

# 膨润土对塑性混凝土抗溶蚀性能的影响研究

丁向群, 杨宇稀\*, 张洁

(沈阳建筑大学材料科学与工程学院, 沈阳 110168)

**摘要:**目的:研究膨润土对混凝土抗溶蚀性能的影响。方法:采用直接浸泡法,模拟溶蚀水环境配制氯离子溶液、硫酸根离子溶液,将试块放入侵蚀溶液中进行溶蚀,测试了不同膨润土掺量的塑性混凝土在标准养护条件、氯离子溶液浸泡养护、硫酸根离子溶液浸泡养护后的立方体抗压强度,同基准组作对比,分析膨润土掺量与在环境水溶蚀后试块的强度关系,采用SEM扫描电镜对内掺膨润土的细观结构进行了研究,并对其溶蚀机制进行了探讨。结果:随着膨润土在胶凝材料中所占比重的增大,塑性混凝土的立方体抗压强度逐步下降,在0~30%范围内,氯离子溶液对混凝土强度的溶蚀程度先减小后增大,当膨润土掺量为20%时,溶蚀作用最小;硫酸根离子溶液对混凝土强度的溶蚀程度持续减小,当膨润土掺量为30%时,溶蚀作用最小。结论:一定掺量的膨润土能有效降低塑性混凝土遭受溶蚀后的强度损失。

**关键词:**塑性混凝土;膨润土;抗压强度;溶蚀

**DOI:**10.48014/pcms.20230328002

**引用格式:**丁向群,杨宇稀,张洁. 膨润土对塑性混凝土抗溶蚀性能的影响研究[J]. 中国材料科学进展,2023,2(2):35-40.

## 0 引言

塑性混凝土是一种流动性较高的混凝土,使用较少的水泥,并加入膨润土或黏土等材料来部分替代水泥。与普通混凝土相比,它的强度介于土壤和普通混凝土之间。坍落度是混凝土流动性的一个指标,它表示混凝土在施工过程中的可塑性和易于流动的程度,坍落度越大,混凝土的可塑性和流动性越好,具体来说,坍落度为40~90mm的塑性混凝土适用于需要较高可塑性和流动性的混凝土结构,例如梁、柱、墙板等;而坍落度为0~40mm的塑性混凝土则适用于需要较高强度和耐久性的混凝土结构,例如基础、桥墩、隧道等。此外,塑性混凝土的特征是强度低、弹性模量小、渗透性小、适应性强<sup>[1]</sup>,因此被广泛应用于铁路交通、水利工程中,以及各种海港工程和城市建筑的基础工程中,如地下

室、地下车库等<sup>[2,3]</sup>。在长时间的使用中,它的耐久性问题已经引起了广泛的关注。影响混凝土结构耐久性的因素有:碱集料反应、冻融循环、碳化、机械损伤、溶蚀等。在这些因素中,水环境对混凝土的溶蚀会引起钙的溶解,这也是导致混凝土结构耐久性降低的一个主要因素<sup>[4]</sup>。长期暴露于含流动软水或其他腐蚀介质中,由于内外介质浓度差异,会引起 $\text{Ca}^{2+}$ 的外渗。在此过程中,可溶解的固体钙化物将开始溶解,造成混凝土的溶蚀,使其孔隙率增大,力学性能降低。因溶蚀而导致混凝土结构损坏的工程实例屡见不鲜,美国的科罗拉多拱坝、鼓后池拱坝<sup>[5]</sup>等,均因遭受水环境溶蚀而致使耐久性退化。目前对于混凝土溶蚀实验的方法有很多,Faucon等<sup>[6]</sup>最先提出电化学法,徐文雨等<sup>[7]</sup>采用渗淋法进行溶蚀实验,Nguyen等<sup>[8]</sup>制作圆柱形混凝土试块,采用接触溶蚀法<sup>[9]</sup>进行实验,直接浸泡法<sup>[10]</sup>和

\* 通讯作者 Corresponding author: 杨宇稀, 909557620@qq.com

收稿日期:2023-03-28; 录用日期:2023-05-10; 发表日期:2023-06-28

破碎浸泡法<sup>[11]</sup>是目前使用最为广泛的接触溶蚀实验,可以对新浇筑的混凝土结构进行溶蚀研究<sup>[12]</sup>。

本文采用直接浸泡法研究膨润土掺量对塑性混凝土受环境水溶蚀后性能的变化及其机理,根据现实环境水模拟离子溶液,制备不同膨润土掺量的塑性混凝土试块,分别浸泡在不同离子溶液中,测试受侵蚀 28d、56d 后塑性混凝土的立方体抗压强度,并分析膨润土对塑性混凝土抗溶蚀性能的影响。

## 1 材料及方法

### 1.1 材料

(1)膨润土:市售钙基膨润土,其主要化学成分含量及物理性能指标分别见表 1、表 2。

表 1 膨润土化学成分含量

Table 1 Chemical composition of bentonite

化学成分	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O
含量(%)	64.36	0.66	1.69	1.57	16.64	4.93	0.88	1.02

表 2 膨润土主要物理性能指标

Table 2 Main physical properties of bentonite

胶质价 (mL/15g)	吸蓝量 (g/100g)	湿压强度 (KPa)	热湿拉强度 (KPa)	膨胀 倍数	pH
40	27	33	1.8	5.5	7.0~8.0

(2)水泥:普通硅酸盐水泥(P·O 42.5),山水水泥集团有限责任公司生产;

(3)粗骨料:普通碎石,5~20mm 连续级配;

(4)细骨料:普通河砂,细度模数 2.5,含泥量 2%~3%;

(5)拌合水:城市自来水,水温 20±2℃。

### 1.2 配合比设计

采用单因素控制法,水胶比为 1.0,膨润土掺量分别为 0%、10%、20%、30%,测试在标准养护、氯离子侵蚀以及硫酸根离子侵蚀三种不同条件下试块的抗压强度变化规律。根据《DL/T 5786—2019 水工塑性混凝土配合比设计规程》的要求,确定了配制过程中的配制参数。塑性混凝土的密度在 2100~2200kg/m<sup>3</sup> 之间,含沙量为 50%,其配合比如表 3 所示。

表 3 塑性混凝土配合比

Table 3 Mix proportion of plastic concrete

编号	膨润土		各材料用量(kg/m <sup>3</sup> )				
	掺量 (%)	水胶比	水	膨润土	水泥	细骨料	粗骨料
K-1	0	1.0	230	0	230	840	840
K-2	10	1.0	230	23	207	840	840
K-3	20	1.0	230	46	184	840	840
K-4	30	1.0	230	69	161	840	840

根据实际工程中的环境水质,分别配制氯离子溶液、硫酸根离子溶液用于模拟不同水质中的侵蚀因素,将混凝土试块分别浸入养护,测试其 28d、56d 两种龄期的抗压强度、微观结构变化,进而分析膨润土掺量对塑性混凝土抵抗环境水溶蚀的影响。

### 1.3 试验方法

制备尺寸为 100mm<sup>3</sup> 试件,并按照《DL/T 5303—2013 水工塑性混凝土试验规程》和《DL/T 5144—2015 水工混凝土施工规范》的要求,测试其抗压强度变化和抗溶蚀性能。

通过查阅文献<sup>[10]</sup>模拟辽宁省丹东市蒲石河电站真实水环境,使用无水硫酸镁以及氯化铵分析纯配制 0.3mol/L 的氯离子溶液和硫酸根离子溶液。将混凝土试块分别进行标准养护、氯离子溶液浸泡养护及硫酸根离子溶液浸泡养护,测试其 28d、56d 立方体抗压强度,对比强度损失差值从而分析膨润土的掺量对塑性混凝土抗溶蚀性能的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 膨润土对塑性混凝土立方体抗压强度的影响

如图 1 所示,膨润土掺量的变化会对塑性混凝土立方体的抗压强度产生影响。由图可见,在龄期相同时,随着掺入膨润土的比例增加,塑性混凝土立方体的抗压强度总体上呈现逐渐下降的趋势。相较于未添加膨润土的试样,28d 时,掺加 10%膨润土试样强度并无明显变化,掺加 20%、30%膨润土试样抗压强度的降幅分别为 30.86%、9.45%;56d 时,掺加 10%、20%、30%膨润土试验的抗压强度降

幅分别为 10.94%、30.89%、13.77%。随着试块龄期的增加,相同掺量的膨润土试样的抗压强度也随之增加。膨润土掺量为 0、10%、20% 和 30% 的试样,56d 强度较 28d 强度增幅分别为 21.85%、12.33%、12.28% 和 36.91%。

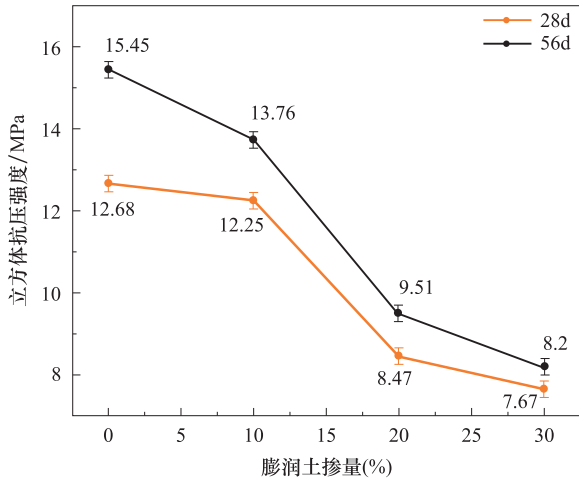


图 1 立方体抗压强度与膨润土掺量的关系  
Fig. 1 Relationship between cubic compressive strength and bentonite content

尽管混凝土的强度主要依赖于水泥的作用,但是膨润土中主要成分蒙脱石的极高吸水性也起到了重要的作用<sup>[13]</sup>,膨润土吸水后会膨胀导致混凝土结构疏松、强度降低,此外,这也会抑制水泥胶体的形成和发展,导致混凝土凝结时间和强度发展的延迟。

## 2.2 离子溶液侵蚀对塑性混凝土的强度影响

将制备好的 0~30% 膨润土掺量的混凝土试块分成三组,第一组标准养护(同 2.1 节);第二组浸入 0.3mol/L 的氯离子溶液中;第三组浸入 0.3mol/L 的硫酸根离子溶液。测试 28d、56d 的立方体抗压强度。图 2 分别是不同掺量的试块在三种环境下的 28d、56d 立方体抗压强度;图 3 分别是标准养护条件下与氯离子溶蚀、硫酸根离子溶蚀后的试块的 28d、56d 的强度差值。

由图 2(a)、图 2(b)可知,在标准养护条件下,混凝土 28 天龄期的立方体试块,分别添加 10%、20% 和 30% 膨润土掺量后,其抗压强度分别降低了 0.43MPa、3.78MPa 和 0.8MPa;56d 试块立方体抗压强度分别下降了 1.69MPa、4.25MPa、1.31MPa;受氯离子溶蚀试块 28d 抗压强度分别下降 0.22MPa、

3.35MPa、0.89MPa; 56d 分别下降 1.78MPa、3.19MPa、2.1MPa;受硫酸根离子溶蚀试块 28d 抗压强度分别下降了 0.22MPa、2.21MPa、0.68MPa。56d 分别下降了 0.23MPa、3.9MPa、0.67MPa。可以明显发现,塑性混凝土在受到离子溶蚀后其立方体抗压强度受损明显。在离子的溶蚀下相同龄期的试块强度下降,但同一配合比的试块随龄期发展强度也会有所增加,这是由于混凝土本身的性质,其强度在溶蚀条件下会随龄期的增长而缓慢增长。

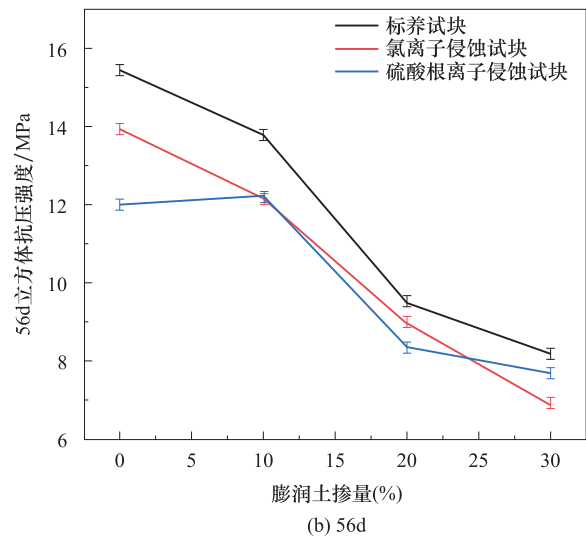
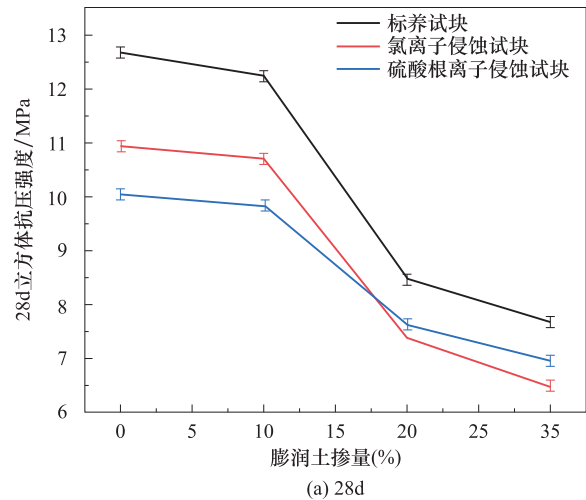
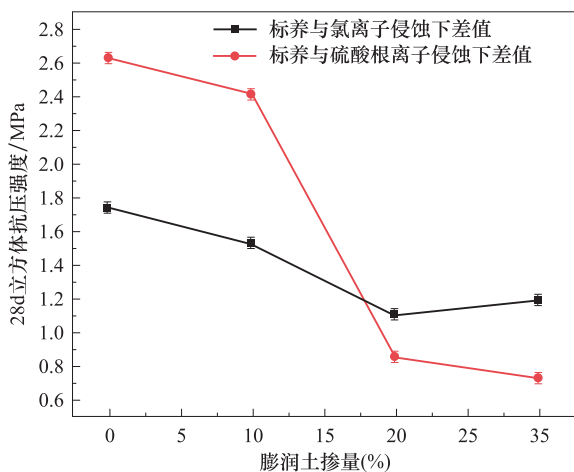


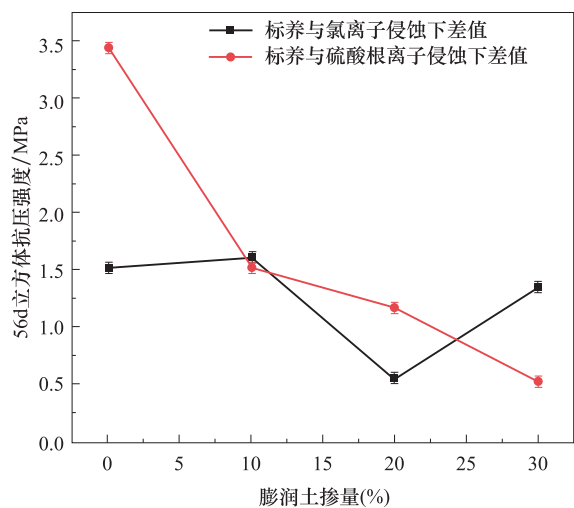
图 2 三种养护条件下立方体抗压强度  
Fig. 2 Cubic compressive strength under three curing conditions

为更直观探究离子溶液对不同膨润土掺量的塑性混凝土溶蚀影响,现将四种膨润土掺量的混凝土试块在标准养护条件下的强度与离子溶蚀后强度的差值绘制成图 3(a)、图 3(b),差值越小说明其

抵抗溶蚀对强度损耗的能力越强。由图可以看出, 28d 和 56d 养护龄期, 曲线呈相同趋势: 标准养护条件与受氯离子溶蚀的试块强度差值随膨润土掺量的增加总体呈现下降趋势, 其中 20% 掺量为最小差值, 30% 掺量差值开始略有回升; 标准养护条件下与受硫酸根溶蚀的试块强度差呈持续下降的趋势。即随着膨润土掺量的增加, 塑性混凝土的抗离子溶液溶蚀能力逐渐增强, 因此其强度受到的影响会减小。



(a) 28d 立方体强度差值  
(a) 28d Cube strength difference



(b) 56d 立方体强度差值  
(b) 56d Cube strength difference

图 3 试块立方体强度差值

Fig. 3 Test cube strength difference

钙质是水泥和混凝土的主要成分之一<sup>[14]</sup>。在软水环境下, 混凝土会受到渗透和渗流的作用, 使得高钙水化产物逐渐转化为低钙含量的产物。随着时间和水的作用, 钙离子会被进一步分解、溶蚀, 使其与混凝土的黏结性丧失, 从而改变了混凝土的

内部结构。其主要特征是: 混凝土内部的孔隙率增加、密实度下降。在外界水渗流压强的影响下, 混凝土中的空隙将进一步增大, 从而使其力学性能变弱。在严重的时候, 混凝土可能会失去强度和抗渗性, 进而缩短其使用寿命并导致建筑物损坏<sup>[15]</sup>。膨润土能够调节混凝土的性能, 其中包括抗溶蚀性, 其外表面具有活性基团, 而这些活性基团能够吸附水中的离子和有机物质; 膨润土的微细孔隙和层状结构能起到阻隔作用, 抑制环境中的离子和有机物质渗透到混凝土内部; 膨润土是一种具有多孔性和大表面积的天然吸附材料, 它的微观结构由层状矿物质组成, 这些矿物质中的部分离子可以与水溶液中的离子进行交换, 这个过程称为离子交换作用, 当膨润土与水溶液接触时, 水中的有害离子(如重金属离子、放射性核素等)会进入膨润土中, 与膨润土表面上的可交换离子进行交换。这样, 有害离子被吸附在膨润土表面上, 被隔离在膨润土的孔隙中, 从而实现了去除有害离子的目的。

### 3 微观结构

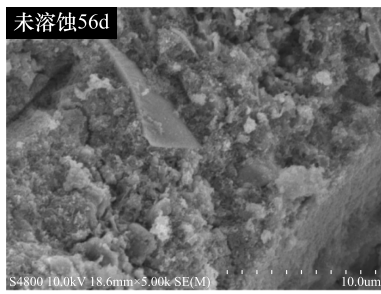
运用 SEM(扫描电子显微镜)观测分析塑性混凝土微观结构情况。不同膨润土掺量在不同条件下养护的塑性混凝土微观结构如图 4 所示。由图可见: 塑性混凝土试块如果没有经过离子溶液溶蚀, 其水化产物会形成一种致密的空间网络结构, 颗粒之间的接触逐渐变得更加紧密。使混凝土结构更加完整充实, 强度相对更高; 而经过离子溶液溶蚀的塑性混凝土试块由于其水化物养护环境的不同, 其水化产物较为粗壮, 且结构更为稀松, 这是由于溶出大量 CaO 和其他一些水化产物, 导致塑性混凝土原本密实的结构变得疏松多孔<sup>[16]</sup>。

### 4 结论

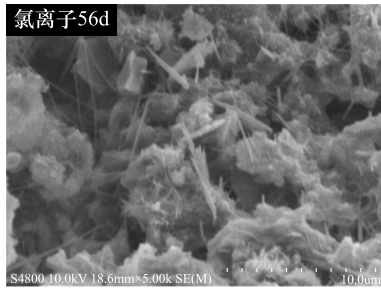
经过实验研究和理论分析, 我们发现不同膨润土掺量的塑性混凝土对离子溶液的溶蚀有不同的影响, 得出以下结论:

(1) 膨润土掺量增加会降低塑性混凝土的强度。膨润土中的蒙脱石吸水后导致胶凝材料出现大量空隙, 使混凝土强度降低, 即“塑性化”。

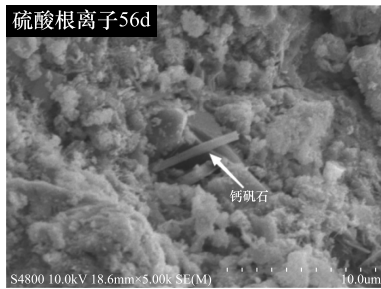
(2) 膨润土能减少离子溶液对混凝土强度的损



(a) 56d未溶蚀  
(a) 56d Nocorrosion



(b) 56d氯离子溶蚀  
(b) 56d Chlorideion corrosion



(c) 56d硫酸根离子溶蚀  
(c) 56d Corrosion by sulfatideon

图 4 混凝土试块的微观结构

Fig. 4 The microstructure of concrete specimens

害,特别是当与含氯离子和硫酸根离子的溶液接触时,添加 20%的膨润土的塑性混凝土比标准养护条件下的试块强度损失更小,且抗溶蚀能力明显提高。

(3)塑性混凝土溶蚀后流失氧化钙,水化产物分解导致密实度下降,因此塑性混凝土受溶蚀后强度会下降。

利益冲突:作者声明无利益冲突。

## 参考文献(References)

[1] 汤俊杰. 塑性混凝土基本性能研究[D]. 郑州:郑州大学,2010.

[2] 张雁. 露天煤矿防渗墙截渗减排机制及工程应用研究[D]. 北京:煤炭科学研究总院,2018.

[3] 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(05):5040-5052.  
<https://doi.org/10.11896/cldb.19090070>

[4] 何绍丽. 软水条件下矿物掺合料混凝土溶蚀性能的实验研究[D]. 南京:南京理工大学,2019.  
<https://doi.org/10.27241/d.cnki.gnjgu.2019.001551>

[5] 郭春伶. 钙溶蚀条件下混凝土性能劣化规律研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.

[6] Faucon P, Gerard B, Jacquinet J F, et al. Water attack of a cement paste: towards an improved accelerated test? [J]. Advances in Cement Research, 1998, 10(2): 67-73.

[7] 徐文雨,关英俊,李金玉. 大坝混凝土渗漏溶蚀的研究[J]. 水利水电技术, 1990(07): 43-47.

[8] Nguyen V H, Nedjar B, Torrenti J M. Chemo-mechanical coupling behaviour of leached concrete: Part II, Modelling[J]. Nuclear Engineering & Design, 2007, 237 (20-21): 2083-2089.

[9] 焦雨起. 接触溶蚀作用下水工混凝土性能演化研究[D]. 宜昌:三峡大学,2018.

[10] 谢辉. 侵蚀环境对混凝土抗硫酸盐侵蚀耐久性的影响[D]. 重庆:重庆交通大学,2021.  
<https://doi.org/10.27671/d.cnki.gcjtc.2021.000793>

[11] 杨志辉. 碱激发混凝土抗氯离子侵蚀长期性能的研究[D]. 广州:广州大学,2021.  
<https://doi.org/10.27040/d.cnki.ggzdu.2021.000153>

[12] 张开来,沈振中,甘磊. 水泥基材料溶蚀试验研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(06): 86-94.

[13] 文一多. 砂土/粉土—膨润土防污隔离墙渗透性的室内和现场试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2017.

[14] 高颂,蒋林华,徐秀珍,等. 塑性水泥基材料溶蚀行为试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35(05): 46-53.  
<https://doi.org/10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2021.05.009>

[15] 高玉琴,郭博文,宋力,等. 塑性混凝土单轴受压性能尺寸效应的试验研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(11): 110-113, 126.

[16] 付腾欢. 掺合料的掺合方式及掺量对塑性混凝土耐久性的影响研究[D]. 西安:西安理工大学,2020.  
<https://doi.org/10.27398/d.cnki.gxalu.2020.000444>

# Study on the Effect of Bentonite on the Resistance to Corrosion of Plastic Concrete

DING Xiangqun, YANG Yuxi<sup>\*</sup>, ZHANG Jie

(School of Material Science and Engineering,  
Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** Objective: To study the effect of bentonite on the corrosion resistance of concrete. Methods: Using the direct immersion method, the chloride ion solution and sulphate ion solution were prepared to simulate the corrosive water environment, and the test blocks were placed in the corrosive solution for corrosion. The cube compressive strength of plastic concrete with different bentonite admixtures was tested under standard curing conditions, after immersion in chloride ion solution and after immersion in sulfate ion solution immersion curing. The relationship between the amount of bentonite admixture and the strength of the test block after dissolution in ambient water was analyzed in comparison with the reference group. The microstructure of the internally doped bentonite was studied using SEM (scanning electron microscopy), and its corrosion mechanism was discussed. Results: As the proportion of bentonite in the cementitious material increases, the cube compressive strength of plastic concrete gradually decreases. In the range of 0~30%, the corrosion degree of chloride ion solution on the concrete strength first decreases and then increases. When the content of bentonite is 20%, the corrosion effect is the smallest; the effect of corrosion of sulfate ion solution on concrete strength continues to decrease, and is minimized at 30%. Conclusion: A certain amount of bentonite can effectively reduce the strength loss of plastic concrete after corrosion.

**Keywords:** Plastic concrete; bentonite; compressive strength; corrosion

**DOI:** 10.48014/pcms.20230328002

**Citation:** DING Xiangqun, YANG Yuxi, ZHANG Jie. Study on the effect of bentonite on the resistance to corrosion of plastic concrete [J]. Progress in Chinese Materials Sciences, 2023, 2(2): 35-40

Copyright © 2023 by author(s) and Science Footprint Press Co., Limited. This article is open accessed under the CC-BY License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

