

高填方路基沉降特性及控制措施分析

马 岩

郑州路桥建设投资集团有限公司 河南 郑州 450000

摘要：高填方路基作为山区高速公路、铁路及机场等重大基础设施建设中的关键组成部分，其稳定性与沉降控制直接关系到工程的安全性、耐久性及运营效率。由于填筑高度大、荷载重、土体压缩性强，高填方路基在施工期及施工后易发生不均匀沉降，导致路面开裂、结构物破坏等工程病害。本文系统分析了高填方路基沉降的形成机理，将其划分为瞬时沉降、主固结沉降和次固结沉降三类，并深入探讨了影响沉降的关键因素，包括填料性质、地基条件、填筑工艺、排水条件及环境因素等。在此基础上，结合工程实践与理论研究，归纳总结了当前主流的沉降控制措施，涵盖地基处理技术（如强夯法、碎石桩、CFG桩、预压法等）、填料优化与压实控制、设置过渡段与反压护道、加强排水系统以及采用土工合成材料加筋等方法。最后，对未来高填方路基沉降预测与智能监测技术的发展趋势进行了展望。研究表明，采取“因地施策、综合治理、动态调控”的理念，是实现高填方路基长期稳定与可控沉降的关键。

关键词：高填方路基；沉降特性；固结理论；地基处理；沉降控制

引言

随着我国交通基础设施建设向西部山区、丘陵地带不断延伸，高填方路基工程日益增多。所谓高填方路基，通常指填筑高度超过10m（部分规范定义为12m或15m以上）的路堤结构。此类路基具有填土体积大、自重荷载高、施工周期长等特点，其沉降问题尤为突出。沉降不仅影响道路线形平顺性，降低行车舒适性与安全性，严重时还可能诱发边坡失稳、桥头跳车、涵洞开裂等结构性病害，造成巨大的经济损失和社会影响。高填方路基沉降是一个复杂的多物理场耦合过程，涉及土力学、岩土工程、水文地质及施工技术等多个学科。传统设计往往依赖经验公式或简化模型，难以准确预测长期沉降行为。近年来，随着数值模拟技术、原位监测手段及新型地基处理工艺的发展，对高填方路基沉降机理的认识不断深化，控制措施也日趋系统化与精细化。本文旨在系统梳理高填方路基沉降的形成机制与影响因素，全面评述现有沉降控制技术的适用条件与效果，并结合工程实例提出优化建议，为类似工程的设计与施工提供理论参考与实践指导。

1 高填方路基沉降机理与分类

1.1 沉降形成机理

高填方路基沉降本质上是土体在外部荷载作用下发生的体积压缩与结构调整过程。根据Terzaghi一维固结理论，饱和黏性土地基在荷载作用下，孔隙水压力逐渐消散，有效应力增加，导致土骨架压缩变形。对于高填方路基，其沉降主要来源于两部分：一是地基土层的压缩变形；二是填筑土体自身的压缩与蠕变。具体而言，

当大量填土加载于天然地基上时，地基土承受附加应力，若地基为软弱土层（如淤泥、淤泥质土、松散砂层等），则会产生显著压缩。同时，填土本身在自重及后续交通荷载作用下也会发生再压缩与侧向挤出，尤其在压实度不足或填料级配不良的情况下更为明显。

1.2 沉降类型划分

根据沉降发生的时间特征与物理机制，高填方路基沉降可分为以下三类：（1）瞬时沉降：指加载瞬间由于土体弹性变形或剪切变形引起的沉降，通常发生在非饱和土或砂性土地基中，完成时间极短（几分钟至几小时）。该部分沉降一般较小，且可部分恢复。（2）主固结沉降：指饱和黏性土地基在孔隙水排出过程中发生的不可逆压缩变形，是高填方路基沉降的主要组成部分。其发展遵循Terzaghi固结理论，沉降速率随时间呈对数或双曲线规律衰减，通常在施工期及施工后1~3年内完成大部分^[1]。（3）次固结沉降：又称蠕变沉降，指主固结完成后，土骨架在恒定有效应力下因颗粒重排、黏土矿物蠕变等机制继续发生的缓慢压缩。次固结沉降虽速率低，但持续时间长（可达数十年），在深厚软土地区不可忽视，尤其对长期运营安全构成潜在威胁。

2 影响高填方路基沉降的关键因素

2.1 地基土性质

地基土的压缩性、渗透性、强度及厚度是决定沉降量的核心因素。高压缩性软土（如淤泥、有机质土）在相同荷载下产生的沉降远大于密实砂土或硬塑黏土。此外，地基土层的非均质性（如夹层、透镜体）易导致不均匀沉降。

2.2 填料特性

填料的类型（如碎石土、砂性土、改良土）、颗粒级配、含水率及压实度直接影响填土自身的压缩模量与抗剪强度。良好级配的粗粒料（如级配碎石）具有高模量、低压缩性，是理想的高填方路基填料。而细粒土（尤其是高液限黏土）易吸水膨胀、失水收缩，且压实后仍具较高压缩性。

2.3 填筑工艺与施工控制

分层填筑厚度、碾压遍数、压实机械类型及施工速率均影响最终压实效果与沉降行为。过快的填筑速率可能导致地基来不及排水固结，引发过大孔隙水压力甚至失稳；而合理的分级加载可促进地基固结，减少后期沉降。

2.4 排水条件

地基与填土的排水路径长度与渗透系数决定了固结速率。良好的竖向与横向排水系统（如砂垫层、塑料排水板）可显著加速孔隙水排出，缩短主固结时间，降低施工后沉降。

2.5 环境与气候因素

降雨下渗会软化填土与地基，降低强度并增加自重；冻融循环在寒冷地区可引起土体结构破坏与不均匀变形；地下水位波动亦会影响有效应力分布，进而改变沉降模式。

3 高填方路基沉降控制措施

3.1 地基处理技术

地基作为高填方路基的承载基础，其力学性能直接决定了整体沉降量与均匀性。因此，对软弱地基进行针对性处理是沉降控制的首要环节。强夯法通过重锤自由落体产生的高能冲击波，使浅层土体产生强烈振动与压密效应，适用于处理碎石土、砂土及低饱和度粉土等地基，具有施工简便、成本较低的优点，但其有效加固深度有限，通常不超过6~8米，且对周边构筑物存在振动干扰，在城市或精密设施附近需谨慎使用。对于深厚软黏土地基，碎石桩技术则更具优势。该方法通过振动沉管或干振成孔后填入碎石并压实，形成具有一定刚度和渗透性的柔性桩体，不仅通过置换作用减少软土占比，还能在桩周形成挤密区，并作为竖向排水通道加速孔隙水消散，从而显著缩短固结周期^[2]。当工程对沉降控制要求极为严格，如临近桥梁台背或机场跑道区域，则常采用CFG桩（水泥-粉煤灰-碎石桩）复合地基。CFG桩属于低强度混凝土桩，与桩间土通过褥垫层共同受力，形成高承载、低变形的复合体系，能有效将荷载传递至深层稳定持力层，大幅降低总沉降与差异沉降。此外，预压法作为一种经典的地基处理方式，通过施加等载或超载

的临时堆载，促使地基在施工期内完成大部分主固结沉降。为提升效率，常与塑料排水板联合使用，形成“排水+加载”协同机制。尽管该方法工期较长，但其效果可靠、适用范围广，尤其适用于大面积软基处理工程。

3.2 填料优化与压实控制

即便地基条件良好，若填料选择不当或压实质量不达标，高填方路基本身仍可能发生显著压缩变形。因此，填料优化与精细化压实控制是抑制填土自重沉降的关键。工程经验表明，级配良好的粗粒土（如级配碎石、砂砾混合料）因其颗粒间嵌挤紧密、孔隙率低、抗剪强度高，是理想的高填方路基填料。在缺乏优质料源的地区，可对本地细粒土进行物理或化学改良。例如，掺入3%~8%的生石灰或消石灰，不仅能降低土体塑性指数、改善压实特性，还能通过离子交换与胶结作用提升长期强度；水泥改良则适用于需要更高早期强度的场合，但需注意控制水泥剂量以避免开裂。压实控制方面，必须严格执行分层填筑制度，每层松铺厚度不宜超过30厘米，并根据填料类型选用合适的压实机械（如振动压路机用于砂性土，凸块碾用于黏性土）。含水率应严格控制在最优含水率±2%范围内，过高会导致“弹簧土”，过低则难以达到最大干密度。同时，应建立完善的压实度检测体系，采用灌砂法、核子密度仪或智能压实监控系统，确保路床（0~80cm）压实度不低于96%，路堤主体不低于94%，从而形成均匀、密实、稳定的填土结构体。

3.3 设置过渡段与反压护道

高填方路基常与桥梁、隧道、涵洞或低填方路段相接，由于结构刚度差异巨大，极易在交界处产生不均匀沉降，引发“桥头跳车”等严重病害。为此，设置过渡段成为不可或缺的设计措施。过渡段的核心思想是实现刚度的渐变过渡，而非突变。具体做法包括：在桥台后一定范围内（通常10~30m）采用轻质填料（如发泡聚苯乙烯EPS块体、泡沫混凝土或气泡混合土），大幅降低附加应力；或采用渐变桩长、渐变桩距的复合地基设计，使复合模量由桥台向路堤方向平缓降低。与此同时，在高填方路堤两侧设置反压护道，是一种经济有效的边坡稳定与沉降协同控制手段^[3]。反压护道通过在外侧增加一定宽度和高度的填土，形成反向压力，有效平衡高路堤产生的侧向推力，抑制地基土的侧向挤出变形。而侧向位移的减小，反过来又降低了因土体侧胀引起的竖向附加沉降，从而间接提升了整体沉降的均匀性。该措施在软基高填方工程中应用广泛，尤其适用于地形受限、无法设置足够宽平台的山区路段。

3.4 加强排水系统

水分是诱发高填方路基沉降加剧的重要诱因。无论是地表降雨下渗，还是地下水上升，都会导致土体软化、强度下降、有效应力减小，进而引发附加沉降甚至失稳。因此，构建“立体化、多层次”的排水体系至关重要。在地基层面，除前述塑料排水板外，还可在路基底部铺设50~80cm厚的透水性砂砾垫层，作为水平排水通道，并每隔一定间距埋设横向软式透水管或HDPE打孔波纹管，将汇集的渗水引出路基范围。在路基结构内部，可结合土工布设置纵向盲沟或渗沟，防止层间积水。在地表，应完善截排水系统，包括在路堑顶设置截水沟拦截山坡汇水，在路堤边坡设置急流槽与排水沟引导径流，并对坡面进行植被防护或骨架护坡，减少雨水冲刷与入渗。通过“上拦、中排、下疏”的综合排水策略，最大限度维持路基土体的干燥状态与力学性能，从根本上削弱水分对沉降的不利影响。

3.5 土工合成材料加筋

土工合成材料的应用代表了现代岩土工程向高性能、轻量化、智能化发展的趋势。在高填方路基中，土工格栅、土工格室等加筋材料被广泛用于提升整体稳定性与控制沉降。其作用机理在于：当填土发生微小变形时，加筋材料因具有高抗拉强度而被拉紧，产生张力反作用于土体，从而约束其侧向位移，提高复合体的抗剪强度与刚度。这种“准粘聚力”效应使得加筋路基在相同荷载下产生的沉降更小、更均匀^[4]。尤其在软土地基上的高陡路堤中，加筋可有效防止填土沿软弱面滑移，避免因局部失稳引发的集中沉降。此外，土工布还可发挥隔离与反滤功能，防止不同性质填料混杂，同时允许水分通过而阻隔细颗粒流失，保障排水通道长期畅通。随着高强聚酯、玻纤等新型材料的出现，土工加筋技术正朝着更高耐久性、更强功能性方向发展，已成为高填方路基沉降精细化控制体系中的重要一环。

4 沉降预测与监测技术发展

传统沉降预测多采用双曲线法、指数函数法或Asaoka法，依赖现场监测数据拟合，外推精度有限。近年来，基于Biot固结理论的有限元/有限差分数值模拟

(如PLAXIS、MIDASGTS)可考虑土体非线性、各向异性及施工过程，显著提升预测能力。同时，自动化监测技术快速发展。静力水准仪、光纤光栅传感器、GNSS位移监测系统及InSAR遥感技术可实现高填方路基沉降的全天候、高精度、远程实时监控。结合大数据与人工智能算法(如LSTM神经网络、支持向量机)，可构建沉降智能预警模型，实现“监测—预测—预警—调控”闭环管理。

5 结语

高填方路基沉降是多种因素耦合作用的结果，其控制需采取系统化、全生命周期的管理策略。本文得出以下结论：高填方路基沉降以主固结沉降为主，次固结沉降在长期运营中不可忽视，需在设计阶段予以充分考虑；地基条件是沉降控制的首要制约因素，应根据地质勘察结果选择适宜的地基处理方案；“优质填料+严格压实+合理排水+加筋补强”的综合措施可显著提升路基整体性能，有效抑制沉降；动态设计理念至关重要，应结合施工期监测数据及时调整填筑速率与控制参数，实现信息化施工。未来研究方向应聚焦于多尺度耦合模型的建立，融合微观土体结构与宏观力学响应；绿色低碳地基处理技术(如生物固化、工业废料再生利用)的开发；基于数字孪生的高填方路基全寿命周期智能运维平台构建。唯有通过理论创新、技术集成与工程实践的深度融合，方能实现高填方路基“零事故、低沉降、长寿命”的建设目标，支撑国家重大基础设施的高质量发展。

参考文献

- [1]刘洋.高填方路基沉降观测及控制措施分析[J].交通世界,2023,(14):79-81.
- [2]柳鹏.高填方公路路基沉降控制新技术探究[J].科技创新与应用,2025,15(33):177-180.
- [3]阳恩慧,张梦亭,郭晓倩,等.高速公路高填方路基沉降监测与预测模型[J].交通科技与经济,2025,27(06):50-57.
- [4]朱妍.高填方路基施工中的沉降控制技术[J].交通世界,2025,(24):68-70.