

文章编号:1671-8879(2015)04-0048-06

基床表层级配碎石注浆改良模型试验

聂志红¹, 刘 源¹, 罗承平², 王 翔¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中铁一局集团有限公司, 陕西 西安 710054)

摘 要:为了解决寒冷地区铁路客运专线路基的冻胀问题,利用注浆泵与真空泵联合对路基层级配碎石大比例模型进行注浆试验,获取注浆参数,通过电镜扫描、渗透试验、冻融循环试验验证注浆改良级配碎石冻胀性的效果。研究表明:试验浆液的粘度为 $2.50 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ 时,其可灌性满足注浆要求;注浆后的级配碎石与浆液粘结情况良好,其渗透系数由 $6.8 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 降为 $1.4 \times 10^{-10} \text{ cm/s}$,级配碎石改良后的渗透性显著降低;在 30 次冻融循环作用下,注浆改良后的级配碎石最大冻胀率为 0.25% ,其冻胀性满足铁路客运专线路基不均匀变形要求;模型试验验证了注浆能够有效改善级配碎石的渗透性与冻胀率,为基床表层级配碎石的现场注浆试验提供了参考依据。

关键词:道路工程;级配碎石;模型试验;注浆改良;渗透性;冻胀

中图分类号:U416.1;TU433

文献标志码:A

Model test on grouting improvement of graded gravel in surface layer of subgrade

NIE Zhi-hong¹, LIU Yuan¹, LUO Cheng-ping², WANG Xiang¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China;

2. China Railway First Group Co. Ltd, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In order to solve the frost heave problem in subgrade of passenger dedicated line in cold region, a graded gravel model was grouted by using grouting pump and vacuum pump to obtain the grouting parameters. Electron microscope scanning, penetration test and freeze-thaw cycle test were carried out to verify the frost heave effect of graded gravel after grouting improvement. The results show that when the viscosity of slurry reaches to $2.50 \text{ MPa} \cdot \text{s}$, the groutability of slurry can meet the requirement of grouting test. The graded gravel after grouting is well bounding with the slurry and the permeability of the samples decreases from $6.8 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ to $1.4 \times 10^{-10} \text{ cm/s}$. The permeability of graded gravel reduces significantly after grouting improvement. The maximum frost heave ratio is 0.25% , which meet the requirement of the uneven deformation in subgrade of passenger dedicated line. The model test demonstrates that the permeability and frost heave ratio can be effectively improved by grouting, which provides a reference for field grouting test of graded gravel in surface layer of subgrade. 3 tabs, 7 figs, 10 refs.

Key words: road engineering; graded gravel; model test; improvement by grouting; permeability

收稿日期:2015-03-20

基金项目:国家自然科学基金高铁联合基金项目(U1134207)

作者简介:聂志红(1973-),男,湖南娄底人,副教授,工学博士,E-mail:niezhieh@126.com。

ty; frost heave

0 引言

在中国北方地区,气候环境条件恶劣,冬季温度低,极端温度低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该地区的铁路客运专线路基在冬季会发生不同情况的冻胀问题,路基产生的冻胀会使线路产生不均匀变形,严重影响线路的安全运营^[1-2]。根据现场观测与调查分析,路基冻胀量的 90%产生于基床表层范围内。级配碎石作为路基基床表层的主要组成材料,其产生的冻胀量是路基冻胀问题发生的主要原因。其中,地表水下渗至路基基床表层引起水分在底部汇集是路基冻胀问题产生的主要因素之一^[3]。因此,研究通过注浆改良来改善级配碎石的渗透性及冻胀性具有十分重要的意义。

目前,国内外主要研究对土体掺入添加物来改善土体的工程性质,而通过注浆改良的方法来改善土体的冻胀性及渗透性的研究很少。Aitcin 等对混凝土进行硅粉注浆改良,得出硅粉能够提高混凝土的稳定性^[4];Kalkan 认为含硅粉的稳定剂能够降低冻融循环作用对细粒土试样的无侧限抗压强度和渗透性的影响^[5];Yarbasi 等认为使用废料作为添加剂掺入到集料中能提高其在冻融循环作用下的耐久性^[6];Liu 等研究水泥和石灰改良后的粘土在冻融循环作用下的动力学性能,认为改良后的粘土较改良前表现出更好的性能^[7]。为此,本文研究级配碎石模型注浆改良方法,确定模型注浆改良试验的施工方案,并分析级配碎石注浆改良后的渗透性及冻胀性,进而为基床表层级配碎石的现场注浆试验提供参考。

1 试验材料及指标

1.1 级配碎石

试验选取的级配碎石为新鲜的、微风化、棱角尖锐的硬质砂岩。级配碎石的物理指标见表 1,其级配曲线见图 1。

表 1 级配碎石的物理指标

Tab. 1 Physical indexes of graded gravel

最大粒径/ mm	最大干密度 $\rho_{dmax}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	干密度 $\rho_d/$ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	含水率 $w_0/\%$
45	2.24	2.14	2.7~3.2

1.2 注浆材料

浆液的粘度、凝固时间及固化抗压强度是确定其工艺参数的主要因素。浆液的粘度越大,扩散半

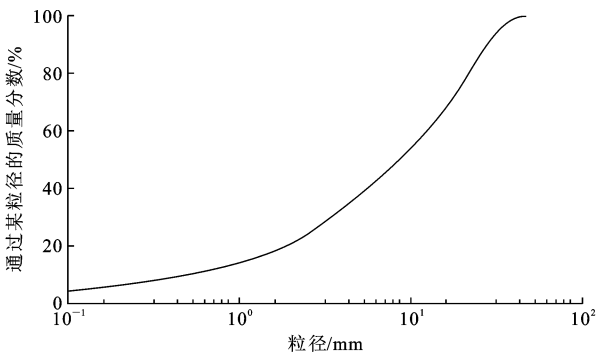


图 1 级配碎石的级配曲线

Fig. 1 Grain size distribution curve of graded gravel

径越小,需要的注浆压力越大,浆液的凝固时间越长,扩散半径越小,需要的注浆压力越大。在满足控制注浆过程中模型顶部变形的条件下,对浆液进行了大量的室内配比试验,确定试验浆液的粘度为 $2.50\text{ MPa}\cdot\text{s}$,浆液的成分及配合比为,A 液:胶粉:丙酮:B3:B5:C 粉:305=100:1.5:5:1:1:2:0.5。注浆材料的技术指标见表 2。

表 2 注浆材料的技术指标

Tab. 2 Technical indexes of grouting material

密度 $\rho/$ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	粘度/ $(\text{MPa}\cdot\text{s})$	凝固时间/h	固化抗压 强度 /MPa
1.12	2.50	3~5	0.25

2 试验模型及模型填筑

试验模型尺寸:长 350 cm,宽 60 cm,高 70 cm;C30 混凝土作为基础;模型底部铺设厚度 5 mm 钢板;模型周围采用厚度为 5 mm 钢板,槽钢作为骨架。试验模型的立体图见下页图 2。

根据试验所采用的级配,在 17%孔隙率下计算所需级配碎石的质量,分级称重石料后人工拌和并入模。分层填筑时,采用内燃打夯机分 5 层均匀压实。当所有级配碎石填筑完毕后,对模型顶部进行混凝土密封处理,混凝土层的厚度为 10 cm。

3 模型注浆试验

3.1 模型注浆的主要参数

(1)注浆材料

通过级配碎石注浆改良模型试验,确定注浆材料的可操作性,即浆液是否满足试验的可灌性要求。同时,在相同的级配碎石条件下,确定注浆压力与浆液扩散半径的关系。

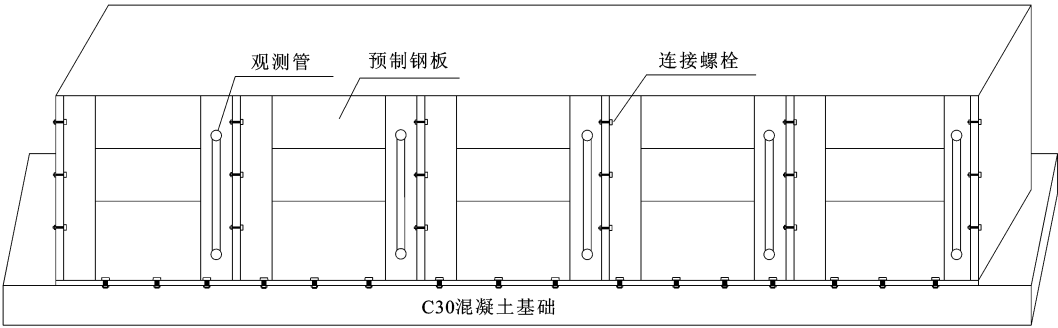


图2 试验模型的组装立体图

Fig.2 Perspective view of test model

(2)级配碎石与浆液的适应性

对注浆改良后的级配碎石进行模型取芯,对取芯的试样进行扫描,分析级配碎石与浆液之间的粘结情况,即浆液与级配碎石之间的适应性。

(3)施工参数

在注浆材料符合要求后,对级配碎石进行注浆改良,确定合理的施工工艺参数。在保证模型顶部变形及模型注浆效果的前提下,主要试验参数为:注浆孔位布置、注浆压力、注浆方式及注浆时间等。

3.2 模型注浆的效果观测方法

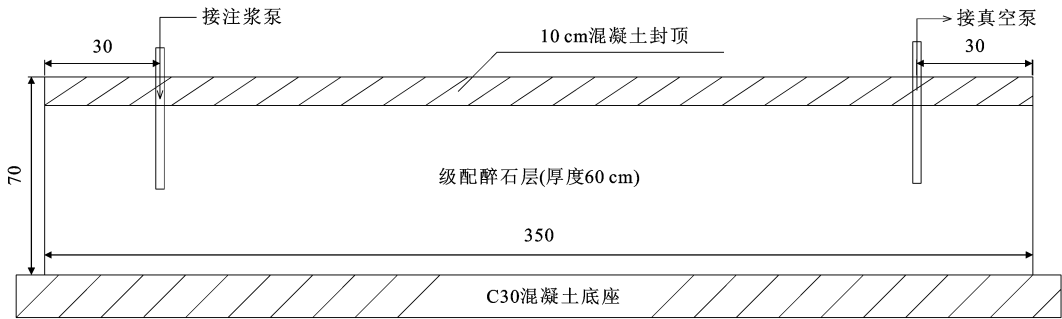
在进行模型注浆试验时,为了能够反映模型的注浆效果,须采用一定的方法进行检测。注浆效果

检测方法:①注浆完成后,通过模型侧边的观测管观测真空管内的浆液上升高度,确定模型内注浆高度;②模型拆模后,观测浆液与粒料的粘结情况,即拆模后浆液是否与粒料凝结成固态整体。

3.3 模型注浆改良及结果分析

3.3.1 模型注浆试验

确定模型试验方案为注浆泵与真空泵相结合方法(即采用一侧注浆一侧抽真空的试验方案,见图3)。根据室内试验结果,在最大注浆压力为0.08 MPa下,浆液的渗透半径为30 cm。因此,布置注浆管与抽真空管均距边缘30 cm,以保证浆液能渗透到整个模型中。



单位: cm

图3 试验模型的正面布置

Fig.3 Front layout of test model

模型填装完成后,进行注浆模型试验。从左侧注浆管内进行压力注浆,在保证模型中混凝土板的变形前提下,最大注浆压力为0.08 MPa。在注浆管中浆液基本不流动后,从右侧抽真空管进行抽真空,以保证模型内形成一定的负压条件,使左侧注浆管中的浆液能够进入模型。试验时,记录模型中每次的注浆量及总注浆量,为保证浆液能充分在模型内渗透,而不是一直沿着最佳路径迁移,控制最大注浆压力为0.08 MPa。同时,在模具顶部安装百分表,

确定试验过程中顶部混凝土板的变形。

3.3.2 模型注浆试验结果

采用注浆泵与真空泵相结合的方法注浆,注浆结果如下所述。

(1)注浆过程:在注浆改良时,最大压力注浆为0.08 MPa,最大真空负压为一0.03 MPa。试验注入的总浆液量约为200 kg,注浆时间为2~3 h。

(2)监测:顶部位移计没有明显变化,其读数变化较小,约0.3 mm,满足试验变形要求。真空泵抽

出少量的原浆液,所有观测管中的浆液均已满格。观测管的情况见图 4。



图 4 注浆模型中的观测管

Fig. 4 Case of observation pipes of grouting model

由图 4 可知,模型注浆后,各观测管中均充满浆液,且观测管中浆液凝固后均能很好地填充在观测管中,模型试验的饱满性良好。

为检验模型内注浆效果,在浆液凝固后进行拆模观测,拆模后级配碎石的情况见图 5。由图 5 可知,在模型内级配碎石能与浆液形成密实的固态整体,浆液能较好地填充到级配碎石内,模型注浆情况良好。



图 5 模型注浆改良后的拆模

Fig. 5 Dismantle of grouting model after improvement

3.4 模型注浆的可行性分析

级配碎石模型注浆改良后,分析浆液与粒料之间的适应性、浆液的可灌注性、注浆改良后试样的渗透性与冻胀性,确定模型注浆改良的可行性。

3.4.1 改良后的级配碎石

将模型中注浆改良后的级配碎石进行取芯扫描,试验结果见图 6。由图 6 分析可知,级配碎石注浆改良后,粒料与浆液之间孔隙微弱,且浆液与粒料之间粘结情况良好,即浆液与粒料能很好地形成固态整体,满足了级配碎石与粒料之间的适应性。

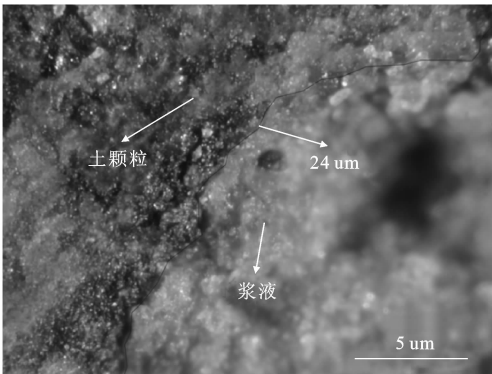


图 6 模型取芯后试样的扫描

Fig. 6 Scanning image of samples after model of coring

3.4.2 浆液的可灌性

浆液的粘度决定着浆液的流动性,也就决定着浆液的可灌性。试验所采用浆液的粘度为 2.50 MPa·s,浆液的粘度较小,有利于浆液在粒料孔隙间充分渗透;注浆管与抽真空管均距边缘 30 cm,满足浆液扩散半径 30 cm 范围内,有利于浆液充分填充在整个模型中。同时,采用注浆泵与抽真空泵相结合的注浆方法,在真空泵形成的负压条件下,浆液的粘度满足试验可灌性要求。

3.4.3 注浆改良后的渗透性

分别将改良前后的试样按照《铁路工程土工试验规程》(TB 10102—2010)^[8] 进行常水头渗透试验,级配碎石改良前后的渗透系数见表 3。

表 3 级配碎石改良前后的渗透性

Tab. 3 Permeability of graded gravel before and after improvement

试样名称	17%孔隙率的级配碎石	注浆改良后级配碎石
渗透系数/(cm·s ⁻¹)	6.8×10 ⁻³	1.4×10 ⁻¹⁰

由表 3 可知,注浆改良后,级配碎石的渗透系数由 6.8×10⁻¹⁰ cm/s 下降到 1.4×10⁻¹⁰ cm/s,级配碎石注浆改良后的渗透性显著降低,注浆改良能改善级配碎石渗透性。由于级配碎石注浆改良后孔隙微弱,浆液在其表面形成致密层,故能够有效防止水分下渗。

3.4.4 注浆改良后的冻胀性

将模型中注浆改良后的级配碎石制作成 Φ100 mm×100 mm 的试样,按照文献[8]进行试样的冻胀试验。在冻融循环作用下,分别在试样经过一定的冷冻次数后计算试样的冻胀率,试验结果见下页图 7。试样的冻胀率计算公式为

$$\eta=\frac{\Delta h}{H}\times 100\%$$

式中:η 为试样的冻胀率;Δh 为试样的高度变化

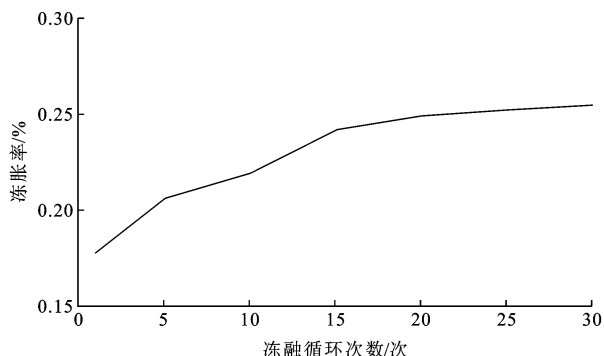


图7 冻融循环作用下试样的冻胀性

Fig. 7 Frost heave of samples in freezing-thaw cycles

(mm); H 为试样的原始高度(100 mm)。

由图7可知,在冻融循环作用下,随着冻融循环次数的增加,试样的冻胀率逐渐增大。其中,试样在经过5次冻融循环作用后,其冻胀率变化最大,由0.170%增加到0.215%;在经过20次冻融循环作用后,试样的冻胀率基本趋于稳定。经过30次冻融循环作用后,其冻胀率为0.25%。基床表层级配碎石厚度为60 cm,经注浆改良后级配碎石的最大冻胀量为1.5 mm,其冻胀性满足客运专线路基不均匀变形要求。

密实的土体在冻融循环作用下,其内部孔隙率会随着冻融循环次数的增加而增大^[9-10]。由于级配碎石为密实土体,故在冻融循环作用下,其体积和冻胀率会逐渐增大。级配碎石注浆改良后,浆液填充在孔隙内,级配碎石内部原存的水分被置换出来,并以自由水的形式从真空管流出。注浆改良后,级配碎石内部的水分会显著降低,同时浆液填充在级配碎石的孔隙中,其内部孔隙率也会发生显著降低。细粒料被浆液包裹住,显著降低了细粒料与水分之间的作用。经过一定的冻融循环次数后,级配碎石的内部结构趋于稳定,其冻胀率也基本保持不变。在冻融循环作用下,级配碎石注浆后的冻胀率满足铁路客运专线路基不均匀变形要求,而且其冻胀稳定性较好。

综上所述,在现有浆液条件下,级配碎石与浆液之间能很好地粘结成固态整体,浆液与级配碎石的适应性满足试验要求;同时,采用注浆泵与真空泵联合注浆方案,浆液能较好地填充在级配碎石孔隙中,注浆时间为2~3 h,浆液的可灌注性满足要求;将模型取芯后的试样进行渗透试验和冻胀试验,试样的渗透性会显著降低,在冻融循环作用下试样的冻胀性满足路基冻胀要求。因此,该级配碎石模型注浆的试验方案是可行的。

4 结 语

(1)模型试验方案为注浆泵与真空泵联合的注浆方法,浆液的可灌注性满足试验注浆要求;对级配碎石进行注浆改良后,浆液与粒料粘结情况良好,并能形成密实的固态整体。

(2)对注浆改良后的试样进行渗透试验,注浆改良后试样的渗透性会显著降低。注浆改良能够改善级配碎石的渗透性,级配碎石表面形成的致密层能有效地防止地表水下渗。

(3)级配碎石注浆改良后,其冻胀率随着冻融循环次数的增加而增大。其中,试样在经过5次冻融循环作用后,其冻胀率变化最大;在经过20次冻融循环作用后,试样的冻胀率趋于稳定,变化较小。注浆改良后试样的最大冻胀率为0.25%,其冻胀性满足客运专线路基的不均匀变形要求。

(4)试验模型的密封性较好,模型内的级配碎石填筑存在局限性,而实际路基的情况要比模型复杂。因此,注浆改良模型试验只能在一定程度上模拟级配碎石注浆情况。在参考模型注浆改良的基础上,须根据路基的实际情况探索适宜基床表层级配碎石的注浆改良方法。

参考文献:

References:

- [1] Seppala M. Geomorphological aspects of road construction in a cold environment, Finland[J]. Geomorphology, 1999, 31(1-4): 65-91.
- [2] 霍凯成, 黄继业, 罗国荣. 路基冻胀机制及冻害防治整治措施探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1099-1103.
HUO Kai-cheng, HUANG Ji-ye, LUO Guo-rong. On mechanism of freeze-heave and its treatment on roadbeds[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 1099-1103. (in Chinese).
- [3] 张先军. 哈大高速铁路路基冻胀规律及影响因素分析[J]. 铁道标准设计, 2013(7): 8-12.
ZHANG Xian-jun. Analysis of frost heave laws in subgrade on Harbin-Dalian high-speed railway and its influence factors[J]. Railway Standard Design, 2013(7): 8-12. (in Chinese)
- [4] Aitcin P C, Ballivy G, Parizeau R. The use of condensed silica fume in grouting[J]. Innovative Cement Grouting, 1984, 83(1): 1-18.
- [5] Kalkan E. Effects of silica fume on the geotechnical properties of fine-grained soils exposed to freeze and

- thaw[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 58(3): 130-135.
- [6] Yarbasi N, Kalkan E, Akbulut S. Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze-thaw of granular soils with waste additives[J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 48(1): 44-54.
- [7] Liu J K, Wang T L, Tian Y H. Experimental study of the dynamic properties of cement and lime-modified clay soils subjected to freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 61(1): 29-33.
- [8] TB 10102—2010, 铁路工程土工试验规程[S]. TB 10102—2010, Code for soil test of railway engineering[S]. (in Chinese).
- [9] Viklander P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze-thaw[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 35(3): 471-477.
- [10] 齐吉琳, 程国栋, Vermeer P A. 冻融作用对土工程性质影响的研究现状[J]. 地球科学进展, 2005, 20(8): 887-894.
- QI Ji-lin, CHENG Guo-dong, Vermeer P A. State-of-the-art of influence of freeze-thaw on engineering properties of soils[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(8): 887-894. (in Chinese).
-
- (上接第19页)
- [8] 高传东. 山区灾害多发区段道路选线的理论与方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
- GAO Chuan-dong. Theory and method of route alignment design in mountain hazardous areas[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003. (in Chinese)
- [9] 宋金利. 基于GIS公路选线方案设计和优选的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- SONG Jin-li. The study of the design and optimization of highway schemes based on GIS[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [10] 叶亚丽. 公路智能选线与决策支持系统研究及开发[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- YE Ya-li. Research and development of highway alignment intelligent selection and decision support system[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [11] 贾兴利. 高烈度地震峡谷区公路选线理论与方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- JIA Xing-li. Study on theory and method of highway alignment selection in high seismic intensity canyon region[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [12] 王浣尘. 可能度和满意度在多目标决策中的应用[J]. 信息与控制, 1981(5): 8-13.
- WANG Huan-chen. Application of possibility and satisfiability concepts in multi-objective decision-making[J]. Information and Control, 1981(5): 8-13. (in Chinese)
- [13] 蒋尚华, 徐南荣. 基于目标达成度和目标综合度的交互式多目标决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 1999(1): 9-14.
- JIANG Shang-hua, XU Nan-rong. Interactive multi-objective decision-making method based on objective achievement scale and objective comprehensive scale[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 1999(1): 9-14. (in Chinese)
- [14] 徐泽水. 基于方案达成度和综合度的交互式多属性决策法[J]. 控制与决策, 2002, 17(4): 435-438.
- XU Ze-shui. Interactive method based on alternative achievement scale and alternative comprehensive scale for multi-attribute decision making problems[J]. Control and Decision, 2002, 17(4): 435-438. (in Chinese)
- [15] 刘树林, 邱菀华. 多属性决策基础理论研究[J]. 系统工程理论与实践, 1998(1): 38-43.
- LIU Shu-lin, QIU Wan-hua. Studies on the basic theories for MADM[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 1998(1): 38-43. (in Chinese)
- [16] 钱保国, 叶志明, 陈伶俐, 等. 生命线工程网络系统抗震可靠性分析方法综述[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(1): 122-125.
- QIAN Bao-guo, YE Zhi-ming, CHEN Ling-li, et al. Summary of analysis method for seismic reliability of lifeline network system[J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(1): 122-125. (in Chinese)
- [17] 冯清海, 袁万城. 基于IDA-MC的桥梁地震风险概率评估方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(3): 60-65.
- FENG Qing-hai, YUAN Wan-cheng. Method and application of seismic risk probability analysis for large-long span bridge based on IDA-MC[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(3): 60-65. (in Chinese)