

高性能精细混凝土单轴受压性能试验研究

尹世平*, 徐世烺

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 纤维编织网增强混凝土(TRC)结构因其良好的承载能力、高韧性、不腐蚀、防磁化和薄壁轻质而被认为 21 世纪最有前途的结构形式之一. 作为 TRC 基体的精细混凝土, 没有直接的方法来研究它的力学特性, 像 σ - ϵ 曲线, 抗压、弯曲及张拉强度等. 为配合纤维编织网增强混凝土的推广应用, 对精细混凝土的单轴受压性能及应力-应变关系进行了试验研究. 试验结果表明, 精细混凝土的弹性模量比相同抗压强度的普通混凝土低, 但极限荷载处应变较大; 当用试验得出的模型参数值替代同等强度普通混凝土的参数值, 试验曲线和模拟曲线吻合得比较好.

关键词: 精细混凝土; 应力-应变曲线; 受压性能

中图分类号: TU502.6 **文献标志码:** A

0 引言

纤维编织网增强混凝土(textile reinforced concrete, 简称 TRC)是一种新型复合材料, 是多轴纤维编织网和精细混凝土的结合^[1]. 它可以用于设计非常薄的混凝土结构, 这种结构既有高的抗压强度又有高的张拉强度. 纤维编织网主要是由抗碱玻璃纤维织成, 其被布设在复合材料的主应力方向, 与任意分布短切玻璃纤维增强的复合材料(glass fiber reinforced cement, 简称 GFRC)相比有更高的增强效果, 纤维编织网也可用其他材料, 如碳纤维和芳族聚酰胺纤维. 然而, TRC 是一种新型材料, 用于 TRC 承载结构设计的详细信息还未知, 因此需要大量的试验研究.

作为 TRC 基体的精细混凝土, 没有直接的方法来研究它的力学特性, 像 σ - ϵ 曲线, 抗压、弯曲及张拉强度等. 由于 TRC 结构的特殊性, 用于普通混凝土的试验设备和试件尺寸可能不适合用做研究精细混凝土的力学特性. 小尺寸的试件更适于获得代表薄结构单元结构行为的力学参数. 尽管用于精细胶凝材料的测试方法在理论上不是新的, 但为了测试小尺寸试件, 需要发展测定 TRC 专用精细混凝土力学性能的新方法.

混凝土单轴受压是混凝土材料最基本的物理力学性能, 是研究混凝土结构承载力和变形的主要依据, 是分析构件极限承载力和进行非线性全过程分析时必不可少的材料本构模型的基础. 普通混凝土和高强混凝土的应力-应变曲线, 国内外已开展了大量研究^[2~4]. 但对高性能精细混凝土应力-应变曲线的研究却不多. 因此, 有必要研究已有的规范或标准中用来设计计算普通混凝土结构的公式或描述混凝土 σ - ϵ 曲线的模型是否能用于 TRC 结构. 尽管 TRC 结构主要承受拉力作用, 如板、工字形或 U 形断面的弯曲, 但其受力性能也与压应力相关. 因此, 对 TRC 结构来说, 进行抗压试验特别重要, 因为对于新发展的精细胶凝系统, 其荷载变形反应仍然是未知的.

1 材料和试验方法

1.1 材料

1.1.1 原材料 为保证混凝土顺利通过纤维编织网, 要求其骨料较细, 本文选用的砂子最大粒径为 1.2 mm, 为确保其级配均匀连续, 选择了粒径为 0~0.6 mm 和 0.6~1.2 mm 的两种砂, 且后者的质量是前者的 2 倍; 为提高混凝土的强度, 特

别是早期强度,采用了 PII52.5R 硅酸盐水泥和硅灰;为提高混凝土的流动性,掺加了 I 级粉煤灰.混凝土水胶比为 0.4,其他配比见表 1.

表 1 精细混凝土的配比组成^[5]

Tab.1 The composition of fine grained concrete^[5]

材料	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
硅酸盐水泥 PII52.5R	472
粉煤灰	168
硅灰	35
全部胶凝材料	675
水	262
超塑剂(Sika 三代)	3.25
砂(0~0.6 mm)	460
砂(0.6~1.2 mm)	960

1.1.2 试件制作及养护 考虑到 TRC 结构的厚度,试件设计应尽可能地反映结构的特性.根据文献[6],轴心抗压试验采用 6 组 18 个 40 mm×40 mm×160 mm 棱柱体试件,其中 2 组用于碳化试验;抗压标准强度试验选用 2 组 6 个 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 立方体试件.

试件带模在标准养护室中养护 24 h,拆模后放入标准养护室中的水槽中(即水中养护)养护至 56 d 试验龄期,这样做可以减少碳化和干缩对试件的影响.用于碳化的试件到 28 d 取出,烘干,放入碳化箱.

1.2 采集设备及试验机

采用 1 000 kN 微机控制液压伺服试验机,加载程序为等位移控制 1.0 mm/min 至峰值.应变

采用应变片采集,辅助以 LVDT 测量位移,采集系统用德国进口的 IMC(integrated measurement and control).应变片布置在与浇筑面相邻的两个相对侧面的中部,竖向应变片标距为 8 cm,横向应变片标距为 2 cm;两个 LVDT 的布置位置和应变片相同,固定在加载板上.试验装置如图 1 所示.

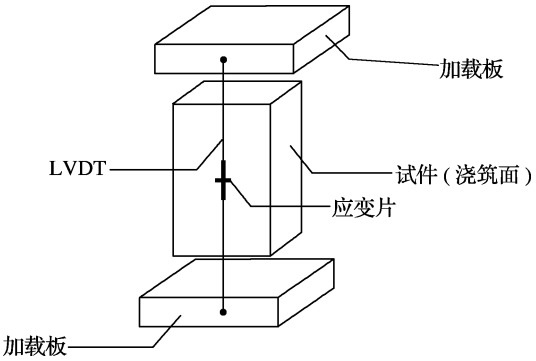


图 1 抗压试验装置示意图

Fig.1 Test set up of compression

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

棱柱体轴心抗压试验进行了 3 组,共 12 个试件,有一个试件接线出错,丢弃.首先预压 0.8 kN,然后重新清零采集,以排除试件受压面和垫板之间的空隙对 LVDT 结果的影响.11 个试件的结果见表 2.

表 2 棱柱体抗压试验结果

Tab.2 Prism compressive test results

试件编号	f_c/MPa	极限荷载处应变/ 10^{-3}		ν	割线弹模量/ MPa		
		LVDT 测得	应变片测得		0.3 f_c 处	0.4 f_c 处	f_c 处
1	72.26	5.11	3.26	0.190	28 700	27 900	22 200
2	70.60	4.63	3.01	0.180	28 900	28 400	23 500
3	71.02	4.96	2.82	0.186	30 600	29 400	25 200
4	79.86	4.64	3.07	0.180	29 900	30 800	26 000
5	73.78	3.89	2.86	0.169	34 000	30 500	25 800
6	76.27	4.59	3.21	0.185	29 800	29 200	23 800
7	78.76	3.70	3.28	0.205	29 200	29 600	23 100
8	71.99	4.34	3.07	0.185	28 500	28 600	23 400
9	71.57	3.54	3.01	0.200	32 200	28 800	23 800
10	71.57	3.65	2.94	0.185	31 100	29 500	24 400
11	67.01	3.96	2.96	0.200	27 300	27 300	22 600
平均值	73.15	4.27	3.04	0.188	30 000	29 100	24 000
标准差	3.775	0.55	0.15	0.010	1 884	1 044	1 245
相对标准差	5.15%	12.88%	4.93%	5.32%	6.30%	3.59%	5.19%

立方体抗压采用了 2 组,共 6 个试件,结果见表 3,其平均值为 79.1,标准差为 3.95.

取其中的 2 组试件,用应变片采集的应变与应力之间的试验曲线如图 2 所示(“8-1”中,“8”指的是标距为 8 cm 的应变片,“1”指的是试件的编号).

用应变片采集的数据与用 LVDT 采集的数据比较如图 3 所示,以“LVDT”表示用 LVDT 采集的应变值,以“应变片”表示用应变片采集的应变值.

表 3 立方体抗压试验结果
Tab.3 Cube compressive test results

试件编号	f_{cu}/MPa
1	74.0
2	83.2
3	76.8
4	78.4
5	84.4
6	78.0

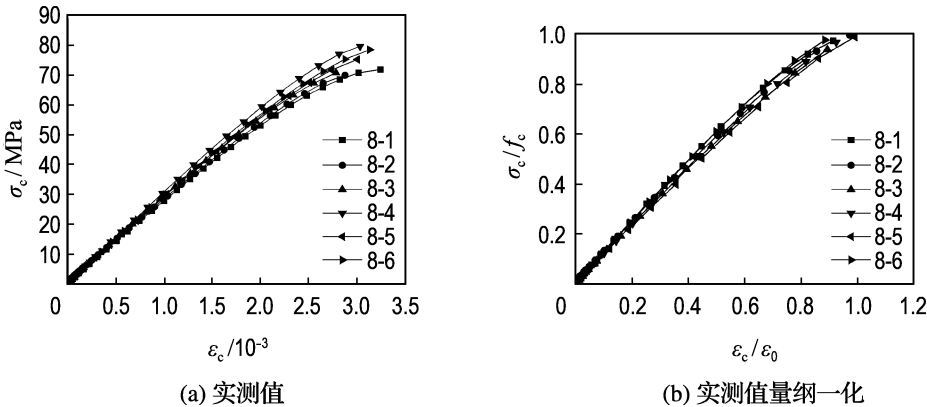


图 2 碳化前精细混凝土的应力-应变曲线上升段

Fig.2 Ascending segments of stress-strain curves of un-carbonated fine grained concrete

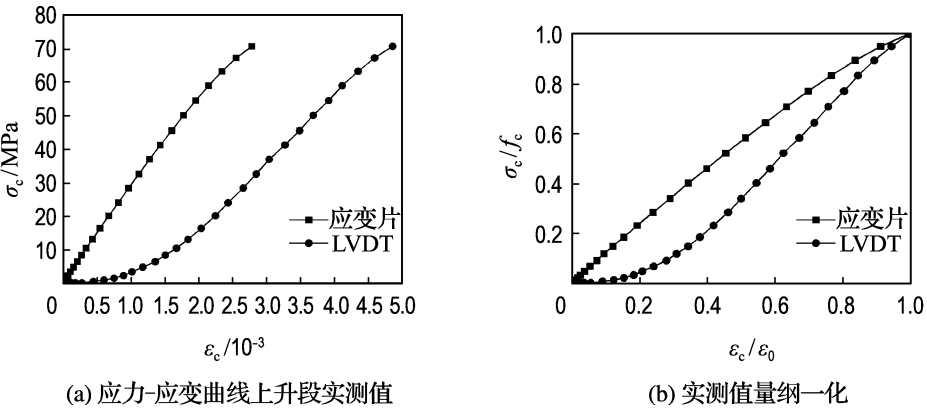


图 3 采用不同的应变测量方法获得曲线的比较

Fig.3 Comparison of curves obtained by using different strain measurement methods

由图 2 可见,精细混凝土应力-应变曲线的上升段几乎为直线,这与高强混凝土的力学特性是一致的,有高的脆性特征.

由表 2 和图 3 可见,由于受压端的不均匀变形及试件制作误差的影响,LVDT 测量所得到的

应变大于应变片测量所得到的应变,且在荷载小于 $0.2f_c$ 的 σ_c - ϵ_c 曲线有明显的塑性变形.由此可见,该曲线不能准确地反映精细混凝土的 σ - ϵ 曲线特性,但可以作为试验分析的参考,不推荐用其确定受压应力-应变曲线.

2.2 破坏过程和形态

试件的破坏形态见图 4.

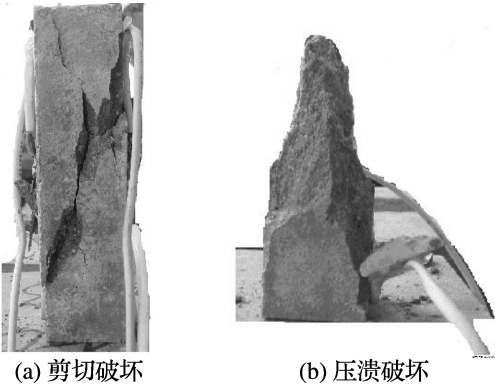


图 4 精细混凝土的破坏形态

Fig. 4 Damage pattern of fine grained concrete

试件的破坏过程比较短暂,在达到最大承载力但尚未见到表面裂缝时,于发出很大声响的同时突然破碎,且有渣片向外飞溅.由于试件的强度较高,所有试件都是突然炸裂而破坏.仅一些试件在破坏前瞬间,试件内部有较明显的劈裂声,这时应力-应变曲线开始略微变弯,但是,此后瞬间试件即被劈裂炸飞,只剩下上下部锥体,破坏面平整光滑,如

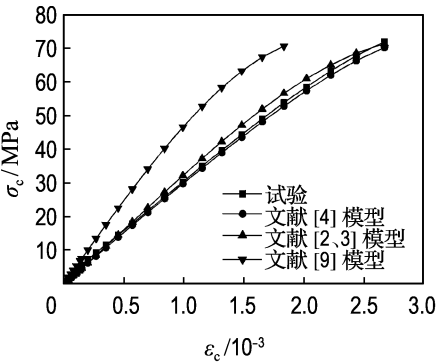
图 4 所示.典型的应力-应变曲线如图 2 所示.

2.3 应力-应变曲线模拟

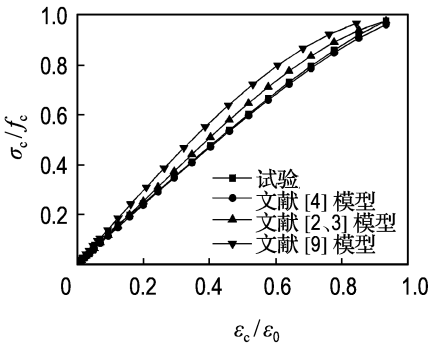
对于混凝土在单轴受压下的应力-应变关系,已经做了大量的试验研究工作,在此基础上不少学者提出了多种混凝土受压应力-应变曲线方程^[7].针对高强混凝土,文献[2]提出用多项式和有理分式表达的应力-应变曲线关系.

图 5 用量纲一应力 σ_c/f_c 为纵坐标, ϵ_c/ϵ_0 为横坐标.根据文献[8],本文采用文献[4]和[2,3]中提出的模型进行模拟计算,并与文献[9]建议模型的模拟结果比较,结果见图 5.

由图 5 可见,将试验得出的模型参数值替代同等强度普通混凝土的参数值,试验曲线和模拟曲线吻合得比较好,如文献[4]和文献[2,3]模型;而按照文献[9]建议的方法(将文献[9]建议的同等强度普通混凝土弹性模量和应变输入),进行曲线模拟,与试验曲线差别比较大.结果表明,从普通混凝土经验获得的,给定的弹性模量和极限荷载对应的应变值,不能应用于本文研究的精细混凝土.



(a) 实测及模拟的应力-应变曲线上阶段



(b) 实测及模拟曲线的量纲一化

图 5 碳化前精细混凝土的实测与模拟曲线的比较

Fig. 5 Comparison of measured and simulated curves of un-carbonated fine grained concrete

3 碳化对单轴抗压性能的影响

与钢筋增强相比,抗碱玻璃纤维增强的腐蚀机制在低的碱性毛孔溶解中被阻碍,这样对于 TRC 来说,通过碳化引起的低 pH 是更可取的.

试件放入标准养护室中养护至 28 d,然后取出放入碳化箱中碳化 28 d,试件试验龄期为 56 d.

3.1 碳化后试验结果

由表 2 和 4 可见,碳化后棱柱体抗压强度和弹性模量明显增大,而极限荷载应变和泊松比几

乎没有什么变化. 由于 CO_2 的引入, 与其中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应, 生成强度比 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 高的 CaCO_3 , 这个过程不但降低了精细混凝土的碱性, 也提高了其强度. 因此, 碳化对于 TRC 结构来说是非常有利的, 只要满足粘结性能的要求, 可用最小的保护层厚度.

3.2 碳化后应力-应变曲线

3.2.1 试验应力-应变曲线 碳化前一组试件和碳化后一组试件的试验应力-应变曲线的对比见图 6.

由图 6(a)可见, 碳化后精细混凝土的强度和弹性模量变得更高, 试验应力-应变曲线变得更加陡峭. 而由图 6(b)可见, 碳化前后精细混凝土的力学特征比较相似, 应力-应变曲线上升段几乎都

为直线.

碳化后应变片采集的应变与应力之间的试验曲线如图 7 所示(“C-1”中, “C”指的是碳化后的试件, “1”指的是试件的编号).

由图 7 可见, 由于碳化后精细混凝土的强度和弹性模量变得更高, 试验应力-应变曲线变得更加陡峭.

3.2.2 应力-应变曲线模拟 由 2.3 的讨论可知, 将试验得出的参数代替 GB 50010—2002 中的相关参数后, 数值模拟的曲线和试验的结果吻合得比较好. 这里采用文献[4]的模型模拟碳化后的应力-应变曲线, 如图 8 所示.

由图 8 可见, 将试验得出的参数输入到模型中模拟出来的结果和试验结果吻合得比较好.

表 4 棱柱体抗压试验结果
Tab. 4 Prism compressive test results

试件编号	f_c/MPa	极限荷载处应变/ 10^{-3}		ν	割线弹性模量/ MPa		
		LVDT 测得	应变片测得		0.3 f_c 处	0.4 f_c 处	f_c 处
1	79.45	4.04	2.74	0.204	34 900	32 700	29 000
2	88.98	5.14	3.26	0.190	33 300	32 600	27 300
3	83.18	4.59	3.39	0.192	31 900	31 700	24 600
4	86.91	4.06	3.43	0.187	32 200	32 100	25 300
5	85.11	4.73	3.19	0.190	32 800	32 700	26 700
6	81.80	3.84	3.24	0.186	32 100	32 000	25 200
平均值	84.24	4.40	3.21	0.192	32 900	32 300	26 400
标准差	3.475	0.50	0.247	0.004	1 121	424	1 643
相对标准差	4.12%	11.36%	7.69%	2.08%	3.41%	1.31%	6.22%

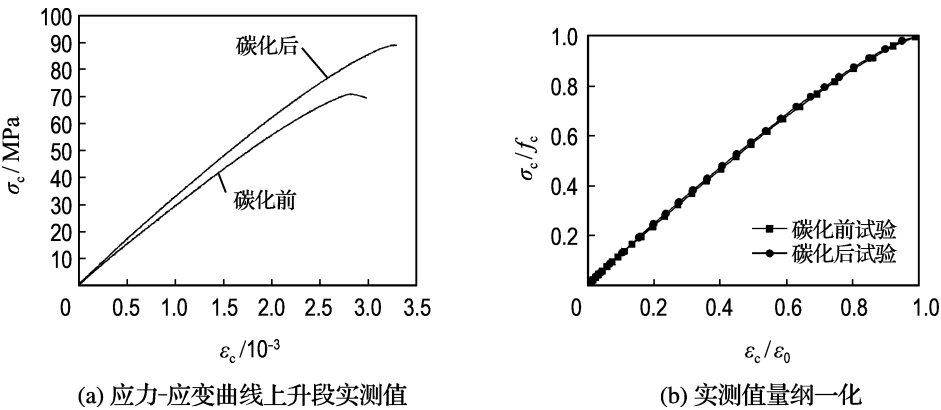


图 6 碳化前后精细混凝土应力-应变曲线的比较

Fig. 6 Comparison of stress-strain curves of fine grained concrete before and after carbonation

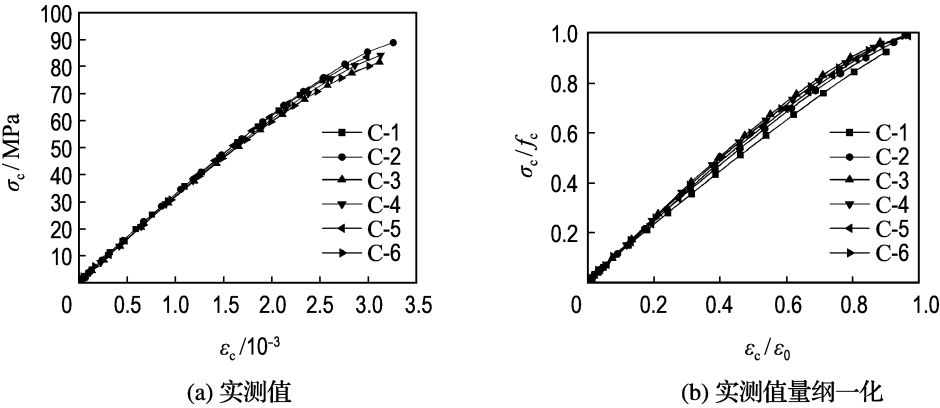


图 7 碳化后精细混凝土的应力-应变曲线上升段

Fig. 7 Ascending segments of stress-strain curves of carbonated fine grained concrete

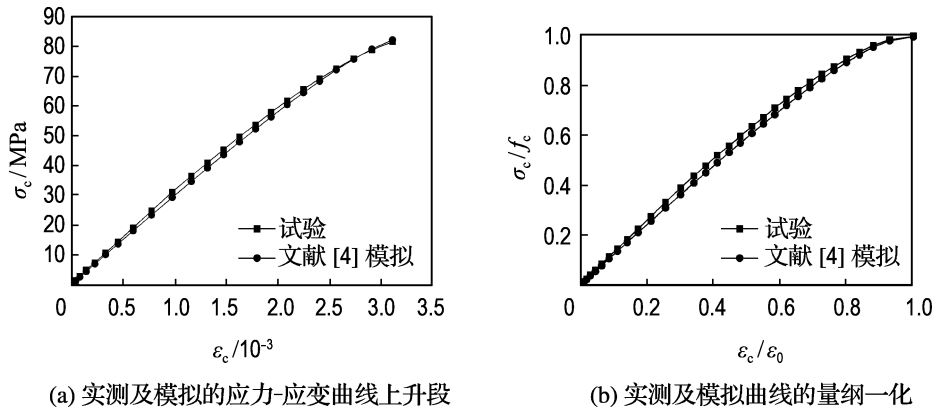


图 8 碳化后精细混凝土的实测与模拟曲线的比较

Fig. 8 Comparison of measured and simulated curves of carbonated fine grained concrete

4 结 语

将试验得出的模型参数值替代同等强度普通混凝土的参数值,试验曲线和模拟曲线吻合得比较好;而从普通混凝土经验获得的,给定的弹性模量和极限荷载对应的应变值,不能应用于本文研究的精细混凝土。

与相同抗压强度的普通混凝土相比较,精细混凝土有以下特点:

(1)弹性模量是低的,极限荷载处的应变是高的,这些与普通混凝土的不同可由基体的组分很好地解释,高的胶凝材料含量意味着高含量的水泥胶凝体,其具有高的变形能力,因此导致高的测量应变;

(2)棱柱体受压强度与立方体受压强度之比较高,试验平均值为 0.92;

(3)应力-应变曲线上上升段较陡且近似直线,相应最大应力处的应变较高;

(4)碳化后精细混凝土的强度和弹性模量变得更高,试验应力-应变曲线变得更加陡峭。

在本文研究框架的范围内,只有有限数目的试件,因此不能非常准确地反映高性能精细混凝土的特性,但可以作为设计 TRC 结构的参考.如果精细混凝土的不同变形行为(长期的受压性能、受拉性能等)被考虑,通过大量试验确定的弹性模量 E_c 和相应的极限荷载应变 ϵ_{c1} 及在模型中的其他建议的参数可用于表示 $\sigma\epsilon$ 关系或简化的抛物线-矩形图的材料抗压本构。

参考文献：

[1] HEGGER J, WILL N, BRUCKERMANN O, *et al.* Loading-bearing behavior and simulation of textile-reinforced concrete [J]. **Materials and Structures**, 2006, **39**(8):765-776

[2] 过镇海. 混凝土的强度和变形 —— 试验基础和本构关系[M]. 北京:清华大学出版社, 1997

[3] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系 —— 原理与应用 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004

[4] Comité Euro - International du Béton. CEB-FIP Model Code 1990 — Design Code [S]. UK:Redwood Books, 1993

[5] 李 赫. 纤维编织网增强混凝土力学性能的实验研究及理论分析[D]. 大连:大连理工大学, 2005

[6] BRAMESHUBER W, BROCKMAN T. Size effect on the mechanical properties of fine grained concrete matrices [C] // **Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2)**. Dresden: Technische Universität Dresden, 2003:161-173

[7] 康清梁. 钢筋混凝土有限元分析[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1996

[8] 李义强,王新敏,陈士通. 混凝土单轴受压应力 - 应变曲线比较[J]. 公路交通科技, 2005, **22**(10):75-78

[9] 中华人民共和国建设部. GBJ 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002

Experimental study of uniaxial compression properties of high performance fine grained concrete

YIN Shi-ping* , XU Shi-lang

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: As a result of high bearing capability, excellent ductility, resistance to corrosion, no magnetizing, thin wall and light weight, the textile reinforced concrete (TRC) is expected as one of the most promising structural elements in the 21st century. For the fine grained concrete used as matrix for TRC, there are currently no straightforward methods to research into the mechanical properties such as $\sigma\epsilon$ curves, compressive, flexural and tensile strengths. For popularization and application of TRC, the compressive properties and stress-strain curve of the fine grained concrete under uniaxial compression are studied by experiments. The experimental results show that compared with ordinary concrete with similar compressive strength, the Young's modulus of fine grained concrete is lower, and the strain at ultimate load is higher. When the experimentally determined control parameters are used, experimental curves show very good agreement with the calculated curves.

Key words: fine grained concrete; stress-strain curves; compression property