

大跨度预应力空间折板结构的设计问题

崔佳 戴国欣 李开禧

摘要 本文总结了二十多年来大跨度预应力折板结构在我国发展过程中的成功经验及失败教训,对此类结构在设计中应注意的一些重要问题,如板的扭转失稳、翼板宽厚比对板承载能力的影响、折板纵向裂缝形成的原因以及预加应力的效应等进行了讨论,并原则性地提出改进设计的方法、制作及施工中应注意的问题。

关键词 预应力折板结构 扭转失稳 翼板宽厚比 纵向裂缝 预应力效应

大跨度预应力空间折板结构系列由于具有节省材料、结构重量轻、抗震性能好以及建设周期短等优势,在我国建筑工程上得到了广泛的应用。特别是在我国北方地区大量采用的V形折板结构系列,二十几年来,被广泛应用于影剧院、展览馆、仓库、工业厂房等,取得了巨大成功。纵观大跨度预应力空间折板结构二十多年来的发展过程,既有成功经验,也有失败的教训。特别是发生了某厂正在施工中的大跨度折板结构严重垮塌的事故,这些都给现阶段此类结构的设计与施工提出了更高的要求。

目前,国内外有关大跨、宽幅薄壁截面构件实用计算理论的研究已渐趋成熟,这对于我们更深入地探索大跨宽幅折板结构系列的受力性能及破坏机理,提高设计水平奠定了理论基础。本文即是在此研究成果的基础上,针对大跨度折板结构系列在设计中应注意的几个重要问题进行讨论。

一、截面形状对承载能力的影响

目前国内采用的大跨度折板结构系列,主要有A形(图1a)、V形(图1b)、W形(图1c)、Y形(图1d)及T形(图1e)等。

A形、W形及T形截面的受压区有较大的侧向刚度,因而在构件的制作、安装等尚未形成空间作用的独立工作阶段,不会出现局部侧弯失稳问题。故就其承载能力而言,其受力性能明显优于V形截面。实践经验证明,A形折板结构出现工程

事故的原因,绝大多数是由于顶部脊线处未牢固连接所引起,其破坏一般也只发生在该折有缺陷的折板处,极少波及相邻折板结构。

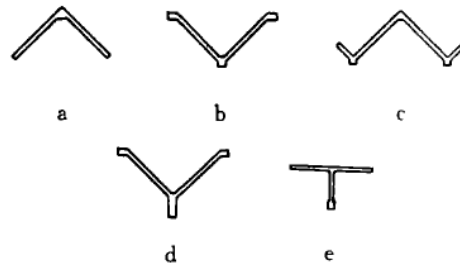


图1

V形及Y形折板结构的接合部位于波峰处,其优点是防水处理简单,不易漏水。但由于在单体工作状态时,折板的上部受压区处于无侧向支撑状态,侧向刚度很差,因而当由承载能力的需求控制设计时,是非常不利的。特别是由于结构的空阔工作全靠相邻折板间的相互支撑作用所维系,一旦某块折板发生倾翻破坏,将连带波及至相邻板块,造成整个屋盖结构系统的连续坍塌,某厂发生的折板破坏事故,正是这一典型破坏形式的反映,这是在设计中需特别注意的。

二、折板的整体扭转失稳

对于大跨、宽幅、薄壁的预应力折板结构而言,由于其力学模型已超出了普通材料力学所包容的等厚实体截面的范围,其理论基础应属于薄壁结构理论涵盖的领域。因而,若仍只把它简化为

窄矩形截面梁,以构件的强度破坏作为其承载力设计的控制值,既不符合折板结构的实际受力情况,也是很危险的,实践证明,在局部稳定得到保证的前提下,折板结构的破坏多为整体失稳。

近期的理论研究成果也表明,过去认为由于折板结构的平面外刚度 EI_y 较大,因而没有整体失稳发生的观点是十分错误的。相反,对于截面翘曲刚度 EI_w 为零的 V 形折板结构,由于其临界弯矩 M_{cr} 值较低,约为:

$$M_{cr} = \frac{GI_k}{\sqrt{2}b}$$

式中, GI_k 为截面的自由扭转刚度, b 为翼板的宽度(图 2)(1 式的推导详见文献[1]),因而,很容易发生扭转失稳。多次工程事故及大型试验都已证明,这种类型的梁在单体工作时,其破坏模式均为扭转失稳破坏而不是弯曲强度破坏(参见文献[2])。

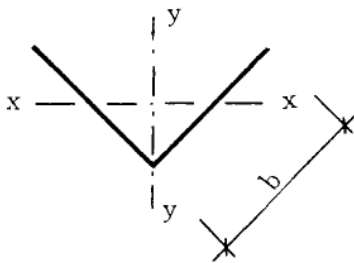


图 2

基于上述认识,作者建议在对大跨宽幅预应力折板结构进行设计时,除应按现行规程所规定的正截面承载力、斜截面承载力等进行计算外,尚应补充验算其单体工作时的整体稳定临界力,将构件所承受的极限弯矩限制在(1)式所得到的临界弯矩值以内,以避免扭转失稳的发生。

三、翼板宽厚比对承载能力的影响

预应力折板结构在发展初期一般仅应用于中小跨度的屋盖结构,经过二十多年来的试验研究及不断的完善和发展,目前,跨度在 24m 及 24m 以上的大跨度预应力折板屋盖已被广泛应用于各类建筑工程中。随着这类结构向大跨方向发展,其翼板的幅宽亦相应逐步增加。目前,部分大跨度 V 形折板翼板的宽厚比已直逼甚至超过了《V 形折板屋盖设计与施工规程》(JGJ/T21—93)所规定

的 $b/t \leq 40$ 的限值。某厂发生的大跨度折板结构垮塌事故,其主要原因之一,即因为施工单位因片面追求经济效益而任意减薄翼板厚度而造成的。

显然,V 形折板结构的上部受压肋梁虽然很细长但又没有失稳的原因,全在于受到侧板的横向支撑约束。如果侧向翼板没有足够的面外弯曲刚度,就不能为折板的上部受压肋梁提供有效的支撑作用,以阻止其丧失稳定。因此,限制折板结构翼板的宽厚比,对于保证整个结构的整体稳定,是非常必要的。

现行规程虽对折板结构翼板的宽厚比有严格限制,但对于具体的设计则缺乏明确的指示。文献(3)采用侧向弹性支承柱作为 V 形折板上部肋梁的力学模型,计算得出当侧板成为多波型空间曲面时外加荷载的临界值,并把这类稳定问题简洁地说成是局部稳定问题,实际上,它是板件受压其截面形状改变后的畸变失稳问题。

文献(3)还提出了预应力折板结构屈曲分析的简化模型及简明的校核公式。同时建议用控制翼板侧向弯曲刚度的方法代换宽厚比的限制条件,使其既能正确反映板内横向钢筋的作用,又能保证折板的局部稳定性。

四、纵向裂缝产生的原因及其对承载能力的影响

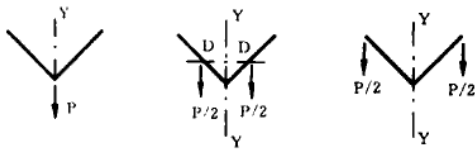
大跨度 V 形折板中纵向裂缝的产生以及裂缝对折板力学性能有无影响一直是工程界关心的问题。近期研究发现,折板结构中纵向裂缝的形成,主要源于壁薄而产生的截面相对扭转变形。

以图 3 所示 V 形截面杆件为例,若两端简支,跨中作用一竖向集中力 P 。按照初等材料力学的观点,不论此 P 力作用在截面的任何位置,如图 3(1)a、b、c 三种加载情况,因为假定杆件在弯曲变形之后其横截面仍然保持平面,则只要他们的合力均等于 P ,且合力使用线与对称轴 y 重合,则正应力在截面上线性分布并完全相等。实际上,对于大跨度折板这种薄壁截面而言,运用现行理论来计算其受力及变形是不准确的,而应该针对其宽幅、壁薄的特点,考虑截面周边形状的改变对其受力性能的影响。

如图 3(1)a 所示受力情况,很容易定性地得出,全截面除产生竖向挠度外,还伴随着两侧截面

的相对转动,即如图 3(2)a 中的细线所示,这种现象称为相对扭转。同理,对于图 3(1)c 所示受力情况,集中力 P 的两个等值分力除引起截面产生竖向挠度外,还要产生反向的相对扭转变形,变形后的形状将如图 3(2)c 的细线所示。只有集中力 P 的两个等值分力分别作用于截面的两个特定对称点,如图 3(1)b 中所示的 D 和 D' 点,截面才不会产生相对扭转变形而只发生弯曲变形,也就是说,若要全截面在保持形状不变的条件下发生弯曲变形,则要求加载方式必须符合图 3(1)b 的条件。因此,对于薄壁折板结构而言,假定按平截面导出的应力线性分布的结论只是在特定加载条件下才成立,而工程实际情况一般极少能满足这一加载条件,因而截面上正应力的分布将由于相对扭转变形而大不相同。

(1)变形前



(2)变形后

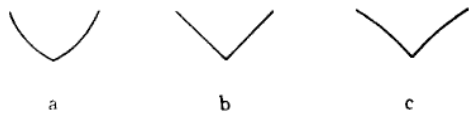


图 3

折板截面的相对扭转变形,将引起杆件截面下部两侧向翼板发生对称的横向弯曲变形,如图 3(2)a、c 所示。由于两侧向翼板通常较薄,因而引起侧向开裂,形成纵向裂缝。

同时,由于杆件的上部受压肋梁不可避免地存在初始侧向弯曲,其侧向弯曲也有一个发展过程,从而使侧向翼板在加载初期即开始出现纵向裂缝。

纵向裂缝的存在将削弱折板全截面的刚度,引起承载能力降低。现行设计规程中,对纵向裂缝出现的原因未作详尽解释,亦无明确的防止措施,此为待改进之处。

五、V 形折板的预应力效应

《V 形折板屋盖设计与施工规程》建议,在进

行 V 形折板的截面设计时,可以将其折算为等宽度的矩形截面梁,但同时又通过对两侧向翼板宽度及宽厚比的限制条件,保证了此简化算法的适用范围,即是说并不意味着在任何情况下都能够用简化方法计算。特别是随着大跨、宽幅折板结构逐步进入建筑市场,对这种简化算法的应用需要更加慎重。

以折板预应力的效果为例,众所周知,对钢筋混凝土矩形截面梁施加预应力的重要目的之一,是首先让梁的上部形成预拉应力,使得今后能和荷载所产生的压应力部分抵消,减少实际受压应力。当 V 形或 Y 形折板的顶部肋梁较小时,这项措施对于保证上部肋梁的稳定、防止整个构件的侧向失稳就显得更为重要。但是,由于大跨、宽幅 V 形及 Y 形截面折板翼板刚度降低,形心位置下移,使得下部肋梁预加应力的合力作用点靠近构件的实际形心轴,甚至位于截面的核心区之内,因而预应力效果往往达不到预期设计水平,而是造成原设计预应力受拉区出现压应力,这对于顶部肋梁的受力而言,是十分不利的。

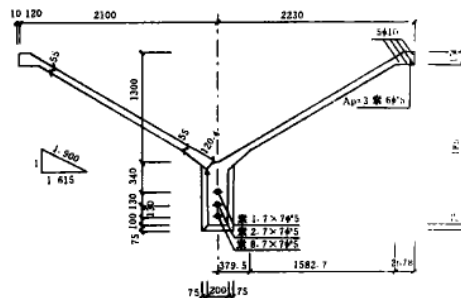


图 4 试件截面尺寸及配筋

图 4 是一 45 米跨度 Y 形折板结构试件的截面尺寸及预应力筋的布置情况。该试件两侧翼板的宽度约为 2.56m,宽厚比为 46,均已超过《规程》的规定。试件两端简支,承受均布荷载。下部肋梁的高度为 62cm,布置三束预应力钢筋,编号分别为张 1、张 2、张 3,其张拉力分别为 1126kN、1090kN 和 1057kN(文献[4])。

张拉预应力筋以后,上部肋梁纵向应变的实测分布如图 5 所示。从图中不难看出,除靠近支座处肋梁出现拉应变外,以后测得的应变值都为受压,说明上部肋梁在底部施加预应力后,预应力效果与设计的预期效果恰恰相反。

当然,工程上造成预应力达不到预期效果的原因还有很多,特别是由于施工精度等因素使构件的侧板不能做到完全平直,也是影响预应力效应的很重要的原因。

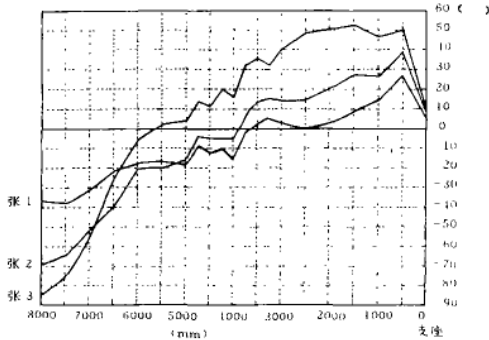


图5 固支端上部翼梁纵向应变分布

六、结语

以上讨论,虽主要针对大跨度预应力折板结构在施工及制作阶段尚未形成空间工作时的单体构件而言,但上述各项因素的存在,使构件的可靠

度指标降低。加之施工时往往由于折板接合部误差等因素,如预埋件错位,焊接连接不可靠等,使得构件间的相互支撑作用得不到保证,其空间受力作用亦不能发挥,则上述诸多不利因素将成为结构失效的隐患,这是在设计上必须注意的。

此外,鉴于大跨、宽幅折板结构所具有的特殊力学性能,对这类钢筋混凝土薄壁结构尚应有特殊的施工工艺,以减小构件尺寸的误差,保证钢筋位置的准确,同时对构件的初始变形加以限制,以保证其具有足够的可靠性指标,使这种新型的结构体系能健康地发展。

参考文献

- (1)李开禧,周绥平,程永才,关于V形截面梁的扭转失稳问题,建筑结构,1994(9)
- (2)李开禧,周绥平,关于V形截面梁的变曲变形,建筑结构,1994(9)
- (3)李开禧,崔佳,戴国欣,周绥平,关于雁形截面梁的局部稳定问题,建筑结构,1996(1)
- (4)重庆建筑大学建工学院工程结构实验室,45m跨后张预应力混凝土雁形板静载破坏试验报告,1995.7

HVM 信息

HVM 产品在全国首条磁悬浮高速铁路中标

柳州海威姆建筑机械有限公司在全国首条磁悬浮高速铁路——上海磁悬浮高速铁路中一举中标,承担该铁路全部锚具的生产供应。HVM 群锚锚固体系锚具将在铁路关键部位——轨道梁的构建中发挥关键作用。

上海磁悬浮高速铁路是全国首条磁悬浮铁路,也是世界上首条用于商业运营的磁悬浮铁路,该高速铁路从上海市区至浦东机场,全长30公里,设计时速450公里/小时,工程质量要求非常严格。柳州海威姆建筑机械有限公司研制生产的

HVM 群锚锚固体系锚具,是在总结国内外锚固体系优点的基础上,采用计算机有限元设计分析软件开发成功的新一代锚固体系锚具,能可靠锚固2000MPa及其以下的钢绞线,经中国工程院、交通部、铁道部等专家鉴定,HVM 群锚锚固体系锚具达到了国内领先、国际先进水平,有关部门和专家经过多方比较、考察,最后认定HVM产品完全符合磁悬浮铁路的建设质量要求。

(玉进男)