



码头改造中新老混凝土界面抗剪性能分析

梁超, 陈文明

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 码头改造工程中, 新老混凝土界面抗剪强度是影响被改造构件受力性能的关键因素, 但国内相关混凝土设计规范中并未提供明确的计算方法和要求。结合大荷载作用下码头构件改造实例, 总结新老混凝土强度等级、界面配筋率、界面粗糙程度、界面剂、掺加纤维等因素对新老混凝土黏结性能的影响, 对比美国标准和欧洲标准中新老混凝土界面抗剪强度的计算方法, 并对改造工程中新老混凝土界面设计提出构造建议。结果表明, BS EN 1992-1-1 的计算公式经济合理, 推荐使用。

关键词: 新老混凝土; 界面抗剪强度; 抗剪钢筋; 粗糙度

中图分类号: U 656.1; U 654

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0209-07

Analysis of shear performance of interface between existing concrete and new concrete in wharf reconstruction

LIANG Chao, CHEN Wen-ming

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: In the wharf reconstruction project, the interface shear strength between existing concrete and new concrete is the key factor affecting the mechanical performance of the reconstructed element. However, there is no definite calculation method or requirement in the Chinese concrete design code. We combine with the example of wharf element reconstruction under the heavy load, summarize the influence factors of interfacial bonding strength, such as the concrete strength grade of existing and new concrete, reinforcement ratio of interface, interface roughness, interface agent and mixing fiber in concrete, compare the calculation methods of shear strength for the interface between existing concrete and new concrete in American code and European code, and propose the suggestions for construction details of interface treatment between existing concrete and new concrete in reconstruction project. The results show that the calculation formula in BS EN 1992-1-1 is economical and reasonable, and it is recommended to use.

Keywords: existing concrete and new concrete; interface shear strength; shear reinforcement; roughness

近年来, 随着区域港口整合和港区规划变更, 码头改造项目越来越多, 给在已建水工结构上改造基础或锚固设施等带来了新要求。对于承受振动荷载、结构形式复杂(含锚板或弯钩等)或受现场条件制约的锚固件, 不能采用简单的后锚固手段, 只能局部凿除混凝土→整体放置锚固件→现浇新混凝土结构。此时, 如何处理新老混凝土界

面, 使新老混凝土协同作业, 就显得至关重要。本文结合工程实例, 从结构计算和构造措施两方面对新老混凝土界面处理问题进行分析, 并提出相应的处理建议。

1 工程概况

江苏省某码头桅杆吊平台, 高桩墩式结构,

收稿日期: 2021-06-08

作者简介: 梁超(1987—), 女, 硕士, 工程师, 从事港口工程水工结构及道路堆场设计。

平台尺寸为 32 m×18 m×2 m (长×宽×高), 混凝土强度等级 C40, 桩基为直径 1 200 mm 大管桩。该平台浇筑时已预埋桅杆吊后拉杆铰座锚栓, 但在安装桅杆吊设备前, 设备生产厂家对铰座规格和形式提出了变更要求, 需要新埋设 30 根带锚板的 M68 螺栓作为桅杆吊后拉杆铰座锚固件。此时距该平台混凝土浇筑完成时间尚不足 1 年。拟改造的后拉杆铰座平面位置见图 1, 单个后铰支座承受的上拔力标准值为 1 360 kN。

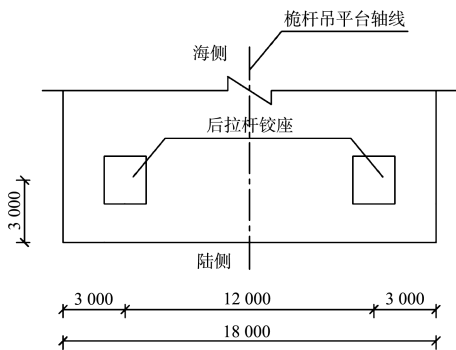


图 1 后拉杆铰座平面位置 (单位: mm)

本改造工程有 4 个特点: 1) 现有埋件与拟埋设锚固件位置重合, 须局部凿除混凝土再进行拆除; 2) 拟埋设锚固件为带锚板锚栓, 不宜采用植筋等后锚固形式; 3) 改造位置位于大管桩桩顶以上, 桩芯混凝土外伸钢筋和桩顶加强钢筋错综复杂, 改造作业容易与现有钢筋相碰; 4) 桅杆吊作业时, 后铰支座为主受力构件, 单个后铰支座承受的上拔力大。因此, 本工程最具可实施性的改造方案为凿除现有埋件区域混凝土, 整体拆除现有埋件→在对应位置放入拟埋设的锚固件→浇筑新混凝土。该方案关键技术难点在于新老混凝土界面处理。在大上拔力作用下, 新老混凝土之间会产生沿交界面的剪切力, 使新老混凝土界面成为整个结构最薄弱部分; 只有新老混凝土界面黏结效果足够好、可以产生足够的抗剪承载力时, 才能保证界面的安全。

2 影响新老混凝土界面黏结性能的因素

2.1 新老混凝土强度等级

国内外针对混凝土强度等级与界面承载力之

间的关系进行了大量研究, 研究结论不尽相同, 但普遍认为一定范围内增大混凝土强度可以增强界面抗剪能力。谢钰^[1]通过分析叠合面受力性能, 得出混凝土强度等级对结合面抗剪强度影响较大的结论。叶果^[2]的研究表明, 界面承载力与混凝土强度等级呈指数相关性。

2.2 界面配筋率

界面配筋可以使无筋新老混凝土界面的脆性破坏变为延性破坏, 且黏结强度得到显著提高, 对新老混凝土界面的抗剪承载力影响较为明显。张申^[3]通过剪切试验研究配筋率对界面抗剪性能的影响, 结果表明界面抗剪强度随着配筋率的增大而升高, 且配筋率可以限制界面位移的增速。张雷顺等^[4-5]的剪切试验证明, 采用优质技术的界面植筋可以达到与预埋钢筋同趋势的黏结剪切效果, 且植筋胶性能越好, 黏结剪切强度越靠近预埋钢筋的试验值; 随着植筋率的增大, 新老混凝土结合面剪切性能相应得到提高, 但植筋率达到一定数值后再增加, 对剪切性能的提高效率将不再显著。

2.3 界面粗糙程度

增大新老混凝土界面粗糙度, 可以提高界面间的机械咬合力和结合面的黏结抗剪强度。韩菊红等^[6]通过新老混凝土黏结断裂韧度试验证明, 提高界面粗糙度可以显著改善新老混凝土的粘接性能, 但粗糙度达到一定程度后, 其影响程度减弱。中国规范^[7-8]要求混凝土改造工程中须对老混凝土表面进行粗糙度处理, 方法主要包括: 1) 花锤打毛, 形成深度约 3 mm、600~800 点/m²的均匀分布麻点或深度 4~5 mm、间距约 30 mm 的梅花形分布麻点; 2) 砂轮机或高压水射流打毛, 形成垂直于构件轴线、深度 3~4 mm、间距 50 mm 的横向纹路; 3) 人工凿沟槽, 形成垂直于构件轴线、槽深约 6 mm、间距为 100~150 mm 的横向沟槽。

2.4 界面剂种类和性能

新老混凝土结合面涂刷界面剂, 可改善结合面的结构, 使其黏结性能得到不同程度的提高。

工程上常用的界面剂包括水泥净浆、水泥砂浆、聚合物类和环氧类界面剂等。水泥浆型界面剂一般是在水泥浆中添加膨胀剂、粉煤灰等,待界面剂水化后,水化产物渗入到旧混凝土缝隙中,从而改善界面性能提高界面强度。聚合物类和环氧类界面剂则靠自身固化时产生的强度改善界面黏结力。赵志方等^[9]的试验显示,新老混凝土界面采用水泥净浆作为界面剂时,结合面抗折强度比不使用界面剂的结合面提高 13%;水泥净浆中添加一定的外加剂后,结合面抗折强度可提高 23%。曹宏亮等^[10]通过试验对比不同水灰比和粉煤灰掺量对水泥净浆界面剂效果的影响,当水泥净浆水灰比增大时结合面劈裂强度随之减小;掺加一定数量的粉煤灰可提高其劈裂强度。目前国内关于界面剂研究较多,研发了多种不同外加剂和配合比的水泥浆类界面剂以及新型环氧类界面剂,其中环氧类界面剂由于其优越的黏结效果而得到较多的应用。

2.5 混凝土掺加纤维

新浇筑混凝土中掺加纤维,可以减少新老混凝土界面处的干缩裂缝,提高新老混凝土协同作业的能力。混凝土中常用的纤维为钢纤维;聚丙烯腈纤维更为经济,可用于提高混凝土和砂浆的早期抗裂性能;玄武岩纤维和碳纳米管为新兴材料,可较好地改善混凝土抗拉和抗裂性能。朱亚阁等^[11]通过混凝土立方体试件劈拉试验,验证了混凝土掺加纤维对新老混凝土结合面黏结性能的改善作用,得出不同纤维改善效果不同且存在最优掺量的结论。

3 新老混凝土界面抗剪承载力计算

3.1 新老混凝土界面抗剪作用机理

本工程为大荷载作用下码头构件改造,新老混凝土界面配置抗剪钢筋可以显著提高界面承载力,此处重点讨论配筋的新老混凝土界面抗剪作用机理和计算方法。目前配筋新老混凝土界面抗剪作用机理的研究主要包括摩擦抗剪理论、钢筋

销栓作用和混凝土的黏结力等,其中摩擦抗剪理论是最被广泛接受并应用于多个混凝土规范中。摩擦抗剪理论是 Birkeland 等^[12]于 1966 年提出。根据该理论,界面产生相对位移时,受界面粗糙度影响,界面会张开一定的宽度 Δ ,这个宽度 Δ 使界面抗剪钢筋产生拉应力,而钢筋拉应力的反力会对界面有夹紧作用,进而产生摩擦力以抵抗剪力。假定界面是倾斜角度为 φ 的锯齿状,发生剪切滑移后界面钢筋达到屈服状态,此时摩擦抗剪作用见图 2。

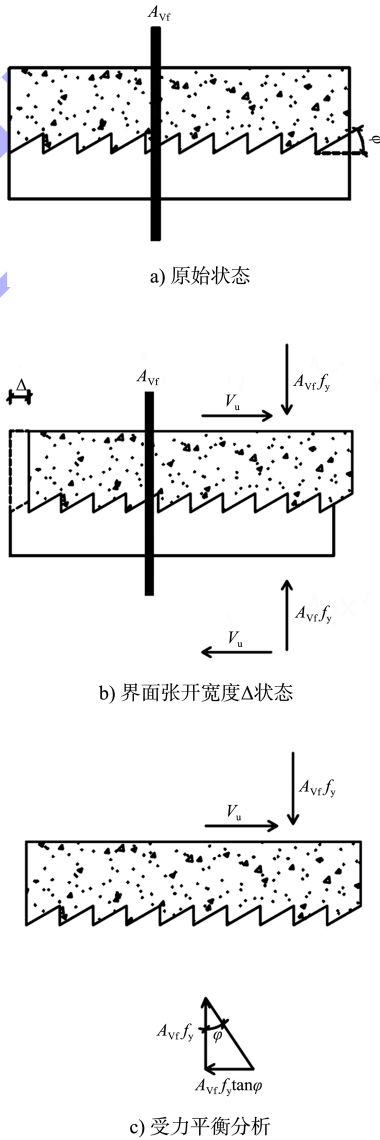


图 2 摩擦抗剪作用

根据图 2 可得:

$$V_u = A_{vf} f_y \tan \varphi \tag{1}$$

式中： V_u 为界面抗剪承载力(N)； A_{vf} 为界面抗剪钢筋截面面积(mm^2)； f_y 为抗剪钢筋屈服强度(N/mm^2)。

3.2 新老混凝土界面抗剪承载力计算公式

国内的《混凝土结构加固设计规范》《混凝土结构设计规范》^[13]和《水运工程混凝土结构设计规范》^[14]均未对新老混凝土界面的抗剪承载力计算方法做出明确规定。欧洲混凝土标准 BS EN 1992-1-1^[15]、美国混凝土标准 ACI 318M-14^[16]和美国桥规 *ASSHTO LRFD Bridge Design Specifications*^[17]中给出了新老混凝土界面承载力计算公式。

3.2.1 欧洲混凝土标准 BS EN 1992-1-1

欧洲混凝土标准 BS EN 1992-1-1 给出了新老混凝土界面抗剪应力应满足：

$$\nu_{\text{Edi}} \leq \nu_{\text{Rdi}} \tag{2}$$

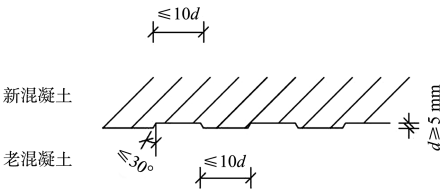
其中：
$$\nu_{\text{Edi}} = \beta V_{\text{Ed}} / (z b_i) \tag{3}$$

$$\nu_{\text{Rdi}} = c f_{\text{ctd}} + \mu \sigma_n + \rho f_{\text{yd}} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0.5 \nu f_{\text{cd}} \tag{4}$$

$$\nu = 0.6 (1 - f_{\text{ck}} / 250) \tag{5}$$

式中： ν_{Edi} 为新老混凝土界面剪应力设计值(N/mm^2)； ν_{Rdi} 为新老混凝土界面抗剪应力设计值(N/mm^2)； β 为新浇筑混凝土区域的纵向力与总纵向力的比值； V_{Ed} 为横向剪力(kN)； z 为组合界面的力臂(m)； b_i 为界面宽度(m)； f_{ctd} 为混凝土抗拉强度设计值(N/mm^2)； f_{cd} 为混凝土抗压强度设计值(N/mm^2)； σ_n 为跨越界面的最小法向外力和剪力共同作用下产生的单位面积上的应力(N/mm^2)， $\sigma_n < 0.6 f_{\text{cd}}$ ； ρ 为界面配筋率； α 为钢筋与界面的夹角， $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ ； f_{yd} 为钢筋抗拉强度设计值(N/mm^2)； f_{ck} 为混凝土抗压强度标准值(N/mm^2)； ν 为混凝土强度折减系数； c 、 μ 为与界面粗糙度有关的系数，非常光滑时 $c = 0.25$ 、 $\mu = 0.5$ ，光滑时 $c = 0.35$ 、 $\mu = 0.6$ ，粗糙时 $c = 0.45$ 、 $\mu = 0.7$ ，锯齿状时 $c = 0.5$ 、 $\mu = 0.9$ ，其中非常光滑指使用钢模具、塑料模具或特质木质模具浇筑而成的表面，光滑指滑模、模压表面或振捣后未做进一步加工的自由表面，粗糙表面指粗糙度至少为 3 mm、间距约为 40 mm 的表面，一般通过梳刮、暴露集料或其他类似方法获得，锯齿状为符合图 3 的表

面锯齿槽。



注： d 为锯齿槽深度。

图 3 新老混凝土界面锯齿槽

3.2.2 美国混凝土标准 ACI 318M-14

美国混凝土标准 ACI 318M-14 规定新老混凝土界面抗剪强度应满足：

$$V_u \leq \Phi V_n \tag{6}$$

其中：
$$V_n = A_{vf} f_y (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \tag{7}$$

式中： V_u 为新老混凝土界面剪力设计值(N)； V_n 为新老混凝土界面抗剪强度设计值(N)； Φ 为强度折减系数，对于剪力计算取 0.75； μ 为摩擦系数，新老混凝土界面粗糙 ($\geq 6\text{mm}$) 时 $\mu = 1.0$ ，光滑时 $\mu = 0.6$ ； A_{vf} 为穿过新老混凝土界面的抗剪钢筋截面面积 (mm^2)； f_y 为钢筋抗拉强度设计值 (MPa)； α 为抗剪钢筋与界面的夹角。

3.2.3 美国桥规 *ASSHTO LRFD Bridge Design Specifications*

美国桥规规定新老混凝土界面抗剪强度应满足：

$$V_{ui} \leq \Phi V_{ni} \tag{8}$$

其中：
$$V_{ni} = c A_{cv} + \mu (A_{vf} f_y + P_c) \tag{9}$$

($V_{ni} \leq K_1 f'_c A_{cv}$ 且 $V_{ni} \leq K_2 A_{cv}$)

式中： V_{ui} 为新老混凝土界面剪力设计值(kip)； V_{ni} 为新老混凝土界面抗剪强度设计值(kip)； Φ 为折减系数，取 0.90； A_{cv} 为新老混凝土界面面积(in^2)； A_{vf} 为穿过混凝土界面的抗剪钢筋截面面积(in^2)； P_c 为垂直于新老混凝土界面的永久压力(kip)； f'_c 为新老混凝土中强度等级较小一方的 28 d 混凝土抗压强度(ksi)； c 为黏结系数(ksi)； μ 为摩擦系数； K_1 为混凝土强度折减系数； K_2 为界面面积折减系数。对于新老混凝土界面粗糙 ($\geq 0.25\text{ in}$) 时 $c = 0.24\text{ ksi}$ 、 $\mu = 1.0$ 、 $K_1 = 0.25$ 、 $K_2 = 1.5\text{ ksi}$ ；光滑时 $c = 0.075\text{ ksi}$ 、 $\mu = 0.6$ 、 $K_1 = 0.2$ 、 $K_2 = 0.8\text{ ksi}$ 。

3.2.4 BS EN 1992-1-1、ACI 318M-14 和 ASSHTO LRFD 计算公式对比

1) 3 个计算公式的理论基础均为摩擦抗剪理论, 均假设新老混凝土界面抗剪强度达到峰值时钢筋已经屈服。

2) ACI 318M-14 抗剪强度设计值计算公式中仅考虑了剪切摩擦; 美国桥规考虑了剪切摩擦、混凝土黏聚力和外界压力; BS EN 1992-1-1 考虑了剪切摩擦、混凝土强度等级、混凝土黏聚力和外界压力。故 BS EN 1992-1-1 抗剪强度设计值计算公式对影响因素考虑的更为全面。张玖传^[18]利用 Z 字形试件对新老混凝土界面剪切作用下的破坏特征进行研究, 并与多个规范抗剪承载力计算结果进行对比, 结果显示 BS EN 1992-1-1 抗剪强度计算值与试验值吻合较好, 而 ACI 318M-14 偏于保守。

4 提高配筋新老混凝土界面黏结性能的构造措施

《混凝土结构加固设计规范》给出提高新老混凝土界面黏结性能的构造措施包括: 1) 利用人工凿毛、砂轮机或高压水射流法打毛以及切槽法等方式增大新老混凝土界面的粗糙度, 并给出详细的打毛深度和间距要求; 2) 新老混凝土界面涂刷改性环氧类界面胶, 或经独立检验机构确认为具有同等功效的其他品种界面胶; 3) 新混凝土提高一个强度等级。

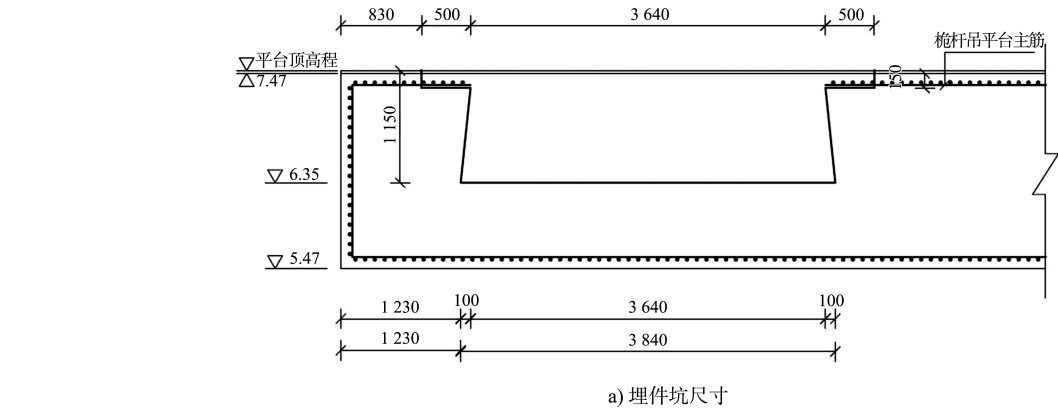
根据文献[19-20]的研究结果, 新老混凝土界

面设置倾角 ($>30^{\circ}$ 更优) 或锯齿形、新混凝土中掺加适量纤维 (钢纤维、聚丙烯腈纤维、玄武岩纤维和碳纳米管等), 均可提高新老混凝土界面抗剪承载能力。

5 工程改造方案

综合考虑工程现状条件及新老混凝土界面影响因素, 改造方案如下:

1) 通过凿除混凝土拆除现有埋件, 形成埋件坑。2) 整理坑内部形状, 坑四壁与直立面间设置倾斜角, 受平台现状及施工条件限制, 新老混凝土界面与直立面的夹角约 6° , 如图 4 所示。3) 埋件坑四壁及底部打毛完成后, 用钢丝刷等工具清除原构件混凝土表面松动的集料、砂砾、浮渣和粉尘, 并用清洁压力水冲洗干净。4) 埋件坑四壁和底部均植入钢筋, 考虑到拟埋设锚固件位置、植筋间距及施工作业空间要求, 坑四壁植筋植入两排间距 260~300 mm、直径 36 mm 钢筋共 44 根, 坑底植入间距 300 mm、直径 32 mm 钢筋共 28 根, 如图 5 所示。植筋的流程为: 采用风镐钻头钻孔→空压机初步清理→采用毛刷、丙酮清孔→空压机清孔→采用胶枪注入植筋胶→旋转向下植入钢筋。植筋流程和植筋胶通过破坏性试验进行验证。5) 埋件坑四壁和底部涂刷改性环氧类界面胶。6) 整理恢复墩台顶部钢筋。7) 放置新埋件并浇筑混凝土, 新浇筑混凝土强度等级为 C45, 自密实混凝土, 掺加微膨胀剂。方案见图 4。



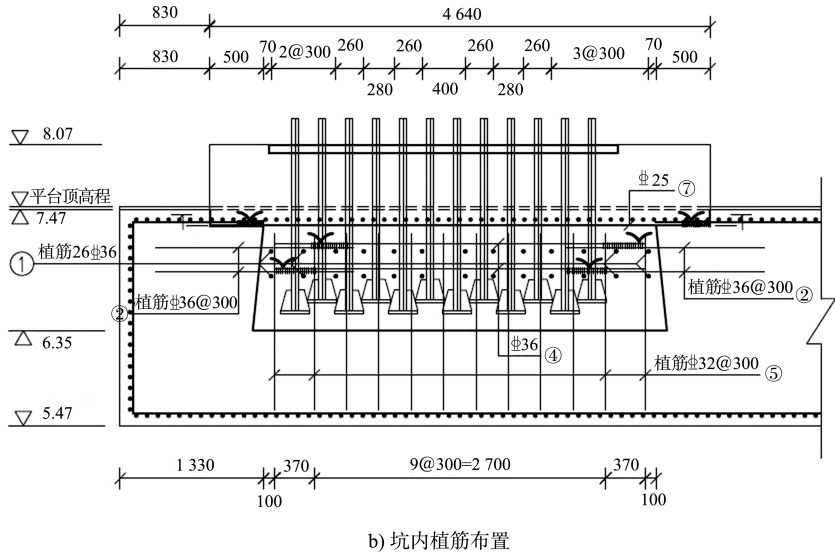


图 4 改造方案 (高程: m; 尺寸: mm)

采用 BS EN 1992-1-1、ACI 318M-14 和美国桥规的公式进行计算(仅考虑坑四壁钢筋)，结果对比见表 1。

表 1 界面剪切力及剪切承载力计算值		
规范	考虑分项系数后的 界面剪切力设计值	考虑分项系数后的 界面剪切承载力设计值
BS EN 1992-1-1	1 538 kPa	1 743 kPa
ACI 318M-14	17 720 kN	13 290 kN
美国桥规	4 586 kip	7 704 kip

上述计算结果显示，根据 BS EN 1992-1-1 和 AASHTO LRFD 计算出的工程改造方案剪切力设计值小于剪切承载力设计值，本工程改造方案满足 BS EN 1992-1-1 和美国桥规对新老混凝土界面抗剪承载力要求；而根据 ACI 318M-14 计算出的工程改造方案剪切力设计值大于剪切承载力设计值，若要满足其要求，需要配置更多的界面抗剪钢筋，因此与 BS EN 1992-1-1 和美国桥规相比，ACI 318M-14 计算偏于保守，张玖传的试验趋势也与此结论一致。3 个规范的计算公式均未考虑界面剂作用。

6 结论

1)BS EN 1992-1-1 配筋新老混凝土界面抗剪强度设计值计算考虑了剪切摩擦、混凝土强度等级、混凝土黏聚力和外界压力，考虑因素较为全面且计算值与试验值吻合较好，在工程设计中较

经济，推荐采用。

2)目前计算公式中均未考虑界面剂的作用，但界面剂在多项改造工程(包括大坝加高、桥梁加固等)中已成功应用并获得良好效果，因此建议改造工程中采用性能良好的界面剂，可用于潮湿混凝土表面的固化，具有较好的疏水和保水性能、适当的黏度，收缩性低，耐久性好。

3)目前规范对新混凝土中掺加纤维用于增强新老混凝土结合效果并无明确规定，仅见于相关试验研究，建议改造项目可通过试验确定纤维种类和掺量。

4)有条件时，可通过整体拉拔试验验证改造效果。本工程桅杆吊后铰承受的拉力较大，实施拉拔试验较困难，故施工完成后未进行该试验。

参考文献:

[1] 谢钰.低周期反复荷载作用下叠合框架节点梁端抗震性能研究[D].长沙: 湖南大学, 2007.

[2] 叶果.新老混凝土界面抗剪性能研究[D].重庆: 重庆大学, 2011.

[3] 张申.钢筋混凝土开裂面剪力传递性能研究[D].大连: 大连理工大学, 2009.

[4] 张雷顺, 王二花, 闫国新.植筋法新老混凝土粘结面剪切性能试验研究[J].郑州大学学报(工学版), 2006(3): 34-37.

[5] 张雷顺, 郭进军.新旧混凝土植筋结合面剪切性能试验

对比[J].工业建筑, 2007(11): 71-73.

[6] 韩菊红, 毕苏萍, 张启明, 等.粗糙度对新老混凝土粘结性能的影响[J].郑州工业大学学报, 2001(3): 22-24.

[7] 四川省建筑科学研究院, 山西八建集团有限公司.混凝土结构加固设计规范: GB 50367—2013[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

[8] 四川省建筑科学研究院.建筑结构加固工程施工质量验收规范: GB 50550—2010[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[9] 赵志方, 赵国藩, 黄承逵.新老混凝土粘结抗折性能研究[J].土木工程学报, 2000(2): 67-72.

[10] 曹宏亮, 史长城, 郭旭东, 等.第二龄期老混凝土与新混凝土粘结劈拉强度研究[J].水利与建筑工程学报, 2016, 14(6): 102-106, 238.

[11] 朱亚阁, 李碧雄, 蒲养林, 等.改善新老混凝土界面粘结性能的措施研究[J].四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(S1): 128-134.

[12] BIRKELAND P W, BIRKELAND H W. Connections in precast concrete construction[J]. ACI Journal proceedings, 1966, 63(3): 345-368.

[13] 中国建筑科学研究院.混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[14] 中交水运规划设计院有限公司.水运工程混凝土结构设计规范: JTS 151—2011[S].北京: 人民交通出版社, 2010.

[15] European Committee for Standardization.Eurocode 2: Design of concrete structures- part 1-1: general rules and rules for buildings: BS EN 1992-1-1: 2004 [S]. Brussels: CEN, 2004.

[16] American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-14) and commentary (ACI 318RM-14): ACI 318M-14[S]. Farmington Hills: ACI, 2015.

[17] American Association of State Highway and Transportation Officials.AASHTO LRFD bridge design specifications[S]. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.

[18] 张玖传.配筋新老混凝土界面抗剪性能及承载力设计方法研究[D].宜昌: 三峡大学, 2019.

[19] 潘传银, 石雪飞, 周可攀.新、老混凝土粘结抗剪强度试验[J].交通科学与工程, 2014, 30(2): 6-12.

[20] 高丹盈, 程红强.纤维混凝土与既有混凝土黏结性能的研究[M].北京: 科学出版社, 2008.

(本文编辑 王璁)

(上接第 202 页)

3 结论

1) JTS 167—2018《码头结构设计规范》和 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》中关于沉箱构件配筋的规定已沿用多年, 成功指导了我国沉箱码头设计。

2) 针对沉箱外壁支座配筋, 国内设计人员经常采用通长钢筋和加强短筋共同受力的计算模式。针对外壁支座加强短筋伸出长度, 规范规定其最小长度为板净跨的 1/4, 具体长度应通过计算确定。部分情况仅按板净跨的 1/4 确定截断钢筋位置有可能得到偏危险的结果。设计人员应充分全面理解规范, 不可仅采用规范规定的最小外伸长度, 建议进行进一步的受力分析, 通过计算得出合理的结论。

参考文献:

[1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.码头结构设计规范: JTS 167—2018[S].北京: 人民交通出版社, 2018.

[2] 中交水运规划设计院有限公司.水运工程混凝土结构设计规范: JTS 151—2011[S].北京: 人民交通出版社, 2011.

[3] 陈际丰, 刘国宝, 芦志强, 等.关于方沉箱构件内力计算的建议[J].水运工程, 2010(1): 47-49.

[4] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S].北京: 人民交通出版社, 2015.

(本文编辑 郭雪珍)