

1.1 组合结构与钢板-混凝土组合结构

钢材与混凝土是应用最普遍的两种工程材料,也是支撑当前社会运行和发展的最大宗、最基本的人工材料。钢材与混凝土材料的这种历史地位,来源于其自身在各方面的综合优势,并且是经过工程界和建筑市场长期实践和选择所形成的。众所周知,钢材是一种高强度材料,在韧性、质量稳定性、可加工性等方面也有很好的表现,同时由于原材料来源广泛且产量巨大,价格相对其他金属材料也较为低廉。混凝土则是人类历史上产量最大的一种人工材料,相对于其他人工材料其性能并不具有明显优势,但如果把易获得程度、制造成本、适应能力、耐久性与稳定性等因素考虑进来,那么混凝土是当之无愧的现代土木工程支柱。

钢材与混凝土有不同的材料特性,单独使用其中一种材料难以形成一座建筑。混凝土在硬化前可方便地进行浇筑,并可填充到几乎任何形状的模板内。混凝土在自然环境中也是一种具有很好稳定性的材料,相对于大部分天然和人工材料而言,其抗火、耐高温、抗腐蚀、抗风化能力都比较强。混凝土还具有较高的抗压强度,非常适用于承受压力,例如柱、墙、拱等。但是,相对于其抗压强度而言,混凝土的抗拉强度很低,在荷载作用下混凝土表现得很脆,因此将混凝土用于以受拉、受弯(部分截面受拉)、受剪(主应力方向受拉)为主的构件,可能无法实现或工作效率很低。

19 世纪下半叶,工程师发明了一种用钢筋来增强混凝土的新技术,即在混凝土受拉力较大的部位,在浇筑之前埋入钢筋,当混凝土硬化后二者能够充分结合成为整体来共同工作。这种新结构形式就是我们所熟悉的钢筋混凝土结构,它把混凝土抗压强度高、易于成型、价格低廉、稳定性好等优点,与钢材抗拉强度高、延性好等优势充分结合在一起,是将两种材料有机组合的典范,大大推动了结构工程技术的进步,并广泛应用于房屋、道路、桥梁、隧道、港口、水工等几乎所有的土木工程领域。

钢筋混凝土可以用来制作梁、柱、墙、板、壳甚至桁架、网架等结构构件。设计的关键问题之一是如何在构件的恰当部位合理配置钢筋,以充分发挥钢筋抗拉强度高的优势并弥补混凝土抗拉强度低的不足。此外,利用钢筋对混凝土施加约束以增强结构的延性和抗裂性,也是配筋的重要作用。图 1-1 是钢筋混凝土墙、板的示意图。本书所述的钢板-混凝土结构,也主要针对墙、板这两类构件形式。

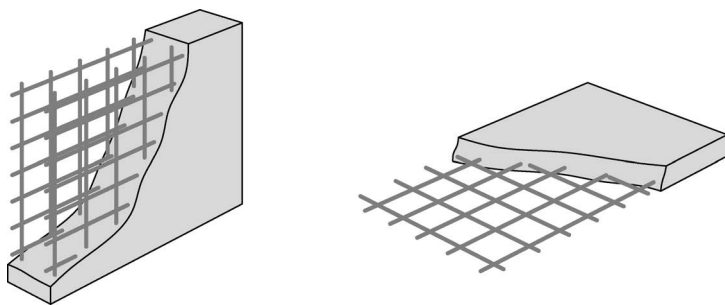


图 1-1 钢筋混凝土墙与钢筋混凝土板

钢筋混凝土结构设计的关键核心问题之一是如何保证两种材料能够共同工作。为了达到这一目的,对钢筋的构造特征和布置形式提出了各种要求,例如将钢筋表面压制出各种形状的凸肋以增大钢筋与混凝土之间的黏结力、钢筋端部有足够的锚固长度以减少钢筋与混凝土之间的界面应力,或者将钢筋设置为闭合环形来发挥其对内部混凝土的约束作用。这些方法和措施的目的都是确保钢筋与混凝土两种材料能够共同工作并发挥各自的优势,达到更高的受力效率。在后面所述的各类钢-混凝土组合结构中,如何保证两种材料的协同工作性能,同样也是最关键核心问题之一。

工程建设的发展导致技术要求也在不断提高。例如,前面提到混凝土的重要优点之一就是可以通过浇筑成型,实现各种复杂的形态来适应工程的需求。但是,由于需要架设模板、绑扎钢筋,混凝土现场浇筑成型的过程在某些工程条件下反而会表现为难以接受的缺点。再如,工程中使用的钢材有很多种形式,包括线材(钢筋、钢丝、钢绞线)、板材(钢板以及通过弯折、焊接、栓接等形成的各种构件)、型材(轧制型钢)、零件(连接件、紧固件)、铸件等。在绝大部分情况下,我们用到的钢结构都是由钢板构成的。对于这类宽厚比很大的钢板,由于其在受压状态下会发生屈曲,因而材料强度无法充分发挥。

显然,工程师始终面临的一项任务是,利用不同的材料并采取合理的施工方法,建造出满足功能要求同时成本相对最低的建筑,取得安全、经济、适用、美观以及耐久、环保等方面的综合平衡。钢-混凝土组合结构就是随着社会经济的发展,经过各国工程师和学者的共同努力,针对新的需求、新的形势,不断发展和完善起来的。具体来说,组合结构的发展过程,就是不断探索将钢材与混凝土两种材料更合理有效地组合为整体来共同工作,使每种材料都处于能够发挥其优势的最合适位置的过程。

以下以钢-混凝土组合梁和钢管混凝土柱为例,简要说明钢-混凝土组合结构的特点。

钢-混凝土组合梁(steel-concrete composite beam)的基本结构形式如图 1-2 所示。简支组合梁受到的最主要内力是荷载引起的弯矩和剪力。弯矩由顶部混凝土板压力及钢梁拉力所形成的力偶抵抗,剪力则主要由钢梁腹板所承担。通过将混凝土和钢材分别布置在受压最大的顶部和受拉最大的底部,使二者的力臂最大,从而能够尽可能地发挥出每种材料的力学性能优势。同时,这种构造形式也避免了混凝土受拉开裂、钢梁受压屈曲等不利的因素,减少了对结构抗力贡献不大的材料。为了保证钢材与混凝土的共同工作(受弯时满足平截面假定),关键是要保证二者在界面处(钢梁上翼缘顶面)能够变形协调,也就是不发生过大的纵向滑移和竖向分离,因此需要设置足够多的连接件。通常,工程中采用的栓钉等各类

连接件都能够满足这一要求。作为一种性能优越、材料利用率很高的水平承重构件形式,组合梁在桥梁、房屋等各种工程中都有广泛的应用。

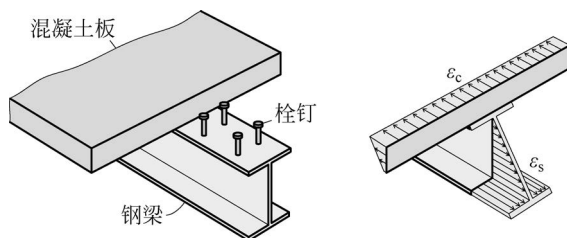


图 1-2 钢-混凝土组合梁

钢管混凝土(concrete filled steel tube, CFST)是另一类非常有代表性的组合结构构件(在房屋建筑中常称为钢管混凝土柱),其中圆形实心截面的受力性能最好。作为竖向受压构件使用时,在加载初期,混凝土产生微裂之前,根据荷载作用的位置不同(是作用于内核的混凝土截面还是外层的钢管截面),钢管与混凝土分担的竖向力有所不同。由于钢管的泊松系数大于混凝土的横向变形系数,这一阶段二者之间并不会产生互相挤压或约束作用。随着竖向应变的增加,混凝土产生竖向微裂并不断发展,如图 1-3 所示,其侧向膨胀速度超过钢管的侧向膨胀速度,使得钢管处于竖向受压、环向受拉的双向应力状态,而混凝土处于三向受压状态。由于混凝土在围压作用下的强度和延性都得到显著增强,整个结构的承载力、刚度、延性都会明显高于钢管与素混凝土之和。因此,作为受压构件,钢管混凝土柱是非常好的选择。

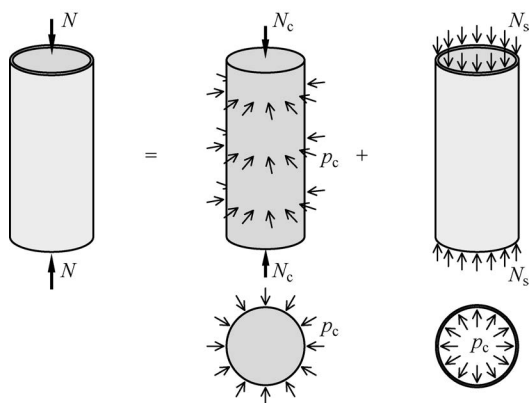


图 1-3 钢管混凝土柱

除了工程中常用的梁、柱构件可以应用组合结构技术获得更好的经济技术效益(如前面所述的组合梁、钢管混凝土柱),墙、板、壳等构件也可以采用钢-混凝土组合结构。从受力上讲,将钢板设置于对抗弯最有利的外侧,可以发挥最大的效力。

历史上,将钢板与混凝土进行组合的结构形式出现得很早,较有代表性的是压型钢板-混凝土组合板,如图 1-4 所示。根据需要可以将压型钢板压制带凹凸板肋的各种截面形式。有时在钢板表面上也压制较浅的槽纹来提高钢板与混凝土的咬合力,甚至通过在压型钢板上附加钢筋或穿透压型钢板焊接栓钉来保证钢板与混凝土的充分连接。虽然压型钢板

的主要作用是代替模板,但如果钢板与混凝土之间的连接性能能够得到保证,压型钢板也完全能够代替混凝土板内的受拉钢筋,使两种材料的受力性能得到充分发挥。

压型钢板厚度较小,通常不超过 1mm,对于民用建筑的楼板,通过合理构造压型钢板能够发挥一定的承载能力,但更多情况是作为永久模板来使用。如果采用比较厚的钢板,例如 8~20mm 甚至更厚的钢板,并通过有效的连接方式使其与混凝土共同工作,则可以形成各种满足不同工程需求的钢板-混凝土组合结构。典型的钢板-混凝土组合结构由双面或单面钢板及混凝土构成,如图 1-5 所示。

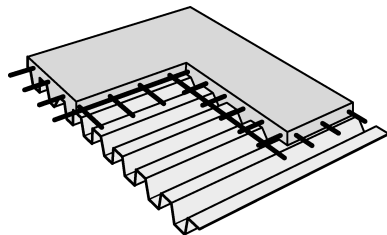


图 1-4 压型钢板-混凝土组合板

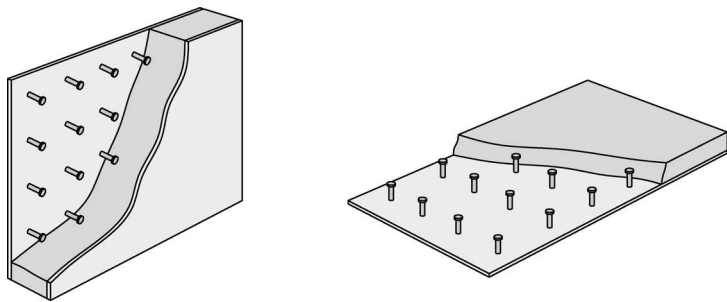


图 1-5 钢板-混凝土组合结构

钢板-混凝土组合结构可以作为竖向承重构件,也可以作为水平承重构件。前者包括高层建筑中的核心筒及剪力墙、核反应堆安全壳、桥塔塔壁等;后者包括桥面板、隧道顶板、安全壳顶盖等。其中,剪力墙等结构以承受面内压、弯、剪荷载为主,其他结构则以承受面外弯、剪荷载为主。与图 1-1 所示的钢筋混凝土墙与钢筋混凝土板相比,钢板-混凝土组合结构用钢板(具有抗拉、抗压、抗剪能力的板材)代替了钢筋(主要起抗拉作用的线材)。二者在受压、面外受弯等模式下的受力机理相近,可以在符合平截面假定的前提下给出类似的设计方法。但在受剪等状态下,则表现出较为明显的区别。钢板-混凝土组合结构的具体类型和特点将在 1.2 节中详细介绍。

在钢板-混凝土结构发展的过程中,根据其应用场合以及构造特征的不同,有过多种命名方式,例如钢板-混凝土组合结构、钢壳混凝土结构、外包钢板混凝土结构等,英文命名也有 steel-plate concrete (SC) structures、steel-plate concrete composite structures、double-skinned composite structures、steel-concrete-steel sandwich structures 等不同的表述方式。其中,有些命名比较强调“组合”这一特征,有些则未体现这一特征。钢板与混凝土结合为整体共同工作后,其各方面性能都超越了两材料性能的简单叠加,表现出组合结构的明显优势。但与钢筋混凝土类似,在大多数应用场合下钢板与混凝土并不能单独工作,只有结合为整体才能够形成有效的结构,因此也可将“组合”一词忽略。这一点与我们熟悉的钢-混凝土组合梁有所不同,即混凝土板和钢梁也能够发挥各自的功能,但通过设置抗剪连接件使之形成整体共同工作,则可以进一步获得性能的显著提升。钢板-混凝土结构的各种命名方式体现了其在不同应用场景下的特征,也与各国或不同行业的传统习惯有关,并不妨碍我们对这种结

构形式的认识和应用。本书后续部分,并未对钢板-混凝土结构的各种命名方式做严格区分,在此进行说明。

1.2 结构类型及特点

1.2.1 结构类型

钢板-混凝土组合结构的基本构造包括钢板、混凝土及二者之间的连接。根据使用功能、构造形式、受力特征等不同,钢板-混凝土组合结构可以分为很多种类型。例如,根据钢板与混凝土之间的相对位置关系,钢板-混凝土组合结构可分为内嵌钢板(单层或双层)、外包单侧钢板、外包双侧钢板三种结构形式,如图 1-6 所示。其中,内嵌钢板-混凝土组合结构,也可以采用一层钢板或两层钢板的形式。

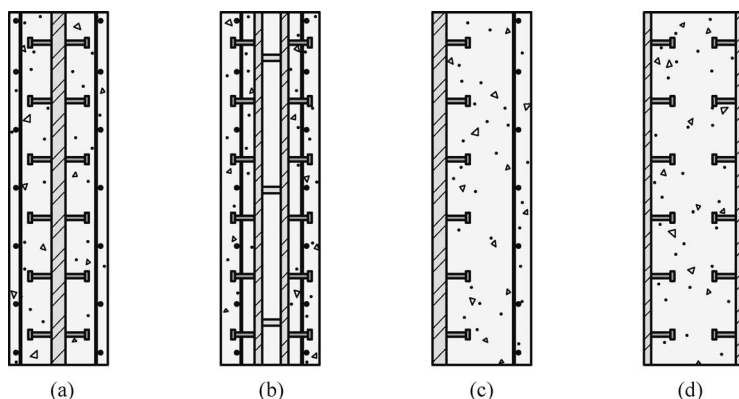


图 1-6 内嵌钢板与外包钢板结构形式示意图

(a) 内嵌单层钢板; (b) 内嵌双层钢板; (c) 外包单侧钢板; (d) 外包双侧钢板

单侧钢板的构造多适用于水平承重构件,内嵌及外包双侧钢板的形式则适用于竖向构件。内嵌钢板的构造形式,需要在混凝土内设置钢筋。钢筋一方面起到受力的作用,同时能够控制裂缝发展并对混凝土进行约束,从而避免在较大内力作用下外侧的混凝土发生脆性破坏。

相比传统钢筋混凝土结构内嵌钢板与单侧钢板组合结构,混凝土板的轴压承载力大幅提高,能够在一定程度上抑制钢板屈曲,充分发挥钢板的力学性能,保证结构在侧向荷载作用下的承载能力和耗能能力。对于内嵌钢板组合结构,外包混凝土还可起到防火和防腐作用^[1]。但是,内嵌钢板和单侧钢板组合结构,在受力性能及施工性能方面存在一些不足。例如,由于混凝土位于钢板外侧,在大变形的情况下,混凝土板可能会发生开裂剥落,对钢板的约束作用大大减弱,使结构的延性耗能能力大幅降低;同时,构造较为复杂,钢板运输安装难度较大,现场需支模板、绑钢筋等工序,施工相对比较困难;再有,外露的混凝土受内部钢结构的约束,易收缩开裂,影响结构的正常使用和耐久性。

对于外包双侧钢板的构造形式,在其内部可仅填充混凝土而不需配钢筋,这对于简化施工有非常重要的价值。同时,钢板布置在最外侧,对于发挥受力性能也能起到最大的作用。

本书无特别说明时,作为墙构件使用的钢板-混凝土组合结构特指两侧均设置钢板的结构形式。

单侧钢板的结构形式则主要应用于桥面板、重载楼板等。图 1-7 是一种典型的钢板-混凝土组合桥面板的构造,主要通过栓钉或开孔板连接件将混凝土与底部钢板结合成整体。根据实际工程的需要,钢板与混凝土之间还可以有其他不同的连接构造形式,参见本章后续部分的说明。

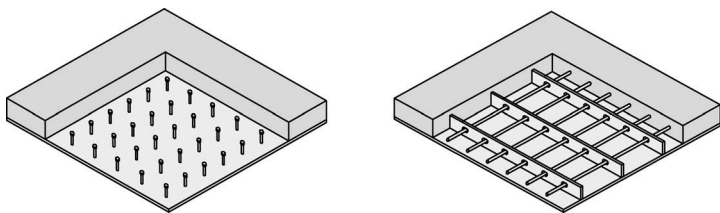


图 1-7 钢板-混凝土组合桥面板

由于可以采用较厚的钢板,钢板-混凝土组合板的承载力相对于压型钢板-混凝土组合板可以显著提升。钢板从工程应用的角度可以看作各向同性的材料,因此在水平各个方向都有很高的抗拉强度,从而能够适应异形板等更为复杂的受力条件。此外,设置合理的加劲肋和钢板连接构造措施,可以使此类结构在安装和施工等方面 also 具有很高的效率。

除了应用较多的平面构件外,钢板-混凝土组合构件也可制成曲面形状,应用于罐体、安全壳、穹顶等。

此外,也有学者提出了其他多种钢板-混凝土组合结构形式(图 1-8),例如波形钢板-混凝土组合剪力墙^[2]、防屈曲钢板-混凝土组合剪力墙^[3]、钢管束组合剪力墙等^[4]。这些结构的受力性能或工作机理与本书所述的钢板-混凝土组合结构有较大区别,此处不再展开分析讨论。

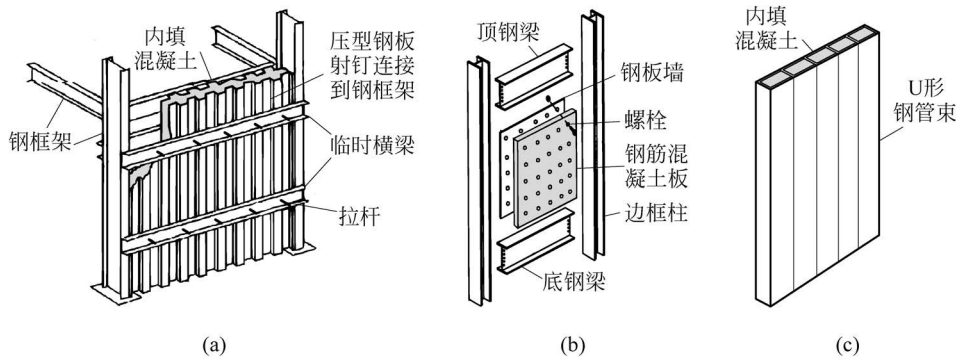


图 1-8 其他各类钢板与混凝土组合所形成的墙体结构示意图

(a) 波形钢板-混凝土组合剪力墙; (b) 防屈曲钢板-混凝土组合剪力墙; (c) 钢管束组合剪力墙

1.2.2 结构特点

以下简要分析说明钢板-混凝土组合结构的特点,特别是其相对于钢筋混凝土构件以及钢结构构件,在受力性能、施工性能等方面的特点。

1. 强度

相对于钢筋混凝土构件,钢板-混凝土组合结构可以提高含钢率且使钢板处于受弯最有利的外层,因此具有更高的抗弯承载力,或者同样承载力时,截面高度更小。钢筋混凝土构件受到钢筋构造的限制,往往无法做到很高的含钢率。例如,钢筋含钢率超过5%后,钢筋绑扎及混凝土浇筑将非常困难。而钢板-混凝土组合结构通过增大钢板的厚度,很容易做到比较高的含钢率,且对混凝土施工不会造成困难,从而获得更高的承载力。同时,钢板位于受弯能够发挥最大作用的最外侧,距离中性轴更远,抗力的力臂更大,这对于面外受弯为主的构件非常有利。再有,由于受拉侧混凝土不外露,钢板-混凝土组合结构通常不受裂缝宽度的限制,因此材料或结构的强度更容易充分发挥。此外,如果设置合理的隔板或对拉抗剪措施,也可以具有较高的抗剪能力。

对于面内受压的情况,外侧放置的钢板有利于增大结构的面内轴向刚度,提升结构的稳定性和承载力。面内受剪时,同样由于钢板具有比混凝土及钢筋强得多的抗剪能力,抗剪很少再起到控制作用,这一点对于类似房屋中的剪力墙结构非常有价值。

当结构处于受拉状态时,例如高宽比很大且处于高地震烈度区的建筑,竖向构件可能处于拉-剪受力状态。这对于钢筋混凝土结构非常不利,但对于钢板-混凝土结构,由于钢板的抗拉能力很高,则比较容易满足设计需求。

对于钢结构,如果其承载力和截面高度与钢板-混凝土组合结构相同,则其用钢量将会显著提高。为了防止钢板在达到屈服之前发生屈曲失稳,必须增加很多的构造用钢量,例如加劲肋、隔板等,而这一部分用钢量,并不会对构件的受弯、受剪产生直接的贡献。

2. 刚度

与钢-混凝土组合梁类似,钢板-混凝土组合结构在荷载作用下,钢板与混凝土之间会发生一定的滑移,并引起结构弯曲刚度的降低。滑移的大小受荷载水平、剪力大小和分布、界面连接构造特征等很多因素的影响。但大量的试验和实测表明,在正常使用荷载条件下,满足一定的抗剪连接构造时,滑移并不会对结构的正常使用产生值得关注的影响。

相对于钢筋混凝土受弯构件,双钢板-混凝土组合结构对内部混凝土裂缝的形成和发展有更强的约束作用,因此同样荷载下的裂缝宽度更小,因而结构的刚度更大。相对于钢结构构件,由于内部填充的混凝土也能发挥很大作用,双钢板-混凝土组合结构的刚度明显更高。

对于面内作用的工况,双钢板-混凝土组合结构由于类似的原因,其正常使用荷载下的刚度也都较高。

3. 延性

面外受弯的钢板-混凝土组合结构,如果是由受拉侧的钢板屈服来控制结构的极限破坏模式,则能够表现出非常优异的延性性能。对于双钢板组成的构件,往往两侧钢板厚度相等,即受压区和受拉区的钢材一致,这种破坏模式很容易实现。外侧钢板对内部混凝土的约束作用,可以在很大程度上避免钢板-混凝土构件出现由于混凝土脆性所带来的延性降低问题,这也使得高强混凝土更容易获得应用。

对于钢结构构件,如果来实现延性破坏,例如塑性设计方法所要求的全截面屈服状态,则需要严格限制钢板的宽厚比,即设计为密实截面,以避免发生钢板屈曲。这对于钢结构有时也是难以实现的。钢板-混凝土组合结构中的钢面板,由于受到内部混凝土和连接件的约

束,达到全截面屈服的难度则要小得多。

4. 适应性

对于正常配筋范围内的钢筋混凝土构件,钢筋起到控制性的关键作用。这表现在:承载力极限状态时,钢筋首先屈服,决定了承载力的大小;在正常使用阶段,钢筋控制了裂缝的间距、宽度和发展程度。对于梁、柱等以受弯、受压为主的构件,构件内的应力方向明确。不同荷载作用下,只是内力和应力大小发生改变,应力方向改变不大,钢筋可以布置在发挥作用最高效的方向,即与主拉应力相同的方向。但板、墙等构件的应力状态要复杂得多。这种复杂性既表现为构件不同区域在同一种荷载下的主应力方向分布规律具有复杂性,也表现为在不同的荷载或内力作用下应力分布有不同的规律。例如,对于斜板、曲线板,在恒载作用下,支承边的钝角、锐角以及自由边、跨中等位置的应力方向均不同且差别很大,同时在活载(典型的为车辆轮载集中力)作用下,应力方向又与恒载有明显区别。同样,对于剪力墙,在恒载(轴压为主)作用下和在风载、地震等侧向力(受弯、受剪为主)作用下,主拉应力方向也有很大差别。这种复杂的应力分布规律,给钢筋的设计和施工带来了很大困难,无法将钢筋全部配置在受拉最大的方向,而只能寻求一定的妥协,因而材料的利用效率受到一定影响,特别是对控制裂缝发展也很不利。

在工程尺度上,钢板可以看作一种各向同性的材料,钢板在平面内的各个方向都可以发挥相同的作用。因此,利用钢板-混凝土组合结构的这一特点可以有效克服钢筋混凝土构件的上述不足,特别是用于异形构件或活荷载占比较大的构件(典型的如小跨径斜板桥),将具有比较高的受力效率,设计和施工也较为方便。

另外,对于有很高密封、耐磨要求的结构,例如核电站的安全壳、水工输水结构等,可以将结构受力钢材与钢衬合并为一体,从而使结构更为经济合理。

5. 自重

钢板-混凝土组合构件的厚度或截面高度与钢筋混凝土构件相同时,其重量也基本相同。但如前面所述,在同样承载力和刚度前提下,钢板-混凝土组合构件的截面高度可以更小,因此通常情况下其重量较轻。

当然,如果仅仅从受力的角度,纯钢结构比需要内填混凝土的双钢板-混凝土组合结构更轻。但为了满足功能以及其他方面的要求,钢结构往往无法单独使用。通过将钢材与混凝土两种材料有机结合来共同受力,钢板-混凝土组合结构往往在总体重量上也不会高于纯钢结构。

6. 耐久性

对于暴露于自然环境的结构,耐久性是必须要考虑的一个重要因素。双钢板组合结构中混凝土完全被钢板包裹,这对其耐久性很有利,设计时只需考虑钢板的耐久性。通常,仅需在外部表面上进行防腐保护。

7. 抗冲击性能

双钢板-混凝土组合结构的整体性和韧性较强,特别是背侧钢板能够防止混凝土崩落,使其抗爆和抗冲击能力显著提升。研究证明,在具有相同的抗弹丸冲击能力时,钢板-混凝土组合结构比钢筋混凝土结构的厚度可以减少30%以上。利用这一点,可用其建造军事防护结构以及核电安全壳、防爆墙等工程。

8. 抗火性能

对于建筑中采用的钢板-混凝土组合结构,火灾会引起一侧钢板的受热(也有可能两侧钢板同时受到火灾作用,这种情况更为不利,但不改变钢板-混凝土组合结构在火灾下的受力机理,只是影响程度的不同)。内部填充的混凝土会起到类似散热器的作用来吸收钢板的热量,并阻止或延缓钢板强度的快速下降,使得结构的耐火时间有所延长。这一点已在结构抗火试验中得到了验证。

9. 密封性能

在不采用预应力的条件下,混凝土结构带裂缝工作,很难做到完全密封。而钢板-混凝土组合结构利用其钢结构外壳,则可以做到理论上的完全密闭,这对于地下工程、海洋工程、防护工程、储水工程等具有很大的价值。钢板-混凝土组合结构的密封性能也较容易进行检验。施工时,在浇筑混凝土之前可以较为方便地检验钢板或钢板模块的抗渗性能并进行处理,而混凝土浇筑过程也是对密闭性能的进一步测试。

10. 施工性能

钢板-混凝土组合结构施工时可以采用钢结构和混凝土结构的成熟工艺,在施工方面较为方便快捷,同时易于保障质量。

钢板在工厂内通过焊接等工序加工成所需要的形式,特别是,钢板可以制作成较为大型的预制模块,现场施工时又可以作为浇筑混凝土的永久模板。但对于结构厚度较小的情况,两侧钢板组拼后,设备和操作人员均难以到达其内部空间,因此很难在内部将两块钢板通过焊接连为整体。因此,制作钢结构部分时如何连接两块面板并保持它们之间的准确距离是一大难题。最初采用的连接方法是在其中一块钢板上焊接长栓钉,栓钉长度约为两钢板之间的距离,栓钉头可与另一块钢板点焊,同时两块钢板上分别焊接较短的栓钉。但这种工艺较为复杂,且钢板之间的连接在定位精度、受力可靠性等方面都有很大问题。英国 Corus 公司引入旋转摩擦焊并研发了一套专门的制作工艺来解决这一问题。钢杆可以同时承受压力和拉力,能够保证面板在施工荷载和内部湿混凝土压力下的准确定位。按照这一工艺生产的产品被命名为“Bi-steel”,如图 1-9 所示。采用这种工艺,既可以做平板,也可以方便地做曲面板,该工艺可应用于剪力墙、防护结构以及隧道、储水池等对裂缝要求很严格的结构。两块面层钢板通过钢连杆焊接成整体后,具有较大的整体和局部刚度,可以方便地进行运输及现场安装。现场施工时取消了钢筋绑扎,钢面板可作为模板。同时,由于面板和钢连杆所形成的体系具有较高的刚度,因此该结构作为竖向构件使用时,浇筑混凝土过程中无需额外的模板和支撑。该结构作为水平

构件使用且跨度不大时也可省去临时支撑,从而能够最大限度地减少工地的劳动力需求,缩短现场施工时间。此外,由于内部不设钢筋,因此避免了重载结构通常因密集绑扎钢筋带来的浇筑困难。再有,钢板能够防止水分散失,因此施工过程中不需额外采取遮蔽覆盖等工序,养护难度大大降低。同时,混凝土密闭在钢结构内可以大大减少干缩,从而使混凝土的质量通常要高于普通的钢筋混凝土结构。

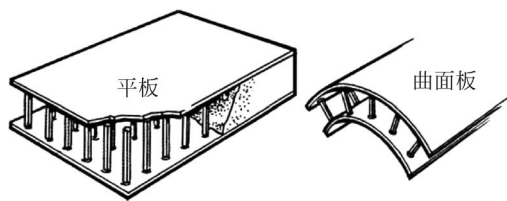


图 1-9 Bi-steel 结构示意图

对于钢板-混凝土组合结构,在设计阶段可以方便地进行孔洞局部加强和预埋件设计,即在工厂的钢结构制造阶段把预埋件、孔洞等与结构进行整合处理,这样现场安装时可以获得很高的定位精度并加快施工速度。对于小型的支架、支座等,在施工或使用阶段可以方便地直接连接或焊接在钢板表面,而不必像钢筋混凝土构件一样,需要采取埋入或穿透的锚固措施。但需要注意的是,钢板-混凝土组合结构现场进行开孔后再进行局部加强不易处理,因此较大的孔洞应尽量提前在钢结构部分预留。随着建筑信息模型(building information modeling,BIM)技术的发展,钢板-混凝土组合结构在工厂化制造、装配式施工方面的优势将更容易体现出来。

11. 环保性能

钢板-混凝土组合结构是一种符合建筑业绿色可持续发展需求的结构形式。例如,与钢筋混凝土结构相比,钢板-混凝土组合结构可以不使用或大量减少模板,因此减少了施工过程中产生的废弃物和垃圾,有助于降低环境负载。

针对钢板-混凝土组合结构的上述特点,综合考虑并灵活运用,该结构可以在房屋、桥梁等很多领域发挥出优势。其中,受力和施工方面的潜力及可能遇到的问题,是设计时需要重点关注的方面。总结这些特点及可能的应用领域,如表 1-1 所示。

表 1-1 钢板-混凝土组合结构的应用领域和特点

应用领域	受力性能									施工性能									其他	
	强度	刚度	延性	高强材料	稳定性	约束混凝土	复杂应力	密封抗渗	抗冲击抗爆	工厂化制造	现场施工快	模块化施工	避免模板	减少支撑	方便浇筑	方便养护	开孔及预埋	浮态施工	防腐维护	材料回收
剪力墙	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○	○		○	○	○			○
核安全壳	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○		○	
防护结构	○	○	○	○		○		○	○	○	○	○	○		○	○				
轻型桥面板	○	○		○						○	○	○	○	○	○				○	○
异形桥面板	○	○		○			○			○	○	○	○	○	○					○
桥塔塔壁	○	○	○	○	○	○			○	○	○	○	○		○	○				○
沉井	○	○				○		○		○	○	○	○		○	○				
沉管隧道	○	○	○			○		○		○	○	○	○	○	○	○		○	○	
隧道衬砌	○	○						○	○	○	○	○	○	○		○				
海洋结构	○	○		○	○	○	○	○		○	○	○	○		○	○	○	○	○	○
船坞	○	○			○	○		○		○	○	○	○		○	○			○	
液体储罐	○	○	○				○	○	○	○	○	○	○			○				
筒仓	○	○			○		○	○		○	○	○	○			○				○
工业容器	○	○					○	○		○	○		○			○	○			
结构加固	○	○			○			○			○		○			○			○	

1.3 国内外研究进展

国内外学者对钢板-混凝土结构已开展了很多研究。这些研究既包括单元、构件和结构体系层面的静、动力性能和设计方法,也包括新型构造的研发、新材料的应用。由于各个工