

中美隧道二次衬砌结构设计规范对比研究

武云飞, 龚 铖, 王 建, 黄 鹏, 张鹏林

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 611130)

摘 要: 隧道设计规范是开展设计工作的依据, 将我国隧道相关设计规范与国际先进技术标准对标, 有助于提高我国工程建设企业的国际化竞争力。通过文献调研和计算分析对比研究了中美隧道二次衬砌结构设计的异同, 并且从设计准则、极限状态划分、设计使用年限、材料特性、荷载分类和组合以及结构设计方法等方面展开对比, 结合工程实例研究分析, 结果表明:《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1—2018)的设计参数更加保守、安全, 能更好的保证隧道衬砌结构的安全性和耐久性, 更有利于隧道二次衬砌的长期安全服役。

关键词: 隧道工程; 中美隧规; 结构设计; 二次衬砌; 对比分析

中图分类号: U452.2+1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)02-0282-06

0 引 言

隧道设计规范是开展设计工作的依据, 由于不同国家的地质条件、工程经验和科技水平的差异, 导致规范的设计理念、方法准则和控制条件均有所不同^[1]。

随着我国交通网的不断延展和联通, 隧道长度、跨度、穿越地层的复杂程度等不断增加^[2], 为保证隧道工程设计的安全性、合理性, 降低运维成本, 满足设计使用年限要求, 有必要将我国隧道相关设计规范与国际先进技术标准对标, 学习其先进方法及经验^[3]; 同时, 为响应“一带一路”战略, 将我国规范与国际标准接轨, 有助于提高我国工程建设企业的国际化竞争力^[4], 对我国基建行业拓展国际市场具有显著的经济价值和技术意义^[5]。

本研究系统对比了中美隧道二次衬砌结构设计规范的异同, 主要从设计准则、极限状态划分、材料特性、荷载分类和组合以及结构设计方法等方面展开对比, 并结合工程实例对比分析。

1 设计准则和极限状态划分

1.1 设计准则

我国《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)^[6]中规定: 隧道设计要综合考虑既有及规划交通网、周边生态及土地资源、建设经济

效益、设施安全可靠耐久、方便运营维护检修等方面的要求。

美国《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)^[7]提出隧道设计准则为: 隧道设计在满足“结构安全, 便于施工”的基本技术性要求外, 还需兼顾“环境保护、经济节约、便于检修维护”等方面的要求。

中美规范中均对隧道结构的安全性、经济性、环保性、可检修性提出了要求。《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)明确要求隧道土建工程和运维设施应综合设计; 美国《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)中对隧道运营设施没有做明确要求, 将隧道设计准则分为技术性要求和非技术性要求两个层级, 技术性要求为第一层级, 非技术性要求为第二层级。相比而言, 《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)的考虑更为全面, 更有利于隧道工程的设计、建设和长期运维。

1.2 极限状态划分

《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)中采用破损阶段法验算二次衬砌的截面强度, 为确保衬砌结构的设计使用年限满足要求, 需限制衬砌裂缝的开展宽度。

美国《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)采用强度设计法, 强度设计法要求设计强度大于所需强度, 并通过环境耐久性系数控制结构使用年限。

收稿日期: 2023-07-28

作者简介: 武云飞(1997—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事隧道设计工作。

中美规范在结构设计方面综合考虑了承载能力极限状态和正常使用极限状态。结构设计安全是首要,充分发挥承载能力是关键,长效耐久是核心。

2 材料

2.1 混凝土

根据《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)中相关要求,隧道结构中常用的混凝土强度等级见表 1。美国《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)以混凝土抗压强度对其进行级别划分,以英制单位为基准,为便于比较,将英制单位换算为国际单位,详见表 2。

表 1 《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)混凝土强度指标

混凝土	f_{ck} /MPa	f_{cd} /MPa	f_{tk} /MPa	f_{td} /MPa	$E_c/\times 10^4$ MPa
C15	10.0	7.2	1.27	0.91	2.20
C20	13.4	9.6	1.54	1.10	2.55
C25	16.7	11.9	1.78	1.27	2.80
C30	20.1	14.3	2.01	1.43	3.00
C40	26.8	19.1	2.39	1.71	3.25
C50	32.4	23.1	2.64	1.89	3.45

表 2 美国《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2-2901)混凝土强度指标

混凝土	f_c' /MPa	f_t /MPa	$E_c/\times 10^4$ MPa
Grade2500	17.0	2.56	1.98
Grade3000	20.7	2.82	2.18
Grade3500	24.1	3.04	2.36
Grade4000	27.6	3.26	2.52
Grade5000	34.5	3.64	2.82
Grade7000	48.3	4.31	3.34

《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)中混凝土强度标准试件为边长 150mm 的立方体,美国《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)则采用 150 mm $\times$ 300 mm 的圆柱体。《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)中对于混凝土抗压(拉)强度区分标准值和设计值,设计值由标准值除以相应材料分项系数得到,美国《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)采用综合抗力系数来考虑强度折减,两国

规范中的混凝土抗拉强度均由抗压强度换算得来。两国规范中的混凝土弹性模量均依据抗压强度指标换算得来,但计算公式差异较大。

2.2 钢筋

《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)规定的常用钢筋强度等级以及美国《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)中规定采用的钢筋级别对比见表 3。

表 3 《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)与美国《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)钢筋强度指标对比表

标准	等级	抗拉或抗压强度标准值 /MPa	抗压强度设计值 /MPa	抗拉强度设计值 /MPa	弹性模量 /MPa
《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)	HPB300	300	270	270	210
	HRB400	400	360	360	200
	HRB500	500	410	435	
美国《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)	Grade280	280	280	280	200
	Grade420	420	420	420	
	Grade520	520	520	520	
	Grade550	550	550	550	

《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)中钢筋的抗压(拉)强度区分标准值和设计值,设计值由标准值除以相应材料分项系数得到,美国《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)采用综合抗力系数来考虑强度折减;中美规范中钢筋的弹性模量相等。

3 荷载分类及组合

3.1 荷载分类

《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)中将荷载分为三类,分别为永久荷载、可变荷载和偶然荷载,其中包含不同名称的荷载,详见中国隧规表 6.1.1^[6],而美国陆军隧规中并没有对荷载进行分类,而是列出了作用在衬砌结构上的常见荷载,如恒载、围岩压力、运营静液压、静水压瞬态、外部静水压、活荷载以及地震荷载等,具体设计过程中若存在其他荷载,设计时必须予以考虑。

《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG

3370.1—2018)中的基本可变荷载与美国《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)中提到的变化荷载具有相似之处,但是美国规范中没有考虑温度变化以及施工过程对于隧道支护结构的影响,美国《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)中也考虑了地震荷载对隧道支护结构的影响。总体而言,中国隧规关于可变荷载的考虑更加全面。

3.2 荷载组合

《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)中有4类荷载组合模式,分别为荷载基本组合、荷载偶然组合、荷载长期效应组合、荷载短期效应组合,不同荷载组合模式分别对应不同安全系数,施工阶段安全系数乘以0.9的折减系数。

《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)中的设计工况是《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)中荷载组合方法的另一种表现形式。设计工作开展之前,需明确隧道工程可能承受的所有荷载,针对不同的荷载类别,分别明确其荷载系数,荷载系数见表4,有时可能存在表4所列以外的荷载,此时,必须确定其设计工况和荷载系数。

表4 隧道钢筋混凝土衬砌不同设计工况及推荐荷载系数

荷载	1	2	3	4
恒载	1.3	1.1	1.1	1.1
围岩压力	1.4	1.2	1.4	1.2
运营静水压	1.4	—	—	—
静水压瞬态	—	1.1	—	—
外部静水压	—	—	1.4	1.4
活荷载	—	—	—	1.4

《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)与美国陆军隧规均采用了荷载组合的设计方法,只是美国陆军隧规中采用设计工况一词;《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)中根据不同的荷载组合,分别采用不同的安全系数,而美国陆军隧规中不同设计工况的荷载种类分别采用不同的荷载系数,这与《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)不同荷载组合中各个荷载采用同一安全系数的方法不同,相比之下,美国陆军隧规中考虑的更具针对性,更加具体,但是美国陆军隧规中没有将荷载系数按照施工阶段和使用阶段划分。

4 结构设计方法

4.1 强度验算

4.1.1 《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)

破损阶段法验算矩形截面混凝土构件,在轴心以及偏心受压条件下的抗压强度验算应按照《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)中式(9.2.11)^[6],抗拉强度验算应按照《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)中式(9.2.12)^[6]。若上述计算所得的安全系数不能满足《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)中最小安全系数的要求,则对衬砌结构进行配筋计算,计算流程及方法详见《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)中附录N^[6]。

4.1.2 美国 Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock(EM 1110-2—2901)

首先明确设计工况,然后计算衬砌结构上的应力,根据应力计算结果,选择拉应力较大的截面,将应力积分得出拉力,然后进行配筋,图1所示为截面应力分布示意图。

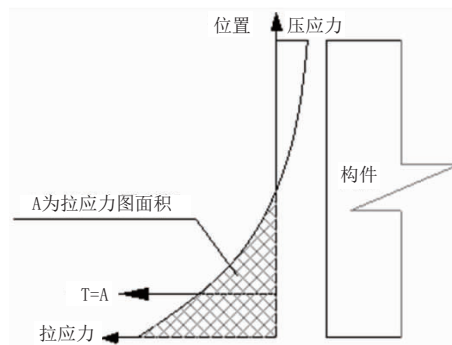


图1 截面应力分布示意图

根据截面拉应力分布结果确定钢筋面积。

$$T \leq A_s f_y \quad (1)$$

式中: T 为根据所选截面拉应力积分得到的拉力; f_y 为钢筋屈服强度,拉力控制截面的强度折减系数为0.9; A_s 为钢筋截面面积。

根据剪应力计算结果,选取具有代表性的断面,积分得出截面剪切力。

截面抗剪设计应按下式计算:

$$\phi V_n \geq V_u \quad (2)$$

式中: ϕ 取0.8; V_u 为所选截面的系数剪切力; V_n 为根据下式计算的截面标准抗剪强度;

$$V_n = V_c + V_s / s d \quad (3)$$

$$V_c = 0.17 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (4)$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (5)$$

式中: V_c 为混凝土标准抗剪强度; f'_c 为混凝土标准抗压强度; b_w 为受剪截面宽度、腹板宽度或圆形截面的直径; d 为受拉钢筋轴心与截面受压边缘之间的距离; V_s 为钢筋标准抗剪强度; A_v 为抗剪钢筋面积; f_y 为的钢筋屈服强度; s 为隧道轴向上的抗剪钢筋间距。

4.2 抗裂及裂缝计算

4.2.1 《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1-2018)

钢筋混凝土构件在拉、压、弯条件下的最大裂缝宽度 $\omega_{\max}$ 可按《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)中式(N.0.11)^[6]计算,当偏心距 $e_0 \leq 0.55 h_0$ 时,可不进行裂缝宽度的验算。

4.2.2 美国陆军隧规

抗弯钢筋分布和容许应力大小限制非压缩控制截面构件的弯曲开裂,根据美国陆军隧规的规定,当混凝土表面外观令人担忧,且混凝土保护层超过 75 mm,在正常环境暴露区域,容许弯曲拉应力不得超过式(6)中给出的值,钢筋与受拉表面的间距 s 不应超过式(7)中给出的值。

$$f_{s, \max} = \min \left[\frac{56\,000}{\beta \sqrt{s^2 + 4(50 + d_b/2)^2}}, 250 \right] \quad (6)$$

$$s_{\max} = \min \left[\left(\frac{94\,600}{f_s} \right) - 2.5 c_c, 300 \right] \quad (7)$$

式中: β 为应变梯度放大因子; $h \geq 400$ mm, $\beta=1.2$;为钢筋间距,mm; s 为钢筋直径,mm; f_s 为承载状态下的钢筋计算应力。计算公式为 $f_s = T_k/A_s$,式中 T_k 是不考虑载荷系数的张力特征值; c_c 为从最近的受拉表面到弯曲受拉钢筋的净覆盖层厚度,对于混凝土衬砌,等于 50 mm。

5 工程实例计算与对比分析

5.1 工程实例计算

5.1.1 工程概况

工程实例计算依托尼泊尔塔纳湖水电站主交通洞工程,主交通洞里程范围 K0+016.00 ~ K0+281.00,全长 265 m,主交通洞平面图如图 2 所示,根据地质报告可知,主交通洞穿越地层以Ⅳ级围岩为主,Ⅳ级围岩采用拱墙衬砌结构,深埋段衬砌断面如图 3 所示。

5.1.2 荷载及荷载组合

(1)《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG

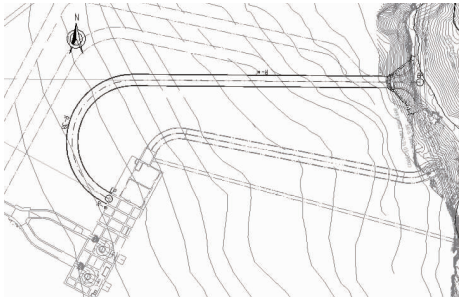


图 2 主交通洞平面图

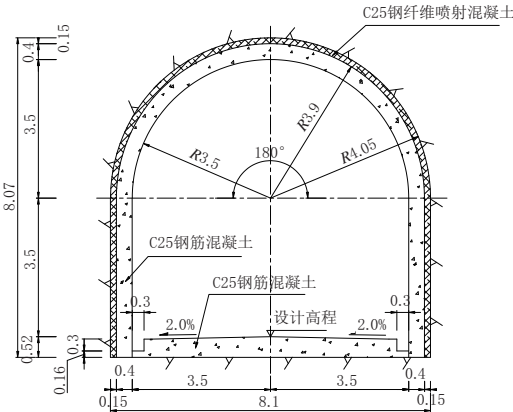


图 3 Ⅳ级围岩衬砌断面(单位:m)

3370.1—2018)

对深埋工况,荷载主要考虑永久荷载,其中永久荷载包括围岩压力、结构自重,隧道所处位置无可变荷载。钢筋混凝土的自重为 25 kN/m³。垂直压力 q 及水平压力 e 的大小见表 5。

表 5 Ⅳ级围岩衬砌所受围岩压力 单位:kN/m ²	
围岩压力	压力值
垂直均布压力 q	122.62
水平均布压力 e	36.78

(2)美国陆军隧规

根据美国陆军隧规,作用在混凝土衬砌上的荷载包括衬砌自重、外部水压力、围岩压力和注浆压力,注浆压力包括回填注浆压力和固结注浆压力,注浆压力与外部水压力只取二者中值较大者,荷载系数及其大小见表 6。

5.1.3 强度设计

(1)《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)

采用 GTS NX 软件进行计算,计算所得内力图如图 4 至图 6 所示。

结构最小安全系数为 3.53,位于边墙中部,不能满足《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)中最小安全系数要求,因此需要对结构进行配筋计算。根据《公路隧道设计规范 第一册

表6 IV级围岩衬砌断面荷载系数

自重/(kN·m ⁻³)	内部水压力	外部水压力/MPa	围岩压力/MPa		回填注浆压力/MPa	固结注浆压力/MPa	地震荷载
			竖直	水平			
1.1		1.4		1.2	1.4	1.4	
27.5		0.31	0.102		0.28	0.17	

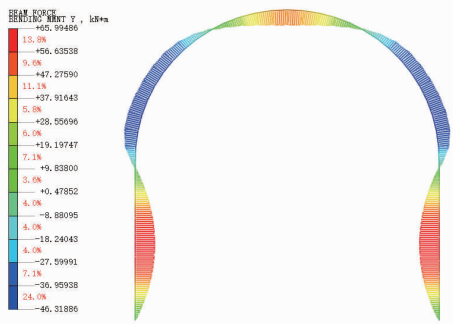


图4 IV级围岩衬砌结构弯矩图

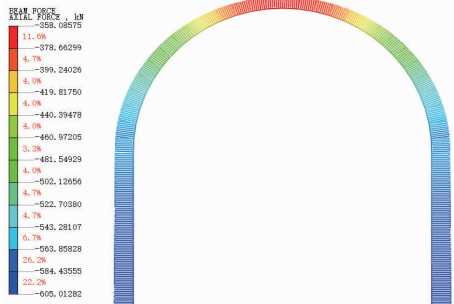


图5 IV级围岩衬砌结构轴力图

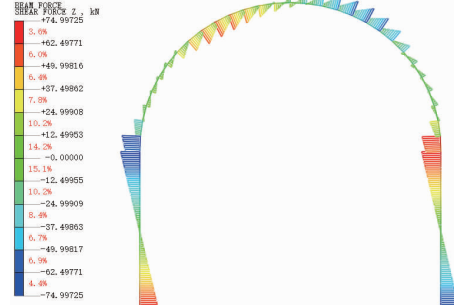


图6 IV级围岩衬砌结构剪力图

《公路隧道设计规范》(JTJ 3370.1—2018)中相关要求计算的配筋结果为:主筋采用 C20@250 对称配筋,箍筋采用 $\phi 6@250$,纵向钢筋采用 C12@250。

(2)美国《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)

采用 Rocscience.Phase2(V8.0)软件进行计算,图7、8显示了主应力分布。对于 σ_1 ,拱脚内边缘处的最大压应力为20.95 MPa,小于混凝土抗压强度;对于 σ_3 ,大部分区域的应力小于设计抗拉强度,拱顶内边缘、拱脚外边缘和边墙底部内边缘处的拉应力超过设计抗拉强度;图9显示了剪切应力分布,大部分地区的剪应力小于2 MPa,大剪应力值范围较小。

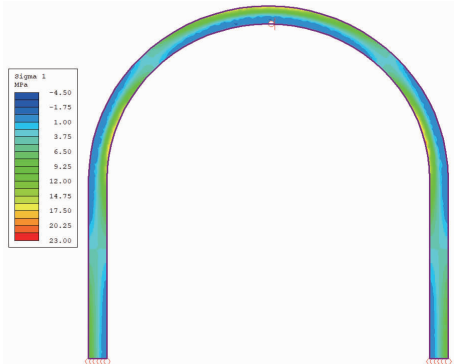


图7 IV级围岩衬砌断面应力 σ_1 分布

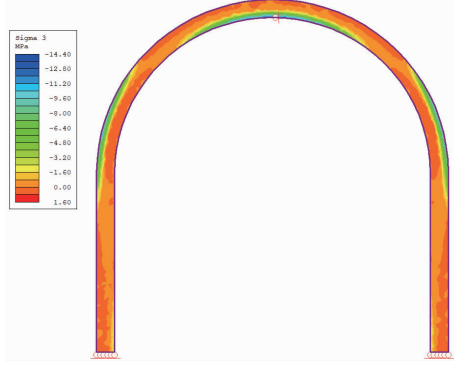


图8 IV级围岩衬砌断面应力 σ_3 分布

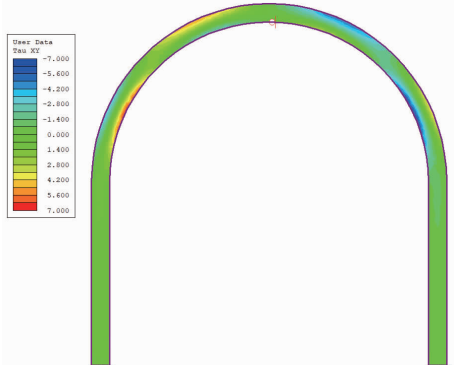


图9 IV级围岩衬砌断面剪应力分布

根据应力计算结果,分别选取拱顶、拱脚、边墙三个位置拉应力最大的截面,将截面应力积分得到拉力,各部位拉力计算结果、对应配筋面积及配筋结果见表7。

纵向钢筋按照构造要求配筋,分别在拱顶、拱脚、边墙对称设置6根纵向钢筋,参数为 $\phi 16@200$ 。根据剪应力计算结果,选取具有代表性的断面,积分所得的剪切力为737 kN,根据美国陆军隧规的要求,混凝土和钢筋提供的抗剪强度满足抗剪要求。

表 7 各部位拉力、配筋面积及配筋结果

拉力 / (kN·m ⁻¹)	钢筋面积 A _s /mm ²	最小配筋面积 A _{s,min} /mm ²	配筋设计及钢筋 面积(单侧)	备注
1 120	2 488			拱顶
907	2 014	1 120	φ22@150 (2533 mm ²)	拱脚
153	339			边墙

5.1.4 抗裂及裂缝设计

(1)《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)

由计算结果可知,对于所有单元都满足 $e_0 \leq 0.55 h_0$ 的要求,故不进行裂缝宽度验算。

(2)美国《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)

根据《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)中关于抗裂计算的要求,最大容许应力 $f_{s,max}$ 和受力钢筋最大间距 S_{max} 计算结果见表 8。

表 8 最大允许拉应力和受力钢筋最大间距计算结果

项目	值	备注
保护层厚度 /mm	50	
张力特征值	1.2	
钢筋计算应力 f_s /MPa	221.08	
钢筋最大容许应力 $f_{s,max}$ /MPa	241.36	满足要求
受力钢筋最大间距 S_{max} /mm	174.53	满足要求

从以上计算结果可以看出,钢筋的应力和间距可以满足裂缝控制的要求。

6 结 语

本研究系统对比了中美隧道二次衬砌结构设计规范的异同,主要研究结论如下:

(1)《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)明确要求隧道土建工程和运维设施应综合设计,美国《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)对隧道运营设施没有做明确要求,隧道设计更注重技术性要求。中美规范均综合考虑了承载能力极限状态和正

常使用极限状态。

(2)混凝土强度标准试件,《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)采用边长 150 mm 的立方体,美国《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)则采用 150 mm × 300 mm 的圆柱体;中国隧规中采用材料分项系数区分强度设计值与标准值,美国陆军隧规则采用折减系数来体现抗力折减效应。

(3)《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)根据不同的荷载组合,分别采用不同的安全系数,而《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)中不同设计工况的荷载种类分别采用不同的荷载系数;美国《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)中考虑的更加细致,更加具体,但其没有区分施工阶段和使用阶段。

(4)隧道结构设计,《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)采用破损阶段法,《Engineering and Design Tunnels And Shafts In Rock》(EM 1110-2—2901)采用强度设计法;《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)的设计参数更加保守、安全,能更好的保证隧道衬砌结构的安全性和耐久性,更有利于隧道二次衬砌的长期服役安全。

参考文献:

[1] S.D.埃斯克森,刘嫦娥.国际隧道协会隧道建设历程与展望[J].水利水电快报,2015,36(8):12-13.
[2] 《中国公路学报》编辑部.中国隧道工程学术研究综述·2015.[J].中国公路学报,2015,28(5):1-65.
[3] 陈湘生,徐志豪,包小华,等.中国隧道建设面临的若干挑战与技术突破[J].中国公路学报,2020,33(12):1-14.
[4] 王晓春.中美欧混凝土桥梁设计规范对比与评价体系研究 [D].南京:东南大学,2016.
[5] 梁程亮.中美混凝土桥梁设计规范对比与分析研究[D].南京:东南大学,2015.
[6] JTG 3370.1—2018,公路隧道设计规范[S].
[7] EM 1110-2—2901,Engineering and Design-Tunnels and Shafts in Rock[S].