

钢—混凝土组合结构及其应用

孙国良

(钢—混凝土组合结构科研组)

提 要

钢—混凝土组合结构是继钢与混凝土结构而兴起的一种新结构类型。组合结构的基本意义是：在一构件中，将型钢与混凝土结构材料密切组合成为一个整体，共同承受荷载。这种结构类型的优点是在大型、高层及重型建筑结构中，较单独采用钢筋混凝土结构有更好的适用性——减小构件体积、增大使用空间和减轻地基荷载、节省木模和支撑，节省混凝土用量，有更好的抗震性能和免除构件中的预埋件。较单独采用钢结构，则大大节省钢料。

本文将钢—混凝土组合结构分为柱和梁两个部分，并分别对各种组合柱和组合梁的构造、受力性能、优缺点、适用范围以及国内外发展简况进行评介。

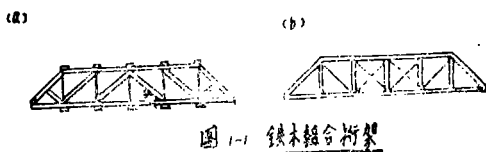
前 言

古代建筑结构的材料，大都是泥土、木、石、砖和铁，它们各有其适用范围，没有什么选择余地。到了近代，人们意识到如果在某些构件中采用两种材料组合，就能更好地发挥各自的材质。这里举屋架和桥梁结构为例：十九世纪四十年代有豪氏(HOWE)(图1—1a)和普拉特(PRATT)桁架(图1—1b)，均以木做受压杆，以铸铁(图1—1的位置)为受拉杆。前者用铁拉杆做腹竖杆，而后者则用铁拉杆做腹斜杆。

进入二十世纪，人们进一步发展了两大主材——钢和混凝土。它们又有各自众多的规格和材质。结构用钢有合金钢、低合金钢和碳素钢三大类型，热轧型钢、轻钢和薄钢等多种规格。混凝土有多种标号，以及普通混凝土和轻质混凝土。

这样不仅能按结构物要求选择适用和经济的材料，并且能使钢和混凝土组合起来，成为组合结构，供选择应用。形成组合结构的主要前提条件是：在结构构件中，型钢与混凝土之间接触面必须完全粘结，无相对滑移，使结构构件起整体作用，共用承受荷载，直到破坏为止。经过理论及实践证明：组合结构不仅能更好地发挥各自的材质特点，而避免其薄弱的一面，且能起相辅相成的作用：混凝土还能更好地提高钢的刚度，而钢能提高混凝土的强度，超过了单纯以一种材料制成的构件的承载能力。钢—混凝土组合结构是建筑结构专业中继钢与混凝土结构而兴起的一种新结构类型。国家建委已把它列入科研规划的中心课题中。

为了论述方便起见，我们将钢—混凝土组合结构分为两个部分。第一部分为组合柱，包



括钢管混凝土柱、外包钢混凝土柱和劲性混凝土柱三种类型。第二部分为组合梁，也包括三种类型：钢—混凝土组合梁、外包钢混凝土组合梁和带压型钢板的组合楼层。

第一部分：钢—混凝土组合柱

普通的钢筋混凝土柱是混凝土和钢筋结合而成。钢—钢筋混凝土组合柱则是以型钢代替了全部或部分钢筋，而型钢在构件截面中有着不同的位置。混凝土完全被钢管包裹的柱称为钢管混凝土柱；混凝土四角为四个角钢包住的柱称为外包钢混凝土柱；而型钢位于混凝土核心时则称为劲性混凝土柱。

一、钢管混凝土柱

1、构造：

用钢管内填混凝土的组合柱，其截面外形有两种主要形式，即圆形及方形或矩形（图1—2 a、b、c）。

钢管截面的管壁用热轧型钢或钢板条焊合（将板条旋滚焊或直接焊），壁厚 δ 应：

对于方形及矩形孔： $\delta \leq b\sqrt{\sigma_s/3E_s}$

对于圆形孔： $\delta \leq d\sqrt{\sigma_s/8E_s}$

式中： b ——方形截面的边长或矩形截面的短边长；

d ——圆管的外径；

E_s ——钢材的弹性模量；

σ_s ——钢材的屈服应力。

圆孔截面最小外径 $d \leq 100\text{mm}$ ；方孔截面的最小边长 $b \leq 100\text{mm}$ ；矩形截面的边长 $a \times b \leq 100 \times 80\text{mm}$ 。

管中混凝土占截面积的百分比，按

分配参数 $\alpha = \frac{\text{混凝土截面抗力}}{\text{混凝土截面抗力} + \text{钢材截面抗力}}$

应 $0.1 < \alpha < 0.8$ ；

常用的含钢率为4~12%；

混凝土标号宜在200~560之间。

2、填混凝土圆钢柱受力概念

据国外实验，填混凝土圆钢管短柱承载能力较混凝土与钢两者强度总和，还能增大70%。其原因是：组合柱受轴心荷载下压时，柱心混凝土使钢管刚度大大增强，钢管壁受力时不产生局部弯曲；而钢管壁对核心混凝土起紧箍作用，使混凝土受力时产生三轴应力（图

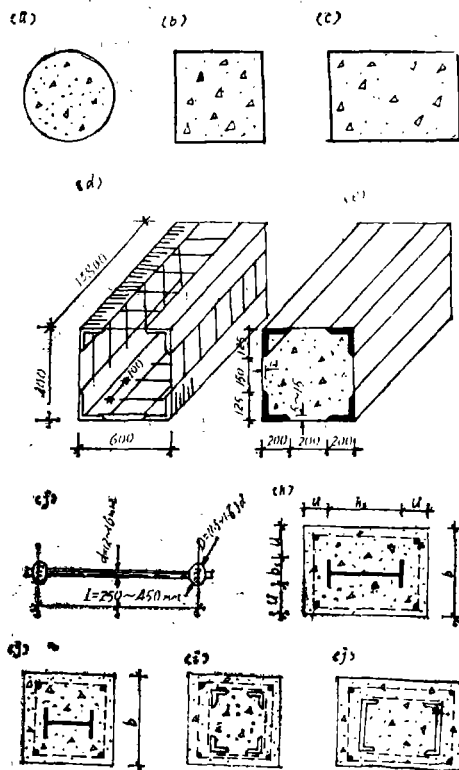


图1—2 各类型的钢—混凝土组合柱截面

1—3a,b,c), 提高了混凝土的强度。所以采用较高标号的混凝土更为有利。根据国内外经验, 填混凝土圆钢柱应限于计算长度与直径之比 l_0/d 不超过17~20及荷载偏心距 e 不超过 $0.125d$ 。当填混凝土的圆柱细长及有较大偏心荷载时, 柱的承载能力不取决于截面强度而存在稳定问题, 填混凝土组合柱的上述优越性就减少以至消失。这里还应理解的一点是: 当混凝土受力向周边挤压时, 圆钢管产生了环向应力(图1—3b、d), 使钢管承载能力略有降低。所以, 钢管混凝土柱承载能力 N 的基本公式是:

$$N = A_s \sigma_{s1} + A_c \sigma_{c1}$$

式中: A_s 及 A_c 分别表示钢及混凝土的截面积;

σ_{s1} 表示降低了的钢抵抗应力;

σ_{c1} 表示增加了的混凝土抵抗应力。

σ_{s1} 及 σ_{c1} 值取决于: ①计算长度及管径之比; ②钢及混凝土的泊桑比; ③钢管壁厚及管径之比。

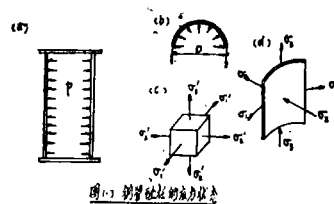


图1-3 钢管混凝土的应力状态

3、填混凝土方钢柱受力概念

填混凝土方钢管柱和外包钢混凝土的劲性混凝土柱, 受轴心荷载下的计算承载能力通常是采用普通钢筋混凝土柱的计算方法。即短柱的承载能力等于混凝土截面强度和钢截面强度之和。但随柱长的增加和必然存在的荷载对截面的初始偏心值影响, 柱承载能力不仅取决于截面性质, 且取决于沿柱长的屈曲, 承载力就逐渐下降。

填混凝土方形短柱和劲性混凝土短柱受偏心荷载时, 如果是纯钢截面的柱, 轴荷——弯矩交互作用是: 当轴荷增加时, 柱的弯矩承载量就不断下降(图1—4a)。但对组合柱却不同。实际上因有轴荷而弯矩承载量有所增加。这是因为轴荷产生的预应力效应阻止开裂, 增加了混凝土的抗弯矩效应(图1—4b)。图1—4b中当 $M/M_u = 0$ 时 $N/N_u < 1.0$ 的原因是考虑组合柱存在有初始偏心及杆件不可能绝对平直这些因素。

填混凝土方钢柱不同于填混凝土圆钢柱的地方是: 方管壁对核心混凝土的强度提高, 远不如圆管那么显著。所以, 在计算时不考虑混凝土的强度提高部分。但是由于方钢管截面管壁的端角受到挤压而产生更大的刚度。根据国外资料, 这个特点适用于细长比 $l_0/r < 50$ 的受轴压及弯矩的柱(Beam-column)。

荷载的偏心值 e 既可以是平行于管壁或与管壁成 45° , 甚至达 30° (图1—5及1—6), 也不会由于荷载位置及截面主轴线处于不对称而产生扭矩失稳。图1—5是两端铰接, 截面为 200×200 mm填混凝土方管柱(壁厚为10mm)的荷载——中段挠度关系曲线。a线是填混凝土钢柱, 轴心受压, 柱长3m; b线是填混凝土钢柱, 荷载偏心值 $e = 38$ mm; c线是纯钢管柱, 荷载偏心值 $e = 38$ mm。这些线都是实验值。

中心受压时承载能力填混凝土柱显然较空钢管柱为大, 所以不需比较。当 $\frac{\text{偏心距}}{\text{截面高}} = \frac{38}{200} = 0.19$ 时, 填混凝土管无论是承载能力和挠度均较空心管为大。从c线与b线比较, 也可看出: 当

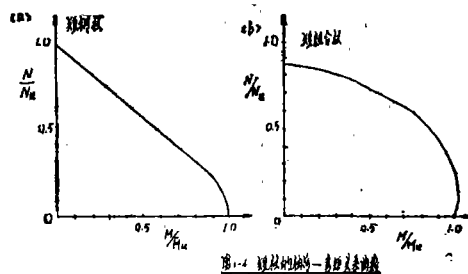


图1-4 轴压和弯矩的交互作用

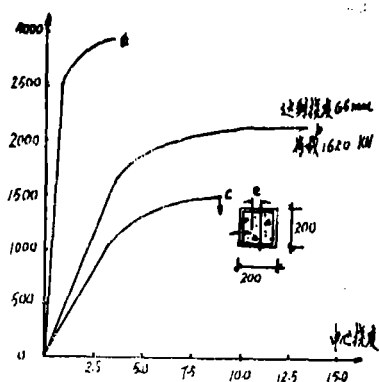


图1-5 方形截面—中心挠度关系曲线

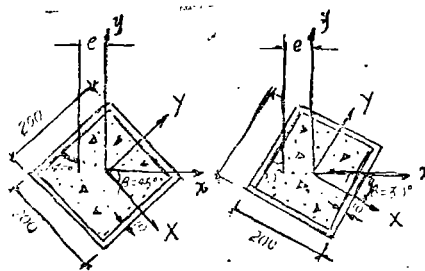


图1-6 方形截面荷载倾斜

低荷载时空管挠度仅较填混凝土管挠度约大25%。这是说当混凝土未开裂、钢材与混凝土均在弹性阶段时,在组合截面中钢管提供了弯曲刚度的75%。钢所以能有这么高比例的刚度,是由于钢位于截面的最外边且有棱角。当荷载产生弯矩时,钢较混凝土有较高的相对刚度。

4. 填混凝土钢管柱的特点

填混凝土钢管柱与普通钢筋混凝土柱比较,优点是:

①用钢量略有增加或大体相等,但截面小,节省水泥达65~80%,减少在建筑中结构所占用的面积,比起钢筋混凝土柱或钢管柱显得美观。

②施工时浇筑混凝土不需木模板,节约了全部木材,直接将混凝土注入钢管中(但须注意水泥、沙、石和水份必须拌匀),勿使稀稠不均,且管内没有钢筋和绑扎工作,施工周期短,深受施工单位的欢迎。施工时尚须注意:钢管内壁应清净无锈蚀油垢,以利混凝土与管壁的粘结。柱底宜留孔,但当灌混凝土时应暂堵住。留孔的目的有二:1)可使过剩水份漏出;2)防止管内湿气冬日冰冻膨胀,或遇火爆炸而损伤管壁。

③有些厂房因工艺要求,厂房结构物不仅承重,还须支承设备管线,填混凝土钢管柱外表是钢的,可节省大量预埋件,省料又省工。

④延性大,有吸能作用,抗震性好。比起纯钢柱,填混凝土钢管节约钢材达40~50%,而重量则稍重。防火性能比较好。当结构为多层构架或多层建筑物时,按各层荷载不同,而用不同壁厚的钢管,但保持外径不变,大大简化管上下段间的连接。

5. 填混凝土钢管柱适用范围:

填混凝土钢管柱除用于建筑及构筑物的支柱外,还适用于桁架(房屋、吊车梁及桥梁的桁架)的受压弦杆、桥梁墩台、高压输电线塔,无线电及电视塔架以及单层和多层建筑的柱。

在选用截面形状时,须注意填混凝土圆钢管柱仅适用于以轴心受压为主的柱,所以在有桥式吊车的厂房中,采用双肢柱或三肢、四肢柱分别支承屋盖和吊车梁,柱肢间用缀板或缀条相连(图1—7),巧妙地使柱受轴心压力或小偏心压力并降低了柱的细长比。我国有关基建单位研究厂房填混凝土圆钢柱已有二十余年历史,完成了十多座大型工程。例如地铁建筑

的支柱采用了这种结构。在多层框架方面：国内也有多处设计采用填混凝土园钢管柱。例如电力基建设计部门和锅炉制造厂应用在锅炉构架多座。60万瓩电厂的锅炉构架高达106m，管径为2m，壁厚为24mm。填混凝土的园钢管柱还应用于500KV变电构架的A形支柱。高炉炉体框架也采用了这种新型结构。

在国外，用填混凝土园钢管柱设计高175m 的五十层高楼建筑。国外较多的采用方形或矩形截面的填混凝土钢管柱。它的优点是在一定的长细比范围内（例如 $L/r \leq 50$ ）有较好的抗柱端弯矩的性能。柱端与其它构件连接的构造可以采用普通钢结构联结形式，颇为简便。但填混凝土园钢管柱与其它构件联结处（柱脚、柱头及牛腿等）比较复杂，费工费料。

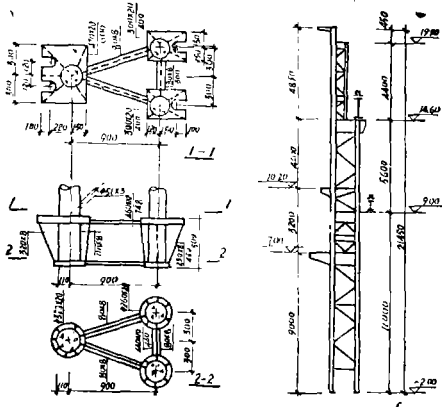


图1-7 445 榀柱中连接构造图

二、外包钢混凝土柱

1. 构造及承载能力：

外包钢混凝土柱截面为方形或矩形（图1—2d、e、f）。这种构件用相同的等边角钢包住四个角，取代了混凝土柱内的纵向钢筋。角钢间的联结是将头部墩粗的圆钢焊在角钢内侧，形成横向箍筋，在这钢骨架内填素混凝土，并在钢箍外侧填混凝土至少厚10mm作为保护层，不使箍筋外露，而与四个角钢外表齐平，或稍凸出。角钢尺寸及混凝土标号按强度计算确定，角钢厚度通常不小于10mm，箍筋直径为10~16mm，箍筋间距为100~200mm。

外包钢混凝土柱的受力性能：经国内外实验证明，当构件的轴心受压、短柱、（长细比 ≤ 10 ）箍筋间距 $\leq 150\text{mm}$ ，混凝土标号 ≥ 400 号，钢材屈服应力 $\geq 40\text{kg/mm}^2$ ，配筋率 $\geq 5.5\%$ ，箍筋直径 $\geq 10\text{mm}$ 时，钢骨架对核心混凝土起着“圈环效应”，使柱承载能力较钢筋混凝土柱约高20%。当外包钢混凝土柱为低配筋率（ $\approx 1.5 \sim 2\%$ ），箍筋间距100~200mm，小偏心受压 $e \leq 0.1 \times$ 截面高度的中长杆件时，钢与混凝土间仍存在有粘结作用和不同程度的相互作用，它的破坏荷载值较普通钢筋混凝土柱相当接近而略高。所以，按普通钢筋混凝土规范计算是适合的，而偏于安全方面。

这个类型的柱用于有桥式吊车的重型厂房时采用双肢柱，使它们承受轴心荷载，并对屋架铰接支承（图1—8）。

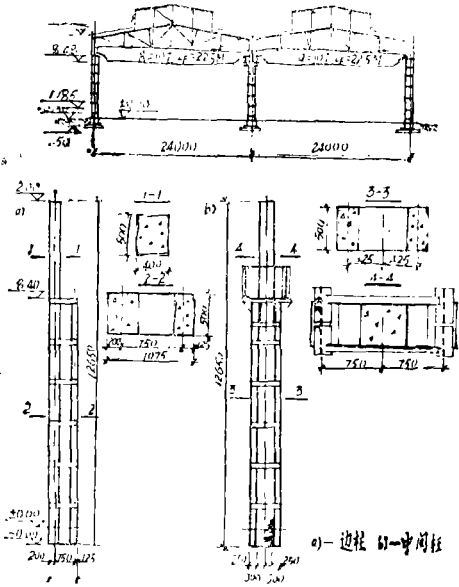


图1-8 双肢柱中连接构造图

2. 特点:

这种结构比起钢筋混凝土柱的优点是:

①构造较简单,没有密布弯折的钢筋,便于混凝土捣实,有利于采用高标号混凝土(一般不低于400号)。

②方形或矩形截面,且四角外包角钢。有以下两个优点:1)与其它构件的联结(如柱顶,柱脚和柱身上的牛腿、支托等)均可采用钢结构的联结方式,颇为方便。2)不需要在混凝土中设预埋件,节省了钢材。

③当上下柱段有不同荷载时,可以改变角钢的尺寸和混凝土标号,而不改变截面的外部尺寸,以利柱身的连接,有利于减少柱截面尺寸规格。例如用于火力发电厂主厂房的外包钢混凝土仅用三种标准截面尺寸,即:400×400、400×600、600×600,使工厂预制时避免钢模板规格过多,有利于机械化、标准化和工厂化施工。

根据苏联实验资料,在受同等轴向荷载下,外包钢混凝土柱,钢材用量大致相等,但可节约混凝土50%,避免大量的钢筋剖口焊接和减少二次浇筑混凝土量。截面尺寸也大大减小。并增加了结构的塑性和延性,有利于抗震。比起纯钢柱节约钢材30%~50%,并提高结构的耐火性。

3. 适用范围:

国外已将外包钢混凝土结构用于电厂主厂房,随着发电单机容量的增大,设备要求厂房结构高,跨度大,荷载重,工艺要求复杂,就更显示出用外包钢混凝土结构的优越性和经济性。我国电力部门,不久将应用于20万瓩和30万瓩的电厂主厂房柱。

外包钢混凝土柱的劳动量和制造时间,依施工设备条件而有很大的差异。首先是拚制构件的钢骨架,包括断钢筋、钢筋头墩粗、每根钢箍和四角角钢的焊接。接着是把钢骨架放在钢模板中进行浇捣混凝土。这么多的工序如主要依靠人工,则不仅费时费事,而且拚制质量不易保证。所以将外包钢混凝土柱应用于实践工程时必须先考虑构件的制造问题。

关于联结四角角钢的横向箍筋,是否可以考虑在柱的四个纵向面内改用连接的蛇形(“之”字形)圆钢,装置在两角钢的内平面上(图2—7)。为了保持圆钢与柱表面有一定的距离,可先在圆钢每个弯折点处加焊一块小垫板,以代替墩粗的圆钢头。装配时通过小垫板和角钢内平面焊接,这种方法要比原有型式易于施工和减少劳动量。

三、劲性混凝土柱

1. 构造:

劲性混凝土柱截面常为方形或矩形,它的核心型钢,有两大类型:①实腹型钢包括窄翼或宽翼工字钢或两个背对背的槽钢(图1—2g, h)。②型钢拚制截面一般是面对面的两个槽钢或四角用四个角钢,用缀条或缀板把它们联结成核心的钢骨架(图1—2I, J)。本文限于篇幅仅对前者应用较广的核心工型钢——混凝土柱予以介绍。

做为截面一部分的混凝土型钢复盖层厚 u (符号见图1—2h)应 $40\text{mm} \leq u \leq 0.3h_s$,通常为50mm。复盖层厚度超过75mm的部分不考虑其承载能力。截面中混凝土的分配系数 α :

$0.2 < \alpha < 0.8$ 。

为了防止混凝土的局部剥落,在外包混凝土截面中加钢筋。在柱全长中应有适当直径的横向钢筋箍(最小直径为5mm),箍的间距不得超过 $\frac{2}{3} \times b$ 或200mm。至少有四个纵向钢筋使其在捣筑混凝土时能够支撑钢筋箍。包括在柱强度计算中的纵向钢筋截面积 A_r 不得超过混凝土截面积的3%。对钢筋的混凝土复盖层厚度按一般钢筋混凝土规程办理,对纵向钢筋不得小于25mm。

工型钢截面尺寸,一般限制腹板高度 h_s : $100\text{mm} < h_s < 1000\text{mm}$,翼宽 $b_s > 500\text{mm}$ 。美国规范规定:钢管混凝土柱和劲性混凝土柱的混凝土标号应在200~560号之间。规定混凝土标号的下限目的是:保证混凝土能做为承受荷载的结构材料;规定上限的原因是迄今还没有对超过560标号混凝土进行过组合柱的试验。

2. 承载力:

前文提到过各类型的组合短柱承载能力等于混凝土截面强度与钢截面强度之和。前提条件是各组成部分必须能保证刚度,以抵抗在增加的应变,使各组成部分能达到额定的承载力。在混凝土保持不开裂的情况下,核心型钢与纵向钢筋不会产生局部弯曲。根据实验,混凝土的受力极限时的应变 $= 0.0018$,过了这个极限,混凝土开裂程度使它不再能受力。这也就是在均匀轴向应变下的组合截面达到了破坏状态。这个限制使组合截面中取钢的额定屈服强度的上限数值,即:

最大的钢材屈服应力 $\sigma_s = 0.0018 E_g = 3900 \text{kg/cm}^2$ 。

如果钢材受力超过 3900kg/cm^2 ,则在设计时认为组合截面中的混凝土不再能对型钢提供局部稳定性的保证和发挥更大的承载力。

现行英国的钢结构规范BS449(1969年)对劲性混凝土柱有简化的承载力计标方法,主要条文是:

对核心工字钢付轴(即位于工字钢腹板面中的弱轴 y)的回转半径 r_y ,近似地采用 $0.2(b+100)\text{mm}$ 。(式中 b 为翼宽)。对主轴(即垂直于工字钢腹板面的强轴 x)的回转半径 r_x 可按非外包截面计算。(纯工钢截面时: $r_y = 0.206$, $r_x = 0.39h$ 。 h 为I型钢截面高度)。这就大大地提高了对轴心受压和对弱轴偏心受压的承载能力。但同时还规定其轴心承载力不得超过其纯钢压杆承载力的两倍。

3. 设计特点及使用范围:

在四十年代以前,国外一些国家由于建筑法规要求某些建筑的钢结构需要有严格的防火性能,所以在钢柱外包混凝土,以后发展到钢筋混凝土与钢材结合,经过多次进行轴压、偏压试验,证明它比纯钢柱有更大的强度和刚度,更高的局部和整体稳定性,节约钢材达50%较钢筋混凝土柱有更大的承载能力和更小的截面积,特别是它们的抗震性能受到日本建筑业的重视。

从“组合柱简易计算方法”看出,在这个新订的规程中,窄翼工字钢或背靠背的双槽钢截面适用于受轴心荷载短柱($\frac{L_{ox}}{h_x}$ 及 $\frac{L_{oy}}{h_y}$ 均不超过12,式中符号: L_{ox} 及 L_{oy} 分别是对截面 x 轴和 y 轴的柱的有效长度; h_x 及 h_y 分别是垂直于柱弯曲主轴和付轴的截面总高度)或两侧梁

的跨度及荷载均接近时的有支撑柱。但对于受较大弯矩及长细的组合柱 ($\frac{L_{ox}}{h_x}$ 及 $\frac{L_{oy}}{h_y}$ 值介于 12~20 之间) 则以宽翼工字钢为宜。英国在五十年代后期才有热轧宽翼工字钢。在这以前采用加宽的钢板条铆于窄翼工字钢两翼, 组成 I 型截面, 广泛用作钢柱和组合柱。目前我国尚缺热轧宽翼工字型钢, 建议采用在工字钢两翼加焊钢板条的截面。

美国迄至 1978 年公布的美国钢结构规范中有关组合结构的章节仅列了组合梁。近年来, 美国有些高层结构在施工时先用钢柱架设好底面的五六层框架, 以便进行这些层的其它工作, 同时再将钢柱外包混凝土, 增加柱承载能力, 继续架设以上各层的框架结构。既缩短工期, 又达到经济效果。

第二部分: 钢—混凝土组合梁

我们按钢—混凝土组合梁的构造把它们分为三种类型: 即①用混凝土板与钢梁组合的钢—混凝土组合梁。②梁底部用其它型钢 (角钢、槽钢或钢板) 的外包钢混凝土梁。③混凝土板、压型板与钢梁三者组合的钢混凝土组合楼层。现分别介绍如下。

四、钢—混凝土组合梁

1、组合概念及其特点:

在多层建筑中, 钢梁和它上面的楼面混凝土板当受竖向荷载时, 在它们之间的摩擦阻力被克服后, 就产生相对移动, 形成图 2—1、b 的挠曲图形。如果沿梁纵向有足够联结件 (在钢梁上翼面焊以联结件并筑入混凝土板中) 承受其间的水平剪力, 并防止混凝土板受力后向上掀起与钢梁脱离, 那么板和梁两者组合成一个结实的整体, 梁受荷载直到破坏。截面受荷载后在共同的中和轴以上部分产生弯压应力, 主要由混凝土板承受, 中和轴以下部分产生弯拉应力, 主要由钢梁承受 (图 2—1d、e) (如果中和轴位置在混凝土板中, 中和轴以下混凝土受拉部分在计算时不予考虑; 如果中和轴位置在钢梁部分, 则钢梁还部分地受到压应力, 应予计算。) 这就充分发挥两种结构材料的受力性能。对于荷载重, 跨度大 ($L > 7.5\text{m}$), 原拟用钢梁的结构采用组合梁可以节省钢材 17~25%, 降低梁的高度 15~25%, 和受力时的挠度; 由于混凝土板做为多层建筑物的横隔, 钢梁做为它的加劲肋, 大大增强建筑的水平抗力 (风力、地震及其它震动力)。当筑捣混凝土楼板时可利用钢梁下翼支撑模板, 而不需从地面搭脚手架 (图 2—2), 此外还可以在钢梁上焊接托架

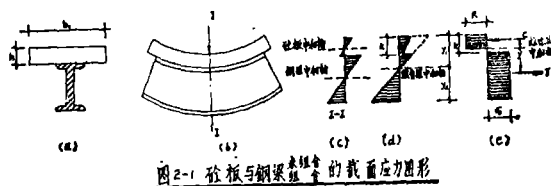


图 2-1 钢梁与混凝土板的截面应力图形

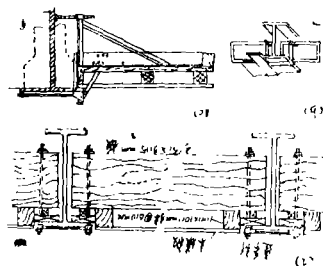


图 2-2 现浇混凝土板的支撑架

或牛腿供建筑内敷设管线，而不必象钢筋混凝土梁那样需要设予埋件。

2、类型：

如前所述，组合梁由三部分构成，即钢梁、剪力连结件和混凝土板，每个部分也各有若干类型，分述如下：

①钢梁部分：

1) 工字梁——最通用型式是工字型钢(图2—3a)和在工字型钢底翼再加焊一块板条，以增大抗拉强度(图2—3b)或用三块板焊成上翼小、下翼大的工字形，并将上翼伸入混凝土板中，而不另需要剪力连结件(图2—3c)。

2) 箱形钢梁——适用于公路及铁路桥梁(图2—3e)。

3) 轻钢桁架梁及普钢桁架梁——轻钢桁架是采用角钢做上弦，元钢做下弦及腹杆；普通桁架的各杆件是用双角钢及单角钢组成。桁架上弦节板或桁架腹杆也可以向上伸入到混凝土板中，做为桁架和混凝土板间的连结件，形成组合结构，以减小上弦杆型钢的截面尺寸(图2—3f)。

4) 蜂窝式梁

将工字型钢的腹板纵向割成锯齿形的两半，然后错开，将凸出部分对头焊接，形成了腹板有六角形开孔的蜂窝式梁。与顶部混凝土板组合成整体后，较单纯的钢蜂窝梁，更增加了梁的强度与刚度。适用于跨度大而荷载较轻的多层建筑(图2—3g、h)。

上述2)至4)的各式钢梁均是空腹的，可以利用它穿挂设备管线而不需另占楼层的空间。

②剪力连结件

1) 刚性连结件(图2—4a)

这种连结件可以是方形钢块、T形钢或背贴背的双角钢，焊以半圆形钢环，仅能按弹性设计，适用于桥梁。

2) 栓钉连结件(图2—4b)

通常采用 $\phi 16$ 、20及23mm圆钢，将头墩粗，用自动焊机施焊。在钢梁上翼板上，每排自一个至四个，施工迅速，用料经济，

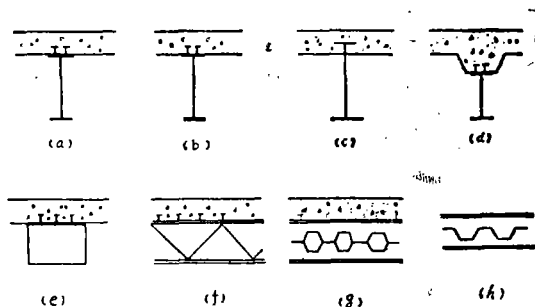


图2-3 钢-砼组合梁的各种组合形式

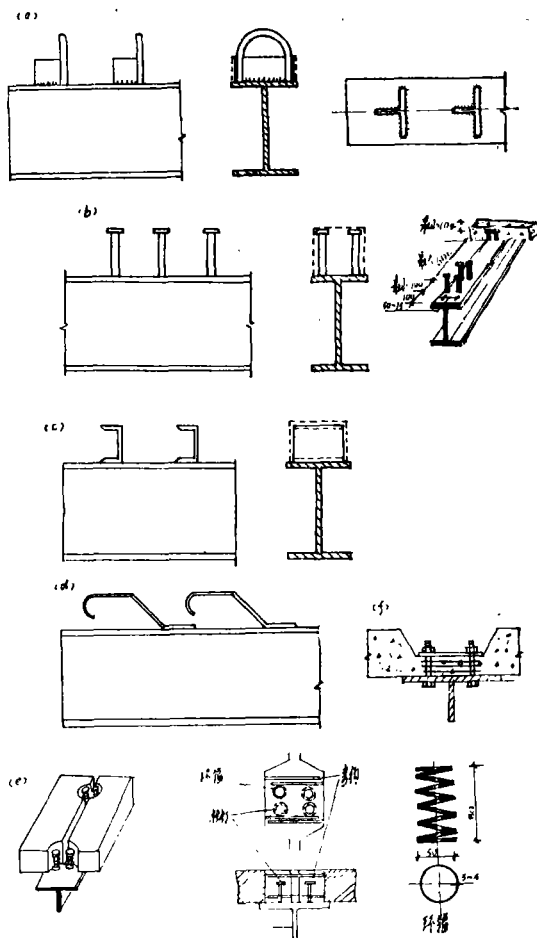


图2-4 连结件的各种类型

保证质量。现在工业发达国家，全部采用此式，而淘汰了其它型式。予制混凝土板使用栓钉做连结件时结构图形见图2—4e。

3) 槽钢连结件 (图2—4c)

通常采用8、10或12号槽钢，采用栓钉有困难时，宜用槽钢做连结件。

4) 蛇筋连结件 (图2—4d)

将蛇形的园钢成对地焊在梁上翼面两侧，在五十年代盛行于西德苏联及东欧国家。我国也采用此式。现在有些单位已开始采用槽钢连结件，工料均较经济。

2) 至4) 均属柔性连结件，按弹性及塑性设计均可。

5) 用高强度螺栓作为予制混凝土板与钢梁的连结件 (图2—4f)。

③混凝土板

采用普通或轻骨料混凝土，其承载能力无大差异，但受力时后者挠度稍大于前者。采用塑性设计时，混凝土标号宜用200~300号。混凝土板通常是现浇的，也可以是予制的，后者见图2—4e。

混凝土板的另一种型式是在板和钢梁间增加梯形的混凝土托座 (图2—3d)，优点是更节约钢材，减小挠度，自混凝土楼板到钢梁上翼面截面无突变，消除了混凝土板与钢梁间产生的剪力滞后 (shear lag) 作用。此外，当楼板有梁格时，为了使主次梁均能与现浇楼板成整体，在主梁或次梁加混凝土托座。

3、设计要点：

①施工方法与组合梁受荷载计算的关系：

在钢梁上浇筑混凝土板时，如钢梁下设临时支撑，待混凝土凝固达到能承受荷载时，再撤去支撑，组合梁的计算方法是以整个组合梁承受全部荷载 (自重及使用荷载)。如不设临时支撑，计算方法是以钢梁单独承受自重 (梁重及湿混凝土重)，整个组合梁承受除自重外的恒载和使用荷载。

②弹性设计计算步骤：

1) 先算出截面的混凝土板有效宽度 b_0 。

2) 算混凝土的折算系数 n = 钢梁的弹性模量 E_g /混凝土的弹性模量 E_h 。

3) 板的换算截面积 $A_h = \frac{b_0 \times \text{混凝土板厚} \delta}{n}$ 。

4) 查出或算出拟采用的钢梁断面面积 A_g ，惯性矩 I 和截面抗力矩 W 。

以上步骤亦适用于塑性设计。

5) 已知钢梁的截面积 A_g 及其中和轴位置，混凝土的折算截面积 A_h 及其中和轴位置，算出组合截面的共同中和轴位置。

6) 求出组合梁截面的惯性矩 I_z 。

7) 验算简支组合梁钢梁下翼底面受到的最大弯拉应力 $\sigma_g = \frac{\text{外力} M}{I_z/y_4} \leq \text{钢材容许应力} [\sigma_g]$ 。

验算组合梁混凝土板顶面受到的最大弯压应力 $\sigma_h = \frac{\text{外力} M}{I_z/y_1} \leq \text{混凝土容许应力} [\sigma_h]$ 。式中 y_4 及 y_1 分别是组合梁截面中和轴到钢梁下翼底面及混凝土板顶面的距离 (见图2—1d)。

③按塑性设计的几项规定:

1) 不适用于受震动荷载的结构。

2) 钢梁部分须符合钢结构塑性设计的要点, 混凝土标号不应超过300号。

3) 适用钢结构的简化塑性应力应变原理, 计算结合结构的截面(图2—1e)。

4) 设混凝土的极限抗压应力为 R , 钢的极限抗拉应力为 σ_s (屈服应力), 当塑性阶段时整个截面的中和轴位置如在混凝土板中时, 截面的最后抵抗弯矩 $M_u = \text{混凝土抗压强度} \times C \times Y$ (图2—1e), 或 $M_u = \text{钢抗拉强度} \times X \times Y$ 。

式中 $C = \text{混凝土抗压截面积} \times R$

$T = \text{钢抗拉截面积} \times \sigma_s$,

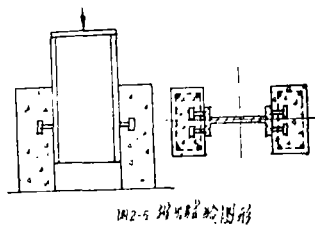
$Y = \text{混凝土的重心线} C \text{至钢的重心线} T \text{间距离。混凝土板中的受拉部分不予考虑。}$

组合梁在塑性阶段中和轴位置很少在钢梁部分。

④计算剪力连结件

首先算出梁中剪力跨的纵向水平总剪力值 V , 按每个柔性剪力连结件的抗剪强度 S (由推出试验(图2—5)或查手册得出), 求出需要连结件的数量 N

(即 $N = \frac{V}{S}$), 均匀地布置在该剪力跨中。但在有较大的集中荷载处, 连结件应密些。



⑤核算混凝土板中的钢筋:

在计算的承载能力阶段内, 应有足够的纵向钢筋, 防止板的横向开裂; 应有足够的横向钢筋防止板的纵向开裂。

⑥考虑混凝土板的干缩、徐变以及在露天结构中混凝土板与钢梁的气候温度差异 (从略)。

⑦验算梁的挠度:

结构按极限状态或塑性设计时梁的挠度常常起控制作用。

钢—混凝土组合梁的挠度计算须考虑到:

1) 施工时如在钢梁下未设临时支撑, 则组合梁的挠度 = 施工时钢梁单独承受湿混凝土重量及自重产生的挠度 Δ_1 + 使用荷载产生的挠度 Δ_2 ; 另外还规定 Δ_1 的绝对值不得超过25mm, 以防止梁下凹段落增加混凝土用量和自重。如施工时钢梁下有临时支撑, 则组合梁挠度 = 组合梁受全部荷载 (自重及使用荷载) 的挠度。

2) 施工时, 混凝土凝固过程中有干缩, 在长期荷载下有徐变。从另一方面说, 建筑中的混凝土板不太厚 (通常 $\leq 125\text{mm}$), 徐变的影响不大。一般近似地计算挠度时, 可将混凝土的弹性模量 E_c 值采用 $\frac{E_s}{2}$ 。

3) 英国规范考虑到长期荷载不可能是长期满载的, 除自重天花板及隔墙等长期静载外, 其余可按1/3使用荷载计算挠度值。

4) 为了减少挠度值, 施工时可先将钢梁做反拱, 以抵消自重及混凝土板重所产生的挠度。

五、外包钢混凝土梁

1、构造及优点:

外包钢混凝土梁是在普通的钢筋混凝土梁底面采用钢板或其它型钢 (槽钢或用两个角钢

包住截面底边两角见图2—6)以代替全部或部分原钢筋混凝土内受弯拉应力的钢筋。型钢与混凝土的连结通过锚筋来保证,锚筋垂直焊在型钢上,并起箍筋作用。锚的间距通常取150~250mm。它的优点是:

①由于采用底部型钢取消了底部钢筋保护层,外包钢混凝土梁的截面减少高度,而仍保持相同的截面有效高度。这就降低了混凝土用量和建筑层高,减轻自重,对于多层建筑的经济性有重要影响。

②利用外包钢可以直接焊接建筑所需要的悬吊或依附设备,而不需在梁中另设予埋件。

③用所加的截面底部型钢(和一部分钢筋)代替密排的钢筋,使外包钢混凝土梁较钢筋混凝土梁更适用于跨度大荷载重的结构。

2、国内外科研简况

外包钢钢筋混凝土组合梁近些年来,在我国、苏联和英国均在进行研究,虽然对构件的承载力的探讨是一致的,但由于要求不尽相同,因而在构造方面也各有发展重点。以下分别做简要的介绍。

①电力部电力设计研究院和北京电力设计院在1979年试验外包钢混凝土柱的同时,也进行了外包钢混凝土梁受弯受剪的试验。证明它的应力状况,破坏形态均与普通钢筋混凝土梁板为相似,可以采用按钢筋混凝土梁计算方法而稍偏于安全方面。它的抗弯和抗剪能力均较钢筋混凝土梁稍高。此外还进行了受荷状态下直接施焊,对梁无显著影响。在梁底角钢上任位置直接受局部吊重时箍筋应适当加密(图2—6)等试验。

②苏联进行了普通混凝土与轻混凝土(陶粒混凝土)的外包钢板的混凝土梁试验。比较结果:在配筋率与混凝土强度相同的条件下,承载力相同。但在同等荷载时,后者较前者挠度值为大,需要增加配筋率。后者的优点是自重大大减轻,此外还进行了予应力钢绞混凝土吊车梁的试验,并与予应力普通钢筋混凝土梁做了比较。

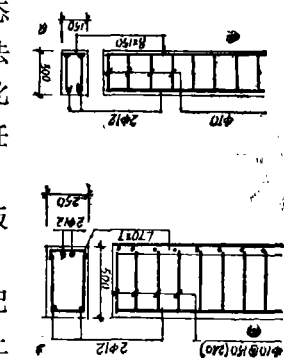


图2—6外包钢混凝土梁

③英国所进行的外包槽钢的混凝土梁(他们称之为组合钢筋混凝土梁composite

reinforced concrete beams)如图2—7,采用予制空心钢筋混凝土楼坂,安置在槽钢上的两侧,然后现浇钢筋混凝土梁和楼坂的复盖层;在槽钢内焊以栓钉型的剪力连结件,做为防止型钢与上部混凝土脱落,使其起整体共同作用的主要措施。并在槽钢内两侧布置高强度园钢或予应力钢绞线,以提高梁的承载能力。它可以与外包钢组合柱连结如图2—8。

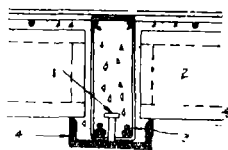
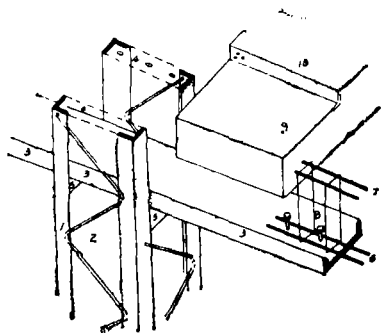


图2—7组合混凝土梁 截面

1. 栓钉连结件
2. 予制混凝土坂和顶部二次浇筑
3. 予应力钢绞线或高强元钢
4. 槽钢



组合梁与外包钢柱的连接

图2—8

1. 外包钢筋混凝土柱的外包角钢;
2. 柱中填混凝土;
3. 外包混凝土梁的底面槽钢;
4. 焊在角钢的钢板条(与上部柱连接用);
5. 支承组合梁的钢板;
6. 沿梁纵向的高强度钢筋;
7. 在负弯矩区的受拉钢筋;
8. 栓钉连结件;
9. 预制空心板;
10. 现浇混凝土板。

六、用压型板的组合楼层

早在四十年代国外多层工业建筑工地上已有这类型结构,但那时半波状的压型薄板只是用它做为永久性的混凝土模板,而取代木模板及其支撑。将混凝土和凸凹相间的薄板及钢梁三者有意识的组合,使它们成为整体承重结构而迅速发展,还是近些年的事(图2—9)。

1. 构造:

在混凝土板、压型薄钢板和钢梁组合成为楼层的结构中,压型薄钢板的放置方向有两种类型,即薄钢板的肋平行或垂直于纵向的钢梁。前者与通常的钢—混凝土组合梁在层与梁间增加了混凝土托相似。现在通常均采用后者,介绍如下:

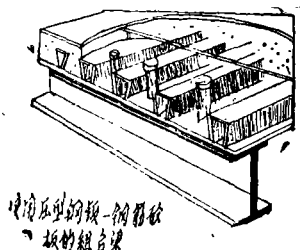


图2—9使用压型钢板—钢筋混凝土板的组合梁

国际组织(CEB—ECCS—FIP—IABSE)的组合结构规程草案对本组合结构有以下一些具体规定:

- ①混凝土板的总厚度 $\leq 90\text{mm}$,在凸肋上的混凝土复盖层 $\leq 50\text{mm}$ 。
- ②压型薄板应用碳钢屈服点应力介于 $25\text{—}76\text{kg/mm}^2$ 。通常每块板段的尺寸为:宽 $610\text{—}760\text{mm}$,长达 12m ,净厚度 $\leq 0.7\text{mm}$,最好镀锌。
- ③当用剪力连结件穿过薄板焊到支承梁时钢梁上翼面涂漆厚度不要超过 50微米 (即 $\frac{1}{20}\text{mm}$)。如未经电镀,总厚度不应超过 1.5mm ,且仅允许有最小限度的锈蚀。所采用栓钉连结件直径 $\geq 19\text{mm}$ 。虽然薄钢板与混凝土间有自然粘结力,但效应不大,在计算时不予考虑。它们间的组合作用(也就是抗剪力和抗挠曲)主要靠以下三个方面:

1)薄钢板冷弯的型式大致有两种类型:闭合式和开敞式;

上图(a)和(b)为开敞式;(c)为闭合式。

2)薄钢板面(顶面底面和两侧面)采用凹凸纹。

3)垂直于板的凸肋上焊以连续的细钢筋。

这种钢—混凝土组合楼层,做为整个建筑结构体系的横隔,极为有效地抵抗水平横向力。

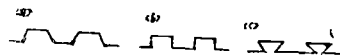


图2—10 用于组合楼层的压型板形式

用栓钉连结件穿过薄钢板焊接在钢梁上翼面,这种楼房承受水平力犹如钢板梁:楼层水平横肋相当于腹板承受剪力,边缘的梁相当于翼缘。

2. 结构设计概念

由于,①压型薄钢板的截面有多种几何形式,且非全部与钢梁相贴而具有柔性;②混凝土、薄钢板与钢梁各具有不同的材料性能;③以及这三种材料组合作用所依靠的栓钉连结件,具有柔性抗剪强度问题,结构相当复杂。更形象地说:压型板与钢梁接触部分是肋,当肋受荷载有变形时,栓钉是柔性的,会产生微小滑移。钢筋混凝土部分犹如多跨门或框架,肋是短柱而肋间混凝土板是梁,所以这就使滑移值关系到肋的宽、深、间距以及板厚,因此迄今仍需要按不同情况的半实验公式进行设计。

经近年来实践调查与研究,对压型板组合楼房有了以下的见解:

- ①组合体系能发挥最大作用,取决于板与混凝土间的剪力粘结强度;
- ②钢板承受湿混凝土的重量须按弹性设计方法;
- ③组合楼层的容许挠度设计应按一般钢筋混凝土设计规范的规定;
- ④在一定的承载能力条件下,浅的楼层较深的楼层表现出更好的组合性能;
- ⑤对于这种组合体系承受震动及循环荷载的研究,虽然已有学者在进行,但尚不能普遍地应用于桥梁及多层汽车库中。

3. 特点及其应用

使用冷压成型的肋状薄板,既可代替浇筑混凝土板时所用的木模板和施工时的临时工作台,又可做为混凝土板中的配筋,有足够刚度以承受施工荷载和永久性的使用荷载。这就免除板底部钢筋的绑扎和焊接,使施工迅速简便。板底凹肋空处可供敷设电力管线的通道,降低楼层高度。

国内建筑采用这种结构做楼房的有上海宝山钢厂发电厂厂房,南京和镇江的丁山饭店,苏州姑秀饭店,无锡水秀饭店以及桂林的三座旅游楼。

七、关于钢—混凝土组合结构的应用问题

我们已将钢—混凝土组合结构做了扼要评介。总的说来,我们对组合结构在国外发展过程中,有下述认识:国外最初(五十年代)是把钢—混凝土组合结构通用于桥梁,而用于建筑是1960年以后的时期,并得到蓬勃发展。英美及西欧将钢—混凝土组合梁从简支到连续梁,从实心混凝土板到用压型钢板的组合楼层,使整个建筑——特别是多层和高层——不仅构件本身节省了材料(钢材和水泥),减少占用空间,而且降低楼层高度,节约其它建筑材料,扩大使用空间和大大减轻地基的荷载,达到整个建筑的适用、经济和美观。此外,英国特别重视劲性混凝土柱和钢—混凝土组合梁节约钢材的优点,日本喜用钢管混凝土柱,因为它还有抗强烈地震的延性。近十年来苏联把外包钢结构应用到电厂和一些重型厂房结构中,它的用钢量较全钢的柱节省,并且还能采用钢结构的联结方式,应用于柱和其它部件的联结。至于构件的制造虽费些工,但采用自动焊接,机械化和成批量生产等专用设备,也就无碍于外包钢结构的推广应用了。

我们采用钢—混凝土组合结构时,至少需要考虑以下几点:

首先,结构专业人员由于专业性质和岗位工作的特点,往往偏重于一个方面,而缺少对

其它方面的钻研。组合结构则需要钢和钢筋混凝土两种结构的知识为基础,再做进一步的钻研。搞钢筋混凝土科技人员仅凭钢筋混凝土的结构性能或者搞钢科技人员仅凭钢结构性能是不能满足组合结构要求的。我国在研究和推广组合结构过程中,必当重视组合结构共同的和各自特有的性能,参考国外资料,通过我们自己的实验与理论分析,订出合理的正确反映结构承载能力和便于工程实用的设计规程。

其次是要考虑我国现在建筑业中“工”和“料”的情况。我国劳动力充沛,其中技术工人搞砧石和钢筋混凝土结构多,而钢结构工人少;地方生产的砧石和混凝土材料较普遍而工业生产的钢铁在数量和品种规格方面均较贫乏。例如当前最突出的是缺少薄钢板,推广钢管混凝土柱就受到限制;未生产宽翼工字型钢,对推广劲性混凝土柱不无影响。工价和料价比值,极为粗略地说:国外工业国家为3:7我国为1:9。所以我国推广钢—混凝土新型结构的途径和国外工业国家不尽相同。在充分发挥结构的优越性能前提下,节约材料(钢材和水泥)必须优先于节省“工”的考虑。

第三是构件的制造及工地施工的设备。要把一种新型结构应用到实践中去,必须同时考虑到所设计出来的构件如何制造和施工。这里只例举几项组合结构突出需要解决的专用设备:制造钢管混凝土柱需要卷管机;制造外包钢混凝土柱的钢骨架时需要整套的拼装设备(如墩粗圆钢头部,焊接好成对的梯形平面骨架,再用圆钢把这两骨架焊成立体),钢—混凝土组合梁和带压型板的组合楼层均需半自动栓钉焊接机。特别是压型板的组合楼层更需要有适当的施工技术与设备。

推广新型结构的最后一个问题,也是最重要的问题之一是领导的全力支持。在确认某种新结构适用于我国四化建设的某些基建工程时,进行统一领导和组织协调,采取措施,鼓励技术人员积极克服困难,拨给必要的专款(甚至小额外汇)试制或仿制专用设备;在第一次应用新结构时必须给以充分的时间。在取得初试成功后,再进而考虑企业核标,和以后在技术上改进和提高。

从近年来实际调查,了解到我国在以下特定情况下,可能采用组合结构:1)原必须用钢的结构,当改用组合结构时,可以节省相当大百分比的钢材;2)原为钢筋混凝土结构,当改用组合结构时用量不相上下或略有增加,但能节约大量水泥木材和劳动并且有强大的抗震力;3)厂房设备或工艺对结构有特殊要求。例如除为了满足厂房跨度、高度、柱距的要求有必要采用组合结构外,需要梁和柱的表面是钢板,以便随时随地焊住管架和支托;4)多层的不等跨建筑,较短梁用钢筋混凝土,长跨不用钢梁而用组合钢梁,节约钢材而使梁有同等高度;又如工厂的工作台需要有较大的净空,使台面混凝土板和钢梁结成整体最为经济合用。此外若干公用及民用建筑随着时代的进展,也有逐渐迫使建筑采用组合结构的趋势,这里就不在详述了。

参考资料

限于篇幅,从略。读者如有需要,请来函向作者查询。