

# 超吸水聚合物对混凝土渗透性及耐久性的影响

王 伟,王中华,罗云龙,刘天赐,唐伟剑

(江南大学 环境与土木工程学院,江苏 无锡 214122)

**[摘 要]** **【目的】**探讨超吸水聚合物(SAP)对混凝土坍落度、抗压强度、抗渗性、抗冻融性及耐久性的影响。**【方法】**采用坍落度试验、抗压强度试验及渗透试验,在混凝土中分别掺入相对水泥含量 0.4%,0.3%,0.2%,0.1%,0% SAP,测定混凝土的坍落度,养护 7 和 28 d 抗压强度、抗冻融性以及养护 28 d 抗渗性。**【结果】**随着 SAP 含量的增大,混凝土的坍落度减小;当 SAP 含量为 0.2%时,养护 7 d 混凝土的抗压强度最高,养护 28 d 混凝土抗渗性和抗冻融性均最强;当 SAP 含量高于 0.2%时,随着 SAP 含量的继续增加,混凝土抗压强度、抗渗性和抗冻融性均减小。**【结论】**掺入 SAP 可以使混凝土的早期开裂及收缩减小,当其含量达 0.2%时,混凝土的抗渗透性尤其是冻融状态下的抗渗透性能够得到明显改善和提高,同时在一定程度上增强了混凝土的耐久性。

**[关键词]** 超吸水聚合物;混凝土;抗渗性;抗冻融性;耐久性

**[中图分类号]** TU411

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2010)10-0229-06

## Effect of super absorbent polymers on concrete in the respects of permeability and durability

WANG Wei, WANG Zhong-hua, LUO Yun-long, LIU Tian-ci, TANG Wei-jian

(Department of Environment and Civil Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** **【Objective】**The influence of super absorbent polymers on slump, compressive strength, anti-water-seeping, anti-freeze-thaw and durability of the concrete were studied. **【Method】**Through mechanical tests the following studies were performed; the respects of Slump, compressive strength, anti-water-seeping and anti-freeze-thaw indexes were determined for characteristics of Slump, compressive strength for 7 and 28 days, anti-water-seeping and anti-freeze-thaw for 28 days of the concrete. In the cement content the percentage of addition of SAP was up to 0.4%, 0.3%, 0.2%, 0.1%, 0%. **【Result】**Slump of the concrete decreased with the increase of super absorbent polymers content. The compressive strength of concrete for 7 days, anti-water-seeping and anti-freeze-thaw for 28 days of the concrete were the highest with the SAP concentration at 0.2%. Anti-water-seeping and anti-freeze-thaw of concrete increased with the increase super absorbent polymers content after coming to 0.2%, and then it decreased rapidly with the increase of super absorbent polymers content. **【Conclusion】**Super absorbent polymers can effectively decrease the early-age cracking and shrinkage of concrete, mass percentages of super absorbent polymers content was 0.2% for the incorporation of the best. Anti-water-seeping, especially anti-water-seeping of concrete can be improved and increased under freeze-thaw, at the same time durability of the concrete was strengthened to a certain extent.

**Key words:** super absorbent polymer; concrete; anti-water-seeping; anti-freeze-thaw; durability

\* [收稿日期] 2010-02-28

[基金项目] 江苏无锡建设局科研项目

[作者简介] 王 伟(1952—),女,新疆乌鲁木齐人,教授,硕士,主要从事土力学地基基础、软土加固处理及抗震研究。

用混凝土建造的河、湖堤坝护岸工程、水工工程、地下工程都是永久性工程,但由于河、湖堤坝护岸的侧渗及河水、被污染的湖水日益加剧而侵蚀护岸混凝土材料,导致护岸侧渗加剧,腐蚀而裂缝、强度降低,造成混凝土的耐久性下降<sup>[1]</sup>。由于河、湖的侧渗而引发护岸周边地面发生沉降变形,使建筑物和道路受到影响而被破坏,或使坡岸失稳、水土流失,造成越来越大的经济损失,现在每年用于建筑维修的费用甚至超过了新建工程的费用。

目前,许多研究表明,在混凝土中掺入不同的物质,可有效控制和减少混凝土由于早期自收缩引发的裂缝,从而提高混凝土的抗渗性、抗冻融性及耐久性。Wei 等<sup>[2]</sup>研究了混杂纤维和膨胀剂对高性能混凝土收缩和渗透性的影响;Daniel 等<sup>[3]</sup>采用预浸细骨料对高性能混凝土进行养护,以防止混凝土自收缩引发的裂缝;Burcu 等<sup>[4]</sup>利用最优化轻骨料以调节混凝土的变形。

超吸水聚合物(SAP)是一种有特殊功能的高分子材料,吸水量为其自身质量的几百倍乃至几千倍,已广泛应用于工业、医药、个人卫生、农业等诸多领域。目前,美国、日本、西欧各国已用 SAP 制成了建筑光纤、电缆、防渗漏剂等,应用于各个领域<sup>[5-11]</sup>。在我国,有关混凝土中掺入 SAP 后对混凝土抗渗性、抗冻融性及耐久性影响的研究还较少。

针对由于混凝土的渗透性使其性能劣化而导致

抗渗性、抗冻融性及耐久性降低的问题,本研究在混凝土中掺入 SAP,采用坍落度试验、抗压强度试验、渗透试验研究 SAP 对混凝土的抗压强度、抗渗性、抗冻融性及耐久性的影响,以期延长拟建混凝土工程的使用寿命提供参考。

1 材料与方法

1.1 SAP 的基本特性

从微观结构看,SAP 具有低度直链、支链及交联共聚亲水性的三维空间网络结构,其离子特征及交联的微结构可以吸附及吸收成百上千倍水,这是由于水中高分子电解质离子电荷相斥作用引起的伸展作用,及由交联结构、氢键而引起的阻止扩张作用所产生的<sup>[12-15]</sup>。SAP 的种类很多,主要由天然淀粉、纤维素、石油化工类丙烯酸系列产品等合成,其中由天然淀粉和纤维素制备的 SAP 存在主要问题有:(1)吸水后凝胶强度低,长期保水性差;(2)使用中易受微生物分解而失去吸水保水能力,分子结构中存在多糖类单元,产品易腐败;而石油化工类丙烯酸系列产品合成树脂 SAP 克服了以上 2 种 SAP 的缺点,不仅吸水性、保水性强,而且能改善成膜状态时的结构强度,吸水后凝胶强度更高。所以本研究选择石油化工类丙烯酸系列产品合成树脂 SAP 进行试验,其基本物理特性指标如表 1 所示。

表 1 SAP 的基本物理特性指标

Table 1 Indexes for physical characteristics of SAP

| 含水量/%<br>Water content | 密度/(g·cm <sup>-3</sup> )<br>Density | 吸无离子水的量/(mL·g <sup>-1</sup> )<br>Absorbent un-ion water | 吸生理盐水的量/(mL·g <sup>-1</sup> )<br>Absorbent physiology salt water | 吸水速度/(mL·s <sup>-1</sup> )<br>Absorbent water speed |
|------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| <3                     | 0.9                                 | 400                                                     | 65                                                               | <80                                                 |

1.2 粗细骨料

1.2.1 砂 采用无锡地区的河砂,于 2007-03-05 在江苏无锡江南大学环境与土木工程学院土工实验室进行砂的筛分试验,绘制砂的粒径分布曲线及粒径累积级配曲线。

1.2.2 碎石 所用碎石的最大粒径 20 mm,表观密度为  $\rho_G = 2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,用水将碎石冲洗干净,进行砂的筛分试验,绘制碎石粒径分布曲线和粒径累积级配曲线。

1.3 SAP 混凝土配合比设计

本试验选用混凝土强度等级为 C25,水灰比为 0.45,通过多次反复地调配、拌和,分别掺加相对水泥含量 0.4%,0.3%,0.2%,0.1%,0% 的 SAP(以下简称 SAP 含量),不同含量 SAP 混凝土配合比

设计如表 2 所示。

表 2 不同含量 SAP 混凝土的配合比设计

Table 2 Mix proportion design of SAP concrete

| kg/m <sup>3</sup> |            |              |           |            |            |
|-------------------|------------|--------------|-----------|------------|------------|
| 编号<br>Number      | 水<br>Water | 水泥<br>Cement | 砂<br>Sand | 石子<br>Rock | SAP        |
| A1                | 195        | 433          | 511       | 1 265      | 0(0%)      |
| A2                | 195        | 431.1        | 511       | 1 265      | 1.95(0.1%) |
| A3                | 195        | 429.1        | 511       | 1 265      | 3.90(0.2%) |
| A4                | 195        | 427.2        | 511       | 1 265      | 5.85(0.3%) |
| A5                | 195        | 425.2        | 511       | 1 265      | 7.80(0.4%) |

1.4 混凝土坍落度试验

采用坍落度筒法,在试件中分别掺入相对水泥含量 0.4%,0.3%,0.2%,0.1%,0% 的 SAP(表 2)进行坍落度试验,研究不同含量 SAP 对混凝土坍落度的影响。

1.5 混凝土抗压强度试验

混凝土抗压强度试验的试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm,试件分别掺入相对水泥含量 0.4%,0.3%,0.2%,0.1%,0%的 SAP(表 2),每处理 6 试件,分别测定自然状态下养护 7,28 d 以及冻融状态下养护 28 d 时混凝土的抗压强度,研究在自然状态与冻融状态下,不同含量 SAP 对混凝土抗压强度的影响。

1.6 混凝土渗透试验

混凝土的渗透性是评价混凝土质量的重要指标,混凝土的渗透性与耐久性密切相关。渗透试验试件尺寸:顶面直径为 175 mm,底面直径为 185 mm,高度为 150 mm。分别在自然状态和冻融状态下,试件中分别掺加相对水泥含量 0.4%,0.3%,0.2%,0.1%,0%的 SAP(表 2),每处理 6 试件,分别测定自然状态以及冻融状态下养护 28 d 时混凝土的渗透高度,研究不同含量 SAP 对混凝土渗透性能的影响。本试验是在相同最大压力下完成的,渗透高度越大,混凝土的抗渗透性越低,所以试件的渗透高度可以间接地反映混凝土抗渗透性的高低。

2 结果与分析

2.1 混凝土粗细骨料级配的分析

根据砂的级配得出砂的细度模数为 2.77,表观

密度  $\rho_G=2.65\times10^3\text{ kg/m}^3$ ,属于中砂,在满足混凝土工作性要求的前提下,适当地控制、降低砂率,以防止混凝土抗裂性能的劣化,因此通过试验优化分析将砂率定为 36%。

(1)由图 1 可以看出,中砂的分布范围比较广,粒径为 0~1 mm 砂的含量较大,大约占砂总量的 30%;砂的粒径累积级配曲线连续分布,其中当砂的粒径为 0~1 mm 时,累积级配曲线坡度很陡;当砂的粒径大于 1 mm 时,不同粒径的砂分布较均匀,累积级配曲线趋于平缓。

(2)由图 2 可以看出,不同粒径碎石累积级配曲线基本呈现正态分布,累积级配曲线不仅分布广,而且连续,但基本缺失粒径 0~2 mm 碎石。而由图 1 可知,粒径为 0~2 mm 砂占砂总量的 70%,碎石间孔隙刚好可由小粒径的砂子来填充,可知粗细骨料搭配与组合合理,优化了级配,使粗细骨料级配良好,而良好的级配能使骨料的孔隙率和总表面积均较小,使水泥浆量较少,提高混凝土的密实度,使其具备良好的体积稳定性。本研究中,粗骨料碎石的粒径较小,水泥和骨料的过渡区周长和厚度都小,难以形成大的缺陷,有利于界面强度提高,碎石粒径越小,得到相同渗透系数所需混凝土的水胶比可以越大,有利于提高混凝土的抗渗性。

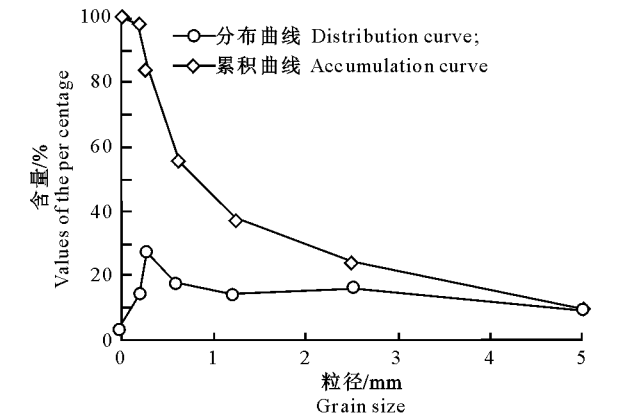


图 1 砂的粒径分布及粒径累积级配曲线  
Fig. 1 Grain-size distribution and accumulation curve of sand

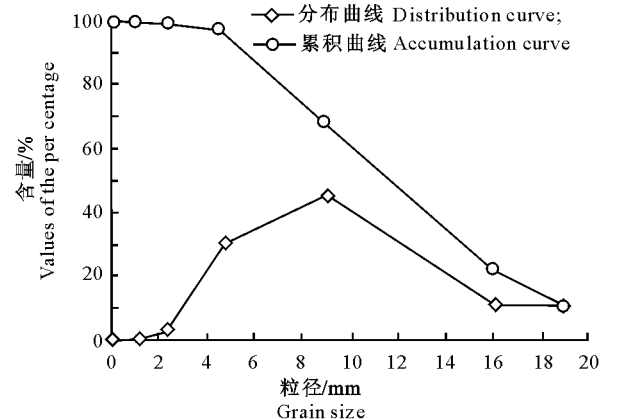


图 2 碎石粒径分布及粒径累积级配曲线  
Fig. 2 Grain-size distribution and accumulation curve of breakstone

2.2 SAP 对混凝土坍落度的影响

由图 3 可以看出,在满足施工要求条件下,宜采用较小的混凝土坍落度,以防止混凝土的离析和泌水而导致其表面产生裂缝。混凝土中掺入 SAP 后,混凝土的坍落度明显减小,且随着 SAP 含量的增大,坍落度逐渐减小。本研究发现,在拌和过程中,

当 SAP 含量为 0.2% 时,拌合物慢慢逐渐下沉,其保水性、和易性及粘聚性良好,没有泌水现象,结构状态好。良好的粗细骨料级配,不仅有利于提高混凝土的工作性能,而且也为了提高混凝土的密实性、抗渗性、耐久性、抗裂性提供了最基本的条件。分析其机理可知,SAP 在混凝土中起到减水剂、膨胀剂

等多重作用。

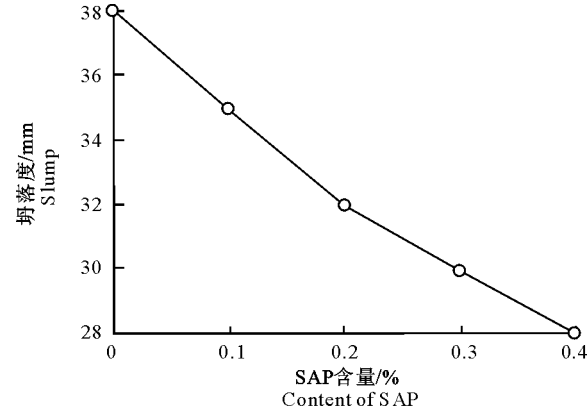


图 3 不同含量 SAP 对混凝土坍落度的影响  
Fig. 3 Effect of slump of concrete and different contents of SAP

(1)首先,SAP 吸取水泥颗粒表面及颗粒孔隙内部的部分水分并予以储存,在保证密实成型的前提下,使混凝土的水胶比降低,减小了孔隙率。水灰比直接影响混凝土的孔隙率及结构,水灰比的增大可使孔径增大,抗渗性、抗冻融及耐久性降低,还可降低混凝土表面的析水现象,而 SAP 可以有效阻止混凝土由于表面迅速失水造成较大体积收缩,避免混凝土表面出现裂缝,由此提高混凝土的抗裂性,从而降低硬化混凝土的渗透性,提高混凝土的抗冻融及耐久性。

(2)SAP 吸水膨胀后可形成大于自身体积上百倍或上千倍的凝胶体,这些凝胶体在拌合物中的硬化胶凝材料与骨料的界面上分布、搭接延伸,并有效地占据、堵塞混凝土中的孔隙和毛细通道,由此改变了孔结构,最终使混凝土结构更加致密,从而提高了混凝土的抗渗性及耐久性。

(3)在水泥硬化的初期,SAP 吸收的部分水是以氢键形式结合而被固定在高分子链上的,这部分水的蒸发所消耗的能量较大,SAP 吸水形成的凝胶表面成膜,减缓了由蒸发引起的水分损耗,也减缓了干燥速度;而同时储存的大量水分又可以被缓慢释放出来,由此可以有效阻止由于混凝土表面迅速失水造成较大体积的收缩,改善混凝土早期的塑性收缩、干燥收缩及温度收缩,从而避免混凝土表面出现裂缝。SAP 通过提供给混凝土硬化时所需要的水分以及其吸水膨胀形成的凝胶,可以有效抑制混凝土早期裂缝的生成和发展。

2.3 SAP 对混凝土抗压强度的影响

图 4 是养护期为 7 d 时混凝土抗压强度与不同

含量 SAP 的关系曲线。由图 4 可以看出,不加 SAP 的混凝土抗压强度是 20.73 MPa,随着 SAP 含量的逐渐增加,抗压强度迅速增加,当 SAP 含量增至 0.2%时,混凝土的早期抗压强度达到峰值;之后随着 SAP 含量的继续增大,抗压强度呈现快速降低的趋势。由此可见,0.2%为 SAP 最佳掺入量。塑性状态的混凝土强度极低,SAP 吸水膨胀形成凝胶,在混凝土中承担了部分由于逐渐干缩而产生的拉应力,可减少并阻止塑性状态下混凝土内部裂缝的产生和发展,即加入适量的 SAP 可使混凝土早期抗压强度得以提高。因 SAP 吸水膨胀补偿了混凝土的收缩变形,同时吸水膨胀形成的凝胶体可填充混凝土内部孔隙,从而提高了混凝土的密实度,其早期抗压强度随之提高,因此可以有效地抑制混凝土早期由于收缩而产生的微裂缝,起到了抗裂补强的作用。

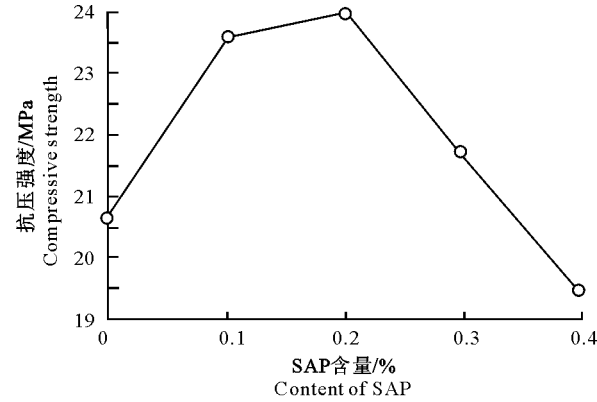


图 4 不同含量 SAP 对养护 7 d 混凝土抗压强度的影响  
Fig. 4 Curve between compressive strength of concrete at the age of 7 days and different contents of SAP

提高和改善混凝土早期性能,控制混凝土早期开裂极为重要。如果能有效地阻止混凝土早期裂缝的产生,即可减少混凝土结构中的约束应力和变形,减少环境因素对混凝土早期性能的影响,因为后期开裂是在荷载及外部环境侵蚀的作用下,在已有早期开裂或潜在开裂的基础上,混凝土的耐久性遭受破坏后发展、演变的。SAP 可使混凝土的早期抗压强度得到提高,在混凝土早期抗拉强度尚未形成之前,由于温度下降、干燥等原因产生收缩,受约束的硬化混凝土会产生裂缝,但掺入的 SAP 吸水膨胀后,相当于在混凝土内部提供了一定的抗拉强度,可有效阻止混凝土潜在的早期裂缝的形成。从某种意义上而言,抗渗的前提是抗裂,不裂则不渗。要提高混凝土的抗渗性,除混凝土本身具有极低的渗透性以外,避免混凝土结构出现裂纹和裂缝更为重要,这也从本质上增强了混凝土的耐久性。

在自然状态与冻融条件下,不同含量 SAP 对养护 28 d 混凝土抗压强度的影响见图 5。由图 5 可以看出:(1)加入 SAP 含量为 0.1%时,混凝土抗压强度有所减小,但当 SAP 含量增加到 0.2%时,抗压强度又有所提高,之后随着 SAP 含量继续增大,抗压强度持续降低,即 0.2%为 SAP 最佳掺入量。(2)在冻融条件下,SAP 含量为 0.1%时,混凝土强度有所降低,当 SAP 含量增至 0.2%时,混凝土的抗压强度增大,此时混凝土抗压强度提高幅度比未冻融条件下明显,之后随着 SAP 含量继续增大,混凝土的抗压强度降低。(3)混凝土养护期为 28 d 时,在自然和冻融状态下 SAP 含量为 0.2%时,两条曲线都达到峰值,两条曲线的差值最小,且冻融条件下的抗压强度明显比未冻融时增幅大,表明掺入 SAP 使混凝土的抗冻融能力增强。

2.4 SAP 对混凝土抗渗性、抗冻融性及耐久性的影响

由图 6 可以看出:(1)自然状态下不加 SAP 时,混凝土渗透高度最大,即抗渗性最差。随着 SAP 含量的增加,曲线陡直下降,混凝土的渗透高

度迅速减小,即混凝土抗渗性快速增强,当 SAP 含量为 0.2%时,渗透高度达到最小,即混凝土抗渗性最强;此后随着 SAP 含量的继续增大,混凝土的渗透性反而增大,即混凝土的抗渗性降低。(2)冻融状态下未加 SAP 时,混凝土的渗透性大于自然状态,这是因为冻胀后的混凝土,由于冻胀力将混凝土内部拉裂成网状的裂隙体,结构密实性降低,孔隙率增大,强度降低,使混凝土冻融后渗透高度加大,抗渗性降低。(3)在冻融状态下,随着 SAP 含量的逐渐增大,曲线陡直下降,混凝土的渗透性迅速减小;当 SAP 含量为 0.2%时,渗透高度降低到最小,因此 0.2%为 SAP 最佳掺入量;之后随着 SAP 含量继续增大,渗透高度也逐渐增大,混凝土的抗渗性快速下降。分析其原因是:①在冻融状态下,SAP 吸水膨胀后形成凝胶,成为冰、水迁移的极佳“蓄水池”,可有效缓冲冻融引起的静水压和渗透压;②冻胀力使混凝土内部被拉裂成网状的裂隙体,而 SAP 吸附大量的融化水后形成凝胶,占据并堵塞这些网状的裂隙,从而使冻融条件下混凝土的抗渗性有所提高。

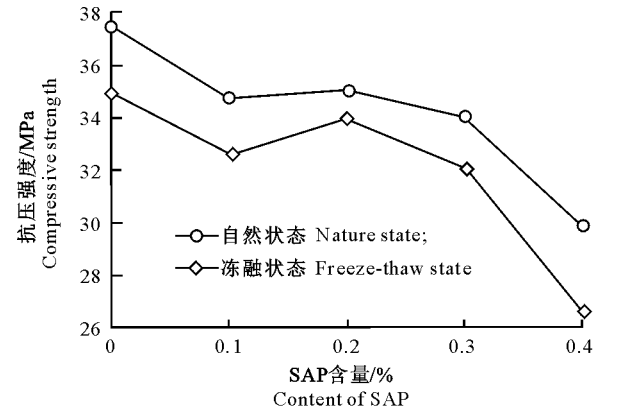


图 5 不同含量 SAP 对养护 28 d 混凝土抗压强度的影响  
Fig. 5 Curve between compressive strength of concrete at the age of 28 days and different contents of SAP

混凝土是一个多孔系统,其渗透性与空隙率有一定的关系,但最重要的是孔结构,其中连通性孔的孔隙率低而渗透性高,而封闭性孔的孔隙率高而渗透性低。外部环境中液体、气体或离子等有害介质能够进入混凝土体内,这些侵蚀性介质进入混凝土体内的难易程度,主要取决于混凝土自身的渗透特性,这与混凝土材料或结构性能的退化或劣化密不可分,也是其耐久性下降的症结所在。混凝土的毛细孔越大,渗透性也越大,其强度越低。混凝土中掺入 SAP 后,犹如加入了高性能的膨胀剂,其吸水膨

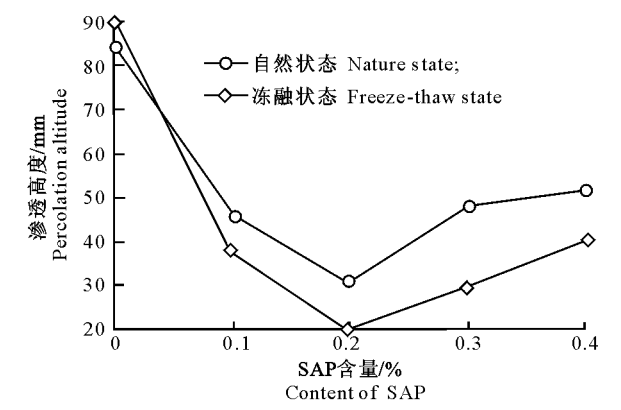


图 6 混凝土不同含量 SAP 与渗透高度的关系曲线  
Fig. 6 Curve between seepage altitude of concrete and different contents of SAP

胀形成凝胶体,不仅能有效地堵塞、切断毛细孔渗水通路,改变孔结构,使孔结构网络的连通性变差,提高混凝土的密实度,使混凝土的微观结构得以改善,而且能有效阻隔外部环境中液体、气体或离子等有害介质进入混凝土体内,从而极大地提高了混凝土的抗渗性能和耐久性。

虽然 SAP 可使混凝土的抗压强度有所降低,但 SAP 失水干燥后,即可变成强度极高的固体,同时混凝土在长期工作环境下,只要遇水后,SAP 吸水膨胀又生成凝胶体占据混凝土的孔隙,所以在混凝

土长期运行过程中,SAP 可以使其抗渗性及抗冻融性得到保证和提高,其抗压强度也可以得到保证。

### 3 结 论

(1)SAP 在混凝土中起到减水剂作用,吸水并储存水,同时吸水形成凝胶体,在保证密实成型的前提下,使混凝土的水胶比降低,减少混凝土表面的析水现象,从而降低硬化混凝土的渗透性。

(2)SAP 在混凝土中起到膨胀剂作用,吸水膨胀形成大于自身体积上百倍或上千倍的凝胶,这些凝胶在硬化胶凝材料与骨料的界面上分布、搭接延伸,并有效占据、堵塞混凝土中的孔隙、毛细通道,从而可以有效地改变混凝土内部的孔结构特征,最终使混凝土结构更加致密,微观结构从本质上得以改善,从而提高了混凝土的抗渗性及耐久性。

(3)在水泥硬化的初期,SAP 将已储存的大量水分又缓慢释放出来,提供混凝土硬化时所需要的水分,有效阻止由于混凝土表面迅速失水造成较大体积收缩,改善混凝土的早期塑性收缩、干燥收缩及温度收缩,从而避免混凝土表面出现裂缝,可以有效地抑制混凝土早期裂缝的生成和发展。

(4)SAP 吸水膨胀,相当于在混凝土内部提供了一定的抗拉强度,使混凝土硬化早期产生膨胀,对混凝土收缩予以补偿,可有效阻止混凝土在早期由于收缩而产生的微裂缝,SAP 在混凝土中起到抗裂补强的作用,可使混凝土在早期 7 d 的抗压强度得到提高,但混凝土 28 d 的抗压强度有所降低。

(5)SAP 的最佳掺入量为 0.2%,此时混凝土抗渗性、抗冻融性最好。

(6)冻融状态下,掺加 SAP 混凝土的渗透性都小于自然状态。在冻融状态下 SAP 吸水膨胀形成凝胶,成为冰、水迁移的极佳“蓄水池”,可缓冲冻融引起的静水压和渗透压;同时先冻后融,由于冻胀力将混凝土内部拉裂成网状的裂隙体,而 SAP 吸附大量的融化水后形成凝胶占据并堵塞这些网状的裂隙,从而使混凝土在冻融状态下的抗渗性得到提高。

### [参考文献]

- [1] Jin K K,Chil S L. Moisture diffusion of concrete considering self-desiccation at early ages [J]. Cement and Concrete Research,1999,29:1921-1927.
- [2] Wei S,Hui S,Chen X L,et al. The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete [J]. Cement and Concrete Research,2001,31:595-601.

- [3] Daniel C,Ted H. Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking [J]. Cement and Concrete Research,2008,38:757-765.
- [4] Burcu A,Mehmet A T. Optimization of using lightweight aggregates in mitigating autogenous deformation of concret [J]. Construction and Building Materials,2009,23:353-363.
- [5] Kim Y J,Yoon K J,Ko S W. Preparation and properties of alginate super absorbent filament fibers crosslinked with glutaraldehyde [J]. Journal of Applied Polymer Science,2000,78:1797-1804.
- [6] 乌 兰. 高吸水性树脂的性能及应用 [J]. 山东化工,2005,36(6):11-14.  
Wu L. Properties and application of superabsorbent polymers [J]. Shandong Chemical Industry,2005,36(6):11-14. (in Chinese)
- [7] 刘爱红,姜发堂,张声华. 超强吸水剂的制备及其性能研究进展 [J]. 胶体与聚合物,2004,22(2):31-33.  
Liu A H,Jiang F T,Zhang S H. Advance of studies on the preparation of super absorbent polymers and its properties [J]. Chinese Journal of Colloid & Polymer,2004,22(2):31-33. (in Chinese)
- [8] Xu K,Zhang W D,Yue Y M,et al. Swelling behaviors of a three-component copolymer (starch graft sodium acrylate and 2-acrylamido-2-methyl-propanosulfonic acid) synthesized by microwave polymerization [J]. Journal of Applied Polymer Science,2005,98:1050-1054.
- [9] Fowler D W. Polymers in concrete: a vision for the 21st century [J]. Cement and Concrete Composites,1999,21(2):449-452.
- [10] Kohno K,Okamoto T,Isikawa Y,et al. Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete [J]. Cement and Concrete Research,1999,29:611-614.
- [11] Bentur A,Igarashi S,Kovler K. Prevention of autogenous shrinkage in high strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates [J]. Cement and Concrete Research,2001,31:1587-1591.
- [12] Zhuo R X,Li W. Preparation and characterization of macroporous poly(N-isopropylacrylamide) hydrogels for the controlled release of proteins [J]. Polymer Science:Part A,Polymer Chem,2003,41:152-159.
- [13] Hansen L M,Smith D J,Reneker D H,et al. Water absorption and mechanical properties of electrospun structured hydrogels [J]. Journal of Applied Polymer Science,2005,95:427-434.
- [14] Zhang J T,Huang S W,Cheng S X,et al. Preparation and properties of poly(N-isopropylacrylamide)/poly(N-isopropylacrylamide) interpenetrating polymer networks for drug delivery [J]. Polymer Science:Part A,Polymer Chem,2004,42:1249-1254.
- [15] Raju M P,Raju K M. Design and synthesis of super-absorbent polymers [J]. Journal of Applied Polymer Science,2001,80:2635-2639.