

不锈钢钢筋混凝土技术综述与桥梁应用设计指引

刘明虎

(中交公路规划设计院有限公司,北京市100088)

摘要:普通钢筋混凝土构件在恶劣环境条件下普遍耐久性不足,采用不锈钢钢筋可从根本上解决锈蚀问题进而提高结构耐久性,保障结构服役安全和设计使用寿命,节约维养费用。相关规范特别是钢筋混凝土用不锈钢钢筋国家标准的颁布,为其在桥梁工程的推行使用创造了条件。鉴于不锈钢钢筋与普通钢筋存在一定差别,不能简单按直接等代置换进行设计。分析建立了桥梁混凝土结构不锈钢钢筋应用的设计内容,基于国内外研究成果,总结提出了桥梁混凝土结构不锈钢钢筋的应用场合、材料选择、保护层厚度、弯曲与连接、与普通钢筋同时使用、承载力、变形及裂缝、温度变形差、抗疲劳及抗震性能的设计指引,并分析探讨了有关问题。

关键词:不锈钢钢筋混凝土;桥梁工程;耐久性;技术综述;设计指引

中图分类号: U444

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)08-0271-05

0 引言

钢筋混凝土广泛应用于土建结构工程,暴露在外部环境特别是严酷恶劣环境条件下的普通钢筋混凝土构件普遍存在耐久性不足的问题。普通钢筋混凝土结构耐久性不足的原因是多方面的,相应的防腐方法和措施也很多。采用不锈钢钢筋是从根本上防止钢筋锈蚀而增强混凝土结构耐久性的一个有效措施^[1-5]。目前在发达国家已逐步广泛应用到包括桥梁在内的各类工程中,并已制订产品技术标准和应用手册来指导应用^[6]。我国早在《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(CCES 01-2004)就提出了不锈钢钢筋应用的场景需求,但一直以来由于相关研究不足、材料价格昂贵、材料技术标准、设计和施工规范欠缺等原因,不锈钢钢筋混凝土的应用发展受到阻碍。但随着经济快速发展特别是工程建设理念的提升,以及各项条件逐步成熟,近年来在桥梁工程领域已开始尝试应用^[1-5]。其中,2018年建成通车的港珠澳大桥是我国内地首座在建设期大量应用不锈钢钢筋的桥梁,其主体工程的桥梁工程共使用了约8 200 t 不锈钢钢筋^[7-8]。近年来,我国相关规范标准的制、修订,奠定了不锈钢钢筋混凝土应用的基础。总体层面,《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50476-2019)规定“不锈钢钢筋...可用于环境作用

等级为D、E、F的混凝土构件”,《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》(JTG/T 3310-2019)将不锈钢钢筋归为耐蚀钢筋,并将采用耐蚀钢筋作为一种防腐蚀附加措施进行应用。材料层面,《钢筋混凝土用不锈钢钢筋》(YB/T 4362-2014)和《钢筋混凝土用不锈钢钢筋》(GB/T 33959-2017)填补了空白,以国家或行业对不锈钢钢筋的产品生产许可和性能检验认证为前提,为不锈钢钢筋的推广应用创造了条件。应用层面,目前唯有广东省编制了地方标准《海洋工程不锈钢钢筋应用技术规范》(DB44/T 2294-2021),但其内容重点在于产品、加工、物流管理、现场施工、检验与验收方面,对设计仅提及“不锈钢钢筋设计与同等级、同类型普通钢筋一致”或“满足设计要求”,而鉴于不锈钢钢筋在物理力学性能方面与普通钢筋存在一定差别,按直接等代置换的设计是不完善的。

1 不锈钢钢筋应用的设计内容

混凝土工程结构设计已由以往单一的狭义结构设计逐步发展形成为目前包括狭义结构设计和耐久性设计的完善体系。狭义结构设计可理解为结构受力设计,主要基于力的作用和材料的物理力学性能两方面条件,以结构受力性能为核心,以结构在整个建造和使用寿命期内的安全和结构行为状态为目标和关注重点。结构耐久性设计则主要基于环境条件(环境类别及作用等级)和材料的腐蚀性能两方面条件,以结构耐久性能为核心,以结构在整个使用寿命期内的结构腐蚀状况和安全保障为目标和关注重点,也包括

收稿日期:2023-06-30

作者简介:刘明虎(1971—),男,学士,正高级工程师,从事桥梁与地下工程设计工作。

结构方案及构造的合理性、防腐附加措施以及施工质量保障和运营维养要求。结构受力设计基于经典力学理论,从力的作用效应和材料提供的承载及变形抗力出发,对两者进行计算和比较,通过满足一定的判定准则来保证结构受力安全和适用,理论成熟、方法科学,设计结果量化且精确。结构耐久性设计目前则分为经验方法和定量方法,经验方法基于工程经验类比,对处于不同环境作用等级下的结构构件,直接提出混凝土材料耐久性的质量要求,规定钢筋保护层厚度等构造要求;定量方法从环境作用效应和材料的耐久性抗力出发,基于对环境作用的量化、构建合适的结构劣化模型计算出环境作用效应,进而求得耐久性极限状态下的环境作用效应与耐久性抗力之间的关系,以验算使用年限或规定材料与构造参数。目前耐久性设计仍以经验方法为主,以定量设计为辅。两种设计在目标、条件、内容、理论、方法上存在区别,但在诸多方面又存在紧密联系。

综上,不锈钢钢筋应用包括结构受力设计和结构耐久性设计两方面内容(见图1)。国内对不锈钢钢筋研究起步较晚,并且主要集中在材料防腐、力学及工艺性能方面,而对构件的受力性能和设计研究非常不足^[1-9]。既已取得的成果可作为当前桥梁混凝土结构不锈钢钢筋应用在设计方面的技术支撑和指导,并作为以后持续性研究和应用的基础。

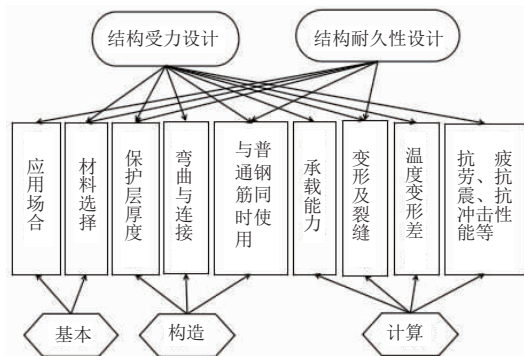


图1 不锈钢钢筋应用的主要设计内容

2 应用场合与材料选择

2.1 应用场合

不加区别地将所有环境条件下的所有桥梁混凝土构件全部采用不锈钢钢筋固然能在最大程度上提升结构耐久性,但鉴于初期成本投入高,从必要性、成本及资源节约考虑,在现阶段,将之用到最需要的地方及结构部位才是现实而可取的。

应用场合的确定实际上是一个基于桥梁结构

(构件)设计使用年限保证的多维度统筹考虑的结果。这些维度包括:环境类别、环境条件、重要性、可更换性、维修难易程度、钢筋所在结构中的具体部位等。耐久性设计规范建议或要求了采用不锈钢钢筋的环境条件,这些环境类别包括有盐冻融环境、近海或海洋氯化物环境、除冰盐等其他氯化物环境、盐结晶环境和化学腐蚀环境;具体环境条件包括水下区、水(潮)位变动区、浪溅区、大气区,或从环境作用影响程度上判断为严重(D级)及以上的情形;其它维度如不可更换且非常重要的构件、维修特别危险和困难的构件、临大气临水的结构外侧而非内腔侧等。上述维度可以单独考虑,更多则应统筹考虑。应用场合的确定并非是绝对的,实际上是结构使用寿命和经济成本的权衡与优化的结果。具体应用时,应基于上述维度,结合桥梁具体情况和需求,确定应用位置。如港珠澳大桥的桥梁工程,就对属于现浇混凝土构件的承台外层钢筋、索塔下塔柱及下横梁的外层钢筋、索塔支座垫石钢筋、部分非通航孔桥墩身外层钢筋采用了不锈钢钢筋^[10]。

2.2 材料选择

GB/T 33959—2017的颁布为钢筋混凝土用不锈钢钢筋的选用铺平了道路。材料选择包括结构性能和耐腐蚀性能两方面,分别对应钢筋牌号和钢号的选择。结构性能方面:该标准将不锈钢钢筋分为三级,其强度等级、尺寸、物理性能、力学性能、工艺性能、疲劳性能等要求与《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)及GB/T 1499.1—2017、GB/T 1499.2—2018的普通钢筋一致。因此可根据结构设计需要,与普通钢筋对应牌号直接等代采用。耐腐蚀性能方面:该标准从GB/T 20878众多钢号的不锈钢材料中选择了4种奥氏体、4种奥氏-铁素体及1种铁素体共3种组织类型、9种钢号的钢材用以制作钢筋混凝土用不锈钢钢筋。钢号的选择实际是考虑钢筋耐腐蚀性能与经济性的平衡。该标准附录A指出:不锈钢钢筋的耐腐蚀性能与化学成分有关,主要体现为耐点蚀当量,同时也与使用的环境有关。考虑不同使用环境和性能需求和经济性,分三种情况给出了钢号选用的参考。DB44/T 2294—2021附录A也给出了钢号选择指南,相较而言,其考虑因素更加全面,可作为选择依据。港珠澳大桥桥梁工程设计时,尚无上述钢筋混凝土用不锈钢钢筋规范,设计依据GB/T 1220—2007、GB/T 20878—2007并参考《British Standard BS6744:

2001+A2:2009》、《ASTM A955/A955M07a》确定了材料的力学性能,在相关试验研究基础上最终选用了国产 2304 双相不锈钢钢筋^[8,10,14]。

3 构造设计

3.1 保护层厚度

由于采用不锈钢钢筋,则构件不存在钢筋锈蚀及后续各阶段的耐久性极限状态,即构件对环境作用的抵抗能力加强了,因此,对相同的环境作用和设计使用年限,不锈钢钢筋混凝土对保护层的耐久性要求低于普通钢筋混凝土,从有利于防止出现开裂或控制裂缝宽度,可适当减小保护层厚度,但尚应满足钢筋与混凝土之间黏结力传递的要求,可通过专门研究确定。工程实践中可保守地采用与普通钢筋相同的保护层厚度要求。港珠澳大桥桥梁工程设计采用了与普通钢筋相同的保护层厚度。

3.2 弯曲与连接

弯曲:不锈钢钢筋与普通钢筋有相近的冷弯性能,与普通钢筋相同的弯曲加工能满足不锈钢钢筋混凝土构件的成型要求。因此,设计时受拉不锈钢钢筋弯折的角度与形状、弯弧内直径及平直部分长度,箍筋弯折、末端弯钩的构造及尺寸,可与普通钢筋相同。

连接方式与位置:不锈钢钢筋可焊性较好的,焊接接头的受力和工艺性能能够满足要求^[1]。但采用焊接的不锈钢钢筋焊缝及其热影响区的耐腐蚀性能会有所降低,而采用绑扎搭接和机械连接对其耐腐蚀性几乎没有影响^[3]。GB/T 33959 规定“钢筋推荐采用机械连接的方式进行连接”;JTG/T 3310—2019 和 DB44/T 2294—2021 规定,不锈钢钢筋连接宜(或应)采用机械连接或绑扎搭接。因此,设计时:对不锈钢钢筋的连接应采用机械连接;当钢筋公称直径小于 25 mm 且非轴心受拉和小偏心受拉构件的主筋时,可采用绑扎搭接接头;机械连接技术要求应符合《钢筋机械连接技术规程》(JGJ 107)规定;机械连接接头和绑扎钢丝应采用与钢筋同材质的钢材或耐腐蚀合金钢材;连接接头的位置与普通钢筋相同。港珠澳大桥桥梁工程直径大于 20 mm 的不锈钢钢筋设计采用同牌号的不锈钢机械连接器,其它不锈钢钢筋及节点处采用直径 1.2 mm 同牌号的柔软不锈钢钢丝绑扎。

锚固与绑扎搭接长度:美国 AASHTO 规范指出不锈钢钢筋与混凝土的黏结强度低于普通钢筋混凝

土^[2]。近年国内所做的黏结性能研究也多数得出如下结论:不锈钢钢筋与混凝土之间的黏结性能较好,其平均黏结应力和普通钢筋差别不明显,应力-滑移曲线相似,变化趋势相同^[1,11-13]。因此,考虑应用经验不足,目前不锈钢钢筋的锚固与绑扎搭接设计长度可暂采用与普通钢筋相同,条件容许时宜考虑留有适当裕度或开展专门试验进行验证。GB/T 33959 的实施,为进一步开展针对性、系列化的黏结性能试验研究并取得成熟统一的结论创造了条件,这也是不锈钢钢筋在广泛应用之前需重点研究解决的内容。港珠澳大桥桥梁工程不锈钢钢筋的锚固与绑扎搭接长度当时设计采用与普通钢筋相同。

3.3 与普通钢筋同时使用

CCES01-2004 规定“不锈钢钢筋不得与普通钢筋电连接”,GB/T 50476—2019 对此没有规定,JTG/T 3310—2019 规定“耐蚀钢筋不应与普通钢筋直接连接”。近年有关研究表明,不锈钢钢筋搭接碳钢能抵抗腐蚀破坏,当环境中氯含量适度时,低碳钢的电偶腐蚀影响基本可以忽略。DB44/T 2294—2021 基于港珠澳大桥的研究成果规定“同一构件的不同环境、不同部位可同时使用不锈钢钢筋和普通钢筋。同时使用时,不锈钢钢筋和普通钢筋可直接连接和接触,并应满足设计要求”^[14]。可见,对该问题目前意见尚未统一。因此,基于最新研究结论,从方便施工出发,在适度的氯含量环境中,设计可不提出限制两者直接连接和接触的要求。在特殊环境条件下,则应开展研究并提出要求。

4 计算方法与性能

4.1 承载能力

普通钢筋混凝土构件的承载能力基于钢筋与混凝土变形协调、受力平截面假定及材料的性能。研究表明,在弹性阶段和开裂初始阶段,不锈钢钢筋混凝土梁的跨中截面应变沿高度近似呈直线分布,基本吻合平截面假定;但在接近破坏荷载时,则与平截面假定出现一定程度的不符。总体而言,在进一步研究获得修正平截面假定方法前,不锈钢钢筋混凝土梁可暂按平截面假定考虑受力,后续应通过系统试验研究,获得其平截面假定修正方法^[1,15]。而不锈钢不同于碳素钢,是典型的非线性材料,不存在明显的应力-应变曲线屈服平台,通常取 0.2% 塑性应变对应的应力作为材料屈服强度。且材料在受拉伸和压缩时存在一定程度的各向异性^[3,11]。国内对不同不锈钢

材料的本构模型研究很少,应加强国产系列不锈钢钢筋本构模型的研究。必要时,可参考国外可靠的研究成果,如最能反映材料实际情况的本构模型 Quach 模型^[16]。而如果不锈钢钢筋采用与碳素钢筋一样的弹性-理想塑性模型进行计算,承载力设计会偏于保守。研究表明,普通钢筋混凝土梁、不锈钢钢筋混凝土梁的开裂和极限弯矩的实测值与理论值之比差别不明显,但后者的实测极限剪力却明显高于前者^[15];不锈钢钢筋混凝土梁的极限承载力和对应 0.3 mm 裂缝宽度的荷载值比普通钢筋混凝土梁均有所提高^[17]。因此,可以按照现行规范计算不锈钢钢筋混凝土梁的正截面极限承载力,在建立针对性的计算方法之前,可暂按相同屈服强度的钢筋等代替的原则,进行不锈钢钢筋混凝土梁设计^[15,17-19]。

虽然国内已开展了一定的配置不锈钢钢筋的梁板柱构件的力学性能试验研究,也有研究者提出了不锈钢钢筋混凝土截面的承载力表达式,但试验数量有限,且钢筋材料来源不一,还不能够充分考虑各种因素对试验的影响,因此仍需进一步对国产系列不锈钢钢筋混凝土构件开展全面深入的力学性能研究,建立相应的结构承载力计算方法^[9]。

4.2 变形及裂缝

钢筋的材料本构关系直接关系到结构的变形和裂缝计算。有关试验表明,国产不锈钢钢筋的弹性模量比普通钢筋存在明显偏低的情况,且状况不太稳定^[1,9],这就导致其用于大跨结构时会产生相对偏大的变形和开裂,在用于混凝土受压构件时其强度难以充分发挥。目前 GB/T 33959 未给出弹性模量取值,国内试验数据不多,因此,应针对规范的钢筋牌号开展测试获得确定参数值用以计算,同时从钢材研发方面,应努力提高其弹性模量。而由于材料本构关系存在较大差别,如果采用双线性模型,则变形计算会偏于不安全。因此,将普通钢筋混凝土构件的设计理论直接应用于不锈钢钢筋混凝土是不适宜的^[1,17],需建立适用于不锈钢钢筋构件的正常使用状态下的变形和裂缝宽度的计算方法^[9,20]。

有关研究表明,不锈钢钢筋混凝土梁的抗弯、抗剪加载破坏过程和形态与普通钢筋混凝土梁十分相似,但受力性能有一定差异。在开裂前,两者截面性质相同,开裂弯矩可采用相同计算方法。但在开裂后的极限破坏弯矩的计算方法需区别对待,计算结果有一定区别。在现阶段,在不锈钢钢筋构件变形计算方法建立之前,可参考国外有关规范进行计算,比如

可采用美国 ACI 规范推荐的有效惯性矩法挠度计算公式^[17]。若计算结果不能满足规范要求,则需加强不锈钢钢筋配置或从结构其它方面予以加强。

根据有关试验研究,不锈钢钢筋混凝土梁的最大裂缝宽度试验值接近于按规范计算的值,因此裂缝计算可参照普通钢筋混凝土进行。但因受钢筋材料非线性的影响,可对裂缝计算公式的参数进行调整。对于针对普通钢筋混凝土的 JTG 3362—2018 中式(6.4.3)中 σ_{ss}/E_s ,由于不锈钢钢筋材料是非线性的, E_s 为非固定值,其随应力增大而降低,其应变应根据试验数据或前述可靠本构模型对 E_s 作修正计算^[18]。

裂缝宽度限值是由耐久性要求和外观要求共同决定的。规范对普通钢筋混凝土在不同环境条件、正常使用极限状态下的最大裂缝宽度均给出了限值。但基于 GB/T 50476—2019 在有保护措施或耐久性附加措施的前提下裂缝宽度可以放宽的思想,鉴于不锈钢混凝土耐腐蚀性能好,对其耐久性要求相较于普通碳素钢筋混凝土结构可以放宽,因此其裂缝宽度在现有规范基础上宜适当放宽,具体宽度值以含氯离子介质不能通过裂缝侵入混凝土内部与钢筋直接接触为准^[3],同时要从美观上进行检验。港珠澳大桥桥梁工程设计时偏保守采用了与普通钢筋相同的裂缝宽度限值。

4.3 与混凝土的温度变形差

通常,混凝土的线膨胀系数为 $10 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$,普通碳钢为 $12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$ 。根据有关资料,奥氏体不锈钢线膨胀系数为 $16 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$,与混凝土相差较大,这会导致比普通钢筋混凝土更加显著的温度变形差。但双相不锈钢和铁素体不锈钢线膨胀系数分别为 $13 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $10.5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$,与混凝土的线膨胀系数较接近。此外,不锈钢的热导率比碳钢低很多,这可在某种程度上抵消其膨胀系数的增大效果。总之,对温差作用突出地区选用奥氏体不锈钢钢筋时,应引起重视,加强最大温差作用下钢筋-混凝土界面应力验算,必要时开展专门研究。

4.4 抗疲劳和抗震性能等

在材料层面,桥梁钢筋混凝土构件的抗疲劳和抗震性能要求,主要通过对钢筋的抗疲劳性能予以基本要求。GB/T 33959—2017 对不锈钢钢筋的疲劳性能要求与 GB/T 1499.2 一致,即采用相同技术要求进行疲劳试验,要求不锈钢钢筋与普通钢筋一样应具有抵受 5×10^6 次应力循环的抗疲劳性能。对材料

韧性方面 GB/T 33959—2017 还提出了 V 形缺口冲击试验性能要求。此外,国内外开展的相关试验研究表明,不锈钢具有较好的塑性和延性,表现出饱满的滞回曲线较高的总耗能和能量耗散系数,可以有效提高构件的抗疲劳性能和抗震性能^[21,22]。因此,设计对不锈钢钢筋混凝土构件的抗疲劳和抗震设计可按普通钢筋混凝土构件对待。

5 结论与展望

基于目前国内有关标准规范和国内外研究成果,总结提出了不锈钢钢筋应用于桥梁混凝土结构的设计主要内容和具体设计指引,并进行了探讨。目前国内对不锈钢钢筋混凝土构件的受力性能和设计研究还非常不足,工程应用实践经验更是缺乏,因此指导设计的依据仍很不充分,尚需大力开展研究,包括:从钢材研发方面,努力提高不锈钢钢筋的弹性模量;针对材料规范给定的国产不锈钢钢筋开展系列化的材料力学性能、与混凝土的黏结性能的试验研究,总结规律,确定其锚固与搭接长度、保护层厚度等构造设计要求;丰富普通钢筋与不锈钢钢筋连接和接触的电偶腐蚀试验样本,进而确定两者是否容许电连接;基于材料力学性能研究,全面深入开展国产系列不锈钢钢筋混凝土构件性能试验研究,建立成熟可靠的不锈钢钢筋混凝土结构的承载能力、变形及裂缝的计算方法;此外,开展不锈钢钢筋混凝土结构节点和整体抗震性能、结构在高腐蚀环境条件且长期作用疲劳荷载下的力学性能、损伤破坏机理和疲劳寿命衰减规律、结构抗冲击性能,也是十分必要和紧迫的。同时,应积极开展不锈钢钢筋混凝土工程设计应用、运营期跟踪测试和研究反馈,积累经验,进而指导后续工程应用。如此反复得以促进技术进步,并逐步制订更加全面的设计施工技术规范。基于不锈钢钢筋优异的防腐性能,期望随着研究的深入、技术的进步、需求的增多、成本的下降,其在严酷恶劣环境条件下包括桥梁在内的土建结构工程中的应用将更加广泛。

参考文献:

[1] 张劲泉,李承昌,郑晓华,等.不锈钢钢筋混凝土结构研究[M].北京:人

民交通出版社,2015.

- [2] 张国学,吴苗苗.不锈钢钢筋混凝土的应用及发展[J].佛山科学技术学院学报(自然科学版),2006,24(2):10-13.
- [3] 袁焕鑫,王元清,石永久.不锈钢钢筋混凝土初探及应用前景[J].建筑科学,2011,27(5):101-105.
- [4] 高迪,李晓滨,王亚楠,等.不锈钢钢筋研究及应用综述[J].工程建设标准化,2018(3):65-69.
- [5] 王冰,赵凯月,王文涛,等.不锈钢在跨海桥梁工程防腐中的应用[J].混凝土,2021(8):141-145,149.
- [6] 李晓滨,陈洁,孙嘉国,等.国内外不锈钢钢筋标准对比分析[J].热加工工艺,2018,47(3):19-22,30.
- [7] 孟凡超,刘明虎,吴伟胜,等.港珠澳大桥设计理念及桥梁创新技术[J].中国工程科学,2015,17(1):27-35,41.
- [8] 张兴志,朴泷,樊翔宇,等.不锈钢在跨海桥梁耐久性设计中的应用[J].公路交通科技,2017,34(增刊1):28-32.
- [9] 朱爱萍,付瑞佳,杨健彬,等.配置不锈钢钢筋结构的研究现状及趋势[J].重庆建筑,2018,17(3):26-29.
- [10] 刘明虎,孟凡超,李国亮,等.港珠澳大桥青州航道桥设计[J].公路,2014(1):44-51.
- [11] 徐春一,王元清,逯彪,等.双相体不锈钢钢筋与普通碳素钢筋与混凝土粘结性能对比试验[A]//第25届全国结构工程学术会议论文集(第Ⅲ册)[C]//2016.
- [12] 李承昌,何伟南,芦杰,等.不锈钢钢筋与混凝土的黏结性能[J].公路交通科技,2016,33(12):15-20,55.
- [13] 付瑞佳,刘璐,王亚楠,等.不锈钢钢筋混凝土粘结锚固性能试验研究[J].建筑科学,2019,35(11):72-77,142.
- [14] 景强,方翔,倪静姁,等.2304 不锈钢钢筋在港珠澳大桥的应用—钢筋耐腐蚀性能研究[J].公路交通科技,2017,34(10):51-56.
- [15] 李承昌,耿会涛,李清富,等.不锈钢钢筋混凝土梁试验研究[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(1):15-18.
- [16] 朱浩川,姚谏.不锈钢材料的应力-应变模型[J].空间结构,2011,17(1):62-69.
- [17] 张国学,徐永生,丁舟.不锈钢钢筋混凝土梁受弯性能的试验研究[J].铁道建筑,2008(2):13-15.
- [18] 赵晶.不锈钢钢筋混凝土在地铁设计中的应用[J].都市快轨交通,2016,29(3):69-74.
- [19] 高迪,张辉,王晓锋,等.配置高强不锈钢钢筋混凝土梁受弯承载力试验研究[J].建筑科学,2018,34(5):40-43.
- [20] 赵毅,王晓锋,赵勇.高强不锈钢钢筋混凝土梁短期受弯裂缝宽度和刚度计算方法研究[J].建筑结构学报,2021,42(6):268-276.
- [21] 张国学,赵峰,张志浩,等.不锈钢钢筋混凝土梁抗震性能试验研究[J].中国铁道科学,2010,31(5):35-40.
- [22] 赵勇,张琛,王晓锋.配置高延性不锈钢钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(6):803-810.