



水工建筑物抗倾覆稳定、倾覆力矩 计算方法研究

韦成艳, 刘晶晶

(中国能源建设集团广西电力设计研究院有限公司, 广西南宁 530007)

摘要: 水工建筑物的抗倾覆稳定计算是工程设计中的核心问题, 然而规范对稳定、倾覆力矩的划分不明确导致采用不同甚至同一规范进行抗倾覆稳定计算的结果缺乏唯一性。针对现行规范存在的稳定、倾覆力矩划分不明确问题, 通过分析《建筑基坑支护技术规程》《公路路基设计规范》《船闸水工建筑物设计规范》及《水工挡土墙设计规范》中抗倾覆公式的争议点, 提出以基底应力分析为核心的理论框架。研究表明, 抗倾覆稳定性本质可归结为基底拉应力控制问题, 通过材料力学方法分析基底应力受压面积分布推导出对应的稳定力矩(竖向荷载力矩)与倾覆力矩(水平荷载力矩)的临界比值, 该比值即基底应力分布状态的间接表征, 验证了《水工挡土墙设计规范》公式的合理性。研究成果为统一抗倾覆稳定计算标准提供了理论依据, 并建议将基底应力验算作为抗倾覆稳定的判据。

关键词: 水工建筑物; 抗倾覆稳定; 稳定力矩; 倾覆力矩; 计算方法; 基底应力

中图分类号: U656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)04-0193-07

Calculation method research on stabilizing moment and overturning moment in the anti-overturning stability of hydraulic structures

WEI Chengyan, LIU Jingjing

(China Energy Engineering Group Guangxi Electric Power Design Institute Co., Ltd., Nanning 530007, China)

Abstract: The anti-overturning stability calculation of hydraulic structures is a core issue in engineering design. However, the ambiguous division of stabilizing and overturning moments in design codes results in non-unique calculation outcomes, even when the same code or different ones are adopted for anti-overturning stability calculation. In response to the ambiguous division of stabilizing and overturning moments in current codes, this paper analyzes the controversial points of anti-overturning formulas in the *Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavations*, *Specifications for Design of Highway Subgrades*, *Code for Design of Hydraulic Structures of Shiplocks*, and *Code for Design of Retaining Walls for Hydropower Projects*, and proposes a theoretical framework centered on base stress analysis. The study demonstrates that anti-overturning stability is essentially attributed to the control of base tensile stress. By analyzing the distribution of the compressive area of base stress using the material mechanics method, the critical ratio between stabilizing moments (vertical load moments) and overturning moments (horizontal load moments) is derived. This ratio is an indirect characterization of the base stress distribution state, which ultimately verifies the rationality of the formulas in the *Code for Design of Retaining Walls for Hydropower Projects*. The research results provide a theoretical basis for unifying the calculation standards of anti-overturning stability and recommend taking base stress verification as the criterion for anti-overturning stability.

Keywords: hydraulic structure; anti-overturning stability; stabilizing moment; overturning moment; calculation method; base stress

收稿日期: 2025-08-15 录用日期: 2025-10-29

作者简介: 韦成艳(1989—), 女, 工程师, 从事水工结构设计工作。

水工建筑物的抗倾覆稳定性是保障其结构安全的核心问题。在挡土墙、船闸、堤坝等工程中,倾覆失稳可能导致灾难性后果,其计算方法的可靠性直接关系到工程设计的合理性。倾覆力矩及抗倾覆力矩的力学定义:使得物体绕支撑点往脱离支撑面方向旋转的力矩之和为倾覆力矩,阻止物体绕支撑点往脱离支撑面方向旋转的反向力矩为稳定力矩。现行国内规范虽普遍采用稳定力矩与倾覆力矩的比值(安全系数)作为抗倾覆判据,但对两类力矩的划分标准存在显著分歧^[1]。例如, JGJ 120—2012《建筑基坑支护技术规程》^[2]将整个扬压力、被动土压力计入稳定力矩项; JTG D30—2015《公路路基设计规范》^[3]则对被动土压力水平分量施加 0.3 的折减系数后计入稳定力矩; JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》^[4]将浮托力归入稳定力矩、渗透压力归入倾覆力矩。此类差异导致相同工况下不同规范的计算结果缺乏唯一性,给工程设计带来困惑。

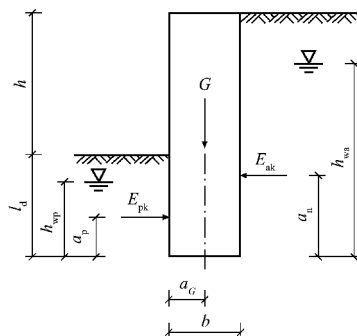
一些学者^[5-7]对抗倾覆计算公式进行了相应的改进,但尚未达成统一观点。值得注意的是,美国规范 EM 1110-2-2502《防洪墙及其他水力挡土墙》(2022 版)^[8]、EM 1110-2-2100《混凝土结构稳定性分析》(2005 版)^[9]、《美国公路桥梁设计规范——荷载与抗力系数设计法》(2017)(简称《AASHTO—LRFD》规范)^[10]未直接定义力矩比值,而是通过基底应力偏心距及受压区范围控制抗倾覆稳定。这一方法表明,抗倾覆问题本质上可通过基底应力分布状态间接表征。然而,国内规范仍以力矩平衡公式为主导,对基底应力验算与抗倾覆稳定的内在关联缺乏系统阐释,进一步加剧了理论认知与工程实践的脱节。

针对上述问题,本文提出以基底应力分析为核心的理论框架,旨在弥合规范间的分歧。通过材料力学方法推导基底应力分布,明确倾覆临界条件,并反演竖向荷载与水平荷载力矩的临界比值,从而验证 NB/T 11089—2023《水工挡土墙设计规范》^[11]公式的物理合理性。

1 国内规范抗倾覆稳定性计算差异分析与问题探讨

1.1 《建筑基坑支护技术规程》计算方法

该规范中重力式水泥土墙的抗倾覆稳定性计算见图 1,计算公式见式(1)。



注: a_a 为水泥土墙外侧主动土压力合力作用点至墙趾的竖向距离, m; a_p 为水泥土墙内侧被动土压力合力作用点至墙趾的竖向距离, m; a_g 为水泥土墙自重与墙底水压力合力作用点至墙趾的水平距离, m; E_{ak} 、 E_{pk} 为作用在水泥土墙上的主动土压力、被动土压力标准值, kN/m; G 为水泥土墙的自重, kN/m; h_{wa} 为基坑外侧水泥土墙底处的水头高度, m; h_{wp} 为基坑内侧水泥土墙底处的水头高度, m; b 为水泥土墙的底面宽度, m; h 为墙前临空高度, m; l_d 为墙前填土高度, m。

图 1 挡墙计算模型

Fig. 1 Calculation model of retaining wall

$$\frac{E_{pk} a_p + (G - u_m b) a_g}{E_{ak} a_a} \geq K_{Ov} \quad (1)$$

式中: K_{Ov} 为抗倾覆稳定安全系数,其值不应小于 1.3; u_m 为水泥土墙底面上的水压力, kPa, 水泥土墙底面在地下水位以下时,可取 $u_m = r_w(h_{wa} + h_{wp})/2$, 在地下水水位以上时,取 $u_m = 0$ kPa。

式(1)中抗倾覆力矩由竖向力(自重、扬压力)、水平力(被动土压力)提供,倾覆力只有水平力(主动土压力)提供。该式在竖向方向上,将整个扬压力作为负值计入稳定力矩项,即对竖向力先进行抵消(自重减去扬压力)再算力矩(情况 1);而在水平方向上,对土压力则不可以先抵消计算合力后再算力矩,逻辑不一致。如果在水平方向上先对土压力(含水压力)进行抵消得倾覆力矩后再做抗倾覆计算,结果会与情况 1 不一致。

1.2 《公路路基设计规范》计算方法

该规范中,挡土墙抗倾覆稳定系数按式(2)计算:

$$K_O = \frac{GZ_G + E_Y Z_X + E'_P Z_P}{E_X Z_Y} \quad (2)$$

式中: K_0 为抗倾覆稳定安全系数, 应符合规范规定; G 为作用于基底以上的重力, kN, 浸水挡土墙的浸水部分应计入浮力; E_y 为墙后主动土压力的竖向分量, kN; E_x 为墙后主动土压力的水平分量, kN, E'_p 为墙前被动土压力水平分量的 0.3 倍; Z_G 为墙身重力、基础重力、基础上填土的重力及作用于墙顶的其他荷载的竖向力合力重心到墙趾的距离, m; Z_x 为墙后主动土压力的竖向分量到墙趾的距离, m; Z_y 为墙后主动土压力的水平分量到墙趾的距离, m; Z_p 为墙前被动土压力的水平分量到墙趾的距离, m。

式(2)中抗倾覆力矩由竖向力(自重、扬压力、主动土压力的竖向分量)、水平力(被动土压力水平分量的 0.3 倍)提供, 倾覆力只有水平力(主动土压力)提供。该公式并没有将整个被动土压力做为抗倾覆力矩, 而是取被动土压力水平分量的 0.3 倍产生的力矩作为抗倾覆力矩。此外, 该公式同样出现对竖向力先进行抵消(自重减去扬压力, 再加上主动土压力的竖向分量)再算力矩、对土压力则不可以先抵消计算合力后再算力矩的问题。因此, 被动土压力折减系数缺乏理论依据, 且竖向力与水平力处理逻辑仍不一致。

1.3 《船闸水工建筑物设计规范》计算方法

船闸结构的抗倾覆稳定安全系数应按式(3)计算:

$$K_0 = M_R / M_O \quad (3)$$

式中: M_R 为对计算截面前趾的稳定力矩之和, kN·m, 其中包括浮托力产生的力矩; M_O 为对计算截面前趾的倾覆力矩之和, kN·m, 其中包括渗透压力产生的力矩。

式(3)中将扬压力的浮托力力矩放在稳定力矩项, 而渗透压力的力矩放在倾覆力矩项, 同一方向的扬压力被拆分, 但规范未说明依据, 且当船闸一侧有土压力时, 将其作为负的稳定力矩放在分子还是作为倾覆力矩放在分母, 不同设计人员的不同理解也会导致计算结果不唯一。

1.4 《水工挡土墙设计规范》计算方法

挡土墙的抗倾覆稳定安全系数应按式(4)

计算:

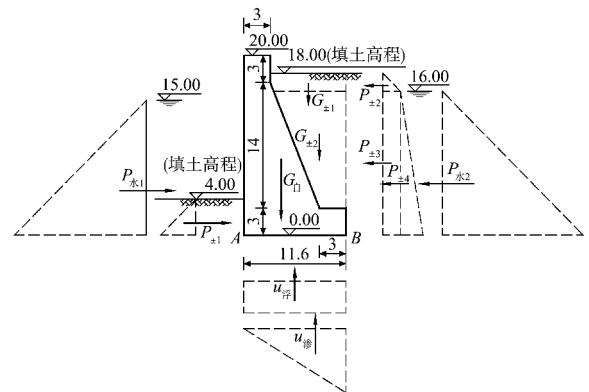
$$K_0 = \sum M_V / \sum M_H \quad (4)$$

式中: $\sum M_V$ 为对挡土墙基底前趾的抗倾覆力矩, kN·m; $\sum M_H$ 为对挡土墙基底前趾的倾覆力矩, kN·m。

《水工挡土墙设计规范》条文说明: 抗倾覆稳定力矩为作用于挡土墙上的全部垂直于水平面的荷载对墙趾的力矩之和, 倾覆力矩为作用于挡土墙上的全部平行于水平面的荷载对墙趾的力矩之和。式(4)中抗倾覆力矩(分子)的力均为竖向, 倾覆力矩(分母)的力均为水平向, 逻辑清晰, 计算结果唯一, 且与基底应力分析结论一致。

1.5 国内规范计算实例分析

某工程的重力式挡墙计算模型见图 2。混凝土的重力密度为 25 kN/m³; 水的重力密度取 10 kN/m³; 填土为砂砾石, 其天然重力密度为 18 kN/m³, 饱和重力密度为 20 kN/m³, 内摩擦角取 35°, 采用库仑土压力计算, 挡墙置基岩上, 计算工况为正常工况。采用以上不同规范对该侧墙进行抗倾覆计算, 结果见表 1、2。



注: $G_{自}$ 为结构自重, kN/m; $G_{\pm 1}$ 、 $G_{\pm 2}$ 分别为结构内水上土体自重、水下土体自重, kN/m; $U_{浮}$ 为单位长度上结构的浮托力, kN/m; $U_{渗}$ 为单位长度上结构的渗透压力, kN/m; $P_{水1}$ 为单位长度上结构的墙前水平压力, kN/m; $P_{水2}$ 为单位长度上结构的墙背水平压力, kN/m; $P_{\pm 1}$ 为单位长度上结构的墙前土压力, kN/m; $P_{\pm 2}$ 为单位长度上结构的墙背水上土压力, kN/m; $P_{\pm 3}$ 、 $P_{\pm 4}$ 为单位长度上结构的墙背水下土压力, kN/m。

图 2 某工程挡墙计算模型(单位:m)

Fig. 2 Calculation model of a retaining wall in a project (unit:m)

表 1 计算荷载及力矩

Tab. 1 Calculation loads and moments

项目	竖向力/(kN·m ⁻¹)	水平力/(kN·m ⁻¹)	对墙趾 A 点的力臂/m	对墙趾 A 点的力矩/(kN·m)
自重	3125	-	3.753	11 728.13
水上土体自重	306	-	7.350	2 249.10
水下土体自重	1 456	-	8.600	12 521.60
内侧水压力	-	1 125.00	5.000	5 625.00
外侧水压力	-	1 280.00	5.330	6 826.67
内侧被动土压力	-	253.56	1.330	338.08
外侧水上主动土压力	-	17.90	16.67	298.35
外侧水下主动土压力	-	286.42	8.00	2 291.32
外侧水下主动土压力	-	636.48	5.33	3 394.55
浮托力	1 740	-	5.80	10 092.00
渗透压力	58	-	7.73	448.53

表 2 不同规范计算对比分析

Tab. 2 Comparative analysis of calculations based on different norms

规范	稳定力矩组成	倾覆力矩组成	安全系数 计算值	规范安全 系数限值	结论
《建筑基坑支护技术规程》	自重-扬压力+被动土压力力矩	主动土压力力矩	1.71	1.3	满足(富余度 31.5%)
《公路路基设计规范》	自重-浮力+主动土压力竖向分量+0.3 倍被动土压力	主动土压力水平分量力矩	1.39	1.5	不满足
《船闸水工建筑物设计规范》	含浮托力力矩	含渗透压力力矩	1.88	1.5	满足(富余度 25.3%)
《水工挡土墙设计规范》	全部竖向力力矩	全部水平力力矩	2.33	1.5	满足(富余度 55.3%)

通过表 2 对比分析可知,同一挡墙结构采用不同规范计算时,抗倾覆安全系数 K 存在显著差异,《水工挡土墙设计规范》计算结果最大($K=2.33$),超出规范限值达 55.3%,表明结构具有较大优化空间;《公路路基设计规范》计算结果最小($K=1.39$),低于限值 7.3%,需通过增大截面尺寸或调整基础形式来满足稳定性要求。这种差异直接导致按最保守规范设计时,工程成本增加;按最优规范设计时,可减少工程成本而不降低安全裕度。计算结果非唯一性的根源在于各规范对被动土压力影响系数的界定不同,扬压力处理原则存在“整体计算”与“拆分计算”的分歧;安全系数取值与基底应力状态的关联性未统一。

1.6 美国规范计算方法

《防洪墙及其他水力挡土墙》(2022 版)抗倾覆稳定根据基底受压面积进行判断,规范中 7.4.1 规定,基底合力作用点参照《混凝土结构稳定计算分析》(2005 版)判别。该规范中表 3-5 规定,一般

工况要求基底 100%受压;特殊工况基底最少 75%受压;对于地震工况,只要求合力作用在基底。倾覆稳定性不直接计算力矩比值,而是通过基底应力分布间接控制。

《AASHTO—LRFD》规范第 11.6.3.3 条规定,对于墩台、挡土墙抗倾覆稳定,用合力作用点限值表达:对于土体上的基础,反力的合力作用位置应位于基底中央的 2/3 范围内;对于岩石上的基础,反力的合力作用位置应位于基底中央的 9/10 范围内^[10]。物理意义明确,避免了力矩划分的主观性,计算结果具有唯一性。

2 基于基底应力分析的抗倾覆稳定计算方法

2.1 基底应力与抗倾覆稳定性的关系

抗倾覆稳定性的本质是与基底的应力状态密切相关的,实为基底应力控制的衍生问题。应从建筑物基底应力分析反演建筑物竖向荷载与水平荷载力矩的临界比值(即安全系数),从而为稳定

力矩和倾覆力矩的合理划分提供理论依据。

2.2 理论推导与临界条件分析

假设建筑物及地基为绝对刚体, 地基具有足够的承载能力, 基应力按照三角形分布, 以考虑单向荷载作用下的建筑物为例, 见图 3, P_1 、 P_2

分别代表左右侧土压力(含左右侧向水压力), 则 P_1 、 P_2 对基底面的和力矩为 $M_{H合}$, 假设竖向荷载不变, 改变水平荷载的大小, 则建筑物基底的应力见式(5)。

$$\sigma = \frac{\sum V}{A} \pm \frac{\sum M_x}{W_x} \quad (5)$$

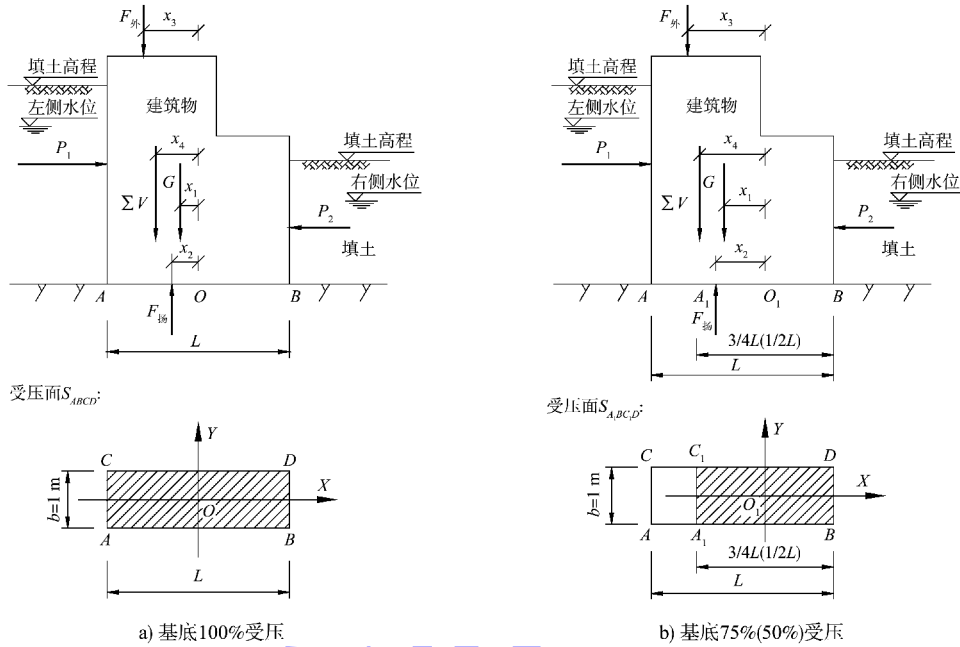


图 3 建筑物基底应力分析

Fig. 3 Stress analysis of building foundation base

则 100% 工况时:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{G + F_{扬} + F_{外}}{L} + \frac{Gx_1 + F_{扬}x_2 + F_{外}x_3}{L^2/6} + \frac{M_{H合}}{L^2/6} > 0 \\ \Rightarrow (G + F_{扬} + F_{外}) \times L/6 + (G + F_{扬} + F_{外})x_4 + M_{H合} &> 0 \\ \Rightarrow \frac{(G + F_{扬} + F_{外})(L/2 + x_4)(L/6 + x_4)}{(L/2 + x_4)} + M_{H合} &> 0 \\ \Rightarrow M_{V合} \frac{(L/6 + x_4)}{(L/2 + x_4)} + M_{H合} &> 0 \\ \Rightarrow \frac{|M_{V合}|}{|M_{H合}|} > \frac{L/2 + x_4}{L/6 + x_4}, \text{其中 } x_4 < L/2 \\ \Rightarrow \frac{|M_{V合}|}{|M_{H合}|} > 1.5 \end{aligned} \quad (6)$$

则 75% 工况时:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{G + F_{扬} + F_{外}}{(3L/4)} + \frac{Gx'_1 + F_{扬}x'_2 + F_{外}x'_3}{(3L/4)^2/6} + \frac{M_{H合}}{(3L/4)^2/6} > 0 \\ \Rightarrow \frac{(G + F_{扬} + F_{外}) \times (3L/4)/6}{(3L/4)^2/6} + \frac{Gx'_1 + F_{扬}x'_2 + F_{外}x'_3}{(3L/4)^2/6} &+ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{M_{H合}}{(3L/4)^2/6} > 0 \Rightarrow \frac{|M_{V合}|}{|M_{H合}|} > \frac{3L/8 + x'_4}{L/8 + x'_4}, \text{其中 } x'_4 < 5L/8 \\ \Rightarrow \frac{|M_{V合}|}{|M_{H合}|} > 1.33 \end{aligned} \quad (7)$$

则 50% 工况时:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{G + F_{扬} + F_{外}}{(L/2)} + \frac{Gx'_1 + F_{扬}x'_2 + F_{外}x'_3}{(L/2)^2/6} + \frac{M_{H合}}{(L/2)^2/6} > 0 \\ \Rightarrow \frac{(G + F_{扬} + F_{外}) \times (L/2)/6}{(L/2)^2/6} + \frac{Gx'_1 + F_{扬}x'_2 + F_{外}x'_3}{(L/2)^2/6} &+ \\ \frac{M_{H合}}{(L/2)^2/6} > 0 \Rightarrow \frac{|M_{V合}|}{|M_{H合}|} > \frac{L/4 + x'_4}{L/12 + x'_4}, \text{其中 } x'_4 < 3L/4 \\ \Rightarrow \frac{|M_{V合}|}{|M_{H合}|} > 1.2 \end{aligned} \quad (8)$$

式中: σ 为基底应力, kPa; ΣV 为作用在结构上全部竖向力, kN; ΣM_x 、 $M_{V合}$ 为作用在结构上全部竖向荷载对于基底面形心轴 x 的力矩, kN·m;

W_x 为结构基础底面对于该底面的形心轴 x 的抵抗矩, m^3 ; G 为结构自重, kN ; $F_{扬}$ 为作用再结构上的扬压力, kN ; $F_{外}$ 为作用在结构上的附加外力, kN ; $M_{H合}$ 为作用在结构上全部水平荷载(土压力、水压力)对于基底面的力矩, $kN \cdot m$ 。

通过以上推导可得不同受压工况下的临界条件: 保证基底 100% 受压的工况下, 作用于建筑物上竖向荷载(含竖直向上、竖直向下)对基底面的力矩之合与水平荷载对基底面的力矩之合的比值大于 1.5; 保证基底 75% 受压的工况下, 作用于建筑物上竖向荷载对基底面的力矩之合与水平荷载对基底面的力矩之合的比值大于 1.33, 适用于特殊荷载组合; 保证基底 50% 受压的工况下, 作用于建筑物上竖向荷载对基底面的力矩之合与水平荷载对基底面的力矩之合的比值大于 1.2, 适用于偶然工况条件。

2.3 计算方法优化建议

力矩划分原则中稳定力矩(分子)为全部竖向荷载力矩(含自重、扬压力等), 倾覆力矩(分母)为全部水平荷载力矩(含土压力、水压力等), 物理意义明确, 与基底应力状态直接对应; 计算具有唯一性, 避免因荷载抵消方式不同导致的结果差异; 与《水工挡土墙设计规范》要求一致(安全系数 1.5 对应 100% 受压), 具有规范协调性。在工程应用中建议优先采用基底应力分析法进行验算, 采用力矩比值法时, 建议采用上述划分原则, 基底应力满足要求时, 可不再进行抗倾覆验算。

2.4 规范对比与验证

本文方法得出的安全系数限值(1.50、1.33、1.20)与《水工挡土墙设计规范》的规定高度吻合, 验证了该方法的合理性。相比其他规范, 解决了力矩划分标准不统一的问题, 消除了计算结果的不唯一性, 建立了与基底应力状态的直接对应关系。

3 结语

1) 现行 4 种抗倾覆计算公式在力矩划分标准上存在显著差异。其中, 《水工挡土墙设计规范》提出的竖向荷载力矩与水平荷载力矩之比, 因其

物理意义明确、计算结果唯一, 具有明显的理论优势。

2) 美标抗倾覆稳定验算未直接定义力矩比值, 转而通过基底应力偏心距及受压区范围控制抗倾覆稳定。这一方法表明, 抗倾覆问题本质可通过基底应力分布状态间接表征。本文通过基底应力反演分析证实: 基底 100% 受压对应临界安全系数 1.5, 基底 75% 受压对应临界安全系数 1.33, 基底 50% 受压对应临界安全系数 1.2, 这一规律与《水工挡土墙设计规范》的安全系数限值高度吻合, 验证了其合理性。

3) 提出以基底应力验算为核心的双评价体系, 在保留规范力矩比值法的同时, 将基底应力分布状态(偏心距、受压区比例)作为抗倾覆稳定的判据。该方法可有效消除不同规范力矩归类差异引起的计算结果差异, 提升设计标准的统一性。

4) 《水工挡土墙设计规范》的抗倾覆计算安全系数限值为基底应力分布状态的间接表征, 建议建筑、公路、船闸等领域采用相应行业规范设计结构时可用该规范中抗倾覆公式进行复核对比后考虑合理安全富余度。

5) 研究进一步揭示, 抗倾覆稳定性实为基底应力控制的衍生问题, 其安全系数可转化为对偏心距的间接约束。基于此, 并建议将基底应力验算作为抗倾覆稳定的判据, 以提升计算结果的唯一性与工程适用性。

6) 本文主要研究方法为理论推导和规范对比, 研究具有局限性, 后续需通过模型试验和有限元分析验证其非刚性基底假设下的临界倾覆条件, 对高扬压力工况, 可开展浮托力对基底有效应力影响的定量化研究, 从而为工程实践提供更科学、可靠的计算依据。

参考文献:

- [1] 程刚. 建(构)筑物抗滑抗倾覆稳定性计算的新公式[J]. 西北水电, 2018(2): 25-29.
CHENG G. A new formula for computation of structural stability against sliding and overturning [J]. Northwest water power, 2018(2): 25-29.

- [2] 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations: JGJ 120-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [3] 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., 2015.
- [4] 船闸水工建筑物设计规范: JTJ 307—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
Code for design of hydraulic structures of shiplocks: JTJ 307-2001[S]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [5] 黄岳文. 关于挡土墙抗倾覆稳定分析的讨论[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 1158-1164.
HUANG Y W. Overturning stability of retaining walls[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2015, 37(6): 1158-1164.
- [6] 姚存锴, 吴钊. 关于挡土墙抗倾覆稳定性的计算[J]. 西北水电, 2016(5): 20-23.
YAO C K, WU Z. Calculation of stability against overturning of retaining wall[J]. Northwest hydropower, 2016(5): 20-23.
- [7] 方玉树. 挡土墙抗倾覆稳定性计算方法的改进[J]. 岩土工程界, 2009, 12(6): 18-20.
FANG Y S. Improvement of calculation method for anti-overturning stability of retaining walls[J]. Geotechnical engineering world, 2009, 12(6): 18-20.
- [8] Floodwalls and other hydraulic retaining walls: EM1110-2-2502[S]. Washington: United States Army Corps of Engineers, 2022.
- [9] Stability analysis of concrete structures: EM1110-2-2100[S]. Washington: United States Army Corps of Engineers, 2005.
- [10] AASHTO-LRFD bridge design specifications[S]. 8th ed. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2017.
- [11] 水工挡土墙设计规范: NB/T 11089—2023[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2023.
Code for design of retaining wall for hydropower projects: NB/T 11089-2023[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2023.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 192 页)

- [16] 刘莹, 徐盼龙, 黄茂松, 等. 小型桩基竖向循环加载模型试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 374-383.
LIU Y, XU P L, HUANG M S, et al. Development and application of a small-scale vertical cyclic loading system for model tests of pile foundations[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2020, 39(2): 374-383.
- [17] 胡黎明, 濮家骝. 土与结构物接触面损伤本构模型[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 6-11.
HU L M, PU J L. Damage model of soil-structure interface[J]. Rock and soil mechanics, 2002, 23(1): 6-11.
- [18] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils [J]. Journal of the soil mechanics and foundations division, 1970, 96(5): 1629-1653.
- [19] STUTZ H, MAŠÍN D. Hypoplastic interface models for fine-grained soils[J]. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 2017, 41(2): 284-303.
- [20] YANG J, YIN Z Y. Soil-structure interface modeling with the nonlinear incremental approach[J]. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 2021, 45(10): 1381-1404.

(本文编辑 赵娟)