

铁路隧道复合式衬砌初期支护可靠性分析

龚彦峰¹, 员健祥², 焦齐柱¹, 宋玉香², 郑强¹

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:《铁路隧道设计规范(极限状态法)》(Q/CR 9129—2018)使得概率极限状态法在铁路隧道结构设计中得到迅速发展,但其规定的设计方法以及目标可靠指标都是针对二次衬砌结构的,尚不适用于初期支护的设计。为将规范的适用范围扩大到初期支护,以8套铁路隧道衬砌通用参考图的复合式衬砌结构为研究对象,建立初期支护与二次衬砌共同作用的荷载-结构模型,用梁单元模拟初期支护与二次衬砌,采用杆单元模拟初期支护与二次衬砌之间的弹性链杆、围岩与支护间的弹性约束。对正态分布的随机变量,取截断正态分布。用蒙特卡罗法对初期支护荷载效应进行统计分析,以JC法对初期支护进行可靠度分析,通过校准法确定初期支护的目标可靠指标。通过与国内外相关规范的比较以及对材料性能的分析,推荐二级安全等级的隧道初期支护的目标可靠指标分别为2.7、3.2。

关键词:复合式衬砌;可靠性;目标可靠指标;校准法;初期支护

中图分类号: U25 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2023)01-0084-09

极限状态法是土木工程结构设计的发展趋势,目前,发达国家的结构设计采用这种以概率理论为基础的极限状态设计方法^[1-2]。为完善铁路技术标准体系,统一铁路工程结构极限状态法设计技术标准,对铁路隧道进行极限状态法设计标准转轨工作,既是铁路设计安全可靠、先进成熟、经济适用的必由之路,也是提高铁路隧道设计水平、实现与国际接轨的实际需要。自20世纪90年代起,中国开展了隧道设计标准的转轨研究^[3-12],在2018年颁布了《铁路隧道设计规范(极限状态法)》^[13](以下简称“规范”),规范规定:承载能力极限状态下,二级安全等级的隧道衬砌结构延性破坏、脆性破坏的目标可靠指标分别为4.2、4.7。规范的颁布使得铁路隧道极限状态法设计得到部分应用,但其仅适用于隧道二次衬砌等结构,而复合式衬砌的初期支护目前还难以采用极限状态法,概率极限状态设计还没有涉及。

此外,在铁路隧道结构可靠指标的常规计算中^[14-15],引用了经验值“荷载分担比”,进而将复合衬砌模型简化为单层衬砌模型。但该参数有很大的不确定性和模糊性,对结果有很大影响。为了削减荷载分担比的影响,故建立初期支护与二次衬砌共同作用模型,通过对现行衬砌参考图进行反算分析,评估其对应的可靠性水平,探究铁路隧道复合式衬砌在使用阶段的目标可靠指标。

1 复合式衬砌可靠性分析方法

1.1 复合式衬砌计算模型

采用荷载-结构模型,用梁单元模拟初期支护与二次衬砌,采用杆单元模拟初期支护与二次衬砌之间的弹性链杆、围岩与支护间的弹性约束。隧道类型分为有仰拱隧道和无仰拱隧道,荷载作用包括结构自重及围岩压力,以划分单元数量为原则,初期支护、二次衬砌每层划分成100个单元,其有限元计算模型和边界条件如图1所示。

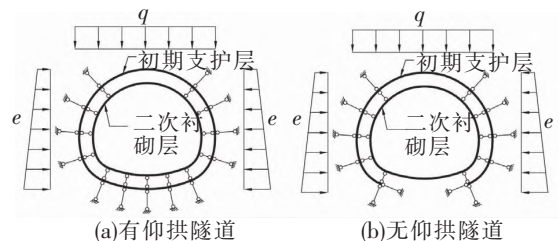


图1 隧道衬砌有限元计算模型图

收稿日期:2022-10-15 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20220313

基金项目:中铁第四勘察设计院集团有限公司科研项目(2020K152-1)

作者简介:龚彦峰(1969—),男,正高级工程师,研究方向为隧道与地下工程领域。E-mail:tsygyf@126.com

龚彦峰,员健祥,焦齐柱,等.铁路隧道复合式衬砌初期支护可靠性分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(1):84-91,126.

初期支护-二次衬砌结合面弹性链杆的径向刚度是影响复合式衬砌模型的关键因素。复合式衬砌结构的径向压缩关系可简化为图 2^[16]，图 2 中， R_1 、 R_2 分别为初期支护与二次衬砌的外半径； t_1 、 t_2 分别为初期支护与二次衬砌的厚度； K_Y 为单个结合面弹性链杆的压缩刚度； K_{Y1} 、 K_{Y2} 分别为初期支护与二次衬砌压缩区单元的压缩刚度。假定层间压缩刚度等于内、外衬砌各 1/2 厚度压缩区内结构的压缩刚度，则内、外层衬砌压缩区域内单元的压缩刚度分别为

$$K_{Y1}=\frac{E_1A}{t_1'}=\frac{2E_1A}{t_1} \tag{1}$$

$$K_{Y2}=\frac{E_2A}{t_2'}=\frac{2E_2A}{t_2} \tag{2}$$

式中， E_1 、 E_2 分别为初期支护与二次衬砌混凝土的弹性模量； A 为单个结合面径向弹性链杆对应的结合面压缩区面积， $A=B\theta R_H$ ， θ 为单个结合面弹性链杆对应的计算角度， R_H 为结合面半径； t_1' 、 t_2' 分别为初期支护与二次衬砌压缩区的混凝土厚度。根据串联弹簧刚度系数的计算公式，将式(1)、式(2)进行组合，得

$$K_Y=\frac{K_{Y1}K_{Y2}}{K_{Y1}+K_{Y2}}=\frac{2E_1E_2A}{E_1t_2+E_2t_1} \tag{3}$$

1.2 复合式衬砌极限状态方程

(1) 素混凝土衬砌截面抗裂极限状态方程的表达式为

$$\phi \frac{\gamma_p f_{tk} b h}{6(e_0/h)-1} - N = 0 \tag{4}$$

式中， ϕ 为稳定系数，对明洞结构取 $\phi=1.0$ ； b 、 h 分别为截面宽度和高度； N 为荷载产生的轴向力； γ_p 为混凝土抗拉塑性系数， γ_p 取 1.75； f_{tk} 为衬砌混凝土轴心抗拉强度值； e_0 为轴向力偏心距 M/N 。

(2) 素混凝土衬砌截面抗压极限状态方程的表达式为

$$\phi f_{ck} b h \alpha - N = 0 \tag{5}$$

式中， f_{ck} 为衬砌混凝土轴心抗压强度值； α 为轴向力偏心影响系数。

(3) 钢筋混凝土衬砌截面极限状态方程的表达式为

$$\alpha_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) - f_y' A_s' (h_0 - a_s') - N \left(e_0 + e_a + \frac{h}{2} - a_s \right) = 0 \tag{6}$$

式中，取 $\alpha_1=1.0$ ； e_a 为附加偏心距； h_0 为截面有效高度， $h_0=h-a_s$ ； a_s 、 a_s' 分别为受拉区、受压区的钢筋合力点至截面近边的距离； f_y' 为钢筋强度设计值； A_s' 为受压区钢筋面积。

1.3 基本随机变量的统计特征

对隧道衬砌结构进行可靠度分析时，围岩压力的计算采用《铁路隧道设计规范》^[17] 推荐的方法，围岩参数的基本统计特征如表 1 所示，衬砌材料的基本统计特征如表 2~表 4 所示^[10]。其中，衬砌重度的变异系数为 0.02，衬砌重度和钢筋强度均为正态分布。

表 1 围岩参数统计特征

围岩 级别	围岩重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)			弹性反力系数/ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$)			侧压力系数			计算摩擦角 $\varphi_c/(^\circ)$			侧摩擦角 $\theta/(^\circ)$			坍方高度/m		
	均值	变异 系数	分布 类型	均值	变异 系数	分布 类型	均值	变异 系数	分布 类型	均值	变异 系数	分布 类型	均值	变异 系数	分布 类型	均值	变异 系数	分布 类型
II	26.0	0.019		1 500	0.110	0	—			74	0.027 0		$0.9\varphi_c$	0.027 0		根据	0.24	
III	24.0	0.020	正态	850	0.225	正态	0.075 0	0.500	对数	65	0.038 5	正态	$0.9\varphi_c$	0.038 5	正态	具体	0.32	正态
IV	21.5	0.035	分布	350	0.236	分布	0.200 0	0.175	正态	55	0.045 5	分布	$0.8\varphi_c$	0.045 5	分布	参数	0.40	分布
V	18.5	0.041		150	0.177		0.366 7	0.128	分布	45	0.056 0		$0.6\varphi_c$	0.056 0		确定	0.45	

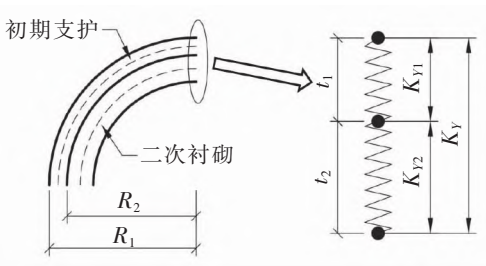


图 2 复合式衬砌层间压缩刚度计算图示

表 2 混凝土强度统计特征

混凝土标号	混凝土弹性模量/GPa			混凝土强度设计值/MPa				衬砌厚度/m		
	均值	变异系数	分布类型	轴心	轴心	变异系数	分布类型	均值	变异系数	分布类型
				抗压 f_c	抗拉 f_t					
C25	28.0	0.085 3	正态分布	23.07	2.71	0.16	正态分布	取现行标准		
C30	30.0			25.98	2.86	0.14		设计的	0.05	正态分布
C35	31.5			29.89	3.12	0.13				
C40	32.5			33.64	3.36	0.12				

表 3 衬砌重度统计特征 kN/m³

衬砌重度	C20、C30 素混凝土	C35 钢筋混凝土
均值	23	25

表 4 钢筋强度统计特征

钢筋强度	均值/MPa	变异系数
HRB335	353.8	0.034
HRB400	425.2	0.036
HRB500	531.5	0.036

2 铁路隧道复合式衬砌可靠度分析

2.1 复合式衬砌控制截面可靠指标

选取中国铁路行业发布的铁路隧道衬砌通用参考图分析对象,运用蒙特卡罗法对基本随机变量进行 1 万次抽样模拟,对于正态分布的随机变量,取截断正态分布,截断区间为平均值加减 3 倍标准差,且下限不小于 0。采用 JC 法原理计算各截面的可靠指标,先将非正态随机变量转换为等效正态变量,再通过一次二阶矩法计算可靠指标,计算流程如图 3 所示。依据《铁路隧道设计规范》^[17],对初期支护和二次衬砌结构进行安全性分析。

以时速 200 km 客货共线铁路(普通货物运输)双线隧道为例,Ⅳ级隧道各截面的内力均值、安全系数和可靠指标如图 4~图 7 所示,控制截面的计算结果如表 5 所示。

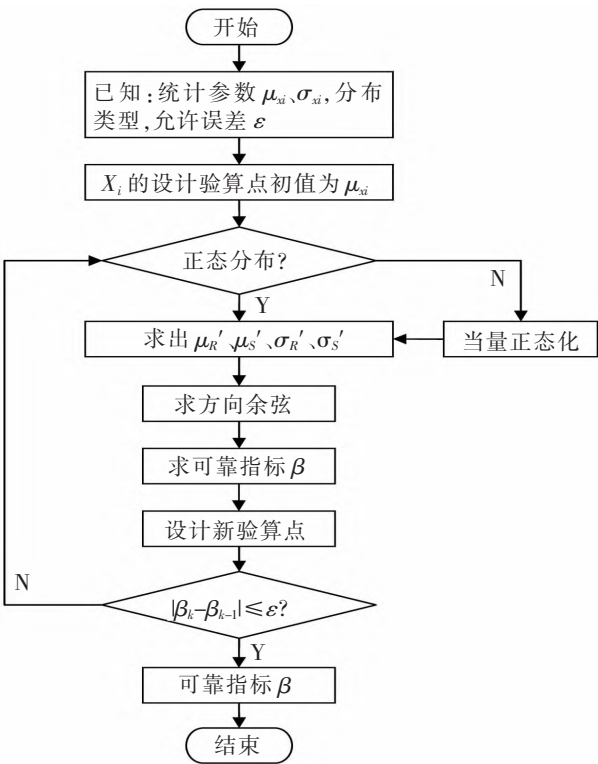


图 3 JC 法流程图

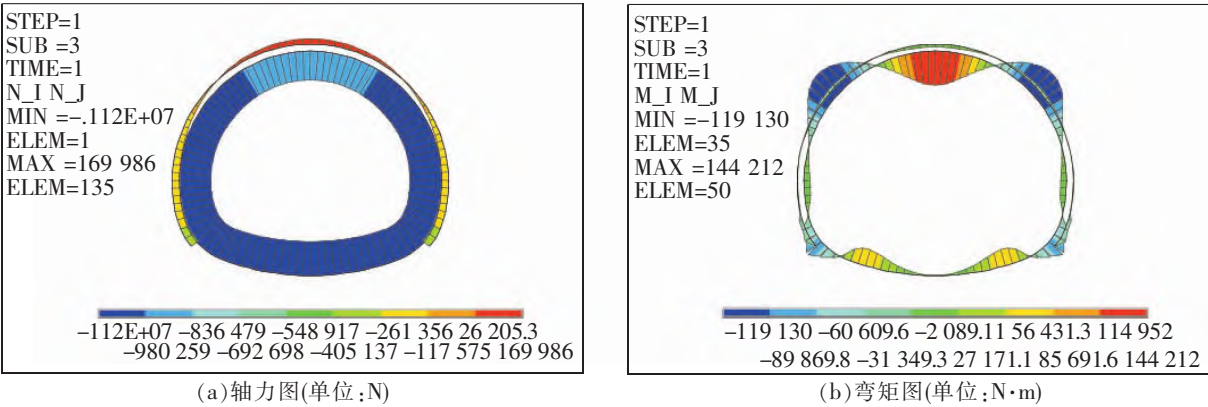


图 4 200 km/h 双线Ⅳ级深埋隧道内力均值图

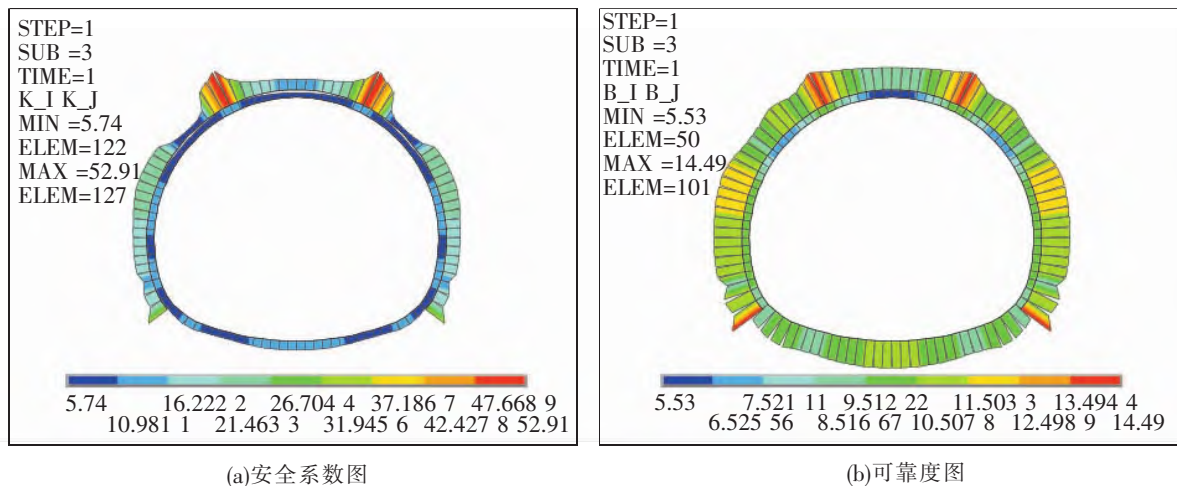


图 5 200 km/h 双线Ⅳ级深埋隧道可靠性图

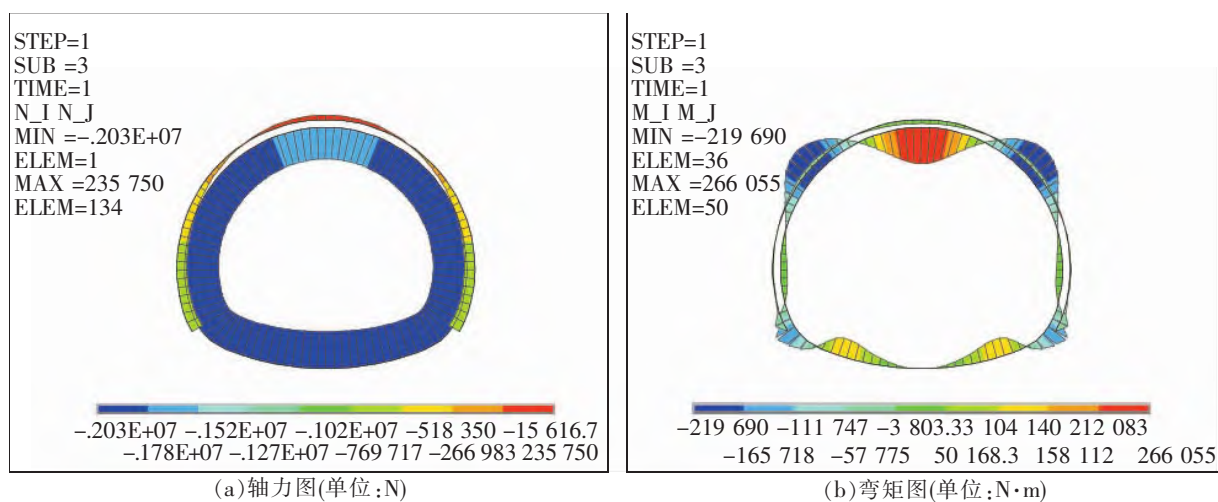


图 6 200 km/h 双线Ⅳ级浅埋隧道内力均值图

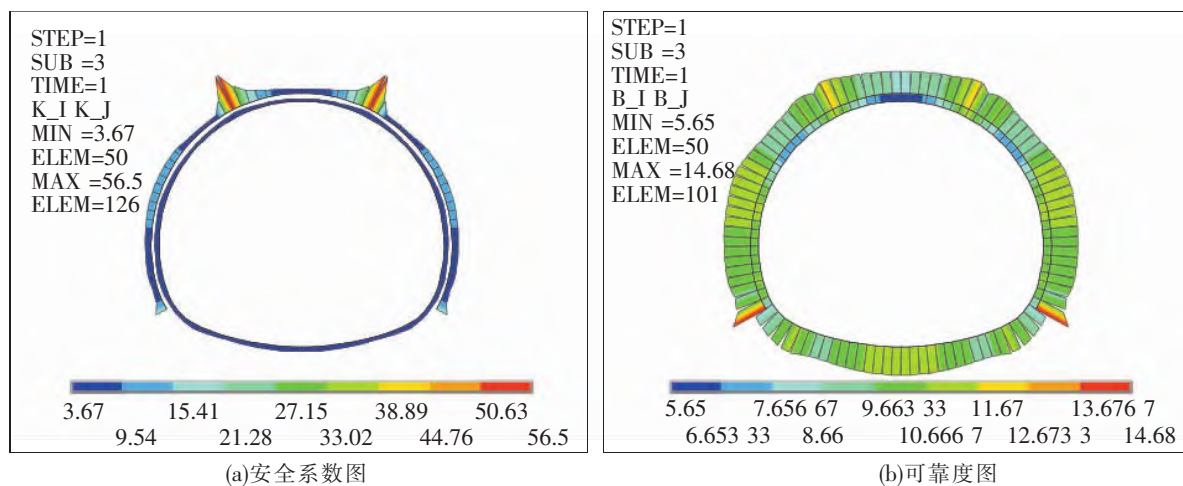


图 7 200 km/h 双线Ⅳ级浅埋隧道可靠性图

表 5 200 km/h 双线Ⅳ级隧道可靠指标

部位	深埋									
	二次衬砌					初期支护				
	轴力 均值/kN	弯矩均值/ (kN·m)	可靠 指标	安全 系数	破坏 类型	轴力 均值/kN	弯矩均值/ (kN·m)	可靠 指标	安全 系数	破坏 类型
仰拱	1 099.95	63.80	9.36	9.83	小偏心	—	—	—	—	—
墙脚	1 094.94	70.35	9.24	9.61	小偏心	256.08	12.41	8.41	11.88	小偏心
边墙	1 098.18	77.75	8.48	9.35	小偏心	250.39	1.78	10.93	18.74	小偏心
拱脚	1 049.20	24.43	9.76	10.78	小偏心	241.38	2.22	11.00	18.96	小偏心
拱腰	1 011.71	119.13	6.87	7.31	大偏心	73.85	10.15	9.50	5.74	小偏心
拱顶	942.94	144.21	5.53	6.54	大偏心	169.95	12.22	8.82	14.96	小偏心

部位	浅埋									
	二次衬砌					初期支护				
	轴力 均值/kN	弯矩均值/ (kN·m)	可靠 指标	安全 系数	破坏 类型	轴力 均值/kN	弯矩均值/ (kN·m)	可靠 指标	安全 系数	破坏 类型
仰拱	1 974.31	114.02	9.62	5.54	小偏心	—	—	—	—	—
墙脚	1 953.56	131.16	9.50	5.37	小偏心	591.56	15.92	9.36	7.05	小偏心
边墙	1 936.08	156.01	8.20	4.59	小偏心	580.44	6.41	10.27	8.48	小偏心
拱脚	1 864.99	48.29	10.17	6.03	小偏心	557.83	5.24	10.38	8.89	小偏心
拱腰	1 848.58	213.56	6.97	4.03	小偏心	217.33	25.15	8.95	4.83	小偏心
拱顶	1 741.87	266.06	5.65	3.67	大偏心	235.75	29.57	8.49	6.37	小偏心

由图 4~图 7 及表 5 可知,200 km/h 双线Ⅳ级隧道初期支护与二次衬砌的受压轴力值最大处均位于墙脚,并自墙脚向两侧逐渐减小;初期支护拱顶处多为受拉;二次衬砌的轴力、弯矩远大于初期支护;控制截面出现在二次衬砌拱顶处,可靠指标最小值为 5.53,属于大偏心破坏;各截面的安全系数均满足《铁路隧道设计规范》^[17] 要求。

200 km/h 双线其他围岩等级隧道的计算结果如表 6、表 7 所示。

表 6 200 km/h 双线Ⅲ级隧道可靠指标

部位	深埋									
	二次衬砌					初期支护				
	轴力 均值/kN	弯矩均值/ (kN·m)	可靠 指标	安全 系数	破坏 类型	轴力 均值/kN	弯矩均值/ (kN·m)	可靠 指标	安全 系数	破坏 类型
仰拱	656.40	0.33	14.55	15.46	抗压	—	—	—	—	—
墙脚	642.74	24.20	14.48	15.40	抗压	153.09	2.52	11.50	23.67	抗压
边墙	637.90	24.44	13.55	13.58	抗压	150.08	0.02	14.83	15.08	抗压
拱脚	618.25	7.85	14.11	14.46	抗压	147.64	0.13	14.89	15.38	抗压
拱腰	580.87	53.23	6.46	7.06	抗裂	9.77	1.06	2.10	8.93	抗裂
拱顶	546.86	63.44	5.19	3.81	抗裂	105.74	1.16	14.73	21.00	抗压

部位	深埋加强									
	二次衬砌					初期支护				
	轴力 均值/kN	弯矩均值/ (kN·m)	可靠 指标	安全 系数	破坏 类型	轴力 均值/kN	弯矩均值/ (kN·m)	可靠 指标	安全 系数	破坏 类型
仰拱	690.25	0.56	14.34	14.70	抗压	—	—	—	—	—
墙脚	678.50	28.21	14.16	14.42	抗压	157.07	4.42	11.21	18.25	大偏心
边墙	671.76	27.31	13.26	12.78	抗压	151.21	0.25	15.10	15.87	大偏心
拱脚	658.72	0.90	13.91	13.70	抗压	149.97	0.07	14.25	13.77	大偏心
拱腰	605.79	53.63	7.03	7.72	抗裂	4.23	7.41	1.65	4.29	大偏心
拱顶	570.37	63.70	5.47	4.01	抗裂	120.31	8.23	4.06	8.80	大偏心

表 7 200 km/h 双线 V 级隧道可靠指标

部位	深埋									
	二次衬砌					初期支护				
	轴力 均值/kN	弯矩均值/ (kN·m)	可靠 指标	安全 系数	破坏 类型	轴力 均值/kN	弯矩均值/ (kN·m)	可靠 指标	安全 系数	破坏 类型
仰拱	1 451.31	151.17	7.23	7.22	小偏心	818.86	9.64	6.35	6.47	小偏心
墙脚	1 450.94	144.14	7.39	7.33	小偏心	799.29	9.51	6.43	6.62	小偏心
边墙	1 501.42	153.09	6.62	6.45	小偏心	744.70	4.85	6.95	7.55	小偏心
拱脚	1 420.05	60.99	8.16	8.23	小偏心	607.98	6.32	8.02	9.47	小偏心
拱腰	1 413.45	248.71	4.20	4.72	大偏心	417.09	25.26	7.66	9.14	小偏心
拱顶	1 294.17	296.13	2.55	3.33	大偏心	32.13	30.09	9.56	4.12	小偏心

部位	浅埋									
	二次衬砌					初期支护				
	轴力 均值/kN	弯矩均值/ (kN·m)	可靠 指标	安全 系数	破坏 类型	轴力 均值/kN	弯矩均值/ (kN·m)	可靠 指标	安全 系数	破坏 类型
仰拱	2 434.95	252.40	8.10	4.32	小偏心	1 425.34	16.13	6.83	3.90	小偏心
墙脚	2 435.34	240.33	8.22	4.39	小偏心	1 387.03	15.83	6.96	4.00	小偏心
边墙	2 528.08	257.00	7.36	3.85	小偏心	1 243.78	10.99	7.52	4.57	小偏心
拱脚	2 407.60	103.31	9.18	4.83	小偏心	1 040.44	11.24	8.71	5.73	小偏心
拱腰	2 438.42	431.58	4.45	2.81	大偏心	655.79	45.18	8.23	5.57	小偏心
拱顶	2 253.91	519.11	2.33	2.02	大偏心	0.84	52.87	10.17	2.68	小偏心

由表 5~表 7 可知,可靠指标与安全系数大体上呈正相关关系;二次衬砌的控制截面集中于拱顶;Ⅲ级围岩最小可靠指标为 1.65,出现在深埋加强隧道初期支护拱腰处,属于大偏心破坏;V 级围岩中,最小的安全系数和可靠指标都出现在拱顶处,最小可靠指标为 2.33;最小可靠指标为Ⅲ级深埋加强隧道初期支护拱腰处,为 1.65,其较小的原因是初期支护无钢架,宜进行增设钢架改进;同一围岩等级下,浅埋隧道的最小可靠指标多小于深埋。

2.2 铁路隧道初期支护结构的可靠指标

铁路隧道通用参考图初期支护控制截面的可靠指标如表 8 所示。

表 8 铁路隧道通用参考图初期支护控制截面可靠指标

隧道类型	钢筋混凝土(延性破坏)			素混凝土抗压(脆性破坏)		素混凝土抗裂(脆性破坏)	
	Ⅲ	Ⅳ	V	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ
140 km/h 单线	—	—	14.33	16.72	7.70	4.23	2.88
140 km/h 双线	11.81	8.81	5.15	15.34	11.07	2.98	—
160 km/h 单线	—	1.79	13.61	10.27	13.28	—	4.21
160 km/h 双线	—	6.88	7.15	11.58	—	2.11	—
200 km/h 单线	10.39	10.25	7.71	—	12.52	—	4.78
200 km/h 双线	1.65	8.41	6.35	11.50	—	2.10	—
250 km/h 双线	9.85	6.33	6.01	12.94	—	2.02	—
350 km/h 双线	5.69	6.15	5.74	7.50	—	2.75	—

注:表中“—”表示该时速对应围岩级别没有编制相应衬砌参考图。

由表 8 可知,初期支护的钢筋混凝土延性破坏可靠指标多高于素混凝土抗裂破坏,且低于素混凝土抗压破坏。以 200 km/h 双线可靠指标计算值最低,为可靠指标 1.65 的钢筋混凝土;混凝土达到抗压承载能力极限状态时,可靠指标最小值为 7.50;混凝土达到抗裂承载能力极限状态时,可靠指标最小值为2.02。

2.3 铁路隧道初期支护结构目标可靠指标的确定

采用校准法确定初期支护的目标可靠指标,西南地区 10 余条干线上铁路隧道各级围岩结构出现频率如表 9 所示^[10]。

表 9 铁路隧道各级围岩出现频率的统计结果				Hz
围岩等级	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
频率	0.034	0.294	0.342	0.330

以表 9 中各级围岩统计结果为基础数据,根据破坏类型及围岩级别比例,不同隧道类型衬砌结构的权系数如表 10 所示。

表 10 铁路隧道通用参考图初期支护破坏类型权系数

隧道类型	钢筋混凝土(延性破坏)			素混凝土抗压(脆性破坏)		素混凝土抗裂(脆性破坏)	
	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ
140 km/h 单线	—	—	1.000	0.462	0.538	0.462	0.538
140 km/h 双线	0.304	0.354	0.342	0.462	0.538	1.000	—
160 km/h 单线	—	0.509	0.491	0.462	0.538	—	1.000
160 km/h 双线	—	0.509	0.491	1.000	—	1.000	—
200 km/h 单线	0.304	0.354	0.342	—	1.000	—	1.000
200 km/h 双线	0.304	0.354	0.342	1.000	—	1.000	—
250 km/h 双线	0.304	0.354	0.342	1.000	—	1.000	—
350 km/h 双线	0.304	0.354	0.342	1.000	—	1.000	—

将表 10 中每个可靠指标与相应的权系数先求积后求和,所得控制截面可靠指标加权值如表 11 所示。

表 11 铁路隧道通用参考图初期支护控制截面可靠指标加权值

项目	钢筋混凝土(延性破坏)	素混凝土抗压(脆性破坏)	素混凝土抗裂(脆性破坏)
140 km/h 单线	14.33	11.87	3.50
140 km/h 双线	8.47	13.05	2.98
160 km/h 单线	7.60	11.89	4.21
160 km/h 双线	7.01	11.58	2.11
200 km/h 单线	9.43	12.52	4.78
200 km/h 双线	5.65	11.50	2.10
250 km/h 双线	7.29	12.94	2.02
350 km/h 双线	5.87	7.50	2.75
可靠指标均值	8.21	11.61	3.06
单侧 95%置信下限	6.30	10.40	2.40

通过与国内外相关规范的比较以及对材料性能的分析,推荐初期支护采用的目标可靠指标值如表 12 所示。

表 12 铁路隧道初期支护目标可靠指标建议值

工程结构	设计基准期/a	破坏类型	安全等级		
			一级	二级	三级
铁路隧道初期支护	100	延性破坏	3.2	2.7	2.2
		脆性破坏	3.7	3.2	2.7

由表 12 可知,推荐的初期支护目标可靠指标,与规范中二次衬砌不相同。分析如下:铁路隧道结构可靠指标的常规计算中,所采用的“荷载分担比”有不确定性和模糊性,导致计算精度不如复合衬砌模型;相比于规范中的衬砌结构的目标可靠指标,推荐的初期支护的目标可靠指标建议值较小。主要是由于现行的铁路隧道施工中,初期支护多数仅作为施工措施,喷射混凝土的设计厚度远小于二次衬砌,故初期支护的目标可靠指标值较小。

3 结论

(1)初期支护与二次衬砌的受压轴力最大处集中于仰拱、墙脚,并向拱顶方向逐渐减小。

(2)二次衬砌的内力远大于初期支护,二次衬砌的可靠指标和安全系数普遍小于初期支护;同一围岩等级下,浅埋隧道的最小可靠指标多小于深埋。

(3)铁路隧道通用参考图中,初期支护的钢筋混凝土延性破坏可靠指标多高于素混凝土抗裂破坏,且低于素混凝土抗压破坏。故未架设钢架的初期支护可靠性更低,需要相应加强。

(4)通过与国内外相关规范的比较以及对材料性能的分析,推荐二级安全等级的隧道初期支护的目标可靠指标分别为 2.7、3.2。

参 考 文 献

- [1] British Tunnelling Society. Tunnel lining design guide[M]. London: Thomas Telford, 2004.
- [2] 日本土木学会. 隧道标准规范[盾构篇]及解说[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [3] 张弥, 沈永清. 用响应面方法分析铁路明洞结构荷载效应[J]. 土木工程学报, 1993, 36(2): 58-66.
- [4] 张清, 王东元, 李建军. 铁路隧道衬砌结构可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(3): 209-218.
- [5] 景诗庭, 冯卫星, 朱永全. 混凝土偏压构件抗压强度试验研究[J]. 铁道学报, 1996, 18(5): 95-101.
- [6] 朱永全, 刘勇, 宋玉香. 隧道工程结构可靠度计算方法分析[J]. 石家庄铁道学院学报, 1997, 10(4): 41-47.
- [7] 宋玉香, 刘勇, 朱永全. 响应面方法在整体式隧道衬砌可靠性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1847-1851.
- [8] 朱永全, 张素敏, 景诗庭. 铁路隧道初期支护极限位移的意义及确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1594-1598.
- [9] 宋玉香, 刘勇, 齐键旭, 等. 铁路隧道复合式衬砌作用效应统计特征分析[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(6): 69-75.
- [10] 赵东平, 喻渝, 赵万强, 等. 铁路隧道衬砌目标可靠指标研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(6): 51-56.
- [11] 张建风. 铁路隧道衬砌结构可靠度软件开发[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017.
- [12] 胡炜, 赵东平, 郑长青. 铁路隧道衬砌极限状态法设计验证研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(6): 1592-1598.
- [13] 中国铁路总公司. 铁路隧道设计规范(极限状态法): Q/CR 9129—2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- [14] 龚彦峰, 陈文博, 房倩. 隧道衬砌可靠指标的优化求解方法[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(8): 1286-1292.
- [15] 张晓静. 铁路隧道复合式衬砌目标可靠指标及分项系数研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2014.
- [16] 姚超凡, 晏启祥, 何川, 等. 一种改进的盾构隧道双层衬砌分析模型及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 80-89.
- [17] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范: TB 10003-2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.

(下转第 126 页)

[13]杨小冈,高凡,卢瑞涛,等.基于改进YOLOv5的轻量化航空目标检测方法[J].信息与控制,2022,51(3):361-368.

Liquid Level Instrument Recognition Based on Deep Learning

Li Chang, Wang Xuejun

(School of Information Science and Technology, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The substation is very important to the safe operation of high-speed railway. In order to accurately obtain the accurate reading of liquid level instrument in high-speed railway substation, this paper proposed KN-YOLOX-S deep learning network model based on YOLOX-S. In the backbone network, Ghost convolution was introduced to replace the traditional convolution layer, which reduced the network parameters and computation, and realized the lightweight of the model. The KNSE attention module was added to the SPPBottleneck module of the backbone network to improve the ability of the network, which extracted effective feature information and enhanced the ability to extract effective feature information. The experiment showed that the KN-YOLOX-S model improved 0.4% compared with that of the YOLOX-S model in mAP@0.50, and mAP@0.5:0.95 improved 0.54%, and the reasoning speed almost tripled, meeting the real-time detection requirements of the liquid level gauge in the high-speed railway substation.

Key words: substation; liquid level instrument; deep learning; real-time detection

(上接第 91 页)

Reliability Analysis of Primary Lining for Composite Lining of Railway Tunnel

Gong Yanfeng¹, Yuan Jianxiang², Jiao Qizhu¹, Song Yuxiang², Zheng Qiang¹

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd., Wuhan 430063, China;

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The issue of Code for Design of Railway Tunnel (Limit State Method) (Q/CR 9129—2018) makes the probabilistic limit state method develop rapidly in the design of railway tunnel structure. However, the prescribed design method and the target reliability index are all for the secondary lining structure, which is not suitable for the design of primary lining. To expand the application scope of the specification to the primary lining, the composite lining structure of eight sets of general reference maps of railway tunnel lining was taken as the research object, and the load-structure model of the interaction between the primary lining and the secondary lining was established. The beam unit was used to simulate the initial primary and secondary lining, and the rod unit was used to simulate the elastic chain link between the initial primary and secondary lining, and the elastic constraint between the surrounding rock and the support. For normally distributed random variables, truncated normal distribution was taken. The Monte Carlo method was used to analyze the load effect of the primary lining, and the JC method was used to analyze the reliability of the primary lining. The target reliability index of the primary lining was determined by the calibration method. Through the comparison with the relevant norms at home and abroad and the analysis of the material performance, the target reliability indexes of the secondary safety grade tunnel primary lining are 2.7 and 3.2 respectively.

Key words: composite lining; reliability analysis; target reliability index; calibration method; primary lining