

文章编号: 1673-9469 (2019) 01-0017-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.01.004

基于桩-土作用效应的滚石撞击桥墩动力响应分析

郭森, 张柳煜, 郭元凯, 武芳文, 孟园英, 张桂通

(长安大学公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 滚石灾害会直接影响山区桥梁结构使用状况, 甚至会导致桥墩偏位、落梁甚至造成整个桥梁发生坍塌。为了能更加真实的模拟滚石撞击桥墩这一动力过程, 结合工程实例建立有限元模型, 对碰撞动力学分析理论以及数值分析原理进行了介绍。运用 LS-DYNA 对不同滚石质量、不同滚石速度撞击桥墩时结构动力响应进行参数化分析, 研究表明: 滚石质量越大、速度越大对桥墩损伤产生的影响越显著。

关键词: 桥梁; 滚石撞击; 滚石质量; 滚石速度; 动力响应

中图分类号: U442.5+9

文献标识码: A

Dynamic Response Analysis of Rolling Stone Impact Pier Based on Pile-soil Interaction Effect

GUO Sen, ZHANG Liuyu, GUO Yuankai, WU Fangwen, MENG Yuanying, ZHANG Guitong
(Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The rolling stone disaster will directly affect the use of the bridge structure in the mountainous area, and even lead to the deviation of the bridge pier, the falling beam and even the collapse of the entire bridge. In order to simulate the dynamic process of rock-rock impact piers more realistically, this paper combines engineering examples to establish a finite element model, and introduces the theory of collision dynamics analysis and the principle of numerical analysis. The LS-DYNA is used to analyze the structural dynamic response of different rolling stone quality and different rolling stone speeds. The research shows that the greater the mass of the rolling stone and the higher the speed, the more significant the impact on the pier damage.

Key words: bridge; rolling stone impact; rolling stone quality; rolling stone speed; dynamic response

针对山区滚石撞击桥墩的问题, 国内外学者考虑桩-土作用及上部结构约束下滚石撞击桥梁有限元精细化分析相关文献鲜有提及。

2002年刘建成、顾永宁等人运用 LS-DYNA 软件对油轮与斜拉桥桥墩的动态撞击进行了仿真分析, 得到了撞击过程中船桥变形、桥梁应力分布等随时间变化的时程曲线^[1]。余志祥, 许浒等对落石冲击柱式桥墩进行模拟, 考虑了不同落石直径、落石高度、落石速度、落石撞击角度等因素对撞击力的影响^[2]。Philippe 等开展了数组落石冲击混凝土防护板实验, 分析了混凝土防护板遭到落石冲击后的损伤破坏

情况, 并提出了一种缓冲落石冲击的结构形式^[3]。

本文旨在考虑桩-土作用及上部结构约束等复杂边界条件下, 滚石撞击参数发生变化时, 滚石撞击桥墩的动力响应: 撞击力、关键部位位移、结构损伤的规律。

1 滚石撞击桥墩动力学理论及数值实现方法

1.1 概述

滚石撞击桥墩是一个复杂的多重非线性的碰撞动力学问题, 涉及到材料非线性、几何非线性及边

收稿日期: 2018-09-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408040); 陕西省自然科学基金资助项目(2017JM5110)

作者简介: 郭森(1992-), 男, 河南舞钢人, 硕士研究生, 主要从事桥梁安全评估与维护的研究。

界非线性^[4]。碰撞动力学过程不能忽略加载速率、材料应变率、质量惯性力等所造成的影响。

本文选用 ANSYS/LS-DYNA 显式动力学软件进行数值分析, 仿真分析。

1.2 接触碰撞介绍

1.2.1 接触碰撞的基本算法

在 LS-DYNA 软件中, 物体之间的相互接触作用是通过选择合适的接触类型并定义与接触有关的参数定义可能发生接触的接触表面的接触对实现的^[5]。

1.2.2 接触类型介绍

在 LS-DYNA 程序中主要有三种类型的接触面: 单面接触、点面接触、面面接触。

在滚石撞击桥墩冲击过程的数值模拟中, 为了提高数值仿真的可靠性, 滚石与混凝土桥墩、桥墩钢筋的接触类型均选择面面接触。

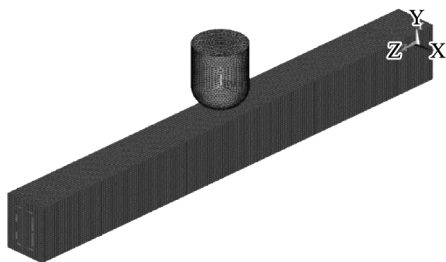


图1 钢筋混凝土梁冲击实验有限元模型
Fig.1 Finite element model for impact test of reinforced concrete beams

2 滚石撞击桥墩模型验证

本章对已有试验的钢筋混凝土梁冲击实验进行有限元仿真, 运用 LS-DYNA 模拟现场试验验证正滚石撞击桥墩有限元仿真中材料参数取值以及模拟方法合理性。验证模型为日本国防研究所 FUJIKAKE 等进行的钢筋混凝土梁冲击实验^[6]。文中试验内容充实, 数据记录真实, 有很高的参考意义。

2.1 有限元计算结果的评判准则

显式动力学计算结果一般用沙漏能控制、总体能量控制、能量比率控制。在数值模拟中, 当沙漏能与总能量的比值大于 10% 时, 认为模拟计算是失效的。

在计算仿真过程中, 总体能量应基本保持不变或无较大波动, 当计算结果能量比等于 1 时, 表示计算稳定。本文数值仿真计算中沙漏能都控制在 3% ~ 6% 之间, 符合要求。

2.2 验证模型概况

验证模型如图 1 所示, RC 梁和冲击重锤选用 SOLID164 单元, 材料采用 HJC 材料本构, 冲击重锤采用刚体材料本构。纵筋及箍筋采用 LINK160 单元。冲击重锤采用 4 节点四面体单元, 网格尺寸为 1 cm, 冲击锤前端球面部分和试验的重锤尺寸完全一致。混凝土结构阻尼比取为 5%^[7], 钢筋混凝土梁的约束采用简支梁的约束方式, 冲击锤初速度 1.72 m/s, 重锤质量 400 Kg, 计算终止时间为 0.1 s。

2.3 验证模型仿真结果评价

由撞击力时程曲线图 2 及位移节点时程曲线图 5 可知: 冲击锤冲击 RC 梁瞬间撞击力达到最大值 152.3 kN, 随后冲击锤与 RC 梁体的脱离, 撞击力迅速减到 0; 撞击过程中钢筋混凝土梁跨中部位下缘节点的最大下挠量为 6.23 mm; 跨中节点位移随着梁上下颤动, 但由于梁体结构阻尼的存在, 节点位移峰值有逐渐变小的趋势。

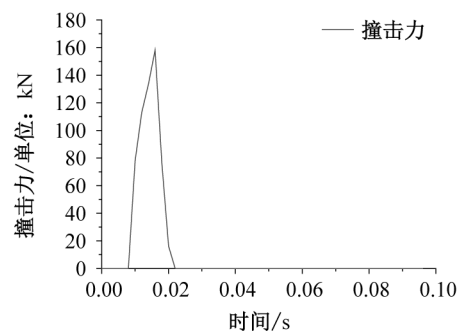


图2 撞击力时程曲线

Fig.2 The history curves of impact forces

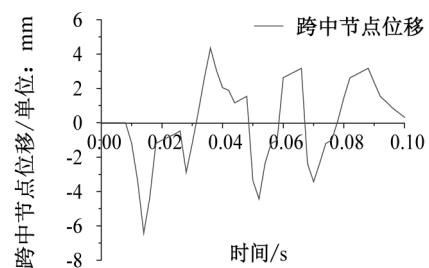


图3 跨中节点位移

Fig.3 The displacement of the mid-span nodes

数值模拟过程中, 不关注冲击锤的破坏形式, 同时为了缩减计算时间, 因此赋予冲击锤刚体材料特性, 忽略了冲击锤的变形, 仿真结果较试验结果偏安全。从结果来看模型本构参数选取是合理的。

表 1 仿真结果与实验值对比

Tab.1 Comparison of simulation results with experimental values

项目验证	撞击力峰值 /kN	跨中节点最大位移 /mm
实验结果	142.7 kN	5.80 mm
有限元仿真	158.3 kN	6.23 mm
相对误差 /%	6.73	7.41

3 不同参数对撞击结果的影响分析

3.1 滚石质量影响分析

本节探讨滚石质量的变化对滚石撞击桥墩动力响应的影响。所取滚石质量的范围为 $2 \sim 20 \text{ t}^{[8]}$ 。仿真模拟时采用方形滚石，滚石的横截面尺寸为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 。滚石质量因素影响分析时，采用单因素分析法，具体工况表如下所示。

表 2 各工况参数表

Tab.2 The table of working parameters

工况	参数	质量 /t	速度 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	撞击位置	桥墩结构形式
工况 1(基本)		2.3	10	中部	独柱墩
工况 2		5	10	中部	独柱墩
工况 3		10	10	中部	独柱墩
工况 4		15	10	中部	独柱墩
工况 5		20	10	中部	独柱墩

3.1.1 桥墩撞击力分析

为了研究不同质量的滚石撞击桥墩时撞击力的变化情况，取滚石质量分别为 2.3 t 、 5 t 、 10 t 、 15 t 、 20 t ，下面给出不同滚石工况下撞击力时程曲线及各工况下撞击力峰值表。

通过撞击力时程曲线图 4 可知：滚石撞击桥墩撞击力时程曲线 $F(t)$ 在滚石与桥墩接触碰撞时，撞击力迅速达到峰值 $F_{\max}$ ，然后迅速衰减，撞击力时

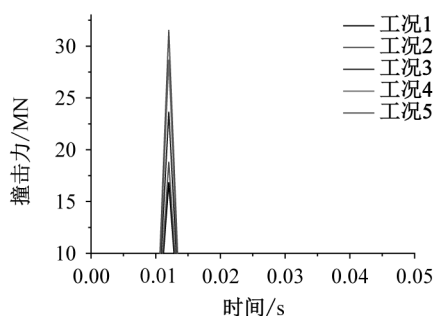


图 4 不同工况撞击力时程曲线图

Fig.4 Time history curve of impact force under different working conditions

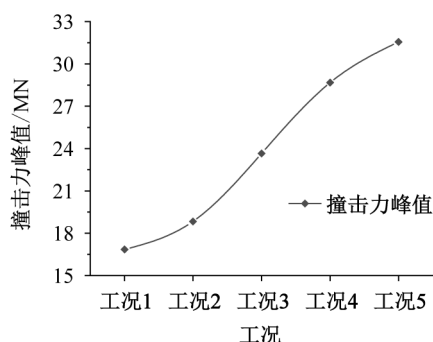


图 5 不同工况撞击力峰值变化图

Fig.5 Peak value change diagram of impact force under different working conditions

程呈现一个类似三角形脉冲荷载 t_1 ，该阶段荷载峰值较大，滚石与桥墩的撞击时间大致都在 0.005 s 时间段内。

随着滚石质量的增加，撞击力峰值也随之增大，依次为 16.844 MN 、 18.834 MN 、 23.65 MN 、 28.68 MN 、 31.56 MN ，由撞击力峰变化规律可知，滚石质量对撞击力影响很大。

3.1.2 桥墩位移分析

撞击部位的节点位移时程变化可以反应桥墩受撞击后局部变形，而桥墩墩顶部位节点位移可间接反映桥墩受撞击后对上部结构的影响。

由图 6 可知：滚石撞击桥墩后，墩顶部节点先朝着撞击反方向运动达到最大值，然后朝着撞击方

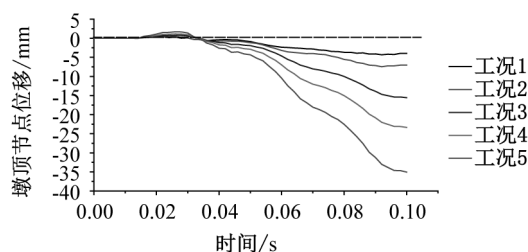


图 6 墩顶部位节点 (10100 节点) 位移时程图

Fig.6 Displacement time history diagram of the top node (10100 nodes)

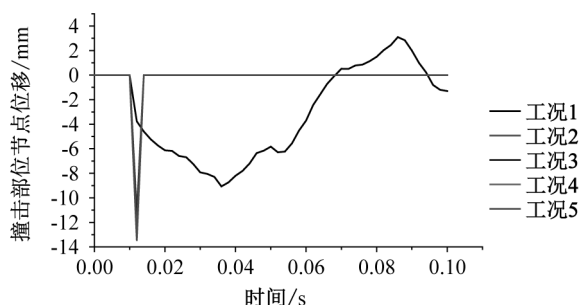


图 7 撞击部位节点 (138228 节点) 位移时程图

Fig.7 Displacement time map of the impact site node (138228 node)

向位移增加达到最大值。随着滚石质量增加,墩顶部位节点位移值逐渐增大。

由图 7 可知:工况 1 时撞击部位节点位移先朝撞击方向达到最大值,后朝反向增大到最大值;工况 2、工况 3、工况 4、工况 5 撞击部位节点位移变化趋势相同,撞击部位节点位移在撞击瞬间迅速增大,后减小零。

随着滚石质量的增加,墩顶位置节点位移(Y 轴正向、负向)均随之增大;在工况 5 滚石质量状况下,墩顶位移最大可达 35.04 mm,滚石质量的变化对墩顶移动动力响应影响较大。

3.1.3 桥墩损伤分析

通过定义主应变失效的方式来考虑混凝土的失效来模拟在碰撞过程中桥墩碰撞区域混凝土的局部损伤破坏。文中桥墩的损伤量以桥墩墩柱混凝土的剥落失效体积衡量,如表 3 所示。

由表 3 可知:工况 1 情况下,桥墩混凝土单元几乎没有损伤;随着滚石初动能增加,桥墩混凝土

表 3 桥墩损伤情况统计表

Tab.3 Bridge pier damage statistics

损伤情况 工况	混凝土 损伤面积 /cm ²	撞击 最大深度 /cm	混凝土 失效体积 /cm ³	体积 损失率 /%
工况 1	0	0.906 8	0	0
工况 2	4 055.83	5.213	21 143.042	0.051 8
工况 3	6 542.56	6.126	40 079.723	0.098 2
工况 4	10 598.04	6.962	73 783.554	0.180 7
工况 5	12 495.22	7.253	90 627.831	0.222 1

损伤面积、最大撞击深度、混凝土损失体积、体积损失率均随之增加;随着滚石质量的增加,滚石对混凝土桥墩的损伤开始由保护层(5cm)区域向核心混凝土区域扩展;工况 5 时,滚石最大撞击深度达 7.253cm 已经达到核心混凝土部位。

3.2 滚石速度影响分析

滚石速度是评判滚石运动状态的重要指标。本节采用单因素分析法即滚石速度为 5 m/s、10 m/s、15 m/s、20 m/s 四种不同速度工况进行研究。

3.2.1 桥墩撞击力分析

为了研究不同速度工况桥墩撞击力的变化规律,用以上四种速度工况的滚石对桥墩进行冲击,研究不同速度工况撞击力时程曲线的变化规律。

由图 9 可知:滚石与桥墩的初始间隙为 10 cm

时,不同速度工况撞击力 $F(t)$ 随时间变化趋势一致,

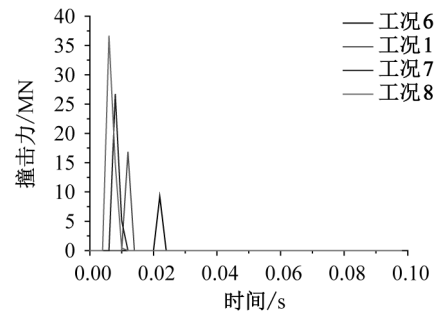


图 8 不同工况撞击力时程曲线图

Fig.8 Time history curve of impact force under different working conditions

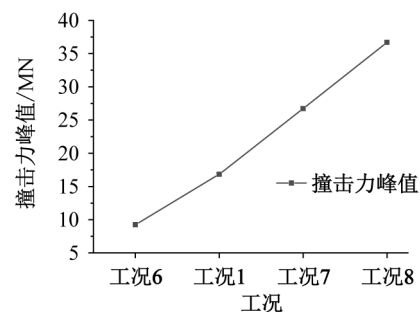


图 9 不同工况撞击力峰值变化图

Fig.9 Peak value change diagram of impact force under different working conditions

撞击力时程呈现一个类似三角形脉冲荷载,该阶段荷载作用时间较短;且撞击力峰值与速度大致呈现线性增长趋势。

3.2.2 桥墩位移分析

不同滚石速度工况对桥墩进行撞击,研究桥墩受到不同速度的滚石撞击下,桥墩墩顶位置和撞击位置的位移时程变化规律。

由图 10 可知:不同工况下墩顶节点位移变化趋势一致,即桥墩顶部节点位移先朝与撞击方向相反的方向达到最大值,随后向与撞击方向运动并达到最大值;随之滚石速度的增大,滚石撞击桥墩造成

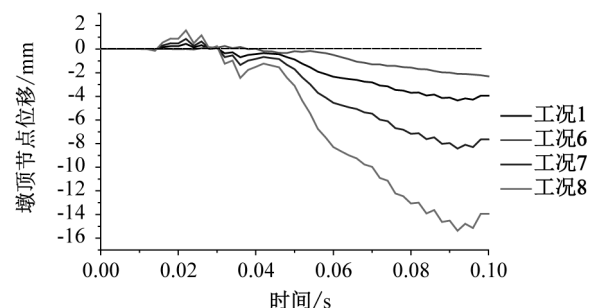


图 10 墩顶部位节点(10100 节点)位移时程图

Fig.10 Displacement time history diagram of the top node (10100 nodes)

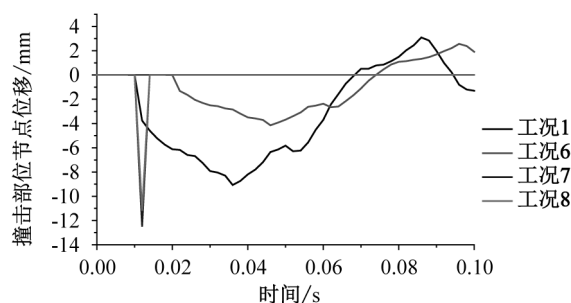


图 11 撞击部位节点 (138228 节点) 位移时程图

Fig.11 Displacement time map of the impact site node
(138228 nodes)

的墩顶节点位移的最大值也随之增大。

由图 11 可知：工况 1、工况 6 时撞击部位节点位移先朝撞击方向达到最大值，后朝反向增大到最大值，随后类似正弦曲线往复交替，但由于阻尼的存在位移峰值逐渐衰减；工况 7、工况 8 撞击部位节点位移时程曲线变化趋势相同，撞击部位节点位移在撞击瞬间迅速增大，后迅速减小为零一直到结束；随着滚石速度的增加，在碰撞瞬间碰撞部位节点单元达到失效应变，单元失效单元上的节点也随之删除。

不同滚石速度工况下墩顶部节点位移的最大值，随着滚石速度的增大墩顶部节点位移也随之增大，滚石速度对墩顶节点位移响应影响很大；滚石速度依次由 5 m/s、10 m/s、15 m/s、20 m/s 变化，由速度变化引起的墩顶节点位移最大值变化依次为 2.345 mm、4.343 mm、7.637 mm、13.935 mm 最大位移增长速率分别为 85.2%、75.8%、82.5%。

3.2.3 桥墩损伤分析

对不同速度工况下滚石撞击桥墩造成桥墩的损伤状况进行分析，下面将给出桥墩损伤示意图及桥墩损伤情况统计表 4。

由表 4 可知：在工况 1、工况 6 下，桥墩混凝土单元几乎没有损伤；随着滚石速度的增加，桥墩的损伤随之加剧，桥墩混凝土损伤面积、最大撞击

深度、混凝土损失体积、体积损失率、滚石撞击桥墩的最大撞击深度均随之增加，滚石对混凝土桥墩的损伤开始有保护层 (5 cm) 区域向钢筋笼核心混凝土区域扩展；滚石速度在工况 8 时，滚石撞击桥墩的最大撞击深度达 5.524 cm 已经达到核心混凝土部位，但桥墩核心混凝土几乎并未出现损伤失效。

速度工况 7、工况 8 情况下，滚石撞击混凝土桥墩造成桥墩局部的损伤，下面给出桥墩的损伤示意图 12、图 13。

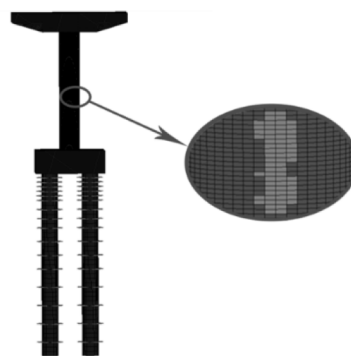


图 12 工况 7 桥墩损伤示意图

Fig.12 The bridge pier damage diagram working condition 7

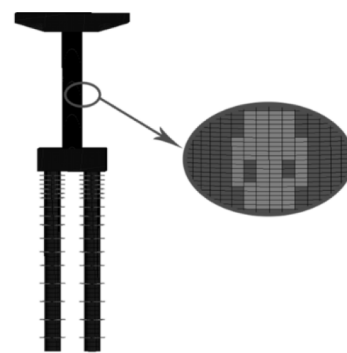


图 13 工况 8 桥墩损伤示意图

Fig.13 The bridge pier damage diagram working condition 8

4 结论

1) 随着滚石质量的增加，滚石撞击力、桥墩关键部位的位移、桥墩钢筋应力、桥墩损伤都随之增大，撞击力峰值的增长率先增大后变小。

2) 滚石速度的增大，滚石撞击力与速度基本成线性增长；滚石速度的增大桥墩关键部位的位移、桥墩钢筋应力、桥墩局部损伤也随之增大。

3) 相较于滚石质量的变化，滚石速度的增大对滚石撞击力以及桥墩损伤产生的影响更为显著。

(下转第 112 页)

表 4 桥墩损伤情况统计表
Tab.4 Bridge pier damage statistics

工况	损伤情况	混凝土损伤面积 /cm ²	撞击最大深度 /cm	混凝土失效体积 /cm ³	体积损失率 /%
工况 1		0	0.907	0	0
工况 6		0	0.415	0	0
工况 7		4 317.72	5.073	21 903.794	0.053 7
工况 8		5 887.84	5.524	32 524.207	0.079 6

如果说随机性研究,要解决的关键问题是,建立二值逻辑支撑的、概率理论的公理化体系的话;那么模糊性研究要解决的关键问题是,在近似推理逻辑支撑下,解决基于相关关系的知识转换算法实现。

这是成功的随机性研究的启示,失败的模糊集合论研究的启示,更是无法取得实质性进展的当今模糊性研究的启示。

2 结语

集合中元素具有像电子一样的“不可分割性”不容挑战,所以破坏了“元素不可分割性”的模糊集合,是一种破坏性概念,是导致模糊集合论不成功的根本原因。须研究的模糊性,不是“元素部分

属于模糊集合”呈现的虚拟模糊性,而是因信息不完备,不完整,目标值的“真值”人们无法知道只能确定真值近似产生的不确定性。模糊性研究要解决的基本问题是通过建立一种支撑逻辑,解决“计算不可重复”、“计算结果不唯一”和“不是相对最优近似”问题;实质性问题,是解决相关关系下知识转换的算法实现。

参考文献:

- [1] Zadeh L.A. Fuzzy Sets. Information and Control. 1965(8): 338-353.
- [2] 李德毅, 杜鹞著. 不确定性人工智能 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

(责任编辑 李新)

(上接第 21 页)

参考文献:

- [1] 刘建成, 顾永宁. 基于整船整桥模型的船桥碰撞数值仿真 [J]. 工程力学, 2003, 20(5): 155-162.
- [2] 余志祥, 许 浒, 吕 蕾. 落石冲击对山区桥梁墩柱破坏的影响 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2012, 44(6): 86-91.
- [3] BERTHET-RAMBAUD P, TIMSAH Y, DAUDEVILLE L, et al. Finite Element Modelling of Concrete Protection Structures Submitted to Rock Impacts; proceedings of the Proceedings of 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, F, 2003[C].

- [4] 崔堃鹏, 夏超逸, 刘炎海, 等. 高速铁路桥墩汽车撞击力的数值模拟与特性分析 [J]. 桥梁建设, 2013, 43(6): 57-63.
- [5] 李裕春, 等. ANSYS11.0/LS-DYNA 基础理论与工程实践 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [6] FUJIKAKE K, LI B. Impact response of reinforced concrete beam and its analytical valuation [J]. Journal of Structure, ASCE, 2009, 135(8): 938-950.
- [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 B02-02-2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [8] 张路青, 杨志法, 许 兵. 滚石与滚石灾害 [J]. 工程地质学报, 2004(3): 225-231.

(责任编辑 李新)

(上接第 93 页)

- 优化处理方法 [J]. 地理与地理信息科学, 1999, 15(1): 75-80
- [9] 刘祖典. 影响黄土湿陷系数因素的分析 [J]. 工程勘察, 1994(5): 6-11.
- [10] 高凌霄, 赵天雁. 黄土湿陷系数与物性指标间的定量关系 [J]. 大连民族大学学报, 2004, 6(5): 63-65.
- [11] 李 萍, 李同录. 黄土物理性质与湿陷性的关系及其工程意义 [J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 506-512.
- [12] 谢婉丽, 王家鼎, 张新军, 等. 模糊信息优化方法在黄土湿陷性评价中的应用 [J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2005, 35(1): 95-99.

- [13] 李瑞娥, 谷天峰, 王娟娟, 等. 基于模糊信息优化技术的黄土湿陷性评价 [J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(2): 213-218.
- [14] 韩晓萌, 王家鼎, 王 煜, 等. 高速铁路地基黄土湿陷性评价中的 ANFIS 方法 [J]. 地理科学, 2008, 28(6): 833-837.
- [15] 中华人民共和国水电部. 土工试验方法标准 [M]. 北京: 中华计划出版社, 1989.
- [16] 罗奇斌, 王家鼎, 康东卫, 等. 湿陷性黄土试坑浸水试验中土压力的变化情况 [J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(4): 88-92.

(责任编辑 李新)