

大型钢闸门轨道与混凝土基础接触问题分析

白润波¹, 曹平周¹, 曹茂森^{1,2}

(1. 河海大学 土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 水工钢闸门轨道底板与混凝土基础间的接触, 是决定轨道和混凝土基础复合系统服役能力的关键。以大型水工钢闸门轮轨支承体系为对象, 基于三维接触有限元数值实验和物理模型试验综合分析, 探讨轨道截面尺寸、砗基础厚度及砗强度等对轨道-砗基础接触压应力的影响效应。取得研究成果包括: (1) 揭示了轨道-砗基础接触压应力在轨道长度、宽度方向上呈现出中部凸起的二角帽形状分布规律; (2) 观察到轨道后砗基础厚度取大于2倍轨道高度时轨道应力已趋于稳定, 为取混凝土厚度为无限大对轨道进行分析提供了依据; (3) 鉴于压应力从轨道腹板传到底板, 扩散范围有限, 提出 $t_w + 3h_f$ 为底板宽度的优化取值, 可使压应力扩散较为充分而又不存在过多的小应力区。此外, 考虑轨道高度和轨道底板宽度对减小混凝土最大压应力的不同贡献, 且计及混凝土不同弹性模量时的影响, 提出了计算轨道底板混凝土承压应力的设计建议。

关键词: 压应力; 接触问题; 轨道; 混凝土基础; 钢闸门

中图分类号: TV663.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)01-0010-07

滚动式支承行走装置是大型水工钢闸门常用的支承形式, 可保证闸门的正常启闭运行。其中, 轨道底板与混凝土基础间接触压应力(以下简称轨-砗接触压应力)的大小和分布是决定轨道和混凝土基础内力乃至尺寸的关键因素, 研究轨-砗接触压应力分布规律, 对合理进行轨道和混凝土基础设计具有重要理论意义。目前, 对轨-砗接触压应力的基本分析方法大致有3种: 第一种是基于倒梁法、Winkler地基上弹性梁法、弹性半空间无限体上弹性梁法等各种简化模型的解析方法^[1-3]; 第二种是借助于计算机的数值解法^[4-6], 如有限元法、有限差分法和边界元法等; 第三种是针对具体水利工程采用物理模型试验的方法^[7,8]。解析方法需作较多的简化处理, 往往不能有效反映工程的实质情况; 数值解法用于模拟轨-砗接触应力的能力较强, 但现有研究着重于具体的工程实例计算, 从揭示工程内在机理角度做得工作不多, 也不够系统深入; 而物理模型试验难以考虑诸多影响因素及其相互关系。上述3种方法中, 数值解法用于对轨-砗接触压应力分析具有较大潜力, 不仅可以检验理论解, 还可以指导物理模型试验的开展; 而利用当前最先进的数值分析技术从工程不确定性角度, 深入研究轨道、混凝土基础几何尺寸及混凝土强度等对轨-砗接触压应力的影响, 是揭示轨-砗接触压应力内在规律的有效途径。本文采用大型商业有限元软件包 ANSYS, 用三维接触仿真技术对平面钢闸门轮轨支承体系进行数值实验分析, 探索轨-砗接触压应力内在规律, 通过与现有典型工程物理模型试验结果相比较, 验证方法的正确性和有效性, 并尝试提出轨道底板混凝土承压应力的简易计算式, 在与现有经验公式^[1]对比分析中提出结构优化指导对策。

1 三维接触分析

工程实际中轨道为埋入式, 即轨道顶面与二期混凝土顶面平齐。但按现行规范, 轨道承受的轮压直接传

收稿日期: 2008-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50608027); 江苏省研究生培养创新工程(CX07B_129z)

作者简介: 白润波(1982-), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 主要从事钢结构及钢与混凝土组合结构的研究。

E-mail: bai1982@126.com

递到与轨道底板相接触的混凝土上, 不考虑轨道两侧混凝土对轨道受力的影响, 计算时按此规定处理, 轨道两侧作为自由表面. 此外, 轨道及混凝土基础沿轨道纵向很长, 且布置有多个滚轮, 分析时取一个滚轮并取适当的轨道及混凝土基础长度. 为对计算单元的选取及计算方法的正确性进行验证, 利用文献 [8] 中的模型尺寸、材料参数建立滚轮、轨道、混凝土基础支承体系模型, 并与试验^[8]方案一致, 将轮轨支承体系取为卧位放置, 几何模型见图 1(a). 利用对称性取模型的 1/4 进行分析. 滚轮、轨道、混凝土均采用 SOLID45 单元, 在滚轮与轨道、轨道与混凝土基础之间设接触对, 接触单元采用 CONTA173 单元, 目标单元采用 TARGE170 单元. 在两对称面上施加对称约束, 在混凝土基础底部约束各方向的线位移. 坐标系的选择是以模型横向对称面轨道底板中心为坐标原点, 轨道长度方向为 z 轴, 沿轮轴方向为 x 轴, z 轴至 x 轴按右手螺旋方向为 y 轴负方向. 有限元模型见图 1(b).

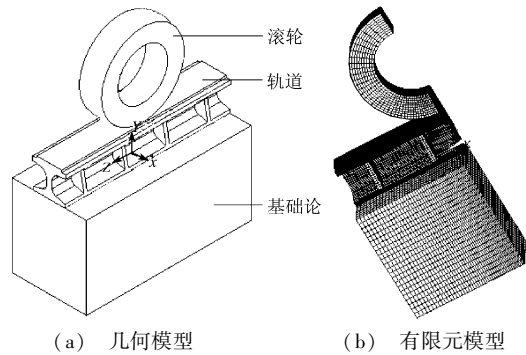


图 1 分析模型
Fig. 1 Analytic model

为模拟实际荷载作用状态, 开发相应程序以在滚轮的半个内圆周上施加滚轮轴承传来的按正弦分布的径向压力. 轮压通过轮轨间的接触作用传递到轨道上. 大型平面钢闸门的轮轨接触属于小变形, 采用小变形接触算法. 在计算的第一步建立接触关系, 并保持不变. 采用试算法确定法向接触刚度因子 FKN ^[9].

有限元计算结果与试验数值的比较见图 2.

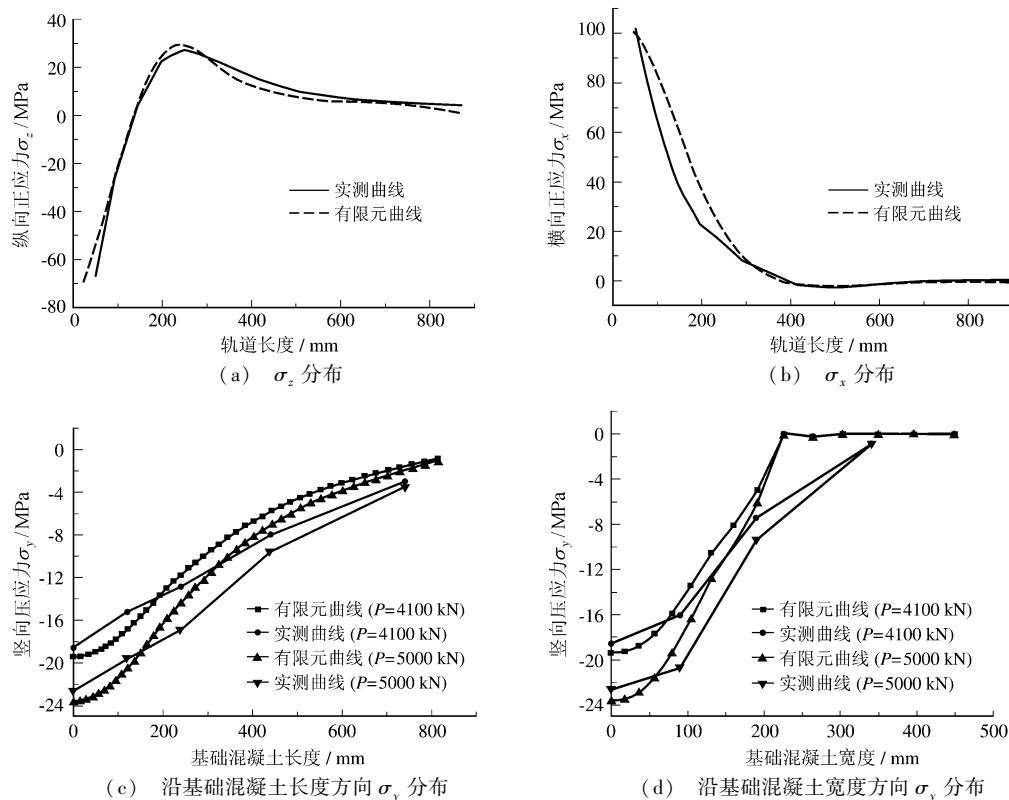


图 2 有限元计算结果与试验数值比较
Fig. 2 Comparison of the finite element results with experimental data

图中(a)、(b)为轨道顶面纵向中心线上的应力分布比较;(c)、(d)分别为混凝土基础中距顶面 50 mm 处的纵向中心线和横向中心线上的应力分布比较;各图均按对称性取一半, 方向由轨道中心指向外侧. 由图 2 可见, 有限元计算结果与试验结果符合良好, 验证了有限元模型以及分析方法的合理有效性, 说明该方法

可用于轨-砟接触压应力的系统分析。

2 轨-砟接触压应力分布规律揭示

水工钢闸门的轮轨支承体系一般按弹性设计. 采用上述有限元分析建模方法, 取结构材料为线弹性, 钢材弹性模量 $E_s = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu_s = 0.3$; 混凝土弹性模量 $E_c = 3.00 \times 10^4 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu_c = 0.2$. 为便于分析有关因素的影响, 以三峡工程为背景, 取轨道截面如图3所示. 设计轮压 $P = 1000 \text{ kN}$.

轨-砟接触压应力的分布主要与轨道刚度和混凝土基础抵抗变形的能力有关, 据此确定轨-砟接触压应力的影响因素主要包括轨道高度、轨道底板宽度、混凝土基础厚度及混凝土强度。

2.1 轨道后砟基础厚度

实际工程中, 闸门轨道后混凝土的厚度远远大于轨道截面高度. 在用有限元法建模分析时, 可近似地取某一有限值, 使其在保证计算精度的同时, 又不增加过多的计算工作量. 轨道截面取为 $b_{yf} \times t_{yf} \times r_t \times r_l \times t_{yf} \times b_{yf} \times t_w \times h_k = 160 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, 混凝土基础厚度 h_c 取为轨道高度 h_k 的 α 倍, 即 $h_c = \alpha h_k$ 时, 计算得到的轨-砟接触压应力的分布形态相似 (见图4). 可见, 荷载呈不均匀向下传递, 轨-砟接触压应力在轨道长度、宽度方向上呈中间大、两边小的曲面形状. 应力分布的不均匀性与图2试验曲线一致. 图4(a)中给出了轨-砟最大接触压应力值 σ_{\max} 随 α 的变化, 可见, 随 α 值的增大, σ_{\max} 逐渐减小, 当 $h_c \geq 2h_k$ 时, σ_{\max} 趋于稳定, 取 $\alpha = 2$ 和 $\alpha = 8$ 时求出的 σ_{\max} 偏差为 1.2%. 说明取 $h_c = 2h_k$ 进行分析已有足够的精度, 后面的分析模型均取 $h_c = 2h_k$. 鉴于实际工程中轨道后混凝土基础厚度远远大于 $2h_k$, 上述成果为将混凝土厚度取为无限大对轨道进行分析提供了理论依据, 混凝土厚度取为无限大能简化计算。

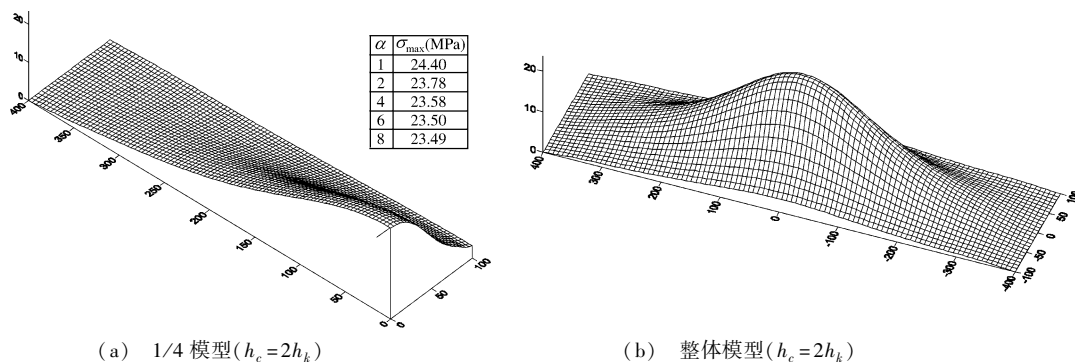


图4 砟基础取不同厚度时轨-砟接触压应力分布

Fig. 4 Distribution of contact compression stress of track-concrete with different thickness of concrete foundation

2.2 砟强度

根据现有规范^[10], 选取6种常用的混凝土强度等级 C15、C20、C25、C30、C35、C40 进行分析, 弹性模量 E_c 见表1, 这几种情况对应的轨-砟接触压应力的分布形态与图4类似, 最大接触压应力 σ_{\max} 随 E_c 的变化见图5. 可见, σ_{\max} 随 E_c 的增大逐渐增大, σ_{\max} 与 E_c 近似成线性关系. 若以 $E_c = 3.00 \times 10^4 \text{ MPa}$ 时的 σ_{\max} 为标准1, 其他 E_c 下的 σ_{\max} 与之相比, 得到相应的折算系数 η 见表1, η 也可按下式计算:

$$\eta = 0.55 + 0.15e \quad (1)$$

式中: e 为取相应 E_c 以 10^4 MPa 为单位时的数值。

表 1 折算系数 η 随 E_c 的变化

Tab. 1 Variations of the conversion coefficient η with E_c

混凝土强度等级	C15	C20	C25	C30	C35	C40
弹性模量 E_c (10^4 MPa)	2.20	2.55	2.80	3.00	3.15	3.25
折算系数 η	0.88	0.94	0.97	1	1.02	1.03

2.3 轨道高度

为使分析更具普遍性, 对不同 b_{fy} 下的情况进行了分析, 轨道高度分别取 150、200、250、300、350、400 mm 时, 最大接触压应力 σ_{max} 随 h_k 的变化见图 6. 可见, 随着 h_k 的增大, σ_{max} 快速减小, 表明轨道高度的增加有利于降低混凝土基础上的最大压应力。

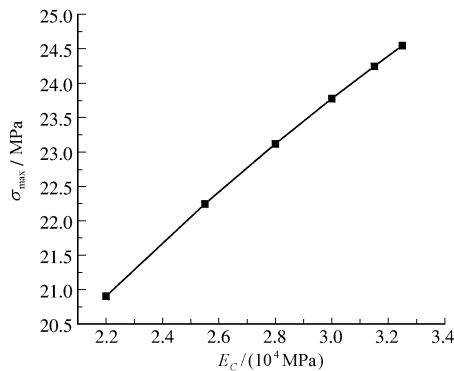


图 5 σ_{max} 随 E_c 的变化

Fig. 5 Variations of σ_{max} with E_c

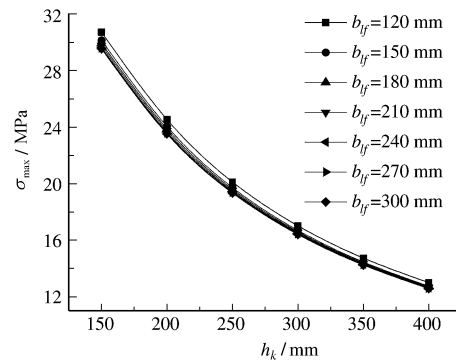


图 6 σ_{max} 随 h_k 的变化

Fig. 6 Variations of σ_{max} with h_k

2.4 轨道底板宽度

轨道的底板宽度取 $b_{fy} = t_w + \gamma h_l$ (γ 为比例系数), 当 b_{fy} 变化时轨-砟接触压应力的分布形态与图 4 类似, 但在 $\gamma = 1.5$ 和 $\gamma = 2.0$ 时, 轨道宽度方向上的应力呈中间大, 两边小, 边缘再增大的曲线形状. 最大接触压应力 σ_{max} 随 γ 的变化见图 7(a), 可见, σ_{max} 随 γ 的增大逐渐减小. 底板宽度超过某一限值后, 对减小最大接触压应力作用不大, 这是由于轮压传到腹板下部, 再扩散到底板上, 扩散范围有限. 因此单纯增大底板宽度对降低混凝土基础的最大压应力值效果有限, 存在合理的底板宽度取值. 为反映轮压作用截面上轨-砟接触压应力的均匀程度, 引入参数 $\lambda = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ (轨道宽度方向上最小、最大接触压应力的比值), 可得 $\lambda - \gamma$ 曲线 (见图 7(b)). 由图可见, 随着 γ 的增大, 轨-砟接触压应力在轨道宽度方向上分布愈加不均匀. 当 $\gamma \geq 4$ 时, 轨-砟最小接触压应力为 0, 轨道底板中超过 $t_w + 4h_l$ 的部分对分担压应力已不起作用. 因此, γ 不宜大于 4. 虽然当 $\gamma = 1.5 \sim 4.0$ 时, 轨道底板宽度越窄, 接触压应力在宽度方向上分布越均匀, 但从图 7(a) 可以看出, σ_{max} 与 b_{fy} 不存在线性关系, σ_{max} 值变化不大, 最大变幅为 4.2%. 结合图 7(b), $\gamma = 3.0$ 时, $\lambda = 0.094$ (平均值), 应力的扩散已较为充分. 取 $b_{fy} = t_w + 3h_l$ 比较合适, 轨道底板宽度在此值附近取值时, 压应力扩散较为充分而又不存在过多的小应力区, σ_{max} 值也处在稳定变化区内. 三峡水利枢纽深孔事故闸门所用轨道底板宽度与 $t_w + 3h_l$ 很接近.

从图 6、图 7(a) 可以看出, h_k, b_{fy} 对 σ_{max} 的不同, 而现行规范^[1] 在计算轨道底板混凝土承压应力时将二者的作用等同则欠妥. 不同的 b_{fy} , σ_{max} 随轨道高度变化的曲线几乎重合, σ_{max} 对 b_{fy} 的变化不敏感; 而 h_k 不同时, σ_{max} 则差异较大. 进一步分析表明, σ_{max} 与 h_k 近似成反比例关系. 需要说明的是, 上述结论是在 $\gamma = 1.5 \sim 4.5$ 时得出的. 当 $\gamma < 1.5$ 时, 轨-砟接触压应力图形在轨道宽度上呈现出边缘比中间大的形态, σ_{max} 与 $\gamma \geq 1.5$ 时的情况相比, 有较大幅度的增加, 此时不能认为 σ_{max} 对 b_{fy} 的变化不敏感. 但 $\gamma < 1.5$ 的情况在工程上很少出

现. 因此, 上述结论对工程设计具有指导意义.

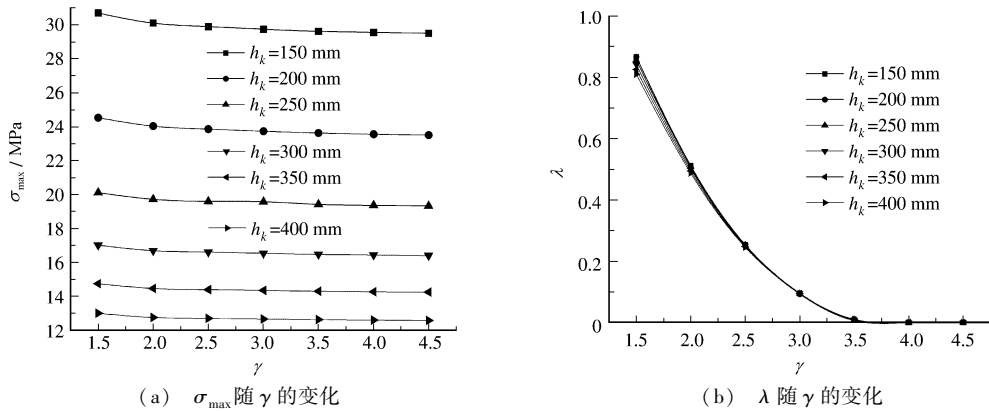


图 7 轨道底板取不同宽度时轨-砟接触压应力分布

Fig. 7 Distribution of contact compression stress of track-concrete with different width of track lower flange

3 新型简易模型

3.1 轨道底板混凝土承压应力简易模型

轨-砟接触压应力在轨道长度和宽度两个方向上都呈非均匀分布, 主要影响因素是荷载大小、轨道高度、轨道底板宽度和混凝土的弹性模量. 考虑现有设计习惯, 仍采用压力扩散角法的公式形式, 以有限元分析结果为依据, 采用最小二乘法线性回归模式对轨道底板混凝土承压应力进行回归, 得出的最大承压应力 σ_{\max} 的计算式为:

$$\sigma_{\max} = \frac{\eta P}{h_k B'_k} = \frac{\eta P}{h_k(t_w + 3h_l)} \quad (2)$$

式中: η 为考虑混凝土弹性模量不同时的折算系数, 可按(1)式计算或由表 1 查得; P 为滚轮的设计荷载值; $B'_k = t_w + 3h_l$, 为轨道底板等效宽度.

(2)式在 $\gamma \geq 1.5$ 时成立, 其涵盖了工程中的绝大多数情况. 按(2)式求出的最大轨-砟接触压应力与有限元结果对比的偏差曲面见图 8. 可见, 两者大部分情况的偏差小于 5%, 只在 b_{ly} 取大值, 且 h_k 取小值或 b_{ly} 取小值, 且 h_k 取大值时偏差才超过 5%, 最大为 8.5%, 而这两种组合情况下的轨道截面在工程上是很少见到的. 可见(2)式有较高的精度. 与现行规范^[1]中计算轨道底板混凝土承压应力的公式 $\sigma_h = \frac{P}{3h_k B_k}$ 相比, (2)式考虑了应力集中的影响, 反映了轨道高度与轨道底板宽度对减小混凝土基础最大压应力的不同贡献, 且能计及混凝土不同弹性模量时的影响, 因此更为合理.

3.2 σ_{\max} 阈值

对于混凝土这种脆性特性很强的材料, 应考虑应力集中的影响. 大型水工钢闸门轮轨支承体系的轨道底板与混凝土基础间的最大接触压应力 σ_{\max} 过大会导致混凝土基础产生裂纹或破坏, 使其传递、分担荷载的能力下降. 需要说明的是, σ_{\max} 的阈值应考虑混凝土受局部压力时的强度提高系数. 由图 4 轨-砟接触压应力分布图可见, 轨道传给混凝土基础的作用力集中在轮压中心处下不大的范围内, 相当于混凝土基础上受一局部

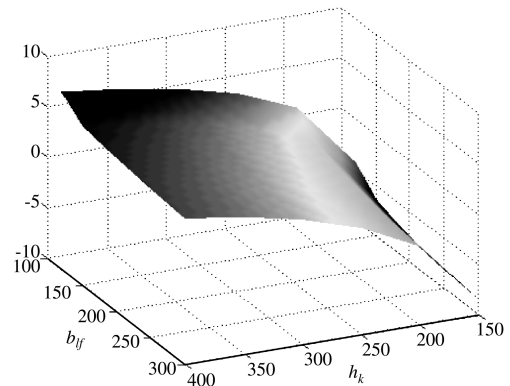


图 8 (2) 式计算值与有限元法计算结果偏差曲面
Fig. 8 Deviation surface of finite element results from that yielded by equation (2)

荷载作用,此时混凝土的强度提高系数可参照《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2002)7.8.2条计算。

4 结 语

(1)揭示了轨-砗接触压应力的分布形态类似二角帽,在轨道长度、宽度方向上呈中间大、两边小的曲面形状;

(2)观察到取轨道后混凝土基础厚度大于2倍轨道高度进行分析时,轨道应力状态以及轨-砗接触压应力分布已趋于稳定。鉴于实际工程中轨道后混凝土厚度远远大于2倍轨道高度,这一成果为将混凝土厚度取为无限大对轨道进行分析,提供了理论依据,达到简化计算的效果;

(3)计算结果表明,压应力从轨道腹板传到底板上,扩散范围有限。为使压应力充分扩散而又不存在过多的小应力区,认为取底板宽度在 $t_w + 3h_f$ 附近比较合适;

(4)考虑轨道高度和轨道底板宽度对减小混凝土基础最大压应力的贡献不同,且计及混凝土不同弹性模量的影响,提出了轨道底板混凝土最大承压应力的简易计算式,对工程设计具有指导意义。

参 考 文 献:

- [1] SL74-95, 水利水电工程钢闸门设计规范[S]. (SL74-95, Hydraulic and Hydroelectric Engineering Specification for Design of Steel Gate[S]. (in Chinese))
- [2] Daloglu Ayse T, Vallabhan Girija C V. Values of k for slab on winkler foundation[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2000, 126(5): 463-471.
- [3] Maina James W, Matsui Kunihito. Developing software for elastic analysis of pavement structure responses to vertical and horizontal surface loadings[J]. **Transportation Research Record**, 2004, 1896: 107-118.
- [4] Ma Zheng-Dong, Perkins N C. A track-wheel-terrain interaction model for dynamic simulation of tracked vehicles[J]. **Vehicle System Dynamics**, 2002, 37(6): 401-421.
- [5] Choi Yongkyu, Oh Seboong, Kwon Ohkyun. A numerical analysis for axial and lateral behavior of instrumented steel pipe piles[J]. **Geotechnical Special Publication**, 2002, 116(1): 289-304.
- [6] Chinnaboon Boonme, Katsikadelis John T, Chucheepsakul Somchai. A BEM-based meshless method for plates on biparametric elastic foundation with internal supports[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2007, 196(33): 3165-3177.
- [7] 朱秀雁, 周定荪. 小浪底工程大型定轮闸门轨道、滚轮及基础混凝土结构应力的研究[J]. 河海科技进展, 1993, 13(4): 77-82. (ZHU Xiu-yan, ZHOU Ding-sun. Stress analysis for large fixed gate track, wheel and concrete foundation in Xiao langdi[J]. **Advances in Science and Technology of Hohai**, 1993, 13(4): 77-82. (in Chinese))
- [8] 河海大学. 三峡水利枢纽高压闸门定轮支承结构试验研究[R]. 南京: 河海大学, 2001. (Hohai University. Experimental study on the supporting structure of the fixed wheel in heavy pressure gate of the Three Gorges hydro-junction[R]. Nanjing: Hohai University, 2001. (in Chinese))
- [9] ANSYS Inc. ANSYS Release 9.0 Documentation[M]. America: ANSYS Inc, 2004.
- [10] GB50010-2002, 混凝土结构设计规范[S]. (GB50010-2002, Code for Design of Concrete Structures[S]. (in Chinese))

Investigation on contact behavior between steel-gate track and concrete foundation

BAI Run-bo¹, CAO Ping-zhou¹, CAO Mao-sen^{1,2}

(1. *College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Hydraulic and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China*)

Abstract: The contact mechanic behavior of hydraulic steel gate track and concrete foundation is a crucial parameter, which can be used to determine the service ability of track and concrete foundation. But a study of this problem is not systematic and thorough enough, which affects the structural optimization and the functional reliability. For changing this situation, the wheel-track bearing system of a large-scale hydraulic steel gate is analyzed through contact analysis of 3D finite-element method and the present experimental data. The paper also discusses the effect of the track sectional dimensions, concrete foundation thickness and concrete strength on the contact pressure of track-concrete foundation. The conclusions can be drawn as follows: (1) The contact pressure of track-concrete foundation distributes as a two corner cap shape along the length and width of the track; (2) The stress condition of track is stable when the depth of concrete foundation greater than 2 times of the height of the track, which provides a basis for analyzing the track with infinite concrete foundation; (3) The spread range is limited when the compression stress spreads from web to lower flange. Optimal value $t_w + 3h_l$ of lower flange width is put forward based on this phenomena, and this value results in the sufficient diffusion of compression stress and small range of low stress. Furthermore, design formulas of concrete compression stress are advised considering the different contribution of track height and lower flange width to the largest concrete compression stress and the effect of different Young's modulus of concrete.

Key words: compression stress; contact problem; track; concrete foundation; steel gate