

DOI: 10.7672/sgjs2024100019

# 锚具槽回填微膨胀自密实混凝土试验研究\*

韩立祥

(中铁十八局集团隧道工程有限公司,重庆 400700)

[摘要] 为解决长距离引水隧道无黏结预应力结构锚具槽混凝土振捣不密实或发生较大塑性变形导致开裂脱空等问题,研究粉煤灰掺量、膨胀剂掺量和水胶比对强度、限制膨胀率等性能的影响,设计了微膨胀自密实混凝土,测定其自身体积变形和自收缩变化。结果表明:水胶比0.40,粉煤灰掺量25%,膨胀剂用量 $30\text{kg}/\text{m}^3$ 时,28d抗弯拉强度和抗压强度分别为4.77、53.6MPa,抗渗等级大于W11,混凝土60d自身体积变形率为 $20\times 10^{-6}$ ,趋于基本稳定,90d干燥收缩率约为 $-460\times 10^{-6}$ ,应加强微膨胀自密实混凝土的保湿养护,延长保湿养护的时间,以利于膨胀剂性能的发挥。

[关键词] 混凝土;自密实;收缩;膨胀剂;粉煤灰;水胶比;强度

[中图分类号] TU528

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)10-0019-05

## Experimental Study on Backfilling Micro-expansive Self-compacting Concrete in Anchor Slot

HAN Lixiang

(China Railway 18th Bureau Group Tunnel Engineering Co., Ltd., Chongqing 400700, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of cracking and voiding caused by uncompact vibration or large plastic deformation of concrete in anchorage slot of unbonded prestressed structure in long-distance diversion tunnel, the effects of fly ash content, expansive agent content and water-binder ratio on strength and limited expansion rate were studied. The micro-expansion self-compacting concrete was designed, and its free volume deformation and autogenous shrinkage were measured. The results show that when the water-binder ratio is 0.40, the content of fly ash is 25%, and the dosage of expansive agent is  $30\text{kg}/\text{m}^3$ , the 28d flexural tensile strength is 4.77MPa and the 28d compressive strength is 53.6MPa, respectively, and the impermeability grade is greater than W11. The autogenous volume deformation of concrete is  $20\times 10^{-6}$  in 60d, which tends to be basically stable, and the drying shrinkage is about  $-460\times 10^{-6}$  in 90d. The moisturizing curing of micro-expansion self-compacting concrete should be strengthened, and the time of moisturizing curing should be prolonged to facilitate the performance of expansive agent.

**Keywords:** concrete; self-compacting; shrinkage; expansion agent; fly ash; water-binder ratio; strength

### 0 引言

无黏结环锚预应力混凝土衬砌是有压水工隧洞采用的一种新型衬砌形式,主要适用于围岩覆盖浅、地质条件较差、水压力较大的输水隧道<sup>[1]</sup>,具有广阔的应用前景。对锚具槽内锚索进行张拉是无黏结环锚预应力衬砌结构施工中非常重要的一环,锚具槽混凝土的回填质量对锚具槽部位的受力状态起关键作用,锚具槽作为锚头最后的保护层,实

现其密实填充是保障预应力锚索长期耐久性和正常工作的前提条件<sup>[2]</sup>。目前,常使用普通混凝土回填,由于锚具槽内锚索密集、充填间隙小,导致混凝土振捣不密实、锚具槽内无法提供预应力,从而使锚具槽内混凝土开裂脱空,致使锚索端部出现漏油现象<sup>[3]</sup>。锚具槽密封性受到破坏后,外部介质从开裂脱空部位进入槽内对锚头造成腐蚀,并可进一步侵蚀预应力筋,使预应力降低,严重时会造成应力腐蚀破坏而影响结构安全<sup>[4]</sup>。为解决锚具槽密封性问题,具有微膨胀特性的自密实混凝土技术可用于锚具槽的回填密封,利用混凝土的自流平特性实现狭小空间的密实填充,利用微膨胀特性改变混凝

\* 国家自然科学基金;环锚衬砌的预应力荷载传递机理及其应力状态解析(51079282)

[作者简介] 韩立祥,项目副经理,E-mail:351527059@qq.com

[收稿日期] 2024-01-20

土硬化过程中的收缩特性,以期大幅度提高锚具槽整体密封性<sup>[5]</sup>,解决长距离有压隧道无黏结预应力结构的安全耐久问题。

因此,本文研究了原材料组成对微膨胀自密实混凝土工作性能和力学性能的影响规律,测定了限制收缩率和自由体积变形等,得到了变形规律和养护条件。

## 1 原材料与试验方法

### 1.1 原材料及配合比

水泥为 P·MH 42.5 中热硅酸盐水泥;粉煤灰为 I 级粉煤灰;砂为颗粒级配为 II 区、细度模数为 3.06 的机制砂,属于粗砂;考虑到锚头钢筋较多,骨料过大可能造成堵塞,选用 5~15mm 粒径花岗岩石子,饱和面干吸水率为 0.86%,压碎指标为 11.1%;聚羧酸高性能减水剂(JM-PCA)固含量为 36%,减水率为 26.6%;引气剂(JM-2000)固含量为 34%,含气率为 3.8%;选用 UEA 膨胀剂。

为了便于浇筑和填充密实,锚固混凝土选用微膨胀自密实混凝土,设计强度等级为 C40, T500 时间控制为 5~10s,坍落扩展度控制为 550~650mm,限制膨胀率控制为 0~0.01%(水中 28d),考虑到耐久性,按照 F100 的抗冻要求,混凝土拌合物含气量控制为 2.5%~3.5%。混凝土配合比设计参考 CCES 02—2004《自密实混凝土设计与施工指南》,根据工程设计和实际情况及其他工程实践经验,粉煤灰掺量为 20%,25%,30%,膨胀剂用量为 15,20,30kg/m<sup>3</sup>,水胶比为 0.36,0.40,0.44,优选的混凝土配合比如表 1 所示。

表 1 优选混凝土配合比

Table 1 Preferred concrete mix ratio

编号	水胶比	胶材总量/(kg·m <sup>-3</sup> )	粉煤灰掺量/%	减水剂掺量/%	膨胀剂掺量/(kg·m <sup>-3</sup> )	引气剂掺量/%	砂率/%
SW36	0.36	583	25	1.0	0	0.04	54.8
SW40	0.40	533	25	1.0	0	0.04	55.4
SW44	0.44	480	25	1.0	0	0.04	56.1
SF20	0.40	545	20	1.0	0	0.04	55.2
SF30	0.40	525	30	1.0	0	0.04	55.3
PU15	0.40	480	25	0.8	15	0.04	57.3
PU20	0.40	475	25	0.8	20	0.04	56.8
PU30	0.40	500	25	0.8	30	0.04	56.7
PW36	0.36	569	25	0.8	20	0.04	55.5
PW44	0.44	466	25	0.8	20	0.04	57.2
PF20	0.40	500	20	0.8	20	0.04	56.0
PF30	0.40	513	30	0.8	20	0.04	55.0

注:S表示素混凝土;P表示膨胀混凝土;W表示水胶比变量;F表示粉煤灰掺量变量;U表示膨胀剂掺量变量;数字代表变量大小

### 1.2 试验方法

按 SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》测

试混凝土 T500 时间、坍落扩展度、V 漏斗通过时间、含气量、抗压强度(3,7,28d)、劈裂抗拉强度(3,7,28d)、限制膨胀率和自由体积变形等。膨胀混凝土强度试件用铁模成型,带模养护至龄期后拆模,限制膨胀率试件也用铁模成型,2d 后拆模测初长,然后放入标准养护室水中养护至 28d。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 混凝土拌合物工作性能

混凝土拌合物工作性能如表 2 所示。由表 2 可见,V 漏斗通过时间为 23~38s,容重为 2 267~2 311kg/m<sup>3</sup>,T500 时间为 5~9s,坍落扩展度为 560~670mm,含气量为 2.6%~3.5%,所有 12 组配合比的坍落扩展度、拌合物含气量等均能满足设计要求。

表 2 混凝土拌合物性能

Table 2 Performance of concrete mixture

编号	T500 时间/s	坍落扩展度/mm	V 漏斗通过时间/s	含气量/%	容重/(kg·m <sup>-3</sup> )
SW36	9	560	38	3.3	2 305
SW40	6	650	27	3.2	2 277
SW44	5	640	32	2.7	2 289
SF20	6	650	33	2.6	2 311
SF30	8	620	35	3.4	2 267
PU15	8	650	24	2.8	2 289
PU20	7	650	23	3.3	2 285
PU30	6	650	24	3.5	2 283
PW36	8	650	25	3.0	2 300
PW44	6	650	32	3.0	2 289
PF20	6	600	35	3.2	2 306
PF30	5	670	24	2.6	2 284

### 2.2 基本水胶比和粉煤灰掺量的优选

由素混凝土配合比优选试验,即表 1 中 SF30 组配合比,用来试拌调整,确定基本水胶比和粉煤灰掺量。未掺膨胀剂、水胶比为 0.4 时,粉煤灰掺量对抗压强度的影响如图 1 所示。由图 1 可知,28d 抗压强度随粉煤灰掺量的增加先降低后增加,掺量达到 25% 时 28d 抗压强度最小,粉煤灰掺量对 3d 和 7d 抗压强度影响不大,因此推荐选用 25% 的粉煤灰掺量。

未掺膨胀剂、粉煤灰掺量为 25% 时,水胶比对抗压强度的影响如图 2 所示。由图 2 可知,抗压强度随水胶比的增大而减小,龄期较大时线性相关性较好,95% 保证率时 C40 混凝土的配制强度为 48.2MPa。28d 龄期混凝土选用低于 0.50 的水胶比即可满足强度要求。因此,选用水胶比为 0.40、粉煤灰掺量为 25% 进行膨胀剂掺量、品种的优选试验。

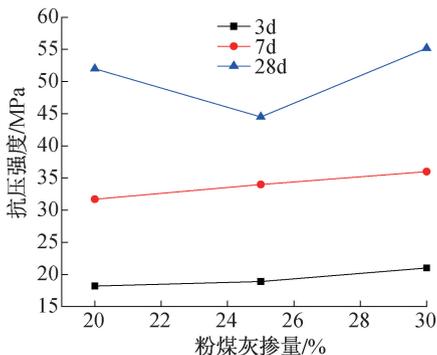


图1 粉煤灰掺量对抗压强度的影响

Fig. 1 Effect of fly ash content on compressive strength

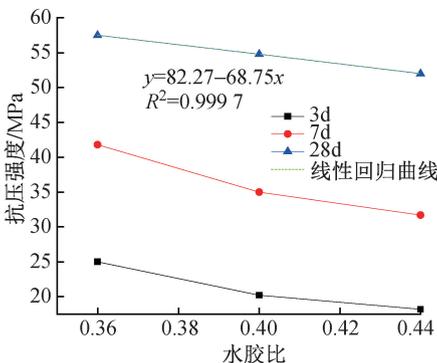


图2 水胶比对抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of water-binder ratio on compressive strength

### 2.3 膨胀剂对混凝土性能影响

水胶比为 0.40、粉煤灰掺量为 25%，膨胀剂掺量为 15、20、30 $\text{kg}/\text{m}^3$  时，对应的混凝土配合比为表 1 中的第 6~8 项配合比。膨胀剂类型为 UEA 型膨胀剂，UEA 膨胀剂的主要矿物组成是  $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ 、 $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{CaO}$  等<sup>[6]</sup>，硬化过程中，膨胀剂的主要矿物能形成钙矾石结晶体，与 C-S-H 凝胶交织成网络状，使水泥石体积膨胀，结构更致密<sup>[7]</sup>。

膨胀剂掺量对抗压强度的影响如图 3 所示。由图 3 可知，3、7d 抗压强度随膨胀剂掺量的增加而增加，但增幅不大，膨胀剂掺量对混凝土 3、7、28d 抗压强度影响均不大；膨胀剂掺量为 15 $\text{kg}/\text{m}^3$  时，混凝土 28d 抗压强度最低。主要原因为：水化初期，膨胀剂与水泥水化产物形成钙矾石结晶体，填充在水泥石的毛细孔或气孔中，使混凝土内部有害孔隙减少，增加了混凝土的密实性，进而提高了强度，随着时间的延长，混凝土内部孔结构进一步优化，强度提高，继续增加膨胀剂掺量，混凝土内部孔发生破坏，强度降低<sup>[8]</sup>。

膨胀剂掺量对限制膨胀率的影响如图 4 所示。由图 4 可知，限制膨胀率随膨胀剂掺量的增加而增

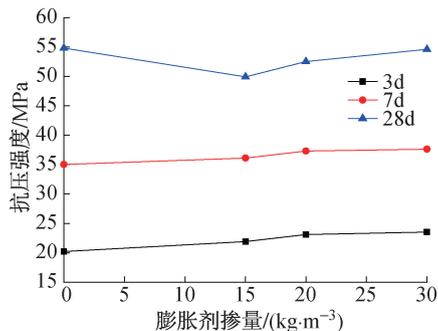


图3 膨胀剂掺量对抗压强度的影响

Fig. 3 Effect of expansive agent dosage on compressive strength

加，膨胀剂掺量达到 22 $\text{kg}/\text{m}^3$  时，限制膨胀率达到正值，即不收缩。掺量大于 22 $\text{kg}/\text{m}^3$  时，限制膨胀率增加速率较大，建议膨胀剂用量为 30 $\text{kg}/\text{m}^3$  左右，在使用过程中膨胀剂掺量不应过量太多，否则后期持续膨胀量过大，可能存在异常膨胀。

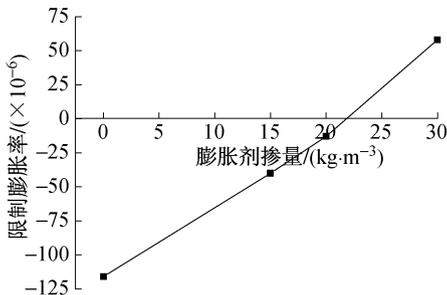


图4 膨胀剂掺量与限制膨胀率的关系

Fig. 4 The relationship between expansive agent dosage and the limited expansion rate

### 2.4 掺膨胀剂时水胶比和粉煤灰掺量的优选

为了考察掺膨胀剂后，混凝土的最佳水胶比和粉煤灰掺量的变化情况，固定膨胀剂掺量为 20 $\text{kg}/\text{m}^3$ ，对应的混凝土配合比为表 1 中的第 7、9~12 个配合比。

粉煤灰掺量对膨胀混凝土抗压强度的影响如图 5 所示。由图 5 可知，3、7、28d 抗压强度随粉煤灰掺量的增加先增加后下降，掺量为 25% 时，抗压强度均达到最高值。掺量为 25% 以上时，3、7、28d 抗压强度均下降，28d 抗压强度降低幅度较大，考虑到成本，选用 25% 的粉煤灰掺量。

粉煤灰掺量为 25%，水胶比变化对应的配合比为表 1 中的 7、9~10 号配合比，水胶比对膨胀混凝土抗压强度的影响如图 6 所示。95% 保证率时 C40 混凝土的配制强度为 48.2MPa。由图 6 可知，28d 龄期的膨胀混凝土选用低于 0.42 的水胶比才可满足强度要求，比素混凝土的计算水胶比 0.50 低不

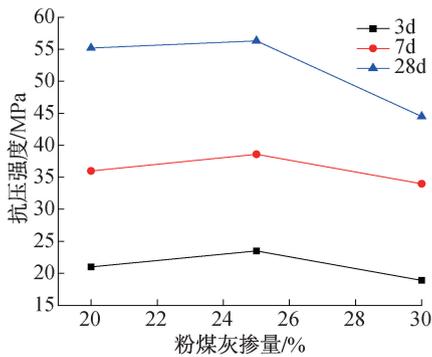


图5 粉煤灰掺量对膨胀混凝土抗压强度的影响

Fig. 5 Effect of fly ash content on compressive strength of expansive concrete

少。综合考虑混凝土抗压强度与水胶比关系优选试验结果和掺膨胀剂对混凝土强度的影响,选用水胶比为0.40较合适。

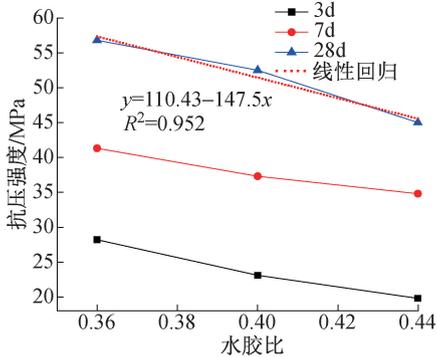


图6 水胶比对膨胀混凝土抗压强度的影响

Fig. 6 Effect of water-binder ratio on compressive strength of expansive concrete

## 2.5 微膨胀自密实混凝土性能试验

根据试验结果分析,确定的最优水胶比0.40,粉煤灰掺量25%,膨胀剂用量 $30\text{kg}/\text{m}^3$ ,微膨胀自密实混凝土配合比为( $\text{kg}/\text{m}^3$ ):水:水泥:粉煤灰:膨胀剂:砂:石子:减水剂:引气剂=210:371:124:30:810:690:9.98:0.24,拌合物工作性能和力学性能试验结果如表3,4所示。由表3可知,微膨胀自密实混凝土具有自流平特性,能实现锚具槽内锚索密集、充填间隙小的工况。由表4可知,微膨胀自密实混凝土能承受一定拉力,具有延展性,可满足预应力混凝土衬砌的设计要求。微膨胀自密实混凝土的抗渗试验按逐级加压法进行,最大水压力为1.1MPa时未透水,平均渗透高度1.9cm,所以混凝土的抗渗等级应大于W11。

混凝土试件底面直径为200mm、高为550mm,试件在密封桶成型后,在 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 的恒温绝湿环境

表3 拌合物工作性能试验结果

Table 3 Test results of working performance of mixture

T500 时间/s	坍落扩展度/mm	V漏斗通过时间/s	含气量/%	容重/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	初凝时间/h	终凝时间/h
8	660	36	3.2	2 270	9.67	14.5

表4 力学性能试验结果

Table 4 Test results of mechanical properties

龄期/d	抗压强度/MPa	劈裂抗拉强度/MPa	抗弯强度/MPa	轴压弹性模量/GPa
3	21.6	1.54	3.25	14.1
7	39.6	2.25	4.49	18.2
28	53.6	3.42	4.77	20.5
90	58.1	3.70	4.92	21.8

中和无外界荷载下养护,以成型后24h时应变计的测值作为基准值,开始测定混凝土自身体积变形。微膨胀自密实混凝土体积变形曲线如图7所示。在绝湿条件下,混凝土自身体积随龄期的增加先增大后减小,3d时达到最大值,超过3d自身体积开始降低,到60d测长龄期时,混凝土的自身体积变形已趋于稳定,最终自变值为 $20\times 10^{-6}$ 左右,说明绝湿条件下混凝土为膨胀型。

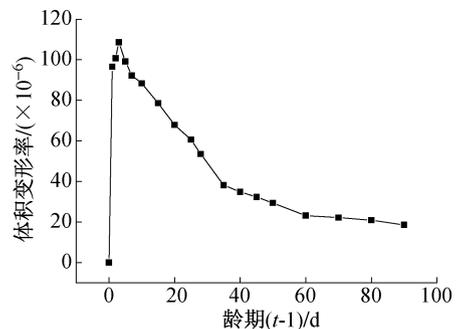


图7 自身体积变形曲线

Fig. 7 Volume deformation curve of itself

混凝土试件尺寸为 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 550\text{mm}$ ,两端埋设金属测头,试件成型后,在养护室中养护,48h后拆模,拆模后测其长度作为基准长度,试件置于不吸收硬质垫板上,在温度为 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 和湿度为 $(60\pm 5)\%$ 的恒温恒湿干缩室中养护,测定不同龄期的干缩率。干缩变形曲线如图8所示,由图8可知,微膨胀自密实混凝土干燥收缩随混凝土龄期的增加而增大,90d干缩约为 $460\times 10^{-6}$ 左右,比普通混凝土收缩大,由此可见,在收缩养护室中进行标准养护时,微膨胀自密实混凝土就会发生干燥收缩,在现场施工现场中对掺膨胀剂混凝土一定要注意加强保湿养护,否则易导致收缩,甚至开裂,造成锚具槽密封性失效。

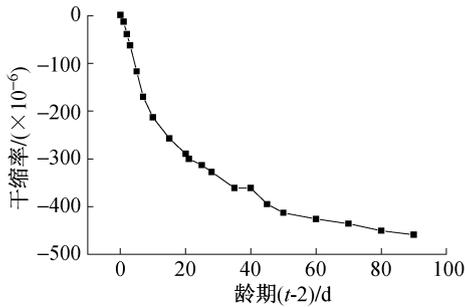


图8 干缩变形曲线

Fig. 8 Shrinkage deformation curve

### 3 结语

1) 锚具槽微膨胀施工配合比设计为:最优水胶比为 0.40、粉煤灰最大掺量为 25%、膨胀剂用量为  $30\text{kg}/\text{m}^3$ ,拌合物性能应控制 T500 时间 8~10s,坍落扩展度 550~700mm,含气量 2.5%~3.5%,减水剂和引气剂掺量应根据现场试拌情况进行调整,保障混凝土拌合物性能满足以上要求。

2) 微膨胀自密实混凝土应加强保湿养护,并尽可能延长保湿养护的时间,以利于膨胀剂性能的发挥,提高填充的可靠度。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 皮进,王玉杰,齐文彪,等. 无黏结环锚预应力混凝土衬砌张拉工艺研究[J]. 水利水电技术,2018,49(7):81-87.  
PI J, WANG Y J, QI W B, et al. Tensioning technology of prestressed concrete lining with unbonded circular anchor[J]. Water resources and hydropower engineering, 2018, 49(7): 81-87.
- [ 2 ] 亢景付,沈兆伟,荆锐,等. 环锚预应力混凝土衬砌锚具槽区域应力状态分析[J]. 水电能源科学,2016,34(7):108-111.  
KANG J F, SHEN Z W, JING R, et al. Analysis of stress state

in anchorage groove area of ring anchor prestressed concrete lining [J]. Water resources and power, 2016, 34(7): 108-111.

- [ 3 ] 李鹏,苗苗,马晓杰. 膨胀剂对补偿收缩混凝土性能影响的研究进展[J]. 硅酸盐通报,2016,35(1):167-173.  
LI P, MIAO M, MA X J. Effect of expansive agent on the performance of shrinkage-compensated concrete [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2016, 35(1):167-173.
- [ 4 ] 高曙光,王少江,李秀琳. 锚具槽填充用微膨胀自密实混凝土试验研究[J]. 水利科技与经济,2021,27(12):91-95.  
GAO S G, WANG S J, LI X L. Experimental study on micro-expansive self-compacting concrete for anchor slot filling [J]. Water conservancy science and technology and economy, 2021, 27(12): 91-95.
- [ 5 ] 刘伟宝,陆采荣,王珩,等. 回填微膨胀自密实混凝土配制及单轴膨胀试验[J]. 水利水运工程学报,2014(6):16-21.  
LIU W B, LU C R, WANG H, et al. Preparation and uniaxial expansion test of backfilling micro-expansive self-compacting concrete [J]. Hydro-science and engineering, 2014(6): 16-21.
- [ 6 ] 宋超,马淑琴,师华. UEA 膨胀剂替代早强剂配制低温超早强混凝土[J]. 新型建筑材料,2015,42(6):12-14.  
SONG C, MA S Q, SHI H. The low temperature super early high strength concrete prepared by UEA expensive agent instead of early strength agent [J]. New building materials, 2015, 42(6): 12-14.
- [ 7 ] 叶显,吴文选,侯维红,等. 膨胀剂对高强灌浆料体积稳定性的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(6):950-955.  
YE X, WU W X, HOU W H, et al. Influence of expansive agent on the volume stability of high-strength grouting materials [J]. Journal of building materials, 2018, 21(6):950-955.
- [ 8 ] JIANG Z W, H B, ZHU X P, et al. State-of-the-art review on properties evolution and deterioration mechanism of concrete at cryogenic temperature [J]. Construction and building materials, 2020, 257:119-131.

(上接第 18 页)

- [ 4 ] 刘腾,潘虹,罗滔,等. 再生粗骨料混凝土改性增强技术试验研究[J]. 水利水电快报,2023,44(10):82-87.  
LIU T, PAN H, LUO T, et al. Experimental study on the modification and reinforcement technology of recycled coarse aggregate concrete [J]. Express water resources & hydropower information, 2023, 44(10): 82-87.
- [ 5 ] 范玉辉,王宁. MMA 强化再生粗骨料混凝土力学性能试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2024, 43(1): 189-195.  
FAN Y H, WANG N. Experimental study on mechanical properties of MMA reinforced recycled coarse aggregate concrete [J]. Journal of Henan Polytechnic University (natural science), 2024, 43(1): 189-195.
- [ 6 ] 赵宝军,吴琛,尹正,等. 膨润土对超高性能混凝土性能影响研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2023, 47

(4): 727-731.

- ZHAO B J, WU C, YIN Z, et al. Research on the influence of bentonite on the performance of ultra-high performance concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology (transportation science & engineering), 2023, 47(4): 727-731.
- [ 7 ] 徐海峰. 天然及高温活化膨润土对混凝土力学性能的影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2022.  
XU H F. Research on the influence of natural and high-temperature activated bentonite on the mechanical properties of concrete [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.
- [ 8 ] 刘睿,陈志宽,叶晖,等. 外掺膨润土对混凝土抗压强度的影响[J]. 绿色科技,2023,25(2):263-267, 275.  
LIU R, CHEN Z K, YE H, et al. The effect of adding bentonite on the compressive strength of concrete [J]. Journal of green science and technology, 2023, 25(2): 263-267, 275.