

专题科技情报资料

第 8004 号

内部资料

钢丝网水泥译文集

建筑材料工业部 苏州水泥制品研究所

一九八〇年六月

目 录

北美钢丝网水泥的发展近况	1
钢丝网水泥抗弯性能与分析	12
钢丝网水泥梁的疲劳性能和设计	27
受弯钢丝网水泥板的非弹性性能	40
钢丝网水泥船壳的抗冲击性	68
钢丝网水泥带肋楼板	78
房屋建筑使用的钢丝网水泥罩面构件	85
用于房屋和水上建筑物的组合构件	91
混凝土复合材料中细筋的选择准则	96
提高钢丝网水泥用砂浆强度的可能性	104

北美钢丝网水泥的发展近况

[美] G. M. Sabnis

虽然钢丝网水泥在许多国家中已经作为一种建筑材料应用于各个方面，但在西半球用它作为一种结构材料仅仅在最近才逐渐产生兴趣。在混凝土基材中配置连续的细钢筋比配置直径较大的粗钢筋能使钢丝网水泥具备若干优点，有相当长的时间在许多发展中国家内钢丝网水泥无需根据有力的分析已被认可。近来各地在钢丝网水泥方面进行的研究工作及其新颖的用途引起了在北美的大为研究。美国混凝土学会成立了一个钢丝网水泥委员会。该委员会1978年4月在加拿大的多伦多主办了一次讨论会。会议出版的论文集发表了钢丝网水泥技术发展水平报告，并附有大为参考文献。根据北美近来的经验，本文讨论的题目如下：

- (1) 钢丝网水泥的基本定义；
- (2) 实际使用的结构性能；
- (3) 最近研究的特殊性能；
- (4) 最近的应用；
- (5) 钢丝网水泥在土木工程中的发展趋势。

引 言

毫无疑问，“钢丝网水泥”材料并不是一种新的建筑材料。象许多其它材料一样，它在发展中国家的许多工程上已应用很长时间。如同工艺学的发展一样，工程师们对钢丝网水泥的材料科学发生了兴趣，这就导致在北美，将这一材料作为“建筑材料”来重新加以评价；并作为一项正式的研究，以便工程师们通过他们的设计可以将它用作新的用途。

(美国) 国家科学院1973年发表了国家科学院关于钢丝网水泥的第一篇报告，同时发表小组对其用途进行了推荐。更重要的是，1976年在曼谷的亚洲理工学院内设立了国际钢丝网水泥情报中心。在北美，美国混凝土学会于1974年设立了549钢丝网水泥委员会，其使命是：

“研究和报告关于钢丝网水泥及类似材料的工程性能，促进实践和实际应用，研究制定钢丝网水泥结构的标准和安全措施。”

上述这些事件在最近几年引起了各界人士和机构相当大的关注，以求改进这一“工艺上”行止不前但很有用的材料，探究它在工程应用中的趋势，本文试图从钢丝网水泥的定义开始到它在工程专业中的应用趋势，简要地报告北美有关钢丝网水泥的活动。

钢丝网水泥的定义

与其说“钢丝网水泥”材料曾长期应用在船舶建造和类似构筑物中，倒不如说用于结构工程上，但是，至今还没有对钢丝网水泥作出一个严格的工程定义。在美国混凝土学会 549 委员会内，关于钢丝网水泥的定义开展了广泛的讨论，认为应当把来自众多资料的各种有用的定义汇集在一起，归纳为工程专业可以认可的简明而准确的定义。这里提出的是委员会考虑的几个定义：

Bigg 详细讨论了定义问题。他指出，根据美国船舶局的规定，钢丝网水泥的定义是：

“一种薄的、高强度增强的混凝土壳体，其中钢筋广泛分散配置于整个混凝土，使材料在应力作用下近似于一种均质材料。材料的强度性能由试验大量样品测定……”

匆匆一看，上述定义似乎是一个可以认可的定义，但细细一推敲，加着重点的这些字就会引起许多问题。不同的人由此可能对钢丝网水泥有不同的解释。Bigg 接着讨论了对钢丝网水泥的几种见解，提出了几种不同的定义方法，如把它定义为一种复合材料。同时指出，如何采用纤维增强混凝土复合材料所用的工程术语来给钢丝网水泥下定义。

因为钢丝网水泥是由钢筋和砂浆（基材）两个部分组成，故 Брызгунов 按照钢筋的表面积对复合材料体积之比给它下定义。这样，钢丝网水泥就区别于普通的钢筋混凝土。他有几分武断地规定，凡比表面大于 $2 \text{ 厘米}^2/\text{厘米}^3$ 的为钢丝网水泥，它或多或少地表现为一种均质材料，小于 $2 \text{ 厘米}^2/\text{厘米}^3$ 的则被认为是钢筋

混凝土。

Shan在讨论一些结构材料的定义时，以类似Bezyskragob的方式给钢丝网水泥下了定义。他把钢丝网水泥称为一种用砂浆和类似钢筋的细直径连续网制成的复合材料。在这种情况下，由于钢丝网的尺寸较小，并且在每单位体和砂浆中的表面积较大，所以这种复合材料具有较高的抗裂能力。因此，这一比值可能比普通钢筋混凝土的大十倍。这将导致钢丝网水泥在受拉时，由于钢丝网的实际破坏和基材中产生较高的开裂强度而破坏。

作为一种复合材料，钢丝网水泥的某些特性可以摘要如下：

(1) 因为钢丝网（钢筋）的抗拉强度比基材（砂浆）高得多，基材的作用就是使钢丝网保持适当的位置，给予适当的防护，并通过足够的粘结来传递应力。

(2) 此复合材料的抗压强度通常是基材（砂浆）抗压强度的一个函数，而抗拉强度是钢丝网含率和其性能的一个函数。

(3) 由上述第(2)点得出，受拉钢丝网水泥的应力应变关系可以表示为组合弹性行为（在钢丝网断裂之前），或者根据网的屈服性能表示为某种非弹性行为。

(4) 由于这种复合材料的性能差不多是钢筋配置方向的函数，故此材料通常是各向异性的，可以通过理论分析加以论述。

以上讨论指出了在为钢丝网水泥作结构定义方面存在的多种多样的方法。显然，对于美国混凝土协会来说，首要的任务就是确定钢丝网水泥为一种结构材料，从而得出下述定义：

“钢丝网水泥是一种薄壁钢筋混凝土结构，在这种结构中坚硬性水泥通常由数层连续的、直径较小的网增强。网可以用金属材料或其它适当材料制做。”

在本文的其余部分中，这个定义将用于讨论钢丝网水泥的各种性能以及它在北美的发展。

作为建筑材料的性能

钢丝网水泥与其被视为建筑材料，不如说一般被看作房屋的建筑材料。然而，在本半球它的应用已扩展到多种结构方面，因此，目前可以获得有关其工程性能方面的少量科技情报资料。这并不是

说。这里打算采用不熟练的劳动使一种简单的材料变为要复杂的材料，而是要提供关于它的工程性能的补充情报，以使钢丝网水泥成为一种用途广的结构材料。

北美近来研究的主要性能包括：

- (1) 抗拉行为（或者抗弯强度）；
- (2) 开裂行为；
- (3) 抗冲击强度；
- (4) 抗疲劳强度；
- (5) 抗压强度。

因为钢丝网水泥基本上是钢筋和砂浆组合而成，所以它可以与钢筋混凝土相比。但是，从前面的讨论中知道，这两种材料存在非常明显的差别。结构性能也不同。这主要由于钢丝网水泥中的钢筋配置得较密，无论在北美，还是在其它地方，近年来的大多数研究都集中于这些性能，本文关于性能的讨论是根据美国混凝土协会 S49 委员会的报告和 Batson 等人提出的报告。

抗 拉 行 为

钢丝网水泥的抗拉行为同钢筋混凝土的抗拉行为有本质的差异。这主要是因为钢丝网水泥中的配筋比钢筋混凝土中更为致密和均匀。同时由于其直径较小，结果使比表面积大为提高，比表面积的提高又影响到钢丝网水泥的开裂行为（裂缝较细和裂缝数量较多）。

抗拉行为是以试件的开裂（初裂）、韧性和伸长，以及极限强度来表征的。Naaman 和 Shan 的研究指出，出现初裂时的应力值和裂缝间距是钢筋比表面积的函数，如图 1 所示。韧性和伸长是根据荷载—伸长曲线下面的面积测得，每单层钢筋提供的韧性是随着钢筋层数的增加而增加。钢丝网水泥试件的极限荷载与该方向上钢筋的承载能力相同；这是料想得到的，因为在砂浆开裂之后，荷载是由配筋本身承载。

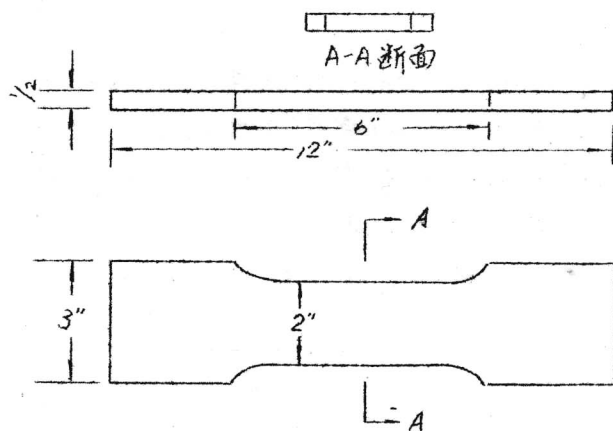


图 1(a) 抗扭试件

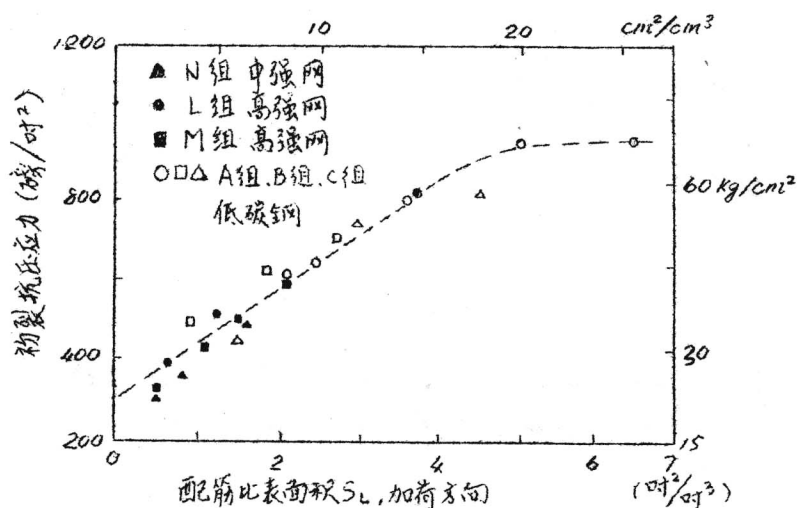


图 1(b) 初裂应力与配筋比表面的关系

抗扭强度 (弯曲性能)

在某些应用中，钢丝网水泥可能经受弯曲应力的作用，在这种情况下，首先必须考虑可以预测钢丝网水泥抗弯行为的方式方法。毋需说，钢丝网水泥梁与普通钢筋混凝土梁（通常在下部配筋）相比，前者由于配几层钢丝网，因此趋向于超配筋。所以，保证钢丝网水泥的确实超配筋混凝土梁那样不断裂是很重要的。Johnston,

Mowat, Logan, Shan, Balaguru, 及 Pama 等都报导了有关的分析和试验数据。

值得注意的是, 钢丝网水泥梁的抗弯强度能够用普通分析钢筋混凝土的方法来计称。图2所示的荷载挠度关系清楚地指明这一点。图2还表明, 增加钢筋的数量并不显著增加梁的开裂弯矩, 同时表明, 开裂行为不同于前面讨论的(图1b)抗拉开裂行为。图2还指出, 没有在超配筋的钢筋混凝土梁中达到的那种突然的断裂。

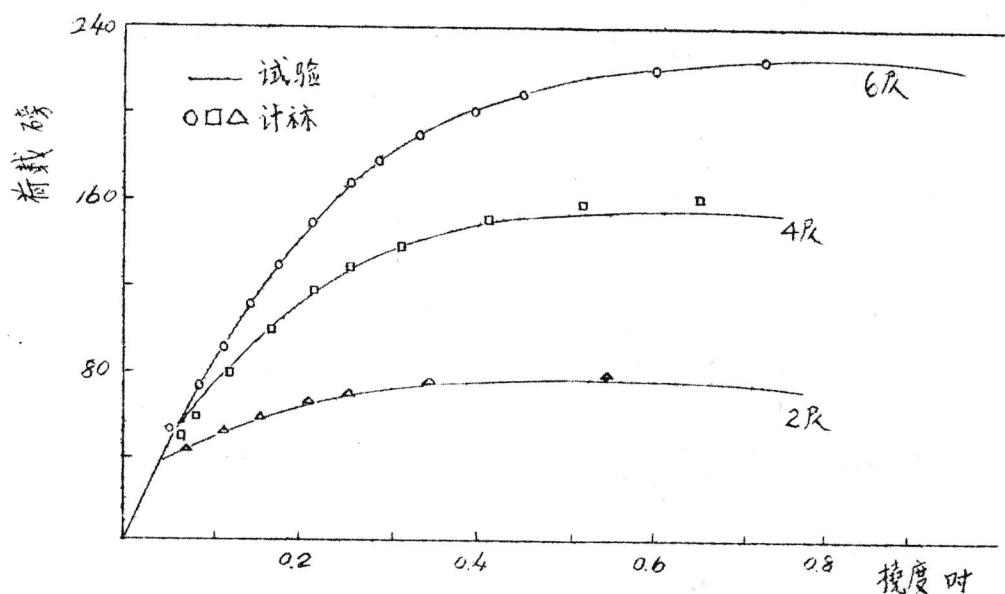


图2 钢丝网水泥试件的试验荷载挠度曲线
与分析荷载挠度曲线的比较

抗压强度

与上述其它强度相似, 砂浆的高抗压强度主要有助于钢丝网水泥复合物的抗压强度, 虽然配筋可能对抗压强度有某些影响, 但美国混凝土协会549委员会的最近研究报告指出, 有些类型的配筋具有有利的作用。例如, 采用焊接网将会增加抗压强度, 因为焊接的横向钢丝可以保证侧向约束, 而采用六角形网或网眼钢板, 由于纵向劈裂则可能降低复合物的抗压强度。图3所示为用网眼钢板配筋的柱和用焊接钢丝网配筋的柱两者抗压强度和含钢量之间的观测关系, 它将表明, 横向钢筋数量较多的矩形网一般比增加纵向钢筋对

于提高抗压强度在经济上(通过产生三轴应力条件)更加有效。

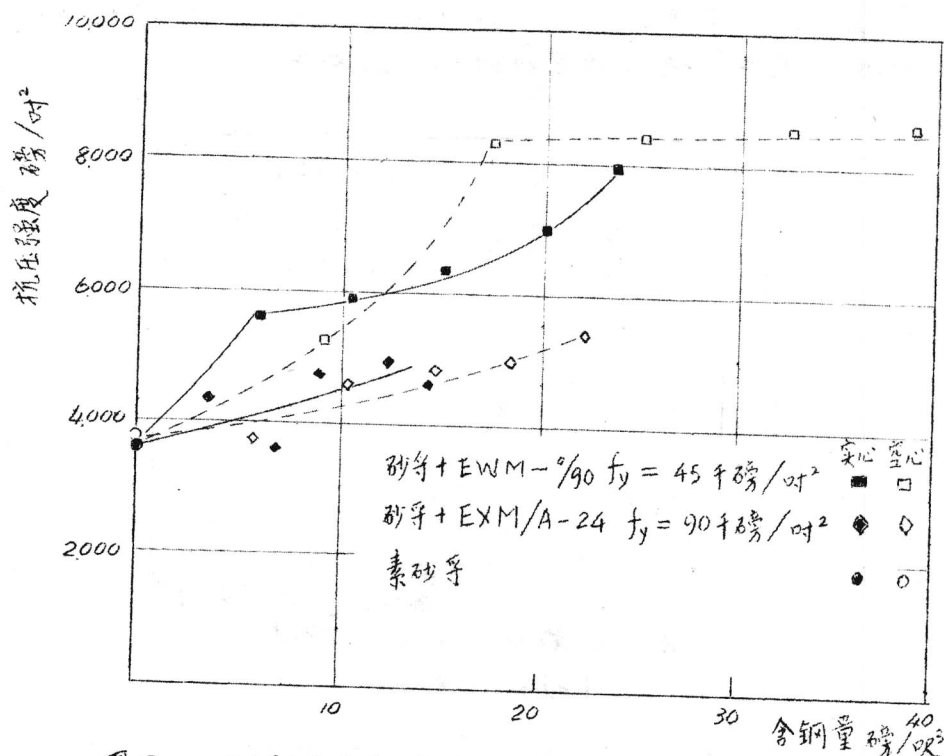


图3 两眼钢板配筋柱和焊接钢丝网配筋柱的抗压强度和含钢量之间的关系

抗冲击和疲劳强度

抗冲击和抗疲劳强度可看作特殊的性能。在有关海洋建筑物的应用中，抗冲击强度是一个有用的参数。在钢丝网水泥用于经受桥梁那种荷载的结构范围内，抗疲劳强度可以起重要的作用。这里提出的是近来研究的结果。

Shan 和 Key 采用专门设计的冲击试验机试验了9英寸见方和0.5英寸厚的钢丝网水泥板。这几种板的配筋具有不同的抗拉强度和不同层数，从而值它们具有不同的比表面。冲击强度是用从等高度跌落的摆锤敲打试件时，根据试件吸收的能量为确定。损坏是根据经过吸收一定能量(600磅英寸)的损坏表面的相对流水面测定的；它表明，钢丝网比表面越大，强度越高，则冲击荷载造成的损坏就越小。这表示在图4中。这些观察结果与上述抗拉试验中的观察结

果也是一致的。

Balaguru 等最近完成了一项关于采用方形编织网和焊接网配筋的钢丝网水泥梁的挠曲疲劳性能的广泛研究。

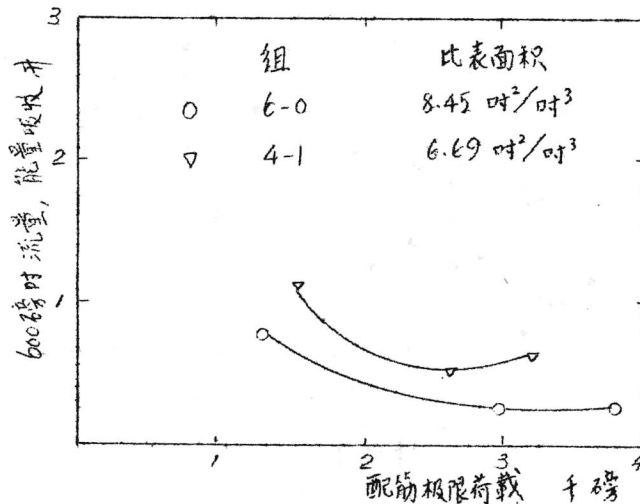


图4 配筋的比表面积和韧性对冲击破坏的影响

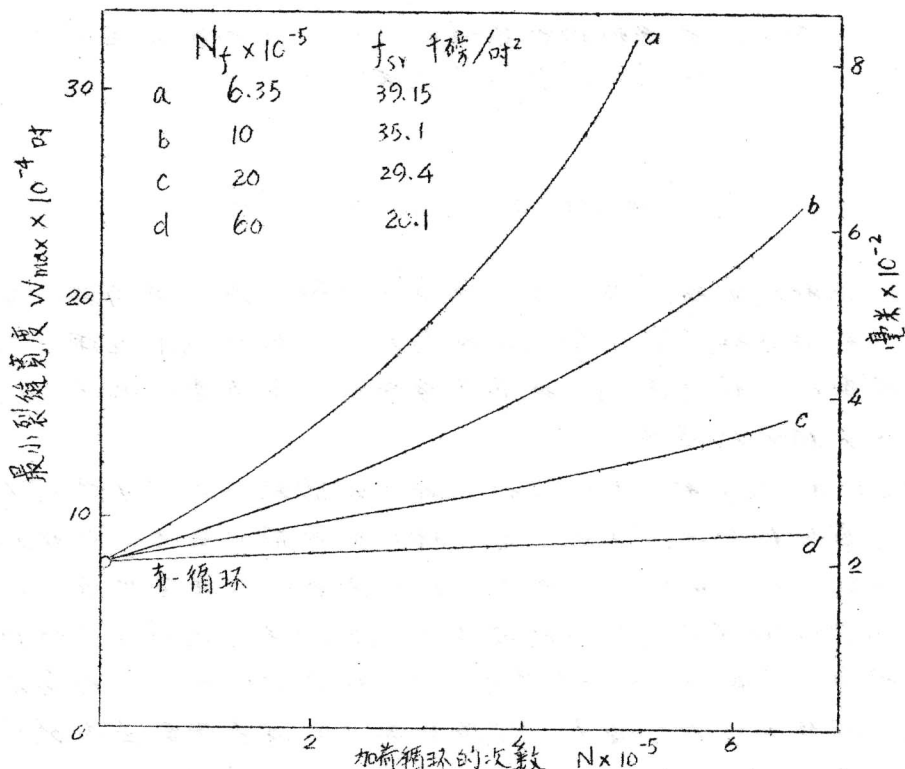


图5 在循环荷载下挠曲梁中典型裂缝宽度的增长

根据对最外层钢丝网中应力范围 f_{sr} 和疲劳循环数 N_f 之间观测数据进行的回归分析，得出下列关系：

$$f_{sr} = 152.3 - 19.5 \log_{10} N_f$$

f_{sr} 的单位为千磅/吋²

如果用国际单位表示，同样的方程式为：

$$f_{sr} = 105.1 - 134.4 \log_{10} N_f$$

式中 f_{sr} 的单位为兆牛顿/米²。

一般可以观察到，同样荷载产生的挠度和裂缝宽度，根据荷载史，随着荷载循环次数增加而增加。如图5所示，当 N_f 数值低时，这一效应特别显著。

保水（或液体）能力

需要指出的另一个特殊性能，是考虑钢丝网水泥用作液体储贮罐时的保水能力。重要的一点是，钢丝网水泥的裂缝宽度微小，以致渗漏极其有限。Shan 和 Naaman 的研究指出，在钢筋应力相同时，钢丝网水泥的裂缝宽度比钢筋混凝土中的小。根据裂缝大小的次序，选择钢丝网水泥用作蓄水结构材料更好。为了研究水压影响，试验是在加内水压的圆柱体容器中进行的，图6所示的结果清楚表明，钢丝网水泥的裂缝宽度比美国混凝土协会350委员会、卫生工程组织特别着重强调的0.004吋（0.01毫米）小得多。此外，由于配筋的布置得好，配筋网越是细密，则容器的性能在极限荷载值下越加良好，那种损坏压力也越加缓和，并且，象在其它材料制做的罐中一样，没有初裂出现。Naaman 和 Sabins 提出了几个关于采用钢丝网水泥制做水罐的建议。

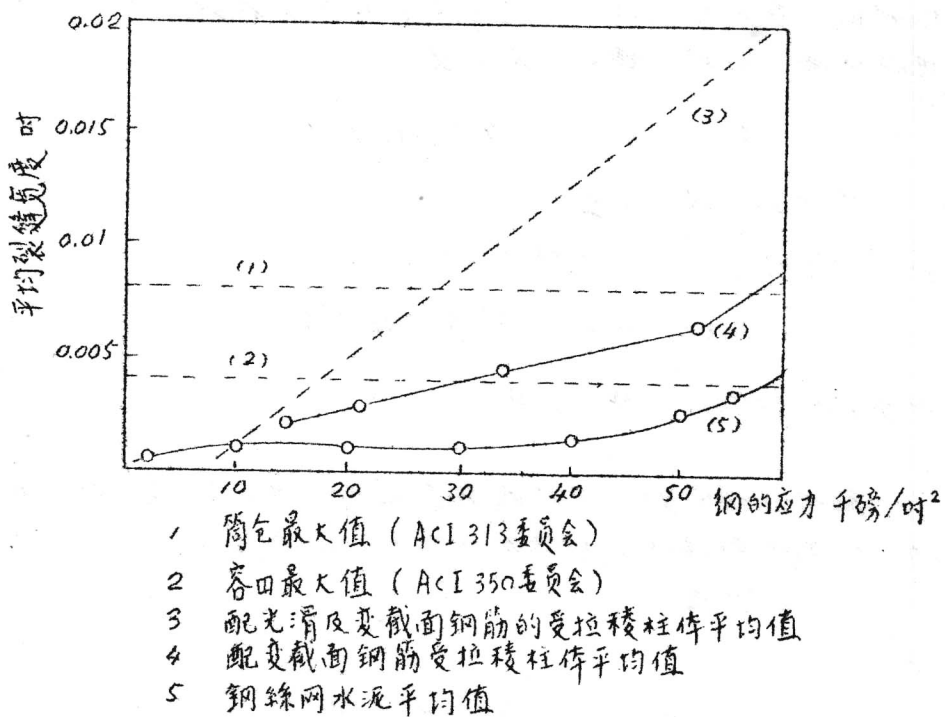


图6

钢丝网水泥性能的改进

近来已经做了不少努力来改进钢丝网水泥的性能。值得注意的是 Atcheson 和 Alexander 在他们的研究中提到的改进，即采用纤维增强钢丝网水泥。纤维混凝土也已被发现具有优良的结构性能。上述作者证明，把这两种类型的混凝土结合起来，采用较大口径的钢网和纤维可以制得性能等同或更好的纤维钢丝网水泥 (Fibrous ferrocement)，从而改变钢丝网水泥的钢网配置紧密的限制。

改进钢丝网水泥性能还有另一种可能性，例如采用聚合技术。它已被证明大大地改进了钢筋混凝土的性能。随着关于经济应用聚合工艺的进展，希望会有更多的关于促进它用于钢丝网水泥中的研究报告。

最近的应用

无论在发展中国家或在发达国家，钢丝网水泥在全世界已经有了许多应用。采用钢丝网条作为其本身的硬模板这一特性，是钢丝网水泥用于造型复杂的结构中的一个重大优点。通常，这种结构的成型成本是高出数倍的，钢丝网水泥的应用不仅有利于港口建筑，而且也有利于建筑艺术结构。钢丝网水泥的最近应用在许多文献中都有论述。应用范围从墨西哥的廉价房屋到加萨大的渔船以及加萨大魁北克的预制墙壁屋顶。Naaman和Shan也提出许多其它的潜在用途。钢丝网水泥的应用有另一些可能性，在海洋结构中如用作浮标、深潜器以及运载液化气的船只。

结 论

本述评提出了钢丝网水泥在北美的某些最近发展概况，这一材料的优良性能将打开通往在工业发达国家中获得广泛应用的道路。对钢丝网水泥许多性能的最近分析评价和试验测定使它完全有资格象其它现今使用的结构材料一样用作结构材料。

(参考文献略)

陈德明译自《Journal of Ferrocement》,
1979, Vol. 9, No. 1 许如流校

钢丝网水泥抗弯性能与分析

P. N 巴拉格鲁¹ A. E 纳爱² S. P. 沙³

前 言

最近, 通过大弯试验, 成功地估计了钢丝网水泥梁的极限抗弯强度。然而, 对这些梁受弯时的挠度、裂缝分布及裂缝宽度, 却没有做过详细的定量估计。钢丝网水泥构件的断面较薄, 故可用较大的挠度作为重要的设计极限。钢丝网水泥建筑物的用途包括屋顶、筒仓和油、气罐。对于这类用途来说, 裂缝宽度是一个临界参数。要确定合理的设计方法就必须对其进行估计, 虽然对钢筋混凝土梁中钢筋应力和裂缝宽度之间的关系已经作过研究, 但这并不适用于钢丝网水泥, 因为钢丝网水泥的裂缝细。

这次试验是为了估计钢丝网水泥构件受弯时的挠度和裂缝宽度。为此: (1) 对不同网型和不同配网率的钢丝网水泥梁进行了单调增弯试验 (特别强调要精确测量其挠度及裂缝宽度); (2) 求出砂浆抗压应力—应变曲线 (包括下降部分) 和网的抗拉应力—应变曲线; (3) 研究估计钢丝网水泥梁 (假定组成这些梁的材料特性是已知的) 弯矩—荷载曲线及荷载—挠度曲线的数学模型; (4) 提出裂缝宽度和钢筋应力之间的经验关系及分析关系。本文对试验结果进行了总结。

试验程序及结果

钢丝网水泥抗弯试验

钢丝网水泥梁的尺寸均为 18 吋 (457 毫米) 长; 5 吋 (130 毫米) 宽; 1/2 吋 (13 毫米) 厚。用美国材料试验协会 (ASTA) 的 III 类水泥和通过 16 号筛的河砂搅拌成砂浆, 水灰比 (按重量) 灰砂比分别为 0.55, 2.0。用三种方格钢丝网作配筋: 1/2 焊接网、1/2 编织网和 1/4 编

1. 美国新泽西州鲁特格斯大学土木工程系助理教授。
2. 美国伊利诺斯大学 (芝加哥) 材料工程系副教授。
3. 美国伊利诺斯大学材料工程系教授。

丝网 ($1/2$, $1/4$ 为网孔每一方向的尺寸) 以吋为单位。每种网浇三块试件, 试件中各配二、四、六层网。 $1/2$ 吋的钢丝直径为 0.042 吋 (1.07 毫米); $1/4$ 吋的为 0.025 吋 (0.635 毫米)。钢丝网是由滚扎机切割的, 因此网的长度与滚扎机的宽度相同。试件在立式有机玻璃模型中成型, 以确保试件二个表面光滑, 并能更好地控制网层的位置。试件湿养护七天后, 试验前在 $(21^{\circ}\text{C}) 70^{\circ}\text{F}$, 相对湿度 50% 的试验室中放置四天。

然后在冲程率为 0.1 吋 (2.5 毫米) / 秒的 MTS 大学的试验机上进行试验。试件上设四个加载点, 其间距为 15 吋 (381 毫米) 并采用 5 吋 (130 毫米) 的固定矩形 (见图 1 略)。支架系统是经过谨慎设计的, 为的是使试件免受轴向力。轴向力一般在达到极限荷载时出现, 因为这时挠度与厚度的数量级相异。

试验时, $x-y$ 函数记录仪上绘出各加载点上的荷载和挠度曲线。荷载读数精确到 2.5 磅 (11.3 牛顿), 挠度精确到 0.01 吋 (0.25 毫米)。荷载应加至试件破坏或达到其最大挠度 1 吋 (25 毫米) 为止 (取二者中先发生者)。每组试件中有一个试件连续加载直至破坏; 另两个在挠度值达到选定值 (约 5) 吋, 停止加载, 测出裂缝宽度。(裂缝一旦形成就沿着试件整个宽度延伸) 沿固定矩形区的两条纵线测量裂缝宽度, 故相当于每一挠度每条裂缝都可测出两个宽度尺寸。用精确度为 50 微吋 (0.00127 毫米) 装有测微计的内置明显微镜 (放大率为 50 倍) 观察裂缝。

用波威尔 (Powell) 方法取每组三个试件的荷载—挠度平均值。根据该方法用三阶仿样函数将实验数据作如下的拟合。选择大量的挠度观测值, 计算每个挠度值的荷载平均值和标准偏差; 然后用三阶仿样函数进行拟合得出平均曲线。以标准偏差的倒数作为相等于每一挠度观测值的荷载平均实验值的权。用波威尔法拟合本试验的数据时, 其观测误差大大小于用 10 阶以上的简单多项式函数得出观测误差。误差在这里被定义为观测值和拟合方程得出的值之间差值的平方和的开方。典型结果见图 2。图 3 表示配有 $1/2$ 吋网孔的各组试件在最大荷载时的平均试验曲线, 其中有个别点偏离后面介绍的分析模式。九组试件的试验结果列于表 1-2。结果表明:

1. 荷载—挠度曲线有三个明显阶段: (a) 砂浆开裂前 (最陡斜线); (b) 砂浆初裂后但在钢筋屈服前; (c) 钢丝网屈服后, 曲线

几乎平行于扭转轴(图3)。

2. 荷载—扭转曲线较陡的线性部分的终点相当于砂浆的初裂位置。在这点以前没有可见裂缝, 而刚达到该荷载后往往就立即出现裂缝。在这项研究中配不同网型和不同配网率的试件其砂浆的初裂荷载基本相同(图3、表2)。这与以前得出的开裂荷载随配网率的增加而增大的结果明显不同。虽然 Logan, D 和 Shan, S.P 曾在文献中提出将开裂荷载定义为产生 0.003 吋(0.076 毫米)宽度裂缝时的荷载, 可是本研究中采用的裂缝宽度标准为 0.00005 吋(0.00127 毫米)。

3. $1/2$ 编织网和 $1/2$ 焊接网试件裂缝的总数和横向钢丝数相等, 并不受所配钢丝网层数的影响(表1)。一般来说一达到初裂荷载后立即就会出现上述数量的裂缝, 超过此荷载后裂缝数仍保持不变。除大网试件逼近极限荷载时的开裂情况外, $1/2$ 编织网试件中未发现上述现象。总之, 无论裂缝什么时候出现其位置总是沿着最外层网的某一横向钢丝方向的。

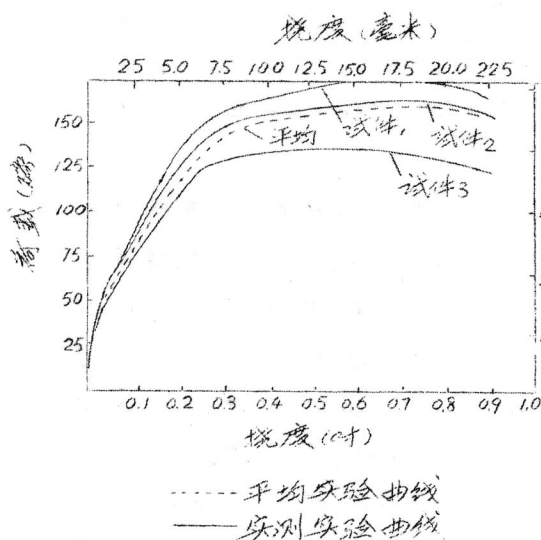


图2 荷载—扭转曲线
(四层 $1/2$ 焊接网)

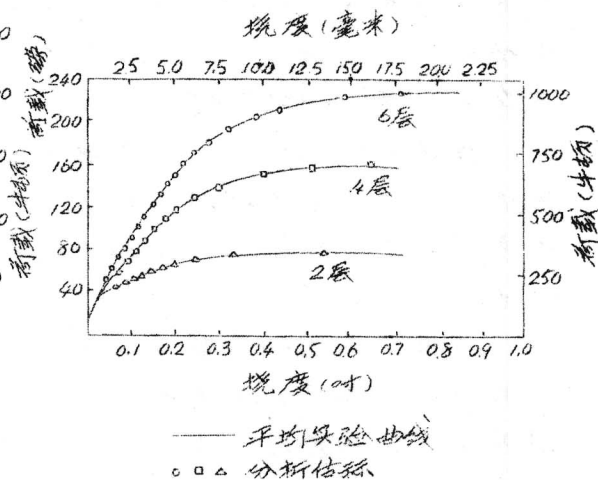


图3 分析和实验荷载—
扭转曲线比较 ($1/2$
焊接网)

表1 钢丝网水泥梁受弯时测得的裂缝分布和宽度

网 型	二			四			四			四			六			八		
	荷载 (磅)	裂缝 数	裂缝宽度 $\times 10^{-4}$ 吋		荷载 (磅)	裂缝 数	裂缝 数	裂缝宽度 $\times 10^{-4}$ 吋		荷载 (磅)	裂缝 数	裂缝 数	裂缝宽度 $\times 10^{-4}$ 吋		荷载 (磅)	裂缝 数	裂缝宽度 $\times 10^{-4}$ 吋	
			平均值	标准 偏差				平均值	标准 偏差				平均值	标准 偏差			平均值	标准 偏差
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	
1/2 焊接	37.5	5	5.2	5.47	5.75	50	4	2.0	0	2.0	60	10	7.8	3.62	8.0			
	50.0	9	9.68	4.45	14.75	75	10	4.6	2.15	6.25	120	10	11.1	2.0	13.25			
	67.5	9	14.2	4.50	18.5	100	10	8.4	1.49	10.5	180	10	21.4	2.39	26.0			
1/2 编织	57.5	10	11.9	1.14	13.0	50	9	7.0	1.77	8.25	50	10	8.0	0.83	9.0			
	67.5	10	17.2	1.47	19.0	75	10	12.4	0.60	13.0	100	10	13.2	1.97	14.25			
	80.0	10	20.5	1.76	24.0	100	10	14.9	0.98	16.75	150	10	18.9	3.2	20.0			
1/4 编织						125	10	17.95	1.20	18.5	200	10	26.7	5.95	31.5			
	50.0	10	6.5	1.67	8.5	150	10	20.7	0.89	22.5	50	9	5.1	1.94	6.0			
	62.5	10	10.6	1.84	13.0	67.5	10	8.77	2.39	11.75	87.5	18	7.9	3.70	10.5			
						75	12	11.3	2.22	15.0	125	19	13.7	3.63	17.25			
						87.5	13	12.6	2.87	17.75								
						100	14	17.8	4.29	28.5								

注：裂缝数系在5吋固定弯矩区测得的裂缝数，1吋=25.4毫米；1磅=4.45牛顿