

土工格栅加筋路堤现场试验研究

冯晓静¹, 杨庆^{*1,2}, 栾茂田^{1,2}, 肖成志³, 上官云龙⁴

(1. 大连理工大学 土木水利学院 岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

3. 河北工业大学 土木工程学院, 天津 300310;

4. 吉林省交通科学研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 对包裹式加筋路堤进行了现场试验测试分析. 试验分别对2种格栅类型、3种不同加筋间距等工况下的土压力、格栅应变、路堤沉降进行了跟踪观测, 研究了加筋层数及加筋类型对路堤结构性能的影响. 通过试验结果的分析发现, 包裹式柔性支挡结构土压力受加筋形式及加筋率的影响, 双向格栅在降低土压力方面作用更为显著, 水平土压力在加筋路堤坡面处接近静止土压力, 而加筋体后部则较接近朗肯主动土压力, 其分布同时还受到加筋形式和加筋率的影响. 应变沿格栅分布并不均匀且各层的分布规律也不尽相同; 应变随时间持续会增大, 且早期增长快. 包裹式加筋对于早期沉降及冻胀的限制作用并不明显. 试验显示了加筋路堤的真实工作状态, 结果可为土工格栅加筋结构的后续研究和工程实践提供参考.

关键词: 土工格栅; 加筋路堤; 现场试验; 土压力; 应变

中图分类号: TU432 **文献标志码:** A

0 引言

随着经济的发展, 我国的公路建设已经大规模展开, 路堤稳定对于公路建设质量至关重要. 实践证明, 加筋路堤是一种行之有效的加固措施. 土工格栅作为一种加筋材料, 具有抗拉强度高、刚度大、耐久性好、重量轻、易于裁剪, 并与土体之间能够有效结合^[1]等特点, 得到了广泛应用. 然而, 加筋体工作机理的研究仍然滞后于工程实践, 国内外学者对此开展了一系列试验研究工作, 杨庆等^[2]利用0.7 m高的室内小比尺模型试验对土工格栅加筋路堤边坡进行了研究, 得出了加筋参数对路堤边坡稳定性的影响. Bathurst等^[3]、Onodera等^[4]、Thamm等^[5]对足尺的加筋挡墙模型进行了全面的测试分析, 得到了筋带拉力、土压力、结构变形的分布规律. 虽然模型试验实施方便, 测试精度高, 然而现场试验能够更好地反映实体的所有特征, 朱湘等^[6]对格栅加筋路堤的现场沉降观测证明, 加筋能够部分消减工后沉降. 胡启军等^[7]在现场观测了软基上土工格栅加筋垫层的

受力特性, 发现顶层格栅拉力较大, 格栅沿横向的受力要比纵向大. 苗英豪等^[8,9]通过离心模型试验结合现场观测对加筋路堤以及其浸水情况下路堤的变形和强度进行了研究, 发现格栅增强了路堤的整体性, 提高了稳定性, 但加大了倾覆趋势, 并认为填筑碾压是格栅变形的主要原因. 上述试验中, 格栅沿路堤横断面上均通长布置, 本试验段中格栅仅在路堤边坡处铺设格栅进行加固, 而边坡处一般受力均较复杂, 本文对试验段路堤进行系统测试, 通过对多种工况下, 加筋路堤在填筑过程中以及竣工后的土压力、格栅应变、路堤沉降的观测, 对比研究各种加筋参数对加筋路堤结构性能的影响.

1 工程概况

1.1 试验场地

本试验段的依托工程为黑河至大连一级公路榆树至大口钦段(K71+800~K71+920), 全长120 m, 路基为低液限性黏土, 换填砂砾土进行处

理,路堤高4~5 m.采用一级公路技术标准,主要技术指标:计算行车速度,100 km/h;设计荷载,汽超-20,挂-120;路基压实度95%.

路堤加筋采用土工格栅包裹回折式,边坡坡度为1:1.5,加筋长度3 m,回折长度1 m.为了全面分析各种参数对加筋效果的影响,现场试验布置了5种工况(见表1).对各工况下路堤内竖向、横向土压力,格栅应变和路堤顶面沉降,以及它们随时间的变化做了详尽的跟踪观测.

表1 试验工况一览

Tab.1 The test cases

加筋间距/m	格栅类型	试验编号
0.50	单向	A
0.75	单向	B
0.75	双向	C
1.00	单向	D
-	-	E

1.2 填料特性

路堤填料采用附近料场的山砂,其各项指标如表2所示.

表2 填土料工程性质

Tab.2 Properties of filled soil

液限/ %	塑限/ %	塑性指数/ %	<0.074/ %	土类 划分	c/ 10kPa
28.5	21.8	6.7	20.1	SM	39
CBR/%					
$\phi/(\circ)$	最佳含 水量/%	最大干密 度/($g \cdot cm^{-3}$)	压实度 90%	压实度 93%	压实度 95%
	32	8.5	2.09	22.0	42.0

1.3 试验用格栅基本参数

试验用格栅采用青岛颐中格栅有限公司生产的单向、双向格栅,各种参数如表3所示.

表3 土工格栅试件的性能参数

Tab.3 Coefficients of geogrid

产品规格 及类型	抗拉强度/ ($kN \cdot m^{-1}$)	不同应变对应的 抗拉力/($kN \cdot m^{-1}$)		单位面积 质量/ 原材料	
		2%	5%	($kg \cdot m^{-2}$)	
EG65R (单向)	64.5	16.1	30.9	0.40	HDPE
EG3030 (双向)	30/30 (T/L)	10.5 (T/L)	21.0 (T/L)	0.30	PP

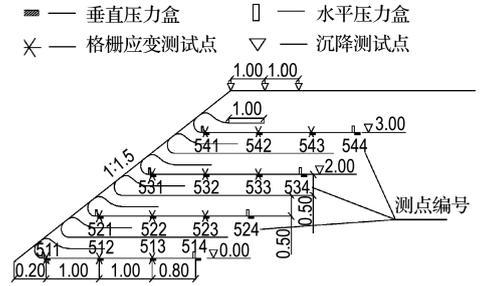
注: T代表 Transverse direction,即横向; L代表 Longitudinal direction,即纵向

1.4 试验测点布置

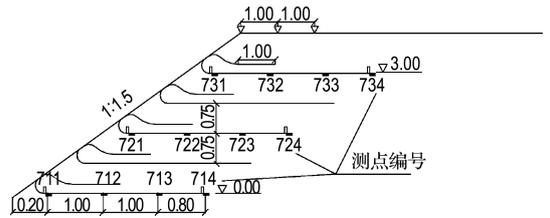
试验分别布置了土压力测点、格栅应变测点和路堤沉降观测点.每种工况选取一个测试横断

面,每个断面沿堤高有3~4个测试层,每个测试层设置了4个测试点,各点与坡面的距离分别为0.2、1.2、2.2、3.0 m.

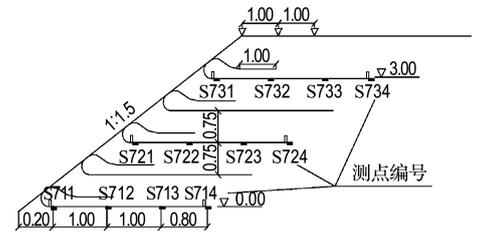
土压力和格栅应变测点位于同一位置.沉降观测点位于路堤顶部两侧的路肩上,每个测试断面设置3个观测点,取其平均值作为该断面的沉降值.测点的具体布置及编号见图1.



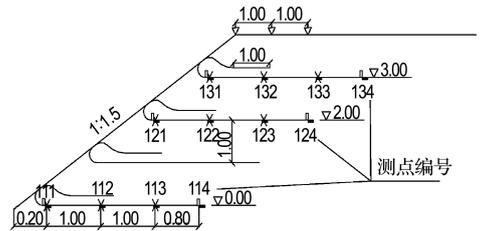
(a) A区测点布置



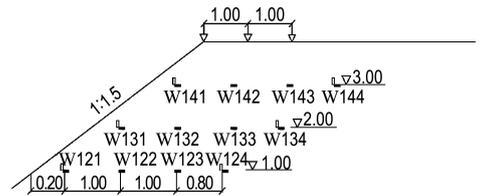
(b) B区测点布置



(c) C区测点布置



(d) D区测点布置



(e) E区测点布置

图1 各区测点布置

Fig.1 Instrumentation arrangement for each district

土压力测试仪器采用 TYJ-2020 型振弦式土压力计,该仪器根据不同压力下振弦的频率不同来测试土压力,仪器性能见表 4. 格栅应变的测量采用电阻应变测量方法,电阻应变计型号: BE120-3AA;电阻值: $(119.7 \pm 0.1) \Omega$;灵敏系数: $2.19(1 \pm 0.01)$. 应变仪为 UCAM-70A 型多功能数据采集器. 由于格栅肋宽的限制,测量方式采用单点公共补偿.

表 4 TYJ-2020 型振弦式土压力计各项指标

Tab. 4 Properties of TYJ-2020 vibrating wire cell

测量范围/ MPa	分辨力 (F · S)	综合误差 (F · S)	测温范围/ ℃
0.2	$\leq 0.08\%$	$\leq 1.5\%$	-25~60

2 试验结果及分析

2.1 土压力分析

加筋是否能够降低竖向附加应力,目前仍无定论,然而大多试验证明了其有效性. 本文根据观测数据,从多角度考查了土压力的分布特点.

为了便于说明问题,引入 Hatami 等^[10]针对加筋挡土墙提出的加筋比 R_λ 的概念,计算公式如下:

$$R_\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{J_i l_{fi}(\lambda) L_i}{s_{vi}}}{K_{ah} \gamma H^2} \quad (1)$$

式中: J_i 、 L_i 、 s_{vi} 分别是第 i 加筋层的刚度、长度和竖向间距; K_{ah} 、 γ 、 H 分别是填土的库仑主动土压力系数水平分量、填土重度及墙高; n 为总的加筋层; $l_{fi}(\lambda)$ 是第 i 层加筋的长度因子,定义为

$$l_{fi}(\lambda) = 1 + \frac{L_i/H - \lambda}{L_i/H + \lambda}$$

其中 λ 是最优的加筋长度与墙高的比值,这里取 0.7. 由式(1)可得各区的加筋比,见表 5.

表 5 各区加筋比

Tab. 5 The reinforcement ratio of each district

工况	加筋比
A	3 812
B	2 241
C	1 461
D	1 702
E	0

2.1.1 竖向土压力随填土高度增加的变化 随着上部填土高度的增加,地基表面的土压力逐渐增大,研究显示土中加入格栅后,上部土体对地基

所产生的附加应力有所降低. 试验取各区地基第三点的土压力值作为代表绘制图 2, A、B、D 区均为单向格栅,从图中可以发现当填土高度大于 2 m 后, A 区的地表土压力明显低于 B、D 两区, B、D 两区的土压力相当,且等于无加筋区 E 的土压力. 说明当加筋比达到一定值后,格栅才能起到降低竖向土压力的效果. C 区为双向格栅加筋区, C 区的加筋比最小,然而该区的土压力却远远小于其他测区,可见双向格栅在降低土压力方面作用显著,其原因应该归究于土工格栅的特殊网格形式,格栅沿路堤轴向能够承受比单向格栅更多的荷载,胡启军等通过试验观测,也建议在平面应变中应该考虑纵向格栅的影响.

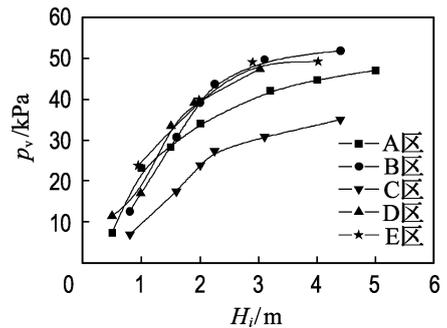


图 2 填土期间竖向土压力的变化

Fig. 2 Change of vertical earth pressure during filling

2.1.2 水平土压力分析 传统土压力计算理论一般都针对刚性挡土结构,而本文的包裹式加筋路堤则是一种典型的柔性挡土结构,其土压力理论仍在探索当中. 一般认为,传统的库仑主动土压力理论在柔性支挡结构领域是不适用的. Casagrade 在调查了德国和巴拿马运河的一系列锚拉墙破坏实例后指出,作用在各种柔性支挡结构上的土压力通常要比按传统的库仑方法确定的主动土压力大,其数值接近于土的静止土压力^[11]. Hatami 等^[10]对表面倾斜度为 70° 的包裹式加筋挡土墙进行数值计算,结果显示除墙趾及墙顶外,坡面后的水平土压力系数接近库仑主动土压力系数,且随着加筋间距的增大,水平土压力系数增大.

水平土压力测点的布设见图 1,各测试层的首尾分别埋设了水平土压力计. 各点的水平土压力系数(水平土压力与其竖向土压力的比值)汇总于图 3. 同时,根据试验参数分别计算得库仑主动土压力系数 $K_a(\text{Coul}) = 0.038$,朗肯主动土压力

系数 K_a (Rank) = 0.307, 静止土压力系数 $K_0 = 0.470$.

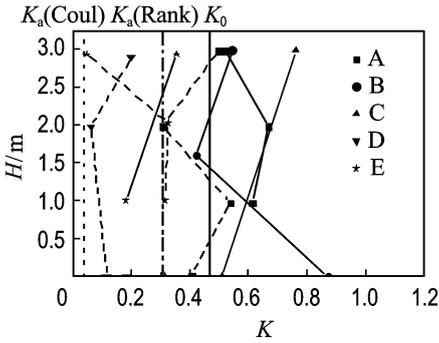


图3 水平土压力系数的分布

Fig. 3 Distribution of lateral earth pressure coefficient

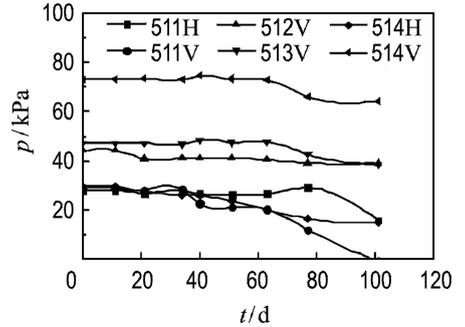
尽管图3中的图线比较凌乱,但通过比较仍然能够发现一些规律:加筋区接近坡面处的水平土压力系数(图中实线)平均值较接近静止主动土压力系数,而加筋体后部的水平土压力系数(图中虚线)平均值较接近朗肯主动土压力系数且大于库仑主动土压力系数.就单向格栅来讲,加筋密度越大,水平土压力系数越大;与竖向土压力类似,加筋密度最小的双向格栅加筋区水平土压力系数反而最大.试验结果与Casagrade在试验中得到的结论较为接近.

2.1.3 土压力随时间的变化 土体和格栅都具有明显的流变特性,它们将随时间的持续继续发生变形,这种变形会导致土体内土压力的重新分布.竣工后,土体在自重作用下向外、向下发生变形,向外的位移使得土体内的水平应力得到一定释放,因此水平土压力降低.加筋区,格栅限制了土体向外的变形,致使格栅应力增大,张力膜效应变得明显,由于格栅的蠕变及格栅与土之间的滑移蠕变,加筋区土压力也有所降低,且其降幅大于无加筋区.观测竣工后的土压力变化,发现无论是加筋区(图4(a)),还是无加筋区(图4(b)),土压力随时间均减小,这种减小的幅度越靠近坡面处越大,加筋区大于无加筋区,水平土压力降幅大于竖向土压力降幅.

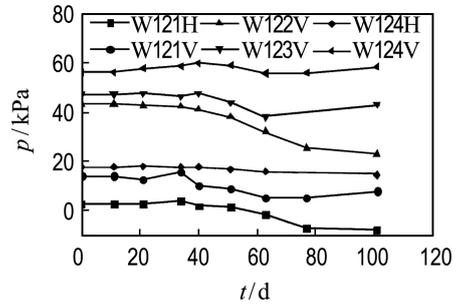
2.2 格栅应变分析

Bathurst等^[3]、Onodera等^[4]、Thamm等^[5]通过对包裹式格栅加筋挡墙的足尺或缩尺模型试验研究,给出了格栅应变沿筋层的分布规律.这些

规律的共同点是:格栅应变沿长度并非均匀分布;然而各试验给出的应变分布趋势并不一致. Onodera等^[4]的试验结果只给出其中一层的应变分布,显示应变最大点分布在中部,并位于主动破裂面上. Thamm等^[5]指出各层格栅的应变最大点不在同一处. Bathurst等^[3]的试验则显示当荷载较小时,格栅应变最大点发生在面板后;接近破坏荷载时,应变分布发生变化,最大点在各层的分布将沿着内部破裂面.对于沿路堤横向通长布筋的加筋路堤,杨庆等^[2]、苗英豪等^[9]的试验结果显示各层格栅的最大应变发生在边坡中心处.



(a) A区



(b) E区

图4 土压力随时间的变化

Fig. 4 The change of earth pressure with time

本试验的应变观测分别在竣工后的第1、21、30、40、51、63、77 d进行,期间,气温由16℃降到-15℃.高达30多度的温度差将对电阻应变测量带来影响,而单点补偿的效果比较差,致使本试验中应变测量出现了大量的负值,但同层各点之间仍然可以看做处于同一温度场,数据之间的相对关系仍然可以参考.

2.2.1 格栅应变沿筋层的分布 各层格栅沿筋层的分布规律如图5所示(取最后一次的观测结果),从图中看出:应变沿格栅分布不均匀,且各层的分布趋势也不尽相同,顶层及底层的格栅应变

自坡面(外侧)至路堤中心(内侧)方向逐渐增大,而中间层的格栅应变趋势则相反. 众多研究表明沿路堤横断面,中心部分的竖向沉降较大,向两边逐渐减小,受此影响,靠近中心处的格栅在竖向沉降的作用下应变增大;靠近坡面处,顶层格栅由于上覆土压力较小,底层则由于地基的摩擦限制作用,侧向变形都比较小,格栅的应变也较小,而中间层坡面的横向变形普遍较大,因此格栅应变较大. 因此呈现了上述的分布规律.

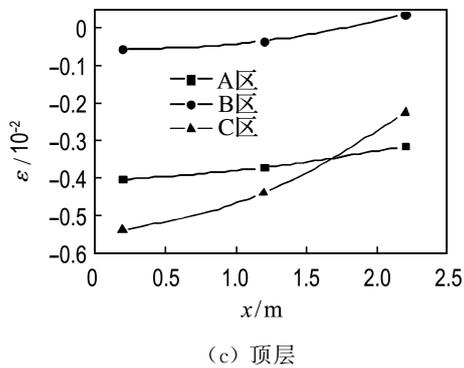
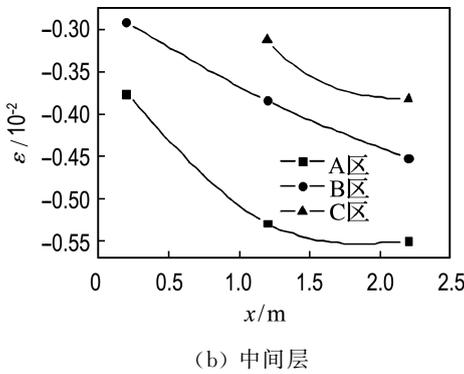
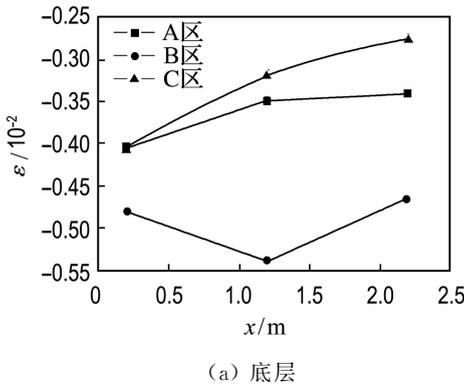


图 5 格栅应变沿筋层的分布

Fig. 5 Distribution of the strains along the geogrids

2.2.2 格栅应变随时间的变化 为确保加筋结构的长期稳定,结构的变形必须限制在一定范围

内,而蠕变是土工格栅的一种重要特性,研究长期荷载下土工格栅在土中的变形具有重要意义. 试验对竣工后格栅的变形进行了跟踪观测,如图 6 所示,竣工后格栅仍发生了较大的变形,尤其是前 20 d 内,完成了观测期内变形的 70% 以上,大部分格栅应变增大;顶层及底层变化较大,观测期内增长了近 0.4%;中间层变化较小,而且出现应变较大点应变减小,而相邻测点应变增大的现象,说明格栅与周围土体发生了相对位移,使得格栅的内力重新分布. 为了得到加筋路堤的长期工作性能,仍然需要长期的观测.

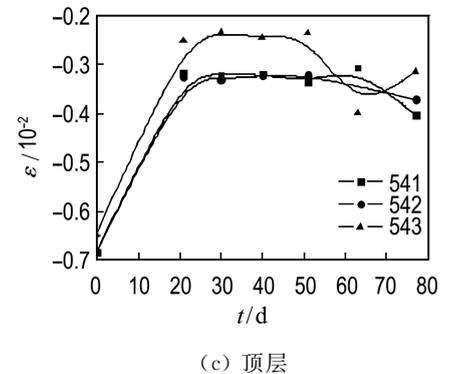
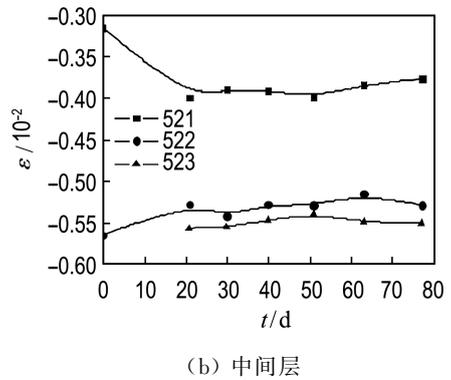
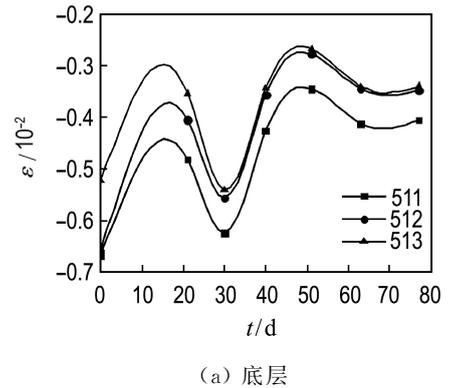


图 6 格栅应变随时间的变化(A 区)

Fig. 6 The change of strains with time (District A)

2.3 沉降观测

加筋对沉降量的影响至今仍无定论,而沉降对于工程却有着非常重要的意义,它是衡量适用性、稳定性的重要指标.工程界和学术界也纷纷利用现场观测、模型试验、数值分析等对此进行探讨,提出了不同的看法^[12~14].

本试验所测沉降变化如图7所示,沉降曲线与朱湘等^[6]在现场试验中的测试结果相比较,早期的沉降发展相同,然而本试验地处吉林,有明显的冻胀现象,因此从中还可以看出:

(1)比较早期的沉降,加筋比最大的A区沉降值明显小于其他几区,大约有2 cm的差距,其他几区基本相当,说明加筋对路堤沉降有影响,但是这种影响在早期并不显著,后期还有待继续观测.

(2)试验路段地处季节性冻土区,自第二次观测开始由于气温的降低,路基发生冻胀,沉降值有了较大的回弹,随着气温的逐步降低,回弹继续发展.从测量结果看,土工格栅对于冻胀并没有很好的限制作用.

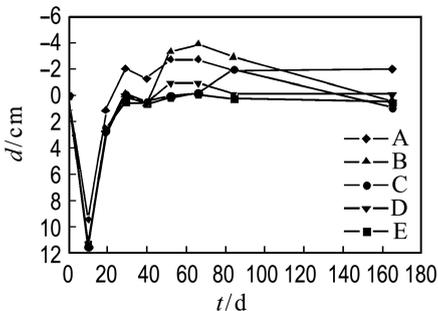


图7 各断面沉降曲线

Fig.7 The settlement of each district

3 结论

(1)对于同种格栅类型,达到一定加筋比后,加筋体土压力随加筋率的增大而减小.双向格栅对降低竖向附加应力的作用更为有效.

(2)包裹式土工格栅加筋路堤,靠近坡面处的水平土压力系数接近静止土压力.加筋体后侧的土压力则接近库仑主动土压力.

(3)土压力随时间均有所降低,水平土压力

的相对降低幅度要比竖直土压力大,加筋区的土压力降幅比无加筋区要大.

(4)加筋路堤格栅应变沿筋带的分布并不均匀,且各层的分布趋势也不尽相同,在顶部荷载较小时,顶层及底层的最大点位于靠近路堤轴线处,而中间层的最大点则靠近坡面处.

(5)沉降结果显示,加筋对于早期的沉降有影响,但是效果并不显著.土工格栅加筋对于冻胀没有很好的限制效果.

参考文献:

- [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,2000
- [2]杨庆,季大雪,栾茂田,等.土工格栅加筋路堤边坡结构性能模型试验研究[J].岩土力学,2005,26(8):1243-1246
- [3]BATHURST R J, VLACHOPOULOS N, WATERS D L, *et al.* The influence of facing stiffness on the performance of two geosynthetic reinforced soil retaining walls [J]. *Canadian Geotechnical*, 2006, 43:1225-1237
- [4]ONODERA S, FUKUDA N, NAKANE A. Long-term behavior of geogrid reinforced soil walls [C] // *Proceedings of the 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics*. Seoul: [s n], 2004: 255-264
- [5]THAMM B R, KRIEGER B, KRIEGER J. Full-scale test on a geotextile reinforced retaining structure [C] // *The 4th International Conference on Geotextiles Geomembranes and Related Products*. Hague: [s n], 1990:3-8
- [6]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
- [7]胡启军,谢强,卿三惠.加筋碎石垫层中双层土工格栅拉力特性试验研究[J].岩土力学,2007,28(4):799-802
- [8]苗英豪,胡长顺.土工格栅加筋陡边坡路堤位移特性试验研究[J].中国公路学报,2006,19(1):47-57
- [9]苗英豪,芦军,高传明,等.土工格栅加筋陡边坡路

- 堤压实特性及格栅长期变形研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008, **32**(1):51-54
- [10] HATAMI K, BATHURST R J, PIETRO P D. Static response of reinforced soil retaining walls with nonuniform reinforcement [J]. *The International Journal of Geomechanics*, ASCE, 2001, **1**(4):477-506
- [11] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
- [12] 苏艺, 许兆义, 王连俊. 青藏高原多年冻土区铁路加筋路堤的变形特征研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1):115-119
- [13] 孟雷, 沈羽鹏. 土工格栅在多年冻土区路基工程中的应用[J]. 山西建筑, 2005, **31**(18):87-88
- [14] 王引生. 土工格栅在青藏铁路多年冻土区路基工程中的应用[J]. 冰川冻土, 2003, **25**(3):355-358

Field experimental study of geogrid reinforced embankment

FENG Xiao-jing¹, YANG Qing^{*1,2}, LUAN Mao-tian^{1,2},
XIAO Cheng-zhi³, SHANGGUAN Yun-long⁴

- (1. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
3. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300310, China;
4. Communications Scientific Research Institute of Jilin Province, Changchun 130022, China)

Abstract: The results of field experiment of the geogrid reinforced embankments with wrapped face are reported. In these tests, the structural responses including earth pressure, strain of geogrid and settlement on pavement are investigated for the reinforced embankments with two geogrid types, three different reinforcement spacing and one district without reinforcement. Based on the contrast analysis, it is found that the distribution of earth pressure behind the reinforced embankment is influenced both by reinforcement type and reinforcement ratio. The effect on the reducing of earth pressure is more obvious for bi-axial geogrid. The horizontal earth pressure behind the slope is close to the earth pressure at rest and that behind the reinforced body is close to the Rankine active earth pressure, and meanwhile its distribution is also influenced by the reinforcement type and reinforcement ratio. The distribution of strain along the geogrid is non-uniform and it is distinct for different layers. The strain increases with the time and the increase in the early stage is quick. Compared with the non-reinforced area, the conditions of reinforced embankment for the problem of early settlement and frost heaving are not improved. In general, this experiment reveals the embankment's real work condition, and the results shown here give a good reference for the succeeding research and the similar engineering.

Key words: geogrid; reinforced embankment; field experiment; earth pressure; strain