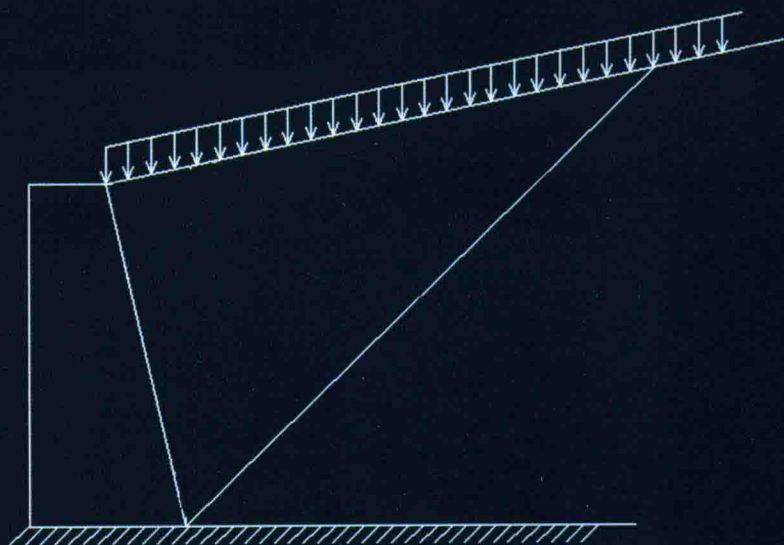




地震作用下挡墙土压力非线性 分布的计算理论与方法

林宇亮 著



科学出版社

地震作用下挡墙土压力非线性 分布的计算理论与方法

林宇亮 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在已有研究成果之上,基于 Mononobe-Okabe 理论的基本假设,综合多种因素推导黏性土地震主动和被动土压力非线性分布的通用公式。求解地震主动和被动土压力临界破裂角的显式解;研究黏性土主动土压力裂缝深度的计算方法;获得地震土压力及其非线性分布较完备的理论解答。通过参数简化,验证 Mononobe-Okabe、Coulomb、Rankine 等经典土压力公式为本书公式的特例。通过与已有试验结果的对比,验证公式的正确性和有效性。对地震主动和被动土压力进行参数分析。为便于理论成果的推广应用,开发地震土压力计算软件,完成土压力计算软件参数输入模块、计算结果输出模块,以及土压力非线性分布的绘图模块,实现土压力计算结果的界面输出和文件输出。研究成果是对抗震规范地震土压力计算理论的补充和拓展,具有显著的工程意义和广泛的应用前景。

本书可供从事岩土工程、道路与铁道工程的广大工程技术人员借鉴,也可供相关大专院校和科研院所的研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地震作用下挡墙土压力非线性分布的计算理论与方法 / 林宇亮著. —北京:科学出版社, 2017.6

ISBN 978-7-03-053100-1

I. ①地… II. ①林… III. ①挡土墙-地震时土压力-压力分布-计算方法
IV. ①TU432-32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 124062 号

责任编辑:刘凤娟 / 责任校对:彭 涛

责任印制:张 伟 / 封面设计:正典设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京数图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017 年 6 月第一次印刷 印张:12

字数:221 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

土压力计算是岩土工程领域一个经典而又复杂的问题。在地震土压力方面,目前应用最为广泛的是基于极限平衡理论的 Mononobe-Okabe 理论。尽管如此, Mononobe-Okabe 公式没有考虑填土黏聚力的影响,只适用于无黏性土的地震土压力计算;另一方面, Mononobe-Okabe 公式只能获得土压力合力大小,无法得到土压力非线性分布和土压力合力作用点位置。因此,对于无黏性土, Mononobe-Okabe 公式隐含假设地震土压力为直线分布,土压力合力作用点位置在距离墙底 $1/3$ 墙高处。这种“直线”分布的假设与实际情况往往存在较大的差异,可能使挡墙抗震检算得到的安全稳定性系数偏高,在工程应用上安全性偏低。

本书基于 Mononobe-Okabe 理论的基本假设,综合多种因素推导黏性土地震主动和被动土压力非线性分布的通用公式。求解地震主动和被动土压力临界破裂角的显式解;研究黏性土主动土压力裂缝深度的计算方法;获得地震土压力及其非线性分布较完备的理论解答。通过参数简化,验证 Mononobe-Okabe、Coulomb、Rankine 等经典土压力公式为本书公式的特例。通过与已有试验结果的对比,验证公式的正确性和有效性。对地震主动和被动土压力进行参数分析。为便于理论成果的推广应用,开发地震土压力计算软件,完成土压力计算软件参数输入模块、计算结果输出模块,以及土压力非线性分布的绘图模块,实现土压力计算结果的界面输出和文件输出。对比于 Mononobe-Okabe 理论,本书主要补充和拓展工作体现在以下四个方面:

(1) 综合考虑填土黏聚力、墙土黏结力、水平和垂直地震系数、墙背倾角、墙背填土面倾角、填土内摩擦角、墙土摩擦角、均布超载等多种因素的影响,将地震土压力公式拓展为可适用于黏性土、不同填土面倾角和不同墙背倾角的地震主动和被动土压力计算。

(2) 基于条分法的思想,推导了复杂条件下地震主动和被动土压力非线性分布以及土压力合力作用点位置的解析解,弥补了线性分布假设的缺陷和不足。

(3) 提出了黏性土地震主动土压力裂缝深度的迭代计算方法。结果表明,裂缝深度受填土黏聚力、填土内摩擦角、水平和垂直地震系数、墙土黏结力等多种因素的影响。对比于 Rankine 主动土压力裂缝深度计算公式,本书计算结果更为合理。

(4) 通过将土压力合力与破裂角的三角函数关系式转换为土压力合力与几何边长的关系式, 突破了超越方程求解等数学难题, 获得了复杂条件下地震主动和被动土压力临界破裂角的显式解析解。

本书是在已有研究成果基础上做的补充和拓展工作。书中给出了地震土压力计算公式的详细推导过程, 并附上了地震土压力计算软件的源程序代码。如能对科学工作者或工程技术人员有所借鉴或裨益, 作者将倍感欣慰。

本书的出版得到了国家自然科学基金面上项目“高边坡复合支挡结构抗震设计方法与试验研究”(编号: 51678571)、“高速铁路膨胀土路堑新型防排水基床结构研究”(编号: 51478484), 国家自然科学基金青年项目“挡墙黏性土地震土压力非线性分布的分析方法研究”(编号: 51308551), 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目“地震作用下组合式边坡支挡结构计算理论与分析方法”(编号: SKLGDUEK1705)等项目的资助, 在此深表感谢。研究生石峰、汤兵等做了整理、校对等工作, 在此一并致谢。

限于知识水平, 书中难免有疏漏和不足之处, 敬请广大读者批评指正。

林宇亮

2017年3月24日

主要符号

- H 挡墙墙高 (m)
- h_c 主动土压力裂缝深度 (m)
- H' $H'=H-h_c$ (m)
- k_h 水平地震系数
- k_v 垂直地震系数
- η 地震角 ($^\circ$)
- γ 土体重度 (kN/m^3)
- α 挡墙墙背与垂直面的夹角 ($^\circ$)
- β 墙背填土面与水平面的夹角 ($^\circ$)
- c 填土黏聚力 (kPa)
- c' 墙背与填土之间的黏结力 (kPa)
- φ 填土内摩擦角 ($^\circ$)
- δ 墙背与填土之间的摩擦角 ($^\circ$)
- q_0 挡墙墙背填土面的均布超载 (kPa)
- q_1 裂缝深度处墙背填土面的上覆压力 (kPa)
- θ 土压力破裂角 ($^\circ$)
- θ_{acr} 主动土压力临界破裂角 ($^\circ$)
- θ_{pcr} 被动土压力临界破裂角 ($^\circ$)
- E_a 地震主动土压力合力 (kN/m)
- E_p 地震被动土压力合力 (kN/m)
- z_0 土压力合力作用点位置至墙底的距离 (m)
- z_0/H' 归一化处理后土压力合力作用点位置至墙底的距离
- W 墙后土楔体自重 (kN/m)
- dW 微元土体单元自重 (kN/m)
- $p(h)$ 距墙顶 h 深度处的墙背土压力强度 (kPa)
- $q(h)$ 距墙顶 h 深度处微元体单元的上覆压力 (kPa)
- R 滑动面以下土体对滑动土楔体的支持反力 (kN/m)

$r(h)$ 距墙顶 h 深度处微元体单元在滑动面处的支持反力 (kPa)

K_{1a} 、 K_{2a} 、 K_{3a} 、 K_{4a} 分别指与填土自重、均布超载、填土黏聚力和墙土黏结力相关的地震主动土压力系数

K_{1p} 、 K_{2p} 、 K_{3p} 、 K_{4p} 分别指与填土自重、均布超载、填土黏聚力和墙土黏结力相关的地震被动土压力系数

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 极限平衡状态下的挡墙地震动土压力	2
1.2.2 不同位移模式下的挡墙地震动土压力	4
1.2.3 地震动土压力的其他计算方法	5
1.2.4 地震动土压力的数值分析方法	6
1.2.5 地震动土压力的试验研究	7
1.3 主要研究工作	8
第 2 章 地震作用下挡墙主动土压力解答	10
2.1 概述	10
2.2 地震主动土压力公式推导	11
2.2.1 地震主动土压力极限平衡方程	11
2.2.2 地震主动土压力分布强度	14
2.2.3 地震主动土压力合力和作用点位置	19
2.2.4 地震主动土压力临界破裂角	21
2.3 考虑裂缝深度的地震主动土压力	27
2.3.1 考虑裂缝深度的主动土压力分布强度	27
2.3.2 考虑裂缝深度的主动土压力合力和作用点位置	28
2.3.3 考虑裂缝深度的主动土压力临界破裂角	29
2.4 地震主动土压力公式与已有公式的比较	34
2.4.1 与王云球主动土压力计算结果的比较	34
2.4.2 与王渭漳和吴亚中的主动土压力计算结果的比较	35
2.4.3 与 Mononobe-Okabe 主动土压力公式的比较	37
2.4.4 与 Coulomb 主动土压力公式的比较	38

2.4.5	与 Rankine 主动土压力公式的比较	39
2.5	地震主动土压力算例对比	40
2.6	地震主动土压力参数分析	47
2.6.1	水平和垂直地震系数对地震主动土压力的影响	48
2.6.2	墙背倾角对地震主动土压力的影响	49
2.6.3	填土面倾角对地震主动土压力的影响	51
2.6.4	填土内摩擦角和墙背外摩擦角对地震主动土压力的影响	54
2.6.5	填土黏聚力和墙土黏结力对地震主动土压力的影响	56
2.6.6	均布超载对地震主动土压力的影响	58
2.6.7	挡墙墙高和填土重度对地震主动土压力的影响	59
2.7	本章小结	61
第 3 章	地震作用下挡墙被动土压力解答	62
3.1	概述	62
3.2	地震被动土压力公式推导	63
3.2.1	地震被动土压力极限平衡方程	63
3.2.2	地震被动土压力分布强度	65
3.2.3	地震被动土压力合力和作用点位置	70
3.2.4	地震被动土压力临界破裂角	71
3.3	地震被动土压力公式与已有公式的比较	77
3.3.1	与王云球被动土压力计算结果的比较	77
3.3.2	与 Mononobe-Okabe 被动土压力公式的比较	78
3.3.3	与 Coulomb 被动土压力公式的比较	80
3.3.4	与 Rankine 被动土压力公式的比较	81
3.4	地震被动土压力算例对比	81
3.5	地震被动土压力结果与分析	83
3.5.1	水平和垂直地震系数对地震被动土压力的影响	83
3.5.2	墙背倾角对地震被动土压力的影响	85
3.5.3	填土面倾角对地震被动土压力的影响	86
3.5.4	填土内摩擦角和墙背外摩擦角对地震被动土压力的影响	87
3.5.5	填土黏聚力和墙土黏结力对地震被动土压力的影响	88
3.5.6	均布超载对地震被动土压力的影响	89
3.5.7	挡墙墙高和填土重度对地震被动土压力的影响	90
3.6	本章小结	91

第4章 地震土压力计算软件开发	92
4.1 概述	92
4.2 软件设计内容	92
4.2.1 主窗口界面设计	94
4.2.2 主动土压力计算窗口界面设计	94
4.2.3 被动土压力计算窗口界面设计	96
4.3 软件使用说明	98
4.3.1 文件的启动与运用	98
4.3.2 主界面窗口使用说明	99
4.3.3 主动土压力计算窗口使用说明	99
4.3.4 被动土压力计算窗口使用说明	103
4.4 软件计算算例	105
4.4.1 地震主动土压力计算算例	105
4.4.2 地震被动土压力计算算例	109
4.5 本章小结	111
第5章 结论与展望	112
5.1 研究工作总结	112
5.2 研究工作展望	113
参考文献	114
附录 地震土压力计算软件源程序代码	123

第1章 绪 论

1.1 研究背景

我国是地震多发国家。纵观近两千多年,我国的地震活动具有频次高、强度大、分布广的特点。在20世纪的100年间,我国共发生6级以上破坏性地震650余次,其中,1920年12月16日的海原地震和1976年7月28日的唐山大地震造成的死亡人数均达到了20万以上。进入21世纪以来,尤其是2008年四川汶川地震,其震级大、破坏力强、破坏面广,造成了大量的人员伤亡和巨大的经济财产损失。汶川地震是新中国成立以来破坏力最大的地震,也是唐山大地震后伤亡最严重的一次地震。汶川地震中,超过19.7万的边坡发生破坏^[1, 2],大量的路基及边坡挡墙发生破坏,其中较大规模的垮塌多达1736处^[3, 4]。

巨大的地震灾害给现行抗震设防技术带来了挑战。在边坡及支挡结构抗震设计方面,我国的《铁路工程抗震设计规范》(GB50111—2006)在2008年汶川地震后进行了局部修订,并于2009年12月颁布实施。在考虑支挡结构地震作用时,主要参考资料为1980年四川省建筑科学研究院《模拟地震荷载作用重力式挡土墙土压力的模型试验》的研究成果。在确定边坡与支挡结构地震力时,采用了拟静力法;在验算支挡结构地震稳定性时,采用的是Mononobe-Okabe(M-O)地震土压力分析理论。在公路抗震设计方面,我国交通运输部于2013年12月颁布了《公路工程抗震规范》(JTGB02—2013)。在进行挡墙抗震设计时,则沿用了铁路抗震规范的设计思想,采用Mononobe-Okabe理论来确定挡墙墙背的地震土压力。

Mononobe-Okabe理论是在Coulomb土压力基础上发展而来的,并假定挡墙后填土处于主动和被动土压力极限平衡状态。因此,一方面,Mononobe-Okabe公式推导时延续了Coulomb理论中无黏性填土的假定,使得公式的适用范围有限。另一方面,Mononobe-Okabe公式取墙后土楔体进行整体受力平衡分析,只能求解土压力合力而无法获得土压力分布规律以及土压力合力作用点位置,因此Mononobe-Okabe公式隐含假设土压力为直线分布,土压力合力作用点位置在距墙底1/3墙高处。已有研究成果表明,地震土压力合力大小与Mononobe-Okabe公式

计算结果比较接近,但土压力通常为非线性分布,且在很多工况下,地震主动土压力的作用点位置要比线性分布假设的更高。也就是说,土压力分布采用“直线型”假设是存在较大缺陷的,这将使挡墙抗震检算得到的安全稳定性系数偏高,在工程应用上是偏不安全的。因此,地震条件下土压力分布规律及土压力合力作用点位置是一个亟待解决的重要问题。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 极限平衡状态下的挡墙地震动土压力

土压力计算是岩土工程领域一个经典而又复杂的问题。挡墙土压力的类型和大小与墙身位移等因素有关,随着挡墙位移量的变化,土压力的大小可能变化于主动和被动土压力两个极限值之间,土压力方向也随之变化。尽管如此,现有的土压力理论仍主要是研究极限状态下的土压力,Rankine 土压力理论和 Coulomb 土压力理论是极限状态下静土压力计算的两个经典理论。

地震作用下挡墙土压力计算是支挡结构抗震设计的重要内容。地震动土压力研究是在 1923 年日本关东大地震后才开始的,日本学者首先提出了适用于土体极限平衡状态下地震主动土压力计算的 Mononobe-Okabe 公式^[5-7]。随后, Kapila^[8]发展了与 Mononobe-Okabe 主动土压力公式相对应的地震被动土压力公式。Mononobe-Okabe 土压力公式是基于 Coulomb 理论假定,地震作用按拟静力法考虑,并通过对挡墙后滑动土楔体建立极限状态平衡方程来求解主动和被动土压力的。尽管在地震作用下挡墙与土体的实际受力情况要比 Mononobe-Okabe 理论假设复杂得多,但 Mononobe-Okabe 公式仍被推荐为侧向动土压力计算的标准方法。Mononobe-Okabe 公式的贡献,在岩土工程领域被认为与 Coulomb 公式、Terzaghi 固结方程并列^[9]。

尽管如此, Mononobe-Okabe 公式的诸多假定使得公式的适用范围有限:①公式推导时没有考虑黏聚力的影响,只适用于无黏性土的地震土压力计算;②公式只适用于 $\alpha + \delta + \eta < 90^\circ$ (α 为墙背倾角, δ 为挡墙墙背与填土的外摩擦角, η 为地震角) 和 $\beta + \eta + \varphi$ (β 为墙背填土坡角, φ 为填土内摩擦角) 的情况。因此,很多学者对其进行补充、拓展和简化。王云球^[10]、陈国祝^[11]、冯震等^[12]、Kim 等^[13]、Ghosh 等^[14, 15]、Shukla 和 Habibi^[16]分别采用不同的方法研究了考虑黏聚力的地震动土压力计算公式。Caltabiano 等^[17]研究了不同超载条件下挡墙的地震动土压力。Wang 等^[18, 19]研究了渗流和超载条件下地震被动土压力计算方法。应宏伟等^[20, 21]、涂兵雄和贾金青^[22]

研究了考虑土拱作用的土压力计算方法。Morrison 和 Ebeling^[23] 在假设挡墙墙后土体为对数螺旋破裂面的条件下对 Mononobe-Okabe 公式进行了改进。Seed 和 Whitman^[24] 在“填料为非黏性土, 墙背平直、光滑, 填土面水平, 挡墙加速度与土楔体加速度相同”等假设条件下简化了 Mononobe-Okabe 公式, 仅需知道内摩擦角和地震动峰值加速度就可以求出地震动土压力。李涛^[25] 针对铁路桥台采用水平地震系数法导出了非黏性土地震土压力简化计算公式, 避免了 Mononobe-Okabe 公式中地震角的概念。梁波^[26] 在考虑铁路荷载特点以及墙背仰斜较大时土压力计算可能产生误差的基础上, 提出了计算地震土压力的简化公式, 突破了 Mononobe-Okabe 公式在填土水平、内摩擦角小于地震角时无法计算的局限。

另一方面, 在推导地震动土压力时取挡墙后土楔体进行整体受力平衡分析, 只能获得土压力合力大小而无法得到土压力非线性分布情况和土压力合力作用点位置, 因此对于无黏性土, Mononobe-Okabe 公式隐含假设地震动土压力为直线型分布, 土压力合力作用点位置在距离墙底 $1/3$ 墙高处。而大量的研究成果表明^[27-30], 地震土压力合力大小与 Mononobe-Okabe 公式计算结果非常接近, 但土压力分布通常是非线性的, 而且作用点位置比线性分布假设的要高。欧洲规范规定, 一般情况下, 土压力合力作用点在 $1/2$ 墙高处; 新西兰规范规定, 对于刚性墙, 合力作用点在 $1/2$ 墙高处, 对于完全刚性墙, 合力作用点在 0.58 墙高处。也就是说, 采用拟静力法可以有效地获得地震动土压力合力大小, 但土压力分布采用“直线型”假设存在较大缺陷, 其降低了挡土结构物的抗震稳定性, 在工程应用上是偏不安全的。因此, 地震条件下土压力分布情况及土压力合力作用点位置是一个亟待解决的重要问题。

鉴于此, 很多学者将薄层微元分析法引入土压力计算中^[31-36]。薄层微元分析法的思想是由 Lo 和 Xu^[37] 较早提出来的, 该方法通常将土体划分为若干水平微元体, 通过建立水平微元体的极限平衡方程来求解岩土构筑物强度及稳定性问题。目前水平层分析法已广泛应用于土坡和挡墙等结构的稳定性分析中^[38-42]。在进行地震动土压力计算时, 薄层微元分析法能很好地解决土压力分布和作用点位置的问题。薄层微元分析法不需要事先假定土压力合力作用点的位置, 通过选取挡墙后土体微元建立极限状态平衡方程即可求解挡墙后土压力分布规律、土压力合力及作用点位置的表达式, 薄层微元分析法也因此被称为土压力的非线性分布解法^[43]。Wang^[44] 在墙背直立、填土面水平等条件下通过选取墙后水平土体微元建立水平和垂直两个方向的极限平衡状态方程, 得到了无黏性土土压力分布的理论公式。王立强等^[45] 推导了地震作用下无黏性土土压力公式。杨剑等^[46] 在填土面水平条件下, 通过水平层分析法获得了地震作用下非黏性土被动土压力公式, 并给出了

临界破裂角的数值解答。Zhu 等^[47, 48]在极限平衡法的框架内采用条分法获得了静土压力和地震土压力的计算流程。林宇亮等^[49, 50]基于 Mononobe-Okabe 基本假设,在墙背填土面水平的条件下采用水平层分析法研究了黏性土地震动土压力及其非线性分布解答,采用图解法给出了主动和被动土压力临界破裂角的显式解答,讨论了复杂条件下黏性土主动土压力裂缝深度计算方法,并对地震动土压力进行了参数分析。尽管如此,现有的研究成果多没有综合考虑水平和垂直地震加速度、墙背倾角、填土面倾角、墙背与填土黏结力和外摩擦角、填土黏聚力和内摩擦角、均布超载等多种因素的影响,使得公式应用存在局限性。同时,在综合考虑多种因素的复杂条件下,地震动土压力临界破裂角求解问题也是一个迫切需要解决的难题。通常情况下,求解土压力临界破裂角可根据主动和被动土压力存在的原理^[51]:“在所有可能的破裂角中,正好存在一个主动(被动)土压力临界破裂角,使得主动(被动)土压力达到极大值(极小值)。”为此,只需将土压力合力对破裂角求极值便可得到土压力合力和临界破裂角的解答。常采用数学中“求导数”的方法,但采用该方法求解复杂条件下土压力临界破裂角时往往会遇到难以求解的超越方程,从而无法得到土压力合力和临界破裂角的显式解答,因此一些学者采用了数值解法^[46]。另外,地震作用下黏性土主动土压力计算也应考虑裂缝深度的影响,而国内外这方面的研究成果很少,尤其是在复杂条件下黏性土主动土压力裂缝深度的研究成果更是少见。针对上述不足,综合考虑多种因素研究复杂条件下黏性土地震动土压力及其非线性分布通用解答具有十分重要的意义。

1.2.2 不同位移模式下的挡墙地震动土压力

上述讨论的主动和被动土压力是假设挡墙产生了足够位移使得墙后填土达到了主动和被动极限平衡状态而得到的。主动和被动土压力分别是墙体移离填土和墙体挤压填土使得填土发生主动和被动破坏时墙上受到的最小土压力和最大土压力。实际上,作用在墙背上的土压力是和墙体的位移大小有很大关系的,当挡墙墙背在地震作用下没有达到主动和被动极限平衡状态所需的位移量时,墙背土压力会有很大的差别。另一方面,目前国内外学者已充分意识到挡墙抗震设防不仅仅是强度问题,还应考虑墙体位移对其抗震设防的要求,基于位移控制标准的设计思想也越来越受到重视,甚至在一些国家的抗震设计规范中已将变形控制标准作为岩土结构物抗震设防的基本方法^[52, 53]。在不同位移模式下,挡墙地震动土压力计算倘若依旧采用土体极限平衡状态假设的 Mononobe-Okabe 理论,显然是存在较大缺陷的。由此,不同位移模式挡墙地震动土压力研究的

意义显得十分重要。

不同位移模式土压力方面的研究已受到国内外学者的关注和重视。当填土介于主动和被动两个极限平衡状态时,除静土压力这一特殊情况外,填土处于弹性或弹塑性平衡状态,这种情况下的土压力计算是比较复杂的,通常情况下涉及挡墙和填土等变形强度特性和共同作用等问题。Bang^[54]认为土体从静止状态到极限主动状态是一个渐变的过程,提出中间主动状态的概念,指出土压力计算应考虑墙体位移大小和模式。当挡墙位移大小和位移模式改变时,挡墙系统的内、外摩擦角发挥程度也会随之变化,当内、外摩擦角达到最大值时,墙后塑性滑动楔体形成,土压力便达到极限状态^[55]。因此,一些学者建立了内、外摩擦角与位移之间的关系公式,并由此将土压力系数或土压力分布强度同挡墙位移联系起来,得到考虑位移效应的非极限状态土压力计算公式^[56-58]。张永兴等^[59]基于水平微分单元法的思想得到对应于不同内、外摩擦角和挡土墙位移的侧土压力系数,由此求解挡土墙平移模式下非极限状态土压力公式。这些研究成果都有力地推动了不同位移模式挡墙土压力计算理论的发展。

除此之外,Zhang等^[60, 61]基于“中间滑楔体”的概念,提出了能用于评价挡墙从主动到被动土压力状态之间的任意侧向位移条件下的地震动土压力理论,该理论根据地震土压力形成机理将其划分为土体有效重度分量、惯性作用分量、附加荷载分量和残余土压力分量,并给出了各分量合力及其作用点的公式,为不同位移模式挡墙地震动土压力计算提供了新的思路和方法。

1.2.3 地震动土压力的其他计算方法

基于 Mononobe-Okabe 理论的土压力计算方法依旧是地震动土压力计算的标准方法。尽管如此,国内外学者研究和开发了地震动土压力计算的其他方法,包括极限位移理论、拟动力法、考虑土体-结构相互作用的动力分析法、能量法(极限分析上限法)、特征线法(也称滑移线法)等。

Richards等^[62]结合 Mononobe-Okabe 理论和 Newmark 滑块模型,取最大加速度、最大速度以及容许位移作为控制量,从而计算挡土墙的地震土压力,但该方法忽略了竖直加速度的影响、挡墙倾斜位移以及地震土压力的时变性。随后,一些学者对其进行了改进和补充。Zarrabi-Kashani^[63]研究了在水平和竖直加速度作用下且破裂面倾角发生变化时的动态地震土压力计算。Nadim^[64]、Wong^[65]等将 Richards 的方法扩展到可考虑竖直加速度、挡土墙的滑动和倾斜等复杂情况的地震土压力计算。

拟动力法考虑地震波传播时水平和垂直加速度放大系数沿墙高的分布情

况,通过建立墙后土体极限平衡方程来求解地震动土压力,考虑了包括土体振动频率在内的诸多动力参数的影响。Choudhury 和 Nimbalkar^[66]采用拟动力法研究了非黏性土地震动土压力分布情况,并对地震动土压力进行了参数分析。Kolathayar 和 Ghosh^[67]等采用拟动力法研究了当挡墙墙背折线变化时的地震主动土压力分布情况。Azad 等^[34]将拟动力法同水平层分析法结合,得到了地震土压力合力达到峰值前后土压力沿墙背分布的变化情况。Sima 和 Richi^[68, 69]采用拟动力法研究了挡墙墙背倾斜、填土面倾斜时的地震动土压力。Ahmad 和 Choudhury^[70]将拟动力法运用到加筋土挡墙地震土压力的计算之中。然而,拟动力法在理论上存在一些不足,例如,拟动力法直接将弹性波动理论应用于考虑塑性屈服的土体中;也没有考虑土体边界弹性波的反射、折射等现象的影响。

基于土体-结构动力相互作用的动土压力分析法在理论上是比较严谨的。该方法须解决地震波输入机制、土体-结构系统初始状态及动力相互作用模型、土的动力本构模型及参数选取以及动力数值计算模型与方法等诸多问题^[71, 72]。周健等^[73]采用一种能考虑软土振动孔压变化以及土体-结构动力相互作用等因素的软土地下建筑物抗震稳定分析方法,对上海地铁一号线典型地铁车站结构进行地震动土压力计算。Navarro 和 Samartin^[74]通过建立 Rayleigh 波作用下土体-结构相互作用时域控制方程来求解刚性挡墙的动土压力,并研究了激振频率对地震土压力的影响。

基于能量守恒定理,根据外力做功与内部能耗相等的原则来求解土压力的方法已经得到很大的应用^[75]。在采用能量法计算地震动土压力时,地震作用也多采用拟静力法来考虑。Yang 和 Yin^[76-78]、Soubra 等^[79]、陈昌富等^[80]基于非线性破坏准则和极限分析上限法,研究了地震作用下的被动土压力公式。

Cheng^[81]采用特征线法并通过旋转坐标轴来求解地震作用下的侧向土压力。Panos 等^[82]、Santolo 和 Evangelista^[83]、彭明祥^[84-88]考虑挡墙墙背土体塑性应力区的方法来求解挡墙土压力也具有新意。

1.2.4 地震动土压力的数值分析方法

Nadim 和 Whitman^[89, 90]采用有限元方法进行挡土墙运动模式研究时指出,地震作用引起的应力重分布使得挡土墙墙背产生的残余应力可能会比静态主动土压力大 30%左右。Jung 和 Bobet^[91]通过数值模拟研究了不同位移模式下挡墙的地震动土压力。Psarropoulos 等^[92]采用有限元法研究了刚性和柔性挡墙地震土压力的分布情况。Zeng 和 Madabhushi 等^[93-96]结合离心模型试验,在进行挡墙土压力有限元分析时考虑了土体的非线性反应特性以及孔隙水压力的影响,结果表明,

数值模拟与试验结果吻合得比较好。另外,在有限元边界效应的处理方面,陈学良和袁一凡^[97-101]运用解耦的近场波动数值模拟技术成功处理了数值模拟中无限域条件的模拟,并研究了地震波输入时动土压力和动土剪力的大小、合力作用点、土压力分布规律等,为改进挡土墙的抗震设计提供了有益的资料。

1.2.5 地震动土压力的试验研究

在试验研究方面,地震动土压力的研究手段主要包括振动台试验和离心机试验等。在离心试验研究方面,Linda和Nicholas^[102]通过离心试验研究了动土压力的分布情况,并指出动土压力最大值沿着挡墙墙高逐渐增大,在墙底达到最大,土压力分布可近似为三角形分布。Dewoolkar等^[103]对悬臂式挡墙后液化土土压力开展了动力离心机试验,并成功测试了静土压力和动土压力。张连卫和张建民^[104]开展了考虑各向异性土压力的离心模型试验,并指出墙后主动土压力受填土强度各向异性影响的程度可能达到40%。Woodward和Griffiths^[105]提到Ortiz等进行了悬臂式挡墙的离心试验,并指出地震土压力分布是非线性的。

在振动台试验研究方面,Koseki等^[106]、Watanbe等^[107]通过开展一系列加筋土挡墙、重力式挡墙及悬臂式挡墙的振动台试验来分析不同形式挡墙的地震稳定性及墙背土压力。Tamura和Tokimatsu^[108]采用振动台试验对比了存在液化现象和无液化现象时的墙背土压力。刘昌清等^[109]对重力式路肩墙、重力式路堤墙和衡重式挡墙三种挡墙的动土压力分布开展了足尺试验研究。陈学良等^[110]提到Neelakantan对变幅正弦输入下的L形挡墙的动土压力进行了振动台试验分析。这些试验成果都极大程度地推动了地震土压力的发展,并为地震土压力的后续试验研究提供了重要佐证。尽管如此,在地震动激励下挡墙可能发生的位移具有随机性,墙后土体所处的状态也具有不确定性,倘若将非极限状态下的地震土压力试验结果同极限状态假设下的土压力理论进行对比分析,在理论上是不严谨的。为解决这个问题,一些学者制作了活动挡墙,通过控制挡墙位移来测试不同应力状态下的墙后土压力,并通过观测土体变位及滑裂面形成情况来定性判断土体的极限平衡状态^[111],或结合挡墙位移和土压力的测试结果进行定量判断^[112-114]。这种试验方法在静土压力测试中已经得到了广泛的应用^[115-117]。在地震土压力试验方面,Sherif、Ishibashi和Fang^[112, 113]在正弦波激励下通过控制挡墙移离土体的位移,测试了不同位移模式下无黏性土地震土压力的分布结果,并将达到主动极限状态时的地震土压力试验结果同Mononobe-Okabe公式进行了对比。Ichihara和Matsuzawa^[114]制作了活动挡墙,测试了正弦波激励下的挡墙土压力合力、合力作用点位置以及墙背外摩擦角,并结合测试结果判断土体的主动土压力极限平衡状