

(12)

挡土墙

土工织物

加筋土

有限元

可编辑

第17卷 第3期  
1995年9月

重庆建筑大学学报  
Journal of Chongqing Jianzhu University

Vol. 17 No. 3  
Sep. 1995

85-95

# 土工织物加筋土挡墙特性的有限元分析

Mitchell, J.K.

编译 彭蜀生  
(重庆建筑大学)

原著 J. K. Mitchell, J. G. Zornberg  
(美国 加利福尼亚大学 柏克利分校)

TU476.4

10

**摘要** 一座高12.6 m,顶部填土高度超过5 m的土工织物加筋土挡墙在华盛顿州的西雅图市建成。该挡墙的高度大于已建成的同类型的加筋土挡墙,因而对其进行了广泛的测试。将填土堆放前及堆放后的反应的非线性有限元分析及数值分析的预测与实测结果进行了比较。在确定网格尺寸、材料参数及加荷顺序时,要求特别的细心。现场的土工织物模量是由可得到的测试记录与数值计算结果相比较,进行反算得到的。结果发现有约束的土工织物刚度比无约束试验所得的数值大2~4倍。预计的加筋中应力的分布、墙的侧向位移,及土体中应力的分布与实测记录相当一致。数值方法计算的土应力和加筋拉力对控制挡墙特性的机理提供了更加深刻的了解。

**关键词** 土工织物加筋,挡土墙,非线性有限元分析,倾斜填土

**中图法分类号** T476.4

目前在运用加筋土挡墙分析与设计的近似方法中,已经积累了大量的经验。按一般采用的土的特性指标及安全系数而言,现行的设计规范("FHWA 设计规划", Christophor 等, 1990)提供了安全的结构设计,和在工作应力状态下可接受的较小的变形。但是,这些方法是具有简单几何尺寸的墙体而建立的。实际上,目前采用的墙体几何尺寸、墙面、填土材料、以及加筋特性的范围很大,可能造成挡墙的特性与设计假设不同。非标准几何形状的荷载超出了经验设计方法的考虑范畴,大量足尺现场试验挡墙的建造和监测可以解决许多不定因素。但足尺挡墙的试验设备和特殊监测都是非常昂贵的。

数值模拟分析是预估非标准项目特性的另一种方法,所能得到的现场测试数据为分析所采用的程序和参数的正确性提供了保证。一个合理的研究方法,包括试验结果的初始解释,第二步是数值模型对现场数据的合理性分析,接着是新设计方式的数值模拟。本文的目的是描述代表具有两个明显特征的土工结构的有限元法分析的合理性,该结构的两个特征是:延伸性土工织物加筋,以及在墙的顶部有一倾斜填土。

尽管,许多成功的金属和土工格栅加筋土挡墙有限元分析方法的合理性为现场试验数

\* 收稿日期:1994-12-23

彭蜀生,男,1937年生,副教授,重庆建筑大学建工学院(630045)

该文原名为:"Finite element prediction of the performance of an instrumented geotextite-reinforced wall",为了突出该文的特点,编译时对标题作了改动

国际岩土力学计算机方法协会第八届国际会议论文,1994.5.22~28,美国,西弗吉尼亚大学

据所证实,但是,这些方法并不包括具有较大柔性的土工织物加筋的结构。Yako 和 Christopher 的回顾(1987)指出,在北美州大约建造了200座采用聚合物加筋的挡土墙和边坡。从那时开始,其数量肯定有大幅度的增长。但是,在上述项目中,仅有13个项目有较完整的测试记录。而13个项目中,仅5个项目提供了应力-应变资料,而这几个项目都是土工格栅加筋结构。因此,到目前为止,大部分现场经验仅为土工织物加筋土结构的设计参数提供了定性的估价,而为了使设计的改进具体化,需要定量的数据。

这篇文章中的 Rainier 大道的土工织物加筋土挡墙的有限元分析给原已有的试验记录增加了定量的资料,并为进一步的参数研究提供了一个检验模型程序。

土工人造聚合物加筋挡墙顶部局部工作面积上的倾斜填土是很常见的。实际上采用各种加筋构件的加筋土挡墙的设计,都考虑朗金破裂面(Rankine Failure Surface)作为最大拉力迹线(Mitchell 和 Christopher, 1990)。对具有水平和倾斜填土的加筋土挡墙,设计时都考虑采用同样的潜在破裂面(图1)。抗拔锚固长度采用该破裂面以外的加筋长度。因而,正确地确定潜在破裂面的位置,对检验挡土墙的内部稳定性有着主要的影响。在 Rainier 大道的挡土墙的填土荷载施加前及施加后,采用了所获得的土应力分布及加筋拉力的数据,对潜在破裂面进行了研究。

在对挡土墙和其试验装置进行描述以后,将介绍有限元模型的特征(几何定义、土与加筋材料的参数、分析的增量序)。最后是分析结果、控制挡土墙特性的机理的解释、并对潜在破裂面的位置进行了论述。

## 1 加筋土结构的有限元分析

该研究工作的有限元分析采用的程序,为最初由 Seed 和 Duncan 制定的 SSCOMP 程序(1984),然后为了分析加筋土结构,Collin(1986)和 Jaber(1989)对该程序进行了改进。为了该研究工作,又对上述程序做了进一步的修改。SSCOMP 是一个包括考虑压实所产生的应力和变形的土工结构静态分析的一般的平面应变,土-结构物相互作用程序。

在 SSCOMP 程序中,Duncan 等用双曲线公式来模拟土的非线性应力-应变和体积应变特性(1980)。该程序容许采用一个无侧向变形时,由循环加荷产生的应力的滞后模型来模拟压实产生的应力。用弹性杆件来模拟加筋。土-结构物间的相互作用,由可在土与加筋间传递剪应力的耦合元件来模拟。修改后的程序采用 UNIX 版本,该版本能处理较原版本自由度更高的课题,为计算结果的后处理形成输出文件,对受拉的土元件的细部处理稍有不同。SSCOMP 已被许多研究者成功地运用于预测离心试验中的大型墙体模型和足尺加筋土挡墙的特性。Zornberg 和 Mitchell(1993)提出了一份关于曾运用 SSCOMP 模型,并采用该程序分析了计算结果对实验记录的合理性的加筋土结构的回顾报告。

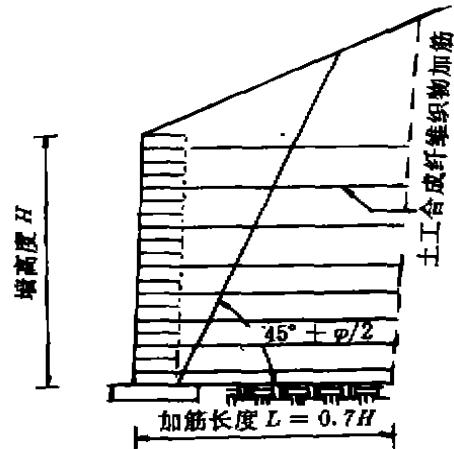


图1 一般设计中的假设潜在破裂面

有一些文献报导了采用土工合成纤维织物(主要是土工格栅)的加筋土结构有限元分析。其中,某些研究者(如 Chalaturnyk 等1990;Ho 及 Rowe 1993)对假想的加筋土结构的性能进行了研究,而另一些研究者(如 Adib 1988;Bathurst 等1992)研究了土工格栅加筋土结构有限元分析结果对现场实验结果的合理性。考虑到模拟经验的有限性,我们在土工织物加筋结构的研究中,对确定恰当的网格尺寸、材料参数、及分析顺序等给予了特别细心的考虑。

采用延伸性加筋的土工结构的有限元模型与采用非延伸性加筋的结构模型有所不同。对第一种情况(延伸性加筋),某些模拟特性要简单一些:

1) 土工合成纤维织物加筋一般是连续的薄层,所以它们可认为是平面应变的结构构件。这与非延伸性加筋的情况不同,如钢条带或钢筋网都具有三维形式。

2) 在墙的综合特性中,刚性墙面结构起着非常重要的作用。对柔性较大的结构,土和加筋的特点对墙的特性起着控制作用。所以,在这些分析中,墙面参数的选择并不重要。

另一方面,土工合成纤维织物加筋的土工结构的有限元法的模拟特征,在某些方面确更加复杂:

(1) 约束及时间对土工合成纤维织物的抗拉强度及刚度的影响还不十分清楚。可利用的资料一般由大宽度拉力试验结果获得。土工合成纤维试样在无约束、高应变率条件下的试验数据不能代表其使用状态下的情况。

(2) 由于土工合成纤维织物加筋的土工结构的加筋垂直间距,较采用非延伸性加筋结构的加筋间距为小,要求较高的网格离散度。此外,由于土与土工合成纤维织物接触面的摩擦力很高,要求采用一很细的网格代表每一压实土层。

(3) 土工合成纤维织物加筋墙的有限元分析结果对墙背填土的应力-应变-强度关系,比非延伸性加筋墙的情况要敏感得多。后者采用的刚度较大的加筋和墙面结构,控制了墙响应特征。

(4) 已建立了分析程序来预估用静止土压力代表无侧向变形状态下,由压实产生的土压力(Seed 和 duncan,1984)。但是,运用该模型模拟由压实作用在采用延伸性构件及柔性墙面的结构物中产生的应力,尚需进一步研究。

5) 在延伸性加筋结构中,与非延伸性加筋结构相比,墙背填土材料将经受更大的侧向位移。从而,产生高剪应力的区域,即可能破坏的单元将可能得到发展。但是,土的特性的模拟精确度是可以解决的。就是在无加筋的土工结构中,产生高剪应力的区域的存在并不是有害的。这是因为如果加筋中的拉应力未达到极限拉应力时,产生高剪应力的区域的发展并不意味着破坏机理。

## 2 RAINIER 大道的挡土墙

为了提供在一个范围内进行填方的有限道路使用权,华盛顿州交通部设计了一座12.6 m 高的土工合成纤维织物加筋土挡墙,并对其施工进行监督管理。由于该墙的高度大于任何已建成的土工织物加筋土挡墙,并且墙顶支持了5.3 m 高的填方超载,为了评价该墙的性能,对其进行了广泛的试验监测(Christopher 等,1990;Allen 等,1991)。监测试验的目的是观测加筋土挡墙中应力和应变的分布,以及评价挡墙对倾斜填土超载的反应。Rainier 大道挡墙所要求的加筋是按常规的“拉筋-楔体分析”法(Mitchell 和 Christopher,1990)确定的,加筋

层的间距彩 0.38 m。选定的土工织物加筋的强度随墙的高度而变化,使其尽量与理论设计强度要求相符合。根据以上要求,选择了四种聚丙烯条带薄膜织物及聚脂纤维束织物等土工织物作为加筋材料。

为了测定应变分布和最大拉应力的数值及位置,在土工织物中安装了粘贴式电阻应变片及机械式变形测定仪。试验中观察到了应变片记录和变形仪记录之间的误差。土工织物的最大应变值,应变片的测量结果约为0.5%,而变形仪给出的结果为0.7%到1.0%。变形仪的结果包括土工织物微结构的应变,包括皱纹与折叠等的局部影响。另外,变形仪不是刚性地固定在纤维上,而是绑扎在土工织物之上,变形仪有可能对土工织物产生相对移动(Christopher等,1990;Allen等,1991)。根据这些原因,这次仅考虑了应变片的记录。然而,由于用来固定应变片的粘胶相对地比土工织物坚硬,估计所测得的应变值较实际的现场应变值要低一些。

在墙面、加筋土范围内、以及加筋土范围以外都安装了测斜仪,以监测墙的水平位移。在施工期间及完工后,还对墙面进行了光学和摄影测量。最后,墙下的垂直应力是用 Glotzl 应力盒测量的。

### 3 模拟特征

分析 Rainier 大道挡土墙的有限元网格的建立是根据网格离散化的灵敏度研究结果、仪器监测位置回收数值结果的需要、以及程序功能和运算时间的实际限制等。最后选择的有限元网格由1698个结点组成,共1661个平面应变单元,为模拟加筋采用了561个杆元。

为了正确地代表各层土的特性,各加筋层间网格的离散化是非常必要的。由于土工织物与土之间的接触效率很高,土与加筋的变形协调是一很合理的假设。甚至在拔出时,破坏将可能发生于土体之内,而不会沿加筋与土的接触面破坏。同时,在分析中采用了两加筋层间的填土的高离散化。

表 1 土工织物参数

与墙顶 的距离 m.	土工织物类型	a) 大宽度 试验强度	b) 拉应力峰 时的应变	c) 应变为5% 时的刚变系数	d) 数值法反算 的刚度系数	比率 (d)/(c)
0~3	聚丙烯薄膜条 织物	13	21	198	438	2.21
3~6	聚丙烯(两层) 压合织物	62	16	453	1237	2.73
6~9	聚丙烯(三层) 压合织物	92	17	662	2767	4.18
9~12	聚脂纤维丝织 物	186	18	1086	371	3.55

土工织物的抗拉刚度是加筋土挡墙有限元分析中所选择的最重要的参数之一。但是,一般采用的合成纤维织物力学性能的测定方法,不能代表和模拟土工织物在现场的工作状态。对结构物中所采用的土工织物的研究,目前能采用的无约束大宽度抗拉试验可能显著地低

估了土工织物的现场抗拉刚度。当土工织物被土约束时,其刚度和强度将会大大地增高。不幸的是,基本不可能从测试数据直接确定土工织物的现场刚度。但是,数值反算法为确定现场刚度提供了另一方法,在这项研究中运用该法估算了土工织物的现场刚度。当应变为5%时,从大宽度抗拉强度试验所得到的无约束刚度系数值列于表1。这些系数值是该挡墙研究中采用的土工织物刚度系数的下限值。另外,还根据拔出试验结果计算了土工织物的刚度系数值(Zornbderg 和 Mitchell, 1993)。拔出试验所得到的刚度系数值,为工作应力状态下的土工织物刚度系数提供了上限值。

墙背填土的应力-应变-强度特征在土工合成织物加筋的挡墙中所起的作用,比在较刚劲的金属加筋的结构物中重要得多。所以,在估计填土材料的模拟参数时,给予了特别的注意。分析采用的土的本构关系是 Duncan(1989)提供的双曲线模型的改进版本。有限元分析过程中,在任何增量处的土材料特征,都是根据每一单元的目前应力状态和原始应力状态确定的。非线性应力相关模型假设土的应力-应变曲线,可近似地用图2所示的双曲线来表示。墙背填土的校正采用了三轴试验数据。表2给出了所获得的参数值。有两组三轴试验数据可利用,比较值是分别用每一组数据而获得的。采用校正后的参数所做的模型推算,能够在每一试验中取得破坏前的应力-应变特性及破坏时的应力值(图2)。很明显,双曲线模型很好地代表了偏应力-应变特征。

表2 土的双曲线参数

参数	参数定义	墙背填土	地基
$K$	杨氏弹性模量系数	913	1900
$n$	杨氏弹性模量指数	0.6	0.25
$R_f$	破坏比	0.64	0.7
$c(kPa)$	粘聚力	0.0	48.9
$\phi_0(^{\circ})$	内摩擦角(在1标准大气压下)	46.1	40.0
$\Delta\phi(^{\circ})$	内摩擦角降低值	5.3	0.0
$K_v$	体积模量值	250	450
$m$	体积模量指数	0.8	0.0
$K_{\omega}$	卸荷-再加荷模量系数	1485	2850
$\gamma(kN/m^3)$	单位容重	21.1	20.5
$K_0$	静止土压力系数	0.35	0.41

在决定体积模量时,需要体积变化的数据。但是,压实的土是在非饱和状态下进行试验的,因而不能取得体积变化的资料。从而,体积模量参数是由 Boscardin 等(1990)采用相似的压实粗粒材料试验确定的。表2所列的地基土的双曲线参数是根据 Duncan 等(1980)准备的一份报告估算的。有限元分析结果对所选择的地基土的特征的敏感度表明:地基土的特性对分析结果仅有很小的影响。

SSCOMP 程序包含有厚度为零的界面元,通过模拟土与结构物之间的相对运动,该界面元可以代表土与结构物接触面的状况。该界面元由一法向弹簧和一个非线性应力相关的剪切弹簧构成。当然,采用这种界面元将给分析引进附加的自由度。由参数分析表明,采用界面元对计算结果影响很小,所以,最后该研究没有采用界面元。土和加筋之间的变形协调假设的正确性,从土工织物界面的高剪切强度,以及在破坏以前,土工织物可承受和土同样大的

应变这一事实而得到了证明。

以前曾用梁单元来模拟加筋土结构的层面。我们观察到,如果用梁单元来模拟柔性墙面,其对分析结果的影响甚微。根据该参数研究结果,在 Rainier 大道挡墙的最后分析中,没有考虑采用梁单元。

在 SSCOMP 程序中,通过采用与土工结构的实际施工顺序相似的阶段增量分析,来模拟非线性以及应力相关的材料特性。分析增量数目的选择是提高非线性、应力相关的模量值的代表性与增加计算时间之间的权衡。在做了敏感度分析后,土层的填筑厚度采用 0.38 m,并采用了在墙顶施加等值分布荷载来模拟倾斜填土超载。

#### 4 分析结果

正如已经指出的,对研究的挡墙所选择的模拟参数和程序,将由计算结果的敏感度研究来评价。校正过程的最后一步包括选择挡墙中采用的各种不同土工织物的恰当的现场刚度值。现场刚度是根据所观察到的 Rainier 大道挡墙的数值分析结果与试验观测记录之间的一致性确定的。由校正过程得到的反算的土工织物的有约束刚度值见表1。

数值反算的刚度值与试验所得的无约束刚度值的比值也列于表1中。反算的刚度值,比大宽度试验所获得的刚度值要大得多,其原因已经在前面提到了。刚度的提高取决于土工织物的材料类型和现场的约束压力。对聚丙烯材料,有约束刚度值比无约束刚度值在加筋区上部分(从墙顶算起0~3 m的区域)大约提高了两倍,而在第三区域(从墙顶算起6~9 m的区域)约增高了四倍。在聚脂纤维材料加筋的区域内(从墙顶算起9~12米的区域)其增高小于无约束刚度值的四倍。由于现场和试验室条件的不同(现场施工损坏、土工织物的老化、试验室结果的代表性等),反算的现场模量值预料比试验室拔出试验结果要低一些。反算的模量值约为拔出试验所得的模量值的65%(Zomberg 及 Mitchell, 1993)。

图3给出了有限元分析预计的加筋拉力,在图中并将其与应变片测得的拉应力分布进行了比较。由于这些现场测量结果代表实际应变的下限,因而所选择的现场加筋刚度值代表了现场应变记录的上包络线(而且,不是平均值)。曲线吻合得很好,而且数值计算结果与现场测试结果都相似地反应出施加超载后拉力的增大。

在墙面后2.7米的加筋土体内安装了测斜仪。该测斜仪的测量结果,被认为是所能得到的代表侧向位移的最可靠的记录。图4给出了在加筋区内,测斜仪位置处的侧向位移。每一结点处的位移,代表了相对于该结点原始位置的位移值。数值计算所得的位移值与测斜仪的测量结果非常一致。数值计算结果与各种测试仪表对挡墙的测试结果之间很好的一致性,有力地支持了分析研究所选择的参数和程序的正确性。

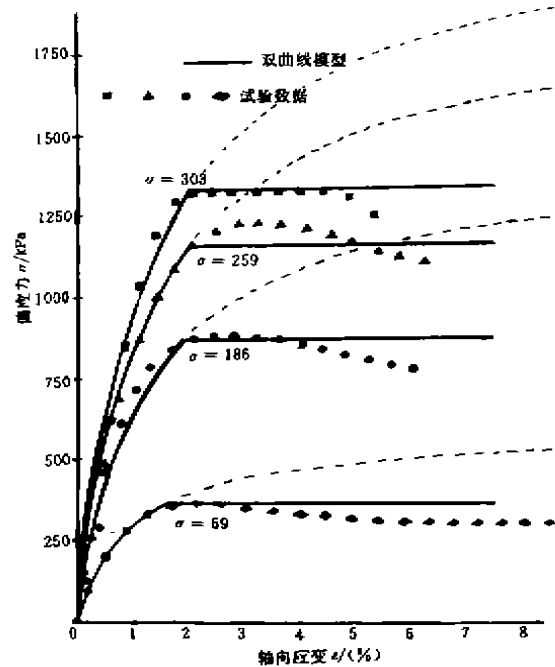


图2 填土特性的双曲线表征

采用 Clotzl 应力盒测得的墙下的垂直应力表明：墙趾处的应力比墙中部及墙背处的应力大约高20%。但是，无论在倾斜超载施加以前或施加以后，所测得的这些垂直应力并不是在任何位置都比平均上覆压力低(Allen 等, 1991)。所测得的垂直应力如图5所示。图中给出了地面超载施加前、后的有限元分析所得的垂直应力值，作为参考，还给出了平均上覆压力的理论值。数值计算结果的图形曲线与压力盒所测得的分布曲线极为相似。而且，在两个施工阶段，数值计算的预计值与平均上覆压力相一致。压力盒所测得的垂直应力在墙趾处向上漂移，直至实测垂直应力与平均上覆压力相匹配为止。校正后的现场测验结果与数值计算的预估相当一致。这说明了：甚至当墙的高度比常规情况更高时，有限元解能正确地代表土中垂直应力的分布状况。

在结构的面层及加筋土的开始部分，预计的加筋土体内的垂直应力低于平均上覆应力。另一方面，在离结构表面较远的区域，预计的垂直应力高于上覆应力，可能是由于沿加筋锚固长度的摩擦阻力，比按假设的上覆应力计算的摩擦阻力值更高的缘故。数值分析结果还表明，紧临加筋区以外的区域，预计的水平应力与按朗金主动土压力系数计算的水平应力相一致。由于接近表面部分的加筋土体经历了很大的侧向位移，在接近表面处，高剪应力被调动起来。但是，高剪应力区的存在不会导致逼近的破坏状态。Zornberg 和 Mitchell(1993)对垂直应力分布情况、侧向土压力、及调动起来的剪应力等作了完整的介绍。

土工织物的最大拉力线的位置，将决定满足抗拔要求所需的加筋锚固长度的起始点。对每一层土工织物，数值计算所获得的最大加筋拉力线的轨迹示于图6中。图中表明了倾斜超载施加前，及施加后所获得的结果。图中还绘出了朗金直线，该直线就是采用土工聚合纤维织物的加筋土挡墙惯用的、假定的最大加筋拉力迹线。根据所观察的分布情况，可得出如下两点意见：a) 虽然在靠近墙的顶端有一些分散，在施加超载以后，没有观察到拉应力的增高；b) 朗金直线是实际最大加筋拉力迹线偏于保守的近似轨迹线，就是说，实际上最大拉力迹线是在与水平面呈 $(45^\circ + \varphi/2)$ 的平面内。

在具有倾斜填土超载的加筋土结构的设计中，假设同样的设计破裂面，与墙背倾斜超载的存在无关。正如图6所示，Rainier 大道挡墙的数值计算结果，证明了无论在地面超载施加前，或施加后，实际的破裂面都在朗金平面以内。但是，该轨迹线不是一条光滑的曲线。我们可用一组虚线对所观察到的特征曲线的机理进行解释。因为 Rainier 大道挡墙在垂直方向设

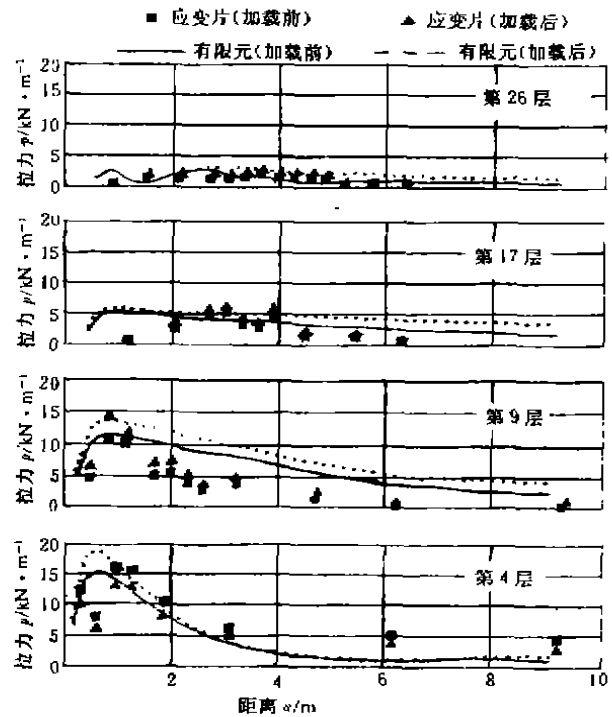


图3 沿土工织物加筋的拉力分布

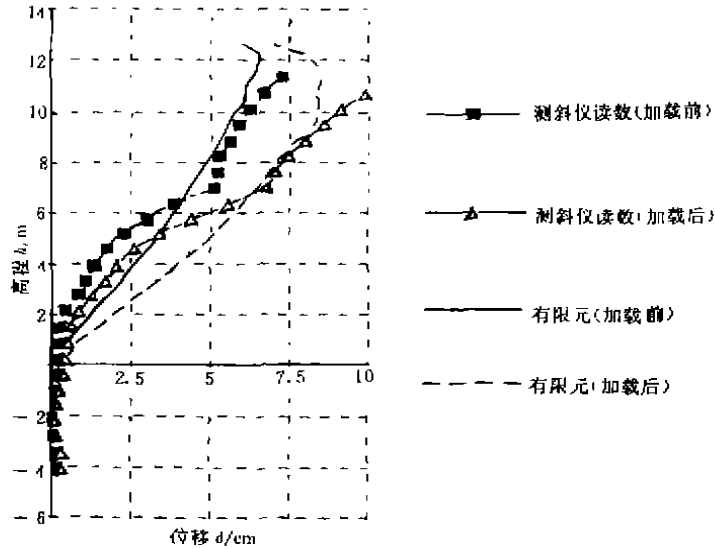


图4 测斜仪位置处的侧向位移

计为四层不同加筋强度的区域,每一区域都可以视为放置于刚度较大的地基上的组合材料层。这样,在各区域的界面之间形成了不同的潜在滑动面,结果形成了坡度较陡的复合最大加筋拉力线,这种特征曲线对抗拔安全度是有利的。所以,具有几个垂直加筋区域的挡墙,对于由抗拔要求控制设计的工程项目是特别有利的。

最大加筋拉力与墙高度间的关系示于图7中。图中的三条直线分别代表由朗金主动土压力系数( $K_a$ )、倾斜无限墙背填土库伦理论、及静止土压力系数( $K_0$ )所确定的最大加筋拉力线。当墙背填土水平(无超载)的情况,预计的最大拉力与朗金直线吻合得很好;而对施加倾斜超载以后的情况,由倾斜无限超载的库伦主动土压力系数所确定的直线,对最大加筋拉力做了保守的估计。对应于不同加筋区交界处,可以观察到最大拉力的突然变化。

## 5 危险破裂平面的位置

加筋土挡墙最危险的潜在滑动面,假设与加筋的最大拉力迹线相一致。采用延伸性加筋结构的最大拉力线,假设为一-条直线。如果假设潜在破裂面为平面的话,潜在破裂面位置的参数研究也将会很简单。但是从图6所观察到的资料很难确定这一破裂平面:为了确定该危险平面,运用了系统研究法。

对无加筋的土工结构的潜在破裂面的位置,Duncan等,于1992年已经运用有限元法做了研究。在该研究中,将数值计算预估的沿一个试算面上的剪应力与可能得到的沿该平面上的极限剪应力相比较。这个方法可以扩展用于加筋土结构,来研究与水平面呈 $\beta$ 角的一组试算破裂平面。

“加筋拉力总和”(RTS—Reinforcement Tension Summation)是将沿每一试算平面的各个加筋层的拉力相加而得。沿每一试算平面的安全系数值可由数值方法计算的土应力和加筋拉力来确定。具有最大RTS(加筋拉力总和)的平面就是危险破裂平面,因为从简单的前提考虑,完全可以正式的证明:安全系数(FS)最小的平面正好就是RTS(加筋拉力总和)最大的平面(Zornberg和Mitchell,1993)。



试算后确定的地面超载施加前、后的危险破裂平面见图8。在该图中,同时指出了每一试算平面的 RTS(加筋拉力总和)值。该结果证明:无论在地面超载施加前或施加后,用理论的朗金直线定义的潜在破裂面所确定的加筋锚固长度都是偏于保守的。运用 Rainier 大道挡墙分析所得到的输入参数和模拟程序进行了参数研究,以确定倾斜地面超载对土工聚合纤维织物加筋挡墙性能的影响。该参数研究所得的结果将在以后的论文中介绍。对 Rainier 大道挡墙,计算所得的沿危险破裂平面的安全系数值等于 3 (Zornberg 和 Mitchell)。如此高的

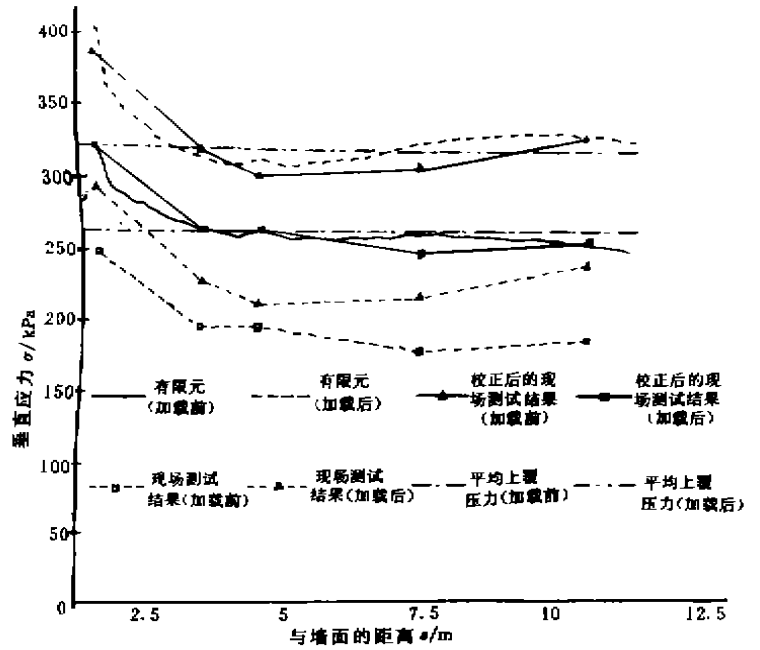


图 5 预估与实测的垂直应力

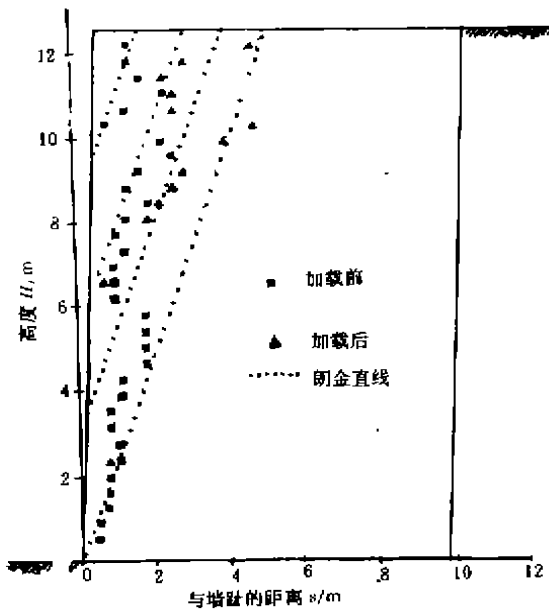


图 6 最大加筋拉力迹线

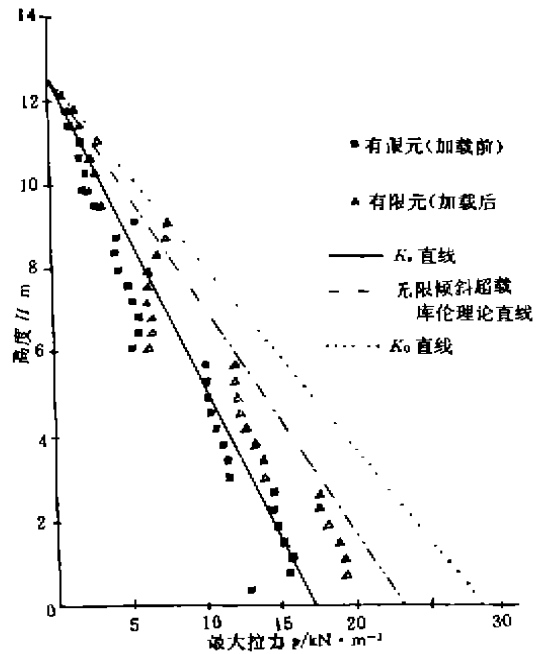


图 7 最大加筋拉力与墙高度的关系

安全系数表明,现行的土工织物加筋土结构的设计程序是保守的。

### 6 结 论

在该研究课题中,对一座精密测试过的,具有倾斜墙背填土的土工织物加筋土挡墙进行

了有限元分析,可以得出如下的结论:

1) 数值分析结果与不同仪表对挡墙测试结果相当一致(土工织物拉力分布、侧向位移、垂直应力)。

2) 我们发现:通过所能得到的测试仪表记录与有限元分析结果相对照,反算的土工织物的现场刚度为无约束大宽度抗拉试验所获得的刚度值的2~4倍。

3) 数值分析结果表明,对墙背填土水平的情况,可利用朗金主动土压力系数来粗略地估算最大加筋拉力。用墙背倾斜无限填土的库伦主动土压力系数来确定施加超载后的最大加筋拉力是偏于保守的。

4) 当挡墙设计为几个不同强度的加筋区时,其最大加筋拉力线的轨迹将由多个潜在破裂面组合而成(复合破裂面)。

5) 无论在地面超载施加前或施加后,Rainier大道挡墙的最大加筋拉力线的位置都在通常假设的朗金直线以内。

6) 利用有限元分析得到的加筋拉力和土应力计算的沿危险破裂面的安全系数非常高,反应出该挡墙设计的保守性。

感谢 Polyfelt 公司及 Tensar 公司对该研究提供的财政支持,对他们的经济资助表示特别的谢意,对 CNPQ(巴西国家开发与研究委员会)所给予的热情支持表示感谢。

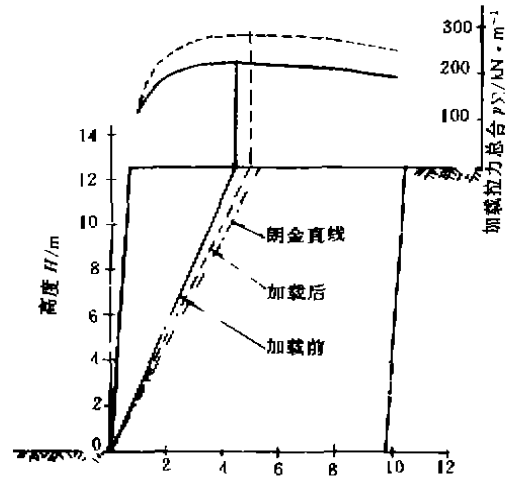


图8 最大 RTS 平面的位置

#### 参 考 文 献

- 1 Adib M E. Internal Lateral earth pressure in earth walls. Ph. D. Thesis, U. of California, Berkeley, 1980
- 2 Allen T M, B R Christopher, R D Holtz. Performance of a 12.6 m high geotextile wall in Seattle, Washington. Int. Symp. on Geosynthetic Reinforced Soil Retaining Walls, 1991, 81~100
- 3 Bathurst R J, R Karpurapu, P M Jarrett. Finite element analysis of a geogrid reinforced soil wall. Grouting soil Improvement and Geosynthetics, ASCE, 1993, 1213~1224
- 4 Boscardin M D, E T Selig, R S Lin. Hyperbolic parameters for compacted soils. J. Geot. Eng. ASCE, 1990, 116 (1): 88~104
- 5 Chalaturnyk R J, J D Scoll, D H K Chan, E A Richard. Stresses and deformations in a reinforced soil slope. Can. Geot. J. . 1990, 27, 224~232
- 6 Christopher B R, S A Gill, J P Grous, I Juran, J K. Mitchell, F. Schiesser, J Dunicliff. Design and construction guidelines for reinforced soil structures. Report No. FHWA-RD-89-043, U. S. Department of Transportation, 1990
- 7 Christopher B R, R D Hottz, T M Allen. Instrumentation for a 12.6 m high geotextile-reinforced wall. Performance of reinforced soil structures. 1990, 75~78
- 8 Collin J G. Earth wall design. Ph. D. thesis, U. of California, Berkeley, 1986
- 9 Duncan J M. State-of-the-Art, Static Stability and deformation analysis. Stability and Performance of Slopes and Embankments 11. Geot. Publ. No. 31, ASCE, 1992, 222~266

- 10 Duncan J M, P Bryne, K S Wong, P Mabry. Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements on soil masses. Report UCB/GT/80-01, Civil Eng. U. of California, Berkeley, 1980
- 11 Ho S K, R K Rowe. Finite element analysis of geosynthetics-reinforced soil walls. *Geosynthetics*, 1993, 203~216
- 12 Mitchell J K, B R Christopher. North American practice on reinforced soil systems. *Design and Performance of Earth Retaining Structures*. ASCE, 1990, 322~346
- 13 Jaber M B. Behavior of reinforced soil walls on centrifuge model tests. Ph. D. thesis. U. of California, Berkeley, 1989
- 14 Seed R B, J M Duncan. SSCOMP: A finite element analysis program for evaluation of soil-structure interaction and compaction effects. Report UCB/GT/84-02, Civil Eng. U. of California, Berkeley, 1984
- 15 Yako M, B R Christopher. Polymerically reinforced retaining walls and slopes in North America. The application of polymeric reinforcement in soil retaining structures, 1987, 239~284
- 16 Zornberg J G, J K Mitchell. Finite Element Analysis of Geosynthetically Reinforced Soil Walls with Sloping Backfills. Report UCB/GT/93-04, Civil Eng. U. of California, Berkeley, 1993

(编辑: 刘家凯)

## FINITE ELEMENT PREDICTION OF THE PERFORMANCE OF AN INSTRUMENTED GEOTEXTILE-REINFORCED WALL

*Peng Shusheng* (compiler and translator)  
(Chongqing Jianzhu University)

*J. K. Mitchell, J. G. Zornberg*  
(University of California at Berkeley, U. S. A)

**ABSTRACT** A geotextile-reinforced retaining wall 12.6 m high with a surcharge fill more than 5 m in height was constructed in Seattle, Washington. As the wall was higher than previously constructed structure of its type, it was extensively instrumented. Nonlinear finite element analyses were made to compare the numerically predicted wall response before and after surcharge placement with the measured behavior. Extra care was required in determining the appropriate mesh layout, material parameters, and loading sequence. In-situ geotextile moduli were back calculated by matching available instrumentation records with numerically obtained results. Confined geotextile stiffness was found to be two to four times greater than the value determined from unconfined tests. Predicted reinforcement force distributions, lateral wall displacements, and stress distribution in soil mass agreed well with instrumentation records. The numerically calculated soil stress and reinforcement tensions provide insights into the mechanisms that dominated the behavior.

**KEY WORDS** geotextilereinforced retaining wall, nonlinear finite element analyses, sloping backfill, locus of the maximum reinforcement tensions, geotextile stiffness, lateral displacement