

考虑 SSI 的客运专线圆端形板式 桥墩抗震性能研究

朱 晞¹, 江 成², 李 宇³, 张 凯¹

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044;

2. 中交铁道勘察设计院有限公司, 北京 100088; 3. 长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:圆端形板式桥墩是我国铁路客运专线主要采用的桥墩形式之一,对于我国这样一个地震多发区,研究其抗震性能具有十分重要的理论意义和应用价值.在回顾国内外研究土-结相互作用问题的基础上,以客运专线圆端形板式桥墩为研究对象,引入了 FEMA440 中推荐的改进的等效非线性化方法,介绍了考虑 SSI 的能力谱方法的应用步骤,对比了非线性时程分析与能力谱方法的计算结果.结果表明,此方法适用于基于位移的抗震设计方法,场地土的变软会加剧 SSI 的作用,地震能量耗散也相应增加.

关键词:客运专线;土-结构相互作用;时程分析;能力谱方法;圆端形板式桥墩

中图分类号: TU 375; U 442.55

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)02-0153-05

我国第一条快速客运专线——秦沈客运专线有大量的圆端形板式桥墩,这种桥墩是铁路桥梁主要的桥墩形式之一,它的缺点是截面配筋率一般较低,变形性能较差,在地震中容易遭到破坏^[1].许多国家的抗震规范都对土-结构相互作用问题作了一定程度上的考虑,如我国《铁路工程抗震设计规范》(GB50111-2006)^[2]采用 M 法计算非岩石地基的柔度系数,仅考虑了地基柔性效应;日本《日本公路桥规范与说明》^[3]采用常数法计算土结相互作用,未能考虑运动学效应和基础阻尼效应的影响;美国 ATC-40^[4]和 FEMA 356^[5]中均给出了计算地基柔度和强度的公式,但二者也是只考虑了地基的柔性效应.美国 FEMA 440^[6]在 ATC-40 和 FEMA 356 的基础上,提出了一种可以同时考虑三类土结相互作用的方法.基于 FEMA440 的研究成果和我国已建成的秦沈客运专线的工程背景,本文选取秦沈客运专线上某圆端形板式桥墩作为研究对象,采用非线性动力时程分析和非线性静力弹塑性分析方法对圆端形板式桥墩进行了抗震性能评估比较,并考虑了土结相互作用对抗震性能评估的影响,研究 FEMA440 对非线性弹塑性分析方法的改进.

1 桥墩结构分析模型的建立

本文选取秦沈客运专线上某简支梁桥为算例,它位于 7 度地震区,墩高 16 m,截面为圆端形,采用扩大基础,桥梁上部结构为 32+32 m 双线简支箱梁,墩顶与箱梁之间采用盆式橡胶支座固定连接,简化成等效质量直接作用在墩顶上,墩身材料采用 C30 混凝土,弹性模量为 $3.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$,桥墩纵向钢筋采用 136 根 Q335 直径 20 mm 的钢筋,箍筋采用直径为 8 mm 的 Q235 钢筋,箍筋间距为 15 mm.纵筋配筋率为 0.22%,基础材料采用 C20 号混凝土.依据以上工程概况,本文分别建立了在线弹性和弹塑性时程分析的情况下,圆端形板式桥墩的结构分析模型,并在模型中以土弹簧的形式加入了柔性地基作用.

1.1 线弹性模型和弹塑性模型

本文采用通用结构分析软件 SAP2000 建立有限元计算模型,主要采用梁单元、多段线性塑性连接

收稿日期:2012-07-05 修改稿日期:2013-04-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50578007, 50808015, 50908014);北京交通大学科技基金资助项目(2007XM033, 2008RC026)

作者简介:朱 晞(1937-),男,江苏常州人,教授,博士生导师,研究方向为桥梁抗震.

单元和弹簧单元,建立了三种场地下圆端形板式桥墩的线弹性和弹塑性计算模型。

桥梁结构在强震作用下会进入塑性,塑性变形主要由墩柱的塑性铰的变形能力所决定^[7],墩柱恢复性模型的建立是进行桥梁结构非线性分析的基本环节.《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/TB02-01—2008)^[8]中第 6.2.2 条规定:沿顺桥向,简支梁桥墩柱的底部区域为塑性铰区域.表 1 为本桥桥墩的墩底截面抗弯承载力参数。

表 1 墩底截面塑性铰特性

Tab. 1 Properties of plastic hinge at the bottom of pier

截面	轴力 /kN	屈服弯矩 /10 ³ kN·m	屈服曲率 /10 ⁻³ 1·m ⁻¹	极限弯矩 /10 ³ kN·m	极限曲率 /10 ⁻³ 1·m ⁻¹	有效刚度 /10 ¹⁰ N·m	曲率延性
1	17 028.8	31.1	1.1	36.6	41.5	3.0	36.8

1.2 柔性地基模型

根据《铁路工程抗震设计规范》(GB50111-2006)^[2]的规定,本文采用等代土弹簧模拟土结相互作用,将桥墩的固结支撑变更为弹性支撑(水平弹簧、转动弹簧和耦联弹簧),等代弹簧的刚度采用表征土介质弹性值的 m 参数来计算.由于地基系数采用的比例系数为 m ,故常称“ m 法”^[8]. I 类场地固结,故不必计算场地刚度.本文选取

表 2 不同场地条件下模型的土弹簧刚度

Tab. 2 Soil spring stiffness of model under different site conditions

了 II 类和 III 类场地下 的 m 中值,计算出的刚度代表其场地的土弹簧刚度,计算结果如表 2 所示.

1.3 地震波的选取

我国《抗震规范》根据土
层平均剪切波速和场地覆盖土层厚度将场地土划分为四类,本文研究的内容为规范中的 I 类、II 类和 III 类场地的土结相互作用,故选取地震波时,按照这三类场地的剪切波速等信息选取.美国加州伯克利大学的太平洋地震工程研究中心(PEER)提供了强震记录数据库^[9],本文从中挑选了震级在里氏 6.5~7.5 级,震中距为 30~150 km,峰值加速度(PGA)在 0.1~0.15 g 之间的强震记录,每一类场地选择 7 条地震波,共 21 条地震波,作为圆端形板式桥墩地震反应时程分析的地震动输入.考虑到地震波的频谱特征,本文对每条地震波的总体下降点也作了相应的筛选,力求使各个地震波的下降点处于规范设计加速度反应谱的平台范围内.为了比较所选波的统计特性,图 1 给出了在阻尼比为 5% 时,各类场地动力放大系数均值谱在调整峰值后,与《铁路工程抗震设计规范》(GB50111-2006)中动力放大系数谱的对比.从图中可见,本文所选地震波的放大系数均值谱在各类场地下均与规范谱相近,地震波统计特性基本符合现行规范要求。

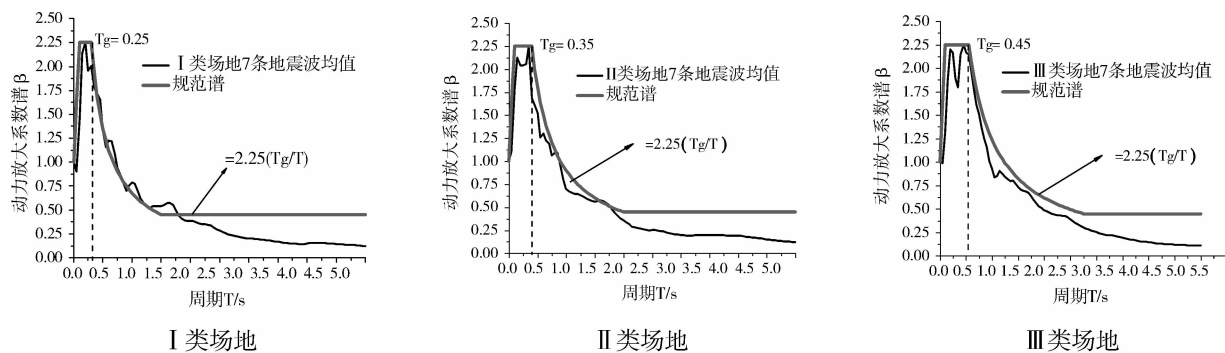


图 1 动力放大系数 β 谱(I、II 和 III 类场地均值)

Fig. 1 Dynamic magnification factor β (Mean of site of I, II and III class)

2 考虑 SSI 的能力谱方法

由震源出发,通过场地土传播的地震波输入到结构体系,使其振动.这时,结构体系产生的惯性力如同新的震源又反过来作用于场地,引起的场地变形将使土-结构体系交界面的运动不同于自由场地情况.这种现象称为土结相互作用(Soil Structure Interaction,即 SSI)^[10].本文将土-结构相互作用研究问题分成下列三种主要内容进行研究:(1)基础柔性效应(SSI①),将基础的弹性作用引进土-结构相互作用系统;(2)运动学效应(SSI②),考虑结构的过滤作用对地面运动的影响;(3)基础阻尼效应(SSI③),土-结构系统通过辐射阻尼和土的滞回阻尼耗散地震波能量.

用等效非线性化方法计算结构最大位移响应的过程需要用迭代或图解的办法. FEMA440 中介绍了三种能力谱的等效线性化方法的步骤 A、B 和 C 以供选用. 本文选取的是 C 方法,即 MADRS 轨迹法,运用手算和绘图的方式找到性能点. 其具体步骤为:

1) 选择一个感兴趣的并且有初始阻尼 β_i (通常为 5%) 的地面运动谱图像. 这个可以是 ATC-40 或者 FEMA356 的设计谱,一条指定场地确定谱,或者等风险概率谱.

2) 考虑土结相互作用(SSI)折减所选的地面运动谱,包含运动学效应和基础阻尼效应的折减.

3) 将折减后的地面运动谱转换为 ATC-40 里 ADRS(加速度-位移反应谱)格式,这就是初始的 ADRS 需求曲线.

4) 对结构进行 Pushover 分析,生成结构的能力曲线,并转换为 ATC-40 里 ADRS(加速度-位移反应谱)格式,这就是 ADRS 能力曲线. 其纵坐标是拟谱加速度 A ,横坐标为拟谱位移,计算公式为:

$$\begin{cases} A = \frac{V_b}{M_1^*} \\ D = \frac{u}{\Gamma_1 \cdot \phi_{N1}} \end{cases}$$

其中: Γ_1 为结构的基阶振型 ϕ_1 的参与系数; M_1^* 为结构的基阶振型的有效质量; ϕ_{j1} 是基阶振型在节点 j 处的振幅; N 为节点总数.

5) 选择初始性能点(最大加速度 a_{pi} 和最大位移 d_{pi}),如图 2 所示,初始性能点的选择可以基于等位移近似,也可以基于工程判定的其他点.

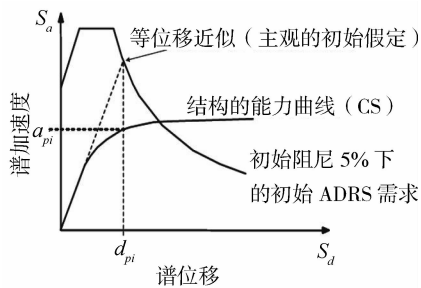


图 2 初始的 ADRS 需求谱和能力谱^[6]

Fig. 2 Initial ADRS demand and capacity spectrum

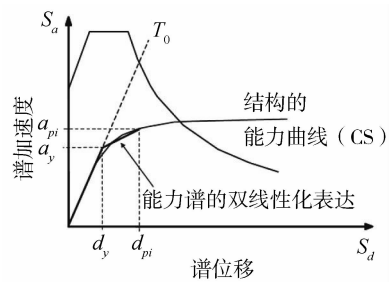


图 3 能力谱的双线性化表达^[6]

Fig. 3 Bilinear representation of capacity spectrum

6) 生成能力谱的双线性化表达,步骤与 ATC-40 中的方法一致. 定义初始周期 T_0 , 屈服位移 d_y 和屈服加速度 a_y (图 3). 注意,这些参数可以随着最大加速度 a_{pi} 和最大位移 d_{pi} 假定的不同而改变. 在本文中,由于生成的能力曲线已经接近双线性标准,所以这一步可以略过.

7) 对步骤 6 中生成的双线性化表达,计算后弹性刚度 α 和延性 μ ,计算公式如下:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y} \right)}{\left(\frac{a_y}{d_y} \right)}; \mu = \frac{d_{pi}}{d_y}$$

8) 用步骤 7 中计算的后弹性刚度 α 和延性 μ ,计算相应的有效阻尼 β_{eff} 和有效周期 T_{eff} ,计算公式

如上节所述.

9) 用步骤 8 中选定的有效阻尼, 修改初始 ADRS 谱到 β_{eff} .

10) 用修正系数 M 仅仅与用 β_{eff} 修正的 ADRS 加速度坐标轴相乘(注意, 不是位移坐标轴), 生成修正的加速度-位移反应谱(MADRS).

11) 割线周期 T_{sec} 的射线与 MADRS 的交点生成了一个可能的性能点(图 4).

12) 增加或减少假设的性能点, 重复这个过程, 生成一系列可能的性能点.

13) 实际的性能点定义为步骤 12 的点轨迹与能力谱的交点.

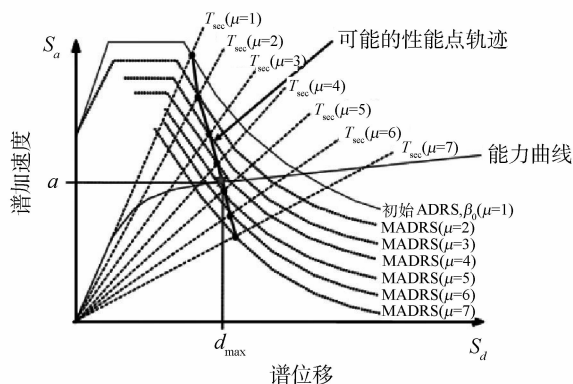


图 4 方法 C: MADRS 轨迹法确定最大位移值^[6]

Fig. 4 Procedure C: Determination of estimated maximum displacement using MADRS

3 计算结果和分析

在采用非线性动力时程分析和上述考虑土结相互作用的能力谱方法对圆端形板式桥墩进行了计算之后, 本文得到了以下的计算结果及抗震性能分析.

3.1 非线性动力时程分析结果

本文采用 Sap2000 程序对建立的圆端形板式桥墩的各种计算模型进行了非线性动力时程分析, 得到了罕遇地震下地基柔性效应, m 值的变化以及场地特性对桥墩地震响应的影响规律. 以Ⅲ类场地为例, 在罕遇地震下进行桥墩的弹塑性时程分析, 得到结果如下图所示.

图 5 显示了Ⅲ类场地 7 条地震波作用下, SSI 对基底剪力和墩顶位移的影响. 由图可见, 考虑 SSI 后, 桥墩整体变柔, 基础位移增加, 从而墩顶位移变大. 模型的墩顶位移均值由 4.357 cm 增加到 5.815 cm, 增大了 33.46%. 基底剪力峰值呈现较不规则的变化, 但总体上考虑 SSI 后的基底剪力偏大.

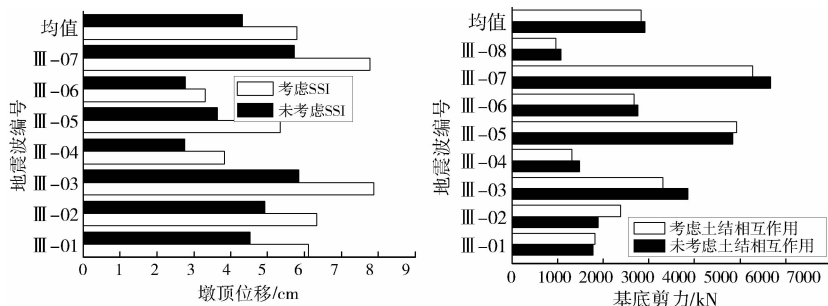


图 5 SSI 对基底剪力和墩顶位移的影响

Fig. 5 Effect of SSI on the basal shear and the pier displacement

3.2 能力谱分析结果

本文对桥墩采用能力谱方法进行分析. 需求谱采用了所选的 21 条实际地震记录所生成的加速度谱, 对模型进行推倒分析时, 加载模式为基阶振型, 采用位移控制, 监测点在墩顶, 框架铰为弯矩控制的 M3 铰. 由于Ⅰ类场地模型中地基是刚性的, 无法考虑地基阻尼效应和埋深效应, 所以本文只对Ⅱ、Ⅲ类场地模型进行了考虑土-结构相互作用 (SSI①②③) 的能力谱法分析, 得到各模型的墩顶位移和基底剪力的最大响应, 并与只考虑地基柔性效应 (SSI①)、时程分析中考虑 SSI 效应的结果进行对比. 对比结果如下:

由上图可见, 同样是只考虑基础柔性效应 (SSI①), 时程分析法计算的墩顶位移比 MADRS 方法计算的墩顶位移要大, 但是大的不多. 同时考虑 SSI 三个方面效应的 MADRS 方法计算的墩顶位移是最小的, 并且随着场地土的变软, 三种方法计算墩顶位移的结果差别变大.

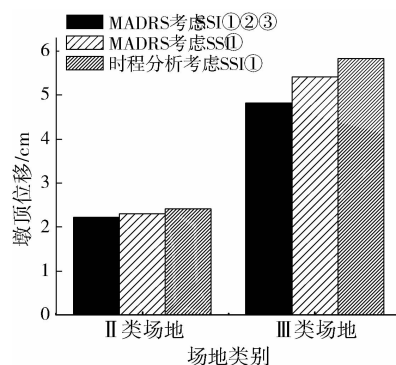


图 6 三种考虑 SSI 效应的方法比较

Fig. 6 Comparison of three kinds of methods considering SSI effect

4 结 论

本文研究可获得以下结论:

(1)在同样只是考虑基础柔性效应的情况下,能力谱方法与时程分析的计算结果相比,前者的墩顶位移和基底剪力响应总是比后者要小.然而二者偏差并不大,表明用能力谱方法计算结构的地震峰值响应是可行的.FEMA440 改进的能力谱方法和 ATC-40 的能力谱方法基本步骤相同,采用 Pushover 单调加载分析,仅仅模拟了单方向的地震作用,无法反映结构所受的真实反复力作用.所以此方法更适用于基于位移的抗震设计方法.

(2)在考虑土结相互作用方面,FEMA440 考虑了三种土结相互作用对结构的影响,即基础柔性效应,运动学效应和基础阻尼效应.这三种土结相互作用的折减不同程度的降低了地震对结构的作用,导致了结构地震响应的减小.随着场地土的变软,土结相互作用的影响越来越明显,对地震波的折减也相应增加.可见在较软场地下,地震的能量耗散也相应增加,场地土对地震波的影响变大.应该指出,本文选取的地震波较少,不具有一般性,当结构类型、场地土特性和地震激励不同时,可能得到不同的结果.然而本文的计算方法和思路可以为其他的研究土结相互作用的影响提供参考和依据.

(3)本文的研究是以基阶模态起控制作用的圆端形板式桥墩为对象展开的,由于高阶模态的影响,对于高柔桥墩的研究尚需进一步讨论.

参考文献 References

- [1] 中国铁路建设史编委会. 中国铁路建设史[M]. 北京:中国铁道出版社,2002.
Editorial Board of China's railway construction history. China's railway construction history[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002.
- [2] 中华人民共和国铁道部,中华人民共和国建设部. GB50111-2006. 铁路工程抗震设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2006.
Ministry of Railway of the People's Republic of China, Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50111-2006. Code for seismic design of railway engineering[S]. Beijing: China Planning Press, 2006.
- [3] 日本道路协会. 道路桥示方书同解说(日本公路桥规范与说明)[R]. 东京:日本道路协会,1996.
Japan Road Association. Japanese Bridge Specifications and description for highway[R]. Tokyo: Japan Road Association, 1996.
- [4] Applied Technology Council(ATC). Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Report ATC-40[R]. California: California Seismic Safety Commission, 1996.
- [5] Federal Emergency Management Agency. The Seismic Rehabilitation of Buildings. Report FEMA356[R]. Washington, D. C. : FEMA, 2000.
- [6] Federal Emergency Management Agency. NEHRP Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. Report FEMA 440[R]. Washington, D. C. : NEHRP & FEMA, 2005.
- [7] 樊增彬. 薄壁空心墩非线性地震反应分析[D]. 成都:西南交通大学,2002.
FAN Zeng-bin. The Non-Linear Seismic Response of Hollow Thin-wall Pier[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002.
- [8] 中华人民共和国交通运输部. 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.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG-T B02-01-2008. Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [9] PEER Strong Motion Database[EB/OL]. <http://peer.berkeley.edu/smcat/>.
- [10] 房营光. 岩土介质与结构动力相互作用理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2005.
FANG Ying-guang. Theory and Applications of Geotechnical Media and Structural Dynamic Interaction[M]. Beijing: Science Press, 2005.

(下转第 191 页)

Strong aggregate interlocking structure in asphalt mixture

ZHANG Yi^{1,2}, JIANG Ying-jun¹, YANG Qiu-xia³

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education,

Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Quality Supervision Station of Shaanxi Provincial Communications Department, Xi'an 710075, China;

3. Civil Engineering College of Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to optimize the aggregate gradation and improve the performance of asphalt mixture, a numerical test method based on the particle flow modeling was developed for the California Bearing Ratio (CBR) test and was proved to be reliable. The CBR laws of aggregate were analyzed based on the numerical simulation, and the Strong Aggregate Interlocking Structure (SAIS) was developed according to optimal performance of AC-16 asphalt mixture. The road performance of SAIS asphalt mix were studied and the results indicate that 13.2~19 mm aggregates are the main skeleton with SAIS, while the proper amount 9.5~13.2 mm aggregates and 4.75~9.5 mm aggregates provide a properly packed aggregate skeleton structure; the optimal ratio of the three types of aggregates (13.2~19 mm, 9.5~13.2 mm, 4.75~9.5 mm) is 45 : 35 : 20 by mass. Upon the maximum CBR principle, and the ratio of coarse aggregate and fine aggregate is 55 : 45~65 : 35 based on optimal performance of asphalt mixture. Compared with aggregate gradation in specifications, SAIS asphalt composite is superior in terms of compressive strength, splitting strength and dynamic stability, which are enhanced by 26%~28%, 20%~30% and 22%~27% respectively. The achievement of this study can be used as reference in practice.

Key words: road engineering; asphalt mixture; strong aggregate interlocking structure; particle flow code; california bearing ratio; road performance

Biography: ZHANG Yi, Senior engineer, Candidate for Ph. D., Xi'an 710064, P. R. China, Tel: 0086-13359215488, E-mail: 519885641@qq.com

(上接第 157 页)

Research on round-ended plate pier aseismic performance of passenger dedicated railway line considering soil-structure interaction

ZHU Xi¹, JIANG Cheng², LI Yu³, ZHANG Kai¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044 China;

2. CCCC Railway Consultants, LTD, Beijing 100088 China;

3. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064 China)

Abstract: Round-ended plate pier is one of the most popular forms used in Chinese passenger dedicated railway line PDRL hereafter. It is well known that China is a country with much active earthquake. Studying the seismic behavior of this pier has a lot of theoretical significance and practical value. By taking round-ended plate piers of PDRL as the research object, this paper introduces the improved equivalent linearization method recommended by FEMA440 and the application procedure of considering SSI based on capacity spectrum method reviewing the research of SSI at home and abroad, with discussion on the differences of the analytical results between the nonlinear time-history analysis and the capacity spectrum method. Results indicate that this method is suitable for the displacement-based seismic design method, the soft soil will increase the role of the SSI, and the seismic energy dissipation will also be increased.

Key words: passenger dedicated railway line; soil-Structure interaction; time-history analysis; capacity spectrum method; round-ended plate piers

Biography: ZHU Xi, Professor, Beijing 10044, P. R. China, Tel: 0086-13810455370, E-mail: xzhu@center.njtu.edu.cn