

[摘 要] 在混凝土拌合物中加入聚丙烯纤维,对遭受海水干-湿循环的混凝土表面,提高其抗损坏的能力是可能的。本文介绍了国外在这方面的研究成果,希望在我国南方沿海地区的混凝土工程中能有所借鉴或参考。

[关键词] 聚丙烯纤维 干-湿循环 化学反应 海水侵蚀

聚丙烯纤维增强混凝土的性能与应用

河北大地土木工程有限公司 许贤敏

河北省国防工业建筑工程公司 王晓硕

前言

当混凝土浸泡在海水中时,表面就会慢慢地生成一层水镁石(氢氧化镁),上面再覆一层较厚的霰石(碳酸钙),其中有方解石的痕迹,这是由于混凝土在水泥中的水化组份与骨料中的 Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} 和 Mg^{2+} 之间的化学反应,溶解在海水中的缘故。在这种化学反应期间,在混凝土表面产生了水泥素浆空隙的逐渐损坏。混凝土表面性质的这种变化与所用水泥的种类无关。这种变化造成了混凝土表面的软化,电阻率暂时提高,和可渗性暂时降低。

国外的科学界把浸在海海水中的水泥素浆的化学分解,说成是逐渐进入硬化混凝土内部的“三区”化学反应。第一区是钙离子和氢氧离子析出到混凝土表面形成霰石。在有二氧化碳存在时,霰石就转化为碳酸氢盐。由于镁离子的侵蚀,在第二区形成了水镁石。硫酸盐和氯离子继续向混凝土内部迁移,就在第三区形成了硫代铝酸盐水化物和氯代铝酸盐水化物。

混凝土面层的性能对钢筋混凝土结构和素混凝土组份的耐久性都是十分重要的。面

层保护混凝土块体不受机械和化学的影响。迄今为止对于永远浸泡在海水中的混凝土已经考虑得很多了。然而混凝土结构的平面,例如桥面板、人行道面等受到海水干-湿暴露时是最容易损坏的。海水侵蚀的破坏作用是很明显的,因为这种侵蚀既有化学性的,也有物理性的。由于干-湿循环以及风、温度和太阳辐射引起的膨胀和收缩是物理的损坏过程。

在阿拉伯湾的沿岸地区,上述的混凝土损坏现象在海岸建设的混凝土结构中是随处可见的,因为那里的地面和气候条件极其恶劣。海岸的地面是内陆的盐碱滩,是由进入沉积物的地下水连续蒸发和补充造成的。其含盐量很高,含有多种可溶性盐,例如霰石、石膏、硬石膏和岩盐。地下水位在地面以下不足一米深。气候条件是特别热,而且湿度相当高。在夏季的月份里,气温往往高达 50°C ,大气的湿度也高达 100%。该地区经常刮强劲的有时是持久的干热风,平均年降雨量少于 50mm。

本文介绍了聚丙烯纤维增强混凝土经充分的养护后,对遭受海水干-湿循环混凝土

表 1 聚丙烯纤维的某些性能

熔点	160-170℃
燃点	590℃
抗拉强度	550-760MPa
杨氏弹性模量	3500MPa
导热率	较低
导电率	较低
对酸和盐的耐蚀性	较高

表 2 硅酸盐水泥的成份

成份	重量%	成份	重量%
石灰 (CaO)	60-66	三氧化硫 (SO ₃)	1-3
硅石 (SiO ₂)	19-25	硅酸三钙 (C ₃ S)	50
矾土 (Al ₂ O ₃)	3-8	硅酸二钙 (C ₂ S)	24
铁 (Fe ₂ O ₃)	1-5	铝酸三钙 (C ₃ A)	11
镁土 (MgO)	0-5	铝铁酸四钙 (C ₄ AF)	8

表 3 粗骨料的化学分析

化学成份	重量%	化学成份	重量%
二氧化硅 (SiO ₂)	4.29	氧化钠 (Na ₂ O)	0.031
三氧化铝 (Al ₂ O ₃)	0.23	氧化钾 (K ₂ O)	0.087
氧化铁 (Fe ₂ O ₃)	0.23	二氧化钛 (TiO ₂)	0.1
氧化镁 (MgO)	0.99	烧失量	41.2
氧化钙 (CaO)	52.50	合计	99.2

表 4 细骨料的化学分析

化学成份	重量%	化学成份	重量%
二氧化硅 (SiO ₂)	82.20	氧化钠 (Na ₂ O)	0.96
三氧化铝 (Al ₂ O ₃)	3.78	氧化钾 (K ₂ O)	1.05
氧化铁 (Fe ₂ O ₃)	0.79	二氧化钛 (TiO ₂)	0.29
氧化镁 (MgO)	0.81	烧失量	2.77
氧化钙 (CaO)	3.72	合计	96.37

表面损坏的影响。

试验程序

材料

在试验中使用的聚丙烯纤维是市场上可以买到的,制成 20mm 长的纤维束。这些纤维在拌合时就分散成一股一股的,均匀地分布在混凝土拌合物里。聚丙烯纤维的某些性能列在表 1 中。试验中所用的其他材料有硅盐水泥、级配的石灰石骨料、山丘砂、饮用水和海水。水泥、粗骨料、砂子和海水的化学分析列在表 2- 表 5。

试件的制备与试验

总共制备了三种拌合物,其水灰比 (w/c) 分别为 0.45, 0.55 和 0.65。全部拌合物中的水泥用量均为 400kg/m³,粗骨料与总骨料之比率为 0.60。从各种水灰比的拌合物中,均制备了有和没有聚丙烯纤维的试件。聚丙烯纤维的用量为混凝土拌合物体积的 0.2%。试验中所用的试件种类、养护条件和各种试验,在以下各节中说明。

海水的干-湿循环

制备了 30 块混凝土试板,其尺寸为 75×375×750mm,用于海水的干-湿循环试验。试件有两种养护条件:有控制的实验室条件和现场条件。12 块试板在有控制的实验室条件下养护,浇筑后 24 小时脱模,然后在饮用水中浸泡 60 天。18 块试板浇筑后立即放在阿拉伯湾炎热的自然条件下进行现场养护。浇筑后 24 小时脱模,每天用饮用水喷洒,共喷洒了 7 天。在受到海水的干-湿循环之前,先把 18 块试板放在架子上平放 14 天。沿着每块板的周边做砂浆围堤,以便蓄住海水。在这些试板上每天浇 2 次海水。

X-射线衍射 (XRD)

混凝土粉末试样通过 75mm 的筛子 (尽可能把砂子都筛掉),用 X 射线衍射技术进行分析。混凝土试样是从混凝土表面形成的结壳中,从混凝土块体与结壳层

表 5 阿拉拍湾的海水和地下水化学分析

离子名称	单位	海水	地下水
溶解固体总量	Mg/l	64771	7748
氯离子 (Cl ⁻)	Mg/l	31734	2402
硫酸盐离子 (SO ₄ ²⁻)	Mg/l	4000	2300
钠离子 (Na ⁺)	Mg/l	21111	1824
钾离子 (K ⁺)	Mg/l	1268	53
钙离子 (Ca ²⁺)	Mg/l	3400	940
镁离子 (Mg ²⁺)	Mg/l	559	170

表 6 受海水围池浸泡的板试件结壳状况的数据

水灰比	试件编号	发现结壳时的星期数			
		现场养护的板		实验室养护的板	
		纤维增强混凝土板	素混凝土板	纤维增强混凝土板	素混凝土板
0.45	1	26	13	80	79
	2	26	12	82	82
	3	24	12	-	-
0.55	1	36	8	79	79
	2	35	7	79	78
	3	31	8	-	-
0.65	1	41	4	77	76
	2	42	5	77	77
	3	40	4	-	-

之间的界面上,和深度为 5-10mm 的混凝土中取得的。然后把混凝土试样磨成粉末进行试验。因为从混凝土的块体和结壳层的界面上取得的试样是很小的,所以把它装在德拜-谢乐 (Debye-Scherrer) 照相机上,而试样的衍射花样就收集在胶卷上了。胶卷洗出后即可测定峰尖的角度了。

电子显微镜扫描 (SEM)

从每组抽取一个试样,用能量弥散 X 射线 (EDX) 显微分光计测定 Cl⁻, Mg²⁺ 和 SO₄²⁻ 的扩散情况,并对分析区拍几张照片。然而扫描式电子显微镜无助于把损坏的试样拍出高分辨率的照片 (例如水镁石和霰石相),因为这些相存在的数量极少。

结果与讨论

目测检查

肉眼可见混凝土板表面结壳的时间列在表 6 中。由表 6 可见在现场养护条件下,纤维增强混凝土 (FRC) 板试件同素混凝土 (PC) 板试件相比较,前者表面结壳的时间总是较晚的。水灰比为 0.45 的素混凝土板在海水围池浸泡后 12 星期就见到表面有结壳了,而相应的纤维增强混凝土板则要等 25 星期后才能见到结壳。在水灰比为 0.55 时,素混凝土板 8 星期后就开始损坏了,而纤维增强混凝土板则在 34 星期后才开始损坏。当水灰比为 0.65 时,素混凝土板和纤维增强混凝土板分别在 5 星期和 41 星期后开始结壳。

结壳使得砂浆表面分层剥落 (开始时好像是突然蹦出来的)。素混凝土板的表面很容易呈片状剥落。纤维增强混凝土板虽然表面的结壳也很清楚可见,但其表层并不完全分离。在实验室有控制的养护条件下,素混凝土板和纤维增强混凝土板开始结壳的时间几乎是一样的 (表 6)。然而甚至在海水中干-湿循环 85 星期后,这些板也未见严重的损坏。这些结果说明长期有控制的养护,使得聚丙烯纤维的作用大为逊色。

X 射线衍射分析

试件中各相存在的近似相对重量列在表 7 中。数字是在排除石英 (SiO₂) 后归一化了的。对损坏试件的 X 射线衍射分析表明,在现场养护板和实验室养护板中都有石膏和霰石的存在。板表面硬化砂浆的结壳和软化与这些化合物的形成有关。表 7 说明石膏 (Ca-

表 7 各相近似的相对重量百分率

化合物名称	有纤维的现场养护板 (%)	无纤维的现场养护板 (%)	实验室养护板 (%)	界面试样 (%)
方解石 (CaCO_3)	65.8	44.6	68.2	40-50
岩盐 (NaCl)	3.2	-	5.7	-
霰石 (CaCO_3)	5.7	9.8	3.4	5-10
水镁石 [$\text{Mg}(\text{OH})_2$]	-	-	-	40-50
石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	14.6	38.0	13.6	-
白云石 [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$]	10.7	7.6	7.6	-
羟钙石 [$\text{Ca}(\text{OH})_2$]	-	-	-	-

$\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 的近似相对重量在无纤维的现场养护板中是最高的, 这可看作是板的表面损坏程度的一个指标。现场养护板(无纤维的)中霰石(CaCO_3)的含量最高, 而实验室养护板中的含量则是最低的。因为实验室养护板中的胶结组份——CSH 凝胶和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 均较强。在用德拜-谢乐照相机从现场养护板的结壳层与板体的界面上拍摄的照片中, 发现有水镁石[$\text{Mg}(\text{OH})_2$]。在现场养护中未发现结壳组份 CSH 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 而在实验室养护板中则发现有极少数的羟钙石[$\text{Ca}(\text{OH})_2$]。

上述的 X 射线衍射分析证实了表 6 中关于板面损坏的结果。

结论

本文所介绍的国外研究结果表明, 加入聚丙烯纤维进行增强和充分的养护, 对于遭受海水侵蚀的混凝土表面的损坏都有着明显的影响。现场养护的纤维增强混凝土板表面结壳的开始时间为 26-40 星期, 而现场养护的素混凝土板则为 4-13 星期。根据 X 射线衍

射分析, 现场养护的纤维增强混凝土板中霰石(CaCO_3)的数量为 5.7%, 而在相应的素混凝土板则为 9.8%。

在实验室养护的纤维增强混凝土板和素混凝土板表面开始结壳的时间至少为 76 星期, 而且损坏的程度也没有相应的现场养护板那么严重。在实验室养护的情况下, 海水中的盐(例如氯化物、硫酸盐和镁)与水化的水泥组份的化学反应只限于混凝土的表面。鉴于在现场结构中用实验室有控制的养护条件是不现实的, 所以在混凝土中用聚丙烯纤维来延缓在海水侵蚀下混凝土表面的损坏, 特别是在炎热的环境中不失为一种补救措施。

聚丙烯纤维混凝土的应用实例

聚丙烯产品是一种淡乳白色的半透明粒料, 无毒, 具有良好的耐热性、绝缘性和化学稳定性, 可广泛应用于电器部件、食品包装物和医疗器材的生产等。当然, 聚丙烯纤维也是无毒的, 除比重轻、保暖性好、强度高、耐腐蚀、耐磨等优点外, 还具有柔软、导湿和穿着舒服等特点, 是纺织工业的优质产品。

针对我国新疆大部分地区昼夜温差较大, 容易引起桥面出现纵向和横向裂缝的情况, 新疆桥梁工程处于 2003 年首次将聚丙烯纤维增强混凝土应用到桥梁施工中, 避免了桥面混凝土干缩裂缝的出现和扩展, 从而确保了桥面的外观质量和整体质量得到了明显的提高。在新疆维吾尔自治区喀什的七里桥施工中, 在桥面混凝土中掺入了体积 0.9% 的聚丙烯纤维, 这种混凝土的重量配合比为 1:3.38:1.44:0.38(水泥:粗骨料:细骨料:水)。粗骨料采用粒径 10-20mm 砾石, 细骨料采用细度模量为 2.27 的中粗砂; 水灰比为 0.38, 使用的是当地的饮用水。另外, 每 100kg 水泥还使用了 0.75kg 的缓凝减水剂(北京生产的高星牌 RH4 型的产品)。