

自密实混凝土桥墩抗震性能试验研究

张霁颜¹, 逯宗典², 段洪亮³, 肖 纬⁴, 王志强¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;

2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430000;

3. 同济大学 建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092;

4. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要:通过两阶段的试验研究了自密实混凝土桥墩的抗震性能。第一阶段试验为10组混凝土与钢筋的拉拔试验,分析了各个试件的破坏形式并将自密实混凝土与钢筋之间的粘结锚固性能与同等强度普通混凝土进行了对比。第二阶段试验为自密实混凝土桥墩抗震性能拟静力试验,研究了桥墩试件的破坏模式和滞回环,以及漂移比、位移延性、等效粘滞阻尼比、等效刚度和残余变形等5项抗震性能指标。试验结果表明:与普通混凝土试件相比,钢筋与自密实混凝土试件间的粘结性能偏弱,但随着锚固长度的增加,两者的差异逐渐减小;2个拟静力试验桥墩试件破坏形式均表现为弯曲破坏,与自密实混凝土桥墩试件相比,普通混凝土桥墩试件在整个试验过程中具有相对饱满的滞回环和较缓的强度退化;自密实混凝土桥墩试件表现出相对较弱的延性能力和耗能能力。

关键词:自密实混凝土;抗震性能;粘结锚固性能;拟静力试验

中图分类号: U443.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2020)04-0010-09

自密实混凝土(Self-Compacting Concrete,简称 SCC)于20世纪80年代后由日本成功研发并运用于桥梁、建筑、隧道工程,与普通混凝土相比,其具有卓越的流动性与自填充性能,能免去振捣工序,节省劳动力与施工成本,还能有效利用粉煤灰、硅灰等工业固体废弃物,更利于环境保护。

近年来,随着自密实混凝土在实际工程中的不断推广与应用,国外对自密实混凝土的本构关系和与钢筋的粘结锚固性能进行了较多试验研究^[1-4]。自密实混凝土的骨料粒径较小而球度模数较大,会影响混凝土中骨料间的咬合力,导致其与钢筋的粘结性能与普通混凝土的粘结行为存在不同。桥墩作为桥梁抗震的主要构件,伴随自密实混凝土在桥墩中的应用,其抗震性能的研究显得尤为重要。Paultre和Srilakshmi et al^[5-6]通过自密实混凝土短柱静力轴压试验研究了约束自密实混凝土的本构关系,结果表明,配箍率越高时,约束混凝土的强度和试件的延性都提高,Mander模型还是较好地与自密实混凝土试验结果相对应,但一些参数需要修正。Angotti et al^[7]通过偏心轴压测试得到自密实混凝土立柱具有相对较低的极限抗压强度与较好的延性性能。Asl et al^[2]通过单向拉拔试验对钢筋与自密实混凝土、普通混凝土的粘结力学行为进行了探讨,结果表明,自密实混凝土与钢筋之间存在粘结滑移现象,其早期粘结强度低于普通混凝土,但28 d后的粘结强度大于普通混凝土5%~8%,发现自密实混凝土施工质量对粘结行为有影响。Veerle et al^[8]对自密实混凝土和普通混凝土试件通过拉拔试验进行了粘结力学行为的研究,研究表明,自密实混凝土与钢筋的粘结强度高于普通混凝土,最大粘结应力随螺纹钢筋直径的增加而加大。Helinckx et al^[3]针对不同自密实混凝土级配,在不同混凝土浇筑环境(实验室、混凝土工厂)制作的自密实混凝土试件进行了拉拔试验,得出对直径16 mm以下的钢筋,粘结强度提高,而对较大直径的钢筋,粘结

收稿日期:2020-05-27 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20200084

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51778470);国家自然科学基金面上项目(51378386)

作者简介:张霁颜(1998—),女,硕士研究生,研究方向为桥梁抗震。E-mail:1932469@tongji.edu.cn

张霁颜,逯宗典,段洪亮,等.自密实混凝土桥墩抗震性能试验研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(4):10-17,43.

强度有减少趋势。国外对于自密实混凝土立柱的抗震性能研究则处于初步阶段。2005年, Okamura et al^[9]对自密实混凝土立柱的抗震性能进行了试验研究, 研究发现, 自密实混凝土柱吸收能量和抵抗地震力的能力不低于普通混凝土柱, 具有相当好的延性; 同时, 混凝土与钢筋较好的粘结性能可考虑减小钢筋的搭接锚固长度; 但是, 自密实混凝土柱的抗剪能力低于普通混凝土柱。2014年, Ashtiani et al^[10]研究了高强自密实混凝土梁柱节点的抗震性能, 研究表明, 高强自密实混凝土试件能在保证良好抗震性能的同时有效提高材料品质与施工特性。

国内方面, 2004年, 王国杰等^[11]针对自密实混凝土与钢筋的粘结锚固性能进行了系列研究, 研究表明, 在混凝土抗压强度基本相同的情况下, 自密实混凝土的粘结强度略高于普通混凝土。山显彬^[12]和杨帆等^[13]均采用拉拔试验的方法, 研究了混凝土强度、保护层厚度、配箍率、锚固钢筋直径和锚固长度等因素对自密实混凝土和钢筋间粘结性能的影响。2013年, 郑建岚等^[14]通过自密实混凝土与钢筋的粘结性能试验发现其粘结-滑移曲线与普通混凝土相似, 为保证自密实混凝土与钢筋的粘结锚固性能, 在自密实混凝土配合比设计中应控制坍落度与坍落扩展度不太大或太小。

综上所述, 国内外关于自密实混凝土力学行为的试验研究仍主要集中于立柱混凝土本构关系及粘结行为等静力研究方向, 其粘结锚固性能与普通混凝土存在一定的差异, 而粘结锚固性能的不同, 对桥墩塑性铰区损伤机理也会有一定的影响。因此, 自密实混凝土桥墩是否可应用于高地震危险区, 其抗震性能是否满足预期要求, 目前国内对其开展的研究还很少。因此有必要对自密实混凝土与钢筋的粘结行为和采用自密实混凝土浇筑的桥墩抗震性能进行研究, 为自密实混凝土桥墩抗震设计提供可靠的基础性资料。

1 试验设计

1.1 第一阶段——粘结锚固试验

1.1.1 试件设计制作

参照文献^[15], 试验模型设计考虑了锚固长度、箍筋作用、保护层厚度等因素, 共设计了10组拉拔试验, 每组浇筑3个试件(编号为1表示采用钢筋剖开工艺粘贴应变的试件, 编号为2表示采用外包环氧工艺粘贴应变片的试件, 编号为3表示未粘贴应变片的试件)。NVC1~3为普通混凝土试件组, 保护层厚90 mm, 锚固长度分别为 $5d$ 、 $8d$ 和 $10d$, 与之对比的自密实混凝土试件组为SCC1~3; SCC4~7均为锚固长度 $5d$ 的自密实混凝土试件组, 其中SCC4和SCC5试件组箍筋配置分别为 $\Phi 8@80$ 和 $\Phi 8@40$, 而SCC6和SCC7试件组将前2组的保护层厚度从90 mm改为32 mm, 箍筋采用相同配置。试件设计如图1所示。

试件所用自密实混凝土采用细度模数为2.6的中砂、5~20 mm粒径的碎石、南陵42.5普通硅酸盐水泥、复合高效减水剂、F类I级粉煤灰, 其工作性能通过坍落度与坍落拓展度检验符合自密实混凝土的要求, 混凝土强度等级均为40 MPa, 钢筋均采用直径 d 为20 mm的HRB400螺纹钢。试件横截面尺寸为200 mm×200 mm, 高度随钢筋锚固长度进行调整。为消除试验时加载端与垫板间局部挤压影响, 在加载端与自由端均设置一段长为 $5d=100$ mm硬质PVC套管, 以形成钢筋与混凝土间的无粘结区。

1.1.2 试验方法

钢筋拉拔荷载由加载吨位为1 500 kN, 位移行程为250 mm的电液伺服作动器(MTS793系列作动器)施加。图2为试件安装与试验过程的照片。为了较好地记录拉拔试验P-S曲线下降段, 加载程序采用闭环控制方式, 即上升段(极限荷载80%前)采用力控制方式, 根据钢筋直径得到加载速度200 N/s, 后转

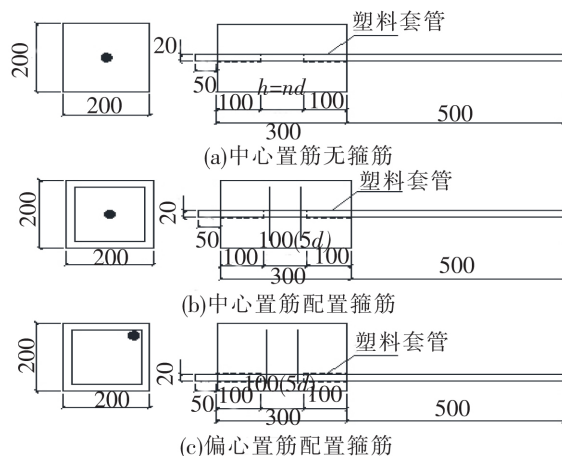


图1 基准拔出试件图(单位:mm)

换为位移控制方式,根据调试速度取 2 mm/min ,既能保证试验效率,又能较好记录峰值和曲线下降段的情况。拉拔试验过程中量测的内容主要包括荷载、位移、应变 3 部分,试验数据均采用国产 DH3817 数据自动采集系统进行采集,采集频率为 5 Hz 。

1.2 第二阶段——桥墩抗震性能拟静力试验

1.2.1 试件制作

本文共设计 1[#]、2[#] 2 个现浇桥墩试件,且试件的模型缩尺比例为 $1:3$ 。所用混凝土和钢筋的材料与粘结锚固试验相同,混凝土的强度等级为 C40,试件构造特点和研究内容见表 1。

表 1 试件描述和研究内容

试件编号	试件构造特点	试验研究内容
1 [#]	现浇普通钢筋混凝土单柱墩试件	作为自密实混凝土桥墩抗震性能研究的比较基准
2 [#]	现浇自密实钢筋混凝土单柱墩试件	研究自密实混凝土桥墩的抗震性能及破坏模式等

试验试件采用统一尺寸,立柱尺寸均为 $530\text{ mm}\times 500\text{ mm}\times 3\,200\text{ mm}$ (高),加载端的尺寸为 $900\text{ mm}\times 500\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ (高),底座(承台)的尺寸为 $1\,600\text{ mm}\times 1\,600\text{ mm}\times 600\text{ mm}$ (高)。加载中心到立柱底的距离为 $3\,400\text{ mm}$,荷载沿长边(边长 530 mm)加载,试件的剪跨比为 6.42 。试件构造见图 3。桥墩试件的配筋设计如图 4 所示,纵筋采用直径 20 mm 的 HRB400 热轧带肋钢筋,构造筋、箍筋和拉筋分别采用直径 8 mm 和 6 mm 的热轧光圆钢筋,箍筋外净保护层 39 mm ,将应变片粘结在塑性铰区域的纵筋和箍筋上,位置为沿墩身高度按 5 cm 间距布置 4 层。位移测点为墩顶加载位置、墩身中部和墩底。

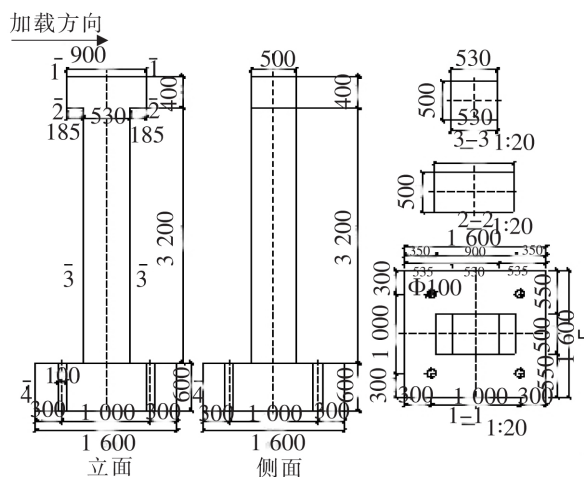


图 3 桥墩试件构造尺寸(单位:mm)

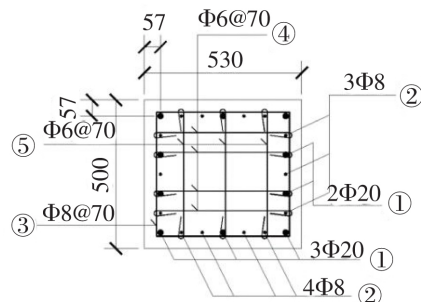


图 4 立柱截面配筋设计(单位:mm)

1.2.2 试验方法

试验中通过竖向千斤顶对桥墩恒载轴压力进行模拟,由于轴压比对桥墩的抗震性能有较大影响,需要准确模拟,考虑到模型的自重和缩尺比存在差异,最终确定施加试件的竖向荷载为 56.0 t 。在承受恒定轴向压力的同时,桥墩试件通过逐级加载单向水平循环荷载至破坏,水平单向加载方式采用位移控制的加载制度,加载频率 0.01 Hz ,采样频率 5 Hz 。试验实际加载如图 5 所示。每级循环加载到最大位移时持载,进行破坏现象的观察和标记工作。直至试件的强度下降到最大强度的 85% ,加载结束。每级荷载进行 3 个循环加载,加载幅值为 2 mm 、 5 mm 、 10 mm 、 15 mm 、 20 mm 、 25 mm 、 30 mm 、 40 mm 、 60 mm 、 80 mm ,其后以 20 mm 的幅值递增。



图 5 试件实际加载图

由于试验试件设计为可能发生弯曲破坏的试件,实测项目有:(1)塑性铰区域的曲率分布;(2)墩身关

键位置位移;(3)塑性铰区域的钢筋和箍筋应变;(4)水平荷载和竖向荷载等。

2 试验现象及结果分析

2.1 第一阶段——拉拔试验

2.1.1 试验现象

本试验以不同锚固长度、配箍率和保护层厚度为参数,共设计了 30 个拉拔试件,经归纳,试验中主要出现以下 3 种破坏形式:

(1)钢筋拉断破坏。当保护层厚度和钢筋锚固长度得到保证时,钢筋与混凝土间的粘结锚固性能相应较好,混凝土较难发生劈裂破坏,试件最终多发生钢筋颈缩拉断破坏,图 6 为钢筋拉断破坏照片。图 7 为试件组 SCC2 的荷载-位移曲线,其中 2[#] 和 3[#] 试件为钢筋拉断破坏。



图 6 钢筋拉断破坏

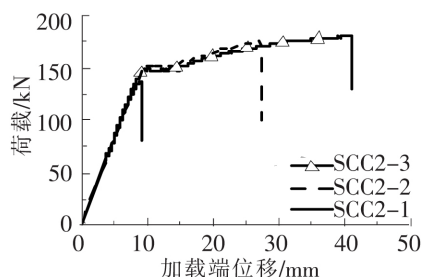


图 7 SCC2 试件组荷载-位移曲线

(2)钢筋拔出破坏。对于保护层较厚的短锚试件,较易发生钢筋拔出破坏。拔出破坏的试件,混凝土的咬合齿被剪断,孔内壁形成较为光滑的纵向擦痕,钢筋凹处被混凝土碎屑填满,钢筋自由端滑移较大而试件保持完整。图 8 为钢筋拔出破坏照片。图 9 为试件组 SCC1 的荷载-位移曲线,其中 2[#] 和 3[#] 试件为钢筋拔出破坏。



图 8 钢筋拔出破坏

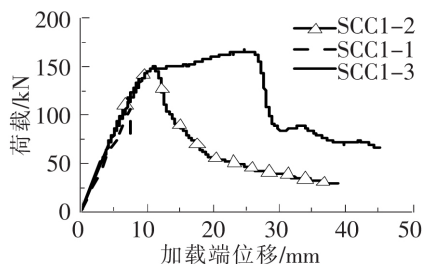


图 9 SCC1 试件组荷载-位移曲线

(3)混凝土劈裂破坏。当钢筋保护层厚度较小时,试件较容易发生混凝土劈裂破坏。试件发生劈裂破坏时,没有任何预兆,并伴随劈裂声响,荷载突然下降为零。打开劈裂破坏试件观察内部,可看见混凝土中的劈裂裂缝以及钢筋横肋对混凝土挤压破碎的痕迹,钢筋肋前有挤压形成的混凝土碎屑楔状堆积。图 10 为混凝土劈裂破坏照片。图 11 为 SCC6 试件组劈裂破坏的荷载-位移曲线。



图 10 混凝土劈裂破坏

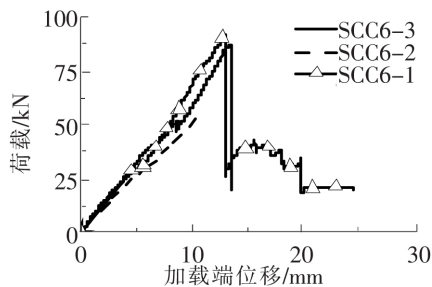


图 11 SCC6 试件组荷载-位移曲线

2.1.2 试验结果分析

对比自密实混凝土试件和普通混凝土试件可以发现:当钢筋锚固长度为 $5d$ 时,自密实混凝土试件发生钢筋拔出破坏,锚固失效,而普通混凝土试件中钢筋却未被拔出,最终钢筋被拉断破坏;而当钢筋锚固长度大于等于 $8d$ 时,2 类试件均未发生钢筋拔出破坏,钢筋与混凝土间粘结性能较为可靠;并且当钢筋锚固长度相同时,在同等外力荷载作用下,自密实混凝土和钢筋之间的相对滑移大于普通混凝土和钢筋之间的相对滑移。由此可知,相较于钢筋和普通混凝土间的粘结性能,钢筋和自密实混凝土间粘结性能表现较弱,且随着锚固长度的增加,这种差异逐渐减小。而钢筋与自密实混凝土之间的粘结锚固性能对钢筋保护层厚度较为敏感,当保护层厚度较大时,短锚自密实混凝土试件最终均发生钢筋拔出破坏,且混凝土表面没有裂缝发展;随着钢筋保护层厚度减小,外围混凝土劈裂抗力减弱,试件开始发生混凝土劈裂破坏,钢筋与自密实混凝土间的极限粘结应力随之下降。配箍率对自密实混凝土粘结性能也有影响:在钢筋锚固长度为 $5d$ 且中心布置的情况下,随着配箍率的增大,变形钢筋与自密实混凝土间极限粘结应力相应略微有所提高;而当钢筋偏心布置时,配置横向箍筋的混凝土试件发生劈裂破坏,但由于箍筋的侧向约束作用,试件仍表现出较好的延性。

2.2 第二阶段——拟静力试验

2.2.1 试验现象

2.2.1.1 1# 试件描述

1# 试件的损伤状态照片如图 12 所示,损伤状态和性能水平描述如下:

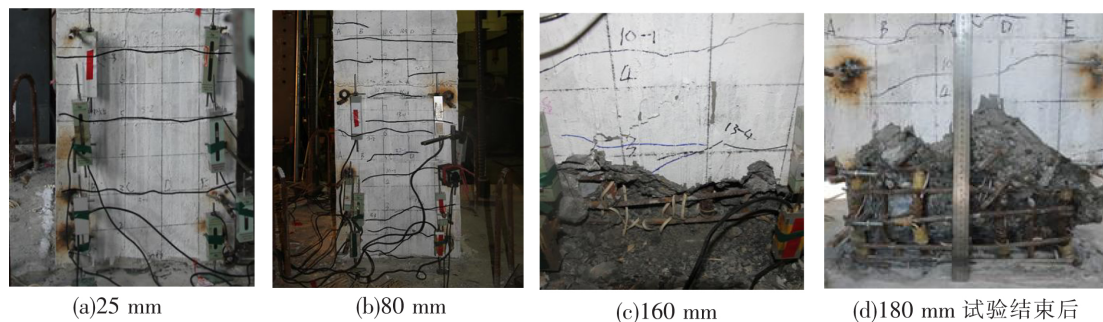


图 12 1# 试件损伤状态图

加载位移到 10 mm 时,试件沿墩身出现发丝般微小裂缝,卸载后裂缝闭合。加载位移到 25 mm 时,试件沿墩身出现多条弯曲裂缝,裂缝间距比较均匀,为 15~20 cm,并有多条裂缝延伸至侧面,裂缝宽度 0.04~0.28 mm,墩底出现裂缝,宽度约为 1 mm(如图 12(a)所示)。卸载后裂缝闭合。

加载位移到 80 mm 时,墩身出现多条弯曲裂缝和斜裂缝,裂缝宽度 0.1~0.8 mm,多条水平裂缝在正反两方向荷载作用下贯通闭合,墩底裂缝宽度 5~9 mm,墩底混凝土有脱落的趋势(如图 12(b)所示)。随着变形的增加,保护层混凝土持续剥落且混凝土剥落区高度保持不变。墩底弯曲裂缝宽度超过 10 mm。

加载位移到 160 mm 时,试件承载力降低至最大荷载的 85% 以下,达到强度衰减级别。墩底附近保护层混凝土大量剥落,墩底弯曲裂缝宽度约为 20 mm(如图 12(c)所示),但未观察到纵筋屈曲断裂、箍筋断裂、核心混凝土碎裂等典型破坏特征。

试验继续加载至 180 mm,保护层混凝土大量剥落,核心混凝土压碎破坏,构件强度急剧衰减,试验加载停止。清理塑性铰区压碎的混凝土后,试件最终破坏形态如图 12(d)所示。由图可以看出,破坏区域主要集中在墩身底部,破坏区域高度为 30~50 cm,纵筋屈曲(墩底有钢筋断裂)、箍筋外鼓。试件破坏时,靠近墩底附近 20 cm 范围内水平裂缝和斜裂缝发展丰富。该范围以上以水平弯曲裂缝为主,且分布均匀,裂缝间距为 10~15 cm。

2.2.1.2 2# 试件描述

2# 试件的损伤状态照片如图 13 所示,与普通混凝土试件相比,损伤状态和性能水平描述如下:

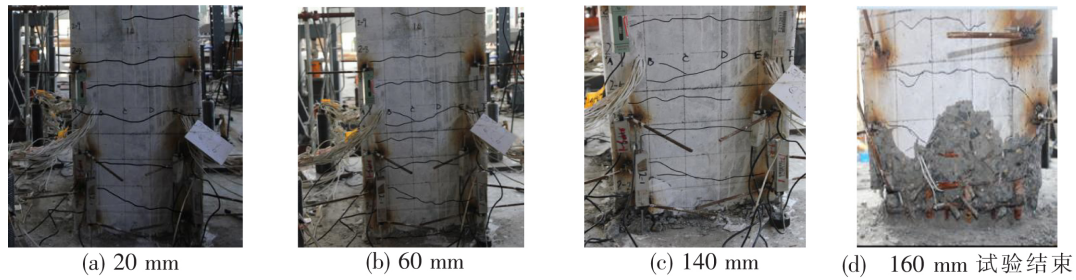


图 13 2# 试件损伤状态图

加载位移到 5 mm 时,试件沿墩身出现发丝般微小裂缝。加载位移到 20 mm 时,试件沿墩身出现多条弯曲裂缝,裂缝间距比较均匀,约为 20 cm,并有多条裂缝延伸至侧面,裂缝宽度 0.04~0.30 mm,墩底出现裂缝,宽度约为 1 mm(如图 13(a)所示)。卸载后裂缝闭合。

加载位移到 60 mm 时,墩身出现多条弯曲裂缝,裂缝宽度 0.1~0.42 mm,多条水平裂缝在正反两方向荷载作用下贯通闭合,墩底裂缝宽度 3 mm,墩底混凝土有脱落的趋势(如图 13(b)所示)。加载位移到 100 mm 时,在距离承台 15 cm 高度内,混凝土保护层大量剥落,且有继续剥落的趋势。

加载位移到 140 mm 时,试件承载力降低至最大荷载的 85% 以下,达到强度衰减级别。墩底附近保护层混凝土持续剥落,纵筋屈曲但未断裂,箍筋外鼓(如图 13(c)所示)。

试验继续加载至 160 mm,保护层混凝土大量剥落,核心混凝土压碎破坏,构件强度急剧衰减,纵筋屈曲(墩底有钢筋断裂),箍筋外鼓,试验加载停止。试件最终破坏形态如图 13(d)所示。破坏区域主要集中在墩身底部,破坏区域高度约为 20 cm。由剥落的混凝土保护层可以观测出桥墩纵筋和箍筋与自密实混凝土间粘结界面完全剥离,粘结性能较差,可能是由自密实混凝土未经振捣引起的。试件破坏时,靠近墩底附近 20 cm 范围混凝土大量剥落。该范围以上以水平弯曲裂缝为主,且分布均匀,裂缝间距约为 20 cm。

2.2.2 试验结果分析

1# 和 2# 试件得到实测滞回曲线以及相应的骨架曲线如图 14 所示。观察 1# 试件和 2# 试件滞回曲线,可以看出两试件在较低荷载作用下,基本处于弹性阶段;随着加载位移等级的提高,混凝土开裂、钢筋屈服等非线性现象逐渐出现,滞回环相应增大,耗能增强;整体而言,两试件均表现为弯曲破坏。相比于普通振捣混凝土试件,自密实混凝土试件在整个试验过程中具有相对扁平的滞回环和较快速的承载力退化。2 个试件骨架曲线总体形状相似。加载初期,相比普通振捣混凝土试件,2# 自密实混凝土试件率先开裂,刚度相对较小;随着加载位移等级的提高,当位移加载到 80 mm 时,两者均达到极限承载能力,随后承载力开始下降,普通振捣混凝土桥墩试件表现出更为平缓的强度衰减,延性相对较好。

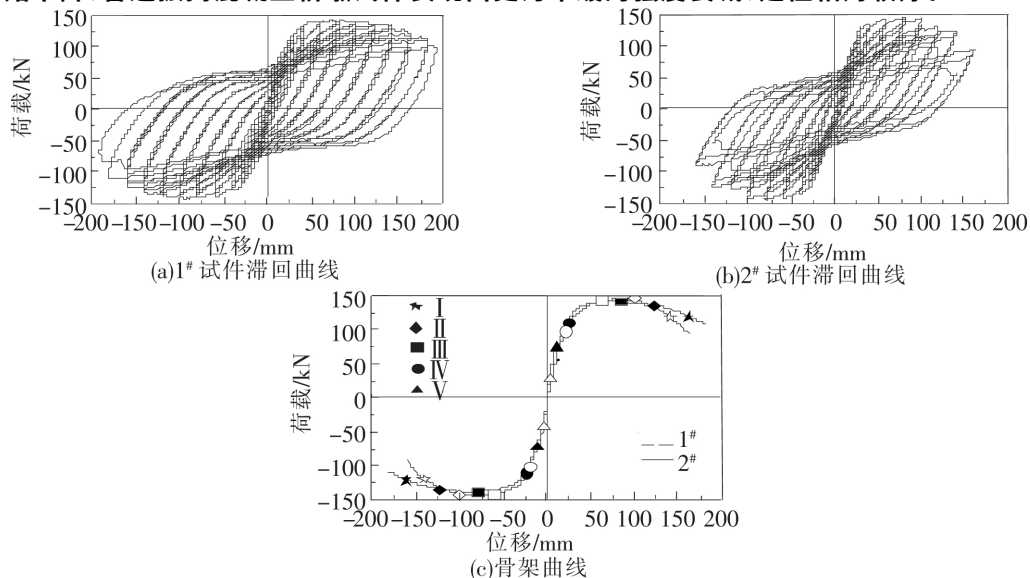


图 14 试件实测滞回曲线与骨架曲线

同时,本文拟采用漂移比、位移延性、等效粘滞阻尼比、等效刚度、残余变形等 5 项参数来评价试件的抗震性能。

(1) 漂移比。漂移比定义为试件在各个加载等级下的水平向控制位移与试件有效加载高度之比,本试验试件等效高度为 3.4 m,1[#] 试件在 160 mm 加载时强度下降至 85% 以下,对应漂移比为 4.71%,2[#] 试件在 140 mm 加载时强度下降至 85% 以下,对应漂移比为 4.12%。

(2) 位移延性。构件的位移延性系数定义为给定加载等级下的侧向位移与理想屈服位移之比。在进行延性系数比较时,通常采用试件强度下降到最大强度值 85% 时的位移作为极限位移,且本文采用通用屈服弯矩法^[16]进行计算。由表 2 可知,相比于普通振捣混凝土桥墩试件,自密实混凝土桥墩试件表现出相对较差的延性能力。

表 2 桥墩试件位移延性系数

试件编号	极限位移/mm	通用屈服弯矩法	
		Δ_y/mm	μ_Δ
1 [#]	158.7	21.7	7.3
2 [#]	140.6	25.2	5.6

(3) 等效粘滞阻尼比。本文采用等效粘滞阻尼比 ξ_{eq} 来评价试验试件的耗能能力。由图 15 可以看出,与普通混凝土桥墩试件相比,自密实混凝土桥墩耗能能力较弱,同等位移等级下,试件阻尼比较小。

(4) 等效刚度。从骨架曲线可以看出,随着位移加载的持续进行,试件刚度不断发生变化。试件的等效刚度如图 16 所示。可以看出,2 个桥墩试件刚度退化规律较为相似:加载初期,试件刚度很大,且随加载位移等级的提高较快衰减;随着试件强度发生屈服,等效刚度继续衰减但趋于平缓;当试件达到极限承载能力后,等效刚度趋近于某一稳定值,不随荷载等级相应变化。

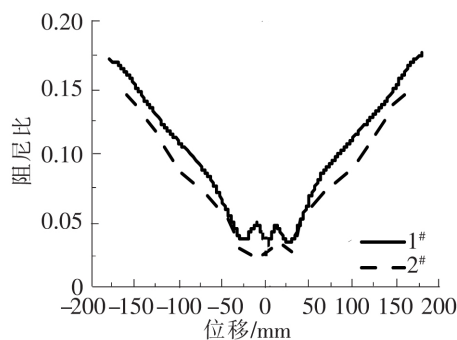


图 15 试件阻尼比

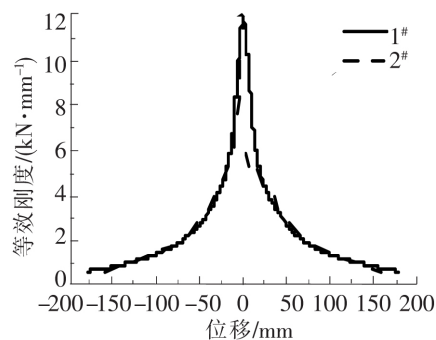


图 16 试件等效刚度

(5) 残余变形。残余变形指构件卸载后不可恢复的塑性变形,是表征结构弹塑性行为的一个重要参数,可以用来评估结构在震后的损伤或者可修复水平。由图 17 可以看出,两试件残余变形与加载位移等级间的关系曲线十分接近。

3 结论

通过对采用高强钢筋的自密实混凝土构件进行的拉拔试验和拟静力试验,得到如下结论:

(1) 从第一阶段试验可知,锚固长度较短时,变形钢筋与自密实混凝土间的粘结性能相比于普通混凝土表现偏弱。当保护层厚度较大时,短锚自密实混凝土试件最终均发生钢筋拔出破坏;随着钢筋保护层厚度减小,外围混凝土劈裂抗力减弱,试件开始发生混凝土劈裂破坏,变形钢筋与

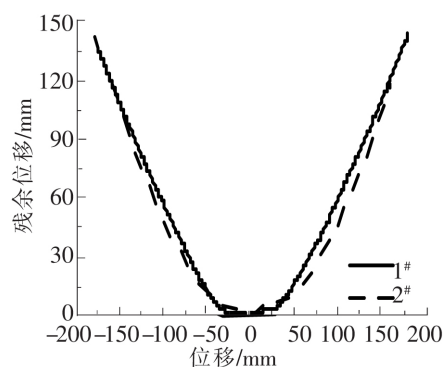


图 17 试件残余变形

密实混凝土间的粘结应力随之下降。箍筋对混凝土能提供侧向约束作用,随着配箍率的增大,变形钢筋与自密实混凝土间粘结应力相应提高。

(2) 从第二阶段试验可知,普通混凝土试件与自密实混凝土试件破坏形式相似,均表现为弯曲破坏。但由自密实混凝土试件剥落的混凝土保护层可以观测出桥墩纵筋和箍筋与自密实混凝土间粘结界面完全剥离,粘结性能较差,这可能是由自密实混凝土试件未经振捣引起的,与施工质量有关。

(3) 对比分析拟静力试验得到的滞回曲线与骨架曲线,可以看出,随着加载位移等级的提高,滞回环增大,耗能增强;相比于普通混凝土试件,自密实混凝土试件在整个试验过程中具有相对扁平的滞回环和较快的强度退化。

(4) 对比第二阶段试验中 2 个试件的抗震指标,可发现 2 个试件阻尼比随加载位移等级的变化规律基本一致,且刚度退化规律以及残余变形也较为相似,但自密实混凝土试件表现出相对较弱的延性和耗能能力。

参 考 文 献

- [1] Tragardh J. Microstructural features and related properties of self-compacting concrete[C]//Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete. Stockholm:[s. n.],1999:175-186.
- [2] Asl A F, Dilmaghani S, Famili H, et al. Bond strength of reinforcement steel in self-compacting concrete[J]. International Journal of Civil Engineering, 2008, 6(1): 24-33.
- [3] Helinckx P, Boel V, De Corte W, et al. Structural behaviour of powder-type self-compacting concrete: Bond performance and shear capacity[J]. Engineering Structures, 2013, 48: 121-132.
- [4] Reza Ghavidel, Rahmat Madandoust. Reliability of pull-off test for steel fiber reinforced self-compacting concrete[J]. Measurement, 2015, 73: 628-639.
- [5] Paultre P, Khayat K H, Cusson D, et al. Structural performance of self-consolidating concrete used in confined concrete columns[J]. Aci Structural Journal, 2005, 102(4): 560-568.
- [6] Srilakshmi P, Seshagiri Rao M V. Comparison of different stress-strain models for confined self-compacting concrete (SCC) under axial compression[J]. International Journal of Advances in Engineering & Technology, 2012, 5(1): 185-193.
- [7] Angotti F, Galano L, Giordano S, et al. Assessment of structural performance of SCC and HSC little size slender columns via experimental tests[C]//Proceedings of First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete. Hunan:[s. n.],2005.
- [8] Veerle Boel, Peter Helinck, Pieter Desnerck, et al, Bond behaviour and shear capacity of self-compacting concrete[C]//RILEM Bookseries. Dordrecht:[s. n.], 2010:343-353.
- [9] Okamura H, Maekawa K, Mishima T. Performance based design for self-compacting structural high-strength concrete [J]. ACI Materials Journal, 2005,228:13-34.
- [10] Ashtiani M S, Dhakal R P, Scott A, et al. Seismic performance of high-strength self-compacting concrete in reinforced concrete beam-column joints[J]. Journal of Structural Engineering-asce, 2014, 140(5): 1-7.
- [11] 王国杰,郑建岚. 自密实混凝土与钢筋的粘结锚固性能试验研究[J]. 福州大学学报:自然科学版,2004,4(3): 334-338.
- [12] 山显彬. 变形钢筋与自密实混凝土之间粘结锚固性能试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [13] 杨帆,程家幸,孙立新. 钢筋与自密实混凝土粘结锚固性能试验研究[J]. 山西建筑,2016,42(2):98-101.
- [14] 郑建岚,庄金平. 自密实混凝土与钢筋的粘结性能试验研究[J]. 工程力学,2013,30(2):112-117.
- [15] 中华人民共和国原城乡建设环境保护部. GB50152—92 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [16] 朱伯龙. 结构抗震试验[M]. 北京:地震出版社,1989.

(下转第 43 页)

Numerical Parameter Optimization of a Dynamic Vibration Absorber with Negative Stiffness

Xing Zhaoyang, Shen Yongjun, Xing Haijun

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: A dynamic vibration absorber with negative stiffness element was presented. It was found that the system was difficult to optimize parameters by analytic derivation. The amplitude amplification factor of the main system of the dynamic vibration absorber was taken as the control target, and the parameters were optimized by the sequence quadratic programming algorithm. At first, the correctness of the numerical optimization method in H-infinity optimization was verified by two models i. e., Voigt type dynamic vibration absorber and a dynamic vibration absorber with negative stiffness element. Then the numerical optimization method was used to optimize the parameters of the proposed dynamic vibration absorber in this paper. Compared with a variety of dynamic vibration absorbers under simple harmonic excitation and random excitation, the proposed model performs good performance in vibration absorption.

Key words: dynamic vibration absorber; negative stiffness; sequential quadratic programming algorithm; parameters optimization

(上接第 17 页)

Experimental Study on Seismic Behavior of Self-Compacting Concrete Columns

Zhang Jiyang¹, Lu Zongdian², Duan Hongliang³, Xiao Wei⁴, Wang Zhiqiang¹

(1. Bridge Engineering Department of Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. CCCC Second Highway Survey and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430000, China;

3. Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China;

4. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: In this paper, a two-stage test was conducted to study the seismic behavior of self-compacting concrete piers. The first stage of it consisted of 10 groups of pull-out tests of concrete and rebars. The failure forms of each specimen were analyzed and the bonding anchorage performance between self-compacting concrete and steel bars was compared with that of ordinary concrete of the same strength. The second stage test was a quasi-static test of seismic behavior of self-compacting concrete piers, studying the failure modes and hysteretic ring of the pier specimens, and the seismic performance of the specimens were evaluated by five indexes, including drift ratio, displacement ductility, equivalent viscous damping ratio, equivalent stiffness and residual deformation. The results showed that the bond property between rebars and self-compacting concrete was weaker compared with ordinary concrete, but with the increase of anchorage length, the difference between the two decreased gradually. The failure forms of the two quasi-static test pier specimens were both bending failures. Compared with the self-compacting concrete specimen, the ordinary concrete specimen had relatively plumper hysteretic ring and slower strength degradation during the whole test. And the self-compacting concrete specimen showed relatively weaker ductility and energy dissipation.

Key words: self-compacting concrete; seismic performance; bond anchorage performance; quasi-static test