

特长公路隧道取消变形缝试验研究

卓越¹, 邹 翀¹, 闫自海²

(1. 中国中铁隧道集团有限公司, 河南洛阳 471009; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

[摘要] 结合包家山隧道的施工情况, 利用数值模拟和现场试验两种方法, 对设置变形缝和不设置变形缝两种工况下衬砌结构的受力、变形及安全性进行了对比分析。研究认为: a. 无论设置变形缝与否, 隧道纵向的安全性要求均能满足。b. 对于隧道结构的横向安全性, 不设置变形缝时, V级围岩端的安全系数增加, IV级围岩端的安全系数减小, 此时需要进行配筋; 设置变形缝时, IV级和V级围岩处的拱顶安全系数均较小, 不能满足安全要求, 此时需要进行配筋。

[关键词] 特长公路隧道; 变形缝; 定量指标; 数值模拟; 试验研究

[中图分类号] U459.2 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)07-0059-07

1 前言

变形缝是伸缩缝和沉降缝的总称, 它的作用主要是为了适应工程结构的不断伸缩、沉降、位移和变形, 以避免结构物的损坏^[1]。《公路隧道设计规范》(JTG D70-2004) 规定“硬软地层分界处及对衬砌受力有不良影响处, 应设置变形缝”^[2], 然而变形缝的设置虽然解决了围岩不均匀沉降和混凝土收缩的问题, 却增加了隧道衬砌防水的难度。变形缝一旦渗水, 不仅降低衬砌混凝土的耐久性, 而且恶化隧道环境、影响洞内设施的使用功能, 并给维修管理造成困难。研究发现, 由于在实际施工过程中的种种原因, 变形缝的渗漏水现象普遍存在, 且变形缝的设置条件目前尚无定量指标^[1-5]。因此, 笔者拟结合包家山隧道的施工情况, 尝试研究在规范规定需要设置变形缝处取消变形缝的可行性。

包家山隧道位于包茂线(陕西境)小河—安康高速公路的咽喉部位, 全长 11.2 km, 为国内第三长公路隧道。该隧道不仅地质条件复杂、穿过断层多(约 37 个)、施工工期紧, 而且存在高压岩溶突水, 施工难度大等特点。特别是 1 号斜井和 3 号斜井之间, 岩溶发育、断层密集, 涌水突泥的可能性较大。表 1 列出了隧道右线主要穿过的断层破碎带。

表 1 右线穿过断层表

Table 1 Table about the tunnel right line through the fault

断层分段 里程桩号	岩石名称	断层编号	水文地质特征
K156+770, K157+390	绵云母粉砂质千 枚岩、白云母、灰 岩、断层破碎带	有 F42, F49 ~ F46 断层 穿过	推测地下 水较大
K157+420, K157+930	灰岩加绿泥石钙 质片岩、断层破碎 带	F49, F50 穿 过, F51 穿 过, 岩溶异常	有岩溶水、 地下水及 溶洞
K159+240, +310 K159+456, +550	断层破碎带	F53, F54, F60	有水渗出

变形缝是隧道防水的薄弱环节, 通常采用止水带防水。目前, 常见的止水带以下几种: 弹性密封胶嵌实密封或采用贴片式橡胶片止水带, 附贴片式止水带, 埋入式橡胶或塑料止水带^[3,6]。我国常用的变形缝防水形式主要为复合防水构造^[4], 主要有中埋式止水带与背贴式止水带复合防水构造和中埋式止水带与遇水膨胀橡胶条、嵌缝材料复合防水构造。

在包家山隧道中, 采用中埋式止水带防水。该

[收稿日期] 2009-03-16; 修回日期 2009-05-06

[作者简介] 卓越(1965-), 男, 安徽灵璧县人, 教授级高工, 研究方向为隧道与地下工程防排水技术; E-mail: zhuoyue120879@126.com

隧道在衬砌类型变化界面、明洞进暗洞界面、洞口段、V级围岩中每隔30 m衬砌段,均设置了变形缝,缝宽2 cm。文章拟结合地质条件和现场施工情况,在IV、V级围岩交接面处选择测试主断面,重点测试变形缝所在区域的围岩压力和孔隙水压力,研究该区域的围岩力学参数、结构受力情况和防水效果,分析取消变形缝的可行性。

2 数值模拟

取包家山隧道右线YK157+365至YK157+935之间65 m长的隧道衬砌为研究对象,在此区间围岩级别发生了变化,由IV级过渡到V级围岩。所取区间地质条件为灰岩加绿泥石钙质片岩,并有断层破碎带,地下水发育。数值模拟采用大型有限元软件ansys,选取该区段中间30 m进行计算。

2.1 模型的建立

隧道埋深320 m到400 m属于深埋隧道,计算中衬砌厚度取实际的设计值,其中IV级围岩区段的衬砌厚度为400 mm,V级围岩区段的衬砌厚度为450 mm。计算模型采用三维荷载结构模型,如图1所示。模型中混凝土衬砌采用实体单元进行模拟,衬砌厚度简化为等厚度的,即拱顶、边墙和仰拱衬砌截面厚度相同。衬砌与围岩间的作用采用弹簧单元模拟,弹簧采用ansys中的单受压单元模拟,与衬砌之间通过节点连接,端部进行 x, y, z 三个方向的约束。模型的两端在隧道轴向进行约束。变形缝设在模型中部,采用单受拉单元模拟,单受拉单元与衬砌之间通过节点连接。

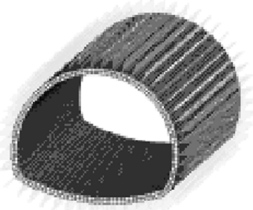


图1 隧道计算模型

Fig.1 Schematic diagram of calculation model of the tunnel

2.2 模型参数选取

1)弹性抗力系数。根据《公路隧道设计规范》(JTG D70-2004),本次数值计算中,IV级围岩弹性抗力系数取500 MPa/m,V级围岩弹性抗力系数取100 MPa/m。

2)二次衬砌混凝土物理力学参数。二次衬砌

混凝土物理力学参数根据设计值,参照《公路隧道设计规范》确定,见表2。

表2 二次衬砌物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of the secondary lining

弹性模量 E/MPa	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	厚度/m		泊松比 μ
		IV	V	
29.5	2 300	0.45	0.4	0.2

3)变形缝物理力学参数。变形缝物理力学参数见表3。

表3 变形缝物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of deformation joint

宽度/mm	止水带规格/ mm^2	止水带拉伸强度/MPa	止水带弹性模量/MPa
20	300×8	≥12	2.6

4)荷载。考虑围岩压力为松散荷载,根据《公路隧道设计规范》(JTG D70-2004)松散荷载的统计公式计算确定,垂直应力和水平应力见表4。荷载通过换算为点荷载之后,直接施加在计算模型的节点上。

表4 竖向均布荷载取值设定表

Table 4 Table of vertical uniformly distributed load setting value

围岩级别	IV	V
q 值/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	110 160	220 320
e 值/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	16 524 ~ 33 048	66 096 ~ 110 160

2.3 计算工况

考虑不设置变形缝和设置变形缝的两种工况。在模型长度范围内,不考虑水压力作用,IV级和V级之间的荷载是渐变的,对于弹性抗力系数取值也由500 MPa/m至100 MPa/m渐变,计算工况见表5。

表5 计算工况

Table 5 Calculation condition

计算工况	荷载变化情况	弹性抗力系数变化情况
设置变形缝	从V级到IV级线性减小	从V级到IV级线性增大
取消变形缝	从V级到IV级线性减小	从V级到IV级线性增大

2.4 数值模拟结果分析

2.4.1 变形缝对结构纵向安全性影响分析

将隧道视为偏心受压,因隧道断面对称,荷载对称,结构的最大拉应力和最大压应力只会出现在拱顶和仰拱底,所以只分析拱顶和仰拱底应力。其纵向应力分布见图 2 和图 3。图中为了消除边界影响,只计算了中间 22 m 范围。

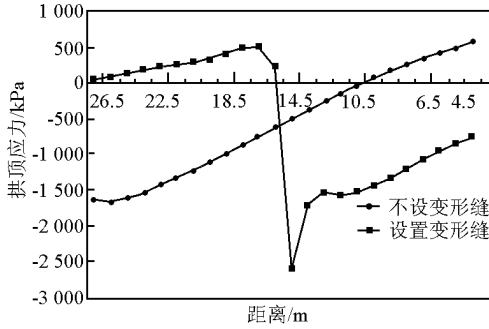


图 2 拱顶应力

Fig. 2 Stress map of vault

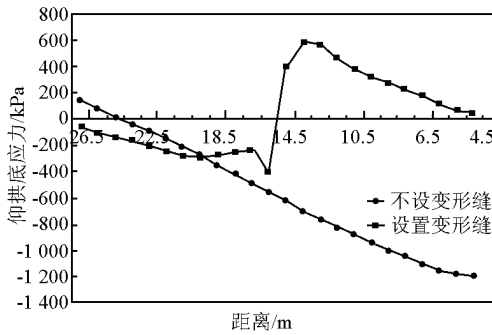


图 3 仰拱底应力

Fig. 3 Stress map at the end of inverted arch

由图 2 和图 3 可知,不设置变形缝时,衬砌的纵向压应力最大值为 2 MPa,拉应力最大值为 0.55 MPa,均小于混凝土的抗拉强度和抗压强度,隧道纵向不会出现环向裂缝。设置变形缝时,最大压应力 2.6 MPa,最大拉应力 0.6 MPa,也能满足混凝土强度的要求,隧道纵向不会出现环向裂缝。

2.4.2 变形缝对结构横向安全性影响分析

为研究隧道衬砌在岩性发生变化点处的安全性,本节以围岩级别发生变化处为中轴线,如图 4、图 5 所示,选取左右各 0.5 m 范围内的衬砌进行研究,同时在离衬砌两侧 5.5 m,9.5 m 处再取两个断面,其中左侧 3 个断面位于 V 级围岩中,右侧 3 个断面位于 IV 级围岩中,对其轴力、弯矩及衬砌的安全系数等进行分析。

下面对选取的断面在设置变形缝和不设置变形

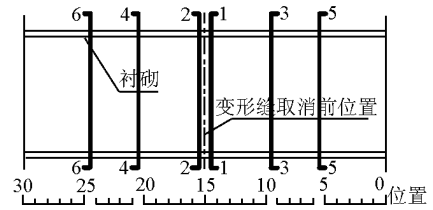


图 4 断面图

Fig. 4 Section map

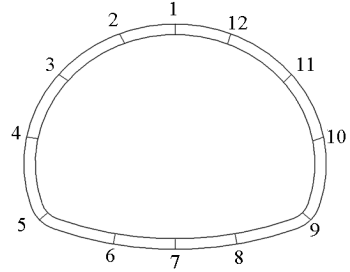
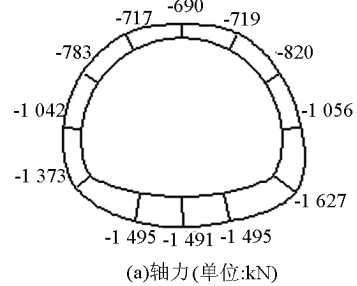


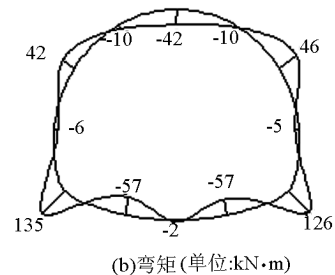
图 5 截面 1-1 的剖面图

Fig. 5 Cross-section of the profiles 1-1

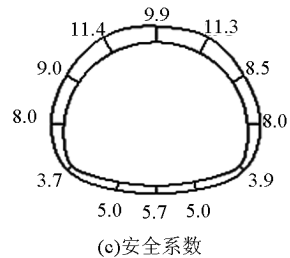
缝情况下各监测点的轴力、弯矩和安全系数进行对比分析,具体见图 6 和表 6 ~ 表 11 所示。



(a)轴力(单位:kN)



(b)弯矩(单位:kN·m)



(c)安全系数

图 6 不设置变形缝时 1-1

断面内力及安全系数

Fig. 6 The cross-section internal forces and safety factor of not set the time slot on profiles 1-1

表6 断面1-1 内力及安全系数

续表

Table 6 The internal forces and safety factors of section 1-1

侧点	取消变形缝			设置变形缝轴力		
	轴力	弯矩	安全	轴力	弯矩	安全
	/kN	/(kN·m)	系数	/kN	/(kN·m)	系数
1	-906	-41	8.0	-951	-46	7.5
2	-921	-12	8.9	-912	-11	9.0
3	-924	30	8.2	-821	38	8.8
4	-902	-6	9.3	-809	-8	10.2
5	-888	128	1.9	-805	106	2.6
6	-1 093	-54	6.5	-939	-44	7.7
7	-1 145	-1	7.5	-957	2	8.9
8	-1 093	-54	6.5	-939	-44	7.7
9	-993	127	2.3	-922	104	3.4
10	-916	-4	9.2	-820	-7	10.1
11	-963	34	7.8	-861	41	8.4
12	-943	-12	8.7	-915	-11	9.0

表7 断面2-2 内力及安全系数

Table 7 The internal forces and safety factors of section 2-2

侧点	取消变形缝			设置变形缝轴力		
	轴力	弯矩	安全	轴力	弯矩	安全
	/kN	/(kN·m)	系数	/kN	/(kN·m)	系数
1	-927	-41	7.9	-1 152	-208	1.0
2	-940	-12	8.7	-1 248	-32	6.3
3	-941	31	8.1	-1 446	175	1.8
4	-916	-5	9.2	-1 564	-30	5.1
5	-901	132	1.8	-1 553	225	1.1
6	-1 105	-57	6.4	-1 762	-119	3.8
7	-1 156	-2	7.4	-1 806	-13	4.6
8	-1 104	-57	6.4	-1 762	-119	3.8
9	-1 008	131	2.1	-1 814	224	1.3
10	-930	-4	9.1	-1 583	-29	5.1
11	-980	34	7.7	-1 513	186	1.6
12	-943	-12	8.7	-1 252	-33	6.2

表8 断面3-3 内力及安全系数

Table 8 The internal forces and safety factors of section 3-3

侧点	取消变形缝			设置变形缝轴力		
	轴力	弯矩	安全	轴力	弯矩	安全
	/kN	/(kN·m)	系数	/kN	/(kN·m)	系数
1	-804	-37	9.0	-856	-40	8.4
2	-821	-10	10.0	-872	-10	9.4
3	-838	30	9.0	-872	32	8.6
4	-853	-6	9.8	-854	-6	9.8
5	-869	109	2.7	-845	105	2.8
6	-1 072	-42	6.9	-1 026	-41	7.2
7	-1 117	3	7.6	-1 065	3	7.9
8	-1 071	-42	6.9	-1 025	-41	7.2

取消变形缝 设置变形缝轴力

侧点	取消变形缝			设置变形缝轴力		
	轴力	弯矩	安全	轴力	弯矩	安全
	/kN	/(kN·m)	系数	/kN	/(kN·m)	系数
9	-983	107	3.6	-958	103	3.8
10	-864	-5	9.7	-866	-5	9.7
11	-873	33	8.6	-909	35	8.2
12	-823	-10	10.0	-874	-11	9.4

表9 断面4-4 内力及安全系数

Table 9 The internal forces and safety factors of section 4-4

侧点	取消变形缝			设置变形缝轴力		
	轴力	弯矩	安全	轴力	弯矩	安全
	/kN	/(kN·m)	系数	/kN	/(kN·m)	系数
1	-1 033	-43	7.1	-1 152	-208	1.0
2	-1 039	-13	7.9	-1 248	-32	6.3
3	-1 024	30	7.5	-1 446	175	1.8
4	-992	-4	8.5	-1 564	-30	5.1
5	-988	153	1.5	-1 553	225	1.1
6	-1 186	-68	5.8	-1 762	-119	3.8
7	-1 233	-8	6.8	-1 806	-13	4.6
8	-1 186	-68	5.8	-1 762	-119	3.8
9	-1 104	152	1.7	-1 814	224	1.3
10	-1 008	-2	8.4	-1 583	-29	5.1
11	-1 067	33	7.2	-1 513	186	1.6
12	-1 042	-13	7.9	-1 252	-33	6.2

表10 断面5-5 内力及安全系数

Table 10 The internal forces and safety factors of section 5-5

侧点	取消变形缝			设置变形缝轴力		
	轴力	弯矩	安全	轴力	弯矩	安全
	/kN	/(kN·m)	系数	/kN	/(kN·m)	系数
1	-717	-35	10.0	-765	-40	9.2
2	-737	-9	11.1	-784	-11	10.4
3	-767	29	9.7	-808	34	9.1
4	-796	-6	10.5	-836	-7	9.9
5	-819	95	3.5	-859	99	3.4
6	-1 029	-34	7.4	-1 070	-36	7.1
7	-1 084	4	7.8	-1 119	4	7.5
8	-1 028	-34	7.4	-1 069	-36	7.1
9	-932	92	5.2	-983	96	5.3
10	-807	-5	10.4	-848	-6	9.8
11	-800	32	9.3	-842	37	8.7
12	-739	-9	11.1	-786	-11	10.4

表 11 断面 6-6 内力及安全系数

Table 11 The internal forces and safety factors of section 6-6

测点	取消变形缝			设置变形缝轴力		
	轴力 /kN	弯矩 /(kN·m)	安全 系数	轴力 /kN	弯矩 /(kN·m)	安全 系数
1	-1 110	-43	6.7	-1 229	-209	1.0
2	-1 112	-13	7.4	-1 315	-36	5.9
3	-1 079	27	7.3	-1 472	173	1.9
4	-1 015	-4	8.3	-1 526	-24	5.3
5	-1 001	164	1.3	-1 473	223	1.0
6	-1 187	-75	5.7	-1 650	-123	3.9
7	-1 236	-14	6.7	-1 691	-22	4.8
8	-1 188	-75	5.7	-1 650	-123	3.9
9	-1 113	164	1.5	-1 713	224	1.2
10	-1 033	-2	8.2	-1 543	-23	5.3
11	-1 123	30	6.9	-1 541	184	1.7
12	-1 115	-13	7.4	-1 319	-37	5.9

通过分析表 6~表 11 可知:

1) 在 IV 级围岩端, 不设置变形缝时, 靠近变形缝处的衬砌结构的安全系数比设置变形缝时的小, 安全系数最小值达到了 1.9, 两种情况下的弯矩量值差别不大。但随着衬砌远离变形缝, 两种情况下的受力差别逐渐减小, 设置变形缝与否对衬砌结构的影响范围为其外加荷载变化的范围。

2) 在 V 级围岩端, 不设置变形缝时的隧道衬砌结构的轴力、弯矩均有所减小, 其安全系数则有较为明显的提高。但无论是取消还是设置变形缝, 都不能满足安全性的要求, 需要通过配筋来满足。

3) 变形缝对衬砌结构变形影响分析, 由于分析对象是对称结构, 本节略去对横向位移的分析^[7], 仅对隧道纵向拱顶和仰拱底的竖向和纵向位移进行分析, 竖向和纵向位移如图 7~图 10 所示。

由图 7 可以看出, 在不设变形缝的情况下, 隧道衬砌结构的竖向位移变化是连续的, 从 IV 级围岩处向 V 级围岩过渡时, 位移逐渐增大。在设置变形缝的情况下, 位移变化则表现出了非连续性, 在变形缝设置处发生了不均匀沉降, V 级围岩端比 IV 级围岩端沉降大, 沉降差在 5 mm 左右。最大竖向位移都是发生在拱顶, 但设置变形缝的最大位移比不设置变形缝的大。

纵向位移与竖向位移相比量值较小, 取消和设置变形缝后, 最大位移都在 0.4 mm 左右, 在变形缝

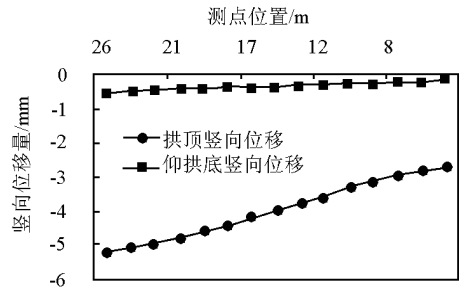


图 7 不设置变形缝时拱顶及仰拱底竖向位移
Fig. 7 Crown and bottom of the invert vertical displacement of no setting deformation joint

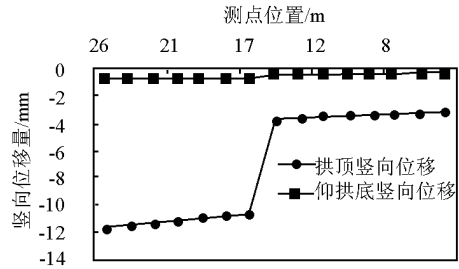


图 8 设置变形缝时拱顶及仰拱底竖向位移
Fig. 8 Crown and bottom of the invert vertical displacement of setting deformation joint

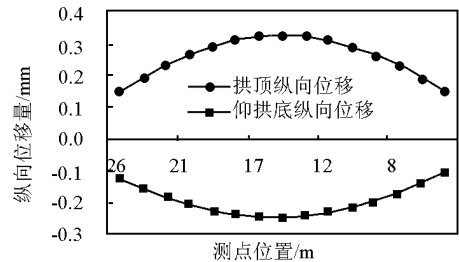


图 9 不设置变形缝时拱顶及仰拱底纵向位移
Fig. 9 Crown and bottom of the invert longitudinal displacement of no setting deformation joint

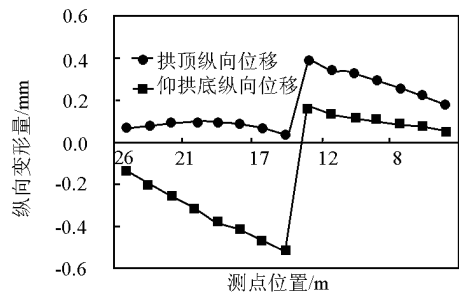


图 10 设置变形缝时拱顶及仰拱底纵向位移
Fig. 10 Crown and bottom of the invert longitudinal displacement of setting deformation joint

处位移不连续,差值为 0.2 mm。

3 现场试验研究

3.1 现场实测数据分析

在现场,主要实测项目有围岩压力、衬砌轴力、拱顶下沉、仰拱位移等。拱顶下沉和仰拱位移通过水准仪进行测试,围岩压力是通过在隧道围岩与钢拱架之间埋设压力盒来进行测试的,衬砌轴力是通过钢应变计测得的钢支撑应变计算得到的。

埋设前测定元器件初始频率。混凝土埋入式应变计安装时,绑扎在衬砌内外侧钢筋上,尽量安置于钢筋外侧,并应保证其轴线与应力方向一致。钢筋计安装在内外两层钢筋上,采用“姊妹杆法”焊接。接触式压力盒埋设在衬砌与围岩接触面上,将元器件的传输电缆线绑扎在钢筋上,集中于每个断面两侧的集线箱处,便于保护电缆线和采集数据。采用钢弦式频率仪采集数据。根据包家山隧道施工情况,在IV、V级围岩过渡段共选取了4个断面测试围岩压力和衬砌轴力。由于隧道内部涌水量较大,为使仪器能够满足长期监测的要求,提高仪器成活率,对埋设的各类仪器均进行了二次防水处理。在现场对设置变形缝的情况进行了测试,测试断面压力盒(表面钢应变计)布置如图11所示。

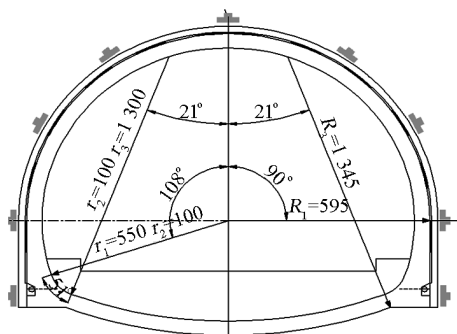


图 11 压力盒(表面钢应变计)布设示意图(单位:mm)

Fig. 11 Stress box (the surface of steel strain gauge) layout diagram (Unit:mm)

断面1-1轴力图如图12所示,隧道竖向的位移取最后一次监测数据,如图13所示。

对于设置变形缝的情况,衬砌轴力最大值出现在仰拱,拱顶处较小。而随着围岩从IV级向V级过渡,隧道拱顶的下沉量不断增大,在变形缝处,位移发生了突变。

3.2 数值模拟与现场试验结果对比分析

将数值模拟和现场测试的隧道结构受力情况进

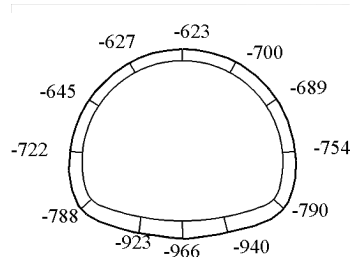


图 12 设置变形缝时1-1断面轴力图(单位:kN)

Fig. 12 Axial force diagram of setting deformation joint on profiles 1-1 (Unit:kN)

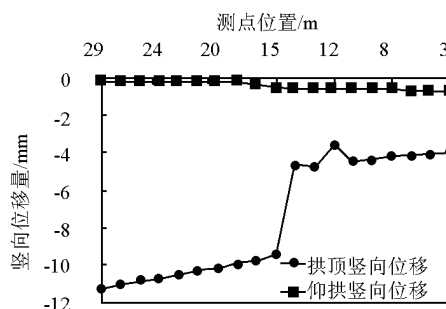


图 13 设置变形缝时竖向位移图

Fig. 13 Vertical displacement map of setting deformation joint

行对比后发现,两种方法得到的衬砌内力大小及变化规律基本相同。

将现场实测的设置变形缝情况下的位移值与相应的数值模拟结果进行比较分析,如图14所示。由图14可以看出,数值模拟得到的设置变形缝情况下的衬砌结构围岩略大于现场实测值,但是两种方法得到的规律符合得非常好,这说明数值模拟结果是可靠的。

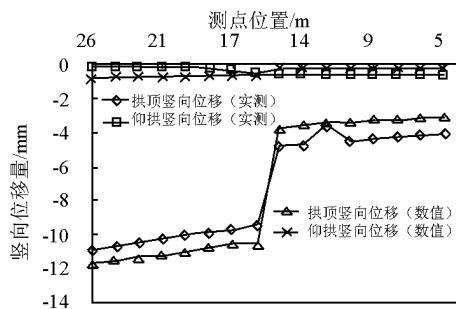


图 14 数值模拟与现场实测位移值对比

Fig. 14 Displacement value comparison map of numerical simulation and field measurement

4 结语

利用数值模拟和现场量测相结合的方法,对特

长公路隧道取消变形缝的可行性进行了研究,得出如下结论。

1)隧道纵向安全性评价:设置变形缝和不设置变形缝两种工况,均能满足隧道纵向的安全性要求。隧道衬砌结构的纵向变形和竖向沉降连续,不会由于产生不均匀沉降而引起环向裂缝。

2)隧道横向安全性评价:a. 不设置变形缝时,V级围岩端的安全系数增加,IV级围岩端的安全系数减小,需要进行配筋;b. 设置变形缝情况下,V级围岩和IV级围岩拱顶安全系数均较小,不能满足安全要求,此时需要进行配筋。

总之,隧道纵向不会由于未设置变形缝而产生不均匀沉降而引起环向开裂;在包家山隧道IV,V级围岩过渡段无论设置或取消变形缝均需要进行配

筋。所以,此处取消变形缝是可行的。

参考文献

- [1] 周立霞,王昱之,王起才. 隧道衬砌施工缝、变形缝防水技术现状[J]. 兰州铁道学院学报,2003,22(04):101-104
- [2] JTG D70-2004. 公路隧道设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004
- [3] 沈春林. 地下防水设计与施工[M]. 北京:化学工业出版社,2003
- [4] 韩忠存. 隧道及地下工程结构防排水技术的发展和应[J]. 隧道建设,2001,38(2):5-10
- [5] GB50108-2001. 地下工程防水技术规范[S]. 北京:中国计划出版社,2001
- [6] 吴全立,方卫民. 隧道工程环向施工缝张开度与止水条抗水压力关系的试验研究[J]. 中国建筑防水,2003,(11):14-17
- [7] 王光钦,等. 弹性力学[M]. 北京:中国铁道出版社,2005

Long highway tunnel experimental study on the abolition of deformation joint

Zhuo Yue¹, Zou Chong¹, Yan Zihai²

(1. China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Luoyang, Henan 471009, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

[Abstract] Based on the construction of Baojiashan tunnel, the authors used numerical simulation and field test to analyze lining force, deformation and safety in the conditions of setting deformation joint and not. Studies suggest that: a. whether deformation joint is set or not, tunnel's vertical safety can meet the security requirements; b. if we do not set deformation joint for tunnel structure of the horizontal safety, the safety factor increases in V grade rock side, decreases in IV class rock side and reinforcement is needed at this time; when deformation joint is set, IV and V grade-level department of dome rock safety factors are smaller and can not meet the safety requirements, then reinforcement is needed.

[Key words] long highway tunnel; deformation joint; quantitative indicators; numerical simulation; experimental research