

· 港口 ·



[抗震设计讲座] 港口结构抗震设计方法的发展 (5)

贡金鑫

(大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 以我国、美国和日本的港口码头设计规范、手册为基础, 对我国、美国和日本港口码头抗震设计的方法进行了分析, 同时介绍了国际航运协会标准《港口结构抗震设计指南》的有关规定。此系列论文共分6部分, 该文为第5部分, 分析和比较了我国、美国和日本规范中高桩码头的抗震设计方法。比较表明: 对于高桩码头抗震设计, 我国规范和美国规范采用反应谱法确定地震力, 日本规范则将地震危险性分析得到的结果作为输入的地震波, 根据结构的反应确定地震系数。美国规范给出了多种码头变形的计算方法。

关键词: 港口工程; 抗震设计; 规范

中图分类号: U 612.3⁺7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)11-0057-06

Development of seismic design of port and harbour structures: part 5

GONG Jin-xin

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

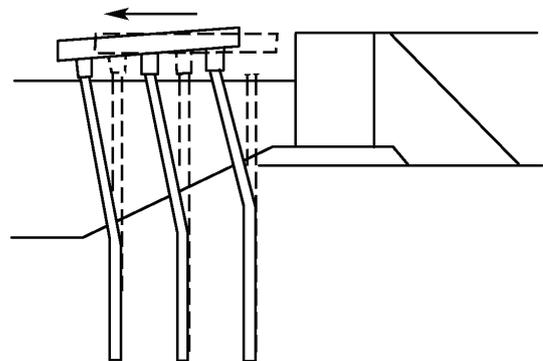
Abstract: A comparative study was made on seismic design of port and harbour structures based on Chinese code, US guidelines and Japanese standards as well as guideline of international navigation association. This is the fifth of the series papers and the method for seismic design of pile-supported wharf in these codes is analyzed. It is shown that for the design of pile-supported wharf, the response force generated by earthquake is determined based on acceleration response spectrum in Chinese code and spectrum acceleration in US guidelines, and the seismic coefficient obtained from analysis of seismic hazard and dynamic response of structures is used in Japanese standard. Several approaches are presented in US guidelines for deformation prediction.

Key words: port structure; seismic design; code

8 高桩码头

高桩码头由下部桩支撑、板和接岸结构、岸坡构成。高桩码头的地震反应很大程度上受复杂的土-结构相互作用影响^[31]。地震时的破坏形式取决于桩的变形和地面位移(图12), 特别是如图12c)所示, 与地面位移有关的破坏表明, 设计应考虑岩土地质条件的影响。与重力式和板桩码头不同, 高桩码头是柔性结构, 除强度外, 结构的变形能力或延性是其保持良好抗震性能的重要方面, 因此延性设计非常重要。图13给出了《港口结构抗震设计指南》(2001)描述高桩码头变形

和应力的参数。



a) 板惯性力引起的变形

收稿日期: 2012-01-09

作者简介: 贡金鑫(1964—), 男, 教授, 主要从事结构设计理论和方法的研究。

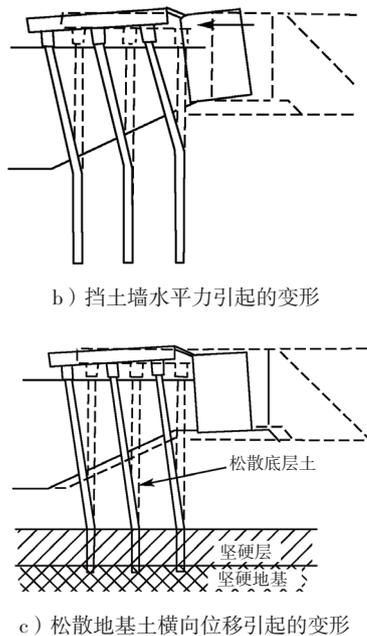


图12 高桩码头的变形和破坏方式

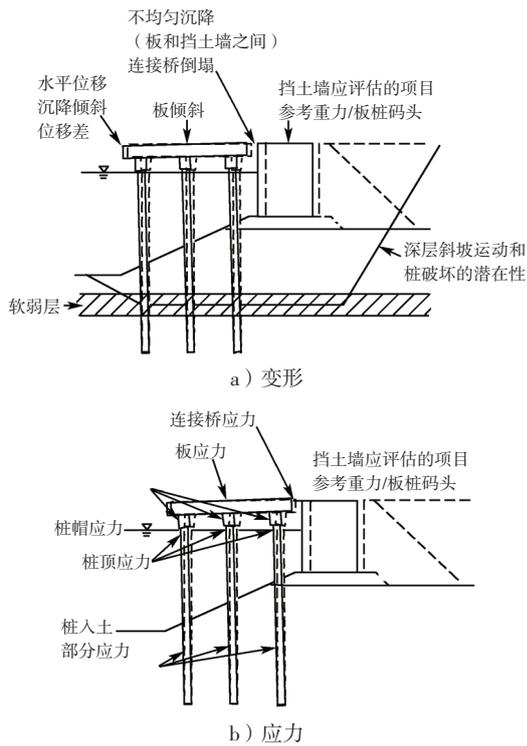


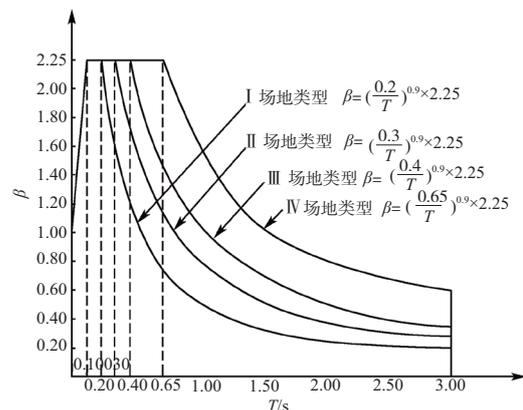
图13 描述高桩码头变形和应力准则的参数

8.1 地震力计算

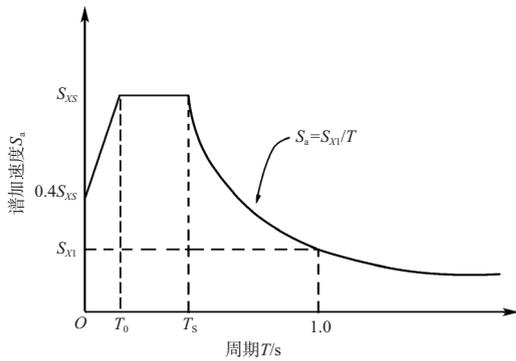
对于高度大于30 m的空箱式和刚架式高桩墩式码头，我国《水运工程抗震设计规范》规定采用多质点振型反应谱法计算地震作用力，最大地震作用按平方和开平方法计算，一般取不多于3个振型。桩的深度采用假想嵌固点法确定。

图14所示为按拟静力法计算地震力时我国

《水运工程抗震设计规范》与美国《海洋油码头》采用的反应谱，尽管反应谱曲线的形状相似，但概念上却有着本质的区别。我国规范按建筑物所在地区的烈度或地面最大加速度和特征周期（对应于反应谱水平段的末端点，与场地类别有关）确定反应谱。近年的研究表明，地震的发生和地震波的传播是一个复杂的过程，结构地震反应与多种因素有关，只用地面最大加速度准确反映结构的反应是困难的。因此，美国应用技术协会（ATC-3-06）率先提出了“有效峰值加速度”和“有效峰值速度”的概念^[32]，虽然这两个概念在物理意义上尚没有十分精确的定义，却是从大量的实际反应谱归纳设计反应谱时，定义地面运动峰值参数的基础数据。在发生大地震时，对于场地距能量释放区较远的情况，振动周期偏长，结构反应主要受速度影响，应采用有效峰值速度进行设计。如果场地的实际情况需要同时考虑近震和远震的影响，设计中就应同时考虑有效峰值加速度和有效峰值速度。具体设计中，有效峰值加速度和有效峰值速度分别用短周期（通常为0.2 s）加速度 S_s 和周期为1 s的加速度 S_1 体现，称为谱加速度，两者均从地震区划图得到。对 S_s 乘场地系数 F_a 得到考虑场地类别的短周期谱加速度 S_{XS} ， S_1 乘场地系数 F_v 得到考虑场地类别的周期为1 s的谱加速度 S_{X1} ，由 S_{X1} 与 S_{XS} 的比值得到图14b)中的 T_0 ，水平线与曲线 S_{X1}/T 的交点得到 T_s 。由此可见，图14b)所示的美国反应谱的 $[0, T_s]$ 段反映了短周期加速度反应的特点， T_s 之后的段尽管是用加速度表示的，但反映了中周期速度反应的特点，理论上更为合理和先进。另外美国《海洋油码头》



a) 我国水运工程



b) 美国海洋油码头
图14 地震反应谱

采用的谱加速度曲线还考虑了结构阻尼比的影响，这对采用非线性静力法进行地震反应分析是非常重要的。

在日本《港口设施技术标准与解说》（2007）中，直接将地震危险性分析得到的地面加速度时程关系作为输入地震进行一维地震反应分析，计算假想地面以下 $1/\beta$ （ β 为桩的相对刚度系数）位置的加速度时程，得到高桩码头的加速度反应谱，然后计算对应于高桩码头固有周期的反应加速度，用重力加速度除以反应加速度得到地震系数特征值，计算过程如图15所示。计算加速度反应谱时的折减系数可取0.2。高桩码头的固有周期可以根据框架分析求得。由于按框架分析确定的高桩码头刚度所求得的码头固有周期与实际周期有一定误差，而时程分析得到的地震反应谱有较大的波动性，如图16所示，所以日本标准特别强调了地震反应的合理取值问题。

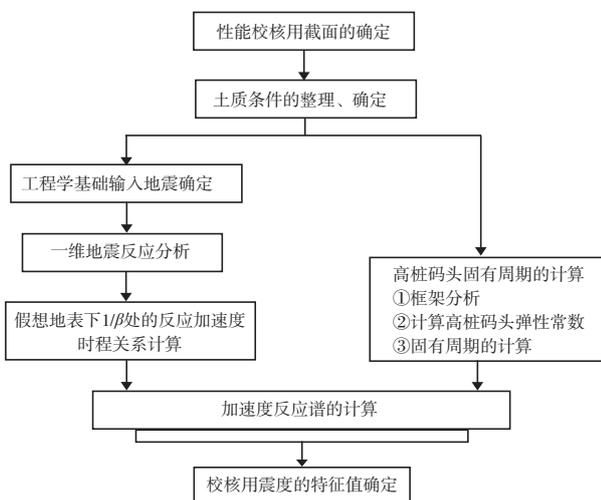


图15 日本标准中确定地震系数的一般步骤

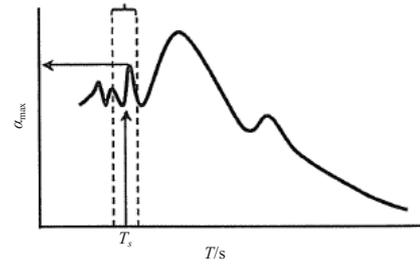


图16 输入地震波计算的加速度反应谱

分析码头后的挡土墙的抗震性能时，由于其性能不同于高桩码头，不能采用高桩码头分析得到的地震系数，可通过非线性有效应力分析直接评价挡土墙的变形，也可采用地震系数法进行简化分析。采用地震系数法进行分析时，需考虑地震频谱特性或持时的影响。重力式挡土墙的校核与重力式码头相近，但频谱特性的过滤与重力式岸壁不同。

8.2 承载力验算

我国《水运工程抗震设计规范》、美国统一设施准则《设计：墩与码头》（UFC 4-152-01）、《海洋油码头》及日本《港口设施技术标准与解说》（2007）均采用分项系数法验算地震作用下高桩码头的强度。我国规范的公式除在荷载效应项增加了地震作用和在抗力项考虑了抗震调整系数外，其余与静力时的情况相同；美国统一设施准则《设计：墩与码头》（UFC 4-152-01）的承载力计算表达式中，荷载系数包括码头空闲、靠泊和系泊3种情况，表12给出了3种情况中包括地震的组合（不包括地震的组合未列出），在美国《海洋油码头》^[3]中，地震组合只考虑恒荷载、土压力和地震作用。

日本《港口设施技术标准与解说》（2007）按可变状况和偶然状况两种状况考虑。对于上部结构和桩的承载力，可变状况按船舶作用、水准1地震、堆货荷载、波浪力进行组合；对于偶然状况，按水准2地震考虑。

8.3 变形计算

强度是结构最大承载力的表征，在静力作用下，只要结构的内力不超过强度，结构就是安全的，它不反映结构的破坏过程。地震是一个反复作用的过程，除强度外，其破坏过程还依赖

表12 美国统一设施准则《设计：墩与码头》中考虑地震的荷载组合

| 荷载 | 空闲 | | 靠泊 | 系泊 | |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 组合1 | 组合2 | | 组合1 | 组合2 |
| 恒荷载 D | 1.2 | 0.9 | 1.2 | 1.2 | 0.9 |
| 均布活荷载 L | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 浮力 B | 1.2 | 0.9 | 1.2 | 1.2 | 0.9 |
| 系泊力 B_e | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 作用在结构上的水压力 C | 1.2 | 0.9 | 1.2 | 1.2 | 0.9 |
| 作用在船上的水压力 C_s | 0 | 0 | 0 | 1.2 | 0.9 |
| 土压力 E | 0 | 1.6 | 0 | 0 | 1.6 |
| 地震荷载 E_Q | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

于结构所经受的变形，所以，结构的变形对结构抗震非常重要。随着对结构抗震性能研究的不断深入，结构抗震设计中的变形验算越来越受到重视。特别是对于高桩码头，地震作用下结构本身可能并没有破坏，但过大的变形使结构不能再继续使用。

我国《水运工程抗震设计规范》采用单设防水准的设计方法，没有变形能力验算的规定。日本《港口设施技术标准与解说》（2007）中，码头的变形直接反映在地震系数中，设计中根据变形要求的不同，得到不同的地震系数，实现对码头变形的控制。

在美国，常采用线弹性分析法、非线性时程法和非线性静力法计算码头的变形。

1) 线弹性分析法。

一般用于风险等级为中或高的不规则的混凝土或钢结构。美国《海洋油码头》规定可根据构件的等效惯性矩通过三维线弹性振型分解法计算总的位移需求。分析中需考虑足够多的振型，在结构的主要水平方向至少考虑90%的质量参与振动。采用完全二次组合法进行振型组合。也可采用按割线刚度计算的等效线性分析方法，为减少划分的单元数量和减小计算量，可以将多个桩等效为“超级桩”进行分析^[33]。

2) 非线性时程分析。

一般用于较高设防地震水准下的结构动力分析，在这种情况下结构构件可能会进入非线性状态，结构的非线性反应采用恢复力曲线表示。

进行非线性时程分析时，需要输入地面加速度时程。美国《加利福尼亚州海洋油码头抗震准

则》规定，非线性时程分析法可用于确定水准1和水准2地震作用下码头结构构件的非弹性转角和设计位移。计算中，最少需要5组具有正交加速度记录的频谱曲线，用5个结果的平均值作为设计或估算的标准。每组记录的振幅、持时和频率应当与所考虑地震的大小和作用范围相一致。

美国《海洋油码头》规定，当使用加速度时程时，首先应选择相应于合适概率水平的设计谱加速度作为目标谱加速度。对于相应于1个概率水平的每组目标谱加速度，至少给出3组水平时程曲线（每组1条或2条水平加速度时程曲线）。

初始的时程曲线应考虑震级、距离及与设计谱加速度时程条件类似的断层类型。初始时程的震级和与震源的距离最好接近于从概率危险性分析或合适的区划图中推定的模型震级和模型距离。当没有足够多的时程记录时，可采用模拟的加速度时程。

无论是在频域内还是在时域内，在产生加速度时程曲线之前的缩放比例或修正应保持最小。当目标谱加速度包括近场方向效应时，初始的时程应反映方向效应。

当分析采用3组时程曲线时，从每组时程得到谱加速度包络线应等于或高于目标谱加速度。若包络线低于目标值，应进行修正保证谱加速度包络线高于目标谱加速度值。

当采用7组或多于7组的时程曲线时，由时程曲线得到的谱加速度值的平均值应等于或高于目标谱加速度值。若平均值小于目标值，应进行修正以保证平均值高于目标谱加速度值。

当分析中采用3组时程曲线时，设计、评价和

修复中应采用每个反应参数的最大值。当分析中采用7组或多于7组的时程曲线时，应采用每组反应参数的平均值。

3) 非线性静力法。

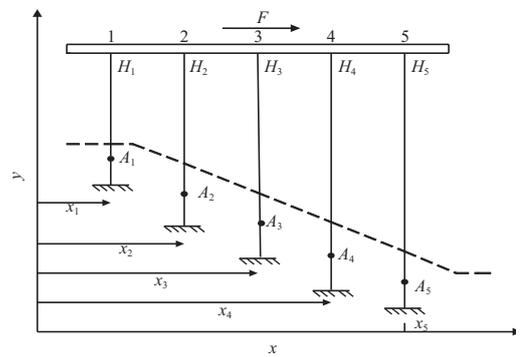
非线性静力法也称为Pushover方法，是近年来在国外得到广泛应用的一种结构抗震能力分析方法，可计算结构在罕遇地震作用下的弹塑性变形，帮助设计人员更好地了解结构的内部反应机制，给出有关结构强度极限、相应变形、强度分配不连续性以及可能遭受严重破坏的部位等有关信息。这种方法从本质上说是一种静力非线性计算方法，与以往的抗震静力计算方法不同之处主要在于它将设计反应谱引入了计算过程和计算结果的工程解释。与时程分析方法相比，Pushover方法可以获得较为稳定的分析结果，减少分析结果的偶然性，花费时间较少。美国《海洋油码头》、《长滩港码头设计准则》和国际航运协会标准《港口结构抗震设计指南》都推荐采用非线性静力法对码头结构进行变形分析。

非线性静力分析方法是考虑自重作用的同时，通过对结构施加水平单调递增的荷载将结构推至某一预定的目标位移或者使结构成为机构，来找出结构的薄弱部位及确定非线性状态的反应，以判断在未来可能地震作用下结构及构件的非线性变形能力是否满足设计要求，如图17所示。其大致步骤是：逐渐在结构上施加水平力，使结构各构件依次进入塑性状态，因为某些构件进入塑性状态后，整个结构的动力特性会发生改变，此时相当于形成新的结构；求出“新”结构的自振周期，并继续施加水平荷载，使下一个构件也进入屈服状态；这样不断进行下去，直至结构达到预定破坏目标。将结构不同状态时的自振周期及其对应的总水平力绘成曲线，同时将相应场地的各条反应谱曲线绘在一起，如果结构的反应曲线能够穿过某条反应谱，就说明结构能够抵抗那条反应谱所对应的地震烈度。非线性静力分析方法包括两个方面的内容，首先计算单调水平荷载下的非线性荷载-位移曲线；其次求给定地震下的弹塑性位移，将该变形值与规范变形限值比较，确定抗震能力是否满足要求，从而评估结构

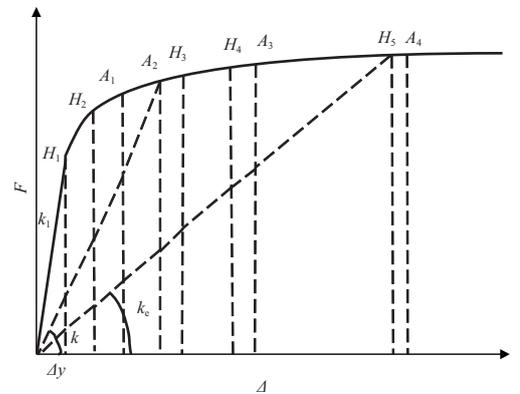
抗震性能。目前提出的非线性静力分析方法有多种，如ATC-40能力谱法^[18]、N2方法^[34]和位移影响系数法^[35]等，图18给出了能力谱法的基本概念。

《海洋油码头》^[3]给出了采用能力谱方法对高桩码头变形进行分析的步骤。文献[36]采用能力谱法对高桩码头结构的变形性能进行了分析，并与非线性时程分析的结果进行了比较，说明Pushover方法可用于高桩码头的抗震分析。

关于高桩码头变形控制的标准，各规范的规



a) 高桩码头分析截面



b) 力-位移反应及塑性铰出现顺序

图17 高桩码头非线性静力分析模型

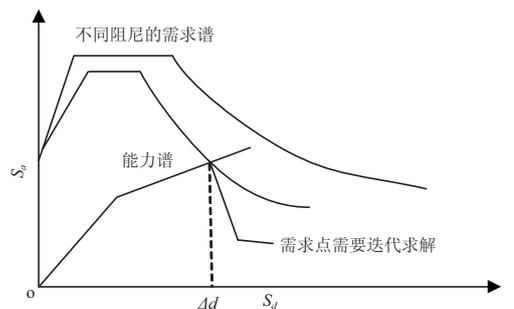


图18 能力谱法确定变形

定不同。美国《海洋油码头》^[3]和《长滩港码头设计准则》^[4]均通过限制桩混凝土的极限压应变和钢

筋的极限拉应变控制高桩码头的变形能力，表13为《海洋油码头》^[3]对桩混凝土极限压应变和钢筋

极限拉应变的限制，表14为国际航运协会《港口结构抗震设计指南》(2001)^[9]的控制标准。

表13 《海洋油码头》中对混凝土和钢筋应变的限值

| 应变 | 构件 | 水准1 | 水准2 |
|-----------|-----|-------------------------------|------------------------------|
| 混凝土最大压应变 | 桩板铰 | $\epsilon_c \leq 0.005$ | $\epsilon_c \leq 0.025$ |
| | 土内铰 | $\epsilon_c \leq 0.005$ | $\epsilon_c \leq 0.008$ |
| 钢筋最大拉应变 | | $\epsilon_s \leq 0.001$ | $\epsilon_c \leq 0.05$ |
| 预应力筋最大拉应变 | 土内铰 | $\epsilon_p \leq 0.005$ (增加值) | $\epsilon_p \leq 0.04$ (总应变) |

表14 国际航运协会《港口结构抗震设计指南》中高桩码头的破坏准则^①

| 破坏程度 | 残余位移 | | 峰值反应 |
|--------|----------------|-------------|-------------------------------|
| | 板和板后地面的不均匀沉降/m | 向海的残余倾斜角(°) | 桩 ^② |
| 程度 I | <0.1 ~ 0.3 | <2 ~ 3 | 最小残余变形或没有残余变形 |
| 程度 II | N/A | N/A | 控制范围内的非弹性延性反应和残余变形，但能保证结构可以修复 |
| 程度 III | N/A | N/A | 接近倒塌的延性反应（在一个或少数几个桩中出现两个塑性铰） |
| 程度 IV | N/A | N/A | 超过程度 III 的状态 |

注：① 表中仅指桩和板；② 结构构件的弯曲破坏应先于剪切破坏。

参考文献：

[31] 李颖, 贡金鑫. 考虑桩土相互作用的高桩码头非线性地震反应分析[J]. 水利水运工程学报, 2010(2): 92-99.

[32] ATC-3-06. Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings[S]. California: Applied Technology Council, 1978.

[33] 李颖, 贡金鑫. 预应力高桩码头振型反应谱抗震分析[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(6): 846-853.

[34] Fajfar P. A nonlinear analysis method for performance based seismic design[J]. Earthquake Spectra, 2000, 16(3): 573-592.

[35] FEMA 356. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings[S]. 2000.

[36] 李颖, 贡金鑫, 吴澎. 高桩码头抗震性能的Pushover分析[J]. 水利水运工程学报, 2010(4): 73-80.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

四航局一科研成果达国际领先水平

近日，在广明高速富湾特大桥“大跨度混凝土钢结构变形控制技术及其耐久性研究”项目成果鉴定会上，鉴定委员会专家一致认为，四航局研发的广明富湾特大桥科研成果整体达到国际先进水平，其中“钢纤维聚合物高强结构混凝土新材料和远距离摄像及图像处理技术在大跨度混凝土钢构桥中的应用”达到国际领先水平。

富湾特大桥是广明高速公路西樵至更楼段跨越西江的特大桥,主桥为112 m+2×200 m+112 m一联的预应力混凝土连续钢构。四航局在大桥实施过程中，采用了钢纤维聚合物高强结构混凝土新材料，用于大跨度混凝土刚构桥结构关键部位，与国内外同类材料相比，具有既强又韧、抗裂抗疲劳性能优异、耐久性好等特点；基于远距离摄像及图像处理的桥梁结构位移长期监测技术及其监测子系统，首次用于桥梁位移监测，与现有技术相比，具有监测距离远、测量精度高、成本低、稳定性好、使用方便等特点。

该课题全面系统研究了富湾大桥大跨度混凝土钢结构变形控制技术及其耐久性使用要求，主要成果具有显著的社会和经济效益。

摘自《中国交通建设网》