# 跨海桥现浇大悬臂 Y 形墩施工技术

王成维
（中交一航局第三工程有限公司）

**摘　要：**为解决阿联酋区域海上高温、高湿条件下，海上现浇大悬臂 Y 形墩施工面临的海上大体积高强混凝土裂缝控制、空间异形结构精度控制等难题，采用现浇大悬臂 Y 形墩分阶段浇筑+支架支撑+预应力张拉施工技术，通过预应力张拉建立长期有效应力，抵消后期荷载变形，配合分阶段施工的结构整体性优化，墩身开裂风险有效降低。同时可最大程度缩短施工工期。钢管支撑+预应力张拉组合施工技术可有效应对该区域恶劣自然环境与复杂地质挑战，保障海上现浇大悬臂 Y 形墩顺利施工，可为海外类似海上大悬臂 Y 形墩工程提供可靠技术参考。

**关键词：**阿联酋；跨海桥；Y 形墩；现浇大悬臂；裂缝控制

## 1　工程概况

阿联酋哈伊马角永利岛连接桥项目包含 1 座 548 m 的连续箱梁桥，桥梁共 9 跨。主桥桥跨为 70 m+100 m+70 m，桥面宽度 28.86 m，其中中跨中心处渐变至 36.46 m；引桥桥跨为 44 m+55 m+55 m，桥面宽度 28.86 m。

主桥桥墩为双 Y 形，直立段厚度为 3 m、宽度方向为 15 m，高度分别为 4.695 m、4.943 m，每个墩台直立段浇筑结束后，沿 4 个方向扩展，形成双 Y 形；双 Y 形墩身宽度方向由 15 m 渐变至 19.312 m，横断面方向由 3 m 渐变至 80.88 m，最高点高度距离墩身分别为 11.536 m、11.784 m。混凝土强度等级为 C75，方量分别为1 957 $m^3$、1 968 $m^3$。桥梁示意图见图 1。

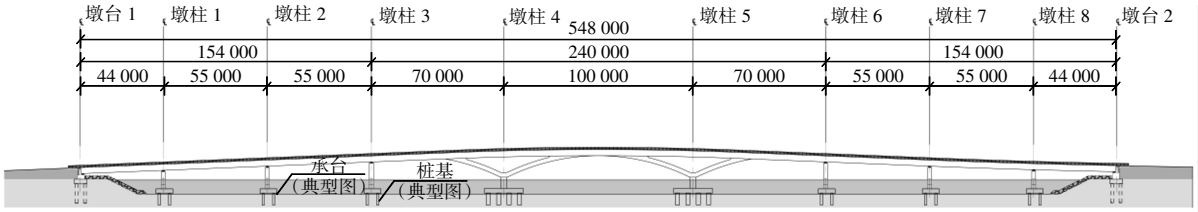



**图 1　桥梁示意图（mm）**

## 2　国内外规范中混凝土性能参数

中国标准 JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》规定混凝土强度等级以立方体抗压强度标准值为核心判定依据，采用 150 mm×150 mm×150 mm 立方体标准试件；养护条件需满足温度（20±2）℃、相对湿度≥95%的标准环境，养护 28 d 后试件抗压强度需达到设计强度等级的 95%，方可判定强度达标。

美国标准 *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* 规定混凝土强度以指定圆柱体抗压强度 $f_c'$ 为指标，采用 $\phi$150 mm×300 mm 圆柱体试件[1]；养护环境为温度（73±3）℉，即（23±2）℃湿养护，同样养护 28 d 后直接测定圆柱体抗压强度，该数值即为混凝土的核心强度参数。

2 本标准在混凝土试样制作和养护、抗压试验等方面主要存在 2 点差异：1）试样形状尺寸不同；2）中国标准要求测得强度保证率为 95%，而美国标准强度保证率不明确。混凝土圆柱体抗压强度 $f_c'$ 与立方体抗压强度 $f_{cu}$ 的关系为：$f_c'=(0.79\sim0.81)f_{cu}$，近似取 $f_c'=0.8f_{cu}$。

中国标准和美国标准混凝土各强度指标及弹性模量对比分别见表 1、表 2。

**表 1　《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》中混凝土各强度指标及弹性模量**

MPa

| 强度等级 | 立方体抗压强度标准值 | 混凝土轴心抗压强度标准值 | 混凝土轴心抗压强度设计值 | 混凝土轴心抗拉强度标准值 | 混凝土轴心抗拉强度设计值 | 弹性模量 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| C75 | 75 | 47.4 | 32.4 | 3.05 | 2.1 | $3.75\times10^4$ |

表 2　*AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* 中混凝土各强度指标及弹性模量

MPa

| 混凝土圆柱体抗压强度 $f_c'$ | 圆柱体抗压强度 | 混凝土抗压强度设计值 | 混凝土轴心抗拉强度标准值 | 混凝土的劈裂抗拉强度 | 弹性模量 |
|---|---|---|---|---|---|
| 60 | 60 | 39 | 1.86~2.87 | 1.78 | $3.67\times10^4$ |

本项目主梁及 Y 形墩混凝土材料参数为按美国标准混凝土圆柱体抗压强度 $f_c'$ 不小于 60 MPa，对应中国标准中 C75 标号混凝土。

## 3　国内外规范裂缝宽度计算公式的差异

中国规范《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》采用数理统计理论进行宽度裂缝的计算，公式见式(1)：

$$w_c=C_1C_2C_3\frac{\sigma_s}{E_s}\left(\frac{c+d}{0.35+1.7\rho_{te}}\right) \tag{1}$$

式中：$C_1$ 为构件受力特征系数；$C_2$ 为荷载长期作用影响系数；$C_3$ 为钢筋表面形状系数；$\sigma_s$ 为纵向受拉钢筋的工作应力，MPa；$E_s$ 为纵向受拉钢筋的弹性模量，MPa；$c$ 为纵向受拉钢筋的混凝土保护层厚度，mm；$d$ 为纵向受拉钢筋的等效直径，mm；$\rho_{te}$ 为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率。

该公式仅考虑构件的垂直裂缝，不包括施工中混凝土收缩过大、养护不当及渗入氯盐过多等引起的其他非受力裂缝，其允许的最大裂缝宽度按不同环境条件为 0.10~0.20 mm。

美国标准规范 *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* 不直接进行裂缝宽度的计算，而是通过控制钢筋间距来控制裂缝宽度。以第一类暴露条件下裂缝最大允许宽度为 0.432 mm、第二类暴露条件下裂缝最大允许宽度为 0.216 mm 为最低要求，确定钢筋间距。该钢筋间距公式依据 Frosch RJ 推荐的最大裂缝公式得出。Frosch RJ 依据黏结–无滑移理论并结合实验数据得到的公式见式(2)：

$$w_s=2\frac{f_s}{E_s}\sqrt{d_c^2+d_s^2} \tag{2}$$

式中：$w_s$ 为位移、挠度或局部张开量，mm；$f_s$ 为钢筋的拉应力，MPa；$d_c$ 为构件受拉外表面到最近受拉钢筋中心的垂直距离，mm；$d_s$ 为相邻 2 根受拉钢筋间距的 1/2，mm。

以 Y 形墩最大悬臂状态工况为例，Y 形墩根部上缘截面按中国标准公式计算的裂缝宽度为 0.129 mm，按美国标准公式计算的数值为 0.138 mm[2]。由结果可知，中国标准计算的裂缝宽度比美国标准计算值小。

## 4　Y 形墩底部结构施工过程受力分析

### 4.1　Y 形墩底部结构分段

Y 形墩底部结构分段示意图见图 2。

主桥 Y 形墩结构施工步序为：满堂支架和 Z1

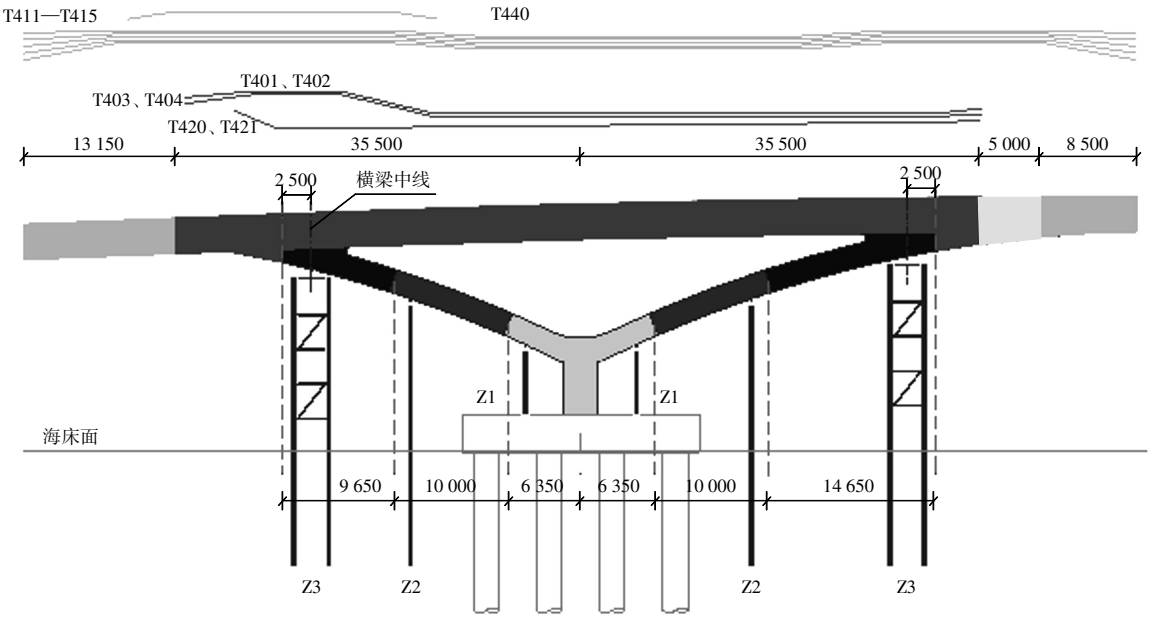



图 2　Y 形墩结构分段图(mm)

支撑墩支撑下浇筑 Y 形墩第 1 节段，Y 形墩强度达到设计强度 90%，拆除满堂支架，保留 Z1 支撑。满堂支架和 Z2 支撑墩支撑下浇筑 Y 形墩第 2 节段，Y 形墩强度达到设计强度 90%，拆除满堂支架，保留 Z2 支撑。满堂支架和 Z3 支撑墩支撑下浇筑 Y 形墩第 3 节段，Y 形墩强度达到设计强度 90%，拆满堂支架，保留 Z3 支撑。浇筑 Y 形墩上方主梁第 1 节段，张拉第 1 节段预应力。依次进行第 2 节段和第 3 节段的浇筑和预应力张拉。张拉完成拆除 Z1、Z2 及边跨 Z3 钢管支撑，仅保留主跨 Z3 钢管支撑。

Y 形墩的分段原则为浇筑分界线避开钢筋加密区 1.5 m，Y 形墩分为 3 个阶段浇筑[3]。第 1 次浇筑第 1 节段，边跨和主跨均长 6.35m，下设 Z1 钢管支撑，Z1 钢管支撑采用 $\phi$630 mm×10 mm 钢管，每个 Y 形墩支撑处横向布置 2 根；第 2 次浇筑第 2 节段，边跨和主跨均长 10 m，下设 Z2 钢管支撑，Z2 钢管支撑采用 $\phi$800 mm×10 mm 钢管，每个 Y 形墩支撑处横向布置 2 根；第 3 次浇筑第 3 节段，边跨长 9.55 m，主跨长 14.65 m，下设 Z3 钢管支撑，Z3 钢管支撑采用四肢格构柱式结构布置，单肢钢管型号为 $\phi$630 mm×10 mm。主梁的分段原则为节段分割适应预应力张拉布置，并适当避开齿块。主梁分为 3 个阶段浇筑。第 1 次浇筑第 1 节段，长 70.5 m，本节段张拉预应力 T403、T404、T420、T421；第 2 次浇筑第 2 节段，长 5 m，本节段张拉 T401、T402；第 3 次浇筑第 3 节段，边跨长 13.15 m，主跨长 8.5 m，本节段张拉预应力 T411—T415、T440。

### 4.2　Y 形墩结构分阶段施工受力分析

Y 形墩浇筑过程中，新浇筑混凝土会产生 10 kPa 的水平力侧压力，Y 形墩满堂支架需考虑此水平力的影响。

#### 4.2.1　Y 形墩施工全过程受力分析

1）Y 形墩第 1 节段施工

Y 形墩第 1 节段浇筑施工完成后，拆除满堂支架进行应力与裂缝检测。结果显示，墩身根部上缘位置拉应力为 0.7 MPa；依据中国标准规范计算，该部位裂缝宽度为 0.026 mm，按照美国标准规范计算，裂缝宽度为 0.029 mm，裂缝宽度满足对应规范限值要求（中国标准限制为0.20 mm，美国标准限制为 0.32 mm），结构初始状态稳定。

2）Y 形墩第 2 节段施工

Y 形墩第 2 节段浇筑完成并拆除满堂支架后，墩身受力状态发生变化，根部上缘位置拉应力从第 1 节段的 0.7 MPa 增大至 3.0 MPa。依据中国标准规范计算，该部位裂缝宽度为 0.105 mm，按美国标准规范计算，裂缝宽度为 0.112 mm，仍在规范允许范围内，裂缝控制效果符合要求。

3）Y 形墩第 3 节段施工（最大悬臂工况）

Y 形墩第 3 节段浇筑完毕拆除满堂支架后，结构进入最大悬臂工况，此时墩身根部上缘位置拉应力进一步从 3.0 MPa 增大至 3.9 MPa，为 Y 形墩单阶段施工最大拉应力。按中国标准规范计算，该部位裂缝宽度为 0.129 mm，按美国标准规范计算，裂缝宽度为 0.138 mm，裂缝宽度未超出规范限值，最大悬臂状态下结构安全性得到保障。

#### 4.2.2　上部箱梁施工全过程 Y 形墩受力分析

1）主梁第 1 阶段施工与预应力张拉

主梁第 1 阶段浇筑完成后，开展第 1 批预应力张拉作业。检测发现，张拉后 Y 形墩根部上缘拉应力基本消除，应力集中区域转移至墩身顶部下缘截面，该截面最大拉应力为 5.1 MPa。按中国标准规范计算，此截面裂缝宽度为 0.133 mm，按美国标准规范计算，裂缝宽度为 0.142 mm，裂缝宽度符合规范要求，预应力张拉对结构应力优化效果初步显现。

2）主梁第 2 阶段施工与预应力张拉

主梁第 2 阶段浇筑完成后，进行第 2 批预应力张拉。张拉后墩身顶部下缘截面受力得到进一步优化，拉应力从张拉前的 5.1 MPa 降低至 3.1 MPa，应力状况显著改善。按中国标准规范计算，该截面裂缝宽度为 0.077 mm，按美国标准规范计算，裂缝宽度为 0.082 mm，裂缝指标满足要求，结构稳定性持续提升。

3）主梁第 3 阶段施工与预应力张拉

主梁第 3 阶段浇筑施工完成后，再次开展预应力张拉。张拉后 Y 形墩顶部下缘截面应力状态进一步优化，最大拉应力降至 1.0 MPa，拉应力水平大幅降低，未产生超出限值的裂缝，结构整体受力更趋合理。

#### 4.2.3　支撑拆除全过程 Y 形墩受力分析

拆除 Z1、Z2 及边跨 Z3 支撑后，Y 形墩顶部下缘截面受力受支撑卸荷影响，拉应力从拆除前的 1.0 MPa 增大至 1.8 MPa。按中国标准规范计算，该截面裂缝宽度为 0.045 mm，按美国标准规

范计算，裂缝宽度为 0.048 mm，裂缝宽度仍满足规范限值要求，支撑拆除过程对结构的影响可控。

### 4.3　Y 形墩钢管立柱承载力验算

整个 Y 形墩结构施工过程中，根据地质情况对钢管立柱承载力进行验算。

1）Z1 支撑

Z1 支撑采用型号为 $\phi$630 mm×10 mm 的钢管结构，其计算长度为 5.5 m。经力学计算，该钢管支撑承受的最大轴力为 1 213.5 kN，长细比为 25，稳定系数为 0.953，对应钢管应力为 66 MPa；而该类型支撑的容许应力为 140 MPa，钢管应力小于容许应力，满足工程设计要求。

2）Z2 支撑

Z2 支撑采用型号为 $\phi$800 mm×10 mm 的钢管结构，计算长度为 19.3 m。力学分析结果显示，其钢管支撑承受的最大轴力为 2 123 kN，长细比为 69，稳定系数为 0.757，钢管应力为 81 MPa；该支撑的容许应力为 140 MPa，钢管实际应力未超出容许应力范围，符合工程设计标准。

3）Z3 支撑

Z3 支撑为格构柱结构，由型号为 $\phi$630 mm×10 mm 钢管组成，计算长度为 3 m。计算数据表明，该格构柱承受的最大轴力为 1 375 kN，长细比为 14，稳定系数为 0.985，钢管应力为 72 MPa；其容许应力设定为 140 MPa，钢管应力低于容许应力，满足工程受力要求。

按 JGJ 3363—2019《公路桥涵地基与基础设计规范》中，桩侧摩阻力标准值取值为 75 kPa，极限端阻力标准值取值为 7 000 kPa[4]。对于入土12 m 的 $\phi$630 mm×10 mm 钢管桩，单桩的极限承载力为 3 378 kN，单桩竖向承载力特征值为 1 689 kN，大于钢管最大轴力荷载设计值（1 375 kN），竖向承载力满足工程受力要求。对于入土 12 m 的 $\phi$800 mm×10 mm 钢管桩，单桩极限承载力为 4 888 kN，单桩竖向承载力特征值为 2 444 kN，大于钢管最大轴力荷载设计值（2 123 kN），竖向承载力满足工程受力要求。

因此，Z1、Z2、Z3 三类支撑的钢管应力均小于各自对应的容许应力，均符合设计规范，支撑结构的承载能力与稳定性可保障工程施工安全。主跨侧 Z3 支撑墩在整个施工过程不能拆除。Y 形墩结构施工过程中的主要矛盾是主跨侧整体重力力矩比边跨侧大，导致合龙前最大悬臂状态有内倾的趋势。没有主跨 Z3 支撑的情况下，Y 形墩结构多处裂缝宽度超过设计限值，结构变形将近 20 cm。因此，控制结构内倾是 Y 形墩结构施工方案的关键。

## 5　Y 形墩控裂措施

Y 形墩第 3 节段浇筑完毕，拆除满堂支架后，Y 形墩达到最大悬臂状态，此时根部上缘位置拉应力为 3.9 MPa，中国标准计算的裂缝宽度为0.129 mm，美国标准计算的裂缝宽度为 0.138 mm。2 项指标虽均符合对应规范限值要求，但 Y 形墩开口的悬臂状态下，支撑墩的沉降将加剧Y 形墩根部上缘的开裂。在第 3 节段顶部增设主动预应力（在 Z3 墩附近设置 4 束 12$\phi$15.2 mm 的钢绞线，每根钢绞线张拉力为 98 kN），按中国标准计算，最大悬臂状态裂缝宽度从 0.129 mm 降到 0.101 mm，降幅约 21.7%，拉应力集中现象明显缓解，有效抵御了支撑墩沉降可能引发的开裂风险。并且可以使张拉一期预应力工况最大拉应力截面裂缝宽度从 0.133 mm 降低到 0.120 mm[5]，降幅约 9.8%，进一步提升了结构在多工序衔接过程中的应力稳定性。通过在 Y 形墩第 3 节段顶部增设主动预应力措施，不仅有效降低了最大悬臂状态下的裂缝宽度，还优化了后续预应力张拉工况的应力分布，成功规避了支撑墩沉降带来的开裂风险，为 Y 形墩结构在复杂施工阶段的安全性与耐久性提供了可靠保障。

## 6　施工监测

Y 形墩采用分阶段悬臂浇筑工艺时，钢管支撑墩的沉降会直接改变墩身受力平衡，加剧根部截面拉应力集中与开裂风险；同时，墩身应力（应变）随浇筑阶段动态变化，需通过系统性监测实时掌握结构状态，为控裂措施调整提供依据。

### 6.1　沉降观测方法及精度控制

根据阿联酋海上施工环境（多风沙、温差大），优先采用几何水准测量法，辅以三角高程测量作为应急补充：选用精度等级不低于 DS05 的电子水准仪，配套 2 m 铟钢水准尺，按国家二等水准测量规范执行往返闭合观测；观测时段选择每日清晨（温度 20~25 ℃，风力≤3 级），避免正午高温导致的仪器热变形与风沙对视线的干扰；每测段观测完成后，立即进行数据检核，要求往返校差小于等于±0.5$L$ mm（$L$ 为测段长度），符合精度要求后方可进入下一测段。

当风沙天气导致水准测量无法开展时，采用 2 s 级全站仪进行三角高程测量，观测时采用对向观测法消除大气折光与地球曲率影响，每个观测点观测 6 测回，测回间校差≤1.0 mm，确保应急数据的可靠性。观测精度严格控制高程中误差为 ±0.5 mm，单次观测数据需与前次数据对比，当沉降量变化异常时（如单次沉降>0.3 mm 或连续 3 次累计沉降>0.8 mm），立即暂停 Y 形墩浇筑，排查支撑墩基础是否存在砂层液化或桩端持力层变形，必要时采取补充注浆或增设临时支撑措施，待沉降稳定后再恢复施工。

钢管支撑墩沉降观测点设置在钢管支撑墩旁，Y 形墩分节段悬臂浇筑过程中，每隔 2 d 监测 1 次，绘制沉降曲线，直至主梁第 1 阶段预应力张拉完成。

在 Y 形墩第 1 节段浇筑前后，完成相应测点初值测量，并进行跟踪测量。从 Y 形墩第 1 节段浇筑开始，至主梁第 1 阶段预应力张拉完毕，每 2 d 进行 1 次沉降观测；每次观测后，以时间为横轴、沉降量为纵轴绘制沉降–时间曲线，分析支撑墩沉降趋势（如匀速沉降、加速沉降或稳定），当曲线出现拐点时，预判可能的受力突变风险。主梁第 1 阶段预应力张拉期间，加密至每天观测 1 次，重点监测张拉作业对支撑墩沉降的影响，避免预应力施加导致的支撑墩不均匀沉降，确保 Y 形墩根部截面受力均衡。

### 6.2　应力（应变）监测控制

Y 形墩根部截面采用振弦式应变传感器进行现场测量，该技术成熟，测量精度高，可靠性好，采用人工非连续采集数据。每个 Y 形墩设置 2 处应变监测断面，每个断面设置 4 个应变测点。全桥共设置 16 个应变计。

在 Y 形墩第 1 节段浇筑前后，完成相应应变测点初值测量，并进行跟踪测量。随 Y 形墩分节段浇筑过程，每隔 3 d 测量 1 次。Y 形墩浇筑完第 3 节段，达到最大悬臂状态，加大监测频率，每隔 1 d 监测 1 次。

## 7　结语

本文以阿联酋哈伊马角永利岛连接桥项目现浇大悬臂 Y 形墩为研究对象，针对阿联酋区域海上高温、高湿、混凝土标号高等复杂情况，通过有效的计算和推演，提出了大悬臂 Y 形墩的分段位置，针对分段位置设置了合理的支撑措施，有效解决了海上高温大体积高强混凝土裂缝控制、空间异形结构精度控制等难题，施工经验可为阿联酋地区跨海桥项目大悬臂 Y 形墩施工提供直接借鉴。

**参考文献：**

[1] AASHTO LRFD bridge design specifications[S]. 8th ed.

[2] 冯志秀，李大茂，高小妮. 中美钢筋混凝土桥梁裂缝控制的理念与方法比较[J]. 公路交通科技（应用技术版），2017，13（1）：144–145.

[3] 杨玉龙，戴显荣. 薄壁 V 形墩施工和监控技术[J]. 世界桥梁，2004（3）：9–11.

[4] JTG 3363—2019 公路桥涵地基与基础设计规范[S].

[5] 李金奎，张强. 大体积海工混凝土温升及裂缝控制[J]. 混凝土，2019（10）：155–160.