

奎素黄河特大桥抗震设计与研究

赵永刚，殷世林，李梦然

(黄河勘测规划设计有限公司,河南 郑州 450003)

摘要:以奎素黄河特大桥为例,介绍了长联预应力混凝土连续梁地震作用下的受力特点、抗震设计计算要点以及双曲面球减震装置减隔震机理与计算模型。为此类长联连续梁设计提供借鉴参考。

关键词:连续梁桥;减隔震设计;双曲面球型减隔震支座;时程分析;桥墩;桩基础

中图分类号:U442.5+5 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2014)02-0027-06

长联预应力混凝土连续梁桥具有结构受力性能好、刚度大、变形小、行车平顺舒适、造型美观、经济、后期养护工程量小等优点^[1],是近几年公路桥梁中逐渐采用的桥型。由于我国属于地震发生频率高、强度大、分布范围广、灾害严重的国家,地震致使基础设施、桥梁结构受到破坏,导致巨大的经济损失^[2-3],因此对桥梁结构进行安全经济可靠的抗震分析与设计是极其重要的。

奎素黄河特大桥位于内蒙古自治区独贵塔拉奎素村附近的黄河上,主桥采取59.7+7×100+59.7 m的一联预应力砼连续箱梁结构,引桥为40 m跨预应力混凝土先简支后连续箱梁结构以及20 m跨预应力混凝土先简支后连续空心板梁,全长1 847 m,属特大型桥梁,桥型布置图见图1。该工程地处中纬度内陆,属于旱的中温带大陆型季风气候,温差较大,年平均气温6.8℃,年极端最高气温38.4℃,年极端最低气温-31.4℃。结合奎素黄河特大桥的设计实践,探讨了长联预应力混凝土连续梁桥的抗震分析与设计特点,为同类的桥梁设计建造提供参考。

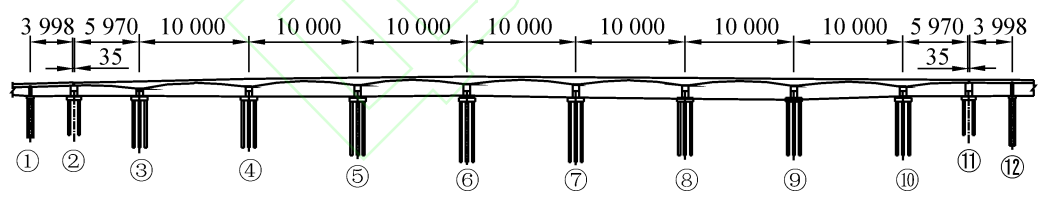


图1 奎素黄河特大桥主桥桥型布置图(单位:cm)

1 主桥技术标准及构造特点

奎素黄河特大桥主桥的技术标准如下:设计行车速度采用80 km/h,荷载采用公路-I级,桥宽采用单幅桥12 m,宽度布置为11 m(行车道)+2×0.5 m(防撞护栏),地震峰值加速度为0.145 5g,地震基本烈度Ⅶ度,桥面横坡为双向1.5%,通航标准为Ⅳ级。

奎素黄河特大桥主桥桥宽12 m,采用单箱单室箱梁,箱梁顶宽12 m,底板宽6.5 m,翼板悬臂长2.75 m,边缘厚18 cm,顶板承托处厚60 cm;中墩支点梁高采用6.09 m,跨中梁高采用2.59 m,截面梁高变化采用1.6次抛物线,腹板为直腹板,腹板厚70~50 cm,底板跨中厚32 cm,墩顶箱梁底板根部厚110 cm,中间按1.6抛物线变化。主桥桥墩采用实体墩,墩帽尺寸6.5 m×4.6 m,墩身截面尺寸6.5 m×3 m,主桥过渡墩采用T型墩,墩帽尺寸11.2 m×3.4 m,墩身截面尺寸6.5 m×3 m。墩与承台连接处设置破冰体,承台

下基础采用直径 1.8 m 的钻孔灌注桩群桩基础。

2 抗震分析计算模型

2.1 地震输入

根据《内蒙古奎素黄河公路大桥工程场地地震安全性评价报告》，在抗震计算分析中取 50 a 63%、50 a 10% 和 50 a 2% 超越概率下的加速度反应谱（反应谱阻尼比取 0.05）作为地震荷载进行反应谱分析，加速度反应谱放大系数及反应谱取值根据文献[4]、[5]取用，反应谱数据见图 2。根据场地的反应谱以及工程场地特征，从 PEER 强震数据库中选择了一组地震动加速度时程记录，见图 3～图 5。考虑工程场地地震动峰值加速度将其调幅，分别生成两组人工地震波时程，每组 3 条波，地震波时程峰值数据见表 1。

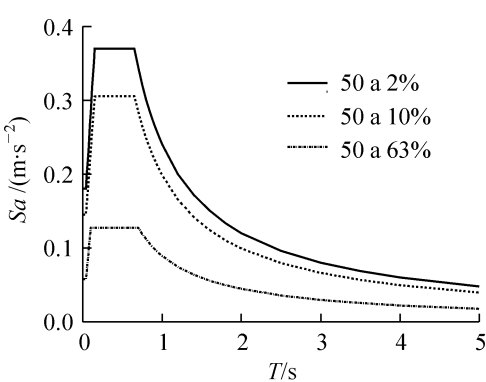


图 2 加速度反应谱(阻尼比 0.05)

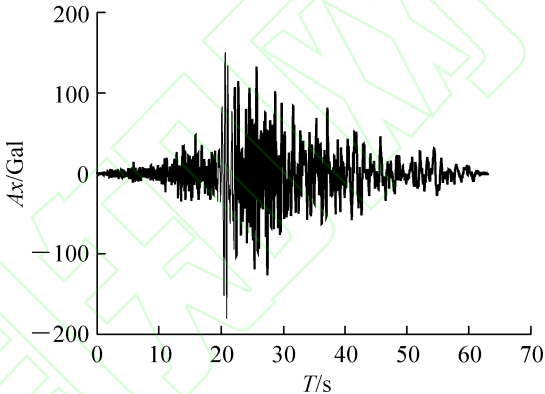


图 3 加速度时程曲线(纵桥向)

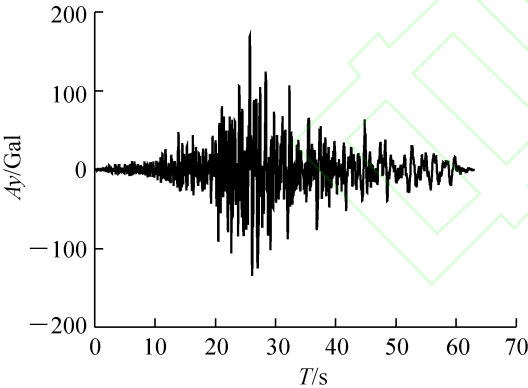


图 4 加速度时程曲线(横桥向)

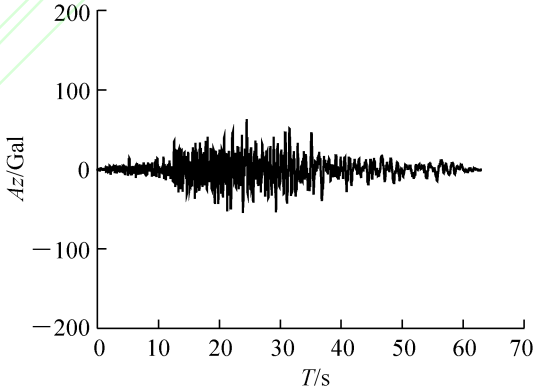


图 5 加速度时程曲线(竖向)

超越概率	表 1 地震动加速度峰值		
	加速度峰值/(10 ⁻² m·s ⁻²)		
	时程曲线 1	时程曲线 2	时程曲线 3
50 a 10%	200.8	212.5	213.7
50 a 2%	364.2	347.1	348.5

2.2 双曲面球减震装置减隔震机理与计算模型

目前,国内所使用主要是橡胶类减隔震支座(如铅芯橡胶支座),该类支座耐久性差、承载能力有限(一般在 1 000 t 以内)的缺陷使得其在大型桥梁减隔震中的应用受到限制^[6]。双曲面球型减隔震支座是在普通球型支座的基础上,巧妙地将平面摩擦转变为大半径的球面摩擦,使大球面摩擦在发生滑动的过程中,不仅因摩擦阻力而耗散地震能量,而且发生动能与势能的转换,控制支座位移。

双曲面球型减隔震支座包括一个具有滑动凹球面的上支座板、一个具有双凸球面的中支座板和一个具有转动凹球面的下支座板,滑动面和转动面都是由不锈钢板和聚四氟乙烯板组成的。双曲面球型减隔震支座通过结构自重沿滑动曲面的切线方向的分力提供回复力,帮助上部结构回到原来的位置。支座的

侧向滞回曲线的基本形状如图 6。支座的侧向力 F 等于回复力与摩擦力之和,见式(1)(W 为上部结构的竖向荷载, D 为支座的侧向位移, H 为滑动球面与转动球面之间的球心距, μ 为滑动球面的摩擦系数);支座屈后刚度见式(2);支座的等效阻尼比见式(3)(E_D 为每一加载循环的耗能,即一个滞回环的面积, $E_D = 4\mu WD_D$, D_D 为支座的设计位移, K_{eff} 为支座设计位移所对应的等效刚度)。

$$F = \frac{W}{H}D + \mu W(\operatorname{sgn}D)$$

(1)

$$K_h = \frac{W}{H}$$

(2)

$$\beta_{eff} = \frac{E_D}{2\pi K_{eff}D_D^2}$$

(3)

2.3 主桥有限元计算分析模型

对内蒙古奎素黄河特大桥结构进行动力分析的有限元模型如图 7 所示,模型利用空间梁单元模拟主梁、墩柱,考虑恒载作用对结构刚度的影响($P-\Delta$ 效应),计算采用大型通用有限元程序 SAP2000,各墩桩基均采用 6×6 耦合弹簧模拟。在进行动力特性及动力反应分析计算时,墩-梁连接关系见表 2(x 为纵桥向, y 为横桥向, z 为竖向。“0”表示自由,“1”表示互相约束或固结,“2”表示双曲面球型减隔震支座连接)。

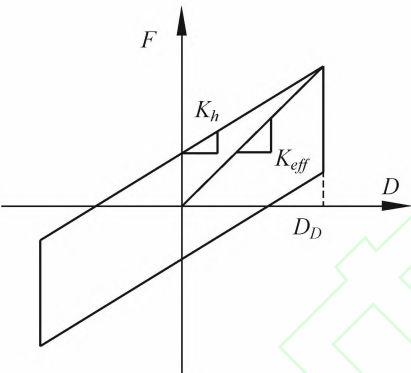


图 6 侧向滞回曲线

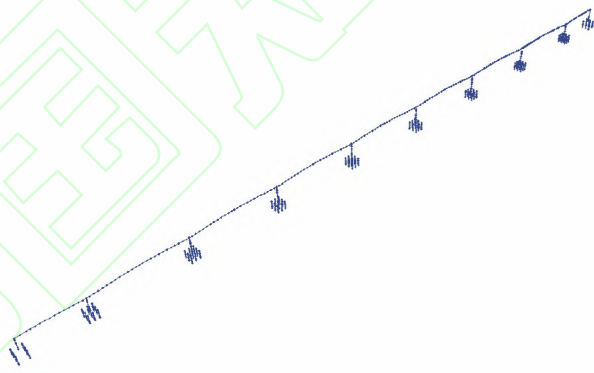


图 7 主桥有限元计算模型

表 2 模型边界连接条件

位置	自由度					
	x	y	z	θ_x	θ_y	θ_z
主梁与 6、7 号桥墩	2	1	1	1	0	0
主梁与其他桥墩	0	1	1	1	0	0

3 抗震分析

3.1 动力特性分析

分析和认识桥梁结构的动力特性是进行桥梁结构抗震性能分析的基础和重要环节,为此,采用前述结构计算模型,对素黄河大桥进行动力特性分析。主桥前 10 阶自由振动的周期、频率及振型特征见表 3,其中第 1 阶振型为主梁纵飘,对 6、7 号墩墩底纵桥向内力以及墩梁间纵桥向相对位移贡献最大;第 6、8、10 阶振型为主梁横向振动桥墩横弯,对各墩墩底横桥向内力贡献最大。

3.2 地震反应分析

对主桥反应谱分析时,利用前述动力特性分析所采用的结构有限元模型,输入地震安全性评价报告 50 a 63% 和 50 a 2% 超越概率的加速度反应谱,取结构前 400 阶振型,按 CQC 方法进行组合,地震采用纵向 + 竖向输入方式,方向组合采用 SRSS 方法。对主桥线性时程与非线性时程分析时,对应于 50 a 63% 和 50 a 2% 的超越概率分别输入 3 条人工地震波,对结构进行时程分析(直接积分法),计算结果取 3 条人工地震波的最大值,地震采用纵向 + 竖向输入方式,方向组合采用 SRSS 方法。

表 3 主桥动力特性

振型阶数	周期/s	频率/Hz	振型特征
1	9.991	0.100	主梁纵飘
2	1.506	0.664	主梁竖弯
3	1.218	0.821	主梁竖弯
4	0.966	1.035	主梁竖弯
5	0.781	1.280	主梁竖弯
6	0.689	1.452	主梁侧弯
7	0.649	1.542	主梁竖弯
8	0.625	1.599	主梁侧弯
9	0.609	1.642	主梁竖弯
10	0.558	1.791	主梁侧弯

奎素黄河特大桥主桥在 50 a 超越概率 10% 的地震作用下,主桥墩、桩的抗弯能力满足预期性能要求;单桩动轴力最大值仅 2 479 kN,单桩恒载轴力小于 6 700 kN,单桩承载力大于 10 000 kN,满足预期性能要求;墩梁间相对位移最大值,纵桥向 5.12 cm,横桥向 7.92 cm,支座水平变形能力满足预期性能要求。在 50 a 超越概率 2% 的地震作用下,主桥墩、桩的内力满足预期性能要求;单桩动轴力最大值仅 2 682 kN,单桩恒载轴力小于 6 700 kN,单桩承载力大于 10 000 kN,满足预期性能要求;墩梁间相对位移最大值,纵桥向 5.6 cm,横桥向 10.2 cm,支座水平变形能力满足预期性能要求。奎素黄河特大桥主桥的主要部位的时程分析计算结果见图 8 ~ 图 11(6、7 号桥墩采用 KZQZ25000 级双曲面球型抗震支座)。

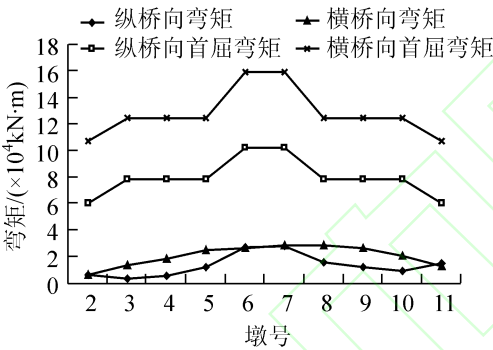


图 8 50 a 10%超越概率地震主桥墩底弯矩

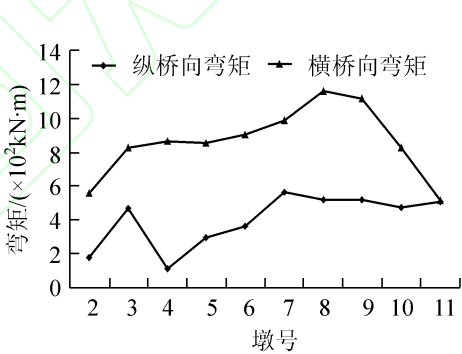


图 9 50 a 10%超越概率地震主桥桩基弯矩

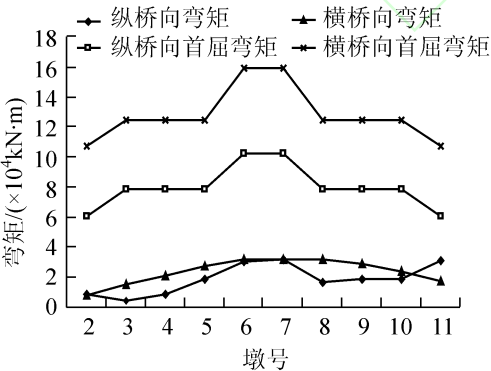


图 10 50 a 2%超越概率地震主桥墩底弯矩

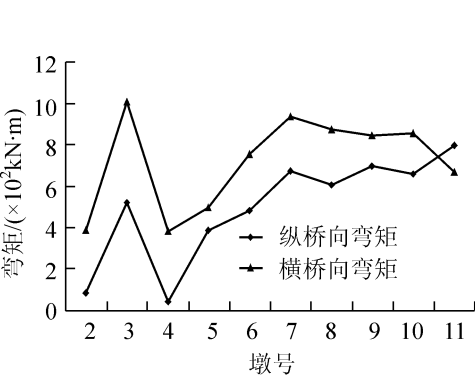


图 11 50 a 2%超越概率地震主桥桩基弯矩

3.3 桥墩和桩基截面验算

桥梁抗震的目标是减轻桥梁的地震破坏,保障人民生命财产的安全,减少经济损失。因此,既要使震前用于抗震设防的经济投入不超过我国当前的经济能力,又要使地震中经过抗震设计的桥梁的破坏程度限制在人们可以承受的范围内,在经济与安全之间进行合理平衡。根据现行规范要求,奎素黄河特大桥各桥墩墩底及群桩基础的性能目标及检算准则为:EI 地震作用下主桥桥墩、桩基础保持弹性;50 a 10% 超越概率地震作用下过渡墩可发生可修复的损伤;50 a 2% 超越概率地震作用下主桥桥墩、桩基局部可发生

可修复的损伤,过渡墩可进入塑性状态,但不倒塌,震后可修复,可供紧急救援车辆通行。

根据桥梁抗震性能的要求,对墩柱和桩基关键截面进行抗震性能验算(采用 Ucfiber 程序),将桥墩和桩基截面划分为纤维单元(见图 12~图 15),在划分纤维单元时,混凝土和钢筋单元分别划分,钢筋和混凝土单元分别采用实际的钢筋和混凝土应力-应变关系。利用实际的钢筋和混凝土应力-应变关系,采用截面数值积分法进行弯矩-曲率分析(考虑响应轴力),得到弯矩-曲率曲线。把实际弯矩-曲率曲线等效为弹塑性双线性恢复模型时的等效抗弯屈服弯矩。截面等效抗弯强度实质上是一个理论上的概念值,是将实际的截面弯矩-曲率曲线按能量等效的原则将其等效为一个弹塑性曲线。此外,由于地震为偶遇荷载,对于 E1 地震作用下的反应,验算中相应的材料强度均为规范中的设计值;对于 E2 地震作用下的反应,验算中相应的材料强度均为规范中相应的标准值,同时,不再考虑材料的安全分项系数,主桥主要构件的抗弯特性见表 4。

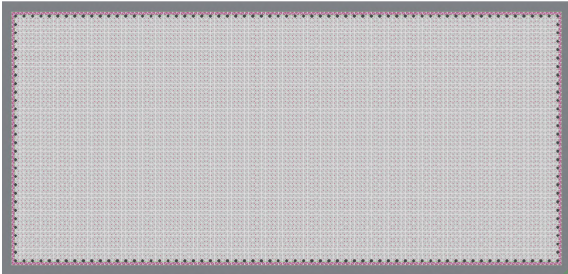


图 12 2、11 号墩计算示意图

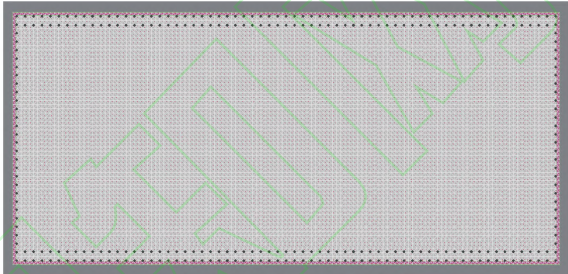


图 13 3~5、8~10 号墩计算示意图

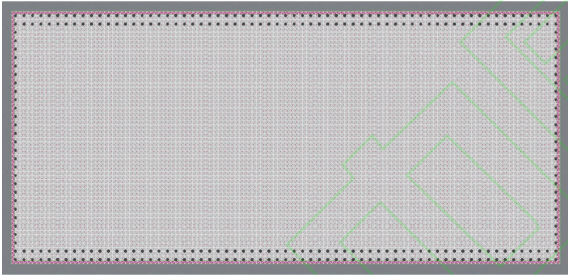


图 14 6、7 号墩计算示意图

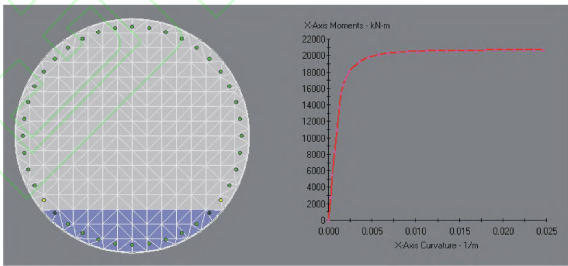


图 15 1.8 m 直径钻孔灌注桩计算示意图

位置	表 4 主桥主要构件抗弯能力				kN · m
	纵桥向首屈弯矩	纵桥向极限弯矩	横桥向首屈弯矩	横桥向极限弯矩	
2、11 号墩墩底	60 520	71 580	107 600	152 500	
3~5、8~10 号墩墩底	78 760	90 240	124 600	190 700	
6、7 号墩墩底	101 900	117 500	159 000	245 000	
12~16 号墩墩底	22 130	27 670	38 840	55 800	
1.8 m 钻孔灌注桩	2 477	3 535	2 477	3 535	

根据抗震计算结果以及经济与安全之间进行合理平衡的原则,在设计中,2~5、8~11 号桥墩分别布置 LQZ4000 与 LQZ25000 级球型支座,6、7 号桥墩采用 KZQZ25000 级双曲面球型抗震支座,在地震荷载作用下,可以有效减轻桥梁工程的地震破坏,同时保证墩底、桩基等桥梁主要构件在正常的工作状态,根据计算,主桥主墩控制截面在 E1、E2 两种地震水平,截面配筋率不小于 1.0%,截面抗弯能力大于截面等效屈服弯矩,说明截面塑性转角远远小于截面极限转角,主桥各桥墩均满足抗震验算要求。主桥各墩桩基截面配筋率不小于 2.0%,过渡墩桩基截面配筋率不小于 3.4%,实际设计中采用桩基采用钢护筒的形式,满足抗震验算要求。

4 结论

通过奎素黄河特大桥抗震分析与研究,介绍了长联预应力混凝土连续梁地震作用下的受力特点、抗震设计计算要点以及双曲面球减震装置减隔震机理与计算模型。得到如下结论:

(1)介绍了双曲面球减震装置减隔震机理及其计算模型,为有限元分析计算模拟、桥梁结构动力计算

提供参考。

(2) 计算中根据场地特点,采用了人工地震时程波,为桥梁抗震计算提供了新的方法。

(3) 分析了长联预应力混凝土连续梁地震作用下的受力特点与抗震分析计算要点,通过先进的计算分析手段和专题研究,使该桥构造结构布置合理、安全可靠,符合安全、经济、适用、美观的原则,为类似的超长联预应力连续梁设计计算提供参考。

参 考 文 献

[1] 赵永刚,韩文涛,于振刚,等. 超长联连续梁设计[J]. 中外公路,2013(1):144-147.
[2] 范立础,胡世德,叶爱军,等. 大跨度桥梁抗震设计[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
[3] 范立础,王志强. 桥梁减隔震设计[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
[4] 重庆交通科研设计院. JTG/T B02-01—2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京:人民交通出版社,2008.
[5] 王国新,陶夏新,姜海燕,等. 反应谱特征参数的提取及其变化规律研究[J]. 世界地震工程,2001(2):73-78.
[6] 同济大学土木工程防灾国家重点实验室. 内蒙古奎素黄河公路大桥抗震报告[R]. 上海:同济大学土木工程防灾国家重点实验室,2008.
[7] 中交公路规划设计院. JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
[8] 中交公路规划设计院. JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.

Seismic Design and Research of Kuisu Yellow River Bridge

Zhao Yonggang, Yin Shinlin, Li Mengran

(Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: This paper describes the mechanical characteristics and seismic design calculation points under earthquake loading as well as the energy dissipation and isolation mechanism of double spherical friction pendulum sliding bearings and calculation model, taking Kuisu Yellow River Bridge as an example in the study, which may be used as reference for long continuous beam design.

Key words: continuous bridge; seismic isolation design; double spherical friction pendulum sliding bearings; time-history analysis; pier; pile foundation

(责任编辑 刘宪福)

(上接第 26 页)

Study on Technology of Pile Foundation Underpinning
Road Overpass in Subway Construction

Liu Heng, Xu Shida, Zhou Kai

(China Railway South Investment & Development Co., Ltd, Shenzhen 518055, China)

Abstract: During the urban rail transit construction, it is inevitable for the underground engineering to underpass the upper structures. While most of the construction adopt the pile foundation, though the line planning could be optimized, it is hard to change too much for limitation of the general planning and the general line planning. So pile foundation underpinning is a good program for such constructions. In this paper, Chuangye Road overpass of Shenzhen Metro Line 5 is taken for study, it describes in detail the design, numerical analysis, construction techniques and the monitor data of the construction. It could be referenced for other such metro construction.

Key words: pile foundation underpinning; overpass; numerical analysis; civil construction

(责任编辑 刘宪福)