

小跨宽幅连续梁桥支座负反力分析

李娜¹, 周小勇^{2*}, 李阳², 潘勋², 蔡华³

(1. 文华学院 城建学部, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074;

3. 郑州市市政工程设计研究院, 河南 郑州 450000)

摘要:为研究小跨宽幅连续梁桥的受力特性和支座负反力问题,以河南沁阳市一座无梁板桥设计项目为研究对象,利用 Midas/Civil 软件分别建立单梁模型、梁格模型和板壳模型进行对比分析,提出适合工程设计的桥型方案。主要解决无梁板桥在温度梯度和不均匀沉降作用下产生较大的支座负反力问题,对结构构造进行结构优化。结果表明:宽幅桥建议采用梁格模型分析,按单梁模型计算的內力和支撑反力与实际偏差较大,无法指导设计;温度梯度和不均匀沉降对反力的影响非常大,荷载组合考虑这两项作用时,小跨宽幅连续梁桥出现支座负反力的概率较大,应引起重视;组合作用下,负反力不仅会出现在桥台的支座处,桥墩处也可能出现;横向支座多于两个时,相邻支座的反力相差较大,桥台处的外侧支座和桥墩上的内侧支座出现负反力的可能性相对较大;结构设计时,增加桩长以减少基础不均匀沉降,减小板厚、降低主梁刚度可以明显降低支座负反力的出现概率,而调整边中跨比影响相对较小。

关键词:小跨宽幅桥;连续梁桥;支座负反力;梁格模型;优化设计

近年来,交通量日益增长,城市道路宽度也随之增加,30 m 及以上的路幅宽度经常被采用,当需要跨越支路、小型沟渠、景观护城河等障碍物时,常采用宽跨比大于 2 的宽幅桥梁甚至超宽幅桥梁。宽幅现浇连续桥具有桥型简单、施工方便、建筑高度小、结构整体刚度大、行车舒适的优点而被广泛应用于小跨径桥梁或异形桥梁^[1-2]。在已建成的部分宽幅连续板桥中由于设计、施工存在的缺陷而产生裂缝,出现支座脱空现象,影响结构的耐久性和使用性能^[3-4]。这种桥型的宽度远大于跨度,单梁模型无法分析空间效应,忽略了结构横向变形的影响,会导致计算结果与实际结构受力偏差较大,对可能出现的支座负反力考虑不全。该文结合河南省沁阳市一座城市宽幅无梁板设计桥梁,采用有限元方法分别建立单梁模型、梁格模型和板壳模型进行对比分析,比较各种建模方法的优劣,并针对支座负反力问题进行研究探讨。

1 工程概况

桥梁位于河南省沁阳市区河内路,道路宽度 37

m,城区水系深度治理工程中,将原 3 m 宽水系改造治理成一条护城河,河道控制蓝线 35 m,河床断面为 5 m(步行道)+5 m(绿化带)+2.5 m(亲水平台)+10 m(水系)+2.5 m(亲水平台)+5 m(绿化带)+5 m(步行道),设计水位 1.2 m 深,亲水平台距河底 1.5 m,桥型方案应满足宽高为 6 m×2.5 m 游船的通行和两侧 2.5 m×2.5 m 亲水平台的人行要求。桥型初步方案跨径布置为(5.4+9.2+5.4) m,全长 26.6 m,桥宽 37 m,双幅桥,宽跨比为 2。上部结构采用实心连续板梁,跨中梁高 0.6 m,墩顶位置板厚按线性变化至 0.85 m,桥面铺装层为 8 cm 防水混凝土现浇层+9 cm 沥青混凝土层。下部结构采用柱式墩及桩柱式桥台,桥型布置及横断面布置见图 1、2。

2 有限元模型方案

2.1 有限元模型

目前,桥梁结构受力分析多采用空间梁单元法、梁格法、板壳元法和三维实体单元法^[5]等。空间梁单元法与规范契合度最高,验算得到的结论也与规范条文

收稿日期:2021-05-08(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51708527)

作者简介:李娜,女,硕士,副教授。E-mail:363908437@qq.com

* 通信作者:周小勇,男,博士,讲师。E-mail:xyz@cug.edu.cn

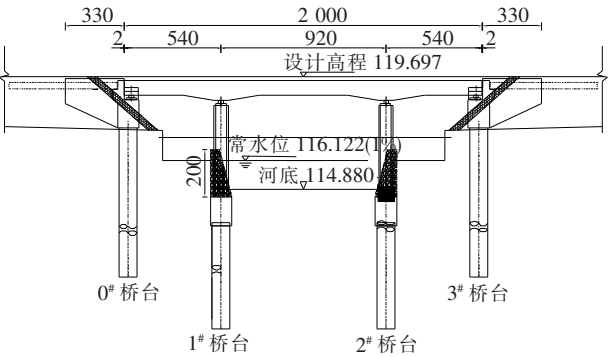


图 1 桥型布置图(除标高单位为 m 外,其余:cm)

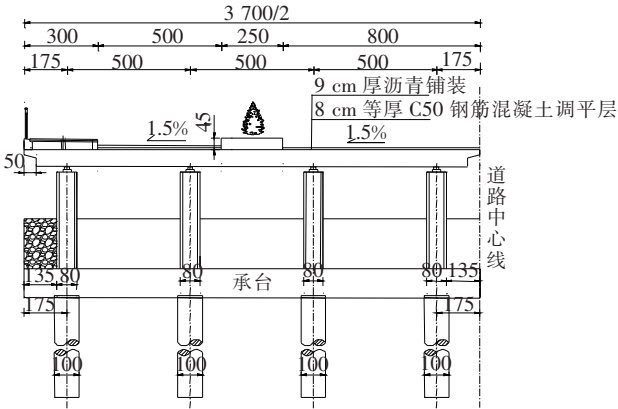


图 2 桥梁断面图(单位:cm)

相互对应,运用广泛,但仅适用于宽跨比较小的狭长结构,因无法获得横桥向内力和应力分布,用来分析宽幅桥时误差较大;梁格法^[6]的主要思路是将上部结构用一个等效的平面梁格或空间构架来模拟,将分散在主梁每一区段内的弯曲刚度和抗扭刚度集中于最邻近的等效纵向或横向梁格内,该方法计算速度快,与现行规范验算相匹配,针对宽桥有较高精度;板壳元法和三维实体单元法均需划分网格,对于复杂结构计算不占优势。JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[7]规定:“弯、宽、斜及变宽或分岔等复杂混凝土桥梁结构可采用实体有限元或附录 A 的实用精细化分析模型计算”。因此,宽桥采用空间梁单元法分析是不合理的。该文以沁阳市一座实心连续板桥为例,采用单梁模型、梁格模型和板壳模型进行对比分析,各类有限元模型及单元、节点数量如图 3 所示。

梁单元模型仅 25 个单元,横桥向 4 个支座简化成单支座;梁格模型的纵梁、横梁单元尺寸均为 1 m 左右;板壳模型中,通过改变六自由度板单元厚度来实现变截面,在平面内的旋转刚度受单元密度影响较大,应尽量细分,共 475 个板单元。该桥结构宽厚比大于 10,属于厚板。因此桥面单元采用以厚板理论(Mind-

lin-Reissner Plate Theory)为基础开发的 4 节点等参数单元 DKMQ (Discrete Kirchhoff—Midlin Element),可计算出单位宽度上的弯矩分布,有利于板的截面配筋设计。

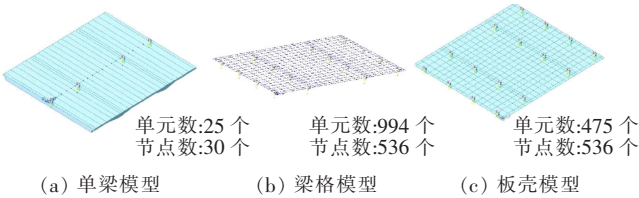


图 3 模型示意图

2.2 荷载组合

模型对比分析中考虑了结构自重、汽车荷载、人群荷载、基础变位作用及温度作用(整体温差和日照温差)的组合。汽车荷载为城市—B 级,基础不均匀沉降对超静定高刚度结构应力和挠度有显著影响^[8],桥梁基础采用摩擦桩,穿越杂填土、淤泥层,持力层位于承载力较低的粉质黏土层上。为安全起见,不均匀沉降按 5 mm 考虑。依据沁阳气象数据,最高有效温度 34℃,最低有效温度 -10℃,施工温度按 10℃考虑,则整体升温为 24℃,整体降温为 -20℃。竖向温度梯度考虑铺装层厚度影响,正温度梯度 $T_1=14℃$, $T_2=5.5℃$ 。为考察支撑反力的分布情况,荷载组合仅采用规范的标准组合,荷载分项系数均为 1,即标准组合 = 1.0×自重 + 1.0×二期恒载 + 1.0×支座不均匀沉降 + 1.0×汽车荷载 + 1.0×整体升温 + 1.0×温度梯度(正/负)。

实际桥梁共设置 16 个支座,纵横向均为 4 个支座,布置如图 4 所示。

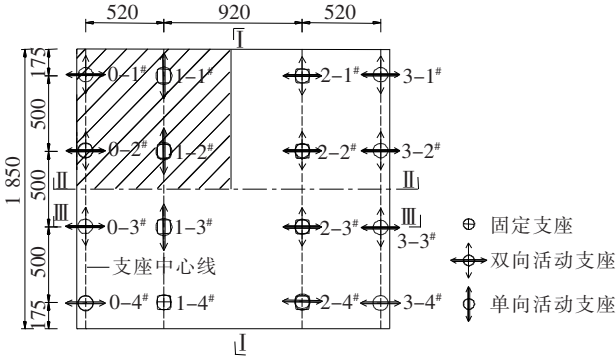


图 4 结构计算简图(单位:cm)

2.3 结果分析

2.3.1 位移分析

三跨连续梁边中跨比一般为 0.5~0.7^[9],结合桥位处河道和人行步道规划,采用 5.2 m/9.2 m=0.56。桥梁宽度达到 18.5 m(半幅),横向支座等间距 5 m 布

置 4 个,全桥共设置 32 个支座(半幅 16 个);1[#]墩设置固定支座,其余墩台支座释放纵向约束,考虑横桥向温度作用,横向外侧支座均释放横向约束,具体支座平面布置如图 4 所示;计算模型采用弹性支座进行模拟,支座刚度取值参考 JTT 391—2009《公路桥梁盆式支座》第 4.1 条规定,竖向刚度取支座设计承载力作用下压缩变形不大于支座总高度 2% 时对应的刚度,水平方向上的刚度(横向刚度和纵向刚度)取支座承受的最大水平力与水平方向容许位移的比值。

自重荷载作用下结构变形情况,考察跨中横向 I—I 剖面 and 纵向桥中线 II—II 剖面的挠度情况(图 5、6)。

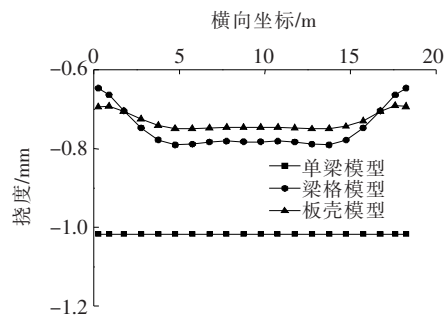


图 5 中跨跨中横向挠度

由图 5 可知:在自重作用下,梁格模型与板壳模型的中跨跨中挠度变化规律基本保持一致,单梁模型无法模拟横向挠度变化规律。在相同的荷载工况下,同一横截面不同位置的变形存在较大的偏差。内侧(靠

近结构中心)挠度大于外侧(靠近悬臂端)板带的挠度,计算结果相差达到 17% 左右,说明宽幅连续梁桥整体变形呈空间分布的特点,横向变形不可忽略,呈现典型的双向板受力特性。

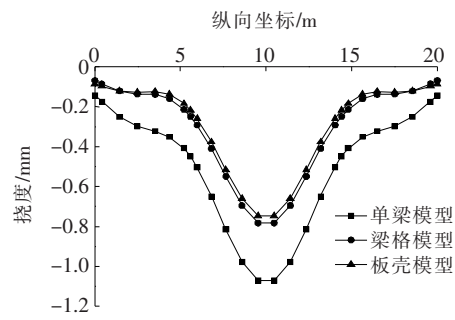


图 6 纵向挠度图

由图 6 可知:由于结构采用弹性支座模拟,在自重作用下支座位置的竖向位移不为零。单梁模型整体刚度较小,最大位移为 1.017 mm,梁格模型与板壳模型得出的挠度在数值上比较接近,两者相差 5% 左右。说明上部平板结构受荷时,一个方向受弯对另一个方向有抑制作用。因此,宽幅板桥相对于条形板梁结构刚度更大。

2.3.2 支座反力

由于该桥结构的对称性,表 1 的反力结果仅提取 1/4 模型进行分析,即图 4 中的阴影部分,0[#]桥台 1[#]、2[#]支座,1[#]桥墩 1[#]、2[#]支座。

表 1 1/4 结构支座反力计算结果

项目	0 [#] —1 [#]			0 [#] —2 [#]			1 [#] —1 [#]			1 [#] —2 [#]			
	单梁	梁格	板壳	单梁	梁格	板壳	单梁	梁格	板壳	单梁	梁格	板壳	
自重	131.3	103.0	107.5	131.3	153.6	153.0	671.1	564.8	561.6	671.1	783.4	782.6	
二期恒载	35.2	41.9	40.4	35.2	26.1	28.5	162.3	183.6	182.8	162.3	139.9	148.9	
汽车荷载	Q _{max}	177.8	54.7	57.8	177.8	302.1	314.6	204.3	75.9	76.8	204.3	351.3	340.3
	Q _{min}	-34.9	-25.3	-24.9	-34.9	-41.0	-38.3	-16.4	-13.5	-17.6	-16.4	-26.9	-28.4
整体升温	-0.4	0.2	2.4	-0.4	-0.7	-0.6	0.5	1.6	2.6	0.5	0.3	-1.5	
正温度梯度	151.2	203.6	215.9	151.2	48.4	136.8	-151.2	122.9	265.1	-151.2	-374.7	-618.0	
负温度梯度	-81.0	-101.8	-115.7	-81.0	-24.2	-73.3	81.0	-61.5	-142.0	81.0	187.4	331.1	
不均匀沉降	-139.4	-131.4	-133.4	-139.4	-169.5	-168.6	-488.2	-465.4	-390.5	-488.2	-608.0	-685.3	
基本组合	-89.3	-113.4	-123.7	-89.3	-55.7	-99.3	178.0	209.6	196.9	178.0	-86.0	-401.7	

注:标准组合为:1.0×自重+1.0×二期恒载+1.0×支座不均匀沉降+1.0×汽车荷载+1.0×整体升温+1.0×温度梯度(正/负)。

由表 1 可知:在标准组合下,桥台位置支座(0[#]—1[#]、0[#]—2[#])和桥墩侧边支座(1[#]—1[#])反力为负值,桥墩中间支座(1[#]—2[#])反力为正值。从各项荷载所占比例来看,不均匀沉降对支座负反力影响较大,占恒

载的 73%。说明针对小跨径连续梁桥,支座不均匀沉降产生的次内力起控制因素。正温度梯度作用下无梁板桥中间支座最大负反力为-618 kN,而两侧支座表现为受压。说明在不均匀温度荷载作用下,板产生翘

曲变形。当板顶温度高于板底时,板桥出现中间凸起两边下凹的情况,导致中间的1[#]-2[#]支座受拉,板角和两侧的0[#]-1[#]、0[#]-2[#]、1[#]-1[#]支座受压;当板顶温度低于板底时,板桥出现中间下凹两边凸起的情况,导致板角和两侧的0[#]-1[#]、0[#]-2[#]、1[#]-1[#]支座受拉,中间的1[#]-2[#]支座受压。温度梯度作用下,板壳模型和梁格模型的支反力相差较大,主要是采用 Midas/Civil 进行板单元建模时,只能输入板顶和板底的温差,不能完全按照公路规范输入分段非线性温差。

从上述模型计算结果可以看出:采用单梁模型设计结果偏安全,但是无法体现结构横向受力特性。而且无梁板部分横向支座在不均匀沉降和温度作用下可能产生负反力,在单梁模型中无法体现。针对宽幅板桥结构,其上部结构为板受力形式,采用板壳模型不仅计算简便,而且 Midas 软件可提取单位宽度上的弯矩,便于工程设计。但 Midas 软件仅能施加线性温度梯度荷载,对于空心板结构需修改刚度系数实现截面刚度的准确模拟。梁格模型易于理解和使用,可以避免上述板壳模型存在的问题。

3 结构设计优化

针对温度梯度、不均匀沉降等因素产生的支座负反力,考虑横向刚度影响,采用板壳模型计算,对结构进行优化设计提出3种措施:①减小板的厚度;②调整边跨与中跨比值;③墩梁固结。

3.1 板厚对支座反力的影响

混凝土连续板跨中厚度 h 一般为 $(1/28 \sim 1/22)L$ (L 为跨径),支点厚度为跨中截面板厚 h 的1.2~1.5倍^[8]。而且连续板桥较宽度窄小的条形板具有正弯矩小、承载能力高的优点。因此,板厚可比装配式空心板小得多。为研究不同板厚对无梁板桥支座反力的影响,选取0.3、0.4、0.5和0.6 m板厚进行数值分析,计算出相应的恒载(结构自重+二期恒载)、温度梯度及不均匀沉降产生的支座反力如图7所示。

由图7可知:温度梯度和不均匀沉降产生负反力与恒载比值分别为54%、80%、102%和147%,说明板厚越大,支座负反力越大。当板厚超过0.5 m时,支座出现负反力,对结构设计不利。但板过薄时,结构刚度减小。0.3 m板厚在基本组合下产生的最大挠度为15.83 mm,大于 $L/600=15.3$ mm。

3.2 中边跨比对支座反力的影响

混凝土连续梁跨径一般采用不等跨布置,若边跨

过长会削弱边跨刚度,增大中跨跨中正弯矩;过短则会使桥台支座产生负反力,一般边跨与中跨比值为0.5~0.8^[10]。选取边跨长度为0.5 l 、0.6 l 、0.7 l 、0.8 l 进行数值分析,计算出相应的恒载(结构自重+二期恒载)、温度梯度及不均匀沉降产生的支座反力如图8所示。

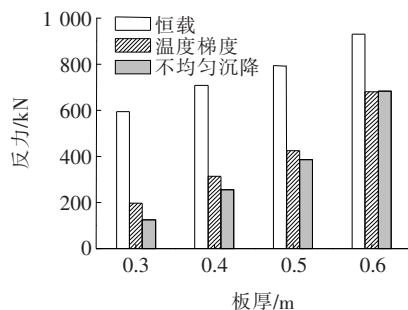


图7 不同板厚1[#]、2[#]支座反力

(温度梯度及不均匀沉降为负反力)

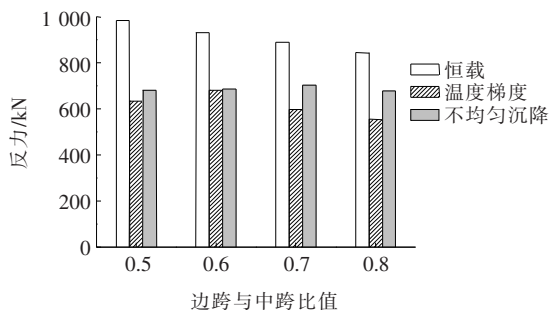


图8 不同跨径比1[#]、2[#]支座反力

(温度梯度及不均匀沉降为负反力)

由图8可知:增加边跨与中跨比值结构产生负反力减少,但温度梯度和不均匀沉降产生负反力与恒载比值变化不明显,最大值和最小值在数值上也非常接近,相差在8.8%以内。说明针对小跨径桥梁,增加边跨与中跨比值对支座负反力影响相对较小。

3.3 桥墩支承条件对结构内力的影响

连续板桥墩柱与板主要有铰接和固结两种连接方式^[11]。墩柱与板身固结,分担了板身在恒载、活载作用下的弯矩,进一步削弱了墩顶处板身负弯矩峰值,同时避免了支座出现负反力的情况。但是,采用墩板固结形式,支承位置应力复杂,温度梯度和不均匀沉降会使结构产生较大次内力。为此考虑3种连续板桥受力:①桥墩与板全部固结;②中间桥墩与板固结,两侧采用铰接形式;③桥墩与板全部铰接。采用墩梁固结时结构不产生负反力。因此,只对比分析不同桥墩支承条件下单位板宽结构内力。对比图4中Ⅲ-Ⅲ截面单位板宽墩顶负弯矩和跨中正弯矩,如表2所示。

表 2 Ⅲ—Ⅲ 截面单位板宽弯矩计算结果 kN·m

支承类型	跨中最大正弯矩				墩顶最大负弯矩			
	恒载	汽车荷载	正温度梯度	不均匀沉降	恒载	汽车荷载	正温度梯度	不均匀沉降
全部固结	12.6	32.2	185.5	15.7	−277.8	−59.1	482.8	−118.1
部分固结	12.8	32.5	183.8	16.2	−282.0	−66.0	514.8	−129.9
全部铰结	14.3	33.7	191.7	18.5	−309.8	−92.1	533.3	−204.6

由表 2 可知:墩柱与板身全部固结在跨中正弯矩和墩顶最大负弯矩均最小,其中不均匀沉降效果最明显,固结体系比支承体系墩顶最大负弯矩减少了 42%,恒载和汽车荷载作用下负弯矩峰值分别减少了 10%和 35%,但固结体系较支承体系跨中最大正弯矩变化不明显。因此,针对宽幅连续板桥采用墩柱与板全部固结的连接方式桥梁结构受力性能最好。

3.4 结构设计优化

基于以上分析,结构优化设计中,将原桥板厚进行削减,将桥墩位置板厚降至 70 cm。跨中采用空心截面,将 $\phi 250$ mm PVC 管埋入现浇混凝土板中,形成永久性的芯模,减小主梁刚度,降低支座不均匀沉降的负反力影响。提高边跨与中跨比值(0.65),可以改善结构受力,增大边跨恒载支撑反力。采用墩梁固结的形式可以消除支座负反力的影响。但考虑到该桥跨径较小,墩高仅 4 m,固结后结构承受的次内力较大。故结构优化未采用墩梁固结的措施。其优化后的主梁结构如图 9 所示。

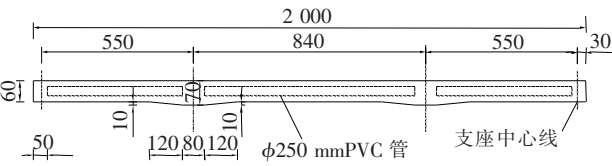


图 9 优化后主梁结构图(单位:cm)

4 结论

(1) 对于板桥,特别是桥面宽度较大的桥梁,其横桥向受力呈现出明显的不均匀性,因此仅采用单梁模型进行分析不尽合理,只有建立能反映结构横向受力的板壳模型或梁格模型进行分析,才能对该结构承载能力进行较为合理的评价。

(2) 板壳模型虽然计算简单,但不便于非线性温度梯度荷载的施加,且针对空心截面计算较为麻烦。

梁格模型易于理解和使用,可以避免上述板壳模型存在的问题。

(3) 经过计算分析,混凝土板厚对支座反力影响较大。板厚超过 0.5 m 时,支座出现负反力,板过薄则导致结构挠度较大;对于跨径较小的连续板桥,调整边跨与中跨比值对支座负反力影响不大;采用墩板固结形式可以减少墩顶最大负弯矩。

(4) 温度梯度和不均匀沉降导致支座产生较大负反力,针对类似情况建议采取以下措施:① 在进行桩基础设计时应以桩的沉降量作为桩长控制因素,减少不均匀沉降;② 增加桥面铺装层厚度减小温度梯度影响;③ 支座选型以拉应力为控制因素。

参考文献:

[1] 王伯惠,张亚军. 无梁板桥[M]. 北京:人民交通出版社,1998.

[2] 翟晓亮,陈定市. 中小跨径桥梁结构形式优选[J]. 中外公路,2018,38(3):185—189.

[3] 周瀛,叶见曙,钱培舒,等. 钢筋混凝土连续板桥裂缝分析[J]. 公路,2003(9):52—55.

[4] 韦锋,杨洋,苏成,等. 华南地区混凝土刚构桥典型病害调查及分析[J]. 中外公路,2018,38(1):95—98.

[5] 戴公连,李德建. 桥梁结构空间分析设计方法与应用[M]. 北京:人民交通出版社,2001.

[6] E·C 汉勃利[英]. 桥梁上部构造性能[M]. 北京:人民交通出版社,1982.

[7] JTG 3362—2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

[8] 杨勇. 基础不均匀沉降对连续梁桥结构力学性能的影响研究[D]. 兰州交通大学硕士学位论文,2013.

[9] 杨兴,武电坤. 短边跨连续梁设计理论与创新技术研究[J]. 中外公路,2017,37(1):144—147.

[10] 范立础. 桥梁工程(上册)[M]. 3 版. 北京:人民交通出版社,2017.

[11] 徐海军,常江. 长悬臂无梁板桥梁结构分析与设计优化[J]. 桥梁建设,2010(6):53—57.