

高烈度区城市双层高架桥梁抗震设计新方案

傅吉兴, 王明晔, 徐俊

(上海市政交通设计研究院有限公司, 上海市 200030)

摘要: 双层桥梁在跨江跨海桥梁、城市高架桥等的应用越来越多。结合某机场航站楼前双层高架桥梁工程设计, 着重解决高烈度区、桥面宽度大、净空要求苛刻、施工要求快捷等因素, 从结构材料、结构体系、减隔震设计等方面进行多方案比选, 并进行空间建模计算, 提出的双层框架配合隔震支座的设计新方案, 为今后类似桥梁设计提供有益的参考。

关键词: 双层高架; 抗震设计; 减隔震体系

中图分类号: U442.5+5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)02-0066-04

1 工程背景

某机场航站楼设置双层出发流程, 为配合航站楼双层出发功能, 航站楼前高架桥采用双层结构型式。

航站楼柱距 18 m, 楼前双层高架桥墩与航站楼立柱对齐, 景观效果好, 且便于出入口的设置。结构标准跨径采用 36 m, 楼前直线段跨径布置为 $(36+36+36+36+36)m+(27+36+27)m+(36+36+36+36+36)m=450 m$ 。

工程所在地区属高烈度区, 根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015), 本工程场地基本地震动峰值加速度值为 $0.20g$, 由上述标准附录 G 查得相应的地震烈度为Ⅷ度。根据工程所在地区《建筑场地类别区划》(2016 版) 中表 3 确定, 场地设计特征周期 T_g 为 $0.43 s$ 。

2 基于抗震要求的桥型结构设计

2.1 城市双层高架桥梁的工程实例

双层高架桥梁能够充分利用空间, 在城市有限的道路面积上有效实现交通分流和扩容, 是一种高效的交通网络解决方案。目前国内采用双层高架结构形式的城市高架桥梁工程主要有上海市共和新路双层高架桥、武汉宝丰路桥、福州洪山桥西双层高架桥、宁波北环快速路双层高架桥等(见图 1)。上述双层高架桥通过 H 型框架墩使上下层桥梁梁体与桥墩分别通过支座连接或隔震, 受力明确, 施工便捷,

但需考虑 H 型墩对净空的影响。



图 1 既有双层高架桥

2.2 工程特点分析

(1) 双层高架基础承担的荷载较单层高架更大, 要求更轻的结构材料。

(2) 本高架上层桥面宽 46 m, 下层桥面宽 35.5 m。桥面宽, 结构受力不利, 横梁受力大。

(3) 净空受限, 本工程层高仅 7 m, 净空 4.5 m, 要求更薄的结构且不具备设置 H 型墩的条件。

(4) 工程所在地区属高烈度区, 本工程场地基本地震动峰值加速度值为 $0.20g$, 需选用合适的抗震体系。

2.3 双层高架桥的结构设计

从结构材料、结构体系、减隔震设计 3 个方面对结构进行分析。

2.3.1 结构材料

本工程对层高限制较严格, 双层高架系统的层高为 7 m, 扣除净空、铺装后, 结构高度为 2.4 m。本工程横向宽度大, 立柱横向间距 28 m。经计算, 采用 2.4 m 结构高的钢箱梁已经是设计梁高压缩的极限。如果采用混凝土梁, 横梁结构高度需要 2.8~3.0 m, 则桥

收稿日期: 2021-11-19

作者简介: 傅吉兴(1972—), 男, 本科, 高级工程师, 从事桥梁设计相关工作。

梁净空无法满足要求。所以,采用钢结构可以降低梁高以满足净空要求。

同时,采用钢结构利于高烈度区桥梁抗震,也有利于双层桥梁施工。

2.3.2 结构体系

本工程双层高架结构桥面宽,自重大,质点高,框架效应明显,地震力大。如何从结构体系上解决双层桥梁结构的抗震问题,是必须解决的重要课题。

由于层间净空有限,不具备设置H型墩的条件。因为双层桥上部结构需与下部桥墩立柱结合起来,统筹考虑结构受力体力。现对以下4种体系进行讨论:

(1)全固结体系

双层高架有两层桥面,该体系上下层桥面与立柱之间采用固结形式(见图2)。

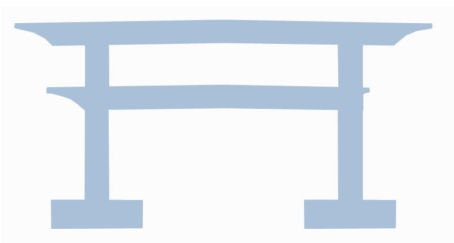


图2 结构体系1示意图

从抗震设计角度看,全固结体系为延性结构体系。延性体系适合用于墩柱较高的结构,通过墩柱形成塑性铰进行耗能。本工程桥墩立柱高度小,且存在部分不均匀高度,因此桥墩刚度大且不均匀,对塑性铰发生及变形不利,不适合采用延性体系。

(2)上层桥面设支座、下层桥面固结体系

为改善结构受力,该体系考虑在结构中加入减隔震支座(见图3)。

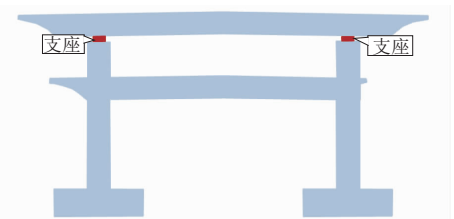


图3 结构体系2示意图

为避免在下层桥面设置牛腿,考虑上层桥面设支座,下层桥面固结。考虑下层桥面地震力较上层桥面地震力大,该种体系未能解决下层桥面的抗震问题,整体隔震效果有限。

(3)上下层桥面均设支座

该体系上下层桥面均设置支座,上下层支座均设为减隔震支座,能有效降低地震力。该方案有两种做法。

a. 上下层共用立柱(见图4)。该方案下层桥面需开孔让立柱穿越,需在桥墩立面纵向设置牛腿,影响美观。

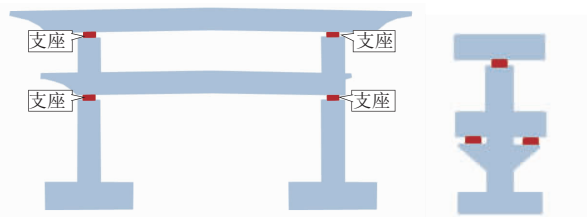


图4 结构体系3示意图(a)

b. 上下层桥面间立柱与下层桥面固结(见图5)。该方案的两层支座受力协调问题存疑。

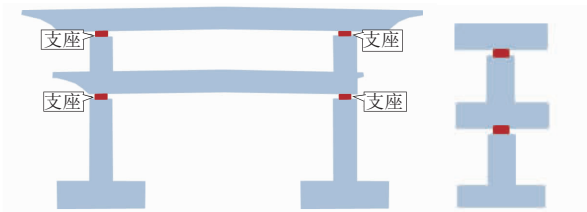


图5 结构体系3示意图(b)

(4)上下层固结为框架、框架下隔震体系

该体系上下层桥面间立柱与两层桥面结构固结为整体框架,受力更好,整体框架下设隔震支座,通过一层的减隔震支座有效解决了两层桥面的抗震问题,同时解决了支座布设的美观问题和两层支座的受力协调性问题(见图6)。

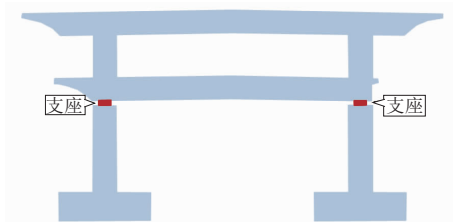


图6 结构体系4示意图

经过以上对比分析,本工程首创的上下层固结为框架、框架下隔震体系解决了两层结构的抗震问题,受力清晰,施工快捷,结构美观,为本桥推荐体系(见图7)。

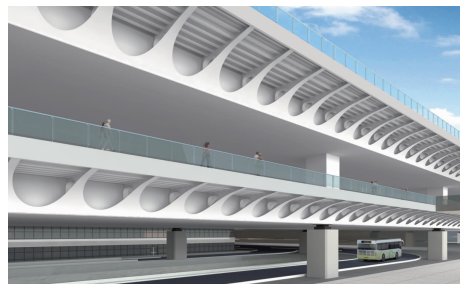


图7 双层高架桥

3 工程抗震专项设计

3.1 结构布置

为验证结构体系选择的有效性,设计选取了标

准段结构进行分析验算,对双层高架桥梁的抗震性能进行分析。

本工程双层高架桥上层宽 46 m,下层宽 35.5 m。连续钢箱梁采用整体箱型断面,截面等高,上下层钢结构梁高均为 2.2 m。挑臂长度 4.25 m,腹板与立柱外表面齐平布置。钢箱梁采用正交异性钢桥面板。

双层高架桥墩采用双立柱+承台结构,立柱间距为 28 m。中墩立柱标准断面尺寸为 2.5 m×2.5 m,过渡墩立柱标准断面尺寸为 3.6 m×2.5 m(见图 8)。立柱底设钢筋混凝土承台,承台尺寸为 10 m×10 m×3 m。每个承台下采用 9 根 $\phi 1.5$ m 钻孔灌注桩。

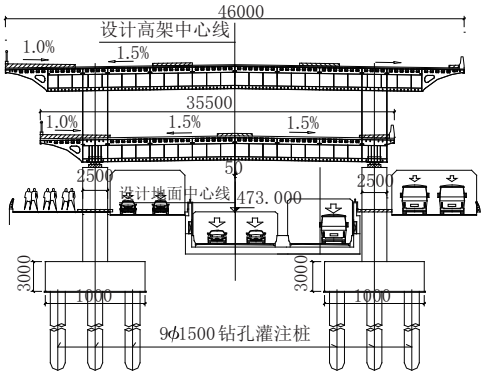


图 8 标准横截面

3.2 动力特性分析

3.2.1 动力计算模型的建立

标准段动力特性分析采用有限单元方法,计算软件采用 SAP2000,有限元计算模型均以顺桥向为 x 轴,横桥向为 y 轴,竖向为 z 轴。

主梁、桥墩、承台均离散为空间的梁单元;二期恒载采用分布质量模拟。为了模拟桩土共同作用,对于承台基础,采用在承台底中心加 6×6 的土弹簧来模拟。

为考虑边联桥的影响,在进行时程分析时,采用三联模型,如图 9 所示。

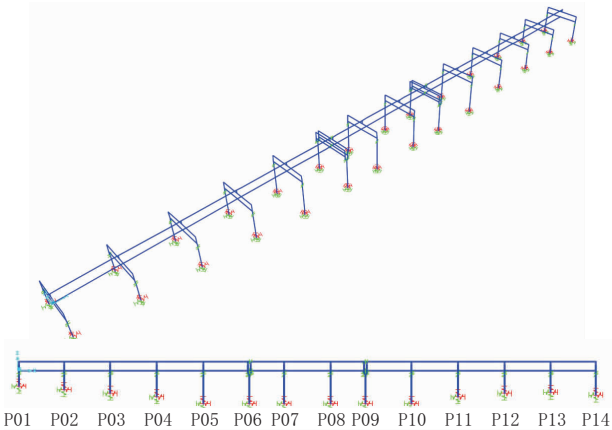


图 9 SAP 计算模型

3.2.2 动力特性计算

根据建立的动力计算模型,进行了结构动力特性分析。表 1 列出了前 4 阶振型的频率和振型特征。图 10 为第一阶典型振型图示。

表 1 动力特性

振型顺序	周期 /s	频率 /Hz	振型描述
1	2.62	0.38	第二联纵向一致振动
2	2.46	0.41	第三联纵向一致振动
3	2.46	0.41	第一联纵向一致振动
4	1.90	0.53	主梁横向对称振动、桥墩侧弯

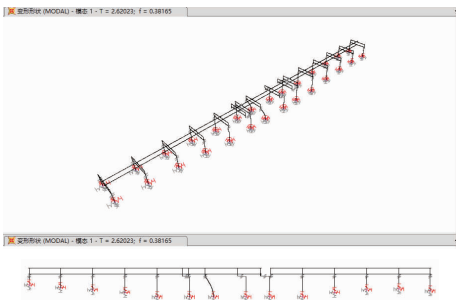


图 10 第一阶:第二联纵向一致振动

从表 1 可以看出,双层高架动力特性与单层连续梁桥有相近之处。可见,在地震作用下,本结构体系将复杂的双层高架桥受力转化为单层受力,验证了体系选择的有效性。

3.3 结构抗震性能研究

3.3.1 常规体系非线性时程分析

根据规范反应谱拟合地震动时程,利用非线性时程分析方法,对非线性动力有限元模型进行地震反应分析。地震输入组合为纵向和横向。时程分析的最终结果,采用 3 组地震加速度时程计算时,取各组计算结果的最大值。非线性时程的结果统计如图 11 所示。

由常规体系 E2 地震响应及计算可以发现,E2 地震作用下,桥墩抗震能力严重不足,特别是纵向向地震输入下,固定墩截面能力需求比只有 0.21。

如果通过调整截面尺寸、增加截面配筋进行调整,则截面尺寸增加较大,不具可行性。

3.3.2 减隔震体系非线性时程分析

将普通支座调整为减隔震支座,进行减隔震体系的非线性时程分析,并对摩擦摆支座和拉索支座的性能进行了对比。摩擦摆支座和拉索支座的设计参数根据相关规范和标准进行选取,结果如图 12 所示。

减隔震体系中,桥墩配筋方案均按照 E1 地震

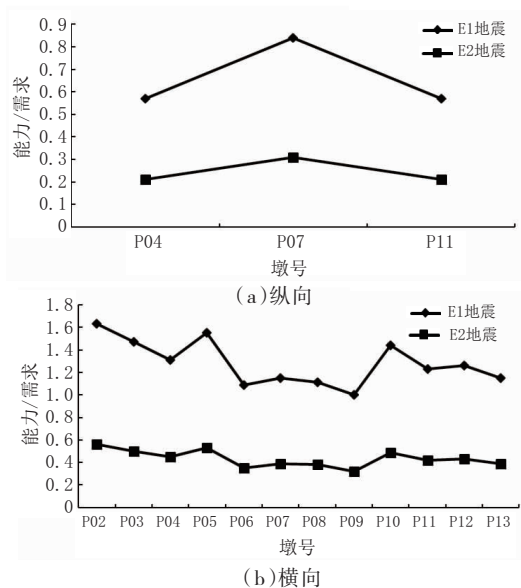


图 11 常规体系能力需求比

下,支座剪切滑动时刻的地震内力控制。验算表明,桥墩及桩基抗弯能力均可满足抗震设防要求。

3.3.3 抗震性能分析小结

结构常规体系 E1/E2 地震作用下,桥墩、桩基截面抗震能力不足;需调整桥墩、桩基的截面尺寸、配筋,增加支座水平抗剪能力,不具可行性。

减隔震体系下,对于摩擦摆支座体系,E2 地震作用下,墩柱能力需求比略大,截面抗弯能力未充分利用以限制支座位移。

拉索摩擦摆支座在 E2 地震作用下,充分利用了下部结构抗弯能力情况,有效地控制了支座位移,合理平衡了地震内力与地震位移的矛盾。

设计中结合力与位移的实际需求,选取合适的减隔震支座。

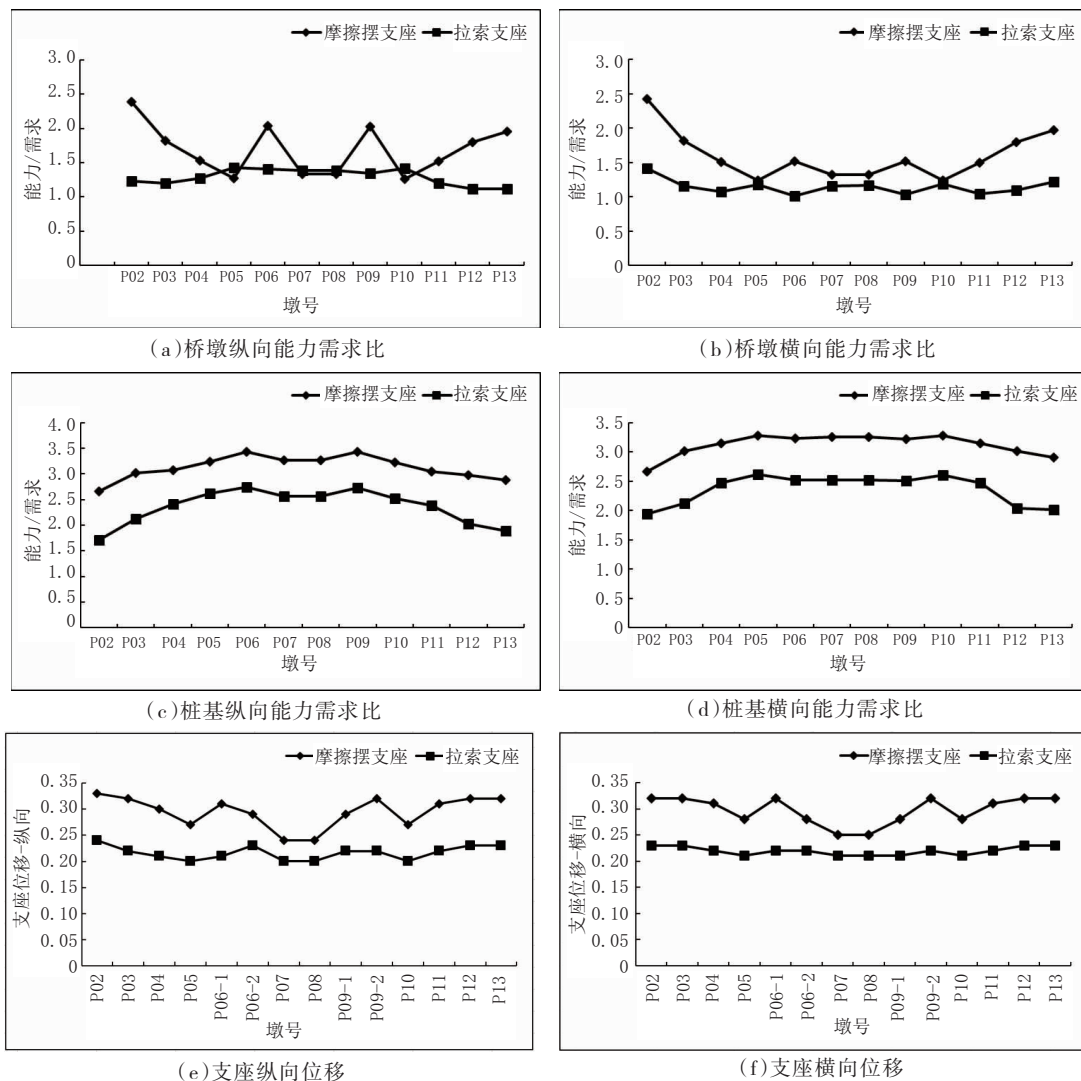


图 12 减隔震体系能力需求比

4 结 语

本工程为国内首次在 8 度高震区的双层高架桥梁

采用上下层间立柱与两层桥面结构固结为框架、框架下设隔震体系的双层高架桥梁。采用减隔震设计后,在 E2 地震作用下,桥墩、桩基均保持弹性,支座

(下转第 74 页)

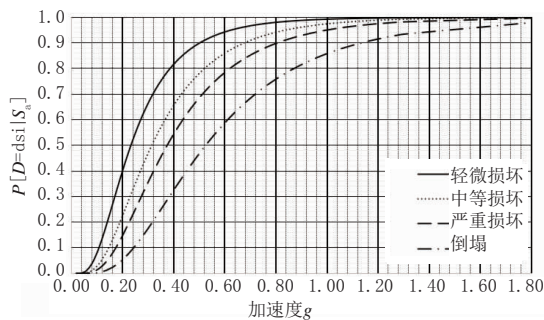


图4 易损曲线

根据易损曲线,按照 $S_a=S_{D1}/1.5=0.46g$ 查询各易损状态下的概率值,进而计算该桥抗震加固需要的费用占新桥的比例,计算结果见表10。

表10 加固成本分析表

等级	$P[D>DS_i S_a]$	$P[DS_i S_a]$	RCRi	合计
1	1.000	0.128	0	0.00
2	0.872	0.136	0.02	0.00
3	0.736	0.103	0.08	0.01
4	0.633	0.220	0.25	0.06
5	0.413	0.413	0.67	0.28
合计		1.000		0.35

根据表10计算得到该桥的抗震加固直接费用占重建的比例约为35%。该费用可作为加固评估的参考因素,当直接抗震加固费用超过新建桥梁的60%~70%时,一般不考虑抗震加固,而更加倾向于拆除重建。

根据上述两种方式计算得到该桥进行抗震加固排序指数 $R=69$,直接抗震加固费用占重建费用比例为35%。同时考虑该桥位于港口运输要道上,加固费用在合理范围内,因此建议进行抗震加固。

6 结论及建议

(1)基于美标就抗震加固初步评估阶段提出了定量的判别方法,尤其对于旧桥较多的高烈度区域,可按照本文方法对桥梁进行优先级排序,对加固排序指数较高、加固费用少的桥梁可以优先加固。

(2)指数法侧重于评估桥梁加固的紧迫性,损伤评估法则着重于加固成本考量。两种方法使用简单,可以综合考虑。国内旧桥抗震加固评估也可以借鉴这两种方法。

(3)基于易损评估法,在获取桥梁的设计地震、桥跨等初步资料后,可以大概预估该桥的抗震加固成本,可以作为项目前期的经济对比分析的参考。一般对于抗震加固成本超过60%~70%重建桥梁时,建议考虑拆除重建。

(4)本文抗震加固初步评估还需结合桥位处的环境、间接成本、社会影响等进行综合分析。

参考文献:

- [1] Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures Part 1 - Bridges, [S]. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2006.
- [2] JTG/T J22—2008,公路桥梁加固设计规范[S].
- [3] JTG/T 2231-01—2020,公路桥梁抗震设计规范[S].
- [4] Fung G G, LeBeau R J, Klein E E, et al. Field Investigation of Bridge Damage in the San Fernando Earthquake, "State of California, Division of Highways, Bridge Department, 1971.
- [5] Soil Liquefaction During Earthquakes [S]. Earthquake Engineering Research Institute, 2008.
- [6] Basoz N, and Mander J B, Enhancement of the Highway Transportation Lifeline Module in HAZUS, Final Pre-Publication Draft (#7) prepared for the National Institute of Building Sciences, March 31, 1999.

(上接第69页)

位移能力满足要求。

综上所述,本工程采用的结构体系及抗震设计新方案很好地满足了高震区条件下的安全性和适用性,为今后类似工程设计提供了新的思路和有益的参考。

参考文献:

- [1] CJJ 166—2011,城市桥梁抗震设计规范[S].
- [2] 上海市政交通设计研究院有限公司.高烈度区双层高架桥梁抗震性能分析[R].上海:上海市政交通设计研究院有限公司, 2021
- [3] 袁万城,等.拉索减震支座及桥梁抗震设计应用研究[J].工程力学, 2011,28(S2):204.