

特大跨径钢筋砼拱桥施工临时扣索索力调整研究

李华¹, 王祺顺², 周关艺¹

(1.中大检测(湖南)股份有限公司, 湖南 长沙 410015; 2.湖南省交通科学研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘要:为解决钢筋砼拱桥悬臂浇筑过程中索力调整问题,基于线性规划理论建立某悬臂浇筑拱桥 ANSYS 有限元模型,联合 MATLAB 对扣索索力进行修正,并对分析修正前后拱圈截面应力及线形变化。结果表明,通过调整扣索索力初拉力,顶板最大拉应力由 3.24 MPa 降至 1.93 MPa,降幅 40.4%,同时顶、底板最大拉应力差值减小,截面顶、底板应力分布更均匀;索力对拱圈节段线形影响有限,且随着浇筑的进行,影响越来越小;采用修正后索力,扣塔在最大悬臂状态下的稳定性满足结构受力要求。

关键词:桥梁;钢筋砼拱桥;悬臂浇筑;扣索;索力调整

中图分类号:U448.22

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2022)02-0097-04

钢筋砼拱桥悬臂浇筑过程中,截面上下缘拉应力是结构安全的重要控制指标,保持施工阶段拱圈截面拉应力不超限是其监控重点和难点。根据相关研究,拱圈截面拉应力对扣索索力的敏感性很高,索力修正及优化是悬浇拱桥主拱圈监控核心,合适的索力有助于提高拱桥悬臂浇筑过程中结构安全性。采用悬臂浇筑的拱桥一般存在施工期扣锚索数量多、调索难度大的问题。该文以某特大跨悬臂浇筑施工钢筋砼拱桥为研究对象,基于线性规划理论建立参数化有限元模型,对施工阶段扣索索力进行修正,为悬浇拱桥施工及监控提供参考。

1 工程概况

某钢筋砼拱桥为目前国内采用悬臂浇筑施工的

最大跨径桥梁,位于贵州山区。主桥为 240 m 钢筋砼无铰拱,矢高 40 m,拱轴系数 1.85,设计荷载为公路—I 级。下部结构为钢筋砼拱座,主拱圈采用斜拉扣挂悬臂浇筑施工,截面形式为单箱双室,宽 10 m、高 4.5 m。沿桥轴线纵向共分为 37 个节段,包括 2 个拱脚支架现浇段、34 个挂篮对称悬浇节段和 1 个合龙段。合龙段采用拱顶吊架施工。主桥采用 C60 砼,扣塔采用 Q345a 钢材。桥型立面布置及斜拉扣挂施工最大悬臂段分别见图 1、图 2。

2 基于线性规划理论的数学模型

线性规划理论为处理优化问题的一种基本理论,根据其求解目标分为极大值求解和极小值求解,约束条件分为线性等式、线性不等式及两者结合的

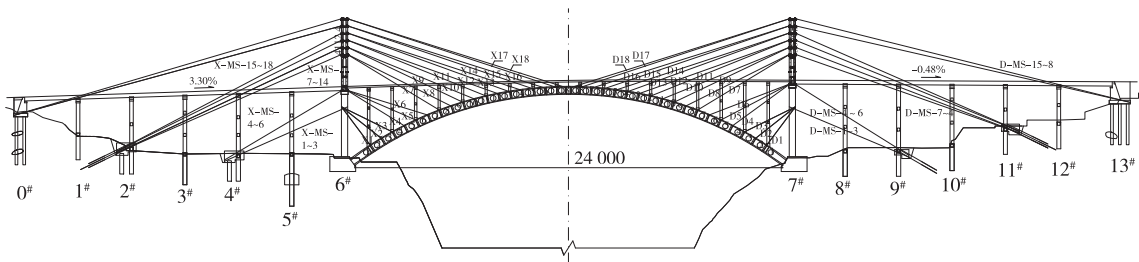


图 1 悬浇拱桥立面图(单位:cm)

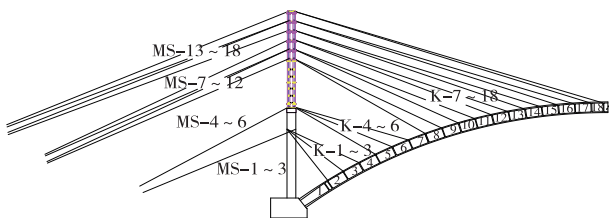


图 2 斜拉扣挂施工最大悬臂阶段示意图

形式,约束变量通常取一个非负数。数学模型如下:

$$\min \sum_{i=1}^n c_i x_i \quad (i=1,2,3,\dots,m) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } a_i^T x = b_i; x_i \geq 0$$

$$\min c^T x \quad (2)$$

$$\text{s.t. } Ax = b; x \geq 0$$

式中: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in R^n$; $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)^T \in R^n$; $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)^T \in R^{m \times n}$; $b = (b_1, b_2, \dots, b_m)^T \in R^m$ 。

若式(1)、式(2)存在最优解,则有某最优基本可行解满足要求,找出对应目标函数最小的基本可行解即得到线性规划问题的最优解。求解线性规划问题的基本思路为从线性规划问题的某可行解出发,逐步改良目标函数的值,直到求出满足条件的最优基本可行解。步骤如下:1) 确定初始基本可行解;2) 检查初始目标函数是否最优,若所求并非最优解,则求解其他待检查基本可行解,再进行目标函数最优性检验;3) 如此循环,直至收敛于最优解为止。

为实现其求解过程,采用构造评价函数法,同时调用 MATLAB 中 fminimax 函数工具箱进行求解,数学表达式见式(3)。对式(3)进行求解,即可得到约束目标函数最优解。

$$\begin{aligned} & \min_{x \in D} \max[\min[f_i(x)]] \\ & \text{s.t. } A_1 x \leq b_1; A_2 x \leq b_2; l \leq x \leq u \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $f_i(x)$ 为原优化模型的各目标函数。

以主拱圈各施工阶段截面最大拉应力平方和均值最小为目标,目标函数见式(4)。自变量为扣索索力初拉力,通过赋予实常数的形式模拟。约束条件为上下缘最大拉应力不超过 C60 砼强度,同时,根据规范要求,张拉过程中扣索安全系数不低于 2.5,即扣索最大应力不大于 744 MPa。

$$f = \min \sum_1^n \sigma_{i,n}^2 / n \quad (4)$$

3 有限元参数化模型建立

建立图 3 所示 ANSYS APDL 参数化有限元模型。主拱圈及交接墩采用 Solid45 三维实体单元模拟,扣塔塔架立柱、横联及竖斜杆采用 Shell63 壳单元模拟,扣索采用 Link10 杆单元模拟;拱脚截面使用面约束固结,扣索单元在拱圈及扣塔上锚点调用 Ceintf 命令建立约束方程耦合其节点自由度;为简化计算流程,横隔板采用 Mass21 质量单元加载进行等效模拟。考虑挂篮刚度对扣索索力及拱圈截面应力的影响,根据桥梁设计建立挂篮模型,使用 Beam188 单元模拟挂篮主要受力杆件,其接触面通过调用 Targe170 和 Contal74 单元进行模拟,接触对法向惩罚刚度因子设置为 0.1。利用 ANSYS 中“单元生死”功能实现悬臂浇筑施工过程模拟,网格划分均采用六面体扫掠法。

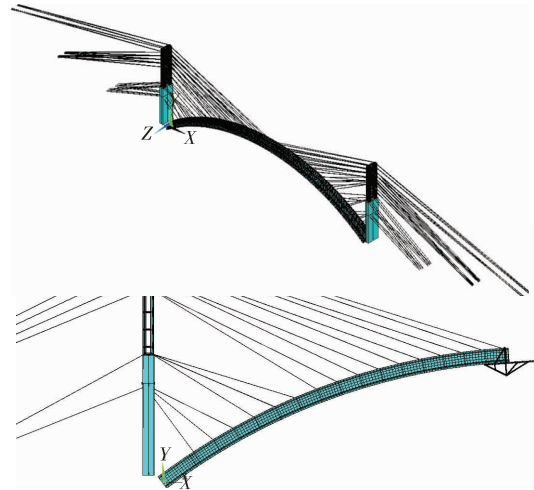


图 3 ANSYS 有限元模型

考虑到单元刚度矩阵庞大,在 ANSYS 中直接求解较困难,调用 MATLAB 矩阵求解器,在 MATLAB 中创建数学优化模型,求得自变量解析解后输入 ANSYS 中,借助其 Batch 批处理功能快速对施工阶段进行分析;分析完成后,将 ANSYS 计算结果导入 MATLAB 中进行最优解验证;如此反复。该方法仅将 ANSYS 作为求解器使用,不必在 ANSYS 中进行大规模刚度矩阵运算,可极大提高计算效率。

4 修正结果分析

4.1 索力修正结果

表 1、图 4、图 5 为半个拱圈结构(以西岸为例,扣索编号为 X1~X18)在运行至最大悬臂状态时索力调整后最优解。扣索初拉力表示第一次张拉扣索时的施加力,扣索拉力极值表示该索张拉锚固后在各施工阶段的索力最大值。

由表 1、图 4、图 5 可知:1) 修正后各拱圈节段索力初拉力有一定程度上升,尤其是 10# 节段以后,索力初拉力较修正前有大幅提升。这是由于随着悬臂浇筑施工的进行,拱圈与地面水平夹角逐渐减小,扣索索力沿拱圈水平方向分力逐渐增大,而水平分力对改善截面应力峰值及分布没有贡献,加上节段自重累计效应,需要更大的扣索力提供竖向分力抵抗拱圈自重下顶板的拉应力。2) 修正后扣索索力在浇筑过程中的变化幅度较修正前显著减小,通过适当提高扣索初拉力,可减小施工过程中扣索索力变化幅度,避免扣索受力反复变化导致扣索发生低应力破坏。

表 1 修正前后索力对比

扣索 编号	扣索初拉力/kN		扣索拉力极值/kN	
	修正前	修正后	修正前	修正后
X1	1 153.50	1 332.47	1 642.22	1 724.15
X2	1 499.55	1 662.62	1 566.47	1 614.75
X3	1 614.90	1 717.82	1 737.96	1 844.62
X4	1 730.25	1 870.27	1 658.39	1 749.24
X5	1 730.25	1 966.35	1 821.79	1 953.79
X6	1 441.88	2 202.42	1 752.43	1 911.64
X7	1 441.88	1 507.24	1 643.18	1 661.65
X8	1 845.60	1 905.63	1 888.60	1 975.50
X9	2 018.63	2 167.66	1 721.69	1 834.11
X10	2 307.00	2 573.92	2 162.53	2 263.91
X11	2 422.35	2 768.53	2 156.26	2 221.41
X12	2 076.30	2 622.42	2 311.79	2 435.80
X13	2 133.98	2 726.37	2 866.68	2 919.62
X14	1 845.60	2 473.38	2 801.57	2 944.82
X15	1 960.95	2 444.02	2 852.74	2 930.12
X16	1 845.60	2 246.11	2 866.99	3 041.44
X17	1 845.60	2 037.29	2 732.32	2 890.12
X18	1 845.60	1 770.09	2 347.96	2 436.05

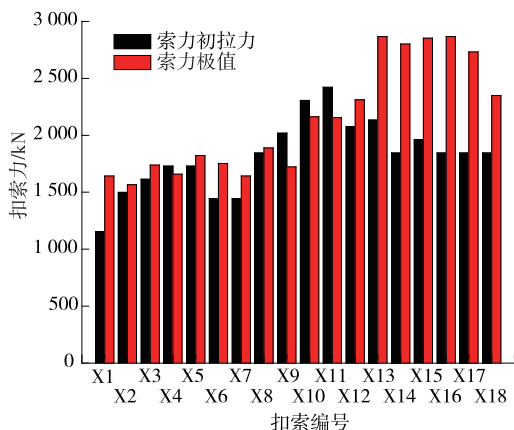


图 4 修正前扣索初拉力及索力极值

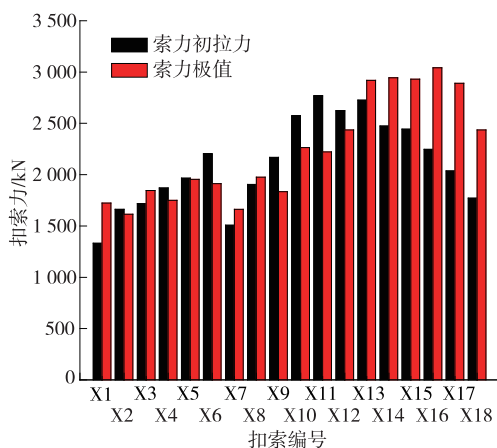


图 5 修正后扣索初拉力及索力极值

4.2 拱圈截面应力

拱圈截面应力是悬浇拱施工控制重点,合理的受力状态可有效保证施工过程中拱圈的强度、刚度及稳定性。各节段拱圈截面顶、底板最大拉应力见表 2。由表 2 可知:索力修正前,由于初始索力偏小,拱圈节段呈下挠趋势,各节段截面顶板拉应力普遍较大,大部分在 2 MPa 以上,大于 C60 砼抗拉强度 1.96 MPa,拱圈存在开裂风险;对索力进行修正后,拱圈各节段截面应力峰值明显下降,最大拉应力由修正前的 3.24 MPa 降至 1.93 MPa,降幅 40.4%,索力调整取得了较理想的效果。

表 2 修正前后拱圈截面最大拉应力对比

拱圈 节段号	顶板拉应力/MPa		底板拉应力/MPa	
	修正前	修正后	修正前	修正后
1	2.35	1.60	0.56	1.62
2	1.59	0.92	0.46	1.18
3	1.62	0.95	0.60	1.32
4	2.22	1.02	0.39	1.10
5	2.36	1.19	0.43	1.01
6	2.39	1.26	0.39	1.50
7	2.75	1.52	0.36	1.18
8	2.91	1.71	0.41	1.37
9	2.46	1.76	0.34	1.02
10	3.24	1.84	0.39	1.10
11	2.86	1.69	0.36	0.90
12	2.96	1.75	0.42	0.82
13	2.89	1.63	0.65	1.01
14	2.82	1.93	0.54	1.09
15	2.01	1.50	0.44	0.95
16	1.65	1.31	0.37	0.61
17	1.18	1.06	0.29	0.53
18	0.70	0.69	0.23	0.58

图 6 为修正前后顶、底板最大拉应力对比。从图 6 可看出:通过对扣索初拉力进行修正,实现了拱圈截面内部应力重分布。修正前由于索力较小,拱圈顶板位置拉应力过大,而底板拉应力较小,截面高应力区域集中于顶板狭小范围内,加上扣索在拱圈上的锚固区存在应力集中现象,顶板砼极易出现局部开裂破损;索力调整后,顶板高应力区域被稀释,底板拉应力有一定幅度增大,顶、底板拉应力差值减小,截面上应力分布跳跃断层现象得到改善,应力流分布更均匀、合理,材料性能得到充分发挥。

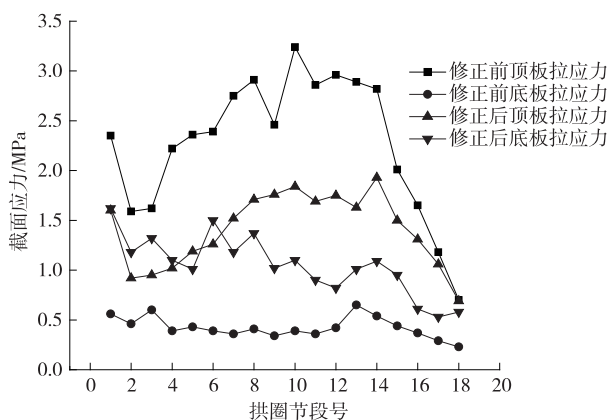


图6 修正前后顶、底板最大拉应力对比

4.3 拱圈节段线形

悬臂浇筑拱桥的线形主要通过立模标高控制,主拱线形是否平顺、流畅直接影响拱圈截面内力分布。索力调整后,需明确其对主拱线形的影响效应,以便施工时对线形实施更精准的控制。图7为索力修正前后拱圈各节段端头位置在施工过程中最大竖向变形对比。

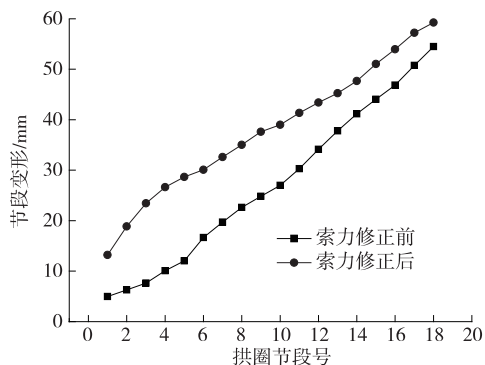


图7 拱圈各节段施工过程中最大竖向变形对比

从图7可看出:扣索索力调整对拱圈节段线形的影响随着浇筑施工的进行逐渐降低。这是因为随着浇筑的进行,拱圈节段自重越来越大,单纯地改变索力很难对线形产生明显影响,同时拱圈节段与地面的水平夹角随施工进行呈逐渐减小趋势,索力在水平方向上的分力占比提高,该力能给拱圈提供类似于体外预应力的作用,对拱圈产生一定“刚化”作用。因此,拱圈节段越靠后,水平倾角越小,索力对拱圈线形的影响越有限。

4.4 扣塔稳定性

扣塔在斜拉扣挂体系中虽为临时性结构,但其自身稳定性对结构安全至关重要。根据索力修正结果,扣索初拉力较修正前有一定增加,而锚索索力根据扣索索力的水平分力确定,扣索索力增加,锚索索

力随之增大,对扣塔稳定性有不利影响。表3为扣索索力修正前后扣塔在最大悬臂状态下前5阶临界屈曲系数对比。

表3 扣塔修正前后前5阶临界屈曲系数对比

阶次	临界屈曲系数	
	修正前	修正后
1	8.66	7.23
2	12.36	9.75
3	19.62	15.96
4	21.84	18.95
5	30.98	24.18

从表3可看出:扣索修正后,塔架1阶临界屈曲系数由8.66降至7.23,但仍满足规范要求的不小于4的要求,且有相当富余。可认为基于线性规划理论的索力修正方法能合理兼顾扣索、拱圈及塔架等结构的受力要求,对实际工程具有一定应用价值。

5 结论

以某悬浇施工拱桥为研究对象,基于线形规划理论建立ANSYS参数化有限元模型,对其扣索索力进行修正,并对比分析索力变化对拱圈应力及线形的影响,得到以下结论:

(1) 适当提高索力初拉力值可减小施工过程中索力变化幅度,降低初拉力与施工过程中最大索力的差值。

(2) 索力调整对拱圈截面拉应力的影响明显,通过调整索力,拱圈截面最大拉应力由3.24 MPa降至1.93 MPa,降幅达40.4%,同时改善了拱圈截面的应力分布,顶板高应力区域向底板扩展,有效利用了底板砼材料性能。

(3) 索力调整对拱圈节段线形的影响有限,且随着拱圈节段浇筑的进行,影响效应越来越小。

(4) 基于线性规划理论进行扣索索力调整后,扣塔稳定性满足规范要求。该方法在实际施工中具有可操作性,能满足工程实际需求。

参考文献:

- [1] 吴欣,王祺顺,张祖军.大跨径RC拱桥悬臂浇筑过程中临时预应力效应分析[J].公路工程,2019,44(3):11-16.
- [2] 陈强,张凯杰,周水兴,等.单箱单室混凝土拱桥拱圈悬臂浇筑施工控制[J].公路,2019(1):103-107.
- [3] 常星.大跨钢筋混凝土箱形拱桥悬臂浇筑技术[J].中外

(下转第104页)

由图7可知:不平衡荷载对桥塔纵向偏位的影响较大。不平衡荷载达到40 t时,桥塔偏位值为-24.9 mm,远大于无不平衡荷载时的-0.29 mm,说明桥塔偏位对不平衡荷载大小较敏感。在塔梁同步施工中,需注意由桥塔两侧不平衡荷载导致的主塔轴线偏移,尽量避免不平衡荷载情况出现。

4 结论

(1) 塔梁同步施工和先塔后梁施工时成桥索力最大差值为92.31 kN,为原设计成桥索力的1.7%,塔梁同步施工对叠合梁斜拉桥合理成桥状态的影响可忽略。

(2) 塔梁同步施工中,主塔顺桥向温差对主塔偏位有一定影响,温差达到20 ℃时桥塔顺桥向最大偏位值接近6 cm。塔梁同步施工时应避免出现温差过大的情况。

(3) 塔梁同步施工中,主塔偏位对不平衡荷载大小较敏感,无不平衡荷载作用时主塔偏位值仅为-0.29 mm,而不平衡荷载为40 t时该值为-24.9 mm。塔梁同步施工时应避免荷载堆积在同一侧。

参考文献:

[1] 曾洋,冯仲仁.混合梁斜拉桥塔梁同步施工中主塔偏位影响因素分析[J].中外公路,2017,37(6):205-209.

[2] 顾箭锋,曾祥红.混合梁斜拉桥塔梁同步施工可行性分析[J].桥梁建设,2016,46(1):111-116.

[3] 张淑坤,张向东,陆启珂.大跨度斜拉桥塔梁同步施工控制技术[J].广西大学学报(自然科学版),2012,37(1):88-93.

[4] 谢官模,刘志.不对称独塔斜拉桥塔梁同步施工的可行性研究[J].公路工程,2014,39(1):169-176.

[5] 赵晓斌.大跨钢箱斜拉桥塔梁同步施工计算分析[J].北方交通,2013(2):104-106.

[6] 孙全胜,孙永存.斜拉桥塔梁同步施工与控制技术的研究[J].公路,2007(6):88-91.

[7] 韩伟.基于无应力状态法的铁路独塔混合梁斜拉桥索力调整研究[J].施工技术,2019,48(23):53-58.

[8] 许立强.确定斜拉桥合理成桥索力的综合方法与施工控制研究[D].武汉:武汉理工大学,2007.

[9] 冯仲仁,苗永慧,王雄江.确定斜拉桥施工索力的影响矩阵[J].武汉理工大学学报,2012,34(2):85-90.

[10] 张玉平,刘雪松,李传习.基于MOPSO算法的双塔斜拉桥合理状态确定[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(2):22-27.

[11] 郑一峰,毛健,尹笑.基于影响矩阵的双塔斜拉桥合理成桥状态研究方法[J].公路,2017(2):82-85.

[12] 刘来君,刘世臣.大跨径斜拉桥悬拼施工控制中温度影响的研究[J].公路交通科技(应用技术版),2013(4):229-232.

[13] 刘来君,贺拴海,宋一凡.大跨径桥梁施工控制温度应力分析[J].中国公路学报,2004,17(1):53-56.

[14] 赵阳,项贻强,汪劲丰,文辉.大桥索塔变形监测[J].施工技术,2004,33(11):61-63.

[15] 刘来君.大跨径桥梁施工控制温度荷载[J].长安大学学报(自然科学版),2003,23(2):61-63.

[16] 喻骁.大跨度斜拉桥施工控制与塔梁同步施工方法[D].重庆:重庆交通大学,2009.

[17] 陈钧.斜拉桥塔梁同步施工技术研究[D].南京:东南大学,2013.

[18] 王琳,周世军.基于解释结构模型的塔梁同步施工风险因素分析[J].公路交通科技,2015,32(2):100-107.

收稿日期:2020-10-09

(上接第100页)

公路,2019,39(6):130-132.

[4] TIAN Zhong-chu, PENG Wen-ping, ZHANG Jian-ren, et al. Determination of initial cable force of cantilever casting concrete arch bridge using stress balance and influence matrix methods[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(11): 3140-3155.

[5] 訾银辉,田仲初,彭文平.基于ANSYS的斜拉悬臂浇筑拱桥施工中的索力优化[J].公路与汽运,2013(1):171-176.

[6] 陈磊,郭全魁,吕彬.线性规划问题的统一建模与快速算法[M].北京:北京邮电大学出版社,2012.

[7] 王祺顺.扣索力与预应力耦合作用对悬浇混凝土拱桥

拱圈截面应力调控机理研究[D].长沙:长沙理工大学,2018.

[8] 胡大琳,陈定市,赵小由,等.大跨径钢筋混凝土拱桥悬臂浇筑施工控制[J].交通运输工程学报,2016,16(1):25-36.

[9] 何畏,周伟光,陈俊诚.悬臂浇筑拱桥扣索索力优化研究[J].桥梁建设,2015,45(3):32-36.

[10] 李晓斌,蒲黔辉,杨永清,等.钢筋混凝土拱桥悬臂浇筑施工模型试验设计与索力优化[J].公路,2007(7):7-11.

收稿日期:2021-04-28