夏玉超,李振.考虑动水压力的桥墩钢筋锈蚀抗震性能改进模型研究[J].地震工程学报,2020,42(5):1310-1316.doi:10.3969/j. issn.1000-0844.2020.05.1310

XIA Yuchao,LI Zhen,Improved Model for Seismic Performance of Bridge Piers with Corroded Reinforcement under Hydrodynamic Pressure[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(5):1310-1316. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05. 1310

考虑动水压力的桥墩钢筋锈蚀 抗震性能改进模型研究

夏玉超1,李振2

(1. 湖南交通职业技术学院, 湖南 长沙 410132; 2. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要:针对考虑动水压力作用下桥墩内部钢筋锈蚀后抗震力学性能变化规律的问题,通过力学推导 和 abaqus 有限元模拟研究了桥墩的力学性能,首先依托塑性铰区域高度计算公式,构建桥墩动水 压力计算简化模型,通过改进有限元计算模型,提出了优化后的考虑钢筋锈蚀的桥墩计算公式。计 算结果表明:动水压力作用下桥墩底部钢筋锈蚀与混凝土损伤对桥墩主压应力影响最大,其他区域 钢筋锈蚀影响较小,并对桥梁承载力计算公式进行修正,为后期同类工程计算提供了理论依据。 关键词:塑性铰;桥墩损伤;动水压力

中图分类号: U446.2 文献标志码:A 文章编号: 1000-0844(2020)05-1310-07 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1310

Improved Model for Seismic Performance of Bridge Piers with Corroded Reinforcement under Hydrodynamic Pressure

XIA Yuchao¹, LI Zhen²

(1. Hunan Communication Polytechnic, Changsha 410132, Hunan, China;2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

Abstract: To clarify the seismic performance of bridge piers with corroded reinforcement under the action of hydrodynamic pressure, the mechanical properties of the piers are studied by theoretical derivation and numerical simulation. First, based on the calculation formula of plastic hinge height, a simplified calculation model of the hydrodynamic pressure of bridge piers is constructed. Then, according to the improved finite element model, the optimized calculation formula of piers with corroded reinforcement is proposed. The results show that under the hydrodynamic pressure, the steel bar corrosion and concrete damage at the pier bottom have the greatest

收稿日期:2020-01-04

基金项目:国家自然科学基金重大项目(U1806227);国家重点研发计划(2017YFC0806000);国家自然科学基金青年基金项目 (51508261);基于复杂应力路径的混凝土索塔开裂的宏细观损伤演化机理与模型研究

第一作者简介:夏玉超(1984-),女,研究方向:桥梁结构安全检测,预应力混凝土张拉技术。E-mail:xiayuchaochao@163.com。 通信作者:李 振(1983-),男,硕士,副教授,研究方向:桥梁抗震与安全评定。E-mail:lizhenlizli@163.com。

effect on the principal compressive stress of the pier, and the reinforcement corrosions at other parts have less effect. The calculation formula of the bridge bearing capacity is corrected, which provides a theoretical basis for the calculation of similar projects.

Keywords: plastic hinge; pier damage; hydrodynamic pressure

0 引言

地震作用是因地壳运动而造成地面结构发生动 态变化的一种作用。受地震作用的影响,桥墩本身 也会发生振动,目振动的幅度随地震作用的增大而 增大。当桥墩发生振动时,桥墩附近的水体会产生 一种辐射应力。因桥墩自身及其周边水体的运动变 化,处于水面以下的桥墩部分受到辐射应力的影响, 使其动力特性发生较为明显的变化,从而导致其动 态响应过程也发生变化。为深入探析动水压力和地 震作用对桥墩性能的影响,相关专家对此展开研究。 文献「1]基于辐射波理论设计了一种数值模拟及分 析模型,用于探究桥梁抗震性能受动水压力而产生 的变化。文献[2]中基于弹性一重力相似律设计了 一种单桩基础桥塔动力试验模型,并分析在存在入 射正弦波的条件下,桥塔及墩身结构的动力响应情 况。文献[3]对地震作用下海冰与桥墩的间距对桥 墩动力响应的影响进行分析。对地震作用下冰水海 域桥墩结构动力相互作用进行分析,通过弹性波传 播理论,建立桥墩、冰与水体的流固耦合动力方程, 分析桥墩与海冰距离对桥墩结构动水压力的作用。 实验结果表明,当其间距小于1倍结构尺寸时,墩底 的弯矩和剪力达到最大值。文献「4]提出一种深水 桥梁群桩--桁架组合基础抗震性能分析方法,它对 水下双桩系统的平行与非平行振动模态进行分析, 讨论这两种状态下的频率和动水压力。4 根桩基试 件上,可以通过安装桁架来提高桩的刚度,并验证其 动力性能,利用地震反应谱分析某四跨深水大桥群 桩桁架基础的抗震性能,通过实验得出非平行振动 模态能够增加水动力效应。文献[5]提出一种圆形 桥墩动水压力时域简化公式方法,引入了无量纲参 数对动水压力的解析公式进行分析。对动水压力的 解析公式进行分段简化。简化后的公式以低频振动 附加质量的形式表示。简化后的公式用高频振动中 附加质量和附加阻尼的形式表示。

由上述阐述内容可以看出,在不同动水压力下, 桥墩抗震性能变化相关研究得到进展。但是,动水 压力与钢筋锈蚀共同作用下,桥墩抗震性能的变化 尚未被发现。因此,本文结合两种因素,对桥墩抗震 性能进行分析,对于该领域的研究具有一定的推动 作用。

1 理论分析

在地震作用下,RC桥墩最易产生变形与破坏 的部位在塑性铰位置,多表现为弯曲以及剪切破坏。 采用三维实体元素,对易发生变形的塑性铰部位进 行模拟研究^[6]。可以通过该模拟过程,对桥墩的长 度加以模拟,从而保证模型的研究精度与效率。塑 性铰部位的高度可以通过塑性铰公式加以描述:

 $L_r = 1.5(0.08L + 0.022d_sf_y)$ (1) 式中:L 代表桥墩总高(单位:m); d_s 代表纵向钢筋 直径(单位:m); f_y 代表纵向钢筋屈服强度(单位: MPa)。

塑性铰部位的长度模拟以及桥墩剩余部位的模 拟过程,共同组成桥墩抗震性能有限元模型,由三维 实体单元组成^[7-10]。可以通过保证界面处兼容条 件,在不同比例元素下,实现桥墩抗震性能的模 拟^[11-13]。在微观单元与宏观单元两部分均满足界面 兼容条件时,通过节点位移,计算边界区域节点内力。

2 基本有限元模型建立

本文根据烟台市海边 RC 桥墩构建数值模型, 桥墩的基本参数设置如表 1 所示。

表1 桥墩的基本参数设置

Table 1 Basic parameter setting of pier	
名称	参数
S_{mR}/m^2	0.18
厚度/m	0.2
长度/m	8
钢筋距离/mm	25
箍筋距离/mm	12
强度等级	C35

桥墩受力示意图如图1所示。

钢筋本构关系列于表 2。

根据桥墩的三个方向来对地震波进行检测,分 析桥墩的响应性能^[14-18]。通过有限元模型获取桥墩 结构参数和约束条件,对桥梁上部结构质量进行优 化,得到上部结构质量为 761 kN/m²,受力云图如 图 2 所示。



利用仿真软件构建桥墩钢筋锈蚀抗震模型,桥 墩由混凝土结构与钢筋构架组成,使用张量隐式求 解方法对桥墩的三个方向进行应力分析,获取承载 力和位移与之前的不同关系^[19-20]。并计算桥墩的应力,其表达式为:

$$\sigma = \frac{P}{A} \times SW \tag{2}$$

式中:P 为载荷;A 为试样的原始截面积;S 为桥墩 底部钢筋锈蚀量;W 为混凝土损伤量。当桥墩结构 在受地震作用时,桥墩底部钢筋锈蚀与混凝土损伤 对桥墩主压应力影响较大,而应力影响越大,对桥墩 结构的抗震性的影响也就越大。在重大地震灾害 后,桥梁是否可以正常承载和使用主要对桥梁上部 的混凝土和桥墩所能承受的重量进行分析。此时, 本文采用相关软件对桥梁地震后分析的数据进行分 析,在获取的桥墩数据基础上,模拟地震波出现的频 率,设置地震波放大系数、修正地震范围基线。上述 安排后模拟的地震波位移加速度运行时长情况如图 2 所示。







3 桥墩有限元计算模型改进方法研究

在构建桥墩有限元改进模型之前,本文对已有 研究进行了深入剖析,可知当前对于桥梁破坏作用 的研究方向是桥梁某一重要部件失效方面,导致由 于研究部件选择不合理,导致桥墩破坏作用分析结 果精度较低,因此本文在前人研究的基础上,以桥墩 结构作为基础进行研究。根据先验知识可知,当地 震荷载作用在桥墩结构上时,桥墩钢筋锈蚀与其抗 震性具有相关性,尤其是底部钢筋锈蚀是较为显著 的影响因素,而中部和上部是不显著的影响因素。

在实际中,通常是根据工程实际构建1:1的桥 墩模型,但是在计算过程中,由于桥墩有限元模型过 于复杂,导致计算耗时过长,分析结果也与实际有较 大偏差,以此以简化计算过程,优化分析结果精度为 目标,本文设计了一种桥墩有限元模型的改进方法, 以期减少计算耗时,提升桥墩结构损失预测效率,能 够更好地为桥梁工程施工提供重要参考。 根据以上分析,本文对已有桥墩有限元模型进行 简化,以提升计算效率。通过式(1)计算出塑性铰区 域面积,该区域面积长度为1.6 m,梁单元长5.6 m,将 这一桥墩有限元模型命名为改进后的桥墩有限元模 型1。根据实际桥墩施工工程参数可知,该桥墩混凝 土类型是 C35,纵筋类型 HRB335,上部结构荷载约 为137 kN,根据以上设定,对桥墩受力情况进行分析,结果如下图。对桥墩改进模型进行 CHI-CHI 地震测试,利用数值模拟方法分析混凝土支反力与 基底弯矩。基于式(1)将塑性铰部分表示为改进模型2,其中该部分的梁单元距离是 5.06 m,其他数值 不发生变化。图 3 为改进模型示意图。





Fig.3 Schematic diagram of improved model

根据图 3 的改进模型自振分析结果可知,该模型中第一阶段和第二阶段的自振频率分别为 21.1 Hz 和 21.2 Hz,二者差距不明显,同时,获取的阻尼系数为 α =1.063, β =0.002 4。

对比分析改进模型1与改进模型2,具体分析 内容包括混凝土支反力与基底弯矩,如图4是不同 振型云图,图5是改进模型与详细模型支反力对比 图,图6是改进模型与详细模型弯矩对比图。

根据图 4 可知,改进模型 2 与详细模型在最大 反力数据方面具有相似性,当时间为 24 s 时,改进 模型 2 的支反力比详细模型高,这是由于塑性铰区 域与梁单元受到了约束,从而造成改进模型 2 的支 反力得到了提升。根据上述式(1)构建的有限元模 型难以满足现有研究需求,一系列支反力数据不能



Fig.4 Cloud chart of different vibration modes







Fig.6 Bending moment comparison results

与有限元模型输出数据相匹配,导致在计算桥墩的 承载力极值时,计算结果与实际结果之间存在较大 差距,不能进行实际应用。

对比分析图 5 与图 6 可知,改进后的有限元模 型其数据情况良好,模型中的弯矩数据与桥墩实际 数据基本吻合,能够解决公式(1)构建模型存在的数 据误差问题。改进的有限元模型 2 能够直观的输出 桥墩弯矩承载力数据,缩小模型计算值与实际值之 间的弯矩误差,在提高模型性能的基础上,进一步降 低了运算复杂性。

从图 7 所示的云图可以看出,改进的有限元模型2具有良好的应用效果,能够准确计算桥墩的实



图7 改进模型2支反力云图

Fig.7 Nephogram of two reaction forces of improved model

际弯矩数据。但是公式(1)构建的模型 1,在 30 s 左

1315

右则出现了较为严重的计算误差,因此,此时的模型 计算结果不能作为参考数据进行使用。为了解决这 一问题,引入修正系数λ(λ=1.3)对式(1)进行修正 处理,则处理后的计算公式为:

 $L_{r} = 1.5\lambda(0.08L + 0.022d_{s}f_{y})$ (3) 式中: λ 为修正系数;L 为桥墩模型的总高; d_{s} 为桥 墩模型的纵向钢筋直径; f_{y} 为桥墩模型中纵向钢筋 的屈服强度。

假设修正系数用 α 表示,通过修正桥梁承载力 的计算公式,提出了桥梁承载力公式的修正系数取 值范围,具体如下所示:

- 当 0≤k≤5%时,α 取值为 0.95;
- 当 5<*k*≤10%时,α取值为 0.88;
- 当 10 < k ≤ 15 % 时,α 取值为 0.82;
- 当15<k≤20%时,α取值为0.76。

得到承载力公式,其表达为:

 $\gamma_0 N_d \leq N_\mu = 0.9 \varphi \alpha (f_{cd} A + f'_{sd} A'_s)$ (4) 式中: α 为修正后的系数; φ 为受压系数;A 为毛截面 积(单位:mm²);A'_s表示桥墩模型中全部纵筋截面 的面积(单位:mm²),N_d 表示桥墩模型中的轴向力 设计值(单位:kN);f_{cd}表示混凝土轴心的抗压设计 值(单位:MPa);f'_{sd}表示纵筋抗压的强度设计值(单 位:MPa)。

4 小结

在实际情况下,考虑到桥墩钢筋受众多因素影响,例如:锈蚀的位置、动水压力、混凝土的损伤,利用 ABAQUS 进行数值分析,分析在动水压力的作用下桥墩抗震能力受钢筋锈蚀和混凝土损伤所造成的影响,分析结果如下:

(1)在动水压力的作用下,只有当桥墩底部钢筋 受到锈蚀和混凝土损伤时会对桥墩造成较大影响,而 其他区域的钢筋受到锈蚀时桥墩所受影响较小。

(2)在动水压力的作用下,当桥墩底部钢筋被腐蚀时,桥墩会发生移动,向Z方向大幅度位移。 当底部钢筋的锈蚀系数达到20%时,相应桥墩混凝 土位移幅度增加9.9%,其他部位钢筋发生锈蚀时, 混凝土位移增幅为8.7%。

(3)在动水压力的作用下,桥墩承载力主要受 底部钢筋锈蚀程度的影响,当底部钢筋的锈蚀系数 达到 20%时,桥墩的支反力下降 17.58%。

参考文献(References)

[1] 黄信,李忠献.动水压力作用下深水桥墩非线性地震响应分析

[J].震灾防御技术,2010,5(3):352-357.

HUANG Xin,LI Zhongxian.Nonlinear Seismic Response Analysis of Bridge Pier in Deep Water under Hydrodynamic Pressure Influence[J].Technology for Earthquake Disaster Prevention,2010,5(3);352-357.

- [2] LIU C G, ZHANG S B, HAO E T. Joint Earthquake, Wave and Current Action on the Pile Group Cable-stayed Bridge Tower Foundation: an ExperimentalStudy [J]. Applied Ocean Research, 2017, 63:157-169.
- [3] 宋波,齐福强.地震作用下海冰与桥墩的间距对桥墩动力响应的影响研究[J].工程力学,2013,30(2):174-181.
 SONG Bo,QI Fuqiang. The Effect of Distance between Sea Ice and Pier on Dynamic Responses of Pier Structures Subject to Earthquake[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(2):174-181.
- [4] 魏凯,袁万城,伍勇吉,等,深水桥梁群桩-桁架组合基础抗震性 能分析[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(10):1463-1469.

WEI Kai, YUAN Wancheng, WU Yongji, et al. Seismic Performance Analysis of Pile Group-truss Composite Foundation of deep-water Bridge[J].Journal of Tongji University (Natural Science Edition),2013,41(10):1463-1469.

- [5] DU X, WANG P, ZHAO M. Simplified Formula of Hydrodynamic Pressure on Circular Bridge Piers in the Time Domain [J].Ocean Engineering, 2014, 85(3):44-53.
- [6] 金佳敏.基于 IDA 方法的大跨度深水刚构桥地震损伤性能研究[D].北京:北京交通大学,2016.
 JIN Jamin.Research on Seismic Damage Performance of Longspan Deep-water Rigid Frame Bridge Based on IDA Method
 [D].Beijing:Beijing Jiaotong University,2016.
- [7] 叶建.考虑墩一水共同作用的桥梁地震反应分析[D].哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所,2013.
 YE Jian.Seismic Response Analysis of Bridge Considering Pierwater Interaction [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, 2013.
- [8] 高大峰,路军,董旭,等.基于动水及桩-土-结构相互作用的斜拉桥地震响应分析[J].公路工程,2016,41(4):19-23. GAO Dafeng, LU Jun, DONG Xu, et al. Seismic Response Analysis of Hydrodynamic and Pile – soil – structure Interaction for Cable – stayed Bridge[J].Central South Highway Engineering,2016,41(4):19-23.
- [9] 王锦富. 地震与动水压力联合作用下深水桥墩的响应分析
 [D].石家庄:石家庄铁道大学,2016.
 WANG Jinfu. Response Analysis of Deep Water Pier under Combined Action of Earthquake and Hydrodynamic Pressure
 [D].Shijiazhuang:Shijiazhuang Tiedao University,2016.
- [10] DI SARNO L, DEL VECCHIO C, MADDALONI G, et al. Experimental Response of an Existing RC Bridge with Smooth Bars and Preliminary Numerical Simulations[J]. Engineering Structures, 2017, 136: 355-368.
- [11] KANG X, JIANG L Z, BAI Y, et al. Seismic Damage Evaluation of High-speed Railway Bridge Components under Different Intensities of Earthquake Excitations [J]. Engineering

Structures, 2017, 152: 116-128.

- [12] 成虎,李宏男,王东升,等.考虑锈蚀黏结退化的钢筋混凝土桥 墩抗震性能分析[J].工程力学,2017,34(12):48-58.
 CHENG Hu, LIHongnan, WANG Dongsheng, et al. Seismic Performance Analysis of Reinforced Concrete Bridge Column Considering Bond Deterioration Caused by Chloride Ion Induced Corrosion[J].Engineering Mechanics,2017,34(12):48-58.
- [13] 李建中,范立础.非规则梁桥纵向地震反应及碰撞效应[J].土 木工程学报,2005,38(1):84-90.

LI JIANZHONG FAN LICHU. Longitudinal Seismic Response and Pounding Effects of Girder Bridges with UnconventionalConfigurations[J]. China Civil Engineering Journal, 2005,38(1):84-90.

- [14] INQUALABI K Q.GARG R K.RAO K B.Seismic Vulnerability of Urban Bridges Due to Liquefaction Using Nonlinear Pushover Analysis and Assessing Parameters for Damage Detection[J].Procedia Engineering, 2017, 173:1739-1746.
- [15] 张云,谭平,郑建勋,等.梁桥结构地震反应分析中输入地震动选取及调整方法研究[J].振动与冲击,2015,34(6):18-23.
 ZHANG Yun, TAN Ping, ZHENGJianxun, et al. Selecting and Adjusting Methods for Earthquake Input in a Girder Bridge's Seismic Response Analysis [J]. Journal of Vibration and Shock,2015,34(6):18-23.
- [16] 杨帆,赵建锋,赵旭.海洋不同暴露环境下 RC 桥墩抗震性能 分析[J].工程建设,2020,52(4):11-16.
 YANG Fan,ZHAO Jianfeng,ZHAO Xu.Seismic Performance

Analysis of RC Piers under Different Marine Exposure Environments[J].Engineeing Construction, 2020, 52(4):11-16.

- [17] 李奉阁,倪晶.基于钢筋混凝土框架-钢板剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构,2020,50(5):116-119,98.
 LI Fengge, NI Jing. Experimental Study on Seismic Behavior of Reinforced Concrete Frame Steel Plate Shear Wall[J].
 Building Structure,2020,50(5):116-119,98.
- [18] 梁岩,任超,牛欢,等.近海环境下耐久性损伤刚构桥墩时变抗 震性能分析[J].铁道科学与工程学报,2019,16(4):968-975. LIANG Yan,REN Chao,NIUHuan,et al.Time Varying Seismic Performance Evaluation of Durability Damage Rigid Frame Bridge in Offshore Environment[J].Journal of Railway Science and Engineering,2019,16(4):968-975.
- [19] 马肖彤,包超,马艳,等.框架剪力墙结构抗震动力性能与抗侧 向倒塌能力研究[J].中国安全生产科学技术,2019,15(11): 113-117.

MA Xiaotong, BAO Chao, MA Yan, et al. Research on Seismic Dynamic Performance and Lateral Collapse Resistant Capacity of Frame Shear Wall Structure[J]. Journal of Safety Science and Techonlogy, 2019, 15(11):113-117.

[20] 武乾,李娜,胡鑫,等.钢筋混凝土旧工业厂房主体结构的改造 加固风险研究[J].中国安全生产科学技术,2019,15(3):167-173.

> WU Qian,LI Na, HU Xin, et al.Research on Reconstruction and Reinforcement Risk of Main Structure of Reinforced Concrete Old Industrial Plant[J].Journal of Safety Science and Technology,2019,15(3):167-173.

1316