

文章编号:1006-2106(2013)05-0017-06

# 自然灾害与人为失误引起的工程事故及其分析<sup>\*</sup>

王赞芝<sup>1\*\*</sup> 潘国强<sup>1</sup> 江林雁<sup>2</sup> 梁庆昌<sup>3</sup>

(1. 广西科技大学, 广西 柳州 545006; 2. 中煤邯郸设计工程有限责任公司,  
河北 邯郸 056031; 3. 印度尼西亚大学, 印度尼西亚 雅加达 10260)

**摘要:**研究目的:印度尼西亚处在环太平洋地震带中,是一个多地震的国家,地震与人为失误常常造成该国人员伤亡、财产损失和环境恶化。尽管地震是无法避免的,而人为失误却是可以预防的。本文研究近十年来印度尼西亚较大的自然灾害和重大的人为工程失误,并对工程事故进行细致的失效分析,为改进安全标准从而使结构能有效地经受住未来可能遭受的灾难提供参考。

**研究结论:**通过研究与分析得出:(1)在导致巨大伤亡的天灾中,常有自然事故与人为失误的联合作用;(2)部分设计者对建筑抗灾规范存在错误认识,认为规范仅适用于高耸结构或大型永久性防御设施;(3)单独的人为失误也能引起一系列灾难并导致多人伤亡;(4)研究成果可应用于自然灾害预测、预警和防治。

**关键词:**自然灾害;人为失误;相互作用;土木工程;印度尼西亚

中图分类号:X4 文献标识码:A

## Analysis of Engineering Accidents Induced by Natural Disasters and Human Errors

WANG Zan-zhi<sup>1</sup>, PAN Guo-qiang<sup>1</sup>, JIANG Lin-yan<sup>2</sup>, LIANG Qing-chang<sup>3</sup>

(1. Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China; 2 Handan Design Engineering Chinacoal Co. Ltd, Handan, Hebei 056031, China; 3. University of Indonesia, Jakarta 10260, Indonesia)

**Abstract: Research purposes:** Indonesia lies in the circum-pacific seismic belt with many seismic activities. Earthquakes and human errors always cause the human injuries and deaths, property losses and environmental worsening. Although earthquakes are unavoidable, but the human errors can be prevented. The study is done on the various disasters and tragedies in civil engineering that happened in Indonesia in the last decade and the detailed failure analysis of the engineering accidents is made to improve safety standards so that the structures can successfully withstand future disasters.

**Research conclusions:** From the studies and analyses, it is concluded: (1) In a natural disaster that causes large fatalities, there is usually an interaction between the natural incident and human error. (2) Some designers have the wrong perception about the objectives of the code on resistant disaster to building. They think that the code is only available for the high-rise structure or large permanent infrastructures. (3) Human error can also trigger the serious disaster and cause many fatalities. (4) The research results can be used in forecasting, early warning and preventing for natural disasters.

**Key words:** natural disaster; human error; interaction; civil engineering; Indonesia

<sup>\*</sup> 收稿日期:2012-11-28

基金项目:广西教育厅科研项目(201012MS122);广西工学院博士基金项目(院科博0901)

<sup>\*\*</sup> 作者简介:王赞芝,1964年出生,男,副教授。

灾害可造成人员伤亡、财产损失和环境恶化。灾害可能是自然的,如地震、海啸、火山喷发和洪水等;也可能是人为的,例如人为失误引起的事故。通常,自然灾害与人为失误间有害的相互作用可造成严重的损失,如大型建筑的整体倒塌。

通过吸取灾害中的教训,土木工程师可以学习到更多的结构工程和建筑细部构造的知识,来改进安全标准从而使结构能有效地经受住未来可能遭受的灾难。

## 1 印度尼西亚地震风险

印度尼西亚是世界上高地震活动性的地区之一。这是由于印度尼西亚位于四大构造板块——欧亚板块、太平洋板块、印度-澳大利亚板块和菲律宾板块的结合处,如图1所示。另外,印度尼西亚存在多种具有独特地文特征的岛弧结构,如巽他海峡等地区的深海盆结构、火山内弧结构和边缘海盆结构。

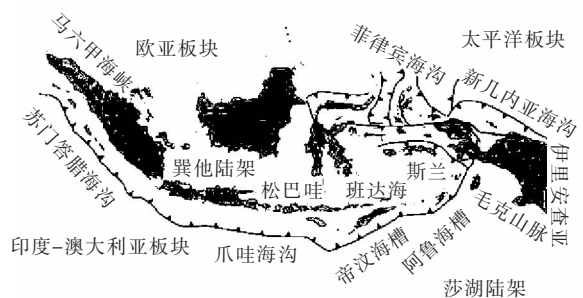


图1 围绕印度尼西亚的四大构造板块

图2为1964—2000年期间印度尼西亚的地震活动,图中显示了震中位置;相应的震源深度如图3所示<sup>[1]</sup>。

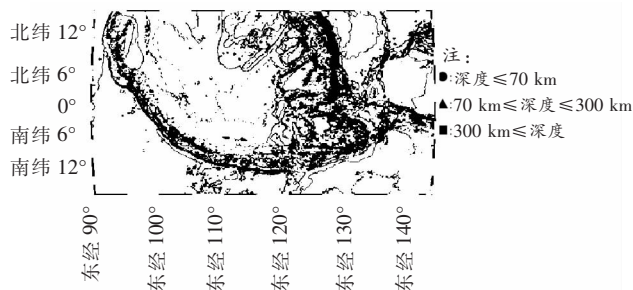


图2 1964—2000年间印度尼西亚的地震活动

在所有岛屿中,由于复杂的大地构造地质学条件,也由于存在大苏门答腊断层带的活动踪迹,通常认为苏门答腊岛的西部部分是印度尼西亚地震风险最高的地区<sup>[1-2]</sup>。

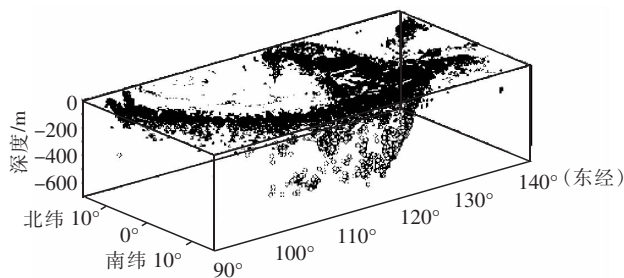


图3 震源深度

## 2 2009年巴东地震

### 2.1 震源

巴东是西苏门答腊省省会,2009年9月30日下午约5点发生了地震矩规模(MMS)为8的强冲断层地震,震中位于巴东西北约45 km处。

### 2.2 对周围地区的影响

据官方通讯社证实,这次灾难至少造成1 115人死亡,1 214人重伤,1 688人轻伤。另外,约135 000间房屋严重破坏,65 000间房屋中度破坏,79 000间房屋轻度破坏。

在受这次地震影响的地区中,巴东市中心是损失最严重的地区之一,许多低层建筑(2~4层)全部被毁,有些建筑毁后就像三明治一样。

许多其他类型的建筑(多数是商店房屋和一些政府建筑)显示出了软层效应(图4)。在此效应中,破坏是在地震时逐渐产生的,并导致一、二层楼的“消失”。

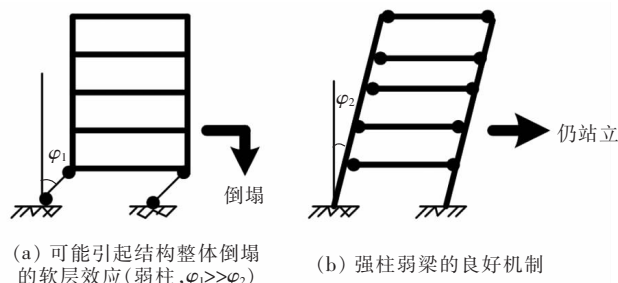


图4 框架结构倒塌机制

### 2.3 吸取的教训

在巴东地震中,许多低矮建筑的倒塌可以解释这样一个事实,即此类型的房屋在规划和施工阶段大多没有很好地设计,也没有详细地绘制施工图。也即没有按照《印度尼西亚混凝土结构设计规范》中的结构抗震标准进行设计。

在倒塌的建筑中也发现了一些明显的结构缺陷。如在破坏的梁柱节点中观察到混凝土材料中的缺点和不易产生足够塑性变形的构造细节(如混凝土柱中箍

筋不足,以及细节处理不当或没有箍筋),有些混凝土构件的抗弯和抗剪钢筋的配筋量严重不足,尤其是底层柱,因此在地震时不能抵抗基底的剪力。

低矮房屋抗震能力不足常常应归于人们的错误认识,认为对低矮房屋不需要考虑很高的地震风险,不按照正确的抗震设计要求去设计。

相反,巴东市设计优良的建筑,如一些高耸建筑,总体上在地震时没有造成严重损坏。如巴东水泥厂旋风预热塔是巴东市最高建筑,高 92 m,由钢筋混凝土制成,其每层都受有重荷。地震时,该建筑没有出现裂缝。又如巴东的最高旅馆——布密·米囊旅馆,地震时,该建筑发生了轻到中度的破坏,但旅馆还是直立的。该旅馆经修缮后已重新开业。还有该市的水泥制造厂,结构与巴东水泥厂一样复杂。地震时只是在个别混凝土柱有轻微的损坏,因为在相应位置存在一些不连续的环向横梁(出于机械装配的需要),在大地震风险区不推荐这种不连续的横梁。

## 2.4 自然灾害与人为失误的交互作用

在自然灾害中,建筑毁灭性倒塌也可能是自然力与人为失误交互作用的结果。下面介绍的阿巴仓酒店建筑的悲剧就是一个例子。

该酒店原是一座建于 20 世纪早期的二层楼的货栈建筑。2005 年,使用钢框架和混凝土板,将原建筑增加了 3 层。以后,在这座 5 层楼的后院又增加了一座钢框架的 6 层建筑,形成一个 U 形,在 U 字形的两翼之间有一个游泳池。

在 2009 年地震中,原先建筑后面部分的第二层向游泳池方向倒塌,随后,后建的 6 层建筑也向游泳池方向倒塌,造成 100 多人死亡,为 2009 年巴东地震中遇难人数最多的建筑。

根据观察,突然的倒塌可能是由于在做加层和修复的时候,缺乏对影响结构安全的细部构造的综合处理,包括所使用的材料规格过低,同时结构细节又考虑不周,也包括缺乏质量控制与保证措施(如建筑施工规范执行不严)。

事实证明,在还没有对地基的承载力和对现有建筑的强度有充分把握的前提下,尤其是没有足够的知识来正确地加固原有建筑、在现有结构与新加结构间做好连接细节时,绝不推荐通过增加楼层使现有建筑“变大”的做法,特别是在高地震风险区。

## 3 2004 年亚齐地震和海啸

### 3.1 地震及海啸的震源

2004 年 12 月 26 日发生的亚齐地震与海啸为深海大型逆冲区地震,地震矩规模为 9.3,震中位于靠近

苏门答腊西岸的海洋之中。

### 3.2 对周边地区的影响

地震沿着亚齐省沿海及环印度洋的其他国家沿海地区引发了一系列破坏性海啸,使亚齐省超过 200 000 人丧命,35 m 高的巨浪淹没了落阿港的居民区<sup>[3]</sup>。这是印度尼西亚有史以来最致命的自然灾害之一。

在亚齐省省会班达亚奇市,尽管许多房屋并没有受海啸的直接影响,却仍然出现倒塌现象。主要是由于巨大的地震力与低劣的施工质量和构造细节不好造成的。

### 3.3 吸取的教训

毁坏房屋普遍反映了楼层间的软层效应或梁柱节点细节设计不当,以致地震时发生整体倒塌。

## 4 2011 年库卡大桥倒塌

### 4.1 库卡大桥概况

库卡大桥(全名“库台-卡达尼加拉大桥”)是一座坐落于东加里曼丹省婆洲的大跨悬索桥,横跨马哈坎河,连接登加龙和三马林达。总长 710 m,含主跨 270 m、边跨  $2 \times 100$  m 和引桥  $(3 \times 25 + 57.50 + 57.50 + 2 \times 25)$  m。1996 年开始建造,2001 年 9 月 21 日开放交通。2011 年 11 月 26 日,该桥在维修时倒塌,至少 20 人死亡,40 人受伤,另有 19 人失踪。

### 4.2 库卡大桥运营期间的变形

该桥运营的第一年,在登加龙侧的主缆锚碇区发现 9 cm 的水平位移和 5 cm 的沉降,造成桥梁中部的桥面板产生相对于原始成桥位置的向下位移 61.6 cm(图 5)。另外,塔顶也产生了水平位移,尤其是登加龙侧的 1 号塔向主跨内移动了 13.2 cm(2003 年 3 月 6 日记录,图 6)。

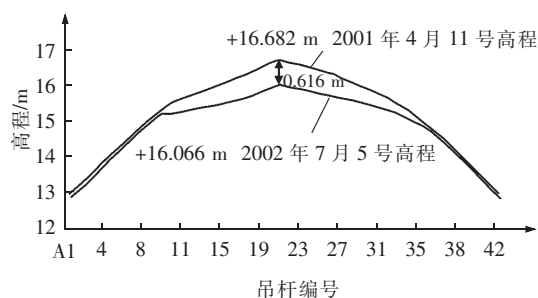


图5 桥面变形

### 4.3 桥梁管理局的维修工作

发现桥面的大量变形之后,当地的桥梁管理局决定对该桥进行维修。小规模维修自 2007 年开始,替换了膨胀接缝,在登加龙侧的锚碇区用填沙增设配重。然而,这些措施未能解决桥面板下挠的问题。

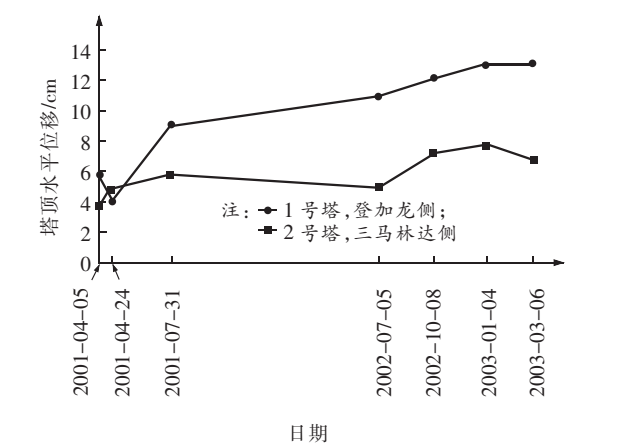


图 6 2003 年 3 月 6 日记录的两个塔顶向主跨内的位移

2011 年,桥梁管理局提出了一个更为综合的维修计划,计划通过提升桥面来解决桥面下挠问题,并指派了由专家组成的维修承包人。

用中空的液压千斤顶系统顶起桥面。然而,在顶升之前,完整的脚手架和应进行的一系列分析工作并没有准备好,且在桥梁的维修准备阶段,该桥仍开放运营。

图 7 为提升中间吊杆(M13)的提升方法。第一步的目标是将南侧桥面提升 15 cm(仅在一侧实施)。

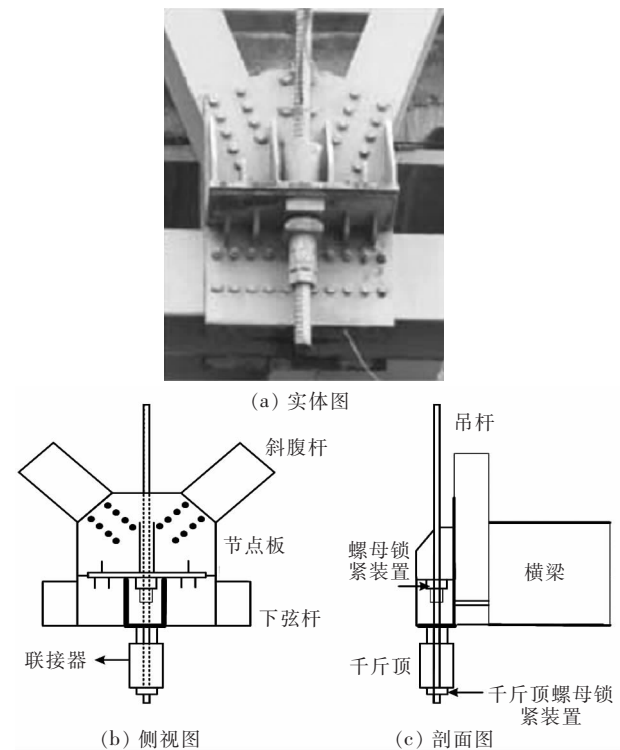


图 7 用于顶升中间吊杆的顶升方法

4.4 桥梁倒塌

当施工人员用千斤顶缩短中间吊杆来努力提升桥面时(图 8),将从邻近的吊杆向中间吊杆传递力,使得中间吊杆中的拉力大幅度地上升;另外,由于桥面的不

对称顶升,还会因为扭转而在(将吊杆连接到主缆的)索夹上产生力(图 9)。

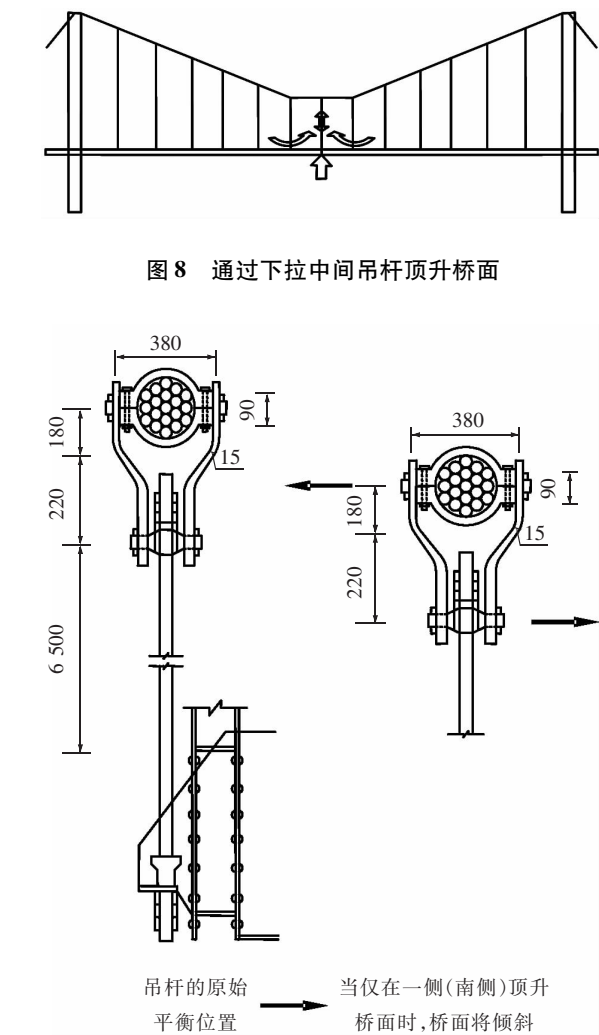
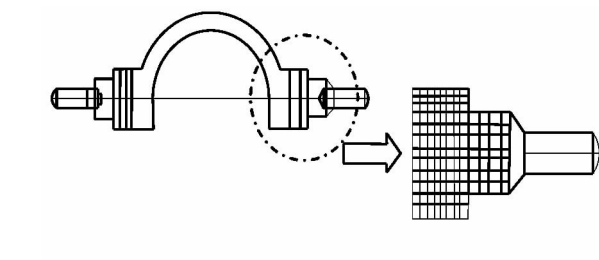


图 9 由于不平衡顶升而作用在索夹上的扭力(单位:mm)

由于应力集中效应,作用在索夹过渡区(包括销连接接头)的剪力可以增大到吊杆拉力的 1.5 ~ 2 倍(图 10)。



2011 年 11 月 26 日大桥突然倒塌,正在维修桥梁的几乎所有工人都在这次事故中丧失了生命,但监理工程师和地方桥梁管理局却无一人到场,具体发生了什么,无人得知。

经分析认为,将中心吊杆连接到固定在索上的索



夹的销接接头是最重要的部件,该部件在不断增加的吊杆力和应力集中的综合影响下失效。由于使用了铸铁材料,中心吊杆接头的破坏是突然发生的。第一根杆的破坏产生了额外的冲击力作用在相邻的吊杆上,所以紧接着就发生了相邻杆的连接的破坏。重复这种多米诺效应,其余所有吊杆的连接都渐次而快速地断裂,直至全桥在 30 s 内倒塌。

4.5 桥梁结构失效分析

应桥梁管理局邀请,我们用 Midas Civil 2011 对桥梁结构进行了验证性分析,并对维修阶段的桥梁建立了模型(图 11)。分析结果如图 12、图 13 所示。结果表明,在恒载与车辆活载作用下,桥梁结构是安全的;对吊杆及其连接,安全系数  $F_s \geq 2.5$ 。

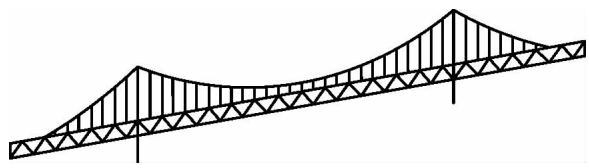


图 11 Midas Civil 2011 建立的桥梁模型

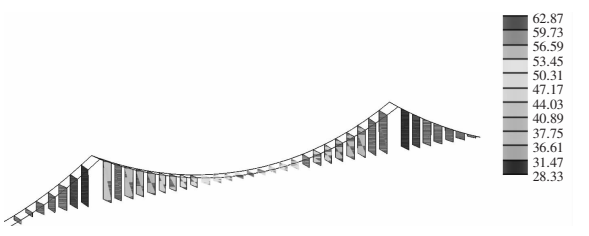


图 12 恒载与移动交通荷载作用下吊杆内力(单位:t)

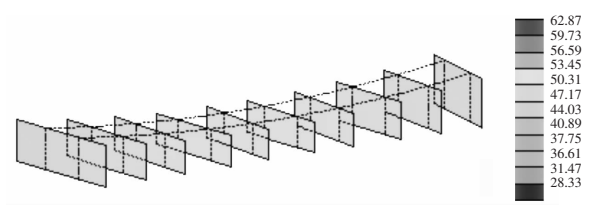


图 13 中间部分吊杆的内力图(单位:t)

接着,通过构造一种具有特殊节点的杆单元(图 14,这种单元容许桥面向上移动、吊杆向下移动从而产生相对位移)来增加一个连接单元<sup>[4]</sup>,用以模拟桥面的顶升和吊杆长度的缩短。

图 15 和图 16 为桥面向上顶升 1.1 cm 时各吊杆中的力,这时中间吊杆(M13)向下拉了 15 cm。结果表明在顶升过程中(只在一侧顶升)中间吊杆的拉力有了大幅度的增加,而相邻的吊杆中拉力则明显下降。

由于不知道桥梁突然倒塌之前发生了什么和当时桥面被提升的高度,因此假设了顶升过程中由不同的

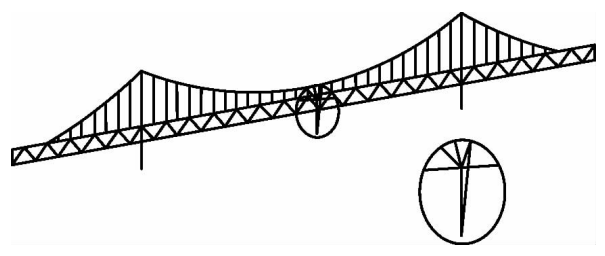


图 14 顶升模型中特殊节点的杆单元

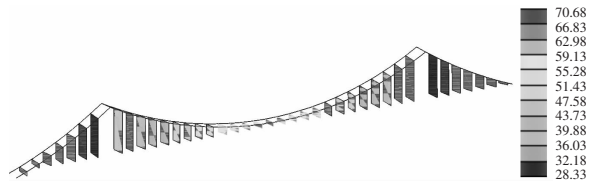


图 15 顶升桥面 1.1 cm 时吊杆应力

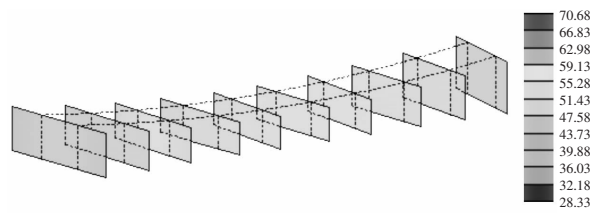


图 16 顶升桥面后中间部分吊杆的应力图

桥面高度而得到的几个顶升位移来进行分析,如表 1 所示。

表 1 在 M13 位置顶升时,假定不同桥面顶升位移对应的吊杆内力

顶升高度 /cm	吊杆 M11 内力/t	吊杆 M12 内力/t	吊杆 M13 桥面顶升 高度/cm	吊杆 M13 内力增量 /t	吊杆 M13 下拉量 /cm
0.0	52	52	0.0	52	—
1.1	52	44	1.1	71	15
2.5	52	28	2.5	103	32
2.8	52	23	2.8	113	37
3.6	52	13	3.6	133	47.5

由表 1 可以看出,若桥面顶升了 2.5 cm,中间吊杆的拉力理论上将增加到 103 t,考虑到吊杆夹应力转换区的应力集中,剪力将达到大于 154 t 的极大值(超过吊杆销接系统的材料极限强度),导致连接的突然破坏,继而引起后续所有的吊杆连接系统一个接一个的失效。

4.6 经验与教训

人为失误也常常引起一系列灾难,在库卡大桥事故中,有许多值得深思之处,如:顶升工作从中间吊杆开始且只顶升桥面的一侧,桥梁在维修时没有关闭交通,在没有监理工程师和地方桥梁管理局工作人员在

场的情况下仍进行桥梁维修工作等。

## 5 结 论

(1)在导致巨大伤亡的天灾中,常有自然事故与人为失误的联合作用。人为失误常常是因为缺乏足够的知识。

(2)对建筑抗灾规范的认识存在一些错误观念,如认为规范仅仅适用于高耸结构或大型下部结构。各种建筑,不管低层还是高层,小跨还是大跨,都应该进行设计并符合规范的要求,尤其是在高灾害风险区域。

(3)土木工程师应该从灾难中吸取教训,深刻认识建筑安全的本质,以实践来丰富自身的专业知识。

## 参考文献:

[1] Natawidjaja, D. H. , Triyoso, Wahyu. The Sumatran

Fault Zone: From Source to Hazard [J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2007(1): 21-47.

[2] McCloskey, J. , Lange, D. , Tilmann, F. , etc. The September 2009 Padang Earthquake [J]. Nature Geoscience, 2010(2): 70-71.

[3] Sibuet, J. C. , Rangin, C. , Le Pichon, X. , etc. 26th December 2004 Great Sumatra - Andaman Earthquake: Co - seismic and Post - seismic Motions in Northern Sumatra [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007(1-2): 88-103.

[4] 刘坤. 新疆伊犁河大桥主桥地震响应分析[J]. 铁道工程学报, 2012(6): 59-64.

Liu Kun. Analysis of Seismic Response of Main Bridge of Yili River Bridge [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012(6): 59-64.

(上接第 11 页)

China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd. The Preliminary Feasibility Study Report on Baluntai - Kaitele Railway [R]. Wuhan: China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd, 2011.

[2] 乌鲁木齐铁路局. 乌鲁木齐铁路列车运行图技术资料[Z]. 乌鲁木齐:乌鲁木齐铁路局,2011.

Urumqi Railway Bureau. Urumqi Railway Bureau of the Train Diagram Information Technology [Z]. Urumqi:Urumqi Railway Bureau,2011.

[3] TB/T 1407—1998, 列车牵引计算规程[S].

TB/T 1407—1998, Train Traction Calculation Rules [S].

[4] 中华人民共和国铁道部. 铁路技术管理规程[M]. 北京, 中国铁道出版社,2006.

Ministry of Railway of the People's Republic of China. Railway Technology Management Discipline [M]. Beijing:China Railway Publishing House,2006.

[5] 马孝川. 关于我国铁路均衡坡度的研究[J]. 铁道工程学报,1989(3):22-27.

Ma Xiaochuan. Study on Equilibrium Slope Railway in China[J]. Journal of Railway Engineering Society,1989(3):22-27.

[6] 铁道部运输局装备部. 铁路机车概要[M]. 北京:中国铁

道出版社,2009.

Bureau of Transportation Equipment Department of the Ministry of Railway. Railway Locomotive [M]. Beijing:China Railway Publishing House,2009.

[7] 张曙光. 和谐型大功率交流传动机车技术丛书[M]. 北京:中国铁道出版社,2009.

Zhang Shuguang. Harmonious High - power AC Drive Locomotive Technology [M]. Beijing: China Railway Publishing House,2009.

[8] 铁运[2000]16号, 机车操作规程[S].

Railway Transport [2000] No. 16, Locomotive Operation Rules[S].

[9] 乌鲁木齐铁路局. 乌鲁木齐铁路局行车组织规则[M]. 北京:中国铁道出版社,2000.

Urumqi Railway Bureau. Urumqi Railway Bureau of the Transport Rules [M]. Beijing: China Railway Publishing House,2000.

[10] 铁道部第二勘察设计院,铁道部第三勘察设计院. 铁路运量与行车组织[M]. 北京:中国铁道出版社,1992.

The Second Survey and Design Institute of MOR, The Third Survey and Design Institute of MOR. Railway Traffic Volume and Traffic Organization[M]. Beijing: China Railway Publishing House,1992.