

文章编号:1007-9629(2023)12-1254-08

膨润土对塑性混凝土力学性能的影响及微观机理

唐 贝¹, 崔 激^{1,2,*}, 张宝增³, 江志安³

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350; 2. 天津大学 中国地震局地震工程综合模拟与城乡抗震韧性重点实验室, 天津 300350; 3. 中国水电基础局有限公司
天津市地基与基础工程企业重点实验室, 天津 301700)

摘要:通过室内常规三轴压缩试验,分析了膨润土对塑性混凝土应力-应变曲线和主要力学指标的影响,并采用扫描电镜和X射线衍射等技术揭示了其宏观力学特性演变的微观机理.结果表明:随着膨润土掺量的增加,塑性混凝土体积膨胀变形量逐渐减小,应力-应变曲线表现出更加显著的延展性,峰值应力明显减小,峰值应变逐渐增大,模强比呈增加趋势,黏聚力先增后减,内摩擦角先减后增.掺入膨润土可大幅增加塑性混凝土微观颗粒的孔洞通道,低掺量膨润土发挥出较好的骨料间隙填充效果,削弱了颗粒棱角,提高了结构的致密性;当膨润土掺量过高时,界面过渡区出现低黏结团聚体,颗粒表面粗糙度增加.膨润土对塑性混凝土宏观力学性能的影响主要是由塑化效应增加颗粒孔隙通道和固化效应填充颗粒间隙两者协同作用的结果.

关键词:塑性混凝土;膨润土;力学特性;三轴试验;微观结构

中图分类号:TU528.041

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.12.003

Effect of Bentonite on Mechanical Properties of Plastic Concrete and Its Microscopic Mechanism

TANG Bei¹, CUI Wei^{1,2,*}, ZHANG Baozeng³, JIANG Zhian³

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China;
2. Key Laboratory of Earthquake Engineering Simulation and Seismic Resilience of China Earthquake Administration,
Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Ground and Foundation Engineering,
Sinohydro Foundation Engineering Co., Ltd., Tianjin 301700, China)

Abstract: The triaxial, scanning electron microscope and X-ray diffraction tests had been made to investigate the bentonite content on macroscopic and microscopic properties of plastic concrete with a view to revealing the mechanism of macro-mechanical behavior from micro-scale. The results show that increasing the bentonite content makes the material behavior act like the ductile materials with expansion deformation decrease. The bentonite content increase results in decrease of the peak stress and increase of the peak strain and the modulus-strength ratio. The cohesion increases at first and then weakens, while the trend of internal friction angle is opposite to cohesion. According to the result of micro-tests, the more pore channels exist with the higher addition of bentonite which reflect the attenuative effect on macro-strength. Furthermore, low bentonite content will be liable to fill voids in aggregate and weakens the particle angularity. The superabundance of bentonite dosage causes the poor bond and increase of roughness of particles. The influence of bentonite on the macro-mechanical properties of plastic concrete is mainly attributed to the synergistic effect of plasticization by increasing the particle pore, and solidification by filling the particle gaps.

收稿日期:2022-12-24; 修订日期:2023-03-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52079092)

第一作者:唐 贝(1998—),女,湖南永州人,天津大学博士生.E-mail:tangbei@tju.edu.cn

通讯作者:崔 激(1977—),男,山东诸城人,天津大学教授,博士生导师,博士.E-mail:cuiwei@tju.edu

Key words: plastic concrete; bentonite; mechanical property; triaxial test; microstructure

塑性混凝土是由水泥、膨润土、砂石骨料和水等掺合料组成的柔性材料,具有弹性模量低、应变大,以及适应周围土体变形能力强等特性^[1]。另外塑性混凝土抗渗性好,被广泛应用于高风险水库和垃圾填埋场等防渗、防污工程中^[2]。与传统混凝土防渗墙相比,塑性混凝土防渗墙的高变形协调性大大降低了墙体与土体的沉降差和应力集中问题^[3],确保了水库堤坝的安全运行。

国内外众多学者通过室内试验、理论分析和数值模拟等多种手段对塑性混凝土的力学特性展开了大量研究^[4-11],探讨了配合比、龄期、围压及养护条件等多种因素对塑性混凝土力学性能的影响,为其发展应用作出了重要贡献。但部分研究结论存在一定差异,掺入膨润土对塑性混凝土力学性能的影响机理仍不明晰。如王四巍等^[12-15]通过室内试验分析得到塑性混凝土强度随膨润土掺量增加而逐渐降低,且随着龄期的延长,其抗压强度下降幅度更为显著的结论。王协群等^[16]认为当黏土掺量低于 80 kg/m^3 时,塑性混凝土强度随着黏土掺量的增加而减小;当黏土掺量高于 80 kg/m^3 时,黏土掺量对其强度影响较小。田雷等^[17]研究发现,随着膨润土掺量的增加,自密实混凝土的抗压强度和弹性模量均先增后减,模量比先减后增。Adeboje 等^[18-20]借助扫描电镜(SEM)发现膨润土可以填补塑性混凝土中的空隙,增加膨润土掺量使得材料微观结构更加致密,从而提高了塑性混凝土的强度。李尚辉等^[21]认为添加膨润土减缓了水对填充体强度的削弱作用,确保了水泥水化作用的持续进行,从而提高了填充体的致密度和宏观力学性能。Isaia 等^[22]探讨了火山灰反应和物理填充效应对混合料的微观结构影响,认为火山灰物质的火山灰效应和细颗粒的填充效应会改善微观结构的孔隙结构,增加混凝土结构的力学强度和耐久性。部分研究人员关于膨润土对塑性混凝土抗剪强度影响规律也存在较大差异。如宋帅奇等^[23]研究发现,膨润土掺入会降低塑性混凝土的黏聚力,并增加其内摩擦角,黏聚力的减小主要是膨润土的吸水性强和水

泥水化作用消耗水分引起混凝土干缩所致。Pisheh 等^[24]认为增加膨润土掺量会削弱颗粒间的黏结作用,同时加强了颗粒间的摩擦互锁作用,导致塑性混凝土黏聚力下降,内摩擦角增加。王泽东等^[25]研究了膨润土对水泥土抗剪强度的影响,结果表明,膨润土的强吸水性对水泥土胶凝物的生长黏结有极大抑制作用,从而降低了膨润土改性水泥土的黏聚力和内摩擦角。

塑性混凝土的力学性能较为复杂,其关键力学指标变化规律受材料组分的影响与普通混凝土和土料存在显著差异,已有研究尚未取得共识。目前塑性混凝土力学特性研究大多集中于宏观尺度方面,从微观角度揭示其宏观力学演变机理的研究则较少。

鉴于此,本文通过开展常规三轴压缩试验,重点探究了不同膨润土掺量下塑性混凝土的宏观力学性能,并采用 SEM 和 X 射线衍射(XRD)等微观技术手段,进一步分析了膨润土对塑性混凝土微观结构和晶体物相的影响,以期从微观尺度揭示其宏观力学性能演变机理,为更加深入、全面地研究塑性混凝土奠定基础。

1 试验

1.1 原材料

水泥采用鑫达山 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,28 d 抗压强度、抗折强度分别为 45.80 、 7.20 MPa ;膨润土采用钠基膨润土,其主要性能指标见表 1;砂采用中砂,细度模数为 2.84 ;粗骨料粒径为 $5 \sim 20 \text{ mm}$;外加剂采用奈系减水剂,掺量(质量分数,文中涉及的掺量、砂率等除特别注明外均为质量分数或质量比)为 1.8% 。

1.2 配合比设计

本研究结合实际工程需求,通过工程类比方法设计了 3 组膨润土掺量,分别为 70 、 85 、 100 kg/m^3 ,砂率均为 0.50 ,共包括 9 组试件,配合比见表 2。圆柱体试件尺寸为 $\phi 150 \times 300 \text{ mm}$ 。

表 1 膨润土的主要性能指标
Table 1 Main performance indicators of bentonite

$W_t/\%$	$W_p/\%$	$I_p/\%$	Moisture content(by mass)/%	Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Sieve residue(by mass)/%	
					<0.005 mm	0.005-0.075 mm
54.10	16.20	37.90	0.90	2 744.00	45.50	51.40

Note: W_t —liquid limit; W_p —plastic limit; I_p —swelling index.

表2 塑性混凝土的配合比
Table 2 Mix proportions of plastic concretes

Specimen No.	Mix proportion/(kg·m ⁻³)				m_w/m_c
	Cement	Bentonite	Gravel	Water	
K1	140	70	866	290	2.07
K2	160	70	857	290	1.81
K3	180	70	848	290	1.61
K4	140	85	851	295	2.11
K5	160	85	842	295	1.84
K6	180	85	833	295	1.64
K7	140	100	834	302	2.16
K8	160	100	825	302	1.89
K9	180	100	816	302	1.68

1.3 试验方法

1.3.1 常规三轴压缩试验

常规三轴压缩试验按照 GB/T 5013—2019《土工试验方法标准》进行。试验仪器为 SY250 型应变式三轴压缩仪,通过外体变量测装置对试件的体积应变进行测量,体变量测量精度为 0.1 mL。试验加载速率取为 0.4 mm/min,可有效降低阻尼效应的影响,允许微裂缝产生,保证整个试验过程在静态条件下进行。

1.3.2 扫描电镜和 X 射线衍射分析

采用 Regulus8100 场发射 SEM (20~800 000×, 日立)分别对各试样进行扫描,通过电子束扫描成像观测试件表面的真实结构,从而实现对试样微观结构的定性半定量分析。XRD 分析采用 Smartlab X-Ray Diffraction 衍射仪,扫描角度为 10°~80°,扫描

间隔为 0.03°,从而确定试样的晶体相和晶体大小。

2 宏观试验结果与讨论

2.1 膨润土掺量对塑性混凝土应力-应变曲线的影响

在 200 kPa 围压下,膨润土掺量与塑性混凝土应力-应变曲线及体应变-轴向应变的关系如图 1 所示。由图 1(a)可见:(1)塑性混凝土在低围压下的应力-应变曲线可分为 4 个阶段——初始反弯段、线性上升段、非线性上升段和下降段。(2)在加载初期,随着荷载的施加,试件内部微裂隙逐渐闭合,应变的增幅超过应力的增幅,其应力-应变曲线出现反弯段;在应力达到峰值应力之前,试件的变形以内部裂缝发展为主;当应力到达峰值之后,试件的塑性变形急剧增加,随着应变的增加,试件表面出现多条贯通裂缝,轴向承载力逐渐降低。(3)当膨润土掺量从 70 kg/m³增至 100 kg/m³时,试件的应力-应变曲线表现出更加明显的塑性。由图 1(b)可见:(1)在加载初期,试件内部裂隙被压缩,体应变增加,体积收缩减小;随着轴向应变的增加,试件横向变形迅速增大,体应变逐渐减小,体积变形开始增大,当压应力引起的体缩变形与剪应力引起的体胀变形达到平衡时,试件的体应变趋于零,体变由收缩行为转为膨胀行为,试件内部裂隙随轴向应变增加不断扩展,最终导致试件失稳破坏。(2)随着膨润土掺量的增加,试件膨胀体积变形量逐渐减小,表明膨润土的添加对塑性混凝土体积收缩变形起到促进作用。

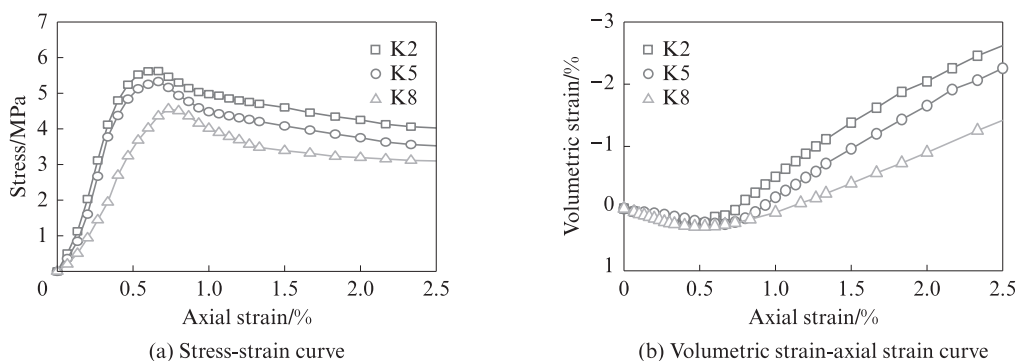


图1 膨润土掺量与塑性混凝土应力-应变曲线及体应变-轴向应变的关系

Fig. 1 Effect of bentonite content on stress-strain curves and volumetric strain-axial strain of plastic concretes

2.2 膨润土掺量对塑性混凝土峰值应力和峰值应变的影响

塑性混凝土强度发展主要是塑化效应和固化效应不断演变的结果^[2, 26-27],示意图见 2。由图 2 可见:塑化效应和固化效应这 2 个反应交替进行,相互制约。其中塑化效应是水化过程中蒙脱石吸水膨胀在骨料表层形成

一层薄膜^[2, 27](图 2(a)),阻止水分子与水泥发生水化反应,对塑性混凝土的强度发展有一定抑制作用;固化效应是 SiO₂、Al₂O₃ 与水化产物 Ca(OH)₂(CH) 发生火山灰反应^[26],通过离子交换生成水化硅酸钙(C-S-H)、水化铝酸钙(C-A-H)和水化硅铝酸钙(C-A-S-H)等胶凝产物(图 2(b)),从而提高塑性混凝土的强度。

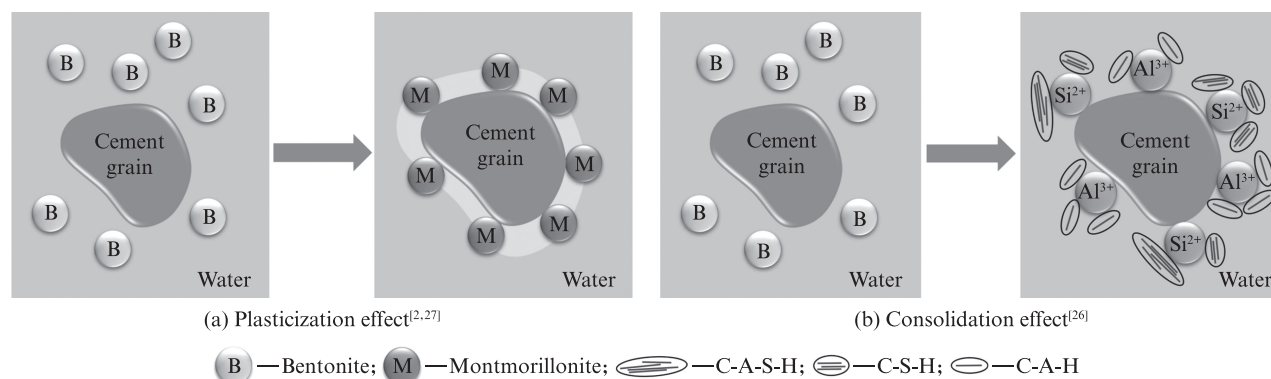


图2 塑性混凝土强度发展塑化效应和固化效应示意图
Fig. 2 Schematic diagram of plasticization effect and consolidation effect of plastic concrete

膨润土掺量与塑性混凝土峰值应力和峰值应变的关系如图3所示.由图3(a)可见:塑性混凝土的峰值应力随着膨润土掺量的增加而减小.这是因为固化效应属于二次水化反应,反应速率较慢,且反应程度不充分.膨润土掺量越多,塑化效应越明显,进一步阻碍了固化效应的进行,导致塑性混凝土强度逐渐减小.由图3(b)可见:塑性混凝土的峰值应变随着

膨润土掺量的增加呈增大趋势.这是因为随着水化反应和固化反应的进行,C-S-H等水化胶凝产物不断填充颗粒间隙,增加了骨架之间的相互挤压能力,大幅度提高了材料的适应变形性能.相比普通混凝土防渗墙,塑性混凝土防渗墙能够承受更多的变形,减小墙体与周围土体的变位差和沉降差,大幅度提高墙体的抗裂性能,增加坝体的稳定安全性.

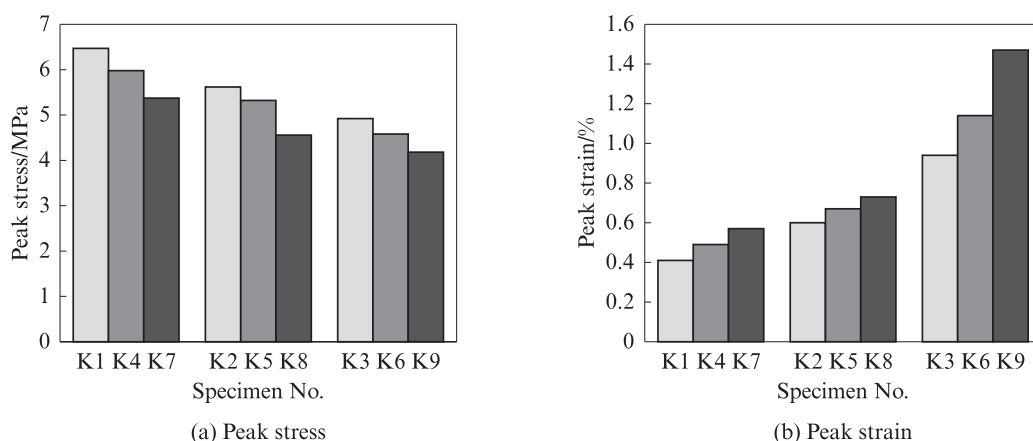


图3 膨润土掺量与塑性混凝土峰值应力和峰值应变的关系
Fig. 3 Effect of bentonite content on peak stress and peak strain of plastic concrete

2.3 膨润土掺量对塑性混凝土模强比的影响

模强比即混凝土材料弹性模量(E)与抗压强度(f)的比值.防渗墙材料的力学特性一般需要满足2个要求,即足够的强度以承受坝体的质量和较低的弹性模量以适应周围土体的变形.因此低模强比有利于提高墙体的变形协调能力,改善墙体的受力状态.

实际工程中塑性混凝土的模强比一般介于100~300之间,本研究中塑性混凝土试件的模强比范围为150~350,表明本文塑性混凝土试件配合比参数设计符合实际工程需求.在200 kPa围压下,膨润土掺量与塑性混凝土模强比的关系如图4所示.由图4可见,塑性混凝土模强比随着膨润土的掺加呈逐渐增大趋势.蒙脱石是由硅氧四面体和铝氧八面体

组成的晶体结构^[28],分子结构层间力较弱,水分子可进入分子结构层间发生膨胀,导致塑性混凝土可压缩性增强.塑性混凝土试件在受压过程中,随着膨润土掺量的增加,材料的抗压强度下降速度大于弹性模量下降速度,因此模强比表现出增大趋势.

2.4 膨润土掺量对塑性混凝土抗剪强度的影响

混凝土的抗剪强度主要包括黏聚力和内摩擦力,其中黏聚力代表颗粒之间相互的胶结作用,内摩擦力表示颗粒之间的咬合摩擦作用.膨润土掺量与塑性混凝土抗剪强度的关系如图5所示.由图5可见:随着膨润土掺量的增加,塑性混凝土的黏聚力呈先增后减趋势,内摩擦角呈先减后增趋势,说明膨润土掺量在70~100 kg/m³之间存在阈值,该阈值使得塑性混凝

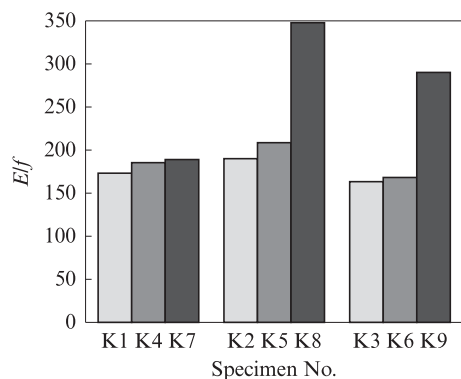
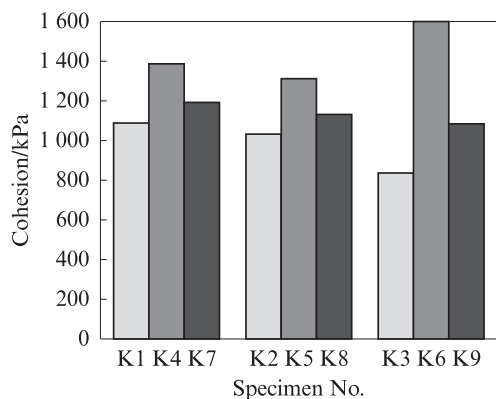


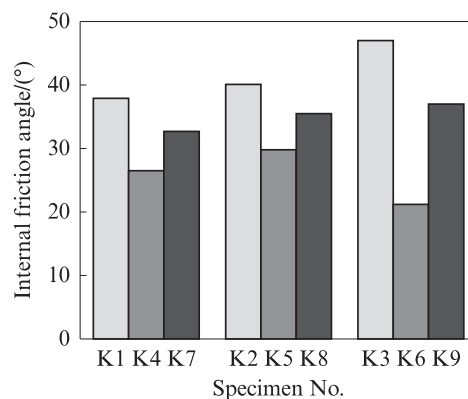
图4 膨润土掺量与塑性混凝土模强比的关系

Fig. 4 Relationship between bentonite content and modulus-strength ratio of plastic concretes

土的黏聚力达到最大,内摩擦力达到最小.塑性混凝土的黏聚力与内摩擦角的变化趋势完全相反,这与



(a) Cohesion



(b) Internal friction angle

图5 膨润土掺量与塑性混凝土抗剪强度的关系

Fig. 5 Relationship between bentonite content on shearing strength of plastic concrete

3 微观试验结果与讨论

3.1 SEM分析

塑性混凝土属于非均质多孔复合材料,内部微观结构对其宏观力学特性的影响是研究该材料力学性能发展演化机理的关键.为分析膨润土掺量对塑性混凝土微观结构的影响,分别对不同膨润土掺量试件进行SEM和XRD分析.将膨润土掺入水泥浆中后,水泥的水化产物CH溶解稀释出 Ca^{2+} 和 OH^- ,强碱性环境促进了膨润土中的 SiO_2 和 Al_2O_3 溶解, Si^{2+} 、 Al^{3+} 分别与水泥水化过程中释放的 Ca^{2+} 和 OH^- 进行火山灰反应,在颗粒表面形成凝胶结构C-S-H、晶体结构C-A-H和针状结构钙矾石(Aft)等水化物.膨润土掺量对微观颗粒孔洞和微观颗粒间隙的影响如图6、7所示.

由图6可见:(1)当膨润土掺量为 70 kg/m^3 时,试件内部的微观组织结构最为致密.这是因为膨润土

Akbarpour等^[4]和Pisheh等^[24]的研究结论一致.

随着膨润土掺量的增加,塑性混凝土固化效应和水泥水化作用产生的C-S-H等凝胶增强了颗粒之间的胶结作用,结构内部胶结团聚体增多,缓解了颗粒摩擦互锁现象,因此黏聚力增加,内摩擦力减小;当膨润土掺量达到阈值时,塑性混凝土的固化效应和塑化效应处于相对平衡状态,C-S-H和C-A-H等水化胶凝产物生成量最大,颗粒之间的胶结效果最佳,黏聚力达到峰值;当膨润土掺量超过阈值时,大量水分子被膨润土薄膜吸收,塑化效应一直处于饱和状态,抑制了水泥的水化反应和膨润土固化效应,塑性混凝土的水化产物凝胶体减少,颗粒间胶结作用减弱,塑性混凝土的黏聚力降低,此时主要通过颗粒摩擦互锁作用提供抗剪强度.

加入水泥浆液后,颗粒溶解吸附在骨料表面,将大量的自由水吸收转化成内部结合水;在塑性混凝土凝结硬化过程中,内部大量水分挥发,颗粒表面形成蜂窝空间网络结构.(2)随着膨润土掺量的增加,颗粒内的孔洞通道数量和尺寸大幅度增加,反映了膨润土对塑性混凝土宏观抗压强度的削弱作用,与宏观力学试验结论一致.

由图7可见:(1)随着膨润土掺量的增加,促进了C-S-H等水化凝胶产物的生成,颗粒黏结作用逐渐增强,骨料间隙被填充,颗粒棱角减小,骨料界面过渡区(ITZ)明显增多,导致塑性混凝土宏观性能出现黏聚力增加、内摩擦角减小的现象.(2)当膨润土掺量过多时,ITZ附近形成低黏结强度的颗粒聚集体和团簇状.这主要是由于水化反应与火山灰反应的速率差异和含水量不足,导致膨润土颗粒水化不完全,颗粒表面粗糙度增加.因此塑性混凝土宏观抗剪性能出现黏聚力减小、内摩擦角增大趋势.

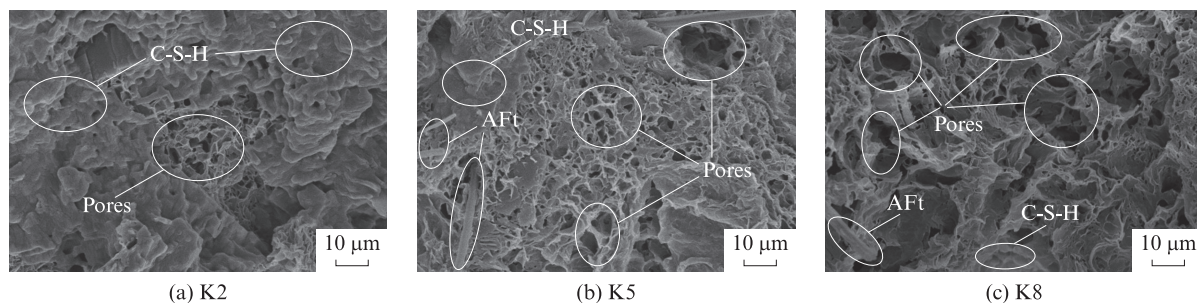


图6 膨润土掺量对微观颗粒孔洞的影响

Fig. 6 Effect of bentonite content on micro-particle pores

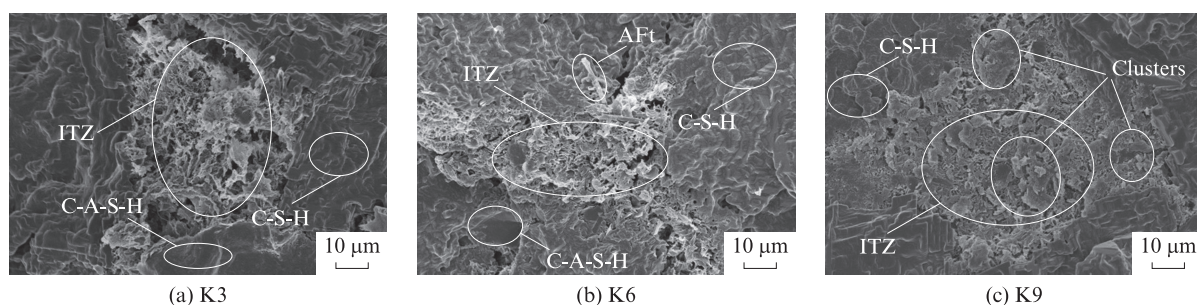


图7 膨润土掺量对微观颗粒间隙的影响

Fig. 7 Effect of bentonite content on micro-particle intervals

3.2 XRD分析

不同膨润土掺量试样的XRD图谱如图8所示。由于C-S-H为非晶体物相,因此本研究不对C-S-H水化产物的物相变化进行分析。由图8可见:(1)随着膨润土掺量增加,塑性混凝土试样中的CH和石英含量明显增加,峰值强度大幅提高。(2)当膨润土掺量从 70 kg/m^3 增至 85 kg/m^3 时,CH含量逐渐减少,第一特征衍射峰强度明显降低,说明CH既与膨润土中的活性成分发生火山灰反应,又与 CO_2 发生碳化反应,增加了CH的消耗量;当膨润土掺量从 85 kg/m^3 增至 100 kg/m^3 时,CH含量和衍射峰强度变化较小,这是

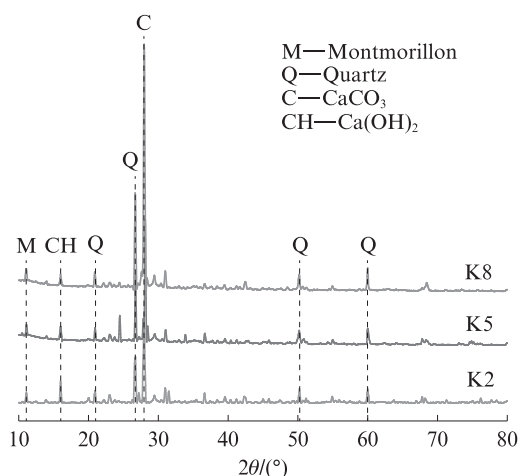


图8 不同膨润土掺量试样的XRD图谱

Fig. 8 XRD patterns of samples at different bentonite contents

由于火山灰反应速率较慢,高掺量膨润土大量吸收水分产生塑化效应,延缓了水泥的水化反应,从而降低了CH的消耗速率。这也从晶体物相层面验证了膨润土对塑性混凝土宏观力学性能的影响是塑化效应和固化效应同时作用和相互制约的结果。

4 结论

(1)随着膨润土掺量的增加,塑性混凝土膨胀体积变形量逐渐减小,应力-应变曲线表现出更为显著的延展性;峰值应力显著下降,峰值应变逐渐增大,模强比呈增大趋势;黏聚力与内摩擦角的变化规律完全相反,黏聚力呈先增后减趋势,而内摩擦角先减后增。

(2)掺入膨润土大幅度增加了塑性混凝土微观颗粒的孔洞通道。低掺量膨润土可以发挥较好的骨料间隙填充效果,削弱颗粒棱角,提高微观结构的致密性;当膨润土掺量过多时,膨润土颗粒未完全水化,界面过渡区(ITZ)出现低黏结强度的颗粒聚集,颗粒表面粗糙度增加。

(3)低掺量膨润土会促进塑性混凝土的火山灰反应,增加CH的消耗量,而高掺量膨润土在一定程度上对火山灰反应和水泥水化反应有延缓作用。膨润土对塑性混凝土宏观力学特性影响的微观机理主要是塑化效应增加颗粒孔隙通道和固化效应填充颗粒间隙两者协同作用的结果。

参考文献:

- [1] 高丹盈, 宋帅奇. 塑性混凝土常规三轴性能与强度计算模型[J]. 水力发电学报, 2014, 33(2):201-207.
GAO Danying, SONG Shuaiqi. Performance and strength calculation model of plastic concrete under conventional tri-axial stress[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 201-207. (in Chinese)
- [2] 王升位, 闻一江, 洪项华, 等. 配合比和龄期对塑性混凝土强度、pH值和电导率的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(1):97-101.
WANG Shengwei, WEN Yijiang, HONG Xianghua, et al. Effect of mix proportion and age on strength, pH value, electrical conductivity of plastic concrete[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(1):97-101. (in Chinese)
- [3] 王清友, 孙万功, 熊欢. 塑性混凝土防渗墙[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008:24-46.
WANG Qingyou, SUN Wangong, XIONG Huan. Plastic concrete cut-off wall [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008:24-46. (in Chinese)
- [4] AKBARPOUR A, MAHDIKHANI M, MOAYED R Z. Mechanical behavior and permeability of plastic concrete containing natural zeolite under triaxial and uniaxial compression [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(2): 04021453.
- [5] 杨哲, 饶锡保, 谭凡, 等. 不同期龄塑性混凝土力学性能试验研究[J]. 人民长江, 2020, 51(增刊1):184-187, 227.
YANG Zhe, RAO Xibao, TAN Fan, et al. Experimental study on mechanical properties of plastic concrete at different ages[J]. Yangtze River, 2020, 51(Suppl 1):184-187, 227. (in Chinese)
- [6] 王四巍, 孙逢涛, 吴华. 三轴应力下再生粗骨料塑性混凝土的力学性能和破坏准则[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2):454-459.
WANG Siwei, SUN Fengtao, WU Hua. Mechanical properties and failure criteria of recycled plastic concrete under triaxial stresses[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2):454-459. (in Chinese)
- [7] 焦凯, 党发宁, 谢凯军. 膨润土与水泥掺比对塑性混凝土变形特性的影响[J]. 水利水电工程学报, 2016(4):76-84.
JIAO Kai, DANG Fanning, XIE Kaijun. Effects of bentonite-cement mix ratio on strength characteristics of plastic concrete[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016(4): 76-84. (in Chinese)
- [8] 宋博, 何江涛, 刘长礼. 不同荷载作用下塑性混凝土渗透性试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2):309-313.
SONG Bo, HE Jiangtao, LIU Changli. Experimental study on permeability of plastic concrete under different load levels[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(2):309-313. (in Chinese)
- [9] 常芳芳, 刘璐璐, 宋力. 三轴作用下塑性混凝土应力应变特性试验[J]. 人民黄河, 2015, 37(2):133-135.
CHANG Fangfang, LIU Lulu, SONG Li. Study on stress-strain characteristics of plastic concrete under triaxial[J]. Yellow River, 2015, 37(2):133-135. (in Chinese)
- [10] 王四巍, 潘旭威, 高丹盈, 等. 三轴应力下塑性混凝土应力-应变关系试验研究[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(1):42-46, 59.
WANG Siwei, PAN Xuwei, GAO Danying, et al. Experiment study of stress-strain relation of plastic concrete under triaxial stress[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(1):42-46, 59. (in Chinese)
- [11] HINCHBERGER S, WECK J, NEWSON T. Mechanical and hydraulic characterization of plastic concrete for seepage cut-off walls[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(4):461-471.
- [12] 王四巍, 李小超, 李杨, 等. 膨润土及水泥用量对塑性混凝土变形及破坏特征的影响[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(1):33-37.
WANG Siwei, LI Xiaochao, LI Yang, et al. Effects of bentonite and cement content on plastic concrete deformation and failure[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(1):33-37. (in Chinese)
- [13] 乔光华. 粉煤灰掺量对塑性混凝土静态强度特性的影响分析[J]. 混凝土, 2022(5):108-111, 116.
QIAO Guanghua. Influence of fly ash content on static strength characteristics of plastic concrete [J]. Concrete, 2022(5): 108-111, 116. (in Chinese)
- [14] SHI Y, CHEN X, LI J Z, et al. Micro-macro properties of plastic concrete anti-seepage wall materials mixed with low-liquid limit clay[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(5): 8132-8140
- [15] 张胜强, 杨磊, 李佳伟, 等. 掺石渣粉塑性混凝土配合比试验研究及应用[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(5):116-120.
ZHANG Shengqiang, YANG Lei, LI Jiawei, et al. Mix proportion design of plastic concrete mixed with stone ballast[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(5):116-120. (in Chinese)
- [16] 王协群, 鲍晓煜. 单掺黏土的塑性混凝土配合比试验研究[J]. 水力发电学报, 2019, 38(9):37-43.
WANG Xiequn, BAO Xiaoyu. Experimental study on mix proportion of plastic concrete with clay [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(9):37-43. (in Chinese)
- [17] 田雷, 林宁, 周虎, 等. 膨润土掺量对自密实混凝土强度及变形能力的影响[J]. 工业建筑, 2019, 49(11):108-112.
TIAN Lei, LIN Ning, ZHOU Hu, et al. Effects of bentonite content on strength and deformability of self compacting concrete [J]. Industrial Construction, 2019, 49(11):108-112. (in Chinese)
- [18] ADEBOJE A O, KUPOLATI W K, SADIKU E R, et al. Experimental investigation of modified bentonite clay-crumb rubber concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 233:117187.
- [19] LIU M L, HU Y, LAI Z Y, et al. Influence of various bentonites on the mechanical properties and impermeability of cement mortars [J]. Construction and Building Materials, 2020, 241:118015.
- [20] GUPT C B, BORDOLOI S, SAHOO R K, et al. Mechanical performance and micro-structure of bentonite-fly ash and bentonite-sand mixes for landfill liner application[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 292:126033.
- [21] 李尚辉, 饶运章, 许威, 等. 某铜矿高硫尾砂充填体膨胀特性试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(3):83-87.

- LI Shanghui, RAO Yunzhang, XU Wei, et al. Experimental study on the expansion characteristics of filling body with high sulfur tailings in a copper mine [J]. Mining Research and Development, 2018, 38(3):83-87. (in Chinese)
- [22] ISAIA G C, GASTALDINI A L G, MORAES R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(1):69-76.
- [23] 宋帅奇,陈颖杰,韩杨. 水泥窑灰塑性混凝土防渗墙材料基本性能试验研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(7):58-64.
SONG Shuaiqi, CHEN Yingjie, HAN Yang. Experimental study on basic properties of cutoff wall plastic concrete with cement kiln dust[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(7): 58-64. (in Chinese)
- [24] PISHEH Y P, HOSSEINI M M M. Experimental investigation of mechanical behavior of plastic concrete in cutoff walls[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(1):04018355.
- [25] 王泽东,周盛涛,方文,等. 膨润土改性水泥土力学特性试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(10):3287-3292.
WANG Zedong, ZHOU Shengtao, FANG Wen, et al. Experimental study on mechanical properties of cement soil modified by bentonite [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(10):3287-3292. (in Chinese)
- [26] 丁国庆,蒋林华,储洪强,等. 膨润土种类及掺量对塑性混凝土性能的影响[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(2):34-37.
DING Guoqing, JIANG Linhua, CHU Hongqiang, et al. Influences of types and dosage of bentonite on properties of plastic concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(2):34-37. (in Chinese)
- [27] 丁国庆,蒋林华,张继尹. 膨润土对硅酸盐水泥水化硬化的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(4):20-23, 41.
DING Guoqing, JIANG Linhua, ZHANG Jiyin. Influence of bentonite of hydrating and hardening of cement [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(4):20-23, 41. (in Chinese)
- [28] 刘益良,苏幼坡,殷尧,等. 膨润土改性胶凝材料的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(5):5040-5052.
LIU Yiliang, SU Youpo, YIN Yao, et al. Research progress of bentonite modified cementitious materials [J]. Materials Reports, 2021, 35(5):5040-5052. (in Chinese)

(上接第1253页)

- implications for subduction zone processes [J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117:B03205.
- [20] LIU C B, GAO J M, TANG Y B, et al. Early hydration and microstructure of gypsum plaster revealed by environment scanning electron microscope [J]. Materials Letters, 2019, 234:49-52.
- [21] 焦叶宏,杨林,李贺军,等. 流态化热处理对磷石膏杂质及胶凝性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(3):401-407, 439.
JIAO Yehong, YANG Lin, LI Hejun, et al. Effect of fluidized heat treatment on impurities and gelling properties of phosphogypsum [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(3): 401-407, 439. (in Chinese)
- [22] SIPPLE E-M, BRACONI P, DUFOUR P, et al. Microstructural modifications resulting from the dehydration of gypsum [J]. Solid State Ionics, 2001, 141-142:447-454.
- [23] GARKAVI M, FISCHER H B, KOLODEZHNAYA E. Crystallization features of calcium sulfate in the process of "artificial aging" [J]. Vestnik of Geosciences, 2020(9):37-39.
- [24] PRETURLAN J, VIEILLE L, QUILIGOTTI S, et al. Comprehensive thermodynamic study of the calcium sulfate-water vapor system. Part 1: Experimental measurements and phase equilibria [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2019, 58(22):9596-9606.
- [25] 刘云霄,张春苗,赵洁,等. 脱硫建筑石膏水化特性与机理分析[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(8):2583-2587.
LIU Yunxiao, ZHANG Chunmiao, ZHAO Jie, et al. Hydration characteristics and mechanism analysis of FGD gypsum [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(8): 2583-2587. (in Chinese)