海河堤岸预应力土层锚杆加固的数值模拟分析

朱芳清,李胜军,李 振

(天津市水利局,天津 300074)

Numerical sinulation analysis on the reinforcement of banks of Haihe River with pre-stressed anchor rod ZHU Fang-qing, LI Sheng-jun, LI Zhen

(Tianjin Water Resources Bureau, Tianjin 300074, China)

Absract: A numerical model for simulation analysis on the pre-stressed anchorage for the reinforcement of the banks of Haihe R iver is established based on the 3-D explicit finite difference method, so as to investigate the effect of the pre-stressed anchor rod on the anchorage reinforcement of the banks. Through the field experiment concerned, the necessary parameters for the numerical calculation of the pre-stressed anchorage are obtained. It shows that the results of the experiment basically coincide with the theoretical calculation, and then the reliability of the engineering design for the modification works of Haihe R iver Banks is confirmed as well.

Key words: pre-stress anchor rod; numerical simulation; bank reinforcement; Haihe River

1 引 言

本文以海河改造工程堤岸的加固设计为工程背 景,结合锚杆的现场试验,采用数值模拟技术,对预 应力土层锚杆的加固作用效果进行了探索。

海河堤岸改造工程包括北运河北洋桥至海河外环 桥全长约 20 km河道、近 40 km堤岸。护岸大多修建 于 20世纪 50、60年代,从现场检测来看,堤岸结构 存在混凝土碳化和钢筋锈蚀问题,有些堤段破损程度 较严重。根据海河两岸综合开发的要求和景观设计, 需新建直立式护岸结构。从护岸结构安全可靠和技术 经济比较及景观效果考虑,选取有锚板桩作为主要受 力结构,考虑现场施工场地、建筑物、道路和现状地 下管线等因素,为此设计选用预应力土层锚杆作为护 岸的拉锚体系。工程区地下水主要为孔隙型潜水,地 下水动态受季节影响明显,枯水期地下水补给河水, 丰水期河水补给地下水,两者互为补排关系。由于该 工程地处饱和软土地层中,海河市区两岸特殊的地理 位置和环境为土层锚杆技术的实施提出了新的课题。

2 数值模拟方法

锚杆加固的堤岸结构包含土体、板桩、锚杆和锚 孔中的灌注砂浆几部分介质。预应力一方面通过板桩 作用于土体表面,另一方面通过锚杆内锚固段与土体 之间的砂浆粘结作用于土体,其结果使锚固土体成为 多种介质相互作用的复合体。由岩土介质的特点决定 了岩土力学的问题往往牵涉到非线性大变形的问题, 它兼顾了材料非线性和几何学上的非线性问题,对锚 杆—堤岸结构体系的数值仿真,既要正确模拟这几部 分材料介质的物理力学特性,又要正确模拟结构各部 分之间接触面的粘结滑移关系。 HAC^{3D} (Fast La-

收稿日期: 2005-02-18

作者简介:朱芳清(1956—),男,高级工程师,副局长。

grangian Analysis Continue 连续介质快速拉格朗日分 析)是由 P.A. Cudall提出的一种显式时间差分解析 法,由美国 ITASCA 咨询集团首先使用并推广发行。 它是一种专门用于求解岩土力学问题的拉格朗日元法 程序,可用于进行有关边坡、基础、坝体、隧道、锚 固、地下采场、洞室等的应力分析,在国际岩土界相 当流行。这一方法的最主要特点是利用有限差分法, 通过对三维介质的离散,使所有外力与内力集中于三 维网络节点上,进而将连续介质运动定律转化为离散 节点上的牛顿定律,将静力问题当作动力问题来求 解,将运动方程中的惯性项用来作为达到所求静力平 衡的一种手段。同有限元法和边界元法相比, HAC^{3D}求解岩土介质大变形问题更具优势,还能针 对不同的材料特性,使用相应的本构模型来比较真实 地反映实际材料的动态行为。

对锚杆加固机理的数值仿真,应正确模拟锚固体 的各个组成部分以及各部分之间的界面。对于岩土工 程中的多种加固措施和支护形式, FLAC^{3D}设置了梁、 锚、桩、壳四种结构单元,用来模拟锚杆、衬砌、板 桩、混凝土喷层等。本文计算中,应用的结构单元有 两种:桩单元(PileSel)和锚杆单元(CableSel)。对于 锚杆自由段、内锚固段采用锚单元来模拟,预应力采 用施加在锚固端的一对集中力来模拟。

在 RLAC³⁰软件中,锚杆支护模型的建立是假定 锚杆与岩土体完全结合,在岩土体发生变形时由锚杆 通过充填与岩土体间产生的剪应力来抵抗岩土体变 形,这一模拟过程为沿锚杆方向的单轴行为特性^[2]。 锚单元的轴向行为特性采用一维模型描述,锚单元可 以指定其拉伸屈服强度和压缩屈服强度,单元轴力不 能超过强度极限。界面材料特性假定为理想弹塑性, 采用莫尔一库仑准则作为屈服准则。每个锚单元均允 许沿轴向产生变形并发生屈服。锚索与岩体间的界面 可以发生剪切屈服、产生滑动直至拉拔破坏。

3 锚杆拉拔试验的数值分析

为了研究锚杆数值模型的计算可靠性,建立了锚 杆土体相互作用的数值计算模型,对锚杆现场试验进 行了数值分析。

3.1 地质模型

根据天津市水利勘测设计院的地质工程勘察报告,海河市区段左、右岸的地层除人工填土层外,均 为第四系全新统松散沉积物。人工填土层由炉灰渣、 碎砖块及粉质粘土组成,层厚 0.5~1.5 m;人工填 土层以下地层的岩性由粉质粘土及粉土组成,局部夹 淤泥质粉质粘土及泥质粉土透镜体。本次试验锚杆自 由段穿过人工填土层,锚杆与水平呈 20 角布置,锚 固段位于下部的粉质粘土及粉土中。

3.2 数值模型

计算范围包括锚杆、锚头和其周围的土体。锚杆 和土体共同受力的计算模型取 10 m ×10 m ×30 m 的 立方块,锚杆布置在模型的中心,如图 1所示。锚杆 长度取 20 m,锚固体直径取 ϕ 15 cm,采用锚单元模 拟锚杆,锚杆自由段则简化为锚杆端部的集中力。靠 近外锚头的土体表面为自由面,模型其他部位的土体 表面均采用法向约束条件。



图 1 锚杆数值模型示意

分析时土体利用 8节点的六面体单元进行划分, 共划分 3 000个六面体单元。锚杆共划分 20个锚杆 元。土体采用了莫尔 — 库仑模型,锚杆和土体之间用 弹簧连接,锚杆的内力和两者间的相对剪切位移成正 比,破坏时的拉力取决于土体的性质。

3.3 数值计算结果与现场试验对比分析

土层锚杆现场试验是确定锚杆在应用土层中的极 限承载力、安全系数,获取锚杆的力学参数,为在应 用土层中设计锚杆提供第一手资料的必要手段,同时 通过试验还能对锚杆的施工工序和施工方法做进一步 完善和补充。

目前常用的土层锚杆有普通圆柱型锚杆和端部扩 大头型锚杆。根据海河两岸的地质构造和施工条件, 分别对这两种类型的锚杆进行了试验,以便进行方案 比选。并选取试验圆柱型锚杆和试验端部扩大型锚 杆,对计算模型逐级施加预应力直至锚杆位移速率迅 速加大破坏,以研究锚杆承载的能力。图 2为圆柱型 锚杆的 *p*~*s*曲线,从曲线上可以看出,在锚杆的工 作区内计算值与试验值有较好的一致性。两条曲线的 屈服拐点位置相近,试验值约为 320 kN,计算值约 为 310 kN。

实践证明,采用端部扩大头型或二次灌浆的工艺 能有效提高锚杆的锚固力。但在锚杆数值分析中,如 何模拟这种加固效果,目前尚无较好的计算模型。采 用等效力学参数计算^[3],即提高岩土体 *c*、*φ*值可以 较好地模拟锚杆对岩土体的加固作用。文献 [3]的具



图 2 圆柱型锚杆的 p~s曲线

体做法是在二次灌浆后,将锚杆 15 m 范围内岩体的 C、 ϕ 值提高 20%,以等效二次灌浆作用。

为模拟端部扩大头型锚杆的加固效果,本文计算 时将锚杆的剪切刚度提高了约 30%,计算得到的锚 杆 *p~s*曲线与试验得到的锚杆 *p~s*曲线吻合的比较 好,证明应用 HAC^{3D}程序计算预应力锚固问题,采 用提高岩土体力学参数的方法来模拟端部扩大或二次 灌浆等加固效果是可行的。端部扩大型锚杆的 *p~s* 曲线见图 3。



图 3 端部扩大型锚杆的 p~s曲线

4 堤岸结构加固效果分析

在上面试验研究的基础上,选取海河典型堤岸 段,利用 HAC^{3D}程序和现场试验所确定的各力学参 数,对施加预应力锚杆前后堤岸结构的应力和变形情 况进行了计算分析。

海河旧堤岸主要为浆砌石护岸和直立式护岸两种 结构型式,根据景观要求,新建护岸为直立式结构, 堤岸断面在高程 2.00 m处设亲水平台,亲水平台与 河岸采用板桩护岸,并选用预应力锚杆作为护岸的拉 锚体,根据地质条件和施工场地,采用端部扩大头型 锚杆或二次灌浆施工工艺。锚杆间距为 2.0 m,锚杆 与水平面的夹角根据土层、施工场地和地下管线因素 确定为 20 °,此时锚杆锚固段基本处于粉质粘土层 中,锚固点高程根据施工场地和施工水位及现状地下 管线的影响,确定为 0.8 m。

计算模型取一段单位长度堤岸,计算范围包含锚 杆和板桩,锚杆的外锚头锚固于板桩上,通过板桩将 力传递到土层中,按照设计要求,锚杆张拉力的锁定 荷载不低于 180 kN,并考虑了沿堤岸景观路面所作 用的人群荷载和车辆荷载。据此建立了 HAC³⁰计算 模型,分别采用锚杆单元,桩单元和六面体单元来模 拟锚杆、板桩和土体。计算模型如图 4所示。



图 4 开挖支护后堤岸计算模型

整个数值计算共模拟了旧堤岸开挖、板桩墙支挡 和拉锚支护三个过程。为了检验理论计算的可靠性, 在赤峰桥左岸 200 m长堤岸上,间隔 50 m共设置 4 个观测点,在墙体内预埋测斜管,对桩顶水平位移和 桩体的变形进行了监测。

计算表明:当旧堤岸开挖后,由于没有采取适当 的支挡措施,土体发生向开挖面方向倾斜,最大位移 量为 31.2 mm;采用板桩支挡后,板桩水平位移随入 土深度及预应力锚杆施工而变化,其变化规律分如下 两个阶段。

(1)施加锚杆前:当采用板桩支挡后,抑制了土体向开挖面方向的滑动趋势,但板桩水平位移仍呈外倾曲线,计算求得的顶端位移为 21.3 mm。现场测试的顶端位移范围为 18~28 mm,计算曲线与实测接近。 (下转第 44页)

水利水电技术 第 36卷 2005年第 11期



5 结 语

"碎裂 —散体化过程 的发现与识别,对于顺向 坡稳定性研究具有重要意义: (1)从本文实例看, 处于碎裂 —散体化阶段的边坡,尽管其安全储备很 低,但基本稳定或接近极限状态。因此,处于早期 演化阶段(轻微弯曲、强烈弯曲 —隆起)的边坡,其 (自然条件下)稳定性应是比较高的。(2)由于中缓 倾角顺向坡在整体失稳前还存在一个以材料破坏为 特征的碎裂 —散体化阶段或过程,因此,其破坏判 据,应有别于目前依据"三阶段 演化地质模式、按 结构失稳概念所得的结果^[2~5]。限于篇幅,这里不 再介绍。

参考文献:

- [1] 王士天,黄润秋,李渝生,等.雅砻江锦屏水电站重大工程地质问题研究 [M].成都:成都科技大学出版社,1998.
- [2] 张倬元,王士天,王兰生,编著.工程地质分析原理 [M].北 京:地质出版社,1981.
- [3] 孙广忠 · 岩体结构力学 [M] · 北京 · 科学出版社, 1988.
- [4] 秦四清,张倬元,等.非线性工程地质学导引[M].成都:西 南交通大学出版社,1993.
- [5] 李荣强.突变理论在顺层边坡稳定分析中的应用 [J]. 同济大学学报, 1993, 21(3).

(责任编辑 欧阳越)

(上接第 40页)

(2)施加锚杆后:锚头施加预应力并锁定后,墙体 在锚力作用下后倾,计算求得的桩顶位移为 - 7.1 mm, 大约至高程 - 7.00 m以下转向正位移,呈反弯曲线。 现场测试的桩顶端位移范围为 - 5 ~ - 12 mm,大约 至 - 5 ~ - 7 m以下转向正位移,呈反弯曲线。

从计算所得到的堤岸断面应力情况看出,无支护 开挖情形下堤岸的塑性区主要分布在开挖面和岸坡坡 脚处,表明岸坡在无支护开挖下有破坏的可能;施加 预应力锚杆后,使岸坡的塑性区极度缩小,塑性区仅仅 出现在坡脚底部极小范围内,不会对岸坡的稳定性产生 危害。

以上说明通过桩锚土的相互作用,锚杆调整了桩 与土体之间的应力,大大提高了堤岸的整体强度,说 明预应力锚杆用于海河堤岸结构支护是有效的。

5 结 语

本文采用三维显式有限差分方法,建立了堤岸加

固的预应力锚固数值仿真模型,通过计算机模拟,获 得了锚杆加固堤岸结构的变形、塑性区分布规律。

数值计算与锚杆现场试验结果的对比分析表明, 应用 FLAC^{3D}程序计算预应力锚固问题,采用提高岩 土体力学参数的方法来模拟端部扩大或二次灌浆等加 固效果是可行的;通过对海河堤岸锚杆加固过程的数 值模拟,表明理论计算与实测结果在总体规律上基本 吻合,因而验证了海河堤岸改造工程设计的可靠性。

参考文献:

- [1] CECS 22: 90, 土层锚杆设计与施工规范 [S].
- Itasca Consulting Group Inc. FLAC 3D (Version 2.0) users manual USA: Itasca Consulting Group Inc. [Z]. 1997.
- [3] 程 桦,孙 钧.三峡船闸及高边坡非线性大变形数值分析[J].岩土力学,1998,19(4).
- [4] 漆泰岳,陆士良,高 波.HAC锚杆单元模型的修正极其应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(13).
- [5] 冯元祯.连续介质力学 [M].北京:科学出版社, 1987.

⁽责任编辑 欧阳越)