

国际材料与结构试验室联合会
一九七五年会议文集

纤维增强水泥与混凝土

第一册

中国建筑工业出版社

国际材料与结构试验室联合会
一九七五年会议文集

纤维增强水泥与混凝土

总编辑 [英] 亚当·丙维尔
协助编辑 D.J. 汉南特 A.G. 马汉维尔
C.D. 波威各伊 B.N. 斯梅
杨顺喜 沈荣熹 田恒 译
漆平生 校

中国建筑工业出版社

本书系统介绍美国、英国、日本、比利时、加拿大、匈牙利、丹麦、印度、西德、苏联等国关于钢纤维、玻璃纤维、有机纤维、石棉纤维以及碳纤维、植物纤维增强水泥和混凝土的研究和应用成果，包括纤维增强机理、增强后的水泥和混凝土性能、试验和用途等。

本书可供从事纤维增强水泥和混凝土、石棉水泥材性的研究人员以及混凝土制品厂、石棉水泥制品厂和各种混凝土工程的有关技术人员参考。

Rilem symposium 1975

FIBRE REINFORCED CEMENT AND CONCRETE

General Editor

Adam Neville

in association with

D J. Hannant A. J. Majumdar C. D. Pomeroy R. N. Swamy

The Construction Press Ltd 1976

* * *

国际材料与结构试验室联合会

一九七五年会议文集

纤维增强水泥与混凝土

第一册

杨顺喜 沈荣熹 田恒译

漆平生 校

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本：850×1168 毫米 1/32 印张：17¹/₁₆ 字数：459 千字

1980年12月第一版 1980年12月第一次印刷

印数：1—2,500册 定价：2.10元

统一书号：15040·3839

译 者 的 话

《纤维增强水泥与混凝土》由英国利兹大学土木工程系教授兼主任、国际材料与结构试验室联合会混凝土常设委员会主席亚当·内维尔主编，书中收集了1975年9月在伦敦召开的第一次纤维增强水泥与混凝土国际会议的论文和讨论记录。全书系统地报导了各国学者关于纤维增强水泥和混凝土在力学模型、材料微观结构、纤维排列及其空间分布、多缝开裂等基本理论方面创立的各种假说和提出的一些新概念；用长期积累的大量对比资料和试验数据，从技术性能和经济效果的角度，综合地介绍了这种新型材料的实用价值和在一些国家的应用成果；指出了今后有待解决的问题和发展趋势。

全书共分两册出版。第二册是第一册的必要补充和续编，此外，会议中专家们的讨论意见均收入此册。

本书出版后在国际混凝土学术界引起了广泛的反响，在我国也深受有关部门和人员的重视。为了向我国研究和利用这种材料的有关人员提供一些比较系统的参考资料，我们翻译了此书。在翻译过程中，曾经得到南京工学院姚珪、叶连生，北京市市政工程研究所孙绍平、高乃熙等同志的大力支持，在此一并致谢。由于本书篇幅较大，专业性很强，加之译者水平所限，不妥之处，谨请读者指正。

译 者

一九七九年八月

目 录

第 1 部分 纤维混凝土的用途

- 1-1 纤维混凝土的应用.....D.R.兰卡德 (2)

第 2 部分 纤维水泥的应用

- 2-1 纤维水泥的应用J.F.赖德 (26)

第 3 部分 纤维混凝土与纤维水泥的理论探讨

- 3-1 纤维水泥与纤维混凝土的理论探讨
..... A.S.阿贡、W.J.沙克 (48)
- 3-2 多缝开裂的间断纤维复合材料中的纤维拔出
.....D.K.黑尔 (67)
- 3-3 纤维间距和纤维比表面H.克伦歇尔 (82)
- 3-4 玻璃纤维增强水泥的力学分析.....N.G.奈尔 (95)
- 3-5 含有顺向或乱向钢纤维作为微筋材的混凝土梁的
强度..... V.S.帕拉美斯瓦兰、K.拉贾戈帕兰 (112)
- 3-6 关于钢纤维增强混凝土的某些研究结果
..... B.施纽特根 (124)

第 4 部分 钢纤维混凝土的性能与试验

- 4-1 钢纤维混凝土的试验方法与力学性能
..... N.M.德乌兹 (138)
- 4-2 离心纤维增强混凝土构件的质量试验
..... E.F.P.伯内特 (158)
- 4-3 钢筋混凝土中由于掺入钢纤维而获得的减少 缩裂
的效果..... R.H.厄尔弗里、M.A.萨马利 (170)
- 4-4 钢纤维混凝土的耐久性... D.J.汉南特、J.埃金顿 (180)

- 4-5 关于定向和顺向钢纤维粘结力的研究
..... A.E.纳曼、S.P.夏 (196)
- 4-6 用于折板结构的纤维混凝土
.....J-P.拉曼特、M.范.莱特姆 (205)
- 4-7 配有普通钢筋的纤维混凝土的抗弯性能
.....R. N. 斯瓦梅、K.A.阿尔-诺里 (213)
- 4-8 高和易性钢纤维混凝土的某些特性
..... R.N.斯瓦梅、H.斯塔弗里兹 (226)
- 4-9 纤维混凝土梁的足尺试验
..... G.R.威廉森、L.I.纳布 (242)

第5部分 非钢纤维混凝土的性能与试验

- 5-1 非钢纤维混凝土的性能与试验 J.J.桑斯费尔德 (252)
- 5-2 在聚丙烯纤维增强混凝土力学性能的研究中作出的
一点贡献.....J.达达尔 (266)
- 5-3 乱向钢纤维和玄武岩纤维增强混凝土的强度和变
形特性..... K.科姆洛斯 (277)
- 5-4 纤维对轻集料混凝土的作用
..... A.G.B.里奇、O.A.阿尔-卡雅里 (287)

第6部分 石棉水泥的性能与试验

- 6-1 石棉水泥的性能与试验..... H.G.克罗斯 (302)
- 6-2 关于石棉水泥板材长期露置之后内含石棉纤维
“腐蚀”状况的研究..... L.奥波茨基、L.潘特克 (313)

第7部分 含有非石棉纤维的水泥的性能与试验

- 7-1 纤维水泥复合材料的性能 A.J.马江达尔 (324)
- 7-2 以抗弯强度下降作为玻璃在纤维增强水泥复合材料中
受到碱性侵蚀的指标是否可靠 E.B.柯恩 (367)
- 7-3 玻璃纤维增强水泥复合材料的微观结构特征

-A.C.杰拉斯、K.L.李特兰德(383)
- 7-4 石棉能否有一天完全被取代?
.....H.克伦歇尔、O.海加尔德(394)
- 7-5 玻璃纤维增强水泥复合材料的拉应力-应变特性
.....D.R.奥克利、B.A.普罗克特(407)
- 7-6 碳纤维增强水泥的结构特性
.....S.萨卡、M.B.贝利(424)

第8部分 应 用

- 8-1 钢纤维混凝土穹顶的充气成型.....G.B.贝岑(438)
- 8-2 钢纤维增强混凝土公路罩面的足尺试验
.....J.格雷戈里、J.W.加罗维、K.D.莱特贝(449)
- 8-3 纤维混凝土在水工构筑物上以及在海洋环境
中的应用G.C.霍夫(462)
- 8-4 钢纤维混凝土路面C.D.约翰斯顿(477)
- 8-5 苏联的纤维增强材料研究
.....Б.А.克里洛夫、B.П.特兰波维也茨基(490)
- 8-6 钢纤维增强混凝土的有效应用
.....西岡國男、垣見上、山川角男、白川恭之(497)
- 8-7 如何使纤维混凝土满足某些特殊要求?
.....C.D.波马洛伊(507)
- 8-8 玻璃纤维增强水泥敷面墙板的设计
.....A.J.M.索恩、J.R.威廉斯(520)
- 8-9 胡德堡的纤维混凝土罩面G.R.威廉森(531)
- 附录 英、美制单位对公制的换算(540)

第 1 部 分

纤维混凝土的用途

1-1 纤维混凝土的应用

D.R. 兰卡德

贝特尔哥伦布实验室（美国，俄亥俄州，哥伦布）

摘要 纤维增强混凝土在工业应用上的积极推广，只是近年来的事。在美国、英国和西欧等地，对于某些应用领域作过相当规模的现场试验，其中包括桥面和路面（公路和飞机场）的罩面层、采矿和隧道工程的各种应用、边坡的固定、防火设施、混凝土修补、工业地面以及各种预制混凝土产品等等。虽然迄至目前，绝大部分的现场研究工作一直是集中在钢纤维混凝土上，但除了钢纤维以外，对于用作混凝土筋材的玻璃纤维和聚丙烯纤维，也都取得了不少的经验。

总结应用纤维混凝土的现场经验，作为初步的结果，绝大部分是令人鼓舞的。但也有一些领域，其中尚需作出进一步的努力，从而使这种材料能够更加大量地、而且以更加多样化的方式作为结构材料和建筑材料获得应用。为了有效而迅速地搅拌出大量纤维混凝土，技术和设备都需要进一步改善。由于找到了在低含水量下灌筑这种材料的一些方法，而且由于研究出了纤维与基体之间更好的粘结方式，纤维混凝土的性能可望进一步提高。

此外，由于在设计程序、材料制备和材料特性等方面，可供应用的基本知识正在不断地积累扩大，因此，纤维混凝土应用的大量增长也是可望实现的。

引 言

用纤维来增强水泥和混凝土，作为我们这次讨论会的课题，并不完全是一种新的想法。早在普通硅酸盐水泥^①混凝土获得应用之前，便已有了将稻草用于制砖和将毛发拌在灰浆里的方法。而且，大自然也向人类提供了诸如木材和竹料之类由于包含纤维而获得增强的结构材料。然而，除了石棉的应用之外，对于用人造纤维来提高一般可注结构材料（其中包括石膏灰泥、水泥浆和混凝土^②）的性能，则只是在最近的大约 15 年期间内，开始作了认真的考虑。赖德博士前此已就纤维在水泥基体材料中的应用及其提供利益的情况作出了评论。至于在混凝土中使用纤维的情况，则尚需进一步根据以下两个方面的观点来加以考虑：其一是混凝土的搅拌和浇筑；其二是这种材料在建筑业中的应用。

在混凝土中拌入纤维是一种简便而行之有效的办法，可借以提高材料的多种技术性能，类如断裂韧度、抗疲劳性、冲击抗力和抗弯强度等等。作为新浇大体积混凝土中的一个组成部分来提供增强作用的设计原理，在工厂预制产品和构件的情况下同样也显示出了多方面的优越性。正是这些潜在的优越性和这种设计原理的新颖性，目前在全世界范围内相当广泛地激起了人们对于将纤维筋材用于混凝土的深切关注。

目前正在对某些可用作混凝土筋材的纤维进行研究，其中包括钢（碳钢和不锈钢）、玻璃（耐碱玻璃）和聚丙烯。至于其它类如尼龙、聚乙烯、人造丝和 E 玻璃^③等纤维，过去也曾研究过将它们用于水泥浆，但这些材料或是价格太高、收效低微，或是由于对周围的碱性水泥（指硅酸盐水泥而言）没有足够的耐蚀性，

① 本书原文中的“波特兰水泥(Portland Cement)”，在译文中一律按照我国文献中的惯用名称，译作“硅酸盐水泥”——译注。

② 在本文中，混凝土系指由水硬水泥、集料和水组成的任何混合料而言。

③ E 玻璃又名电绝缘玻璃、无碱玻璃。

因而都已被排除在外，不予正式考虑。

一般说来，拌有纤维筋材的混凝土不同于普通混凝土之处，在于水泥含量较高（ $350\sim 500$ 公斤/米³ [$600\sim 800$ 磅/码³]），粗集料含量较低（ $350\sim 370$ 公斤/米³ [$600\sim 1250$ 磅/码³]），而且粗集料的粒度较小（最大10毫米 [$3/8$ 英寸]）。

在迄至目前我们考察过的绝大多数应用领域中，纤维含量的变化范围，按体积计算，大约是从0.3%到2.0%。

1973年9月，美国混凝土协会举办了一次纤维增强混凝土国际讨论会[1]，浏览一下会上发表论文的标题目录，即可深入了解有关的考察和研制工作在纤维和基体类型两个方面的注意重点和努力方向。在发表的论文中，有十五篇谈到的是钢纤维，八篇是玻璃纤维，一篇是碳纤维，其它则是讨论一般性的纤维增强概念。从基体类型上来看，有二十二篇论文谈的是混凝土，四篇是水泥，其余则是关于脆性基体的一般性考察。很可能，使用钢纤维作筋材的积极性之所以更高，部分原因也在于，钢纤维已经以相当大的数量和较之任何其它纤维类型更长的历史获得了实际应用。

关于钢纤维混凝土方面的研究成果，在60年代早期已有报导[2、3]。然而就商业性产品和实际应用的意义而言，对这种材料进行认真的研究，在美国实际上是始自1971年。在英国和西欧，类似的研究工作很快也就跟了上来。最近以来，对于钢纤维混凝土实际应用方面的兴趣，已开始出现于加拿大、日本、澳大利亚和新西兰。而且在美国、英国、西欧、澳大利亚和日本，钢纤维完全能够以商业性的规模保证供应。

目前正在生产耐碱玻璃的，有美国和英国，可能还有日本。将玻璃纤维应用于混凝土的初步积极性，眼下显然是集中在美国。就美国而言，也只是最近，方始在现场规模的基础上对这种材料的应用进行了探索。

聚丙烯纤维增强的混凝土，若干年前曾出现于英国的产品行列之中，但这种材料的应用，至今仍然受到某些限制。

为了方便起见，可将纤维混凝土现有的和可能的应用方式划

分为两大类。

(1) 作为大体积混凝土的应用——在这种情况下, 最后产品产生于施工或建筑现场;

(2) 作为预制混凝土构件的应用——在这种情况下, 产品产生于工厂中, 然后运往其它地方供使用。

在美国, 就吸引潜在用户对这种材料关心并积极参与其事的意义而言, 纤维混凝土正是在作为大体积混凝土应用方面已经取得了最大的成功。在英国和西欧, 人们在两种应用方式上的兴趣大致是相等的, 然而总地说来, 积极性不如美国。

纤维混凝土越出实验室阶段之后, 开始进入实际应用只是最近三、四年间的事情, 尽管如此, 却已经积累了相当可观的知识和经验。在这几年的研制工作中发生了一些什么事情? 学到了一些什么东西? 而且, 也许最重要的是, 怎样才能将学到的这些知识用来提高纤维混凝土的实用潜力?

作为大体积混凝土的应用

对于纤维混凝土来说, 迄至目前已经作过研究的一些大体积混凝土应用领域如表 1 所示。表 1 也显示出了以这些现场应用方式使用于混凝土中的纤维类型, 并且注明了进行过大量现场工作的国家。

在美国, 据估计全部现场工作中至少有 70% 涉及桥面、公路、街道和飞机场跑道铺面的结构、罩面与修理, 以及其它类如堤坝和涵洞等大体积混凝土构件的修理。

桥面的罩面层和结构 美国自从 1972 年以来, 共铺筑了八个桥面的纤维混凝土面层 [4、5]。在所有的工程项目中, 使用的都是钢纤维^①, 含量范围按体积计算是由 0.75% 到 1.5%。

① 0.63×63.5 毫米 (0.025×2.5 英寸) $0.25 \times 0.56 \times 25.4$ 毫米 ($0.01 \times 0.022 \times 1.0$ 英寸)。
 0.25×12.7 毫米 (0.010×0.5 英寸)。

已完成现场试验的纤维混凝土大体积应用领域

表 1

应 用 领 域	使用于混凝土中经过现场鉴定的纤维类型	进行过相当大量现场工作的国家
桥面的罩面层和结构	钢	美国
公路、街道以及飞机场跑道铺面的罩面层和结构	钢, 玻璃	美国、英国、加拿大
新筑路面结构	钢	美国
大体积混凝土的维护和修理(堤坝、板块、路面、桥梁、涵洞等等)	钢	美国、英国、西欧
采矿和隧道工程	钢	美国、英国
岩面稳定	钢	美国
工厂地面		美国、意大利、英国
耐火工程应用	钢	美国

其中有六项工程是现有桥面(混凝土或木质桥面)的罩面,罩面厚度51到127毫米(2到5英寸),平均为76毫米(3英寸)。有四个罩面完全同原有桥面粘结(使用环氧树脂和水泥浆作粘结剂);另有一个罩面是部分粘结的;再有一个则是完全不粘结的(罩面与桥面之间夹置着加厚的聚乙烯塑料布)。

所有完全粘结和部分粘结的罩面在使用期间都发生了一些裂缝,但这些裂缝在绝大多数情况下仍然保持紧闭,因而并未对路面行驶质量造成不利影响。而76毫米(3英寸)厚的非粘结罩面,则在经过了每日交通量30000车次的三年时间之后,实际上仍然保持没有裂缝。根据迄今目前取得的结果,看不出纤维的尺寸或含量对桥面罩面层的性能有任何显著的影响。

1973年6月,弗吉尼亚州采用双层粗糙接合结构工艺,在两座桥上修筑了六个新桥面。这种工艺的特点在于首先浇注一个底层,一直达到接近于增强表层的高度,接着再浇注一个51毫米(2英寸)厚的高质量磨耗层。工程中包含三种磨耗层,使用的材料分别为高质硅酸盐水泥混凝土,钢纤维混凝土和乳胶改良混凝土。用每种磨耗层构成两个16×12米(52×38英尺)的试验段。这种双层结合桥面的性能,将与邻近桥梁上同时筑成的普通

桥面（单层结构）进行比较。

公路、街道和飞机场跑道铺面的罩面层 在美国，目前对于将纤维混凝土用作修整路面的罩面材料寄予很高的希望。这种情况的造成，部分地是由于日趋严重的道路保养问题，而且以传统的罩面材料，在许多情况下并不能对这个问题作出令人满意的解决。纤维混凝土由于其高超的强度和耐疲劳性，由于它能够以一个相当薄的断面来铺筑的特点，用作罩面材料似乎便有某些优越性。1972年以来，完成了许多有重大意义的工程项目，其中包括公路路面、住宅区和市区街道、飞机场跑道和滑行道以及停车场等等的罩面[4、6~17]。已经拟定了某些试验计划，来对一系列的可变因素进行比较性的研究，其中包括混凝土配料设计、纤维类型和含量、接缝间距及其设计、罩面层厚度及其与原有表面的结合方式等等[4、11]。

密执安、依阿华和明尼苏达等地也铺筑了一些公路罩面。1973年在依阿华州乡村公路上铺筑的一段罩面，乃是迄今完成的一项最大的公路罩面工程（长4.8公里或3英里）[4、10、11]。

图1显示了用滑模铺路机铺筑这一6.7米（22英尺）宽的罩面的施工情况。

依阿华州[4、10、11]和密执安州[4、8、9]铺筑的罩面，都只用了钢纤维（体积百分率0.75到1.5），而明苏尼达的罩面工程（1974年秋）的特点，则是钢纤维和玻璃纤维增强的混凝土首次在同一工程项目中获得应用。公路罩面的厚度由51至102毫米（2至4英寸）不等，而且既有完全粘结的路段，又有部分粘结的路段，也有不粘结的路段。1972年在依阿华州铺筑的，是两条住宅区街道的部分粘结式钢纤维混凝土罩面[4]。其中60米（200英尺）长的一段街道，是用钢纤维含量的体积百分率为1.3至1.9的混凝土，以64至102毫米（2.5至4英寸）的厚度来浇铺的。

为估计将钢纤维混凝土用作机场跑道罩面材料的可能性，首次大规模试验是1973年2月在坦帕（佛罗里达）的国际机场上进

行的[13]。在这次浇筑之前，密西西比州维克斯堡的美国陆军工程兵部队航道试验站进行了一次极有成效的考察研究，研究表明，钢纤维混凝土罩面的性能，超过了素混凝土和普通钢筋混凝土的罩面[14]。在坦帕市，53米（175英尺）长的罩面以102和152毫米（4和6英寸）的厚度铺筑在滑行道区域内。1972年9月，在依阿华州塞达拉皮兹机场主滑行道上一个23×27米（75×90英尺）的区域内，也铺筑了一个51到102毫米（2到4英寸）厚的罩面[4]。该工程中使用了两种尺寸的钢纤维（0.41×25.4毫米[0.016×1.0英寸]和0.63×63.5毫米[0.025×2.5英寸]）1974年5月，在纽约肯尼迪国际机场主跑道末端一个53×37米（175×120英尺）的地段上，铺筑了一个127毫米（5英寸）厚的非粘结式钢纤维混凝土罩面，这是美国迄今最有意义的一次机场罩面试验。与此同时，在滑行道的回转区，修筑了一块毗连的216毫米（8.5英寸）厚的坡面板（37×15米[120×50英尺]）。用于工程中的混凝土，每立方米包含446公斤水泥和105公斤0.63×63.5毫米的纤维（合每立方码752磅水泥和175磅纤维）。罩面和坡面板上都采用了楔形和传力杆式的工作缝。图2所示，是将7.6米（25英尺）宽的钢纤维混凝土罩面浇注在加厚聚乙烯塑料布上的施工情况。罩面和坡面板的性能，迄至目前仍然十分卓越。

钢纤维混凝土也曾用于某些涉及停车场地罩面修复的工程项目。其中包括迄至目前最大的一项纤维混凝土工程（22572米² [27000码²]），亦即为德克萨斯州的一个陆军坦克停驻场铺筑一个罩面层[15]。一层102毫米（4英寸）厚的钢纤维混凝土（纤维尺寸为0.25×12.7毫米[0.01×0.5英寸]，含量体积率为1.5%），直接铺筑在原有127毫米（5英寸）厚的沥青地面上。

除了纤维含量过高或过低的两种极端情况下的某些例外，钢纤维混凝土罩面的性能迄至目前是令人满意的，而且用户的态度则是有保留的满意，其原因在于长期性能尚未可知。要断定为取得良好的罩面性能所需要的最佳纤维类型和数量，目前尚且为时

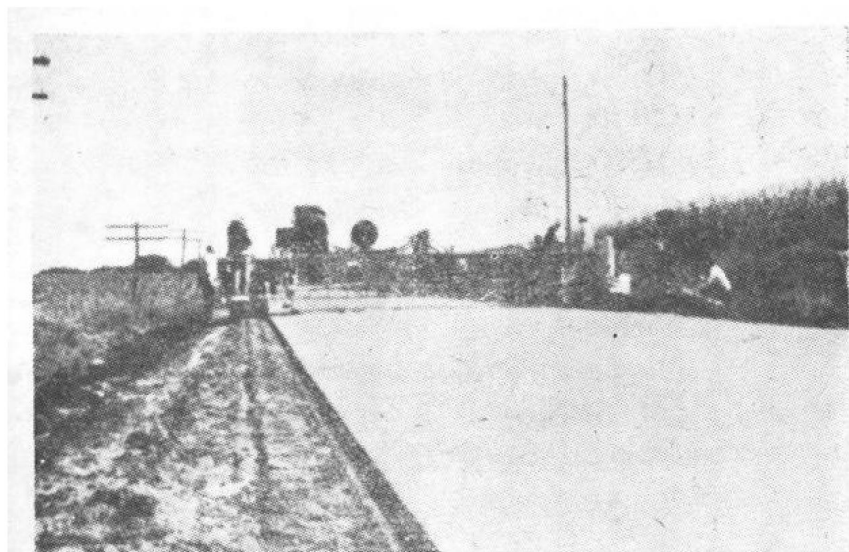


图 1 美国依阿华州的一条乡村公路上正在铺筑一个 4.8 公里
(3 英里) 长的钢纤维混凝土罩面。施工中使用了—台滑模式
铺路机 (宽度 6.7 米 [22 英尺])



图 2 1974 年在纽约肯尼迪国际机场的一条跑道上铺筑一个非粘
结式钢纤维混凝土罩面 (127 毫米 [5 英寸] 厚) 的施工情况

过早。但一般的印象似乎是，所要求的纤维数量和罩面厚度，可能要根据不同的工作条件（原有路面的质量、交通量等等）来决定。而且对纤维混凝土来说，为了消除非荷载性的开裂，尤其是在为原有的硅酸盐水泥混凝土路面铺筑罩面的情况下，似乎也需要采取某种非粘结的形式。

在作为路面罩面层的应用上，玻璃纤维混凝土方面由于进行过的现场工作十分有限[16]，因而无法同钢纤维混凝土作出比较。但近来对前者的试验表明，203毫米（8英寸）厚的玻璃纤维混凝土板块，在重荷载条件下性能优于203毫米（8英寸）厚的钢筋板块[17]。图3中是1974年在明尼苏达州圣保罗市的一条市区道路上用滑模式铺路机铺筑76毫米（3英寸）厚的玻璃纤维混凝土罩面的施工情况。玻璃纤维混凝土的装卸和浇注特性，与钢纤维混凝土并无不同。

英国进行的路面罩面层试验（在M10号公路上），将由讨论会的其它与会者来介绍。

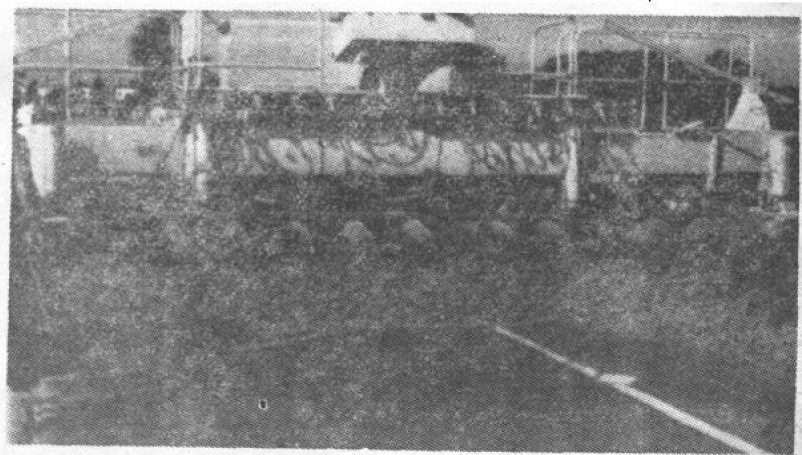


图3 1974年明苏尼达州圣保罗市内街道上用滑模法铺筑部分粘结式玻璃纤维混凝土罩面（76毫米[3英寸]厚）的施工情况。

新筑路面结构 以纤维混凝土作为新筑路面结构材料的意向受到了一定的限制。作为这方面一项仅有的工程，是1971年在俄