

刘小浪,马淑芝,贾洪彪,等.地震作用下重力式挡土墙土压力特性数值模拟研究[J].地震工程学报,2017,39(4):0750-0758.
doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0750
LIU Xiao-lang, MA Shu-zhi, JIA Hong-biao, et al. Numerical Simulation of Soil Pressure Characteristics of Gravity Retaining Walls during Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(4): 0750-0758. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0750

地震作用下重力式挡土墙土压力特性数值模拟研究^①

刘小浪, 马淑芝, 贾洪彪, 吴 涛, 胡志新, 朱子豪

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 重力式挡土墙在地震作用下的土压力特性一直是挡土墙设计的重要内容。本文通过数值模拟,在挡土墙背轴线上设置一系列监测点,得到地震过程中监测点的加速度、土压力强度时程曲线;然后根据时程曲线分析墙后土压力强度分布特征、根据土压力强度分布求出总土压力、根据总土压力求出其对墙趾的力矩;最后分别将土压力强度分布、总土压力、总土压力对墙趾的力矩与现有的研究方法对比。结果表明:地震作用下墙背各点加速度峰值在同时刻发生,但土压力峰值不在同时刻发生;现有的一些研究方法未考虑土压力强度峰值时程变化,其结果比实际偏大;在低地震烈度条件下,规范计算的总土压力及倾覆力矩偏于保守,而在高烈度条件下则偏于危险。

关键词: 地震;重力式挡土墙;土压力;PGA

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)04-0750-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0750

Numerical Simulation of Soil Pressure Characteristics of Gravity Retaining Walls during Earthquake

LIU Xiao-lang, MA Shu-zhi, JIA Hong-biao, WU Tao, HU Zhi-xin, ZHU Zi-hao

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: The soil pressure characteristics of gravity retaining walls under seismic action are an important consideration in the retaining wall design. In the seismic design codes of many countries, including China, the seismic soil pressure of a retaining wall is calculated using the Mononobe-Okabe formula. Previous studies have identified many limitations with respect to some of the assumptions of the Mononobe-Okabe formula, which has led to results that are inconsistent with actual situations. As such, the reliability of this method must be further examined. In their detailed studies of the soil pressure characteristics of retaining walls, researchers have improved the pseudo static method, developed the pseudo dynamic method, and introduced model experimentation and numerical analysis, which have greatly improved the accuracy of the calculated results. However, most research has considered maximum earthquake intensity, but not the impact of the time-history variation of seismic waves on the soil pressure behind the wall. In this study, we

① 收稿日期:2017-03-16

基金项目: 中国地质大学(武汉)大学生自主创新资助计划项目(1610491A20);国家级大学生创新创业训练项目(201610491072);国家自然科学基金项目(41672309)

作者简介: 刘小浪(1990—),男,贵州纳雍人,硕士研究生,研究方向为岩土工程性质及稳定性。E-mail:1628301855@qq.com。

通信作者: 马淑芝(1974—),女,教授,硕士,从事地质工程、岩土工程的教学和科研工作。E-mail:maszyy@163.com。

used numerical simulation to establish a series of monitoring points on the back of the retaining wall and then obtained time-history curves of the acceleration and soil pressure strength. Based on these time-history curves, we then analyzed the distribution characteristics of soil pressure strength, calculated the total soil pressures, and obtained the overturning moment of the toe of the wall. Finally, we compared the soil pressure distribution, total soil pressures, and overturning moment of the toe of the wall with those calculated by existing methods and codes. The results show that the peak acceleration of each monitoring point occurs at the same moment, but the peak soil pressure does not. Some existing methods do not consider the time-history change of peak soil pressure strength, thereby yielding a bigger result than is practical. In low seismic intensity conditions, the total soil pressures and overturning moments calculated by codes tend to be conservative, whereas in high intensity conditions they tend to be dangerous.

Key words: earthquake; gravity retaining wall; soil pressure; PGA

0 引言

为保证地震高发区各种建筑设施的安全使用,挡土墙被广泛应用在边坡的治理中,因此研究地震作用下挡土墙的稳定性越发重要。地震土压力计算是挡土结构抗震设计的核心,其计算方法的差异性不仅体现了各国抗震规范的地震背景、区域划分、衰减规律等技术层面,也体现了抗震设防水准与设防目标,反映了挡土结构抗震的发展水平^[1]。我国现行规范^[2]采用物部-冈部公式^[3-4]计算地震作用下重力式挡土墙的土压力。

物部-冈部公式认为地震时填土受水平和竖向地震惯性力的作用,并假设填土是无黏性砂土,滑体为滑面经过墙踵的楔体,该楔体上各点具有相同的加速度。其原理是将因地震产生的地震惯性力施加到滑动土体上,再与滑动土体的土重组合成一个等代重量,最后按静力问题的库伦压力理论计算^[5]。我国学者结合实际,在物部-冈部基础上对地震土压力理论进行了拓展。朱桐浩^[6],林宇亮等^[7],陈奕柏等^[8]通过不同的数学力学分析法,得到黏性土主动和被主动土压力强度分布、合力大小及其作用点位置的计算式。张建民等^[9]认为压剪耦合才是土压力形成的物理本质,据此提出考虑填土侧向变形的地震土压力计算新方法,并通过模型实验验证了该方法的可靠性。苏晓成等^[10]认为现行规范中计算地震动力荷载未考虑振动频率和地震持时,不能反映实际地震过程,并据此引入加速度分布系数对拟静力法公式进行了改进。

地震荷载事实上是一个循环往复的过程,物部-冈部公式与其派生出来的一系列拟静力方法不能完全体现真实的地震作用。基于此,Steedman 和

Zeng^[11-12]合作将拟动力法运用到地震土压力分析中,假设地震加速度随深度和时间呈正弦变化,并运用离心机模型实验验证了该方法的有效性。马少俊等^[13]运用拟动力法,在考虑墙背倾角、填土内摩擦角、墙土摩擦角影响的条件下研究了挡土墙的抗滑稳定性。何思明等^[14]基于 Steedman 的假设,用薄层分析法研究地震动土压力随时间的变化。这些拟动力法皆认为地震土压力峰值和地震加速度峰值同时发生。

2008 年汶川大地震后,西南交通大学的姚令侃^[15-16]、张建经^[17-18]等教授的课题组率先针对汶川地震中挡土墙的破坏模式,通过改变挡土墙各种要素开展一系列振动台实验,在挡土墙动土压力特性分析方面取得丰硕成果。他们分析总土压力时,提取墙背竖直方向各点动土压力强度时程曲线上的峰值点,根据规范取 0.25 的经验折减系数将该峰值折减,计算出动土压力,叠加到静止土压力(库伦主动土压力计算)上,作为实际地震土压力,并未考虑墙背各点地震动土压力强度峰值的时程变化。

本文基于重力式挡土墙地震土压力的研究现状以及有限差分法在分析土的非线性动力反应方面的成熟应用,运用有限差分软件 FLAC^{3D} 分析地震土压力的时程变化特性,并与现有方法和规范对比,得出结论。

1 模拟构建

参考文献^[16]的条件,建一个长 30 m,宽 10 m,厚 5 m 的岩质地基模型。在地基上建立 6 m 高的重力式刚性挡土墙,墙底嵌入地基 0.5 m,墙背直立,墙顶宽 1 m,墙面坡比 1 : 0.3。墙后填土长

20 m,宽 10 m,高 6 m。为分析土压力随墙高的变化,分别在距墙踵 0、1、2、3、4、5 及 6 m 七个墙高点设置加速度和土压力强度监测点。模型建立后,给地基、挡土墙、墙后填土赋物理力学参数,参数取值见表 1。参数赋值后,使用不同的边界条件进行静力计算和动力计算。静力计算阶段,除挡土墙和填土顶部外,固定其余边界,使模型在重力作用下达到稳定状态。对诸如大坝之类的地面结构进行动力反应分析时,在模型各个侧面的边界条件须考虑为没有地面结构时的自由场运动^[19]。故动力计算阶段应在静力计算的基础上去掉模型原有的静力条件。施加自由场边界条件后的模型见图 1。

表 1 模型材料参数

Table1 Material parameters of the model					
材料类型	体积模量 /Pa	剪切模量 /Pa	黏聚力 /Pa	内摩擦角 /(°)	密度 /(kg·m ⁻³)
填土	5.14e7	2.31e7	1.34e4	30	1 810
挡土墙	1.1e10	1.1e10	-	-	2 300
岩质地基	1.8e10	1.8e10	-	-	2 400

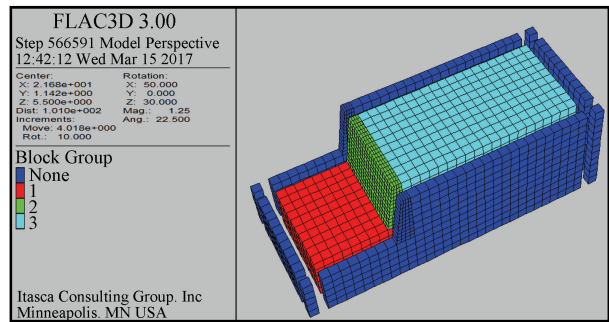


图 1 自由场边界模型

Fig.1 Free-field boundary model

模拟采用单向水平地震输入,即只用地震波中的 X 分量。为研究不同强度地震对地震土压力的影响,对模型施加 0.1g、0.2g、0.4g、0.6g 四个量级峰值地震加速度(PGA)的 El Centro 地震波,分别对应Ⅶ、Ⅷ、Ⅸ、>Ⅸ四个量级的地震烈度。

2 结果分析

2.1 墙背加速度和土压力强度监测结果

以 $PGA=0.2g$ 为例,墙背监测点加速度、土压力强度时程曲线见图 2。根据图 2(a),从墙底到墙顶的加速度时程曲线形态上完全一致,加速度峰值点出现在同一时刻,且墙底的加速度明显小于墙顶加速度。根据图 2(b),3 m 监测点土压力强度变化较小;3 m 以下各监测点土压力强度曲线形态较为

接近,但峰值不在同一时刻发生;3 m 以上曲线形态与 3 m 以下完全相反,土压力强度峰值亦不在同一时刻点。由此可见,地震过程中加速度峰值沿挡土墙墙高在同一时刻出现,而土压力强度峰值并不在同一时刻出现。

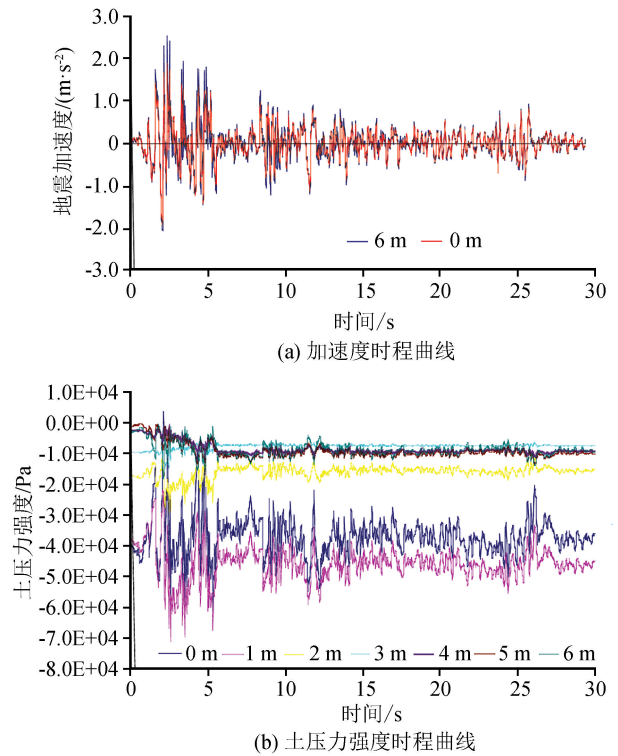


图 2 墙背监测点加速度、土压力强度时程曲线

Fig.2 Time-history curves of acceleration and soil pressure strength of monitoring points on the wall back

由以上分析可知,部分模型试验的相关文献笼统地取各监测点土压力强度时程曲线上的峰值作为某时刻墙后土压力强度分布,与实际情况有一定出入。基于此,本文通过监测点的土压力强度时程曲线,分析距墙踵 0、1、2、3、4、5 及 6 m 七个点出现土压力强度峰值时刻(下文分别对应 t_0 、 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5 、 t_6 时刻)的土压力特性。

2.2 墙背土压力强度的分布

在 PGA 为 0.1g、0.2g、0.4g、0.6g 的地震作用下,挡土墙的土压力强度分布如图 3 所示。强度为动土压力强度与静止土压力强度的叠加。

由图 3 可见:

(1) 在各个土压力强度峰值时刻点,土压力强度沿墙背呈非线性分布,并非库伦土压力理论所假设的三角形分布,这与曲宏略^[12]的振动台实验研究结论相同。

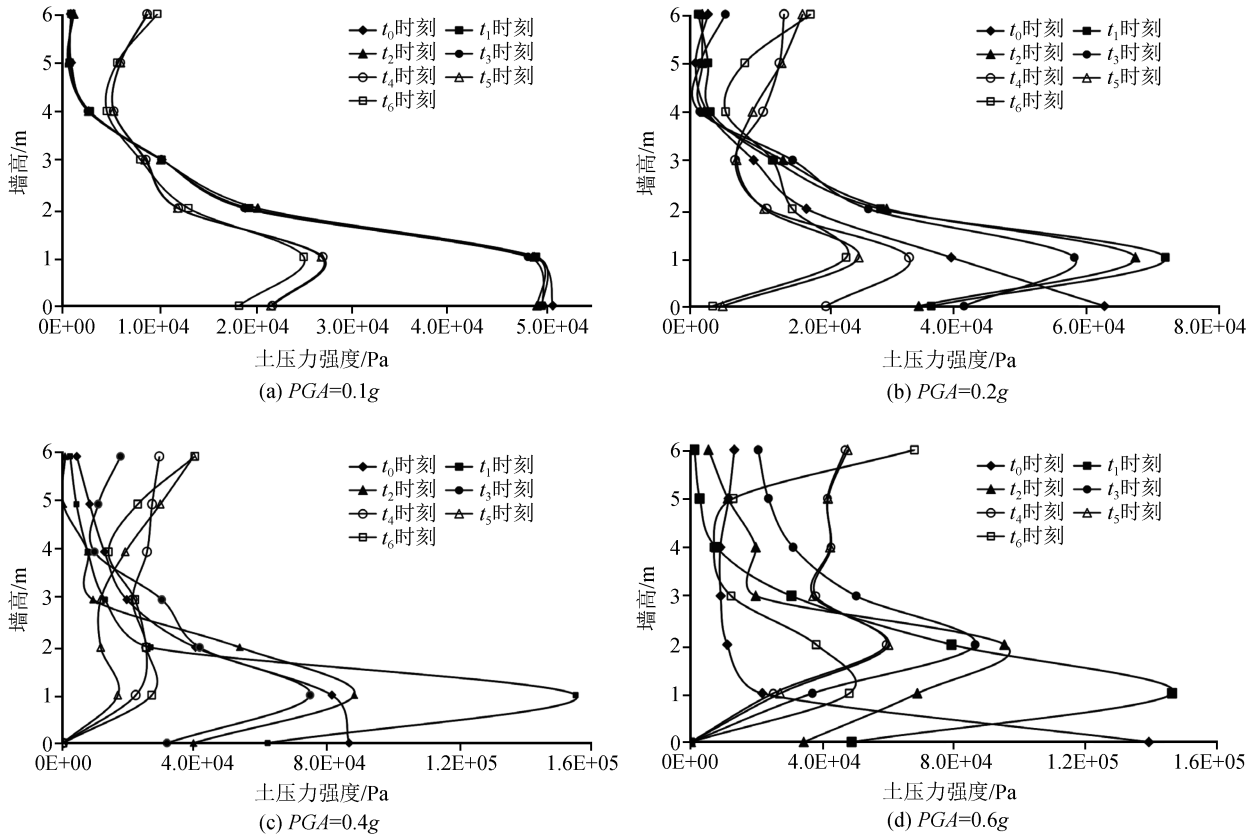


图 3 土压力强度沿墙高分布

Fig.3 Distribution of soil pressure strength along wall height

(2) 无论何种 PGA 条件下,墙底处土压力强度随时间变化逐渐减小,甚至接近于 0。此外,在整个地震过程中最大土压力强度峰值产生在 $1/6H$ (H 表示墙高,下同)处,该现象与物部-冈部理论不符。

(3) 参考偏态系数的定义,求出各分布曲线沿墙高的偏态系数,以表征土压力强度的分布特征,结果见图 4。由图 4 可知,低烈度条件下偏态系数差异较小,说明土压力强度沿墙高的分布形态较为接近;相反,高烈度条件下偏态系数差异较大,则说明土压力强度的分布随时间变化,其形态存在较大的差异。整体上,偏态系数由大变小,说明土压力强度放大区域逐渐上升,甚至在高烈度条件下发展为负偏分布,土压力强度放大区域处于 $1/2H$ 以上。

(4) 土压力强度峰值点较低时,土压力强度分布曲线呈左偏单峰曲线分布。随着峰值点的升高,土压力曲线逐渐呈“S”型分布。曲线出现两个明显的土压力放大带,低烈度条件下处于 $1/6H$ 处与墙顶,高烈度条件下处于 $1/3H$ 处与墙顶。此外,墙顶加速度放大效应^[20]引起土压力强度不断增大,墙底

又因为墙土分离^[15]使得土压力强度减小,甚至在高烈度条件下呈近似“倒三角”分布。这些现象与偏态系数规律相对应,说明土压力分布随时程的变化而变化。

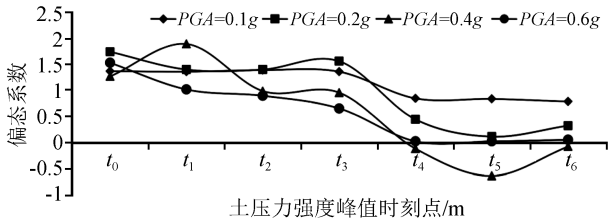


图 4 土压力强度分布偏态系数

Fig.4 Deviation coefficients of soil pressure strength distribution

(5) 总体上看,挡墙上部土压力强度变化较慢,挡墙下部土压力强度变化较快,推测这可能是由于墙体位移影响,墙体上部发生较快的转动位移,故土压力强度变化相对较慢,墙体下部正好相反,因而土压力强度变化快。

2.3 墙背土压力的合力

地震作用下墙背土压力的合力(下文称总土压

力)大于地基抗滑力时,挡土墙易发生水平滑动而失效。得到土压力强度沿墙高的分布之后,计算分布

曲线与坐标轴所围成的面积便可得到总土压力,结果统计见表 2。

表 2 总土压力统计

Table 2 Statistics of total soil pressure

PGA/g	总土压力/(kN·m ⁻¹)						
	0 m 峰值	1 m 峰值	2 m 峰值	3 m 峰值	4 m 峰值	5 m 峰值	6 m 峰值
0.1	107.37	107.49	107.76	106.08	73.92	73.62	70.19
0.2	102.97	137.99	133.34	127.03	93.60	78.16	76.10
0.4	207.25	238.51	178.68	191.06	135.57	107.77	130.49
0.6	85.32	292.58	235.64	239.39	230.72	233.06	152.98

根据表 2 分别绘制总土压力与土压力强度峰值点、PGA 关系曲线(图 5)。

(1) 根据图 5(a),总土压力随着土压力强度峰值点的变化呈非线性变化。整体上看,总土压力随着峰值点呈上升-下降-平稳-再下降的形态。当 t_1 时刻出现土压力强度峰值时,总土压力达到最大,这

与图 3 土压力强度分布相印证。

(2) 根据图 5(b),随着 PGA 的增大,不同峰值点对应的总土压力差值不断增加。PGA=0.1g 时总土压力的差距为 53.5%,PGA=0.2g、0.4g、0.6g 时差距分别为 81.3%、121.3%、184.1%。由此可见,PGA 越大,总土压力随峰值点的变化越大。

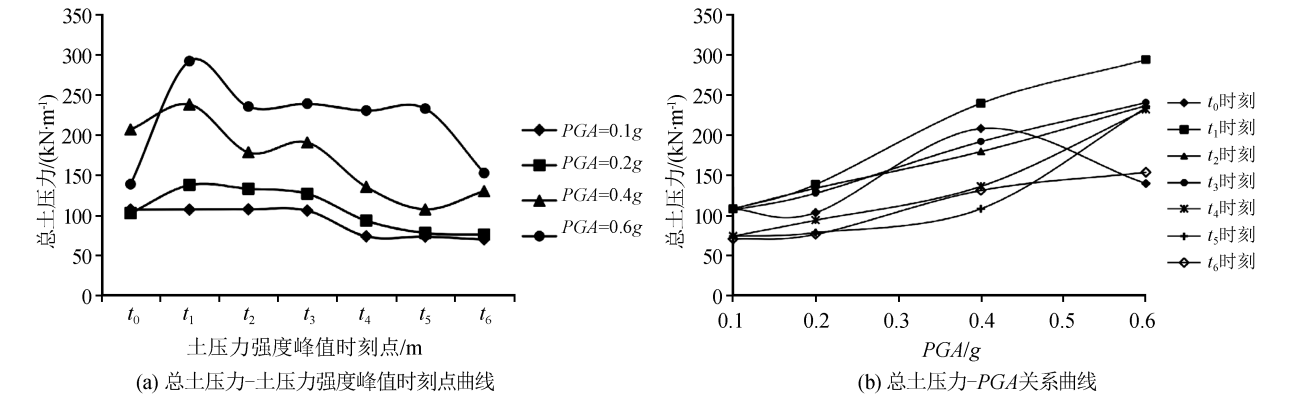


图 5 总土压力与峰值点、PGA 关系曲线

Fig.5 Relationship among total soil pressure, peak soil pressure strength, and PGA

2.4 总土压力对墙趾的力矩

挡土墙墙背合力产生的倾覆力矩大于抗倾覆力矩时,常使挡土墙发生绕墙趾转动,从而发生倾覆破坏。根据土压力强度分布计算出总土压力对墙趾的力矩,统计于表 3。

根据表 3 绘制出倾覆力矩与土压力强度峰值点、PGA 关系曲线(图 6)。

(1) 根据图 6(a),倾覆力矩随峰值点变化呈非

线性变化。整体上,曲线随土压力强度峰值点升高先上升、后下降,约在 $2/3H \sim 5/6H$ 间出现峰值。该规律与图 5(a)所示的总土压力分布规律相反,这是因为当 $2/3H \sim 5/6H$ 出现峰值点时,虽然总土压力较小,但作用点较高,导致力矩较大;与之相反,1/6H 峰值点时力矩较小。

(2) 根据图 6(b),整体上,随着 PGA 增大,倾覆力矩逐渐增大,同一 PGA 对应的力矩差值也增

表 3 倾覆力矩统计

Table3 Statistics of overturning moment

PGA/g	倾覆力矩/($\times 10^5$ N·m ⁻¹)						
	0 m 峰值	1 m 峰值	2 m 峰值	3 m 峰值	4 m 峰值	5 m 峰值	6 m 峰值
0.1	1.43	1.43	1.44	1.41	1.55	1.55	1.52
0.2	1.37	2.03	1.98	1.95	2.33	2.26	2.07
0.4	3.37	3.14	2.62	3.94	4.56	4.09	4.25
0.6	2.26	4.54	4.77	6.63	7.71	7.74	4.48

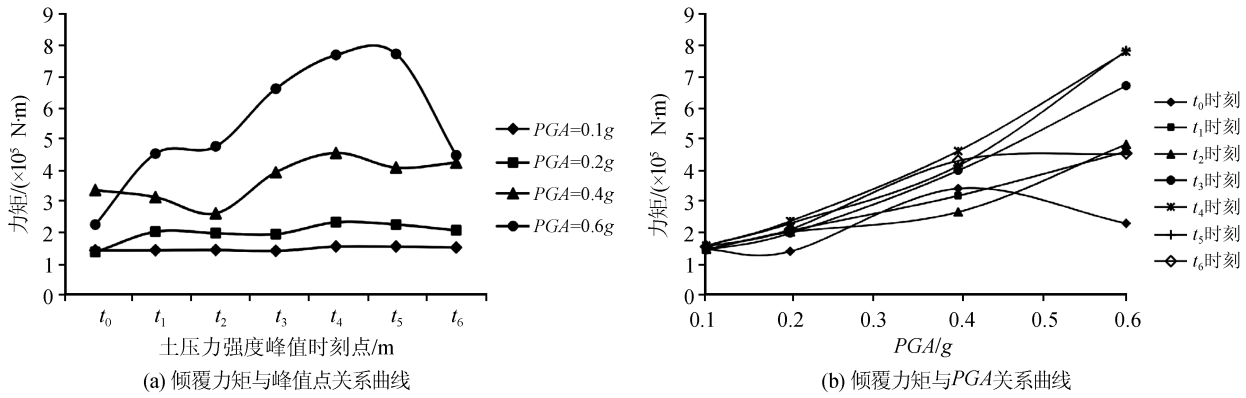


图 6 倾覆力矩与峰值点、PGA 关系曲线

Fig.6 Relationship among overturning moment, peak soil pressure strength, and PGA

大。PGA = 0.1g、0.2g、0.4g、0.6g 时,倾覆力矩的差距分别为 9.9%、70.1%、74%、242.5%,说明随着 PGA 的增大,倾覆力矩随土压力强度峰值点的变化越大。

2.5 与不考虑时程变化结果对比

不考虑时程变化时,取各监测曲线上的土压力强度峰值,绘制土压力强度峰值沿墙高的分布曲线(图 7)。

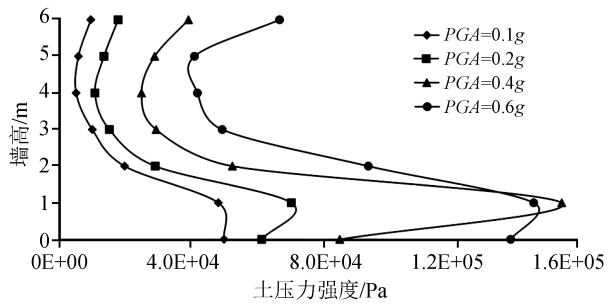


图 7 土压力强度峰值沿墙高分布

Fig.7 Distribution of peak soil pressure strength along wall height

由图 7 可见,土压力强度呈“S”型,在 $1/6H$ 和墙顶处产生土压力强度放大带。PGA 从 0.1g 至 0.4g,分布曲线沿墙高的偏态系数分别为 1.33、1.04、0.93、0.69,呈逐渐降低趋势,说明 PGA 越大,土压力强度越往 $1/2H$ 集中。

根据该分布曲线,计算出总土压力、总土压力对墙趾的倾覆力矩,并与不同时期结果进行对比(图 8)。纵坐标均为不考虑时程变化结果减去考虑时程变化的结果。

由图 8 可见,对总土压力和倾覆力矩,不考虑时程变化得到的结果均大于考虑时程变化得到的结果,且随着 PGA 增大差值大幅增加。

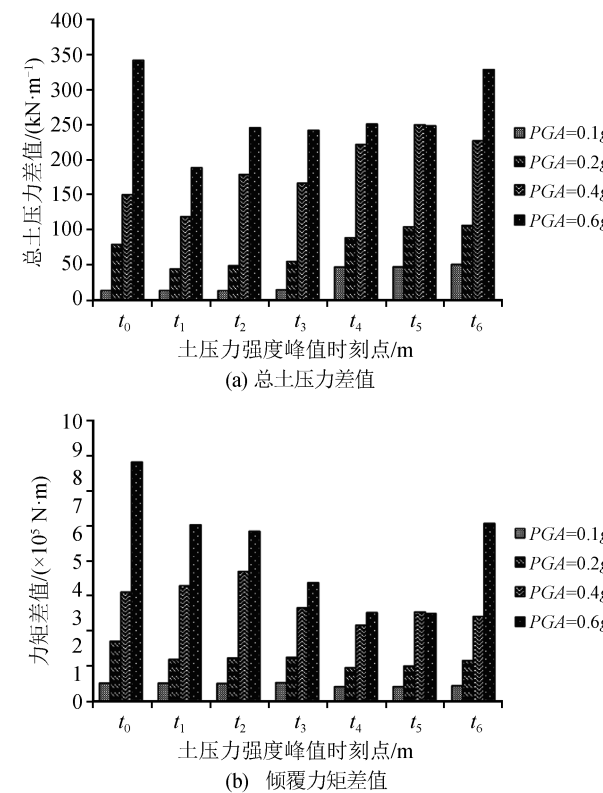


图 8 总土压力、倾覆力矩差值

Fig.8 Total soil pressure difference and overturning moment difference

2.6 与规范计算结果对比

为了验证物部-冈部公式的可靠性,将数值模拟结果与该公式的计算结果对比(图 9)。纵坐标均为数值模拟结果减去规范计算结果。

由图 9(a)总土压力对比可见,PGA = 0.1g 的条件下,数值模拟结果均小于公式计算结果;PGA = 0.2g 条件下, $1/6H$ 峰值点时数值模拟结果略大于公式计算结果;PGA = 0.4g,前四个峰值点的数值模拟结果均大于公式计算结果;PGA = 0.6g 条件

下, $1/6H \sim 5/6H$ 峰值点对应的数值模拟值均大于公式计算结果。这说明在低烈度条件下, 规范中公式计算的总土压力比实际偏大; 高烈度条件下规范计算总土压力比实际小, 且在 $1/6H$ 峰值点时差值最大。

由图 9(b) 倾覆力矩对比可见, $PGA = 0.1g$ 、 $0.2g$ 条件下, 数值模拟结果均小于公式计算结果; $PGA = 0.4g$ 、 $0.6g$ 条件下, 除个别峰值点外, 数值模拟结果基本上大于公式计算结果, 且在 $2/3H$ 峰值点处达到最大。这说明在低烈度条件下, 规范计算的倾覆力矩大于实际值, 而在高烈度条件下小于实际值, 且随着 PGA 的增大, 与实际值的差距大幅增加。

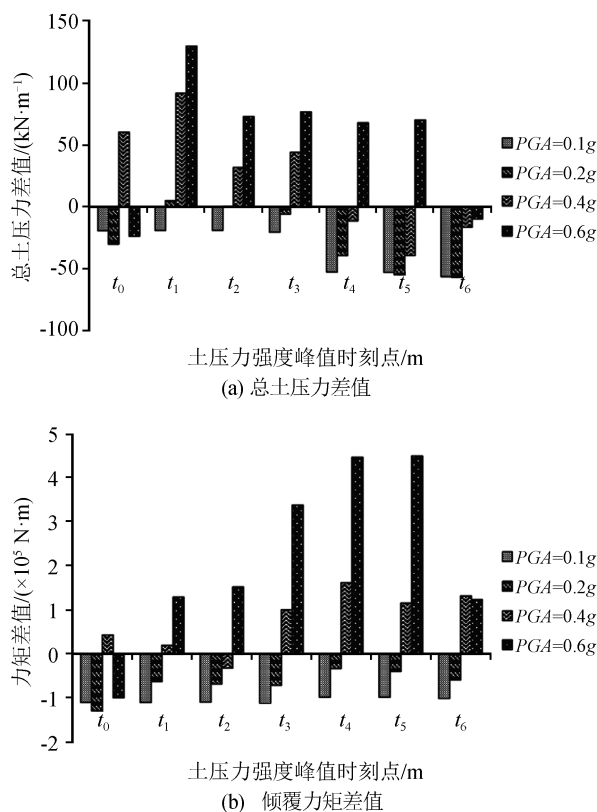


图 9 规范计算与数值模拟总土压力、倾覆力矩差值

Fig.9 Differences of total soil pressure and overturning moment calculated by code and numerical simulation

3 结果讨论

土压力强度峰值随着地震波的传播呈非线性变化, 推测是因为地震波是高频的无规律的往复振动, 而挡土墙和墙后填土的惯性和柔度不同, 在地震水平剪切波作用下, 填土发生非线性的往复位移, 挡土墙和填土的运动速度在大小和方向上存在较大差

异, 导致局部墙土“紧密结合”, 产生土压力放大, 局部墙土“分离”, 土压力减小, 甚至反向的动土压力抵消原静止土压力使得墙背土压力为零。此外, 墙体产生两个土压力放大带会导致局部压力高度集中。对墙顶的放大带而言, 压力集中会使浆砌片石等柔性墙顶部受到较大剪应力产生剪切破坏, 或因局部弯矩放大产生弯折破坏, 且作用点较高, 提高了挡土墙的倾覆力矩; 对中下部的放大带而言, 压力集中会使挡土墙墙背一侧产生较大的局部压应力, 而对应的墙面一侧产生较大的局部拉应力, 可能导致柔性挡土墙发生“鼓胀”破坏或剪切破坏。

对于总土压力和倾覆力矩, 二者皆受土压力强度分布形式所控制。地震波传播过程中, t_1 时刻总土压力最大, t_4 时刻倾覆力矩最大。考虑时程得到的总土压力和倾覆力矩均小于不考虑时程得到的峰值结果, 在低烈度下亦小于规范计算所得结果, 高烈度条件下则大于规范计算结果。这说明在低烈度条件下规范计算偏于保守, 能满足设计要求, 高烈度条件下规范可能不满足设计要求, 易产生水平滑移破坏和倾覆破坏。不考虑时程变化时结果整体偏大, 过于保守。

上述破坏形式与杨冬^[15]、焦方辉^[16]等在四川地震后观察到的挡土墙破坏形式大致相同, 说明模拟结果较符合实际情况。

4 结论与建议

通过数值模拟, 讨论了不同土压力强度峰值时刻点的墙背土压力强度分布形式、总土压力大小、倾覆力矩, 并与不考虑时程变化结果、现行规范计算结果相比较, 得到如下结论:

(1) 挡土墙土压力强度沿墙背均呈非线性分布, 随土压力强度峰值点的升高分布曲线由偏态单峰曲线逐渐变为“S”型甚至“倒三角”型, 且峰值有向挡墙中部集中的趋势。建议规范中增加挡墙土压力放大带采取加强措施的内容, 防止局部土压力放大引起的弯折、剪切、鼓胀等破坏。

(2) 本文数值模拟证明墙背 PGA 虽然同一时刻发生, 但动土压力强度峰值具有随时间变化的特点。目前大部分模型试验和理论分析假设墙背土压力强度峰值同时刻发生, 使结果偏于保守, 应在这方面加强研究工作, 使结果与实际更加接近。

(3) 对于总土压力和倾覆力矩而言, 在较低烈

度(Ⅶ、Ⅷ)条件下,规范计算结果大于数值模拟结果,偏于保守,说明规范计算能满足抗滑和抗倾覆稳定性的要求。但在高烈度Ⅸ、>Ⅸ)条件下,规范计算值小于数值模拟结果,结果偏于危险,建议在高烈度地区验算地震土压力,并加强抗震措施。

挡土墙的地震动力响应是一个比较复杂的问题,受圬工材料、填土类型、地基类型、地震波类型、地震强度、挡墙高度等诸多因素的影响。本文仅仅模拟了6 m墙高条件下不同量级El Centro波对地震土压力的影响,以研究考虑时程影响条件下每个PGA之间土压力结果的细微差别。本文结论可为开展更深入的理论研究及挡土墙设计提供参考,但仍有很大的不足,需要在墙高、地震波类型、地基类型、填土类型等影响因素方面深入研究。

参考文献(References)

- [1] 韩鹏飞.重力式挡墙大型振动台模型试验与基于性能的抗震设计方法研究[D].成都:西南交通大学,2011.
HAN Peng-fei. Performance-based Seismic Design of Gravity Earth-retaining Wall Based on Large Shaking Table Test[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [2] JTG B02-2013, 公路工程抗震规范[S].北京:人民交通出版社,2013.
JTG B02-2013, Specifications of Earthquake Resistant Design for Highway Engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2013. (in Chinese)
- [3] Mononobe N, Matsuo H. On the Determination of Soil Pressure During Earthquakes[C]//Proceedings of the 6th World Engineering Congress. Tokyo: [s.n.], Japan, 1929, (9): 177-185.
- [4] Okabe S. General Theory on Soil Pressure and Seismic Stability of Retaining Walls and Dams[J]. Journal of the Japanese Society of Civil Engineering, 1924, 10(6): 1277-1323.
- [5] 卢廷浩.土力学[M].南京:河海大学出版社,2011:224-226.
LU Ting-hao. Soil Mechanics[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2011: 224-226. (in Chinese)
- [6] 朱桐浩.在地震荷载作用下挡土墙主动土压力[J].四川建筑科学研究,1981(3):37-44.
ZHU Tong-hao. Active Earth Pressure On Retaining Wall under Seismic Load[J]. Sichuan Building Science, 1981(3): 37-44. (in Chinese)
- [7] 林宇亮,杨果林,赵炼恒.地震条件下挡墙后黏性土主动土压力研究[J].岩土力学,2011,32(8):2480-2486.
LIN Yu-liang, YANG Guo-lin, ZHAO Lian-heng. Active Earth Pressure of Cohesive Soil behind Retaining Wall under Seismic Condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2480-2486. (in Chinese)
- [8] 陈奕柏,谢洪波,柯才桐,等.地震条件下黏性土挡土墙土压力分析[J].岩土力学,2014,35(12):3397-3402.
CHEN Yi-bai, XIE Hong-bo, KE Cai-tong, et al. Analysis of Earth Pressure of Cohesive Soil behind a Retaining Wall under Seismic Condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3397-3402. (in Chinese)
- [9] 张建民,宋飞.考虑填土侧向变形的地震土压力计算方法[J].地震工程学报,2013,35(1):9-18.
ZHANG Jian-min, SONG Fei. Evaluation of Seismic Earth Pressure Considering Lateral Deformation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 9-18. (in Chinese)
- [10] 苏晓成,周天来,刘志峰.拟静力法公路路基结构抗震稳定性研究[J].地震工程学报,2014,36(3):482-487.
SU Xiao-chen, ZHOU Tian-lai, LIU Zhi-feng. Seismic Stability Analysis of Highway Subgrade Based on the Pseudo-static Method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 482-487. (in Chinese)
- [11] Steedman R S, Zeng X. The Influence of Phase on the Calculation of Pseudo-static Soil Pressure on a Retainingwall[J]. Geotechnique, 1990, 40(1): 103-112.
- [12] ZENG X, Steedman R S. On the Behavior of Quay Walls in Earthquakes[J]. Geotechnique, 1993, 43(3): 417-431.
- [13] 马少俊,胡安峰,王奎华.地震作用下挡土墙的滑动稳定性分析[J].工程力学,2012,29(7):209-213.
MA Shao-jun, HU An-feng, WANG Kui-hua. Stability Against Sliding Analysis of a Retaining Wall under Seismic Loading Condition[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(7): 209-213. (in Chinese)
- [14] 何思明,王忠福,王娟.考虑地震加速度时程影响的挡土墙动土压力分布[J].四川大学学报:工程科学版,2015,47(4):31-37.
HE Si-ming, WANG Zhong-fu, WANG Juan. Research on the Earth Pressure Distribution behind the Retaining Wall under Seismic Acceleration Influence[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2015, 47(4): 31-37. (in Chinese)
- [15] 杨冬,姚令侃,蒋良潍.土质场地重力式挡土墙地震土压力振动台实验研究[J].防灾减灾学报,2011,27(1):8-15.
YANG Dong, YAO Ling-kan, JIANG Liang-wei. Experimental Study of Seismic Earth Pressure of GRW on Soil Site[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2011, 27(1): 8-15. (in Chinese)
- [16] 焦方辉,姚令侃,蒋良潍,等.岩石场地重力式挡土墙地震土压力振动台实验研究[J].防灾减灾工程学报,2011,31(3):316-321.
JIAO Fang-hui, YAO Ling-kan, JIANG Liang-wei, et al. Shaking Table Model Experimental Study on Seismic Soil Pressure of GRW on Rock Site[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(3): 316-321. (in Chinese)
- [17] 曲宏略,张建经.地基条件对挡土墙地震土压力影响的振动台试验研究[J].岩土工程学报,2012,34(7):1227-1233.

QU Hong-lue,ZHANG Jian-jing.Shaking Table Tests on Influence of Site Conditions on Seismic Earth Pressures of Retaining Wall[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012,34(7):1227-1233.(in Chinese)

[18] 张建经,韩鹏飞.重力式挡墙基于位移的抗震设计方法研究——大型振动台模型试验研究[J].岩土工程学报,2012,34(3):416-423.

ZHANG Jian-jing,HAN Peng-fei.Displacement-based Seismic Design Method for Gravity Retaining Walls——Large Scale Shaking Table Tests[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012,34(3):416-423.(in Chinese)

[19] 陈育民.FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2013:221-224.

CHEN Yu-min.FLAC/FLAC3D Foundation and Engineering Example[M].Beijing:China Water & Power Press,2013:221-224.(in Chinese)

[20] 黄润秋,李果,巨能攀.层状岩体斜坡强震动力响应的振动台试验[J].岩石力学与工程学报,2013,32(5):865-875.

HUANG Run-qiu,LI Guo,JU Neng-pan.Shaking Table Test on Strong Earthquake Response of Stratified Rock Slopes[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(5):865-875.(in Chinese)

(上接 749 页)

JIANG Shu,WEN Bao-ping,ZHAO Chen,et al. Analysis of the Mechanics of Movement of Xieliupo Landslide in Zhouqu, Gansu[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2013,24(3):1-7.(in Chinese)

[10] 黄晓,杨为民,张春山,等.舟曲泄流坡滑坡变形特征及其形成机理[J].地质力学学报,2013,19(2):178-187.

HUANG Xiao,YANG Wei-min,ZHANG Chun-shan,et al. Deformation Characteristics and Growth Mechanics of Xieliupo Landslide in Zhouqu[J].Journal of Geomechanics,2013,19(2):178-187.(in Chinese)

[11] 黄斌,傅旭东,谭凡,等.含水率对滑带土强度及变形影响试验研究[J].岩土力学,2012,33(9):2613-2618.

HUANG Bin,FU Xu-dong,TAN Fan,et al. Experimental Study of Relationship between Water Content and Strength or Deformation of Slip Soil[J].Rock and Soil Mechanics,2012,33(9):2613-2618.(in Chinese)

[12] 李又云,谢永利,刘保健.路基压实黄土动力特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(5):1037-1046.

LI You-yun,XIE Yong-li,LIU Bao-jian.Experimental research on Dynamic Characteristics of Roadbed Compaction Loess[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(5):1037-1046.(in Chinese)

[13] 周健,白冰,徐建平.土动力学理论与计算[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.

ZHOU Jian,BAI Bing,XU Jian-ping. Theory and Calculation of Soil Dynamics[M].Beijing:China Architecture and Building Press,2001.(in Chinese)

[14] 栾茂田,何杨,许成顺,等.黄河三角洲粉土循环剪切特性的试验研究[J].岩土力学,2008,29(12):3211-3216.

LUAN Mao-tian,HE Yang,XU Cheng-shun,et al. Experimental Study of Cyclic Shear Behaviour of Silty Soils in Yellow River Delta[J].Rock and Soil Mechanics,2008,29(12):3211-3216.(in Chinese)

[15] Santos J A,Correia A G.Shear Modulus of Soils under Cyclic Loading at Small and Medium Strain Level.12WCEE,2000.

[16] Matasovic N. Seismic Response of Composite Horizontally-layered Soil Deposits[D]. Los Angeles: Department of Civil Engineering, University of Colifornia at Los Angeles,1993.

[17] 王兰民.黄土动力学[M].北京:地震出版社,2003:23-24.

WANG Lan-min.Loess Dynamics[M].Beijing:Seismological Press,2003:23-24.(in Chinese)

[18] 吴世明.土动力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2000:75-88.

WU Shi-ming.Soil Dynamics[M].Beijing:China Architecture and Building Press,2000:75-88.(in Chinese)