

# 論文 圧縮領域を加熱した Jute 繊維混入型 PC はりの爆裂性状および曲げ耐力評価と HPFRCC による補修効果

旭澤 広輝\*1・橋田 美知花\*2・藤本 謙太郎\*3・小澤 満津雄\*4

**要旨:** 本研究では、圧縮領域を加熱した Jute 繊維混入型 PC はり試験体を対象として、爆裂性状の評価と曲げ載荷試験による荷重変位関係の評価を行った。加えて、加熱領域を高靱性セメント複合材料(HPFRCC)で補修した場合の初期剛性と終局耐力の評価を行った。その結果、Jute 繊維を混入した PC 試験体は繊維混入無と比較して爆裂を抑制することができた。また、圧縮領域を加熱した PC 試験体の荷重-変位関係では、加熱無と比較して、初期剛性と終局耐力は大きく低下することがわかった。加えて、圧縮領域加熱で損傷した領域を HPFRCC で 50mm 補修した場合、初期剛性と終局耐力は加熱後と比較して向上することがわかった。

**キーワード:** プレストレストコンクリート, 爆裂, 曲げ載荷試験, Jute 繊維, HPFRCC

## 1. はじめに

プレストレストコンクリート(以下、PC)構造物は導入されるプレストレスの影響により RC 構造物よりも爆裂現象が生じやすいという報告がある<sup>1),2),3),4),5)</sup>。爆裂現象の発生メカニズムは水蒸気圧説と熱応力説およびその複合説がある<sup>6)</sup>。爆裂抑制方法は合成繊維の混入がある<sup>6),7),8)</sup>。本研究グループでは天然の Jute 繊維を爆裂抑制繊維として適用する方法を提案している<sup>9),10)</sup>。加えて、Jute 繊維混入型 PC はりの引張側部分加熱試験を実施し、爆裂性状と加熱後の残存耐力の評価およびポリマーセメントモルタルによる補修の効果を検討している<sup>11)</sup>。一方、PC 部材の圧縮領域を加熱した場合の爆裂性状と加熱後の曲げ耐力の評価については、十分な検討がなされていないのが現状である。そこで、本研究では Jute 繊維混入型 PC はりを対象として、以下の検討を行った。すなわち、圧縮領域加熱試験後および

高靱性セメント複合材料(以下、HPFRCC)による補修後の PC はり試験体に対し曲げ載荷試験を実施することにより、爆裂性状の評価と加熱後の曲げ耐力評価および補修後の曲げ耐力と初期剛性の回復効果を検討した。

## 2. 試験概要

### 2.1 研究フロー

図-1 に本研究のフローを示す。本研究では、下記を実施した。①PC はり試験体を作製、②部分圧縮領域加熱試験、③曲げ載荷試験、④圧縮領域のはつり作業と高靱性セメント複合材料による補修、⑤再度の曲げ載

表-1 コンクリートの材料一覧

W	水：地下水(密度：1g/cm <sup>3</sup> )
C	早強セメント(密度：3.14g/cm <sup>3</sup> )
S1	細骨材：茨城県行田市(絶乾密度：2.53g/cm <sup>3</sup> )
S2	細骨材：茨城県神栖市(絶乾密度：2.54g/cm <sup>3</sup> )
G	細骨材：茨城県笠間市(絶乾密度：2.64g/cm <sup>3</sup> )
Ad	高性能AE減水剤
Jute	ジュート繊維、繊維長：12mm、繊維径：50μm、平均密度1.38g/cm <sup>3</sup>

表-2 コンクリートの計画配合

	W/C	単用量(kg/m <sup>3</sup> )						
	(%)	W	C	S1	S2	G	Ad	Jute
Control	36.3	170	469	378	378	912	4.69	-
Jute								1.38

表-3 コンクリートの力学特性および含水率

	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
Control	25.7	47.6	4.2
Jute	25.6	44.8	4.6

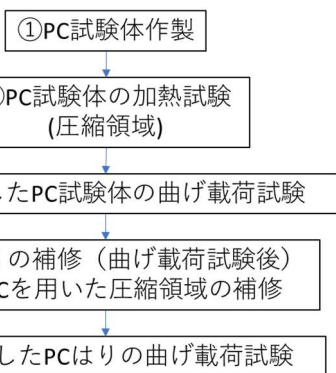


図-1 研究フロー

\*1 群馬大学 理工学部 環境創生理工学科 4年生 (学生会員)

\*2 群馬大学大学院 理工学府 環境創生理工学教育プログラム (学生会員)

\*3 (株)ピーエス三菱 東京土木支店 土木技術部 (正会員)

\*4 群馬大学大学院 理工学府 物質環境類 土木環境プログラム 教授 (正会員)

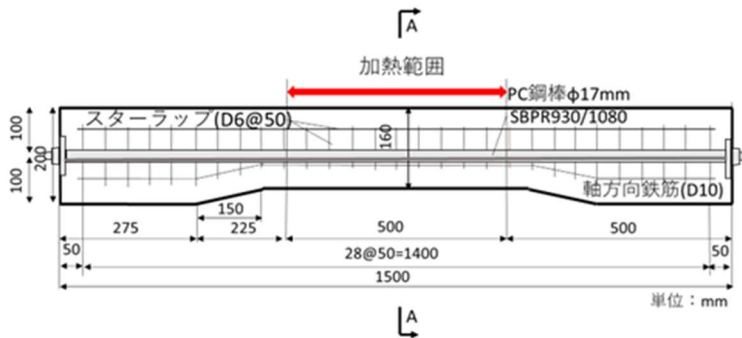


図-2 PC 試験体概要

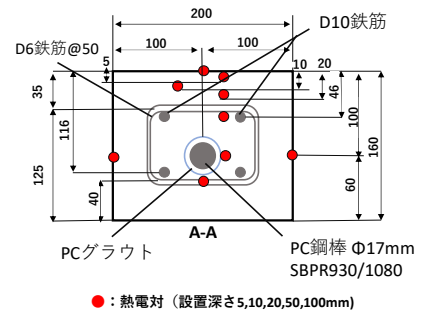


図-3 試験体断面図

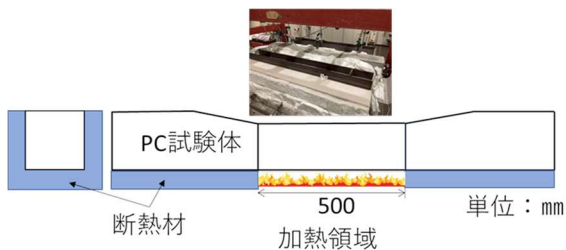


図-4 加熱試験の概要図

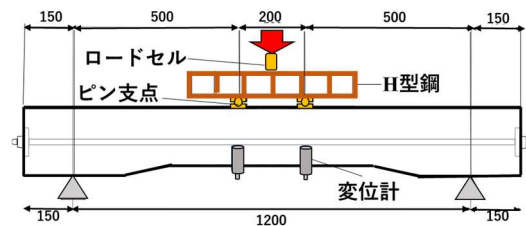


図-5 曲げ荷重試験図

荷試験を実施した。

## 2.2 試験体概要

本研究では 2 種類の PC はり試験体を用意した。すなわち、①繊維混入なし（以下 Control と記す）試験体と②Jute 繊維混入（以下 Jute と記す）試験体とした。表-1～表-3 に使用したコンクリートの材料一覧と計画配合および材齢 28 日での力学特性と含水率を示す。W/C は 36.3%とした。セメントは早強セメント(密度：3.14g/cm<sup>3</sup>)を使用した。粗骨材の最大寸法は 20 mmとした。爆裂抑制繊維として、Jute 繊維を使用した。ただし混入率は Vol.0.1%とした。繊維長が 12mm，繊維径が 50 $\mu$ m であり，平均密度は 1.38g/cm<sup>3</sup>（密度範囲 1.3～1.45g/cm<sup>3</sup>）である。Jute 繊維はストロー（中空）構造を有し，蒸気の逸散ネットワークを形成されることで爆裂を抑制できるとされている<sup>8)</sup>。圧縮強度は Control と Jute でそれぞれ 47.6N/mm<sup>2</sup>と 44.8 N/mm<sup>2</sup>であった。含水率は Control と Jute でそれぞれ 4.2%と 4.6%とした。図-2 に PC はり試験体の概要を示す。PC はり試験体はポストテンション方式とした。試験体の長さは 1500mm とし，試験体中央断面は 160×200mm，支点部の断面は 200×200mm とした。PC 鋼材には SBPR930/1080  $\phi$ 17mm の PC 鋼棒を使用した。試験体の軸方向には D10 (SD345) を主筋と圧縮鉄筋として使用し，有効高さはそれぞれ 116mm と 46mm とした。スターラップには D6 (SD295A) を 50mm 間隔でそれぞれ配置した。試験体はコンクリート打設翌日に脱型を行い，3 日間の湿布養生を行った。図-3 に加熱領域の

試験体断面図を示す。支間中央部の A-A 断面において熱電対は加熱面から深さ方向 0, 5, 10, 20, 50, 100, 120mm 位置に加えて上面から 100mm 位置の両側面位置にも設置した。プレストレスの導入は，材齢 2 日で実施した。図-2 の状態で非加熱面である下縁の応力が 5MPa となるように，PC 鋼材を緊張した。初期緊張力は 113.5kN（約 2500 $\mu$ ）とし，PC 鋼材の緊張は油圧ジャッキを用いた。プレストレス導入後に PC 鋼棒とシーすとの間にグラウトを注入し一体化させた。

## 2.3 加熱試験

図-4 に加熱試験の概要図を示す。加熱試験は試験体の上面長手方向の中央部 500mm 範囲に対して加熱を行った。加熱しない面に対しては耐熱ブランケットで覆うことで断熱し，圧縮領域の部分加熱とした。加熱にはガス水平炉を使用した。加熱開口面は 900mm×900mm である。加熱には 1200 $^{\circ}$ C で 25 分間加熱する RABT30 加熱曲線を用いた。

## 2.4 曲げ荷重試験と損傷度の評価

図-5 に供試体に対する曲げ荷重試験の概要を示す。荷重スパンを 1200mm とし，等モーメント区間を 200mm とした 2 点集中荷重を行った。なお，図-8 で後述するが，Control は爆裂したため，損傷面に石膏を塗布した。Jute について爆裂はなく，ひび割れが生じたため，荷重面を研磨して荷重試験を実施した。計測項目は荷重および荷重点変位とした。荷重測定ではロードセル（許容値 300kN）を使用した。変位計はストロークが 100mm（分解能：1/500mm）のものを使用し

た。加熱試験後に PC 試験体の加熱面から深さ方向の損傷度を評価するために、超音波伝播速度を測定した。測定方法は透過法とし、加熱面から試験体の縦方向に測定した。

### 2.5 加熱損傷部の補修方法

2.4 曲げ載荷試験を実施した PC 試験体に対して、加熱損傷部分の補修を行った。図-6 にははつり作業と補修モルタルの施工フローを示す。PC 試験体のはつり領域は、加熱面である PC 試験体上面の中央部から 300mm の範囲とし、はつり深さは 50 mm とし圧縮鉄筋が露出する深さとした。補修に使用した補修モルタルは高靱性セメント複合材料(以下、HPFRCC)とした<sup>13)</sup>。表-4、表-5 に HPFRCC の配合と圧縮強度と曲げ強度および弾性係数を示す。W/B は 34% であり、使用した短繊維は、PE 繊維(直径 0.012mm, 長さ: 12mm)と PVA 繊維(直径 0.04mm, 長さ: 8mm)とした。なお、それぞれの繊維量については、公開されていない。HPFRCC の圧縮強度と弾性係数はそれぞれ 68.4 N/mm<sup>2</sup>, 30.1kN/mm<sup>2</sup>であった。

### 2.6 補修後の曲げ再載荷試験

補修した PC 試験体を対象として、補修効果を確認するために曲げ再載荷試験を実施した。試験方法は 2.4 と同様とした。

## 3 実験結果および考察

### 3.1 PC 試験体内部の温度変化

図-7 に Control と Jute 試験体の加熱試験時における内部温度の経時変化を示す。2 種類の試験体ともに加熱面の近い位置から温度が上昇していることがわかる。加熱面から 5 mm 位置の最高温度は Control と Jute でそれぞれ 613°C および 751°C であった。また、PC 鋼棒位置の温度は 30°C 程度であった。

### 3.2 PC 試験体の爆裂性状

図-8 に Control と Jute 試験体の加熱面の状況を示す。Control は加熱面の片側で部分的に爆裂が生じた。また、爆裂を生じていない領域でも亀甲状のひび割れが確認できた。Jute 試験体は、軽微な剥離があり、全体的には亀甲状のひび割れが確認できた。

### 3.3 Jute 繊維の爆裂抑制効果

図-9 に Control と Jute の爆裂深さの比較を示す。爆裂深さは長手方向に 50mm ピッチ、幅方向に 25mm ピッチで測定した。ここでは、最大爆裂深さ周辺の計測点 9 点について、平均値と最大値および最小値を示す。Control 試験体の最大値は約 22 mm であり、その周囲 9 点の平均値は約 14 であった。Jute 試験体の最大剥離深さは 4 mm であり、平均値は 2.7 mm であった。Jute 繊維を混入することで、既報<sup>10)</sup>と同様に爆裂を抑制でき

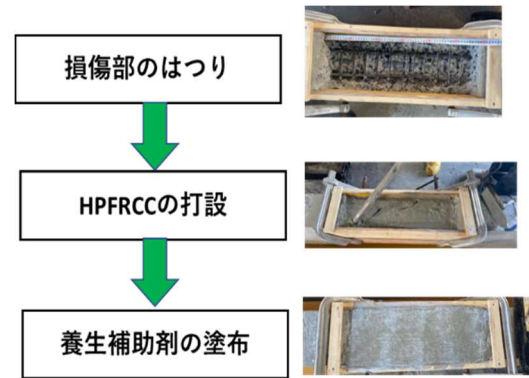


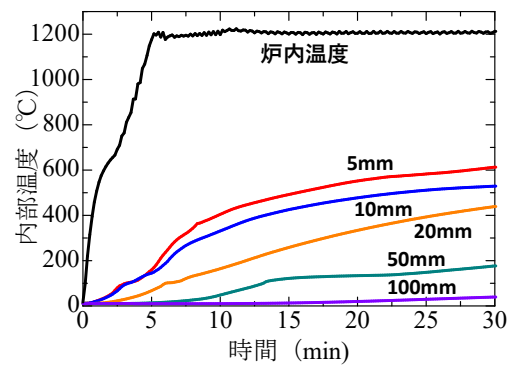
図-6 はつり作業と HPFRCC の補修施工

表-4 HPFRCC の配合

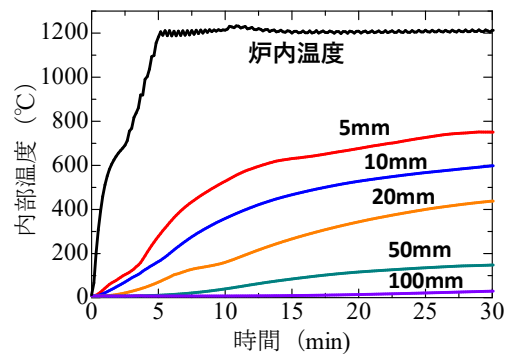
	W/B (%)	S/B (%)	(PE+PVA) (vol%)
HPFRCC	34	63	1.4

表-5 HPFRCC の力学特性

	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
HPFRCC	30.1	68.4

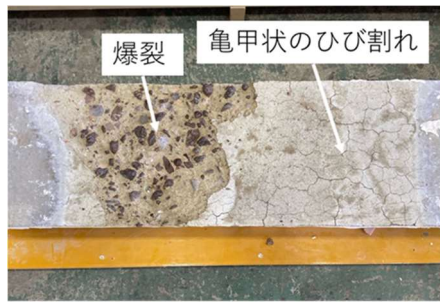


a) Control

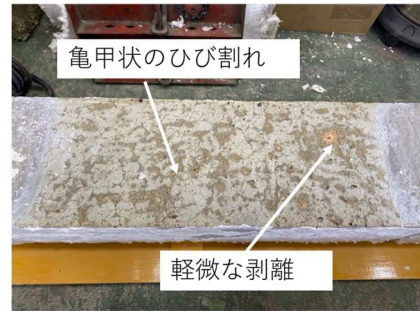


b) Jute

図-7 内部温度の経時変化(30分まで)



a) Control



b) Jute

図-8 加熱面損傷状況

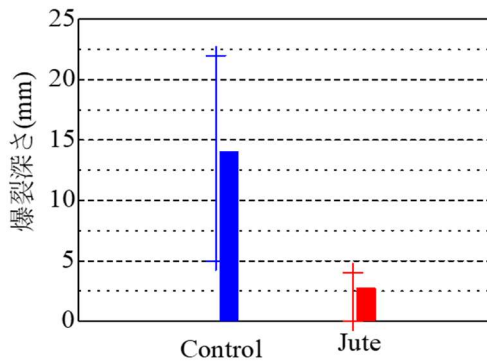


図-9 爆裂性状

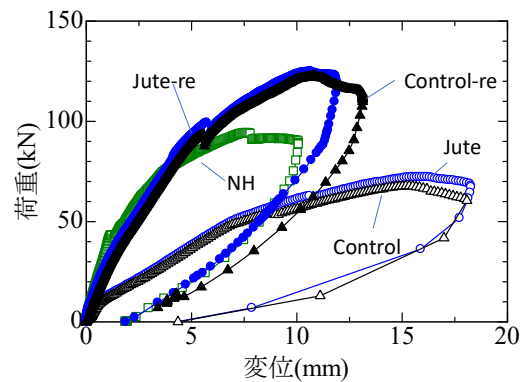


図-10 荷重-変位関係

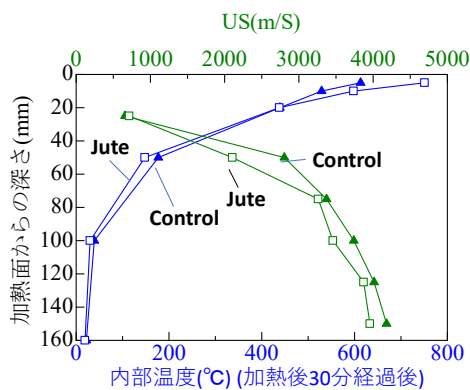


図-11 内部温度分布と加熱後の US 値

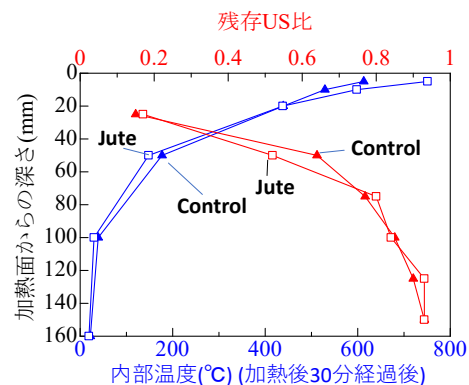


図-12 内部温度分布と加熱後の残存 US 比

る結果となった。その程度は、Control 試験体と比較して、平均値で約 1/5 となった。

### 3.4 PC はりの荷重-変位関係

図-10 に Control と Jute 試験体の曲げ荷重試験による荷重-変位関係を示す。ここで加熱後を Control と Jute、補修後は Control-re と Jute-re とする。併せて、既報<sup>11)</sup>より、同等配合で作製した PC はり(加熱なし)の曲げ荷重試験結果を NH として示す。まず、基準となる NH 試験体では、荷重の増加に伴い曲げひび割れ(43kN)発生後、鉄筋降伏(74kN)を生じ、終局状態で上縁部が圧壊(94kN)した。除荷後にプレストレスの影響によって、ひび割れが閉じる現象を確認した。一方、Control と Jute

は初期剛性が大きく低下し、終局状態で加熱領域が圧壊した。終局荷重は Control と Jute それぞれについて 67kN と 74kN となった。除荷時には、下面のひび割れが閉じることを確認した。次に、Control-re と Jute-re については、HPFRCC で補修した。補修厚を 50 mm とした理由として、図-12 の残存 US 比が 0.53~0.67 で、非加熱領域の US 比よりも大きく低下した領域とした。加熱後の Control と Jute と比較すると初期剛性は NH と同等まで回復した。終局荷重は Control-re と Jute-re でそれぞれ 121kN と 124kN であり、NH よりも大きくなった。

### 3.5 圧縮領域加熱の影響

図-11, 図-12 に PC 試験体加熱領域の内部の温度分布(加熱 30 分経過後)と超音波伝播速度(以下, US)および無加熱部の超音波伝播速度を 1 としたときの残存比を示す。5 mm 位置の温度は Control と Jute でそれぞれ 613℃と 751℃となった。加熱面から 20mm の位置では, 400℃程度であったが, PC 鋼材の配置位置である 100mm 位置では 40℃程度であり, PC 鋼材は加熱の影響が小さいと考えられる。US 値は, 加熱面から 150mm で 4000m/s 程度であるが, 加熱面の近いほど低下し, 25mm 位置で 660m/s となった。次に, US 比について, 加熱面から 25mm と 50mm 位置では Control 試験体と Jute 試験体ともに, 約 0.2 未満と 0.6 程度であった。US 値の低下は間接的にコンクリートの圧縮強度と弾性係数などの力学特性の低下と関係するため, 加熱面付近では残存強度の低下が著しいと考えられる。圧縮領域の力学特性が低下したことが影響し, 加熱後の Control と Jute 試験体の初期剛性の低下と終局耐力の低下が生じたと考えられる。

### 3.6 HPRFRCC の補修効果

図-13 に Control と Jute 試験体の初期剛性と NH を 1 とした場合の比率を示す。図中には, 加熱後と HPRFRCC で圧縮領域を 50mm 厚で補修した後の値を併せて示す。NH は 42.5kN/mm となり, 加熱後 Control と Jute はそれぞれとは 9.9kN/mm と 11.2kN/mm となり大きく低下した。その比率は Control と Jute はそれぞれ 0.23 と 0.26 であった。圧縮領域加熱した今回のケースでは, 曲げ試験において, 加熱面から 5 mm 位置の最高温度は Control と Jute でそれぞれ 700℃および 750℃であり, US 値の低下が 0.2 未満と大きく低下したことによって, 曲げ試験時に圧縮合力が大きく低下したため, 初期剛性が低下したと考えられる。一方, HPRFRCC で補修したあとは, Control-re と Jute-re はそれぞれ 26.8kN/mm と 38kN/mm であった。NH との比率は, Control-re と Jute-re はそれぞれ 0.63 と 0.89 となった。加熱後と比較として, 加熱後の初期剛性および終局耐力を 1 とした比率を回復比とすると Control-re と Jute-re の回復比はそれぞれ, 2.7 と 3.4 となった。これは加熱によって, 上面が損傷し, US 値が 0.2 未満であることから HPRFRCC で補修した効果が大きくなったと考えられる。

図-14 に Control と Jute 試験体の終局耐力と NH を 1 とした場合の比率を示す。図中には, 加熱後と HPRFRCC で圧縮領域を 50mm 厚で補修した後の値を併せて示す。NH は 94kN となり, 加熱後 Control と Jute はそれぞれとは 67.8kN と 74.2kN となり大きく低下した。その比率は Control と Jute はそれぞれ 0.72 と 0.78 であった。圧縮領域を加熱したことで, 終局耐力は低下している

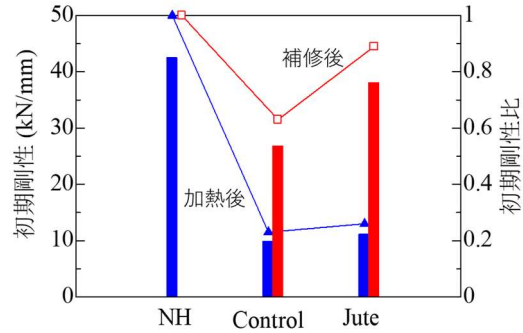


図-13 PC はり曲げ載荷試験による初期剛性(加熱後と補修後の変化)

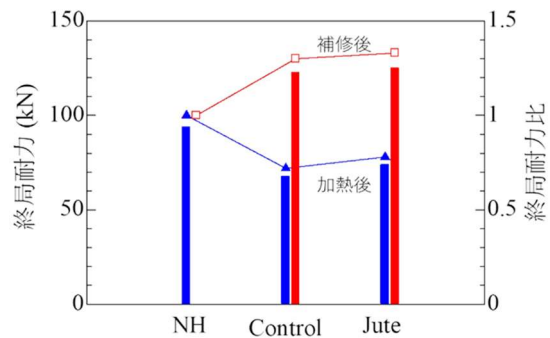


図-14 PC はり曲げ載荷試験による終局耐力(加熱後と補修後の変化)

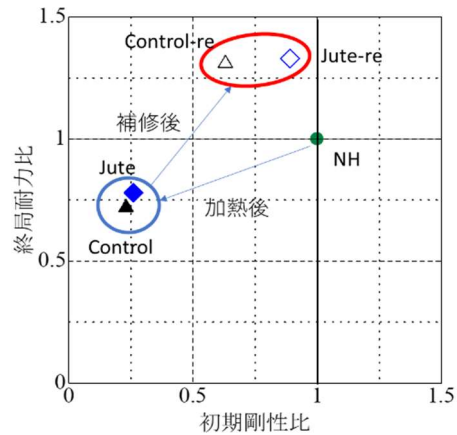


図-15 終局耐力比と初期剛性比の関係

が, PC 鋼棒の位置の温度は, 30℃程度でありプレストレスの低下は小さいと考えられる。そのため, 終局耐力比は 0.75 程度となったと考えられる。一方, HPRFRCC で補修したあとは, Control-re と Jute-re はそれぞれ 122.8kN と 125.138kN であった。NH との比率は, Control-re と Jute-re とともに 1.3 程度となった。加熱後と比較として, Control-re と Jute-re の回復比は約 1.75 となった。これは, HPRFRCC の圧縮強度と弾性係数が 68.4N/mm<sup>2</sup> と 30.1kN/mm<sup>2</sup> であり, PC 試験体で使用したコンクリートよりも大きいことが影響していると考

えらえる。

### 3.7 最大荷重比と初期剛性比の関係

図-15にControlとJute試験体の最大荷重比と初期剛性比の関係を示す。ここでは、NHを基準として、加熱後の損傷の程度とHPFRCCで補修したあとの効果を確認した。加熱前後の残存比について着目すると、Control試験体とJute試験体は、終局耐力比と初期剛性比がそれぞれ、0.72と0.23および0.78と0.26であった。今回の圧縮領域加熱では初期剛性の低下率が大きいことがわかった。Jute試験体では、爆裂抑制繊維としてJuteを0.1%vol混入し、爆裂の抑制効果は確認できた。しかし、PC試験体の力学性能の低下の抑制効果は見られず、Control試験体とほぼ同程度であった。次に、補修前後の残存比について着目すると、Control試験体とJute試験体は、終局耐力比と初期剛性比がそれぞれ、1.31と0.69および1.33と0.89であった。終局耐力比と初期剛性比ともHPFRCCを使用することで加熱後よりも回復する結果となった。終局耐力比は、NHよりも30%程度大きくなり、圧縮強度と弾性係数が母材コンクリートよりも大きい材料を使用することの効果を確認することができた。今後は、解析的な検討を行い、加熱を受けたPC部材の補修工法の効果を検討する必要があると考えられる。

### 4. まとめ

本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- 1) Jute 繊維を混入した PC 試験体について圧縮領域を加熱した場合、繊維混入無と比較して爆裂を抑制することができた。
- 2) 圧縮領域を加熱した PC 試験体の荷重-変位関係では、加熱無と比較して、初期剛性と終局耐力は大きく低下した。しかし、Jute 繊維混入の影響は小さかった。
- 3) 圧縮領域加熱で損傷した領域を HPFRCC で 50mm 補修した場合、荷重変位関係において初期剛性と終局耐力は加熱後と比較して向上することがわかった。

今後は、解析的な検討を行い、加熱を受けたPC部材の補修工法の効果を検討する必要があると考えられる。

### 謝辞

加熱されたPC試験体の補修に際し、デーロスジャパンの林承燦氏より補修材料の提供と施工を実施頂いた。ここに謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 斎藤光：プレストレストコンクリート部材の爆裂について、日本建築学会論文報告集，pp.688，1966.10
- 2) 川越邦雄：PS コンクリート床版の耐火性，建築技術，No.40，pp.34-42，1956
- 3) N.H. Yi, S.J.Choi, S.W.Lee, J.HJ.Kim: Failure behavior of unbonded bi-directional prestressed concrete panels under RABT fire loading , Fire Safety Journal, Vol.71, pp.123-133, 2015
- 4) 吉田正友：プレストレストコンクリート構造の耐火性に関する研究の動向，Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.63, No.8, pp.571-581, Aug.2014
- 5) 日本コンクリート工学会：高温環境下におけるコンクリートの性能評価に関する研究委員会 報告書，2017年9月
- 6) 森田武：コンクリートの爆裂とその防止策，コンクリート工学年次論文集，Vol.45, No9, pp.87- 91, 2007
- 7) 韓千求，韓ミンチョル，李建哲，許榮善：有機繊維を調合使用した高強度コンクリートの爆裂防止，コンクリート工学年次論文集,Vol.29, No2, pp.151-156, 2007
- 8) 小澤満津雄，森本博昭：高温環境下における天然繊維を添加した高強度コンクリートの爆裂抑制効果，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol69, No.3, pp.324-336, 2013
- 9) 赤坂春風，小澤満津雄，Sirjana Subedi Parajuli, 杉野雄亮：リング拘束供試体加熱試験による天然繊維を混入した高強度コンクリートの爆裂抑制効果の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40, No1, pp1029-1034, 2018
- 10) 橋田美知花，池谷拓由紀，藤本謙太郎，小澤満津雄：火災時における天然繊維混入 PC はりの爆裂抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol43, No1, pp730-735, 2021
- 11) 橋田 美知花，池谷 拓由紀，藤本 謙太郎，杉野 雄亮，小澤 満津雄：火害後にモルタルで補修したプレストレストコンクリートはりの 曲げ耐力，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第22巻，pp457-462，2022年10月
- 12) [https://www.deros-japan.co.jp/works/高靱性ジェットモルタル\(R\)カタログ資料\(2023/01/3 閲覧\)](https://www.deros-japan.co.jp/works/高靱性ジェットモルタル(R)カタログ資料(2023/01/3 閲覧))