

高水头差船闸围堰防渗墙塑性混凝土试验研究



李林恩，鲁 舟

(中交四航局第三工程有限公司, 广东 湛江 524005)

摘要: 依托江西万安高水头差船闸围堰，并依据水利水电相关试验标准，通过调整防渗墙塑性混凝土的水胶比、膨润土掺量等参数，确定适用于高水头差围堰的高极限应变、低抗压强度、低弹性模量及低渗透系数的塑性混凝土配合比(即水胶比为0.80、膨润土掺量为25%)，并经现场注水试验及高密度电测法检测。结果表明，该塑性混凝土防渗墙抗渗性能优异、区段连续性及总体完整性良好。在围堰使用期内，通过监测塑性混凝土防渗墙内部的应变，发现塑性混凝土均处于安全的受压状态，防渗墙止水效果良好。

关键词: 高水头差围堰；塑性混凝土配合比；水胶比及膨润土掺量；高密度电法；应变监测

中图分类号: U 641.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0180-06

Test on plastic concrete of cutoff wall in ship lock cofferdam with large head difference

LI Lin-en, LU Zhou

(The Third Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Zhanjiang 524005, China)

Abstract: Relying on the ship lock cofferdam with a large head difference in Wan'an, Jiangxi Province, this study adjusts the water-binder ratio, the bentonite content, and other parameters of the plastic concrete mix used in the cutoff wall according to water resources and hydropower engineering standards. The paper determines the optimal plastic concrete mix ratio (the water-binder ratio is 0.80, and the bentonite content is 25%) with high ultimate strain, low compressive strength, a low elastic modulus, and a low permeability coefficient for cofferdam with a large head difference, then tests the plastic concrete by the field water injection test and the high-density electrical method. The results show that the plastic concrete cutoff wall has excellent impermeability, good section continuity, and good overall integrity. During the service period of the cofferdam, the strain monitoring results in the plastic concrete cutoff wall indicate that the plastic concrete is in a safe compressive state, and the cutoff effect of the wall is good.

Keywords: large head-difference cofferdam; plastic concrete mix ratio; water-binder ratio and bentonite content; high-density electrical method; strain monitoring

塑性混凝土是介于普通刚性混凝土和土之间的柔性复合材料，具有极限破坏应变高、弹性模量低、渗透系数及抗压强度低等特点，多用于坝体心墙防渗、水库除险加固、地基抗渗等工程。1957年在意大利Aja河水电站围堰工程中首次使用塑性混凝土作为坝体防渗墙，极大改善了防渗墙的防渗性能，随后该技术在英国、智利、西班牙等国家的堤坝防渗工程得到了广泛应用，取得

了很大成功。国内于1988年，在新疆乌拉泊水库除险加固工程中首次使用塑性混凝土防渗墙，随后该防渗技术在广东田心水库、十三陵抽水蓄能电站下围堰、三峡二期围堰等近百个水利水电防渗工程中得到广泛应用，并取得良好的抗渗防渗效果^[1]。王四巍^[2]、宗敦峰等^[3]通过分析多个水利工程的塑性混凝土防渗墙配合比，总结配合比设计的用水量、砂率、水胶比、模强比、弹性模量

等参数的推荐范围。与普通混凝土配合比设计采用的表观密度法或体积法不同, 塑性混凝土配合比设计主要依据工程类比法, 但不同工程的设计水力坡降、渗透系数及弹性模量不同, 加之不同地区的原材料种类及品质差别较大, 故适用于特定工程的配合比要在参考类似工程的基础上单独设计。针对江西万安高水头差(工作水头 32.5 m)船闸围堰防渗墙, 从塑性混凝土配合比设计及优化入手, 通过调整混凝土水胶比、膨润土掺量等参数, 并根据室内试验结果及现场注水试验、应

变监测数据确定适用于高水头差船闸围堰的塑性混凝土配合比。

1 原料选择

1.1 原材料选用

根据勘测及环境水测试结果, 工程所处地段无明显侵蚀环境, 优先选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。综合经济方面考虑, 本工程采用江西鹰鹏水泥有限公司生产的红狮牌 P·O 42.5 型普通硅酸盐水泥, 水泥主要物理指标见表 1。

表 1 水泥物理性能指标

密度/ (t·m ⁻³)	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	标准稠度 用水量/%	凝结时间/min		安定性	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
			初凝	终凝		3 d	28 d	3 d	28 d
3.10	347	27.2	160	215	合格	5.3	7.6	26.5	48.6

塑性混凝土中加入粉煤灰等掺合料可改善出机混凝土的流动性, 也可增加混凝土的后期强度, 并可提高混凝土的抗渗性能。选取吉安惠鑫实业有限责任公司生产的 F 类、Ⅱ级粉煤灰, 其性能指标为细度(45 μm 筛余)24.1%, 需水量比 98%, 烧失量 3.48%, SO₃ 含量 0.35%, 含水率 0.1%, 28 d 强度活性指数 72%。膨润土选用湖南临澧县众帮化工有限公司生产的钠基膨润土, 吸水率为 324%, 75 μm 筛余为 3.1%, 膨胀指数为 17.6 mL/g。粗、细集料由江西万安罗塘砂石料场生产, 其中细集料为细度模数在 2.6~3.0 的洁净河砂; 粗集料为粒径为 5~20 mm 的卵石, 经岩相试验检测卵石母岩主要为砂岩, 且无潜在碱活性。

1.2 配合比设计

依据设计图纸, 本工程围堰防渗墙塑性混凝土的设计指标见表 2。塑性混凝土的用水量、胶凝材料组成及用量、水胶比、膨润土掺量等参数对混凝土的弹性模量、抗压强度及渗透系数影响很大, 在参考类似工程的塑性混凝土配合比基础上, 通过调整水胶比(0.6~1.0)和膨润土掺量(15%~35%), 研究混凝土出机性能及硬化后各力学参数, 优选符合设计要求的配合比, 室内配合比试验结果见表 3。依据《水工塑性混凝土试验规程》^[4], 检测出机混凝土的坍落度、扩展度等和易性指标及硬化后的抗压强度、弹性模量及渗透系数指标。

表 2 防渗墙塑性混凝土设计指标

坍落度/mm	扩展度/mm	混凝土表观密度/(t·m ⁻³)	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	渗透系数/(cm·s ⁻¹)	允许渗透比降
180~220	340~400	≥2.10	≥3.0	<2.0	<10 ⁻⁷	≥50

表 3 塑性混凝土室内配合比试验结果

配合 比编号	水胶比	膨润土 掺量/%	混凝土原材料用量/(kg·m ⁻³)						坍落度/ mm	扩展度/ mm	混凝土表观 密度/(kg·m ⁻³)
			水泥	粉煤灰	膨润土	河砂	5~20 mm 卵石	水			
A1	0.6	25	203	92	88	789	789	230	8.43	175	340
A2	0.7	25	174	76	82	815	816	230	7.24	190	350
A3	0.8	25	151	68	68	839	838	230	6.31	200	375
A4	0.9	25	131	61	64	854	855	230	5.38	210	380
A5	1.0	25	107	50	52	889	887	220	4.20	225	405
B1	0.8	15	143	100	43	839	839	230	5.45	230	415
B2	0.8	20	143	86	57	839	839	230	6.01	225	395
B3	0.8	30	143	57	86	838	840	230	6.29	190	365
B4	0.8	35	143	43	100	839	839	230	6.29	175	350

1.3 混凝土配合比试验结果分析

水胶比是影响塑性混凝土性能(抗压强度、弹性模量、渗透系数)最主要的因素,随着水胶比的增大,混凝土内部孔隙逐渐增多、混凝土密实性逐渐变差,混凝土抗压强度、弹性模量及渗透性能均逐渐降低。当水胶比大于 0.9 时,28 d 抗压强度达不到 3.97 MPa 的配制强度,且水胶比为 1.0 时,渗透系数超过 10^{-7} cm/s,达不到设计要求;而水胶比低于 0.6 时,因水泥用量提高而使塑性混凝土的刚性增加、极限变形性能变差,即混凝土弹性模量大于 2.0 GPa,不满足设计要求,检测结果见图 1,因此以水胶比为 0.8(配合比编号为 A3)为样本进行 B 系列试验(表 3),进一步研究膨润土掺量对混凝土渗透系数及弹性模量的影响。

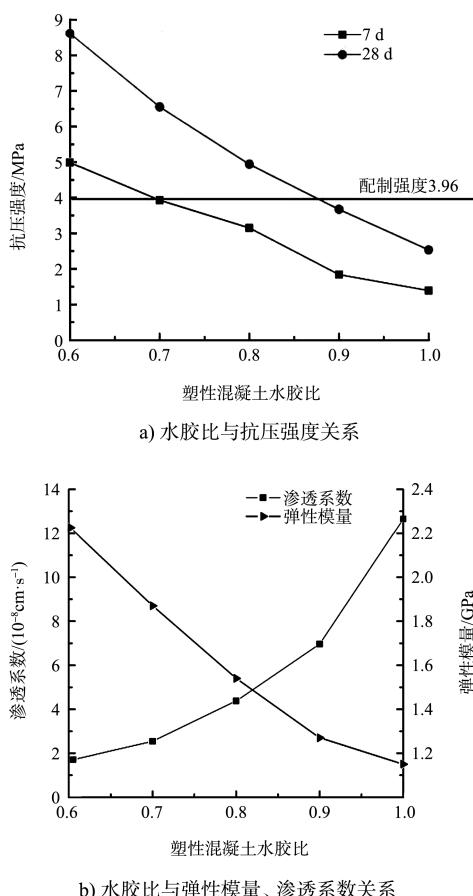


图 1 混凝土标养试件水胶比与各性能指标的关系

膨润土对降低塑性混凝土弹性模量及提高混凝土的抗渗性能效果明显^[5]。随着膨润土的掺量由

15% 提高至 35%,塑性混凝土的抗压强度逐步减小、弹性模量降低,但抗渗性能逐渐提高,膨润土掺量小于 15% 时,混凝土弹性模量接近 2.0 GPa 的上限值;而掺量大于 35% 时,抗压强度不满足要求,故膨润土的最佳掺量确定为 25%,检测结果见图 2。综合以上数据分析,并从成本方面考虑,确定编号为 A3 的配合比为最佳配合比,即水胶比为 0.80、膨润土的掺量为 25%。

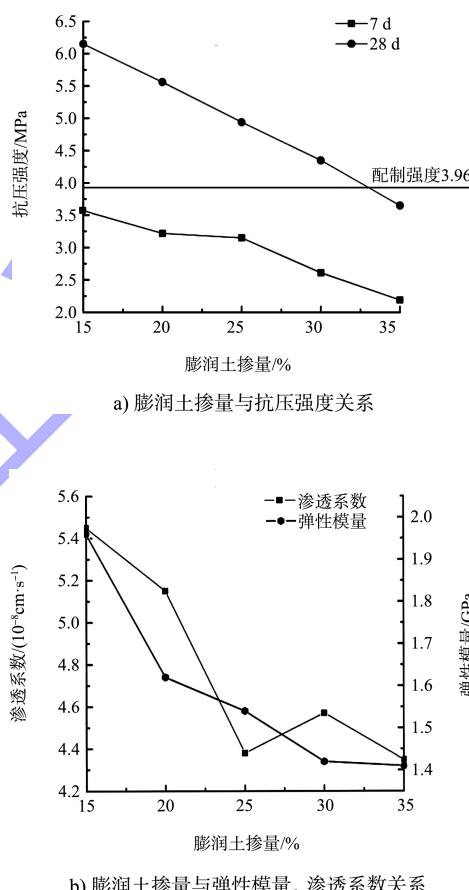


图 2 混凝土标养试件膨润土掺量与各性能指标的关系

2 塑性混凝土防渗墙现场应用

江西万安二线船闸为国内第 5、世界前 10 的高水头单级船闸,设计水头差为 32.5 m。船闸二期围堰位于右岸原土坝上游的库内阶地,左端与原土坝近船闸侧土坝衔接,右端接右岸山体,呈倒 L 形布置,坝轴线全长 537.22 m,其防渗体系采用黏土心墙+塑性混凝土+帷幕灌浆,塑性混凝土防渗墙轴线长 570.3 m,厚度 0.8 m,成槽最大深度 52.2 m,防渗墙的设计断面见图 3。

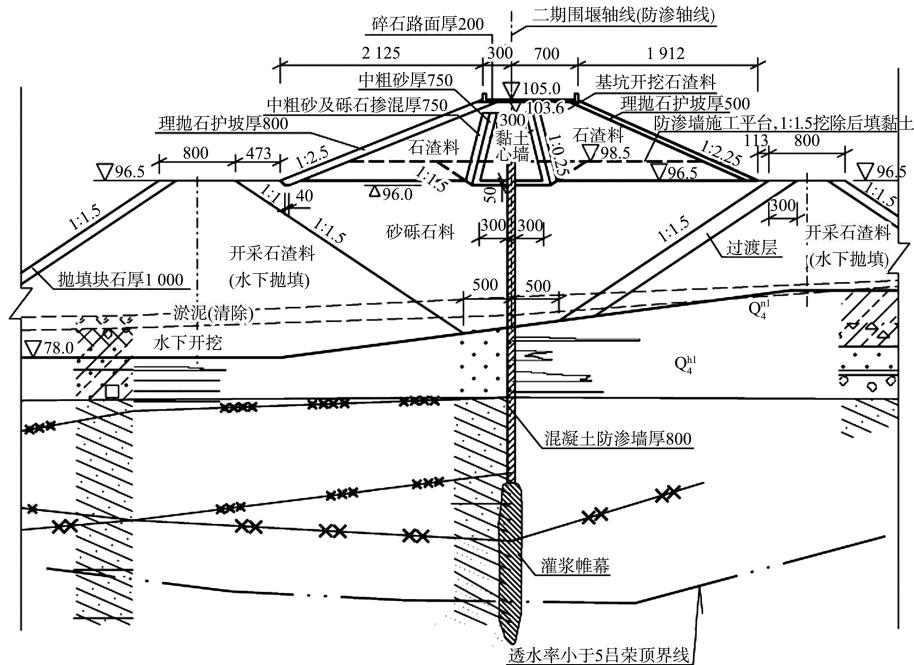


图3 塑性混凝土防渗墙设计断面 (高程: m; 尺寸: mm)

根据《水利水电工程混凝土防渗墙施工技术规范》^[6]的检测频率, 在塑性混凝土防渗墙浇筑过程中随机抽取 244 组混凝土抗压强度试件、14 组弹性模量试件及 10 组渗透系数试件。依据《水利水电工程注水试验规程》, 在混凝土防渗墙选取 5 个已达 28 d 龄期的槽段进行常水头注水试验, 防渗墙施工完成后用高密度电法进行完整性检测, 在围堰防渗墙施工期及使用期内通过监测混凝土内部应变情况, 分析防渗墙内部混凝土的受力特征。

3 检测结果及分析

3.1 混凝土试件检测

2019—2020 年共浇筑 94 个槽段的塑性混凝土防渗墙, 244 组混凝土试件抗压强度的平均值为 4.11 MPa, 强度标准差 σ 为 0.44 MPa, 抗压强度落在区间 $[\bar{x} - \sigma, \bar{x} + \sigma]$ 即 [3.67 MPa, 4.55 MPa] 的概率为 67.62%, 落在 $[\bar{x} - 2\sigma, \bar{x} + 2\sigma]$ 即 [3.23 MPa, 4.99 MPa] 的概率为 94.67%, 而两区间的理论正态分布频率分别为 68.26%、95.45%, 实际分布频率与理论频率相近, 故塑性混凝土试件抗压强度值符合正态分布, 混凝土抗压强度分布见图 4,

概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{0.44\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-4.12)^2}{0.39}} \quad (1)$$

式中: $f(x)$ 为混凝土试件抗压强度概率密度函数; x 为混凝土试件抗压强度 (MPa)。

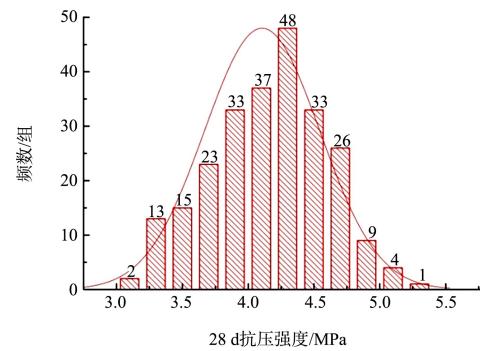


图4 塑性混凝土试件 28 d 抗压强度分布

塑性混凝土防渗墙浇筑过程中随机抽取 14 组弹性模量试件和 10 组抗渗试件, 其中试件的弹性模量均小于 2.000 GPa, 最大值为 1.980 GPa, 平均值为 1.494 GPa; 试件的渗透系数最大值为 7.39×10^{-8} cm/s, 平均值 3.20×10^{-8} cm/s, 弹性模量和渗透系数均满足设计要求, 其中弹性模量检测结果见图 5。

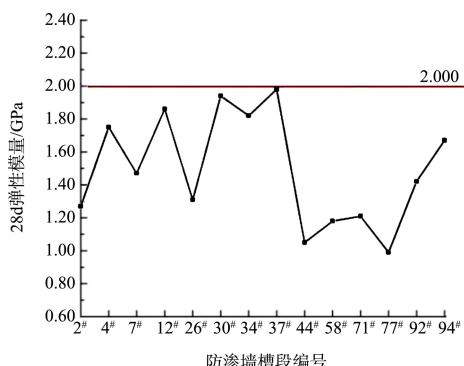


图 5 塑性混凝土 28 d 标养试件弹性模量

3.2 塑性混凝土防渗墙现场注水试验

在混凝土防渗墙选取 5 个已达 28 d 龄期的槽段钻孔进行常水头注水试验, 渗透系数最大值为 $7.95 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$, 平均值 $5.84 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$, 检测结果见图 6。

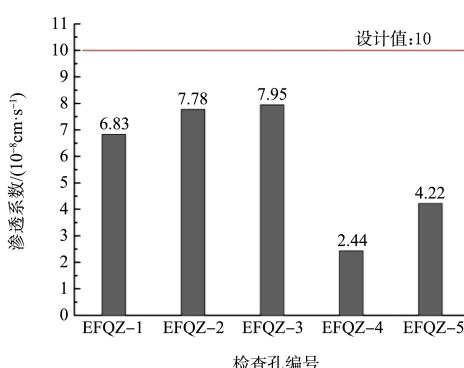


图 6 防渗墙注水试验检测结果

3.3 防渗墙连续性及完整性检测

混凝土、人工填土、破碎及完整岩体等材料的电阻率有较大差异, 完整塑性混凝土防渗墙表现为中-高电阻率异常, 而塑性混凝土防渗墙出现裂隙漏水及破损渗漏的区域的电阻率断面等值线有明显的低阻扭曲、畸变带或局部低电阻率异常, 基岩、不同风化层及破碎岩体、人工填土相对于完整塑性混凝土防渗墙表现为低电阻率异常。使用高密度电法检测塑性混凝土防渗墙的连续性、完整性, 局部物探测线见图 7, 部分检测结果断面见图 8。断面上视电阻率等值线扭曲、畸变较小, 沿深度方向开启型分布, 不出现闭合等值线, 由此推断塑性混凝土防渗墙质量较好, 无明显渗透点, 即防渗墙身区段连续性、总体完整性较好。

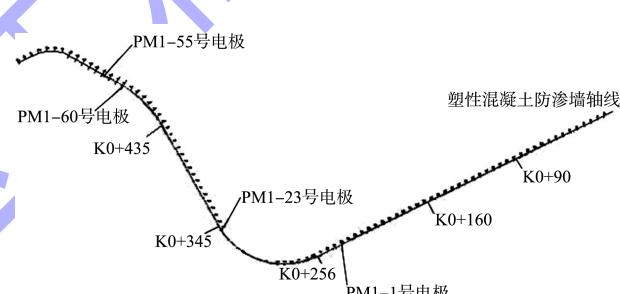
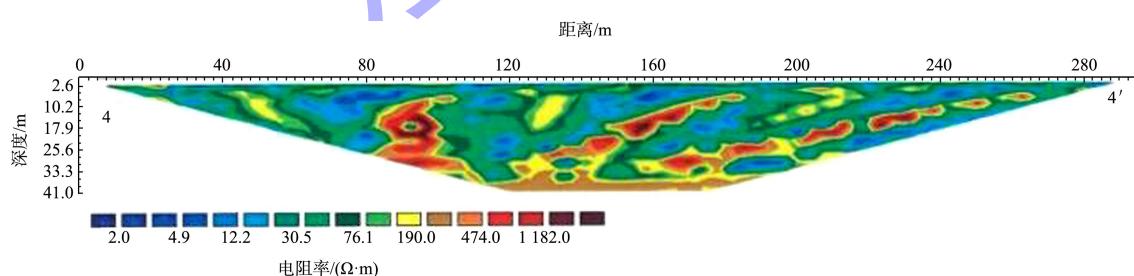
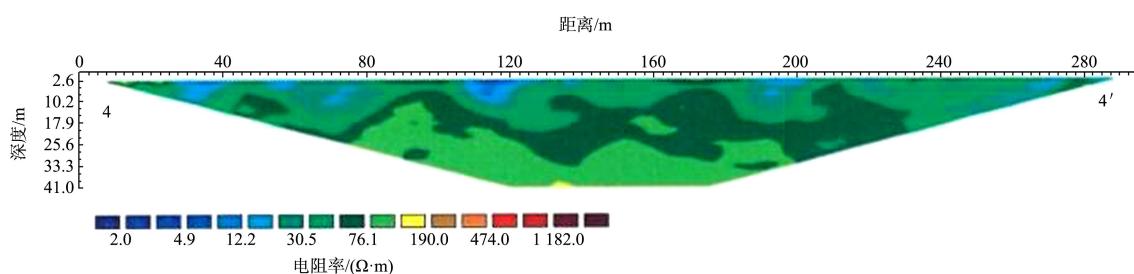


图 7 局部物探测线



a) 测量视电阻率拟断面



b) 计算视电阻率拟断面

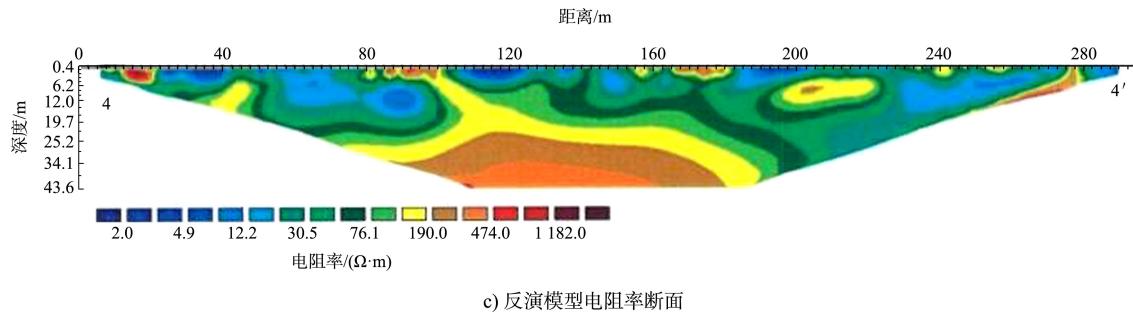


图8 高密度电法检测结果断面

3.4 防渗墙塑性混凝土内部应变监测

针对塑性混凝土防渗墙的结构特点及地质条件, 在混凝土内部布设仪器进行应变监测, 即选取5个塑性混凝土防渗墙代表性槽段, 在混凝土不同高程预埋30支应变计, 监测自2020年1月—2021年12月塑性混凝土内部应变情况, 结果见图9。可以看出, 防渗墙内部应变在塑性混凝土硬化前期变化较大, 但随着混凝土龄期的增长, 防渗墙内部应变值也基本趋于稳定, 应变稳定值(表4)均在混凝土设计允许拉压应变(-750×10^{-6} ~ 100×10^{-6})内, 塑性混凝土防渗墙处于安全状态。

表4 塑性混凝土防渗墙内部应变监测结果

防渗墙监测部位	应变计埋深/m	混凝土龄期/d	应变/ 10^{-6}
29#槽段上部	3.5	610	-81.49
29#槽段中部	9.5	610	-57.65
29#槽段下部	15.5	610	-114.11
44#槽段上部	3.5	610	-71.16
44#槽段中部	9.5	610	-93.85
44#槽段下部	15.5	610	-158.23
58#槽段上部	3.5	610	-213.04
58#槽段中部	7.5	610	-90.26
58#槽段下部	11.5	610	-250.55
77#槽段上部	3.5	580	7.5
77#槽段中部	9.5	580	-18.6
77#槽段下部	15.5	580	17.5
83#槽段上部	3.5	580	-119.6
83#槽段中部	7.5	580	-165.1
83#槽段下部	11.5	580	-192.1

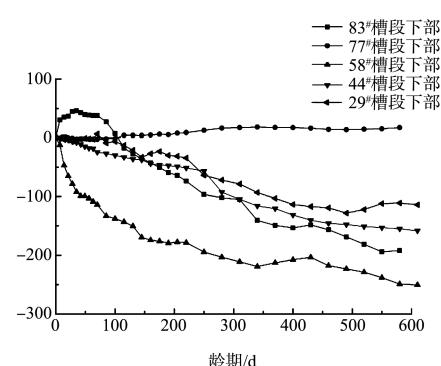


图9 塑性混凝土内部应变过程

4 结论

1) 水胶比对塑性混凝土的抗压强度、弹性模量等性能影响最大, 而膨润土对降低塑性混凝土弹性模量、提高混凝土的抗渗性能效果明显。当混凝土水胶比为0.8、膨润土掺量为25%时, 混凝土的出机和易性及硬化后的力学性能及抗渗性能最佳, 根据混凝土试件抗压强度统计数据, 证明了低强度的塑性混凝土抗压强度符合正态分布。

2) 塑性混凝土防渗墙施工完成后, 通过高密度电法显示防渗墙质量较好, 无明显渗透点, 即防渗墙身区段连续性、总体完整性较好, 该方法可作为推断防渗墙裂隙漏水、渗漏等缺陷位置的重要手段。

3) 根据埋设在塑性混凝土中应变计的应变检测结果, 表明塑性混凝土防渗墙内部应力基本为压应力, 且应力分布较均匀, 与周围土体能协调变形, 混凝土的抗裂性能优异, 防渗墙在使用期内处于安全状态。

(下转第190页)