# 高桩码头承插式 T 形桩帽安装灌浆工艺*

林红星[1,2]，何　聪[1,2]，冯先导[1,2]，施少治[1]，林明臻[3]
（1. 中交第二航务工程局有限公司，长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室，
交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心，湖北 武汉 430040；
2. 中交公路长大桥建设国家工程研究中心有限公司，北京 100120；
3. 福建省交通建设质量安全中心，福建 福州 350001）

**摘要**：在传统高桩码头结构中，桩芯、桩帽常采用现浇工艺。受潮位变动区影响，现浇过程中钢筋、混凝土受海水浸泡侵蚀，难以控制结构质量。并且海上作业需要赶潮施工，人员风险性高。依托福建宁德 18~20 号泊位工程，介绍一种高桩码头承插式 T 形桩帽施工工艺。通过将 T 形桩帽承插式安装至钢管桩内，并利用 UHPC 材料灌浆与钢管桩形成整体。T 形桩帽为一种新型结构，通过研究其安装、灌浆工艺，解决了高桩码头直桩装配化技术问题。应用结果表明，该工艺可以提高码头的装配化率和施工质量，应用效果良好。

**关键词**：T 形桩帽；承插式安装；灌浆连接；装配化

**中图分类号**：U656. 1+13　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1002-4972(2024)10-0225-06

## Installation of socketed T-pile cap and grouting process for high pile wharf

LIN Hongxing[1,2], HE Cong[1,2], FENG Xiandao[1,2], SHI Shaozhi[1], LIN Mingzhen[3]
(1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology of Ministry of Communications, Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan 430040, China;
2. CCCC Highway Bridge National Engineering Research Center Co., Ltd., Beijing 100120, China;
3. Fujian Transportation Construction Quality and Safety Centre, Fuzhou 350001, China)

**Abstract:** In traditional high pile wharf structures, the pile core and pile cap often adopt cast-in-place process. Due to the influence of tidal fluctuation zone, the reinforcement and concrete in the cast-in-place process are subject to seawater soaking and erosion, which makes it difficult to control the quality of the structure. Moreover, the marine operation needs to catch up with the tide construction, and the risk of personnel is high. Relying on the berth 18-20 project in Ningde, Fujian, this paper introduces a T-pile cap construction process using high pile wharf socket. By installing the T-shaped pile cap socket into the steel pipe pile and using UHPC material grouting to form a whole with the steel pipe pile. The T-pile cap is a new type of structure, and the installation and grouting process solves the technical problem of assembling straight piles for high pile wharf. The application results show that the process can improve the assembly rate and construction quality of the wharf, and the application effect is good.

**Keywords:** T-pile cap; socket installation; grouting connection; assembly

**收稿日期**：2024-01-09

***基金项目**：山东省重点研发计划项目(2021ZLGX04)；国家重点研发计划项目(2022YFB2603000)；福建省交通运输科技项目(202254)

**作者简介**：林红星（1988—），男，硕士，高级工程师，从事水运工程领域科技研发与施工技术管理工作。

水运工程

高桩码头因结构透空性好，受水文地质影响小，在港口码头建设中应用广泛[1]。但主要的施工方法仍是现浇混凝土方式，存在海上作业量大、劳动力需求大、安全风险高等问题[2]。我国沿海潮汐以不规则半日潮为主，码头现浇结构的桩芯、桩帽处于潮位变动区，混凝土、钢筋、模板等易受到海水浸泡和侵蚀，给现浇结构质量控制和作业工效带来挑战。

随着港口向深海、远海发展，装配式结构已成为主要发展方向[3]。在已建成的高桩码头中，预制横梁、预制纵梁、预制面板、靠船构件等装配构件较为普遍，预制、安装工艺较为成熟。码头的新型装配化构件也在逐渐应用，江苏连云港徐圩港区六港池 64#～65#液体散货泊位工程实现了横梁的整体预制装配化安装，桩芯现浇完成后与横梁灌浆连接为一体[4]。国外哥伦比亚阿瓜杜尔塞集装箱码头项目采用全直桩钢管桩桩基，内部插入桩芯实现了桩芯的预制安装[5]。但国内外码头在设计标准上存在差异，国内无法适用。在此基础上，林学良等[6]提出一体式预制桩帽的设计方法，并建议采用超高性能混凝土灌浆连接钢管桩。本文介绍一种承插式 T 形桩帽在工程应用中的安装、灌浆工艺，旨在解决高桩码头直桩的装配化技术问题，为类似项目提供参考方案。

## 1　工程概况

福建宁德 18～20 号泊位工程主要施工内容为新建 3 个 5 万吨级通用泊位，结构为高桩梁板式码头。当地施工水位最大潮差达 7.42 m，桩芯、桩帽结构处于潮位变动区，现浇施工窗口期受限。为提高工程质量，减少海上现浇作业量，将码头 20 号泊位第 9 结构段设计为承插式 T 形桩帽示范段。

如图 1 所示，结构段每排架桩基由 7 根直径 1.2 m、壁厚 18 mm 的钢管桩组成，共 9 个排架。海侧与岸侧的钢管桩为斜桩，桩芯、桩帽为现浇结构。中间侧为 2 根直桩，采用承插式 T 形桩帽灌浆连接。桩帽顶部安装预制横纵梁，通过现浇节点和面层连成整体。

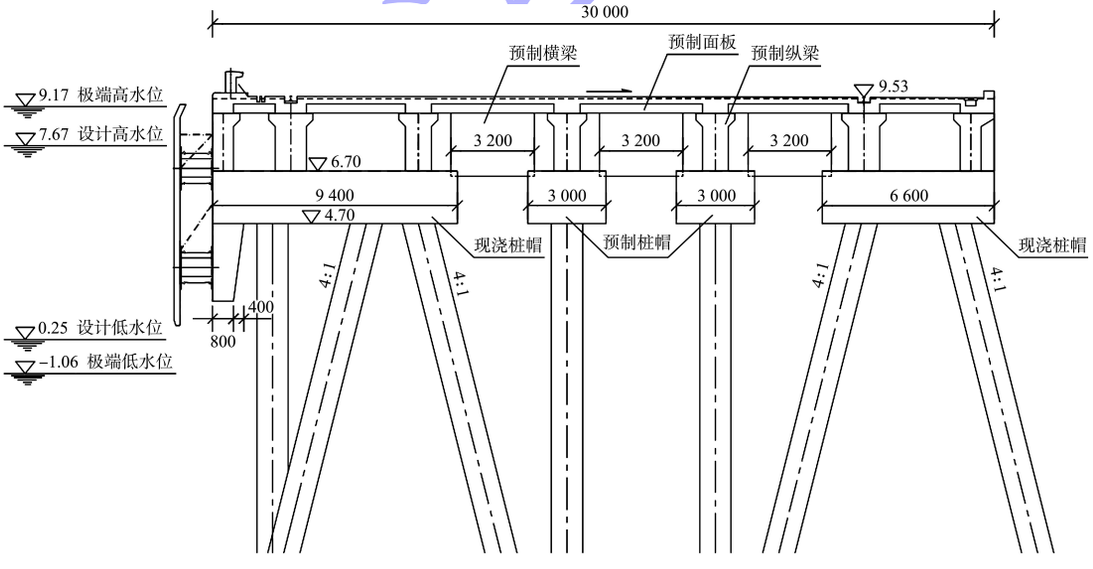



图 1　预制桩帽示范段断面（高程：m；尺寸：mm）

## 2　承插式 T 形桩帽

### 2.1　结构特点

承插式 T 形桩帽结构由桩芯、桩帽两部分组成，桩帽尺寸为 3 m×3 m×1.8 m（长×宽×高），桩帽底部的桩芯直径 1.0 m、长 5.5 m，桩芯钢筋笼伸入桩帽中。该结构具有 2 个特点：1）安装上部结构简便，见图 2，桩帽截面为“凹”形，用于安装预制横梁、纵梁。外伸钢筋布置在桩帽 4 个边角，伸出顶面 2.9 m，避免安装预制横纵梁时外伸钢筋互相干扰。2）环式灌浆见图 3，桩帽顶面

设计 4 个直径 0.13 m 的贯通灌浆孔，其中至少 1 个孔道用于灌浆，另外孔道用于排气。灌浆区域为桩芯与钢管之间环状空腔，环径 82 mm。钢管顶部设计有长度 1 m、壁厚 18 mm 的加强环，此处环径 64 mm。当钢管桩内腔灌满后，浆液从灌浆孔溢向挡坎并包裹钢管桩。

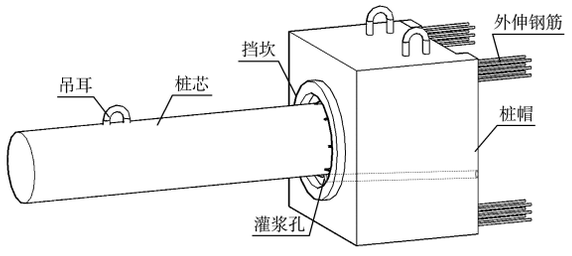



图 2　承插式 T 形桩帽

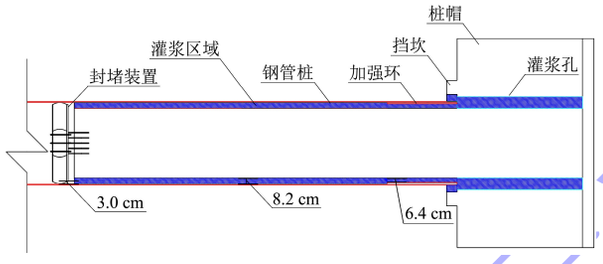



图 3　环式灌浆

## 2.2　场内预制

承插式 T 形桩帽的预制无可借鉴经验，在施工中存在 3 个难点：1）结构整体长度达 10.4 m，如果采用竖向预制方式，需要桩芯插入地下，拆模、养护困难，对场地要求高；2）钢筋笼绑扎复杂，预埋件多；3）挡坎体积小，成形困难。

为解决预制过程中的拆模、钢筋绑扎等问题。T 形桩帽采用卧式预制方式，从桩芯桩帽上部进行混凝土的浇筑和振捣，保证了挡坎成形质量。并选择组拼式钢模作为预制模板，桩芯、桩帽钢筋笼部品化整体吊装至台座后再安装模板，拆模时依次拆除。

## 2.3　灌浆材料

钢管桩与桩芯连接为关键节点，灌浆节点破坏将导致码头基础破坏。在现有工程应用中，海上风电导管架采用了 UHPG-120、SKG-3 等高性能灌浆料填充连接[7]，连云港港徐圩港区的桩芯与下横梁采用细石混凝土连接[8]，市场上暂无两种界面连接的材料。

在此基础上，承插式 T 形桩帽应用新型 UHPC 灌浆材料，该材料具有良好的抗水分散性和流动性能，可在水下进行灌浆，主要性能指标和现场检验结果见表 1。硬化后的浆体与钢管内壁面平均粘结强度可达到 1MPa，粘结性能适用于钢-混凝土连接。

表 1　UHPC 灌浆材料性能

| 项目 | 最大骨料粒径/mm | 截锥流动度/mm | | 竖向膨胀率/% | | 抗压强度/MPa(标养) | | | 氯离子含量/% | 泌水率/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 初始值 | 30 min | 3 h | 24 h 和 3 h 膨胀值之差 | 1 d | 3 d | 28 d | | |
| 控制标准 | ≤4.75 | ≥290 | ≥280 | 0.10~3.50 | 0.02~0.50 | ≥25 | ≥50 | ≥85 | <0.1 | 0 |
| 检验结果 | 1.18 | 310 | 310 | 0.45 | 0.10 | 43.5 | 72.3 | 94.0 | 0 | 0 |

## 3　安装工艺

承插式 T 形桩帽质量达 52 t，若采用浮式起重船安装 T 形桩帽，船舶在海浪影响下精度控制效率低，并且单台起重设备难以调整预制桩帽位姿。T 形桩帽由运输车卧式平运至现场后，通过码头梁板架设机[9]进行安装，该设备安装构件受风浪影响小，具备三维位姿调整功能。安装过程包括 5 个步骤：

1）起吊 T 形桩帽。架设机的起吊系统包含 2 个天车，其中靠海侧天车的吊钩连接桩帽顶部的 4 个吊耳，靠岸侧天车的吊钩连接桩帽侧面和桩芯的吊耳。运输时由于桩帽朝向码头长度方向，所以在起吊后需在水平面旋转 90°，使桩帽顶部垂直于码头，见图 4。

图 4　钢栈桥上起吊

水运工程

2）T 形桩帽平移至码头中间侧。通过 2 台天车配合，同时向码头海侧平移，将承插式 T 形桩帽移动至钢管桩侧边，见图 5。

图 5　码头上方作业

3）竖直翻转预制桩帽。操控架设机的 2 台天车吊具，伸长桩芯处吊具的钢丝绳长度，并适当收缩桩帽顶侧的吊具钢丝绳，最终实现桩帽的翻转竖直。

4）桩芯与钢管桩对位。受钢管桩顶部加强环影响及封堵装置（直径 1 104 mm）的限制，下放 T 形桩帽时桩芯底部钢板的侧边与钢管顶部壁面单边间距仅 12 mm，精度控制要求高。通过架设机吊具的横向、纵向油缸调整 T 形桩帽的垂直度，并缓慢调节架设机天车平移距离，将桩芯底部对准钢管桩的桩口，见图 6。

图 6　桩芯与钢管桩对位

5）桩芯插入桩内。通过伸长吊具的钢丝绳下放桩芯最终到达设计位置，割除桩帽顶部及侧边的 6 个吊耳。

T 形桩帽从起吊到安装完成，整个过程约 20 min。在安装过程中，通过限位控制桩帽的平面位置，在圆环形挡坎内焊接三角板进行顶部限位，满足设计平面安装偏差最大值 20 mm 要求。安装完成后桩帽的平面偏差结果显示均控制在 20 mm 以内，桩帽的平面扭角由梁板架设机的旋转吊具进行调整，并通过测量复核。

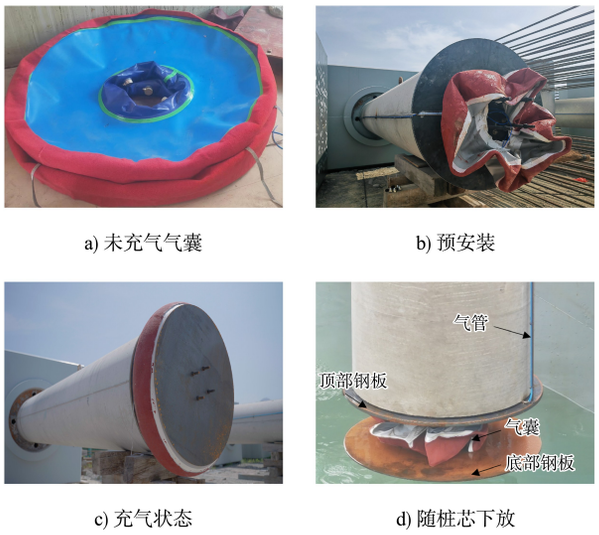
## 4　灌浆工艺

### 4.1　工艺设计

承插式 T 形桩帽的灌浆工艺设计包括：1）灌浆封底：T 形桩帽在插入钢管桩后，对桩芯底部进行封堵。2）灌浆方式：因桩内存在海水，所以采用埋入导管式灌浆，将导管伸入桩芯最底部，并随灌浆量增加不断上提，保持导管在灌浆料液面以下。3）质量检测：灌浆后对脱空率进行检测。

### 4.2　封底设计

承插式 T 形桩帽在安装完成后需对桩芯底部进行封堵才能灌浆，在海上风电工程中常采用三元乙丙遇水膨胀橡胶进行封堵[10]，但存在泡水等待时间长、无法适应偏位的问题。借鉴市政中管道封堵的思路[11]，设计一种快速充气式气囊封堵装置。如图 7 所示，新型封底装置由气囊和 2 块钢板组成，顶部钢板与桩芯采用膨胀螺栓固定，底部钢板与顶部钢板采用螺栓连接。气囊为中空环形，设计于钢板之间，充气时可自适应调整位置，保证处于钢管桩轴线中心。




a) 未充气气囊　b) 预安装　c) 充气状态　d) 随桩芯下放

图 7　气囊结构及安装应用

水运工程

气囊内环设有进气阀门和气压监测阀门，阀门口连接直径 4 mm 的软管到桩帽顶部。灌浆前从桩帽顶部采用空压机对气囊充气至 75 kPa，该压力值通过承载试验测试得出，可根据灌浆料质量进行调整。充气结束后对充气管进行封堵，并监测气囊压力。

### 4.3　灌浆工序

在高潮位时人员无法在水上作业，需在退潮后立即进行灌浆作业，因此对施工效率要求较高。单根钢管桩灌浆设计量达 1.7 $m^3$，为保持灌浆料的流动特性，每根桩的灌浆时长不超过 2 h。将灌浆泵压力控制在 0.8～1.2 MPa，并采用 2 $m^3$ 体积的的搅拌机，按照 1 $m^3$ 搅拌量分 2 次进行搅拌输送给灌浆泵，每次搅拌时长约 15 min。同时为防止设备故障导致灌浆作业中途暂停，备用灌浆泵 1 台。

如图 8 所示，通过桩帽顶部的灌浆孔将灌浆料泵送至桩底。灌浆时保证导管口浆液饱满再插入桩内底部，通过导管上的长度标记与灌浆量推算提升的高度，保证管口处于浆料液面以下。灌浆作业需连续进行，不得中间间断或停顿。灌浆过程中持续关注气囊气压变化，随着灌浆量的增加，气囊压力呈线性增加。在 4 个灌浆孔均有浓浆溢出时停止灌浆，计算实际灌浆量是否达到目标量。溢出浓浆后，气囊压力稳定在 128 kPa。观察半小时内气囊的压力有无变化以及灌浆孔液面是否下沉，以判断灌浆过程泄露情况。对顶部的灌浆孔进行薄膜覆盖保护，避免涨潮时浆料被海水冲走。

a) 顶部灌浆孔　　b) 灌浆泵送

c) 孔顶溢浆　　d) 浆体硬化

图 8　灌浆工序

灌浆结束后随着浆料的硬化，对气囊的竖向压力逐渐减小。如图 9 所示，通过连续 7 d 的气压监测，显示气压在前 3 d 的变化量最大，然后缓慢减至 80 kPa，与浆料的强度上升规律相匹配。

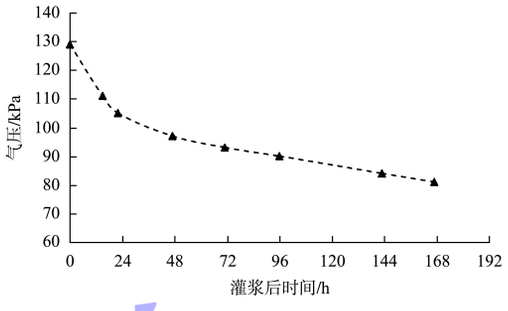
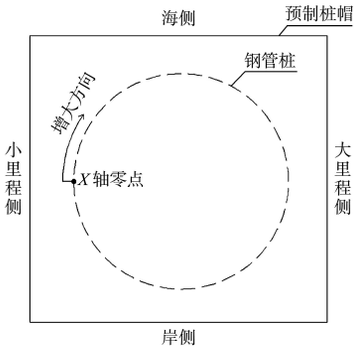


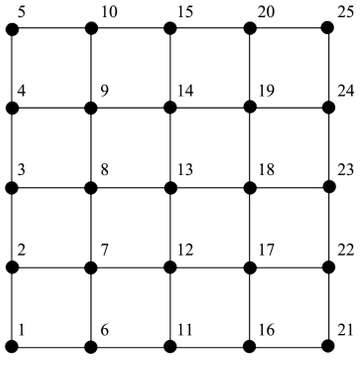

图 9　灌浆后气囊压力变化

### 4.4　灌浆检测

在灌浆完成后，对桩芯与钢管桩连接的灌浆质量进行检测，判断灌浆料与钢管桩壁面脱空情况。将钢管桩分为若干区域，以桩帽底部挡坎为竖轴基准点，向下为负。采用冲击回波法检测脱空，在钢管桩表面以网格状布置测线（$x$ 行×$y$ 列），测区布置如图 10 所示，其中水平向测点间距为 0.1 m，竖向测点间距为 0.2 m。




a) 测试方向




b) 点位布置

图 10　测试区间区域

水运工程

钢管桩纵向-1.1～-0.1 m 整个环面的脱空云图见图 11，其中超过测点数值 5.5 km/s 区域显示为脱空。通过对整根桩灌浆面积的检测，结果显示灌浆脱空率为 0.15%。GB/T 50448—2015《水运工程质量检验标准》[12] 未对钢管桩灌浆连接检测进行规定，参照 JTG F80/1—2017《公路工程质量检验评定标准》[13] 对灌浆脱空率规定不超过 1.2%，灌浆质量符合要求。

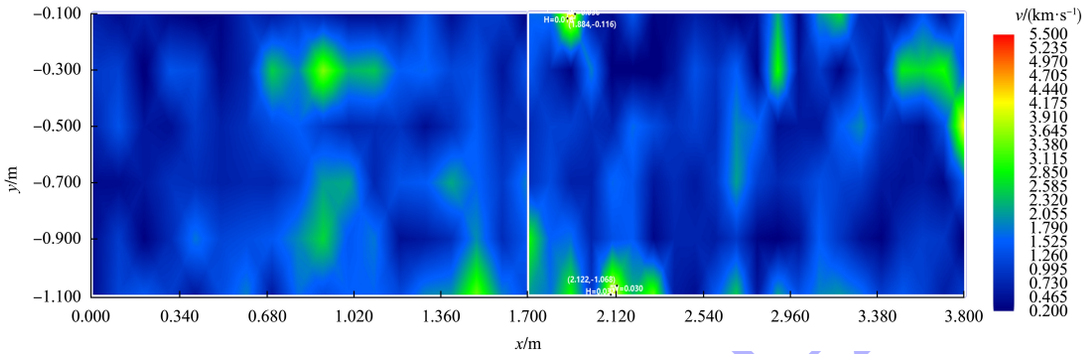



图 11　脱空云图

## 5　结语

1）承插式 T 形桩帽结构通过一体化预制、承插式安装、灌浆连接，突破目前国内码头桩芯依然采用现浇施工的瓶颈。

2）提出钢-混凝土灌浆连接工艺，配套充气式气囊，实现快速灌浆，有效保证灌浆质量，减少现浇作业工期，提高码头上构安装工效。

3）应用钢结构与预制混凝土粘接的 UHPC 灌浆料，为高桩码头水下钢-混凝土节点连接提供了参考方案。

## 参考文献：

[1] 江义, 程泽坤, 吴志良, 等. 装配式桩基码头设计建造应用现状与展望[J]. 水运工程. 2018(6): 103-109.

[2] 蒋勤俭. 国内外装配式混凝土建筑发展综述[J]. 建筑技术, 2010, 41(12): 1074-1077.

[3] 何晓杰. 装配化技术在水运工程应用现状综述[J]. 施工技术, 2017, 46(S1): 1127-1129.

[4] 郭兆珈, 盛佳珺, 杭建忠, 等. 某全装配式高桩码头平面布置及工程应用[J]. 水运工程, 2023(5): 65-70.

[5] SIRCAR J, OSPINA C E, Kumar V K, Seismic design and construction of pile-supported concrete wharves for container and bulk-handling terminals [C]//PIANC-World Congress. Panama City: 2018.

[6] 林学良, 王磊, 曹凯平, 等. 承插式 T 型桩帽构件在装配式高桩码头中的应用[J]. 水运工程, 2023(5): 17-21.

[7] 王海斌, 王霄, 孙烜, 等. 海上升压站基础导管架及上部组件灌浆连接施工技术[J]. 水电与新能源, 2021, 35(4): 55-59.

[8] 周厚亚, 刘鹏, 吴辉. 新型全装配式高桩码头施工技术[J]. 水运工程, 2023(5): 137-142.

[9] 施少治, 何聪, 林红星, 等. 高桩码头梁板架设机研发及应用[J]. 中国港湾建设, 2023, 43(7): 100-104.

[10] 胡兴昊, 娄学谦, 苏世定. 海上不利工况下的导管架灌浆连接段黏结力试验研究[J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(6): 81-86.

[11] 韩传军, 费一栗, 张芹芹, 等. 管道封堵气囊结构设计与密封性能研究[J]. 润滑与密封, 2023, 48(2): 123-128.

[12] 中冶建筑研究总院有限公司, 鲲鹏建设集团有限公司. 水泥基灌浆材料应用技术规范: GB/T 50448—2015 S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

[13] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程: JTG F80/1—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.

（本文编辑　赵娟）