

汶川 8.0 级地震路堑墙震害特征及机理分析^{*}

赵 静¹, 姚令侃^{1,2}, 焦方辉¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031;

2. 抗震工程技术四川省重点实验室道路与铁道工程抗震技术研究所, 四川 成都 610031)

摘 要:通过对 2005 年竣工的都江堰至映秀的三级公路的调查, 分析了路堑墙的汶川 8.0 级地震震害模式; 以浆砌片石典型解体崩毁工点为例, 将基于抗震设计规范的验算与实震情况比较, 认为现行抗震规范是按照刚性挡土墙进行设计的, 对于“柔性挡土墙”并不完全适用; 通过拟静力法进行计算认为墙后坡度越大, 挡墙稳定性越差, 未超过一定坡度时主动土压力系数增长缓慢, 当超过一定坡度时, 主动土压力系数急剧增长。

关键词:汶川 8.0 级地震; 震害模式; 路堑墙; 墙后边坡坡度

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2011)01-0054-06

0 引言

2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震是继唐山地震之后我国又一损失巨大的毁灭性地震^[1]。

课题的调查工作内容有对震区路基工程震前相关资料的收集, 包括汶川震区 1:5 万地形图、国道 213 沿线 1:2 000 地形图、线路平纵面设计图、路基工程横断面设计图及竣工图、地勘资料、震前工程照片等; 震害调查, 包括成灾模式的判别、变形测量以及震害成因分析等; 以及关于震后抢通保通阶段工程措施的测量和记录等。

对于道路路堑挡土墙的震害显现出的明显特征, 本文在总结这些震害的基础上, 从地震作用下动土压力的分布和土压力随墙顶坡度的变化, 来分析路堑挡土墙的震害机理, 进而提出抗震设计原则, 可望为道路支挡工程抗震设计提供依据。

1 路堑墙震害调查

1.1 调查区域

汶川 8.0 级地震后, 我们对强震区公路的现场考察, 主要包括国道 213 线紫坪铺—汶川段三级公路、都江堰—映秀高速公路、映秀—汶川二级公路, 此外还包括 213 线水磨支线、映秀镇城

区道路、紫坪铺水利枢纽重载公路等。本文统计路段为 213 国道紫坪铺水库区淹没段改建工程。路线起于映秀中学, 止于都江堰马鞍山隧道西端洞口, 全长 30.6 km, 为 2005 年竣工的三级公路(山岭重丘区), 抗震设计按场地基本烈度Ⅶ度考虑。该路段为山腰线方案, 地面横坡坡度陡、深挖和高填较多, 考虑是重要旅游公路, 采用了较高的设计标准, 新型支挡工程多, 工点密集。调查路段位于汶川地震Ⅸ、Ⅹ、Ⅺ度三个地震烈度区, 断层距均小于 10 km。调查区如图 1 所示^[2]。

1.2 路堑墙破坏模式

调查区域多采用浆砌片石重力式挡墙, 其余为混凝土挡墙。

混凝土挡土墙的破坏模式主要是外倾和中、部剪出。混凝土挡墙相对浆砌片石挡墙轻微, 最普遍的震害是外倾, 形成沿伸缩沉降缝的错位(图 2)。混凝土挡墙最严重的震害是在中部被剪出, 如图 3 所示的混凝土挡墙中部被剪出 24 cm。

浆砌片石挡土墙的破坏模式主要是解体崩毁(图 4)、剪断(图 5)、凸出变形(图 6)。浆砌片石挡墙最严重的震害是沿砌缝开裂后挡墙解体, 导致垮塌, 其中, 浆砌片石挡墙出现鼓出变形往往

^{*} 收稿日期: 2010-05-27

基金项目: 高陡边坡特殊支挡工程技术研究(2008G028-D-3); 铁道部科技研究开发计划项目(2008G010-A); 中央高校基本科研业务费专项资金(SWJTU09ZT04)

作者简介: 赵静(1986-), 女, 河北保定人, 硕士研究生, 主要从事道路与铁道工程的研究工作. E-mail: 252516767@qq.com

是解体破坏的前兆(图 6)^[3-4]。

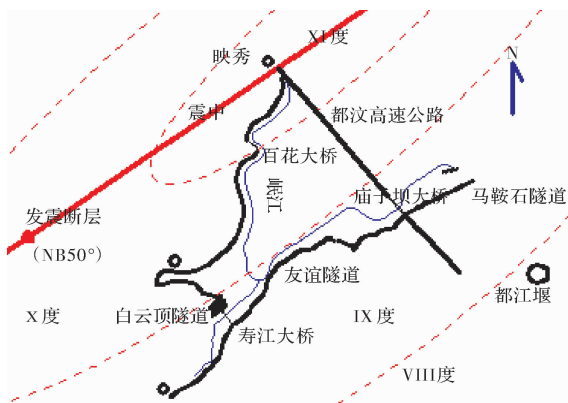


图 1 调查区域示意图



图 2 混凝土挡墙外倾



图 3 混凝土挡墙中部剪出



图 4 浆砌片石挡墙解体崩毁



图 5 浆砌片石挡墙剪断



图 6 浆砌片石墙体凸出变形



图 7 浆砌片石挡墙下部崩解

1.3 路堑墙震害统计分析

目前,国际上公认的抗震设防原则是“小震不坏”,“中震可修”,“大震不倒”,根据三级抗震设防原则,定义三级地震水平,这是国内外规范理念发展的总趋势。为与三级抗震设防原则相对应,同时考虑到震害等级的评定也应是制定抢修保通方案的基本依据,将震害严重程度划分成 5 个等级(表 1),作为路基工程震害评定的标准。

从混凝土挡墙无一完全垮塌的现象来看,混凝土挡墙的抗震性能明显优于浆砌片石挡墙。浆砌片石毁坏率高达 40%,毁坏工点破坏模式基本为沿砌缝开裂后挡墙解体,导致垮塌。浆砌片石挡墙的抗震性能的提高有助于路堑墙整体抗震性能的提高。

2 浆砌片石挡墙破坏机理分析

以 k1012+820 工点倒塌 25 m 浆砌片石路堑墙(图 7)为例分析路堑墙倒塌破坏机理。假设该挡土墙为刚性,基于库伦土压力理论进行挡土墙抗滑

稳定性、抗倾覆稳定性、偏心距、墙底截面强度 检算。然后与实际情况进行对比分析。

表 1 震害等级评判标准

震害程度	评判标准	加固或修复措施	对应设防原则表述
完好	无明显震害	可正常使用	不坏
基本完好	构筑物出现裂缝掉块等现象或轻微变形	可正常使用, 按常规养护要求修复即可	不坏
损伤	有明显变形, 但主要受力构件基本完好, 在正常工况下构筑物整体能维持稳定	可维持使用, 在抢险阶段过后逐步修复	可修
严重损害	构筑物产生过大变形或局部破坏, 但未出现整体倒塌现象	必须采取紧急加固措施, 才能保通运行	可修
毁坏	路基主体崩塌或滑动, 挡墙倒毁, 道路中断	抢通措施	倒毁

调查路段路堑墙课题主要调查挡墙高度在 3 m 以上的工点, 对 3 m 以下的只调查了震害比较严重 的挡墙, 这样共调查了 58 个工点。因挡墙材料不同而导致不同的震害情况统计(表 2)。

表 2 G213 线挡墙类型震害情况统计

挡墙类型	毁坏		严重损坏		损伤		基本完好		完好	
	数量	百分率/%	数量	百分率/%	数量	百分率/%	数量	百分率/%	数量	百分率/%
浆砌片石	12	40	1	3.3	5	16.6	8	26.7	4	13.3
混凝土	0	0	1	3.6	14	50.0	11	36.7	2	6.7

2.1 工点资料

依据该路段原设计地勘资料, 该挡土墙采用的材料为 M7.5 砂浆砌筑 MU30 片石, 用 10#砂浆勾缝。该墙身高 5.5 m, 墙顶宽 1.25 m, 面坡倾斜坡度 1:0.25, 背坡倾斜坡度 -1:0.25, 墙趾台阶高 0.5 m, 宽 0.3 m, 墙底倾斜坡度 0.2:1, 如图 8 所示, 计算参数如表 3 所示。墙后坡体为老滑坡体(地基也在滑坡体上), 工点位于 X 度强震区。

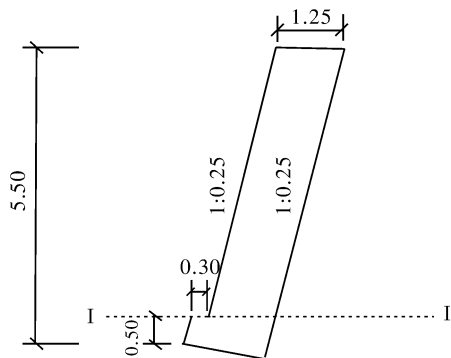


图 8 计算墙体示意图

表 3 主要计算参数

计算参数	取值
圬工砌体容重/(kN/m ³)	22.00
墙后填土内摩擦角/°	35.00
墙后填土粘聚力/kPa	0.00
墙后填土容重/(kN/m ³)	18.00
墙背填土摩擦角/°	17.5
地基土容重/(kN/m ³)	18.00
地基土内摩擦角/°	35.00
地基土容许承载力值/kPa	500
墙底摩擦系数	0.5

2.2 检算

汶川地震加速度峰值, 系根据汶川地震烈度图^[1], 再经加速度衰减模型^[5]进行修正后确定。

$$\lg S_a(T) = c_1 + c_2 M + c_3 M^2 + c_4 \lg [R + c_5 \exp(c_6 M)] + \varepsilon, \quad (1)$$

式中: $S_a(T)$ 为峰值加速度或加速度反应谱 (cm/s²), M 为面波震级, R 为震中距 (km), ε 是随机误差; c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 和 c_6 是回归系数。

(1) 稳定性检算

挡土墙抗滑动稳定系数 K_c 按下式计算:

$$K_c = \frac{[\sum N + (\sum E_x + \sum E_{ihw}) \tan \alpha_0] \cdot f}{\sum E_x + \sum E_{ihw} - \sum N \cdot \tan \alpha_0}, \quad (2)$$

式中: $\sum N$ 为作用于基础底面上的总垂直力 (kN); $\sum E_x$ 为地震主动土压力的总水平分力 (kN); α_0 为基础底面倾斜角 (°); $\sum E_{ihw}$ 为挡土墙墙身的总水平地震力 (kN); f 为基础底面与地基间摩擦系数。

挡土墙抗滑动稳定系数 K_o 按下式计算:

$$K_o = \frac{\sum M_y}{\sum M_o}, \quad (3)$$

式中: $\sum M_y$ 为稳定力系对墙趾的总力矩 (kN·m), $\sum M_o$ 为倾覆力系对墙趾的总力矩 (kN·m)。

正常工况下, $K_c = 4.299$, $K_o = 2.960$ 。

地震工况下, $K_e = 1.185$, $K_o = 1.194$ 。

《公路路基设计规范(JTG D30-2004)》^[6]规定在荷载组合 I 及 II 时, 验算挡土墙的抗滑动和抗倾覆稳定时, 抗滑动稳定系数 K_e 不应小于 1.3, 抗倾覆稳定系数 K_o 不应小于 1.5。《公路工程抗震设计规范(JTG 044-89)》^[7]规定挡土墙稳定性验算时, 抗滑动稳定系数 K_e 不应小于 1.1, 抗倾覆稳定系数 K_o 不应小于 1.2。

可见即使地震条件下, 该挡墙整体稳定性也满足要求。

(2) 墙身截面偏心距 e 检算(选取截面如图 8 中 I-I 所示)

作用于墙身截面的合力偏心距 e (单位: m)按下式计算:

$$e = \frac{B}{2} - \frac{\sum M_y - \sum M_o}{\sum N}, \quad (4)$$

式中: B 为验算截面宽度; $\sum M_y$ 为稳定力系对墙趾的总力矩($\text{kN} \cdot \text{m}$); $\sum M_o$ 为倾覆力系对墙趾的总力矩($\text{kN} \cdot \text{m}$)。

正常工况下, $e = 0.0034 \text{ m}$ 。

地震工况下, $e = 1.0271 \text{ m}$ 。

依据《公路路基设计规范(JTG D30-2004)》^[6]规定基底合力的偏心距 e , 对土质地基不应大于 $B/6$ 。正常工况下, $e = 0.0034 \text{ m} < B/6 = 0.2083 \text{ m}$ 。地震工况下, $e = 1.0271 \text{ m} > B/6 = 0.2083 \text{ m}$ 。在地震作用下, 偏心距不满足要求。

(3) 墙身截面基底应力检算(选取截面如图 8 中 I-I 所示)

基底两边缘点, 即趾部和踵部法向压应力 σ_1 、 σ_2 (单位: kPa)为:

$$|e| \leq \frac{B}{6} \text{ 时, } \sigma_{1,2} = \frac{\sum N}{B} \left(1 \pm \frac{6e}{B} \right), \quad (5)$$

$$|e| > \frac{B}{6} \text{ 时, } \sigma_1 = \frac{2N_d}{3\alpha_1}, \sigma_2 = 0, \quad (6)$$

其中, $\alpha_1 = \frac{B}{2} - e_0$ 。

正常工况下, $\sigma_1 = 124.5807 \text{ kPa}$, $\sigma_2 = 120.5797 \text{ kPa}$ 。

地震工况下, $\sigma_1 = -305.7876 \text{ kPa}$, $\sigma_2 = 0 \text{ kPa}$ 。

依据《公路挡土墙设计》^[8]当砂浆强度等级为 M7.5 石料强度等级为 MU30 时, 片石砌体的抗压强度设计值为 740 MPa , 轴心抗拉强度设计值为

0.08 MPa 。该工点正常工况满足要求, 地震工况不满足要求。

2.3 机理分析

依据抗震设计规范进行的上述计算可见, 地震作用下, 浆砌片石挡土墙整体稳定性满足, 偏心距不满足, 基底出现拉应力。挡土墙应出现外倾和基底破坏。但实际调查并未发现该挡土墙有明显的外倾, 基底仍然完好。实际上, 该工点震害为面坡部分解体, 背坡仍保持整体状。理论计算和实际调查情况不相符。

根据课题振动台模型试验, 地震作用下, 墙背动土压力集中分布在 $0.4 \sim 0.6$ 倍墙高之间(图 9)。

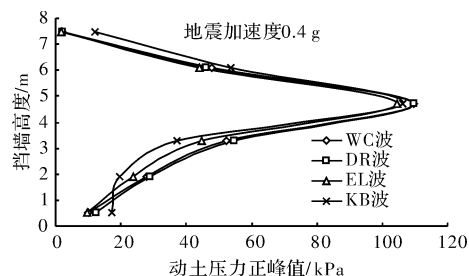


图9 地震作用下墙背动土压力峰值分布

浆砌片石挡土墙并非完全刚性的挡土墙, 在上述动土压力冲击作用下, 面坡受拉鼓出(图 10), 背坡受压, 中间存在一中性面。面坡在拉力作用下挡土墙沿软弱结构面砂浆砌缝开裂。故浆砌片石呈现出大量的面坡部分解体, 背坡仍保持整体状工点。



图10 浆砌片石挡墙鼓胀裂缝

3 墙后边坡影响

3.1 实震资料统计

路堑墙墙后边坡坡度所得的震害情况(表 4)。从表 4 可见当坡度大于 25° 后, 挡墙的毁坏率增加。

表 4 G213 线坡度震害情况统计

边坡	完好或基本完好工点		损伤工点		严重损害或毁坏工点	
坡度	数量	百分率/%	数量	百分率/%	数量	百分率/%
≤25°	5	83.3	1	16.7	0	0.0
>25°	9	45.0	9	45.0	2	10.0

注：此表仅包括墙后边坡为土坡的情况。

3.2 计算分析

目前我国《铁路工程抗震设计规范》^[9]、《公路工程抗震设计规范》^[6,10]规定，地震作用下重力式（刚性）挡土墙墙背的土压力按拟静力法（即 Mononobe - Okabe，物部 - 冈部公式）计算，实质为基于地震角旋转修正后的库仑主动土压力公式。作用于挡土墙上的地震主动土压力，应按库伦理论公式计算。但土的综合内摩擦角 φ_E 、墙背摩擦角 δ 、土的重度 γ ，受地震作用的影响，应根据地震角分别按下列公式进行修正：

$$\varphi_E = \varphi - \theta, \quad (7)$$

$$\delta_E = \delta + \theta, \quad (8)$$

$$\gamma_E = \frac{\gamma}{\cos\theta}, \quad (9)$$

当 φ 取 45°、 δ 取 25°、 α 取 -14.036°，库伦土压力系数随边坡坡度的变化如图 11 所示。

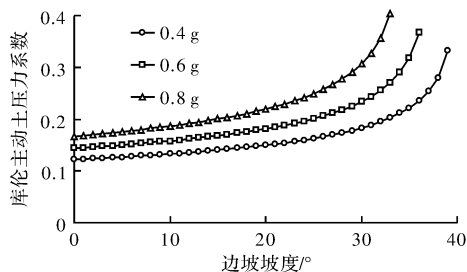


图 11 库伦土压力系数随边坡坡度的变化

由图 11 可见，主动土压力系数增加，挡土墙趋于不安全。在其他条件相同的情况下，在 0.4 g 时，墙后边坡坡度小于 25° 时，库伦主动土压力系数缓慢增加；当超过 25° 以后，库伦主动土压力系数急剧增大。同时，地震烈度越大，主动土压力系数急剧增大点的坡度值越大。

4 结论

(1) 现行抗震规范是按照刚性挡土墙进行设计的，对于“柔性墙”并不完全使用。由于地震力会产生集中作用现象，则“柔性挡土墙”的局部变形效应需要特殊考虑。对于刚性较大的墙也要注意避免在挡墙中部设计或施工过程中出现软弱结构面的现象，减少地震力集中作用效应。

(2) 墙后的坡度越陡会使地震作用下的土压力增大。因此，在挡墙设计时可以将削坡与挡墙的设计综合考虑。有条件时墙后坡体最好能控制在 25° 以内。

参考文献：

- [1] 《汶川地震灾害地图集》编纂委员会. 汶川地震灾害地图集 [M]. 成都：成都地图出版社，2008.
- [2] 冯俊德，姚令侃，王智猛. 汶川地震强震区路基工程震害模式与分析 [C]//汶川大地震工程震害调查分析与研究. 北京：科学出版社，2009：630 - 637.
- [3] 姚令侃，冯俊德，杨明. 汶川地震路基震害分析及对抗震规范改进的启示 [J]. 西南交通大学学报，2009，44(3)：301 - 311.
- [4] 姚令侃，陈强. 5.12 汶川地震对线路工程抗震技术提出的新课题 [J]. 四川大学学报：工程科学版，2009，41(3)：43 - 50.
- [5] 雷建成，高孟潭，俞言祥. 四川及邻区地震动衰减关系 [J]. 地震学报，2007，29(5)：500 - 511.
- [6] 中交第二公路勘察设计研究院. JTG D30 - 2004 公路路基设计规范 [S]. 北京：人民交通出版社，2004.
- [7] 交通部公路规划设计院. JTJ 004 - 89 公路工程抗震设计规范 [S]. 北京：人民交通出版社，1990.
- [8] 陈忠达. 公路挡土墙设计 [M]. 北京：人民交通出版社，1999.
- [9] 铁道部第一勘察设计院. GB 50111 - 2006 铁路工程抗震设计规范 [S]. 北京：中国计划出版社，2006.
- [10] 交通部第二公路勘察设计院. 公路设计手册 路基 [S]. 2 版. 北京：人民交通出版社，2001.

Analysis on Characteristics and Mechanism of Seismic Damage of Cutting Retaining Wall in the Wenchuan Earthquake

Zhao Jing¹, Yao Lingkan^{1,2} and Jiao Fanghui¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Research Institute of Hazard Prevention and Mitigation Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on a survey of the third-grade highway from Dujiangyan to Yingxiu built in 2005, the seismic failure types and causes of cutting retaining wall in the Wenchuan earthquake are summarized and analyzed. Taking the typical mortar flagstone site of disintegration and demise as an example, by comparative analysis of the code checking and the real seismic resistance behavior, it is thought that the current seismic design codes are designed in compliance with rigid retaining wall. The codes are not completely suitable for "flexible retaining wall". The calculation by use of traditional quasistatic analytical method shows that a steeper pitch behind the retaining wall entails a worse stability. When it is not more than 25° , coefficient of active earth pressure increases slowly. Once exceed, it will be a sharp increase.

Key words: M8.0 Wenchuan earthquake; seismic damage type; cutting retaining wall; grade of side slope

.....
(上接第 53 页)

Temporal and Spatial Distribution and Grain Risk Assessment of Natural Disasters in China

Jiang Li and An Pingli

(Department of Land Resources Management, College of Resources and Environment,
China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The major disasters including droughts, floods, wind and hail disasters, frost disasters, typhoon disasters, agricultural pests, agricultural weeds and agricultural rodents are studied, and spatial and temporal distribution of eight kinds of disasters is analyzed. The deduction of agricultural production over the years caused by these disasters is calculated and the influence of natural hazards on grain yield in China in 2020 is assessed. The results show that different natural hazards cause different impacts on grain production in different provinces in 2020. The drought risk areas concentrate in the North China, such as Yellow River and Huaihe River Basin and northwest region. The flood risk areas concentrate in the South China, such as the areas in the middle and lower reaches of the Yangtze River. The effects of wind and hail hazards on grain yield in China are relatively less. The risk areas of wind hails mainly distribute in Xinjiang and Qinghai. The risk areas of typhoon hazards concentrated in southern coastal areas. The agricultural pest risk areas are mainly distributed in the South China, such as southern coastal area and Southwest China. And the influence of frost disaster, agricultural weeds agricultural rodents on grain production is relatively less.

Key words: natural hazards; spatial and temporal distribution; risk assessment; 2020