

风积沙管沟回填水坠法施工工艺应用研究

文 / 王西盟 中交二公局东萌工程有限公司

摘要：风积沙管沟回填施工具有独特性，主要源于风积沙本身的物理和工程特性，如颗粒细小、级配不良、无粘性、易流动、保水性差等，选择最佳施工工艺至关重要。水坠法施工工艺的应用就可以发挥积极作用，文章重点围绕着风积沙管沟回填中水坠法施工工艺的应用，首先介绍了水坠法施工工艺的应用必要性，然后探讨了水坠法施工工艺要点，如施工前准备、分层回填、排水固结、试验检测等，以供同行业人员参考。

关键词：风积沙；管沟回填；水坠法；施工工艺

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.19.018

引言

风积沙主要是指风力搬运堆积形成的松散沙体，主要分布在沙漠、戈壁边缘等地，它的特点是颗粒均匀、级配差、无粘聚力、透水性强、易流动、天然状态下密度低、承载力差。管沟回填是指在管道敷设完成后，将开挖的沟槽用合适的材料回填并压实，以保护管道、恢复地貌、提供支撑和防止冲刷。在风积沙管沟回填施工处理中，水坠法的应用较为普遍，是一种利用水作为介质，使土（沙）体在饱和状态下发生液化、流动、排水固结，从而达到密实目的的特殊施工方法。具体到风积沙管沟回填水坠法施工工艺应用中，技术人员应该准确掌握各个施工要点，同时关注各个常见问题，力求达到最优施工效果，相关研究极为必要。

一、风积沙管沟回填水坠法施工工艺应用的必要性

风积沙管沟回填难度较大，材料特性主导施工方法，风积沙易松散、难压实，风积沙颗粒均匀、无粘聚力，干燥状态下非常松散，传统碾压或夯实效果有限，需要特殊工艺（如振动压实、水坠法/水夯法）才能达到设计要求的压实度。风积沙流动性强，在干燥状态下或受到扰动时（如风吹、机械作业），极易流动，导致回填过程中边坡坍塌、回填沙流失，增加回填量和难度。需要及时覆盖或采取防风固沙措施。风积沙保水性差，渗透性极高，水分迅速下渗。利用水夯法时，需持续补水或控制注水速率，以保证最佳含水率下的压实效

果。风积沙对含水率敏感，存在一个最优含水率范围（通常在8%-12%左右），此时最易压实达到最大干密度，过干则颗粒间摩擦力大，难压实；过湿则易液化、侧向流动。

基于此，风积沙管沟回填时应该选择恰当施工工艺，传统回填方法在应用中表现出了明显的局限性。比如碾压困难，风积沙颗粒间无粘聚力，传统碾压机械（如压路机）难以有效压实，容易产生“橡皮土”现象或过度扰动导致密度不增反降；成本高昂，在偏远沙漠地区，运输重型压实设备成本极高；效率低下，碾压遍数多，效果却不理想；密实度难以保证，难以达到设计要求的密实度（通常要求相对密实度 $D_r \geq 0.65$ 或压实系数 ≥ 0.90 ），导致回填后沉降过大，威胁管道安全；环境影响，重型设备扰动破坏地表脆弱的生态。

水坠法施工工艺的应用就表现出了明显优势，适用性强，特别适用于级配不良、无粘聚力的风积沙；密实效果好，利用水的渗透力和沙粒自重，可实现深层密实，达到较高的相对密实度（ D_r 可达0.70-0.85以上）；设备简单，主要设备为水泵、水管、围堰材料等，便于在沙漠地区运输和操作；成本较低，相比大型碾压设备，设备投入和运输成本显著降低；环境影响相对可控，设备轻便，对地表扰动小；但需关注水资源消耗和泥浆水处理；工效较高，可大面积同时注水作业。水坠法和传统碾压法的对比如下表1所示。

表1 水坠法的应用优势

指标	水坠法	传统碾压法
密实度	$D_r=0.75 \sim 0.85$ （均匀）	$D_r=0.60 \sim 0.70$ （表层高）
成本	降低30%（省机械燃料）	设备运输成本高
工期	缩短20%（可并行作业）	分层碾压耗时长
适用深度	有效处理深层回填	仅表层有效

二、风积沙管沟回填水坠法施工工艺要点

（一）施工前准备

风积沙管沟回填水坠法施工工艺应用前，应该围绕整个项目进行综合分析，明确后续水坠法施工作业需

求，提前做好各方面准备工作，其中比较关键的准备要点如下：

材料检查。风积沙作为管沟回填最为关键的材料，施工前应该进行严格检查，确保其符合应用要求，规避

该方面影响因素。确认风积沙的物理特性，其中颗粒级配应该保障粒径集中在 0.075 ~ 0.25mm，天然含水率通常 < 3%，最大 / 最小干密度也应该通过试验确定，满足管沟回填施工规定，禁用含泥量 > 5% 或含盐量高的沙，避免影响排水固结。

水源保障。风积沙管沟回填水坠法施工中，注水同样也是比较关键的环节，针对可供使用的水源进行严格把控，应该作为准备阶段的重要任务。结合水坠法施工特点，应该确保水源充足，满足单方沙耗水量约 0.8 ~ 1.2m³ 的需要，结合项目所处区域的实际状况，优先选用地下水或处理后河水。针对施工用水进行严格检查，确保其水质 pH 值控制在 6 ~ 9，避免腐蚀管道防腐层。

管道保护。针对风积沙管沟回填项目中的所有管道进行必要保护，避免在水坠法施工过程中出现受损问题。管道下部用细沙或软土铺垫 ≥ 20cm，防止注水冲刷。安装临时抗浮装置（如压重袋），防止饱和沙中管道上浮。

（二）分层回填

风积沙管沟回填采用水坠法时，分层回填是确保回填质量、控制沉降、防止管线上浮或侧移的关键环节。分层回填应该遵循“薄层、慢速、多遍”的基本原则，避免一次性填筑过厚，确保每层都能充分饱和、排水固结，达到设计密实度。具体而言，分层回填应该注重把握好以下几个基本要点：

分层厚度控制。严格控制厚度是最重要的要点之一。每层虚铺厚度应严格控制在 30cm - 50cm 范围内。具体厚度需根据现场试验确定，考虑因素包括：风积沙的颗粒级配（尤其细颗粒含量）、渗透系数、设计要求的密实度、注水方式和能力、排水条件等。分层厚度过薄造成施工效率低，层间结合面过多，可能影响整体性，需做好层间处理；过厚可能导致下部沙体难以充分饱和，排水路径长，固结缓慢，易形成下部松散区或“弹簧土”，注水易冲垮边坡或形成集中渗流通道，沉降量大且不均匀，对管线侧压力突增风险大。分层厚度控制应该确保标识清晰，在管沟侧壁或支撑上清晰标记每层的回填顶面标高线，作为填料和注水的控制基准。

摊铺整平。风积沙管沟回填水坠法施工中，分层填筑还应该注重进行填料的摊铺以及整平处理，力求形成符合施工要求的管沟回填处理条件。分层填筑需要将风积沙均匀摊铺在沟槽内，避免集中堆积。回填应从管线两侧对称进行，防止管线产生侧向位移。填料摊铺到位后，用机械（如小型挖掘机斗轻拍）或人工进行初步整平，使表面大致平整，无明显大坑或凸起，利于均匀注水渗透。避免过度扰动下层已初步稳定的沙层。

注水饱和。风积沙管沟回填中应用水坠法时，注水饱和是核心环节，应该在恰当选择注水方式的基础上，

严格控制注水速度和水量，以便达到最佳饱和效果。当前比较常用的注水方式有以下几种：（1）沟槽注水。在回填层顶面形成一定水深（通常 10-20cm）。适用于宽度较大、边坡稳定的沟槽。需在沟槽上游或分段设置围堰蓄水。（2）插管注水。将带孔水管（如 PVC 花管）垂直插入沙层中，深度至该层底部或更深（若需加速下层排水固结）。通过水泵向管内注水。适用于狭窄沟槽或需更精确控制水量的情况。注水点间距根据渗透性确定，通常 1.5-2.5m 梅花形布置。（3）组合方式。常结合使用，先表面注水初步饱和，再辅以插管注水确保深层饱和。注水时应该控制注水速度，使水能缓慢、均匀地渗入沙层，避免冲刷形成孔隙或水流短路。确保注入水量足以使该层风积沙完全饱和，并有一定的超量水从排水设施（如排水井、滤水管）排出，带走部分细颗粒，促进颗粒重组密实。注水量通常通过试验确定，约为沙体积的 25%-40%。严格控制注水时间，持续注水直至观察到该层表面不再明显下沉，且排水口出水变清，表明细颗粒迁移基本完成。

（三）排水固结

风积沙管沟回填水坠法施工中，排水固结同样也是关键环节，是决定回填密实度和后期沉降控制的核心环节。其本质是通过重力排水使饱和沙层中的孔隙水排出，沙颗粒重新排列压密，形成稳定结构，其中比较关键的施工控制要点如下：

排水系统布设。排水固结处理应该注重布置适宜合理的排水系统，当前比较常用的主要有以下几种：（1）沟底排水层。在管沟底部铺设透水性材料（如级配碎石或粗砂层），厚度 ≥ 20cm。（2）竖向排水体。在回填前预埋滤水管（花管），采用 PVC 打孔管外包土工布，间距 1.5 ~ 2.5m（梅花形布置），深度穿透回填层至排水层。（3）集水井 / 排水沟。在沟槽低洼处或分段设置集水井，连接抽水泵及时排水。结合风积沙管沟回填项目的施工要求以及注水状况，恰当选择最佳排水系统，构建高效排水通道。

排水控制。排水固结还应该注重过程控制，以便达到最佳排水效果的同时，消除可能出现的隐患。排水固结应该严格控制排水时机，与注水协同，注水饱和完成后立即启动排水，避免水分下渗滞留。排水过程需连续不间断，直至固结稳定。排水过程的控制要求如下表 2 所示。排水过程应该定期检查滤水管是否堵塞，轻敲听水声，出水变小时需冲洗或更换。滤水管外包裹的土工布需满足透水性 > 沙层渗透系数 10 倍，且有效阻隔细颗粒。沟底铺设砾石滤层，定期清理淤沙，尤其注水初期高含泥阶段。排水时密切观察沟槽边坡稳定性，出现裂缝或滑移迹象时暂停排水并加固。

表 2 排水控制要求

项目	控制要求
排水速度	初期快速排水（避免沙粒流失），后期放缓（防塌孔）
排水量	≥注水量的 80%，直至出水由浑浊变清澈（细颗粒迁移完成）
水位控制	集水井内水位低于回填层底面 0.5m 以上，形成水力梯度

沉降观测。在风积沙管沟回填水坠法施工作业中，排水固结应该注重实时观测沉降状况。首先，合理布置观测点，沿管沟每 20 ~ 30m 设一个观测断面，地质条件变化处（如软硬交界）需加密。每个断面至少 3 个观测点（管顶中心线、两侧沟肩外 1m 处），必要时增加管底观测点。在施工影响范围外（≥ 30m）设置 2 ~ 3 个稳定基准点，避免振动或荷载干扰。仪器选择精密水准仪（如 DS05 级）配合钢钢尺，误差控制在 ±0.5mm/km，辅助全站仪或沉降观测桩（人工测量），记录时间、荷载（注水量 / 回填厚度）、沉降量、周边裂缝等异常。绘制荷载 - 时间 - 沉降量曲线，判断稳定趋势（如收敛至平缓）。若沉降持续增大或突变，需暂停施工，排查原因（如积水排泄不畅、沙体密实度不足等）。

（四）试验检测

在风积沙管沟回填水坠法施工后，试验检测是确保回填质量满足设计要求的环节。技术人员需结合风积沙的特性（松散、易渗水、颗粒均匀）和水坠法（注水促密）的工艺特点，制定针对性的检测方案。在试验检测时应该控制好检测点位和频率，纵向每 50 ~ 100m 一个检测断面，地质变化处加密；横向管顶中心、管侧 1m、沟边各 1 点（至少 3 点 / 断面）；每回填层（30cm 厚）完成后检测，顶层全覆盖。试验检测应该严格按照设计文件（如 GB 50268-2008《给水排水管道工程施工及验收规范》）以及地方标准（如沙漠地区风积沙回填专项技术要求），对于试验检测结果进行准确判断。

针对风积沙管沟回填水坠法施工要求，试验检测的主要项目及方法如下：（1）压实度检测。常用的有环刀法（适用于浅层，0 ~ 30cm），取样点设置为每 100m 至少 3 处，管顶、管侧、沟边各 1 点。压实度 ≥ 93%，或者按设计要求调整。灌砂法的应用同样较为常见，适用于深层，30cm 以下，检测分层压实效果，每层回填后检测。（2）沉降观测验收。最终沉降量对比施工期沉降数据，总沉降量应 ≤ 设计允许值（如 5cm/100m）。差异沉降的检测同样不容忽视，相邻测点沉降差 ≤ 0.2%L（L 为点间距）。（3）渗透性检测。主要借助于变水头渗透试验，检测风积沙回填后的渗透系数（K），防止因渗透性过高导致管沟渗漏或边坡失稳。控制标准：K ≤

1×10^{-4} cm/s（根据工程要求调整）。（4）承载力检测。轻型动力触探（N10）较为常见，锤击数 ≥ 15 击 / 30cm（适用于风积沙浅层检测）。平板载荷试验同样较为常见，可以检测回填地基承载力特征值（如 ≥ 150kPa）。（5）含水率与干密度。烘干法测定含水率，控制最优含水率范围（风积沙通常为 8% ~ 12%），或者借助于核子密度仪快速检测（需与环刀法校准）。

通过系统化检测，可确保风积沙回填的均匀性、密实性和长期稳定性，避免管沟沉降、渗漏或管道变形。此外，试验检测还应该注重处理特殊问题，比如若压实度不足，可补注水碾压或采用振动夯实；如果渗透系数超标时，需检查排水系统或增设防渗层（如黏土夹层）；如果表面龟裂，含水率过低导致，需洒水补压。

结语

综上所述，风积沙管沟回填水坠法的核心在于利用水的渗透力和自重，使松散沙体饱和液化、排水固结，达到密实效果。技术人员应该着重围绕水坠法施工流程进行精细化把控，确保水坠法施工规范有序，且借助于全面试验检测程序，及时发现异常问题并修复处理。

参考文献

[1] 王宏刚, 王盛兴, 李征. 沙漠地区风积沙路基施工技术研究 [J]. 公路, 2025, (04): 44-52.
 [2] 邓林飞. 复掺纤维水泥改良风积沙抗压强度试验研究 [J]. 铁道建筑, 2024, 64(06): 136-139.
 [3] 郭德尚, 房建宏, 王青志. 水泥和 SH 固化剂复合改性风积沙路基土动力特性研究 [J]. 青海大学学报, 2024, 42(03): 71-76+103.
 [4] 陈全德, 丁亚飞, 冯辉. 沙漠地区风积沙路基结构设计及施工 [J]. 城市道桥与防洪, 2024, (04): 39-42+12.
 [5] 邸金梅. 浅谈风积砂路基施工工艺 [J]. 内蒙古科技与经济, 2020, (08): 96.
 [6] 刘春喜. 风积沙路基水坠法施工工艺与质量控制 [J]. 交通世界, 2018, (26): 52-53.
 [7] 周志华, 孙强. 浅析水坠法和湿法工艺在风沙路基施工中的应用 [J]. 山西建筑, 2018, 44(15): 125-126.