

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2021.04.053

UHPC 在连续组合梁负弯矩区的受力性能研究

张策

(上海市政交通设计研究院有限公司, 上海市 200030)

摘要:通过对组合连续梁负弯矩区影响因素的建模分析,建议超高性能混凝土(UHPC)桥面板厚度与组合梁高度之比为1/5~1/9,组合梁高度与跨径的比值为1/18~1/22,钢梁与UHPC桥面板刚度之比为2~10;钢-UHPC组合连续结构梁高远低于钢-C50混凝土组合连续梁结构梁高,结构负弯矩区UHPC桥面板不开裂。

关键词: UHPC;连续组合梁桥;负弯矩

中图分类号: U441+.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)04-0195-05

0 引言

钢-混组合连续桥梁负弯矩区混凝土易开裂是制约组合结构广泛应用的一个关键设计问题。连续组合梁桥混凝土桥面板开裂问题的常规解决方案为:增大负弯矩区桥面板厚度、增加结构配筋率、负弯矩区设置预应力、调整施工顺序等,但这些方案都不能从根本上解决混凝土桥面板开裂的问题。

超高性能混凝土(UHPC)具有超高抗弯拉强度的材料特性,若在组合连续梁负弯矩区采用UHPC桥面板,则可降低组合连续梁负弯矩区混凝土开裂的风险。

1 钢-UHPC组合连续梁负弯矩区影响因素

影响钢-UHPC组合连续梁负弯矩区受力性能的影响因素有很多,本文主要对UHPC桥面板的构造尺寸进行研究分析:UHPC桥面板厚度 h_1 与组合梁高度 h 之比、组合梁高度 h 与跨径 L 的比值、钢梁刚度 k_1 与UHPC桥面板刚度 k_2 之比。针对上述3种影响因素,建立钢-UHPC3跨连续组合梁有限元模型,对UHPC桥面板尺寸进行优化设计。

1.1 计算假定

根据UHPC材料特性,在进行参数分析时,为简化计算,作如下计算假定:

(1)不考虑钢筋作用,组合连续梁负弯矩由UHPC桥面板承担。

(2)不考虑钢材与UHPC通过剪力连接件组合的

滑移效应。

(3)不考虑材料非线性影响。

UHPC材料性能与混凝土的组合配比、水胶比、养护条件等因素有关^[1],参考湖南省地方标准《钢-超高韧性混凝土轻型组合结构桥面技术规范》(DB43/T 1173—2016)对材料力学性能的相关规定,选取STC28(STC为超高韧性混凝土,UHPC材料)的材料力学性能作为研究钢-UHPC组合连续梁负弯矩区受力性能的依据。

UHPC主要力学性能指标见表1。

表1 UHPC主要力学性能指标

弹性模量 E_c /MPa	泊松比 γ	热膨胀系数 α	轴心抗压强度设计值 f_{cd} /MPa	抗弯拉强度设计值 f_{td} /MPa	高温蒸汽徐变系数
4.35×10^5	0.2	1.0×10^{-5}	71.2	19.3	0.2

1.2 钢-UHPC组合连续梁模型

1.2.1 模型截面

选取较为简单的标准等高组合钢板梁进行数值分析,跨径采用 2×30 m;考虑有效翼缘宽度的影响,板宽4600 mm;因钢梁刚度主要由梁高控制,为简化控制参数,钢梁上缘宽600 mm,厚25 mm,下缘宽800 mm,厚32 mm,腹板厚20 mm。截面尺寸见图1。

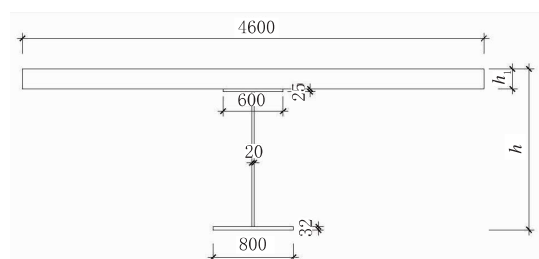


图1 钢-UHPC组合梁标准断面图(单位:mm)

收稿日期: 2020-09-22

作者简介: 张策(1989—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

1.2.2 荷载及组合

荷载仅考虑恒载及汽车活载。

恒载:自重及桥面铺装。

汽车荷载:公路-I级,单车道荷载。

荷载组合:基本组合。

1.2.3 计算模型

整体计算分析采用 Midas 2017 有限元分析软件,建立 2×30 m 钢板组合梁模型,组合截面钢、UHPC 联合截面,模型总计单元 30 个,节点 31 个。

2×30 m 钢-UHPC 组合梁模型见图 2。

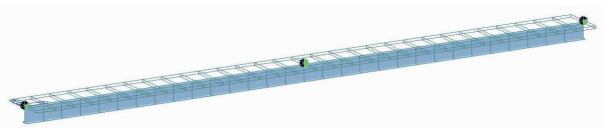


图 2 2×30 m 钢-UHPC 组合梁模型

1.3 UHPC 桥面板尺寸优化

1.3.1 厚高比 h_1/h

取模型截面高度 $h=1\ 650\text{ mm}$,调整 UHPC 桥面板厚度 h_1 ,组合结构计算分析结果见图 3~图 5。

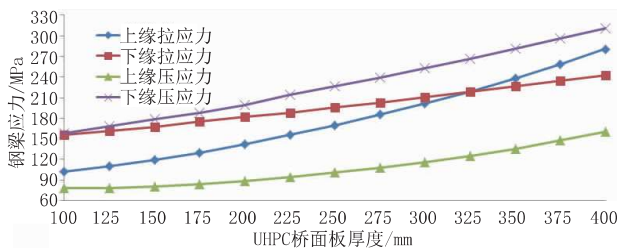


图 3 UHPC 桥面板厚度 - 钢梁应力曲线

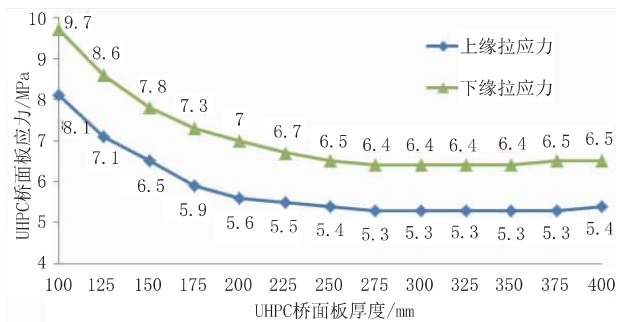


图 4 UHPC 桥面板厚度-UHPC 桥面板应力曲线

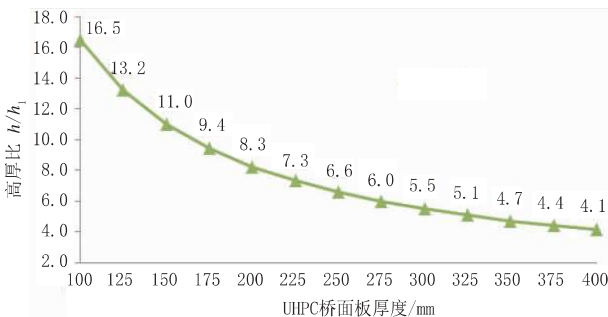


图 5 UHPC 桥面板厚度 - 厚高比曲线

由图 3、图 4 可知,随着 UHPC 桥面板厚度的增加,结构自重随之增加,桥面板的刚度也随之增加,

而钢梁的结构刚度随之降低,因此钢梁的上下缘应力随之增加,UHPC 桥面板拉应力随之降低。

另外还可看出,当 UHPC 桥面板厚度超过 200 mm 后,桥面板应力变幅很小甚至保持不变。当 UHPC 桥面板厚度小于 200 mm 时,钢梁应力在 200 MPa 以下,钢材的利用效率较低;当 UHPC 桥面板厚度超过 350 mm 后,钢梁底缘应力超过 300 MPa。因此,可以通过调整钢梁顶底板厚度(钢梁的结构刚度变化不大)来改善钢梁的结构受力。

根据上述分析,建议 UHPC 桥面板厚度取为 200~350 mm。由图 5 可知,此时组合截面高度与 UHPC 桥面板厚度之比为 4.7~8.3,因此建议厚高比 $h_1/h=1/5\sim 1/9$ 。

1.3.2 高跨比 h/L

根据上述优化结论,取 UHPC 桥面板厚度与模型截面高度之比 $h_1/h=1/8$ 。通过调整截面高度,得到组合结构计算结果,见图 6~图 8。

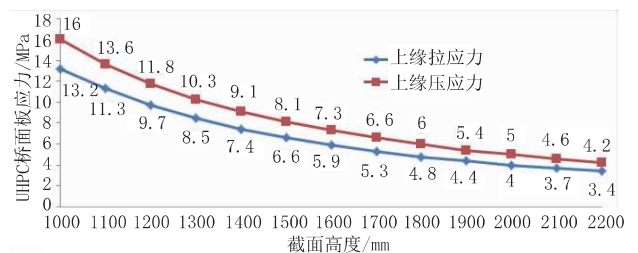


图 6 截面高度-UHPC 桥面板应力曲线

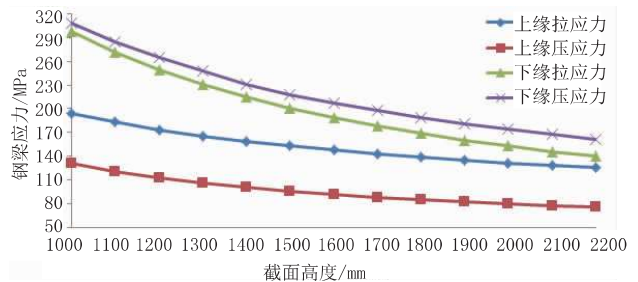


图 7 截面高度 - 钢梁应力曲线

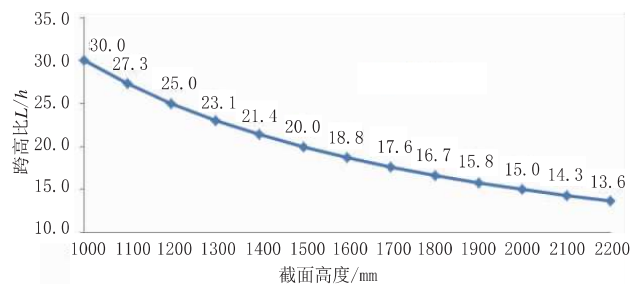


图 8 截面高度 - 跨高比曲线

由图 6、图 7 可知,随着截面高度的增加,UHPC 桥面板的刚度及钢梁的结构刚度随之增加,组合刚度也随之增加,因此钢梁及 UHPC 桥面板的上下缘应力随之降低。

另外还可看出,当截面高度超过 1 400 mm 后,

UHPC 桥面板及钢梁的应力变幅较为稳定平缓;当组合截面高度超过 2 000 mm 后,钢梁底缘应力小于 200 MPa,钢梁的利用效率较低。

因此建议截面高度取 1 400~2 000 mm。由图 8 可知,此时组合梁跨度与截面高度之比为 15~21.4,因此建议高跨比 $h/L=1/18\sim 1/22$ 。

1.3.3 刚度比 k_1/k_2

UHPC 桥面板厚度 - 刚度比曲线见图 9,截面高度 - 刚度比曲线见图 10。

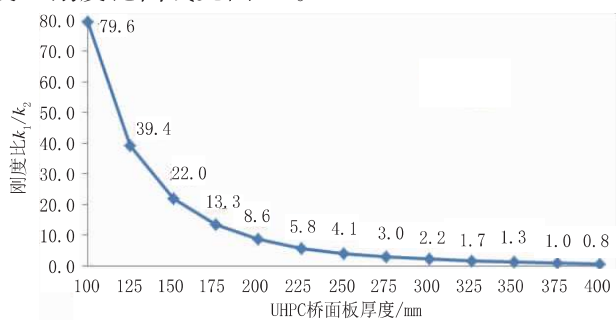


图 9 UHPC 桥面板厚度 - 刚度比曲线

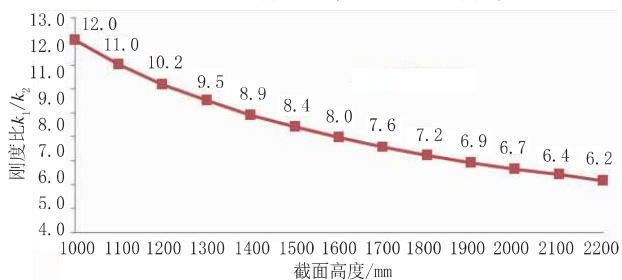


图 10 截面高度 - 刚度比曲线

在组合截面高度不变的情况下,根据优化结果,UHPC 桥面板厚度取 200~350 mm。由图 9 可见,此时组合截面钢梁刚度 k_1 与 UHPC 桥面板刚度 k_2 之比为 1.3~8.6。

在 UHPC 桥面板高度与截面高度比值保持不变的情况下,根据优化结果,截面高度取 1 400~2 000 mm。由图 10 可见,此时组合截面钢梁刚度 k_1 与 UHPC 桥面板刚度 k_2 之比为 6.7~8.9。

根据上述计算结果,建议组合截面钢梁刚度与 UHPC 桥面板刚度 k_2 之比 $k_1/k_2=2\sim 10$ 。

2 组合钢板梁整体计算

2.1 工程案例

2.1.1 钢 -C50 混凝土连续组合梁

某已建成项目桥梁跨径为 4×35 m,桥宽 33 m,分双幅布置。桥面布置见图 11。

35 m 跨径主梁结构中的钢主梁梁高 1.75 m。其中顶板厚度为 340~400 mm,顶板宽度均为 800 mm;腹板厚度为 16~24 mm;底板厚度为 30~50 mm,底板

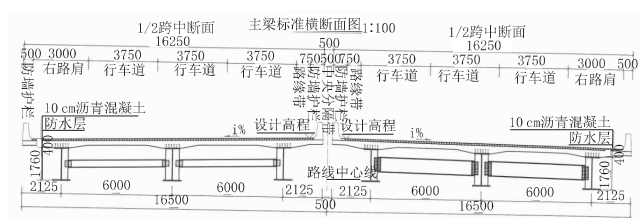


图 11 钢板组合梁标准断面图(单位:mm)

宽度均为 960 mm。钢主梁之间通过横梁连接,横梁间距 7 m。

主梁结构中的混凝土桥面板在其横向上为变厚度的结构形式,在钢主梁外侧厚 250 mm,钢主梁之间厚 250 mm,在钢主梁上侧设置承托,承托处桥面板厚度为 400 mm。在混凝土桥面板厚度变化之间通过线性变化的形式过渡。结构断面见图 12。

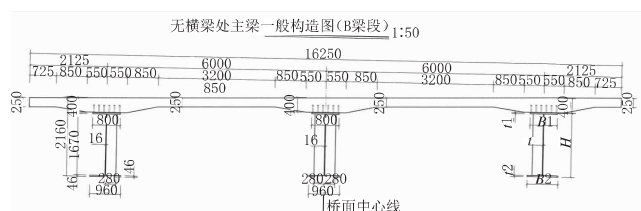


图 12 无横梁处主梁一般构造图

2.1.2 钢 -UHPC 连续组合梁截面优化

根据第 1 节内容,将上述项目组合梁桥面板采用 UHPC 进行结构优化。为简化计算,全桥采用等厚 250 mm UHPC 桥面板,钢梁结构高度 1 550 mm(钢梁其他板件厚度、宽度均不变),截面高度 1 800 mm。宽高比 $h_1/h=250/1\ 800=1/7.2$,有效翼缘宽度范围内钢梁与 UHPC 桥面板刚度比 $k_1/k_2=7.5\sim 10$,高跨比 $h/L=1\ 800/35\ 000=1/19.4$,结构尺寸均在组合结构优化后的合理范围内。

UHPC 具有很强的抗弯拉性能,对结构优化计算的目标是负弯矩区(距中支座 $0.15L$ 范围)桥面板不开裂,因此负弯矩区结构不考虑钢筋作用,刚度采用未开裂组合截面刚度。2 种连续组合梁结构尺寸对比表见表 2(2 种组合梁方案中钢梁顶底板/腹板厚度均一致)。

表 2 结构尺寸对比表

连续组合梁	桥面板厚/mm	钢梁高/mm	截面梁高/mm	高跨比
钢 -C50 混凝土	340~400	1 750	2 090~2 150	1/16.5
钢 -UHPC	250	1 550	1 800	1/19.4

2.2 计算模型

整体计算分析采用 Midas 2019 有限元分析软

件,建立 $4 \times 35 \text{ m}$ 钢板组合梁梁格模型,组合截面采用钢、混凝土双单元截面,UHPC 桥面板与钢梁采用刚性连接。模型总计单元 2 146 个,节点 1 303 个。

钢板组合梁断面模型见图 13,钢-UHPC 以及钢-C50 混凝土组合梁整体计算模型见图 14。

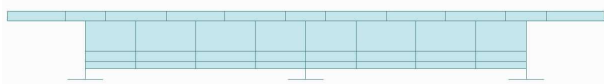


图 13 钢板组合梁断面模型

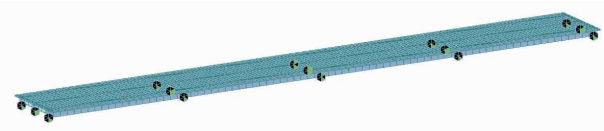


图 14 钢-UHPC 以及钢-C50 混凝土组合梁整体计算模型

2.3 计算荷载及参数

一期恒载:结构自重。

二期恒载:桥面铺装及混凝土护栏。

基础变位:不均匀沉降量为 10 mm。

混凝土收缩、徐变按《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D60—2015)第 7.1.3 条计算,UHPC 不考虑收缩效应。

汽车荷载:公路-I 级。

温度影响力:根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)第 4.3.12 条规定取值。

施工荷载:根据所选择的施工方法,确定施工过程中所发生的恒载与活载。

荷载组合:基本组合、频遇组合及准永久组合。

有效翼缘宽度:根据《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》第 5.3.2 条有关规定计算。

分析方法:根据《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》第 7.1.2 条,采用开裂分析方法。

结构重要性系数:1.1。

2.4 施工方案

设计中的钢板梁桥采用逐孔架设施工方案。

- (1)下部结构施工,拼装钢板梁,架设架桥机。
- (2)整体吊装第 1 孔钢梁。
- (3)架桥机前移,拼装架设第 2 孔钢梁。
- (4)架桥机前移,架设第 1 孔桥面板。
- (5)拼装架设第 3 孔钢梁。
- (6)架桥机前移,架设第 2 孔桥面板。
- (7)拼装架设第 4 孔钢梁。
- (8)架设剩余桥面板。
- (9)浇筑跨中段湿接缝。
- (10)浇筑墩顶湿接缝,施工桥面系。

2.5 结果对比及分析

2.5.1 钢-C50 混凝土组合连续梁结构计算

基本组合作用下,钢-C50 混凝土钢主梁上、下翼缘应力包络图见图 15、图 16。

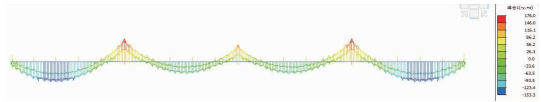


图 15 基本组合作用下,钢主梁上翼缘应力包络图(单位:MPa)

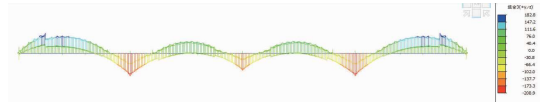


图 16 基本组合作用下,钢主梁下翼缘应力包络图(单位:MPa)

由图 15、图 16 可见,基本组合作用下,钢主梁上、下翼缘最大应力均发生在次边支点位置,钢主梁上翼缘最大应力为 $176.0 \text{ MPa} < 270/1.1=245.5 \text{ MPa}$,下翼缘最大应力为 $-208.9 \text{ MPa} < 270/1.1=245.5 \text{ MPa}$,满足规范要求。

频遇组合作用下,负弯矩区桥面板上缘应力见图 17。



图 17 频遇组合作用下,负弯矩区桥面板上缘应力(单位:MPa)

由图 17 可见,频遇组合作用下,负弯矩区桥面板纵桥向最大拉应力为 5.1 MPa ,换算钢筋最大拉应力为 159.2 MPa (受拉钢筋直径 22 mm,间距 120 mm),裂缝宽度计算见表 3。

表 3 裂缝宽度验算

C1	C2	C3	σ_{s6} / MPa	ρ	裂缝宽度 /mm	允许值 /mm	是否满足
1	1.40	1.2	159.2	0.017	0.168	0.2	是

2.5.2 钢-UHPC 组合连续梁结构计算

基本组合作用下,钢-UHPC 组合连续梁钢主梁上、下翼缘应力包络图见图 18、图 19,频遇组合作用下,UHPC 桥面板上缘应力见图 20。

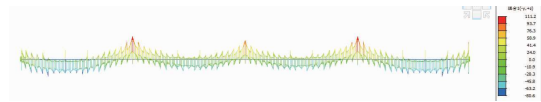


图 18 基本组合作用下,钢主梁上翼缘应力包络图(单位:MPa)

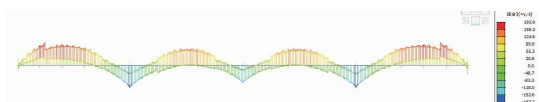


图 19 基本组合作用下,钢主梁下翼缘应力包络图(单位:MPa)

由图 18、图 19 可见,基本组合作用下,钢主梁腹板最大竖向剪应力发生在次边支点附近,最大竖向剪应力为 $64.4 \text{ MPa} < 155/1.1=140.9 \text{ MPa}$,满足规范

要求。

由图 20 可见,频遇组合作用下,UHPC 桥面板纵向最大拉应力为 19.3 MPa < 28/1.1=25.5 MPa,满足应力验算要求,UHPC 桥面板不开裂。

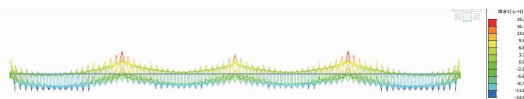


图 20 频遇组合作用下,UHPC 桥面板上缘应力(单位:MPa)

2.5.3 计算结果及分析

2 种组合梁计算结果对比表见表 4。表 4 中:钢梁顶、底缘应力为基本组合作用下的结构应力(拉正压负);桥面板应力为频遇组合下的结构应力。

表 4 计算结果对比表

连续组合梁	钢梁		桥面板	
	顶缘应力 /MPa	底缘应力 /MPa	应力 /MPa	裂缝宽度 /mm
钢-C50 混凝土	176.0	-208.9		0.168
钢-UHPC	111.2	-193.9	19.3	

由表 4 可知,钢-C50 混凝土组合连续梁、钢-UHPC 组合连续梁整体计算结果均满足规范要求。钢-UHPC 组合连续结构梁高远低于钢-C50 混凝土组

合连续梁结构梁高,负弯矩区 UHPC 不开裂,且还可进一步优化钢结构顶缘尺寸。

3 结 语

(1)钢-UHPC 组合截面负弯矩区受拉弯性能远超普通钢-混组合截面,结构可以大幅度降低组合截面梁高,且负弯矩区桥面板不开裂。

(2)钢-UHPC 组合截面构造尺寸参数为:合理厚高比 $h_1/h = 1/5 \sim 1/9$,高跨比 $h/L = 1/20 \sim 1/22$,刚度比 $k_1/k_2 = 2 \sim 10$ 。

(3)本文对结构的优化分析建立在一定的假定基础上,若考虑材料非线性、材料的黏结滑移效应、钢筋的贡献作用,可进一步对结构进行优化分析。

(4)基于 UHPC 较高的工程费用,可在组合连续梁负弯矩区段采用 UHPC 桥面板,其余受压段桥面板采用普通混凝土,从而进一步优化组合连续梁的经济效应,使其在工程应用上具有更强的竞争力。

参考文献:

[1] 邵旭东,胡建华.钢-超高韧性混凝土轻型组合桥梁结构[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

(上接第 180 页)

7 结 论

结合微信小程序建立桥梁全寿命管理系统,为桥梁信息化管理提供参考:

(1)借助微信小程序平台,有效整合桥梁信息,提供高效管理方法;

(2)桥梁全寿命管理系统实现信息的实时反馈、及时处理,以延长桥梁使用寿命;

(3)以微信小程序为平台,提升桥梁全寿命管理系统的用户体验,创造良好的管理平台。

参考文献:

[1] 中国互联网络信息中心.第 38 次中国互联网络发展状况统计报告[EB/OL].(2016-08-03)[2016-12-10].<http://www.cnnic.net.cn/hlwfzyj/hlwxzbg/hlwtjbg/201608/P020160803367337470363.pdf>.

[2] 佚名.百度开发者中心-轻应用.[EB/OL].(2016-11-02)[2016-12-10].<http://developer.baidu.com/wiki/index.php>.

[3] 刘红卫.微信小程序应用探析[J].无线互联科技,2016(23):11-12,40.

[4] 单德山,李乔.基于智能客户端的桥梁管理系统[J].交通与计算机,2007(6):120-124.