

张啸驰,陈建伟,闫文赏,等.圆钢管约束高强灌浆料局部承压性能研究[J].地震工程学报,2018,40(3):612-618.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.612

ZHANG Xiaochi, CHEN Jianwei, YAN Wenshang, et al. Local Compressional Behavior of Circular Tubed High Strength Grouting Material[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 612-618. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.612

圆钢管约束高强灌浆料局部承压性能研究

张啸驰^{1,2}, 陈建伟^{1,3}, 闫文赏^{1,3}, 郑玲玲¹

(1. 华北理工大学建筑工程学院, 河北 唐山 063009; 2. 中国新兴建设开发总公司第六分公司, 北京 100039;
3. 唐山市绿色建筑产业技术研究院, 河北 唐山 063009)

摘要:以圆钢管约束高强灌浆料局部承压性能试验为基础,基于 ABAQUS 有限元计算平台,通过建立分段模型(Multi-section Model 简称 MSM 模型)进行数值模拟,探究圆钢管约束高强灌浆料在局部承压作用下的力学性能,并将软件计算得到的荷载-位移曲线与试验结果进行对比分析。结果表明,分段模型适用于圆钢管约束高强灌浆料局部承压作用下的数值模拟,且计算结果与试验结果吻合较好;增大试件高径比、钢管壁厚和高强灌浆料强度均可提高其极限承载力。

关键词: 高强灌浆料; 局部承压; 分段模型; 极限承载力

中图分类号: TU317.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)03-0612-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.612

Local Compressional Behavior of Circular Tubed High Strength Grouting Material

ZHANG Xiaochi^{1,2}, CHEN Jianwei^{1,3}, YAN Wenshang^{1,3}, ZHENG Lingling¹

(1. College of Civil and Architectural Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China;
2. The 6th Branch of China Xinxing Construction & Development General Co., Beijing 100039, China;
3. Tangshan Institute of Green Building Industrial Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: In early experiments, the authors researched the force characteristics and failure modes of high strength grouting material in circular tubes with different thicknesses and forms. It was determined that the failure mode of the test pieces is that of shear failure and that the ultimate bearing capacity of the test pieces increases with an increase in the thickness of tube. Based on experiments on the local compression behavior of circular tubed high strength grouting material, a numerical simulation is conducted by establishing a multi-section model (MSM model) using the ABAQUS finite element computing platform. In addition, the mechanical properties of high strength grouting material confined by circular steel tube under local compression are investigated. Load-displacement curves calculated by the software are then compared with experimental results. Results show that the MSM model is applicable for conducting numerical simulations of circular tubed, high strength, grouting material under local compression. Calculated results are in

收稿日期: 2017-04-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678236)

作者简介: 张啸驰(1990—), 男, 硕士, 主要从事钢-混凝土组合结构研究。E-mail: xc Zhang2016@126.com。

通信作者: 陈建伟(1978—), 男, 博士, 教授, 从事工业化建筑、工程抗震研究。E-mail: heuu2010@163.com。

good agreement with test results, and the bearing capacity can be improved by an increase in the following: the height-to-diameter ratio of samples, thickness of the steel tube, and strength of the high strength grouting material.

Key words: high strength grouting material; local compression; multi-section model; ultimate bearing capacity

0 引言

为满足我国建筑的产业化发展和环保节能的要求,采用预制装配式钢管混凝土组合结构可以有效、迅速地实现这一目的(图 1)。将圆钢管内灌入高强灌浆料的套筒是连接预制钢管混凝土边框剪力墙的一种新型方式^[1-2],这种节点连接方式弥补了传统结构构件连接方式的缺陷(图 2)。因此对装配式结构的研究在国内外建筑事业的发展中逐步升温^[3-7]。高强灌浆料具有微膨胀、自流平、早高强、适用性强等优点,可以较好地应用在套筒灌浆工程中,但目前对约束灌浆料构件的试验研究、理论计算都很少,也缺乏相应的规范^[8-14]。而混凝土的材料性能和灌浆料非常相似,本文通过将混凝土的本构关系代替高强灌浆料,计算分析钢管约束高强灌浆料的结构构

件。根据前期试验的经验,圆钢管约束高强灌浆料可能会发生局部冲切和局部承压两种形式的破坏^[8],因此应用有限元软件建立 MSM 模型,数值分析圆钢管约束高强灌浆料构件在局部承压作用下的力学性能。在此结构模型的基础上进行参数分析,通过试件高径比、钢管壁厚和灌浆料强度等参数的变化,对圆钢管约束高强灌浆料的局部承压性能进行进一步研究。

1 试验概况

张雪娇等^[8]为研究钢管约束高强灌浆料局部承压性能,对 5 组试件进行了局部承压试验研究。钢管约束高强灌浆料钢管均选用高 171 mm、外径 114 mm 的 Q335 圆钢管,按照国家标准的有关规定进行拉伸试验,钢管的力学性能如表 1 所列。高强灌浆料按照规定配合比在水泥胶砂搅拌机中进行配置,测得局部承压试块的实际抗压强度 $f_{cu}=82.7$ MPa、抗折强度 $f_{tf}=7.9$ MPa。选取部分试件,详细参数如表 2 所列。

表 1 钢管力学性能

Table 1 Mechanical performance of steel tube				
钢管类型 /mm	屈服拉力 /kN	屈服强度 /(N·mm ⁻²)	极限强度 /(N·mm ⁻²)	屈服应变 u_e
1	9	360	574	2 000
2	14.27	286	348	1 538
3.5	27.9	320	371	1 789
6	45.32	302	448	1 775

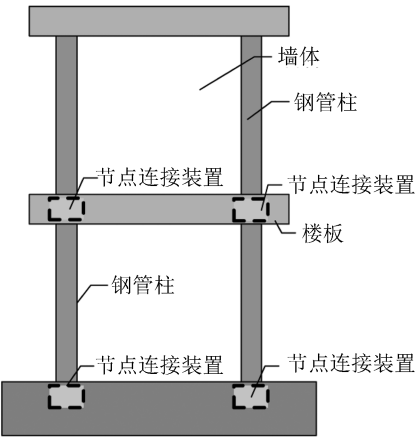


图 1 节点连接装置在结构中位置

Fig.1 Position of node connection device in the structure

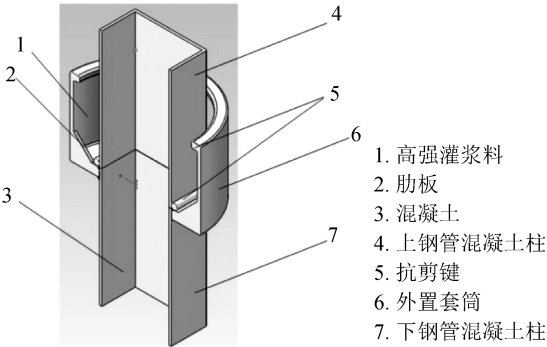


图 2 节点连接装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of node connection device

试验采用最大功率为 2 000 kN 的液压式压力试验机。试验前,按顺序将试验机上加载板、上部定位装置、圆钢管、下部定位装置和下加载板放置在压力试验机上,以保证试件受到均匀的局部压力作用。试验装置图和实际设备图如图 3 所示。

在试件钢管外的实际高度 1/4、1/2、3/4 处沿 90°方向布置应变片,环向布置 3 个、纵向布置 1 个应变片,共布置 4 组,以详细分析钢管约束高强灌浆料构件的受力机理。图 4 为测点布置图。在加载前,先要预加载,然后卸载。正式加载时,加载速率一般在 4 kN/s 左右,所有数据及变形都由 Strain-book 动态应变采集仪自动采集。

表 2 试件参数

Table 2 Parameters of specimens							
试件编号	钢管类型	壁厚 t /mm	外径 d /mm	试件高度 h /mm	灌浆料强度 /MPa	局部承压面积 A_1 /mm ²	核心灌浆料面积 A_c /mm ²
CY-H- t_1	焊管	1	114	171	C80	3 316.63	9 847.04
CY-H- t_2	焊管	2	114	171	C80	3 316.63	9 498.5
CY-H- $t_{3.5}$	焊管	3.5	114	171	C80	3 316.63	8 987.47
CY-W- t_6	无缝	6	114	171	C80	3 316.63	8 167.14

注:试件编号中 CY 表示承压试验;H 表示焊管;W 表示无缝钢管; t 表示试件厚度;其后的数字表示钢管壁厚。

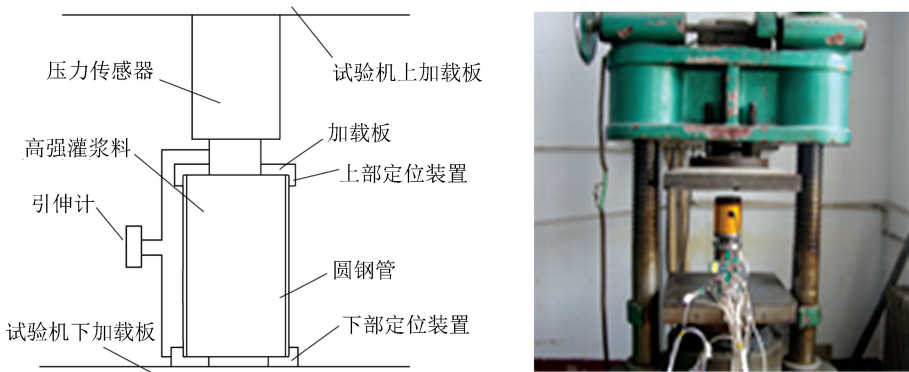


图 3 试验装置图
Fig.3 Test device diagram

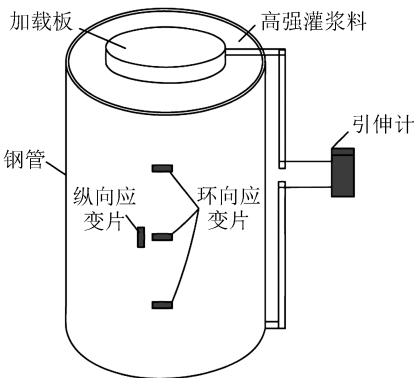
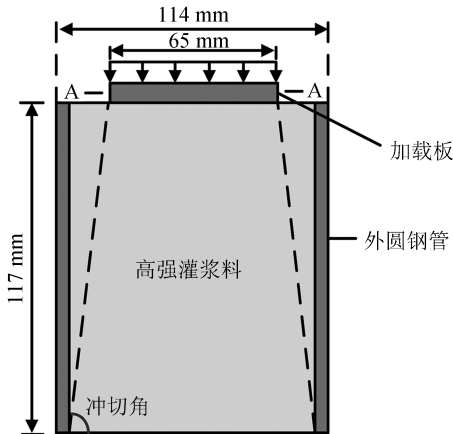


图 4 测点布置
Fig.4 Arrangement of measuring points



2 MSM 模型建立与参数确定

2.1 MSM 模型

根据圆钢管约束高强灌浆料局部承压的试验研究^[15-17],应用 ABAQUS 软件建立有限元模型,试件设计示意图如图 5 所示。为简化整体模型,便于网格划分及准确设置各部件间的相互作用,建立 MSM 模型(图 6)。

基于分段模型,根据试件尺寸大小和各段组成部分建立的圆钢管约束高强灌浆料模型主要包括以下方面:(1)由于钢管的厚度相对于混凝土较小,所

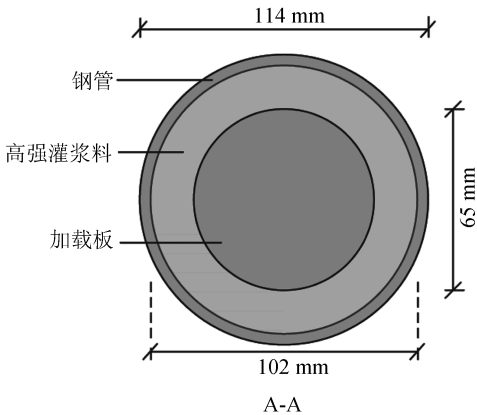


图 5 试件设计示意图
Fig.5 Schematic diagram of specimen design

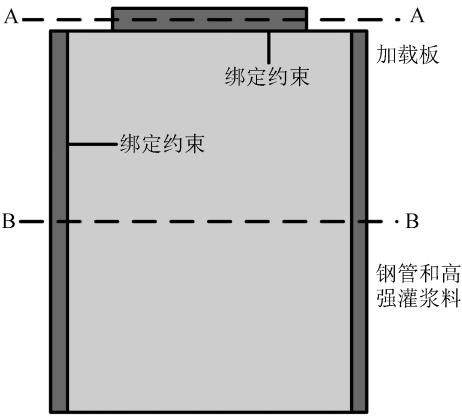


图 6 分段模型
Fig.6 Multi-section model

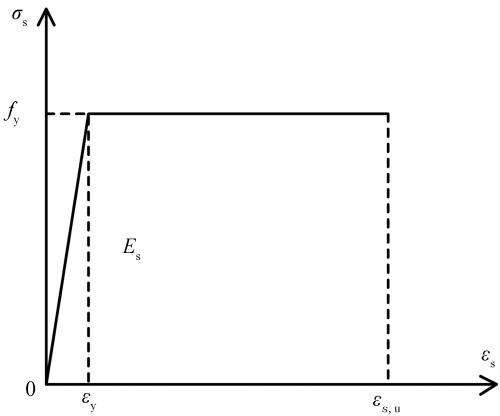


图 7 钢材本构关系
Fig.7 Constitutive relation of steel

以钢管采用 4 节点减缩积分格式的壳单元(S4R)。在壳单元厚度方向采用 9 个积分点的 Simpson 积分。高强灌浆料采用 8 节点减缩积分格式的三维实体单元(C3D8R),加载板刚度较大,采用刚性体模拟;(2)采用映射的网格划分方式。网格的划分对计算结果的影响非常显著,网格尺寸过大会使结果出现严重偏差,网格尺寸过小需要花费很长的计算时间;(3)加载板、高强灌浆料和钢管之间均采用绑定约束。绑定约束需要在初始状态设置,可以忽略从面节点自由度,节约计算时间。同时绑定约束可以计算钢管和混凝土的共同变形,不用考虑黏结滑移的影响,更接近试验结果;(4)将构件底面完全固定住,加载板沿竖直方向位移加载。

2.2 材料本构

钢管选取适合单调加载的等向弹塑性模型,满足 Von.Mises 屈服准则。对于常用的低碳钢,一般选用钢材单轴应力-应变关系曲线(图 7)。弹性模量取 206 000 MPa,泊松比取 0.3。

当 $\epsilon_s < \epsilon_y$ 时, $\sigma_s = E_s \epsilon_s$ ($E_s = f_y / \epsilon_y$);
当 $\epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{s,u}$ 时, $\sigma_s = f_y$; 取 $\epsilon_{s,u} = 0.01$ 。
高强灌浆料采用混凝土的塑性损伤模型。该模型适用于各种荷载作用下(单调加载、动力荷载、往复荷载等)混凝土的受力分析,同时也适用于各种单元类型(梁单元、壳单元、实体单元等)。混凝土单轴荷载作用下的混凝土响应如图 8 所示。根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)^[9]中的取值,膨胀角取 30,偏心率取 0.1, f_{bo}/f_{co} 取 1.16,黏性参数取 0.005。

受拉:

$$\sigma = (1 - d_t) E_c \epsilon \tag{1}$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t [1.2 - 0.2x^5] & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t (x - 1) 1.7 + x} & x > 1 \end{cases} \tag{2}$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{t,r}}, \rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c \epsilon_{t,r}} \tag{3}$$

式中: α_t 为混凝土单轴受拉应力-应变曲线下降段

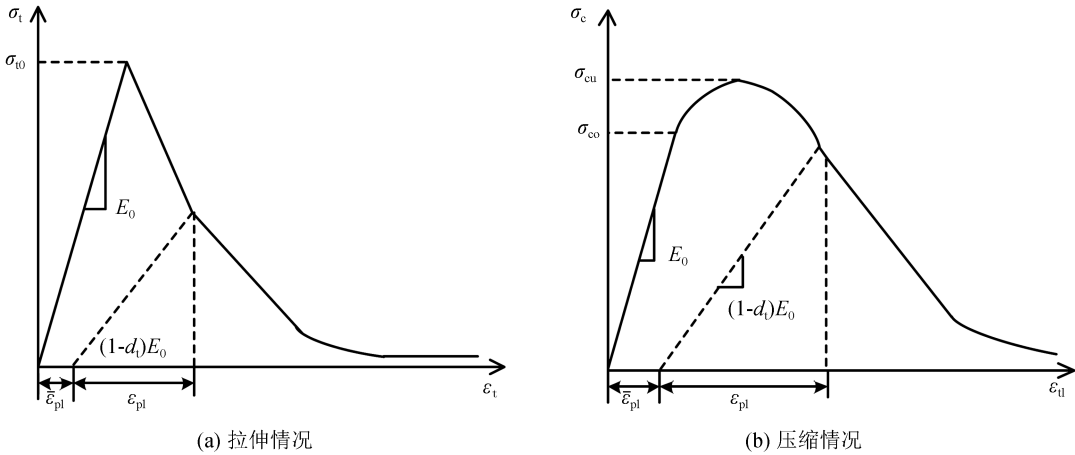


图 8 单轴拉伸和压缩荷载作用下混凝土的响应
Fig.8 Responses of concrete under uniaxial tensile and compressive loading

的参数值,按照《混凝土结构设计规范》^[9]中表C.2.3取值; $f_{t,r}$ 为混凝土单轴抗拉强度代表值; $\epsilon_{t,r}$ 为与单轴抗拉强度代表值相应的混凝土峰值拉应变,按照《混凝土结构设计规范》^[9]中表C.2.3取值; d_t 为混凝土单轴受拉损伤演化参数。

受压:

$$\sigma = (1 - d_c) E_c \epsilon$$

(4)

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

(5)

$$\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_c \epsilon_{c,r}}, n = \frac{E_c \epsilon_{c,r}}{E_c \epsilon_{c,r} - f_{c,r}}, x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{c,r}}$$

(6)

式中: α_c 为混凝土单轴受压应力-应变曲线下降段参数值,按照《混凝土结构设计规范》^[9]中表C.2.4取值; $f_{c,r}$ 为混凝土单轴抗压强度代表值; $\epsilon_{c,r}$ 为与单轴抗压强度相应的混凝土峰值压应变,按照《混凝土结构设计规范》^[9]中表C.2.4取值; d_c 为混凝土单轴受压损伤演化参数。

3 数值模拟

采用上述材料本构,基于MSM模型应用ABAQUS有限元软件,对表1中4个圆钢管约束高强灌浆料试件进行计算,得到荷载-位移曲线。图9是圆钢管约束高强灌浆料试件受局部承压作用的试验结果与有限元计算结果的比较。图9(a)、(b)、(c)分别为厚度1 mm、2 mm、3.5 mm的焊管在弹性阶段的荷载-位移曲线,均近似呈直线,且计算结果的刚度比试验结果大,这可能是因为试验过程中截面有初应力;进入塑性阶段后,厚度为1 mm的试件出现明显的下降段,这是因为钢管厚度太小,随荷载增大钢管沿裂缝开裂,厚度为2 mm和3.5 mm的试件有明显荷载峰值点,且下降段平缓。图9(d)为厚度6 mm的无缝钢管在弹性阶段的荷载-位移曲线,也近似呈直线,无明显的峰值点。试件极限承载力误差:试件CY-H-t1为2.8%,试件CY-H-t2为14.3%,试件CY-H-t3.5为15.9%,试件CY-W-t6为16.3%,均在允许误差范围内。由此说明,建立的MSM模型对于圆钢管约束高强灌浆料局部承压的模拟是适用的。

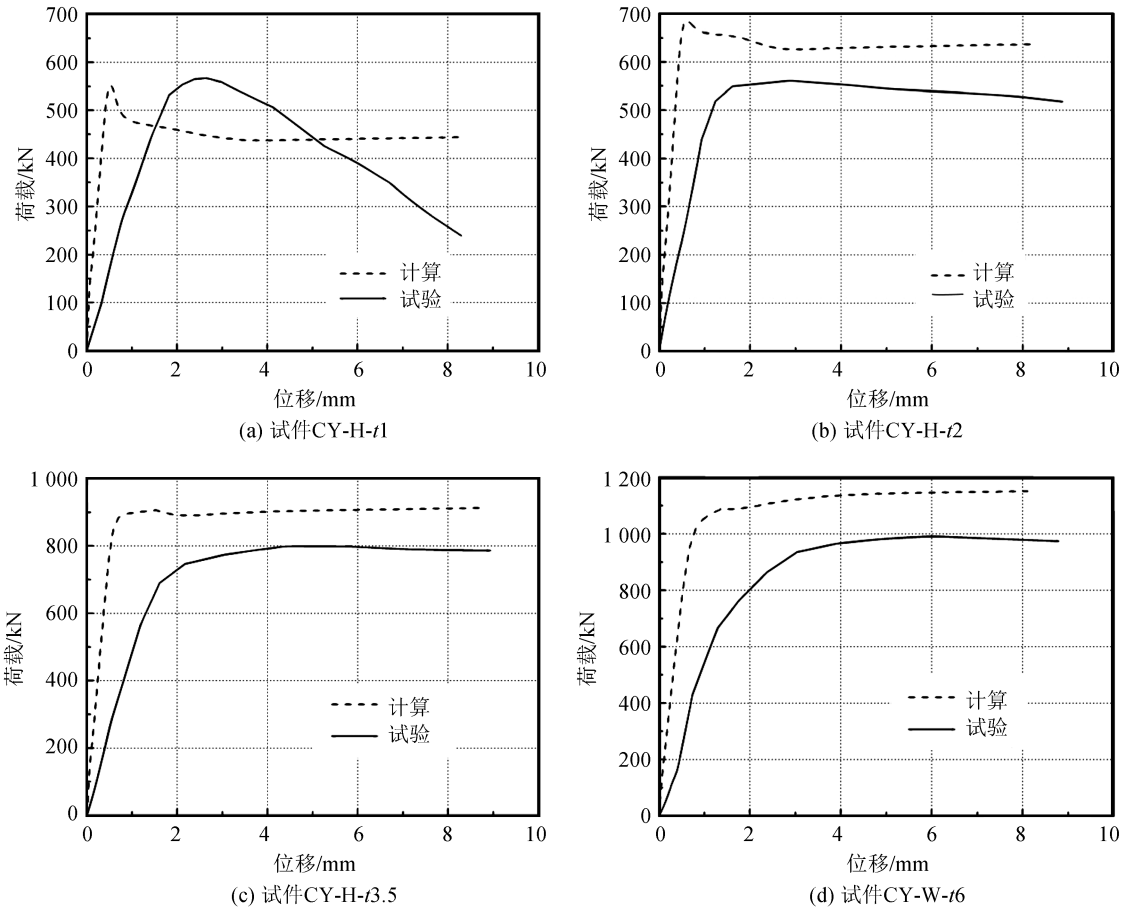


图9 试件荷载-位移计算与试验结果的对比

Fig.9 Comparison between load-displacement calculated and tested results of specimens

4 参数分析

4.1 高径比

选取厚度为 3.5 mm 的无缝钢管,其他条件相同,通过减小试件高度改变高径比的大小。图 10 是钢管约束高强灌浆料试件高径比为 1.15、1.32 和 1.5 时,试件在局部承压的作用下对荷载-位移曲线的影响。由图 10 可知,高径比为 1.5 的试件比高径比为 1.32 的试件极限承载力高 3.75%,高径比为 1.32 的试件比高径比为 1.15 的试件极限承载力高 2.41%。由此说明,圆钢管约束高强灌浆料试件在局部承压的作用下,随高径比的增大其极限承载力也变大。

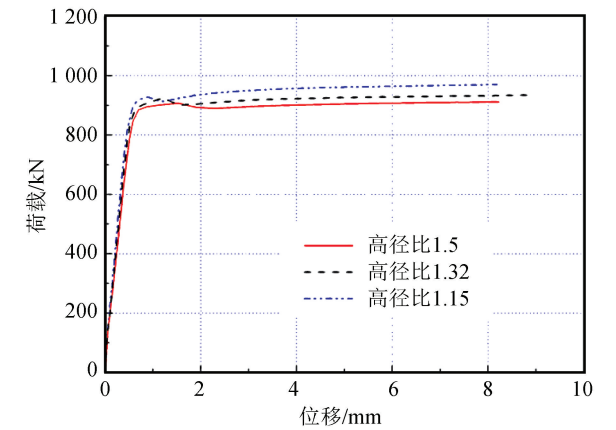


图 10 高径比的影响

Fig.10 Effect of the height-to-diameter ratio

4.2 钢管壁厚

图 11 是钢管约束高强灌浆料试件的钢管厚度为 2 mm、3.5 mm 和 6 mm 时,试件在局部承压的作用下对荷载-位移曲线的影响。当钢管壁厚较小时,主要是钢管内的高强灌浆料承受局部荷载作用,当钢管壁厚增大时,可以有效提高外钢管对高强灌浆料的约束作用,从而提高试件的极限承载力。由图 11 可知,壁厚 3.5 mm 试件的极限承载力比壁厚 2 mm 试件的极限承载力提高了 42.88%,壁厚 6 mm试件的极限承载力比壁厚 3.5 mm 的试件提高了 26.18%。由此说明,圆钢管约束高强灌浆料试件在局部承压的作用下,钢管壁厚越大其极限承载力越大。

4.3 高强灌浆料强度

以文献[8]中试验测得的灌浆料强度为基础,计算试件受局部承压作用时的荷载-位移曲线如图 12 所示。在其他条件均相同,灌浆料强度为 C100 时试件的极限承载力比灌浆料强度为 C80 时大 3.6%。说明随灌浆料强度的增加,试件在局部承压作用下

极限承载力会增大。

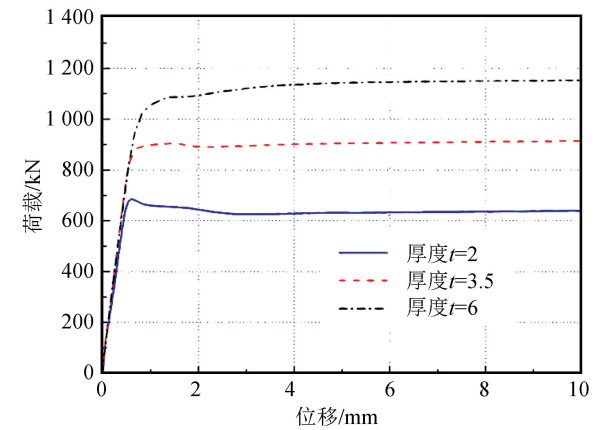


图 11 钢管壁厚的影响

Fig.11 Effect of the steel tube thickness

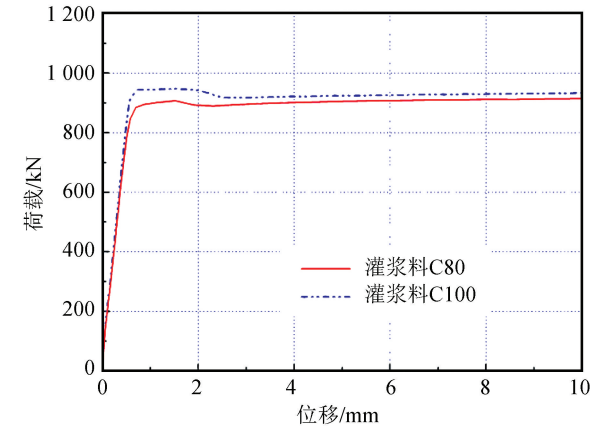


图 12 高强灌浆料强度的影响

Fig.12 Effect of the strength of high strength grouting material

5 结论

根据圆钢管约束高强灌浆局部承压试验研究,建立分段模型,并在该模型的基础上详细探讨了关键参数对其极限承载力的影响,得到以下结论:

- (1) 建立圆钢管约束高强灌浆料局部承压性能的分段模型,该模型能简单、准确地模拟圆钢管约束高强灌浆料受局部承压的作用。
- (2) 将计算得到的荷载-位移关系曲线与试验结果进行对比,二者总体上吻合较好。
- (3) 圆钢管约束高强灌浆料在局部承压的作用下,通过增加试件的高径比、钢管壁厚和高强灌浆料强度都可以提高试件的极限承载力。

参考文献(References)

[1] 苏幼坡,高林,徐国强,等.钢管混凝土连接器[P].中国,实用新

- 型专利,ZL 2012 2 0078120.X,2012-09-19.
- SU Youpo,GAO Lin,XU Guoqiang,et al.Concrete Filled Steel Tube Connector[P].China,Patent for Utility Models,ZL2012 2 0078120.X,2012-09-19.
- [2] 陈建伟,苏幼坡.预制装配式剪力墙结构及其连接技术[J].世界地震工程,2013,29(1):38-48.
- CHEN Jianwei,SU Youpo.Prefabricated Concrete Shear Wall Structure and Its Connecting Technology[J].World Earthquake Engineering,2013,29(1):38-48.
- [3] 张同亿,张兴虎.装配整体复合墙抗震性能试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2000,32(4):325-328.
- ZHANG Tongyi,ZHANG Xinghu.Experimental Study on Seismic Performance of Assembled Composite Wall[J].Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition),2000,32(4):325-328.
- [4] 宋国华,柳炳康,王东炜.装配式大板结构竖缝抗震性能试验研究[J].世界地震工程,2002,18(1):81-85.
- SONG Guohua,LIU Bingkang,WANG Dongwei.Experimental Study on Seismic Performance of Vertical Joints Assembled Structure[J].World Earthquake Engineering,2002,18(1):81-85.
- [5] 严薇,曹永红,李国荣.装配式结构体系的发展及建筑工业化[J].重庆建筑大学学报,2004,26(5):131-136.
- YAN Wei,CAO Yonghong,LI Guorong.Development of Assembly Structure System and Construction Industrialization[J].Journal of Chongqing Jianzhu University,2004,26(5):131-136.
- [6] 汪峰.某办公楼装配式框架剪力墙结构加固施工[J].施工技术,2009,38(2):67-69.
- WANG Feng.Strengthening Construction Technology for Prefabricated Frame Shear Wall Structure on Some Office Building[J].Construction Technology,2009,38(2):67-69.
- [7] 李晓明.装配式混凝土结构关键技术在国外的发展与应用[J].住宅产业,2011(6):16-18.
- LI Xiaoming.Development and Application of Key Technologies of Assembled Concrete Structures at Abroad[J].Housing Industry,2011(6):16-18.
- [8] 张雪娇.钢管约束高强灌浆料局部承压及抗冲切性能研究[D].唐山:华北理工大学,2013.
- ZHANG Xuejiao.Research on Local Pressure and Cutting Resistance of High Strength Grouting Material Pole Constraints [D].Tangshan:North China University of Technology,2013.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部组织.混凝土结构设计规范:GB 50010-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of People's Republic of China.Code for Design of Concrete Structures:GB 50010-2010[S].Beijing:China Architecture & Building Press,2014.
- [10] 蔡绍怀.钢管混凝土结构的计算和应用[M].北京:中国建筑工业出版社,1989.
- CAI Shaohuai.The Calculation and Application of Concrete Filled Steel Tube Structure[M].Beijing:China Architecture & Building Press,1989.
- [11] 钟善桐.钢管混凝土结构[M].北京:清华大学出版社,1994.
- ZHONG Shantong.Concrete-filled Steel Tube Structure[M].Beijing:Tsinghua University Press,1994.
- [12] HAN L H,LU H,YAO G H,et al.Further Study on the Flexural Behavior of Concrete-filled Steel Tubes[J].Journal of Constructional Steel Research,2006b,62(6):554-565.
- [13] 郑捷,左河山,陈景恒,等.高强高性能混凝土损伤的细观数值演[J].地震工程学报,2016,38(5):745-750.
- ZHENG Jie,ZUO Heshan,CHEN Jingheng,et al.Meso-scale Numerical Analysis of Damage Evolution of High-strength and High-performance Concrete[J].China Earthquake Engineering Journal,2016,38(5):745-750.
- [14] 郝效强,杨仕升,秦荣.含剪力墙钢筋混凝土结构抗震能力的评估方法及应用[J].西北地震学报,2007,29(4):347-350.
- HAO Xiaoqiang,YANG Shisheng,QIN Rong.Evaluation Method of Anti-seismic Capability for Reinforced Concrete Structure Including the Shear Wall and Its Application[J].Northwestern Seismological Journal,2007,29(4):347-350.
- [15] 刘威.钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D].福州:福州大学,2005.
- LIU Wei.Research on Working Mechanism of Local Compression of Concrete Filled Steel Tube[D].Fuzhou:Fuzhou University,2005.
- [16] 陈建伟,苏幼坡,武立伟,等.钢管混凝土组合剪力墙竖向接合面抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(2):76-83.
- CHEN Jianwei,SU Youpo,WU Liwei,et al.Experimental Study on Seismic Performance of Vertical Joint for Shear Wall with Concrete Filled Steel Tubular Column[J].Journal of Architectural Structure,2014,35(2):76-83.
- [17] 陈建伟,苏幼坡,龚丽妍,等.装配式开洞钢管混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(1):251-260.
- CHEN Jianwei,SU Youpo,GONG Liyan,et al.Experimental Study on Seismic Performance of Precast Concrete Shear Wall with Steel Tube[J].Journal of Architectural Structure,2016,37(1):251-260.