

地震作用下不同类型夯土长城的动力响应及稳定性分析*

孔德政^{1,2}, 石玉成^{1♣}, 梁庆国², 卢育霞¹

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730030; 2. 兰州交通大学
土木工程国家级实验教学示范中心, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为了研究不同类型长城在地震作用下的动力响应特征及抗震稳定性, 选取了黄羊河农场段长城、金川西段长城和长城博物馆段长城作为研究对象, 通过室内土工试验得到了这3段长城的基本参数, 并运用 Midas - GTS 软件分别建立数值模型, 并输入山丹—民乐 6.1 级地震波判断不同长城段的动力响应及稳定性。结果表明: 黄羊河农场段长城加速度和位移最大值都位于墙体右上侧, 墙体最大拉应力在墙体底部, 整体稳定; 金川西段长城加速度和位移随高度的增加而增大, 拉应力最大处在掏蚀部位, 在地震作用下不稳定; 长城博物馆段长城在通道上部加速度和位移最大, 最大拉应力位于通道周围, 在地震作用下不稳定。

关键词: 夯土长城; 地震波; 数值模拟; 动力响应; 抗震稳定性

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2018)02-0328-09

0 引言

长城是我国古代伟大的军事防御工程, 也是中华民族献给世界的伟大历史遗产。我国的长城最早建于战国时期, 在秦、汉、明等时期达到了顶峰 (景爱, 2008)。在甘肃河西地区保存有大量的长城遗址, 但由于河西地区土遗址建造时间久远、所处的自然环境恶劣且缺少必要的保护, 因此保存现状不容乐观 (赵海英, 2007)。在众多造成长城土遗址破坏的因素中, 地震无疑是最主要的因素之一。2003 年山丹—民乐 6.1 级地震使山丹境内的明长城发生多处破坏甚至倒塌 (李舒, 2011)。由于夯土结构比起木质结构和砖体结构抗震性更差且更难修复, 所以长城土遗址在地震作用下更容易坍塌损毁并且很难修复。因此, 对于长城土遗址的保护最重要的就是事先进行抗震危险性的分析, 然后对薄弱环节进行加固, 以防在地震中大面积垮塌。

目前一些学者对夯土长城做了一定的研究, 主要集中在以下几个方面: (1) 长城的历史、构

造方式和分布: 李并成 (1994, 1995) 通过古籍史料和实地考察, 摸清了河西走廊地区汉长城的基本走向; 沈旸等 (2014) 调查研究了大同镇段明长城的现状和墙体的成分与建筑形式。(2) 长城破坏类型和加固: 赵海英 (2007) 研究了甘肃境内秦、汉长城的破坏类型, 并针对不同破坏类型提出了加固方法; 谌文武等 (2015) 在实验室内研究了不同浓度下的高分子材料 SH 对土体的加固效果; 和法国等 (2010) 通过对 PS 材料加固的土体进行抗压、抗拉、雨蚀和风蚀等一系列实验, 提出了 PS 材料加固的最优浓度和次数; 戴鹏飞和谌文武 (2011) 调查了青海湟中段明长城的工程性质, 并针对不同的长城病害提出了一系列的加固措施, 如注浆、砌补和锚固等。(3) 夯土长城的地震荷载响应: 刘锟等 (2010) 通过对玉门关汉长城墙体的三维模型动力计算, 得出了在建筑过程中加入芦苇绳和芦苇层就相当于现今加筋墙的效果, 从而提高了其在地震作用下的稳定性; 王旭东等 (2011) 对产生掏蚀的长城墙体在地震作用下的响应做了相关的研究, 得出山丹长城在Ⅷ度地震作用下保持整体稳定的极限掏蚀深度为

* 收稿日期: 2017-11-17.

基金项目: 国家自然科学基金——丝绸之路土遗址文物地震破坏机理与灾变控制方法研究 (51678545) 资助.

♣ 通讯作者: 石玉成 (1966-), 研究员, 主要从事岩土地震工程与工程地震等领域的研究. E-mail: shiyc@gssb.gov.cn.

0.778 m; 石玉成等(2011)运用可靠度相关理论得出在未来50年内,骆驼城土遗址在地震作用下有92.8%的可能处于稳定状态。前人还未专门研究过地震作用下河西地区不同破坏类型夯土长城的动力响应和地震稳定性。因此,本文选取河西地区3段典型的长城土遗址,通过建立数值模型,输入2003年山丹—民乐6.1级地震波,研究各段长城的地震动力响应规律,并结合各段长城的土体抗拉强度得出在烈度为Ⅷ度下长城的稳定性。

1 典型段长城物性参数

通过实地考察,本文选取甘肃河西区的3段长城墙体作为研究,分别为武威市凉州区的黄羊河农场段长城(102.94°E、37.68°N,海拔:1721 m,图1a),金昌市永昌县的金川西段长城(101.94°E、38.33°N,海拔:1905 m,图1b)和张掖市山丹县的长城博物馆段长城(101.40°E、38.52°N,海拔:2004 m,图1c)。首先通过室内土工试验得到了土体的基本物理参数(天然密度 ρ 、干密度 ρ_d 、含水率 ω 和泊松比 μ)、动弹性模量 E_d 、抗拉强度 σ_t 和阻尼比 λ 。由于动抗剪强度的实验需要进行的实验组数过多,但可供获取的长城土体数量有限。因此,通过室内静三轴实验来得到长城土体的静抗剪强度(c 和 φ)。各段长城的物理力学参数见表1。

由于长城所处的河西地区降水量稀少,属于干旱、半干旱区,各段长城的平均含水率 ω 很小,在1.44%~1.56%之间,平均密度 ρ 在1.46~1.64 g/cm³之间。各段长城土体的内摩擦角 φ 较大,都在30°以上,这是由于夯土长城土体致密,含水率 ω 和孔隙率都偏低,此外土体中还含有很多石子,增大了土体之间的咬合能力。而由于各段长城土体性质和建筑工艺的不同,粘聚力 c 差别较大,在46.98~137.64 kPa之间(表1)。

土体抗拉强度 σ_t 虽然都较小,但拉应力的存在会使夯土墙体产生裂缝,对夯土长城的稳定性产生很大的影响。因此夯土长城抗拉强度的测定对于之后分析地震作用下夯土长城的稳定性具有重要意义。本文通过轴向压裂法(Fang, Daniels, 2006)测得3段长城的抗拉强度 σ_t 分别为0.16 MPa、0.17 MPa和0.13 MPa。

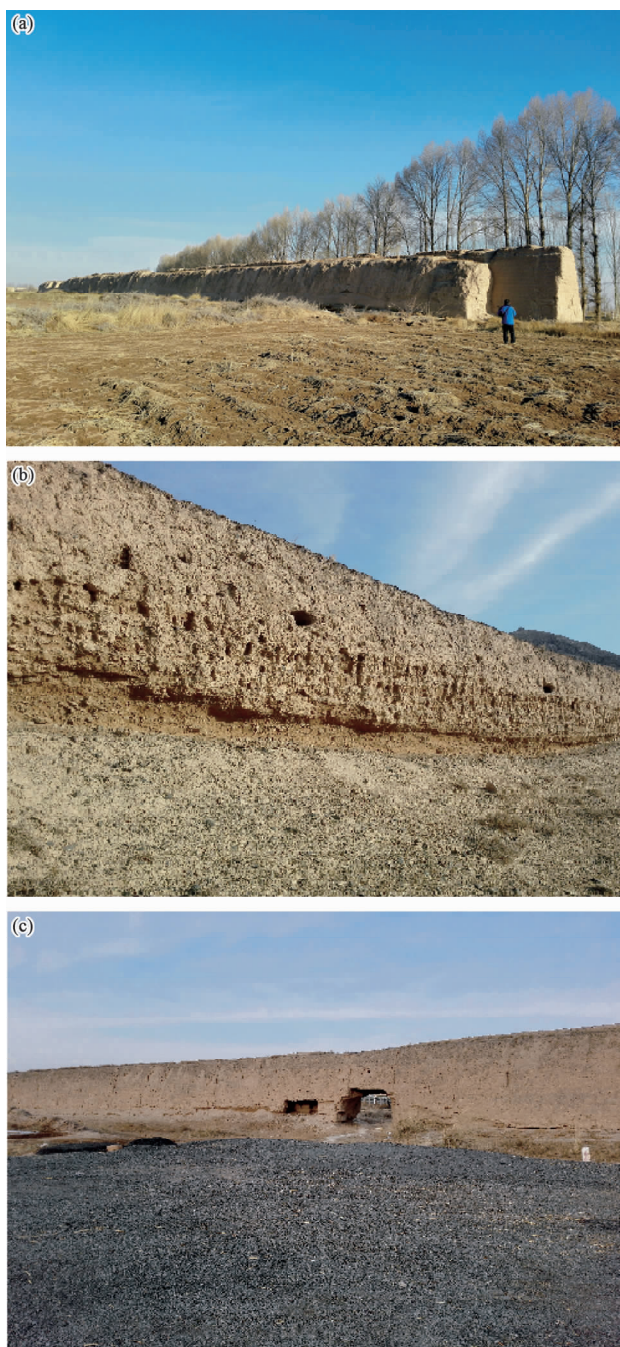


图1 黄羊河农场段(a)、金川西段(b)、长城博物馆段(c)长城墙体

Fig. 1 The Huangyanghe farm section (a), the Jinchuan west section (b) and the Great Wall Museum section (c) of the Great Wall

通过动三轴实验来获取3段长城的动弹性模量 E_d 和阻尼比 λ 。从表1可以看出,3段长城的 E_d 相对都较大,在100 MPa以上,其中金川西段长城的 E_d 最大。3段长城由于较硬, λ 相对较小,且随着动应变的增加 λ 逐渐增大。

表 1 3 段长城物性参数

Tab. 1 Physical – mechanical parameters of the three sections of the Great Wall

名称	平均 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	平均 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	平均 $\omega/(\%)$	E_{30}/MPa	μ	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	σ_c/MPa	λ
黄羊河农场段	1.61	1.59	1.44	104.17	0.3	137.64	34.20	0.16	0.079 ~ 0.126
金川西段	1.64	1.61	1.67	116.28	0.3	46.98	46.99	0.17	0.067 ~ 0.118
长城博物馆段	1.46	1.44	1.56	106.38	0.3	74.30	43.92	0.13	0.081 ~ 0.125

2 模型的建立

根据实际的考察情况，通过 Midas/GTS 分别建立黄羊河农场段、金川西段和山丹县长城博物馆段长城三维模型（图 2），土体材料采用摩尔—库仑准则，各段的材料参数见表 2，分别研究这 3 段长城在地震荷载作用下的动力响应与稳定性。

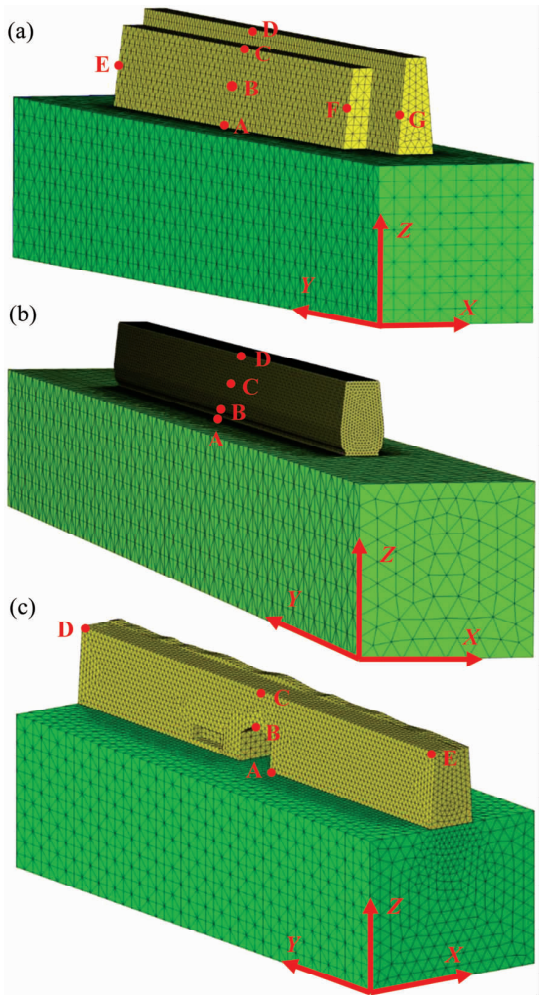


图 2 黄羊河农场段 (a)、金川西段 (b)、长城博物馆段 (c) 长城模型

Fig. 2 The models of the Huangyanghe farm section (a), the Jinchuan west section (b) and the Great Wall Museum section (c) of the Great Wall

2.1 黄羊河农场段

黄羊河农场段长城模型（图 2a）的具体尺寸为：高侧墙体高 6.1 m，上顶宽 1.3 m，下底宽 2.3 m，长 50 m。矮侧墙体高 5.1 m，上顶宽 1.3 m，下底宽 1.5 m，长 44 m。取地基深 10 m，宽 10 m，长 70 m。边界条件：墙体四周取自由边界，为了消除地震波反射作用的影响，基座四周及底面采用人工粘弹性吸收边界。

2.2 金川西段

金川西段长城模型（图 2b）的具体尺寸为：墙高 3.6 m，长 50 m，上顶宽 1.6 m，中下部宽 2 m，下底宽 1.5 m，基础掏蚀垂直向高 0.4 m，水平向深 0.2 m，掏蚀尺寸见图 3。基础选取宽 8 m，深 8 m，长 50 m。边界条件：墙体四周取自由边界，为了消除地震波反射作用的影响，基座四周及底侧采用人工粘弹性吸收边界。

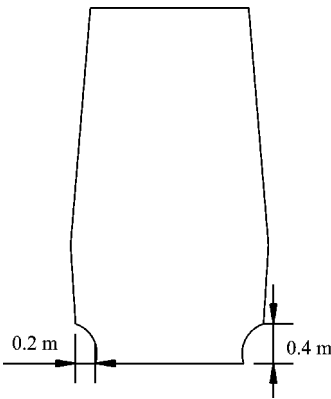


图 3 金川西段长城模型掏蚀尺寸

Fig. 3 Basal sapping geometry of the Jinchuan west section of the Great Wall

2.3 山丹长城博物馆段

山丹长城博物馆段长城模型（图 2c）的具体尺寸为：墙体高 4 m，上部还有断断续续的女儿墙，下底宽 2.5 m，上顶宽 2 m，长 30 m，人为挖的通道宽 2.5 m，高 2 m。基础选取深 8 m，宽 10 m，长 30 m。边界条件：墙体沿走向两侧面取自由

边界，为了消除模型边界地震波反射与折射的影响，因此垂直于走向的墙体两侧面和基座四周及底面采用人工粘弹性吸收边界。

表 2 3 段长城材料参数
Tab. 2 Material parameters of three sections of the Great Wall

名称	位置	$\rho/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	μ	$E_d/$ MPa	$c/$ kPa	$\varphi/$ ($^{\circ}$)
黄羊河农场段	墙体	1.61	0.3	104.17	137.64	34.2
	基座	1.32	0.3	90.00	25.31	22.7
金川西段	墙体	1.64	0.3	116.28	46.98	46.99
	基座	1.41	0.3	97.12	30.26	23.3
长城博物馆段	墙体	1.46	0.3	106.38	74.30	43.92
	基座	1.21	0.3	89.23	30.00	27.7

3 地震波的选择

河西地区发生过很多次中强震，长城遗址所在区域多数都处在地震烈度为 V ~ VIII 的区域内。2003 年山丹—民乐 6.1 级地震对长城土遗址造成了很大的破坏，部分墙体产生了开裂甚至倒塌（石玉成等，2006）。山丹—民乐 6.1 级最高地震烈度为 VIII 度，与历史上长城土遗址在地震中普遍遭受的烈度影响相吻合。山丹—民乐 6.1 级地震是河西地区实测的地震波，所以其主要周期与长城所在地的卓越周期接近，同时功率谱密度函数形状与长城所在地土体特性相符合。故本文选取山丹—民乐 6.1 级地震波作为数值模拟的输入地震波，其东西向、南北向和垂直向地震波的峰值加速度分别为 230.69 gal、273.59 gal 和 169.84 gal（图 4）。

4 动力响应及稳定性分析

由于长城大体都为东西走向，因此沿各长城模型的走向方向（y 方向）输入山丹—民乐 6.1 级东西向地震波，沿各长城模型的水平垂直方向（x 方向）输入山丹—民乐 6.1 级南北向地震波，沿各长城的垂直方向（z 方向）输入山丹—民乐 6.1 级垂直向地震波。

4.1 加速度响应

黄羊河农场段长城的整体坐标系方向加速度（ $a = xi + yj + zk$ ，其中 x, y, z 为墙体在 X, Y, Z

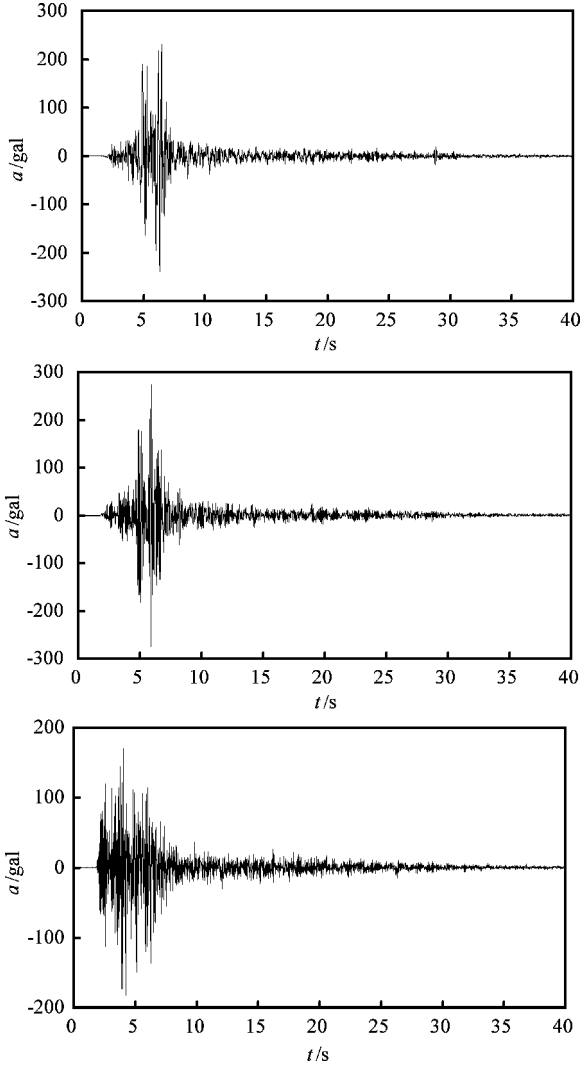


图 4 山丹—民乐 6.1 级地震东西向（a）、南北向（b）、垂直向（c）加速度时程
Fig. 4 Acceleration time histories of the Shandan $M_56.1$ earthquake in EW (a), NS (b) and vertical (c) directions

方向的加速度分量，下同）云图见图 5a。为了研究长城各点加速度变化趋势，在模型上选取了 7 个点（图 2a）：沿着墙体高度方向上分别选取 A 点（ $z = 0\text{ m}$ ， z 为距长城底部高度，下同）、B 点（ $z = 2.5\text{ m}$ ）、C 点（ $z = 5.1\text{ m}$ ）和 D 点（ $z = 6.1\text{ m}$ ），沿着墙体从左至右分别选取了 E 点（ $y = 0$ ， y 为距墙体左侧面距离，下同）、B 点（ $y = 22\text{ m}$ ）、F 点（ $y = 44\text{ m}$ ）和 G 点（ $y = 50\text{ m}$ ）。将沿长城高度方向的 A, B, C, D 四点加速度绘于图 6a，沿长城走向方向的 E, B, F, G 四点加速度绘于图 6b。从图 5a 和图 6a、b 可以看出，墙体左上部和右上部加速度较大，尤其是没有副墙那侧加速度最大，

达到 5.18 m/s^2 ，而有副墙存在的部位墙体加速度较小。墙体的加速度沿着墙体高度的增加而增大，墙体两端加速度相对墙体中间较大。副墙的存在对墙体产生了加固的效果，因此，有副墙部位的加速度小于没有副墙部位的加速度。

金川西段长城的整体坐标系方向加速度云图见图 5b。为了研究沿长城高度的加速度变化规律，本文分别选择了沿长城高度的 4 个点：A 点 ($z=0 \text{ m}$)、B 点 ($z=0.4 \text{ m}$)、C 点 ($z=1.8 \text{ m}$) 和 D 点

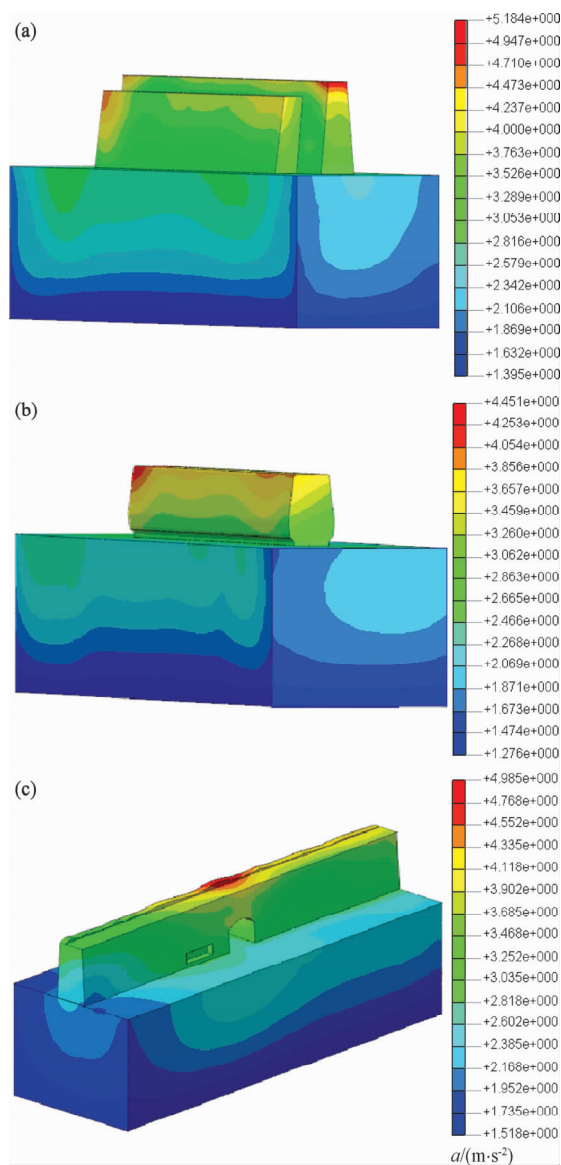


图 5 黄羊河农场段 (a)、金川西段 (b)、长城博物馆段 (c) 长城加速度云图

Fig. 5 Acceleration nephograms of the Huangyanghe farm section (a), the Jinchuan west section (b) and the Great Wall Museum section (c) of the Great Wall

($z=3.6 \text{ m}$)。将 A ~ D 各点加速度变化绘于图 6c。根据图 5b 和图 6c 可以看出，长城的加速度随着高度的增加呈增大的趋势，由于长城受 3 个方向的地震作用，因此加速度最大处为长城上部左右端两

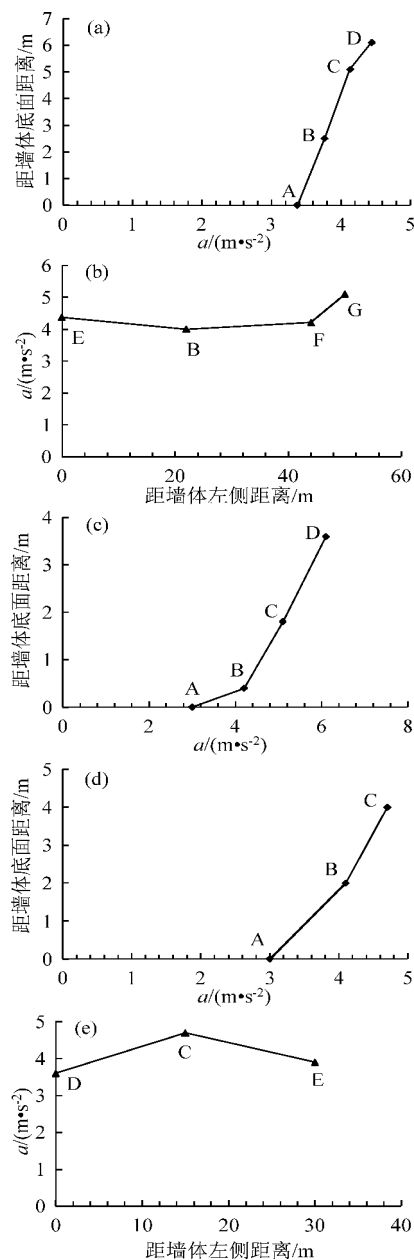


图 6 黄羊河农场段高度 (a) 及走向 (b) 方向、金川西段 (c)、长城博物馆段高度 (d) 及走向 (e) 方向长城加速度变化趋势

Fig. 6 Acceleration variation trend of the Huangyanghe farm section in height(a) and trending(b) directions, the Jinchuan west section and the Great Wall Museum section in height(d) and trending(e) directions of the Great Wall

侧（最大为 6.67 m/s^2 ），且在墙体掏蚀部位上侧（ $z=0.4 \text{ m}$ ），由于墙体掏蚀的存在加速度增大较快，图 6c 的折线图在该处（B 点处）产生了较大转折。

长城博物馆段长城的整体坐标系方向加速度云图见图 5c。为了研究长城各点加速度变化趋势，在模型上选取了 5 个点（图 2c）：沿着墙体高度方向上分别选取 A 点（ $z=0 \text{ m}$ ）、B 点（ $z=2 \text{ m}$ ）和 C 点（ $z=4 \text{ m}$ ），沿着墙体从左至右分别选取了 D 点（ $y=0$ ）、C 点（ $y=15 \text{ m}$ ）和 E 点（ $y=30 \text{ m}$ ）。将沿长城高度方向的 A、B、C 三点加速度绘于图 6d，沿长城走向方向的 D、C、E 三点加速度绘于图 6e。从图中可以看出，由于人为所挖通道的存在，通道上部随着高度的升高，墙体加速度增大，且通道上方墙体加速度明显大于两侧同等高度处的墙体加速度，其最大加速度达 4.99 m/s^2 。表明通道的存在破坏了长城结构的稳定性。

4.2 位移响应

分别提取出黄羊河农场段长城 A~G 各点的位移，沿长城高度方向 A、B、C、D 各点位移绘于图 7a，沿长城走向方向 E、B、F、G 各点位移绘于图 7b。从图 7a、b 可以看出随着墙体高度的增加位移逐渐增大，体现出了地震随高度增加的放大效应。有副墙的部位墙体位移较小，而墙体右侧没有副墙的部位位移较大，副墙起到了一定的加固作用。

由金川西段长城不同高度处各点的位移峰值曲线（图 7c）可以看出，长城的位移随着高度的增加而逐渐增大，最大处位于墙体两侧顶部（约 9.7 mm ），体现了地震随高度增加的放大效应。且由于掏蚀的存在，掏蚀部位上方的位移也增长较快，比墙体底部位移增大了 1.2 mm 。

长城博物馆段长城墙体不同点位移折线图 7d（沿高度方向 3 点 A、B、C 位移）和图 7e（沿走向方向 3 点 D、C、E 位移）可以看出，整体上墙体位移随高度的增加而增大，且由于人为所挖通道的存在，造成通道上部墙体位移远大于同等高度处两侧墙体的位移，通道上方最大位移达 14.3 mm 。

4.3 应力响应及稳定性

从黄羊河农场段长城最大拉应力云图（图 8a）可以看出长城墙体底部拉应力较大，最大处在墙体底部两侧（约为 0.143 MPa ），主墙和副墙接触

的部位拉应力也较大，在地震作用下两墙有拉裂的趋势。根据抗拉实验，黄羊河农场段长城的抗拉强度为 0.16 MPa 。长城墙角最大拉应力（ 0.143 MPa ）小于土体抗拉强度，因此在烈度为Ⅷ作用下

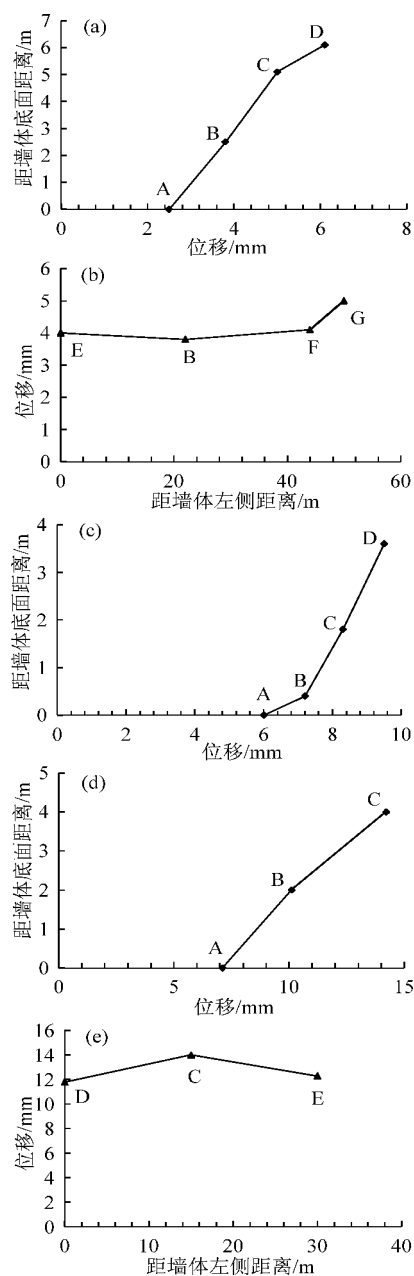


图7 黄羊河农场段高度 (a) 及走向 (b) 方向、金川西段 (c)、长城博物馆段高度 (d) 及走向方向 (e) 长城位移变化趋势

Fig. 7 Displacement variation trend of the Huangyanghe farm section in height (a) and trending (b) directions, the Jinchuan west section and the Great Wall Museum section in height (d) and trending (e) directions of the Great Wall

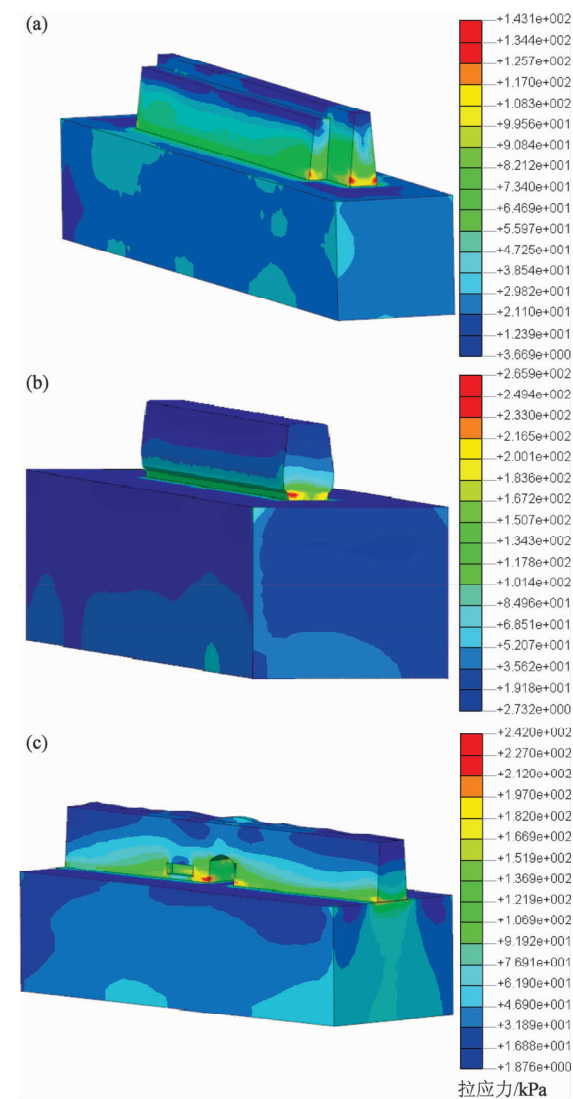


图8 黄羊河农场段 (a)、金川西段 (b)、
长城博物馆段 (c) 长城最大拉应力云图
Fig.8 Max tensile stress nephogram of the Huangyanghe farm section (a), the Jinchuan west section (b) and the Great Wall Museum section (c) of the Great Wall

黄羊河农场段长城整体稳定, 不会产生大面积的垮塌, 但底部仍有开裂的危险。

从金川西段长城最大拉应力云图 (图 8b) 可以看出, 长城墙体底部掏蚀处应力较大, 个别部位有应力集中现象, 掏蚀部位拉应力普遍在 0.1 ~ 0.18 MPa, 个别部位可达 0.26 MPa。根据抗拉实验, 金川西段长城的抗拉强度为 0.17 MPa。因此在烈度为Ⅷ度作用下长城掏蚀部位将会产生一定的开裂和垮塌, 因此长城整体有发生坍塌的可能性。很有必要对该段长城进行加固, 以防将来在大的地震 (烈度≥Ⅷ) 作用下发生倒塌。

因为人为所挖通道的存在, 造成了长城博物馆段长城墙体结构稳定性的破坏, 因此在长城墙体通道处有应力集中现象, 主要位于墙体通道下部, 通道周边拉应力范围在 0.16 ~ 0.2 MPa, 最大处拉应力达 0.24 MPa, 见图 8c。此外, 墙体通道正上方的应力也大于同等高度处墙体的应力。由于实验室所测得的峡口至长城博物馆段长城的抗拉强度为 0.13 MPa, 因此在烈度为Ⅷ度作用下长城人为挖通道周边会产生垮塌, 从而也可能进一步造成长城的整体垮塌。因此, 必须提前对该段长城进行加固处理。

综上, 将黄羊河农场段、金川西段和长城博物馆段长城动力响应特征与稳定性绘于表 3。

5 结论与讨论

本文通过对 3 段长城土体进行的室内实验可以得出, 长城土体含水率极低, 在 1.44% ~ 1.56% 之间。平均密度范围在 1.46 ~ 1.64 g/cm³ 之间。由于夯土墙体较硬, 动弹性模量相对较大都在 100 MPa 以上, 阻尼比不是很大, 在 0.067 ~ 0.126 之间。由于长城土体所含石子较多, 内摩擦角较大, 都在 30°以上。而各段长城粘聚力变化范围较大, 在 46.98 ~ 137.64 kPa 之间, 各段长城的抗拉强度在 0.13 ~ 0.17 MPa 之间。

表3 长城动力响应及抗震稳定性
Tab.3 Dynamic response and seismic stability of the Great Wall

名称	最大加速度峰值/ (m·s ⁻²)		最大位移峰值/mm		最大拉应力/MPa		稳定性
	数值	位置	数值	位置	数值	位置	
黄羊河农场	5.18	主墙右上角	10.9	主墙右上角	0.14	墙体底侧边缘	基本稳定
金川西	6.67	墙体顶侧及两端	9.7	墙体顶部	0.26	掏蚀部位	不稳定
长城博物馆	5.00	通道顶部墙体	14.3	通道顶部墙体	0.24	通道周边墙体	不稳定

通过 Midas/GTS 建立了黄羊河农场段、金川西段和长城博物馆段长城模型,分析了在烈度为Ⅷ度作用下的稳定性。结果表明:

(1) 黄羊河农场段长城在地震作用下加速度和位移总体上随着墙体高度的增加而增大,不过由于副墙的存在起到了一定的加固作用,在地震作用下该段长城整体稳定,不过底部有开裂危险。

(2) 金川西段长城在地震作用下加速度和位移都随着长城墙体高度的升高而增大。且由于基础的掏蚀,最大拉应力产生在掏蚀部位,在地震作用下掏蚀处会产生多处开裂,甚至有整体倒塌可能,基础掏蚀对墙体的稳定性影响较大。

(3) 由于长城博物馆段长城存在人为挖的通道,因此在地震作用下墙体通道上方的墙体加速度和位移都大于2侧墙体的加速度和位移。墙体的最大拉应力位于通道周围,在地震作用下通道周边墙体会产生开裂和垮塌,从而可能进一步造成整个墙体的破坏和坍塌。通道的存在破坏了墙体结构的稳定性,增大了失稳的可能。

本文在撰写过程中得到了陈永明研究员、王谦博士、刘红梅副研究员和王丽丽助理研究员的悉心指导,并得到了赵涛、王良、徐世民、李瑞宽同学的帮助,在此一并向他们表示衷心的感谢。

参考文献:

- 谌文武,郭志谦,徐彦荣,等. 2015. 基于SH加固材料的土遗址夯土试样室内滴渗试验研究[J]. 岩土工程学报,37(8):1517-1523.
- 戴鹏飞,谌文武. 2011. 青海省明长城濒危遗址(湟中段)土体工程性质与保护措施[J]. 冰川冻土,33(4):873-879.
- 和法国,谌文武,赵海英,等. 2010. PS材料加固遗址土试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),41(3):1132-1138.
- 景爱. 2008. 长城[M]. 北京:学苑出版社.
- 李并成. 1994. 河西走廊中部汉长城遗迹考[J]. 敦煌学辑刊,(1):49-52.
- 李并成. 1995. 河西走廊东部汉长城遗迹及其相关问题考[J]. 敦煌研究,(2):135-145.
- 李舒. 2011. 骆驼城土遗址抗震稳定性研究[D]. 兰州:兰州交通大学.
- 刘琨,石玉成,卢育霞,等. 2010. 玉门关段汉长城墙体结构抗震性能研究[J]. 世界地震工程,26(1):47-52.
- 沈畅,周小棣,常军富. 2014. 明代夯土长城的城墙材料与构造——以大同镇段为例[J]. 东南大学学报(自然科学版),44(1):205-210.
- 石玉成,李舒,刘琨. 2011. 地震作用下骆驼城土遗址的安全性评价[J]. 西北地震学报,33(3):255-260.
- 石玉成,马尔曼,何文贵,等. 2006. 2003年甘肃民乐—山丹6.1、5.8级地震震害特点及启示[J]. 世界地震工程,22(3):95-101.
- 王旭东,石玉成,刘琨. 2011. 夯土长城墙体掏蚀失稳机理研究[J]. 西北地震学报,33(增刊1):381-385.
- 赵海英. 2007. 甘肃境内战国秦长城和汉长城保护研究[J]. 岩石力学与工程学报,26(1):215.
- Fang H Y, Daniels J. 2006. Introductory geotechnical engineering: an environmental perspective[M]. Introductory Geotechnical Engineering.

Dynamic Response Analysis and Seismic Stability of the Rammed Great Wall of Different Types under Earthquake Action

KONG Dezheng^{1,2}, SHI Yucheng¹, LIANG Qingguo², LU Yuxia¹

(1. *Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730030, Gansu, China*)

(2. *Lanzhou Jiaotong University National Demonstration Center for Experimental Civil Engineering Education, Lanzhou 730070, Gansu, China*)

Abstract

In order to study the seismic dynamic response and Seismic Stability of the Rammed Great Wall of different types, the Huangyang river farm Great Wall, the Jinchuanxi Great Wall and the Great Wall of the Great Wall Museum were selected in this paper. The basic parameters of three sections of the Great Wall are obtained by laboratory soil tests. Based on Midas – GTS finite element software, the Great Wall of three sections were built respectively. After inputting Shandan 6.1 magnitude seismic wave, the results of this study are summarized as follows. The maximum acceleration and displacement of the Huangyang river farm Great Wall are located at upper right – side in the wall, the maximum tensile stress is located at the bottom of the wall. The Great Wall of Huang yang river farm is in a basically stable state under earthquake action. Acceleration and displacement of Jinchuanxi increase with the altitude of the wall, the maximum tensile stress is located at the basal sapping region. The Jinchuanxi Great Wall will to collapse under earthquake action. The maximum acceleration and displacement of the Great Wall at Shandan Great Wall Museum are located at above passageway of the wall, the maximum tensile stress is located at the passageway periphery region. The Great Wall of Shandan Great Wall Museum will probably collapse under earthquake action.

Keywords: the Rammed Great Wall; seismic wave; numerical simulation; dynamic response; seismic stability