

不锈钢槽式预埋组件受拉性能研究

蔡远征¹, 张浩^{1,2}, 苏明周^{1,2}, 袁森¹, 郑勇¹, 孙艳文³

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055;
3. 中国建筑标准设计研究院, 北京 100048)

摘要: 为研究不锈钢槽式预埋组件在拉力作用下的受力性能, 首先对 S-CAG-53/34、S-CBG-52/34 两种不锈钢预埋槽道进行锚杆中心线和槽道跨中位置受拉静载试验。试验结果表明: 不锈钢预埋槽道主要发生槽口卷边屈曲破坏。然后, 采用有限元分析软件 ABAQUS 建立 2 种不锈钢槽式预埋组件的有限元模型, 将数值模拟结果与试验结果对比, 验证有限元模型的准确性和适用性。最后, 建立 50 个足尺试件的有限元模型, 研究槽口卷边厚度、槽道侧壁厚度、锚杆尺寸、锚杆间距以及相邻荷载对不锈钢槽式预埋组件受拉性能的影响。分析结果表明: 增加槽道槽口卷边厚度、槽道侧壁厚度以及减少锚杆间距均能有效提高不锈钢槽式预埋组件的受拉承载力; 增加槽口卷边及侧壁厚度会使槽道截面刚度提高, 从而提高槽道跨中部位受拉承载力; 减少锚杆间距使得槽道受弯承载力增加, 从而提升槽道跨中部位受拉承载力。改变锚杆长度对槽道跨中位置受拉承载力的影响较小; 在一定间距内同时施加多个荷载, 会导致部分锚杆承受较高荷载, 对槽道承载力产生影响, 但这种影响随着锚杆间距减少逐渐降低。

关键词: 不锈钢; 槽式预埋组件; 受拉承载力; 延性性能; 破坏模式

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)02-0249-11

Study on tensile behavior of stainless-steel anchor channel assemblies

CAI Yuanzheng¹, ZHANG Hao^{1,2}, SU Mingzhou^{1,2}, YUAN Sen¹, ZHENG Yong¹, SUN Yanwen³

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education (XAUAT), Xi'an 710055, China;

3. China Institute of Building Standard Design & Research Co., Ltd., Beijing 100048, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of stainless steel anchor channel components under tension, first, tensile static load tests were conducted on the anchor rod centerline and the mid span position of S-CAG-53/34 and S-CBG-52/34 stainless steel anchor channels. The experimental results showed that the stainless steel anchor channels mainly experienced buckling failure of the channel edge curling. Then, the finite element analysis software ABAQUS was used to establish the finite element models of two kinds of stainless steel anchor channel components. The numerical simulation results were compared with the experimental results to verify the accuracy and applicability of the finite element model. Finally, the finite element model of 50 full-scale specimens was established to study the influence of channel edge thickness, channel side wall thickness, bolt size, bolt spacing and adjacent load on the tensile performance of stainless steel anchor channel components. The analysis results show that increasing the thickness of the channel edge, the thickness of the side wall of the channel and reducing the spacing of the bolts can effectively improve the tensile bearing capacity of the stainless steel anchor channel components. Increasing the thickness of the channel edge and the side wall will increase the stiffness of the channel section, thereby improving the tensile bearing capacity of the middle part of the channel. Reducing the anchor spacing increases the flexural bearing capacity of the channel, thereby improving the tensile bearing capacity of the mid-span of the channel. Changing the length of the anchor rod has little effect on the tensile bearing capacity of the mid-span position of anchor channel, and applying multiple loads simultaneously within a certain spacing results in some anchor rods bearing higher loads, thereby affecting the bearing capacity of the channel. The analysis results show that this effect gradually decreases as the spacing between anchor rods decreases.

Key words: stainless steel; anchor channel assemblies; tensile load-bearing capacity; ductility; failure mode

收稿日期: 2023-02-20

修回日期: 2023-03-23

基金项目: 上海睿中实业股份公司项目(20210367)

第一作者: 蔡远征(1999—), 男, 硕士, 主要从事钢结构及不锈钢结构研究。E-mail: cyz19990402123@163.com

通信作者: 张浩(1993—), 男, 博士, 讲师, 主要从事新型韧性钢结构体系抗震性能与设计理论研究。

E-mail: zhanghao0219@xauat.edu.cn

槽式预埋组件是一种能够预埋于混凝土结构中,外留槽口用以安装 T 型螺栓进行连接、承重的受力构件,如图 1 所示.使用预埋槽道可以根据实际工况进行合理的螺栓位点布置,后期还可以进行更改^[1],同时槽式预埋组件的受拉、平行受剪、垂直受剪的承载力较高,在地铁隧道、高层幕墙、大型工业厂房等施工要求高的基础设施工程、建筑结构中广泛应用^[2].

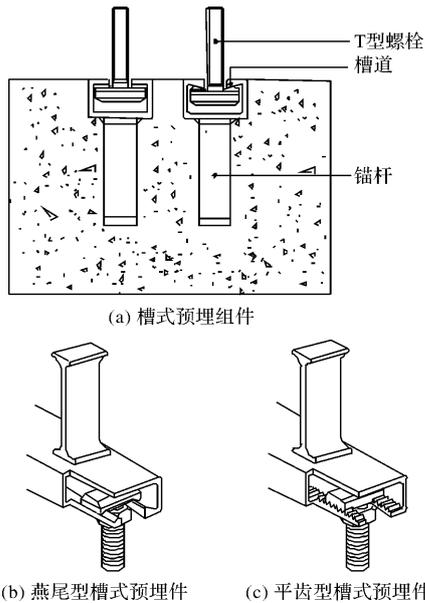


图 1 不锈钢预埋槽道示意图

Fig. 1 Configuration of stainless steel anchor channel

槽式预埋组件通过锚杆锚固于混凝土表面,受力情况较为复杂,根据实际工程情况,合理使用槽式预埋组件可以达到节省材料,提高工程耐久性和可靠性的目的.不锈钢材料具有强度高、耐腐蚀性好,良好的应变硬化性能和延性^[3-5],应用于建筑结构中可以提高工程的耐久性和使用年限.因此,不锈钢槽式预埋组件可有效发挥不锈钢材料与槽式预埋组件的性能优势,其在基础设施和建筑结构中的应用将具有一定的工程实际意义.

国内外对预埋槽道开展了较为深入的研究, Mahrenholtz 和 Sharma^[6-8]将欧洲规范 EN 1992-4 和美国规范 ACI 318 进行了对比,系统的概括了槽式预埋组件的评价标准和设计方法. Cattaneo 等^[9]提出了一种用于槽式预埋组件的新型滑块式螺栓,对其进行了单调静力试验,结果表明新型滑块式螺栓表现出了更好的承载性能. Abouhamdah 等^[10]对埋设于混凝土中的 C 型槽道进行了试验研究和数值模拟. Wang 等^[11]通过试验,研究了直径对锚杆在混凝土中抗拔性能和破坏模式的影响,结果表明,随着直径的增加锚杆的承载能力显著

提高,破坏模式分别出现了锚杆拔出破坏、混凝土锥体破坏以及兼有以上两种情况的复合破坏模式. Shin 等^[12]通过试验研究了锚杆端头对锚杆锚固性能的影响,随着锚杆端头尺寸增加,锚杆承载力出现先增大后减小的情况. Delhomme 等^[13]通过试验,研究了荷载类型、边缘距离、混凝土的开裂状态对光圆锚杆和带肋锚杆的粘结锚固性能. Nilforous 等^[14]通过试验,对埋设于普通混凝土构件中和通过钢纤维增强混凝土构件中的锚杆进行了单向拉伸试验,研究了钢纤维对锚杆锚固性能的影响. 徐淑美^[15]、李智明^[16]和张世卓等^[17]对研究了 Q235 材质的槽式预埋组件在拉力作用下的破坏机理和承载性能. 以上研究主要针对碳钢槽式预埋组件,由于不锈钢与碳钢的材料力学性能差异较大,导致不锈钢槽式预埋组件与碳钢预埋件在受力性能上有较大区别,同时对于不锈钢槽式预埋组件承载力的评估和计算方法尚需通过相关研究进行论证. 为此,本文选取 2 种常用不锈钢预埋槽道型号进行受拉静载试验,研究不锈钢预埋槽道在拉力作用下的力学性能及破坏机理,并建立有限元模型,研究槽口卷边厚度、锚杆间距、锚杆深度等因素对不锈钢槽式预埋组件承载性能的影响.

1 试验概况

1.1 试件设计

采用 2 种型号的不锈钢预埋槽道,槽道钢材均为奥氏体型不锈钢,钢材牌号为 06Cr17Ni12Mo2Ti (S31668). 分别采用两种槽口卷边形式:轧制平面有齿型(CAG)和轧制燕尾型(CBG). 锚杆类型均为工字形锚杆(锚杆材质与槽道材质相同),槽道截面宽度分别为 53 mm 和 52 mm,截面高度均为 34 mm,锚杆间距均为 250 mm. 参考《预埋槽道型钢》GB/T 37613—2019^[18]的规定,不锈钢预埋槽道的型号分别命名为: S-CAG-53/34、S-CBG-53/34,每组 3 个,试件规格参数见图 2,具体设计参数如表 1 所示. T 型螺栓为 8.8 级 M20 高强度螺栓,对 S-CAG-53/34 试件为平面有齿型,对 S-CBG-52/34 试件为燕尾型,有效长度均为 120 mm(螺栓编号分别为 LSA M20×120-8.8 和 LSB M20×120-8.8),螺栓尺寸见图 3. 参考《槽式预埋组件系统应用评价技术规范》RB/T 059—2020^[19]中槽口受拉试验和槽道受拉抗弯试验进行设计,将预埋槽道整体浇筑在混凝土中,混凝土设计箍筋和纵筋. 考虑两种拉力荷载加载方式,即不锈钢预埋槽道跨中部位和锚杆中心线处进行加载. 试件的混凝土强度等级采

用 C30, 自然养护 28 d. 混凝土试件设计尺寸为 600 mm×300 mm×250 mm.

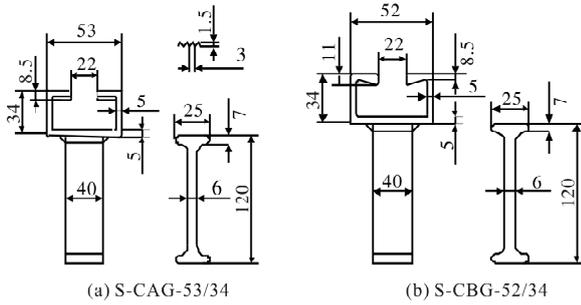


图 2 试件型号及其尺寸(mm)

Fig. 2 Geometric dimensions of specimens/mm

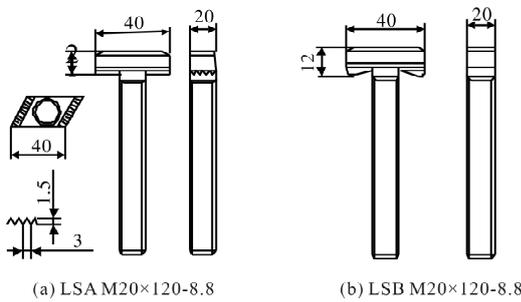


图 3 螺栓尺寸(mm)

Fig. 3 Geometric dimensions of channel bolts/mm

1.2 加载装置及加载制度

试验加载装置如图 4 所示, 试件在 250 kN MTS 疲劳试验机上进行加载. 混凝土试件通过盖板固定在加载支座上, 安装时扭紧盖板上的固定丝杆. T 型螺栓螺杆通过试验机上端夹头固定, 两种螺栓的安装扭矩均为 120 N·m. 采用位移控制加载, 加载速率为 1 mm/min. 荷载达到 1.5 倍 F_L (预埋槽道工作静态承载力, 按照《预埋槽道型钢》(GB/T 37613—2019)^[18] 规定取 15 kN) 时, 检查预埋槽道有无塑性变形, 以及荷载-位移曲线是否异常. 加载过程中当试件荷载下降至极限荷载 85% 或产生较大变形不适合继续加载时停止试验.

1.3 材性性能试验

截取不锈钢预埋槽道底部板件进行材性拉伸试验, 每种型号进行 3 组. 材性试验设计符合《金属材料拉伸试验: 第 1 部分: 室温试验方法》GB/T 228.1—2021^[20] 的要求. 取每组试验结果的平均值作为不锈钢材料性能指标的实测值, 试验结果见表 2. 由表中数据可见, 各项指标均符合《不锈钢棒》(GB/T 12202007)^[21] 的要求. 养护 28 d 后, C30 混凝土标准立方体试块 (150 mm×150 mm×150 mm) 的实测抗压强度平均值为 37.5 MPa.

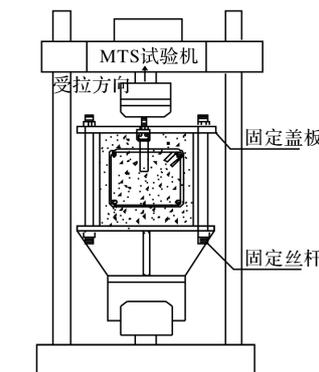
表 1 试验试件设计参数

Tab. 1 Design parameters of test specimens

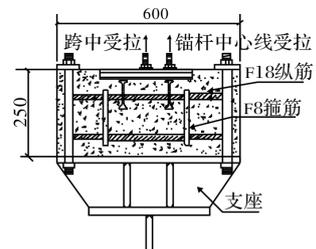
试件编号	槽道类型	槽道钢材等级	槽口卷边形式	锚杆形式	锚杆间距	混凝土强度	T 型螺栓型号
S-CAG-53/34	53×34	S31668	平面有齿型	工字形	250	C30	8.8 级-M20
S-CBG-53/34	52×34	S31668	燕尾型	工字形	250	C30	8.8 级-M20



(a) 试验加载装置



(b) 试验加载装置示意图



(c) 加载装置支座示意图

图 4 加载装置及支座

Fig. 4 Loading device and support

表 2 钢材力学性能参数

Tab. 2 Mechanical property parameters of steel

试件名称	E /MPa	t /mm	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_u /MPa	屈强比 $\sigma_{0.2}/\sigma_u$	断后伸长率/%	断面伸长率/%
S-CAG-53/34	188 314	4.61	207.35	540.25	0.38	65.20	59.64
S-CBG-52/34	183 510	4.07	213.35	534.25	0.40	65.41	58.54

注: E 为弹性模量; t 为材性试件实测厚度; $\sigma_{0.2}$ 为塑性残余变形为 0.2% 时的应力; σ_u 为抗拉强度.

2 试验结果与分析

2.1 试验现象和破坏形态

荷载作用于锚杆中心线处, 试件 S-CAG-53/34 和 S-CBG-52/34 的破坏形式为槽口卷边屈服, T 型螺栓被拉出。50 kN 时, 试件 S-CAG-53/34 和 S-CBG-52/34 槽道两侧与混凝土交界处产生一条沿槽道方向的细微裂缝。70 kN 时, 荷载作用位置混凝土表面对称的出现两条垂直槽道方向的裂缝。90 kN 时, 试件 S-CAG-53/34 出现两条起始于槽道边缘位置的斜向裂缝覆盖在槽口表面的混凝土薄层逐渐破碎剥落。破坏时试件 S-CAG-53/34 仅槽口部位凸起张开较为明显, 槽道整体与混凝土表面平齐, 图 5(a)。试件 S-CBG-52/34 破坏时, 可以观测到荷载作用位置一侧翘起, 槽道槽口表面整体相对混凝土表面出现轻微滑移, 图 5(b)。试件 S-CAG-53/34 混凝土表面裂缝发展较 S-CBG-52/34 严重, 且前者破坏时位移更小。试验结果表明在拉力荷载作用下, 槽口卷边形式的不同, 构件破坏时对荷载作用位置周边混凝土影响程度也不同。

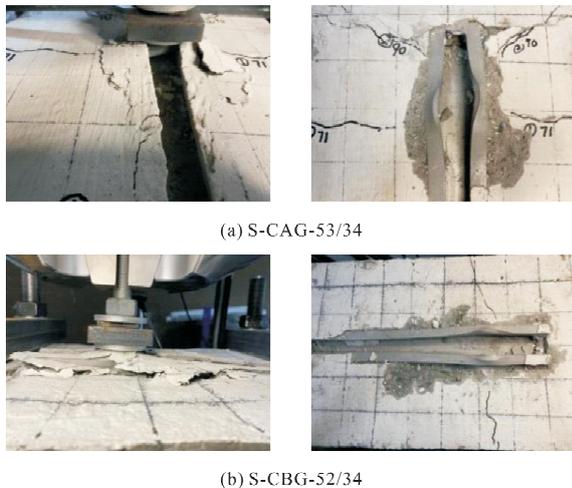


图 5 锚杆中心受拉工况试件 S-CAG-53/34 和 S-CBG-52/34 破坏模式

Fig. 5 Failure modes of S-CAG-53/34 and S-CBG-52/34: above the anchor position of the bolts

荷载作用于跨中部位, 试件 S-CAG-53/34 和 S-CBG-52/34 的破坏形式为槽口卷边屈服, T 型螺栓被拉出, 破坏过程中槽道产生了一定的弯曲变形。40 kN 时, 试件产生沿槽道方向的细微裂缝; 70 kN 时, 加载处槽口周围混凝土薄层出现破碎剥落现象, 槽口卷边向上产生凸起现象, 试件 S-CAG-53/34 表面出现多条斜向裂纹但并未向试件侧面发展图 6(a); 80 kN 时, 试件 S-CBG-52/34 加载处槽口向上凸起明显, 槽口张开, 槽道跨中

加载处隆起明显, 图 6(b), 试件 S-CAG-53/34、S-CBG-52/34 加载处槽口附近混凝土破碎剥落严重, 原因是前者槽口卷边在荷载作用下向两边混凝土挤压现象较后者严重。

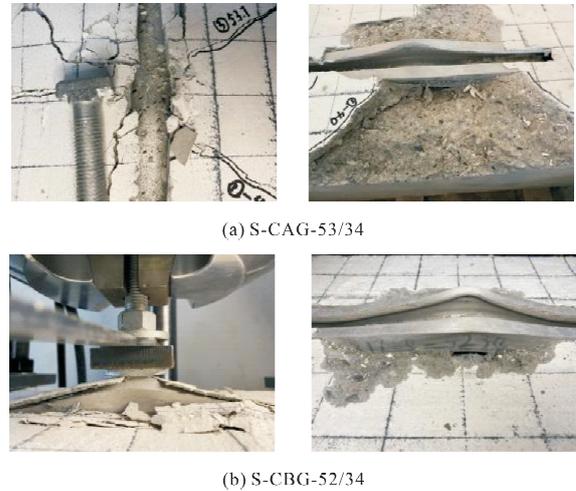


图 6 S-CAG-53/34 和 S-CBG-52/34 跨中受拉破坏模式
Fig. 6 Failure modes of S-CAG-53/34 and S-CBG-52/34: midspan position of the bolts

2.2 荷载位移曲线

不锈钢预埋槽道的荷载-位移曲线见图 7, 可分为四个阶段; ①弹性变形阶段, 这一阶段预埋槽道位移变化较小, 试件无明显变形, 混凝土无裂缝产生, 荷载-位移曲线呈线性变化; ②弹塑性变形阶段, 这一阶段位移快速增加, 槽口开始表现出轻微凸起, 混凝土出现裂缝, 荷载-位移关系曲线不再呈线性。③塑性阶段, 进入塑性变形阶段后槽口张开凸起明显, 混凝土表面破碎剥落现象严重; ④下降阶段, 塑性变形持续增加, 槽口卷边屈服严重, 对 T 型螺栓不再具有约束能力。

不同型式的槽口卷边对试验槽道受拉性能产生了一定影响, 具体表现为: 跨中受拉试验, 试件 S-CAG-53/34 破坏时承载力较 S-CBG-52/34 降低了 21.59%, 破坏荷载对应的位移降低了 49.96%。锚杆中心线受拉试验, 前者承载力较后者降低了 25.28%, 破坏荷载对应的位移降低了 51.25%。不考虑齿牙的厚度, 燕尾型槽口卷边厚度较平齿形槽口的大, 导致试件 S-CAG-53/34 承载力较试件 S-CBG-52/34 低。

试件 S-CAG-53/34 和 S-CBG-52/34 的跨中受拉极限荷载较锚杆中心线受拉的极限荷载分别降低 22.08% 和 18.24%, 位移分别增加 47.52% 和 51.44%。两种试件的破坏模式均为槽口卷边屈服, 槽道跨中受拉还要考虑槽道弯曲变形对承载力的影响。

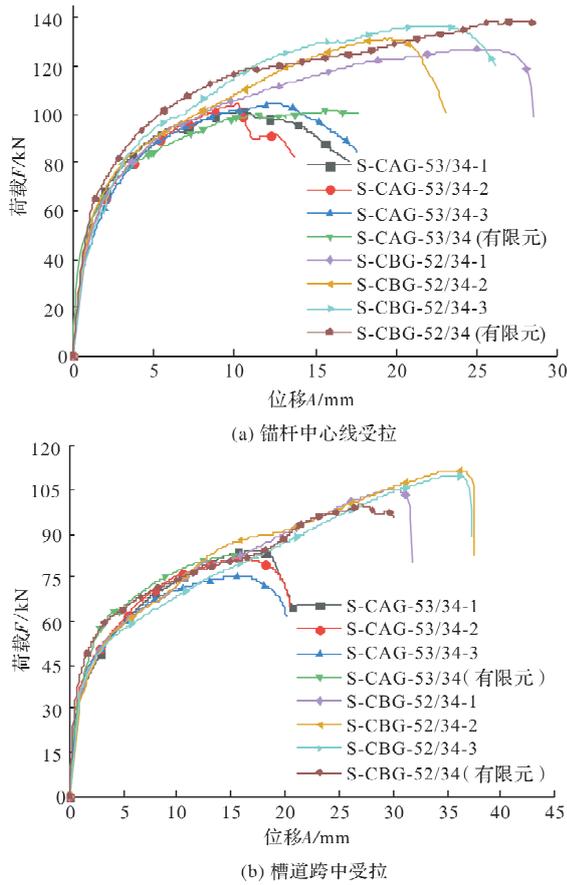


图 7 试件的荷载-位移曲线

Fig. 7 Tensile load-displacement curves of specimens

3 有限元验证

3.1 有限元模型建立

采用有限元分析软件 ABAQUS 建立试验试件有限元模型, 槽道试件和混凝土试件均采用考虑减缩积分的三维八节点空间六面体单元 (C3D8R). 不锈钢材料参数采用根据材性试验测得的名义应力-应变曲线转换为真实应力-应变. 混凝土采用塑性损伤模型^[22] (Concrete Damage Plasticity Model), 受压和受拉单向应力-应变曲线按《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)^[23] 采用, 其中试验试件模型采用实测值, 有限元参数分析采用名义值. 槽道与螺栓之间、槽道与混凝土之间的接触采用面与面接触, 接触法向方向设置为硬接触. 切向方向: 槽道与螺栓的切向设置

的摩擦系数取 0.15^[24], 槽道与混凝土的摩擦系数取 0.35^[23]. 锚杆与混凝土之间的约束采用内置区域. 图 8 为有限元模型的网格划分和边界条件. 混凝土构件底部设置固定约束, 在 T 型螺栓顶部施加位移荷载.

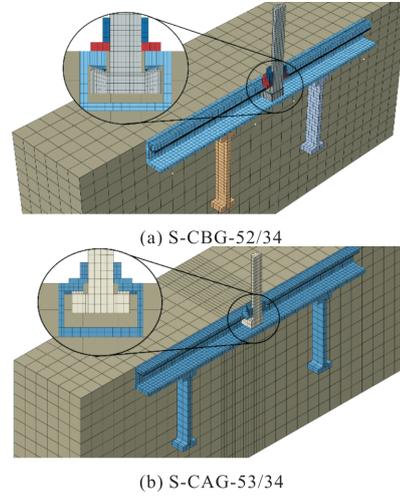


图 8 试件有限元模型

Fig. 8 Finite element models

3.2 有限元与试验结果对比

有限元和试验的荷载-位移曲线对比见图 7, 有限元模型可以较为准确地模拟出槽道跨中受拉和锚杆中心线受拉两种工况下试件在弹性变形阶段、弹塑性变形阶段以及塑性变形阶段的荷载-位移曲线.

图 9 给出了有限元计算获得的 DAMAGEC 损伤云图. 可以看出, 有限元和试验的破坏模式较为接近, 表明有限元模型可以准确的模拟出不锈钢预埋槽道的变形特点和破坏特征.

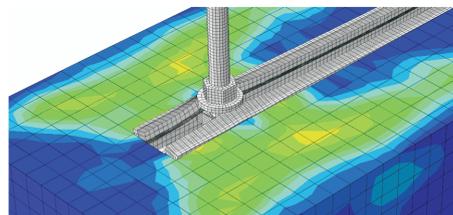
4 有限元参数分析

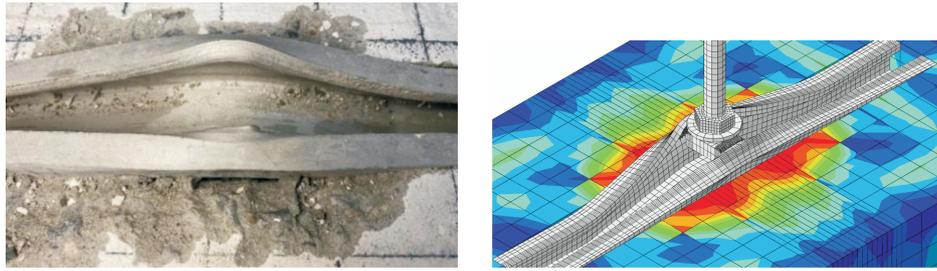
4.1 有限元模型参数设计

考虑槽口卷边厚度、锚杆间距、锚杆长度等参数对槽道跨中受拉承载力的影响. 规范未对螺栓群荷载间的间距进行规定, 实际工程中相邻螺栓之间可能产生相互影响, 因此考虑将锚杆数量增加至 3 个, 同时施加 2 个拉力荷载研究相邻荷载之间的影响. 试件 S-CAG-53/34 的模型设计参数见表 3, 试件 S-CBG-52/34 的模型设计参数见表 4.



(a) 锚杆中心线部位受拉





(b) 槽道跨中受拉

图 9 试件破坏模式对比

Fig. 9 Comparison of failure modes of specimens

表 3 试件 S-CAG-53/34 参数设计

Tab. 3 Design parameters of S-CAG-53/34 models

模型编号	设计参数		模型编号	设计参数 锚杆长度 l/mm	模型编号	设计参数 锚杆间距 L/mm	设计参数		
	槽口卷边厚度 h_1/mm	槽道壁厚 d/mm					模型编号	锚杆间距 L/mm	作用荷载个数
Base-1	7	5	Base-1	120	Base-1	250	Base-2	250	2
A-1	5.5	3.5	B-1	90	C-1	175	D-1	175	2
A-2	6	4	B-2	100	C-2	200	D-2	200	2
A-3	6.5	4.5	B-3	110	C-3	225	D-3	225	2
A-4	7.5	5.5	B-4	130	C-4	275	D-4	275	2
A-5	8	6	B-5	140	C-5	300	D-5	300	2
A-6	8.5	6.5	B-6	150	C-6	325	D-6	325	2

注: Base-1 的尺寸与试件 S-CAG-53/34 相同, 荷载作用位置为槽道跨中部位, 其他未列出的参数同 Base-1. Base-2 的尺寸与试件 S-CAG-53/34 相同, 仅将锚杆个数增加至 3 个, T 型螺栓荷载增加至 2 个, 其他未列出的参数同 Base-2.

表 4 试件 S-CBG-52/34 参数设计

Tab. 4 Design Parameters of S-CBG-52/34 models

模型编号	设计参数		模型编号	设计参数 锚杆长度 l/mm	模型编号	设计参数 锚杆间距 L/mm	设计参数		
	槽口卷边厚度 h_1/mm	槽道壁厚 d/mm					模型编号	锚杆间距 L/mm	作用荷载个数
Base-3	8.5	5	Base-3	120	Base-3	250	Base-4	250	2
E-1	7	4	F-1	90	G-1	175	H-1	175	2
E-2	7.5	4.5	F-2	100	G-2	200	H-2	200	2
E-3	8	5	F-3	110	G-3	225	H-3	225	2
E-4	9	6	F-4	130	G-4	275	H-4	275	2
E-5	9.5	6.5	F-5	140	G-5	300	H-5	300	2
E-6	10	7	F-6	150	G-6	325	H-6	325	2

注: Base-3 的尺寸与试件 S-CBG-52/34 相同, 荷载作用位置为槽道跨中部位, 其他未列出的参数同 Base-3. Base-4 的尺寸与试件 S-CBG-52/34 相同, 仅将锚杆个数增加至 3 个, T 型螺栓荷载增加至 2 个, 其他未列出的参数同 Base-4.

4.2 有限元结果分析

4.2.1 荷载-位移曲线

图 10(a)给出了 A 系列模型的荷载-位移曲线, 由图可知, 槽口卷边厚度对承载力影响较大, 模型 A-5 的槽口卷边厚度为 8 mm, 荷载-位移曲线在 15 mm 左右出现了下降段, 混凝土发生受拉锥体破坏, 混凝土受力状态由受拉转为受压, 随后荷载继续增加. 槽道继续弯曲变形, 荷载由锚杆传至锥体混凝土以及箍筋上.

图 10(b)给出了 B 系列模型的荷载-位移曲线, 由图可知, 锚杆长度对承载力影响较小, 原因是混凝土受拉屈服后沿 45° 方向的锥体破坏, 荷载由混凝土锥体、纵筋和箍筋共同承担. 锚杆与混凝土的粘结作用对承载力的影响较小.

图 10(c)给出了 C 系列模型的荷载-位移曲线, 由图可知, 锚杆间距对承载力影响较大, 减小锚杆间距通过提升槽道的受弯承载力来提高槽道的受拉承载力. 减小锚杆间距与模型破坏时的极限荷载成

正比, 与极限荷载对应的破坏位移成反比. 当锚杆间距降低到 175 mm 时, 模型 C-1 发生 T 型螺栓头受弯破坏, 该破坏方式为脆性破坏. 图 10(d) 给出了 D 系列模型的荷载-位移曲线, 由图可知, 锚杆间距减少, 破坏荷载增加, 与破坏荷载对应的破坏位移减少. 其他参数条件不变的情况下, 对比单个 T 型螺栓受拉情况, 与破坏荷载对应的破坏位移平均减少了 25.22%, 同时施加两个荷载, 对槽道的弯曲变形产生了影响. 图 10(e) 给出了 E 系列模型的荷载-位移曲线, 由图可知, 槽口卷边厚度对承载力影响较大, 其中模型 E-6 的槽口卷边厚度增加到 10 mm 时发生了 T 型螺栓头受弯破坏, 承载力与模型 E-5(槽口卷边屈服破坏)相当. 槽口卷边厚度达到 9 mm 时, 荷载-位移曲线在 15 mm 左右出现了下降段, 混凝土发生受拉锥体破坏.

图 10(f) 给出了 F 系列模型的荷载-位移曲线,

由图可知, 锚杆长度对承载力影响较小. 对比图 10(f) 和 10(b) 可知, 锚杆长度对 S-CBG-52/34 型槽道承载力的影响较 S-CAG-53/34 型槽道大, 原因是 S-CBG-52/34 型槽道燕尾型槽口卷边有效厚度更厚, 槽口卷边承载力较高, 锚杆底部混凝土破坏程度较 S-CAG-53/34 型槽道严重. 图 10(g) 给出了 G 系列模型的荷载-位移曲线, 由图可知, 锚杆间距对承载力影响较大, 模型 G-5 和 G-6 的荷载-位移曲线在破坏之前未出现下降段, 表明混凝土锥体破坏情况较轻, 减小锚杆间距不仅提升了槽道的受拉承载力, 还提升了锚杆与混凝土的锚固作用.

图 10(h) 给出了 H 系列模型的荷载-位移曲线, 为更直观地表示出相邻荷载对槽道承载力的影响, 表 5 列出了 C 系列和 D 系列、G 系列和 H 系列的承载力对比.

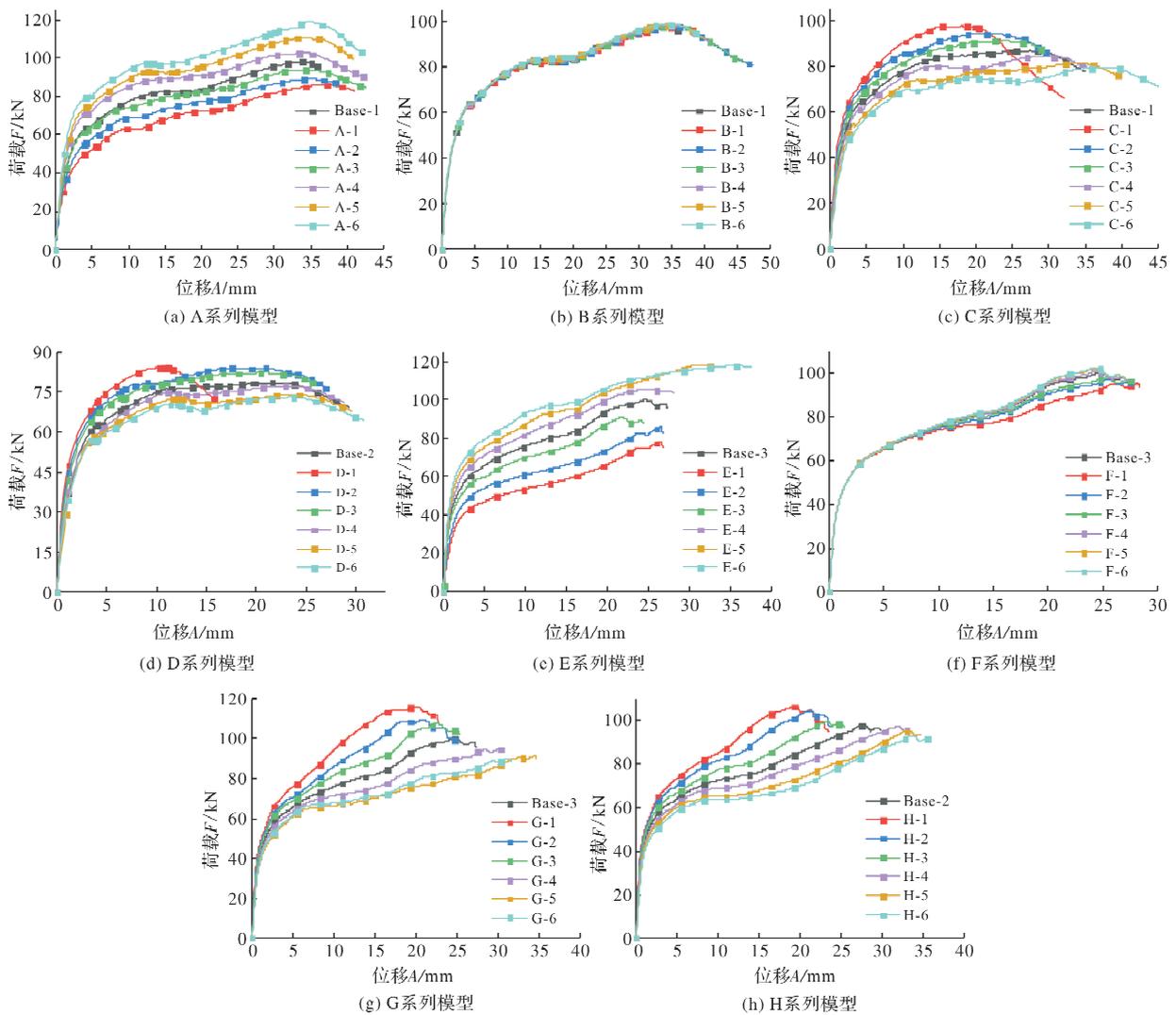


图 10 有限元模型的荷载-位移曲线

Fig. 10 Tensile load-displacement curves of models

表5 C和D系列、G和H系列模型承载力对比

Tab. 5 Comparison of bearing capacity between C and D、G and H series models

模型	破坏荷/kN	模型	破坏荷/kN	对比/%
Base-1	86.64	Base-2	84.20	2.82
C-1	97.31	D-1	90.41	7.09
C-2	93.96	D-2	90.24	3.96
C-3	91.03	D-3	88.47	2.81
C-4	84.02	D-4	83.01	1.20
C-5	81.24	D-5	79.47	2.18
C-6	79.47	D-6	78.53	1.19
Base-3	99.81	Base-4	97.73	2.08
G-1	115.83	H-1	106.03	8.46
G-2	109.12	H-2	104.19	4.52
G-3	107.33	H-3	99.39	7.40
G-4	94.66	H-4	97.02	-2.49
G-5	91.08	H-5	95.02	-4.33
G-6	89.55	H-6	92.73	-3.55

结果表明,同时施加两个T型螺栓荷载对于

槽道的承载能力有一定的削弱,但是随着锚杆间距的增加,削弱程度逐渐减小。

4.2.2 关键性能指标

采用最远点法确定各模型的屈服点^[25],延性系数 μ 定义为 Δ_u/Δ_y 。各试件的屈服点、极限点及延性系数见表6和表7。根据表中数据,可以得到以下结论:(1)增加槽口卷边及槽口侧壁厚度能有效增加不锈钢预埋槽道跨中受拉的承载力和延性,槽口卷边厚度及槽道侧壁厚度各增加1.5mm,模型A-6和E-6的承载力较Base模型分别增加了17.45%和15.39%,其中试件S-CBG-52/34槽口卷边厚度仅增加1mm就出现了T型螺栓头受弯屈服。(2)改变锚杆长度对不锈钢预埋槽道承载力的影响较小。(3)减小锚杆间距可以有效增加不锈钢预埋槽道受拉承载力。构件的延性由槽口卷边屈服程度、槽道弯曲程度等多种因素共同作用,表现出先增大后减小。

表6 试件S-CAG-53/34承载力与延性系数

Tab. 6 Bearing capacity and displacement ductility coefficient of S-CAG-53/34

模型编号	屈服点		极限点		μ	模型编号	屈服点		极限点	
	P_y/kN	Δ_y/mm	P_u/kN	Δ_u/mm			P_y/kN	Δ_y/mm	P_u/kN	Δ_u/mm
Base-1	62.26	4.30	97.82	34.09	7.92	Base-1	63.18	3.98	97.82	34.09
A-1	60.05	7.68	85.88	36.81	4.79	B-1	62.80	3.96	97.23	34.16
A-2	64.40	7.29	88.88	34.81	4.78	B-2	62.99	3.97	97.53	34.68
A-3	62.26	4.30	93.78	34.30	7.97	B-3	63.04	3.97	97.60	34.60
A-4	70.88	4.24	102.60	34.23	8.08	B-4	63.29	3.99	98.00	33.74
A-5	73.36	3.83	110.36	33.97	8.87	B-5	63.42	4.00	98.20	33.74
A-6	76.31	3.28	118.49	34.76	10.60	B-6	63.47	4.00	98.27	33.62
Base-1	64.64	4.35	86.64	27.41	6.30	Base-2	58.18	3.72	84.20	21.73
C-1	67.95	3.23	97.31	17.94	5.55	D-1	57.39	2.33	90.41	10.26
C-2	68.22	3.83	93.96	19.62	5.12	D-2	63.03	3.72	90.24	17.32
C-3	67.87	4.43	91.03	23.99	5.42	D-3	61.15	3.68	88.47	20.59
C-4	61.12	3.92	84.02	29.25	7.46	D-4	58.06	4.81	83.01	23.51
C-5	64.98	6.92	81.24	34.51	4.99	D-5	53.48	3.47	79.47	24.31
C-6	65.88	8.36	79.47	37.98	4.54	D-6	53.18	3.38	78.53	23.58

表7 试件S-CBG-52/34承载力与延性系数

Tab. 7 Bearing capacity and displacement ductility coefficient of S-CBG-52/34

模型编号	屈服点		极限点		μ	模型编号	屈服点		极限点	
	P_y/kN	Δ_y/mm	P_u/kN	Δ_u/mm			P_y/kN	Δ_y/mm	P_u/kN	Δ_u/mm
Base-3	60.60	3.30	99.81	24.50	7.42	Base-3	59.51	3.00	99.81	24.50
E-1	42.01	2.85	78.18	26.55	9.32	F-1	56.89	3.14	95.42	28.20
E-2	49.50	3.30	85.68	26.55	8.05	F-2	57.76	3.23	96.87	25.70
E-3	54.79	2.95	91.02	21.80	7.39	F-3	58.28	3.30	97.73	24.95
E-4	67.07	3.75	105.43	25.40	6.77	E-4	60.13	3.27	100.84	24.40
E-5	73.58	3.40	117.96	31.55	9.28	F-5	60.77	3.20	101.91	24.20
E-6	77.79	4.30	117.61	35.95	8.36	F-6	60.92	3.13	102.16	24.10

续表 7

Base-3	61.11	3.45	99.81	24.50	7.10	Base-4	59.01	4.20	97.73	27.95
G-1	69.34	3.40	115.83	28.20	8.29	H-1	65.26	2.85	106.03	19.55
G-2	65.40	3.30	109.12	25.70	7.79	H-2	63.57	2.90	104.19	21.30
G-3	62.46	3.00	107.33	24.95	8.32	H-3	61.58	3.10	99.39	23.40
G-4	59.36	3.55	94.66	24.40	6.87	H-4	57.89	3.55	97.02	32.05
G-5	62.24	5.15	91.08	24.20	4.70	H-5	58.43	4.35	95.02	33.35
G-6	63.58	5.55	89.55	24.10	4.34	H-6	57.90	4.85	92.73	33.95

4.2.3 破坏模式

限于篇幅, 给出部分模型的破坏模式进行说明. 图 11(a)、11(b)给出了 Base-1 模型的破坏模式, 可知: 混凝土破坏主要集中在锚杆底部, 且沿 45°方向发生锥体破坏; 槽口卷边屈服之后, T 型螺栓被拔出, 但钢材未发生撕裂破坏.

图 11(c)、11(d)给出了模型 A-1 和 A-6 的 DAMAGET 图, 通过对比可以发现: 模型 A-1 中混凝土未表现出严重损伤但槽道已经丧失承载能力; 模型 A-6 的槽口卷边厚度为 8.5 mm, 槽口卷边屈服时, 锚杆底部混凝土破坏严重, 裂缝产生贯通, 锚杆上部混凝土未丧失承载能力.

图 11(e)、11(f)给出了模型 B-1 和 B-6 的 DAMAGET 图, 通过对比可以发现: 模型 B-1 的混凝土锥体破坏相比模型 B-6 更为严重, 但是由于纵筋和箍筋对混凝土的约束作用, 二者均发生槽口卷边屈服破坏, 且极限承载力接近. 图 11(g)、11(h)给出了模型 C-1 和 C-6 的 DAMAGET 图, 通过对比可以发现: 槽道破坏时混凝土的锥体破坏仅发生在锚杆底部, 减小锚杆间距, 可以有效增加槽道受弯承载力从而提高槽道受拉承载力.

图 11(i)、11(j)给出了模型 Base-2 的破坏模式, 同时施加两个螺栓荷载, 中间部位的锚杆底部混凝土破坏相较两侧更为严重, 仅槽口卷边部位钢材进入了塑性, 锚杆处于弹塑性变形状态.

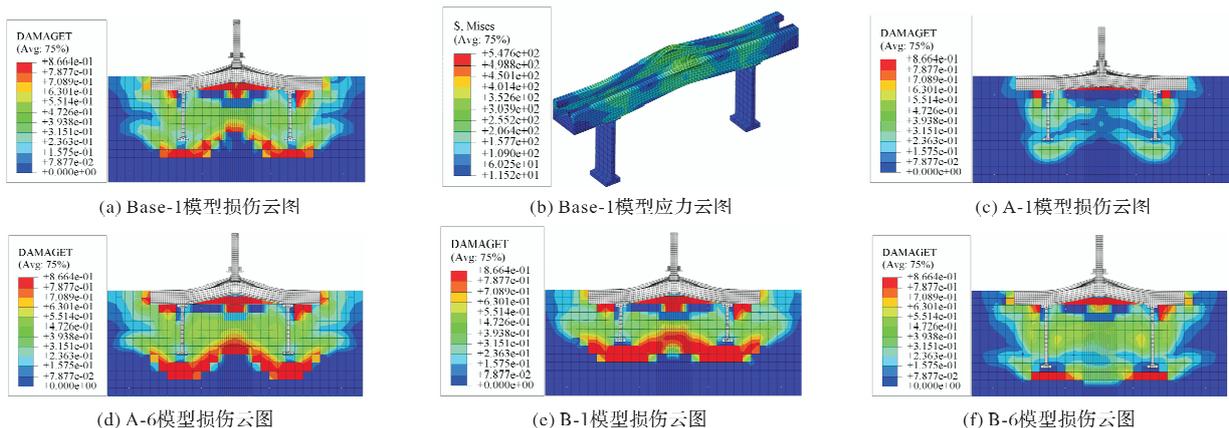
图 12(a)、12(b)给出了模型 Base-3 的破坏模式, 模型 Base-3 的混凝土破坏现象较模型 Base-1

严重, 锚杆底部混凝土受拉屈服, 混凝土裂缝向外延伸. 槽道端部对混凝土产生了挤压导致端部混凝土发生侧锥体破坏. Mises 应力云图上可以观测到槽口卷边钢材产生轻微撕裂现象.

图 12(c)、12(d)给出了模型 E-1 的 DAMAGET 图和 E-6 的 Mises 应力云图, 通过对比可以发现: 模型 E-1 的破坏方式为槽口卷边屈服, 锚杆底部混凝土裂缝发展程度较模型 Base-3 轻. 模型 E-6 槽口卷边厚度为 10 mm, 发生了 T 型螺栓头受弯破坏. T 型螺栓破坏属于脆断破坏, 建议槽口卷边的设计厚度不超过 10 mm.

图 12(e)、12(f)给出了模型 F-1 和模型 F-6 的 DAMAGET 图, 其中模型 F-1 锚杆长度为 90 mm, 破坏时底部产生了贯通的纵向裂缝, 混凝土破坏现象较模型 F-6 更为严重, 表明锚杆长度过短会降低混凝土的锚固和保护作用. 根据有限元分析结果, 建议锚杆长度按照规范《预埋槽道型钢》(GB/T37613—2019)中 50 型槽道锚杆不低于 120 mm 进行设计.

图 12(g)、12(h)给出了模型 G-1 和模型 G-6 的 DAMAGET 图, 模型 G-1 锚杆间距为 175 mm, 破坏时承载力达到 115.83 kN, 模型 E-6 在 117 kN 发生了 T 型螺栓破坏. 为防止此现象产生, 锚杆间距不应低于 175 mm. 模型 G-6 由于锚杆与混凝土边距小于 150 mm, 槽道弯曲变形对端头处混凝土产生了挤压作用导致产生了混凝土边缘破坏. 设计时建议槽道端部锚杆距混凝土边缘距离不小于 150 mm.



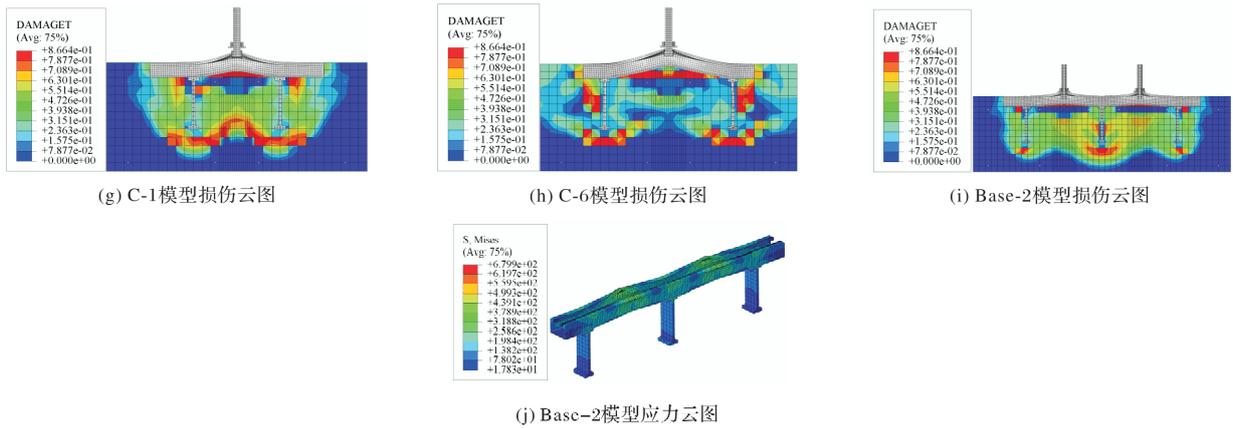


图 11 S-CAG -53/34-PC 模型的应力云图分布

Fig. 11 Stress nephogram distribution of S-CAG-53 / 34-PC model

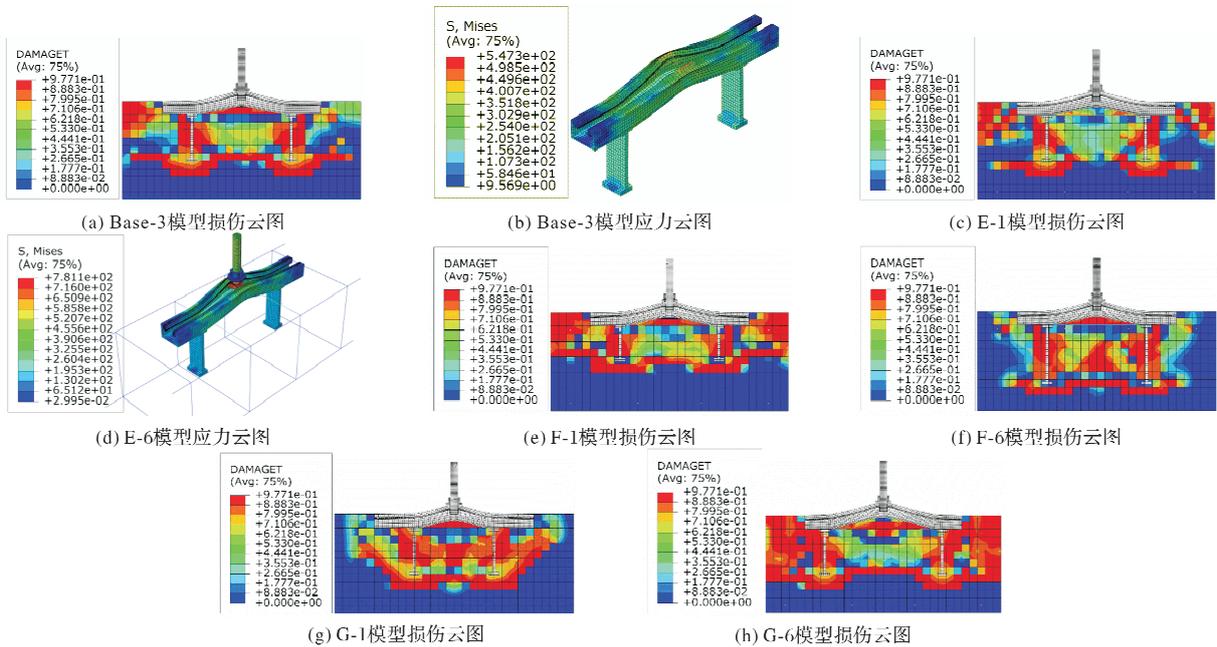


图 12 S-CBG -52/34-PC 模型的应力云图分布

Fig. 12 Stress nephogram distribution of S-CBG-52 / 34-PC model

5 结论

(1)槽道跨中受拉承载力受槽道弯曲变形的影响,试件 S-CAG-53/34、S-CBG-52/34 跨中受拉试验较锚杆中心线受拉试验破坏荷载分别降低 22.08%和 18.24%,破坏荷载对应的位移值分别增加 47.52%和 51.44%。不锈钢预埋槽道跨中部位受拉承载力较锚杆中心线处受拉承载力降低,塑性变形能力增加;

(2)不锈钢槽式预埋组件的主要破坏模式为槽口卷边屈服失效;有限元分析结果表明,增加槽口卷边厚度可以有效提高不锈钢槽式预埋组件的受拉承载能力,槽口卷边厚度达到 10 mm 时其发生 T 型螺栓头受弯破坏;

(3)增加锚杆长度对槽道跨中受拉承载力影响较小,将锚杆长度减少至 90 mm 时,试件 S-CAG-53/34 的锚杆底部混凝土破坏较为严重,建议锚杆长度按照规范《预埋槽道型钢》中不小于 120 mm 进行设计;

(4)减小锚杆间距可有效提升槽道跨中受拉承载力,当间距小于 175 mm 时,T 型螺栓发生破坏;

(5)施加两个 T 型螺栓荷载,槽道中间部位锚杆周围混凝土破坏较为严重,对锚杆的锚固性能产生影响,但随着锚杆间距的增加,影响逐渐减弱,模型 D-2 锚杆间距增加到 200 mm 时,对受拉承载力的影响减少至 5%以内。模型 H-4 的锚杆间距增加到 275 mm,承载能力有所增强。

参考文献 References

- [1] MAHREHOLTZ C, SHARMA A. Comparison of design rules for anchor channels with channel bolts [C]// 3rd International Symposium on Connections between Steel and Concrete (ConSC2017); IEEE Xplore, 2017.
- [2] 李士平. 槽式预埋组件研究现状与工程应用[J]. 低温建筑技术, 2017, 39(2): 43-45.
LI Shiping. Research status and engineering application of slot embedded parts[J]. Journal of Low Temperature Architecture Technology, 2017, 39(2): 43-45.
- [3] 舒赣平, 王元清, 袁焕鑫, 等. 《不锈钢结构技术规程》的编制及内容简介[J]. 工业建筑, 2015, 45(12): 1-6.
SHU Ganping, WANG Yuanqing, YUAN Huanxin, et al. Introduction to the establishment background and content of technical specification for stainless steel structures [J]. Journal of Industrial Construction, 2015, 45(12): 1-6.
- [4] 郑宝锋, 吴步宸, 张奎, 等. 不锈钢圆管 T 形、Y 形相贯节点支管受拉承载力研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 54(4): 508-516.
ZHENG Baofeng, WU Buchen, ZHANG Kui, et al. Investigations on capacity of stainless steel T- and Y-joints in circular hollow sections with axial tension in brace[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2022, 54(4): 508-516.
- [5] GEDGE G. Structural uses of stainless steel—buildings and civil engineering [J]. Journal of constructional steel research, 2008, 64(11): 1194-1198.
- [6] MAHREHOLTZ C, SHARMA A. Qualification and design of anchor channels with channel bolts according to the new EN 1992-4 and ACI 318[J]. Structural Concrete, 2020, 21(1):94-106.
- [7] CEN/TC 250 Structural Eurocodes. Design of fastenings for use in concrete-part 4-3: Anchor channels. CEN/TS 1992-4-3: 2009[S]. UK: CEN, 2009.
- [8] ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete. ICC-ES AC 318-20147[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2014.
- [9] CATTANEO S, CRESPI P, BONATI A, et al. Tensile behavior of different anchor channel connections[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 45:103438.
- [10] ABOUHAMDAH I S, AI-O M A, BALUCH M H, et al. Structural behavior of cast - in C - channel anchors in precast concrete under uniaxial tension [J]. Structural Concrete, 2018, 19(4): 1157-1173.
- [11] WANG D, WU D, HE S, et al. Behavior of post-installed large-diameter anchors in concrete foundations[J]. Construction and Building Materials, 2015, 95: 124-132.
- [12] SHIN J, KIM J H, CHANG H J. Anchor plate effect on the breakout capacity in tension for thin-walled concrete panels [J]. Engineering Structures, 2016, 106 (JAN. 1): 147-153.
- [13] DELHOMME F, ROURE T, ARRIETA B, et al. Static and cyclic pullout behavior of cast-in-place headed and bonded anchors with large embedment depths in cracked concrete[J]. Nuclear Engineering & Design, 2015, 287:139-150.
- [14] NILFOROUSH R, NILSSON M, ELFGREN L. Experimental evaluation of tensile behaviour of single cast-in-place anchor bolts in plain and steel fibre-reinforced normal- and high-strength concrete [J]. Engineering Structures, 2017, 147(sep. 15): 195-206.
- [15] 徐淑美, 周德源, 毕大勇. 预埋式槽型锚轨抗拔性能的试验研究[J]. 结构工程师, 2010, 26(5):111-116.
XU Shumei, ZHOU Deyuan, BI Dayong. Test study on tensile behavior of cast-in channels[J]. Journal of Structural Engineers, 2010, 26(5): 111-116.
- [16] 李智明. 电气化铁路接触网隧道内预埋槽道理论和试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
LI Zhiming. Theoretical and experimental study on embedded channel of electric railway's contact net in tunnel[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [17] 张世卓, 周德源, 付宗超, 等. 预埋式槽型锚轨抗拔及抗剪性能试验研究[J]. 结构工程师, 2015, 31(1): 127-131.
ZHANG Shizhuo, ZHOU Deyuan, FU Zongchao, et al. Test study on tensile and shear behavior of cast-in channels[J]. Journal of Structural Engineers, 2015, 31(1): 127-131.
- [18] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 预埋槽道型钢: GB/T 37613—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Embedded channel steel: GB/T 37613—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.