

我国岩溶区建筑震害分析与抗震研究进展*

杨仕升^{1,2}, 何 声¹, 谢开仲¹, 蒙 雷¹

(1. 广西壮族自治区地震局, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530022)

摘要: 结合国内岩溶工程建设的相关文献资料, 通过分析岩溶区的地质特点、基础选型及震害特征, 总结了目前我国对岩溶区建筑的抗震措施及研究现状, 并展望今后岩溶区建筑工程的抗震研究。

关键词: 岩溶地质; 建筑结构; 震害分析; 抗震

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2013)03-0401-06

0 引言

我国位于世界两大地震带一环太平洋地震带和亚欧地震带之间, 受太平洋板块、亚欧大陆板块和印度洋板块的挤压, 地震断裂带纵深发育水平很高, 导致我国地震活动频度高、强度大, 是世界上遭受地震灾害最严重的国家之一(张国民等, 2004)。大陆VI~IX度地震区占国土面积的80%以上, 其中很大一部分为岩溶分布区。

我国可溶性岩石分布面积达 $3.65 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占国土面积1/3以上, 尤其以桂、黔和滇东部地区分布最广, 其次是湘西、鄂西、川东、鲁、晋等地, 全国各省区均有分布(雷明堂, 蒋小珍, 1998)。改革开放以来, 随着经济发展与土地资源的供应紧张, 将很难避免在岩溶地基上建造建筑物。在岩溶区进行工程建设, 由于岩溶发育往往使地面上石芽、溶沟丛生, 参差不平整; 地下溶洞又破坏了岩体的完整性, 岩溶水动力条件的变化, 会使其上部覆盖土层产生沉陷, 这些都不同程度影响工程结构的稳定性, 降低建筑结构的抗震性能, 抗震隐患严重(陈洪江, 2010)。在岩溶地质条件下, 为达到建筑物抗震设防标准和优化建造成本的目的, 合理的设计显得尤为重要。目前我国并没有针对岩溶区建筑结构的抗震技术规程, 绝大多数结构设计都是依照一般性的抗震规范。而在地基处理方面, 设计人员多依赖当地经

验, 大部分都还没有成熟的计算方法。随着工程建设的发展以及信息技术、电子计算机技术的引进, 工程界应给予岩溶区的抗震问题足够的重视。

1 岩溶工程地质问题

1.1 岩溶地基与围岩的稳定问题

在岩溶区修建各类建筑物都有一个特殊的地质稳定问题。这是因为, 在建筑物基础之下可能埋藏有岩溶洞穴、漏斗、溶沟、石芽等岩溶形态, 它破坏了岩体的连续性、均一性和整体性。当地震来临时, 岩土体产生附加应力与荷载, 导致岩土内原有力学稳定性的破坏, 会造成建筑基础丧失承载能力。

1.2 岩溶水对工程建设的危害

岩溶区一般地下水极为丰富, 易造成基坑突涌、岩溶水库的渗漏、岩溶外水压力等, 对工程的危害很大。在抗震方面, 地震可引起地下水的水动力变化, 水位跌荡起伏, 使潜蚀作用增强, 甚至使地面产生开裂、地应力场发生变化, 诱发岩溶塌陷。

1.3 岩溶区诱发地震

在人类对自然资源不断地开发与利用下, 岩溶区特殊的地质条件 and 环境因素极易诱发地震。主要类型有: 岩溶区水库诱发地震、岩溶区矿山诱发地震、岩溶区城市和爆破诱发地震。岩溶区诱发地震特别引人注目, 已成为当今主要的环境工程地质问题之一(光耀华, 1998)。

* 收稿日期: 2013-02-04.

基金项目: 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科攻12426001-5)资助.

2 岩溶区建筑的基础选型

历次地震的震害调查表明,地基基础的地震效应对建筑物遭受的地震破坏轻重有密切关系。一次强烈地震发生后,其震害程度不是均匀地随着与震中的距离增大而衰减,而是在很大程度上受地质构造、地形、岩土性质、地下水等条件的控制。岩溶地质作为一种非稳定场地,是影响建筑抗震性能的重要因素。因此,不同的建筑结构对基础选型有一定要求。

(1) 浅基础。一般情况下,对单柱荷载不是很大且灰岩面上覆盖较深的岩溶场地,可采用浅基础。由于箱型基础和筏板基础的基础沉降量比较小,调整地基不均匀沉降的能力较强,抗震性能良好,是岩溶地区常用的基础形式(邓海东, 2009)。

(2) 复合地基基础。若基岩上覆盖有一定厚度土层,但其承载力不满足要求时,可采用复合地基基础。目前,岩溶地区大多采用深层搅拌桩、刚性桩对土层进行加固处理。还有近几年比较新的 CFG 桩复合地基处理方法(钟毅,李文胜, 2011)。

(3) 桩基础。桩基抗变形能力强,承载力大,能适用于各种不利的地理情况,比天然地基具有更好的抗震能力,在岩溶区的高层建筑中得到广泛应用。采用桩基在岩溶地基上建造高层建筑,需要解决一系列特殊问题,如持力层的稳定、溶槽溶洞处理、同一承台下长桩与短桩的应力、应变协调等。目前岩溶地基主要使用的桩基形式有:冲(钻)孔灌注桩、预应力管桩、裙桩、沉管夯扩灌注桩、静压预制桩等(顾太华,潘健, 2005)。

另外,由于箱型基础和筏板基础的整体性好,也常采用箱桩结合或桩筏结合的基础形式。这种混合的基础形式共同作用有利于控制基础差异沉降,提高桩基础的抗震能力。

3 岩溶区建筑的震害特点及原因分析

由于岩溶区复杂的地质条件,强烈的地震动易诱发滑坡、地裂缝、塌陷等灾害。纵观我国多

次强地震中遭受破坏的建筑可知,由于地质灾害而导致上部结构的破坏,是岩溶区主要的震害特点。

3.1 地震岩溶塌陷对建筑的破坏

在碳酸盐岩石分布区有许多岩溶洞穴隐伏在第四纪覆盖层之下,地震会破坏原有的平衡条件,溶洞崩塌,上覆土层陷落,这种现象被称为地震岩溶塌陷。岩溶地基基础的塌陷会造成上部结构不同程度的开裂、倾斜,楼板的垮塌等。例如 1976 年唐山大地震时,分别在唐山市与东矿区、秦皇岛石门寨地区出现直径 3~40 m 的岩溶地面塌陷坑 20 多个、18 个和 9 个,许多民房塌落到陷坑中造成不同程度的损坏,甚至倒塌。

地震波导致岩溶塌陷的原因主要有两方面:首先,地震作为一种内动力地质作用,其强大的地震波会引起岩土体破裂位移,土层压密下沉,使处于临界状态或稳定性不高的洞穴顶板承受附加力量而失去平衡产生岩溶塌陷。另外,地震作为一种振动荷载,对盖层土体产生扰动,破坏土体结构,同时地震可引起地下水的水动力变化,造成土体液化和触变,使其变得松散,抗剪强度降低,诱发岩溶塌陷(贺可强等, 2005)。

3.2 地裂缝对建筑的破坏

地震产生的地裂缝是构造应力和地震波作用于地壳表层的结果。地裂缝的垂向位移可造成地基一侧相对下沉,使建筑物因差异沉降产生张拉破坏;若垂向位移较大,可直接对建筑物造成垂向剪切破裂。地裂缝的水平张开可导致建筑物张裂;水平剪切运动将会使建筑物被水平错移。此外,地裂缝也是地表水和地下水向深处渗流的通道,引起土体湿陷、形成线状陷穴、陷坑和洼池等,从而大大降低了地基的强度和稳定性,间接对建筑物构成危害(纪万斌, 1998)。

岩溶区发生地震,地裂缝的产生与底部灰岩的岩溶化有密切关系,地下水溶蚀形成的岩溶管道的发育程度直接决定着上覆土层裂缝的发展,影响表层地裂土层的力学性质。水的作用是岩溶区地震地裂缝成灾的重要因素:首先,含水量的多少直接决定土的胀缩性,其周期性变化会引起土体的膨胀与收缩的交替,加剧地裂缝的产生;其次,土体中含水量的变化削弱枯土颗粒之间的胶结程度,导致土体强度降低,诱发地裂缝(张

骏卢等, 1996)。

3.3 较低矮建筑震害严重

岩溶区的地质构造, 决定着地震的活动及性质。在岩溶区发生的一些小震级地震能造成相当严重的破坏。2010年5月16日, 广西河池市金城江区东江镇发生 M_L 2.8地震, 震源深度5~10 km。地震造成东江镇加道村才吉屯61户村民104间房屋不同程度受损。钟新基(1985)指出, 岩溶区高烈度地震的成因与岩溶介质有关。地震发生时, 岩溶区饱含水的软介质层对地震波有放大作用, 使地表的振动位移大于入射波的位移, 其卓越周期一般在0.2 s左右。这一周期正好与地面三层以下的框架结构、砌体结构、砖混结构等结构形式的低矮楼房周期(0.1~0.3 s)相接近。由于两者的振动周期相近, 建筑物在地震波的作用下会发生共振, 使震幅增大, 从而使地面较低矮的建筑物遭受破坏。

3.4 岩溶区地震灾害易相互诱发

岩溶区的震害可能影响水工及矿山建筑物的稳定安全, 引发山崩、滑坡、崩塌及地裂缝等次生灾害。有时, 塌陷作用也可产生破坏性的地震, 既塌陷地震。它们往往成群成带发生, 相互诱发、相互转化, 形成灾害链, 加剧建筑物的破坏程度(覃子建, 1996)。

4 岩溶区建筑的抗震研究进展

纵观我国结构抗震领域, 大量的专家学者都对结构抗震研究做了许多努力, 也取得了很大的成果。随着我们对建筑结构地震响应特征研究的不断深入, 要求科研人员在建筑结构的抗震研究工作中应更具针对性。岩溶作为一种复杂工程地质, 给结构的抗震技术提出了更高的要求。目前, 国内还没有针对岩溶区的结构抗震问题的研究, 地基处理多凭当地经验, 抗震设计也是基于一般性的抗震规范。因此, 进行岩溶区大型工程地震防御技术研究是一项有重要意义的研究课题。

岩溶作为一种特殊的地质条件下形成的现象, 许多科技工作者从多个方面对其进行了研究, 其中岩溶稳定性评价方法和岩溶地基基础研究对岩溶区的结构抗震具有重要意义。

4.1 岩溶稳定性评价的研究

岩溶地基稳定性评价, 直接关系到结构整体

的抗震设计与地基基础方案的选择, 是岩溶区工程建设中的重要内容。当前, 我国岩溶稳定性评价仍然以宏观把握为主, 定性的评价较多。今后需要不断地总结实践经验, 提高岩溶稳定性评价的勘察工作程度和综合研究水平。

岩溶稳定性评价方法主要分两种: 定性评价和定量评价。定性评价方法主要是根据岩土体的地质勘查资料, 结合基底荷载情况, 对影响溶洞稳定性的各种因素(如地质构造、岩层产状、岩性和层厚、洞体形态及埋藏条件、地下水等)进行分析比较, 作出稳定性评价, 适合一般工程建设; 定量评价方法是根据一些公式对溶洞或土洞的稳定性进行分析, 主要的方法有: 普式压力拱理论、有限元数值分析法、多元逐步回归分析和模糊综合分析法、根据溶洞顶板坍塌自行填塞土洞所需厚度进行计算、对顶板进行抗弯、抗剪计算、根据极限平衡条件, 按顶板能力抵抗受荷载剪切的厚度计算等(刘之葵, 2004)。

4.2 岩溶地基基础的研究

查阅我国岩溶地基基础研究的相关文献, 较多报道的是一些学者和工程技术人员针对具体的工程实践过程中所遇到的岩溶地基(如溶洞地基、土洞地基、塌陷地基)的分析评价, 尚无对岩溶地基基础进行过系统的研究。比如: 蒋继昭(1998)运用溶洞塌塞式和岩溶化地基承载力计算方法对岩溶区的端承桩进行计算评价, 同时评价了桩基嵌岩与冲刷问题; 王建秀等(2000)提出用“盖层土体—薄顶板无充填溶洞力学系统”的稳定性来解释岩溶区的塌陷稳定性; 沈清林(2001)介绍了某高层建筑采用旋喷桩加固地基的成功经验; 陈忠平(2001)通过工程实例, 详细介绍了有上覆土层的浅层岩溶路基塌陷防治的灌浆技术(刘之葵, 2004)。

5 提高岩溶区建筑抗震能力的措施

由于岩溶地基的不稳定性, 在地震作用下容易产生地基失效而导致上部结构的破坏。因此, 加强地基基础的抗震研究对提高岩溶区建筑结构抗震能力尤为重要。通过改善上部结构的整体性与抗震性能, 可避免建筑物的倒塌伤人, 在岩溶地区建筑结构的抗震研究中也不容忽视。

5.1 建筑场地的选择

建筑场地的选址原则是尽可能选择对建筑物抗震有利的地段,避开不利的特别是危险地段。建筑抗震有利的地段,一般是地形起伏较小的开阔平坦坚硬场地,或土质为密实均匀的中硬场地,地下没有岩溶洞穴等。建筑物抗震不利地段,一般是属于软弱场地土,易液化土,条状突出的山嘴,高耸孤立的丘,非岩质的陡坡,采空区,河岸和边坡边缘,或不均匀的场地土。建筑物危险地段,是指地震时可能发生崩塌、滑坡、泥石流、地震塌陷和地裂等地段以及地震基本烈度为Ⅷ度或Ⅷ度以上的发震断裂带上和可能发生地表错位的地段。为了正确选择建筑场地,必须事先进行勘察,若无法回避潜在的地震塌陷区,应采取适当地基处理(范一知,1999)。

5.2 岩溶区的地基处理

若不可避免的在复杂岩溶地质上建造建筑物,需要对岩溶地基进行加固处理。根据不同的岩溶场地条件和建筑结构要求地基处理方法大致归类如下(马琳琳,2004;金瑞玲等,2002;谢勤,2008):

(1) 填垫法。该法可分为充填法、换填法、挖填法、垫褥法等。充填法适用于裸露型的岩溶土洞,其上部附加荷载不大的情况;已被充填的岩溶土洞,若充填物物理力学性质不好,须清除洞中充填物,再全部用块石、片石、砂、混凝土等材料进行换填,此方法称为换填法;挖填法是将浅埋的岩溶土洞挖开或爆破揭顶,以块石、片石、砂等填入,然后覆盖粘性土并夯实。该方法适用于在浅埋的岩溶土洞上建设轻型建筑物;对有岩溶洞、隙、沟、槽、石芽等岩溶凸出物,可能引起地基沉降不均匀,可将凸出物凿去后做砂土垫褥处理。

(2) 加固法。此法通常包括溶洞灌浆、顶柱法、强夯法、挤密法、浆砌法等。溶洞灌浆主要是针对众多的小型设备基础及辅助用房下的浅层多溶洞的软弱土,适用范围广,造价较低。当洞顶板较薄、裂隙较多、洞跨较大,顶板强度不足以承受上部荷载时,为保持地下水通畅,条件许可时采用附加支撑减少洞跨,即顶柱法。强夯法在覆盖型岩溶区,处理大面积土洞和塌陷时经常采用,是一种省工省料、快速经济且能根治整个

场地岩溶地基稳定性的有效方法。

(3) 跨越法。当岩溶洞体埋藏较深,挖填困难不经济或浅埋洞体顶板厚度难以确定时,可根据上部结构性质、荷载大小及跨度大小,分别采取板、梁、拱等方式跨越,将跨越结构置于岩溶地基基础之上。

(4) 桩基法。在溶洞、塌陷漏斗较深较大或溶洞多层发育外,可采用桩基础。桩基础具有比天然地基良好的抗震性能,震害远远小于天然地基。其因为在地震水平推力的作用下对建筑物产生倾覆弯矩,但由于桩和承台及连系梁的存在对建筑物产生一个抗倾覆弯矩,增强了建筑物的抗震性能。且桩端持力层承载力比较大,同时由于桩土之间的摩擦力的作用,基础的沉陷变形小。

5.3 岩溶区建筑基础抗震措施

(1) 避免地基和结构在地震时发生共振(贺雅敏,杨锋,2006)。岩溶区富含水的软介质层对地震波具有放大作用,改变地震波的卓越周期。根据微震观察资料,在高烈度的地震区要考虑地基土层的特点和上部建筑物的地震反应,合理选择地基方案和上部结构形式,防止发生共振而加大震害。

(2) 合理的地基基础设计。同一建筑单元应设置在性质相同的地基上,采用同一类型的基础,不宜部分采用天然地基部分采用桩基。同一建筑单元的基础(或承台)宜埋置在同一标高上。地基有软弱性粘土、可液化土、严重不均匀土层时,要加强基础的整体性和刚性,桩基宜采用低承台桩。

(3) 为提高地震作用下岩溶地基基础的抗震性,可对地基基础不利地段的设计地震动参数进行放大,将其水平地震影响系数最大值乘以增大系数。根据岩土工程地质勘察情况,从多方位考虑影响地基基础抗震因素(王志刚,2011)。

(4) 基础的隔震与减震。基础隔震是在建筑物基础与上部结构之间设置由隔震器、阻尼器等组成的隔震层,隔离建筑基础与上部结构,减少输入到上部结构的地震能量,降低其地震反应,从而达到预期的抗震设防要求。国内外的大量试验数据和工程经验表明:隔震一般可使结构的水平地震加速度反应降低60%左右,结构的震动和变形均可控制在较轻微的水平,从而使建筑物的

安全得到更可靠的保证(田文斌,2002)。

5.4 岩溶区建筑上部结构的抗震措施

修建在岩溶地基上的建筑物一定要重视上部结构的抗震问题。建筑物的平面、立面布置要规则、对称、质量和刚度变化均匀,避免楼层错层;对体型复杂的建筑物要设置伸缩缝和沉降缝。判明建筑物的易损部位,采取加强措施或提高抗变形能力。建筑物结构的构件,应力求避免脆性破坏,为改善其变形能力,加强构件的延性,对砌体结构要求采用钢筋混凝土圈梁和构造柱等措施;对钢筋混凝土构件(梁、柱、墙)应通过对尺寸的选择,纵向钢筋和箍筋的合理配置,避免剪切破坏先于钢筋的屈服,避免钢筋锚固失效先于构件破坏;对钢结构构件应防止屈服、失稳。若建筑物已设在小型的崩塌、滑坡、地面塌陷灾害危险地段,除了加强建筑物的基础和结构外,重点应选择在技术和经济上合理的治理方案,提高地基的稳定性;对规模较大的崩塌、滑坡和地面塌陷危险区,应采取避让的方案。

6 结论与展望

作为一个地震多发的国家,岩溶区的不良的地质条件对建筑结构的抗震性能造成不利影响。随着我国经济条件的不断改善与重大建筑物的不断兴起,加强岩溶区建筑结构抗震性能研究对于我国工程建设的长期发展有着重要意义。对于今后岩溶区建筑结构的抗震研究,笔者认为主要有以下几个方面:

(1) 岩溶地基—基础—上部结构共同作用地震反应分析。对于岩溶地基上的建筑物,地基—基础—上部结构共同作用的影响突出,不能忽视。目前,共同作用的抗震分析的研究成果较多,但没有在实际设计中得到应用,基本都停留在理论研究阶段。因此,将地基—基础—上部结构共同作用的抗震分析工程应用化将是这一研究的发展方向,需要科研人员不断的努力与开发(贺雅敏,杨锋,2006)。

(2) 岩溶区地震破坏机理的研究。目前对基础抗震的研究非常困难,其中很少能用接近实际的实验方法来完成,岩溶区工程结构的基础处于复杂的地质条件下,各种重大工程结构尚无充足

的经历震害的经验,亦缺乏足够的模型实验验证,其地震破坏机理的研究有待加紧进行。

(3) 基础隔振和减振方法的研究。隔震与效能减震技术与传统抗震体系相比,具有巨大的优越性,在突发性的超过设防烈度地震中不破坏、不倒塌,既保护建筑结构本身,又保护建筑物内部的仪器设备及人员的安全,经济适用。加强隔震减震技术作为应用技术的研究,对岩溶区建筑的抗震具有重要意义。

(4) 岩溶区场地条件对地震动的影响研究。不同场地条件对基底入射地震动都有不同的影响。岩溶区的基底岩性特征和土层力学特征对岩溶地区的抗震设防工作起着决定性作用。因此,需加强岩溶区场地条件对地震动的影响的深入研究

(5) 岩溶区强地震动的衰减规律的研究。岩溶区存在“小震级、高烈度”的特点,建立我国岩溶区强地震动的衰减规律直接影响建设场地地面运动的估计结果。目前为止,我国缺乏对岩溶区强地震动的衰减规律的深入研究。

参考文献:

- 陈洪江. 2010. 土木工程地质[M]. 北京:中国建材工业出版社.
- 陈忠平. 2001. 岩溶区路基塌陷防治的灌浆技术[J]. 冶金矿山设计与建设,33(3):41-44.
- 邓海东. 2009. 岩溶地区基础设计探讨[J]. 装备制造,(11):215.
- 范一知. 1999. 场地、地基及地基土对建筑物震害影响的探讨[J]. 福建建材,(2):57-58.
- 顾太华,潘健. 2005. 岩溶地区基础选型及桩筏基础的工作性状[J]. 广东土木与建筑,(11):20-22.
- 光耀华. 1998. 岩溶地区工程地质研究的若干新进展概述[J]. 中国岩溶,17(4):378-383.
- 贺可强,王滨,杜汝霖. 2005. 中国北方岩溶塌陷[M]. 北京:地质出版社.
- 贺雅敏,杨锋. 2006. 地基—基础—结构共同作用抗震分析综述[J]. 工业建筑,36:633-636.
- 纪万斌. 1998. 塌陷与建筑[M]. 北京:地质出版社.
- 蒋继昭. 1998. 南(宁)柳(州)高速公路洛维大桥桩基岩溶问题[J]. 广西交通科技,23(3):22-23.
- 金瑞玲,李献民,周建普. 2002. 岩溶地基处理方法[J]. 湖南交通科技,28(1):10-12.
- 雷明堂,蒋小珍. 1998. 岩溶塌陷研究现状、发展趋势及其支撑技术方法[J]. 中国地质灾害与防治学报,9(3):1-6.
- 马琳琳. 2004. 复杂岩溶地基处理[J]. 河南科技大学学报,25(4):75-77.
- 沈清林. 2001. 旋喷桩在多溶洞地基中的应用[J]. 福建建筑高等专科学校学报,3(3/4):80-82.

覃子建. 1996. 中国岩溶区中国岩溶区的地震及其震害特征[J]. 地震学刊, (4):34-38.

田文斌. 2002. 建筑隔震与消能减震技术[J]. 电力学报, 17(4):265-267.

王建秀, 杨立中, 刘丹, 等. 2000. 覆盖型无充填溶洞薄顶板塌陷稳定性研究[J]. 中国岩溶, 19(1):65-72.

王志刚. 2011. 基础抗震研究[J]. 科技传播, 9(上):93-94.

谢勤. 2008. 谈岩溶地区的地基处理方法[J]. 山西建筑, 34(28):116-117.

张国民, 马宏生, 王辉, 等. 2004. 中国大陆活动地块与强震活动关系[J]. 地球科学, 34(7):591-599.

张骏卢, 玉东, 孙建中, 等. 1996. 广西小平阳岩溶区地裂缝形成因素分析[J]. 西安地质学院学, 18(4):69-74.

钟新基. 1985. 广西岩溶区烈度异常地震[J]. 西北地震学报, (增刊):142-147.

钟毅, 李文胜. 2011. CFG 桩复合地基在岩溶地区高层建筑地基处理中的应用[J]. 广西城镇建设, (6):63-65.

刘之葵. 2004. 岩溶区溶洞及土洞对建筑地基影响的研究[D]. 长沙:中南大学.

张国民, 马宏生, 王辉, 等. 2004. 中国大陆活动地块与强震活动关系

Seismic Damage Analysis and Seismic Resistance Research Progress
of Architectural Structures in Karst Area of China

YANG Shi-sheng^{1,2}, HE Sheng¹, XIE Kai-zhong¹, MENG Lei¹

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)
(2. Seismological Bureau of Guangxi Autonomous Region, Nanning 530022, Guangxi, China)

Abstract

Combined with relative literature data of karst engineering construction in China, we analyzed the geological characteristic and the selection of foundation type and seismic damage characteristic of architectural structure in karst area, and summarized the anti-seismic measurement and research status of architectural structures in karst area. Furthermore, anti-seismic research on the architecture engineering in karst area is forecasted.

Key words: karst geology; architectural structure; seismic damage analysis; seismic resistance