

基于山区港口工程地质特点的高填方路基沉降控制技术研究

杨宇帆

云南省港航投资建设有限公司，云南省昆明市，650000；

摘要：随着内河航运向山区河流扩展，山区港口建设中高填方路基沉降控制成了关键的技术问题。本文以山区港口工程地质为基础，对沟谷地貌下地基非均匀支承、填筑体压缩流变以及港口特种荷载等影响因素在路基沉降上的作用机理进行系统的分析。用数值模拟法来探究高填方路基在分级填筑过程中沉降的变化特点和空间分布状况，找到填筑高度与沉降量的关系非常强。经过研究发现，采用土工合成材料加筋、轻质填料置换和复合地基技术可以有效地控制路基的沉降变形。研究成果可以给类似的地质条件下高填方工程的建设提供理论依据和实践指导。

关键词：山区港口，高填方路基，沉降控制，数值模拟

DOI：10.64216/3080-1508.26.03.028

伴随着国家综合立体交通网建设速度不断加快，内河航运建设也开始转向山区河流。山区港口普遍存在着陆域腹地狭窄的问题，必须依靠“削坡填谷”来创造平坦的空间，造成几十米乃至上百米高的高填方路基工程比比皆是。这类路基位于复杂的地质条件下，受到地下水系的发达以及填挖交界刚度的突然变化而造成非常复杂。控制措施不当容易引起路面开裂或者支挡结构失效。本文针对山区港口工程地质特点，结合工程实例和数值模拟，探究高填方路基沉降机理及其控制方法，以期给港口高质量建设提供工程支持。

1 山区港口高填方路基工程地质特性及其沉降机理的分析

1.1 沟谷地貌下地基的非均匀支承和应力集中机制

山区港口道路多沿深切沟谷布置，其地基横断面一般为“V”型或者“U”型。由于地形原因造成路基基底刚度分布极为不均匀，沟谷中心处填筑最高，深厚填土产生巨大自重应力，引发深层地基明显固结沉降；而靠近山体的地方，因为覆盖层薄、下伏基岩刚度大，变形比较小。软土和基岩并存的二元地质结构，造成路基底部支承刚度发生剧烈的变化。路堤自重和港口重载车辆荷载长时间共同作用于路基中时，容易产生剪切应力集中，在此条件下极易出现纵向裂缝。另外山区基岩的节理发育，地下水径流复杂。高填方路基会改变原有的水文路径，汇水软化基底土体，降低其的有效应力，引起潜蚀或者湿陷。对泥质岩、页岩等遇水容易泥化的软岩地基，此过程还会造成软弱滑动面的产生，从而大大增大整体沉降及失稳的风险。

1.2 填筑体自身压缩流变和水力耦合效应

高填方路基的工后沉降是由地基固结和填筑体自身压缩共同作用的结果。超高路基，填料在深部高压下高围压下，由于颗粒的破碎、重排以及压密而造成孔隙比降低，从而产生瞬时和长期的变形。山区填料大多是由就地取材的碎石土或者风化岩块组成的，这些粗粒料虽然初始强度较高，但是在高应力长期作用下会表现出流变性，颗粒棱角破碎和骨架结构的调整都会导致连续数年工后蠕变。由于山区多雨潮湿，所以路基处于干湿循环之中。雨水入渗增加填料自重及产生孔隙水压力，削弱粒间摩擦。如果压实不足，那么渗流就会引起松散区的湿化变形，进而造成局部沉降。因此，沉降控制要充分考虑到填料流变和水力耦合长期的影响。

1.3 津浦特大桥港口特殊荷载对其长期变形的动力响应

与一般的公路不一样，山区港口道路要承担重型集装箱卡车等特种车辆频繁的作用。这些车辆轴载大、启停频繁，产生了很高的循环荷载。动力波在路基中会引起土体的振动液化或者累积塑性变形。在填挖交界或者桥头过渡段，由于刚度变化导致动力冲击系数增大，加快材料的疲劳损坏。长期高频振动还会造成填方体孔隙结构不可逆的重组，从而引起“震陷”。另外港口堆场区长期不均匀的非对称堆载会改变路基内的应力场，从而引起侧向挤出变形。因此，山区港口高填方路基沉降机理具有静动力荷载叠加、流变和固结耦合等复杂非线性的特点，给控制技术提出更高的要求。

2 根据数值模拟得出高填方路基沉降演化的规

律分析

2.1 分级填筑过程中沉降演化特征

采用数值模拟的方式,对路基分层填筑、逐级加载的施工过程进行严格的还原,然后在每一级填筑之后做相应的压实效果和固结停顿的模拟。根据计算结果可以看出,随着填筑层数的增大,竖向位移场也变得越来越积累并逐步向深部扩张。初期下沉多在沟谷底部的软土层内发生,逐渐向两侧边缘山坡蔓延。沉降速率在填筑初期比较快,在填筑之后虽然有一定的减缓,但是累积量一直保持在快速的固结阶段中,并且每隔一个加载瞬间就会出现瞬时沉降跳跃的现象,随后会进入缓慢的固结期。由此可知,施工期速率控制和间歇期设置对控制最终沉降量有十分重要的意义。

2.2 沉降空间分布及填高敏感性

数值模拟对位移场的详细分析表明,路基顶面沉降具有规律性的空间分布模式。沉降量在路基纵、横断面的中心点达到最大值,并沿道路横向及纵向,随着与中心点距离的增加而呈现非线性衰减,整体形态可类比为一个“沉降盆地”。具体而言,在中心轴线两侧约1.5倍填高范围内,沉降衰减梯度最为显著,形成明确的“沉降漏斗区”;超出此范围后,沉降量变化趋于平缓。这一分布规律直观地揭示了路堤自重荷载通过填筑体和地基向下、向四周的应力扩散效应。另外填土高度和最大沉降量成极好的线性正相关关系,说明自重应力是造成沉降的主要原因。给工程实践提供预测依据,可以采用控制填筑高度或者等效超载预压来降低工后沉降的风险。

3 高填方路基沉降控制关键技术及操作实施

3.1 利用土工合成材料加筋增强技术

根据数值模拟得出的路基侧向位移和不均匀沉降问题,采用土工格栅加筋技术可以提高路基的整体刚度和稳定性。土工格栅是高抗拉强度的合成材料,把土工格栅铺设在路基分层填筑面之下,可以和填料颗粒相互咬合互锁,从而增强土体的抗剪强度。加筋作用机理与钢筋混凝土中的约束作用相似,通过限制土颗粒的侧向滑移来使本来松散的填料变成具有一定的抗拉性能的复合体。

施工时在路基底部、分级平台结合部及路床顶面以下80cm处铺设高强双向钢塑土工格栅。格栅的极限抗

拉强度应当满足设计要求,断裂伸长率不能低于3%,使在长期荷载的作用下可以产生很好的变形协调性。基面处理是格栅铺设是否成功的关键步骤,铺设前需要将下承层表面平整、压实,彻底清除尖锐石块和硬质突起物,防止刺破格栅造成强度降低。对局部凹坑用同种填料找平,保证格栅与基面密贴。

土工格栅的铺设需构成一个完整的空间加筋体系。在平面布局上,格栅主受力方向必须垂直于路堤轴线(即沿路基横向)铺设,相邻幅间应保持不小于20厘米的搭接宽度。在竖向剖面上,加筋层需重点布置于路基基底、分级填筑的台阶结合面以及路床顶面以下80厘米的范围内。尤为关键的是边坡处的三维处理:格栅在边坡坡脚处需向内水平延伸铺设一定距离后,再向上反折,包裹住压实填土,形成长度不小于2.0米的反包结构。这种“水平铺设-竖向反包”的构造,使格栅在边坡内部形成一个连续的柔性加筋网络,有效约束浅层土体,把边坡土体包裹起来,在内形成柔性支挡结构,从而抑制边坡浅层滑塌。格栅铺好以后,在二十四小时内迅速完成填筑工作,并防止长时间曝晒使紫外线降解。填筑时用轻型机械从中间向两侧推平,严禁车辆直接在裸露的格栅上行驶或者急转弯,待上覆土层厚度大于30cm之后才能进行强振碾压作业。

3.2 轻质高性能填料置换减载技术

从根本上减少路堤自重,也就是控制地基沉降和填料压缩的第一步。高填方路基的沉降量同填土自重应力有明显正相关的关系,所以用轻质材料代替部分常规填料,在保证路基强度的同时大幅度减小了对地基的作用力。山区港口高填方工程中,在桥台背、挡土墙后和软基路段上推荐使用气泡混合轻质土(泡沫混凝土)或者EPS颗粒混合土,这两类材料自重轻、整体性强、施工方便。

在材料制备上,气泡混合轻质土的湿密度应控制在6到8kN/m³之间,比普通的填土低了1/3左右,减载效果明显。材料配制要经由室内试配来选择水泥、粉煤灰、发泡剂以及水的最适宜配合比,在现场做验证性的试验拌合,保证流动度和固化后的强度达到设计要求。发泡剂的选择以及发泡设备的稳定性都极为重要的一部分,在气泡均匀性以及材料相对密度方面也都至关重要的一环,施工中要加强对质量控制的管理。EPS颗粒混合土就是将预发泡聚苯乙烯颗粒和轻质土或者水泥土按

照一定的比例搅拌在一起,它的密度可以根据工程需要来调节,具有轻质、有一定的抗压强度。

在填筑轻质材料路段和一般土质路基交界处,要设置有效的过渡段来保证新老路基的变形协调。宜在界面开挖台阶搭接,台阶高度一般为0.5~1.0m,坡比一般为1:1~1:2,台阶面应向内倾斜2%~4%以便排水^[1]。轻质土用分层浇筑法施工,单层浇筑厚度控制在0.5m~1.0m内,浇筑时应连续作业、均匀布料,防止扰动已经初凝的下层土体。由于气泡混合轻质土有较好的直立自稳性能,边坡可以采用较陡的坡度或者垂直浇筑,从而大大地缩小了坡脚所占的土地面积,减少山区珍贵土地资源的占用,有着明显的经济效益和社会效益。浇筑完毕后应立即进行覆盖保湿养护,养护期不小于7天,防止表面水分迅速蒸发造成干缩裂缝。轻质土的质量检测项目有湿密度、流动度和28天龄期无侧限抗压强度,必须达到设计的要求才能保证减载的效果以及结构的安全。

3.3 复杂地基的差异化处治和复合地基技术

山区沟谷地基的地质条件一般比较软硬不均、变化快,沿路线纵向常常会在很短时间内出现基岩暴露和深厚软土混合的情况,必须采用精细化的差异化处治措施来消除不均匀沉降隐患。工程实践证明,地基处理方案的选择要根据软弱土层的厚度、分布范围和工程重要程度来决定,做到因地制宜、经济合理。

当高填方路基区周围有软弱土层并且厚度不大(一般小于3m)的时候,可以采用换土垫层法处理^[1]。施工时用挖掘机把地表腐殖土和软弱土层挖掉到稳固的持力层上,开挖边界向外扩张到坡脚外一定距离处,防止软土侧向挤出。基坑底部清理干净后,用回填料配好的碎石、块石或者砂砾等透水性材料进行回填。回填应分层进行,每层松铺厚度控制在30cm左右,配合大吨位振动压路机碾压到密实,压实度不小于96%。碎石垫层能明显提高地基的承载能力,在路基下形成水平排水通道,给上覆软土层提供排水边界,加快软土的固结过程,缩短工后沉降稳定时间。

当软弱土层厚度较大、换填法不经济时,可以采用水泥搅拌桩进行地基加固处治^[2]。水泥搅拌桩借助搅拌机对水泥浆液和原位软土进行强力拌合,用水泥的水化反应来促使软土变硬而硬化成桩。施工前应根据地质勘察资料和室内配合比试验确定水泥掺量、水灰比及搅拌

参数。桩机就位之后,要严格控制钻进速度和喷浆压力,保证桩身质量的均匀性。水泥搅拌桩应按梅花形布置,桩径一般为350~500mm,桩间距按复合地基的承载力来计算确定。桩长须穿过软土层,并深入到下部持力层50cm以上,保证有可靠的端承力^[3]。施工时应采用“四搅两喷”或者“两搅两喷”的工艺,即下钻和提升过程中不断搅拌并分两次喷入水泥浆液,保证桩身水泥土搅拌均匀、无夹层。

桩体施工完毕后,桩顶应达到设计标高,用碎石压路机将桩顶表面20cm厚处压实。褥垫层起着重要的作用,它可以调节桩土之间的荷载分担比例,使桩体和桩间土共同承受荷载。在褥垫层里铺上一层高强土工格栅,可以增大桩顶的应力扩散作用,从而改善桩-网复合地基。该体系可以有效地控制桩、土的应力比,把桩体承担大部分的高填方荷载,从而大大降低总的沉降量和差异沉降,是山区高填方路基地基处理的选择之一。复合地基施工完毕后,需要做静载试验或者动力触探来检验承载力和桩身的完整情况是否符合设计要求。

4 结束语

本文针对山区港口高填方路基沉降问题,对它的工程地质特性及变形机理进行了系统的分析,并用数值模拟的方式探究出沉降演变的规律。研究表明,用土工合成材料加筋、轻质填料置换和复合地基等综合技术措施来控制路基工后沉降是可行的。经过工程实践证明,必须按照具体的地质条件和荷载特性来选择处治办法,重视施工质量的控制以及长远的观测。研究可以探究新的材料运用以及智能监测技术,进而进步改善沉降控制精度、可靠性,并给山区港口建造赋予更好的技术支持。

参考文献

- [1] 蔡云鸥. 高填方路基沉降分析及控制技术研究[J]. 工程技术研究, 2021, 6(7): 90-91.
- [2] 魏义仙. 基于FLAC3D的高填方路基沉降变形因素分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(11): 81-83.
- [3] 王金明, 陈昌彦, 张建坤, 等. 不同类型填方路基沉降监测及沉降分析[J]. 工程勘察, 2019, 47(1): 61-64+73.

作者简介: 杨宇帆(1991.12-), 男, 汉族, 籍贯: 云南省安宁市, 学历: 大学本科, 职称: 工程师, 研究方向: 公路工程。