

文章编号:1673-2049(2015)01-0035-07

铝合金配筋新型混凝土梁试验研究

邢国华¹, 牛荻涛², 何志兵¹, 刘伯权¹

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:对6根铝合金配筋新型混凝土梁试件进行了单调静载试验,研究该类新型混凝土梁的破坏机理,分析铝合金配筋混凝土梁的破坏过程、荷载-跨中挠度曲线以及纵筋应变和弯曲裂缝等的变化规律。研究表明:铝合金配筋新型混凝土梁发生弯曲破坏和粘结破坏2种典型模式,其中受弯破坏模式表现为铝合金纵筋拉断失效或受压区混凝土压溃失效,粘结破坏模式主要由“拱机理”导致,表现为试件在支座处锚固破坏或斜截面混凝土剪压破坏;该类新型混凝土梁的极限荷载和名义屈服荷载非常接近,二者之比均小于1.15;发生弯曲破坏的铝合金配筋混凝土梁试件的荷载-跨中挠度曲线可分为弹性阶段、带裂缝工作阶段和破坏失效阶段。

关键词:混凝土梁;铝合金;受弯性能;承载力;拱机理;破坏模式;静载试验

中图分类号:TU375.4 **文献标志码:**A

Experiment Study on New Type Concrete Beams Reinforced with Aluminum Alloy Bars

XING Guo-hua¹, NIU Di-tao², HE Zhi-bing¹, LIU Bo-quan¹

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: According to the experiment investigation on six new type concrete beams reinforced with aluminum alloy bars under monotonic static loading, the failure mechanism of new type concrete beams was researched. The failure process, load-deflection curve, longitudinal strain distribution and flexural crack development were analyzed. The study results indicate that there are two typical failure patterns of new type concrete beams reinforced with aluminum alloy bars: flexural failure and bond failure. The flexural failure pattern always occurs with tensile rupture of aluminum alloy bars or crushing failure of concrete. Owing to the “arch action”, the bond failure pattern always occurs with anchor failure of aluminum alloy bars at the supports or shear-compression failure of concrete in shear-compression zone. Moreover, the ultimate load is quite near with the nominal yielding load of new type concrete beams reinforced with aluminum alloy bars, the average ratio between the ultimate loads and the nominal yielding loads is less than 1.15. In addition, the load-deflection curves of flexural failure specimen can be divided into three stages: elastic stage, crack stage and failure stage.

Key words: concrete beam; aluminum alloy; flexural behavior; bearing capacity; arch action; failure pattern; static experiment

收稿日期:2014-08-16

基金项目:国家自然科学基金项目(50725824);陕西省自然科学基金研究计划项目(2013JQ7023);

中国博士后科学基金项目(20110491651)

作者简介:邢国华(1983-),男,内蒙古呼和浩特人,副教授,工学博士,E-mail:guohuachd@yahoo.com。

0 引 言

混凝土结构是目前基础设施使用最广泛的结构形式,大量混凝土结构提前失效多数源于混凝土结构的耐久性不足。混凝土结构的耐久性问题已成为全球性可持续发展的重要问题,其中因钢筋锈蚀需要处理的工程具有普遍性。钢筋锈蚀是混凝土结构丧失原有承载力,难以达到预期使用寿命的主要因素^[1-8]。

铝合金具有自重小、比强度高等优点,与传统结构材料相比,铝合金材料的强度与钢材相近,密度约为钢材的 1/3,单位长度棒材综合造价约为钢材的 3/4,耐腐蚀性能^[9-10]显著优于钢材,因此,铝合金有望解决钢筋锈蚀引发的结构耐久性问题。此外,铝合金主要构成元素铝的矿藏储量远大于铁元素且易于加工,是当前较为理想的潜在结构材料之一。

目前,铝合金材料在土木工程中主要以铝合金金属结构的形式应用于桥梁工程、大跨度屋盖、玻璃幕墙、天文台支架等^[11-12],在混凝土结构中的应用主要限于作为设备管道穿越楼板,而在侵蚀环境下作为混凝土结构受力材料^[13]的应用十分有限,将铝合金作为混凝土梁纵筋及箍筋进而研究其受弯性能尚未见文献报道。

本文中笔者对 6 根铝合金配筋新型混凝土梁试件进行单调静载试验,研究该类新型混凝土梁的破坏机理,分析铝合金配筋混凝土梁的破坏过程、荷载-挠度曲线和纵筋应变、弯曲裂缝等的变化规律,对该类新型混凝土试件的受力性能进行初步研究,以探讨侵蚀环境下新型混凝土结构的受力性能。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

试验设计了 6 根相同截面尺寸的铝合金配筋混凝土简支梁试件,梁长度为 1 500 mm,支座间距为 1 200 mm,梁截面为矩形,宽度 $b=120$ mm,高度

$h=200$ mm。混凝土采用 C25 级商品混凝土,保护层厚度取 20 mm,新型混凝土梁的纵筋和箍筋均采用抗腐蚀性能好的中国产 6061-t6 铝合金,铝合金纵筋与箍筋在室外暴露后的对比见图 1。根据试验梁铝合金配筋率的不同分为 2 组:第 1 组试件的编号为 AC1~AC3,配筋率为 0.7%;第 2 组试件的编号为 AC4~AC6,配筋率为 1.4%。试件设计参数见表 1,典型试件 AC1,AC4 的尺寸及配筋如图 2 所示,其中 P 为荷载。

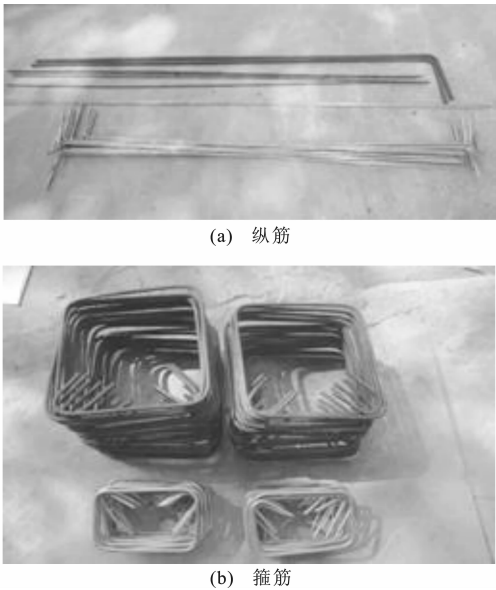


图 1 铝合金纵筋与箍筋在室外暴露后的对比
Fig.1 Comparisons Between Aluminum Alloy Longitudinal Bar and Stirrup Exposed Outdoors

试验时铝合金配筋的实测材料力学性能如表 2 所示,直径为 8 mm 的铝合金配筋应力-应变关系如图 3 所示。

1.2 加载方案及量测内容

试件采用三分点对称加载,纯弯段长度为 400 mm,由一台 20 t 油压千斤顶通过分配梁进行单调加载,试验加载装置如图 4 所示。

测试内容包括:跨中及支座处竖向位移、跨中截

表 1 试件设计参数
Tab.1 Design Parameters of Specimens

试件编号	宽度/mm	高度/mm	底部纵筋型号	顶部纵筋型号	跨中箍筋型号	剪压区箍筋型号	混凝土强度/MPa	设计分组
AC1	120	200	3 ϕ 8	2 ϕ 8	ϕ 6@130	ϕ 6@100	24.3	第 1 组
AC2	120	200	3 ϕ 8	2 ϕ 8	ϕ 6@130	ϕ 6@100	24.3	第 1 组
AC3	120	200	3 ϕ 8	2 ϕ 8	ϕ 6@130	ϕ 6@100	24.3	第 1 组
AC4	120	200	6 ϕ 8	2 ϕ 8	ϕ 6@130	ϕ 6@100	24.3	第 2 组
AC5	120	200	6 ϕ 8	2 ϕ 8	ϕ 6@130	ϕ 6@100	22.6	第 2 组
AC6	120	200	6 ϕ 8	2 ϕ 8	ϕ 6@130	ϕ 6@100	22.6	第 2 组

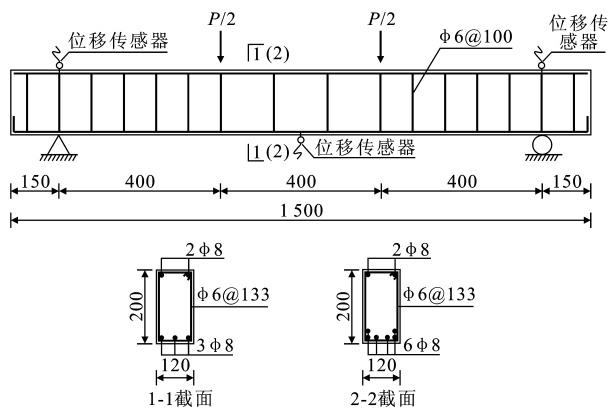


图 2 典型试件 AC1, AC4 的尺寸及配筋 (单位: mm)

Fig. 2 Dimensions and Bars of Typical Specimens AC1, AC4 (Unit: mm)

表 2 铝合金配筋力学性能

Tab. 2 Mechanical Properties of Aluminum Alloy Bars

配筋型号	$f_{0.2}$ /MPa	$\epsilon_{0.2}/10^{-3}$	f_u /MPa	$\epsilon_u/10^{-2}$	E_s /MPa
φ6	314.2	4.640	344.1	2.835 0	67 711
φ8	362.1	5.302	378.9	2.052 9	68 292

注: $f_{0.2}$ 为名义屈服强度^[14]; f_u 为极限强度; E_s 为弹性模量; $\epsilon_{0.2}$ 为名义屈服应变; ϵ_u 为极限屈服应变。

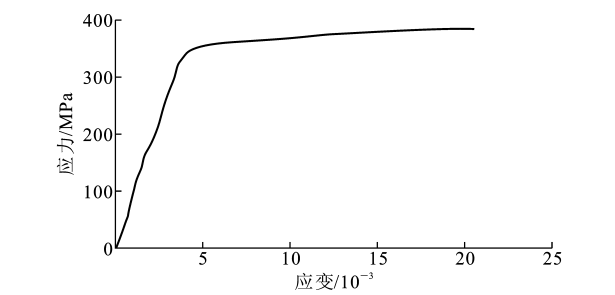


图 3 铝合金配筋应力-应变关系

Fig. 3 Stress-strain Curve of Aluminum Alloy Bar

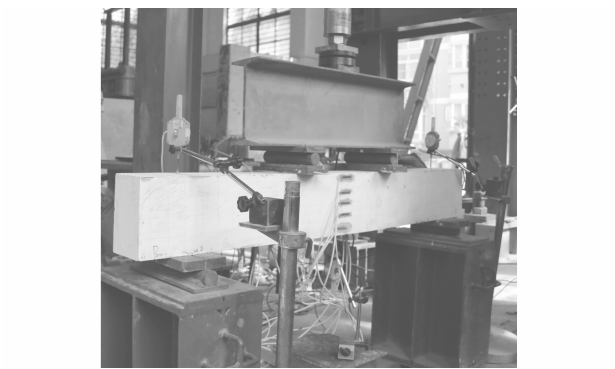


图 4 试验加载装置

Fig. 4 Experiment Loading Setup

面混凝土上下边缘及沿截面高度均匀分布处的应变、铝合金纵筋及箍筋的应变。测试数据由自动数据采集系统采集记录,人工记录开裂荷载、特征荷载时的裂缝分布及裂缝宽度等内容。

2 试验现象及破坏模式

2.1 试验现象

本文试验共制作 2 组 6 根铝合金配筋新型混凝土梁试件,在单调静载作用下配筋率较小的试件 AC1~AC3 发生了受弯破坏,试件失效时受力纵筋先后被拉断;配筋率较大的试件 AC4 虽然发生了弯曲破坏,但是试件失效是由于受压区混凝土被压溃造成的,此时受拉纵筋的应变刚达到名义屈服应变 $\epsilon_{0.2}$;试件 AC5 由于光圆纵筋与混凝土界面在加载后期粘结失效发生滑移,纵筋合力通过其 90°弯钩作用于支座处的混凝土,导致支座处发生了端部锚固破坏;试件 AC6 的混凝土强度较低,虽然端部锚固区有裂缝产生,但是最终发生了斜截面剪压破坏。下面将以典型试件 AC2, AC4, AC6 为例,具体介绍试验情况。

2.1.1 试件 AC2

所有试件在正式加载前先进行了预加载,以确保加载设备、测试装置等正常工作。当荷载为 2 kN 时,新型混凝土梁纯弯段底部出现第 1 条受弯裂缝,裂缝宽度约为 0.02 mm,肉眼可见;随着荷载的增加,新裂缝陆续产生,已有裂缝不断向上延伸且裂缝宽度逐渐增大,当荷载为 12 kN 时,受弯裂缝宽度最大可达到 0.10 mm;当荷载为 28 kN 时,纯弯段受弯裂缝基本出齐,裂缝间距为 70~100 mm,已有裂缝缓慢向上发展且宽度不断增大,最大裂缝宽度可达到 0.26 mm;此后,随着荷载的增加,裂缝宽度显著增大。当荷载为 46 kN 时,最大裂缝宽度为 0.56 mm,并进入不稳定发展阶段;混凝土裂缝不断扩展,当加载至 52 kN 时,荷载不再增加而梁的跨中挠度急剧增大,伴随着“砰”的一声巨响,受拉铝合金配筋被拉断,继而受压区混凝土被压溃,试件发生破坏。试件 AC2 最终破坏形态如图 5 所示。



图 5 试件 AC2 最终破坏形态

Fig. 5 Final Failure Mode of Specimen AC2

2.1.2 试件 AC4

当荷载为 2 kN 时,梁底部开裂,出现微细裂缝,裂缝宽度为 0.02 mm,肉眼可见;随着荷载的增

加,新裂缝陆续产生,已有裂缝不断向上延伸,当荷载为 16 kN 时,受弯裂缝宽度最大可达到 0.10 mm;当荷载为 36 kN 时,纯弯段受弯裂缝基本出齐,裂缝间距为 50~80 mm,已有裂缝缓慢向上发展且裂缝宽度不断增大,最大裂缝宽度可达到 0.22 mm;随着荷载继续增加,受弯裂缝宽度显著增大,当荷载为 38 kN 时,剪压区出现斜裂缝,裂缝宽度为 0.02 mm;继续增大荷载,陆续有少量斜裂缝产生,从支座向加载点方向缓慢发展,此时受弯裂缝的宽度持续增大并向上发展;当加载为 88 kN 时,伴随着“砰”的一声响,受压区混凝土被压溃,试件破坏,此时裂缝宽度可达到 0.50 mm。试件 AC4 最终破坏形态如图 6 所示。

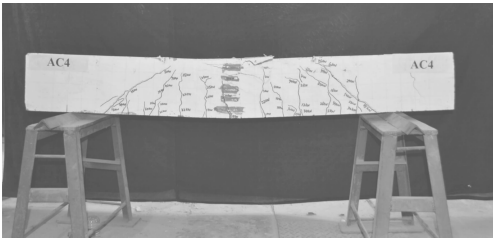


图 6 试件 AC4 最终破坏形态

Fig. 6 Final Failure Mode of Specimen AC4

2.1.3 试件 AC6

当荷载为 2 kN 时,梁底部开裂,出现微细裂缝,裂缝宽度为 0.02 mm;随着荷载的增加,新裂缝陆续产生,已有裂缝不断向上延伸,当荷载为 22 kN 时,出现贯通裂缝,受弯裂缝宽度最大可达到 0.10 mm;当荷载为 36 kN 时,纯弯段受弯裂缝基本出齐,裂缝间距为 50~70 mm,已有裂缝缓慢向上发展且裂缝宽度不断增大,最大裂缝宽度可达到 0.18 mm;随着荷载继续增加,受弯裂缝宽度显著增大,当荷载为 38 kN 时,剪压区出现宽度为 0.02 mm 的斜裂缝,受弯裂缝宽度为 0.20 mm;继续增大荷载,陆续有少量斜裂缝产生,从支座向加载点方向缓慢发展,尚未形成主斜裂缝,此时受弯裂缝的宽度持续增大并向上发展,当荷载为 78 kN 时,受弯裂缝宽度可达到 0.60 mm,此时斜裂缝宽度约为 0.06 mm;当加载至 86 kN 时,剪压区斜裂缝迅速贯通且形成主斜裂缝,铝合金箍筋已清晰可见,部分混凝土沿斜裂缝方向剥落,试件破坏。试件 AC6 最终破坏形态如图 7 所示。

2.2 破坏模式

光圆铝合金配筋混凝土梁的受力性能受配筋率、纵筋表面形式、混凝土强度等级、配箍率等因素



图 7 试件 AC6 最终破坏形态

Fig. 7 Final Failure Mode of Specimen AC6

的影响,会出现弯曲破坏和粘结破坏 2 种模式。对于剪跨比为 2~3 之间的普通钢筋混凝土梁,其受力性能受“梁机理”和“拱机理”共同作用。粘结破坏往往是“拱机理”居于主导地位,将会发生端部锚固破坏(图 8)和剪压破坏(图 7),可通过提高混凝土强度等级,纵筋表面处理,增大截面尺寸,增加锚固长度及配箍率等予以避免,此处不再赘述。

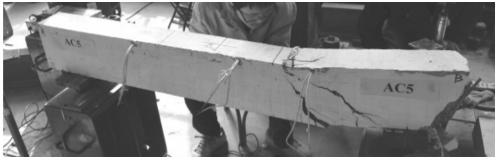


图 8 试件 AC5 最终破坏形态

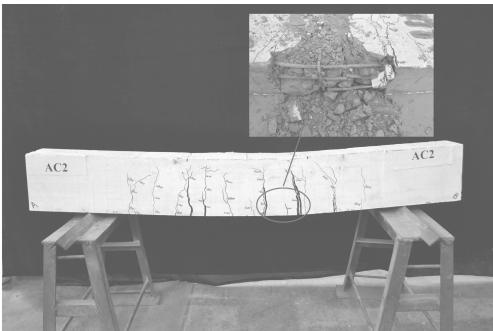
Fig. 8 Final Failure Mode of Specimen AC5

本文中重点对发生弯曲破坏的梁试件进行分析,通过宏观试验现象结合试件模式取样结果可知,新型混凝土梁受弯破坏模式可进一步分为纵筋拉断失效[图 9(a)]和混凝土压溃失效[图 9(b)]2 种类型。纵筋拉断失效发生于配筋率较小的铝合金梁试件,由于铝合金材性的特点,受拉应力接近或达到名义屈服强度后,随着荷载的少量增大,铝合金应变急剧增加,导致裂缝宽度显著增大,从而最终导致试件破坏;混凝土压溃失效类似于适筋梁的破坏,但是又有所区别。适筋梁^[15]达到屈服阶段后荷载仍可进一步增大至极限荷载,裂缝发展趋于稳定并逐渐贯通,而铝合金混凝土梁达到名义屈服强度后,荷载迅速达到极限荷载,裂缝宽度急剧增大,跨中挠度同时增长较快。

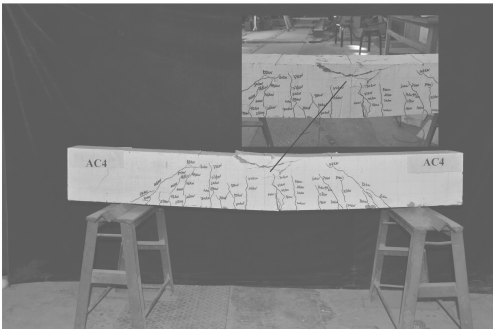
3 试验结果分析

3.1 荷载-跨中挠度曲线

试件的荷载-跨中挠度曲线如图 10 所示,其主要试验结果见表 3。从图 10 和表 3 可以看出,铝合金配筋新型混凝土梁的极限荷载和名义屈服荷载非常接近,二者之比均小于 1.15,即该类新型混凝土



(a) 纵筋拉断失效



(b) 混凝土压溃失效

图 9 受弯破坏模式

Fig. 9 Flexural Failure Patterns

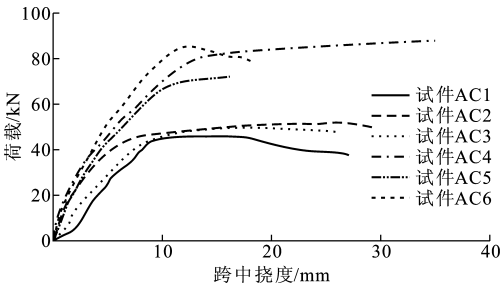


图 10 荷载-跨中挠度曲线

Fig. 10 Load-mid-span Deflection Curves

表 3 试件主要试验结果

Tab. 3 Main Experiment Results of Specimens

试件 编号	$P_{cr}/$ kN	$P_{0.2}/$ kN	P_u/kN	$\Delta_{0.2}/$ mm	$\Delta_u/$ mm	$P_u/P_{0.2}$	$\Delta_u/\Delta_{0.2}$	破坏 模式
AC1	2.0	44.0	46.0	8.93	26.9	1.05	3.01	F
AC2	2.0	46.0	52.0	8.06	29.6	1.13	3.67	F
AC3	2.0	45.0	50.0	9.31	25.9	1.11	2.78	F
AC4	2.0	78.0	88.0	12.4	35.2	1.13	2.84	F
AC5	3.0		72.0		16.2			B
AC6	2.0	82.0	86.0	10.5	18.1	1.05	1.72	FS

注:F表示发生受弯破坏;B表示发生端部锚固破坏;FS表示发生弯剪破坏; P_{cr} 为开裂荷载; $P_{0.2}$ 为名义屈服荷载,即混凝土梁受拉区铝合金应变达到 $\epsilon_{0.2}$ 时的荷载实测值; P_u 为极限荷载; $\Delta_{0.2}$ 为对应于 $P_{0.2}$ 时的实测跨中挠度; Δ_u 为试件破坏时的实测跨中挠度。

梁一旦受拉纵筋应变达到 $\epsilon_{0.2}$ 后,试件很快达到峰值荷载,其强度方面的安全储备有限,设计时应予以重视。对于发生受弯破坏的试件(AC1~AC4),破坏时的跨中挠度约为试件达到名义屈服荷载 $P_{0.2}$ 时跨中挠度的3倍左右,说明该类新型混凝土梁的变形能力较好,优于纤维增强复合材料(FRP)钢筋混凝土梁^[16]的变形能力,但是与钢筋混凝土梁^[15]的变形能力相比仍较差。对于大跨度混凝土梁桥结构,该类新型混凝土梁需要克服跨中变形较大的问题。

图 10 中发生弯曲破坏试件的荷载-跨中挠度曲线大致可分为 3 个阶段:弹性阶段、带裂缝工作阶段和破坏失效阶段。受拉区混凝土开裂前,试件处于弹性状态,荷载与挠度呈线性关系,此时试件刚度较大;随着荷载的增大,受拉区混凝土开裂并退出工作,拉力全部由铝合金承担,荷载-跨中挠度曲线出现了第 1 个拐点,这一阶段的荷载与挠度呈非线性关系,此时试件由于裂缝的不断出现而导致刚度显著减小;此后,随着荷载继续施加,荷载-跨中挠度曲线出现了第 2 个拐点,跨中挠度急剧增大,但是荷载增大十分有限,个别配筋率较小的试件在达到峰值荷载后,出现了下降段,这主要是由纵向受力铝合金先后被拉断造成的。

3.2 荷载-应变关系

图 11 为荷载作用下实测应变沿梁截面高度的分布情况。从图 11 可以看出:加载过程中,当荷载较小时,梁高度方向的应变基本保持较好的线性关系,梁截面应变基本符合平截面假定;随着荷载的增加,混凝土梁中性轴上升,荷载达到 24 kN 后,梁高度方向的应变不再呈线性关系,这主要由于加载后期,光圆纵筋与混凝土间粘结性能退化,产生了界面滑移,铝合金配筋的应变显著增大,此时平截面假定不再成立。

图 12 为新型混凝土梁跨中荷载-铝合金配筋应变曲线。从图 12 可以看出:荷载达到名义屈服强度后,梁纵筋应变迅速增大,1 级或 2 级荷载增量作用下试件发生破坏,跨中纵筋应变数据溢出,破坏时跨中铝合金配筋应变大约为 0.015。此外,当荷载达到 0.7 $P_{0.2}$ 时,所有试件纵筋应变均已大于 2.4×10^{-3} (普通钢筋的屈服应变)。可见,该类新型混凝土梁正常使用极限状态下的验算方法应与普通钢筋混凝土梁不同。

3.3 荷载与裂缝关系

图 13 为铝合金配筋新型混凝土梁弯曲裂缝宽度与荷载的关系曲线,其中,横坐标是以 2 为底的对

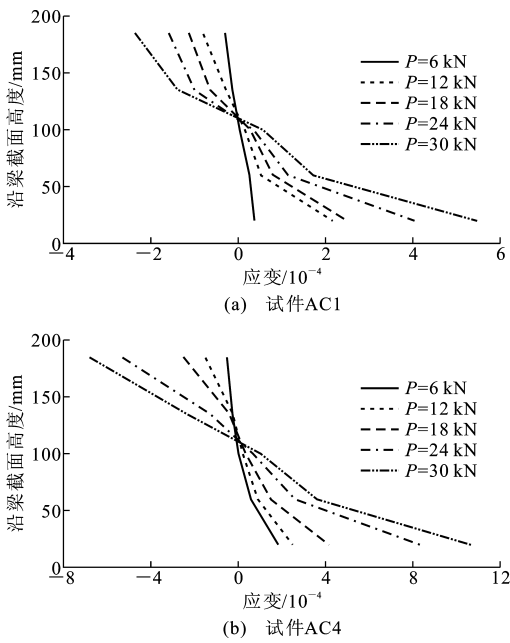


图 11 梁跨中截面应变分布

Fig. 11 Strain Distributions of Beam Section at Mid-span

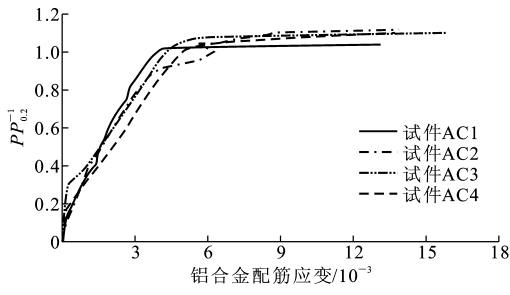


图 12 荷载-铝合金配筋应变曲线

Fig. 12 Load-aluminum Alloy Bar Strain Curves

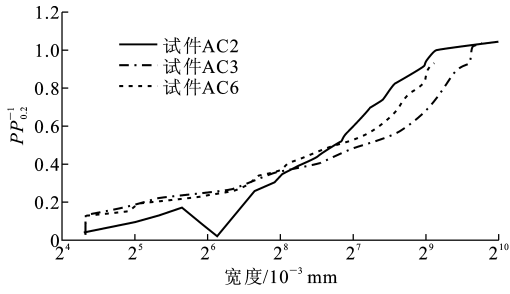


图 13 受弯裂缝宽度随荷载变化曲线

Fig. 13 Variation Curves of Flexural Crack Widths with Load

数函数形式表示。从图 11 可以看出: $0.4P_{0.2}$ 荷载作用下, 该类新型混凝土梁的受弯裂缝宽度已达到 0.2 mm ; $0.5P_{0.2}$ 荷载作用下, 该类新型混凝土梁的受弯裂缝宽度已达到 0.3 mm 。究其原因在于: 铝合金的弹性模量约为传统钢材的 $1/3$ 左右, 该类构件与传统钢筋混凝土构件相比, 相同荷载作用下铝

合金配筋构件变形较大, 裂缝较宽。此外, 光圆纵筋与混凝土界面粘结性能较差, 对此也产生一定的影响。综上所述, 铝合金配筋混凝土梁尚未达到名义屈服荷载时, 裂缝宽度早已超过现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[17] 中对最大裂缝宽度限值的规定, 该类新型混凝土梁的配筋设计应由正常使用极限状态控制。

4 结 语

(1) 铝合金配筋新型混凝土梁的受力性能受配筋率、纵筋表面形式、混凝土强度等级等因素的影响, 会出现弯曲破坏和粘结破坏 2 种模式, 其中受弯破坏模式可进一步分为铝合金纵筋拉断失效和受压区混凝土压溃失效 2 种类型。

(2) 铝合金配筋新型混凝土梁的极限荷载和名义屈服荷载非常接近, 二者之比均小于 1.15 , 即该类新型混凝土梁受拉纵筋一旦达到名义屈服应变, 试件很快达到峰值荷载, 其强度方面的安全储备有限, 设计时应予以重视。与传统钢筋混凝土构件相比, 由于铝合金的弹性模量较小, 该类新型混凝土梁的跨中挠度较大, 应用于大跨度混凝土梁桥结构时应提出可靠方案。

(3) 发生弯曲破坏的铝合金配筋混凝土梁试件的荷载-跨中挠度曲线可以分为 3 个阶段: 弹性阶段、带裂缝工作阶段和破坏失效阶段。由于加载后期, 光圆纵筋与混凝土界面发生滑移, 平截面假定不再成立。

(4) 铝合金配筋混凝土梁尚未达到名义屈服荷载时, 裂缝宽度早已超过现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 中对最大裂缝宽度限值的规定, 该类新型混凝土梁的配筋设计应由正常使用极限状态控制。

参考文献:

References:

[1] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
NIU Di-tao. Durability and Life Forecast of Reinforced Concrete Structure[M]. Beijing: Science Press, 2003.

[2] 范颖芳, 周 晶. 受腐蚀钢筋混凝土构件受力性能研究现状[J]. 土木工程学报, 2004, 37(7): 23-28.
ZHOU Ying-fang, ZHOU Jing. State of the Art on Load Bearing Property of Corroded Reinforced Concrete Members[J]. China Civil Engineering Journal,

- 2004,37(7):23-28.
- [3] VAL D V. Deterioration of Strength of RC Beams Due to Corrosion and Its Influence on Beam Reliability[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(9):1297-1306.
- [4] AL-HAMMOUD R, SOUDKI K, TOPPER T H. Fatigue Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams Repaired with CFRP Sheets[J]. Journal of Composites for Construction, 2011, 15(1):42-51.
- [5] 邢明亮,王伯禹,李华平,等. 腐蚀疲劳作用下混凝土膨胀内应力分析[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2013, 33(2):22-27.
- XING Ming-liang, WANG Bo-yu, LI Hua-ping, et al. Analysis of Expansion Internal Stress of Concrete Under Coupling Action of Corrosion and Fatigue[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(2):22-27.
- [6] 李世秋,汪厚植,胡新民. 桥梁预应力钢筋混凝土结构耐久性影响因素及对策[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(6):41-43, 52.
- LI Shi-qiu, WANG Hou-zhi, HU Xin-min. Influencing Factors on Durability and Counter Measure of Bridge Prestressed Concrete Structure[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(6):41-43, 52.
- [7] 张建仁,刘彬,王磊,等. 箍筋锈蚀的配斜筋混凝土梁抗剪试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(6):73-79.
- ZHANG Jian-ren, LIU Bin, WANG Lei, et al. Test on Shear Behavior of Diagonal Reinforcement RC Beams with Corroded Stirrup[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(6):73-79.
- [8] 张建仁,张克波,彭晖,等. 锈蚀钢筋混凝土矩形梁正截面抗弯承载力计算方法[J]. 中国公路学报, 2009, 22(3):45-51.
- ZHANG Jian-ren, ZHANG Ke-bo, PENG Hui, et al. Calculation Method of Normal Section Flexural Capacity of Corroded Reinforced Concrete Rectangular Beams[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(3):45-51.
- [9] MCGEARY F L. Performance of Aluminum in Concrete Containing Chlorides[J]. ACI Material Journal, 1966, 63(9):247-265.
- [10] 张正. 飞行器用铝合金大气腐蚀的电化学检测研究[D]. 天津:天津大学, 2007.
- ZHANG Zheng. Research on Electrochemical Detection for Atmospheric Corrosion of Aircraft Aluminum Alloy[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [11] 钱鹏,叶列平. 铝合金及FRP-铝合金组合结构在结构工程中的应用[J]. 建筑科学, 2006, 22(5):100-105.
- QIAN Peng, YE Lie-ping. Aluminum Alloy Structures and FRP-aluminum Alloy Composite Structures in Civil Engineering[J]. Building Science, 2006, 22(5):100-105.
- [12] 王誉瑾,范峰,钱宏亮,等. 6082-T6 高强铝合金材料本构模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(6):113-120.
- WANG Yu-jin, FAN Feng, QIAN Hong-liang, et al. Experimental Study on Constitutive Model of High-strength Aluminum Alloy 6082-T6 [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(6):113-120.
- [13] 柳红滨. 铝合金加固钢筋混凝土梁破坏模式的理论与试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011.
- LIU Hong-bin. Theoretical and Experimental Study on Failure Modes of Reinforced Concrete Beams with Aluminum Alloy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [14] 郭小农,沈祖炎,李元齐,等. 国产结构用铝合金材料本构关系及物理力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6):110-117.
- GUO Xiao-nong, SHEN Zu-yan, LI Yuan-qi, et al. Stress-strain Relationship and Physical-mechanical Properties of Domestic Structural Aluminum Alloy [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6):110-117.
- [15] 帕克 R,波利 T. 钢筋混凝土结构[M]. 秦文钺,译. 重庆:重庆大学出版社, 1985.
- PARK R, PAULAY T. Reinforced Concrete Structures[M]. Translated by QIN Wen-yue. Chongqing: Chongqing University Press, 1985.
- [16] KASSEM C, AHMED SABRY F, BRAHIM B. Evaluation of Flexural Behavior and Serviceability Performance of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars[J]. Journal of Composites for Construction, 2011, 15(5):682-695.
- [17] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].