

doi:10.3969/j. issn. 1672 - 6073. 2013. 01. 021

岩石地区地铁矿山法区间 隧道衬砌设计模式

雷 刚 周婷婷 郑广亮

(北京城建设计研究总院有限责任公司 北京 100037)

摘 要 岩石地区地铁矿山法区间隧道衬砌的设计模式长期处于无章可循的状态,亟须合理化、规范化。从结构可靠度的角度出发,分3种模式(铁规破损阶段法、铁规概率极限状态法、建规概率极限状态法)对铁路系统和建工系统的设计模式进行分析研究,提出合理的可靠度设计方法进行 $P-\Delta$ 分析,并提出区间隧道设计中各个关键参数的合理取值。

关键词 地铁;岩石;矿山法;区间隧道;衬砌设计模式;可靠度

中图分类号 U451.4 文献标志码 A

文章编号 1672 - 6073 (2013)01 - 0087 - 06

1 研究概况

目前,全国在建地铁城市约20余个,地质条件各异,其中包括一部分岩石地质城市,如重庆、深圳、青岛、大连等,这类城市的地铁区间隧道大部分采用矿山法施工。但是,对于地铁矿山法区间隧道,还没有相关的规范规程对其设计方法进行详细的描述,所以目前只能参考《铁路隧道设计规范》(以下简称“铁规”)和建工系统的相关设计规范进行设计。

依据上述规范,目前地铁矿山法区间隧道二次衬砌的设计模式有两种:按可靠度(概率极限状态法)和非可靠度(破损阶段法或允许应力法)的方法设计。其中,对于概率极限状态法又存在铁路系统和建工系统两种版本。笔者依托青岛地铁单线区间隧道,主要针对地铁矿山法区间单线单洞隧道,拟对这3种设计模

式进行比较分析,从而研究出理论正确、安全可靠的设计方法。

2 工程概况

青岛市地铁一期工程为线网规划中的M3线,是位于青岛城区中部的一条南北向骨干线路,保儿站-河西站区间为M3线试验段工程,区间全长1150m,采用矿山法施工,复合式衬砌结构,断面全部为马蹄形,开挖跨度为6.2m,高度6.7m。区间结构标准断面如图1所示。

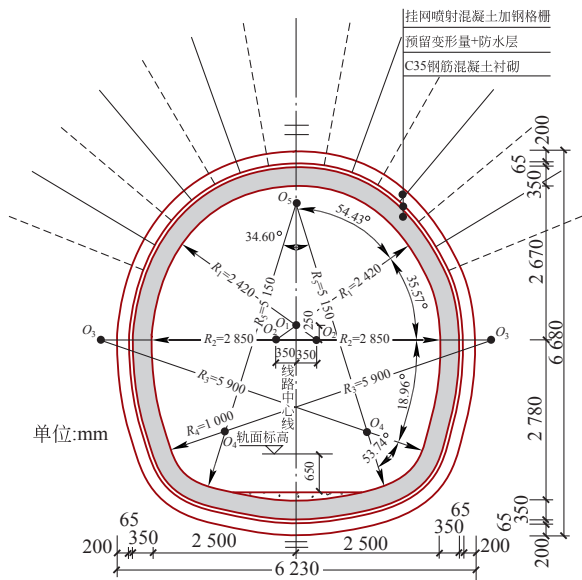


图1 区间隧道结构标准断面

3 设计模式的分析比较

笔者对3种设计方法(铁规破损状态法、铁规概率极限状态法、建规概率极限状态法)从计算公式和配筋结果两个方面进行了研究比较。

收稿日期: 2011-12-30 修回日期: 2012-02-29

作者简介: 雷刚,男,高级工程师,长期从事岩石隧道及地铁工程的理论与技术的研究,taizil@tom.com

重点工程: 青岛地铁3号线一期工程(PJ01262)

3.1 计算公式的差异

3.1.1 承载力公式

3种方法的内力计算公式原理一致,都是通过平截面假定和力学平衡原理推导得出,公式形式基本相似,只是符号上有所差别。下面列出3种方法的大偏心配筋计算公式,可以看出其相似性。其中,由于《铁路隧道规范》1999年和2005年版本关于概率极限法的计算存在较大差别,特此将1999年版规范的公式列出,详细分析。

建规极限法公式(大偏心)为

$$N \leq \alpha_1 f_c b x + f_y' A_s' - \sigma_s A_s \tag{1}$$

$$Ne \leq \alpha_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_y' A_s' (h_0 - \alpha_s') \tag{2}$$

1999版铁规极限法公式(大偏心)为

$$N_d \leq f_{cd} b x + f_{scd}' A_s' - \sigma_s A_s \tag{3}$$

$$N_d e \leq f_{cd} b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_{scd}' A_s' (h_0 - a') \tag{4}$$

2005版铁规极限法公式(大偏心)为

$$N_d \leq f_{cmd} b x + f_{scd}' A_s' - \sigma_s A_s \tag{5}$$

$$N_d e \leq f_{cmd} b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_{scd}' A_s' (h_0 - a') \tag{6}$$

铁规破损法公式(大偏心)为

$$KN \leq R_w b x + R_g (A_g' - A_g) \tag{7}$$

$$KNe \leq R_w b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + R_g A_g' (h_0 - a') \tag{8}$$

小偏心的计算公式也类似,这里不再列出。

3.1.2 正常使用极限状态裂缝宽度验算公式

铁规破损阶段按非可靠度方法计算,不存在承载力极限状态和正常使用极限状态的设计概念,也无法验算裂缝;而铁规概率极限法中正常使用极限状态裂缝宽度验算公式引用了建规的方法,因此和建规概率极限法的裂缝计算公式是完全相同的。

3.1.3 承载力公式中各参数取值的差异

3种方法由于设计理论和概念不尽相同,所以在公式当中的参数取值上存在较大差异,详见表1。

表1 3种设计方法公式参数的差异

设计方法		内力设计值	混凝土强度设计值 (C35)	钢筋强度设计值 (HRB335)
可靠度方法	建规极限法	1.49 × 标准值	16.7	300
	2005版铁规极限法	1.8 × 标准值	19	268
	1999版铁规极限法	1.0 × 标准值	17.5	268
非可靠度方法	2005版铁规破损法	2.0 × 标准值	32.5	360

另外,两规范所规定的附加偏心距不同:铁规附加偏心距 $e_s = 0.12(0.3h - e_0)$, 当 $e_0 \geq 0.3h_0$ 时,取 $e_s = 0$ 。建规附加偏心距取值应取20mm和偏心方向截面最大尺寸的1/30两者中的较大值。

3.2 配筋计算结果的差异

矿山法区间隧道内力计算中,需要先确定塌落拱高度。极限法塌落拱高度和破损法有一定的区别,但是差别不大,为了便于比较,本次研究采用统一的内力标准值。

拟采用的3对标准值如下: $N = 852\text{ kN}$, $M = 88\text{ kN} \cdot \text{m}$; $N = 1\,200\text{ kN}$, $M = 140\text{ kN} \cdot \text{m}$; $N = 1\,700\text{ kN}$, $M = 280\text{ kN} \cdot \text{m}$ 。选取250mm和300mm两种常见的衬砌厚度进行比较。

本次计算采用统一的附加偏心距 $e_0 = 20\text{ mm}$, 取偏心距增大系数 $\eta = 1.0$ (此系数的分析论证详见后文)。3种方法判别大小偏心的原则相同,有

$$x = \frac{N}{f_c b}$$

当 $x \leq 0.55h_0$ 时为大偏心; 当 $x > 0.55h_0$ 时为小偏心。结果如表2~表3所示。

表2 不同工况下3种设计方法配筋结果的比较
(厚度250mm)

内力标准值	设计方法	截面厚度250mm	
		计算配筋面积 /mm ²	备注
$N = 852\text{ kN}$ $M = 88\text{ kN} \cdot \text{m}$	铁规破损法	$A_s = 1\,515$	$x < 2a'$
	1999版铁规极限法	$A_s = 1\,126$	$x < 2a'$
	2005版铁规极限法	$A_s = 1\,832$	$x < 2a'$
	建规极限法	$A_s = 1\,359$	$x < 2a'$
	推荐法	$A_s = 1\,463$	$x < 2a'$
$N = 1\,200\text{ kN}$ $M = 140\text{ kN} \cdot \text{m}$	铁规破损法	$A_s = 2\,755$	$x < 2a'$
	1999版铁规极限法	$A_s = 2\,025$	$x > 2a'$ 且 $> 0.55h_0$
	2005版铁规极限法	$A_s = 3\,726$	$x > 2a'$ 且 $> 0.55h_0$
	建规极限法	$A_s = 2\,577$	$0.55h_0 > x > 2a'$
	推荐法	$A_s = 3\,048$	$x > 2a'$ 且 $> 0.55h_0$
$N = 1\,700\text{ kN}$ $M = 280\text{ kN} \cdot \text{m}$	铁规破损法	超过最大配筋率	—
	1999版铁规极限法	超过最大配筋率	—
	2005版铁规极限法	超过最大配筋率	—
	建规极限法	超过最大配筋率	—
	推荐法	超过最大配筋率	—

表 3 不同工况下三种设计方法配筋结果的比较
(厚度 300 mm)

内力标准值	设计方法	截面厚度/300 mm	
		计算配筋面积 /mm ²	备注
N = 852 kN M = 88 kN·m	铁规破损法	构造配筋	$x < 2a'$
	1999 版铁规极限法	构造配筋	$x < 2a'$
	2005 版铁规极限法	构造配筋	$x < 2a'$
	建规极限法	构造配筋	$x < 2a'$
	推荐法	构造配筋	$x < 2a'$
N = 1 200 kN M = 140 kN·m	铁规破损法	$A_s = 1\ 233$	$x < 2a'$
	1999 版铁规极限法	$A_s = 903$	$0.55h_0 > x > 2a'$
	2005 版铁规极限法	$A_s = 1\ 742$	$0.55h_0 > x > 2a'$
	建规极限法	$A_s = 1\ 205$	$0.55h_0 > x > 2a'$
	推荐法	$A_s = 1\ 413$	$0.55h_0 > x > 2a'$
N = 1 700 kN M = 280 kN·m	铁规破损法	$A_s = 4\ 098$	$0.55h_0 > x > 2a'$
	1999 版铁规极限法	$A_s = 3\ 075$	$x > 2a'$ 且 $> 0.55h_0$
	2005 版铁规极限法	$A_s = 5\ 819$	$x > 2a'$ 且 $> 0.55h_0$
	建规极限法	$A_s = 4\ 938$	$x > 2a'$ 且 $> 0.55h_0$
	推荐法	$A_s = 5\ 736$	$x > 2a'$ 且 $> 0.55h_0$

可以看出,几种方法在不同的工况下均存在较大的差异。必须进行深入的 分析,研究出合理的设计方法。

3.3 结论与分析

通过以上的比较研究,得出以下结论:

1) 在混凝土受压区高度较小的情况下,破损阶段法的配筋面积与建规极限法比较接近,大部分情况适用于建规极限法。随着混凝土受压区高度增加,建规极限法的配筋面积会逐渐赶上并超过破损阶段法。

2) 在可靠度设计方法中,2005 版铁规和建规的公式和原理基本一致,差别只是在于荷载和材料强度的取值上不同。由于铁规内力设计值取值较大,且钢筋强度较低,所以配筋结果偏大。

3) 1999 版铁规与 2005 版铁规配筋差异巨大,主要是因为 1999 版规范分项系数采用 1.0,2005 版采用

1.8,至于前后两版为何有如此巨大差异,规范中并未做详细解释。笔者认为,可能是因可靠度设计方法中校准过程不完善导致的。

4) 非可靠度的设计方法(破损阶段法)计算较为简单,但目前设计人员均不习惯,且目前各个行业的规范都逐渐向可靠度方法发展。应用该方法时,混凝土弯曲抗压极限强度过大,致使配筋结果偏于危险,且无法验算裂缝,所以不建议采用。

5) 在荷载的取值上,两种可靠度设计方法所采用的荷载标准值是一样的,区别在于分项系数。

事实上,应该明确,对于矿山法区间隧道,采用建规的分项系数是错误的。建规的分项系数是依据可靠度原理,考虑各种不确定因素引起荷载的变异性,通过对民用及工业建筑结构的概率统计数据分析得出的,而矿山法区间隧道的荷载根本不在它的统计样本之内,因此建规的分项系数是不适用于矿山法区间隧道的。铁规给出的分项系数是根据 1 000 多个矿山法隧道(包括公路、铁路等)塌方高度的统计参数,按照可靠度原理推算得来的,是完全适用于地铁矿山法隧道的,但是铁规两版规范的巨大差异是需要考证的。

6) 在材料强度的取值上,铁路铁规是根据华东交通大学等科研机构对铁路系统所属混凝土成品厂、各工程局和各铁路局施工部门进行的混凝土强度的统计分析结果而得出的,适用于铁路系统的工程。根据统计数据可以看出,铁路系统混凝土的质量控制严于建工系统。而地铁工程属于市政工程,它对材料的标准要求,应该都是符合建筑系统规范的,所以材料强度的取值应该遵循建规的标准,铁规的标准是不适用的。

4 可靠度方法的应用研究

从以上的分析结果可以看出,对于矿山法区间隧道结构设计,以可靠度理论为基础的设计模式仍然是最科学最合理的设计方法。但是,正如前述的分析,目前无论是采用铁路隧道概率极限法,还是采用建规概率极限法,对于岩石地区地铁矿山法区间隧道的设计都存在着一定的问题。因此,需要从最根本的可靠度理论上去研究适合于矿山法区间隧道的设计方法。

既然采用可靠度的设计方法,首先必须明确所设计结构的目标可靠指标 β 值。铁路隧道设计规范中已明确指出单线及双线隧道的目标可靠指标,见表 4 ~ 表 5。

表 4 铁路隧道结构安全等级

安全等级	结构类型
一级	大跨度及复杂结构,如三线以上大跨隧道、明洞和其他新型结构等
二级	单、双线铁路隧道结构
三级	单、双线铁路明洞及棚洞等

注:摘自铁规说明表 10.1.1-1

表 5 铁路隧道结构目标可靠指标 β_{nom}

极限状态类型		安全等级		
		一	二	三
正常使用极限状态		1.0~2.5		
承载能力	脆性破坏	4.7	4.2	3.7
极限状态	延性破坏	4.2	3.7	3.2

注:铁规说明表 10.1.1-2

按照《建筑结构可靠度设计统一标准》区间隧道结构安全等级应为一,所采用的目标可靠指标与铁路隧道相同,详见规范中表 3.0.11。

由此可以明确,对于单、双线地铁区间隧道结构,铁规和建规所采用的目标可靠指标是一致的,这样才可以进行下面的研究和比较。

5 地铁矿山法区间隧道推荐设计方法

由以上 3 个方面的分析,可以认为,目前独立采用 3 种方法当中的任何一种,都是不妥当的,必须进行改进,在此给出推荐方法。

5.1 推荐方法的思路

推荐方法的公式,依然是同前 3 种方法一致,都是通过平截面假定和力学平衡推导得出,在公式各参数的选取上,推荐方法还是依据可靠度理论。因为可靠度设计方法是目前普遍为广大设计人员所接受,且科学合理的设计方法。

本文提出的建议方法,主要基于以下原则:

- 1) 采用可靠度方法。
- 2) 建筑材料设计值的取值:地铁工程本身属于市政工程,它对材料的标准要求,应该都是符合建筑系统的要求,并且地铁其他土建工程(如车站,明挖区间等)都是采用建工系统的设计值,为了保证地铁土建工程整个系统的统一性和设计的便利性,以及日后实施过程中的可维护性,因此,在材料强度的取值上,推荐方法采用建规的设计值。

- 3) 内力分项系数的确定:反复试算校准,使得建议方法的取值介于 2005 版铁规破损法和极限法之间。

由于破损阶段法是传统设计方法,经过了工程的检验。因此,推荐方法重点与传统破损阶段法做比较,

进行反复试算校准,保证推荐方法能包住破损法。

2005 版极限法过于保守,1.8 的系数不知从何而来,条文说明也没有解释,配筋结果最大值要比破损阶段法超出 44%,其方法合理性需要进一步考证。所以,本推荐方法分项系数校准后的配筋结果不超过 2005 版铁规极限法。

经过反复试算校准,推荐内力分项系数采用 1.6 (即 1.1×1.45),按建议方法配筋后的结果详见表 2~表 3。通过计算结果可以看出,推荐方法可以较好地满足以上原则,同时也是科学、经济、合理的设计方法。

5.2 推荐法计算过程中几个重要参数的取值

5.2.1 附加偏心距的取值

对于附加偏心距,建规和铁规是有所区别的,但在推荐法中,按照建规,偏于安全地取一个常数 20 mm。

5.2.2 偏心距增大系数 η 的取值

由于马蹄形隧道断面是曲线构件,所以按照目前的规范无法确定偏心距增大系数 η 的取值。因此,对马蹄形断面隧道进行了 $P-\Delta$ 效应模拟分析(做 5 次迭代分析),详见图 2~图 11。

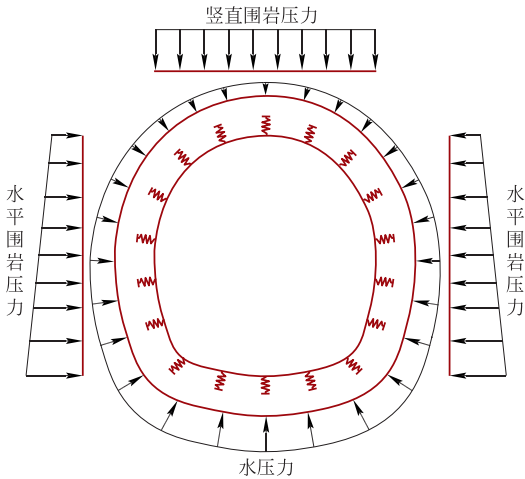


图 2 区间隧道计算模型(考虑周围约束)

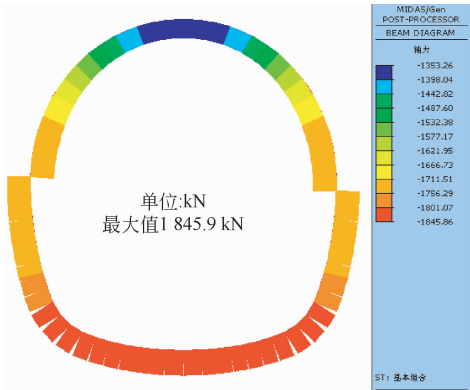


图 3 轴力图(不考虑二阶效应)

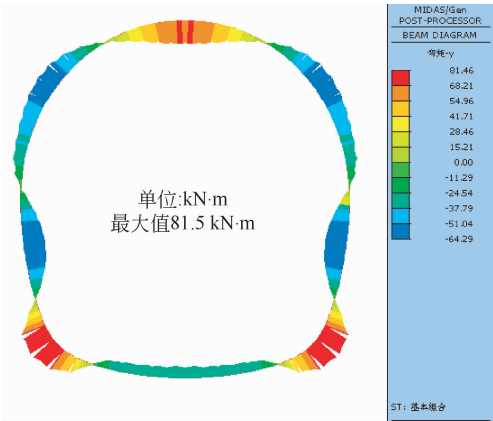


图4 弯矩图(不考虑二阶效应)

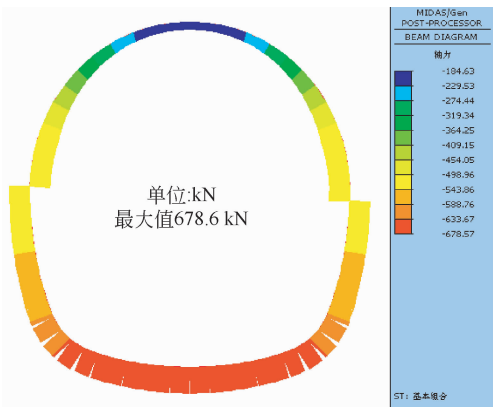


图5 轴力图(考虑二阶效应)

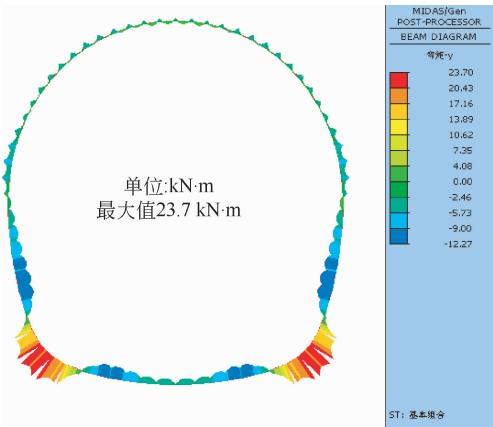


图6 弯矩图(考虑二阶效应)

1) 考虑周圈地层约束的情况。从图中可见,在周圈地层约束的情况下,事实上考虑了二阶效应之后,对衬砌结构的受力有明显的改善作用。但是,由于设置周圈地层约束是理想状态,实际工程中并不一定能完全发挥作用,所以对于这种情况在设计中可不考虑二阶效应的有利影响,取 $\eta = 1.0$ 。

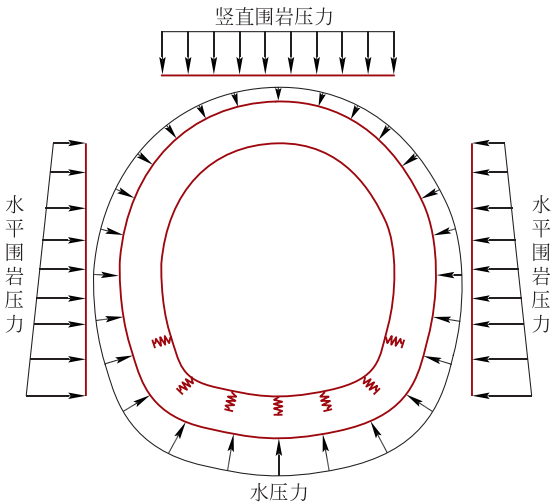


图7 区间隧道计算模型(仅考虑底部约束)

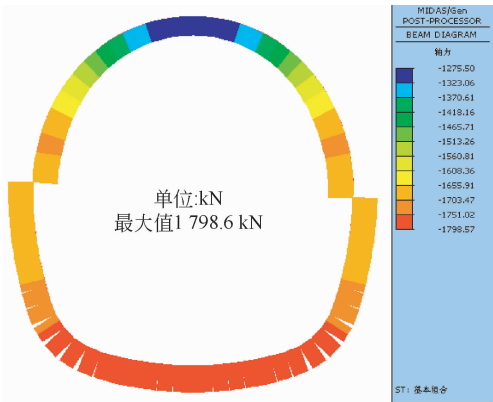


图8 轴力图(不考虑二阶效应)

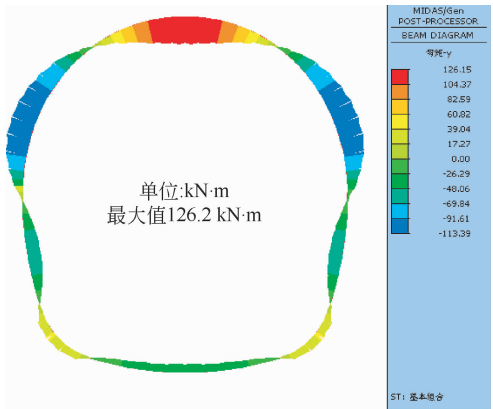


图9 弯矩图(不考虑二阶效应)

2) 在仅考虑底部地层约束的情况下。通过数值分析结果可以发现,在这种情况下二阶效应对马蹄形断面的影响很小(基本是在3%左右),因此在实际应用中,仍然可以不考虑二阶效应的影响,取 $\eta = 1.0$ 。

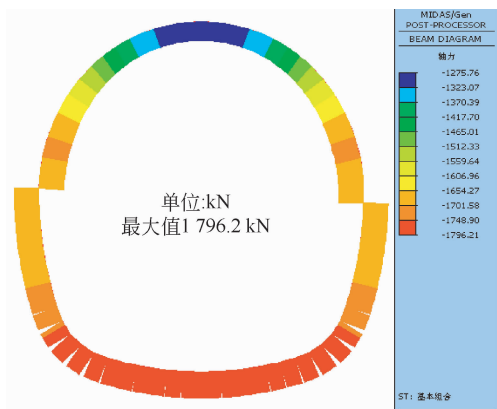


图10 轴力图(考虑二阶效应)

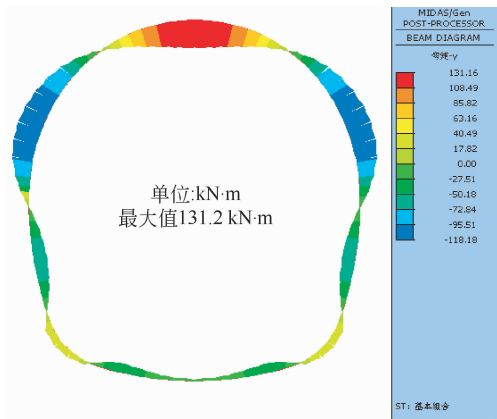


图11 弯矩图(考虑二阶效应)

6 结语

岩石地层地铁矿山法区间隧道衬砌的设计模式目前尚处于无章可循的设计状态,每家设计院都有自己的设计方法,存在着较多流派,迫切需要进行科学化的统一,本次研究正是基于这种现状而开展的。

1) 通过以上研究,主要得出以下几点结论:

本次研究结论的对象只是针对于岩石地区地铁单线单洞区间隧道,并不适用于大断面区间隧道。

地铁区间隧道推荐设计方法采用了建规的设计公式,属于可靠度设计方法。材料设计值应符合建工系统的要求。推荐方法内力分项系数的取值经试算校准,统一取1.6。推荐方法的配筋结果比2005版铁规极限法有所优化,且便于设计人员,是科学、经济、合理的设计方法。根据 $P-\Delta$ 分析结果,对于单线区间隧道结构可不考虑二阶效应的影响,取 $\eta=1.0$ 。

2) 目前关于地铁区间隧道衬砌的设计仍然缺乏相关的规范支持,存在以下问题需要进一步研究:

① 隧道塌落拱荷载全部作用在二衬上,没有考虑初期支护的有利作用,偏于保守,需要改善。

② 塌落拱荷载的统计样本来源于1000个跨度10 m以内的隧道,所以不适用于大跨度(如3线、4线)的隧道,需要进一步研究大跨度隧道的荷载取值方法。

③ 《铁路隧道设计规范》虽然做了塌落拱的统计工作,但是后期分析研究很不完善,致使破损阶段法、1999年版概率极限法、2005年版概率极限法三者存在巨大差异,不符合《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)的要求,需要进一步认真研究完善。

目前地铁设计规范缺少对矿山法区间隧道结构设计的详细说明,如荷载、材料强度及分项系数的取值等,随着矿山法区间隧道的日益增多,亟待完善。

参考文献

[1] GB 50157—2003 地铁设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2003.
[2] TB 10003—2005 铁路隧道设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2005.
[3] TB 10003—99 铁路隧道设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,1999.
[4] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
[5] 铁道部第二勘察设计院. 铁路工程设计技术手册:隧道[M]. 北京:中国铁道出版社,1995.
[6] 施仲衡. 地下铁道设计与施工[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2006.

(编辑:郝京红)

Design Patterns of Metro Mining Method
Excavated Rock Tunnel Linings

Lei Gang Zhou Tingting Zheng Guangliang

(Beijing Urban Engineering Design & Research
Institute Co., Ltd., Beijing 100037)

Abstract: The design patterns of metro mining method excavated rock tunnel linings are in a state with no criteria to follow and need to be rationalized and normalized. From the viewpoint of structural reliability, the essay analyzes the design patterns of railway system and building construction system from three modes (damage-stage method by railway specifications, probability limit state method by railway specifications, probability limit state method by building codes). Then it advances the reliability design method by adopting $P-\Delta$ analysis, and puts forward reasonable values for the key parameters of tunnel design.

Key words: urban rail transit; rock; mining method; tunnel; design pattern of lining; reliability