

什么是组合结构

前言：2014年春季，在北京工业大学听白正先教授的组合结构课程，她提了一个问题，什么是组合结构？我忽然很不正经地想到混凝土结构就是组合结构，于是开始下面的胡扯。

结构设计中提到组合结构一般会想到钢与混凝土的组合结构，在当代高层建筑中运用较多，通过两种材料的组合，大幅提高材料使用效率，为建筑创造更多应用空间。教学中组合结构的多以两者间结合面计算和构造措施作为主要的教学要点，这样很容易将组合结构限定在特殊的应用范围，那么如何理解组合结构？

退回到远古时代，古人类开始进入茅草屋的时候，就开始使用组合结构，组合材料可能是木柱和稻草粽叶，其中木柱作为支撑结构，稻草粽叶作为建筑外围结构，组成最简单的结构体系，如果按照现代设计理念，外围稻草粽叶不作为受力构件进行计算，但仔细观察古人类的房屋结构（图1），其体量很小，外围稻草粽叶类在厚度和跨度的综合因素下，其支撑作用明显，中间的木柱主要起顶起中部高度作用，其根部不会像现代设计那样以刚接方式连接于地面上，更多会以摇摆柱的形式出现在房屋中间，因此，以现代眼光去分析，究竟是木柱重要还是稻草粽叶重要可能是很有意思的事情！

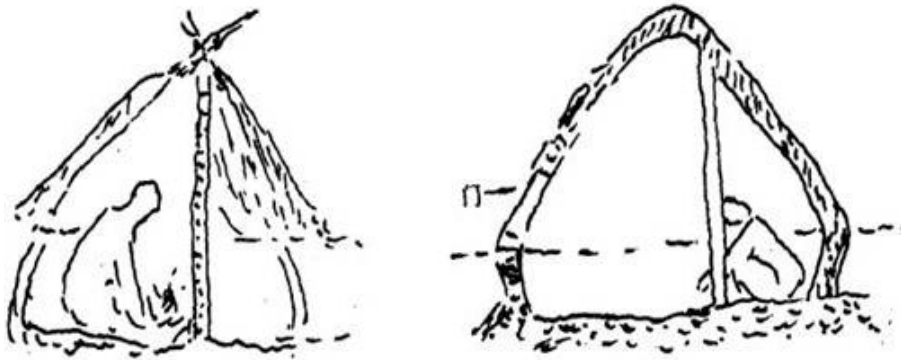


图1 古人类的房屋结构

随着人类进化脚步，房屋建造开始向近代模式发展，运用更大截面或更多数量的木材可以建造出更大面积的房屋（图2），随着跨度的发展及对厚度的限制，外围稻草粽叶的结构功能就逐步退出承载体系，最终演变成彻底的建筑围护材料，



图2 古代的房屋结构

随着木材的运用，木结构房屋才出现真正的单一结构体系，即房屋楼板和围护结构也是由木材组成，如果不是为了防雨需要，图3中的屋面瓦在结构体系中是不需要的构件，因此

出现地震时，瓦片会从屋面脱落，减轻上部荷载，木结构则保持安全。由于木板参与受力，就不能简单以杆系结构或板系结构去区分，加上中国木结构连接节点的半刚性属性，以现代计算方法还不能有效进行模拟。



图3 单一材料组成的木结构房屋

随着更多建筑材料应用，人类开始采用砌体结构，在通常意义上，砌体结构是单一材料，工程常说的“砖混结构”是指在砌体结构中增加混凝土构造柱提高抗震性能，这也是组合结构，仔细分析“单纯”的砌体结构组成，由砌块和砂浆组成，砌块通过砂浆的粘合能力才形成砌体结构，在结构设计中，主要验算砌块的抗压能力和砂浆的抗剪能力，两者缺一不可，不组合不成为结构体，这并非计算得出的结论，而是人类千百年工程实践结果。

接着看混凝土结构，一般将其定义为用水泥等胶凝材料，将砂、石料与水（可含外加剂和掺合料）按一定比例配合，经搅拌后凝固而成的材料，随着材料和比例的变化，混凝土强度等级发生变化，可以从C10一直到C100。为了改善混凝土的抗弯、抗拉性能，在混凝土中加入钢筋，出现钢筋混凝土结构，在结构设计中，主要验算混凝土的抗压、抗剪能力和钢筋的抗拉能力，两者有机结合，才能实现适筋破坏效果。

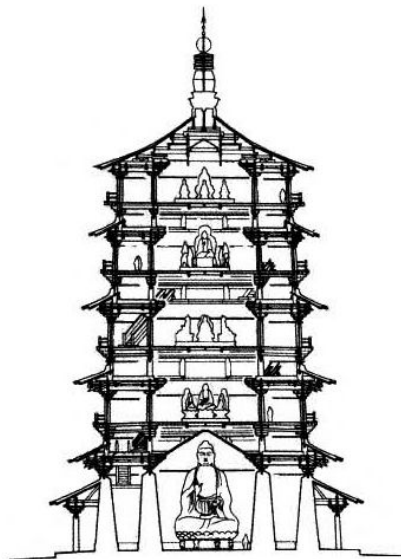


图4 应县木塔剖面图

通过上面的例子可以看出，现代建筑中，结构设计其实都是运用组合结构来完成的，而单一材料的结构体系，实际很难运用，或者说真正去运用时，在计算模拟方法上不能有效实现，最典型的例子是山西应县木塔（图4），是世界现存最古老最高的全木结构高层塔式建筑，建于辽清宁二年（公元1056年），塔高67.31米，历经数次地震冲击和人为破坏而不倒，运用现代结构计算理论和有限元模拟都不能很好解释其原委，只能以概念分析方法去推论，以卯榫接头摩擦耗能去解释，由此可以猜测一下结构设计的奥秘在哪里？

在组合结构应用，可能我们将目光更多地集中于材料运用上，不过在结构体系上一样是变化万千，比如框架剪力墙结构是框架与剪力墙的组合结构，教学中将其应用主要归结为框架结构在建筑使用上具有更大灵活性，这是客观事实，从结构安全角度出发则是变形因素的组合，当框架截面受限制的情况下，高层框架的变形过大，剪力墙能有效减少这个影响，这才是这种结构体系运用的本质（图5）。

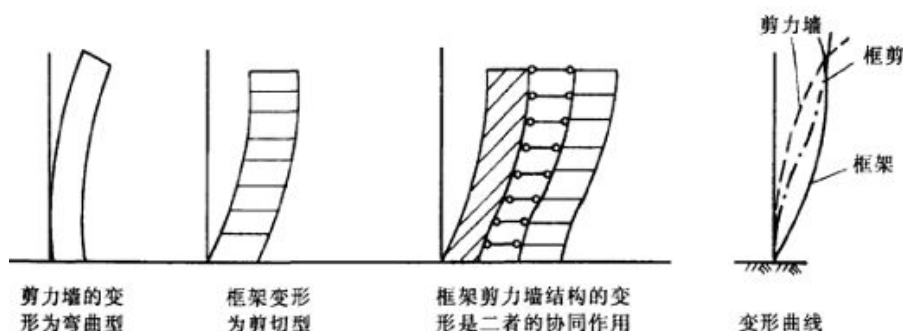


图5 框架剪力墙变形特点

剪力墙减少变形的情况下，可以避免框架因形变产生过大内力，从而控制合理框架截面尺寸，使框架体系可以适用于建筑使用功能下。仔细考察框架剪力墙体系，特别是框架核心筒体系，中部的竖向交通形式可以用多种结构形式去解决，在建筑功能上不依赖框架体系去解决，采用剪力墙形式在特定因素下是最佳选择，之所以这么说，是因为林同炎在早期就做过超过中国规范建议的高层延性框架，日本也有超过百米的4根柱框架建筑，因此结构体系的选择是多样化的，教科书喜欢将已有的案例进行分类总结，很容易固化设计思路。比如日本经常设计与中国截然不同的框架剪力墙体系（图6），在横向受力由剪力墙结构承担，纵向受力由框架结构承担，两国对于两种体系的想法也是截然相反，否则不会各自推崇各自的体系，这一点是比较有趣的，以中国规范不建议采用的日本体系，在日本经常性接受地震作用考验，其发生地震破坏的概率更大，而中国体系在日本的应用则很少。

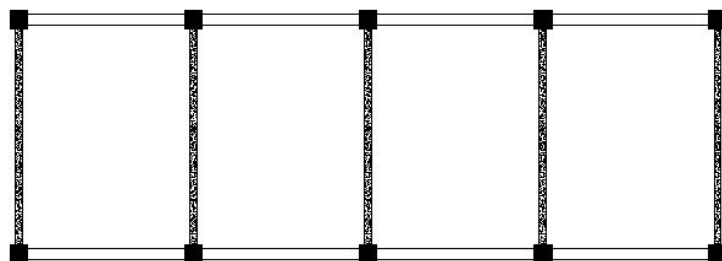


图6 双向受力结构体系

通过上面简单的描述，结合目前工程中的组合结构可以分为两种情况：一种像钢筋混凝土构件、钢骨构件、砌体结构的情况，发挥两种材料或结构体系的优势组合。另一种情况可能是工程师不太容易注意到，或者认为这是新结构体系，那就是以牺牲一种材料或体系的优势去发挥第二种材料或体系的性能的组合结构。

先以应用比较多的屈曲约束支撑为例，该构件由防屈曲支撑内芯和约束部件构成，约束部件的作用为防止内芯在受压时发生整体屈曲并约束其局部屈曲，使内芯在拉力和压力作用下都能达到全截面的充分屈服。如果采用传统支撑，在往复作用下，拉力和压力绝对值基本相同，但是支撑的抗拉或抗压能力并不相同，以钢结构支撑为例，对于长细比为 100 左右的构件，其受压承载力约为受拉承载力的一半，设计控制必须以受压承载力为准，这样就会降低钢材受拉效率，或者增加支撑截面，满足受压承载力需求，造成材料利用率降低。使用约束构件直接对支撑受压承载力提高是没有帮助的，在间接方面约束内芯防止早期屈曲，达到与受拉相同的承载力，下表对比可知，屈曲约束支撑在构件层面提高承载能力，在结构体系层面起到耗能作用，提高结构抗震安全性。

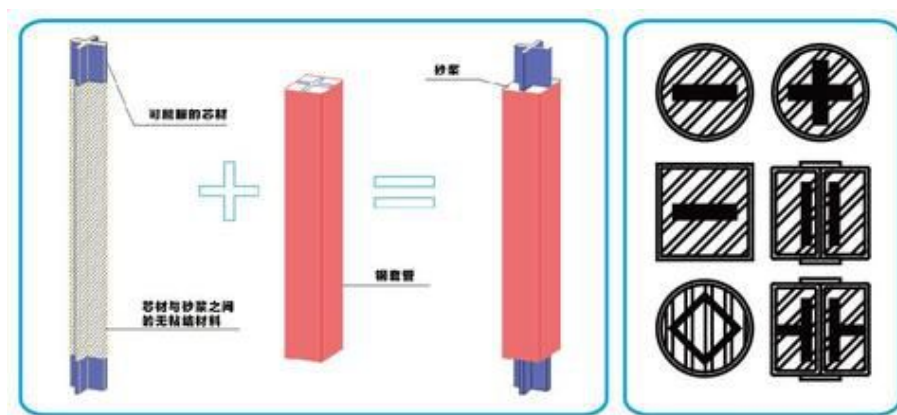


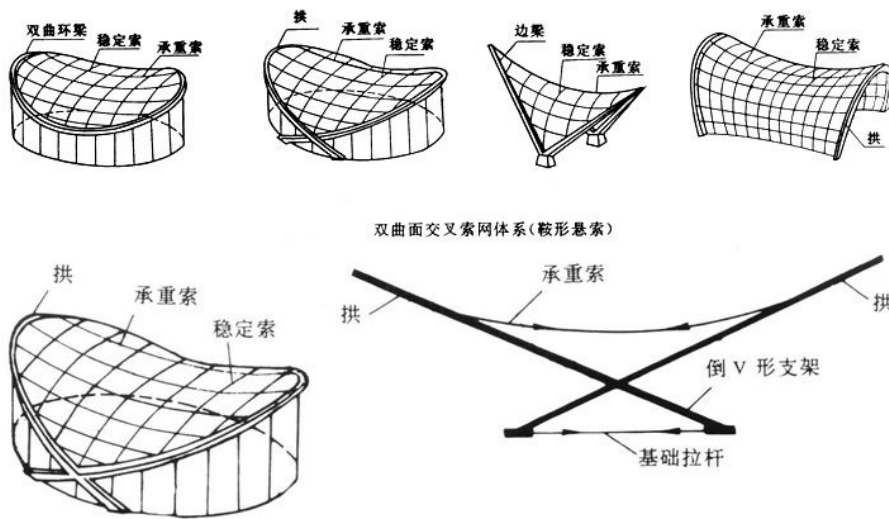
图 7 屈曲约束支撑组成

表 1 两种支撑对比

状态	传统支撑框架		屈曲约束支撑框架	
	主体结构	普通支撑	主体结构	屈曲约束支撑
小震	弹性	弹性	弹性	弹性
中震	弹性或塑性	弹性或屈曲	弹性	塑性（耗能）
大震	塑性	屈曲	弹性或塑性	塑性（耗能）
中、大震后	拆除损坏部分，影响建筑使用		检查屈曲约束支撑，更换不影响建筑物使用	

设计中经常运用这种组合，例如一根简支钢梁如果没有楼板约束，在构造上就要增加侧向支撑构件，缺少这些支撑构就会将会降低主梁的承载力，无法实现建筑使用要求。

相比两种材料的组合结构，同一种材料也可以组合，形成更有效的结构体系，例如双曲面交叉索网由稳定索和承重索共同组成，才能形成有效而稳定的结构体系，这里以牺牲支座刚度为代价来获得大跨度轻盈效果，以前苏联第 22 届奥运会中心体育场为例，平面为椭圆形，长轴 224 米，短轴 183 米，外环支座梁采用槽型钢混凝土截面，截面尺寸达到 1.75X5.00（宽）。



边缘构件为一对交叉斜拱获得的马鞍形索网

图8 双曲面交叉索网

如果说这种组合有些司空见惯，那么以常用的框架结构来说明，在上世纪70年代以前，高层建筑突飞猛进到300米高度时便不再升高，一个重要原因是采用图9中左边的布置形式，因为它符合大家对重力荷载的理解，但是Fazlur Khan把柱的布局组合进行调整，形成右边的布置形式，提出束筒理论并付诸实现，1974年建成的西尔斯大厦一下子将高层建筑高度提升至442米，这里牺牲的是水平构件结构效率，换取竖向构件在弯曲作用下的抗拉抗压效率提升。

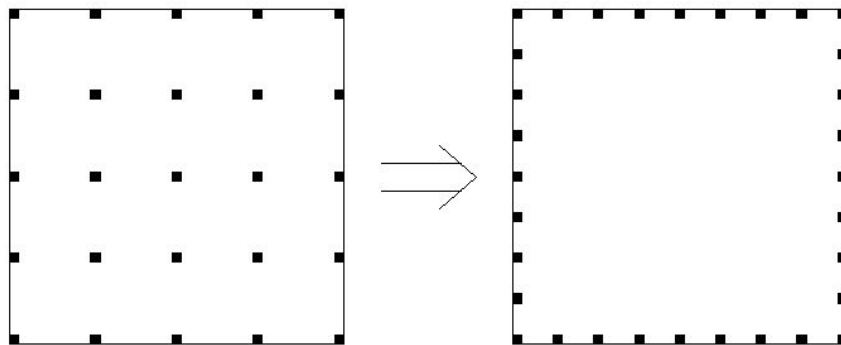


图9 框架柱的组合变化

如果理解上述划分原理，那么结构工程师就很容易理解各种结构的受力特点，根据设计目标来进行结构组合，例如隔震结构的雏形在1881年由日本河合浩藏提出，但是百年后的中国建筑仍以抗震结构为主，在很大程度上是因为设计思想以结构体系出发，而不是以设计需求为出发点，或者以现实的解释来说明，既以节省经济造价为首要目标，而不是以结构安全为出发点。隔震结构最大特点是以牺牲隔震层变形来换取上部主结构小变形，降低地震作用对上部结构冲击（图10）。相比汽车中大量使用弹簧减震器，中国建筑上使用隔震措施更像是高科技一样在运用，源于不从组合思维出发，上部结构的设计仍要遵循降低一定标准的常规设计要求，而不是依据地震作用下隔震后的效果去设计，其后果可能是安全的也可能是危险的。分块设计是常见模式，在某种程度上降低设计完整性。

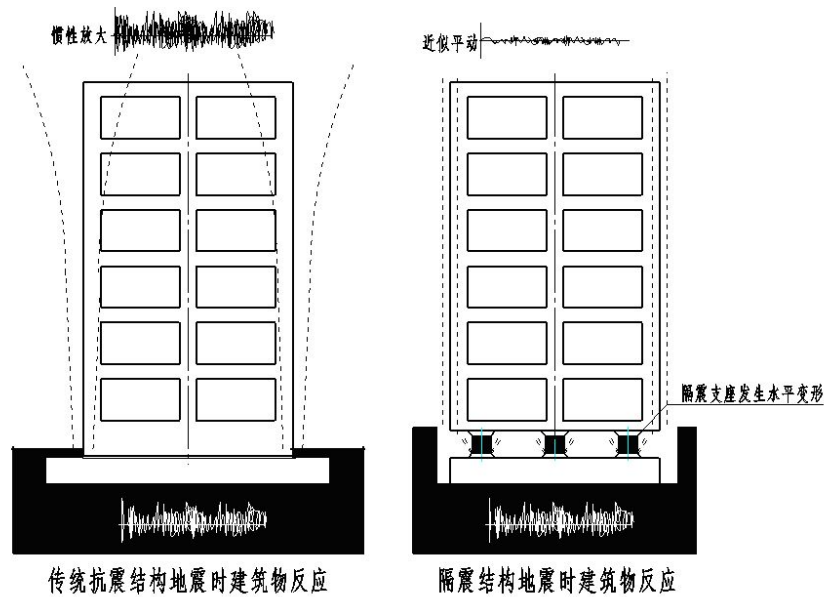


图 10 隔震技术原理

美国一风电基础坐落于垃圾山上，垃圾厚度达 30 米，其下才是岩石层，根据力学常识，风电塔高度很高，底座与高度相比很小，在基础设计就会有两个极端要求，一个是抗压能力，另一个是弯曲抗拉能力，由于垃圾厚度过深，沉积年代很短，压缩性极高，给基础设计带来很大难度，常规思维是进行地基处理，可是你要把垃圾都翻出来重见天日？这基本也是不可行的，打桩是风电基础常见模式，但是垃圾的属性，让桩基抗拔成为不确定的事情。最终组合结构解决这个问题，采用钢管桩放置在基础和岩石层之间，解决承压问题，然后利用钢管空间，在岩石层打锚杆，通过预应力技术将岩石和基础间张紧，解决抗拉问题，各种技术都是常规技术，只是巧妙结合而已。说到地基处理，特别是桩土结合形式，在很多时候就跟稀粥里插筷子是一样的，不组合不成大器，因此组合结构思维是结构设计的核心技术，脱离单一结构模式思维，是提高结构效率的有利武器。

胡 扯

谨记！忘记！