

· 地基与基础 ·



中美欧规范码头工程 预应力混凝土管桩制作对比*

吴佳琪, 娄学谦, 吕述晖

(中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 随着我国“一带一路”倡议的提出, 工程建设面临着不同国家不同标准的困惑。制作工艺决定着桩基构件的力学性能, 了解不同国家的制作工艺标准是进行合理设计的重要基础。以中国码头施工规范、美国混凝土圆桩规范和欧洲标准相关规范为例, 对比预应力混凝土管桩的部分制作工艺差异, 结果发现: 1) 对于先张法, 中国规范采用离心成型工艺, 美国规范采用离心或静压注浆工艺; 对于后张法, 中国规范采用复合工艺或离心工艺, 美国规范采用离心成型工艺; 欧盟标准未具体规定。2) 中国规范对钢筋加工、张拉、注浆和预应力制作工艺的规定较为细致; 美欧规范具有通用性, 一般需要大量引用其他规范或手册。比较结果对于我国建筑企业参与国外码头建设有参考借鉴意义。

关键词: 中美欧规范; 预应力混凝土管桩; 制作; 对比

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0246-06

Comparison among Chinese, American, and European codes for manufacturing prestressed concrete pipe piles of wharf projects

WU Jia-qi, LOU Xue-qian, LYU Shu-hui

(CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Due to the proposal of the Belt and Road Initiative, project construction is now faced with the confusion caused by the different standards of different countries. As the manufacturing process determines the mechanical properties of the pile foundation components, understanding the manufacturing processes of different national standards is an important basis for reasonable design. This paper discusses the Chinese code for wharf construction, the American code for concrete cylinder piles, and relevant codes in the European standard to reflect some differences in the manufacturing processes of prestressed concrete pipe piles. The main results are as follows: 1) As for the pre-tensioning method, the Chinese code prefers the centrifugal casting process, while the American code uses a centrifugal or static pressure grouting process. In terms of the post-tensioning method, the Chinese code specifies a composite or centrifugal process, whereas the American code opts for a centrifugal casting process and the European code does not provide specific provisions. 2) The Chinese code offers more detailed regulations on the processes of steel bar processing, tensioning, grouting, and prestressed manufacturing. In contrast, the American and European codes are universal and generally require that a large number of other codes or manuals be looked up. The comparison results can provide a reference for Chinese construction enterprises to participate in foreign wharf projects.

Keywords: Chinese, American, and European codes; prestressed concrete pipe pile; manufacturing; comparison

收稿日期: 2021-12-08

*基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)河口海岸与岛礁工程创新团队建设项目(311020009)

作者简介: 吴佳琪(1994—), 女, 助理工程师, 从事桩基工程的数值分析、试验检测。

我国现行的标准规范中, 涉及到桩基设计与施工的规范主要包括 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》、JTS/T 167-17—2020《港口工程后张法预应力混凝土长管节管桩设计与施工规程》等。本文主要针对码头工程的预制桩制桩工艺开展研究, 因此主要采用 JTS 215—2018《码头结构施工规范》^[1]。美国国防部标准、实践统一设施标准、设施标准和统一设施指导性规范 MIL-STD-3007G 规定, 施工标准通常指的是 UFGS(统一设施指导性规范)文档。欧盟标准是一个分散的系统, 预制桩生产涉及的规范极为广泛。EN 12794:2005^[2]是预制混凝土产品系列标准之一, 详细说明了在工厂环境中制造、储存、运输及最终安装的预制混凝土基础桩的要求、基本性能标准和详细

规定。

已有学者对中美标准规范在公路桥梁桩基施工中开展过对比研究^[3-4], 但关于中美欧规范在码头工程预应力混凝土管桩制作方面的比较报道较少, 开展相关比较是跨国码头工程项目设计施工的关键。

1 先张法预应力混凝土管桩制作

1.1 混凝土

先张法预应力管桩混凝土应满足的主要规定见表 1, 其中, 美国标准出自 UFGS 31 62 13. 24^[5], 而欧洲标准相关规范 EN 12794:2005、EN 13369:2004^[6]、EN 447 对这部分内容的规定均由 EN 206-1:2000^[7]指导完成。

表 1 中美欧混凝土与灌浆性能要求

规范	强度等级	胶凝材料用量/(kg·m ⁻³)	水胶比	稠度/mm	密度/(kg·m ⁻³)
中国规范 《码头结构施工规范》 (JTS 215—2018)	>C80	480 ~ 520	≤0. 35	塌落度 80~120	>2 500
美国规范 混凝土圆柱 (UFGS 31 62 13. 24)	28 d 最小抗压强度为 48 MPa 或约定值	>354	≤0. 40	离心浇注桩使用无 坍落度混凝土	—
欧盟规范 EN 12794:2005、EN 13369:2004、 EN 206-1:2000、EN 447	>C35/45	>300	≤0. 45	—	2 000~2 600

1.2 钢筋加工

1.2.1 中国规范

JTS 215—2018《码头结构施工规范》规定: 预应力筋采用预应力混凝土用钢棒时, 其质量应符合现行国家标准 GB/T 5223《预应力混凝土用钢棒》中低松弛螺旋槽钢棒的规定, 且抗拉强度不应小于 1 420 MPa, 非比例延伸强度不应小于 1 280 MPa, 断后伸长率应大于延性 35 级的规定。

预应力筋采用高强度低松弛钢绞线时, 其质量应符合现行国家标准 GB/T 5224《预应力混凝土用钢绞线》的有关规定。

1.2.2 美国规范

UFGS-31 62 13. 24 在对模具的规定中指出,

采用符合 ASTM A416/A416M 270 规定的 7 线缓释应力或低松弛钢绞线。使用无油脂、油、蜡、油漆、泥土、污物和松锈的预应力钢。不可使用有扭结、弯曲或其他缺陷的预应力钢绞线或钢丝。

1.2.3 欧洲规范

EN 13369:2004 对预应力钢规定: 当规范用于设计时, 预应力钢(钢丝、钢筋和钢绞线)应符合 prEN 10138-1、prEN 10138-2、prEN 10138-3、prEN 10138-4 的要求, 可采用 3 线或 7 线钢绞线。相关规定均为通用要求。

钢筋笼制作与安装允许偏差的中美欧规范差异见表 2。

表 2 中美欧钢筋笼制作与安装允许偏差 mm

规范	钢筋笼长度	预应力筋间距	螺旋筋间距	纵向钢筋位置	预应力筋股位置
中国规范 (JTS 215—2018)	5 -10	±5	±10	-	-
美国规范 UFGS 31 62 13. 24	-	-	±13, 不包括混凝土 保护层要求	3~6	±6
欧洲规范 EN 13369:2004	钢筋两端的相互差 应小于 20 mm	-	-	钢筋的位置及其公差应 在生产图纸中规定	-

1.3 筑造

筑造的内容包括浇注、张拉、养护、放张和拼接。中美欧相关规定存在较多差异，美国规范浇注方法包括离心浇注法、静压注浆法；欧洲规

范要求对拼接接头进行刚度测试，并有具体指导方法。与中国规范不同，美欧规范多为对预制桩的通用要求，其差异见表 3。

表 3 中美欧先张法预应力混凝土管桩筑造对比

规范	浇注	张拉	养护	放张	拼接
中国规范 码头结构施工规范 (JTS 215—2018)	应采用离心成型工 艺，离心速度宜分 为低速、中低速、 中速、高速 4 个阶段	以应力控制为 主，应变控制 为辅	可采用自然养护、 常压蒸汽养护和高 温高压蒸汽养护的 蒸养工艺，根据试 验确定	预应力钢筋放张 时，管桩的混凝 土抗压强度不得 低于 45 MPa	接头型式应采 用端板焊接或 碗型端头焊接
美国规范 混凝土圆桩 (UFGS 31 62 13. 24) 工厂质量控制和结构预制混凝土产 品制造手册 (PCI MNL-116) ^[8] 预制和预应力混凝土施工公差手册 (PCI MNL-135) ^[9]	离心浇注法、静压 注浆法	控制张拉应力， 并通过钢的伸 长率来验证	采用湿法或加速养 护，其他要求按照 PCI MNL-116 的规 定进行	指定或约定，如 释放强度为 28 d 设计强度的 0.7 倍	-
欧盟规范 EN 12794:2005、EN 13369:2004、 EN 13670:2009、EN 206-1:2000 等	-	控制张拉应力	湿法或加速养护， 控制混凝土最高平 均温度 T	混凝土受到的最大压应力的 1.5 倍，且不小 于 20 MPa	EN 12794:2005 给出了接头的 原则性规定及 刚度测试方法

2 后张法预应力混凝土管桩制作

2.1 混凝土

对比 1.1 节《港口工程后张法预应力混凝土长管节管桩设计与施工规程》(JTS/T 167-17—2020)^[10]对长管节(长度为 8 m 及以上且采用离心工艺制作的混凝土管段)规定：胶凝材料用量为 450~500 kg/m³，水胶比不大于 0.25，其他内容无明显差异。

2.2 钢筋加工

2.2.1 中国规范

JTS 215—2018《码头结构施工规范》指出，钢筋笼的制作应采用冷拔钢筋，每一管节长度的钢筋笼脱焊点不得多于 4 个。

2.2.2 美国规范

UFGS 31 62 13. 24 美国混凝土筒桩规范规定，

混凝土结构中钢筋的最小保护层取决于环境、土壤条件、防腐蚀需要和打桩的位置。正常暴露时，最小保护层为 50 mm；暴露于海洋环境(氯含量超过 1 000×10⁻⁶)的桩，最少使用 75 mm 保护层，但宜在角处采用 100 mm 保护层；在正常和海洋条件下，可采用 38 mm 保护层。

2.2.3 欧洲规范

标准 EN 12794:2005 中对桩和桩节产品的偏差规定时，包括了对保护层的相关规定，同时规定钢筋的加工应符合 EN 13369:2004。

EN 13670:2009 作为混凝土结构执行规范，有关于钢筋弯曲、切割等规定。

中美欧钢筋笼的制作与安装的偏差相关规定见表 4。

表 4 中美欧钢筋笼制作与安装允许偏差								mm
规范	钢筋骨架 长度	钢筋笼 直径	箍筋 间距	纵向钢筋 间距	钢筋保护 层厚度	钢筋笼离 端盖距离	纵向钢筋 位置	
中国规范 码头结构施工规范 (JTS 215—2018)	±5	±5	±10	±10	±5	±5	—	
美国规范 混凝土圆桩(UFGS 31 62 13.24) 工厂质量控制和结构预制混凝土 产品制造手册(PCI MNL-116)	—	—	±13	—	ACI 117 ^[11] ：壁厚≤304.8 时，-9.5 壁厚>304.8 时， -12.7 保护层的减少不应 超过指定混凝土保护层的 1/3	—	3~6	
欧洲规范 EN 12794:2005 EN 13670:2009	—	—	—	—	-10	钢筋两端的 相互差应小 于 20	钢筋的位置及其 公差应在生产图 纸中规定	

2.3 筑造

管桩(或管节)制造主要包括模板工程、钢筋加工、截面成型、固化养护、拼接等关键工艺。中国规范采用复合工艺或离心工艺；美国规范采

用离心浇注法；欧洲标准无明确规定，后张拉可参考 ETAG013。中美欧管桩(或管节)制作差异见表 5。

表 5 中美欧管桩(或管节)制作							
规范	模板	钢筋笼	管节成 型工艺	养护		保护	
				成型后	拆模后	成型后	脱模过程
中国规范 码头结构施工规范 (JTS 215—2018)	—	管节主要控制钢筋骨架长度、钢筋笼直径、箍筋间距、纵向钢筋间距、钢筋保护层厚度、钢筋笼离端盖距离	复合工艺或离心工艺，一次完成	管节采用蒸汽养护或《水运工程混凝土施工规范》(JTS 202—2011)的有关规定养护	水养 7 d 或潮湿养护 10 d，使用淡水，水面高于管节最高处应大于 20 mm	管节成型后，吊离成型机座时，应平稳、轻放，严禁碰撞，并应对管节内壁进行收面处理	在专用平台上进行，脱模时混凝土强度不应小于设计强度等级的 70%
美国规范 混凝土圆桩(UFGS 31 62 13.24)、工厂质量控制和结构预制混凝土产品制造手册(PCI MNL-116)	模板制作和安装公差通常宜是产品公差的一半	主要控制：纵向钢筋位置、箍筋间距、钢筋保护层厚度	离心浇注法，初凝前一次完成	采用湿法或加速养护，其他要求按照 PCI MNL-116 的规定进行	在加速养护后，使用水或膜固化的湿硬化，直到总加速和湿硬化时间为 72 h	达到设计的提升强度或最小立方体强度 39.3 MPa(取高值)前，不得拆除或从浇注床上吊起桩，起重装置必须保证桩不受震动或冲击	桩必须在模具中进行养护，直至混凝土达到规定强度，以防止拆模时的变形或破坏
欧盟规范 EN 12794:2005、EN 13369:2004、EN 206-1:2000、EN 447	可以参考 EN 13670：2009 的原则性规定	EN 12794：2005、EN 13369：2004 等产品标准无规定，在执行规范 EN 13670:2009 有简要的原则性规定	—	湿法或加速养护，控制混凝土最高平均温度 T	—	—	—

各主要规范对后张法预应力混凝土管桩的张拉、灌浆、应力传递(放张)的要求见表 6。中国规范对放张控制规定较少，欧洲规范给出了基本

的控制原则和方法，允许各国制定相应的国家参数，考虑的因素可更全面。

表 6 中美欧对后张法预应力混凝土管桩的张拉、灌浆及放张的要求

规范	张拉			注浆	应力传递	
	主控指标	应力精度	钢绞线伸长值		最小强度	应力筋滑移
中国规范 码头结构施工规范 (JTS 215—2018)	应采用应力控制法张拉,需超张拉时,控制在钢绞线强度标准值的 0.75 倍,并校核钢绞线的伸长值	第二次张拉控制力值与设计张拉力值的允许偏差不得大于 3%	理论伸长值与实际伸长值的差值应满足设计要求;偏差大于 6% 时,应暂停张拉。锚固阶段张拉端钢绞线的回缩值与锚具变形值之和不应大于 6 mm	环境温度低于 5℃或以后 48 h 内可能降至 5℃以下时,应对管桩加热;应保持 0.4~0.6 MPa 压力不少于 2 min,确保浆体密实性	-	-
美国规范 混凝土圆桩 (UFGS 31 62 13.24) 工厂质量控制和结构预制混凝土产品制造手册 (PCI MNL-116) 后张结构注浆技术参数 (PTI M55.1-2019)	预应力应张拉到一个允许的单位应力,由压力计测量张拉应力,并由钢绞线的伸长验证	控制张拉应力测量仪器精度,一般在 ±2%。同时,将应力从千斤顶转换到临时锚固处所造成的集料预应力损失,任何一根缆索平均不得超过 10%,或一桩所有缆索平均不得超过 5%	实际伸长和计算伸长的变化不得大于 5%	灌浆压力必须慢慢提高到至少 690 kPa,但不能超过 1 034 kPa,并保持至少 1 min	对混凝土,通常最低为 20.7 MPa,更高的强度要求需要特殊的配合比设计、硬化规定和硬化时间。对灌浆,达到抗压强度 30 MPa 之前,不得将临时端锁的后张拉力传递给灌浆预应力筋	当移除端头固定时,预应力筋严禁出现滑移。有预应力索滑移迹象的桩视为不合格桩
欧洲规范 EN 12794:2005 EN 13670:2009 EN 446 EN 13369:2004 EN 1992-1-1:2004	张拉应力最大值; $\sigma_{0max} = \min (0.85f_{pk} \text{ 或 } 0.95f_{p0.1k})_{class 1}$; $\sigma_{0max} = \min (0.80f_{pk} \text{ 或 } 0.90f_{p0.1k})_{class 2}$	A 类-正常公差: 单筋/力: ±7% 总力: ±5%	在结构的特定截面上所有筋组的实际伸长不在计算伸长的 5% 内,或一个单筋不在计算伸长量的 15% 内,应按照执行规范采取行动	未给出注浆压力,需要参考其他要求或规范	混凝土受到的最大压应力的 1.5 倍,且小于 20 MPa	EN 12794:2005 不包含应力筋滑移,可参考 EN 13369:2004 中的规定

注:美国标准中关于注浆的进一步指导,可参见 PCI MNL-116、PTI M55.1。

3 管桩质量与偏差

中美欧规范相关规定主要差异有:

1) 桩的允许偏差参数不一致,其中最显著的是欧洲标准将钢筋的位置及保护层规定归于产品偏差中;

2) 欧洲的桩端/桩顶倾斜(角偏差)区分了 AD1

和 AD2 两个类别;

3) 欧盟标准包含桩趾允许偏差,并对桩的符合性评价(初始形式试验、工厂产品控制)等有非常详细的规定。

鉴于美欧标准为通用性标准,现将与中国标准相关的主要规定列于表 7。

表 7 中美欧管桩质量和允许公差规定

项目	允许偏差/mm								外观质量	结构性能检验
	管桩长度	公称外径	外周长	壁厚	保护层厚度	桩顶倾斜度	桩纵轴线弯曲矢高	桩端对桩纵轴线偏斜		
中国规范 码头结构施工规范 (JTS 215—2018)	±100	-	±10	10 0	预应力筋保护层厚度不得小于 45	D/1 000 且不大 于 8	L/1 000 且 不大于 30	10	管桩的质量应满足设计要求，并应符合现行行业标准 JTS 257—2008《水运工程质量检验标准》的有关规定。	应进行抗弯性能检验，应以同规格的管桩连续生产 10 万 m 或在 3 个月内生产总数不足 10 万 m 时为 1 批，每批应随机抽样 2 根进行抗裂性能检验。所抽 2 根全部符合规定，则应判定抗裂性能合格；有 1 根不合格，则应加倍数量进行复验，仍有 1 根不合格，则应判定抗裂性能不合格
美国规范 混凝土圆桩 (UFGS 31 62 13.24)	总长的 0.3% 以内	6 -3	-	10 -3	在钢筋加工部分规定	-	与直线度的累计偏差不应超过每 1 m 长度 3 mm	桩端必须为平面，垂直于桩的纵轴，在桩头处的最大偏差为每 12 in 6 mm	端面必须无破碎，任何显示超过 10% 的端面面积剥落深度超过 3 mm 的端面都将被拒绝	开始生产前先取 3 根桩进行破坏性试验，验证离析、配筋和强度等是否满足要求
欧洲规范 EN 12794:2005	150 -100	桩的截面尺寸：-10~15 实际横截面应大于标称横截面的 95%	-	-	-10	AD1 级：1/100 横截面。 AD2 级：横截面 3/100 或 10 mm，以较小的为准	轴线平直度： $L \leq 10\text{ m}$ ：±20； $10 \leq L < 20\text{ m}$ ：±2； $L \geq 20\text{ m}$ ：±40	AD1 级：1/100 横截面。 AD2 级：横截面 3/100 或 10 mm，以较小的为准	EN 12794：2005 未做规定	EN 12794:2005 未做规定，只提及了验证桩节点坚固性和刚度的形式试验方法(包括弯曲试验)

注：1. 中国规范：D 为管节外径，L 为管桩长度，单位均为 mm。
2. 欧洲规范：长度 L 的单位是 m。任何扩大的桩趾的轴线名义上应与桩身轴线同心。最大允许偏差是 $d_p/100$ 或 20 mm，以较小的为准。其中 d_p 为扩大的桩趾；桩顶和桩底各钢筋的保护层厚度应在 10~50 mm 的范围内，而钢筋两端的相互差应小于 20 mm。

4 结语

1)对于混凝土的规定，中美欧规范的主要差异主要体现在：只有中国规范给出了胶凝材料用量的范围取值，美国规范仅是规定了该材料的最小含量；只有中国规范对混凝土的密度提出大于2 500 kg/m³的要求，欧洲规范则要根据 EN 206-1:2000 的指导，在相关的技术规格书中规定。

2)中美欧规范对钢筋加工、张拉、注浆和预应力制作工艺、质量验收等方面的规定存在较多差异。中国规范规定较为细致，美欧规范一般需要大量引用其他规范或手册。

3)中美欧规范具有通用性，在对应用于码头

工程的预应力混凝土管桩进行制作差异比较时，相关国内外参考规范为：先(或后)张法预应力混凝土管桩(JTS 215—2018)、预制混凝土圆筒桩(UFGS-31 62 13.24)、预制混凝土产品-基础桩(EN 12794:2005)及各自的引用标准。

参考文献：

[1] 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构施工规范: JTS 215—2018 [S].北京: 人民交通出版社, 2018.

[2] British Standards Institution. BS EN 12794: 2005. Precast concrete products—Foundation piles[S]. London: BSI, 2005.