



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107831076 B

(45)授权公告日 2019.11.01

(21)申请号 201710914745.2

(22)申请日 2017.09.30

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107831076 A

(43)申请公布日 2018.03.23

(73)专利权人 东南大学
地址 211189 江苏省南京市玄武区四牌楼2号

(72)发明人 马涛 崔凯 丁珣昊 赵永利
黄晓明

(74)专利代理机构 南京苏高专利商标事务所
(普通合伙) 32204
代理人 柏尚春

(51)Int.Cl.
G01N 3/20(2006.01)

(56)对比文件

CN 103630450 A,2014.03.12,
CN 104462843 A,2015.03.25,
CN 105115840 A,2015.12.02,
CN 102072840 A,2011.05.25,
CN 104499396 A,2015.04.08,
US 6799471 B1,2004.10.05,
朱厚江 等.新疆路面沥青混合料疲劳寿命
预估分析.《公路工程》.2017,

审查员 秦鲲

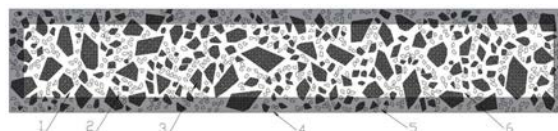
权利要求书3页 说明书5页 附图1页

(54)发明名称

一种控制应变加载模式下的沥青混合料仿真疲劳试验方法

(57)摘要

本发明公开了一种控制应变加载模式下的沥青混合料仿真疲劳试验方法,该试验方法通过对沥青砂浆进行疲劳试验获取沥青砂浆疲劳失效条件,再通过生成沥青混合料仿真试件进行疲劳试验输出疲劳表征变量,将输出表征变量与疲劳失效条件相对比,从而得出沥青混合料疲劳失效相关参数。本发明能够很好地模拟沥青混合料在进行四点弯曲疲劳试验时的受力状态,在获得沥青砂浆疲劳性能衰减规律的基础上,可任意改变粗集料含量实现沥青混合料疲劳过程的仿真模拟而不需要进行实际沥青混合料疲劳试验,解决了沥青混合料疲劳试验周期长,实验结果离散性大,试验成本高等问题,对于道路工程专业研究具有重要意义。



1. 一种控制应变加载模式下的沥青混合料仿真疲劳试验方法,包括以下步骤:

步骤1):获取沥青砂浆在与沥青混合料相同疲劳试验条件下的疲劳失效条件,具体步骤如下:

I、根据去除沥青混合料中粗集料后剩余细集料、矿粉与沥青质量之比例不变的原则,确定沥青砂浆的级配与油石比,制作沥青砂浆试件,并进行控制应变加载模式下的疲劳试验,实验条件与沥青混合料疲劳试验条件保持一致;根据沥青砂浆在与沥青混合料相同试验条件下的疲劳试验结果,获取相关力学参数以及各参数随疲劳加载次数的变化规律;

II、沥青砂浆力学本构模型与疲劳演化方程构建:设定沥青砂浆只有在受到拉应力时才会发生疲劳破坏,此时受到拉应力大小为 σ ,初始弯曲劲度模量为 E ,实时弯曲劲度模量为 \tilde{E} ,产生拉应变大小为 ε ,损伤大小为 D ,疲劳加载次数为 N ,根据损伤力学原理构建沥青砂浆含损伤本构模型如式(1):

$$\sigma = (1-D) E \varepsilon \quad (1)$$

构建控制应变加载模式下的沥青砂浆损伤演化方程如式(2):

$$\frac{dD}{dN} = a[\varepsilon(1-D)]^p \quad (2)$$

此时,沥青砂浆内损伤的计算方法为式(3):

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad (3)$$

式(2)中 a 、 p 为模型参数,需要通过拟合得到;

结合式(1)、(2)可得当加载次数为 N 时,沥青砂浆试件底面损伤大小如式(4):

$$D_c = 1 - [1 - (-p+1)a\varepsilon_c^p N]^{\frac{1}{p+1}} \quad (4)$$

式中: ε_c 为控制应变加载模式下疲劳试验中的所施加的应变大小, D_c 为相应荷载条件下加载次数为 N 时的损伤大小;

III、模型参数获取:根据步骤I中得到的沥青砂浆弯曲劲度随疲劳加载次数变化规律,通过式(3)计算得到损伤随疲劳加载次数变化规律,将此规律与式(4)进行拟合,得到式(2)与式(4)中参数 a 、 p ,并通过损伤大小与疲劳加载次数的变化规律判定沥青砂浆试件的疲劳失效条件;

步骤2):生成沥青混合料仿真试件,并按照与沥青砂浆疲劳试验相同的试验条件进行疲劳试验,具体步骤如下:

I、计算沥青混合料级配与空隙率:根据疲劳试验研究对象级配与空隙率要求,计算沥青混合料仿真试件中各档粗集料质量之比例,据此计算各档粗集料颗粒数量之比例以及空隙占试件总体积之比例;

II、生成沥青混合料仿真试件:以实际疲劳试验试件尺寸规格为基础,设定初始沥青混合料试件尺寸,根据试件尺寸,建立试件空间,首先将沥青砂浆填充在试件空间中,然后根据上述步骤I中计算得到的粗集料颗粒、空隙应占试件空间之比例计算得到该空间中各档粗集料颗粒数量以及空隙数量,将集料颗粒-空隙体系按照随机分布、互不重叠的原则继续填充到该试件空间中,将与之重叠的沥青砂浆部分剔除,生成沥青混合料初始试件,设定为

A;对试件A进行切割得到符合试验尺寸要求的沥青混合料仿真试件,设定为B;

III、按照实际疲劳试验中沥青混合料试件的受力状态,建立加载夹具与固定夹具,并与生成的沥青混合料仿真试件合并构建沥青混合料疲劳仿真试验系统;

IV、仿真疲劳试验控制应变加载模式实现:通过控制加载夹具垂直方向的位移,实现对沥青混合料仿真试件施加应变荷载;

V、疲劳表征变量输出:在每个加载周期末,将步骤1)中计算得到的a、p的值输入仿真试验系统用于计算疲劳表征变量大小并利用SDV变量实现输出;

VI、表征变量与沥青砂浆试件疲劳失效条件对比:若表征变量满足在步骤1)中的沥青砂浆疲劳试验中获得的疲劳失效条件则仿真疲劳试验结束;若不满足则继续进行疲劳加载。

2.根据权利要求1所述的一种控制应变加载模式下的沥青混合料仿真疲劳试验方法,其特征在于:所述步骤2)的I步骤中计算各档粗集料颗粒数量之比例具体方法如下:

设定各档粗集料在筛孔尺寸为 C_1 、 C_2 、 C_3 ... C_n 时通过率分别为 P_1 、 P_2 、 P_3 ... P_n ,可根据式(5)计算得到各档粗集料筛余百分比 S_1 、 S_2 、 S_3 ... S_n ,

$$\begin{aligned} S_1 &= 100 - P_1 \\ S_2 &= P_1 - P_2 \\ S_3 &= P_2 - P_3 \quad (5) \\ &\dots \\ S_n &= P_{n-1} - P_n \end{aligned}$$

设定所有粗集料颗粒粒径满足随机均匀分布且密度 ρ 相同,为计算各档粗集料颗粒数量之比例,将所有粗集料颗粒近似为球形,则各档粗集料单个颗粒体积可表示为:

$$[(C_1 + C_2)/2]^3 \times \frac{1}{6}\pi, [(C_2 + C_3)/2]^3 \times \frac{1}{6}\pi, [(C_3 + C_4)/2]^3 \times \frac{1}{6}\pi \dots [(C_n + C_{n+1})/2]^3 \times \frac{1}{6}\pi$$

每档粗集料颗粒的数量可表示为

$$\frac{S_1}{[(C_1 + C_2)/2]^3 \times \frac{1}{6}\pi\rho}, \frac{S_2}{[(C_2 + C_3)/2]^3 \times \frac{1}{6}\pi\rho}, \frac{S_3}{[(C_3 + C_4)/2]^3 \times \frac{1}{6}\pi\rho} \dots \frac{S_n}{[(C_n + C_{n+1})/2]^3 \times \frac{1}{6}\pi\rho}$$

由此可计算得到各档粗集料颗粒数量之近似比 $N_1:N_2:N_3:\dots:N_n$,计算方法如式(6):

$$N_1:N_2:N_3:\dots:N_n = \frac{S_1}{[(C_1 + C_2)/2]^3} : \frac{S_2}{[(C_2 + C_3)/2]^3} : \frac{S_3}{[(C_3 + C_4)/2]^3} : \dots : \frac{S_n}{[(C_n + C_{n+1})/2]^3}。$$

3.根据权利要求1所述的一种控制应变加载模式下的沥青混合料仿真疲劳试验方法,其特征在于:所述步骤1)的I步骤中生成沥青砂浆试件的具体方法如下:

利用沥青混合料马歇尔试验获得不同空隙率对应的不同油石比,根据去除沥青混合料中粗集料后剩余细集料、矿粉与沥青质量之比例不变的原则,确定沥青砂浆的级配与油石比;利用轮碾法或振动法成型沥青砂浆车辙板,待充分冷却后脱模,然后利用切割机对其进行切割,得到符合疲劳试验尺寸规格的沥青砂浆试件。

4.根据权利要求1所述的一种控制应变加载模式下的沥青混合料仿真疲劳试验方法,其特征在于:所述步骤1)的III步骤中,沥青砂浆试件的损伤大小随疲劳加载次数表现出三阶段变化规律,对三阶段中的第一与第二阶段进行拟合得到模型中a、p值,对比拟合曲线与实际曲线,将第三阶段实际曲线开始偏离拟合曲线时对应的加载次数定义为疲劳失效时的

加载次数,此时的疲劳失效损伤大小为步骤1)的III步骤中所述的疲劳失效条件。

5.根据权利要求4所述的一种控制应变加载模式下的沥青混合料仿真疲劳试验方法,其特征在于:所述步骤2)的步骤VI中,将步骤2) V步骤中输出的仿真试验疲劳加载次数为N时沥青混合料中沥青砂浆内损伤最大值与步骤1)的III步骤中得到的疲劳失效条件即疲劳失效损伤相比较,若疲劳失效损伤>损伤最大值,则认为沥青混合料仍没有发生疲劳失效,需要继续加载,若疲劳失效损伤<损伤最大值,则认为沥青混合料发生了疲劳失效,试验终止。

6.根据权利要求1所述的一种控制应变加载模式下的沥青混合料仿真疲劳试验方法,其特征在于:所述步骤2)的IV步骤中,通过控制加载夹具的垂直位移 y ,实现沥青混合料产生大小为 ε_t 的拉应变, y 的计算方法如式(7)所示:

$$y=0.472033304 \times \varepsilon_t \quad (7)。$$

一种控制应变加载模式下的沥青混合料仿真疲劳试验方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种疲劳试验方法,具体为一种控制应变加载模式下的沥青混合料仿真疲劳试验方法。

背景技术

[0002] 疲劳裂缝是沥青路面的主要病害形式之一,沥青混合料作为沥青路面的主要组成部分,其疲劳性能对沥青路面中疲劳裂缝的产生与发展具有重要影响。对于沥青混合料疲劳性能的研究,主要从两个方面进行:一是室外大型环道试验,这种试验方法具有实验结果准确,可直接应用等优点,但是试验时间成本与资金成本高,目前只有少数国家采用此方法;二是室内小型疲劳试验,这种试验方法试验周期相对较短,资金投入相对较低,但是实验结果离散性大,我国《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20-2011)规定,四点弯曲疲劳试验需进行3次以上的平行试验,以便对平行试验结果进行统计分析,并剔除提出异常结果。同时还规定若要获得一条完整的疲劳曲线应选择3个或3个以上的实验水平,且疲劳寿命次数宜涵盖几千次值几百万次的范围。这样就导致沥青混合料的四点弯曲疲劳试验的时间成本与资金成本大大提高。

[0003] 通过大量沥青混合料疲劳试验可以发现,疲劳裂缝往往产生在沥青砂浆结构中,而粗集料在整个疲劳过程中发生破坏的概率很小。因此,在沥青砂浆的疲劳性能研究的基础上对沥青混合料的疲劳性能进行研究,成为研究沥青混合料的疲劳破坏规律的一种新方法。

发明内容

[0004] 发明目的:本发明提出了一种控制应变加载模式下的沥青混合料仿真疲劳试验方法,通过该方法可以实现控制应变加载模式下沥青混合料四点弯曲疲劳试验仿真模拟,解决了沥青混合料四点弯曲疲劳试验离散性大,试验时间成本与资金成本高的问题,而且仿真试验过程中可以对沥青混合料仿真试件内部的各力学指标进行实时计算与监控。

[0005] 发明内容:一种控制应变加载模式下的沥青混合料仿真疲劳试验方法,具体步骤如下:

[0006] 步骤1):获取沥青砂浆在与沥青混合料相同疲劳试验条件下的疲劳失效条件,具体步骤如下:

[0007] I、利用沥青混合料马歇尔试验获得不同空隙率对应的不同油石比,根据去除沥青混合料中粗集料后剩余细集料、矿粉与沥青质量之比例不变的原则,确定沥青砂浆的级配与油石比。利用轮碾法或振动法成型沥青砂浆车辙板,待充分冷却后脱模,然后利用切割机对其进行切割,得到符合疲劳试验尺寸规格的沥青砂浆试件,并进行控制应变加载模式下的疲劳试验,实验条件与沥青混合料疲劳试验条件保持一致,根据沥青砂浆在与沥青混合料相同试验条件下的疲劳试验结果,得到应力、应变、弯曲劲度模量等力学指标随疲劳加载次数的变化规律。

[0008] II、沥青砂浆力学本构模型与疲劳演化方程构建：设定沥青砂浆只有在受到拉应力时才会发生疲劳破坏，此时受到拉应力大小为 σ ，初始弯曲劲度模量为 E ，实时弯曲劲度模量为 \tilde{E} ，产生拉应变大小为 ε ，损伤大小为 D ，疲劳加载次数为 N ，根据损伤力学原理构建沥青砂浆含损伤本构模型如式(1)：

$$[0009] \quad \sigma = (1-D) E \varepsilon \quad (1)$$

[0010] 构建控制应变加载模式下的沥青砂浆损伤演化方程如式(2)：

$$[0011] \quad \frac{dD}{dN} = a[\varepsilon(1-D)]^p \quad (2)$$

[0012] 此时，沥青砂浆内损伤的计算方法为式(3)：

$$[0013] \quad D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad (3)$$

[0014] 式(2)中 a 、 p 为模型参数，需要通过拟合得到。

[0015] 结合式(1)、(2)可得当加载次数为 N 时，沥青砂浆试件底面损伤大小如式(4)：

$$[0016] \quad D_c = 1 - [1 - (-p+1)a\varepsilon_c^p N]^{-\frac{1}{p+1}} \quad (4)$$

[0017] 式中： ε_c 为控制应变加载模式下疲劳试验中的所施加的应变大小， D_c 为相应荷载条件下加载次数为 N 时的损伤大小。

[0018] III、模型参数获取：根据步骤I中得到的沥青砂浆弯曲劲度随疲劳加载次数变化规律，通过式(3)计算得到损伤随疲劳加载次数变化规律，沥青砂浆试件的损伤大小随疲劳加载次数表现出三阶段变化规律，对三阶段中的第一与第二阶段变化规律与式(4)进行拟合，得到式(2)与式(4)中参数 a 、 p ；对比拟合曲线与实际曲线，将第三阶段实际曲线开始偏离拟合曲线时对应的加载次数定义为疲劳失效时的加载次数，此时的疲劳失效损伤大小即可确定为沥青砂浆试件的疲劳失效条件。

[0019] 步骤2)：生成沥青混合料仿真试件，并按照与沥青砂浆疲劳试验相同的试验条件进行疲劳试验，具体步骤如下：

[0020] I、计算沥青混合料级配与空隙率：根据疲劳试验研究对象级配与空隙率要求，计算沥青混合料仿真试件中各档粗集料质量之比例，据此计算各档粗集料颗粒数量之比例以及空隙占试件总体积之比例；计算各档粗集料颗粒数量之比例具体方法如下：

[0021] 设定各档粗集料在筛孔为 C_1 、 C_2 、 C_3 ... C_n 通过率分别为 P_1 、 P_2 、 P_3 ... P_n ，可根据式(5)计算得到各档粗集料筛余百分比 S_1 、 S_2 、 S_3 ... S_n ，

$$[0022] \quad \begin{aligned} S_1 &= 100 - P_1 \\ S_2 &= P_1 - P_2 \\ S_3 &= P_2 - P_3 \\ &\dots \\ S_n &= P_{n-1} - P_n \end{aligned} \quad (5)$$

[0023] 设定所有粗集料颗粒粒径满足随机均匀分布且密度 ρ 相同，为计算各档粗集料颗粒数量之比例，将所有粗集料颗粒近似为球形，则各档粗集料单个颗粒体积可表示为：

$$[0024] \quad [(C_1 + C_2)/2]^3 \times \frac{1}{6}\pi, [(C_2 + C_3)/2]^3 \times \frac{1}{6}\pi, [(C_3 + C_4)/2]^3 \times \frac{1}{6}\pi \dots [(C_n + C_{n+1})/2]^3 \times \frac{1}{6}\pi$$

[0025] 每档粗集料颗粒的数量可表示为

$$[0026] \quad \frac{S_1}{[(C_1+C_2)/2]^3 \times \frac{1}{6}\pi\rho}, \frac{S_2}{[(C_2+C_3)/2]^3 \times \frac{1}{6}\pi\rho}, \frac{S_3}{[(C_3+C_4)/2]^3 \times \frac{1}{6}\pi\rho} \dots \frac{S_n}{[(C_n+C_{n+1})/2]^3 \times \frac{1}{6}\pi\rho}$$

[0027] 由此可计算得到各档粗集料颗粒数量之近似比 $N_1:N_2:N_3:\dots:N_n$, 计算方法如式(6):

$$[0028] \quad N_1:N_2:N_3:\dots:N_n = \frac{S_1}{[(C_1+C_2)/2]^3} : \frac{S_2}{[(C_2+C_3)/2]^3} : \frac{S_3}{[(C_3+C_4)/2]^3} : \dots : \frac{S_n}{[(C_n+C_{n+1})/2]^3}$$

[0029] II、生成沥青混合料仿真试件:以实际疲劳试验试件尺寸规格为基础,设定长、宽各增加20mm后尺寸为初始沥青混合料试件尺寸,根据试件尺寸,建立试件空间,首先将沥青砂浆填充在此试件空间中,然后根据上述步骤I中计算得到的粗集料颗粒、空隙应占试件空间之比例计算得到该空间中各档粗集料颗粒数量以及空隙数量,将集料颗粒-空隙体系按照随机分布、互不重叠的原则继续填充到该试件空间中,将与之重叠的沥青砂浆部分剔除,生成沥青混合料初始试件,设定为A;对试件A进行切割,按照试验试件尺寸将A之上下、左右各切除10mm,得到符合试验尺寸要求的沥青混合料仿真试件,设定为B;

[0030] III、按照实际疲劳试验中沥青混合料试件的受力状态,建立加载夹具与固定夹具,固定夹具与加载夹具各由两个水平位置相同,垂直间距50mm的20mm*5mm 的矩形组成,相邻夹具之间形心水平距离为119mm,垂直高度相同。在仿真实验过程中,每组固定夹具形心位置不变,但可以围绕二维平面法线方向自由转动,每组加载夹具形心水平位置不变,同样可以围绕二维平面法线方向自由转动,垂直方向位移可以按照试验要求进行设定。固定夹具和加载夹具与生成的沥青混合料仿真试件合并构建沥青混合料疲劳仿真试验系统;

[0031] IV、仿真疲劳试验控制应变加载模式实现:通过控制加载夹具垂直方向的位移,实现对沥青混合料仿真试件施加应变荷载;其中垂直位移 y 与沥青混合料大小为 ϵ_t 的拉应变的关系如式(7)所示:

$$[0032] \quad y = 0.472033304 \times \epsilon_t \quad (7)$$

[0033] V、疲劳表征变量输出:在每个加载周期末,将步骤1)中计算得到的 a 、 p 的值输入仿真试验系统用于计算疲劳表征变量大小并利用SDV(依赖解的状态变量)变量实现输出;

[0034] VI、表征变量与沥青砂浆试件疲劳失效条件对比:将步骤2) V步骤中输出的仿真试验疲劳加载次数为 N 时沥青混合料中沥青砂浆内损伤最大值与步骤1) 的III步骤中得到的疲劳失效条件即疲劳失效损伤相比较,若疲劳失效损伤 $>$ 损伤最大值,则认为沥青混合料仍没有发生疲劳失效,需要继续加载,若疲劳失效损伤 $<$ 损伤最大值,则认为沥青混合料发生了疲劳失效,试验终止。

[0035] 有益效果:本发明提供了一种沥青混合料仿真疲劳试验方法,采用此种方法,只需要先进行一次沥青砂浆的疲劳试验,再利用有限元仿真计算软件对沥青混合料的疲劳过程进行模拟,便可以任意改变粗集料含量进行沥青混合料的仿真疲劳试验而不必进行实际的沥青混合料疲劳试验。利用该方法能够降低试验时间成本与资金成本,同时,可以对沥青混合料内部各力学指标进行监控,可用于对沥青混合料疲劳裂缝产生与发展机理的研究。

附图说明

[0036] 图1为沥青混合料切割过程示意图;

[0037] 图2为沥青混合料仿真疲劳试验系统示意图。

具体实施方式

[0038] 现具体阐述沥青混合料仿真疲劳试验方法的实施过程：

[0039] 步骤1)

[0040] I、沥青砂浆基本参数获取：利用沥青混合料马歇尔试验获得不同空隙率对应的不同油石比，根据去除沥青混合料中粗集料后剩余细集料、矿粉与沥青质量之比例不变的原则，确定沥青砂浆的级配与油石比。此时4%空隙率AC13沥青混合料对应的沥青砂浆各档通过率为： $P_{2.36}:P_{1.18}:P_{0.6}:P_{0.3}:P_{0.15}:P_{0.075}=100:71.6:51.4:36.5:27.0:16$ ，油石比为12.97%。采用轮碾法或者振动法成型沥青砂浆车辙板，待充分冷却后脱模，然后利用切割机对其进行切割，得到符合疲劳试验尺寸规格的沥青砂浆试件，并进行控制应变加载模式下的疲劳试验，实验条件与沥青混合料疲劳试验条件保持一致，得到应力、应变、弯曲劲度模量等力学指标随疲劳加载次数的变化规律；

[0041] II、沥青砂浆力学本构模型与疲劳演化方程构建：设定沥青砂浆只有在受到拉应力时才会发生疲劳破坏，此时受到拉应力大小为 σ ，初始弯曲劲度模量为 E ，实时弯曲劲度模量为 \tilde{E} ，产生拉应变大小为 ε ，损伤大小为 D ，疲劳加载次数为 N ，根据损伤力学原理构建沥青砂浆含损伤本构模型如式(1)：

$$[0042] \quad \sigma = (1-D) E \varepsilon \quad (1)$$

[0043] 构建控制应变加载模式下的沥青砂浆损伤演化方程如式(2)：

$$[0044] \quad \frac{dD}{dN} = a[\varepsilon(1-D)]^p \quad (2)$$

[0045] 此时，沥青砂浆内损伤的计算方法为式(3)：

$$[0046] \quad D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad (3)$$

[0047] 式(2)中 a 、 p 为模型参数，需要通过拟合得到；

[0048] 结合式(1)、(2)可得当加载次数为 N 时，沥青砂浆试件底面损伤大小如式(4)：

$$[0049] \quad D_c = 1 - [1 - (-p + 1)a\varepsilon_c^p N]^{\frac{1}{-p+1}} \quad (4)$$

[0050] 式中： ε_c 为控制应变加载模式下疲劳试验中的所施加的应变大小， D_c 为相应荷载条件下加载次数为 N 时的损伤大小。

[0051] III、模型参数获取：根据步骤I中得到的沥青砂浆弯曲劲度随疲劳加载次数变化规律，通过式(3)计算得到损伤随疲劳加载次数变化规律，将此规律与式(4)进行拟合，得到式(2)与式(4)中参数 a 、 p ，此时沥青砂浆的损伤大小随疲劳加载次数一般表现出三阶段变化规律，拟合时对三阶段中的第一与第二阶段进行拟合得到模型中 a 、 p 值，对比拟合曲线与实际曲线，将第三阶段实际曲线开始偏离拟合曲线时对应的加载次数定义为疲劳失效次数，此时的损伤大小即为疲劳失效损伤；

[0052] 步骤2)

[0053] I、沥青混合料级配与空隙率计算：对于级配为《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)中级配中值，空隙率为4%的AC13沥青混合料，2.36mm筛孔为粗集料与细集料的

分界筛孔,各档粗集料通过率之比例为 $P_{13.2}:P_{9.5}:P_{4.75}:P_{2.36}=95:76.5:53:37$,据此计算各档粗集料质量之比例 $S_{13.2}:S_{9.5}:S_{4.75}:S_{2.36}=5:18.5:23.5:16$,进而计算各档粗集料颗粒数量之比例 $N_{13.2}:N_{9.5}:N_{4.75}:N_{2.36}=1:7:36:212$ 以及空隙占试件总体积之比例为4%;

[0054] II、沥青混合料仿真试件生成:在实际四点弯曲试验中,沥青混合料试件有效尺寸为 $377\text{mm}\times 50\text{mm}$,在此基础上长、宽各加20mm,生成一个 $397\text{mm}\times 70\text{mm}$ 的矩形作为初始试件空间,首先将沥青砂浆1填充在此试件空间中,然后根据步骤I中计算得到的粗集料颗粒3、空隙2应占试件空间之比例计算得到该空间中各档粗集料颗粒3数量以及空隙2数量,将粗集料颗粒3-空隙2体系按照随机分布、互不重叠的原则继续填充到该空间中,将与之重叠的沥青砂浆1部分剔除,生成沥青混合料初始试件4,设定为A。对试件A进行切割,切除部分5按照试验试件尺寸将A之上下、左右各切除10mm,得到符合试验尺寸要求的沥青混合料仿真试件6,设定为B,切割过程如图1所示;

[0055] III、仿真疲劳试验系统构建:按照实际疲劳试验中沥青混合料试件的受力状态,建立加载夹具8与固定夹具7,与沥青混合料仿真试件6合并构建沥青混合料疲劳仿真试验系统,如图2所示;

[0056] IV、仿真疲劳试验控制应变加载模式实现:通过控制加载夹具垂直方向的位移,实现对沥青混合料仿真试件施加应变荷载;其中垂直位移 y 与沥青混合料大小为 ϵ_t 的拉应变的关系如式(7)所示:

$$[0057] \quad y=0.472033304 \times \epsilon_t \quad (7)$$

[0058] V、疲劳表征变量输出:以式(1)、式(2)以及拟合得到的 a 、 p 值为基础,编写用户材料子程序文件,在第 N 个加载周期末,主程序将应变数据 ϵ_N 传入到子程序中,利用式(1)计算得到应力数据 σ_N ,然后利用式(2),计算得到第 N 次加载产生的损伤 d_N ,并将其与之前 $N-1$ 次造成损伤之和相加,得到此时沥青混合料仿真试件中的损伤值 D ,并利用SDV(依赖解的状态变量)变量实现输出;

[0059] VI、表征变量与沥青砂浆试件疲劳失效条件对比:将步骤2) V步骤中输出的仿真试验疲劳加载次数为 N 时沥青混合料中沥青砂浆内损伤最大值与步骤1)的III步骤中得到的疲劳失效条件即疲劳失效损伤相比较,若疲劳失效损伤 $>$ 损伤最大值,则认为沥青混合料仍没有发生疲劳失效,需要继续加载,若疲劳失效损伤 $<$ 损伤最大值,则认为沥青混合料发生了疲劳失效,试验终止,此时通过仿真试验系统获取沥青混合料发生疲劳损伤时的各相关参数。

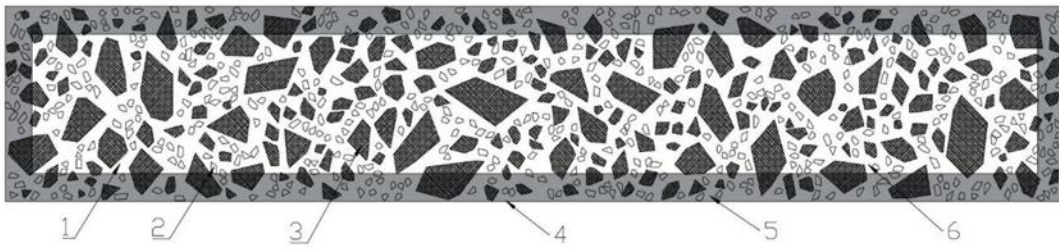


图1

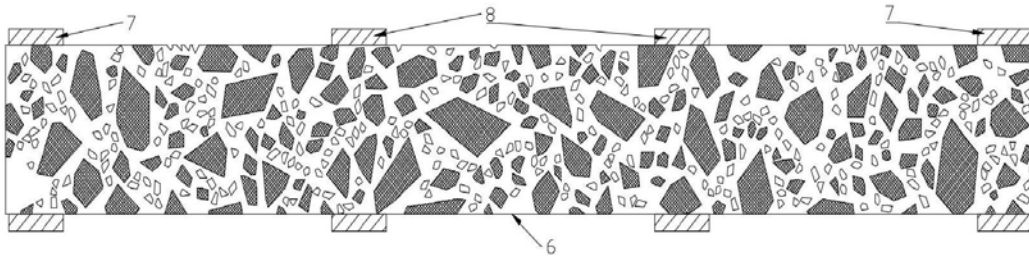


图2