

隧道复合式路面层间剪应力分析及面层厚度设计

王玉臣¹, 陈剑锋²

(1.湖南省高速公路建设开发总公司, 湖南 长沙 410016; 2.江西省天驰高速科技发展有限公司, 江西 南昌 330000)

摘要: 针对隧道复合式路面沥青面层厚度设计中存在的问题, 以层间剪应力为控制指标, 引入层间剪切弹性柔量, 利用 Bisar3.0 软件, 分析部分连续结合状态、连续状态下的层间剪应力和 5 种不同面层厚度下的层间最大剪应力; 考虑复合式路面温度场和层间剪应力的差别, 分别对隧道进出口和中部面层厚度进行设计。结果表明, 部分连续结合状态下, 水平纵向剪应力和最大剪应力都较小, 但不能依据层间结合状态来减小剪应力, 考虑到新建工程结合状态良好, 宜采用连续结合状态分析层间剪应力; 随着沥青面层厚度的增加, 最大剪应力逐渐降低; 设计中隧道中部沥青面层厚度可比进出口处小 2 cm 左右。

关键词: 隧道; 复合式路面; 层间剪应力; 温度场; 面层厚度

中图分类号: U451

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)02-0135-05

2004 年以前, 无论在隧道工程领域还是道路工程领域, 针对隧道路面结构设计的研究都较少, 也没有专门规范和指南指导隧道内路面结构和材料设计, 有关隧道工程的研究主要为洞体施工技术和隧道通风及照明。虽然 2004 年颁布了《公路隧道设计规范》, 但其仍是套用公路或城市道路工程设计规范, 与公路相比隧道环境较封闭, 且隧道路面基础与公路不同, 完全套用不符合实际情况, 导致路面较早破坏。马磊、王航等通过对隧道进出口交通事故的调查, 从隧道进出口亮度、线形、车速、路面结构等方面分析, 确定了隧道进出口过渡段及其长度。根据该研究, 隧道路面包括进出口过渡段和隧中部分, 两者的受力及温度场不同, 对路面结构的要求也不一。该文利用 Bisar3.0 软件分析不同厚度基层、面层及不同层间结合状况下层间最大剪应力, 并对复合式路面结构中沥青面层厚度进行设计。

1 计算软件和参数简介

1.1 计算软件

Bisar 软件的依据是弹性层状体系理论, 可计算多圆均布复合荷载作用下 N 层弹性连续—光滑—半连续结合状态下体系内任一点的应力和位移分量、主应力、主应变分量及方向。计算中 Bisar 软件无需进行网格单元划分, 无需考虑单元类型和单元尺寸, 相比有限元软件, 其计算结果更可靠。

1.2 路面结构模型及计算点位

荷载考虑水平和垂直方向应力。其中: 水平方

向应力的夹角取零, 其随汽车行驶时所受摩擦力系数的不同而不同; 垂直方向应力表现为法向分量特征, 考虑荷载和作用半径的影响, 荷载中心位置坐标取相应计算值。如图 1 所示, 选择单轴双轮组, 以双圆均布荷载进行分析。

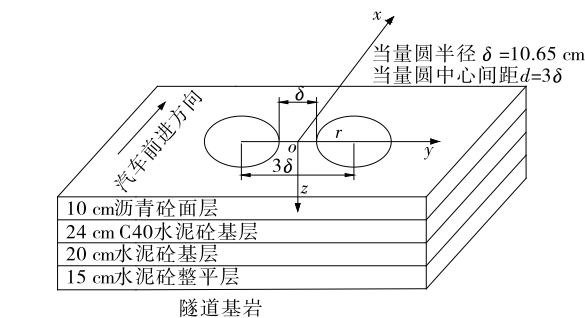


图 1 几何坐标系建立

双圆均布荷载当量圆半径按下式计算:

$$\delta = \sqrt{P/(\pi p)} \quad (1)$$

式中: δ 为当量圆半径(m); P 为标准车辆单轮荷载(kN); p 为轮胎接触压力(MPa)。

主要计算参数如下: 1) 标准轴载 100 kN, 单轮荷载 25 kN, $P = 0.7$ MPa, 等效圆半径为 0.106 5 m, 轮间距为 3δ ; 摩擦系数选取条件为紧急制动, $f = 0.5$; 隧道路面所受水平力为 12.5 kN, 与水平方向的夹角为零。2) 厚度、弹性模量和泊松比使用部分连续状态下的值(见表 1)。3) 在三维坐标体系中对需要计算的点位进行设定, 包括坐标 (x, y, z) , 一个体系最多可计算 10 个点位, 计算时选取 z 为 10(即

$h=10$), x 轴取 $0, \pm 0.1\delta, \pm 0.3\delta, \pm 0.5\delta, \pm 0.7\delta, \pm 0.9\delta, \pm \delta$, y 轴取 $0, 0.5\delta, \delta, 1.5\delta, 2\delta, 2.2\delta$ 。计算点位选取见图 2。

表 1 路面结构层参数

结构层	厚度/m	弹性模量/MPa	泊松比
沥青砼上面层	0.04	1 400	0.35
沥青砼下面层	0.06	1 200	0.35
C40 水泥砼层	0.18	33 000	0.15
C20 水泥砼基层	0.20	23 000	0.15
水泥砼整平层	0.15	13 000	0.15
隧道基岩	—	5 000	0.20

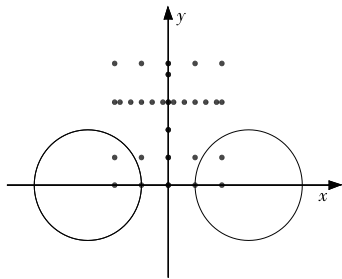


图 2 计算点位示意图

1.3 层间剪切弹性柔量

为分析完全连续、部分连续两种层间结合状态下的层间剪应力,先明确层间结合状态。层间状态采用标准剪切弹性模量 AK 和简化弹性柔量 ALK 表示,其中 AK 按式(2)计算, ALK 按式(3)计算。

$$AK = \text{层间相对位移} / \text{界面剪应力} \quad (2)$$

$$ALK = \partial / (1 - \partial)a \quad (3)$$

式中: ∂ 为摩擦参数,按式(4)计算,其值为 $0 \sim 1$, $\partial = 0$ 时摩擦力最大, $\partial = 1$ 时摩擦力为零; a 为荷载作用半径(m)。

$$\partial = AK / [AK + (1 + \nu) / Ea] \quad (4)$$

式中: ν 为泊松比; E 为弹性模量(MPa)。

设定系数 K , K 值通过试验等方法确定,则 AK 和 ALK 可表示为:

$$AK = 1/K \quad (5)$$

$$ALK = AK \cdot E / (1 + \nu) = 1/K \cdot E / (1 + \nu) \quad (6)$$

根据文献[5],常温下层间设置抗剪材料时,沥青砼面层间及其与水泥砼刚性基层之间的粘结系数 K 分别为 $3\,700 \sim 4\,200$ 、 $3\,000 \sim 3\,200 \text{ N/m}^3$;常温下沥青路面面层间及其与水泥砼刚性基层之间的抗剪模量分别为 $4\,200$ 、 $3\,000 \text{ N/m}^3$ 。复合式沥青砼路面各层材料的弹性模量采用勘探文件及相关材料报告中的结果。各结构层参数见表 1。

将表 1 中参数代入式(6),可计算出相邻结构层之间的 ALK 值。根据计算结果,层间状态呈部分连续结合状态时,沥青砼路面上下面层间 ALK 值为 0.26 ,沥青面层与刚性基层间 ALK 值为 0.35 ;层间状态为完全连续结合状态时,沥青砼路面面层之间及其与水泥砼基层间的 ALK 值均为零。

2 复合式路面层间剪应力分析

隧道路面基岩的回弹模量较高,路面很少因为强度不足产生破坏,路面设计时不需着重考虑路面强度和弯沉,而应重点验算层间剪应力是否满足要求。其原因高温条件下沥青的粘聚力较低,层间材料的抗剪强度较低,极易发生剪切滑移而导致路面结构破坏。

2.1 不同层间结合状态下层间最大剪应力

假定复合式沥青路面厚度为 10 cm ,板厚 18 cm ,分别计算层间部分连续结合状态、完全连续结合状态下路面各结构层间水平纵向最大剪应力 τ 和层间最大剪应力 τ_{\max} ,计算结果见表 2、表 3。

表 2 层间部分连续结合状态下最大剪应力

坐标	τ/MPa	τ_{\max}/MPa	坐标	τ/MPa	τ_{\max}/MPa
$(\delta, 0)$	-0.054 4	0.092 0	$(0.9\delta, 1.5\delta)$	-0.069 6	0.205 6
$(0.5\delta, 0)$	-0.050 0	0.153 7	$(0.7\delta, 1.5\delta)$	-0.065 4	0.255 0
$(0, 0)$	-0.037 0	0.166 5	$(0.5\delta, 1.5\delta)$	-0.060 7	0.285 1
$(\delta, 0.5\delta)$	-0.059 2	0.095 2	$(0.3\delta, 1.5\delta)$	-0.053 5	0.299 0
$(0.5\delta, 0.5\delta)$	-0.054 2	0.131 8	$(0.1\delta, 1.5\delta)$	-0.045 4	0.305 0
$(0, 0.5\delta)$	-0.038 8	0.132 3	$(0, 1.5\delta)$	-0.041 1	0.304 1
$(-0.5\delta, 0.5\delta)$	-0.023 6	0.090 0	$(0, 2.0\delta)$	-0.036 3	0.273 6
$(-\delta, 0.5\delta)$	-0.018 0	0.048 2	$(\delta, 2.2\delta)$	-0.055 4	0.123 0
$(0, \delta)$	-0.041 2	0.273 0	$(0.5\delta, 2.2\delta)$	-0.050 0	0.209 9
$(\delta, 1.5\delta)$	-0.069 9	0.177 0	$(0, 2.2\delta)$	-0.033 0	0.234 0

表 3 层间完全连续结合状态下最大剪应力

坐标	τ/MPa	τ_{\max}/MPa	坐标	τ/MPa	τ_{\max}/MPa
$(\delta, 0)$	-0.100 8	0.121 2	$(0.7\delta, 1.5\delta)$	-0.227 3	0.295 1
$(0.5\delta, 0)$	-0.087 9	0.092 2	$(0.5\delta, 1.5\delta)$	-0.160 5	0.320 0
$(0, 0)$	-0.036 2	0.046 6	$(0.3\delta, 1.5\delta)$	-0.121 1	0.305 7
$(\delta, 0.5\delta)$	-0.139 0	0.163 6	$(0.1\delta, 1.5\delta)$	-0.080 4	0.284 3
$(0.5\delta, 0.5\delta)$	-0.124 0	0.174 2	$(0, 1.5\delta)$	-0.038 2	0.256 6
$(0, 0.5\delta)$	-0.053 1	0.139 1	$(0, 2.0\delta)$	-0.150 0	0.239 3
$(-0.5\delta, 0.5\delta)$	-0.010 4	0.091 3	$(\delta, 2.2\delta)$	-0.071 1	0.209 7
$(-\delta, 0.5\delta)$	-0.015 1	0.049 8	$(0.5\delta, 2.2\delta)$	-0.063 2	0.238 3
$(0, \delta)$	-0.086 2	0.215 1	$(0, 2.2\delta)$	0.012 5	0.222 7
$(\delta, 1.5\delta)$	-0.242 6	0.254 8	$(-0.5\delta, 2.2\delta)$	0.030 6	0.163 1
$(0.9\delta, 1.5\delta)$	-0.242 4	0.279 9	$(-\delta, 2.2\delta)$	0.056 8	0.078 2

由表 2、表 3 可知:水泥砼板厚 18 cm 时,层间为部分连续结合状态时,层间最大剪应力最大值出现在坐标 $(0.1\delta, 1.5\delta)$ 处,为 0.305 MPa;水平纵向最大剪应力最大值出现在坐标 $(\delta, 1.5\delta)$ 处,为 0.069 9 MPa;层间为完全连续结合状态时,层间最大剪应力最大值为 0.320 MPa,水平纵向最大剪应力最大值为 0.242 MPa。水平纵向最大剪应力与层间最大剪应力在层间部分连续结合状态时的最大值相差较大,而在完全连续结合状态下相差较小,表明层间结合状态不同时水平纵向最大剪应力和层间最大剪应力差别较大,路面结构抗剪设计中应考虑层间结合状态的影响。根据文献[4],路面结构随使用时间的增长逐渐由完全连续变为部分连续,层间最大剪应力会相应减小,但不能依靠降低层间结合状态来减小剪应力。

2.2 不同基层厚度下层间最大剪应力

假定水泥砼板厚为 18~26 cm,增量为 1 cm,计算层间最大剪应力随水泥砼板厚度增加的变化规律,结果见表 4。

表 4 不同板厚对应的层间最大剪应力

水泥板厚度/cm	最大点位	τ_{\max}
18	$(0.5\delta, 1.5\delta)$	0.274 7
19	$(0.5\delta, 1.5\delta)$	0.270 7
20	$(0.5\delta, 1.5\delta)$	0.271 4
21	$(0.5\delta, 1.5\delta)$	0.272 0
22	$(0.5\delta, 1.5\delta)$	0.272 6
23	$(0.5\delta, 1.5\delta)$	0.273 2
24	$(0.5\delta, 1.5\delta)$	0.273 7
25	$(0.5\delta, 1.5\delta)$	0.274 2
26	$(0.5\delta, 1.5\delta)$	0.274 7

由表 4 可知:水泥砼板厚度改变,层间最大剪应力变化不明显。计算路面结构层间剪应力时,可在 18~26 cm 内任取一厚度进行近似计算,水泥砼路面面板厚度可在确定沥青层厚度后确定。

2.3 不同沥青面层下层间最大剪应力

设定 5 种不同下面层厚度对层间最大剪应力进行分析,沥青面层方案见表 5。

表 5 沥青面层方案

方案 编号	路面厚度/ cm	上面层 厚度/cm	下面层 厚度/cm
1	8	4	4
2	9	4	5
3	10	4	6
4	11	4	7
5	12	4	8

根据上面的分析,水泥砼板厚度对路面层间剪应力的影响很小,假定板厚为 24 cm,材料回弹模量和泊松比见表 1。隧道路面结构不仅受到汽车荷载产生的竖向力作用,也受到汽车行驶产生的水平方向力 F 的作用,水平力按式(7)计算。隧道进出口处汽车启动、制动较多,其所处状态为路面最不利状况,计算该状态下水平力时取车辆紧急制动时的摩擦系数 $f=0.5$,得水平力为 12.5 kN。按以上参数进行计算,得到不同沥青面层厚度下层间最大剪应力(见表 6)。

$$F=fP \tag{7}$$

式中: f 为摩擦系数。

由表 6 可知:随着沥青面层厚度的增加,最大剪

应力呈线性递减。可适当增加沥青面层厚度来减小层间最大剪应力,使路面更耐久。

表6 不同面层厚度下层间最大剪应力

沥青面层 厚度/cm	水平纵向最大剪应力		层间最大剪应力	
	应力值/MPa	点位坐标	应力值/MPa	点位坐标
8(4+4)	-0.277 2	(0.9 δ ,1.5 δ)	0.296 5	(0.5 δ ,1.5 δ)
9(4+5)	-0.259 6	(0.9 δ ,1.5 δ)	0.286 3	(0.5 δ ,1.5 δ)
10(4+6)	-0.242 3	(0.9 δ ,1.5 δ)	0.273 7	(0.5 δ ,1.5 δ)
11(4+7)	-0.225 6	(δ ,1.5 δ)	0.262 8	(0.5 δ ,1.5 δ)
12(4+8)	-0.210 3	(δ ,1.5 δ)	0.244 4	(0.5 δ ,1.5 δ)

3 基于隧道路面温度场和层间剪应力的沥青面层厚度设计

长隧道中温度场是沥青路面结构设计的重要影响因素,其主要受空气对流、通风、环境温度等影响。通常隧道中部温度比两端温度稳定,且夏季最高气温低于两端,隧道中部路面中水泥板的温度相对较低,板内温度应力对路面的破坏作用较小。因此,隧道路面结构设计时不必考虑水泥板温度应力的作用,只需考虑沥青路面面层抗剪强度设计。

3.1 剪应力与隧道内温度的关系

复合式路面中沥青层厚在《沥青路面设计规范》中无明确规定,通常通过验算沥青层与刚性基层间最大剪应力是否满足要求来确定。研究表明,沥青层厚达4 cm及以上时才能起到降低板顶温度应力的作用。层间抗剪粘结层采用SBS改性沥青,根据有关资料,不同温度 T 下SBS改性沥青粘结层抗剪强度 τ_f 为:

$$\tau_f = -0.022\,7T + 1.493\,1 \quad (8)$$

根据SHRP计算一年中最热的7 d最高路表温度平均值的方法,以路表下深度为20 mm处的温度为路表温度,计算公式为:

$$T_{20\text{ mm}} = (T_{\text{air}} - 0.006\,18Lat^2 + 0.228\,9Lat + 42.2) \times 0.954\,5 - 17.78 \quad (9)$$

式中: T_{air} 为空气温度; Lat 为纬度。

采用ANSYS对CRC+AC温度场进行模拟分析,发现复合式路面中水泥板顶温度是路表温度经沥青面层厚度 h_a 衰减得到的,且沥青面层越厚温度衰减越多。层间处于完全连续结合状态时,回归得到不同层厚和路面温度下水泥板顶夏季最高温度为:

$$T = 0.804\,9T_{20\text{ mm}} - 0.888\,6h_a + 6.141\,9 \quad (10)$$

3.2 隧道中不同段温度统计

隧道内温度场对路面结构性能有极大影响,沥青材料的层间抗剪强度主要取决于材料的粘聚力,而随着温度的改变,改性沥青粘弹性能会发生变化,导致其抗剪强度不同。广西坡荷隧道属于长大隧道,隧道中部和两端温度情况差异较大,对层间抗剪材料性能的影响也较大。其中夏季温度最高7 d的温度见表7。

表7 隧道中部和进出口处夏季最高温度 $^{\circ}\text{C}$

日期 编号	温度		日期 编号	温度	
	进出口处	中部		进出口处	中部
1	36.1	16.4	5	35.7	15.0
2	35.8	15.8	6	35.9	15.0
3	35.2	14.9	7	34.7	14.6
4	35.1	14.8			
平均温度				35.5	15.2

3.3 隧道不同段沥青面层厚度计算

3.3.1 进出口

根据隧道中部和两端进出口处夏季温度最高7 d的温度数据对板顶温度进行计算。采用隧道路面下深20 mm处温度为计算温度,根据表7,隧道进出口温度为35.5 $^{\circ}\text{C}$,坡荷隧道的 Lat 约为23.0,由式(9)得路表温度为:

$$T_{20\text{ mm}} = (35.5 - 0.006\,18 \times 23.0^2 + 0.228\,9 \times 23.0 + 42.2) \times 0.954\,5 - 17.78 = 58.3\,^{\circ}\text{C}$$

由式(10)得板顶夏季最高温度为:

$$T = 0.804\,9 \times 58.3 - 0.888\,6 \times 10 + 6.141\,9 = 44.182\,^{\circ}\text{C}$$

由式(8)得抗剪强度为:

$$\tau_f = -0.022\,7 \times 44.182 + 1.493\,1 = 0.490\,2\text{ MPa}$$

容许剪应力为:

$$\tau_R = \tau_f / K_t = 0.490\,2 / 1.2 = 0.408\,5\text{ MPa}$$

式中: $K_t = 1.2 / A_c$ 。

由Bisar3.0软件计算可知,在层间完全连续结合状态下,沥青路面采用10 cm时 $\tau_a = 0.273\,7\text{ MPa} < \tau_R = 0.408\,5\text{ MPa}$,满足沥青路面层间抗剪强度要求,隧道进出口处沥青路面面层厚度宜采用10 cm。

3.3.2 中部

隧道中部沥青面层厚度计算与隧道进出口处相似,计算过程如下:

$$T_{20\text{ mm}} = (15.2 - 0.006\,18 \times 23.0^2 + 0.228\,9 \times 23.0 + 42.2) \times 0.954\,5 - 17.78 = 38.9\,^{\circ}\text{C}$$

$$T = 0.804\,9 \times 38.9 - 0.888\,6 \times 8 + 6.141\,9 =$$

30.343 °C

$$\tau_f = -0.022\ 7 \times 30.343 + 1.493\ 1 = 0.804\ \text{MPa}$$

$$\tau_R = \tau_f / K_t = 0.804 / 1.2 = 0.67\ \text{MPa}$$

隧道中部的温度变化不大,故其温度场对路面结构层产生的温度疲劳破坏相对较小。当沥青路面面层厚度为 8 cm 时, $\tau_a = 0.296\ 5\ \text{MPa} < \tau_R = 0.67\ \text{MPa}$,隧道中部沥青路面面层厚度宜采用 8 cm。

4 结论

(1) 层间状态为完全连续时层间剪应力较大,水泥砼板厚度、基层板厚度对层间最大剪应力的影响较小。

(2) 沥青面层厚度逐渐增加,则层间最大剪应力逐渐降低。沥青路面设计时,可通过适当增加沥青面层厚度来减小层间剪应力,使路面更耐久。

(3) 隧道进出口与中部因温度场不同,层间剪应力有较大差别,进出口与中部沥青面层的设计厚度应不同。一般情况下,隧道中部沥青面层厚度可比进出口处的小 2 cm 左右。

参考文献:

- [1] 李英涛.老山隧道路面型式选择及结构设计研究[D].南京:东南大学,2006.

- [2] 马磊,王航,刘江,等.隧道进出口过渡段及其长度[J].中外公路,2013,33(3).
- [3] 黄优,刘朝晖,李盛,等.不同层间结合状态下刚柔复合式路面的剪应力分析[J].公路交通科技,2015,32(6).
- [4] 刘朝晖.连续配筋混凝土刚柔复合式沥青路面研究[D].长沙:长沙理工大学,2007.
- [5] 刘朝晖,黄优,李盛.层间结合状态对刚柔复合式路面剪应力的影响分析[J].公路,2015(1).
- [6] 兰光欣,孙湘俊.公路隧道路面结构设计及施工[J].公路与汽运,2008(1).
- [7] 李盛.连续配筋混凝土复合式沥青路面结构厚度研究[D].长沙:长沙理工大学,2010.
- [8] 刘朝晖,林佛光,华正良.连续配筋混凝土复合式沥青路面温度应力分析[J].交通科学与工程,2009,25(1).
- [9] JTJ D70—2004,公路隧道设计规范[S].
- [10] 刘静.凿毛台车在复合式路面界面处治中的应用研究[J].公路与汽运,2017(4).
- [11] 陈明,肖杰,杨和平,等.旧水泥砼路面加铺沥青层的三维有限元分析[J].公路与汽运,2018(4).
- [12] 张草原.基于环境因素的隧道沥青路面抗滑性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2017.
- [13] 袁明,凌天清,张睿卓,等.复合式路面层间剪应力分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2011,30(6).

收稿日期:2018—06—23

(上接第 124 页)

件应力为 -96.2 MPa。杆件应力均小于钢材的强度设计值 270 MPa。

4 结论

(1) 根据桥梁施工方案,钢桥共设置 4 组临时支墩,其中中跨 2 组、两边跨各 1 组。卸载完成后,中跨竖向变形最大达 215 mm。

(2) 支承转换后,钢桥整体杆件最大应力为 -79.9 MPa,千斤顶处钢桥下弦杆最大应力为 -63.8 MPa,均小于钢材的强度设计值 270 MPa;千斤顶处钢平台(H600×300×12×17)的最大应力为 -290.9 MPa,小于钢材(Q345 材质)的强度设计值 310 MPa。

(3) 中跨支墩卸载后,钢桥中跨最大竖向变形为 -175.1 mm,钢桥最大杆件应力为 100.1 MPa;边跨支墩卸载后,钢桥中跨最大竖向变形为 -189.8 mm,钢桥最大杆件应力为 -96.2 MPa。杆件应力均小于钢材的强度设计值 270 MPa。

参考文献:

- [1] 邵旭东.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [2] JTJ D62—2012,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [3] 范立础.预应力混凝土连续梁桥[M].北京:人民交通出版社,1997.
- [4] 潘峰.新型钢连梁控制结构抗震性能研究[D].南宁:广西大学,2004.
- [5] 潘志明.新型组合连梁控制结构抗震性能研究[D].南宁:广西大学,2007.
- [6] 徐冬晓.钢桁架连梁抗震性能试验研究[D].南宁:广西大学,2008.
- [7] 邓志恒,胡强,潘志明,等.钢桁架连梁耗能性能试验研究及损伤分析[J].自然灾害学报,2009,18(6).
- [8] 陆振华,鄧才富.钢桁架人行桥空间受力特征探讨[J].城市道桥与防洪,2010(11).
- [9] 裴现伟.一种新型组合结构在桥梁工程中的应用[J].公路与汽运,2018(1).

收稿日期:2018—07—05