

OVM250钢绞线斜拉索防腐性能研究

闫云友 黄芳玮 庞维林 陈建国

黄永玖 唐燕华 齐琪

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545005)

摘要:主要介绍了OVM250钢绞线斜拉索的结构及防腐特点,为了提高钢绞线斜拉索的耐久性,结合产品开发及工程应用经验,根据fib2005、PTI2007和CIP2002等国际通行的斜拉索规范对斜拉索体系提出的防腐要求,从拉索索体防腐结构、拉索锚具的密封结构及水密性能、拉索锚具表面防腐等的各个环节着手进行防腐性能研究,并对斜拉索施工及运营中的防护处理提出要求,以确保OVM250钢绞线斜拉索体系全方面满足规范要求及工程使用寿命的期望。

关键词:钢绞线斜拉索 防腐性能 耐久性 水密性

1 前言

随着技术的日新月异,现代大跨度斜拉桥发展速度很快,因钢绞线斜拉索采用“化整为零”的施工工法、施工设备轻量化等特点,已越来越受到设计者的青睐,然而,要保证大跨度斜拉桥的设计施工质量,对其主要承重构件的斜拉索系统的耐久性提出了更高的要求。

因大跨度斜拉桥大多是跨江、跨河或跨海工程,斜拉索所处的特殊使用环境和条件,在桥梁病害检查中,发现拉索腐蚀是桥梁主要病害之一,因此,对钢绞线斜拉索系统的防腐性能研究

显得尤为重要。

OVM公司从上世界九十年代开始,致力于钢绞线斜拉索体系的研制、开发、生产与施工,在工程应用的基础上,不断总结经验,对产品进行改进与创新,在拉索的密封结构、防腐性能等方面进行深入研究,并根据国际斜拉索规范提出的防腐要求,进行试验,取得了卓有成效的成果。

2 OVM250钢绞线斜拉索的结构及防腐特点

2.1 OVM250钢绞线斜拉索结构

OVM250钢绞线斜拉索结构如图1。

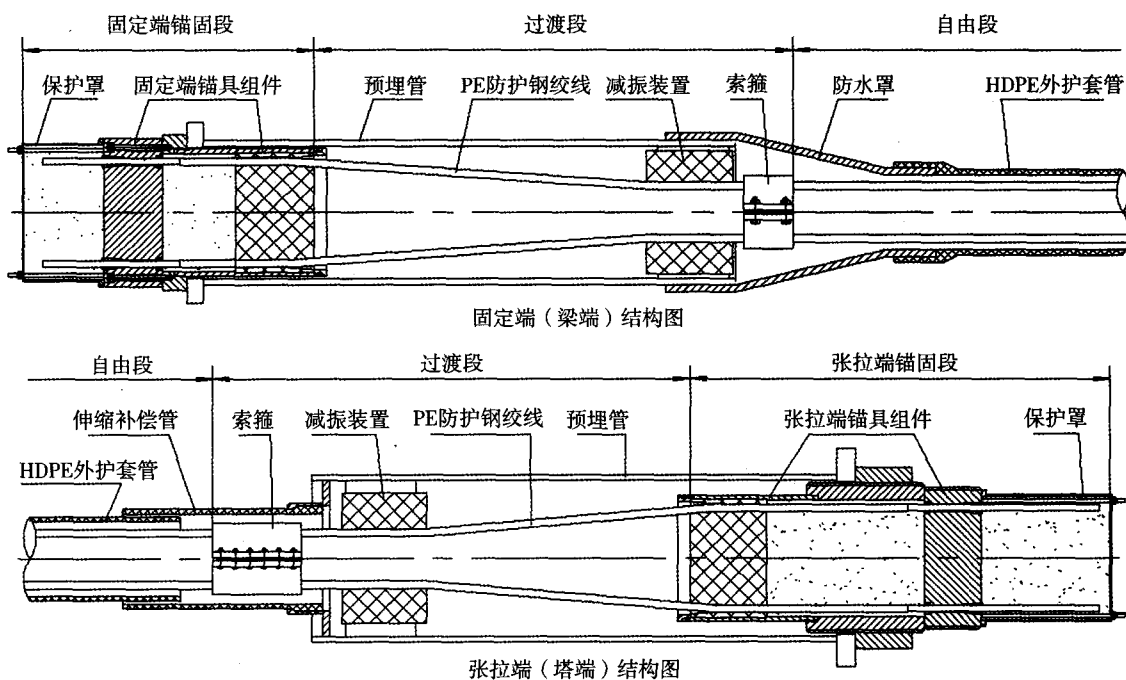


图1 OVM250钢绞线斜拉索结构图

2.2 OVM250钢绞线斜拉索防腐特点

(1) 拉索体系从锚固段到过渡段,再到自由段,所有构件达到同等的安全和耐久性能,即整个拉索系统中不存在薄弱环节。

(2) 拉索锚具具有良好的密封性能,保证锚具内部钢绞线不受外部有害物质的侵入,满足不同规范要求的水密性能。

(3) 拉索索体(自由段)采用多层防腐保护体系,即:钢绞线钢丝表面的镀层(镀锌层)或涂覆层(环氧树脂涂覆层)、钢绞线表面的防

腐润滑脂(或蜡)、单根钢绞线的PE护套,以及整个钢绞线束的HDPE外护套管。具体防护结构如图2,多层防腐保护体系构成及作用如表1。

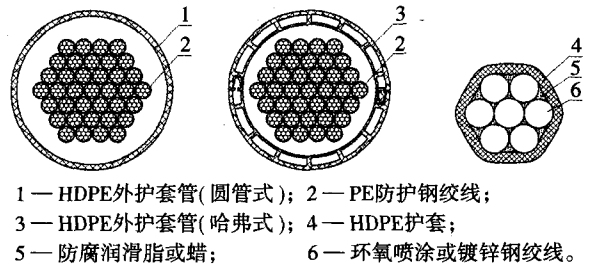


图2 索体(自由段)多重防护结构示意图

表1 拉索索体(自由段)多层防腐保护体系构成及作用

层数	防护层	防护形式	主要作用
1	内层防护	环氧涂层或锌层	1 施工中和最终保护之前,对锚固段外露钢绞线起临时保护作用; 2 在拉索外护套尚未封口或钢绞线PE护套受损但未修复之前,对钢绞线起临时防腐作用。
2	中间防护	防腐润滑脂或蜡	1 避免冷凝水与钢绞线表面接触; 2 如果水已进入钢绞线或隔层,防止水在钢绞线表面滑动; 3 防腐。
3	外部防护	钢绞线热挤PE护套	1 为防止水侵入,对钢绞线采取的永久性密封防护,同时防止化学物质(如卤化物)的侵蚀; 2 防止气体和蒸汽扩散的隔层防护; 3 为运输和安装提供的机械保护。
4	外部防护	外护套管	1 防止外部水及有害气体进入拉索内部,对拉索起整体保护作用; 2 隔热,避免组成拉索的钢绞线受阳光直射,降低温度对拉索受力的影响,同是降低紫外线对钢绞线产生直接影响,提高钢绞线的使用寿命; 3 具有抗风雨激振功能的外护套管,可有效降低拉索受风雨作用而产生的有害振动。

(4) 拉索索体每根钢绞线的防腐保护是独立的,其中某一根钢绞线的防腐失效,不会立即影响到整根拉索的防腐性能。

3 OVM250钢绞线斜拉索防腐性能研究

为了提高OVM250钢绞线斜拉索体系的耐久性,OVM公司结合产品开发及工程应用经验,从拉索的各个部位着手进行防腐性能研究,以确保其全方面满足标准要求及工程使用寿命的期望。

3.1 拉索索体防腐性能研究

美国后张协会编写的斜拉索规范“Recommendations for Stay Cable Design, testing and installation (PTI2007)”第4.1.2节中,对斜拉索索体的防腐保护,明确提出了至少由两层完全嵌套的护套组成的要求:内护套应完全包住主

要承拉构件的自由段和锚固段,外护套管完全包住索体自由段,这种结构的好处是,当外护套出现破损,内护套还能对主要承拉构件起到防腐保护作用。

法国规范“Cable Stays Recommendations of French interministerial commission on Prestressing (CIP2002)”及国际结构混凝土协会编写的规范“Acceptance of stay cable systems using prestressing steels (fib2005)”对钢绞线斜拉索也都明确提出应采用多层防腐保护体系,以提高钢绞线斜拉索的防腐保护性能,从而延长拉索的使用寿命。

3.1.1 PE包裹防护钢绞线

(1) 钢绞线选用单丝环氧涂覆钢绞线或热浸镀锌钢绞线,本身具有优良的防腐性能;

(2) 钢绞线的PE护套材料采用高密度聚乙烯, 材料符合CJ/T 297的规定;

(3) PE包裹防护钢绞线制作, 护套厚薄均匀, 最小厚度不小于1.5mm。PE防护钢绞线护套

光滑无裂缝、无气孔、无明显褶皱和机械损伤;

(4) PE防护钢绞线采用的防腐材料可选用防腐润滑脂或蜡, 并对防腐润滑脂和蜡的技术性能指标作了严格的规定, 具体要求如表2和表3;

表2 防腐润滑脂的技术性能指标

项目	质量指标	试验方法
工作锥入度 1/10mm	220 ~ 320	GB/T 269
滴点℃ 不低于	160	GB/T 4929
水分 % 不大于	0.1	GB/T 512
钢网分油量 (100℃ 50h) % 不大于	4	SH/T 0324
腐蚀试验 (45号钢片 100℃ 24h)	合格	SH/T 0331
低温性能 (-40℃ 30min)	合格	SH/T 0387 附录二
湿热试验 (45号钢片 30d) 级 不大于	B	GB/T 2361
盐雾试验 (45号钢片 30d) 级 不大于	B	GB/T 0081
氧化安定性 (99℃ 100h)		
A 氧化后压力降 MPa 不大于	0.06	SH/T 0325
B 氧化后酸值 mgKOH/g 不大于	1.0	GB/T264
对套管的兼容性 (65℃ 40d)		
A 吸油率 % 不大于	10	HG 2-146
B 拉伸强度变化率 % 不大于	30	GB/T 1040.2

表3 蜡的技术性能指标

项目	质量指标	试验方法
工作温度℃	-40 ~ 80	
密度, 20℃, g/cm ³	0.85 ~ 0.92	
石蜡针入度, 25℃, 0.1mm	110 ~ 170	GB/T 4985
释油率, 7d, 40℃, %	≤0.5	SH/T 0324
滴点℃	≥70	GB/T 4929
氧化安定性 (99℃ 100h) MPa 不高于	0.03	SH/T 0325
腐蚀试验45号钢片 100℃ 24h)	合格	SH/T 0331
盐雾试验 (45号钢片 30d) 级 不高于	B	SH/T 0081

(5) 钢绞线防腐润滑脂或蜡涂敷及护套的制作一次完成, 并通过挤压工艺成型, 防腐润滑脂或蜡沿钢绞线全长均匀涂敷。每米防腐润滑脂的用量在15g ~ 30g之间, 每米蜡的用量在10g ~ 30g之间, 并保证将钢绞线外表面和钢绞线周围的缝隙填满, 以防止气体及流体进入并沿钢绞线内部缝隙流动;

(6) 在斜拉索安装张拉过程中, PE包裹防护钢绞线的PE护套与钢绞线一起伸长;

(7) PE包裹防护钢绞线耐久性研究。

为了验证PE包裹防护钢绞线PE护套防护性能, 参照PTI2007对PE护套的耐久性试验要求进

行试验, 满足试验要求。

①抗化学作用试验

PE包裹防护钢绞线的PE护套的抗化学试验按SY/T 0039规定, 将PE防护钢绞线浸入以下每种溶液进行评估: 一份3mol的CaCl₂水溶液, 一份3mol的NaOH水溶液, 一份饱和的Ca(OH)₂水溶液, 试件取护套完好和人为钻有直径为6mm通孔两种。在23 ± 2℃下试验, 最短测试时间45d内, PE护套应无软化、开裂或明显的品质降低。

②氯化物渗透试验

参照GB/T 25823标准氯化物渗透试验要求进行试验, 测量具有最小厚度的固化涂膜的氯化物

渗透特性。测试应在 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 下持续45d, 氯离子透过膜层的渗透量应小于 1×10^{-4} mol。

③抗冲击性能

PE包裹防护钢绞线的机械损伤抗力, 按SY/T 0040进行检验, 冲击应发生在PE防护钢绞线的凸起部分。测试应在室温下进行, 在能量为 $9\text{N} \cdot \text{m}$ 的冲击下, 护套应无震破或开裂迹象, 只存有冲击区内的永久变形。

④耐磨性能试验

PE防护钢绞线的耐磨性能可用GB/T 23988试验方法确定, 护套磨去0.25mm厚度所需要的砂量应大于1000L。

⑤盐雾腐蚀试验

按GB/T 10125的要求, PE防护钢绞线应在70%的最小极限抗拉强度下, 在盐雾中露置3000h。试验中应对端部锚具进行保护, 避免盐雾或腐蚀影响试验结果。对腐蚀痕迹的观察应每隔250h记录一次。在露置3000h后, 应没有锈斑痕迹。试件测试应不间断地进行。在盐雾试验完成后, 试件应进行拉力试验。在达到1%的延伸率时, PE护套应没有明显肉眼可见的裂缝。

3.1.2 HDPE外护套管

HDPE外护套管是拉索的最外层防护, 应该具备防水、抗紫外线照射、减少温度对其内部索体的影响等作用, 另外, 从美观的角度, 结合桥梁及环境要求, 采用相应的颜色来制作HDPE外护套管, 因此, 色彩稳定性也是一个重要考虑因素。

制作拉索的外护套管的原材料采用高密度聚乙烯, 满足CJ/T297标准要求, 我们从提高外护套管的寿命研究中发现, 原材料中的抗紫外线及热老化关键要素, 采用合理的组分可以有效地控制外护套管的开裂及老化现象, 目前, OVM公司采用进口原材料配方, 通过试验证明, 公司生产的HDPE外护套管可以达到50年以上的使用寿命。

3.2 OVM250拉索锚具组件防腐性能研究

OVM250拉索锚具组件的防腐性能包括拉索锚具表面防腐处理及拉索组件的水密性能, 其中表面防腐处理可选用电镀锌、喷涂Zn-Al伪合金、粉末渗锌等方式, 水密性能是根据规范试验要求进行水密性试验考证。

3.2.1 拉索锚具表面防腐处理

(1) 电镀锌

电镀锌是利用电解, 在制件表面形成均匀、致密、结合良好的锌保护层, 通常锌层厚度在10~20 μm 。

(2) 喷涂Zn-Al伪合金

Zn-Al伪合金涂层防腐体系为电化学防护和化学遮断防护体系的结合, Zn-Al伪合金涂层充分取用了锌涂层和铝涂层的长处, 即锌涂层具有阴极保护性能的优点和铝涂层具有长效的防腐性能的优点。

为了提高产品的防腐性能, 在拉索产品喷涂Zn-Al伪合金后, 还需喷涂环氧封闭漆、环氧中间漆及环氧面漆, 具体喷涂厚度如下: Zn-Al伪合金(80 μm)+环氧封闭漆(不计厚度)+环氧中间漆(80 μm)+环氧面漆(80 μm)

(3) 粉末渗锌

粉末渗锌原理是利用金属原子的扩散渗透, 在钢铁表面形成锌铁合金保护层, 以达到防护目的, 具体就是在一定温度下, 活化了了的锌被钢表面吸附, 锌向基体中扩散, 同时铁向界面扩散, 形成锌-铁合金, 粉末渗锌厚度40~60 μm , 在粉末渗锌后, 还需对表面进行封闭处理。

比较以上三种防腐方式, 电镀锌是一般机械零件的通用防腐方式, 技术、工艺相对成熟, 成本低, 对具有精密配合要求的零件来说是最好的防腐方式, 如锚头锥孔与夹片的配合、螺纹配合等, 但是电镀锌有氢脆现象, 因此, 对受力构件, 在电镀锌后均要求进行脱氢处理。相对而言, 另两种防腐方式则不会出现氢脆现象, 并且由于防腐层相对更厚, 其使用年限会大大提高, 但是喷涂Zn-Al伪合金和粉末渗锌, 因防护层较厚, 会影响产品螺纹配合, 因此, 拉索锚具中螺母、支承筒及张拉端锚板螺纹在喷涂Zn-Al伪合金或粉末渗锌后, 只喷涂表面封闭漆, 不再做喷漆处理。

3.2.2 锚头的密封结构

单根防护钢绞线进入锚头的部分需要剥除PE保护层方可与夹片进行有效锚固, 因此, 在锚头部分, 我们采用了可以锁紧密封单根钢绞线的密封装置, 并在锚头内部灌注油性蜡, 这种材料既可以很好地防止钢绞线腐蚀, 又具有很好的灌注性

能,并且不会产生泄漏。

3.2.3 拉索组件的水密性能

国际斜拉索规范PTI2007、fib2005和CIP2002

均对拉索锚具产品提出了水密性试验要求,以上三个规范对拉索试件的水密性试验要求存在较大的差别,具体对照表如表4。

表4 国际斜拉索规范对拉索试件水密性试验要求对照表

	PTI2007	fib2005	CIP2002
拉索试件		包括锚具组件、过渡段及最少1m的自由长度。	
拉索试件规格	无规定	拉索试件的极限荷载应大于7000kN,拉索规格应不小于27孔	
试验要求	1 拉索试件先按规范要求完成疲劳试验,试验合格的拉索试件进行水密性试验; 2 试件置于不小于3m水头的染色溶液中浸泡96小时。	1 试件置于不少于3m水头的染色溶液中; 2 在常温下对拉索试件在0.2fptk至0.45fptk间循环加载10次,然后将轴向荷载稳定在0.3fptk; 3 拉索试件轴向应力保持在0.3fptk的条件下,水温从20℃~60℃之间循环8个周期; 4 试验过程中,分别选定低温和高温各两次,保持温度不变,对拉索试件进行横向偏转运动(偏转角度 $\pm 1.4^\circ$,位移约 $\pm 75\text{mm}$)。	1 在常温下安装拉索试件,0.2fptk至0.5fptk间循环加载10次,然后将轴向荷载稳定在0.3fptk; 2 向试验装置注入2m水头的染色水; 3 拉索试件在室温静置一个星期; 4 水温从20℃~70℃之间循环8个周期,约3.5天一个周期; 5 在温度循环过程中,分别选定低温和高温各两次,保持温度不变,对拉索试件进行横向偏转运动(偏转角度 $\pm 1.4^\circ$,位移约 $\pm 100\text{mm}$)。 6 拉索试件在室温静置一个星期。
安装方式	无规定	竖直安装	倾斜30°安装
试验时间	96小时	8个周期,约8天	约6个星期
偏转运动频率	无	不超过1Hz	约0.1Hz
验收标准		染色水不进入锚具内部	

为了验证OVM250拉索锚具的水密性能,我们分别按PTI2007、fib2005和CIP2002的水密性试验要求进行试验,试验均达到规范要求。

在欧洲,一些国家的桥梁设计师在斜拉桥设计中,对拉索锚具的水密性试验提出更高的技术要求,要求水密性试验按CIP规范做,但将水压提高到3m水头,这样一来,试验装置也需加长,试验过程中,拉索横向偏转位移也相应加大,为了让OVM250拉索体系更好地走向国际市场,必须满足设计要求,因此,于2011年,OVM公司针对这一更高的设计要求,在中国建筑科学研究院结构实验室及美国CTL实验室的双重见证下,进行了水密性试验,试验取得圆满成功,证明了OVM250拉索体系所采取的防腐措施合理有效。

4 拉索防护处理

根据对钢绞线斜拉索使用和事故状态的实际情况,斜拉索系统的防护失效多发生在梁端锚固部位,原因是这一部位安装后由于结构限制不便检查和维护,如果在施工过程中或运营期间,梁端预埋管排水不畅,就容易造成预埋管积水,梁端

锚具长期处于潮湿环境中,当表面防腐层消耗殆尽时,锚具就很容易被腐蚀,如果锚具密封不好,积水就会入侵锚具内部,进而对钢绞线造成腐蚀破坏,危害拉索的安全,因此为了提高钢绞线斜拉索的耐久性,在改进和提高斜拉索本身防护体系的同时,在施工期间,拉索的防护处理尤为重要。

(1) 材料在运输及储存过程中应防水、防火、防损伤,表面损伤应及时修复到可以使用的状态,否则应更换;

(2) PE防护钢绞线的PE护套完全包住钢绞线的自由段、过渡段,PE护套剥除长度计算应精确,保证适当长度的PE护套进入锚具组件的密封结构内部。

(3) 在梁端锚垫板端面最低位置设计排水槽,在施工与营运阶段,保持排水槽畅通,这样能保证施工期间进入预埋管的水或营运期间的冷凝水能顺利排出,不会出现积水现象;

(4) 根据当地的气候历史资料及施工时的环境温度等条件,充分考虑拉索的外护套管热胀冷缩的影响,保证足够的伸缩空间,从而保证拉

索外护套对拉索的防护功能不因环境温度的变化而失效。

(5) 施工过程中对拉索应进行临时防护, 尽可能避免雨水进入锚头及预埋管;

(6) 拉索锚具内灌注油性蜡对锚固段剥除PE护套的钢绞线进行有效防护;

(7) 锚板端面及锚板外预留钢绞线涂抹专用防腐润滑脂, 然后加装保护罩进行防护, 根据设计需要, 也可在保护罩内灌注油性蜡防护;

(8) 拉索体系外露金属件做与桥梁外露金属件同等级别的防护处理。

5 结束语

在斜拉桥设计中, 虽然考虑了斜拉索的可更换性, 但在实际应用中更换的代价是很大的, 所以斜拉桥设计、建造和使用都要求延长斜拉索的安全使用寿命。在斜拉桥使用过程中, 拉索的防腐性能是决定使用寿命的关键因素之一, 为了提高OVM250钢绞线斜拉索的防腐性能, 项目组对拉索材料、产品做了大量的试验研究, 特别是在拉索锚具组件水密性要求方面, 根据不同规范要

求, 完成了水密性试验。

OVM250钢绞线斜拉索设计采用多层防腐结构, 具有各钢绞线之间相互独立的防护特点, 对PE防护钢绞线耐久性试验要求, 拉索锚具组件能经受各种规范要求的水密性试验考验, 都充分证明OVM250钢绞线拉索体系具有优异的防腐性能。

实际应用表明, 为了提高钢绞线斜拉索的耐久性, 在改进和提高斜拉索本身防腐性能的同时, 在桥梁施工过程中, 规范施工操作, 保证施工质量, 在运营期间, 加强对钢绞线斜拉索的防护与保养也是延长安全使用寿命的重要环节。

参考文献

(上接第21页)

4 结论

(1) FRP体外预应力混凝土梁中, 等效塑性区长度与中性轴高度的比, 即Pannell模型中的参数 φ , 依然比较稳定, 并可取为一常数。但该常数与以钢材为体外预应力筋的构件的不同, 两者之间可用式(7)进行转换。

(2) 以Pannell模型为基础的美国AASHTO LRFD规范公式、英国BS8110规范公式及加拿大A23.3-94规范公式, 虽然不显含预应力筋的弹性模量, 但仍然适用于FRP体外预应力混凝土梁。

(3) 本文建议的式(8), 既适用于简支梁, 亦适用于连续梁; 既适用于常规的体外预应力钢筋, 亦适用于非常规体外预应力FRP筋, 具有普遍意义。

参考文献

- [1] Au F T K, Du J S. Prediction of ultimate stress in unbonded prestressed tendons[J]. Magazine of Concrete Research, 2004, 56(1): 1-11.
- [2] Harajli M H. Effect of span-depth ratio on the ultimate steel stress in unbonded prestressed concrete members[J]. ACI

- [1] Recommendations for Stay Cable Design, testing and installation [S]. Post-tensioning institute (PTI), fifth edition, 2007.
- [2] fib bulletin 30, Acceptance of stay cable systems using prestressing steels[S]. International Federation for Structural Concrete, 2005.
- [3] Cable Stays - Recommendations of French interministerial commission on Prestressing[S]. SETRA, France, June 2002.
- [4] 中华人民共和国交通运输部. JT/T771-2009 无粘结钢绞线斜拉索技术条件[S].
- [5] 李民, 白琳徽. 粉末渗锌工艺探讨[J]. 材料保护. 2008年9月, 第41卷, 第9期.
- [6] 吴文明, 李闯. 斜拉索防腐技术探讨[J]. 公路交通技术. 2008年8月, 第4期.

- [1] Structural Journal, 1990, 87(3): 305-312.
- [3] Pannell F N. The ultimate moment of resistance of unbonded prestressed concrete beams[J]. Magazine of Concrete Research, 1969, 21(66): 43-54.
- [4] Au F T K, Su R K L, Chan K H E. Full-range behavior of partially prestressed concrete beams with external tendons[J]. Magazine of Concrete Research, 2008, 60(6): 455-467.
- [5] 杜进生. CFRP体外预应力混凝土梁的试验研究报告[R]. 北京交通大学, 2007年1月, 92 pp.
- [5] Du Jinsheng. Test of partially prestressed concrete beams with CFRP external tendons[R]. Beijing Jiao Tong University, January 2007, 92 pp. (in Chinese)
- [6] Ghallab A and Beeby A W. Factors affecting the external prestressing stress in externally strengthened prestressed concrete beams[J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(5): 945-957.
- [7] Du J S, Lu W L, Ji W Y. Discussion of stress in the external tendons at ultimate[J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(1): 149-154.
- [8] AASHTO. LRFD Bridge Design Specification[S]. American Association of State Highway and Transportation Officials, 1998, Washington D.C.
- [9] BSI. Structure Use of Concrete BS 8110 - Part 1: Code of practice for design and construction[S]. British Standards Institution, U.K, 1997.
- [10] Design of Concrete Structures (A23.3-94). Canadian Standards Association[S]. Rexdale, Ontario, Canada, 1994.
- [11] ACI COMMITTEE 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 2008.