

格室与格栅在路基拼宽及填挖交界处的应用对比分析

付毕龙¹, 贾岳², 刘凤玲²

(1. 广东广惠高速公路有限公司扩建管理处, 广东 广州 510623;

2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 为了应对日益激增的交通压力, 改扩建项目刻不容缓, 土工格室与土工格栅作为常用加固材料, 在不同工况下的加固效果对比尚不充分, 需系统探究二者的加固性能差异。通过三轴压缩试验确定土体物理力学参数, 并利用 Abaqus 有限元软件针对不同工况建立路基模型, 对沉降与水平位移进行对比分析。结果表明: 土工格室与土工格栅均能有效降低不同工况下的路基沉降与水平位移; 在 10 m 填高工况下, 土工格栅加固效果较弱, 而土工格室依然具有良好的加固效果; 在纵向填挖交界工况下, 中部与底部加筋对沉降的影响不大, 顶部加筋对沉降的影响较大, 且顶部加筋层数越多加固效果越好; 格栅抗拉强度也会影响土体加固效果, 具体表现为抗拉强度越大对土体的加固效果越好。揭示了不同工况下土工格室与土工格栅的加固规律, 为实际工程的设计与施工提供了理论依据和技术支撑。

关键词: 岩土工程; 土工格室; 土工格栅; 路基拼宽; 填挖交界; ABAQUS; 三轴压缩试验; 抗拉强度

中图分类号: TU442

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)03-0097-08

Comparative Analysis of the Application of Grid Room and Grid at the Junction of Roadbed Widening and Filling and Excavation

FU Bilong¹, JIA Yue², LIU Fengling²

(1. Guangdong Guanghui Expressway Co., Ltd., Expansion Management Office Guangzhou, Guangzhou, Guangdong 510623, China;

2. School of High Engineering Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: Given the pressing need for reconstruction and expansion projects to alleviate ever-increasing traffic pressure, a systematic investigation into the reinforcement performance of geocells and geogrids under various working conditions is imperative, as current comparisons of their reinforcement effects remain inadequate. The physical and mechanical parameters of the soil were determined through triaxial compression tests, and subgrade models corresponding to different working conditions were established using the finite element software Abaqus to conduct a comparative analysis of settlement and lateral displacement. The results are as follows. Both geocells and geogrids can effectively reduce subgrade settlement and lateral displacement under various working conditions. Under the condition of a 10m fill height, the reinforcement effect of the geogrid is relatively weak, whereas the geocell still demonstrates good reinforcement performance. Under the longitudinal cut-and-fill transition condition, reinforcement in the middle and bottom layers has little effect on settlement, while reinforcement in the top layer has a significant impact; moreover, a greater number of top reinforcement layers leads to better reinforcement effects. The tensile strength of the geogrid also influences the soil reinforcement effect, specifically, the higher the tensile strength, the more significant the reinforcement effect on the soil. The reinforcement mechanisms of geocells and geogrids under different working conditions were elucidated, providing a theoretical basis and technical support for the design and construction of practical engineering projects.

Keywords: geotechnical engineering; geocell; geogrid; roadbed widening; fill-and-cut interface; ABAQUS; triaxial compression test; tensile strength

随着社会经济飞速发展,交通量激增,既有高速公路宽度已无法满足通行需求,路基拼宽成为改扩建工程的核心环节^[1-3]。然而,新旧路基的差异沉降容易诱发路面开裂与结构失稳,成为制约拼宽工程质量的关键瓶颈,选择合适的加固方式成为解决路基拼宽差异沉降的重中之重。土工格室是一种三维网状格室结构,通常是由强化的高密度聚乙烯(HDPE)片经高强度焊接而形成^[4-5]。竖向荷载作用在土工格室加筋层时,格室产生侧向围压抑制土体变形。因其对差异沉降的约束程度大而广泛应用于公路、铁路、机场等工程领域中^[6-8]。土工格栅是用聚丙烯、聚氯乙烯等高分子聚合物经热塑或模压而成的二维网格状或具有一定高度的三维立体网格屏栅^[9-10],主要通过格栅肋条与土颗粒间的摩擦阻力传递拉应力减小土体变形。因其具有经济实惠,施工便捷,广泛应用于公路、铁路、机场的路基增强中^[11-13]。

近年来,大量学者研究了土工格室与土工格栅降低路基沉降的作用,梁鹏等^[14]通过大型循环板荷载试验验证了经土工格室加固的聚苯乙烯泡沫路基能有效降低峰值沉降与残余沉降,且降低幅度随循环周期增大而变大。赵阳等^[15]建立路基离散元模型和土工格室有限差分模型,证明了土工格室加筋路基在振动荷载作用下的压实行行为,提出了土工格室加筋路基的预应力效应。张冰冰等^[16]结合沙漠公路路基现场试验研究了不同路基深度动力响应特征,验证了土工格室加固方法,可为沙漠公路建设提供一条新路径。王炳龙^[17]等采用不同焊距、高度、规格的土工格室进行整治铁路基床下沉病害的现场试验,并与换砂法试验进行了对比,分析不同整治法的轨下动应力衰减规律,为换填厚度设计提供了理论设计方法。顾凡等^[18]建立了一个考虑筋土相对位移、土工格栅侧向约束以及压实过程影响的土工格栅加筋高液限黏土回弹模量与永久变形预估模型,量化了土工格栅横向约束对土体回弹模量与永久变形的影响,分析了各影响因素对加筋路基土变形特性的影响。杨涛等^[19]采用二维非线性有限元法对软土地基上的拓宽路堤土工格栅加筋作用和效果进行模拟分析,证明了格栅嵌入老路基的长度对拓宽路堤侧向位移和新老路基差异沉降的影响,且增加格栅层数并不会显著减小拓宽路堤的差异沉降。汪益敏等^[20]对软土地基高速公路直接拼接路堤进行一系列模型试验,试验表明,在拓宽路堤填土的顶部和底部各布设一层土工格栅加筋层时可明显

减小路堤土中竖向应力和路堤沉降,证明了土工格栅加筋对软土地基拓宽路堤沉降有较好的控制作用。张玲^[21]等利用 ABAQUS 有限元软件建立了土工加筋路堤三维数值模型,深入分析了移动荷载下土工加筋路堤的动应力和变形的变化规律,进行了加筋路堤横截面变形和路堤顶面应力的对比验证,并分析了土工加筋路堤数值模型在移动荷载下的纵、横截面动应力分布,竖向动应力分布特性以及车辆超载。土工格室与土工格栅均为良好的加筋材料,但目前缺乏在改扩建项目中二者对差异沉降及水平位移影响的对比分析研究。

为了解决这一问题,本次研究通过 abaqus 软件建模,对比分析不同高度的改扩建路基在土工格室与土工格栅加固情况下的差异沉降与水平滑动,同时与素土模型一并分析,验证土工格室与土工格栅对路基加固效果,为实际工程提供理论参考与借鉴资料。

1 饱和与非饱和路基压实填料三轴试验

试验材料选取济广高速公路惠州改扩建工程 SJ3 标段 YK1983+714.31 右 85.80 m 处所取风化花岗岩残积土,如图 1 所示。根据《公路路基设计规范》^[22](JTG D30—2015)、《公路工程地质勘察规范》^[23](JTG C20—2011)、《公路土工试验规程》^[24](JTG3430—2020)的相关规定和说明,针对路基规范中的正常工况制备重塑非饱和土试样。三轴试样的直径为 100 mm,高度为 200 mm,现场取土测得土样的干密度为 1.75 g/cm³,含水率为 17.87%。制备好的试样分别在 100、200、300、400 kPa 围压下进行三轴不固结不排水剪切试验,目的获取非饱和试样强度变化规律。击实曲线如图 2 所示,试验实测的偏差应力随轴向应变变化的曲线如图 3 所示,基于应力应变曲线得到非饱和土的莫尔圆如图 4 所示。



图 1 花岗岩残积土土样

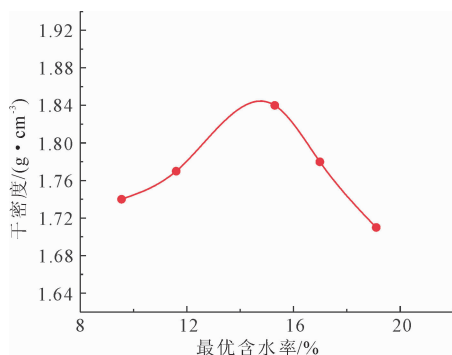


图 2 最大干密度与最优含水率关系曲线

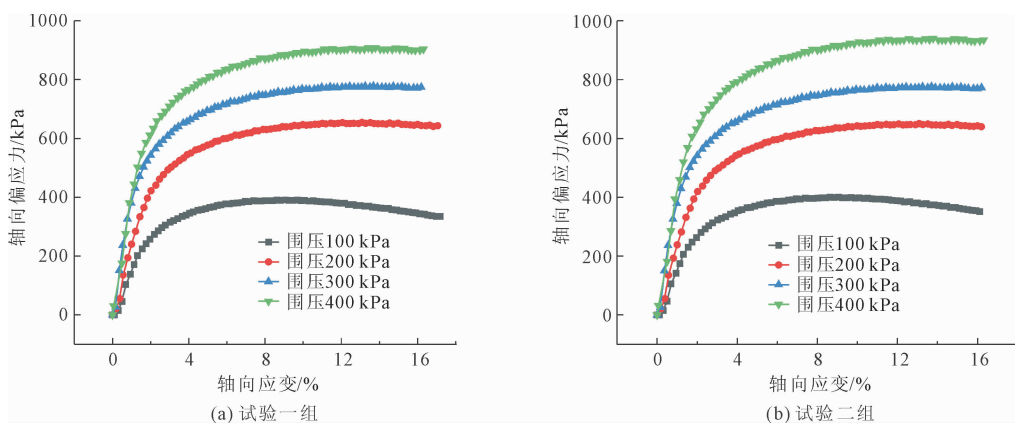


图 3 不同围压下轴向应变与轴向偏应力关系曲线

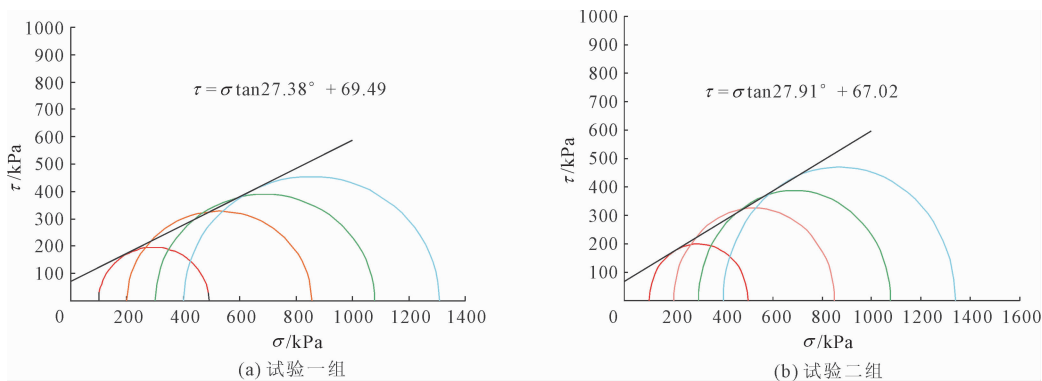


图 4 非饱和土样莫尔圆强度包线

由图 4 可知,非饱和试样一组的摩擦角与黏聚力分别为 27.38° 和 69.49 kPa , 试验二组的摩擦角与黏聚力分别为 27.91° 和 67.02 kPa 。考虑到循环往复荷载、强降雨及干湿循环等外界因素作用,对非饱和土的强度参数进行一定折减^[25-27]。折减后的摩擦角为 15° ,黏聚力为 24 kPa 。

2 模型配置

2.1 本构模型及材料参数

土工格室中应力水平不高时,格室的应力应变关系处在弹性范围内,此时可用线弹性本构模型模

拟土工格室。当土工格室中应力水平较大时,格室的应力应变关系超出弹性范围内,达到塑性应力状态,此时再用线弹性本构模型模拟土工格室会产生较大误差。因此,采用线弹性模型并不完全适用于土工格室的力学特性。如采用 ABAQUS 中自带的弹塑性本构模型,只能输入一个弹性模量,则不能反映土工格室拉伸模量和压缩模量不同的力学特性。宋飞^[28]等针对土工格室材料本身的力学特性编写了弹塑性本构关系和相应的用户自定义材料子程序 UMAT 文件。在计算分析中对土工合成材料的应力

正负进行探测,如果应力为正值,则为拉应力,此时 $\varepsilon_{\text{拉伸}} = \sigma_{\text{拉伸}} / E_{\text{拉伸}}$,如果应力为负值,则为压应力,此时 $\varepsilon_{\text{压缩}} = \sigma_{\text{压缩}} / E_{\text{压缩}}$,通过设置拉伸模量远远大于压缩模量来反映土工合成材料抗拉不抗压的力学特性。同时设置土工合成材料的屈服极限 T_s ,如果土工合成材料的拉应力达到其屈服极限 T_s ,则拉应力固定为屈服极限不变。填土体的单元类型为八节点三维实体单元 C3D8,土工格室和土工格栅则采用弹塑性本构关系,单元类型为三维四节点膜单元 M3D4,膜单元面内受力,可反映土工格室和土工格

栅抗拉但不能承受弯矩的力学特性。土工格室片厚度为 0.6 mm, 土工格栅厚度为 3 mm, 土工合成材料参数如表 1 所示, 土体及路面结构计算参数如表 2 所示。表 1 中土工格室与土工格栅的泊松比取为 0, 这是因为如果土工格室的泊松比大于土的泊松比, 则在竖向压力作用下其侧向膨胀量大于格室中填土的侧向膨胀量, 对填土起不到约束作用, 不能反映格室的侧向约束效应这一物理实质。填土、路面结构和地基均采用 Drucker-Prager 模型, 屈服面函数为:

$$f = q - p \tan \beta - d = 0 \quad (1)$$

$$q = \sqrt{\frac{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}{2}} \quad (2)$$

$$p = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3} \quad (3)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为最大主应力、中间主应力和最小主应力; p 为平均应力; q 为偏应力; β 和 d 分别为剪切破坏面的斜率与截距, 与摩尔库仑模型中内摩擦角和黏聚力类似。

在平面应变条件下, 参数 β 和 d 与平面应变强度参数(即 d 和 c) 通过以下公式相关联:

$$\tan \beta = \frac{\sqrt{3} \sin \varphi}{\sqrt{1 + \frac{\sin^2 \varphi}{3}}} \quad (4)$$

$$\frac{d}{c} = \frac{\sqrt{3} \cos \varphi}{\sqrt{1 + \frac{\sin^2 \varphi}{3}}} \quad (5)$$

式中: φ 为内摩擦角; c 为黏聚力。

表 1 土工格室与土工格栅力学参数

材料	容重 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	拉伸模量 E_s/MPa	压缩模量 E_c/MPa	泊松比 ν	材料屈服极限 σ_s/MPa
土工格室	9.2	7500.0	0.001	0	400.0
土工格栅(抗拉强度 100 kN/m)	9.2	583.3	0.001	0	33.3
土工格栅(抗拉强度 300 kN/m)	9.2	1000.0	0.001	0	100.0

表 2 土体及路面结构计算参数表 新老路基的
土体参数不可能一样

材料	容重 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^3$)	摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 c/kPa	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν
老路基	20	15	24	65	0.30
新路基	20	15	24	55	0.31
路面结构	22	45	800	1500	0.26
地基	19	25	47	600	0.30

2.2 接触关系

土工格室或土工格栅与填土之间的接触关系通过施加内置区域的约束关系完成。其中主体区域为填土, 内置区域为所有土工格室或土工格栅, 两者的容差设置按照软件默认值设置即可, 该种接触关系在能满足实际情况的同时又有利于有限元计算的收敛性。

2.3 荷载与边界条件

在对改扩建路基拼宽进行三维数值模拟时将其当作平面应变问题来进行处理, 因此在初始分析步(Initial)中对模型底部 xoz 平面对其三个方向的自由度进行了约束, 在 $yo z$ 平面上对 x 方向和 z 方向的变形进行了限制(即 U1 和 U3), 即只允许产生沉降变形。在两侧 xoy 平面上设置了 $U3 = UR1 = UR2 = 0$

的对称边界条件, 限制了 z 方向的位移和其他两个方向的旋转自由度, 同时对土工格室和土工格栅也设置了相同的对称边界条件。在初始分析步(Initial)中完成边界条件的设置后需要在第一个分析步(Step-1)中对填土、地基、土工格室和土工格栅施加体力荷载, 在第二个分析步(Step-2)中施加外部荷载。以路基 10 m 填高为例, 图 5 为施加完边界条件与荷载后的模型图。

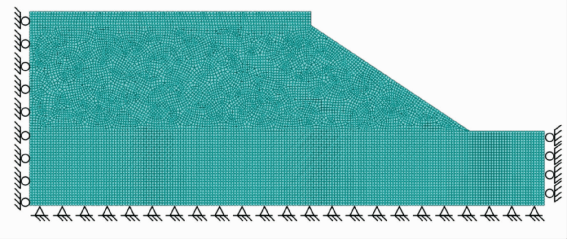


图 5 施加边界条件与荷载后的模型

3 路基填高工况

3.1 路基 3 m

参考广惠改扩建施工图文件, 给出路基填高 3 m 的模型示意图, 其填高工况的加筋位置如图 6 所示。

土工格栅与土工格室加筋位置相同, 土工格室与土工格栅加筋后的竖向沉降云图及对比图如图

7—图8所示。

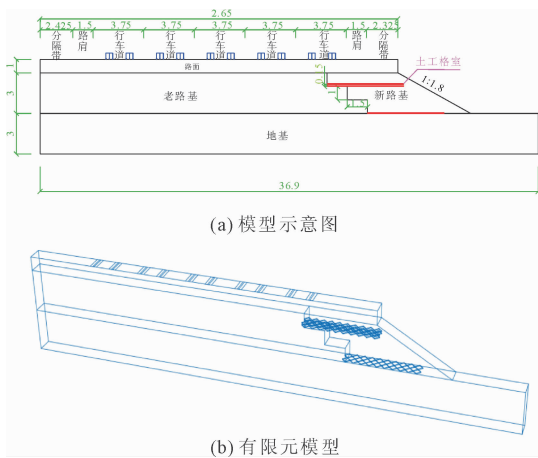


图6 3 m 填高加筋工况

由图8可得,土工格室与土工格栅能有效减少3 m 工况模型沉降量与水平位移,具体减幅为土工格室 > 土工格栅(抗拉强度 300 kN/m) > 土工格栅

(抗拉强度 100 kN/m)。沉降对比分析中素土路基的最大沉降为 0.106 m,土工格室加筋路基的最大沉降为 0.041 m,土工格栅(抗拉强度 100 kN/m)加筋路基的最大沉降为 0.071 m,土工格栅(抗拉强度 300 kN/m)加筋路基的最大沉降为 0.066 m。水平位移对比分析中素土路基的最大水平位移为 0.175 m,土工格室加筋路基的最大水平位移为 0.043 m,土工格栅(抗拉强度 100 kN/m)加筋路基的最大水平位移为 0.107 m,土工格栅(抗拉强度 300 kN/m)加筋路基的最大水平位移为 0.096 m。在降低路基水平位移方面土工格室更加显著,因为土工格栅是二维平面加筋材料,主要依靠其高抗拉强度、与土体的界面咬合力和摩擦力来限制土体的变形,对水平位移的限制较小;而土工格室是一种三维蜂窝状结构,蜂窝壁对填充材料施加显著的侧向约束力,阻止其侧向移动和挤出。这极大提高了填料的强度和刚度,因此土工格室对模型的加固效果更好。



(a) 素土工况竖向沉降云图



(b) 土工格室工况竖向沉降云图

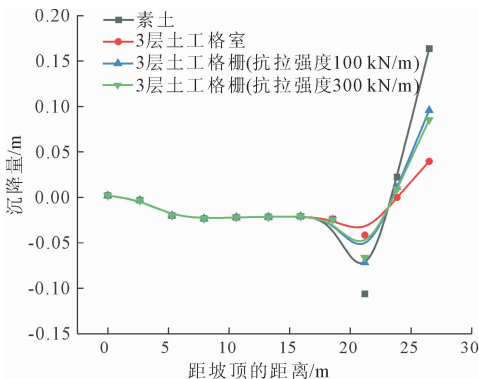


(c) 抗拉强度(100 kN/m)土工格栅工况竖向沉降云图

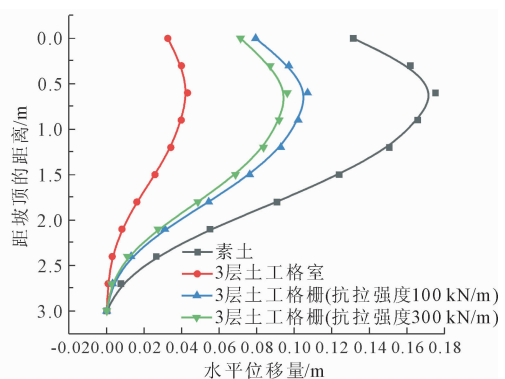


(d) 抗拉强度(300 kN/m)土工格栅工况竖向沉降云图

图7 3 m 工况竖向沉降云图



(a) 差异沉降对比



(b) 水平位移对比

图8 路基填高3 m 各工况位移对比

3.2 路基 10 m

10 m 填高工况的加筋位置如图9所示。

土工格栅与土工格室加筋位置相同,土工格室

与土工格栅加筋后的竖向沉降云图及对比图如图10—图11所示。

由图11可得,土工格室与土工格栅能有效减少

10 m 工况模型沉降量与水平位移,具体减幅为土工格室 > 土工格栅 (抗拉强度 300 kN/m) > 土工格栅 (抗拉强度 100 kN/m)。沉降对比分析中素土路基的最大沉降为 0.278 m,土工格室加筋路基的最大沉降为 0.118 m,土工格栅 (抗拉强度 100 kN/m) 加筋路基的最大沉降为 0.225 m,土工格栅 (抗拉强度 300 kN/m) 加筋路基的最大沉降为 0.213 m。水平位移对比分析中素土路基的最大水平位移为 0.493 m,土工格室加筋路基的最大水平位移为 0.138 m,土工格栅 (抗拉强度 100 kN/m) 加筋路基的最大水平位移为 0.383 m,土工格栅 (抗拉强度 300 kN/m) 加筋路基的最大水平位移为 0.359 m。土工格栅对 10 m 工况沉降量与水平位移的影响很小,10 m 高的填土产生的巨大自重应力,远超低路堤,下部土体的侧向变形被强烈压制,格栅难以充分发挥其限制侧

向变形的能力,导致格栅加固效果有限^[29];而土工格室的加固机理为三维立体约束而非二维加筋,因此在 10 m 工况依旧有良好的加固效果。

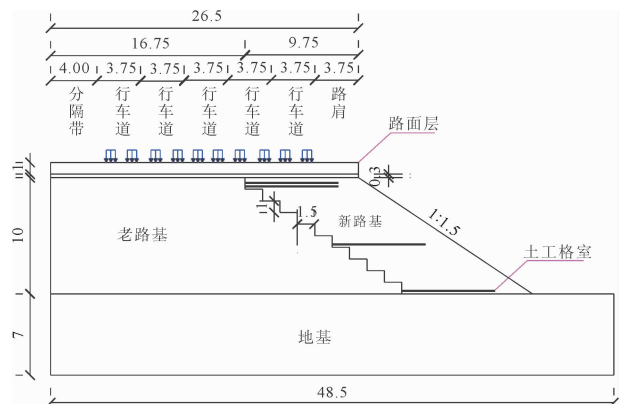


图 9 10 m 填高加筋工况

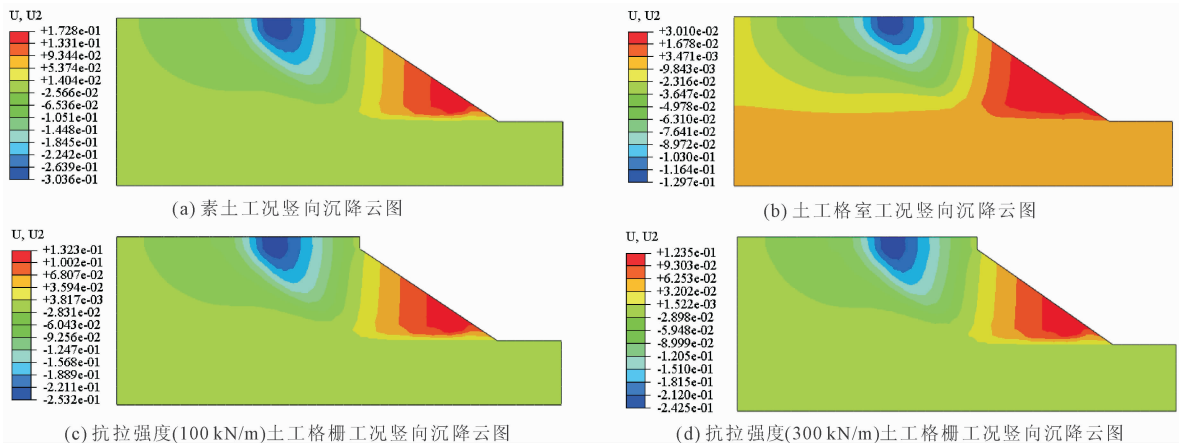


图 10 10 m 工况竖向沉降云图

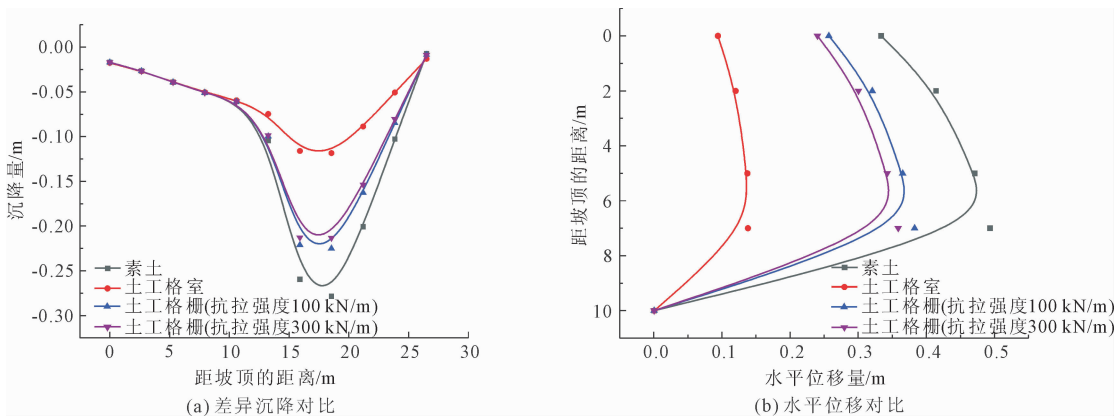


图 11 路基填高 10 m 各工况位移对比

4 纵向填挖交界

路基横向填挖交界处加筋工况的计算分析与上述改扩建路基横向拼接工况基本相同,本节主要研

究纵向填挖交界工况,其加筋位置如图 12 所示。

其中土工格室加筋情况共有四种,分别为上部一层加筋、上部两层加筋、上部两层加筋中部一层加筋及上部两层加筋中部一层加筋底部一层加筋。土

工格栅加筋情况为上部一层加筋和两层加筋。土工格室与土工格栅加筋后的水平位移云图及对比图如图 13—图 14 所示。

由图 14 可得,中部与底部加筋是非必要的,因此仅选取顶部一层和两层加筋进行格室格栅对比。土工格室与土工格栅能有效减少纵向填挖交界工况模型沉降量,具体减幅为两层土工格室 > 两层土工格栅 > 一层土工格室 > 一层土工格栅。其中两层土工格室加筋路基的最大沉降为 0.232 m,两层土工格栅加筋路基的最大沉降为 0.251 m,一层土工格室加筋路基的最大沉降为 0.254 m,一层土工格栅

加筋路基的最大沉降为 0.274 m。

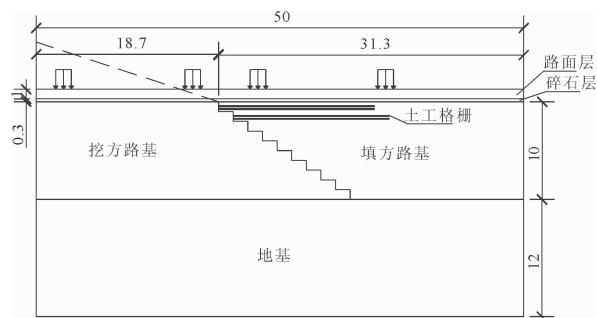


图 12 纵向填挖交界加筋工况

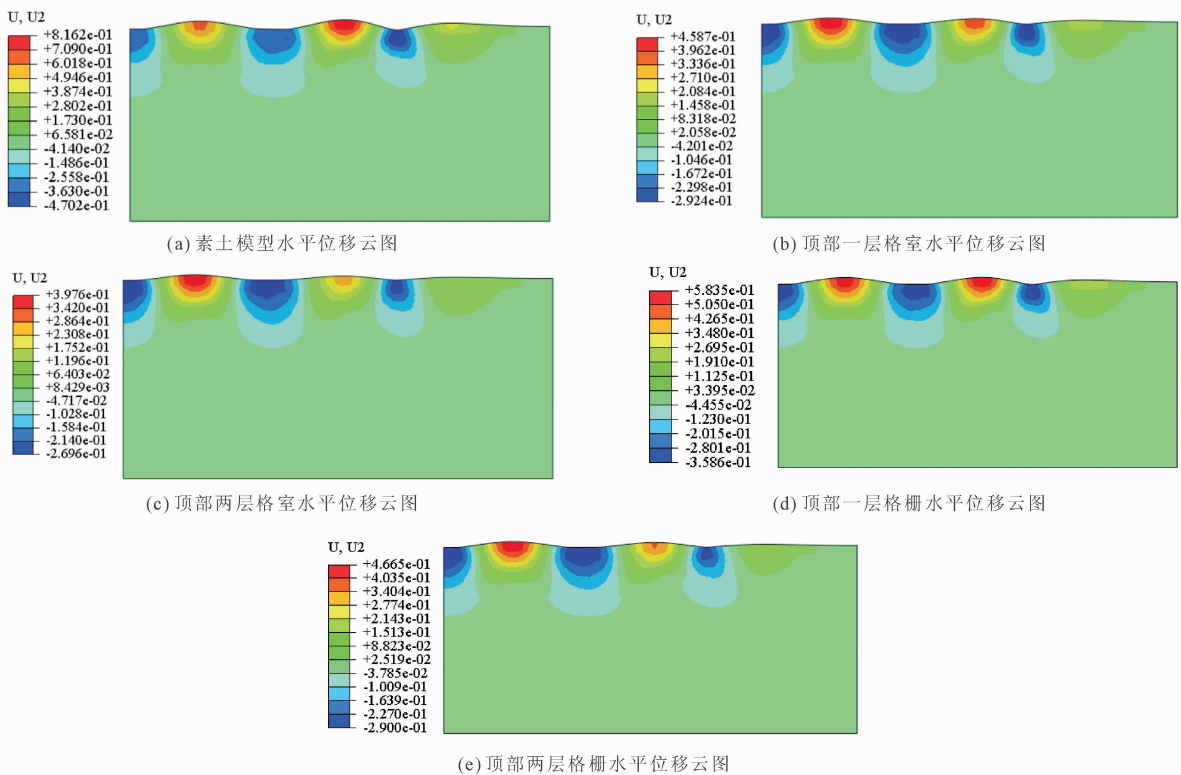


图 13 填挖交界工况水平位移云图

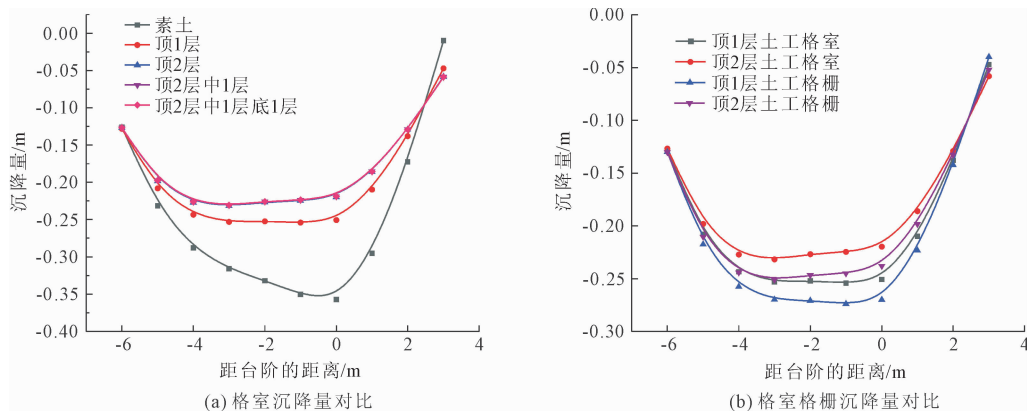


图 14 纵向填挖交界工况位移对比

5 结 论

本文采用 Abaqus 弹塑性有限元软件针对改扩建路基拼宽和填挖交界处土工格室与土工格栅加筋工况进行计算分析,对比研究土工格室与土工格栅对不同工况的加固效果,得到以下结论:

(1) 土工格室与土工格栅均能有效减小新老路基拼宽时的差异沉降与水平位移,亦能减小填挖交界工况的差异沉降,从而减小由于反射裂缝造成的路面开裂。格室对于差异沉降和水平位移的减小优于格栅。

(2) 随着路基填高的增加,格室加筋效果仍然显著,而格栅加筋效果有所减弱,格室与格栅加筋效果的差异逐渐增大。路基填高 3 m 时,高强格室可减小最大沉降量约 61%,水平位移约 75%,高强格栅可减小最大沉降量约 37%,水平位移约 45%。路基填高 10 m 时,高强格室可减小最大沉降量约 58%,水平位移约 72%,高强格栅可减小最大沉降量约 23%,水平位移约 27%。

(3) 在纵向填挖交界工况下,路基中部加筋与底部加筋对于差异影响很小,仅在路床上部加筋即可获得顶部中部和底部多层加筋相同的加固效果,因此建议在路床加筋两层。

参考文献:

[1] 陈 庚,王 波,陈永辉,等. 海域拓宽公路的变形特征及数值模拟分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(01):273-279.

[2] Jiang Kang, Fu Liang Gao, Wei Fang. Treatment mechanism research on the roadbed widening with geosynthetics [J]. Applied Mechanics and Materials, 2024 (2012): 1789-1793.

[3] Lu Z, Zhao Y, Liu J, et al. Engineering properties and micropore structure of clay-based foamed lightweight soil [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2024, 36 (03):04023598.

[4] 靳飞飞,宋 飞,皇甫钊. 地震作用下土工格室挡墙抗震性能大型振动台试验研究[J/OL]. 振动工程学报, 1-12 [2026-03-09]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1349.TB.20250331.0853.002>.

[5] 张冰冰,宋 飞. 土工格室加筋粗粒土的非线性剪胀模型及其有限元实现[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2025, 57(11):71-84.

[6] Halder K, Chakraborty D. Influence of soil spatial variability on the response of strip footing on geocell-reinforced slope [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 122: 103533.

[7] Feng L, Neto A J, Zornberg J. Evaluation of the elastic modulus improvement in geocell-reinforced unbound aggregates: Full-scale experimental sections on a highway [J]. Transportation Geotechnics, 2024, 49:101444.

[8] 邱 毅,余 强,陈 强,等. 土工格栅和土工格室加筋在公路拓宽工程中的应用对比分析[J]. 公路交通技术, 2020, 36(03):7-13.

[9] Jia Y, Guo Y, Morsy M A, et al. Experimental evaluation on bearing performance of tire cell-geogrid reinforced subgrades [J]. Transportation Geotechnics, 2026, 59: 101944.

[10] 蔡晓光,徐洪路,王海云,等. 土工格栅加筋土挡墙水平地震系数研究[J]. 岩土力学, 2025, 46(10):3033-3044.

[11] 廖 鸿,徐 超,杨 阴. 某机场飞行区土工格栅加筋高边坡优化设计[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48 (06):113-121.

[12] Hajiazizi M, Arkawazi F A S. Experimental investigation of the effect of using expanded polystyrene geofoam and geogrid in different forms on vertical earth pressure on high-filled cut-and-cover roadway tunnel[J]. Cogent Engineering, 2024, 11(01):1-30.

[13] Önal Yakup, Çalışıcı Mustafa, Kayadelen Cafer, et al. A comparative experimental study of geocell and geogrid-reinforced highway base layers under repeated loads[J]. Road Materials and Pavement Design, 2023, 24(12): 2877-2892.

[14] 梁 鹏,李文举,路再红. 土工格室对聚苯乙烯泡沫路基的影响研究[J]. 西部交通科技, 2025(02):56-59,142.

[15] 赵 阳,卢 正,颜廷舟,等. 土工格室加筋路基振动压实行为及预应力效应[J]. 岩土力学, 2024, 45 (S1):771-782.

[16] 张冰冰,刘 杰,阿肯江·托呼提,等. 土工格室加固风积沙路基不同深度动力响应试验研究[J]. 地质科技通报, 2022, 41(06):308-315.

[17] 王炳龙,梅 祯,肖军华. 土工格室补强路基整治路基病害的试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(S1):325-332.

[18] 顾 凡,李 海,蒋晨煜,等. 考虑额外等效应力的土工格栅加筋高液限黏土变形特性试验及预估研究[J]. 中国公路学报, 2025, 38(10):158-172.

[19] 杨 涛,杨锦忠,石 磊,等. 土工格栅加筋拓宽路堤有限元分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(S2):37-40.

[20] 汪益敏,闫 岑,于 恒,等. 静载作用下土工格栅加筋拓宽路堤土中应力特征试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(S1):311-317.

- 堤工程快速检测技术研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(06):129-133.
- [10] 邢涛, 袁伟, 李建慧. 回线源瞬变电磁法的一维 Occam 反演[J]. 物探与化探, 2021, 45(05):1320-1328.
- [11] Chaerul V A, Djaja I G P F S, Pratomo P M, et al. Identifying seawater intrusion in coastal areas using the transient electromagnetic method at Santolo Beach, Garut, West Java, Indonesia[J]. Geosystems and Geoenvironment, 2026, 5(01):100440.
- [12] Yu Chuantao, Zhang Xi, Chen Weiying, et al. Detection of water-enriched goaf via the semi-airborne transient electromagnetic method[J]. Journal of Applied Geophysics, 2023, 212:105011.
- [13] 徐正玉, 付能翼, 周洁, 等. 瞬变电磁法非线性优化反演算法对比[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(03):744-753.
- [14] Yuan Zhanbo, Wu Muyang, Fu Nengyi, et al. Research on 1-D forward modeling and inversion of TEM considering induced polarization effects[J]. Journal of Applied Geophysics, 2025, 241:105844.
- [15] Jiao Junjun, Cheng Jiulong, Liu Yuben, et al. Inversion of TEM measurement data via a quantum particle swarm optimization algorithm with the elite opposition-based learning strategy[J]. Computers & Geosciences, 2023, 174:105334.
- [16] 陈熠坤, 储亚, 蔡国军, 等. 低频电阻率测试技术在特殊土地中的应用研究进展[J]. 工程地质学报, 2024, 32(05):1798-1813.
- [17] 覃玉龙, 江元, 闫江, 等. 岩土介电性参数与物性参数关联性研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(S2):345-350.
- [18] 罗东翔, 孙敬, 党如童, 等. 辽河干流防洪工程筑堤土料电阻率特性试验研究[J]. 东北水利水电, 2025, 43(06):32-37.
- [19] 彭光灿, 黄世传, 徐兴倩, 等. 红黏土固结压缩电阻率模型试验研究[J]. 环境工程学报, 2025, 19(11):3014-3021.
- [20] 郭嵩巍, 刘小畔, 郑凯, 等. 基于全区视电阻率的瞬变电磁一维 Occam 反演中雅克比矩阵的解析算法[J]. 物探与化探, 2020, 44(03):559-567.
- [21] 王书明, 底青云, 夏彤, 等. 瞬变电磁数据 L-PSO 反演方法[J]. 地球物理学报, 2022, 65(04):1482-1493.
- [22] Xu Zhengyu, Liu Longhuan, Liao Xian, et al. Research and application of small-loop transient electromagnetic inversion method using improved FLCPSO-IFAH optimization algorithm[J]. Journal of Applied Geophysics, 2025, 239:105759.

(上接第 104 页)

- [21] 张玲, 欧强, 赵明华, 等. 移动荷载下土工加筋路堤动力响应特性数值分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(10):2865-2874.
- [22] JTGD30—2015 公路路基设计规范[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [23] JTGC20—2011 公路工程地质勘察规范[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2011.
- [24] JTG3430—2020 公路土工试验规程[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- [25] 张景昱, 刘盼, 邓华锋, 等. 应力-干湿循环耦合作用下泥岩力学特性劣化效应研究[J/OL]. 岩土工程学报, 1-10 [2025-12-17]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1124.TU.20251127.1010.002>.
- [26] 侯小强, 范泓涓, 黄解放, 等. 冻融循环下固化高原软土长期强度劣化规律与微观机制研究[J/OL]. 岩石力学与工程学报, 1-13 [2025-12-17]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1397.O3.20251126.1007.001>.
- [27] 陈航航, 魏亚妮, 范文, 等. 干湿循环作用下黏黄土微观结构响应及强度劣化机制研究[J/OL]. 工程地质学报, 1-17 [2025-12-17]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2025-0034>.
- [28] 宋飞, 赵健. 土工格室挡墙破坏机理及评价方法[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2019.
- [29] 褚夫蛟, 刘敦文, 侯志勇, 等. 高速公路复工路基土工格栅的加固补强稳定性[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(05):741-74.