

高墩大跨度连续刚构桥抗震性能分析

陈欣, 谭建领

(黄河水利职业技术学院, 河南 开封 475004)

摘要:以西南山区某高墩大跨度预应力混凝土连续刚构桥为例,应用 Midas civil 建立了有限元分析模型,分析了该桥的自由振动特性。采用非线性时程分析方法分析了该桥在 E1、E2 地震作用下的抗震性能。

关键词:高墩大跨度连续刚构桥; Midas civil; 有限元分析; 时程分析法; 抗震验算; 地震动参数

中图分类号: U445.34

文献标识码: A

doi: 10.13681/j.cnki.cn41-1282/tv.2019.04.006

0 引言

我国地处环太平洋和地中海—喜马拉雅地震带,是一个地震多发国家,特别是西部地区属于地震高发区。我国西部地区多山区,在道路沿线,为跨越山谷,修建了大量高墩大跨度连续刚构桥。桥梁是道路的咽喉,当地震发生时,桥梁的破坏不仅会导致巨大的经济损失,而且会导致道路阻断,拖延救灾时间。因此,连续刚构桥的抗震性能是设计中必须要考虑的问题。笔者应用 Midas civil 软件建立了有限元模型,采用非线性时程分析方法,分析了我国西南某高墩大跨度预应力混凝土连续刚构桥的抗震性能,以为类似工程提供参考。

1 桥梁概况及有限元模型的建立

1.1 桥梁概况

该桥为三跨预应力混凝土连续刚构桥,跨径布置为 102 m+190 m+102 m,主梁为单箱单室截面,三向预应力,混凝土强度等级为 C55。箱梁顶板横向宽为 12.0 m,底宽为 6.5 m,翼缘悬臂长 2.75 m,根部梁高为

11.7 m,跨中梁高为 4.2 m,其高度与底板厚度按 1.8 次抛物线变化。箱梁采用悬臂浇筑法施工,每个“T”构纵向对称划分为 22 个节段,边、中跨合拢段长均为 2 m,边跨现浇段长为 6.0 m。主墩墩身采用双肢矩形截面空心墩,纵向壁厚为 0.8 m,横向壁厚为 1.0 m,两主墩高度均为 130.0 m,每个主墩双肢之间设一道预应力横系梁。主墩承台厚为 5 m,基础采用桩径为 2.5 m 的钻孔灌注桩,基桩按纵向四排、横向三排布置,每墩共有 12 根桩。主墩混凝土强度等级为 C40。

1.2 有限元模型的建立

采用 Midas civil 软件建立该桥的有限元计算模型,如图 1 所示。主梁采用变截面空间梁单元模拟,主墩、过渡墩、承台、桩基础采用一般梁单元模拟^[1],通过预应力荷载施加预应力钢束。墩梁固结采用弹性连接中的刚性连接,盆式支座采用弹性支承等代弹簧模拟,桩—土相互作用采用等代土弹簧模拟^[2],其他边界条件、连接方式、材料特性则按照实际情况进行模拟。

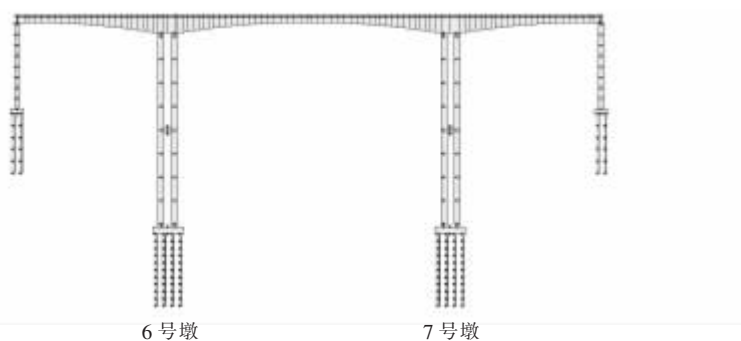


图1 研究桥空间有限元模型

Fig.1 Full bridge space finite element model

收稿日期:2019-06-02

作者简介:陈欣(1987-),男,河南商丘人,助教,硕士,主要从事高校道路与桥梁工程技术专业的教学与研究工作,研究方向为施工力学与安全性分析。

2 自由振动特性分析

结构的自由振动特性与结构自身的质量、刚度、边界条件密切相关，是结构的固有特性。本文借助

Midas civil 软件的子空间迭代法计算桥梁的频率、周期和振型,限于篇幅,仅列出前 10 阶振型,并做了相应振型描述,结果如表 1 所示。

表 1 研究桥前 10 阶频率、周期及振型描述

Tab.1 Description of first 10 phrase frequency, period and vibration mode

阶次	频率/Hz	周期/s	振型描述
1	0.214	4.688	主墩横弯
2	0.256	3.961	主梁纵飘
3	0.288	3.482	主梁一阶反对称横弯
4	0.375	2.666	过渡墩局部纵弯
5	0.451	2.275	主梁一阶对称横弯
6	0.507	1.974	过渡墩局部纵弯
7	0.667	1.517	主梁二阶反对称横弯
8	0.860	1.175	主梁对称竖弯
9	1.068	0.940	主梁二阶对称横弯
10	1.207	0.829	主梁反对称竖弯+主墩纵弯

由表 1 可知,该桥第 1 阶的频率为 0.214 Hz,周期为 4.688 s,且主墩振型为横向弯曲。即该桥墩身横向地震反应大。所以,应注意风荷载作用下的横向稳定问题。

3 地震动参数分析

3.1 加速度反应谱分析

根据《中国地震动反应谱特征周期区划图》和

本工程所在地的地质勘察报告，该地区地震抗震设防烈度为 7 度，设计基本地震动峰加速度为 0.10g，场地类别为 II 类，频谱特征周期为 0.45 s。根据《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008)第 5.2.1 条,得出在 E1 和 E2 地震作用下,工程场地地表水平向和竖向的加速度反应谱曲线,如图 2 所示^[3]。

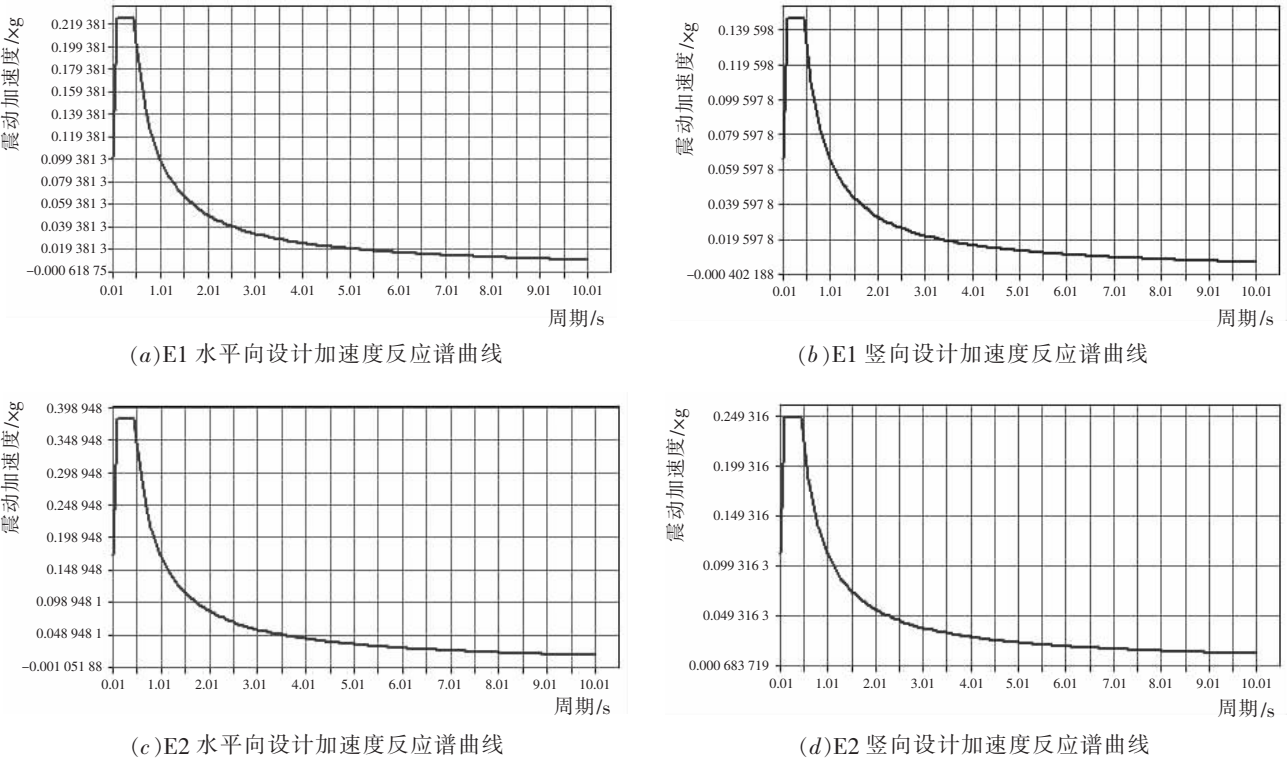


图 2 设计加速度反应谱曲线

Fig.2 Design of acceleration response spectrum curve

3.2 地震动时程分析

为考虑地震动方向的随机性,本研究采用的设计加速度时程不得少于三组,且应保证任意两组间

同方向时程的相关系数 ρ 的绝对值小于0.1。对于E1和E2地震,分别采用3条人工波对结构进行抗震分析,结果如图3所示^[4]。

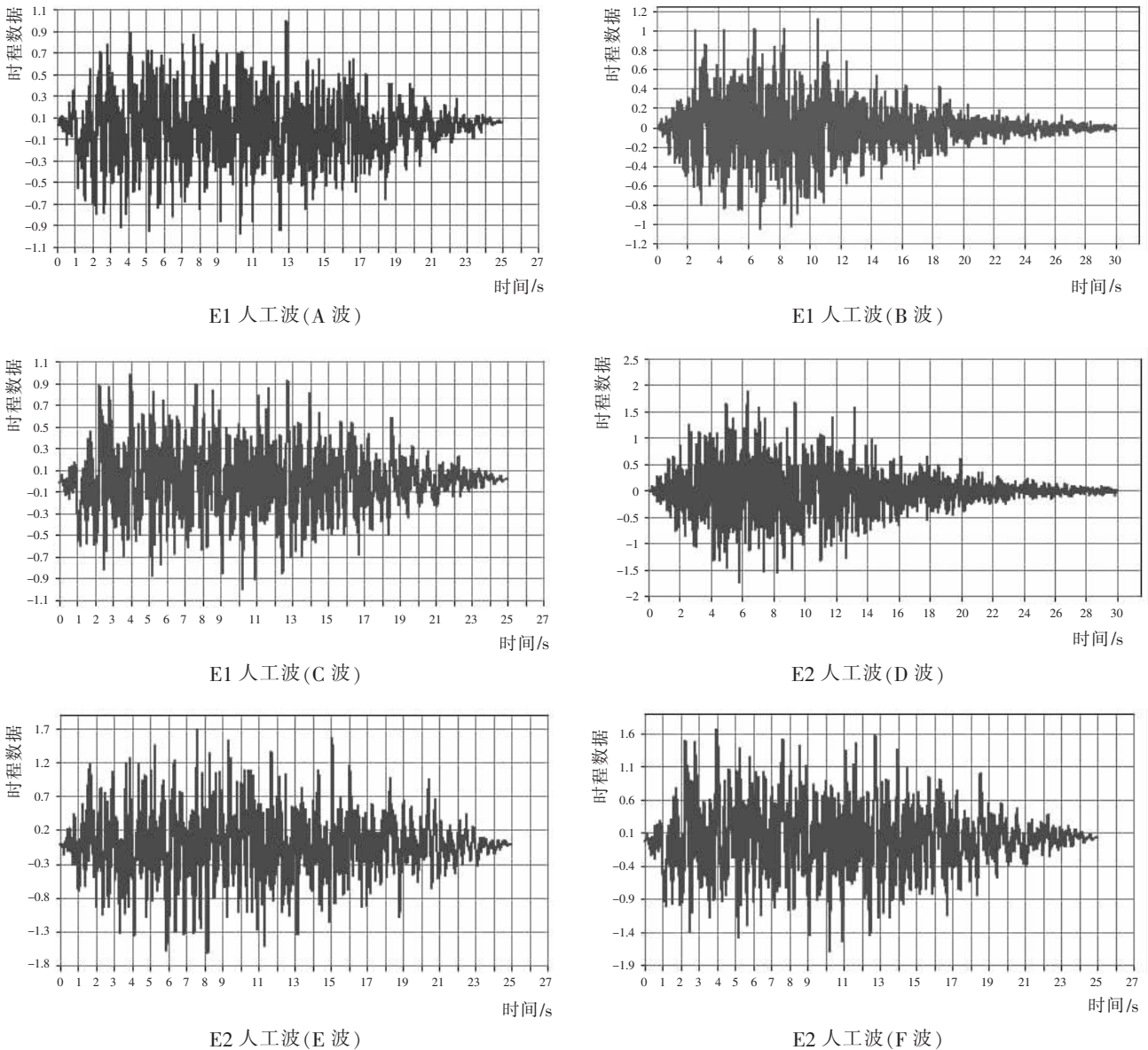


图3 E1、E2地震作用下研究桥结构抗震性能检验结果

Fig.3 Structure seismic performance under E1, E2 earthquakes

将6条人工波作用在Midas civil有限元模型中,在不考虑恒载时,将顺桥向主墩墩身位置动时程分析的计算结果与反应谱法分析结果对比,结果如表2所示。

从表2可以得到如下结论:

(1) 人工波A、B、C作用在Midas civil模型中时,在柱墩墩身产生的最大弯矩和最大剪力分别是反应谱分析时产生的最大弯矩和剪切力的115%、104%、114%和113%、106%、113%。人工波D、E、F作用在Midas civil模型中时,在柱墩墩身产生的最大弯矩和最大剪力分别是反应谱分析时产生的最大

表2 地震动时程分析与反应谱法分析结果

Tab.2 Results of time-procedure analysis and response spectrum analysis of earthquake ground motion

震型	人工波	最大弯矩/(kN·m)	最大剪力/kN
E1	反应谱	139 986	3 932
	A波	161 324	4 456
	B波	145 679	4 184
	C波	16 024	4 428
E2	反应谱	247 861	6 569
	D波	272 134	7 554
	E波	256 743	7 268
	F波	276 543	7 488

弯矩和剪切力的110%、104%、112%和115%、111%、114%。依据《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008)第9.3.1条的规定,A波、B波、C波可进行E1地震作用下该桥的非线性时程分析,D波、E波、F波可进行E2地震作用下该桥的非线性时程分析。

4 结构地震响应及抗震验算

4.1 分析工况

地震波在传递时,会产生不同的传播路径。对于大跨度刚构桥,地震波传递到桥身时,会产生与地面的非一致震动。在采用考虑行波效应的非线性时程

法分析时,分析以下两种工况:(1)恒载+地震纵向+横向+竖向,地震纵向一致激励;(2)恒载+地震纵向+横向+竖向,地震纵向非一致激励。

4.2 墩柱的地震响应及抗震验算

4.2.1 墩柱的地震响应

由以上分析可知,在E1、E2地震作用下,主要验算构件是墩柱和桩(本文主要分析墩柱)。在顺桥向方向,主墩的控制截面在墩顶与墩底,过渡墩的控制截面在墩底。在横桥向方向,主墩与过渡墩的控制截面均在墩底。所有控制截面均在空心段处最不利截面,该桥控制截面如图4所示。

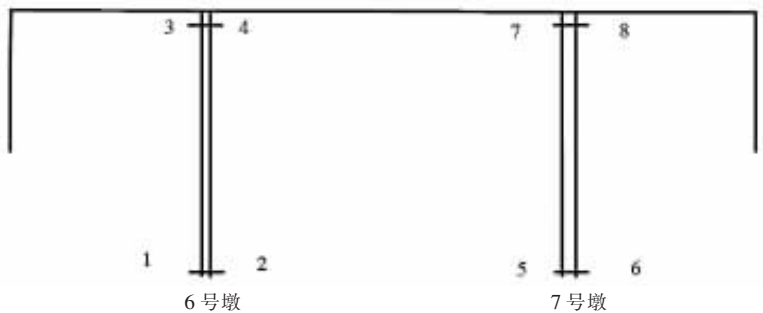


图4 研究桥控制截面位置示意图
Fig.4 Control section place layout of this bridge

将人工波A、B、C输入到Midas civil模型中,计算E1地震作用下,各控制截面在两种工况下的内力,并各取最大值,结果如表3和表4所示。

将人工波D、E、F输入到Midas civil模型中,计算E2地震作用下,各控制截面在两种工况下的内力,并各取最大值,结果如表5和表6所示。

从表3~6可得出以下结论:(1)在E1、E2地震作用下,桥墩控制截面在两种工况下的轴力、弯矩、剪力的分析结果相差不大。这主要是因为该工程所

处场地为基岩,地震波传播速度较快,且桥墩间距不大。(2)桥墩的内力最大值不一定是在同一工况下发生的。因此,考虑最不利原则,有必要对两种工况进行验算。(3)在E1、E2地震作用下,两个主墩的墩顶和墩底均产生了较大的弯矩。因此,在进行刚构桥设计时,应考虑墩顶与墩底进入塑性区的可能性。

4.2.2 墩柱的抗震验算

《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008)9.4.1条规定,在E1地震作用下,结构不发生

表3 E1地震作用下桥墩控制截面顺桥向内力最大值
Tab.3 Vertical bridge internal force maximum of pier control section under E1 earthquake

墩号	截面位置	工况一			工况二		
		轴力/kN	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	剪力/kN
6	1	133 963	180 236	4 698	134 264	178 926	4 599
	2	161 771	180 251	4 730	161 449	178 935	4 683
	3	25 036	140 078	3 853	26 140	138 732	3 836
	4	94 058	166 334	3 801	95 128	165 283	3 784
7	5	159 010	191 126	5 174	159 290	186 756	5 075
	6	135 367	190 948	5 063	132 813	186 667	4 992
	7	94 732	159 728	3 688	94 105	161 108	3 642
	8	24 478	132 800	3 858	22 745	134 404	3 732

表 4 E1 地震下,墩控制截面横桥向内力最大值

Tab.4 Cross bridge internal force maximum of pier control section under E1 earthquake							
墩号	截面位置	工况一			工况二		
		轴力/kN	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	剪力/kN
6	1	133 738	222 129	2 346	137 314	224 683	2 391
	2	161 545	246 587	2 702	164 607	250 111	2 751
7	5	158 786	265 223	2 685	162 359	269 704	2 792
	6	135 143	246 788	2 422	135 930	250 529	2 525

表 5 E2 地震下,墩控制截面顺桥向内力最大值

Tab.5 Vertical bridge internal force maximum of pier control section under E2 earthquake							
墩号	截面位置	工况一			工况二		
		轴力/kN	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	剪力/kN
6	1	149 584	255 879	6 609	150 165	253 963	6 490
	2	178 696	255 818	6 586	178 231	253 890	6 554
	3	29 082	185 509	5 168	31 054	183 389	5 165
	4	97 149	211 521	5 150	99 043	209 910	5 146
7	5	174 141	274 500	7 351	174 728	267 426	7 211
	6	151 787	274 283	7 242	147 676	267 361	7 150
	7	98 318	200 453	4 966	97 352	202 929	4 918
	8	28 070	173 329	5 187	25 183	176 184	4 999

表 6 E2 地震下,墩控制截面横桥向内力最大值

Tab.6 Cross bridge internal force maximum of pier control section under E2 earthquake							
墩号	截面位置	工况一			工况二		
		轴力/kN	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	剪力/kN
6	1	149 785	378 473	4 101	150 186	378 528	4 100
	2	178 897	420 057	4 708	178 252	420 111	4 707
7	5	174 344	451 877	4 682	174 751	451 678	4 683
	6	151 990	420 418	4 234	147 699	420 241	4 235

损伤,保持在弹性范围内;在 E2 地震作用下,主缆不发生损伤,主塔、基础、主梁等重要结构受力构件局部可发生可修复的损伤。因此,本研究需针对不同地震类型进行抗震验算(本文只验算抗弯能力)。应用 Midas civil 中的弯矩-曲率模块,建立桥墩的

纤维单元截面,通过进行截面的弯矩-曲率分析,得到桥墩的钢筋等效屈服强度^[5]。在 E1、E2 地震作用下,桥墩的弯矩地震相应计算结果应小于桥墩截面的等效屈服弯矩。桥墩抗弯性能验算结果如表 7 所示。

表 7 E1、E2 地震下抗震验算

Tab.7 Antiseismic checking calculation under E1, E2 earthquakes					
地震类型	验算位置	方向	需求弯矩/(kN.m)	等效屈服弯矩/(kN.m)	是否满足
E1 地震	柱墩顶	顺桥向	166 334	289 163	满足
	柱墩底	顺桥向	191 126	549 987	满足
		横桥向	269 704	1029 132	满足
E2 地震	柱墩顶	顺桥向	211 521	342 114	满足
	柱墩底	顺桥向	274 500	674 456	满足
		横桥向	451 877	1296 722	满足

从表7可得如下分析结果:(1)在E1地震作用下,桥墩墩顶顺桥向、墩底顺桥向和横桥向的等效屈服弯矩分别是需求弯矩的173.8%、287.8%和381.6%。因此,在E1地震作用下,桥墩结构满足抗震要求。(2)在E2地震作用下,桥墩墩顶顺桥向、墩底顺桥向和横桥向的等效屈服弯矩分别是需求弯矩的161.7%、245.7%和287%。因此,在E2地震作用下,桥墩结构亦满足抗震要求。

5 结语

本文利用Midas civil建立了考虑桩—土相互作用的有限元模型,分析了我国西南山区某三跨预应力混凝土连续刚构桥的自由振动特性和地震动参数,发现该桥墩身横向地震反应大。因此,应注意其在风荷载下的横向稳定问题。在考虑与不考虑行波效应的两种工况下,利用非线性时程分析方法对

E1、E2地震作用下的桥墩柱和桩进行验算,发现该桥墩满足抗震要求。

参考文献:

- [1] 陈付雷,郭永平.大跨度连续刚构桥抗震性能分析[J].城市道桥与防洪,2017(7):70-72.
- [2] 胡迪,陈锐林.考虑桩土相互作用的连续刚构桥抗震性能分析[J].湖南工程学院学报,2017,27(2):77-83.
- [3] 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.
- [4] 张伟,刘建新.大跨径连续刚构桥地震反应分析[J].工程抗震与加固改造,2005,27(6):75-78.
- [5] 张滔.双薄壁墩连续刚构桥抗震分析[J].城市道桥与防洪,2016(11):60-62.

[责任编辑 杨明庆]

Seismic Performance Analysis on Long Continuous Rigid Frame Bridge with High Piers

Chen Xin, Tan Jianling

(Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, Henan, China)

Abstract: Taking a long prestressed concrete continuous rigid frame bridge with high piers in the south-west mountainous area as an example, a finite element analysis model was established by using Midas civil, and the free vibration features of the bridge were analyzed. The seismic performance of the bridge under the action of E1 and E2 earthquakes is analyzed by nonlinear time-procedure analysis.

Key Words: Long continuous rigid frame bridge; Midas civil; finite element analysis; time-procedure analysis method; antiseismic checking calculation; ground motion parameter