

现代建筑材料和结构构件

和田章¹, 曲哲²

(1 日本东京工业大学, 东京; 2 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150090)

[摘要] 根据历史上建筑结构材料的变化, 结合历次震害结果, 介绍了木结构、钢筋混凝土结构、钢结构、型钢混凝土混合结构在实际工程中的应用、结构特性、抗震性能, 分析了结构在抗震设计中需注意的关键问题及需要采取的相关技术措施, 强调了结构的塑性变形性能和强度问题, 通过对比和实例举证, 展望未来城市的发展方向, 以期实现从抗震建筑到弹性城市的转变。

[关键词] 建筑材料; 木结构; 钢筋混凝土结构; 钢结构; 型钢混凝土混合结构; 抗震性能; 塑性变形; 强度
中图分类号: TU366, TU375, TU391, TU398 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2014)07-0001-08

Materials and structural members for buildings in our age

Akira Wada¹, Qu Zhe²

(1 Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan;

2 Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150090, China)

Abstract: According to the changes of structure materials in history, combining with successive earthquake damage results, the application in actual engineering, structure characteristics and seismic performance of the wood structure, RC structure, steel structure and steel reinforced concrete composite structure were introduced. The key problems that needed to note and the related technology measures that should to be taken during seismic design were analyzed. The plastic deformation performance and intensity problem about structure were emphasized. Through contrast and instance proof, the development direction of the city in future is prospected to come true the shift from seismic building to elastic city.

Keywords: construction material; wood structure; reinforced concrete structure; steel structure; steel reinforced concrete composite structure; seismic performance; plastic deformation performance; intensity

1 建筑结构材料

1.1 材料的应力和应变

自人类建筑活动开始以来, 土壤、木材、石材等自然材料就已经被广泛地应用(图1)。而如今, 木材、混凝土和钢材是最常使用的建筑材料。



图1 桂离宫(日本京都)

图2为典型建筑材料在压力和拉力作用下的单轴应力-应变关系曲线, 为方便比较, 忽略不同材料强度和刚度的巨大差异, 以相同的比例给出曲线。由图2可知, 混凝土的抗压强度与木材的相近, 而抗拉强度远小于木材的; 铸铁仅抗压强度最高, 而超高强度钢(低碳钢)不仅具有优于其他材料的高强抗压和抗拉强度, 而且在单调或循环荷载作用下还具

有很大的延性。

1.2 历史上材料强度的变化

图3主要比较了常用建筑材料, 包括石材、砖、混凝土、木材、铸铁、锻铁、钢材和铝材的抗拉和抗压强度、密度和刚度(杨氏模量)在三个不同时期内的

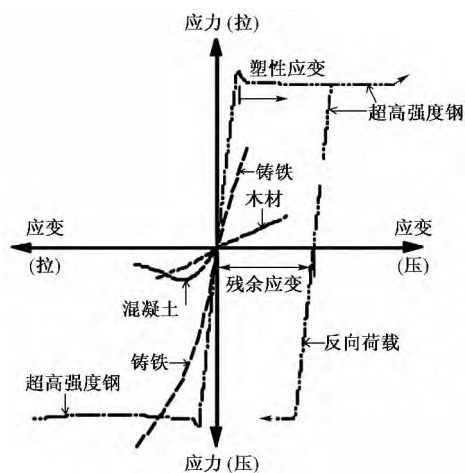


图2 典型建筑材料的单轴应力应变曲线

作者简介: 和田章, 日本东京工业大学名誉教授, 日本建筑学会名义会长, 曾在美国华盛顿大学和麻省理工学院担任客座教授, 其研究领域包括建筑结构工程、抗震设计、隔震结构、损伤控制设计、计算机模拟结构等。

材性变化,即工业革命时期(1800 年左右)、纽约帝国大厦等高层建筑建造时期(1930 年左右)以及现代时期(1990 年左右)。

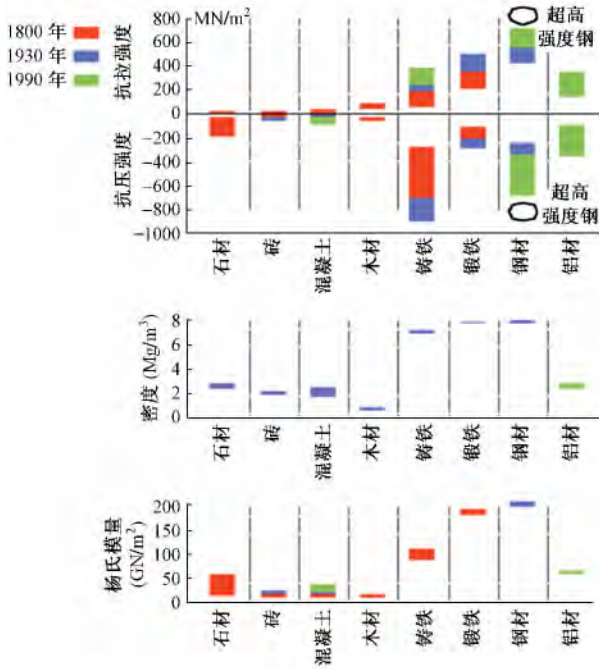


图3 历史上建筑材料的强度、密度和杨氏模量

由图3可知,钢材的抗拉强度明显优于其他材料,刚度(杨氏模量)很大,密度也比木材等材料大得多,而且钢材的比强度(材料的强度与密度比)也优于其他材料。

然而,有意思的是,在上述提到的材料中,混凝土虽然具有最低的比强度,但如今却在全球范围内广泛应用。这可能要归功于混凝土低廉的价格。除此以外,由于混凝土的比强度较低,其构件也通常是大型、重型构件,可浇筑成一个完整的连续体系。因此,混凝土结构很容易满足人类活动对空间的隔热和隔音等要求。而且对于结构构件,特别是对于地面上受到压力、弯矩和剪力联合作用的建筑柱而言,相比抗拉强度,抗压强度往往是更重要的考虑因素。这也是为什么像混凝土这样抗压强度较高但抗拉强度较低的材料却能被如此广泛应用的原因。

2 木结构

2.1 传统和现代木结构

现存几百年甚至超过一千年的日本传统木结构建筑物(图4),如奈良的东大寺佛像、法隆寺的金堂和五重塔,都很好地证明了木材不仅可以作为建筑材料成功应用于小型住宅,还可应用于大型、壮观的建筑物。然而,随着技术的高速发展,由于大型木构件供应短缺以及不断增长的快速建设需求,传统木

结构已渐渐不再适用于现代建筑。

目前,在日本虽然也有像出云巨蛋这样的大跨度木结构,但更多的是小型住宅木结构,木结构房屋是日本住宅的最大组成部分。最近,采用木结构的多层学校、公寓及购物中心即将建设,在建造过程中,木结构的防火问题似乎比强度问题更值得关注。

2.2 木结构的特性

通常情况下,人们会认为木材的性能弱于混凝土和钢材。实际上,测得的日本扁柏标准试件强度几乎与普通混凝土的抗压强度一样,但其密度仅为普通混凝土的1/5。因此,木结构能够用来建造体育馆、音乐厅及餐厅等大空间建筑。

木材本质上是正交材料,平行于构件纵轴的纤维方向的强度较大,正交方向相对较弱,容易受到挤压和撕裂。在木结构中,木构件难免会受到正交于纤维方向的作用力,且由此产生的局部变形可能对结构的整体变形有很大影响,因此不能忽略这些影响。

木材在干燥时难变形、潮湿时易变形。若木结构承受外部荷载时受湿度影响,高湿度时弯曲变形增大,湿度降低时变形不能恢复,这种现象使木结构产生加速蠕变,称为机械吸湿蠕变,在大跨木结构设计时应给予足够的关注。



(a) 既存的五重塔(日本京都)



(b) 清水寺中支承在平台上的木框架

图4 传统木结构建筑

2.3 建筑结构的抗震性

在日本,设计的所有的建筑结构均能抵御多级强度地震(从重现期数十年的小震到重现期数百年的大震)。目前,普通建筑结构的抗震等级为二级,根据设计规范规定,一级抗震要求结构在小震作用下保持必要的弹性性能并且在震后可及时使用;二级抗震要求结构在大震中不倒塌,为居住者提供足够的保护,但建筑可能会因严重破坏而导致震后无法恢复。

抗震设计的基本原则不仅适用于木结构,也适用于下文介绍的钢筋混凝土结构和钢结构。为了实现二级抗震性能目标,保证结构具有足够的塑性变形能力以避免破坏或倒塌是非常重要的。

2.4 木结构的抗震性

首先在工厂将木材加工成木构件,然后现场组装成结构,而连接时需要在构件上钻孔,这些孔洞削弱了节点的强度和刚度,在大地震作用下可能会在孔洞处出现非弹性变形集中现象。而非弹性变形可能是由木材局部受压、钉子变形和钉子拔出所引起的,因此在设计中均应充分考虑这些因素的影响。另外,为防止结构过度变形,应适当增强结构体系的完整性,充分利用构件和节点的性能。

现代木结构的节点通常使用金属连接件,这可能导致节点强于连接梁或柱,非弹性变形出现在梁或柱上,而不是出现在节点上。一旦超过变形限制,木构件会像筷子折断那样突然断裂。为防止木构件脆性断裂,通常将节点设计得弱于框架构件,这样塑性变形及损坏便可限制在力学性能更容易控制的节点中。

3 钢筋混凝土结构

3.1 混凝土特性

混凝土和钢材的热膨胀系数几乎一样,可确保两种材料结合在一起时产生同步热变形。因此,钢筋混凝土结构(图5)的一个重要特点就是环境温度的变化仅会在钢筋混凝土构件中引起很小的界面应变。

如1.1节所述,混凝土抗压强度较大但抗拉强度较小,受平面内纯剪切作用时,混凝土主拉应力与剪力呈 45° 角,且主压应力与主拉应力正交。主应力值可从“莫尔应力圆”中计算得到,且只要混凝土不发生开裂并保持弹性,主拉应力值就与作用的剪切应力相同。当主拉应力达到其抗拉强度时,混凝土开裂,这时剪切应力达到了混凝土的抗拉强度,也就是说,混凝土剪切强度与其抗拉强度相同。

普通混凝土抗压强度大约在 $12 \sim 100\text{MPa}$ 之间,而其抗拉强度和抗剪强度仅为抗压强度的

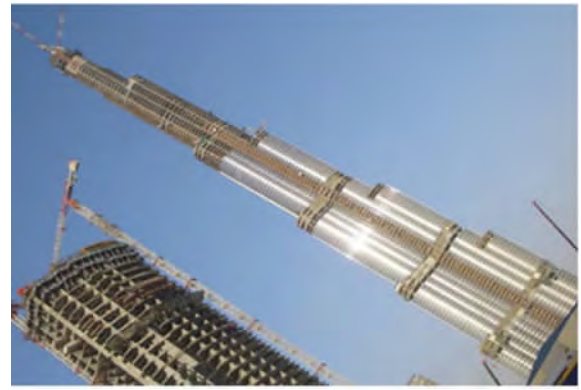


图5 超高层钢筋混凝土结构

1/10,对于高强混凝土,抗拉强度与抗压强度的比值会更小。

3.2 混凝土和钢筋的关系

钢筋主要用于加强缺少拉、剪抵抗力的混凝土。平行于柱或梁纵轴方向的钢筋称为主钢筋,正交于轴向的钢筋称为横向钢筋;柱中的横向钢筋也称为箍筋或环箍,梁中的横向钢筋称为箍筋或腹筋。

当应力水平较低时,钢筋混凝土结构近似弹性体,钢筋的贡献微乎其微。然而,混凝土开裂后,大部分拉力将由钢筋承担。如果钢筋数量不足,在混凝土开裂后,钢筋不能承担混凝土开裂后产生的拉力可能会立即屈服,混凝土横截面上裂缝迅速发展,导致构件发生脆性断裂。为防止这种脆性破坏,混凝土结构设计规范规定了最小配筋率。如果钢筋数量合理,钢筋将能抵抗混凝土开裂时所释放的拉力,阻止裂缝进一步发展;而如果外部荷载继续增加,构件受拉一侧的其他地方将会出现新的裂缝。

混凝土和钢筋之间的粘结作用在裂缝中应力传播时起着重要的作用。如果混凝土和钢筋之间没有粘结,初始裂缝将随着外荷载的增加继续发展,且由于其他部位的混凝土拉应变没有增加,便不会出现新裂缝。另一方面,如果混凝土和钢筋之间充分粘结,裂缝附近的钢筋应变将大于其他部位钢筋的应变,且钢筋同周围混凝土协调变形来共同抵抗拉力,一旦混凝土的拉应变超过其开裂限值,混凝土便会产生新裂缝,与混凝土和钢筋之间没有粘结时只有一条主裂缝不同,新裂缝会一个接一个地出现,且宽度较小的混凝土裂缝沿构件轴向分布。

梁伸入柱中的主要钢筋需较好地锚固,以便将梁端弯矩传给柱。考虑到钢筋粘结的重要性,具有多种粗糙表面的变形钢筋被广泛用于现代混凝土结构中,以增加钢筋与混凝土之间的粘结力。

由于混凝土承担了大部分压力,仅能抵抗较小的拉力,因此即使结构受到很大的反向荷载,一些钢

筋也总是承担拉力。如柱和梁中的横向钢筋承受外部反向荷载时,钢筋的内力也总是拉力。由于钢筋承受的拉力的作用,加载过程中塑性变形累积,即使移除外部荷载,混凝土裂缝仍然会存在,这些裂缝会使钢筋混凝土构件产生相当大的膨胀变形。以一个高宽比为2或3的钢筋混凝土短柱为例,短柱在横向循环荷载作用下产生严重的斜裂缝,斜裂缝的张开致使柱产生明显的横向膨胀变形。虽然混凝土本身的膨胀变形是微不足道的,但此时若横向钢筋的数量不足,由横向膨胀变形产生的拉力将使横向钢筋屈服,加速斜裂缝发展,柱就会丧失轴向承载能力。

3.3 钢筋混凝土柱的设计

钢筋混凝土柱设计中另一个非常重要但常被忽略的问题是主筋的屈服强化。柱承受结构自重及人类活动荷载,而风荷载和地震作用等外部荷载进一步对柱施加了弯矩和剪力。在钢筋混凝土结构设计中,当判断出柱的计算强度不足以承担预估荷载时,工程师更倾向于增加主筋的数量而不是增大横截面的尺寸。一个原因是钢筋强度为混凝土强度的10倍左右,增加钢筋对柱轴向和弯曲荷载承载能力的提高是非常有效的;另一个原因可能是从建筑师的角度来考虑的,在建筑规划时,较小的柱截面得到更多的空间及增加空间灵活性是非常有利的。

众所周知,细长的钢筋一旦失去混凝土的约束,便非常容易屈曲。由于在较大的轴压比以及弯矩和剪力联合作用下,混凝土会出现过度开裂,小截面柱在大震中很可能会出现混凝土的剥落(图6)。这样,钢筋由于失去了混凝土的约束,在随之而来的压力作用下会立即屈曲,致使原本预计同混凝土协同工作以弥补其缺陷的作用就不能实现。历次地震也证明了由于细长超筋混凝土柱的失效而导致结构发生灾难性破坏的事实。



图6 钢筋混凝土结构地震破坏(中国四川)

3.4 柱的剪切破坏

1968年M7.9级Tokachi-oki地震袭击了日本

西北部,报道称该地震造成许多学校建筑大量破坏,且大部分破坏由柱的剪切破坏引起。根据研究人员在钢筋混凝土结构领域的大量研究成果,日本建筑学会(AIJ)在1970年出版了改进的抗震设计建议,并被于1981年生效的修订版《日本建筑标准法》采纳。新抗震法规的一个主要进步是增加了混凝土柱所需的箍筋数量。1995年日本神户大地震后进行的地震调查研究表明,1970年以后(特别是1981年新抗震法规成为强制性规定后)设计和建造的混凝土结构破坏程度均显著小于1970年之前的混凝土结构。

再次强调,尽管日本神户大地震验证了新抗震法规的成效,但是钢筋的重要性也不应被过度强调。采用正确的结构概念以及确定适当的构件尺寸对混凝土结构的安全性总是非常重要的。一个缺乏混凝土结构设计概念的建筑师,如果在设计初期阶段不与结构工程师协商,可能会设计出过小的横截面尺寸的柱和剪力墙等混凝土构件。在以后的设计阶段中,如果结构工程师采用这些构件尺寸,毋庸置疑,即使构件利用了大量钢筋来满足设计规定,结构性能也一定会很差。因此在建筑设计的初期阶段,必须尽早意识到仔细考虑结构体系以及重要构件尺寸的重要性。

3.5 剪力墙

剪力墙也是混凝土结构的重要抗震构件。在1923年日本关东大地震和1995年日本神户大地震中,一些破坏较小的建筑结构已证实了剪力墙的有效性,这些建筑破坏较小的原因是在结构的两个主方向合理布置了剪力墙。

剪力墙平面内抗侧力较大,剪力墙横截面方向的厚度与纵向宽度相比非常小,因此平面外抗侧力可忽略。考虑到剪力墙的这一特性,在建筑结构的两个主方向优先布置剪力墙以抵抗地震作用的两个水平分量。假设两个主方向剪力墙的抗侧力是相同的(例如100),可以确定剪力墙在任意方向提供的抗侧力都大于主方向的抗侧力(例如在45°方向上为141)。换言之,剪力墙只需进行两个主方向的结构计算,就可以保证其他方向的强度。

相比之下,延性框架中的混凝土柱通常承受双向弯矩和剪力。为更好地控制强震中延性框架的行为,应使柱足够强,即保证柱在连接梁屈服之前不会屈服。为达到此目的,新西兰的一项研究表明,若考虑地震作用与建筑的主轴方向呈45°角,则节点周围柱的平面内抗弯强度应为节点周围平面内梁抗弯强度的1.8~2.0倍。

然而,日本和中国抗震规范规定的柱梁强度比仅为1.3左右。如果考虑 45° 方向的地震作用,很显然这个比值不足以确保上述提到的屈服顺序,因为节点周围所有梁会将自身方向的弯矩传递给柱,柱会因受到双向力作用而过早屈服。

在不考虑抵抗强震的缺陷时,不布置任何剪力墙的延性钢筋混凝土框架仍然在全世界范围内的地震多发区中广泛使用,其原因是框架结构理论发展成熟,且其结构计算比剪力墙结构要简单得多。但这绝不是最好的做法,比上述这些更重要的是应该考虑强震作用下结构的安全性,例如不能忽略合理布置的剪力墙在抗震中的关键作用。在混凝土结构中采用剪力墙有许多优势。目前日本设计的剪力墙不承担任何竖向荷载。因而,在强震作用下,剪力墙中的裂缝不会造成结构竖向荷载承载能力的任何退化,且柱本身足以承担结构自重。另外,沿结构高度方向连续布置的剪力墙对控制结构振动时的变形模式及防止薄弱层的破坏是非常有效的。这样,结构中的所有构件都能协同工作以实现更好的抗震性能。

4 钢结构

4.1 钢结构特性

从英国工业革命时期,钢铁就开始在桥梁和建筑的建造中应用。著名的案例是伦敦世博会(1851年)建造的水晶宫以及巴黎世博会(1899年)建造的埃菲尔铁塔。由埃菲尔设计的纽约自由女神像是钢铁结构。现在,钢材已经广泛应用在超高层建筑、大跨体育场的屋顶、钢铁厂等工业建筑、学校健身房、超市以及大型仓库中。最近的数据表明,日本的钢结构建筑的总建筑面积比木结构的略大,钢结构在日本已成为广泛使用的一种结构。

钢结构与混凝土结构相比具有如下优势:钢结构自重比混凝土结构小得多,可减少基础工作量;钢结构构件通常在工厂制作,然后运到现场通过高强螺栓和焊接组装成结构。钢结构的施工周期比混凝土结构短得多,且在建筑设计时允许有更大的空间灵活性。

4.2 钢结构的力学性能

从力学观点来看,钢构件有许多有利的特性。钢构件的高强抗压和抗拉特性可使其能有效地承担压力、拉力及弯曲作用。在使用阶段受到外部荷载作用时,钢构件为弹性变形;在外部荷载作用下屈服时,钢构件能在不丧失强度的情况下维持较大的塑性变形。

钢材轴向应变的弹性极限大约为 $0.1\% \sim 0.2\%$,而断裂时轴向应变能超过 20% 。换句话说,

钢材的塑性变形可达到其弹性极限的100倍。此外,超高强度钢的屈服强度约为其极限强度的 $60\% \sim 80\%$,且此屈服强度可维持至塑性应变增大到约 2% 。此后,随着外部荷载作用的增加,钢材强度达到极限强度,这种与众不同的特性即为“应变硬化”,使得塑性变形不仅存在于独立构件中,也存在于构件之间,结构便可充分利用较高的塑性变形特性来抵抗强风和地震作用。

4.3 钢结构的关键问题

许多经验教训可从大跨钢结构(如承受较大雪荷载的体育馆和仓库)的破坏以及强震作用下钢结构建筑的损坏中得出。下文将讨论其中的一个关键问题。

三角钢框架及三角钢桁架通常用于体育馆和仓库等大跨结构的屋顶。框架或桁架的跨度约为 40m ,平行框架或桁架间的间距约为 8m 。次梁安装在平行框架或桁架之间以提供平面外支撑,在其上部铺设更小的次梁。通过这种方式,结构网格变得越来越细,直到可以安装屋面材料。

在这个层次中,三角结构是最重要的抗力构件。正交的次梁安装在主要构件上,以防止主要构件的平面外屈曲。然后,安装结构的更低层次的构件,如铺设在次梁上的更小的梁。在这样一种结构中,构件以这种方式相互联系,若一个独立构件突然失效,如在不可预料的大雪荷载作用下,有可能致使其他构件逐渐失效,最后导致整个结构的倒塌。

更具体地说,这种逐渐失效至破坏对在设计中追求轻质及突出强调材料效率的大型结构来说更为关键。21世纪初,高层建筑纽约世界贸易中心在2001年9月11号被恐怖分子袭击,燃烧超过 1h 后,整栋建筑轰然倒塌(图7),这是上述提到的建筑结构逐渐失效至破坏的一个典型案例。建筑在平面内强度足够大,但在平面外缺少具有刚度和强度的周边框架支撑,虽然102层的楼板体系对周边框架提供了平面外支撑,通过这种方式也可获得非常有效的结构体系,但却忽略了结构的稳定性。由于飞机的碰撞和长时间的燃烧,某些楼层楼板坠落,导致周边框架由于缺少平面外支撑而发生屈曲,最终导致整个结构完全倒塌。世界贸易中心破坏的钢框架现保存于美国马里兰州盖瑟斯堡市美国国家标准与技术研究院。

4.4 钢结构的抗震设计

1994年美国诺斯里奇地震及1995年日本神户大地震中出现了大量钢结构建筑的破坏。

对于带有刚性梁-柱节点的延性钢框架而言,在



图7 世界贸易中心中破坏的钢框架

强震中塑性铰可能会出现在梁端,且这些塑性铰的稳定滞回作用会消耗大部分地震能量,保护结构的其他部分。然而,工程师和研究员很震惊地发现,在这两个地震中,许多钢梁的梁端均发生了脆性破坏,大部分脆性破坏出现在受到最大弯矩的梁根部的焊缝中,脆性裂缝竟然传到了柱中。

通过研究脆裂发生的原因,提出了一些预防措施:一种方法是扩大梁端翼缘宽度,这样可使塑性铰远离焊缝;另一种是引入一些特殊的耗能设备,如不会发生屈曲的特殊支撑(也就是屈曲约束支撑)和钢板剪力墙来消耗地震输入能量,以减小梁和柱的塑性变形。具有这种耗能设备的结构称为被动抗震控制结构,这些结构最早应用于高层建筑,后来也应用于超市等多层建筑。

钢结构中的这些设备特别像钢筋混凝土结构中的混凝土剪力墙。支撑和钢板剪力墙先于主框架屈服并开始消耗地震能量,从而保护主框架免于发生过度变形,且这些设备并不承担竖向荷载,没有增加结构倒塌的危险性。不仅如此,这些设备如果在强震中损坏,也很容易被替换。

就抗震能力而言,钢结构的塑性变形性能与木结构和钢筋混凝土结构一样重要。然而,与将木结构的塑性变形优先限制在节点中相比,钢结构的塑性变形最好分布在钢构件中而不是集中在节点中,

这样可以增加钢结构的整体变形性能。为防止节点发生断裂,设计时一般遵循节点强于相连构件的原则。

能量消耗的数量是与塑性变形而不是与塑性应变直接相关的。需要指出,塑性变形是沿屈服构件长度方向产生的塑性应变的积分,如果只是结构的一小部分屈服,如一个节点,即使产生过度的局部塑性应变,塑性变形可能仍然较小;另一方面,如果在钢结构构件中塑性应变分布较广,当局部节点没有产生过度的塑性应变引起断裂时,构件的塑性变形仍可能较大。用这种方式可增加整个结构的变形性能。

5 型钢混凝土混合结构

5.1 型钢混凝土结构的特性

美国的高层建筑在建造初期沿用了传统欧洲砖石建造的建筑风格。然而,随建筑高度的增加,砖石结构不能再支承自身的重量。因此,钢被嵌入砖石柱和梁中来提供额外的强度。在20世纪30年代的纽约和芝加哥的高层建筑中,钢几乎承担了所有的荷载,而砖和混凝土块只用于增加建筑刚度并为钢提供防火保护。

日本早期建造的建筑也应用了相同的施工方法,自此,由钢柱和钢梁嵌入钢筋混凝土中形成的型钢混凝土组合结构(SRC)开始被纳入设计考虑。这种结构体系在日本首次应用于1923年5月建成的日本兴业银行的办公大楼,建成几个月之后,这幢建筑便经历了1923年9月的日本关东大地震,并幸存下来且几乎没有被破坏。在这一成功案例的鼓舞下,日本开始将SRC结构广泛应用于高度小于60m的建筑中。

这种结构体系在利用了钢筋混凝土结构和钢结构的优势的同时规避了它们的缺点。如上所述,钢结构构件具有易屈服、局部屈曲及耐火性较差等缺点,均可通过将钢构件嵌入混凝土来弥补;同时,钢筋混凝土柱在较高轴向力作用下的脆性剪切破坏可通过嵌入钢构件来避免;通常受自身重量限制的传统钢筋混凝土梁的跨度也可通过嵌入钢构件来增加。

5.2 高层建筑

在高层建筑中,SRC结构通常用于地下室和底部楼层以获得足够的刚度和强度,而上部楼层则采用钢结构。

日本建筑学会出版的规范中有SRC结构的详细设计方法,其中包括采用叠加法计算SRC构件的强度。在轴力、弯矩和剪力联合作用下,采用该方法

计算 SRC 构件的强度时,可简单地将强度视为钢筋混凝土部分及钢结构部分的强度之和,钢筋混凝土部分及钢结构部分的强度可通过现有计算方法计算。在某些情况下,通过这种方法计算的单个构件的强度在叠加之前,需要乘以一定的折减系数来进行调整。

在 20 世纪 90 年代,通过在圆形或方形钢管中内灌高强混凝土形成了另一种型钢混凝土构件,即钢管混凝土构件或称为 CFT,它具有更强的轴向承载能力。近年来,这种构件已经被广泛地用作高层建筑的柱。在日本,CFT 的横截面通常为 80cm × 80cm 的矩形管及直径达 2m 的圆形管,直径达 3m 的钢管混凝土柱现已在美国有应用。

6 结构的塑性变形性能和强度

6.1 超高强度钢的前景

上面已经讨论了木结构、钢筋混凝土结构、钢结构及型钢混凝土结构的特性。在日本、美国西海岸、中国、菲律宾、意大利,以及土耳其、阿尔及利亚、伊朗及印度等均发生过大地震。在所有地区,建筑结构的抗震设计都是一个不可避免的社会问题,正如上面讨论所给出的建议,结构的塑性变形性能对其在强震中是否能幸存下来是至关重要的。

回顾过往 21 世纪初,结构材料的发展为人类历史和文明的发展作出了很大贡献,而超高强度钢不仅具有更高的强度,还具有令人满意的可循环性及耐久性,预计在未来建筑结构的会发挥重要的作用,其抗拉和抗压强度如图 2 所示。

随着钢材强度的增加,建造相同建筑所需的用钢量减少,结构自重降低且结构构件变小。换句话说,相同尺寸的结构构件,采用高强材料可建造更大型的结构。

6.2 结构的塑性变形性能和强度

上面提到的所有结构,从木结构到型钢混凝土结构,甚至是超高强度钢结构,它们的塑性变形性能和强度都是同等重要的问题。现有大量文献已经说明结构的塑性变形性能可通过消散地震输入能量来提高建筑结构的抗震性能。下面将讨论塑性变形性能的另一个重要作用,即将结构维系在一起并使其充分利用各个独立构件的能力。

结构由许多构件组成串联系统或者并联系统。在很多情况下,串联和并联系统以复杂的方式组合成结构体系。当串联系统的一个构件达到极限状态时,结构体系即达到极限状态,但并联系统并非如此,这也是并联系统相对串联系统的基本优势。

并联系统中,具有不同力学行为的构件对外部

作用的抵抗力可能会截然不同。延性构件和脆性构件构成的并联系统的强度示意图 8。当一个构件在保持强度不变时仍能具有较大的塑性变形,即为延性构件。如果一个并联系统由这样的延性构件组成,则系统总强度即为各个构件强度的总和。在理想的情况下,并联系统中的所有构件将共同工作来承担外部荷载作用。对于由脆性构件组成的并联系统,则是另外一种情况。当受到外部荷载作用时,系统中的构件开始变形,个别构件达到变形限值时,将先于其他构件失效并退出工作,留下其他构件继续承担外部荷载。随着荷载的持续增加,系统中的构件接连失效退出工作,系统此时的总强度将远小于所有构件强度的总和。这也是建筑结构倒塌的一个非常重要的原因。类似于多米诺骨牌的倒塌、链条破坏、接连失败或连续性倒塌。

塑性变形性能在防止建筑结构倒塌以及在结构承受超出设计荷载的更大的外部荷载时确保结构安全方面起着关键作用,这种特性也可称作结构的冗余度。

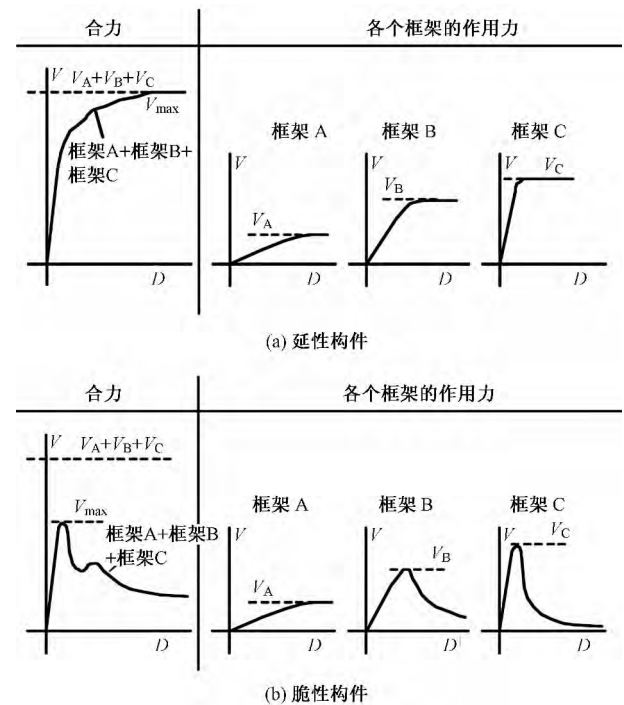


图 8 延性构件和脆性构件构成的并联系统强度示意

7 从抗震建筑到弹性城市

7.1 城市的抗震性能

通过许多相关研究和工程实践提高了建筑结构的抗震性能,并发展了多种类型的抗震结构。结构按抗震设防从高到低,有隔震结构、被动控制结构、基于强度的抗震结构以及延性结构。在技术高度发展的今天,只要未来地震的特征和强度不超过设计

预期,相信以上四种类型的抗震结构都会表现出预期的抗震性能。然而,在大自然面前,结构工程师不应该对技术感到骄傲。因为,1995年的日本神户大地震后公布了关于延性结构整体抗震性能中出现的许多意想不到的问题,而这些延性结构在日本神户大地震之前曾被认为是最可靠的结构,但是该种结构即使在地震中不会倒塌,地震过后也会由于过度的变形而不可修复,这种结构的抗震性能并不能满足社会需求。

地震是一种自然现象,建筑结构抗震设计最困难的问题在于对地震预知甚少,任何关于未来地震的大小和发生时间的预测都是不可靠的。大地震的发生概率低,并不代表不会发生。抗震设计时,由于需要平衡地震安全性和建筑经济性,一般不考虑这样的大地震,但就城市安全而言,这更像是与自然的赌博。单体建筑的寿命仅约为60年,而由大量单体建筑构成的城市则可能会存在几百年甚至上千年。设计和建造的抗震建筑可抵御的抗震强度是按照单体建筑的寿命确定的,似乎不足以保证寿命远长于单体建筑的整个城市的安全。另一方面,如果设计的建筑旨在抵御未来可能发生的最大地震,但是在建筑几十年的寿命中这样大的地震没有发生,也是金钱和资源的浪费,这也确实存在矛盾。

7.2 城市迈向更高的抗震性能

如果不增加成本的情况下,能开发出大大改善建筑结构抗震性能的新技术,就能使建筑即使在罕遇地震作用下也可完好保存,同时保证建筑在经济及环境方面的合理性。如果设计的建筑物能抵抗重现期为1000年或2000年(相当于城市寿命)的地震,便更有可能赌赢自然。

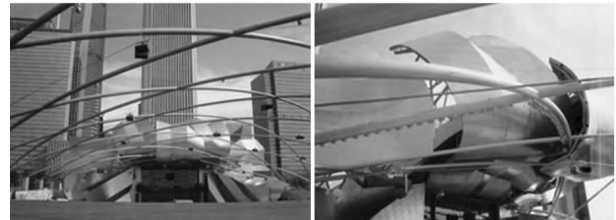
在过去的100年里,日本在明治维新时期从欧洲引入的钢筋混凝土结构和钢结构遭受了各种地震损害。21世纪初,这些结构的局限性被广泛讨论并提出了更好的技术。因此,隔震及被动控制等先进技术应该推广到更多的实际工程中,以实现可抵抗地震灾害的更有弹性的城市。

7.3 美丽建筑的结构

生命的意义是什么?建筑在其中起的作用是什么?建筑通常与衣食并列,为人类提供活动空间,免遭风雨袭击,且在地震中保证生命安全。实际上,这些只是对建筑的最低要求,但却并不能仅仅满足于。因为建筑在作为人类避难所的同时也塑造了历史和文化。

建筑是人类活动,包括文化活动的场所,图9为2004年芝加哥中心竣工的露天音乐厅——千禧公

园音乐馆。从舞台延伸的传播管道就像是圣诞礼物的巨型丝带,舞台上的乐队通过这些管道向坐在草地上的观众传播音乐。管道支撑着扬声器结构,不仅要承担扬声器自重,也需要能抵御芝加哥的强风。建造这样一个看似简洁的结构,采用新型的材料以及先进的设计、制造和施工工艺是很有必要的,它也在提醒我们要一直保有“做一些新东西”的渴望。



(a) 正视图

(b) 侧视图

图9 千禧公园音乐馆(建筑师:弗兰克·盖瑞)

参 考 文 献

- [1] TANABE, HEIGAKU. Questions and answers on earthquake resistant buildings: Wind resistance/Fire resistance/Air defense [M]. Maruzen Co., Ltd., 1933.
- [2] SANO, TOSHIKI AND MUTO, KIYOSHI. Questions and answers on earthquake resistant building: Earthquake resistant residence/Wind resistant structure [M]. Tokiwa Press, 1935.
- [3] UMEMURA, KAI. Approaching the earthquake resistant structures [M]. Gihodo Shuppan Co., Ltd., 1989.
- [4] Architectural Institute of Japan. Collapse analysis of structures: Basic principles [M]. 1997.
- [5] WADA, AKIRA, IWATA, et al. Seismic damage control of building structures [M]. Maruzen Co., Ltd., 1998.
- [6] MAINSTONE, ROWLAND J. Developments in structural form [M]. Architectural Press, 1998.
- [7] Architectural Institute of Japan. Collapse analysis of structures: Applications [M]. 1999.
- [8] FUJIMOTO, MORIHISA. History of structural technologies: Documentations and events [M]. Ichigaya Press, 2001.
- [9] Safety in tall buildings and other buildings with large occupancy [R]. International Working Group Convened by the Institution of Structural Engineers, 2002.
- [10] Report of investigation committee on the collapse of the World Trade Center Towers: WTC collapse/Damage of the Pentagon/Lessons learnt [R]. Special Investigation Committee on WTC Collapse, Architectural Institute of Japan, 2003.
- [11] BOZORGNIA, YOUSEF AND BERTERO, VITELMO V. Earthquake engineering from engineering seismology to performance-base engineering [M]. CRC Press, 2004.