

土工网与土相互作用机理的有限元分析^{*}

喻泽红 张起森
(长沙交通学院河海系, 410076)

文 摘 本文应用有限元方法, 编制了土工网处理桥头跳车力学模型分析程序, 由计算出的土体应力及位移, 分析出土与土工网相互作用机理及土工网加固土体的机理。本文的分析结果得到了实体工程实测结果及模型试验结果的验证, 也为土工网的推广应用提供了理论依据。

关键词 土工网, 机理, 有限元。

1 前 言

土工网已在欧洲、北美、日本等国工程上得到了广泛应用, 一些国家基于经验还编写了相应的规范。在我国, 土工网以其优良的性能和应用的简便性也引起了工程界的广泛关注。但由于土工网在岩土工程中的作用机理、设计理论、计算方法等都研究得很不够, 不能适应土工网在岩土工程中的应用需要, 致使不少实际工程不得不简单仿效已建的工程。而实际工程条件, 可以说没有两个是完全相同的, 这就无法预测工程的安全程度, 往往不是浪费就是不安全。由于土工网与土相互作用机理复杂, 其理论研究仍很不成熟, 已编出的规范在指导设计和施工方面有很大的局限性, 从而大大制约了土工网在土木工程中的应用。针对这一情况, 国内外正在进行广泛的研究。结果表明, 土工网能提高土体承载能力, 降低土体的沉降和侧向位移^[1~3]。但目前为止, 有关土工网与土相互作用的力学机理还没有系统的理论报道。现有的研究成果主要来源于土工织物与土相互作用的机理研究。其核心主要是: 土工网与土的摩擦作用制约了土体的侧向变形, 土工网的张力膜效应产生的拉力分量承担了部分土体水平应力和垂直应力^[4,5]。本文通过对土工网处理桥头跳车的力学模型进行有限元分析, 对土工网与土相互作用机理提出了不同的看法。

本文的计算结果由笔者编制的有限元程序算出。该程序算出的土体沉降及侧向位移结果得到了湘潭龙云立交桥和株州白关桥桥头跳车实体工程长期观测结果的验证^[1]。本文关于土工网与土相互作用机理的研究结果, 得到了土工网加筋土试件的压缩试验和直剪试验的验证; 同时在曼谷 AIT 校园的软土上, 用土工网加筋修筑的 6m 高足尺荷载试验路堤, 其长期应力、应变监测数据也验证了本文研究结果的合理性。

2 非线性有限元分析

2.1 力学模型

将铺有土工网的路堤近似地看作平面应变的三层连续体系, 即将土体、土工网、土工网与

^{*} 国家自然科学基金资助项目(登记号 59278364)及交通部“八五”攻关项目。

土体界面分别作为独立的结构层次。

土体采用八节点等参单元。在等参单元中,形成单刚及计算面力、体力的等效荷载向量都使用高斯数值积分,积分的阶次 $n=2$ 。界面单元用古德曼(Goodman)单元表示,即由四节点弹簧单元——两个法向弹簧和两个切向弹簧表示,这些弹簧可以计算界面的切向和法向应力。界面单元的厚度不进入计算结果,界面单元及邻近的八节点等参单元及土工网单元之间,只有通过结点才有力的联系。土工网单元用二维薄膜单元表示,它近似于埋在土里的薄膜,只能承受张力,不考虑弯曲应力。

柔性挡土墙(如板桩墙)在土压力作用下,其轴线将发生挠曲变形,墙后土的性质与墙的变形有十分密切的关系。桥台是刚性挡土墙,墙的变形可以忽略不计,为简化计算,忽略了桥台与填土之间的摩擦力影响。

土工网处理桥头跳车的力学模型如图1所示。

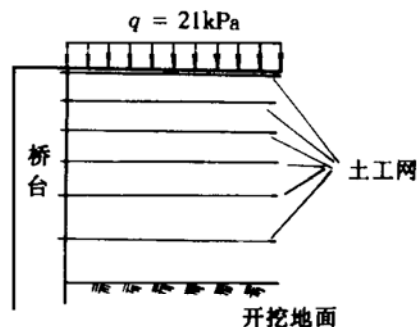


图1 土工网处理桥头跳车的力学模型

2.2 模型参数

本文根据桥背压实土具体作用条件,采用非饱和土固结排水试验,得出在不同密实度和不同压力下击实土样的应力应变关系曲线,如图2所示。由此求得各荷载段的弹性模量 E 、泊松比 μ 和轴向压力 σ_1 。应该指出的是,由于水平铺设土工网的土样要制成三轴试件很困难,实际所用的三轴试件都是纯土试件。又根据击实试验得出的土工网对土体击实密实度的影响曲线,可知纯土试件的实际密实度较达到相应单轴抗压强度时铺网试件的密实度小3%左右。本文在计算中没有考虑铺网对密实度变化的影响。

土工网与土界面单元的特性参数:土与土工网界面剪切模量 K_s ,最大抗剪强度 τ_p 和对应的最大剪切位移 S_m 取铺一层水平土工网的直剪试验结果。

土工网的抗拉模量由英国力特(Netlon)公司提供:CE131型号, $E' = 1.2 \text{ kN/m}$ 。

2.3 计算方法及程序框图

采用有限元增量迭代法。其中对土体单元用初应力迭代法,即将应力的线弹性解 $\{\sigma\}^e$ 与实际非线性弹性解 $\{\sigma\}$ (由图2得出)之间的差值(初应力)转化为相应单元的等效结点荷载,再重新解方程,直到比值 $(\{\sigma\}_m^e - \{\sigma\}_m) / \{\sigma\}_m^e$ 小于0.05,单元迭代结束。摩擦单元采用摩擦迭代。由于接触面上剪应力的极值应等于摩擦力,因此,必须把剪应力超过摩擦力的部分,即 $(\tau - f \cdot \sigma_n)$,化为单元的等效结点荷载转到其它单元上去。然后逐次迭代,直到前后两次剪应力之差值和剪应力之比能满足5%的精度要求时为止。

首先进行若干次初应力迭代,达到收敛后,再进行一次接触面摩擦迭代,这样反复进行,直到接触面上的剪应力收敛为止。这样,在最后一次摩擦迭代结束时,填土应力和接触面剪应力同时收敛。

计算程序是用FORTRAN语言编写的,框图如图3所示。

3 土工网对土体应力的影响

3.1 土工网对土体垂直应力 σ_v 的影响

图4为土体垂直应力沿桥背填土深度的变化。从图中可以看出,土工网使土体垂直应力重分布。如图4(b)所示,当填土上半部布置土工网,下半部不布置土工网时,上半部土体 σ_v

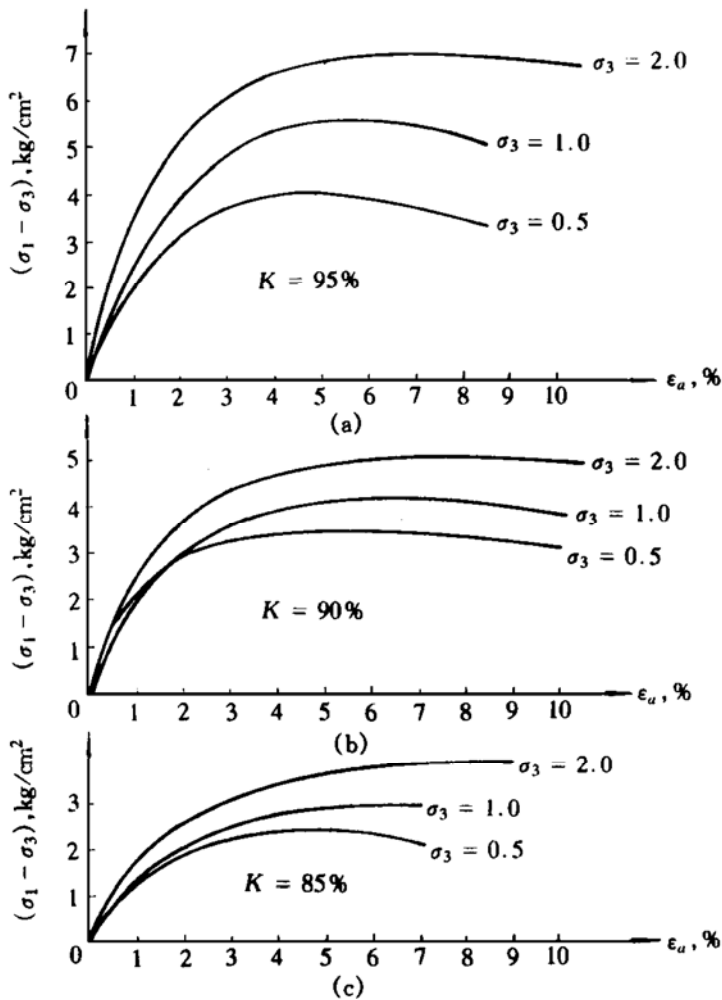


图2 土的应力-应变关系曲线

呈锯齿变化,而下半部土体 σ_y 则随深度逐渐递增。对 8m 高的桥背填土,全高铺设土工网、仅上半部铺土工网、不铺土工网三种情况下的填土层底部垂直应力分别为 24, 52, 168kPa。相应的填土面层最大沉降分别为 0.8, 2.1, 4.6cm^[1]。由上可知,水平铺设土工网使土体垂直应力明显降低,从而提高了土体承载能力,降低了土体沉降。击实试验也表明,在土体中加铺土工网,可以增加土体在相同击实能量下的压实度,提高土体的抗压强度^[2]。

用土工网加筋修筑的 6m 高试验路堤底部的垂直应力实测结果验证了水平铺设土工网能降低土体垂直应力的论述。在曼谷 AIT 校园的软土上,分别利用聚合物 TenaxTT201SAMP 型土工格栅和钢筋修筑了两座 6m 高试验路堤^[6]。为便于比较,同样也取桥背填土高为 6m。表 1 为桥背填土的计算垂直应力 σ_y 与两座实验路堤底部实测垂直应力 σ_y 的比较。

从表 1 可以看出,土工格栅与土工网均有明显降低土体垂直应力的作用。钢筋对土体垂直应力也有影响,但其影响程度却远小于土工格栅与土工网。土工格栅和土工网的抗拉强度对土体垂直应力的影响不大。

减小填土垂直应力 σ_y 主要依靠土与土工格栅或土工网接触面的摩擦咬合作用,而非取决于它们的抗拉强度,即张力膜效应。美国的 Milligon, Jewell 等用实验也证实了这一观点^[7]。

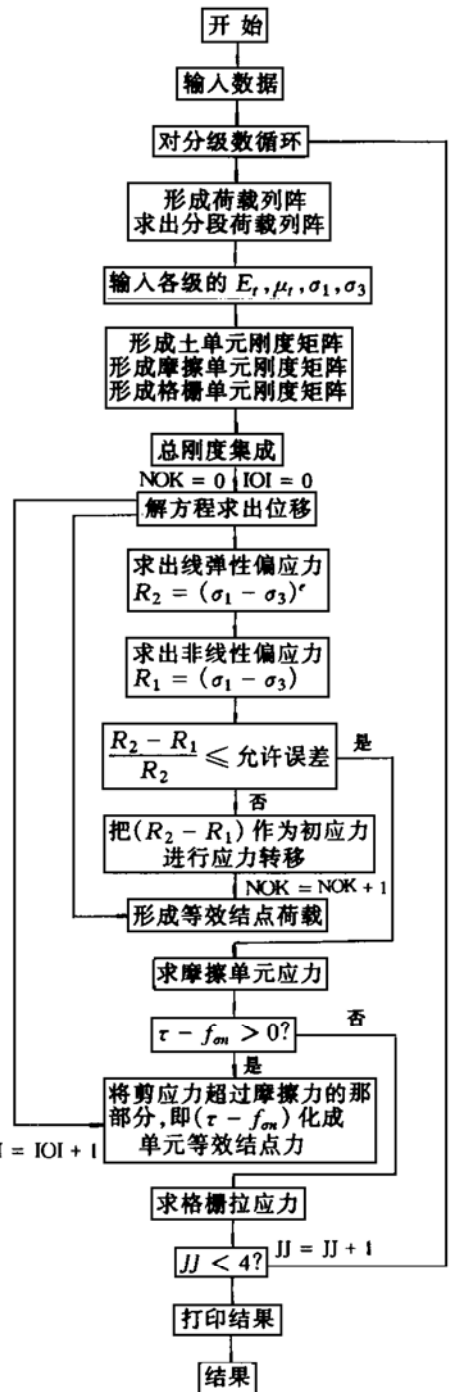


图3 程序框图

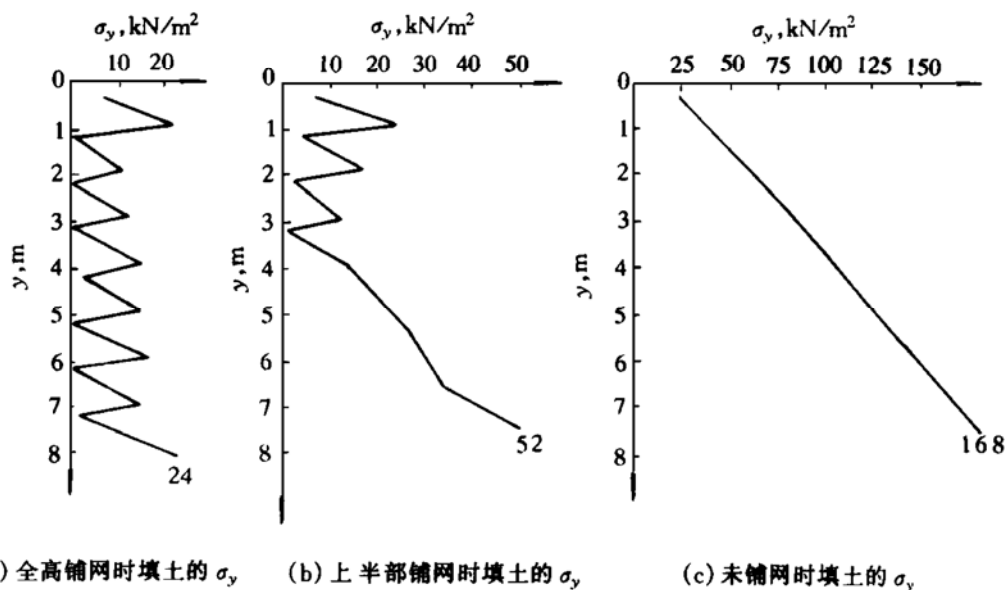


图4 土体垂直应力沿填土深度的变化

表1

垂直应力 σ_y 与实测结果的比较

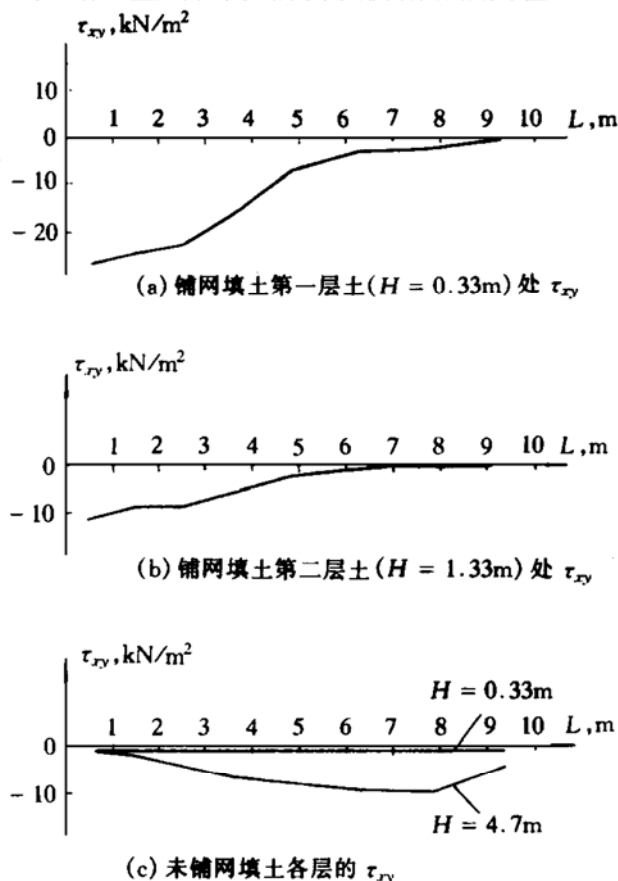
桥背填土路堤底部 σ_y 计算结果(kPa)		试验路堤底部 σ_y 实测结果(kPa)	
纯土	CE131 土工网	钢筋	TenaxTT201SAMP 土工格栅
110	17	82	12

注: ①实测结果是在施工开始后 270 天测得的; ②施工开始后 200 天, 软土路堤固结完成 70%; ③CE131 型土工网极限抗拉强度为 8.62kN/m, TenaxTT201SAMP 型土工格栅极限抗拉强度为 55kN/m; ④桥背土工网的加筋密度比软土路堤的土工格栅加筋密度小一倍左右; ⑤表 1 中土体垂直应力均取路堤中央横断面的底部值。

3.2 土工网对土体剪应力的影响

如图 5 所示, 铺设土工网后土体的最大剪应力 $\tau_{xy} = 25.54\text{kPa}$, 是纯土的最大剪应力 $\tau_{xy} = 8.62\text{kPa}$ 的 3 倍。另外, 如图 6 所示, 从土体的剪应力大小分布来看, 铺设了土工网的土体, 在靠桥台 A' 处的剪应力 $\tau_{xy} > 20\text{kPa}$, 最大剪应力为 25.54kPa, 最大垂直位移为 0.8cm, 最大侧向位移为 0.01cm。而无土工网土体的剪应力大多小于 5.0kPa, 仅在位置 B 处接近 9.0kPa。在靠近桥头的 A' 处, 其剪应力 $\tau_{xy} < 1.0\text{kPa}$, 最大垂直位移为 4.6cm, 最大侧向位移为 1.0cm。由上可以看出, 对于桥背未铺土工网的路堤, 在靠桥头 A' 处的土体变形较大。而铺土工网后, 为抵抗较大的变形趋势, 在靠桥头 A' 处, 土体颗粒与土工网摩擦咬合作用增强, 从而使与土工网相邻的土颗粒本身摩擦作用增强, 剪应力由 1.0kPa 增至 25.54kPa, 土体的变形则明显减小。

铺设土工网后, 由于土工网与土接触面间的剪应力传递, 使土工网两侧的摩擦作用增强, 剪应力增大。这也得到了土工网与土复合体试件直剪试



说明: H 是填土面向下的深度

图5 土体剪应力

验的验证^[8]。从表 2 可以看出,铺土工网土体的剪应力比纯土的剪应力均增加约 8kPa。

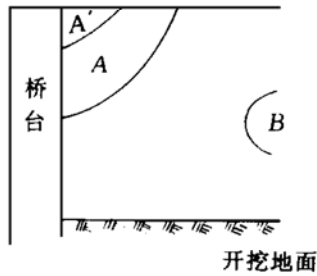


图 6 土体剪应力分布图

表 2 纯土与铺土工网试件土体剪应力的比较

正应力 σ (kPa)	剪应力 τ (kPa)	
	纯土	铺 CE131 土工网
5.66	22.5	30.38
11.32	25.0	33.64
17.0	27.5	36.99

加铺土工网后,土工网两侧土体颗粒摩擦作用增强,剪应力增大,因而约束了土体的侧向变形。这也得到了土工网与土复合体试件压缩试验的验证^[2]。图 7 为试件破坏时的状况,从该图可以看出,随着土工网层数的增加,试件的破坏状况逐渐从 45° 面上的剪切破坏向竖直面转移,土体的侧向变形随之明显减小。

3.3 土工网对土体水平应力的影响

从图 8 可以看出,水平铺土工网能有效降低土体水平拉应力。未铺土工网的桥背填土路堤,在距桥头 4m 范围内,面层土的水平拉应力 $\sigma_x > 20\text{kPa}$,且位于桥头端部的最大水平拉应力 $\sigma_x = 28.62\text{kPa}$ 。而铺设了土工网的桥背填土路堤,其最大水平拉应力 $\sigma_x = 7.1\text{kPa}$,位于面层土距桥头 0.7m 处。其它部位的土体水平拉应力 $\sigma_x < 5.0\text{kPa}$ 。

在土工问题中,人们对土的抗拉强度研究很少,对大多数稳定计算都不考虑土的抗拉强度。现有资料表明,粘性土的确有一定的抗拉强度。为了适应高土石坝的需要,清华大学水利系曾对 4 种粘性土的击实试件,用单轴拉伸和土梁弯曲两种方法测定抗拉强度。结果表明,当土料的初始状态接近最大干容重和最优含水量时,4 种击实试件的抗拉强度约为 38~39kPa^[9]。

由上述可知,未铺土工网的桥背填土路堤,其桥头处的最大水平拉应力 $\sigma_x = 28.62\text{kPa}$,已接近击实粘性土试件的抗拉强度,这极易引起土体裂缝。而铺设了土工网的桥背填土路堤,由于其水平拉应力较小,则大大降低了土体产生裂缝的可能性。这一结果得到了湘潭龙云立交桥及株州白关桥桥头跳车实体工程的验证^[2]。株州白关桥未进行土工网处理的桥头端,其桥台与填土路堤搭接处及填土路面均已出现明显裂缝。更有甚者,桥头处填土路堤已出现塌方。文献[10]通过对 50 多座桥进行统计,总结出引起桥头跳车的 4 个原因。其中一条就是在桥头

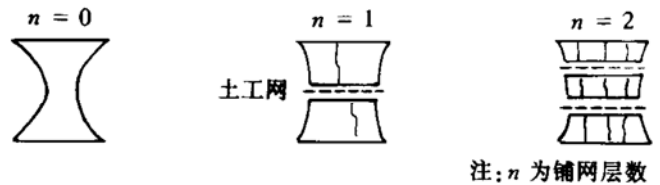
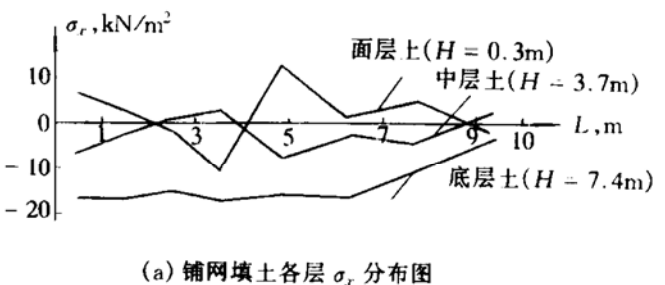


图 7 试件的破坏状况



(a) 铺网填土各层 σ_x 分布图

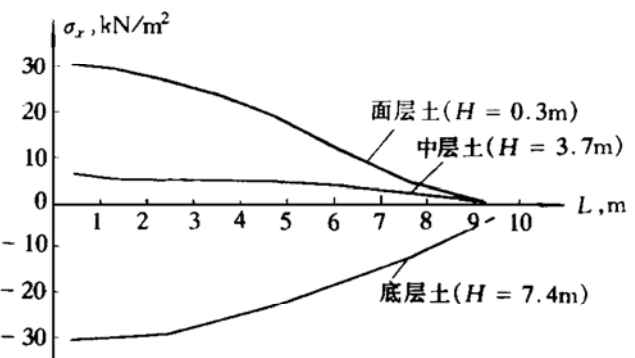


图 8 土体水平应力 σ_x

处容易产生拉力裂缝,随着雨水及污垢逐渐浸蚀而导致塌方,引起桥头跳车。而进行了土工网处理的桥头端,其桥台与填土路堤搭接处及填土路面均无裂缝,无任何坍塌现象。湘潭龙云立交桥未进行土工网处理的桥头端,其桥台与路堤搭接处出现裂缝,且搭接处的混凝土破碎。而进行了土工网处理的桥头端无此现象。

4 土工网与土相互作用机理

人们通常认为,土工网与土复合体中,土工网的张力膜效应起着关键作用。然而计算表明,桥背填土中土工网最大筋肋张力为 $2.15 \times 10^{-4} \text{ kN/m}$, 远远小于 CE131 型土工网的极限荷载 8.16 kN/m 。由此可见,土工网的张力并没有得到发挥。同时,在曼谷 AIT 校园软土上,利用聚合物 TenaxTT201SAMP 土工格栅加筋修筑的 6m 高试验路堤,其施工开始后 270 天的土工格栅应变测试结果也正说明了这点。测试的所有土工格栅筋肋应变都在 $0.4\% \sim 1.1\%$ 范围内,相当于土工格栅荷载 $0.84 \sim 2.3 \text{ kN/m}$,与土工格栅最大强度 55 kN/m 比,土工格栅的实际受力仅为其极限强度的 $1.5\% \sim 4.2\%$ ^[6]。然而,无论是理论计算结果,还是模型试验及实体工程观测结果都证明,在土体中水平铺设土工格栅或土工网的确能明显提高土体承载能力和抗变形能力,从而起着加固土体的作用。为此,本文对影响土工网加筋土的另一重要因素——土工网与土接触面的界面剪应力进行研究,发现其最大界面剪应力为 55.76 kPa ,其值小于由直剪试验得出的土与土工网复合体试件在同等正应力下的土与土工网界面抗剪强度 63.89 kPa ^[2]。最大界面剪应力位于路堤面层土与其相邻的土工网接触面上,平均界面剪应力也在 10 kPa 以上。从上述界面剪应力大小及分布来看,变形趋势大的部位,如路堤面层,其界面剪应力也相应较大。这就说明,土工网与土接触面的界面剪应力对土工网与土复合体的性能起着关键作用。

土工网与土一起承受外部和内部的荷载作用,由于土工网的变形影响,其两侧的土颗粒受到约束,土体本身颗粒间以及土颗粒与土工网接触面间的摩擦咬合作用增强,土体中的部分应力得到扩散和转移。从而使土体的垂直应力和水平拉应力明显降低,而土体剪应力明显提高,但未超过土与土工网复合体的抗剪强度。同时,土工网与土复合体试体的直剪试验也表明,在土体中加铺土工网能有效提高土体的抗剪强度^[2]。因此,土工网与土复合体的力学性能不仅与土体、土工网各自的性能有关,更重要的是取决于土工网与土的界面特性。

5 结 论

(1) 本文提出的有限元分析程序可用于土工网加筋土的应力分析。原型观测和模型试验结果都验证了计算结果的合理性。

(2) 在土体中合理布置土工网,可使土体的垂直应力、水平应力明显降低,土体剪应力(土颗粒之间的摩擦作用)明显提高,土体的抗剪强度得到充分发挥。大大提高了土体的承载能力、抗变形能力和抗裂能力。

(3) 土工网加筋土结构在工作时,土工网与土一起承受外部和内部荷载作用。但土工网的张力膜效应未得到充分发挥,特别对于降低土体垂直应力而言,土工网与土接触面的界面剪应力对复合体的性能起着关键作用。

参 考 文 献

- 1 喻泽红, 韩理安. 土工网处理桥头差异沉降的有限元分析. 岩土工程学报, 1996, **18**(6): 24~ 30.
- 2 长沙交通学院. Netlon 土工网试验研究报告. 1995.
- 3 俞仲泉, 李少青. 土工织物加固堤基的离心模型试验. 岩土工程学报, 1989, **11**(1): 67~ 72.
- 4 白冰. 土工织物三向受力状态加筋软基承载力的计算. 华东公路, 1994(4): 54~ 57.
- 5 高宏兴. 软土地基加固. 上海: 上海科学技术出版社, 1990. 222.
- 6 Bergado D T, Menil N J L(泰国), Rimoedi P (意大利), Douglas R S(新加坡). 利用土工格栅加筋修筑软土路堤. 中国土工合成材料工程协会, 1995: 21~ 24.
- 7 Milligon G W E, Jewell R A, Houlshy G T, et al. A New Approach to the Design of Unpaved Roads. Part 1. Ground Engineering, 1989.
- 8 陈晔, 张起森等. Netlon 土工网材料有关工程性能试验报告. 交通科技信息, 1994(4): 21.
- 9 黄文熙. 土的工程性质. 北京: 水利水电出版社, 1983. 317~ 319.
- 10 Jonathan Wu T H, Bassam Helwany H. Alleviating Bridge Approach Settlement with Geosynthetic Reinforcement. Geotextiles, Geomembrances and Related Products. Den Hoedt(ed). 1990 Bakema Rotterdam, ISBN 90: 107.

Finite Element Analysis for Mechanism of Geonets— Soil Interaction

Yu Zehong

Zhang Qisen

(Department of Harbor and River Engineering, Changsha Communications University, 410076)

Abstract Finite element program is developed to investigate the “bump” mechanics model at bridge approaches . After examining the character of stresses and displacements within the backfill behind bridge abutments, mechanism of geonets— soil interaction and soil stabilization is obtained. Results from this study have been checked by in situ measurement and model test. Theoretical foundation is provided to widely use geonets.

Key words geonets, mechanism, finite element.

南京水利科学研究院暨本刊电话总机、传真号码变更启事

自 1996 年 11 月 20 日起南京水利科学研究院暨本刊电话总机、传真号码变更如下:

	程 控 总 机	电脑台	传真
原号码	6633662. 6634178. 6634173	3309255	3310321
现号码	3717662, 3739178, 3737173	3719255	3734321

本刊编辑部分机号码: 512(不变), 谢谢!

本刊谨启