

基础脱离及桥墩弹塑性对结构地震反应影响的研究

吴高峰, 徐 鸿

(北京化工大学机电学院 CAE 中心, 北京 100029)

摘 要:浅平基桥墩在承受强震作用时其基础与地基之间会发生脱离,地基土会进入塑性状态。同时,当结构遭遇设防烈度地震或罕遇地震时,结构往往处于非线性状态,这都会导致桥梁的严重破坏。本文以兰州小西湖黄河大桥为工程背景,采用场地超越概率为 10% 人工地震波,研究了在弹塑性 Winkler 地基上同时考虑桥墩塑性时的结构地震反应。通过非线性时程反应分析得到:考虑地基和桥墩的非线性使得桥墩墩顶的位移增大,墩底弯矩减小,这对保护桥墩是有利的;同时得到,小西湖黄河大桥当遭遇罕遇地震(大震)时桥墩已进入屈服,但其屈服曲率不到破坏曲率的 1/2,该桥能够满足“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设计目标。

关键词:脱离;桥墩;弹塑性;地震反应分析

中图分类号:TU311

文献标识码:A

文章编号:1000-0844(2005)01-0008-05

Research on Seismic Response of Bridge Structure Considering Uplift of the Foundation and Pier Elasto-plastic

WU Gao-feng, XU Hong

(Mechanical and Electrical Engineering College, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: When the bridge piers with shallow foundation subject to strong earthquake action, the uplift of foundations will occur and the foundation soil will enter to plasticity, meanwhile the structure will enter to nonlinear state and is damaged. It is very difficult to simulate the uplift and yield of supporting soil using an accurate method. In this paper, an improved Winkler foundation model, which could be used to consider uplift and yield, is employed in the seismic response analysis. Taking the project of Xiaoxihu Yellow River Bridge in Lanzhou city as the example, an artificial seismic wave with the site transcendental probability 10% level is inputted and the nonlinear history responses are obtained. The result shows that the displacement on top of the pier increases and the moment at bottom of the pier decreases, the piers will yield when meet strong earthquake, but its curvature will not reach constructure. So the goal of three-level aseismic design can be meet.

Key words: Uplift; Pier; Elasto-plastic; Seismic response analysis.

0 引言

目前,在对桥墩进行地震反应分析时,都将基础与地基土看成是完全粘结在一起的,即不考虑基础与地基土之间的分离。实际上浅基础桥墩主要靠重力支承在地基上,当地震荷载较大时,它引起的倾覆力矩将超过由于重力所提供的稳定力矩,浅基桥墩

的基底将与地基脱离而脱离,甚至产生倾覆。另一方面,当桥墩基础出现脱离之后,局部应力集中现象将使基础边缘的地基土进入塑性状态。因此,对桥墩进行大震时的地震反应分析时,需要考虑基础脱离及地基塑性的影响。

为了研究地震时基础的脱离影响,Psycharis,

收稿日期:2004-06-28

作者简介:吴高峰(1974-),男(汉族),甘肃白银人,博士研究生,从事力学 CAE 及抗震研究。

Yim 和 Chopra 等在分析中采用了允许脱离的广义 Winkler 地基模型^[1-2],并在 Psycharis 提出的广义 Winkler 分布元件模型和双元件模型的基础上对柔性地基上建筑物的地震反应进行了研究^[3]。Wolf 等通过利用分布的弹塑性弹簧研究了土壤屈服对脱离条件下结构反应的影响^[4]。Izumi 等研究了考虑脱离与地基土屈服后建筑物的摇摆振动^[5]。但他们在分析中所使用的理想弹塑性地基模型对于地基塑性的处理过于简单,不能真实地反应地基的滞回特性。

为了使所用的模型建立在可靠的基础上,国内陈兴冲在室内进行了砂土地基上浅基桥墩在水平反复荷载下的滞回特性实验,提出了允许脱离的弹塑性 Winkler 地基模型^[6],并利用该地基模型对刚性浅平基础桥墩进行了滞回特性分析,用数值方法模拟的滞回曲线与实测结果吻合较好,从而验证了允许脱离的弹塑性 Winkler 地基模型的适用性^[7]。

此外,当结构遭遇设防烈度地震或罕遇地震时,结构往往处于非线性状态,如桥墩开裂、屈服、支座位移过大等。现代钢筋混凝土桥梁结构中,因基础与地基之间发生脱离和桥墩破坏导致桥梁结构严重破坏甚至倒塌,已成为桥梁震害的最主要特征之一。如 1994 年美国北岭地震^[8]中,Mission Gothic 跨线桥桥墩典型弯剪破坏情况如图 1 所示。

要精确模拟上述两个问题是非常复杂的。本文在总结国内外学者在 Winkler 地基模型研究的基础上,利用弹塑性 Winkler 地基模型和弹塑性梁柱单元模型,研究了兰州小西湖黄河大桥桥墩的地震反应。

1 允许脱离的弹塑性 Winkler 地基模型

允许脱离的弹塑性 Winkler 地基模型如图 2 所示。众所周知,对于传统的 Winkler 地基模型,基础的(弯矩—转角)关系为线性。若允许基础脱离,则当弯矩较大时 $M-\theta$ 关系是非线性的(图 3)^[9-10]。



图 1 Mission Gothic 跨线桥桥墩典型破坏
Fig. 1 Typical piers breakage at Mission Gothic bridge.

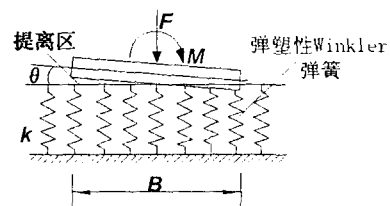


图 2 Winkler 地基模型
Fig. 2 Winkler foundation model.

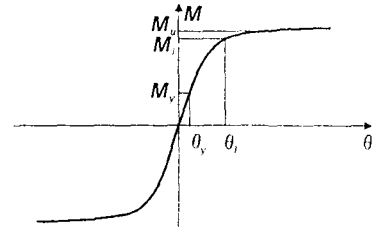


图 3 允许脱离 Winkler 地基的 $M-\theta$ 关系
Fig. 3 $M-\theta$ relation of Winkler foundation allowed to uplift.

由于地基塑性的影响,结构在反复加载过程中出现了明显的滞回环^[7](图 4),这是由于地基塑性所造成的。进一步的研究表明, $M-\theta$ 关系的滞回环主要是由于地基压缩与回弹曲线的不重合所引起的。由实验所得的压缩与回弹曲线如图 5 所示^[7]。

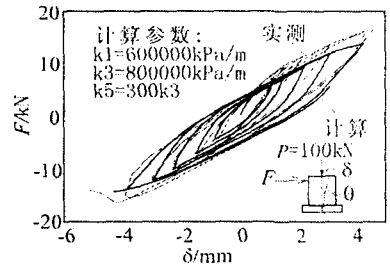


图 4 桥墩的荷载—位移关系
Fig. 4 Load—displacement relation of rigid bridge piers.

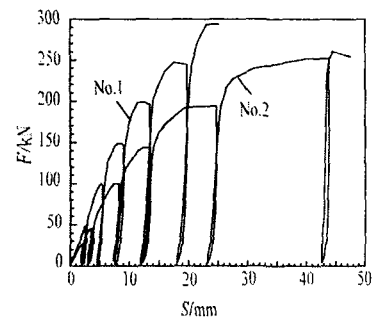


图 5 地基土的压缩与回弹曲线
Fig. 5 Compression and resilience curve of foundation.

根据实测的压缩与回弹曲线,形成一个由弹塑性分布弹簧所组成的弹塑性 Winkler 地基模型(图 6)。在此模型中,加载、卸载及再加载由五个参数确

定,即初始加载模量 k_1 、卸载模量 k_5 和 k_2 、再加载模量 k_3 以及破坏荷载 p_y 。初始加载沿折线 OAB 。对于卸载,若从骨架曲线(OA 段、 AB 段)或再加载状态开始卸载,将按以下的规律进行:先按模量 k_5 卸载至当前荷载的一半,然后再按卸载模量 k_2 卸载。而再加载模量 k_3 则可根据卸载模量 k_5 和 k_2 导出。即若在 G 点处再加载,则再加载线经过线段 DF 的中点 H ,并由此导出再加载模量 k_3 。若在线段 DF 或 FG 的任意点再加载,则再加载线平行于 GH ,也按 k_3 再加载。另外,无论对于无粘性土,还是粘性土,由于不计基础和地基土之间的粘结作用,因此这种弹塑性弹簧只能受压而不能受拉。

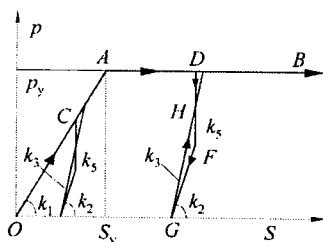


图 6 允许提高的弹塑性 Winkler 地基模型

Fig. 6 Elastic-plastic Winkler foundation allowed to uplift.

由于桥墩在地震作用之前一般已经历了恒载及活载的重复作用,因此在地震反应分析时,地基弹簧的加载模量 k_3 从开始,而不是从 k_1 开始。

2 桥墩截面的恢复力模型

目前,公路或铁路抗震设计规范采用综合影响系数粗略的考虑结构塑性的影响。我国新修订的建筑物抗震设计规范已经列入了弹塑性分析内容。本文在研究小西湖黄河大桥抗震性能时,将采用以下桥墩弹塑性恢复力模型。

钢筋混凝土桥墩构件的恢复力特征通常采用 $M-\phi$ 关系曲线和 $P-\delta$ 关系曲线表示。本文中对于钢筋混凝土桥墩采用考虑刚度退化的武田三线性模型。武田模型是依据较多的钢筋混凝土构件试验所得的恢复力特性抽象出来的。本文在考虑刚度退化的武田模型的基础上稍加简化,建立了考虑刚度退化的三线性恢复力特征曲线的变化规律。如图 7 所示。

骨架曲线由开裂点 $C(M_c, \phi_c)$ 、屈服点 $Y(M_y, \phi_y)$ 和破坏点 $U(M_u, \phi_u)$ 确定,对于具有对称配筋的构件,其骨架曲线关于原点对称。恢复力特征曲线的基本参数有刚度参数: $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$; 曲率参数 $\phi_c, \phi_y, \phi_{s,max}^*, \phi_{s,min}^*, \phi_i^*, \phi_{s3}^*, \phi_{s3}^{**}, \phi_{s6,max}^*, \phi_{s6,min}^*, \phi_{s6}^*, \phi_{s6}^{**}$; 弯矩参数 $M_c, M_y, M_u, M_{s,max}^*, M_{s1}^*$,

$M_{s6,max}^*, M_{s6,min}^*$ 。

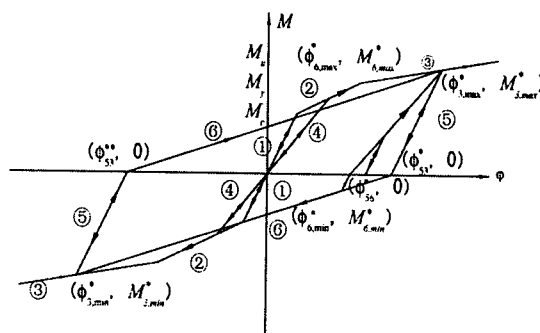


图 7 钢筋混凝土恢复力特征曲线(三线性)

Fig. 7 Reinforced concrete resuming force curve (three linear).

根据截面几何尺寸、材料性质及轴向力可确定的参数有: $K_1, K_2, K_3, \phi_c, \phi_y, \phi_u, M_c, M_y, M_u$ 。其中: $K_1 = \frac{M_c}{\phi_c}, K_2 = \frac{(M_y - M_c)}{(\phi_y - \phi_c)}, K_3 = \frac{(M_u - M_y)}{(\phi_u - \phi_y)}$ 。结构滞回曲线按照以下规律变化:

(1) 第一种曲线:反映截面处于弹性阶段的曲线。当前一时步位于此曲线上,且当前步的曲率满足: $|\phi| \leq \phi_c$ 时,则当前步仍位于此曲线上。此曲线具有可逆性,对应的刚度为 K_1 。

(2) 第二种曲线:开裂点至屈服点之间的骨架曲线,此曲线不可逆,对应的刚度为 K_2 。在以下两种情况将转向此种曲线:前一步位于第一种曲线上,且当前步的曲率满足 $|\phi| \leq \phi_c$ 时;前一时步位于第四种曲线上,且当前步的曲率满足 $|\phi| > \phi_i^*$ 。

(3) 第三种曲线:屈服点至破坏点之间的骨架曲线,此曲线不可逆,对应的刚度为 K_3 。在以下三种情况将转向该曲线:前一时步位于第二种曲线上,且当前步的曲率满足 $|\phi| > \phi_y$;前一时步位于第五种曲线上,加载且当前步的曲率满足 $|\phi| > \phi_{s,max}^*$ 或 $|\phi| > -\phi_{s,max}^*$;前一时步位于第六种曲线上,反向加载且当前步的曲率满足 $|\phi| > \phi_{s,max}^*$ 或 $|\phi| > -\phi_{s,max}^*$;

(4) 第四种曲线:在开裂点至屈服点之间即第二种曲线上卸载时,转向此种曲线,此曲线具有可逆性,对应的刚度为 K_4 。其值按下式计算:

$$K_4 = \frac{M_i^*}{\phi_i^*}$$

其中 M_i^*, ϕ_i^* 分别为卸载点的弯矩和曲率;

(5) 第五种曲线:在屈服点至破坏点之间(即第三种曲线上)或在第六种曲线上卸载时,转向此种曲线,此曲线具有可逆性,对应的刚度为 K_5 。其值按下式计算:

若在第三种曲线上的卸载点为 $(\varphi_{3,\max}^*, M_{3,\max}^*)$

$$K_5 = \frac{(M_y + M_c)}{(\varphi_y + \varphi_c)} + \left(\frac{\varphi_y}{\varphi_{3,\max}^*} \right)^\alpha$$

α 为考虑刚度退化的系数,通常为 0.4。当在第六种曲线上卸载转向第五种曲线时,其刚度与同侧第三种曲线上卸载的刚度 K_5 相同。

(6) 第六种曲线:屈服后弯矩 M 的符号发生改变时,转向此种曲线,此曲线不可逆。指向该侧第三种曲线上的最大到达点,当该侧尚未屈服时,指向屈服点,对应的刚度为 K_6 。其值按下式计算:若最大到达点为 $(\varphi_{3,\max}^*, M_{3,\max}^*)$ 时, $K_6 = \frac{M_{3,\max}^*}{(\varphi_{3,\max}^* - \varphi_{53}^*)}$, $(\varphi_{53}^*, 0)$ 为第六种曲线的开始点。

3 求解方法

由于兰州市地处 8 度地震区,需要对小西湖黄河大桥进行抗震设计。在本文中,对小西湖黄河大桥进行强震作用下地震反应分析时,同时考虑了弹塑性 Winkler 地基和桥墩塑性双重非线性效应。分析时采用黄河大桥主桥场地 50 年超越概率为 10% 人工地震波,其桥址地面地震动峰值加速度为 0.24 g,因此抗震成为桥墩设计的关键。同时考虑地基—基础脱离和桥墩塑性双重非线性效应后,由于滞回规律的复杂性,弯矩—转角($M-\theta$)关系难以用一个显式的滞回模型表示。本文在处理方法上不使用显式的 $M-\theta$ 关系,而是直接从弹塑性 Winkler 地基模型和武田三线性恢复力模型出发进行求解。即在直接积分的每一时步,根据当前结构应变历史来确定弹塑性 Winkler 地基弹簧的刚度和桥墩所处恢复力模型的位置,并由此进一步确定结构下一荷载步刚度矩阵,整个计算通过自编程序对结构地震反应进行计算。

4 弹塑性地震反应分析

4.1 工程背景

兰州市小西湖黄河大桥由铁道第一勘察设计院设计,采用矮塔斜拉桥方案,桥跨布置为 81.2 m + 136 m + 81.2 m,单索面,主梁采用梯形截面单箱三室箱梁,底宽 15.4 m,顶宽 27.5 m,标准节段长 4 m,结构地处Ⅷ度地震区。

4.2 计算结果及分析

在计算中,同时进行了小西湖黄河大桥在小震及设防地震作用下的线性时程分析。通过对全桥的线性地震反应分析,可知控制该桥抗震设计的为顺

桥向振动,且上部结构基本为平动。故可将全桥墩顶以上的所有恒载质量(21690.6 t)置于 3 号墩墩顶,从而简化为一个单墩模型进行弹塑性地震反应分析。

本桥桥墩截面采用对称配筋,其纵向弯曲的弹塑性截面特性计算结果列于表 1。滞回曲线采用武田三线性弯矩—曲率模型。

表 1 墩底截面特性计算表(纵向)

截面特性	开裂	屈服	破坏
曲率/ m^{-1}	0.000 095	0.000 73	0.005 2
弯矩/ $[kN \cdot m^{-1}]$	12 7197.1	310 685.5	331 832.9

为了研究地基的非线性对结构地震反应的影响,本文分别进行了采用允许脱离的弹塑性 Winkler 地基模型和不考虑地基非线性两种情况下的对比分析。以下为结构在罕遇地震(大震)的人工地震波作用下,固定墩纵向墩顶位移时程曲线、墩底弯矩时程曲线及墩底弯矩—曲率关系,如图 8—9 所示。图中线性和非线性是指在分析中是否考虑桥墩塑性的影响,线性是指不考虑,非线性则考虑桥墩的非线性恢复力模型。

通过以上计算表明,当小西湖黄河大桥遭遇多遇地震(小震)时,桥墩尚未开裂;当遭遇设防烈度地震(中震)时桥墩已开裂,钢筋只发生轻微屈服,最大曲率(0.000 86)仅为破坏曲率(0.005 2)的 1/6;当遭遇罕遇地震(大震)时桥墩已进入屈服,最大曲率为 0.001 27,不到破坏曲率的 1/2,倒塌破坏的安全系数大于 2。故该桥能够满足“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设计目标。

5 结论

(1) 考虑地基的非线性影响后,墩顶的位移要大于不考虑非线性时的位移值,表明考虑地基的非线性使桥墩的位移反应增大;考虑地基的非线性影响后,墩底的弯矩要小于不考虑非线性时的数值,说明考虑地基的非线性对保护桥墩是有利的;

(2) 考虑桥墩非线性恢复力模型时,墩顶的位移要大于不考虑非线性时的位移值,表明考虑桥墩的非线性使桥墩的位移反应增大;考虑桥墩的非线性影响后,墩底的弯矩要小于不考虑非线性时的数值,说明考虑桥墩的非线性对保护桥墩是有利的;

(3) 由于现行抗震设计规范的局限性,它对于钢筋混凝土桥墩的设计往往是不经济的,而基于弹塑性分析的延性设计方法能够克服现有规范的局限性,能够使设计既经济又安全。因此对于地震区的

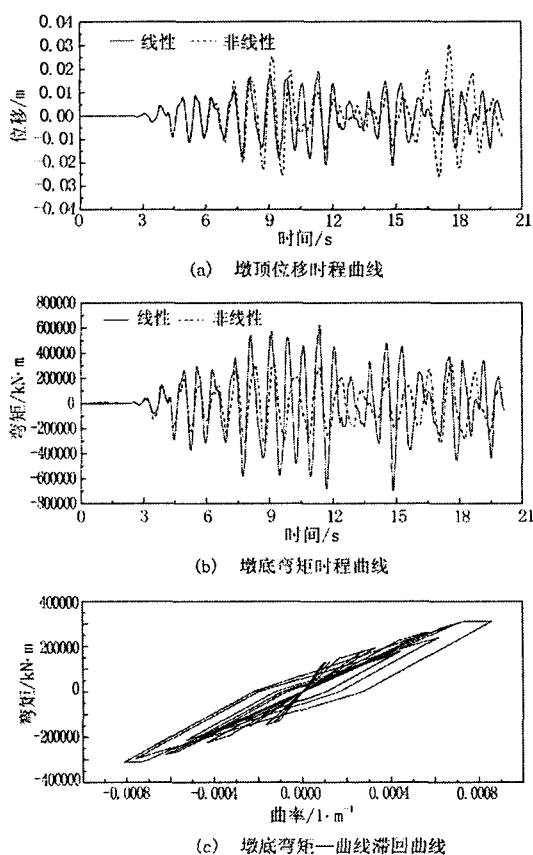


图 8 不考虑 Winkler 地基模型的地震反应

Fig. 8 Seismic responses of the pier without considering Winkler model.

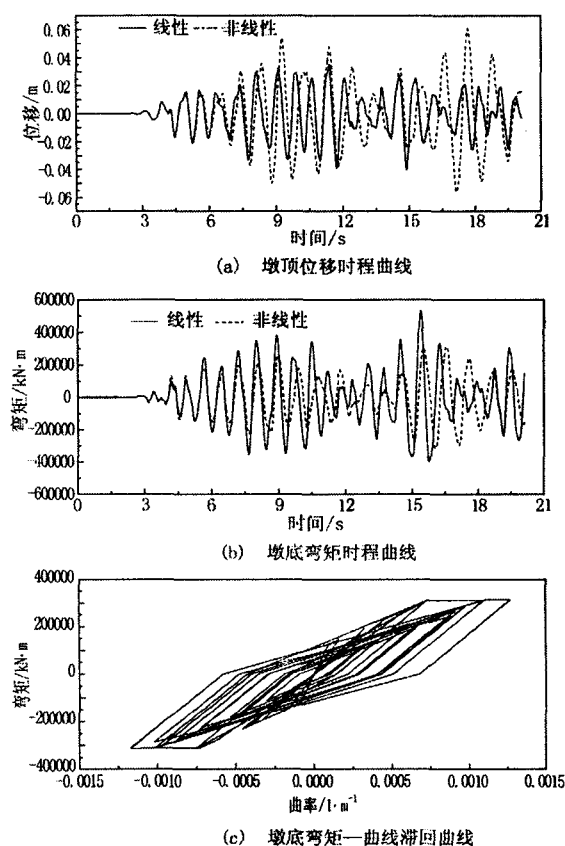


图 9 考虑 Winkler 地基模型的地震反应

Fig. 9 Seismic responses of the pier considering Winkler model.

重要桥梁应进行延性设计。对小西湖黄河大桥进行三水准的抗震验算结果表明,该桥能够满足“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设计目标。

【参考文献】

- [1] Psycharis I N, Jennings P C. Rocking of slender rigid bodies allowed to uplift [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1983, 11, 57—76.
- [2] Yim C—S, Chopra A K. Earthquake response of structures with partial uplift on Winkler foundation [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1984, 12, 263—281.
- [3] Chopra A K, Yim C S. Simplified earthquake analysis of structures with foundation uplift [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1985, 111, 906—930.
- [4] Wolf J P, Skrikerud P E. Seismic excitation with large overturning moments: Tensile capacity, projecting base mat or lifting—off? [J]. Nuclear Engineering and Design, 1978, 50, 305—321.
- [5] Izumi M, et al.. Rocking vibration considering uplift and yielding of supporting soil[A]. In: Proc. 4th Japanese Earthquake Engineering Symposium[C]. 1975, 727—734.
- [6] 陈兴冲, 朱晔. 弹塑性 Winkler 地基模型及其应用[J]. 工程力学, 1997, 14(增刊), 355—359.
- [7] 陈兴冲, 朱晔. 弹塑性 Winkler 地基上刚性浅平基桥墩水平力—位移关系的滞回特性分析[J]. 工程力学 14(增刊): 1997, 360—364.
- [8] Earthquake Engineering Research Institute (EERI), 'Northridge Earthquake of January 17 1994 Reconnaissance Report Volume 1', Rep. No. 95—03, 6. Highway bridge and traffic management(Earthquake Spectra), 1995, 287—372.
- [9] 陈兴冲. 重力式桥墩—地基的线性及非线性动力性态研究[D]. 北京: 北方交通大学, 1996.
- [10] Siddharthan R, Ara A, Norris G M. Simple rigid plastic model for seismic tilting of rigid walls [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1989, 118, 469—487.
- [11] 陈兴冲, 朱晔. 允许提高的弹塑性 Winkler 地基上桥墩的地震反应[J]. 工程力学, 1999, 16(5), 101—107.