

铁路隧道软岩大变形段施工成本控制研究

樊玲玲

中铁隧道股份有限公司 河南 郑州 450001

【摘要】：软岩大变形是铁路隧道施工中常见的难题，其围岩稳定性差、施工工序多、风险隐患大等特点，容易造成施工成本超支、工期延误，严重制约铁路工程建设效益。本文结合铁路隧道软岩大变形段施工实际情况，从施工工艺优化、资源配置控制、风险预判防控、全过程动态管理四个方面提出相应的成本控制措施，结合工程案例验证措施的可行性和有效性，为同类铁路隧道软岩大变形段施工成本控制提供实践参考。

【关键词】：铁路隧道；软岩大变形；施工成本；成本管控；工艺优化

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.019

1 引言

随着我国铁路建设向山区、丘陵地带发展，铁路隧道工程数量急剧增多，施工环境日趋复杂，软岩地层出现的机率越来越大。软岩强度低、遇水软化、蠕变性强，隧道施工过程中容易产生大变形，造成掌子面坍塌、支护失效等现象，需多次返工加固，造成施工成本大幅度增加。软岩大变形段的施工成本一般比普通地段高出30%以上，在一些极端的例子中甚至会超支50%，不但会对工程的经济效益产生影响，还会影响工程的进度，甚至对施工安全构成威胁。目前，我国关于铁路隧道施工成本控制的研究主要集中在常规地段上，针对软岩大变形这样特殊工况的专项研究比较缺乏，现有的管控措施不够具有针对性，不能适应软岩大变形段施工的不确定性及其复杂性。因此开展铁路隧道软岩大变形段施工成本控制研究，找出成本超支的主要原因，建立科学可行的控制体系，对降低施工成本、提高工程建设效益、保证工程顺利进行有重要的理论价值和现实意义。

2 铁路隧道软岩大变形特性及施工成本构成

2.1 软岩大变形核心特性

铁路隧道软岩大变形的产生，主要是由于软岩自身物理力学性质和施工扰动共同造成的，主要特性体现在三个方面。一是围岩稳定性很差，软岩颗粒间联结力小，遇水后强度急剧下降，掌子面容易发生崩解、流塑的现象，施工中掌子面的坍塌风险很大，需要依托针对性的衬砌支护体系加强防护。二是变形具有时效性、累积性，软岩蠕变性强，隧道开挖后围岩变形不会立即稳定，会随时间不断发展，容易造成支护结构受力过载，产生开裂、变形，需通过预应力锚索等构件抵消变形应力，减少加固处理频次。第三是施工干扰大，软岩大变形段需采用双层初支+超前小导管+预应力锚索或单层初支+超前小导管+预应力锚索等专用衬砌工艺，工序衔接要求高（如超前小导管注浆、预应力锚索张拉与初支施工的衔接），如果某道工序出现问题，就会引起连锁反应，造成工期延误，间接增加施工成本。

2.2 施工成本构成

铁路隧道软岩大变形段的施工成本相比于一般隧道，在原有基础上增加了大量的加固、返修和风险控制费用，总体成本由直接成本和间接成本两大部分组成。

2.2.1 直接成本

施工中直接消耗的费用，占总成本的75%到85%，主要是人工费、材料费、机械使用费和施工措施费。其中材料成本占比最高，核心包括两种衬砌类型所需的支护材料（单层/双层初支的喷射混凝土、钢拱架）、加固材料（超前小导管、预应力锚索、注浆材料）和防水材料，软岩大变形段支护材料消耗量大、周转效率低，且预应力锚索、双层初支钢材等材料单价较高，是直接成本控制的重点。人工成本方面，因两种衬砌工艺工序复杂（如预应力锚索安装张拉、双层初支分层施工），需要专业技术人员和熟练工人，人工投入远大于常规路段。

2.2.2 间接成本

间接成本主要有管理费用、工期延误损失、质量返修费用、安全事故损失等。软岩大变形段施工风险大，且两种衬砌工艺对现场管理、监测预警、安全防护的要求更高，现场管理、监测预警、安全防护等工作量增加，管理费用随之提高；施工中由于围岩变形、坍塌等问题，或因衬砌工艺施工不当（如预应力锚索张拉不到位、超前小导管注浆不饱满），造成已施工段变形重新拆换施工及工期延误现象，产生机械闲置、人工窝工、拆换费用增加等损失，施工成本进一步提高。

3 铁路隧道软岩大变形段施工成本控制措施

3.1 优化施工方案，提升工艺适配性

改进开挖工艺，按照围岩等级选取恰当的开挖方法，软岩大变形严重地段先采用CD法、CRD法、三台阶法等分步开挖工艺，控制开挖进尺，减小对围岩的扰动，降低变形风险，合理安排开挖顺序，缩减围岩暴露时间，改善围岩稳定性。优化衬砌方案，结合变形等级精准选用两种主流衬砌类型，明确施工工艺要点。单层初支+超前小导管+预应力锚索：适用于软岩变形中等、围岩稳定性较好的地段，超前小导管采用 $\Phi 50 \times$

3.5mm 无缝钢管，间距 $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ ，注浆压力控制在 $0.5\text{--}1.0\text{MPa}$ ，提前加固围岩；初支采用 C30 喷射混凝土（厚度 $25\text{--}30\text{cm}$ ）+I20 钢拱架（间距 $80\text{--}100\text{cm}$ ）+锚杆联合支护，锚杆与预应力锚索协同受力，预应力锚索采用 $\Phi 15.24\text{mm}$ 钢绞线，长度 $8\text{--}12\text{m}$ ，张拉控制力为 $150\text{--}200\text{kN}$ ，待初支混凝土强度达到 70% 后进行张拉，抵消围岩蠕变应力。双层初支+超前小导管+预应力锚索：适用于软岩变形严重、围岩稳定性极差的地段，在单层初支工艺基础上，增加一层 C20 喷射混凝土（厚度 $15\text{--}20\text{cm}$ ）和 I16 钢拱架（间距 100cm ），两层初支间铺设防水板，超前小导管加密至间距 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ ，预应力锚索长度延长至 $12\text{--}15\text{m}$ ，张拉控制力提升至 $200\text{--}250\text{kN}$ ，分层施工、分层受力，增强支护承载力。同时合理安排二次衬砌施工时机，待围岩变形稳定后再施工，减少衬砌开裂风险，降低返修费用。

3.2 优化资源配置，提高资源利用率

根据施工工序和进度要求来改善人工、材料、机械的资源配置情况，提高资源的利用率，减少资源消耗成本。人工配置上，精简冗余人员、引进专业技术人员和熟练工人、开展岗前培训、提高作业人员技能水平与作业效率；建立绩效考核机制，把作业效率、施工质量同薪酬挂钩、调动作业人员积极性、降低人工成本。材料管理上建立完善的采购、储存、领用制度，根据施工进度制定准确的采购计划，选择性价比高的供应商，降低采购成本，加强材料储存管理，做好防潮、防晒、防损耗工作，减少材料损耗，实行材料领用登记制度，按需领用，杜绝浪费。从机械配置上看，根据施工工序合理调配机械设备，实行机械共享机制，提高大型机械利用率；加强机械设备维护保养，减少机械故障发生率，延长机械使用寿命，降低机械使用费。

3.3 构建全过程管控体系，实现动态管控

打破成本管控的碎片化格局，创建前期勘察设计、施工过程、后期运维全过程成本管控体系，达到成本动态控制。前期勘察设计阶段增加勘察投入，保证勘察数据准确，优化设计方案，减少后期设计变更，建立设计方案成本评审机制，对比不同的设计方案的成本投入，选择性价比最高的方案。施工阶段建立成本动态监测机制，实时掌握成本支出情况，将实际成本与预算成本进行比较，分析成本超支的原因，及时调整管控措施，加强工序衔接管理，优化施工进度计划，避免工期延误，减少机械闲置、人工窝工等损失，严格控制设计变更，确需变更的，必须进行成本评审，评价变更对成本的影响，防止无序变更造成成本超支。后期运维阶段，建立隧道病害排查制度，定期对病害进行排查并加以整治，减小病害发展所造成的运维成本，总结施工期间的成本控制经验，为类似工程提供借鉴。

4 工程案例分

4.1 工程概况

新建铁路隧道全长 8.2km ，软岩大变形段长 1.3km ，该段围岩主要是泥质页岩、粉质黏土，围岩等级为 V 级，强度低、遇水软化、蠕变性大，施工初期监测围岩收敛量为 $80\text{--}120\text{mm/d}$ ，其中前段 600m 收敛量 $80\text{--}100\text{mm/d}$ （变形中等），后段 700m 收敛量 $100\text{--}120\text{mm/d}$ （变形严重），施工过程中容易出现掌子面坍塌、围岩大变形等现象。该段初始施工方案采用常规台阶法开挖，支护方案为喷射混凝土+锚杆支护，未采用预应力锚索，施工初期出现围岩收敛量过大、支护结构开裂等问题，造成成本超支严重。为解决上述问题，施工单位优化了施工方案，结合围岩变形等级，分别采用两种衬砌类型，采取了针对性的成本控制措施。

4.2 成本管控措施实施

根据该工程软岩大变形的特点，结合两段不同变形等级的围岩，施工单位从方案优化、资源配置、风险控制、全过程控制四个方面开展成本控制。

4.2.1 优化施工方案

开挖工艺统一改为 CD 法分步开挖，控制开挖进尺为 0.6m /循环；衬砌类型按需选用：前段 600m （变形中等）采用单层初支+超前小导管+预应力锚索，超前小导管采用 $\Phi 42 \times 3.5\text{mm}$ 无缝钢管，预应力锚索采用 $\Phi 15.24\text{mm}$ 钢绞线（长度 10m ），初支采用 C25 喷射混凝土（厚度 28cm ）+I20 钢拱架（间距 90cm ）；后段 700m （变形严重）采用双层初支+超前小导管+预应力锚索，超前小导管 $\Phi 60 \times 5\text{mm}$ 无缝钢管，预应力锚索长度延长至 13m ，增加一层 C20 喷射混凝土（厚度 18cm ）和 I16 钢拱架（间距 100cm ），各节点增加 2 根 5m 长 $\Phi 60$ 锁脚锚管，二次衬砌提前施作，待围岩收敛速率 $< 5\text{mm/d}$ 后即施工。

4.2.2 优化资源配置

精简冗余人员，引进熟悉预应力锚索张拉、双层初支施工的专业技术人员，开展岗前培训；精准制定材料采购计划，针对两种衬砌类型的材料需求，批量采购预应力锚索、钢拱架等专项材料，选择优质供应商，加强材料存储防护（预应力锚索做好防锈处理）；合理调配机械设备，配备锚索张拉机、双层初支喷射机械手，推行机械共享，提高机械利用率。

4.2.3 强化风险管控

布置完善的监测网点，除监测围岩收敛、拱顶下沉外，新增预应力锚索应力、初支混凝土应变监测点，实时监测围岩变形动态和衬砌结构受力状态，及时处置风险隐患（如 2 处锚索应力不足，及时进行补张拉）；加强施工质量管控，严格执行工序检验制度，重点检查小导管注浆饱满度、锚索张拉精度、初支厚度，减少返修费用。

4.2.4 构建全过程管控体系

加强前期勘察设计复盘，优化衬砌类型选择方案，严格控制设计变更；实时跟踪成本支出，重点监控两种衬砌类型的材料消耗和人工投入，动态调整管控措施（如优化双层初支材料用量，减少浪费）。

表2 案例中两种衬砌类型工艺参数对比表

衬砌类型	适用段落	超前小导管	预应力锚索	初支参数
单层初支+超前小导管+预应力锚索	前段 600m (变形中等)	Φ42×3.5 mm, 间距 30cm×30cm	Φ15.24m m 钢绞线, 长度 10m	C25 喷射混凝土 (28cm)+I20 钢拱架(间距 90cm)
双层初支+超前小导管+预应力锚索	后段 700m (变形严重)	Φ42×3.5 mm, 间距 20cm×20cm	Φ15.24m m 钢绞线, 长度 13m	C25 喷射混凝土 (28cm)+I20 钢拱架(间距 90cm)+C20 喷射混凝土 (18cm)+I16 钢拱架 (间距 100cm)

4.3 管控效果分析

对上述软岩大变形段施工成本控制措施加以执行之后，隧道软岩大变形段施工成本得到有效的控制，施工进度得以顺利推进，没有发生安全事故以及重大质量问题。具体的管控效果见下表。

表2 优化前后管控效果

管控阶段	总成本 (万元)	直接成本 (万元)	间接成本 (万元)	成本降低率
优化前 (100m 试验段)	896.5	752.3	144.2	-
优化后 (100m 试验段)	730.2	625.8	104.4	18.6%

参考文献:

- [1] 洪阳.高地应力铁路隧道施工成本超支原因与控制措施研究[J].工程机械与维修,2025,(10):104-106.
- [2] 李军.高速铁路隧道施工材料成本高效控制研究[J].内蒙古煤炭经济,2021,(16):148-149.
- [3] 王唤龙,张龙飞,杨昌宇,等.基于模糊层次分析的单线铁路隧道施工经济性评价[J].建筑经济,2021,42(S1):386-390.
- [4] 陈阳.铁路隧道施工物资成本管理[J].工程技术研究,2020,5(14):182-183.
- [5] 曹广.隧道工程成本管控和项目管理研究[J].城市建筑,2020,17(11):196-198.

优化之后该段施工总成本较优化前减少 18.6%，其中直接成本减少 16.8%（主要得益于衬砌类型精准选择，减少了材料浪费和返修成本），间接成本减少 25.3%（主要得益于工期缩短，减少了机械闲置和人工窝工损失），解决了成本超支的问题，提高了施工质量与施工效率，证明了结合两种主流衬砌类型的成本管控措施的可行性、有效性。

表3 段落成本管控效果对比表

段落类型	衬砌类型	优化前单位成本 (万元/m)	优化后单位成本 (万元/m)	单位成本降低率
前段 600m (变形中等)	单层初支型	8.87	7.25	18.3%
后段 700m (变形严重)	双层初支型	9.05	7.40	18.2%
整体 1300m	两种类型结合	8.97	7.32	18.4%

5 结论

软岩大变形的稳定性差、时效性强、施工干扰大等特性，导致材料消耗增加、工期易延误，直接推高直接成本与间接成本，其中材料成本、人工成本及风险防控成本是管控核心环节。当前施工成本控制存在方案适配性差、资源利用率低、风险管控薄弱、全过程管控缺失等问题，是引发成本超支的主要诱因。基于此提出的四维管控措施具有较强的实践适配性，优化施工方案可提升工艺与软岩特性的匹配度，减少返修加固成本；优化资源配置能有效降低人材机消耗，提升利用效率；强化风险管控可规避安全质量隐患带来的额外支出；构建全过程管控体系能实现成本动态调控，破解管控碎片化难题。工程案例表明，实施该套管控措施后，施工总成本可降低 18%以上，兼顾经济性与安全性，可为同类铁路隧道软岩大变形段施工成本控制提供可靠参考。