

项目名称	锈蚀钢筋混凝土矩形柱的抗震性能研究		
项目类别	D类	产业领域	其他
所在平台	其他：浙大宁波理工学院		

浙江省“钱江人才计划”C、D类
项目申请表

姓 名 马佳星

单 位 浙大宁波理工学院

部门（地区） 宁波市人力社保局

浙江省人力资源和社会保障厅

一、申请人基本信息

姓 名	马佳星	工作单位	浙大宁波理工学院		
职 务	讲师	从事专业	工程结构		
联系地址	浙江省宁波市钱湖南路1号			邮 编	315000
单位电话	0574-88229587	手 机	13884422983	E—mail	majiaxing@163. com
留学国别	新加坡	出国时间	201207	回国时间	201707
留学机构名称	南洋理工大学				
留学性质	自费	学习性质	博士		
主 要 学 习 工 作 经 历	2017-至今 浙江宁波理工学院 讲师				
从事专业 工作情况	主要研究方向包括钢筋混凝土结构的抗震性能、混凝土结构耐久性、UHPC新材料等。 参加工作两年以来，作为负责人主持浙江省自然科学基金1项、教育部重点实验室项目1项，参与各类横向课题、校内课题3项。在浙大top100期刊Journal of Structural Engineering以第一及通讯作者发表论文1篇，以第三作者发表论文一篇（单篇引用次数达97次）。在土木工程领域三大权威期刊之一的ACI Structural Journal以第一作者发表论文2篇，其他sci论文达数5篇。并于2018年入选宁波市高层次人才。				

二、五年来主要成果

1、参与过的主要项目

序号	项目名称	起止时间	项目性质和来源	经费总额 (万元)	参与人数、本人排名 和任务
1	宁波港航物流资源整合及信息平台构建	201910 - 202110	浙江省教育厅一般科研项目	1.0	2/4, 建立信息平台
2	异形多曲面（饰面）清水混凝土劲性钢框架施工技术研究与应	201908 - 202010	企业单位委托	5.0	2/3, 施工技术研究
3	宁波环城南路西延（薛家南路至环镇北路）工程III标段技术服务	201908 - 202004	企业单位委托	9.5	4/4, 水热化数值模拟分析
4	上海塘大桥波形钢腹板预应力混凝土连续箱梁主桥设计计算复核	201907 - 201910	企业单位委托	12.0	5/6, 数据整理
5	锈蚀钢筋混凝土矩形柱的应力应变关系研究	201906 - 202106	防灾减灾与工程安全重点实验室开放基金	9.0	1/5, 项目统筹实施
6	不同方向水平荷载下非矩形截面RC矮墙抗震性能的试验及理论研究	201901 - 202112	浙江省自然科学基金	9.0	1/5, 项目统筹实施
7	非矩形截面剪力墙抗剪强度的研究	201803 - 201902	人才引进基金项目	10.0	1/1, 项目全过程

2、代表性论文

序号	论文题目	刊物名称	论文类别	时间	排名	索引	引用
1	Peak Shear Strength of Flanged Reinforced Concrete Squat Walls ★	Journal of Structural Engineering	国外期刊	2020	通讯作者	SCI	0
2	Seismic Behavior of L-shaped RC Squat Walls under Various Lateral Loading Directions	Journal of Earthquake Engineering	国外期刊	2019	1	SCI	5
3	Influence of Lateral Loading Direction on the Peak Shear	Advances in	国外期刊	2019	通讯作者	SCI	2

	Strength of Non-rectangular Reinforced Concrete Squat Walls	Structural Engineering					
4	Influence of shear span ratio on the seismic performance of L-shaped RC walls	Magazine of Concrete Research	国外期刊	2019	1	SCI	1
5	Comparison of the Seismic Performance of Slender and Squat T-shaped RC Walls	5th International fib Congress	国际会议	2018	通讯作者	其它	0
6	Experimental and Analytical Studies on H-shaped Reinforced Concrete Squat Walls ★	ACI Structural Journal	国外期刊	2018	通讯作者	SCI	5
7	Experimental Assessment of T-shaped Reinforced Concrete Squat Walls	ACI Structural Journal	国外期刊	2018	1	SCI	3
8	Load-Carrying Mechanism to Resist Progressive Collapse of RC Buildings	Journal of Structural Engineering	国外期刊	2015	3	SCI	98
9	Seismic Performance of Steel-concrete Composite Structural Walls with Internal Bracings	Journal of Constructional Steel Research	国外期刊	2015	2	SCI	21

3、代表性著作

序号	著作题目	出版社	类别	出版时间	排名
1	无				

4、专利

序号	专利名称	专利号	专利类别	批准时间	排名
1	无				

5、产品

无

6、其他

--

无

三、项目可行性说明

1、立项背景 一、项目的背景和意义 众所周知，钢筋混凝土结构结合了钢筋与混凝土的各自优点，已成为当今世界应用最为广泛的结构形式[1]。我国每年花费在混凝土结构上的费用达2000余亿元[2]。传统观念中，人们对于钢筋混凝土结构的寿命期望值很高，却往往忽视了其耐久性问题，也因此付出了惨痛的代价[3-4]。据统计，世界各国因腐蚀而造成的损失约占国民生产总值（GDP）的2%~4%。其中钢筋锈蚀作为引起混凝土结构性能退化最主要的因素之一，正越来越多地收到重视。 我国大陆海岸线长达1.8万公里，岛屿海岸线约1.4万公里。海港、码头、潮汐电站等海工建筑物众多，钢筋受侵蚀现象较为严重，造成的混凝土结构耐久性劣化的案例也屡见不鲜。对某在役混凝土码头的检测表明，使用过程中梁、板、柱等构件出现不同程度的锈胀开裂[5]；交通部四航局对华南地区某港20个泊位的调查表明，部分码头建成5年后即发现大量锈胀裂缝[6]。浙江大学调研浙江省内37座在役桥梁后表明，多数桥梁在服役期内出现了耐久性问题[7]。同时，亦有已有大量试验[8-12]表明，钢筋锈蚀会导致结构的刚度、延性、承载力、耗能能力、服役年限等降低，已成为钢筋混凝土结构破坏的最为重要的原因之一。因此，如何针对锈蚀钢筋混凝土结构进行相应的耐久性设计，延长其使用寿命，已成为当前迫切需要解决的问题。宁波作为“一带一路”的始发港，坐拥杭州湾，海岸线漫长。境内建筑物易受钢筋锈蚀影响。近年来宁波市政府亦认识到这一问题的重要性。以我校为基地，引入了李焯芬院士，并成立宁波大湾区建设工程技术研究中心开展相关研究。 钢筋混凝土柱作为框架结构中主要的承重与抗侧力构件，受氯离子侵蚀后其受力性能劣化将会直接影响整体框架结构的抗震性能[13]。2010年智利大地震中，大量钢筋混凝土柱受损，其中伴有钢筋锈蚀的混凝土柱损伤更为严重[14]。我国作为幅员辽阔的大国，地震灾害频发。2008年汶川大地震中亦出现了因箍筋锈蚀或箍筋配置不足造成的结构倒塌[15]。各国学者针对锈蚀钢筋混凝土柱进行了大量研究[16-23]。研究表明，箍筋布置及箍筋数量对于钢筋混凝土结构性能，特别是其塑性性能具有显著影响[24]。而锈蚀现象又能造成箍筋约束能力大幅下降[25]。因此，在设计之初就需精确考量这些可能出现的箍筋锈蚀及其造成的不良影响，特别是对于处于腐蚀环境或地震带中的建筑物。然而，现有研究多针对于锈蚀钢筋混凝土圆柱及方柱，对于同样运用广泛的矩形柱的抗震性能的了解仍不完善。 另一方面，现有锈蚀钢筋混凝土的研究多为定性研究，缺乏相应公式及理论支撑锈蚀钢筋混凝土柱的耐久性设计。钢筋及约束混凝土应力应变关系在钢筋混凝土结构设计中占有举足轻重的地位，对于预测结构性能，特别是其弯曲及剪切性能起着不可或缺的作用[26]。其中，关于锈蚀钢筋应力应变关系的研究已较为充分[27-30]。关于混凝土应力应变关系的研究起步较早，Mander等人[31]在1988年就给出了描述约束混凝土应力应变关系的经典方程。但此方程并未考虑到锈蚀现象对于箍筋侧向约束的影响，相关研究也长时间缺失。直至2017年，Vu等人[32]才以此方程为基础，提出了针对锈蚀钢筋混凝土圆柱及方柱的应力应变关系模型。国内方面，刘磊等人[33]于2018年在一系列方柱的试验基础上，通过回归法提出了锈蚀钢筋约束混凝土应力应变本构关系模型。但申请人在前期研究中发现，上述模型均建立在对于圆柱及方柱的研究基础之上，并不适用于矩形柱。无法精确描述锈蚀钢筋对于矩形柱内约束混凝土应力应变关系影响。钢筋混凝土矩形柱作为一种常见的柱结构形式，应该广泛。因此，极有必要展开相关研究，建立能准确描述锈蚀钢筋混凝土矩形柱应力应变曲线的理论模型，推导相关公式，为钢筋混凝土结构的耐久性设计提供指导。 1. 国内外研究现状 下面申请人就从试验研究及理论研究两方面，对国内外已有的关于锈蚀钢筋混凝土柱的研究进行介绍。 （1）试验研究

1) 锈蚀钢筋混凝土柱的抗震性能

钢筋锈蚀会导致结构的承载能力、变形能力和耗能能力等抗震性能指标出现不同程度的下降,使建筑物在地震作用下易发生破坏甚至倒塌,严重威胁生活生产安全。汶川大地震后,我国对《建筑抗震设计规范》进行了修订,提高了部分地区抗震设防烈度。然而按以往抗震设防要求设计的建筑在各地仍大量存在。同时很多建筑由于所处环境较为恶劣或服役时间较长,钢筋锈蚀较为严重。这一问题也受到了越来越多学者们的关注。

郑山锁等人[17]对6片钢筋混凝土框架柱试件进行了加速腐蚀,并对腐蚀后试件进行拟静力加载试验。试验结果表明随着锈蚀程度的增加,钢筋混凝土框架柱塑性铰区的受弯承载力和弯曲变形能力逐渐减小,且极限状态下由塑性铰区弯曲变形引起的柱顶水平位移在柱顶总水平位移中所占比例逐渐减小。Meda等人[18]对2片锈蚀钢筋混凝土方柱进行了拟静力试验。试验结果表明,钢筋锈蚀严重影响了试件的抗震性能:其承载力和延性分别下降了30%和50%。因而在设计之初,就必须针对这一现象做出相应的预防措施。Goksu等人[20]测试6片锈蚀程度不同的钢筋混凝土矩形柱抗震性能。试验结果表明,由于纵筋锈蚀,原本分布于整个塑性铰区域的塑性变形逐渐集中于锈蚀区,从而使得纵筋过早发生断裂,使构件的变形能力急剧下降。贡金鑫等人[34]对16片锈蚀钢筋混凝土方柱进行了低周反复荷载试验。对研究结果表明,结果表明,试件开裂后的滞回曲线形状基本上呈梭形,同时由于钢筋锈蚀程度的不均匀性,滞回曲线呈现明显的不对称。随钢筋锈蚀率的增大,试件的屈服荷载和极限荷载降低,滞回曲线的丰满程度和滞回环的面积逐渐减小,刚度、延性和耗能能力逐步降低。

通过对现有研究的总结可以发现,学术界对锈蚀钢筋混凝土柱抗震性能的了解多建立于圆柱及方柱的研究基础之上[35-38],对于同样广泛存在的矩形柱的研究则较为缺乏。较之圆柱及方柱,矩形柱在各主轴方向上的性能不尽相同。可能会发生脆性劈裂破坏(Splitting failure)和类似短肢剪力墙的因柱角混凝土压碎造成的破坏,而这些破坏形态又缺乏完整可靠的描述模型。

此外,现有对于锈蚀钢筋混凝土柱的认知多留于构件的宏观性能层面,少有深入的定量分析,相关的建议也缺乏理论支撑。故申请人认为,开展锈蚀钢筋混凝土矩形柱的拟静力加载试验,探究各重要参数对于其抗震性能的影响,可增强对于此类柱抗震性能的认知。

2) 锈蚀钢筋混凝土柱的加固

钢筋锈蚀现象普遍存在于既有建筑物中,特别是沿海地区的钢筋混凝土构件中。钢筋混凝土柱作为建筑结构中主要的承重与抗侧力构件[39],钢筋锈蚀后其受力性能劣化将会直接影响整体结构的抗震性能。为了确保钢筋混凝土柱的抗震安全性,对其进行抗震性能评定和加固研究具有重要意义。

徐玉野等人[21]对比了一些列普通钢筋混凝土方柱、锈蚀钢筋混凝土方柱及经碳纤维增强复合材料(CFRP)加固锈蚀钢筋混凝土方柱的抗震性能。试验结果表明CFRP加固锈蚀钢筋混凝土短柱钢筋锈蚀对混凝土短柱受剪承载力影响较小,但显著降低了短柱的变形能力和耗能能力。使用CFRP加固可以提高锈蚀钢筋短柱的受剪承载力至略优于未锈蚀钢筋柱的受剪承载力,并显著改善锈蚀钢筋短柱的延性和耗能能力。张闯等人[22]采用复材对苯二甲酸乙二醇酯(PET)纤维布对不同箍筋锈蚀程度混凝土方柱进行外包加固,并通过水平低周往复加载的方式研究了箍筋锈蚀对柱进行PET纤维布抗剪加固的影响。试验结果表明,随着箍筋锈蚀率的增大,柱的抗剪承载力下降;损伤钢筋混凝土柱在经过PET纤维布加固后,试验柱的极限承载力得到了明显提高,但PET纤维布的利用率随着箍筋锈蚀率的增大而降低。Bousias等人[23]对采用纤维增强复合材料(FRP)对20片锈蚀钢筋混凝土矩形柱进行了外包加固,并对试件施加了于截面强轴或弱轴平行的往复荷载。试验结果表明,试件在强、弱轴加载方向上出现了不同破坏形态,使用FRP的加固效果在强轴上表现得更好。Li等人[40]则同时利用了碳纤维增强复合材料(CFRP)及钢板对14片锈蚀钢筋混凝土方柱进行了外包加固,并施加以周期往复荷载探究加固效果。试验结果表明,相较于钢板,CFRP加固效果更好。同时采用上述两种加固方式能显著提高柱强度及延性。程玲等人[41]对贡金鑫等人[34]测试的锈蚀钢筋混凝土方柱进行了地震响应模拟。对研究结果表明,钢筋混凝土柱锈蚀后,由于钢筋截面减小及钢筋与混凝土之间的粘结性能降低,抗震性能降低。加固后,其抗震性能有所恢复。恢复程

度不仅与加固形式和加固材料用量有关，还与地面运动的频谱特性有关。

通过回顾文献中关于锈蚀钢筋混凝土柱的加固研究可以发现，现今加固方式种类多样，且加固效果也在逐步提高。诚然，此类研究对于提高即有锈蚀钢筋混凝土构件性能必不可少。但如何从源头上妥善考虑锈蚀钢筋对约束混凝土的影响，改良相应设计，如何从最基础的本构关系出发来指导对于锈蚀构件的加固，仍需要进一步的深入研究。

(2) 理论研究

箍筋在钢筋混凝土柱结构中扮演重要角色，其不仅能够提升结构延性及抗震性能，同时对混凝土柱周围产生约束围压，减缓内部混凝土裂缝的发展，从而提升了柱的轴向承载力[42]。因此，锈蚀箍筋约束混凝土应力应变关系模型是服役结构剩余承载力和变形性能的研究基础，也是服役结构非线性有限元分析时必不可少的本构关系[43, 44]。

Scott等人[45]于1982年在25片钢筋混凝土方柱的试验基础上，提出了描述约束混凝土的应力应变关系的方程。Mander等人[31]在Scott等人及同一时期相关学者的研究基础上，于1988年提出描述约束混凝土的应力应变关系的一系列方程。

Mander等人的提出的模型适用面广泛，可准确描述带普通箍筋或螺旋箍筋的圆柱及方柱内约束混凝土的应力应变关系。因此被广泛运用于钢筋混凝土柱的承载、变形能力计算及相关的有限元分析中。随着学术界对于锈蚀问题的逐渐重视，诸多学者[33, 46-48]发现该模型并不适用于锈蚀钢筋混凝土柱。因其并未考虑到锈蚀现象对于箍筋侧向约束的影响。Vu等人[32]于2017年对一系列锈蚀钢筋混凝土圆柱、方柱进行了轴压试验，分析了各参数对于应力应变关系的影响，并提出了相应公式加以阐述。刘磊等人[33]也于2018年在一系列方柱的试验基础上，通过回归法提出了锈蚀钢筋约束混凝土应力应变本构关系模型。尽管上述研究指出了锈蚀钢筋混凝土柱的一些共性问题，但此申请人在前期研究中发现这些模型并不适用于矩形截面锈蚀钢筋混凝土柱。正因如此，为增强对于锈蚀钢筋约束混凝土的了解，指导钢筋混凝土柱的耐久性设计，极有必要展开相关研究。

参考文献

- [1]赵国藩，金伟良，贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2000
- [2]李明顺. 坚持科研促使混凝土结构设计规范水平跻身世界先进行列[J]. 工程建设标准化. 1997（1）：13-16.
- [3]张誉，蒋利学，张伟平. 混凝土结构耐久性概论[M]. 上海：上海科学技术出版社，2003.
- [4]金伟良，赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 科学出版社，2014：371-380.
- [5]吴灵杰，寇新建，周拥军，蒋萌. 既有钢筋混凝土码头保护层锈胀开裂计算时长对比[J]. 哈尔滨工业大学学报，2016，48（12）：51-55.
- [6]王胜年，黄君哲，张举连，潘德强. 华南海港码头混凝土腐蚀情况的调查与结构耐久性分析[J]. 水运工程，2000（6）：8-12.
- [7]吕清芳. 混凝土结构耐久性环境区划标准基础研究[D]. 杭州：浙江大学，2003.
- [8]Jaffer S. J., and Hansson C. M., Chloride-induced corrosion products of steel in cracked concrete subjected to different loading conditions[J]. Cement and Concrete Research. 2009, 39（2）：116-125.
- [9]刘小娟，蒋欢军. 钢筋混凝土框架结构基于时变的抗震性能研究[J]. 建筑结构学报，2019，40（03）：134-141.
- [10]Alipour A., Shafei B., and Shinozuka M., Performance evaluation of deteriorating highway bridges located in high seismic areas[J]. Journal of Bridge Engineering. 2011, 16（5）：97-611.
- [11]余波，陈冰. 锈蚀钢筋混凝土梁抗剪承载力计算的概率模型[J]. 工程力学，2018，35（11）：115-124.

- [12]付传清, 何家豪, 金贤玉, 金南国. 带横向荷载裂缝钢筋混凝土梁的钢筋锈蚀形态研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40 (01): 123-131.
- [13]郑山锁, 刘巍, 左河山, 董立国, 李强强. 近海大气环境下考虑锈蚀的不同剪跨比RC框架梁抗震性能试验[J]. 工程力学, 2018, 35 (04): 78-86.
- [14]Markou, J. T., and Durkin, S. A., Chilean earthquake of 2010: response and lessons[R], Nova Science Publishers, Hauppauge, New York, 2011, 135.
- [15]张鑫, 徐向东. 汶川大地震钢筋混凝土框架结构震害调查[J]. 山东建筑大学学报, 2008, 23 (06): 547-550.
- [16]李强, 牛荻涛, 张成中, 杨光. 锈蚀箍筋约束混凝土柱低周往复试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49 (05): 671-679.
- [17]郑山锁, 董立国, 左河山, 秦卿, 刘巍, 李强强. 人工气候环境下锈蚀RC框架柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39 (04): 28-36.
- [18]Meda A., Mostosi S., Rinaldi Z., and Riva P., Experimental evaluation of the corrosion influence on the cyclic behaviour of RC column[J]. Engineering Structures, 2014, 76 (1): 112-123.
- [19]蒋欢军, 刘小娟. 锈蚀钢筋混凝土柱基于变形的性能指标研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36 (07): 115-123.
- [20]Goksu C., and Ilki A., Seismic behavior of reinforced concrete columns with corroded deformed reinforcing bars[J]. ACI Structural Engineering, 2016, 113 (5): 1053-1064.
- [21]徐玉野, 王振, 林碧兰. CFRP加固锈蚀钢筋混凝土短柱的抗震性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41 (03): 67-76.
- [22]张闯, 张大伟, 赵羽习, 段安. 纤维布加固锈蚀混凝土柱抗剪承载力的试验研究[J]. 工业建筑, 2016, 46 (07): 183-187.
- [23]Bousias S.N., Triantafillou T.C., Fardis M.N., Spathis L., and O' Regan B.A., Fiber-reinforced polymer retrofitting of rectangular reinforced concrete columns with or without corrosion[J]. ACI Structural Engineering, 2004, 101 (4): 512-520.
- [24]Li B., Park R., and Tanaka H., Stress-strain behavior of high-strength concrete confined by ultra-high- and normal-strength transverse reinforcements[J]. ACI Structural Engineering, 2001, 98 (3): 395-406.
- [25]El-Sayed A.K., Shuraim A.B., and Hussain R.R., Influence of stirrup corrosion on shear strength of reinforced concrete slender beams[J]. ACI Structural Engineering, 2016, 113 (6): 1223-1232.
- [26]王坤, 赵羽习, 夏晋. 混凝土结构锈裂形态试验研究及数值模拟[J]. 建筑结构学报, 2019, 40 (07): 138-145.
- [27]马亚飞, 王强, 王磊, 张建仁. 不同缺口类型钢筋力学性能试验及数值分析[J]. 建筑材料学报, 2019, 22 (02): 245-253.
- [28]林红威, 赵羽习. 变形钢筋与混凝土黏结性能研究综述[J]. 建筑结构学报, 2019, 40 (01): 11-27.
- [29]Kashani M.M., Size effect on inelastic buckling behavior of accelerated pitted corroded bars in porous media[J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 29 (7): 1-13.
- [30]Ou Y-C, Susanto Y.T.T., and Roh H., Tensile behavior of naturally and artificially corroded steel bars[J]. Construction and Building Materials, 2016; 103 (30): 93-104.
- [31]Mander J.B., Priestley M.J.N., and Park R., Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, New York, NY 1988; 114 (8): 1804-1826.
- [32]Vu N.S., Yu B., and Li B., Stress-strain model for confined concrete with corroded transverse reinforcement[J]. Engineering Structures, 2017, 151 (15): 472-487.
- [33]刘磊, 牛荻涛, 李强, 何真. 锈蚀箍筋约束混凝土应力-应变本构关系模型[J]. 建筑材料学报, 2018, 21 (05): 811-816.
- [34]贡金鑫, 仲伟秋, 赵国藩. 受腐蚀钢筋混凝土偏心受压构件低周反复性能的试验研究[J]. 建筑结

构学报, 2004 (05): 92-97+104.

[35]李金波, 贡金鑫. 钢筋锈蚀对钢筋混凝土圆柱抗震性能的影响[J]. 中国公路学报, 2008 (04): 55-60.

[36]Meda A., Mostosi S., Rinaldi Z., and Riva P.. Corroded RC columns repair and strengthening with high performance fiber reinforced concrete jacket[J]. Materials and Structures, 2016; 49 (5): 1967-1978.

[37]Yang S-Y., Song X-B., Jia H-X., Chen X., and Liu X-L., Experimental research on hysteretic behaviors of corroded reinforced concrete columns with different maximum amounts of corrosion of rebar[J]. Construction and Building Materials, 2016; 121 (15): 319-327.

[38]史庆轩, 牛荻涛, 颜桂云. 反复荷载作用下锈蚀钢筋混凝土压弯构件恢复力性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000 (04): 44-50.

[39]Ma, J., and Li, B., Experimental and analytical studies on H-shaped reinforced concrete squat walls[J], ACI Structural Journal, 2018, 115 (2): 425-438.

[40]Li J., Gong J., and Wang L., Seismic behavior of corrosion-damaged reinforced concrete columns strengthened using combined carbon fiber-reinforced polymer and steel jacket[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23 (7): 2653-2663.

[41]程玲, 贡金鑫, 李金波. 钢筋混凝土柱锈蚀及加固后的地震响应[J]. 工程抗震与加固改造, 2012, 34 (03): 31-39.

[42]Ma, J., Zhang, Z., and Li, B., Experimental assessment of T-shaped reinforced concrete squat walls[J], ACI Structural Journal, 2018, 115 (3): 621-634.

[43]Ma, J., Li, B., and Ning, C., Influence of lateral loading direction on the peak shear strength of non-rectangular reinforced concrete squat walls[J], Advances in Structural Engineering, 2019, 22 (11): 2392 - 2405.

[44]荻涛, 陈新孝, 王学民. 锈蚀钢筋混凝土压弯构件抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2004 (10): 36-38+45.

[45]Scott B D., Park R., and Priestley M.J.N., Stress-strain behavior of concrete by overlapping hoops at low and high strain rates[J], ACI Structural Journal, 1982, 79 (1): 13-27.

[46]曹国辉, 韩传昌, 邓昂, 唐皇. 钢筋锈蚀条件下混凝土柱有效弹性模量试验研究[J]. 实验力学, 2019, 34 (03): 509-516.

[47]李强, 金贤玉. 箍筋锈蚀对轴压混凝土短柱承载力的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49 (10): 1929-1938+1951.

[48]陈少杰, 任建喜, 李强. 锈蚀钢筋混凝土柱承载力退化机理[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38 (01): 85-90.

2、主要内容和预期成果

二、研究内容及预期研究成果

1. 研究内容

(1) 锈蚀钢筋混凝土矩形柱的抗震性能研究

钢筋锈蚀的影响：选择典型钢筋混凝土矩形柱为研究对象，通过电化学方式加速箍筋锈蚀，开展拟静力加载试验。从裂纹分布、破坏形态、滞回曲线、位移组成和钢筋应变等方面研究锈蚀钢筋混凝土矩形柱抗震性能。

其它重要参数的影响：通过不同试件试验数据的比对分析，探究截面形状、箍筋布置、箍筋间距和锈蚀程度对于锈蚀箍筋混凝土矩形柱抗震性能的影响。

(2) 锈蚀钢筋混凝土矩形柱的参数研究

应力应变关系及其影响因素：以试件为基础，利用非线性有限元软件丰富锈蚀钢筋混凝土矩形柱样本，模拟其在轴压下的性能。从而得到各重要参数对于其应力应变关系的影响。

(3) 锈蚀箍筋混凝土矩形柱的应力应变关系模型

极限强度：以Mander等人提出的公式为基础，考虑箍筋锈蚀程度对箍筋截面面积及屈服强度的影响，建立公式计算锈蚀钢箍筋混凝土矩形柱的极限强度。

峰值应变：以Mander等人提出的公式为基础，考虑箍筋锈蚀程度及截面形状的影响，建立公式计算锈蚀箍筋混凝土矩形柱的峰值应变。

极限应变：以Paulay and Priestley提出的公式为基础，考虑箍筋锈蚀程度及箍筋极限应变降低的影响，同时引入修正后的约束混凝土极限强度，建立公式计算锈蚀箍筋混凝土矩形柱的极限应变。

2. 预期研究成果

- 1. 探明截面形状、箍筋布置、箍筋间距、锈蚀程度等参数对锈蚀箍筋混凝土矩形柱抗震性能的影响。
- 2. 建立能准确描述锈蚀箍筋混凝土矩形柱应力应变关系模型。为钢筋混凝土结构的耐久性设计提供指导。
- 3. 采用学术论文和项目研究报告的形式提交研究成果，拟在国内外期刊上发表SCI/EI检索论文1至3篇，并参加1次以上结构工程方向的学术会议。

3、项目实施方案和计划进度安排

三、研究方案及计划进度

1. 研究方案

(1) 技术路线

本项目研究对象为钢筋混凝土矩形柱。通过电化学加速箍筋锈蚀，进行拟静力加载试验，从裂纹分布、破坏形态、滞回曲线、位移组成和钢筋应变等方面比对分析截面形状、箍筋布置、箍筋间距、锈蚀程度等参数对锈蚀钢筋混凝土矩形柱抗震性能的影响。同时，通过非线性有限元软件进行大规模的参数研究，推导锈蚀钢筋混凝土矩形柱极限强度、峰值应变、极限应变的计算公式，建立模型描述其应力应变曲线关系。技术路线如附件中图1所示。

(2) 试验方案

1) 试验装置和加载方案的设计

为模拟地震荷载作用，本项目所有试件均承受水平方向的低周往复荷载（拟静力试验）。为模拟建筑物中钢筋混凝土柱的受力情况，本项目中试件均承受一定轴力。轴力选用液压千斤顶施加。千斤顶一端通过随动小车平台与加载架相连，另一端与L形加载梁相连。L形加载梁则通过螺栓与试件端部相连。此套装置设计的初衷是使轴力均匀分布于柱截面的同时满足水平加载的需要。

水平荷载选用MTS电液伺服作动器施加。作动器末端固定于反力墙上。作动器首端通过球铰、L形加载梁与试件相连。试件底座通过若干地锚螺栓及钢框架固定于地面。整套加载装置如附件中图2所示。

2) 试件设计

本项目选取典型的矩形截面钢筋混凝土柱为研究对象。考虑到截面形状及箍筋布置对其抗震性能的影响，试验中拟采用如附件中图3所示的三种截面（A型，B型和C型）。

其中A型与B型截面的长宽均为 $400 \times 200\text{mm}$ ，但箍筋和纵筋的布置均有所不同。众所周知，箍筋布置对约束混凝土影响的十分显著。本试验拟通过对比A、B两种截面的钢筋混凝土柱的抗震性能，来分析箍筋布置对于柱抗震性能的影响。C型截面的长宽为 $600 \times 200\text{mm}$ ，较以上两种截面长宽比较大，但仍属于柱的范围，与短肢剪力墙有所区别。通过对比B、C两种截面钢筋混凝土柱的抗震性能，可以明确截面形状对于柱抗震性能的影响。

除了箍筋布置方式外，箍筋的间距亦对约束混凝土有明显影响。本项目拟在以上三种截面的基础上，各设计两组具有不同箍筋间距的钢筋混凝土柱试件（40，100mm），以探究疏密程度不同的箍筋对于柱抗震性能的影响。此类布置亦见于Vu等人主导的钢筋混凝土圆柱试验中。

如前所述，本项目研究的重点为锈蚀钢筋混凝土柱。由于钢筋自然锈蚀过程较为漫长，本项目拟通过电化学法加速钢筋锈蚀。首先将试件浸于5%NaCl溶液内或使混凝土保持潮湿，将箍筋作为阳极，铜片作为阴极，通之以恒定的约 $0.5\text{mA}/\text{cm}^2$ 的电流。在此过程中，用绝缘胶带包裹纵筋防止其锈蚀。从而探究锈蚀箍筋对于钢筋混凝土柱抗震性能的影响。

理论上而言，可通过法拉第定律（Faraday's law）及通电时间估算锈蚀质量，从而得到钢筋的锈蚀程度。但诸多学者均指出此方法易高估钢筋的锈蚀程度。故本项目拟采用试验法测定钢筋的锈蚀程度。试验中选用钢筋质量损失 $X_{\text{corr}} = (W_0 - W_1) / W_0$ 作为衡量锈蚀程度的指标。其中 W_0 与 W_1 分别为钢筋锈蚀前后质量，采用ASTM标准化步骤测量。本项目拟针对0%，10%，20%三种不同的锈蚀状况进行研究：其中设计锈蚀率0%（不锈蚀）的一组试件作为对照组，其余两组分别代表一般及严重锈蚀的钢筋混凝土柱。

综上所述，本项目试验中的主要研究参数为截面形状、箍筋布置、箍筋间距和锈蚀程度。拟设计18片钢筋混凝土矩形柱试件，具体参数如附件中表1所示。除以上参数外，试件其他参数保持一致，拟于项目实施第一阶段，通过有限元数值模拟结合工程实践经验确定。

3) 加载方案设计

如前所述，本项目试验采用拟静力方式进行加载。按照《建筑抗震试验方法规程》（JGJ/T 101-2015）的规定，试验时先用千斤顶在试件顶部施加大小为满载的40%的轴向压力，重复加载2-3次，以消除试件内部组织的不均匀性。此后轴力逐步加至100%，并在试验过程中保持稳定。

本项目中水平荷载由MTS电液伺服作动器施加，采用荷载、位移混合控制的加载制度。试件屈服前采用荷载控制加载，按预估屈服荷载的10%增量进行加载，每级荷载循环1次。试件屈服后采用位移控制加载，按屈服位移的倍数循环加载，每级位移循环3次。试验过程中，当所测承载力下降到峰值承载力的85%时，或者试件发生脆性破坏突然失去承载力时，认为试件破坏，同时停止加载。

4) 试验测试及试验数据分析

根据既定试验方案对各试件进行测试，收集试验数据。通过对数据的归纳总结，分析钢筋混凝土矩形柱在的抗震性能。在试验前于柱体表面绘制钢筋网格线。在试验过程中，逐步描绘试件裂纹分布，观测并记录其破坏形态。采用压力传感器测量承载力；采用位移计测量各位移分量；采用应变片测量钢筋应变。试验

后，整理各试件相关试验数据，绘制相应图表。

（3）参数研究方案

利用非线性有限元软件对试验中的锈蚀钢筋混凝土矩形柱试件进行三维建模。通过材料试验确定相应参数，模拟试验中的约束条件及加载方式。通过定义接触单元（Contact element）来模拟锈蚀对于钢筋混凝土粘结力的影响。通过比对试验与数值模拟中的滞回曲线、钢筋应变等数据验证有限元模拟的准确性。

以试验中的锈蚀钢筋混凝土矩形柱试件为基础，丰富截面形状、箍筋布置、箍筋间距、锈蚀程度这四个参数的研究范围及总样本数。同时，对于混凝土强度，钢筋强度等可能影响锈蚀钢筋混凝土柱抗震性能的参数进行研究。详尽分析各参数对于柱应力应变关系的影响。

（4）理论研究方案

如前所述，Mander等人提出了一些列公式，描述约束混凝土的应力应变关系。但此研究乃建立于普通钢筋混凝土柱上，并未考虑锈蚀箍筋对于约束混凝土的影响。Vu等人后又对锈蚀钢筋混凝土圆柱、方柱进行了轴压试验，分析了各参数对于约束混凝土应力应变关系的影响，并提出了相应公式加以描述。但此模型并不适用于矩形截面锈蚀钢筋混凝土柱。故本文拟基于Mander提出的经典公式，同时考虑锈蚀箍筋、截面形状、箍筋间距的影响，建立能准确描述锈蚀钢筋混凝土矩形柱应力应变曲线的公式。

钢筋在锈蚀后，力学及物理性能均有一定程度的下降，反映在截面面积及屈服强度的降低。因此，在描述锈蚀钢筋混凝土柱应力应变关系的过程中，必须考虑以上两个方面对于箍筋施加的侧向力的影响。同时，本项目拟采用非线性回归法，以试验及数值模拟数据为基础，对约束混凝土极限强度（Maximum strength）进行修正。在此过程中，需充分考虑钢筋锈蚀程度对箍筋截面面积及屈服强度的影响，从而确定相关系数的取值。

因为钢筋锈蚀，约束混凝土的最大应力时对应的应变将急剧下降，幅度甚至超过最大应力的下降程度。故亦需通过非线性回归法，以试验及数值模拟数据为基础，对约束混凝土峰值应变（Strain at maximum strength）进行修正。在此过程中，亦需充分考虑钢筋锈蚀程度及截面形状的影响，从而确定相关系数的取值。

对于应力应变关系中另一个重要参数极限应变（Ultimate strain），本项目拟参照Paulay and Priestley提出的经典公式，进行相应修正。在此过程中，亦需充分考虑钢筋锈蚀程度及箍筋极限应变降低的影响，同时引入修正后的约束混凝土极限强度，从而确定相关系数的取值。修正后，将计算数据与试验数据进行对比，评价其准确性。

通过以上三个关键参数推到及相应公式的建立，可以得到能够准确预测锈蚀钢筋混凝土矩形柱应力应变关系曲线的模型，从而为锈蚀钢筋混凝土结构的耐久性设计提供指导。

2. 进度安排

（1）2020年6月-2020年12月

收集、归纳并总结国内外现有文献及技术资料。详尽记录锈蚀钢筋混凝土柱的相关试验数据并将其汇总成表；

利用有限元软件对文献中圆柱及方形柱的拟静力加载试验进行拟合，结合实验室条件设计本项目钢筋混凝土矩形柱试件。

（2）2021年1月-2021年12月

开展锈蚀钢筋混凝土矩形柱的拟静力加载试验研究，记录并分析试验数据，观察试件破坏形态；

整理试验数据，分析各参数对于锈蚀钢筋混凝土矩形柱抗震性能的影响；

总结已取得的阶段性研究成果，发表相关成果，参加学术会议1人次。

(3) 2022年1月-2022年6月

利用有限元软件建立锈蚀钢筋混凝土矩形柱的三维模型，对试验中未涉及或未充分研究的工程参数进行大规模的参数研究，探究各参数对于其应力应变关系的影响；

推导锈蚀钢筋混凝土矩形柱在轴压下的极限强度、峰值应变、极限应变的计算公式，建立能准确描述其应力应变关系模型；

总结已取得的阶段性研究成果，发表相关成果，撰写结题报告。

4、现有工作基础和条件

四、工作基础及条件

1. 工作基础

项目申请人具有从事钢筋混凝土结构抗震性能的试验和理论研究经验。于2012年至2017年在新加坡南洋理工大学土木与环境工程学院下属的灾害风险控制研究所（Institute of Catastrophe Risk Management）攻读博士学位，其间主导并协助了一系列关于钢筋混凝土框架、板、柱、墙的结构性能研究。在国际权威SCI期刊Journal of Structural Engineering等发表结构抗震性能方面论文6篇（第一作者4篇）。近年来亦数次赴重要国际学术会议展示交流相关成果。已取得了较好的研究基础。申请人现阶段在浙大宁波理工学院从事教研工作，所在的桥梁与结构工程研究所与浙江大学结构工程研究所保持着良好的合作关系，能有力保障本项目的成功实施。

下面从试验研究、数值模拟及理论研究三方面，简要地对申请人的研究工作基础进行总结：

(1) 钢筋混凝土结构的试验研究

申请人以新加坡内政部（Ministry of Home Affairs, Singapore）资助的关于房屋安全性能研究项目（Building Security Research - MHA）为依托，对一系列钢筋混凝土墙、柱开展了拟静力试验研究。并在Journal of Earthquake Engineering和ACI Structural Journal等SCI权威学术期刊中发表多篇相关论文。其中墙、柱的试验装置如附件中图4所示。

通过上述研究，申请人在钢筋混凝土结构的抗震性能试验研究方面累积了足够的经验，熟练掌握了钢筋混凝土结构拟静力试验加载及测量的基本方法及需要注意内容。这些研究基础将有利于本项目中锈蚀钢筋混凝土矩形柱的抗震性能试验的开展。同时，申请人发现箍筋约束对钢筋混凝土柱的弯曲及剪切性能均具有显著影响。而文献中缺乏针对锈蚀钢筋混凝土矩形柱的试验研究，难以支撑相关抗震设计及耐久性设计。此亦促使申请人展开本项目研究及进行针对性的试件设计。

(2) 钢筋混凝土结构的数值模拟

申请人曾利用三维非线性有限元软件ABAQUS、DIANA对各类钢筋混凝土构件进行数值模拟研究（附件中图

5)。并通过对文献中已有试验进行模拟比对,对钢筋混凝土结构的抗震性能进行了深入探索。相关研究结果发表在Journal of Constructional Steel Research、Journal of Earthquake Engineering等SCI学术期刊。

通过上述精细化有限元数值模拟研究,申请人在钢筋混凝土结构的数值模拟上累积了丰富经验。对相关有限元软件的建模方法、非线性材料的本构模型等相关技术有了较为深入的认知。上述研究为本项目中锈蚀钢筋混凝土矩形柱的有限元数值模拟的顺利开展提供了宝贵经验。

(3) 钢筋混凝土结构的理论研究

申请人曾以试验中腹板裂纹分布为基础(附件中图6),参照Moehle公式,提出钢筋混凝土剪力墙抗剪承载力计算模型(附件中图7),推导出水平荷载作用下钢筋混凝土剪力墙的抗剪承载力公式。更进一步总结文献中现有试验数据,汇总成表。利用所得公式计算试件抗剪承载力。通过比对发现相较于ACI 318-14和ASCE 43-05中的相关公式,所得公式能够更加准确地预测钢筋混凝土剪力墙的抗剪承载力。

通过上述理论研究,申请人对钢筋混凝土结构的力学性能有了较为深入的认知。这些经验将有利于本项目中应力应变模型的建立及相关公式的推导。

(3) 期刊论文

- [1]Ma, J. (马佳星), Li, B., and Ning, C., "Influence of Lateral Loading Direction on the Peak Shear Strength of Non-rectangular Reinforced Concrete Squat Walls", Advances in Structural Engineering, Vol. 22, No. 11, 2019, pp. 2392 - 2405. (SCI, EI检索)
- [2]Ma, J. (马佳星), and Li, B., "Seismic Behavior of L-shaped RC Squat Walls under Various Lateral Loading Directions", Journal of Earthquake Engineering, 2019, 23 (3), 422-443. (SCI, EI检索)
- [3]Ma, J. (马佳星), Zhang, Z., and Li, B., "Experimental Assessment of T-shaped Reinforced Concrete Squat Walls", ACI Structural Journal, 2018, 115 (3), 621-634 (SCI, EI检索)
- [4]Ma, J. (马佳星), and Li, B., "Experimental and Analytical Studies on H-shaped Reinforced Concrete Squat Walls", ACI Structural Journal, 2018, 115 (2), 425-438. (SCI, EI检索)
- [5]Lan, W., Ma, J. (马佳星), and Li, B., "Seismic Performance of Steel-concrete Composite Structural Walls with Internal Bracings", Journal of Constructional Steel Research, 2015, 110, 76-89. (SCI, EI检索)
- [6]Qian, K., Li, B., and Ma, J. (马佳星), "Load-Carrying Mechanism to Resist Progressive Collapse of RC Buildings", Journal of Structural Engineering, 2015, 141 (2). (SCI, EI检索)

(4) 会议论文

- [1]Ma, J. (马佳星), and Wang, Y., "Influence of Shear Span Ratio on the Seismic Performance of L-shaped RC Walls", The 15th International Symposium on Structural Engineering, 2018, Hangzhou, China.
- [2]Ma, J. (马佳星), Wang, Y., and Zhang, Z., "Comparison of the Seismic Performance of Slender and Squat T-shaped RC Walls", 5th International fib Congress, 2018, Melbourne, Australia.

2. 工作条件

申请人所在单位为浙江大学宁波理工学院，学科“土木工程”为所在单位“首批优势特色”学科，建设期为2012-2016年，已投入1000余万元支持学科硬件建设。2015年土木工程学科获批宁波市工程结构性能提升重点实验室，2016年土木工程学科获批建设“浙江省一流学科”。项目组所在结构与桥梁实验室拥有反力加载架、千斤顶加载系统、MTS电液伺服系统、500T电液伺服长柱试验机等先进试验设备及完善的数据采集设备，能充分满足本项目试验研究需求。近年来亦为国家自然科学基金面上项目、地区项目级其他省部级科研项目完成了大量试验工作。项目组成员近年来对锈蚀混凝土柱、剪力墙、梁柱节点等结构开展了一些力拟静力试验。申请人亦多次主导钢筋混凝土墙、柱的抗震性能试验研究工作。以上一切能充分支撑本项目中锈蚀钢筋混凝土矩形柱的试验研究的展开。

作为浙江大学的分支机构，申请人所在的结构与桥梁研究所与浙江大学结构工程研究所保持着良好的合作关系，双方时常联合开展试验研究，可共享试验设备。从而为本项目试验研究的成功展开提供了有力保障。

**浙江省“钱江人才计划”C、D类项目申报
个人承诺及单位审核意见表**

姓名	马佳星
工作单位	浙大宁波理工学院
项目名称	锈蚀钢筋混凝土矩形柱的抗震性能研究
本人 声明	我保证本人所提交的所有申报材料属实，如有不实之处，愿承担一切责任。 申请人（签名）： 年 月 日
所在单位 审核	申请人以上材料经与原件核对，情况属实。表格所填报内容均已在单位内部进行全信息公示，没有异议。 申请人单位（盖章） 年 月 日

注：本表格打印后需经本人亲笔签名、单位盖单，并将扫描件上传至系统。