

文章编号: 1674—8247(2023)02—0019—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.02.004

超高回填明洞荷载模式优化研究

许兴伍

(中国铁路成都局集团有限公司, 成都 610082)

摘要: 超高回填明洞拱顶回填土高度远大于普通明洞, 采用传统荷载计算模式时理论与现实存在冲突。本文基于明洞结构施工过程及土压力形成机理, 将传统明洞荷载计算模式中侧向压力由主动土压力优化为静止土压力。结果表明: (1) 明挖法修建明洞工程, 采用传统荷载计算模式时, 存在某个极限回填高度; 超过该极限回填高度, 结构较难满足承载力及正常使用极限状态的要求; (2) 明洞结构在回填土荷载作用下, 变形量较小, 不具备形成主动土压力的变形条件, 明洞边墙侧向压力应为自重应力场的静止土压力; (3) 案例表明, 优化后的荷载计算模式与明洞受力状态更为接近, 静止土压力荷载的计算模式合理可行。

关键词: 超高回填; 明洞; 主动土压力; 静止土压力; 计算模式

中图分类号: U451.4

文献标识码: A

A Study on Optimization of Load Pattern of Open-cut Tunnel with Ultra-high Backfill

XU Xingwu

(China Railway Chengdu Group Co., Ltd., Chengdu 610082, China)

Abstract: The backfill height of the arch crown of the open-cut tunnel with ultra-high backfill is much higher than that of the ordinary open-cut tunnels, and there is a conflict between theory and reality when the traditional load calculation mode is adopted. Based on the construction process of open-cut tunnel structure and the formation of earth pressure, the lateral pressure in the traditional load calculation mode of the open-cut tunnel was replaced from active earth pressure to static earth pressure as an optimization in this paper. The results show that: (1) When the traditional load calculation mode is applied for the an open-cut tunnel, there is a certain limit backfilling height; exceeding the limit backfilling height, the structure is difficult to meet the requirements on bearing capacity and serviceability limit state. (2) Under the action of backfill soil load, the deformation of the open-cut tunnel structure is small and does not have the deformation conditions to form active earth pressure. The lateral pressure of the side wall of the open-cut tunnel shall be the static earth pressure of the dead-weight stress field. (3) The case shows that the optimized load calculation mode is closer to the stress state of the open-cut tunnel, and the calculation mode of static earth pressure load is reasonable and feasible.

Key words: ultra-high backfill; open-cut tunnel; active earth pressure; static earth pressure; calculation mode

为缓和边坡危岩落石的冲击或支挡边坡的坍塌, 明洞顶都会有一定厚度的回填土石。根据设计要求,

回填土石的厚度选取遵循如下原则:

(1) 为防御一般的落石、崩塌, 回填土石的厚度不

收稿日期: 2022-04-23

作者简介: 许兴伍(1971-), 男, 高级工程师。

引文格式: 许兴伍. 超高回填明洞荷载模式优化研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(2): 19-23.

XU Xingwu. A Study on Optimization of Load Pattern of Open-cut Tunnel with Ultra-high Backfill[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(2): 19-23.

- 应小于 1.5 m;
- (2) 当落石、崩塌较严重时,应适当增加回填土石厚度;
- (3) 当洞顶回填土石用于支挡边坡坍滑时,其厚度应结合边坡稳定及回填反压等需要确定;
- (4) 立交明洞的回填土石厚度,根据立交建筑物的控制高程和结构要求确定,必要时可不设回填土石层。

通常情况下明洞顶部回填土石厚度较小,然而,随着交通路网快速延伸、土地资源愈加稀缺、交通综合枢纽、无缝对接成为发展趋势以及受制于规划等因素,超高回填明洞越来越多地出现在工程建设中^[1-4]。目前,明洞结构进行设计时通常采用 TB 10003 - 2016《铁路隧道设计规范》和 JTG 3370. 1 - 2018《公路隧道设计规范第一册土建工程》^[5-6](以下简称《隧规》)推荐的荷载计算模式:采用的竖向土压力为明洞顶部土柱重力,侧向土压力则为主动土压力。根据该荷载计算模式,明洞顶部回填土石厚度十分有限。然而实际工程中常有明洞顶部回填土石厚度远大于设计厚度的工程案例。鉴于此,有专家提出“当明洞顶部回填土石较厚时,明洞土压荷载计算模式可以参照浅埋隧道”的观点。大量工程实践表明^[7-13],采用目前《隧规》荷载计算模式对超高填方明洞结构进行设计明显不合理。换言之,目前对超高回填明洞荷载计算模式缺少清晰的思路与认识,对其荷载计算模式进行优化研究,一方面可解决现实与理论的冲突,另一方面可用于指导超高回填明洞设计,具有重要的工程实际意义。

本文从《隧规》中明洞回填土压力计算方法(以下简称“传统模式”)入手,对超高回填明洞荷载计算模式进行分析和优化。

1 传统模式受力分析

1.1 荷载

明洞的主要荷载包括:结构自重、围岩压力以及回填土石压力(其中可考虑一定数量的塌方、落石)^[14]。《隧规》中明挖隧道拱部竖向土压力为全覆土石重力,计算见式(1);侧向土压力计算见式(2);当填土坡面水平时,侧向土压力为朗肯主动土压力,侧压力系数计算见式(3)。

$$q = \gamma h_i$$

(1)

$$e = \lambda \gamma h_i$$

(2)

$$\lambda = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_c}{2}\right)$$

(3)

式中: h_i ——明洞拱顶土柱高度(m);
 φ_c ——回填土计算摩擦角($^{\circ}$);
 γ ——回填土重度(kN/m^3);
 λ ——拱圈或边墙侧压力系数,计算方式参照《隧规》执行。

以某单洞双线铁路隧道为例,开挖宽度 11 m,围岩级别为 V 级,对明洞回填坡面水平时进行讨论。回填土重度取值 $20 \text{ kN}/\text{m}^3$ 时,计算荷载如表 1 所示。

表 1 计算荷载表

回填土高度/m	竖向土压力/(kN/m^2)		水平土压力(主动)/(kN/m^2)	
	拱顶 q_1	拱脚 q_2	拱顶 e_1	隧底 e_2
5	100.00	182.62	27.10	68.25
10	200.00	282.64	54.20	95.36
15	300.00	382.65	81.30	122.47
20	400.03	482.67	108.40	149.57
25	500.00	582.68	135.50	176.68
30	600.00	682.69	162.59	203.78
40	800.00	882.72	216.79	258.00
50	1 000.00	1 082.75	270.99	312.21
75	1 500.00	1 582.81	406.49	447.74
100	2 000.00	2 082.88	541.98	583.27

1.2 计算模型

明洞衬砌计算采用“荷载 - 结构”法,即主动荷载加地层弹性约束,按平面杆系有限元法进行计算。主动荷载包括土压力和结构自重,地层弹性约束采用曲面弹簧(只能受压)模拟。当明洞回填坡面水平时,计算模型如图 1 所示。

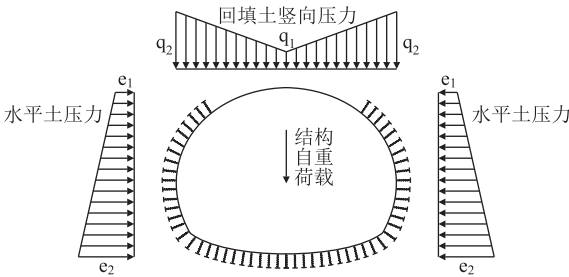


图 1 明洞计算模型图

1.3 受力分析

1.3.1 衬砌受力随回填土高度变化

假设明洞衬砌厚 0.8 m,材质为 C35 钢筋混凝土。弹性反力系数为 180 MPa,受拉侧设置 10 根 $\phi 32 \text{ mm}$ 的 HRB400 钢筋。通过有限元软件 MIDAS/GTSSNX 计算得到衬砌内力,按照破损阶段法和容许应力法验算承载力,按照概率极限状态法验算最大裂缝宽度。衬砌拱顶为控制截面受力最不利,随着回填土高度变

化,拱顶内力及承载力安全系数、最大裂缝宽度变化情况如表 2 所示。

表 2 衬砌拱顶受力随回填土高度变化情况表

回填土高度/m	弯矩 M/(kN·m)	轴力 N/kN	安全系数 K	最大裂缝宽度/mm
5	307	412	12.34	0.02
10	530	696	7.06	0.03
15	754	981	4.94	0.07
20	978	1 265	3.80	0.15
25	1 221	1 633	3.09	0.22
30	1 425	1 835	2.60	0.29
40	1 873	2 404	1.97	0.43
50	2 321	2 973	1.59	0.57
75	3 440	4 397	1.07	0.78
100	4 559	5 820	0.81	0.78

1.3.2 结构受力随衬砌厚度变化

假设明洞衬砌材质为 C35 钢筋混凝土,回填土高度 50 m。弹性反力系数为 180 MPa,受拉侧设置 10 根 $\phi 32$ mm 的 HRB 400 钢筋。通过有限元软件 MIDAS/GTSNX 计算得到衬砌内力,按照破损阶段法和容许应力法验算承载力,按照概率极限状态法验算最大裂缝宽度。随着衬砌厚度变化,拱顶内力及承载安全系数、最大裂缝宽度变化情况如表 3 所示。

表 3 衬砌拱顶受力随结构厚度变化情况表

衬砌厚度/cm	弯矩 M/(kN·m)	轴力 N/kN	安全系数 K	最大裂缝宽度/mm
60	1 621	3 427	1.81	0.40
70	1 968	3 199	1.65	0.51
80	2 321	2 973	1.59	0.57
90	2 667	2 759	1.53	0.63
100	3 001	2 554	1.47	0.67
110	3 304	2 372	1.44	0.71
130	3 827	2 063	1.43	0.74
150	4 221	1 836	1.48	0.71

由表 2 可知,在相同的明洞衬砌厚度和配筋时,衬砌内力随着洞顶回填土石高度的增加而增大,安全系数随着回填土石高度的增加而减小,最大裂缝宽度随着回填土石高度的增加而增大;当回填土高度超过 25 m 时,衬砌结构将不满足设计要求。

由表 3 可知,在相同的明洞衬砌回填土石高度和配筋情况下,衬砌厚度的增加导致结构刚度增大,拱顶弯矩增大,轴力减小,安全系数变化不大,最大裂缝宽度变大。

综上所述,采用《隧规》中明洞回填土压力计算方法(即传统荷载计算模式)时,对于超高回填钢筋砼明洞衬砌,增大衬砌厚度对提高结构承载能力作用甚

微,甚至会导致最大裂缝宽度增大。此外,考虑到施工及钢筋间距构造要求,增加配筋提高承载力的空间有限。因此,采用传统荷载计算模式时,明洞结构必定存在某个极限回填高度,如本节计算模型中拱顶极限回填高度约为 25 m。超过该极限回填高度,明挖法修建明洞工程是不可行的。

2 优化模式受力分析

2.1 优化内容

明挖法修建的明洞工程,明洞衬砌结构施作完成后,再对周围回填土进行分层填筑,机械压实,整个过程中回填土与结构一起变形沉降,回填土应力场为回填土固结形成的自重应力场,竖向压力为静止土压力。明洞结构在荷载作用下,变形量较小,不具备形成主动土压力的变形条件。明洞边墙侧向压力应为自重应力场的静止土压力。基于明洞结构施工过程及土压力形成机理,本文将传统明洞结构荷载模式中侧向压力由主动土压力优化为静止土压力。

2.2 计算模型

假定回填坡面水平,计算模型如图 1 所示,侧向压力计算如下:

$$e = \lambda \gamma h_i \tag{4}$$

$$\lambda = 1 - \sin \varphi_c \tag{5}$$

式中各符号说明同 1.1 节。

当回填土重度为 20 kN/m³ 时,计算荷载如表 4 所示。

表 4 计算荷载表

回填土高度/m	竖向土压力/(kN/m ²)		水平土压力(静止)/(kN/m ²)	
	拱顶	拱脚	拱顶	隧底
5	100.00	182.62	42.65	107.40
10	200.00	282.64	85.29	150.05
15	300.00	382.65	127.94	192.70
20	400.03	482.67	170.58	235.35
25	500.00	582.68	213.23	278.01
30	600.00	682.69	255.88	320.66
40	800.00	882.72	341.17	405.96
50	1 000.00	1 082.75	426.46	491.26
75	1 500.00	1 582.81	639.69	704.52
100	2 000.00	2 082.88	852.92	917.78

2.3 受力分析

计算模型同 1.2 节,明洞衬砌厚度、配筋等信息同 1.3 节。利用 MIDAS/GTS 分析得到衬砌拱顶为最不利受力位置,随着回填土高度变化,拱顶内力及承载力安全系数、最大裂缝宽度变化情况如表 5 所示。

表 5 衬砌拱顶受力随回填土高度变化情况表

回填土高度/m	弯矩 M/(kN·m)	轴力 N/kN	安全系数 K	最大裂缝宽度/mm
5	242	490	17.68	0.01
10	454	804	9.07	0.02
15	642	1 138	6.42	0.03
20	820	1 470	5.04	0.08
25	1 006	1 806	4.11	0.13
30	1 193	2 140	3.46	0.18
40	1 563	2 810	2.65	0.29
50	1 931	3 475	2.14	0.39
75	2 866	5 145	1.44	0.65
100	3 792	6 820	1.09	0.79

由计算结果可知,在结构厚度和配筋相同的条件下,当水平土压力为静止土压力时,最大回填土高度约为 35 m。在结构厚度、配筋以及填土高度相同条件下,相比于传统荷载计算模式,采用静止土压力优化模式时,结构轴力增大、弯矩减小,安全系数增大、最大裂缝宽度减小。采用静止土压力计算模式进行超高回填明洞结构设计可有效提高极限回填高度。

3 案例分析

3.1 案例情况

西南地区某时速 160 km 电气化铁路某双线隧道洞身设置偏压式明洞隧道,隧道拱顶回填土高度设计为 3~5 m,回填土周边修建截水天沟。受城市扩张影响,该片区已纳入城市规划建设范围,隧道明洞范围 200 m 以外区域已进行平场,部分区域已完成路网和城市建设,原地形已发生根本变化,明洞洞顶被地方单位回填了约 15 m 厚土石,远超出设计允许回填高度。洞身结构横断面如图 2 所示。

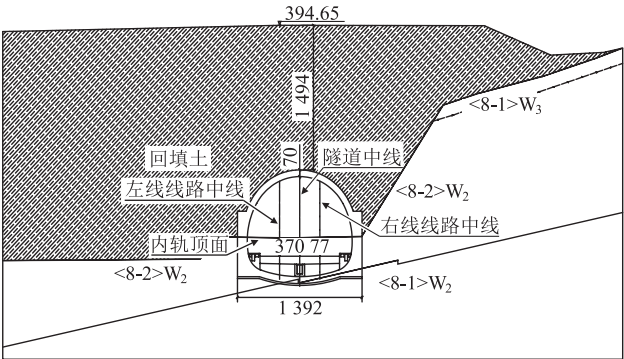


图 2 洞身结构横断面图

3.2 受力分析

该隧道明洞采用 C35 钢筋混凝土衬砌,厚 0.7 m,边墙地层弹抗系数取值 50 MPa/m、仰拱取值 150 MPa/m,

受拉侧设置 5 根直径为 28 mm 的 HRB400 钢筋。土压力荷载计算见“表 1、表 4 计算荷载”中回填土高度 15 m。采用“荷载-结构”法计算得到传统荷载计算模式和优化模式的衬砌内力,并进行承载能力和正常使用极限状态验算,如表 6 所示。

表 6 15 m 高填方下衬砌拱顶受力情况表

水平土压力类别	弯矩 M/(kN·m)	轴力 N/kN	安全系数 K	最大裂缝宽度/mm
主动土压力	672	1 227	2.19	0.38
静止土压力	573	1 348	3.52	0.18

由计算结果可知,根据传统荷载计算模式,水平荷载采用主动土压力,明洞衬砌承载能力及正常使用极限状态不能满足设计要求,结构存在着极大的安全隐患。

根据优化模式,当水平土压力为静止土压力时,明洞衬砌能够有效满足承载力及正常使用极限状态要求,且安全系数有较大富余。

3.3 案例分析

按传统荷载计算模式,该案例拱顶回填极限高度仅为 7 m,现场实际填土堆高达 15 m,远远超出了设计回填高度。该超载状态持续近一年,隧道结构未出现结构劣损、开裂等病害,该现状与传统荷载模式计算结果严重不符。通过优化的荷载计算模式,采用静止土压力进行结构计算,该案例堆载 15 m 情况下,结构承载能力及正常使用极限状态满足要求。工程案例的现状表明优化后的荷载计算模式与明洞实际受力状态更为接近,同时也验证了静止土压力荷载计算模式的合理性和可行性。

4 结论

超高回填明洞由于拱顶回填土高度远大于普通明洞,采用传统荷载计算模式时存在理论与现实的冲突。本文基于明洞结构施工过程及土压力形成机理,将传统明洞荷载计算模式中侧向压力,由主动土压力优化为静止土压力,得到的主要结论如下:

(1) 明挖法修建明洞工程,采用传统荷载计算模式时,存在某个极限回填高度。超过该极限回填高度,由于受力、结构的限制,结构不能满足承载力及正常使用极限状态要求。

(2) 基于明洞结构施工过程及土压力形成机理,明洞结构在荷载作用下,变形量较小,不具备形成主动土压力的变形条件。明洞边墙侧向压力应为自重应力场的静止土压力。

(3) 采用优化荷载计算模式,超高回填明洞极限

回填高度可大大提高,如常规双线铁路隧道极限回填高度由 25 m 增大为 35 m。

(4) 案例分析表明,优化后的荷载计算模式与明洞受力状态更为接近,静止土压力荷载计算模式合理可行。

本文尝试运用简单的岩土理论,解决复杂的工程问题,对超高回填明洞荷载计算模式做了尝试性优化研究,希望能抛砖引玉。

参考文献:

- [1] 韩国强,周鹏,李盛,等. 考虑多因素耦合的高填明洞垂直土压力计算方法研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(3): 94–99.
HAN Guoqiang, ZHOU Peng, LI Sheng, et al. Research on the Calculation Method of Vertical Soil Pressure on High-filled Open Cut Tunnels Based on Multi-factor Coupling [J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(3): 94–99.
- [2] 黎康. 渝利铁路高填方深基础明洞结构力学特性研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(3): 79–84.
LI Kang. Study on Mechanical Characteristics of Open Cut Tunnel Structure with High Fill and Deep Foundation in Chongqing-Lichuan Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(3): 79–84.
- [3] 车宏亚. 上埋式管道垂直土压力的研究[M]. 北京: 水利电力出版社, 1958.
CHE Hongya. Research on Vertical Earth Pressure of Upper Buried Pipeline [M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1958.
- [4] 周鹏. 高填方明洞土压力设计荷载研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
ZHOU Peng. Study on Design Load of Earth Pressure in High-filled Cut-and-cover Tunnel [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2019.
- [5] TB10003–2016 铁路隧道设计规范[S].
TB10003–2016 Code for Design of Railway Tunnel [S].
- [6] JTG 3370.1–2018 公路隧道设计规范第一册土建工程[S].
JTG 3370.1–2018 Code for Design of Highway Tunnel Volume One Civil Engineering [S].
- [7] 罗禄森,张璞. 高填方明洞荷载初探[J]. 高速铁路技术, 2014, 5(3): 90–93.
LUO Lusen, ZHANG Pu. Preliminary Study on Load of High Fill Open Cut Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2014, 5(3): 90–93.
- [8] 李盛. 高填黄土明洞卸载结构的垂直土压力特性和计算方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
LI Sheng. Study on Vertical Earth Pressure Characteristic and Calculation Method of Unloading Structure for High Fill Loess Open Cut Tunnel [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2015.
- [9] 匡亮,陈永坤,谭永杰,等. 沟谷山区城市超厚填土铁路明洞设计[J]. 铁道工程学报, 2013, 30(12): 51–56.
KUANG Liang, CHEN Chikun, TAN Yongjie, et al. Design of Extra-high Filling Urban Railway Open Cut Tunnel in Valley Mountain Area [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30(12): 51–56.
- [10] 杨锡武,张永兴. 山区公路高填方涵洞的成拱效应及土压力计算理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3887–3893.
YANG Xiwu, ZHANG Yongxing. Study on Arch Action and Earth Pressure Theory for Culverts under High Embankment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3887–3893.
- [11] 杨锡武. 山区公路高填方涵洞土压力计算理论研究综述[J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(4): 55–61, 66.
YANG Xiwu. Comprehension Introduction about the Earth Pressure Calculation Theories for High Embankment Culverts in Mountainous Place [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(4): 55–61, 66.
- [12] 折学森,顾安全. 沟谷地形中埋设管道的土压力研究[J]. 长安大学学报(自然科学版), 1989, 9(4): 33–39.
ZHE Xuesen, GU Anquan. Study on the Earth Pressure on Conduit Lying Hidden in the Trench Terrain [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 1989, 9(4): 33–39.
- [13] 顾安全. 上埋式管道及洞室垂直土压力的研究[J]. 岩土工程学报, 1981, 3(1): 3–15.
GU Anquan. Investigation of the Vertical Earth Pressure on Projecting Conduit and Underground Chamber under a High Embankment [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1981, 3(1): 3–15.
- [14] 旷文涛. 超高回填明洞设计探讨[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(7): 112–115.
KUANG Wentao. Design Research on Open Cut Tunnel Having Ultra-high Backfill [J]. Railway Standard Design, 2014, 58(7): 112–115.