

超宽混凝土主梁斜拉桥收缩徐变效应分析

黄 新¹, 贾 焱¹, 李建慧¹, 王 涛²

(1. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037;
2. 南京市政设计研究院有限责任公司, 江苏 南京 210008)

摘要: 为了研究收缩徐变参数对超宽混凝土主梁斜拉桥的影响, 根据工程实际建立全桥空间梁格模型, 基于 AEMM-FEM 法和灰色关联度方法分析结构收缩徐变参数敏感性。结果表明: 收缩徐变参数变化时超宽混凝土主梁负弯矩区的截面应力与弯矩变化沿横向分布不均, 超宽主梁收缩徐变的效应显著。提高主梁混凝土加载龄期、抗压强度和环境相对湿度会引起跨中斜拉索应力松弛, 同时加重梁端附近斜拉索的索力负担。由灰色关联度序列可知, 主梁加载龄期是影响超宽主梁线形的最敏感因素。

关键词: 斜拉桥; 收缩徐变; 参数敏感性; 有限元法; 灰色关联度

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)02-0155-05

Analysis on the shrinkage and creep effects of super wide concrete girder cable-stayed bridge

HUANG Xin¹, JIA Yang¹, LI Jianhui¹, WANG Tao²

(1. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;
2. Nanjing Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210008, China)

Abstract: In order to study the influence of shrinkage and creep parameters on the super wide concrete girder cable-stayed bridge, a spatial grillage model of the whole bridge was established according to the engineering practice. Based on AEMM-FEM method and gray correlation degree method, the sensitivity of shrinkage and creep parameters of the bridge was analyzed. Results show that the spatial effect of shrinkage and creep of the super wide girder is significant when the parameters of shrinkage and creep change because the variation of the section stress and moment of the negative moment area of the girder is unevenly distributed along the lateral direction. Increasing the loading age, compressive strength of the girder concrete and environmental relative humidity will lead to the stress relaxation of the mid-span stay cables. Due to the increase of these parameters, the tensile load of the stay cables near the beam end is aggravated. According to the gray correlation sequence, the loading age of the girder is the most sensitive factor affecting the line shape of the super wide girder.

Key words: cable-stayed bridge; shrinkage and creep; sensitivity of parameters; finite element method; gray correlation degree

作为混凝土的固有时变特性, 收缩徐变能够在较长时间内引起混凝土变形。收缩徐变变形受到约束后会在混凝土构件内部产生附加应力^[1]。为了计算混凝土构件的收缩徐变效应, 学者们在试验的基础上提出了一系列收缩徐变预测模型, 其中 CEB-FIP1990 预测模型为我国公路桥梁设计规范所采纳^[2-3]。计算理论方面, 将按龄期调整的有效模量法(AEMM)结合有限单元步进法(FEM), 便于编制程序计算混凝土构件的收缩徐变效应^[4-5]。

斜拉桥属高次超静定结构, 收缩徐变作用下

斜拉桥结构的力学响应受到了国内外研究者的广泛关注。根据周履^[6]的介绍, 英国迪河斜拉桥的工程师通过修正预测模型预估收缩徐变变形量, 在主梁线形控制方面取得了良好的效果。陈太聪等^[7]基于等效增量荷载原理编制了混凝土主梁斜拉桥节段施工收缩徐变计算程序。苏成等^[8]基于响应面-蒙特卡罗法对一座独塔双索面斜拉桥进行了收缩徐变随机分析。而与普通宽度主梁斜拉桥相比, 超宽主梁斜拉桥混凝土用量大且一般均设置有多道横梁。超宽主梁在纵横向预应力和拉索力的共

同作用下内力分布状况复杂,而混凝土徐变与构件应力状态密切相关,因此有必要研究超宽混凝土主梁斜拉桥的收缩徐变效应.斜拉桥收缩徐变受材料组成、施工工艺和环境条件等因素耦合作用^[9],现有文献对超宽混凝土主梁斜拉桥的收缩徐变参数敏感性研究较少.本文依托实际工程,建立超宽混凝土主梁斜拉桥全桥梁格模型,基于 AEMM-FEM 法和灰色关联度方法对该桥进行收缩徐变参数敏感性分析.

1 工程概况

某独塔双索面斜拉桥跨度为 185 m(100 m+85 m),塔柱为椭圆型钢箱混凝土结构,为墩塔梁固结体系,全桥布置情况如图 1 所示.主梁和桥塔均采用 C50 混凝土,斜拉索与预应力钢束材料分别为钢丝和钢绞线.超宽主梁采用双边箱形式,边箱结构为预应力混凝土单箱双室,桥面宽为 37 m,主梁横断面如图 2 所示.

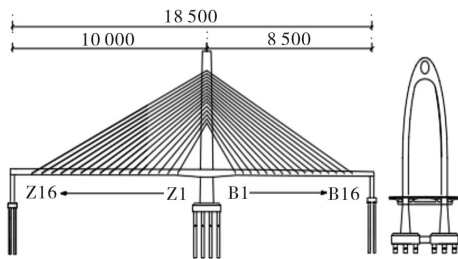


图 1 全桥布置图(单位: cm)
Fig. 1 Layout of the bridge (Unit: cm)

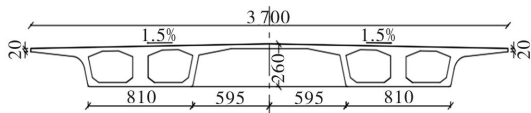


图 2 主梁横断面(单位: cm)
Fig. 2 Cross section of the girder (Unit: cm)

2 有限元建模

2.1 全桥空间梁格模型

利用 Midas/Civil 有限元软件建立全桥空间梁格模型,由于超宽主梁具有腹板距离大、翼缘板宽且箱壁薄的特点,为了准确反映结构的受力特性,采用剪力-柔性梁格法^[10]模拟超宽混凝土主梁,将主梁划分为 6 根纵梁.桥塔和斜拉索分别采用梁单元和只受拉桁架单元模拟,在模型中考虑的荷载作用主要包括自重、拉索力、预应力、二期恒载和城-A 级汽车荷载.根据设计资料划分施工阶段:主塔和边跨主梁施工时间共计 150 d;主

跨主梁各节段悬臂浇筑施工时间为 15 d;在主跨主梁各节段的施工过程中,对称张拉两侧斜拉索的时长为 2 d;施工桥面铺装和附属设施、拆除支架的持续时间共计 35 d.全桥有限元模型见图 3,在表 1 中列出了模型的边界条件,主要构件的材料参数见表 2.

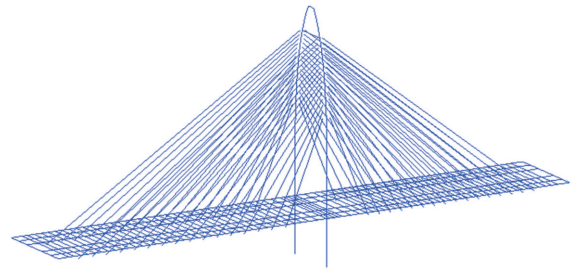


图 3 全桥空间梁格模型
Fig. 3 Spatial grillage model of the bridge

表 1 模型边界条件

Tab. 1 Model boundary condition

位置	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
盆式支座 1	0	1	1	1	0	1
盆式支座 2	0	0	1	1	0	1
桥塔底部	1	1	1	1	1	1

表 2 主要材料参数

Tab. 2 Main material parameters

构件	材料	容量/(kN·m ⁻³)	弹模/MPa
主塔	C50	25	3.45×10 ⁴
主梁	C50	25	3.45×10 ⁴
斜拉索	钢丝	78.5	1.95×10 ⁵
预应力束	钢绞线	78.5	1.95×10 ⁵

2.2 模型验证

为了验证有限元模型的准确性,进行全桥动力特性试验.沿纵桥向选取主梁振动测试截面,J1~J3 截面位置为主跨主梁三分点,J4 截面位于边跨主梁跨中,图 4 为现场试验情况.在环境激振作用下得到前 4 阶结构固有振动频率实测值和模型理论值,分析结果如表 3 所示.



(a) DH5922 型数据采集仪 (b) 941B 型低频拾振器

图 4 现场试验图

Fig. 4 Photos of field test

表3 自振频率对比表

Tab.3 Comparison of natural frequency

阶数	实测值/Hz				理论值 /Hz	最大误差/%
	J1	J2	J3	J4		
1	1.89	1.95	1.91	1.91	1.92	1.56
2	3.52	3.73	3.77	3.86	3.69	4.61
3	3.72	4.21	4.14	4.38	4.12	9.71
4	5.01	5.61	5.63	5.81	5.35	8.59

由表3可知,在相应振型阶次下主梁固有振动频率实测值与理论值较为接近,最大误差值均在10%以内,说明空间梁格模型结构刚度与实际情况基本吻合,此模型可以作为收缩徐变参数分析的基准模型。

3 计算理论

3.1 AEMM-FEM 收缩徐变分析方法

试验结果表明,当混凝土应力低于其极限强度的40%~50%时,终极徐变变形与初始弹性变形近似呈线性关系,分批加载应力后产生的应变可以叠加^[11]。Bazant教授据此推出混凝土收缩徐变总应变增量表达式:

$$\Delta \varepsilon_c(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)} \varphi(t, t_0) + \frac{\Delta \sigma_c(t, t_0)}{E_c(t, t_0)} + \varepsilon_{cs}(t, t_0) \quad (1)$$

式中, $E_c(t, t_0)$ 为按龄期调整后的混凝土弹性模量; $\varphi(t, t_0)$ 为徐变系数; $\varepsilon_{cs}(t, t_0)$ 为收缩应变。

将施工过程细化为若干个计算时段,则在单个时段内收缩徐变产生的应力增量与应变增量为线性关系,可以利用有限单元法和逐步递推法迭代计算混凝土收缩徐变引起的内力和位移。

3.2 灰色关联度分析方法

灰色关联度分析方法通过计算关联度序列,得到元素对于系统的影响敏感性差异^[12],步骤如下:

(1)原始数据矩阵的无量纲化处理:选择 m 个敏感性参数组成自变量比较矩阵,每种参数包括 n 个取值,相应的系统影响值组成因变量参考矩阵。以自变量矩阵元素为例,对原始数据矩阵元素作均值无量纲化处理。

$$x'_{ik} = \frac{nx_{ik}}{S_i} \quad (i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

(2)确定灰色关联差异信息矩阵:对自变量矩阵与因变量矩阵各元素逐一进行差值绝对化计算建立差异信息矩阵 Δ ,提取 Δ 中的最大值 M 与最

小值 m , 计算关联系数。

$$\Delta_i(k) = |x'_i(k) - y'_i(k)| \quad (3)$$

$$\xi_i(k) = \frac{m + \delta M}{\Delta_i(k) + \delta M} \quad (4)$$

为了强化关联系数之间的差异性,分辨系数 δ 取 0.5。

(3)计算灰色关联度序列:对同一自变量的关联系数取平均值作为该自变量与系统因变量之间的关联度。

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (5)$$

将关联度按数值大小进行排序,关联度越大说明该因素对系统影响的敏感性越大。排序结果与采取的数据处理方法无关,分析结果具有可靠性。

4 收缩徐变效应分析

4.1 混凝土收缩徐变参数设置

采用 CEB-FIP1990 预测模型反映混凝土材料的收缩徐变规律,选择主梁加载龄期 X_1 、混凝土收缩龄期 X_2 、环境相对湿度 X_3 、主梁混凝土强度 X_4 作为参数分析的变量。将基准模型的成桥运营时间统一设置为 100 d,桥塔加载龄期为 7 d,基准模型的 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别取 10 d、3 d、70% 和 50 MPa。

4.2 超宽主梁负弯矩区影响分析

提高混凝土收缩徐变参数值,超宽主梁最大负弯矩截面上、下缘压应力变化如图5所示,超宽主梁最大负弯矩变化分别如图6所示,负值代表截面压应力或负弯矩减小。

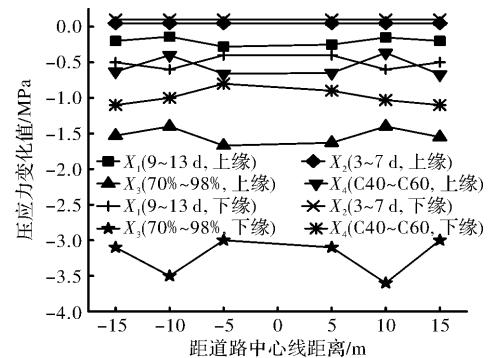


图5 压应力变化

Fig.5 Change of compressive stress

由图5和图6可知,在超宽主梁最大负弯矩位置中,截面上、下缘压应力和负弯矩均随着主梁加载龄期、抗压强度和环境相对湿度的增加而减少。其中,环境相对湿度升高引起的下缘压应力和负弯矩变化量最大,减少率分别达14.57%和

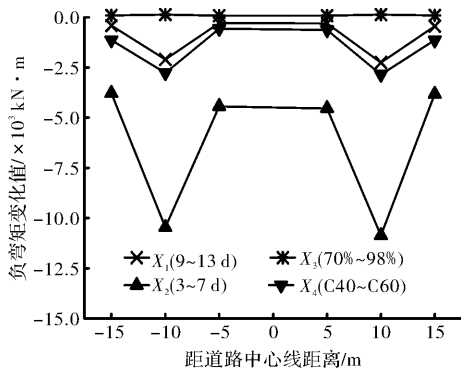


图 6 最大负弯矩变化

Fig. 6 Change of maximum negative moment

8.99%，截面上缘压应力变化量小于下缘，这是由于负弯矩区主梁顶板厚度小于底板，而顶板配筋率大于底板，在钢筋的抑制作用下，收缩徐变对主梁截面上缘应力的影响相对较小。上、下缘应力和弯矩变化值在横截面上分布不均匀，整体呈波浪形曲线，可知超宽主梁收缩徐变的空间效应显著。由于斜拉索锚固在主梁底板，斜拉索预埋管处于中腹板范围内，索力荷载对中腹板应力状态的影响较大，进而影响中腹板的徐变效果。同时，超宽主梁中腹板厚度大于斜腹板，收缩徐变对中腹板的影响更大。因此，超宽主梁中腹板对收缩徐变参数更为敏感。

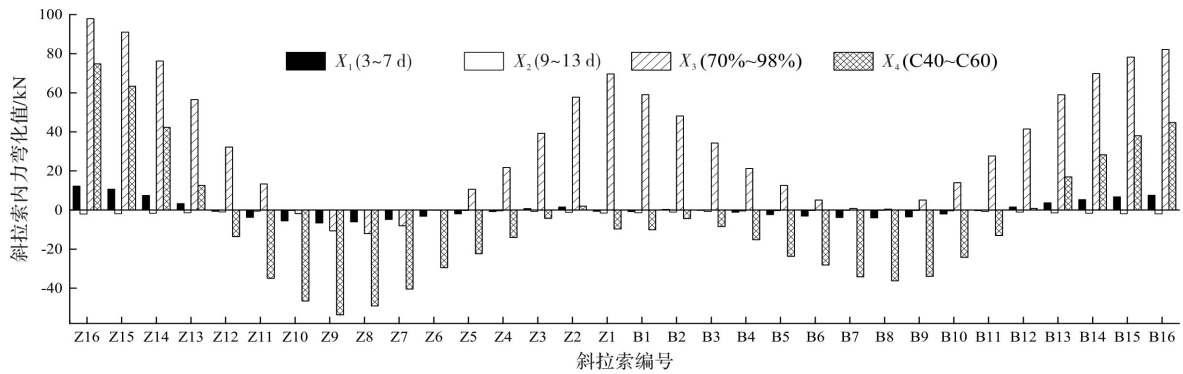


图 7 斜拉索内力变化

Fig. 7 Change of internal force of stay cables

表 4 收缩徐变参数变化对结构线形的影响

Tab. 4 Influence of the change of shrinkage and creep parameters on structural line shape

收缩徐变参数 X				主梁挠度最大值 Y ¹ /mm				塔顶纵偏值 Y ² /10 ⁻² mm			
X ₁ /d	X ₂ /d	X ₃ /%	X ₄ /MPa	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄
9	3	70	40	-68.15	-67.65	-67.65	-72.92	-366.48	-368.64	-368.64	-334.34
10	4	77	45	-67.65	-67.70	-64.41	-70.09	-368.64	-368.78	-365.80	-352.44
11	5	84	50	-67.21	-67.74	-61.01	-67.65	-370.52	-368.93	-362.20	-368.64
12	6	91	55	-66.81	-67.80	-57.76	-65.52	-372.15	-369.10	-357.91	-383.33
13	7	98	60	-66.45	-67.86	-56.36	-63.84	-373.62	-369.29	-353.53	-391.22

注：负值代表坐标轴负方向

由表 4 的数据可知，环境相对湿度、主梁加载龄期增加，超宽主梁挠度均呈减小趋势。这是由于

4.3 索力影响分析

超宽混凝土主梁斜拉桥斜拉索具有数量多、空间分布广、索力均衡性要求高的特点，索力分布状态影响结构整体受力性能。篇幅所限，仅列出收缩徐变各参数影响下单侧索力的变化情况，数据如图 7 所示，负值代表索力减小。

从图 7 可以看出，提高主梁加载龄期、主梁抗压强度和湿度对索力的影响趋势一致：跨中区域斜拉索发生应力松弛现象，梁端附近斜拉索的索力负担加重。其中，主梁抗压强度变化引起的索力下降幅度最大，跨中区域索力松弛率达 1.44%。环境相对湿度从 70% 提高至 98%，Z16 号索的内力增长率达 4.42%。这是由于在混凝土收缩徐变的作用下，桥塔和主梁均会产生结构变形，拉索锚固点偏离初始几何位置，导致索力不均程度加剧。

4.4 收缩徐变参数敏感性分析

选择主梁最大挠度 Y₁、塔顶纵向偏移距离 Y₂ 作为结构变形程度的评价指标。分析时改变基准模型的某一参数，控制其他参数不变，基准模型的参数取值情况如前所述。不同收缩徐变参数条件下，超宽混凝土主梁斜拉桥结构线形的响应值见表 4。

混凝土构件在湿度较大的环境下材料吸附水蒸发量减少，使得混凝土的水泥水化反应更加充分，

收缩徐变效应得到减轻。加载前,混凝土在自重作用下发生初始收缩徐变变形,而收缩徐变变形总量趋于收敛,提高主梁加载龄期将会压缩构件使用期间的收缩徐变发展空间。加载龄期增加后,混凝土在使用阶段弹性模量的起点较高,在一定程度上限制了构件徐变变形能力。桥塔变形方面,仅环境相对湿度的升高会缓解塔顶纵向偏移程度。其中,主梁抗压强度变化引起的塔顶位移最大,抗压强度从C40提高至C60,塔顶偏移变化率达17.01%。

对表2中的数据进行初始列阵,按照灰色关联度方法进行数值计算。收缩徐变参数与超宽主梁挠度之间的关联度矩阵为

$$r^1 = [0.670 \quad 0.534 \quad 0.604 \quad 0.606]^T$$

收缩徐变参数与塔顶纵偏值之间的关联度矩阵为

$$r^2 = [0.693 \quad 0.513 \quad 0.676 \quad 0.751]^T$$

按数值大小对灰色关联度进行排序,结果为

$$r_1^1 > r_4^1 > r_3^1 > r_2^1, r_4^2 > r_1^2 > r_3^2 > r_2^2$$

由灰色关联度序列可知,主梁加载龄期是影响超宽主梁线形的最敏感因素,其次是主梁抗压强度、环境相对湿度、收缩龄期的影响。塔顶位移受主梁抗压强度的影响最为严重,主梁加载龄期、环境相对湿度和收缩龄期的影响依次递减。

5 结论

通过对超宽混凝土主梁斜拉桥进行收缩徐变参数敏感性分析,得出如下结论:

(1)主梁加载龄期、抗压强度和环境相对湿度变化时,超宽主梁负弯矩区截面应力与弯矩变化值沿横向分布不均,索力不均衡现象凸显。为保障结构的使用安全,设计时应应对收缩徐变相关材料参数合理取值,同时考虑环境湿度季节性变化对结构受力性能的影响。

(2)根据灰色关联度分析结果,主梁加载龄期是影响超宽主梁线形的最敏感因素。超宽主梁挠度随着主梁加载龄期的增大而减小,施工时应为主梁早期收缩徐变留足时间,以减轻收缩徐变的不利影响。

参考文献 References

- [1] 张望喜,谭泽腾,薛凯. 基于ABAQUS的钢筋混凝土收缩徐变分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(3):347-353.
ZHANG Wangxi, TAN Zeteng, XUE Kai. Analysis of shrinkage and creep of reinforced concrete based on ABAQUS[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition). 2015, 47(3):347-353.
- [2] PAN Z, LI B, LU Z. Reevaluation of CEB-FIP 90

- prediction models for creep and shrinkage with experimental database[J]. Construction & Building Materials, 2013, 38(2):1022-1030.
- [3] WENDNER R, HUBLER M H, ZDENEK P. Bazant. Statistical justification of model B4 for multi-decade concrete creep using laboratory and bridge databases and comparisons to other models[J]. Materials & Structures, 2015, 48(4):815-833.
- [4] 颜东煌,田仲初,李学文,等. 混凝土桥梁收缩徐变计算的有限元方法与应用[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2):55-58.
YAN Donghuang, TIAN Zhongchu, LI Xuewen, et al. Finite element method and application for the shrinkage and creep of concrete bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2):55-58.
- [5] Zvolanek, Lukas, Terzjiski I. Relaxation of structural concrete due to its shrinkage in terms of age-adjusted effective modulus method[J]. Key Engineering Materials, 2017, 737:471-476.
- [6] 周履. 英国迪河斜拉桥收缩徐变估算与施工中的几何控制[J]. 世界桥梁, 1999(4):1-4.
ZHOU Lyu. Estimation of shrinkage and creep of British dee river cable-stayed bridge and geometric control in the construction[J]. World Bridges, 1999(4):1-4.
- [7] 陈太聪,苏成,韩大建. 桥梁节段施工过程中混凝土收缩徐变效应仿真计算[J]. 中国公路学报, 2003, 16(4):55-58.
CHEN Taicong, SU Cheng, HAN Dajian. Simulation calculation of creep and shrinkage effects of concrete during segmental construction of bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(4):55-58.
- [8] 苏成,陈兆栓,徐郁峰,等. 预应力混凝土斜拉桥收缩徐变效应的概率分析[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2012, 40(7):8-14.
SU Cheng, CHEN Zhaoshuan, XU Yufeng, et al. Probability analysis of shrinkage and creep effect of prestressed concrete cable-stayed bridges[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2012, 40(7):8-14.
- [9] 汪剑,方志. 大跨预应力混凝土箱梁桥收缩徐变效应测试与分析[J]. 土木工程学报, 2008, 41(1):11-21.
WANG Jian, FANG Zhi. Analysis and field measurement of concrete box girder bridges for shrinkage and creep effects[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(1):11-21.
- [10] 戴公连,李德建. 桥梁结构空间分析设计方法与应用[M]. 北京:人民交通出版社, 2001:15-37.
DAI Gonglian, LI Dejian. Spatial analysis design method and application of bridge structure[M]. Beijing: China Communications Press, 2001:15-37.
- [11] 李建慧,李爱群,周广盼. 混凝土自锚式悬索桥收缩徐变效应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2016(6):906-912.
LI Jianhui, LI Aiqun, ZHOU Guangpan. Shrinkage and creep effects analysis of concrete self-anchored suspension bridge[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016(6):906-912.
- [12] 陈志波,简文彬. 边坡稳定性影响因素敏感性灰色关联分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(4):473-477.
CHEN Zhibo, JIAN Wenbin. Sensitivity analysis of slopes stability based on grey correlation analysis[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2006, 26(4):473-477.

(编辑 沈波)