

# 基于正交试验大跨 PC 连续刚构桥主梁参数优化研究

蒋玮<sup>1</sup>, 周群<sup>2</sup>, 李莘哲<sup>1</sup>

(1. 广西路桥工程集团有限公司, 广西 南宁 530000; 2. 广西路桥集团勘察设计有限公司)

**摘要:** 为深入研究大跨 PC 连续刚构桥主梁参数的合理取值, 该文基于正交试验法, 选取主梁边主跨比、梁底曲线幂次、跨中高跨比、支点高跨比作为主梁优化参数, 建立以主跨全截面平均应力、跨中最大挠度、混凝土数量为优化指标的综合目标函数, 通过对有限元结果的计算与分析, 得到主梁参数的最优组合及其参数影响大小。结果表明: ① 主梁最优参数组合为  $A_1 B_4 C_4 D_4$ , 实际工程中可考虑与  $A_3 B_1 C_3 D_4$ 、 $A_4 B_3 C_2 D_4$ 、 $A_2 B_2 C_1 D_4$  等参数组合的综合应用; ② 主梁较大高跨比、较小边主跨比及合适梁底曲线幂次对主梁综合性能改善作用较大; ③ 主梁支点高跨比对主梁综合性能影响最为显著。

**关键词:** 刚构桥; 主梁; 正交试验; 参数优化; 最优参数组合

大跨 PC 连续刚构桥主梁参数众多, 受力复杂, 设计者往往凭借以往经验和参考已有设计或类比试算来选取参数。然而, 实际工程中因主梁参数选取不合理而导致主梁受力不佳出现多种病害的实例不在少数, 更有甚者直接导致安全事故的发生。因此, 对主梁参数进行优化研究, 为主梁参数合理选取提供行之有效的科学指导显得十分必要。

文献[5-7]采用遗传算法、遗传算法与神经网络结合、响应面法等方法对主梁参数优化进行研究, 虽能够得到在经验范围内的精度较好的优化结果, 但這些方法理论过于深奥, 需要大量样本数据反复计算, 不便于被工程人员掌握, 实用性较差, 难以推广应用; 文献[8-10]均以某一座大跨连续刚构桥为研究对象, 利用正交试验设计思想, 通过改变主梁设计参数, 以主梁跨中应力、挠度、混凝土数量为优化指标建立综合目标函数, 通过对计算结果的分析, 得出主梁跨中性能最优参数组合, 但研究仅选取主梁跨中截面下缘应力作为优化指标, 存在缺乏对主梁全截面应力考核的不足, 且均选取一种跨径进行研究, 其结论是否适用其他跨径难以确定。

为进一步深入研究大跨 PC 连续刚构桥主梁参数的合理取值, 该文基于正交试验法, 选取主梁边主跨比、梁底曲线幂次、跨中高跨比、支点高跨比作为主梁优化参数, 建立以主跨全截面平均应力、跨中最大挠度、混凝土数量为优化指标的综合目标函数, 间隔 10

m 建立主跨 100~150 m 之间 6 种不同跨径的有限元参数试验模型, 通过对有限元结果的计算与分析, 研究主梁参数的最优组合, 为主梁参数选取提供更科学可靠的理论指导。

## 1 工程背景简介及有限元模型建立

### 1.1 工程背景简介

背景工程为某山区高速公路一座三跨 PC 连续刚构桥, 桥跨布置为  $(72+120+72)$  m, 上构主梁为单箱单室箱梁, C55 混凝土, 桥面总宽 12 m, 顶板厚 0.28 m, 变截面梁高由跨中 3.1 m 渐变至支点 7.0 m, 按二次抛物线进行渐变, 其横断面如图 1 所示。底板厚由跨中 0.32 m 渐变至支点 0.7 m, 渐变规律同梁高, 底板总宽 6.5 m。

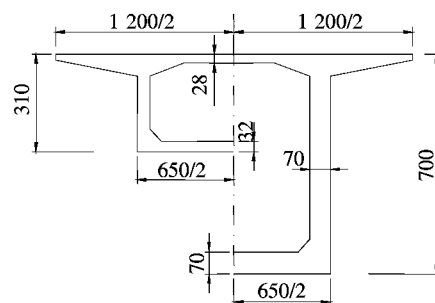


图1 主梁支点与跨中横断面图(单位:cm)

收稿日期:2020-03-25(修改稿)

作者简介:蒋玮,男,高级工程师, E-mail:778294901@qq.com

下构为双薄壁墩,横向壁宽 6.5 m,顺向壁厚 1.5 m,双肢中心间距 7.0 m,墩高 40 m,C40 混凝土。

1.2 有限元模型建立

采用最新 Midas 2019 按实际施工过程建立结构整体有限元模型(图 2),上构为 C55 混凝土,下构为 C40 混凝土,全桥共划分为 184 个梁单元,其中上构 104 个梁单元,下构 80 个梁单元。

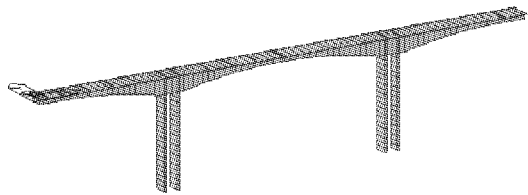


图 2 整体有限元模型图

2 主梁优化参数选取与正交试验设计

2.1 主梁优化参数选取

根据文献[1—4]及笔者对中国已建及在建大跨近 100 座 PC 连续刚构桥主梁参数统计可得,主梁边主跨比多数为 0.52~0.6,梁底幂次为 1.6~2.0,跨中高跨比为 0.02~0.03,支点高跨比为 0.052~0.067。因此,该文主梁 4 个优化参数选取范围即在以上统计范围之内,每个优化参数选取 4 个参数值进行试验,其试验参数水平表如表 1 所示。

表 1 主梁试验参数水平表

水平	试验参数			
	A(边主跨比)	B(梁底曲线幂次)	C(跨中高跨比)	D(支点高跨比)
1	0.525	1.7	0.020 8	0.054 2
2	0.550	1.8	0.023 3	0.058 3
3	0.575	1.9	0.025 8	0.062 5
4	0.600	2.0	0.028 3	0.066 7

2.2 正交试验设计

该文选用的正交表  $L_{16}(4^4)$  及试验参数正交表如表 2、3 所示。

3 主梁优化目标建立

为对各试验整体性能进行综合评价,该文采用公式评分法将多目标优化问题转换为单目标优化问题,即建立以主跨全截面平均应力、跨中最大挠度、混凝土数量为优化指标的综合目标函数,具体函数表达式如下:

表 2 正交表

试验编号	列号			
	1(A)	2(B)	3(C)	4(D)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

表 3 试验参数正交表

试验编号	试验参数			
	A(边主跨比)	B(梁底曲线幂次)	C(跨中高跨比)	D(支点高跨比)
1	0.525	1.7	0.020 8	0.054 2
2	0.525	1.8	0.023 3	0.058 3
3	0.525	1.9	0.025 8	0.062 5
4	0.525	2.0	0.028 3	0.066 7
5	0.550	1.7	0.023 3	0.062 5
6	0.550	1.8	0.020 8	0.066 7
7	0.550	1.9	0.028 3	0.054 2
8	0.550	2.0	0.025 8	0.058 3
9	0.575	1.7	0.025 8	0.066 7
10	0.575	1.8	0.028 3	0.062 5
11	0.575	1.9	0.020 8	0.058 3
12	0.575	2.0	0.023 3	0.054 2
13	0.600	1.7	0.028 3	0.058 3
14	0.600	1.8	0.025 8	0.054 2
15	0.600	1.9	0.023 3	0.066 7
16	0.600	2.0	0.020 8	0.062 5

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n (|\sigma_{si}| + |\sigma_{xi}|)}{2nf_{tk}} + \frac{f}{[f]} + \frac{F}{G} = K_1 + K_2 + K_3 \quad (1)$$

式中: $n$  为主跨节段数; $i$  为主跨各节段截面编号; $\sigma_{si}$  为截面  $i$  恒活载标准值作用下上缘应力; $\sigma_{xi}$  为截面  $i$  恒活载标准值作用下下缘应力; $f_{tk}$  为主梁 C55 混凝土抗拉强度标准值, $f_{tk}=2.74$  MPa; $f$  为跨中最大挠度值; $[f]$  为挠度限值, $[f]=L/600$ , $L$  为主跨跨径; $F$  为主梁总重量; $G$  为所有试验中主梁总重量最小值; $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  为单个目标函数; $K$  为综合目标函数。

4 主梁优化计算结果与分析

4.1 主跨 120 m 主梁优化计算结果与分析

由表 3 可知:根据各试验的参数组合,分别建立主跨 120 m 各试验有限元模型,提取各试验主梁恒活载标准值作用下主跨各截面上下缘应力、跨中最大挠度及混凝土数量,按前文所述建立的综合目标函数,得主跨 120 m 主梁综合目标函数  $K$  计算结果如表 4 所示。

表 4 主跨 120 m 综合目标  $K$  计算结果

试验编号	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K$
4	2.193	0.330	1.109	3.632
9	2.214	0.317	1.135	3.666
15	2.314	0.338	1.123	3.775
10	2.315	0.350	1.121	3.786
6	2.346	0.365	1.080	3.791
3	2.367	0.375	1.073	3.815
5	2.403	0.377	1.079	3.858
13	2.444	0.375	1.122	3.941
16	2.554	0.400	1.078	4.032
8	2.559	0.425	1.054	4.038
2	2.575	0.430	1.037	4.042
7	2.636	0.450	1.052	4.138
11	2.692	0.450	1.045	4.187
14	2.693	0.445	1.077	4.215
1	2.823	0.500	1.000	4.323
12	2.816	0.487	1.034	4.336

注:按  $K$  值从小至大进行排序,下同。

根据表 4 计算结果,对主梁 4 个试验参数进行极差及方差分析,结果见表 5、6。

表 5 主跨 120 m 综合目标  $K$  极差  $R$  分析结果

试验因素	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$R$
A	3.953 0	3.956 3	3.993 8	3.990 8	0.040 8
B	3.947 0	3.958 5	3.978 8	4.009 5	0.062 5
C	4.088 3	4.002 8	3.933 5	3.874 3	0.209 0
D	4.253 0	4.052 0	3.872 8	3.716 0	0.537 0

注: $K_i$  为试验指标和的平均值,下同。

表 6 主跨 120 m 综合目标  $K$  方差分析结果

试验因素	偏差平方和	自由度	均方差	$F$	$F_{\text{临界值}}$
A	0.005 70	3	0.001 90	0.030 42	2.610
B	0.009 00	3	0.003 00	0.048 25	2.610
C	0.097 40	3	0.032 46	0.592 16	2.610
D	0.642 95	3	0.214 32	22.880 8	2.610

由表 4 可知:以最小主跨全截面平均应力为准则,主梁最优参数组合为试验 4( $A_1B_4C_4D_4$ );以最小跨中最大挠度为准则,主梁参数组合最优为试验 9( $A_3B_1C_3D_4$ );以最小主跨全截面平均应力、跨中最大挠度、混凝土数量构成的综合目标为准则,主梁最优参数组合为试验 4( $A_1B_4C_4D_4$ )。

此外,试验 9( $A_3B_1C_3D_4$ )、试验 15( $A_4B_3C_2D_4$ )、试验 6( $A_2B_2C_1D_4$ ) 分别为同一边主跨比下的最优参数组合,实际设计中可根据实际边主跨比综合考虑采用;试验 12( $A_3B_4C_2D_1$ )、试验 1( $A_1B_1C_1D_1$ )、试验 14( $A_4B_2C_3D_1$ ) 均为很差的参数组合,实际设计中应尽量避免使用。

由表 5 可知:较大的支点高跨比、较大的跨中高跨比、较小的边主跨比及合适的梁底曲线幂次对主梁综合性能有很好的改善作用。

由表 6 可知:支点高跨比对主梁综合性能影响显著,各试验因素影响大小顺序依次为:支点高跨比>跨中高跨比>梁底曲线幂次>边主跨比。

4.2 其他跨径主梁优化计算结果与分析

在 4.1 节研究的基础上,根据表 3 各试验的参数组合,分别建立主跨 100、110、130、140、150 m 各试验有限元模型,分别提取各试验主梁恒活载标准值作用下主跨各截面上下缘应力、跨中最大挠度及混凝土数

量,按第 3 节所建立的综合目标函数,得不同主跨跨径下主梁综合目标  $K$  如表 7~11 所示。

表 7 主跨 100 m 综合目标  $K$  计算结果

试验编号	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K$
4	2.069	0.378	1.084	3.532
9	2.048	0.360	1.132	3.540
10	2.142	0.390	1.119	3.651
15	2.164	0.384	1.114	3.661
6	2.174	0.420	1.071	3.675
3	2.206	0.420	1.060	3.686
5	2.233	0.426	1.074	3.733
13	2.281	0.414	1.122	3.817
16	2.377	0.450	1.074	3.902
8	2.393	0.474	1.051	3.918
2	2.433	0.492	1.025	3.950
7	2.456	0.492	1.053	4.000
14	2.498	0.492	1.026	4.016
11	2.530	0.510	1.041	4.080
1	2.635	0.558	1.000	4.193
12	2.650	0.540	1.031	4.221

表 8 主跨 110 m 综合目标  $K$  计算结果

试验编号	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K$
4	2.663	0.371	1.088	4.122
9	2.655	0.355	1.129	4.139
10	2.745	0.376	1.122	4.244
15	2.803	0.371	1.118	4.292
6	2.843	0.409	1.070	4.322
3	2.850	0.415	1.058	4.323
5	2.842	0.409	1.079	4.330
13	2.902	0.404	1.125	4.431
2	3.074	0.469	1.030	4.573
8	3.085	0.464	1.048	4.597
16	3.099	0.436	1.074	4.609
7	3.117	0.475	1.056	4.647
14	3.200	0.469	1.079	4.749
11	3.258	0.491	1.039	4.788
1	3.333	0.535	1.000	4.867
12	3.353	0.518	1.036	4.907

表 9 主跨 130 m 综合目标  $K$  计算结果

试验编号	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K$
9	2.556	0.329	1.148	4.033
4	2.600	0.348	1.106	4.055
6	2.670	0.372	1.085	4.126
15	2.664	0.346	1.126	4.136
10	2.734	0.365	1.130	4.229
5	2.782	0.392	1.082	4.256
3	2.789	0.402	1.071	4.262
13	2.884	0.390	1.132	4.407
16	2.947	0.415	1.075	4.437
2	2.994	0.448	1.035	4.477
8	2.994	0.434	1.061	4.488
11	3.087	0.457	1.045	4.589
7	3.160	0.471	1.057	4.688
14	3.183	0.462	1.082	4.726
1	3.263	0.517	1.000	4.780
12	3.312	0.508	1.029	4.849

表 10 主跨 140 m 综合目标  $K$  计算结果

试验编号	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K$
4	2.634	0.381	1.103	4.118
9	2.671	0.373	1.134	4.178
15	2.723	0.377	1.125	4.225
6	2.753	0.411	1.079	4.243
10	2.726	0.390	1.134	4.250
3	2.804	0.424	1.069	4.297
5	2.806	0.416	1.087	4.309
13	2.884	0.416	1.135	4.435
16	2.978	0.441	1.075	4.495
2	3.018	0.476	1.037	4.530
8	3.010	0.476	1.056	4.542
11	3.140	0.493	1.042	4.675
7	3.122	0.501	1.060	4.683
14	3.177	0.493	1.081	4.751
1	3.295	0.553	1.000	4.848
12	3.290	0.540	1.034	4.864

由表 7~11 可知:以主跨全截面平均应力、跨中最大挠度、混凝土数量构成的综合目标最小为准则,主梁

表 11 主跨 150 m 综合目标  $K$  计算结果

试验编号	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K$
4	2.738	0.368	1.103	4.208
9	2.704	0.356	1.148	4.208
15	2.825	0.364	1.127	4.315
6	2.850	0.388	1.082	4.321
10	2.849	0.392	1.131	4.372
3	2.910	0.408	1.073	4.391
5	2.918	0.400	1.087	4.405
13	3.038	0.416	1.129	4.583
16	3.098	0.428	1.074	4.600
2	3.159	0.468	1.034	4.662
8	3.145	0.460	1.057	4.662
11	3.276	0.500	1.040	4.816
7	3.279	0.496	1.056	4.830
14	3.307	0.488	1.082	4.877
1	3.427	0.532	1.000	4.959
12	3.423	0.540	1.031	4.994

最优参数组合基本为试验 4 ( $A_1B_4C_4D_4$ ) [主跨 130 m 时,为试验 9 ( $A_3B_1C_3D_4$ )], 相对较优组合仍为试验 9 ( $A_3B_1C_3D_4$ )、试验 15 ( $A_4B_3C_2D_4$ )、试验 6 ( $A_2B_2C_1D_4$ )。

相对很差组合仍为试验 14 ( $A_4B_2C_3D_1$ )、试验 1 ( $A_1B_1C_1D_1$ )、试验 12 ( $A_3B_4C_2D_1$ ), 且其综合目标  $K$  值从小至大排序与主跨 120 m 也基本一致。

因此,以主跨全截面平均应力、跨中最大挠度、混凝土数量构成的综合目标最小为准则,所得主梁最优组合与最差组合具有一定的普遍性及适用性。

对以上各主跨综合目标  $K$  同样进行极差及方差分析,所得结论与主跨 120 m 结论基本一致,同样具有一定的普遍性及适用性

## 5 结论

(1) 以主梁最小综合性能指标为准则,最优参数

组合为  $A_1B_4C_4D_4$ , 即主梁边主跨比取 0.525、梁底曲线幂次取 2.0、跨中高跨比取 0.028 3、支点高跨比取 0.066 7。

(2) 实际刚构桥设计中可根据实际边主跨比考虑  $A_1B_4C_4D_4$ 、 $A_3B_1C_3D_4$ 、 $A_4B_3C_2D_4$ 、 $A_2B_2C_1D_4$  等参数组合的综合应用。

(3) 实际刚构桥设计中应尽量避免  $A_3B_4C_2D_1$ 、 $A_1B_1C_1D_1$ 、 $A_4B_2C_3D_1$  等综合性能很差的参数组合的应用。

(4) 实际刚构桥设计中应尽量采用较大的高跨比/较小边主跨比及合适的梁底曲线幂次来改善主梁的综合性能。

(5) 支点高跨比对主梁综合性能影响最为显著,各试验因素影响大小顺序依次为:支点高跨比>跨中高跨比>梁底曲线幂次>边主跨比。

## 参考文献:

- [1] 张继尧. (公路桥涵设计手册) 梁桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [2] 王会利, 谢常领, 秦泗凤, 等. 中国连续刚构桥的调查与分析[J]. 中外公路, 2019(2).
- [3] 徐刚年, 王有志, 安然, 等. 变截面刚构桥主梁几何参数统计分析[J]. 山东建筑大学学报, 2017(5).
- [4] 李艺林, 杨秀荣, 刘英. 连续刚构桥高跨比参数线性关系分析[J]. 河南城建学院学报, 2016(11).
- [5] 李明燕, 方志. 预应力混凝土连续刚构桥的参数优化[J]. 公路工程, 2008(1).
- [6] 陆尧. 基于遗传算法的连续刚构桥主梁设计参数优化研究[D]. 昆明理工大学硕士学位论文, 2015.
- [7] 冯仲仁, 杨亚磊, 李伟. 基于响应面法的连续刚构桥结构优化设计[J]. 中外公路, 2018(3).
- [8] 曾利强. 基于正交试验设计的大跨连续刚构桥主梁设计参数的优化[J]. 广东公路交通, 2016(3).
- [9] 许明. 基于正交设计表的连续刚构桥主梁形状优化[J]. 湖南交通科技, 2016(2).
- [10] 吴俊骥, 刘汉锡, 王惠队, 等. 连续刚构桥主梁设计参数优化方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017(7).
- [11] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].