

文章编号: 1001-4888(2008)01-0053-06

水泥土细观破裂过程的实时观测试验^{*}

宁宝宽^{1,2}, 陈四利^{1,2}, 梧秀², 刘一芳¹

(1. 沈阳工业大学 建筑工程学院, 沈阳 110023; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 利用中科院武汉岩土力学研究所的岩石破裂过程细观力学实验系统, 对不同水泥掺量的水泥土试件进行了单轴压缩细观实验, 该试验系统可通过显微镜和数码视频装置实时观测水泥土试件的细观结构及其破坏的全过程, 试验得到了水泥土破裂过程中的细观图像及其相应应力应变关系曲线。分析了不同水泥掺量的水泥土试件的细观破坏特征及其与宏观力学行为的关系, 研究为水泥土细观损伤本构模型的建立提供了实验依据。

关键词: 水泥土; 细观力学试验; 实时观测; 破裂特征; 显微图像

中图分类号: TU411.3 **文献标识码:** A

0 引言

随着国民经济和工程建设的迅猛发展, 有关岩土工程学科更为广泛和深入的课题不断提出。目前的宏观实验研究远不能解决其中的问题, 许多学者开始重视工程材料的细观行为, 共同认识到宏观的变形破坏行为是细观变形的积累和扩展的结果, 掌握细观变形破坏的规律, 可以为岩土工程中出现的问题提供更科学的解释。因此, 有关岩石和混凝土的细观力学实验和理论研究近年来已经成为研究热点, 并取得了相应研究成果^[1-3]。

水泥土材料, 由于其性能良好, 材料来源广泛, 价格低廉, 被广泛应用于土木工程中。众多学者进行了水泥土的力学性质及其强度增长规律的研究, 如 Fisher 和 Kawasaki^[4-5] 等分析了黏性土中掺入不同水泥的力学特性; 郑刚等^[6] 对水泥土桩的力学性能及其施工技术进行了研究; 童小东等^[7] 就水泥土的应力应变关系及外掺剂的影响进行了系统研究; 本文作者探讨了水泥土的环境侵蚀效应^[8-11]。

然而, 以上研究均集中于水泥土的宏观力学性质以及工程应用, 有关水泥土的变形破坏特征及破坏机理的细观研究还未见文献报道。因此, 作者利用中科院武汉岩土力学研究所的岩石破裂过程细观力学实验系统, 对不同水泥掺量的水泥土试件进行了单轴压缩细观实验, 实时观测了水泥土的细观结构以及荷载作用下微裂纹的萌生、扩展直至变形破坏规律, 并与水泥土材料的宏观力学性质进行了对比分析, 同时探讨了水泥土的破裂机理。为水泥土强度理论以及细观本构模型的研究提供了实验依据。

1 实验

1.1 试样制备

水泥土的原状土为取自沈阳市某路基地下约 3m 深处的粉质黏土, 该层土在自然状态下呈软塑状, 其主要物理性质指标如表 1 所示。

* 收稿日期: 2007-08-20; 修订日期: 2007-12-19

基金项目: 辽宁省教育厅基金资助项目(20060612)和 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室课题资助项目(Z110403)

通讯作者: 宁宝宽(1971—), 男, 博士, 副教授, 从事土木工程方面的教学和科研工作。

表 1 试验用原状土样主要物理性质指标
Tab. 1 The results of physical behaviors of soil

含水率 ω (%)	孔隙比 e	天然重度 γ (kN/m ³)	比重 d_s	饱和度 S_r (%)	液限 ω_L (%)	塑限 ω_p (%)	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	分类
27.0	0.85	19.2	2.71	96.8	35.0	19.4	15.6	0.58	粉质黏土

在水泥土试块制备的过程中,把试验土样按干容重配制成含水率为 40% 的试验样土,水泥采用 425[#] 普通硅酸盐水泥,水泥掺入比分别为 7%、10%、15%、20%,水灰比 0.5,将水泥和土搅拌均匀,装入预制的试模中,制成 17×17×37mm 的矩形试件,24 小时脱模后放入标准养护箱中养护 90d 备用。

1.2 试验设备

实验采用中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室的岩石破裂过程细观力学实验系统。该仪器装配有光学显微镜,可以观察在加载过程中试样表面(试样为长方柱体)及局部区域的变形破坏形貌,并得到应力—应变曲线和相应裂纹开裂和扩展图像。装配摄影仪,还可获得变形全过程的录像,多方位的摄像信号通过视频分配器将图像传送给不同的监视器,这样,试件在荷载作用下的表面变化情况均可由监视器来观察;同时,对裂纹扩展过程的图像进行计算机实时采集。

1.3 试验的进行

实验采用变形控制加载方式,变形速率控制为 0.0005mm/min,显微镜放大倍数取 50 倍。在加载的不同阶段,对试件表面进行显微观察、拍照,得到了各不同受力阶段试件的表面形貌,微裂纹的萌生、扩展、连接,直至宏观断裂破坏全过程的观察记录;利用裂纹扩展过程的数字视频观测系统,对试件的上表面的裂纹扩展过程进行局部显微图像监测;另外,对显微观测的表面以及与其相垂直表面的裂纹扩展全过程进行了全场监测。计算机自动采集了试验过程中的各种应力—应变数值。实验共进行了 4 组(每组 3 个)不同水泥掺量的试件,共计 12 个试件的细观实验,试件制作尺寸偏差在 2mm 以内。

2 试验分析

2.1 不同掺量水泥土的表面细观特征

不同水泥掺量的水泥土试件经过相同时间的养护后,在加载之前,通过显微观测发现,水泥土的固化程度不同。如图 1(a)为 7% 水泥掺量的水泥土试件,其水化产物少,试件颜色较深,与原状土颜色接近,试件硬度较小。随着水泥掺量的增加,水泥和土的水化产物增加,试件颜色变浅,试件硬度增加。图 1(b)、(c)和(d)分别是水泥掺量为 10%、15%和 20%的试件养护 90d 后,试件表面的显微观测图像。

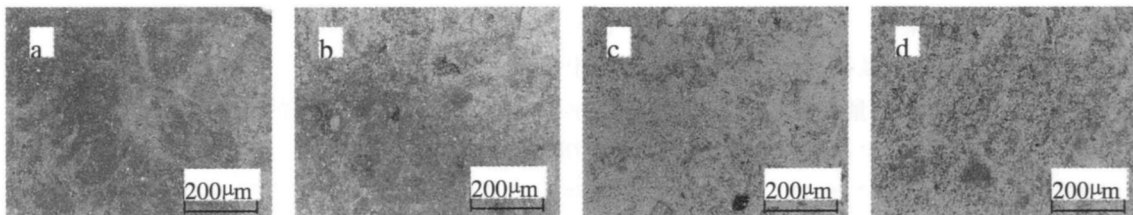


图 1 不同水泥掺量试件表面显微结构图

Fig. 1 Micro-image of structure of different amount of cement

2.2 应力—应变曲线

实验系统自动记录了各试件的应力和应变数据并绘制了相应的应力—应变曲线,选取典型实验曲线如图 2 所示。

水泥掺量不同,水泥土的应力—应变关系曲线明显不同。水泥掺量较低时(7%~10%),随着荷载的增加,变形增长较快,水泥土变形较大,强度较低。7% 的水泥土试件,由于水泥掺量少,水泥与黏土水化所生成的水泥石骨架所占比例少,水泥土的承载虽然比原状土有所改善,但是强度依然偏低,变形量较大;提高水泥掺量(15%~20%),水泥土力学性质明显改善,强度增长幅度也较大。其应力—应变关系曲线具有明显的阶段性,水泥土表现出与混凝土和岩石等脆性材料相似的力学性质。

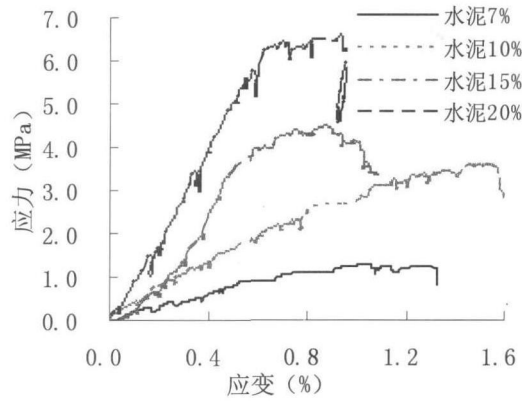


图 2 不同水泥掺量试件的应力—应变关系曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of cemented soil under different amounts cement

2.3 水泥土破裂的全过程

不同水泥掺量的水泥土试件在荷载作用下,其破坏特征与破裂方式并不相同。利用数字视频观测系统观测和记录到了试件破裂的全过程,实验加载示意图见文献[3]。本文所讨论的水泥土试件的破裂方式和破裂特征可根据水泥掺量大体分为以下两类,即较低掺量的水泥土试件,文中指7%和10%二种情况;较高掺量的水泥土试件,文中指15%和20%二种水泥掺量。

2.3.1 低掺量水泥土试件的破裂特征

在荷载作用下,低掺量水泥土试件首先在试件结构内部的薄弱处出现微裂纹;随着荷载的增加,试件变形逐渐增大,试件表面裂纹逐渐增多,裂纹与荷载作用方向的夹角在 45° 左右,继续加载会不断有新裂纹出现,原有裂纹有逐步扩展的也有逐步闭合的,直到试件完全破坏。可见,低掺量水泥土主要发生整体剪切破坏,与黏性土的力学性质相近,水泥土水化物与土颗粒之间的粘聚力是低掺量水泥土强度的主要来源。图3和图4为7%水泥土掺量的局部和全局破裂过程的部分显微图像。

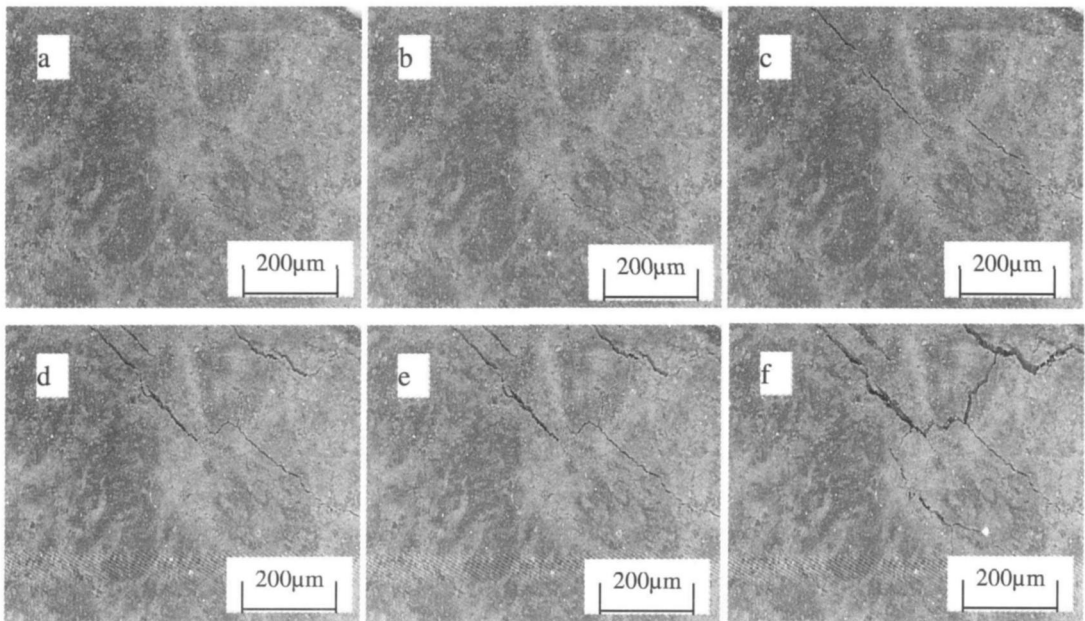


图 3 7%水泥掺量试件破裂过程的显微图像

Fig. 3 Micrographs of meso-fracturing process for the specimen of 7 percent cement

2.3.2 高掺量水泥土试件

在荷载作用下,对高掺量水泥土试件,本文观测到的细观裂纹起裂及扩展方向与荷载方向成较大角度,主要是水泥土细部水泥掺量以及土性等的不均匀引起的,而宏观裂纹的开展几乎与荷载作用方向平

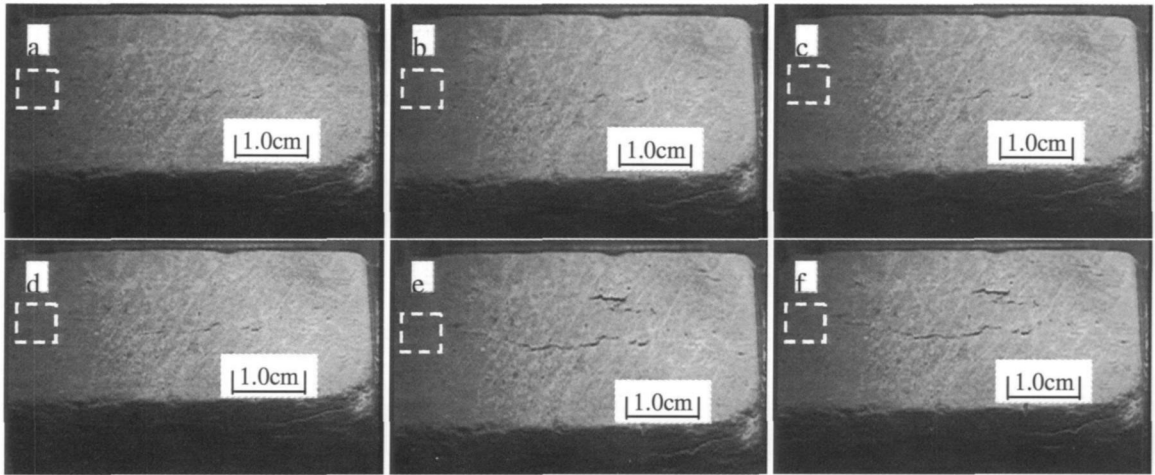


图 4 图 3 所示位置的全场图像

Fig. 4 Entire field of micro-fracturing images corresponding to Fig. 3

行,代表了高掺量水泥土的破裂特征。裂纹起裂并开始扩展时,属于张开型的,并没有明显的剪切现象,而且,主裂纹的扩展几乎没有产生明显的分叉现象,试件最后出现宏观断裂破坏。如图 5 和图 6 为 20%水泥掺量的水泥土试件破裂过程细观实验部分图像,图 5 为图 6 对应处试件破裂过程的局部放大图像。

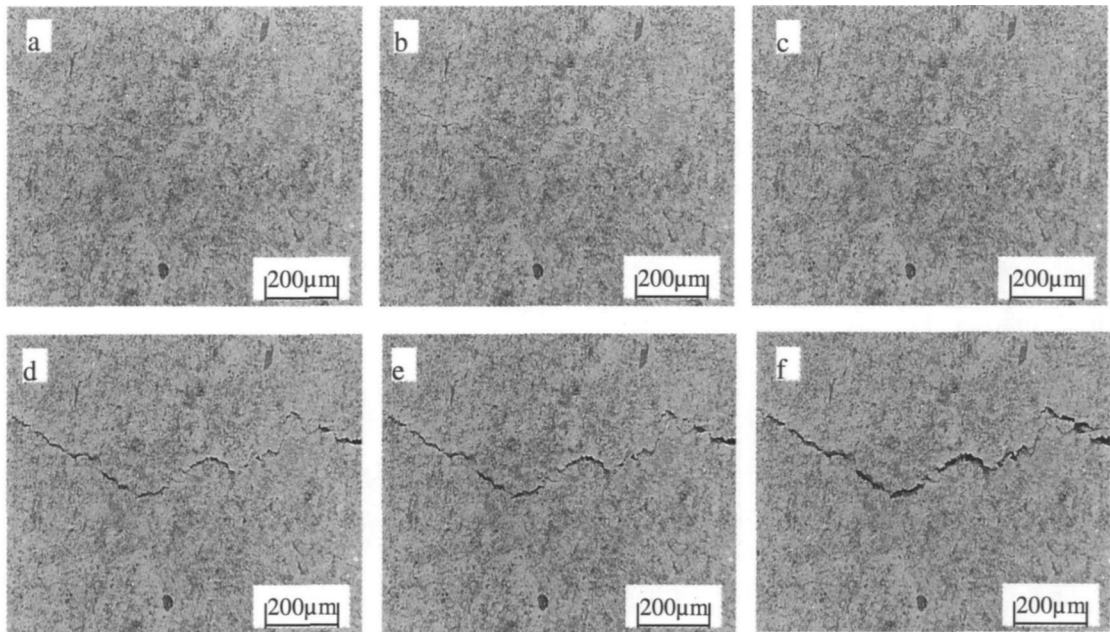


图 5 20%水泥掺量试件破裂过程的显微图像

Fig. 5 Micrographs of meso-fracturing process of 20 percent cement

2.4 水泥土的细观破裂机理分析

同岩石以及混凝土等材料相似,水泥土在成型过程中,内部各基相(水泥水化物、土颗粒等)之间也存在原生微裂纹以及孔洞等随机分布的缺陷。并且各基相本身力学性质也有很大差距,水泥土内部的不均匀结构导致的水泥土内部各局部单元的单元刚度存在着差异,并对水泥土内部的变形与破坏演化过程有着重要制约作用,水泥土内部基相结合面和原生微裂纹等随机分布的缺陷对水泥土内部破坏过程有重要影响。

水泥土较原状土力学性能的改善和强度的提高,主要取决于水泥水化产物的多少和水化产物的力学性能。对本文原状土和水泥没有改变的情况下,水泥的掺量多少决定了水泥土的细观破裂过程和破裂特征。对低掺量水泥土,由于水泥掺量较少,其水化产物对原状土的黏聚力和内摩擦角的改变量较

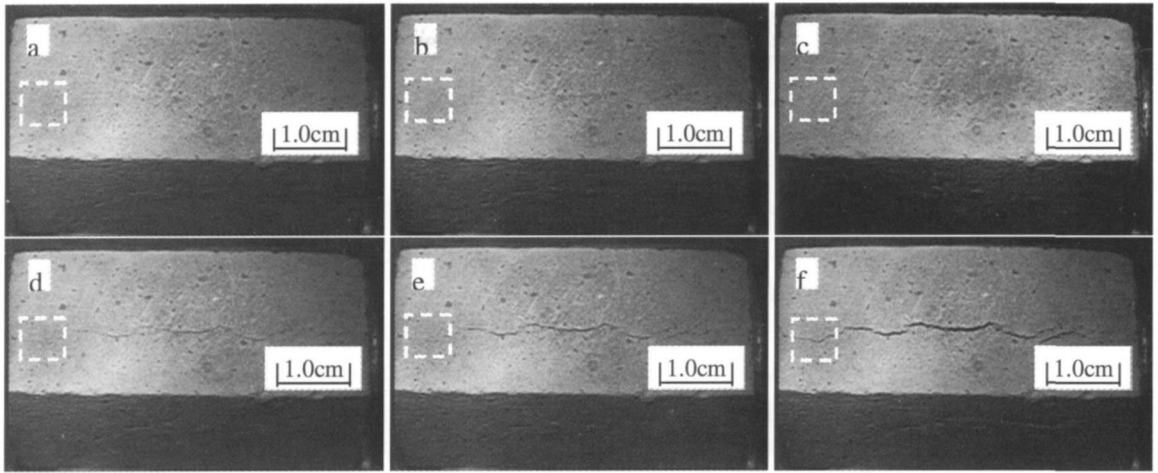


图 6 图 5 所示位置的全场图像

Fig. 6 Entire field of micro-fracturing images corresponding to Fig. 5

小, 水泥土仍然表现出与对应原状土的性质, 如图 2 所示, 7% 的水泥土压缩性依然较大, 图 3 水泥土的细观破裂具有明显的剪切破坏特征, 可见黏聚力是低掺量水泥土强度的主要来源; 高掺量水泥土, 由于水泥的水化产物较多, 它们构成了水泥土强度的主导因素, 水泥土中固化颗粒强度提高较多, 颗粒之间的摩擦系数增加, 内摩擦角的增加是高掺量水泥土强度提高的主要来源, 图 2 应力—应变曲线 15% 和 20% 水泥掺量试件的弹性模量提高明显, 图 5 和图 6 高掺量水泥土的细观裂纹属张开型, 剪切特征不明显, 主裂纹的扩展几乎没有产生明显的分叉现象, 试件最后表现出断裂破坏的特点。

比较图 2 水泥土的应力应变试验曲线, 可见随着水泥掺量的增加, 水泥土强度提高, 弹性模量增加, 变形性能降低, 本试验 7% 和 10% 水泥掺量的水泥土力学性能较原状土改善有限, 水泥土强度不高, 变形较大; 20% 水泥掺量的水泥土虽然强度最大, 但脆性明显; 15% 水泥掺量的试件, 其应力—应变曲线具有明显的四阶段性(即: 压密阶段、弹性阶段、弹塑性阶段、破坏阶段), 此掺量的水泥土既表现出较高的强度, 有具有较好的变形性能, 为最佳水泥掺量为较为合理的水泥参量。因此, 工程中应根据原状土的特点, 选择一最优的水泥掺量来生成水泥土加固体, 既经济, 又能最佳的满足工程需要。

3 结论

(1) 在单轴压缩条件下, 低掺量的水泥土裂纹起裂及扩展方向与荷载的夹角接近 45° , 裂纹起裂并开始扩展时, 具有明显的剪切现象, 试件最后出现为宏观的整体剪切破坏。

(2) 在单轴压缩条件下, 高掺量水泥土裂纹的宏观扩展方向与荷载方向平行或成很小的夹角。裂纹起裂并开始扩展时, 属于张开型的, 并没有明显的剪切现象, 而且, 主裂纹的扩展几乎没有产生明显的分叉现象, 试件最后表现为宏观的劈裂破坏。

(3) 根据水泥土应力—应变关系曲线以及细观破裂特征, 探讨了水泥土的最佳水泥掺量, 文中原状土对应 15% 左右为最佳水泥掺量。

参考文献:

- [1] 肖洪天, 周维垣. 脆性岩石变形与破坏的细观力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 151—155 (Xiao Wei-tian, Zhou Wei-yuan. A mesoscopic model of deformation and failure for brittle rocks. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2): 151—155(in Chinese))
- [2] 周维垣, 剡公瑞. 岩石、混凝土类材料断裂损伤过程区的细观力学研究[J]. 水电站设计, 1997, 13(1): 1—9 (Zhou Wei-yuan, Yan Gong-rui. Micro-mechanical research on fracture process zone in rock-concrete materials. Design of Hydroelectric Power Station, 1997, 13(1): 1—9(in Chinese))
- [3] Feng Xia-ting, Chen Si-li, Li Shao-jun. Effects of water chemistry on microcracking and compressive strength of granite [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001: 557—568.

- [4] Fisher K P. Properties of an artificially cemented-clay[J] . Canadian Geot, 1978, 15: 25— 37.
- [5] Kawasaki T. Deep mixing using cement hardening agent[C] . Proc. 10th ICSM FE, 1981, 37(2): 105— 123.
- [6] 郑刚, 姜忻良. 水泥搅拌桩复合地基承载力研究[J] . 岩土力学, 1999, 20(3): 46— 50(Zheng Gang, Jiang Xin-liang. Research on bearing capacity of cement treated composite foundation. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(3): 46— 50(in Chinese))
- [7] 童小东, 龚晓南, 蒋永生. 水泥土的弹塑性损伤试验研究[J] . 土木工程学报, 2002, 35(4): 82— 85(Tong Xiaodong, Gong Xiaonan, Jiang Yongsheng. Experimental study on elasto plastic damage of cemented soil. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(4): 82— 85(in Chinese))
- [8] 宁宝宽, 金生吉, 陈四利. 侵蚀性离子对水泥土力学特性的影响[J] . 沈阳工业大学学报, 2006(4): 178— 181(Ning Baokuan, Jin Shengji, Chen Sili. Influence of erosive ions on mechanical properties of cemented soil. Journal of Shenyang University of Technology, 2006(4): 178— 181(in Chinese))
- [9] 宁宝宽, 刘斌, 陈四利. 环境侵蚀对水泥土桩承载力影响的试验及分析[J] . 东北大学学报, 2005(1): 95— 98(Ning Baokuan, Liu Bin, Chen Sili. Bearing capacity study of cemented-mixed soil pile under environmental erosion. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2005, 26(1): 95— 98(in Chinese))
- [10] 宁宝宽, 陈四利, 刘斌. 环境侵蚀下水泥土的力学效应试验研究[J] . 岩土力学, 2005, 26(4): 600— 603(Ning Baokuan, Chen Sili, Liu Bin. Experimental study of cemented soil under environmental erosion. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 600— 603(in Chinese))
- [11] 宁宝宽, 陈四利, 刘斌. 水泥土的环境侵蚀效应与破裂过程分析[J] . 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1778— 1782(Ning Baokuan, Chen Sili, Liu Bin. Fracturing behaviors of cemented soil under environmental erosion. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1778— 1782(in Chinese))

Real-Time Observation on the Meso-Fracture Process Testing of Cemented Soil

NING Bao-kuan^{1,2}, CHEN Si-li^{1,2}, DING Wu-xiu², LIU Yi-fang¹

(1. Department of Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China; 2. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, China Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Using the rock meso-mechanics experimental system provided by the Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics affiliated to Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, China Academy of Sciences, a uniaxial compression experiment was conducted in order to investigate the fracturing behaviors of cemented soil with different content of cement. The meso-fracturing process of cemented soil was real-time observed by using the microscope and the digital colorful camera. Stress-strain curves and corresponding micro-images of specimen's failure process have been obtained. The relation between meso-fracturing process and macro-mechanical behavior were studied for cemented soil with different content of cement. Results presented in this paper can be used as experimental evidence for setting up the constitutive model of meso-damage.

Keywords: cemented soil; meso-mechanical experiment; real-time observation; fracture property; micro-image