

文章编号: 1003-1995(2015)10-0038-05

国外关于预应力筋锚固长度的研究综述

蒋 欣

(中国铁道科学研究院 铁道建筑研究所, 北京 100081)

摘要: 准确确定预应力筋的锚固长度对于计算预应力构件的抗弯和抗剪承载力意义重大。对国外有关预应力筋锚固长度的研究作一文献综述, 结合美国既有规范 ACI318 和 AASHTO 以及其它研究成果汇总了锚固长度的计算公式, 探讨了预应力筋直径、混凝土强度等对锚固长度的影响。

关键词: 预应力筋 锚固长度 粘结

中图分类号: TU378.1; TU757.1⁺3 **文献标识码:** A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2015.10.07

1 预应力筋锚固长度

预应力构件中, 混凝土与预应力筋之间的粘结指的是二者之间的相互作用与力的传递, 它直接决定构件的力学性能。对于先张梁来说, 没有粘结就无法实现预应力^[1]。预应力筋的锚固与预应力在构件内的传递和发展都取决于预应力释放后的混凝土与预应力筋之间的粘结性能。粘结共有三种机制: 胶结力 (Adhesion), Hoyer 效应 (Hoyer's effect) 和机械咬合力 (Mechanical Interlock)。按粘结在构件内的不同分布区域又可分为传递粘结 (Transfer Bond) 与弯曲粘结 (Flexural Bond), 如图 1 所示。预应力一旦释放, 传递粘结就会出现在梁端范围内。该长度称为预应力筋的传递长度 l_t (Transfer Length), 其长度为混凝土端部至梁内一特定点的距离, 在这个特定点处预应力筋应力达到考虑预应力损失后的有效预应力 f_{se} , 且位于该点后的梁段内的预应力值保持不变。当构件承受外荷载时, 弯曲粘结开始作用, 使得梁内预应力筋应力由有效预应力 f_{se} 逐渐增至所能发展的最终应力 f_{ps} 。预应力

筋的锚固长度 l_d (Development Length) 指的就是从混凝土梁端到预应力水平达到 f_{ps} 的点之间的距离。从本质上来说, 它指的是达到截面最终承载力时不产生滑移的预应力筋最小埋置长度。在传递长度范围内, Hoyer 效应占主要成分, 同时作用有机械咬合力。而在锚固长度范围内弯曲粘结作用区段, 则是机械咬合作用形成了混凝土与预应力筋之间的粘结应力。

计算抗弯和抗剪承载力时, 准确确定预应力筋的锚固长度是十分必要的。对锚固长度的低估可能导致在锚固长度区段内的截面上承载力的不足; 反之, 过高地估计锚固长度可能导致过多的配筋与设计的经济^[2]。构件内若没有足够的粘结应力使得预应力水平充分发展时, 预应力筋与混凝土之间的相对滑移可能导致锚固的失效。本文对国外有关预应力筋锚固长度的研究作一简要综述, 结合既有规范和其它研究成果汇总了锚固长度的计算公式, 对影响锚固长度的因素进行探讨。

2 既有锚固长度的计算长度

ACI318^[3] 和 AASHTO^[4] 将预应力在构件内的发展简化为双线性模型, 见图 2 和图 3。双线性的转折点为构件内传递长度的终点, 并在该点处达到有效预应力值。在锚固长度的终点, 梁段内的预应力水平达到 f_{ps} , 该截面上达到构件的名义承载力。二者对于传递长度计算的区别在于 ACI318 直接考虑了有效应力的影响, l_t 与 f_{se} 和预应力筋的直径成正比; 而 AASHTO 中将锚固长度简化为 60 倍预应力筋直径。另外, 对于带粘结的先张法预应力构件而言, ACI318 和 AASHTO 中关于 f_{ps} 的计算有所不同。ACI318 公式 (18-3) 给出

$$f_{ps} = f_{pu} \left\{ 1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p} (\omega - \omega') \right] \right\}, \text{ 并在其条文说}$$

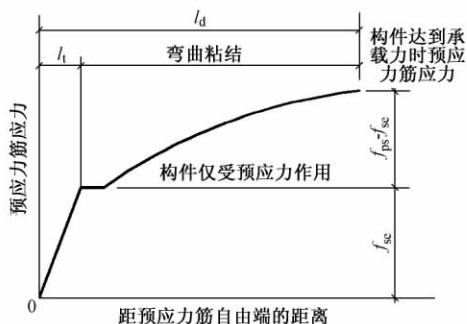


图 1 预应力沿梁长的变化

收稿日期: 2015-08-01; 修回日期: 2015-09-01

作者简介: 蒋欣 (1981—), 男, 助理研究员, 博士。

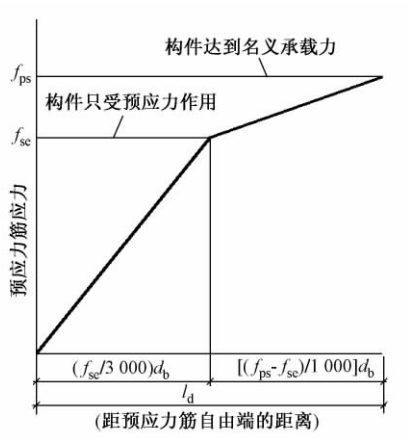


图2 ACI318 关于预应力发展的双线性模型
(ACI318-08 Fig. R12.9)

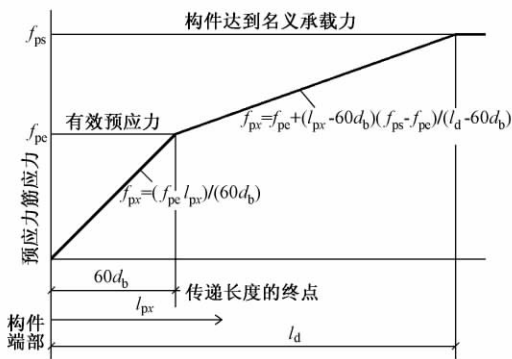


图3 AASHTO 关于预应力发展的双线性模型
(AASHTO 2010 Fig. C5.11.4.2-1)

明中指出该公式可能会低估高配筋率预应力梁的承载力。式中： f_{pu} 为预应力筋的极限抗拉强度， γ_p 为与钢绞线类型相关的系数， β_1 为与混凝土强度相关的系数， ρ_p 为预应力筋配筋率， f'_c 为混凝土抗压强度， d 为受压边缘至纵向受拉钢筋中心的距离， d_p 为受压边缘至预应力筋中心的距离， ω 和 ω' 为对应的受拉和受压钢筋指数。上式计算中若考虑了受压钢筋，则 $\left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p}(\omega - \omega')\right]$ 不应小于0.17且不应大于0.15 d_p 。而AASHTO公式(5.7.3.1.1-1)则规定 $f_{ps} = f_{pu} \left[1 - k \frac{c}{d_p}\right]$ 。式中： k 为与钢绞线类型相关的系数， c 为受压边缘至截面中性轴的距离。对于中性轴以上受压区内配置了预应力筋的构件，两规范均建议宜通过力的平衡与应变协调方程联合求解 f_{ps} 。

另外，本文总结了其它研究得出的关于锚固长度的计算公式^[5-14]，如表1所示。由此可见，锚固长度主要与预应力筋的直径、混凝土强度、有效预应力和对应于承载力时预应力筋内的平均应力值有关。

3 锚固长度的分析

国外对于锚固长度的研究由来已久。通过大量的试验研究，分析了影响锚固长度的因素，从不同粘结机制对预应力筋的锚固进行了深入的剖析。以下是各时期一些国外研究的典型案例。

Janney(1954)^[15]采用大量不同配筋率的小梁和棱柱混凝土试件研究传递长度与锚固长度。影响锚固的因素考虑预应力钢丝直径、钢丝表面状况和混凝土强度。对光滑钢丝的粘结性能研究虽不能直接应用于现在普遍使用的钢绞线的锚固分析，但该研究将预应力钢丝的Hoyer效应与钢绞线的机械咬合作用区分开来，为粘结机制的定性研究提供了依据。

Hanson and Kaar(1959)^[16]在PCA研究开发试验室(Portland Cement Association Research and Development Laboratory)一共浇筑了47片梁用以研究弯曲粘结性能，并借此提出设计依据。试验中采用了不同直径和埋置长度的Grade250预应力钢绞线，考察了配筋率和混凝土强度的影响。他们提出了 f_{ps} 的计算公式，为AASHTO和ACI所提出的关于锚固长度的计算公式奠定了基础。

Martin and Scott(1976)^[17]为分析一浅高度板在施工荷载作用下的破坏，他们对于一个类似的板进行了测试，发现在85%的理论承载力时发生了锚固失效。他们提出在计算 f_{ps} 时应按预应力筋埋置长度与钢绞线直径的比值区别对待。对于小跨径的预应力构件来说，可能因不具有足够的埋置长度而导致承载力的降低。

Zia and Mostafa(1977)^[5]对既有关于传递长度与锚固长度的研究作了全面的文献综述，并从当时规范公式的可靠性出发作了相应的研究。考虑了混凝土强度与预应力释放方式的影响，他们建议将ACI公式中弯曲粘结长度增大25%，以确保在达到极限承载力时发生受弯破坏而不产生粘结滑移失效。

Cousins et al.(1990)^[18]研究了环氧涂层对传递长度和锚固长度的影响。试验中钢绞线直径为10、13和15 mm钢绞线。实测传递长度和锚固长度较之ACI和AASHTO规范公式计算结果更大，认为规范公式若用于计算环氧钢绞线的传递长度和锚固长度不够保守。

Russell and Burns(1993)^[19]在德州大学奥斯汀分校(University of Texas at Austin)进行了关于传递长度与锚固长度的试验研究。二人建议为防止因腹板剪切开裂引起的粘结失效，应适当配置水平和竖向剪切钢筋。因弯曲开裂与腹板开裂会影响锚固长度，故可知

表 1 其它研究给出的锚固长度计算公式

Zia and Mostafa(1977) ^[5]	$l_d = \frac{1.5f_{si}}{f'_{ci}}d_b - 4.6 + 0.18(f_{pu} - f_{se})d_b$
Abdalla et al. (1993) ^[6]	$l_d = \left[\frac{f_{se}}{3} + 1.7(f_{ps} - f_{se}) \right] d_b$
Mitchell et al. (1993) ^[7]	$l_d = 0.33f_{pr}d_b\sqrt{\frac{3}{f'_{ci}}} + (f_{ps} - f_{se})d_b\sqrt{\frac{4.5}{f'_c}}$
Burdette et al. (1994) ^[8]	$l_d = \left[\frac{f_{si}}{3} + 1.5(f_{ps} - f_{se}) \right] d_b$
Buckner(1995) ^[9]	$l_d = \left[\frac{f_{si}}{3} + \lambda(f_{ps} - f_{se}) \right] d_b \quad 1 \leq [\lambda = 0.6 + 40\varepsilon_{ps}] \leq 2$
Lane(1998) ^[10]	$l_d = \left[\frac{f_{si}}{3} + \lambda(f_{ps} - f_{se}) \right] d_b$
Barnes et al. (1999) ^[11]	$l_d = \frac{5}{4} \left[\frac{f_{si}}{\sqrt{f'_c}} + f_{ps} - f_{se} \right] d_b$
Shahawy(2001) ^[12]	$l_d = \frac{4f_{si}}{f'_c}d_b + \frac{6.4(f_{ps} - f_{se})}{f'_c}d_b + 10$
Kose and Burkett(2005) ^[13]	$l_d = \left[95 \frac{f_{si}(1 - d_b)^2}{\sqrt{f'_c}} \right] + \left[8 + 400 \frac{(f_{pu} - f_{si})(1 - d_b)^2}{\sqrt{f'_c}} \right]$
Ramirez and Russell(2008) ^[14]	$l_d = \left[\frac{120}{\sqrt{f'_{ci}}} + \frac{225}{\sqrt{f'_c}} \right] d_b \geq 100d_b$

公式中: l_d 为预应力筋锚固长度(development length/in.); d_b 为名义预应力筋直径(nominal strand diameter/in.); f'_c 为混凝土 28 d 抗压强度(concrete compressive strength at 28 days/psi); f'_{ci} 为预应力释放时的混凝土抗压强度(concrete compressive strength at time of release/psi); f_{ps} 为对应于承载力时预应力筋内的平均应力(average stress in prestressing steel at ultimate load/ksi); f_{pu} 为预应力筋的极限抗拉强度(ultimate tensile strength of prestressing strand/ksi); f_{se} 为考虑预应力损失后的有效预应力(effective stress in the prestressing steel after losses/ksi); f_{si} 为考虑短期预应力损失时的有效预应力(effective stress in prestressed steel after short-term losses/ksi); λ 为与 ε_{ps} 有关的系数(multiplier related to ε_{ps}); ε_{ps} 为达到名义强度时预应力筋的应变(strain in prestressed reinforcement at nominal strength)。

加载模式与截面形状对预应力筋的锚固长度具有一定的影响。

Burdette et al. (1994) ^[8] 在田纳西大学诺克斯维尔分校(The University of Tennessee at Knoxville) 开展了一个科研项目, 制作了一些小尺寸的棱柱试件和一些全尺寸的 AASHTO 一类梁(AASHTO Type I girder)。试验中考察了环氧涂层和钢绞线直径、间距、表面状况、预应力释放方式的影响, 并提出了传递长度与锚固长度的计算公式。

Barnes et al. (1999) ^[11] 在德州大学奥斯汀分校研究了一配置间距 50 mm、直径 15 mm 钢绞线的全尺寸桥梁预应力构件的锚固性能。混凝土的抗压强度采用 40 ~ 100 MPa。研究表明, 15 mm 钢绞线采用 50 mm 的间距是安全可行的。所提出的锚固长度计算公式中考虑了不同阶段的混凝土强度。

Ramirez and Russell(2008) ^[14] 在奥克拉荷马州立大学(Oklahoma State University) 和普度大学(Purdue University) 开展了对高性能混凝土(High Performance Concrete, HPC) 中预应力筋的传递长度和锚固长度的综合研究。结果表明, 锚固长度随混凝土强度的提高而缩短; 对于 HPC 来说, 规范公式偏于保守。对比矩形梁, 工字梁因其较薄的腹板宽度使得腹板处的剪切开裂更加充分, 因而更易产生锚固失效。

Floyd et al. (2011) ^[20] 通过 19 片矩形梁的试验, 对比了自密实混凝土(Self-Consolidating Concrete, SCC) 和传统的高强混凝土中预应力筋的锚固长度。结果表明, ACI 与 AASHTO 规范公式过高估计了梁内锚固长度 60% 以上。

Jiang, Cabage et al. (2013, 2014) ^[21-22]: 因当前的规范公式只适用于普通直径的钢绞线, 故通过大量的

拔出试验与梁受弯试验研究了 18 mm 钢绞线在高强混凝土中的锚固性能。拔出试验中考虑了预应力筋埋置长度和预应力水平的影响,从粘结机制上分析了预应力筋的传递长度。通过大量的矩形截面预应力梁受弯试验,了解了梁内预应力筋在外荷载下沿梁长的应力分布情况,考察了梁端预应力筋的滑移状况从而分析锚固长度。

4 结语

准确确定预应力筋的锚固长度意义重大。既有的锚固长度计算公式多来自于大量的预应力梁受弯试验结果。这些简化了的计算公式,主要考虑了预应力筋直径、混凝土强度与 f_{ps} 三个变量。随着更大直径钢绞线和更高强度混凝土的应用,现有计算公式往往不能准确计算预应力筋的锚固长度。因而需要进行新的试验研究,并与之前关于预应力筋锚固长度的研究结果对比,为设计提供指导或建议。

参 考 文 献

- [1] LEONHARDT F. Prestressed Concrete: Design and Construction [M]. Berlin Munich: Wilhelm Ernst & Sohn, 1964.
- [2] MORCOUS G, HANNA K, TADROS M K. Impact of 0.7 Inch Diameter Strands on NU I-Girders(NDOR Project No. SPR-1 (08) P311) [R]. Lincoln: Nebraska Department of Roads, University of Nebraska Lincoln, 2011.
- [3] American Concrete Institute Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI318-08) and Commentary(318R-08) [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2008.
- [4] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [S]. 4th Edition. Washington D C: AASHTO, 2007.
- [5] ZIA P, MOSTAFA T. Development Length of Prestressing Strands [J]. PCI Journal, 1977, 22(5) : 54-65.
- [6] ABDALLA O A, RAMIRZE J A, LEE R H. Strand Debonding in Pretensioned Beams-Precast Prestressed Concrete Bridge with Debonded Strands-Simply Supported Tests, Part 2(Final Report FHWA/INDOT/JHRP-92-25) [R]. West Lafayette: Purdue University, the Indiana Development of Transportation, 1993.
- [7] MITCHELL D, COOK W D, KHAN A A, et al. Influence of High Strength Concrete on Transfer and Development Length of Pretensioning Strand [J]. PCI Journal, 1993, 38(3) : 52-66.
- [8] BURDETTE E G, DEATHERAGE J H, CHEW C K. Development Length and Lateral Spacing Requirements of Prestressing Strand for Prestressed Concrete Bridge Girders [J]. PCI Journal, 1994, 39(1) : 70-83.
- [9] BUCKNER C D. A Review of Strand Development Length for Pretensioned Concrete Members [J]. PCI Journal, 1995, 40(2) : 84-105.
- [10] LANE S N. A New Development Length Equation for Pretensioned Strands in Bridge Beams and Piles(Report No. FHWA-RD-98-116) [R]. McLean: Federal Highway Administration, 1998.
- [11] BARNES R W, BURNS N H, KREGER M E. Development Length of 0.6-Inch Prestressing Strand in Standard I-Shaped Pretensioned Concrete Beams(Report No. FHWA/TX-02/1388-1) [R]. Austin: Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 1999.
- [12] Shahawy M A. A Critical Evaluation of the AASHTO Provisions for Strand Development Length of Prestressed Concrete Members [J]. PCI Journal, 2001(4) : 94-117.
- [13] KOSE M M, BURKETT W R. Evaluation of Code Requirement for 0.6 in. (15 mm) Prestressing Strand [J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(3) : 422-428.
- [14] RAMIRZE J A, RUSSELL B W. Transfer, Development, and Splice Length for Strand/Reinforcement in High-Strength Concrete(NCHRP Report 603) [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2008.
- [15] JANNEY J R. Nature of Bond in Pre-tensioned Prestressed Concrete [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1954(50) : 717-736.
- [16] HANSON N W, KAAR P H. Flexural Bond Tests of Pretensioned Prestressed Beams [J]. ACI Journal, 1959: 783-802.
- [17] MARTIN L D, SCOTT N L. Development of Prestress Strand in Pre-tensioned Member [J]. ACI Journal, 1976: 453-456.
- [18] COUSINS T E, JOHNSTON D W, ZIA P. Transfer and Development Length of Epoxy-Coated and Uncoated Prestressing Strands [J]. PCI Journal, 1990, 35(3) : 92-106.
- [19] RUSSELL B W, BURNS N H. Design Guidelines for Transfer, Development and Debonding of Large Diameter Seven Wire Strands in Pretensioned Concrete Girders(Report No. 1210-5F) [R]. Austin: Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, 1993.
- [20] FLOYD R W, RUIZ E D, DO N H, et al. Development Lengths of High-strength Self-consolidating Concrete Beams [J]. PCI Journal, 2011, 56(4) : 36-53.
- [21] JIANG X, MA Z. Investigation of Bond Tests to Transfer Performance of Prestressing Strand [C] // 2013 PCI Conference and National Bridge Convention, 2013.
- [22] CABAGE J, MA Z, JIANG X, et al. An Assessment of Development Length when Using High-Capacity Strands [C] // 2014 PCI Conference and National Bridge Convention, 2014.

[4]任伟平.钢桥整体节点疲劳性能试验与研究[D].成都:西南交通大学,2005.

[5]谭明鹤,王荣辉,黄永辉,等.刚性悬索加劲钢桁梁特殊节点模型试验[J].中国公路学报,2008,21(1):47-52.

[6]杨俊杰.相似理论与结构模型试验[M].武汉:武汉理工大学出版社,2005.

[7]KISS K,DUNAI L. Stress History Generation for Truss Bridges Using Multi-level Models [J]. Computers & Structures, 2000, 78(1) : 329-339.

[8]邵旭东,成尚锋,李立锋.钢管混凝土拱肋阶段模型试验[J].长安大学学报(自然科学版),2003,23(4):34-36.

Model test for key joints of extra-kilometer-span highway and railway shared cable-stayed bridge

XIAO Xin^{1,2}, PAN Yongjie^{1,2}, TIAN Yue^{1,2}, LE Sitao^{1,2}

(1. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China;
2. State Key Laboratory for Track Technology of High-speed Railway, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to study the behavior of the integral joint structure of main truss, a 1:2 geometric scale model test and finite element analysis of key joint A60 in Hutong Changjiang River Bridge were conducted. Test results show that in the case of the most unfavorable load, the maximum stress in the joint zone is within the allowable stress, verifying its safety and reliability. The maximum stress appears at welds and the circular arc transition section because of stress concentration, which can be effectively reduced by using the appropriate radius of circular arc transition form. The test results verify the rationality of key joint design of Hutong Changjiang River Bridge and may provide an important basis for similar projects.

Key words: Integral joint; Key joint; Model test; Finite element analysis

(责任编辑 郑 冰)

(上接第 41 页)

Review on research of anchoring length of prestressed strand abroad

JIANG Xin

(Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: An accurate prediction of development length of prestressing strand is significantly meaningful to calculate moment resistance and shear capacity of pre-tensioned members. This paper presented a literature review of the analysis of development length. The equations for calculating development length were summarized from the existing codes ACI318 and AASHTO , as well as other research results. Also , the effect of the diameter of prestressing strand and the compression strength of concrete on development length was discussed.

Key words: Prestressing Strand; Development Length; Bond

(责任编辑 赵其文)