

1 绪 论

随着科学技术的迅速发展，各类学科的分工越来越细，在土木工程专业范围内，建筑学、城市规划、结构工程、地基基础、施工组织、施工技术、房屋设备等许多学科发展都很快。各门学科有自己的研究侧重面，这对科学的发展十分重要。然而，一座优秀的建筑是各专业人员共同创造的产物，过细的分工会使人们不能从总体上考虑问题，容易出现分歧，很难设计出造型、使用功能、结构安全、经济各方面都堪称完美的经典之作。

本书的主要目的是通过学习，使学习者在熟悉各种结构体系的基本力学特点、应用范围以及施工中必须采用的设备和技术措施的同时，领悟出一些新的思考和分析问题的思路，在建筑设计方案设计阶段，不过分纠结于每根杆件或者一个局部的受力，避免只见树木不见森林，学会从整体的角度去考虑并建议最适宜的结构体系方案，使之与建筑功能与和建筑造型有机结合，形成建筑结构的完美统一。

1.1 结构体系

建筑结构不是结构构件的简单组合，而是将各种结构构件有效地组合成结构体系，以承受各种可能的外部作用。

一般在设计这些构件时，主要计算直接作用在这些构件上的荷载和由这些荷载引起的内力，然后进行构件设计、配筋计算以及结构设计等。然而，由许多构件组合成为结构体系后每个构件只是整体结构体系中的一部分或一根杆件，它们在结构受力体系中的受力状态和变形情况与构件设计时的计算简图不同。以单层厂房中的屋架为例，设计屋架只考虑用屋架来承受作用在屋架平面内的荷载。屋架能承受很大的竖向荷载，也有很大的抗弯刚度。但屋架在其平面外方向（垂直于屋架平面方向）的刚度和承载力都非常小，甚至可以忽略不计。但完成屋盖支撑系统和盖上屋面板以后，屋盖就成为一个刚性很大的“刚性盘体”，可以承受各个方向的荷载，协调各柱的变形。此时，屋架只是屋盖体系的一部分，甚至只相当于整个屋盖体系的“加劲肋”，那么，由于整个结构体系受力而在屋架中每根杆件上产生的内力就很小，甚至在设计中都可以忽略不计了。所以，如何将各结构构件组成有效的结构体系，对结构设计人员来说是十分重要的，特别在高层建筑、大跨度建筑和抗震结构设计中显得尤为突出。

建筑结构体系

结构设计中都要求解结构内力，可是在许多情况下引起内力的荷载是含糊不清的。例如，地基不均匀沉降时的结构内力，由于地基和结构的交互作用，实际结构的内力很难准确求出。再如，抗震设计中，地震烈度本身就是个随机变量，地震荷载是个惯性力，它与结构的刚度有关，随着地震的发展，结构刚度也在变化。尽管人们对地震作用已进行了大量的调查研究，但至今房屋的抗震设计主要还依靠“概念设计”，即提高结构的整体性，形成可靠的结构体系，以抵抗各种可能的不利作用。可见，把房屋组成可靠的结构体系才是关键。

以常见的混合结构房屋为例，设置圈梁和构造柱对形成结构体系十分有利。当地基产生不均匀沉降时，房屋就会有较大的整体变形，如图 1.1.1 所示。整个房屋可以看作一个受弯的“梁”，当房屋中部下沉时，设在基础顶面的圈梁就像“梁”的配筋一样承受拉力。尽管圈梁的配筋很少（一般只配 $4\phi 10$ 或 $4\phi 12$ ），然而这根梁的高度很高，相当于房屋总高，内力臂很大，很少几根钢筋就可以承受这个弯矩，阻止砌体开裂，并减少不均匀沉降。反之，当房屋两端下沉时，则设在房屋顶部的圈梁受拉，起到相同的作用。

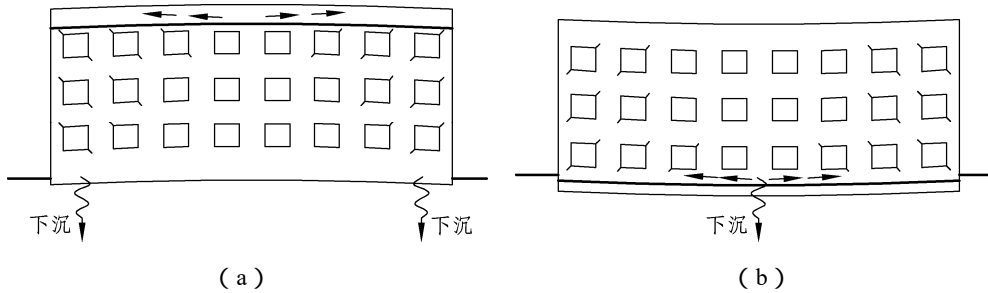
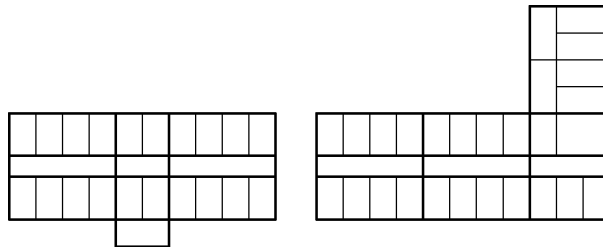


图 1.1.1 地基不均匀沉降时圈梁的作用

在混合结构的抗震构造中还广泛采用构造柱。构造柱没有独立的基础，和圈梁一样，截面小，配筋少，往往不被重视。然而，构造柱和圈梁像从整体上对砌体房屋加的竖向和水平向的箍一样，把房屋紧紧地捆绑在一起，如图 1.1.2 所示。可以看出，构造柱不是“柱”，它在抗震中主要起捆绑作用，从本质上讲也只是个拉杆。地震时，尽管房屋的局部可能受损，但构造柱和圈梁保证房屋整体不散架、不坍塌，从而有效提高了房屋的抗震能力。



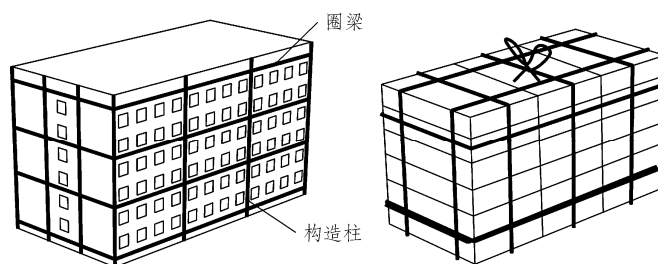


图 1.1.2 圈梁和构造柱对房屋的捆绑作用

1.2 一些重要的结构概念

“结构概念”简单地说，是人们对建筑结构的一般规律及其本质特征的认识。正确的结构概念使人们能深刻理解结构的受力特性，组成更有效的结构体系，使设计更加完善。

1.2.1 基本受力状态

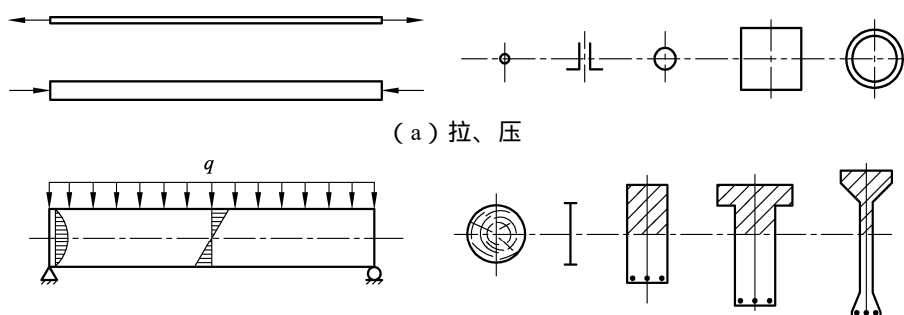
构件的基本受力状态可分为拉、压、弯、剪、扭五种，如图 1.2.1 所示。一般构件的受力状态都可分解为这几种基本受力状态。

1. 轴心受拉

轴心受拉是最简单的受力状态。不论杆件截面形状如何，只要外力通过截面中心，截面上各点受力均匀，构件上任意一点的材料强度都能被充分利用。以有明显屈服点的钢拉杆为例，抗拉承载力 N 可表达为

$$N \leq Af_y \quad (1.2.1)$$

式中 N ——轴力设计值；
 A ——拉杆截面面积；
 f_y ——材料屈服强度。



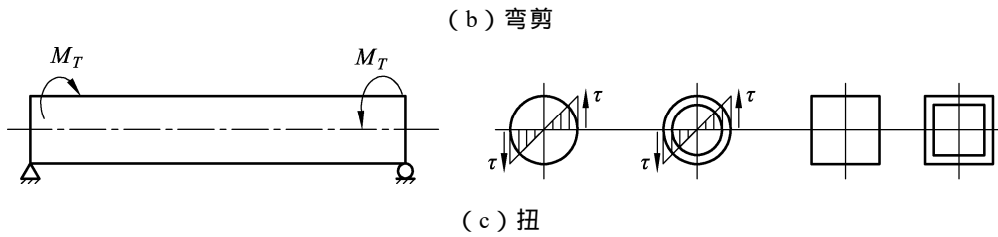


图 1.2.1 基本受力状态

对于适合抗拉的材料（如钢材），轴心受拉是最经济合理的受力状态。

目前，我国生产的高强钢丝强度已达到 1860 N/mm^2 ，一根 $7\phi 5$ 钢绞线的截面面积为 139 mm^2 ，还没有手指粗，而其最大负荷可达 259 kN 。新型碳纤维的抗拉强度更高，自重更轻。可见，在结构构件中利用受拉应力状态是合理的。

2. 轴心受压

轴心受压与轴心受拉相比截面应力状态完全相同，截面上应力分布均匀，只是拉压方向相反，对于适合受压的材料（如混凝土、砌体以及钢材等）也是很好的受力状态。但受压构件较细长时会有稳定问题，偶然的附加偏心会降低构件承载力，甚至引起失稳。抗压承载力 N 表达为

$$N \leq \varphi Af \quad (1.2.2)$$

式中 N ——压杆的压力设计值；

A ——压杆截面面积；

f ——材料抗压强度设计值；

φ ——随杆件长细比 λ 增大而减小的强度折减系数。

长细比 λ 为构件计算长度 H_0 与回转半径 i 的比值，即

$$\lambda = H_0 / i$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

式中 I ——截面惯性矩；

A ——截面面积。

可见，为使系数 φ 增大，在构件截面不变的情况下必须尽可能增大截面回转半径 i 。

由于压杆失稳总在截面回转半径最小的地方发生，所以对于轴心受压杆件，环形截面最为合理，圆形或方形截面也较为合理。工字形截面、角钢或双角钢等也可作压杆使用，但由于其两个方向的回转半径不同，往往首先在回转半径小的方向发生失稳。

现代结构构件通常首先考虑使用混凝土或钢材作为抗压材料，混凝土以其成本低、强度高而得到普遍采用。目前，我国已能生产 C80（或 C85）高强商品混凝土。但自重

较大，限制了它的使用范围，因而，轻质高强混凝土的研究有着广阔的前景。钢材强度高，使用截面小，从而自重轻，但价格高，因而主要用在大跨度结构、重型结构或超高层建筑中。

3. 弯和剪

弯和剪往往同时发生，工程中纯弯或纯剪情况很少。以常见的简支梁为例，跨中弯矩最大，支座附近弯矩很小；而剪力是支座附近最大，跨中很小。弯矩 M 和剪力 V 沿构件长度的分布很不均匀。

在弯矩 M 作用下，截面正应力的分布规律可表达为

$$\sigma = \frac{M}{I}y \quad (1.2.3)$$

式中 σ ——截面正应力；

M ——截面上作用的弯矩；

I ——截面惯性矩；

y ——所求应力点距中和轴的距离。

从上式可见，截面上下边缘离中和轴最远处正应力最大。截面中间部分应力很小，材料强度不能充分利用。若用圆木做梁，圆截面最宽的部分应力最小，而应力最大的上下边缘宽度反而较小，可见用圆木做梁是很不经济的。工字形截面的上下翼缘较厚，腹板较薄，作为受弯构件就比较合理。对于钢筋混凝土受弯构件，受拉区混凝土的抗拉能力可以忽略，由钢筋来承担拉力，可见受拉区混凝土不仅不能提供有效的强度，而且由于自重较大，还成了自身的负担。所以，对于较大跨度的钢筋混凝土梁，应做成 T 字形截面或受拉翼缘较小的工字形截面。

剪力在截面上引起的剪应力也是很均匀的，根据材料力学知识，剪应力沿截面高度的分布规律可表达为

$$\tau = \frac{VS}{Ib} \quad (1.2.4)$$

式中 τ ——剪应力；

V ——截面剪力；

I ——截面惯性矩；

b ——截面宽度；

S ——所求应力点以上部分截面的净矩。

由此可见，剪应力在截面中和轴处最大，截面上下边缘为零。

对于矩形截面梁，无论受弯或受剪，截面的材料强度都不能充分利用。由于弯矩 M 和剪力 V 沿构件长度分布也不均匀，弯矩跨中大、支座处为零，而剪力支座处最大、跨中为零。所以对于等截面受弯、受剪构件，材料的利用率比拉杆或压杆要低得多。当然，

建筑结构体系

做成 T 字形或工字形截面相对要合理一些。无论从承载力或刚度考虑,适当提高截面惯性矩是合理的。

近年来,混凝土的研究已使抗压强度为 200 MPa 级的活性粉末混凝土能在工程中应用。这种混凝土有超高的强度和超好的韧性与延性,并且具有很好的耐久性。活性粉末混凝土还具有高抗剪强度,从而可在结构中承受剪切荷载,梁中完全可去除辅助配筋,其性价比可与钢材竞争。当然,现在对其力学性能的研究还是刚刚起步,特别是疲劳、断裂性能等方面有待深入系统研究。

4. 扭

构件受扭时,由截面上成对的剪应力组成力偶来抵抗扭矩,截面上的剪应力在边缘上大,中间小;截面中间部分的材料应力小,力臂也小。计算和试验研究表明,空心截面的抗扭内力和相同截面的实心截面十分接近。受扭构件采用环形截面为最佳,方形、箱形截面也较好。例如,电线杆在安装电线过程中由于拉力不对称,可能形成较大扭矩,所以一般都采用离心法生产的钢筋混凝土管柱。

综上所述,轴心抗拉是最合理的受力状态,尤其对高强钢丝等抗拉强度高的材料特别合理。目前,悬索、悬挂结构得到广泛应用,就是利用了轴心受拉的合理力学状态。在悬挂式房屋建筑中,采用高强度钢绞线组成的拉索截面很小,甚至可以隐藏在窗框内,这样可以为人们提供开阔的视野;轴心受压虽然要考虑适当采用回转半径较大的截面形式,但由于其截面材料得以充分利用,也是很好的受力状态,尤其对石材、混凝土、砌体等抗压强度高而抗拉强度很差的材料。这类材料一般可就地取材,价格较低。例如石拱桥就是充分利用了石材抗压强度高的特点,结构经济合理。弯剪也是常见的受力状态,但对截面材料的利用不充分。这种受力状态在工程中不可避免,选用合理的截面形式和结构形式就很重要。对于较大跨度的梁,如果改用桁架,梁中的弯矩和剪力便改变为桁架杆件的拉、压受力状态,材料得以充分利用。桁架和梁相比可节省材料,自重能减轻很多,因而可跨越更大的跨度,但需要较高的结构高度。扭转是对截面抗力最不利的受力状态,但工程中很难避免。例如,吊车梁是受弯构件,主要承受弯矩和剪力,但当厂房使用多年发生变形后,吊车荷载有可能偏离梁截面的中心,尽管偏心距 e 可能不大,但竖向荷载 D_{\max} 很大,形成扭矩 $M_T = D_{\max}e$,有可能使吊车梁发生受扭破坏。另外,如框架边梁、旋转楼梯等,都存在较大的扭矩,设计中应引起注意。除了选用合理的截面形式,更应注意合理的结构布置,尽量减少杆件的扭矩。

1.2.2 材料对结构体系的影响

如图 1.2.2 所示,同样是受弯构件,但用不同性质的材料做成,在相同的受力状态下都会产生完全不同的破坏状态。

图 1.2.2 (a) 为石材或素混凝土梁, 由于其抗拉强度 f_t 远小于抗压强度 f_c , 当拉应力 σ_t 超过材料抗拉强度时梁就会开裂破坏, 破坏由 $\sigma_t > f_t$ 引起。图 1.2.2 (b) 所示为钢管受弯, 钢材的拉压强度是相同的, 即 $f_t = f_y$, 但由于受压时可能引起较薄的管壁局部失稳, 当 $\sigma_c > \varphi f_y'$ 时, 受压区局部屈服早于受拉区破坏。图 1.2.2 (c) 所示, 为一根木梁, 由于天然木材有弯曲, 切割成矩形木梁时木纹与梁轴不平行, 而木材的横纹抗拉强度远小于顺纹抗拉强度, 在主拉应力 σ_{pt} 作用下, 当大于木材横纹抗拉强度 f_t^tr , 即 $\sigma_{pt} > f_t^tr$ 时, 就发生斜向撕裂。可见材料性质对构件的破坏有直接影响。

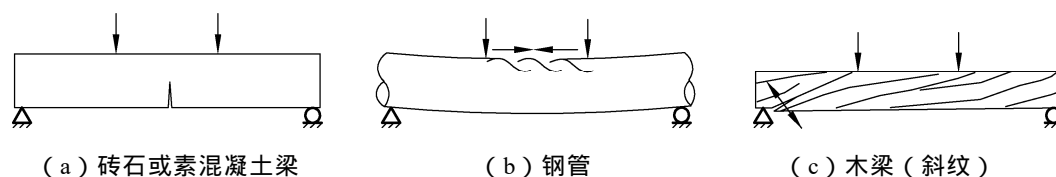


图 1.2.2 材料对结构破坏形式的影响

根据结构可靠度的知识, 要保证结构安全可靠, 应当使结构对荷载的作用效应 S 小于相应的结构抗拉 R , 即

$$S \leq R$$

上述例子相应的表达式为应力小于强度, 即分别为

$$\sigma_t \leq f_t$$

$$\sigma_c \leq \varphi f_c$$

$$\sigma_{pt} \leq f_t^{tr}$$

可见, 在结构设计中应当充分考虑各种材料特性, 做到材尽其用。以下几个方面应在设计中给予充分考虑。

1. 充分发挥材料特性

常用建筑材料主要包括砌块、混凝土、木材、钢材等。砌体和混凝土价格相对较低, 是很好的抗压材料, 但自重大, 不适宜建造高层和大跨度建筑。我国古代受当时建筑材料所限, 有不少砌体建成的高塔。例如著名的西安大雁塔(建于公元 952 年), 如图 1.2.3 所示。正方形塔身底层为 $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$; 共 7 层, 高 64 m。底层墙厚达 9.15 m, 中间只剩不到 $7 \text{ m} \times 7 \text{ m}$ 的有效空间。虽然几经修缮, 但大雁塔经历了 1300 多年能保留至今, 还是反映了当时我国砌体结构很高的设计水平。但从今天的设计角度分析, 用砌体建造高塔显然不合理, 巨大的自重使下部地基不堪重负。据观测, 由于长期大量抽取地下水, 自 1985 年 6 月至 1992 年 10 月, 大雁塔下沉了 585 mm, 塔顶倾斜达 1005 mm, 之后采