

混凝土早期力学性能试验研究

赵联桢, 杨 平, 刘 成

(南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要:混凝土前7 d的力学性能对各种工程耐久性有重要影响. 为探索混凝土早期的力学性能变化规律, 基于4种配合比进行了混凝土前7 d 5个龄期的力学性能试验, 得出如下结论: (1) 混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度、轴心抗拉强度和极限拉伸值等性能在前3 d龄期的增长率远高于3—7 d的增长率; (2) 混凝土前7 d的轴心抗拉强度均大于其劈裂抗拉强度; (3) 以劈裂抗拉强度为基准的压拉比和以轴心抗拉强度为基准的压拉比, 都呈先减小后缓慢增大的趋势, 但是以劈裂抗拉强度为基准的压拉比较大.

关 键 词: 混凝土; 耐久性; 力学性能; 早期

中图分类号: TV431

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)01-0035-06

混凝土作为土木工程建设最基本的材料, 其各项性能直接影响到结构空间的安全稳定; 而力学性能又是混凝土诸多性能中最基本的性能^[1], 进一步的研究表明混凝土早期力学性能对结构耐久性具有至关重要的意义^[7]. 因此, 混凝土专家开展了此领域的研究, 并取得了一些初步成果. 研究^[2-6]发现: 当混凝土的早期强度和极限拉伸值过低时, 混凝土在早期温度应力、干缩应力和自收缩应力作用下产生微裂缝的概率会大大增加, 这些微裂缝将是大裂缝产生的前提条件, 大的裂缝一旦产生将会给结构工程造成难以估量的损失. 江影^[7]通过掺粉煤灰混凝土的早期抗裂力学性能试验, 分析了粉煤灰在混凝土强度改善过程中的化学机理, 并认为合理的粉煤灰掺量能改善混凝土早期力学性能和抗裂性能. 钱晓倩^[8]通过试验研究了偏高岭土对高强混凝土抗拉性能的影响: 当偏高岭土的掺量小于15%时, 能改善混凝土的轴心抗拉强度(以下简称轴拉强度)、抗压强度和抗弯强度, 且掺量越高改善效果越明显. 杨扬等^[9]使用自行设计的试验装置对混凝土1 d以前的抗拉性能做了研究. 就粉煤灰掺量对混凝土力学强度的影响问题, 严捍东^[10]进行了系统的试验研究, 结果表明: 粉煤灰的掺入对水泥基材料早期强度(28 d以前)的影响较大; 抗压强度受粉煤灰影响较小; 抗弯、抗剪、劈裂抗拉强度受到的影响较大. 李栓民^[11]研究了磷渣细度和掺量对水泥早期力学性能的影响, 研究发现磷渣细度对强度的决定性作用发生在后期.

以往的材料专家在混凝土早期力学性能方面做了大量的工作, 但是由于混凝土力学性能早期测量的复杂性, 目前对混凝土前7 d, 尤其是前3 d龄期力学性能的关注和研究较少. 鉴于混凝土早期力学性能对工程耐久性的重大影响, 本文就混凝土在前7 d龄期的力学性能开展了试验研究.

1 试验材料及方法

1.1 原 材 料

水泥为乌兰水泥厂的P·O 42.5水泥, 其化学成分和相关性能见表1, 粉煤灰为托电I级粉煤灰和肥城I级粉煤灰, 相关化学成分和性能见表2.

收稿日期: 2012-05-20

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ11_0521); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 赵联桢(1984-), 男, 山东滕州人, 博士研究生, 主要从事环境岩土与地下工程的教学与研究工作.

E-mail: zhaolianzhen@163.com 通信作者: 杨平(E-mail: yangping@njfu.edu.cn)

表 1 水泥的物理力学性能和化学成分

Tab. 1 Cement's physical and mechanical property and chemical composition									
项 目	抗折强度/ MPa		抗压强度/ MPa		凝结时间/ h		安定性/	细度 80μm/	密度/
	3 d	28 d	3 d	28 d	初凝	终凝	mm	%	(g ·cm ⁻³)
乌兰 P · O 42.5	4.8	8.5	26.8	54.6	2.6	4.75	0.2	2.6	3.08
GB175-2007 规定值	≥3.5	≥6.5	≥16.0	≥42.5	≥0.75	≤10	≤5.0	≤10	-
项 目	标准稠度	SiO ₂ /	Al ₂ O ₃ /	Fe ₂ O ₃ /	CaO/	MgO/	碱含量/	烧失量/	SO ₃ /
	用水量/ %	%	%	%	%	%	%	%	%
乌兰 P · O 42.5	26.2	23.57	8.47	3.67	56.06	2.11	0.46	2.52	2.20
GB175-2007 规定值	-	-	-	-	-	≤5	-	≤5.0	≤3.5

表 2 粉煤灰品质检验结果

Tab. 2 The quality test results of fly ash							
项 目	密度/	细 度/	需水量比/	烧失量/	含水量/	SO ₃ /	强度活性
	(g ·cm ⁻³)	%	%	%	%	%	指数/ %
托电粉煤灰	2.22	4.2	91.8	2.30	0.2	0.80	82.6
肥城 I 级粉煤灰	2.22	11.3	93.0	1.43	0.1	1.06	77.8
DL/T 5055-2007	—	≤12.0	≤95	≤5.0	≤1.0	≤3.0	≥70.0
F 类 I 级灰规定值							
项 目	SiO ₂ /	Al ₂ O ₃ /	Fe ₂ O ₃ /	CaO/	MgO/	f-CaO/	碱含量/
	%	%	%	%	%	%	%
托电粉煤灰	40.33	44.97	3.41	4.05	0.89	0.22	0.43
肥城 I 级粉煤灰	49.48	33.86	4.83	5.44	0.55	0.21	0.81
DL/T 5055-2007	-	-	-	-	-	≤1.0	-
F 类 I 级灰规定值							

试验选用的减水剂为 JM-PCA(1) 型减水剂(聚羧酸)和山东的 HPC-GYJ 高效引气减水剂(萘系),HPC-GYJ 高效引气减水剂, JM-PCA(1) 型减水剂和引气剂按照《混凝土外加剂》^[12] 进行检验. 经检验,均满足要求. 本试验的骨料为二级配,试验用水为南京自来水,具体的材料用量见表 3.

表 3 混凝土的材料用量

Tab. 3 Mix proportion of concrete										
编 号	用量/ (kg ·m ⁻³)							掺量/ %		
	水泥	F1	F2	砂子	小石	中石	水	J1	J2	引气剂
J1F1	245	105	-	731	439	658	140	2.000	-	0.005
J1F2	245	-	105	731	439	658	140	1.350	-	0.010
J2F1	245	105	-	731	439	658	140	-	0.650	0.005
J2F2	245	-	105	731	439	658	140	-	0.455	0.010

注: F1: 肥城粉煤灰, F2: 托电粉煤灰, J1: 萘系减水剂, J2: 聚羧酸类减水剂

1.2 试验方法

试验参照《水工混凝土试验规程》^[13] 进行,且矿物掺合料掺和方式为内掺. 混凝土立方体抗压试件和劈裂抗拉试件的尺寸相同,均为 150 mm×150 mm×150 mm. 轴心抗拉试件尺寸和轴心抗压试件尺寸分别为 100 mm×100 mm×515 mm, 150 mm×150 mm×300 mm. 进行抗压强度试验时,试件的承压面应为试件侧面,加载速度为 0.3 ~0.5 MPa/s. 针对轴拉试验,试验设备有 2 种,1 d 时采用的试验机为数字拉力机(型号为 AGS-J),其余龄期采用的试验机器为液压试验机(型号为 WE-1000),电子设备实时采集数据. 为防止由于混凝土早期强度过低造成的试件和钢模之间的粘结损坏,在成型 1 d 和 2 d 的混凝土试件时需在模具内铺设聚乙

烯薄膜.其他龄期的试件强度较高不会发生粘结破坏,因此就不必铺设薄膜.抗压和劈裂抗拉试验机为液压式压力试验机,型号为YE-2000.

2 混凝土立方体试件抗压强度结果与分析

试验在研究混凝土前7 d力学性能的基础上,探讨了矿物掺合料对早期强度及开裂的影响.

立方体抗压强度试验结果见图1,在4组试验中,混凝土抗压强度增长规律基本相同:混凝土的强度发展呈现先快后慢的趋势,前3 d的强度增长率呈线性,且是3—7 d平均增长率的4.1倍,3 d龄期的抗压强度是1 d抗压强度的6倍,7 d强度是1 d强度的8.4倍;在7 d龄期内,萘系减水剂对强度发展的促进作用要稍高于聚羧酸减水剂;3 d龄期以前,托电粉煤灰对抗压强度发展的促进作用低于肥城粉煤灰;选用萘系减水剂时,1 d和2 d立方体抗压强度分别降低25%和5%;选用聚羧酸减水剂时,1 d和2 d立方体抗压强度则分别降低24%和4%.3—7 d龄期,托电粉煤灰对抗压强度发展的促进作用高于肥城粉煤灰;选用萘系减水剂和聚羧酸减水剂时分别高7%和4.3%.

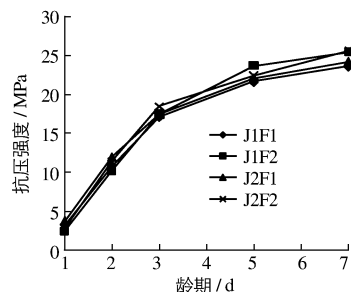


图1 混凝土立方体抗压强度

Fig. 1 Compressive strength of concrete

3 混凝土立方体试件劈裂抗拉强度结果与分析

混凝土劈裂抗拉强度试验结果见图2.可见,劈裂抗拉强度在前3 d的平均增长速率是后4 d平均增长速率的9.1倍,劈裂抗拉强度在前3 d的发展速率明显高于立方体抗压强度;3和7 d的劈裂抗拉强度分别是1 d劈裂抗拉强度的4.8倍和5.6倍.当选用萘系减水剂时,3 d龄期以前,与肥城粉煤灰相比,托电粉煤灰的使用会不同程度降低混凝土的劈裂抗拉强度,1和2 d龄期分别降低3%和7%;3—7 d龄期,掺托电粉煤灰组的劈裂抗拉强度高于掺肥城粉煤灰的组别,3,5,7 d龄期提高幅度分别为7%,11%和10%.而选用聚羧酸减水剂时,与肥城粉煤灰相比,1,2,3,5和7 d龄期托电粉煤灰的使用会导致劈裂抗拉强度分别降低30%,13%,4%,6%和15%.

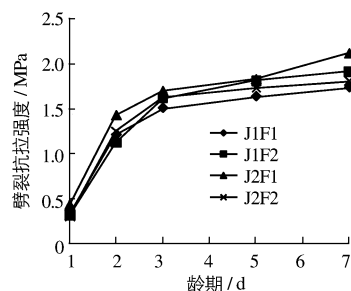


图2 混凝土劈裂抗拉强度

Fig. 2 Splitting tensile strength of concrete

4 混凝土轴拉强度试验

抗拉试验研究的参数有轴拉强度、轴拉弹性模量、极限拉伸值.

4.1 混凝土的轴拉强度试验

轴拉强度试验结果见图3.可见,轴拉强度增长呈现先快后慢的趋势,前3 d的平均增长率是3—7 d平均增长率的8.6倍,这说明轴拉强度在前3 d的发展速度要大于抗压强度的发展速度;3 d龄期的轴拉强度是1 d龄期的5.9倍,7 d龄期的轴拉强度是1 d龄期的6.9倍;选用萘系减水剂时,在前3 d龄期内,2种粉煤灰对轴拉强度的影响程度基本相同,而在5 d和7 d两个龄期,托电粉煤灰对轴拉强度的促进作用比肥城粉煤灰高9%.选用聚羧酸减水剂时,在1 d和2 d两个龄期,与托电粉煤灰相比,肥城粉

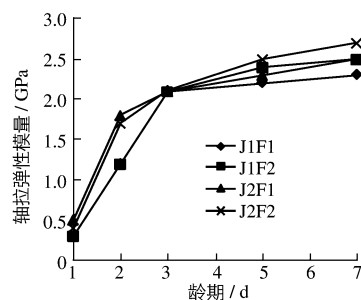


图3 轴心抗拉强度

Fig. 3 Axial tensile strength

的促进作用比肥城粉煤灰高9%.选用聚羧酸减水剂时,在1 d和2 d两个龄期,与托电粉煤灰相比,肥城粉

煤灰的掺入会使轴拉强度分别提高 13% 和 6%; 3 d 时两者相等; 而在 5 d 和 7 d 两个龄期, 掺托电粉煤灰组别的轴拉强度比掺肥城粉煤灰组别的轴拉强度分别高 9% 和 8%。

从图 1~3 可以看出: 在 1, 2, 3, 5 和 7 d 龄期, 混凝土的轴拉强度比劈裂抗拉强度分别高 0%, 18%, 30%, 34% 和 32%, 这是因为轴拉试样的截面积小于劈裂抗拉试样的截面积, 所以轴拉试样包含结构缺陷的概率会降低, 因此其强度会有所提高; 在 7 d 龄期内, 抗拉强度 (包括轴心抗拉强度和劈裂抗拉强度) 的发展速度要高于立方体抗压强度的发展速度, 而抗拉强度在 3 d 龄期以后发展很缓慢, 抗压强度却会保持较快增长, 这是由于在混凝土终凝后各组成微粒的位置已经相对固定, 相互之间的黏聚力已充分发展造成的。

4.2 混凝土的轴拉弹性模量

轴拉弹性模量试验结果见图 4。可见, 混凝土轴拉弹性模量在前 3 d 以及 3—7 d 的增长均呈线性, 且前 3 d 的增长率为 3—7 d 增长率的 3.6 倍, 所以前 3 d 是控制混凝土开裂的关键时期。3 d 龄期的轴拉弹模是 1 d 的 2.2 倍, 7 d 轴拉弹模是 1 d 的 2.9 倍; 选用萘系减水剂时, 掺肥城粉煤灰组别的轴拉弹模在 1, 2, 3, 5 和 7 d 龄期比掺托电粉煤灰的组别分别低 25%, 25%, 3%, 5% 和 3%; 选用聚羧酸减水剂时, 掺托电粉煤灰组别的轴拉弹模在 1, 2, 3, 5 和 7 d 龄期比掺肥城粉煤灰的组别分别高 13%, 21%, 11%, 9% 和 7%。以上分析表明, 掺肥城粉煤灰对混凝土早期抗裂性能的改善要优于掺托电粉煤灰。

4.3 混凝土的极限拉伸值

混凝土前 7 d 的极限拉伸值如图 5 所示。可见, 极限拉伸值的发展在试验所在的龄期内呈现先快后慢的趋势, 混凝土极限拉伸值在 3—7 d 的发展速率仅是前 3 d 的 1/6; 3 d 的极限拉伸值为 1 d 的 1.7 倍, 而 7 d 的极限拉伸值仅为 1 d 的 1.9 倍; 在选用肥城粉煤灰的前提下, 掺聚羧酸减水剂组别的极限拉伸值在 1, 2, 3, 5 和 7 d 龄期比掺萘系减水剂组别的分别降低 3%, 4%, 3%, 3% 和 4%; 当选用托电粉煤灰时, 掺萘系减水剂组别的极限拉伸值在 1, 2, 3, 5 和 7 d 龄期比掺聚羧酸减水剂的组别分别高 9%, 11%, 11%, 7% 和 8%。上述分析表明, 萘系减水剂对混凝土早期抗裂性能的改善作用要优于聚羧酸减水剂。

4.4 混凝土的早期压拉比

压拉比即混凝土抗压强度与抗拉强度的比值。作为衡量混凝土开裂的重要参数, 本文通过试验研究 2 种粉煤灰和减水剂对压拉比的影响。

4.4.1 以劈裂抗拉强度为基准的压拉比 以劈裂抗拉强度为基准的压拉比试验结果见图 6。以劈裂抗拉强度为基准的压拉比在 1, 2, 3, 5 和 7 d 龄期的平均值分别为 8.90, 8.85, 10.83, 12.75 和 13.03, 且以劈裂抗拉强度为基准的压拉比在 1—2 d 龄期内呈下降趋势, 在 2—7 d 龄期内总体上呈缓慢上升趋势, 但是增长速率越来越小, 因此 2 d 龄期时出现压拉比的最小值, 7 d 的压拉比约是 2 d 的 1.5 倍; 在选用萘系减水剂的基础上, 掺肥城粉煤灰组别的压拉比在 1, 3, 5 和 7 d 龄期比掺托电粉煤灰组别的分别高 30%, 5%, 1% 和 2%; 而选用聚羧酸减水剂时, 较之掺肥城粉煤灰组别的压拉比, 掺托电粉煤灰组别的压

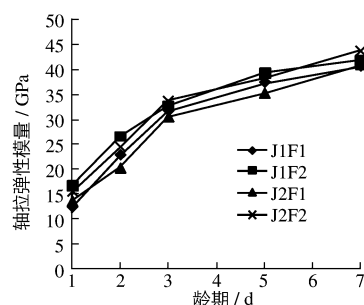


图 4 轴拉弹性模量

Fig. 4 Axial tensile elastic modulus

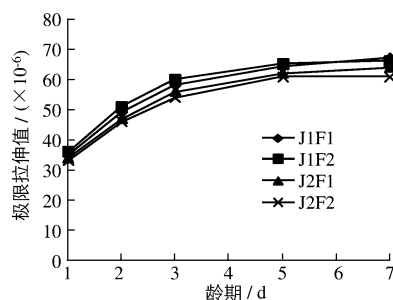


图 5 混凝土极限拉伸值

Fig. 5 Ultimate tensile strain of concrete

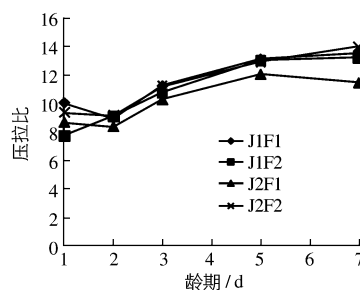


图 6 以劈裂抗拉强度为基准的压拉比

Fig. 6 Pressure ratio based on splitting tensile strength

拉比在2,3,5和7 d龄期分别高10%,10%,8%和23%。上述分析表明,从改善混凝土早期抗裂性能的角度来看,肥城粉煤灰要优于托电粉煤灰,这是由于肥城粉煤灰细度更小,较好地填充了微粒之间空隙,增强了微粒之间的黏聚力。

4.4.2 以轴拉强度为基准的压拉比 以轴拉强度为基准的压拉比试验结果如图7所示。以劈裂抗拉强度为基准的压拉比在1,2,3,5和7 d龄期的平均值分别为8.28,7.70,8.38,9.55和9.85,且以轴拉强度为基准的压拉比和以劈裂抗拉强度为基准的压拉比在1—7 d期间的发展规律基本类似。在1—7 d龄期内压拉比呈先减小(到2 d时为止)后缓慢上升趋势,7 d的压拉比约是2 d的1.3倍;在选用肥城粉煤灰的基础上,掺聚羧酸减水剂组别的压拉比在1,2,5和7 d龄期上比掺萘系减水剂组别的分别低30%,5%,1%和2%;而选用托电粉煤灰时,较之掺聚羧酸减水剂组别的压拉比,掺萘系减水剂组别的压拉比在1,2,5和7 d龄期分别高10%,10%,8%和23%。

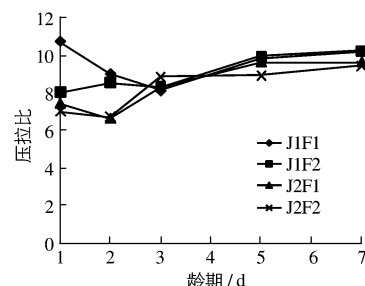


图7 以轴拉强度为基准的压拉比

Fig. 7 Pressure ratio based on axial tensile strength

5 结 语

(1)混凝土的立方体抗压强度发展呈现先快后慢的趋势,前3 d的强度增长率呈线性,且是3—7 d平均增长率的4.1倍;在前7 d龄期内,萘系减水剂对立方体抗压强度发展的促进作用要稍高于聚羧酸减水剂,但此优势会随着龄期的发展而减小。

(2)劈裂抗拉强度在前3 d的平均增长速率是后4 d平均增长速率的9.1倍,劈裂抗拉强度在前3 d的发展速率要明显高于立方体抗压强度;3 d,7 d的劈裂抗拉强度分别是1 d的4.8倍和5.6倍。

(3)轴拉强度增长呈现先快后慢的趋势,前3 d的平均增长率是3—7 d的8.6倍,这说明轴拉强度在前3 d的发展速度要大于立方体抗压强度的发展速度。

(4)混凝土7 d龄期的轴拉强度均大于其劈裂抗拉强度,在1,2,3,5和7 d龄期分别大10%,18%,30%,34%和32%。

(5)混凝土轴拉弹模在前3 d以及3—7 d的增长均呈线性,且前3 d的增长率为3—7 d的3.6倍,所以前3 d是控制混凝土开裂的关键时期。3 d龄期的轴拉弹模是1 d的2.2倍,7 d轴拉弹模是1 d的2.9倍;在使用相同减水剂的条件下,掺托电粉煤灰的组别在各个龄期上的轴拉弹模都要大于掺肥城粉煤灰的组别,说明掺肥城粉煤灰对混凝土早期抗裂性能的改善要优于掺托电粉煤灰。

(6)极限拉伸值的发展在试验龄期内呈现先快后慢的趋势,混凝土极限拉伸值在3—7 d的发展速率仅是前3 d的1/6;3 d的极限拉伸值为1 d的1.7倍,而7 d的极限拉伸值仅为1 d的1.9倍;在粉煤灰种类相同的条件下,聚羧酸类减水剂对极限拉伸值的改善作用次于萘系减水剂,所以萘系减水剂较之聚羧酸类减水剂对混凝土耐久性的改善作用更明显。

(7)在试验龄期内,以劈裂抗拉强度为基准的压拉比和以轴拉强度为基准的压拉比都呈先减小后缓慢增大的趋势,但是以劈裂抗拉强度为基准的压拉比大于以轴拉强度为基准的压拉比,故前者较后者而言,在评价混凝土耐久性方面偏于保守。

参 考 文 献:

- [1] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999: 263-281. (WU Zhong-wei, LIAN Hui-zhen. High performance concrete[M]. Beijing: Railway Publishing House of China, 1999: 263-281. (in Chinese))
- [2] 余学芳. 粉煤灰混凝土的抗裂性分析[J]. 混凝土, 2003(2): 48-50. (YU Xue-fang. The crack analysis of fly ash concrete [J]. Concrete, 2003(2): 48-50. (in Chinese))

- [3] 沈旦申. 粉煤灰混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989: 42-67. (SHEN Dan-shen. The fly ash concrete[M]. Beijing: Railway Publishing House of China, 1989: 42-67. (in Chinese))
- [4] LEPAGES, BALBAKIM, DALLAIRE, et al. Early shrinkage development in high performance concrete[J]. Cement, Concrete and Aggregates, 1999, 21(2): 31-35.
- [5] JCI. Autogenous shrinkage of concrete[R]//EI-ICHI TAZAWA, E & FNSPON. Proceedings of the International Workshop, London, 1998.
- [6] DILGER W H, WANG C, NITANI K. Experimental study on shrinkage and creep of high-performance concrete [C] // Proceedings of 4th International Symposia the Utilization of High-strength/High-performance Concrete. Paris: Ponts et Chaussées, 1996.
- [7] 江影. 粉煤灰混凝土早期抗裂力学性能的试验研究[J]. 大坝与安全, 2005(3): 31-35. (JIANG Ying. The mechanical anti-crack properties test research on concrete at early stage[J]. Dam and Safety, 2005(3): 31-35. (in Chinese))
- [8] 钱晓倩, 李宗津. 掺偏高岭土的高强高性能混凝土的力学性能[J]. 混凝土与水泥制品, 2001(1): 16-18. (QIAN Xiao-qian, LI Zong-jin. The mechanics performance of high-strength high-performance concrete mixed with partial kaolin[J]. China Concrete and Cement Products, 2001(1): 16-18. (in Chinese))
- [9] 杨扬, 江晨晖, 许四法. 高性能混凝土早龄期抗拉性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2008(2): 94-99. (YANG Yang, JIANG Chen-hui, YU Si-fa. The experimental study on tensile property of high performance concrete at early stage[J]. Journal of Building Materials, 2008(2): 94-99. (in Chinese))
- [10] 严捍东. 粉煤灰掺量对大坝混凝土力学性能的影响[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2000(3): 291-295. (YAN Han-dong. Effect of the content of fly ash on the mechanical performance of dam concrete[J]. Journal of Huaqiao University(Natural Science), 2000(3): 291-295. (in Chinese))
- [11] 李栓民. 磷渣细度和掺量对水泥早期力学性能的影响[J]. 中国港湾建设, 2010(2): 39-41. (LI Shuan-min. The effect of finenesses and additions of slag on cement mechanical properties at early stage[J]. China Harbour Engineering, 2010(2): 39-41. (in Chinese))
- [12] GB 8076-1997, 混凝土外加剂[S]. (GB 8076-1997, Concrete admixture[S]. (in Chinese))
- [13] SL 352-2006, 水工混凝土试验规程[S]. (SL 352-2006, Hydraulic concrete test procedures [S]. (in Chinese))

A study of concrete early mechanical properties

ZHAO Lian-zhen, YANG Ping, LIU Cheng

(Institute of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: The concrete mechanical properties of 1 d-7 d have very important effects on the durability of concrete structure. In order to explore the early mechanical property law of concrete, the mechanical properties of concrete in the first seven days are tested on the basis of four proportions. The research findings and conclusions are as follows: (1) the growth rate of cubic compressive strength, axial tensile strength, splitting tensile strength and ultimate tensile strain of concrete in the first three days is higher than the growth rate in 3 d ~ 7d; (2) the axial tensile strength of concrete is greater than its splitting tensile strength in the first seven days; and (3) the pressure ratio of concrete based on splitting tensile strength and the pressure ratio of concrete based on axial tensile strength both tend to decrease firstly and then increase slowly, but the pressure ratio of concrete based on splitting tensile strength is greater than the pressure ratio of concrete based on axial tensile strength.

Key words: concrete; durability; mechanical properties; early-age