

Research on Long-Span Continuous Rigid Frame Bridge Girder Design Parameters Impact Based on Orthogonal Experiment

Feng Tang¹, Yao Lu^{2*}, Dejian Li², Jiao Xiong³

¹Second Engineering Co. Ltd. of CCCC Fourth Highway Engineering Co. Ltd., Beijing

²School of Civil Engineering, Central South University, Changsha Hunan

³Hunan NO.4 Engineering Corporation Co. Ltd., Changsha Hunan

Email: luyaocsu@163.com

Received: Jun. 25th, 2017; accepted: Jul. 8th, 2017; published: Jul. 12th, 2017

Abstract

The design parameters, central beam high-span ratio, high-span ratio at root of the beam and beam bottom curve line, of continuous rigid frame bridge girder were valued in an appropriate range. Based on orthogonal experiment and numerical simulation, the effects of above parameters to the comprehensive performance index on the basis of stress, deflection and concrete volume were studied by the parameters combinations and the calculation of the text models. The result shows that the central beam high-span ratio has the greatest impact on the comprehensive performance index, while the high-span ratio at root of the beam and the beam bottom curve line have less influence. In addition, the impact of the beam bottom curve line is larger than the high-span ratio at root of the beam.

Keywords

The Continuous Rigid Frame Bridge, Girder Design Parameters, Orthogonal Experiment, Parameters Impact

基于正交试验法的大跨连续刚构桥主梁设计参数影响研究

唐峰¹, 陆尧^{2*}, 李德建², 熊蛟³

¹中交四公局第二工程有限公司, 北京

²中南大学土木工程学院, 湖南 长沙

*通讯作者。

³湖南省第四工程有限公司, 湖南 长沙
Email: luyaocsu@163.com

收稿日期: 2017年6月25日; 录用日期: 2017年7月8日; 发布日期: 2017年7月12日

摘要

对某连续刚构桥的主梁截面参数中的主跨0号块梁高高跨比、主跨跨中梁高高跨比、梁底抛物线次数参数在适用范围内选择取值, 应用正交试验法对所选择的参数进行组合和数值建模计算, 得到了综合性能较好的设计参数组合形式。采用极差分析的方法研究了以主梁跨中应力、挠度和全桥混凝土用量为综合指标的各参数的影响程度。研究表明: 主跨跨中梁高高跨比对综合性能指标影响最大, 梁底抛物线次数, 根部梁高高跨比的影响较小, 其中梁底抛物线次数对主梁综合性能的影响稍大于0号块梁高高跨比。

关键词

连续刚构桥, 主梁设计参数, 正交试验法, 参数影响

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

连续刚构体系桥梁是一种结构刚度好, 经济适用同时施工的技术较为成熟且方便的组合体系结构。因为其内力分布合理, 跨越能力较强, 行车感觉舒适, 外观轻巧优美等特点, 在国内得到广泛的应用。

近年来连续刚构桥设计主要参数初步确定, 一般通过设计者的经验以及已建成桥梁数据进行总结分析。在这些连续刚构桥的主要设计参数中, 相关文献对边中跨比[1] [2]、0#块及跨中处梁高[3] [4] [5]、梁底抛物线次数[4] [6]这几个重要的设计参数的优化研究, 多是根据不同形式的组合试验, 找到性能较为良好的典型的组合位置[7], 而对参数的进一步细化的探讨较少。由于这些参数对连续刚构桥的整体设计和受力情况具有显著的影响, 所以有必要对连续刚构桥的参数优化进行进一步分析, 以验证其优化值的常用范围内的综合性能已经达到较好水平, 并对各参数的重要性进行评估。

2. 工程背景

国内某桥梁采用 103 m + 190 m + 103 m 的三跨连续刚构形式, 上部主梁采用单箱单室预应力钢筋混凝土现浇箱梁。主桥箱梁为 C55 混凝土, 主桥桥墩采用 C50 混凝土, 该桥的边中跨比参数为 0.54, 0#块箱梁高 12 米, 梁底抛物线次数为 1.6 次, 跨中处箱梁高 3.8m。全桥立面图及支点处主梁布置图如图 1、图 2 所示。通过对最不利荷载下的跨中挠度, 跨中截面应力, 全桥混凝土用量等计算, 并将计算结果单指标化, 来对不同的参数做出评价。

3. 正交表选择

在对连续刚构桥主梁参数的研究中, 选择正交试验的方法进行优化分析。采用正交试验法进行分析的一般步骤为:

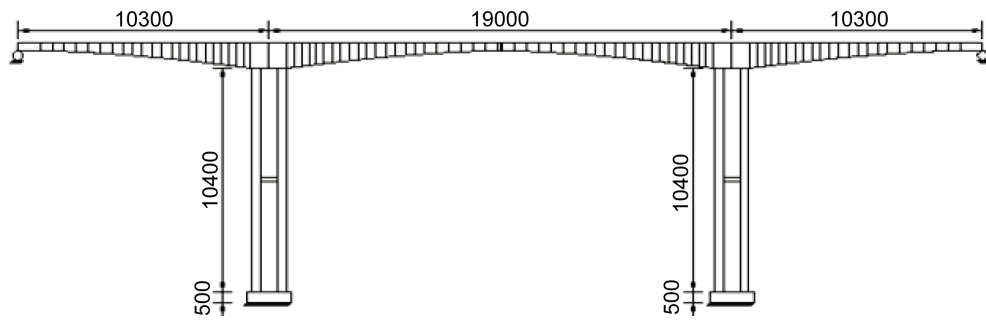


Figure 1. Overall arrangement of the bridge
图 1. 桥梁的立面布置图

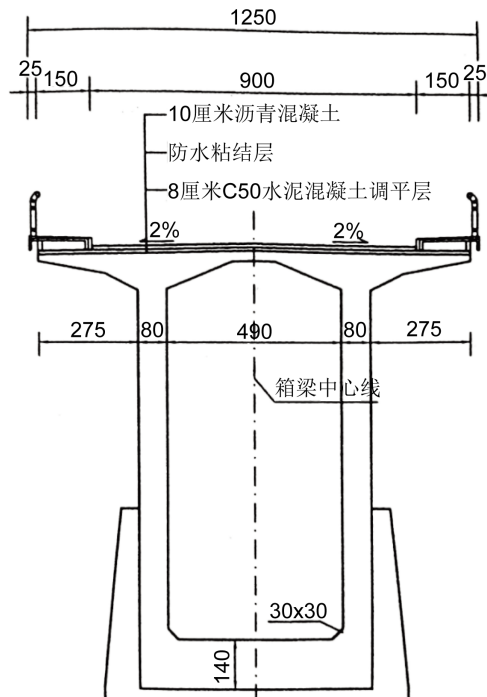


Figure 2. The sectional drawing of 0#block
图 2. 0#块处主梁断面图

首先，确定优化目的，并明确优化的指标；其次，根据确定的优化目的，选取需要优化的因素和每个因素的水平；然后，选取合适的正交表，并对分析的项目进行安排；再其次，根据正交表的计划对项目进行分析，得到各个参数和水平组合的多目标指标；最后，对取得的正交表结果进行分析，得出合理结论。由于预应力钢束的布置影响较大，在优化中一般需要单独地进行。因此，为了更好的明确需要优化的主梁参数对目标的影响，需要控制预应力基本保持不变，仅对预应力钢束的布置做出较小调整。

对连续刚构桥主梁参数的选择主要包括以下 3 个因素，梁底抛物线次数，0 号块梁高高跨比，跨中梁高高跨比。通过结合已有对正交表的对比后，选取正交表 L16(4⁵)进行分析，其中 16 代表试验次数为 16 次，5 表示优化的因素为 5 个，4 表示每个优化因素有 4 个水平。完整的正交表 L16(4⁵)的试验情况如下表 1。

由于本文选取的因素有 3 个，每个因素有 4 个水平。因此在 L16(4⁵)正交表中取前 3 列进行分析。正交表参数组合形式如表 2。

Table 1. Orthogonal array (4^5)
表 1. 正交表 $L_{16}(4^5)$

试验号	列号					试验号	列号				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1	9	3	1	3	4	2
2	1	2	2	2	3	10	3	2	4	3	1
3	1	3	3	3	3	11	3	3	1	2	4
4	1	4	4	4	4	12	3	4	2	1	3
5	2	1	2	3	4	13	4	1	4	2	3
6	2	2	1	4	3	14	4	2	3	1	4
7	2	3	4	1	2	15	4	3	2	4	1
8	2	4	3	2	1	16	4	4	1	3	2

Table 2. Orthogonal table for optimization of girder parameters
表 2. 主梁参数优化的正交表

正交表组合形式			
A1B1C1 (1#)	A2B1C2 (5#)	A4B1C4 (9#)	A3B1C3 (13#)
A1B2C2 (2#)	A2B2C1 (6#)	A4B2C3 (10#)	A3B2C4 (14#)
A1B3C3 (3#)	A2B3C4 (7#)	A4B3C2 (11#)	A3B4C2 (15#)
A1B4C4 (4#)	A2B4C3 (8#)	A4B4C1 (12#)	A3B3C1 (16#)

4. 连续刚构桥主梁参数的正交试验

4.1. 正交试验参数组合的有限元模型

依据之前章节介绍的工程背景为依托,按照正交表的因素水平组合, A 为 0 号块梁高, B 为主跨跨中截面梁高, C 为梁底抛物线次数, A1 取值为 11.2 m, A2 取值为 11.6 m, A3 取值为 12.0 m, A4 取值为 12.4 m; B1 取值为 3.4 m, B2 取值为 3.6 m, B3 取值为 3.8 m, B4 取值为 4.0 m; C1 取值为 1.5 次, C2 取值为 1.67 次, C3 取值为 1.83 次, C4 取值为 2.0 次。共确定如表 2 中参数组合形式的共 16 个有限元模型,基本模型如图 3 所示。

此外,为了明确主梁的参数变化对连续刚构桥整体性能的影响,依然保持对预应力钢束和下部结构中的材料性质和结构尺寸均保持基本不变,钢束布置见图 4。

4.2. 优化指标的确定

由于连续刚构桥结构的复杂性,目前,对于连续刚构桥的优化缺乏一个可以全面评价其性能的指标,已有的优化成果大多针对特定目标进行考虑,如抗震、抗风性能,主梁抗裂或抵抗下挠的能力,预应力和混凝土用量的优化等等。本文选取与主梁跨中截面的强度,挠度,以及混凝土用量作为指标,建立不同参数组合下的有限元模型,分别计算对应的主梁跨中截面最不利荷载组合下的最大应力,跨中处最不利荷载组合下的挠度以及全桥的混凝土用量,并选取以上几个结果作为分析评价的标准。通过计算,分别得到各个指标的结果,如表 3。

为了更好地对主梁的综合性能进行合理而直观的评价判断,需要将多评价指标问题转化为单指标评价问题。这里采用公式评分法[8]来进行相应的转化。

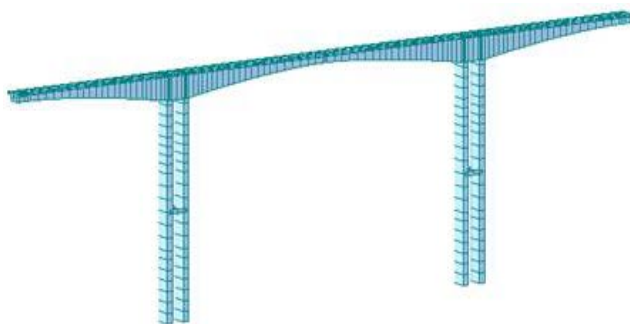


Figure 3. The finite element model of the bridge
图 3. 全桥有限元模型

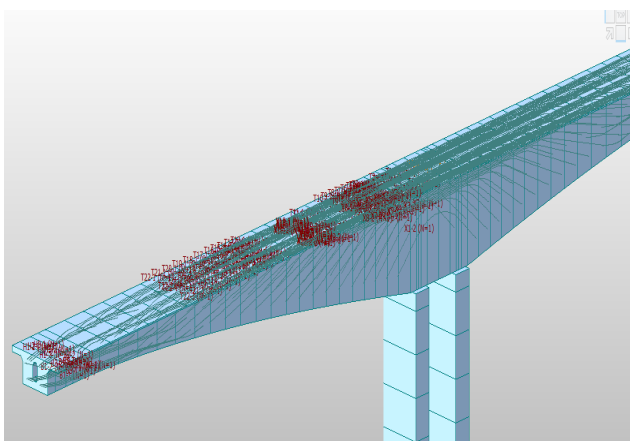


Figure 4. The arrangement of prestressed steel bundle
图 4. 钢束布置图

Table 3. Calculation results of combination of different parameters
表 3. 不同参数组合的计算结果

试验号	组合形式	跨中最大应力(Mpa)	跨中最大挠度(mm)	混凝土用量(tonf)
1	A1B1C1	2.76	71.527	38746.4
2	A1B2C2	2.54	70.73	38665.73
3	A1B3C3	2.30	69.947	38631.78
4	A1B4C4	2.13	69.16	38580.96
5	A2B1C2	2.83	71.413	38899.17
6	A2B2C1	2.32	70.245	39171.93
7	A2B3C4	2.36	69.549	38570.64
8	A2B4C3	1.99	68.714	39028.99
9	A3B1C3	2.91	70.315	38690.04
10	A3B2C4	2.65	69.759	38637.83
11	A3B4C2	1.84	69.217	39508.5
12	A3B3C1	1.97	68.531	39597.46
13	A4B1C4	2.99	70.735	38666.28
14	A4B2C3	2.46	69.967	39107.56
15	A4B3C2	2.03	68.614	39559.39
16	A4B4C1	1.68	69.368	40023

$$K_2 = \frac{\sigma}{f_{tk}} + \frac{f}{[f]} + \frac{F}{G}$$

其中： K_2 ——主梁的综合考察指标；

σ ——主跨跨中最不利荷载组合下的最大应力；

f_{tk} ——C55 混凝土抗拉强度标准值， $f_{tk} = 2.74$ MPa；

f ——主跨跨中最不利荷载组合下的挠度；

$[f]$ ——主跨中长期挠度限值， $[f] = 1/1600L = 11.875$ cm；

F ——结构混凝土用量指标，取模型桥梁总质量；

G ——实际工程的桥梁总质量。

通过对计算结果的单指标化，得到正交试验法的主梁性能的综合考查表 4。

为了更为直观的表现指标的分布，将表 4 绘制成为分布图 5，通过图 5，可以见到其趋势。

根据计算结果及表 4、图 5 所示，16 号试验的综合指标最小，为在正交试验中得出的较好的参数组合优化结果，而 13 号试验结果最大，说明是在当前关于主梁跨中强度，挠度以及混凝土用量的评价指标下，结果最差的参数组合形式。

4.3. 极差分析

为了进一步确定水平因素对试验结果的影响程度，需要对综合试验指标进行极差分析，极差分析方法首先分别求的每个因素 A、B、C 的第 i 个水平所对应的综合指标之和 K_i ，再求每个因素对一个的 i 水平的平均值 k_i 。通过每一列中 k_i 取值中的最大的值减去最小的值得到极差 R，极差反映的是因素水平在试验指标中的影响程度(表 5)。

Table 4. Comprehensive analysis results of combination of different parameters

表 4. 不同参数组合形式的综合指标分析结果

组合形式	1 号 A1B1C1	2 号 A1B2C2	3 号 A1B3C3	4 号 A1B4C4	5 号 A2B1C2	6 号 A2B2C1	7 号 A2B3C4	8 号 A2B4C3
K2	2.654	2.565	2.470	2.400	2.683	2.495	2.487	2.357
组合形式	9 号 A3B1C3	10 号 A3B2C4	11 号 A3B4C2	12 号 A3B3C1	13 号 A4B1C4	14 号 A4B2C3	15 号 A4B3C2	16 号 A4B4C1
K2	2.701	2.598	2.314	2.371	2.726	2.540	2.391	2.269

Table 5. Range analysis of synthetic indexes

表 5. 综合指标的极差分析

指标/因素	0#块梁高高跨比 A	跨中梁高高跨比 B	梁底抛物线次数 C
K1	10.090	10.765	9.789
K2	10.022	10.198	9.954
K3	9.985	9.719	10.068
K4	9.926	9.342	10.212
k1	3.363	3.588	3.263
k2	3.341	3.399	3.318
k3	3.328	3.240	3.356
k4	3.309	3.114	3.404
极差 R	0.054	0.474	0.141

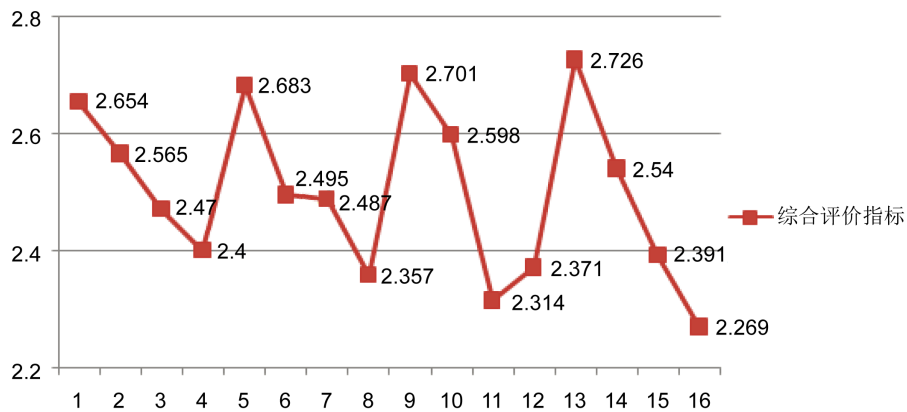


Figure 5. The drawing of comprehensive evaluation index

图 5. 综合评价指标分布图

通过极差的结果可以看出，试验因素 B 跨中梁高高跨比对主梁跨中的综合性能指标具有很大影响，而因素 C 梁底抛物线次数，因素 A0 号块梁高高跨比的影响较小。其中梁底抛物线次数对主梁综合性能的影响稍大于 0 号块梁高高跨比。

5. 结论

1) 采用正交试验法对连续刚构桥主梁设计参数进行多目标综合优化分析可以在确保参数取值均匀分散的基础上有效控制样本数量，提高计算效率。计算结果表明最不利荷载下的跨中弯矩和挠度随着 0 号块梁高及跨中梁高的增加而减小，并随着梁底抛物线次数的增加而增大。全桥混凝土用量随着 0 号块梁高及跨中梁高的增加而增大，并随着梁底抛物线次数的增加而减小。

2) 当以主梁跨中截面应力、挠度、混凝土用量的最佳性能进行多目标综合优化时，应采取相对较大的主梁梁高以及较小的梁底抛物线次数。

3) 正交试验表明，当连续刚构桥主梁设计参数采用 0 号块梁高高跨比为 0.065 (12.4 m)，梁底抛物线次数为 1.5 次，跨中梁高高跨比 0.021 (4.0 m) 时，可以获得在当前目标下较好的主梁综合性能。对综合指标的极差分析表明，跨中梁高对综合性能指标具有很大的影响，而梁底抛物线次数，0 号块梁高的影响相对较小。

参考文献 (References)

- [1] 刘效尧, 徐岳. 梁桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [2] 韩蕊. 连续刚构桥边中跨比研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2014.
- [3] 王立峰, 王子强, 张岩, 等. 高墩大跨连续刚构桥 0#块空间应力分析[J]. 中外公路, 2013, 33(2): 177-179.
- [4] 杨建新. 预应力混凝土连续刚构桥设计参数优化分析[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [5] 陈杰超, 胡伟, 等. 大跨连续刚构桥箱梁高度与主跨比值研究[J]. 重庆建筑, 2008(6): 24-27.
- [6] 胡雄伟, 宁晓骏, 刘庆志. 大跨连续刚构桥箱梁下缘曲线选取研究[J]. 交通标准化, 2008(9): 56-59.
- [7] 李明燕. 预应力混凝土连续刚构桥的参数优化[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [8] Walpole, R.E., Myers, R.H., Myers, S.L. and Ye, K.Y. (2007) Probability & Statistics for Engineers & Scientist. 8th Edition, Pearson Education, New Jersey.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org