

# 关于日本阪神地震震害现象的几点讨论\*

郭子雄

(华侨大学土木工程系, 泉州 362011)

**摘要** 以1995年1月17日发生的日本阪神地震为线索, 在对主要震害进行分析的基础上提出了避免类似震害的设计建议。

**关键词** 1995日本阪神地震, 薄弱底层, 工程抗震

**分类号** TU 352.1

在我国人民对唐山的灾难已经忘淡的今天, 日本神户市于1995年1月17日5时46分发生了里氏7.2级地震。短暂的10多秒钟强烈地震波的冲击给日本关西的神户市带来了灾难性的打击。据最新统计报道, 地震造成了约5500人死亡, 26618人受伤, 60人失踪, 毁坏住宅约7442栋(此数量不包括办公用房), 城市交通遭受严重破坏, 水、电、煤气供给中断。地震使日本经济蒙受了二战以来最严重的打击, 地震对工程设施的大量破坏引起了国内外地震工程界的广泛关注。在我国正处于新的地震活跃期的严峻形势下, 笔者认为很有必要对主要震害现象进行分析, 并集多年从事抗震工作的经验提出一些避免类似震害的设计建议。

## 1 主要震害现象分析

### 1.1 主要震害现象分析

在强烈地震波(图1)的冲击下, 神户市的地表遭受严重破坏, 出现了大规模的地陷和地裂

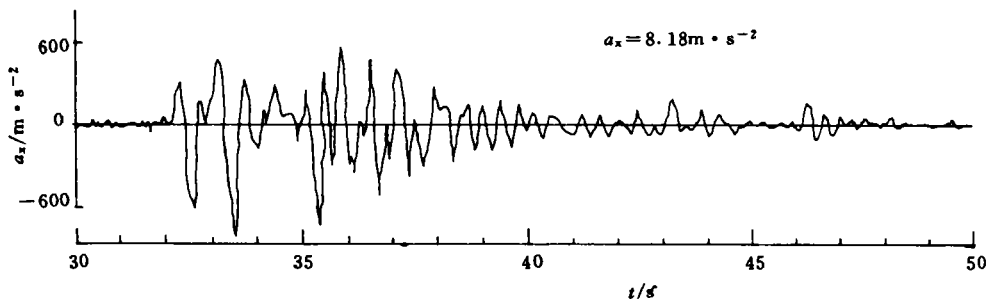


图1 日本海洋气象台测得的神户地震加速度图(NS)

\* 本文1995-07-23收到

缝.最突出的是神户市南部沿海边 40 km 长的一个条带区域内土质发生严重的液化,造成地表下陷 0.5 m. 神户市在本次地震中除了沿海的粉、细砂土层出现严重液化外,在一些粗砂、碎石土层上也出现了液化现象,这些土层在阪神地震以前是公认不会发生液化的. 因此本次地震中粗砂和碎石土的液化将会改变以前人们对可液化土的看法,从而为工程界提供了新的课题,笔者经过分析后初步认为这种特殊的液化现象可能与强烈的竖向地震(加速度为  $3.32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )有关.

### 1.2 生命线工程破坏严重

神户市交通系统、通信系统、给排水系统、热力系统、电力系统等城市生命线工程均受到地震的严重破坏. 日本的阪神高速公路是一条非常重要的交通路线,据报道该条线路占日本国内公路总运输量的 22%,震后出现多处毁坏,交通瘫痪. 这条高速公路在东滩区有一段 1 km 长的高架公路全部侧向倒下,这些高架高速公路系统采用钢筋混凝土结构,形式多采用单柱支撑的 T 形结构. 这样的结构形式虽然有利于地面公路的使用,但是却不利于横向抗震. 除了这种横向破坏外,在立柱的根部还出现大量的纵向剪压破坏,主要原因是立柱箍筋配置不足和锚固不合理. 同时沿纵向,由于各高架墩之间存在相位差,使桥梁与墩之间连接处拉坏,脱落. 地震对铁路系统的破坏也相当严重,阪急伊丹车站倒塌,许多车辆被甩出铁轨而横倒,沿铁路线许多处铁轨出现了扭曲现象,如图 2 所示,这种破坏与路基在地震行波的作用下所产生的残留变形有关. 有的铁轨由于其下面的路基结构破坏而悬空. 另外港口的破坏也非常严重,其中最突出的要数六甲岛附近的两个人工小岛上的世界最大集装箱码头的震害,小岛周边的沉箱严重倾斜,出现严重的不均匀地陷,吊装用的钢结构井架大量失稳、倾倒,港口瘫痪.

神户市的供水、煤气管道等生命线工程均年代较久,管线本身抗震能力脆弱,加上大规模的地陷和地裂缝的作用,使这些地下埋管的接口大部分松动拔出,接头开裂,管身折断,整个供水、煤气系统瘫痪. 据统计,神户市在  $100 \text{ hm}^2$  公倾的密集居住区内共发生了约 350 起火灾,熊熊燃烧的大火给灾区人民雪上加霜,加重了灾区的经济损失. 由于供水系统被破坏,无水灭火,加上道路毁坏、交通阻塞给救援工作带来了很大的困难,从而加重了灾区的次生灾害.

### 1.3 旧式木结构民宅大量倒塌

这些二战后建造的木结构民宅,在当时战后重建家园的历史背景下只追求建设速度而忽视施工质量. 加上从抵御台风考虑,日本旧式木结构在其瓦片上覆盖了较厚的一层泥土而增加了结构自重,从而使木结构房屋的地震作用增大,加之结构的承重土墙抗剪强度又较低. 综合上述原因,这种旧式木结构房屋不可避免在强烈地震下发生大量倒塌.

### 1.4 薄弱底层破坏非常显著

从震害录象和报导资料可知,阪神地区许多多层房屋破坏特点是底层溃塌而以上各层整体坐下没倒塌. 这种破坏是典型的薄弱底层破坏,多见于底层百货的商住房屋. 其震害原因:



图 2 典型的铁路扭曲现象

(1)是底层柱计算高度较一般楼层高导致侧移刚度较一般层小,而底层所所受的地震剪力又是最大,这样就容易产生塑性变形集中而形成薄弱底层;(2)是日本旧建筑法规对框架柱无轴压比限制,横向箍筋的构造也过于单薄,多数破坏柱子箍筋间距达 300 mm,并且箍筋也只是采用 90°弯钩,一旦外围保护层混凝土剥落,箍筋即不能起到约束混凝土的作用,在强烈地震作用下不能提高底层柱子的变形能力而造成倒塌是必然的结果。

### 1.5 软弱中间层震害突出

这种特殊的软弱中间层震害现象出现于神户市约 1 000 栋 5 至 8 层的楼房上,特点是中间楼层被压跨或出现严重破坏而其它楼层震害较轻。这种震害在以往历次地震中很少出现,因而引起了地震工程界的广泛兴趣,震害原因归纳起来主要有以下几个方面。

(1)中间楼层柱子的强度不足:每个楼层同样经过计算设计,为什么偏要是中间层强度不足?问题存在于日本旧的建筑法规(1981 年以前版),日本规范假定结构总地震作用  $F_E$  沿各楼层是均布,如图 3(a)所示。而无论是直接动力法或是振型分解反应谱理论均认为多层剪切型框架结构楼层地震作用分布接近例三角形,如图 3(b)所示。由图中几何关系可推得

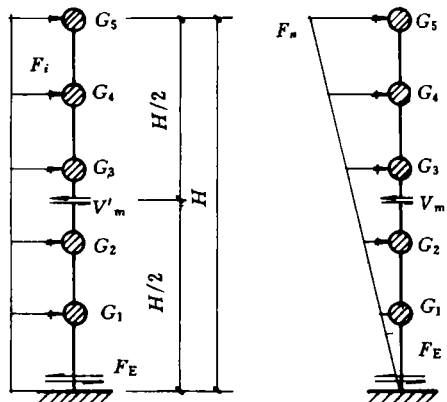


图3 楼层地震作用分布图

$$V'_m = \frac{1}{2} F_E, \quad (1)$$

$$V_m = \frac{3}{4} F_E, \quad (2)$$

式中  $V'_m$  为按日本旧建筑法规计算的中间楼层的层间地震剪力,  $V_m$  为按照例三角形分布方式计算的中间层层间地震剪力,  $F_E$  为总地震作用。综合(1),(2)两式可得

$$V'_m = \frac{3}{4} V_m, \quad (3)$$

由式(3)可知,日本在 1981 年以前建造的框架结构中间层的设计层间剪力仅为结构实际承受层间地震剪力的 67%。这样就不难理解中间楼层在强震作用下可能因强度不足而率先破坏。

(2)由于 1923 年的日本关东大地震中,当时是最高层的 7 层高的纯钢筋混凝土造的内外大厦因地震而完全倒塌<sup>[1]</sup>,使得当时日本工程界对钢筋混凝土结构的抗震性能产生很大的不信任感,从那时起不造七层以上钢筋混凝土建筑成了工程界的惯例。为了突破这一高度上限制,日本当时的做法是在下部几层采用钢-混凝土组合结构,而上部楼层才采用普通钢筋混凝土结构。这样结构中部的结合层除了可能产生强度和刚度的突变外,还不可避免地存在一些连接构造问题,因而在强烈地震下该结合层可能出现严重破坏。

(3)由于此次阪神地震属直下型地震,竖向地震加速度也很显著(神户市记录值为  $m \cdot s^{-2}$ ),而当时设计时并未考虑竖向地震的影响,这也可能是中间层出现倒塌的另一原因。

### 1.6 附加扭转震害

由于结构构件或填充墙非对称布置所造成的附加扭转破坏在临街建筑的震害中表现最为

突出. 这种建筑的特点是沿街设厨窗而背面为实墙, 因而房屋纵向刚度中心与质量中心存在较大偏离, 震害特点是临街无墙一侧柱子严重破坏, 整幢建筑往街一侧倾倒.

## 2 震后的思考

从以上对阪神地震主要震害现象的分析, 可以得到以下几点认识.

(1) 随着城市的日益现代化, 城市生命线工程系统的抗震设防和震害预测已成为城市抗震对策的重要课题. 阪神地震再一次告诫我们, 生命线工程的破坏将使整个城市陷于瘫痪, 由此所造成的次生灾害可能比地震直接造成的经济损失要严重得多. 同时震后生命线工程能否尽快恢复运转将直接影响到震后救灾的顺利进行<sup>[2]</sup>.

(2) 在我国, 特别是福建省内广泛分布的旧式木结构与在阪神地震中倒塌的旧式民宅的结构质式非常相似, 从而不难得知国内这些木结构民宅抗御强烈地震的能力. 至于国内的一些木结构庙宇, 由于其梁、柱截面都较大, 结点榫合也很讲究, 因而这类木结构的抗震性能将大大优于普通民宅. 因此在我国除了石结构房屋需要进行抗震加固外, 对大量仍在使用的旧式木结构民宅地震对策的研究同样应是我们工程界和决策部门必须重视的课题.

(3) 必须充分认识抗震概念设计的重要性, 阪神地震中出现的薄弱底层破坏和抗侧力构件不对称布置造成的附加扭转破坏都是我们工程抗震中长期强调的概念问题. 提高商住建筑底层的侧移刚度除了通常采用的增大底层柱截面外, 还可采用在底层适当设置抗震墙的办法. 如果楼层高度相差较大, 过大增大柱截面尺寸除了影响使用空间, 对提高侧移刚度也不经济, 这种情况下理想的办法是在框架结构的底层适当增设钢筋混凝土抗震墙. 另外, 要重视框架中填充墙的不对称布置对结构抗震的不利影响. 如果没有进行空间分析, 就必须辩明结构的易损部位进行必要的构造处理和适当的加强, 以提高其强度和变形能力.

(4) 框架柱箍筋在框架结构抗倒塌中起着至关重要的作用. 纵观阪神地震中遭受严重破坏或倒塌的钢筋混凝土框架结构, 均可发现柱子配箍量太小, 许多柱箍筋间距达 300 mm, 并且多数箍筋采用 90°弯钩. 这样除了造成柱子本身抗剪强度不足外, 也起不到防止纵筋压屈和高轴压比下约束混凝土以提高其变形能力的作用.

(5) 此次地震中破坏的房屋基本上为多层房屋(木结构、砌体结构和钢筋混凝土结构), 与此形成鲜明对照的是高层建筑却只是出现一些非结构构件的破坏. 这个现象作为本次震害的一个明显特征, 同样也被地震工程界所关注. 这种现象笔者认为应从以下几个方面来综合分析: 首先, 日本高层建筑的建造时间较晚, 在 1923 年日本关东大地震中, 8~9 层由欧美移植的高层建筑遭到了严重破坏, 所以当时日本普遍认为高层对抗震是不利的, 故之后日本的建筑法规把建筑物的高度限制在 31 m 以下. 在此之后日本对其高层建筑的发展一直持非常审慎的态度. 后来由于强震仪的研制、地震记录的积累和电子计算技术的发展使结构的直接动力计算成为可能, 加上当时工业化的生产技术和地产业的迅速发展, 日本建筑法规才于 1963 年取消了建筑物高度上的限制; 其次, 即使同一时期建造, 日本的高层建筑的设计和审核程序要比多层建筑复杂和严格许多. 虽然建筑的高度限制取消了, 但多层建筑只须根据当时的建筑法规按静力法进行设计, 而高度超过 45 m 的高层建筑却必须进行二次设计<sup>[1]</sup>(类似于我国现行的两阶段设计方法), 即除了象多层建筑进行第一次静力设计外, 还必须对按第一次设计的建筑物输入适合于该建筑场地的地震波进行弹性和弹塑性动力分析, 然后将地震反应分析的结

果对内力和变形进行校核、修正才得出最后的设计。所完成的设计还必须经过高层建筑物结构评定委员会进行安全度方面的评定,然后再由日本建筑大臣审批后才能建造。由于进行了直接动力设计,建筑整体具有较好的抗震性能,而严格的审查程序又保证了设计过程的周密程度。这一点多层建筑是无法与之相比的。另外,日本的高层建筑全部采用钢结构和钢-混凝土组合结构,其材料本身具有强度高和延性好的优点。而多层钢筋混凝土结构在延性方面却具有两重性,如果没有有效保证延性的措施,在强烈地震下容易因变形能力不足而倒塌,而神戸市震坏的多层钢筋混凝土结构均不具有保证延性的措施。

(6)从总体上看,日本在 1981 年新耐震设计法颁布以后建造的房屋在这一次阪神地震中多数都表现出了具有较好的抗震性能。由于我国现行的“建筑抗震设计规范”中的三水准两阶段设计方法及建筑物的抗倒塌措施与日本的“新耐震设计法”有许多相似之处,因此日本阪神地震不仅验证了日本现行设计方法的合理性,同时也是我国现行抗震设计规范一次很好的借鉴机会。

(7)任何一次地震灾害都表明,地震造成的人员伤亡和经济损失主要是由于房屋、工程设施、设备的倒塌、破坏所造成的。有人统计了世界上 130 次伤亡巨大的地震灾害资料,认为 95% 以上的伤亡是由建筑物的倒塌造成的。美国科罗拉多大学的比兰姆教授曾这样评述:“造成伤亡的是建筑物而不是地震”<sup>(3)</sup>。因此提高房屋、工程设施的抗震能力是减轻地震灾害的根本途径。希望我们工程师能牢记触目惊心地震灾难,在认真做好本职工作的同时,大力宣传、普及抗震防灾知识,提高群众的应急能力,以最大限度地减轻地震灾害。

### 参 考 文 献

- 1 武藤清. 结构物动力设计. 滕家禄等译. 北京:中国建筑工业出版社,1984. 1~147
- 2 郭增建,陈鑫连. 城市地震对策. 北京:地震出版社,1991. 160~203
- 3 建设部抗震办公室编. 建筑抗震设计规范统一培训教材. 北京:地震出版社,1991. 1~91

## Discussions on the Phenomena of Earthquake Disaster in Kobe, Japan

Guo Zixiong

(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

**Abstract** Beginning with the earthquake occurred in Kobe, Japan, January 17 as the clue, the phenomena of earthquake disaster are discussed briefly. Based on an analysis of main earthquake disaster, a design is suggested for preventing similar earthquake disaster.

**Keywords** 1995 earthquake in Kobe, weak ground floor, aseismic design