

# 城市独柱墩桥梁抗倾覆加固改造设计探讨

杜 军

(南京市城市道路管理中心, 江苏 南京 210018)

**摘 要:**独柱墩桥梁具有结构轻巧、占地少等优点,被广泛应用在城市立交和高架上。近年来,独柱墩桥梁倾覆事故频繁发生,独柱墩桥梁结构的稳定性问题越来越受到桥梁管理者的重视。结合南京市独柱墩桥梁抗倾覆加固改造的工程实践,首先确定了独柱墩桥梁加固改造原则;然后,对不同桥型进行加固改造方案比选,优化抗倾覆加固设计;最后,对桥梁特征状态1和特征状态2情况下如何进行改造进行了总结。

**关键词:**独柱墩桥梁;抗拉拔装置;抗倾覆稳定性系数

**中图分类号:**U445.7+2

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-7716(2022)03-0069-05

## 0 引言

独柱墩桥梁具有结构轻巧、占地少、施工方便等优点,往往是城市立交和高架桥优选的下部结构形式。这类桥梁的上部结构通常采用连续箱梁的结构来提升跨越能力,达到城市土地资源的高效利用。但近年来,独柱墩桥梁倾覆事故频发。2017年4月杭州萧山高架桥发生倾覆垮塌,2019年10月无锡312国道桥梁发生倾覆垮塌。这些事故给人民生命财产造成重大损失。本文介绍在不显著改变原有桥梁结构受力体系的条件下对独柱墩进行改造,并使其技术指标满足现行设计规范的要求。

## 1 独柱墩桥梁排查情况

2018年11月1日实施的《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)<sup>[1]</sup>增加了桥梁稳定性设计指标,即在持久状况下,梁桥不应发生结构体系改变,并应同时满足下列规定:

特征状态1:在作用基本组合下,单向受压支座始终保持受压状态。

特征状态2:按作用标准进行组合时,整体式截面简支梁和连续梁的作用效应应符合式(1)要求。

$$\frac{\sum S_{1k,i}}{\sum S_{sk,j}} \geq k_{qf} \quad (1)$$

式中: $k_{qf}$ 为横向抗倾覆稳定性系数,取 $k_{qf}=2.5$ ;  $\sum S_{1k,i}$ 为使上部结构稳定的效应设计值;  $\sum S_{sk,j}$ 为使上部结

构失稳的效应设计值。

2018年,南京市按照新颁布的《城市桥梁养护技术标准》(CJJ 99—2017)<sup>[2]</sup>中有关独柱墩桥梁的养护要求,对全市独柱墩桥梁进行隐患排查,并按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)对独柱墩桥梁的横向抗倾覆稳定性进行了验算。结果显示,在南京市29座立交和高架桥中共有独柱墩桥梁308联,其中148联横向抗倾覆性能满足规范要求,占比48%,160联横向抗倾覆性能不满足规范要求。在不满足规范要求的桥梁中,有121联(钢箱梁1联)特征状态1不满足规范,占比39.2%;有7联(钢箱梁1联)特征状态2不满足规范,占比2.3%;有32联(钢箱梁7联)特征状态1和特征状态2都不满足规范,占比10.4%。

## 2 独柱墩桥梁加固改造原则

根据南京市独柱墩桥的调查计算结果,综合考虑独柱墩桥梁结构和构造特点、抗倾覆机理及过程、桥梁运行状态和交通现状等多方面因素,提出以下加固改造原则:

(1)提高独柱墩桥梁抗倾覆性能,加固改造后抗倾覆性能满足现行规范要求。

(2)加固改造不显著改变结构受力体系,尽可能降低对既有构件的影响。

(3)加固改造后的桥梁满足原功能要求(如桥下净空)。

(4)考虑桥梁空间布局及周边环境,改造后桥梁外观与周围环境相协调。

(5)尽可能降低对交通的干扰。

收稿日期:2021-03-30

作者简介:杜军(1964—),男,学士,研究员级高级工程师,从事城市桥梁隧道养护管理。

3 桥梁支座脱空改造方案

对于存在支座脱空风险的桥梁,在其梁底增设抗拉拔装置。抗拉拔装置由锚固钢结构及销轴组成。锚固钢结构分为上下两部分,通过销轴连接,通过植入螺杆分别与箱梁底和桥墩连接,允许箱梁产生水平向位移。改造方案见图1和图2。

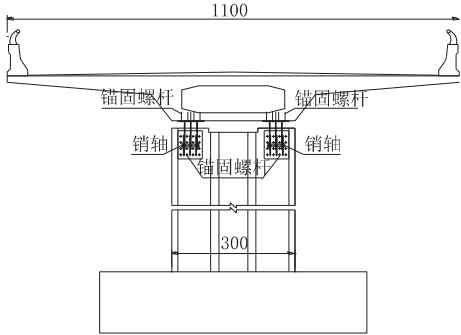


图1 抗拉拔装置示意图(单位:cm)

4 抗倾覆稳定性系数不足的改造方案

为确定独柱墩单支座桥梁抗倾覆加固改造的整体方案(即只在一个中墩增设支座,还是在所有中墩均增设支座),选取南京市四跨一联曲线型独柱墩桥梁进行分析对比,确定单支座混凝土箱梁的整体改造方案。



图2 增设抗拉拔装置改造后照片

改造方案一:只在一个中间墩两侧增设支座,假定恒载作用下,仅原设计支座参与受力,在活载作用下,如外侧倾覆,则内侧支座不受力,外侧支座受力。支座受力如图3所示,抗倾覆验算见表1。

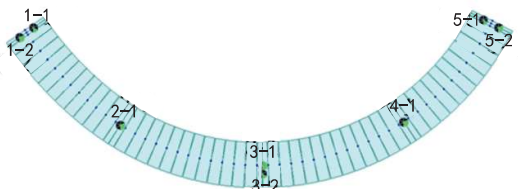


图3 混凝土箱梁桥抗倾覆整体改造方案一示意图

改造方案二:对三个中间墩两侧均增设支座,假定恒载作用下,仅原设计支座参与受力,在活载作用下

表1 混凝土箱梁桥抗倾覆改造方案一验算表

| 验算项目                         |                                                                | 支座编号                        |       |       |        |     |       |        |       |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------|-------|--------|-----|-------|--------|-------|
|                              |                                                                | 1-1                         | 1-2   | 2     | 3-1    | 3-2 | 4     | 5-1    | 5-2   |
|                              |                                                                | 失效支座与有效支座间间距 $l_i$ /m       |       |       |        |     |       |        |       |
|                              |                                                                | 3                           | 0     | 0     | 1.5    | 0   | 0     | 3      | 0     |
| 特征<br>状态 1<br>验算<br>/kN      | $1.0R_{Gki}+1.4R_{Q1ki,11}+0.75\times 1.4R_{Q2ki}+1.1R_{Q3ki}$ | -485                        | 2 244 | 6 435 | 1 557  | -45 | 5 091 | 408    | 836   |
|                              | $1.0R_{Gki}+1.4R_{Q1ki,21}+0.75\times 1.4R_{Q2ki}+1.1R_{Q3ki}$ | 330                         | 1 026 | 4 922 | 1 650  | 635 | 5 840 | 197    | 909   |
|                              | $1.0R_{Gki}+1.4R_{Q1ki,31}+0.75\times 1.4R_{Q2ki}+1.1R_{Q3ki}$ | 44                          | 1 433 | 5 774 | 868    | 974 | 6 636 | -312   | 1 689 |
|                              | $1.0R_{Gki}+1.4R_{Q1ki,41}+0.75\times 1.4R_{Q2ki}+1.1R_{Q3ki}$ | 88                          | 1 095 | 5 849 | 1 615  | 673 | 4 915 | 404    | 875   |
|                              | $1.0R_{Gki}+1.4R_{Q1ki,51}+0.75\times 1.4R_{Q2ki}+1.1R_{Q3ki}$ | 296                         | 998   | 5 224 | 1 470  | 307 | 6 330 | -484   | 2 234 |
| 验算结论                         |                                                                | 原支座不满足要求(规范要求支反力 $\geq 0$ ) |       |       |        |     |       |        |       |
| 特征<br>状态 2<br>验算 /<br>(kN·m) | 稳定效应 $M_0=\sum R_{Gki}l_i$                                     | 1 870                       | 0     | 0     | 7 274  | 0   | 0     | 2 263  | 0     |
|                              | $M_1=\sum (R_{Q1ki,11}+R_{Q2ki}+R_{Q3ki})l_i$                  | -2 588                      | 0     | 0     | -4 374 | 0   | 0     | -991   | 0     |
|                              | $M_2=\sum (R_{Q1ki,21}+R_{Q2ki}+R_{Q3ki})l_i$                  | -843                        | 0     | 0     | -4 274 | 0   | 0     | -1 443 | 0     |
|                              | $M_3=\sum (R_{Q1ki,31}+R_{Q2ki}+R_{Q3ki})l_i$                  | -1 456                      | 0     | 0     | -5 112 | 0   | 0     | -2 535 | 0     |
|                              | $M_4=\sum (R_{Q1ki,41}+R_{Q2ki}+R_{Q3ki})l_i$                  | -1 361                      | 0     | 0     | -4 312 | 0   | 0     | -1 001 | 0     |
|                              | $M_5=\sum (R_{Q1ki,51}+R_{Q2ki}+R_{Q3ki})l_i$                  | -915                        | 0     | 0     | -4 467 | 0   | 0     | -2 902 | 0     |
|                              | $M_0/M_1$                                                      | 1.43                        |       |       |        |     |       |        |       |
|                              | $M_0/M_2$                                                      | 1.74                        |       |       |        |     |       |        |       |
|                              | $M_0/M_3$                                                      | 1.25                        |       |       |        |     |       |        |       |
|                              | $M_0/M_4$                                                      | 1.71                        |       |       |        |     |       |        |       |
|                              | $M_0/M_5$                                                      | 1.38                        |       |       |        |     |       |        |       |
| 验算结论                         |                                                                | 不满足要求(规范要求稳定系数 $\geq 2.5$ ) |       |       |        |     |       |        |       |

注:支座竖向力以向下为正,向上为负。

下,如外侧倾覆,则内侧支座不受力,外侧支座受力。支座受力如图 4 所示,抗倾覆验算结果见表 2。

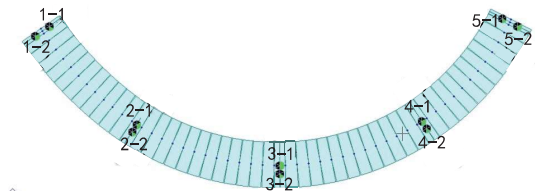


图 4 混凝土箱梁桥抗倾覆整体改造方案二示意图

对比以上方案:方案一独柱墩间隔设置双支座时,特征状态 1 与特征状态 2 的验算结果均不满足规范要求;方案二独柱墩均增设双支座时,特征状态 1 验算结果显示原支座满足要求,特征状态 2 验算结果表明稳定性满足规范要求。通过以上计算分析还可以看出,对于特征状况 1 和特征状态 2 同时不满足设计规范要求时,可以通过在每个中间墩增设支

表 2 混凝土箱梁桥抗倾覆改造方案二验算表

| 验算项目                         |                                                                | 支座编号                       |       |        |       |        |       |        |       |        |       |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|                              |                                                                | 1-1                        | 1-2   | 2-1    | 2-2   | 3-1    | 3-2   | 4-1    | 4-2   | 5-1    | 5-2   |
|                              |                                                                | 失效支座与有效支座间间距 $l_i$ /m      |       |        |       |        |       |        |       |        |       |
|                              |                                                                | 3                          | 0     | 1.5    | 0     | 1.5    | 0     | 1.5    | 0     | 3      | 0     |
| 特征<br>状态 1<br>验算<br>/kN      | $1.0R_{Gki}+1.4R_{Q1ki,11}+0.75\times 1.4R_{Q2ki}+1.1R_{Q3ki}$ | 88                         | 2 360 | 3 715  | 218   | 3 461  | -249  | 3 750  | -170  | 712    | 901   |
|                              | $1.0R_{Gki}+1.4R_{Q1ki,21}+0.75\times 1.4R_{Q2ki}+1.1R_{Q3ki}$ | 606                        | 1 105 | 2 954  | 1 536 | 3 443  | 235   | 3 674  | -187  | 707    | 925   |
|                              | $1.0R_{Gki}+1.4R_{Q1ki,31}+0.75\times 1.4R_{Q2ki}+1.1R_{Q3ki}$ | 500                        | 1 404 | 3 742  | 170   | 2 697  | 1 678 | 3 597  | 212   | 580    | 1 262 |
|                              | $1.0R_{Gki}+1.4R_{Q1ki,41}+0.75\times 1.4R_{Q2ki}+1.1R_{Q3ki}$ | 614                        | 1 084 | 3 723  | -162  | 3 436  | 242   | 2 901  | 1 556 | 685    | 969   |
|                              | $1.0R_{Gki}+1.4R_{Q1ki,51}+0.75\times 1.4R_{Q2ki}+1.1R_{Q3ki}$ | 618                        | 1 060 | 3 790  | -131  | 3 447  | -249  | 3 558  | 359   | 124    | 2 209 |
| 验算结论                         |                                                                | 原支座均满足要求                   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |
| 特征<br>状态 2<br>验算 /<br>(kN·m) | 稳定效应 $M_0=\sum R_{Gki} l_i$                                    | 1 870                      | 0     | 7 942  | 0     | 7 274  | 0     | 7 914  | 0     | 2 263  | 0     |
|                              | $M_1=\sum (R_{Q1ki,11}+R_{Q2ki}+R_{Q3ki}) l_i$                 | -1 153                     | 0     | -2 213 | 0     | -1 922 | 0     | -2 169 | 0     | -127   | 0     |
|                              | $M_2=\sum (R_{Q1ki,21}+R_{Q2ki}+R_{Q3ki}) l_i$                 | -44                        | 0     | -3 029 | 0     | -1 941 | 0     | -2 251 | 0     | -138   | 0     |
|                              | $M_3=\sum (R_{Q1ki,31}+R_{Q2ki}+R_{Q3ki}) l_i$                 | -271                       | 0     | -2 184 | 0     | -2 740 | 0     | -2 333 | 0     | -410   | 0     |
|                              | $M_4=\sum (R_{Q1ki,41}+R_{Q2ki}+R_{Q3ki}) l_i$                 | -27                        | 0     | -2 205 | 0     | -1 948 | 0     | -3 079 | 0     | -184   | 0     |
|                              | $M_5=\sum (R_{Q1ki,51}+R_{Q2ki}+R_{Q3ki}) l_i$                 | -18                        | 0     | -2 133 | 0     | -1 937 | 0     | -2 375 | 0     | -1 388 | 0     |
| 稳定<br>系数                     | $M_0 / M_1$                                                    | 3.60                       |       |        |       |        |       |        |       |        |       |
|                              | $M_0 / M_2$                                                    | 3.68                       |       |        |       |        |       |        |       |        |       |
|                              | $M_0 / M_3$                                                    | 3.43                       |       |        |       |        |       |        |       |        |       |
|                              | $M_0 / M_4$                                                    | 3.66                       |       |        |       |        |       |        |       |        |       |
|                              | $M_0 / M_5$                                                    | 3.47                       |       |        |       |        |       |        |       |        |       |
| 验算结论                         |                                                                | 满足要求(规范要求稳定系数 $\geq 2.5$ ) |       |        |       |        |       |        |       |        |       |

注:支座竖向力以向下为正,向上为负。  
座的方案进行改造。

4.1 增设支座改造方案

在墩顶位置设置钢抱箍,钢抱箍与墩柱通过植入螺栓连接。钢抱箍为两块半圆形的箍板,安装时在箍板连接面处设置连接钢板,采用连接螺栓连接。连接钢板处设置肋板保证连接处的钢板传力安全。增设双支座改造方案见图 5 和图 6。

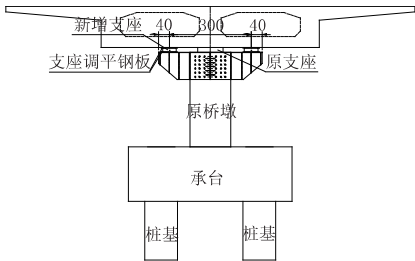


图 5 增设双支座改造示意图(单位:cm)



图 6 增设双支座改造后照片

4.2 增设双支座对原桥梁结构受力影响分析

以下选取桥墩受力较为不利的南京市长江大桥接线高架第一、二联来分析增设支座对桥梁结构的

受力影响。长江大桥接线高架基本资料:设计荷载汽—20,挂—100,桥梁宽8 m,单向两车道,墩高7.05~11.07 m,桥墩直径1.4 m,横梁宽高比4.34/1.36=3.19。

#### 4.2.1 增加支座对桥墩受力影响分析

用Midas软件对桥墩增设双支座的结构受力进行计算,计算结果见图7和图8。



图7 长江大桥接线桥第一联使用阶段正截面抗压承载能力验算图

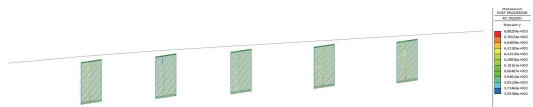


图8 长江大桥接线桥第二联使用阶段正截面抗压承载能力验算图

通过以上桥墩受力验算:桥墩使用阶段的裂缝宽度小于0.1 mm,满足规范要求;桥墩正截面抗压承载能力满足规范要求,且墩柱抗力富余较多,不需要对桥墩进行加固。

#### 4.2.2 增设支座对箱梁横梁受力影响分析

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)8.3.1条规定:当横隔梁宽高比 $B_w/h < 2$ 时,按钢筋混凝土受弯构件进行计算。计算模型单元宽度参照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)附录8.3.2条规定,取3倍横梁腹板宽度,计算结果见图9和图10。

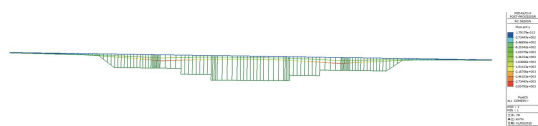


图9 长江大桥接线桥7#墩横梁弯矩包络图

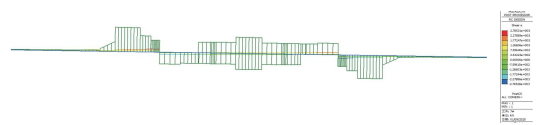


图10 长江大桥接线桥7#墩横梁剪力包络图

通过以上验算,横梁弯矩和剪力均满足规范要求。

### 4.3 钢箱梁花瓶墩改造方案

#### 4.3.1 方案一

在箱梁外侧增设上锚梁,通过高强螺栓与钢箱梁连接,连接位置设置在箱梁腹板及挑梁下缘。腹板处高强螺栓可通过在腹板上开设手孔进行安装。在墩顶两侧增设下锚梁,通过植入螺杆与桥墩连接。上下锚梁间设置抗拉拔球形支座,新设支座设置在箱梁腹板位置。不对梁体进行顶升,使新设支座仅承受

活荷载作用产生的拉(压)力。改造方案见图11。

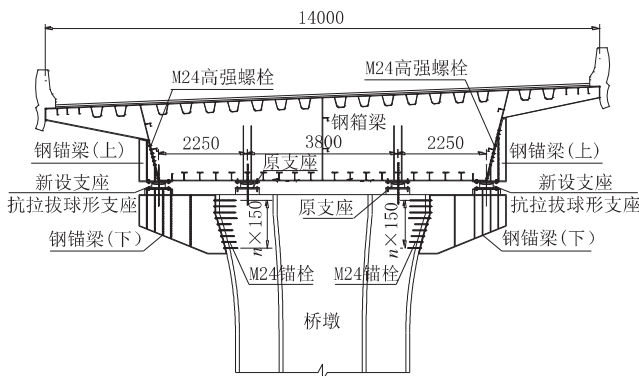


图11 钢箱梁花瓶墩增设双支座改造示意图(单位:mm)

#### (1)优点

桥梁的抗倾覆性能提高明显。

#### (2)缺点

a. 新设支座受力较大。新设支座不仅受汽车偏载作用,还承受梯度温度作用引起的次内力。

b. 新设锚箱与箱梁及桥墩间的连接条件有限,箱梁处仅靠横隔板相连传力,桥墩处钢牛腿悬臂受力较为不利。

c. 部分桥梁改造位置与既有起顶横梁位置相冲突,后期支座更换麻烦,养护困难。

d. 改造费用相对较高。

#### 4.3.2 方案二

采用增设抗拉拔装置对钢箱梁桥抗倾覆进行加固,拉拔装置承载力根据桥梁抗倾覆性能需要确定。抗拉拔装置横向位置与既有支座对齐,保证支座受力与理论一致。抗拉拔装置分上下两部分,通过植入锚栓与箱梁和桥墩连接。对于箱梁内无压重混凝土桥跨,在箱内设置纵横向格子梁与既有结构连接,传递拉力。上下部分之间通过销轴连接,销轴局部切削以提高局部承压能力。下拉杆开设长圆孔,使上下两部分之间可水平自由变位,以适应因温度作用产生的箱梁纵、横向水平位移,从而仅承受活载产生的支座脱空拉力。改造方案见图12。

#### (1)优点

a. 钢箱梁受力更为合理。

b. 改造费用低。

#### (2)缺点

与增设支座相比,抗倾覆稳定性系数略有降低。

综合对比方案一和方案二的优缺点,推荐采用增加抗拉拔装置(方案二)来提高钢箱梁花瓶墩的抗倾覆性能。



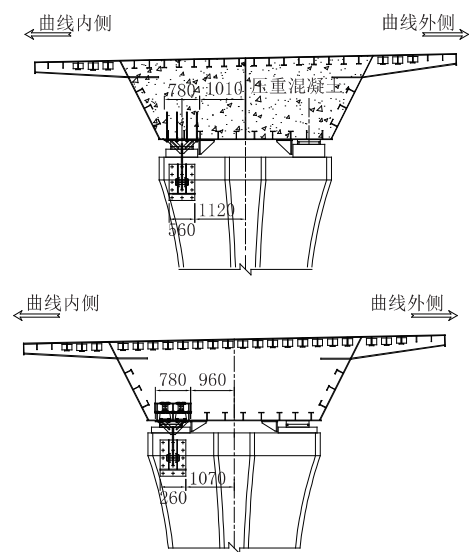


图 12 钢箱梁桥增设抗拉拔装置改造示意图(单位:mm)

5 结 论

通过南京市已完成的城市独柱墩桥梁的改造工程,得出以下主要结论:

(1)特征状态 1 不满足规范的,可在梁底与桥墩之间设置抗拉拔装置,使支座始终处于受压状态。

(2)特征状态 2 不满足规范的,可在独柱墩上采用钢抱箍形式增加支座,提高桥梁的横向抗倾覆稳定性系数。

(3)特征状态 1 和特征状态 2 都不满足规范的,混凝土箱梁可以通过在中间墩增加支座的方式进行改造,钢箱梁可以通过增设抗拉拔装置进行改造。

参考文献:

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

[2] CJJ 99—2017,城市桥梁养护技术标准[S].

(上接第 68 页)

式、接缝材料组合下桥面板湿接缝的性能,探明了不同浇筑材料中不同形状钢筋的锚固性能,揭示了接缝破坏特征,为理论计算方法提供了试验数据,并提出了系列化设计参数,为设计提供参考,保证了湿接缝的安全性和耐久性,促进了桥梁预制拼装技术的发展。

参考文献:

[1] 李国平.全预制混凝土桥梁技术概论[C] 第十八届全国桥梁学术会议论文(上册),2008.

[2] ONG K C G. Flexural behavior of precast joints with horizontal loop connections[J].Aci Structural Journal,2006,103(5):664-671.

[3] JOERGENSEN H B, HOANG L C. Strength of loop connections between precast bridge decks loaded in combined tension and bending [J].Structural Engineering International,2018,25(1):71-80.

[4] JOERGENSEN H B,HOANG L C.Tests and limit analysis of loop connections between precast concrete elements loaded in tension[J]. Engineering Structures,2013,52:558-569.

[5] ZALESOV A S,KIRILLOV A P,RUBIN O D,et al. Calculation of the strength and design of welding loops and linear anchor joints in combined precast-in situ reinforced concrete members [J]. Hydrotechnical Construction,1989,23(2):120-124.

[6] 朱玉,丁德豪.预制混凝土梁湿接缝环形钢筋搭接长度研究[J].公路,2015,60(12):89-93.