

场地类别对预制小箱梁桥抗震性能影响研究

刘 贝, 丁伟慧

(华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014)

摘要: 以30 m跨径预制小箱梁桥为研究对象, 采用反应谱法分析Ⅶ度区(0.1g)不同场地类别、墩高为5~15 m、纵筋率为0.6%~2.1%的小箱梁桥在E1、E2地震作用下的桥梁抗震性能。研究结果表明: 墩高、场地类别越高, 墩柱纵筋率越低, E1、E2地震墩柱强度富裕越少; 墩柱横桥向可按弹性构件设计, 顺桥向可根据墩高、场地类别、配筋经济性采用弹性或延性构件设计; 地震场地类别为Ⅳ类时, 支座抗滑能力不足, 宜采用减隔震设计; 墩柱纵筋率越低、场地类别越高, 墩顶位移越大; 纵筋率越低, 墩顶容许位移越大; 矮墩宜按弹性构件设计, 墩柱按照延性构件的桩与柱纵筋率的比值为1.21~1.92。相关结论供同类工程参考。

关键词: 抗震性能; 场地类别; 预制小箱梁; 反应谱法; 纵筋率

中图分类号: U442

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)02-0111-04

Research on Influence of Site Classification on Seismic Performance of Precast Small Box Beam Bridges

LIU Bei, DING Weihui

(Huashe Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

Abstract: Taking a 30 m-span precast small box beam bridge as the research object, the response spectrum method is used to analyze the seismic performance of small box beam bridges with different site classifications, pier heights of 5~15 m and longitudinal reinforcement ratio of 0.6%~2.1% under E1 and E2 earthquakes in the VII degree zone (0.1g). The research results indicate that the higher the pier height and site classification, the lower the longitudinal reinforcement ratio of the pier column, and the less abundant the strength of the pier column during E1 and E2 earthquakes. The transverse bridge direction of the pier column can be designed as elastic components, while the longitudinal direction can be designed as elastic or ductile components based on the pier height, site classification and reinforcement economy. When the seismic site type is class IV, the anti-sliding capacity of the bearing is insufficient, and the seismic isolation design can be used. The lower the longitudinal reinforcement ratio of pier column and the higher the classification of the site, the greater the displacement of the pier top. The lower the longitudinal reinforcement ratio, the larger the allowable displacement of the pier top. The low piers should be designed as elastic components. The pier columns are designed according to ductile components. The ratio of longitudinal reinforcement ratio of pile to column is 1.21~1.92. The relevant conclusions can be used as reference for similar projects.

Keywords: seismic performance; site classification; precast small box beam; response spectrum method; longitudinal reinforcement ratio

0 引言

桥梁抗震越来越受到学者及工程师的重视^[1], 对于低烈度区、低场地类别的桥梁结构, 设计满足构造要求即可, 但随着场地类别的提高, 地震作用越来越大, 其影响不可忽略。文献[2-4]指出土层条件、场地条件与地震动参数密切相关, 特别是场地放大效应极易引起结构更严重的震害。文献[5]提到长

特征周期的结构地震响应显著, 需重点关注场地类别对桥梁结构的影响。

预制小箱梁桥由于施工方便、工业化程度高等优点而得到广泛运用。近年来学者对小箱梁桥抗震做了相关研究, 文献[6-8]研究了高烈度地区采用钢阻尼器与板式支座、高阻尼支座等减隔震装置的小箱梁桥的地震响应, 结果表明此类装置能起到较好的减震作用; 文献[9-10]分析了小箱梁桥在不同场地类别、不同设防烈度下的墩柱内力、位移, 结果表明场地类别对小箱梁桥的地震响应影响较为显著。但何种场地类别采用减隔震装置, 场地类别对桥梁

收稿日期: 2024-03-07

作者简介: 刘贝(1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事路桥设计工作。

抗震设计的哪些验算指标有较大影响,还需要进一步研究。

本文以30 m跨径不同墩高、配筋率的小箱梁桥为研究对象,采用反应谱法分析不同场地类别E1、E2地震作用下桥梁多个力学指标,相关结论供同类工程抗震设计参考。

1 工程概况及有限元模型

本文以河南某山区高速公路为项目背景,选取30 m跨径连续小箱梁桥为研究对象,桥面宽度为12.81 m,梁高为1.6 m,横向布置4片梁。下部结构采用桩柱式桥墩,柱、桩径为1.4、1.5 m,柱间距为6.8 m,盖梁宽×高为2 m×1.5 m,桥梁横断面如图1所示。墩高 $H < 7$ m时,不设置系梁;墩高在 $7 \text{ m} < H \leq 10 \text{ m}$ 时,设置桩顶系梁;墩高在 $10 \text{ m} < H \leq 15 \text{ m}$ 时,设置1道柱间系梁+桩顶系梁;系梁尺寸宽×高为1 m×1.2 m。

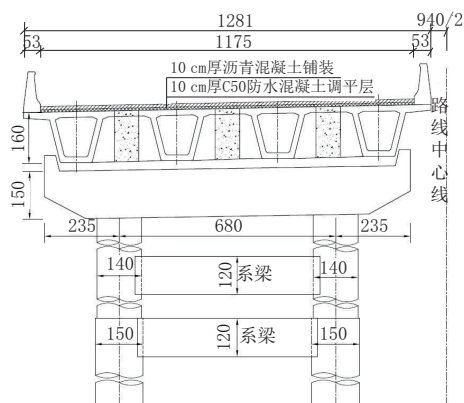


图1 桥梁横断面图(单位:cm)

采用MIDAS Civil 2020建立有限元模型,主梁、桥墩及桩基采用梁单元模拟,桩土约束效应基于 m 法计算参数,对桩基节点施加节点弹性支撑,桩底固结处理,土层比例系数取为 $m_{\text{静}} = 7\,500 \text{ kN/m}^4$ [11], $m_{\text{动}} = 2.5m_{\text{静}}$ 。连续墩采用GBZY 650×170橡胶支座 [12],支座水平刚度为 $2\,779 \text{ kN/m}$,竖向刚度为 $1\,387\,015 \text{ kN/m}$,采用弹性连接模拟。如图2所示,墩高 $H = 10 \text{ m}$,4孔一联的有限元模型。本文采用反应谱方法进行抗震计算。

桥址处区划图上特征周期为 0.4 s ,抗震设防烈

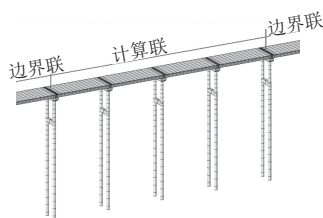


图2 MIDAS模型

度为VII,基本地震动加速度为 $0.1g$,桥梁抗震设防类别为B类,场地类别为 $I_0 \sim IV$ 类。

2 E1地震分析

《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020) [13]提到墩柱在E1地震作用下,墩柱裂缝不超过容许值,结构基本无损伤,即E1地震下截面弯矩 M 需小于墩柱初始屈服弯矩 M_{y0} 。如图3所示,墩高 $5 \sim 15 \text{ m}$ 、 $I_0 \sim IV$ 类场地、E1地震作用、不同纵筋率下,墩柱顺、横桥向的强度安全系数。安全系数为对应轴力初始屈服弯矩 M_{y0} 与墩柱最大弯矩 M 的比值(M_{y0}/M),安全系数小于1表示不满足要求,反之满足要求。

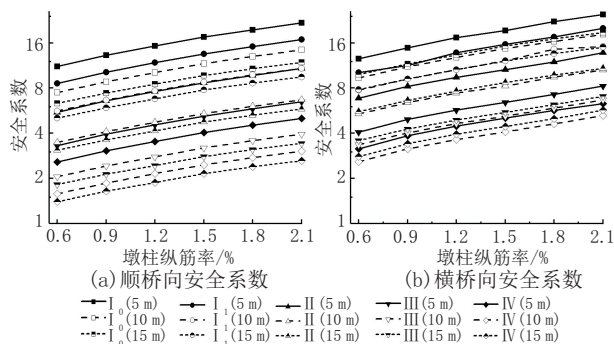


图3 E1地震桥墩强度安全系数

由图3可知,在同一地震作用、同一墩高下,安全系数随着纵筋率增加而增加。同一墩高下,随着场地类别增加,桥墩强度安全系数逐渐降低。规范 [13]给出推荐墩柱纵筋率为 $0.6\% \sim 4\%$,由图3可知,墩柱按照推荐纵筋率配筋,均能满足 $0.1g$ 设防烈度下E1地震桥墩强度要求。

3 E2地震分析

3.1 E2地震效应取值原则

根据规范 [13]要求,构件E2验算内力取值原则为:当墩柱不屈服,各构件验算内力为E2弹性地震力;墩柱屈服,验算内力采用超强内力,按照能力保护构件进行计算。E2弹性地震力 M 、屈服内力 M_y 和超强内力 M_n ($1.2M_y$)的大小关系如图4所示,根据上述原则,验算内力取图4粗实线部分对应的内力值,可知墩柱屈服与否,构件验算内力存在突变。根据规范 [13]横桥向超强内力 M_n 通过静力推倒分析求得。

3.2 E2屈服状态判断

如图5所示为墩高为 $5 \sim 15 \text{ m}$ 、 $I_0 \sim IV$ 类场地、E2地震作用、不同纵筋率下,墩主顺、横桥向的屈服状

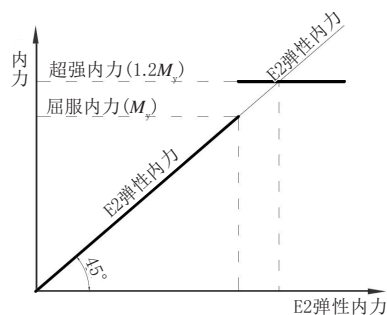


图4 构件内力取值示意图

态安全系数。屈服状态安全系数为对应轴力墩柱屈服弯矩 M_y 与墩柱最大弯矩 M 的比值 (M_y/M), 安全系数小于 1 表示墩柱进入塑性, 为延性构件, 反之为弹性构件。

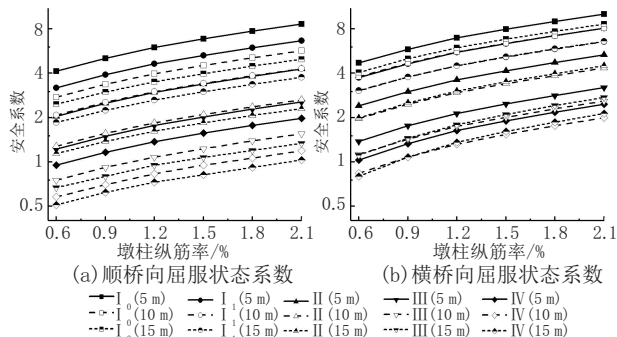


图5 E2地震屈服状态安全系数

由图 5 可知, 随着墩柱纵筋率的增加, 墩柱安全系数也随之增加, 可通过改变墩柱纵筋率实现墩柱按照弹性或延性构件设计。对比图 5(a)、图 5(b) 可知, 相同墩高、场地类别、纵筋率下, 顺桥向安全系数比横桥向要低, 表明墩柱顺桥向更易进入塑性。主要是由于桥墩顺桥向为端部有弱约束的悬臂结构, 墩柱最大弯矩集中于墩底; 而横桥向为框架结构, 最大弯矩发生于柱顶、底, 削减了墩柱最大弯矩。由图 5(b) 可知, 横桥向安全系数普遍大于 1; 仅有 IV 类场地、墩高为 10、15 m、纵筋率为 0.6% 的墩柱屈服。

墩柱顺桥向根据地震场地类别、墩高与配筋经济性的要求, 合理选择纵筋率, 确定墩柱是按照弹性或延性构件设计。墩柱横桥向本文推荐按照弹性构件进行设计。

3.3 支座水平力验算

如图 6 所示为结构在不同墩高、场地类别、纵筋率条件下, 支座在 E2 地震作用下顺、横桥向受到的水平力。验算内力取值原则在 3.1 小节阐述。

如图 6(a) 所示, 对于所处场地为 IV 类、墩高 10 m 的墩柱, 其纵筋率在 0.6%~1.5% 时, 墩柱屈服, 支座水平力按照能力保护构件进行计算求得, 支座水平力随着纵筋率增加而增加; 当纵筋率为 1.8%~2.1%

时, 墩柱不屈服, 支座水平力按照 E2 地震作用下支座受到的内力进行取值, 支座水平力不随纵筋率增加而增加; 支座水平力在纵筋率为 1.5% 与 1.8% 时, 其设计内力计算方法存在不同, 导致剪力存在突变。对于场地类别为 III 类、墩高 5 m、纵筋率为 0.6%~2.1% 的墩柱, 墩柱均不屈服, 按照 E2 弹性地震力进行取值验算, 其支座水平力不随纵筋率变化而变化。图 6(a) 其他曲线变化规律与前述一致, 不再赘述。

如图 6(b) 所示, 桥墩纵筋率大于 0.6% 均不屈服, 支座水平验算内力取 E2 弹性地震力, 可知水平力与墩柱配筋无关。对比图 6(a)、图 6(b), 可知墩柱不屈服时, 墩柱顺桥向支座水平力较横桥向支座水平力小, 横桥向支座力往往控制支座设计, 是因为墩柱横桥向为框架结构较顺桥向刚度大, 使得横桥向地震水平力大。

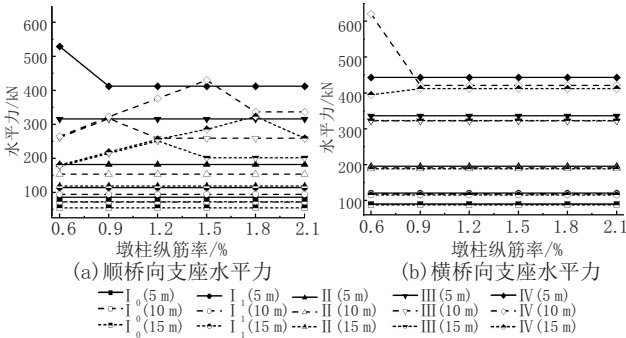


图6 E2地震支座水平力(单位:kN)

本例支座竖向力 R 为 1 739 kN, 支座滑动摩擦系数 μ 为 0.2 (0.25), 支座抗滑力为 $F=\mu R=0.2 (0.25) \times 1\,739=348$ kN (434 kN), 由图 6 知橡胶支座抗滑力可满足 0.1g III 类场地地震设防要求, IV 类场地橡胶支座已经发生滑动, 宜采用减隔震设计。

本文探究场地类别对结构抗震的影响, 支座型号不作为变量, 实际需根据地震水平位移选择支座型号。选择支座平面尺寸越大, 支座刚度越大, 支座水平位移越小, 支座水平力越大, 对支座橡胶层厚度验算有利, 支座抗滑验算不利; 选择支座橡胶层越厚, 支座刚度越小, 支座水平位移越大, 支座水平力越小, 对支座橡胶层厚度验算不利, 对支座抗滑验算有利。

3.4 墩柱抗剪验算

如图 7 所示为不同墩高、场地类别、纵筋率条件下, 墩柱在 E2 地震作用下顺、横桥向受到的剪力。如图 7(a) 所示, 对于 IV 类场地墩高 10 m、III 类场地类别墩高 5 m 的墩柱的曲线变化规律与 3.3 小节一致, 变化原因一致, 其余曲线变化规律类似, 不再赘述。

图7(b)变化规律与图7(a)一致。

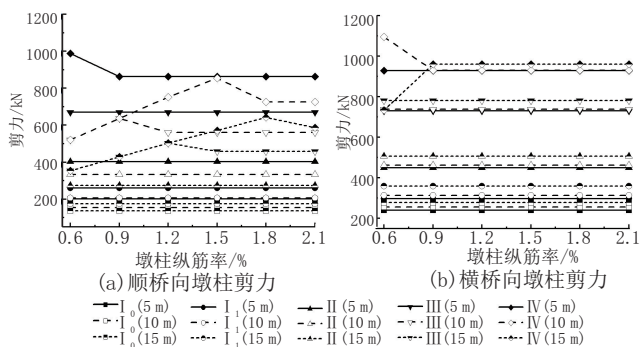


图7 E2地震墩柱剪力(单位:kN)

本例中,配置双肢C12箍筋,墩柱位移延性系数偏保守取为6,计算得到的墩柱抗剪能力为1 319 kN,可知墩柱抗剪均能满足要求。

3.5 墩顶位移验算

当墩柱屈服时,需对墩顶水平位移进行验算。对墩柱延性构件进行刚度折减,进而求出墩柱进入塑性后的墩顶位移。图8为墩柱在不同墩高、场地类别下,E2地震墩顶顺桥向水平位移及容许位移。由图8(a)所示,同一墩高、场地类别,纵筋率越低,墩柱墩顶水平位移越大;同一场地类别、纵筋率,墩高越高,墩柱水平位移越大。由图8(b)可知,纵筋率越高,墩柱容许位移越小;墩高越高,墩柱容许水平位移越大。对比图8(a)、图8(b)可知,墩顶水平位移均满足要求。

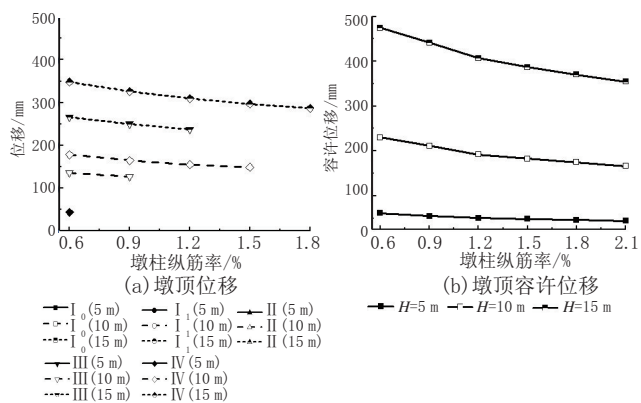


图8 E2墩顶顺桥向位移与容许位移(单位:mm)

3.6 桩基验算

规范^[13]要求桩基作为能力保护构件设计。图9为不同墩高、场地类别、墩柱纵筋率对应的桩基最小纵筋率,该纵筋率满足最小值0.5%的要求^[14]。如图9所示,对于II类场地、墩高10 m的墩柱对应的桩基,按照最低纵筋率取为0.5%能满足抗震要求,其桩基配筋不受墩柱纵筋率控制。其余图9所示桩基纵筋率大于0.5%的曲线变化规律与本文3.3小节曲线变化规律一致,不再赘述。墩柱按照延性构件设

计时,墩高为5、10、15 m的桩基、墩柱纵筋率的比值 $\rho_{\text{桩}}/\rho_{\text{柱}}$ 分别为1.92、1.30~1.48、1.21~1.39;由此可知,墩高越矮时,纵筋率比值越大,为避免墩柱与桩基配筋差异太大,此时矮墩宜按照弹性构件设计。

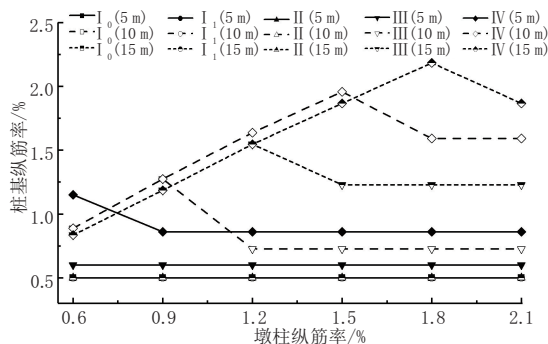


图9 桩基纵筋率

4 结 语

(1)墩高、场地类别越高、纵筋率越低,墩柱E1弹性强度、E2屈服强度安全系数越低;顺桥向可根据墩高、场地类别、纵筋率区分为弹性、延性构件;墩柱横桥向可按照弹性构件设计。

(2)IV类场地,支座抗滑稳定性不满足要求,宜采用减隔震设计。

(3)墩柱纵筋率越低,场地类别越高,墩柱墩顶位移越大;墩柱纵筋率越低,墩顶容许位移也越大。

(4)墩高较矮,墩柱宜按弹性构件设计;墩柱按照延性构件设计,桩纵筋率与柱纵筋率比值为1.21~1.92。

参考文献:

- [1] 孟洋.不同墩柱形式的城市高架桥抗震性能研究[J].城市道桥与防洪,2023(12):75-80.
- [2] 胡进军,赵泽峰,谢礼立.考虑场地类别和断层距的地震动及结构响应参数相关性分析[J].地震工程与工程振动,2020,40(2):13-22.
- [3] 李小军,王芳,陈苏.非基岩场地核设施工程地基处理及对结构地震响应的影响[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(6):1474-1483.
- [4] 宋健,亓富丽,张子阳,等.不同场地类别条件下框架结构地震响应的方向差异性研究[J].河南科学,2023,41(11):1628-1637.
- [5] 胡进.高烈度区软弱场地独塔斜拉桥合理约束体系研究[J].交通科技,2022(6):53-56.
- [6] 林涛.高烈度地震下大悬臂盖梁对桥梁下部结构设计影响分析[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(9):105-110.
- [7] 叶爱君,方家欣,张少为,等.小箱梁桥横向减震体系及其耗能特性[J].中国公路学报,2017,30(12):21-29.
- [8] 茹毅,于西尧.某装配式小箱梁桥减隔震与延性抗震设计比较[J].城市道桥与防洪,2019(11):61-63.
- [9] 王雅静.先简支后连续斜交小箱梁桥动力特性及抗震性能研究

(下转第124页)