

高填方加筋黄土路堤稳定性的有限元分析

王家鼎¹, 谢婉丽¹, 骆凤涛^{1, 2}

(1 西北大学地质系大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069,

2 中交通力公路勘察设计工程有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 采用有限元法对国内最高 (62 m) 的山西北张沟加筋黄土高填路堤稳定性进行了数值模拟, 对其最大主应力、最小主应力、剪应力和塑性破坏区及其变形进行了计算, 然后将其计算结果与未加筋路堤相比较, 得出高填方加筋黄土路堤及地基变形特性和应力特性的变化规律。结果表明, 由于加筋的作用, 降低了黄土高路堤的变形, 提高了其稳定性。这与现场沉降观测结果基本一致。

关键词: 加筋黄土; 高填方路堤; 土工格栅; 有限元分析

中图分类号: TU 432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2007)02-0268-05

随着西部开发的不断深入, 黄土高原地区公路、铁路等基础建设取得了长足的发展, 大大地推动了地方经济建设的可持续发展, 特别是近年来黄土高原地区高速公路、高速铁路的建设极大地缓解了黄土高原的交通压力。然而, 黄土高原地貌单元十分复杂, 沟壑纵横, 加之黄土疏松, 在外荷载作用下极易改变其性质, 诱发次生灾害^[1, 2]。为此, 高速公路以何种方式穿过黄土沟谷, 既经济, 又安全, 是个值得研究的问题。

加筋路堤是近几十年发展起来的介于挡墙与一般填方边坡之间的一种新型加筋土结构, 是在路堤和地基组成的土工结构物的适当位置加入具有抗拉性能的土工合成材料组成的一种复合体。由于土与加筋材料之间的摩擦作用, 使加筋土形成了稳定的整体复合结构, 从而提高了土体强度。土工格栅作为一种筋材, 其使用始于 1980 年。国内外研究表明^[3~8]: 由于土工格栅具有高强度、低延伸率、高稳定性等特点, 所以采用其加固高填路堤具有路堤稳定性好、边坡安全度高、沉降及差异沉降小和承载力强等诸多优点, 因而在土木工程各行业得到广泛的应用, 然而, 高填方加筋黄土路堤稳定性的研究并不多见。在山区修建高等级公路时, 为满足公路线型的要求, 路堤填筑高度的加大已愈来愈受到重视。如何改进和完善处理措施, 确保路基成形后的稳定, 目前国内还处于研究探索阶段, 60

m 以上的高路堤几乎尚未发现。另一方面, 公路建设中由于现有理论假设的局限, 高路堤稳定分析方法并不完全适用于冲沟地形条件, 沉降变形分析与实际存在较大差别, 这种理论研究滞后于工程实践的现象在相当大的程度上限制了这种结构形式的推广应用。

基于以上原因, 为研究高速公路是否可采用高填加筋黄土路堤跨越黄土深沟, 本文拟采用有限元法对山西北张沟 62 m 的高填方加筋黄土路堤稳定性进行数值模拟计算, 并结合现场工程地质调查研究工作, 将两者进行对比分析, 为公路设计和施工提供基础资料。

1 工程概况

北张沟高填方路堤位于山西省霍州市三教乡村东约 300 m 处的黄土深沟内, 起终点桩号分别为 K102+008 095 和 K102+186 020 全长 177.07 m。该段原设计为一座 45 m + 80 m + 45 m 连续刚构桥, 墩高 33 m, 柱式台, 桩基础。

1.1 原设计方案变更理由

为了保证工期, 节约工程费用, 经实际踏勘认为: 该处黄土沟形狭窄, 沟底平缓, 地质条件良好, 高路堤方案基本可行, 我们提出改桥为高路堤方案, 原因如下:

1) 该处地貌类型为黄土塬 冲积扇区, 线路

收稿日期: 2005-09-23 修订日期: 2006-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40572157, 40502028)、高等学校博士学科点专项科研基金 (20050697013) 资助。

作者简介: 王家鼎 (1962-), 男, 陕西蓝田人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事工程地质研究。E-mail wangjd@mwu.edu.cn

与冲沟斜交,设计高架桥通过时,桥长 177 m,而实际冲沟顶垂直宽度仅为 100 m 左右,沟底垂直宽度仅为 10~25 m。

2) 沟深 62 m,两侧山坡较陡,由于桥梁跨度有限(如再增大跨径,将会造成边孔浪费),桥墩承台难于座落在两侧陡坡上,因此,必然导致高桥墩,增加施工难度;桥墩施工平台形成时挖方量大;承台上临空面过高(最高达 45 m),对桩基安全施工带来一定隐患。

3) 桥位上游汇水面积很小,汇水总面积不超过 3 km²,采用高填方路堤,只设置 1 孔 2.5 m 的污水隧洞即可满足排洪要求。

4) 桥位处土质较好,均为粘性黄土,是良好的填筑路堤填料,而且北张沟北岸(祁县方向)约 1 km 范围有 20~10⁴ m³ 黄土废方,可利用此黄土废方填筑路基,以减少借方数量。

1.2 高填方路堤设计方案

1) 路基边坡坡率。距路面标高 8 m 范围内的第一级边坡坡率采用 1:1.5,第一级平台宽度采用 2.0 m。第二级边坡高度采用 12 m,坡率采用 1:1.75,第二级平台宽度采用 3.0 m。第三、四级边坡高度均采用 12 m,坡率采用 1:2.0,第三级平台宽度采用 4.0 m,第四级平台宽度采用 5.0 m。以下各级边坡高度、坡率及平台宽度与第四级相同(图 1)。

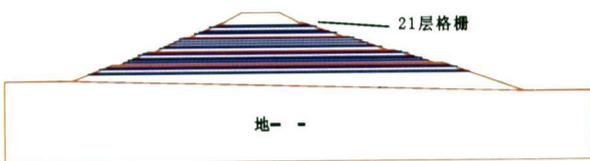


图 1 高填方加筋路堤示意图

Fig 1 Sketch of high reinforced embankment

2) 土工格栅的选择与布置。本次选用的土工格栅主要材料是聚丙烯。其主要物理力学性质如下:单位面积质量 500 g/m²;纵向尺寸 100 mm,横向尺寸 20 mm;卷幅宽 1.1 m,卷长 50 m;最大抗拉强度 30 kN/m;延伸率 10%。从高程 700 m 开始,止高程 742 m 共铺设 21 层土工格栅,每 2 m 设计一层(图 1)。

3) 排水及防护。每级平台上均设平台截水沟,尺寸为 0.4 m × 0.4 m,平台及水沟均用 25 cm 厚浆砌片石进行加固防护,截水沟与两侧急流槽相

接,平台向内设 2% 的反坡。边坡坡面与主沟两侧坡面交界处设急流槽;急流槽与路基两侧排水沟相接,直设计至沟底。急流槽为 0.6 m × 0.6 m 的矩形断面,其结构与主线相同;坡面采用拱形骨架护坡进行防护,并植草进行绿化。

4) 沟底排水设计。沿沟底设盲沟,其尺寸为 2.0 m × 2.0 m,以解决沟中及地下水的排泄。为防止盲沟堵塞,用土工布与土体隔离。

2 计算方案的选定

用有限元的方法从理论上研究加筋黄土高路堤,就是选用合适的物理力学模型来模拟加筋路堤,然后将计算的结果与未加筋路堤相比较,从而探索加筋高路堤的工作状态和加筋机理。

2.1 有限元方法进行加筋黄土高填路堤分析特点
有限元法是一种十分有效的数值分析方法。进行加筋黄土高填路堤计算有如下几个特点:

(1) 可以考虑黄土体的非线性弹塑性本构关系及变形对应力的影响;(2) 能适应各种复杂的边界条件;(3) 可以模拟路堤与地基、土体与加筋材料之间的共同作用;(4) 能够模拟高路堤的失稳过程及其滑移面形状;(5) 可以模拟高路堤施工的逐级加载过程。

2.2 高填方加筋黄土路堤有限元分析过程

1) 高填方加筋黄土路堤的几何参数与施工过程的模拟。本文选用与路线相交跨度最大的断面作为计算对象,即图 1 所示的高填方加筋路堤地基系统。由于受冲沟地形的影响,路堤底部有 1:5 的角度,路堤中心高度为 62 m,路堤顶宽为 34.54 m,路堤底宽为 405.4 m,地基深度约为一倍的路堤高度,平均深度为 60 m,地基宽度为路堤宽度向两边各延伸 30 m,即 525.4 m。路堤的施工步骤为逐层填土、铺筋、碾压,直到路堤顶面。有限元分析中,把一层填土当作是一次加荷,由此计算出当前施工范围内格栅与土体内各处的变形和应力,上一层填土引起的变形和应力与先前值迭加,直至整个结构完成。这样就实现了整个施工顺序的模拟。

2) 数值模型的建立。根据工程实际情况,上述高填方加筋土路堤所用材料沿道路轴向相对均匀,而且路堤有足够的长度,故将高填方加筋黄土路堤作为平面应变问题处理;对于该黄土冲沟地基和路基填土基本参数,我们开展了大量现场原位试

验、室内土工试验及黄土地区勘察经验等选取 (表 1), 土单元采用平面四节点等参单元; 由于土工格栅的模量远远大于黄土的模量, 因此把土工格栅视为线弹性的杆单元; 土与土工格栅的接触面采用双曲线古德曼四边形无厚单元, 其参数是根据按一定比例缩小的黄土加筋模型承载模拟试验来确定的 (表 2); 采用弹塑性模型和摩尔库仑屈服准则进行计算。

表 1 地基和路堤填土的计算参数

Table 1 Calculated parameters of high reinforced embankment and foundation

土层	E (kPa)	ν	γ (kN/m ³)	C (kPa)	ϕ (°)
填土	110400	0.25	17.8	43	25.7
地基	31000	0.27	19.2	35	24.8

表 2 接触面计算参数

Table 1 Calculated parameters of boundary between soil and geogrid

类型	Ks	Kn	C	Vm	Rf	
	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m ²)	(kPa)	(°)	(m)
筋-土	51	1000	21	12	15	0.02

3) 网格划分和边界条件。网格划分如图 2 所示, 共有 659 个单元、723 个节点。模型中的左右边界条件为水平约束, 底部约束条件为双向约束。



图 2 网格划分和边界条件

Fig 2 Finite element mesh and boundary condition

4) 分析方法。为了探索加筋高路堤的工作状态和加筋机理, 采用岩土二维有限元应用程序分别对加筋与未加筋黄土高路堤模拟分析。

3 计算结果分析

根据计算结果, 分别绘出加筋与未加筋高路堤的应力、变形和屈服图, 并进行如下的分析。

3.1 应力分析

1) 最大主应力: 最大主应力等值云图见图 3。总体来看, 它随着填土深度的增加而增加, 在地基最底部为最大值; 但在加筋部位, 和为未加筋的路堤相比较, 值有所下降。说明土工格栅和填土的相互作用, 可以使路堤中的降低。

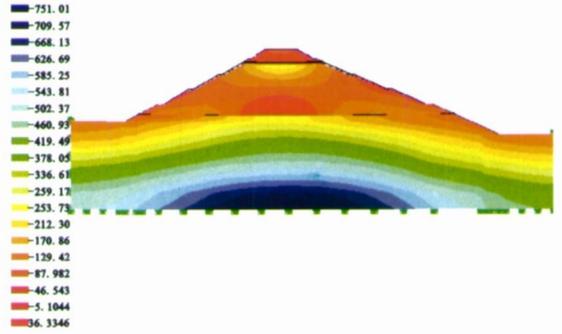


图 3 最大主应力等值云图

Fig 3 Continuous contours of σ_1

2) 最小主应力: 最小主应力的等值云图见图 4。依然是在基础底面应力值最大。在填土和格栅的接触部位, 尤其在整個加筋区的上下面处, 出现应力集中现象, 说明由于填土与加筋之间本身力学性能的差异, 导致此现象的发生。

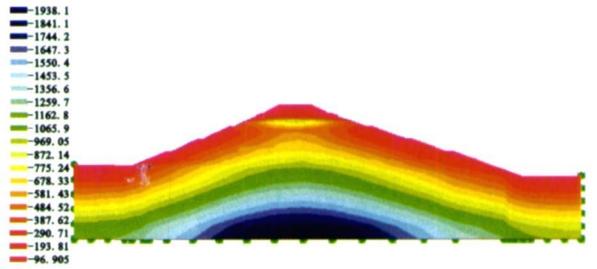


图 4 最小主应力等值云图

Fig 4 Continuous contours of σ_3

3) 剪应力: 剪应力的等值云图见图 5。加筋后剪应力出现在路堤两侧一定范围内, 说明在设计土工格栅的位置时, 不一定要在整个土体内布置土工格栅, 只要在发生塑性区的范围布置格栅即可满足工程要求。

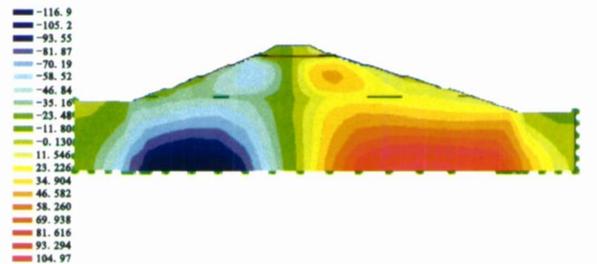


图 5 剪应力等值云图

Fig 5 Continuous contours of τ

3.2 塑性区

塑性区的等值云图见图 6。与未加筋的路堤

相比,加筋后塑性区的深度和范围明显变小,未加筋路堤的塑性区在地基底部,加筋后塑性区发生在加筋区和未加筋区交界处,且范围减小很多。

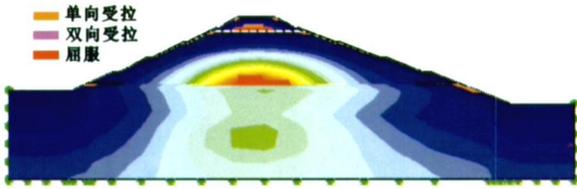


图 6 变形后的塑性区

Fig 6 Continuous contours of plastic strain

3.3 变形分析

高填方加筋黄土路堤的变形见图 7。加筋路堤的最大沉降变形出现在路堤中心处,与未加筋路堤相比,加筋路堤中心沉降量(0.82 m)明显小于未加筋路堤沉降量(1.9 m)。由此可见,土工格栅对减小路堤沉降十分有效。同时,路堤横断面差异(即路肩和路堤中心沉降比)也明显减小,和未加筋情况相比,弯盆明显变浅。这是由于随着变形的发展,填土受剪胀作用,使得格栅与填土的相互作用加强,提高了加筋土的整体性和刚度,有效地减小了地基中的附加应力,使路堤下的应力扩散更趋均匀,说明土工格栅对调整地基的不均匀沉降有显著效果。加筋后路堤的侧向位移比未加筋情况下的小,加筋后路堤的侧向位移发生在地表附近,沿深度明显减小。说明土工格栅的铺设可以减小最大侧向位移值,且改变侧向位移随深度的分布,使侧向位移集中在地表附近。

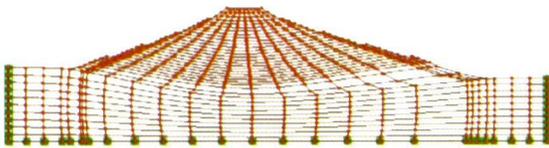


图 7 变形后的网格图

Fig 7 Deformed mesh

现场埋设沉降观测标 7 个,并及时进行了沉降观测计算,观测数据计算可靠,施工期沉降观测分别为:地基沉降 52~58 cm,路基下部沉降 64~70 cm,路基中部沉降 29~31 cm,和计算结果比较一致。

4 结 论

1) 土工格栅在高填黄土路堤中的使用,可以

使路堤中的降低充分利用格栅与填土自身的强度,有效提高黄土路堤的强度和稳定性,减少路堤和地基的变形。将这种加筋土技术应用于黄土山区公路高填方路堤,具有可建筑高度大(现已可达 62 m)、造价低、节约用地、施工速度快、提高道路使用品质的优点,是一种有效的加固方法。

2) 加筋后剪应力出现在路堤两侧一定范围内,说明在设计要注意格栅的抗拉强度,同时设计土工格栅的位置时,不一定要在整个黄土体内布置土工格栅,只要在发生塑性区的范围布置格栅即可满足工程要求。为公路建设降低造价,缩短工期,各项技术指标更加合理以及公路的设计方法与施工方法等提供理论依据,使公路的修建创造更大的经济与社会效益,具有良好的推广应用前景。

3) 土工格栅的使用可以减小路堤沉降和路堤横断面差异,提高黄土路堤的整体性和连贯性。

4) 采用有限元方法对加筋黄土高路堤进行了数值模拟,其结果较理想,并且该结果与现场沉降观测结果一致。

参考文献:

- [1] 王家鼎,张倬元.黄土自重湿陷变形的脉动液化机理[J].地理科学,1999,19(3):271~276.
- [2] 王家鼎,惠决河.黄土地区灌溉诱发滑坡群的系统研究[J].地理科学,2002,22(3):305~310.
- [3] 朱湘,黄晓明.有限元方法分析影响加筋路堤效果的几个因素[J].土木工程学报,2002,35(6):86~92.
- [4] Jewell R A. Soil Reinforcement with Geotextiles[M]. London: C R I A, 1996.
- [5] Rowe R K, Skinner G D. Numerical analysis of geosynthetic reinforced retaining wall constructed on a layered soil foundation[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, 19: 387~412.
- [6] Fannin, O Sigurdsson. Field observations on stabilization of unpaved roads with geosynthetics[J]. J Geotech Eng ASCE, 1996, (7): 544~553.
- [7] 朱湘,黄晓明.加筋路堤的室内模拟试验和现场沉降观测[J].岩土工程学报,2002,24(3):386~388.
- [8] Jones C J F P, Lawson C R, Ayres D J. Geotextile reinforced piled embankments[A]. DenHoeedt(ed). Geotextile Geomembranes and Related Products[M]. Balkema, Rotterdam, 1990. EBN90: 155~160.
- [9] 黄晓明,朱湘.公路土工合成材料应用原理[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [10] 钱家欢,殷宗泽(主编).土工原理与计算(第二版)[M].北京:中国水利水电出版社,1996.

Finite Element Analysis on Stability of High Reinforced Embankment in Loess Valley

WANG Jia-Ding¹, XIE Wan-Li¹, LUO Feng-Tao²

(1. Geological Department of Northwest University, State Key Laboratory of the Continental Dynamics
Xi'an, Shaanxi 710069 2. China Transportation Tong-Li Highway Engineering
Co. Ltd. Xi'an, Shaanxi 710075)

Abstract Numerical simulation analyses of the highest reinforced embankment in Beizhang loess valley, Huozhou Town, Shaanxi Province, China, were carried out with finite element method. It is analyzed for the maximum and minimum strains and stresses, shear stress, plastic zone of the highest embankment. The characteristics of strain and stress of high reinforced embankment and foundation are gotten, based on the comparison between reinforcement and non-reinforcement. The results show that the geo-grid not only enhance the stability of high embankment and foundation but also reduce its deformation. The FEM analysis results agree with the field tests.

Key words reinforced loess, high embankment, geo-grid, analysis of finite element

中国城市群第三版已发行

自 1992 年和 2001 年《中国城市群》第一版、第二版相继问世以来,中国的经济社会得到了迅速发展,城市化进程明显加快,城市化问题已列入国家的重大发展战略。国家的十一五发展规划纲要又明确指出:城市群的发展将作为中国推进城镇化的主体形态。

姚士谋、陈振光等的城市群著作第三版于 2006 年 12 月修改后再版就是顺应了这个重要的历史时刻。自 90 年代中后期,中国已有 20 多个省区在建设部与各省建设厅的支持下,做了不少城市群规划研究,中国城市群将近 80 万字的著作,根据中国各地大量的规划实践,结合国内外的研究动态与经验,比较系统地分析了我国 6 大城市群、7 个城镇密集地区的形成发育条件、历史与自然基础,提出了有关城市群的概念、结构特征、空间布局、类型和指标,分析了不同类型、不同规模、不同功能的城市群区域特征与问题。同时运用科学发展观,深入研究中国城市化的问题与趋势,提出了城市化健康发展的新思路,为中国城镇化与城镇发展提出了重要的理论依据,也是中国系统地、综合地研究城市群问题的重要著作,起到了重要的指导作用。本书曾于 1998 年获得中科院自然科学二等奖以及 2004 年华东地区优秀图书奖。

本书第三版出版,周干峙院士、吴传钧院士及崔功豪教授为本书作了序言,并热情地推荐本书。本书共分为 10 章,内容丰富、观点鲜明、资料翔实、图文并茂,并附有 500 多条专业英文生词、短语,欢迎广大读者购买本书,定价:58 元。订购地址:合肥市金寨路 96 号,中国科学技术大学出版社,邮编:230026 联系人:高哲峰。