

钢管混凝土格构式梁桥设计参数抗震研究

林建茂, 欧智菁, 林上顺, 林文

(福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要:以三跨一联钢管混凝土格构式高墩连续梁桥为研究对象,探讨了梁墩刚度比、缀管布置形式和有无减隔震装置设计参数对格构墩地震响应(墩底轴力、墩底弯矩和墩顶位移)的影响规律。研究表明:随着梁墩刚度比值的增大,桥墩的地震响应值先急剧下降之后逐渐趋于平缓减小;缀管布置形式参数对格构墩的弯矩响应值影响较为敏感,而轴力和位移值受其影响较小;减隔震装置对该类桥梁的隔震效果显著,隔震率随梁墩刚度比值的增大而减小。设防烈度等级越高,轴力隔震效果越明显,弯矩和位移的隔震率受设防烈度等级影响较小。该研究可为同类桥梁抗震概念设计提供借鉴与参考。

关键词:钢管混凝土格构墩;地震响应;抗震分析;梁墩刚度比;缀管布置式;减隔震装置

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2017)06-0549-06

Research on seismic applicability of design parameters of continuous bridges with concrete-filled steel-tube latticed high-rise piers

Lin Jianmao, Ou Zhijing, Lin Shangshun, Lin Wen

(School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Three-span continuous bridges with concrete-filled steel-tube latticed high-rise piers were studied with a discussion of the girder-pier stiffness ratio, tube arrangement types and the influence of design parameters of seismic isolation devices on seismic response of latticed piers (on pier bottom's axial force and its bending moment and pier top's displacement). Results show that with the increase of the girder-pier stiffness ratio, the seismic response value of the pier gradually decreases after a sharp decrease. The bending moment response value of latticed piers is more sensitive to the parameters of the tube arrangement than the axial force and the displacement value, which are almost unaffected. And the effect of the seismic-isolation device is especially remarkable with the response value decreasing as the girder-pier stiffness ratio increases. As for the seismic precautionary intensity grade, the higher it is, the more obvious the seismic-isolation effect of the axial force is, while the seismic-isolation ratios of the bending moment and the displacement are less affected. The study may serve to provide reference for seismic designs of similar bridges.

Keywords: CFST latticed pier, seismic response, seismic analysis, girder-pier stiffness ratio, tube arrangement type, isolation device

收稿日期: 2017-08-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408128); 福建省高校新世纪优秀人才支持计划项目(GY-Z15108); 福建省自然科学基金项目(2017J01471)

通讯作者: 欧智菁(1975-),女,福建南平人,教授,博士,研究方向:钢管混凝土组合结构和桥梁抗震。

钢管混凝土格构式高墩连续梁桥是一种新型的组合桥梁结构,具有结构轻、承载能力高、抗震性能好等优点^[1],在我国西部山区桥梁建设中已推广应用,如雅泸高速公路上的干海子特大桥。

目前,针对该类新型结构的抗震性能研究主要集中在具体的工程实例。如文献[2]通过振动台试验模拟干海子大桥抗震性能,表明该类新型桥梁结构体系在不同方向地震力作用下,抗震性能良好。文献[3~5]分别采用弹性反应谱法、线性时程法、非线性动力法等不同分析方法对干海子大桥展开动力性能研究,探讨了该类新型组合桥梁的非线性地震响应特性和结构破坏机理。而关于这类结构的地震响应参数研究暂未见相关报道。本文以干海子大桥第一联为背景,研究不同设计参数对该类桥的抗震影响规律,旨在为钢管混凝土格构式高墩连续梁桥的概念抗震设计提供支撑。

1 模型的建立

1.1 工程概况

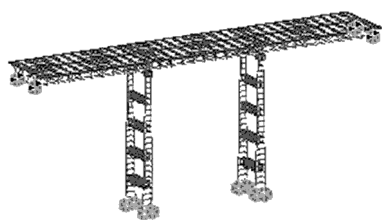
干海子特大桥位于雅西高速公路雅安至泸沽段内。全桥长 1 811 m,分三联共 36 跨设计,第一联长 481.9 m,第二联长 1 044.7 m,第三联长 268.2 m。桥面双向四车道分左右幅设计,每幅主梁由钢管混凝土下弦管、钢管腹杆及顶板组成桁架梁式结构。桥面板埋设预应力钢绞线。下部桥墩有钢筋混凝土双柱式墩、钢管混凝土格构墩和钢管混凝土复合墩 3 种结构形式。

1.2 有限元建模

以干海子大桥的第一联五、六、七三跨(墩高最高)为模型尺寸,主梁跨径均为 45 m,下部墩高 50 m,桥墩柱肢纵向坡度为 1:50。运用 Midas Civil 软件构造多座对称直线连续梁桥,全桥均采用梁单元模拟。桥面二期恒载按 20 kN/m 分布,采用组合截面模拟钢管与混凝土约束效应。用不同的弹性刚度值模拟 1#墩(固定支座 GPZ-12.5GD)和 2#墩(盆式支座 YLXZ-1000×12)支座连接。主梁两端竖向、横向位移和绕 Y、Z 轴转动均受约束,墩底用固结形式。三维有限元模型如图 1 所示。

1.3 抗震分析方法

现有的桥梁弹性抗震分析方法主要有弹性静力法、反应谱法和时程分析法。本文采用时程分



固定墩(1#) 活动墩(2#)

图 1 有限元计算模型(B-0)

Fig.1 Finite element model of the bridge(B-0)

析法^[6]。

1.4 地震波输入

依据《公路桥梁抗震设计细则》^[7],采用时程分析法,分别选取 El Centro、Taft、Northridge 3 条与场地相适应的地震波,取地震响应最大值作为结果。仅考虑顺桥向工况,最大加速度峰值均调为 0.086g。

2 地震响应参数分析

高墩梁桥一般以弯曲型破坏为主,结合标准模型 B-0 的响应分析,选取固定墩(1#)的墩顶和墩底处作为桥墩的控制截面。分别以墩顶位移值、墩底轴力和弯矩值作为抗震性能评价依据指标。

2.1 梁墩刚度比

梁墩刚度比在一定程度上决定了结构的内力分布。通过改变桥墩的高度来实现纵向梁墩不同的刚度比值。主梁和桥墩纵向刚度相对大小采用梁墩纵向刚度比 R_1 表示。

$$R_1 = \frac{2E_G I_G H_i^3}{L^3 \left(\sum_{i=1}^2 E_P I_P \right)} \quad (1)$$

式中: $E_G I_G$ 为主梁纵向抗弯刚度, $N \cdot mm^2$; L 为全桥长度,m; $E_P I_P$ 为桥墩抗弯刚度, $N \cdot mm^2$; H_i 为第 i 个桥墩的墩高,m。一般情况下,桥梁跨径与墩高的比值在 0.5~1.5 之间,干海子大桥最低格构墩墩高 24.15 m,最高 67.29 m,均此范围内。为研究梁墩刚度比参数对格构墩的抗震影响规律,在标准模型 $R_1 = 9.2(50 \text{ m})$ 的基础上,以 $R_1 \pm 2$ 为主要间距,构造了 $2.2 \leq R_1 \leq 17.2(22 \text{ m} \leq H \leq 71 \text{ m})$ 的多个模型。在 E1 地震作用下,不同的 R_1 地震响应值见表 1,曲线图见图 2~4。

由表 1 及图 2~4 可以看出:在 E1 地震力作

用下,随着梁墩刚度比 R_1 的增大,格构墩的内力响应值及墩顶位移值大致呈两个递减阶段。当 R_1 从 2.2 增大到 9.2 时,墩底柱肢单元轴力值、弯矩值和墩顶位移率分别减小了 21.8%、71.4% 和 41.6%,其中 $R_1 = 5.2$ 时,由于结构共振效应使得内力响应值出现“反弹”增大现象;当 R_1 从 9.2 递增至 17.2 时,地震响应值变化幅度较小,对应的内力值分别下降了 6.5%、35.8%、25.6%。

表 1 不同梁墩刚度比的内力值

Tab.1 Internal force value with different R_1

梁墩 刚度比 R_1	墩高 H/m	墩底 轴力/ kN	墩底 弯矩/ $(\text{kN} \cdot \text{m})$	位移 Δ / mm	Δ/H
2.2	22	12 451	1 327	163	1/135
3.2	28	11 679	950	167	1/168
5.2	37	12 197	707	234	1/158
7.2	44	10 828	500	226	1/195
9.2	50	9 742	380	216	1/232
11.2	56	9 560	328	219	1/256
13.2	61	9 367	298	220	1/278
15.2	66	9 386	278	247	1/267
17.2	71	9 108	244	227	1/313

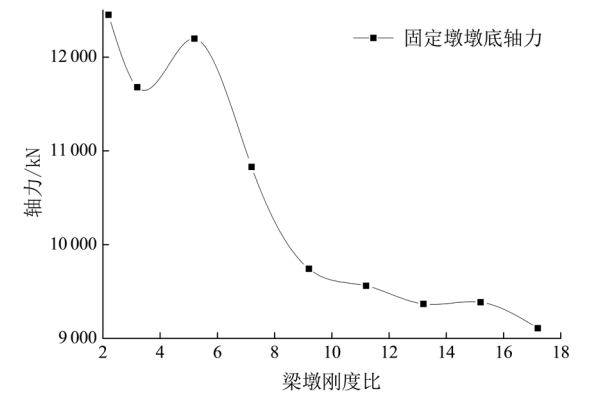


图 2 不同梁墩刚度比的墩底轴力值

Fig.2 Pier bottom axial forces with different R_1

综上可知:梁墩刚度比是影响钢管混凝土格构墩地震响应值的主要参数之一。总体上,随着 R_1 的增大,结构的内力响应值和位移变形量逐渐

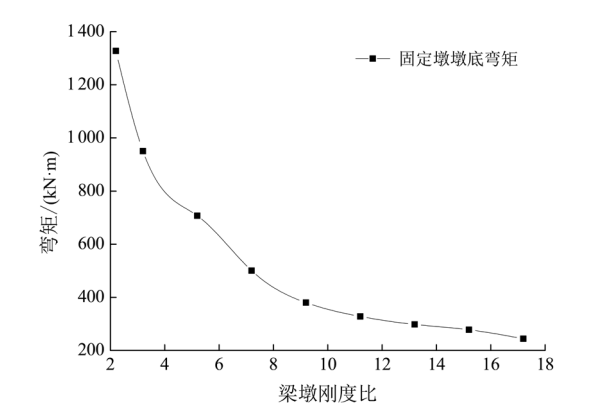


图 3 不同梁墩刚度比的墩底弯矩值

Fig.3 Pier bottom bending moment with different R_1

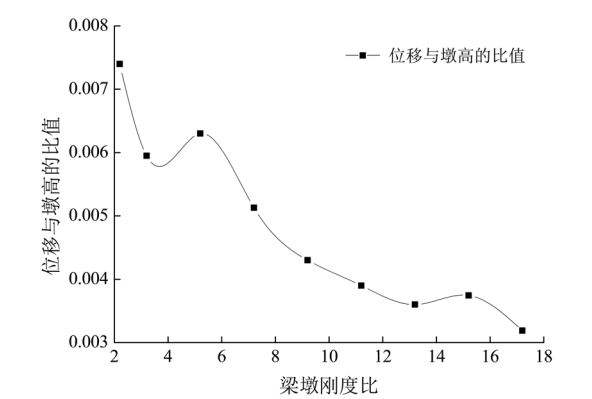


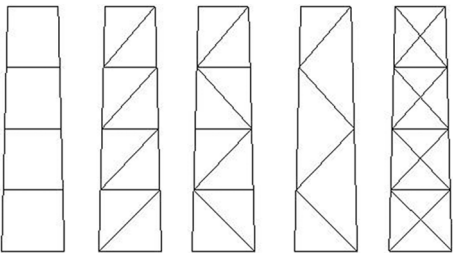
图 4 不同梁墩刚度比的位移率

Fig.4 Displacement rate with different R_1

降低且趋于稳定,主要是因为结构的地震响应与刚度有关。当 R_1 较小时,结构刚度大,此时地震响应值变化较为敏感;之后随着 R_1 的增大,整体结构变柔,在外力作用下,更多的能量是在桥墩变形过程中耗散。建议针对该类新型结构体系,梁墩刚度比 R_1 宜大等于 9.2,这样既可避免因桥墩刚度过大而引起构件破坏,同时又能保证地震响应值相对较为稳定,有利于工程设计控制。

2.2 格构墩缀管布置形式

常见的钢管混凝土格构柱缀管布置形式有“平型”、“N 型”、“K 型”、“W 型”和“X 型”5 种^[8],如图 5 所示。为了解各缀管布置形式抗震性能的差异性,保持其他设计参数不变,仅改变格构墩缀管布置形式。在多地震作用下,5 种不同缀管布置形式桥型的响应峰值及对比图分别如表 2 和图 6~ 8 所示。



(a) 平型 (b) N 型 (c) K 型 (d) W 型 (e) X 型

图 5 格构墩缀管布置方式

Fig.5 Tube arrangement types of latticed piers

表 2 不同缀管形式的内力值

Tab.2 Internal force values of different infix tubes

缀管形式	缀管用 钢量/ t	墩底轴力/ kN	墩底 弯矩/ (kN·m)	位移△/ mm
平型	21.3	9 742	380	216
N 型	50.1	11 288	320	240
K 型	50.1	10 823	290	215
W 型	29.1	10 790	312	215
X 型	79.1	10 951	243	218

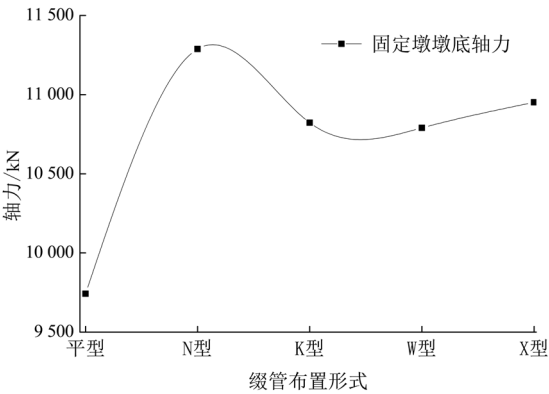


图 6 不同缀管布置形式的墩底轴力值

Fig.6 Pier bottom axial force with different infix tubes

由上可见,格构墩的缀管布置形式参数对轴力值和位移量指标影响较小,对弯矩响应值影响显著。与其它 4 种斜缀管布置形式相比,平型缀管式格构墩的墩底弯矩响应值明显最大,而墩底轴力值和位移值相差较小,一方面是因为斜缀管仅起到连接纵向柱肢之间的传力与耗能作用,斜缀管能够分解部分纵向水平推力,有效降低柱肢单元的力矩;另一方面,格构墩柱肢截面面积大,

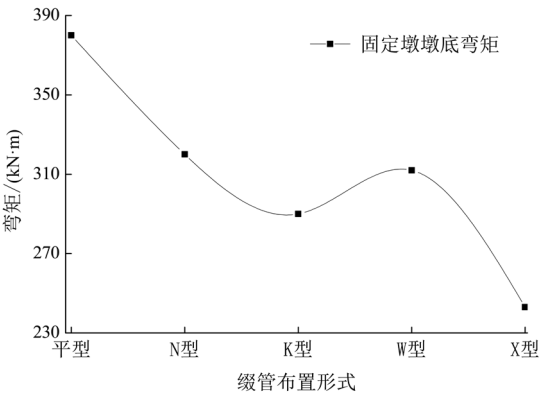


图 7 不同缀管布置形式的墩底弯矩值

Fig.7 Pier bottom bending moment with different infix tubes

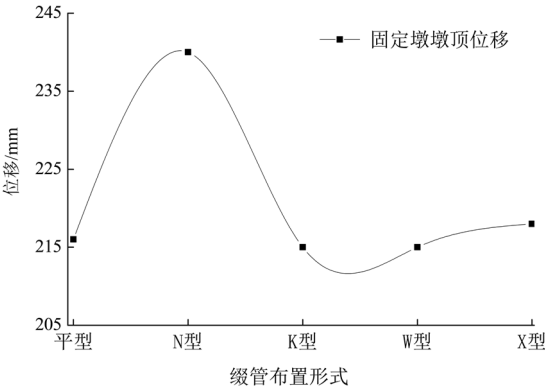


图 8 不同缀管布置形式的墩顶位移值

Fig.8 Displacement value of pier tops with different infix tubes

是整体结构的主要抗力构件,缀管起到的作用比重较小,因此对轴力值和变形量影响较小。

对比 4 种不同的斜缀管响应峰值发现,N 型各个地震响应指标均最大,是最不合理的构造结构。其余 3 种缀管布置形式内力值相差较小,X 型缀管桥墩力学性能较好,但结构相对复杂且缀管用钢量明显较大,W 型和 K 型缀管格构墩桥梁的内力值和用钢量适中。权衡考虑结构的力学性能、用钢量和施工的难易性,建议格构墩缀管布置可采用平型、K 型或 W 型斜缀管形式。

2.3 减隔震装置

桥梁支座作为连接桥梁上下部结构和传递荷载的重要部件,应用减隔震技术是实现结构抗震减震的有效方法和重要手段。鉴于钢管混凝土格构式高墩连续桁架梁桥结构刚度小、周期长,采用

整体型减隔震装置效果不是很理想,选择橡胶支座+粘滞阻尼器(VFD 主要参数值:额定荷载 2 000 kN,阻尼系数 2 kN·s/mm,速度指数 1,设计速度 1 000 mm/s)装置。为了探究减隔震装置是否适用于该新型梁桥结构体系,构造了不同的梁墩刚度比值和设防烈度等级双参数模型,并对其进行响应分析。引入减隔震概念来评价隔震装置的隔震效果,其计算公式下式所示^[9]。

隔震率 =

$$\frac{\text{无隔震结构反应值} - \text{隔震结构反应值}}{\text{无隔震结构反应值}} \times 100\%$$

(2)

篇幅所限,本小节就不列出各个指标的隔震率具体数值表,不同模型的轴力、弯矩及位移值指标隔震率对比结果如图 9~11 所示。

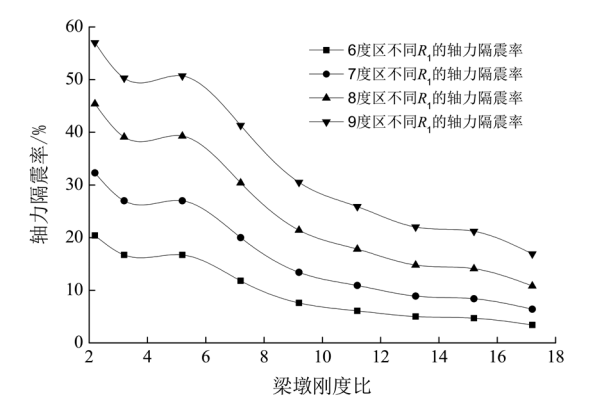


图 9 计算模型的轴力隔震率

Fig.9 Calculation of the model's seismic isolation of the axial force

由上可见,梁墩刚度比值越小,隔震率越突出,3 个指标的最大隔震率值接近 80%。且设防烈度区等级对各个指标的隔震率影响程度不尽相同,从图 9 可知,设防烈度等级越高,轴力指标的隔震效果越好,如当 $R_1=2.2$ 时,6 度和 9 度等级的隔震率分别是 57.0% 和 20.4%,且隔震率与设防烈度等级近似呈比例关系;由图 10 可看出,在 6、7、8 度设防烈度,弯矩响应值的隔震率相差较小,且均大于 9 度设防烈度;从图 11 可看出,位移指标的隔震率几乎不受设防烈度等级影响。主要是因为减隔震装置起到延长结构自振周期作用,当梁墩刚度比值较小时,这种现象越明显。建议针对该类新型梁桥体系,不论结构处于哪个设防烈度等级,在同等条件下均应首选减隔震装置来

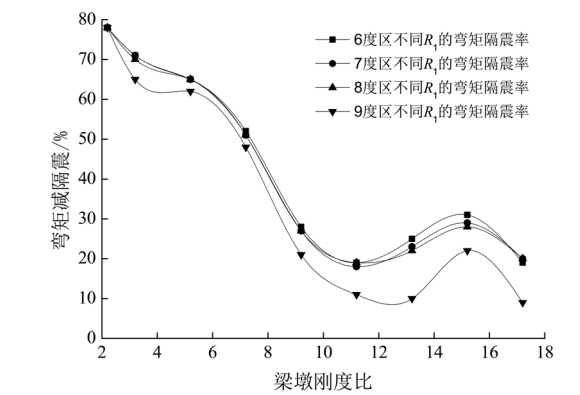


图 10 计算模型的弯矩隔震率

Fig.10 Calculation of the model's seismic isolation ratio of the bending moment

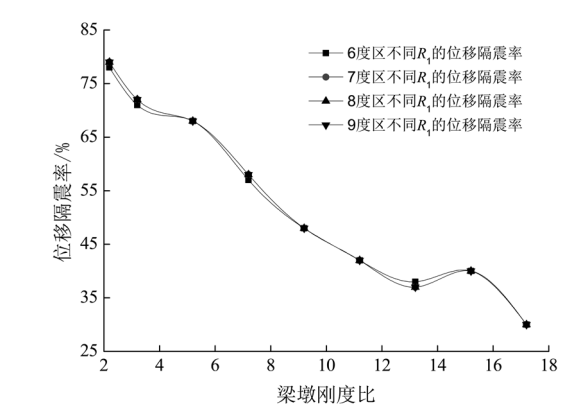


图 11 计算模型的位移隔震率

Fig.11 Calculation of the model's seismic isolation ratio of the displacement

提高结构的受力性能,尤其是刚度较大,周期较短的结构。

3 结论

- 1) 梁墩刚度比参数是影响格构墩地震响应值的主要参数之一。随着 R_1 的增大,结构的地震响应值近似呈两个不同程度的下降阶段,当 $R_1 < 9.2$ 时,各个响应值递减幅度明显,当 $R_1 \geq 9.2$ 时,各个指标变化较小且趋于稳定值。建议梁墩刚度比值宜控制在大等于 9.2,可使得结构的受力性能更合理。
- 2) 缀管布置形式对格构墩的墩底弯矩响应值影响较大,而对控制截面的轴力值和位移量几乎没有影响。建议实际工程中选择平缀管式、K 型或 W 型作为格构墩缀管连接方式。

3)减隔震装置发挥的隔震效果与梁墩刚度比和设防烈度等级密切相关,总体上轴力、弯矩和位移指标的隔震率随着梁墩刚度比的增大而减小。随着设防烈度等级的提高,轴力隔震效果越

好,且与设防烈度等级呈线性关系,而弯矩隔震率呈不同幅度的减小,位移隔震率几乎不受设防烈度等级影响。

参考文献:

[1] Usami T, Ge H B , Saizuka K. Behavior of partially concrete-filled steel bridge piers under cyclic and dynamic loading[J]. J. Construct. Steel Res,1997,41(2/3):121-136.

[2] 吴庆雄,黄育凡,陈宝春.钢管混凝土组合桁梁-格构墩轻型桥梁振动台阵试验研究[J].工程力学,2014,31(9):89-96

[3] 王海良,张铎,王剑,等.基于 IDA 的钢管混凝土空间组合桁架连续梁桥抗震易损性分析[J].世界地震工程,2015,31(2):76-86.

[4] 黄育凡.钢管混凝土组合桁式梁-格构式高墩连续梁桥非线性地震性能研究[D].福州:福州大学,2012.

[5] 王海良,金城,杨新磊.曲线钢管混凝土组合桁架连续梁桥抗震分析[J].公路交通科技,2011(12):287-288.

[6] 俞琦,陈语,王家林.桥梁抗震分析方法[J].重庆交通学院学报,2006,25(增刊):32-34.

[7] 中华人民共和国交通运输部.公路桥梁抗震设计细则:JTG/T B02-01-2008[S].北京:人民交通出版社,2008.

[8] 陈盛富.四肢变截面钢管混凝土格构柱抗震性能研究[D].福州:福建工程学院,2017.

[9] 孙颖,陈天海,卓卫东,等.长周期地震动作用下隔震连续梁桥地震反应特性研究[J].工程力学,2016,31(增刊):244-250.

(责任编辑:陈雯)

(上接第 538 页)

[5] Vasheghani F R, ZHAO Q, Burdette E G. Seismic Analysis of Integral Abutment Bridge in Tennessee, Including Soil-Structure Interaction[J].Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2010,22(1):70-79.

[6] 冯士伦.可液化土层中桩基横向承载特性研究[D].天津:天津大学,2004.

[7] Zheng w., luna R. Liquefaction effects on lateral pile behavior for bridges[J].Geotechnical Special Publication,2006,10(2):153-164.

[8] 常士骠,张苏民.工程地质手册[M].4版.北京:中国建筑工业出版社,1992.

[9] 刘波,韩彦辉.FLAC 原理、实例与应用指南[M].北京:人民交通出版社,2005.

[10] 熊志远.聚苯乙烯泡沫((EPS)力学行为的实验研究[D].湘潭:湘潭大学,2007.

[11] 张战廷,刘宇锋.ABAQUS 中的混凝土塑性损伤模型[J].建筑结构,2011(s2):229-231.

[12] 秦浩,赵宪忠.ABAQUS 混凝土损伤因子取值方法研究[J].结构工程师,2013,29(6):27-32.

[13] 刘巍,徐明,陈忠范.ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数标定与验证[J].工业建筑,2014(s1):167-171.

[14] 中华人民共和国建设部.GB50010-2010 混凝土结构设计规范[s].北京:中国建筑工业出版社,2010.

[15] 李昊煜.RPC 材料的塑性损伤本构模型参数识别及有限元验证[D].北京:北京交通大学,2009.

[16] 曲哲,叶列平.基于有效累积滞回耗能的干钢筋混凝土构件承载力退化模型[J].工程力学,2011,28(6):45-51.

[17] 樊铮晖.新型半整体式桥台无缝桥梁台后扩孔微型桩侧向受荷性能试验研究[D].福州:福州大学,2014.

(责任编辑:陈雯)