

超高性能混凝土连接装配式桥墩设计理念与实践

王瑞龙, 马 磊, 黄 虹

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 超高性能混凝土连接装配式桥墩钢筋无需绑扎或焊接、施工快速、钢筋定位要求低,且适用于束筋布置,成为一种较好的连接形式。该连接形式目前包括3种连接形式:扩头式、类承插式和环缝式。结合该连接形式中对超高性能混凝土的受力和施工要求,列出了超高性能混凝土的性能指标要求和相应的测试依据。该连接形式的设计理念为超高性能混凝土连接段的安全度大于预制段,即破坏发生在预制段。设计目标为在静力、E1地震作用和E2地震作用下,分别采用强度设计理论和延性设计理论进行验算,并保证超高性能混凝土应变应小于极限拉伸应变(2 000 $\mu\epsilon$)。标准设计案例表明,对于环缝式连接形式,墩身截面尺寸为2.2 m $\times$ 1.5 m,墩高10 m、超高性能混凝土壁厚350 mm时,满足预定设计目标,构造合理。

关键词: 超高性能混凝土;装配式桥墩;性能指标;设计理念;极限拉伸应变

中图分类号: U443.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)01-0068-03

0 引 言

在当前产业转型升级、提升新型工业化发展水平的大背景下,桥梁行业从传统的现浇逐渐向工业化装配式施工发展。与现浇桥梁结构相比,预制拼装桥梁结构具有施工便捷、质量稳定、对环境和交通影响小等优点,具有良好的节能与环保特点,目前已成为世界桥梁结构的主要发展趋势之一。该技术将桥梁结构分解成多个预制构件,在工厂进行标准化制作,并运送至现场进行拼装^[1]。

在装配式桥梁结构中,预制构件的连接接缝为受力和施工的重点区域,应具有足够的力学性能、良好的耐久性和稳定性,且便于施工^[2]。目前,桥梁上部结构预制构件主要为空心板、小箱梁等,采用湿接缝连接成整体;下部结构预制构件的连接形式主要为灌浆套筒连接、灌浆金属波纹管连接等。

灌浆套筒连接形式为在桥墩中预埋套筒,预制桥墩吊装就位,承台预埋钢筋与套筒对插,然后灌注高强砂浆连接成整体。该连接方式施工快速,钢筋定位精度要求高,不适用于束筋连接,对静力性能要求高,抗震性能低于现浇,套筒灌浆饱满度检测较为困难。

灌浆金属波纹管连接形式为在承台中预埋金属波纹管,预制桥墩吊装就位,桥墩预埋钢筋插入金属波纹管,然后灌注高强砂浆连接成整体。该连接

方式施工快速,钢筋定位要求低于套筒连接,对于束筋连接较为困难。

目前,超高性能混凝土由于具有高强度、高韧性、高耐久性、与钢筋握裹力强、自流平便于施工等优点,逐渐得到工程应用,其具有的优良性能有望在结构设计中取代普通混凝土和高强混凝土,成为新一代结构材料,在装配式桥墩的连接处有很大应用前景。

1 当前超高性能混凝土装配式桥墩连接形式和应用

装配式桥墩采用超高性能混凝土连接构造钢筋搭接连接,无需绑扎或焊接,现场工作量小,施工快速,钢筋定位要求低,且适用于束筋布置,是一种较好的连接形式。

在此基础上,上海市政总院开发出以下3种超高性能混凝土装配式桥墩连接形式,如图1所示。3种连接形式各有优劣,如表1所示。

随着超高性能混凝土连接装配式桥墩的出现,我国在一些工程中进行了超高性能连接装配式桥墩的应用试点。其中,扩头式连接构造已经在上海嘉闵高架、上海南浦大桥W3上匝道改建工程、新疆乌鲁木齐城北主干道工程、宁波机场快速路南延工程等得到应用,环缝式连接构造预计在宁波西洪大桥连接线工程、上海G1503工程等应用。

2 超高性能混凝土特性与技术性能指标要求

超高性能混凝土由预混料(包括水泥、细砂、硅

收稿日期:2020-06-14

作者简介:王瑞龙(1988—),男,博士,高级工程师,主要从事桥梁抗震和设计相关研究工作。

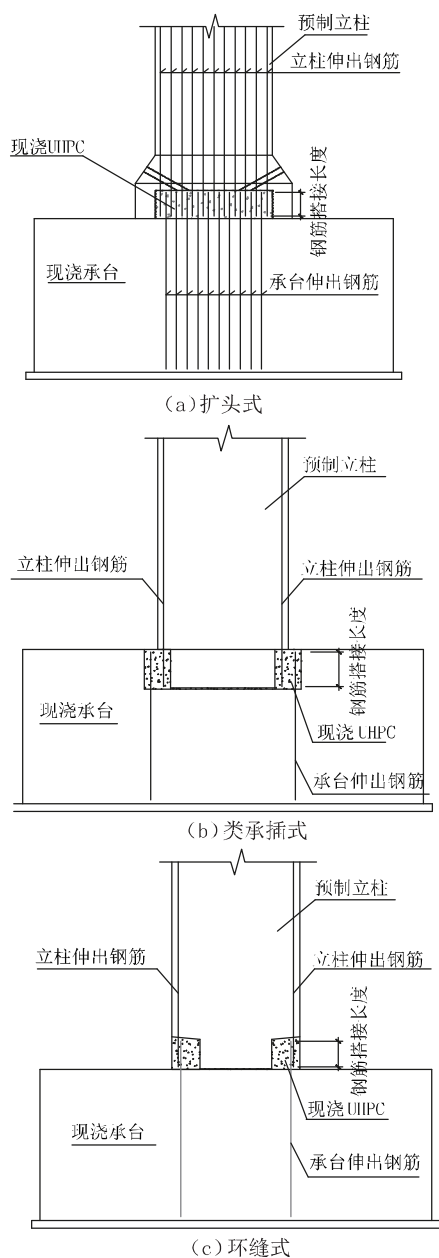


图 1 超高性能混凝土连接形式

表 1 超高性能混凝土连接形式比选

项目	扩头式	环缝式	类承插式
构造形式	扩头构造略复杂	构造简单	承台构造略复杂
设计精细化	较低	较高	较低
地震损伤	不可见	可见	不可见
连接施工	扩头可兼做模板	需支模	无需支模
浇筑检测	较难	可见	较难
UHPC 用量	较大	较小	适中
景观性	一般	较好	较好

灰、石英粉)、细钢纤维等基本材料组成,配制过程中采用最大密实度理论,减小材料内部空隙和微裂缝数量,控制材料内部缺陷,提高材料的均质性,并掺入小直径短纤维空间桥接弥合微裂缝,从而达到高

强度、高韧性、高耐久性的目的^[9],如图 2 所示。其中,细砂的粒径最大,为 150~600 μm;水泥与石英粉粒径次之,分别为 15 μm 与 10 μm;硅灰的粒径最小,可填补水泥与石英粉之间的空隙;钢纤维直径 0.2 mm,长度 12.7 mm,抗拉强度大于 2 000 MPa,体积掺量在 2.0%左右。

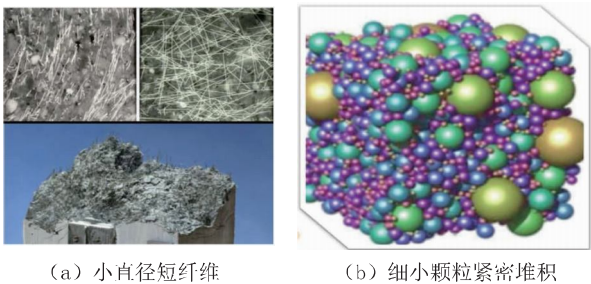


图 2 UHPC 材料示意图

根据目前工程项目中超高性能混凝土的应用情况,超高性能混凝土在立柱连接时技术性能指标要求见表 2。其中,超高性能混凝土采用标准养护,即环境温度 20±2℃,相对湿度大于 95%。

表 2 超高性能混凝土技术性能指标要求

材料性能	技术指标	测试依据
3 d 抗压强度 /MPa	≥90	GB/T 50081,试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm
28 d 抗压强度 /MPa	≥130	
弹性模量 /GPa	45~55	GB/T 50081,试件尺寸为 100 mm×100 mm×300 mm
弹性抗拉强度 /MPa	≥8	瑞士 SIA 2052 规范,中间段截面为 50 mm×100 mm
极限抗拉强度 /MPa	≥9	
极限抗拉强度 /弹性抗拉强度	≥1.1	
极限拉伸应变 /με	≥2 000	
28 d 收缩率 /10 ⁻⁶	<500	GB/T 50082 中接触法测量
初始扩展度 /mm	≥700	
1 h 扩展度 /mm	≥650	

3 超高性能混凝土连接装配式桥墩构造研究

3.1 设计理念

超高性能混凝土连接的设计理念为:超高性能混凝土连接段的安全度大于预制段,即破坏发生在预制段。因此,这就涉及如何进行合理的连接构造设计,确保经济性与受力性能的统一。

3.2 设计目标

(1)静力和 E1 地震作用

采用强度设计理论,即材料采用设计值,考虑墩高影响系数,确保超高性能混凝土连接段安全

系数大于预制段, UHPC 应变应小于极限拉伸应变 ($2\,000\ \mu\varepsilon$)。

(2) E2 地震作用

采用延性设计理论, 即材料采用标准值, 考虑墩高影响系数和抗弯超强系数 1.2, 确保超高性能混凝土连接段安全系数大于预制段, UHPC 应变应小于极限拉伸应变 ($2\,000\ \mu\varepsilon$)。

3.3 设计案例

本节针对一典型市政匝道桥进行分析, 桥宽 9.0 m, 跨径 30 m, 如图 3 所示。下部结构为单柱墩, 桥墩尺寸为 2.2 m (横桥向) $\times$ 1.5 m (顺桥向), 桥墩高度为 10 m, 盖梁尺寸为 1.9 m (顺桥向) $\times$ 7.5 m (横桥向) $\times$ 1.5 m (竖向)。立柱配筋为 HRB400 钢筋, 共计 66 根, 配筋率为 1.60%。主梁和盖梁采用 C50 混凝土, 桥墩采用 C40 混凝土。

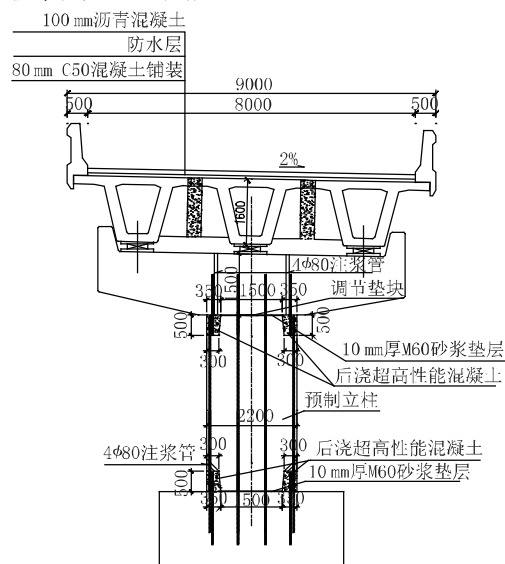
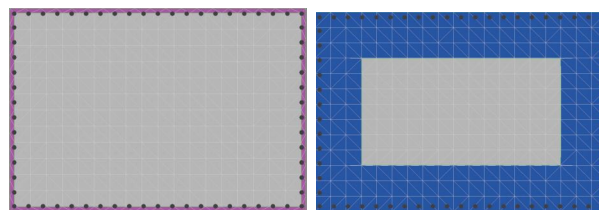


图3 典型匝道桥横断面(单位:mm)

其中, 环缝式连接对设计的精细化要求最高, 因此以下对环缝式连接形式的构造设计进行分析。

采用 XTRACT 软件进行模拟分析。将截面离散为纤维单元, 与截面信息 (截面尺寸、保护层厚度和钢筋配置情况) 相对应, 每块纤维单元被赋予钢筋、混凝土材料的本构关系。用纤维截面进行构件受力和变形的全过程分析时, 通常采用以下假定: (1) 平截面假定; (2) 不考虑混凝土和钢筋之间的相对滑移; (3) 忽略剪应力对构件截面的弯矩-曲率关系的影响。纤维模型如图 4 所示。

表 3 列出了超高性能混凝土连接装配式桥墩计算结果。其中, 超高性能混凝土连接段壁厚 350 mm。从表中可看出, 在静力和 E1 地震工况下, 预制段弯矩为 16 920 kN·m, 考虑墩高影响系数 1.05, 连接段弯矩为 17 811 kN·m, 对应超高性能混凝土的拉伸



(a) 预制段C40混凝土

(b) 连接段超高性能混凝土

图4 XTRACT 纤维模型

应变为 $1\,009\ \mu\varepsilon$; 在 E2 地震工况下, 预制段弯矩为 26 150 kN·m, 考虑墩高影响系数 1.05 和超强系数 1.2, 连接段弯矩为 33 032 kN·m, 对应超高性能混凝土的拉伸应变为 $1\,815\ \mu\varepsilon$, 满足前述预设设计要求, 破坏发生在预制段, 构造合理。

表3 UHPC 连接装配式桥墩计算结果

位置	工况	弯矩 (kN·m)	超高性能 混凝土拉伸应变/ $\mu\varepsilon$
预制段弯矩	静力和 E1 地震	16 920	—
连接段弯矩		17 811	1 009
预制段弯矩	E2 地震	26 150	—
连接段弯矩		33 032	1 815

4 结 论

随着超高性能混凝土的出现, 装配式桥墩采用超高性能混凝土连接。由于钢筋无需绑扎或焊接、施工快速、钢筋定位要求低, 且适用于束筋布置, 成为一种较好的连接形式。本文对该连接形式进行了研究, 主要结论如下:

(1) 该连接形式构造包括扩头式、类承插式、环缝式。3 种连接形式各有优劣, 其中扩头式和环缝式目前在实际工程中均有所应用。

(2) 基于超高性能混凝土在连接形式中的受力和施工要求, 列出了其性能指标要求和相应的测试依据。

(3) 该连接形式的设计理念为超高性能混凝土连接段的安全度大于预制段, 即破坏发生在预制段。基于该设计理念, 设计目标相应为: 在静力和 E1 地震作用下, 采用强度设计理论, 即材料采用设计值, 考虑墩高影响系数, 确保超高性能混凝土连接段安全系数大于预制段, 超高性能混凝土应变应小于极限拉伸应变 ($2\,000\ \mu\varepsilon$); 在 E2 地震作用下, 采用延性设计理论。即材料采用标准值, 考虑墩高影响系数和抗弯超强系数 1.2, 确保超高性能混凝土连接段安全系数大于预制段, 超高性能混凝土应变应小于极限拉伸应变 ($2\,000\ \mu\varepsilon$)。

(下转第 87 页)

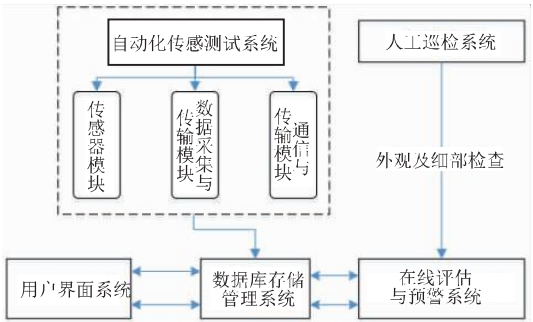


图 13 澄浪桥健康监测系统的构成要素图

4 结 论

本文通过调研国内外桥梁健康监测案例，了解最新监测技术发展现状，建立了无风撑系杆拱桥有限元模型，计算其恒载及各种组合下的静力响应，得到拱肋系、主梁、横梁及吊杆在各工况下的内力和应力，总结得到应力应变测点布置位置；计算结构动力特性，获得其主要振动频率和振型，为动力监测测点布置提供依据；通过结构稳定分析，获得其失稳系数。

在有限元分析结果基础上，将无风撑系杆拱桥健康监测系统监测内容分为环境监测和结构响应监测两大部分，该监测方案同时考虑后续 BIM 与 Benchmark 模型的接入。该方案的实施可获得桥梁正常运营技术状况，为后续同类桥梁监测系统提供

提供参考价值。

参考文献:

[1] 钱天华 / 世界文化遗产大运河之石拱桥保护实践探索[D]. 浙江杭州:浙江工业大学, 2019.

[2] 雍家林. 铁路钢管混凝土系杆拱桥施工过程监控及受力性能分析[D]. 河北石家庄:石家庄铁道大学, 2019.

[3] Bonhyun Koo, Shon Taeshik. A Structural Health Monitoring Framework Using 3D Visualization and Augmented Reality in Wireless Sensor Networks[J]. JOURNAL OF INTERNET TECHNOLOGY, 2010, 11(6S):801-807.

[4] 吴小平. 复杂桥梁结构综合监测系统开发研究[D]. 浙江杭州:浙江大学, 2005.

[5] 余波, 邱洪兴, 王浩, 等. 苏通大桥结构健康监测系统设计[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4):170-177.

[6] 赵翔, 李爱群, 缪长青, 等. 润扬大桥结构健康监测传感器测点布置[J]. 工业建筑, 2005(1):82-85.

[7] 缪长青, 李爱群, 吉林, 等. 大跨缆索支承型桥梁健康监测与评估系统的设计研究[J]. 特种结构, 2009, 26(2):40-47.

[8] Aygün, Bengi, Cagri Gungor V. Wireless sensor networks for structure health monitoring: recent advances and future research directions[J]. Sensor Review, 2011, 31(3):261-276.

[9] Magalhães F, Cunha A, Caetano E. Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: From automated OMA to damage detection[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2012, 28: 212-228.

[10] Magalhães F, Cunha A, Caetano E. Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: From automated OMA to damage detection[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2012, 28: 212-228.

(上接第 70 页)

(4) 一典型市政匝道桥墩分析案例表明, 桥墩采用环缝式连接设计, 截面尺寸为 2.2 m (横桥向) × 1.5 m (顺桥向), 墩高 10 m, 在超高性能混凝土壁厚 350 mm 时, 连接段安全系数大于预制段, 在静力、E1 地震作用和 E2 地震作用下, 超高性能混凝土拉伸应变分别为 1 009 $\mu\epsilon$ 和 1 815 $\mu\epsilon$, 满足预定的设计目标, 构造合理。

参考文献:

[1] 王景全, 王震, 高玉峰, 等. 预制桥墩体系抗震性能研究进展: 新

材料、新理念、新应用[J]. 工程力学, 2019, 36(3):1-23.

[2] 黄国斌, 查义强. 上海公路桥梁桥墩预制拼装建造技术[J]. 上海公路, 2014(4):1-6.

[3] 马磊, 王浩, 冀振龙, 等. 一种预制钢筋混凝土立柱连接构造: 中国, 201721060948.1[P]. 2018-04-13.

[4] 马磊, 王瑞龙, 黄虹, 等. 一种立柱与相邻构件的类承插连接结构: 中国, 201821070140.6[P]. 2019-03-15.

[5] 马磊, 王瑞龙, 赵晓梅, 等. 预制立柱和相邻构件的环缝连接结构: 中国, 201821069556.6[P]. 2019-03-22.

[6] GRAYBEAL, B. Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete [J]. Federal Highway Administration, August 2006, pp186.