

# 深埋山岭富水公路隧道衬砌结构设计模拟分析

丁燕平<sup>1,2</sup>, 徐林生<sup>1\*</sup>

(1. 重庆交通大学 土木工程学院山区桥隧工程国家重点实验室培育基地, 重庆市 400074;

2. 重庆路威土木工程设计有限公司)

**摘要:** 由于近年来环保要求的提高,在富水隧道工程中提出了“以堵为主、限量排放”的治水理念,该理念要求设计者充分考虑山岭富水地段隧道设计中衬砌结构的抗水压能力。采用“荷载-结构”模型对全断面承压情况下抗水压衬砌结构进行分析,通过分析3种不同隧道衬砌结构形式的受力特征,在“安全实用,质量可靠,经济合理”的原则下,设计了0.3 MPa外水压作用下深埋公路隧道衬砌结构形式,采用SK1形衬砌控制超前注浆加固区折减系数不大于0.6,对于外水压大于0.3 MPa工况,采用相应增大衬砌截面厚度设计,衬砌根据富水段水压进行分段设计。

**关键词:** 山岭富水隧道; 抗水压结构; 衬砌设计; 折减系数法; 有限元分析

随着中国综合交通网络建设不断发展,西南地区交通网络建设正在不断加快,西南地区地形地貌条件复杂,地质多变,在这种情况下修建山岭隧道,不可避免地会遇到富水高压隧道。过去由于隧道多采取防、截、排、堵结合,“以排为主”思路,基本消除了作用在衬砌上的外水压力,因此通常不考虑此种荷载,从而回避了“抗水压隧道衬砌结构”这一问题。近年来,由于环保要求提高,工程技术人员开始采取“以堵为主、限量排放”的治水理念,在此要求下,外水压成为隧道结构的一种主要永久荷载,但目前的公路隧道设计相关规范中均未对抗水压衬砌结构形式提出规定。工程设计人员往往采用增大衬砌厚度、增大配筋等措施来满足一定水压作用下的衬砌结构设计。但其设计不满足“安全实用,质量可靠,经济合理”的设计原则。姚俊峰、高新强等对单线铁路小断面隧道的衬砌抗水压性能进行了研究,随着公路交通的发展,公路隧道同样不可避免地遭遇富水地质,衬砌结构面临抗水压这一工程问题,但目前对公路隧道衬砌结构没有深入分析,由于公路隧道断面较铁路隧道断面形式与尺寸不同,抗渗性能也不一样,公路隧道设计往往不能直接运用相关数据,因此需对外水压作用下两车道公路隧道衬砌结构进行设计研究。该文对水压作用下深埋公路隧道

衬砌进行研究,以设计适用于一定水压下的深埋山岭富水隧道的抗水压衬砌结构形式。

## 1 外水压确定

重庆南(川区)两(江新区)高速公路春天门特长隧道为双洞分离式隧道,起点位于涪陵区新妙镇岔河村,洞身段主要为巴南区双河口镇塘湾村,终点位于巴南区双河口镇太平村春天门。隧道穿越的丰盛场背斜为一富水构造,隧道由南东翼进入背斜,由北西翼穿出,穿越3个强赋水带,且隧道段处于地下水位以下,在此条件下的隧道施工容易遭遇涌突水、突泥事故,同时可能造成地表塌陷、地下水疏干等次生环境问题。根据地勘资料分析,隧道单洞预测最大涌水量达64 669.40 m<sup>3</sup>/d,最大外水压1.17 MPa。为保证春天门隧道结构与运营安全,富水地区衬砌结构需采用抗水压衬砌结构形式,根据隧道穿越段含水量及水压不同,水压分别采用0.3、0.6与1.0 MPa分段设计,该文按0.3 MPa水压初步拟定衬砌结构形式。根据水压( $P$ )、作用在衬砌结构上的外水压( $P_1$ ),采用折减系数法确定衬砌结构形式,外水压折减系数 $\beta$ 分别采用0.2、0.4、0.6、0.8和1.0共5种工况,则作用在衬砌上的外水

收稿日期:2019-09-12

基金项目:重庆市交通科技项目(编号:JK2015-03);重庆市涪陵科委攻关项目(编号:FLKJ 2016BBB1082);重庆交通大学山区桥梁与隧道工程国家重点实验室培育基地开放基金项目(编号:CQSLBF-Y16-1)

作者简介:丁燕平,男,博士研究生,工程师, E-mail:45881477@qq.com

\* 通信作者:徐林生,男,教授,博士生导师, E-mail:1651941117@qq.com

压为:

$$P_1 = \beta P$$

### (1) 3 有限元模拟分析

## 2 抗水压衬砌结构形式

根据春天门隧道富水段工程特性,对设计抗水压衬砌 SK1 形、一般隧道衬砌 SY1 形与圆形衬砌 SY2 形共 3 种衬砌形式进行理论分析(图 1)。

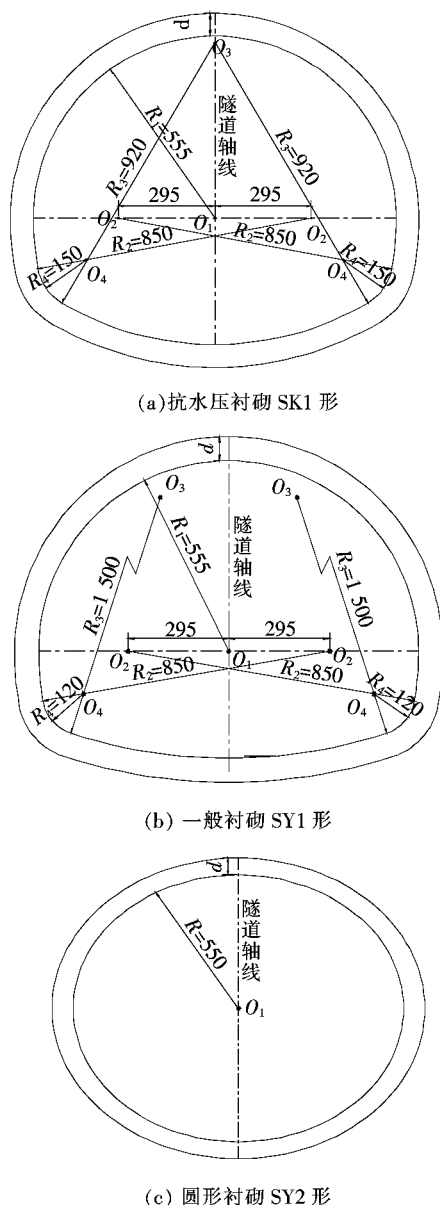


图 1 隧道衬砌设计形式(单位:cm)

设计采用双层配筋,SK1 形衬砌环向主筋为 C32 (HRB400),纵向间距为 20 cm;纵向主筋为 C20 (HRB400),环向间距为 25 cm;箍筋为 A12 (HPB300)。

### 3.1 有限元计算模型

有限元分析采用大型有限元软件 Ansys14.0 进行分析,分析过程中将外水压视作作用在衬砌结构表面的面力,这样可将隧道水压的计算模型简化为“荷载—结构”模型。衬砌采用弹性梁单元(Beam188)进行模拟,隧道衬砌结构设计采用 C30 混凝土参数;围岩采用线弹簧单元(Combin14)进行模拟,弹簧参数参考地勘报告资料,弹性抗力系数  $k=1\ 200\text{ MPa/m}$ 。

### 3.2 计算工况

根据设计衬砌结构形式不同(图 1),按照衬砌外水压折减系数不同组合,计算分为 45 种工况,工况组合见表 1。

### 3.3 边界条件

春天门隧道富水段埋深为 110~250 m,该段处于 IV 级围岩段,隧道开挖净跨  $B=13.5\text{ m}$ ,围岩重度  $\gamma=22.5\text{ kN/m}^3$ ,围岩计算内摩擦角  $\varphi=28^\circ$ 。根据 JTG D70—2004《公路隧道设计规范》提出的深埋隧道围岩压力计算公式,采用衬砌结构节点施加竖向力  $150\text{ kN/m}^2$ 、施加水平力  $30\text{ kN/m}^2$ 、重力加速度为  $9.8\text{ m/s}^2$ ,弹簧末端施加位移全约束、衬砌梁单元外侧施加均布水压力  $P_1$  进行计算。

### 3.4 模拟分析过程

“荷载—结构法”计算分析衬砌结构受力特征,对结构施加外水压荷载,计算后分析弹簧单元受力,通过生死单元控制,杀死所有受拉弹簧单元,重新施加外水压并重新计算,直至所有生单元均为受压状态,结束计算,提取衬砌受力结果。

### 3.5 安全系数指标

安全系数根据 JTG D70—2004《公路隧道设计规范》求解,并按规范制定安全系数控制值,见表 2。

抗水压衬砌结构按永久荷载+基本可变荷载组合控制。

### 3.6 计算结果分析

#### 3.6.1 $\beta=0.6$ 、 $d=70\text{ cm}$ 工况结果分析

通过计算分析可知,相同衬砌结构形式在不同外水压工况下,衬砌结构最大轴力、最大弯矩与安全系数的表现形式基本一致,在不同水压下,轴力、弯矩与安全系数只表现为数值大小差异,因此,该文只给出折减系数  $\beta=0.6$ 、衬砌厚度  $d=70\text{ cm}$  工况下 3 种衬砌形式的受力与安全系数云图,见图 2~4。

表 1 不同工况组合下的主要计算参数

工况	衬砌类型	d/cm	总水压/MPa	外水压折减系数	衬砌上的外水压/MPa	工况	衬砌类型	d/cm	总水压/MPa	外水压折减系数	衬砌上的外水压/MPa
1	SK1	60	0.3	0.2	0.06	24	SY1	70	0.3	0.8	0.24
2	SK1	60	0.3	0.4	0.12	25	SY1	70	0.3	1.0	0.30
3	SK1	60	0.3	0.6	0.18	26	SY2	70	0.3	0.2	0.06
4	SK1	60	0.3	0.8	0.24	27	SY2	70	0.3	0.4	0.12
5	SK1	60	0.3	1.0	0.30	28	SY2	70	0.3	0.6	0.18
6	SY1	60	0.3	0.2	0.06	29	SY2	70	0.3	0.8	0.24
7	SY1	60	0.3	0.4	0.12	30	SY2	70	0.3	1.0	0.30
8	SY1	60	0.3	0.6	0.18	31	SK1	80	0.3	0.2	0.06
9	SY1	60	0.3	0.8	0.24	32	SK1	80	0.3	0.4	0.12
10	SY1	60	0.3	1.0	0.30	33	SK1	80	0.3	0.6	0.18
11	SY2	60	0.3	0.2	0.06	34	SK1	80	0.3	0.8	0.24
12	SY2	60	0.3	0.4	0.12	35	SK1	80	0.3	1.0	0.30
13	SY2	60	0.3	0.6	0.18	36	SY1	80	0.3	0.2	0.06
14	SY2	60	0.3	0.8	0.24	37	SY1	80	0.3	0.4	0.12
15	SY2	60	0.3	1.0	0.30	38	SY1	80	0.3	0.6	0.18
16	SK1	70	0.3	0.2	0.06	39	SY1	80	0.3	0.8	0.24
17	SK1	70	0.3	0.4	0.12	40	SY1	80	0.3	1.0	0.30
18	SK1	70	0.3	0.6	0.18	41	SY2	80	0.3	0.2	0.06
19	SK1	70	0.3	0.8	0.24	42	SY2	80	0.3	0.4	0.12
20	SK1	70	0.3	1.0	0.30	43	SY2	80	0.3	0.6	0.18
21	SY1	70	0.3	0.2	0.06	44	SY2	80	0.3	0.8	0.24
22	SY1	70	0.3	0.4	0.12	45	SY2	80	0.3	1.0	0.30
23	SY1	70	0.3	0.6	0.18						

表 2 钢筋混凝土结构的强度安全系数

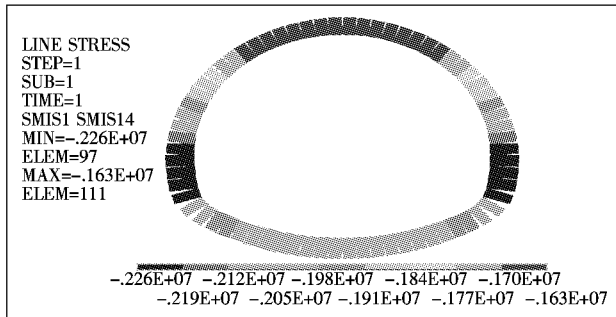
项目	永久荷载 +基本可 变荷载	永久荷载+基 本可变荷载+ 其他可变荷载
钢筋混凝土达到计算强度或混凝土达到抗压或抗剪极限强度	2.0	1.7
混凝土达到抗拉极限强度	2.4	2.0

(1) 由图 2 可知:3 种隧道衬砌结构形式所受轴力均为压力,圆形衬砌 SY2 衬砌压力最小,其最大轴力为 1 850 kN,抗水压衬砌 SK1 次之,最大轴力为 2 260 kN,一般隧道衬砌 SY1 所受压力最大,最大轴力为 2 590 kN。其中 SK1 形衬砌与 SY1 形衬砌轴力最大值分布于边墙与拱脚部位,而 SY2 形衬砌轴力最大值位于仰拱部位,3 种衬砌形式轴力最小值均位于拱顶部位。其次,SK1 形衬砌轴力最大值与最小值相差 63

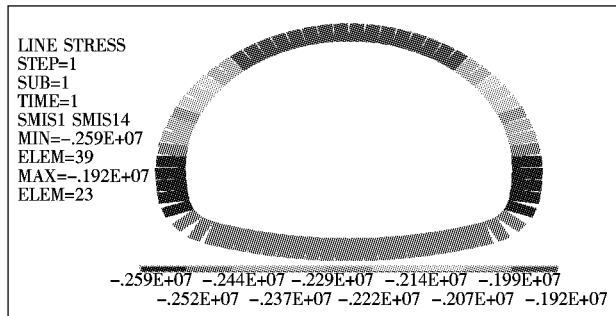
kN,SY1 形衬砌轴力最大值与最小值相差 67 kN,SY2 形衬砌轴力最大值与最小值相差 70 kN,轴力变化范围相对较小,轴力部分较为均匀。

(2) 由图 3 可知:3 种衬砌结构形式在外水压作用下均存在正负弯矩,表明衬砌结构内外侧均存在受拉形式,图中弯矩衬砌外侧受拉为正,内侧受拉为负。SK1 形衬砌最大负弯矩为 521 kN·m、最大正弯矩为 355 kN·m,SY1 形衬砌最大负弯矩为 413 kN·m、最大正弯矩为 586 kN·m,SY2 形衬砌最大负弯矩为 371 kN·m、最大正弯矩为 436 kN·m。3 种衬砌结构形式最大正弯矩位于衬砌拱腰处,但最大负弯矩位置表现不同,其中 SK1 形衬砌最大负弯矩主要集中在拱脚小圆弧与仰拱连接部位,SY1 形衬砌最大负弯矩主要出现在仰拱与拱顶,而 SY2 形衬砌最大负弯矩出现在仰拱与拱腰部位。

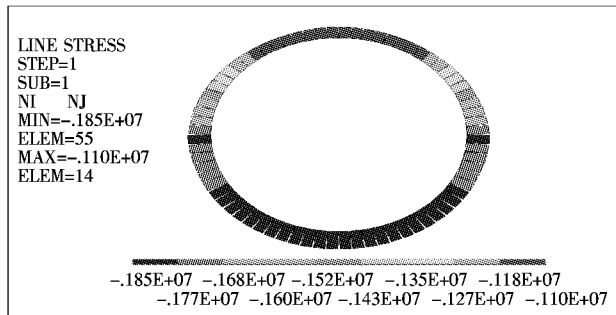
(3) 由图 4 可知:SY2 形衬砌结构最小安全系数



(a) SK1 形



(b) SY1 形

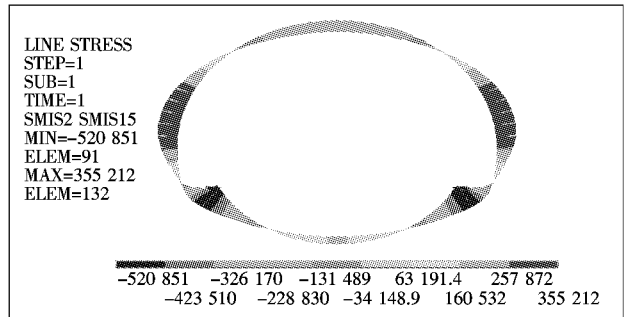


(c) SY2 形

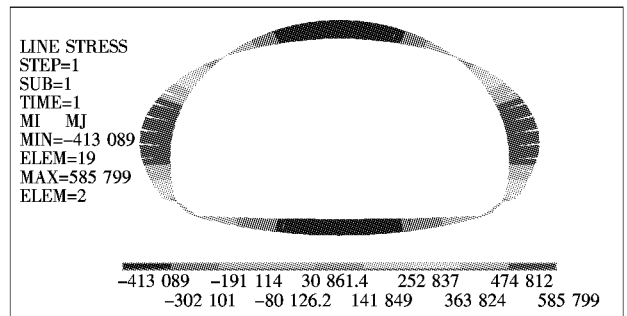
图2 轴力图(单位:N)

最大,其值为 4.02;其次为 SK1 形衬砌,为 2.54;SY1 形衬砌最小安全系数为 1.56。其中 SK1 形衬砌最小安全系数位于拱脚小圆弧与仰拱连接部位,与最大负弯矩位置相对应;SY1 形衬砌最小安全系数位于衬砌拱腰处,与最大正弯矩位置一致;而 SY2 形最小安全系数位于拱腰部位,与最大负弯矩相对应。根据分析,安全系数均为混凝土受拉极限控制,因此安全系数控制值为 2.4,根据表 2 控制指标,SY1 形衬砌工况下安全系数不满足设计要求。

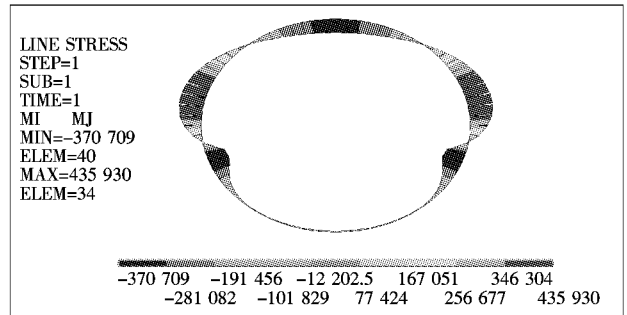
(4) 由图 2~4 可知:在衬砌结构跨径相同(即衬砌上半圆半径相同)情况下,截面受外力作用时,衬砌结构受竖向轴向力和切向力与半径及偏角相关,拱脚处曲率半径减小,轴向力和切向力分力增大,受拉弯矩增大,使得 SY1 形衬砌弯矩在拱脚处最大,SY2 形衬



(a) SK1 形



(b) SY1 形



(c) SY2 形

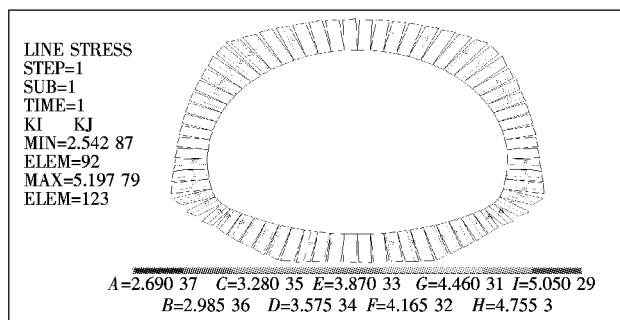
图3 弯矩图(单位:N·m)

砌最小。

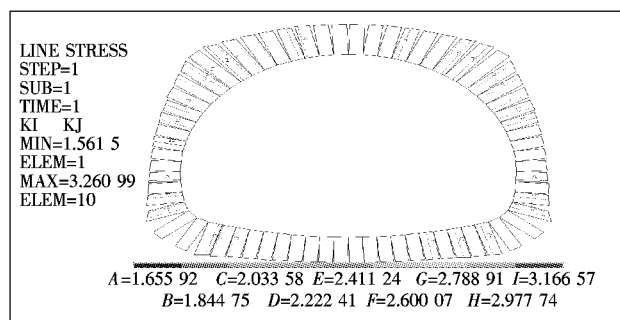
由此可知,在  $\beta=0.6$ 、 $d=70$  cm 工况下,圆形 SY1 形衬砌受力相对较优,但隧道界面最大,一般隧道 SY1 形衬砌安全系数不能满足设计要求,设计抗水压 SK1 形衬砌在满足规范设计要求下,能够减小隧道截面面积。综合轴力、弯矩及安全系数云图分析可得,3 种衬砌形式最不利位置一般位于拱脚或拱腰受力转换位置,设计配筋需以该处为控制值校核。

### 3.6.2 不同折减系数各工况结果分析

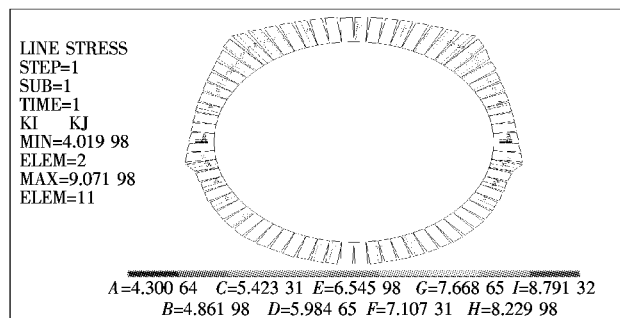
根据折减系数不同,各工况下衬砌结构受外水压作用,对隧道衬砌结构受力与安全系数影响明显,图 5~7 为各工况衬砌结构最大轴力、最大弯矩与最小安全系数趋势图。



(a) SK1 形



(b) SY1 形



(c) SY2 形

图 4 安全系数图

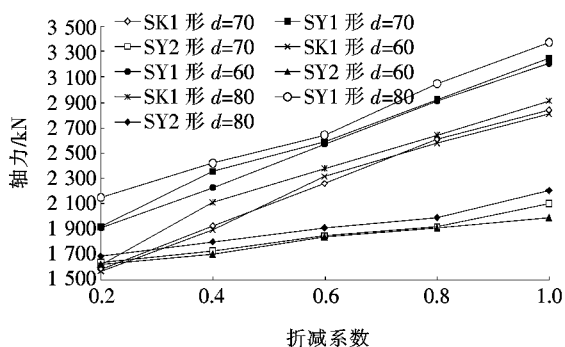


图 5 轴力趋势图

(1) 由图 5 可知:隧道衬砌最大轴力随折减系数增大而增大,其中 SY2 形衬砌轴力最大值变化幅度较小,曲线较为平缓, $\beta=1.0$ 、 $d=80$  cm 时达到最大轴力,其值为 2 210 kN,较 SK1 形式衬砌小 700 kN,较

SY1 形衬砌小 1 160 kN,说明圆形衬砌结构增大衬砌厚度其轴力变化不明显,增大衬砌厚度提高抗水压能力不适用于圆形衬砌形式。SK1 形衬砌与 SY1 形衬砌结构轴力随折减系数增加而显著增大,这两种衬砌所受轴力增大幅度随折减系数增大幅度基本呈等比例关系。其中 SK1 形衬砌增大幅度最大者为  $d=80$  cm 工况,轴力由 1 620 kN 增大至 2 910 kN,增大 1 290 kN。SY1 形衬砌增大幅度最大为  $d=70$  cm 工况,轴力由 1 920 kN 增大至 3 250 kN,增大 1 330 kN。

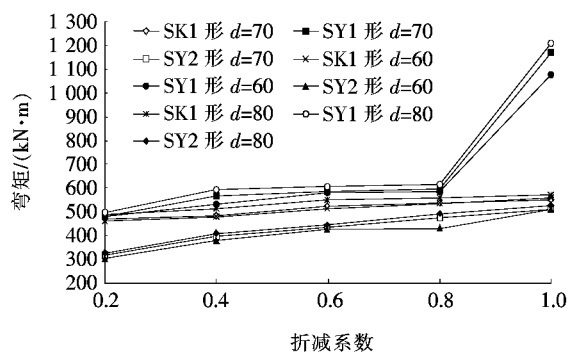


图 6 弯矩趋势图

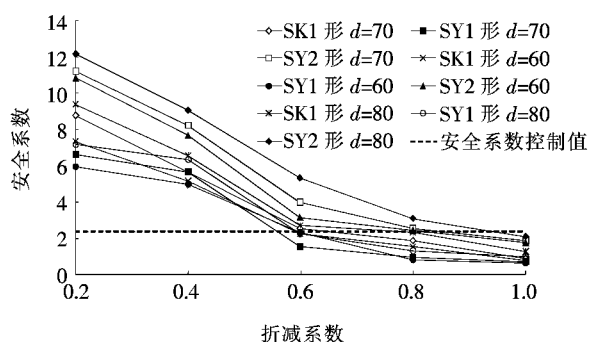


图 7 安全系数趋势图

(2) 由图 6 可知:SK1 形衬砌与 SY2 形衬砌所受弯矩变化较缓,但 SY1 形衬砌折减系数为 0.2~0.8 时弯矩变化较小,为 0.8~1.0 时,弯矩显著增大,增大幅度为 600~700 kN·m。而 SK1 形衬砌增大幅度为 100 kN·m,SY2 形衬砌增大幅度约为 200 kN·m。分析认为由于 SY1 形衬砌较为扁平,在水压增大后,受拉弹簧单元消除较多,内力重分布后,衬砌拱腰弯拉显著增大。

(3) 由图 7 可知:折减系数为 0.2~0.6 时安全系数减小较快,为 0.6~1.0 时减小较缓,其中当  $\beta=0.6$  时,SY1 形衬砌安全系数均在控制值(2.4)以下,SK1 形衬砌中  $d=60$  cm 时也不能满足规范要求。当折减系数增大至  $\beta=0.8$  时,只有 SY1 形衬砌安全系数值在控制值之上,且  $d=60$  cm 时安全系数为 2.43,接近

控制值。当折减系数增大至 $\beta=1.0$ 时,所有衬砌安全系数均小于控制值。

(4) 根据实际工程经验与相关研究:随着注浆圈厚度增大,水压折减性能与渗水量逐渐降低,水压减小,但厚度增大至一定量后外水压及渗水量减小幅度降低,无限制增大注浆层厚度在实际工程中并不可取。根据图5~7分析可知,在外水压为0.3 MPa工况下,当采用SK1形衬砌时,采取 $d=70\text{ cm}$ 、 $\beta=0.6$ 满足结构安全要求且最为经济;当采用SY1形衬砌时,采取 $d=80\text{ cm}$ 、 $\beta=0.6$ 满足结构安全要求且最为经济;采用SY2形衬砌时,采取 $d=60\text{ cm}$ 、 $\beta=0.6$ 满足结构安全要求且最为经济。但采用SY2形衬砌开挖断面较SK1形与SY1形衬砌大,而SY1形衬砌较SK1形与SY2形衬砌厚度大。综合比较在外水压为0.3 MPa工况下,采用SK1形衬砌,控制超前注浆加固区折减系数不大于0.6、 $d=70\text{ cm}$ 。

## 4 结论与建议

(1) 3种隧道衬砌结构形式所受轴力均为压力,圆形衬砌SY2形压力最小,抗水压衬砌SK1形次之,一般隧道衬砌SY1形所受压力最大,其中SK1形衬砌与SY1形衬砌轴力最大值分布于边墙与拱脚部位,而SY2形衬砌轴力最大值位于仰拱部位,3种衬砌形式在外荷载作用下,轴力最小值均位于拱顶部位。

(2) 3种形式隧道衬砌结构最大轴力随隧道折减系数增大而增大,其中SY2形衬砌轴力最大值变化幅度较小,曲线较为平缓,SK1形衬砌与SY1形衬砌结构轴力随折减系数增加而显著增大。

(3) 3种形式衬砌结构正负压力均存在,表现为衬砌结构内外侧均存在受拉形式,3种形式衬砌结构最大正弯矩位于衬砌拱腰处,但最大负弯矩位置表现不同,其中SK1形衬砌最大负弯矩主要集中在拱脚小

圆弧与仰拱连接部位,SY1形衬砌最大负弯矩主要出现在仰拱与拱顶,而SY2形衬砌最大负弯矩出现在仰拱与拱腰部位。

(4) SY2形衬砌结构安全系数最大,其次为SK1形衬砌,SY1形衬砌安全系数最小。其中SK1形衬砌最小安全系数位于拱脚小圆弧与仰拱连接部位,与最大负弯矩位置相对应,SY1形衬砌最小安全系数位于衬砌拱腰处,与最大正弯矩位置相一致,而SY2形最小安全系数位于拱腰部位,同最大负弯矩相对应。

(5) 设计按照“安全实用,质量可靠,经济合理”的原则在总水压不大于0.3 MPa段,拟定采用SK1形衬砌,控制超前注浆加固区折减系数不大于0.6、 $d=70\text{ cm}$ ,总水压大于0.3 MPa段采用相应增大衬砌截面厚度设计,富水段根据水压进行分段设计。

## 参考文献:

- [1] 高新强. 高水压山岭隧道衬砌水压力分布规律研究[D]. 西南交通大学博士学位论文, 2005.
- [2] 姚俊峰. 富水区山岭隧道衬砌水压力及结构受力特性的分析研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2014.
- [3] 蒋忠信. 隧道工程与水环境的相互作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(1).
- [4] 高新强, 仇文革, 高扬. 山岭隧道高水压下衬砌结构平面数值分析[J]. 岩土力学, 2005(3).
- [5] 王建宇. 再谈隧道衬砌水压力[J]. 现代隧道技术, 2003(3).
- [6] 张有天. 岩石隧道衬砌外水压问题的讨论[J]. 现代隧道技术, 2003(3).
- [7] 王建宇. 隧道围岩渗流和衬砌水压力荷载[J]. 铁道建筑技术, 2008(2).
- [8] 李健, 谭忠盛, 王秀英, 等. 海底隧道施工过程中初期支护受力特征试验研究[J]. 北京交通大学学报, 2012(1).
- [9] JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S].
- [10] 刘立鹏, 汪小刚, 贾志欣, 等. 水岩分算隧道衬砌外水压力折减系数取值方法[J]. 岩土工程学报, 2013(3).