

浅析高铁工程中后张法预制箱梁裂缝成因及防护措施

刘 伟

中铁九局集团第三建设有限公司 广东 佛山 528000

摘 要：高铁工程中后张法预制箱梁裂缝的成因主要包括材料缺陷、施工工艺不当、预应力控制失准及环境荷载影响，后张法预制箱梁中钢筋布置不到位是引发裂缝的关键原因之一，主要体现为锚下抗裂钢筋缺失、钢筋保护层厚度偏差、钢筋间距控制失准及波纹管定位不当等问题，通过精细化养护管理，可显著降低干缩裂缝与温度裂缝发生率，提升梁体耐久性。

关键词：高铁工程；后张法预制箱梁；裂缝成因；防护

通过精细化管控台座预拱度、波纹管密封性及对称张拉工艺，可有效保障箱梁结构完整性和耐久性。

1 高铁工程后张法预制箱梁裂缝成因

(1) 后张法预制箱梁钢筋布置不到位裂缝原因。锚下抗裂钢筋缺失或布置不精确。局部承压不足：梁端锚区未按设计要求（通常为3~4道井字形网片）设置抗裂钢筋，或因锚垫板、螺旋筋安装阻碍导致钢筋位置偏移，张拉时混凝土局部应力超限，引发锚下开裂。张拉槽口未设抗裂钢筋：设计或施工中槽口区未补充纵向延伸钢筋，降低了混凝土抗拉能力，加剧裂缝风险。钢筋保护层厚度偏差过大。保护层过小：钢筋直接暴露在环境中，易受锈蚀膨胀顶裂混凝土（通常厚度不足5cm），同时增加应力集中风险，导致表面纵向裂缝。保护层过大：超出合理范围（如>5cm）削弱钢筋与混凝土黏结力，在温度变化或干燥收缩时产生不均匀应力，引发开裂。施工扰动：拆模或振捣时钢筋受撞击移位，保护层不均进一步降低混凝土抗拉强度。钢筋间距控制不规范。主筋或箍筋间距混乱：间距偏差超限（设计允许 $\pm 10\text{mm}$ ）导致应力集中，尤其在梁端钢筋密集区，易形成蜂窝孔洞或裂缝源点。分布筋不均匀：底板横向钢筋间距过大（如>设计值），限制混凝土收缩变形，增大收缩应力，沿钢筋方向产生裂缝。波纹管定位及相关问题。波纹管保护层不足：波纹管下方混凝土保护层厚度<5cm时，收缩应力叠加预应力作用，易沿管道方向产生纵向裂缝。波纹管竖向偏位：安装偏差改变零弯矩轴位置，导致梁端偏心受力，引发侧面纵向裂缝。

(2) 后张法预制箱梁混凝土振捣不密实裂缝原因。振捣不密实引发裂缝的成因。钢筋密集区振捣困难，梁端锚区因波纹管、锚垫板及多层抗裂钢筋网（通常3~4道井字形网片）阻挡振捣棒插入，导致混凝土出现蜂窝孔洞，形成裂缝源点。振捣操作不规范，振捣不足：顶

板、腹板倒角等部位漏振，混凝土松散不密实，降低抗拉强度；振捣过度：振捣时间过长导致粗骨料下沉、细骨料上浮，上层浆体干缩性增大，诱发塑性收缩裂缝；插入间距过大：振捣棒间距未按 $\leq 50\text{cm}$ 控制，混凝土内部形成未密实区域。波纹管阻碍振捣路径，波纹管周围混凝土因管体阻挡振捣棒穿透，尤其管道下方保护层薄弱处（<5cm）更易形成纵向收缩裂缝。分层浇筑界面处理不当，分层浇筑时未在下层混凝土初凝前完成上层浇筑，或接缝处未复振，界面黏结力不足产生沉降裂缝。防控振捣缺陷的关键措施。优化振捣工艺，钢筋密集区：梁端采用附着式振捣器辅助插入式振捣，波纹管两侧预留振捣间隙（ $\geq 5\text{cm}$ ）；顶板与倒角：增设扁形振捣棒，确保模板边角振捣全覆盖；分层控制：每层浇筑厚度 $\leq 30\text{cm}$ ，下层初凝前完成上层浇筑并复振。严格操作规范，振捣棒快插慢拔，单点振捣时间15~30秒，以混凝土停止下沉、表面泛浆为准；振捣间距按振捣棒作用半径1.5倍控制（一般 $\leq 40\text{cm}$ ），避免漏振。薄弱部位专项控制，波纹管下方增设震动导管辅助振捣，确保保护层 $\geq 5\text{cm}$ 区域密实；翼缘板根部、腹板倒角等区域延长振捣时间10%~15%，消除骨料离析风险。

(3) 后张法预制箱梁混凝土养护不当裂缝原因。温湿度控制失效，洒水养护不及时或覆盖不全，混凝土初凝后未及时覆盖保湿薄膜或麻袋，表面水分蒸发过快引发塑性收缩裂缝（尤其风速>5m/s或湿度<60%时）；梁体侧面养护洒水不连续，导致干湿交替区域产生不规则龟裂纹。养护周期不足，普通混凝土养护少于7天，或高强度混凝土养护未达14天，水分供应中断导致水泥水化受阻，内部微裂缝扩展为贯穿裂缝。水源质量不合格，使用海水或含氯离子超标的水养护，加速钢筋锈蚀膨胀导致顺筋裂缝。温度应力失控，升降温速率超限，蒸汽养护时升温/降温速率>10℃/h，内外温差>20℃，混凝土

热胀冷缩超过抗拉强度形成温度裂缝。极端气候防护缺失,高温($>35^{\circ}\text{C}$)未采取遮阳降温措施,加剧水分蒸发速率;低温($<5^{\circ}\text{C}$)仍洒水养护,水分结冰膨胀破坏混凝土结构。特殊部位养护失误,梁端锚区保湿不足,锚下齿块因钢筋密集,水分难以渗透,局部干燥收缩引发放射状裂缝。底板与翼缘板养护遗漏,底板下方洒水困难,翼缘板根部积水蒸发不均,产生收缩差导致纵向裂缝。

(4) 后张法预制箱梁预应力张拉不当裂缝原因。后张法预制箱梁预应力张拉不当是诱发裂缝的关键成因,主要体现为张拉工艺失控、锚固系统偏差及混凝土强度不足等问题,张拉工艺失控,不对称张拉导致应力集中,单束张拉或未分阶段对称张拉(如未按“先中间后两侧”顺序操作),造成梁体纵向受力不均,引发侧向弯曲及梁端剪切裂缝。多束一端张拉时未将张拉端交错布置在梁体两端,加剧局部应力超限。张拉力或速率超限,未实测孔道摩阻损失,导致实际张拉控制应力偏离设计值,混凝土局部承压不足而开裂。张拉速率过快($>0.15\sigma_{\text{con}}/\text{min}$),应力骤增超过混凝土瞬时抗拉强度。延伸率偏差过大,预应力筋实际延伸量与理论值偏差超 $\pm 6\%$,反映张拉力失控或孔道摩阻异常,易在薄弱区产生裂缝。锚固系统安装偏差,锚具定位失准,锚垫板与波纹管轴线不垂直,或千斤顶、锚具、预应力筋三者中心线未对齐,张拉时形成偏心受压,导致锚下放射状裂缝。螺旋筋与锚垫板未紧密贴合,削弱抗裂能力。波纹管定位偏差,波纹管竖向偏位改变弯矩轴位置,引起梁体偏心受力,侧面产生纵向裂缝。管道与锚垫板连接不密实,张拉时应力传递不均。混凝土状态不满足张拉条件,过早张拉,混凝土强度或弹性模量未达设计要求(通常强度 $\geq 90\%$ 设计值,弹性模量 $\geq 90\%$),抗拉能力不足,张拉时直接压裂。龄期不足,未考虑混凝土收缩徐变影响(规范要求龄期 ≥ 7 天),收缩应力叠加预应力作用诱发裂缝。温度与约束效应,梁体上拱受约束,张拉后梁体上拱受支座或存梁台座约束,产生横向摩擦力,当压力超混凝土抗拉极限时梁端开裂。养护温差影响,蒸汽养护时降温速率 $>10^{\circ}\text{C}/\text{h}$,残余温度应力与张拉应力叠加引发裂缝。特殊工况处理:梁端增设U形抗裂钢筋网片(间距 $\leq 10\text{cm}$),替换原井字形网片以提升锚区抗裂性;张拉后24h内检查锚垫板后方,发现裂缝立即低压注浆修补。通过精细化张拉控制与锚固系统精准定位,可有效避免应力集中引发的结构性裂缝。

2 后张法预制箱梁施工工艺要点

(1) 台座与模板施工要点。台座设置,基础需分层碾压密实,地基较差时换填处理(密实度 $\geq 96\%$);

台座顶面设预拱度(通常为跨径的3%)并铺8mm厚钢板,两侧预埋角钢嵌橡胶条防漏浆;梁端设扩大基础,宽度超出梁底0.5m以分散张拉应力。模板安装,外模采用5mm厚钢板,内模用竹胶板或胶囊芯模,拼缝宽度 $\leq 1\text{mm}$;新模板需彻底打磨除锈(卫生纸擦拭无锈迹),涂脱模剂后安装;锚垫板与波纹管轴线垂直度偏差 $\leq 1^{\circ}$,端模锚穴位置精准防混凝土破损。

(2) 钢筋与预应力系统安装。钢筋绑扎,在专用胎模上分层绑扎:先底板 $\rightarrow$ 腹板箍筋 $\rightarrow$ 预应力管 $\rightarrow$ 顶板钢筋;保护层用锯齿型塑料垫块,预应力管用“#”形定位筋固定(间距 $\leq 1.5\text{m}$)。波纹管与锚具安装,波纹管接头用套管连接密封,波峰设排气孔、最低处留排水孔;锚垫板后方螺旋筋需紧密贴合,管道两端泡沫封堵防进浆。

(3) 混凝土浇筑与养护。浇筑控制,分层厚度 $\leq 30\text{cm}$,从梁端向跨中对称浇筑;腹板用附着式+插入式振捣器组合;钢筋密集区采用扁形振捣棒,锚区复振防空洞。养护要求,初凝后覆盖塑料薄膜+麻袋,洒水保湿 ≥ 7 天(高强混凝土 ≥ 14 天);蒸汽养护时升/降温速率 $\leq 10^{\circ}\text{C}/\text{h}$,环境温差 $>25^{\circ}\text{C}$ 延迟拆模。

(4) 预应力张拉与压浆。张拉条件,混凝土强度 $\geq 90\%$ 设计值且龄期 ≥ 7 天,弹性模量同步检测。张拉工艺,分阶段对称张拉(先60%初调 $\rightarrow$ 100%终拉),多束时张拉端交错布置;控制张拉速率 $\leq 0.15\sigma_{\text{con}}/\text{min}$,延伸量偏差 $\leq \pm 6\%$ 。孔道压浆,张拉后48h内完成真空辅助压浆,水泥浆强度 $\geq 30\text{MPa}$;压浆时结构温度 $\geq 5^{\circ}\text{C}$,超 35°C 改夜间施工。

(5) 移梁与存梁。移梁条件,压浆强度 $\geq 75\%$ 设计值方可吊移,吊点位置按设计预设。存梁要求,存梁台座基础稳固,支点高差 $\leq 2\text{mm}$,多层存梁时支点垂直对齐。关键控制点:锚垫板后方敲击检查空洞,漏振区需凿除后采用高一等级微膨胀混凝土修补;低温环境改用养护剂+保温棉覆盖防冻裂。

3 后张法预制箱梁裂缝防护措施

(1) 锚固区抗裂强化措施。优化锚下配筋,将锚下井字形抗裂钢筋替换为U形钢筋网片,间距 $\leq 10\text{cm}$ 且距锚具 $\leq 8\text{cm}$,提升局部承压能力;加长张拉槽口纵向水平筋至距端模 $\leq 3\text{cm}$,增设U形筋形成抗裂网片。锚具精准定位,锚垫板与波纹管垂直度偏差 $\leq 1^{\circ}$,千斤顶-锚具-预应力筋三心对齐,避免偏心受压导致放射状裂缝;螺旋筋与锚垫板紧密贴合,增强应力扩散能力。

(2) 混凝土施工控制。材料与配比优化,降低水泥用量,控制水灰比 ≤ 0.4 ,添加减缩剂减少收缩应力;石子最大粒径 $\geq 25\text{mm}$,优化级配提升弹性模量。振捣密

实性保障,腹板采用附着式+插入式振捣器组合,锚区复振消除空洞;波纹管两侧预留振捣通道,钢筋密集区使用扁形振捣棒。

(3) 温湿度协同养护。全过程保湿,初凝后立即覆盖塑料薄膜+麻袋,洒水养护 ≥ 7 天(高强混凝土 ≥ 14 天),防止干缩裂缝。梯度控温防裂,蒸汽养护升温/降温速率 $\leq 10^\circ\text{C}/\text{h}$,环境温差 $> 25^\circ\text{C}$ 时延迟拆模;高温($> 35^\circ\text{C}$)遮阳降温,低温($< 5^\circ\text{C}$)改用养护剂+保温棉覆盖。

(4) 预应力精准张拉。张拉条件严控,混凝土强度 $\geq 90\%$ 设计值且龄期 ≥ 7 天,同条件养护试块检测弹性模量。对称张拉工艺,分阶段对称张拉(60%初调 $\rightarrow$ 100%终拉),多束时张拉端交错布置,避免应力集中;张拉速率 $\leq 0.15 \sigma_{\text{con}}/\text{min}$,延伸量偏差 $\leq \pm 6\%$ 。

(5) 移存梁防护。支点均布防扭裂,存梁支点高差 $\leq 2\text{mm}$,多层存梁时支点垂直对齐,斜撑设于翼板根部非外缘;真空压浆密封,张拉后48h内完成真空辅助压浆,水泥浆强度 $\geq 30\text{MPa}$,压浆温度 $5\sim 35^\circ\text{C}$ 。

(6) 后张法预制箱梁预应力张拉控制方法。张拉条件控制,混凝土强度与龄期,张拉前混凝土强度需达到设计值的75%以上,且拆除限制位移的模板后方可张拉。宜在混凝土龄期满足设计要求时执行,避免早期收缩应力叠加。设备校验与安装,张拉设备(千斤顶、油压表)需定期校验,确保张拉力与压力表读数对应准确。锚垫板与波纹管必须垂直安装,锚具-钢绞线-千斤顶三者中心线严格同心,防止偏压开裂。张拉工艺控制,张拉方式选择,曲线预应力筋或长度 $\geq 25\text{m}$ 的直线筋,采

用两端张拉;长度 $< 25\text{m}$ 的直线筋可单端张拉。压浆过程监控饱满度,曲线孔道波峰处设排气孔。安全与异常处理,操作安全规范,张拉区域设置防护屏障,千斤顶后方严禁站人。油管接头紧固,额定油压下无渗漏。

4 后张法预制箱梁裂缝检测和修复方法

(1) 裂缝检测技术。基本检测,目视普查:多人协同检查梁体表面,记录裂缝位置、长度及走向,重点关注锚固区、张拉槽口及底板纵向波纹管下方。敲击检查:张拉后24h内敲击锚垫板后方,通过空鼓声判断混凝土空洞(裂缝诱因之一)。深度检测,裂缝测深仪:对宽度 $> 0.1\text{mm}$ 的裂缝抽样检测深度,判断是否为贯穿裂缝。管道监控:采用工业内窥镜检查预应力孔道压浆密实度,排除压浆缺陷导致的裂缝。

(2) 修复后验证与防护。封闭效果验证,环氧封闭24h后泼水测试,无渗水即为合格;注浆修复后钻芯取样检查填充密实度。预防二次开裂,修复区域覆盖养护膜保湿 ≥ 7 天,冬施时搭设暖棚维持 5°C 以上环境。存梁支点高差严格控制在 $\leq 2\text{mm}$,避免支点不均引发修复区扭裂。

总之,张拉后24h内敲击检查锚垫板后方,发现空鼓立即注浆;底板采用滴灌养护系统避免干湿不均裂缝。通过材料优化、精准张拉及全周期养护协同控制,可显著降低结构性裂缝风险。

参考文献

- [1]赵旭.高铁工程中后张法预制箱梁裂缝成因及防护措施分析.2022.
- [2]王海云.浅谈高铁工程中后张法预制箱梁裂缝成因及防护策略.2023.