

饱和填土稳定渗流条件下动主动土压力计算

王俊杰^{1,2}, 柴贺军², 林新¹, 陈野鹰¹

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 国家山区公路工程工程技术研究中心, 重庆 400067)

摘要:地震力和地下水渗流共同作用条件下的饱和填土土压力的计算问题是土力学中土压力课题研究的热点和难点所在。对地下水渗流流线为竖直向下的稳定渗流(问题 1)和流线弯曲、地下水从挡土墙排出的稳定渗流(问题 2)2 种简化状态, 基于拟静力法和库仑土压力理论, 建立了动主动土压力的计算公式。通过和前人研究的对比分析, 验证了该计算公式的可靠性, 讨论了填土内摩擦角对动主动土压力的影响。结果表明, 总动主动土压力随填土有效内摩擦角的增大均呈非线性减小变化, 且问题 2 的总主动土压力随有效内摩擦角增大的减小变化更显著。

关键词:动主动土压力; 地下水渗流; 地震力; 理论分析

中图分类号: TU443 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2011)04-0100-06

Seismic Active Earth Pressure in Saturated Soil Subjected to Steady Seepage

WANG Jun-jie^{1,2}, CHAI He-jun², LIN Xin¹, CHEN Ye-ying¹

(1. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China; 2. National Research Center on Mountain Highway Engineering and Technology, Chongqing 400067, P. R. China)

Abstract: To calculate the earth pressure in saturated soil mass subjected to earthquake forces and groundwater seepage, two cases, in which the seepage states are steady but the shapes of the flow lines are different, are investigated. The two cases are Case 1, in which the flow line is vertical downward, and Case 2, in which the flow line is curve toward retaining wall. Based on the pseudo-static method and Coulomb's theory, the formula to calculate the seismic active earth pressures in Cases 1 and 2 is proposed. The comparison of the results with the published work indicates that the suggested formula is reasonable. The influence of the soil effective internal friction angle on the seismic active earth pressure is also discussed. The results indicate that the total seismic active earth pressure is decreasing nonlinearly with the increase of the soil effective internal friction angle. And the decrement of the total seismic active earth pressure in Case 2 is larger than that in Case 1.

Key words: seismic active earth pressure; groundwater seepage; earthquake force; theoretical analyses

尽管土压力大小和分布的计算是土力学的基本课题之一^[1], 但是人们对土压力计算方法的研究至今仍在继续^[2-3]。在众多土压力的计算方法和理论中, 朗肯土压力理论和库仑土压力理论^[4]仍是目前土压力计算的经典且最为主要的理论。当挡土墙后

填土处于饱和状态时, 土压力的计算需要考虑孔隙水压力的作用, 地下水的渗流状态将对土压力的大小和分布产生影响^[3,5-8]。当有地震力作用时, 挡土墙所受土压力即动土压力的计算, 由于需要考虑地震惯性力的作用而复杂化, 动土压力的计算因此成

收稿日期: 2010-12-05

基金项目: 重庆市自然科学基金重点项目(CSTC, 2009BA6001); 中国博士后科学基金特别资助项目(200902284)

作者简介: 王俊杰(1973-), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土工程、地质工程研究, (E-mail) wangjunjiehu@163.com.

为土力学中的前沿课题,也是当前的研究热点课题^[9-15]。如果同时考虑挡土墙后填土处于饱和状态(地下水可能处于静止状态或渗流状态)和地震力作用,则动土压力的计算更为复杂,相关的研究很少^[16-18]。在实际工程中,挡土墙后填土处于饱和状态和地震力作用两种情况是很可能同时发生的,例如,临水(大海、水库或河流)岸坡的防护结构、地下水位较高地区的深基坑止水帷幕及防护结构等。因此,研究饱和填土动土压力的计算方法是有一定理论意义和工程实用价值的。

文章基于拟静力法和库仑土压力理论,提出了一种计算饱和填土中存在地下水稳定渗流条件下动主动土压力的方法。通过和前人对类似问题研究成果的比较分析,证明了该方法的可靠性。

1 动主动土压力计算公式推导

1.1 研究问题描述

问题1:挡土墙为墙背直立、不透水的刚性结构物;墙后填土为表面水平且无限延伸的均质无粘性土体;地下水位与填土表面平齐且保持不变,地下水渗流为竖直向下的稳定渗流。如图1(a)所示。

问题2:挡土墙为墙背直立、透水的刚性结构物;墙后填土为表面水平且无限延伸、底部存在水平无限延伸不透水层的均质无粘性土体;地下水位与填土表面平齐且保持不变,地下水渗流为从挡土墙排出的稳定渗流。如图1(b)所示。

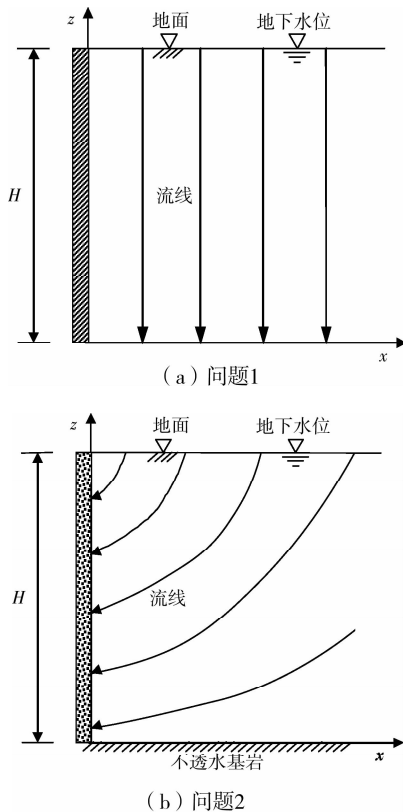


图1 研究问题示意图

1.2 基本假定

1)地震力可用拟静力法近似计算,即可用水平地震力系数 k_h 和竖直地震力系数 k_v 表示;

2)Coulomb 土压力理论的基本假定成立,即土体达到主动极限平衡状态时,土体内将产生过墙踵的破裂面,且破裂面为平面,破裂面和墙土界面间的土楔体可视为刚体;

3)地震力引起的超静孔隙水压力可按下式计算^[19]:

$$\Delta u = \gamma_{\text{sat}} \left[\beta \frac{(k_h + k_v)(1 + \nu)}{3} + \sqrt{2\alpha} \sqrt{(k_h + k_v)^2 (\nu^2 - \nu + 1) - 3k_h k_v} \right] \quad (1)$$

式中: γ_{sat} 为墙后填土的饱和重度; ν 为填土的泊松比,对饱和土体可近似取0.5; k_h 和 k_v 分别水平地震加速度系数和竖直地震加速度系数,假定 $k_h \geq k_v$ 。

由式(1)可知,超静孔隙水压力可同时由水平地震力(k_h)和垂直地震力(k_v)引起。

1.3 问题1的动主动土压力计算

计算简图如图2所示。

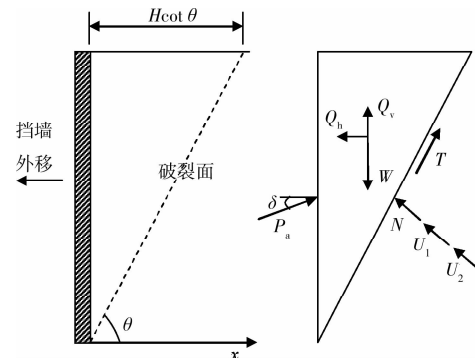


图2 动主动土压力计算模型

作用于图中破裂面和墙土界面组成的土体楔体的各力计算如下:

1)重力 W

$$W = \frac{1}{2} \gamma_{\text{sat}} H^2 \cot \theta \quad (2)$$

式中: γ_{sat} 为填土饱和重度; H 为挡墙高度; θ 为破裂面倾角。

2)水平向地震力 Q_h

$$Q_h = k_h W \quad (3)$$

式中: k_h 为水平地震力系数。

3)竖直向地震力 Q_v

$$Q_v = k_v W \quad (4)$$

式中: k_v 为垂直地震力系数。

4)作用于滑裂面的由于渗流引起的总孔隙水压力 U_1

墙后填土中任意点的孔隙水压力为^[18]:

$$u(z) = \gamma_w (H-z)(1-i) \quad (5)$$

式中: i 为水力坡降。

则

$$U_1 = \int_0^H u(z) \csc \theta dz = g(1-i) \cdot \frac{\csc \theta}{\cot \theta} \cdot W \quad (6)$$

式中: g 为水土重度比, 即 $g = \frac{\gamma_w}{\gamma_{\text{sat}}}$ 。

5) 作用于滑裂面的由于地震作用引起的总孔隙水压力 U_2

$$U_2 = \int_0^H \Delta u \csc \theta dz = \frac{2U'}{H} \cdot \frac{\csc \theta}{\cot \theta} \cdot W \quad (7)$$

式中:

$$U' = \beta \frac{(k_h + k_v)(1+\nu)}{3} +$$

$$\sqrt{2}\alpha \sqrt{(k_h + k_v)^2 (\nu^2 - \nu + 1) - 3k_h k_v} \quad (8)$$

6) 土楔体静力平衡条件

$$\begin{cases} N = P_a \sin(\theta - \delta) + (W - Q_v) \cos \theta - Q_h \sin \theta - U_1 - U_2 \\ T = -P_a \cos(\theta - \delta) + (W - Q_v) \sin \theta + Q_h \cos \theta \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_a 为动主动土压力; N 为作用于滑裂面的总法向力; T 为作用于滑裂面的总切向力; δ 为墙土界面摩擦角。

7) 土楔体极限平衡条件

$$T = N \tan \varphi' \quad (10)$$

式中: φ' 为填土有效内摩擦角。

8) 动主动土压力计算

式(9)代入式(10), 并考虑式(2)~(7), 可得动主动土压力的计算式为:

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma_{\text{sat}} H^2 K_{a1} + \gamma_{\text{sat}} H K_{a2} \quad (11)$$

式中: P_a 为问题 1 的动主动土压力; K_{a1} 和 K_{a2} 为问题 1 的动主动土压力系数, 依下式计算:

$$K_{a21} = \frac{1}{\cos(\theta - \delta) + \sin(\theta - \delta) \tan \varphi'} \cdot [\cot \theta (\sin \theta - \cos \theta \tan \varphi') (1 - k_v) + k_h \cot \theta (\cos \theta + \sin \theta \tan \varphi') + g(1-i) \csc \theta \tan \varphi']$$

$$K_{a22} = \frac{U' \csc \theta \tan \varphi'}{\cos(\theta - \delta) + \sin(\theta - \delta) \tan \varphi'} \quad (12)$$

1.4 问题 2 的动主动土压力计算

计算简图同图 2 所示。

作用于图中破裂面和墙土界面组成的土体楔体的各力计算如下:

1) 重力 W , 计算式同式(2)。

2) 水平向地震力 Q_h , 计算式同式(3)。

3) 竖直向地震力 Q_v , 计算式同式(4)。

4) 作用于滑裂面的由于渗流引起的总孔隙水压力 U_1

墙后填土中任意点的孔隙水压力为^[5]:

$$u(x, z) = \gamma_w \left[H \left(1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-\frac{Mz}{H}} \cos \frac{Mz}{H} \right) - z \right] \quad (13)$$

式中: $M = (2m+1)\pi/2, m=0, 1, 2, 3, \dots$ 。

则:

$$U_1 = \int_0^H u(z \cot \theta, z) \csc \theta dz = g \cdot \frac{\csc \theta}{\cot \theta} \cdot U'' W \quad (14)$$

式中:

$$U'' = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{4 \sin^2 \theta e^{-\cot \theta M}}{M^3} \cdot (\cot \theta e^{\cot \theta M} - \cot \theta \cos M + \sin M) \quad (15)$$

5) 作用于滑裂面的由于地震作用引起的总孔隙水压力 U_2 , 计算式同式(7)。

6) 土楔体静力平衡条件, 同式(9)。

7) 土楔体极限平衡条件, 同式(10)。

8) 动主动土压力计算。

式(9)代入式(10), 并考虑式(2)~(4)、(7)和(14), 可得动主动土压力的计算式为:

$$P_a^* = \frac{1}{2} \gamma_{\text{sat}} H^2 K_{a1}^* + \gamma_{\text{sat}} H K_{a2}^* \quad (16)$$

式中: P_a^* 为问题 2 的动主动土压力; K_{a1}^* 和 K_{a2}^* 为问题 2 的动主动土压力系数, 依下式计算:

$$K_{a1}^* = \frac{1}{\cos(\theta - \delta) + \sin(\theta - \delta) \tan \bar{\omega}'} \cdot [\cot \theta (\sin \theta - \cos \theta \tan \bar{\omega}') (1 - k_v) + k_h \cot \theta (\cos \theta + \sin \theta \tan \bar{\omega}') + g U'' \csc \theta \tan \bar{\omega}']$$

$$K_{a2}^* = \frac{U' \csc \theta \tan \bar{\omega}'}{\cos(\theta - \delta) + \sin(\theta - \delta) \tan \bar{\omega}'} \quad (17)$$

2 讨论

2.1 不同方法计算结果比较

对图 1 所描述的 2 个问题, 文献[16]基于 2 种不同的动孔隙水压力计算方法, 依据库仑土压力理论的基本假定, 提出了动主动土压力的计算方法。本节与文献[16]的方法(下文称之为 Ebeling-Morrison 方法)进行比较研究。

Ebeling-Morrison 方法中, 动孔隙水压力的计算式为:

方法 1:

$$\Delta u = r_u \sigma'_v \quad (18)$$

式中: r_u 为超孔隙水压力比; σ'_v 为地震前土体中某点的竖向有效应力。

方法 2:

$$\Delta u = \frac{7}{8} k_h \gamma_w \sqrt{(H-z)H} \quad (19)$$

为了便于比较分析, 假定某挡墙的墙高为 $H = 5.0$ m, 墙后填土的有效内摩擦角 $\varphi' = 35^\circ$, 饱和重度 $\gamma_{\text{sat}} = 19.6$ kN/m³, 墙土界面摩擦角 $\delta = 17.5^\circ$ 。对图

1 所示的 2 个问题,不同计算方法得到的水平向总动主动土压力如表 1、2 所示。

表 1 问题 1 不同方法得的水平向总动主动土压力/(kN·m⁻¹)

| <i>i</i> | <i>k_h</i> | <i>k_v</i> | Ebeling-Morrison 方法 1 (<i>r_u</i> =0.1) | Ebeling-Morrison 方法 2 | 本文方法 ($\alpha=0.75, \beta=1.0, v=0.5, g=0.5$) |
|----------|----------------------|----------------------|---|-----------------------|--|
| 0.0 | 0.0 | 0.0 | 160.63 | 151.25 | 138.43 |
| 0.0 | 0.1 | 0.0 | 176.68 | 178.32 | 172.24 |
| 0.0 | 0.1 | 0.05 | 174.38 | 176.06 | 169.56 |
| 0.0 | 0.1 | 0.1 | 172.31 | 174.03 | 167.29 |
| 0.2 | 0.0 | 0.0 | 143.75 | 132.50 | 121.58 |
| 0.2 | 0.1 | 0.0 | 159.09 | 158.76 | 151.53 |
| 0.2 | 0.1 | 0.05 | 156.57 | 156.24 | 148.09 |
| 0.2 | 0.1 | 0.1 | 154.15 | 153.82 | 144.81 |
| 0.4 | 0.0 | 0.0 | 126.88 | 113.75 | 105.18 |
| 0.4 | 0.1 | 0.0 | 141.74 | 139.50 | 132.60 |
| 0.4 | 0.1 | 0.05 | 139.10 | 136.86 | 128.79 |
| 0.4 | 0.1 | 0.1 | 136.53 | 134.26 | 125.05 |

表 2 问题 2 不同方法得的水平向总动主动土压力/(kN·m⁻¹)

| <i>k_h</i> | <i>k_v</i> | Ebeling-Morrison 方法 1 (<i>r_u</i> =0.1) | Ebeling-Morrison 方法 2 | 本文方法 ($\alpha=0.75, \beta=1.0, v=0.5, g=0.5$) |
|----------------------|----------------------|---|-----------------------|--|
| 0.0 | 0.0 | 76.25 | 77.71 | 77.71 |
| 0.1 | 0.0 | 90.30 | 109.59 | 108.60 |
| 0.1 | 0.05 | 87.55 | 107.83 | 105.27 |
| 0.1 | 0.1 | 84.79 | 106.34 | 102.04 |

由表 1、2 可知,不同方法计算的水平向总动主动土压力的差别不是很大,特别是本文方法与 Ebeling-Morrison 方法 2 计算结果的差别很小,表明本文提出的动主动土压力的计算方法是合理的。尽管如此,但表中显示不同方法计算结果的差别有时达到不可忽略的程度,就其原因,有如下 2 点:

1)不同方法对地震力引起的超静孔隙水压力的计算方法不同。在本文方法中,假定超静孔隙水压力可同时由水平地震力和垂直地震力引起;而在 Ebeling-Morrison 方法中,假定超静孔隙水压力仅由水平地震力引起。

2)不同计算方法对动主动土压力的方向假定不同。本文方法中,对作用于墙背的土压力和水压力不进行区分,用一个综合的动主动土压力表示其大小,并假定该动主动土压力与墙背法线方向的夹角为墙土界面摩擦角;而在 Ebeling-Morrison 方法中,把作用于墙背的力分为有效动主动土压力、渗流引起的水压力和地震力引起的水压力三部分,并假定有效动主动土压力与墙背法线方向的夹角为墙土界面摩擦角,水压力垂直作用于墙背。

为了进一步分析不同计算方法的差异,图 3、4 分别给出了 2 个问题用不同计算方法得到的水平向动土压力沿墙高的分布图。由图可知,不同方法计算的水平向动主动土压力的差别是很有限的。

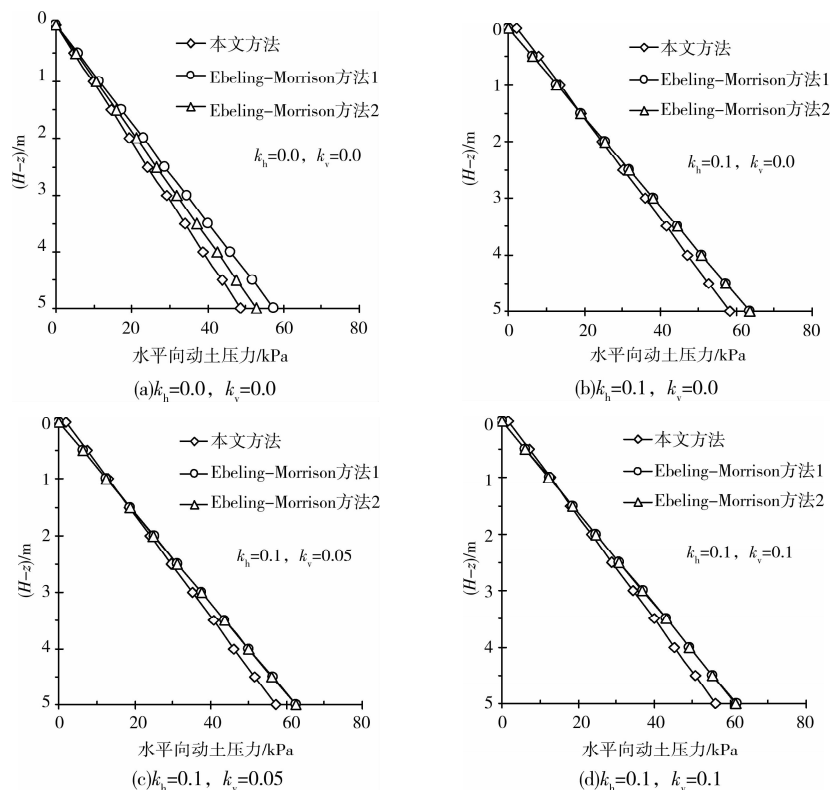


图 3 问题 1 ($i=0.2$) 的不同计算方法典型结果比较

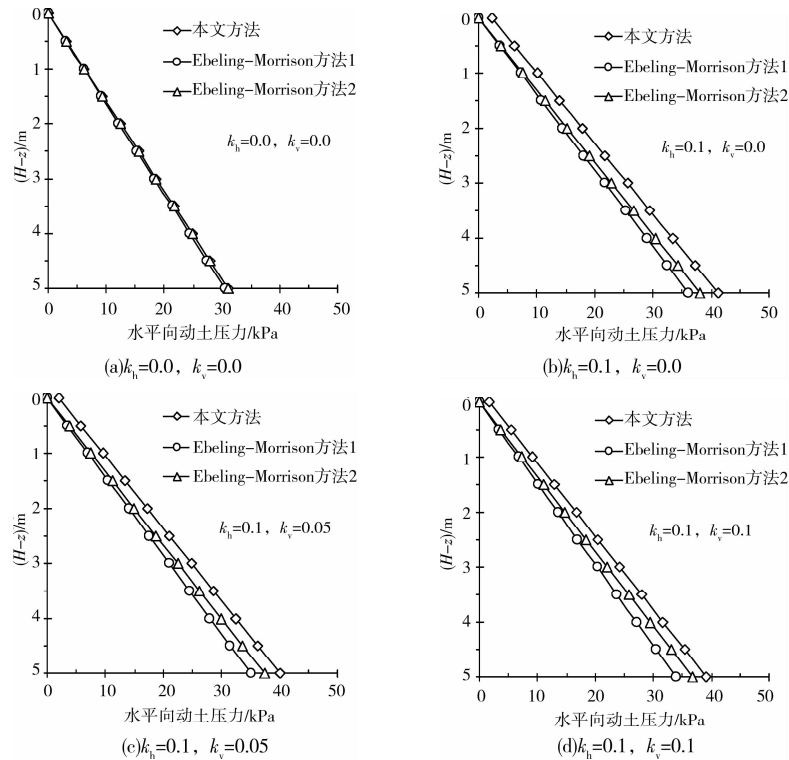


图 4 问题 2 的不同计算方法典型结果比较

2.2 动主动土压力影响因素分析

从动主动土压力的计算式可知,动主动土压力的大小因许多因素的变化而发生变化,如填土的饱和重度、有效内摩擦角、超静孔隙水压力系数、泊松比,墙土界面摩擦角,水平和垂直地震力系数等均影响动主动土压力的大小。由于篇幅的限制,文章仅就填土有效内摩擦角对动主动土压力的影响进行分析。

为便于分析,假定挡墙的墙高为 $H=5.0\text{ m}$,墙后填土的饱和重度 $\gamma_{\text{sat}}=19.6\text{ kN/m}^3$,墙土界面摩擦角 $\delta=\frac{\varphi'}{2}, \nu=0.5, \beta=1.0$ 及 $\alpha=0.75$ 。

图 5 给出的是 2 个问题在不同地震力作用下的动主动土压力大小随填土有效内摩擦角的变化。

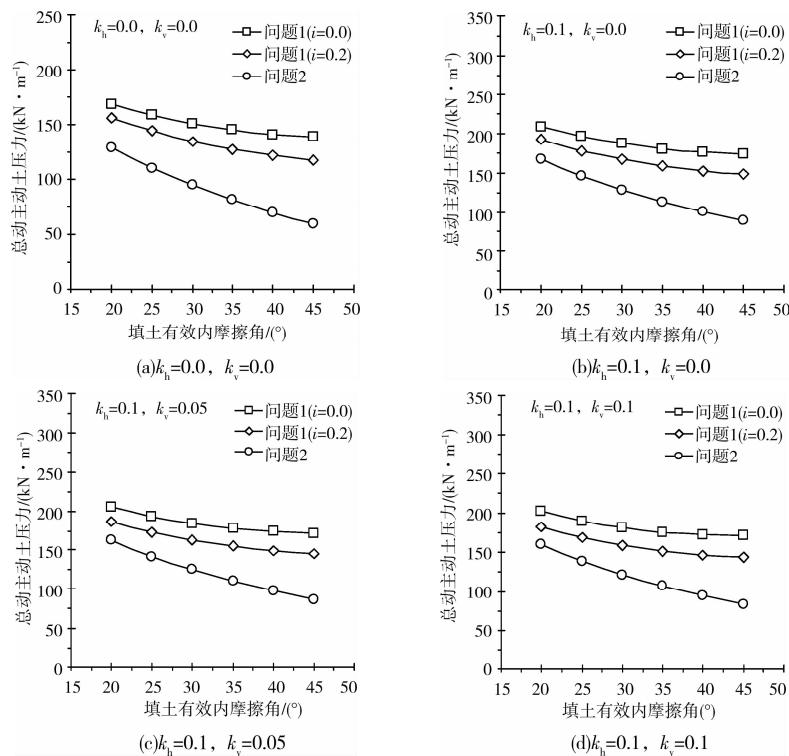


图 5 填土有效内摩擦角对动主动土压力的影响

由图可知,不同条件下,作用于挡土墙的总动主动土压力随填土有效内摩擦角的增大均呈非线性减小变化。相比之下,问题2的总主动土压力总是小于问题1的总主动土压力,且总主动土压力随有效内摩擦角增大的减小变化更显著。这就是说,在选择岸坡防护结构物是,选择透水性的结构物或者地下水排水系统设在墙背,对减小作用于岸坡防护结构物上的主动土压力是有益的。

3 结语

在地下水渗流和地震力共同作用条件下,如何计算作用于挡土结构物上的土压力的大小和分布是当前土力学中有关土压力课题的研究热点和难点问题。拟静力法在动土压力的计算理论中具有相当重要的地位,多数有关动土压力的研究是基于拟静力法建立的。当存在地下水渗流时,动土压力的计算难点是动孔隙水压力的计算。

文中建立的动主动土压力的计算方法中,对地下水渗流状态进行了稳定流的简化,并假定地下水位不随时间变化。这种处理可能会扩大动主动土压力,但从工程安全的角度而言,是允许的,况且,只有这样处理才使研究问题可能有解析解。

参考文献:

- [1] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理·方法·程序[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [2] SOUBRA A H. Static and seismic passive earth pressure coefficients on rigid retaining structures [J]. Canada Geotechnical Journal,2000,37:463-478.
- [3] 王俊杰,柴贺军. 车辆荷载下饱和路基挡墙主动土压力计算[J]. 岩土工程学报,2008,30(3):372-378.
WANG JUN-JIE, CHAI HE-JUN. Active earth pressure induced by saturated subgrade under vehicle load [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(3):372-378.
- [4] 卢廷浩. 土力学[M]. 2版. 南京:河海大学出版社,2005.
- [5] BARROS P L A. A coulomb-type solution for active earth thrust with seepage[J]. Géotechnique,2006,56(3):159-164.
- [6] BENMEBAREK N, BENMEBAREK S, KASTNER R, et al. Passive and active earth pressure in the presence of groundwater flow [J]. Géotechnique,2006,56(3):149-158.
- [7] 王俊杰,柴贺军. 饱和填土 Rankine 被动土压力计算[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2008,27(2):259-263.
- [8] WANG JUN-JIE, CHAI HE-JUN, LIN XIN, et al. Coulomb-type solutions for passive earth pressure with steady seepage[J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China,2008,2(1):56-66.
- [9] STEEDMAN R S, ZENG X. The influence of phase on the calculation of pseudo-static earth pressure on a retaining wall [J]. Géotechnique,1990,40(3):417-431.
- [10] SOUBRA A H. Static and seismic passive earth pressure coefficients on rigid retaining structures [J]. Can. Geotech. J.,2000,37:463-478.
- [11] ZENG X, STEEDMAN R S. On the behavior of quay wall in earthquakes[J]. Géotechnique,1993,43(3):417-431.
- [12] DAS B M, PURI V K. Static and dynamic active earth pressure[J]. Geotechnical and Geological Engineering,1996,14(4):353-366.
- [13] CHOUDHURY D, NIMBALKAR S. Seismic passive resistance by pseudo-dynamic method [J]. Géotechnique,2005,55(9):699-702.
- [14] RAO K S S, CHOUDHURY D. Seismic passive earth pressure in soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, ASCE,2005,131(1):131-135.
- [15] CHOUDHURY D, NIMBALKAR S. Pseudo-dynamic approach of seismic active earth pressure behind retaining wall [J]. Geotechnical and Geological Engineering,2006,24(5):1103-1113.
- [16] EBELING R M, MORRISON E E Jr. The seismic design of waterfront retaining structures[R]. US Army Technical Report ITL-92-11 and US Navy Technical Report NCEL TR-939,1992.
- [17] KRAMER S L. Geotechnical Earthquake Engineering [M]. Prentice Hall, New Jersey,1996.
- [18] WANG J J, ZHANG H P, CHAI H J, et al. Seismic passive resistance with vertical seepage and surcharge [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2008,28:728-737.
- [19] WANG J J, CHAI H J, ZHU J G, et al. Static and seismic passive resistance in saturated backfill [C]// Proceedings of the 12th International Symposium on Water-Rock Interaction,2007,2:1411-1415.

(编辑 王秀玲)