



T 型混凝土压弯构件设计的中英规范对比

卢 昭, 肖 鑫, 胡志敏, 李新国
(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 从设计理念、公式推导及裂缝对比等方面, 对 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》和 BS 8110—1997 *Structural Use of Concrete* 中英混凝土规范中的 T 型压弯构件进行对比, 经过实例验证得到一些有益结论, 供涉外工程参考。

关键词: 中国规范; 英国规范; 混凝土结构; T 型压弯构件

中图分类号: TU 37 文献标志码: A 文章编号: 1002-4972(2015)07-0081-06

Comparison of British code and Chinese code for T-shape compression-bending concrete structure design

LU Zhao, XIAO Xin, HU Zhi-min, LI Xin-guo
(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Some useful conclusions of T-shape compression-bending structure are summarized through the comparison between concrete code of China (JTS 151—2011) and Britain (BS 8110—1997) in the design concept, formula derivation and crack calculation, which is checked through Egypt project and which may serve as reference for overseas project design.

Keywords: Chinese code; British code; concrete structure; T-shape compression-bending structure

随着港口施工能力的提高, 大型 T 型混凝土桩或 T 型混凝土地连墙的应用不论在国内工程还是国外工程都逐渐增多, 如国内的曹妃甸某码头工程、埃及苏伊士运河某码头工程等, 但对于 T 型压弯构件的规范对比研究还不多见。本文主要对中英混凝土规范中的 T 型压弯构件在设计理念及公式推导等方面进行对比分析, 得到一些有益的结论; 利用本文的相关推导公式可编制中英标 T 型桩的配筋计算书。关于材料基本假定、设计表达式等对比见文献 [1]。

1 设计理念与方法

JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》^[2]采用以概率论为基础的分项系数表达的极限

状态设计法, 规定了 2 种极限状态和 4 种设计状况。2 种极限状态分别是承载力极限状态和正常使用极限状态, 4 种设计状况分别是持久状况、短暂状况、地震状况和偶然状况。英标 BS 8110—1997 *Structural Use of Concrete*^[3-4]采用的是以经验系数法为基础的分项系数表达的极限状态设计法, 规定了两种极限状态, 但没有规定设计状况, 设计状况在荷载组合中体现。两种极限状态为承载力极限状态和正常使用极限状态。

2 规范特征

2.1 英标特征

英国规范中的强制部分已纳入法规, 英标 BS 不是强制性的, 发布时总是声明: 1) 英标 BS

收稿日期: 2015-01-05

作者简介: 卢昭 (1983—) 男, 工程师, 从事港口规划、设计工作。

(用词 Standard Code 或 Code) 是推荐、建议、不强求; 2) 规范是给有实践经验的工程师使用的; 3) 有充分依据时, 可以不受本规范的约束; 4) 使用本规范不能免除其责任。

2.2 我国规范特征

强制性条文较多, 类似手册。

3 计算公式

3.1 翼缘宽度的计算

3.1.1 英标 BS 8110—1997^[3-4]

由规范 3.4.1.5, 翼缘宽度为 $+l_z/5$ 或实际翼缘宽度。其中, l_z 为弯矩为零点之间的距离 (对于连续梁, 可取有效跨度的 0.7)。对于压弯构件, 建议取嵌固点至 T 型桩顶端之间的距离。

3.1.2 中国规范 JTS 151—2011^[2]

见规范表 5.2.3 (表 1)。

表 1 T 形及倒 L 形面受弯构件翼缘计算宽度 b_f'

考虑情况	T 形截面		倒 L 形截面
	肋形梁 (板)	独立梁	肋形梁 (板)
按计算跨度 l_0 考虑	$\frac{l_0}{3}$	$\frac{l_0}{3}$	$\frac{l_0}{6}$
按梁 (肋) 净距 S_n 考虑	$b + S_n$		$b + \frac{S_n}{2}$
按翼缘高度 h_f' 考虑			
$\frac{h_f'}{h_0} \geq 0.1$	$b + 12h_f'$		
$0.1 > \frac{h_f'}{h_0} \geq 0.05$	$b + 12h_f'$	$b + 6h_f'$	$b + 5h_f'$
$\frac{h_f'}{h_0} < 0.05$	$b + 12h_f'$	b	$b + 5h_f'$

注: ①表中 b 为梁的腹板宽度, h_0 为截面有效高度; ②如肋形梁在梁跨内设有间距小于纵肋间距的横肋时, 则可不遵守表中项次 3 的规定; ③对有加腋的 T 型和倒 L 形截面, 当受压区加腋的高度 $h_h \geq h_f'$ 且加腋的宽度 $b_h \leq 3h_h$ 时, 则其翼缘计算宽度可按表中项次 3 的规定分别增加 $2b_h$ (T 形截面) 和 b_h (倒 L 形截面); ④独立梁受压区的翼缘板在荷载作用下如可能产生沿纵肋方向的裂缝, 则计算宽度应取腹板宽度 b 。

3.2 压弯构件极限承载力状态配筋计算

3.2.1 英标 BS 8110—1997^[3-5]

根据英标 3.8.4, 压弯构件可根据梁的相关受力模式来计算。对于梁的压弯计算, 只有设计原则, 无压弯构件的具体公式。参考采用英国混凝土教材 *Reinforced concrete analysis and design*^[5],

其受力方程如下:

可统一对 T 型桩中心轴取矩, 则

$$N = C_c + C_s - T \tag{1}$$

$$M = M_c + M_s - M_T \tag{2}$$

式中: N 为极限状态下压力; M 为极限状态下对某一轴的弯矩, 需要说明的是, 这可能是计算软件弯矩结果对于不同轴变换后的值; C_c 为混凝土压力值; C_s 为受压钢筋压力值; T 为受拉钢筋拉力值; M_c 为混凝土压力对于某一轴的弯矩 (其中, 若受压区高度在翼缘内, 按翼缘宽度的矩形截面计算; 超过翼缘宽度, 还应考虑腹板的作用); M_s 为受压钢筋拉力对某一轴的弯矩; M_T 为受拉钢筋拉力对某一轴的弯矩。需要注意的是, 需验算受压或受拉钢筋是否满足达到设计值。

3.2.2 中国规范 JTS 151—2011^[2]

依据 5.3.5, T 型截面偏心受压构件当翼缘位于较大受压边时, 其正截面受压承载力应按下列规定计算, 偏心受压见图 1。

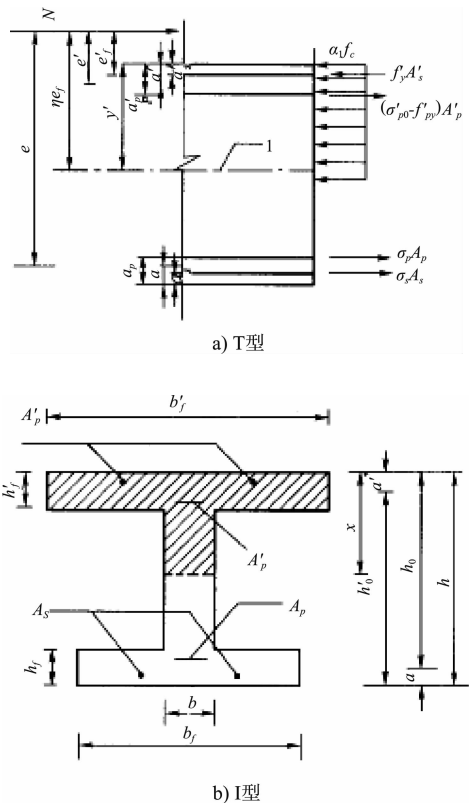


图 1 T/I 型截面偏心受压结构计算图示

1) 规范 5.3.5.1 条: 如受压区高度 $x \leq h'_f$ 应
按照宽度为 b'_f 的矩形截面计算。

2) 规范 5.3.5.2 条: 如受压区高度 $x > h'_f$ 则
应考虑腹板的受压作用, 按式(3)计算:

$$N_u = f_c b x + f_c (b'_f - b) h'_f + f'_y A'_s - \sigma_s A_s - (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p - \sigma_p A_p$$

(3)

$$N_u e = f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_c (b_f - b) h_f \left(h_0 - \frac{h_f}{2} \right) +$$
$$f'_y A'_s (h_0 - a'_s) - (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p (h_0 - a'_p)$$

(4)

式中: σ'_{p0} 为受压区纵向预应力钢筋合力点处混凝土
法向应力等于零时的预应力钢筋应力 (N/mm^2);
 A_s 、 A'_s 为受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面
积 (mm^2); A_p 、 A'_p 为受拉区、受压区纵向预应力
钢筋的截面面积 (mm^2); σ_s 、 σ_p 为受拉边或受
压较小边的纵向普通钢筋、预应力钢筋的应力
(N/mm^2); h_0 为截面有效高度 (mm); a'_s 、 a'_p 为
受压区纵向普通钢筋合力点、预应力钢筋合力点
至截面受压边缘的距离 (mm)。

3) 规范 5.3.5.3 条: 当翼缘位于截面受拉边
或受压较小边, 且 $x > h - h_f$ 时, 在正截面受压承
载力计算中应考虑翼缘受压部分的作用。

4) 规范 5.3.5.4 条: 对翼缘位于截面受拉边
或截面受压较小边的小偏心受压构件, 应按下列
公式进行验算: $N e' \leq N_u e'$

$$N_u e' = f_c [b h (h'_0 - h/2) + (b_f - b) h_f (h'_0 - h_f/2) +$$
$$(b'_f - b) h'_f (h'_f/2 - a')] + f'_y A'_s (h'_0 - a'_s) -$$
$$(\sigma'_{p0} - f'_{py}) A_p (h'_0 - a_p)$$

(5)

式中: e' 为轴向力作用点至受压钢筋合力点之间的
距离 (mm); h_f 为 T 形截面翼缘位于截面受拉边
或受压较小边的翼缘高度 (mm); b'_f 为 T 形截面
翼缘位于截面受拉边或受压较小边时的翼缘计算
宽度 (mm)。

利用以上公式时, 还应符合以下规定: 1) 当
 $\zeta \leq \zeta_b$ 时, 称为大偏心构件, 此时 $\sigma_s = f_y$, 此处 ζ
 $= x/h_0$; 当 $\zeta > \zeta_b$ 时, 称为小偏心构件, 此时 σ_s 按
5.1.4 计算; 2) 如计算中考虑受压钢筋时, 则受
压区高度应符合下列条件: $x \geq 2a'$ 。

3.2.3 两者间的区别

英标 BS 8110—1997 与国标 JTS 151—2011 极
限承载力状态比较见表 2。

表 2 BS 8110—1997 与 JTS 151—2011
极限承载力状态计算比较

规范	相同点	不同点
BS 8110—1997	计算模式及 原理相同	规范里没有具体公式, 没有大 小偏心名词
JTS 151—2011		规范里有具体计算公式, 公式 条纹较细致; 有大小偏心概念

3.3 压弯构件裂缝宽度计算

3.3.1 英标 BS 8110—1997^[3-5]

基本原理: 采用特征裂缝宽度验算混凝土构
件的裂缝。

基本假设: 根据平截面假定计算应变; 假定
钢筋是弹性的; 假定混凝土是线弹性的; 公式是
经验性的, 且经过实验验证 (图 2)。

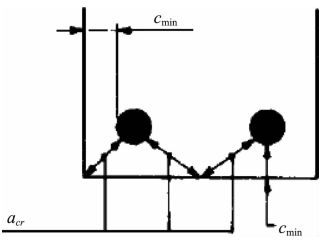


图 2 英标 BS 8110 裂缝计算模式

允许裂缝宽度: 不超过 0.3 mm。

$$W_{\max} = \frac{3 a_{cr} \varepsilon_m}{1 + \frac{2 (a_{cr} - c_{\min})}{h - x}}$$

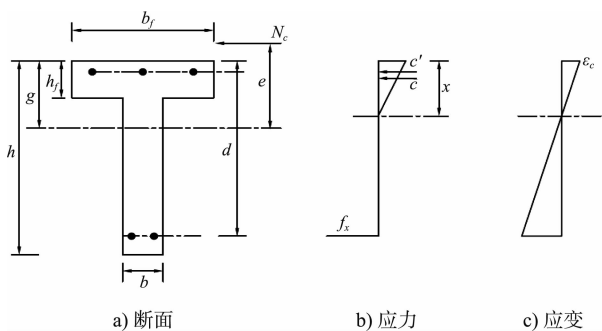
(6)

$$\varepsilon_m = \varepsilon_1 - b_t (h - x) \cdot \frac{(a' - x)}{3 E_s A_s (d - x)}$$

(7)

式中: ε_1 为正常使用极限状态下的钢筋应力; b_t
为受拉钢筋中心处截面宽度; $c_{\min}$ 为受拉钢筋最小
保护层; d 为有效高度; x 为中和轴高度; A_s 为受
拉钢筋面积。

对于压弯构件, 最重要的就是计算正常使用
极限状态下的钢筋应力 (图 3), 由于英标中并未
出现相关公式, 本文推导如下:



注: C' 为受压截面内钢筋压力; C 为受压截面混凝土压力; T 为受拉钢筋拉力; N_c 为压力; M 为截面弯矩; x 为受压区边缘至中性轴的高度; ε_c 为混凝土极限压应变; ε'_s 为受压区钢筋应变; ε_s 为受拉区钢筋应变; $m = E_s/E_c$ 。

图 3 压弯构件正常使用状态受力示意图

根据截面受力平衡:

$$\begin{cases} C' + C = N_c + T \\ e = \frac{M}{N_c} \end{cases} \quad (8)$$

式中: g 为受压区边缘至受力截面重心的距离:

$$g = \frac{bx\left(\frac{x}{2}\right) + (m-1)A'_s d' + mA_s d}{bx + (m-1)A'_s + mA_s} \quad (9)$$

对受拉钢筋处取矩:

$$-N_c(e + d - g) + C'(d - d') + C\left(d - \frac{x}{3}\right) = 0 \quad (10)$$

或

$$-N_c(e + d - g) + (m-1)f_c A'_s \left(\frac{x - d'}{x}\right)(d - d') + 0.5bxf_c\left(d - \frac{x}{3}\right) = 0 \quad (11)$$

或

$$(m-1)\left(1 - \frac{d'}{x}\right)(d - d')\frac{f_c A'_s}{d} + 0.5bx\left(1 - \frac{x}{3d}\right)f_c = N_c\left[\frac{(e - g)}{d} + 1\right] \quad (12)$$

令

$$k_1 = \frac{(e - g)}{d} + 1 \quad (13)$$

$$k_2 = \frac{x}{2d}\left(1 - \frac{x}{3d}\right) \quad (14)$$

$$k_3 = (m-1)\left(1 - \frac{d'}{x}\right) \quad (15)$$

式中: k_1 、 k_2 、 k_3 为常数。

$$k_3\left(1 - \frac{d'}{d}\right)f_c A'_s + k_2 b d f_c = k_1 N_c \quad (16)$$

或

$$f_c = \frac{k_1 N_c}{k_3\left(1 - \frac{d'}{d}\right)A'_s + k_2 b d} \quad (17)$$

$$T = C' + C - N_c \quad (18)$$

或

$$A_s f_s = (m-1)f_c A'_s \left(\frac{x - d'}{x}\right) + 0.5bxf_c - N_c = k_3 f_c A'_s + 0.5bxf_c - N_c \quad (19)$$

或

$$f_s = \frac{f_c(k_3 A'_s + 0.5bx) - N_c}{A_s} \quad (20)$$

根据平面应力假设

$$\frac{f_s}{f_c} = \frac{m(d - x)}{x} \quad (21)$$

或

$$x = \frac{d}{\left(1 + \frac{f_s}{mf_c}\right)} \quad (22)$$

可根据此公式假设 x 之后计算出 f_c 与 f_s , 从而反推 x , 在试算之后, 得到符合精度要求的 x 。从而推导出正常使用状态下的钢筋应力。

3.3.2 中国规范 JTS 151—2011^[2]

我国规范的裂缝宽度计算公式是属于半理论半经验公式中的综合理论, 其具体表达式如下:

$$W_{\max} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \left(\frac{c + d}{0.30 + 1.4\rho_{te}} \right) \quad (23)$$

式中: α_1 、 α_2 、 α_3 为特征系数; c 为最外排纵向受拉钢筋保护层厚度, 当 $c > 50$ mm 时, c 取 50 mm; d 为钢筋直径; ρ_{te} 为纵向受拉钢筋的有效配筋率; σ_s 为钢筋混凝土构件纵向受拉钢筋的应力。

根据 6.4.5, T 型桩偏心受压构件中纵向受拉钢筋应力采用下式计算:

$$\sigma_s = \frac{N_q(e - z)}{A_s z} \quad (24)$$

$$Z = \left[0.87(10\gamma_f') \left(\frac{h_0}{e} \right)^2 \right] h_0 \quad (25)$$

式中: N_q 为按作用的准永久组合计算的轴向力值; Z 为内力臂; e 为纵向力至受拉钢筋 A_s 的距离; γ_f' 为受压翼缘面积与腹板有效面积的比值。允许裂缝宽度 (不含预应力) 见表 3。

表 3 混凝土最大裂缝宽度限制							mm
淡水港			海水港				
水上区	水位变动区	水下区	大气区	浪溅区	水位变动区	水下区	
0.25	0.25	0.40	0.20	0.20	0.25	0.30	

3.3.3 裂缝计算比较

裂缝计算比较见表 4。

表 4 裂缝计算比较						
规范	计算原理	主要影响因素	相同点	不同点	计算结果	
BS 8110—1997	采用特征裂缝宽度验算	保护层厚度, 钢筋直径, 钢筋应	均考虑保护层厚度, 钢筋直径及钢筋应力的影响, 且均得到试验的验证; 其中钢筋应力都是直接影响裂缝大小的因素	1) 保护层厚度的影响不同, BS 8110—1997 裂缝宽度与保护层厚度及钢筋间距正相关	1) 经过本国大量实验验证 2) 由于正常使用情况荷载组合及公式不同的双重影响, 一般来说计算结果较大或需要钢筋较多, 尤其在保护层厚度较大时更是如此	
				2) 裂缝允许宽度不同, BS 8110—1997 只规定裂缝宽度不小于 0.3 mm, 对于浪溅区及码头特殊部分的裂缝控制将取决于业主或咨工的特殊要求及其它的专业规范要求		
JTS 151—2011	半理论半经验公式, 数理统计方法, 用平均裂缝宽度及扩大系数确定	保护层厚度, 钢筋直径, 钢筋应力		3) 无具体计算钢筋应力公式		
				1) 保护层厚度影响不同, 当保护层厚度 > 50 mm 时, 取常数, 且保护层还与纵向钢筋配筋率的计算相关	1) 经过本国大量试验验证 2) 由于正常使用情况荷载组合及公式不同的双重影响, 一般来说计算结果比 BS 8110—1997 为小	
				2) 裂缝允许宽度分类较细		
				3) 有具体计算钢筋裂缝公式		

4 工程案例分析

以埃及项目为例。该项目采用桩基码头 T 构地连墙组合结构, 桩基排架间距 7 m, 每排架设 3 根桩, 海侧桩和陆侧桩采用 T 型现浇钢筋混凝土桩 (翼缘尺寸 2.8 m × 0.8 m, 梁肋尺寸 3.4 m × 0.8 m, 保护层厚度 90 mm), 中间桩采用矩形现浇钢筋混凝土桩 (断面尺寸 5 m × 0.8 m), 码头桩基底高程 -52.50 ~ -56.00 m。相邻 T 桩之间均采用现浇地连墙连接, 地连墙断面尺寸为 4.2 m × 0.8 m。案例三维模型见图 4。

根据弯矩结果进行配筋, 选取 -40 m 截面 (T 型翼缘受压) 的配筋计算进行算例验算。

由于英标和国标从计算荷载组合表达式及分项系数上已出现差异, 若对两种计算体系完全对比, 应从同一结构的配筋比选即需从软件结构计算开始。假如按照已知计算弯矩及压力结果作为输入条件为基础进行相关配筋对比, 结果如下:

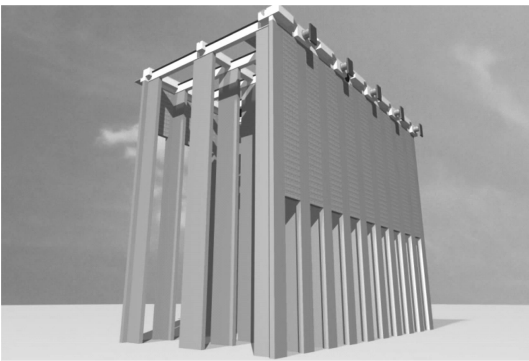


图 4 桩基码头 T 构地连墙组合新型结构 (无土体) 三维模型

- 1) 极限承载力状态: 英标及国标的理念及公式一致, 计算结果基本一致。
- 2) 正常使用状态: 因为两国规范在裂缝的理念及公式均有差别, 通过比较, 英国规范对于计算裂缝的结果更为严格。以本算例 -40 m 截面为例, 裂缝计算结果见表 5; 若采用相同的裂缝标准 (均不超过 0.45 mm), 配筋计算结果见表 6。

表 5 裂缝计算结果对比

断面位置	极限承载力 学指标(ULS)	正常使用力 学指标(SLS)	裂缝配筋		英标验算	国标验算	说明
-40 m	$M = -35\,778\text{ kN}\cdot\text{m}$ $N = 23\,378\text{ kN}$	$M = -24\,028\text{ kN}\cdot\text{m}$ $N = 16\,211\text{ kN}$	翼缘部分	12T32	无裂缝	无裂缝	英标裂缝 > 国标
			腹板部分	21T32	0.437 mm	0.293 mm	

表 6 相同裂缝标准配筋结果对比

断面位置	极限承载力 学指标(ULS)	正常使用力 学指标(SLS)	裂缝计算标准		英标配筋	国标配筋	说明
-40 m	$M = -35\,778\text{ kN}\cdot\text{m}$ $N = 23\,378\text{ kN}$	$M = -24\,028\text{ kN}\cdot\text{m}$ $N = 16\,211\text{ kN}$	翼缘部分	0.45 mm	12T32	8T32	英标钢筋 > 国标
			腹板部分	0.45 mm	21T32	15T32	

5 结语

1) 本文主要从设计理念、规范特征、部分公式推导及裂缝计算等方面进行了对比;详细推导了英标 T 型构件的配筋公式;在裂缝计算方面,从计算原理、主要因素、公式表达等方面比较了异同点。

2) 一般来说,英标的配筋结果会大于国标配筋结果,通过算例进行验证。

3) 通过对比两种规范,对于进一步理解 T 型桩混凝土的计算设计是有益的,对规范的理解也会更透彻。

参考文献:

[1] 卢昭,李新国,胡志敏.中英混凝土设计规范对比研究[J].水运工程,2011(9):43-47.

[2] JTS 151—2011 水运工程混凝土结构设计规范[S].

[3] BS 8110-1: 1997, Structure use of concrete—Part 1: Code of practice for design and construction [S].

[4] BS 8110-1: 1997, Structure use of concrete—Part 2: Code of practice for special circumstances [S].

[5] S S Ray. Reinforced Concrete Analysis and Design [M]. Oxford: Blackwell Science Ltd., 1995.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 65 页)

3 结论

1) 在竖向和水平荷载作用下,空间模型考虑面板作用比忽略面板作用的模型横梁及纵梁弯矩小。

2) 在竖向荷载作用下,空间等高建模与空间按实际高程建模横梁弯矩基本一致;而在含水平荷载作用下,空间等高建模横梁弯矩则小 30% ~40% 。

3) 在竖向荷载作用下,平面模型比空间模型在除桩基外其他构件内力均大;而在水平荷载作用下,除桩基外其他构件内力变化相对偏差无规律。

4) 建议对于常见的高桩梁板式码头,可按平面模型计算;在含较多空间特征显著的荷载作用时,建议采用按实际高程建模并忽略面板时的空间计算结果与平面模型计算结果进行比较,选择较大值进行设计;对于非常规的高桩码头结构,建议按照空间结构计算。

5) 在含水平荷载作用时,不同模型下构件内力计算结果相差较大。如何能更真实地模拟水平荷载的作用,尚待进一步研究。

参考文献:

[1] JTS 167-1—2010 高桩码头设计与施工规范[S].

[2] 黄涛,周杰鑫,马平.空间有限元模型和平面模型在高桩码头结构计算中的比较分析[J].中国水运,2013(1):60-61.

[3] 董华钢.高桩码头设计按空间与平面计算方法的比较[J].水运工程,2001(9):36-37.

[4] 杨锡鑑,陈振民.高桩梁板式码头空间结构计算中忽略面板作用的方法[J].水运工程,2012(9):93-99.

[5] 王婷婷,陈振民,何文钦.高桩梁板式码头结构设计中的空间有限元分析[J].水运工程,2009(7):118-123.

[6] 陈万佳.港口水工建筑物[M].北京:人民交通出版社,1989.

(本文编辑 郭雪珍)