

采用 PPC 设计的斜拉桥模型疲劳试验研究

颜东煌¹, 邹恺¹, 袁明¹, 谭龙田¹, 刘昀², 姚方舟²

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南交通职业技术学院; 3. 邵阳市交通建设质量安全监督站)

摘要:为了研究部分预应力混凝土(PPC)斜拉桥体系的抗疲劳性能,对某 PC(预应力混凝土)斜拉桥的缩尺模型进行了 B 类预应力混凝土的设计并进行了相关疲劳试验,从 3 个维度(主梁位移、索力变化、刚度)综合验证了部分预应力设计在斜拉桥设计上的可行性。研究表明:采用部分预应力设计的斜拉桥主梁在正常行车状态下,拉应力控制较好的情况下,混凝土在拉压区交替变化时不会产生损伤开裂。几乎不对主梁刚度造成退化,同时位移与索力的恢复较好。还发现边界条件对于整个体系影响较大,承受了较大的荷载,因此优化边界条件,可以改善斜拉桥的荷载分配,从而改善受力性能。表明了混凝土斜拉桥采用部分预应力设计是可行的,可为后续 PPC 斜拉桥的研究提供思路。

关键词: 桥梁工程; 斜拉桥; 部分预应力; 刚度; 疲劳

1 引言

混凝土斜拉桥是一种桥面体系受压,支撑体系受拉的特殊桥梁结构。其桥面系由加劲梁构成,并由斜拉索组成支撑体系。每一根斜拉索相当于一个弹性支撑,为主梁带来强大的竖向支撑力时,水平分力不可避免地给主梁储备了过多的压应力。适当地储备压应力对于提高主梁的抗弯能力是有利的,而过大的压应力则会使混凝土存在被压裂的隐患。

部分预应力混凝土(PPC)桥梁是指在预加力与外加荷载的作用下允许主梁存在一定的拉应力或开裂现象,采用 PPC 设计在节约成本的同时,也使得部分桥梁的内力设计更为合理,为不适合采用全预应力设计的桥梁提供了额外的解决方案。丁大钧、卢树圣等较早地研究了 PPC 构件的最大裂缝宽度计算方法及 A、B 类 PPC 构件的裂缝宽度界限;钟明全研究了疲劳作用对 T 形截面 PPC 简支梁力学性能的影响,发现受拉区混凝土的疲劳开裂致使裂纹宽度变大及钢筋应力增加。而现阶段采用 PPC 设计的桥梁大多以梁式桥为主,且一般适用于中小跨径,对于大跨度混凝土桥梁设计应用的研究则相对较少。若对混凝土斜拉桥部分主梁采用 PPC 设计,允许混凝土内存在一定的拉应力

甚至携带裂缝工作,混凝土主梁内应力的设计允许范围更大,且斜拉桥索力具有可调性,故采用 PPC 设计的斜拉桥逐渐引起学者们的注意。颜东煌、刘昀等已经完成了 PPC 斜拉桥的理论可行性论证及相应计算,并进行了斜拉桥静力模型受力性能的相关试验。

混凝土斜拉桥结构经过若干年的发展,随着跨径的不断增长,相应地要求其结构自重轻量化,以致于结构受到变化的动荷载的影响比重增大。在反复变化的疲劳荷载作用下,混凝土主梁逐步累积损伤,因疲劳问题导致的桥梁坍塌事故在世界范围内时有发生。所以在现代大跨径桥梁结构设计中,也是体现桥梁长期性能的一个重要指标。该文以某 PC 斜拉桥为背景,开展该桥节段缩尺模型试验,通过索力及预应力对斜拉桥模型进行 PPC 设计,并进行疲劳试验,通过挠度、索力、截面刚度等指标验证斜拉桥采用 PPC 设计的可能,以期后续的设计与应用提供参考。

2 试验梁概况

2.1 试验梁制作

选取某主跨 220 m 的 PC 斜拉桥为原型桥,选取其中 5 个节段,根据相似理论,制作相似比为 1:7 的缩尺模型作为模型试验梁,设计参数如表 1 所示。其中 L 为

收稿日期:2020-04-17

基金项目:国家重点研究基础发展计划(973 计划)项目(编号:2015CB057706);国家自然科学基金资助项目(编号:51678068, 51878074);湖南省教育厅科学研究项目优秀青年项目(编号:18B140)

作者简介:颜东煌,男,博士,教授,博士生导师。E-mail:yandonghuang@126.com

试验梁全长, L_0 为计算跨度, h 为梁高, b 为腹板宽度, f_{plk} 为钢绞线极限强度标准值。混凝土内预埋特定角

度的高强螺杆用于斜拉索与主梁间的连接, 在试验前将梁存放 28 d 以上使混凝土强度达到设计要求。

表 1 模型梁设计参数

预应力筋(1×7 钢绞线)			普通钢筋		$L/$	$L_0/$	$h/$	$b/$	混凝土强度等级
f_{plk}/MPa	束数	每束根数	纵筋	箍筋	mm	mm	mm	mm	
1 860	2	2	HRB335	HRB335	7 196	6 736	420	195	C50

2.2 试件所用材料

混凝土选用 C50 细骨料混凝土, 浇筑试件时预留试块, 模型梁截面与原桥截面配筋率相同, 模型梁配筋如图 1 所示。纵筋采用 HRB335 级钢筋, 直径分别为 10、8 mm, 在梁内布置间距为 100 mm。

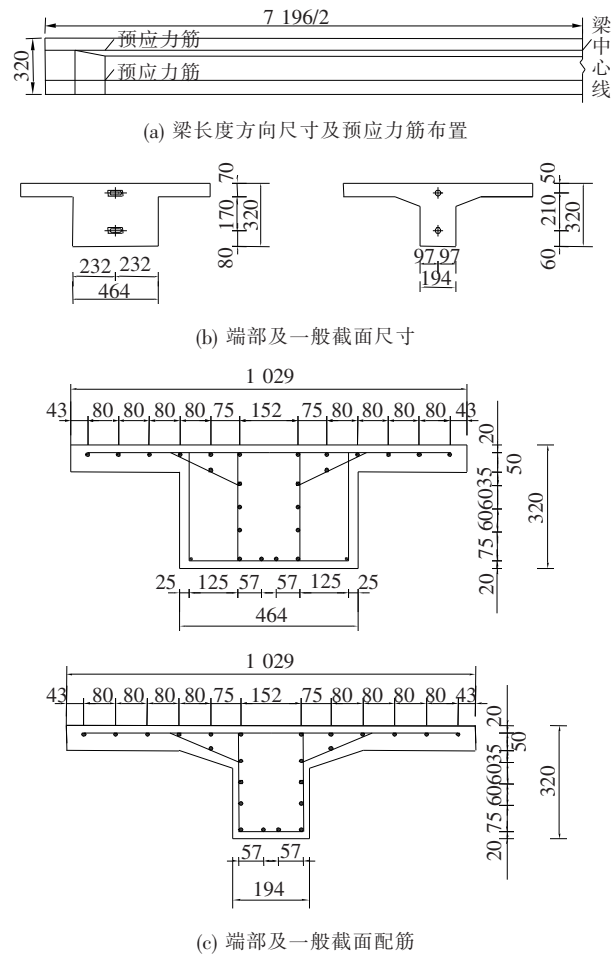


图 1 预应力混凝土模型梁尺寸及配筋(单位:mm)

预应力筋采用 4 束 1×7 钢绞线, 公称直径 15.2 mm, 采用上下两股直线布置, 后张法单端张拉, 张拉控制应力 $\sigma_{con} = 930 \text{ MPa}$ (50% 预应力), 在张拉时试验梁存放超过 28 d, 斜拉索采用 1 束 1×7 钢绞线进行模拟, 具体张拉力根据模型计算所得进行控制。主梁内预埋竖向螺杆和斜向螺杆分别与杠杆系统和斜拉索进行连接, 竖向与斜向螺杆分别采用直径 12、20 mm 的

高强螺杆。模型梁模型与内部钢筋布置如图 2 所示。

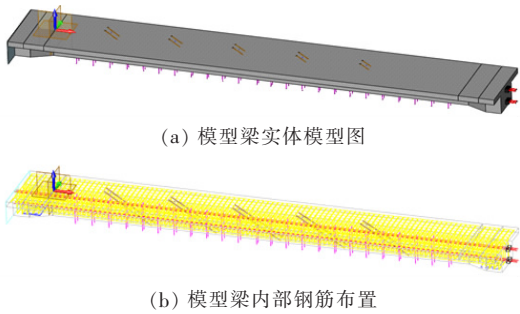


图 2 试验梁模型及内部钢筋布置

2.3 部分预应力斜拉桥主梁的设计

按照原桥有限元模拟提取最不利荷载组合后采用 Midas/Civil 建立装置的有限元模型, 主梁采用梁单元, 弹簧与斜拉索采用桁架单元模拟, 预应力及斜拉索索力分别采用体内力及体外力进行模拟, 建立的模型如图 3 所示。采用相关规范规定的车道荷载方式进行加载设计, 并按照相似比进行一定的缩减, 取 C50 混凝土极限抗拉强度为 2.8 MPa, 调索至 1.0 倍恒载 + 1.0 倍活载下主梁不开裂, 1.0 倍恒载 + 1.4 倍活载下设计截面刚好开裂的情况, 符合 B 类部分预应力混凝土构件设计。设计张拉索力及恒载配重大小如表 2 所示。此时主梁下缘储备压应力为 2.98 MPa。成桥状态下主梁下缘应力分布如图 4 所示。

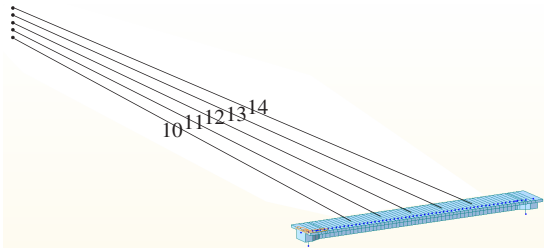


图 3 有限元计算模型

3 疲劳加载设计

3.1 荷载类型及加载装置

加载部分分为恒载的施加与疲劳荷载的施加, 恒

表 2 设计张拉索力及恒载配重大小

斜拉桥模型设计张拉索力/kN					预应力筋张拉控制应力/MPa	恒载大小/(kN·m ⁻¹)
10 [#]	11 [#]	12 [#]	13 [#]	14 [#]		
45.5	47.0	48.4	48.8	51.1	930	25.03

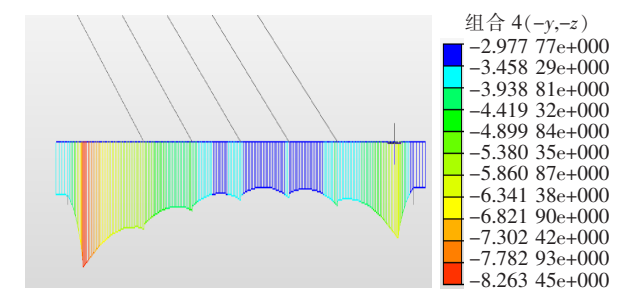


图 4 成桥状态下下缘正应力分布(单位:MPa)

载采用砝码加载,并通过杠杆挂篮系统施加到主梁上,杠杆放大比例为 1:4;试验在 PMW-800 电液式脉动疲劳试验机上进行,疲劳荷载采用作动器对加载装置加载,加载装置通过主梁上预留锚孔与主梁相连并通过托梁与主梁锚固,加载装置如图 5 所示。

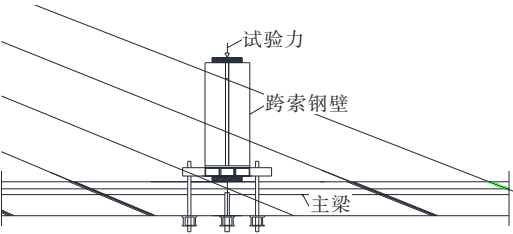


图 5 主梁加载示意图

3.2 加载力计算及复核

由实桥荷载谱计算得到原桥跨中底缘应力幅为 3.0 MPa,由应力等效通过有限元模型换算加载集中力为 12 kN,如图 6 所示。

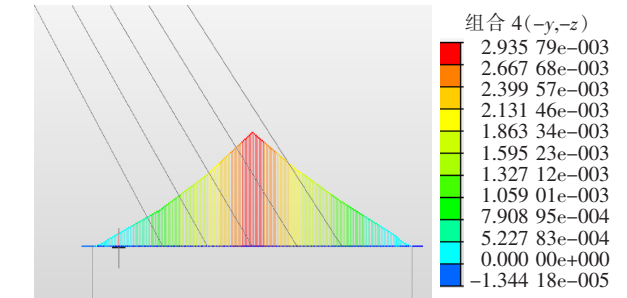


图 6 集中力换算应力(单位:kPa)

进行预试验时发现恒载及加载装置质量带来的惯性力对于疲劳荷载的加载有较大影响,故采用跨中底

缘的实际应变变化作为控制值,得到考虑惯性力影响的集中力为 7 kN,故根据应力等效的原则,疲劳加载时取集中力变化量为 7 kN,循环静载时集中力采用 12 kN。叠加加载装置自重及作动器预压力后,梁底正应力 $\sigma = -1.304$ MPa,如图 7 所示;加载至最大值时,梁底正应力 $\sigma = 1.516$ MPa,如图 8 所示,梁底正应力在拉压区交替变化,满足试验设计要求。

3.3 试验加载方案

根据 GB 50152-92 相关规定采用正弦波加载,试验加载频率为 1.5 Hz,在疲劳荷载加至 1 万、2 万、10 万、20 万、50 万、100 万、120 万、150 万、180 万、210 万、250 万次时停机进行一个循环的静载试验,从循环的下限值分级加载至上限值,读取每级荷载下的设计关心截面的挠度及斜拉索索力变化值,重复 1~2 次取均值。疲劳荷载与循环静载参数如表 3 所示。

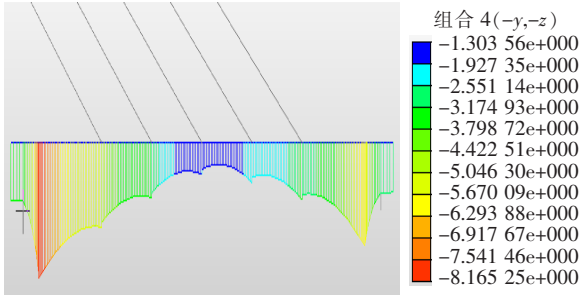


图 7 预压后主梁应力分布(单位:MPa)

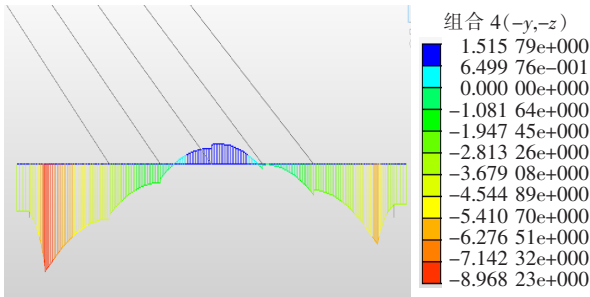


图 8 最大荷载下主梁应力分布(单位:MPa)

表 3 疲劳与循环静载参数

设计应力幅 $\Delta\sigma$ / MPa	疲劳加载参数			循环静载加载参数		
	上峰值 F_{\max} / kN	下峰值 F_{\min} / kN	$F_{\max} - F_{\min}$	上峰值 F'_{\max} / kN	下峰值 F'_{\min} / kN	$F'_{\max} - F'_{\min}$
3.0	10.0	3.0	7.0	16.0	4.0	12.0

3.4 数据采集方案

在弹簧支座 K1、K2 与跨中,1/4 与 3/4 跨处,每根斜拉索的下方及相邻斜拉索之间共布有 13 个位移

传感器,用以测量疲劳过程中每次循环加载试验及静载工况试验下的荷载—挠度曲线。采用 20 t 穿心式振弦锚索计对 5 根斜拉索索力进行测量,用以测量循环加载与静载下索力的变化情况。DH3822 施工状态监测系统行动应变的采集及疲劳参数控制,模型实体总装如图 9 所示。

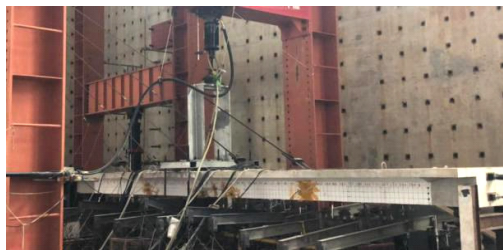


图 9 试验模型总装

4 试验结果及分析

4.1 主要试验现象

在进行疲劳加载过程中,采用疲劳机与动态应变共同控制。加载时主梁同挂篮一同振动,跨中震荡量较大,两侧弹簧也有一定量的压缩,斜拉索无特殊变化。疲劳加载前后发现除索力随温度有些微变化外,主梁挠度变化较为平稳,无残余位移,未发现主梁有开裂现象,主梁完好无可见异状。穿插其中进行的循环静载索力线性变化的趋势较好且加载前后也未见特殊变化,基本可认为在该工况作用下主梁及体系无损伤,主梁跨中最大拉应力未达到极限,体系尚处于线弹性阶段,与设计预期相符。

4.2 试验梁位移

弹簧支座荷载位移曲线见图 10,跨中截面荷载位移曲线见图 11,最大荷载下各截面位移见图 12。

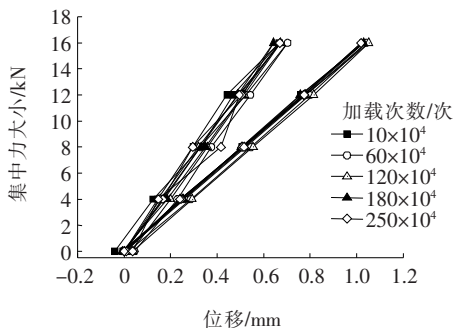


图 10 弹簧支座荷载位移曲线

从图 10 可以看出:不同的疲劳加载次数下,近塔端支座最大位移为 0.6 mm,远塔端支座最大位移为

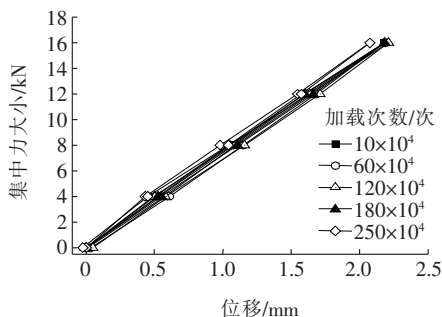


图 11 跨中截面荷载位移曲线

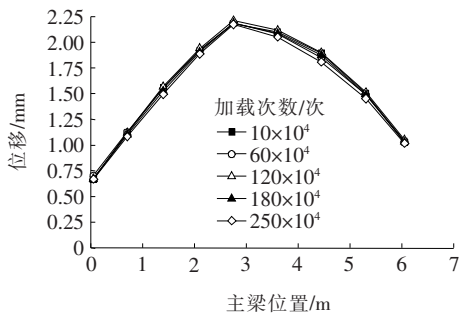


图 12 最大荷载下各截面位移

1.1 mm,远塔端荷载位移曲线线性程度较好,基本为线性,而近塔端的支座荷载曲线存在一定的跳动偏差,且在不同加载次数下两支座的荷载位移曲线存在一定的平行偏移量,考虑是由于温度场变化对于近塔端支座的影响更大,差异量较小,对曲线的趋势不造成较大影响,且存在测量误差,故认为支座的工作状态较好,主梁的边界条件不发生变化;由图 11 可知:主梁跨中截面在不同加载次数下的荷载位移曲线线性程度较好,截面最大位移为 2.4 mm,不同加载次数下的曲线也并非完全重合,同支座变化有一定的相似性,但基本也可以判定主梁仍处在线弹性阶段,梁内混凝土与钢筋仍在联合受力,疲劳对主梁基本不造成损伤;由图 12 可知:主梁各关键截面的最大位移响应变化并不明显,曲线随疲劳次数的变化震荡变化,震荡量最大为 2.3% 左右,基本可认为最大位移曲线与疲劳加载次数无关,主梁基本无损伤。

4.3 主梁截面刚度变化

刚度一定程度上可以反映结构的健康情况且是基于测量的挠度进行计算的,该文采用各截面单位位移下的集中力作为刚度基准,计算所得基准刚度如表 4 所示。随后根据基准刚度计算刚度退化系数,作出典型次数下的疲劳刚度变化曲线(图 13)。

由图 13 可知:各截面刚度随疲劳次数增加在 1.0 基准线上下震荡,最大震荡量不超过 5%,甚至结束时

表 4 截面基准刚度

截面	基准刚度/ (kN · mm ⁻¹)	截面	基准刚度/ (kN · mm ⁻¹)
近塔端支座	23.964	3/4 跨	8.447
1/4 跨	10.256	远塔端支座	15.559
1/2 跨	7.339		

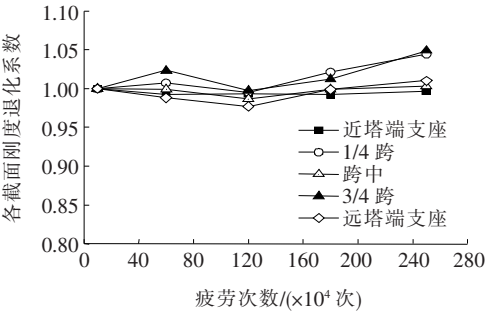


图 13 全过程刚度曲线

部分截面刚度超越基准线。此处虽受到温度场变化及仪器测量精度的影响,但仍可以看出:主梁各截面的刚度几乎不变化,因此可认为在此疲劳过程中,体系刚度基本不发生变化,整个体系在正常车辆疲劳工况下不发生损伤。说明全寿命正常行车荷载作用下,采用 B 类预应力设计的混凝土斜拉桥体系具有较好的抗疲劳性能。

5 结论

该文基于 PPC 斜拉桥模型疲劳试验结果,从位移、索力、刚度 3 个维度研究了 PPC 斜拉桥体系在正常行车荷载下的抗疲劳性能,得到以下结论:

- (1) 采用部分预应力设计的斜拉桥主梁在正常行车状态下,拉应力控制较好时不会使主梁开裂;且疲劳荷载使得混凝土在拉压区交替时,不会使混凝土造成损伤并开裂。验证了 PPC 斜拉桥全寿命周期内单一正常行车荷载不会对主梁刚度造成损伤。
- (2) 在试验过程中,整个试验模型斜拉索索力恢复较好,斜拉索索力未出现明显变化,整个体系在试验前后模型受力状态基本不变,所有斜拉索变形均较小,因此拉索的疲劳性能较好。

(3) 边界条件对试验结果影响较大,荷载被支座平衡较大部分,斜拉索承载力还有很大余量。合理对边界条件进行调整,可以优化相应设计。

综上,该试验验证了部分预应力在混凝土斜拉桥中设计应用的可行性,在考虑按规范中 B 类部分预应力设计时,仍能使体系具有较好的抗疲劳性能,同时,需要重点关注边界条件对结构的影响。该试验结论可为部分预应力混凝土斜拉桥设计提供参考,为后续 PPC 斜拉桥模型的疲劳寿命预测、极限承载力等相关方面的研究提供思路。

参考文献:

[1] 林元培. 斜拉桥[M]. 北京:人民交通出版社,2004.

[2] 刘昀,颜东煌. 部分预应力混凝土斜拉桥设计的合理性分析[J]. 中外公路,2015(2).

[3] 孙宝俊,郑文忠,吕志涛. 部分预应力混凝土结构裂缝控制设计建议[J]. 中国公路学报,1995(2).

[4] 李忠诚,李唐宁. 部分预应力(PPC)梁裂缝控制计算的探讨[J]. 建筑结构,2001(11).

[5] 于琦,孟少平. 部分预应力混凝土受弯构件裂缝宽度计算方法探讨[J]. 建筑结构,2009(3).

[6] 卢树圣. 预应力度及部分预应力混凝土 A、B 类构件分类限值[J]. 长沙铁道学院学报,1991(3).

[7] 丁大钧,金芷生. 部分预应力混凝土受弯构件刚度和最大裂缝宽度的计算[J]. 土木工程学报,1981(1).

[8] 钟明全. 疲劳加载对部分预应力混凝土梁钢筋应力、裂缝宽度及静力强度的影响[J]. 西南交通大学学报,1995(3).

[9] 刘昀,袁明,颜东煌. 大跨径混凝土斜拉桥模型试验[J]. 长安大学学报(自然科学版),2019(5).

[10] 刘昀. 部分预应力混凝土斜拉桥非线性性能与设计方法研究[D]. 长沙理工大学博士学位论文,2015.

[11] 周明华. 土木工程结构试验与检测[M]. 南京:东南大学出版社,2002.

[12] 肖凯. 基于刚度相似原理的斜拉桥缩尺模型的设计研究[D]. 武汉理工大学硕士学位论文,2012.

[13] JTG D62—2012 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

[14] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].

[15] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].

[16] GB 50152—92 混凝土结构试验方法标准[S].