

不同因素对沥青砼渗流流速的影响<sup>\*</sup>

周志刚, 平高明, 郭安顺, 李岩

(长沙理工大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 针对沥青路面普遍存在的水损害, 考虑沥青砼空隙率、环境温度、孔隙水压和交通荷载等因素对沥青路面内部渗流的影响, 进行沥青砼 AC-13 圆柱形试件渗透试验。结果表明, 渗流流速随着试件空隙率和试验水压、轴压、温度的增大而增大, 其中空隙率、水压和温度对试件渗流流速的影响显著, 轴压的影响相对较小; 与正常条件相比, 高压水(0.7 MPa)、高温(60 ℃)和大空隙率(8%)可使渗流流速增加 24.5 倍以上, 应高度重视和加强高温重载下沥青砼水损害的防治措施。

**关键词:** 公路; 沥青砼; 渗透试验; 流速; 空隙率; 水压; 温度; 轴压

**中图分类号:** U416.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2017)05-0061-04

目前关于沥青路面水损害研究的一个主要方面是试验测试沥青混合料的渗流规律, 对比分析影响渗流性能的因素。如郑木莲采用常水头渗透方法测试了低水压条件下多孔砼的渗透特性, 探讨了试件空隙率的影响; 魏鹏克通过自制变水头渗透仪测试了 3 种不同级配沥青混合料的渗流规律, 发现随着空隙率的增大, 渗流速度增大, 且空隙率达到 8% 左右时变化趋势更为明显; 冯德成等通过 3 种不同级配沥青混合料的渗透试验, 发现渗流流速与集料最大公称粒径、级配类型、结构层厚度和成型方式息息相关; 高俊启等采用变水头渗透试验测试了沥青混合料芯样在 40~350 kPa 水压力下的渗流规律, 探讨了水压、空隙率对渗流的影响。上述研究一般基于低水压条件下的渗透试验, 而对于实际车轮荷载高压水条件下的渗透试验研究较少。该文采用常水头渗透试验方法, 利用自制渗透仪, 针对不同空隙率的沥青砼 AC-13, 在不同水压、轴压和温度下进行渗透试验, 探究沥青混合料在高水力梯度作用下的渗流规律, 对比分析各因素对其渗流流速的影响, 为进一步揭示沥青路面渗透特性和水损害机理、改进沥青路面排水设计提供依据。

## 1 试件制备

选用沥青路面表面层常用的连续密级配沥青砼 AC-13, 其中沥青为复合 I-D 等级要求的 SBS 改性沥青, 粗集料为玄武岩, 细集料为石灰岩, 矿粉为

石灰岩矿粉。根据马歇尔试验, SBS 改性沥青砼 AC-13 的最佳油石比为 4.7%。

按照 JTG E20-2011 关于沥青混合料试件制备方法中的标准击实法(T0702-2011)成型试件, 试件尺寸为  $\phi 101.6 \times 63.5 \pm 1.3$  mm。

## 2 渗透试验方法

根据基于饱和土 Biot 固结理论的饱水沥青路面有限元计算及现场动水压力测试结果, 沥青路面结构内部动水压力为 0.3~0.5 MPa, 考虑到有关计算理论和试验方法的缺陷, 针对交通轮载实际轮压对动水压力的影响, 试验水压选为 0.05~0.7 MPa, 每隔 0.05 MPa 一个梯度。

沥青混合料属于典型热流变材料, 其性能受温度的影响较大。像湖南等南方省份, 无论冬季还是夏季, 均有长时间的降雨过程, 由于渗水与其流经沥青砼空隙内壁之间的粘滞作用受温度的影响大, 沥青砼材料内的渗流规律会发生变化。因此, 有必要研究温度对沥青混合料渗流特性的影响。根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》, 当沥青混合料结构层以层底弯拉应力为设计验算指标时, 最不利温度为 15 ℃, 考虑到南方高温季节路面温度可达 60 ℃左右, 试验温度选取 5、15、40、60 ℃。基于以往研究成果, 考虑不利于沥青砼水稳定性的空隙率, 选取空隙率 6% 和 8% 进行试验。

采用自制的可施加不同水压和围压的多功能渗

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378084); 交通运输部应用基础研究项目(2014319825060); 江西交通科技计划项目(2011C0063); 湖南省研究生科研创新项目(CX2014B371)

透试验装置,配合材料试验系统 MTS810 的环境箱和加载测试系统,针对沥青砼 AC-13 的 2 种空隙率(实测空隙率为 6.5%、8.2%)的击实成型试件,在不同水压(0.05~0.7 MPa)、不同温度(5、15、40、60 °C)及不同轴压(0.7、0.9、1.1 MPa,考虑超载影响)下进行常水头渗透试验。

### 3 各因素对渗流流速的影响

#### 3.1 试验数据处理

渗透试验中得到的主要数据为渗水量  $Q$  和水压  $u$ ,根据水力学中基本公式将其转换成流速  $v$  和水力梯度  $J$ :

$$v = Q / (At) \quad (1)$$

$$J = 1\,000 \Delta u / (\gamma_w h) \quad (2)$$

式中: $A$  为马歇尔试件的横截面面积( $\text{m}^2$ ); $t$  为渗水时间( $\text{s}$ ); $\Delta u$  为水压差( $\text{MPa}$ ),试验中出水口段与大气相通, $\Delta u$  就是所施加的水压  $u$ ;  $\gamma_w$  为水的容重( $\text{kN/m}^3$ ); $h$  为试件高度( $\text{m}$ )。

#### 3.2 水压的影响

水力梯度对流速的影响见图 1。由图 1 可知:

其他条件相同时,渗流流速随水压(水力梯度)的增大而增大,且随水压的进一步增大呈非线性增长。15 °C、轴压 0.7 MPa 时,空隙率 6.5% 的试件在水压 0.3 MPa 作用下的渗流流速为水压 0.05 MPa 作用下的 2.82 倍,在水压 0.5 MPa 作用下的渗流流速为水压 0.05 MPa 作用下的 3.62 倍;空隙率 8.2% 的试件在水压 0.3 MPa 作用下的渗流流速为水压 0.05 MPa 作用下的 3.24 倍,在水压 0.5 MPa 作用下的渗流流速为水压 0.05 MPa 作用下的 4.32 倍。15 °C、轴压 1.1 MPa 时,空隙率 6.5% 的试件在水压 0.3 MPa 作用下的渗流流速为水压 0.05 MPa 作用下的 2.77 倍,在水压 0.5 MPa 作用下的渗流流速为水压 0.05 MPa 作用下的 3.53 倍;空隙率 8.2% 的试件在水压 0.3 MPa 作用下的渗流流速为水压 0.05 MPa 作用下的 2.90 倍,在水压 0.5 MPa 作用下的渗流流速为水压 0.05 MPa 作用下的 3.84 倍。60 °C、轴压 1.1 MPa 时,空隙率 6.5% 的试件在水压 0.3 MPa 作用下的渗流流速为水压 0.05 MPa 作用下的 3.66 倍,在水压 0.5 MPa 作用下的渗流流速为水压 0.05 MPa 作用下的 4.86 倍;空隙率 8.2% 的试件在水压

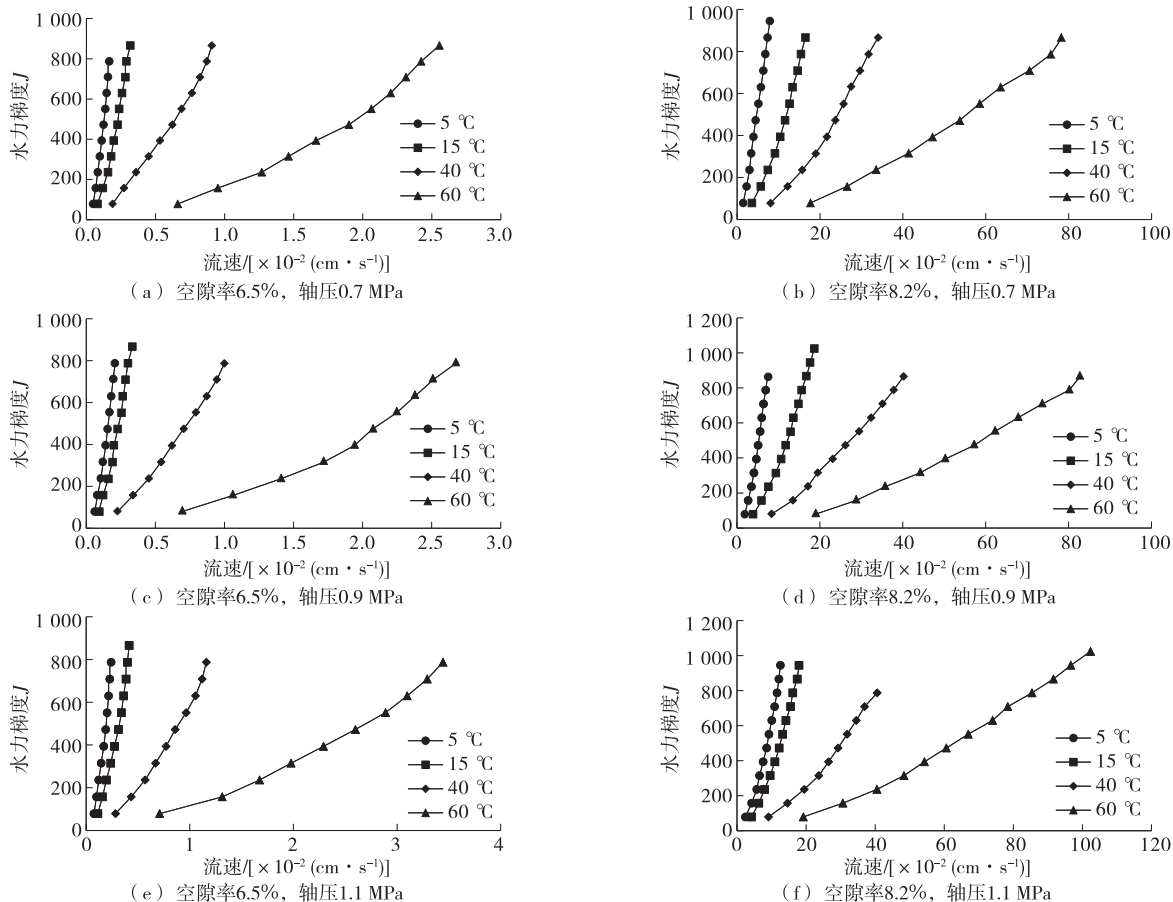


图 1 水力梯度对流速的影响

0.3 MPa 作用下的渗流流速为水压 0.05 MPa 作用下的 3.16 倍,在水压 0.5 MPa 作用下的渗流流速为水压 0.05 MPa 作用下的 4.45 倍。这种差异随温度

和空隙率的增大愈加显著,轴压的影响则较小。

### 3.3 空隙率的影响

轴压 0.7 MPa 时空隙率对流速的影响见图 2。由

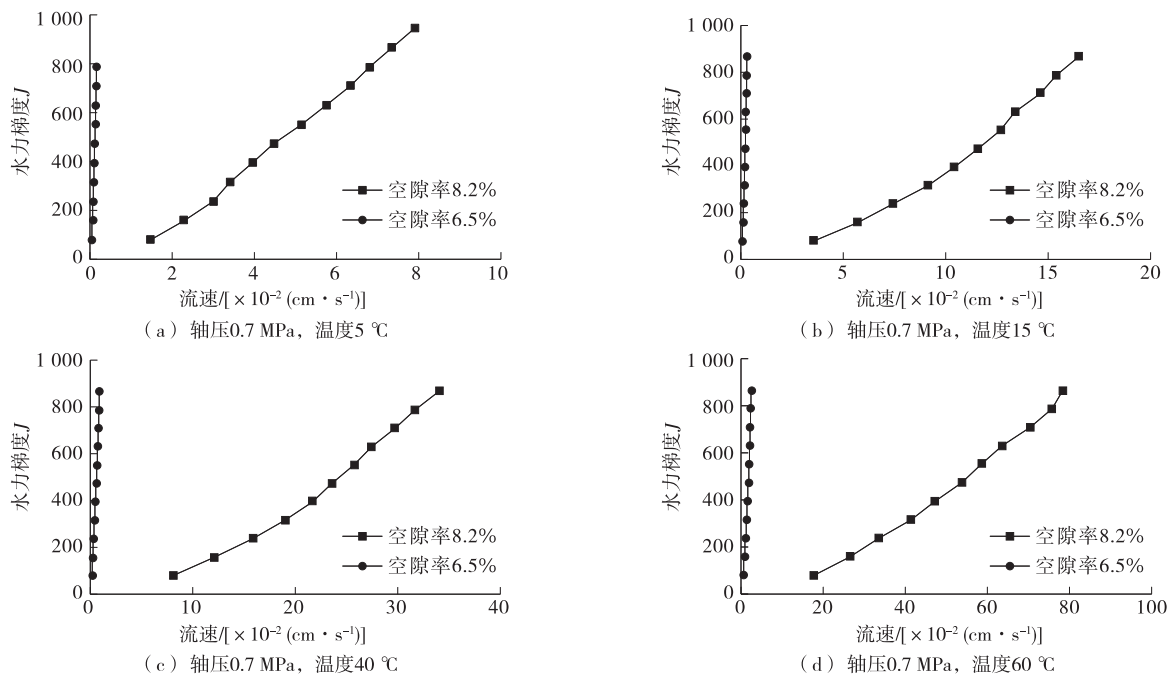


图 2 空隙率对流速的影响(轴压 0.7 MPa)

图 2 可知:在其他条件相同时,两种空隙率沥青砼试件中的渗流流速相差很大。15 °C、水压 0.3 MPa 时,空隙率 8.2% 的试件在轴压 0.7、1.1 MPa 作用下的渗流流速分别为空隙率 6.5% 的 51.33、39.16 倍。15 °C、水压 0.7 MPa 时,空隙率 8.2% 的试件在轴压 0.7、1.1 MPa 作用下的渗流流速分别为空隙率 6.5% 的 48.89、41.32 倍。60 °C、水压 0.7 MPa 时,空隙率 8.2% 的试件在轴压 0.7、1.1 MPa 作用下的渗流流速分别为空隙率 6.5% 的 24.51、22.86 倍。空隙率对沥青砼内部渗流流速的影响很大,这种影响随着温度和水压的增大更显著。

### 3.4 温度的影响

空隙率 6.5% 时温度对流速的影响见图 3。由图 3 可知:在其他条件相同时,渗流流速随着温度的升高而增大。水压 0.3 MPa、轴压 0.7 MPa 作用下,空隙率 6.5% 的试件在 5、40、60 °C 时的渗流流速分别为 15 °C 时的 0.52、2.61、8.52 倍,空隙率 8.2% 的试件在 5、40、60 °C 时的渗流流速分别为 15 °C 时的 0.39、2.04、4.64 倍。水压 0.3 MPa、轴压 1.1 MPa 作用下,空隙率 6.5% 的试件在 5、40、60 °C 时的渗流流速分别为 15 °C 时的 0.58、2.65、8.39 倍,空隙率 8.2% 的试件在 5、40、60 °C 时的渗流流速分别为

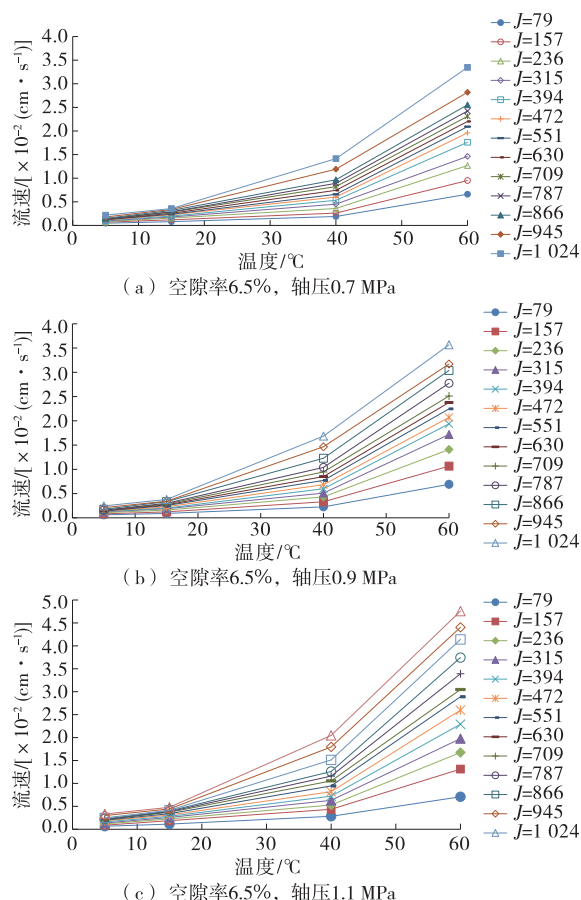


图 3 温度对流速的影响(空隙率 6.5%)

15℃时的0.70、2.40、4.96倍。水压0.7 MPa、轴压1.1 MPa作用下,空隙率6.5%的试件在5、40、60℃时的渗流流速分别为15℃时的0.72、4.78、10.48倍,空隙率8.2%的试件在5、40、60℃时的渗流流速分别为15℃时的0.70、2.87、5.80倍。温度对沥青

砼内部渗流流速的影响很大,这种影响随着空隙率和水压的增大更显著。

### 3.5 轴压的影响

空隙率6.5%时轴压对流速的影响见图4。由图4可知:在其他条件相同时,随着轴压的增加,渗

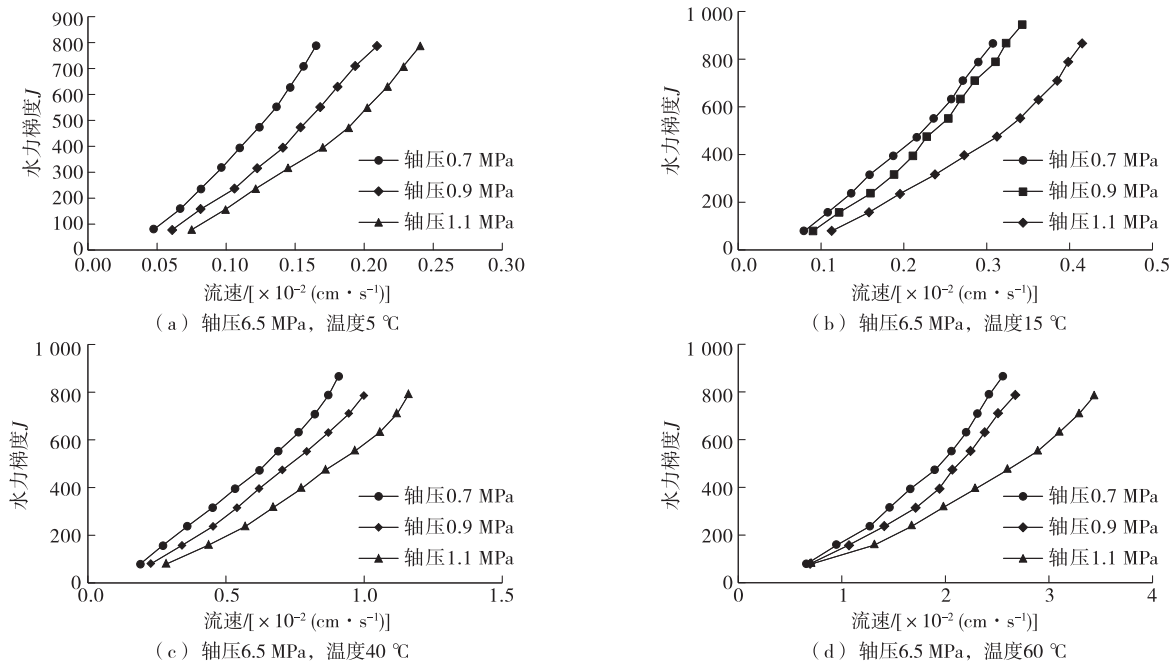


图4 轴压对流速的影响(空隙率6.5%)

流流速有所增大。15℃、水压0.3 MPa时,空隙率6.5%的试件在轴压0.9和1.1 MPa作用下的渗流流速分别为轴压0.7 MPa作用下的1.01、1.38倍,空隙率8.2%的试件在轴压0.9和1.1 MPa作用下的渗流流速分别为轴压0.7 MPa作用下的1.02、1.06倍。15℃、水压0.7 MPa时,空隙率6.5%的试件在轴压0.9和1.1 MPa作用下的渗流流速分别为轴压0.7 MPa作用下的1.13、1.32倍,空隙率8.2%的试件在轴压0.9和1.1 MPa作用下的渗流流速分别为轴压0.7 MPa作用下的1.06、1.11倍。60℃、水压0.7 MPa时,空隙率6.5%的试件在轴压0.9和1.1 MPa作用下的渗流流速分别为轴压0.7 MPa作用下的1.10、1.35倍,空隙率8.2%的试件在轴压0.9和1.1 MPa作用下的渗流流速分别为轴压0.7 MPa作用下的1.08、1.26倍。与水压、温度、空隙率相比,轴压对沥青砼内部渗流流速的影响相对较小。

## 4 结论

根据渗透试验结果,沥青砼AC-13试件内渗流流速随着试件空隙率和试验水压、轴压、温度的增

大而增大,其中空隙率、水压和温度对试件渗流流速的影响显著,轴压的影响很小。在试验范围内,增大水压、温度和空隙率可分别使渗流流速增大2.8~4.9、0.4~10.5、22.8~51.3倍,增大轴压仅使渗流流速增加1.01~1.38倍。高流速动水将对沥青混合料形成过大的冲击作用,会导致沥青路面水损害。因此,应重视和加强高温重载下沥青砼水损害的防治措施,包括严格控制沥青砼空隙率。

### 参考文献:

- [1] 郑木莲.多孔混凝土的渗透系数及测试方法[J].交通运输工程学报,2006,6(4).
- [2] 魏鹏克.动水压力作用下沥青混凝土路面破坏研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
- [3] 冯德成,宜军艳,王东升.沥青混合料渗水特性的试验研究[J].建筑材料学报,2010,13(2).
- [4] 高俊奇,盛余祥,张世铎,等.动水压力作用下沥青路面渗水量影响分析[J].南京航空航天大学学报,2013,45(2).
- [5] 高俊奇,盛余祥,徐宝艳,等.沥青混合料动静态渗透性

(下转第145页)

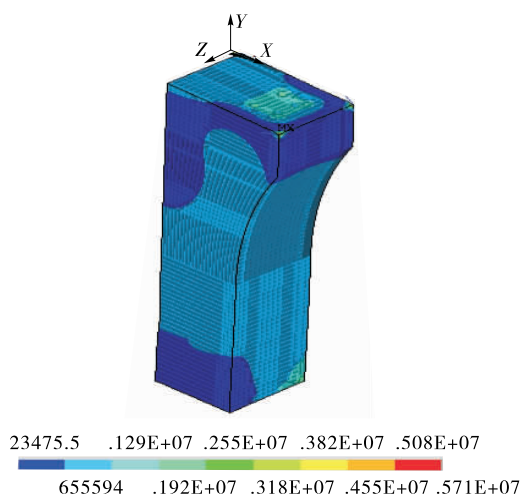


图8 桥墩应力云图(单位:Pa)

束作用,通过 ANSYS 建立有限元模型(见图 7)。模型的收敛精度采用缺省设置,通过不断调整网格密度和子步数,经计算收敛后得到等效静力作用下桥墩的应力与位移。图 8 为桥墩的应力云图。

从图 8 可看出:在等效静力作用下,桥墩最大应力为 5.71 MPa,最小为 0.023 MPa。桥墩所用砼为 C30,砼均处于弹性阶段。

位移计算结果表明:在施加荷载的方向上,桥墩施加等效静力区域的最大位移为 0.09 mm,合力点的位移为 0.08 mm。

## 6 结论

该文初步讨论了车辆与桥墩发生碰撞后桥墩应力与位移的变化规律,主要结论如下:1) 桥墩在车辆冲击力作用下,被撞区域的应力随着时间的推移而增大,达到最大值后又随着时间的增加而减小,体现出砼弹性阶段的特点。但某些区域砼的应力极速增大后,随着时间的推移基本保持不变,这部分砼已由弹性阶段进入塑性阶段,符合砼的弹塑性规律。2) 与应力类似,在桥墩被撞的某些区域,节点位移达到某一值后呈现上下波动的规律,数值不断减小,最终趋于零,体现出砼弹性阶段的特点。但在某些区域,节点位移迅速增大达到某值后,随着时间的推移基本保持不变,这部分砼已由弹性阶段进入塑性

阶段,同样符合砼的弹塑性规律。3) 将桥墩在车辆冲击荷载和规范给出的等效静力作用下的应力与位移进行比较,等效静力作用下桥墩的应力与位移远小于前者。而规范提供的撞击力偏小,在现实状态中可能导致结构物破坏。

中国现行规范仅给出了撞击力的大小与作用高度,并未给出动态撞击力的计算方法。显然,车辆类型、速度及结构物的形状、材料组成等因素与之有关,需进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 马祥禄.跨线桥梁在超高车辆撞击下的动态响应分析[D].北京:北京工业大学,2009.
- [2] Chopra A K.Dynamics of structures:theory and applications to earthquake engineering [M]. 2th Edition. Prentice-Hall,2000.
- [3] Avinash S Joshi,Laxmikant M Gupta.A simulation study on quantifying damage in bridge piers subjected to vehicle collisions[J].International Journal of Advanced Structural Engineering,2012,4.
- [4] Sherif El-Tawil,Edward Severino,Priscilla Fonseca.Vehicle collision with bridge piers[J].Journal of Bridge Engineering,2005,10(3).
- [5] 徐林枫.车辆撞击下桥墩的撞击力和墩身的应变研究[D].北京:北京交通大学,2014.
- [6] 王泽鹏,胡仁喜,康士廷,等.ANSYS13.0/LS-DYNA 非线性有限元分析实例指导教程[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [7] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
- [8] TB 10002.1—2005,铁路桥涵设计基本规范[S].
- [9] AASHTO LRFD bridge design specifications,6th Edition[S].
- [10] 段敏,王银辉,袁伟东.船舶撞击桥梁分析方法探讨[J].公路与汽运,2015(6).
- [11] 王银辉,袁伟东,张存辉,等.船桥碰撞的质量—弹簧等效模型研究[J].公路与汽运,2016(1).
- [12] 张存辉.基于船舶等效模型的船桥碰撞分析[D].重庆:重庆交通大学,2014.

收稿日期:2017—02—16

(上接第 64 页)

能研究[J].公路交通科技,2014,31(5).

- [6] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

- [7] 傅搏峰,周志刚,陈晓鸿,等.沥青路面水损害疲劳破坏过程的数值模拟分析[J].郑州大学学报:工学版,2006,27(1).

收稿日期:2017—03—09