

高桩基础双薄壁墩连续刚构桥的地震响应研究

杨秀涛

(河南省中工设计研究院集团股份有限公司, 河南 郑州 450018)

摘要: 为探究高桩基础的双薄壁墩连续刚构桥的地震响应机理, 基于OpenSees平台建立一座四跨双薄壁墩连续刚构桥有限元模型, 进行非线性动力时程分析, 通过与未考虑高桩基础桥墩的模型进行对比, 可得到高桩基础桥墩对桥梁抗震性能的影响; 再通过对Xtract程序计算桩基截面弯矩曲率的结果, 得到高桩基础的桥梁破坏模式。结果表明: (1) 考虑采用高桩基础的桥梁各阶周期值均有不同程度的增大, 结构柔性显著增强; (2) 在地震作用下, 桥梁上部结构的纵横向位移较大且幅度接近, 墩底弯矩则大幅减小, 承台纵向位移明显大于横向位移; (3) 桥梁边墩内肢的地震内力响应最大, 中墩次之, 边墩外肢最小; (4) 采用群桩形式的高桩基础在地震作用下不易发生轴压破坏, 但在大震作用下角桩桩顶可能出现塑性铰, 影响基础正常功能的使用。

关键词: 高桩基础; 双薄壁墩; 增量动力分析; 地震响应; 连续刚构桥

中图分类号: U442.5⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)01-0101-05

Research on Seismic Response of Double Thin-walled Pier Continuous Rigid-frame Bridge with High-pile Foundation

YANG Xiutao

(Henan Zhonggong Design and Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450018, China)

Abstract: To explore the seismic response mechanism of double thin-walled pier continuous rigid-frame bridge with high-pile foundation, a finite element model of a four-span double thin-walled pier continuous rigid-frame bridge is established on the OpenSees platform to carry out the nonlinear dynamic time-history analysis. By comparing with the model without considering the high-pile foundation pier, the influence of the high-pile foundation pier on the seismic performance of the bridge is obtained. By comparing the results of calculating the bending moment curvature of pile foundation section with the Xtract program, the failure mode of the bridge with high-pile foundation is obtained. The results show that: (1) The period value of each stage of the bridge with high-pile foundation is increased to different degrees, and the structural flexibility is increased significantly. (2) Under the action of earthquakes, the longitudinal and lateral displacements of the bridge superstructure are large and close in amplitude, and the bending moment at the base of the pier is greatly reduced. The longitudinal displacement of the base slab is obviously greater than the lateral displacement. (3) The seismic internal force response of the inner leg of the bridge side pier is the largest, followed by the middle pier, and the outer leg of the side pier is the smallest. (4) The high-pile foundation with pile group is not prone to axial compression failure under earthquake action. However, the plastic hinge may appear at the top of corner pile under the action of large earthquake, which affects the normal operation function of foundation.

Keywords: high-pile foundations; double thin-walled piers; incremental dynamic analysis; seismic response; continuous rigid-frame bridge

0 引言

随着我国的公路交通网日趋完善, 桥梁在公路运输中所占比重越来越大。双薄壁墩连续刚构桥因其大跨度、易施工、行车顺畅及养护简便等诸多优点

在山区和平原等各类地形公路中受到广泛应用^[1]。双薄壁墩连续刚构桥作为一种适用性广的非常规桥型, 在各种地震作用下的抗震性能和不同构造因素对双薄壁墩连续刚构桥的震损机理的影响, 一直为国内外学者、专家所重视。石雄伟等^[2]、Shi X W等^[3]通过分析双薄壁墩的双肢间距对桥梁地震响应的影响, 得到了适用于不同跨度桥梁的合理肢距。李杰等^[4]以一座双薄壁高墩曲线梁桥为研究对象, 通过研究墩底边界约束以及地震动输入方式对结构自振

收稿日期: 2024-07-18

基金项目: 河南省交通运输厅科技项目(2020J9)

作者简介: 杨秀涛(1980—), 男, 本科, 高级工程师, 从事桥梁结构抗震研究工作。

特性的影响,表明模型的墩底固结会减小自振周期及结构响应会受地震动输入方式影响。齐秀廷等^[5]通过建立不同桥墩截面的双薄壁墩连续刚构桥梁模型,对比分析了空心矩形、实心矩形及圆形桥墩截面的桥梁内力响应,得出实心矩形截面桥墩内力最大且其位移与空心矩形墩桥梁相当的结论。既有的针对双薄壁墩连续刚构桥地震响应的研究,均在一定程度上对桥梁承台及基础部分进行了简化模拟。

河南三门峡黄土高原沟壑纵横,不少桥梁位于冲沟陡坎边缘。高桩基础可以减少边坡开挖,减少墩台圯工防护的应用,在桥梁工程中被广泛采用^[6]。高桩基础是指承台以下、地表以上存在相对较高的部分外露的桩基础。由于桩基外露部分缺失土地的水平约束作用,“高桩-承台”结构在地震作用下与桥墩及上部结构的相互作用机理极为复杂。叶爱君等^[7]基于两质点模型研究了群桩基础桥梁结构的地震响应机理,结果表明地震作用下承台质量对结构响应影响较大。唐亮等^[8]通过高承台 2×2 “群桩-独柱墩”结构的振动台试验,表明地震作用下大质量高承台与上部结构会放大地震作用。武崇福等^[9]、王君杰等^[10]以双薄壁墩连续刚构跨海桥为例,研究了桥梁在地震与波浪力、地震与动水压力共同作用下

的结构响应,表明角桩桩顶受到轴力最大、中间桩的受力最小。

上述研究表明高桩基础对桥梁地震响应的影响不可忽略,而针对高桩基础对双薄壁墩连续刚构桥的地震响应程度和机理的研究却相对缺乏。有鉴于此,本文基于OpenSees平台建立了一座四跨预应力混凝土连续刚构桥的空间三维模型,采用动力弹塑性分析法,研究具有高桩基础的双薄壁墩连续刚构桥的地震响应和破坏机理。

1 工程简介

1.1 工程背景

桥梁位于河南三门峡市黄土高原上,跨径布置为 $(66 \text{ m}+2 \times 120 \text{ m}+66 \text{ m})$,桥宽 27.5 m 。上部结构为预应力混凝土连续刚构,梁高按1.8次抛物线,由 7.26 m 逐渐变化至 2.86 m ;桥墩采用双薄壁墩,壁厚 1.3 m ;墩底承台厚 5 m ,单个承台下设置12根 $\phi 2.2 \text{ m}$ 群桩基础;桥台采用肋板桥台,桥台上设置盆式橡胶支座;桥梁的几何参数及整体布置如图1所示。

根据地质勘察资料,地震动峰值加速度为 $0.05g$,地震特征周期值为 0.35 s ,属II类场地,按地震烈度VI度进行设防。

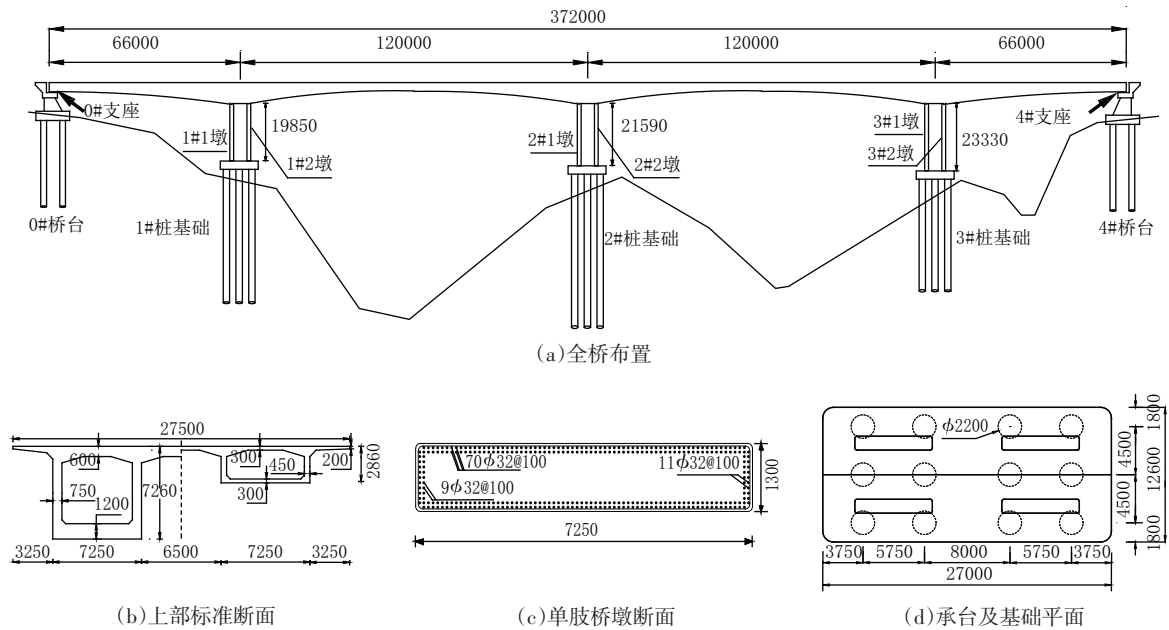


图1 桥梁几何参数及整体布置(单位:mm)

1.2 有限元模型

基于OpenSees平台建立全桥有限元模型,如图2所示。主梁和承台采用弹性梁柱单元Elastic Beam Column Element进行模拟;在强震作用下,桥墩较易

发生破坏,采用非线性单元Force-Based Beam-Column Element进行模拟,并采用纤维截面获取桥墩微观层面的破坏状态,混凝土和钢筋材料分别采用concrete01和steel01本构;主梁与桥墩顶部的连接采

用刚臂单元 Equal DOF 进行固结模拟;为研究高桩基础的损伤状态,参考既有研究将群桩基础在岩石地基表面处进行固结,桩基础采用非线性单元 Force-Based Beam-Column Element 和纤维截面进行模拟;采用 Elastomeric-Bearing-Bouc Wen 单元模拟

盆式支座;桥台台高较小,故将桥台支座底作固结处理。

为研究高桩基础的外露自由桩长度对双薄壁墩连续刚构桥地震响应及震损机理的影响,建立两个模型进行研究。

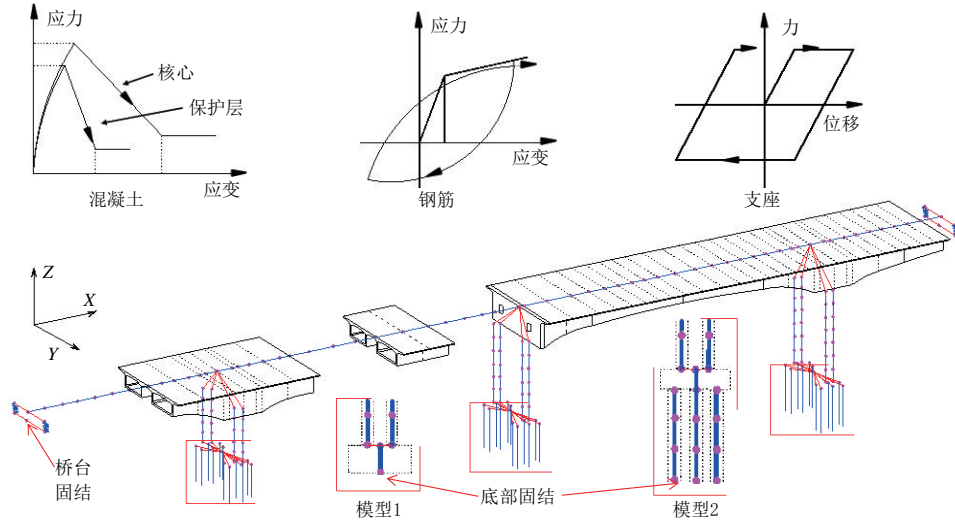


图2 桥梁有限元模型

模型 1:固结承台底部。

模型 2:在岩石表面固结桩底,1#、2#和 3#桩基自由段长度分别为 2、4.8、4.5 m。

1.3 结构动力特性

为验证模型的准确性并对比两个模型的动力特性,对模型 1、2 进行特征值分析,取各模型的前 10 阶计算结果,如表 1 所列。其中 T_1 、 T_2 为结构的 1、2 阶自振周期。

表 1 两个模型的自振周期对比

阶数	模型 1 T_1/s	模型 2 T_2/s	$(T_2-T_1)/T_1$ %
1	1.17	1.85	58
2	0.66	1.47	122
3	0.57	1.20	112
4	0.54	0.86	61
5	0.52	0.67	28
6	0.48	0.54	13
7	0.41	0.44	8
8	0.35	0.35	1
9	0.33	0.33	0
10	0.25	0.26	1%

由表 1 可知,考虑高桩基础后,桥梁各阶周期值均有不同程度增大,其中基本周期增大 58%,这表明,模型中考虑高桩影响会显著增大结构柔性。

2 地震动选取及分析工况

本文通过对模型进行非线性动力时程分析得到结构的地震响应。结构的非线性时程分析结果依赖于有限元模型、地震动特性及其输入方式,为避免地震动引起分析结果具有较大离散性,采用匹配设计谱的方法从美国的 NGA-West2 强震数据库中选取了 5 条具有 3 个分量的加速度地震动记录。5 条记录选自 II 类场地上的 5 个不同地震事件,其加速度反应谱如图 3 所示。图中 RSN(Response Spectral Normalization) 为地震记录在数据库中的序列号。

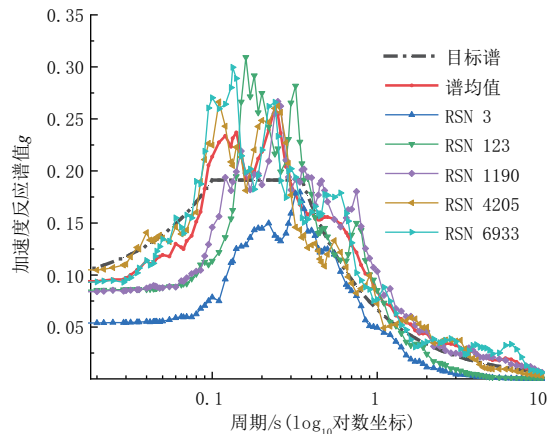


图3 地震动的加速度反应谱

为了得到桥梁在不同地震动强度下的响应结果,5 条记录的两个水平分量均按加速度峰值 0.05g、0.1g、0.2g、0.3g、0.4g 及 0.5g 进行调幅,加速度峰值的

竖向分量取为水平分量的1/2。根据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01-2020)^[11],分别采用“纵向+竖向输入”和“横向+竖向输入”两种输入方式对地震动输入模型进行增量动力分析。

3 分析结果

本文通过对比两个模型的主梁跨中水平位移、0#支座剪切变形及墩底弯矩时程以探究高桩基础对桥梁地震响应的影响,通过分析模型2的承台纵横向位移及角桩轴力以探究考虑高桩基础的桥梁下部结构的地震响应规律。

3.1 两个模型响应对比

两个模型的主梁跨中水平位移及支座剪切变形如图4所示,位移和变形值取计算结果均值。

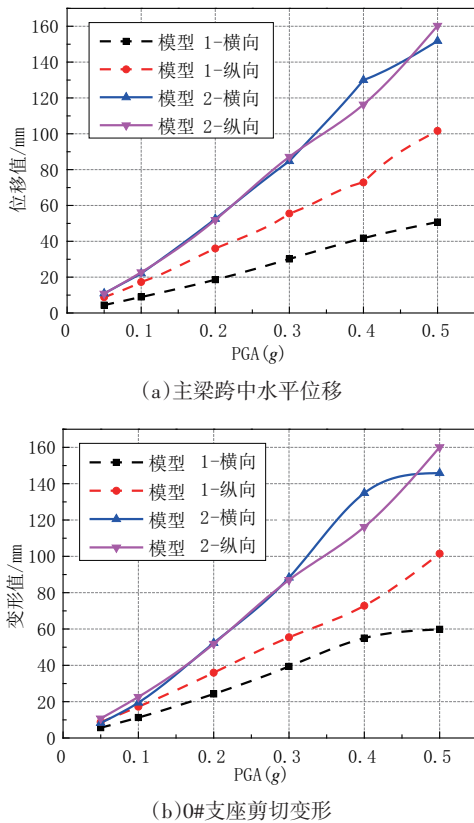


图4 主梁跨中水平位移及支座剪切变形

由图4可知,考虑了高桩基础的影响后,桥梁在纵横桥向的地震响应均明显增大,两个模型主梁跨中的横向位移最大相差3倍。且对比图4(a)和(b)可见,地震作用下主梁跨中的水平位移和支座剪切变形变化规律几乎一致,故以图4(a)为例进行分析。图4(a)表明,不考虑高桩基础的主梁跨中水平位移在纵横向差异明显,峰值地面加速度PGA (Peak Ground Acceleration)=0.5g时,主梁跨中纵向位移为横向位移的两倍;考虑高桩影响的桥梁纵横向位移

接近一致,但位移变化速率大于不考虑高桩影响的桥梁。

将RSN123记录在0.5g水平下的“纵向+竖向”地震动输入模型进行分析,可得到两个模型2#1桥墩墩底的纵向弯矩时程曲线,如图5、图6所示。

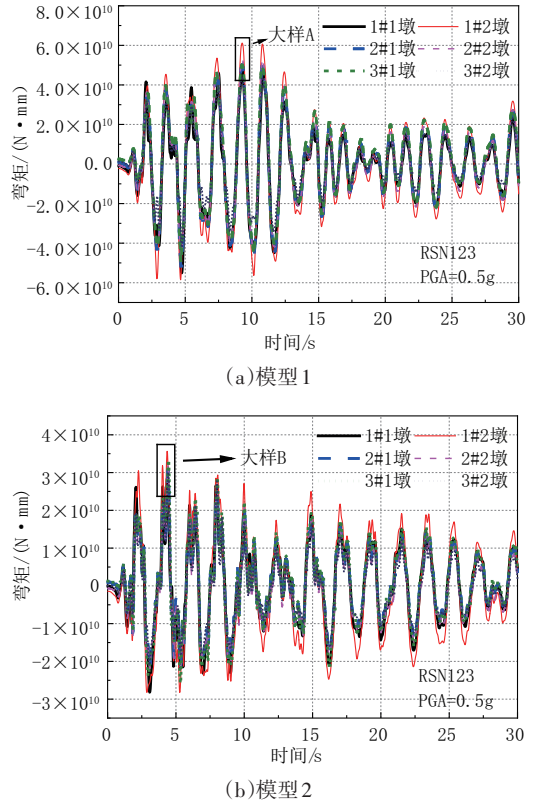


图5 2#1墩底弯矩时程

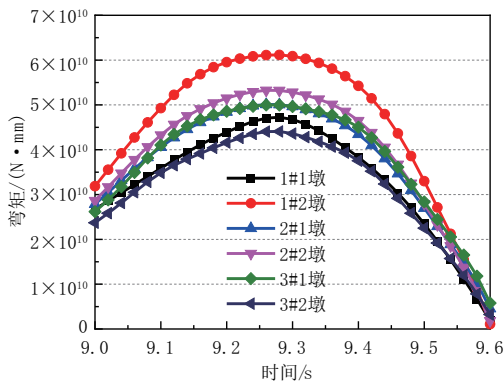
由图5、图6可知,不考虑高桩基础的桥梁墩底弯矩值约为考虑高桩基础桥梁的两倍,两个模型的弯矩极值存在一个相位差。此外,弯矩极值大样图表明了,在双薄壁墩连续刚构桥的桥墩中,边墩内肢所受弯矩大于边墩外肢和中墩。

3.2 高桩对桥梁地震响应的影响

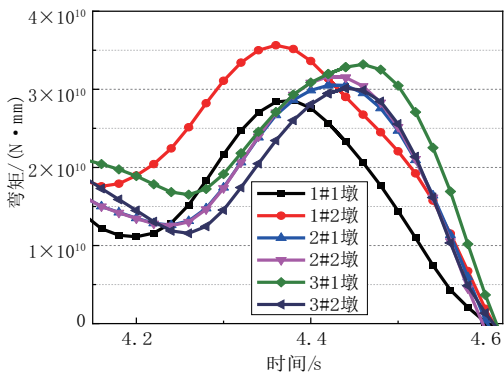
模型2的承台位移如图7所示,位移值取各地震工况作用下计算结果的均值。

图7表明3个承台的横向位移在各地震强度下均在5 mm以下,而承台纵向位移随地震强度增大而增加,且增加速率也在增加。由于承台的横向尺寸大于纵向,且桩基础在横向的数量及间距也均大于纵向,造成桥梁下部结构的横向刚度大于纵向刚度。

模型2的群桩基础中角桩桩顶所受轴力如图8所示,轴力值取各地震工况作用计算结果均值。图8表明各地震强度下2#桩基础的角桩轴力大于1#和3#桩基础的角桩轴力,横向地震响应大于纵向地震



(a)大样A(模型1)



(b)大样B(模型2)

图6 2#1墩底弯矩时程大样图

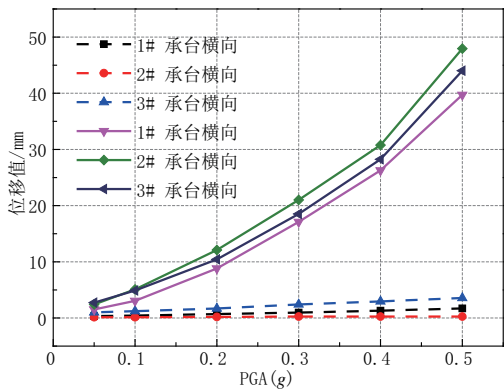


图7 承台位移响应

响应。PGA=0.5g时,2#桩基础的角桩在“横向+竖向”地震作用下的轴力为 1.9×10^7 N,远小于单桩轴向受压承载力特征值 2.896×10^7 N,表明桩基础在地震作用下较难发生轴压破坏。

采用XTRACT程序分析桩截面弯矩曲率得出其等效屈服弯矩为 8.193×10^9 N·mm,等效屈服曲率为 2.137×10^{-6} mm⁻¹。在“纵向+竖向”地震作用下,响应最为剧烈的2#角桩桩顶的弯矩及曲率如表2所列。表2表明在PGA小于0.2g的情况下,群桩基础正常工作;当PGA达0.2g后,即进入大震情况,角桩桩顶开始出现屈服状况。

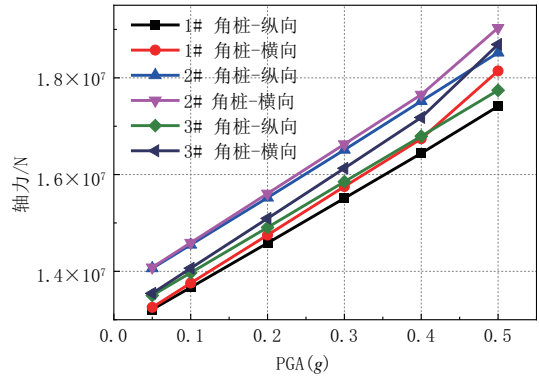


图8 角桩桩顶轴力

表2 2#角桩桩顶弯矩及曲率

PGA (g)	弯矩/(N·mm)		曲率/mm ⁻¹	
	均值	变异系数	均值	变异系数
0.05	2.117×10^9	0.14	7.415×10^{-7}	0.14
0.1	4.548×10^9	0.19	1.601×10^{-6}	0.20
0.2	8.861×10^9	0.19	3.816×10^{-6}	0.29
0.3	1.135×10^{10}	0.15	6.218×10^{-6}	0.26
0.4	1.268×10^{10}	0.13	7.744×10^{-6}	0.26
0.5	1.344×10^{10}	0.10	8.682×10^{-6}	0.22

4 结 语

本文通过OpenSees程序对一座具有高桩基础的双薄壁墩连续刚构桥进行地震作用下的非线性时程分析,得到了如下结论。

(1)不考虑高桩基础的影响时,桥梁上部结构的纵向位移明显大于横向位移;考虑高桩基础的影响后,上部结构的纵横向位移幅度接近,承台纵向位移明显大于横向位移,故可得高桩基础使桥梁的横向刚度显著减小。

(2)考虑高桩基础的影响后,桥梁的各阶周期值均有不同程度增大,结构柔性显著增大;地震作用下墩底弯矩大幅减小,增加了桥梁的抗震性能。

(3)双薄壁墩连续刚构桥的桥梁边墩内肢受力最大,中墩次之,边墩外肢受力最小,因此进行桥梁抗震设计和健康检测时,要着重关注边墩内肢,尤其是墩顶和墩底的损伤状况。

(4)采用群桩形式的高桩基础在地震作用下较难发生轴压破坏,在大震作用下角桩桩顶可能出现塑性铰,影响基础的正常使用功能;故建议进行震后桩基础检测时,重点检测角桩桩顶受拉钢筋的屈服状况。

参考文献:

[1] 张永亮,王云,陈兴冲,等.双薄壁墩连续刚构桥地震反应影响参

(下转第109页)