



基于中美规范的码头驳岸深层水泥搅拌桩 加固设计对比*

周清泉¹, 张文锋², 张弛², 黄永智², 芮城新², 李聪²

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032; 2. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

摘要: 采用深层水泥搅拌桩(deep cement mixing, DCM)壁式加固的码头驳岸工程, 中美规范设计方法区别较大, 而现有研究缺乏全面对比。基于此问题, 结合工程案例进行对比分析。结果表明, 美国规范水泥土原位抗剪强度标准值较中国规范高出 34.8%; 美国规范 50%置换率 DCM 复合土抗剪强度考虑了场地变异系数的影响, 计算滑弧稳定时较中国规范高出 22.6%, 计算其他破坏模式时较中国规范高出 46.8%; 采用中国规范计算 DCM 稳定性和强度时, 若额外考虑主动土压力侧土体竖向剪力和前趾处土体水平围压的影响, 可使抗倾稳定系数提高 5.7%, 前趾压应力降低 7.8%, 前趾抗压强度提高 29.6%。中国规范计算壁式 DCM 地基承载力时, 取基底竖向合力的方法不合理, 应取 DCM 前趾处的容许竖向应力, 并考虑合理的抗力分项系数; 在计算 DCM 加固体竖向剪应力时, 应考虑基底竖向合力偏心的影响; 在设计纵向挡墙以避免壁间土挤出时, 可给出细化规定。

关键词: 码头驳岸; 深层水泥搅拌桩(DCM); 壁式加固; 加固体稳定性; 加固体强度

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0027-09

Chinese and American codes-based comparison of deep cement mixing reinforcement design for wharf dike

ZHOU Qingquan¹, ZHANG Wenfeng², ZHANG Chi², HUANG Yongzhi², GUO Chengxin², LI Cong²

(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. China Harbor Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: Regarding wharf dike improved by wall-type deep cement mixing (DCM), there are significant differences between design methods in Chinese and American codes, yet existing research lacks comprehensive comparisons. On the basis of this issue, a comparative analysis is conducted using engineering case. The results show that the in-situ shear strength of cement-treated soil under American code is 34.8% higher than that under Chinese code. For DCM composite soil with a 50% replacement ratio, the American standard accounts for the influence of the site variability coefficient, resulting in shear strengths that are 22.6% higher than Chinese code when calculating circular slip stability, and 46.8% higher for other failure modes. When applying Chinese code to calculate DCM stability and strength, additional consideration of the vertical shear force from the soil on the active earth pressure side and the horizontal confining pressure at the toe can increase the anti-overturning stability factor by 5.7%, reduce the toe compressive stress by 7.8%, and increase the toe compressive strength by 29.6%. In Chinese code, the method of taking the vertical resultant force at the toe for wall-type DCM foundation bearing capacity calculation is unreasonable. The allowable vertical stress at the toe should be adopted, considering appropriate resistance partial factors. When calculating the vertical shear stress in the DCM body, the influence of

收稿日期: 2025-12-01 录用日期: 2026-01-04

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604200)

作者简介: 周清泉(1992—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程设计与研究工作。

eccentricity in the vertical resultant force at the base should be considered. In designing longitudinal walls to prevent soil extrusion between walls, refined specifications can be provided.

Keywords: wharf dike; deep cement mixing (DCM); wall-style reinforcement; reinforcement body stability; reinforcement body strength

深层水泥搅拌桩(deep cement mixing, DCM)作为一种成本低、效率高、质量可控的地基加固方式,近年来在机场、公路、码头、围堰、基坑支护等多种工程中得到广泛应用^[1-11]。朱幸科等^[12]通过Plaxis三维有限元分析对比不同DCM布置形式对应的水泥搅拌桩内力、变形和边坡稳定情况,得出DCM采用壁式布置(走向垂直于驳岸走线)最优的结论;刘慧芳等^[13]针对重力式码头采用DCM地基加固的案例,对比中国、日本规范的计算结果,并认为两国规范计算方法基本一致;王艳萍等^[14]介绍美国规范水泥搅拌桩应用于路堤的设计方法,但缺乏中美规范设计结果的详细对比。JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》^[15](简称“中国规范”)关于水泥搅拌桩的设计侧重于重力式结构基础,而高桩码头驳岸DCM布置受前

沿水深、码头桩位、接岸结构等因素影响,与重力式结构基础区别较大;美国联邦公路局(Federal Highway Administration, FHWA)规范^[16](简称“美国规范”)针对采用DCM壁式加固的路堤基础设计给出详细规定。现有研究缺乏对中美规范的详细对比,本文依托具体案例,对中美规范的设计方法进行对比,并提出相关建议,可为中国规范修订提供参考。

1 工程概况

某码头工程设计高水位2.40 m、设计低水位0.30 m,50 a一遇有效波高为0.3 m。结构安全等级为二级。钻孔资料揭示工程区域表层为松散粉细砂和软黏土,底部持力层为坚硬黏土,表层软土和持力层之间存在一定的硬黏土或密实砂过渡。土层物理力学指标见表1。

表1 土体物理力学指标
Tab.1 Soil physical and mechanical indices

土层名称	天然重力密度/ (kN·m ⁻³)	直剪固快		直剪快剪		不排水抗剪 强度/kPa	平均标贯 击数/击
		黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)		
回填砂	18.0	0	30.0	0	30.0	-	-
① ₁ 松散粉细砂	16.5	2.0	25.0	4.0	20.0	-	3.8
① ₂ 淤泥质软土	16.2	3.5	13.0	5.0	11.0	15.0	1.9
③ ₁ 淤泥质软土	15.7	8.9	12.9	8.5	3.4	15.0	1.2
④ ₁ 硬黏土	18.6	30.0	20.0	25.0	5.0	40.0	9.9
④ ₂ 硬黏土	19.3	38.0	18.0	28.0	10.0	-	19.3
⑥ ₁ 坚硬黏土	21.1	45.0	20.0	-	-	-	73.0
⑥ ₂ 坚硬黏土	21.6	50.0	22.0	-	-	820.0	100.0

码头前沿设计水深为-14 m,桩台宽度42 m,码头与驳岸之间通过筒支板连接,接岸结构采用L形挡土墙,后方回填至设计高程。码头驳岸软土采用DCM加固,DCM单桩直径为0.85 m,桩体搭接距离为20 cm。驳岸靠前沿25.55 m宽度范围内采用DCM格栅式加固,DCM桩位与码头桩位适配,置换率为30%。L形挡墙下方6 m宽度范围内采用DCM壁式布置,置换率按满足挡墙

下地基承载力的要求进行计算,取50%,DCM剪力墙中心间距 $s_{shear} = 1.525$ m。地基处理后码头驳岸按坡比1:2.4开挖,并采用200~300 kg块石护面。设计均载自码头前沿线向岸侧0~42 m范围为30 kPa,向岸侧42~50 m范围为20 kPa均载(车道),向岸侧50~100 m范围为60 kPa(重箱区堆载)。码头设计断面见图1,DCM平面布置见图2。

表 2 关于 DCM 加固土强度计算的规定
Tab. 2 Regulations on calculation of reinforcement soil strength

规范	水泥土原位抗压强度标准值	水泥土原位抗剪强度标准值	DCM 加固复合土的抗剪强度
JTG D30—2015 《公路路基设计规范》 ^[17]	取现场原位加固土 90 d 无侧限抗压强度 q_u , 也可按室内加固土试件无侧限抗压强度乘以折减系数 0.6 取值	$\tau_{DCM} = q_u/2$	进行整体滑弧稳定分析时, 复合地基滑动面的抗剪强度按照置换率比例进行加权计算, $\tau = a\tau_{DCM} + (1-a)\tau_{soil}$ (a 为 DCM 置换率; τ_{soil} 为桩间原土抗剪强度)
中国规范	取施工工期对应龄期的室内配比试验水泥土强度 f_{cu} 乘以 0.6 (虽折减系数 0.6 与公路规范相同, 但条文说明中认为现场水泥土和室内加固土的平均强度相同, 0.6 是考虑现场施工可靠性后对加固土设计强度的折减系数, 该折减系数未经可靠度分析)	$\tau_{DCM} = 0.3f_{cu}$	未明确水泥搅拌桩复合土的抗剪强度计算方法, 可按 JTG D30—2015《公路路基设计规范》的规定执行
美国规范	认为水泥土试验室强度和现场原位强度的换算关系较复杂, 现场抗压强度 (设计要求值) q_u 可按室内试验强度的一半取值, 也可结合类似项目经验评估。另外引入养护系数 f_c 和残余强度系数 f_r 。 $f_c = 0.187\ln t + 0.375$, 其中 t 为养护时间, 当 $t = 28$ d 时 $f_c = 1.0$, $t = 365$ d 时 $f_c = 1.48$, 但 f_c 的计算公式不适用于高有机质土。 f_r 一般取 0.8 (考虑低围压情况下, 原位水泥土强度在过了峰值强度后仍有应变软化导致的残余强度)。因此, 水泥土原位抗压强度标准值为 $f_r f_c q_u$	$\tau_{DCM} = \frac{1}{2} f_r f_c q_u$	需根据 DCM 不同破坏模式的安全系数选择对应的场地变异系数 f_v , 不考虑桩间原土强度, 复合土抗剪强度设计值 $\tau_{wall} = f_v a \tau_{dm}$ (f_v 为场地变异系数) 考虑水泥搅拌桩可能发生的单桩弯曲破坏, 直接将水泥土的抗剪强度取为 71.8 kPa, $\tau_{center} = \max [71.8 + (1-a)\tau_{soil}, \tau_{soil}]$ (τ_{soil} 为桩间原土抗剪强度)

表 3 中美规范针对水泥土强度的计算结果
Tab. 3 Calculation results of cement-soil strength as per Chinese and American codes

规范	水泥土抗压强度技术规格书要求值/kPa	水泥土原位抗压强度标准值/kPa	水泥土原位抗剪强度标准值/kPa	置换率	场地变异系数		桩间土黏聚力标准值/kPa	DCM 复合土抗剪强度/kPa	
					滑弧稳定计算(安全系数为 1.5)	其他破坏模型计算(安全系数统一为 1.3)		滑弧稳定计算(安全系数为 1.5)	其他破坏模式计算(安全系数统一为 1.3)
美国规范	900	720	360	0.3	0.96	1.15	-	103.7	124.2
				0.5	0.96	1.15	-	172.8	207.0
中国规范	890	534	267	0.3	-	-	15	90.6	90.6
				0.5	-	-	15	141.0	141.0

3 边坡滑弧稳定计算

在计算边坡滑弧稳定时, 美国规范要求采用 Spencer 法, 安全系数不小于 1.5; 而中国规范规定采用简单条分法时, 安全系数可取 1.1~1.3。按表 3 的 DCM 复合土抗剪强度计算图 1 设计断面的边坡稳定安全系数, 中国规范方法计算得 1.406, 美国规范方法计算得 1.501, 均满足规范要求。另外, 美国规范的抗剪强度计算采用的是质量控制较差情况下 ($V_{dm} = 0.6$) 的场地变异系数,

强度有所折减。整体而言, 中美规范计算边坡稳定的富余度近似, 但美国规范关于水泥土抗剪强度的取值更量化。

4 DCM 加固体稳定性和强度计算

对挡墙下方 50% 置换率的 DCM 加固体进行稳定性和强度计算, 在计算土压力时, 美国规范将土层的抗剪强度按规范要求的安全系数 ($F = 1.3$) 折减, 即折减后的土体黏聚力 $c_m = c/F$, 折减后的

土体内摩擦角 $\varphi_m = \arctan(\tan\varphi/F)$ 。

计算被动土压力时, 由于码头驳岸为斜坡面, 且 DCM 加固体强度取不排水抗剪强度, 无法适用库仑土压力计算方法, 因此保守考虑按朗肯理论假定一条被动土压力起算泥面, 具体操作为: 画出被动土压力破坏面并找到其与坡面轮廓线的交点, 将此交点高程作为被动土压力起算泥面, 见图 3。图 3 中的 P_a 和 P_p 分别为总主动作用力和被动作用力标准值(含土压力和水压作用)。

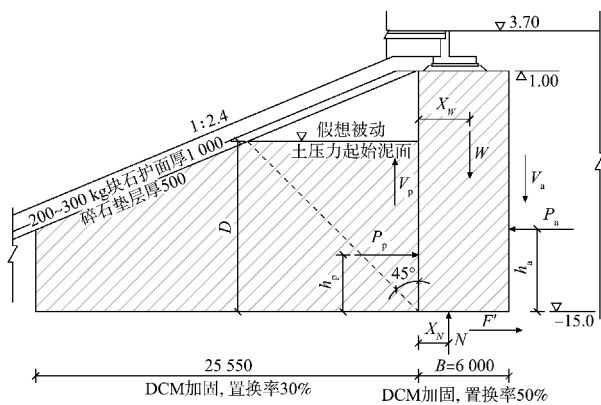


图 3 DCM 加固体稳定计算(高程:m;尺寸:mm)
Fig. 3 Calculation of DCM reinforcement body (elevation:m;dimension:mm)

4.1 公式对比

中国规范将 DCM 壁式布置定义为长短壁沿码头纵向间隔布置, 且要求短壁深度不宜小于 3 m。而美国规范则将壁式布置定义为沿驳岸轴线按一定间距布置若干剪力墙, 每道剪力墙沿码头横向连续, 剪力墙相互无搭接。虽然中美规范关于 DCM 壁式布置的定义有所区别, 但计算内容相近, 以下进行逐一对比。

4.1.1 抗滑稳定计算

1) 中国规范计算公式为:

$$\gamma_0(\gamma_E E_a + \gamma_{P_w} P_w) \leq \frac{1}{\gamma_d}(F' + \gamma_{E_p} E_p) \quad (1)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数, 取 1.0; E_a 包括永久作用和可变作用产生的主动土压力标准值; γ_E 为主动土压力分项系数, 在持久组合下永久作用和可变作用下均为 1.35; P_w 为剩余水压力标准值, 其分项系数 γ_{P_w} 为 1.05; E_p 为永久作用被动土压力标准值, 其分项系数 γ_{E_p} 取 1.0; F' 为加固体底面抗滑阻力设计值, 取基底摩擦力和抗剪力设计值的较小值, 即

$F' = \min(\gamma_w W \tan\varphi + \gamma_c c B, \tau_{ak} B a / \gamma_R + \gamma_c c B (1-a))$, 其中 W 为作用于 DCM 加固体底面的总自重力标准值, 其分项系数 γ_w 取 1.0, φ 和 c 分别为 DCM 加固体底层土的内摩擦角和黏聚力, 黏聚力分项系数 γ_c 取 1.0, τ_{ak} 为水泥土抗剪强度标准值, B 为加固体宽度; γ_R 为水泥土抗力分项系数, 取 2.2; γ_d 为结构系数, 取 1.1。

2) 美国规范对抗滑稳定无要求。

4.1.2 抗倾稳定计算

1) 中国规范关于抗倾稳定的计算公式为:

$$\gamma_0(\gamma_E M_{EH} + \gamma_{P_w} M_{P_w}) \leq \frac{1}{\gamma_d}(\gamma_w M_w + \gamma_{E_p} M_{E_p}) \quad (2)$$

$$x_N = \frac{P_p h_p + W x_w - P_a h_a}{N} \quad (3)$$

式中: M_{EH} 、 M_{P_w} 、 M_w 、 M_{E_p} 分别为主动土压力、剩余水头产生的水平力、DCM 加固体自身重力、被动土压力相对 DCM 加固体前趾的力矩; N 为 DCM 加固体受到的基底竖向反力, 在土压力没有竖向分力的情况下, $N=W$; h_p 为被动土压力合力作用点距 DCM 基底高度; h_a 为主动土压力合力作用点距 DCM 基底高度; x_w 为作用于 DCM 加固体底面的总自重力标准值距 DCM 加固体前趾的水平距离; x_N 为持久组合时作用在拌和体上的合力标准值作用点与拌和体前趾的距离, 中国规范要求其不得小于拌和体底宽的 1/3。

2) 美国规范关于抗倾稳定的计算公式为:

$$N = W + V_a - V_p \quad (4)$$

$$x_N = \frac{P_p h_p + W x_w + V_a B - P_a h_a}{N} \quad (5)$$

式中: V_a 为主动土压力侧土体对 DCM 加固体的竖直向下剪力; V_p 为被动土压力侧土体对 DCM 加固体的竖直向上剪力; x_N 为加固体底面受到的竖向合力 N 至加固体前趾的水平距离。

若 $x_N \leq 0$ 则加固体宽度太窄, 若 $x_N > B/2$ 则认为稳定满足要求, 不需要额外计算前趾处的地基承载力和 DCM 强度; 若 $0 < x_N \leq B/2$, 则需补充计算地基承载力和强度。另外, 美国规范考虑了由土体黏聚力产生的剪力作用(拌和体在主动土压力一侧受到的剪力向下, 在被动土压力一侧受到的

剪力向上)。

4.1.3 DCM 加固体前趾受到的地基竖向应力计算

1) 中国规范的计算公式为:

$$\sigma_{\max} = \begin{cases} \frac{N}{Ba} \left[1 + 6 \left(\frac{B}{2} - x_N \right) / B \right] & \left(x_N > \frac{B}{3} \right) \\ \frac{2N}{3x_N a} & \left(x_N \leq \frac{B}{3} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: σ_{\max} 为 DCM 加固体前趾处最大压应力标准值。

2) 美国规范的计算公式为:

$$\sigma_{\max} = \begin{cases} \frac{N}{B} \left(\frac{2B}{3x_N a} - \frac{1}{a} + 1 \right) & \left(x_N \leq \frac{B}{3} \right) \\ \frac{N}{B} \left(\frac{3}{a} - \frac{6x_N}{Ba} + 1 \right) & \left(\frac{B}{3} < x_N \leq \frac{B}{2} \right) \end{cases} \quad (7)$$

中国规范的计算公式不考虑基底应力对 DCM 壁间原土的作用, 而美国规范的计算公式则考虑了基底应力在 DCM 剪力墙与壁间土的分配。

4.1.4 DCM 加固体前趾抗压强度计算

1) 中国规范的计算公式为:

$$\gamma_0 \gamma_\sigma \sigma_{\max} \leq \frac{1}{\gamma_R} \sigma_{\text{cak}} \quad (8)$$

式中: γ_σ 为地基应力综合分项系数, 取 1.35; γ_R 为抗力分项系数, 取 2.2; σ_{cak} 为拌和体抗压强度标准值。

2) 美国规范的计算公式为:

$$\sigma_{\text{all}} = \frac{2\tau_{\text{dm}} f_v}{F_c} + \sigma_h \quad (9)$$

$$\sigma_{\max} \leq q_{\text{all}} \quad (10)$$

式中: σ_{all} 为 DCM 加固体前趾处的抗压强度; τ_{dm} 为水泥土抗剪强度标准值; F_c 为抗压碎安全系数, 取为 1.3; σ_h 为前趾处的静止水平土压力, 即水泥土抗压强度计算考虑了水平围压的影响。

4.1.5 DCM 加固体地基承载力计算

1) 中国规范关于地基承载力竖向合力的计算公式为:

$$\gamma_0 \gamma_s V_k \leq \frac{1}{\gamma_R} F_k \quad (11)$$

式中: γ_s 为作用综合分项系数, 取 1.0; V_k 为计算面上的竖向合力标准值; F_k 为计算面的地基承

载力竖向合力标准值; γ_R 为抗力分项系数, 持久状况取 2.0~3.0。

2) 美国规范关于允许地基承载力竖向应力 q_{all} 计算公式为:

$$q_{\text{all}} = c_m N_c + \frac{1}{2} \gamma_{\text{below}} b_{\min} N_\gamma + \gamma_{\text{above}} D N_q \quad (12)$$

$$\sigma_{\max} \leq q_{\text{all}} \quad (13)$$

式中: N_c 、 N_γ 、 N_q 分别为与土体黏聚力 c 、重力密度 γ 、压力 q 有关的用于计算地基承载力的系数; c_m 为按安全系数折减后的土体黏聚力; γ_{below} 为 DCM 加固体底部的土体重力密度; γ_{above} 为 DCM 加固体基底以上的土体平均重力密度; b_{\min} 为 DCM 剪力墙的最小允许有效宽度, 可按水泥搅拌桩单桩直径的 90% 估算; D 为 DCM 加固体前趾深度。

中国规范关于地基承载力的计算思路仅适用于块式基础。由于地基承载力计算基于条形基础假定, 针对 DCM 壁式布置的情况, 基础宽度应为每道 DCM 剪力墙沿码头纵向的宽度, 因此中国规范计算地基承载力竖向合力的方法并不适用。另外, 中国规范采用的 γ_R 是在重力式码头和防波堤工程的基础上确定的, 对驳岸 DCM 加固体的适用性有待讨论。

4.1.6 DCM 加固体竖直面抗剪切计算

1) 中国规范的计算公式为:

$$\tau_v = \frac{V - W}{S} \quad (14)$$

$$\gamma_0 \gamma_\tau \tau_v \leq \frac{1}{\gamma_R} \tau_{\text{ak}} \quad (15)$$

式中: τ_v 为计算剪切面的平均竖向剪应力; S 为计算剪切面上加固体的面积; V 为地基竖向合力; W 为 DCM 加固体自身重力, V 和 W 的作用宽度为 DCM 加固体前趾至加固体顶面应力边线的水平距离; γ_τ 为剪应力综合分项系数, 取 1.35; τ_{ak} 为抗剪强度标准值。

2) 美国规范的计算公式为:

$$\tau_v = \begin{cases} \frac{V_p}{H_{\text{dm}}} + \frac{N}{H_{\text{dm}}} \left(1 - \frac{3x_N}{2B} \right)^2 & \left(x_N \leq \frac{B}{3} \right) \\ \frac{V_p}{H_{\text{dm}}} + \frac{3N}{4H_{\text{dm}}} \left(1 - \frac{2x_N}{B} \right) & \left(\frac{B}{3} < x_N \leq \frac{B}{2} \right) \end{cases} \quad (16)$$

$$\tau_{v,all} = \frac{f_v(c/s_{shear})\tau_{dm}}{F_v} \quad (17)$$

$$\tau_v \leq \tau_{v,all} \quad (18)$$

式中: H_{dm} 为 DCM 加固体高度; τ_v 为最不利剪切面的平均竖向剪应力; $\tau_{v,all}$ 为允许竖向剪应力; F_v 为抗剪安全系数, 取 1.3; c 为相邻水泥搅拌桩搭接形成的弦长度; s_{shear} 为两道平行布置的 DCM 剪力墙的中心距。

经比较可知, 美国规范在计算临界竖直面最大平均剪应力时, 将其与底部竖向合力的偏心距建立定量联系, 意义更明确, 另外还考虑了被动土压力侧土体竖向剪力的影响。中国规范的计算公式对驳岸工程的适用性有待讨论。

4.1.7 DCM 壁间土抗挤出计算

1) 中国规范的计算公式为:

$$\gamma_s(P'_a + h_w\gamma_w D_i L_s) \leq \frac{1}{\gamma_R} [2(L_s + D_i)cB + P'_p] \quad (19)$$

式中: γ_s 为综合分项系数, 可取 1.0; D_i 为拌和体短壁底至土体滑动面的距离; c 为土体计算滑动面的抗剪强度; γ_R 是抗力分项系数, 取值不小于 1.2; L_s 为壁间土宽度; P'_a 和 P'_p 分别是作用在壁间土两侧的主动、被动土压力标准值; $h_w\gamma_w$ 为土体计算滑动面的剩余水头重力。

2) 美国规范的计算公式为:

$$s_{shear} - d \leq \{ [F_c(\sigma_{va} - \sigma_{vp}) / (2c_e - 2)] / B - 1 / H_c \}^{-1} \quad (20)$$

式中: $s_{shear} - d$ 为相邻 DCM 剪力墙的净距; H_c 为

进行抗挤出分析的软土总厚度; σ_{va} 为主动土压力侧软土层的平均竖向应力; σ_{vp} 为被动土压力侧软土层的平均竖向应力; c_e 为软土层总应力概念的黏聚力; F_c 为软土抗挤出计算安全系数, 取 1.3。

美国规范认为水泥土剪力墙之间若分析的是砂土或硬黏土, 一般不可能发生挤出, 只有软黏土需要计算挤出风险。计算外力采用的是软土层在主、被动土压力侧的土体平均竖向应力。

中国规范抗挤出稳定性并不特定针对软土, 而是将公式中的土层厚度定义为土体滑动面以上的土层厚度, 难以准确界定其数值。计算外力采用的是作用在壁间土侧面的总主动、被动土压力标准值。

4.2 计算结果

DCM 加固体外力、稳定性和强度计算结果见表 4、5。考虑中国规范计算剪应力及地基承载力的方法有待商榷, 因此结果未列出。中国规范的计算公式不包括 DCM 加固体两侧土体竖向剪力的作用, 但主动土压力侧的土体竖向向下剪力的传力机制明确, 应加以考虑, 而被动土压力侧的土体向上剪力能否充分发挥有待进一步研究论证。若考虑主动土压力侧的土体竖向剪力作用, 则 DCM 加固体稳定力矩和基底竖向合力均有所提高, 抗倾稳定系数(抗倾力矩设计值/倾覆力矩设计值)由 1.05 提高至 1.11, 增幅 5.7%; 前趾压应力标准值由 1 262 kPa 降至 1 164 kPa, 降幅 7.8%。若考虑土体水平围压作用, DCM 前趾处抗压强度标准值由 890 kPa 提高到 1 153 kPa, 增幅 29.6%。

表 4 DCM 加固体所受外力计算结果

Tab. 4 Calculation results of external forces on DCM reinforcement body

计算方法	总主动土压力标准值/kN	被动土压力标准值/kN	主动土压力侧的竖向向下剪力标准值/kN	被动土压力侧的竖向向上剪力标准值/kN	稳定力矩标准值/(kN·m)	倾覆力矩标准值/(kN·m)	基底竖向合力标准值/kN
美国规范	1 935	2 229	113	988	15 101	12 013	988
中国规范	1 609	2 173	146	-	14 337	10 134	1 997
					15 215		2 144

表5 DCM加固体稳定性和强度计算结果

Tab. 5 Calculation results of stability of DCM reinforcement body

计算方法	抗滑力设计值/滑动力设计值	抗倾力矩设计值/倾覆力矩设计值	基底竖向合力至DCM前趾的距离/m	DCM加固体前趾处最大压应力标准值/kPa	DCM加固体前趾处的抗压强度标准值/kPa	DCM加固体竖向剪切应力核算	壁间土抗挤出计算(均以壁间软土为计算对象)
美国规范	-	-	3.12 (>B/2)	由于 $x_N > B/2$, 所以无需核算	899.5	由于 $x_N > B/2$, 所以无需核算	壁间净距临界值0.94 m > 0.675 m, 满足要求
中国规范	1.21	1.05	2.10 (>B/3)	1 262	890.0	-	壁间软土所受滑动力设计值为740 kN, 抗滑力设计值为2 389 kN, 满足要求

5 结论

1) 美国规范和中国规范分别基于容许应力法和分项系数法进行DCM设计, 在DCM抗剪强度取值、稳定性、地基承载力、抗压抗剪和壁间土抗挤出计算等方面的规定均有不同, 计算结果存在差异。

2) 建议中国规范基于高桩码头驳岸DCM加固特点进行以下修订: ①计算DCM前趾处抗压强度时, 基于摩尔应力圆理论考虑对应深度处土体水平围压影响。计算加固体基底竖向反力及前趾压应力时, 应考虑DCM加固体在主动土压力侧受到的土体竖向剪力作用, 并合理评估前趾压应力在DCM剪力墙与壁间土之间的分配。②驳岸DCM加固体竖向剪切破坏的实质是基底竖向合力偏心导致的相邻DCM桩的错动, 计算DCM加固体平均竖向剪应力时, 应考虑基底竖向合力偏心距的影响。③计算壁式DCM地基承载力时, 应基于条形基础的假定, 比较DCM墙前趾处的最大压应力和地基允许竖向应力, 并根据驳岸工程特点考虑合理的抗力分项系数。④计算壁间土抗挤出时, 美国规范基于软土层两侧土体竖向应力复核DCM壁间净距, 中国规范基于滑动面以上土体的主、被动土压力复核抗滑稳定。若计算不满足要求, 则需要另设纵向挡墙, 但中美规范均未给出纵向挡墙设计详细规定, 建议细化相关要求。

参考文献:

[1] 何洪涛, 王征亮, 林佑高, 等. 海上深层水泥搅拌法在香

港国际机场第三跑道填海工程的应用[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(2): 38-42.

HE H T, WANG Z L, LIN Y G, et al. Application of offshore deep cement mixing method in the main reclamation works of Hong Kong International Airport three runway system project[J]. China harbour engineering, 2022, 42(2): 38-42.

[2] 赵作富, 屈笑宇, 方明. 复合地基路基填筑对桥梁桩基的影响研究[J]. 公路, 2022, 67(8): 92-97.

ZHAO Z F, QU X Y, FANG M. Study on the impact of composite foundation subgrade filling on bridge piles[J]. Highway, 2022, 67(8): 92-97.

[3] 高茂鸿, 王志斌, 王选仓, 等. 水泥搅拌桩处治桥头过渡段路基沉降控制技术研究[J]. 公路, 2023, 68(6): 177-185.

GAO M H, WANG Z B, WANG X C, et al. Research on settlement control technology of bridge ends transition section subgrade treated by cement mixing pile[J]. Highway, 2023, 68(6): 177-185.

[4] 孙武鹏. 深厚软土地区河道开挖高铁桥墩围护方案研究[J]. 世界桥梁, 2023, 51(5): 53-59.

SUN W P. Study of excavation enclosure solutions for construction of high-speed railway bridge piers in soft ground[J]. World bridges, 2023, 51(5): 53-59.

[5] 陈盛原, 戴济群, 关云飞, 等. 主动区水泥搅拌桩加固对锚式板桩墙侧向减载机理研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(10): 2026-2035.

CHEN S Y, DAI J Q, GUAN Y F, et al. Research on lateral load reduction mechanism of anchored sheet pile wall by deep cement mixing pile in active zone[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2025,

- 47(10): 2026-2035.
- [6] 姚志安. 深中通道伶仃洋大桥筑岛围堰施工关键技术[J]. 世界桥梁, 2020, 48(2): 15-19.
YAO Z A. Key construction techniques for artificial island cofferdam of Lingdingyang Bridge on Shenzhen-Zhongshan Link[J]. World bridges, 2020, 48(2): 15-19.
- [7] 许昱, 徐国平, 陈伟乐, 等. 深中通道沉管隧道深层水泥搅拌桩复合地基合理布置形式研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(11): 1944-1953.
XU Y, XU G P, CHEN W L, et al. Optimal layout of deep cement mixing piles for composite foundations in immersed tunnels: a case study of Shenzhen-Zhongshan Link[J]. Tunnel construction, 2023, 43(11): 1944-1953.
- [8] 王卫东, 丁文其, 杨秀仁, 等. 基坑工程与地下工程: 高效节能、环境低影响及可持续发展新技术[J]. 土木工程学报, 2020, 53(7): 78-98.
WANG W D, DING W Q, YANG X R, et al. Deep excavation engineering and underground engineering-new techniques of high-efficiency and energy-saving, low environmental impact, and sustainable development[J]. China civil engineering journal, 2020, 53(7): 78-98.
- [9] 周清泉, 尤坛洪, 江义. 深厚软土地基深水板桩码头变形控制优化设计[J]. 水运工程, 2024(3): 32-37.
ZHOU Q Q, YOU T H, JIANG Y. Optimal design of deformation control for deep water sheet pile wharf on deep soft soil foundation[J]. Port & waterway engineering, 2024(3): 32-37.
- [10] 陈盛原, 叶华洋, 张伟锋, 等. 水泥搅拌桩联合堆载固结法对海相软土不同处理方式的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(30): 12533-12539.
CHEN S Y, YE H Y, ZHANG W F, et al. Experimental study on different treatments of marine soft soil by cement mixing pile with stack consolidation[J]. Science technology and engineering, 2020, 20(30): 12533-12539.
- [11] 滕超, 刘志军, 王雪刚. 基于施工数据的水下深层水泥搅拌桩成桩质量影响因素分析[J]. 水运工程, 2020(7): 217-222.
TENG C, LIU Z J, WANG X G. Analysis of influencing factors of underwater deep cement mixing pile's quality based on construction data[J]. Port & waterway engineering, 2020(7): 217-222.
- [12] 朱幸科, 谢万东. 基于三维有限元的 DCM 平面布置对边坡稳定的影响[J]. 水运工程, 2024(3): 171-177.
ZHU X K, XIE W D. Influence of DCM layout on slope stability based on 3D finite element method[J]. Port & waterway engineering, 2024(3): 171-177.
- [13] 刘慧芳, 巴蕾, 刘强. 重力式码头地基加固中 DCM 桩的设计方法[J]. 水运工程, 2021(10): 179-183.
LIU H F, BA L, LIU Q. Design method of DCM pile in foundation reinforcement of gravity wharf[J]. Port & waterway engineering, 2021(10): 179-183.
- [14] 王艳萍, 孙庆楠, 陈昊若. 美标水泥搅拌桩设计方法研究[J]. 中外公路, 2022, 42(5): 19-24.
WANG Y P, SUN Q N, CHEN H R. Research on design methods for cement mixing piles in American Standards[J]. Journal of China & foreign highway, 2022, 42(5): 19-24.
- [15] 水运工程地基设计规范: JTS 147—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
Code for foundation design on port and waterway engineering: JTS 147-2017 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.
- [16] Federal highway administration design manual: deep mixing for embankment and foundation support: FHWA-HRt-13-046 [S]. Washington: Federal Highway Administration, 2013.
- [17] 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
Specifications for design of highway subgrades: JTG D30-2015 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.

(本文编辑 王璁)