

聚丙烯纤维混凝土在集装箱码头上的研究与应用

张英杰, 迟玮海

(上海国际港务(集团)有限公司外高桥港区五期工程建设指挥部, 上海 200137)

摘要: 通过对码头面层的龟裂和裂缝原因进行的调查分析, 并通过对混凝土面层防止龟裂的四种方法的现场试验, 得出掺聚丙烯纤维对混凝土面层龟裂有较好的性价比。在此基础上, 对聚丙烯纤维混凝土特性进行了系统的试验研究, 并在上海外高桥港区三期、四期和五期码头面层中成功应用。

关键词: 聚丙烯纤维混凝土; 集装箱码头面层; 防裂缝; 研究应用

中图分类号: TU377.9+4

文献标识码: B

文章编号: 1002-4972(2005)05-0055-07

Research and Application of Polypropylene Fiber Concrete in Container Terminal

ZHANG Ying-jie, CHI Wei-hai

(Construction Headquarters of Waigaoqiao Port Phase V Terminals, Shanghai International Port(Group)Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: Based on the analysis of the investigation on reason of cracks in terminal facing layer concrete and action mechanics of fiber in concrete, and through site tests about anti-cracks in concrete facing layer by 4 methods, this paper draws a conclusion that we can get higher performance-price ratio by adding polypropylene fiber in concrete facing layer. Furthermore, systematic experimental study was conducted on the characteristics of polypropylene fiber concrete, which was successfully applied in terminal facing layers of Shanghai Waigaoqiao Port Area Phase III, Phase IV and Phase V projects.

Key words: polypropylene fiber concrete; container terminal facing layer; anti-crack; research and application

码头面层混凝土表面的裂缝和龟裂, 不但直接影响到混凝土观感质量, 而且影响到码头面层的耐久性。对码头面层龟裂防治的研究, 有效地消除龟裂和裂缝, 提高码头使用的耐久性已刻不容缓。1999年颁布的“港口质量检验评定标准”已将其作为工程项目竣工验收和质量评定的重要指标之一。

通过对码头面层混凝土产生裂缝原因的分析, 和纤维在混凝土中作用机理的分析, 对码头面层的龟裂和裂缝原因展开了调查, 通过对砼面层防止龟裂的四种方法(掺尼龙纤维砼、掺聚丙烯纤

维砼、磨耗层后浇、真空吸水法)的现场试验, 得出掺聚丙烯纤维对砼面层龟裂有较好的价格性能比, 在此基础上, 对聚丙烯纤维混凝土特性进行了系统的试验研究, 并在外高桥港区三期、四期和五期码头面层中得到了成功应用。

1 混凝土裂缝的类型及龟裂产生的原因

1.1 混凝土裂缝的类型

混凝土是由不同材料组成的非均质体, 内部存在着固、液、气体, 当边界条件发生变化或在外荷载的作用下, 混凝土内部将会发生复杂的物

收稿日期: 2005-04-11

作者简介: 张英杰(1963-), 男, 工程师, 从事工业与民用建筑专业。

理变化。码头的边界条件有其特殊性，主要表现在以下几个方面：

(1) 面层一般都在混凝土预制结构上浇注，预制层和现浇层的收缩不一致。

(2) 施工区域位于水边，受气候的影响比较大。

(3) 面层的施工多为大面积、大方量的连续施工。

(4) 近几年大量商品混凝土的使用，为满足泵送要求，混凝土的水灰比较大，因此单方的用水量较大。

根据上述特点分析，造成码头面层混凝土裂缝主要有以下几个方面：

(1) 水化裂缝：因混凝土内部的水分远远多于化合反应所需要的水分，同时混凝土的硬化过程中会产生体积收缩和水分的析出，水分的析出在码头面层，由于下层为预制构件，多为单向向上，毛细水会不断上升，当毛细水的通道发展并串联成网状结构时，表面即产生了微细的网状裂缝，俗称龟裂。

(2) 收缩裂缝：因面层的预制底层的混凝土收缩已经结束，并约束了现浇层混凝土体积的收缩，使混凝土面层的表面受拉，而面层表面的砂浆层抗拉强度很低，引起受拉开裂。

(3) 温度裂缝：混凝土的硬化过程中会产生热量，外部受风、浪等自然条件的影响，内外温差不一致，而各种材料的收缩和膨胀不一致，造成表面开裂。

(4) 应力集中裂缝：混凝土硬化体积收缩后，会与别的物体产生微小的缝隙，在外荷载作用下，应力集中的部位易产生开裂现象。如护边角铁周围、预埋铁件周围等。

1.2 混凝土龟裂产生的原因

码头面层砼绝大多数采用的是泵送砼，其水灰比一般在 0.6~0.7 之间，加之采用了适量的泵送外加剂，使砼中的水份在初凝前流动性变大。一般认为，砼拌合料浇筑之后到开始凝结期间，由于骨料和水泥浆下沉，水份上升，在已浇筑构件

的表面析出水份的现象称为泌水。泌水的通道产生在水泥浆与固相骨料之间，同时伴随着泌水现象的出现，砼发生体积收缩现象。这类收缩产生的原因大多数是干缩，也即混凝土中随着多余水份蒸发，湿度降低而产生体积减小的收缩，致使表面出现宽度在 0.05~0.2 mm 之间，走向没有规律性的干缩裂缝。

在混凝土配合比和原材料一定时，水份蒸发是使混凝土产生塑性收缩裂缝的最主要原因。混凝土表面水份蒸发速率的计算公式为：

$$E=0.313(e_{so}-re_{sa})(0.253+0.06v) \quad (1)$$

式中： E 为水份蒸发速率； e_{so} 为混凝土表面蒸气压； e_{sa} 为空气的蒸气压； r 为相对湿度； v 为风速。

其中， e_{so} ， e_{sa} 均由下式确定：

$$e_s=0.61\exp(17.3T/237.3+T) \quad (2)$$

式中： e_s 为蒸气压； T 为温度。

从式(1)、式(2)可知，水份蒸发速率与风速、温度、相对湿度有关，其中风速是最主要因素。

所以，地处长江入海口的外高桥地区，风速和日夜温差对码头面层的龟裂产生带来很大影响。

1.3 减少混凝土龟裂的措施

以往在工程施工中虽然采取了诸如加强洒水养护、表面覆盖等措施，但收效甚微，究其原因，主要原因还是码头施工现场无法在砼浇筑、养护的全过程防止外界因素对砼的影响。

为了减少外界因素对砼的影响，减少混凝土龟裂，可以采取磨耗层后浇、真空吸水法等施工措施。

由于在码头施工现场无法在砼浇筑、养护的全过程防止外界因素对砼的影响，因而解决龟裂的方法逐渐转向了在砼内部掺尼龙纤维、掺聚丙烯纤维等措施。

2 聚丙烯纤维网特性及聚丙烯纤维砼的性能

2.1 聚丙烯纤维网特性

聚丙烯纤维是一种束状纤维（拉开后成网状），其特点是直径小、数量多、易分散。通过检

测(上海新纺织产业用品有限公司提供的产品),其断裂强度为 320 MPa 熔点 166 ℃, 燃点 590 ℃, 无吸水性, 抗酸碱性强, 导电、导热性低。

聚丙烯纤维投入混凝土中搅拌后被打碎并均匀分布在混凝土中, 由于纤维具有一定的抗断裂性和延展性, 限制了混凝土浇筑初期不同比重物质的相对运动, 首先抑制了毛细管的发展, 抑制了龟裂裂纹的产生, 进而提高了混凝土的整体性。同时, 由于纤维网在混凝土中的牵扯约束作用, 在混凝土破裂前, 纤维被拉长, 承担了部分破碎能量, 从而使混凝土的抗冲击性, 抗疲劳性和握裹力得到提高。

纤维网是由聚丙烯合成的薄膜束状短条带, 横向拉开成网状。其特点是直径小、数量多、易分散。加入混凝土原材料中, 在搅拌机的搅拌下, 受到水泥、砂石料的冲击混合, 成束的纤维会撕裂成大量的三叉、二叉或单独的纤维(不会纠缠成团), 以乱维的方式均匀自动地分散在混凝土中, 从微观上改变了混凝土的内在品质, 因此把聚丙烯纤维可当作混凝土的防裂纤维或“次要加强筋”使用。

2.2 聚丙烯纤维砼的性能

从聚丙烯纤维在混凝土中作用机理上看, 它具有以下的功能:

(1) 抑制混凝土的塑性收缩龟裂。掺入纤维后, 大量均匀、呈乱维分布的纤维限制了混凝土浇筑初期不同比重物质的相对运动, 首先抑制了毛细管的发展, 进而抑制了龟裂的产生。其次, 凝固后的混凝土, 因为有纤维网的约束作用, 提高了混凝土的整体性, 能够更好的抵抗温度变形和其他外力引起的裂缝的发展。

(2) 提高混凝土的抗冲击能力。从相关的试验资料表明, 当在混凝土中加入标准掺量的纤维后, 其抗冲击能力提高非常明显。

(3) 提高混凝土的坚韧性和延展性。由于纤维网在混凝土中的牵扯约束作用, 在混凝土破裂前, 纤维被拉长, 承担了部分破碎能量, 从而使混凝土的延展性提高, 抗疲劳性也会提高。

(4) 减少混凝土的表面渗透性。由于纤维混凝土抑制了微裂缝的发展, 比普通混凝土减少了渗水, 从而也防止和延缓了渗水、潮湿气体和氯化物等有害介质对混凝土侵蚀和受力钢筋的锈蚀, 延长了建筑物的使用寿命。

综上所述, 从机理上讲砼中掺入聚丙烯纤维, 可减少面层砼裂缝, 并提高面层耐久性, 国外相关资料表明, 聚丙烯纤维砼可减少裂缝 70% 以上。

2.3 聚丙烯纤维使用情况

聚丙烯纤维网这项技术是由美国军队工程师团罗博特工程协会在 80 年代中期研制成功, 并陆续应用到公路、桥梁、工业与民用建筑、机场跑道、水利等工程中去。国外工程应用的实例较多, 如英国希斯罗国际机场, 加拿大多伦多水塔、美国德克萨斯州世界联合大厦等。

进入 90 年代以来, 进口聚丙烯纤维在国内的西北、西南、中南、东北等地区有工程的实例, 应用的范围大多是公路和桥面的铺装层。如西安绕城高速公路桥面铺装层, 成绵高速公路桥, 江西上饶公路改造, 辽宁省彩电中心广场路面等。

合成纤维的掺入以改善混凝土的性能, 在华东地区应用的工程实例比较多, 比如上海 8 万人体育场看台面层、市政高架的下匝道等, 但采用的为单丝状的尼龙纤维, 网状的聚丙烯纤维网则没有应用实例, 也没有发现应用于码头的先例。

本项目采用的国产“NT76 型”聚丙烯纤维网, 是上海新纺织品公司新近开发的一种新型材料, 也是首次将这项技术应用到水工工程中去。

3 减少混凝土龟裂的不同措施的现场试验研究

3.1 现场试验情况

在外高桥三期码头的施工现场, 一座废弃的海监局码头的引桥上进行了同工况下, 不同掺加料和不同施工工艺的对比试验。

试验共有 6 块面层, 每块小面层尺寸为 560 cm×360 cm×18 cm, 结构同码头面层的配筋一

致, 混凝土采用与面层强度等级相同的 C30, 坍落度控制在 $100\text{ mm}\pm 20\text{ mm}$, 分别采用 4 种方法进行了试验:

(1) 磨耗层后浇 1 块: 第一次浇注到上层钢筋, 7d 后采用 $30\sim 50\text{ mm}$ 同强度等级、低坍落度混凝土浇注磨耗层。

(2) 真空吸水 2 块: 主要目的是验证气垫搭接处真空吸水的效果。

(3) 掺加尼龙纤维 1 块: 纤维采用上海金山石化生产的单丝尼龙纤维, 掺量为 1 kg/m^3 。

(4) 掺加聚丙烯纤维 2 块: 1 块掺入上海新纺织公司生产的“NT76 型”纤维, 掺量为 1 kg/m^3 , 纤维长度 38 mm ; 另 1 块掺入美国“博赛特”生产的纤维, 掺量为 0.9 kg/m^3 , 纤维长度 19 mm 。

混凝土浇注结束后, 均采用先覆盖塑料薄膜, 上面再加盖 1 层土工布的养护方法。潮湿养护 14 d。混凝土浇注完成后, 对试验的面层连续观测了 12 周, 每周 2 次。主要观测裂缝的开展情况。

3.2 现场试验分析及结论

从现场试验的混凝土面层的情况分析:

(1) 磨耗层后浇的办法, 采用 $3\sim 5\text{ cm}$ 低坍落度混凝土, 虽然对裂缝和龟裂的控制有一定的效果, 但对施工的进度不利, 而且两次混凝土的结合面处理难度较大。

(2) 真空吸水是比较成熟的工艺, 对码头的裂缝和龟裂的控制也有较好的效果, 但增加了码头面层的分缝数量, 工序增加, 工艺成本的投入较大, 高温季节施工难于控制。

(3) 采用尼龙纤维混凝土在上海地区有应用的先例, 但从尼龙和纤维网作用的机理上, 多丝的聚丙烯纤维更胜一筹。

(4) 掺入纤维后, 对平仓后的混凝土重新挖开, 发现纤维在混凝土中的各层分布均匀; 钻芯取样的试件取出困难, 说明纤维在混凝土中的“牵扯”作用明显。

通过组织相关专家试验结果进行了分析与评估, 一致性的意见为:

(1) 掺加聚丙烯纤维和真空吸水的 3 块面层,

3 个多月后, 外表基本没有裂缝, 而其它面层不同程度观察到裂缝。

(2) 真空吸水在工艺操作上, 施工控制难度较大; 而掺聚丙烯纤维现场操作同常规的施工基本相同。

(3) 从性价比上, 国产纤维优势明显。

所以, 仅从现场模拟对比而言, 砼中掺入聚丙烯纤维对减少码头面层的裂缝, 效果是明显的。

4 C30 纤维砼性能的试验研究

4.1 聚丙烯纤维特性的试验

我们委托“中国化纤工业协会化纤产品检测中心”对“NT76”型聚丙烯纤维进行了检测, 同进口的“博赛特”纤维相比见表 1。

表 1 两种纤维物理、化学指标对比

检测项目	NT76 型	博赛特
密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	0.91	0.91
熔点/ $^{\circ}\text{C}$	160~170	160~170
燃点/ $^{\circ}\text{C}$	590~593	590
热传导性	低	低
电传导性	低	/
吸水性	无	无
耐酸耐碱性	高	高
抗拉强度/ (N/tex)	0.32	0.56~0.77
纤维长度/ mm	19~51	12~51
杨氏弹性系数	3.0	3.5

从两种纤维的物理、化学指标的比较上看, 大部分指标相同或接近, 只是进口纤维在抗拉强度上高于国产纤维, 但国产纤维也接近钢筋的抗拉强度。而且国产纤维的价格要远远低于进口纤维。因此, 采用国产纤维是可行的。

4.2 C30 纤维砼性能试验结果

(1) 不同规格的纤维 C30 纤维砼坍落度对比见表 2。

表 2 纤维砼坍落度对比

砼强度等级	纤维掺量	纤维长度	设计坍落度	实测坍落度
	$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	mm	mm	mm
C30	0	/	120 ± 20	140
	1	19	120 ± 20	121
	1	38	120 ± 20	100

从试验的结果上看, 掺入纤维后, 坍落度会有所损失, 这与纤维的特性是一致的。

(2) 砂浆试件的抗裂对比见表 3。

表 3 砂浆试件的抗裂对比

砂浆等级	纤维掺量	纤维长度	裂缝百分率
	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	mm	%
C30	0	/	100
	1	19	13.1
	1	38	0

从试验结果上看, 掺入纤维后, 可以有效提高构件的抗裂性能。

(3) 混凝土抗冲击对比见表 4。

表 4 混凝土抗冲击对比

砼强度等级	纤维掺量	纤维长度	冲击次数	冲击抗裂性能提高倍数
	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	mm		%
C30	0	/	/	100
	1	19	/	162
	1	38	/	177

从试验的结果上看, 纤维混凝土抗冲击性能提高明显。

(4) 混凝土收缩对比见表 5。

表 5 混凝土收缩对比

砼强度等级	纤维掺量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	纤维长度 mm	平均收缩值 ($\times 10^{-4}$)			
			龄期 3d	龄期 7d	龄期 14d	龄期 28d
C30	0	/	/	/	0.95	0.195
	1	19	/	/	0.80	0.180
	1	38	/	/	0.75	0.155

说明掺入纤维后, 对混凝土的收缩有一定的抑制作用。

(5) 对 C30 混凝土劈裂强度、抗折强度、抗渗对比 (28 d 龄期) 见表 6。

表 6 砼劈裂强度、强度、抗折强度抗渗对比

砼强度等级	纤维掺量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	纤维长度 mm	劈裂强度	抗折强度	抗渗平均渗透高度
			MPa	MPa	mm
C30	0	/	3.84	4.08	28
	1	19	3.46	4.39	18
	1	38	4.00	4.41	17

说明对抗折强度和抗渗性有一定提高。

5 不同掺量及不同长度组合 C40 纤维砼性能的试验研究

5.1 试验概况

5.1.1 试验项目

本次试验内容主要分两大部分: ①现场浇筑面层试样板, 对砼的和易性、坍落度及试样板表面裂缝作观察; ②制作各种试块在实验室内作检测。

本次面层试样板共做 6 块, 每块尺寸均为 3 m (长) \times 2 m (宽) \times 8 m (厚), 其中第 1 块砼中不掺加丙纶纤维, 第 2 块砼中掺 38 mm 长的丙纶纤维 0.8 kg/m^3 , 第 3 块砼中掺 38 mm 长的丙纶纤维 1.0 kg/m^3 , 第 4 块砼中掺 38 mm 长的丙纶纤维 1.2 kg/m^3 , 第 5 块砼中掺 51 mm 长的丙纶纤维 1.0 kg/m^3 , 第 6 块砼中掺 38 mm 长与 19 mm 长的丙纶纤维各 0.5 kg/m^3 。并且每块面层均留好相应试块, 做如下试验: ①抗裂试验; ②抗冲击试验; ③收缩对比试验; ④钢筋握裹力试验; ⑤抗压强度试验; ⑥轴心抗压强度试验; ⑦抗折试验; ⑧劈裂抗拉试验; ⑨砼和易性观察, 坍落度测定, 试样板表面裂缝检测。

其中①、②、③、④项试验由上海市建筑科学研究所承担, ⑤、⑥、⑦、⑧项试验由上海航道勘察设计研究院华源检测中心承担, ⑨项试验由现场试验室承担。现场试样板制作结构类同于四期码头面层结构, 且这 6 块面层除所掺丙纶纤维的掺量和长度不同外, 其余如混凝土配合比、所用原材料、外加剂、拌制时间和设备均相同。

5.1.2 砼配合比、原材料检测

C40 混凝土基准配合比由东友商品砼公司提供 (见表 7)。

表 7 混凝土基准配合比

原材料	水泥	砂	碎石	水	外加剂	粉煤灰	矿粉
数量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	280	670	1 020	190	4.62	69	113

试验所用原材料

水泥: 上海浦东水泥厂 P.O425 普通硅酸盐水泥; 砂: 产地——富池, 细度模数 2.4; 中砂, 碎

石：产地——安溪，5~31.5连续级配；外加剂：上海中立建材厂 SP406 高效减水剂；粉煤灰：上海新宝粉煤灰综合利用厂，Ⅱ极灰；矿渣微粉：上海宝田新型建材有限公司，S95；聚丙烯纤维：上海新纺织产业用品有限公司， $L=19\text{ mm}$ ， $L=38\text{ mm}$ ， $L=51\text{ mm}$ 。

5.1.3 砼的拌制

现场试样板砼由 3 m^3 强制式搅拌机拌制，时间 1.5 min ；上海建科院采用 100 L 立轴强制式搅拌机，总拌和时间 3 min 。

5.2 不同掺量及不同长度组合 C40 纤维砼的性能试验

现场试样于 2001 年 6 月 15 日浇筑。上海建筑科学研究所和上海航道勘察设计院华源检测中心分别于 6—7 月，9—10 月完成各项试验的检测。

(1) 不同规格的纤维掺量和坍落度对比见表 8。

表 8 不同规格的纤维掺量和坍落度对比

砼强度等级	纤维掺量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	纤维长度 mm	设计坍落度	实测坍落度
			mm	mm
C40	0	38	180 ± 20	200
	0.8	38	180 ± 20	180
	1.0	38	180 ± 20	150
	1.2	38	180 ± 20	112
	1.0	51	180 ± 20	142
	长度 19 mm ，掺量 0.5 kg/m^3 。 长度 38 mm ，掺量 0.5 kg/m^3 。			180 ± 20

从试验的结果上看，掺入纤维越多，坍落度损失越大，这与纤维的特性是一致的。

(2) 试件的抗裂对比见表 9。

表 9 抗裂对比

强度等级	纤维掺量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	纤维长度 mm	裂缝百分率
			%
C40	0	38	100
	0.8	38	14.5
	1.0	38	2.7
	1.2	38	1.8
	1.0	51	6
	长度 19 mm ，掺量 0.5 kg/m^3 。 长度 38 mm ，掺量 0.5 kg/m^3 。		

从试验结果上看，掺入纤维越多，越可有效提高构件的抗裂性能。

(3) 混凝土抗冲击对比见表 10。

表 10 抗冲击对比

强度等级	纤维掺量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	纤维长度 mm	冲击次数	冲击抗裂性能 提高倍数/%
C40	0	38	20	100
	0.8	38	72	360
	1.0	38	128	640
	1.2	38	121	650
	1.0	51	> 150	> 750
	长度 19 mm ，掺量 0.5 kg/m^3 。 长度 38 mm ，掺量 0.5 kg/m^3 。			

从试验的结果上看，掺入纤维越多，构件的抗冲击性能提高越明显。

(4) 混凝土收缩对比见表 11。

表 11 收缩对比

砼强度等级	纤维掺量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	纤维长度 mm	平均收缩值 ($\times 10^{-6}$)			
			龄期 3 d	龄期 7 d	龄期 14 d	龄期 28 d
C40	0	38	0.077	0.137	0.203	0.337
	0.8	38	0.08	0.133	0.19	0.293
	1.0	38	0.083	0.133	0.197	0.263
	1.2	38	0.083	0.147	0.233	0.267
	1.0	51	0.077	0.147	0.24	0.3

说明掺入纤维后，对混凝土的收缩有一定的抑制作用。

(5) 对 C40 混凝土抗压强度、轴心抗压强度、抗折强度、劈裂强度对比(28 d 龄期)见表 12。

表 12 各种强度对比

砼强度等级	纤维掺量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	纤维长度 mm	抗压强度	轴心抗压强度	抗折强度	劈裂强度
			MPa	MPa	MPa	MPa
C40	0	38	42.0	34.4	4.7	3.41
	0.8	38	43.5	31.4	5.04	3.06
	1.0	38	45.0	36.1	4.88	3.56
	1.2	38	45.0	38.0	5.17	3.52
	1.0	51	40.3	40.3	4.96	3.65
	长度 19 mm ，掺量 0.5 kg/m^3 。 长度 38 mm ，掺量 0.5 kg/m^3 。			43.5	43.5	5.45

说明对混凝土抗压强度、轴心抗压强度、抗折强度、劈裂强度有一定提高。

(6) C40 混凝土钢筋握裹对比试验见表 13。

表 13 握裹对比

砼强度等级	纤维掺量	纤维长度	平均握裹强度
	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	mm	MPa
C40	0	38	4.12
	0.8	38	4.25
	1.0	38	4.5
	1.2	38	4.52
	1.0	51	4.43
	长度 19 mm, 掺量 0.5 kg/m^3 。 长度 38 mm, 掺量 0.5 kg/m^3 。		4.11

说明掺入纤维后, 混凝土对钢筋的握裹力增加。

5.3 试验结论

(1) 掺加聚丙烯纤维的砼与基准砼相比, 在物理性能上有不同程度的提高。

(2) 长度同为 38 mm, 纤维掺量不同的三组数据表明: 纤维掺量为 0.8 kg/m^3 与 1.0 kg/m^3 相比, 1.0 kg/m^3 掺量的各项指标有较大程度提高(除 28d 抗折强度之外), 但 1.0 kg/m^3 与 1.2 kg/m^3 的掺量的试验数据相比较, 1.2 kg/m^3 掺量的某些指标虽有提高, 但提高的程度不大。

(3) 掺量均为 1.0 kg/m^3 , 长度分别为 38 mm, 51 mm, 19 mm 与 38 mm 组合的三组试验对比结果表明: 纤维长为 51 mm 的砼抗冲击性能最高; 纤维长由 19 mm 与 38 mm 组合的砼抗折强度和劈裂抗拉强度性能最高且裂缝百分率较低; 纤维长为 38 mm 的砼检测数据虽没有出现最高物理性能指标, 但各项数据与最优数据相比, 差距不大, 可以认为是试验数据中的“期望值”。

(4) 通过多组试验检测对比, C40 砼中掺加长 38 mm, 1.0 kg/m^3 的聚丙烯纤维的价格性能比较优, 且现场抹面操作与添加量控制方便, 值得最先采用, 其次采用 19 mm 与 38 mm 组合, 掺量各为 0.5 kg/m^3 的砼。

(5) 试验过程中表明, 添加聚丙烯纤维于砼

中仍需加强常规的砼养护工作, 只有“内、外结合”才能对砼表面龟裂起到较好的预防作用。掺加聚丙烯纤维后的砼在表面观感、手感上稍差于基准砼, 但随着砼面层投入使用时间的延长, 这种感观差距逐渐缩小。

6 聚丙烯纤维混凝土在外高桥码头面层中的应用与经济效益评价

外高桥集装箱码头三至五期码头面层总计约 20 万 m^2 的码头面层全部采用了聚丙烯纤维砼经过运营多年的观察, 码头面层裂缝基本得到控制, 效果极为明显。

根据工程的实践经验, 在施工工艺方面应注意以下两方面问题:

(1) 混凝土的拌合: 与普通混凝土一致, 对各种材料的称量要求更为准确。最好增加 1~1.5 min 的搅拌时间。

(2) 混凝土的坍落度: 掺入纤维网后, 坍落度有所降低, 振捣后, 出浆量减少, 从一定程度上减少了泌水现象。

聚丙烯纤维混凝土应用的经济效益评价:

虽然聚丙烯纤维掺入混凝土后, 单方混凝土的价格会有所增加, 但与其它处理码头面层龟裂的方法相比, 资金投入少。比如真空吸水, 虽然混凝土的单价没有变化, 但需增加设备费用、模板费用等; 与掺加膨胀剂或防水剂的混凝土造价基本接近, 但防裂效果及适用范围明显改善和增加, 施工养护中可每平方米节省人工费 3~5 元。以码头面层的平均厚度 20 cm 计, 掺聚丙烯纤维同其他面层的处理方法相比, 每平方米的费用增加见表 14。

表 14 每平方米增加的费用对比

方法	掺聚丙烯纤维	掺进口纤维	表面刻痕
增加费用/元	5~6	30	10~12

因此, 在码头工程施工中, 掺入国产的聚丙烯纤维的混凝土不仅提高了码头面层的质量, 其经济效益也是显著的。