

DOI: 10.11779/CJGE202001017

# 基于性能的重力式挡墙地震易损性分析

朱宏伟<sup>1</sup>, 姚令侃<sup>2, 3</sup>, 赖军<sup>3</sup>

(1. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 2. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031;  
3. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 位于高烈度地震区的支挡结构时刻面临着特大震灾的严峻考验, 迄今国内外还没有人针对重力式挡墙系统地做过易损性方面的研究工作。采用增量动力分析方法, 考虑地震动输入的不确定性, 选取PGA为地震强度参数, 挡墙的位移指数 $D_1$ 为性能参数, 基于振动台模型试验划分了挡墙的抗震性能水准, 利用FLAC<sup>3D</sup>对8 m高的重力式挡墙进行了地震动力响应分析和地震易损性分析, 通过易损性曲线对挡墙在不同地震动作用下的易损性进行了评估和对比分析。研究表明: PGA与挡墙的位移指数近似呈指数关系, 当地震动加速度小于0.4g时, 场地条件对墙体位移指数的影响不显著, 当地震动加速度大于0.4g时, 土质场地挡墙位移指数与岩石场地挡墙相比显著增大, 墙体位移指数受场地条件的影响显著。当PGA<0.4g时, 挡墙基本保持完好或以轻微损伤破坏为主; 当PGA>0.6g时, 挡墙已完全损伤, 发生严重损坏的概率也较大; 当PGA>0.8g时, 会造成挡墙的严重损坏, 甚至可能造成整体倒塌, 需要采取一定的抗震加固措施。

**关键词:** 重力式挡墙; 抗震性能; 增量动力分析; 地震易损性

中图分类号: TU476.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)01-0150-08

**作者简介:** 朱宏伟(1982—), 男, 甘肃陇西人, 博士研究生, 讲师, 主要从事路基加筋土工程抗震等方面的研究与教学工作。E-mail: zhw-1-zhw@163.com。

## Seismic vulnerability assessment of gravity retaining walls based on performance

ZHU Hong-wei<sup>1</sup>, YAO Ling-kan<sup>2, 3</sup>, LAI Jun<sup>3</sup>

(1. School of Environment and Resources, Southwest Science and Technology University, Mianyang 621010, China; 2. MOE Key Laboratory of High-Speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The retaining structures in the high earthquake intensity areas face the severe tests of devastating earthquake, and so far, the seismic vulnerability of gravity retaining walls has not been studied systematically at home and abroad. The increment dynamic analysis method is used in this study. Taking into account the uncertainty of seismic input, the PGA and displacement index are selected as the seismic intensity parameter and performance parameter, respectively, and the classification of the performance level of retaining walls is determined based on shaking table tests. The seismic response and seismic vulnerability of a 8 m-high gravity retaining wall are analyzed by applying FLAC<sup>3D</sup>, and the fragility curves are derived to assess and compare the seismic performances of the retaining wall under different ground motions. It is shown that the displacement index exponentially relates to the PGA. When the PGA is less than 0.4g, the displacement index increases slowly. When it exceeds 0.4g, the displacement index increases quickly, and it is greatly affected by site conditions. When the PGA is less than 0.4g, the retaining wall keeps slight damage or good situation; when it is more than 0.6g, the retaining wall is damaged completely, and the probability of severe damage increases. When the PGA is more than 0.8g, the retaining wall suffers serious damage, and even collapse is caused, and reinforcing measures should be taken to maintain the stability of the retaining wall.

**Key words:** gravity retaining wall; seismic performance; increment dynamic analysis; seismic vulnerability

## 0 引 言

自21世纪以来, 中国曾发生过多起破坏性极强的地震, 2008年的汶川大地震使得灾区的地面建筑物及交通基础设施遭受严重破坏, 给震后救援和灾后重建

带来了极大的困难。挡墙作为一种重要的路基支挡结

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0802206); 国家自然科学基金项目(41571004)

收稿日期: 2018-10-08

构, 在交通土建领域应用十分广泛, 随着越来越多的交通基础设施在高烈度地震区的修建, 挡土墙将无时无刻不面临特大震灾的严峻考验。通过对汶川大地震中遭受地震破坏的挡墙震害调查, 发现挡墙倒塌后会造成交通中断, 给灾后救援工作带来了巨大的困难, 进而加剧人员伤亡及财产损失<sup>[1]</sup>。因此, 对高烈度地震区的挡墙进行地震风险评价并进行可靠的抗震设计是摆在土木工程师面前的一项挑战和艰巨任务。

地震易损性指结构在不同地震动强度下发生相应不同程度损伤的超越概率, 是进行结构地震风险评价的基础, 也是预测地震破坏和损失的关键技术。Shinozuka 等<sup>[2]</sup>分别用动力时程分析和能力谱方法分析了混凝土桥梁结构的地震易损性。Nilson 等<sup>[3]</sup>对钢筋混凝土框架结构时变系统可靠度问题的地震易损性进行了分析。于晓辉等<sup>[4]</sup>通过建立结构构件的 Bayesian 概率能力模型, 绘制了某低层钢筋混凝土框架结构的震害易损性曲线并进行了震害经济损失评估。Hwang 等<sup>[5]</sup>对受 New Madrid 地震带影响的高速公路混凝土连续梁桥进行了震害易损性评价。孔宪京<sup>[6]</sup>采用坝体地震震后变形、坝坡稳定性、面板防渗体安全为抗震性能评价指标, 通过大量非线性有限元计算, 得到各性能参数的地震易损性曲线。尹超<sup>[7]</sup>基于 IDA 方法对高速公路路堤的地震易损性进行了风险评价, 在此基础上提出了路堤震害风险管理方法。可见, 易损性分析方法在房屋建筑、桥梁工程和堤坝工程等重要领域得到了应用和发展, 并取得了许多对抗震设计有实际意义的成果, 但迄今为止国内外还没有人针对挡土墙等支挡结构系统地做过这方面的研究工作。

鉴于此, 本文采用增量动力分析法 (IDA), 考虑地震动输入的不确定性, 选取地震峰值加速度 PGA 为地震强度参数, 挡墙的位移指数  $D_1$  (墙顶最大位移与墙高的比值) 为性能参数, 基于振动台模型试验和震害调查结果划分了挡墙的抗震性能水准, 对一座 8 m 高的重力式挡墙进行地震动力响应分析和易损性分析, 得出基于不同性能指标的各破坏等级易损性曲线和概率, 此项研究工作可为挡墙基于性能的抗震设计和地震安全风险评价提供参考。

## 1 挡墙抗震性能参数的选取

基于位移的抗震设计方法是实现基于性能的抗震设计的一种重要方法, 与传统的基于强度的抗震设计方法相比, 其用量化的位移设计指标来控制建筑物的抗震性能。在岩土工程抗震设计中, 国内外研究者也已充分认识到, 在不影响公路、铁路使用功能的情况下, 应允许支挡结构有一定的位移量。如欧洲的抗

震设计规范 Eurocode 8 规定: 挡墙在地震作用下的永久性位移包括滑移位移和倾覆位移, 为了不影响墙体的美观和正常功能的发挥, 必须使其震后的位移控制在合理的范围内<sup>[9]</sup>; 日本铁路规范建议用垂直差异沉降来评价挡墙的地震稳定性; 为确保挡墙发生变形时不引起相邻结构的破坏, 《新西兰桥梁手册》规定<sup>[10]</sup>: 在设计地震下, 可允许支挡结构保持弹性状态, 在强地震下, 可允许支挡结构具备有限的永久性位移, 例如, 对于刚性支挡结构, 允许的墙体位移是 100 mm。

挡墙的破坏模式一般可分为滑移、绕墙趾转动和绕墙顶转动。根据《公路工程抗震规范》(JTG B02—2013)<sup>[11]</sup>, 在地震作用下挡墙的抗滑稳定系数  $K_c \geq 1.1$ , 抗倾稳定系数  $K_0 \geq 1.2$ 。并且, 大量的工程设计实例表明, 挡墙在地震作用下的稳定性主要受抗滑稳定系数控制, 也就是说在地震作用下, 挡墙更多地会发生滑动破坏而非倾覆破坏。然而, 在汶川地震中, 大量的挡墙破坏属于倾覆破坏, 仅少数挡墙发生滑动, 且滑移量很小。例如, 在对 G213 线都江堰—映秀段的 49 处重力式挡墙的震害调查发现, 发生倾覆破坏的挡墙为 36 座, 占挡墙总数的 73.4%。这表明就最常见的重力式挡土墙而言, 倾覆位移可作为衡量挡墙抗震性能指标。

鉴于此, 本文依据已有的研究成果, 选取位移指数  $D_1$  (定义为震后墙顶最大位移与墙高比值) 作为衡量挡墙抗震性能的量化参数:

$$D_1 = d_{\max} / H \quad (1)$$

式中,  $d_{\max}$  为挡墙顶面最大位移,  $H$  为挡墙高度, 如图 1 所示。

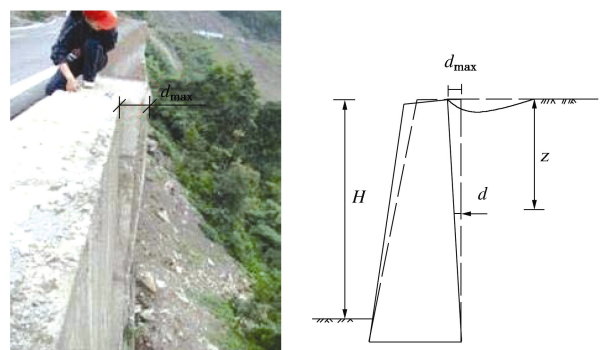


图 1 挡墙在地震作用下发生倾斜

Fig. 1 Inclination deformation of retaining wall under earthquake

位移指数可作为直观反映挡墙震后性能状态的重要指标, 不仅便于计算, 还宏观地反映了震后挡墙的性能状态, 位移指数越大挡墙的抗震性能越差, 位移指数越小挡墙的抗震性能优越。挡墙在不同性能状态下的位移指数可通过开展振动台模型试验和对挡墙震害资料的分析和评估来获取。

## 2 挡墙抗震性能水准的划分

### 2.1 振动台模型试验

试验在高速铁路线路工程教育部重点实验室的单向电液伺服驱动式大型振动台上进行。系统的最大加速度为1.2g，水平向振动有效负荷质量为25 t，最大振幅为±10 cm。试验采用的钢制模型箱尺寸为3.5 m（长）×1.5 m（宽）×2.1 m（高），自重约为27 kN。为了对比不同地基条件下重力式挡墙地震地震动力特性，分别制作了岩石地基和土质地基两种场地形式的试验模型。为了模拟嵌岩地基挡墙，采用钢筋混凝土制作了厚15 cm，前部带10 cm高凸坎的基座，基座可以整体吊装进入模型框，再在基座上吊装挡土墙模型（图2（a））；土质地基挡墙的模拟是将挡墙模型直接置于混凝土基座（无凸坎）上，挡墙和基座之间铺有5 cm厚的细砂（图2（b））。

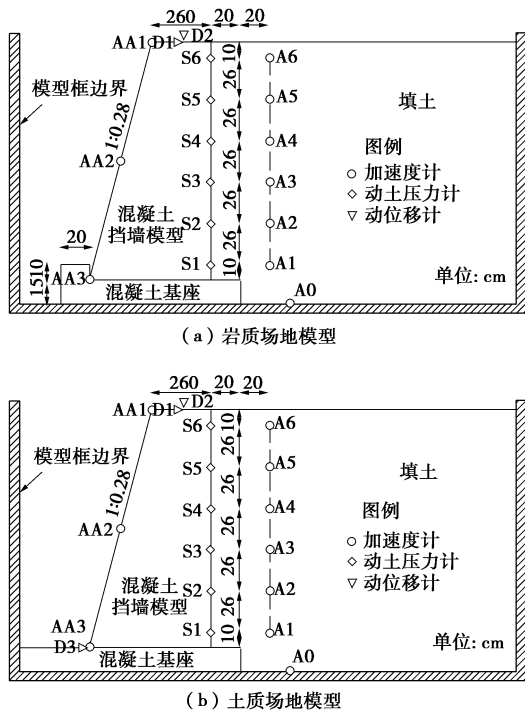


图2 振动台模型试验设计

Fig. 2 Model design of shaking table tests

#### (1) 试验模型的制作及监测点布置

重力式挡墙模型的截面为直角梯形，墙背直立，墙面坡率为1：0.28，墙顶和墙底宽度分别为0.26，0.68 m，墙身沿走向长1.45 m。按墙背填土水平考虑，为保证墙后土体“第一滑裂面”交于填土面及保留适当动力边界距离，按内摩擦角35°测算，拟定模型挡墙的高度为1.5 m。为便于墙背土压力盒装设，在墙背土压力测点位置预留与土压力盒同直径的凹坑，深度需保证土压力盒安装后顶面能突出2 mm左右，如图3所示。模型填料为碎石土，综合内摩擦角为35°，

无黏聚力，非均匀系数为6.8，曲率系数为1.3，最大干密度为2.15 g/cm<sup>3</sup>，最优含水率为5.4%。



图3 振动台试验模型

Fig. 3 Shaking table test model

测试元件包括加速度传感器、动土压力盒和动位移计以及位移百分表，布置简图如图2所示。其中，墙背沿中轴线布设6个动土压力盒（S1~S6），盒间垂直距离26 cm，距墙背40 cm的填土中与动土压力盒同高程布设6个加速度传感器（A1~A6，量程由下至上分别为2个1g，2个2g和2个5g），墙顶和距墙背20 cm的填土面上各设置水平和垂直动位移计（D1~D3）及百分表。墙底的加速度由台面主控加速度传感器量测（A0，控制台开环控制测点）。在墙顶、墙底和1/2墙高处设置加速度传感器以量测墙体地震加速度（AA1~AA3）。按照图2所示模型设计及布置进行模型填筑与测试元件的安装。墙背填土根据大型相对密度试验结果，以压实度不低于95%进行人工填筑并夯实。

#### (2) 模型试验的相似关系及加载制度

为模拟墙高分别为12，8，4 m的原型挡墙，将几何相似比拟定为8.0，5.333，2.667。根据 Buckingham  $\pi$  定理导出了各物理量之间的相似关系<sup>[12]</sup>，模型试验的主要相似参数见表1。

表1 模型试验主要相似常数

Table 1 Primary similitude coefficients of model

物理量	相似关系	相似常数		
		12 m	8 m	4 m
长度 $L$	$C_l$	8.000	5.333	2.667
密度 $\rho$	$C_\rho$	1	1	1
加速度 $a$	$C_a$	1	1	1
速度 $v$	$C_v=C_\rho^{1/4}C_l^{3/4}$	4.75	3.51	2.09
位移 $u$	$C_u=C_\rho^{1/2}C_l^{3/2}$	22.63	12.32	4.36
黏聚力 $c$	$C_c=C_\rho C_l$	8.00	5.33	2.67
内摩擦角 $\varphi$	$C_\varphi=1$	1	1	1
时间 $t$	$C_t=C_\rho^{1/4}C_l^{3/4}$	4.75	3.51	2.09
频率 $\omega$	$C_\omega=C_\rho^{-1/4}C_l^{-3/4}$	0.210	0.285	0.479

选取汶川地震中卧龙强震台站所记录到的东西向地震波作为输入波形（代号WL），如图4所示。试验

采用单向输入激励, 台面输入的加速度峰值按 0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g, 0.5g, 0.6g, 0.7g, 0.8g, 0.9g, 1.0g 的量级逐级递增, 直至模型发生破坏为止。在试验过程中, 穿插时间长度不小于 30 s 的高斯平稳白噪声(代号 WN) 激励的微振试验(加速度峰值约 0.04g), 观察模型动力特性的变化情况。

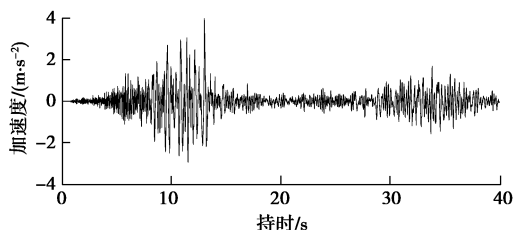


图 4 汶川波波形

Fig. 4 Wenchuan earthquake waves

## 2.2 抗震性能水准的定义与划分

图5反映了在0.4g的地震作用下, 墙顶的动位移计(D1)监测到的挡墙位移随时间的变化规律。可以看出, 位移在 $t=13$  s时发生了较大的突变, 与汶川波主波的峰值加速度时刻相对应, 突变后, 相对位移继续增大, 但增加的幅度放缓, 直至 $t=33$  s时相对位移才出现了陡增, 此时输入的地震波正好达到次波正峰值。

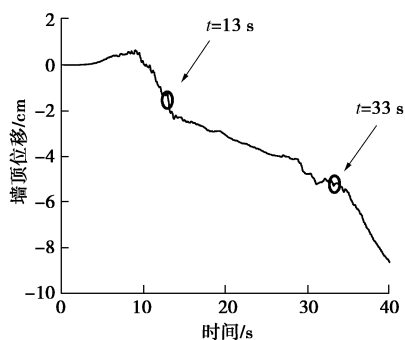


图 5 挡墙墙顶的位移变化

Fig. 5 Displacement curve of retaining wall top

图 6 显示了不同的场地条件下挡墙位移指数变化规律, 可以看出: 相同的地震动强度下, 土质场地挡墙位移指数明显大于岩石场地挡墙位移指数, 场地条件对位移指数的影响程度随地震动峰值(PGA)的增加而增大。当地震峰值加速度小于 0.4g 时, 场地条件对墙体位移指数的影响不显著, 这说明在地震烈度为 IX 度及以下的区域进行挡墙抗震设计时, 场地条件对墙体位移的影响很小, 可以忽略。当地震峰值加速度大于 0.4g 时, 土质场地挡墙位移指数与岩石场地挡墙相比显著增大, 墙体位移指数受场地条件的影响显著, 因而在 IX 度区以上进行挡墙抗震设计时, 应重视场地条件对墙体位移的影响, 软硬程度不同的场地土应分别考虑。

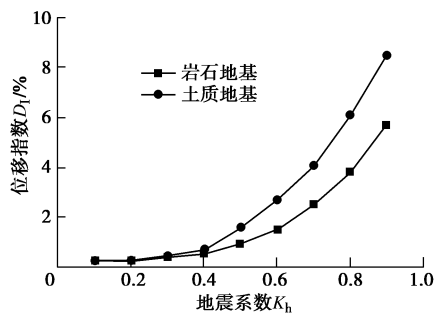


图 6 位移指数随地震系数变化

Fig. 6 Change of displacement indexes under different intensity earthquakes

挡墙的抗震性能水准描述了其在相应设防地震强度下的最大破坏程度, 但如何对抗震性能水准进行量化是挡墙地震易损性研究的难点和关键。张建经等<sup>[13]</sup>对支挡结构的震害调查, 提出了不同性能要求的挡墙位移控制标准。分述如下: ①墙体不损坏或轻微损坏, 能够保持正常使用功能, 位移指数在 1%以内; ②墙体可能出现局部损坏, 需修补, 短期内可以恢复正常使用功能, 位移指数在 3.5%以内; ③墙体出现较大变形, 但不出现整体倒塌, 经抢修后可以使用, 位移指数在 6%以内。

根据韩鹏飞<sup>[14]</sup>的振动台试验研究结果表明, 当重力式挡墙的位移指数 7.5% 时, 墙体出现显著的倾斜变形, 墙后填料大面积沉陷, 如图 7 所示。

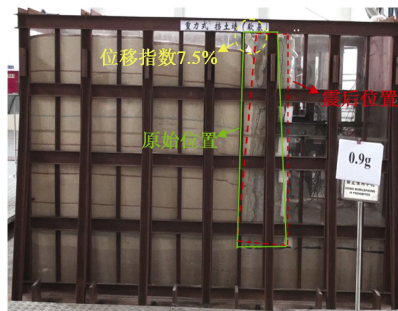


图 7 挡墙震后变形图(韩鹏飞<sup>[14]</sup>)

Fig. 7 Deformation pattern of retaining wall under earthquake

笔者<sup>[15]</sup>曾对汶川震区内基本完好、损伤以及严重损坏的 49 座重力式挡墙进行了震害调查, 并进行了统计分析, 发现基本完好或损伤的挡墙其位移指数均在 4% 以下(覆盖率 88.2%), 如图 8 所示。

《生命线工程地震破坏等级划分》(GB/T 24336—2009) 将公路震害分为基本完好、轻微损伤、中等破坏、严重破坏和毁坏 5 级, 并描述了各级震害对应的破坏程度<sup>[8]</sup>。美国联邦应急管理局定义了公路桥梁破坏的 5 种状态, 即没有损伤、轻微损伤、中等损伤、严重损伤和完全破坏。日本将高速公路震害分为严重、较重、中等、轻微和非常轻微 5 级, 并认为严重、较重、

中等震害可能导致交通中断。为了与三级抗震设防原则相对应，本文根据挡墙的震害程度，将其抗震性能水准分别定义为完好、基本完好、损伤、严重损坏和毁坏，并结合以上研究成果，确立了挡墙的各性能水准对应的性能参数大小，如表2所示。

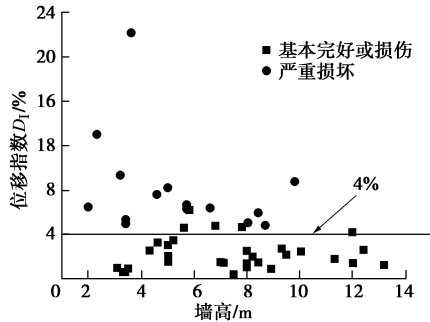


图8 位移指数与墙高的关系

Fig. 8 Relationship between deformed exponent and wall height

表2 挡墙抗震性能水准的划分

Table 2 Quantitative indexes of seismic performance of retaining wall

性能水准	损伤描述	评判标准	功能状态描述	位移指数 $D_1$
I	完好	无明显震害	可正常使用	$0 \leq D_1 < 1\%$
II	基本完好	出现裂缝或轻微变形	按常规方法养护后使用	$1\% \leq D_1 < 2\%$
		有明显变形，但主体结构保持完好	可维持使用，在后期运营中逐步修复	
III	损伤	出现过大变形或局部破坏，但未倒塌	必须采取紧急加固措施	$2\% \leq D_1 < 4\%$
IV	严重损坏	严重损坏	严重损坏	$4\% \leq D_1 < 6\%$
V	毁坏	倒塌	重建	$D_1 > 6\%$

### 3 基于 IDA 的重力式挡墙易损性分析

增量动力分析法 (IDA) 是一种基于非线性动力时程响应分析的地震易损性分析方法，可以全面深入地分析结构在不同强度地震作用下的动力响应特性<sup>[15]</sup>。分析步骤如下：①选择地震动记录，确定地震动强度参数 (intensity measure, IM, 如峰值加速度 PGA 或相应于结构基本周期的谱加速度  $S_a$ )；②通过调整地震动参数 (如峰值加速度 PGA, 峰值速度 PGV 等)，将原始的地震动转化成一组不同强度的地震动；③选取描述结构响应的性能参数 DM (如最大位移)；④输入不同强度的地震动，分别对结构进行非线性动力时程分析，得到一系列 (IM, DM) 坐标点，绘制 IDA 曲线；⑤通过对 IDA 曲线的趋势、离散状态进行统计分析，可以了解结构在地震动强度逐渐增强的情况下

性能灾变失效的全过程。

#### 3.1 计算模型的建立与地震记录的选取

本文利用 FLAC<sup>3D</sup> 建立了重力式挡墙的三维非线性动力分析模型，计算模型由挡墙、墙后接触面、回填土和基岩等 4 部分组成。挡墙墙高为 8 m，计算范围长 40 m，厚度 (沿挡墙走向) 取 10 m，基岩取 4 m 厚，4 m 以上为挡墙及填土。为了提高计算精度，网格划分时，挡墙和离墙体较近的部分网格边长取为 0.5 m，外围部分取 1 m。为了更好地模拟挡墙与墙后填土的相互动力作用，在挡墙与填土以及挡墙与基岩之间分别设置了接触面，计算模型如图 9 所示。

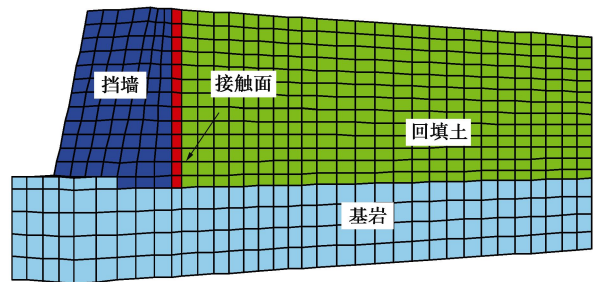


图9 数值计算模型

Fig. 9 Numerical model

墙-土接触面用非线性的 Goodman 接触面单元来模拟，该单元是一种无厚度而只有长度和宽度的特殊单元，其本构模型为 Coulumb 剪切模型。挡墙与填土接触面的法向刚度和切向刚度取 444 MPa，内摩擦角取 26.6°。填料采用碎石土，采用服从 Mohr-Coulomb 破坏准则与非关联流动法则的理想弹塑性模型，剪胀角  $\psi = \varphi/2 = 17.5^\circ$ <sup>[16]</sup>，墙体和基岩采用各向同性弹性模型。各材料的物理力学参数如表 3 所示。

表3 各材料的物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of materials

材料	干密度 / (kg·m <sup>-3</sup> )	体积模量 / MPa	剪切模量 / MPa	泊松比	内摩擦角 / (°)
填土	2150	50	23.1	0.31	35
挡墙	2300	10500	10500	0.17	—
基岩	2400	17900	12300	0.17	—

#### 3.2 地震记录的选取

地震动的选取是结构进行易损性分析的关键，由于受震中距、地震波传播路径和场地条件的影响，实际记录地震动的 PGA、卓越周期和持时高度离散，相应的结构地震响应也存在较大差异<sup>[17]</sup>。

在增量动力分析方法中，由于强度峰值在分析中可以进行调整，因此选择地震波时主要考虑频谱特性、持续时间和地震波数量。根据 Vamvatsiko 等的建议，10~20 条地震波即能满足增量动力分析的精度要求<sup>[18]</sup>。因此，以混凝土抗震设计规范规定的地震动设计反应谱为目标谱，从 PEER 中选取 20 条地震动记录，本文

所选取的地震动震中距均大于 30 km, 排除了近场地地震记录中高能脉冲对结构响应的影响。如表 4 所示。

表 4 地震动记录

Table 4 Far-field seismic information

序号	地震记录	地震名称	记录台站	PGA/g
1	NGA#15	Kern County	Taft Lincoln School	0.159
2	NGA#175	Imperial Valley-06	Delta	0.237
3	NGA#176	Imperial Valley-06	EL Centro Array #12 Hills-Mulhol EL Centro	0.145
4	NGA#266	Imperial Valley-06	Array #12Country-W LC	0.229
5	NGA#326	Northridge	Camarillo	0.198
6	NGA#522	Hector Mine	Hector	0.231
7	NGA#582	Hector Mine	Mecca-CVWD Yard	0.236
8	NGA#729	Chi-Chi, Taiwan	CHY041	0.149
9	NGA#737	Chi-Chi, Taiwan	CHY031	0.158
10	NGA#778	Chi-Chi, Taiwan	CHY028	0.143
11	NGA#884	Chi-Chi, Taiwan	CHY080	0.968
12	NGA#985	Manjil-Iran	Rudsar	0.167
13	NGA#978	Imperial Valley	EI Centro Array #11 54171	0.367
14	NGA#1000	Chalfont Valley	LADWP	0.143
15	NGA#1116	Loma Prieta	Capotola	0.227
16	NGA#1637	Loma Prieta	Agnews State Hospital	0.225
17	NGA#1762	Bishop Rnd Val	1661 Mc Gee	0.128
18	NGA#1810	Kobe, Japan	Shin-Osaka	0.267
19	NGA#1823	Victoria-Mexico	Chihuahua	0.387
20	NGA#3265	N. Palm Springs	Indio	0.365

对选取的 20 条地震波均按 PGA 进行等值调幅, 调幅级差为 0.2g, 调幅后的 PGA 分别为 0.2g, 0.4g, 0.6g, 0.8g, 1.0g, 1.2g。根据震害调查的结果, 发现挡墙的震害主要是因水平地震作用所致<sup>[19]</sup>, 故在计算时只将地震波沿水平向单向输入, 不考虑竖向地震的作用。

## 4 计算结果的验证及易损性分析结果

### 4.1 计算结果的验证

图 10 为在 0.4g 的汶川波作用下挡墙的位移云图, 可以看出, 挡墙的位移沿墙高逐渐增大, 最大位移出现在墙顶, 即挡墙在地震作用下主要发生绕墙底的转动变形, 这与震害调查的结果是一致的。并且, 随着地震动强度的增大, 挡墙顶部的位移也将相应增加, 从而说明, 将位移指数作为衡量挡墙震后抗震性能的量化指标是合理的, 位移指数越大挡墙的抗震性能越差, 反之, 挡墙的抗震性能越好。

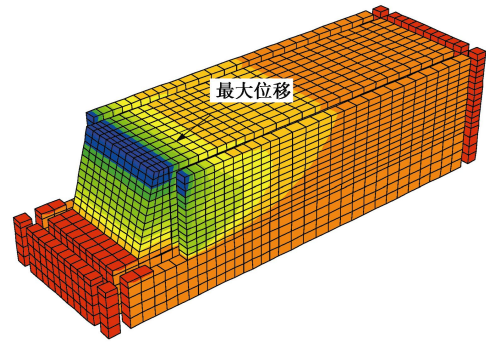


图 10 地震作用下挡墙的位移云图

Fig. 10 Displacement nephogram of retaining wall under earthquake

为了验证计算结果的正确性, 将数值模拟的结果和前期开展的振动台试验结果进行了对比<sup>[15]</sup>。从图 11 可以看出, 在不同强度的汶川波作用下, 挡墙位移指数的计算值和试验值吻合得较好, 说明本文建立的数值分析模型能够准确可靠地反映挡墙在地震作用下真实的动力响应特性。

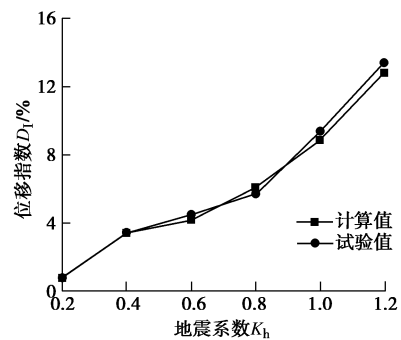


图 11 试验值和计算值的比较

Fig. 11 Comparison of test and calculated values

### 4.2 IDA 分析

将各地震动记录输入所建立的挡墙数值计算模型, 进行 120 次的动力响应分析, 首先得到各地震动作用下挡墙墙顶的最大位移值  $d_{max}$ , 再按式 (1) 求得挡墙在不同地震强度下的位移指数。图 12 所示的是位移指数随着地震动强度变化的关系曲线, 可以看出, 挡墙的位移指数随着地震动强度的增大而近似线性增加, 并且, 地震波的类型对位移指数计算结果的影响并不大。

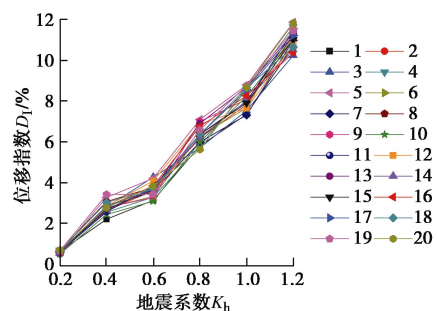


图 12 不同强度的地震作用下的位移指数变化

Fig. 12 Change of displacement indexes under different intensity earthquakes

以地震系数的自然对数为横坐标, 位移指数的均值的自然对数作为纵坐标进行线性回归分析, 得到回归直线, 如图 13 所示。可以看出, 散点较好地围绕在回归函数直线附近, 说明回归函数可以较好地反映挡墙的位移指数与地震动参数之间的关系。

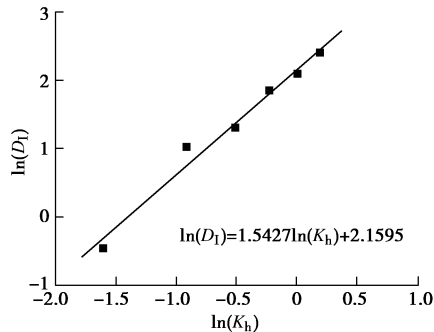


图 13 回归拟合直线

Fig. 13 Regression fitting curve

#### 4.3 概率地震需求分析

挡墙在地震作用下超越第  $k$  级震害的概率, 即发生第  $k$  级或比第  $k$  级更严重震害的概率  $P_k$  为

$$P_k = P(R_k / S \leq 1) \quad (2)$$

式中  $k=2$  表示基本完好,  $k=3$  表示损伤,  $k=4$  表示严重损坏,  $k=5$  表示毁坏;  $P_k$  为挡土墙超越第  $k$  级震害的概率;  $R_k$  为第  $k$  级震害对应的取值下限;  $S$  为地震造成的挡墙震害损伤, 即位移指数  $DI$  的实际取值。根据文献  $\ln R_k$  与  $\ln S$  均服从正态分布<sup>[20]</sup>, 则式 (2) 可改写为

$$P_k = \phi \left[ \frac{\ln(R_k / S)}{\delta} \right] \quad (3)$$

式中,  $\delta$  为挡墙震害损坏对地震动强度的离散程度, 表达式为

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\ln R_k - \ln(\alpha M_i^\beta)]^2}{N-1}} \quad (4)$$

式中,  $\alpha$  和  $\beta$  均为待估参数,  $M_i$  为地震动记录确定时各地震动调幅后的取值, 即  $M_1=0.2g$ ,  $M_2=0.4g$ ,  $M_3=0.6g$ ,  $M_4=0.8g$ ,  $M_5=1.0g$ ,  $M_6=1.2g$ 。

通过图 13 结合 IDA 结果对  $\alpha$  和  $\beta$  进行回归分析, 得到:  $\alpha=8.752$ ,  $\beta=1.542$ , 代入式 (4) 可以计算得到  $\delta=0.342$ 。

由于  $\ln R_k$  和  $\ln S$  均服从标准正态分布, 则  $\phi$  亦服从标准正态分布, 根据式 (3) 计算出不同地震动作用下超越某震害等级的概率, 并绘制地震易损性曲线如图 14 所示。

由图 14 可以看出, 在较小量级的地震作用下 ( $PGA < 0.4g$ ), 挡墙基本保持完好或以轻微损伤破坏为主; 在较大量级的地震作用下 ( $PGA=0.6g$ ), 挡墙已完全损伤, 发生严重损坏的概率为 46.72%; 当

$PGA=0.8g$  时, 挡墙已基本严重损坏, 破坏概率达 99.63%, 发生毁坏的概率也较大, 为 30.45%; 当  $PGA=1.0g$  时, 挡墙毁坏的概率进一步增加, 为 76.35%。综合分析挡墙的地震易损性曲线可以得出, 对于  $0.8g$  及以上的强震, 会造成挡墙的严重损坏, 甚至可能造成整体倒塌, 从而导致道路中断, 严重影响抢险救灾。

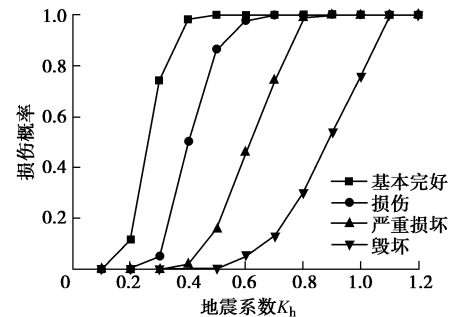


图 14 挡墙的地震易损性曲线

Fig. 14 Seismic fragility curves of retaining wall

## 5 结 论

(1) 基于对挡墙震害资料的分析, 将挡墙的抗震性能水准划分为完好、基本完好、损伤、严重损坏和毁坏等五个等级。选取位移指数(震后挡墙顶部最大位移与墙高的比值)作为抗震性能参数, 并根据振动台模型试验和对震害资料的分析评估确立了重力式挡墙的抗震性能量化指标。

(2) 试验表明, 当地震动加速度小于  $0.4g$  时, 场地条件对墙体位移指数的影响不显著; 当地震动加速度大于  $0.4g$  时, 土质场地挡墙位移指数与岩石场地挡墙相比显著增大, 墙体位移指数受场地条件的影响显著, 因而在 IX 度区以上进行挡墙抗震设计时, 应重视场地条件对墙体位移的影响。

(3) 通过易损性曲线可以看出, 当  $PGA$  小于  $0.4g$  时, 挡墙基本保持完好或以轻微损伤破坏为主; 当  $PGA$  在  $0.6g$  以上时, 挡墙已完全损伤, 发生严重损坏的概率也较大; 当  $PGA$  在  $0.8g$  以上时, 会造成挡墙的严重损坏, 甚至整体倒塌, 需要采取一定的抗震加固措施。

#### 参考文献:

- [1] 朱宏伟, 姚令侃, 张绪海. 两种加筋土挡墙的动力特性比较及抗震设计建议[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 2072 - 2080. (ZHU Hong-wei, YAO Ling-kan, ZHANG Xu-hai. Comparison of dynamic characteristics between netted and packaged reinforced soil retaining walls and recommendations for seismic design[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(11): 2072 - 2080. (in

- Chinese))
- [2] SHINOZUKA M, FENG M Q, LEE J, et al. Statistical analysis of fragility curves[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, **126**(2): 1224 - 1231.
- [3] NIILSON B G, DESROCHES R. Analytical seismic fragility curves for typical bridges in the central and southeastern United States[J]. *Earthquake Spectra*, 2007, **23**(3): 615 - 633.
- [4] 于晓辉, 吕大刚, 王光远. 土木工程结构地震易损性分析的研究进展[C]// 第二届结构工程新进展国际论坛论文集. 大连, 2008: 763 - 774. (YU Xiao-hui, LU Da-gang, WANG Guang-yuan. Seismic fragility analysis of civil engineering structures:state-of-the-art[C]// Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Forum on Advances in Structure Engineering. Dalian, 2008. (in Chinese))
- [5] HWANG H, LIU J, CHIU Y. Seismic fragility analysis of highway bridges[R]. Champaign: The University of Memphis of Center for Earthquake Research and Information, 2001: 1 - 117.
- [6] 孔宪京. 混凝土面板堆石坝抗震性能[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (KONG Xian-jing. Seismic Performance of Concrete-faced Rockfill Dam[M] Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))
- [7] 尹超. 平原区路堤地震灾害风险评估研究[D]. 西安: 长安大学, 2015. (YIN Chao. Study on Seismic Risk Assessment of Embankment in Plain Areas[D]. Xi'an: Chang'an University. 2015. (in Chinese))
- [8] 生命线工程地震破坏等级划分: GB/T24336—2009[S]. 2009. (Seismic Damage Hierarchies of Lifeline Engineering: GB/T24336—2009 [S]. 2009. (in Chinese))
- [9] Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 5: Foundations, Retaining Structures and Geotechnical Aspects: EUROCODE 8. 2003.[S]. 2003.
- [10] Transit New Zealand. Bridge Manual Plus Amendment No.1[S]. Wellington: Transit New Zealand, 1995.
- [11] 公路工程抗震规范: JTG B02—2013 [S]. 2006. (Specification of Seismic Design for Highway Engineering: JTG B02—2013[S]. 2013. (in Chinese))
- [12] 蒋良滩, 姚令侃, 王建. 基于振动性态和破坏相似的边坡振动台模型实验相似律[J]. *交通科学与工程*, 2009, **25**(2): 1 - 7. (JIANG Liang-wei, YAO Ling-kan, WANG Jian. Similitude for shaking table model test on side slope relating to dynamic characteristics and strength[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2009, **25**(2): 1 - 7. (in Chinese))
- [13] 张建经, 冯君, 肖世国. 支挡结构抗震设计中的 2 个关键技术问题[J]. *西南交通大学学报*, 2009, **44**(6): 321 - 325. (ZHANG Jian-jing, FENG Jun, XIAO Shi-guo. Discussions on two key technical problems for seismic design of retaining wall[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2009, **44**(6): 321 - 325. (in Chinese))
- [14] 韩鹏飞. 重力式挡墙大型振动台模型试验与基于性能的抗震设计方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011. (HAN Peng-fei. Performance-based Seismic Design of Gravity Retaining Wall Based on Large Shaling Table Test[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese))
- [15] 朱宏伟, 姚令侃, 蒋良滩. 考虑变形影响的重力式挡墙地震土压力分布[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(6): 1035 - 1044. (ZHU Hong-wei, YAO Ling-kan, JIANG Liang-wei. Distribution of seismic earth pressure on gravity retaining walls considering influence of deformation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(6): 1035 - 1044. (in Chinese))
- [16] 孔位学, 芮勇勤, 董宝弟. 岩土材料在非关联流动法则下剪胀角选取探讨[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(11): 3278 - 3282. (KONG Wei-xue, RUI Yong-qin, DONG Bao-di. Determination of dilatancy angle for geomaterials under non-associated flow rule[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(11): 3278 - 3282. (in Chinese))
- [17] ATC-63 Methodology for Evaluating Seismic Collapse Safety of Archetype Buildings[R]. Redwood City, CA: ATC, 1996.
- [18] VAMVATSIKOS D. Seismic Performance, Capacity and Reliability of Structures As Seen Through Incremental Dynamic Analysis[D]. Stanford: Stanford University, 2002.
- [19] 廖 焱. 汶川地震公路路基震害调查分析及易损性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012. (LIAO Yi. Analysis of Seismic Hazard Investigation and Study on Vulnerability of Highway Subgrades in Wenchuan Earthquake[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [20] WU D, TESFAMARIAM S, STIEMER S F, et al. Seismic fragility assessment of RC frame structure designed according to modern Chinese code for seismic design of buildings[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2012, **11**(3): 331 - 342.