

预埋爬锥承载能力计算方法研究分析

余兵兵¹, 凌萌茁¹, 刘结兵¹, 陈晓龙², 邵铭浚³, 姚嘉³

(1. 中铁四局第三建设有限公司, 天津市 300163; 2. 北京市建设工程质量第三检测所有限责任公司, 北京市 100037;

3. 北京交通大学, 北京市 100044)

摘要: 预埋爬锥托架法因其高效性和经济性在桥梁施工中得到广泛应用。然而, 我国目前尚未制定预埋爬锥的设计标准, 这在实际工程中容易引发设计不合理。为解决这一问题, 依据预埋爬锥的破坏形式, 对国内外相关标准的规定进行分类, 探讨各标准的内在联系及适用范围。研究提出, 在锚栓承载能力要求之外, 还应补充混凝土基材的破坏验算。结合预埋爬锥施工的工程经验, 重点分析锚栓边距、间距及锚固深度对混凝土承载能力的影响, 最终形成一套适用于桥梁墩柱预埋爬锥体系承载能力的设计方法。该设计方法已在北京亮马河北路桥梁工程中得到应用, 并经实际工程验证其有效性, 可为同类工程项目提供参考依据。

关键词: 预埋爬锥施工; 混凝土锥体破坏; 锚固深度

中图分类号: U445

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)02-0300-06

Research and Analysis on Load-Bearing Capacity Calculation Method of Pre-embedded Climbing Cones

YU Bingbing¹, LING Mengzhuo¹, LIU Jiebing¹, CHEN Xiaolong², SHAO Mingjun³, YAO Jia³

(1. CTCE Third Construction Co., Ltd., Tianjin 300163, China; 2. Beijing Construction Engineering Quality Third Test Institute Co.,

Ltd., Beijing 100037, China; 3. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The pre-embedded climbing cone bracket method is widely used in bridge construction due to its efficiency and economic advantages. However, there are currently no design standards for pre-embedded climbing cones in China. This is likely to cause unreasonable design in practical projects. To address this issue, and based on the failure modes of pre-embedded climbing cones, the provisions of relevant standards at home and abroad are categorized, and the intrinsic connections and applicable scopes of each standard are discussed. It is proposed that in addition to the requirements for the bearing capacity of anchor bolt, the failure verification of the concrete substrate should also be supplemented. Combined with the engineering experience of pre-embedded climbing cone construction, the focus is on analyzing the effects of anchor bolt edge distance, spacing, and anchoring depth on the bearing capacity of concrete. Finally, a set of design method suitable for the bearing capacity of pre-embedded climbing cone systems in bridge piers is formed. The design method has been applied in the Beijing North Liangma River Road Bridge Project, and its effectiveness has been validated through practical engineering, which can provide a referring basis for similar projects.

Keywords: pre-embedded climbing cone construction; concrete cone failure; anchoring depth

0 引言

在桥梁施工领域, 预埋爬锥托架法作为一种创新且高效的施工技术, 正受到广泛关注与应用。如图1所示, 预埋爬锥托架法的工作原理是通过预埋在桥梁墩柱混凝土中的底座螺母、螺杆锥形螺母及受力螺栓, 形成可靠的支撑和传力路径^[1-3]。该技术

通过将牛腿锚固于墩身, 构建稳定的支撑体系, 并借助分配梁作为荷载传递的关键媒介, 将盖梁施工过程中产生的荷载均匀传递至墩柱结构。这种荷载传递机制显著优化了传统施工模式对大量支架的依赖, 减少了支架的使用数量, 从而直接降低了施工成本。此外, 预埋爬锥托架法减少了支架搭设与拆除所需的空间和时间, 有效缓解了施工对周边交通环境的压力, 对维持施工期间区域交通的顺畅具有重要意义。

预埋爬锥的承载能力涉及多个力学性能和材料特性, 但我国目前尚未形成统一的计算方法^[4-6]。因

收稿日期: 2025-06-16

作者简介: 余兵兵(1990—), 男, 学士, 工程师, 从事桥梁施工工作。

通信作者: 姚嘉(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事土木工程结构研究工作。电子信箱: 724418032@qq.com

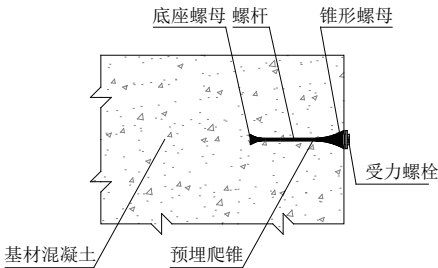


图 1 预埋爬锥示意图

此,研究预埋爬锥的承载能力计算不仅能够提升施工安全性,还能推动施工技术的标准化和可持续发展,具有重要的理论和实践价值。

1 相关标准研究

1.1 研究标准的选择

工程标准是基于科学研究和工程实践制定的,具有权威性和适用性。研究预埋爬锥的承载能力,理应先从相关标准入手。当前我国并无预埋爬锥设计的相关标准,也没有其承载能力的准确计算公式^[7-8]。但预埋爬锥本质上也是一种锚栓,根据其材质、结构形式及受力特点,可借鉴锚栓的相关标准规定进行研究。

锚栓受力体系的破坏可分为爬锥破坏和基材混凝土破坏,其破坏形式见表 1。

表 1 预埋爬锥破坏形式

破坏方式		破坏机理
爬锥拉断破坏		预埋爬锥外露段拉断,爬锥所受拉力大于其自身抗拉强度
混凝土锥体受拉破坏		预埋爬锥与混凝土的界面面积和粘接力增大,从而形成一个混凝土破坏锥体,爬锥受拉时,预埋段混凝土以预埋爬锥为中心呈倒锥形拉脱破坏
受拉破坏	桥墩混凝土侧向破坏	预埋段两侧混凝土出现圆锥形破坏面,当预埋爬锥与桥墩混凝土结构边距小于 $6d$ (d 为锚栓直径)及 $0.4h_{ef}$ (h_{ef} 为锚栓锚固深度)的较大值时易发生
	桥墩混凝土劈裂破坏	桥墩混凝土表面沿各预埋爬锥连线产生贯通裂缝,混凝土发生劈裂,当各预埋爬锥间距小于 $6d$ 及 70 mm 的较大值或与桥墩混凝土结构边距小于 $1.5h_{ef}$ 时易发生
爬锥剪断破坏		预埋爬锥受剪破坏,爬锥所受剪力大于其自身抗剪强度
受剪破坏	混凝土楔形受剪破坏	在桥墩混凝土边缘发生楔形撕裂破坏,常见于边距小于 $6d$ 及 $0.4h_{ef}$ 的较大值且缺乏钢筋加固的桥墩混凝土边缘
	桥墩混凝土剪撬破坏	当短而刚的锚栓沿与作用剪力相反方向位移时,于位移前方混凝土形成破裂,常见于锚栓锚固深度不足

由此可见,预埋爬锥破坏可由表 1 中的单一形式或多种形式耦合生成,本次研究选定了我国标准《混

凝土结构设计规范》^[9](GB 50010—2010)(后简称《规范》)、《混凝土结构后锚固技术规程》^[10](JGJ 145—2004)(后简称《规程》)及美国标准 *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*^[11] ACI 318(后简称 ACI 318),按照前述不同破坏形式进行讨论。

1.2 相关标准规定

对应表 1 中的破坏形式,当前国内外相关标准对锚栓承载能力的验算项目汇总见表 2。

表 2 锚栓承载能力相关规定汇总

项目		《规范》	《规程》	ACI 318
适用范围		仅预埋件	后锚固工程	后锚固安装、预埋现浇工程
受拉破坏	锚栓拉断破坏	采用材料力学公式辅以影响系数		
	混凝土锥体破坏	缺失	在试验和模拟分析的基础上采用由安全系数计算法进行数值回归得到验算公式	
	混凝土侧向破坏	构造要求	有验算公式,但可通过满足构造要求不做验算	
	混凝土劈裂破坏	构造要求		
受剪破坏	锚栓剪断破坏	采用材料力学公式辅以影响系数		
	混凝土楔形受剪破坏	构造要求	有验算公式,但可通过满足构造要求不做验算	
	混凝土剪撬破坏	缺失	剪撬破坏承载力与锥体破坏承载力呈线性正相关	

通过对 3 部标准的深入研究,可得出以下结论:

(1)预埋爬锥多采用钢材制成,其材料性能明显优于基层混凝土,因此在验算预埋爬锥承载力时应更多关注混凝土破坏,这也是当前我国所缺失的。

(2)我国现有的 2 部相关标准中,《规范》缺少针对基材混凝土结构的规定。《规程》的适用主体是后锚固工程,与预埋爬锥不符。美国标准 ACI 318 的适用范围为后锚固安装、预埋现浇工程,因此可作为后续研究的重点比较对象。

(3)锚栓的抗拉及抗剪能力是由钢材自身决定的,不受其他因素影响。

(4)对于基材混凝土的侧向及劈裂破坏,上述 3 部标准均采用对锚栓边距、群锚间距等进行构造要求的方式避免发生此类破坏。其中,《规程》与 ACI 318(该 2 部标准的构造要求尺寸大于《规范》,为安全起见选择较大值)均规定锚栓的最小边距 $c_{\min}$ 应大于 $0.4h_{ef}$ (h_{ef} 为锚栓的预埋深度)及 $6d$ (d 为锚栓直径)的较大值,其临界边距(超过临界边距时,继续增大边距不再提高混凝土的承载力)为 $1.5h_{ef}$ 。桥梁墩台

多为大体积混凝土结构,在预埋爬锥时其边距及间距空间可以得到充分保证,此类破坏在预埋爬锥设计中完全可以避免。

(5)当剪力方向上锚栓中心到混凝土边缘的距离 $c_{a1} \geq 10h_{ef}$ 或 $60d$ 时,可不进行混凝土楔形受剪破坏验算。对于预埋爬锥,其在剪力方向上锚栓中心到混凝土边缘的距离 c 实际上就是预埋锚栓到墩柱柱脚的距离,故 $c_{a1} \geq 10h_{ef}$ 或 $60d$ 亦可轻松实现。

(6)结合混凝土剪撬破坏承载力与锥体破坏承载力呈线性正相关的结论,混凝土锥体破坏是验算预埋爬锥基材混凝土承载能力的关键。

1.3 相关标准研究

现针对ACI 318中混凝土锥体破坏验算公式进行分析。由条文说明可知,标准中的计算公式采用安全系数计算法,即将影响变量通过试验结果进行拟合得到计算公式,再辅以相应的安全系数,ACI 318中混凝土锥体破坏验算见式(1)~式(3)。

$$\Phi N_{cbg} \geq N_u \quad (1)$$

$$N_{cbg} = N_b \frac{A_{nc}}{A_{nc0}} \varphi_{ec,N} \varphi_{ed,N} \varphi_{c,N} \quad (2)$$

$$N_b = k_c \sqrt{f'_c} h_{ef}^{1.5} \quad (3)$$

式中: N_u 为锚栓承受的拉力; N_{cbg} 为群锚固条件下混凝土锥体破坏强度; N_b 为在满足临界边距的条件下,单根锚栓受拉时混凝土锥体破坏受拉承载力标准值,其中现浇时 $k_c=24$, f'_c 为混凝土抗压强度(采用圆柱体试件,单位为psi), h_{ef} 为锚栓的锚固深度(单位为in); A_{nc} 为群锚的混凝土有效面积; A_{nc0} 为不受边距或空间限制时,群锚的混凝土有效面积; Φ 为强度降低系数; $\varphi_{ec,N}$ 为考虑偏心影响的系数; $\varphi_{ed,N}$ 为边缘效应调节系数; $\varphi_{c,N}$ 为混凝土不开裂时的修正系数。

由式(1)~式(3)可知,ACI 318采用单个受拉锚栓的试验拟合计算公式,乘以考虑锚栓(群)布置、偏心距、边距(间距)、开裂情况及若干修正系数来预测一个或一组锚栓时,混凝土的锥体破坏强度。此外,由式(3)可知,单根锚栓在满足边距构造条件下,混凝土锥体破坏受拉承载力标准值与混凝土抗压强度、锚固深度等因素相关。我国当前预埋爬锥乃至锚栓的锚固深度尚未有统一的计算方法,其中《规范》只给出了最小锚固深度,ACI 318给出的验算思路可用于弥补该方面缺失,即在明确锚栓的受力情况下,可由混凝土锥体破坏验算公式反推锚栓的锚固深度。

进而得到预埋爬锥承载力的设计方法如下。

(1)通过锚栓的拉断及剪断破坏确定锚栓的有效横截面。

(2)由混凝土锥体破坏验算公式反推锚栓的锚固深度。

(3)锚栓边距、间距满足构造要求,优先满足临界边距从而避免多种破坏形式耦合的发生。

2 混凝土破坏锥体计算方法研究

由前可知,混凝土锥体破坏是验算预埋爬锥基材混凝土承载能力的关键。ACI 318虽可借鉴使用,但其通过试验结果进行拟合得到计算公式在我国使用往往会引起疑问,其主要争论如下。

(1)ACI 318中所用单位为英制单位,改为国际单位时,式(3)系数将改变。

(2)美标混凝土在等级划分、试件尺寸、强度保证率及计算方法等方面与我国存在显著差异。

由此可见,争论来源集中于式(3),该公式是单根锚栓在满足临界边距条件下,混凝土破坏锥体的承载力标准值公式,是通过试验结果拟合而来。式(1)和式(2)对应我国标准体系中的设计值概念,二者均采用式(3)乘以相应条件下的安全系数而来。因此,可保留ACI 318中式(1)和式(2)的相应安全系数,通过理论推导得到可替代式(3)的混凝土破坏锥体的计算公式,其推导过程如下。

2.1 混凝土锥体破坏承载力理论公式推导

国内外相关研究发现:在满足临界边距的前提下,锚栓上作用拉力,预埋区混凝土应力峰值随加载成波状变化并持续增大,混凝土锥体破坏线沿着锚栓底部向上表面发展,破坏线与水平线的夹角约为 35° ,见图2。

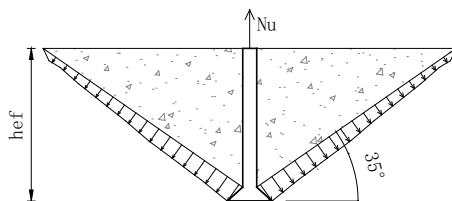


图2 混凝土破坏锥体示意图

《规程》及ACI 318中混凝土锥体破坏验算公式均使用混凝土抗压强度作为控制参数。然而混凝土锥体破坏的破坏形态是受拉破坏,此外,随着混凝土强度增大,抗压强度标准值 f_{ck} 的增长速度高于抗拉强度标准值 f_{tk} 。当桥墩采用高强度混凝土浇筑时,采用国内外现行规范公式计算的承载力会偏高,因此

混凝土强度控制参数应取混凝土抗拉强度标准值 f_{tk} ,而不是 f_{ck} 。

相关拉拔试验表明,混凝土锥体破坏始于混凝土内部,裂缝贯通形成锥面后,发生锥体破坏,锥顶周围混凝土正应力从零增大到极限抗拉强度后,其峰值应力沿锥面向混凝土表面转移。现对锥体破坏面进行受力分析,使图2中竖向力平衡,可得到:

$$N_u = \int F(f_i) \cdot A \cdot \cos\alpha \cdot d(f_i) \quad (4)$$

式中: A 是锥面的面积; f_i 是锥面上某点的混凝土的拉应力; $\alpha = 35^\circ$; N_u 为预埋爬锥所受拉力。

由式(4)可知,如能得到 f_i 准确的变化规律,即可求出锥面面积 A 上的抵抗力,由 A 和 α 可反推锥体的高,即预埋爬锥的埋置深度 h_{ef} 。

f_i 的变化规律受材料、施工及试验水平等因素影响,无法得到准确且具有代表性的函数。但 f_i 的最大值及最小值是确定的,即最大值为 f_{tk} ,最小值为0。又已知锥顶周围混凝土拉应力达到极限抗拉强度后,其峰值应力沿锥面向混凝土表面转移。因此可得到1临界状态,即锥顶混凝土达到 f_{tk} ,正将向混凝土表面转移,此时锥面上拉应力分布的极限值见图3。

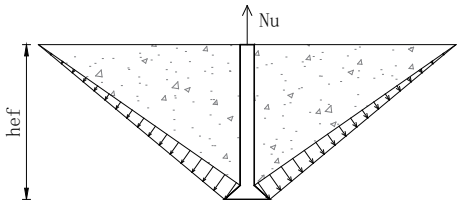


图3 临界状态锥面应力变化

在该临界状态时,由竖向力平衡可推得平衡方程为:

$$N_u = 0.5 \cdot f_{tk} \cdot A \cdot \cos\alpha \quad (5)$$

为留有一定安全储备,式(5)中的 f_{tk} 可用混凝土抗拉强度设计值 f_t 替代,可得到:

$$N_u = 0.5 \cdot f_t \cdot A \cdot \cos\alpha \quad (6)$$

式(6)即为理论推导公式,可用作验算混凝土锥体破坏及反推预埋爬锥的锚固深度 h_{ef} 。但需要说明的是,该公式是在满足临界边距的前提下,单根锚栓受拉时混凝土锥体破坏承载力标准值。因此在计算混凝土锥体破坏设计值时,仍需参考《规程》或ACI 318的相关修正系数加以修正。

2.2 理论推导公式与ACI 318对比

由前可知,ACI 318是通过试验结果进行拟合得到的计算公式,其本身即代表大量试验验证。在此,将理论推导式(6)与试验拟合式(3)进行对比(因二者试验工况相同,且均为标准值)。

现固定混凝土强度为C40,以锚固深度 h_{ef} 为变量,在满足临界边距的前提下,将英制单位换算为国际单位,采用函数图像可视化比较单根锚栓受拉时混凝土锥体破坏承载力可得到图4。

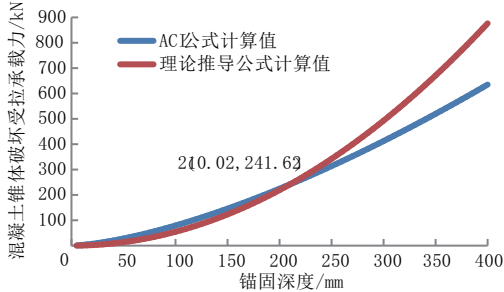


图4 抗拉承载力对比图

由图4可知,在锚固深度 h_{ef} 小于210 mm前,采用理论推导式(6)的计算值均小于式(3)的计算值,说明此时按照理论推导公式计算是偏保守的。当锚固深度 h_{ef} 大于210 mm后,理论推导式(6)的计算值开始大于式(3)的计算值,因为理论推导公式是关于 h_{ef}^2 的函数,其变化率大于ACI 318。在 $h_{ef}=300$ mm时,采用理论推导公式的计算值为493 kN,采用ACI 318的计算值为413 kN,两者相差19%。当 $h_{ef} \geq 350$ mm后,2个函数图像离散较大,采用理论推导式(6)反推得到的 h_{ef} 可能会引起承载力不足,此时不推荐采用理论推导式(6)计算 h_{ef} 。

需要注意的是,在计算混凝土锥体破坏设计值时,式(1)及式(2)中的部分修正系数是使用理论推导公式不应考虑的,如针对现浇混凝土未开裂的基材,ACI 318规定应乘以修正系数 $\varphi_{c,N}$,该修正系数与理论推导公式的基本假设相符,因此不应再重复修正。为构建相同试验工况,图4中的ACI公式计算值曲线已采用式(3)乘以 $\varphi_{c,N}$ 。

3 实际工程验证

3.1 项目概况

本次研究依托于北京亮马河北路(东四环—机场第二高速)道路桥梁工程,西起东苇路东侧,东至首都机场第二通道西侧。其中主线桥共计27轴,盖梁采用预埋爬锥托架法施工。

由施工设计已知,单一锚栓所受到的最大拉力设计值 $N_u = 182$ kN。

3.2 爬锥及牛腿结构尺寸设计

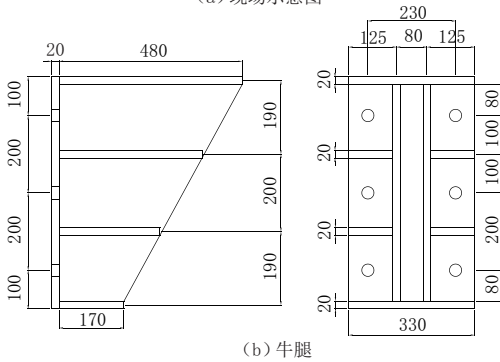
爬锥是该体系的主要受力构件,本工程拟采用D32螺杆爬锥,混凝土强度C40。预埋爬锥最小边距 c_{min} 满足其临界边距,爬锥间距大于 $6d$ 和70 mm的较

大值。

牛腿采用 20 mm 厚 Q235 钢板组件焊接,中间设置两道加劲板和腹板,单个牛腿重 0.11 t,爬锥及牛腿布置见图 5。



(a) 现场示意图



(b) 牛腿

图 5 爬锥及牛腿示意图(单位:mm)

3.3 爬锥埋置深度设计

现采用《规程》、ACI 318 及理论推导式(6)辅以 ACI 318 式(1)、式(2)的修正系数(不含 $\varphi_{c,N}$)分别反推螺杆爬锥的埋入深度,计算结果见表 3。

表 3 锚栓埋入深度

单位:mm

计算项目	《规程》	ACI 318	理论推导公式
埋入深度	762	328	315

由表 3 可知,采用《规程》计算所得结果约大于 ACI 318 及理论推导方法的 2 倍。对于实际工程而言,预埋爬锥分别安装在混凝土桥墩的两侧,受桥墩结构尺寸所限,762 mm 的有效埋入深度会限制其应用场景。因基材混凝土结构厚度小于 $2h_{ef}$ 时,会引发混凝土劈裂,如为安全考虑选用《规程》设计,应选择增加锚栓数量,减少埋入深度。

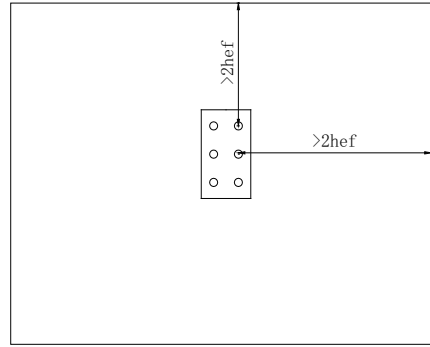
在此工况下,采用理论推导式(6)辅以 ACI 318 式(1)、式(2)的修正系数反推得到的螺杆爬锥锚固长度略小于 ACI 318 的计算值。

3.4 试验验证

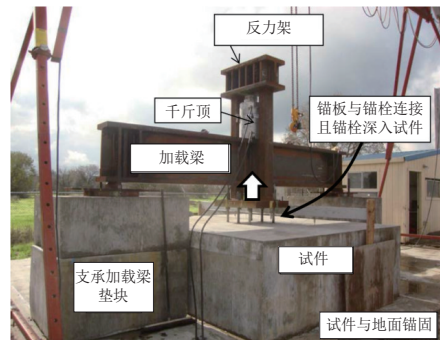
3.4.1 试验设计

通过试验验证理论公式的准确性及适用性,试件及加载设备见图 6。

如图 6(a)所示,试件采用 C40 混凝土并于地面固定。螺杆群布置同图 5,锚栓采用 D32 螺杆,锚固深度按照理论计算式(6)乘以 ACI 318 中的修正系数所得, $h_{ef} = 315$ mm。为避免基材混凝土发生侧向破



(a) 试件平面图



(b) 加载设备

图 6 试件及加载设备。

坏及劈裂破坏的耦合,螺杆中心到混凝土边缘的距离 $c_{min} > 2h_{ef}$,基材混凝土厚度 $= 2h_{ef}$ 。如图 6(b)所示,试验装置包括一个加载梁和一个反力架,在加载梁与反力架之间放置了一个容量为 450 t 的液压千斤顶,以便提升反力架。将刚性锚板连接到反力架的下表面,六根锚杆与锚板连接并锚固于混凝土中。通过千斤顶上顶对混凝土试件进行提升,混凝土试件与地面锚固,从而模拟预埋爬锥所受拉力。

千斤顶以 50 kg/s 的速率加载。由于试验空间受限,无法在混凝土表面布设传感器。锚板具有较大刚性,因此通过测量锚板位移可描述混凝土表面的位移变化。使用压力计监测试验中的荷载,使用位移传感器固定在刚性锚板顶面上的 3 个位置,以测量刚性锚板的向上位移。

3.4.2 试验结果分析

在千斤顶的加载过程中同时记录刚性锚板的向上位移,生成了荷载-变形曲线见图 7。

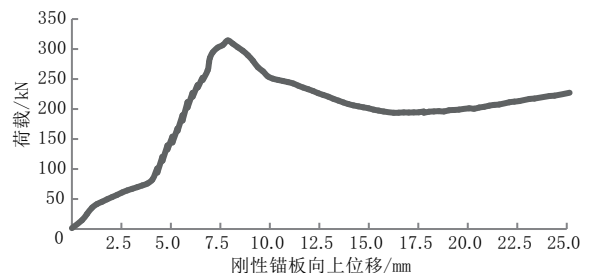


图 7 荷载-变形曲线

图 7 反映了刚性锚板的荷载-位移曲线,该曲线大致可分为 4 部分:(1)调整区段,荷载从 0~100 kN。单根锚栓所受拉力达到 100 kN 时,刚性锚板上升 4.1 mm,该区段没有发现任何结构病害。图 7 中调整区段荷载-位移曲线的变化率较小,究其原因应为试验设备在安装过程中的间隙等初始环境所致;(2)加速上升区段,荷载从 100~315 kN。单根锚栓所受拉力达到 260 kN 时,刚性锚板共上升 7.4 mm,该区段荷载-位移变化率达到最大,是锚栓及基材混凝土的主要受力阶段。在接近该区段顶峰(单根锚栓所受拉力约 290 kN 时,顶峰处拉力达到 315 kN)时,混凝土顶面开始出现裂缝;(3)突然下降区段,该阶段荷载由 315 kN 下降至 250 kN,刚性锚板上升至 10.5 mm,在此过程中裂缝逐渐扩展;(4)破坏区段,该区段荷载下降幅度减小,但反力架向上位移急剧增大直至破坏。

使用一台摄像机悬挂在测试装置上方,以捕捉基材混凝土的破坏过程,在单根锚栓荷载到达约 290 kN 时,混凝土表面开始产生裂缝。当单根锚栓荷载从 315 kN 下降至 250 kN 区段,裂缝开展具有类似冲切锥体特征,沿着 6 个锚栓形成的矩形 4 个角约呈 45° 扩散,见图 8。荷载持续下降最终形成混凝土破坏锥体。



图 8 混凝土破坏

本次试验的锚栓预埋深度是根据单一锚栓所受到的最大拉力设计值 $N_u = 182 \text{ kN}$ 反推而来,182 kN 处于试验所得荷载-位移曲线的加速上升区段,混凝土表面未发生破坏。因此采用理论推导公式进行设计是可行的。但无论是 ACI 138 还是理论推导公式其设计值较试验结果均相对保守,试验产生的混凝土破坏锥体底面半径也超过了 $h_{ef}/\tan 35^\circ$,即实际破坏线与水平线夹角 $\alpha < 35^\circ$,究其原因如下。

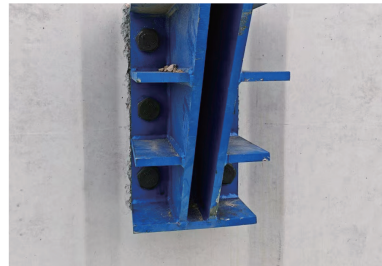
(1)试验基材混凝土并非素混凝土,其配置了钢筋,位于混凝土表面的钢筋网有效延缓了混凝土裂缝的发展,而 ACI 138 及理论推导公式均未考虑钢筋

影响因素。

(2)该 2 种方法均未考虑刚性锚板的有益影响。

(3)采用 ACI 318 中的修正系数提供的安全储备。

按照该方法设计的预埋爬锥顺利完成了盖梁托架施工,桥墩混凝土上未见裂缝等病害(见图 9)。



(a)桥墩混凝土无破坏及变形



(b)爬锥无破坏及变形

图 9 爬锥及桥墩状态

4 结 语

本次研究通过分析对比国内外相关标准,结合行业经验,对桥梁墩柱预埋爬锥系统进行全过程设计,经实际工程验证,得到结论如下:

(1)《规范》虽以预埋件为适用主体,但其缺乏对混凝土基材承载力的验算方法,仅采用《规范》设计并不安全。《规程》只适用于后锚固,ACI 318 对预埋现浇和后锚固均适用,采用《规程》计算预埋爬锥承载能力较为保守,特定情境下并不适用。

(2)基材混凝土侧向破坏、劈裂破坏及楔形受剪破坏均能通过满足锚栓边距、间距的构造要求从而避免。当最小边距 $c_{\min}$ 大于 $1.5h_{ef}$,锚栓间距不应小于 $6d$ 和 70 mm 的较大值时,无需验算混凝土侧向及劈裂破坏。当沿剪力方向的边距 c_{a1} 大于 $10h_{ef}$ 或 $60d$ 时,无需验算混凝土楔形受剪破坏。桥梁墩台预埋爬锥空间充裕故完全可以防止多种破坏形式耦合的发生。

(3)本次研究结合现有规范提出了预埋爬锥的

(下转第 309 页)