

流固耦合对加筋土边坡力学行为影响的弹塑性分析

曾四平, 凌建明, 祝云琪

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 分析了在考虑地基土体中流体与固体耦合作用情况下加筋土边坡的力学行为, 采用 Biot 固结理论说明了土体中流体与土体耦合作用的机理。通过数值计算比较了在考虑地基土体中流固耦合作用及不考虑流固耦合作用 2 种情况下, 土体的侧向位移、沉降及筋材应变等特点, 并与试验路的测试数据相比较。研究表明, 考虑流固耦合作用的分析与实际情况更吻合。所以, 在今后加筋土边坡的力学行为分析中, 应尽可能计入流固耦合作用的影响, 该研究成果对加筋土边坡的工程实际有一定的指导作用。

关键词: 加筋土边坡; 有限差分法; 流固耦合

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)03-0024-03

中图分类号: U416.1

Elasto-plastic Analysis of Effect of Coupling Between Fluid and Solid of Foundation on Mechanic Characteristics of Reinforced Slope

ZEN G Si-ping, L IN G Jian-ming, ZHU Yun-qi

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The mechanic characteristic of reinforced slope is analyzed by considering the coupling between fluid and solid of foundation, and the mechanism of the coupling is illuminated by Biot consolidation theory. Then the variety of lateral displacements, settlements in the soil and the strain of reinforcement are compared by numerical calculation considering the coupling or not. Outcomes from the calculation are compared with obtained data of a test road. The conclusion is that the outcomes which consider the coupling are more consistent with the real circumstance. So, the coupling between fluid and solid of foundation should be considered as much as possible when analyzing the mechanic characteristic of reinforced slope henceforth. This can be used to guide practical reinforced slope engineering.

Key words: reinforced slope; finite difference method; coupling of foundation

由于加筋土结构具有优良的工程特性, 自从其概念提出以来, 研究者甚众。各国学者分别就加筋土结构的加筋原理、力学行为及设计方法, 做了大量的研究。但由于加筋土结构本身的复杂性, 对其的研究仍然不够充分。在以往的研究中通常只把土体作为弹性非线性或弹塑性材料进行分析, 对地基土体的固结, 地下水位的高低、变化对加筋土结构力学行为的影响研究得还比较少。而土体是由固、液、气组成的三相体系, 土体中流体的变化必然会对整个加筋土结构力学行为有一定的影响。所以研究地基土体中流体与固体的耦合作用对加筋土边坡力学行为的影响是很有必要的。Allen Lunzhu Li 在其博士论文中考虑了不排水与部分排水条件对加筋土路基力学行为的影响^[1], 国内赵维炳等对土工织物加筋与塑料排水板联合加固软基的方法进行了研究^[2], 考虑了地

基土的固结对土工织物加筋的影响; 冯震等分析了部分排水条件下软土地基土工合成物加筋路堤的性状^[3], 考虑到了加筋与固结的耦合作用。但总的来说, 当前关于加筋土边坡一般性的研究已比较成熟, 但关于流体与固体耦合作用对加筋土边坡力学行为的影响研究还很不充分, 本文在前人研究的基础上, 就流固耦合作用对加筋土边坡力学行为的影响做进一步的研究, 主要探讨考虑地基土的固结对整个加筋土边坡的位移及筋材应变的影响。

1 理论分析

1.1 土体的本构关系

由于土体应力应变关系的复杂性, 本文采用修正的剑桥模型来表示土体的本构关系^[4-5], 修正后的剑桥模型弹塑性本构关系可以表示为:

$$\begin{Bmatrix} d^+ \\ d^- \end{Bmatrix} = \frac{(1-k)}{(1+e)p} \frac{2}{(M^2+2)} \begin{bmatrix} -\frac{M^2+2}{2} & 1 \\ 1 & \frac{2}{M^2+2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} dp \\ dq \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\frac{d^+}{d^-} = q/p$; M —— p — q 面上破坏线的斜率, $M = 6 \sin \phi / (3 - \sin \phi)$, 其中 ϕ 为土体的有效摩擦角; d^+, d^- ——分别为体积应变与剪切应变增量; e ——孔隙比; k ——分别表示土体等向压缩与膨胀曲线中正常固结初压曲线及回弹曲线中的斜率。

1.2 Biot 固结理论

土体的固结现象是流体与土体相互作用的主要

$$\begin{cases} -\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{11} \frac{\partial u}{\partial x} + D_{12} \frac{\partial v}{\partial y} + D_{13} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{31} \frac{\partial u}{\partial x} + D_{32} \frac{\partial v}{\partial y} + D_{33} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \\ -\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{31} \frac{\partial u}{\partial x} + D_{32} \frac{\partial v}{\partial y} + D_{33} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{21} \frac{\partial u}{\partial x} + D_{22} \frac{\partial v}{\partial y} + D_{23} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

此外,由饱和水体的连续条件可得连续性微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{w} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} k_x + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} k_y \right) = 0 \quad (3)$$

式中: w ——水的容重; k_x 和 k_y ——分别为土体 x 和 y 方向的渗透系数。

联立两式,即得 Biot 固结微分方程,它包含位移 u, v 以及孔压 p 这 3 个未知量,由 3 个偏微分方程构成联立方程组,该方程组通常采用数值方法求解。

1.3 筋材及筋土界面的本构关系

1.3.1 加筋材料的本构关系 加筋材料是一种典型的韧性材料,通常情况下在土中受到的拉力比其抗拉强度要小很多,其应力应变关系还在线弹性范围之内,故本文将筋材的本构关系取为线弹性。

1.3.2 筋土接触面的本构关系 由于筋材与土体的性质相差悬殊,在一定受力条件下可能会产生错动滑移或开裂,所以,在筋土之间设置了接触面单元。本文采用无厚度 Goodman 双曲线型非线性弹性模型来模拟筋土接触面的相互作用^[8-9]。

2 数值计算

2.1 有限差分法

本文采用有限差分法来对该课题进行分析,相对于有限元的物理离散而言,它是一个数学上的离散方

形式,它包含了渗流和土体变形这两个方面,是两者的耦合。Biot 固结理论能够比较全面地考虑这两者的结合^[6-7],它的基本公式包括平面微分方程和连续性方程两部分。

在本研究中,我们以平面应变问题为例,其位移和孔压表示的平衡微分方程为:

法^[10],它将待解问题的基本方程组和边界条件近似转化为差分方程,把求解微分方程的问题转化成代数方程问题来求解。

2.2 试验路概况

本文就交通部西部交通建设科技项目“加筋土边坡力学行为与设计方法研究”资助课题的试验路:重庆忠(县)一垫(江)高速公路的一段加筋土路堤边坡作为计算原型,取该试验路位于 K81+390 位置的一个断面,该段属于一软弱地基路段,采用加筋与碎石桩处治,其设计示意图如图 1 所示,根据土体固结试验及三轴试验得到土体参数见表 1 所示,计算时有限差分软件 FLAC 来模拟,筋材采用其中的 cable 单元,筋材及筋土界面的参数如表 2 所示。

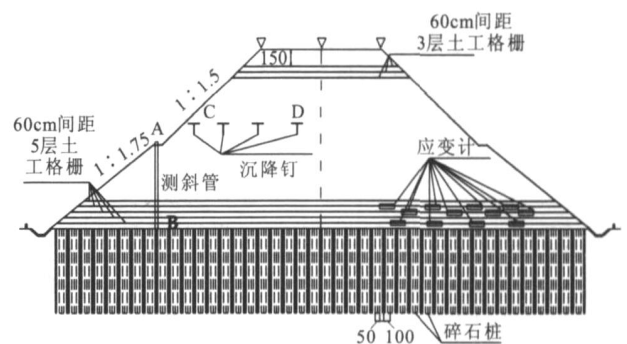


图 1 忠—垫路加筋试验段设计示意图

表 1 忠—垫路加筋试验段土体参数

材料属性	体积模量/ Pa	土体参数 M	正常固结线斜率	弹性膨胀线斜率 k	正常固结线的比容 v	渗透系数/ ($m \cdot s^{-1}$)	孔隙比	初始固结压力/ Pa	超固结比 R	容重/ ($kg \cdot m^{-3}$)
地基土	5×10^6	0.89	0.16	0.06	2.86	$3.35E-11$	0.10	1000	8	2000
路堤填土	4×10^7	1.02	0.25	0.05	3.16	$7.85E-9$	0.25	1000	10	2050

表 2 筋材及筋土界面参数

参数	弹性模量/ MPa	横截面积/ m ²	拉伸屈服 强度/MPa	刚度/MPa	黏聚力/ (kN·m ⁻¹)	外周长/m	筋土摩擦 角/(°)	密度/ (kg·m ⁻³)
数值	2 000	8.50 ×10 ⁻⁴	10	7	100	0.314	20	2 000

2.3 加筋土边坡中位移的特性

本文从地基和边坡的侧向位移和沉降 2 个方面出发,研究流固耦合作用对加筋土边坡位移的影响。探讨考虑及不考虑流固作用下加筋土边坡的变形情况,并与试验路中实测的数值相比较,说明考虑流固耦合作用对分析加筋土边坡的重要性。试验路中利用测斜管来量测土体的侧向位移与沉降,如图 1 所示,选取与测斜管上的 A 点与 B 点相接触的土体为例,研究两点的侧向位移变化情况。选取沉降钉 C 和 D 研究土体中的沉降变化情况。

2.3.1 流固耦合作用对侧向位移的影响 笔者从 2006 年 2—7 月经过历时 6 个月的观测,得到关于 A 点和 B 点不同时刻的实测值与数值分析值的比较如图 2 所示。考虑流固耦合作用时,所得的值比实测值略大,是因为实测值只是土体在固结过程中某一时刻的数值,所以比固结完全时所得的值要小,而不考虑流固耦合作用的值比实测值要小。整个来说,考虑流固耦合作用,更符合实际情况。

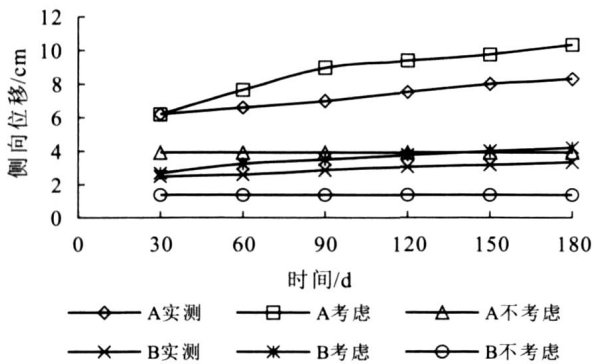


图 2 水平位移实测值与计算值的比较

2.3.2 流固耦合作用对沉降的影响 图 3 为试验路中 C 点和 D 点的实测值与考虑流固耦合作用与否的数值计算所得值的比较。从图 3 中可以看出,仍是考虑流固耦合作用时的值比实测值略大,不考虑流固耦合作用所得的值比实测值要小,所以考虑流固耦合作用时,更符合实际情况。

2.4 流固耦合作用对筋材应变的影响

为反映加筋土边坡中筋材的作用效果及变形情况,试验路中在筋材不同位置上连接了应变计(见图 1)。从应变计所得出的 1,3,4 层筋材应变与 2 种方法所得的结果比较如表 3 所示。结果表明,3 者比较

接近,其筋材应变要比不考虑流固耦合作用略大,即流固耦合作用对筋材应变的影响不是很明显。

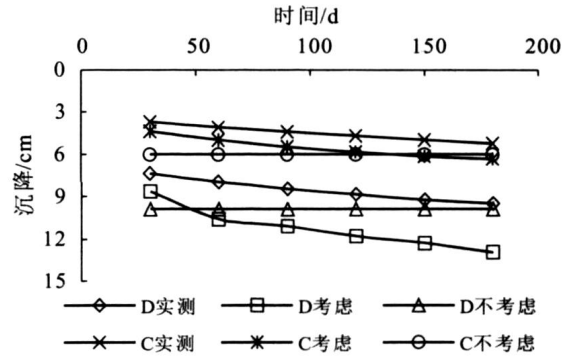


图 3 沉降实测值与计算值的比较

表 3 筋材应变比较

结果	第 1 层	第 3 层	第 4 层
实测	9.50E-3	6.20E-3	5.10E-3
考虑流固作用	9.94E-3	6.03E-3	4.57E-3
不考虑流固作用	1.01E-2	6.11E-3	4.88E-3

3 小结

分析了在考虑地基土中流固耦合作用与否情况下,加筋土边坡中的位移、筋材应变变化情况,并与试验路实测数据进行了对比,发现考虑流体与土体相互作用时,土体的水平和垂直位移、筋材的应变都比不考虑流固相互作用要大,且与实际测量结果更为接近。这说明不考虑流固耦合作用是偏于保守的,在加筋土实体工程中,考虑流体与固体的耦合作用更接近工程实际。

[参 考 文 献]

[1] Allen Lunzhu Li. Time Dependent Behaviour of Reinforced Embankment on Soft Foundations[D]. Ph. D. The University of Western Ontario London, Ontario, September, 2000.

[2] 赵维炳,李松泉.土工织物加筋与塑料板排水联合加固软基的计算方法研究[J].岩土工程学报,1998(5):60—65.

[3] 冯震,王连俊,王娜,等.部分排水条件下加筋路堤性状分析[J].水文地质工程地质,2005(4):104—107.

[4] 郑颖人,沈珠江,龚晓南.广义塑性力学岩土塑性力学原理[M].北京:中国建筑工业出版社,2002.209—222.

逐渐恶化为Ⅲ类水。农田是整个库区土地利用类型之一,分布在入库河流周围。整个水源区主要以种植业为主,随着农业产业结构的调整,一些农户改种果树、花卉等高产经济作物,随着作物播种面积的扩大,产量增加的同时,化肥、农药的施用量随之增加。松华坝库区农田径流、入库河流与水库已构成一个相互联系,相互影响的整体。农田施肥量的增加,促使农田径流、入库河流的全N,全P含量的升高,再加上昆明地区旱雨两季非常明显,在雨季,土壤中的N,P势必会随着降雨通过地表径流流入入库河流,从而进入水库,使水库水质恶化。

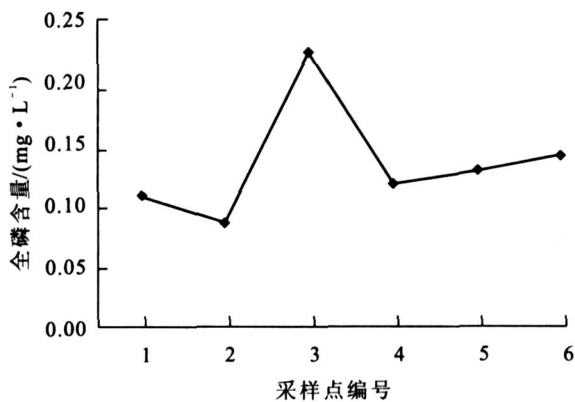


图3 松华坝水库入库河流全P含量趋势变化

3 结论

(1) 整个库区土壤(0—20 cm)全氮含量为1.10~2.30 g/kg,平均值为1.79 g/kg; $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量为0.72~74.48 mg/kg,平均值为13.55 mg/kg; $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量为0.87~21.62 mg/kg,平均值为7.29 mg/kg,属于全氮含量比较丰富的土壤。土壤(0—20 cm)

全氮含量依次为:粮田>果园>菜地;土壤(0—20 cm) $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量依次为:果园>粮田>菜地;土壤(0—20 cm) $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量依次为:果园>菜地>粮田。土壤中剩余的氮肥通过各种途径,如径流、淋溶等进入环境,必然会对水库水质产生影响。

(2) 整个库区土壤(0—20 cm)全磷含量为0.64~2.31 g/kg,平均值为1.60 g/kg;速效磷含量为1.74~27.31 mg/kg,平均值为10.36 mg/kg。属于全磷含量比较丰富的土壤。土壤(0—20 cm)全磷含量依次为粮田>果园>菜地;土壤(0—20 cm)速效磷含量依次为菜地>粮田>果园。磷肥更易随径流、淋溶等进入环境,使水库水质恶化。

(3) 入库河流的全N含量最初为Ⅲ类水,但是在入库口全N含量为Ⅱ类水。入库河流的全P含量最初为Ⅲ类水,全P含量最高为Ⅱ类水。总体趋势为,顺流而下,直至入库口水质下降为Ⅲ类水。农田施肥量的增加,促使农田径流、入库河流的全N,全P含量升高。在雨季,土壤中的N,P势必会随着降雨通过地表径流流入入库河流,从而进入水库,使水质恶化。

[参考文献]

- [1] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1—6.
- [2] 张水龙, 庄季屏. 农业非点源污染研究现状与发展趋势[J]. 生态学杂志, 1998, 17(6): 51—55.
- [3] 吕殿青, 同延安, 孙本华, 等. 氮肥施用对环境污染影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 8—15.
- [4] 高超, 张桃林, 吴蔚东. 农田土壤中的P向水体释放的风险评价[J]. 环境科学学报, 2001, 21(3): 343—348.
- [5] 周健. 试论农业非点源污染的危害[J]. 农业环境保护, 1990, 9(1): 22—24, 45.
- [6] 沈珠江. 用有限元法计算软土地基的固结变形[J]. 水利水运科技情报, 1977(1): 7—13.
- [7] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [8] 朱湘. 软土地基格栅加筋路堤结构性能研究[D]. 南京: 东南大学博士学位论文, 2000.
- [9] 孙钧, 任炳铨. 地下结构有限元法解析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1988.
- [10] 谢婉丽. 黄土地区高填方加筋土路堤变形与稳定性研究[D]. 西安: 西北大学博士学位论文, 2004.

(上接第26页)