

纤维补强混凝土

(日) 小林一輔 著

邹崇富 译 广钟岩 校

中国铁道出版社

1985年·北京

纤维补强混凝土

(日) 小林一輔 著

邹崇富 译 广钟岩 校

中国铁道出版社

1985年·北京

纤维补强混凝土

(日) 小林一輔 著

邹崇富 译 广钟岩 校

中国铁道出版社出版

责任编辑 丁益民 封面设计 翟 达

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092毫米 $\frac{1}{2}$ 印张: 3.375 字数: 72千

1985年7月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—7,500册 定价: 0.65元

译 者 的 话

纤维补强混凝土，是近二十年来迅速发展起来的一种新型复合材料，它的用途很广，工程实例很多，效果很好，各国竞相开发。日本、美国、英国、苏联、联邦德国、瑞典等国家，经过理论研究和工程实践，都肯定了它的技术经济效益。它们普遍在各种道路工程、隧道工程、地下工程、工业与民用建筑、公路与铁路工程等方面取得了成功的经验。随着喷锚技术的发展，纤维补强混凝土，不仅在新建隧道和地下工程中得到了广泛的应用，而且在既有的混凝土或钢筋混凝土的裂损修复与强化中，也发挥了它的独特作用。

纤维补强混凝土的研究，始于1910年，由美国的Porter首创。1911年美国的Graham正式将钢纤维掺合到混凝土中，初步验证了它在补强方面的优越性。1940年前后，美、英、法、德等国，先后获取了一系列有关专利。在第二次世界大战中，日本曾把它用于抗爆结构。1963年美国学者 Romuldi 从理论上阐明了钢纤维的补强作用和机理，从而为钢纤维补强混凝土的进一步开发，奠定了理论基础，使它从小规模的探索试验阶段，跃进到大面积开发的新阶段。1966年美国混凝土学会（ACI）设置了钢纤维混凝土专门委员会（ACI-544）。该委员会于1977年在加拿大首都渥太华召开了有关钢纤维混凝土的首次国际会议。

我国工程界，对纤维补强混凝土的开发也十分重视。据了解，冶金部建筑科学研究院，正在进行用于矿山支护的试验，1976年上海市政工程研究所等单位，曾进行用于道路工

程的试验, 1980年南京建筑工程公司, 曾做过用于民用建筑的试验。铁路部门也正积极组织力量进行试验研究, 1982年襄渝线曾用于隧道衬砌裂损的加固, 1983年鸦宜支线曾用于风化岩石路堑边坡的防护, 均取得了良好的效果。目前, 衡广复线的新建隧道, 正在做一次支护的试验。

综上所述, 可以看出, 纤维补强混凝土, 已从试验研究阶段扩展到开发应用阶段, 试验研究与生产实践相互补充, 它有力地推动着纤维补强混凝土在各类建设工程中广泛应用和迅速发展。为使这一新型复合材料为我国的四化建设服务, 特译出这本小册子, 供从事这项工作的工程技术和科研人员参考。

本书译自日本山海堂1980年4月初版发行的“最新エンクリート技術選書”(9)。由于译者水平有限, 有误译之处请读者指正。

书中表4·7、4·8、5·4、5·5及〈资料〉未全文译出, 采用译者注的形式, 用文字归纳叙述附于书后。

译 者 1984年7月

目 录

1 章 绪 论	1
2 章 纤维补强混凝土	3
2.1 纤维补强混凝土的力学特性	3
2.2 纤维补强混凝土的定义和分类	4
3 章 纤维补强混凝土的历史	6
3.1 初期的研究	6
3.2 近年的开发研究	6
3.2.1 钢纤维补强混凝土	6
3.2.2 玻璃纤维补强混凝土	7
3.3 最近的开发研究	8
3.3.1 钢纤维补强混凝土开发研究的现状	8
3.3.2 玻璃纤维补强水泥开发研究的现状	10
3.3.3 其它纤维补强混凝土开发研究的现状	12
4 章 钢纤维补强混凝土	13
4.1 概 论	13
4.2 钢纤维	15
4.2.1 钢纤维的种类和制造	15
4.2.2 钢纤维的性质	17
4.2.3 钢纤维的货形	20
4.2.4 钢纤维表面包覆物	20
4.2.5 日本市场上出售的钢纤维	21
4.3 一般性质	22
4.3.1 概 要	22

4.3.2	抗裂性及变形能(韧性)	22
4.3.8	拉伸强度、弯曲强度、剪切强度和 压缩强度	25
4.3.4	动强度和耐疲劳性	31
4.3.5	弹性模量	31
4.3.6	耐久性	32
4.3.7	热传导率、耐热性	33
4.4	强化机理	34
4.4.1	概 要	34
4.4.2	纤维间隔说	35
4.4.3	混合法则的运用	37
4.4.4	钢纤维补强混凝土的强化法则	39
4.5	纤维的分散和配向	40
4.5.1	概 要	40
4.5.2	纤维的分布	42
4.5.3	纤维的配向	46
4.5.4	纤维的配向方法及其应用	50
4.6	配合比	55
4.6.1	概 要	55
4.6.2	根据拉伸强度或弯曲强度确定钢纤维补强 混凝土的配比	55
4.6.3	根据稠度决定钢纤维补强混凝土的配合比	57
4.6.4	混合剂的使用	63
4.7	施 工	65
4.7.1	概 要	65
4.7.2	拌 合	66
4.8	试验方法	68
4.8.1	概 要	68

4.8.2	试件的尺寸效果	69
4.8.3	试件的制作方法	69
4.8.4	弯曲强度试验	69
4.8.5	韧性试验	70
4.8.6	拉伸强度试验	70
4.8.7	和易性试验	71
4.8.8	其它试验方法	72
4.9	应用范围和施工实例	72
4.9.1	钢纤维补强混凝土的特性及其适用范围	72
4.9.2	用于道路路面	73
4.9.3	隧道方面的应用	76
4.9.4	其它方面的运用	79
5 章	玻璃纤维补强水泥	84
5.1	概 要	84
5.2	耐碱玻璃纤维	84
5.3	玻璃纤维补强水泥的制造方法	86
5.3.1	使用材料及配合比	86
5.3.2	制造方法	86
5.4	玻璃纤维补强水泥的特性	87
5.4.1	概 要	87
5.4.2	影响强度的各种主要因素	88
5.4.3	玻璃纤维补强水泥的应用范围和施工 实例	91
	译者注	93
	参考文献	98

1 章 绪 论

混凝土固有的弱点是：因有脆性而容易产生裂纹，一旦产生裂纹，就有丧失结构体机能的可能。距今一百五十年前，自从英国的 Aspdin 发明波特兰水泥以来，混凝土的质量虽以日新月异的趋势，不断提高；但对于混凝土的脆性，几乎未见应有的改善。的确，企图改善作为一种人造岩石的混凝土的脆性，是极其困难的事情，单凭以往的材料工学是近乎不可能解决的课题。

另一方面，近数年来，当设想改善某种材料的性质时，在过期待这种材料的固有技术业已无望的情况下，就利用同这种材料具有显著不同特性的其它系统的材料进行组合，以期取得预期性能的技术，即材料复合化的技术发展了起来。也就是说，利用两种或两种以上特性各异的材料进行复合，制造出一种具有崭新特性的材料，这种特性对原有材料来说是完全没有的，这就是所谓复合材料 (Composite material) 的制造技术。

纤维补强混凝土，由于在混凝土中均匀掺合短纤维状材料，从而增加了抗拉强度和抗裂强度，同时，还显著地提高了韧性，并使上述脆性问题得到大幅度地改善，它正是采用了复合化技术而得到的新的复合材料之一。

为强化像混凝土这样的脆性材料，而掺入纤维质材料这一有效的经验，是自古以来就知道的。例如，古代埃及就曾进行过在晒砖中掺入麦杆的尝试。以后，文艺复兴时代，意大利也曾使用过掺入麻纤维的粉饰。在日本，自古以来就在

土墙中拌合通称麻刀的麦秸，从这一观点看，纤维补强混凝土，其原形也是自古以来就存在着的，因此，现在也只不过是把它发展成为结构材料而已。

纤维补强混凝土，因使用的纤维质材料种类的不同，不仅是特性不同，而且从制造方法直到利用范围也不同。作为纤维质材料，其杨氏模量越大，约束裂纹的能力也越大，因此一般使用钢纤维或玻璃纤维。聚丙烯等合成纤维，杨氏模量小（低于混凝土材的 $1/10$ ，约为钢材的 $1/100$ ），所以使用它也不能指望提高约束裂纹的效果和抗拉强度；但因伸长率大，所以能有效地改善耐冲击的性能。

以上所述，已实用化的纤维补强混凝土，是采用钢纤维和玻璃纤维，而后者，如同后面所讲的那样，一般来说，就作为混凝土材料而论，它是在绝然不同的方向上发展的。因此，本书将把使用钢纤维的纤维补强混凝土作为中心内容。

2 章 纤维补强混凝土

2.1 纤维补强混凝土的力学特性

纤维补强混凝土的荷载——变形特性曲线，最清楚地表达了它的力学特性。图2.1所示，为钢纤维补强混凝土试件，受拉伸荷载作用时得到的荷载——变形曲线。由图可见， A 点为最初产生裂纹之点与其对应荷载值（初期裂纹荷载），比普通混凝土的荷载值（破坏荷载）显著增大。越过 A 点之后，在纤维与水泥硬化体界面间产生的粘结力破坏之前，荷载由纤维传递，一直达到最大荷载（ B 点）。此间，荷载—变形曲线呈现明显地非线性关系，达到最大荷载之后，钢纤维还能继续抵抗拉拔外力，使其破坏断裂要费很大的劲（参照图2.2）。这些就是纤维补强混凝土作为构造材料的基本特性。

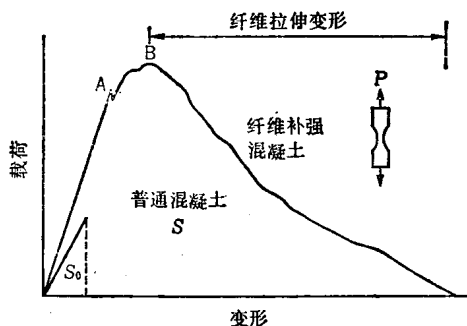


图2.1 钢纤维补强混凝土拉伸荷载—变形曲线

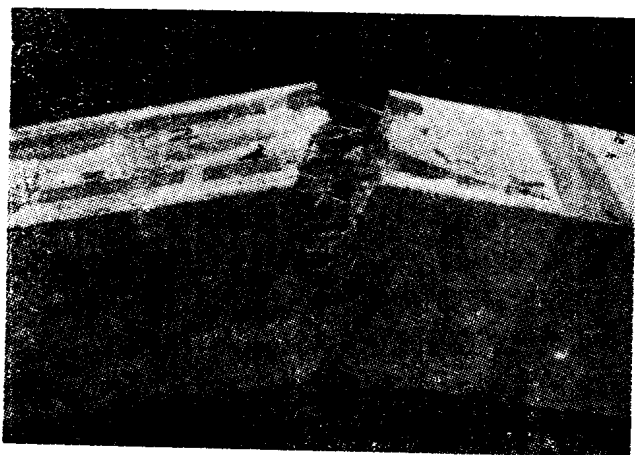


图2.2 钢纤维补强混凝土弯曲破坏后的状态

2.2 纤维补强混凝土的定义和分类

一般所说的纤维补强混凝土 (Fiber Reinforced Concrete), 是指在灰浆中或者是在混凝土中均匀分散短纤维而得到的一种材料。在这种情况下, 使用直径为 $0.2 \sim 0.6\text{mm}$ 左右的短纤维, 这类短纤维与混凝土的拌合, 主要是通过搅拌机来完成的。在这种意义上的纤维补强混凝土, 虽以钢纤维补强混凝土为典型, 但是, 其它像使用聚丙烯纤维之类的混凝土也属于这一类。

另外, 像玻璃纤维之类, 其直径为 $5 \sim 20\mu\text{m}$, 几乎接近水泥粒径, 使用这种纤维时, 所用的结合材料为水泥浆, 或者在其中掺入细砂来使用, 几乎不使用粒径较大的粗骨料。用这种素材制作而成的复合材料, 特意叫做纤维补强水泥 (Fiber Reinforced Cement), 以便与纤维补强混凝土相区别。纤维补强水泥的制造方法, 有时虽然也用机械方法混合成形, 但在一般情况下, 多参照使用类似强化纤维塑料

(FRP)的成形方法。也就是使用把水泥浆(或砂浆)和纤维直接喷射到模板内的喷射成形方法。纤维补强水泥的代表是玻璃纤维补强水泥(GFRC)。

纤维补强混凝土的制造或施工,一般可以采用和普通混凝土相同的方法,运用的范围很广,从3mm左右的薄断面到大型构造物都可采用。

纤维补强水泥的运用对象,虽只限于厚度在5~20mm间的比较薄的二次制品,但由于造型的自由度较大,而且又可以和其它材料复合起来使用等,所以运用的范围也比较广泛。

3 章 纤维补强混凝土的历史

3.1 初期的研究

关于纤维补强混凝土的早期文献，已在本世纪初问世。例如，1910年美国的Porter，曾提出把短纤维均匀地分散在混凝土中，用以作为强化构造材料的建议，它在结构上同今天的钢纤维补强混凝土大致相同。同样，1911年，美国的Graham，曾把钢纤维加到一般的钢筋混凝土中，得到了可以提高强度和稳定性的结论。此后，直到1940年，美、英、法、联邦德国等国家，公布了许多关于钢纤维补强混凝土方面的专利。

另外，日本在第二次世界大战中，由于军事上的需要，曾进行过有关钢纤维补强混凝土的研究。负责这项研究工作的净法寺博士，以8镀锌铁线（ $\phi 4.2\text{mm}$ ），切成8~10cm的长度当作钢纤维使用，采用人工投料方法，把钢纤维从圆形搅拌机的投料口适当地投入混凝土中，纤维掺入量虽仅在1%以下，而散布的并不均匀。当时把这种混凝土叫做“麻刀”混凝土。这种“麻刀”混凝土，实际上是供抗爆构造物的实验用的，对其抗爆性能虽同钢筋混凝土进行过分析比较，但当时尚未达到实用化的程度。

3.2 近年的开发研究

3.2.1 钢纤维补强混凝土

如节3.1所述，钢纤维补强混凝土的初期研究和专利，仅仅停留在研究者的设想阶段，没有为把钢纤维补强混凝土发

展成为一种新的构造材料提供契机。

钢纤维补强混凝土，实用化研究的开端，始于1963年美国 Romualdi (当时康奈尔工科大学的助教授) 等人发表的一系列研究，他们的研究成果阐明了钢纤维约束混凝土裂纹的机理。Romualdi 等人根据他们的研究成果，得出了钢纤维混凝土的裂纹强度，是由对拉伸应力起有效作用的钢纤维平均间隔所决定的结论，这个结论，后来成为美国 Battelle 公司 (Battelle Development Co) 所享有的两个美国专利的基础。

其中，于1969年批准的“混凝土和钢材组成的二相材料 (Two-Phase Concrete and steel material) No. 3429094”，奠定了今天关于钢纤维补强混凝土技术的基础，同时，对将来有关应用技术的种种组合，在专利申请范围方面，都有很重要的作用，此后凡以钢纤维补强混凝土作为开发研究目标的人员，这些都是必读的文献。

此外，以往在谋求钢纤维补强混凝土的实用化方面，所以感到有阻力，主要是因为钢纤维价格昂贵的缘故。但是，到前述 Battelle 公司的总公司——Battelle Memorial Institute 研制出一种划时代的钢纤维制造方法，即熔融拔出法 (Melt-Extraction) 之后，钢纤维补强混凝土的实用化从根本上已取得了进展。

3.2.2 玻璃纤维补强混凝土

通常，玻璃纤维遇到强碱时，就会劣化（即溶蚀），因此，为用于水泥混凝土，很有必要研究耐碱性的玻璃纤维。关于玻璃纤维作为水泥混凝土用的补强材料，苏联的 Biryukovich 是最早有组织地进行研究的开发者。他的一系列研究成果，发表在五十年代的后期。

这些研究并未达到实用化,但在六十年代后期,英国建筑研究所 (Building Research Establishment), 在具有划时代意义的厚板玻璃制造方法的研究方面,得到了英国知名的 Pilkington 公司 (Pilkington Brothers Ltd.) 的协助,研制成功了可供实用的耐碱玻璃纤维。大致在同一时期,美国陆军工兵部队 (Corps of Engineer, U.S. Army) 建筑技术研究所的 Williamson, 探索了对爆炸荷载的抵抗性能,为此,进行了一系列的应用研究。

3.3 最近的开发研究

3.3.1 钢纤维补强混凝土开发研究的现状

现在,钢纤维补强混凝土的开发研究,以日本、美国及英国三个国家的进展最为活跃,试验施工的例子也很多。除上述各国外,加拿大、意大利、澳大利亚、联邦德国、比利时、挪威等各国,也正在进行局部性的研究。尤其,日本在钢纤维的制造技术方面最为先进,处于领先地位。

(1) 美国的现状

关于钢纤维的制造,如前所述, Battelle 公司 (Battelle Development Co.), 完全拥有这种专利,目前,以美国钢铁业 (U.S. Steel) 为首的数家公司,生产制造钢纤维。据说,其年产量约为 5,000t, 每一吨的市场售价最高也不过 15 万 (日) 元左右。

美国钢纤维补强混凝土的开发研究,主要由 Battelle 公司和陆军工兵部队建筑技术研究所进行的。除此而外,伊利诺大学受联邦铁路局的委托,对使用盾构法施工的地下铁道工程,正在进行运用于衬砌的研究。1972 年以来,以公路和机场的路面工程为主体,进行了大量的试验施工,同时,运

用于有关喷射混凝土方面的研究，也开展得十分活跃。在二次制品方面，运用于防波砌块的例子，也是人所共知的。

(2) 英国的现状

钢纤维，由生产线材的National Standard Co.和Johnson and Nephew Ltd. 制造和出售。开发研究的中心是Sheffield大学的Swamy，不仅限于钢纤维补强混凝土的基础研究，而且结合构件的设计施工进行实用研究，其研究活动，正在广阔的范围继续深入，同时还担负试验施工的指导工作。作为实用的例子，以铺设在比斯陆机场内BOAC的高层停车场的预制地面板为最有名。

(3) 日本的现状

关于钢纤维的制造，在日本于1973年，首先由日本钢管株式会社用冷延薄钢板的切断方法生产商品钢纤维（商品名：テスサ），第二年，住友金属株式会社用同样的方法制造出异形钢纤维（商品名IS纤维）向市场出售。1977年，新日本制铁株式会社（商品名STIEBER）和川崎制铁株式会社（商品名：纤维クリート）步入了生产钢纤维的行列，进而神户制钢株式会社（商品名シンコ纤维也开始制造了。图3.1是上述各株式会社的钢纤维。

用机械方法生产钢纤维最引人注目的新的制造方法，有东大生产技术研究所中川助教授研制的切削纤维。因为，这种方法能够直接用比较便宜的钢块制造纤维，所以它在机械加工制造方法中，有可能成为制造最便宜钢纤维的方法，而且质量优良，现在这种切削纤维已开始生产。

钢纤维补强混凝土的基础研究以及应用研究，目前，在东大生产技术研究所开展的最活跃，此外，德岛大学、名古屋大学、鹿岛建设株式会社、清水建设株式会社、大林公路株式会社、日本钢管株式会社、住友金属工业株式会社、新