

寇立亚.地震作用下混合桥结合段的极限承载力分析[J].地震工程学报,2019,41(1):23-28.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.023

KOU Liya.Ultimate Bearing Capacity of the Joint Sections of Mixed Bridges under Earthquake Action[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(1):23-28.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.023

地震作用下混合桥结合段的极限承载力分析

寇立亚

(1. 江苏城市职业学院建筑工程学院, 江苏 南京 210014; 2. 河海大学土木交通学院, 江苏 南京 210004)

摘要:采用 Nishiumi 算法分析地震作用下混合桥结合段的极限承载力时,未考虑贯穿钢筋对混合桥结合段剪力键承载力的影响作用,分析出的极限承载力结果与实际结果差异较大。提出新的地震作用下混合桥结合段的极限承载力分析方法。通过分析计算得到栓钉类剪力键和钢筋混凝土柱类剪力键的极限承载力,设计新的极限承载力分析试验,通过设计剪力键试件、试件地震加载和试验测试点安置和测试内容安排,分析地震作用下混合桥结合段剪力键的极限承载力。分析结果说明,所提方法可准确分析地震作用下混合桥结合段剪力键的极限承载力,且分析得到的极限承载力结果与实测结果几乎一致,误差不超过 7%。

关键词:地震作用;混合桥;结合段;极限承载力;剪力键;地震加载

中图分类号:U448

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2019)01-0023-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.023

Ultimate Bearing Capacity of the Joint Sections of Mixed Bridges under Earthquake Action

KOU Liya

(1. College of Construction Engineering, City Vocational College of Jiangsu, Nanjing 210014, Jiangsu, China;

2. Civil & Traffic College, Hohai University, Nanjing 210004, Jiangsu, China)

Abstract: The effect of through-reinforcing rebar on the bearing capacity of the shear connectors of the hybrid bridge is not considered when the Nishiumi algorithm is used for analyzing the ultimate bearing capacity of the joint sections of hybrid bridges under earthquake action; therefore, the analysis results of ultimate bearing capacity are considerably different from the actual results. A new analysis method has been proposed in this study with respect to the ultimate bearing capacity of the joint sections of a hybrid bridge under earthquake action. Further, the ultimate bearing capacities of the stud-type and the RC column-type shear connectors were obtained through analysis and calculation, and a new ultimate bearing capacity analysis test was designed. Using the design of the shear connector specimens, the seismic loading of the specimens, and the test arrangement, the ultimate bearing capacity of the shear connector in the joint sections of a hybrid bridge was analyzed under earthquake action. The analysis results exhibited that the proposed

收稿日期:2018-05-23

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51608116);江苏省高等学校自然科学研究项目(13KJB580002);2018江苏省高职院校专业带头人高端研修项目(2018GRFX013)

作者简介:寇立亚(1974-),女,河北保定人,在读博士研究生,副教授,研究方向:钢-混凝土组合结构。E-mail:koko93@163.com。

method can accurately analyze the ultimate bearing capacity of the shear connector in the joint sections of a hybrid bridge under earthquake action; the analysis results were almost the same as the measured results and exhibited a difference of less than 7%.

Keywords: earthquake action; mixed bridge; joint section; ultimate bearing capacity; shear connector; seismic load

0 引言

钢筋-混凝土复合混合结构在桥梁建筑结构中应用逐渐增多,作为混合桥核心构件的结合段,对其在强烈地震影响下的受力和承载力研究较为落后,地震对混合结构桥梁造成较大影响,容易导致混合桥结合段出现断裂、变形问题,大大降低结合段的承载力。为了提高混合桥结合段的抗震性能,采用有效方法分析混合桥结合段的极限承载力,并采用有效措施进行调整,具有重要意义。

现有的混合桥结合段极限承载力研究大多研究的是钢筋-混凝土组合结构的剪力连接件^[1],且采用的方法也以试验为主,而对地震作用下钢筋-混凝土结合段的极限承载力研究较少。以往的研究中,由于钢筋-混凝土混合桥结合段在地震作用力下,格室中钢板产生一股约束混凝土的力量^[2],因此在钢板与混凝土间的摩擦力使地震作用下混合桥结合段的极限承载力分析结果与实际相差较大^[3]。本文为获取地震作用下混合桥结合段的真实极限承载力结果,提出一种新的地震作用下混合桥结合段的极限承载力分析方法,精确分析结合段剪力键的极限承载力。

1 极限承载力分析方法设计

1.1 栓钉类剪力键极限承载力计算

混合桥结合段的关键受力部件为剪力键,而栓钉类剪力键的应用最为广泛^[4],分析地震作用下混合桥结合段的极限承载力时,主要分析混合桥结合段中剪力键的承载力。剪力键的抗剪极限承载力的计算过程如下所示:

$$W_u = 0.43M_s \sqrt{Q_{ct}t_c} \leq 0.7M_s t \quad (1)$$

式(1)中经过多次试验验证后得出的承载力结果较为保守,应将公式中的 t 条件放宽为 t_u ,有如下公式:

$$W_u = 0.43M_s \sqrt{Q_{ct}t_c} \leq 0.7M_s t \quad (2)$$

此外一些专家将式(1)转换为如下的表达式:

$$W_u = \alpha_1 \beta_1 M_s \sqrt{Q_{ct}t_c} + \alpha_2 \beta_2 M_{tr} t_y \quad (3)$$

式中: α_1 和 α_2 分别为混凝土类型影响因素和混合桥

结合段中横向钢筋位置影响系数; β_1 和 β_2 均为回归系数^[5]。

式(1)~(3)中设计栓钉的抗拉强度和横截面积分别用 t 和 M_s 表示;混合桥结合段混凝土材料的弹性模量、圆柱体抗压强度和轴心的抗压强度分别用 Q_c 、 t'_c 和 t_c 表示;将混合桥结合段中栓钉受剪力方向横向钢筋的屈服强度和横截面积分别用 t_y 和 M_{tr} 表示;设计栓钉的极限抗拉强度为 t_u 。

Eurocode 4(欧洲规范 4)依照大量的试验结果和可靠性分析得到如公式(4)所示的混合桥结合段中栓钉剪力键极限承载力表达式:

$$P_{Rd} = \begin{cases} 0.29od^2 \sqrt{Q_{cm}t_{ck}}/\chi_w \\ 0.8M_s t_u/\chi_w \end{cases} \quad (4)$$

式中: Q_{cm} 和 t_{ck} 分别表示混合桥结合段中混凝土弹性模量的均值和混凝土的标准抗压强度; d 为开孔板的孔径大小;栓钉长度的影响系数为 o ; χ_w 表示分项安全系数通常为 1.25,但文章研究混合桥结合段中栓钉剪力键的极限承载力,取该分项安全系数为 1。

1.2 钢筋混凝土柱类剪力键极限承载力计算

Perfobond Strip 剪力键的承载力计算是基于 Leonhardt 等^[6]对剪力破坏分析结果获取的,其表达式如下:

$$W_u = 2(\pi R^2/4) \times 1.6Ft'_c \quad (5)$$

Eurocode 4 通过分析地震后混合桥结合段剪力键大量试验资料,确定将 W_u 均值和其 2 倍标准差的差值下限当作 Perfobond Strip 剪力键的极限承载力; R 为混凝土柱半径; F 为地震作用力。根据剪力键在地震作用后是否穿过钢筋,得到两种承载力运算公式:

(1) 剪力键不穿过钢筋

$$W_u = (4.31M - 121.0 \times 10^3)/\chi \quad (6)$$

式中: $M = \frac{\pi R^2}{4} \sqrt{n/K} \epsilon_{cd}$, $40 \times 10^3 \text{ N} \leq M \leq 200 \times 10^3 \text{ N}$, K 和 n 分别为钢板的口径和厚度,混合桥结合段中混凝土受到地震的抗压强度为 ϵ_{cd} ,构件系数为 χ 通常取 1。

(2) 剪力键穿过钢筋

$$W_u = (1.85M' - 106.1 \times 10^3) / \chi \quad (7)$$

式中: $M' = \frac{\pi R^2}{4} \epsilon_{cd} + \frac{\pi \varphi_{st}^2}{4} \epsilon_{st}$, $56 \times 10^3 \text{ N} \leq M' \leq 380 \times 10^3 \text{ N}$, 且 φ_{st} 和 ϵ_{st} 分别表示穿过混合桥结合段中钢筋的直径和抗拉强度。

上述过程得到地震作用下混合桥结合段剪力键的极限承载力结果^[7], 但是无法获取剪力键的实际极限承载力, 混合桥实际试验得到的承载力水平超出试验的 3 倍之多, 所以要获取精确的混合桥结合段中剪力键的极限承载力与实际水平一致的极限承载力运算公式, 需设计新的试验来实际研究^[8]。

2 试验设计

2.1 试验试件设计

本文设计了新的试验以分析地震作用下的混合桥结合段剪力键极限承载力。试验中首先需要先根据 Eurocode 4 确定试件剪力键的受剪承载力。试验共设置 8 组剪力键试件^[9], 各组试验包括 3 个试件, 且试件参数如表 1 所列。

表 1 试件设计参数(单位:mm)

Table 1 Design parameters of samples (Unit:mm)

组别	钢筋直径	钢板间距	钢板高度	钢板厚度	开孔板孔径
RT-6	25	88	160	25	65
RT-7	25	165	160	25	65
RT-8	25	210	110	25	65
RT-10	25	210	220	21	70
RT-11	25	210	220	27	70
RT-12	25	210	160	25	80
RT-13	25	220	160	25	70
RT-14	25	215	180	24	80

向混合桥结合段中 T 形钢翼的边缘板处浇灌混凝土, 同时连接 2 个 T 型钢构件为工字钢, 该连接过程通过高强度的螺栓实现^[10]。试件制作过程中为降低开孔板下部混凝土受力产生对连接件抗剪力的影响, 在开孔板下方安装一块泡沫垫层^[11]。在浇灌混凝土前预先留存混凝土试块, 目的是为获取 30 m^3 混凝土的棱柱体弹性模量和抗压强度。

2.2 试件地震加载

混合桥结合段剪力键试件的地震作用力加载如图 1 所示。在平面上放置一些细砂可以促使试件的受力更加均匀; 安置两个薄垫片在工字钢的两侧边缘板处能够使两侧边缘板顶部的受力更加均匀^[12]。

在对试件加载地震作用力时, 应对一组试件中的前 2 个试件进行单独加载, 对第 3 个试验实施往返重复加载。地震作用力加载前, 先预先估计试件

的抗剪力承载极限 W_u , 地震作用力往返重复加载时的荷载分为 7 个级别^[13], 分别为 $0.1W_u$ 、 $0.2W_u$ 、 \dots 、 $0.7W_u$, 且地震作用力的加载和去除速度均一致。

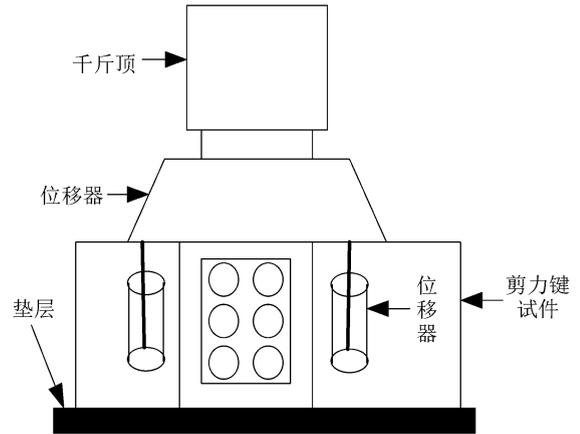


图 1 混合桥结合段剪力键试件的地震作用加载图
Fig. 1 Seismic loading diagram of shear connector specimens in the joint sections of hybrid bridge

2.3 试验测试点安置和测试内容安排

分别在混凝土块的四周安置一个位移器, 通过位移器的数值变化情况实现对试件的极限承载力的测试^[14]。测试内容包括: 混合桥结合段中剪力键试件的地震荷载-相对位移曲线; 混合桥结合段中混凝土的裂缝变化情况、剪力键试件和穿过的钢筋受损情况以及试件的极限承载力和极限承载力下的相对位移。

3 效果验证

实验基于 2.2 的剪力键模型试验结果, 获得分析混合桥结合段中剪力键试件在受到地震作用力后的地震荷载-相对位移曲线^[15], 根据测试结果及地震荷载-相对位移曲线, 获取准确的地震作用下混合桥结合段剪力键的极限承载力计算公式, 如公式(8)所示, 实现混合桥结合段极限承载力的准确分析。

$$W_u = 1.5(d^2 - d_s^2)t_{ck} + 1.5d_s^2 t_{sk} \quad (8)$$

式中: d_s 表示混合桥结合段中贯穿钢筋的直径, 单位为 mm; d 为开孔板的孔径大小, 单位也为 mm; 混凝土的标准抗压强度为 t_{ck} , 钢筋的抗拉强度为 t_{sk} , 单位均为 MPa。

3.1 剪力键试件承载力分析

根据试验测试结果描绘地震荷载-滑移曲线(R-T 曲线), 并根据该曲线获取剪力键试件的状态承载力 W_y 和对应的抗剪力刚度、极限承载力下的相对

位移以及抗剪极限承载力 W_u 。将状态承载力作为试件发生 0.3 mm 相对位移时的荷载,用 K_s 表示抗剪力刚度,其可用 $R-T$ 曲线上通过相对位移 0.3 mm 时的斜率定义; W_u 表示剪力键试件可接收的最大地震荷载,最大荷载下测得的位移量即为剪力键试件极限承载力下的相对位移。

根据试验测试结果得到如图 2 所示 $R-T$ 曲线。限于篇幅的限制,实验仅描绘试件组 RT-11 的 $R-T$ 曲线。由试验获取剪力键试件的状态承载力、抗剪力刚度和抗剪力极限承载力结果如表 2 所示,说明本文方法是一种有效的地震作用下混合桥结合段极限承载力分析方法。

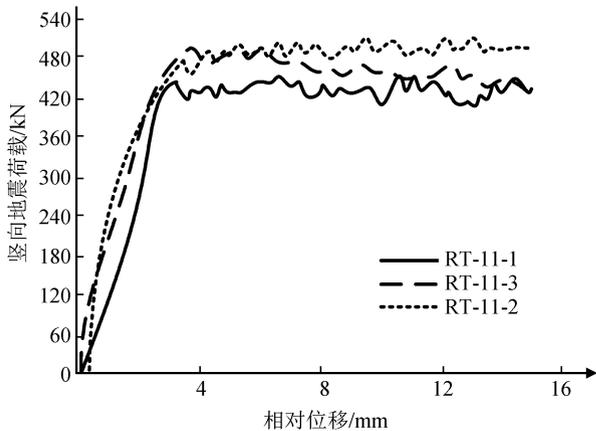


图 2 RT-11 组剪力键试件 $R-T$ 曲线

Fig.2 $R-T$ curves of shear connector specimens in RT-11 group

表 2 剪力键试件抗剪力承载性能测试结果

Table 2 Test results of shear stress bearing capacity of shear connector specimens

组别	抗剪力刚度 /($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	状态承载力 /kN	抗剪极限承载力/kN	抗剪极限承载力对应的 相对位移/mm
RT-6	889	187	340	3.5
RT-7	953	199	365	6.7
RT-8	932	195	320	8.3
RT-10	1 188	246	405	4.2
RT-11	1 196	248	415	3.7
RT-12	1 059	221	369	2.3
RT-13	1 048	231	375	2.5
RT-14	1 142	242	362	2.8

3.2 性能分析

当混合桥结合段中抗剪力承载力为 W_u 时,此时混合桥结合段中开孔板中的贯穿钢筋受到剪力发生屈服且混凝土也发生变形。所以分析混合桥结合段中剪力键的极限承载力需要同时考虑开孔板中钢筋和混凝土的作用,混合桥结合段中混凝土抗剪作

用与混凝土的抗压强度和开孔板孔径相关,贯穿钢筋的影响与其自身的抗拉强度和直径相关。通过对试验得到数据采用最小二乘法实施回归分析,即获取地震作用下混合桥结合段剪力键的极限抗剪承载力表达式[式(8)]。

图 3 为试件剪力键的极限承载力实际测得的数值与采用式(1)本文方法计算得到数值的对比结果。图中可以看出混合桥结合段中极限承载力计算结果的差值较小,得到的承载力结果与实际测量值基本相同。

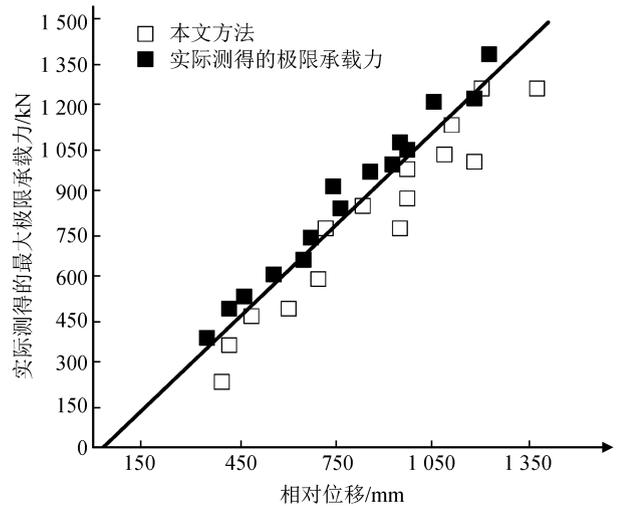


图 3 极限承载力实测值与计算值对比结果

Fig.3 Comparative results of measured and calculated ultimate bearing capacity

为验证本文方法在分析地震作用下混合桥结合段剪力键极限承载力的准确性,设计对比试验。将本文方法与基于 Nishiumi 算法的极限承载力分析方法作对比,分析两种方法与实际测量数值的相差结果。分析出的极限承载力用表 3 描述,且为突出分析结果与实测数据的差异,将表 3 用图 4 所示的折线图描绘。

分别将本文方法和基于 Nishiumi 算法的极限承载力分析方法得到的极限承载力与实测结果进行比较。从表 3 和图 4 中可以看出,采用 Nishiumi 算法分析得到的极限承载力与实际结果差异较大,因为该算法未将贯穿钢筋的受力情况考虑在内,没有有效计算出贯穿钢筋对剪力键的影响;而本文方法同时将混凝土和钢筋对剪力键的影响考虑在内,充分分析二者在地震发生时的荷载,分析得出的结果几乎与实测结果相同,误差低于 0.07,说明本文方法在分析地震作用下混合桥结合段剪力键极限承载力上效果显著,结果准确性高。

表 3 不同方法的极限承载力与实测结果(单位:kN)

Table 3 Ultimate bearing capacity and measured results by using different methods (Unit:kN)

实验测试编号	本文方法	实测数据	误差	基于 Nishiumi 算法的极限承载力分析方法	实测数据	误差
1	380	400	-0.05	580	400	0.45
2	400	420	-0.05	660	420	0.57
3	490	460	-0.05	680	460	0.48
4	600	580	0.07	820	580	0.41
5	690	660	0.03	860	660	0.3
6	720	750	0.05	910	750	0.21
7	830	810	-0.04	990	810	0.22
8	950	940	0.02	890	940	-0.05
9	970	990	0.01	1 240	990	0.25
10	970	1 000	-0.02	1 380	1 000	0.38
11	1 080	1 050	-0.03	1 400	1 050	0.33
12	1 100	1 080	0.03	1 350	1 080	0.25
13	1 180	1 200	0.02	1 030	1 200	-0.14
14	1 200	1 230	-0.02	1 480	1 230	0.20
15	1 370	1 400	-0.02	1 560	1 400	0.11

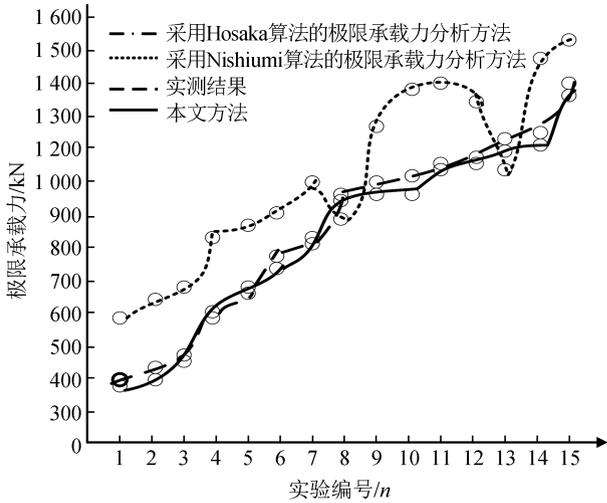


图 4 不同方法的极限承载力结果

Fig.4 Ultimate bearing capacity results by using different methods

4 结论

本文提出的新的地震作用下混合桥结合段的极限承载力分析方法,主要针对混合桥结合段中剪力键的承载力进行分析,本文能准确分析剪力键的极限承载力原因在于以下几点:

(1) 根据试验测试结果和剪力键的荷载-位移规律可以得出剪力键的极限承载力和刚度运算公式,具有较高承载力运算精度。

(2) 本文方法在分析地震作用对剪力键承载力影响的同时,将剪力键周围混凝土贯穿钢筋对剪力键的影响考虑在内,综合多方面因素分析,因此得到

的极限承载力结果较为准确,与实际结果的误差低于 0.07,是一种高精度的地震作用下混合桥结合段的极限承载力分析方法。

参考文献(References)

[1] 霍学晋,程曦.钢-混结合段的极限承载力研究[J].公路交通科技,2017,34(3):52-61.
HUO Xuejin, CHENG Xi. Study on Ultimate Bearing Capacity of Steel-Concrete Composite Segment[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(3): 52-61.

[2] 苗润池,李龙安,屈爱平.基于地震作用的大跨度混合梁斜拉桥钢混结合点位置优化分析[J].世界桥梁,2017,45(5):76-80.
MIAO Runchi, LI Longan, QU Aiping. Optimization of Steel-concrete Joint Location of Long-span Hybrid Cable-stayed Bridge Based on Seismic Action[J]. World Bridges, 2017, 45(5):76-80.

[3] 姜文,谭仕强.混合体系斜拉桥钢混结合段试验模型研究[J].公路工程,2017,42(4):102-107.
JIANG Wen, TAN Shiqiang. Model Test Research of Steel and Concrete Joint Section for Hybrid Cable-stayed Bridges[J]. Highway Engineering, 2017, 42(4):102-107.

[4] 蒲黔辉,周阳,施洲.铁路混合梁斜拉桥钢-混结合段受力及参数分析[J].桥梁建设,2016,46(1):12-17.
PU Qianhui, ZHOU Yang, SHI Zhou. Mechanical Behavior and Parametric Analysis of Steel and Concrete Joint Section of Railway Hybrid Girder Cable-Stayed Bridge[J]. Bridge Construction, 2016, 46(1):12-17.

[5] 高翔,周尚猛,陈开利.混合梁斜拉桥钢混结合段试验研究技术新进展[J].钢结构,2015,30(6):1-4.
GAO Xiang, ZHOU Shangmeng, CHEN Kaili. New Development of the Experimental Research on Steel-Concrete Compos-

- ite Joint of Composite Beam Cable-stayed Bridge[J]. Steel Construction, 2015, 30(6): 1-4.
- [6] 凌龙, 李东, 许祥山, 等. 盘锦内湖大桥工程钢混结合段应用研究[J]. 施工技术, 2016, 45(24): 55-57.
LIANG Long, LI Dong, XU Xiangshan, et al. Application Research of Steel-Concrete Section in Panjin Neihu Bridge[J]. Construction Technology, 2016, 45(24): 55-57.
- [7] 周阳, 蒲黔辉, 施洲, 等. 混合梁斜拉桥钢-混结合段剪力连接件群力学性能研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(10): 134-141.
ZHOU Yang, PU Qianhui, SHI Zhou, et al. Study on Mechanical Behavior of Group Shear Connectors for Steel-Concrete Composite Joint of Hybrid Girder Cable-stayed Bridge[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(10): 134-141.
- [8] 朱亚林, 李端洲, 汪正兴, 等. 混合梁斜拉桥钢混结合段脱空识别方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(7): 933-937.
ZHU Yalin, LI Duanzhou, WANG Zhengxing, et al. Study of Identification Method of Steel-Concrete Joint Section Void of Hybrid Girder Cable-stayed Bridge[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2017, 40(7): 933-937.
- [9] 张建强, 郑清刚. 沪通长江大桥主航道桥公路桥面钢-混结合段设计[J]. 桥梁建设, 2016, 46(4): 6-10.
ZHANG Jianqiang, ZHENG Qinggang. Design of Steel and Concrete Composite Sections for Highway Deck of Main Ship Channel Bridge of Hutong Changjiang River Bridge[J]. Bridge Construction, 2016, 46(4): 6-10.
- [10] 刘迎倩. 自锚式悬索桥桥塔钢-混结合段受力的试验研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(2): 13-17.
LIU Yingqian. Experimental Study on Bridge Tower Steel-concrete Combined Segment of Self-anchored Suspension Bridge[J]. Railway Engineering, 2018, 58(2): 13-17.
- [11] 王煦, 董军, 焦驰宇. 纵向碰撞下 FPS 隔震曲线桥地震响应分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(2): 64-70.
WANG Xu, DONG Jun, JIAO Chiyu. Seismic Response Analysis of FPS Isolated Curved Bridge with Longitudinal Collision[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(2): 64-70.
- [12] 文传勇. 万州长江大桥船舶撞击力有限元分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(2): 17-20.
WEN Chuanyong. Finite Element Analysis of Ship Collision Force of Wanzhou Yangtze River Bridge [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2016, 35(2): 17-20.
- [13] 张二, 吴梵, 吕岩松, 等. 加肋锥-环-柱结合壳连接分段极限承载能力分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(6): 770-775.
ZHANG Er, WU Fan, LÜ Yansong, et al. Analysis of the Ultimate Bearing Capability of a Cabin With Ring-stiffened Cone-Toroid-Cylinder Combined Shell[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(6): 770-775.
- [14] 何江, 王玉振. 大跨度桥梁结构多级地震响应研究[J]. 地震工程学报, 2018, 40(1): 26-31.
HE Jiang, WANG Yuzhen. Study on the Multistage Seismic Response of Long-span Bridge Structures [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(1): 26-31.
- [15] 张宁, 罗卫华, 刘迎春, 等. 基于虚拟现实技术的轮机英语环境仿真研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(6): 212-217.
ZHANG Ning, LUO Weihua, LIU Yingchun, et al. Research on Marine Engineering English Environment Simulation Based on Virtual Reality Technology [J]. Computer Simulation, 2015, 32(6): 212-217.