

考虑温度荷载等效的某钢管混凝土桥徐变分析

王继祥

[上海市市政工程设计研究总院集团浙江市政设计院有限公司, 浙江 杭州 310000]

摘要: 既有钢管混凝土桥梁徐变公式计算复杂, 难以在工程中普及应用。首先推导了徐变系数的关系式, 将徐变效应等效为温度荷载以便于在 MIDAS Civil 软件中应用。基于某钢管混凝土桥梁计算了徐变等效温度, 进一步分别建立了两个模型(考虑钢管约束效应与不考虑钢管约束效应), 经计算分析可知, 关键施工阶段在两种工况下误差约在 50% 左右, 徐变计算所用的系数需要考虑钢管约束效应。

关键词: 徐变; 温度荷载; 徐变系数

中图分类号: U441

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)06-0124-05

Analysis on Creep of a Concrete-filled Steel Tube Bridge Considering Equivalent Temperature Load

WANG Jixiang

[Zhejiang Municipal Design Institute Co. Ltd., Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co. Ltd., Hangzhou 310000, China]

Abstract: The calculation of creep formula for an existing concrete-filled steel tube bridge is complex and difficult to popularize and apply in the projects. The relationship formula of creep coefficient is derived, and the creep effect is equivalent to temperature load for the application in MIDAS Civil software. Based on a concrete-filled steel tube bridge, the creep equivalent temperature is calculated. Furthermore, two models are established (considering the restraint effect of steel pipe and not considering the restraint effect of steel pipe). Through the calculation and analysis, it is found that the error in the key construction stage under the two working conditions is about 50%. The coefficient used in creep calculation should take into account the restraint effect of steel pipes.

Keywords: creep; temperature load; creep coefficient

0 引言

混凝土徐变一直是工程中难点问题^[1]。钢管混凝土桥梁因其良好的优点而被大量用在城市跨线桥梁中^[2-3]。受荷后, 核心混凝土的徐变需要考虑多轴应力的影响, 进而合理分析混凝土徐变特征^[4]。既有计算公式较复杂, 难以在工程中便捷实用, 文中结合《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG/T D65-06-2015)^[5]和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62-2018)^[6]做了阐述并推导了相关公式。既有桥梁分析软件 MIDAS Civil 不适用于分析钢管混凝土的徐变, 通过相关公式的推导, 将徐变效应换算成荷载, 进一步施加到 MIDAS Civil 中进行分析。图 1 所示为某跨线桥效果图。



图 1 某跨线桥效果图

1 钢管混凝土桥梁的徐变理论

1.1 考虑钢管约束效应值的徐变系数

规范基于徐变系数分析钢管混凝土桥梁的徐变, 徐变系数需要考虑钢管约束效应^[7-8]:

$$\phi'(t, t_0) = \frac{\phi(t, t_0)}{1 + \frac{E_s}{E_c} [1 + \rho \phi(t, t_0)] a_s} \quad (1)$$

式中: a_s 为钢管截面积 A_s 与混凝土截面积 A_c 的比值;

收稿日期: 2024-10-31

作者简介: 王继祥(1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

ρ 为 $\varphi(t, t_0)$ 的函数, $\rho = \frac{1}{1 - e^{-\phi(t, t_0)}} - \frac{1}{\phi(t, t_0)}$; E_s 、 E_c 为钢管和混凝土材料的弹性模量。各参数将用于后续分析。

考虑钢管约束效应后,徐变计算公式:

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \phi'(t, t_0) \cdot \varepsilon(t_0) = \frac{\phi(t, t_0)\sigma_0(t_0)}{E_c \left(1 + \frac{E_s}{E_c} [1 + \rho\phi(t, t_0)] a_s \right)} \quad (2)$$

式中: t 为钢管混凝土计算时的龄期; t_0 为加载时的龄期; $\sigma_0(t_0)$ 和 $\varepsilon(t_0)$ 分别为 t_0 状态下的应力和应变; $\varphi(t, t_0)$ 为由 t_0 到 t 的徐变系数。

徐变系数 $\varphi(t, t_0)$ 可根据如下公式进行计算:

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) \quad (3)$$

ϕ_0 为名义徐变系数,可根据如下式进行计算:

$$\phi_0 = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) = \left[1 + \frac{1 - RH/RH_0}{0.46(h/h_0)^{1/3}} \right] \left[\frac{5.3}{(f_{cm}/f_{cm0})^{0.5}} \right] \left[\frac{1}{0.1 + (t/t_1)^{0.2}} \right] \quad (4)$$

式中: f_{cm} 为混凝土抗压强度, MPa; h 为构件理论厚度, mm, 通过如下公式计算:

$$h = 2A/u \quad (5)$$

式中: A 为杆件横截面面积; u 为杆件周长; h_0 在本文中为 100 mm; f_{cm} 和 $f_{cu,k}$ 分别为混凝土 28 d 龄期时立方体平均抗压强度和具有 95% 保证率的立方体抗压强度标准值; f_{cm0} 为 10 MPa。

承受荷载后,随时间发展的系数 $\beta_c(t-t_0)$ 采用下面公式计算:

$$\beta_c(t - t_0) = \left[\frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right]^{0.3} \quad (6)$$

式中: β_H 采用下式计算:

$$\beta_H = 150 \left[1 + \left(1.2 \frac{RH}{RH_0} \right)^{18} \right] \frac{h}{h_0} + 250 \leq 1500 \quad (7)$$

将式(4)~式(7)代入式(3),就可获得徐变系数 $\varphi(t, t_0)$ 与 t 的关联关系。

1.2 温度荷载等效混凝土的徐变效应

软件无法直接考虑本文研究的徐变效应,拟引入温度荷载表征。根据线膨胀系数的概念可知^[9]:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L \times \Delta T} \quad (8)$$

由材料力学可知,假定两者产生的结构应变相同,即可得到:

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \varepsilon_T = \frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T \quad (9)$$

t 时刻徐变效应等效的温度差值,如下式所示:

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha \times E_c} \times \frac{\phi(t, t_0)\sigma_0(t_0)}{1 + \frac{E_s}{E_c} [1 + \rho\phi(t, t_0)] a_s} \quad (10)$$

2 钢管混凝土桥梁等效温差计算

2.1 钢管混凝土桥梁内混凝土徐变系数计算

某钢管混凝土桥梁所属地区年平均气温为 17.2 ℃, 年极端最高气温为 39.7 ℃, 年极端最低气温 -2.4 ℃^[10]。

拱肋的模拟方法采用既有研究成果^[11-13]。钢管混凝土截面有 4 种:主拱肋拱脚处下弦杆为 1 280 mm×36 mm 的钢管;拱脚下弦杆四分点过渡截面分别为 1 280 mm×32 mm 和 1 280 mm×28 mm 的钢管;四分点处跨中截面及上弦杆截面为 1 280 mm×24 mm 的钢管;横联钢管混凝土截面为 802 mm×14 mm 的钢管。各构件几何参数见表 1。

表 1 构件几何参数表

截面/ (mm×mm)	混凝土直径/ mm	混凝土面积/ mm ²	接触长度/ mm	理论厚度/ mm
1 280×36	1 208	1 146 103	3 795	604
1 280×32	1 216	1 161 334	3 820	608
1 280×28	1 224	1 176 665	3 845	612
1 280×24	1 232	1 192 096	3 870	616
802×14	774	470 513	2 432	387

各个截面的年平均相对湿度徐变系数 φ_{RH} , 见表 2。

表 2 年平均相对湿度徐变系数 φ_{RH} 表

截面	φ_{RH}
1 280×36	1.30
1 280×32	1.30
1 280×28	1.29
1 280×24	1.29
802×14	1.35

混凝土强度随时间发展的系数 $\beta(f_{cm})$ 按照下式计算:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{(f_{cm}/f_{cm0})^{0.5}} = \frac{5.3}{(56/10)^{0.5}} = 2.24 \quad (11)$$

$\beta(t_0)$ 是关于时间 t 的函数, 见图 2。

由图 2 可知, $\beta(t_0)$ 随着时间的增加而减小, 且初期减小的速度很快, 之后趋于平稳。依据图 2 当时时间确定后可获得 $\beta(t_0)$ 值。

文中以某钢管混凝土桥梁内混凝土浇筑完成、桥梁建成阶段和徐变 15 a 3 个过程进行分析。名义徐变系数在表 3 展示了出来。

系数 $\beta_c(t-t_0)$ 曲线图见图 3, 随着时间的推进, 系数 $\beta_c(t-t_0)$ 逐步增大, 在最初 500 d 内增大速度很快,

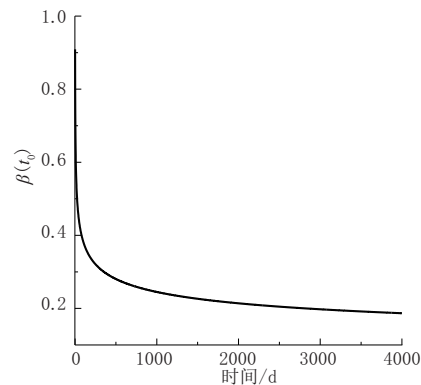


图2 $\beta(t_0)$ 关于时间 t 的函数折线图

表3 名义徐变系数计算表

施工阶段	截面/mm	φ_{RH}	$\beta(f_{cm})$	$\beta(t_0)$	φ_0
浇筑完成	1 280×36	1.30	2.24	0.43	1.25
	1 280×32	1.30	2.24	0.43	1.25
	1 280×28	1.29	2.24	0.43	1.24
	1 280×24	1.29	2.24	0.43	1.24
	802×14	1.35	2.24	0.43	1.30
桥梁建成	1 280×36	1.30	2.24	0.35	1.02
	1 280×32	1.30	2.24	0.35	1.02
	1 280×28	1.29	2.24	0.35	1.01
	1 280×24	1.29	2.24	0.35	1.01
	802×14	1.35	2.24	0.35	1.06
徐变 15 a	1 280×36	1.30	2.24	0.19	0.55
	1 280×32	1.30	2.24	0.19	0.55
	1 280×28	1.29	2.24	0.19	0.55
	1 280×24	1.29	2.24	0.19	0.55
	802×14	1.35	2.24	0.19	0.57

当 $\beta_e(t-t_0)$ 达到0.8后,系数 $\beta_e(t-t_0)$ 增速逐渐放缓。同时,截面802 mm×14 mm较其他截面的差距较大。

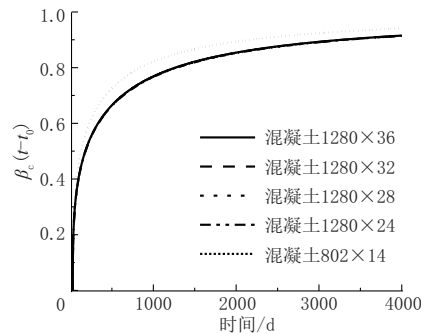


图3 加载后徐变随时间发展的系数 $\beta_e(t-t_0)$ 折线图

载浇筑完成、桥梁建成与徐变15 a的系数 $\beta_e(t-t_0)$ 及徐变系数 $\varphi(t, t_0)$ 计算结果见表4。

2.2 徐变等效温度

主拱肋外圈为Q345、核心为C60混凝土各个截面参数见表5,包括钢管和混凝土截面积等参数。

本文重点关注拱脚段、L/8段、2L/8段、3L/8段和合拢段,分别提取了以上5个关键截面(各截面包括上弦杆、下弦杆和横联)在浇筑完成、桥梁建成和徐

表4 $\beta_e(t-t_0)$ 及 $\varphi(t, t_0)$ 计算表

阶段	截面/mm×mm	β_H	$\beta_e(t-t_0)$	$\beta(t_0)$	$\varphi(t, t_0)$
浇筑完成	1 280×36	1 366.78	0.31	1.25	0.39
	1 280×32	1 365.23	0.31	1.25	0.39
	1 280×28	1 381.77	0.31	1.25	0.39
	1 280×24	1 388.91	0.31	1.24	0.38
	802×14	902.1	0.35	1.30	0.46
桥梁建成	1 280×36	1 366.78	0.47	1.03	0.48
	1 280×32	1 365.23	0.47	1.03	0.48
	1 280×28	1 381.77	0.47	1.03	0.48
	1 280×24	1 388.91	0.47	1.03	0.48
	802×14	902.1	0.53	1.07	0.57
徐变 15 a	1 280×36	1 366.78	0.91	0.55	0.50
	1 280×32	1 365.23	0.91	0.55	0.50
	1 280×28	1 381.77	0.91	0.55	0.50
	1 280×24	1 388.91	0.91	0.55	0.50
	802×14	902.1	0.94	0.57	0.54

表5 结构参数表

截面/mm×mm	$\alpha / ^\circ\text{C}^{-1}$	A_s/mm^2	A_c/mm^2	a_s
1 280×36	1.20×10^{-5}	140 693	1 146 103	1.12E-01
1 280×32	1.20×10^{-5}	125 463	1 161 334	9.75E-02
1 280×28	1.20×10^{-5}	110 132	1 176 665	1.19E-01
1 280×24	1.20×10^{-5}	94 700	1 192 096	7.02E-02
802×14	1.20×10^{-5}	34 658	470 513	8.96E-02

变15 a 3个施工阶段的应力水平。结果见表6。

表6 某钢管混凝土桥梁关键截面应力表 单位:MPa

截面	弦杆位置	浇筑完成	桥梁建成	徐变 15 a
拱脚段	上弦杆	-3.88	-8.07	-6.36
	下弦杆	-11.05	-16.00	-14.77
	横联	-6.41	-7.01	-6.84
L/8段	上弦杆	-6.46	-10.37	-8.81
	下弦杆	-6.76	-11.64	-10.12
	横联	-4.88	-8.02	-7.43
2L/8段	上弦杆	-8.12	-12.27	-10.90
	下弦杆	-5.25	-10.22	-8.90
	横联	-5.12	-7.62	-6.94
3L/8段	上弦杆	-7.22	-11.90	-10.52
	下弦杆	-6.74	-10.21	-8.99
	横联	-4.75	-9.37	-8.27
合拢段	上弦杆	-6.43	-10.88	-9.41
	下弦杆	-10.02	-13.56	-12.10
	横联	-7.69	-11.33	-10.80

进一步地,求得了徐变等效温度,本文仅列出徐变15 a等效温度的数据,结果见表7。

随着混凝土龄期的增大,混凝土徐变系数也将增大,进一步地导致徐变效应增强。由于徐变等效温度与徐变效应呈正相关,因此徐变等效温度也将变大。由表7可知,徐变15 a阶段,在合龙段下弦杆处,徐变等效温度为-10.60℃。将该数值施加到模

表 7 徐变 15 a 徐变等效温度计算表

截面	弦杆位置	$\varphi(t, t_0)$	$\varphi(t, t_0)$	ρ	$\sigma_0(t_0)$	温差/ $^{\circ}\text{C}$
拱脚段	上弦杆	-8.23	0.50	0.54	-8.23	-6.30
	下弦杆	-16.33	0.50	0.54	-16.33	-10.45
	横联	-7.15	0.54	0.54	-7.15	-5.34
L/8 段	上弦杆	-10.58	0.50	0.54	-10.58	-8.11
	下弦杆	-11.88	0.50	0.54	-11.88	-8.05
	横联	-8.18	0.54	0.54	-8.18	-6.11
2L/8 段	上弦杆	-12.52	0.50	0.54	-12.52	-9.59
	下弦杆	-10.43	0.50	0.54	-10.43	-6.47
	横联	-7.78	0.54	0.54	-7.78	-5.81
3L/8 段	上弦杆	-12.14	0.50	0.54	-12.14	-9.30
	下弦杆	-10.42	0.50	0.54	-10.42	-7.98
	横联	-9.56	0.54	0.54	-9.56	-7.14
合龙段	上弦杆	-11.1	0.50	0.54	-11.10	-8.50
	下弦杆	-13.84	0.50	0.54	-13.84	-10.60
	横联	-11.56	0.54	0.54	-11.56	-8.64

型中即可以计算由徐变效应带来的内力值。

3 徐变分析

是否考虑钢管约束效应,本文进行了对比分析,偏差值定义如下式所示:

$$\eta = \frac{\sigma_2(t) - \sigma_1(t)}{\sigma_2(t)} \times 100\% \quad (12)$$

式中: $\sigma_1(t)$ 和 $\sigma_2(t)$ 分别为考虑钢管约束效应和不考虑钢管约束效应所计算得到的徐变应力。为直观展示关键施工阶段及截面的徐变偏差,见图 4 至图 8,绘制了徐变偏差曲线图。

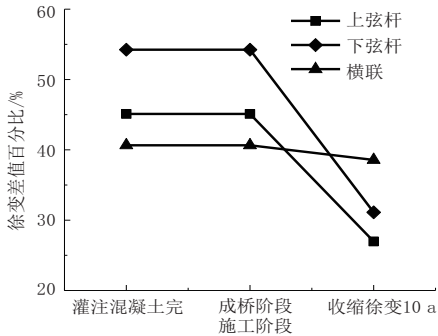


图 4 拱脚段徐变偏差百分比图

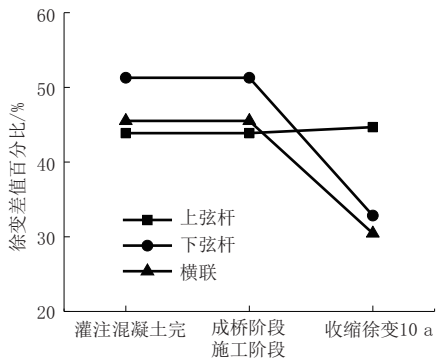


图 5 L/8 段徐变偏差百分比图

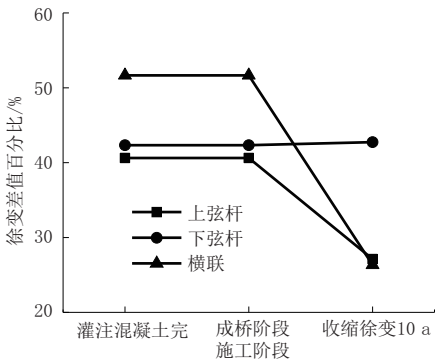


图 6 L/4 段徐变偏差百分比

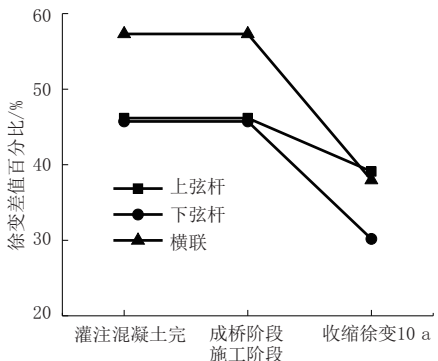


图 7 3L/8 段徐变偏差百分比图

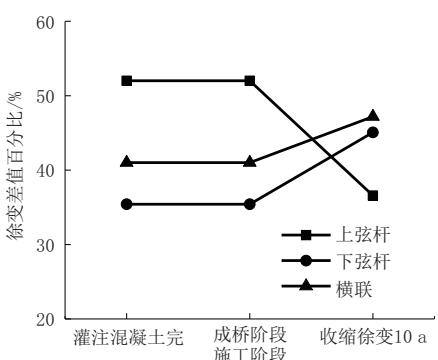


图 8 合龙段徐变偏差百分比折线图

浇筑完成混凝土阶段,3L/8 的横联处出现最大偏差,57.02%;桥梁建成阶段,3L/8 的横联处出现最大偏差,57.31%;收缩徐变 15 a 阶段,合龙段的横联处出现最大偏差,47.18%。是否考虑钢管约束后,徐变差值在 50% 左右,故徐变计算所用的系数需要考虑钢管约束效应。

4 结 语

文中在考虑钢管约束效应的基础上,对钢管混凝土桥梁的徐变效应进行了分析,首先推导了相关公式,采用公式将徐变效应等效为温度差值,从而应用于通用有限元软件 MIDAS Civil 中。基于某钢管混凝土桥梁为例,进行了一系列分析计算,主要得出以下结论。

(1)对钢管混凝土桥梁中混凝土的徐变效应等

效为温度荷载,从而可快速用于有限元软件中,提高了工程实用性。

(2)计算分析发现,考虑钢管约束与不考虑差值在50%左右,故徐变计算所用的系数需要考虑钢管约束效应。

参考文献:

- [1] 张伟平,顾祥林.混凝土收缩徐变预测模型研究进展[J].建筑材料学报,2006,9(3):249-256.
- [2] 王明,李华.现代组合结构桥梁设计理论[M].北京:人民交通出版社,2018.
- [3] 张强,赵立.城市跨线桥新型结构应用研究[J].桥梁建设,2020,50(3):45-50.
- [4] TERRY P J, BRADFORD M A, GILBERT R I. Creep and shrinkage of concrete in concrete-filled circular steel tubes[C]//Proc of 6th Inter Symposium on Tubular Structures. Australia:ASCCS, 1994: 293-298.
- [5] JTG/T D65-06-2015,公路钢管混凝土拱桥设计规范[S].
- [6] JTG 3362-2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [7] 韩林海,杨有福.钢管混凝土结构—理论与实践[M].北京:科学出版社,2004.
- [8] Huo J S, Xiao Y, Chen B C. Experimental study on creep behavior of concrete-filled steel tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(5): 722-730.
- [9] 刘鸿文.材料力学[M].北京:高等教育出版社,2017.
- [10] 吴志刚,周敏.钢管混凝土桥梁温度效应分析[J].工程力学,2022,39(5):112-118.
- [11] 沈兴谊,杨军,肖海波.钢管拱肋混凝土灌注过程计算分析[J].城市道桥与防洪,2016(6):143-145.
- [12] 顾卫国.关于《公路钢管混凝土拱桥设计规范》中拱肋刚度取值问题的探讨[J].城市道桥与防洪,2016(12):39-42.
- [13] 叶伟,王雷,王同,等.钢管混凝土拱桥拱肋模拟方法探讨与分析[J].城市道桥与防洪,2023(11):91-94;105.
- [10] Hayrettin Karaca, Kurtuluş Soyuk. Effects of Near-Fault and Far-Fault Ground Motions on Cable-Stayed Bridges[J]. Disaster Science and Engineering, 2018(1): 12-21.
- [11] 夏春旭,柳春光.近断层多脉冲地震动作用下斜拉桥地震响应特征分析[J].桥梁建设,2018(3):32-37.
- [12] 马跃腾,王剑明,伍大成.近远场地震作用下斜拉桥有无辅助墩静动力响应[J].公路,2021,66(8):181-185.
- [13] 陈超,陈鑫,俞伟根,等.近断层速度脉冲型地震动对多层校舍减震加固性能影响研究[J].工程抗震与加固改造,2021,43(3):95-103.
- [14] 焦驰宇,刘文勃,桂晓珊,等.近断层地震下小半径曲线桥碰撞响应的振动台试验研究[J].工程力学,2020,37(8):189-201.
- [15] 杜永峰,董云霏,包超.近断层地震作用下超长复杂隔震结构动力响应分析[J].工程抗震与加固改造,2014,36(5):68-74.
- [16] Wen Y, Zhou Z. Qualification of the Ernst formula for modeling the sag effect of super-long stay cables in the long-span railway cable-stayed bridges[C]//Structures. Elsevier, 2022.
- [17] Sohrabi-Bidar A, Maghami S, Khajevand R. The application of time domain boundary element modeling for investigating the seismic response of deep alluvial basin and Rayleigh waves generation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2025(190): 109154.
- [18] Stewart J P, Chiou S-J, Bray J D, et al. Ground motion evaluation procedures for performance-based design [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(9).
- [19] GB 50111-2006,铁路工程抗震设计规范[S].
- [20] Baker J W. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(5): 1486-1501.
- [21] Zhang C, Fu G H, Lai Z C, et al. Shake Table Test of Long Span Cable-Stayed Bridge Subjected to Near-Fault Ground Motions Considering Velocity Pulse Effect and Non-Uniform Excitation [J]. Applied Sciences-Basel, 2020, 10(19).

(上接第123页)