

報 告

[1117] アラミド繊維による組紐状棒材の基本的特性

正会員 ○岡本 直 (三井建設 技術研究所)

正会員 田村 富雄 (三井建設 技術研究所)

松原 澄行 (三井建設 技術研究所)

正会員 谷垣 正治 (三井建設 技術研究所)

1. はじめに

最近、軽量かつ高強度で耐食性にも優れているなど、様々な特徴を有した新しい繊維材料が各分野で活用されてきている。筆者らは、この様な繊維を建築および土木分野へ適用するために種々検討してきた。本報告は、その1つとしてアラミド繊維を組紐状の棒材に加工したものを、コンクリート補強用材料として用いるために行った各種実験についてまとめたものである。ここでは、コンクリート補強用材料として具備すべき性能のうち、引張特性、疲労特性、付着特性、耐久性等の基本的な特性を把握するために行った試験について報告する。

2. 組紐状棒材の概要

アラミド繊維(ケブラー49使用)の組紐状棒材を写真-1に、使用する材料の基本物性を表-1に示す。製造方法は、直径 12μ の繊維を6000デニール(1デニール=1g/9000m)束ねたボビンを、必要引張強さに応じた本数用いて組紐機により編組し、エポキシ樹脂を含浸する。樹脂含浸された組紐は、そのまま加熱硬化するものと、表面に砂を接着した後、加熱硬化するものがある。

表-2に各種試験に用いた棒材の基本物性を示す。表中の平均直径及び断面積は、棒材の体積より換算したものであり、理論引張強さは、各棒材に使用した繊維断面に、表-1に示す引張強度を乗じて算定したもので、使用した繊維が100%強度を発揮した時の値である。

3. 引張特性

3.1 試験方法

棒材の引張特性を把握するために、図-1に示す方法により引張試験を行った。試験は棒材をあらかじめ鋼製パイプ中に接着剤で固定し、このパイプをアムスラーのチャックで引っ張る方法である。伸び測定は、検長50mmの伸び計およびひずみゲージを併用して行った。伸び計による測定は理論引張強さの1/2までとした。

3.2 試験結果

表-3に各棒材の引張試験結果の平均値を、図-2に引張強度と伸び率の関係の一例を、図-3に棒材の強度有効率を示す。引張強度の平均値は使用繊維量で換算した理論強度に対して78%

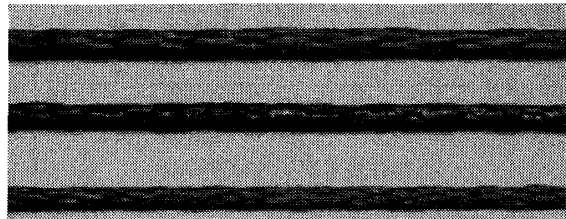


写真-1 組紐状棒材

表-1 使用材料の基本物性

材料	特性	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	伸び率 (%)
アラミド繊維		28,000	1.33×10^6	2.4
エポキシ樹脂		8,000	1.45×10^4	5.5

表-2 材料の基本物性

棒 材	繊維本数 (X6000デニール)	理 論 引 張 強 さ (kgf)	平均直径 (mm)	断 面 積 (mm ²)
K16	16	2,100	4.0	13
K32	32	4,200	6.0	25
K64	64	8,400	8.0	50
K96	96	12,600	10.0	75
K128	128	16,800	12.0	100
K192	192	25,200	14.0	150

～88%の範囲であり、棒材が太くなるにしたがいやや有効率が低下している傾向が見られる。また、引張強度のバラツキに関して、サンプル数の多いK64で見ると、平均値7.15tonfに対して6.4tonf～7.9tonfの範囲にあり、 σ は0.28tonfであった。表-3に示す基準引張強さは、バラツキ等考慮して、下限有効率として一律76%とした値である。ヤング率に関しては、各棒材間での差はあまり見られず、 $0.612 \sim 0.666 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 程度であり、使用繊維のみの断面積で求めると $1.02 \sim 1.12 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 程度となり、アラミド繊維そのものの77～84%程度の値となっている。

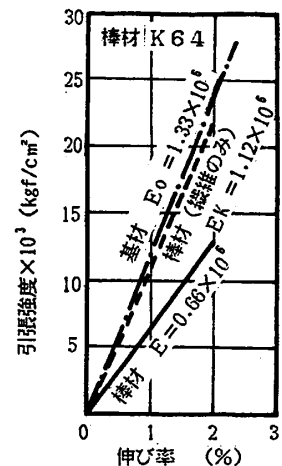
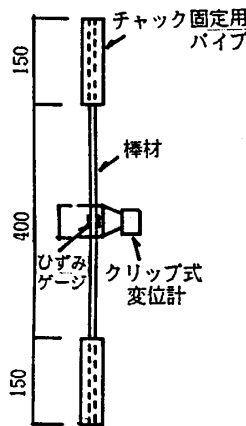


図-1 引張試験方法 図-2 引張強度と伸び率の関係

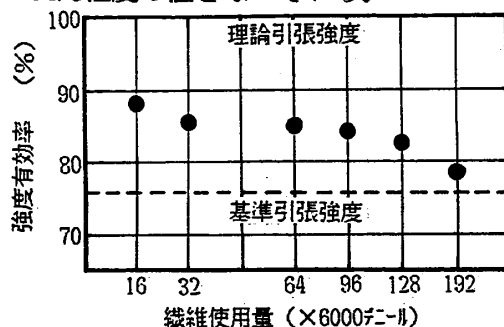


図-3 強度有効率

表-3 引張試験結果

棒 材	平均引張強さ(kgf)	ヤング率 $\times 10^6 (\text{kgf/cm}^2)$	釘ノリ	伸び率 (%)	引加数 (本)	基準引張強さ(kgf)
K16	1,850	0.612	—	2.33	73	1,600
K32	3,560	0.642	—	2.22	64	3,200
K64	7,150	0.662	0.616	2.16	118	6,400
K96	10,650	0.666	—	2.13	5	9,600
K128	13,850	0.650	0.619	2.13	39	12,800
K192	19,580	0.646	—	2.02	14	19,200

4. 引張疲労特性

4.1 試験方法

K64棒材について疲労特性を把握した。試験は10tonfの電気油圧サーボ式の疲労試験機を用いて、部分片振疲労試験とした。試験条件としては、下限荷重を実破断荷重(Pu)の50%(3290kgf)一定として応力幅を変え、200万回の繰返しでも破断しない疲労限を求めた。なお、棒材の固定は樹脂注入型定着具を用いて行った。

4.2 試験結果

表-4に疲労試験結果を示す。表中の破断回数に関して、>はその回数まで行っても破断せずに試験を終了したことを意味している。棒材4本のうち応力幅が38.2 kgf/mm²までは200万回を越えても破断しなかった。その時の荷重5200kgfは実破断荷重(Pu)に対して約80%の値であった。

表-4 引張疲労試験結果

試験 No.	下 限		上 限		応力幅 (kgf/mm ²)	破断までの回数 $\times 10^3$	備 考
	荷 重 (kgf)	応 力 (kgf/mm ²)	荷 重 (kgf)	応 力 (kgf/mm ²)			
1	3,290	65.8	4,790	95.8	30.3	>2,090	破断せず
2	3,290	65.8	5,050	101.0	35.2	>3,557	破断せず
3	3,290	65.8	5,200	104.0	38.2	>2,063	破断せず
4	3,290	65.8	5,550	111.0	45.2	306	母材部で破断

5. リラクセーション特性

5.1 試験方法

K64の棒材についてリラクセーション試験を行った。試験は自動平衡型の20tonfリラクセーション試験機を使用した。試験条件としては、初期荷重を実破断荷重(6580kgf)の50%(0.5Pu) 60%(0.6Pu), 70%(0.7Pu)の3種類とし、比較のために通常のP C鋼材についても行った。また試験時の温度は20℃一定とした。

5.2 試験結果

図-4にリラクセーション曲線を示す。K64のリラクセーション値は10時間で約4%,100時間で約10%前後の値を示しており、P C鋼材に比べて10時間で3.5倍、100時間で2~2.5倍程度であった。また、P C鋼材では初期荷重が高いほどリラクセーション値も大きくなるが今回のK64の結果では、初期荷重が0.5Puと0.7Puのものとは同程度の値で、0.6Puのものが0.7Puのものよりやや大きな値となっている。

これは材料のバラツキ等によるものと考えられ、初期荷重による顕著な傾向は見られなかった。

6. クリープ特性

6.1 試験方法

K64, K128, K192の棒材についてクリープ試験を行った。表-5に試験の構成を示す。試験はK64については、基準引張強さ(Pu)の50%(0.5Pu)および60%(0.6Pu), K128については60%, K192については50%の4種類とし、油圧ジャッキにより荷重を一定に保つ方法とした。また伸び量の測定には、棒材にひずみゲージを貼付けておこなった。試験時の温度は22~24℃の範囲である。荷重の導入は、目標荷重を5段階に分けて行い緊張開始から緊張終了までの時間は15分程度である。

6.2 試験結果

図-5に緊張終了時に対する伸びの増加率を示す。K64の緊張終了時から約10時間後の伸び増加率は5%~6%,100時間後で7%~8%,1000時間後で9.5%~10%であり、10時間までの伸び量に比べて、それ以後の伸び量はかなり小さくなっている。また、0.5PUと0.6PUを比較すると、緊張力による差はあまり見られず、リラクセーション特性とも同様な結果が得られた。棒材の太さによるクリープ量に関しては、太くなるとやや少ない傾向は見られるが、さらに実験を重ねる必要がある。

7. 付着特性

7.1 試験方法

棒材とコンクリートとの付着性能を確認するために付着試験を行った。試験は表-6に示すように、棒材としてはK64, K96, K128, K192で、それぞれ表面に砂を付着したもの(棒材名にSが付いたもの)としないものの2種類とし、付着長さは6dとした。K128については付着長さの影響を把握するために、付着長さ8dについても行った。また、比較のためにD10およびD16の鉄筋についても同様な試験を行った。コンクリート強度に関しては、圧縮強度が220kgf/cm²,

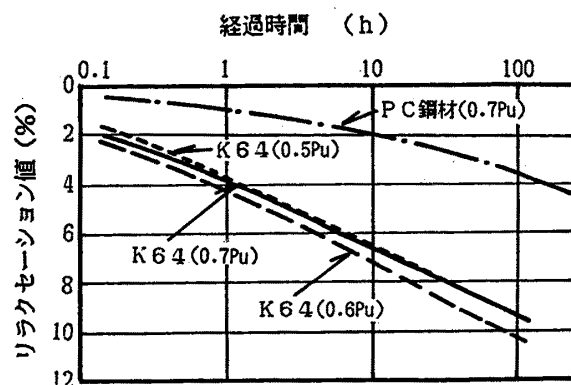


図-4 リラクセーション曲線

表-5 クリープ試験の構成

試験体名	使用材料	緊張荷重 P (kgf)	基準引張強さ Pu (kgf)	P/Pu
K64-06	K64	3,840	6,400	0.6
K64-05	K64	3,200	6,400	0.5
K128-06	K128	7,680	12,800	0.6
K192-05	K192	9,600	19,200	0.5

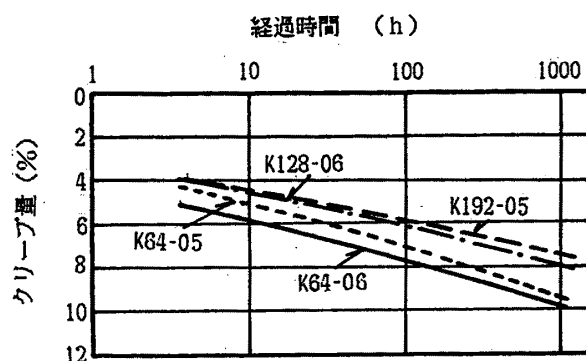


図-5 クリープ試験結果

330kgf/cm², 400kgf/cm², 500kgf/cm², 540 kgf/cm²の5種類である。試験方法は図-6に示すように、棒材を一辺150mmの立方体のコンクリートの中に埋込み、他端は鋼製パイプに挿入しエポキシ樹脂を充填して固定した。なお、試験付着長さ以外は軟質ビニールパイプにより棒材とコンクリートとの縁を切っている。加力はアムスラー試験機を用い鋼製プレートと鋼製パイプを押し開く方法で行い、コンクリートブロックに固定した変位計で棒材自由端のめり込み量を測定した。

7.2 試験結果

図-7に0.025mm時の、図-8に0.25mm時のそれぞれ付着応力度とコンクリート強度との関係を、棒材3本の平均値で示す。また、図-9に付着応力度と端部めり込み量の関係の一例を示す。端部めり込み量の0.025mm時の付着応力度を比較すると、表面に砂を接着した棒材に関しては、異形鉄筋とほぼ同程度で、50~80 kgf/cm²の高い値を示している。また、表面に砂の接着していないものは、異形鉄筋を下回った付着応力度であるが、個々の棒材で見ると高いものと低いものととの差が大きく、高いものではD10以上の付着強度を示しているものがあつた。この原因は、棒材を収束している樹脂の表面に付着している量にバラツキがあり、組紐本来の凹凸が十分に発揮されなかったためと考えられ、さらに実験を重ねていく必要がある。コンクリート強度と付着応力度の関係を見ると、全般的にコンクリート強度が高いため顕著な傾向は見られなかった。また、棒材の径と付着応力度に関しては、細径になる程大きくなる傾向がやや見られるが、今回の試験だけでは判断することはできなかった。各試験体の破壊状況を大別すると、砂付の棒材についてはほとんどが抜け出しによって最終状態に達しているのに対し、砂なしの棒材では、立方体コンクリートにひびわれが発生して荷重が低下する傾向が強かった。

表-6 付着試験の構成

棒材	付着長さ	付着面積 (cm ²)
K64	6d	12.06
K64S	6d	15.27
K96	6d	18.85
K96S	6d	22.81
K128	6d	27.14
	8d	36.19
K128S	6d	34.35
	8d	45.80
K192	6d	36.95
K192S	6d	45.29
D16	4d	32.00
D10	4d	12.00

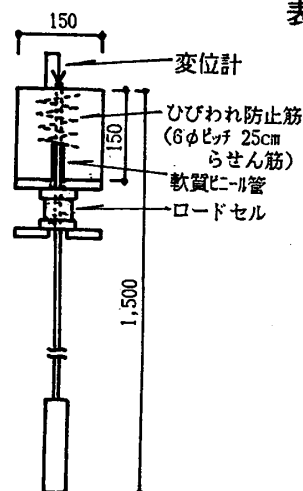


図-6 付着試験方法

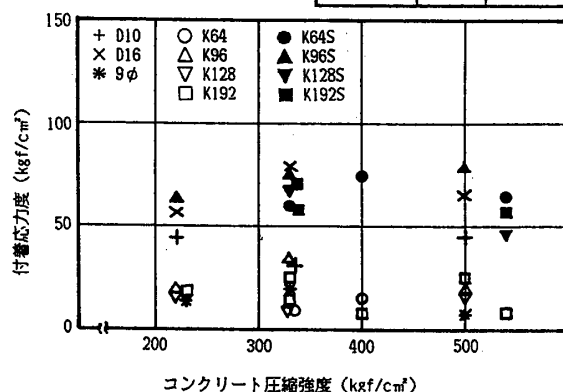


図-7 0.025mm時の付着応力度

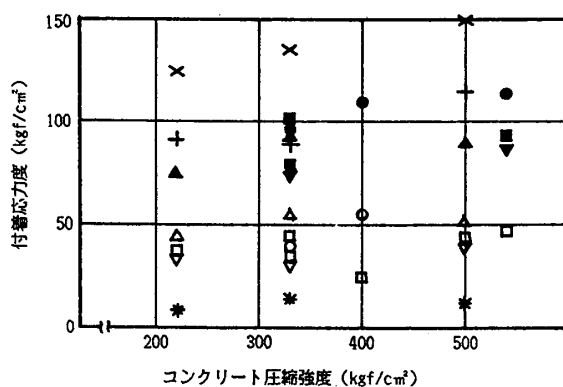


図-8 0.25mm時の付着応力度

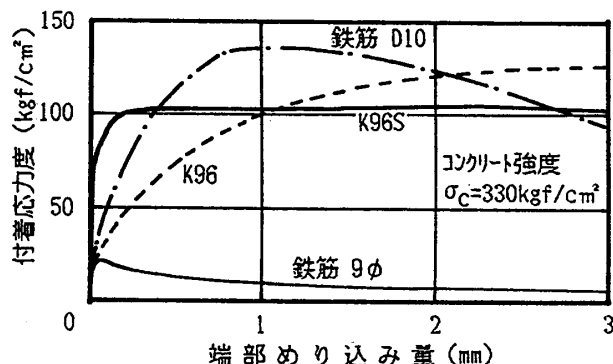


図-9 付着応力度と端部めり込み量の関係

8. 耐熱性

8.1 試験方法

使用したアラミド繊維の耐熱性は 200℃までとされているが、棒材にした時の耐熱温度を把握するために、K16の細径の棒材を用いて耐熱試験を行った。試験は乾熱および湿熱試験の2種類で、処理温度 280℃までを、乾熱試験では 160℃から 15℃毎に、湿熱試験では 140℃から 20℃毎にそれぞれ2時間熱処理した。耐熱性の評価は棒材を室温まで冷却した後、棒材の引張試験を行い、その強度保持率として表現した。

8.2 試験結果

図-10に乾熱および湿熱試験の結果を、未処理の強度を 100とした時の各温度における強度保持率として示す。図中の値は、棒材6本の平均値である。

両試験結果とも、処理温度 220℃までの引張強度保持率は95%前後の高い値を示しておりアラミド繊維そのものの耐熱性まで十分に強度が発揮できることがわかった。

9. 耐アルカリ性

9.1 試験方法

棒材をコンクリートの補強材に用いるためにアルカリに対する影響について検討した。試験に用いた棒材はK16で、 $\text{Ca}(\text{OH})_2 + 3\%\text{NaCl}$ (pH=13) のアルカリ溶液中に浸漬後、耐熱性試験と同様に引張試験を行い、強度保持率を把握した。また、温度による影響も合わせて検討するために、アルカリ溶液の温度を、常温、40℃、60℃、80℃の4種類とした。

9.2 試験結果

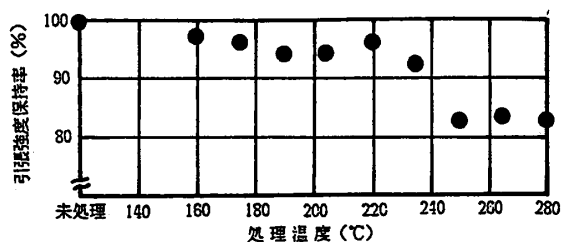
図-11に耐アルカリ試験結果を、未処理のものの強度を 100とした時の各材料における強度保持率として示す。アルカリ溶液温度が常温および40℃では、2000時間経過後においてもほぼ100%近い強度保持率を示している。

60℃および80℃では、1400時間を過ぎるとやや低下する傾向は見られるが、95%以上の高い強度保持率は確保されている。本試験では、K16の細径の棒材を使用しており、太くなるにしたがいアルカリの影響はさらに少なくなると考えられ、80℃程度の温度範囲では、実用上問題ないものと思われる。

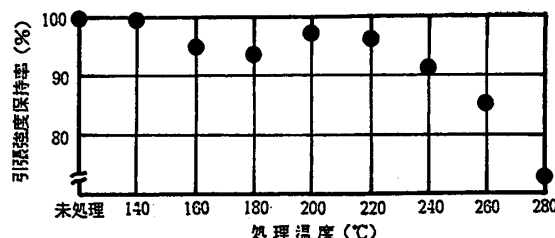
10. 耐薬品性

10.1 試験方法

耐薬品性試験は、表-8に示すように酸、アルカリ、人工海水、有機溶剤等9種類、12水準についてK16の棒材を用いて行った。人工海水に関しては、界面の影響を考慮して、棒材全体およ



(a) 耐乾熱試験結果



(b) 耐湿熱試験結果

図-10 耐熱試験結果

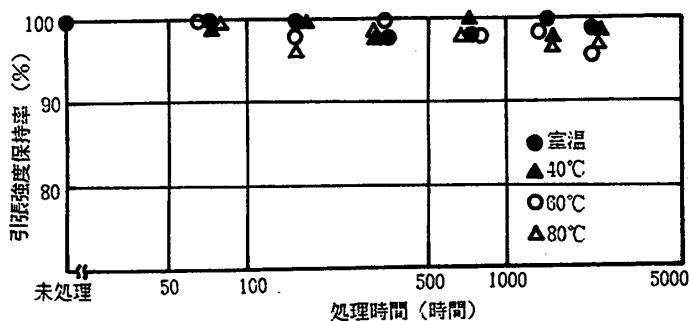


図-11 耐アルカリ試験結果

び半分浸漬した場合について行った。耐薬品性の評価としては、引張強度保持率および重量変化率で表わした。試験時温度は常温である。

10.2 試験結果

表-8に耐薬品性の浸漬後30日の試験結果を示す。表中の重量変化率および強度保持率はともに棒材5本の平均値である。また、重量変化率の(－)は重量減少を表している。引張強度保持率に関しては、硫酸(H_2SO_4)を除くと、全て90%以上の値であり、30日浸漬については特に顕著な変化は見られなかった。

表-8 耐薬品性試験結果

薬品名	重量増加率(%)	引張強度保持率(%)	薬品名	重量増加率(%)	引張強度保持率(%)
NaOH(30%)	-0.25	92	H_2SO_4 (30%)	1.46	80
NaOH(5%)	-0.27	90	H_2SO_4 (10%)	1.38	85
NaClO(5%)	-0.73	95	トルエン	-0.36	96
$Ca(OH)_2$	-0.26	96	トリクレン	0.61	93
人工海水(全体浸漬)	-0.10	100	ジメチルホルムアミド	1.53	99
人工海水(半分浸漬)	-0.20	93	灯油	-0.09	93

11. 結 論

アラミド繊維の組紐状棒材を、コンクリート補強材として用いるために行った各試験結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 棒材の平均引張強さは、アラミド繊維量で換算した強度の78～88%の範囲であり、棒材の径が大きくなるにしたがい有効率がやや下がる傾向が見られる。
- (2) ヤング率に関しては、棒材の径による差は見られず、 $0.612 \sim 0.666 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 程度である。
- (3) K64の棒材は、下限値0.5Pu，上限値0.8Pu 程度の引張疲労試験では、200万回くり返しても破断しない。
- (4) K64のリラクセーションは、100時間経過後でおよそ10%前後となっており、PC鋼材に比べて2～2.5 倍の値である。
- (5) K64のクリープ量は、緊張終了時の伸び量に対して1000時間で10%程度であり、緊張力による差はあまり見られない。
- (6) 棒材の端部めり込み量0.025mm 時の付着強度に関して、棒材表面に砂を接着したものは異形鉄筋に比べて大きく、 $50 \sim 80 \text{ kg/cm}^2$ 程度の値を示している。
- (7) 耐熱性については、乾熱および湿熱状態とも220℃まではほとんど強度低下を示さない。
- (8) 耐アルカリ、耐薬品性についても今回の試験結果では、顕著な変化は見られず、実用上の支障は少ないものと思われる。

以上のように、アラミド繊維の組紐状棒材がコンクリート補強材料としての必要性能をほぼ満足していることが確認でき、さらに、実際に使用する際の設計資料にフィードバックできる定量的評価も行えた。しかし、新しい材料であるために、試験データも少なく、今後さらに詳細な試験を実施する必要があるものと考えている。最後に本研究を進めるにあたり、東レ(株)および神鋼鋼線(株)の多大なる御協力を頂きました。ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 「引抜き試験による鉄筋とコンクリートの付着強度試験方法(案)」コンクリート工学 Vol.23 No.3 1985
- 2) 岡本, 松原, 谷垣「アラミド繊維による組紐状棒材の研究(その1引張特性および耐久性, その2コンクリート補強効果)」日本建築学会大会梗概集A, P529, 昭和62年