文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

层状软岩公路隧道非对称大变形下衬砌结构失效模式研究

田宁
四川建筑职业技术大学　四川德阳　618000

DOI：10.32629/ems.v8i10.22549

［摘　要］层状软岩地层在山区公路隧道中分布广泛，其各向异性力学特征容易引发非对称大变形问题，使衬砌结构的安全状态受到威胁。以某高速公路层状千枚岩隧道为工程背景，结合现场监测与数值模拟两类技术手段，分析了非对称大变形的形成机理，归纳了衬砌结构的三类典型失效模式，提出了差异化的支护处治方案。现场监测数据与数值计算结果共同表明，岩层倾角与隧道轴线的空间组合关系决定偏压效应的强弱程度，衬砌失效的形式以边墙挤入最为多见，拱肩拉裂以及底板底鼓也均有出现。处治措施实施后隧道周边收敛速率降低约 62%，各部位最终变形量均控制在允许范围内，相关监测数据与处治经验可供同类层状软岩隧道的设计与施工参照。

［关键词］层状软岩；公路隧道；非对称大变形；衬砌结构；失效模式

国内西部山区公路建设规模逐年扩大，穿越层状软岩地层的隧道随之增多。层状千枚岩与板岩等岩体带有清晰层理结构，不同方向的强度和变形模量相差较多，开挖以后围岩应力重新分布并呈现不对称特征，非对称大变形问题随之产生。这类变形往往表现为两侧边墙收敛量相差悬殊，拱顶下沉与底板隆起并不一致，初期支护局部受力超出限值，二衬施作以后仍可能出现开裂与破坏。以往支护设计大多建立在均匀围压假设之上，对层状岩体各向异性引发的偏压效应考虑不足，施工中频繁出现初支侵限和二衬开裂等病害且处治成本居高不下。根据工程现场的变形监测数据，厘清非对称大变形演化规律并识别衬砌结构的主要失效模式，有助于支护参数选取与施工风险降低。

一、工程概况与变形特征

（一）工程地质条件

某高速公路隧道穿越低山区地貌，隧道采用分离式双向四车道设计，单洞长度与最大埋深分别约 2860m、420m。隧道穿越的地层以中元古界千枚岩为主，岩层之间夹有薄层状的变质砂岩，岩层产状在不同段落变化较大，围岩中主要发育两组节理裂隙。围岩级别以Ⅳ级和Ⅴ级两者为主，其中Ⅴ级围岩段约占隧道总长的 38%。隧道进口段的埋深相对较浅，地表覆盖层的厚度普遍较薄，岩体的风化程度也相对较高；进入洞身以后埋深逐步增大，对应岩体的完整性相对较好，层理面倾角在 35° 至 65° 之间不断变化，局部段落的岩层近于水平产出。场内地下水以基岩裂隙水为主，涌水量受季节影响较为明显，雨季施工时掌子面的渗水量会明显增大。

施工过程中可以发现，隧道左右洞在相同埋深条件下变形特征存在明显差异。左洞进口段施工至 K15+320 断面时左侧边墙的收敛速率持续偏大，右侧边墙测得的变形相对较小，两侧收敛量的差值随掌子面推进持续扩大。现场采用全站仪与收敛计开展监测，相邻监测断面的间距设置为 10m，每个断面布置拱顶下沉测点 1 个、以及周边收敛测线 2 条。

（二）现场监测变形特征

K15+320 断面的监测数据显示，开挖后 15d 内左侧边墙累计收敛量达到 86mm，右侧边墙累计收敛量仅为 32mm 而两侧差值超过 50mm。拱顶下沉累计值为 48mm 而底板隆起量约为 22mm。左侧边墙在开挖后第 3d 达到峰值 12.3mm/d，峰值过后变形转入缓慢衰减阶段；右侧边墙峰值速率仅为 4.7mm/d 且该峰值出现在开挖后第 5d。相关规范要求周边收敛速率连续 3d 小于 0.2mm/d 时方可施作二次衬砌，但该断面左侧边墙在开挖后 45d 时速率仍为 0.8mm/d，远未达到稳定标准。

现场观察可以发现，左侧边墙初期支护的钢拱架出现明显的向内屈曲现象，喷射混凝土表面分布有纵向裂缝且最大宽度约 3mm。右侧边墙支护结构的外观相对完整，未出现明显的开裂或变形异常。这种左右不对称的变形特征在同类层状软岩隧道中较为多见，与岩层倾角和隧道轴线的空间组合关系密切相关。

二、层状软岩隧道非对称大变形机理

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

（一）层状岩体各向异性变形特征

层状岩体的力学性质受层理面控制，垂直层理方向与平行层理方向的变形模量和抗压强度存在明显差异。千枚岩的片理面发育充分且矿物颗粒呈定向排列，垂直片理方向的抗压强度约为平行片理方向的 1.5 至 2.0 倍而变形模量相差 2 至 3 倍。隧道开挖完成以后围岩应力重新分布，不同方向的岩体变形能力不一致,导致隧道周边各点的变形量出现差异。

当岩层倾角较缓时，隧道两侧边墙受到的层理面切割程度并不相同。顺层侧的岩体容易沿层理面发生滑移且变形量较大；逆层侧的岩体受层理面约束较强且测得变形量相对较小。这种由岩层产状引起的天然偏压效应，是层状软岩隧道非对称变形的内在原因。数值模拟结果显示当岩层倾角为 45° 且隧道轴线与岩层走向夹角为 30° 时，隧道两侧边墙的最大主应力差值可达 3MPa 以上,应力分布的不对称性直接导致变形不对称。

（二）非对称变形的形成机制

层状软岩隧道非对称大变形的形成，是多类因素共同作用的结果。岩体本身的各向异性特征构成首要因素，层理面的存在使岩体整体强度有所降低，开挖以后围岩容易沿软弱结构面发生剪切破坏。施工偏载效应构成另一项因素，钻爆法施工时左右侧的开挖进尺和爆破装药量难以保持完全对称，初期支护的施作时间也存在先后差异，变形的不对称程度随之加剧。

围岩压力的传递过程同样存在不对称特征。在层状岩体内部围岩应力容易沿坚硬岩层传递而软弱夹层发生压缩变形。隧道开挖以后上覆岩层的荷载通过层状结构传递到隧道周边，不同部位的受力路径并不相同，导致衬砌结构承受的荷载分布不均。现场监测到的钢拱架应力数据显示，左侧边墙钢拱架的轴向压力比右侧高出约 40%，说明支护结构的受力存在明显的不对称性。

地下水的作用同样不容忽视。层状岩体的渗流特性具有各向异性，地下水容易沿层理面发生渗流并软化软弱夹层，结构面的抗剪强度也随之降低。雨季施工时段层理面充水以后岩体强度出现衰减，对应部位的变形量随之增大，且这种衰减在隧道两侧的程度并不一致，非对称变形的发展过程随之加剧。

三、衬砌结构失效模式与受力演化

（一）衬砌结构受力演化过程

隧道开挖以后围岩变形从临空面向深部逐步发展，初期支护承担主要的围岩压力。随着变形持续发展初期支护的刚度逐渐不足以约束围岩变形，部分支护构件进入屈服状态。当二次衬砌施作以后围岩压力通过初期支护传递到二次衬砌，衬砌结构的受力状态随之发生变化。

在非对称荷载作用下，衬砌结构的弯矩分布与均匀荷载条件下存在实质差异。在均匀围压作用条件下衬砌各截面以轴力为主而弯矩所占比重偏低，使整体结构处于小偏心受压的受力状态。非对称荷载作用下衬砌其中一侧的弯矩随之增大而轴力相对减小,结构可能从大偏心受压状态进入受拉区，混凝土容易出现受拉裂缝。

现场实测的二次衬砌应力数据显示，左侧边墙部位的衬砌混凝土拉应力达 1.8MPa，超过了 C25 混凝土的抗拉强度设计值。右侧边墙衬砌则处于受压状态，约 5.2MPa 的压应力远小于混凝土抗压强度。这种受力状态的不对称性是衬砌结构出现差异化破坏的直接原因。

（二）典型失效模式分类

结合现场病害调查与数值模拟结果，层状软岩公路隧道衬砌结构的典型失效模式可归纳为三类，具体内容如表 1 所示。

表 1　层状软岩隧道衬砌典型失效模式分类

失效模式	发生部位	主要诱因	破坏特征
边墙挤入型	顺层侧边墙	层理面滑移、围岩压力偏大	钢拱架屈曲、喷射混凝土纵向开裂、初支侵限
拱肩拉裂型	拱肩部位	不均匀沉降、弯矩过大	二次衬砌环向裂缝、混凝土剥落
底鼓型	仰拱及底板	底板岩体鼓起、仰拱刚度不足	仰拱开裂、路面隆起、轨道变形

边墙挤入型是层状软岩隧道中最常见的失效形式。当岩层倾角较陡且隧道轴线与岩层走向夹角偏小的工况下，顺层侧边墙的岩体容易沿层理面向洞内滑移，初期支护承受的水平压力过大。钢拱架在轴向压力作用下发生屈曲，喷射混凝土因受拉出现纵向裂缝,严重时初期支护侵入二次衬砌界限，需要进行扩挖处治。

拱肩拉裂型多发生在埋深偏大且岩层倾角较缓的段落。隧道开挖以后两侧拱肩部位的围岩压力分布不均，一侧拱肩承受的竖向荷载偏大使衬砌截面弯矩随之增大。二次衬砌混凝土在弯矩作用下受拉，当拉应力超过混凝土抗拉强度时衬

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

砌表面出现环向裂缝。裂缝通常从拱肩向拱顶方向延伸，裂缝宽度随时间逐步扩展。

底鼓型失效在层状软岩隧道中也较为常见。底板部位的岩体受开挖卸荷影响，应力重新分布以后发生向上的弹性恢复与塑性变形。层状岩体的底板鼓起往往具有不对称性，其中一侧的底鼓量大于另一侧，导致仰拱结构承受不均匀的隆起力，仰拱混凝土表面出现横向裂缝，路面结构随之隆起变形。

四、处治措施与工程效果

（一）差异化支护处治方案

结合层状软岩隧道非对称大变形的特点，施工中采用了差异化支护处治方案。初期支护参数率先得到调整，顺层侧边墙的钢拱架间距由 0.8m 加密至 0.6m 使单侧支护刚度相应增大。锚杆长度从 3.5m 加长至 4.5m 且方向垂直于层理面布置，锚杆对层状岩体的锚固效果随之提高。

二次衬砌结构也得到优化，变形较大的左侧边墙部位二次衬砌厚度由 40cm 增加至 50cm，混凝土强度等级则由 C25 提高至 C30。仰拱初期支护中增加仰拱锚杆，新增锚杆的布设间距缩小至 1.0m，仰拱混凝土厚度从 45cm 增加至 55cm 使底板抗隆起能力随之增强。

施工工序上相应缩短开挖步距，上下台阶错开距离从 15m 调整为 8m，开挖面的临空时间随之减少。仰拱施作位置距离掌子面从 30m 缩短至 20m 并及时封闭成环，围岩变形的持续发展得到控制。对于变形格外严重的段落采用超前注浆加固，通过小导管向掌子面前方的层理面注浆，使岩体的整体性得到提高。

（二）处治效果监测分析

处治措施实施以后，监测人员对 K15+410 断面进行了跟踪监测，并与之前未处治的 K15+320 断面进行对比。监测结果如图 1 所示而处治以后断面的变形发展明显趋缓。

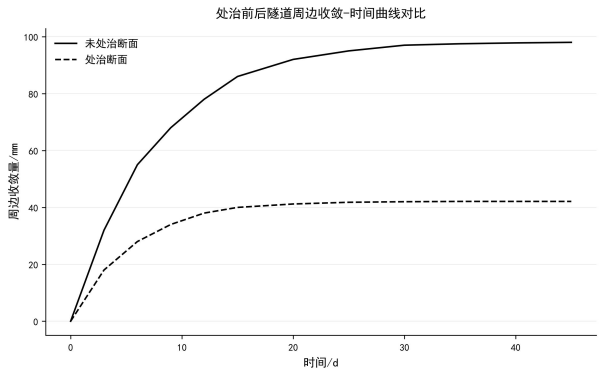

图 1　处治前后隧道周边收敛-时间曲线对比

现场监测数据表明，处治断面左侧边墙最终收敛量为 42mm 而相比未处治断面的 98mm 降低约 57%。右侧边墙收敛量为 28mm 而与未处治断面的 32mm 相比变化不大。处治断面左侧边墙的变形速率峰值为 5.2mm/d 且出现在开挖后第 4d，峰值过后变形的衰减速度较快且开挖后 25d 时边墙速率已降至 0.15mm/d，达到了施作二次衬砌的条件。未处治断面在开挖后 45d 时速率仍为 0.8mm/d，对应变形远未达到稳定状态。

二次衬砌施作以后，对衬砌应力进行了跟踪监测。处治断面左侧边墙的衬砌混凝土拉应力为 0.6MPa，小于 C30 混凝土的抗拉强度设计值且该部位未出现受拉裂缝。右侧边墙压应力为 4.8MPa 且该数值处于安全范围内。仰拱部位的底鼓量控制在 15mm 以内且路面结构未出现隆起变形。差异化支护处治方案使层状软岩隧道的非对称大变形得到控制，衬砌结构的受力状态也随之改善。

结论

层状软岩隧道的非对称大变形，是岩体各向异性与施工偏载以及地下水作用共同导致的结果，岩层倾角与隧道轴线的空间组合关系是决定变形不对称程度的内在因素。衬砌结构的失效模式以边墙挤入型、拱肩拉裂型和底鼓型三类为主，不同模式对应的发生部位与破坏特征存在明显差异。采用差异化支护方案以后顺层侧的支护参数得到加密，对应锚杆的布置方向得到优化，二衬厚度与混凝土强度也得到调整，非对称大变形的发展可以得到控制。现场工程实践表明处治以后隧道周边收敛速率降低约 62%，衬砌结构的受力状态满足安全要求。本次研究以单一隧道工程案例得出结论，在其他地层条件下的适用性仍需验证，后续可结合更多工程实例完善非对称变形的预测方法。

[参考文献]

[1]杨坚. 断层破碎区高地应力层状软岩隧道非对称大变形机制[J].铁道建筑技术, 2025(10): 9-12.

[2]韦猛, 林宇. 层状软岩隧道非对称大变形控制解耦方法[J].成都理工大学学报(自然科学版), 2022, 49(3): 358-369.

[3]孟陆波, 黄意霖, 李天斌, 等. 高地应力层状软岩隧道非对称挤压大变形分级修正方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(1): 147-156.

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.