

# 夹片式锚具锚垫板荷载传递试验介绍

## ——预应力锚固区安全探讨之七

裴 镛<sup>1</sup> 杨 志<sup>2</sup> 陈 茜<sup>1</sup> 曾 利<sup>3</sup>

(1 中国建筑科学研究院 北京 100013 2 国家建筑工程质量监督检验中心 北京 100013

3 杭州浙锚预应力有限公司 浙江富阳 311402)

**摘 要:**意大利米兰市“材料检验实验室”作为官方机构,完成了一项夹片式锚具铸造型锚垫板的荷载传递试验,以确认此项锚垫板用于混凝土结构的负荷能力及安全性。它依据的标准是欧洲标准ETAG 013《预应力结构后张成套组件》和它的“理解文件”(2007年12月发布)。欧洲28个成员国都执行这项标准,域外工程单位也多有采用。我国即将实施的新版锚具国家标准(GB/T 14370)与欧洲标准基本一致。这份试验报告对我国当前情况很有参考价值。在我国预应力行业中,多数从业人员对“荷载传递试验”还比较陌生,不久将会遇到这种试验的工作要求。本文按试验报告原件的章节对试验过程进行了综合梳理和说明,并补充了欧洲标准的相关要点,希望减少读者疑问。

**关键词:**荷载传递试验 锚垫板 混凝土棱柱体试件 预应力 锚具

**DOI:** 10.13211/j.cnki.pstech.2015.04.001

### 1 前言

国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》(GB/T 14370)已经完成修订报批工作,可望年内发布实施。与2007版相比,新版增加了“锚固区传力性能的要求和试验方法”。这一部分和欧洲标准中“荷载传递试验”基本相同。今后凡能符合新国标的锚垫板,也能满足欧洲标准的要求,这表明今后的锚垫板必须通过试验认可才能用于预应力结构工程,对中国新品升级和走向世界非常重要。国内预应力锚具生产单位、结构设计施工和监理单位,目前对这项标准要求还了解不多,新国标一旦发布实施,可能有许多单位和个人将探寻这项技术。

为了满足这种需要,《预应力技术》2015年第一期发表了《夹片式锚具荷载传递试验方法》——预应力锚固区安全探讨之六。该文以YJM15-19型锚具为例,介绍了能符合新版国标GB/T 14370的试验方法。

许多同志都想了解欧洲国家是如何执行欧洲标准的这项要求的,本文或可略供所求。意大利米兰市材料检验实验室的试验报告按欧洲标准ETAG 013进行试验,试验项目为其3种规格的锚

垫板,试验申请人为米兰市的ALGA S.P.A.。他们的工作严谨、正规、完整,值得我们借鉴。原试验报告为独立的3个文件,是对同一个系列三个规格锚垫板产品提出的认可文件,本文将其合并阐释。

试验报告中的符号定义和欧标、FIP及新版国标相同,具体规定如下:

$F_{pk}$ —预应力筋的特征极限抗拉力,  $F_{pk}=A_{pk} \times f_{pk}$

$F_u$ —荷载传递试验中的实测极限荷载

$A_s$ —钢筋总截面面积

$A_c$ —荷载传递混凝土试件的横截面面积

$f_{ck}$ —混凝土28天特征抗压强度

$f_{ck,o}$ —现场施加全部预应力时混凝土的最小特征抗压强度

$f_{cm,o}$ —现场施加全部预应力时混凝土的平均抗压强度

$f_{cm,e}$ —荷载传递试验中达到破坏时试块混凝土的平均抗压强度

$W$ —试件混凝土的裂缝宽度

$\varepsilon$ —试件混凝土的应变

$\Delta$ —位移传感器测量的位移值

$t$ —时间

## 2 试验目的

Alga的MG12T15、MG 19T15及MG31T15三个规格的锚垫板,申请进行荷载传递认可试验。

## 3 概况

本项荷载传递试验是在米兰市官方专职人员监督之下,在Alga试验室完成的。试验之前,首先在监督人员在场的情况下,随机抽取了锚垫板等试验用样品。混凝土棱柱体试件(以下简称试件)的浇灌制作和试验全过程,也都有官方的监督,三份试验报告由官方技术负责人P.Colombi教授提出。

## 4 文件依据

(1) 欧洲标准ETAG 013《预应力结构后张成套组件》

(2) ETAG 013指南的理解文件(2007年12月)

(3) 文件LPM/PT.01.001:《后张成套组件初始型式试验的评估》

(4) 文件LPM/PT.02.001:《ALGA T15后张成套组件按ETAG 013指南完成的初始型式试验说明》

(5) 文件ALGA 4287-PT5-026:《荷载传至结构MG 12T15、MG 19T15和MG 31T15》(共三篇)

后三份文件表明,在本次试验之前,三种规格的锚垫板已在Alga完成了厂内型式试验。

## 5 试件

试件的内装锚具组件及抗裂钢筋均由Alga按文件规定进行组装。三个试件的尺寸分别为:385mm×385mm×770mm、440mm×440mm×900mm及570mm×570mm×1200mm,尺寸不大。螺旋筋、孔道及抗裂钢筋的数据均列于表1。

螺旋筋的用钢量较大,体积配筋率高达 $\rho_v=(5.5\sim 5.9)\%$ ,比我国常用的4%~4.5%高很多,它的钢筋直径为 $\phi 18\sim \phi 22$ ,比我国的粗1~2个规格。这一因素能明显地提高试件的承载力。三个试件的箍筋用量为(60.4~65.6)

表1 荷载传递混凝土棱柱体试件参数表

锚垫板规格	螺旋筋参数	孔道直径 (mm)	混凝土试件尺寸 (mm)	箍筋尺寸及用量 (mm)	纵向钢筋尺寸及用量 (mm)	混凝土试件	
						浇灌日期 (年.月.日)	压力试块 数量
MG 12T15	钢筋 $\phi 18$	$\phi 90$	385×385×770 体积 $V_c=0.1141\text{m}^3$	$\phi 8$	不详	2007.2.27	20块 试压龄期 2、4、7天
	圆圈 $\phi 310$			8-375×375			
	螺距 60 圈数 6 $\rho_v=5.5\%$			5-272×272 Q=6.9kg Q/ $V_c=60.4$			
MG 19T15	钢筋 $\phi 20$	$\phi 90$	440×440×900 体积 $V_c=0.1742\text{m}^3$	$\phi 10$	4- $\phi 10$	2007.6.12	20块 试压龄期 2、6、8天
	圆圈 $\phi 370$			2-420×420	4- $\phi 8$		
	螺距 60 圈数 7 $\rho_v=5.7\%$			$\phi 8$ 8-420×420 7-300×300 Q=10.7kg Q/ $V_c=61.4$	$A_s=0.0027A_c$		
MG 31T15	钢筋 $\phi 22$	$\phi 125$	570×570×1200 体积 $V_c=0.3899\text{m}^3$	$\phi 10$	12- $\phi 8$	2008.12.4	15块 试压龄期 5、6、7、 8、11、18天
	圆圈 $\phi 430$			2-550×550	4- $\phi 10$		
	螺距 60 圈数 8 $\rho_v=5.9\%$			$\phi 8$ 13-550×550 Q=25.6kg Q/ $V_c=65.6$	$A_s=0.0028A_c$		

$\text{kg/m}^3$ ，均超出ETAG 013规定的 $50\text{kg/m}^3$ 限量（此处 $\text{m}^3$ 指的是试件混凝土体积）。纵向钢筋总截面面积 $A_s$ 没有超过欧标 $A_s \leq 0.003A_c$ 的规定（此处 $A_c$ 为试件横截面面积）。

三个试件制作的时间虽有夏冬之分，但混凝土的配合比相同，如表2所示。混凝土中可能还掺入了外加剂（减水剂、早强剂等），试验报告原件未示出。混凝土的设计标号为C30/37（圆柱体强度/立方体强度）。试件采用木模平卧式浇灌混凝土，如图1所示。同时制作了15~20块压力试块，尺寸为 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 的立方体，随试件同条件养护。试验前多次少量试压试块以监控混凝土强度。

表2 试件的混凝土的配合比

材料	用量
骨料规格(0~3)mm	$640\text{ kg/m}^3$
骨料规格(3~7)mm	$550\text{ kg/m}^3$
骨料规格(7~15)mm	$640\text{ kg/m}^3$
水泥(52.5级)	$420\text{ kg/m}^3$
水	$(86 \sim 110)\text{ l/m}^3$

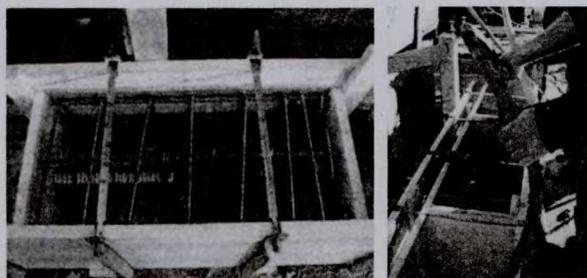


图1 锚具组件位置及混凝土浇灌情形

## 6 试验设备

Alga试验室的压力试验设备，由一个试验机架和一台 $17000\text{kN}$ 千斤顶构成。用一台PTL 50/4型油泵形成荷载控制油路进行加荷。千斤顶的荷载标定由米兰市官方完成。

试验前由Alga专人涂刷试件表面、粘贴位移传感器用的测点附件，并将试件安装到试验机架中，使试件稳座在一个干砂找平层上，以确保受力均匀。如图2所示。从图中可见，试件的四个侧面均安装有位移传感器，以采集循环荷载时的应变值。位移传感器须与应变测试分析系统（例如中国的DH 3821静态型可供参考）及电脑相

连。试验用的位移传感器都有合格标定证书。三个试件共12个侧面的上半部的布置如图3所示。

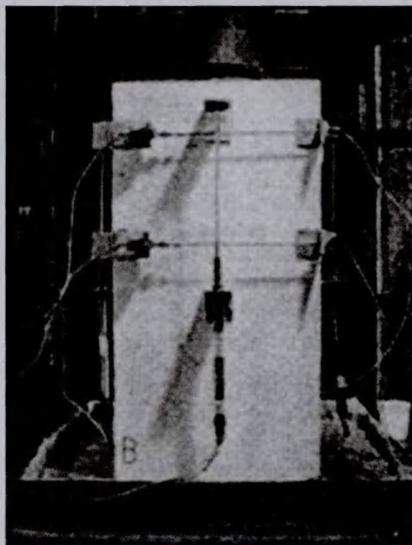


图2 试件在试验机框架中就位的情形

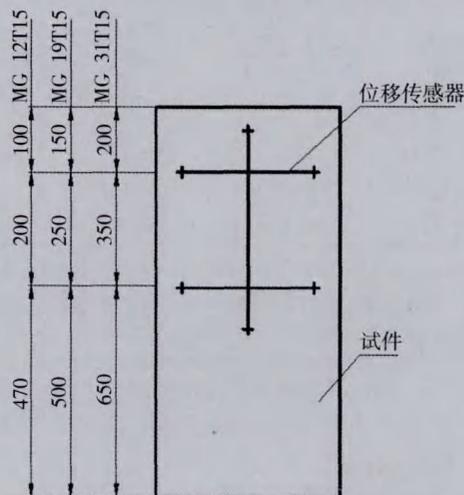


图3 位移传感器布置示意图

测量裂缝宽度的仪器为“裂缝显微镜”，它是手持式的，由试验人员在规定的荷载点时，在一条选中的主要裂缝指定位置处测量并记录下来（中国的HC-CK 102型裂缝测宽仪可资参考）。

## 7 试验过程

### (1) 开始试验的时刻

国内外所有标准都规定试件混凝土必须在规定强度以下进行试验。欧洲标准ETAG 013（2002年6月）及EN 13391（2004年3月）规定，在最后的破坏试验时，试件混凝土的平均抗压强度 $f_{cm,e}$ 应满足式（1）。

$$f_{cm,e} \leq f_{cm,o} \quad (1)$$

以往, 预应力工程经常提前进行预应力张拉, 所以FIP、欧标、美标都规定混凝土尚未达到设计标号时即要求进行荷载传递试验。这就造成试验时一旦试件的强度超过规定值, 试件只能作废的尴尬局面。

2007年12月及2008年7月, ETAG 013两次发布“理解文件”, 试验时试件强度可在达到设计标号之上再放宽3MPa (以圆柱体强度计), 即满足式(2):

$$f_{cm,e} \leq f_{cm,o} + 3\text{MPa} \quad (2)$$

而且欧标规定的混凝土平均强度高于特征强度的幅度为8MPa, 比FIP规定的5MPa更大, 即满足式(3):

$$f_{cm,o} = f_{ck,o} + 8\text{MPa} \quad (3)$$

这就给试验操作人员提供了较大空间, 试件一般不会超过规定强度。中国新版国标按中国规定的两项强度幅宽再加4MPa作为试件强度的限值, 也为试验提供了方便, 即满足式(4), 式中强度以立方体强度计。

$$f_{cm,e} \leq 1.15 f_{ck,o} + 4\text{MPa} \quad (4)$$

三个试件的混凝土强度实测值及有关规定如表3所示。试验时三个试件的混凝土龄期分别是7天、8天和18天, 强度均符合规定。其中, MG 19T15的强度超过ETAG 013的标准 (40.86 MPa > 38MPa), 但未超过“理解文件”再加3MPa (共41MPa) 的规定。

表3 混凝土试件的强度规定及实测值

锚垫板规格	试验日期 (年 月 日)	设计 标号 $f_{ck}$	混凝土强度 (MPa)				
			施加预应力时		荷载传递试验时		
			特征强度 $f_{ck,o}$	平均强度 $f_{cm,o}$	平均强度限值 $f_{cm,e} \leq$	立方试块实测 强度平均值 $R_{cm,e}$	换算成圆柱体 实测平均值 $f_{cm,e}$
MG 12T15	2007.3.6	C30/37 <sup>[1]</sup>	30	$f_{ck,o} + 8^{[2]} = 38$	$f_{cm,o} + 3^{[3]} = 41$	42.78	35.5 <sup>[4]</sup> < 38 < 41可
MG 19T15	2007.6.20	C30/37	30	$f_{ck,o} + 8 = 38$	$f_{cm,o} + 3 = 41$	49.23	40.86 > 38 < 41可
MG 31T15	2008.12.22	C30/37	30	$f_{ck,o} + 8 = 38$	$f_{cm,o} + 3 = 41$	43.18	35.84 < 38 < 41可

注: [1] 式中30为混凝土圆柱体强度, 37为立方体强度; 对应值为欧洲模式规范规定;

[2] 欧洲标准ETAG 013及EN 13391均规定  $f_{ck,o} = f_{cm,o} - 8\text{MPa}$ ;

FIP1993“建议”规定  $f_{ck,o} = f_{cm,o} - 5\text{MPa}$ ;

中国标准《混凝土强度检验评定标准》(GB/T 50107-2010)对C60以下混凝土规定  $f_{cm,o} = 1.15 f_{ck,o}$ ;

[3] ETAG 013的理解文件(2007年12月)允许试验时混凝土试件强度  $f_{cm,e} \leq f_{cm,o} + 3\text{MPa}$  (以圆柱体强度计);  
中国新版GB/T 14370允许  $f_{cm,e} \leq 1.15 f_{ck,o} + 4\text{MPa}$  (以立方体强度计)。

## (2) 加荷

荷载数量是根据各锚具适用的预应力筋特征抗拉力  $F_{pk}$  决定的。Alga的15系列锚具能适用于  $\phi 15.24\text{mm}$  及  $\phi 15.7\text{mm}$  的两种钢绞线, 试验中选取抗拉力较大的  $\phi 15.7\text{mm}$  的  $F_{pk}$  值。当特征强度为1860MPa级时, 单根钢绞线的特征极限抗拉力为279kN。三种试件的钢绞线根数分别为12根、19根及31根, 整束钢绞线的  $F_{pk}$  分别为3348kN、5301kN及8649kN。

加荷分两阶段, 首先分4级加荷:  $0.2F_{pk}$ 、 $0.4F_{pk}$ 、 $0.6F_{pk}$  及  $0.8F_{pk}$ 。 $0.8F_{pk}$  为最大荷载 (上限)。然后进行第2加荷阶段, 即循环荷载阶段: 自  $0.8F_{pk}$  慢速直降至  $0.12F_{pk}$ , 此为最小荷载

(下限)。稍停, 再直升至  $0.8F_{pk}$ 。至此完成第1循环。如此共进行  $n$  次循环,  $n \geq 10$  次, 直至裂缝宽度增量及应变增量趋于稳定为止。稳定的判别标准, 欧洲标准有规定 (后面将论及)。最后, 将试件加荷到破坏。加荷程序如图4所示。

Alga三个试件的加荷都编成程序控制, 图5为仪器绘出的MG 12T15的荷载-试件试验记录, 全程不超过1.5小时。根据我们的经验, 因为裂缝测量是人工操作, 进程中或需各种观察分析和讨论, 试验中有可能需要持荷, 所以用手动加荷控制比较方便。

## (3) 测量

测量, 即试验值的采集。按图4的负荷点1、

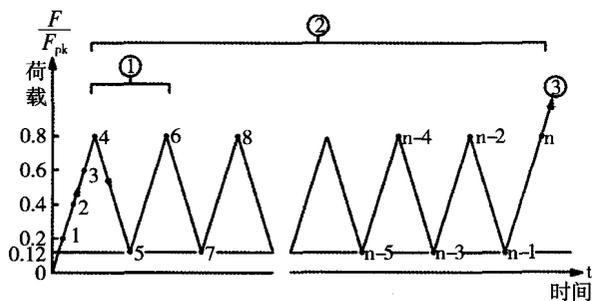


图4 荷载传递试验加荷程序

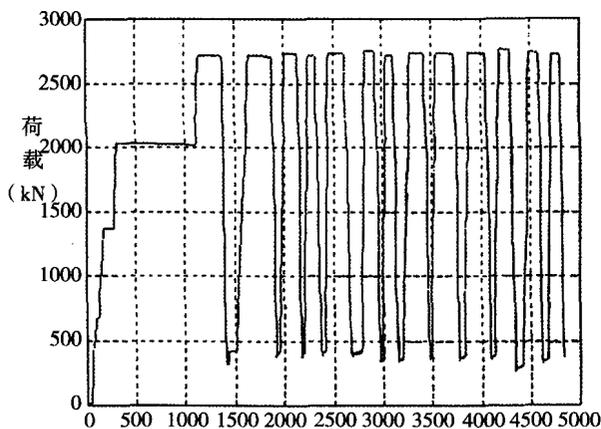


图5 MG 12T15试件的加荷程序记录

2、3…… $n-1$ 、 $n$ 时采集裂缝宽度值及应变值；最后的破坏荷载值也必须记录。

试件裂缝及破坏形态应予拍照、记录、描述。

测量记录是认可论述和结论的依据。

## 8 试验结果

### (1) 裂缝宽度及稳定性的规定

裂缝的形成、宽度及扩展，在欧洲标准中非常重要，裂缝宽度值的规定如下：

a) 在荷载第1次达到最大荷载 $0.8F_{pk}$ 时（即图4中的荷载点4），裂缝宽度应满足 $W \leq 0.15\text{mm}$ ；

b) 在荷载最后一次达到最小荷载 $0.12F_{pk}$ 时（图4之 $n-1$ 点），裂缝宽度 $W \leq 0.15\text{mm}$ ；

c) 在最后一次达到最大荷载 $0.8F_{pk}$ 时（图4之 $n$ 点），裂缝宽度应满足 $W \leq 0.25\text{mm}$ 。

裂缝宽度在循环荷载期间的扩展速度必须减慢，欧标对其稳定性要求为：裂缝宽度满足式(5)时即可认为裂缝扩展已经稳定。

$$W_n - W_{n-4} \leq \frac{1}{3}(W_{n-4} - W_0) \quad (5)$$

式中 $W$ 的下标为图4之荷载点。

### (2) 裂缝测量

测量裂缝宽度的“裂缝显微镜”为手持式仪器，在每个荷载点时进行人工测量，并将读数在纸质记录表格中记载下来。较新型的裂缝测宽仪可将读数保存到内存SD卡上，它也可以拍照并保存图像。

MG 31T15试件的裂缝记录如表4所示。三个试件的裂缝宽度实测值没有超过欧洲标准的规定，宽度增量都符合稳定性要求（MG 12T15试件未示出实测值），详见表4。

通常在第3级荷载时可能出现第1条裂缝。

表4 裂缝宽度记录表（试件：MG 31T15）

测量次数 (按加荷程序)	荷载循环次数	荷载 (kN)	裂缝宽度 (mm) (A侧面)
0	1	0	无可见裂缝
1	1	1729.8	无可见裂缝
2	1	3459.6	无可见裂缝
3	1	5189.4	-
4	1	6919.2	0.07
5	1	1037.88	-
6	1	6919.2	0.08
7	2	1037.88	-
8	2	6919.1	0.09
9	3	1037.88	-
10	3	6919.1	0.10
11	4	1037.88	-
12	4	6919.2	0.09
13	5	1037.88	-
14	5	6919.2	0.10
15	6	1037.88	-
16	6	6919.2	0.10
17	7	1037.88	-
18	7	6919.2	0.10
19	8	1037.88	-
20	8	6919.1	0.10
21	9	1037.88	-
22	9	6919.2	0.10
23	10	1037.88	-
24	10	6919.2	0.10
25	11	1037.88	-
26	11	6919.2	0.10
27	12	1037.88	-
28	12	6919.2	0.10
29	13	1037.88	-
30	13	6919.2	0.10
31	14	1037.88	0.06
32	14	6919.2	0.10

表5 混凝土试件的裂缝及破坏荷载

锚垫板规格	荷载 (预应力筋板 限抗拉力) $F_{pk}$ (kN)	裂缝宽度 $W$ (mm)			循环荷载上限 时裂缝的稳定 性要求 ( $W_n - W_{n-4} \leq$ $\frac{1}{3}(W_n - 4 - W_0)$ )	破坏荷载 $F_u$ (kN)		破坏 情况
		第1次0.8 $F_{pk}$ 时限值: $\leq 0.15$	最后循环 0.12 $F_{pk}$ 时 限值: $\leq 0.15$	最后循环 0.8 $F_{pk}$ 时 限值: $\leq 0.25$		要求: $F_u \geq 1.1F_{pk} \frac{f_{cm,e}}{f_{cm,o}}$	实测值	
MG 12T15	3348	-	-	-	-	3440.51	4106 可	锚垫板未开裂
GM 19T15	5301	0.12	0.10	0.20	$0 < 0.08/3$	6270	6388 可	锚垫板未开裂稍下沉
MG 31T15	8649	0.07	0.06	0.10	$0 < 0.03/3$	8973.34	10454 可	锚垫板未开裂

(3) 应变稳定性的规定

欧标规定试件受循环荷载时, 4个侧面的纵向和横向应变增量应趋于变小, 当满足式(6)时即可认为应变已经稳定:

$$\epsilon_n - \epsilon_{n-4} \leq \frac{1}{3}(\epsilon_{n-4} - \epsilon_0) \quad (6)$$

式中 $\epsilon$ 的下标为图4之荷载点。试验中用位移传感器测量其标距点的位移, 标距长度无严格规定, 约为试件边长的(40~80)%, 用位移差值判定位移的稳定性, 可与应变判定相同。欧标对应变无绝对值规定。

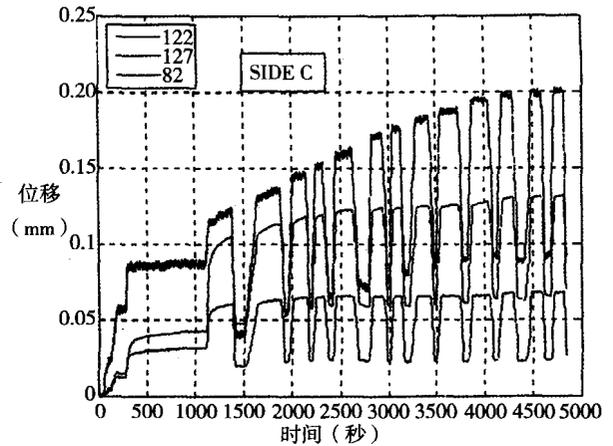


图6 MG 12T15试件C侧面3个位移传感器的实测记录

表6 混凝土试件的应变 ( $\epsilon_t$ 、 $\epsilon_v$ ) 试验结果

锚垫板规格	荷载循环 次数及判定	位移传感器读数 $\Delta^{[1]}$ (mm)					
		C侧面 <sup>[2]</sup>			D侧面		
		横向, 上	横向, 下	竖向	横向, 上	横向, 下	竖向
MG 12T15	1	0.1072	0.0586	0.1248	0.1190	0.0749	0.1486
	10	0.1272	0.0663	0.1888	0.1482	0.0863	0.1858
	14	0.1315	0.0685	0.2023	0.1539	0.0873	0.1877
	判定 <sup>[3]</sup>	可	可	可	可	可	可
MG 19T15		B侧面			C侧面		
		横向, 上	横向, 下	竖向	横向, 上	横向, 下	竖向
	1	0.3861	0.2168	0.2180	0.2409	0.3407	0.2218
	10	0.5680	0.4348	0.2390	0.4112	0.4278	0.2279
	14	0.5997	0.4712	0.2415	0.4401	0.4473	0.2229
	判定	可	可	可	可	可	可
MG 31T15		A侧面			D侧面		
		横向, 上	横向, 下	竖向	横向, 上	横向, 下	竖向
	1	0.2005	0.1050	0.3201	0.2178	0.1012	0.4634
	10	0.2983	0.1400	0.3217	0.2858	0.1372	0.4680
	14	0.3214	0.1429	0.3222	0.2955	0.1474	0.4674
	判定	可	可	可	可	可	可

注: [1]试验中位移传感器的标距固定, 可以用实测位移 ( $\Delta$ ) 进行差值比较, 以判定应变 ( $\epsilon$ ) 的稳定性;

[2]ETAG 013规定, 可在试件4个侧面中任选2个侧面的测量值进行判定;

[3]按ETAG 013的判别式此处应为:  $\epsilon_{14} - \epsilon_{10} \leq \frac{1}{3}(\epsilon_{10} - \epsilon_1)$

- Structures, 2011, 20(5): 055001.
- [35] 刘秀成, 吴斌, 何存富, et al. 兆赫兹磁致伸缩超声导波管道检测系统的研制[J]. 失效分析与预防, 2013, 8(1): 1-5.
- [36] 钟恒. 基于磁致伸缩导波的桥梁索锚固系统无损检测试验[D]. 重庆交通大学, 2013.
- [37] 林子阳, 游棉州, 李春早, et al. 桥梁索杆内部锈蚀断丝无损检测技术运用[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2013, (9).
- [38] 段鸿杰, 林鸣, 李文波. 基于磁致伸缩技术的吊杆检测应用研究[J]. 湖南交通科技, 2014, (1).
- [39] Zhang D, Zhou Z, Sun J, et al. A Magnetostrictive Guided-Wave Nondestructive Testing Method With Multifrequency Excitation Pulse Signal[J]. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 2014, 63(12): 3058-3066.
- [40] 武新军, 徐江, 沈功田. 非接触式磁致伸缩导波管道无损检测系统的研制[J]. 无损检测, 2010: 166-170.
- [41] 何存富, 黄垚, 刘增华. 小型超声导波管道检测系统的研究和开发[J]. 测控技术, 2008, 27(1): 33-35.
- [42] 陈福梁. 基于磁致伸缩效应的导波管道缺陷检测系统设计研究[D]. 浙江大学, 2014.
- [43] Kim Y Y, Kwon Y E. Review of Magnetostrictive Patch Transducers and Applications in Ultrasonic Nondestructive Testing of Waveguides[J]. Ultrasonics, 2015.
- [44] Kwon Y E, Kim H W, Kim Y Y. High-frequency lowest torsional wave mode ultrasonic inspection using a necked pipe waveguide unit[J]. Ultrasonics, 2015.
- [45] Kharrat M, Gaillet L. Non-destructive evaluation of anchorage zones by ultrasonics techniques[J]. Ultrasonics, 2015, 61: 52-61.
- [46] 丁秀莉, 武新军, 孙鹏飞. 开放磁路式磁致伸缩导波传感器原理的实验研究[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(12).
- [47] Xu J, Wu X, Zhang Y, et al. Research on one-direction receiving method of guided waves based on magnetostrictive effect[C]. 2015 International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC-15), 2015.
- [48] 孔东颖. 管道磁致伸缩导波检测周向传感方法研究[D]. 华中科技大学, 2013.
- [49] Kim H W, Lee J K, Kim Y Y. Circumferential phased array of shear-horizontal wave magnetostrictive patch transducers for pipe inspection[J]. Ultrasonics, 2013, 53(2): 423-431.
- [50] 刘秀成, 吴斌, 何存富. 磁致伸缩与磁弹一体化传感器的研制[J]. 机械工程学报, 2013, 49(22): 46-52.
- [51] 刘秀成. 磁致伸缩与磁弹一体化传感技术及其钢索检测应用研究[D]. 北京工业大学, 2013.

### (上接第8页)

每个试件有A、B、C、D 4个侧面。每个侧面上的二横一竖传感器, 在应变分析系统上的连线编成一组。图6为MG 12T15试件C侧面上的3个仪器的实测记录, 图中时间坐标与图4的荷载程序同步。Alga的三份试验报告共给出了12幅位移图。

按照欧标的要求, 试验中只需n次循环荷载上限( $0.8F_{pk}$ )时的位移值( $\Delta$ ), 就可以做出应变( $\varepsilon$ )稳定性的判定。三个试件的应变( $\varepsilon_i$ 、 $\varepsilon_v$ )试验结果列于表6, 完全满足要求。

#### (4) 破坏荷载

试件经n次循环荷载后, 应缓慢增加荷载, 直至破坏。欧标要求试件的破坏荷载( $F_u$ )不应小于预应力筋特征抗拉力的1.1倍, 并乘以修正系数, 即满足式(7):

$$F_u \geq 1.1 F_{pk} \frac{f_{cm,e}}{f_{cm,o}} \quad (7)$$

式中的 $f_{cm,e}/f_{cm,o}$ 为修正系数, 它考虑了试验时试

件混凝土的实际强度影响, 此系数在数值1左右小幅度摆动。

三个试件的实测破坏值列于表5, 试件破坏后, 从照片可见锚垫板没有开裂破损。

## 9 结论

(1) 3个试件的破坏荷载都高于要求限值(见表5), 锚垫板没有断裂;

(2) 在3个荷载控制点时, 3个试件的裂缝宽度都未超过裂缝宽度限值(见表5): 荷载上限第一次达到 $0.08 F_{pk}$ 时和荷载下限最后一次达到 $0.12 F_{pk}$ 时, 裂缝宽度都没有超过 $0.15\text{mm}$ ; 荷载上限最后一次达到 $0.8 F_{pk}$ 时, 裂缝宽度没有超过 $0.25\text{mm}$ ;

(3) 裂缝宽度的读数, 直到循环荷载的最后阶段都是稳定的;

(4) 混凝土试件的横向和竖向变形读数, 直到循环荷载之最后阶段都是稳定的。