力系数的提高,钢支撑的承载能力也在提高。具体到本隧道的情况,当隧道浅埋时,荷载的侧压力系数一般偏低,钢拱架的承载能力约 90~100 kPa,相当于 5.6~6.3 m 高的土压力荷载。

根据上面对初期支护的分析结果,我们发现 II 类浅埋围岩地段初期支护的承载能力约为 8.1~9.3 m 高的土压力。对于洞口超浅埋(5~12 m)地段,初期支护承载能力约为总荷载的 50%~60%,在长管棚的保护下能够保证施工过程的安全。对于埋深在 12~35 m 之间的浅埋地段,松散荷载约为 15~24 m 高的土压力,初期支护承载能力约为总荷载的 40%~50%,因此二次衬砌必须紧跟开挖面。

(3) 二次衬砌承载能力计算与分析

计算结果见图 3。二次衬砌采用钢筋混凝土结构,该结构能够很好的发挥钢筋混凝土的抗拉作用和混凝土的抗压作用,因此其承载能力较大,比较适应各种不利的荷载组合以及浅埋软弱破碎地带的复杂受力情况。由于二次衬砌的刚度较大,因此各种荷载承载能力随荷载侧压力系数的变化而变动较大:如当侧压力系数为 0.3 时,弹性抗力系数取低值,则承载能力约为 300 kPa;弹性抗力系数取高值,则承载能力约为 410 kPa。根据表 1 的设计参数进行计算,该类二次衬砌的承载能力约 350~450 kPa,相当于 21.9~28.1 m 高土压力。因此,二次衬砌施作完成,仅二次衬砌就几乎承担全部松散土压力,能够充分保证土结构在使用过程中的安全。

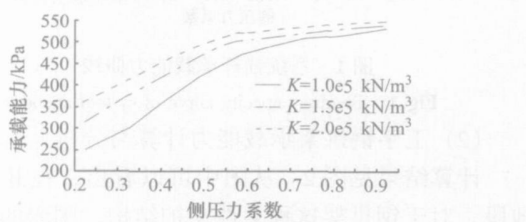


图 3 二次衬砌承载能力曲线

Fig 3 Bearing capacity curve of secondary lining

由于设计过程中给出了各种支护的承载能力曲线,通过现场的监控和量测结果,就可以掌握围岩在开挖过程中的动态变化,分析支护结构的稳定状态,及时对原支护设计进行修改,并决定下一阶段条件类似的施工方法、施工时间、支护参数。根据上面的分析,只要二次衬砌施作时间合理,及时施作仰拱,形成封

衬砌的承载能力,隧道的支护体系完全能确保隧道的稳定,并且有一定的富余。当然这些计算是建立在施工过程中严格按照设计要求和施工规范的条件下去进行的。

2 初期支护参数调整研究

由上面的承载能力分析,隧道初期支护相当于 8.1~9.3 m 高的土压力,二次衬砌相当于 21.9~28.1 m 高的土压力,如果再考虑到超长管棚强预支护效果和土体的自承能力,则隧道支护结构完全能满足隧道稳定性要求,且有一定的富余。考虑到隧道设计施工的经济性原则,可适当对隧道支护参数进行调整。

文献[5]认为,对于软弱围岩洞室,其破坏的根本原因是支护体力学特性与围岩力学特性不耦合所造成的,并且首先从某一部位开始,进而导致整个支护系统的失稳。支护体刚度小于围岩刚度(负向刚度不耦合),围岩产生的过量变形得不到限制,使围岩剧烈变形损伤、强度降低,从而将其本身承担的荷载传递到支护体上,形成局部过载而产生破坏。而支护体系刚度大于围岩刚度(正向刚度不耦合),围岩的塑性不能充分转化为变形能而释放,造成局部能量聚集,使支护体局部过载而首先破坏。

因此,隧道支护结构减弱并不是简单的对原设计参数进行缩减,而是应该在满足隧道稳定性的前提下,研究支护结构和地层的耦合关系,正如孙钧院士所言,“支护荷载随支护结构与地层相对刚度的减少而减少,随地层的屈服程度的增加而增加”,因此必须寻求支护结构和围岩之间合理的刚度匹配,以寻求最佳的支护方式。在这里主要考虑初期支护钢拱架、喷射混凝土的参数调整。由于中墙为厚 1.6m 的钢筋混凝土结构,设计上较为保守,故不考虑其受力和变形情况。

这里,笔者将采用有限元软件模拟不同支护参数条件下围岩和支护结构的应力场、位移场,以定量分析在分别变更某一支护参数的可能性质。为减少网格划分单元数和节点数,节省计算时间,在三维工艺模拟中,忽略施工方案的不对称性的影响,假设围岩材料为均质体,按对称性进行建模(见图 4)。隧道模型埋深 15 m,长度 30 m,左边取其跨度的 4 倍,右边沿中隔墙设计中线,下部取 3 倍洞高。计算模型的边界条件除上部为无荷载自由边界外,其余各侧面和底面均为法向约束边界,计算时仅按自重应力场考虑。岩体作为理想弹塑性体,采用空间二十节点等参元模

拟, 喷射混凝土以壳单元模拟, 中隔墙衬砌做填土单元。屈服条件采用 **Druker Prager** 屈服准则, 当材料进入塑性状态后, 其应力-应变关系由塑性理论中的增量法求解。

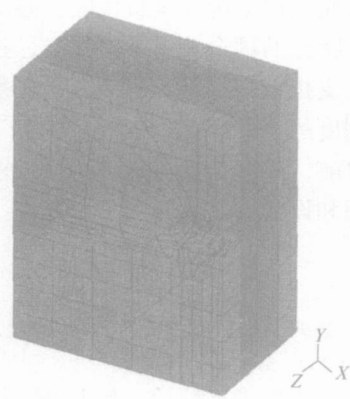


图 4 双连拱隧道三维有限元计算模型

Fig 4 3D FEM model for calculating

2 1 喷射混凝土厚度参数调整

采用三维有限元软件模拟了锚喷支护条件下喷层厚度一系列变化, 得到喷射混凝土层的应力变化值, 可以对比极限强度, 得到喷射混凝土厚度的优化取值, 见表 2。

表 2 喷射混凝土层不同厚度下的喷层应力变化

Tab 2 Stress of shotcrete of various thickness

喷射混凝土厚度/cm	拉应力/MPa	压应力/MPa	剪应力/MPa
28	一般 0. 28, 最大 1. 38	最大 3. 23	最大 1. 20
25	一般 0. 30, 最大 1. 48	最大 3. 54	最大 1. 30
20	一般 0. 35, 最大 1. 72	最大 4. 43	最大 1. 54
15	一般 0. 43, 最大 2. 34	最大 5. 73	最大 1. 88

从喷射混凝土的作用和破坏机理中, 喷射混凝土的破坏主要是剪切破坏和拉伸破坏。从表中应力情况可以看出, 喷射混凝土层的拉应力和最大压应力都基本满足其强度要求, 只是局部位置的最大拉应力、最大剪应力超过了其抗拉强度和抗剪强度。

由于破坏位置主要位于喷层与中隔墙的接触部位等处, 可通过局部加强予以改善。且以上模拟仅是考虑了锚喷支护单独作用的情况, 实际施工中, 在喷层中采用了双层钢筋网, 有效地改善了喷层的受力情况, 提高了其抗拉和抗剪的性能, 应该满足支护体的安全要求。

从表 2 对比情况可以看出, 厚度 28、25 cm 和 20 cm 的喷层最大拉应力均略高于其极限强度, 但相差不大, 最大剪应力也基本满足要求, 在对重点部位予以加强和设置钢筋网的情况下, 另外混凝土是分两次喷

在原有喷层厚度上酌减。
考虑到新奥法柔性支护的要求, 在锚喷钢拱支护中, 喷层的厚度一般不超过 20 cm。当然, 由于钢拱架的存在, 应考虑保护层的问题。综合考虑以上因素, 喷射混凝土层厚度可以调整为 20 cm, 在钢拱架位置略微加厚。

2 2 钢拱架间距参数调整

从原设计参数 (每榀间距 0. 75 m) 钢拱架模拟结果来看, 钢拱架在侧墙部位位移和弯矩值相对较大, 在侧导和主洞钢拱架连接处出现较大弯矩和应力集中现象, 应特别注意接头安装的可靠性。另外, 混凝土在喷射后虽然其压缩强度很快增长, 但达到较高程度尚需一些时间, 故在初期支护阶段, 承受围岩压力的主要还是钢支撑, 事实上刚支撑无论是隧道施工过程中, 还是在施工完成后, 均是承受围岩压力以及维持隧道稳定的主要结构。具体到本软弱破碎围岩隧道, 钢支撑的支护作用不可小视。考虑到钢支撑榀距的变化对围岩稳定性的影响非常敏感, 增加榀距几乎不太可能, 相比之下, 考察不同型号的工字钢支护时围岩的变形和受力特征以及工字钢的稳定性, 从而寻求节约加固材料却是可行的。表 3 给出了模拟钢拱架采用不同工字钢型号时隧道应力和变形情况。

表 3 钢拱架选用型钢参数对支护效果的影响

Tab 3 Reinforce effect of various steel frame

工字钢 型号	钢拱架 最大弯矩 /(kN·m)	钢拱架 最大轴力 /kN	围岩最 大位移 /mm	围岩最大 拉应力 /MPa	围岩最大 压应力 /MPa	围岩最大 剪应力 /MPa
14	6. 2	51. 0	19. 1	1. 84	8. 58	4. 17
18	10. 7	72. 1	18. 1	1. 76	8. 33	4. 06
20a	13. 4	83. 7	17. 5	1. 72	8. 15	3. 98
20b	14. 1	92. 1	17. 1	1. 70	8. 03	3. 92
22a	16. 9	98. 9	16. 8	1. 69	7. 94	3. 87

从表 3 中可以看出, 钢拱架强度增大, 其承受的最大弯矩和轴力亦相应增大, 效果非常显著。钢拱架强度变化对围岩位移、应力变化亦有影响, 位移、应力值都随着钢拱架强度的增大而减小, 因此, 增加钢拱架的强度可以提高围岩的稳定性。

当钢拱架强度太小时, 钢拱架的支护效果并不明显, 但钢拱架强度过高, 对支护效果的进一步提高也并不显著。设计中采用 20b 号工字钢架比较适中, 在考虑经济性的前提下, 可降一型号采用 20a 号工字钢。

3 二次衬砌减薄可能性探讨

1/2, 故在保证合理的安全系数的前提下, 选择合适的二次衬砌参数非常重要。

基于我国隧道结构设计中^[6]: (1) 结构设计上重衬砌, 轻初期支护或超前支护; (2) 安全系数偏大、结构设计模式化的情况, 笔者认为完全有必要对复合支护, 尤其在对软弱地层条下, 隧道二次衬砌设计的一些理念重新进行审视。对于二次衬砌来说, 以下几个方面有待进一步研究:

(1) 二次衬砌荷载分配问题, 尤其是软弱围岩的荷载分配问题;

(2) 在确定了其应承担的荷载(承载能力)后, 结构的优化问题, 比如如何确定合理的配钢率和衬砌厚度组合。

对于软弱围岩, 甚至黄土隧道, 锚喷支护完全可以起永久支护的作用, 有资料试验表明, 对于净宽 8.5~10.25 m 的老黄土隧道, 锚喷 10~15 cm (并设钢筋网) 可作为永久支护的一部分^[7]。

说明二次衬砌的厚度与应用范围可以进一步减少。当今不少学者^[8,9] 提倡推广挪威法(NIM)设计与施工, 也说明了这类问题。具体到本隧道, 由于二次衬砌几乎可承担隧道所有的上部荷载, 因此作者认为二次衬砌偏强, 可以在适当减弱, 对其最佳的配筋率和衬砌厚度组合优化设计可参考有关文献^[10]。

4 结论与建议

(1) 对于软弱地层中连拱隧道, 可供参考工程实例较少, 采用经验类比法进行设计是不可取的, 必须进行必要的理论验算。

(2) 结构设计的关键是对结构在施工过程与使用过程中可能遇到的各种因素进行可靠度分析, 通过计算结构承载能力曲线基本可以达到这个目的。实践证明这种分析方式具有十分重要的理论与现实意义。

(上接第90页)

跨径、主缆垂度以及用于设计主缆的各项参数。

参考文献:

- [1] 石磊, 张哲, 刘春成, 檀永刚. 混凝土自锚式悬索桥设计及其力学性能分析[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(2): 202-206.
- [2] JOHN A OCHSENDORF, DAVID P BILLINGTON. Self-anchored suspension bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 1999 (3): 151-155.
- [3] HO K YUNG KM, MYEONG JAE LEE, SUNG PIL CHANG. Non-linear shape finding analysis of a self-anchored suspension bridge [J]. E-

(3) 通过上面的计算分析发现, 在初期支护敷设及时且二衬紧跟的前提条件下, 某隧道洞口座复合衬砌初始支护设计参数完全能满足隧道的稳定性要求, 并具有一定的富余, 可适当降低支护参数。

(4) 研究支护结构的承载性能, 必须考察支护体和围岩力学特性的耦合关系才有意义, 过大的支护刚度和过强的支护结构都是不合理的, 必须寻求支护结构和围岩刚度的合理匹配。

(5) 目前, 我国二次衬砌设计过于模式化, 其相关作用机理和设计方法有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘洪洲. 连拱隧道设计施工技术研究现状 [J]. 西部探矿工程, 2001 (1): 54-55.
- [2] 徐干成, 白洪才, 郑颖人, 等. 地下工程支护结构 [M]. 北京: 中国水利出版社, 2002.
- [3] 郭小红, 乔春江. 罗盘基隧道支护结构的承载能力分析[C] // 2001年全国公路隧道学术会议论文集. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [4] STILLE H, HOLMOERY M, MORD G. Support of Weak Rock with Grouted Bolts and Shotcrete [J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech, 1989 26 (1): 99-103.
- [5] 何满潮, 景海河. 软岩工程力学 [M]. 北京: 科学技术出版社, 2002.
- [6] 关宝树. 隧道工程设计要点集 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [7] 张惠民, 程少俊. 公路隧道复合衬砌的设计与探讨 [J]. 河南交通科技, 1999, 19 (2): 5-9.
- [8] THOR SKJEGGEDAL, PER BOLLINGMO, NICK BARTON. Norwegian tunneling methods [J]. Tunnels & Tunneling, 1995, 12 (6): 32-34.
- [9] 王守仁. 应用新奥法的几个问题 [J]. 铁道工程学报, 1997, 53 (1): 104-111.
- [10] 黄小华, 彭立敏. 整体式隧道衬砌的非线性优化设计方法[J]. 现代隧道技术, 2001, 38 (4): 48-51.

- [4] 沈世钊, 徐崇宝, 赵臣. 悬索结构设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [5] ZHE ZHANG, YONGGANG TAN, LEI SHI, BIN TIAN. A new searching approach on the calculation of the target configuration of cables for suspension bridges [C] // Proceedings of the 3rd International Conference on Current and Future Trends in Bridge Design, Construction and Maintenance 2003: 95-99.
- [6] 傅强. 悬索桥空间非线性分析 [J]. 同济大学学报, 1997, 25 (4): 364-368.
- [7] 肖汝诚, 项海帆. 大跨径悬索桥结构分析理论及专用程序系统的研究 [J]. 中国公路学报, 1998, 11 (4): 42-50.
- [8] 丁望星. 悬索桥主缆线形计算方法 [J]. 海威姆预应力技术,