

# 基于有限元模拟的土工格室加筋基层力学响应及工程应用研究

何新平<sup>1</sup>, 兰 虎<sup>2</sup>, 刘 瑾<sup>1</sup>, 何美美<sup>1</sup>, 刘安述<sup>3</sup>, 延丽丽<sup>4</sup>

<sup>1</sup>中国公路工程咨询集团有限公司, 北京

<sup>2</sup>长安大学公路学院, 陕西 西安

<sup>3</sup>中国铁路设计集团有限公司, 天津

<sup>4</sup>抚顺市交通运输综合行政执法队, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2023年7月25日; 录用日期: 2023年8月15日; 发布日期: 2023年8月25日

## 摘 要

本研究利用abaqus有限元模拟不同因素对基层承载能力影响, 通过应力应变云图, 竖向沉降量、回弹模量、塑性变形量随荷载变化曲线等分析不同基层承载能力差异, 验证承载板试验结论。同时对格室加固材料进行研究, 对比填料为单粒级碎石、沥青面层-半刚性基层混合铣刨料、沥青面层铣刨料及乳化沥青冷再生混合料对结构层加固效果分析, 为开展工程试验提供指南和有理论支持。开展试验路验证承载板试验结论正确性并跟踪观测路面服役效果, 对机械化施工方式进行改进与完善。

## 关键词

土工格室, 混合铣刨料, abaqus有限元模拟, 工程试验

# Research on Mechanical Response and Engineering Application of Geocell Reinforced Base Based on Finite Element Simulation

Xinping He<sup>1</sup>, Hu Lan<sup>2</sup>, Jin Liu<sup>1</sup>, Meimei He<sup>1</sup>, Anshu Liu<sup>3</sup>, Lili Yan<sup>4</sup>

<sup>1</sup>China Highway Engineering Consultants Corporation, Beijing

<sup>2</sup>Highway School, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

<sup>3</sup>China Railway Design Group, Tianjin

<sup>4</sup>Fushun Transportation Comprehensive Administrative Enforcement Team, Fushun Liaoning

Received: Jul. 25<sup>th</sup>, 2023; accepted: Aug. 15<sup>th</sup>, 2023; published: Aug. 25<sup>th</sup>, 2023

文章引用: 何新平, 兰虎, 刘瑾, 何美美, 刘安述, 延丽丽. 基于有限元模拟的土工格室加筋基层力学响应及工程应用研究[J]. 土木工程, 2023, 12(8): 1092-1103. DOI: 10.12677/hjce.2023.128125

## Abstract

In this study, abaqus was used to simulate the influence of different factors on the load-bearing capacity of the base. The difference in load-bearing capacity of the different bases was analyzed through a stress-strain cloud map, vertical settlement, resilience modulus and plastic deformation curve with load, etc., and the conclusion of the load-bearing plate test was verified. At the same time, the reinforcement materials of the cell were studied, and the reinforcement effect of the single grain gravel, asphalt surfacing and semi-rigid base mixed milling material, asphalt surfacing milling material and emulsified asphalt cold recycled mixture were compared to provide guidance and theoretical support for engineering tests. To carry out trial road verification of load-bearing board test conclusions and monitor the pavement's performance, improvements and refinements to mechanized construction methods will be made.

## Keywords

Geocell, Mixed Milling Materials, Abaqus finite Element Simulation, Engineering Test

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

纵观交通行业发展史，土工格室出现时间较晚，相比而言土工格室在国外应用较早，国内仍然处于探索阶段。卢硕[1]针对软土地基进行土工格室加筋处理同时利用有限元模拟得出：土工格室加筋层应力扩散效果明显，将上部荷载向下传递，传递效率在 90%左右。土工格室加筋碎石结构层可提高路基变形模量约 15%，回弹模量约 10%。王世立[2]通过数值模拟与室内试验相结合，研究了土工格室加筋土处理桥头过渡段不均匀沉降现象的效果，得出结论：土工格室加筋土铺设层数、压实度对其治理效果影响明显，而含水率影响较小。土工格室最上层铺设长度为 10 m~15 m、铺设间距为 2 m~2.5 m 时降低不均匀沉降效果最好，且由上至下，土工格室铺设长度可逐渐减小。M. P. Vibhoosha 等[3]根据总结的大量文章及试验，得出了土工格室可以使垂直应力扩散至更深层区域，土工格室配筋约可减少 50%垂直应力并提高承载能力约 3~4 倍。0.3 m 厚度的土工格室加筋土基视为梁，而 0.15 m 厚度的加筋土基表现为张拉膜，张拉膜效应是增加承载能力的重要原因。Ahn Jaehun 等[4]通过落锤弯沉仪试验、承载板试验和降雨模拟试验得出加筋后路面弹性模量提高，未加筋基层厚度为 600 mm 的路面提供与加筋路面相同的弹性模量值，当使用格室加筋基层后，设计人员可降低路面厚度；降雨试验得出格室加筋基层可有效处理地表径流。

近年来许多学者对土工格室加筋结构进行了探索，但并没有形成完备的理论体系，只是针对不同场景进行了研究，因此加快国内土工格室加筋结构体系的构建和完善对行业发展非常必要。

Abaqus 提供了大量的材料模型，输入参数即可模拟水泥混凝土、钢筋、岩土、高分子材料、金属、液体等材料性能。Abaqus 可以对应力、应变、位移等相关参数进行验证，除此之外还可以模拟光、电、温度等耦合作用、热传导、岩土力学分析等[5] [6]。

本研究利用土工格室加筋沥青面层 - 半刚性基层混合废弃铣刨料，在承载板试验的基础上结合 Abaqus 有限元模拟分析，对试验数据进行分析、验证与预测，选择加筋效果更好的试验方案。铺设试验路，对该路段服役过程持续跟踪并采集土工格室加筋结构层数据，给出沥青路面各结构层用料类型及厚

度等推荐值。

## 2. 土工格室加固混合铣刨料基层结构有限元模型建立

### 2.1. 有限元模型和边界条件

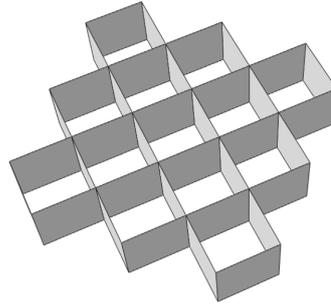


Figure 1. Geocell mode  
图 1. 土工格室模型

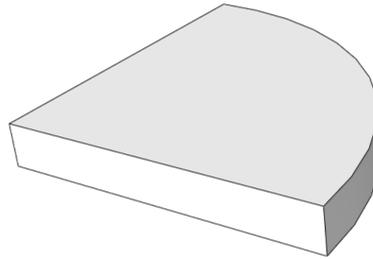


Figure 2. Quarter bearing plate model  
图 2. 四分之一承载板模型

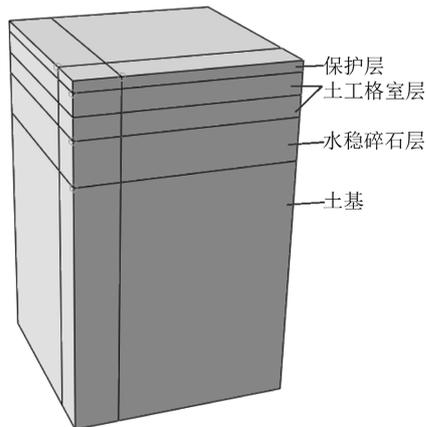


Figure 3. Overall model of road structure  
图 3. 道路结构整体模型

土工格室加固混合铣刨料基层结构整体模型如图 1~3 所示。模型结构由上至下分别为保护层、土工格室加筋基层、水稳碎石结构层、土基。土工格室采用焊距 20 cm、高度 10 cm 规格，与室内试验参数保持一致。整体道路结构模型为轴对称结构，为减少计算量方便计算机运行且不影响结果前提下，取整体结构四分之一进行分析，则模型长度为 100 cm、宽度 100 cm。为了准确分析应力传递过程中，格室加筋对结构层的作用影响深度，将土基结构加深至整体道路模型深度为 2 m，更准确的模拟道路实际情况。

刚性承载板同取四分之一，即为半径 15 cm、厚度 0.2 cm 扇形结构。

## 2.2. 结构材料参数选取

实际工程中土体材料的种类、特性繁多，模拟中无法实现完全贴合实际土体的全部特性，只能实现模拟一类土的性质，因而建模时要对土体材料模型进行简化。土工格室做加筋结构层，在极限荷载作用下最大拉应变仍处于线弹性范围，因此在模拟中选择线弹性[7] [8]。模型中道路基层铣刨料与地基土材料均采用摩尔 - 库伦理论进行模拟计算，Abaqus 中选择摩尔 - 库伦模型模拟。根据试验路勘察得出各项材料的参数如下表 1 所示：

**Table 1.** Model material parameter

**表 1.** 模型材料参数

材料名称	质量密度 $\text{g/cm}^3$	杨氏模量 $\text{E/MPa}$	泊松比 $\mu$	摩擦角 $\beta/^\circ$	粘聚力/ $\text{KPa}$
沥青面层	2.3	1300	0.25	—	—
承载板	7.8	206,000	0.3	—	—
土工格室	0.95	500	0.3	—	—
高强度土工格室	1.8	2930	0.3	—	—
混合铣刨料	2.2	200	0.35	20	10
单粒级碎石	2.5	400	0.35	25	—
乳化沥青 冷再生混合料	2.3	1200	0.3	25	20
水稳碎石	2.3	3000	0.3	—	—
地基土	1.8	40	0.4	—	—

## 2.3. 分析步

Abaqus 中分析步包含通用分析步(General steps)和通用摄动分析步(Linear perturbation steps)。在模拟道路基坑开挖时，前一步分析步的结束状态为下一分析步的初始状态，属于通用分析步。模拟过程中需考虑工后沉降问题，路基一般在自重作用下趋于平衡，沉降量几乎为零，其沉降量主要产生原因为行车荷载与路面荷载，因此在有限元模拟分析过程中考虑地应力平衡。分析步设置为两步，第一步为地应力、平衡初始应力，第二步为静力、通用。

## 2.4. 边界条件与相互作用

模型结构为整体 1/4，方型道路结构模型等同于箱体，边界受到位移限制。X 轴与 Y 轴方向的纵向截面，边界条件不允许箱体向水平方向移动，因此限制位移和转角使其完全固定。其余两个侧面限制其法相位移，模型底部限制所有方向位移。

## 2.5. 荷载与网格划分

网格划分的疏密程度与模拟结果精确度相关，网格过密导致计算量成倍增加使运行负担加重，而网格过疏可能使结果精确度不足，因此在网格划分时要权衡两个因素影响比重，使运行结果精密度较高且网格数量合适。考虑作用在承载板上的荷载主要集中在承载板周围以及承载板下方区域，即应力与位移

主要发生在该区域附近,因此将承载板周围网格局部加密,其他部位网格划分相较稀疏,整体结构网格单元总数在5万个左右较为合适。针对道路结构,近似全局尺寸采用0.09,局部加密部位适当缩小尺寸;承载板、土工格室近似全局尺寸分别采用0.02、0.04。选择单元属性为C3D8(即实体八结点线性六面体单元)对道路结构层进行网格划分、M3D4(即四结点四边形膜单元)对土工格室进行网格划分、C3D8(即八结点线性六面体单元薄壳,膜应变)对刚性承载板进行网格划分。

### 3. 土工格室结构参数对基层力学响应影响

#### 3.1. 保护层厚度影响

向承载板施加垂直方向荷载后,应力不仅沿着垂直方向向下传递,还分布在荷载以外的很大范围内,由于刚性承载板与结构层之间模量差距悬殊,若无保护层结构可能导致应力无法有效扩散导致结果不准确,同时考虑实际施工过程中,摊铺机直接作用于格室结构层上可能导致格室侧壁压弯或压坏而提前失去约束作用,保护层可对土工格室起到一定保护作用,为此利用Abaqus有限元模拟不同厚度保护层对格室加筋基层的力学响应影响。

保护层材料与土工格室填料种类相同,此模型材料采用沥青面层-半刚性基层混合铣刨料,保护层厚度分别取无保护层、3 cm、5 cm和10 cm对结构层承载能力影响分析对比。图4为不同保护层厚度对格室加固基层竖向变形量影响对比图。

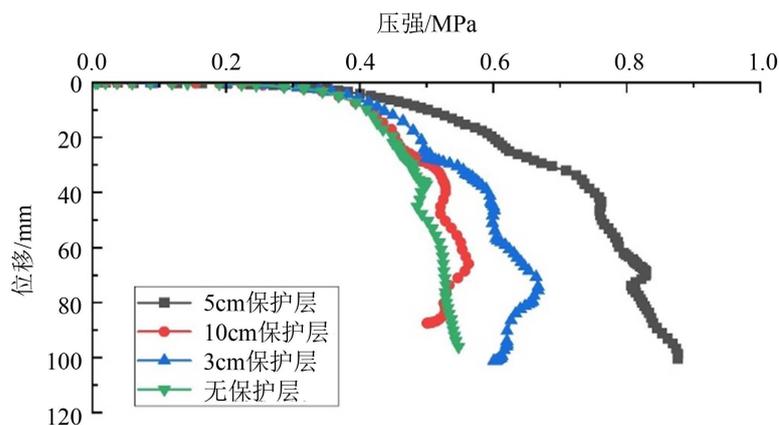


Figure 4. Comparison of the influence of different protective layer thickness on the vertical deformation of cell reinforced base

图4. 不同保护层厚度对格室加固基层竖向变形量影响对比图

综上所述,根据不同保护层厚度对应的荷载-位移曲线得出,保护层的存在对结构层承载能力有提升,保护层起到了帮助应力扩散的作用,使作用在承载板上的荷载有效传递到格室加筋基层结构中。5 cm保护层效果好于3 cm保护层,10 cm保护层相比于5 cm和3 cm保护层,其对结构层承载能力没有提升,且效果与无保护层基本相同。从实际考虑,保护层的存在及其厚度的增加使道路结构整体厚度也增加,保护层的主要作用是扩散应力和避免土工格室施工过程中被破坏,因此不适合采用过厚的保护层,推荐采用3 cm厚度。

#### 3.2. 土工格室模量影响

随着土工格室生产工艺不断更新,为了满足机械化施工要求,新型高强度土工格室逐渐普及,由于其提升抗拉强度、降低延展率而使土工格室加筋层整体刚度提升,路面结构承载能力也有不同程度的加强。为了比较高强度格室加筋基层效果提升程度,模型中对两种模量格室进行对比分析,其中普通强度

土工格室模量为 500 MPa，高强度土工格室模量为 2930 MPa。图 5 为两种格室加固沥青面层 - 半刚性基层混合铣刨料作柔性基层的荷载 - 位移曲线图。

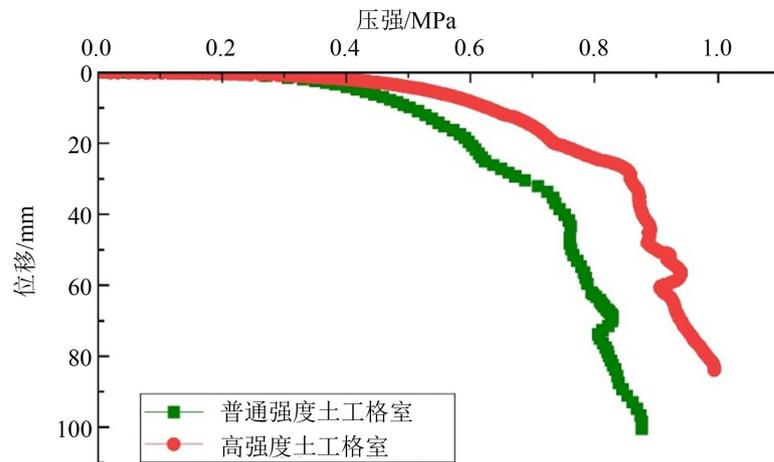


Figure 5. Comparison of reinforcement effect of geocell with different strength  
图 5. 不同强度土工格室加筋效果对比图

### 3.3. 土工格室高度影响

为了比较格室高度对加筋结构层承载能力的影响情况，模拟格室高度分别为 20 cm、15 cm 和 10 cm 时结构层荷载与沉降量关系，同时对比单层 20 cm 土工格室与双层各 10 cm (共 20 cm) 土工格室对结构层承载能力的影响。图 6 为其他条件相同时，三种高度格室加筋层的荷载 - 位移曲线。

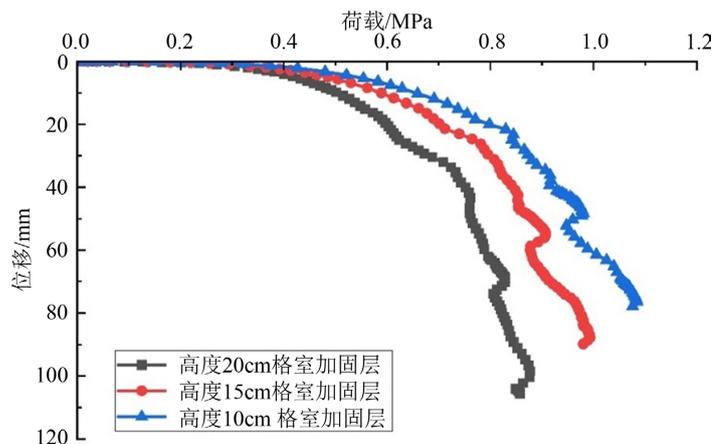


Figure 6. Loading and displacement curves of reinforced layer with different height  
图 6. 不同高度格室加筋层荷载位移曲线图

根据结果得出，单层 20 cm 高度格室与双层各 10 cm 高度格室加固铣刨料后结构层的荷载 - 位移曲线重合，说明理论上高度相同情况下，单层与双层的施工工艺对路面承载能力无影响。但在实际施工过程中，需要考虑机械压实对格室的破坏程度与两层格室之间联接程度对承载能力的影响。

从图 6 可以看出，当荷载超过 0.4 MPa 后，高度对格室加筋影响逐渐明显。高度 20 cm、15 cm、10 cm 格室加固层荷载 - 位移曲线拐点荷载依次为 0.7 MPa、0.8 MPa、0.9 MPa。当位移为 60 mm 时，三种高度格室加筋层对应荷载分别为 0.79 MPa、0.87 MPa、0.98 MPa，说明随着格室高度降低结构层承载能力

逐渐提升。但该结论与室内试验结论相反，这是由于 Abaqus 模拟承载板试验过程中设置竖向总位移为 100 mm，通过向承载板施加荷载使结构层达到竖向沉降目的。当土工格室高度降低时，该结构层高度也随之降低，水稳碎石结构层则发挥更大作用，而水稳碎石结构层模量是格室模量的数倍，其强度也远远高于格室加筋结构层。尤其当格室高度降低为 10 cm 时，竖向位移同为 10 cm 下降至水稳碎石结构层表面，水稳碎石层发挥主要承载作用，因此格室高度越低反而整体结构层承载能力越强。但在足尺试验时，路面结构层不会产生模拟设定深度的竖向沉降量，实际道路在行车荷载作用下弯沉也较小，因此土工格室加筋层整体提供主要强度，此时为格室高度增加，路面结构承载能力越强。

### 3.4. 水稳碎石结构层对结构承载能力影响

为了分析水稳碎石下基层对整体路面结构承载能力的影响，模拟多层土工格室加筋结构代替水稳碎石结构层，比较并分析其承载能力差距。设置四种方案对比：无水稳碎石结构层 + 基层总高度 30 cm 土工格室加筋混合铣刨料结构、无水稳碎石结构层 + 总高度 40 cm 土工格室加筋混合铣刨料结构、20 cm 高度格室加筋混合铣刨料结构 + 20 cm 水稳碎石结构层、15 cm 高度土工格室加筋混合铣刨料结构 + 20 cm 水稳碎石结构层。下图 7 为有无水稳碎石结构层的荷载 - 位移曲线图。

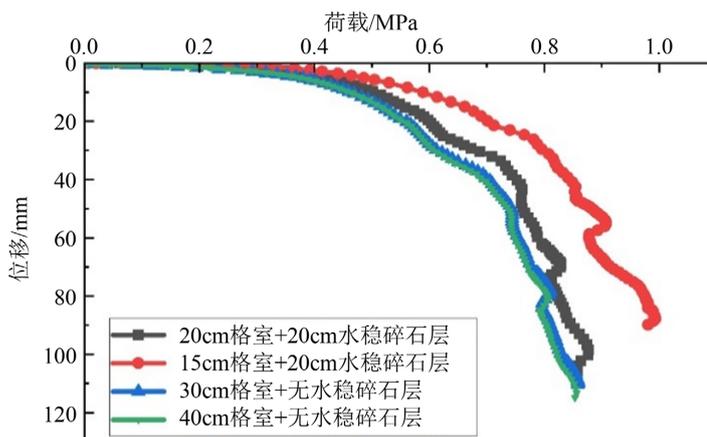


Figure 7. Contrast curve between graded gravel structure layer and ungraded gravel structure layer

图 7. 有无级配碎石结构层对比曲线

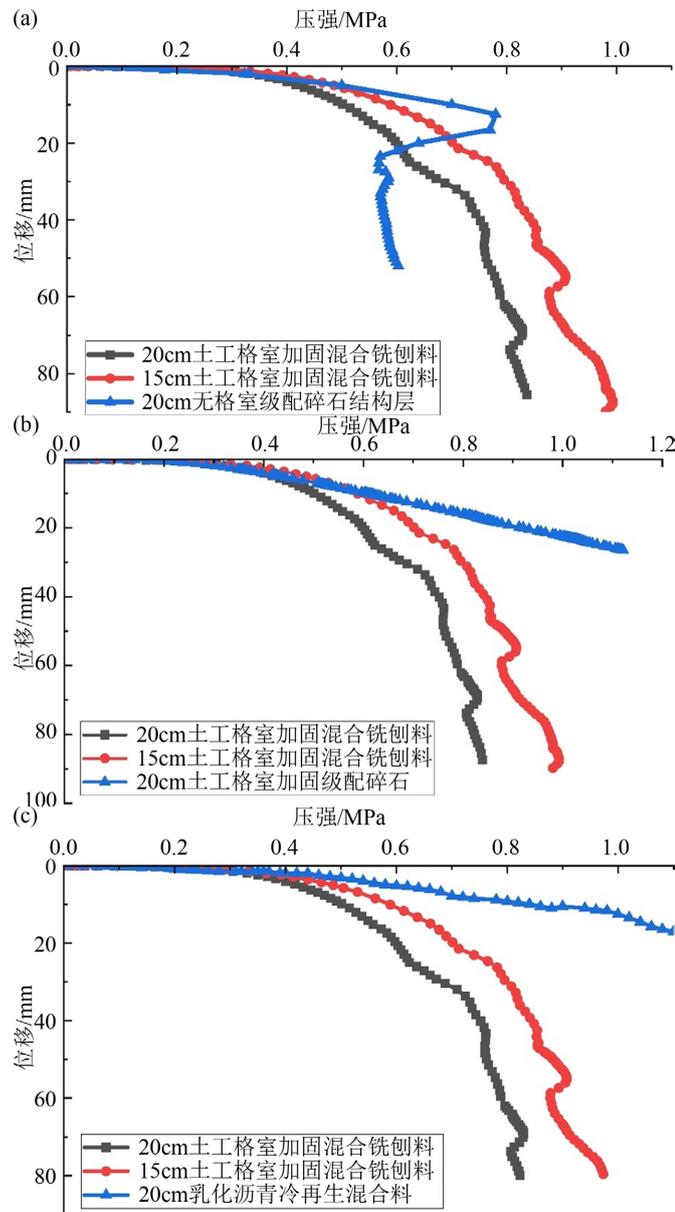
通过图 7 可以看出，无水稳碎石结构层情况下，30 cm 和 40 cm 格室高度的荷载 - 位移曲线基本重合，结合上文结论说明格室高度对结构层承载能力有影响，但增加格室高度超过一定数值后对结构承载能力影响极小。如当竖向沉降量为 60mm 时，30cm 格室加筋层、40 cm 格室加筋层、20 cm 格室 + 20 cm 水稳碎石层、15 cm 格室 + 15 cm 水稳碎石层对应荷载分别为 0.79 MPa、0.87 MPa、0.76 MPa、0.75 MPa，差异较小。

当位移相同时，30 cm 和 40 cm 高度格室结构层对应荷载略低于 20 cm 格室加筋 + 20 cm 水稳碎石结构层，远小于 15 cm 格室加筋 + 20 cm 水稳碎石结构层。说明相同上基层结构情况下，水稳碎石结构作为下基层对整体路面结构提供了一定强度，且由于水稳碎石结构层的强度更高，提高路面承载能力幅度更多；通过增加格室加筋层高度取代水稳碎石结构层，其承载能力不如水稳碎石下基层效果好，因此推荐采用土工格室加筋混合铣刨料 + 水稳碎石结构作为基层。

### 3.5. 土工格室加固填料种类对基层力学响应影响

为了对比土工格室加固混合铣刨料作柔性基层与无格室级配碎石基层、乳化沥青冷再生混合料基层

对路面结构承载能力的影响，模型对三种不同填料类型基层进行对比，下图 8 为土工格室加固混合铣刨料、无格室 10 mm~20 mm 碎石、乳化沥青冷再生混合料结构层的荷载 - 位移曲线图。



**Figure 8.** Load-displacement curves of cell reinforcement with different fillers: (a) comparison between cell reinforced mixed milling material and uncell crushed stone structure layer; (b) comparison of cell reinforced mixed milling material and reinforced gravel; (c) comparison between cell reinforced mixed milling material and emulsified asphalt cold recycled material

**图 8.** 格室加固不同填料荷载 - 位移曲线图: (a) 格室加固混合铣刨料与无格室碎石结构层对比; (b) 格室加固混合铣刨料与加固碎石对比; (c) 格室加固混合铣刨料与乳化沥青冷再生混合料对比

根据图 8(a)可以得出, 20 cm 高度无格室 10 mm~20 mm 碎石基层的荷载 - 位移曲线出现了明显拐点。当荷载小于 0.4 MPa 时, 各结构层荷载 - 位移曲线之间差距较小; 当荷载超过 0.4 MPa 时, 碎石基层与土工格室加筋层承载能力差异逐渐明显, 如当荷载为 0.7 MPa 时, 20 cm 高度格室加筋层、15 cm 格室加筋层、碎石结构层对应位移分别为 23.78 mm、19.81 mm 和 10 mm, 相比格室加筋层, 10 mm~20 mm 碎

石基层竖向沉降量分别降低了 57.95% 和 49.52%。此时, 10 mm~20 mm 碎石结构层承载能力优于格室加固混合铣刨料基层。

当位移小于 16 mm 时, 碎石结构层荷载与竖向位移呈正相关, 且当位移为 16 mm 时荷载达到最大值为 0.78 MPa; 当位移超过 16 mm 后对应荷载急剧变小, 此时该结构层为完全破坏状态。这主要是因为碎石本身强度高, 其作为基层结构时主要依靠碎石之间嵌挤作用提供承载能力, 但对于粒料碎石类填料, 随着荷载强度增加易被压碎压坏。其自身的较高模量可以使结构层短期内迅速达到较高强度, 但从长远来看, 道路结构在行车荷载重复作用下, 碎石基层易失稳发生破坏, 而土工格室提供承载能力时间长, 路面服役寿命也有一定程度提升。因此从实际考虑, 推荐采用土工格室加固混合铣刨料作基层。

根据图 8(b)和图 8(c)可以得出, 随荷载增加, 格室加固级配碎石和无格室乳化沥青冷再生混合料基层产生的竖向沉降量更小, 承载能力更强。当荷载为 0.8 MPa 时, 相比于 15 cm 高度格室加固混合铣刨料结构层产生的竖向变形量 31.16 mm, 格室加固 10 mm~20 mm 碎石层和乳化沥青混合料层产生竖向变形量分别为 15.92 mm、9.21 mm, 降低了 51.35%、70.44%。主要原因是乳化沥青冷再生混合料强度 > 碎石强度, 即使没有土工格室加固提供围压和侧向约束力, 乳化沥青冷再生混合料基层的强度仍远大于格室加固混合铣刨料结构层强度。而碎石在土工格室加固后其提供承载力寿命延长, 承载能力优于格室加固混合铣刨料。

### 3.6. 荷载变化对格室加筋基层力学响应影响

为准确研究荷载对各结构层影响作用, 对模型加铺 15 cm 沥青面层形成完整路面结构, 其参数见表 2。

#### 3.6.1. 荷载对土工格室影响分析

土工格室的应力应变随荷载变化而变化, 通过应力应变云图研究荷载变化对格室加筋基层的力学响应影响。表 2 为不同荷载下格室的拉应力与拉应变值。

**Table 2.** Stress-strain values of cell under different loads  
**表 2.** 不同荷载作用下格室应力应变值

荷载/MPa	0.6	0.8	0.9	1.0
拉应力/MPa	0.1336	0.1673	0.2275	0.2550
拉应变/ $10^{-6}$	440.3	64.61	88.58	101.70

通过表 2 可知, 随着荷载不断增加, 格室的应力应变也随之增大。承载板下方的格室为主要受力区域, 由于受到竖向荷载作用使格室侧壁发生形变产生拉应力, 限制格室内部填料移动, 即对格室内填料形成约束作用, 填料与格室形成整体提供更高强度的承载能力。在格室提供侧向约束力范围内, 荷载越大, 格室侧壁受拉越明显, 对填料的侧向约束能力越强。由于应力扩散使得承载板下方以外的部分格室受到拉应变和拉应力作用, 但影响较小。

#### 3.6.2. 荷载对各结构层影响分析

根据 JTG D50-2017《公路沥青路面设计规范》要求, 对无机结合料稳定层层底拉应力、沥青混合料层变形量以及最大剪应力、路基弯沉进行结构验算, 对比 10 mm~20 mm 碎石基层和格室加固混合铣刨料基层承载能力差别。土工格室采用焊距 400 mm、高度 200 mm 尺寸。不同大小荷载作用下, 各结构层力学响应指标也不同, 因此分别提取模拟结果中荷载为 0.5 MPa、0.8 MPa、0.9 MPa 和 1.0 MPa 下各结构层指标, 结果发现随着荷载增加, 不同结构层的力学指标均按照一定规律变化, 指标均值随着荷载增加

而增加。相同荷载作用下,格室加固混合铣刨料基层相比碎石基层,除无机结合料层层底拉应力增加外,面层最大剪应力、路面弯沉、路基弯沉均有较大幅度降低,尤其最大剪应力降幅明显,说明格室加筋铣刨料的沥青路面承载能力有明显增加。

荷载由 0.6 MPa 增加至 1.0 MPa,无机结合料层层底拉应力增加幅度最大值点位于 1.0 MPa 处,达到了 28.03%,说明荷载越大,格室加筋结构层抵抗外力拉伸的能力越强,提升效果越明显。随荷载变化,面层最大剪应力大幅度降低,其降低范围达到 19.92%~26.62%,说明格室加固铣刨料作为基层相比碎石基层可以有效降低最大剪应力,即减少沥青路面的疲劳开裂,延长路面使用寿命。同时,路面弯沉和路基弯沉都有不同程度降低,但荷载增加其降低幅度减小。综上所述,土工格室加筋铣刨料结构可以有效提升路面承载能力,降低弯沉产生,延长路面服役年限。

#### 4. 土工格室加筋基层的工程应用

为进一步验证课题结论正确性及实际应用效果,课题组先后在宁波高速公路和咸阳 G312 国道附近三级公路开展试验路。宁波试验段主要对格室加筋沥青混凝土作为路面结构的承载能力进行初步探究。咸阳试验段分别对格室加固沥青混合料和混合铣刨料基层的承载能力进行观测,并对现场施工工艺进行研究与改善,提出了格室加固填料的机械化摊铺方法。

##### 4.1. 依托工程及方案

第一次试验段设在宁波穿山至好思房高速公路宁波方向 30K + 800 第三车道处、宁波绕城高速公路东段姜山方向 35K + 900 第三车道处、宁波绕城高速公路东段姜山方向 35K + 900 第三车道处,第二次试验段咸阳 G312 国道附近三级公路处。不同路段根据损坏面积制定不同铣刨修补区域,铣刨区域铺筑两层各 5 cm 高度土工格室,格室均选择焊距 400 mm、高度 50 mm 规格。宁波市试验路填料选择沥青混合料,未加铺面层,格室加固层直接作为路面结构。咸阳试验路填料选择沥青混合料和混合铣刨料分别填筑进行试验,并加铺 2 cm 沥青混合料作为面层。

##### 4.2. 填料参数指标

宁波试验路沥青混合料由当地拌合站提供,采用 AC-16 连续级配,油石比为 5.0%,碎石级配(10 mm~15 mm):(5 mm~10 mm):(0 mm~5 mm):矿粉 = 25:27:45:3。经检测,该混合料中石油沥青、粗集料、细集料、矿粉的各项指标均符合 JTG F40-2019《公路沥青路面施工技术规范》[9]要求。

咸阳试验路用混合铣刨料级配见表 3。

**Table 3.** Screening results of asphalt surface-semi-rigid base mixed milling material

**表 3.** 沥青面层 - 半刚性基层混合铣刨料筛分结果

筛孔	26.5	19.0	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
通过率%	88.3	72.5	62.7	48.6	28.4	8.3	0

宁波试验路、咸阳试验路与承载板试验使用的土工格室物理参数相同,均由山东省泰安市优格工程材料有限公司提供。土工格室物理参数指标符合规范要求。

##### 4.3. 宁波市试验路施工过程

###### 4.3.1. 原路面处理

针对宁波穿山至好思房高速公路宁波方向 30K + 800 第三车道处,对路面病害区域进行检测后,选

择破损区域进行养护维修。现场铣刨，采用型号为 W-1900 的维特根铣刨机进行铣刨切割，铣刨长度为 5.2 米，宽度为 4 米，深度为 10 cm。先对铣刨区域放样，铣刨方向由路段一端向另一端推进并保证一次完成，使铣刨后路面规整，用吹风机吹去杂土整平路面，铣刨后废弃料集中堆放处理。

#### 4.3.2. 张拉土工格室及摊铺、碾压

本次试验路主要对土工格室加筋路面承载效果进行探究与验证，土工格室施工采用人工张拉和人工填筑方式。由于运输的问题格室需要捆绑，部分格室折叠处不平整，在放置格室的时候需从格室四周尽量拉伸格室，使其充分张开，张拉到位。先在格室边缘填料，起到固定边缘的作用，再在格室中间填料，保持整体的平整度，在摊铺的同时需要人工张拉保证同时进行，以防土工格室由于弹性出现收缩。

碾压分为初压、复压与终压。第一层格室张拉固定后填入填料，填料应高于格室顶端 3 cm~4 cm，使用压路机反复压实。再将第二层格室张拉固定后填入填料，同样使填料高出格室顶端 3 cm~4 cm，压路机进行压实。路面压实度应达到 95% 以上，且保证旧路面与新路面衔接处平整。

不同试验段采用相同格室张拉、摊铺和碾压方式。对于绕城高速公路东段姜山方向 35K + 900 第三车道处，病害为横向裂缝，采用格室加筋的方式，将病害位置放置在土工格室的中间起到更好的加筋作用。

#### 4.4. 咸阳试验路施工工艺

试验段方案与宁波试验段相同，选择两条路段进行试验，铣刨深度为 12 cm，加铺 2 cm 沥青混凝土面层。为了满足机械化施工要求，对施工工艺进行改进，将张拉土工格室与人工摊铺填料改为全部机械摊铺。施工步骤如下：

- 1) 先将左侧车道铣刨，铣刨料装在自卸汽车上备用。左侧行车道铣刨结束后，铣刨机立即进行右侧行车道铣刨工作，同时左侧行车道对铣刨后路面进行清理工作。
- 2) 将铣刨后的路面清理干净，不得存在杂物和积水，侧壁整齐，废渣清扫完全。对清理后的下承层喷洒粘层油，再张拉固定土工格室。
- 3) 将自卸汽车中的铣刨料卸载至格室中，进行摊铺与碾压。左侧和右侧行车道按顺序进行施工。最后路面加铺封层。

#### 4.5. 试验路效果观测

施工结束后，对试验路进行持续观测，对其渗水性能和平整度进行测试，宁波穿山至好思房高速公路试验段及咸阳试验段格室加固铣刨料路面测试结果见表 4 所示。每隔一个月观测路面服役情况，观察是否出现破损等病害。

Table 4. Test road test item

表 4. 试验路测试项目

测试项目	渗水系数 ml/min (宁波)	渗水系数 ml/min (咸阳)	平整度/mm (宁波)	平整度/mm (咸阳)
测试值	283	274	1.0	0.9
标准值	<300	<300	<1.2	<1.2

路面施工完成并通车一个月后，路面使用效果良好，新旧路面衔接处平整。宁波试验路服役一年后出现石料轻微松散脱落现象，主要是因为高速公路交通流量大，重载交通多，格室加固沥青混合料直接作为高速公路路面结构承载能力不够。而咸阳试验段所在公路等级较低，且有沥青混合料面层的保护，使用状态良好，并未出现明显道路病害。

## 5. 结论

1) 保护层的存在对结构层承载能力有提升,且保护层起到了帮助应力扩散的作用,使作用在承载板上的荷载有效传递到格室加筋基层结构中。5 cm 厚度保护层效果好于 3 cm 保护层,但保护层导致道路结构整体厚度增加,且保护层的主要作用是扩散应力和防止土工格室施工时被破坏,因此不适合采用过厚的保护层,推荐采用 3 cm 厚度保护层。

2) 土工格室模量对结构层承载能力有较大影响。高强度(模量 2930 MPa)土工格室相比普通强度(模量 500 MPa)土工格室承载能力有较大提升,荷载 0.6 MPa 时可降低竖向沉降量 60.19%,且荷载越大,高模量格室对填料的约束作用越明显,承载能力提高越多。

3) 格室高度对结构层承载能力有影响,但增加格室高度超过一定数值后对结构承载能力影响极小。高度 20 cm、15 cm 和 10 cm 格室加筋基层承载能力相比,10 cm 格室加筋效果最好,15 cm 次之,20 cm 效果提升最小,此结论与承载板试验结论不符,分析原因是由于模拟时设置固定竖向位移且幅度较大,半刚性基层发挥了主要支撑作用,而实际情况下竖向沉降量无法达到该深度,因此实际路况下仍为高度 20 cm 格室加固效果最好。

4) 相同高度条件下,不同填料基层承载能力对比得出结论:乳化沥青冷再生混合料基层 > 土工格室加固碎石基层 > 格室加固混合铣刨料基层 > 10 mm~20 mm 碎石结构基层。其中无格室碎石基层依靠自身较高的模量短期内迅速为路面提供较高的强度,但随着荷载增加其沉降量急剧增大至完全被破坏。从路面服役年限和成本考虑,在行车荷载重复作用下碎石基层易失稳发生破坏,而土工格室加筋基层提供承载能力时间长,路面使用寿命有较大提升,推荐采用土工格室加筋混合铣刨料作为基层。

5) Abaqus 有限元模拟分析得出路面各结构层力学指标均随荷载增加有不同程度增大,格室加固混合铣刨料后大幅降低沥青路面最大剪应力,降幅可达 19.92%~26.62%,减少路面疲劳开裂同时降低弯沉,延长路面使用寿命,可以作为道路维修养护的一种路面结构。

6) 土工格室加固沥青混合料直接作为高速公路路面结构可以有效提供承载能力,成为维修养护路面的一种手段,但寿命较短。当格室加固混合铣刨料作为三级公路路面结构时,其平整度、透水性满足规范要求并拥有良好的承载能力,可以作为养护道路的方式。

## 参考文献

- [1] 卢硕. 土工格室加固路基机理及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2020.
- [2] 王世立. 桥头过渡段路基差异沉降土工格室加筋处治方法研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [3] Vibhoosha, M.P., Bhasi, A. and Nayak, S. (2021) A Review on the Design, Applications and Numerical Modeling of Geocell Reinforced Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, **39**, 4035-4057. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01774-3>
- [4] Jaehun, A., Hung, N.T., Kyoony, Y.I. and Jeongho, O. (2021) Investigation of Mechanical and Hydrologic Characteristics of Porous Asphalt Pavement with a Geocell Composite. *Materials*, **14**, Article 3165. <https://doi.org/10.3390/ma14123165>
- [5] 徐田雨. 土工格室防护边坡稳定性数值分析[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2013.
- [6] Hosseinian, A.R., Keshmiri, N., Kazemian, S. and Ghareh, S. (2019) 3D Numerical Analysis of Loading Geometry on Soil Behavior Reinforced with Geocell Element. *Journal of Testing and Evaluation*, **47**, 1645-1657. <https://doi.org/10.1520/JTE20180194>
- [7] 俞永华, 谢永利, 杨晓华. 桥头楔形柔性搭板作用性状的仿真[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(6): 29-32.
- [8] 张宏光. 楔形柔性搭板作用性状的模型试验与仿真分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2004.
- [9] 交通部公路科学研究所. JTG F40-2004, 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京: 中华人民共和国交通部, 2004.