

童艳光, 蔡增姣, 刘文召, 等. 地震作用下加筋土挡墙整体稳定性分析[J]. 华南地震, 2022, 42(2): 124–130. [TONG Yanguang, CAI Zengjiao, LIU Wenzhao, et al. Global Stability Analysis of Reinforced Soil Retaining Wall Under Earthquake [J]. South China journal of seismology, 2022, 42(2): 124–130]

地震作用下加筋土挡墙整体稳定性分析

童艳光¹, 蔡增姣¹, 刘文召², 张亿凯²

(1. 广州环保投资集团有限公司, 广州 510055; 2. 中国建筑一局(集团)有限公司, 北京 100161)

摘要: 为研究软土地基上加筋土挡墙在地震作用下的稳定性, 通过有限差分软件建立了高度为 10 m 的加筋土挡墙数值模型, 并对其施加坡顶超载和地震荷载, 分析了回填土黏聚力(0 kPa、5 kPa、10 kPa、15 kPa、20 kPa)、内摩擦角(25°、30°、35°、40°)、底部筋材长度(6 m、8 m、10 m、11 m、12 m、14 m)以及筋材位置对加筋土挡墙地震稳定性的影响。结果表明: 加筋土挡墙的地震整体稳定性系数随墙后回填土的内摩擦角及黏聚力的增大近似线性增长; 地震整体稳定性系数随着筋材布置间距的增大而减小, 筋材应布置在边坡位移最大点位附近; 地震整体稳定性系数随底部筋材长度的增加先升高后趋于稳定。

关键词: 软土地基; 加筋土挡墙; 地震稳定性; 强度折减法; 拟静力法

中图分类号: TU476.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2022)02-0124-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.02.17

Global Stability Analysis of Reinforced Soil Retaining Wall Under Earthquake

TONG Yanguang¹, CAI Zengjiao¹, LIU Wenzhao², ZHANG Yikai²

(1. Guangzhou Environmental Protection Investment Group Co., Ltd., Guangzhou 510055, China; 2. China Construction First Group Co., Ltd., Beijing 100161, China)

Abstract: In order to study the stability of reinforced soil retaining wall on soft soil foundation under earthquake, a numerical model of reinforced soil retaining wall with a height of 10 m was established by finite difference software, and the slope top overload and seismic load were applied to it. The influence of backfill cohesive force (0 kPa, 5 kPa, 10 kPa, 15 kPa, 20 kPa), internal friction angle (25°, 30°, 35°, 40°), length of bottom reinforcement (6 m, 8 m, 10 m, 11 m, 12 m, 14 m) and position of reinforcement on seismic stability of reinforced soil retaining wall was analyzed. The results show that the overall seismic stability coefficient of reinforced soil retaining wall increases approximately linearly with the increase of internal friction angle and cohesion of backfill soil behind the wall; the overall seismic stability coefficient decreases with the increase of

收稿日期: 2022-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678352)

作者简介: 童艳光(1968–), 男, 高级工程师, 主要从事岩土勘察设计、监测检测及地质灾害评估治理、岩土工程治理等研究工作。

E-mail: tygzn@163.com

reinforcement spacing, and the reinforcement should be placed near the maximum displacement point of the slope; with the increase of the length of the bottom reinforcement, the overall seismic stability coefficient firstly increases and then tends to be stable.

Keywords: Soft soil foundation; Reinforced soil retaining wall; Seismic stability; Strength reduction; Pseudo-static method

0 引言

中国是一个多山国家,部分地区属于地震频发区域。边坡在地震、降水、坡角变化等因素作用下,其内部会产生裂隙,当裂隙发展到一定的程度,边坡将沿不稳定结构面产生滑移。若边坡内某一滑面的滑动力超过土体抗滑能力,就会产生边坡失稳。在这样的地理环境下,边坡稳定性分析在边坡工程中显得十分重要。而挡土墙广泛应用于边坡工程中,是一种常见的支挡结构。挡土墙支护边坡的地震动力稳定性,是其抗震设计中的一个重要问题。为提高挡土墙支护边坡在地震作用下的稳定性,可对墙体施加水平柔性拉筋,从而形成水平柔性拉筋式挡墙结构^[1]。汶川地震挡墙震害调查结果表明^[2],在强地震作用下,墙-坡整体稳定性问题尤其值得重视。由此,分析加筋土挡墙这一边坡支护结构与其支挡边坡的整体地震稳定性,具有重要实际意义。

Xu 和 Hatami^[3]考虑了竖向地震、筋材特性和回填土软化特性,提出了一种分析加筋土挡墙地震屈服加速度和侧向位移的方法。Shukla^[4]考虑了回填土抗剪强度参数、裂缝等对挡墙地震稳定性的影响,推出了地震作用下挡土墙总主动土压力解析解。聂秀鹏等^[5]运用拟静力分析方法,推提出了一定边坡高度条件下的三维加筋边坡临界加筋强度计算公式。因拟静力法与实际地震波传播情况有较大差异,ALHAJJ CHEHADE 等^[6]用拟动力法考虑地震荷载,分析了非饱和加筋土挡墙内部抗震稳定性。卢谅等^[8]以 Mindlin 位移理论和拟动力法为基础,提出了适用于大多数加筋土挡墙地震动力分析的计算理论。汪益敏等^[9]利用数值软件,研究了地震持续时间、地震波和地震峰值加速度对加筋土挡墙地震稳定性的影响。肖世国等^[10]运用拟静力法与分区水平条分^[11]及斜条分^[13]极限平衡法,基于 Fellenius 法与简化 Bishop 法的条间力假定,推导了墙-坡地震整体稳定系数计算公式。

目前对于加筋土挡墙这种新结构支挡边坡在

地震作用下的墙-坡整体稳定性问题研究鲜见报道。本文采用三维有限差分软件对一软土地基加筋土挡墙建立三维数值模型,分析其在坡顶条形均布荷载作用以及地震作用下的地震整体稳定性,并探讨墙后回填土抗剪强度参数、筋材长度和筋材位置对挡墙地震稳定性的影响。

1 工程概况

广州某铁路工程一高为 10 m 的土工格栅加筋式路肩墙,墙顶、底宽度分别为 2 m、4 m,墙后填土中距填土顶面深 1 m 处的顶层筋材长度为 13 m,向下各层竖向间距为 2 m,各层长度依次减少 1 m,共设置 5 层水平向铺设的筋材。水平填土顶面距墙体 4 m 处作用有大小为 15 kPa、分布宽度为 6 m 的条形均布荷载。工程示意图如图 1 所示。

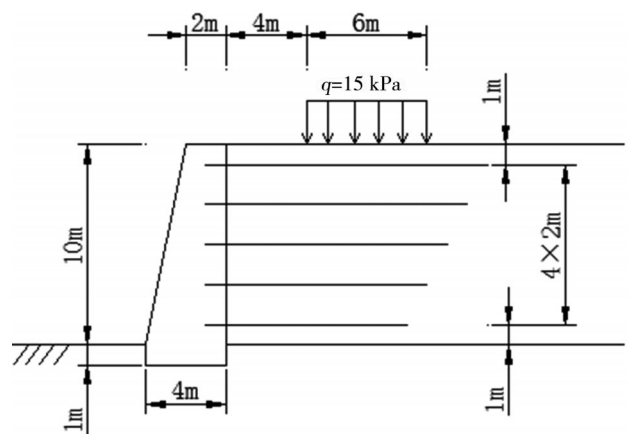


图 1 工程示意图

Fig.1 Project diagram

2 数值模型

2.1 模型建立

在有限差分软件中建立模型,数值模型厚度为 1m,横截面尺寸如图 2 所示。网格划分长度 1m。左右两侧边界采用水平位移约束,下底面受到水平与垂直方向的约束。土体采用摩尔库伦模型、摩尔库伦屈服准则和非关联流动法则。地基土有 4

层，为软粘土。上部为挡墙、回填土以及筋材。数值模拟中采用拟静力法施加地震惯性力，通过反复试算法，使地震惯性力得以施加于潜在滑体的重心(或接近重心)。筋材位置参筋材位置布置示意图，如图3所示，图中带有数字*i*(*i*=1, 2, 3, 4, 5)的筋材对应筋材布置*i*情况下的筋材布置。

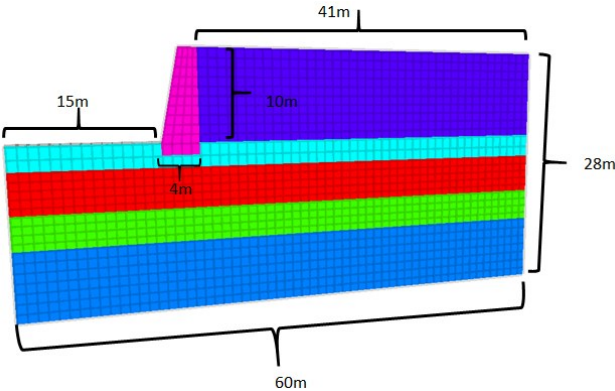


图2 数值模型
Fig.2 Numerical model

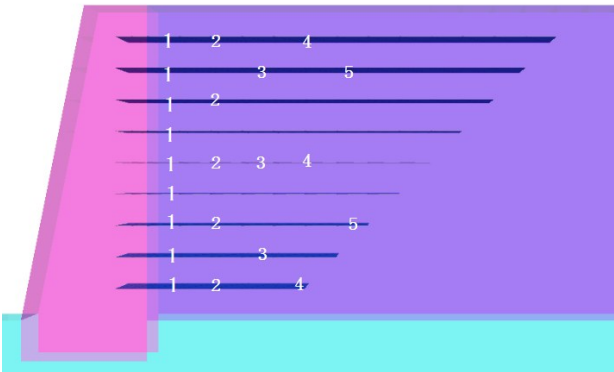


图3 筋材位置布置示意图
Fig.3 Schematic diagram of reinforcement arrangement

2.2 计算参数与工况

填土、地基土、挡墙如表1所示。接触面参数如表2所示。筋材的物理力学参数如表3所示。计算参数参考工程资料与相关文献选取、换算、调整而得。杨氏模量由压缩模量的五倍换算得到。接触面的法向和剪切刚度根据经验公式(1)，取周围最硬区域等效刚度的10倍。

表1 物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters

| | 厚度/m | 黏聚力 <i>C</i> /(kPa) | 内摩擦角 ψ /($^{\circ}$) | 重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$) | 泊松比 μ | 杨氏模量 <i>E</i> /(MPa) | 剪切模量 <i>G</i> /(Pa) | 体积模量 <i>K</i> /(Pa) |
|----------|------|------------------------|--------------------------------|---|-----------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| 2 黏土 | 2.6 | 7 | 27.9 | 18.4 | 0.25 | 3.18 | 1.272×10^6 | 2.120×10^6 |
| 3-1 粉质黏土 | 4.4 | 7 | 28 | 17.9 | 0.25 | 2.12 | 8.830×10^5 | 1.180×10^6 |
| 3-2 黏土 | 3.6 | 6 | 24.9 | 17.5 | 0.25 | 2.47 | 9.880×10^5 | 1.650×10^6 |
| 4-1 粉质黏土 | 7.4 | 17 | 29.8 | 19.5 | 0.2 | 8.37 | 3.490×10^6 | 4.650×10^6 |
| 墙后填土 | 10 | 5-20 | 25-40 | 18 | 0.35 | 50.00 | 1.850×10^7 | 5.560×10^7 |
| 挡土墙 | 10 | 700 | 59.5 | 25 | 0.2 | 30 000.00 | 1.250×10^{10} | 1.670×10^{10} |

表2 接触面参数
Table 2 Contact surface parameters

| | 法向刚度 K_n /(Pa) | 切向刚度 K_t /(Pa) | 黏聚力 <i>C</i> /(kPa) | 内摩擦角/ $^{\circ}$ |
|---------|-------------------|-------------------|---------------------|------------------|
| 挡墙与地基界面 | 1.000×10^9 | 1.000×10^9 | 45.7 | 57 |
| 填土与地基界面 | 1.000×10^8 | 1.000×10^8 | 46 | 48 |
| 挡墙与填土界面 | 1.000×10^8 | 1.000×10^8 | 21 | 48 |

表3 筋材物理力学参数
Table 3 Physical and mechanical parameters of reinforcement

| | 杨氏模量/ (MPa) | 泊松比 | 厚度 /m | 耦合弹簧黏聚力 /(kPa) | 耦合弹簧摩擦角 / $^{\circ}$ | 耦合弹簧刚度 /($\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$) | 密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) |
|----|---------------------|-----|----------|-------------------|-------------------------|---|--------------------------------------|
| 筋材 | 9.00×10^{10} | 0.3 | 0.01 | 3.00×10^7 | 29 | 5.20×10^{10} | 2000 |

$$K_n=K_s=10\max\left[\frac{K+\frac{4}{3}G}{\Delta z_{\min}}\right] \tag{1}$$

式(1)中, Δz_{\min} 为接触面法向方向上连接区域上的最小单元尺寸。

本文研究影响加筋土挡墙地震整体稳定性的因素包括:墙后填土的黏聚力及内摩擦角,筋材布置位置,底部筋材长度。具体工况设计参见表4。

表4 影响因素分析工况设计
Table 4 Influence factor analysis in working condition design

| 填土黏聚力/ (kPa) | 填土内摩擦 角/(°) | 筋材间距/ m | 底部筋材长度/ m |
|-----------------|----------------|------------|---------------------|
| 0,5,10,15,20 | 30 | 2 | 10 |
| 15 | 25,30,35,40 | 2 | 10 |
| 15 | 30 | 1,2,3,4,5 | 10 |
| 15 | 30 | 2 | 6,8,10,11, 12,14 |

2.3 荷载情况

在采用拟静力—有限元强度折减法对边坡地震作用下的稳定性进行计算分析时,地震作用采用拟静力法施加地震惯性力,通过反复试算法,使地震惯性力得以施加于潜在滑体的重心(或接近重心)。铁路抗震设计规范^[15]中给出了边坡水平地震作用力计算公式为:

$$F_{ix} = \eta_x \cdot A_{gx} \cdot m_i \tag{2}$$

一般设计规范中很少考虑水平地震力的作用,但在学术研究中仍应适当考虑竖向地震力的影响。类似于水平地震作用力计算,其公式为:

$$F_{iy} = \eta_y \cdot A_{gy} \cdot m_i \tag{3}$$

式(3)中, A_g 为地震动峰值加速度; m_i 为第*i*条土块体质量; η 为地震作用系数。

结构承受的荷载包括自重、墙顶条形均布荷载、地震惯性力。墙顶均布荷载为水平填土顶面距墙体4 m处,分布宽度为6 m,大小为15 kPa的条形均布荷载。地震荷载根据拟静力法换算为地震惯性力,作用于潜在滑体的重心(或接近重心)。本工程中挡墙高度为10 m,据此条件,采用李承亮^[16]提出的经验公式(4)算出水平地震作用系数、竖向地震作用系数分别为0.5382、1.033 77。选取

水平、竖向地震动峰值加速度为10 m/s²、1 m/s²。再根据式(2)、(3)算取水平地震惯性力245.24 kN,竖向地震惯性力47.10 kN。

$$\eta_x=0.68\exp\left(-2\frac{2H}{78}\right)+0.012$$
$$\eta_y=0.11+\frac{0.98}{1+\exp\left(\frac{\frac{H}{78}-0.8}{0.24}\right)} \tag{4}$$

3 计算结果比较

为验证数值模型的可靠性,采用数值模拟法、Fellenius法、简化Bishop法分别对不同回填土黏聚力下工况进行地震整体稳定性系数的计算,计算结果可见表5。简化Bishop法的计算结果比Fellenius法高出约6%。数值模拟结果与简化Bishop法相近,略大于Fellenius法的结果。从整体上看,两种理论分析方法与数值模拟结果较为接近,可见本文建立的数值模型具有一定的可靠性,可作为基本数值模型进一步研究探讨。

表5 地震整体稳定性系数计算结果
Table 5 The calculation results of seismic overall stability coefficient

| Fellenius法 | 简化Bishop法 | 数值模拟法 |
|------------|-----------|-------|
| 1.174 | 1.241 | 1.22 |
| 1.308 | 1.389 | 1.39 |
| 1.433 | 1.515 | 1.51 |
| 1.548 | 1.638 | 1.64 |
| 1.644 | 1.751 | 1.74 |

4 边坡地震整体稳定性探讨

4.1 回填土抗剪强度参数

图4-5为不同填土内摩擦角和黏聚力条件下挡墙的地震整体稳定性系数。随填土内摩擦角在25°~40°变化,稳定系数从1.38增长至2.29;随填土黏聚力在0~20 kPa变化,稳定系数从1.22增长至1.74。整体来看,稳定性系数随填土强度参数的增大近似线性增长。

4.2 筋材布置

图6为不同间距筋材布置形式下加筋土挡墙的地震整体稳定性系数。从筋材布置在布置1~4间变化的曲线图可以看出,随筋材布置间距的增大,加筋效果降低,稳定性系数呈现非线性降低。筋

材布置为4时,稳定系数为1.1,而无加筋挡墙模拟得到的稳定系数为1.09,可见该筋材布置方式对于挡墙稳定性几乎没有起到有效的作用。而当筋材布置为5时,稳定性系数突然增加,且稳定系数与间距为筋材布置为2时差不多。

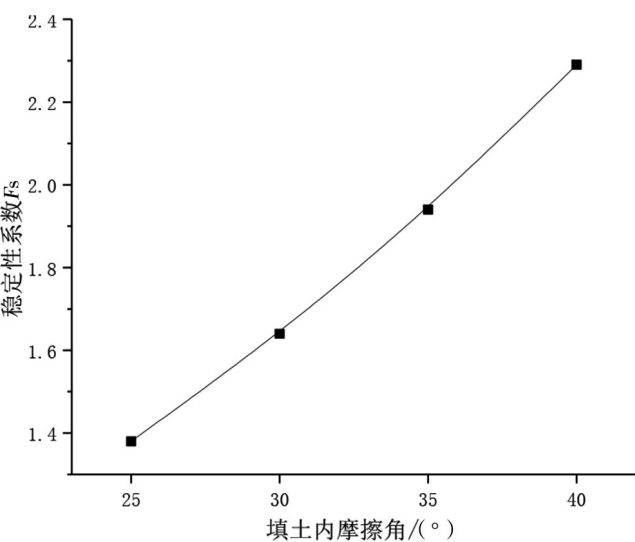


图4 回填土内摩擦角对稳定系数的影响
Fig.4 Influence of internal friction angle of backfill on stability coefficient

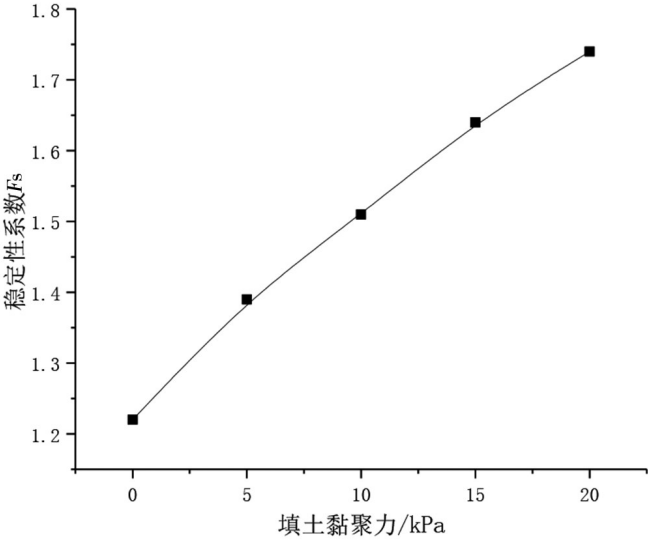


图5 回填土黏聚力对稳定系数的影响
Fig.5 Influence of backfill cohesion on stability coefficient

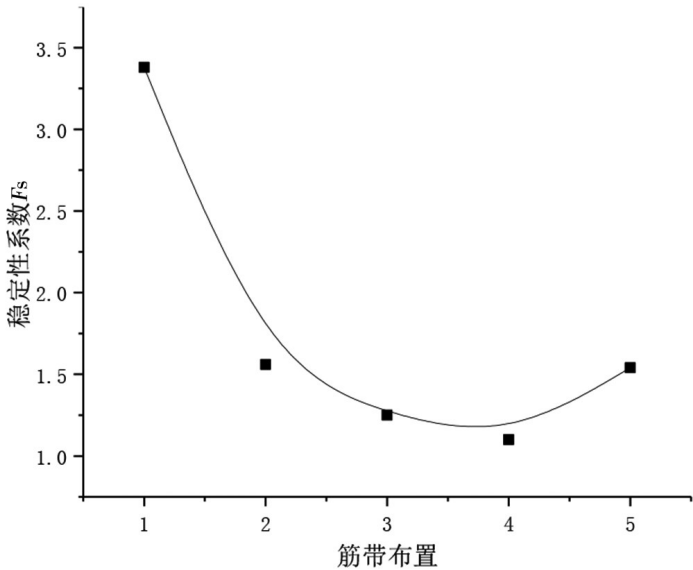


图6 筋材布置对稳定系数的影响
Fig.6 Influence of the arrangement of reinforcement on the stability coefficient

图7~8为筋材布置为4和5时的边坡位移云图。进一步分析,可以看出筋材布置为5时,虽然只有两层筋材,但下层筋材位置处于位移最大的点位附近。而筋材布置为4时,尽管筋材层数有3层,其布置位置却刚好跨越了位移最大的区域,因此对于限制边坡滑移几乎没有起到有效的作用。这进一步解释了筋材布置为4时边坡稳定性系数较低,当筋材布置为5时稳定性系数又突然增加这一现象的原因。此外,筋带布置为5时,筋带的布置以及长度对于滑动面有很好的的限制作用,这一点可以从筋带布置为1和2时的稳定系数较高这一点看出,因为这两种布置包含了筋带布置为5时的

筋带。而另外两种间距布置,即筋带布置为3、4的情况,虽然筋带间距较小,筋带层数多,但其布置的位置和长度不合适,没有起到有效限制坡体滑移的作用。

4.3 底部筋材长度

挡墙地震整体稳定系数底部筋材长度的变化关系图9为所示。由图中可以看出,随着底部筋材长度增加,整体稳定系数呈非线性增加,但达到一定值(本例为11 m)后,稳定系数则基本保持不变,这说明筋材长度过长会出现加筋效果不显著,但过短则会导致无效加筋现象。

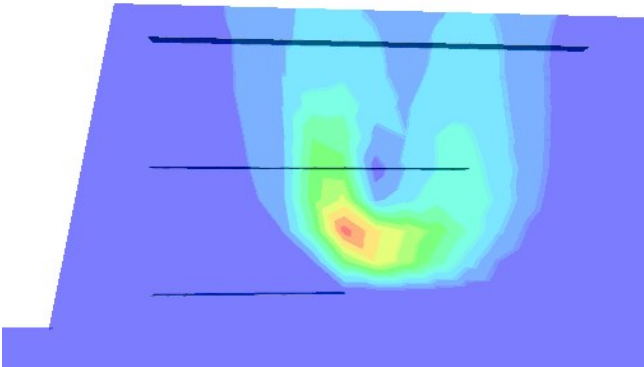


图7 筋材布置4时的边坡位移云图
Fig.7 The slope displacement cloud map when the reinforcement arrangement is type 4

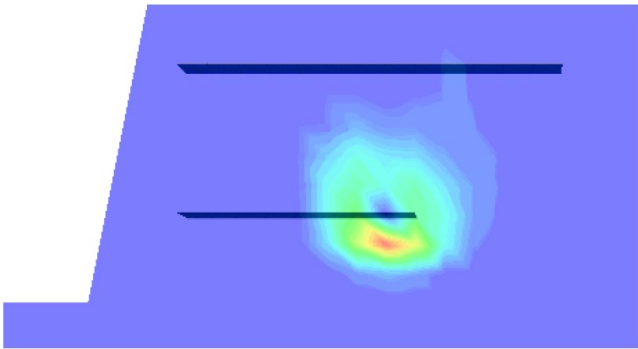


图8 筋材布置5时的边坡位移云图
Fig.8 The slope displacement cloud map when the reinforcement arrangement is type 5

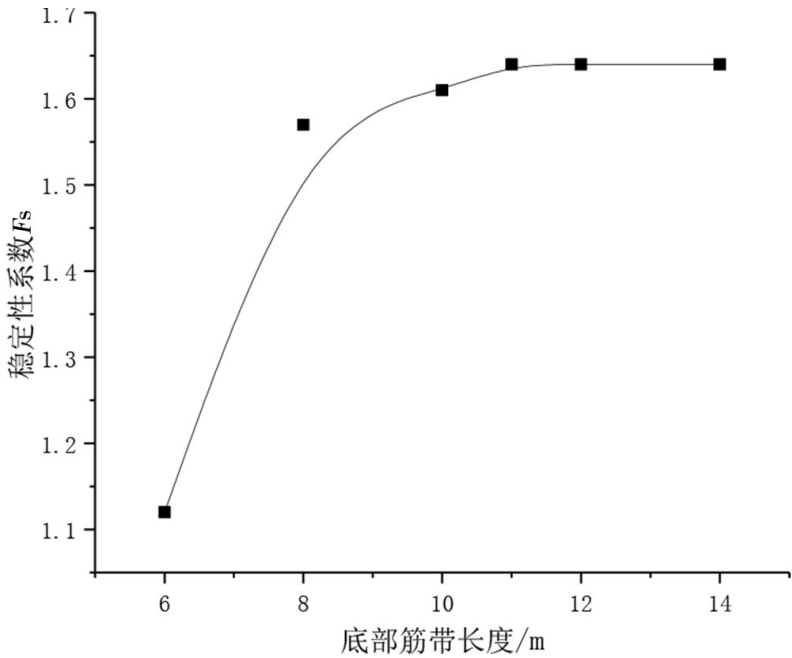


图9 底部筋材长度对稳定系数的影响
Fig.9 Influence of bottom reinforcement length on the stability coefficient

5 结论

本文通过建立三维数值模型,研究了加筋土挡墙的地震整体稳定性与墙后回填土的黏聚力及内摩擦角、筋材位置以及底部筋材长度之间的关联,研究结论如下:

(1)加筋土挡墙的地震整体稳定性系数随填土内摩擦角和黏聚力的增大近似线性增长;

(2)筋材布置间距增大,挡墙地震稳定性降低;筋材布置位置处于边坡位移最大点位附近时,能有效限制边坡滑移,提高地震整体稳定性;

(3)加筋土挡墙的地震整体稳定性系数随底部筋材长度的增加先升高后趋于稳定。

参考文献

- [1] 于昕左,肖世国.水平柔性拉筋式重力墙地震土压力拟静力分析方法[J].土木工程学报,2019,52(S2):180-185.
- [2] 肖世国,张建经,马耀先.汶川地震区路堑重力挡墙震害调查[J].地下空间与工程学报,2011,7(1):174-178.
- [3] XU P, HATAMI K. Sliding stability and lateral displacement analysis of reinforced soil retaining walls[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, 47(4): 483-492.
- [4] SHUKLA S K. Seismic active earth pressure from the sloping $c-\phi$ soil backfills[J]. Indian Geotechnical Journal, 2013, 43(3): 274-279.
- [5] 聂秀鹏,逢焕平,孙志彬,等.三维加筋边坡地震稳定性上限分析[J].岩土力学,2019,40(09):3483-3492.
- [6] ALHAJJ CHEHADE H, DIAS D, SADEK, M, et al. Upper bound seismic limit analysis of geosynthetic-reinforced unsaturated soil walls[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 48(4): 419-430.
- [7] ALHAJJ CHEHADE H, DIAS D, SADEK, M, et al. Seismic analysis of geosynthetic-reinforced retaining wall in cohesive soils[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, 47(3): 315-326.
- [8] 卢谅,何林耀,王宗建,等.地震作用下加筋土挡墙水平位移分区计算理论[J].岩土力学,2021,42(02):401-410.
- [9] 汪益敏,张晖,黎寰,等.考虑地震时程的加筋土挡土墙动力分析[J].振动与冲击,2013,32(24):187-197.
- [10] 肖世国,刘航,于昕左.水平柔性拉筋式重力墙-坡体地震整体稳定性分析方法[J].岩土力学,2020(06):1-9.
- [11] 马学宁,吴培元,王旭.加筋土边坡稳定性分析水平条分简化计算方法[J].铁道学报,2017(9):160-165.
- [12] 贾亮,郭健,姚凯.基于水平条分法的加筋土边坡地震稳定性分析[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(01):168-176.
- [13] 孙平,陈玺,王玉杰.边坡稳定极限分析斜条分上限法的全局优化方法[J].水利学报,2018,49(06):741-748+756.
- [14] 陈昌富,李瑞芳.基于Spencer法边坡地震永久位移计算斜条分法[J].公路工程,2017,42(03):1-5+25.
- [15] 中华人民共和国铁道部.TB 10025-2006:铁路路基支挡结构设计规范[S].北京:中国铁道出版社,2009.
- [16] 李承亮,冯春,刘晓宇.拟静力方法适用范围及地震力计算[J].济南大学学报(自然科学版),2011,25(04):431-436.