

文章编号:1009-3087(2014)06-0044-05

考虑中间主应力的非饱和土刚性挡墙抗倾覆稳定性

张常光,孙珊珊,殷佳

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:由于基于 Mohr-Coulomb 强度准则的饱和土基坑挡墙抗倾覆设计过于保守,基于非饱和土的平面应变抗剪强度统一解,考虑土体强度的非饱和特性与中间主应力效应,推导了满足不同抗倾覆稳定系数的刚性挡墙埋置深度方程,并探讨了中间主应力、基质吸力和稳定系数对埋置深度的影响特性。推求的闭合解为有序新解答的集合,可供不同类型和特点的基坑工程选择与优化。结果表明:中间主应力和基质吸力对埋置深度有影响,表现为随中间主应力效应和基质吸力的增加,埋置深度相应减小且显著;挡墙抗倾覆设计的强度理论效应明显,稳定系数越大对应要求的埋置深度越大,且埋置深度也与基坑开挖深度相关。研究成果为非饱和土基坑挡墙工作性能和安全储备的分析与评价提供了理论基础。

关键词:非饱和土;基坑挡墙;抗倾覆稳定性;埋置深度;中间主应力;基质吸力

中图分类号:TU432;TU476.4

文献标志码:A

Anti-overturning Stability of a Rigid Retaining Wall in Unsaturated Soils Considering the Intermediate Principal Stress

ZHANG Changguang, SUN Shanshan, YIN Jia

(School of Civil Eng., Chang'an Univ., Xi'an 710061, China)

Abstract: The embedment depth equations of a rigid retaining wall, which can meet different anti-overturning stability coefficients, was derived by using the unified solution of shear strength in the plane strain condition for the unsaturated soils. The effects of the unsaturated characteristics and the intermediate principal stress on the shear strength were also taken into consideration. Direct use of these equations can plot the influences of the intermediate principal stress, the matric suction, and the stability coefficient on the embedment depth of a rigid retaining wall. The closed-form solutions are an orderly set of new results and these solutions provide more choices and optimizations for the design of foundation pits with different types and features. The results showed that both the intermediate principal stress and the matric suction have obvious influences on the embedment depth of a retaining wall, i. e., the embedment depth decreases remarkably with the increase of the intermediate principal stress or matric suction. In addition, different failure criteria have an obvious effect on the anti-overturning design of a retaining wall; the greater stability coefficient designed, the greater is the embedment depth, which is also related to the excavation depth of a foundation pit. Finally, the results provide a theoretical basis for the analysis and evaluation about the work performance and the safety reserve of the retaining wall of a foundation pit in the unsaturated soils.

Key words: unsaturated soils; retaining wall of foundation pit; anti-overturning stability; embedment depth; intermediate principal stress; matric suction

迅速发展的高层、超高层建筑及深大地下空间,使得复杂基坑工程及其设计与施工面临众多挑战,

尤其是安全经济的挡墙抗倾覆稳定性设计至关重要。基坑常辅以降水等措施来保证正常施工,此时

收稿日期:2014-03-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41202191);中国博士后科学基金资助项目(2014M562358;2013T60868);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120205120001);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2014JQ7290);长安大学中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2013G2283007;2014G1281072)

作者简介:张常光(1982—),男,副教授,博士。研究方向:非饱和土强度及应用;隧道支护设计。E-mail:zcg1016@163.com

地下水位多降至开挖深度以下,进而基坑周围土体处于有别于完全饱和的非饱和状态^[1-2]。同时,非饱和土的真三轴试验结果已表明^[3-5]:中间主应力对非饱和土的强度有显著影响。然而,现有的基坑挡墙抗倾覆稳定性验算和设计仍采用基于M-C (Mohr-Coulomb)强度准则的饱和土理论,没有考虑基坑周围土体的非饱和特性和中间主应力效应,造成基坑挡墙的埋置深度过大,设计过于保守。有关土体非饱和特性对挡墙稳定性的影响已引起研究者的关注:吴剑敏等^[6]分析了基质吸力对基坑支护结构的内力影响,尚军^[7]提出了非饱和土水泥搅拌桩抗倾覆稳定性的验算方法,李顺群等^[8]分析了预留土对非饱和基坑支护结构嵌固深度的影响,Stanier等^[9]由上限定理确定了无黏性非饱和土挡墙的张拉区深度。但以上研究都是应用基于M-C强度准则的非饱和土抗剪强度公式,没有考虑非饱和土强度的中间主应力效应。张常光等^[10-11]建立的非饱和土平面应变抗剪强度统一解,能合理考虑中间主应力对非饱和土强度的影响,且有广泛的工程应用前景^[12-14]。因此,作者基于非饱和土的平面应变抗剪强度统一解,考虑土体强度的非饱和特性与中间主应力效应,推导了能满足不同抗倾覆稳定系数的埋置深度方程,并探讨了埋置深度的参数影响特性,所得结果可为非饱和土基坑挡墙的优化设计与性能评价提供理论支撑。

1 非饱和土平面应变抗剪强度统一解

作者在文献[10-11]中将统一强度理论^[15]与非饱和土双应力状态变量抗剪强度公式^[16]相结合,利用拓展类比方法建立的非饱和土平面应变抗剪强度统一解为:

$$\tau_t = c_t' + (\sigma - u_a) \tan \varphi_t' + (u_a - u_w) \tan \varphi_t^b \quad (1)$$

$$\sin \varphi_t' = \frac{2(1+b) \sin \varphi'}{2+b(1+\sin \varphi')},$$

$$\sin \varphi_t^b = \frac{2(1+b) \sin \varphi^b}{2+b(1+\sin \varphi^b)},$$

$$c_t' = \frac{2(1+b)c' \cos \varphi'}{2+b(1+\sin \varphi')} \frac{1}{\cos \varphi_t'}.$$

式中, c' 为有效黏聚力, φ' 为有效内摩擦角, c_t' 为统一有效黏聚力, φ_t' 为统一有效内摩擦角, u_a 为孔隙气压, u_w 为孔隙水压, $(u_a - u_w)$ 为基质吸力, σ 为总法向应力, $(\sigma - u_a)$ 为净法向应力, φ^b 为与基质吸力 $(u_a - u_w)$ 有关的吸力角, φ_t^b 为统一吸力角。

统一强度理论参数 b 反映中间主应力对非饱和土强度的影响程度,也是选取不同强度准则的参数,取值范围为 $0 \leq b \leq 1$ 。参数 $b = 0$ 时,式(1)退化为基于M-C强度准则的非饱和土抗剪强度公式^[16],未考虑中间主应力的影响;参数 $b = 1$ 时为基于双剪应力强度理论的非饱和土抗剪强度公式;参数 $0 < b < 1$ 时为一系列新的非饱和土抗剪强度公式。故应用式(1)可以探讨处于平面应变状态下的挡墙、地基与边坡等非饱和土结构的强度理论效应。

2 刚性挡墙抗倾覆埋置深度

假设不计刚性挡墙自重、基坑支撑和超载,挡墙及其周围非饱和土体都处于平面应变状态,且土体强度符合非饱和土平面应变抗剪强度统一解式(1)。

图1为狭长基坑中部纵向单位长度的刚性挡墙,墙侧AB面靠近土体,图中 H 为基坑开挖深度, D 为挡墙抗倾覆埋置深度, y_{ot} 为墙后土体张拉区深度。

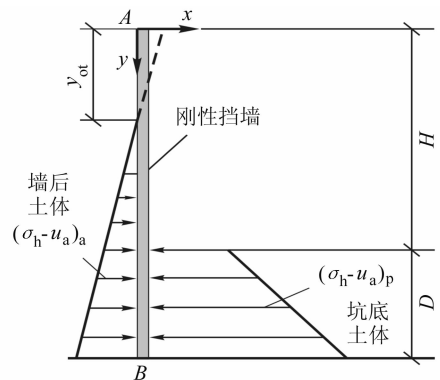


图1 基坑刚性挡墙

Fig.1 Rigid retaining wall of a foundation pit

基坑挡墙抗倾覆稳定系数 K_q 为绕墙趾 B 点的挡墙被动土压力所形成的抗倾覆力矩与挡墙主动土压力所形成的倾覆力矩之比,其表达式为:

$$K_q = \frac{\int_H^{H+D} (\sigma_h - u_a)_p (H + D - y) dy}{\int_{y_{ot}}^{H+D} (\sigma_h - u_a)_a (H + D - y) dy} \quad (2)$$

基坑周围的非饱和土体均匀连续不分层,并且符合朗肯土压力理论。墙后土体处于朗肯主动土压力状态,其水平主动土压力强度 $(\sigma_h - u_a)_a$ 为^[10]:

$$(\sigma_h - u_a)_a = (\sigma_v - u_a) k_a - 2[c_t' + (u_a - u_w) \tan \varphi_t^b] \sqrt{k_a} \quad (3)$$

式中, $k_a = \tan^2(\pi/4 - \varphi_t'/2)$ 为主动土压力系数。将竖向应力 $(\sigma_v - u_a) = \gamma y$ 代入式(3),得非饱

和土主动土压力强度 $(\sigma_h - u_a)_a$ 为:

$$(\sigma_h - u_a)_a = \gamma y k_a - 2[c_t' + (u_a - u_w) \tan \varphi_t^b] / \sqrt{k_a} \quad (4)$$

式中, γ 为非饱和土的重度。

令式(4)中的主动土压力强度 $(\sigma_h - u_a)_a$ 为0,得墙后张拉区深度 y_{ot} 为^[10]:

$$y_{ot} = 2[c_t' + (u_a - u_w) \tan \varphi_t^b] / (\gamma \sqrt{k_a}) \quad (5)$$

令 $c_{tt} = c_t' + (u_a - u_w) \tan \varphi_t^b$ 为统一总黏聚力,并将式(3)、(4)和(5)代入式(2)的分母,得挡墙主动土压力所形成的倾覆力矩为:

$$\int_{y_{ot}}^{H+D} (\sigma_h - u_a)_a (H + D - y) dy = \alpha_{3a} (H + D)^3 + \alpha_{2a} (H + D)^2 + \alpha_{1a} (H + D) + \alpha_{0a} \quad (6)$$

式中, α_{0a} 、 α_{1a} 、 α_{2a} 和 α_{3a} 为倾覆力矩参数, $\alpha_{0a} = -\frac{4c_{tt}^3}{3\gamma^2 \sqrt{k_a}}$, $\alpha_{1a} = \frac{2c_{tt}^2}{\gamma}$, $\alpha_{2a} = -c_{tt} \sqrt{k_a}$, $\alpha_{3a} = \frac{\gamma k_a}{6}$ 。

另外,墙前坑底附近的土体处于朗肯被动土压力状态,其水平被动土压力强度 $(\sigma_h - u_a)_p$ 为^[10]:

$$(\sigma_h - u_a)_p = (\sigma_v - u_a) k_p + 2[c_t' + (u_a - u_w) \tan \varphi_t^b] / \sqrt{k_p} \quad (7)$$

式中, $k_p = \tan^2(\pi/4 + \varphi_t'/2)$ 为被动土压力系数。

将竖向应力 $(\sigma_v - u_a) = \gamma(y - H)$ 代入式(7),得非饱和土被动土压力强度 $(\sigma_h - u_a)_p$ 为:

$$(\sigma_h - u_a)_p = \gamma(y - H) k_p + 2[c_t' + (u_a - u_w) \tan \varphi_t^b] / \sqrt{k_p} \quad (8)$$

将式(7)和(8)代入式(2)的分子,得挡墙被动土压力所形成的抗倾覆力矩为:

$$\int_H^{H+D} (\sigma_h - u_a)_p (H + D - y) dy = \alpha_{3p} (H + D)^3 + \alpha_{2p} (H + D)^2 + \alpha_{1p} (H + D) + \alpha_{0p} \quad (9)$$

式中, α_{0p} 、 α_{1p} 、 α_{2p} 和 α_{3p} 为抗倾覆力矩参数,其中,

$$\alpha_{0p} = -\frac{1}{6} \gamma H^3 k_p + c_{tt} H^2 / \sqrt{k_p}, \alpha_{1p} = \frac{1}{2} \gamma H^2 k_p - 2c_{tt} H / \sqrt{k_p}, \alpha_{2p} = -\frac{1}{2} \gamma H k_p + c_{tt} / \sqrt{k_p}, \alpha_{3p} = \frac{\gamma k_p}{6}。$$

将式(6)和(9)代入式(2),整理得有关刚性挡墙抗倾覆埋置深度 D 的3次方程为:

$$C_3 (H + D)^3 + C_2 (H + D)^2 + C_1 (H + D) + C_0 = 0 \quad (10)$$

式中, C_0 、 C_1 、 C_2 和 C_3 为方程系数,其中, $C_0 = \alpha_{0p} - K_q \alpha_{0a}$, $C_1 = \alpha_{1p} - K_q \alpha_{1a}$, $C_2 = \alpha_{2p} - K_q \alpha_{2a}$, $C_3 = \alpha_{3p} - K_q \alpha_{3a}$ 。

如果张拉区深度 $y_{ot} \geq$ 基坑开挖深度 H ,则不需要进行挡墙支护;相反,则由式(10)通过试算或迭代求得相应的基坑刚性挡墙抗倾覆埋置深度 D 。

由式(10)所得的基坑刚性挡墙抗倾覆埋置深度 D ,可以考虑中间主应力、基质吸力、基坑开挖深度和有效抗剪强度参数等综合影响,给定不同的抗倾覆稳定系数 K_q ,则对应满足不同要求的埋置深度 D 。参数 $b = 0$ 时为基于M-C强度准则的非饱和土挡墙抗倾覆设计^[7];参数 $b = 1$ 时为基于双剪应力强度理论的非饱和土挡墙抗倾覆优化新设计;当 $0 < b < 1$ 时,可获得一系列有序的非饱和土挡墙抗倾覆设计的新解答,基质吸力为0时对应饱和土结果。可供不同类型和特点的基坑工程选择与优化,具有重要的理论意义和工程应用价值。

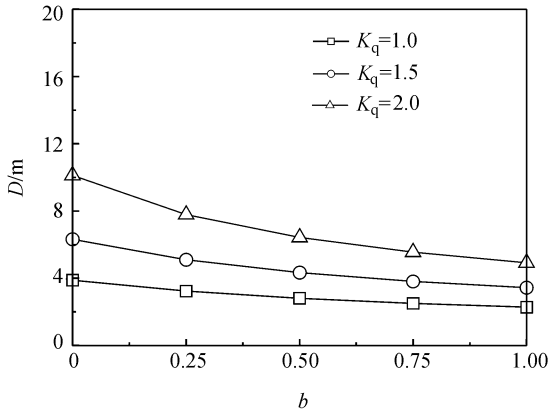
3 参数影响特性

主要探讨中间主应力、基质吸力和抗倾覆稳定系数对挡墙抗倾覆埋置深度 D 的影响特性。某基坑周围均质非饱和土的重度 γ 为 18 kN/m^3 ,有效黏聚力 c' 为 3 kPa ,有效内摩擦角 φ' 为 18° ,吸力角 φ^b 为 10° ,开挖深度 H 取4和6 m 2种情况。

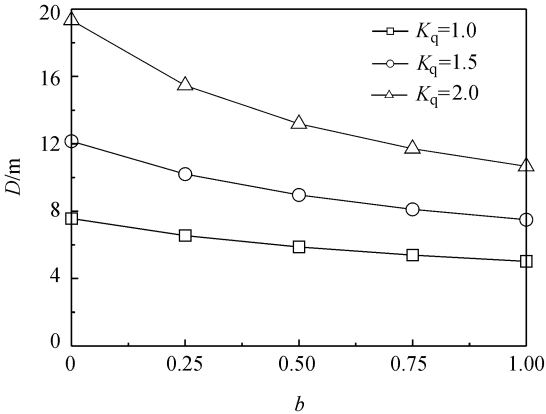
3.1 中间主应力

不同 b 值代表选取不同的强度准则和不同程度中间主应力 σ_2 效应^[15],参数 b 越大 σ_2 效应就越强。图2给出了基质吸力 $(u_a - u_w) = 25 \text{ kPa}$ 时,抗倾覆埋置深度 D 随参数 b 的变化关系。

由图2可以看出,随着参数 b 的增加,埋置深度 D 非线性减小,且稳定系数 K_q 越高,这种非线性趋势越明显。不同稳定系数 K_q 对应不同的埋置深度 D ,稳定系数 K_q 越大,埋置深度 D 就越大。当稳定系数 K_q 分别为1.0、1.5和2.0,开挖深度 $H = 4 \text{ m}$,参数 $b = 1$ 时,埋置深度 D 比参数 $b = 0$ 时分别减小了41.4%、45.7%和51.4%;相应地,开挖深度 $H = 6 \text{ m}$,参数 $b = 1$ 时,埋置深度 D 比参数 $b = 0$ 时分别减小了33.5%、38.3%和44.9%。这表明非饱和土基坑挡墙抗倾覆设计的强度理论效应显著,且开挖深度为4 m时挡墙的强度理论效应更明显;基于M-C强度准则(即参数 $b = 0$ 时)的挡墙抗倾覆设计过于保守,考虑中间主应力效应可以更加充分地发挥非饱和土体自身的强度潜能,保证挡墙抗倾覆设计的安全性和经济性,特别是稳定系数 K_q 为2.0时。



(a) $H = 4 \text{ m}, (u_a - u_w) = 25 \text{ kPa}$



(b) $H = 6 \text{ m}, (u_a - u_w) = 25 \text{ kPa}$

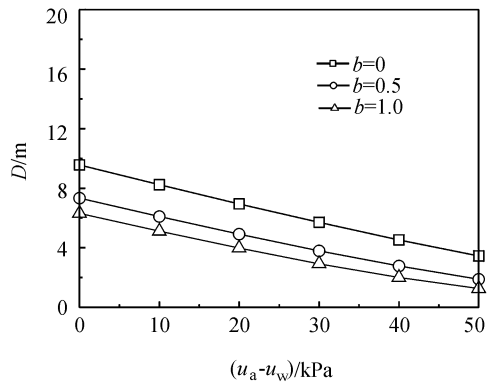
图2 中间主应力对抗倾覆埋置深度 D 的影响

Fig.2 Influence of the intermediate principal stress on the anti-overturning embedment depth D

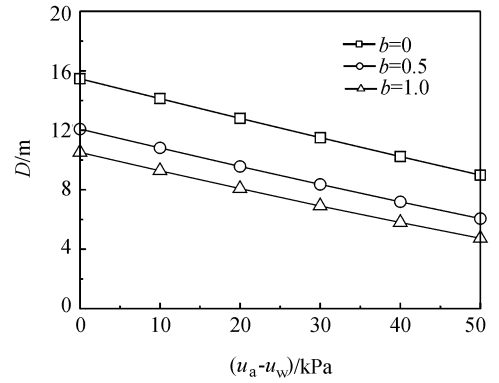
3.2 基质吸力

由负孔隙水压所形成的基质吸力是非饱和土的基本属性^[1-2],如果基质吸力为0,则为饱和土。图3给出了参数 $b = 0, 0.5$ 和 1 , 稳定系数 $K_q = 1.5$ 时,抗倾覆埋置深度 D 随基质吸力的变化关系。

由图3可知,随着基质吸力的增加,埋置深度 D 线性减小。当参数 $b = 0, 0.5$ 和 1 , 稳定系数 $K_q = 1.5$, 基质吸力为 50 kPa 时,非饱和土挡墙的埋置深度 D 分别为 $3.45, 1.89$ 和 1.26 m (开挖深度 $H = 4 \text{ m}$), $8.99, 6.06$ 和 4.73 m (开挖深度 $H = 6 \text{ m}$); 而对应饱和土挡墙的埋置深度 D 为 $9.56, 7.34$ 和 6.31 m (开挖深度 $H = 4 \text{ m}$), $15.47, 12.08$ 和 10.51 m (开挖深度 $H = 6 \text{ m}$), 进而相应的非饱和土挡墙埋置深度 D 可分别减小 $6.11, 5.45$ 和 5.05 m (开挖深度 $H = 4 \text{ m}$), $6.48, 6.02$ 和 5.78 m (开挖深度 $H = 6 \text{ m}$)。可见,开挖深度 H 越大,可减小的埋置深度 D 亦越大。因此,忽略基质吸力对强度的影响,仍按饱和土进行的挡墙抗倾覆设计和验算将造成巨大的浪费,考虑土体强度的非饱和特性可减小挡墙的总



(a) $H=4 \text{ m}, K_q=1.5$



(b) $H=6 \text{ m}, K_q=1.5$

图3 基质吸力对抗倾覆埋置深度 D 的影响

Fig.3 Influence of the matric suction on the anti-overturning embedment depth D

高度,能节省大量的支护费用以降低工程造价,但应采取措措施确保基质吸力的稳定存在。

3.3 抗倾覆稳定系数

不同特点的基坑要求有不同的抗倾覆稳定系数 K_q ,对应需要不同的挡墙埋置深度 D 。图4给出基质吸力 $(u_a - u_w) = 0, 25$ 和 50 kPa , 参数 $b = 0.5$ 时,抗倾覆埋置深度 D 随稳定系数 K_q 的变化关系。

由图4可知,埋置深度 D 与稳定系数 K_q 之间呈非线性增加关系,特别是基质吸力为0时的饱和土。当基质吸力 $(u_a - u_w) = 0, 25$ 和 50 kPa , 开挖深度 $H = 4 \text{ m}$, 稳定系数 $K_q = 2.0$ 时,所需埋置深度 D 比稳定系数 $K_q = 1.0$ 时分别要增加 $5.87, 3.62$ 和 1.53 m ; 相应地,开挖深度 $H = 6 \text{ m}$, 稳定系数 $K_q = 2.0$ 时,所需埋置深度 D 比稳定系数 $K_q = 1.0$ 时分别要增加 $9.56, 7.32$ 和 5.08 m 。根据工程特点及安全经济,合理设定具体基坑的抗倾覆稳定系数 K_q , 并确定所需的挡墙埋置深度 D 。

综上所述可以看出,挡墙埋置深度 D 受中间主应力、基质吸力和抗倾覆稳定系数等综合影响,并且与基坑开挖深度 H 相关,利用式(10)可绘制不同情况下

埋置深度 D 的各种实用图表, 以便工程初步设计和快速查询。

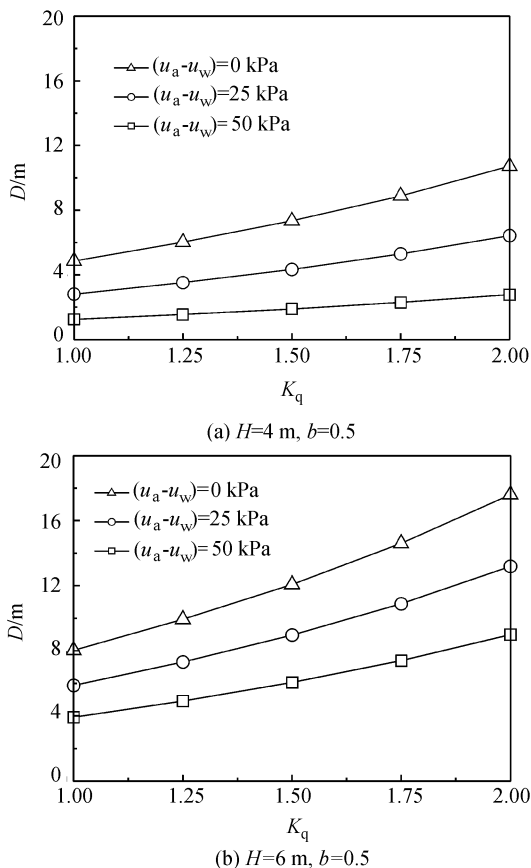


图4 稳定系数对抗倾覆埋置深度 D 的影响

Fig.4 Influence of the stability coefficient on the anti-overturning embedment depth D

4 结论

1) 作者所建立的满足不同抗倾覆稳定系数 K_q 的刚性挡墙埋置深度方程即式(10), 能考虑中间主应力、基质吸力和基坑开挖深度等综合影响, 基于 Mohr-Coulomb 强度准则的解答是其参数 $b = 0$ 时的一个特例, $0 < b < 1$ 时为一系列有序的挡墙抗倾覆设计的新解答, 基质吸力为 0 时对应饱和土结果, 可供不同类型和特点的基坑工程选择与优化, 具有重要的理论意义和工程应用价值。

2) 中间主应力和基质吸力对非饱和土基坑挡墙的抗倾覆设计影响显著, 随着参数 b 和基质吸力的增加埋置深度 D 不断减小; 开挖深度越小, 稳定系数 K_q 越大, 挡墙抗倾覆设计的强度理论效应就越明显; 埋置深度 D 随稳定系数 K_q 增加而非线性增加, 且与基坑开挖深度 H 相关; 考虑土体的非饱和和特性与中间主应力效应能大幅度减小挡墙的总高度, 从而节约工程成本。

参考文献:

- [1] Lu N, Likos W J. Unsaturated soil mechanics [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 2004.
- [2] Fredlund D G, Rahardjo H, Fredlund M D. Unsaturated soil mechanics in engineering practice [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 2012.
- [3] Matsuoka H, Sun D A, Kogane A, et al. Stress-strain behaviour of unsaturated soil in true triaxial tests [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(3): 608 - 619.
- [4] Macari E J, Hoyos L R. Mechanical behavior of an unsaturated soil under multi-axial stress states [J]. Geotechnical Testing Journal, 2001, 24(1): 14 - 22.
- [5] Yu Qinggao, Shao Shengjun, She Fangtao, et al. Research on failure modes and strength characteristics of Q_2 loess under true triaxial condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 66 - 70. [于清高, 邵生俊, 余芳涛, 等. 真三轴条件下 Q_2 黄土的破坏模式与强度特性研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 66 - 70.]
- [6] Wu Jianmin, Li Guangxin, Wang Chenghua. Effect of matric suction of unsaturated soil on the estimation of the load and internal force on supporting structure for deep excavation [J]. Industrial Construction, 2003, 33(7): 6 - 10. [吴剑敏, 李广信, 王成华. 非饱和土基质吸力对基坑支护计算的影响 [J]. 工业建筑, 2003, 33(7): 6 - 10.]
- [7] Shang Jun. Applications of unsaturated soil strength theory in the analysis of general stability of cement mixed pile retaining wall [J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 2004, 10(4): 245 - 251. [尚军. 考虑非饱和土强度理论的水泥搅拌桩挡土墙结构稳定分析研究 [J]. 天津城市建设学院学报, 2004, 10(4): 245 - 251.]
- [8] Li Shunqun, Zheng Gang, Wang Yinghong. Influence of earth berm on retaining structure for unsaturated pit excavation [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(5): 122 - 127. [李顺群, 郑刚, 王英红. 预留土对非饱和基坑支护结构的影响 [J]. 工程力学, 2012, 29(5): 122 - 127.]
- [9] Stanier S A, Tarantino A. An approach for predicting the stability of vertical cuts in cohesionless soils above the water table [J]. Engineering Geology, 2013, 158: 98 - 108.
- [10] Zhang Changguang, Zhang Qinghe, Zhao Junhai. Unified solutions of shear strength and earth pressure for unsaturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1871 - 1876. [张常光, 张庆贺, 赵均海. 非饱和土抗剪强度及土压力统一解 [J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1871 - 1876.]