

高昂,张孟喜.直立式加筋土挡墙基于极限分析的抗震性能研究[J].地震工程学报,2019,41(2):313-318.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.313

GAO Ang,ZHANG Mengxi.Seismic Performance of Vertically Reinforced Earth-Retaining Walls Based on Limit Analysis[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(2):313-318.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.313

直立式加筋土挡墙基于极限分析的抗震性能研究

高 昂¹, 张孟喜²

(1. 浙江工业职业技术学院建筑工程学院,浙江 绍兴 312000; 2. 上海大学土木工程系,上海 200072)

摘要:研究直立式加筋土挡墙抗震性能时,采用的 NCMA 方法未全面运算其墙外功率,抗震性能分析结果存在较高偏差。采用极限分析的方法对直立式加筋土挡墙破坏模式展开极限分析,得到该挡墙运动极限表达式。根据运动极限表达式,对一实例墙体计算出此挡墙外功率(包括土重所做的外功率和地震作用所做的外功率),分析其抗震性能。实验结果表明,计算得到直立式加筋土挡墙各层筋材最大外功率分别为 18.5 kN·m 和 20 kN·m,与实际最大外功率 18 kN·m 差距不大,说明该方法的抗震性能分析与实际情况相符,具有应用性。

关键词:直立式; 加筋土挡墙; 抗震性能; 二楔块法; 极限分析; 外功率

中图分类号: U417 文献标志码:A 文章编号: 1000-0844(2019)02-0313-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.313

Seismic Performance of Vertically Reinforced Earth-Retaining Walls Based on Limit Analysis

GAO Ang¹, ZHANG Mengxi²

(1. School of Architecture and Engineering, Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312000, Zhejiang, China;

2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: When using the National Concrete Masonry Association method of studying the seismic performance of vertically reinforced earth-retaining walls, the external power of the wall could not be comprehensively calculated, and there was a high deviation in the results of the seismic performance analysis. Therefore, the limit analysis method was used in this paper to analyze the failure mode of a vertically reinforced earth-retaining wall, and an expression of the movement limit of the retaining wall was obtained. According to the expression, the external power of the retaining wall (including the external power of the soil weight and the external power of earthquake action) was calculated, and its seismic performance analyzed. The experimental results showed that the maximum external power of each layer of the vertically reinforced earth-retaining wall was 18.5 kN·m and 20 kN·m, respectively, which did not vary significantly from the actual maximum external power (18 kN·m). The study indicates that seismic performance analysis with this method is consistent with actual conditions and can be applied to actual projects.

Keywords: vertical type; reinforced earth retaining wall; seismic performance; two-wedge meth-

收稿日期:2018-08-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41372280)

第一作者简介:高 昂(1982—),男,河南周口人,博士,讲师,主要从事新型土工加筋技术及岩土工程研究工作。E-mail:gaoangv@126.com。

od; limit analysis; external power

0 引言

加筋土技术是由法国工程师亨利维达尔发明的,其凭借良好性能,受到建筑界的青睐,具有较高的应用价值^[1]。直立式加筋土挡墙成本低、施工方便,在实际建筑中得到广泛应用。我国地震现象较为频繁,地震区域分散,需高度重视直立式加筋土挡墙的抗震性能。

直立式加筋土挡墙的抗震性能,在近些年的地震学术研究中得到了较好的发展,挡墙对柔地基的适应性和承受变形能力都好于刚性混凝土结构^[2]。由于直立式加筋土挡墙与土体形成了非线性动力体系,同时影响抗震性能的因素较多,这令分析直立式加筋土挡墙的抗震性变得复杂^[3]。相关研究中对这一问题的剖析还不充分,例如文献[4]研究地震作用下双级加筋土挡墙的动力响应过程中未计算挡墙外功率。文献[5]分析加筋土挡墙地震稳定性时频时,未构建动力稳定性模型。以上分析都有考虑不全面之处,为了更精准分析直立式加筋土挡墙这种复杂建筑结构的动力特性和抗震性能,在此展开新的分析研究,研究方法是采用的 NCMA 方法未全面运算其墙外功率,抗震性能分析结果存在较高偏差,同时采用极限分析的方法对直立式加筋土挡墙破坏模式展开极限分析,得到挡墙运动极限表达式。根据运动极限表达式,分析其抗震性能。并通过实例墙体实验,证明方法的准确性。

1 基于极限分析对直立式加筋土挡墙的抗震性能分析

1.1 直立式加筋土挡墙破坏模式极限分析

1.1.1 条件设定

为方便下文分析,对直立式加筋土挡墙做出以下设定:

- (1) 直立式加筋土挡墙符合平面应变条件;
- (2) 墙后土壤水平且为无黏性材料;
- (3) 直立式加筋土挡墙承受的地震作用采用拟静力方式等效替换;
- (4) 直立式加筋土挡墙破坏方式是双楔块方式,破裂面为平面。为区别普通楔块方式与双楔块方式的差异,设定二者的差异系数为:

$$\varphi = \frac{l_1}{k} (\varphi \geqslant 0) \quad (1)$$

式中: l_1 为楔块底角距离地面的距离; k 为土挡墙宽度。当 $\varphi=0$ 时,即 $l_1=0$,此时破坏方式为普通楔块破坏方式,因此,普通楔块破坏方式为双楔块破坏方式的特殊形式;当 $\varphi \neq 0$ 时, φ 越大,代表差异性越大,即双楔块破坏越严重。图 1 为楔块示意图。

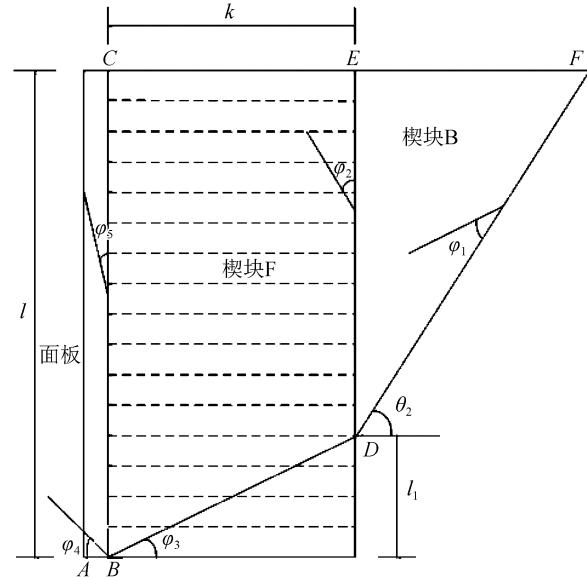


图 1 楔块示意图

Fig.1 Schematic diagram of the wedge block

1.1.2 极限分析

根据理论模型,直立式加筋土挡墙外荷载功率与内能耗散功率满足如下条件:

$$\int_Z Y_i v_i c Z + \int_J X_i v_i c J \leq \int_J \omega_{ij} \eta_{ij} c J \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

式中: Z 和 J 分别为荷载边界和系统体积; Y_i 、 X_i 、 ω_{ij} 分别为面力、体积力、应场力; v_i 、 η_{ij} 分别为位移场、应变场;指标 i 与 j 代表作用方向。

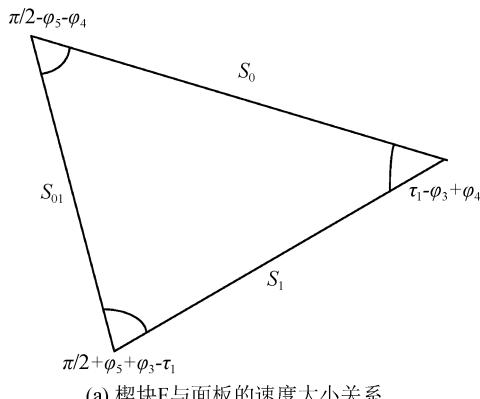
根据极限分析原理和流动法则,构建图 2 所示的直立式加筋土挡墙运动许可速度场。为确保边界约束条件的协调性和连续性,面板与楔块体的速度大小关系(即直立式加筋土挡墙运动极限)分别表示为:

$$s_1 = \frac{s_0 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_4 - \varphi_5\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_3 + \varphi_5 - \tau_1\right)} \quad (3)$$

$$s_{01} = \frac{s_0 \sin(\tau_1 - \varphi_3 + \varphi_4)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_3 + \varphi_5 - \tau_1\right)} \quad (4)$$

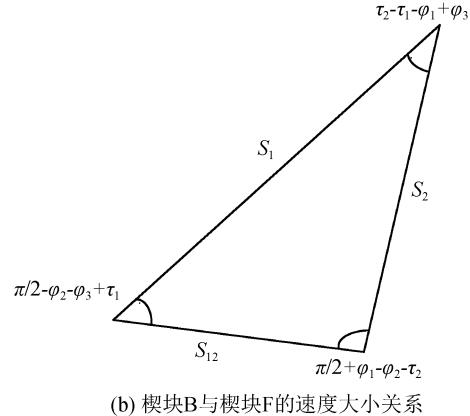
$$s_2 = \frac{s_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} + \tau_1 - \varphi_2 - \varphi_3\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \tau_2 + \varphi_1 + \varphi_2\right)} \quad (5)$$

$$s_{12} = \frac{s_1 \sin(\tau_2 - \tau_1 - \varphi_1 + \varphi_3)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \tau_2 + \varphi_1 + \varphi_2\right)} \quad (6)$$



(a) 楔块F与面板的速度大小关系

式中: $s_0, s_1, s_{01}, s_2, s_{12}$ 分别为 AB, BC, BD, DE, DF 断面上的速度间段量; φ 为墙后填料的内摩擦角, $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5$ 分别为断面 DF, DE, BD, AB, BC 间的夹角, 其中填土与墙体间的摩擦角取为 $1/3\varphi \sim 2/3\varphi$; τ_1, τ_2 为滑动面 BD, DF 与水平方向的夹角。



(b) 楔块B与楔块F的速度大小关系

图 2 直立式加筋土挡墙运动许可速度场

Fig.2 Kinematically admissible velocity field of the vertical reinforced earth retaining wall

1.2 直立式加筋土挡墙外功率计算

1.2.1 挡墙土重所做的外功率

为分析抗震性能, 根据上小节获取的直立式加筋土挡墙运动极限表达式, 构建直立式加筋土挡墙模型如图 3 所示。由该图可知, 利用累加法计算 OBC 、 OBA 和 OAC 土挡墙的外功率 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 是最简单的方法。

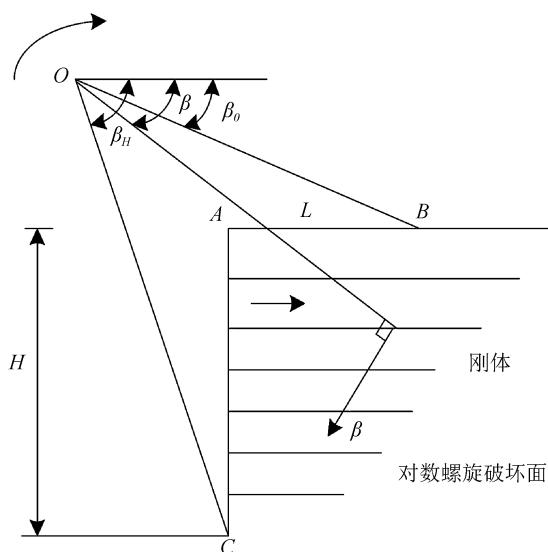


图 3 直立式加筋土挡墙动力稳定性模型

Fig.3 Dynamic stability model of vertical reinforced earth retaining wall

求出 OBC 土挡墙的功率:

$$cQ_1 = \left(\alpha \frac{2}{3} r \cos \beta \right) \left(\eta \frac{1}{2} r^2 c \beta \right) \quad (7)$$

整个土体面积分为:

$$Q_1 = \frac{\eta \sigma}{3} \int_{\beta_0}^{\beta_H} r^3 \cos c \beta = \eta \sigma r_0^3 \frac{1}{3} \cos \beta e^{3(\beta - \beta_0) \tan \varphi} c \beta \quad (8)$$

式中: β_i 是第 i 层筋带与滑移面相交处所对应的倾角; α 为滑移面与地面的角度; η 为土体与筋带平面之间剪切阻力角度; e 为挡墙后单位宽度筋带平面面积占整个平面面积的比例; r 为筋带半径; σ 为筋带厚度。令:

$$f(\beta_0, \beta_H) = \frac{(\sin \beta_H + 3 \tan \varphi \cos \beta_H) e^{3(\beta - \beta_0) \tan \varphi}}{3(1 + 9 \tan^2 \varphi)} - \frac{\sin \beta_0 + 3 \tan \varphi \cos \beta_0}{3(1 + 9 \tan^2 \varphi)} \quad (9)$$

式中: f 为筋带与土体之间的粘结系数; e 为挡墙后单位宽度筋带平面面积占整个平面面积的比例, 则式(8)可写为:

$$Q_1 = \eta \sigma r_0^3 f_1(\beta_0, \beta_H) \quad (10)$$

OBA 土体所做外功率为:

$$Q_2 = \frac{1}{6} \eta \sigma r_0 L \sin \beta_0 (2r_0 \cos \beta_0 - L) \quad (11)$$

式中: L 是第 i 层筋带长度。令

$$f_2(\beta_0, \beta_H) = \frac{L \sin \beta_0}{6r_0} \left(2 \cos \beta_0 - \frac{L}{r_0} \right) \quad (12)$$

则式(11)可写为:

$$Q_2 = \eta \sigma r_0^3 f_2(\beta_0, \beta_H) \quad (13)$$

OAC 土体所做外功率,同理可得:

$$Q_3 = \eta \sigma r_0^3 f_3(\beta_0, \beta_H) \quad (14)$$

1.2.2 地震作用对直立式加筋土挡墙所做的外功率

地震对直立式加筋土挡墙的作用^[6],可以通过乘积运算得出。ABC 土体地震受力下的外功率采用叠加法计算^[7],OBC、OBA、OAC 土体地震受力下的外功率 Q_4 、 Q_5 、 Q_6 为:

$$Q_4 = H_h \eta \sigma r_0^3 f_4(\beta_0, \beta_H) \quad (15)$$

$$f_4(\beta_0, \beta_H) = \frac{(3 \tan \varphi \cos \beta_H) e^{3(\beta_H - \beta_0) \tan \varphi}}{3(1 + 9 \tan^2 \varphi)} - \frac{3 \tan \varphi \sin \beta_0 + \cos \beta_0}{3(1 + 9 \tan^2 \varphi)} \quad (16)$$

$$Q_5 = F_h \eta \sigma r_0^3 f_5(\beta_0, \beta_H) \quad (17)$$

$$f_5(\beta_0, \beta_H) = \frac{L}{3r_0} \sin^2 \beta_0 \quad (18)$$

$$Q_6 = F_h \eta \sigma r_0^3 f_6(\beta_0, \beta_H) \quad (19)$$

$$f_6(\beta_0, \beta_H) = \frac{H}{6r_0} \cos \beta_H e^{(\beta_H - \beta_0) \tan \varphi} \times \left[2 \sin \beta_H e^{(\beta_H - \beta_0) \tan \varphi} - \frac{H}{r_0} \right] \quad (20)$$

式中: H 为筋带层数; F_h 为地震常数; $F_h = b_k/u$, b_k 为加速度, u 是最高地震加速度,外功率之和 Q 为:

$$Q = (Q_1 - Q_2 - Q_3) + (Q_4 - Q_5 - Q_6) =$$

$$\eta \sigma r_0^3 [(f_1 - f_2 - f_3) + F_h(f_4 - f_5 - f_6)] \quad (21)$$

上式获取的地震作用下直立式加筋土挡墙的外功率值越低,说明土挡墙的抗震性能越高。由于论文篇幅所限,有关详细的环节恕这里不做详述,有待今后发表或见详细报告,另外有兴趣者可以与作者进行联系。

2 实验分析

2.1 地震作用下挡墙加速度放大倍数分析

实验检测本文分析方法分析直立土挡墙在地震作用下抗震性能的有效性,本次实验采用经压缩过的代号为 DR 的加载地震波。实验分别对直立式加筋土挡墙和普通加筋土挡墙施加峰值为 0.085g(相当于 6 度)、0.15g(相当于 7 度)、0.2g(相当于 8 度),0.25g(相当于 8 度)、0.312g(相当于 8 度)、0.4g(相当于 9 度)、0.616g(相当于 10 度)的地震加速度^[8-11],测试直立式和普通加筋土挡墙的受力反应^[12]。

2.1.1 直立式加筋土挡墙地震时加速度放大倍数分析

本文方法分析得到的直立式加筋土挡墙加速度放大倍数情况如表 1 所列,墙高与加速度放大倍数关系分布如图 4 所示。

由表 1 和图 4 可以得出本文方法的分析结果为:

(1) 对于不同地震强度、不同墙高,墙体上部加速度大于底部。

(2) 当加速度为 0.085g、0.15g、0.2g、0.25g

表 1 直立式加筋土挡墙加速度放大倍数

Table 1 Acceleration magnification factors of vertical reinforced earth retaining wall

墙体位置/m	0	0.5	0.9	1.3	1.7	2
0.085g	1	1.059 86	1.344 812	1.391 592	1.629 113	1.719 263
0.15g	1	1.024 157	1.366 465	1.445 683	1.665 982	1.777 185
0.2g	1	1.082 519	1.363 143	1.521 004	1.662 7	2.249 761
0.25g	1	1.070 082	1.280 507	1.994 015	2.272 488	2.326 775
0.312g	1	1.012 537	1.127 085	1.506 533	2.145 434	2.081 69
0.4g	1	1.057 493	1.199 628	1.500 048	1.800 356	1.412 758
0.616g	1	1.073 854	1.194 461	1.338 446	1.570 381	1.357 066

时,分布曲线随墙高的增加而线性增加;当加速度为 0.312g、0.4g、0.616g 时,墙高 1.7 m 处出现突变点,分布曲线下部分增长,上部分缩小。

(3) 当加速度为 0.085g、0.15g、0.2g、0.25g 时,分布曲线呈现平稳趋势;在 0.312g、0.4g、0.616g 时,曲线呈现增加趋势。

(4) 当加速度在 0.085g、0.15g、0.2g、0.25g 时,分布曲线峰值分别为 1.719、1.777、2.249、2.326,在 0.25g 时,峰值为 2.326;在 0.312g、0.4g、0.616g

时,峰值在 1.7 m 位置,其值分别为 2.145、1.8、1.57,在 0.312g 时,峰值为 2.145。

2.1.2 普通加筋土挡墙地震时加速度放大倍数分析

为研究直立式加筋土挡墙抗震性能,以普通加筋土挡墙为对比,本文方法分析得到的普通加筋土挡墙加速度放大倍数如表 2 所示,加速度放大倍数分布如图 5 所示。

由表 2 和图 5 可以得出本文方法的分析结果为:

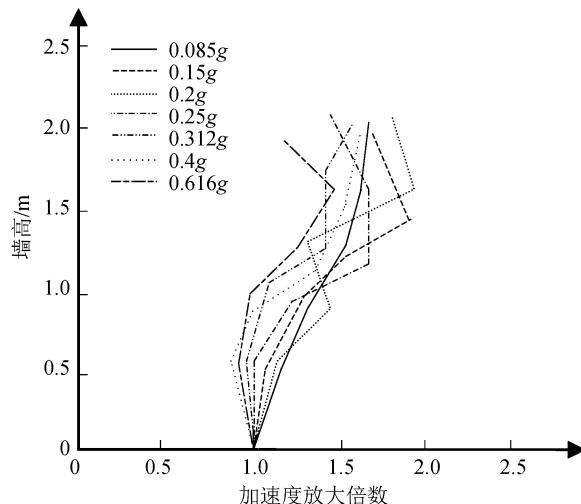


图 4 直立式加筋土挡墙加速度放大倍数分布图

Fig.4 Acceleration magnification factors distribution of vertical reinforced earth retaining wall

(1) 对于不同地震强度、不同墙高, 墙体上部加速度大于底部。

(2) 加速度在墙体 1.7 m 位置开始变化, 下部线性增长, 上部线性减小。

(3) 加速度为 $0.085g$ 、 $0.15g$ 、 $0.2g$ 、 $0.25g$ 、 $0.312g$ 时, 分布曲线呈现平缓; 在 $0.4g$ 、 $0.616g$ 时, 分布曲线上升, 即加速度放大倍数与震级呈反比。

(4) 分布曲线峰值在 1.7 m 位置, 其值分别为 1.754、1.826、2.285、2.375、2.518、1.933、1.658, 在 $0.312g$ 时, 峰值为 2.518。

由直立式和普通加筋土挡墙加速度放大倍数分布曲线对比分析可知, 在 $0.085g$ 、 $0.15g$ 、 $0.2g$ 、 $0.25g$ 时, 直立式加筋土挡墙曲线不断上升, 峰值在墙体最高处; 普通加筋土挡墙的曲线峰值在 1.7 m 位置。在 $0.312g$ 、 $0.4g$ 、 $0.616g$ 时, 二者分布曲线大

表 2 普通加筋土挡墙加速度放大倍数

Table 2 Acceleration magnification factors of ordinary reinforced earth retaining wall

墙体位置/m	0	0.5	0.9	1.3	1.7	2
$0.085g$	1	1.016 376	1.138 193	1.371 354	1.754 082	1.146 282
$0.15g$	1	1.028 295	1.269 185	1.480 639	1.826 495	1.191 033
$0.2g$	1	1.141 793	1.360 27	1.560 25	2.285 427	1.201 374
$0.25g$	1	1.240 184	1.343 669	1.575 632	2.375 79	1.212 557
$0.312g$	1	1.109 557	1.399 482	1.799 481	2.518 726	1.239 543
$0.4g$	1	1.151 328	1.293 068	1.611 077	1.933 224	1.125 708
$0.616g$	1	1.025 365	1.221 224	1.506 543	1.658 249	1.238 161

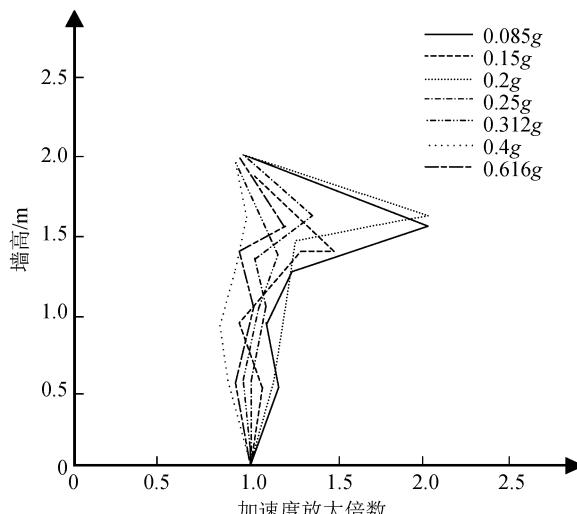


图 5 普通加筋土挡墙加速度放大倍数分布图

Fig.5 Acceleration magnification factors distribution of ordinary vertical reinforced earth retaining wall

弱, 具有较高的抗震性能。

2.2 直立式加筋土挡墙动力内部稳定分析

为分析强震作用下直立式加筋土挡墙的动力内部稳定性, 利用本文方法计算各层筋材在强震作用下的最大外功率, 同时以 NCMA 方法作为对比。图 6 为不同方法分析出的不同加筋土挡墙高度下各层筋材最大外功率分布情况。由该图可以看出, 对于不同的挡墙高度, 本文方法的分析结果表明, 直立式加筋土挡墙各层筋材最大外功率出现在第二、三层筋材分别为 $18.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 和 $20 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ^[13-14], 基本呈上小下大分布, 与实际最大外功率 $18 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 及分布曲线差别不大。而由 NCMA 方法计算^[15]得到的数值及分布与实际数值曲线差别较大, 说明本文方法对直立式加筋土挡墙抗震性能分析更符合实际情况。

3 结论

本文提出的直立式加筋土挡墙的抗震性能分析方法, 利用双楔块法对直立式加筋土挡墙的破坏模式进行极限分析, 构建直立式加筋土挡墙动力稳定

体一致, 峰值都在 1.7 m 位置。本文分析方法对比两种加筋土挡墙分布曲线可知, 直立式加筋土挡墙的最大值均小于普通加筋土挡墙, 说明直立式加筋土挡墙能够令地震波在沿墙体向上传播过程中减

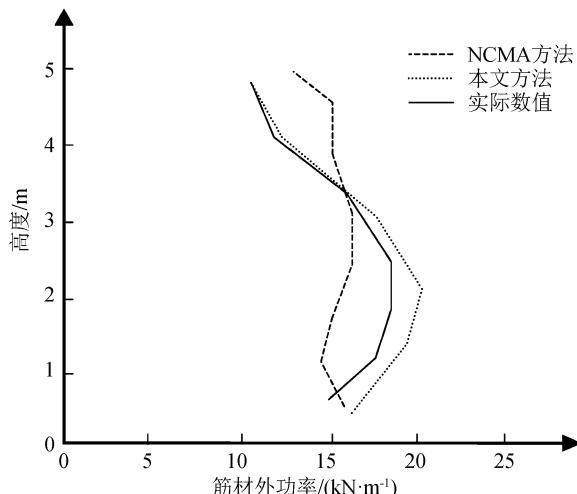


图 6 不同挡墙高度下加筋土挡墙最大外功率分布图

Fig.6 Distribution of maximum external powers of reinforced earth retaining wall at different height

性模型,计算直立式加筋土挡墙外功率,包括土重所做的外功率和地震作用所做的外功率,基于外墙功率情况分析挡墙的抗震性能。实验结果表明,本文方法分析得出当地震峰值加速度在0.085g、0.15g、0.2g、0.25g时,直立式加筋土挡墙的曲线峰值在墙体最高处,其值分别为1.719、1.777、2.249、2.326,均大于普通加筋土挡墙的峰值1.754、1.826、2.285、2.375,说明本文分析方法分析得出直立式加筋土挡墙能够令地震波在沿墙体向上传播过程中减弱,抗震性能更好;本文方法计算所得直立式加筋土挡墙各层筋材最大外功率分别为18.5 kN·m和20 kN·m,与实际最大外功率18 kN·m及分布曲线差别不大,说明所提方法的抗震性能分析与实际情况相符。以上是对直立式加筋土挡墙的抗震性能的研究。

参考文献(References)

- [1] 朱宏伟,姚令侃,陈晓龙,等.土工格栅返包土工袋加筋土挡墙的地震响应分析及设计建议[J].岩土工程学报,2017,39(2):319-326.
ZHU Hongwei, YAO Lingkan, CHEN Xiaolong, et al. Seismic Behaviors and Design Recommendations of Ecological Bag-reinforced Retaining Wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2): 319-326.
- [2] 蔡晓光,张世暖.高烈度地震区高大加筋土挡墙地震反应特性与抗震设计措施研究[J].工程抗震与加固改造,2016,38(5):1-8.
CAI Xiaoguang, ZHANG Shinuan. Research on Seismic Response Characteristics and Seismic Design Measures of High Reinforced Earth Retaining Wall in High Seismic Intensity Re-

gion[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(5): 1-8.

- [3] 陈铖,王泉清.L形面板加筋土挡墙拓宽旧路基的三维有限元分析[J].公路工程,2015,40(3):234-237.
CHEN Cheng, WANG Quanqing. An Analysis of a 3-D Finite Element Method in L-shaped Panel Reinforced Retaining Wall for Widening Subgrade[J]. Highway Engineering, 2015, 40(3): 234-237.
- [4] 张世暖,蔡晓光.地震作用下双级加筋土挡墙的动力响应研究[J].长江科学院院报,2017,34(1):129-134.
ZHANG Shinuan, CAI Xiaoguang. Dynamic Response of Two-stage Reinforced Soil-retaining Wall under Seismic Action[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(1): 129-134.
- [5] 杨长卫,周峰,杨国涛,等.加筋土挡墙地震稳定性时频分析研究[J].铁道工程学报,2015,32(9):41-48.
YANG Changwei, ZHOU Feng, YANG Guotao, et al. Seismic Stability Time-frequency Analysis Theory Resolution of Reinforced Retaining Wall[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(9): 41-48.
- [6] 胡文博,翟希梅,姜洪斌.预制装配式钢筋混凝土一体化剪力墙抗震性能研究及构造方案优化[J].建筑结构学报,2016,37(8):1-10.
HU Wenbo, ZHAI Ximei, JIANG Hongbin. Study on Seismic Performance and Construction Measures Optimization of Pre-cast Fabricated RC Integration Shear Wall[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(8): 1-10.
- [7] 张淑云,赵帅辉.不同节点连接方式下钢板剪力墙抗震性能研究[J].钢结构,2016,31(7):22-25.
ZHANG Shuyun, ZHAO Shuaihui. Research on the Seismic Performance of Steel Plate Shear Wall with Different Connection Modes[J]. Steel Construction, 2016, 31(7): 22-25.
- [8] 王宁,万保华,杜学领.加筋土挡墙在露天矿排土场的应用研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(6):1408-1414.
WANG Ning, WAN Baohua, DU Xueling. Study on Application of Reinforced Earth Retaining Wall in Open-pit Slope[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(6): 1408-1414.
- [9] 李天赐,孔亮,赵新波,等.考虑超孔压影响的海底能源土斜坡稳定性数值模拟和评价[J].科学技术与工程,2019,19(5):103-110. LI Tianci, KONG Liang, ZHAO Xinbo, et al. Numerical Simulation and Evaluation of the Stability of Submarine Energy Soil Slope Considering the Effect of the Excess Pore Pressure[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(5): 103-110.
- [10] 郝勇,巴盼锋.配筋加气混凝土墙体抗震性能分析[J].新型建筑材料,2014,41(4):42-45.
HAO Yong, BA Panfeng. Analysis on Seismic Performance of Reinforced Aerated Concrete Wall[J]. New Building Materials, 2014, 41(4): 42-45.

(下转第384页)

- Intermediate Principal Stress Parameter on Deformation Behavior of Sands under Cyclic Rotation of Principal Stress Axes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(6):946-952.
- [12] YANG Z X, LI X S, YANG J. Undrained Anisotropy and Rotational Shear in Granular Soil [J]. Géotechnique, 2007, 57(4):371-384.
- [13] 冯永珍,张吾渝,马艳霞,等.考虑偏应力比影响的主应力轴旋转下重塑黄土变形研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(3):535-541.
FENG Yongzhen, ZHANG Wuyu, MA Yanxia, et al. Deformation Analysis of Remolded Loess under Principal Stress Axes Rotation Considering the Effect of Deviatoric Stress Ratio [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(3):535-541.
- [14] 孙奇,董全杨,蔡袁强,等.偏应力比和应力主轴偏转角同时变化下饱和砂土变形特性研究[J].岩土力学,2015,36(8):2261-2269.
SUN Qi, DONG Quanyang, CAI Yuanqiang, et al. Deformation of Fully Saturated Sand under Simultaneous Variations of Deviatoric Stress Ratio and Principal Stress Rotational Angle [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(8):2261-2269.
- [15] 郭莹,栾茂田,何杨,等.主应力方向循环变化对饱和松砂不排水动力特性的影响[J].岩土工程学报,2005,27(4):403-409.
GUO Ying, LUAN Maotian, HE Yang, et al. Effect of Variation of Principal Stress Orientation during Cyclic Loading on Undrained Dynamic Behavior of Saturated Loose Sands [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4):403-409.
- [16] 曹维科.桩基础水平承载力性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
CAO Weike. Research on the Bearing Capacity Performance of Pile Foundation under Horizontal Loading [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.

(上接第 318 页)

- [11] 于庆峰,胡敏.动载下无筋砌体墙的应力场及裂隙分布[J].地震工程学报,2018,40(6):1236-1242.
YU Qingfeng, HU Min. Stress Field and Fracture Distribution of Unreinforced Masonry Walls under Dynamic Loading [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(6):1236-1242.
- [12] 薛鹏鹏,郑俊杰,曹文昭,等.加筋土挡墙-抗滑桩组合支挡结构数值模拟[J].长江科学院院报,2017,34(2):75-79.
XUE Pengpeng, ZHENG Junjie, CAO, Wenzhao, et al. Numerical Simulation on Composite Retaining Structure Composed of Reinforced Soil Retaining Wall and Anti-slide Piles [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(2):75-79.
- [13] 占昌宝,罗川,丁振坤,等.高层建筑抗震性能预测仿真研究[J].计算机仿真,2016,33(8):397-402.
ZHAN Changbao, LUO Chuan, DING Zhenkun, et al. Research on Seismic Performance Prediction of High-rise Buildings [J]. Computer Simulation, 2016, 33(8):397-402.
- [14] 王庭华,黄峥,丁静鹤,等.220 kV 户内变电站屋顶构架结构体系及其抗震性能[J].电力工程技术,2017(5):76-80.
WANG Tinghua, HUANG Zheng, DING Jinghong, et al. Research on the Structural Property and Seismic Performance of the 220 kV Roof Frame-GIS Complex Building [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2017(5):76-80.
- [15] 刘建民,孙兵,何杰.施工缝设置方式对剪力墙结构抗震性能的影响研究[J].工业建筑,2014,44(2):64-68.
LIU Jianmin, SUN Bing, HE Jie. Study of Seismic Performance of Shear Wall Structure Considering the Effect of Different Set of Construction Joints [J]. Industrial Construction, 2014, 44(2):64-68.