

加筋土挡墙的地震稳定性影响分析

阮晓波¹ 孙树林² 尚文涛¹ 程强强² 柏仇勇^{1,3}

(1.河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098;2.河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210098;
3.江苏省环境保护厅,江苏 南京 210036)

摘要 针对地震带区域饱和状态下加筋土挡墙稳定性问题,考虑了竖向向上和向下的地震力、孔隙水压力和土的黏聚力等影响因素,运用拟静力-水平条分法研究了以上影响因素对所需加筋拉力总和系数的影响。结果表明,竖向向下地震加速度系数绝对值和孔隙水压力比的大小对所需加筋拉力总和系数具有明显的影响,且变化趋势成正比;与之相反,土的黏聚力与所需加筋拉力总和系数的变化趋势成反比。

关键词 加筋土挡土墙 地震加速度系数 孔隙水压力比 黏聚力 拟静力-水平条分法

中图分类号 :TU476⁺.4 **文献标志码** :A **文章编号** :1006-7647(2012)S1-0008-03

加筋土挡墙是一种经济的挡土结构,其良好的抗震性能在近几年的多次大型地震中得到了较好的验证^[1],它是由法国人 Henri Vidal 在 1963 年发明的,并立即得到工程界的重视^[2]。为了使加筋土挡墙能够更好地防御地震破坏,并且使它的设计能够更加的经济可靠,在具体的工程当中,需要选择合适的抗震设计方法。目前,加筋土挡墙抗震设计通常采用拟静力-极限平衡分析法^[3]。

水平条分法是一种适合用于分析加筋土挡墙与边坡稳定性的极限平衡分析方法^[4],是由 Lo 等^[5]在 1992 年提出来的,通常分别结合拟静力分析方法^[2,6-7]和拟动力分析方法^[8-10]建立平衡方程。Shahgholi 等^[11]首次把这种方法用于分析加筋土挡墙的地震稳定性;之后,Nouri 等^[4,12]进一步发展和完善了此种方法。

当加筋土挡墙后填土中有地下水时,就要考虑孔隙水压力对挡墙稳定性的影响。Choudhury 等^[13]和 Ahmad 等^[14]分别用拟静力分析法和拟动力分析法对海滨挡墙进行了地震稳定性的研究。

本文在前人研究的基础上,运用拟静力-水平条分法推导了地震条件下所需筋材拉力总和的表达式,同时考虑了竖向向上和向下的地震力、孔隙水压力和土的黏聚力等影响因素,研究了它们对所需加

筋拉力总和系数的影响。

1 基本假设

用拟静力-水平条分法进行加筋土挡墙的地震稳定性分析时,作以下 4 点假设:

a. 筋材为可延展性材料,潜在破裂面与墙底水平面成 β (依 Rankine 法,即为 $\pi/4 + \varphi/2$,如图 1 所示),并且破裂面通过挡墙的墙趾 O。

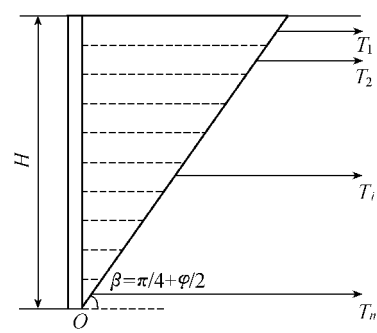


图 1 加筋土挡墙的简化破裂面及水平土条的划分

- b. 挡墙后填土在竖向受到向上和向下的地震力,并且规定向上的地震力为正。
- c. 不考虑填土的遇水膨胀和湿陷,并且地下水水面与挡墙后填土表面齐平。
- d. 挡墙后填土是均质的,根据加筋层把挡墙后填土分为 n 个水平土条,并使每个土条上都包含一

基金项目 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金(2005408911);留学回国人员科研基金(20071108);江苏省环境保护厅项目(201029)

个加筋层,每个土条上的法向条间力等于土条上部的超载,每个土条上的安全系数 F_S 均相等。

2 力的平衡方程

第 i 土条破裂面的法向反力 N_i 和切向反力 S_i 的关系为

$$S_i = \frac{N_i \tan \varphi + c l_i}{F_S} \quad (1)$$

式中: c 为土的黏聚力; φ 为土的内摩擦角; l_i 为第 i 土条的破裂面长度, $l_i = h_i / \sin \beta$; h_i 为第 i 土条的高度, $h_i = H/n$; H 为挡墙高度。

第 i 土条的受力如图 2 所示,土条在竖直方向上力的平衡方程为 $\sum F_y = 0$,即

$$S_i \sin \beta + N_i \cos \beta - W_i + Q_{vi} - V_i + V_{i+1} - (P_{stdi} + P_{dyni}) \cos \beta = 0 \quad (2)$$

式中: V_i, V_{i+1} 为第 i 土条上下两侧的法向条间力; Q_{vi} 为第 i 土条所受的竖向地震力, $Q_{vi} = k_v W_i$, k_v 为竖向地震加速度系数; W_i 为第 i 土条的重量; P_{stdi} 为第 i 土条所受的静水压力; P_{dyni} 为第 i 土条所受的动水压力。

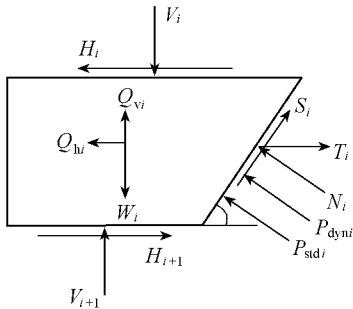


图 2 第 i 土条的受力示意图

挡墙后填土在水平方向上力的平衡方程为 $\sum F_x = 0$,即

$$\sum_{i=1}^n S_i \cos \beta - \sum_{i=1}^n N_i \sin \beta + \sum_{i=1}^n T_i - \sum_{i=1}^n Q_{hi} - \left(\sum_{i=1}^n P_{stdi} + \sum_{i=1}^n P_{dyni} \right) \sin \beta = 0 \quad (3)$$

式中: T_i 为第 i 土条所受的加筋拉力; Q_{hi} 为第 i 土条所受的水平地震力, $Q_{hi} = k_h W$, k_h 为水平地震加速度系数。

由式 (1)、式 (2) 和式 (3) 可以得到所需加筋拉力总和为

$$\sum_{i=1}^n T_i = \frac{\sin \beta - \cos \beta \tan \varphi / F_S}{\cos \beta + \sin \beta \tan \varphi / F_S} \cdot [(1 - k_v)W - (P_{std} + P_{dyn}) \cos \beta - cH / F_S] + k_h W + (P_{std} + P_{dyn}) \sin \beta - cH \cot \beta / F_S \quad (4)$$

其中

$$W = \rho_e g H^2 / 2 g \tan \beta$$

$$P_{std} = \rho_w g H^2 / 2 + (\rho_{sat} - \rho_w) g H^2 r_u / 2$$

$$P_{dyn} = 7 k_h \rho_w g H^2 / 12$$

$$\rho_e g = \rho_{sat} t \rho_w$$

式中: P_{std} 为总静水压力^[15]; P_{dyn} 为总动水压力^[16]; ρ_{sat} 为饱和土的密度; ρ_w 为水的密度; ρ_e 为土的等效密度; g 为重力加速度; r_u 为孔隙水压力比。

与挡墙设计方法中所使用的土压力系数相似,所需加筋拉力总和系数 K 被规定^[14]为

$$K = \frac{2 \sum_{i=1}^n T_i}{\rho_e g H^2} \quad (5)$$

3 影响因素分析

设挡墙高度 $H = 5.0 \text{ m}$,挡墙后填土饱和状态下的密度 $\rho_{sat} = 2.0 \text{ g/cm}^3$,水的密度 $\rho_w = 1.0 \text{ g/cm}^3$,安全系数 $F_S = 1.0$ 。

3.1 竖向与水平地震加速度系数的比值 k_v/k_h 对所需加筋拉力总和系数 K 的影响

当土的内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$,土的黏聚力 $c = 0 \text{ kPa}$,孔隙压力比 $r_u = 0.2$,并且水平地震加速度系数 k_h 在 $0.1 \sim 0.4$ 之间变化时,竖向与水平地震加速度系数的比值 k_v/k_h 在 $-1 \sim 1$ 之间变化。竖向与水平地震加速度系数的比值 k_v/k_h 对所需加筋拉力总和的系数 K 的影响如图 3 所示。随着 k_v/k_h 的增大, K 在减小;相反,随着 k_h 的增大, K 在增大。

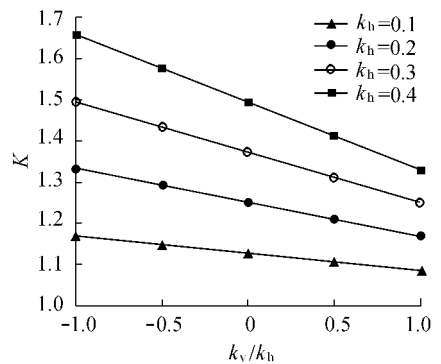


图 3 竖向与水平地震加速度系数的比值 k_v/k_h 对

所需加筋拉力总和系数 K 的影响

3.2 土的黏聚力 c 和孔隙水压力比 r_u 对所需加筋拉力总和系数 K 的影响

当水平地震加速度系数 $k_h = 0.3$,竖向地震加速度系数 $k_v = -0.15$,土的内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$,并且土的黏聚力 c 在 $0 \sim 20 \text{ kPa}$ 之间变化时,孔隙压力比 r_u 在 $0 \sim 0.6$ 之间变化。土的黏聚力 c 和孔隙水压力比 r_u 对所需加筋拉力的总和系数 K 的影响如图 4 所示。随着 r_u 的增大, K 也在增大; c 的变化趋势与之刚好相反,即随着 c 的增大, K 在减小。

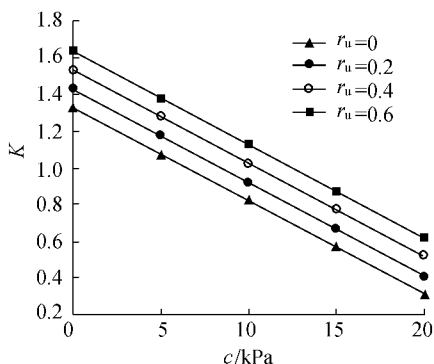


图4 土的黏聚力 c 和孔隙水压力比 r_u 对所需加筋拉力的总和系数 K 的影响

4 结 论

a. 随着竖向向下地震加速度系数绝对值的增大,所需加筋拉力总和系数增大;相反,随着竖向向上地震加速度系数的增大,所需加筋拉力总和系数减小。因此,在加筋土挡墙抗震设计中,应优先考虑竖向向下地震力的影响,从而使设计更加安全可靠。

b. 随着孔隙水压力比的增大,所需加筋拉力总和系数增大,在进行加筋土挡墙的设计时,如果简单地忽略孔隙水压力比的影响,会造成不安全的设计。

c. 随着土的黏聚力的增加,所需加筋拉力总和系数显著减小。因此,在进行加筋土挡墙设计时,考虑土的黏聚力可以达到比较经济的设计效果,从而避免不必要的浪费。

参考文献:

- [1] 黄雨,郑虎,孙启登.加筋土挡墙的抗震性能研究现状[J].工程抗震与加固改造,2010,32(5):107-111.
- [2] 顾慰慈.挡土墙土压力计算[M].北京:中国建材工业出版社,2001:340.
- [3] 蒋建清,杨果林.加筋土挡墙地震稳定性分析的水平条分方法[J].中国铁道科学,2009,30(1):36-40.
- [4] NOURI A,FAKHER A,JONES C J F P. Evaluating the effects of the magnitude and amplification of pseudo-static acceleration on reinforced soil slopes and walls using the limit equilibrium Horizontal Slices Method[J]. Geotextiles and Geomembranes,2008,26(3):263-278.
- [5] LO S C R,XU D W. A strain based design method for the collapse limit state of reinforced soil walls and slopes[J]. Canadian Geotechnical Journal,1992,29(8):832-842.
- [6] JIANG Jian-qing,YANG Guo-lin. A new slice method for seismic stability analysis of reinforced retaining walls[C]//Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. New York:IEEE,2009:164-167.
- [7] AHMADABADI M,GHANBARI A. New procedure for active earth pressure calculation in retaining walls with reinforced cohesive-frictional backfill[J]. Geotextiles and Geomembranes,

2009,27(6):456-463.

- [8] NIMBALKAR S S,CHOUDHURY D,MANDAL J N. Seismic stability of reinforced-soil wall by pseudo-dynamic method[J]. Geosynthetics International,2006,13(3):111-119.
- [9] SHEKARIAN S,GHANBARI A,FARHADI A. New seismic parameters in the analysis of retaining walls with reinforced backfill[J]. Geotextiles and Geomembranes,2008,26(4):350-356.
- [10] SHEKARIAN S,GHANBARI A. A pseudo-dynamic method to analyze retaining wall with reinforced and unreinforced backfill[J]. Journal of Seismology and Earthquake Engineering,2008,10(1):41-47.
- [11] SHAHGHOLI M,FAKHER A,JONES C J F P. Horizontal slice method of analysis[J]. Geotechnique,2001,51(10):881-885.
- [12] NOURI H,FAKHER A,JONES C J F P. Development of horizontal slice method for seismic stability analysis of reinforced slopes and walls[J]. Geotextiles and Geomembranes,2006,24(3):175-187.
- [13] CHOUDHURY D,AHMAD S M. Stability of waterfront retaining wall subjected to pseudo-static earthquake forces[J]. Ocean Engineering,2007,37:1947-1954.
- [14] AHMAD S M,CHOUDHURY D. Pseudo-dynamic approach of seismic design for waterfront reinforced soil-wall[J]. Geotextiles and Geomembranes,2008,26(4):291-301.
- [15] EBELING R M,MORRISON J. The seismic design of waterfront retaining structures[R]. Washington, D. C.: US Army Technical Report ITL-92-11,1992.
- [16] WESTERGAARD H M. Water pressures on dams during earthquakes[J]. Transactions,1933,98:418-433.

(收稿日期:2011-10-10 编辑:熊水斌)

