承插式连接预制拼装RU-NC组合柱抗震性能试验方案

1 试验目的

通过试验研究采用承插式连接的预制拼装RU-NC组合柱的抗震性能，探寻轴压比对RU-NC组合柱的延性、耗能能力的影响。

2 试验构件设计

RU-NC组合柱试验构件以轴压比为试验参数，共设计3个RU-NC组合柱试验构件。其中，试验构件由钢套箍、下承台和RU-NC组合柱三部分组成，RU-NC组合柱使用承插式连接与下承台连接，承插深度30cm（1.0D）。试验构件设计图如图1所示。试验构件参数如表所示。



（a）立面图



（b）俯视图

图 1 试验构件设计图（单位：cm）

表 1 RU-NC组合柱抗震性能试验构件统计表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 构件编号 | 组合柱高度L/cm | 轴压比 | 轴向力/kN | 数量 |
| T-15 | 159 | 15% | 810 | 1 |
| T-20 | 159 | 20% | 1080 | 1 |
| T-25 | 159 | 25% | 1350 | 1 |

RU-NC组合柱，UHPC钢纤维掺量为2%，UHPC壁厚40mm。UHPC套筒采用对称配筋，纵筋采用：直径为8mm的带肋钢筋，环向对称布置6根。箍筋采用直径为6mm的光圆钢筋，柱中截面箍筋间距为40mm,在下端200mm内柱头箍筋加密Φ6@30。管内混凝土采用C50混凝土。具体构造图如图2。

 

图 2 RU-NC组合柱构造图（单位：cm）

下承台尺寸为150cm×80cm×55cm，采用构造配筋，使用C30混凝土现浇制作。下承台制作时在承插位置使用HDPE波纹管预留直径40cm，深度为32cm的承插孔。配筋图如图所示。

3 试验构件制作

3.1 原材料和配合比

1.水泥：福建P.O 52.5普通混凝土硅酸盐水泥。

2.硅灰：西宁铁合金厂生产的硅灰，SiO2大于等于90%，粒径为0.1～0.2μm。

3.砂：闽江河砂（粒径小于0.63mm）。

4.碎石：石子最大粒径不超过6mm。

5.减水剂：福州创先工程材料有限公司CX-8聚羧酸减水剂，减水率25%。

6.钢纤维：鞍山昌宏钢纤维厂，直径约0.22mm，长度约13mm，抗拉强度>2850MPa。

7.拌和水：自来水。

8.塑料模具、聚乙烯薄膜（保鲜膜）。

试验构件采用超高性能混凝土（UHPC），配合比如下表3-1所示。

表 2 UHPC配合比

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 粗砂 | 中砂 | 细砂 | 水泥 | 硅灰 | 石粉 | 减水剂 | 水 | 钢纤维 | 碎石 | 合计 |
| 377 | 254 | 122 | 396 | 136 | 90 | 10 | 117 | 85 | 1063 | 2650 |

3.2 离心法制作RU圆管

本实验的RU圆管试件均在漳平市瑞森有限公司的环形混凝土电杆车间采用离心法工艺生产完成。离心法生产RU圆管的工艺参考中国电力企业联合会标准《超高性能混凝土电杆标准》，混凝土圆管离心成型，是将混凝土导入钢模中，通过对钢模高速旋转获得离心力，混凝土在离心力作用下均匀地聚集在钢模的内壁上，从而获得密实高强的混凝土圆管。

目前为止，离心法成型混凝土生产工艺已经适用于超高性能混凝土，与普通混凝土仅由水和分散胶凝体组成的材料体系相比，UHPC中掺入了钢纤维，构成了水、分散胶凝体和短线体的材料体系，其力学性能、工作性能都有所变化，对其离心成型工艺也有一定的特殊要求：

（1）为提高UHPC的和易性，使钢纤维在离心时不会粘附在钢模内壁，为了使钢纤维均匀分布在环形截面，设计UHPC配合比时，应提高细集料及水泥的用量。

（2）为保证拌合物中钢纤维分散的均匀性，应采用强制式立式搅拌机，搅拌时，宜采用先干拌后湿拌的方法。先干拌1-1.5min的钢纤维和砂子，再加入水泥、硅灰及碎石干拌1.5-2min，最后加入水和减水剂溶液湿拌3min左右。

（3）在拌合物离心前，应尽可能让拌合物在钢模中停留时间最短，存放的时间过长会导致UHPC的和易性变差，钢模离心时，拌合物中钢纤维运动受阻，成型后钢纤维分布不均、外露。

离心法生产RU圆管的制作工艺有八个步骤：钢筋的下料、张拉及绑扎、UHPC的制备、混凝土导入钢模、合模、离心与成型、蒸汽室养护、脱模。

3.3 下承台现浇施工及承插式连接

下承台通过搭设模板现浇C30混凝土制作而成，在承插连接位置设置Φ=400mm的波纹管预留承插孔，承插深度为30cm（1.0D）。待下承台混凝土形成强度后，将RU-NC组合柱对中放入承插孔中，在灌浆槽内浇筑高强无收缩水泥灌浆料。

3.4 钢筋、混凝土贴片

（1）钢筋贴片。对于预埋钢筋应变片应进行防水、隔水处理，以防止后期离心法浇筑混凝土等工序对应变片的影响导致其失效。具体贴片方法为：首先对钢筋贴片处进行打磨，用丙酮清洗后用“禹王502”粘贴应变片，粘贴完成后后在其表面均匀涂抹石蜡，注意要全面覆盖应变片。待凝结后再用涂抹环氧树脂的纱布均匀捆扎以保证应变片与外界隔绝，并用万用表测量应变片阻值，保证应变片的阻值为119±0.1Ω，否则应重新贴片，直至满足要求为止。

（2）混凝土贴片。UHPC表面应变片粘贴过程中的难点主要在于试件表面的处理。由于UHPC结构较为致密，成型后试件硬度很高，且分布于表面的钢纤维增及孔洞加剧了处理难度，因此在贴片之前用环氧树脂填补试件表面孔洞后用打磨机打磨至试件表面平整，并保证试件贴片处平整无孔洞、裂缝或其它缺陷。随后用丙酮棉球擦洗贴片位置，用“禹王502”粘贴应变片，保证应变片与试件表面紧密贴合，并用万用表测量应变片阻值，确保其阻值为119±0.1Ω，否则应重新贴片。在RU圆管柱中截面处贴有纵向应变片与横向应变片，以测量试验过程中RU圆管的横向与纵向受力情况。

3.5 试验材性试块的制作

统计所有设计的构件参数，试验材料用到UHPC（超高性能混凝土）、C30以及钢筋。具体材性试件参数见表3。

表 3 试验材性试块参数及数量

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 材料名称 | 试件规格（mm×mm×mm） | 数量（个） |
| UHPC（钢纤维体积掺量）  2% | 100×100×100 | 3×2=6 |
| 100×100×300 | 3 |
| 100×100×400 | 3 |
| 直拉狗骨 | 6 |
| C30 | 150×150×150 | 3×2=6 |
| 150×150×300 | 3 |
| 钢筋 | 同批次钢筋截取（20cm-30cm） | 3 |

3.6 材性试块的养护制度

根据中华人民共和国行业标准《活性粉末混凝土》（GB/T 31387-2015）相关规定，活性粉末混凝土构件应进行蒸汽养护，升温速度不应大于12℃/h，升温至70℃后，保持恒温（70℃±5℃）72h。蒸养仪器采用上海扬诺锅炉制造有限公司生产的YN36-1.0-D承压蒸汽锅炉，额定工作温度为184℃。养护中通过调节蒸汽释放量和布置温度计的方式来调节蒸养温度以达到标注要求的温度值。

4 试验方法

4.1 试验设备

500kN MTS作动器1个、1500kN液压千斤顶1个、滚轴支座1个、DH3816数据自动采集系统1个、混凝土应变片、数据线、塑料模具。

4.2 试验装置

RU-NC组合柱抗震性能试验加载在福州大学结构实验室进行。试验装置主要有试验构件、加载装置、测量仪表组成。试验装置如图3所示。

水平力的加载装置为500kN MTS电液伺服作动器，500kN MTS作动器长2780mm，行程为±250mm，总行程500mm，作动器行程满足最大10%侧移率的要求，如图6所示。试验系统将收集构件受力过程中荷载-刚体位移曲线，并保存试验数据。作动器通过钢套箍与组合柱连接，钢套箍尺寸如图4-5所示。轴向力的加载装置为1个1500kN液压千斤顶，在水平力加载前，通过反力纵梁和反力框架对试验构件施加固定的轴向压力。

测量采用浙江黄岩测试仪器厂生产的电阻式应变计，规格为500×3mm，电阻为120.2±0.1Ω，灵敏系数为2.08±1%。应变采集系统：扬州晶明测试技术有限公司开发的DH3816工程型静态应变采集系统如图7所示。



（a）立面图



（b）左视图

图 3 试验装置示意图（单位：cm）

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）俯视图 | （b）1-1 |
| （c）三维图 | |

图 4 钢套箍（非连接MTS侧）尺寸图（单位：mm）

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）俯视图 | （b）2-2 |
| (c)三维图 | |

图 5 钢套箍（连接MTS侧）尺寸图（单位：mm）

|  |  |
| --- | --- |
| https://tmsy.fzu.edu.cn/__local/0/3C/2E/6BE3EF0298709477E5EBF48B635_2F641F50_8AEC.jpg?e=.jpg |  |
| 图 6 MTS电液伺服作动器 | 图 7 DH3816应变采集系统 |

4.3 测点布置

由于用于试验的RU-NC组合柱为切割前组合柱的下半部分，其内部钢筋骨架并未设置应变片，故无法获得试验过程中钢筋骨架的受力性能。在RU圆管柱中截面处贴有纵向应变片与横向应变片，以测量轴压受力下RU圆管的横向与纵向受力情况（共8片），在柱底塑性铰区域（h=1.5D的范围），在推拉力的两侧分别布置纵向应变片和横向应变片，每侧从柱底开始布设，连续布置9片纵向应变片，两侧共布设18片，应变片布设情况，如图8所示。为了测量试件试验时的纵向位移变化，在上承台底端布置了竖向的位移传感器，以测量构件纵向的刚体位移，在加载位置同一高度处设置水平向的位移传感器，用于测量构件的水平向位移。试验加载装置及位移测点布置如图8（a）所示。



（a）立面布置图



（b）柱中截面平面布置图

图 8 RU-NC组合柱试验构件测点布置图

4.4 加载制度

试验采用恒定轴力下的低周反复加载，试验构件的轴力根据试验设计参数，分别分为P=810kN（T-15，0.15Nu）、P=1080kN（T-20，0.2Nu）、P=1350kN（T-25，0.25Nu）。其中，Nu=5400kN，取自林世杰硕士论文中2.5m高RU-NC组合柱轴压极限承载力。

在整个低周反复加载试验过程中，试件的轴压保持恒定不变，利用位移控制的方式去实现侧向力的加载。在加载的第一个阶段，每个侧移率只进行一次循环，且侧移率按0.25%递增，待侧移率为1%时，每个侧移率都进行三次循环，具体的加载过程对应的侧移率和循环次数的关系如图所示，其侧移率递增依次为＝1%、1.5%、2%、3%、4%、6%、8%、10%。等到试件出现明显的破坏特征或者侧向力下降到最大侧向力的70%以下，可以终止试验。拟静力试验加载制度如图9所示。



图 9 拟静力试验加载制度