DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.02.029 文章编号:1671-2579(2025)02-0256-08

高速公路填方路基预制梁场变形控制措施研究

谢鑫[1],赵军[1],宋战平[2,3*],郭文光[1]

(1.中交第二公路工程局有限公司,陕西 西安 710119;2.西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055;3.陕西省岩土与地下空间工程重点实验室,陕西 西安 710055)

摘要:山岭地区受地形限制,高填方边坡和桥梁等交通形式屡见不鲜,常常由于地形的限制出现桥梁结构预制构件运输困难等问题。针对这种情况,该文提出在高填方路基布置下沉式预制梁场,分析填方路基沉降变形的主要因素,应用多种变形控制措施以控制高填方路基及预制梁场的变形,通过三维数值模型分析填方路基及梁场变形特点。研究结果表明:换填物理性质较差的下层土体,采用物理性质较好的填料层,能够有效减小预制梁场的不均匀沉降;采用沉降控制措施后,预制梁场的整体沉降为20 mm左右,但不均匀沉降仅为3 mm;预制梁场施工对下层填料的影响范围与梁场面积相似。

关键词:高填方路基;下沉式预制梁场;变形控制;数值模拟

中图分类号:U416.1;U445.8 **文献标志码:**A

Deformation Control Measures for Precast Beam Yard on High Fill Roadbeds of Highway

XIE Xin[1], ZHAO Jun[1], SONG Zhanping[2,3*], GUO Wenguang[1]

(1. CCCC Second Highway Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710119, China; 2. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: In mountainous regions, high fill slopes and bridge structures are common due to topographical limitations, often leading to difficulties in transporting prefabricated bridge components. To address this situation, this paper proposed arranging a sunken precast beam yard on high fill roadbeds. The research analyzed the primary factors of roadbed settlement and deformation, applied multiple deformation control measures to manage the deformation of high fill roadbeds and the precast beam yard, and characterized their deformation through a three-dimensional numerical model analysis. The results show that replacing the lower soil layer with poor physical properties with a filler layer with better physical properties can effectively reduce the uneven settlement of the precast beam yard. After implementing settlement control measures, the overall settlement of the precast beam yard is approximately 20 mm, with uneven settlement limited to only 3 mm. The construction impact range of the precast beam yard on the underlying fill layer is similar to that of the beam yard area.

Keywords: high fill roadbed; sunken precast beam yard; deformation control; numerical simulation

0 引言

随着"一带一路"倡议的实施,中国在周边邻国修筑了众多公路,加深了中国与周边各国的关系,并促进了各国经济交流[1-2]。然而,在"一带一路"北线道路修建过程中,由于遍布各种山脉,加之交通基础设施的限制,公路交通修建难度巨大。特别是受山岭地区的地形限制,导致施工现场条件严重受限,且

收稿日期:2025-02-25(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52178393)

作者简介:谢鑫,男,高级工程师. E-mail: 12604959@qq.com

***通信作者:**宋战平,男,博士,教授. E-mail:songzhpyt@xauat.edu.cn

桥隧占比大，预制构件制造及运输不便[3-4]。因此，考虑在填方路基上布置预制梁场，制作桥梁预制构件，以减小山区道路交通对施工的限制，改善施工现场条件，成为提高施工效率的重要措施。

在填方路基上布置桥梁预制梁场，需要考虑路基沉降对桥梁预制构件的影响。黄松等[5]提出当预制梁场发生不均匀沉降时，会影响预制梁体的反拱度制作，对预制桥梁的长期服役性能产生不利影响。因此，在填方路基上布置预制梁场需要满足桥梁预制构件对不均匀沉降的要求。针对填方路基的沉降问题，高均昭等[6]分析了路基土体的弹性模量、黏聚力及内摩擦角对填方路基的沉降影响，发现弹性模量为路基沉降的敏感性参数；冯忠居等[7]对路基变形特性进行研究，发现路基材料的弹性模量对路基变形的影响较大，选择合适的填筑材料和控制压实度能够减小路基的变形；李国锋等[8]对冻岩地区的边坡稳定性进行分析，发现坡高、冻结温度及冻融次数等参数对边坡稳定性影响较大。此外，为了研究多工况的路基沉降变形特征，研究者[9-12]应用有限元软件对路基沉降进行预测。例如，采用 Abquas 软件，借助强度折减法、虚单元强度法等方法对路基沉降进行分析。然而，在填方路基上布置预制梁场，在施工期间预制构件会对路基产生额外的施工荷载，导致路基变形加剧，进而对桥梁预制构件的质量产生影响。因此，为了控制施工期荷载影响下的路基沉降，通常采用强夯、灌浆、换填土层等方式对路基进行处理[13-15]。

本文基于格鲁吉亚 E60 公路 F3 标项目，通过分析高填方路基沉降主要影响因素，结合工程地质及施工条件，采用多种变形控制措施以满足在填方路基上布置预制梁场的变形要求，通过建立三维数值模型，模拟在填方路基上布置预制梁场的临时施工设施，对填方路基施工过程换填软弱下卧层、使用优质碎石填料等措施的有效性进行分析，并探讨预制梁场、传力柱的变形特征，以及预制梁场对填方路基不同填筑层的影响，为同类型项目提供借鉴。

1　填方路基预制梁场施工方案的确定

1.1　工程概况

格鲁吉亚 E60 公路项目 F3 标位于大高加索褶皱系统南部斜坡（北部）和小高加索褶皱带（南部）之间的外高加索山区。施工段落为 K6＋282AT～K13＋050（左幅）、K6＋295TA～K13＋050（右幅），全长 6.768 km、6.755 km，桥隧比约为 72%。由于山岭地形的影响，施工条件受到严重制约，预制桥梁结构运输极为不便，而布置临时施工道路耗时耗力，考虑到桥梁布置主要集中在 K7＋595 标段附近，因此在主线 K7＋595～K7＋785 路基填方段上布置预制梁场，其地质剖面图如图 1 所示。

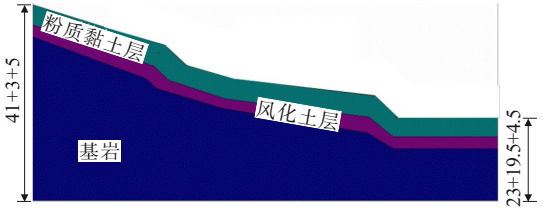


图 1　K7+595~K7+785 横断面地质图（单位：m）

Figure 1　Geological cross-section from K7 + 595–K7 + 785 (unit: m)

1.2　工程重难点分析

根据黄松等[5]的研究，当地基发生较大不均匀沉降时，梁体内部会出现塑性区，严重影响主梁的服役性能。因此，在填方路基上布置预制梁场时，需满足预制梁场对填方路基沉降稳定性的要求。为了明确填方路基沉降的主要影响因素，张俊等[16]指出：在面对路基下卧物理性质不佳的软弱层时，采用换填砂砾垫层等方式处理可有效控制地表沉降；潘隆武等[17]通过监测多层填石路基的施工过程，发现上层填料的施工期荷载对下层填料的二次压实为主要沉降因素，因此提出逐层填筑可以有效控制后期沉降；张硕等[18]通过对高填方边坡加载过程中的变形进行分析，得到随着边坡填方的施工，填方边坡会产生不均匀沉降的结论。

因此，为了满足在填方路基上布设预制梁场的沉降要求，不仅需换填软弱下卧层以防止其变形，还应采用物理性质较好的级配碎石逐级回填路基，以免下层填料在施工期荷载下发生变形，进而导致预制梁场产生不均匀沉降。

1.3　填方路基沉降控制措施

根据对填方路基沉降的主要影响因素的分析，结合项目地质及施工情况，提出以下填方路基沉降措施，以满足填方路基沉降稳定性要求。

1.3.1　土体换填

根据工程的地勘报告，地面最上层为粉质黏土层，此层土体为软土层，沉降量会随着时间的推移逐渐增加，这对土方路基的稳定性以及梁场的不均匀沉降控制极为不利。经现场试验测试，粉质黏土的

物理性能不佳。因此，需要考虑更换上覆粉质黏土层。对于高速路下卧软弱层的填土，根据《公路路基施工技术规范》(JTG/T 3610—2019)[19]，其更换范围为路基填筑至路床以下80 cm，填料选用优质碎石，并对碎石填料进行压密，使密实度达到95%的标准。

1.3.2 梁场沉降控制措施

预制梁场布置在填方路基之上，碎石填料强度优良，但其黏聚力较差，在施工过程中碎石填料受施工荷载的影响产生剪切变形，导致梁场范围内出现较大的不均匀变形。因此，梁场运输主通道和台座采用C25混凝土浇筑，其余场地采用15 cm厚C25混凝土进行硬化。场地纵坡为1%，小桩号一侧较高。排水沟采用砖砌排水沟，并用M7.5砂浆进行抹面。场地硬化的同时施工梁场排水沟。排水沟施工地坪标高以下部分，施工后回填边角，平整至此场地设计标高。

1.3.3 填方边坡沉降控制措施

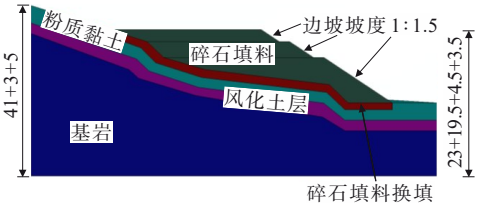
采用多层碎石土填料进行路基填筑，应用分层填筑的方法进行施工，每一层填筑料施工完成后，对填筑料进行振捣压实，防止碎石填料后期产生过大的沉降量。首先进行路基填筑至路床以下80 cm的换填层施工，待施工完成后进行第一层填筑料的施工；接着依次进行第二、三层填筑料的施工，并在每层填料完成施工后对填筑料进行压密，使每层填料层均达到95%的密实度，填筑料边坡坡度设置为1∶1.5，以保证填筑料边坡的稳定性。

1.3.4 填料级配

根据孙开畅等[20]对碎石料的粒径和休止角之间的研究发现，当碎石料粒径为25～50 mm时，随着碎石料粒径的增加，休止角有明显的增大趋势。同时，颗粒级配曲线平滑度越好，相应的休止角越大，堆积体稳定性越好。因此，采用不均匀系数C_u=50、平均粒径d_{50}=50 mm的碎石填料进行填筑，填料的均匀粒径为10～20 cm。

基于上述路基沉降控制措施，确定了施工方案。在K7+595～K7+785段填方路基上设置一个下沉式预制梁场。其道路硬化长168 m，宽30 m，道路硬化面积约5 040 m^2。下沉式预制梁场下沉深度为1.5 m，张拉传立柱中心间距为8.5 m，预制槽的宽度为5.5 m。采用C25混凝土对传立柱及梁场进行0.25 m厚的浇筑，对梁场之外地区进行0.15 m厚的混凝土浇筑，如图2所示。

(a) 项目布置图



(b) 填方边坡横断面地质图(单位：m)

图2 项目布置及横断面地质图

Figure 2 Project layout and geological cross-section

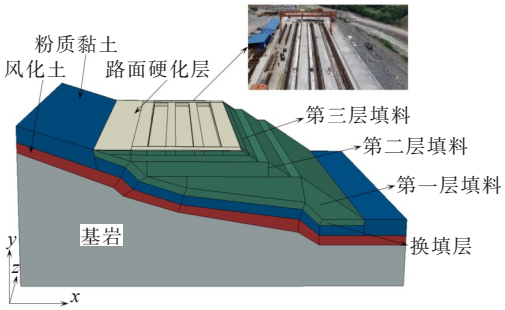
2 填方路基施工过程有限元分析

2.1 模型的建立

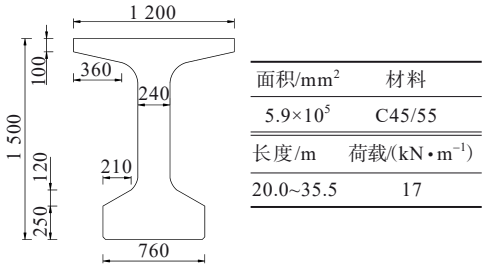
Abaqus软件在模拟路基沉降过程中有较好的应用效果[19]，由于主线K7+595～K7+785位于路基填方段，因此选取此段的地层和地形数据建立模型。三维有限元数值计算模型如图3所示，模型尺寸为120 m×120 m×49 m(外侧)×23 m(内侧)，填方边坡坡度为1∶1.5。在模型的底面、前面、后面及左侧分别施加y、z、x方向的约束。

如图3(a)所示，数值模型中的地层、填料均采用M-C准则。根据现场钻孔信息划分相应的地层，最下层为物理性质较好的基岩，基岩之上为3 m厚的风化土，最上层为5 m厚的粉质黏土。填方路基下的80 cm厚的粉质黏土采用优质碎石填料代替。填方路基共分为3层，采用分层填筑方式，并采用生死单元功能模拟边坡填方施工过程及梁段在填方路基上的施工。对不同材料层间的接触，以位移连续性为控制指标，使其不发生材料间的相对位移。在填方路基模型的基础上进行预制梁场施工过程的模拟，预制梁场范围为107.0 m×25.5 m。

施工阶段，在三槽下沉式梁场上进行预制I梁的制作。因此，选取最不利情况，即三槽梁场上均制作I梁，并将I梁截面面积简化为均布荷载，荷载大小为17 kN/m，如图3(b)所示。将现场钻探得到的土样及岩样进行试验，得到各地层材料参数，如表1所示。



（a）三维模型图



面积/mm²	材料
5.9×10⁵	C45/55
长度/m	荷载/(kN·m⁻¹)
20.0~35.5	17

（b）预制梁荷载简化（单位：mm）

图 3　三维模型图

Figure 3　Three-dimensional model structure

表 1　材料参数

Table 1　Material parameters

类型	E/MPa	c/kPa	φ/(°)	γ/(kN·m^{-3})
粉质黏土	48	17	23	19.5
风化土	173	4	23	20.0
基岩	6 000 000	100	45	25.1
填筑料	173	0	39	20.0
混凝土	28 000	—	—	25.0

2.2　模型验证

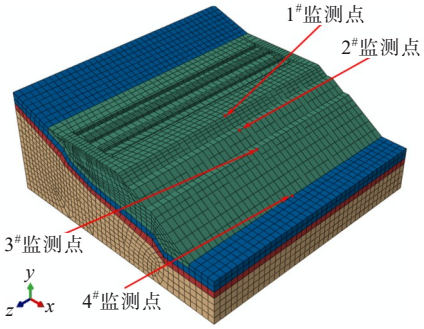
填方边坡的变形集中在边坡坡顶处，当边坡发生滑移破坏时，坡顶最先表现出较大的位移。因此通过对多层填料的坡顶和坡脚的监测，能够有效判断边坡的稳定性及沉降情况。本工程对填料层的坡顶及坡脚处的沉降进行监测，监测点布置及监测结果与模拟结果如图 4 所示。

3　数值模拟结果分析

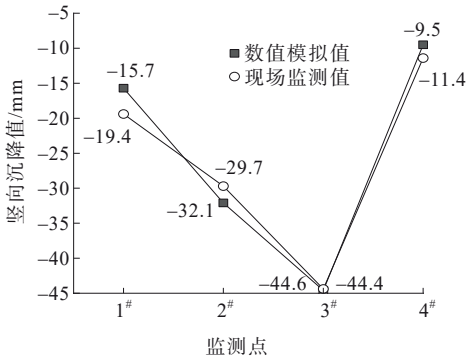
利用 Abaqus 有限元软件创建基岩、风化土、粉质黏土及填筑料等单元部件，基于上述模型采用生死单元法对填料施工过程中的变形进行分析。

3.1　填方路基沉降控制措施有效性分析

梁场的不均匀沉降会影响 I 梁预制过程中的预应力施加、反拱支座等，因此需要采用沉降控制措施来控制路基不均匀沉降。本文采用数值模拟方法验证对沉降控制的有效性。



（a）监测点示意图



（b）监测沉降与模拟沉降对比

图 4　监测点沉降对比

Figure 4　Comparison of settlement at monitoring points

3.1.1　土体换填对预制梁场的影响

结合地勘报告，发现原地表的土体物理性质较差，因此，通过土体换填方法，使用优质碎石填料改善该层土体的物理性质，换填前后三槽预制梁场的变形如图 5 所示。

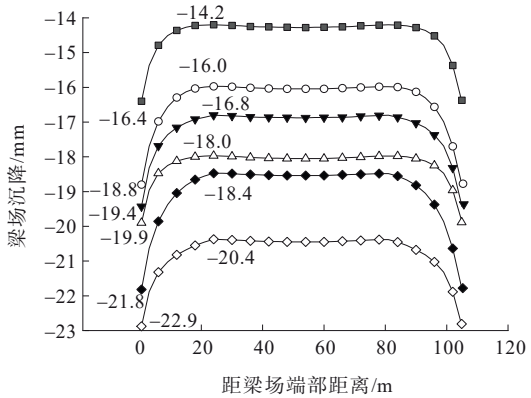


图 5　土体换填对预制梁场变形影响

Figure 5　Influence of soil replacement on deformation of precast beam yard

由图 5 可知：粉质黏土层的换填对预制梁场的沉降有较大影响，土层换填前梁场的整体沉降及不均

匀沉降均大于换填后。换填前1#～3#梁场的不均匀沉降分别为2.6 mm、3.4 mm、2.5 mm，换填后的不均匀沉降分别为2.2 mm、2.8 mm、1.9 mm，换填土体使最大沉降减小约15%。因此，换填粉质黏土层能够有效减小梁场的不均匀沉降。

3.1.2 填筑料物理性质对预制梁场的影响

为分析碎石填料物理性质对梁场不均匀沉降的影响，通过将碎石填料的弹性模量乘以0.8的折减系数，并计算得到梁场沉降，结果如图6所示。

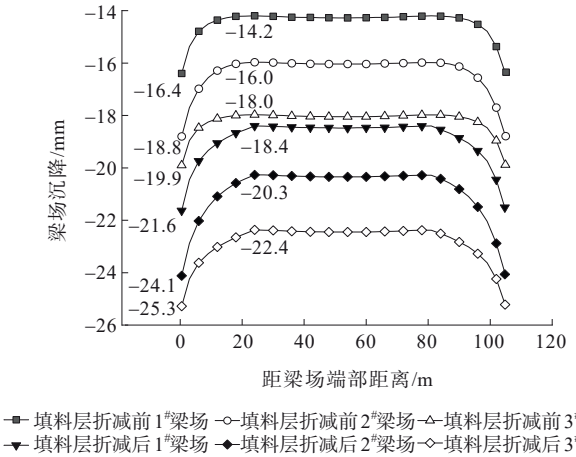


图6 填料层材料参数对预制梁场变形影响

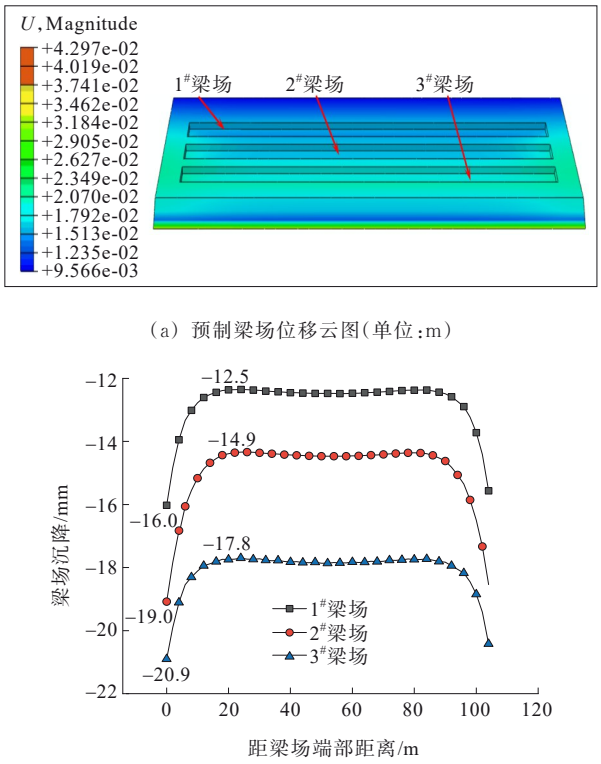
Figure 6 Influence of fill layer material parameters on deformation of precast beam yard

由图6可知：填料层的物理参数对梁场的沉降有较大影响，折减前1#～3#梁场的不均匀沉降分别为2.2 mm、2.8 mm、1.9 mm，折减后的梁场不均匀沉降分别为3.2 mm、3.8 mm、2.9 mm。当碎石填料弹性模量减小20%时，预制梁场最大不均匀沉降约增加25%，因此增加填料层的刚度能够有效减小梁场的不均匀沉降。

3.2 预制梁场变形分析

预制梁场的变形对梁体的预制质量具有至关重要的影响，梁场的不均匀沉降不仅影响预制梁预拱度的设置，还对梁体的应力应变产生不利影响。因此，需要保证预制梁场的沉降处于可控范围内，以此对施工荷载下梁场的变形进行分析，如图7所示。

由图7可知：在施工期荷载作用下，梁场两端布置预应力钢束张拉设备，导致在两端处存在较大的集中荷载，出现了梁场两端的沉降较中间大的现象。随着梁场距边坡的距离减小，填土层变形逐渐增大，导致梁场沉降也逐渐增大。但梁场所产生的不均匀沉降仅为3～5 mm。在施工荷载下，虽然梁场会随着下层土体发生较大沉降，但是对梁场本身而言，所产生的不均匀沉降较小。在梁体预制过程中，梁体质量会受梁场不均匀沉降的影响，但采用多种变形控制措施之后，梁场的不均匀沉降得到了有效控制，远小于文献[21]中所得到结构物所承受最大不均匀沉降12 mm的结论。因此，在采用多种变形控制措施后，梁场对预制梁体的影响可以忽略不计。



（a）预制梁场位移云图（单位：m）

（b）预制梁场变形曲线

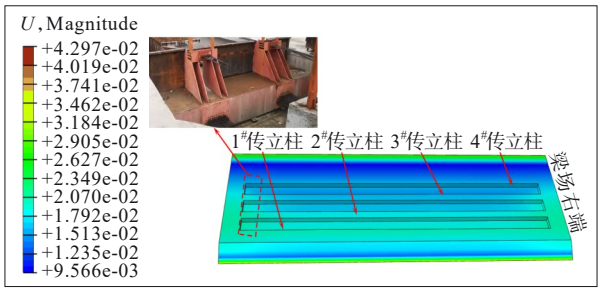
图7 预制梁场变形图

Figure 7 Deformation of precast beam yard

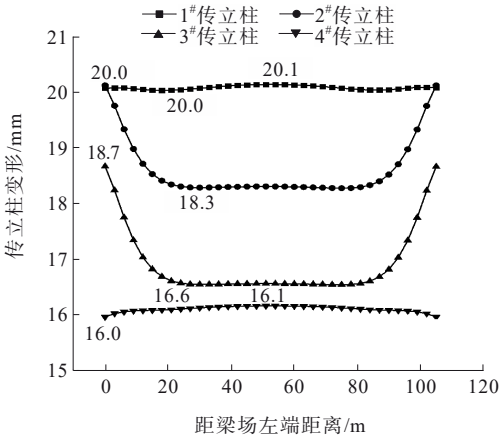
3.3 传力柱变形分析

下沉式框架梁场以传立柱为支撑，在梁场两端布置预应力钢束张拉设备，如图8所示。因此，不仅需要控制梁场沉降以防出现过大不均匀沉降，还需要控制传立柱结构变形，以防在张拉过程中出现传立柱结构的破坏。

由图8可知：1#传立柱与4#传立柱为边传立柱，由于两边传立柱所处位置在预制梁场范围内的边缘，因此预制梁场对1#和4#传立柱的影响较2#和3#传立柱小，所产生的不均匀沉降也较小。而1#传立柱更靠近边坡坡顶，其整体沉降较大。与下沉式梁场相似，传立柱的不均匀沉降控制在2 mm左右，因此传立柱的不均匀沉降导致传立柱失稳破坏的情况可以



（a）传立柱变形云图（单位：m）



（b）传立柱变形图

图 8　传立柱变形图

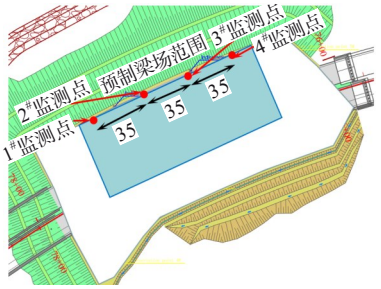
Figure 8　Deformation of transmission column

忽略。所以，在高填方边坡上布置下沉式框架预制梁场的传立柱不均匀沉降较小，保证了预制梁施工过程中的质量。

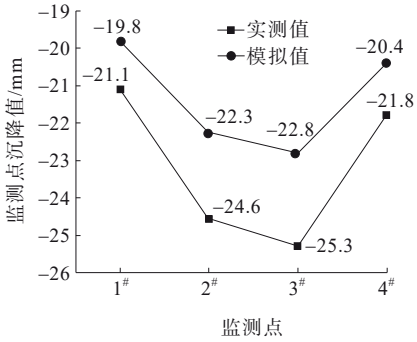
3.4　预制梁场对填方路基变形分析

预制梁场范围内常进行施工作业，导致对预制梁场范围内的沉降变形监测存在诸多不便。为此，监测位于第 3 层填筑料坡顶的 1#传立柱变形。监测点布置图以及监测值与模拟值对比如图 9(a)、(b)所示，不同填料层的土体变形如图 9(c)、(d)所示。

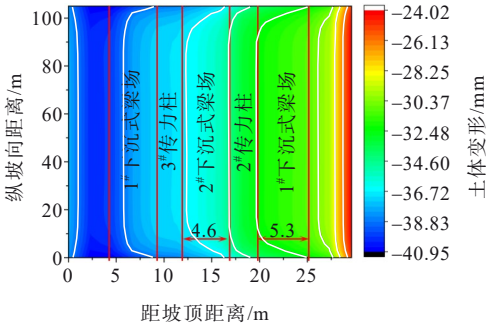
由图 9(a)可知：在预制梁场范围内施工，导致变形监测条件不便，因此对处于坡顶处的预制梁场边线进行监测，监测点之间相隔 35 m。如图 9(b)所示，通过变形控制措施，监测边坡坡顶处的沉降值，发现边坡坡顶处的最大变形为 25.3 mm，不均匀沉降值仅为 4.2 mm。预制梁场存在附加荷载，导致在预制梁场两端处的沉降小于中间的沉降，4 个监测点处变形的监测值与模拟值相差均在 10% 以内，且符合预制梁场两端变形值小于预制梁场中间处的规律。综上所述，采用变形控制措施后，梁场的整体沉降与不均匀沉降均控制在较小范围内，这样可以保证在预制



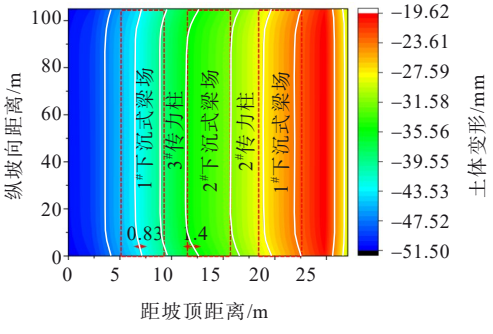
（a）监测点布置图（单位：m）



（b）沉降对比图



（c）第 3 层填料等沉降线图



（d）第 2 层填料等沉降线图

图 9　预制梁场监测点及变形图

Figure 9　Monitoring points and deformation of precast beam yard

梁制作过程中，梁体不会因为梁场所产生的不均匀沉降而导致梁体受力状态的改变。

由图 9(c)、(d)可知：在预制梁场施工过程中，离坡顶距离对填土层的等沉降线有较大影响。沉降在

纵坡方向上随距离的增加先减小后增加。随着离坡顶距离的增加,等沉降线越来越密集,即预制梁场对填土层影响逐渐增加,最大沉降出现在坡脚位置。二层填土的等沉降线在预制梁场范围内所产生的改变分别为0.83 m和1.40 m,均小于下沉式梁场的宽度,而三层填土的等沉降线在预制梁场范围内所产生的改变分别为4.6 m和5.3 m,与下沉式梁场的宽度相似.并且传立柱处的等变形线间距与传立柱宽度相似,相对于下沉式梁场的等变形线更加密集。所以预制梁场对下层填料的影响小于传立柱对下层填料的影响,并且预制梁场对下层填料的影响随距预制梁场垂向距离的增加而逐渐减小。

4 结论

针对山区道路地形受限、运输桥梁预制构件困难的问题,提出在高填方路基上布置预制梁场的施工方案。通过数值模拟分析预制梁场的变形特点及预制梁场对填料层的影响,得到以下结论:

(1)预制梁场的不均匀沉降是高填方路基上布置预制梁场面临的主要问题。为了减小预制路基不均匀沉降,结合预制梁场布置段的地质情况,考虑采用碎石填料换填地表软弱土层;结合预制梁场施工期布置,采用不均匀系数C_u=50、平均粒径d_{50}=50 mm的碎石填料进行分层夯实填筑,能够有效控制路基的不均匀沉降。

(2)由于填方路基施工期及预制梁场施工期荷载的影响,预制梁场的沉降不仅表现为整体沉降,还存在预制梁场范围内的不均匀沉降。通过采用软弱土层换填、改变碎石填料层物理性质等措施,能分别减小路基整体沉降约11%和21%,减小预制梁场的不均匀沉降约15%和25%。

(3)下沉式梁场预制槽在施工期荷载作用下,沉降量随着距坡顶距离的增加而逐渐减小,整体沉降量最大为20 mm。但在施工期荷载作用下,3个预制槽的不均匀沉降均为3 mm左右,预制梁场的传力柱的沉降量随着距坡顶距离的增加而逐渐减小。预制梁场两侧的传力柱以整体沉降为主,预制梁场中间的传力柱表现为整体沉降加不均匀沉降的特点,整体沉降量最大为20 mm,不均匀沉降为3 mm左右,均满足预制梁场的制梁要求。

(4)在预制梁场施工期荷载影响下,随填料层深度的增加,填料层的变形逐渐增加。但填料层变形范围与预制梁场的面积相似,表现出传力柱对填料层的影响大于预制梁场对填料层变形的影响,并且预制梁场对下层填料的影响随着填料层深度的增加逐渐减小。

参考文献:

References:

[1] 狄琛,宋战平.格鲁吉亚公路隧道放坡位置优化[J].现代隧道技术,2020,57(增刊1): 544-555.
DI Chen, SONG Zhanping. Optimization of slope cutting position of the Georgian highway tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology,2020,57(sup 1): 544-555.

[2] JI Z G, LI J H, ZHANG X H, et al. A quantitative assessment method for the correlation between rock mass basic quality and Protodyakonov coefficient[J]. Frontiers in Earth Science,2023,11: 1249866.

[3] 牛彦平,孟旭,刘朋.山岭重丘区预制梁场建设技术探索应用分析[J].建筑结构,2020,50(增刊2): 922-926.
NIU Yanping, MENG Xu, LIU Peng. Exploration and application analysis of precast beam yard construction technology in mountainous and hilly areas[J]. Building Structure,2020,50(sup 2): 922-926.

[4] 罗锦刚,徐仁智,刘玉超.山区高速公路预制梁场规划与设计[J].公路,2018,63(10): 145-148.
LUO Jingang, XU Renzhi, LIU Yuchao. Planning and design of prefabricated beam yard of mountainous expressway[J].Highway,2018,63(10): 145-148.

[5] 黄松,洪宝宁,刘鑫,等.软基差异沉降对现浇梁质量影响数值模拟研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2019,36(1): 1-5,16.
HUANG Song, HONG Baoning, LIU Xin, et al. Numerical simulation study on the effect of uneven settlement on the quality of cast-in-place beam[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition),2019,36(1): 1-5,16.

[6] 高均昭,高璞,杜佐龙.填方路基中影响沉降的关键因素[J].水文地质工程地质,2008,35(4): 88-92.
GAO Junzhao, GAO Pu, DU Zuolong. The key factors affecting settlement in ground fillings[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2008,35(4): 88-92.

[7] 冯忠居,王溪清,芦佳,等.山区加宽路基挡土墙现场试验及数值模拟分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(11): 69-75.
FENG Zhongju, WANG Xiqing, LU Jia, et al. Field test and numerical simulation of retaining wall on widening subgrade in mountain area[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science),2019,38(11): 69-75.

[8] 李国锋,李宁,刘乃飞,等.多年冻岩土区露天矿边坡局部稳定性探究[J].西安理工大学学报,2019,35(1): 53-61.
LI Guofeng, LI Ning, LIU Naifei, et al. Local stability of open-pit coal mine slope in permafrost regions[J]. Journal of Xi'an University of Technology,2019,35(1): 53-61.

[9] 杨三强,段士超,刘娜,等.黄土质高填方路基沉降变形与预测[J].河北大学学报(自然科学版),2020,40(5):454-460.
YANG Sanqiang,DUAN Shichao,LIU Na,et al.Settlement deformation and prediction of loess high fill subgrade[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2020,40(5): 454-460.

[10] 陈国舟,杜子博,田浩东,等.竹筋格栅加固高陡沟壑黄土填方路基数值模拟研究[J].公路,2024,69(1): 1-8.
CHEN Guozhou,DU Zibo,TIAN Haodong,et al.Numerical simulation of loess filled subgrade reinforced with bamboo grids in high and steep gullies[J].Highway,2024, 69(1): 1-8.

[11] 许帅,敖江忠,杨元治,等.路基不均匀沉降对高速列车动力学性能影响分析[J].铁道标准设计,2023,67(12):83-89.
XU Shuai,AO Jiangzhong,YANG Yuanzhi,et al.Analysis of influence of uneven settlement of subgrade on dynamic performance of high-speed train[J]. Railway Standard Design,2023,67(12): 83-89.

[12] 宋金华,要晓迪,杨涛.基于Abaqus的PHC桩网复合地基沉降变形特性研究[J].公路,2019,64(12): 34-41.
SONG Jinhua, YAO Xiaodi, YANG Tao. Research on settlement deformation characteristics of PHC pile-net composite foundation based on Abaqus[J].Highway,2019, 64(12): 34-41.

[13] 程小亮,田文迪,郜梦棵,等.填石路基梁场硬化层利用技术与压实质量控制研究[J/OL].中外公路,1-16[2024-03-18].http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240318.1530.003.html.
CHENG Xiaoliang, TIAN Wendi, GAO Mengke, et al. Research on the utilization technology and compaction quality control of the hardened layer in the beam yard of rock-filled road base[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway,1-16[2024-03-18].http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240318.1530.003.html.

[14] 王艳巧,李一雷,刘康,等.土工袋排列方式对砂性土质边坡加固影响试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(增刊2): 208-213.
WANG Yanqiao, LI Yilei, LIU Kang, et al. Experimental study on influences of inter-layered arrangements of soilbags on reinforcement of sandy soil slopes[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(sup 2): 208-213.

[15] 吴兵,梁瑶,李杰,等.注浆微型钢管桩组合结构在公路滑坡处治中的应用[J/OL].中外公路,1-10[2024-04-23].http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240423.2006.006.html.
WU Bing,LIANG Yao,LI Jie,et al.Application of grouting miniature steel tubular pile composite structure in the treatment of highway landslide[J/OL].Journal of China & Foreign Highway, 1-10[2024-04-23]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240423.2006.006.html.

[16] 张俊,马洪林,朱浮声.银川绕城高速非典型软弱土路基处治方法与效果监测[J].东北大学学报(自然科学版),2011,32(10): 1499-1502,1516.
ZHANG Jun, MA Honglin, ZHU Fusheng. Treating and monitoring lacustrine soft soil subgrade at Yinchuan City ring road[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2011,32(10): 1499-1502,1516.

[17] 潘隆武,张红波.填石路基施工过程沉降变形规律研究[J].公路,2014,59(7): 52-56.
PAN Longwu, ZHANG Hongbo. Study of settlement deformation rules for rock-filled subgrade during construction[J].Highway,2014,59(7): 52-56.

[18] 张硕,裴向军,黄润秋,等.黄土高填方坡体加载过程变形-力学响应特征研究[J].工程地质学报,2017,25(3):657-670.
ZHANG Shuo, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, et al. Loading deformation process and mechanical characterisitcs of high fill loess slope[J]. Journal of Engineering Geology,2017,25(3): 657-670.

[19] 中交第三公路工程局有限公司.公路路基施工技术规范: JTG/T 3610—2019[S].北京: 人民交通出版社股份有限公司,2019.
CCCC Third Highway Engineering Bureau Co., Ltd.. Technical specifications for construction of highway subgrades: JTG/T 3610—2019[S]. Beijing: China Communications Press Co.,Ltd.,2019.

[20] 孙开畅,刘林锋,明华军,等.不同粒径及级配对碎石料休止角影响的试验研究[J].长江科学院院报,2016,33(8): 91-95.
SUN Kaichang, LIU Linfeng, MING Huajun, et al. Experimental research on the influence of particle size and gradation on repose angle of rockfill[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(8): 91-95.

[21] 崔伟,吕高航,刘春阳.高速公路拓宽新路基差异沉降计算分析[J].科学技术与工程,2017,17(34): 326-331.
CUI Wei, LYU Gaohang , LIU Chunyang. Computational analysis of differential settlement on new subgrade in express way widening[J]. Science Technology and Engineering,2017,17(34): 326-331.