

预埋件受剪性能数值分析

朱耀国, 王清湘*

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 预埋件的抗剪机理复杂, 很难通过试验和理论计算确定预埋件的内力分布和应力大小, 通常是在一定的简化与假定基础上, 对试验结果统计回归得出预埋件的抗剪计算公式来进行计算. 为更精确得到抗剪承载力, 建立有限元模型对预埋件的受剪性能进行数值计算, 锚板、锚筋与混凝土的相互作用通过三维面-面接触来模拟, 并考虑了混凝土对锚筋的粘结作用. 通过数值分析得到了剪力作用下预埋件的应力分布和锚筋的截面内力, 确定了锚筋反弯点的位置和混凝土的承压范围. 有限元计算得出的预埋件抗剪承载力与试验实测值很接近, 说明所建立的有限元模型是比较合理的, 数值分析的结果可以运用到理论分析和实际工程中.

关键词: 预埋件; 剪力; 数值分析; 应力分布; 截面内力

中图分类号: TU375

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201402009

0 引言

大型深水混合式码头上部为钢管桩, 下部为混凝土沉箱, 是一种新型码头结构, 由交通部设计大师牛恩宗提出. 其通过设置大直径锚筋的预埋件, 将码头上部结构的竖向荷载和水平荷载可靠地传至下部混凝土沉箱.

预埋件由锚筋和锚板焊接组成, 在浇注混凝土之前设置在混凝土结构中, 锚板外表面用来焊接钢结构或钢构件, 钢结构承受的荷载通过预埋件传递给混凝土结构. 预埋件用以传递拉(压)力、剪力、弯矩等荷载及其组合, 其中传递剪力是预埋件最基本的受力形式, 也是分析预埋件承受各种荷载组合的基础. 相对于拉(压)力、弯矩, 剪力作用下的预埋件更难于分析与计算. 剪力通过锚板传递给锚筋和混凝土. 锚板、锚筋与混凝土之间的相互作用导致预埋件应力分布复杂, 很难建立合理的力学模型进行计算.

预埋件受剪力作用下破坏形态大致分为3种: 混凝土基体的尺寸过小或配筋不够而导致混

凝土基体的撕裂破坏; 锚筋锚固长度不够引起的预埋件滑移破坏; 锚筋根部在复合受力下达到极限强度产生的锚筋破坏. 当上述破坏形态中的前两种破坏发生时, 锚筋均未达到极限强度, 预埋件的抗剪能力未得到充分发挥, 而通过合理的构造和设计是可以避免破坏发生的, 因此预埋件受剪性能的研究均基于第三种破坏形态.

国内外通过试验研究提出两种受剪性能计算理论: 剪力摩擦理论和局部承压理论. 剪力摩擦理论认为形式上承受剪力的锚筋实质上是在拉力作用下工作的, 剪力主要由锚板与混凝土之间的摩擦力承担^[1]. 四川建筑科学研究院根据剪力摩擦理论通过试验得出预埋件极限抗剪承载力 $Q = \mu A_g \sigma_s$, 其中 μ 为类似摩擦因数, A_g 为锚筋截面面积. 认为当受剪锚筋达到一定锚固长度时, 锚筋强度都能充分发挥达到屈服强度 σ_s . 局部承压理论认为剪力由锚筋下混凝土局部承压来承担, 由三部分组成: 混凝土基体对锚筋的承压力 F_1 ; 锚板与混凝土之间的摩擦力 F_2 ; 混凝土基体对锚板底边的承压力 F_3 ^[2-4]. 陈家坤、李光等先后提出计算

简图,认为锚筋在混凝土反力作用下最终形成两个塑性铰而导致预埋件破坏,并做了适当的简化与假定推导出计算公式,通过试验数据回归了公式中的参数.但局部承压理论未考虑混凝土与锚筋之间的粘结力以及粘结力对锚筋弯曲变形的限制,认为锚筋的抗弯刚度较小,锚筋下混凝土承压范围有限.预埋件专题研究组还通过试验发现:采用大直径锚筋的预埋件,锚筋下的混凝土先压碎而锚筋强度不能充分发挥,锚筋直径只有小于一定值,预埋件破坏时锚筋才能达到极限强度.因此混凝土结构设计规范(GB 50010—2010)规定预埋件不宜采用直径大于 25 mm 的锚筋,这限制了预埋件作为刚性节点在大型结构中的应用^[5].由于预埋件锚筋多采用螺纹钢筋,螺纹钢筋与混凝土之间有很好的粘结力,这种粘结力可以约束锚筋的变形,增加锚筋的刚度,使锚筋下混凝土受压范围增大.而专题组做的预埋件试验比较早,当时试件采用的混凝土强度比较低是大直径预埋件发生混凝土压碎的主要原因.作者做了锚筋直径为 28 mm 和 32 mm 的预埋件抗剪试验,预埋件的破坏形态都是锚筋破坏,破坏时锚筋都达到了极限强度.因此大直径锚筋预埋件是可以在工程中应用的^[6].

剪力作用下的预埋件受力比较复杂,特别是锚筋根部承受拉力、弯矩、剪力的复合内力,锚筋各点的应力差别很大.局部承压理论把锚筋简化成塑性梁有一定局限性,而在试验中又很难准确测得预埋件在剪力作用下内力的分布与变化.本文通过有限元法对剪力作用下的预埋件进行数值分析,考虑混凝土与锚筋之间的粘结力,得到预埋件的应力分布以及锚筋的截面内力,为进一步理论分析和工程应用提供依据.

1 有限元模型

本文采用以往试验中的单排锚筋、双排锚筋受剪试件为数值分析的对象,以便把计算值与试验实测值进行对比.为了扩大样本,借鉴了预埋件专题研究组、航四院和四川建筑科学研究院的试验数据.为节省计算时间,计算模型仅取了试验模型中预埋件部分加以相应边界条件,并根据几何对称取预埋件的一半加对称约束进行分析.试验

中预埋件临近破坏时,锚板底边下的混凝土已经剥裂,混凝土反力 F_3 失效.从破坏强度分析, F_3 略去不计,因此有限元模型中未考虑锚板底边下混凝土反力 F_3 的作用.

采用商业软件 ANSYS 进行建模、计算和后处理分析,混凝土采用 solid65 单元,锚板、锚筋均采用 solid45 单元.锚板与混凝土之间采用接触单元,剪力摩擦因数 μ 取 0.7^[7].锚筋与混凝土之间法向采用接触单元,不考虑锚筋与混凝土之间的切向滑移,认为锚筋与混凝土切向是粘结在一起的.这与试验中预埋件在剪力荷载作用下锚筋仅在根部位置与混凝土产生滑移是相符的.

混凝土强度采用试验实测值,见表 1.混凝土的应力-应变关系采用 Hongnestad 提出的表达式(1),泊松比 $\nu = 0.2$.

$$\sigma_c = f_c \left[2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right]; \epsilon_c \leq \epsilon_0 \quad (1)$$

$$\sigma_c = f_c \left[1 - 0.15 \left(\frac{\epsilon_c - \epsilon_0}{\epsilon_{cu} - \epsilon_0} \right) \right]; \epsilon_c \geq \epsilon_0$$

锚筋采用双折线随动强化模型,应力-应变关系按图 1 采用,锚筋屈服强度 f_y 、极限强度 f_u 取实测值,见表 1.

表 1 预埋件抗剪承载力有限元计算值 Q_c 与实测值 Q_e

Tab. 1 The shear capacity Q_c and Q_e of embedded part got from finite element analysis and test

锚筋	f_y / MPa	f_u / MPa	f_c / MPa	Q_c / kN	Q_e / kN	F_2 / kN	Q_e/Q_c
4 Φ 12	364	510	22.7	171	172	58	0.99
4 Φ 16	358	527	10.2	208	210	87	0.99
4 Φ 18	425	620	17.2	357	335	125	1.07
4 Φ 20	396	605	17.1	351	376	135	0.93
4 Φ 20	407	595	21.4	415	420	144	0.99
4 Φ 20	415	593	24.6	449	448	148	1.00
4 Φ 25	387	588	21.9	585	574	179	1.02
Φ 28	365	580	54.1 ¹⁾	319	288	92	1.11
Φ 32	400	590	54.1 ¹⁾	397	368	120	1.08

注: 1) f_c 为实测混凝土轴心抗压强度,其余 f_c 由实测混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 换算得到

单排锚筋预埋件的网格划分如图 2(a)所示,共划分 12 842 个节点和 12 016 个单元.双排锚筋

预埋件的网格划分如图 2(b)所示,共划分 17 609 个节点和 16 744 个单元. 锚筋根部位置应力复杂,网格划分比较细密.

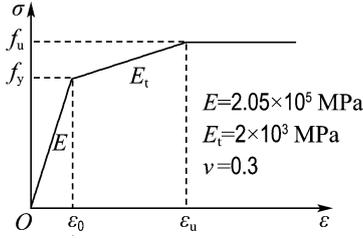


图 1 锚筋的本构关系曲线

Fig. 1 The constitutive relationship curve of anchor bar

根据试验中对混凝土基体的固定约束,在有限元模型中对混凝土实体相对应面的节点施加位移约束,如图 2 所示.

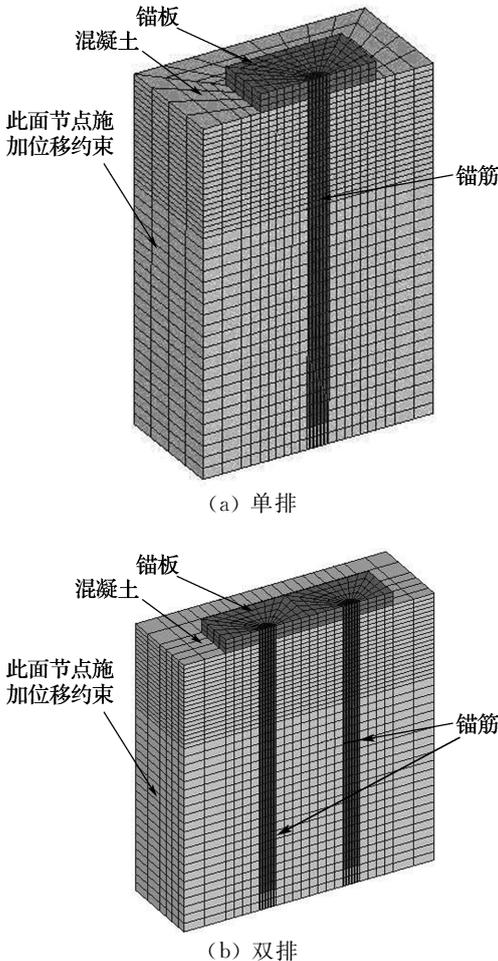


图 2 锚筋预埋件有限元网格划分

Fig. 2 Finite element meshes of embedded part with anchor bar

对锚板施加荷载,加载由位移控制,通过试算采用合理的荷载子步.

2 数值分析

2.1 有限元计算结果

通过有限元法计算得到的预埋件极限抗剪承载力 Q_c 与试验实测结果 Q_e 比较见表 1. 计算值与实测值很接近,说明有限元模型的建立和网格的划分是比较合理的,计算结果可以运用到理论分析和实际工程中. 从表 1 可以看出锚板与混凝土间的摩擦力 F_2 承担 31%~41% 的剪力,这与文献[8]通过试验给出的结论是一致的. 文献[8]通过试验得出不考虑锚板摩擦力(锚板内侧涂油),预埋件抗剪承载力降低 30%.

2.2 荷载位移曲线

图 3 为通过有限元计算得出的预埋件的荷载位移曲线. 由荷载位移曲线图可以得出:外荷载未达到 60% 的极限荷载时,预埋件有很高的抗剪刚度,此时锚筋单元的等效应力尚未达到锚筋的屈服强度,预埋件处于弹性阶段;外荷载超过 60% 的极限荷载时,预埋件的抗剪刚度明显降低,锚筋根部单元的等效应力达到屈服强度;外荷载超过 80% 的极限荷载后,曲线变得平缓,位移迅速增长,锚筋根部等效应力达到锚筋抗拉强度,最后锚筋根部节点位移增长过快,不能收敛,预埋件达到破坏.

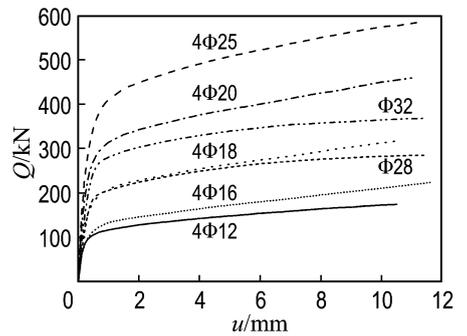


图 3 预埋件的荷载位移曲线

Fig. 3 The load-displacement curves of embedded parts

2.3 预埋件锚筋内力分布

有限元计算得出的直径 28 mm 的预埋件的锚筋在不同荷载等级下的截面位移 δ 以及截面内

力分布见图4。可以看出,随着荷载的增加,锚筋的截面位移 δ 逐步增大,截面拉力 N 、剪力 Q 、弯矩 M 都相应增加,锚筋反弯点的位置逐步向里移动。 q 为锚筋下混凝土的承压应力,随着荷载的增加承压混凝土的范围逐步扩大。达到极限承载力时,承压混凝土的范围扩至距锚筋根部约3倍直径的位置,锚筋根部的弯矩值约为反弯点的弯矩值的2倍。

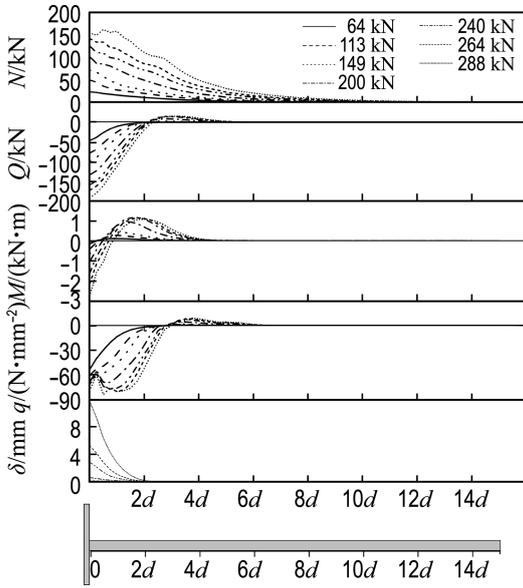


图4 锚筋位移以及内力分布

Fig. 4 The displacement and internal force distribution of anchor bar

2.4 预埋件锚筋的应力

图5为直径为25 mm预埋件达到极限状态时锚筋的变形和 von Mises 应力值。两根锚筋的

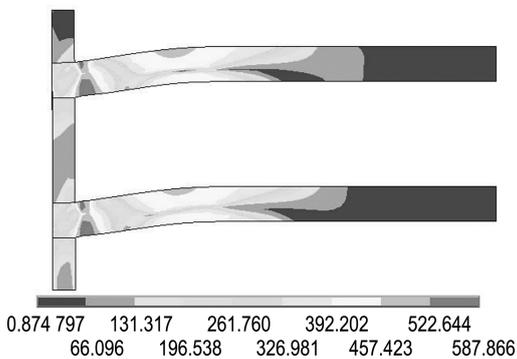


图5 达到极限荷载时预埋件的 von Mises 应力

Fig. 5 von Mises stress of embedded part under ultimate load

变形和应力分布基本一致,说明抗剪中两根锚筋能均匀受力。最大 von Mises 应力值出现在锚筋根部,根部锚筋达到极限状态,这与试验中预埋件的破坏都发生在锚筋根部是一致的。反弯点处的 von Mises 应力值也相对较大,超过了锚筋的屈服强度。锚板的最大应力出现在与锚筋焊接的部位,当锚板厚度较薄时应在焊接锚筋的位置设置加劲肋。

3 结论

(1)在剪力作用下预埋件有限元计算中考虑了混凝土与锚筋之间的粘结力,计算得到的抗剪承载力与实测值吻合较好,说明有限元模型的建立、网格的划分是比较合理的。

(2)确定了不同荷载等级下锚筋的内力分布、锚筋反弯点的具体位置,以及混凝土局部承压的范围。

(3)得出了锚筋的应力分布,锚筋在根部位置应力值最大,预埋件的破坏发生在锚筋根部;锚筋反弯点处的应力值也相对较大;锚板在与锚筋焊接的位置应力最大。

参考文献:

- [1] 王宝珍, 张宽权. 预埋件型式及其计算的研究[J]. 四川建筑科学研究, 1980(3):104-112.
WANG Bao-zhen, ZHANG Kuan-quan. Research of embedded parts type and calculation [J]. **Building Science Research of Sichuan**, 1980 (3):104-112. (in Chinese)
- [2] 预埋件专题研究组. 预埋件的受力性能及设计方法[J]. 建筑结构学报, 1987(3):36-50.
Research Group on Embedded Elements. Mechanical behavior of embedded parts and design methods [J]. **Journal of Building Structures**, 1987(3):36-50. (in Chinese)
- [3] 机械电子工业部设计研究院. 钢筋混凝土结构中预埋件设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1991.
Design and Research Institute of Ministry of Machine Building and Electronics Industry. **Design of Embedded Parts in Reinforced Concrete Structure**

- [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1991. (in Chinese)
- [4] 李光. 受剪预埋件破坏机理及锚筋直径影响的试验研究[D]. 北京:冶金工业部建筑研究总院, 1988.
- LI Guang. Shear failure mechanism of embedded parts and experimental study on influence of diameter of anchor bars [D]. Beijing: Central Research Institute of Building and Construction under MMI, 1988. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50010—2010 Code for Design of Concrete Structure [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [6] 王清湘,朱耀国. 大直径锚筋预埋件纯剪、拉剪作用下的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(增刊):281-286.
- WANG Qing-xiang, ZHU Yao-guo. Experimental study on mechanical behavior of big-diameter anchor bar embedded part under shear and tension-shear [J]. *Journal of Building Structures*, 2008, 29(S1): 281-286. (in Chinese)
- [7] Precast and Prestressed Concrete Institute. **PCI Design Handbook: Precast and Prestressed Concrete** [M]. Chicago: Prestressed Concrete Institute, 2004.
- [8] 徐积善. 预埋件纯剪的研究[R]//预埋件专题组分报告. 北京:北京建筑工程学院, 1985.
- XU Ji-shan. Research of embedded parts under pure shear[R]// Report of Research Group on Embedded Elements. Beijing: Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 1985. (in Chinese)

Numerical analyses of shear performances of embedded parts

ZHU Yao-guo, WANG Qing-xiang*

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

Abstract: The mechanism of embedded parts under shear is complex, and it is difficult to get the internal force and stress of embedded parts from test and theoretical calculation. Existing equations on the shear capacity of embedded parts were developed by fitting a theoretical model to the existing test results under a series of appropriate simplifications and assumptions. To improve the existing methods, numerical analyses of embedded part under shear are performed by establishing a finite element model. The interaction between anchor plate and concrete and the interaction between anchor bars and concrete are simulated with the three-dimensional surface-to-surface contact model, considering the bond strength between the anchor bars and the concrete. The stress distribution of embedded parts and the internal force of the anchor bars under shear are obtained by numerical analyses. The position of the inflection point of anchor bars and the pressure range of concrete are confirmed. The shear capacity of the embedded parts predicted by the numerical analyses agrees well with the results of tests, which indicates that the finite element model established is reasonable. The results of numerical analyses can be applied to the theoretical analyses and practical projects.

Key words: embedded part; shear force; numerical analysis; stress distribution; section internal force