

文章编号:0559-9350(2011)05-0602-07

基于有限元滑面应力法的重力式挡土墙结构抗滑稳定分析

邵龙潭, 刘士乙, 李红军

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 在平面应变条件下, 采用基于弹塑性有限元应力应变分析的滑面应力分析法对重力式挡土墙结构的稳定性及主动土压力进行研究, 该法可直接评判挡土墙结构整体的抗滑稳定。通过与传统土压力理论比较分析, 发现挡土墙后土体达到临界状态时, 利用该法得到的滑裂面的安全系数、破裂角和主动土压力幅值与理论解有较好的一致性, 表明本文方法可行、可靠。随后对填土性质参数进行了敏感性分析, 并运用该法对挡土墙结构进行了深层抗滑稳定安全验算, 可为重力式挡土墙结构安全设计提供可靠依据和技术支撑。

关键词: 重力式挡土墙; 有限元; 滑面应力分析法; 主动土压力; 抗滑稳定

中图分类号: TU432

文献标识码: A

1 研究背景

重力式挡土墙具有结构简单, 施工方便, 能够就地取材, 造价低等优点, 是土木工程中应用最为广泛的一种支挡结构。目前, 重力式挡土墙结构稳定安全验算重点在于土压力, 然后通过验算地基承载力、墙体抗滑和抗倾稳定性确定其整体稳定性^[1-3]。将土体与墙体分开单独分析, 虽然计算简单, 但忽略了墙、填土、地基之间的相互作用以及结构的整体性。现工程上应用最多的仍是经典Coulomb和Rankin土压力理论, 然而, 大量学者通过数值计算和试验验证表明, 墙体和土体之间的相互作用力——土压力的大小和分布形式与墙体的变形存在直接关系, 指出只有当土体水平位移达到一定幅值, 土体达到极限平衡状态时, 经典Coulomb、Rankin土压力值才准确。另外, 研究表明主动土压力沿墙体的分布也与传统的理论存在一定差异, 其分布规律并不严格遵循三角形分布^[4-6]。

有限元法作为一种广泛应用的数值计算方法, 可以有效地用于挡土墙结构的应力应变分析^[4-6], 并能够考虑土体的非线性应力应变关系, 比较准确地确定墙体与土体的应力与协调变形。另外, 利用接触单元的特殊性质, 还可合理考虑墙、填土、地基三者之间的相互作用对结构整体稳定性的影响。随着有限元法的发展, 产生的有限元滑面应力法可直接判定挡土墙结构的整体抗滑稳定性而无需进行土压力计算。本文采用大型商业软件ANSYS, 基于弹塑性有限元应力分析得到应力场, 尝试利用有限元滑面应力法直接评价重力式挡土墙结构整体抗滑稳定性。

2 重力式挡墙结构稳定分析方法

2.1 有限元模拟 目前, 岩土结构数值分析多采用理想弹塑性模型, 其中广义米塞斯屈服准则, 即Drucker-Prager(D-P)准则, 因其参数易于确定, 且屈服面光滑和易计算等优点应用较广。其屈服函数 F 表达式为

收稿日期: 2009-07-23

作者简介: 邵龙潭(1963-), 男, 吉林梨树人, 教授, 主要从事土和颗粒体材料基本理论研究及土工试验仪器的研制与开发研究。E-mail: shaolt@dlut.edu.cn

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (1)$$

式中： I_1 为应力张量第1不变量； J_2 为应力偏量第2不变量； α 、 k 为与岩土材料强度参数黏聚力 c 、内摩擦角 ϕ 有关的常数，通过变换 α 、 k 即可在弹塑性有限元分析中考虑不同形式的D-P屈服准则，包括外角点外接圆、内角点外接圆、内切圆、摩尔-库伦匹配圆(关联型和非关联型)和摩尔-库伦等面积圆等。

赵尚毅等^[6]采用D-P准则通过ANSYS软件对挡土墙土压力进行有限元数值模拟研究后，指出墙后土体材料应采用摩尔-库伦等面积圆屈服准则，此时得到的土压力幅值与库伦主动土压力公式计算结果较为接近。因此，本文在进行挡土墙结构弹塑性应力分析时采用摩尔-库伦等面积圆的D-P准则，参数转换公式为

$$k = \frac{6\sqrt{3}c \cos \phi}{\sqrt{2\sqrt{3}\pi(9 - \sin^2 \phi)}}, \quad \alpha = \frac{2\sqrt{3} \sin \phi}{\sqrt{2\sqrt{3}\pi(9 - \sin^2 \phi)}} \quad (2)$$

在墙体结构整体有限元计算模型中，挡墙、墙后填土和地基均采用二维四节点实体单元(PLANE42)模拟，挡土墙与墙后填土以及墙与地基之间的相互作用均采用ANSYS提供的接触单元(CONTA171与TARGE169)模拟。

2.2 土体结构稳定分析的有限元滑面应力法^[7] 近年来，有限元滑面应力法已成功应用于天然边坡、填筑和开挖边坡、堆石坝、土钉支护基坑、土工加筋结构、抗滑桩等稳定分析及土体结构极限承载力的研究^[7-10]，取得良好的工程效果。本文将该法用于挡墙结构整体抗滑稳定性分析。

在平面应变问题中，土体中任意一点的土体抗剪强度可依据Mohr-Coulomb强度准则确定，其抗剪强度为

$$\tau_f = \sigma_n \tan \phi + c \quad (3)$$

式中： σ_n 为法向应力； ϕ 和 c 分别是土体的内摩擦角和黏聚力。滑动面安全系数 F_s 定义为沿滑动面土体抗剪强度与实际剪应力的比值：

$$F_s = \frac{\int (\sigma_n \tan \phi + c) dl}{\int \tau dl} \quad (4)$$

基于弹塑性有限元分析得到的整体应力场，用线性插值方法确定给定滑动面上各控制节点的应力值，依据式(4)定义的安全系数计算最危险滑动面的抗滑安全系数，采用广义数学规划法中的模式搜索法即Hooke-Jeeves法优化搜索最危险滑动面的位置及其相应的最小安全系数，具体计算步骤如下：(1)利用弹塑性有限元应力分析，确定结构中各单元高斯点的应力；(2)依据超收敛应力分片覆盖技术将高斯点应力外推至单元各节点应力；(3)确定与滑面相交的土体单元，依据加权平均法则确定滑面上各控制节点的应力；(4)在给定的搜索范围内，给定多条初始可行滑动面，采用Hooke-Jeeves模式搜索法进行优化搜索，直至寻找到最危险滑面及其对应最小的安全系数。

2.3 重力式挡墙抗滑稳定分析的滑面应力法 经典Coulomb、Rankin土压力理论基于极限平衡理论建立，而有限元滑面应力法则是从极限平衡方法直接演化而来，有限元滑面应力法与Coulomb、Rankin土压力理论具备共同的理论基础。

将滑面应力法拓展到重力式挡土墙结构，核心思想、实施步骤与上节内容基本一致，仅区别在于滑裂面形式的构造。

(1)挡土墙抗滑稳定：挡土墙沿墙底地基面发生滑动失稳，墙后土体将随之失稳，产生贯穿于填土与墙基底的滑动带，并通过墙踵。上述步(3)，墙基接触单元为无厚度单元，无从判断计算点所在单元，笔者直接以接触对上节点作为计算点，再由墙后的所给初始滑裂面一起组成整体滑裂面，搜索最危险滑裂面，滑动面安全系数 F_s' 修改为

$$F_s' = \frac{\int_1 (\sigma'_n \tan \phi') dl + \int_2 (\sigma_n \tan \phi + c) dl}{\int_1 \tau' dl + \int_2 \tau dl} \quad (5)$$

式中： l_1 为位于地基接触面处的滑裂面(位置、形状固定)； l_2 为位于墙后填土内的滑裂面(搜索得到最危险滑裂面)； ϕ' 地基接触面的摩擦角。挡墙稳定时，接触面应力状态应满足：

$$\tau' \leq \tau'_n = \sigma'_n \tan \phi' \quad (6)$$

(2)深层抗滑稳定：当基底受力层范围内有软下卧层时，挡墙结构有可能发生整体滑动，即产生一条贯穿填土与地基的滑裂带，进而造成挡土墙结构整体的倾覆、滑移、漂浮等形式的破坏。直接以式(4)定义安全系数，采用滑面应力法分析挡土墙结构深层抗滑稳定。

3 算例分析

3.1 计算模型及参数 某重力式挡土墙，用毛石和M2.5水泥砂浆砌筑，如图1所示。砌体重度 22kN/m^3 ，墙顶宽 0.7m ，底宽 2.5m ，填土高度 $H=5\text{m}$ ，重度 $r=20\text{kN/m}^3$ ，挡墙基底摩擦系数 0.5 ，假设墙背光滑，各组成部分的材料参数指标见表1。

表1 计算采用物理力学参数

材料名称	重度/(kN/m^3)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)
填土	20	40	0.30	0	40
软质岩层	22	1 000	0.25	200	30
挡墙	22	4 000	0.25	线弹性材料	

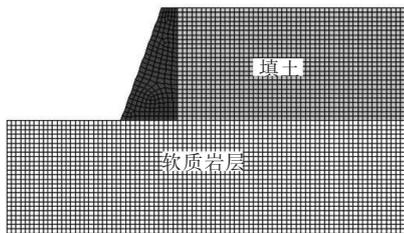


图1 计算模型

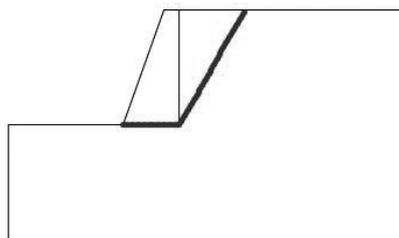


图2 整体结构的最危险滑裂面

3.2 整体抗滑稳定分析 对挡墙和墙后土体组成挡土结构进行整体抗滑稳定性分析。首先进行有限元计算，计算模型如图1所示，得到滑面应力分析所需的整体结构的应力场；再以式(5)定义安全系数，采用有限元滑面应力法搜索确定的最危险滑裂面如图2所示，对应的安全系数为 1.269 ，破裂角为 61.7° 。

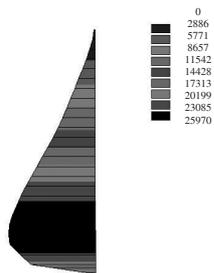


图3 土压力分布



图4 主动土压力分布

墙土之间的接触单元的正应力与剪应力可以模拟墙体与土体之间的相互作用力(水平主动土压力和摩擦力)，假设墙背光滑，作用在墙体的正应力分布形式如图3所示，土压力的合力约为 69.67kN/m ，大于Rankin主动土压力 54.36kN/m ，安全系数计算结果表明，此时墙后土体并未达到极限平衡状态。

3.3 模拟主动土压力 挡土墙在外力和填土压力作用下产生背离(远离)填土方向的位移或变形，当位移或变形达到使填土处于主动极限平衡状态时，作用在挡墙上的土压力最小，即Coulomb、Rankin主动土压力，此时，土体抗剪强度得到充分发挥。工程上一般通过改变挡墙的形状和倾角等，使作用在挡墙上的土压力接近于主动土压力，进而确定经济合理的挡墙设计方案。在本文计算中，通过

改变墙体与地基的摩擦系数，使墙后土体达到极限平衡状态。

其它参数不变，当墙体与地基的摩擦系数 $\mu=0.32$ 时，Rankin理论计算主动土压力为54.36kN/m，挡土墙的抗滑安全系数为1.036，破裂角为65°。此时，采用有限元滑面应力法得到的整体抗滑安全系数为1.018 \approx 1.0，最危险滑裂面形状与图2近似，破裂角为64.5°，求得的主动土压力为55.28kN/m，与Rankin理论计算的结果基本一致，土压力分布如图4所示。

4 参数对稳定性的影响

在挡土墙结构稳定的众多影响因素中，填土的工程性质是其中最为关键的因素之一。因此，研究填土性质参数对挡土墙结构稳定性的影响，对实际工程中挡墙的设计与施工都具有重要意义。

针对算例的计算结果，此挡土墙结构整体稳定有一定的安全储备，可以考虑缩减挡墙的截面积，达到经济、安全的目的，另外实际问题中，墙背不可能完全光滑，所以必须要考虑墙土之间的摩擦系数对墙体结构整体稳定的影响。缩减挡墙截面积，设计墙顶宽0.5m，底宽2m。

4.1 墙土摩擦系数 土与墙背的摩擦角，可根据墙背的粗糙程度和排水条件，由《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2002)表6.5.5-1确定。

在模型中，通过修改接触面上的摩擦系数来模拟不同的墙土接触关系，其他参数不变，由此分析墙土接触关系对挡墙结构稳定影响规律。在计算中，墙土之间的摩擦系数分别取填土内摩擦角的0、1/3、1/2、2/3，所得到计算结果如图5、表2所示。

表2 不同摩擦系数下挡墙结构稳定安全系数

摩擦系数	0	$\phi/3$	$\phi/2$	$2\phi/3$
安全系数	1.147	1.239	1.295	1.358

结果表明，随着摩擦系数的增大，安全系数随之增大，滑裂面随之变缓。

4.2 填土内摩擦角 保持其他参数不变，将墙后填土的内摩擦角依次取为30°、34°、37°和40°，墙后摩擦系数取1/2内摩擦角，分析填土的内摩擦角对挡墙结构整体稳定性的影响，结果如图6、表3所示。

表3 不同摩擦系数下挡墙结构稳定安全系数

内摩擦角/(°)	30	34	37	40
安全系数	1.051	1.141	1.212	1.295

结果表明，随着填土内摩擦角的增大，安全系数随之增大，滑裂面随之变陡，但变化幅度不大。

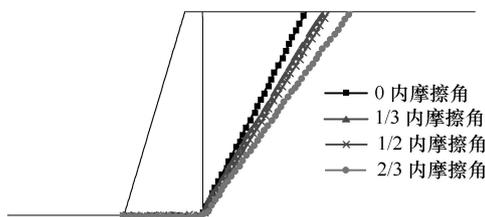


图5 不同摩擦系数下滑裂面形状的比较

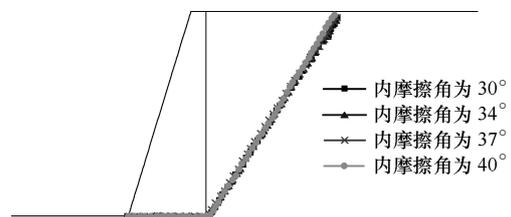


图6 不同内摩擦角下滑裂面形状的比较

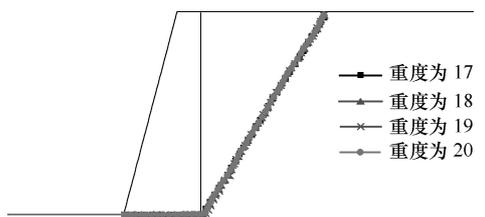


图7 不同重度下滑裂面形状的比较(单位: kN/m³)

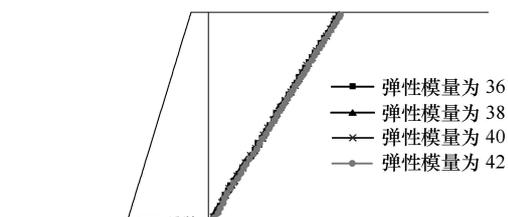


图8 不同弹性模量下滑裂面形状的比较(单位: MPa)

4.3 填土容重 填土的容重也是影响挡墙结构整体稳定性的一个重要参数。在计算中，填土的重度依次取为17、18、19和20kN/m³。结果如图7、表4所示。

表4 不同重度下挡墙结构稳定安全系数

重度/(kN/m ³)	17	18	19	20
安全系数	1.375	1.353	1.326	1.295

结果表明，随着填土重度的增大，安全系数随之略有减小，滑裂面位置几乎重合。

4.4 填土弹性模量 保持其他参数不变，将墙后填料的模量依次取为36、38、40和42MPa，分析填土的弹性模量对挡墙结构整体稳定性的影响，有限元计算的结果如图8、表5所示。

表5 不同重度下挡墙结构稳定安全系数

弹性模量/MPa	36	38	40	42
安全系数	1.294	1.295	1.295	1.295

由表5知，填土的弹性模量对挡墙结构的安全系数几乎没有影响，对应最危险滑动面彼此非常接近。

5 深层抗滑稳定分析

5.1 算例 某浆砌块石挡土墙，砌体重度22kN/m³，墙顶宽0.5m，底宽1.5m，填土高度H=4m，重度r=18kN/m³，挡墙基底摩擦系数0.45，填土与墙背摩擦角13°，各组成部分的物理参数指标见表6。

表6 计算采用物理力学参数

材料名称	重度/(kN/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
填土	18	20	0.3	2	26
地基	17	40	0.3	10	20
挡墙	22	5 650	0.25	线弹性材料	

5.2 深层滑动稳定分析 此算例地基为土质地基，有必要对挡土墙整体结构进行深层抗滑稳定验算。现行规范^[12-13]中对挡墙结构进行深层抗滑稳定验算时，采用圆弧滑动面法，要求安全系数满足

$$K = \frac{M_R}{M_S} \geq 1.2 \quad (6)$$

式中： M_S 为滑动力矩， M_R 为抗滑力矩。

本文分别采用滑面应力分析法和强度折减法这2类有限元分析方法，在平面应变条件下，对挡土墙结构深层抗滑稳定进行分析，并与圆弧滑动面法进行比较。

圆弧滑动面法采用加拿大GEO-SLPOE公司的边坡稳定分析软件SLPOE/W，计算应用Spencer法，对结构整体稳定进行分析，仅对土体条分，对填土施加库伦土压力(作用点为1/3墙高)，地基施加摩擦力，挡土墙的自重作为地面荷载，施加于其地基上^[1]；有限元滑面应力法采用有限元软件ANSYS计算挡墙整体结构应力场，以Hooke-Jeeves模式搜索法搜索最危险滑面及其对应最小的安全系数；有限元强度折减法，仅对填土和地基进行等比例折减，以有限元数值计算是否收敛作为挡土墙整体结构失稳破坏标准(有限元网格与滑面应力法相同)，表7列出3种方法下安全系数的计算结果。

表7 用不同方法求得的安全系数

方法	安全系数
①Spencer法	1.21
②滑面应力法	1.10
③强度折减法	1.04

从表7可知，两类有限元方法得到的安全系数较一致，均大于1.0，Spencer法计算得到的安全系数为1.21大于1.2。

图9给出3种方法得到的滑动面，可以看出滑面应力法与强度折减法得到的滑动面形状非常一致，并且滑面形状都近似为直线滑面。

2种有限元方法计算的结果较一致，与圆弧滑动面法相比差异较大，对于本例填土材料为非黏性填土，墙后滑裂面为直线形状更为合理，而工程上采用的圆弧法在此处并不合适的。

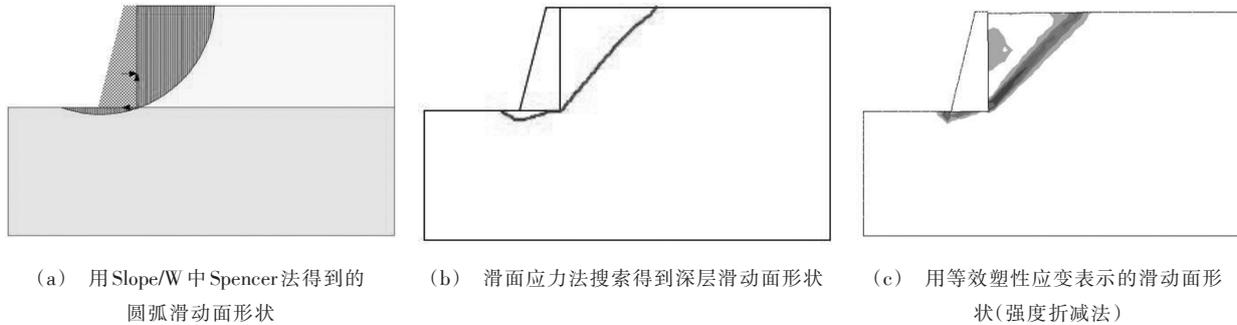


图9 不同方法滑动面形状的比较

重新采用加拿大GEO-SLOPE公司的边坡稳定分析软件SLPOE/W，计算应用Spencer法，对结构整体稳定进行分析，约束条件和上述一样，填土滑裂面假设为平面，采用SLPOE/W提供的Fully Specified(指定滑弧位置和形状)搜索模式，给定一组按扇形分布的平面滑裂面，见图10，经搜索得到最危险滑裂面如图11，对应安全系数为1.08。

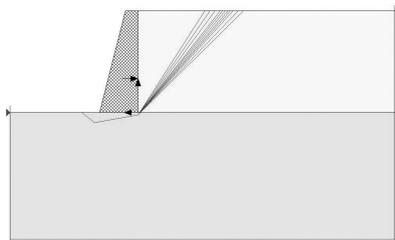


图10 初始滑裂面的位置

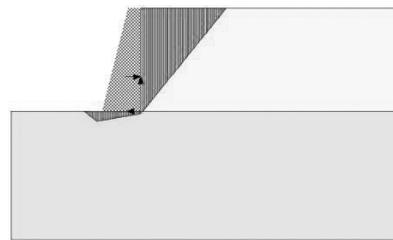


图11 用Slope/W中得到的非圆弧滑动面

此时，3种方法得到的最危险滑动面基本一致，都呈水平面形状，并且破裂角相等，对应的最小安全系数也非常接近。

6 结论

有限元滑面应力法可较好地结合有限元应力分析方法和极限平衡分析方法的特点，通过弹塑性有限元分析合理准确地考虑墙体与土体相互作用对结构整体应力场的影响，进而结合优化搜索方法确定当前真实应力场中最危险滑裂面的位置及其安全系数。数值计算结果表明，有限元滑面应力法在验算挡土墙结构整体抗滑稳定上是可行的，搜索得到的最危险滑动面与Coulomb、Rankin土压力理论计算的滑动面形状保持一致。通过分析均质填土的参数对挡墙结构稳定性影响，发现填土的内摩擦角、重度、墙背摩擦角与挡墙稳定的安全系数呈单调关系，填土的强度、墙背的粗糙度对挡墙抗滑稳定的影响较大，而填土弹性模量对挡墙结构整体稳定几乎没有影响。采用3种不同的方法对挡土墙结构整体进行深层抗滑稳定分析，3种方法所得安全系数较一致(将圆滑滑动面法采用非圆弧搜索后)，对应的最危险滑裂面形状位置一致，墙后填土的滑裂面形状为直线，且与水平方向的夹角相等。证明滑面应力法在验算挡土墙结构深层抗滑稳定分析中是完全可行的，并且理论体系严密，无需反复折减，计算效率高。

参 考 文 献:

- [1] 尉希成,周美玲.支挡结构设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [2] Deepankar Choudhury, Syed Mohd Ahmad. Stability of waterfront retaining wall subjected to pseudodynamic earthquake forces[J]. J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc., 2008, 134(4): 252-260.
- [3] 顾慰慈.挡土墙土压力计算手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [4] 官盛飞,凌建明,赵红铎.刚性挡墙主动土压力的有限元分析[J].勘探科学技术,2007,(6):9-13.
- [5] 陈页开.挡土墙上土压力的试验研究与数值分析[D].杭州:浙江大学,2001.
- [6] 赵尚毅,郑颖人,周春风.挡土墙土压力有限元数值模拟探讨[C]//第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集,北京:科学出版社,2004.
- [7] 邵龙潭,唐洪祥,韩国城.有限元边坡稳定分析方法及其应用[J].计算力学学报,2001,18(1):81-87.
- [8] 赵杰.有限元边坡稳定分析方法的应用研究[D].大连:大连理工大学,2007.
- [9] 郑轶轶.抗滑桩加固边坡的稳定性分析[D].大连:大连理工大学,2008.
- [10] 邵龙潭.土坝边坡及混凝土重力坝地基滑动稳定分析的广义数学规划法[D].大连:大连理工大学,1989.
- [11] 陈祖煜.土质边坡稳定分析-原理,方法,程序[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
- [12] 中华人民共和国国家标准.GB/T50145-2007建筑地基基础设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [13] 中华人民共和国国家标准.GB50330-2002建筑边坡工程规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.

Analysis of stability against sliding for gravity retaining wall structure based on finite element slip surface stress method

SHAO Long-tan, LIU Shi-yi, LI Hong-jun

(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Under the condition of plane strain, slip surface stress method was applied to evaluate the stability against sliding of the gravity retaining wall and earth pressure. Compared with classical earth pressure theories, the results show that safety factor, angle of rupture and earth pressure are quite consistent with the theoretical solution when the filling soil reaches critical state. Then the effect of different soil parameter on the stability of gravity retaining wall is analyzed in this paper. Finally an example of the deep sliding stability of integral construction is given.

Key words: gravity retaining wall; FEM; slip surface stress analysis method; earth pressure; stability against sliding

(责任编辑:李琳)