



PHC 管桩轴力-抗弯承载力关系 国内外标准对比

王 衔, 邱 松, 富 坤

(中交第三航务工程局有限公司, 上海 200032)

摘要: 在国家“一带一路”倡议的推进下, 先张法预应力高强混凝土(PHC)管桩全面在海外各类工程项目中应用, 然而海外 PHC 管桩的技术标准和设计习惯与国内存在较大差异, 这使得以国内标准为基础的 PHC 桩力学性能难以以为国外设计人员所适应。比较了国内混凝土结构标准与常用美标、英标、欧标及日标中对于混凝土结构及桩基的相关规定, 着重对与设计关系密切的 PHC 管桩轴力-弯矩承载力关系进行计算和对比。经过梳理发现, 中国标准的简化计算公式在降低部分精度的情况下, 可以给出较为完整光滑的轴力-弯矩承载力关系曲线; 各国标准对于管桩轴向承载力设计值的规定有所不同, 依照国外标准很难给出较为完整光滑的曲线。

关键词: PHC 管桩; 轴力-抗弯承载力关系; 国内外标准

中图分类号: U656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)07-0196-09

Comparison on relations of axial-bending capacities for PHC piles in domestic and international standards

WANG Xian, QIU Song, FU Kun

(CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Under the promotion of the national “One Belt and One Road” initiative, the pretension prestressed high-strength concrete (PHC) pipe pile has been comprehensively applied in various overseas engineering projects. However, there are large differences between the specifications and design theories in foreign areas, which makes the mechanical properties of PHC piles based on Chinese standards are difficultly be adapted by the designers abroad. This paper compares the concrete structures and piles prescribed in the standards of China, America, British, Europe and Japan, especially the axial-bending capacities for PHC piles, which are mostly significant to the design. After comparisons, it is found that the simplified equations given by Chinese standards, at the expenses of some accuracy, can draw smooth curves for axial-bending capacities of PHC piles. However, due to the large differences of the definition of design axial capacities in different foreign standards, it is hard to give integrated and smooth curves.

Keywords: PHC pile; relation of axial-bending capacity; domestic and international standards

先张法预应力高强混凝土(PHC)管桩是我国发展较早且应用广泛的桩型, 具有较高的工程强度, 单桩轴向承载力高, 工程造价低, 耐久性好, 成为长期以来工程建设的重要建材产品。随着国

家“一带一路”倡议的推进, PHC 管桩已经全面走向海外市场, 在海外水运、公路、桥梁等众多工程领域得到应用。然而, 海外管桩的技术标准和设计习惯与国内存在较大差异, 特别是在英标、

收稿日期: 2022-09-27

作者简介: 王衔 (1991—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为水工结构和海上风电基础结构。

欧标以及美标适用的地区,不仅管桩力学性能的计算公式不同,参数取值也存在较多的差异,直接影响当地设计单位对管桩产品的接受程度,在与海外项目设计单位的对接过程中,采用按照国内管桩标准提供的产品规格表存在困难。

为进一步输出国内混凝土管桩产能,并推动中国标准“走出去”战略实施以及行业技术的进步,本文基于 PHC 管桩国内外项目设计计算需求,针对 PHC 管桩的轴力-弯矩承载力关系进行了基于多国标准的计算和对比;给出了国标、美标、英标、欧标及日标关于 PHC 管桩材料性能、轴向承载力及压弯性能计算基本假定等定义及说明;并基于上述定义和假定给出轴力-抗弯承载力关系曲线计算方法和算例,以此说明各国标准之间存在的差异,从而给出轴力-抗弯承载力关系曲线的对比和探讨。本文定义的轴力-抗弯承载力关系由

两部分组成,即轴力设计值-开裂弯矩设计值 ($N-M_{cr}$) 关系及轴力设计值-极限弯矩设计值 ($N-M_u$) 关系。

1 PHC 管桩的主要参数

选取海外工程项目中的常用桩型 PHC 1200C 150 进行计算对比,其中“1200”代表管桩外径;“150”代表管桩壁厚;“C”代表型号,即相应的配筋数量。

PHC 桩主要几何尺寸见图 1; PHC 1200C 150 主要几何尺寸见表 1; 主要材料参数见表 2; 计算中需要使用 PHC 管桩的混凝土有效预压应力,中国、美标、英标、欧标、日标计算结果分别为 10.82、10.62、10.78、10.69、11.15 MPa。本文计算的所有极限弯矩设计值均未考虑由构件长细比和两端约束情况确定的弯矩二阶效应。

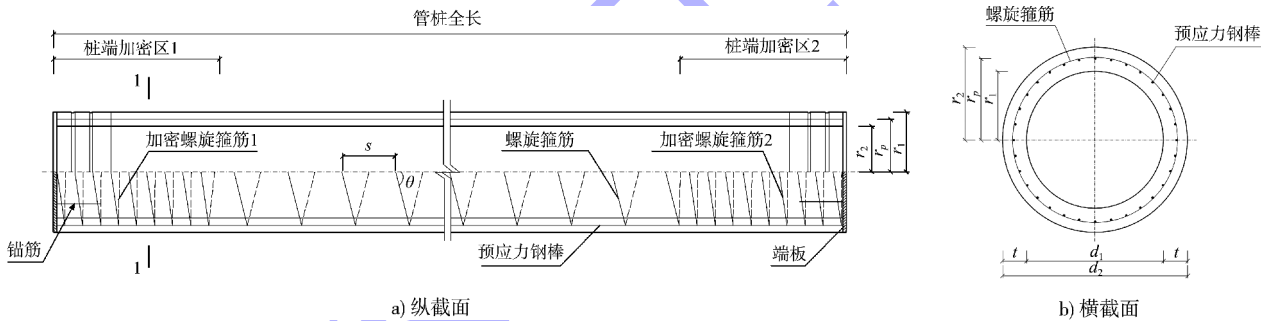


图 1 PHC 管桩

表 1 PHC 1200C 150 管桩几何尺寸

外径/mm	壁厚/mm	主筋直径/mm	主筋数量/根	主筋分布圆直径/mm	单位质量/(kg · m ⁻¹)	截面配筋率/%
1 200	150	12.6	56	1 060	1 286	1.41

表 2 PHC 管桩主要材料性能参数

混凝土等级 f_{cu}/MPa	混凝土弹性模量 E_c/GPa	混凝土轴心抗压强度 标准值 f_{ck}/MPa	混凝土轴心抗压强度 设计值 f_c/MPa	混凝土轴心抗拉强度 标准值 f_{tk}/MPa	混凝土轴心抗拉强度 设计值 f_t/MPa	放张时混凝土 等级 f_{cu}/MPa
80.00	38.00	50.20	35.90	3.11	2.22	45.00
放张时混凝土弹性模量 E_{ci}/GPa	预应力筋抗拉强度 标准值 f_{ptk}/GPa	预应力筋抗拉强度 设计值 f_{py}/GPa	预应力筋抗压强度 设计值 f_{py}/MPa	预应力筋弹性 模量 E_p/GPa	张拉应力控制 系数 k	
33.50	1.42	1.005	400.00	200.00	0.70	

2 中国标准轴力-抗弯承载力关系

2.1 $N-M_u$ 曲线计算

依据《水运工程混凝土结构设计规范》^[1] (简称“规范”), PHC 管桩极限弯矩设计值计算应符合下列规定:

$$N_u = \alpha \alpha_l f_c A - \sigma_{p0} A_p + \alpha f_{py} A_p - \alpha_t (f_{py} - \sigma_{p0}) A_p \quad (1)$$

$$M_u = \alpha_l f_c A (r_1 + r_2) \frac{\sin \pi \alpha}{2\pi} + f_{py} A_p r_p \frac{\sin \pi \alpha}{\pi} + (f_{py} - \sigma_{p0}) A_p r_p \frac{\sin \pi \alpha_t}{\pi} \quad (2)$$

$$\alpha_t = 1 - 1.5\alpha \quad (3)$$

式中: N_u 为轴心受压承载力设计值, kN; M_u 为极限弯矩设计值, kN·m; α 为受压区混凝土截面面积与全截面面积的比值; α_1 为系数, 对 C80 混凝土取 0.94; A 为管桩的横截面积, mm^2 ; σ_{p0} 为受压区纵向预应力钢筋合力点处混凝土法向应力等于零时的预应力钢筋应力, 对于 PHC 管桩取预应力筋有效拉应力, MPa; A_p 为预应力筋的横截面积, mm^2 ; α_l 为纵向受拉预应力钢棒截面面积与全部纵向预应力钢棒截面面积的比值, 当 $\alpha > 2/3$ 时, 取 0; r_1 、 r_2 分别为 PHC 管桩内、外半径, mm; r_p 为 PHC 管桩预应力筋分布圆半径, mm。

规范条文说明指出, 相较于根据基本假定、列出平衡方程严格计算承载力的繁琐方法, 式(1)是将沿截面梯形应力分布的受压及受拉钢筋应力简化为等效矩形力图, 其相对钢筋面积分别为 α 和 α_l , 计算时不需要判断大小偏心情况。但是对于环形截面, 当 α 较小时实际受压区为环内弓形面积, 简化公式可能会低估截面的承载力, 此时按圆形截面公式计算。因此式(1)~(3)是一种简化的近似公式, 大部分条件下与列出截面平衡方程的精确计算差异很小。

利用式(1)~(3)即可得到 PHC 管桩 $N-M_u$ 曲线中弯矩竖轴右侧的较为光滑的压弯段曲线, 如图 2 所示。对 $N-M_u$ 曲线中弯矩竖轴左侧的拉弯段曲线, 可采用将图中 PHC 管桩轴心受拉承载力 N_t 和轴力为 0 时的极限弯矩设计值两点直线相连的简化方法进行绘制, 原因主要有: 1) 一般混凝土构件的轴力-弯矩关系曲线均为上凸曲线, 将上凸曲线简化成直线, 设计中偏于保守; 2) PHC 管桩极少出现承受拉力的工况, 因此中国标准体系并未有 PHC 管桩 $N-M_u$ 拉弯段明确的极限弯矩设计值计算公式。

根据规范, PHC 管桩轴心受拉承载力设计值 N_t 可按式计算:

$$N_t = -f_{py} A_p \quad (4)$$

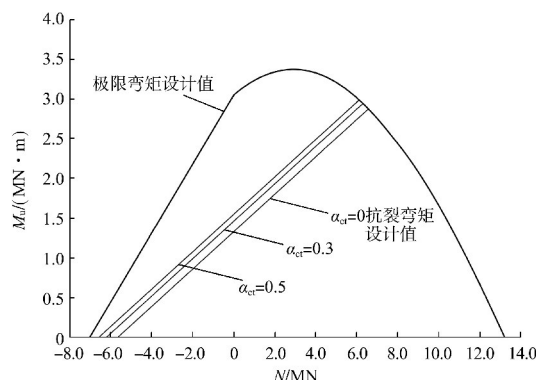


图 2 PHC 1200C 150 型桩轴力与抗弯能力设计值关系

2.2 $N-M_{cr}$ 曲线计算

$N-M_{cr}$ 关系可按式计算:

$$M_{cr} = \left(\sigma_{ce} + \alpha_{ct} \gamma f_{tk} + \frac{N}{A_0} \right) W_0 \quad (5)$$

$$\gamma = \left(1.6 - 0.24 \frac{d_1}{d_2} \right) \left(0.7 + \frac{120}{d_2} \right) \quad (6)$$

$$A_0 = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) + [(E_p/E_c) - 1] A_p \quad (7)$$

$$W_0 = \left[\frac{\pi}{64} (d_2^4 - d_1^4) + \frac{1}{2} [(E_p/E_c) - 1] A_p r_p^2 \right] \frac{2}{d_2} \quad (8)$$

式中: d_1 、 d_2 分别为 PHC 管桩内、外直径, mm; E_p 、 E_c 分别为预应力筋和混凝土的弹性模量, MPa; σ_{ce} 为混凝土有效预压应力, MPa; α_{ct} 为混凝土拉应力限制系数, 与结构的工作条件和钢筋种类相关, 按规范取值; γ 为受拉区混凝土塑性影响系数; N 为轴力设计值, 受压为正, 受拉为负, kN; A_0 为 PHC 管桩换算截面面积, mm^2 ; W_0 为截面换算弹性抵抗矩, mm^3 。

同时应注意, 式(5)计算出的开裂弯矩设计值 M_{cr} 应不大于对应轴力设计值作用下的极限弯矩设计值 M_u , 因此 $N-M_{cr}$ 曲线后半段与 $N-M_u$ 曲线重合。

3 美国标准轴力-抗弯承载力关系

3.1 材料性能的定义

美国标准体系对于管桩预应力损失计算主要参考 PCI design handbook-7th Edition^[2]; 材料参数取值及相关力学指标的计算主要参考 ACI 318-14 标准^[3]。

3.1.1 混凝土

ACI 318-14 以规定的抗压强度 f'_c 作为混凝土的强度指标, 由直径 150 mm、高度 300 mm 的混凝土圆柱体试件的 28 d 抗压试验获得, 按一般经验将 150 mm 立方体抗压强度乘以折减系数 0.8 后的值作为 f'_c 。

3.1.2 预应力钢棒

ACI 318-14 表 20.3.2.2 规定, 高强度钢筋用于设计计算时的抗拉强度规定值不能超过 1.035 GPa, 该值大于 PHC 管桩所用预应力钢棒按照中国标准体系确定的屈服强度设计值 1.005 GPa, 故钢棒的抗拉强度设计值取 1.005 GPa。预应力钢棒的抗压强度设计值 f'_{A-py} 仍按中国标准, 取值 400 MPa。

3.2 轴向受压承载力设计值的定义

美标 ACI 543R-12^[4] 表 4.3.3 规定混凝土桩允许轴向工作压力为:

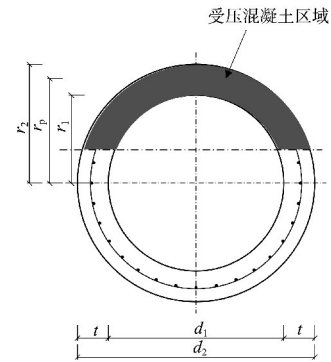
$$N_{A-cd} = (0.33f'_c - 0.27\sigma_{ce})A \quad (9)$$

式(9)规定的允许轴向工作压力可作为美标轴向受压承载力设计值。该式中并未出现预应力钢筋项, 仅与混凝土的抗压强度规定值及有效预压应力有关, 由此可见, 式(9)规定的轴向允许工作压力更偏向于满足正常使用极限状态, 可能是考虑了管桩正常使用的经验强度, 并非是承载能力极限状态设计值。

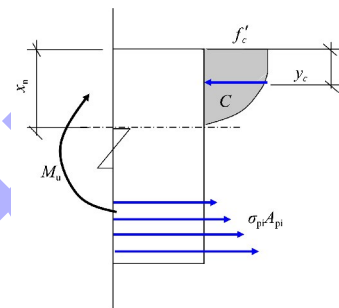
3.3 美标 $N-M_u$ 曲线计算

3.3.1 基本假定

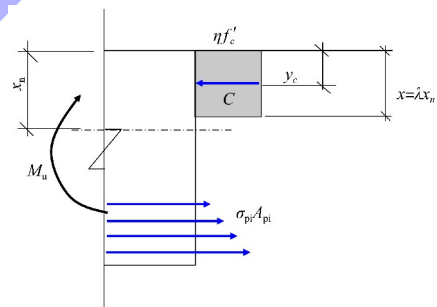
如图 3 所示, 根据 ACI 318-14 的 22.2.2 规定, 计算满足以下假设: 1) 平截面假定, 达到极限强度前截面应变线性分布; 2) 在弯曲和轴向强度计算中混凝土的抗拉强度可以忽略; 3) 受压边缘混凝土最大压应变 ε_{cu} 为 0.003; 4) 混凝土受压区等效应力块强度为 $0.85f'_c$, 即 η 为 0.85; 5) 等效应力块高度为 λx_n , x_n 为实际受压边缘到中性轴的距离, λ 按 ACI 318-14 标准中表 22.2.2.4.3 规定, 对 C80 混凝土取 0.65。



a) 横截面受压区



b) 实际受压区混凝土应力分布



c) 等效受压区混凝土应力分布

注: 对于 f'_c , 英标为 f_{B-cd} , 欧标为 f_{E-cd} , 日标为 f_{J-cd} 。

图 3 美标轴力-极限弯矩计算假定

如图 4 所示, 计算 PHC 管桩 $N-M_u$ 曲线时, 截面的相对受压区高度 (x_n/d_2) 分布有 7 种情况。其中情况 1~3 下, 截面分别处于纯拉和大偏心受拉状态(情况 3 为相对受压区高度为 0 的临界状态), 仍可按照 3.1 节中国标准的相关假定, 简化采用直线模拟拉弯曲线, 直接用直线连接情况 1、3 对应的弯矩轴力点。情况 3~5 下, 截面的相对受压区高度在 0~1, 截面逐渐从拉弯状态转变为压弯状态, 此时可假定截面的受压区边缘应变为

混凝土局部压碎时的极限压应变 ε_{cu} ，从而得到截面上所有预应力筋的分布应变，同时，应当保证截面上最外侧的预应力钢筋最大的应变不大于预应力筋考虑预张拉后的极限拉应变 ε_{su} （可按实际材料取值，或按我国《混凝土结构设计规范》^[5]取为 0.01，本文统一采用 0.01）；若按照受压区混凝土边缘达到 ε_{cu} 得到的最大预应力筋大于 ε_{su} ，则说明混凝土受压区无法压碎，此时可按照截面

预应力筋的最大应变等于 ε_{su} 确定各分布预应力筋应变。而情况 6 时截面处于小偏心受压状态，截面相对受压区高度大于 1，此时受压区边缘混凝土应变介于全截面受压时的极限应变 ε_0 和局部受压极限应变 ε_{cu} 之间，很难清楚假定截面的应变分布，必须增加进一步的假定；考虑到 $N-M_u$ 曲线一般为上凸曲线，可简化地用一条直线连接情况 5、7 之间弯矩轴力点，作为一种保守的设计考虑。

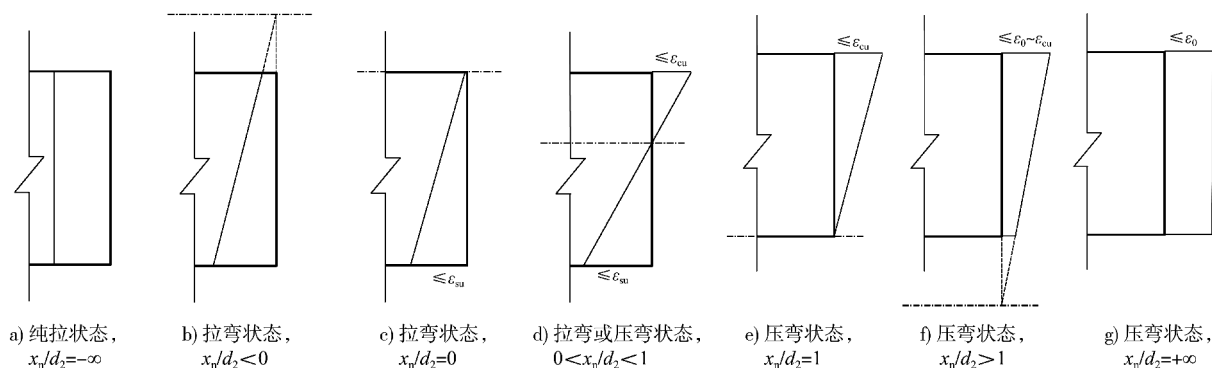


图 4 轴力-弯矩曲线计算的截面相对受压区高度分布情况

美标用于 PHC 管桩极限弯矩时的强度系数取 0.9，即按上述方法计算出的极限弯矩值应乘以 0.9 得到极限弯矩设计值。

3.3.2 计算结果

经过计算，得到如图 5 中所示的 $N-M_u$ 曲线。如 3.2 节所述，美标给出的轴向承载力设计值更多考虑了正常使用极限状态， $N-M_u$ 曲线在极限弯矩尚未达到峰值时就强行进行了截断。

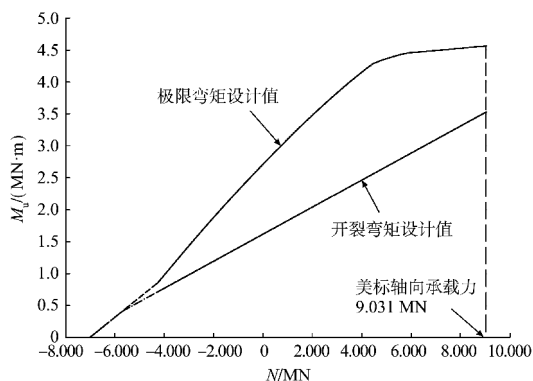


图 5 1200C 150 型桩美标轴力-抗弯能力设计值关系曲线

3.4 美标 $N-M_{cr}$ 曲线计算

美标的 $N-M_{cr}$ 曲线计算仍可按照 2.2 节相关内容进行计算，在此不再赘述。计算时，式(5)中 f_{tk}

应代入的美标混凝土抗拉强度标准值 f_{A-ik} 可按下列式计算：

$$f_{A-ik} = 0.5 \sqrt{f'_c} \quad (10)$$

同时，计算出的抗裂弯矩值应乘以强度系数 0.9 得到抗裂弯矩的设计值。

4 英国标准轴力-弯矩承载力关系

4.1 英标关于材料性能的定义

英国标准对于材料强度设计取值、预应力损失计算、相关力学指标的计算主要参考 BS 8110-1: 1997^[6]。

4.1.1 混凝土

BS 8110-1: 1997 的 2.4.2 条规定，英标的混凝土强度特征值采用 150 mm 立方体试块抗压强度，按 BS 5328-2: 1997^[7] 的混凝土等级规定，C80 等级即表示 28 d 立方体抗压强度特征值 f_{B-cu} 为 80 MPa。根据 2.5.3 条所示的混凝土应力应变设计曲线，英标的混凝土抗压设计值为：

$$f_{B-ed} = \frac{0.67 f_{B-cu}}{\alpha_c} \quad (11)$$

式中： f_{B-cu} 为英标混凝土抗压强度特征值，MPa；

α_c 为英标混凝土材料分项系数, 根据 2.4.4.1, 对轴压及弯曲状态下的混凝土取值 1.5, 对无抗剪钢筋的纯混凝土抗剪状态取值 1.25, 其他情况取不小于 1.5。

4.1.2 预应力钢棒

对于 PHC 管桩的预应力钢棒, 根据 BS 8110-1:1997 的 2.5.3 条, 可得到预应力钢棒抗拉强度设计值为:

$$f_{B-py} = \frac{0.8f_{ptk}}{\gamma_m} \quad (12)$$

式中: f_{B-py} 为英标预应力筋抗拉强度设计值, MPa; γ_m 为材料分项系数, 对预应力筋取 1.05。

预应力钢棒的抗压强度设计值 f'_{B-py} 仍按按中国标准取值 400 MPa。

4.2 轴向受压承载力设计值的定义

BS 8004:1986^[8] 的 7.4.3.3.1 条规定, 对于预应力混凝土桩, 最大工作荷载引起的混凝土平均压应力不应超过试件 28 d 立方体抗压强度与预应力之差 25%, 即:

$$N_{B-cd} = 0.25(f_{B-cu} - \sigma_{ce})A \quad (13)$$

式中: f_{B-cu} 为英标混凝土抗压强度特征值, MPa。

式(13)规定的最大工作荷载可作为英标轴向受压承载力设计值。同美标类似, 该式中并未出现预应力筋项, 仅与混凝土的抗压强度规定值及有效预压应力有关, 因此式(13)也可以理解为更偏向于满足正常使用极限状态, 并非是承载能力极限状态设计值。

4.3 英标 $N-M_u$ 曲线计算

4.3.1 计算基本假定

BS 8110-1:1997 的 4.3.7.1 中对承载能力极限状态假设基本与美标相同, 主要差异在于: 1) 最外缘受压纤维混凝土压应变 ε_{cu} 可取 0.003 5; 2) 图 3 中 η 为 1.0, λ 为 0.9。

相对受压区高度的分段、极限弯矩曲线的组成和简化原则与 4.3.1 节中所述计算假定相同, 在此不再赘述。

4.3.2 计算结果

经过计算, 得到如图 6 中上方所示的 $N-M_u$ 曲

线。如 4.2 节所述, 英标给出的轴向承载力设计值更多考虑了正常使用极限状态, $N-M_u$ 曲线在极限弯矩达到峰值后刚进入下降阶段就强行进行了截断。

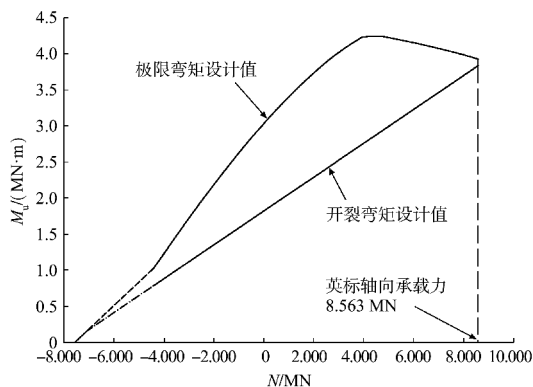


图 6 1200C 150 型桩英标轴力-抗弯能力设计值关系曲线

4.4 英标 $N-M_{cr}$ 曲线计算

英标 $N-M_{cr}$ 曲线计算仍可按照 2.2 节相关内容进行计算, 在此不再赘述。计算时, 式(5)中 f_{tk} 应代入的英标混凝土抗拉强度标准值 f_{B-tk} 可按下列式计算:

$$f_{B-tk} = 0.45\sqrt{f_{B-cu}} \quad (14)$$

5 欧洲标准轴力-弯矩承载力关系

5.1 欧标关于材料性能的定义

欧洲标准的管桩力学性能计算中, 材料强度设计取值、预应力损失计算、相关力学指标的计算均参考 BS EN 1992-1-1:2004^[9]。

5.1.1 混凝土

欧标 BS EN 12390-1:2021^[10] 规定混凝土抗压强度试验可采用多种边长的立方体试件或多种直径和高度的圆柱体试件, 不同尺寸试件确定抗压强度的方法可按标准 EN 12390-3:2019。

按 BS EN 1992-1-1:2004 的 3.1.2 条, 混凝土强度等级以 28 d 龄期的混凝土圆柱体抗压强度特征值 f_{E-ck} 和立方体抗压强度特征值 $f_{E-ck,cube}$ 表示, 例如, C30/37 表示混凝土圆柱体抗压强度特征值为 30 MPa, 立方体抗压强度特征值为 37 MPa。 f_{E-ck} 和 $f_{E-ck,cube}$ 基本呈线性关系, 可按下列式进行拟合:

$$f_{E-ck, cube} = 1.226f_{E-ck} \quad (15)$$

若认为国标 C80 混凝土对应的 $f_{E-ck, cube} = 80 \text{ MPa}$, 则对应的 f_{E-ck} 约为 65 MPa 。

BS EN 1992-1-1:2004 的 3.1.6 条规定混凝土的设计抗压强度为:

$$f_{E-cd} = \alpha_{cc} f_{E-ck} / \gamma_c \quad (16)$$

式中: γ_c 为混凝土材料分项系数, 取 1.5; α_{cc} 为系数, 与抗压强度的长期效应以及荷载造成的不利影响有关, 可取 0.85。

5.1.2 预应力钢棒

对于 PHC 管桩的预应力钢棒, 假定屈服强度标准值仍按国标方法确定, 则根据 BS EN 1992-1-1:2004 的 2.4.2.4 条, 可得到预应力钢棒抗拉强度设计值:

$$f_{E-py} = \frac{0.85f_{ptk}}{\gamma_s} \quad (17)$$

式中: f_{E-py} 为欧标预应力筋抗拉强度设计值, MPa; γ_s 为材料分项系数, 对预应力筋取 1.15。

预应力钢棒的抗压强度设计值 f'_{E-py} 仍按中国标准取值 400 MPa 。

5.2 轴向受压承载力设计值的定义

根据 BS EN 1992-1-1:2004 的 7.2 条规定, 为了避免混凝土出现纵向裂缝导致耐久性降低, 混凝土构件的压应力不宜超过 $0.6f_{E-ck}$, 则轴向受压承载力设计值可定义为:

$$N_{E-cd} = 0.6f_{E-ck}A \quad (18)$$

式中: f_{E-ck} 为 28 d 圆柱体抗压强度特征值, MPa; A 为 PHC 管桩的截面积, mm^2 。

值得注意的是, BS EN 1992-1-1:2004 的 7.2 条处于该标准正常使用极限状态的章节, 因此式 (18) 并非承载力极限状态的设计值。同时, 式 (18) 并未考虑有效预压应力 σ_{ce} 的影响, 原因在于 BS EN 1992-1-1:2004 是一本针对混凝土结构的基本设计标准, 规定了一些基本假定和计算方法, 因此没有针对预应力混凝土构件的特殊规定。如何考虑 σ_{ce} 的影响, 还需要进一步验证。这就给欧标直接应用于 PHC 管桩的计算带来了一些阻碍。

5.3 欧标 $N-M_u$ 曲线计算

5.3.1 计算基本假定

BS EN 1992-1-1:2004 的 6.1 条计算基本假定仍与美标相似, 同时其 3.1.7(3) 给出了图 3 中 η 与 λ 的表达式:

当圆柱抗压强度特征值 $50 \leq f_{E-ck} \leq 90 \text{ MPa}$ 时:

$$\lambda = 0.8 - (f_{E-ck} - 50) / 400 \quad (19)$$

$$\eta = 1 - (f_{E-ck} - 50) / 200 \quad (20)$$

根据 BS EN 1992-1-1:2004 的 3.1.7 条, 对于 $f_{E-ck} \geq 50 \text{ MPa}$ 的情况, 混凝土的极限压应变 ε_{cu} 为:

$$\varepsilon_{cu} = \{2.6 + 35[(90 - f_{E-ck}) / 100]^4\} \times 10^{-3} \quad (21)$$

相对受压区高度的分段、极限弯矩曲线的组成和简化原则与 4.3.1 节中所述计算假定相同, 在此不再赘述。

5.3.2 计算结果

经过计算, 得到了如图 7 中上方所示的 $N-M_u$ 曲线。如 5.2 节所述, 由于现有欧标轴向承载力设计值计算公式未考虑混凝土预压应力的影响, 因此轴向承载力设计值较大, $N-M_u$ 曲线可以出现最右侧的直线(虚线)段。

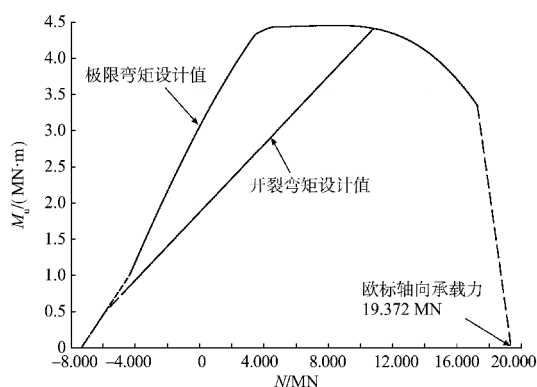


图 7 1200C 150 型桩欧标轴力-抗弯能力设计值关系曲线

5.4 欧标 $N-M_{cr}$ 曲线计算

欧标的 $N-M_{cr}$ 曲线计算仍可按照 2.2 节相关内容进行计算, 在此不再赘述。

计算中式 (5) 中 f_{tk} 应代入欧标的混凝土抗拉强度标准值 f_{E-ik} , 可按下式计算:

$$f_{E-ik} = \max[(1.6 - h / 1\,000)f_{ctm}, f_{ctm}] \quad (22)$$

$$f_{ctm} = 2.12 \ln \left(1 + \frac{f_{E-ck} + 8}{10} \right) \quad (23)$$

式中: f_{ctm} 为混凝土 28 d 平均抗拉强度, MPa;
 h 为构件截面的总高度, 可取管桩外径 d_2 。

6 日本准轴力-弯矩承载力关系

6.1 日标关于材料性能的定义

日本标准的管桩力学性能计算中, JIS A1108: 2006^[12] 对混凝土强度等级进行了定义; JSCE Guidelines for Concrete No. 15^[13] (简称“JSCE”) 对钢筋的设计取值和相关力学指标计算进行了规定; 预应力计算参考了 JIS A5337:1995^[14]。

6.1.1 混凝土

混凝土抗压强度特征值采用 $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 或 $\phi 125 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ 的圆柱体试件经过轴向受压试验得到。由于混凝土圆柱体试件径高比与欧标相同, 故可参考 BS EN 1992-1-1:2004 的混凝土强度规定, 则有:

$$f_{J-ck, \text{cube}} = 1.226 f_{J-ck} \quad (24)$$

式中: $f_{J-ck, \text{cube}}$ 为日标立方体抗压强度特征值, MPa;
 f_{J-ck} 为日标圆柱体试件抗压强度特征值, MPa。

日标混凝土抗压强度设计值 f_{J-cd} 可由下式计算:

$$f_{J-cd} = f_{J-ck} / \gamma_m \quad (25)$$

式中: γ_m 为混凝土材料分项系数, 用于承载能力极限状态时取 1.3, 用于正常使用极限状态时取 1.0。

6.1.2 预应力钢棒

根据 JSCE 5.3.3 条的钢筋应力应变设计曲线, 预应力钢筋抗拉强度设计值按下式计算:

可得到预应力钢棒抗拉强度设计值如下式:

$$f_{J-py} = \frac{0.8 f_{pk}}{\gamma_s} \quad (26)$$

式中: f_{J-py} 为日标预应力筋抗拉强度设计值, MPa; γ_s 为材料分项系数, 对预应力筋承载能力极限状态取 1。

预应力钢棒的抗压强度设计值 f'_{J-py} 仍按中国标准取值 400 MPa。

6.2 轴向受压承载力设计值的定义

根据 JSCE 9.2.1.1 条规定, 混凝土构件截面

的抗压承载力设计值可以取以下两式中的最大值。

$$\begin{cases} N_d = (k_l f_{J-cd} A_e + f'_{J-py} A_p) / \gamma_b \\ N_d = (k_l f_{J-cd} A_e + f'_{J-py} A_p + 2.5 f_{J-yv} A_{spe}) / \gamma_b \end{cases} \quad (27)$$

$$\text{其中: } A_e = \pi \left[r_p^2 - \left(\frac{d_1}{2} \right)^2 \right] \quad (28)$$

$$A_{spe} = 2\pi r_p A_{sp} / s \quad (29)$$

式中: k_l 为混凝土强度折减系数, $k_l = 1 - 0.003 f_{J-ck} \leq 0.85$; A 为扣除预应力筋面积的 PHC 管桩混凝土截面积, mm^2 ; γ_b 为轴压构件系数, 通常取 1.3, 在有受弯作用或压弯作用时, 也可以取 1.1; A_e 为箍紧包围的混凝土截面积, mm^2 ; r_p 为预应力筋所在分布圆半径, mm ; f_{J-yv} 为 PHC 管桩箍筋抗拉强度设计值, 对冷拔低碳钢丝可取 320 MPa; A_{spe} 为箍筋的转换面积, mm^2 ; A_{sp} 为箍筋面积, 按双肢箍计算, mm^2 ; s 为箍筋间距, mm 。

与美标、英标、欧标不同, JSCE 对于轴向承载力设计值的计算与中国规范的轴压承载力设计值计算方法类似, 都是充分考虑混凝土材料和钢筋材料的强度, 是一种承载能力极限状态设计值。然而, JSCE 也是一本针对混凝土结构的基本设计标准, 也没有针对预应力土构件的特殊规定, 因此式中缺少预应力引起的混凝土有效预压应力 σ_{ce} 的影响, 计算出的轴向承载力设计值也相对中国规范偏大。如何考虑 σ_{ce} 的影响, 还需要进一步的验证。这就给日标直接应用于 PHC 管桩的计算带来了一些阻碍。

6.3 日标 $N-M_u$ 曲线计算

6.3.1 计算基本假定

JIS A5337:1995 条文说明的 3.3.3 条对计算极限弯矩时的假定进行了规定, 基本仍与美标类似, 主要差异在于: 1) 混凝土极限压应变 ε_{cu} 的计算; 2) 等效相对受压区高度为 β 的计算; 3) 图 3 中 η 取式(27)中 k_l 。

JSCE 规定, 在 $f_{J-ck} \leq 80 \text{ MPa}$ 的条件下, 极限压应变和参数 β 可分别按下式计算。

$$\varepsilon_{cu} = \frac{155 - f_{J-ck}}{30\,000} \leq 0.003\,5 \quad (30)$$

$$\beta = 0.52 + 80 \varepsilon_{cu} \quad (31)$$

相对受压区高度的分段、极限弯矩曲线的组成和简化原则与 3.3.1 节中所述计算假定相同, 在此不再赘述。

6.3.2 计算结果

经过计算, 得到了如图 8 中上方所示的 $N-M_u$ 曲线。如 6.2 节所述, 由于现有日标轴向承载力设计值计算公式未考虑混凝土预压应力的影响, 因此轴向承载力设计值较大, $N-M_u$ 曲线可以出现最右侧的直线(虚线)段。

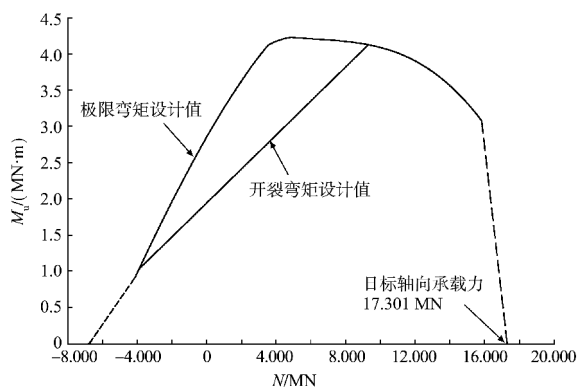


图 8 1200C 150 型桩日标轴力-抗弯能力设计值关系曲线

6.4 日标 $N-M_{cr}$ 曲线计算

日标的 $N-M_{cr}$ 曲线计算仍可按照 2.2 节相关内容进行计算, 在此不再赘述。

计算中式(5)中 f_{tk} 应代入日标计算开裂弯矩时的混凝土抗拉强度标准值 f_{J-tk} , 可按如下方法计算:

$$f_{J-tk} = 0.23f_{J-ck}^{2/3} \quad (32)$$

$$f_{J-btk} = k_{0b}k_{1b}f_{J-tk} \quad (33)$$

$$k_{0b} = 1 + \frac{1}{0.85 + 4.5(h/l_{ch})} \quad (34)$$

$$k_{1b} = \frac{0.55}{\sqrt[4]{h}} \quad (35)$$

$$l_{ch} = G_f E_c / f_{J-tk}^2 \quad (36)$$

$$G_f = 10(d_{max})^{1/3} f_{J-ck}^{4/3} \quad (37)$$

式中: f_{J-tk} 为混凝土抗拉强度标准值, MPa; k_{0b} 为计算系数, 考虑了混凝土受拉软化的混凝土抗拉强度与弯曲开裂强度关系; k_{1b} 为计算系数, 考虑了混凝土烘干与水化热造成的强度折减作用; h 为构件高度, 此处取 PHC 管桩外径 d_2 , 计算中应大于

0.2 m; l_{ch} 为特征长度, m; G_f 为断裂能量, N/m; d_{max} 为混凝土骨料最大直径, 按成熟 PHC 产品, 取 25 mm。

由于抗裂受弯为正常使用极限状态验算, 故设计值的材料分项系数可取 1。

7 结论

1) 各国标准对于混凝土和预应力钢棒材料强度的确定方法存在差异, 由此带来材料设计值规定的差异。

2) 国外标准对于轴向承载力设计值的规定差异十分巨大; 体现在美标、英标及欧标的轴向承载力设计值规定更偏向于正常使用极限状态, 同时欧标及日标还未考虑预应力构件中混凝土有效预压应力的影响。

3) 国标可以得到光滑 $N-M_u$ 曲线, 但其是简化的表达式, 在截面混凝土受压区高度相对较小时不准确, 得到的曲线也存在不准确的区段。

4) 国外标准很难得到如规范[1]式(1)绘制的光滑 $N-M_u$ 曲线。但在常见的 PHC 管桩工作应力范围内给出部分轴力-抗弯性能曲线以供设计单位选用桩型仍是可行的。该部分轴力-抗弯性能曲线可按本文梳理的各国标准的不同定义和计算假定进行计算。

参考文献:

- [1] 中交水运规划设计院有限公司. 水运工程混凝土结构设计规范: JTS 151—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [2] Precast/Prestressed Concrete Institute. PCI design handbook — precast and prestressed concrete (7th Edition) [M]. Chicago: Precast/Prestressed Concrete Institute, 2008.
- [3] American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI-318-14) [S]. New York: American Concrete Institute, 2014.
- [4] American Concrete Institute. Guide to design, manufacture, and installation of concrete piles (ACI 543R-2012) [S]. New York: American Concrete Institute, 2012.

(下转第 229 页)