浅议汶川地震中几种震害认识

徐珂
（清华城市规划设计研究院建筑分院，北京 100083）
（北京清城华筑建筑设计研究院，北京 100083）

[提要] 2008 年 5 月 12 号发生的汶川地震给震中及周边城镇带来严重的地震灾害，一些结构震害如鞭梢效应、楼梯破坏表现出较大的破坏性，应引起设计人员重视。砌体结构和预制结构虽然在本次地震中表现不佳，仍然是今后建筑业大量使用的形式，应加强研究确保抗震构造的合理性。提供墙体晃动痕迹照片，感受建筑物在地震中水平摆动幅度。

[关键词] 汶川地震 震害 鞭梢效应 楼梯 砌体结构 预制结构

Analysis of some types of structural damages in Wenchuan earthquake

Xu Ke
(Beijing Tsinghua Urban Planning & Design Instiutute,Beijing 100083,China)
(Beijing THCA Architectural Design & Consulting Instiutute,Beijing 100083,China)

Abstract: Wenchuan earthquake occurred in May 12th, 2008 brought catastrophic tragedy to Wenchuan and other areas all around. Some structural damage for their tremendous devastation, for example whiplash effect and stair shaft damages, should be thought much of by designer. masonry structures and precast structures were mainly destroyed objects, but they are important structural systems for a long time in future, they should be re-studied so that to insure they have adequate abilities to resist earthquake. Some photos of shaken wall are also provided, so horizontal shaken range of buildings can be realized.

Keywords: Wenchuan earthquake; earthquake damage; whiplash effect; stair shaft; masonry structures; precast structures

作者简介：徐珂，本科，工程师，Email: arch100@126.com。

0 前言

2008 年 5 月 12 日四川省发生里氏 8.0 级强烈地震，震中位于四川省阿坝州汶川县。建筑物的震害表现为抗震研究提供了丰富而具体的结构反应模态，有助于结构人员直观感受地震作用，重新认识抗震设计及构造的重要性。

1 低层建筑的鞭梢效应

鞭梢效应是结构专业经常使用的地震作用词汇，其定义为：在地震作用下，高层建筑或其他建（构）筑物顶部细长突出部位振幅剧烈增大的现象。具体表现为建筑物顶部存在突出部分，该部位的结构质量和刚度与下部主体结构相比较小，形成软弱的“鞭梢”，地震波动过程中，建筑物在摆动方向转换瞬间，突出部位在惯性作用下继续按原来运行轨迹发展，而下部主体结构已经朝相反的方向摆动，突出部位形成较大的加速度，导致突出部分地震作用迅速增加，从而形成结构薄弱部位。

由于该类破坏集中于建筑物顶部或外围，其对人员生命和财产损失威胁较为间接，在客观上容易造成对该部分的忽视，这主要表现为在规范上是建议处理，在教学中多关注于下部主体安全性，鞭稍效应作为一种常见的、影响不大的震害表现来介绍，案例讲解中多以大型、高层建筑作为案例，突出部位比例很小，相应的研究分析也较为充分，在相应的设计中，下部结构往往不减少截面延伸至突出顶部，这样抗剪截面充足，鞭稍效应导致的破坏就会减少很多。但在这次地震中，由于震区大型、高层建筑较少，鞭稍效应震害多集中于低矮建筑上，这些突出物的特点是体形相对较大，层数较多，为满足建筑造型需要，设计成“楼上塔”结构。还有一些电信塔架设在三、四层楼上，以“柔弱”的框架身躯支撑“刚强”的电信塔架，塔架没有地震破坏迹象，而下部楼房则因鞭稍效应产生震害。

图 1 都江堰某框架楼震害

图 1 是典型的鞭稍效应震害案例，地震中顶部甩动位移过大，人员从塔上掉落。通过图片可以看出突出部位的下部主体楼层属于建筑物平面端部，已属于位移较大部位，为满足建筑造型进行二层以上立面收紧，属于刚度突变楼层，这部分框架柱间设置建筑墙体，客观上增加该侧向刚度，上部小塔楼为空旷框架，刚度急剧减弱，地震中小塔楼底层框架柱全部剪断，整体倾斜严重。该建筑物为框架结构，地震中主要发生柱间砌块填充墙剪切破坏，框架部分保持较好，属于“中震可修”状态。但由于塔楼的破坏，给震后修复工作带来很多难题，上部塔楼属于倒塌范围，应进行拆除。如何安全拆除是修复工作的第一步，拆除又面临几个问题，首先是拆除方法和工序错误都会给下部结构主体造成二次伤害，其次是如果采用人员零星拆除工作危险性较大，再次是建筑残体需要大型机械支撑，在城市里道理条件较好可以顺利进入，很多山区和农村建筑受道路限制，给后期工作带来很多困难。从拆除角度出发，也应重视鞭梢效应的破坏性。

当突出部位的基本频率与整体结构的固有频率接近，并与地面扰频接近时，容易发生鞭梢效应。如果调整好凸出部位与主体间质量和刚度间关系，就可以减少鞭梢效应的影响。相对而言图 1 中这类建筑更容易发生固有频率接近的情况，这类建筑受造型方案影响较大，建筑师对结构尺寸都会有要求，结构专业在方案、柱截面调整的范围较小，如果不能很好地预估地震反应，采取相应加强措施，就很难避免震害发生。在设计过程中，由于楼层层数不多，很容易在思想上对设计标准予以降低，在实际计算上予以简化处理，结构人员如果遵从抗震规范[1]以下几点指导，就可以最大限度的较少鞭梢效应造成的地震破坏：

1.1 竖向不规则定义中，局部收进的水平向尺寸大于相邻下一层的 25%时，作为薄弱层的地震剪力应乘以 1.15 的放大系数。这个建议对于多层鞭梢效应意义不大，因为突出部位的地震作用是整体性放大，而不仅是突出部位底层地震作用放大；设计人员应根据这个尺寸标准来确定楼层薄弱部位；

1.2 底部剪力法中，突出屋面的结构，其地震作用效应宜乘以增大系数 3。规范建议主要针对一层突出物的情况，如屋顶间、女儿墙等非主要结构构件；但这个数字可以让结构师在专业配合时有较为清晰的初步认识，从而向建筑师提出合理的结构建议；

1.3 关于地震作用效应增大系数可以参考非结构构件这一章，采用等效侧力法计算中 $F=\gamma\eta\zeta_1\zeta_2\alpha_{max}G$ 这个公式很有指导意义，条文说明里有较为详细的说明。对这部分有较为深刻的理解后，结构师应该明确此类建筑的难点所在；

1.4 这类不规则结构在计算方法上，相比规则多层建筑要严格，应采用静力弹塑性分析方法或弹塑性时程分析法进行罕遇地震作用下薄弱层弹塑性变形计算，严格控制突出部位的弹塑性层间位移角要满足倒塌位移角限值要求。在初步设计中可以参考规范推荐的简化方法来确定方案的可实施性。这一点对于结构专业实现“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设计目标提供重要的计算依据。

2 楼梯构件在框架结构中的震害

框架结构中的楼梯构件在地震中破坏数量相当多，笔者考察量有限，但印象上这类楼梯都有破坏表现，包括设置在框剪结构中框架部分的楼梯。具体破坏表现包括：

2.1 板式楼梯的梯板在板底中部出现裂缝，大量混凝土块在裂缝处脱落，破坏严重的裂缝为上下贯穿的整体裂缝，下部钢筋弯曲，这类破坏出现量最大，说明梯板在地震作用中，起到了 K 型支撑构件的作用，梯板在反复拉、压过程中破坏，参见图 2；

图 2 板式楼梯梯板震害表现

2.2 梁式楼梯的破坏类似板式楼梯，梁在跨中处发生整体性断裂，即使楼梯布置在结构主体外也出现严重震害，参见图 3；

图 3 梁式楼梯梯梁震害表现

2.3 为支撑层间休息平台，在框架梁上设置的梯柱在根部和顶部出现裂缝，这主要是梯板水平位移过大造成，梯柱截面抗剪能力不足造成的；

2.4 层间休息平台的梯梁在两个梯板间发生剪切破坏，这是因为梯梁承担梯板传递上下楼层剪力差，梯梁抗剪截面不足结果，参见图 4；

图 4 层间休息平台板及梯梁震害表现

2.5 层间休息平台板在梯梁破坏处至框架柱间出现斜裂缝，说明上下楼梯传递；

上面的破坏分析原因是笔者的拙见，有待验证。作为非抗震构件，在地震中起到抗震作用，提高结构主体的抗震性能，这是结构设计人员期望的，但对于重要逃生构件来说是灾难性的，出现裂缝意味着危险存在，梯板反复拉、压引起上下波动都会阻止逃生行为，可能加剧人员伤害，所以合理设计楼梯构件是重要的一项工作。日前出台的《建筑抗震设计规范局部修订》[2]第 3.6.6.1 条增加了“计算中应考虑楼梯构件的影响”，也说明这次地震中楼梯破坏数量很多，在规范层面要求设计人员重视楼梯在地震中的反应，但应注意规范并未给出相关调整要求。将楼梯构件加入计算模型里，实际上形成了类支撑构件，支撑结构在地震作用下内力情况复杂，力学计算结果不足以保证地震作用下安全性，像钢框架设计中，支撑杆件的内力是根据支撑类别乘以大于 1.0 的系数进行截面验算，才能保证支撑构件的安全形。由此推论参与整体计算的楼梯构件也应有安全性调整系数，对于梯板设计建议采用双层钢筋配置，增加反复拉、压承载能力，减少破坏几率。

还有一种设计方法是将层间休息平台与框架柱完全脱离方式，休息平台完全由梯柱支撑在框架梁上，这样做的初始目的是希望层间休息平台不对框架柱形成短柱破坏效应，不过考察过程中未发现该类震害表现，笔者粗浅地认为休息平台作为 K 型支撑水平构件，起到类似耗能梁段的作用，才会造成上述破坏表现。将楼梯构件与框架柱脱离设计，可以减少楼梯构件抗震耗能作用，就会减少j件破坏的机率。

3 砌体结构和预制结构的认识

3.1 这两类结构在本次地震中的表现给使用者和设计人员造成极大的心里阴影。破坏原因是多方面的，这里不再讨论，但有三点要说明的，一是很多山区建筑破坏属于地震引起的地质灾害，而这些地区经济条件较弱，承重材料基本上只能选择这两种形式，大量建筑是这两类结构的合成体系，两者的构造措施不足加剧了震害效果；二是震区很多建筑属于框架与砌体混合结构（不是框架+建筑砌块体系），这类结构破坏既有框架震害表现，又有砌体破坏的状况，但表观上更容易归类于砌体震害；三是我国的桥梁工程大量使用预制构件，在这次地震中表现理想，在抗震救灾工作中保证了生命线的畅通。

3.2 砌体结构抗震设计是不同于其它结构形式的，计算上执行底部剪力法，采用水平地震影响系数最大值，验算砌体截面的抗剪能力，超过截面抗剪能力后，就会发生剪切破坏。规范中设防烈度与实际计算烈度是有差异的，比如北京设防烈度为 8 度，抗震计算的对应烈度大约为 6.5 度，当实际烈度超过 6.5 度时，以概率理论分析就要发生破坏状态。砌体结构一旦发生剪切破坏，如窗间墙 X 形破坏、横墙斜向裂缝、水平整体剪切破坏等等，这些重要构件破坏后就会退出承重及抗震体系，改变结构承力途径，向结构整体失效的方向快速发展，缺少类似剪力墙结构中连梁耗能构件，其修复的可实施性、再使用安全性是很低的，就是说砌体结构的计算目标仅能满足“小震不坏”，无法在数据上支持“中震可修” 的设计目标；或者说破坏的砌体结构经过“中震可修”后究竟能达到什么样的抗震性能是值得怀疑的。我国在唐山地震中认识到构造柱和圈梁的抗震作用，在规范上开始制定了相关构造措施，在其后多次地震中证明了是较为有效的手段，合理设置构造柱和圈梁，其约束作用可适当提高墙体延性，起到第二道防线功能，尽可能达到砌体裂而不倒，实现“大震不倒”的设防目的。但这需要设计人员具有较好的抗震概念，不合理的构造措施同样会造成砌体结构非正常震害，比如构造柱截面过大，形成框架柱或剪力墙的情况，那么整个抗震体系就不能以砌体结构来分析。

在汶川地震后，笔者认为应重新审视砌体结构的适用范围和层数，比如都江堰新建小学同一栋楼内，教室部分全部倒塌而小跨度的办公用房破坏严重但未倒塌，在相同地震作用和建筑质量情况下，小开间的砌体墙承载面积小，房屋破坏对人员伤害的机率小；比如六度区可以建 8 层砌体住宅，形成较多人员聚集，一旦发生强震其破坏影响都是灾难性的，按照最新意见[2]，将学校定为乙类建筑仍然可以建设 6 层教学用房，而在四川学校里经常可以看到定员 8 人的学生宿舍，实际塞进 20 多人居住，后患严重；从保护生命、灾后救援、整体经济损失出发，应对砌体的适用范围进行严格限定。

3.3 预制结构设计在我国有一种弱化趋势，最新意见[2]强调“宜采用现浇钢筋混凝土楼、屋盖”，可见这次地震对预制行业的发展打击巨大。笔者认为各界包括建筑界对于预制结构的视野过于狭窄，提到预制结构就会想到预应力空心板、预应力梁等混凝土构件，但是从更大的角度出发，会发现很多预制构件应用在建筑中，如桥梁结构、钢结构、幕墙结构、木结构、桩基础，甚至砌体结构也可以认为是预制块体在现场通过砂浆粘合而成的。前几种结构在震区的表现是较为理想的[3]，这是因为相关规范对于连接设计是重点关注的。我国建筑业的预制结构连接要求仍停留在早期厂房结构、低层框架结构应用上，多年来受认识误区的影响，预制构件行业萎缩严重，相关研究严重落后，设计构造不严，施工水平低劣，才导致本次地震中破坏严重。相关部门应加强预制结构试验研究工作，推荐合理的设计原则和连接构造，同样可以形成良好的抗震结构体系，这是不容质疑的。图 5 是震区典型的厂房结构震害案例，维护墙体因连接薄弱而脱落，造成逃生人员伤亡，而吊车梁、屋面预制 I 型梁和槽型预制板未发生连接破坏，说明了连接节点的重要性。

图 5 排架结构震害表现

3.4 从世界范围来看，预制结构是建筑业发展方向，可以提高构件质量、减少人力成本和材料浪费、提高施工进度、有利于环保，如日本是发国家，预制结构应用范围很广，可以成为习、借鉴的目标。桥梁规范[3]也明确提出“

准化跨径的桥涵宜采用装配式结构，适用于机械化、工厂化施工”。以我国的经济情况，砌体和预制件仍然是今后建筑业大量使用的形式，因此加强两类结构的研究、设计、施工、业主建设指导工作都是重要的。

4 地震中建筑物水平摆动幅度

由于地震持续时间较短，以及人的视线所限，多数人在逃生过程中只观察到 6 层或 6 层以下建筑物水平晃动情况，普遍反映顶部水平晃动距离较大，像都江堰的人员尺寸感在 40cm~60cm 左右，甚至达到 100cm，笔者最初对这个尺度很震惊和怀疑，考虑人员与建筑物间相反晃动，建筑物顶部水平晃动尺度也在 30cm 以上，已处于框架结构倒塌值范围，砌体结构何以承担？

后来笔者在什邡市人民医院新建门诊大楼内拍到图 6 照片，该楼地上共八层，为框架剪力墙结构，震害表现主要为建筑填充墙剪切破坏和吊顶脱落，结构主体未发现明显破坏迹象。拍摄位置位于第五层医生接待病人的办公房间内，室内设小隔墙，用以分隔看病区和医生休息区，小隔墙顶部距楼层地面约 2.0 米，地震中在侧墙上留下摆动痕迹，图中尺子最大测量长度为 18cm，可以得出小隔墙顶部摆动幅度接近 20cm。一段位于中部楼层的自承重墙体都有如此水平位移，可以设想一下结构主体在地震中的位移表现，此点说明该结构体系的抗震性能是优秀的，同时也提醒结构设计人员，地震作用远超乎设计预想。

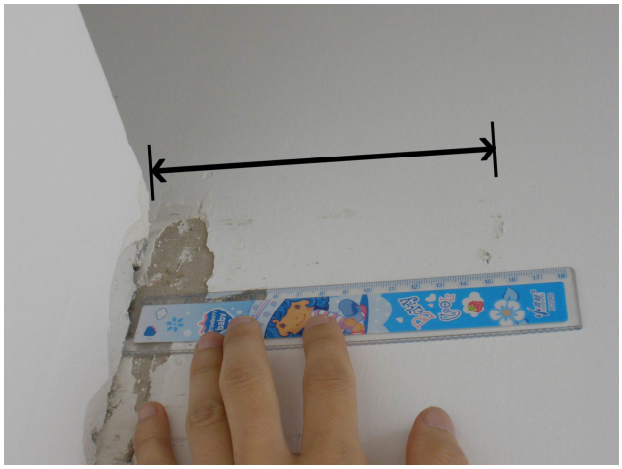

图 6 分隔墙在地震中水平晃动剧烈

6 结束语

由于地震具有强烈的区域性和独特性，对建筑物产生的影响也是不同的，而结构人员是以既有经验来进行设计，难免存在失误，只有不断认知地震影响，改善抗震设计手段，减少震害造成损失，希望本文所述内容对结构人员有所帮助。

参 考 文 献

[1] GB 50011-2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2001.
[2] 建筑抗震设计规范局部修订[S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部公告第 71 号.
[3] 李宏男，肖诗云，霍林生. 汶川地震震害调查与启示[J]. 建筑结构学报，2008, 8.
[4] 清华大学、西南交通大学、北京交通大学土木工程结构专家组. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报，2008, 8.
[5] 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京：人民交通出版社，2004.

作者：徐珂，本科，工程师，Email: arch100@126.com。
100083 北京市海淀区中关村东路 8 号东升大厦 A 座 901 室
Tel: 15601060166 / 82526161-105