

# 钢悬臂拓宽混凝土盖梁的数值模拟与模型试验研究

李杰

(广东交科检测有限公司, 广东 广州 510550)

**摘要:**该文提出一种桥梁下部结构拓宽方法,即采用钢悬臂拓宽混凝土盖梁的方法,利用正交试验及数值模拟分析研究了其受力性能,分别对比分析了试验结果与数值模拟结果的荷载—挠度关系、钢结构受力及混凝土结构受力。分析结果表明:试验结果与数值模拟结果一致,验证了数值模拟计算的准确性;揭示了钢—混组合悬臂结构的破坏机理。对盖梁整体进行了力学性能分析,结果表明:拓宽后整体盖梁的混凝土结构、钢悬臂各部位、预应力钢束、螺栓等传力部件皆满足对应规范的受力要求。表明该文提出的钢悬臂拓宽混凝土盖梁以进一步拓宽桥面的新式拓宽方法可行可靠。

**关键词:**桥梁拓宽;钢悬臂;混凝土盖梁;正交试验;有限元分析

旧桥拓宽改造可充分利用原桥结构,节省大量资源且工期较短,对现有交通影响较小。吴文清等通过对中国高速公路桥梁拓宽工程经验教训的讨论,针对沪宁高速公路的桥梁提出了拓宽总体方案,并通过实践进行了方案的有效应用;常规的桥梁加宽方法有复桥拓宽法、悬臂挑梁加宽法、斜撑杆加宽法,聂建国提出的钢—混凝土组合梁加宽旧桥法,张哲提出的混凝土箱梁正交异性钢悬臂板拓宽法。悬臂挑梁加宽法与斜撑杆加宽法加宽宽度有限,且拓宽部位承载能力低;钢—混凝土组合梁加宽旧桥法与正交异性钢悬臂板拓宽法耗费较多且在桥下空间不足的情况下难以适用;黄立浦等提出了纵横梁拓宽加固法,并对拓宽扩建后桥梁荷载横向分布系数的变化规律进行了研究。基于此,该文提出一种不占用桥下地面空间,适用性广,经济可靠的新型盖梁拓宽法,即钢悬臂拓宽混凝土盖梁法。通过试验与有限元对比的方法研究拓宽后盖梁的力学性能,以证明该方法的可行性。

## 1 工程概况与方案简介

### 1.1 工程背景

广东省境内某简支T梁桥,跨径为 $6\times 30$  m,上部结构由5片梁高2 m的T梁组成,桥宽13.05 m,下部结构为双墩柱加盖梁,由于城市扩张发展,交通量增大,原有桥梁已不能满足通行量需求,需左右各加宽1个车道,但旧桥两侧空间不足无法新建复桥,且桥下现

有交通不允许新设墩柱,故拓宽方案采用上部结构增设边梁,下部采用该文提出的钢悬臂拓宽混凝土盖梁的方法。

### 1.2 方案简介

采用钢悬臂拓宽混凝土盖梁的拓宽形式为:在原混凝土盖梁两端增设钢盖梁,钢盖梁的承压板与原混凝土盖梁通过螺栓与黏钢胶相连;盖梁体外两侧,分别布置预应力钢束连接两端钢盖梁;原混凝土主梁两侧增设T梁(小箱梁/组合梁/钢箱梁),新设梁体支座布置于钢盖梁上。新增设的钢悬臂与混凝土盖梁梁端的连接处理:在混凝土盖梁梁端开凿螺栓孔,植入螺栓,螺栓孔补浇混凝土;将钢悬臂通过定位螺栓与混凝土盖梁连接,横向预应力施加完毕后,钢悬臂的承压板与混凝土盖梁梁端紧密相连,从而形成整体盖梁。拓宽后原桥由双向两车道变为双向四车道,大幅提高其通行能力。拓宽前后横断面及桥面布置对比见图1。

## 2 试验概况与数值模拟

### 2.1 钢—混组合悬臂极限承载力正交试验设计

新型钢—混组合悬臂结构,由钢梁通过黏钢胶、螺栓与钢筋混凝土梁连接,通过体外预应力提高承载力,是一种新型的悬臂组合结构。新型钢—混凝土组合悬臂结构破坏机理尚不明确,可能出现的破坏情况为:螺栓纵向变形过大导致钢—混剥离破坏,螺栓切向变形过大导致钢混滑移破坏,混凝土拉压破坏,预应力钢绞

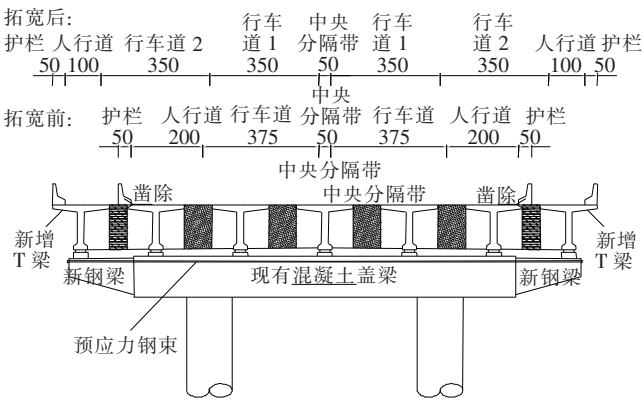


图1 盖梁拓宽示意图(单位:cm)

线屈服破坏,钢板拉压屈服或屈曲破坏等。目前学者们主要进行了钢箱梁的受力特征研究、钢-混凝土接触面力学特性研究等,但对于新型钢-混组合结构各受力构件选取不同特性参数对结构极限承载力的影响研究亟待开展。基于正交试验设计原理和分析方法,研究混凝土性能,钢混连接螺栓规格(面积),体外预应力钢绞线数量与内力大小,钢板厚度对钢-混组合悬臂结构破坏形式及极限承载力的影响,根据模拟试验分析结果推出最佳的结构设计,为钢-混组合结构拓宽盖梁提供理论支持。

2.2 几何尺寸

由于盖梁实际尺寸难以在试验室进行试验设计,以1:4的缩尺比例对原盖梁进行缩尺试验,试件几何尺寸为原盖梁的1/4,根据应力等效原则,预应力加载量为原尺寸1/16。原结构盖梁宽190 cm,高180 cm,缩尺后试件宽47.5 cm,高47 cm,钢筋布置见图2。

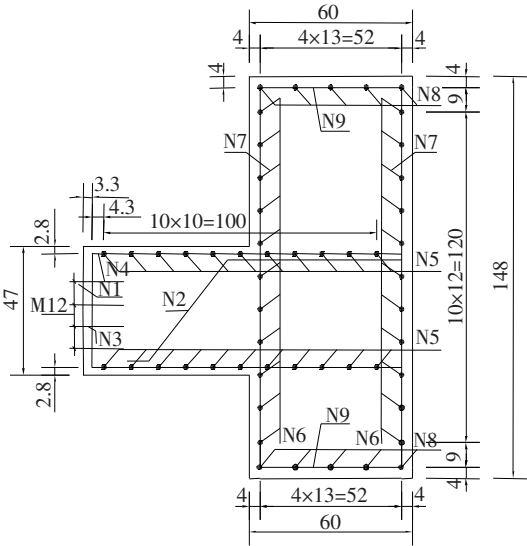


图2 钢筋布置图(单位:cm)

2.3 加载方式

试验加载共两种工况。工况1:预应力的加载;工

况2:梁端荷载的施加。

预应力预加载值为60 kN,以每级10 kN进行加载,并进行一次数据采集,预应力加载完毕,静置10 min后加载梁端荷载,以每级5 kN进行,进行一次数据采集,直至加载到试验构件破坏或预应力钢束应力达到危险应力级别。

2.4 数值模拟

混凝土与钢板采用实体单元C3D8R,钢筋采用桁架单元T3D2,忽略钢筋与混凝土之间的黏结作用,使用Abaqus中的embedded命令将钢筋嵌入混凝土中。混凝土采用塑性损伤本构模型,依据受压及受拉损伤因子模拟混凝土在地震过程中的刚度退化,使用能量法计算损伤因子;钢筋本构模型采用理想弹塑性双折线模型。由于该模型是空间对称结构,故只需建立1/4实体模型,在保证计算精度的同时减少计算成本,且将试验中背墙与基座部分等效为边界条件,有限元模型如图3、4所示。

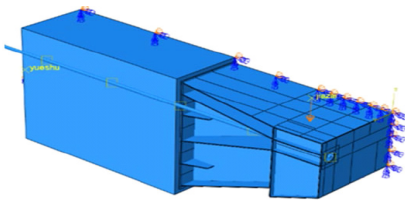


图3 钢-混组合悬臂梁有限元模型

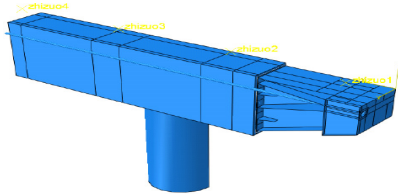


图4 拓宽后盖梁1/4模型

3 试验结果与模拟验证

3.1 梁端荷载—挠度关系曲线

极限承载力试验与数值模拟计算结果的悬臂梁端荷载—挠度关系曲线如图5所示,图5表明:试验结果与数值模拟结果相近。分析试验数据可知:预应力加载完毕后,受预应力产生的弯矩作用,钢悬臂端上挠1.12 mm,当加载力为0~182 kN时,荷载—挠度曲线基本呈线性,此时,钢-混组合悬臂梁处于弹性阶段,随着荷载的增加梁端挠度由-1.12 mm渐变为一0.23 mm;当梁端加载力为182~431 kN时,梁端挠

度为 $-0.23\sim 7.0$  mm;当荷载为 $431\sim 511$  kN时,梁端挠度增长加快,为 $7.0\sim 12.65$  mm,当荷载达到极限承载力 $511$  kN后,梁端挠度迅速增加,此时钢-混凝土悬臂梁进入破坏阶段。

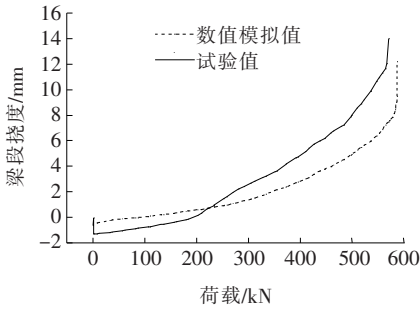


图 5 悬臂梁端荷载—挠度曲线

图 5 中试验结果与模拟结果差异产生的主要原因是:数值模拟模型的剥离发展较试验剥离发展滞后,在同荷载状态下,数值模拟模型的剥离量较试验剥离的小;另一方面,试验螺栓由于装配不如数值模拟精细,存在试验螺栓不如数值模拟螺栓受力均衡现象,致使试验承压板与混凝土梁剥离发展存在差异。从整体上观察分析,试验模型在误差允许范围内。

### 3.2 预应力钢绞线应力发展规律

梁端荷载—预应力钢束应力关系曲线见图 6。

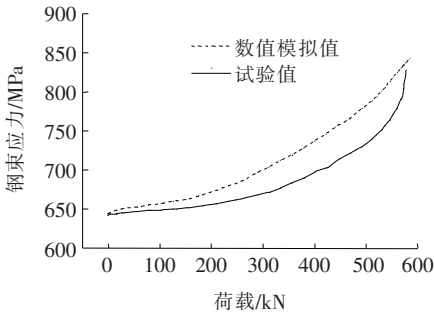


图 6 荷载—钢束应力关系曲线

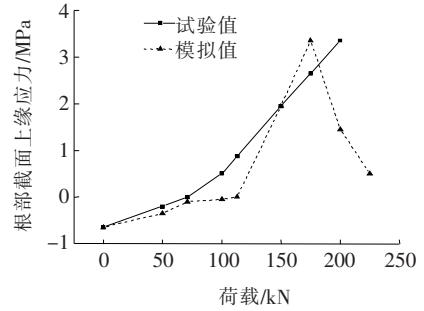
由图 6 可知:梁端荷载为 $0\sim 160$  kN时,预应力钢束应力仅从 $642$  MPa增加至 $665$  MPa,增长较为缓慢,其原因是由于预应力锚固点在荷载作用下随梁端向下位移,位移在预应力钢束方向分量很小;梁端荷载为 $160\sim 490$  kN时,预应力钢束应力由 $665$  MPa增加至 $816$  MPa,增幅较大,其原因是由于钢悬臂端截面在荷载作用下发生向下及垂直于预应力方向的转动,导致预应力锚固点在预应力钢束方向位移分量逐步增大;当试件达到极限承载力 $511$  kN后,荷载不再增加而预应力钢束应力持续增大,随后试验模型丧失承载能力,认定试验模型破坏。

对比试验结果与数值模拟结果,主要差异为数值

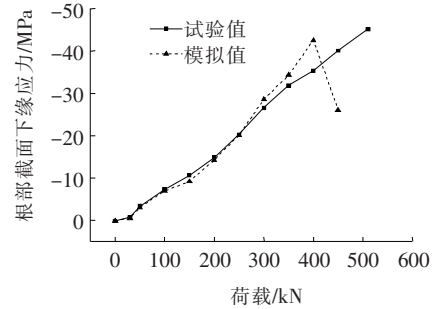
模拟模型的预应力钢束应力发展较试验剥离发展滞后,在同荷载状态下,数值模拟模型的预应力钢束应力较试验剥离的小。从整体上对比分析,梁端荷载—预应力钢束应力发展趋势基本一致。

### 3.3 混凝土悬臂梁悬臂根部截面上下缘应力

梁端荷载—混凝土悬臂梁悬臂根部截面上下缘应力曲线分别如图 7 所示。



(a) 根部截面上缘



(b) 根部截面下缘

图 7 混凝土悬臂梁根部截面荷载—应力曲线

图 7 表明:对于根部截面上缘应力,当梁端荷载为 $0$  kN时,由于预应力作用,混凝土悬臂梁悬臂根部截面上缘应力为 $-0.65$  MPa,当梁端荷载为 $0\sim 71$  kN时,混凝土悬臂梁悬臂根部截面上缘应力为 $-0.65\sim 0$  MPa,因荷载在混凝土悬臂梁根部产生弯矩,混凝土悬臂梁悬臂根部截面上缘应力逐渐减小,当梁端荷载达到 $183$  kN时,混凝土悬臂梁悬臂根部截面上缘应力消失,此时应变片断裂。

对于根部截面下缘应力,预应力加载完毕后,受预应力产生的偏心受压作用,混凝土悬臂梁悬臂根部截面下缘应力为 $0.13$  MPa;当梁端加载力为 $0\sim 30$  kN时,该处压应力增加缓慢,由 $0.13$  MPa发展为 $-0.72$  MPa,梁端加载力为 $30\sim 210$  kN时,该处应力呈线性增长,由 $-0.72$  MPa增至 $-14.9$  MPa;梁端加载力为 $210\sim 510$  kN时,该处应力加速增长,由 $-14.9$  MPa增至 $-45.2$  MPa。

对比试验结果与数值模拟结果,主要差异为试验模型的拉应力在增长过程中突然消失,而模型拉应力有下降段,这主要是因为数值模拟中,无法准确模拟混凝土的断裂与破坏,从而终止分析。整体而言,试验与数值模拟在混凝土悬臂梁根部截面上缘应力发展趋势上基本一致。

4 整体盖梁受力性能分析

4.1 钢悬臂结构受力分析

由 JTG D64—2015《公路钢结构桥梁设计规范》

可知:Q345 钢材的钢板厚度为 16~40 mm 时,抗拉、抗压强度设计允许值为 270 MPa。两种工况下钢悬臂结构应力结构见图 8。由图 8 可知:工况 1 下钢悬臂最大应力为 215 MPa,存在于预应力锚固点处;工况 2 下钢悬臂最大应力为 236.8 MPa,均满足规范要求。

4.2 原混凝土盖梁混凝土受力分析

由 JTG D64—2015《公路钢结构桥梁设计规范》可知:标号为 C40 的混凝土抗拉强度设计值为 1.65 MPa,抗压强度设计值为 18.4 MPa。两种工况下混凝土盖梁最大主应力(拉应力)、最小主应力(压应力)分别如图 9、10 所示。

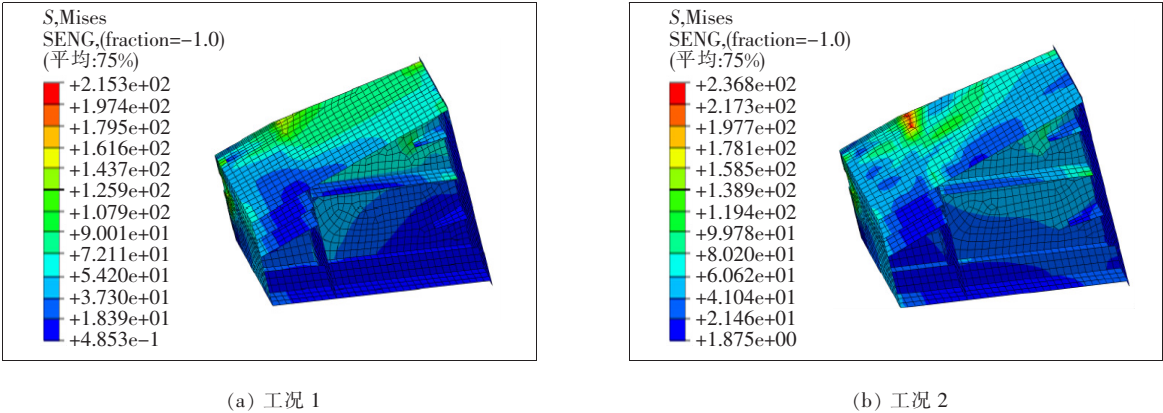


图 8 钢悬臂应力图(单位:MPa)

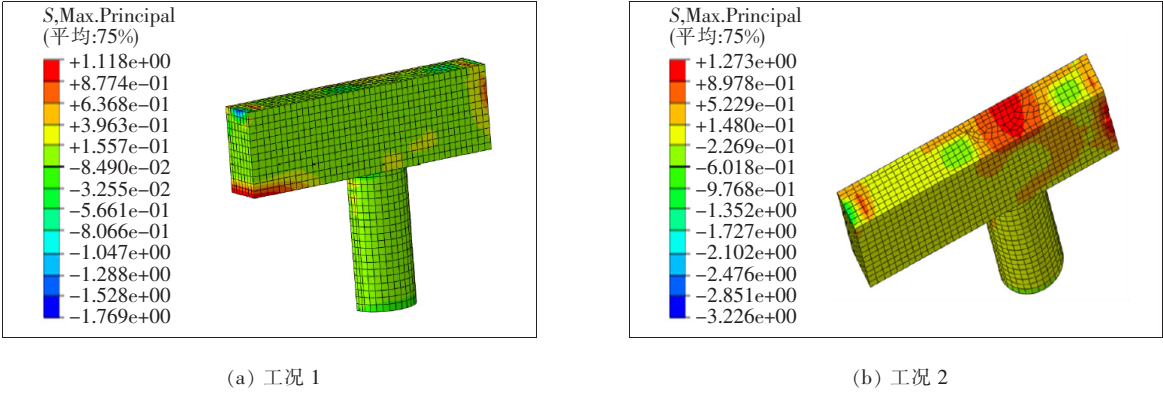


图 9 混凝土盖梁最大主应力图(单位:MPa)

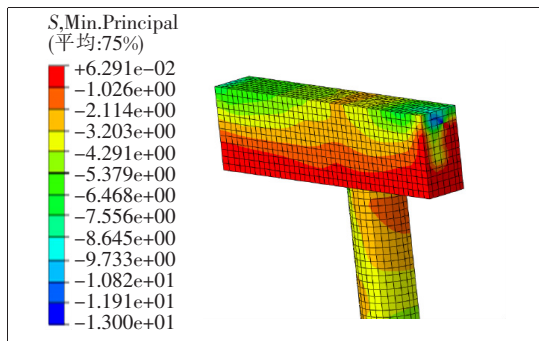
由图 9、10 可知:① 工况 1 作用下混凝土盖梁最大主应力存在于盖梁跨中下缘,为 1.11 MPa,满足规范要求,工况 2 作用下混凝土盖梁最大主应力(拉应力)由盖梁跨中下缘转至盖梁悬臂梁根部,即墩顶上部的盖梁上缘,为 1.27 MPa;② 工况 1 作用下混凝土盖梁最小主应力(压应力)为-13 MPa,发生于钢悬臂与混凝土悬臂梁接触面上缘位置,工况 2 作用下混凝土盖梁最小主应力(压应力)由钢悬臂与混凝土悬臂梁接

触面上缘位置变为墩顶位置,为-16.8 MPa,均满足规范要求。

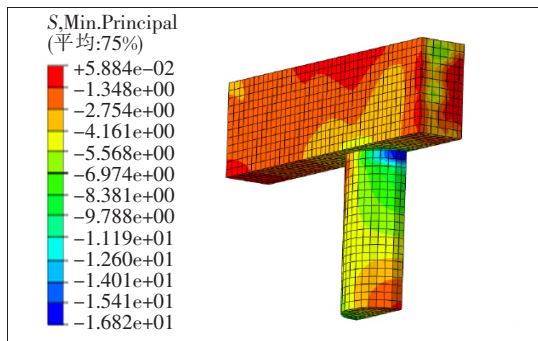
4.3 原混凝土盖梁钢筋受力分析

两种工况下原混凝土盖梁内钢筋应力见图 11。由图 11 可知:工况 1 作用下钢筋最大应力存在于盖梁悬臂部位上部纵筋,为 62 MPa,工况 2 作用下钢筋最大应力存在于盖梁悬臂根部下缘纵筋,为 77.4 MPa。均满足相关规范要求。



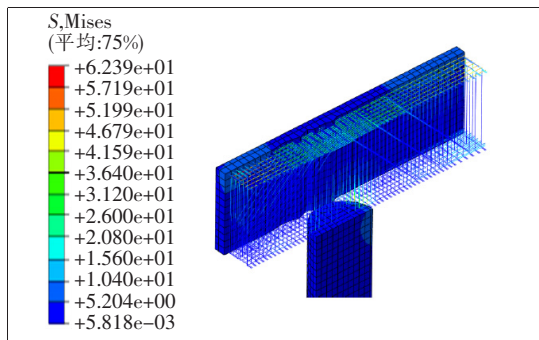


(a) 工况 1

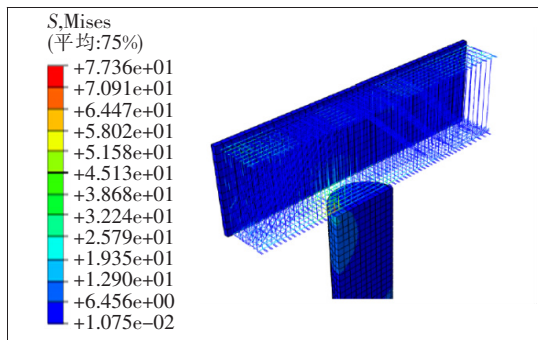


(b) 工况 2

图 10 混凝土盖梁最小主应力图(单位:MPa)



(a) 工况 1



(b) 工况 2

图 11 钢筋应力图(单位:MPa)

## 5 结论

(1) 数值模拟结果与试验结果对比分析表明:数值模型与试验模型在受力关键部位的应力发展、挠度变形、破坏模式基本一致,试件极限承载能力为 511 kN,验证了数值模拟的准确性。

(2) 对于钢悬臂,试验结果与数值模拟结果都表明同级荷载下,根部截面下缘应力最大,但即使在极限荷载状态下,钢板应力仍未超材料设计允许值,因此,该设计中钢悬臂选取的钢材材料与厚度尺寸均满足受力要求。

(3) 对拓宽后盖梁进行力学分析可知,拓宽构件与原混凝土盖梁构件在施工阶段与使用阶段的受力都满足相应规范要求,证实了钢悬臂拓宽混凝土盖梁新式桥梁拓宽方法的可行性。

### 参考文献:

[1] 韩宝睿. 高速公路改扩建工程方案研究的关键技术分析

[D]. 东南大学硕士学位论文,2005.

- [2] 施兹国. 高速公路改造方案的研究[D]. 浙江大学硕士学位论文,2008.
- [3] 孟广文. 关于公路旧桥拓宽设计问题的思考[J]. 公路交通技术,2004(3).
- [4] 罗文艺,李雅杰,严宇,等. 公路桥梁拼宽改造应用与研究现状调查[J]. 安徽建筑,2019(6).
- [5] 吴文清,叶见曙,鞠金荧,等. 高速公路扩建中桥梁拓宽现状与方案分析[J]. 中外公路,2007(6).
- [6] 聂建国,王宇航,樊健生,等. 钢-混凝土组合梁加宽混凝土旧桥技术中组合横梁界面受力性能研究[J]. 土木工程学报,2012(3).
- [7] 聂建国,张晓光,樊健生,等. 钢-混凝土组合梁加宽旧桥的实测与理论分析[J]. 桥梁建设,2009(5).
- [8] 聂建国,张晓光,樊健生. 钢-混凝土组合梁加宽混凝土旧桥试验[J]. 中国公路学报,2010(5).
- [9] 张哲,李斐然,邱文亮,等. 钢悬臂梁拓宽钢筋混凝土箱梁桥的接触面应力分析[J]. 公路交通科技,2010(2).
- [10] 黄立浦,曹素功,常柱刚. 旧桥拓宽加固中荷载横向分布系数的变化规律[J]. 中外公路,2017(4).