

深水高墩大跨连续刚构桥抗震性能分析

Seismic Performance Analysis of Deep-water High Pier Long Span Continuous Rigid Frame Bridge

牛宗胜

(北京市首发高速公路建设管理有限责任公司, 北京 100071)

摘要: 基于 OpenSees 有限元软件构建深水高墩大跨连续刚构桥梁数值模型, 考虑桥梁各构件的非线性特性及深水动水作用的影响, 研究桥梁在地震作用下的响应特性。结果表明: 在深水环境中, 引桥的桥墩动力响应会随着水深增加而降低, 主桥的桥墩及过渡墩则呈现增加趋势; 梁间及桥台间的碰撞次数在不同水深下变化不明显, 但伸缩缝碰撞力随着水深的增加而显著增长。

关键词: 深水环境; 动水作用; 非线性时程响应分析; 碰撞效应; 连续刚构桥梁

中图分类号: U448.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 02-0151-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.025

NIU Zongsheng

(Beijing First Expressway Construction Management Co., Ltd., Beijing 100071, China)

Abstract: A numerical model of a deepwater high-pier, long-span continuous rigid-frame bridge was constructed using OpenSees finite element software, with consideration given to the nonlinear characteristics of the bridge components and the impact of hydrodynamic action in deepwater. The response characteristics of the bridge under seismic action were investigated. The results indicate that in a deepwater environment, the dynamic response of the approach bridge piers decreases with increasing water depth, whereas the main bridge piers and transition piers exhibit an increasing trend. The collision frequency between beams and between bridge abutments shows no significant variation under different water depths. However, the collision force at the expansion joints significantly increases with the rise in water depth.

Key words: deep-water environment; hydrodynamic action; nonlinear time-history response analysis; collision effect; continuous rigid-frame bridge

0 引言

随着我国基础设施建设的飞速发展, 跨越深水区域的高墩桥梁数量逐年增加, 而在深水环境下桥梁所承受的动水作用问题一直是工程界关注的热点。^[1-2] 杨坤等^[3] 利用 ADINA 建立了深水圆形高

墩模型并利用不同方法探索模型合理性及适用范围; 吴堃等^[4] 探究激励幅值、激励频率、截面直径及水深等因素对桥墩加速度和地震动水压力分布规律的影响, 得出 Morison 方程的不适用性, 应借助水下振动台予以修正; 王天明^[5] 同时考虑高墩及库区动水压力的影响, 分析地震时动水压力对桥墩的影响, 得出动水效应对桥梁的横向变形与内力的影响较为明显; 李均进等^[6] 通过开展不同截面形式的桥墩振动台试验, 探讨了不同水位下不同类型桥墩的动水压力变化情况; 何岸等^[7] 通过改变正方形桥墩的截面尺寸, 采用不同的分析方法得出附加质量法及流

作者简介: 牛宗胜 (1972—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 道路桥梁工程。

收稿日期: 2023-05-30

道桥技术

体声单元适用性较好；马安财等^[8]基于 Euler 梁理论并结合 Morison 方程提出桥墩质量模型，研究深水隔震连续梁桥的减震性能和水深变化对桥梁隔震效果的影响，得出随着水深的不断增加，桥墩内力、位移整体上增大，减震效果越来越明显；樊冰等^[9]通过对斜拉桥构建数值模拟，研究其在动水作用下的结构反应，得出动水作用会增大索塔内力、结构位移，且对剪力影响显著；云高杰等^[10]通过对深水大跨桥梁进行振动台试验来研究桥梁加速度动力放大系数、峰值加速度、峰值应变及峰值动水压力的变化情况，得出动水压力在桥梁最低端最大，动水压力与桥梁结构应变正相关。

尽管已有众多学者对动水作用下桥梁的抗震性能进行了研究，但大多集中于桥墩构件及某些特定桥型，而对高墩大跨连续刚构桥梁在动水作用下的抗震性能研究则相对匮乏。基于此，以一座位于水库的高墩大跨连续刚构桥梁为例，采用 OpenSees 有限元软件建立深水高墩大跨连续刚构桥梁模型，探讨动水作用下桥梁动力响应的变化及对抗震性能的影响，旨为同类型桥梁的抗震设计提供技术支持，确保桥梁在极端环境中的安全与可靠性。

1 案例简介

1.1 工程背景

某连续梁桥梁工程，主桥为 50 + 90 + 50 m，引桥为 25 + 25 + 25 m。全桥桥墩中最高墩（4#墩）高 63.5 m，其桥墩部分淹没水中，最大淹没深度为 30 m，最矮墩（1#墩）高 12.6 m，全桥桥墩编号如图 1 所示。

1.2 OpenSees 有限元建模

在 OpenSees 建模中，采用弹性梁柱单元对主梁模拟；墩柱采用非线性梁柱单元及纤维截面来考虑其非线性特性；活动盆式支座的模拟根据 JTG/TB 02-01-2008《公路桥梁抗震设计细则》进行计算，并使用理想弹塑性材料通过赋予零长度单元来实现支座的力学特性，桥台及桩基础采用固结进行简化处理；梁间及梁台间的碰撞效应，采用双线性 Hertz - damp^[12]模型模拟。

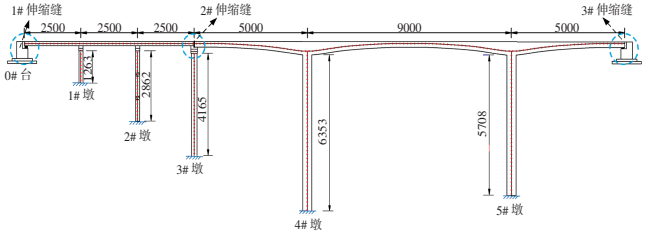


图 1 桥梁空间有限元模型
Fig. 1 Spatial finite element model of the bridge

2 天然地震波

通过桥梁条件生成桥梁的设计反应谱，选取汶川卧龙波以及台湾集集地震波，采取谱兼容^[13]原则匹配天然地震波 7 条，具体地震动信息见表 1，反应谱和设计反应谱匹配情况如图 2 所示。地震波加载方向为纵桥向。对天然地震波进行调幅至 0.4g，阻尼模型采用阻尼比取值为 5% 的瑞利阻尼。

表 1 天然地震波信息
Table 1 Information of natural seismic wave records

编号	地震名称	震级	地震持/s	调幅系数	均方误差
1	汶川波	8.0	16.00	0.964	0.047 3
2	Chi - Chi_ Taiwan	6.3	61.86	4.483	0.069 3
3	Chi - Chi_ Taiwan	6.3	61.86	1.642	0.047 5
4	Chi - Chi_ Taiwan	7.6	84.98	6.536	0.028 4
5	Chi - Chi_ Taiwan	7.6	84.98	1.273	0.076 0
6	Chi - Chi_ Taiwan	7.6	84.98	6.492	0.060 6
7	Chi - Chi_ Taiwan	7.6	84.98	2.737	0.052 8

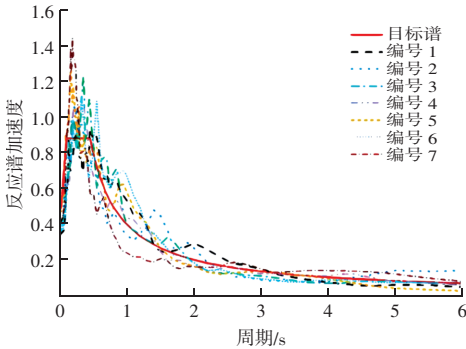


图 2 天然地震动反应谱
Fig. 2 Response spectrum of natural seismic ground motions

3 动水作用的模拟

地震作用下考虑动水效应多采用附加质量法，计算地震荷载作用下动水附加质量的方法很多，但各有优缺点。根据算例的桥墩构造形式，采用杨万理^[14]基于线性辐射波浪法结果进行相应简化后拟合

出来的矩形薄壁墩的附加质量公式。其大体解决思路是通过圆形桥墩算得其附加质量，再通过相应的

矩形桥墩系数对其动水质量进行计算，具体公式为：

$$\left\{\begin{aligned}M_{\text{rec}}^{\text{out}} &= \rho \pi \alpha^2 \cdot M^{\text{sto}}(H, D, Z_i) \cdot (D, H) \cdot S_{\text{rec}}(lab, D, H) \\s(D, H) &= 1.43 + \frac{D(H - 100)}{10^4} \\S_{\text{rec}}(lab, D, H) &= 1 + \frac{15D - DH + 6.5H - 100}{20D^2 + 50H - 800} \ln(lab) \quad lab < 1 \\S_{\text{rec}}(lab, D, H) &= 1 + \frac{\ln(H) \ln(lab)}{-0.5D + 0.028H + 288} \quad lab > 1 \\M^{\text{sor}}(H, a, Z_i) &= \left(1 - \frac{10a}{H^2}\right) \left(1 - \exp\left(\frac{5(Z_i - H)}{aH^{1/3}}\right)\right)\end{aligned}\right. \tag{1}$$

式中： $M_{\text{rec}}^{\text{out}}$ 为所求矩形桥墩附加质量； M^{sto} 为圆形墩截面刚体运动附加系数； ρ 为水密度； α 为桥墩半径； H 为墩高； Z_i 为桥墩入水深度； $s(D, H)$ 以及 $S_{\text{rec}}(lab, D, H)$ 为桥墩系数； D 为桥墩迎水面的长度； L 为非迎水面的长度， $Lab = L/D$ 。

4 桥梁的动力响应结果分析

4.1 桥墩非线性动力响应

考虑水深对桥梁地震响应的变化，水深变化区间取0~60 m，每级增加20 m。全桥桥墩在水深20、40、60 m的墩底剪力响应和弯矩响应结果见表2。

随着水深的增加，桥梁的动力响应变化规律略有不同，引桥中的1[#]和2[#]桥墩墩底的剪力以及弯矩都略微减少；1[#]桥墩弯矩以及剪力，水深60 m较无水时分别减少了3.3%和7.3%，2[#]桥墩弯矩、剪力则分别减少了3.8%和12.2%。对于主桥的4[#]、5[#]桥墩以及过渡墩，墩底的动力响应增长较为明显，4[#]桥墩的墩底弯矩及剪力水深60 m较无水时分别增加了14.7%和44.4%，5[#]桥墩的墩底弯矩和剪力增长幅度与4[#]桥墩比较接近；而过渡墩增长较为迅

速，水深60 m较无水时分别增加了22.4%和57.5%。由于水深的增加，桥墩的附加动水质量增加各有不同。对于主桥的高墩，动水质量增加的更为明显，结构振型发生变化，主桥桥墩将承受更大的地震荷载，特别是对于增速最快的3[#]过渡墩，引桥桥墩承受荷载却在减少，桥墩之内力分布差异化加大，对桥梁整体的抗震性能不利。

全桥桥墩在无水和水深20、40、60 m的墩底曲率变化和墩顶位移变化情况见表3。1[#]墩和5[#]墩的墩底塑性铰的变化情况如图3所示。

根据表3和图3可以看出，对于桥墩的墩顶位移以及墩底曲率的发展，整个桥梁结构规律也不尽相同。引桥中的1[#]和2[#]桥墩墩顶位移以及墩底的曲率出现了略微减少的情况，对于1[#]墩而言，1[#]墩墩顶位移及墩底曲率，水深60 m较无水时分别减少了6.0%和13.2%；4[#]和5[#]主墩及过渡墩规律和引桥桥墩却相反，以5[#]墩为例，墩顶位移及墩底曲率水深60 m较无水时增加了10.4%和35.6%。随着水深的增加，主桥桥墩墩底塑性铰发展速度加快，而引桥墩底塑性铰发展却开始得到抑制。

表2 不同水深下桥墩响应峰值
Table 2 Maximum responses of bridge piers at different water depths

墩号	无水		水深 20 m		水深 40 m		水深 60 m	
	墩底弯矩 / (kN·m)	墩底剪力 /kN	墩底弯矩 / (kN·m)	墩底剪力 /kN	墩底弯矩 / (kN·m)	墩底剪力 /kN	墩底弯矩 / (kN·m)	墩底剪力 /kN
1 [#]	7 323	792	7 013	731	7 092	744	7 087	738
2 [#]	5 436	599	5 160	529	5 236	542	5 228	526
3 [#]	35 749	2 024	35 358	1 987	37 614	2 890	43 744	3 187
4 [#]	176 858	6 458	182 633	7 836	194 218	9 150	202 902	9 324
5 [#]	195 738	7 676	198 724	8 228	207 569	9 600	215 084	10 159

表 3 不同类型地震动下桥墩响应峰值

Table 3 Maximum responses of bridge piers under different types of ground motions

墩号	无水		水深 20 m		水深 40 m		水深 60 m	
	墩顶位移 /m	墩底曲率 / (rad/m)	墩顶位移 /m	墩底曲率 / (rad/m)	墩顶位移 /m	墩底曲率 / (rad/m)	墩顶位移 /m	墩底曲率 / (rad/m)
1 [#]	0.133	7.95×10^{-3}	0.123	6.88×10^{-3}	0.129	8.11×10^{-3}	0.125	6.9×10^{-3}
2 [#]	0.175	1.65×10^{-3}	0.171	1.47×10^{-3}	0.173	1.52×10^{-3}	0.174	1.5×10^{-3}
3 [#]	0.183	4.2×10^{-4}	0.183	4.2×10^{-4}	0.196	4.7×10^{-4}	0.247	5.7×10^{-4}
4 [#]	0.214	3.6×10^{-4}	0.218	3.8×10^{-4}	0.222	4.3×10^{-4}	0.237	4.7×10^{-4}
5 [#]	0.211	4.5×10^{-4}	0.215	4.7×10^{-4}	0.219	5.3×10^{-4}	0.233	6.1×10^{-4}

程中会具有更大惯性质量,从而导致在 3[#]伸缩缝处产生更大的碰撞力;对于碰撞次数而言,水深的变化带给梁间和梁台间碰撞的次数变化无明显规律,但是可以看到水深 20 m 时,全桥 3 处伸缩缝的碰撞次数是最多的。综上分析,水深增加导致的梁-台间的碰撞力增大可能给桥梁结构带来混凝土局部剥落、桥台背土的破坏等潜在威胁,严重甚至导致落梁,建议在此类型桥梁中加入减震隔震措施来避免以上情况的发生。

表 4 碰撞情况详细统计

Table 4 Detailed statistics of collision cases

水深 /m	1 [#] 伸缩缝		2 [#] 伸缩缝		3 [#] 伸缩缝	
	碰撞力 /kN	次数/次	碰撞力 /kN	次数/次	碰撞力 /kN	次数/次
无水	11 194	11	23 458	12	9 689	11
20	11 098	45	14 618	52	11 770	29
40	11 098	3	16 011	3	12 634	4
60	11 412	8	18 661	16	13 716	11

5 结论

从动水作用为出发点并结合桥梁结构及碰撞过程的非线性特性,探讨了动水作用在多条地震动下对全桥动力响应的影响,得到以下主要结论:

(1) 随着水深的增加,主桥和引桥两者的动力响应规律刚好呈现相反的发展趋势,引桥桥墩地震响应均随着水深增加而降低,而主桥桥墩地震响应随着水深增加而增加,这将造成桥墩之间承载不均匀,对整体抗震性能不利。

(2) 随着水深的增加,各墩墩底曲率发展情况和桥墩墩底弯矩剪力情况类似,主桥桥墩墩底塑性铰发展速度加快,而引桥墩底塑性铰发展却开始减少。

(3) 地震动作用时主引桥之间的伸缩缝处碰撞力最大,且伸缩缝碰撞力随水深的增加而明显增长,

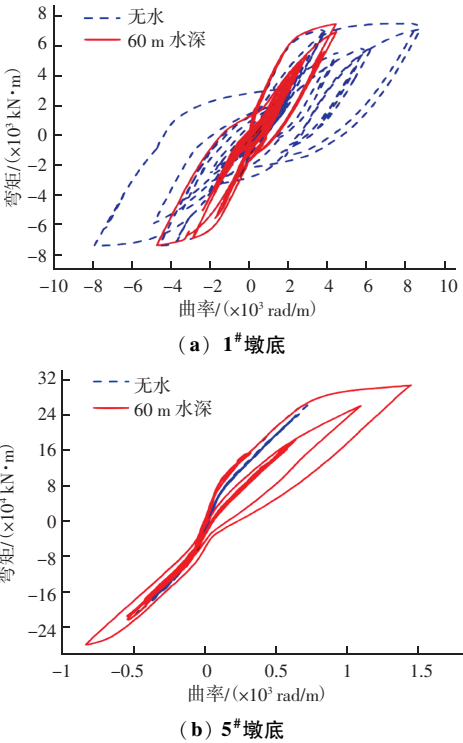


图 3 墩底塑性铰发展

Fig. 3 Development of plastic hinge at pier base

4.2 各伸缩缝处碰撞响应分析

各伸缩缝的碰撞力值和次数情况见表 4。主引桥之间的 2[#]伸缩缝处的碰撞力最大,1[#]伸缩缝与 3[#]伸缩缝的碰撞力峰值大小是十分接近的。随着水深的增加,全桥各伸缩缝碰撞力和碰撞次数各有不同,1[#]伸缩缝的碰撞力变化对水深不敏感,其碰撞力峰值基本不随水深发生改变;而主引桥之间的 2[#]伸缩缝随着水深的增加其碰撞力均值反倒呈现减少的态势,水深 60 m 较无水时降低了 20.4%;而 3[#]伸缩缝的碰撞力却出现增大的趋势,水深 60 m 较无水时增大了 41.6%,由于水深增加对主桥桥墩的动水附加质量的增加影响更为显著,水深增加意味着主桥在地震过

其他各伸缩缝处的碰撞次数和碰撞力的变化规律随水深变化并不明显,在 20 m 水深时全桥各伸缩缝处发生的碰撞次数最多。

参 考 文 献

- [1] 吴文朋,梁鹏,龙士国,等.考虑 PSI 的深水高墩大跨桥梁地震易损性分析[J].振动与冲击,2020,39(19):210-217.
- [2] 和燕燕.水库区高墩大跨连续刚构桥施工监控与地震响应研究[D].兰州:兰州交通大学,2021.
- [3] 杨坤,葛书勋.深水圆形高墩结构振动特性和动力响应分析方法对比研究[J].结构工程师,2022,38(6):75-83.
- [4] 吴堃,李忠献.地震作用下桥墩动水压力及 Morison 方程适用性试验研究[J].工程力学,2022,39(12):41-49.
- [5] 王天明.水电站库区重载高墩大跨桥梁抗震分析[J].林业建设,2022(4):71-75.
- [6] 李均进,熊露瑶,张焱焱,等.桥墩截面型式对动水压力影响的试验研究[J].公路交通技术,2021,37(6):87-94.
- [7] 何岸,潘亦苏.基于不同动水压力计算方法的深水桥地震响应

分析[J].四川建筑,2017,37(2):183-185.

- [8] 马安财,刘良坤,谭平,等.基于分布参数模型深水隔震连续梁桥地震响应分析方法[J].应用基础与工程科学学报,2022,30(4):1002-1013.
- [9] 樊冰,李永庆,宋松林,等.高烈度区深水斜拉桥动水效应及抗震体系研究[J].地震工程学报,2022,44(5):1024-1033.
- [10] 云高杰,柳春光.某深水大跨桥梁水下振动台试验研究[J].振动与冲击,2022,41(12):59-66,177.
- [11] 中华人民共和国交通运输部.公路桥梁抗震设计细则:JTG/TB 02-01-2008[S].北京:人民交通出版社,2008.
- [12] 魏思聪,李鹏飞,董振华,等.考虑摩擦耗能的桥梁盆式橡胶支座三维有限单元构建[J].公路交通科技,2022,39(10):64-74.
- [13] 曹国绒,王博,杨柯,等.远场类谱和地震波加速度反应谱的双峰特征分析[J].防灾减灾工程学报,2022,42(3):480-489,498.
- [14] 杨万理.深水桥梁动水压力分析方法研究[D].成都:西南交通大学,2012.

(上接第 5 页)

料,ASR 抑制效果有效,C30、C40 混凝土碱含量均满足不大于 3 kg/m^3 的要求。

参 考 文 献

- [1] 朱炳喜.水工混凝土耐久性技术与应用[M].北京:科学出版社,2020.
- [2] 周泽聪.大坝混凝土碱骨料反应抑制措施长期安全性研究[D].武汉:长江科学院,2021.
- [3] 杨华全,李鹏翔,陈霞.水工混凝土碱骨料反应研究综述[J].长江科学院院报,2014,31(10):58-62.
- [4] 高性能混凝土技术条件:GB/T 41054—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [5] 水利工程预拌混凝土应用技术规范:DB32/T 3261—2017[S].南京:江苏人民出版社,2017.
- [6] 顾文菊,朱炳喜.江苏沿海海涂混凝土耐久性分析与提升措施探讨[J].粉煤灰综合利用,2016,30(4):34-37.
- [7] 高性能混凝土应用技术指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [8] 肖强,朱炳喜,许旭东,等.混凝土施工质量提升工法[M].北京:中国水利水电出版社,2023.
- [9] 戴健,蔡一平,黄根民,等.一般环境 C30 高性能混凝土配合比优化设计与应用[J].粉煤灰综合利用,2021,35(5):54-59.

- [10] 中华人民共和国水利部.水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范:SL 654—2014[S].北京:中国水利水电出版社,2014.
- [11] 水工混凝土施工规范:SL 677—2014[S].北京:中国水利水电出版社,2014.
- [12] 刘晨霞,陈改新,纪国晋,等.骨料碱活性及碱骨料反应抑制有效性试验研究[J].混凝土,2014(11):103-106.
- [13] 预防混凝土碱骨料反应技术规范:GB/T 50733—2011[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [14] 朱炳喜,庄雪飞,蔡一平,等.水工建筑物建设质量通病防治手册[M].北京:中国水利水电出版社,2023.
- [15] THOMAS M. The effect of supplementary cementing materials on Alkali-Silica Reaction: A review[J].Cement and Concrete Research,2011,41(12):1224-1231.
- [16] 金伟良,赵羽习.混凝土结构耐久性(第二版)[M].北京:科学出版社,2014.
- [17] 水利工程混凝土耐久性技术规范:DB32/T 2333—2013[S].南京:江苏人民出版社,2013.
- [18] 表层混凝土低渗透高密封施工技术规程:T/CSPSTC 111—2022[S].北京:中国标准出版社,2023.
- [19] 水工混凝土试验规程:SL/T 352—2020[S].北京:中国水利水电出版社,2014.