

汶川地震灾后调研和损失评估

赖涛 博士

项目经理，AIR 环球公司，波士顿，美国麻萨诸塞州

编者的话：

2008年5月12日位于中国西南地区的四川省遭受了8.0级的强震，震后几个星期，AIR派出一支由结构工程专家组成的勘查小组，前往受地震破坏最严重的地区调研。这次地震对深入了解中国城乡建筑物易损性及改进措施提供了宝贵经验，同时也为如何重新评估先前被一些专家所低估的四川地震灾害，提供了十分有价值的资料。本文是AIR Currents对汶川地震一系列报道中的第三篇，AIR项目经理赖涛博士对调研结果进行了分析讨论。

引言

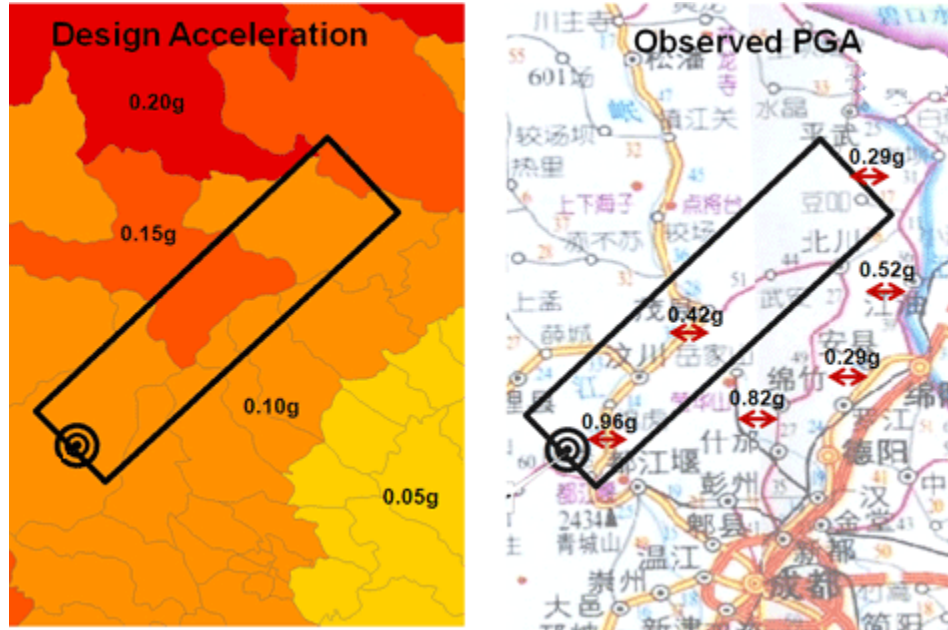
当地时间5月12日下午2点28分，距四川省会成都西北偏西方向大约90公里的汶川县发生了8.0级¹大地震。地震震源深度大约是19公里，地震所释放的能量约为1995年神户大地震²的30多倍。距离震中最近的一台强震仪记录的水平地震动峰值加速度为0.96g³。

这次地震发生在位于中国中部南北地震带的龙门山断裂带上。长期以来，南北地震带上地震非常活跃。汶川周边地区也曾记录到过一些比较大的地震。不过根据过去500年的记录，龙门山断层带没有发生过7级和7级以上的地震，这使得一些地震学家认为这条断层带已不再活跃。此外由于龙门山断裂带上古地震的证据很少，更增加了评估这一断裂带再发地震的难度。5.12大地震发生后，许多科学家都认为先前严重低估了龙门山断裂带的地震风险。AIR工程专家基于对灾区实地调研探讨了该区域的地震危害和这次地震所造成的损失。

震灾风险分析

中国是否对这个地区发生这样的大地震准备不足？自从1976年唐山大地震造成超过24万人死亡后，中国政府已经明定，在受地震影响的地区新建房屋时，要严格遵守国家的建筑抗震设计规范。然而，也许是低估了龙门山地区的地震风险，设计规范在该地区建议的抗震设防烈度，与汶川地震中实际观测到的地震烈度有明显差别。图一左侧显示的是中国建

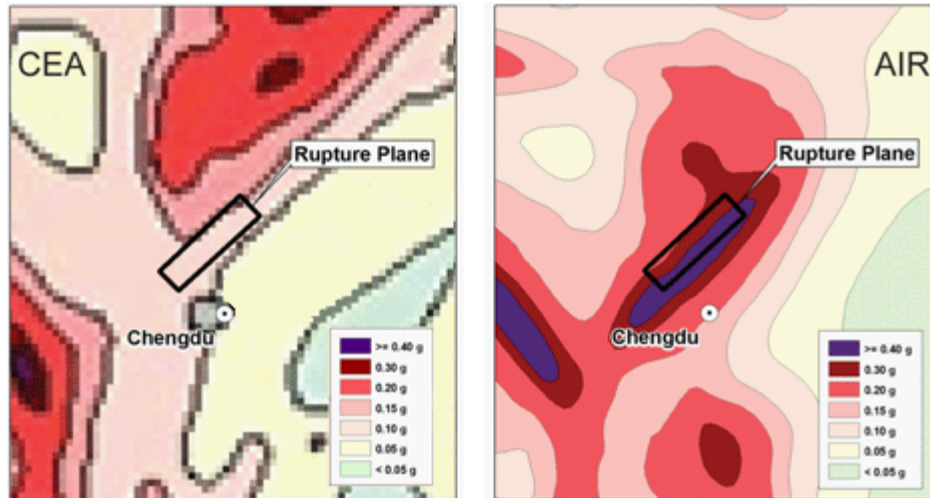
筑抗震设计规范⁴推荐的设计基本地震加速度值，以及震中位置和断裂面的地面投影。图一右侧记录的是 5.12 大地震的震中和附近实测到的地震动加速度峰值。



图一：中国建筑抗震设计规范建议的抗震设计基本地震加速度值（左）和 5.12 汶川地震在震中和附近实测到的地震动加速度峰值（右）。图中黑框为汶川地震断裂面的地面投影，圆圈为震源。来源：AIR 环球。

建筑抗震设计规范中的设防烈度或抗震设计基本地震加速度值源于地震区划图，该图反映的是 50 年超越概率为 10%，或者说 50 年中 90% 概率不被超越的地震烈度，或即相当于 475 年一遇的烈度水平。它是根据每个已知断层的发震震级和频率，区域地震活动背景，以及地震动强度从震源向外传播衰减规律计算所得。

下图左边显示的是中国地震局发布的地震区划图，即 50 年超越概率为 10% 的地震动峰值加速度分布图。该图的中心处黑框是汶川地震破裂面的地面投影。右边是 AIR 中国地震模型采用相同的比例尺生成的地震动峰值加速度图。值得注意的是，在汶川地区 AIR 模型比中国地震局估测的地震灾害高许多，而且 AIR 模型在龙门山断裂带预测了 7.7 级强震。根据汶川地震实测震级和烈度可以发现，AIR 模型更接近实际。这主要是因为 AIR 在计算地震风险时除了利用历史地震资料和古地震资料外，还使用了地震区划图发布后由先进的全球定位系统（GPS）所测得的大量地壳相对运动数据，和先进的运动学模型计算得到的地震能量累积速率结果。



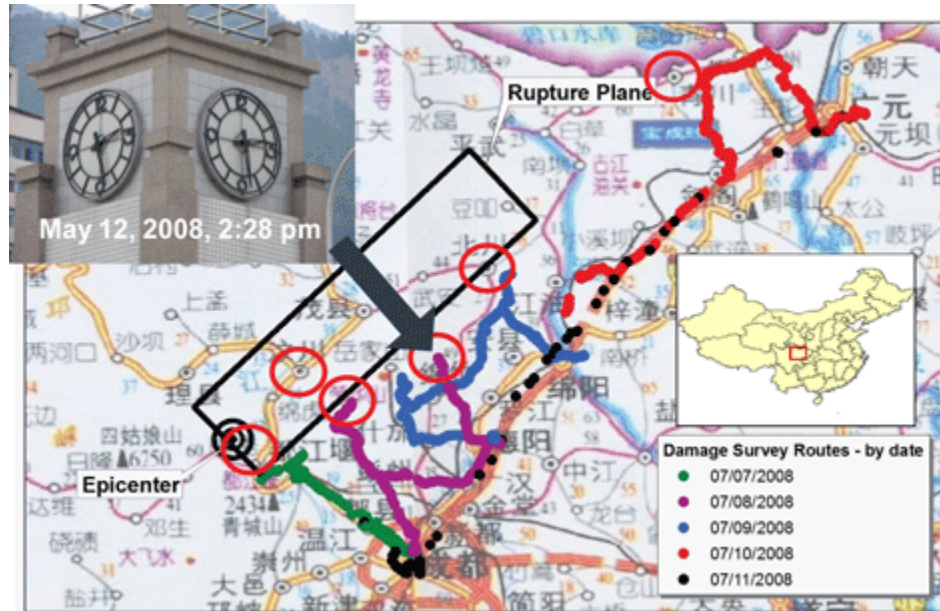
图二：比较龙门山断裂带附近中国地震局最新地震区划图（50年超越概率为10%的地震动峰值加速度）（左）和AIR计算的在相同超越概率条件下的地震动峰值加速度图（右）。来源：中国地震局和AIR。

地震损坏调研

虽然这次地震震中在汶川县，但在遥远的越南和泰国都有震感。震中地区的数百条小水坝不同程度受损。同时滑坡堵流形成所谓的堰塞湖，严重威胁到下游的整个城镇。据官方统计，地震摧毁建筑物近700万间，损坏房屋2400多万间，1500多万人流离失所。

一经允许进入灾区，AIR结构工程专家随即前往调研。由于近几年的发展，新建筑在抗震设计及施工方面都有许多进步，但这些新建筑均未经过大地震的检验，因此此次调研的目的之一是要观察这些新建筑的抗震性能是否达到设计标准以及设计标准是否和宜。更重要的任务是验证和评估AIR利用中国地震模型对汶川地震发生后24小时内所作的损失估算。

图三标出了震中位置、断裂面地面投影以及AIR调研小组灾区的考查路线。图中红圆圈中的6个城镇被夷为平地，但其中最东北部的青川镇主要由强余震破坏。在调研期间，一些离断裂面很近的地区仍未开放。尽管如此，调研小组行访了1500多公里的路程并对1400多个地点进行了房屋损失评估。

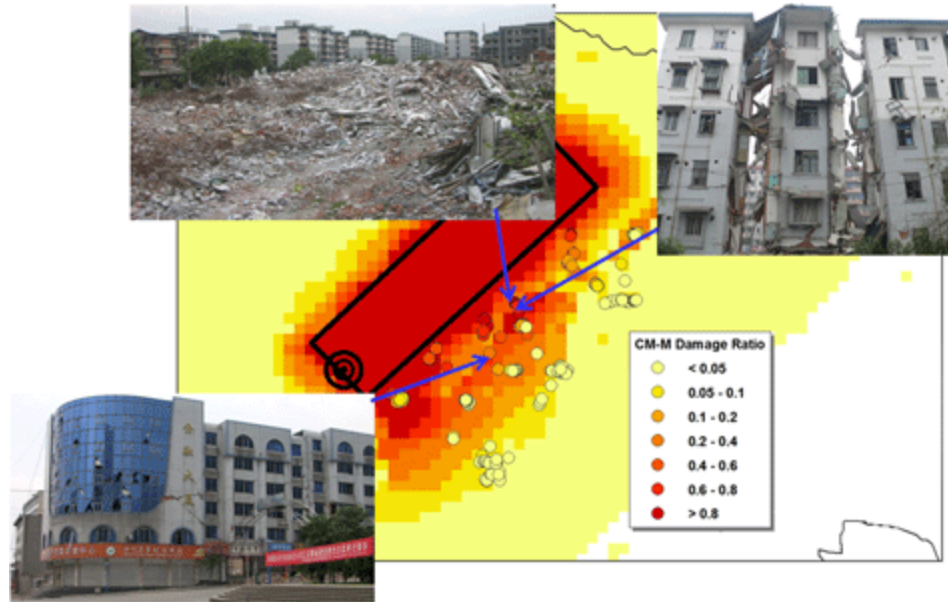


图三：受汶川地震影响大的地区和AIR 灾后调研路线；左上角钟楼上大钟永远定格在地震发生的时刻。

来源：AIR 环球

中国的多层砌体房屋 - 在学界常被称为中层约束砌体房屋 (CM-M)，是中国城乡地区住宅建筑主要类型，由于它经济且相对于无筋砌体较强的抗震抗塌能力，在1976年唐山大地震后很快普及。其细长和少量加筋的梁和柱 (或圈梁) 本身不能单独承重，主要功用是分隔大的无筋砌体墙，以增加建设物的稳定性和整体性。

如果建造合理，多层约束砌体房屋应当能够承受中小型的地震。然而，当遭受到像汶川地震这样的剧烈摇晃时，多层约束砌体房屋的墙体容易出现对角穿墙裂缝，这些裂缝导致一些较旧和不规范的建筑物彻底坍塌，也致使一些较新的建筑物无法居住，如图四中右上角的照片⁵。图四的背景色是AIR地震模型在震后一天对多层约束砌体房屋损失率的预测，那些小圆圈就是这次调研实地观察到的损失率。



图四：多层约束砌体房屋损失率的模型预测值和观察值的比较。背景色彩是预测值，小圆圈是观察值。来源：AIR 环球。

因为地震时正是上课和午休时间，学校受灾尤其严重。虽然许多学校建筑是钢筋混凝土结构，但仍造成成千上万的儿童遇难。有几个因素是这一悲剧的导因：一是该地区地震烈度被低估；二是配筋不足加上相对较大的教室跨度，导致该类建筑物的脆性倒塌；三据报道，一些建筑存在设计不规范和施工不合理的问题；此外，不同于许多其他国家，中国的建筑抗震设计规范没有明文规定学校的建筑标准须高于一般住宅建筑标准；最后一点，尽管许多学校建筑是钢筋混凝土结构，但是还有更多学校建筑还是老的无筋砌体（URM）结构，这类结构几乎不能抗震。更不幸的是无筋砌体房屋在中国农村和小城镇仍很普遍。

另一方面，值得一提的是一些明显建得好的学校建筑在地震中幸存下来并只有轻微损坏，而附近建于相同年代的建筑则被完全震毁。这个现象说明现行的建筑抗震设计规范含有相当大的安全系数，即如果严格按照规范设计与施工，即使在严重低估了地震风险的地区，现行的规范仍能保证建筑物的一定安全。



图五：混合结构类型建筑（上层是约束砌体，底层是钢筋混凝土）受损严重（此照摄于青川县）。

混合结构通常有四到六层高，其实际抗震性能比设计工程师预期的差。这类建筑的底层主要是零售商铺，采用钢筋混凝土结构以利门窗布局 and 空间利用，而上部多为约束砌体用着住宅。这类混合结构建筑在中国城镇乡村的大街上十分普遍，它既能够符合建筑学上的要求，也能缩短施工时限和降低成本。然而，在地震发生时，底层和上部结构对地动的反应不同，造成“软层”效应或过渡层（通常为第二和第三层）的应力集中，导致建筑物部分或完全倒塌（图五）。这是由于结构类型的改变，确切来说是结构刚度的突变，使得这类混合结构更为易损。

钢筋混凝土剪力墙结构在地震发生时表现最佳。对多层或高层混凝土建筑，支撑电梯的墙体能在地震时提供强大刚度以抗侧向剪力。图六中所示的两座大楼都距离地震断裂面非常近，但受到的损坏都相对很小。



图六：高层钢筋混凝土剪力墙结构损失率的模型预测值和观察值比较。背景色彩是预测值，小圆圈是观察值。来源：AIR 环球。

在偏远农村修建的工厂通常没有得到严格的监管，尤其是一些较小或较老的工厂。如图七右边所示，那些细小柱子显然不能为这个严重受损的工厂提供足够的侧向抗力。如果没有远处的钢架厂房，整个工厂都可能已倒塌。即便如此，倒塌的屋顶仍砸坏了下方的机器设备，该工厂很可能需要数月才能恢复部分生产。在同一图的左侧，大而新的厂房只轻微受损。这进一步证明，符合抗震设计规范的建筑物能抵御或降低像汶川这样的大地震造成的损坏。



图七：老而小的厂房（右）遭到严重的破坏，但新且大的厂房（左）在地震中幸存下来。来源：AIR 环球

总结来说，大多数建筑类型在该地震中的表现跟预期差不多。无筋砌体房屋抗震性最差，而设计合理的钢筋混凝土建筑物则抗震性较好。混合结构的抗震性达不到设计标准。新的多层约束砌体在地震中的表现能够达到中国建筑抗震设计的抗震标准，但面对像汶川这样的大地震也可能坍塌，即使不坍塌也不宜继续居住，且对角穿墙裂缝的修理费用也非常高。缺乏严格工程设计的钢筋混凝土建筑的抗震性仍普遍优于多层约束砌体。但如果配筋不足又有大跨度或大开口，这类建筑物的易损性很高，地震中可能有重大损坏甚至崩塌。

结论

2008年5月13日，AIR在汶川地震发生的第二天发布了实时损失估计。模型结果显示，基础设施除外，总的财产损失将在160 - 480亿美元之间，保险损失可能介于4 - 12亿美元之间。保险损失的计算是基于AIR的中国工商业财产数据库及行业平均的保单条款和投保比率。但需要指出的是，中国的投保比率数据有很大的不确定性，因而由此估算的保险损失也含不确定性。

在9月4日，国家汶川地震专家委员会报导了四川省除基础设施外的总财产损失约为530亿美元，比AIR预测的上限高出了约18%。需要说明的是，该委员会的估计不是基于旧建筑的重建费用，而是根据当地政府的调查报告。而地方政府出于为多获中央财政支援的考虑倾向于高报损失数字。

AIR在24小时内发布的预测结果得到了保险行业的广泛认可。因为在当初没有任何确实信息的情况下，这样的实时估算对保险行业十分重要。同时，AIR实时损失估计与后来调研小组实地调查的结果非常吻合。

当调研小组排查震后废墟的时候，灾区已经开始对建筑物进行修复加固。许多挑战立即就摆在眼前，其中之一是迅速重建社区，还是先重新评估该地区的地震风险并加强建筑抗震设计规范的实施？无论是哪种情况，这次地震又给了人类一次警示：建筑规范与施工质量对于防灾减灾至关重要，许多已发生的损害都可以通过和宜的抗震设计和施工而减轻或避免。

¹中国地震局 (CEA) 估计的面波震级；美国地质调查局 (USGS) 估计矩震级为 7.9。

² Yuji Yagi , 日本筑波大学。

³中国地震局 , [Hhttp://peer.berkeley.edu/events/2008/2008-18-08_Wenchuan-Seminar/presentations/ZifaWang-SFO-public.pdf](http://peer.berkeley.edu/events/2008/2008-18-08_Wenchuan-Seminar/presentations/ZifaWang-SFO-public.pdf)

⁴中国建筑规范 (GB 50011-2001) 。

⁵根据中国的建筑抗震设计规范，建筑物的抗震标准是小震不坏，中震可修，大震不倒。遭受像汶川这样的大地震，建筑物不坍塌就算符合抗震标准。如图四右上方显示的建筑物确实没有倒塌，但已无法居住。