

膜结构的节点和相关结构设计

武岳
(哈尔滨工业大学)

胥传喜
(RIGHT TECH(S) PTE LTD)

提 要: 介绍了膜结构节点设计的一般原则,给出了一些典型的节点连接做法,并介绍了膜结构中常见支承结构和基础结构的形式,着重阐述了桅杆和锚碇系统的设计要点。

关键词: 张拉结构 节点 支承结构 锚碇系统

Connection Detailing, Mast and Anchor Design for Tensile Membrane Structure

Wu Yue Xu Chuanxi
(Harbin Institute of Technology) (RIGHT TECH(S) PTE LTD)

Abstract Connection detailing and calculation is the substantial part of membrane design. In this paper, some principles of detailing were discussed, and some typical details were introduced. Moreover, this paper also introduces some principles for supporting structures and foundation design with a focus on the design methodology of mast and tension anchors.

Key words tensile structure, connection, supporting structure, tension anchor

在膜结构系统中,除了膜和索构件以外,还有支承结构(如桅杆、框架等)和基础结构(包括锚碇系统)。这些结构元素通过节点的有效连接,共同维持整个系统的平衡与稳定。节点的构造设计是膜结构设计中的一个重要环节。节点设计是否得当,不仅关系到加工制造难易和施工安装能否顺利进行(例如节点的调节量不足就可能会导致结构局部安装不到位或出现较多褶皱)、影响节点的耐久性和美观程度,还关系到结构的整体性和可靠度。从国内外已发生的一些膜结构破坏工程实例来看,节点构造措施不当导致膜材撕裂,是引发工程事故的主要原因之一。

1. 节点设计的一般原则

膜结构节点具有传递荷载、将结构构件连成整体和提供初始预张力施加点等作用;在进行节点设计时,应综合考虑结构、构造、施工张拉等方面的要求,既要遵循普通钢结构节点设计的一般原则,又要考虑到结构形式和所用材料的具体特点。节点设计要遵循以下一般原则:

(1) 结构强度要求

节点连接件本身应具有足够的强度、刚度和稳定性,以保证其在各种工况下均能可靠地传递荷载,不先于主体材料和构件破坏。

(2) 对结构大变形的适应能力

膜结构在风荷载作用下易产生较大的变形和振动,节点和连接应具有一定的灵活性和自由度,以释放由于大变形所引发的附加应力作用。

(3) 避免膜材出现应力集中

膜材很薄，对缺陷比较敏感，节点设计应避免在膜材与刚性构件的连接部位出现应力集中。在连接处的钢构件不得有尖点或锐角；在接触面处应设置膜衬垫；必要时还应对节点附近的膜材进行局部加强。

(4) 对节点的防水防腐处理

膜结构的节点部件多暴露于自然环境下，易出现锈蚀；节点生锈不但会降低节点自身的强度，锈水的流淌还会对膜面造成二次污染。因此，节点连接件的材料宜选用不锈钢或铝材，对钢构件必须做镀锌或涂装处理。此外，膜节点还应具有良好的防水性能，必要时可在节点上面增加一层覆盖膜或采用铝合金盖板防水。

(5) 施工张拉要求

节点设计应充分考虑初始预张力的施加方式和具体施力点的位置等因素，保证施力点处的节点具有较高的强度、刚度且便于施力机具的操作。节点设计还应考虑结构安装偏差与二次张拉的可能性，留有调节余量。

(6) 结构逻辑性和艺术表现力

膜结构的节点应力求简捷、轻巧，能够充分展示结构内在的逻辑性和艺术表现力。节点构造应能清楚表达结构中的传力路线，并且符合结构计算假定。当有多个构件连接于同一节点时，应保证各构件的内力汇交于一点，以避免引入不必要的弯曲或扭转应力。应注意节点的观感效果，在膜与刚性边界或节点连接处应尽量采用圆弧过渡，以避免应力集中并在视觉上给人以柔和的感觉。

2. 典型节点连接构造

2.1 膜与膜的连接

膜结构的曲面是由许多平面膜材经裁剪设计拼接而成，由于膜材幅宽较小，因此膜片间需通过接缝连接形成整体。膜材接缝的连接方式主要有：缝合连接、机械连接（夹板螺栓连接）、粘合连接、热合连接和束带连接等，如图1至图4所示[1]。

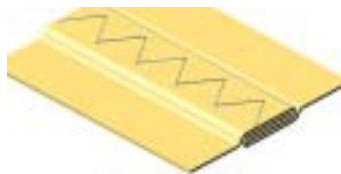


图1 缝合连接



图2 机械连接（夹板螺栓连接）

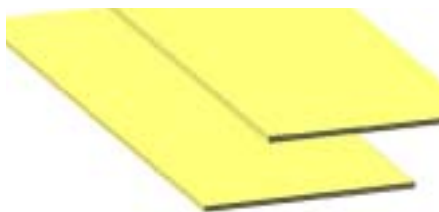


图3 粘合连接或热合连接



图4 束带连接

缝合连接是用缝纫机将膜片缝在一起。这是一种传统的织物连接方式，主要在工厂内制作完成；其特点是比较经济，且质量容易得到控制。但是由于缝合连接的强度较低，因此一般应用于不能采用其他连接方式（如棉织物或氟塑料织物等），或膜内应力较小以及非受力构造连接处。在结构的排水区要慎用缝合连接。

机械连接又称螺栓连接简称夹接，是在两个膜片的边缘埋绳，并在其重叠位置用机械夹板将膜片连接在一起。它是一种现场连接方式，一般适用于结构规模较大，需将膜材分成几个部分在现场拼接的情况。

粘结连接是通过粘合剂将膜片粘合在一起。这种连接方式的耐久性较差，一般用于强度要求不高、现场临时修补或无法采用其它连接方式的地方。

热合连接在构造形式上与粘合连接相似，它是将膜材迭合部分的涂层加热融合，并对其施加一定的压力，使两片膜材牢固地连接在一起。热合连接可在工厂完成，也可以在现场完成，其连接强度几乎可达到母材强度，是一种较为安全有效的膜材连接方式。我国即将颁布的《膜结构技术规程》即规定“膜材之间的主要受力缝宜采用热合连接”。

束带连接利用束带穿过膜边的环圈从而将两片膜连在一起。束带连接便于调整形状、可根据情况分步增减拉应力；缺点是扎紧和放松束带将消耗大量的人工。为了保护束带节点免受气候的影响，通常在其上面增加一层覆盖膜。覆盖膜片较高的一侧在工厂内缝合或热合，较低的一侧可在现场粘合。

2.2 膜与索的连接

在进行膜-索节点设计时需要注意的问题是，由于索与膜之间的材料差异，应使两者之间留有一定的空隙，以适应在荷载作用下膜与索之间可能产生的相对滑动。

膜与索的连接有单边连接（如边索）和双边连接（如脊索和谷索）。常用的单边连接方法是将钢索穿入膜材热合的索套中（如图 5 所示），或采用铝合金或不锈钢夹板和螺栓来连接膜材与钢索，如图 6 所示。图 7 给出了一种膜与谷索的双边连接构造。双边连接通常需要在上面增加一层防水用的覆盖膜。



图 5 索套连接

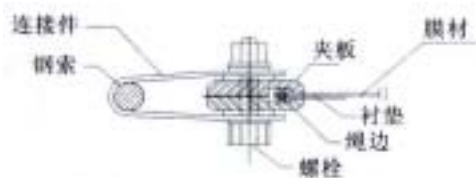


图 6 螺栓连接

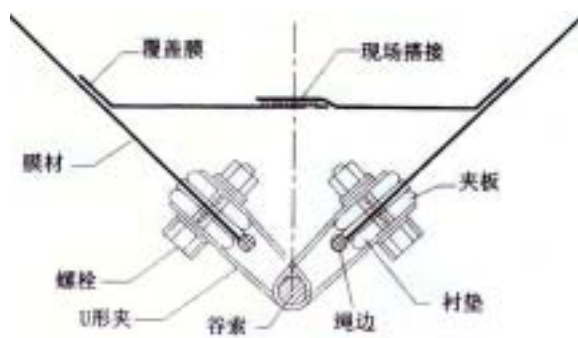


图 7 膜与谷索连接

当膜面跨度在 15 米以上且无中间支承时，为减小膜面应力，可以利用索或合成纤维带对膜面进行局部构造加强。加强索可以缝进膜面内或设在膜面外，如图 8 及图 9、图 10 所示。当加强索位于膜面外侧时，应注意防止索自身的腐蚀以及由于摩擦造成的膜面表皮损伤。



图 8 加强索穿进膜面内



图 9 加强索在膜面外（索在上）



图 10 加强索在膜面外（索在下）

2.3 索与索的连接

双向钢索交叉节点可采用节点板连接，也可采用 U 形夹或夹板等夹具连接，如图 11 所示。为了保证夹紧钢索，可采用低碳钢或高强螺栓。需要注意的是，在无应力状态下被夹紧的索受拉后，其直径会减小，从而使夹持力降低，对此可通过二次旋紧螺栓来调整。

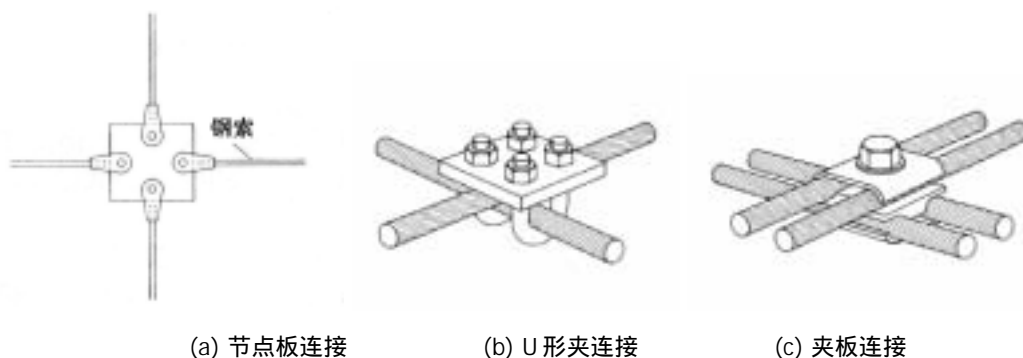


图 11 双向钢索的连接

多向钢索之间可采用连接板连接，如图 12 所示。此时应注意各钢索轴线要汇交于一点，以避免连接板偏心受力。在进行连接板设计时，应尽可能采用曲线造型，以展现膜结构的柔和与灵动之美。

图 13 所示的节点是体育场看台挑篷结构中内环索与脊索和谷索之间的一种连接做法。这种节点的受力很大，且直接关系到挑篷结构的整体稳定性，设计时要特别小心。



图 12 多向钢索的连接



图 13 体育场内环索与径向索的连接

2.4 膜与支承构件的连接

膜材与边缘支承构件的连接通常有夹板连接、绳轨连接及束带连接。夹板连接（图 14）是利用刚性夹板将膜边绳直接固定在刚性边界上。其做法较为简单，一般要求夹具应连续、可靠地夹住膜材边缘，夹具与膜材之间应设置衬垫；当刚性边缘构件有棱角时，应先倒角，使膜材光滑过渡。绳轨连接（图 15）是先将膜边绳穿在铝合金制成的滑槽--绳轨(ropetrack)内，再通过拉力螺栓将绳轨与刚性边界相连。通过调紧拉力螺栓来调整预张力，以满足施工张拉和二次张拉的要求。张拉完成后可将较长的拉力螺栓剪短。膜与支承构件的束带连接构造和膜与索的束带连接构造相似，可通过调紧束带来张拉膜面。



图 14 膜与支承构件夹板连接



图 15 膜与支承构件绳轨连接



图 16 膜与支承构件束带连接

2.5 索与支承构件及基础的连接

索可通过索端头锚具与直接焊接于钢构件上的耳板相连（如图 17 所示）；对于混凝土或其他材料的支承构件，可先预埋节点板再连接，或通过钢套箍连接（如图 18 所示）；基础锚固点处的索端部节点宜考虑采用可调的端头构造形式（如图 19 所示），以方便预张力的施加和二次张拉。

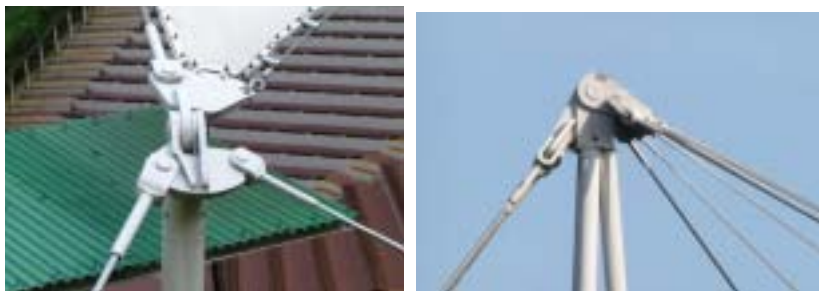


图 17 索与支承构件耳板连接



图 18 索与支承构件套箍连接



图 19 索与基础的连接

文献[2]、[3]详细地介绍了一些构造实例。国内近年来出版的膜结构著作[4]-[6]对节点连接构造也都作了较为系统的介绍,可供参考。

3. 支承结构设计

支承结构在膜结构的设计中占有举足轻重的地位。支承结构的作用可概括为以下三个方面：为膜结构提供一系列高低错落的支承点（边界）或悬吊点，以维持膜结构曲面的稳定；将膜面内拉力转化为压力传至地基基础；支承结构的刚劲挺拔与膜的灵动飘逸间形成鲜明对比，增强建筑整体表现力。

3.1 支承结构的主要形式

根据支承位置的不同，支承结构可分为边缘支承和内部支承两大类。

边缘支承的形式主要有以钢等刚性构件支承以及索等柔性构件支撑两种，如图 20 及图 21 所示。



图 20 边缘刚性构件支承



图 21 边缘柔性构件支承

内部支承的形式主要有：利用钢索将膜内高点悬吊于外部刚性结构上；在结构内部通过桅杆支承；利用飞柱顶升。图 22 至图 25 为部分内部支承实例。；若内部利用拱形圆钢管张为膜的支承，则形成骨架支承式膜结构，图 26 为一骨架支承式膜结构实例。



图 22 悬吊支承

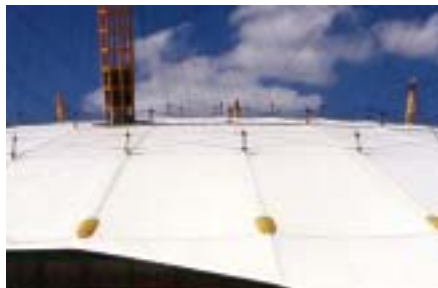


图 23 悬吊支承（膜内有刚性构件）



图 24 桅杆支承



图 25 飞柱支承



图 26 骨架支承式膜结构

3.2 支承结构的体系布置与构件设计

膜结构支承体系的选择与布置取决于膜面的形状和结构尺度。支承体系的布置应满足稳定性要求，并尽可能做到自平衡和自适应。自平衡是指支承体系能最大限度地平衡膜面内的张力，以减小张力对基础结构的影响；自适应是指支承体系能较好地适应膜结构大变形的特点，有一定的自由度和调节余量。

支承结构的内力分析宜考虑与膜面张力的共同作用。结构体系及构件的稳定分析与截面设计按现行钢结构设计规范进行。对于刚性边界膜结构（参见图 20），要特别注意对构件刚度的控制，以免因边界支承构件的变形而导致膜面无法张拉到位造成膜面松弛。

3.3 桅杆结构设计

桅杆是膜结构支承体系中最常见的结构形式。桅杆结构设计主要包括三部分：柱身设计、柱头设计和柱脚设计。其中，柱身设计与普通的钢结构柱设计基本相同，以下主要介绍柱头和柱脚的设计。

(1) 柱头设计

桅杆顶部与膜连接处的节点可做成浮动式或固定式，如图 27 及图 28 所示。浮动式节点的浮动环在不平衡力作用下会发生左右摆动，使桅杆两侧的荷载作用趋于平衡，从而降低了桅杆顶部的水平位移，并可避免此处膜面出现褶皱。当桅杆承受的非对称荷载较大时，宜采用浮动式节点。

拉索与桅杆顶部可通过索端连接件与桅杆顶部的钢板相连接。膜往往通过螺栓或卡具锚固在顶部圆环或圆钢板上。此部位的膜面积急剧减小同时荷载又很大，应采用加强层对顶部的膜进行加强。在桅杆顶部通常设有金属帽，兼具防水和美观功能。伞形膜结构可采用顶升伞帽的方式来施加预张力，此时的柱顶应设计为可调节式节点，如图 29 所示。



图 27 桅杆顶部浮动（悬挂）节点



图 28 桅杆顶部固定节点构造



图 29 桅杆顶部可调节式节点的几种做法

(2) 柱脚设计

桅杆柱脚可设计成双向及三向铰接节点（图 30）或刚接节点（图 31）。当柱顶的不平衡水平荷载较大时，宜采用铰接连接，以避免因弯矩的作用而使桅杆截面过大，且可以通过桅杆顶部的微小摆动来调整膜面的内力分布，避免出现局部应力过大或出现局部褶皱。需要注意的是，当采用铰接节点时，应采取必要的措施对桅杆进行拉结，避免万一膜材破损导致桅杆倒塌。



图 30 柱脚双向及三向铰接节点实例



图 31 柱脚刚接节点实例

4. 基础设计

4.1 膜结构基础的受力情况

膜结构的基础可分为桅杆下部的支承基础和拉索锚碇基础两种形式，其作用主要是承担由预张力引起的结构内部非自平衡力，而结构自重在其中仅占很小的一部分。膜结构对基础的作用有拉力、压力、剪力和弯矩等形式，并有以下 4 种可能的组合：

- (1) 只受向下的轴力，例如铰接垂直桅杆基础，如图 32a 所示；
- (2) 受向下的轴力和水平剪力，例如铰接斜桅杆基础，如图 32b 所示；
- (3) 受向下的轴力、水平剪力和弯矩，例如刚接柱基础，如图 32c 所示；
- (4) 受向上拉力和水平剪力，例如拉索锚碇基础，如图 32d 所示。

其中，(1)~(3)种情况与普通的柱下独立基础类似，不再赘述。第(4)种情况，即抗拔基础或拉索锚碇基础，是张拉结构中所特有的一类基础形式，本文将对此作较为详细的介绍。

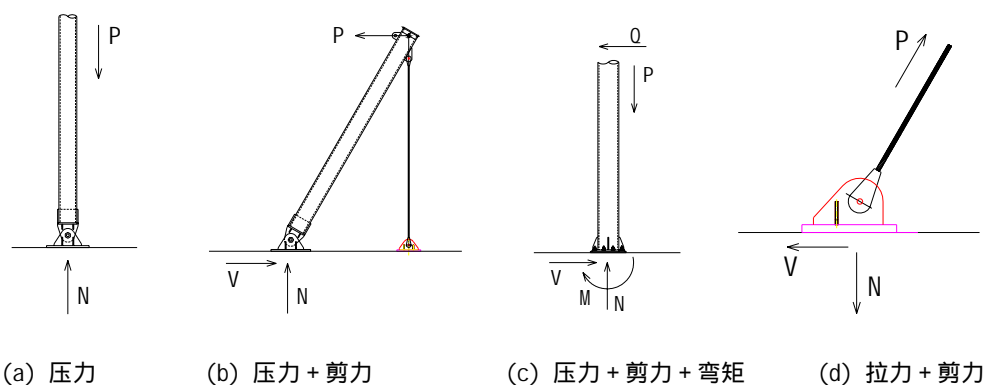


图 32 膜结构基础受力情况

4.2 抗拔基础设计

可用于张拉式索膜结构的落地抗拔基础形式主要有：（1）重力式锚碇(Gravity Anchors)；（2）岩石或土中的锚杆(Ground Anchors)；（3）锚板, 包括螺旋锚（Anchor Plates and Helix Anchors）；（4）抗拔桩（Tension Piles），参见图 33。

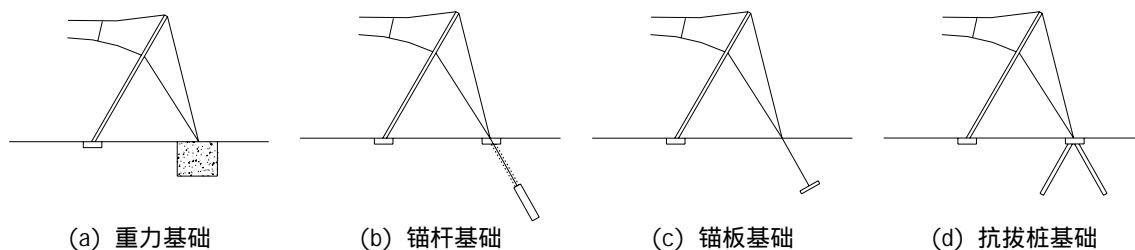


图 33 膜结构抗拔基础类型

（1）重力式锚碇

重力式锚碇利用基础重量来抵抗竖向拉力，利用锚块侧面的被动土压力来抵抗水平拉力。这是最常用的一种抗拔基础形式。

（2）锚杆锚固

锚杆主要应用于边坡加固、挡土墙与基坑支护等工程中，在张拉膜结构中的应用还比较少。与重力锚固相比，锚杆的土方开挖量小，因而比较经济；此外，当采用预应力锚杆时，其基础变形也要比重力锚固和锚板锚固小得多。

锚杆一般由锚头、自由段和锚固段三部分组成（如图 34 所示）。锚头与地表的锚固台座相连，用于固定锚杆预应力筋。自由段一般为钢筋或预应力钢绞线，其作用是传递荷载。对于土层锚杆，其自由段长度不宜小于 5.0m，以保证锚固段埋入足够深度，避免滑移破坏。锚固段是用水泥浆或水泥砂浆将杆体（预应力筋）与土（岩）体粘结在一起，通过侧摩阻力来抵抗拉力。

在进行锚杆设计时，需要考虑的问题有：场地土（或岩石）特性；锚杆以及锚固体的长度；锚杆和土体的蠕变；可能存在的预应力损失；锚杆的防腐处理等。有关这方面的详细内容可参考《土层锚杆设计与施工规范》CECS 22:89。



图 34 锚杆构造示意图

（3）锚板锚固

锚板类型的锚固基础主要有锚板和螺旋锚 2 种，如图 35 所示。

锚板的一般构造为：钢筋混凝土预制的刚性板（一般为正方形），与拉杆相连，拉力荷载作用在拉杆上，由锚板上方的土体的自重和剪切阻力提供上拔阻力。按锚板在极限上拔荷载作用下土体的破坏形态分类，可以分为浅埋锚板、深埋锚板。对浅埋锚板，上方土体整体剪切破坏，破坏面从锚板的边缘开始，延展到土体表面；深埋锚板在极限状态时，锚板上方一定范围内的土体，进入塑性状态，呈局部剪切形态。

螺旋锚由锚杆（管）、螺旋锚片和杆头组成，按螺旋锚片数可以分为单节（一片锚片）和多节螺旋锚。工程上使用较多的是多节螺旋锚。施工时在杆头施加扭矩，依靠螺旋锚的钻进能力达到设计的土层深度。螺旋锚的主要优点是，安装便利快捷，施工时对土体的扰动小。当各螺旋锚片之间的间距小于 6 倍的螺旋锚片直径 D 时，多节螺旋锚的极限破坏形态可以看作是多节螺旋锚片之间形成的圆柱形破坏面，上拔承载力由圆柱形破坏面的剪切阻力和顶节螺旋锚锚板的抗拔承载力组成。有关这方面的更详细内容可参考文献[6]。

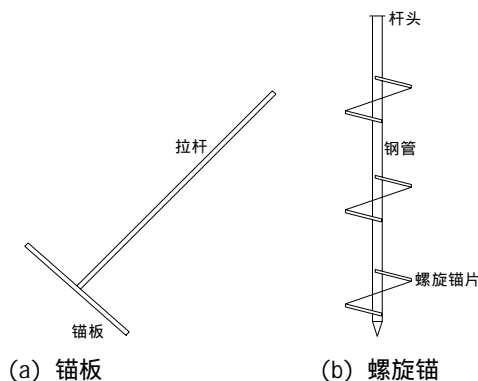


图 35 板式基础锚固类型

(4) 抗拔桩锚固

抗拔桩是工程中经常采用的锚固基础之一。其工作机理是通过桩侧摩阻力和桩身自重来抵抗外拉力，其中前者是主要的，也是承载力计算的关键。模型试验和现场实测结果表明，在相同条件下，抗拔桩的极限侧摩阻力要小于抗压桩的侧摩阻力，其比值一般在 0.5~1.0 之间。造成这一现象的主要原因在于，桩体泊松比效应（桩体在拉力作用下趋向收缩），土体应力场应力水平的变化（拉力减小了土体应力水平，间接影响了水平有效应力），桩周土体单元主应力轴旋转，以及因为作用荷载方向与桩基贯入方向相反造成侧摩阻力减损等。

在实际工程设计中，一般采用对抗压桩的侧摩阻力乘折减系数的方法来计算抗拔桩的侧摩阻力。无粘性土中的折减系数小些，粘性土中的折减系数大一些；桩长径比越大，折减系数越大。《建筑桩基技术规范》（JGJ94-94）用一个抗拔系数 η 表示折减系数，对粘性土、粉土， $\eta=0.7\sim 0.8$ ；对砂土， $\eta=0.5\sim 0.7$ ；当长径比 $L/d < 20$ 时，取小值。

此外还应注意，在计算群桩的总抗拔力时应取下面两者的较小值：（a）单桩抗拔力 \times 群桩根数；（b）将群桩作为整体求得的抗拔力。有关这方面的更详细内容可参考文献[8]。

以上简要介绍了四种常用的抗拔基础形式，在实际设计中应根据各自的工作特点，并综合考虑场地情况、施工条件以及基础受力情况等因素合理选用。从工作机理上来看，锚板是依靠土体自重和土体内部的摩擦阻力来提供抗拔承载力，属于柔性抗拔结构，位移较大；而锚杆和抗拔桩是利用侧摩阻力来提供抗拔承载力，其位移要比锚板小得多。在施工方式上，锚板和重力锚固基础需要比较大的土方开挖，但其施工质量较易得到保证；而锚杆和抗拔桩的土方开挖量较小，但对施工机械的要求较高。总体来讲，当上拔荷载较小时，采用重力锚固和锚板是比较经济的；当上拔荷载较大时，采用锚杆和抗拔桩则更为合理。

4.3 补充说明

(1) 抗拔基础设计注意事项

- 基础宜埋置在地下水位以上，在可能浸水时，还应考虑地下水引起的浮力作用。
- 应预测在长期拔力荷载作用下的基础徐变变形，并确认不会发生徐变破坏。
- 在寒冷地区，基础埋深应在地基冻土深度以下。
- 对于钢制锚固基础，应进行防腐处理。

- e. 结构物作用在锚固基础上的力应为单纯的拉力，并能顺利传给基础。
- f. 锚碇的容许抗拔力应根据建设场地抗拔试验的结果确定。应考虑土壤条件的变化和离散性引起的强度降低，传到锚碇上的膜张力的离散性、施工误差、使用期限及荷载条件等因素。

(2) 抗拔基础的徐变

如前所述，抗拔基础的徐变将导致锚固点产生位移，从而引起膜面应力松弛甚至危及结构的稳定，因此在设计时必须予以足够的重视。研究表明，抗拔基础在长期拉力作用下的典型位移时程曲线如图 36 所示。图中的 Q_1 ， Q_2 ， Q_3 分别代表不同的荷载水平。当上拔力小于破坏荷载 Q_u 的 1/3 时（ Q_1 状态下），基础变形将在一段时间后停止；当上拔力超过破坏荷载 Q_u 的 0.7 倍后（ Q_3 状态下），经过一段时间后变形迅速增加直至徐变破坏；当上拔力介于 Q_1 和 Q_3 之间时（ Q_2 状态下），变形速度随时间的增加趋于变缓。通常在进行基础设计时，取安全系数为 2.5~3.5，此时对应 Q_1 状态。对于 Q_2 状态，需要通过现场试验的方法，来确定建筑物在使用期限内的徐变变形不大于容许变形，且不妨碍建筑物的正常使用。

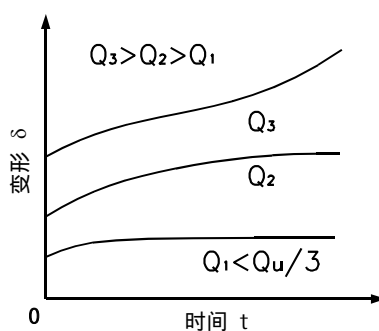


图 36 抗拔基础的徐变曲线

5. 结语

节点的构造设计与连接计算是膜结构设计中的重要环节。本文介绍了膜结构节点设计的一般原则，给出了一些典型的节点连接做法。同样，作为膜结构系统的重要组成部分，支承结构和基础结构的设计也不容忽视。文章的后半部分介绍了膜结构中一些常见的支承结构和基础结构形式，重点阐述了与桅杆和锚碇系统设计相关的知识。

参考文献

- [1] J. Llorens & N. Rodriguez, Textile Construction & Tensile Structures Joints, Connections, Fittings and Anchors Data Bank, <http://www.upc.es/ca1/cat/recerca/tensilestruc/portada.html>
- [2] H. Schock, Soft Shells: Design and Technology of Tensile Architecture, Birkhäuser, Basel, 1997
- [3] Kazuo Ishii, Membrane Structures in Japan, SPS Publishing Company, Tokyo Japan, 1995
- [4] 钱若军、杨联萍. 空间结构系列丛书--张力结构的分析、设计、施工. 东南大学出版社. 2003
- [5] 杨庆山, 姜忆南. 张拉索 - 膜结构分析与设计. 科学出版社. 2004
- [6] 张其林. 索和膜结构. 同济大学出版社. 2002
- [7] 《土层锚杆设计与施工规范》CECS 22-90
- [8] 《建筑桩基技术规范》JGJ94-94