

基于Ansys的装配式带体积缺陷的灌浆套筒承载能力分析

张健翱, 王军晗

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2024年4月20日; 录用日期: 2024年5月20日; 发布日期: 2024年5月27日

摘要

灌浆套筒在建筑和工程领域中是一项重要的技术, 用于各种情况下的结构加固、连接和支撑, 而因工作人员不熟练或者操作不规范可能会造成了钢筋偏置、灌浆不密实等缺陷。本文将采用Ansys仿真实验的方法对装配式结构灌浆缺陷对承载力的影响展开研究。

关键词

灌浆套筒, 缺陷, 应力应变分布

Analysis of the Load-Bearing Capacity of Assembled Grouting Sleeves with Volumetric Defects Based on Ansys

Jian'ao Zhang, Junhan Wang

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 20th, 2024; accepted: May 20th, 2024; published: May 27th, 2024

Abstract

Grouting sleeves are an important technology in the field of construction and engineering. They are used for structural reinforcement, connection and support under various circumstances. However, unskilled workers or irregular operations may cause offset steel bars and improper grouting density and other defects. This article will use Ansys simulation experiment method to study the impact of grouting defects on the bearing capacity of prefabricated structures.

Keywords

Grouting Sleeve, Defects, Stress Strain Distribution

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着建筑工艺的不断发展和建筑材料的更新,装配式结构已经成为建筑结构的主流之一。对比现浇式建筑,在环境保护和施工效率方面更具优势,随着我国社会经济发展转型,节能减排是当前我国面临的重大任务[1]。对于装配式结构的研究层出不穷,其中关键的焦点在于节点连接,为了使装配式结构更加便捷、快速、安全和可靠,许多研究集中在改进装配式结构的连接方式上[2] [3] [4]。Ling [5]基于套筒对灌浆料的约束力沿套筒内壁均匀分布和套筒环向应力沿壁厚方向均匀分布的假设,推导了钢筋与灌浆料接触面之间相互作用的强弱关系。Kim [6]等人对40个试件结果进行线性回归分析,得到了筒壁对灌浆料约束力的计算方法。杨强[7]对半灌浆套筒连接件进行粘结锚固性能试验研究,建立了特征粘结强度表达式和安全临界锚固长度计算表达式。因此,本论文旨在对装配式结构灌浆体积缺陷对承载力的影响进行详细的研究和报告,本研究将采用 Ansys 仿真实验的方法来探究装配式结构灌浆缺陷对其承载力的影响。

2. 有限元建模

2.1. 静态结构分析系统

本模型的半灌浆套筒共有三个设计面:钢筋与套筒的螺栓连接、套筒与灌浆料连接以及灌浆料与套筒连接[5] [8] [9]。螺栓连接保证了钢筋与套筒之间的紧密连接,消除了相对位移,因此简化为绑定。在接触方面,钢筋和套筒接触,而灌浆料则是目标面。在套筒与灌浆料连接以及灌浆料与套筒连接方面,灌浆料相对较软,因此成为接触面,套筒则为目标面[10] [11]。连接均采用摩擦接触,其摩擦系数均为0.2。

2.2. 材料本构关系建立

2.2.1. 灌浆料本构模型

使用 Ansys 模拟钢筋套筒灌浆连接拉伸实验涉及以下三种材料的本构模型。钢筋、套筒和灌浆料的本构关系。灌浆料按照中国专业标准 JG/T408-2019 [12],使用 C40 级高强度灌浆料作为粘结强度,灌浆料的材料参数(见表 1)。

Table 1. Grouting material properties

表 1. 灌浆料材料属性

参数	密度(kg/m ³)	弹性模量(Mpa)	泊松比	抗压强度(Mpa)	抗拉强度(Mpa)
灌浆料	2400	25,460	0.18	1.71	19.1

由于当前对于灌浆料本构关系的研究,还没有形成成熟的理论,本研究用等强度的混凝土的本构关系来代替灌浆料的本构关系以建立模型。常见的描述混凝土单向受压应力-应变关系曲线有两种数学模

型:

- 1) 美国 E. Hognestad 建议的模型。
- 2) 德国 Rusch 建议的模型。

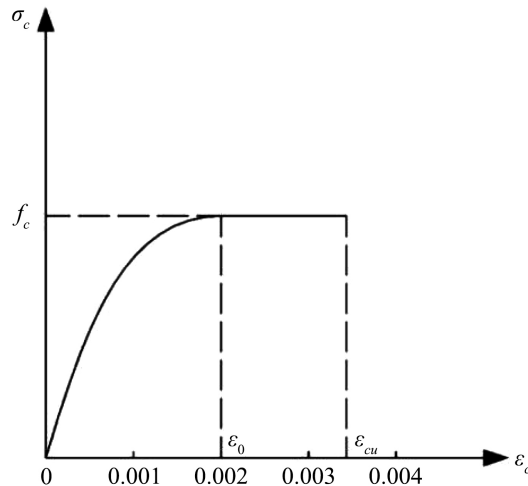


Figure 1. Concrete stress-strain model suggested by Rusch
图 1. Rusch 建议的混凝土应力 - 应变模型

灌浆料本构模型采用德国 Rusch 建议的模型上升阶段采用二次抛物线而下降阶段采用水平直线(见图 1)。

$$\begin{cases} \sigma = f_c \left[2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right], & \varepsilon \leq \varepsilon_0 \\ \sigma = f_c, & \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cU} \end{cases} \quad (1)$$

式中, 取 $\varepsilon = 0.02$; $\varepsilon_{cU} = 0.035$ 。

2.2.2. 钢筋本构模型

本模拟采用的是直径为 20 mm 的 HRB400 的钢筋, 根据相关规范, 材料属性如下(见表 2)。

Table 2. Rebar material properties

表 2. 钢筋材料属性

参数	密度(kg/m ³)	弹性模量(Mpa)	泊松比	抗压强度(Mpa)	抗拉强度(Mpa)
钢筋	7850	200,000	0.3	360	360

描述钢筋的本构模型有三种:

1) 完全弹塑性的双直线模型。2) 完全弹塑性加硬化的三折线模型。3) 弹塑性的双斜线模型。本实验钢筋采用弹塑性双斜线模型(见图 2), 适用于没有明显流幅的刚强度钢筋或钢丝的应力 - 应变曲线, 双斜线模型的数学表达式如下:

$$\begin{cases} \sigma = E_s \varepsilon_s, & \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ \sigma = f_y + (\varepsilon_s - \varepsilon_y) \tan \theta'', & \varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sU} \end{cases} \quad (2)$$

$$\tan \theta'' = E_s = \frac{f_{s,u} - f_y}{\varepsilon_{s,u} - \varepsilon_y} \quad (3)$$

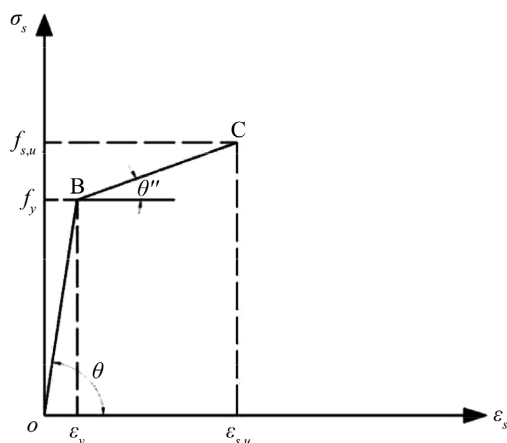


Figure 2. Double slope model steel stress-strain curve
图 2. 双斜线模型钢筋应力-应变曲线

2.2.3. 套筒本构模型

本模型采用 45#钢半灌浆套筒，套筒材料属性如下(见表 3)。

Table 3. Sleeve material properties

表 3. 套筒材料属性

参数	密度(kg/m ³)	弹性模量(Mpa)	泊松比	抗压强度(Mpa)	抗拉强度(Mpa)
套筒	7890	20,900	0.269	360	360

套筒本构关系采用第一种模型(见图 3)，模型数学表达式如下：

$$\begin{cases} \sigma = E_s \varepsilon_s, & \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ \sigma_s = f_y, & \varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,h} \end{cases} \quad (4)$$

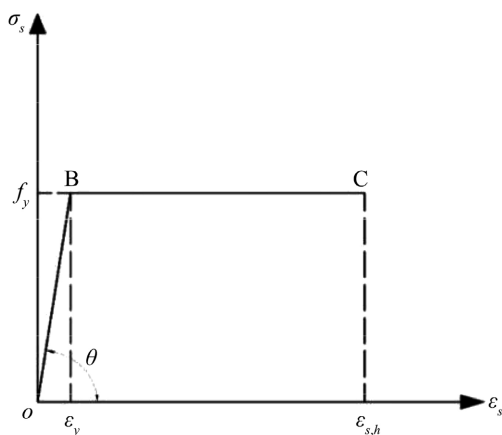


Figure 3. Completely elastic-plastic bilinear sleeve stress-strain curve
图 3. 完全弹塑性的双直线套筒应力-应变曲线

3. 模型建立

3.1. 接触设置

本模型的半灌浆套筒共有三个设计面：钢筋与套筒的螺栓连接、套筒与灌浆料连接以及灌浆料与套筒连接。螺栓连接保证了钢筋与套筒之间的紧密连接，消除了相对位移，因此简化为绑定。在接触方面，钢筋和套筒接触，而灌浆料则是目标面。在套筒与灌浆料连接以及灌浆料与套筒连接方面，灌浆料相对较软，因此成为接触面，套筒则为目标面。连接均采用摩擦接触，其摩擦系数均为 0.2。

3.2. 模型建立

本模型旨在对不同灌浆缺陷的钢筋套筒进行单项拉伸实验。在实验中，钢筋螺纹连接端被固定约束，且固定面被简化为钢筋的底面(见图 4)。在该实验中约束了 X 和 Y 方向的位移，并施加了一根受力方向为 Z 的集中力，该力作用在钢筋底面上，其大小为 185.06 kN。

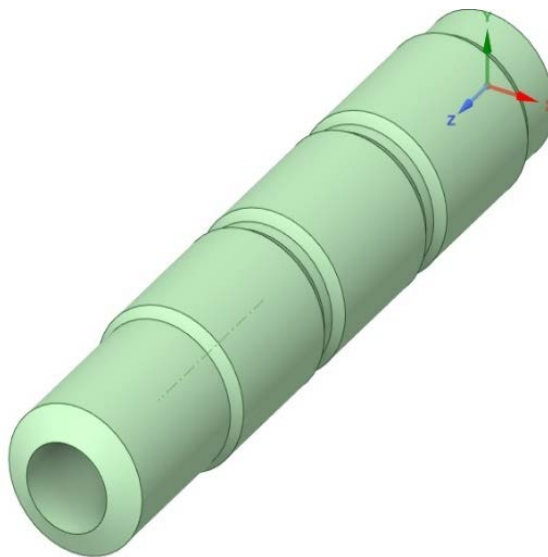


Figure 4. Grout model
图 4. 灌浆料模型

4. 结果分析

4.1. 灌浆料无缺陷

无缺陷灌浆套筒构件最大总变形发生在螺栓连接的钢筋的末端(如图 5 所示)，为 0.004744 m，套筒的最大总变形处在靠近荷载作用处，大小为 0.003713 m。套筒处的总变形也是随着离荷载作用点越远越小，灌浆料的最大总变形处发生在靠近荷载作用点的侧面，大小为 0.0026521 m。同样灌浆料的总变形随着力荷载作用点越远越小，最小为 0.0015913 m，灌浆连接端的钢筋最大变形为 0.0015913 m，在靠近荷载作用点处。

该试件的最大应变发生在灌浆料的内侧靠中间的位置，大小为 $85,078 \mu\epsilon$ ，这里考虑为内部产生破坏时应变急剧增大(见图 6)。螺栓连接端的钢筋的各个位置的应变大致都相等，大小为 $9975.8 \mu\epsilon$ ，灌浆连接端钢筋的应变各个位置大小也差不多相等，大小为 $9975.8 \mu\epsilon$ ，但在灌浆端的两侧应变略有增加，大小为 $3813.9 \mu\epsilon$ ，套筒外壁最大应变值大致为 $19,364 \mu\epsilon$ ，考虑为破坏时的应变增大，靠近中部位置。

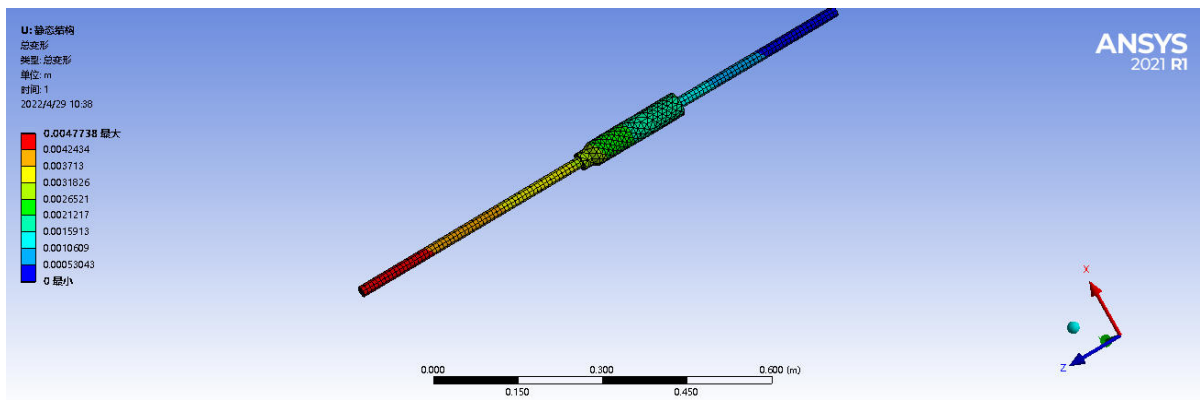


Figure 5. Total deformation result diagram of defect-free steel grouting sleeve
图 5. 无缺陷钢筋灌浆套筒总变形结果图

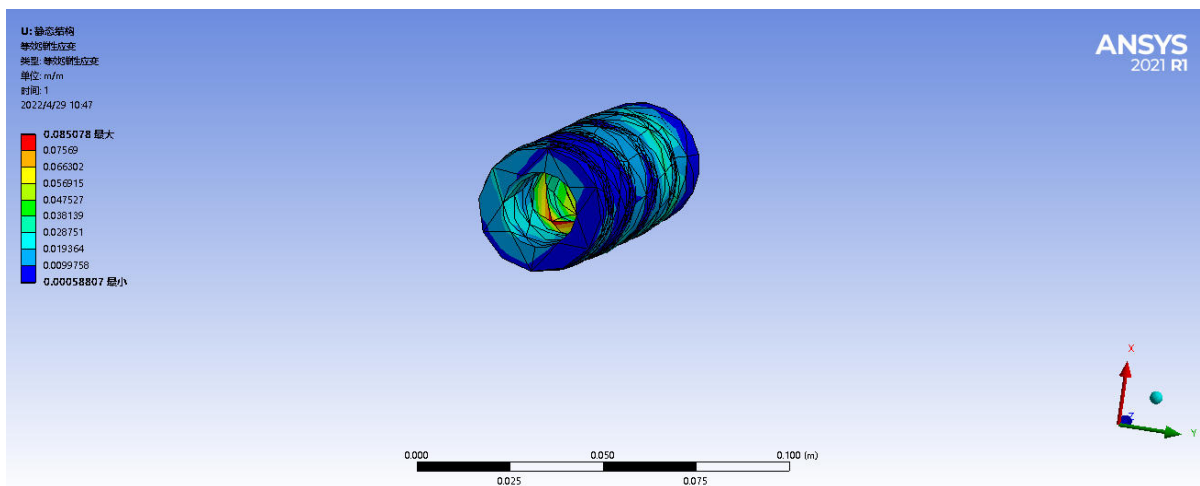


Figure 6. Grouting sleeve strain result diagram
图 6. 灌浆套筒应变结果图

4.2. 灌浆料带缺陷

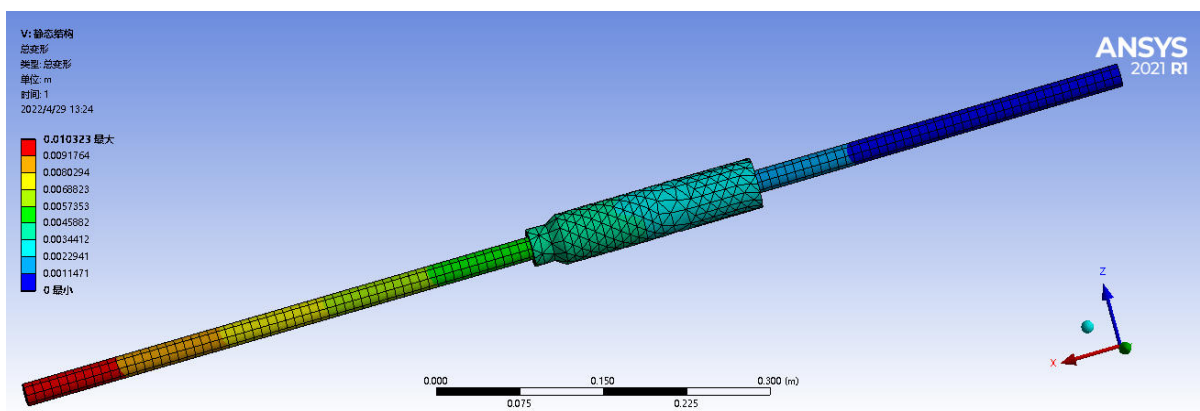


Figure 7. Total deformation diagram of the first 1/4 grouting material defects
图 7. 前 1/4 灌浆料缺陷总变形图

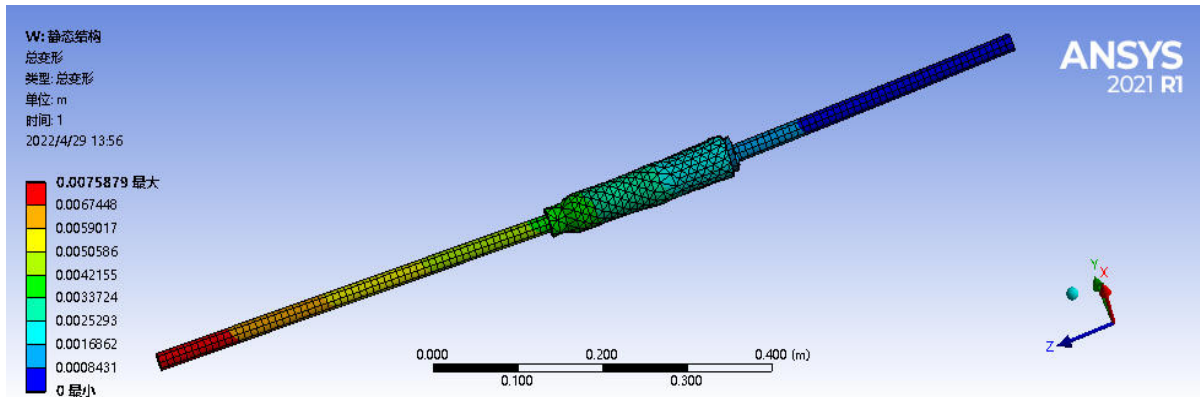


Figure 8. Total deformation diagram of the middle 1/4 grouting material defects
图 8. 中间 1/4 灌浆料缺陷总变形图

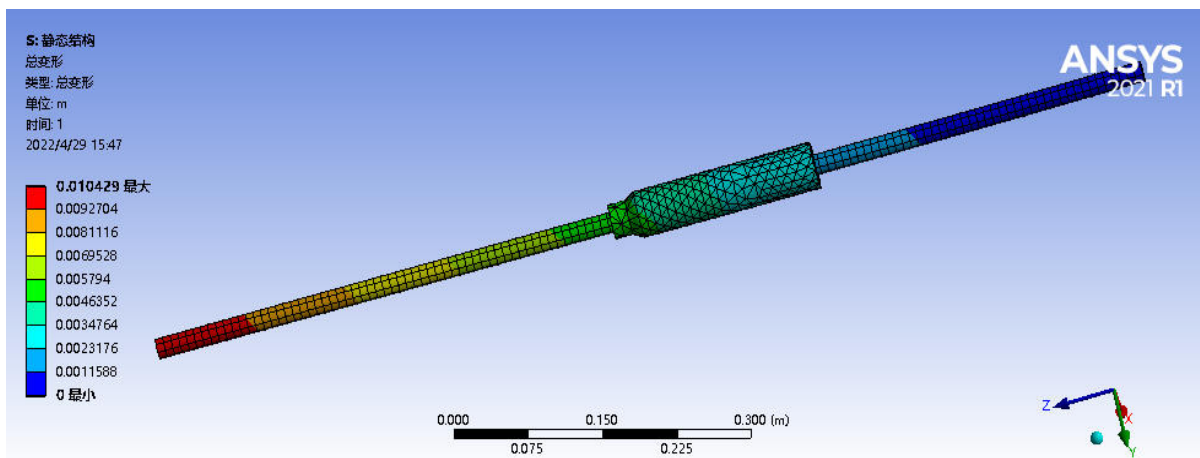


Figure 9. Total deformation diagram of the last 1/4 grouting material defects
图 9. 后 1/4 灌浆料缺陷总变形图

Table 4. Comparison of experimental data of various grouting defect sleeves
表 4. 各灌浆缺陷套筒实验数据比较

组别	总变形(cm)	套筒外壁应变最大值($\mu\epsilon$)	应变最大位置	钢筋应力最大值(Mpa)	应力最大位置
无缺陷	0.77	19,364	套筒中部位置	771.36	灌浆连接钢筋灌浆处的两侧
前 1/4 缺陷	1.03	20,688	靠近螺栓一侧	631.01	灌浆连接钢筋灌浆处的两侧
中 1/4 缺陷	0.76	20,270	靠近螺栓一侧	825.55	两根钢筋灌浆处的最外侧
后 1/4 缺陷	1.04	17,465	靠近螺栓一侧	619.12	钢筋连接端的最外侧

当灌浆缺陷等于钢筋锚固长度的四分之一时, 前 1/4 和后 1/4 的总变形相似, 中间 1/4 的总变形与无缺陷套筒基本相同, 前两种缺陷相对无缺陷套筒增加了约 45% (见图 7、图 8、图 9)。三种缺陷套筒和无灌浆缺陷的套筒总变形最大值位置一致, 都在螺栓连接钢筋的末端。外壁应变分布规律大体均匀, 最大值位置即为破坏位置, 无缺陷试件大部分区域应变为 $9975.8 \mu\epsilon$, 无缺陷最大应变位置出现在中部, 三种

缺陷情况出现在靠近螺栓一侧, 三种缺陷大部分区域应变与无缺陷相差均在 10% 左右, 最大应变出现处为破坏位置, 所以破坏产生的应变较大。前 1/4 和后 1/4 的最大应力略低于无灌浆缺陷套筒, 中间 1/4 的最大应力与无灌浆缺陷套筒的最大应力基本一致。前 1/4 的应力最大值处于无灌浆缺陷套筒应力最大值的位置, 都出现在灌浆连接钢筋灌浆处的两侧, 中间 1/4 和后 1/4 的应力最大值位置出现在灌浆连接端钢筋的远离灌浆料的最外侧(见表 4)。这些结果表明, 灌浆缺陷的增加会导致锚固长度的减少, 进而影响钢筋灌浆套筒连接的承载能力。当灌浆缺陷大小相同但位置不同时, 连接的承载力、应力、应变和总变形也会有所差异, 其最大值通常位于灌浆料附近。

5. 结语

- 1) 不同类型缺陷对半灌浆套筒连接件力学性能的影响不同, 总体承载能力的减小与钢筋锚固长度有很大关系, 应力应变最大处主要集中在末端位置。
- 2) 套筒承载能力远大于粘结力, 在实际工况中应在钢筋与灌浆料粘结强度处加强, 充分利用强度。
- 3) 缺陷处的钢筋应变与相邻未缺陷处的钢筋应变保持一致, 并会使钢筋出现应力集中现象。缺陷未对套筒的应变产生影响, 套筒整体应变由螺纹端向灌浆端减小。
- 4) 缺陷危害程度排序为: 中间缺陷 > 前 1/4 缺陷 > 后 1/4 缺陷, 在缺陷长度相同的情况下, 分布缺陷和中部缺陷将灌浆料分割成多个受力段, 因此危害较大。
- 5) 模拟结果大于实际工况中的承载能力, 考虑是简化方案可以继续优化。

参考文献

- [1] 王俊, 王有为, 林海燕, 徐伟, 高彩凤, 叶凌. 我国绿色低碳建筑技术应用研究进展[J]. 建筑科学, 2013, 29(10): 2-9+33.
- [2] 吴迪. 装配式建筑节点连接方式研究综述[J]. 中外建筑, 2016(8): 150-151.
- [3] 李向民, 高润东, 许清风, 王卓琳, 张富文. 灌浆缺陷对钢筋套筒灌浆连接接头强度影响的试验研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(7): 52-56.
- [4] 匡志平, 郑冠雨, 焦雪涛. 灌浆不足对钢筋套筒连接力学性能影响试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 934-945.
- [5] Ling, J.H., Rahman, A., Baharuddin, A., *et al.* (2016) Tensile Capacity of Grouted Splice Sleeves. *Engineering Structures*, **111**, 285-296.
- [6] Kim, H.-K. (2012) Bond Strength of Mortar-filled Steel Pipe Splices Reflecting Confining Effect. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, **11**, 125-132
- [7] 杨强. 半套筒灌浆连接件粘结锚固性能试验研究及可靠度分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2018.
- [8] 徐建凯, 郭飞, 沙建芳, 等. 灌浆料对钢筋套筒灌浆连接性能影响[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(10): 53-56, 75.
- [9] 毕林, 王李管, 陈建宏, 等. 三维网格模型的空间布尔运算[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(5): 82-85.
- [10] 吴涛, 刘全威, 成然, 等. 钢筋套筒灌浆连接性能试验研究及筒壁应力分析[J]. 工程力学, 2017, 34(10): 68-75.
- [11] Rahman, A.A.B., Ling, J.H., Ibrahim, I.S., Hamid, A.Z. (2010) Performance of Grouted Sleeve Connectors Subjected to Incremental Tensile Loads. *Malaysian Construction Research Journal (MCRJ)*, **6**, 39-55.
- [12] 中华人民共和国建筑工业行业标准. 钢筋连接用套筒灌浆料: JG/T408-2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.