

柳煜,田文通,苏鹤军,等.黄河阶地特征与地震动参数的相关性研究[J].地震工程学报,2019,41(5):1234-1241.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1234

LIU Yu, TIAN Wentong, SU Hejun, et al. Correlation between Characteristics of Yellow River Terraces and Seismic Ground Motion Parameters[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5): 1234-1241. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1234

黄河阶地特征与地震动参数的相关性研究

柳煜, 田文通, 苏鹤军, 李晨桦, 马紫娟

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 在分析已有资料的基础上划分了兰州盆地与建设工程分布密切相关的 T_0 、 T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 级黄河阶地, 建立 201 个土层地震反应模型。通过一维等效线性化计算和反应谱分析, 得出兰州盆地沉积阶地 50 年超越概率 10% 地表地震动参数, 分析阶地高度和 $v_s \leq 500$ m/s 覆盖层厚度特征与地震动参数峰值加速度 A_m 和加速度反应谱特征周期 T_g 的相关性。表明兰州盆地 $T_0 \sim T_2$ 阶地覆盖层厚度与 50 年超越概率 10% A_m 呈正相关, T_3 及以上阶地覆盖层厚度对 A_m 增大有明显的减小作用。 T_g 值随 $T_0 \sim T_3$ 阶地覆盖层厚度的增加而变大, 当覆盖层厚度进一步变大, T_g 值不再同步增大, 阶地覆盖层厚度对 T_g 的影响是有限的, 阶地海拔高度与地表 50 年超越概率 10% 地震动参数没有关系。

关键词: 黄河阶地; 地震动参数; 相关性

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)05-1234-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1234

Correlation between Characteristics of Yellow River Terraces and Seismic Ground Motion Parameters

LIU Yu, TIAN Wentong, SU Hejun, LI Chenhua, MA Zijuan

(Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: In this paper, the Yellow River terraces T_0 , T_1 , T_2 , T_3 , and T_4 in Lanzhou basin, which are related to the distribution of construction projects, were divided on the basis of existing data, and 201 models of soil layers for seismic response were established. Surface ground motion parameters of the deposit terrace in Lanzhou basin, with 10% probability of exceedance in 50 years, were obtained. The correlation between the deposit terraces and the seismic ground motion parameters, such as peak acceleration A_m and the characteristic period T_g of acceleration response spectrum, were analyzed. Results showed that the overburden thickness of terrace from T_0 to T_2 was positively correlated with the peak acceleration A_m with 10% probability of exceedance in 50 years. The overburden thickness of T_3 terrace and above had a significant decreasing effect on the increase of A_m . T_g value increased with increasing overburden thickness of the terrace from T_0 to

收稿日期: 2018-11-15

基金项目: 甘肃省科技计划(1606RJZA093); 甘肃省地震局科技发展基金(2011061)

第一作者简介: 柳煜(1975-)男, 硕士, 高级工程师, 主要从事活动构造、地震工程等工作。E-mail: liu_yu06@126.com。

T_3 , but no longer increased synchronously when the overburden thickness increased to a certain extent, indicating that the influence of overburden thickness of the terrace on T_g was limited. There was no relationship between elevation of terraces and surface ground motion parameters with 10% probability of exceedance in 50 years.

Keywords: Yellow River terrace; seismic ground motion parameters; correlation

0 引言

阶地是自然界河流演化形成的一种地貌形态,早在 19 世纪中叶就被人类所认识。青藏块体周缘阶地的精细化研究可建立气候环境演化与高原的隆升过程、速度^[1-2],揭示新构造运动特征^[3-5]和断裂活动^[6-7]等。地震动参数峰值加速度 A_m 和特征周期 T_g 等是建设工程通过抗震设计得以实现防御地震破坏的重要量化指标,土体参数^[8]和场地条件^[9-13]、输入界面和波的衰减^[14-15]对地震动参数有着重要影响,特殊地形亦会引起地震动参数变化从而导致震害差异^[16-17]等。兰州市属于青藏高原东北缘的河谷型城市,黄河兰州段至少发育七级阶地,局部存在九级阶地^[18-19],建设工程多集中于黄河形成的不同高度的层状阶地上。随着兰州地区经济建设发展,建设工程逐渐由低阶地向高阶地扩展,不同高度的阶梯状沉积地貌体现出不同的场地特性,从而引起地震动参数的差异可造成其上建(构)筑物震害的区别。本文以兰州盆地(文中主要包括城关区、七里河区、安宁区和西固区)与建设工程分布密切相关的

$T_0 \sim T_4$ 级黄河阶地为对象,遵循钻孔揭示的阶地本身特征,探讨阶地与地表 50 年超越概率 10% 地震动参数两者之间的相关性。

1 兰州盆地阶地特征与地震模型孔分布

黄河兰州段 T_5 及以上老阶地形成年代早、受多期次构造运动的改造和地表水流侵蚀,完整度差,面积小,少有建筑体分布,因此不在本文的讨论之列。 T_0 阶地是顺黄河自西向东呈串珠状分布的河滩地,属于兰州盆地最低级的黄河阶地, T_1 阶地分布广泛,连续性好,是城市发展的主要承载区。 T_2 阶地以沙井驿地区为代表,阶地后缘多叠加了其他沉积相,兰州西盆地范家坪、彭家坪等地为 T_3 阶地的主要发育区,阶地结构发育完善,与建设工程分布密切。 T_4 阶地形成时代早,海拔相对较高,受后期流水切割分布相对零星。根据地形图和 DEM 影像等划分了兰州盆地黄河阶地,并建立土层地震反应模型(图 1、表 1)。

T_0 、 T_1 和 T_2 阶地面相对开阔平坦,土层地震反应模型孔基本代表了其原始沉积结构。 T_3 和 T_4

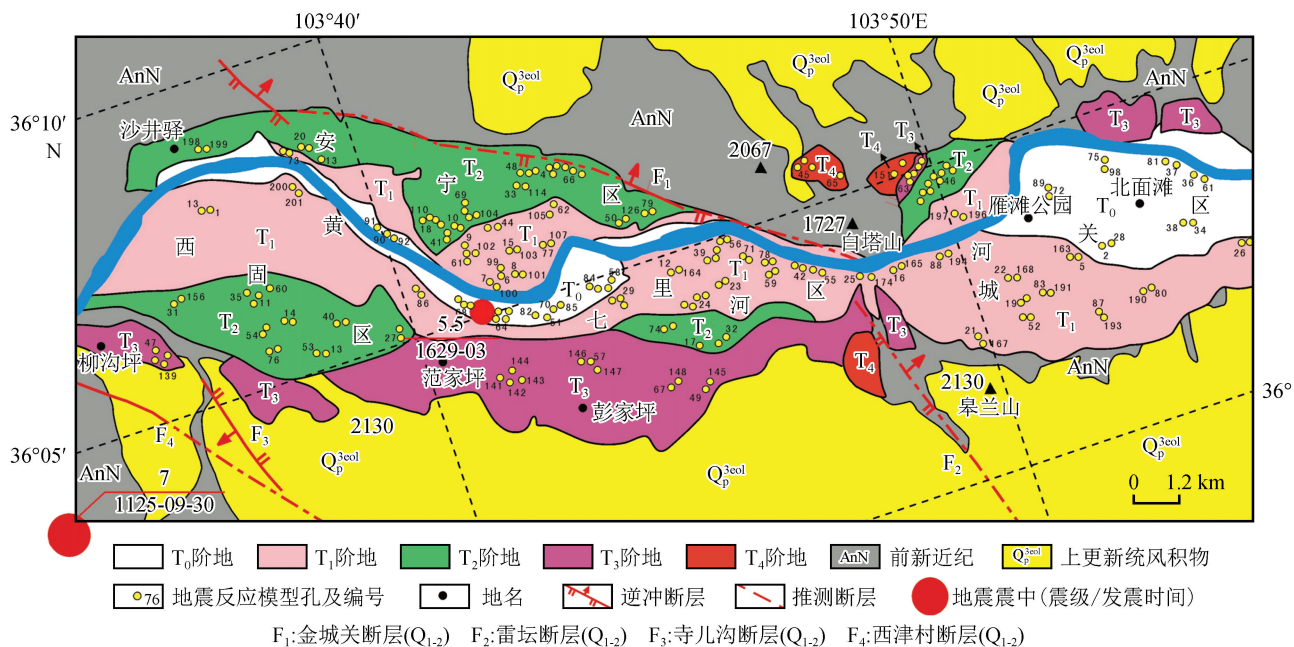


图 1 兰州盆地黄河阶地划分与土层地震反应模型孔分布

Fig.1 Division of Yellow River terraces and distribution of seismic response model for soil layers in Lanzhou basin

表1 兰州盆地黄河阶地结构特征

Table 1 Structure characteristics table of the Yellow River terraces in Lanzhou basin

阶地	地质年代	工程地震典型特征	代表地段	阶地类型	模型孔/个
T ₀	Q _h 中晚期	上部细粒沉积不连续,大部分地段缺失。	崔家大滩、马滩、迎门滩和雁滩等地。	堆积	28
T ₁	Q _h 早期	上部次生黄土状土大部分地段缺失或很薄,厚度2~5m。	兰州东、西盆地分布广泛,南岸分布广。	堆积	83
T ₂	Q _p ³ 中晚期	下部卵石层厚度变化大,夹薄层细砂(<2 m)为特征。	沙井驿、大砂坪和西固区等地。	基座、侵蚀	64
T ₃	Q _p ² 晚期	上部沉积黄土厚度变化大,黄河之南大于北岸(5~12 m)。	范家坪、柳沟坪、彭家坪和白道坪等地。	基座	20
T ₄	Q _p ¹ 晚期	上部黄土沉积厚35~40 m,成份相对均一。	黄河北岸五一山和南岸后五泉等地。	基座	6

所处位置相对较高,本文选取的多数土层地震反应模型孔位于阶地中部地段,不仅可以代表同级阶地主体高度,而且与工程建设密切相关。兰州盆地作为新构造运动相对强烈的河谷地区,断裂与地震作用、复杂的地形地貌及多变的局部沉积环境的叠加效应,以及盆地自西向东较大的延展性,均使得一定概率水平下的地表地震动参数差异不能细化为一个标准值,而只能在某个区间内波动,或取一组离散性数据的平均值作为代表。本文为了考虑同级阶地本身的沉积特征和属性与地表地震动参数的相关性,假定若干变量稳定,合理地推导结论与剩余变量的相关关系。本文中地震危险性分析参数选用编制《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015)的推荐值,基底输入地震波取兰州东、西盆地近中心点计算值,同级阶地选取相同的剪模比、阻尼比和土力学参数等。各级阶地50年超越概率10%地震动参数具有均值或包络意义,可与阶地的土层结构、覆盖层厚度和所在的地质环境等内在特征建立相关性。

2 阶地与地表动参数相关性分析

阶地边部其高度和沉积结构存在叠加效应或沉积过程不完善等因素,会出现计算数据的异常,这种沉积相变迅速现象在兰州盆地边缘地带较为常见。阶地中部地段往往代表了同级阶地相对完整的沉积过程,高度和沉积结构具有代表性,也集中了多数土层地震反应模型孔,因此以该组数据分析具有合理性。50年超越概率10%地震动加速度反应谱特征周期 T_g 和放大倍数 β_m 是以阶地土层地震反应模型孔与合成地震动时程数(≥ 3 条)得出反应谱的综合标定值,其目的就是消除或降低不确定性因素的影响,给出的地表地震动参数能够满足或包络大部分数据。计算分析得到兰州盆地与建设工程关系密切的T₀~T₄阶地50年超越概率10%地表地震动参数(表2)。

2.1 阶地覆盖层厚度与地震动参数的关系

剪切波速 $v_s \leq 500$ m/s土层面至地表的距离,为场地覆盖层厚度。该假设面可以位于第四纪沉积

表2 兰州盆地阶地覆盖层厚度、高度与地表地震动参数($\zeta=0.05$)Table 2 Thickness, height, and seismic ground motion parameters of terrace overburden in Lanzhou basin ($\zeta=0.05$)

阶地编号	主体阶地高度/m	覆盖层厚度/m	阶地中部覆盖层平均厚度/m	50 a 超越概率10%		
				A_m/g	T_g/s	β_m
T ₀	1 505~1 515	8~12	9.8	0.217	0.40	2.5
T ₁	1 520~1 535	12~20	14.7~17.5	0.238~0.246	0.45	2.5
		16~23				
T ₂	1 540~1 560	15~33	23.7~25.2	0.258~0.268	0.50	2.6
		17~36				
T ₃	1 595~1 640	32~49	37.4	0.244	0.55	2.7
T ₄	1 680~1 720	43~63	52.5	0.250	0.55	2.7

注: T_{1N}指黄河北 I 级阶地, T_{1S}指黄河南 I 级阶地, T₂ 相同。

层之中,可以是第四纪与前第四纪基岩的界面,也可以位于基岩面以下的某个深度处。分析表明,兰州盆地T₀、T₁、T₂、T₃和T₄阶地覆盖层厚度呈增加的趋势。T₀、T₁和T₂阶地随着覆盖层厚度的增大,50年超越概率10%峰值加速度 A_m 逐渐增大,

至T₃和T₄阶地覆盖层厚度增大明显,但 A_m 反而减小[图2(a)]。T₀和T₁阶地50年超越概率10%地震动加速度反应谱平台峰靠前,具有尖峰特征。T₂阶地谱形开始变宽,平台向下压缩。至T₃和T₄阶地谱形明显变胖,平台谱形具有宽峰特征,第二拐

点周期向右移, 平台明显变宽[图 2(b)]. 说明兰州盆地 $T_0 \sim T_3$ 阶地随着阶地覆盖层厚度的增加, 谱形平台变宽, T_g 值增大。而当阶地覆盖层厚度增大到一定程度, T_g 不再同步增大, 也就是说并非覆盖层越厚, 平台越宽。

反应谱规范化平台高度与峰值加速度 A_m 和放大倍数 β_m 有关, β_m 对覆盖层厚度不敏感, 只有当覆盖层厚度增大到一定的程度时, 该值才会发生变化。因此兰州盆地 $T_0 \sim T_2$ 阶地当 A_m 与覆盖层厚度呈正相关时, β_m 并没有同步变大, 反应谱会出现随着

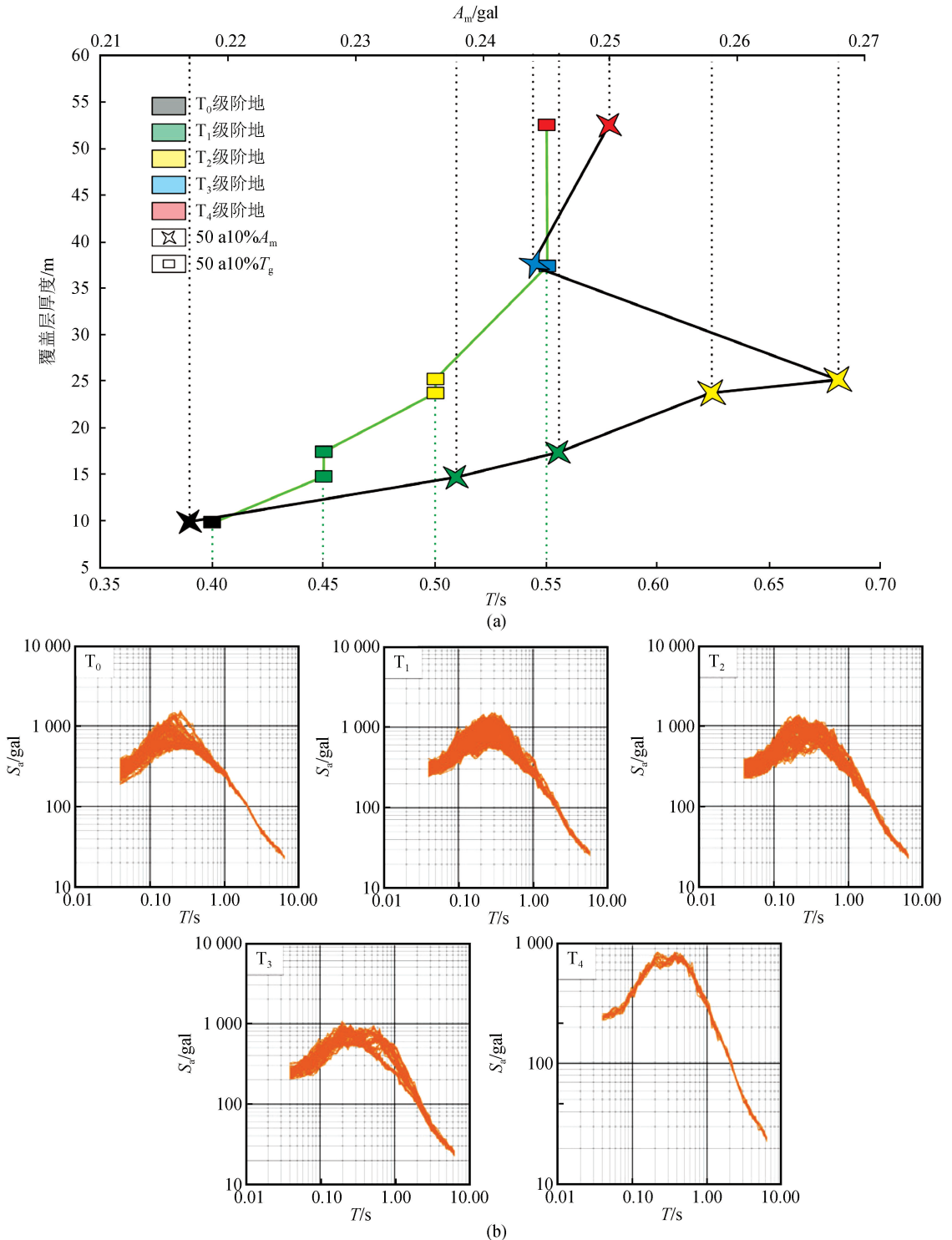


图 2 阶地覆盖层厚度与 50 年超越概率 10% 地震动参数关系 (a) 和地表反应谱图 (b)
 Fig.2 Correlation between thickness of terrace overburden and seismic ground motion parameters with 10% probability of exceedance in 50 years (a) and surface response spectrum (b)

阶地覆盖层厚度变大,谱平台反而降低的现象。

2.2 阶地高度与地震动参数的关系

兰州盆地各阶地面海拔高度并不是成比例依次升高,抬升幅度与相应期次的构造强烈程度和气候条件亦密切相关。 T_0 、 T_1 、 T_2 随着阶地面抬升, A_m 是增加的,高一级阶地相对低一级阶地其 50 年超越

概率 10% A_m 分别增加了 26.4 cm/s^2 和 21.8 cm/s^2 , 大致提高了 12% 和 10%, 可以看出 A_m 随着阶地面升高其值是增大的。 T_3 中部阶地面高度相比 T_2 抬高了近 74 m, T_4 阶地面相比 T_2 和 T_3 阶地分别抬高了近 150 m 和 76 m, 但 T_3 和 T_4 阶地面 A_m 比 T_2 阶地面 A_m 小, 甚至接近 T_1 阶地 A_m 值[图 3(a)]。

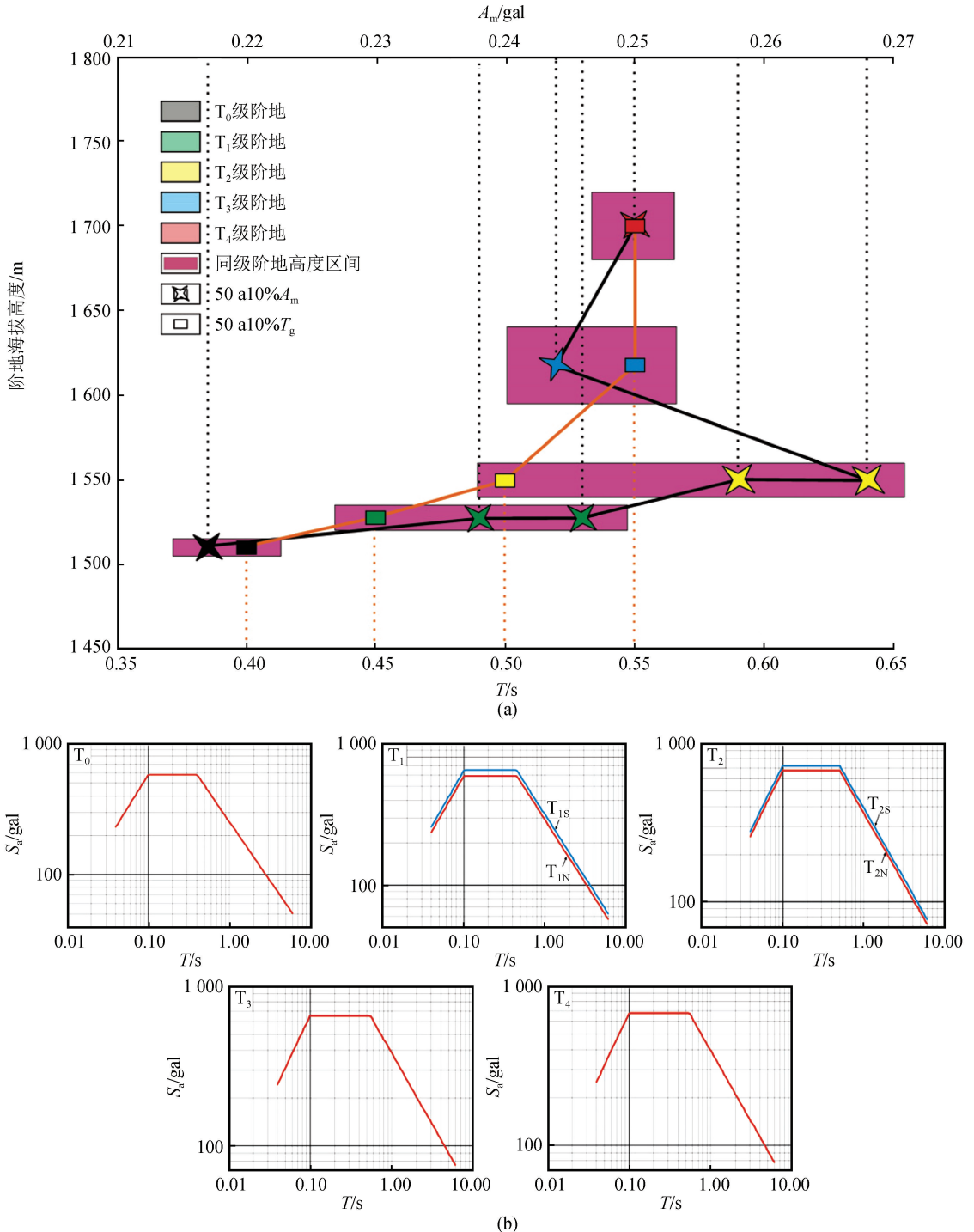


图3 阶地高度与50年超越概率10%地震动参数关系(a)和地表规范化反应谱图(b)

Fig.3 Correlation between terrace height and seismic ground motion parameters with 10% probability of exceedance in 50 years (a) and surface normalized response spectrum (b)

50 年超越概率 10% 地表反应谱特征周期 T_g 值随着阶地高度增加,其值也相应变大。 T_3 和 T_4 阶地 T_g 相同。就兰州盆地黄河阶地而言, T_0 、 T_1 、 T_2 阶地覆盖层土层结构主要以河床相卵石、漫滩相砂土、粉土沉积为主,阶地后缘常常会叠加其他沉积相的物质。 T_3 和 T_4 阶地下部为河床相卵石,中上部多以漫滩相细粒沉积物及大厚度黄土沉积物, $v_s \leq 500$ m/s 阶地中部覆盖层厚度分别为 37.4 m 和 52.5 m,这种厚土层结构导致了地表加速度反应谱长周期的成分显著,拐点明显向右延长[图 3(b)]。对于兰州盆地黄河阶地而言,并不是阶地越高,覆盖层越厚,地表地震动参数就越大。如土层模型孔 K63 位于黄河以北的 T_3 阶地上,覆盖层厚度小于 17 m,接近 T_1 阶地土层反应厚度,而海拔高度为 1 635 m,比 T_2 阶地高出约 80 m,得出地表峰值加速度 A_m 小,而且特征周期与 T_2 阶地相近。

2.3 阶地高度、覆盖层厚度与地震动参数特殊性讨论

在兰州西盆地 T_1 阶地后缘选用 170、171 和 172 号土层地震反应模型孔 (T_1-1),在兰州东盆地

T_3 阶地后缘选用 134、135 和 136 号土层地震反应模型孔 (T_3-1)。这两个点的模型孔土层结构和特征已经偏离其所在阶地的普遍特性。 T_1-1 所在阶地海拔高度 1 538 m, d_o 为 22~23 m, v_{sc} 为 261~284 m/s; 土层结构由黄土状粉土厚 12.2~14.7 m、粉质黏土厚 3.9~4.8 m 和下部河床相卵石层组成。 T_3-1 所在阶地海拔高度 1 599 m, d_o 为 9~11 m, v_{sc} 为 331~382 m/s; 土层结构由黄土状粉土厚 2.5~2.8 m、卵石厚 1.4~2.0 m 和下部新近纪泥质砂岩组成。

经过土层地震反应, T_1-1 地震模型 PGA 为 273.4 cm/s^2 , T_g 为 0.50 s。 T_3-1 地震模型 PGA 为 199.3 cm/s^2 , T_g 为 0.45 s。 T_3-1 至 T_1-1 阶地覆盖层厚度增大,相应计算点 50 年超越概率 10% 峰值加速度 A_m 和特征周期 T_g 趋于变大[图 4(a)]。 T_3-1 至 T_1-1 阶地面海拔高度变小,50 年超越概率 10% 峰值加速度 A_m 和特征周期 T_g 趋于变大[图 4(b)]。由此分析,兰州盆地阶地面上 50 年超越概率 10% 地表地震动参数 A_m 和 T_g 与阶地高度无关,而与阶地覆盖层厚度和土层结构有关。

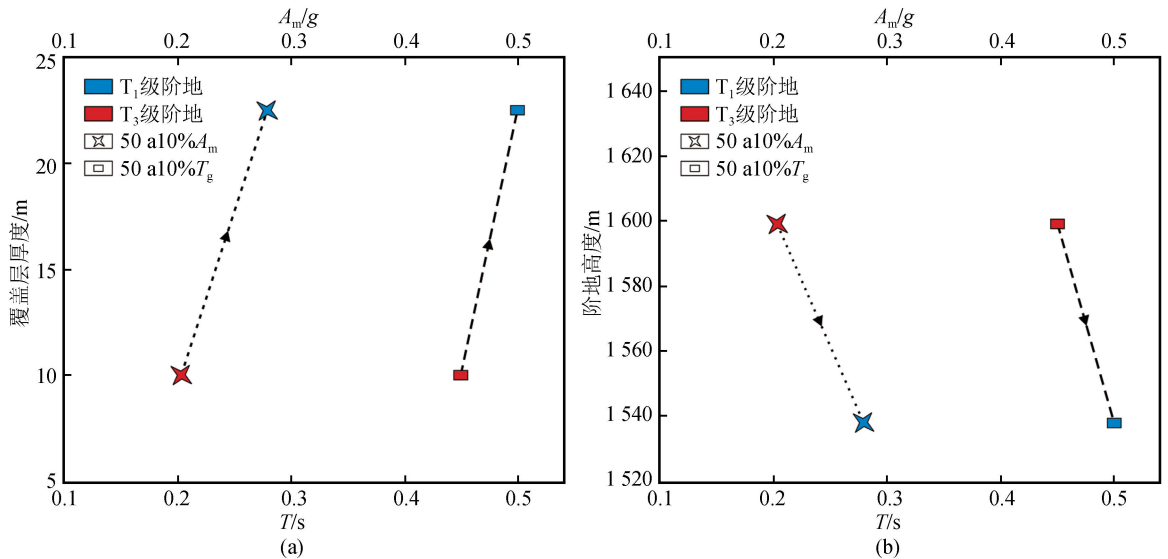


图 4 T_1 和 T_3 阶地特殊模型孔覆盖层厚度(a)和阶地高度(b)与地震动参数关系

Fig.4 Correlation between overburden thickness (a) and height (b) of terraces T_1 and T_3 and seismic ground motion parameters

3 结论

随着经济社会的发展,兰州盆地建(构)筑物逐渐由低河谷地段向两侧黄河高阶地扩张,阶地高度和覆盖层厚度反映出不同地质时期的沉积特征。对于兰州盆地而言,处于复杂的地震构造环境、不利的地形地貌条件和具有复杂土层结构的建设工程,即

使是一般建设工程,应进行与场地相关的地震反应分析来确定抗震设计参数,达到阶地上部建筑结构抗震设防的安全性和经济性,而仅以 II 类场基本地震动峰值加速度 0.20g 进行抗震设计是偏不安全的。本文以兰州盆地黄河阶地的实际土层结构建模分析,所得出的结论对当地建设工程抗震设防具有积极的参考意义。

(1) 兰州盆地 $T_0 \sim T_2$ 黄河阶地随着覆盖层厚度的增大,50年超越概率10%地表峰值加速度 A_m 随之增大。 T_3 和 T_4 高阶地随着覆盖层厚度的增大,其峰值加速度反而减小。表明 T_3 及以上阶地覆盖层厚度对峰值加速度增大有明显的减小作用,这与覆盖层对地表峰值加速度的放大作用并不是随着覆盖层厚度的增加而无限增大^[20]的认识是一致的。

(2) $T_0 \sim T_3$ 阶地随着覆盖层厚度的增加,地表50年超越概率10%加速度反应谱特征周期 T_g 变大,而当阶地覆盖层厚度增大到一定程度,特征周期不再同步增大,可见兰州盆地中阶地覆盖层厚度对地震动参数特征周期 T_g 的影响是有限的。

(3) 兰州盆地黄河阶地的海拔高度是构造和气候综合作用的结果,地表50年超越概率10%峰值加速度 A_m 和反应谱特征周期 T_g 与阶地高度无关。

致谢:本文在建立土层地震反应模型时引用了甘肃省地震工程研究院历年来在兰州地区开展地震安全性评价工作的部分成果,冯建刚副研究员在计算机制图方面给予帮助,在此表示感谢。

参考文献(References)

[1] 李吉均,方小敏,马海洲,等.晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起[J].中国科学(D辑):地球科学,1996,26(4):316-322.
LI Jijun, FANG Xiaomin, MA Haizhou, et al. Geomorphological and Environmental Evolution of the Yellow River during the Late Cenozoic[J]. Science in China (Series D), 1996, 26(4): 316-322.

[2] 潘保田,李吉均,朱俊杰,等.兰州地区黄河阶地发育与地貌演化[C]//中国第四纪冰川与环境研究中心,中国第四纪委员会.中国西部第四纪冰川与环境研究.北京:科学出版社,1991,271-277.
PAN Baotian, LI Jijun, ZHU Junjie, et al. Terrace Development of Yellow River and Geomorphic Evolution in Lanzhou Area [C]//Quaternary Glacier & Environment Research Centre, China Quaternary Research Association. Quaternary Glacier and Environment Research in West China [C]. Beijing: Science Press, 1991, 271-277.

[3] 张天琪,吕红华,赵俊香,等.河流阶地演化与构造抬升速率:以天山北麓晚第四纪河流作用为例[J].第四纪研究,2014,34(2):281-291.
ZHANG Tianqi, LÜ Honghua, ZHAO Junxiang, et al. Fluvial Terrace Formation and Tectonic Uplift Rate: A Case Study of Late Quaternary Fluvial Process in the North Piedmont of the Tian Shan, Northwestern China[J]. Quaternary Sciences, 2014,

34(2):281-291.

[4] 刘兴旺,袁道阳,潘保田,等.由黄河阶地变形反映的兰州盆地活动构造特征[J].兰州大学学报(自然科学版),2013,49(4):459-464.
LIU Xingwang, YUAN Daoyang, PAN Baotian, et al. Active Tectonic Features in Lanzhou Basin Reflected by Yellow River Terrace Deformation[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2013, 49(4): 459-464.

[5] 郭怀军,杨利荣,朱小辉,等.祁连山地区河流阶地与第四纪构造隆升[J].地质通报,2016,35(12):2033-2044.
GUO Huaijun, YANG Lirong, ZHU Xiaohui, et al. River Terrace and Quaternary Tectonic Uplift in the Qilian Mountain [J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(12): 2033-2044.

[6] 张培震,李传友,毛凤英.河流阶地演化与走滑断裂滑动速率[J].地震地质,2008,30(1):44-57.
ZHANG Peizhen, LI Chuanyou, MAO Fengying. Strath Terrace Formation and Strike-Slip Faulting [J]. Seismology and Geology, 2008, 30(1): 44-57.

[7] 王峰,徐锡伟,郑荣章.用阶地测量方法探讨阿尔金断裂中段全新世滑动速率[J].地震地质,2004,26(1):61-70.
WANG Feng, XU Xiwei, ZHENG Rongzhang. Study on Holocene Strike-Slip Rates of the Middle Altyn Tagh Fault by Terraces Offset Measurement [J]. Seismology and Geology, 2004, 26(1): 61-70.

[8] 李小军.场地土层对地震地面运动影响的分析方法[J].世界地震工程,1992,8(2):49-60.
LI Xiaojun. Analysis Method on the Influence of Site Soil Effects on Seismic Ground Motion [J]. World Earthquake Engineering, 1992, 8(2): 49-60.

[9] 吕悦军,彭艳菊,兰景岩,等.场地条件对地震动参数影响的关键问题[J].震灾防御技术,2008,3(2):126-135.
LÜ Yuejun, PENG Yanju, LAN Jingyan, et al. Some Key Problems about Site Effects on Seismic Ground Motion Parameters [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(2): 126-135.

[10] 卢育霞,石玉成,万秀红,等.近地表速度结构对场地强地震动特征的影响[J].地震工程学报,2014,36(4):813-819.
LU Yuxia, SHI Yucheng, WAN Xiuhong, et al. Influence of Near-Surface Velocity Structure on Site Characteristics of Strong Ground Motion [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 813-819.

[11] 石玉成,王兰民,张颖.黄土场地覆盖层厚度和地形条件对地震动放大效应的影响[J].西北地震学报,1999,21(2):203-208.
SHI Yucheng, WANG Lanmin, ZHANG Ying. Effects of Overburden Thickness and Topography of Loessial Sites on Earthquake Ground Motion [J]. Northwestern Seismological Journal, 1999, 21(2): 203-208.

[12] 胡聿贤.地震工程学[M].(第二版).北京:地震出版社,2006.
HU Yuxian. Earthquake Engineering [M]. 2nd Edition. Beijing: Earthquake Engineering [M]. 2nd Edition. Bei-

- jing:Seismological Press,2006.
- [13] 陈永新,迟明杰,李小军.地表岩土层对地震动特性的影响分析[J].地震工程学报,2015,37(3):743-747.
CHEN Yongxin,CHI Mingjie,LI Xiaojun.Effect of Overlapping Rock and Soil Layers on Ground Motion Characteristics [J].China Earthquake Engineering Journal,2015,37(3):743-747.
- [14] 俞言祥,李山有,肖亮.为新区划图编制所建立的地震动衰减关系[J].震灾防御技术,2013,8(1):24-33.
YU Yanxiang,LI Shanyou,XIAO Liang.Development of Ground Motion Attenuation Relations for the New Seismic Hazard Map of China[J].Technology for Earthquake Disaster Prevention,2013,8(1):24-33.
- [15] 文雯,陈宇军,王珏,等.地震安全性评价中地震动衰减关系的类型及其选取[J].地震工程学报,2013,35(3):709-714.
WEN Wen,CHEN Yujun,WANG Jue,et al.Type and Selection of the Ground Motion Attenuation Relations during Seismic Safety Evaluation [J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(3):709-714.
- [16] 盛志强,卢育霞,石玉成,等.河谷地形的地震反应分析[J].地震工程学报,2013,35(1):126-132,202.
SHENG Zhiqiang,LU Yuxia,SHI Yucheng,et al.Seismic Response Analysis of Valley Topography[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(1):126-132,202.
- [17] 刘琨,卢育霞,李倩.复杂地形条件对强地震动特征的影响[J].世界地震工程,2012,28(4):80-88.
LIU Kun,LU Yuxia,LI Qian.Influence of Complicated Topography Conditions on Strong Ground Motion Characteristics[J].World Earthquake Engineering,2012,28(4):80-88.
- [18] 潘保田,苏怀,胡春生,等.兰州地区 1.0 Ma 黄河阶地的发现和 0.8 Ma 阶地形成时代的重新厘定[J].自然科学进展,2006,16(11):1411-1418.
PAN Baotian,SU Huai,HU Chunsheng,et al.Discovery of a 1.0 Ma Yellow River Terrace and Redating of the Fourth Yellow River Terrace in Lanzhou Area[J].Progress in Natural Science,2006,16(11):1411-1418.
- [19] 潘保田,苏怀,刘小丰,等.兰州东盆地最近 1.2 Ma 的黄河阶地序列与形成原因[J].第四纪研究,2007,27(2):172-180.
PAN Baotian,SU Huai,LIU Xiaofeng,et al.River Terraces of the Yellow River and Their Genesis in Eastern Lanzhou Basin During Last 1.2 Ma [J].Quaternary Sciences,2007,27(2):172-180.
- [20] 薄景山,李秀领,刘红帅.土层结构对地表加速度峰值的影响[J].地震工程与工程振动,2003,23(3):35-40.
BO Jingshan,LI Xiuling,LIU Hongshuai.Effects of Soil Layer Construction on Peak Accelerations of Ground Motions[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2003,23(3):35-40.