

# 不同承台结构形式对大跨刚构桥抗震性能的影响分析

胡彪,徐德标,潘可明,赵维贺,黄宜  
(北京市市政工程设计研究总院有限公司,北京市 100044)

**摘要:**为探究高烈度区不同承台结构形式对大跨预应力混凝土连续刚构桥梁抗震性能的影响,以某座 108 m+188 m+108 m 双幅双肢薄壁墩连续刚构桥为工程背景,采用时程分析方法对该桥进行三向激励,对比研究纵联横离式、纵联横联式、纵离横离式、纵离横联式共 4 种承台结构形式对两幅桥墩柱和桩基内力、位移动力响应的影

**关键词:**高烈度区;双幅连续刚构桥;承台结构形式;动力响应;内力需求;地震设计

**中图分类号:** U448.23

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2024)02-0067-05

## 0 引言

与连续梁桥相比,大跨预应力混凝土连续刚构桥具有跨越能力大、整体性能好等优势。此外,因连续刚构桥采用墩梁固结的形式,其顺桥向抗弯及横桥向抗扭刚度较大,能满足成桥安全和稳定性的要求,因而被广泛应用于山区中<sup>[1]</sup>。

目前已有众多国内外学者对大跨连续刚构桥的动力特性以及地震响应规律做了大量的研究。其中:屈爱平等<sup>[2]</sup>探究了考虑桩基-土-结构相互作用效应对大跨刚构桥振动特性的影响;张永亮等<sup>[3]</sup>对双薄壁墩的壁厚、肢距等结构构造开展变参数敏感性分析;单德山等<sup>[4]</sup>在研究中发现墩高以及墩柱截面尺寸等因素对桥梁结构响应存在明显差异;余孝穷等<sup>[5]</sup>采用设计反应谱法对整体和分离式基础对连续刚构桥横向结构响应量的能力开展了研究。综上所述可以发现,目前大多数专家和学者主要以墩身和桩基为研究对象,而承台结构形式的差异对桥梁特别是高烈度区左右分幅大跨连续刚构桥的纵横向地震响应规律,却鲜有研究。

因此,本文依托某座分幅双肢薄壁墩连续刚构桥为工程背景,探究纵横向不同联结形式的承台对高烈度区的分幅大跨连续刚构桥动力特性的影响以

及结构地震响应规律,并基于上述的分析结果,针对高烈度大跨刚构桥的抗震设计,提供合理性的建议。

## 1 工程概况

位于 G109 新线高速路上的某座连续刚构桥采用分幅设计,左右幅主梁梁顶净距 3.8 m;双幅桥的跨径布置,结构类型,截面尺寸等结构参数保持一致。该桥跨径布置为 108 m+188 m+108 m,主梁采用变截面分离式双箱单室预应力混凝土箱梁,单幅桥宽 23.5 m,边支点处梁高 3.8 m,中墩处梁高 12.6 m,梁高按 1.8 次抛物线变化,采用 C60 混凝土。1、2# 中墩采用双薄壁矩形空心墩,墩顶与分离的箱底刚接,墩高 23 m、单墩截面尺寸 7.45 m×2.3 m、双肢中心距 8 m;0、3# 边墩采用双柱接盖梁的结构形式,高 22.5 m、单墩截面尺寸 4 m×2 m(见图 1),中墩采用 C60 混凝土,边墩采用 C45 混凝土。中墩承台采用纵离横联式,通过系梁将左右两幅桥的桩基联成一体,系梁尺寸为 6 m×4 m×3 m。同幅桥的双肢墩在墩底分开,承台纵向切缝宽 0.5 m,切缝内塞入苯板。每个承台尺寸为 21.5 m×7.5 m×4.0 m(见图 2、图 3),承台采用 C35 混凝土。单个承台下设 10 根  $D=2.0$  m,  $L=40$  m 的钻孔灌注桩,桩基采用 C35 混凝土。

## 2 空间动力分析计算

### 2.1 有限元计算模型

采用 Midas/Civil 软件,将全桥简化为空间杆系

收稿日期:2023-02-01

作者简介:胡彪(1991—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

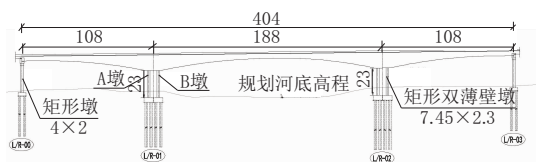


图1 全桥立面布置图(单位:m)

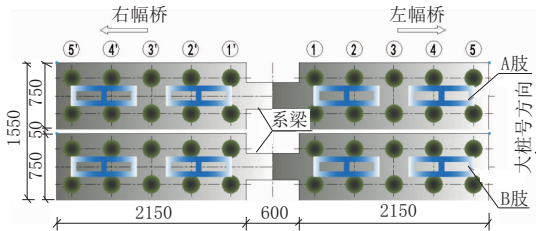


图2 1#墩承台平面图(单位:cm)

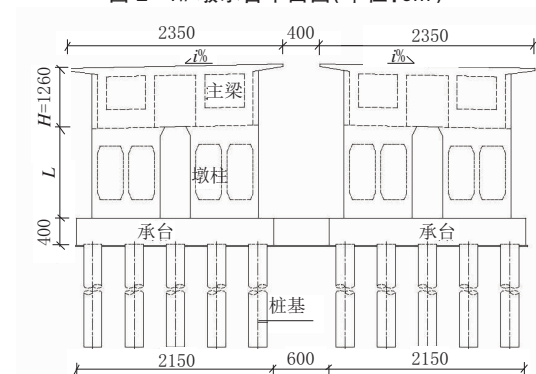


图3 中墩横断面图(单位:cm)

有限元模型;根据《公路桥梁抗震设计规范》<sup>[6]</sup>,对于单跨超过150m的特大桥,抗震设防目标要求其在E2地震作用下,结构整体反应仍处于弹性范围。因此,全桥均采用空间弹性梁单元模拟,分别建立纵联横离式(模型1)、纵联横联式(模型2)、纵离横离式(模型3)、纵离横联式(模型4)共4种承台结构形式(见图4)的分析模型。其中桩基的约束根据“m法”计算得到。桩身土弹簧为水平约束,桩底节点约束6个方向的自由度。建立桩基有限元模型流程:首先根据地勘报告中的土层情况,将桩长所在范围内的土分层,土层厚度比较大的土层可以细分为多个土层。根据地勘报告得到各层土的m值(动力计算为静力比例系数的2.5倍)。根据公式计算各层土的侧向弹簧刚度 $K=a(\text{单元高度})\times b_1(\text{桩计算宽度})\times m(\text{kN/m}^4)\times z(\text{埋置深度})$ 。

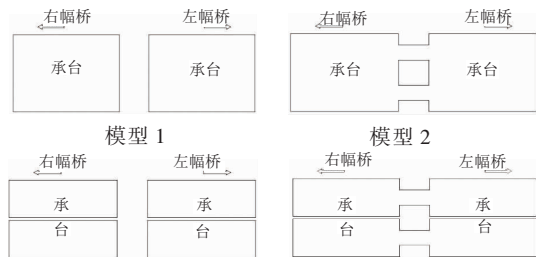


图4 不同承台结构形式平面简图

2.2 地震动的输入

根据《中国地震动参数区划图》<sup>[7]</sup>,拟建桥梁场地的地震动影响基本参数为:设防烈度8度, $A=0.20$ ;场地条件II类, $T_1=0.10\text{ s}$ , $T_g=0.40\text{ s}$ , $\beta_m=2.5$ , $\alpha_{\max}=0.36g$ , $\gamma=0.9$ 。同时为揭示桥梁强震下的损伤机理,依据《公路桥梁抗震设计规范》<sup>[7]</sup>,特大桥应同时考虑水平向和竖向地震作用的影响,分别选取安评报告提供的E2作用水准下的3条水平向和3条竖向地震波进行时程分析。

3 结构动力特性的比较与分析

3.1 结构动力特性

模型1~4的前5阶自振周期及振型描述见表1。

表1 模型1~4前10阶动力特性描述

| 阶次 | 模型1  |       |         | 模型2  |       |        |
|----|------|-------|---------|------|-------|--------|
|    | 周期/s | 频率/Hz | 振型特征    | 周期/s | 频率/Hz | 振型特征   |
| 1  | 1.95 | 0.51  | 边墩横飘    | 1.91 | 0.52  | 双幅相对横飘 |
| 2  | 1.66 | 0.60  | 主梁反对称横弯 | 1.91 | 0.52  | 双幅一致横飘 |
| 3  | 1.59 | 0.63  | 主梁纵飘    | 1.59 | 0.63  | 双幅一致纵飘 |
| 4  | 1.36 | 0.73  | 0#墩纵飘   | 1.46 | 0.68  | 双幅反向横飘 |
| 5  | 1.26 | 0.80  | 中墩横飘    | 1.44 | 0.69  | 双幅反向纵飘 |

| 阶次 | 模型3  |       |         | 模型4  |       |         |
|----|------|-------|---------|------|-------|---------|
|    | 周期/s | 频率/Hz | 振型特征    | 周期/s | 频率/Hz | 振型特征    |
| 1  | 1.96 | 0.51  | 边墩横飘    | 1.93 | 0.52  | 双幅桥相对横飘 |
| 2  | 1.76 | 0.57  | 主梁纵飘    | 1.93 | 0.52  | 双幅桥一致横飘 |
| 3  | 1.66 | 0.60  | 主梁反对称横弯 | 1.76 | 0.57  | 双幅桥一致纵飘 |
| 4  | 1.37 | 0.73  | 0#墩纵飘   | 1.49 | 0.67  | 双幅桥反向纵飘 |
| 5  | 1.26 | 0.79  | 中墩横飘    | 1.47 | 0.68  | 双幅桥反向横飘 |

3.2 动力特性相关规律

由表1可得如下规律:

- (1)4种模型的基频均为横飘,按频率从大到小排序依次是:2>4>1>3;
  - (2)模型1,2,4的2阶振型虽然均为横飘,但模型1为形状更为复杂的中心反对称横飘;
  - (3)模型1,2,4的3阶振型均为纵飘,按频率从大到小排序依次是:1≈2>4;
  - (4)模型1~4前10阶振型均出现竖飘,按频率及出现振型阶段从大到小排序依次是:2>4>1>3。
- 综上所述的4条规律,依次可得以下结论:
- 一、该单幅桥纵向刚度大于横向刚度;
  - 二、承台横联对双幅桥横向刚度贡献较大;
  - 三、承台横联对该桥纵向刚度基本无影响,仅纵

联对该桥纵向刚度影响较大;

四、该桥整体刚度从大到小排序依次为:2>4>1>3,且承台横联相对纵联对全桥刚度贡献更大。

4 结构地震响应的比较与分析

因为该桥关于中跨跨中对称,在地震作用下,1#、2#墩及其对应桩基的动力响应完全一致。受篇幅限制,本文只摘取1#墩及其桩基的结构响应量进行分析。下文将把4种模型的主要结构响应量分别绘制出来,同时为量化分析不同模型间计算结果的差异,以结构形式最简单的模型1为对比基准,将模型2~4的计算结果分别同模型1进行比对。

4.1 桩基的结构响应

成桥单桩恒载反力见表2。在地震作用下,4种模型的桩身控制截面轴力、桩身最大弯矩以及桩顶位移的纵横桥向计算结果见图5。

| 表 2 成桥单桩恒载反力 |   |        |        |        |        |
|--------------|---|--------|--------|--------|--------|
| 桩底反力 /kN     |   | 结构类型   |        |        |        |
| 位置(1#墩)      |   | 模型 1   | 模型 2   | 模型 3   | 模型 4   |
| A 肢          | 外 | 31 880 | 31 300 | 31 260 | 31 690 |
|              | 内 | 23 850 | 24 280 | 23 990 | 23 420 |
| B 肢          | 内 | 15 800 | 16 230 | 16 020 | 16 450 |
|              | 外 | 7 760  | 8 190  | 7 870  | 8 300  |

4.2 墩柱的结构响应

在地震作用下,4种模型的墩柱控制截面轴力、弯矩以及墩顶位移的纵横桥向计算结果见图6。

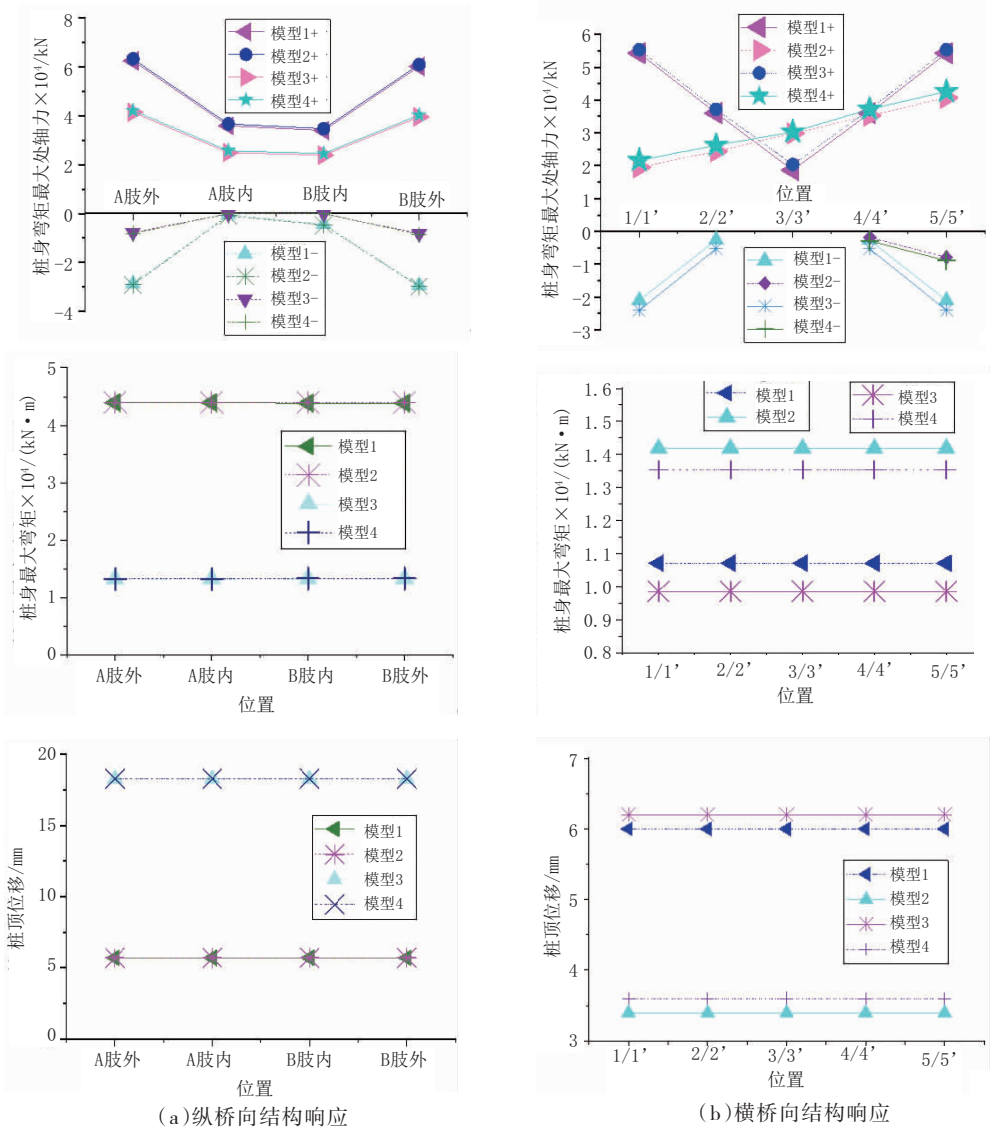
4.3 不同模型结构地震响应的偏差分析

4.3.1 桩基的偏差分析

从图5可知:

(1)在桩基纵桥向结构响应中

a. 对于桩身轴力来说,4种模型均为对称分布,外侧桩基轴力均大于内侧;模型1≈2>模型3≈4;



备注:“模型X+”表示该模型中的桩身压力,“模型X-”表示该模型中的桩身拉力。

图5 地震作用下4种模型的桩基结构响应

与模型 1、2 相比,模型 3、4 桩身拉力降低 2.6 倍,内侧桩基本无拉力;由于双幅桥纵向刚度的减小,模型 3 和 4 的桩身轴力(压力)需求平均为模型 1 的 0.69 倍。

b. 对于桩身最大弯矩来说,各排桩身弯矩均相同;与桩身轴力规律相同,模型  $1 \approx 2 > \text{模型 } 3 \approx 4$ ;由于双幅桥纵向刚度的减小,模型 3 和 4 的桩身弯矩需求平均为模型 1 的 0.30 倍。

c. 与桩身轴力和弯矩规律相反,对于桩顶位移来说,模型  $3 \approx 4 > \text{模型 } 1 \approx 2$ ,各排桩顶位移均相同;由于双幅桥纵向刚度的减小,模型 3 和 4 的位移需求平均为模型 1 的 3.21 倍。

#### (2) 在桩基横桥向结构响应中

a. 对于桩身轴力来说,模型 1、3 关于中排桩 3/3,呈对称分布;模型 2、4 从 1/1,到 5/5,(从内到外)线

性递增;尤其需要注意的是模型 2、4 桩身拉力很小,仅外侧桩基存在较小拉力;由于横向力臂的增大,模型 2 和 4 的桩身轴力(压力)需求平均为模型 1 的 0.89 倍。

b. 对于桩身最大弯矩来说,各排桩身弯矩均相同;桩身弯矩大小,模型  $2 > 4 > 1 > 3$ ,这也与结构的动力特性规律相一致;由于双幅桥横向刚度的增大,模型 2 和 4 的桩身弯矩需求平均为模型 1 的 1.29 倍。

c. 与桩身弯矩规律相反,对于桩顶位移来说,模型  $3 > 1 > 4 > 2$ ,各排桩顶位移均相同;由于双幅桥横向刚度的增大,模型 2 和 4 的位移需求平均为模型 1 的 0.59 倍。

#### 4.3.2 墩柱的偏差分析

从图 6 可知:

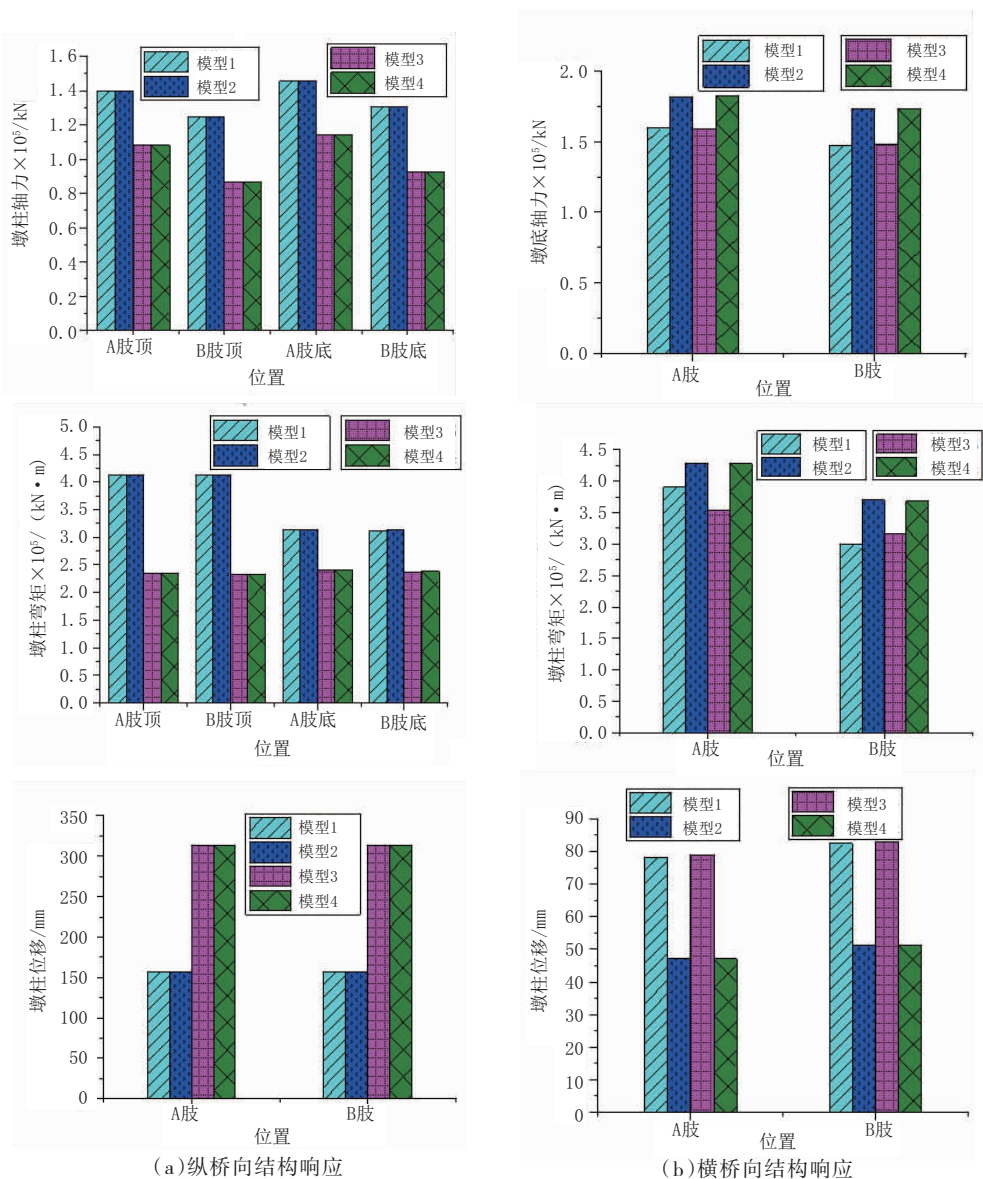


图 6 地震作用下 4 种模型的墩柱结构响应

### (1)在墩柱纵桥向结构响应中

a. 对于墩柱轴力来说,受配重和跨中顶推力的影响,A肢轴力大于B肢,且墩顶底差异较小;模型 $1 \approx 2 >$ 模型 $3 \approx 4$ ;模型3和4的墩身轴力需求平均为模型1的0.74倍;其它规律,与桩身纵向轴力类似。

b. 对于墩身弯矩来说,各模型墩顶弯矩均大于墩底,A、B肢相同位置处弯矩基本相同;模型3和4的墩身弯矩需求平均为模型1的0.67倍;其它规律,与墩身纵向轴力相同。

c. 对于墩顶位移来说,各模型A、B肢相同;模型3和4的墩顶位移需求平均为模型1的2倍;其它规律,与墩身纵向轴力相反。

### (2)在墩柱横桥向结构响应中

a. 对于墩底轴力来说,A肢轴力大于B肢,但差异程度与纵向相比较小;模型 $2 \approx 4 >$ 模型 $1 \approx 3$ ;由于双幅桥横向刚度的增大,模型2和4的墩底轴力需求平均为模型1的1.16倍。

b. 对于墩底弯矩来说,规律与墩身横向轴力相同。

c. 对于墩顶位移来说,A肢位移稍小于B肢;模型2和4的墩顶位移需求平均为模型1的0.61倍;其它规律,与墩身横向轴力相反。

## 5 基于高烈度区的承台结构形式选择

强震作用下,墩柱和桩基是典型的偏压构件,由偏压构件的M-N曲线可知:大偏压构件的抗压能力随着弯矩增加而增加,小偏压构件的抗压能力随着弯矩增加而减小,拉弯构件的随着拉力增大承载力急剧降低,基本可以忽略。因此,从结构安全及经济性的角度来看,应避免桩基出现受拉破坏,同时尽可能减小墩柱的内力响应。

通过上述综合分析比对可以发现:

### (1)对于桩基

采用横联纵离的承台结构形式(模型4)可有效减小甚至消除桩身拉力;虽然桩基横向弯矩增大了30%,但与纵向减小70%相比,模型4对桩基受力改善程度较大,对基础的抗震性能提高非常有利。

### (2)对于墩柱

采用横联纵离的承台结构形式(模型4)虽然横桥向内力响应增大,但可较大程度降低纵桥向内力响应;即墩柱横向内力需求增大16%,但纵向内力响应需求降低了约30%。另外双肢矩形墩存在明显的强、弱轴,横向承载能力比纵向高很多。

## 6 结论及建议

本文以某大跨连续刚构桥为工程背景,进行动力特性以及下部结构内力、位移地震响应的对比分析,研究4种不同承台结构形式下该桥的关键动力响应规律,得出以下主要结论:

(1)单幅桥的纵向刚度大于横向刚度,承台横联相对纵联对整体刚度贡献更。

(2)与最基础的承台形式(模型1)相比,采用纵离的承台形式(模型3、4)在纵向地震下,桩基内力需求降低30%~70%,桩顶位移需求增大了约220%;采用横联的承台形式(模型2、4)在横向地震下,桩基轴力需求降低11%,且桩身基本不存在拉力,桩基弯矩需求增加30%,桩顶位移需求降低了41%。

(3)与模型1相比,采用纵离的承台形式(模型3、4)在纵向地震下,墩柱的内力需求降低了26%~33%,墩顶位移需求增大了100%;采用横联的承台形式(模型2、4)在横向地震下,墩柱的内力需求增大了16%,墩顶位移需求降低了39%。

(4)从特大桥全寿命周期的安全性、耐久性以及经济性等因素考虑,基于高烈度区的大跨连续刚构桥,通过对优势抗震性能的综合比选,建议该桥采用纵离横联(模型4)的承台结构形式。

### 参考文献:

- [1] 王东升,童磊,王荣霞,等.大跨PC连续刚构桥抗震研究进展综述[J].西南交通大学学报,2022(6):1-16.
- [2] 屈爱平,高淑英.梁-墩-桩基的动力特性研究[J].西南交通大学学报,2001(6):641-644.
- [3] 张永亮,王云,陈兴冲,等.双薄壁墩连续刚构桥地震反应影响参数分析[J].桥梁建设,2018,48(4):17-21.
- [4] 单德山,张二华,董俊,等.汶川地震动衰减特性及其大跨高墩连续刚构桥的地震响应规律[J].土木工程学报,2017,50(4):107-115.
- [5] 余孝穷,郭炎峰,吕凯元.承台结构形式对分幅连续刚构桥地震响应的影响研究[J].世界桥梁,2021,49(2):57-63.
- [6] JTG/T 2231-01—2020,公路桥梁抗震设计规范[S].
- [7] GB 18306—2015,中国地震动参数区划图[S].