

地震高烈度区高架桥结构选型及受力特点分析

王培晓

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要:我国地震灾害频发,城市高架桥梁作为交通生命线,抗震安全性尤为重要。目前我国城市高架桥梁普遍采用预制小箱梁和预应力混凝土大箱梁,从抗震分析角度考虑,根据两种结构型式抗震受力特点的不同,以及构造设计不同等方面,对两种结构进行比较,为地震高烈度区城市高架桥梁选型提供借鉴。

关键词:地震力;减隔震支座;预应力混凝土箱梁;预制小箱梁

中图分类号: U442.5+5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)01-0050-04

0 引言

地震是与地球构造运动密切相关的一种自然现象。它是伴随着地壳上能量的释放而引起的地球表面强烈振动。我国是一个多地震的国家,许多桥梁桥址处于地震多发区,地质条件复杂,桥址处地震、台风等自然灾害频繁。倘若桥梁工程遭到严重破坏,就会切断震区的交通生命线,造成救灾工作困难,加重次生灾害。因此,桥梁的抗震防灾工作显得极为重要^[1]。

“5·12”汶川大地震给社会造成了巨大损失,由于震区交通设施损毁严重,致使救援人员和物资不能及时到位。特别是位于震中的汶川县附近道路、国道桥梁受到严重破坏,救灾部队、人员,以及医疗、生活物资迟迟不能从陆路进入,对重灾区救援造成极大的阻碍,加剧了灾区的人员伤亡。

多年来的震害经验表明,传统的桥梁抗震设计,地震后结构损伤破坏严重,不能保证应急交通,桥梁破坏所造成的直接和间接经济损失巨大。基于对桥梁和结构地震震害的认识,美国、日本等国,对于结构的传统抗震设计、分析方法进行了全面的重新认识,提出基于性能的抗震设计思想。目前,我国城市高架桥梁普遍采用预制装配小箱梁和预应力混凝土大箱梁构造。这两种结构无论是在静力计算方法和施工工艺上,均已经比较成熟,积累了较为丰富的经验。但是,由于早期抗震规范不成熟,抗震设计手段不够,地震高烈度区桥梁抗震设计仍有不少技术问题尚待完善。在两种结构选型中,往往重点关注施工

场地运输便捷性、结构整体美观性及施工单位施工能力等因素。现着重从抗震角度,根据强震作用下两种结构型式受力特点不同,以及构造设计不同等,对两种结构进行对比,为地震高烈度区城市高架桥选型提供参考。

1 工程概况

海口市快速路网骨干工程位于海口市中心城区,贯通海口市主城区东西方向,是海口城市快速路网中的主骨架之一。该工程全线采用高架桥梁的结构形式,西起长滨路,东至国兴大道相接,主线桥梁总长13.4 km,主线高架两侧布置多对平行上、下匝道,并设置长滨路立交和龙昆路立交两座立交桥,实桥见图1所示。主线高架桥标准段采用跨度30 m,基础形式以钻孔灌注桩为主。工程场址地震动峰值加速度为0.3g,基本烈度为8度高烈度区,在城市建设中必须考虑地震危险性,进行抗震设防,以保证城市生命线工程的地震安全性,保障人民生命财产安全。



图1 工程之实景

该工程标准跨径采用 3×30 m,标准桥宽25.5 m。现选取标准段分别对预制装配小箱梁和预应力混凝土大箱梁在E2地震下的动力特性进行计算分析,并对受力特点及相应的关键构造设计进行比较,最终对地震高烈度区城市高架桥的结构选型提出参考建议。

收稿日期: 2021-05-08

作者简介: 王培晓(1979—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

2 抗震计算

2.1 预应力混凝土大箱梁

桥梁动力特性分析采用离散结构的有限单元方法,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、桥墩和桩基均离散为空间的梁单元,承台模拟为质点,用等效土弹簧模拟桩土相互作用;与分析对象相接的两联作为边界条件参与建模。结构动力特性和地震反应分析的三维有限元模型,如图 2 所示。

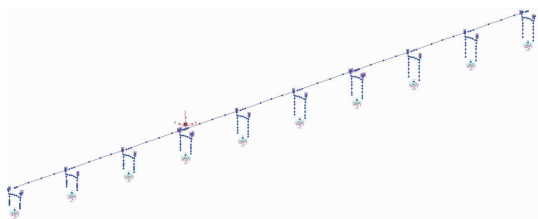


图 2 有限元计算模型

地震高烈度区,桥梁减隔震器的选择至关重要。一般来说,桥梁结构都是将支座作为减隔震器,将上下部结构进行分离,并通过减隔震支座的技术处理,达到减震隔震作用,减少上部结构传递给下部结构的地震力。目前桥梁工程应用较广泛的减隔震器主要有:铅芯橡胶支座、双曲面摩擦摆式支座及阻尼器等。现取典型柱高 8 m,并进行抗震计算分析比选,计算结果如表 1 所列。

表 1 E2 地震作用计算结果比较表

减隔震器选择	墩梁相对位移 /cm		邻梁相对位移 /cm	墩柱尺寸 /m × m	桩基形式
	纵向	横向			
双曲面摆式支座 (R=6.5 m)	54.1	55.9	7.3	1.5 × 2	9 Φ 1200
同上,边墩设置 阻尼器	31.4	34.2	8.9	1.5 × 2	9 Φ 1200
铅芯橡胶支座	38.9	39.5	7.9	2.0 × 2.5	9 Φ 1500

由抗震计算结果可知,采用双曲面摆式支座,配套采用阻尼器,可以有效地控制传递给下部结构的地震力,并减少地震位移,立柱尺寸可以采用较为常规的尺寸。采用铅芯橡胶支座,虽然地震位移比双曲面摆式减隔震支座减少很多,但是传递给下部结构的地震力较大,立柱和桩基等下部结构尺寸变大,降低了经济效益和结构景观。鉴于上述比较结果,选取双曲面摆式减隔震支座方案,E2 地震水准下抗震设计结果整理如表 2 和表 3 所列。

取立柱截面配筋率为 1.44%,双向配箍率均为 0.4%水平时,立柱抗震验算如图 3、图 4 所示。

由上可知,在 E2 纵向 + 竖向输入及 E2 横向 +

表 2 支座验算表(纵向 + 竖向输入)

墩号	竖向承载力 /kN	纵向位移 /cm	容许位移 /cm	是否满足
边墩	7 000	53.8	60	是
中墩	15 000	54.1	60	是

表 3 支座验算表(横向 + 竖向输入)

墩号	竖向承载力 /kN	纵向位移 /cm	容许位移 /cm	是否满足
边墩	7 000	53.3	60	是
中墩	15 000	55.9	60	是

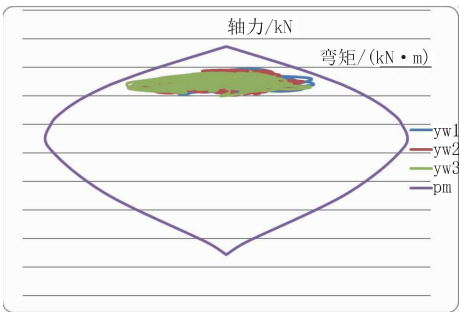


图 3 立柱墩底 P-M 履历图(E2 纵向 + 竖向输入)

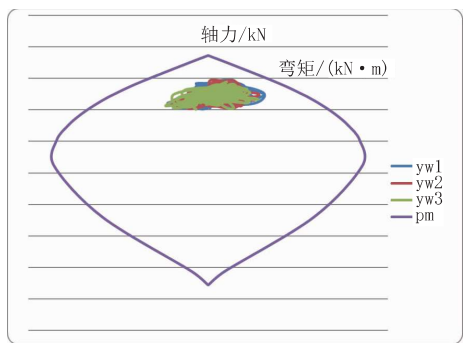


图 4 立柱墩底 P-M 履历图(E2 横向 + 竖向输入)

竖向输入下,立柱的 P-M(轴力 - 弯矩)履历曲线均在立柱截面 PM 能力包络曲线内,立柱基本保持弹性,满足基本无损伤要求。基础因破坏后较难修复,抗震设计使其保持基本无损伤状态,按强度控制设计。

2.2 预制小箱梁

建模方法同 2.1 节所述。由于上部结构采用预制小箱梁,立柱顶需设置盖梁,动力模型如图 5 所示。

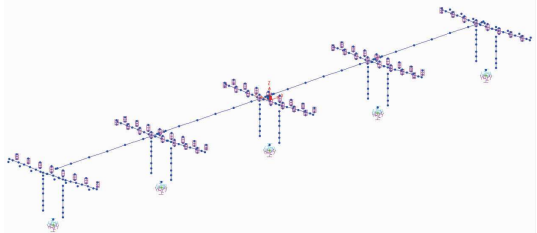


图 5 有限元计算模型

由于小箱梁支座吨位较小,且各小箱梁之间整体性与大箱梁相比较弱,受结构形式限制,地震墩梁相对位移不宜过大,建议减隔震器选择铅芯橡胶支座,进行抗震分析比选,取典型柱高 8 m,采取与预

应力混凝土大箱梁立柱对应的配筋水平, 计算结果如表4所列。

表4 E2地震作用计算结果比较表

结构形式	墩梁相对位移/cm		邻梁相对位移/cm	墩柱尺寸/m × m	桩基形式
	纵向	横向			
倒T盖梁, 桥面连续	28.6	30.6	28.6	2.0 × 2.5	8F1500
平头盖梁, 桥面连续	30.4	31.2	8.3	2.0 × 2.5	8F1500

因预制小箱梁一般需设置立柱盖梁的结构特点, 盖梁的地震力无法通过减隔震支座耗散。下部结构受力仍然较大, 需要增加下部尺寸和配筋才能达到减隔震体系的设防目标, 立柱尺寸普遍需达到2.0 m × 2.5 m, 桩基需达到8Φ1 500 mm。由于平头盖梁高度较高, 影响景观和桥下净空, 倒T盖梁隐藏部分盖梁高度, 结构相对轻巧, 可一定程度回避平头盖梁的不足, 所以建议采用倒T盖梁结构形式(下文构造设计基于倒T盖梁方案)。但是, 预制小箱梁作为简支构造, 桥面需进行专门设计, 以达到桥面连续及舒适性的功能需要。常规小箱梁梁端与盖梁间隙一般为5 cm左右, 地震高烈度区桥梁, 为避免大地震作用下梁体与盖梁碰撞破坏, 小箱梁与倒T盖梁间预留安全空隙根据采用的减隔震手段和地震响应的大小计算确定, 往往要大于常规桥梁。根据规范, 该工程地处8度0.3g(地震安评报告更高), 采用减隔震支座, E2地震水平位移较大。根据表4计算结果, 墩梁相对位移最大可达到30 cm左右, 增加了盖梁尺寸和伸缩缝设计难度。

3 关键构造设计

3.1 预应力混凝土大箱梁

预应力混凝土大箱梁由于上部结构为一个整体, 可以根据抗震设防目标的设计要求, 轻松地通过减隔震支座实现减震和隔震效果, 从而降低下部结构尺寸和造价。当然, 也带来了上下部结构相对位移较大的问题。如果, 不采取技术措施加以控制, 反而会因为位移过大造成结构的不合理。因此, 根据项目的实际情况, 需要配套设置一系列减隔震关键构造措施。

(1)连梁装置, 这是高烈度区桥梁抗震措施的重要组成部分。一般桥梁上部结构在E2地震作用下会发生横向位移、纵向位移及转动位移, 这些位移一旦过大, 会造成桥梁落梁、碰撞, 位移发散等危害。1995年日本阪神大地震时, 桥梁破坏严重, 其中主要的一

种整体破坏形式就是落梁破坏。震后, 日本及时对桥梁抗震规范进行重新修订, 并对现状桥梁进行了抗震措施加固, 普遍加装了连梁装置, 桥梁抗震设防能力却得到了极大提升^[2], 如图6所示。



图6 海秀快速路连梁装置之实景

(2)三向限位装置, 高烈度区桥梁在E2地震作用下, 会出现竖向落梁及跳梁等危害。因此, 与其他同类工程相比, 需增加纵向、横向及竖向限位装置。一方面, 可在大地震作用时, 防止主梁落梁危害; 另一方面, 避免因跳梁造成立柱顶部局部冲击破坏, 造成结构损伤难以修复, 甚至下部结构破坏发生倾覆^[2], 如图7所示。



图7 海秀快速路三向限位装置(边墩)之实景

(3)阻尼器, 高烈度区采用减隔震设计的桥梁, 在E2地震作用下的位移较大, 一般来说允许位移越大, 地震力消耗也越多, 对下部结构越有利。但是, 位移超过一定程度也会带来其他问题, 比如: 支座尺寸和立柱尺寸过大, 景观性差; 伸缩缝过大, 行车舒适度变差等, 因此, 需要设置阻尼器等手段, 适当控制地震位移, 同时又能满足设计预期的抗震性能^[2], 如图8所示。

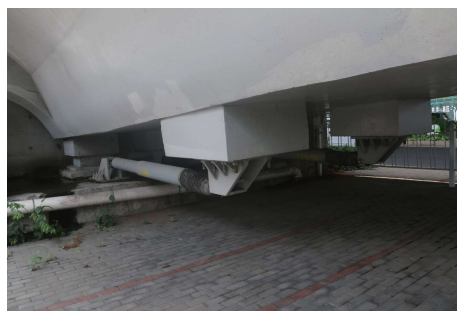


图8 海秀快速路阻尼器之实景

3.2 预制小箱梁

预制小箱梁结构，其主要的减隔震设计为抗震支座，由于上部结构整体性较现浇箱梁要弱，一般将地震位移控制在较小范围，并且由于多支座支撑在盖梁之上，可以省却多项限位、连梁装置等减隔震配

套措施。桥面板连续构造是预制小箱梁方案构造措施的关键点，该构造的可靠性与耐久性不仅关系到结构抗震可靠性，更关系到结构正常使用的性能，是该方案重要的构造设计。桥面板连续构造设计比较，如表 5 所列。

表 5 小箱梁桥面连续构造设计比较表

方案	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
方案描述	桥面铺装连续，铺装与盖梁顶设摩擦面	桥面板连续，桥面板与盖梁顶设摩擦面	桥面板连续，桥面板与盖梁顶完全脱离	桥面板简支，桥面板与盖梁通过顶钢板连接	桥面板简支，桥面板与盖梁通过钢绞线连接
方案优点	施工简便	行车平顺	行车平顺	行车较平顺；连续缝处桥面板简支，减少大量钢筋布置量	行车较平顺；连续缝处桥面板简支，减少大量钢筋布置量
方案缺点	行车条件差；连续缝处铺装易损坏；摩擦面接触不密实，易产生噪声	连续桥面板钢筋布置多，施工质量不易保证，摩擦面接触不密实，易产生噪声	连续桥面板钢筋布置量最多，受力大，施工质量不易保证	连接钢板易疲劳破坏，施工流程多，精度要求高，工艺复杂	施工流程多，工艺复杂
抗震性能	纵横向刚度小，但铺装易损	增加小箱梁横向刚度，地震力不易削弱	增加小箱梁横向刚度，地震力不易削弱	纵、横向弱连接，利于消减地震力	纵、横向弱连接，利于消减地震力

桥面连续构造方案示意图如图 9 所示。

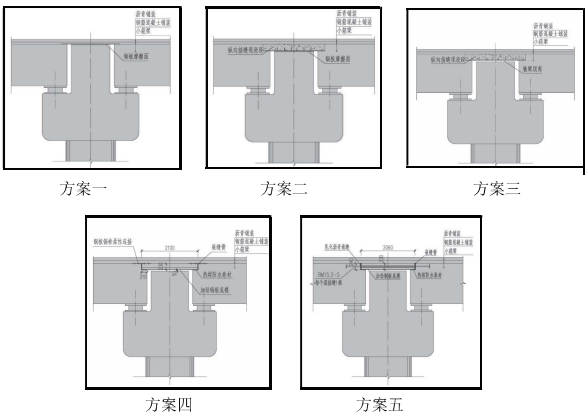


图 9 桥面连续构造方案示意图

桥面板连续构造，在全桥分布极为广泛，且直接影响到行车舒适性，需选择安全、实用、耐久、易修复性的方案。根据上述方案优缺点比较，在地震高烈度区城市高架桥设计中，对于预制小箱梁构造，可采用方案五，但施工中需严格控制施工质量。

4 结 语

(1)我国处于环太平洋地震断裂带和欧亚大陆地震断裂带之间，地震灾害频发。根据我国地震区划规范规定，多地处于地震高烈度区，在这些地区应充分重视城市桥梁抗震设计。一般预应力混凝土大箱梁结构和预制混凝土小箱梁结构都是城市高架桥中比较常用的桥型方案，但是应结合抗震需求和实际建设条件，选择较为合理的结构形式。

(2)从抗震设计的角度，对两种结构形式进行比较可见，预应力混凝土大箱梁由于整体性好，可选择的减隔震手段更为丰富，且避免了大盖梁设计，通过不同的减隔震器设计，能有效降低下部结构的地震力，从而减少下部结构尺寸和配筋，降低造价，在地震高烈度区城市高架桥选型，具有较好的适应性。

参考文献：

[1] 范立础, 王志强. 桥梁减隔震设计[M]. 北京: 人民交通出版社. 2001.
[2] 王培晓. 地震高烈度区高架桥减隔震措施设计[J]. 中国市政工程. 2019.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴，为您提供平台，携手共同发展！

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com