

論文

[2155] 連続繊維筋を用いたコンクリート梁の耐火性能

蓮尾 孝一*1・岡本 直*2・谷垣 正治*1

1. はじめに

近年、連続状の繊維を樹脂等で含浸した複合材料を、コンクリートの補強材として実用化するための研究が各方面で行われている。素材繊維あるいはマトリクスが有機系材料の連続繊維筋を用いたコンクリート部材では、その耐火性能が懸念される。しかしながら、火災時にコンクリート部材中の繊維筋が受ける熱的あるいは応力的環境は、繊維筋そのものの熱間引張試験での状態と必ずしも同一でないため、熱間引張試験の結果から、部材としての耐火性能を一義的に論ずることは困難である。したがって、より実状に近い状態を再現するためには載荷加熱試験を行う必要があると思われる。そこで、ここでは繊維筋を用いたコンクリート部材の耐火性能に関する基礎的データを得ることを目的として、実大のコンクリート梁を設計・作製 [1] して載荷加熱試験を実施した。またその結果を、FEM熱伝導解析より求めたコンクリートの内部温度状態と比較検討を行い、耐火試験後の試験体より取り出した繊維筋の引張耐力についても確認して、耐火試験および加熱引張試験結果と比較した。

2. 試験

2.1 試験体製作

表-1 に本試験に使用した繊維筋の諸元を、写真-1 にその外観を示す。繊維筋は繊維を組紐状に編み、エポキシ樹脂で含漬・硬化させたものである。また、表-2 に試験体の構成を示す。主筋、せん断補強筋および緊張材にアラミド繊維筋を用いたFA、また主筋、せん断補強筋に炭素繊維筋、緊張材にアラミド繊維筋を用いたFCの2種とした。試験体は、図-1 に示すような床スラブ付きの

表-1 繊維筋の諸元

繊維筋	使用繊維	断面積 (cm ²)	引張耐力 (kgf)	弾性係数 (kgf/cm ²)
K64	アラミド繊維	0.420	7,010	0.6×10 ⁶
K128S*1	アラミド繊維	0.905	13,360	
K192	アラミド繊維	1.350	19,550	
C64	炭素繊維	0.420	6,120	1.1×10 ⁶
C128S*1	炭素繊維	0.905	10,700	

*1 末尾がSの繊維筋は、表面に砂を付けてコンクリートとの付着を向上させたもの

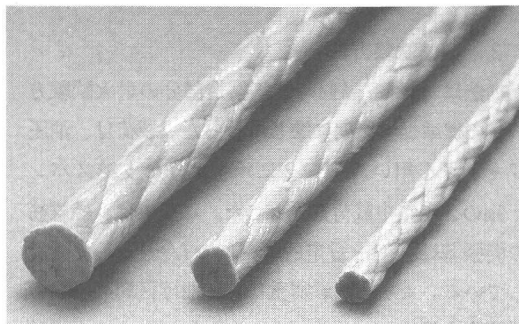


写真-1 繊維筋の外観

表-2 試験体の構成

試験体名	緊張材	主筋	せん断補強筋
FA	K192	K128S	K64
FC	K192	C128S	C64

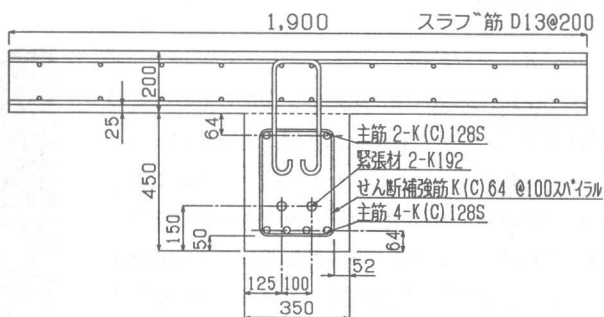


図-1 試験体断面

* 1 三井建設(株) 技術開発本部 技術研究所 (正会員)
 * 2 三井建設(株) 技術開発本部 技術開発推進部 (正会員)

T型断面を有しており、梁部分に繊維筋を用いた。スラブ筋ならびに小梁とスラブのシアコネクタには通常の鉄筋を用いている。試験体の製作は、まず梁型部のプレストレストコンクリートをプレテンション方式で製作し、その後スラブ部コンクリートを打設してT型梁とした。表-3にコンクリートの調合および圧縮強度を示す。緊張材の緊張力は、1本当たり9600kgfで、繊維筋平均引張耐力の約50%である。また、プレストレスによる小梁のコンクリートの下縁圧縮応力度は12.5kgf/cm²である。試験体は約6ヶ月自然乾燥を行った後、試験直前にヒーターによる強制乾燥を行った。耐火試験時におけるコンクリート中の含水率は約7 (wt%)であった。

2.2 試験方法

加熱は、JIS A1304「建築構造部分の耐火試験方法」の標準加熱温度に準じて行った。荷重は、油圧ジャッキを用い、図-2に示すように支持スパン6.9mの2点集中荷重方式とした。ここでは、繊維筋の引張基準強度を暫定的に1800kgf/cm²として設計している。よって試験荷重は、純曲げ区間の主筋の引張応力度が1800kgf/cm²となるように、FA試験体では6.7ton、FC試験体では5.1tonとした。試験体の中央部および荷重点には変位計を取り付け、たわみを測定した。また温度は、試験体軸方向4等分点における3断面において、図-3に示す梁コンクリート表面、外側および内側主筋表面、緊張材表面それぞれの位置に取り付けた熱電対により測定した。

2.3 試験結果

図-4に、加熱時間と試験体中央部のたわみとの関係を示す。荷重の荷重は加熱開始直前に行い、その時のたわみは、FAで8.9mm、FCで3.2mmであった。たわみは、加熱開始から約40分後まで増大した。これは、コンクリートの熱膨張によるものと考えられる。その後、両試験体ともほぼ安定状態となり、80~90分経過時よりたわみが再び増大し、FAで加熱開始114分後、FCで119分後にそれぞれ緊張

表-3 コンクリートの調合および圧縮強度

部位	W/C (%)	セメント (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	圧縮強度 (kgf/cm ²)
小梁	44	389	171	738	988	377
スラブ	58	300	174	862	953	365

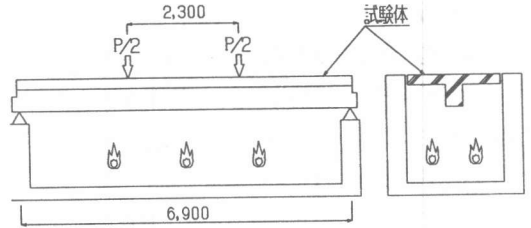


図-2 試験方法

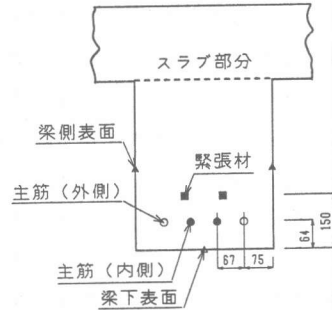


図-3 熱電対位置

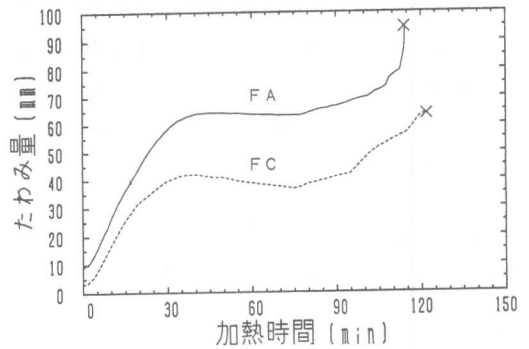


図-4 加熱時間とたわみの関係

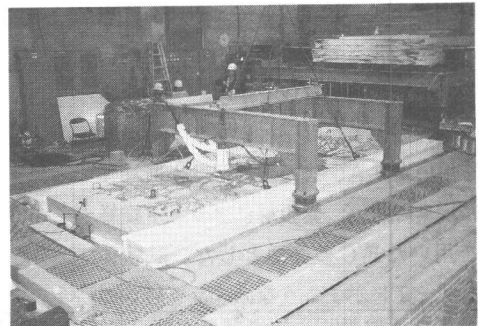


写真-2 試験状況

材が破断した。その時のたわみは、FAで94.6mm、FCで63.9mmであった。なお、加熱中にコンクリートの爆裂、剝離などは生じなかった。写真-2は、加熱開始60分後の試験体状況を示す。コンクリートから水分がしみ出しスラブ上面に溜まっている。図-5、6に試験体FAおよびFCにおける、耐火炉内、コンクリート表面、主筋および緊張材の試験体中央断面での温度を示す。他の断面についてもほぼ同じ温度状況であった。炉内温度は、JIS A 1304の標準加熱曲線とほぼ一致しており、梁下コンクリート表面の温度は、両試験体とも最高約850℃に達した。主筋は、加熱後15~20分で100℃に達してその温度を保持した後、外側のもので35~40分経過後、内側のもので40~65分経過後から再び温度が上昇した。試験終了時における主筋の温度は外側のもので約400℃、内側のもので約200℃であった。緊張材については、加熱開始後20分までほとんど温度変化はなく、その後ゆっくり上昇して約60分後に100℃に達し、試験終了時まで100~110℃の温度範囲であった。

3. 考察

3.1 繊維筋の引張耐力

(1) 破壊時の繊維筋負担力

試験体が破壊した時点での各繊維筋が負担していた引張力を表-4に示す。負担力は、緊張力、梁自重、載荷荷重および熱応力を考慮して(1)式より求めた。

$$T_c = T_p + T_w + T_h \quad \text{---- (1)}$$

- T_c : 繊維筋負担力
- T_p : 緊張力
- T_w : 梁自重+載荷荷重による負担力
- T_h : 温度応力による負担力
 $= (\alpha_c - \alpha_f) \cdot \Delta T \cdot E_f$
 $\alpha_c \cdot \alpha_f$: コンクリートおよび繊維筋線膨張係数
- ΔT : 温度差
- E_f : 繊維筋弾性係数 (加熱温度時)

熱応力の計算に用いた線膨張率は、アラミド繊維筋が 5×10^{-6} (1/℃)、炭素繊維筋が 0.2×10^{-6} (1/℃)、コンクリートが 10×10^{-6} (1/℃)である。また断面積および弾性係数は表-1中の値を用いたが、主筋のアラミド繊維筋の弾性係数については、高温時における低下を考慮して $0.4 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ とした[2]。炭素繊維

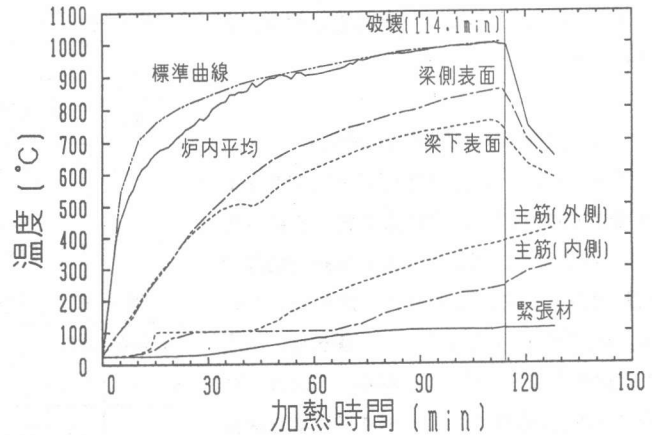


図-5 試験体の温度 (FA)

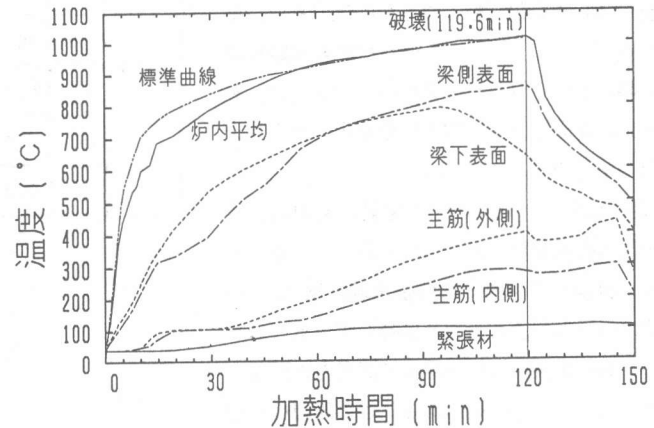


図-6 試験体の温度 (FC)

表-4 繊維筋負担力

部位	繊維筋	負担力 (kgf)
緊張材	K 1 9 2	10,820 (0.55)
主筋	K 1 2 8 S	3,800 (0.29)
	C 1 2 8 S	5,530 (0.52)

表-5 試験後の繊維筋耐力

部位	繊維筋	引張耐力 (kgf)
緊張材	K 1 9 2	11,820 (0.60)
主筋	K 1 2 8 S	5,040 (0.38)
	C 1 2 8 S	-

() 内は初期引張耐力に対する比

については、室温の値を用いた。写真-3に、FA試験体における耐火試験後の繊維筋状況を示す。加熱面に近い主筋およびせん断補強筋は、表面が黒く炭化している。内部にある緊張材は、外観の変化は見られなかった。表-5には、耐火試験後に試験体より取り出した繊維筋の、室温での引張耐力を示す。表-4および5より、耐火試験時における緊張材の負担力と試験後の引張耐力はほぼ同じ値であり、緊張材が破断したことが理解できる。なおC128Sの繊維筋は取り出せなかった。

(2) 加熱引張試験結果との比較

図-7のような方法で別途行ったアラミド繊維筋の加熱引張試験結果を表-6に示す[2]。ここでは、各温度および保持時間後の引張耐力を初期耐力に対する比で表している。耐火試験におけるアラミド繊維筋の強度との比較を図-8に示す。図中の実線は、60分または120分間加熱しそのまま温度を保持して引張試験したもの、破線は、60分間加熱後冷却して引張試験したものの値である。また☆印は、(1)式により求めた耐火試験体破壊時における緊張材の負担力(引張耐力)を表し、★印は耐火試験後に取り出した主筋の引張耐力を表している。

耐火試験後に取り出した主筋の耐力は、冷却後の引張試験結果とほぼ一致している。一方、緊張材の熱間での引張試験結果は、100℃では80%程度の耐力を保持しているのに対し、耐火試験中の緊張材は初期耐力の60%で破断しており差が見られる。この原因は、耐火試験体中の水分(水蒸気)の影響によるものと考えられる。加熱引張試験での繊維筋は乾燥状態であるが、耐火試験ではコンクリートの含有水により、100℃での湿潤状態にある。このためアラミド繊維筋のような有機系材料では、水蒸気によって劣化が促進されたものと考えられる。一方主筋は、かぶりが少

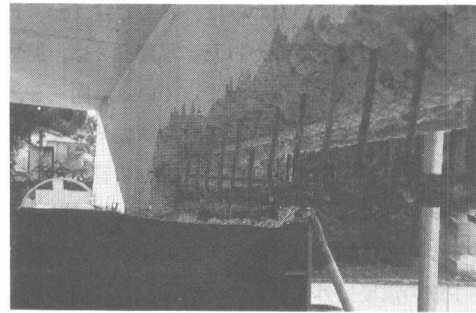


写真-3 耐火試験後の繊維筋状況 (FA)

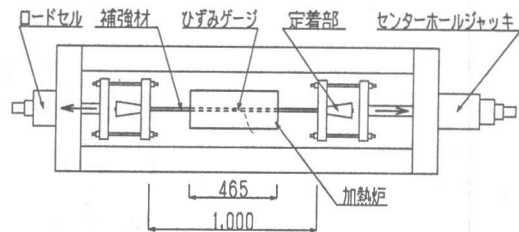


図-7 加熱引張試験方法

表-6 加熱引張試験結果 (アラミド繊維筋)

繊維筋	温度 (℃)	加熱時間 (分) (%)					
		0	30	60	90	120	180
K64	60	96.2	98.2	99.9(108.4)	96.7	98.1	92.3
	100	90.6	89.3	75.7(110.1)	-	93.8	94.6
	140	84.4	85.9	68.3(107.2)	-	63.5	85.5
	200	76.1	75.5	63.5(101.5)	-	63.7	54.9
	250	67.4	64.3	50.7 (99.3)	-	47.4	44.4
	400	16.3	-	16.4 (41.6)	-	15.5	12.4

()内は加熱後冷却したものの値

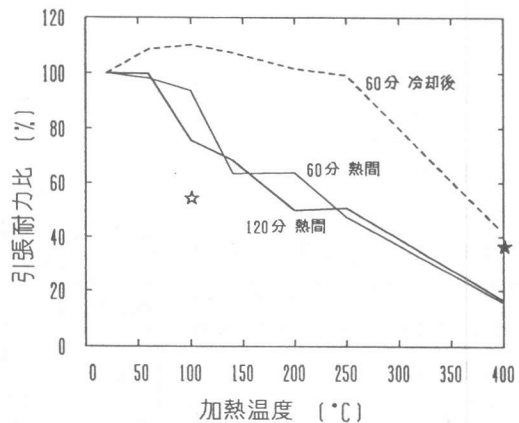


図-8 加熱引張試験との比較 (アラミド繊維筋)

なく加熱面に近いので、図-5, 6からもわかるように、水分が耐火試験初期に無くなり、その後乾燥状態で温度が上昇する。この結果、加熱引張試験とはほぼ同じ条件になり、耐火試験体から取り出した主筋の耐力と引張試験の結果が一致していると考えられる。

3. 2 熱伝導解析

(1) 解析条件

耐火試験におけるコンクリート内部温度の挙動を確認するため、FEMによる熱伝導解析を行った。図-9に解析モデルを示す。モデルは断面の対称性を考慮して、430個の要素に分割した。1要素の大きさは 2.5×2.5 cmである。図-10に本解析に用いたコンクリートの熱伝導率および比熱を[3]、表-7にはその他の材料定数を示す。加熱温度は、JIS A 1304の標準加熱温度を使用し、時間ステップは、60~150秒とした。

(2) 解析結果

試験体断面の各部位における、加熱時間と温度の関係を図-11に示す。コンクリート表面では、解析値と実験値とはよく一致しているが、主筋および緊張材では、100℃付近での温度停滞時間やその後の温度上昇で解析値と実験値に差が見られる。これは、コンクリートの水分移動によるものと考えられる。解析では、コンクリート中の水分が蒸発する時の気化熱を考慮しているが、耐火試験では、水分は蒸発しながら試験体上部へ移動する。本解析は、この蒸発による水分の上方への移動を考慮できないためである。コンクリート表面より深い部位の温度の推定には、蒸発による水分移動を考慮する必要があるものと考えられる。

表-7 材料定数

材 料	項 目	定 数
コンクリート	比 重	2.3
	含水率	7.0 (wt%)
	熱伝達率	30 (kcal/m ² ·h·°C)
水	気化熱	540 (kcal/kg)

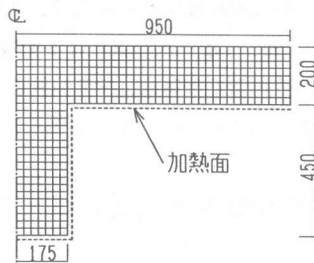


図-9 解析モデル

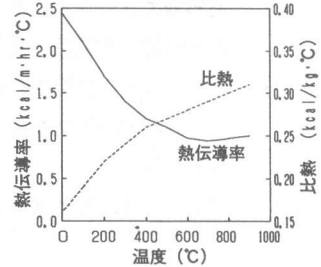


図-10 コンクリートの熱特性

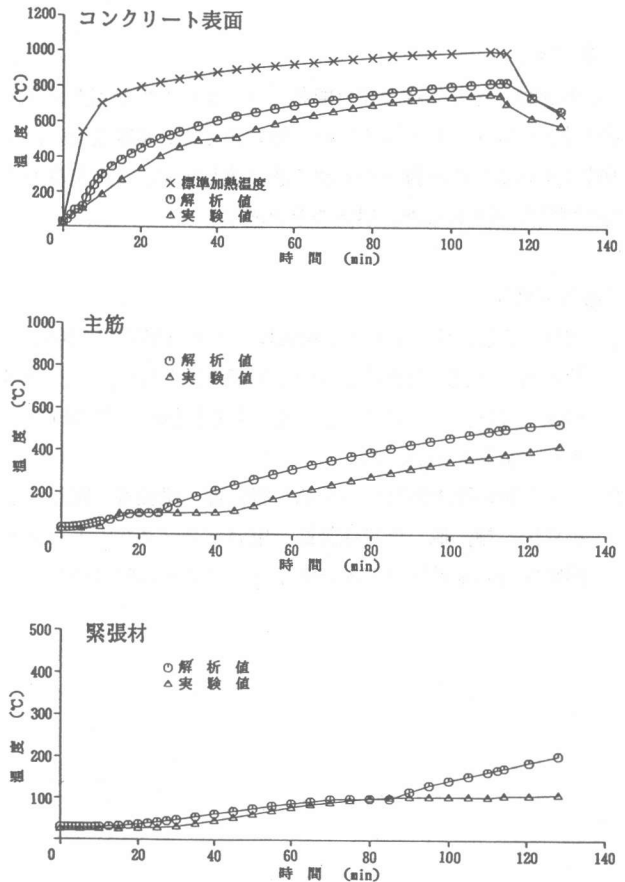


図-11 解析結果

4. まとめ

組紐状アラミド繊維や炭素繊維による繊維筋を、主筋、せん断補強筋および緊張材に用いたプレストレストコンクリート梁の荷重加熱試験を行い、その耐火性能を確認した。またその結果を、FEM熱伝導解析による内部温度状態、および加熱引張試験結果と比較検討した。これより得られたものをまとめると以下のとおりである。

- 1) 本梁は加熱後約90分まで安定したたわみ性状を示し、約2時間後に緊張材に用いたアラミド繊維筋が破断した。その時の主筋温度は約400℃、緊張材温度は約100℃であった。
- 2) 主筋のようにかぶりがない部位の繊維筋の劣化は、その加熱引張試験結果より推定できるが、より内部の繊維筋の劣化に関しては、水蒸気による影響を考慮する必要がある。
- 3) コンクリート表面に近い部位の温度推移は、FEM解析ではほぼ追跡することができた。しかし、より内部の温度状態を把握するためには、コンクリート中の水分の蒸発による移動を考慮する必要がある。
- 4) 以上のより、本梁は1時間半程度の耐火性能を有していると考えられる。

本試験では、加熱後の梁の耐力を確認していない。このため、火災後再使用を考える場合には、加熱後の耐力等を確認する必要がある今後の課題である。

謝 辞

本研究は、建設省総合技術開発プロジェクトの個別共同研究として行われたものであり、耐火試験は建設省建築研究所の耐火炉を用いて行いました。本論文を作成するにあたり御指導を賜った、同研究所の榎田佳寛氏および中村賢一氏に深く感謝致します。また実験および解析にあたりアイシーエス(株)の小坂田諭氏に御協力頂きました。感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 遠藤 克彦, 他: アラミド繊維による組紐状棒材の研究 (その16. プレキャストプレテンションPRC実大梁の曲げ試験), 建築学会大会学術講演梗概集C, pp. 833~884, 1991
- 2) 松原 澄行, 他: アラミド繊維による組紐状棒材の研究 (その17. 熱特性), 建築学会大会学術講演梗概集C, pp. 717~718, 1992
- 3) 「建築物の防火設計法の開発」報告書, 建設省, 昭和63年12月
- 4) 小坂田 諭, 他: 連続繊維筋を用いたコンクリート小梁の耐火試験 (その1. 試験結果, その2. 考察), 建築学会大会学術講演梗概集C, pp. 1387~1390, 1992