

[文章编号]1002-8528(2008)05-0091-04

# 带锚固板钢筋机械锚固性能研究进展及趋势

李智斌, 吴广彬(中国建筑科学研究院 建筑结构研究所, 北京 100013)

王依群(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

[摘 要] 对国内外带锚固板钢筋的机械锚固性能研究进展进行了较全面的介绍, 列举了国外相关规范对机械锚固的规定, 并对带锚固板钢筋的产品开发历史与研究应用趋势进行了综述与展望。

[关键词] 带锚固板钢筋; 机械锚固

[中图分类号] TU502\*.3 [文献标识码] A

## The Study Progress and Trend for Mechanical Anchorage Properties of Headed Reinforcements

LI Zhi-bin, WU Guang-bin (Institute of Building Structures, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

WANG Yi-qun (School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

[Abstract] The study progress for mechanical anchorage properties of headed reinforcements at home and abroad is presented comprehensive in this paper. The related provisions on the mechanical anchorage in overseas standards are introduced. The development history and the study and application trend of the headed reinforcement are given.

[Keywords] headed reinforcement; mechanical anchorage

### 1 前 言

钢筋与混凝土之间可靠的锚固是保证二者共同工作的前提。目前, 混凝土工程中钢筋常用的锚固方式是使用末端带弯钩构造, 这种方式虽然在一定程度上增强了钢筋锚固性能、减小了锚固长度, 但是较大的弯弧半径经常带来如梁柱节点区钢筋拥挤、弯钩与钢筋布置互相干扰等问题。随着工程新技术的不断发展与应用, 如使用更高强度钢筋、使用环氧树脂涂层防止钢筋锈蚀等, 带弯钩钢筋带来的问题日益突出。因此, 减小钢筋锚固长度、优化钢筋锚固条件的研究显得十分重要。带锚固板钢筋就是解决以上问题的途径之一。

目前, 试验研究较为充分的有如图 1 所示的三种带锚固板钢筋, 其特点比较见表 1。

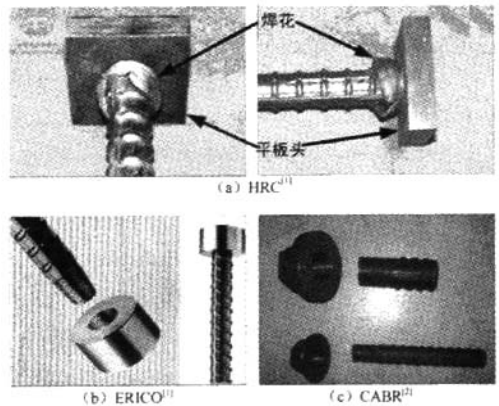


图 1 带锚固板钢筋

表 1 三种带锚固板钢筋

| 名 称                            | 连接方式        | 相对头面积*   | 国家 | 备注               |
|--------------------------------|-------------|----------|----|------------------|
| HRC <sup>[1]</sup><br>带锚固板钢筋   | 高速摩擦<br>焊连接 | 8.6~11.9 | 美国 | 机械设备笨重,<br>已广泛应用 |
| ERICO <sup>[1]</sup><br>带锚固板钢筋 | 锥螺纹<br>连接   | 3.0~6.4  | 美国 | 应用较为广泛           |
| CABR <sup>[2]</sup><br>带锚固板钢筋  | 直螺纹<br>连接   | 4.1~4.8  | 中国 | 试验研究中            |

注: \* 相对头面积指锚固板净面积与钢筋公称面积的比值。

[收稿日期] 2006-03-17

[作者简介] 李智斌(1981-), 男, 硕士, 助理工程师

[联系方式] lizhibin@cabrtech.com

## 2 带锚固板钢筋机械锚固性能研究进展

### 2.1 国内钢筋机械锚固研究进展

我国自 1988 年起,共进行了两批钢筋机械锚固性能研究试验<sup>[3]</sup>,是《混凝土结构设计规范》GB50010-2002 关于机械锚固有关规定的试验依据。第 1 批共 60 个拉拔试验;第 2 批为 40 个梁构件试验。试验指出:变形钢筋的几种机械锚固措施都有很大的锚固承载力,在工程中减短高强钢筋的锚固长度是可行的;为避免机械锚头区域产生过大的混凝土裂缝破碎和钢筋滑移,应有足够长度的直锚段与机械锚头相配合,提高受力前期的锚固刚度,防止过大滑移和变形;为发挥机械锚头的抗力,对于相应承压区域的混凝土,应采取足够的约束措施(保护层厚度、配箍等)予以加强;机械锚固的使用应考虑条件,在受压区使用弯钩、弯折可能导致偏心压曲,应予限制。

值得指出的是,当时钢筋机械锚固装置的发展还比较有限,其中的焊锚板做法存在锚板薄、刚度不足、截面积较小等缺点,造成机械锚固滑移较大。于是,《混凝土结构设计规范》GB50010-2002 对机械锚固的规定条文过于严格,弱化了机械锚固的作用,限制了我国钢筋机械锚固技术的发展和广泛应用。

从 2004 年至今,中国建筑科学研究院与天津大学合作,开展带锚固板钢筋机械锚固性能的试验研究,使用了如图 3 所示的带锚固板钢筋。现已完成了第 1 阶段 98 个拉拔试验与 21 个混凝土棱柱体的钢筋拔出/推出试验;第 2 阶段为四个足尺的节点试验与补充的 17 个拉拔试验,正在进行中。从第 1 阶段的试验结果看,当相对头面积为 4.5 时,钢筋埋入长度为  $0.4l_{ae}$  即可实现钢筋的有效锚固,比《混凝土结构设计规范》GB50010-2002 中规定的  $0.7l_{ae}$  减小了 43%;在其他条件相同的情况下,带锚固板钢筋的极限承载能力与滑移变形性能均优于传统的带弯钩钢筋,前者取代后者是完全可行的<sup>[2]</sup>。

### 2.2 国外钢筋机械锚固研究进展

带锚固板钢筋的应用源于欧洲的海洋石油平台建设。近 10 年来,在北美特别是美国,带锚固板钢筋的基本性能已经得到了较深入的研究。有关带锚固板钢筋的设计规范,如美国 ACI318-02 规范、AASHTO 桥梁设计规范、加拿大混凝土结构设计规

范 CAN3-A23.3-94 等均充分肯定了带锚固板钢筋的机械锚固作用。

#### 2.2.1 Caltrans 的研究<sup>[1]</sup>

20 世纪 70 年代早期,美国 Caltrans 完成了 19 个拉拔试验。如图 2 所示,采用了三种机械锚固方式。目的是研究用锚固板替代弯钩用于桥墩与上部结构连接钢筋锚固的可行性。研究表明:相对头面积很小(1.8)的试件,钢筋可达到屈服,建议更多地研究相对头面积较小的情况;多根并列带锚固板钢筋比单根带锚固板钢筋的滑移更大;锚固板承载力随着埋入深度的减少而增加。

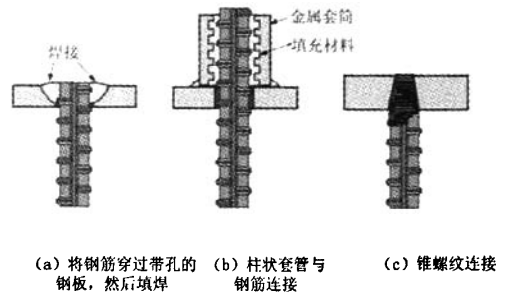


图 2 Caltrans 试验研究使用的带锚固板钢筋

#### 2.2.2 SINTEF 的研究<sup>[1]</sup>

美国 SINTEF 通过对带锚固板钢筋进行静力拉伸、静力弯曲、疲劳拉伸试验,主要研究摩擦焊接锚固板的强度和延性。试验表明:通过摩擦焊连接的带锚固板钢筋性能优越,锚固板被弯曲成  $90^\circ$  后无一破坏,带锚固板钢筋的疲劳寿命至少与带弯钩钢筋相当。

他们还对比埋入混凝土中的带锚固板钢筋进行静力拉拔粘结试验、疲劳拉拔粘结试验、梁抗剪试验。试验表明:带锚固板钢筋试件的钢筋均达到屈服,与同条件的带弯钩钢筋相比有更好的荷载-滑移性能;带锚固板钢筋足以替代带弯钩钢筋;力-变形、裂缝形态均表明带锚固板钢筋可以作为抗剪箍筋。

此次研究促进了带锚固板钢筋的发展,同时也是美国 ASTM A970 焊接带锚固板钢筋用作混凝土配筋技术规程的主要依据。

#### 2.2.3 德克萨斯(Texas)大学的研究<sup>[1]</sup>

美国德克萨斯大学完成了两个阶段的试验:第一阶段,169 个浅埋或深埋拉拔试件(以埋入深度与保护层厚度的比值 5.0 作为浅埋与深埋的分界线);第二阶段,32 个大比例中间层端节点的单向加载试

验,一个足尺中间层端节点的反复加载试验。

浅埋拉拔试件共 21 个,试件除三根钢筋拉断外,其余均为从锚固板开始的混凝土锥体拔出破坏。试验表明:横向钢筋对带锚固板钢筋的极限拉拔强度没有明显影响,但对锚固峰值后的残余强度有所提高;增加粘结锚固长度对有横向钢筋时的极限承载力有所提高并能减少锚固板的滑移。

深埋拉拔试件共 148 个,主要破坏形态为混凝土边缘鼓出。试验表明:埋入深度与保护层厚度的比值为 5.0 以上时,进一步增加埋深不会提高破坏强度,增加粘结锚固长度会改善钢筋的滑移性能,对极限承载力影响较小;矩形锚固板的方向、宽厚比对承载力没有影响;边缘深埋带锚固板钢筋的承载能力随锚固板尺寸的增加而增加,基本为线性关系;承载力不受锚固板厚度(0.5"~0.75")影响;角部带锚固板钢筋比边部带锚固板钢筋承载能力小;边缘破坏的承载能力不受反复加载的影响。

节点试验表明:锚固板面积和埋入深度保持不变,钢筋直径对承载力与荷载-滑移性能无影响;随着埋入深度的增加,承载能力线性地增加,锚固板所承受的荷载不再增加,而承载能力增加;带锚固板钢筋的锚固性能至少与带弯钩钢筋相当,并常常比带弯钩钢筋更好。唯一的中间层端节点反复加载试验表明:带锚固板钢筋试件比带弯钩钢筋试件表现出更好的性能,承载能力的衰退和锚固力的降低是最小的。

#### 2.2.4 Clarkson 大学的研究<sup>[4,5]</sup>

20 世纪 90 年代末,美国 Clarkson 大学开展了使用带锚固板钢筋作为纵筋的梁柱节点研究,包括二个中间层端节点、三个顶层端节点。另外,还进行了二个传统的带 90°标准弯钩钢筋的顶层端节点试验,以作对比。目的是验证带锚固板钢筋是否能满足美国 ACI 352 规范有关房屋建筑节点抗震的要求。试验表明:使用带锚固板钢筋减少了节点钢筋拥挤,力学性能相同或优于使用带 90°标准弯钩钢筋节点,锚固板可取代标准弯钩用于钢筋锚固,无显著设计问题;建议对于 5 号~8 号钢筋,相对头面积最小为 4.0,最小锚固长度为 12d(d 指钢筋的公称直径)。

#### 2.2.5 美国德克萨斯交通运输部与德克萨斯大学的合作研究<sup>[6,7]</sup>

2002 年,美国德克萨斯交通运输部与德克萨斯

大学合作完成了 64 个 CCT 节点试验和 27 个搭接试验。试验指出:钢筋所承受的外力由钢筋与混凝土之间的粘结力和锚固板的局部承压力共同承担;带锚固板钢筋的失效粘结应力与相对头面积有直接关系,相对头面积越大,失效粘结应力越小;箍筋等横向钢筋的约束作用对锚固板的承压能力影响不大,但当应力传递至锚固板时这种约束作用有利于钢筋与混凝土之间的粘结;对于某一特定的锚固长度,相对头面积越大,锚固板滑移越小;锚固板的形状与高宽比对承载能力的影响不明显;带锚固板钢筋可以替代带弯钩钢筋,一定的相对头面积下,前者可实现相同或优于后者的锚固性能。

### 3 国外相关规范对机械锚固的规定

#### 3.1 ACI318-02 规范<sup>[9]</sup>与 AASHTO 桥梁设计规范<sup>[9]</sup>

美国 ACI 318-02 规范第 12.6 条和 AASHTO 桥梁设计规范第 5.11.3 条的机械锚固条款几乎使用了相同的语言,它们对钢筋机械锚固的规定条款如下:

(1)任何能发挥钢筋强度并不损害混凝土的机械装置均可作为锚固;

(2)钢筋所受的外力由机械锚固力和钢筋在最大应力点与锚固板间的粘结力组成;

(3)应在发包图纸中提供机械锚固装置的充分说明文件,并提交给有关建筑管理当局。

#### 3.2 美国 ACI352R-02 规范<sup>[10]</sup>

美国 ACI352R-02 规范在第 4.5 条关于在节点中使用带锚固板钢筋的相关规定如下:

(1)带锚固板钢筋应满足 ASTM A970 规范;

(2)锚固板需放置在节点核心混凝土 50mm 以内,最小锚固长度  $l_{da}$  不能小于  $8d_b$  或 150mm;

(3)带锚固板钢筋的最小锚固长度  $l_{da}(in)$  可按式(1)计算。如果锚固板的边保护层厚度小于  $3d_b$ ,每个锚固板都应由箍筋或弯钩横向约束锚固在节点中。对于抗震区节点,约束弯钩的强度应为锚固钢筋屈服强度的 1/2,其他情况下,约束弯钩的强度应为锚固钢筋屈服强度的 1/4。如果边保护层厚度大于  $3d_b$ ,需根据 ACI 349 规范确定锚固板的约束力。

$$l_{da} = \frac{3}{4} \frac{\alpha f_y d_b}{75 \sqrt{f'_c}} \quad (1)$$

式中, $\alpha$  为节点构件交界面纵向钢筋应力放大系数;

$f_y$  为钢筋屈服应力标准值 ( $psi$ );  $d_s$  为钢筋公称直径 ( $in$ );  $f'_c$  为节点区混凝土抗压强度标准值 ( $psi$ )。

### 3.3 加拿大混凝土结构设计规范 CAN3-A23.3-94<sup>[11]</sup>

加拿大混凝土结构设计规范 CAN3-A23.3-94 第 13.4.8 条允许使用带锚固板抗剪钢筋, 要求如下:

(1) 加头钢筋锚固应能发挥全部钢筋屈服强度;  
(2) 加头钢筋的头面积至少是 10 倍钢筋面积, 除非试验证明可以用较小尺寸;

(3) 乘系数后的总剪应力抗力 (SI 单位) 应不大于  $0.8\lambda\phi_c \sqrt{f'_c}$ , 该值大于 1.33 倍传统箍筋配筋构件允许的总剪力;

(4) 乘系数后的混凝土部分的贡献 (SI 单位) 应不大于  $0.3\lambda\phi_c \sqrt{f'_c}$ , 该值大于 1.50 倍传统钢筋配筋构件混凝土允许的总剪力;

(5) 混凝土剪切能力的增加来自加头钢筋提供的强化的约束影响。

## 4 带锚固板钢筋的研究与应用趋势

从以上国内外对带锚固板钢筋机械锚固性能研究的进展可以看出, 这类研究可分为两类: 基本性能研究与应用研究。其中, 基本性能研究主要研究带锚固板钢筋的一般性能, 集中于锚固长度和锚固能力的研究。应用研究主要涉及三类: 节点试验; 带双锚固板钢筋作为抗剪和约束钢筋的试验<sup>[12]</sup>; 加固与改造研究<sup>[13]</sup>。

20 世纪 80 年代, 带锚固板钢筋在北海的石油平台中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>, 如 Gullfaks C 平台、Draugen 平台、Ekofisk 隔离墙、Sleipner A 平台、Oseberg A 平台、Snorre 基础、Hibernia 平台、Troll 东平台等。近年来, 随着各国对带锚固板钢筋性能研究的深入和相关规范的不完善, 带锚固板钢筋已在桥梁、房屋、加固改造等工程领域得到应用, 如新 Benicia-Martinez 桥、韩国 Incheon LNG 储油罐等。

综上所述, 带锚固板钢筋应用开发的趋势是: 前期研究集中于海工结构物中的应用, 近期研究已经转向了与桥梁或房屋相关的应用。

## 【参考文献】

- [1] Thompson, M. K., Jirsa, J. O., Breen, J. E., and Klingner, R. E.. Anchorage Behavior of Headed Reinforcement: Literature Review [R]. Center for Transportation Research Report 1855-1, Austin, Texas, May 2002.
- [2] 李智斌. 带锚固板钢筋机械锚固性能的试验研究 [D]. 天津: 天津大学硕士学位论文, 2005.
- [3] 汪洪, 徐有邻, 史志华, 钢筋机械锚固性能的试验研究 [J]. 工业建筑, 1991, 11: 36 ~ 40.
- [4] Wallace, J. W., McConnell, S. W., Gupta, P., and Cote, P. A.. Use of Headed Reinforcement in Beam-Column Joints Subjected to Earthquake Loads [J]. ACI Structural Journal, Proceedings Vol. 95, No. 5, pg. 590 ~ 606, Detroit, Michigan, September-October 1998.
- [5] Wallace, J. W.. Headed Reinforcement: A Viable Option [J]. Concrete International, Vol. 19, No. 12, pg. 47 ~ 53, Dec 1997.
- [6] Thompson, M. K., Young, M. J., Jirsa, J. O., Breen, J. E., and Klingner, R. E.. Anchorage of Headed Reinforcement in CCT Nodes [J]. Center for Transportation Research Report 1855-2, Austin, Texas, May 2002.
- [7] Thompson, M. K., Ledesma, A. L., Jirsa, J. O., Breen, J. E., and Klingner, R. E.. Anchorage Behavior of Headed Reinforcement Part A: Lap Splices Part B: Design Provisions and Summary [R]. Center for Transportation Research Report 1855-3, Austin, Texas, May 2002.
- [8] ACI 318-02, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary [S]. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, October 2002.
- [9] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 2nd ed. [S]. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 1998.
- [10] ACI 352R-02, Recommendations for Design of Beam-Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete Structures [S]. ACI-ASCE Committee 352, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, October 2002.
- [11] CSA Standard CAN3-A23.3-94. Design of Concrete Structures for Buildings with Explanatory Notes [S]. Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, 1994.
- [12] Dilger W. H., and Ghali, A.. Double-Headed Studs as Ties in Concrete [J]. Concrete International, Vol. 19, No. 6, pg. 59 ~ 66, Detroit, Michigan, June 1997.
- [13] Dawn E. Lehman, Sharon E. Cookin, Adrian M. Nacamuli, and Jack P. Moehle. Repair of Earthquake-Damaged Bridge Columns [J]. ACI Structural Journal, Vol. 98, No. 2, pg. 233 ~ 242, March 2001.