

全寿命周期的PC小箱梁裂缝成因分析及BIM技术的实现

聂国才

安徽省潜山市公路管理服务中心

摘要：随着我国经济水平的持续发展，预制装配上部结构在我国交通基础设施建设中取得了长足的发展和进步。随着我国《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG D62-2004）及我国2008部颁标准图的制定，预制空心板桥、T梁桥及PC小箱梁桥大规模推广应用。PC小箱梁桥因其良好的抗弯和抗扭刚度，大量应用于我国公路及城市桥梁建设中。但随着我国交通流量的急剧增加、混凝土性能的劣化、施工不规范以及超载等因素的影响，PC小箱梁桥服役期出现大量病害。大量桥梁服役期病害检查结果表明，腹板斜裂缝、顶板纵向裂缝、腹板纵向裂缝及底板纵向裂缝已经成为PC小箱梁桥的通用病害。为改善PC小箱梁桥抗裂性能，运用BIM技术建立分析PC小箱梁桥裂缝发展规律及开裂机理，对提升此类桥梁的服役性能和耐久性能尤为重要。

关键词：施工；PC小箱梁；BIM

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2023.24.030

一、研究背景

截至2020年底，中国公路总里程达519.8万km，中国高速公路总里程达16.1万km，高速公路车道里程达60.44万km。在中国通车里程中，已建成并管理桥梁91.3万座，在这些桥梁中，有86%是中小跨径的砼桥。如何保证中小跨径PC小箱梁桥的服役性能是目前我国桥梁建设和养护管理领域亟待解决的重大课题，尤其是PC梁桥，由于裂缝严重和裂缝的普遍性，已引起了业界的广泛重视。

目前，我国箱梁桥在结构设计、施工方面取得了较大的成就，并给出了不同的理论分析与计算方法。然而，受复杂的结构及服役环境影响，水泥混凝土裂缝的防治及耐久性已成为影响桥梁运营与维护的关键问题。根据调研，箱梁桥最易发生的裂缝有：（1）腹板开裂、竖向开裂和水平开裂；（2）顶板的纵向、斜向及侧向裂隙；（3）底板纵向开裂，斜向开裂，横向开裂；（4）横向、纵向和斜向裂缝；（5）锚下劈裂裂缝；（6）沿着预应力束的孔缝和层间的裂纹。

裂缝是影响桥梁安全的重要因素，其产生直接或间接地限制着桥梁的承载能力和耐久性。在服役过程中，结构中的裂纹会对结构的受力性能产生不利影响，也会成为有害介质迅速侵入、加速钢筋腐蚀、引发混凝土耐久性的重要途径。从世界范围来看，混凝土结构的耐久性能一直是土木工程领域中最为严峻和困难的课题。

针对上述问题，本项目拟以桥梁全生命周期为研究对象，从计划，设计，建设，运行，运行，维护等多个方面开展研究。为了使结构在全生命周期内处于最优工作状态，必须对各个阶段的力学特性进行精确的预测。

项目实例证明，在役桥梁通常会受到多种因素的影响，如结构类型、载荷方式等、环境因素、材质等。已有研究表明，现有的单因子预测方法与真实服役情况存在较大差异，要实现对其全生命周期性能的精确预测，因此，必须充分考虑上述因素和灾变影响之间的相互作用。

基于上述考虑，为提升桥梁的承载能力及使用性能，对箱梁裂缝展开全寿命周期的成因机理及控制方法分析，同时创新性将BIM技术与裂缝控制融合，探索全周期、可视化辨识及处治裂缝的产生及发展，都将为加强裂缝控制产生重大意义。这也是加强节能环保，贯彻落实交通运输行业可持续发展理念的要求^[1]。

二、研究的目的和意义

生命周期内的结构设计是关系到人的生存和长期发展的重要问题，是当前工程领域研究的热点，也是当前国内外研究的热点。建立完整的全生命周期理论，是一种行之有效的方法。研究预应力小箱梁桥在设计阶段、施工阶段和服役阶段的受力性能，确保全生命周期内的安全性和可靠性，对于丰富和发展混凝土桥梁的全生命周期设计理论，具有十分重要的现实意义^[2]。

混凝土小箱梁桥的开裂是限制其使用年限的重要原因。但实际工程中，由于对箱梁桥裂缝现象的成因机制还不清楚，且缺少有效的处理措施，使得此类裂缝事件频频发生，给桥梁带来了极大的潜在风险。为此，本项目拟开展全生命周期开裂致灾机制与调控方法研究，并将BIM技术与裂缝控制相结合，探索全程可视化识别和治理开裂的全过程，对强化开裂防治具有重要意义。

三、国内外研究现状

（一）研究现状

在经济高速发展的今天，人们对交通的便利和舒适的要求日益提高，交通基建项目显得特别重要。在现代化的城市交通中，为更好地满足人民的出行需求和日益增加的交通量，桥面板的宽度也在逐步增加。预应力混凝土小箱梁桥具有受力均衡、结构完整度高、经久耐用、工序简单、费用支出小等优势，能较好地解决20-40米跨度桥梁存在的许多难题。

随着预应力混凝土小箱梁桥的设计和施工技术日趋成熟，其服役性能得到改善，所需成本也随之下落，其桥面宽度已可与钢桥媲美。小箱形箱梁腹板预应力采用简支梁张拉，吊运和安装后完成连续梁的建造。近年来，在我国的城市和道路等基础设施建设中，预应力混凝土小箱梁占有相当大的比重。国内有代表性的桥梁有：河北河北大街高架桥、卡子门桥大榭二桥、北仑侧引桥、南京雨花台区卡子门桥、雨花台区卡子门桥，秦皇岛河北高架桥。在美国，日本，德国等国，小箱梁桥也被普遍采用，但其受力机理尚不明确。

（二）BIM技术应用现状

BIM技术在桥梁工程建设中的应用还处在起步阶段，而在运营期的运用则基本处于一片空白。桥梁 BIM 应该能覆盖桥梁从开始到结束的全部信息，包括构造和实际效能性能（损害积累与抗力衰减为基本表现），通过对既有结构进行分析，得出其与原设计结构之间的差异，便于对在役桥的安全性进行评价，并对其进行检修或更换。同时对重要的桥梁部件维修历史进行了追踪和记载，便于现阶段对其进行管理。

四、研究内容和方法

（一）研究内容

为解决PC小箱梁全寿命周期各阶段裂缝产生及控制问题，本课题设置3个

研究内容：

1. 基于全寿命周期PC小箱梁裂缝成因分析：

（1）基于全寿命周期PC小箱梁裂缝特征及成因分析；

（2）预应力张拉及损失对PC小箱梁裂缝产生及发展影响研究；

（3）温度应力以及混凝土收缩徐变对PC小箱梁裂缝产生及发展影响研究；

（4）车辆荷载对PC小箱梁裂缝产生及发展影响研究。

2. 建立PC小箱梁的全寿命周期裂缝控制方法：

（1）预应力状况裂缝控制方法；

（2）混凝土收缩徐变裂缝控制方法；

（3）温度裂缝控制方法；

（4）车辆荷载裂缝控制方法

3. PC小箱梁裂缝成因及控制方法的BIM技术实现：

（1）基于裂缝扩展的参数化快速建模技术；

（2）裂缝产生及发展全流程追踪及溯源技术；

（3）裂缝产生及发展预警控制技术。

（二）解决的关键问题

1. 通过采用现场调研、试验检测以及数值模拟等多种手段，明晰全寿命周期、多因素耦合情况下PC预制小箱梁裂缝产生及发展内在机理；^[3]

2. 结合裂缝成因机理分析结果，针对性构建全寿命周期PC预制小箱梁裂缝控制方法，提升裂缝控制能力；

3. 利用BIM技术的三维可视化优势，实现裂缝可视化辨识及处治，包括追踪、裂缝定位、裂缝信息无损传递及共享等，提升裂缝处治的信息化水平。

五、全寿命周期PC小箱梁裂缝成因分析

（一）试验检测

在役桥梁的服役性能评估、耐久性评估和安全性评估中，试验测试是一种定量判别内部缺陷和外部裂纹的手段。混凝土桥梁在服役过程中，受负载，构造缺陷，材料特性与环境因子等因素的共同作用，会出现开裂、蜂窝状斑点、雨水侵蚀、外层剥落等病害。特别是结构裂缝，成为混凝土桥梁的主要病害特征。对于在运营期内，各部位的最大裂缝程度都有严格的规定，裂缝宽度及分布特性是评估桥梁安全性的一个重要指标。所以，

在砼桥面板的外观检查中，裂缝始终是一个很重要的问题。

（二）箱梁桥设计中开裂原因分析

在箱形件设计中，材料的品质和控制是一个重要环节，其性能直接影响到其水化性能、收缩徐变、热传导等性能。例如：在施工前，必须对钢筋进行除锈、除锈和校正；在使用高性能水泥的过程中，应降低水泥的加入量，并对水灰比进行严格的控制；选用级配较好、含泥率较低的骨料，并根据现场的实际情况，对砼的配合比进行合理的设计^[4]。

（三）箱形梁施工期开裂原因分析

在施工过程中，由于施工误差和施工方法的不合理，预应力混凝土小箱梁在施工过程中产生裂缝。因预应力筋的侧向偏移，使定位筋的间距偏大或偏小，梁体的受力较大，主要是由于预应力筋的漏浆、支座的沉降、产生的应力过大，易产生裂纹。另外，采取不当维护防范、养护时间较短、工程结束后疏于维护也是装配式小箱梁开裂的主因^[5]。

1. 预应力混凝土孔的偏斜

在施工过程中，预应力筋没有按设计要求布设，致使预应力筋的实际位置与设计偏差较大；由于施工人员疏忽，未按规范规定对预埋钢管或预埋钢管的支脚进行处理，造成垫块数量过少，造成混凝土浇注后，管线下弯偏位。张拉预应力筋时，沿钢束方向将出现上下两个方向的径向力，这种径向力将使箱梁底板发生纵向裂缝的可能性增大^[6]。

2. 预应力束的过度张拉

当前，对预应力钢束进行张拉操作，以张拉量控制为主要指标，但各方面因素导致张拉难以达到设计要求，且经常发生张拉过度的情况。如果不能有效地控制箱梁底板的张拉，则会出现张拉力过大、预应力孔偏斜等现象，从而造成箱梁底板出现纵向裂纹。

六、BIM技术在预应力混凝土桥梁中的应用

1. 充分发挥catia框架模型在建模方面的优势，提出了一种新的预应力混凝土箱梁桥结构设计方法，基于这一点，利用定制的脚本语言，对裂纹扩展模型进行了批处理，构建快速，自动化，参数化的生命周期内的裂纹信息模型。

2. 在明确小箱梁裂纹产生和发展的情况下，运用BIM软件还原桥梁的可视化生产和施工过程，同时对裂纹的生成和发展进行可视化跟踪和定位，该方法不仅能为工程提供理论依据，而且能有效地控制裂缝的状态^[7]。

一方面，可以利用BIM三维可视化技术，让团队的技术人员在开始施工之前，梳理施工过程和施工工序的技术流程，突破了CAD难以进行制图的情况，使各个参与方的施工人员的施工技能得到提升，同时也确保了各个专业之间的交流和协作，实现在整个施工过程中，特殊施工技术的可行性和可靠性。之后，施工人员根据虚拟的施工程序和技术来进行建设，保证在施工过程中的实际操作与虚拟施工方法一致。

同时，三维建模方法能够对工程中出现的工程难点、安全、质量等问题进行预测，并利用BIM技术对施工过程中出现的问题进行识别，并提出相应的优化措施，加强技术交底工作的实际效果。

三维可视化平台主要有 Navisworks Manage、fuzor、synchro等，它们都能满足建筑可视化仿真的需要。本文只对 Navisworks管理软件的可视化过程进行了具体的论述。在 Navisworks Manage软件中，通过 Timeliner函数，建立了施工过程与工程过程之间的关系，为工程可视化提供了一种方法。

七、预应力混凝土小箱梁全生命周期抗裂

(一) 设计中的裂纹控制

1. 控制箱形梁的纵向裂缝

小箱梁桥早期存在着板材缺陷、裂缝严重等问题，且因底板厚度不够，且预应力钢束在施工中位置存在偏差，在张拉预应力过程中极易造成底板开裂。因此，为了防止在预应力张拉时出现底板开裂，在设计时，可以适当增加腹板、底板的厚度^[8]。另外，还可以通过在箱梁中设置适当的横向钢筋，对纵向预应力管线进行加密，并在适当位置设置钢筋，改善其横向承载能力。

2. 防止局部受压部位开裂的措施

针对预应力小箱梁桥在张拉索梁锚固区及支座底部等部位，一方承受过大而另一方容易开裂的问题，提出基于该结构的局部受压计算方法，并在该结构上布置钢筋网，以提高其抗裂能力。

3. 主应力裂纹的控制

应力裂缝有弧形裂纹、剪切裂纹和扭转裂纹。因此，应深入研究箱梁桥在整个施工过程中的应力状态。并在纵向和横向分别布置预应力筋和正弯矩预应力钢束，并在容许的地方安装合适的锚定带，确保该建筑的抗拉、剪力和扭转性能良好，防止裂纹的产生。

(二) 施工阶段裂缝控制方法

1. 物料控制措施

按以下原理布置防裂混凝土：

(1) 在选择水泥时，要尽可能地按照符合既定的施工标准和混凝土强度，并且不能使用早强型水泥；

(2) 骨料宜选用坚固、强度高、级配好的洁净骨料，并对骨料级配和形状进行严格控制；

(3) 尽量选择质量较好的矿渣或粉煤灰等矿物掺合料，采用质量较好的引气剂；

(4) 选用高效超塑化剂，减少拌和水用量；

(5) 在混凝土中应限制胶凝材料标准，并谨慎使用普通硅酸盐水泥。

2. 混凝土浇筑控制方法

在浇注混凝土时，要注意以下几点：

(1) 预应力混凝土小箱梁桥的施工方法是：按照底板、腹板、顶板的次序进行浇筑。小箱梁的施工过程中，要有专人负责监控，避免浇注质量问题的发生。在部分震荡器无法触及的部位，如模板角部，要用插钎辅助振捣。小箱梁顶部采用平板振动棒振捣施工。

(2) 在小箱梁桥浇筑完毕后，对其顶部进行抹

光，并用笤帚在混凝土凝固前进行拉毛。

(3) 在梁内有螺栓紧固件、预压管线及锚垫板后面的加强筋密度较大的地方，要仔细细致地振捣，避免振捣器与预应力管道和预埋件发生碰撞，造成不必要的损坏和错位，保证混凝土的密实程度。

(4) 在夏天进行混凝土浇筑时，必须将砼拌和料的温度控制在32℃以下。

八、技术优势

(一) 技术进展

1. 基于全寿命周期的 预应力混凝土小箱梁开裂机理研究；

2. 基于全寿命周期 预应力混凝土小箱梁施工中的裂隙处理；

3. 在BIM技术基础上，构建可视化跟踪、裂纹位置识别、裂隙信息的传递的三维可视化技术。

(二) 主要创新点

1. 本课题将从全生命周期角度，揭示 PC装配式小箱梁裂纹萌生和扩展的成因及影响因素；

2. 根据该项目的研究成果，创新地提出了一种新的控制措施，为改善预应力管束密实程度，降低预应力损失，对提高预应力混凝土小箱梁的工程质量具有重要意义。

九、结论

PC小箱梁桥因其良好的抗弯和抗扭刚度，大量应用于我国公路及城市桥梁建设中。但随着我国交通流量的急剧增加、混凝土性能的劣化、施工不规范、超载等因素的影响，PC小箱梁桥服役期出现大量病害。大量桥梁服役期病害检查表明，腹板斜裂缝、顶板纵向裂缝、腹板纵向裂缝及底板纵向裂缝已经成为PC小箱梁桥的通用病害，因此对其裂缝的成因研究显得尤为重要。

参考文献

[1] 中华人民共和国交通运输部. 2016年交通运输行业发展统计公报[J]. 交通财会, 2017(5): 92-96.

[2] 中交公路规划设计院. 预应力混凝土梁桥裂缝成因分析研究报告[R]. 北京, 1998.

[3] 刘振伟, 董鹏. 锚下控制应力对PC小箱梁裂缝发展的影响及控制方法研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(08): 16-24.

[4] 贺华刚. 大跨PC连续刚构桥箱梁裂缝成因与控制措施研究[D]. 重庆交通大学, 2009.

[5] 田仲超. 破损预应力小箱梁裂缝开展趋势试验分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(03): 159-161.

[6] 李林汉. 公路桥梁预应力混凝土小箱梁裂缝原因的分析与预防[J]. 长沙铁道学院学报(社会科学版), 2011, 12(03): 199-200.

[7] 袁逸. 预制预应力混凝土小箱梁裂缝的分析与预防[J]. 山西建筑, 2006(05): 124-125.

[8] 孙照玉. 高寒地区预制小箱梁裂缝成因及机理分析[D]. 兰州交通大学, 2016.