

論文

[1168] 連続繊維緊張材を用いたプレストレストコンクリートはり部材の耐火性能

鳥取誠一*1・涌井 一*2・武居 泰*3・川本幸広*4

1. はじめに

連続繊維補強材には鋼材にない利点も多くあるが、耐火性能に関しては懸念される点も少なくない。上記の背景から、本研究では連続繊維補強材の加熱引張試験、高温リラクセーション試験および連続繊維補強材を用いたプレストレストコンクリートはりの耐火試験、耐火試験終了後の同上部材の曲げ載荷試験を行い、加熱後のP C部材の再使用可能性を検討することとした。

2. 連続繊維補強材の熱特性

2.1 連続繊維補強材の加熱引張試験

試験には表-1に示す炭素繊維補強材、アラミド繊維補強材を供した。連続繊維補強材の熱間での引張特性を把握するため、熱間引張試験と加熱冷却後の引張試験を行った。熱間引張試験では30分間で所定温度まで加熱し、所定温度を60分間保持した後、直ちに試験を行った。加熱冷却引張試験では、上記と同様に加熱し、室温に達するまで自然冷却した後、試験を行った。

両試験の結果を図-1,2に示す。図-1の熱間引張試験の結果によれば、炭素繊維、アラミド繊維補強材のいずれも、温度に対して引張強度が直線的に低下し、250~300℃程度で引張強度は加熱前の約1/2に低下する。

図-2の加熱冷却引張試験結果からは、300℃程度までの温度履歴であれば、引張強度、弾性係数は僅かに低下する程度で、冷却後は概ね加熱前の特性までに回復することがわかる。

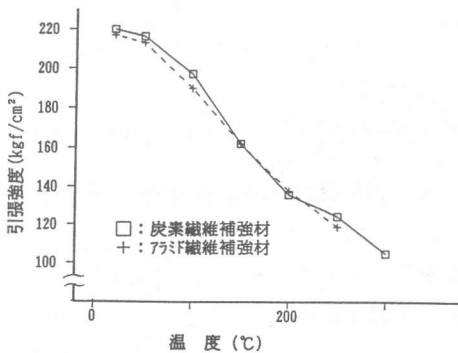


図-1 熱間引張試験結果

表-1 試験に用いた連続繊維補強材

連続繊維補強材の種類	径 (mm)	断面積 (mm ²)	引張強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (kgf/mm ²)
炭素繊維補強材 (7本より線)	12.5	76	220 (191) ¹⁾	1.45×10 ⁴
アラミド繊維補強材 (表面異形加工)	7.4	42.4	217 (180) ¹⁾	0.56×10 ⁴

1) ()内の値は、メーカーの保証強度 $f_{p,un}$

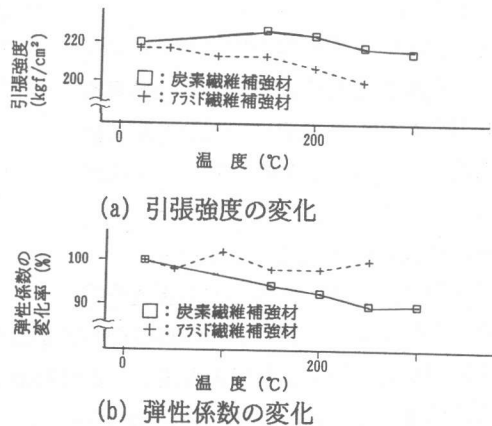


図-2 加熱冷却引張試験結果

- * 1 (財)鉄道総合技術研究所 構造担当研究室 主任研究員, 工修 (正会員)
- * 2 (財)鉄道総合技術研究所 構造担当研究室 室長, 工修 (正会員)
- * 3 (財)鉄道総合技術研究所 建築担当研究室 研究員, 工修 (正会員)
- * 4 (株)ピー・エス 第二技術部 主任技師

2.2 高温リラクセーション試験

アラミド繊維補強材の高温リラクセーション試験の結果を図-3に示す。初期引張応力度は $0.65 f_{pun}$ (f_{pun} :メーカー保証強度)である。高温条件下では引張応力度の低下が大きくなる結果となった。

高温リラクセーション試験終了後の供試体の引張試験を室温で行ったが、特に引張強度の低下は認められなかった。

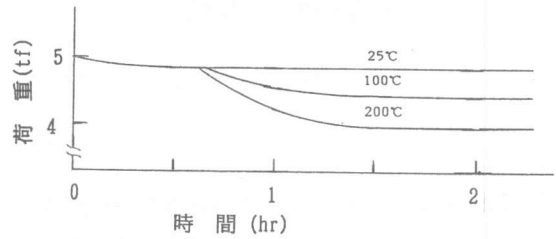


図-3 高温リラクセーション試験結果

3. 連続繊維補強材を用いたPCはりの加熱試験

3.1 供試体および加熱試験の概要

図-4に示すPCはり供試体をプレテンション方式により6体製作した。供試体に用いた補強材の種類、コンクリートの強度特性を表-2に示す。導入プレストレス力は、はり上側、下側で、それぞれ7tf, 20.3tfである。このときのはり下側補強材の引張応力度は、炭素繊維補強材の場合で $134\text{kgf}/\text{mm}^2$ ($0.70 f_{pun}$)、アラミド繊維補強材の場合で $120\text{kgf}/\text{mm}^2$ ($0.66 f_{pun}$)である。

スターラップには鉄筋(SD 295A, D10)を用いた。

加熱試験は、供試体を室内で2~3ヶ月、自然乾燥した後に行った。加熱温度は、JIS A 1304「建築構造部分の耐火試験方法」によった。加熱時間、加熱箇所等は表-2および図-4に示した。なお、加熱箇所以外は大気に接している。

3.2 加熱試験時の供試体内の温度分布

図-5に供試体内部(No.1)の温度の測定結果および解析結果を示す。測定結果から、補強材位置の温度は、20分経過時点で $100\sim 200^\circ\text{C}$ 、60分経過時点で 300°C 程度に達することがわかる。

解析値は2次元の非定常熱伝導FEM解析(図-6参照)によるもので、コンクリートの熱伝導率、比熱の温度に対する非線形性、コンクリート中の水分の気化熱を考慮している。境界面での熱伝達には、対流熱伝達と輻射熱伝達を考慮した。図-5より、解析値と実測値は概ね一致していることがわかる。

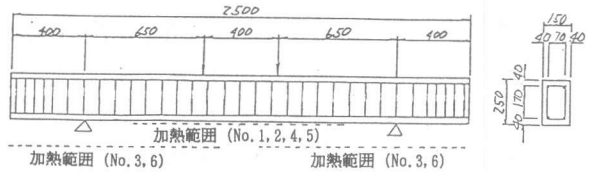


図-4 供試体の概要

表-2 供試体一覧

供試体 No	連続繊維補強材	コンクリートの強度特性			加熱時間	加熱箇所
		圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)		
1	炭素繊維補強材	590	39	2.85×10^5	60	スパン中央下面
2					スパン中央下面	
3					両端	
4	アラミド繊維補強材	510	37	2.75×10^5	60	スパン中央下面
5					スパン中央下面	
6					両端	

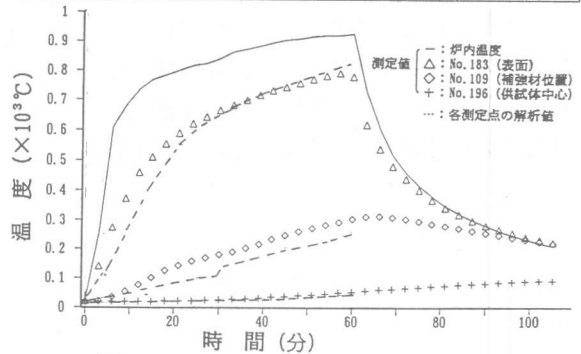


図-5 供試体内部の温度分布

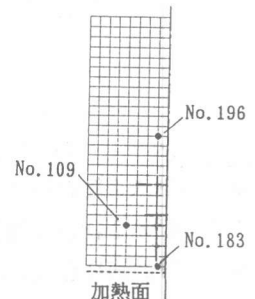


図-6 解析モデル

3.3 加熱試験時における観察

60分間加熱した供試体 (No. 1, 4) においては、耐火試験開始から40分程度経過した時点から、連続繊維補強材が部分的に破断したと思われる音が頻繁に聞き取れた。

加熱試験開始時の有効プレストレスによる補強材の応力度は炭素繊維補強材の場合で、 106kgf/cm^2 ($0.55 f_{p,un}$)、アラミド繊維補強材の場合で 94kgf/cm^2 ($0.52 f_{p,un}$) と推定される。上記の応力度と図-1に示した熱間引張強度の関係、および加熱試験開始から40分間経過後には、 200°C 程度以上に達し、約60分間は 200°C 以上の温度が持続することを考慮すれば、連続繊維補強材の破断は十分予測される。また、上記のような加熱中の連続繊維補強材の破断は、組紐状アラミド繊維補強材を用いたPCはり部材の耐火試験においても確認されている[1]。

図-7に示すように、加熱試験終了後、はり供試体下面には無数の亀甲状のひびわれが生じた。これらのひびわれは、はり側面にも高さ方向に進展し、60分間加熱した場合には6cm程度、20分間加熱した場合には3cm程度の高さにまで達した。なお、供試体下面のひびわれの状況については、加熱時間による差は特に認められなかった。

4. 曲げ載荷試験

4.1 供試体および曲げ載荷試験の概要

加熱試験の終了した供試体 (表-2参照) の曲げ載荷試験を図-4に示す方法により行った。ただし、供試体 No. 3, 6 については、加熱載荷

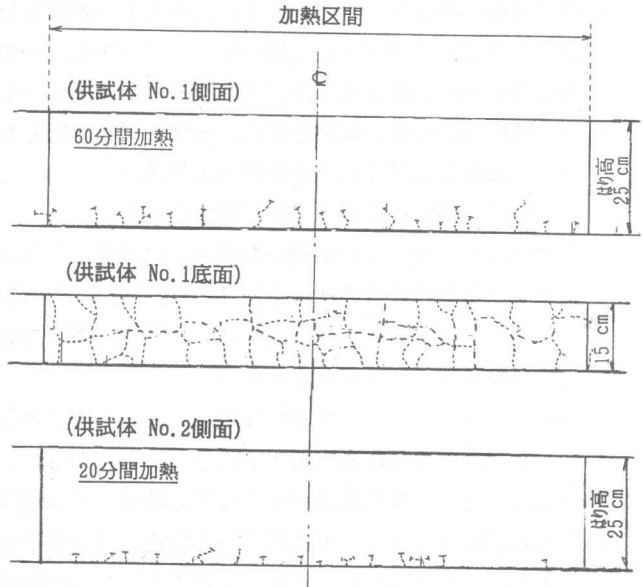
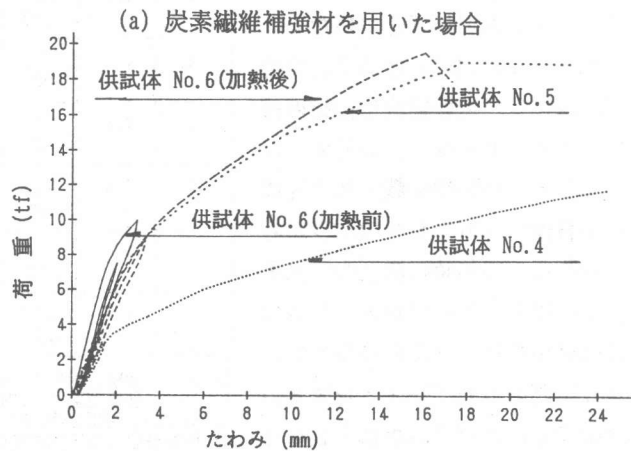
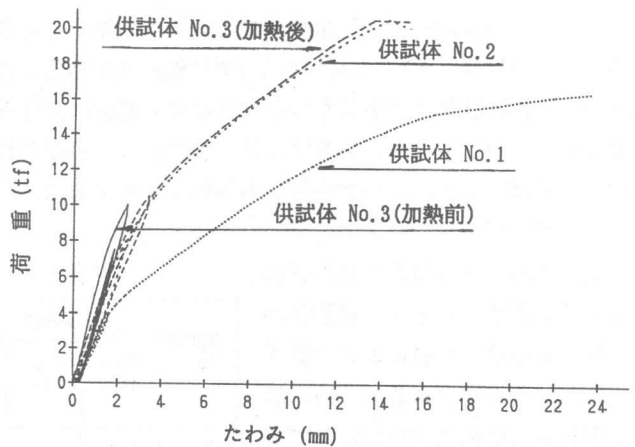


図-7 加熱試験後のひびわれ状況



(a) 炭素繊維補強材を用いた場合

(b) アラミド繊維補強材を用いた場合

図-8 荷重-たわみの関係

試験前に曲げひびわれが発生する程度まで予備荷重を行い、有効プレストレスを確認した。

表-2中のNo.1,2,4,5の供試体は、スパン中央下面の加熱による連続繊維補強材の劣化がPCはり部材の曲げ耐荷性能に及ぼす影響を検討するものである。また、No.3,6の供試体では、加熱が連続繊維補強材の伝達長区間に及ぼす影響を検討した。

4.2 加熱したPCはりの曲げ変形状

(1) 曲げひびわれ進展前の曲げ剛性の評価

全供試体の荷重-たわみ関係を図-8に示す。これより、曲げひびわれが進展する前の荷重レベルにおけるPCはりの曲げ剛性 $E_c I_1$ は、特に60分間加熱した供試体(No.1,4)において低下が著しいことがわかる。この原因には、加熱によるひびわれに伴う曲げ剛性の低下およびコンクリートの弾性係数の低下が考えられる。

一般に、コンクリートの弾性係数 E_c は100℃程度の加熱温度から低下し始め、500℃では加熱前の10~30%程度の値にまで低下する[2]。したがって、図-5の温度分布から、概略的には60分間加熱した場合には供試体中央から下側部分、20分間加熱した場合には連続繊維補強材から下側部分の範囲のコンクリートには、ある程度の弾性係数の低下が生じていると考えられる。

しかし、ここでは簡単のため、コンクリートの弾性係数 E_c の低下はないものとして、荷重-たわみ関係の初期勾配から、耐荷性能上有効な部材高さ h' を試算し、結果を表-3に示した。表中の()内の値は、加熱試験前の予備荷重の結果から求めた値である。結果によれば、供試体No.1,4では h' が約19cm, No.2,5では約21cmである。これらの値は、供試体の高さ h (=25cm) から、加熱試験により生じたひびわれのはり側面における進展高さ(図-7参照)を差し引いた値にほぼ一致しており、略算的には、加熱によりひびわれを生じた範囲の断面を無視して、曲げ剛性を評価しても、十分な精度が得られるようである。

(2) 有効プレストレスの評価

図8から、曲げひびわれが進展し始める荷重 P_{cr} も、60分間加熱した供試体(No.1,4)において低下が著しいことがわかる。一方、20分間加熱した供試体(No.2,5)では、 P_{cr} はほとんど低下していない。

供試体No.1,4における P_{cr} の低下原因には、連続繊維補強材の破断、リラクゼーションの増大、コンクリートの弾性係数の低下等による有効プレストレスの減少が考えられる。加熱時の温度測定結果より、はり上側のプレストレスの変化は少ないと考えられるので、はり下側の有効プレストレス P_{e1} が減少したため P_{cr} が低下したと考え、 P_{cr} の値から P_{e1} を逆算した。結果を表-3に示す。表中の

表-3 曲げ荷重試験の結果

供試体 No.	実験結果			有効プレストレス(tf)			部材有効高さ h' (cm)	α
	P_{cr} (tf)	P_u (tf)	破壊 形式	加熱前		加熱後		
				はり上側	はり下側	はり下側		
1	4.0	16.5 (86)	MT	6.4	16.3	7.5 (46)	19.3	0.85
2	7.0	20.5 (107)	MT	6.4	16.2	14.6 (90)	21.5	—
3	7.5	20.5 (107)	MT	6.3	16.1	15.8 (98)	21.7	—
4	3.5	12.0 (78)	MC	5.8	16.1	6.4 (40)	18.9	0.90
5	8.0	18.5 (123)	MC	5.8	16.0	16.9 (106)	20.9	—
6	7.5	19.0 (127)	MC	5.8	15.9	15.8 (99)	20.7	—

- 1) P_{cr} : 加熱試験により生じたひびわれが進展し始める荷重
- 2) P_u : 破壊荷重 [()内の値は計算値に対する割合(%)]
- 3) MT: 曲げ引張破壊, MC: 曲げ圧縮破壊
- 4) 加熱後のはり下側の有効プレストレスは、はり上側の有効プレストレスは変化しないとして、 P_{cr} より算定。()内の値は加熱前の値に対する割合(%)
- 5) 部材有効高さ h' は、荷重-たわみ関係の初期勾配より算定。

()内の値は、加熱前の有効プレストレスに対する割合を百分率で示したものである。これより、60分間加熱した供試体(No.1,4)では、有効プレストレスが加熱前の1/2以下に減少していると推定される。

(3) 曲げひびわれ進展後の曲げ剛性

60分間加熱した供試体(No.1,4)では、ひびわれ発生以後の曲げ剛性 $E_c I_e$ の低下も大きい(図8参照)。その原因として、連続繊維補強材の破断に伴う断面減少による中立軸の上昇、加熱による引張側コンクリートのテンションスティフニング効果の減少等が考えられる。

図-9は、荷重とスパン中央におけるPCはり側面のコンクリートひずみの関係であるが、 $P \approx 11\text{tf}$ の段階で、No.1の場合には、はり上面から6cmの位置でコンクリートのひずみが0であるのに対して、No.2の同位置におけるコンクリートひずみは、最終荷重段階まで圧縮側にあり、No.1供試体の中立軸はNo.2よりも低い荷重段階で上昇していることが認められる。

また、No.1供試体の場合、補強材位置のコンクリートの引張ひずみがほとんど生じておらず、テンションスティフニングの効果も減少していると推定される(図-9参照)。

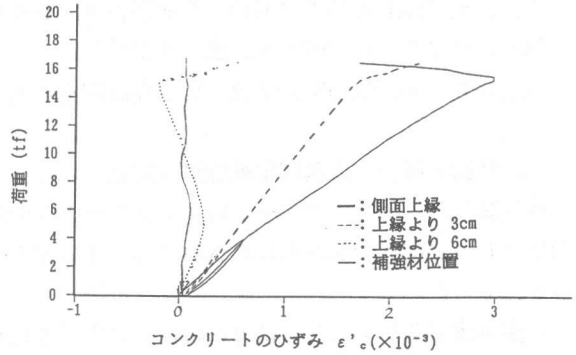
4.3 曲げ耐力

曲げ耐力の試験値および破壊形式を表-3に示す。表中の()内の値は、試験値の加熱前供試体の曲げ耐力の計算値に対する比を百分率で示したものである。これより、60分間加熱した供試体(No.1,4)の曲げ耐力は、加熱前供試体の曲げ耐力の計算値よりも小さく、連続繊維補強材の断面積が減少していることが推測される。No.1,4について曲げ耐力の試験値と計算値が一致するように断面積 A_p' ($=\alpha A_p$, A_p :健全な状態における補強材の断面積) を求めると、 α の値は、No.1,4の場合でそれぞれ0.85, 0.90となる(表-3参照)。No.1供試体は、曲げ引張破壊しているため、 α の値の精度は比較的高いと思われるが、No.4供試体は曲げ圧縮破壊であるため、 α の値の信頼性は低い。

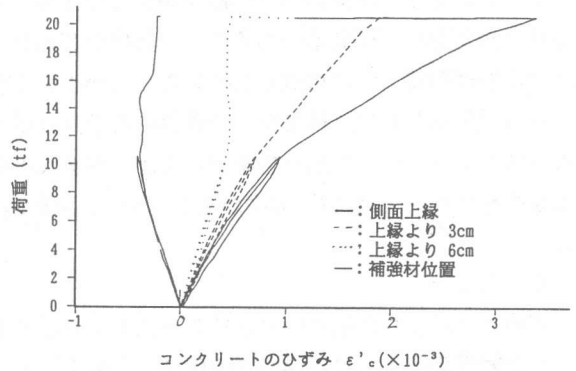
一方、20分間加熱した供試体(No.2,5)の曲げ耐力の試験値は計算値よりも大きく、加熱による曲げ耐力の低下はないと考えられる。

4.4 伝達長区間を加熱した影響

供試体No.3,6は、伝達長区間を含む範囲を20分間加熱した後に、曲げ荷重試験に供した。これらの供試体は、いずれも、加熱試験において他の供試体と同様のひびわれを生じたが、特に異常は認められなかった。



(a) 供試体No.1のコンクリートのひずみ



(b) 供試体No.2のコンクリートのひずみ

図-9 荷重-コンクリートひずみの関係

また、載荷試験の結果においても変形性状、曲げ耐力は、スパン中央下面を20分間加熱した供試体と大差なかった(図-8、表-3参照)。

以上より、本試験の範囲では、伝達長区間を加熱した影響は特に認められなかった。

5. 載荷試験後の連続繊維補強材の調査

載荷試験後、供試体No.1~4のコンクリート中の連続繊維補強材の外観を調査した。全般的な傾向として、60分間加熱した供試体では、連続繊維補強材は相当に損傷しており、特に樹脂の損傷が目立った。

炭素繊維補強材ではPCは供試体中の引張側に配置した2本のうち1本が、アラミド繊維補強材では4本のうち2本が完全に破断していた。炭素繊維補強材の場合は、供試体が曲げ引張破壊したことから、載荷試験中に破断が生じたものと考えられる。アラミド繊維補強材の場合は、破壊形式が曲げ圧縮破壊であること、曲げひびわれ発生以後の剛性低下が大きいことから、補強材が加熱試験終了時には破断していたことが推察される。

20分間加熱した供試体では、補強材の損傷は軽微であった。これらの補強材については赤外線吸収スペクトル法、DSC熱分析を行ったが、健全な補強材とほぼ同一の結果を示した。アラミド繊維補強材については、供試体中から取り出し、引張試験も行ったが、強度低下は認められなかった。

6. まとめ

本論より得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 連続繊維補強材の熱間引張強度は、温度上昇とともに直線的に低下し、250~300℃程度で、加熱前の1/2程度に低下する。しかし、300℃程度の温度履歴であれば、加熱冷却後の引張強度は概ね加熱前の強度まで回復する。
- (2) PCは供試体を60分間加熱した場合には、有効プレストレスによる連続繊維補強材の引張応力度と熱間引張強度が近接するため、加熱中に補強材が破断する可能性が認められた。
- (3) 60分間加熱した供試体の曲げ剛性、曲げ耐力は健全なものに比べ大きく低下した。また、連続繊維補強材の劣化も著しかった。
- (4) 20分間加熱した供試体では、加熱時に生じたひびわれにより、曲げ剛性が若干低下したが、その程度は小さく、曲げ耐力も補強材が健全であるとした場合の計算値以上の値が確保された。また、連続繊維補強材の劣化も軽微であった。
- (5) PCはりの伝達長区間を20分間加熱したが、特に異常は認められなかった。
- (6) 以上より、本試験の20分加熱程度の条件であれば、部材の再使用の可能性も十分あると考えられた。

〔謝辞〕

本研究の実施に際しては、鉄道総合技術研究所・宮田尚彦博士に御指導を戴きました。また、連続繊維補強材の強度試験については、東京製鋼株式会社、帝人株式会社の方々の御協力を戴きました。ここに記し、感謝の意を表します。

〔参考文献〕

- [1] 小坂田他：連続繊維筋を用いたコンクリート梁の耐火試験(その1：試験結果)，日本建築学会大会学術講演梗概集，1992.8
- [2] 原田 有：コンクリートおよび部材の火災特性について，コンクリート・ジャーナル，Vol.11，No.8，1973.8