

文章编号:1000-582X(2013)02-091-05

GA 混凝土高温粘弹变形的非线性本构模型

张顺先¹,张肖宁¹,魏建明²,刘福胜¹,张吉庆¹

(1. 华南理工大学 土木交通学院,广东 广州 510640;2. 重庆交通大学 土木建筑学院,重庆 410621)

摘要:采用改进的 Burgers 模型推导出 GA 混凝土高温变形性能的粘弹性本构模型,并通过动态贯入度试验(DPT)回归改进的 Burgers 模型参数及其验证模型的适用性和可靠性。研究结果表明,该模型从本质上揭示模型参数和试验参数对 GA 高温变形的影响规律,可以有效地预测 GA 高温条件下永久变形的变化规律;采用 DPT 能较准确地反映 GA 混凝土在车辆荷载作用下的实际受力状况,较现有的评价方法有实质性改进;通过在 50 °C 和 60 °C 条件下的 DPT 试验可知,GA 混凝土的高温变形性能对加载时间、温度较敏感,随着荷载作用时间延长和外界环境温度的升高,其变形速率和永久变形量也随着增大。

关键词:GA 混凝土;粘弹性本构模型;高温变形;动态贯入度(DPT)

中图分类号:U414.03

文献标志码:A

Nonlinear constitutive model research of Guss Asphalt Concrete High Temperature Viscolastic Deformation Based on Dynamic Penetration Test

Zhang Shunxian¹, Zhang Xiaoning¹, Wei Jianming², Liu Fusheng¹, Zhang Jiqing¹

(1. College of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. College of Civil Engineering and Construction, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 410621, China)

Abstract: We get the viscoelastic constitutive model of high temperature deformation property about Guss Asphalt (GA) concrete used on the improved Burgers model, through Dynamic Penetration Test (DPT) to regress improved Burgers model parameters, verify model's applicability and reliability. The result shows that this model can reveal influent rule of model parameters and experimental parameters on high-temperature deformation of GA, also can predict the permanent deformation variation effectively under high temperature, DPT used can reflect the GA actual stress condition under the vehicle load more accurately, the high temperature deformation property of GA is sensitive to load time and temperature by DPT test under 50 °C and 60 °C, the deformation rate and permanent deformation are increasing with load time extension and external environment temperature increased.

Key words: guss asphalt concrete; viscoelastic constitutive model; high temperature deformation; dynamic penetration test

收稿日期:2012-09-18

基金项目:国家重大科技支撑计划资助项目(2011BAG07B03);国家自然科学基金资助项目(51038004)

作者简介:张顺先(1984-),男,博士研究生,主要从事桥面铺装、路面结构材料研究,(E-mail)shunxian22@126.com。

由于浇注式沥青(Guss Asphalt)混凝土具有抗低温、疲劳开裂性能好,钢板具有良好的粘结性能和变形协调性能等特点,在我国钢桥面铺装中得到大面积应用^[1-3]。但由于浇注式沥青混凝土自身的组成结构和使用条件的特点,在实际使用中往往会表现出严重的车辙情况^[4-5],没有发挥出应有的工程特性。现有的车辙模型预估方法(经验模型与力学—经验模型)^[6-7]已不适合评价 GA 混凝土的高温性能,Huang 等^[8]采用三维数值模拟手段对普通混凝土高温永久变形进行了非线性模型研究,Louay 等^[9-10]采用非线性手段对重复荷载下的混凝土变形进行了相关研究,但 GA 混凝土组成结构有别于普通沥青混凝土,已有的研究手段不完全适合 GA 混凝土的相关研究。Reinhardt 等^[11]对 GA 混凝土的高温蠕变性能进行模型研究,但该模型建立的基础是在静态荷载作用下,并不符合实际运行状况。Hanzik V 等^[12]对持续动态加载下的 GA 混凝土的力学性能进行过研究,但未考虑温度对其性能的影响。针对 GA 混凝土的变形特性,必需找到一种符合其永久变形规律的模型。文中推导出适用于 GA 的粘弹性力学模型;采用动态贯入度试验 DPT(dynamic penetration test)来验证 GA 混凝土永久变形性能,并根据试验结果验证了模型的适用性和可靠性;从本质上揭示模型参数 GA 永久变形的影响规律,具有重大的工程意义。

1 浇注式沥青混凝土在周期性半矢正弦脉冲荷载作用下的本构关系及其粘弹性力学模型

目前,被认为能够较好地模拟沥青混合料高温变形规律的粘弹性力学模型为“四单元五参数”力学模型,如图 1 所示。

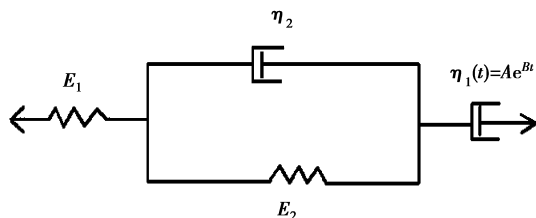


图 1 改进的“四单元五参数”Burgers 模型

该模型将 Burgers 模型中表征材料粘性流动变形特性的外部粘壶进行非线性修正^[13],其粘度为 $\eta_1(t) = Ae^{Bt}$, $\eta_1(t)$ 为修正模型中外部粘壶的粘度, A 、 B 均为粘壶的参数, t 为试验时间。该修正的

Burgers 模型加载期的蠕变柔量 $J(t)$ 为

$$J(t) = \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1 - e^{-Bt}}{AB} + \frac{1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2}t}}{E_2} \right]$$

则加载期蠕变方程为 $\epsilon(t) = \sigma \cdot J(t)$, 将蠕变柔量 $J(t)$ 带入得

$$\epsilon(t) = \sigma \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1 - e^{-Bt}}{AB} + \frac{1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2}t}}{E_2} \right], \quad (1)$$

其中: E_1 、 η_2 、 E_2 为模型参数; σ 为试验时所施加的应力。该修正的 Burgers 模型是在恒定荷载蠕变试验条件下推导出来的,该式可以用来分析应力水平、荷载作用时间及加载次数对沥青混合料变形规律的影响。例如,在其它条件不变的情况下,沥青混合料的变形随加载时间和加载次数的增加而逐渐增大;同理,在周期性荷载的作用下,所施加的应力大小对沥青混合料的变形也有较明显的影响。而在路面实际运行过程中,车辆是间歇式动态脉冲加载的,对于动载作用下的沥青混合料变形力学性能不能采用静载下的蠕变模型进行模拟。因此需要重新推导动载条件下的变形能力学模型。

浇注式沥青混凝土动态贯入度试验是采用动态半矢正弦脉冲加载方式来模拟路面的实际使用情况,对于 1 个动态半矢正弦波而言,1 个周期内加载时间为 $T = t_1 + t_2$, 其中脉冲持续时间 $t_1 = 0.2$ s, 持续加载时间 $t_2 = 1.5$ s。周期性半矢正弦波脉冲式加载如图 2 所示。1 个半正弦波荷载可以定义为分段函数:

$$\sigma(t) = \begin{cases} (\sigma_0 - \sigma_u) \sin \frac{\pi}{t_1} t + \sigma_u & 0 \leq t \leq T_1 \\ \sigma_u & T_1 \leq t \leq T \end{cases}$$

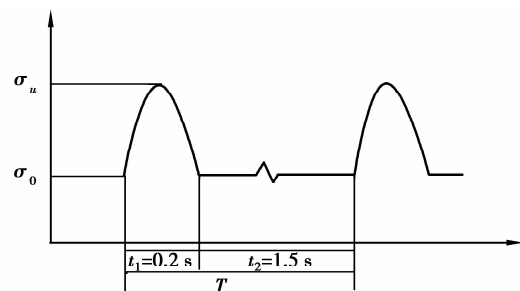


图 2 周期性半矢正弦波脉冲式加载示意图

按照应力冲量等效的原则^[14],将动态半矢正弦波荷载转化为静态荷载,等效换算的方法是动态荷载波形所包围的面积与静态荷载所包围的面积相等,即

$$\int_0^{t_1} [(\sigma_0 - \sigma_u) \sin \frac{\pi}{t_1} t + \sigma_u] dt = \sigma_1 t_1$$

通过解微分方程可得

$$\sigma_1 = \sigma_r + \frac{2}{\pi}(\sigma_0 - \sigma_r)$$

通过该种原则的变换可将动态脉冲荷载的作用转化为静态荷载的作用,这样就可以把材料在动态脉冲荷载作用下的变形近似的转换成在静载作用下的材料变形。再根据 Boltzman 线性叠加原理,对不同时间下荷载所产生的应变简单线性叠

$$\begin{aligned} \epsilon(t_0 + t) &= \sigma_c \left[\frac{1}{E_1}(t - t_0) + \frac{1}{AB}(t - t_0) - \frac{1}{AB^2}e^{-B(t-t_0)} + \frac{1}{E_2}(t - t_0) + \frac{1}{AB} \frac{\eta_2}{E_2} e^{-\frac{E_2}{\eta_2}(t-t_0)} \right] \\ \epsilon(t_0 + t) &= \begin{cases} \sigma_{c1} \left[\frac{1}{E_1}(t - t_0) + \frac{1}{AB}(t - t_0) - \frac{1}{AB^2}e^{-B(t-t_0)} + \frac{1}{E_2}(t - t_0) + \frac{1}{AB} \frac{\eta_2}{E_2} e^{-\frac{E_2}{\eta_2}(t-t_0)} \right] \\ \sigma_{c2} \left[\frac{1}{E_1}(t - t_0) + \frac{1}{AB}(t - t_0) - \frac{1}{AB^2}e^{-B(t-t_0)} + \frac{1}{E_2}(t - t_0) + \frac{1}{AB} \frac{\eta_2}{E_2} e^{-\frac{E_2}{\eta_2}(t-t_0)} \right] \end{cases} \\ \sigma_{c1} &= \sigma_1 t_1 + nT \leq t \leq t_2 + nT \\ \sigma_{c2} &= \sigma_0 t_2 + nT \leq t \leq (n+1)T \end{aligned}$$

设所施加的荷载从 t_0 时刻开始加载。荷载作用周期为 T , $T = t_1 + t_2$, 荷载作用 N 次后所产生的变形为

$$\begin{aligned} \epsilon(t_0 + NT) &= \sigma_c \left[\frac{1}{E_1}(NT - t_0) + \frac{1}{AB}(NT - t_0) - \frac{1}{AB^2}e^{-B(NT-t_0)} + \frac{1}{E_2}(NT - t_0) + \frac{1}{AB} \frac{\eta_2}{E_2} e^{-\frac{E_2}{\eta_2}NT-t_0} \right] \\ \sigma_{c1} &= \sigma_1, t_1 + nT \leq t \leq t_2 + nT, \\ \sigma_{c2} &= \sigma_0, t_2 + nT \leq t \leq (n+1)T. \quad (3) \end{aligned}$$

通过式(3)可得出浇注式沥青混合料的变形与加载作用次数的关系,可以用来分析应力水平、荷载作用时间对 GA 混合料变形规律的影响。

2 浇注式沥青混凝土高温性能试验

2.1 试验方法与装置

浇注式沥青混凝土的高温性能主要由 2 种试验方法来评价:贯入度试验和车辙试验,其中贯入度试验有静态贯入度试验和动态贯入度试验。

动态贯入度试验是轴荷载模拟动荷载作用来测定 GA 高温抗变形性能的一种试验方法,试验采用圆柱体试件($\Phi 150$ mm、高 60 mm),荷载脉冲是一种在时间上按正矢半正弦波变化的荷载,见图 2 所示。压头采用平压头,对试件施加压力脉动荷载(最大荷载 0.875 kN,最小荷载 0.2 kN),以应力进行控制的施加荷载装置,在荷载 > 0.5 kN 测试范围,精度为 $\pm 1\%$,在荷载 ≤ 0.5 kN 范围,精度为 $\pm 5\%$ 。在整个试验期间必须保持给定的荷载-时间曲线。试验装置如图 3 所示,为澳大利亚 IPC 公司生产的

加。假设在 t_0 时刻开始对沥青混合料加载,加载时间为 t ,且 $t > T$ (1 个周期),则在 $t + t_0$ 时刻混合料蠕变方程 $\epsilon(t_0 + t) = \int_{t_0}^t \sigma_c J(t) dt$,代入式(1)得

$$\int_{t_0}^t \sigma_c \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1 - e^{-Bt}}{AB} + \frac{1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2}t}}{E_2} \right] dt, \quad (2)$$

对式(2)积分得

$$\begin{aligned} \epsilon(t_0 + t) &= \sigma_c \left[\frac{1}{E_1}(t - t_0) + \frac{1}{AB}(t - t_0) - \frac{1}{AB^2}e^{-B(t-t_0)} + \frac{1}{E_2}(t - t_0) + \frac{1}{AB} \frac{\eta_2}{E_2} e^{-\frac{E_2}{\eta_2}(t-t_0)} \right] \\ \epsilon(t_0 + t) &= \begin{cases} \sigma_{c1} \left[\frac{1}{E_1}(t - t_0) + \frac{1}{AB}(t - t_0) - \frac{1}{AB^2}e^{-B(t-t_0)} + \frac{1}{E_2}(t - t_0) + \frac{1}{AB} \frac{\eta_2}{E_2} e^{-\frac{E_2}{\eta_2}(t-t_0)} \right] \\ \sigma_{c2} \left[\frac{1}{E_1}(t - t_0) + \frac{1}{AB}(t - t_0) - \frac{1}{AB^2}e^{-B(t-t_0)} + \frac{1}{E_2}(t - t_0) + \frac{1}{AB} \frac{\eta_2}{E_2} e^{-\frac{E_2}{\eta_2}(t-t_0)} \right] \end{cases} \\ \sigma_{c1} &= \sigma_1 t_1 + nT \leq t \leq t_2 + nT \\ \sigma_{c2} &= \sigma_0 t_2 + nT \leq t \leq (n+1)T \end{aligned}$$

UTM-100,试验温度为 50°C 或 60°C ,动态贯入深度为经过某一确定的荷载动冲次数之后在压头之下所记录下来的竖向变形。

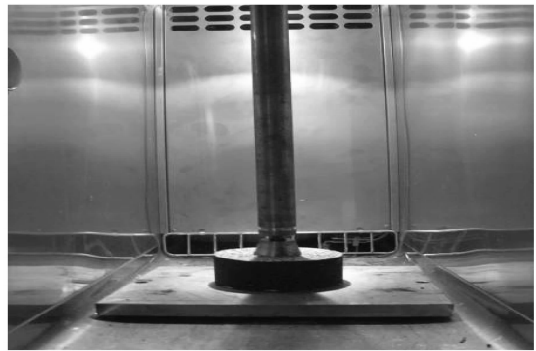


图3 动态贯入度试验装置

静态贯入度试验主要利用“贯入度及增量试验”来评价 GA 混凝土的力学性能,在德国静态贯入度试验温度为 40°C ,考虑到我国南方地区高温多雨实际气候情况,一般采用 60°C 作为试验的温度,其执行的技术标准为贯入度 $1 \sim 4$ mm,贯入度增量小于 0.3 mm。相比动态贯入度试验装置而言,静态贯入度所施加的荷载是恒定的,并不能很好地反映铺装结构在实际行车荷载作用下的受力状态。静态贯入度试验装置如图 4 所示。车辙试验按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》JTJ 052—2000 T0719 来进行。此试验只是将验证性指标作为参考,我国规范中规定的对沥青混合料动稳定度的要求并不适用于 GA 混凝土。在日本,其动稳定度的技术要求 (≥ 300 次/mm),远低于我国规范相应的要求值,但使用效果较好,这说明仅靠车辙试验是不能完全评价 GA 沥青混凝土的高温性能。综上所述,笔者认

为采用动态贯入度试验评价 GA 混凝土的高温性能是合适的。

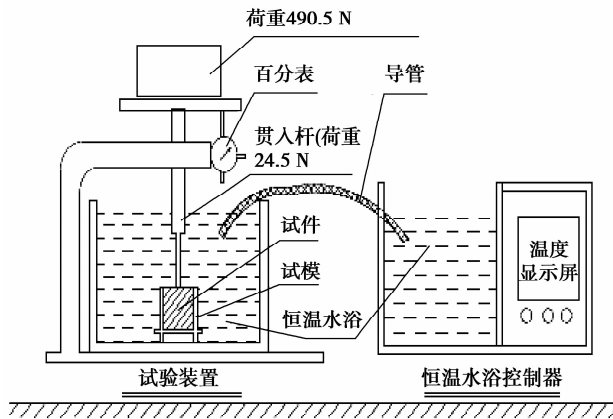


图 4 静态贯入度试验装置

2.2 试验材料基本性能和试验配比

在浇注式沥青混凝土动态贯入度试验 DPT 中, 所采用的沥青为 SK 公司生产的聚合物改性沥青, 其具体性能指标见表 1。

表 1 聚合物改性沥青主要技术指标

针入度 (25 °C, 100 g, 5 s) 0.1/mm	软化点/ °C	延度 (25 °C)/ (135 °C)/ (25 °C)/ cm	粘度 Pa·s	密度 (g·cm ⁻³) (25 °C)/%	弹性 恢复
28	92	73	5.1	1.043	92

试验中所用的集料为江苏茅迪石料场生产的玄武岩, 填料选用石灰石矿粉。采用的浇注式沥青混凝土配比见表 2。

表 2 浇注式沥青混凝土配合比

孔径/mm	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率	100	71.1	54.1	44.8	40.0	35.1	31.4	26.0

试验时将拌和锅的温度加热到 220~240 °C 左右, 将沥青混合料拌和均匀后, 倒入到事先预热的试模当中, 并用插刀进行捣实, 使其空隙率小于 1%。将试件放在室温下自然冷却, 然后进行脱模, 再放入到准备好的保温箱中进行保温。利用澳大利亚 IPC 公司生产的 UTM-100 多功能试验机进行 50 °C 和 60 °C 条件下的动态贯入度试验。

3 试验结果与模型的验证性分析

为了验证修正的 Burgers 模型所推导出的本够模型与实际结果的吻合性, 对浇注式沥青混凝土在 UTM-100 试验机上进行动态贯入度试验, 用以验证模型的可靠性和适用性, 试验温度分别是 50 °C 和 60 °C。图 5 为试验时实测的应力应变图。

利用公式(3)对所得出的试验数据运用数学迭代手段, 按照最小二乘法原理并结合 Origin 软件进行参数拟合, 拟合结果如表 3 所示。通过表 3 模型拟合结果可以看出, 随着温度的升高, E_1 、 E_2 、 A 、 η_2 4 个参数的值均是随着温度的升高而降低, 而参数 B 是随着温度的升高而增大, 从修正的 Burgers 模型来看, 浇注式沥青混凝土高温变形主要与 η_1 有关, 随着温度的升高 η_1 逐渐减少, 变形逐渐增大。在式 $\eta_1(t) = Ae^{Bt}$ 中 A 反映了串联粘壶粘性的大小, B 反映串联粘壶粘度的非线性增长速率, 随着温度的升高, 沥青胶浆的粘度降低, 从而导致沥青混合料内部

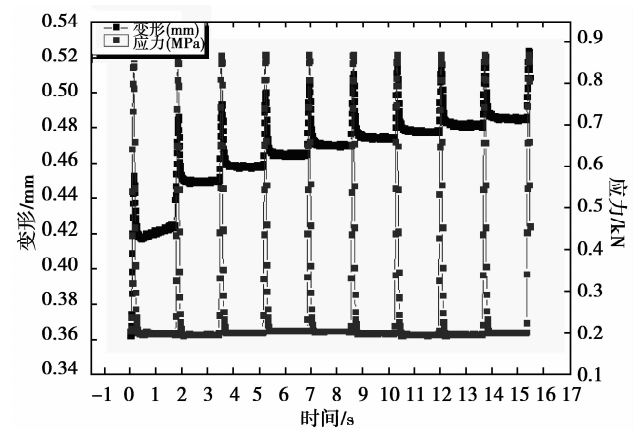


图 5 周期性半正弦脉冲荷载作用下的应力应变实测图

粘聚力的下降, 由摩尔-库伦理论 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ 可知, 当其它条件不变时, C 值越小即沥青混合料的黏结力越低, 其抗剪强度愈小, 因而更容易产生变形。而 E_2 、 η_2 组成的 Kelvin 模型也会产生一些永久变形, 但由于弹簧 2 的存在, Kelvin 模型的变形有一部分可以延迟恢复, 而 η_2 反映的是并联粘壶的粘性, 由于 η_2 的延滞作用, 其变形发展也会逐渐减慢直到最后变形趋于稳定, E_1 、 E_2 分别表示了串、并联弹簧的弹性模量, 反映的是变形的恢复能力, 在高温条件下, 沥青混合料可恢复的粘性变形量减少, 因此弹簧的弹性模量也相应减少^[15]。这些模型参数的变化

可以说明浇注式沥青混凝土(GA)在高温的条件下会产生较大的不可恢复变形。

表 3 模型参数汇总表

试验温度/°C	应力大小	$E_1/(10^3 \text{ MPa})$	$E_2/(10^2 \text{ MPa})$	$A/(10^4, \text{ s})$	$B/(10^{-6}, \text{ s}^{-1})$	$\eta_2 \cdot \text{s}$
50	σ_u	1.682	4.169	7.631	1.738	283.460
	σ_1	1.854	4.538	5.166	1.232	279.536
60	σ_u	1.294	3.358	4.899	2.963	13.452
	σ_1	1.475	3.994	3.944	1.758	27.856

图 6 表示在不同温度下测得的实验数据与运用模型进行拟合得到数据,粗点的连线表示实测数据,连续曲线表示的是用模型拟合出的曲线。由图 4 结果可以看出,随着荷载作用次数的增加,浇注式沥青混凝土(GA)的动态贯入度逐渐增大,即所产生的永久变形越大;同时,GA 高温变形性能随温度的影响也较大,从图 6 可知,当试件在加载 3 000 次时,60 °C 条件下动态贯入的值约为 1.237 mm,50 °C 条件下动态贯入度值约为 0.819 mm,同理可知在其它加载次数条件下,试件在 60 °C 温度下的永久变形远大于在 50 °C 温度下的变形,且曲线的斜率随着温度的升高而变大,说明随着温度的升高变形速率也逐渐加大。由以上分析可知,温度对 GA 的变形性能影响显著,即 GA 的高温变形性能随着温度的升高而逐渐加大。从图 6 可以看出,运用粘弹性理论所推导出的力学模型和实测试验数据之间具有很好的拟合性,由拟合结果可知,相关系数达到 0.98 之上。说明所推导出的力学模型能够很好的描述 GA 在高温下的变形规律,为 GA 的耐高温性能设计提供力学模型和理论计算依据。

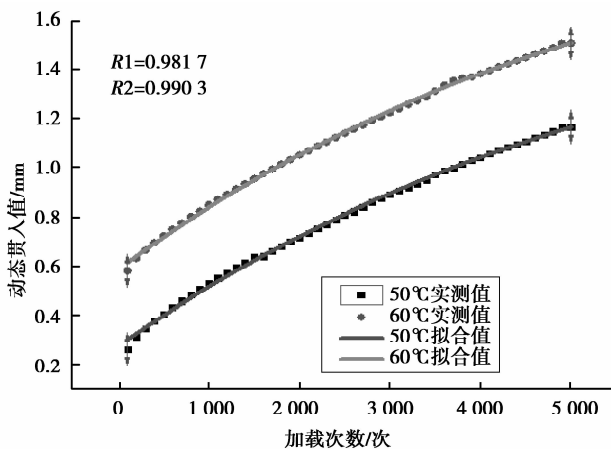


图 6 实测应变和模型拟合曲线

4 结 论

1) 采用改进的 Burgers 模型能够较全面准确地

反映浇注式沥青混凝土(GA)在高温下的变形性能。采用数学迭代法进行参数拟合,由拟合结果可知, E_1 、 E_2 、 A 、 η_2 4 个参数的值均是随着温度的升高而降低,而参数 B 是随着温度的升高而增大,该模型从本质上揭示了模型参数和试验参数对 GA 高温变形的影响规律;从拟合结果可以看出,相关系数大于 0.98,说明该模型能够准确的描述高温条件下 GA 在周期性半正弦脉冲荷载作用下的永久变形规律。

2) 由于浇注式沥青混凝土(GA)的成型机理和内部组成结构有别于普通的沥青混凝土,所以采用动态贯入度试验 DPT 能够较准确的反映 GA 在车辆荷载作用下的实际受力状况,较静态贯入度试验和车辙试验有很大的改进和提高。

3) 浇注式沥青混凝土的变形性能对加载时间、温度较敏感,随着荷载作用时间延长和外界环境温度的升高,GA 变形速率和永久变形性能也随着增大,在进行 GA 设计时,要着重考虑交通荷载作用情况和环境的影响。

参考文献:

- [1] 张力,陈仕周. 钢桥面铺装技术的研究与发展[J]. 公路, 2001(1):2-3.
ZHANG Li, CHEN Shizhou. Research and development of steel deck pavement technology [J]. Highway, 2001(1):2-3.
- [2] 樊叶华,黄卫,钱振东,等. 大跨径钢桥面浇注式沥青混凝土铺装应用研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2006,4(4):51-56.
FAN Yehua, HUANG Wei, QIAN Zhendong, et al. Application study of gussasphalt concrete pavement of long span steel deck [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2006, 4(4):51-56.
- [3] 皮育晖,陈仕周. 浇注式沥青混凝土在桥面铺装中的应用[J]. 中外公路,2006, 26(1):155-158.
PI Yuhui, CHEN Shizhou. The application of gussasphalt concrete used on bridge deck pavement [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2006, 26(1): 155-158.

- interfacial fluid flow[J]. *Computers & Fluids*, 2012, 55(15):70-84.
- [7] Wan D C, Turek S. Fictitious boundary and moving mesh methods for the numerical simulation of rigid particulate flows [J]. *Journal of Computational Physics*, 2007,222(1):28-56.
- [8] Iwaniec T, Kovalev L V, Onninen J. The harmonic mapping problem and affine capacity[J]. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh: Section A Mathematics*, 2011, 141(5):1017-1030.
- [9] Li X, Guo X H, Wang H Y, et al. Meshless harmonic volumetric mapping using fundamental solution methods[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2009,6(3):409-422.
- [10] Barrera-Sánchez P, Noda L C, Francisco J, et al. Adaptive discrete harmonic grid generation [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2009, 79(6),1792-1809.
- [11] 李阳贵. 移动网格方法在非定常渗流计算中的应用[D]. 湖南:南华大学硕士学位论文,2010.
- [12] Hamilton R S. Harmonic maps of manifolds with boundary; lecture notes in mathematics [M]. Berlin: Springer-Verlag,1975.
- [13] Schoen R, Yau S T. On univalent harmonic maps between surfaces[J]. *Inventiones Mathematicae*, 1978, 44(3): 265-278.
- [14] Cao W M, Huang W Z, Russell R D. An error indicator monitor function for an r-adaptive finite element method[J]. *Journal of Computational Physics*, 2001,170(2): 871-892.
- [15] 王礼广,蔡放,熊岳山. 一种新的基于方向导数的二维自适应网格生成算法[J]. *国防科技大学学报*, 2007, 29(6):126-130.
- WANG Liguang, CAI Fang, XIONG Yueshan. A new algorithm of mesh generation for 2-D adaptive mesh based on directional derivatives[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2007, 29 (6): 126-130.
- [16] Cao W M, Huang W Z, Russell R D. Comparison of two-dimensional r-adaptive finite element methods using various error indicators[J].

(编辑 陈移峰)

~~~~~

(上接第95页)

- [4] 张磊. 江阴大桥钢桥面铺装病害研究[D]. 南京:东南大学硕士学位论文,2004.
- [5] 李智, 钱振东. 典型钢桥面铺装结构的病害分类分析[J]. *交通运输工程与信息学报* 2006,4(2):110-115.  
LI Zhi, QIAN Zhendong. Disease analysis and classification of the representative pavements on steel deck [J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2006, 4 (2) :110-115.
- [6] Smith H R, Jones C R. Bituminous surfacings for heavily trafficked roads in tropical climates[J]. *Proceedings of the ICE: Transport*, 1998, 129(1): 28-33.
- [7] Oscarsson E. Evaluation of the mechanistic-empirical pavement design guide model for permanent deformations in asphalt concrete[J]. *The International Journal of Pavement Engineering*, 2011, 12(1): 1-12.
- [8] Huang C W, Rashid K, Abu A R, et al. Three-dimensional simulations of asphalt pavement permanent deformation using a nonlinear viscoelastic and viscoplastic model [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011, 23(1): 56-68.
- [9] Mohammad L, Herath A, Rasoulia M, et al. Laboratory evaluation of untreated and treated pavement base materials: repeated load permanent deformation test[J]. *Transportation Research Record*, 2006, 1967(1): 78-88.
- [10] Peng M J, Xu Z H. Research on nonlinear constitutive relationship of permanent deformation in asphalt pavements[J]. *Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy*, 2006, 49(6): 671-682.
- [11] Hanzik V, Luxemburk F. Properties of Mastic Asphalt at the Continuous Loading[C]. *Bitumen*:9-13, 1978.
- [12] Reinhardt J. Creep Tests on Mastic Asphalt[M]. [S. l.]: *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden*, 1973.
- [13] 徐世法. 表征沥青及沥青混合料高低温蠕变性能的流变学模型[J]. *力学与实践*, 1992(1):37-39.  
XU Shifa. Rheological model with characterization asphalt and asphalt mixture high low temperature creep properties[J]. *Mechanics and Practice*,1992(1):37-39.
- [14] 张裕卿,黄晓明. 重复荷载下沥青混合料永久变形的粘弹性力学模型[J]. *公路交通科技*, 2008,25(4):1-6.  
ZHANG Yuqing, HUANG Xiaoming. Viscoelastic mechanical model of permanent deformation of asphalt mixtures under repeated load[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2008, 25(4):1-6.
- [15] 张肖宁. 沥青与沥青混合料的粘弹性力学原理及应用[M]. 北京:人民交通出版社,2006.

(编辑 陈移峰)