

文章编号:1671-8879(2006)06-0015-04

土工格室在加固沙漠高速公路路基中的应用

景宏君^{1,3}, 景宏伟², 俞茂宏¹

(1. 西安交通大学 航天航空学院, 陕西 西安 710049; 2. 陕西省公路局,
陕西 西安 710068; 3. 咸阳市交通局, 陕西 咸阳 712000)

摘 要:基于土工格室的特殊力学性能,利用其加固沙漠路基。采用 Duncan-Chang 双曲线模型、Biot 固结理论对土工格室加固沙漠路基的机理进行理论研究,并铺筑了野外试验路对理论分析结果验证。结果表明,土工格室对提高沙基承载能力和抗剪能力效果非常明显,能达到减薄路面结构层的目的。
关键词:道路工程; 沙漠公路; 路基; 加固; 土工格室; 力学机理
中图分类号:U416.166 **文献标识码:**A

Application of geocell to strengthen expressway subgrade in desert

JING Hong-jun^{1,3}, JING Hong-wei², YU Mao-hong¹

(1. School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China;
2. Highway Administration of Shaanxi Province, Xi'an 710068, Shaanxi, China;
3. Department of Communications, Xianyang City Government, Xianyang 712000, Shaanxi, China)

Abstract: Based on geocell's mechanic performance, geocell is applied to strengthen expressway subgrade in desert. The strengthening mechanical mechanism is studied with Duncan-Chang hyperbolic model and Biot consolidation theory. A test road is constructed to verify the analysis results. The results show that geocell can raise subgrade's bearing capacity and anti-shear evidently, so the thickness of pavement structure can be reduced. 4 tabs, 5 figs, 7 refs.

Key words: road engineering; desert expressway; subgrade; strengthening; geocell; mechanical mechanism

0 引 言

土工格室作为一种新型的土工材料,近年来被推广应用于公路、铁路、建筑和海岸防护等许多领域。它属于特种土工合成材料,是由高分子聚合物片材经过高强力焊接而形成的一种三维网状结构。在网格中填入沙、土、石或其他混合料后,能形成一种具有强大侧向限制和刚度较大的结构体。这种材料开发应用时间短(只有十多年的历史),国内外目前还没有制定出相关的测试、设计、施工标准和规

范,而且对其力学性能的研究还涉足较浅^[1]。鉴于此,本文从土工格室的力学特性角度出发,以某沙漠高速公路为试验载体,研究其在双圆垂直均布荷载作用下的受力特性,论证减薄路面结构层的可行性,以便科学指导工程实践。

1 强度特性

道路发生破坏的原因,通常是由于土基不稳定,特别是软弱地基上的道路,土基和底基层之间经常发生贯入混合,致使道路承载力下降或完全丧失,从

而产生破坏。有关试验研究表明^[2-5],在土中合理布置一定强度、刚度的加筋材料(即形成加筋土),可以控制土体变形,显著提高土体抗剪强度和承载力。对于土工格室加筋土而言,它具有以下强度特性:

(1)加筋体为格室与其中填料所构成的复合体,其抗拉、抗剪强度都比平铺筋材(如其他膜材)的大。

(2)土工格室是依靠网格侧壁与填料的摩擦力以及网格产生的阻力来提高抗剪强度,对于充填其中的土体可以完全限制其发生明显的侧向位移。

(3)“土筋摩擦系数”即为填料本身的内摩擦系数,它可以提供比平铺筋材大得多的粘着强度。

2 力学模型

国内外应用土工膜、土工格栅等土工合成材料膜材进行软基加固,已有较成熟的膜材力学性能研究理论。代表性力学模型主要有以下 3 种^[6-7]。

2.1 扩展的一维 Pasternak 剪切模型

该模型只计算土工合成加筋材料加固松散粒料地基时的剪切变形,以及经 Shukla 和 Chandra 改进后所推求的挠度(沉降)。模型中软土地基被简化为弹簧模型,而弹簧模型及粒状填充物的变形特性在该扩展模型中可以是线性的,也可以是非线性的。包括:①假设土体为线弹性的 Pasternak 模型,这种模型可以认为是一种放在土工合成加筋软土上的条形基础或其他类似结构的简化情况,即假设土工材料及填充物之间无滑动,填充层中的竖直面只有在竖直向上有相对位移而没有转角或挠曲;②假设土体为非线弹性的 Pasternak 模型,这种假设认为平均竖向剪应力是剪应变的双曲线函数,研究表明,其能很好地模拟土体的非线性关系。

2.2 二维有限差分模型

该模型主要研究土体作为弹塑性以及具有弹塑性边界的情况,所需参数有:①沙基厚度;②是否应用土工合成材料膜材;③刚性光滑基础(变形值恒定的边界)和柔性基础(应力边界)。一般研究这些参数变化对以下几方面的影响:①极限承载力大小;②土工膜材的沉降和拉力;③变形特性。计算结果有助于了解加筋特性,也有助于扩展简单的一维模型。目前的研究成果表明,这种方法能很好地模拟粒状填充物、土工膜材和软土之间的相互作用。

2.3 研究采用的模型

较多研究资料表明,土工合成材料是一种典型的韧性材料,只能受拉,不能受压,其应力-应变关系为双曲线形态,即

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} \quad (1)$$

式中: σ 为应力; ε 为应变; a, b 均为系数。

计算表明,土工格室在土中受到的拉力较其抗拉强度要小得多,即发生的应力-应变关系还在线弹性范围内,故本文将土工格室本构关系取为线弹性。在研究过程中将格室单元看成能受拉、沿轴向变形的二维单元(图 1),同时假设:①路堤足够长,按平面应变问题处理;②格室材料为线弹性;③填土和地基土的本构关系采用 Duncan-Chang 双曲线模型;④地基土固结模型采用 Biot 固结理论;⑤界面单元采用 Goodman 摩擦单元,切向刚度系数随应力水平的变化采用双曲线模拟。

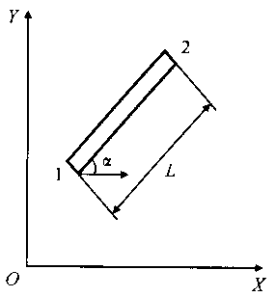


图 1 格室单元

根据弹性力学知识,假定位移函数为线性,则用增量形式表示的单元刚度矩阵为

$$\Delta F = [K]_g^e \{\Delta \delta_e\} \quad (2)$$

通过类似于杆单元的单元刚度矩阵推导,可展开为

$$\begin{bmatrix} \Delta F_x^1 \\ \Delta F_y^1 \\ \Delta F_x^2 \\ \Delta F_y^2 \end{bmatrix} = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha & -\cos^2 \alpha & -\sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha & -\sin^2 \alpha \\ -\cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha & \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \\ -\sin \alpha \cos \alpha & -\cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta v_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta v_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: E 为格室单元的切线弹性模量(kN/m^2); A 为格室的横切面积(m^2); L 为格室单元的长度(m); α 为单元与 X 轴的夹角。

即土工格室单元刚度矩阵为

$$[K]_g^e = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha & -\cos^2 \alpha & -\sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha & -\sin^2 \alpha \\ -\cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha & \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \\ -\sin \alpha \cos \alpha & -\cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据上述假设和推导,进行土工格室加筋土有限元的应力、应变分析。

3 工程应用

沙漠地区公路路基主要采用风积沙材料填筑。由于风积沙无粘性、含水量小、保水性差,目前其施

工工艺、方案及质量控制技术等还不全面,缺乏风积沙路基的工程特性研究。本次试验从方案比较入手,重点解决沙基由于不均匀性所引起上部结构层裂缝;与此同时,考虑原设计方案过于保守,路面结构层总厚度太厚,造成工程造价过高,所以本次试验也考虑减薄路面结构层厚度,进行路面结构优化。

3.1 施工工艺

试验路段选择在北方某高速公路沙漠路基上,土工材料采用山东某厂生产的土工格室,分别为 5×400 、 10×400 、 15×400 和 20×400 (单位: $\text{cm}\times\text{cm}$)4 种,共铺筑 $2\,500\text{ m}^2$ ($100\text{ m}\times 25\text{ m}$),采用德国产 INGERSOLL-RAND SD-150D 振动压路机对填料进行压实。施工工序如下:

(1)沙基压实、整平。将沙基按规定压实度进行压实和整平,并按“试验路实施细则”布设压力传感器、沉降管等传感器。

(2)按设计标高铺设土工格室,具体为:① 在经碾压整平的沙基上平铺一层彩条布(起到隔离下层沙基的作用,便于下道工序的正常进行);② 按“试验路实施细则”要求展开土工格室,沿道路纵向顺序均匀、平整铺筑,格式为 5×400 、 10×400 、 15×400 和 20×400 (单位: $\text{cm}\times\text{cm}$)土工格室,贴好应变片,格室内正确置入应力传感器,并保持一定的松紧度;③用装载机配合人工迅速将格室用质地均匀的沙基土填满,并高出格室最小 10 cm 、最大不超过 15 cm ,摊平后用振动压路机带振动压实 6 遍。

(3)按“试验路实施细则”要求的抽样频率和仪器测试压实度。

(4)进行弯沉及承载板试验。

(5)整理试验数据。

3.2 数据分析

3.2.1 模量的求取

根据“试验路实施细则”要求,振动压路机带振动压实 6 遍所得土工格室压实度结果见表 1。

依据交通部《公路路基路面现场测试规程》(JTJ 059-95),测得弯沉及承载板试验结果见表 2。

由表 1、表 2 数据可看出,通过土工格室加筋沙基后,加筋土压实度较未加筋前增大,模量也有所变化,说明土工格室加筋效果较为明显。

3.2.2 土工格室有限元分析

对于道路工程而言,目前路面结构层的受力分析是考虑在轴对称圆形均布荷载作用下的应力状态,其受力大小用专用程序算出。

表 1 压路机带振动压实 6 遍结果

指标	干容重/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	含水量/%	压实度/%
10 cm 格室	1.633	3.06	92.3
	1.643	1.31	92.8
	1.662	3.58	93.9
	1.696	3.82	95.8
15 cm 格室	1.683	2.96	95.1
	1.638	3.10	92.6
	1.652	3.91	93.4
20 cm 格室	1.664	3.87	94.0
	1.636	5.20	92.4
	1.678	3.66	94.8
沙基	1.609	3.79	90.9
	1.671	3.31	94.4
	1.625	3.16	91.8
	1.626	2.93	91.9

注:① 铺筑时温度:地表 $30.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,沙基深 2 cm 处 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、深 5 cm 处 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、深 10 cm 处 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$;铺筑后地表: $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。② $5\text{ cm}\times 400\text{ cm}$ 格室铺筑效果不好,数据舍弃。

表 2 实测弯沉和回弹模量对比表

指 标	10 cm 格室	15 cm 格室	20 cm 格室	沙基
压实度 $\bar{k}/\%$	93.7	93.8	93.1	91.9
板测模量 E_0/MPa	56.5	53.7	44.5	60.0(代表值)
代表弯沉值 $L_r/0.01\text{ mm}$		97.1	92.2	102.7

在本段试验路中,应变片和应力传感器已经置于格室上、中、下层,各项力学数据正在观测中。由于路面工程仍未竣工,所以格室和路面其他结构层的实际受力情况与理论计算无法比较,有待在后续研究成果中进一步论述。图 2~图 5 是采用专用程序计算出的路面结构受力结果,由各图可以看出,利用有限元计算的各层应力、应变都较小,说明土工格室所起作用较为明显。图中: σ_r 、 σ_z 分别为切向应力和轴向应力(MPa); ε_z 为轴向应变; r 、 z 为圆柱坐标系轴; δ 为轴对称圆半径(cm)。

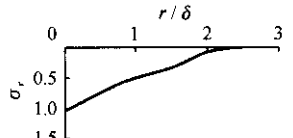


图 2 $r/\delta-\sigma_r$ 关系曲线

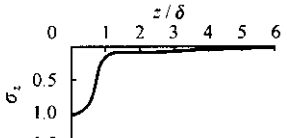


图 3 $z/\delta-\sigma_z$ 关系曲线

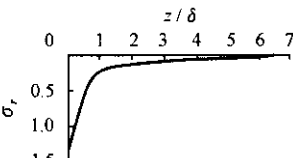


图 4 $z/\delta-\sigma_r$ 关系曲线

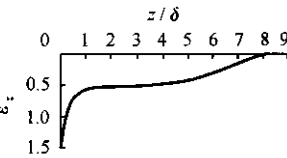


图 5 $z/\delta-\varepsilon_z$ 关系曲线

3.2.3 方案优化

在沙漠中修建高速公路,中国目前还没有系统的理论与实践经验做指导。因此,基于安全考虑,该条高速公路的原设计方案偏于保守,表 3 列出各层(自左向右)+20 cm 灰土封层+沙基。很明显,由于沙漠地区原材料较为缺乏,20 cm 石灰土封层和 36 cm 石灰土底基层已经使工程造价大幅度提高。因此,铺筑土工格室试验路的目的就是通过理论和实践证明,去除 20 cm 石灰土封层和减薄 36 cm 石灰土底基层厚度方案的合理性,达到降低工程造价的目的。

表 3 原设计基本数据

结构层		中粒式沥青混凝土	粗粒式沥青混凝土	水泥稳定碎石	石灰土	土基回弹模量
抗压模量/ MPa	20 ℃	1 100	900			中湿: $E_0=46\text{ MPa}$ (风积沙)
	15 ℃	1 600	1 200			
	180 d			1 100	450	
劈裂强度/ MPa	15 ℃	0.8	0.6			
	90 d			0.4		
	180 d				0.2	
厚度/cm		5	7	20	36	

由铺筑土工格室加筋土的实测回弹模量值,采用专用程序计算石灰土层的最佳厚度见表 4。

表 4 石灰土层厚度计算值

对比值		10 cm 格室	15 cm 格室	20 cm 格室
回弹模量/MPa		56.5	53.7	44.5
计算厚度/ cm	20 ℃ 抗压模量	31	32	37
	15 ℃ 抗压模量	27	28	33
原设计厚度/cm		36		

经计算分析,认为取格式 10 cm×400 cm 土工格室既能达到受力要求,又能达到经济合理的目的。也即试验路路面结构采用:5 cm 中粒式沥青混凝土+7 cm 粗粒式沥青混凝土+20 cm 水泥稳定碎石+31 cm 石灰土+10 cm×400 cm 土工格室加固沙基层。具体方案的设计与推广,有待于后续实测土工格室加筋土应力、应变结果与有限元计算结果比较分析而定。

4 结 语

(1) 理论分析表明,本文提出的土工格室受力模型比较符合实际受力状态。

(2) 有限元计算结果表明,土工格室加固沙漠路基具有明显的分散荷载作用,使沙基所受应力、应变均匀,显著提高沙基抗剪强度和承载能力。

(3) 实践证明,土工格室加固软弱路基具有施工简便、缩短工期、经济效益明显等优点,适合推广。

(4) 阶段试验证明,通过土工格室加固沙基,能

达到减薄沙漠地区公路路面结构层厚度、降低工程造价的目的。

(5) 关于本课题的下一步研究工作,作者准备通过实测土工格室和路面各结构层的应力、应变大小,与有限元理论计算结果进行对比,以具有明显经济效益为前提,研究土工格室作为路面结构层的可能,便于以后的技术推广。

参考文献:

References:

[1] 土工合成材料工程应用手册编写委员会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994. Compile Committee of Geosynthetics Engineering Application Handbook. Geosynthetics engineering application handbook[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1994.

[2] 马卓军. 土工格室加筋粘性土的强度特性研究[J]. 公路, 2000, (10): 34-35. MA Zhuo-jun. Study on strength characteristics of geocell-reinforced clay soil[J]. Highway, 2000, (10): 34-35.

[3] 姜 蓉, 李昌宁. 软土地基 CFG 桩加固技术[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(3): 4-7. JIANG Rong, LI Chang-ning. CFG pile strengthening technology of soft ground[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(3): 4-7.

[4] 谢永利, 俞永华, 杨晓华. 土工格室在处治路基不均匀沉降中的应用研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 7-10. XIE Yong-li, YU Yong-hua, YANG Xiao-hua. Application study of treating differential settlement of subgrade with geocell[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(4): 7-10.

[5] 杨晓华. 土工格室加固饱和黄土地基性状及承载力[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(3): 5-8. YANG Xiao-hua. Bearing capacity and behavior of saturated loess foundation reinforced by geocell[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(3): 5-8.

[6] 龚晓南. 土工计算及分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 49-64. GONG Xiao-nan. Calculation and analysis on civil engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000: 49-64.

[7] 张起森. 道路工程有限元分析法[M]. 北京: 人民交通出版社, 1983. ZHANG Qi-sen. Road engineering finite element analysis method [M]. Beijing: China Communications Press, 1983.