

GFRP 筋地下连续墙混凝土板受弯性能试验研究 及有限元分析

朱大宇¹, 顾浩声², 陈传灿³

(1. 同济大学 高等技术学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;
3. 同济大学 汽车学院, 上海 200092)

摘要:为了解 GFRP 筋地下连续墙的受弯性能,通过 GFRP 筋混凝土板和钢筋混凝土板的对比受弯试验,分析了两者的受力-变形过程和破坏形态,对比了两者的挠度、开裂荷载、极限荷载以及混凝土应变。结果表明:GFRP 筋混凝土板的受力-变形曲线大致可划分为开裂前和开裂后两个阶段,其破坏表现为脆性;混凝土开裂前两种板的截面应变变化规律均基本符合平截面假定,但开裂后 GFRP 筋混凝土板的挠度增长速率远大于钢筋混凝土板,且该速率基本不变;两种板的开裂荷载较为接近,而 GFRP 筋混凝土板的极限荷载为钢筋混凝土板的 1.2 倍。在试验基础上,建立了 GFRP 筋混凝土板的有限元模型,通过参数分析表明,GFRP 筋混凝土板的抗弯刚度在开裂后随配筋率的增大而增大。

关键词:地下连续墙; GFRP 筋; 配筋率; 静力试验; 有限元分析; 受弯性能

中图分类号:TU476.3 TU317.1 **文献标志码:**A

Experimental study and finite element analysis on flexural behavior of diaphragm wall reinforced with GFRP bars

ZHU Dayu¹, GU Haosheng², CHEN Chuancan³

(1. Institute of Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Institute of Automobile, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to understand the flexural behavior of diaphragm wall reinforced with GFRP bars, flexural tests were carried out on concrete slabs reinforced with GFRP bars and steel bars, respectively. The deformation process and failure mode of specimens were examined. Through comparison and analysis of deflection, cracking load, ultimate load and strain of concrete between two types of concrete slabs, it is found that the force-deformation curve of concrete slab reinforced with GFRP bars can be divided into two stages. The strain distributions of both types of slabs essentially complied with the plane section assumption before concrete cracks. However, the deflection of concrete slab reinforced with GFRP bars increases much faster after cracking than that of concrete slab reinforced with steel bars, and the increment speed changes very little. The cracking loads of both types of slabs are very close, while the ultimate load of concrete slab reinforced with GFRP bars is 1.2 times of that of concrete slab reinforced with steel bars. Based on the test results, finite element models are established for concrete slabs with different GFRP reinforcement ratios. Parameter analysis shows that the flexural rigidity of concrete slab reinforced with GFRP bars increases with the reinforcement ratio after cracking.

Keywords: diaphragm wall; GFRP bar; reinforcement ratio; static test; FEA; flexural behavior

作者简介:朱大宇(1975—),男,内蒙古呼伦贝尔人,工学博士,讲师。E-mail:zhudayu2001@163.com
收稿日期:2009年11月

0 引言

与传统的隧道工作井相比,在地下连续墙的盾构机进洞位置采用玻璃纤维(GFRP)筋代替钢筋,在盾构机进洞时可直接切削围护墙掘进,从而避免事前切断钢筋与凿除门洞的工作,既可以简化施工工艺,加快施工进度,减少施工风险,同时还可以减少围护墙前地层加固范围和降低地层与围护墙间的止水要求,节约投资。由于GFRP筋的弹性模量只有钢筋的1/5左右,基坑开挖后地下连续墙的变形比采用配置钢筋的地下连续墙大,严重时会影响基坑的安全。近年来,GFRP筋在地下连续墙中也有一些应用,如武汉长江隧道^[1]和崇明越江通道长江隧道^[2]。但目前国内外对GFRP筋的研究主要集中在其与混凝土协同工作性能上,如GFRP筋的粘结-滑移性能以及GFRP筋的型号、直径、位置和间距等对粘结强度的影响^[3-4]。Damian等^[5]的研究表明,粘结强度与GFRP筋的尺寸和埋入深度等有关。对GFRP筋混凝土构件的试验多集中在梁方面^[6-8],而GFRP筋混凝土板的试验研究不多,因此,对GFRP筋地下连续墙受力后的变形规律,墙体刚度的变化规律以及裂缝的开展和分布规律等尚无据可循。为此,本文分别对GFRP筋混凝土板和钢筋混凝土板进行了受弯试验,通过对比分析获得了GFRP筋地下连续墙的受弯性能,并在试验基础上采用有限元技术考察了不同GFRP筋配筋率对混凝土板抗弯刚度的影响。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验设计了两组共6块相同尺寸的混凝土板,

表1 试件基本参数
Table 1 Basic parameters of specimens

试件编号	几何尺寸/mm	混凝土强度等级	配筋种类	受力筋配置	配筋率	分布筋配置
A-1, A-2, A-3	2300 × 1000 × 150	C30	GFRP筋	Φ10@100, 双面	0.5%	Φ6@200, 双面
B-1, B-2, B-3	2300 × 1000 × 150	C30	钢筋	HRB335级Φ10@100, 双面	0.5%	HPB235级Φ6@200, 双面

表2 GFRP筋的力学性能参数
Table 2 Mechanical parameters of GFRP bars

直径 d/mm	截面积 A _g /mm ²	有效直径 d _e /mm	抗拉强度 f _{pk} /MPa	极限荷载 T _u /kN	弹性模量 E _g /GPa
6	33.23	6.35	825	27	40.8
10	84.32	9.53	760	64	40.8

表3 钢筋屈服强度和抗拉强度实测值
Table 3 Measured yield and ultimate strength of steel bars

直径 d/mm	屈服强度实测值/MPa				抗拉强度实测值/MPa			
	实测值1	实测值2	实测值3	平均值	实测值1	实测值2	实测值3	平均值
6	300	300	295	298	400	405	400	402
10	395	390	390	392	545	535	530	537

每组3个试件,其中第一组内配相同的GFRP筋(编号为A-1、A-2和A-3);第二组内配相同的钢筋(编号为B-1、B-2和B-3)。试件的基本参数见表1。

表2为GFRP筋的力学性能参数,由生产厂家提供,表3为由材性试验得到钢筋的屈服强度和极限强度实测值,混凝土同条件养护试块(150mm × 150mm × 150mm)的抗压强度实测值见表4。

1.2 加载方法

试件采用两边简支,在1/3跨度处施加集中荷载,以在中间1/3跨内形成纯弯段。加载装置如图1所示,在板面1/3跨位置处布置两个刚性垫块和钢滚轴,长度与试件宽度相等,千斤顶施加的集中荷载通过分配梁、钢滚轴、刚性垫块后转变为板面上的线荷载,使板在宽度方向均匀受荷。试验采用分级加载,先以极限荷载的1/15加载,每级荷载的持荷时间为5min,当钢筋的应力达到屈服应力后,以极限荷载的1/12分级加载,当达到极限荷载的90%后,连续加载直至破坏。

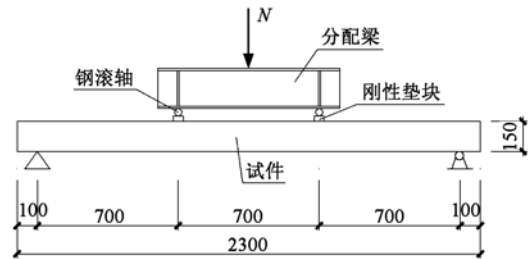


图1 加载装置
Fig. 1 Test set-up

1.3 数据采集及量测内容

试件变形采用位移计测定,GFRP筋(钢筋)和混凝土的应变用电阻应变片测定,量测位置见图2。

表 4 混凝土抗压强度实测值

Table 4 Measured compressive strength of concrete

实测值 1/MPa	实测值 2/MPa	实测值 3/MPa	平均值/MPa
34.2	33.8	34.6	34.2

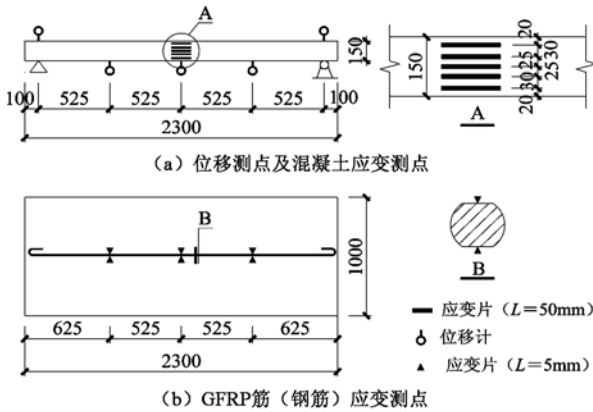


图 2 量测位置

Fig. 2 Measuring points

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

试验发现,配置 GFRP 筋的各试件(A-1、A-2 和 A-3)受力变形形态比较接近,而配置钢筋的各试件中除了试件 B-1 结果发生较大偏差外,试件 B-2 和 B-3 的受力变形形态相同,所以在分析中去除试件 B-1 的结果。根据试验结果可得到典型的弯矩与跨中挠度关系曲线,分别如图 3、4 所示。为便于说明规律,图中纵坐标无量纲 M/M_u 值为相对于试件破坏时极限弯矩 M_u , 横坐标为跨中挠度 f 的实测值。

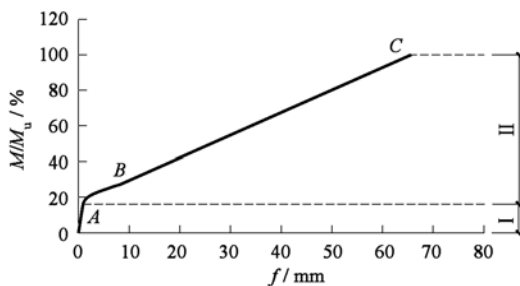


图 3 GFRP 筋混凝土板的 M/M_u - f 曲线

Fig. 3 M/M_u - f curve of concrete slab reinforced with GFRP bars

从图 3 可知,GFRP 筋混凝土板的弯矩与跨中挠度关系曲线可划分为两个阶段,而钢筋混凝土板的弯矩与跨中挠度关系曲线可分为三个阶段,如图 4 所示。在第 I 阶段,GFRP 筋混凝土板和钢筋混凝土板均表现为弹性变形。此时弯矩很小,量测到的试件截面上各纤维的应变很小,GFRP 筋或钢筋与混凝土共同工作,混凝土处于弹性状态,挠度和弯矩关系

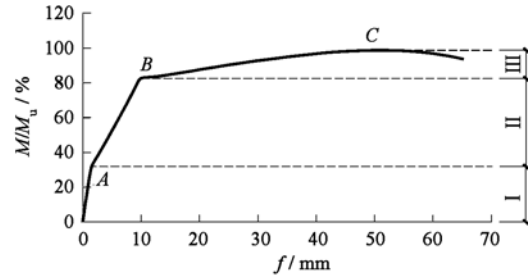


图 4 钢筋混凝土板的 M/M_u - f 曲线

Fig. 4 M/M_u - f curve of concrete slab reinforced with steel bars

接近直线变化。这时的工作特点是板尚未出现裂缝。当弯矩增加到开裂弯矩 M_{cr} 时,受拉区边缘纤维应变恰好达到混凝土受弯时的极限拉应变 ϵ_{tu} ,试件处于将裂未裂的极限状态, M/M_u - f 曲线出现了第 1 个转折点,此即第 I 阶段末,在图 3 和图 4 上以 A 点表示。

当 $M = M_{cr}$ 时,在纯弯段受拉能力最薄弱的截面处出现了第 1 条裂缝,一旦开裂,试件即由第 I 阶段转化为第 II 阶段工作。试验结果表明,GFRP 筋混凝土板的开裂弯矩 M_{cr} 为极限弯矩 M_u 的 20% 左右,而钢筋混凝土板的开裂弯矩 M_{cr} 为极限弯矩 M_u 的 30% 左右。

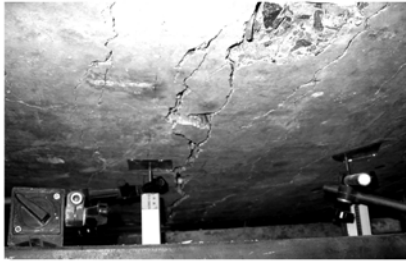
对于 GFRP 筋混凝土板,开裂后在弯矩增加不多的情况下挠度有较大增长, M/M_u - f 曲线的斜率明显减小(图 3 中 AB 段)。随着荷载的增加,裂缝数量和宽度不断增加,高度也不断增长。当弯矩增至极限弯矩 M_u 的 30% 左右时(B 点),裂缝不再向受压区延伸,但数量和宽度继续增加。此后 M/M_u - f 曲线的斜率稍有增大,到弯矩增至极限弯矩 M_u 的 40% 左右时,最大裂缝宽度达 0.3mm,跨中挠度增至近 20mm,约为板跨度的 1/110。

对于钢筋混凝土板,弯矩超过开裂弯矩 M_{cr} 后,裂缝不断开展,挠度增长速率较开裂前快。当弯矩增大至极限弯矩 M_u 的 60% 左右时,最大裂缝宽度约 0.2mm,跨中挠度约 6mm,为板跨度的 1/350。

当荷载增至接近极限荷载时,GFRP 筋混凝土板底混凝土开始大块剥落。在达到极限荷载时,GFRP 筋被拉断,并伴随有巨响。此时对应于图 3 曲线上的 C 点,标志着 GFRP 筋混凝土板的破坏。破坏时跨中挠度近 70mm,为板跨度的 1/30。GFRP 筋混凝土板的破坏形态见图 5。而钢筋混凝土板则在钢筋屈服(B 点)后进入了第 III 阶段,弯矩增加不多的情况下挠度迅速增大,直至受压区混凝土被压碎,其破坏形态如图 6 所示。钢筋混凝土板破坏时的跨中挠度约 60mm,为板跨度的 1/35。

2.2 挠度分析

图 7 和图 8 分别为实测的 GFRP 筋混凝土板和



(a) 板底贯穿裂缝

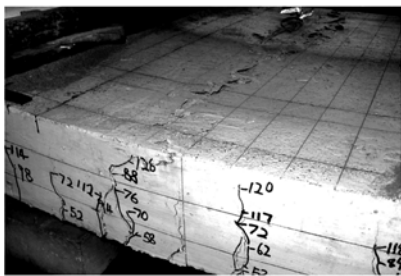


(b) GFRP 筋断裂

图5 GFRP 筋混凝土板的破坏形态(试件 A-1)
Fig. 5 Failure of concrete slab reinforced with GFRP bars (specimen A-1)



(a) 板底贯穿裂缝



(b) 受压区混凝土被压碎

图6 钢筋混凝土板的破坏形态(试件 B-3)
Fig. 6 Failure of concrete slab reinforced with steel bars (specimen B-3)

钢筋混凝土板的弯矩与跨中挠度 ($M-f$) 关系曲线。选择曲线形态较为典型的试件 A-3 和 B-3, 可得到 GFRP 筋混凝土板和钢筋混凝土板的弯矩-跨中挠度 ($M-f$) 关系对比, 如图 9 所示。由图 7~9 可以看出:

(1) 开裂前 GFRP 筋混凝土板和钢筋混凝土板的 $M-f$ 曲线均为直线, 即试件处于弹性工作阶段。开裂时二者的挠度值均很小, GFRP 筋混凝土板开裂时

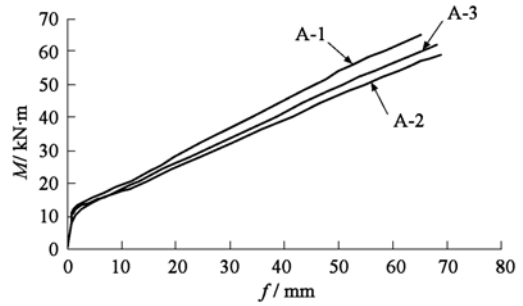


图7 GFRP 筋混凝土板的 $M-f$ 实测曲线
Fig. 7 Measured $M-f$ curves of slabs reinforced with GFRP bars

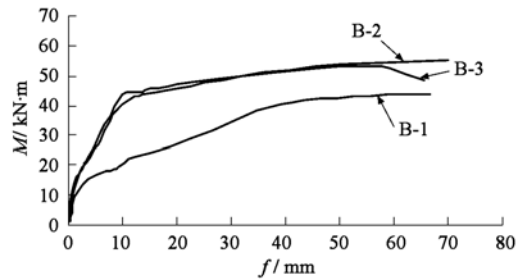


图8 钢筋混凝土板的 $M-f$ 实测曲线
Fig. 8 Measured $M-f$ curves of concrete slabs reinforced with steel bars

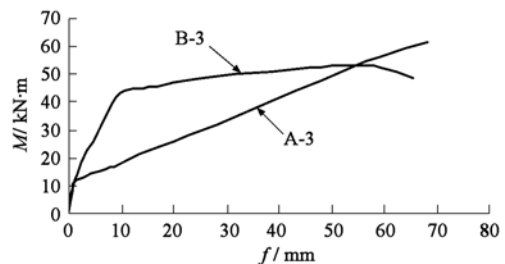


图9 GFRP 筋混凝土板和钢筋混凝土板的弯矩-挠度关系对比
Fig. 9 Comparison of measured $M-f$ curves of slabs reinforced with GFRP bars and steel bars

的挠度在 2.37~3.86mm 之间, 钢筋混凝土板开裂时的挠度在 1.20~2.01mm 之间。GFRP 筋混凝土板开裂时的挠度略大, 最大值为板跨度的 1/544。

(2) 对于 GFRP 筋混凝土板, 开裂后 $M-f$ 曲线表现为两段斜率接近的直线段: 第一段为开裂后至弯矩增加到 30% M_u (约 20kN·m) 的过程, 该段 $M-f$ 曲线斜率最小, 挠度增长最快, 试验量测到的 GFRP 筋跨中测点的应变从 100×10^{-6} 左右急剧增加至 1400×10^{-6} 左右, 表明这个过程为开裂后应力的转移过程, 由于混凝土开裂, 受拉区的工作主要由 GFRP 筋承受, 故 GFRP 筋的应力较开裂前突然增大了很多, 而 GFRP 筋的弹性模量较小, 因此开裂后在弯矩增加不多的情况下挠度有较大的增长, $M-f$ 曲线的斜率明显

减小。在该段结束时(即图3中B点),板的挠度为10.22~12.93mm,最大值约为板跨度的1/162;第二段为弯矩从30% M_u 增加到 M_u 的过程,该段 $M-f$ 曲线斜率比第一段略大,挠度增长速率稍微放慢,破坏时对应于 M_u 的挠度为65.22~68.78mm,最大值约为板跨度的1/30。

(3)对于钢筋混凝土板,在开裂后至钢筋屈服的过程中, $M-f$ 曲线斜率较开裂前有所减小,挠度增长速率加快。除去偏差较大的试件B-1外,试件B-2和B-3分别在弯矩为42.9kN·m和44.2kN·m时(约80% M_u)钢筋屈服,此时二者的挠度分别为10.09mm和9.97mm。在钢筋屈服后直至混凝土被压碎的过程中,挠度增长迅速,试件B-2和B-3对应于 M_u 的挠度分别为62.71mm和59.27mm,约为板跨度的1/35。

(4)由图9可见,由于GFRP筋的弹性模量远小于钢筋的弹性模量,开裂后GFRP筋混凝土板的挠度增长速率远比钢筋混凝土板快。钢筋混凝土板在钢筋屈服时($M=44.2\text{kN}\cdot\text{m}$)的挠度仅为9.97mm,为板跨度的1/210,与GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》中对挠度限制的要求($l_0/200$, l_0 为计算跨度)符合较好。而在相同的弯矩作用下,GFRP筋混凝土板的挠度却达到了43.74mm,为板跨度的1/48,是钢筋混凝土板的4倍。可见,GFRP筋混凝土板开裂后的刚度很小,虽然其极限承载力比较高,但由于正常使用要求的限制,较高的极限承载力是难以利用的,故其在正常使用状态下所能承受的荷载反而小于钢筋混凝土板。图9中在挠度为板跨度的1/210时,GFRP筋混凝土板承受的弯矩值约17kN·m,仅为钢筋混凝土板的38%。因此,GFRP筋混凝土板在设计和应用时应以裂缝宽度或变形作为控制参数。

(5)待钢筋进入屈服后,钢筋混凝土板的挠度增长速率反超GFRP筋混凝土板。钢筋混凝土板钢筋屈服后挠度的加快增长表现出很好的延性,而GFRP筋混凝土板从开裂到GFRP筋被拉断,挠度增长速率变化很小,破坏没有预兆,表现为脆性破坏。

2.3 开裂弯矩和极限弯矩

表5为各试件开裂弯矩和极限弯矩的实测值与

理论值。其中GFRP筋混凝土板的理论值采用钢筋混凝土受弯构件计算理论计算得到。由表5可见:

(1)除去试件A-2和B-1外(在试件吊运过程中产生初始裂缝),开裂弯矩的理论值与试验值较为接近(最大偏差9.14%),考虑到混凝土材料性能的离散性较大,误差在可接受范围内。

(2)除去试件A-2和B-1外,GFRP筋混凝土板的开裂弯矩值与钢筋混凝土板较为接近。这主要是由于开裂前受拉区混凝土参与工作,开裂荷载主要取决于混凝土的极限抗拉强度。

(3)GFRP筋混凝土板的极限弯矩大于钢筋混凝土板的极限弯矩。试件A-1、A-2和A-3的极限弯矩实测均值为62.0kN·m,试件B-1、B-2和B-3的极限弯矩实测均值为50.9kN·m,前者为后者的1.2倍。这主要是由于,对于钢筋混凝土板,钢筋屈服后变形大幅增长,导致跨中形成塑性铰,在这个过程中,钢筋所能承受的拉力增长不大。因此,板的极限弯矩较钢筋屈服时的弯矩增长不多;而对于GFRP筋混凝土板,开裂后拉应力完全由GFRP筋承担,由于GFRP筋没有屈服阶段,因此在受压区混凝土未被压碎的情况下,弯矩将持续增长,而GFRP筋的抗拉强度又较高,故极限承载力相对较大。

(4)钢筋混凝土板极限弯矩的实测值大于理论值,而GFRP筋混凝土板极限弯矩的实测值却小于理论值(最大偏差19.09%)。这说明将钢筋混凝土受弯构件的计算理论直接应用于GFRP筋混凝土构件偏于不安全。

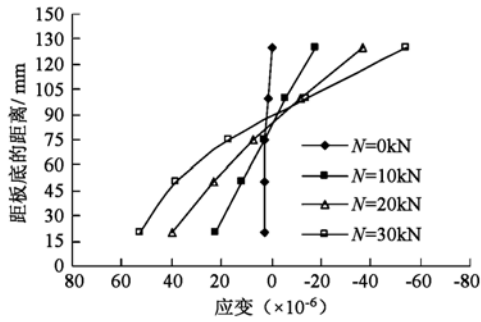
2.4 混凝土应变

开裂前GFRP筋混凝土板和钢筋混凝土板跨中截面的应变变化如图10所示。从图中可见,在荷载很小时,板跨中截面上各个纤维的应变很小,受压区和受拉区混凝土应变分布图为三角形。随着荷载的增大,受拉区边缘处混凝土表现出塑性性质,中和轴稍有上升,应变变化略微偏离直线而变弯,这一点在GFRP筋混凝土板中表现得更为明显。这说明在开裂之前,与钢筋混凝土板相似,GFRP筋混凝土板的截面应变变化规律也基本符合平截面假定,混凝土基本处于弹性工作阶段,应力与应变成正比。

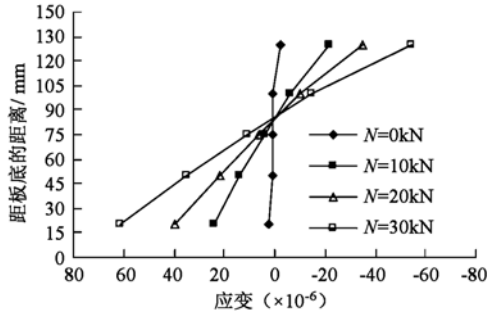
表5 试件开裂弯矩和极限弯矩的试验值与理论值

Table 5 Measured data and theoretical values of cracking and ultimate moment

试件编号	开裂弯矩 M_{cr} /kN·m		(实测值 - 理论值) / 实测值	极限弯矩 M_u /kN·m		(实测值 - 理论值) / 实测值
	实测值	理论值		实测值	理论值	
A-1	14.0	15.2	-8.57%	65.3	70.5	-7.96%
A-2	11.8	15.2	-28.81%	59.2	70.5	-19.09%
A-3	14.2	15.2	-7.04%	61.5	70.5	-14.63%
B-1	13.2	15.9	-20.45%	44.3	33.5	24.38%
B-2	17.2	15.9	7.56%	55.1	33.5	39.20%
B-3	17.5	15.9	9.14%	53.3	33.5	37.15%



(a) GFRP 筋混凝土板(试件 A-1)



(b) 钢筋混凝土板(试件 B-3)

图 10 开裂前 GFRP 筋混凝土板和钢筋混凝土板跨中截面的应变变化

Fig. 10 Variation of strain at mid-span section before cracking

3 有限元分析

3.1 模型建立

为了解配筋率对 GFRP 筋混凝土板刚度的影响,采用大型通用有限元分析软件 ANSYS 10.0 建立与实验室试验条件和尺寸完全相同的 GFRP 筋混凝土板的分离模式有限元模型(图 11)。采用 LINK8 单元模拟 GFRP 筋,该单元是两节点线性单元,每个节点具有三个平动自由度,可以模拟 GFRP 筋的拉、压变形。混凝土和刚性垫块分别采用 SOLID65 和 SOLID45 单元模拟,单元具有 8 节点,每个节点具有三个平动自由度。GFRP 筋的性能参数按表 1 选取,加载过程采用荷载步对模型进行模拟分级加载。

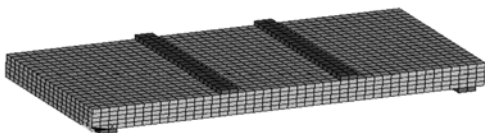


图 11 有限元模型

Fig. 11 Finite element model

3.2 与试验结果对比

有限元模型中选用与试验相同的 GFRP 筋配筋

率,即 $\rho = 0.5\%$ 。图 12 为 GFRP 筋混凝土板弯矩-跨中挠度 ($M-f$) 的计算结果与试验结果的对比,由图可知,计算得到的开裂弯矩、极限弯矩及对应于图 3 中 B 点(即开裂后 $M-f$ 曲线的第一段直线结束点)处的弯矩分别为 $12.5\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $61.0\text{kN}\cdot\text{m}$ 和 $18.3\text{kN}\cdot\text{m}$,与相应试件试验值的最大误差分别为 11.97% 、 6.58% 和 8.50% ;相应于极限弯矩的计算挠度为 61.00mm ,与 3 个试件试验值的最大误差为 10.64% 。可见有限元分析得到的 $M-f$ 关系与试验结果吻合较好,证明了有限元模拟方法的合理性。

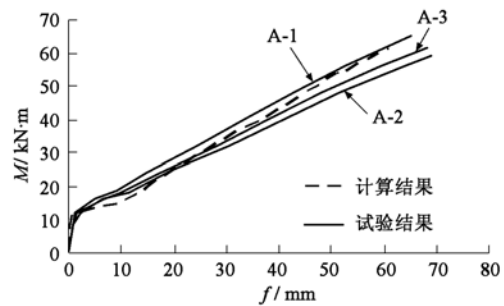


图 12 GFRP 筋混凝土板的 $M-f$ 计算结果与试验结果的对比 ($\rho = 0.5\%$)

Fig. 12 Simulated and measured $M-f$ curves of slabs reinforced with GFRP bars and steel bars ($\rho = 0.5\%$)

3.3 参数分析

在其它条件均与试验试件相同的情况下,选用不同的 GFRP 筋配筋率 ($\rho = 0.25\%$ 、 0.35% 、 0.50% 、 1.00%),利用有限元进行建模和加载模拟,得到不同 GFRP 筋配筋率混凝土板的 $M-f$ 模拟曲线,如图 13 所示。不同 GFRP 筋配筋率混凝土板的弯矩和相应挠度列于表 6。由图 13 和表 6 可见:

(1) 混凝土开裂前,GFRP 筋配筋率对混凝土板的受力性能影响不大,板的跨中挠度很小,开裂弯矩和相应挠度随 GFRP 筋配筋率的增大略有变化,但变化较小。

(2) 从混凝土开裂后至受拉区应力全部转移给 GFRP 筋(对应于开裂后 $M-f$ 曲线第一段直线结束点)的过程中,弯矩的增长幅度随 GFRP 筋配筋率的增大而增大,而挠度的增长幅度随 GFRP 筋配筋率的增大而减小。

(3) 混凝土开裂后,GFRP 筋配筋率将影响板跨中挠度的增长速率和相同荷载条件下的挠度值。在相同荷载条件下,GFRP 筋配筋率 $\rho = 0.25\%$ 的板跨中挠度增长速率最快,挠度值也最大,其次为 $\rho = 0.35\%$ 的板,再次为 $\rho = 0.50\%$ 的板,而 $\rho = 1.00\%$ 的板跨中挠度增长速率最慢,挠度值也最小。表明在混凝土开裂后,混凝土板的抗弯刚度随 GFRP 筋配筋率的增大而增大。

表 6 不同 GFRP 筋配筋率混凝土板的弯矩和相应挠度

Table 6 Moments and corresponding deflections of concrete slabs reinforced with different GFRP reinforcement ratios

加载阶段	$\rho = 0.25\%$		$\rho = 0.35\%$		$\rho = 0.50\%$		$\rho = 1.00\%$	
	弯矩	挠度	弯矩	挠度	弯矩	挠度	弯矩	挠度
	$M/\text{kN}\cdot\text{m}$	f/mm	$M/\text{kN}\cdot\text{m}$	f/mm	$M/\text{kN}\cdot\text{m}$	f/mm	$M/\text{kN}\cdot\text{m}$	f/mm
开裂弯矩	12.2	0.59	12.3	0.59	12.5	0.59	13.5	0.58
开裂后 $M-f$ 曲线第一段 直线结束点弯矩	15.4	17.85	15.4	15.45	18.3	12.15	18.6	6.90
弯矩为 $30\text{kN}\cdot\text{m}$	30.0	43.65	30.0	38.19	30.0	25.71	30.0	15.20
弯矩为 $40\text{kN}\cdot\text{m}$	40.0	60.71	40.0	53.09	40.0	35.83	40.0	21.49
弯矩为 $50\text{kN}\cdot\text{m}$	50.0	77.77	50.0	67.98	50.0	45.95	50.0	27.78

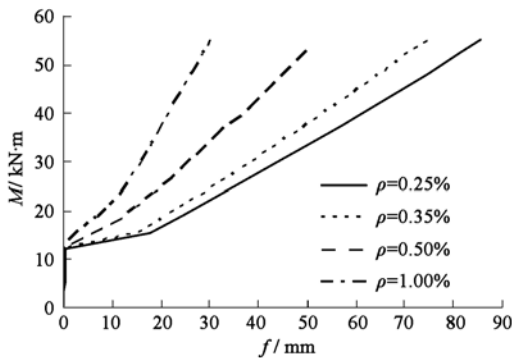


图 13 GFRP 筋混凝土板的 $M-f$ 模拟曲线
Fig. 13 Simulated $M-f$ curves of concrete slabs reinforced with GFRP bars

4 结论

通过对 GFRP 筋混凝土板和钢筋混凝土板的受弯试验和对 GFRP 筋混凝土板的有限元数值分析,得到以下结论:

(1) GFRP 筋混凝土板的受力变形曲线大致可划分为两个阶段,即开裂前和开裂后;GFRP 筋混凝土板的破坏表现为脆性。

(2) 开裂后 GFRP 筋混凝土板的挠度增长速率和裂缝宽度远大于钢筋混凝土板,从开裂到 GFRP 筋被拉断,挠度的增长速率变化很小。

(3) GFRP 筋混凝土板的开裂荷载与钢筋混凝土板较为接近,而极限荷载大于钢筋混凝土板(平均为钢筋混凝土板的 1.2 倍),但鉴于正常使用要求的限制,较高的极限承载力难以利用。

(4) 开裂前 GFRP 筋混凝土板的截面应变变化规律基本符合平截面假定。

(5) 开裂后 GFRP 筋混凝土板的抗弯刚度随配筋率的增大而增大。

参 考 文 献

- [1] 朱继红. GFRP 筋在地下连续墙的应用[J]. 土工基础, 2007, 21(3): 10-12. (Zhu Jihong. Application of GFRP bars in diaphragm wall[J]. Soil Engineering and Foundation, 2007, 21(3): 10-12. (in Chinese))
- [2] 彭惠. 玻璃纤维(GFRP)筋在地下连续墙施工中的应用[J], 中国市政工程, 2008(4): 60-62. (Peng Hui. Glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars used in construction of diaphragm wall[J]. China Municipal Engineering, 2008(4): 60-62. (in Chinese))
- [3] Hao Q, Wang Y, He Z, et al. Bond strength of glass fiber reinforced polymer ribbed rebars in normal strength concrete[J]. Construction & Building Materials, 2009, 23(2): 865-871.
- [4] Hao Q, Wang Y, He Z, et al. Bond behavior of glass fiber reinforced polymer ribbed rebars with specially designed RIB geometries[C]// Proceedings of International SAMPE Symposium and Exhibition. Baltimore, USA: Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 2007.
- [5] Kachlakev D, Lundy J. Performance of hollow glass fiber-reinforced polymer rebars[J]. Journal of Composites for Construction, 1999, 3(2): 87-91.
- [6] Ashour A F. Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced with GFRP bars[J]. Construction and Building Materials, 2006, 20(10): 1005-1015.
- [7] 袁国青. GFRP 筋增强混凝土梁受力性能分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2001(1): 5-7. (Yuan Guoqing. Analysis of deforming performance of GFRP reinforced concrete beam[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2001(1): 5-7. (in Chinese))
- [8] 王增忠, Bin S. 玻璃纤维混凝土梁挠度和裂缝宽度计算方法研究[J]. 工业建筑, 2002, 32(11): 8-10. (Wang Zengzhong, Bin S. Research on the computational method of deflection and crack width of concrete beams reinforced with GFRP bars [J]. Industrial Construction, 2002, 32(11): 8-10. (in Chinese))