

单洞四车道超大跨度公路隧道IV级围岩合理 施工方法研究

李合银¹,高景明¹,李炎峰^{2*},荀文杰²,董方方²,张建刚¹

(1.中交二公局第四工程有限公司,河南 洛阳 471013; 2.长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:为研究超大跨度公路隧道的合理施工方法,该文以连霍高速公路新疆境内小草湖至乌鲁木齐段改扩建工程杏花村1号隧道为依托,通过数值模拟方法对超大跨度公路隧道IV级围岩采用CD法、上台阶CD法和三台阶七步开挖法施工的隧道变形和支护结构受力情况进行分析,在变形与支护结构受力满足设计要求的前提下,考虑各施工方法的优缺点等因素,确定最合理的施工方法,通过开展现场试验分析施工方法的可行性。结果表明:① CD法、上台阶CD法和三台阶七步开挖法数值计算的隧道变形均不大于21 mm,初期支护安全系数分别为2.48、2.41、2.28,大于隧道设计细则要求的最小安全系数,变形与支护结构受力均满足设计要求;② 对比3种工法的优缺点,结合隧道地质条件等因素,确定杏花村1号隧道IV级围岩最优施工方法为上台阶CD法;③ 根据现场测试结果,IV级围岩采用上台阶CD法施工,拱部下沉最大值为14.6 mm,周边位移最大值为15.0 mm,隧道变形控制效果较好;初期支护的最小安全系数为6.94,满足设计要求。

关键词:隧道工程;超大跨度公路隧道;合理施工方法;CD法;上台阶CD法

中图分类号:U455.4

文献标志码:A

Reasonable Construction Method for Grade IV Surrounding Rock in Single-Hole Four-Lane Super-Span Highway Tunnel

LI Heyin¹, GAO Jingming¹, LI Yanfeng^{2*}, XUN Wenjie², DONG Fangfang², ZHANG Jiangang¹

(1. CCCC-SHB Fourth Engineering Co., Ltd., Luoyang, Henan 471013, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: In order to study the reasonable construction method of super-span highway tunnels, the Xinghuacun No. 1 tunnel included in the reconstruction and expansion project of the Xiaocaohu - Urumqi section of the Lianyungang - Khorgos Expressway in Xinjiang was studied. The numerical simulation method was used to analyze the deformation and stress of the supporting structure of the Grade IV surrounding rock in the super-span highway tunnel constructed by the center diaphragm (CD) method, the upper-bench CD method, and the three-bench and seven-step excavation method. Under the premise that the deformation and the stress of the supporting structure met the design requirements, the advantages and disadvantages of each construction method were considered, and the most reasonable construction method was determined. The field test was implemented to analyze the feasibility of the construction method. The results show that: ① The tunnel deformation calculated by the CD method, the upper-bench CD method, and the three-bench and seven-step excavation method are all less than 21 mm, and the safety factors of the supporting structure at the initial stage are 2.48, 2.41, and 2.28, respectively, which are greater than the minimum safety factor required by the tunnel design rules. The deformation and the stress of the supporting structure all meet the design requirements; ② the advantages and disadvantages of the three construction methods are compared, and the optimal construction method for the grade

收稿日期:2023-04-05(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51978065)

作者简介:李合银,男,高级工程师.E-mail:1250347769@qq.com

*通信作者:李炎峰,男,硕士研究生.E-mail:yanfengli@chd.edu.cn

Ⅳ surrounding rock in the Xinghuacun No. 1 tunnel is determined as the upper-bench CD method after considering tunnel geological conditions and other factors; ③ according to the field test results, the grade Ⅳ surrounding rock is constructed by the upper-bench CD method. The maximum arch subsidence is 14.6 mm, and the maximum peripheral displacement is 15.0 mm, indicating a good tunnel deformation control effect. The minimum safety factor of the supporting structure at the initial stage is 6.94, which meets the design requirements.

Keywords: tunnel engineering; super-span highway tunnel; reasonable construction method; CD method; upper-bench CD method

0 引言

近年来,随着中国高等级公路的飞速发展,公路隧道建设规模越来越大。同时,随着中国机动车保有量的持续增长,公路交通量随之快速增加,经济发达地区两车道、三车道公路隧道的交通拥堵问题较为严重。为缓解交通压力,提高公路网络服务水平,高速公路、经济发达城市及周边地区修建单洞四车道超大跨度公路隧道(开挖跨度 ≥ 18 m)的数量越来越多^[1-3]。

与普通的两、三车道公路隧道相比,单洞四车道超大跨度公路隧道具有跨度更大、结构更加扁平、支护结构受力更加不利等特点^[4-6]。现阶段中国超大跨度公路隧道建设缺乏系统的理论和标准指导,给设计、施工带来极大困扰。因此,对单洞四车道超大跨度公路隧道合理的施工方法进行研究十分迫切。目前,部分学者对超大跨度公路隧道施工方法进行了研究,并取得了一定的成果。高文学等^[7]通过数值计算对比分析Ⅲ级围岩分别采用CD法、CRD法和双侧壁导坑法施工时的围岩应力状态,结果表明:双侧壁导坑法比较符合隧道断面的受力特点,受力情况优于CD法和CRD法;吴梦军等^[8]、Hou等^[9]通过开展现场试验,对超大跨度公路隧道Ⅲ级围岩采用上、下台阶法施工时的沉降和应力等进行监测与分析,结果表明:超大跨度公路隧道Ⅲ级围岩采用上、下台阶法施工,隧道变形和支护结构受力均满足设计要求;许崇帮等^[10]、黄海伦^[11]、杨志强^[12]采用数值模拟和现场监测相结合的方法,主要对超大跨度隧道Ⅰ级围岩双侧壁导坑法、CRD法和三台阶法施工时的隧道变形和围岩应力等进行了研究;周丁恒等^[13]、张铁柱^[14]依托实际工程,通过现场试验对双侧壁导坑法和CRD法施工时的隧道变形和支护结构应力进行了研究;李松涛等^[15]、蒋坤等^[16]、马敬夫^[17]、蒋庆等^[18]采

用数值模拟和现场监测结合或数值模拟等方法,对超大跨度隧道Ⅴ级围岩采用CD法、CRD法和双侧壁导坑法施工时的隧道变形控制效果进行了研究,结果表明:双侧壁导坑法的控制效果最好、CRD法次之。综上,目前在超大跨度隧道施工方法研究方面已取得了许多成果,但主要集中在Ⅲ级围岩和Ⅴ级围岩,Ⅳ级围岩施工方法的相关研究相对较少,研究手段主要是通过数值分析或现场试验针对特定隧道采用的某一施工方法进行研究,且施工方法主要为双侧壁导坑法和CRD法,缺乏关于CD法、上台阶CD法和三台阶法的研究。此外,由于中国早期超大跨度隧道的数量较少,其设计与施工没有相应的规范可供参考,主要依据两车道、三车道隧道的工程经验进行修建,导致超大跨度隧道采用的施工方法千差万别,设计施工远没有达到系统化和标准化,也缺少相应施工方法的对比研究。与此同时,中、长隧道中,Ⅳ级围岩占比一般较高,是隧道施工的主要区段,对应的施工方法合理性直接影响隧道施工安全与工程造价。因此,对超大跨度公路隧道Ⅳ级围岩合理施工方法进行研究十分必要。

本文依托连霍高速公路新疆境内小草湖至乌鲁木齐段改扩建工程杏花村1号隧道,在中国已建、在建超大跨度隧道Ⅳ级围岩施工方法调研的基础上,通过数值模拟对不同施工方法的隧道变形控制效果与支护结构受力情况进行分析,并依托工程开展现场试验进行验证。

1 工程概况

杏花村1号隧道位于新疆乌鲁木齐市达坂城区白杨河右岸,是连霍高速公路新疆段内小草湖到乌鲁木齐改扩建工程的控制性工程,为双洞八车道(单洞四车道)高速公路隧道。隧道设计速度100 km/h,最大开挖跨度22.56 m,最大开挖高度14.65 m,扁平

率为0.6,最大开挖面积264 m²。隧道上、下行线全长分别为940.0 m、1 191.0 m。隧址区岩性主要为凝灰岩、凝灰质灰岩、凝灰质砂岩等。

根据杏花村1号隧道地质勘察报告,上行线Ⅳ级围岩段长432 m,占上行线总长的45.0%,下行线Ⅳ级围岩段长554 m,占下行线总长的46.5%。Ⅳ级围岩主要为中、微风化凝灰岩、凝灰质砂岩,呈镶嵌-块状结构,现场揭露围岩情况如图1所示。Ⅳ级围岩采用复合式衬砌结构,隧道衬砌断面如图2所示,支护参数见表1。



图1 现场围岩揭露情况

Figure 1 Exposure of surrounding rock on site

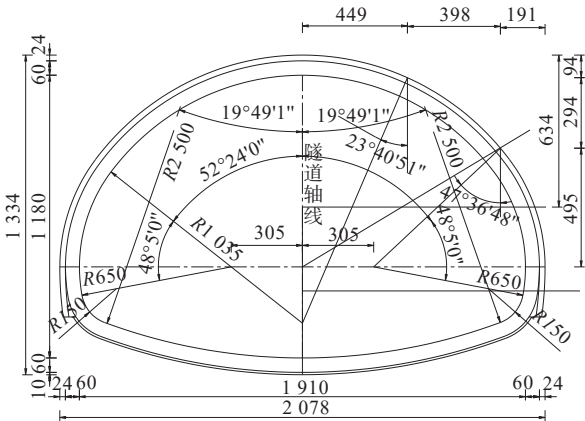


图2 杏花村1号隧道Ⅳ级围岩衬砌断面(单位:cm)

Figure 2 Lining section of grade IV surrounding rock in Xinghuacun No.1 tunnel(unit:cm)

2 不同施工方法对比分析

对中国已建和在建的超大跨度隧道Ⅳ级围岩段施工工法进行调研,统计主要的施工方法,并通过有限元数值软件对比分析不同施工方法的隧道变形控制效果与支护结构受力情况。

2.1 施工方法调研

对中国已建和在建的超大跨度隧道施工方法进行调研,得到27座隧道Ⅳ级围岩的施工方法资料。

表1 杏花村1号隧道Ⅳ级围岩深埋段支护参数

Table 1 Supporting parameters of deeply buried section of grade IV surrounding rock in Xinghuacun No.1 tunnel

支护形式	支护方法	参数	数值
超前支护	超前锚杆	型号	25 mm
		长度	3.5 m
		间距(纵×环)	240 cm×40 cm
	钢架	型号	I20b
		间距	80 cm
初期支护	喷射混凝土	标号	C25
		厚度	26 cm
		型号	25 mm
	中空锚杆	长度	4 m
		间距(纵×环)	100 cm×100 cm (拱、墙)
	钢筋网	型号	6.5 mm
		间距	20 cm×20 cm
预留变形量			80 mm

采用的施工方法有CRD法、CD法、上台阶CD法和三台阶法等。采用CD法施工的有5座,上台阶CD法的有11座,三台阶法的有6座,CRD法的有3座。其中,三台阶法主要为三台阶七步开挖法,各施工方法占比如图3所示。

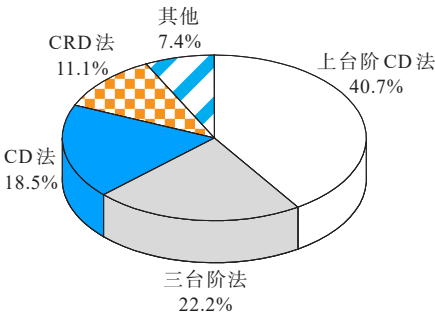


图3 Ⅳ级围岩各施工方法占比

Figure 3 Proportion of construction methods for grade IV surrounding rock

由图3可知:超大跨度隧道Ⅳ级围岩采用的施工方法主要为CD法、上台阶CD法和三台阶七步开挖法。其中,上台阶CD法最多,占比达40.7%,其次为三台阶法、CD法,占比分别为22.2%、18.5%。

3种施工方法的施工工序示意如图4所示,其中,掌子面开挖顺序用阿拉伯数字表示,支护结构施作顺序用罗马数字表示。

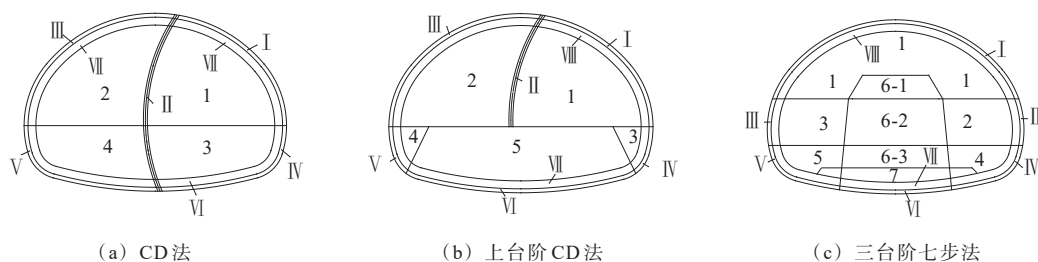


图4 施工工序示意

Figure 4 Construction process

由图4可知:CD法、上台阶CD法的开挖面个数分别为4个、5个,三台阶七步开挖法有5个开挖面和3个核心土开挖步;CD法的支护结构施作步骤为7步,上台阶CD法和三台阶七步开挖法的支护结构施作步骤为8步。

2.2 数值模拟分析

2.2.1 有限元模型的建立

(1) 计算假定

本文采用地层-结构法建立隧道开挖的二维平面应变计算模型,作如下假定:① 围岩为均质、连续的各向同性材料,服从莫尔-库仑屈服准则;② 围岩初始地应力场,仅考虑自重应力场,不考虑构造应力场;③ 初期支护中的钢筋网和纵向连接筋作为安全储备,计算时不予考虑。

(2) 几何边界

杏花村1号隧道下行线Ⅳ级围岩埋深较大,根据《公路隧道设计细则》(JTG/T D70—2010)^[19](下文简称细则),模型的左右和下边界应分别取隧道实际开挖跨度和开挖高度的3倍以上,因此,模型中隧道四周围岩均取3.5倍洞径,模型边界采用位移约束条件,在左右方向和底部施加约束。

(3) 模型物理力学参数

围岩采用平面应变单元建立,物理力学参数见表2。

表2 围岩物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of surrounding rock

弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/MPa
2.5	0.32	20	32	0.4

参数设置时需考虑:① 超前小导管不单独设置结构单元,采用等效原则,即将其等效为围岩加固

区,假定其施作后可使加固区内围岩的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 均提升20%;② 系统锚杆单独设置弹性结构单元,采用植入式桁架属性,按设计参数布置;③ 喷射混凝土同样单独设置弹性结构单元,采用梁属性,实心矩形截面,截面高度按设计喷射混凝土厚度选取,宽度按每延米设置;④ 钢架不单独设置结构单元,采用等效折减的方式将弹性模量和重度折算进喷射混凝土,组成型钢混凝土结构。型钢混凝土结构的等效模量和等效重度计算方法参考《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[20]中的规定,见式(1)、(2):

$$E = E_c + \frac{S_g \times E_g}{S} \quad (1)$$

式中: E 为型钢混凝土等效弹性模量; E_c 为喷射混凝土弹性模量; E_g 为钢架弹性模量; S_g 为钢架截面积; S 为初期支护总截面积。

$$\gamma = \gamma_c + \frac{S_g}{S}(\gamma_g - \gamma_c) \quad (2)$$

式中: γ 为型钢混凝土等效重度; γ_c 为喷射混凝土重度; γ_g 为钢架重度。其余符号同前文。

根据式(1)、(2)计算的初期支护物理力学参数见表3。以上台阶CD法为例,建立的隧道模型如图5所示。

表3 支护结构参数

Table 3 Parameters of supporting structure

支护结构	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/MPa
加固区	4.0	0.30	20.0	38	0.48
初期支护	27.0	0.22	22.6	—	—
临时支护	29.5	0.22	23.3	—	—
锚杆	210.0	0.30	77.0	—	—

2.2.2 结果分析

(1) 隧道变形

以上台阶CD法模拟计算的结果为例,拱顶下沉和周边位移如图6所示。

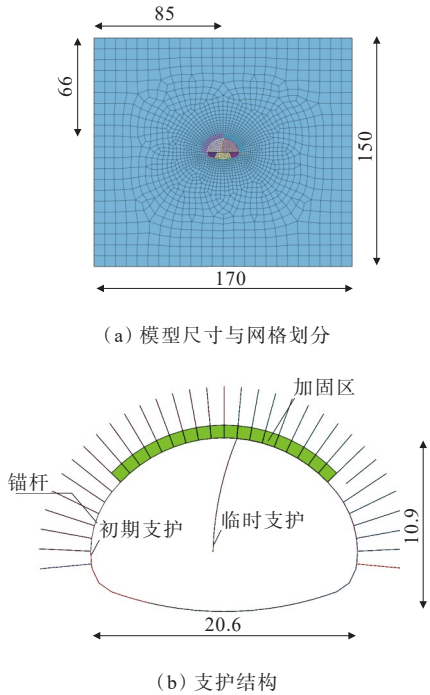


图5 数值计算模型(单位:m)
Figure 5 Numerical calculation model(unit:m)

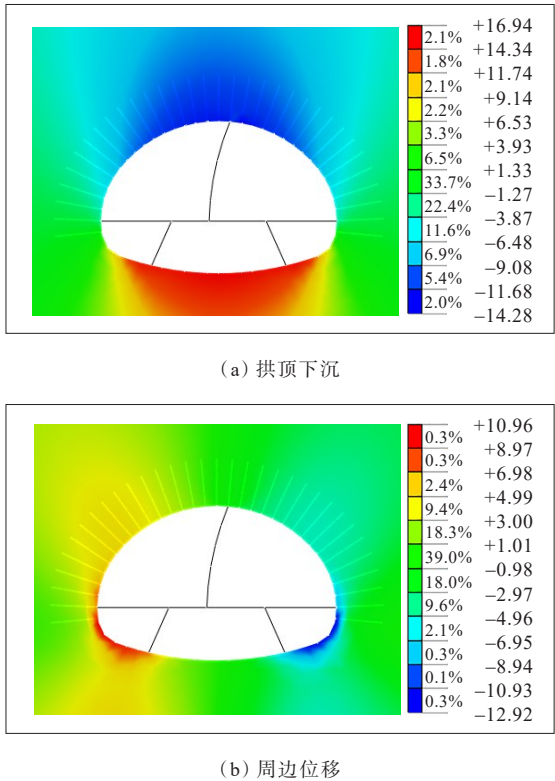


图6 上台阶CD法围岩变形模拟结果(单位:mm)
Figure 6 Simulation results of surrounding rock deformation by upper-bench CD method (unit:mm)

由图6可知:数值计算得到的Ⅳ级围岩上台阶CD法施工时的最大竖向位移为14.3 mm,墙脚与仰

拱接触附近的周边位移最大,约为11.94 mm。分别提取数值模型计算得到CD法、上台阶CD法和三台阶七步开挖法施工的拱顶下沉最大值和周边位移最大值,结果见表4。

表4 各施工方法围岩位移模拟结果
Table 4 Simulation results of surrounding rock displacement of construction methods

施工方法	拱顶下沉/mm	周边位移/mm
CD法	13.87	12.16
上台阶CD法	14.28	11.94
三台阶七步开挖法	17.99	20.71

由表4可知:在控制隧道变形方面,CD法与上台阶CD法的变形量较为相近,三台阶七步开挖法最大。

(2) 初期支护内力及应力

仅列出根据数值模型计算出的上台阶CD法的初期支护结构的轴力和弯矩结果如图7所示。

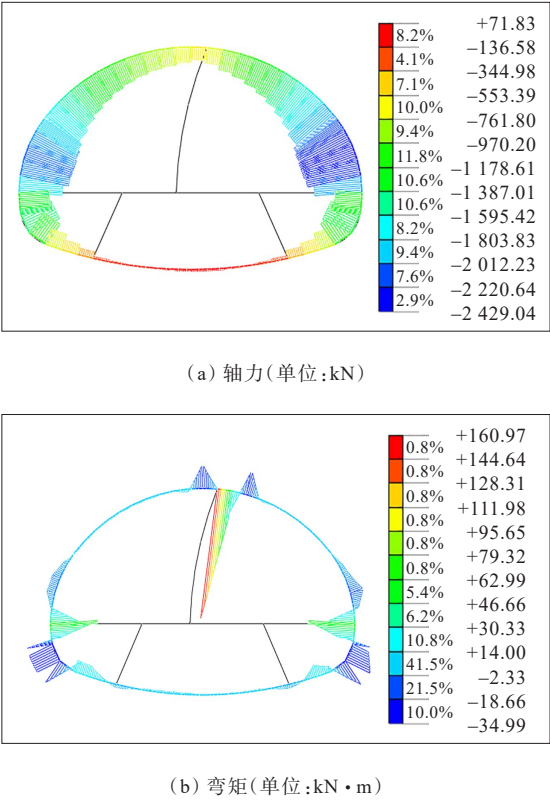


图7 上台阶CD法初期支护轴力、弯矩
Figure 7 Axial force and bending moment of supporting structure at initial stage by upper-bench CD method

由图7可知:采用上台阶CD法施工时,初期支护轴力分布不均,拱部的轴力呈现由拱顶向两侧拱脚

逐渐增大的分布规律,拱脚附近轴向压力最大值为2 429 kN,仰拱中心处轴向拉力最大值为71 kN;初期支护所受弯矩分布不均,在拱顶、两侧拱脚、墙角位置均出现正、负弯矩转换的情况,最大弯矩出现在拱顶初期支护与临时支护连接处,为160 kN·m,其余位置弯矩则相对较小,均不超过50 kN·m。

限于文章篇幅,另外两种工法的轴力、弯矩分布情况不再罗列,对3种施工方数值计算的初期支护拱顶、两侧拱腰、两侧拱脚等关键截面的轴力和弯矩进行提取,结果见表5。根据表5所列数据,计算各施工方法下初期支护最小安全系数以及对应的截面,结果见表6。

采用细则中推荐的综合安全系数法对初期支护进行校核,其中初期支护截面轴力由钢拱架与喷射混凝土共同承担,弯矩由钢拱架承担,相关计算见公式(3)~(7)。

喷射混凝土所承担的轴力 N_h 及弯矩 M_h :

$$N_h = N \frac{A_h E_h}{A_h E_h + A_g E_g}; M_h = 0$$

(3)

钢架所承担的轴力 N_g 及弯矩 M_g :

$$N_g = N \frac{A_g E_g}{A_h E_h + A_g E_g}; M_g = M$$

(4)

喷射混凝土截面受压强度:

$$K_{hy} N_h \leq \alpha R_{hy} A_h$$

(5)

钢拱架受压强度:

$$K_g \left(\frac{N_g}{A_g} + \frac{M_g}{W_g} \right) \leq R_{gy}$$

(6)

钢拱架受拉强度:

$$K_g \left(\frac{N_g}{A_g} - \frac{M_g}{W_g} \right) \leq R_{gl}$$

(7)

式中: R_{hy} 为喷射混凝土的抗压极限强度; R_{gy} 为钢材的抗压极限强度; R_{gl} 为钢材的抗拉极限强度; K_{hy} 为喷射混凝土的抗压强度综合安全系数; K_g 为钢材的抗压、抗拉强度综合安全系数; α 为偏心影响系数,可查表取值。

表5 各施工方法初期支护内力

Table 5 Internal force of supporting structure at initial stage by construction methods

截面	CD法		上台阶CD法		三台阶七步开挖法	
	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	弯矩/(kN·m)
拱顶	689.86	−28.59	300.35	−34.90	1 412.41	1.55
拱顶偏右	1 566.57	−0.18	1 360.94	−0.27	1 721.79	−0.20
拱顶偏左	1 190.74	0.73	941.47	0.76	1 552.76	0.95
右拱腰	2 269.96	−4.39	2 281.13	−5.83	2 236.03	−22.44
左拱腰	2 068.60	0.60	1 902.19	−0.16	2 312.48	−0.66
右拱脚	2 175.00	30.10	2 301.05	30.18	2 135.83	−10.30
左拱脚	1 980.79	−1.13	1 882.69	0.78	2 132.75	23.79
右墙角	1 128.55	6.30	1 633.17	19.08	1 193.73	−40.01
左墙角	1 096.41	−37.32	1 126.63	−37.69	581.73	−39.04

表6 各施工方法支护最小安全系数及截面

Table 6 Minimum safety factor of supporting structure and cross-section by construction methods

施工方法	喷射混凝土受压最小	钢架受压最小	钢架受拉最小	钢架最小
	安全系数及截面	安全系数及截面	安全系数及截面	安全系数及截面
CD法	2.48 右拱腰	2.47 右拱脚	4.01 左墙角	2.53 左墙角
上台阶CD法	2.47 右拱腰	2.41 右拱脚	3.55 拱顶	2.41 右拱脚
三台阶七步开挖法	2.43 左拱腰	2.35 右墙角	3.35 左墙角	2.35 右墙角

由表6可知:CD法、上台阶CD法和三台阶七步开挖法施工的初期支护喷射混凝土受压安全系数最小值均大于规范要求的安全系数2.4;钢架应力安全

系数均大于隧道设计规范要求的2.0。钢架作为初期支护的主要承载结构,其应力安全储备是支护结构安全与稳定的重要影响因素。

2.3 施工方法选择

由上文可知,在超大跨度公路隧道Ⅳ级围岩情况下,CD法、上台阶CD法和三台阶七步开挖法的混凝土受压、钢架受压和受拉等安全系数均符合规范要求,为优选杏花村1号隧道Ⅳ级围岩的施工方法,对不同施工方法的优缺点进行对比分析,结果见表7。

表7 超大跨度公路隧道Ⅳ级围岩施工方法对比

Table 7 Comparison of construction methods for grade Ⅳ surrounding rock in super-span highway tunnel

工法	变形	安全	初期支护 拆除情况	造价	施工 难度	作业循环 周期/h
CD法	小	安全	拆除多	高	复杂	12~16
上台阶 CD法	小	安全	拆除少	较高	较复杂	12~16
三台阶七步 开挖法	小	安全	没有拆除	低	一般	12~16

由表7可知:从支护效果和施工安全方面,3种施工方法没有明显差异。从工程造价与施工工艺角度,3种工法的优劣选择顺序为:三台阶七步开挖法、上台阶CD法、CD法。根据工程调研,三台阶七步开挖法掌子面完成一个作业循环的时间为12~16 h,CD法和上台阶CD法的上台阶导洞掌子面完成一个作业循环的时间也为12~16 h,3种工法的施工速度无明显差异。

由于三台阶七步开挖法主要用于采用机械开挖的软岩和土质隧道,各开挖面开挖对相邻部分岩土体影响较小。而杏花村1号隧道Ⅳ级围岩为块状-镶嵌结构的凝灰岩和凝灰质砂岩,采用爆破开挖方式,同时考虑到三台阶七步开挖法上、中台阶开挖面步距相对较小,爆破开挖易影响核心土的稳定性,施工质量难以控制,采用三台阶七步开挖法,施工速度难以保证。

综合考虑3种工法的优缺点、杏花村1号隧道Ⅳ级围岩地质条件、经济性和施工工期要求等因素,确定杏花村1号隧道Ⅳ级围岩采用上台阶CD法施工。

3 现场试验

为验证上台阶CD法在超大跨度公路隧道Ⅳ级围岩的应用效果,在杏花村1号隧道下行线Ⅳ级围岩开展现场试验研究,选取的试验断面桩号为XK3 495+140。

3.1 试验方案

试验内容主要包括施工过程中的拱顶下沉、周边位移、喷射混凝土应力、钢架应力监测等。测试方案如图8所示。其中,各测点的混凝土应变计用“H测点编号”的形式进行标记;各测点测试钢架应力的表面应变计用“B测点编号-1/2”的形式进行标记,“-1”表示钢架外侧(靠近围岩),“-2”表示钢架内侧(靠近隧道净空)。

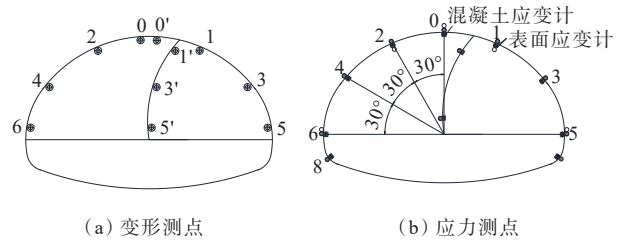


图8 隧道变形、初期支护应力测试方案

Figure 8 Test scheme for tunnel deformation and stress of supporting structure at initial stage

3.2 试验结果分析

3.2.1 变形结果及分析

(1) 拱部下沉

拱部下沉监测结果见表8,拱部下沉时态曲线如图9所示。

表8 XK3495+140断面拱顶下沉监测结果

Table 8 Vault subsidence monitoring results of XK3495+140 section

位置	最大沉降/ mm	累积沉降/ mm
拱顶(0)	10.4	9.9
拱顶偏右(1)	14.6	13.1
拱顶偏左(2)	8.5	8.7
右拱腰(3)	9.6	9.0
左拱腰(4)	7.7	7.3

由表8可知:拱部最大下沉值为14.6 mm,累计下沉值为13.1 mm,位于先导洞拱顶(1号点),其余测点处拱部下沉量均不大于11.0 mm,隧道的拱部下沉远小于设计要求的预留变形量80 mm。

由图9可知:拱部下沉经历了初期快速增长、中期缓慢变形和基本稳定3个阶段;先、后导洞开挖后,对应测点处的变形快速增长,掌子面开挖完成7 d左右逐渐进入缓慢增长阶段,此阶段持续14 d左右,之后进入基本稳定状态。下台阶开挖和仰拱施作对隧道拱部下沉无明显影响。

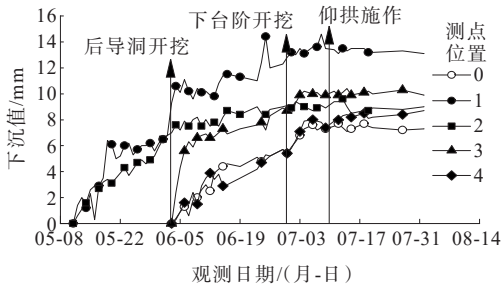


图9 XK3495+140断面拱部下沉时态曲线

Figure 9 Arch subsidence variation of XK3495+140 section with time

(2) 周边位移

XK3495+140断面周边位移监测结果见表9,周边位移时态曲线如图10所示。

表9 XK3495+140断面周边位移监控量测结果

Table 9 Monitoring results of peripheral displacement of XK3495+140 section

位置	最大位移值/mm	累积位移值/mm
先导洞拱腰(3-3')	13.0	13.0
先导洞拱脚(5-5')	15.0	15.0
主洞拱腰(3-4)	10.5	10.5
主洞拱脚(5-6)	11.4	11.0

由表9可知:先导洞和主洞的周边位移均呈现拱脚大于拱腰的规律,周边位移最大值为15.0 mm(5-5'),主洞拱脚处的周边位移最大值为11.4 mm。远小于设计要求的预留变形量80 mm,说明初期支护能够有效控制隧道变形。

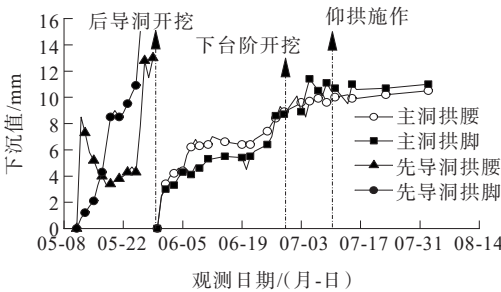


图10 XK3495+140断面周边位移时态曲线

Figure 10 Peripheral displacement variation of XK3495+140 section with time

由图10可知:先导洞开挖后,拱腰、拱脚处周边位移急剧增长,后导洞开挖后主洞的周边位移经历了初期急剧增长、中期缓慢变形和最终趋于平稳3个阶段,后导洞开挖后,主洞的拱腰、拱脚周边位移快

速增长,掌子面开挖完成7 d左右逐渐进入缓慢增长阶段,此阶段持续14 d左右,之后进入基本稳定状态。下台阶开挖和仰拱施作对隧道周边位移无明显影响。

3.2.2 应力结果及分析

在荷载作用下,隧道支护结构主要受压应力,故规定测试结果中喷射混凝土和钢架的压应力为正,拉应力为负。

(1) 喷射混凝土应力

隧道施工过程中,XK3495+140断面喷射混凝土应力时态曲线如图11所示。

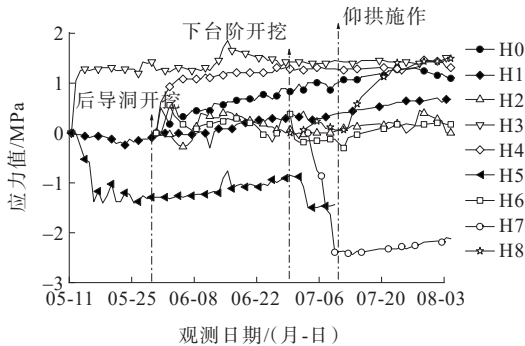


图11 喷射混凝土应力时态曲线

Figure 11 Stress variation of shotcrete with time

由图11可知:先、后导洞开挖后,对应测点处的喷射混凝土应力迅速增长,且在7 d内逐渐进入稳定状态,下台阶开挖、仰拱施作等工序对混凝土应力无明显影响。

初期支护稳定后喷射混凝土应力分布如图12所示。

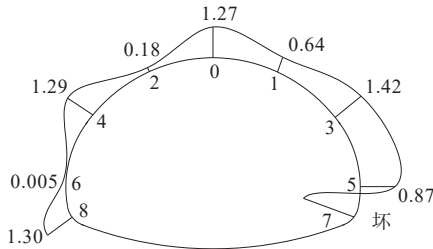


图12 XK3495+140断面喷射混凝土应力分布(单位:MPa)

Figure 12 Stress distribution of shotcrete in XK3495+140 section (unit:MPa)

由图12可知:上台阶CD法施工下监测断面的喷射混凝土应力分布不均匀,其中拱部以受压为主,墙脚和仰拱全部受拉。喷射混凝土最大压应力出现在右拱腰3号点处,其值为1.42 MPa;最大拉应力出现

在右墙脚5号点处,其值为0.87 MPa,小于喷射混凝土的极限抗拉强度2.0 MPa。

(2) 钢架应力

钢架内外侧应力时态曲线如图13所示。

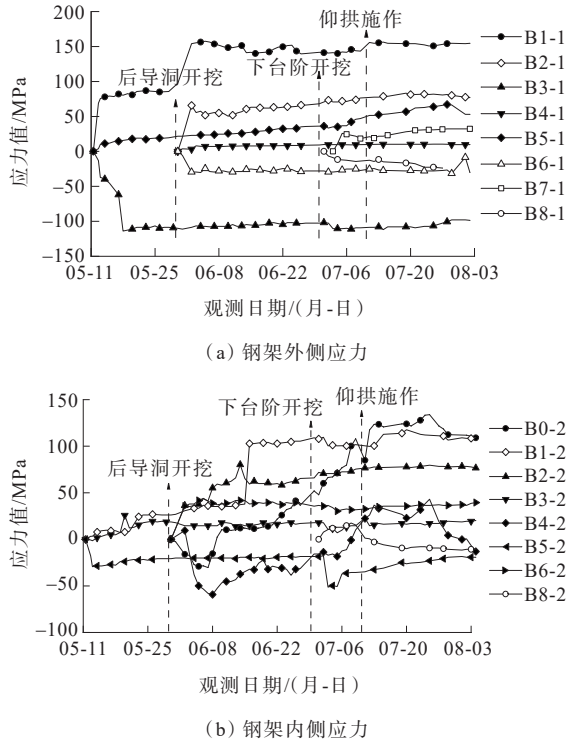


图13 XK3495+140断面钢架应力时态曲线
Figure 13 Steel frame stress variation of XK3495+140 section with time

由图13可知:钢架应力受施工工序影响较大,在初期迅速增大到较大值,而后随着其余工序的进行,钢架应力增长速度放缓,在仰拱施作以后,钢架应力趋于稳定,说明初期支护的及时封闭可以有效地改善支护结构的受力。

初期支护稳定后,钢架内外侧应力分布结果如图14所示。

由图14可知:该监测断面的钢架应力分布不均,拱部主要受压,墙脚和仰拱受拉。最大压应力位于钢架拱顶(0号点)处,为112 MPa[图14(a)],最大拉应力位于边墙(6号点)处,为30 MPa[图14(b)]。以上应力均小于钢材的屈服强度,最大应力112 MPa,占钢材屈服强度的50%。

3.2.3 初期支护内力及安全系数

钢架为压弯组合的偏心构件,假定钢架在同一截面的应力为线性分布,其受力简图如图15所示。根据钢架上下翼缘测点应力的现场监测结果,结合

材料力学中关于应力计算公式可计算出钢架各监测点截面的轴力和弯矩。

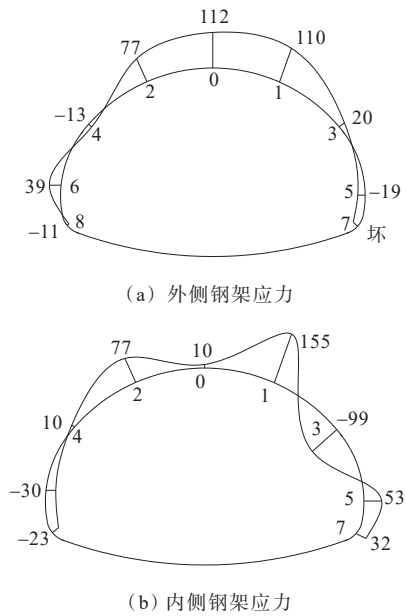


图14 XK3495+140断面钢架应力分布(单位:MPa)

Figure 14 Steel frame stress distribution of XK3495+140 section(unit:MPa)

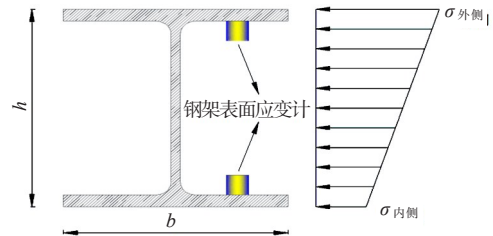


图15 初期支护钢架受力简图

Figure 15 Stress of supporting steel frame at initial stage

钢架轴力和弯矩计算公式见式(8)和式(9):

$$\begin{cases} \sigma_{\text{外侧}} = \frac{M_g}{W_g} + \frac{N_g}{A_g} \\ \sigma_{\text{内侧}} = \frac{N_g}{A_g} - \frac{M_g}{W_g} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可得:

$$\begin{cases} N_g = \frac{\sigma_{\text{外侧}} + \sigma_{\text{内侧}}}{2} A_g \\ M_g = \frac{\sigma_{\text{外侧}} - \sigma_{\text{内侧}}}{2} W_g \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\sigma_{\text{外侧}}$ 、 $\sigma_{\text{内侧}}$ 为钢架内、外侧翼缘处应力; M_g 为钢架横截面上弯矩; N_g 为钢架轴力; A_g 为钢架横截面积; W_g 为钢架验算截面抗弯刚度。

根据钢架应力监测结果,计算得到现场上台阶

CD法施工初期支护各监测点截面内力。根据现场钢架应力测试结果,换算得到初期支护各监测点截面轴力。结果表明:初期支护拱部钢架主要承受轴向压力,拱顶至两侧墙角的弯矩分布不均,并在拱腰和拱脚位置出现正负弯矩转换。上台阶CD法初期支护最小安全系数及截面结果见表10。

表10 初期支护最小安全系数及截面

Table 10 Minimum safety factor of supporting structure at initial stage and cross-section

施工方法	喷射混凝土受压最小	钢架受压最小	钢架受拉最小	钢架最小
	安全系数/截面	安全系数/截面	安全系数/截面	安全系数/截面
上台阶CD法	10.75/拱顶偏右	6.94/右拱腰	8.87/右拱腰	6.94/右拱腰

由表10可知:喷射混凝土受压安全系数最小值为10.75,大于细则要求的2.4;钢架的安全系数为6.94,大于细则要求的2.0,即初期支护的喷射混凝土与钢架受力状态较好,支护结构有充足的承载安全储备。

综上所述,杏花村1号隧道Ⅳ级围岩在施工过程中的变形远小于设计预留变形量,初期支护结构处于安全状态,表明超大跨度隧道Ⅳ级围岩段采用上台阶CD法施工安全可行。

4 结论

本文采用数值模拟与现场试验相结合的方法,对单洞四车道超大跨度隧道Ⅳ级围岩段合理施工方法进行了研究,得出以下结论:

(1) 数值模拟结果表明,超大跨度公路隧道Ⅳ级围岩,CD法、上台阶CD法和三台阶七步开挖法施工时,前两者的拱部下沉和周边位移均不大于15 mm,三台阶七步开挖法的拱部下沉与周边位移均不大于21 mm;3种工法的喷射混凝土抗压安全系数分别为2.48、2.45和2.43,钢架安全系数分别为2.59、2.41和2.28,隧道变形与支护结构受力均满足设计要求。

(2) 综合考虑3种工法的优缺点和隧道地质条件等因素,确定杏花村1号隧道Ⅳ级围岩最优施工方法为上台阶CD法。

(3) 现场测试结果表明:超大跨度公路隧道Ⅳ级围岩采用上台阶CD法施工时,拱部下沉最大值为14.6 mm,周边位移最大值为15.0 mm,隧道变形控制效果较好;初期支护的最小安全系数为6.94,满足设计的安全要求。

参考文献:

References:

[1] 《中国公路学报》编辑部.中国交通隧道工程学术研究综

述·2022[J].中国公路学报,2022,35(4):1-40.

Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's traffic tunnel engineering research:2022[J].China Journal of Highway and Transport, 2022,35(4):1-40.

[2] 李博融,董长松,田敏哲,等.特大跨度公路隧道施工动态力学响应特性研究[J].中外公路,2020,40(S2):170-180.

LI Borong, DONG Changsong, TIAN Minzhe, et al. Study on dynamic mechanical response characteristics of super-long-span highway tunnel construction[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020,40(S2):170-180.

[3] 张俊儒,吴洁,严丛文,等.中国四车道及以上超大断面公路隧道修建技术的发展[J].中国公路学报,2020,33(1):14-31.

ZHANG Junru, WU Jie, YAN Congwen, et al. Construction technology of super-large section of highway tunnels with four or more lanes in China[J].China Journal of Highway and Transport, 2020,33(1):14-31.

[4] 陈建勋,罗彦斌,万利,等.超大跨度公路隧道研究现状与面临的挑战[J].筑路机械与施工机械化,2018,35(6):36-44.

CHEN Jianxun, LUO Yanbin, WAN Li, et al. Research status and challenges of highway tunnel with super long span[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2018, 35 (6):36-44.

[5] 刘新荣,孙翔,蒋树屏,等.四车道公路隧道特点及其所需解决的几个问题[J].地下空间,2003(4):437-439,443-458.

LIU Xinrong, SUN Xiang, JIANG Shuping, et al. Characteristics of four-lane road tunnel and problems to be solved[J]. Underground Space, 2003(4): 437-439, 443-458.

[6] 毛红飞.浅埋软弱地层中超大断面隧道支护方案研究[J].中外公路,2016,36(3):244-247.

MAO Hongfei. Study on supporting scheme of super-large cross-section tunnel in shallow soft stratum[J].

- Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(3): 244-247.
- [7] 高文学, 杨明哲, 毕强. 超大断面隧道合理开挖方法研究[C]//低碳经济与土木工程科技创新: 2010 中国(北京)国际建筑科技大会论文集. 北京, 2010: 340-347.
- GAO Wenxue, YANG Mingzhe, BI Qiang. Research on reasonable excavation methods for super large section tunnels[C]//Low carbon economy and technological innovation in civil engineering-Proceedings of the 2010 China (Beijing) International Conference on Building Technology, Beijing, 2010: 340-347.
- [8] 吴梦军, 黄伦海, 刘新荣. 特大断面隧道施工方法试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(5): 57-60.
- WU Mengjun, HUANG Lunhai, LIU Xinrong. Experimental study on construction method of super-large section tunnel[J]. Journal of Chongqing Architecture University, 2005, 27(5): 57-60.
- [9] HOU F J, LUO Y B, JIANG Q, et al. Analysis on construction deformation and supporting structure of two-step and threesection excavation method for super larger span highway tunnel[J]. Stavební Obzor-Civil Engineering Journal, 2020, 29(1): 110-123.
- [10] 许崇帮, 夏才初, 朱合华. 双向八车道连拱隧道施工方案优化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 66-73.
- XU Chongbang, XIA Caichu, ZHU Hehua. Optimum analysis of construction scheme of multi-arch tunnel with eight traffic lanes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 66-73.
- [11] 黄伦海. 双洞八车道公路隧道施工方案研究[J]. 公路, 2005, 50(9): 206-212.
- HUANG Lunhai. A study on construction schemes of highway twin tunnel with eight travelled lanes[J]. Highway, 2005, 50(9): 206-212.
- [12] 杨志强. 大断面隧道中三台阶五步法的数值模拟分析与监控量测研究[J]. 中外公路, 2020, 40(1): 191-195.
- YANG Zhiqiang. Numerical simulation and monitoring measurement of rapid construction method with three-bench and five-step in large cross-section tunnel[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(1): 191-195.
- [13] 周丁恒, 曲海峰, 蔡永昌, 等. 特大断面大跨度隧道围岩变形的现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1773-1782.
- ZHOU Dingheng, QU Haifeng, CAI Yongchang, et al. In-situ test on surrounding rock deformation in super-large section and large-span tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1773-1782.
- [14] 张铁柱. 四车道特大断面小净距公路隧道力学响应分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S1): 302-305.
- ZHANG Tiezhu. Mechanical response analysis of four-lane highway tunnel with extra-large cross-section and small clear distance[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 302-305.
- [15] 李松涛, 谭忠盛, 杜文涛. 特大断面小净距公路隧道力学效应分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(S2): 292-296.
- LI Songtao, TAN Zhongsheng, DU Wentao. Mechanical effect analysis of extra-large section and small clear distance highway tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S2): 292-296.
- [16] 蒋坤, 夏才初, 卞跃威. 节理岩体中双向八车道小净距隧道施工方案优化分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 841-847.
- JIANG Kun, XIA Caichu, BIAN Yuewei. Optimal analysis of construction schemes of small space tunnel with bidirectional eight traffic lanes in jointed rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 841-847.
- [17] 马敬夫. 大断面、小净距隧道施工力学效应分析[J]. 中外公路, 2020, 40(4): 197-201.
- MA Jingfu. Analysis of mechanical effect of tunnels with large cross-section and small clearance during construction[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(4): 197-201.
- [18] 蒋庆, 范宏运, 李涛, 等. 超大断面小净距隧道应力场演化研究[J]. 中外公路, 2021, 41(1): 197-202.
- JIANG Qing, FAN Hongyun, LI Tao, et al. Study on evolution of stress field in tunnels with super-large cross section and small spacing[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(1): 197-202.
- [19] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 公路隧道设计细则: JTG/T D70—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- CCCC Second Highway Survey and Design Institute Co., Ltd.. Guidelines for design of highway tunnel: JTG/T D70—2010[S]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [20] 中国建筑科学研究院. 组合结构设计规范: JGJ 138—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- China Construction Science Research Institute. Code for design of composite structures: JGJ 138—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.