

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.04.058

再生大骨料-自密实砂浆混凝土力学性能分析

康晶¹, 邹磊堂², 王建超³

(1.沈阳市市政工程设计研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110015; 2.中国建筑上海设计研究院有限公司辽宁分公司, 辽宁 沈阳 110000;
3.沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要: 为了研究再生骨料粒径、再生骨料强度和自密实砂浆强度对其力学性能的影响,运用 ABAQUS 对再生大骨料-自密实砂浆堆石混凝土试件单轴抗压试验进行细观模拟,对比了试验值、模拟值,并对模型的合理性进行验证。结果表明:以再生骨料粒径、再生骨料配制强度以及自密实砂浆配制强度为变量,采用二维正五边形的随机骨料模型进行单轴受压分析,研究上述三个因素对再生大骨料-自密实砂浆混凝土轴心抗压强度的影响,模拟结果与实验结果吻合度较好,进一步验证了细观模型的合理性。

关键词: 再生大骨料;自密实砂浆;堆石混凝土;细观模拟

中图分类号: TU528.37;U414.1+8

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)04-0248-04

0 引言

再生大骨料-自密实砂浆堆石混凝土(RLA-SCMRFC)施工技术的提出,不仅可以填补再生骨料粒径在 40~150 mm 之间的使用空白^[1],并且使填充后的试件密实度也大大提高^[2]。现如今,人们对再生堆石混凝土的力学性能研究大多集中在宏观层面,对细观塑性损伤产生的过程和产生机理缺乏研究。再生大骨料在 RLA-SCMRFC 中起到支撑和骨架作用,但是与再生小骨料不同的是,再生大骨料内部天然骨料的数目不止一个,因此需要在大骨料内部套嵌一定量的天然细骨料^[3]。此外,由于再生大骨料表面有一层老硬化砂浆,导致大骨料与新拌砂浆表面会形成一个薄弱层,称之为新界面层。与此同时,天然细骨料与老砂浆之间也有一个薄弱层,称之为老界面层^[4]。

1 RLA-SCMRFC 本构模型

1.1 天然细骨料本构模型

本文天然细骨料本构关系选用线弹性本构。弹性模量为 70 GPa,泊松比取 0.16,抗拉强度为 10 MPa,抗压强度为 250 MPa。

1.2 砂浆层与界面层本构模型

砂浆层与界面层选用塑性损伤本构模型,该模

型是在分段曲线损伤本构模型的基础上,发展而来的。

混凝土单轴受拉损伤模型,用式(1)表示:

$$\sigma = (1-d_t)E_c \varepsilon \quad (1)$$

其中,受拉损伤变量可以表示为:

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t [1.2 - 0.2x^2] & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t (x-1)^{1.7} + x} & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\chi = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,y}} \quad (3)$$

$$\rho_t = \frac{f_{t,y}}{E_c \varepsilon_{t,y}} \quad (4)$$

混凝土单轴受压损伤模型,用式(5)表示:

$$\sigma = (1-d_c)E_c \varepsilon \quad (5)$$

其中,受压损伤变量可以表示为:

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n-1+x^n} & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\rho_c = \frac{f_{c,y}}{E_c \varepsilon_{c,y}} \quad (7)$$

$$n = \frac{E_c \varepsilon_{c,y}}{E_c \varepsilon_{c,y} - f_{c,y}} \quad (8)$$

式中: α_t 为混凝土单轴受拉应力-应变曲线下降段的参数值; $f_{t,y}$ 为混凝土的单轴抗拉强度代表值,其值可根据实际结构分析需要分别取 f_i, f_k, f_{im} ; $\varepsilon_{t,y}$ 为与单轴抗拉强度代表值 $f_{t,y}$ 相应的混凝土峰值拉应变; d_t 为混凝土单轴受拉损伤演化参数; d_c 为混凝土单轴受压损伤演化参数; α_c 为混凝土单轴受压应力-应变曲

收稿日期: 2023-05-06

作者简介: 康晶(1981—),女,硕士,高级工程师,从事桥梁隧道给排水结构设计工作。

线下降段参数值; $f_{c,\gamma}$ 为混凝土单轴抗压强度代表值,其值可根据实际结构分析的需要分别取 f_c 、 f_{ck} 或 f_{cm} ; $\epsilon_{c,\gamma}$ 为与单轴抗压强度 $f_{c,\gamma}$ 相应的混凝土峰值压应变。

2 试验建模与数值模拟

本文以塑性损伤理论为基础,提出了一个塑性损伤CDP模型。建立由天然骨料、老界面层、老砂浆、新界面层和新砂浆组成的RLA-SCMRFC二维细观模型,如图1所示。并结合试验数据,确立各项细观模拟的参数。运用上述建立好的二维随机细观模型,对其单轴受压性能进行模拟,并研究再生骨料粒径、再生骨料强度和砂浆强度对上述力学性能的影响。

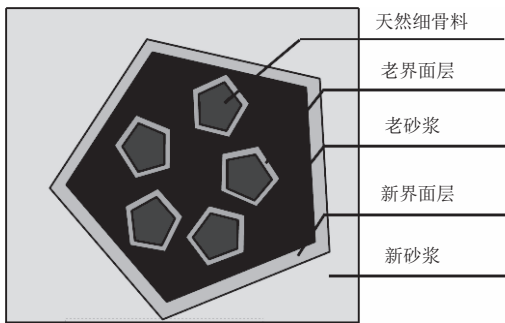


图1 RLA-SCMRFC细观组成

2.1 各相材料细观参数取值

本文所取各相细观力学参数见表1。

表1 RLA-SCMRFC细观力学性能参数

材料	弹性模量 /MPa	泊松比	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa
天然细骨料	70 000	0.16	250	10
再生大骨料1	老砂浆界面层 老砂浆层	0.2 0.22	17.1 30.43	1.66 2.27
再生大骨料2	老砂浆界面层 老砂浆层	0.2 0.22	20.5 36.64	1.83 2.52
再生大骨料3	老砂浆界面层 老砂浆层	0.2 0.22	25.1 44.71	2.05 2.81
自密实砂浆1	新砂浆界面层 新砂浆层	0.2 0.22	12.4 24.7	1.39 2.03
自密实砂浆2	新砂浆界面层 新砂浆层	0.2 0.22	16.2 32.3	1.61 2.35
自密实砂浆3	新砂浆界面层 新砂浆层	0.2 0.22	20.8 41.6	1.85 2.70

其中,天然细骨料密度取 $2\ 600\text{ kg/m}^3$,新、老砂浆层密度取 $2\ 300\text{ kg/m}^3$,新老砂浆界面层密度取 $2\ 200\text{ kg/m}^3$ 。表1中各个材料,除了天然细骨料采用弹性本构,其余材料均采用塑性损伤本构,老界面层厚度取 0.5 mm ,新界面层厚度取 0.1 倍的再生大

骨料半径。其中塑性参数按照表2取值。

表2 塑性参数

膨胀角 μ (°)	偏心率 ν %	f_{b0}/f_{c0}	K	黏性参数
30	0.1	1.16	0.666 67	0.005

2.2 部件剖分与网格划分

网格单元类型的选择会影响到模型的求解时间和求解的精度。本文选用二次缩减积分CPS8R单元,即八结点双向二次平面应力四边形减缩积分单元。

2.3 部件的装配与相互作用建立

进入“装配”模块,将部件导入到实例中。随后进入“相互作用”模块,分别在试件的正下部和正上部 20 mm 创建两个参考点RP-1和RP-2。再运用表面耦合的约束方式,分别将两个参考点RP-1和RP-2与试件的正下部和正上部两边进行耦合约束。

2.4 分析步的设置

本文选择采用刚性位移的方式进行加载。选用静力通用(Static General)类型,时间长度取1,最大增量步数取10 000,初始增量步大小取0.01,最小增量步取 1×10^{-5} 。场输出变量在默认选中的情况下,还需选择“破坏/断裂”下的DAMAGEC受压损伤和DAMAGET受拉损伤上,以及“状态/场/用户/时间”下的STATUS状态。

2.5 荷载与边界条件施加

进入“载荷LOAD”模块,在试件底部参考点RP-1处施加一组水平约束和法向约束,并在试件顶部参考点RP-2位置处施加一个竖直向下的位移荷载,对于单轴压缩工况施加 1 mm 的位移荷载,并限制其水平位移和转角。施加位移荷载后如图2所示。

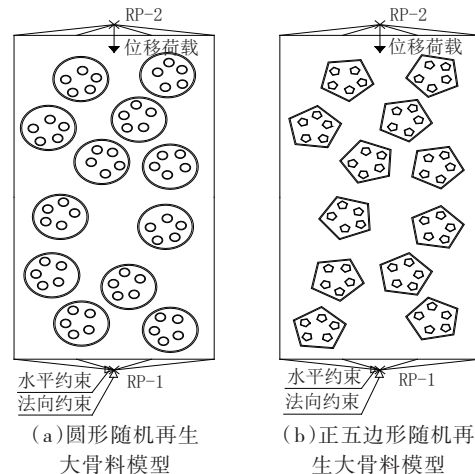


图2 随机RLA-SCMRFC荷载与约束施加示意图

2.6 作业提交与模型检查

进入“作业”模块,并创建一个作业,为了加快计

算效率选中“使用多个处理器”,根据计算机的实际性能,本文选用3个处理器。同时,为了保证计算精度,节点变量输出精度选择“完全分析”。作业创建完成后,进行数据检查,检查无误后方可提交作业。

3 细观模型合理性验证

为了验证本文所建立的细观模型的合理性,以RLA-SCMRFC轴心受压力学性能实验的L7实验组的实验数据为为例,将实验数据与模拟数据的各项力学参数进行比较,来验证本模型建立的合理性。其中,表1是RLA-SCMRFC细观力学性能参数,L7实验组代表的是RLA-SCMRFC轴心受压力学实验的试块组。L7组试验所选用自密实砂浆强度为36.54 MPa,再生骨料强度47.79 MPa,再生骨料粒径(60±5)mm,再生骨料替代率为(30±1)%,模拟试件尺寸为300 mm×300 mm×600 mm,分别建立圆形随机骨料模型,和正五边形随机骨料模型。由图3可以看出,实测值与模拟值的峰值压应力差别不大,但是其峰值压应变和弹性模量略有差别,该模型的整体还是比较理想的,因此可以用于细观模拟研究。此外,由图可以发现,再生骨料形状的选取,对模拟结果的影响程度不是很大。

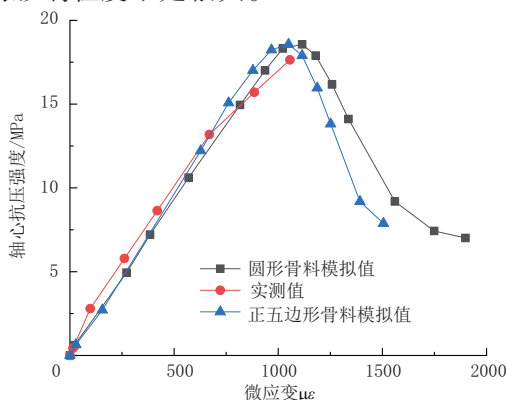


图3 试验值与模拟值对比

4 抗压强度的影响因素的分析

4.1 再生骨料粒径的影响

从图4中的应力应变曲线可以看出,其轴心抗压强度随着再生骨料粒径的增大而增大,这一变化规律同前期试验所得出的结论也是吻合的,在弹性阶段前期,试件表面无显著改变,当荷载逼近极限荷载的80%时,从试件上部产生1~2条裂缝,并随着荷载增大裂纹逐渐向下贯穿至试件底部,直至试件到达极限荷载,RLA-SCMRFC抗压强度随着再生骨料粒径的增大而增大,但是再生骨料粒径对其轴心抗压强度的影响不是十分显著。

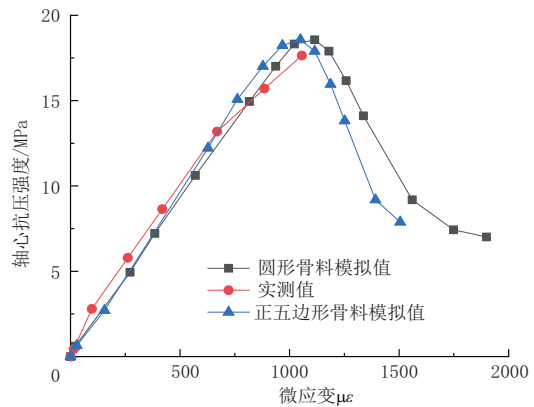


图4 再生骨料粒径对单轴受压应力应变曲线影响

4.2 再生骨料配制强度的影响

从图5中的应力应变曲线可以看出,其轴心抗压强度随着再生骨料配制强度的增大而增大,这一点也符合前期试验得出的结论,并且再生骨料配制强度对其轴心抗压强度的影响介于再生骨料粒径与自密实砂浆配制强度之间。

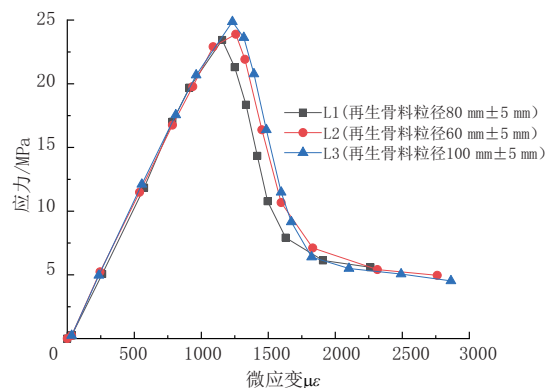


图5 再生骨料强度对单轴受压应力应变曲线影响

4.3 自密实砂浆强度的影响

从图6中的应力应变曲线可以看出,其轴心抗压强度随着自密实砂浆配制强度的增大而增大,这与前期试验得出的结论相吻合,并且自密实砂浆配制强度对其轴心抗压强度的影响最为显著。

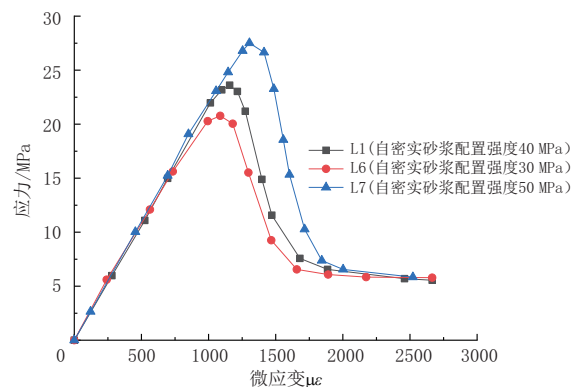


图6 自密实砂浆强度对单轴受压应力应变曲线影响

5 结语

该文运用ABAQUS对再生大骨料-自密实砂浆

