T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	低融点金属繊維補強コンクリートの力学特性と加熱による繊維溶解後の特性変化
Title	Mechanical Characteristics of Low Melting Point Metal Fiber Reinforced Concrete and Characteristic Change after Fiber Melting by Heating
著者	華園光, 千々和伸浩, 昇 悟志, 近藤正聡, オミンホ
Author	Hikaru HANAZONO, Nobuhiro CHIJIWA, Satoshi NOBORU, Masatoshi KONDO, Minho O
出典	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, Vol. 22, , pp. 385-390
Citation	, Vol. 22, , pp. 385-390
発行日 / Issue date	2022, 10
権利情報 / Copyright	著作権は公益社団法人日本材料学会が保有しています。 Copyright(c) 2022 The Society of Materials Science，Japan
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

論文

低融点金属繊維補強コンクリートの力学特性と加熱による繊維溶解後の特性変化

華園　光[*1]，　千々和　伸浩[*2]，　昇　悟志[*3]，　近藤　正聡[*4]，　オ　ミンホ[*5]

Mechanical Characteristics of Low Melting Point Metal Fiber Reinforced Concrete and Characteristic Change after Fiber Melting by Heating

Hikaru HANAZONO[*1], Nobuhiro CHIJIWA[*2], Satoshi NOBORU[*3], Masatoshi KONDO[*4], and Minho O[*5]

要旨：繊維補強コンクリートは，繊維とコンクリートの分離が困難であるため，リサイクルが進んでいない．人為的な繊維溶融による分離回収の可能性を確認するため，低融点金属であるアルミニウムと黄銅を繊維状にして補強材として用いた試験体を作製し，常温下での曲げ試験によって低融点金属繊維による補強効果を検討するとともに，高温下での圧縮によって繊維溶融による補強効果の変化を検討した．その結果，低融点金属繊維の添加により靭性や破壊エネルギーを高められること，高温下では繊維による補強効果が低下することが確認できた．

キーワード：繊維補強コンクリート，低融点金属繊維，曲げ試験，高温下圧縮試験

1. はじめに

日本では現在，年あたり約 3000 万トンの廃コンクリート[1)]が排出されている状況にある．一般的な鉄筋コンクリートでは，鉄筋とコンクリートが現場で分離され，コンクリートについてはその後に破砕され道路の路盤材として再利用されるが，近年では再生骨材としての利用が少しずつ進みつつある[2)]．その一方で，繊維補強コンクリートは，繊維の添加率が多いほど粉砕処理によって細かくなり，再生骨材と繊維を含むペーストとの分離は可能であるものの，ペースト部と繊維の分離は困難であるとされている[3)]。繊維とコンクリートの分離の難しさから，多くの繊維補強コンクリートはリサイクルが難しく，埋立処分となっている状況にある．

繊維補強コンクリートの特性と持続可能性との両立を図るためのアイデアとして，低融点金属で作製した短繊維をコンクリートに添加することで繊維補強コンクリートとしての機能を発揮させ，解体時には加熱により繊維を溶融させて分離回収することが考えられる．これは，セメント工場での焼成過程で生じる排熱等を利用して，繊維を含む解体ガラコンクリートを加熱し，架橋効果の低い状態でコンクリートを細かく破砕し，コンクリートと溶融した金属繊維を熱遠心分離によって分離して、それぞれを独立に材料として再生するというものである。加熱処理により，セメントペーストマトリクス部の脆弱化も生じると予想される．しかし，低融点金属繊維をコンクリート補強材に用いた先行例はなく，その材料条件や補強効果は未知である．当然ながら高温下における低融点金属繊維補強コンクリートを用いた実験例もなく，その力学的性状も未知である．よって本研究では，低融点金属繊維補強コンクリートの実現可能性と加熱溶融による繊維補強効果の低減，および分離の可能性に焦点を当てて検討する．

2. 低融点金属繊維の補強材としての性能評価

低融点金属繊維をコンクリート補強材として使用した先例はなく，その補強効果は未知である．そのため，低融点金属補強コンクリートに対して曲げ試験を実施し，その性能を確認した．

2.1　繊維

本研究において，繊維として使用する金属には，1000℃以下で溶融する低融点であること，荷重をある程度受け持つことができる強度を有することが条件となる．これらを考慮し，繊維の種類は，アルミ

表-1　金属の物性

	ヤング係数 (kN/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	融点 (℃)
アルミニウム	70.3	90-150	660
黄銅	96	295	860

*1　東京工業大学　環境・社会理工学院　修士課程
*2　東京工業大学　環境・社会理工学院　准教授
*3　不動テトラ　総合技術研究所　材料・構造グループ
*4　東京工業大学　科学技術創成研究院　准教授
*5　東京工業大学　物質理工学院　助教

表-2　配合表

繊維の種類	W/C (%)	Air (%)	単位量(kg/m^3)				密度(g/cm^3)		
			W	C	S	Ad	C	S	Ad
アルミニウム	29.3	4.7	265	930	946	7.4	3.16	2.45 (※表乾状態)	1.03 (※20℃)
黄銅	29.3	4.7	265	930	946	7.4			



アルミニウム繊維：ツイスト型
（事前腐食後）



黄銅繊維：ツイスト型



黄銅繊維：W型

図-1　繊維形状

ニウム，黄銅の 2 種類を使用した．アルミニウム，黄銅の物性を**表-1** に示す．引張力に抵抗した繊維は最終的に引き抜けや破断に至るが，これらをできる限り抑制するためには太い径や，複雑な形状が有効となる [3]．これを考慮し，繊維形状は**図-1** に示すように，アルミニウムはツイスト型の 1 種類を，黄銅繊維はツイスト型と W 型と名付けた 2 種類の形状を用いた．ツイスト型の繊維は，直径 1mm の 2 本の巻き線をねじり，30mm の長さで切断して作製した．W 型の繊維は直径 1mm の巻き線を 30mm に切断した後，等間隔で 90 度の角度となるように 3 度曲げることで作製した．ただし，全ての繊維は手作業により作製し，寸法，形状ともに多少の誤差を有する．また純粋なアルミニウムは酸化カルシウムと反応し、水素を生じて付着強度が低下する。そこでポルトランドセメントを溶いて pH12 にしたアルカリ溶液に、使用するアルミニウム繊維を 2 週間浸漬し，アルミニウム繊維表面にアルミン酸カルシウムによる酸化被膜を形成させ，付着性状を改善することとした．ただし，長期間の安定性については現時点では不明であり，今後の検討が必要である．

2.2　供試体

供試体の寸法は，100mm×100mm×400mm の角柱供試体とし，繊維の添加量は種類によらず供試体の体積に対し，2.5%とした．供試体の作製には，モルタルを使用し，混和剤には高性能 AE 減水剤を添加した．配合を**表-2** に示す．繊維は，モルタルの作製後，供試体 1 体分をボウルに移して手練りで混入した．供試体は，個体による結果のばらつきを考慮し，1 種類につき 4 体作製した．

表-3　曲げ試験載荷速度

変位（mm）	載荷速度（mm/min）
0－1	0.04
1－3	0.1
3－	3.0

2.3　実験方法

載荷方法は三点曲げ載荷とし，JCI-S-001-2003[4]および JCI-S-002-2003[5]に記載の規準に則り実施した．載荷前に供試体底面中央部に，ウェットカッターを用いて 3cm の切欠きを作製した．変位計は供試体側面の載荷点直下と支点上の合計 6 ヶ所に鉛直変位計を設置し，これにより供試体の荷重方向の変位の計測値から支点沈下の影響を取り除いた．また，載荷速度は**表-3** のように，供試体の鉛直変位によって 3 段階に変化させた．これは，繊維の補強効果によって長くなる載荷時間を短縮するためである．

2.4　破壊エネルギー

本研究では，繊維補強コンクリートの力学特性を評価するため，破壊エネルギーG_Fを用いた．破壊エネルギーG_Fの算出式を式(1)および(2)に示す．

$$G_F = \frac{W_0' + W_1'}{A_{ig}} \tag{1}$$

$$W_1' = \left(\frac{S}{L}m_1 + 2m_2\right) g \cdot LPD_C \tag{2}$$

ここに，W_o'：供試体が破断するまでの荷重―変位曲線下の面積，W_1'：供試体の自重および載荷治具がなす仕事，A_{ig}：リガメントの面積，S：載荷スパン，L：供試体の全長，m_1：供試体の質量，m_2：試験機

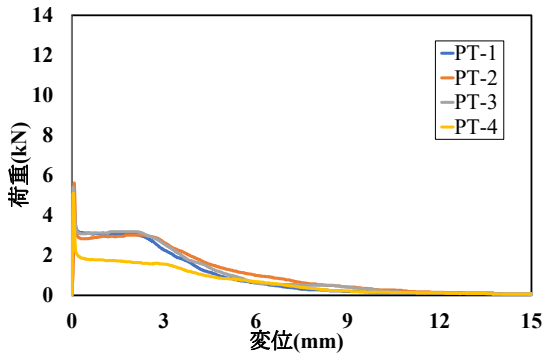

図-2　ツイスト型アルミニウム繊維補強コンクリートの荷重変位曲線

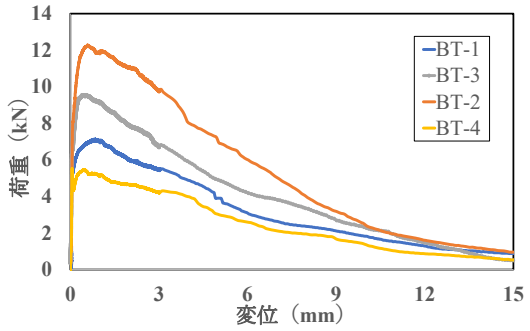

図-3　ツイスト型黄銅繊維補強コンクリートの荷重変位曲線

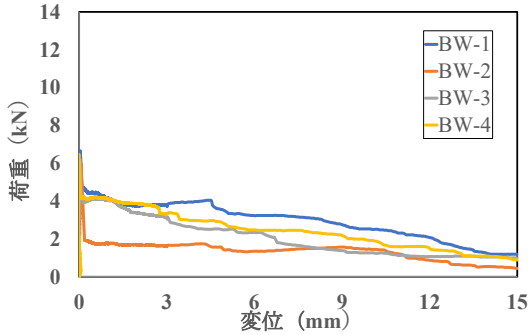

図-4　W 型黄銅繊維補強コンクリートの荷重変位曲線

に取り付けられておらず供試体の破断時まで供試体に載っている治具の質量，g：重力加速度，LPD_C：破断時の載荷点変位

2.5　実験結果と考察

ツイスト型のアルミニウム繊維を添加した供試体をそれぞれ PT-1～PT-4，ツイスト型の黄銅繊維を添加した供試体をそれぞれ BT-1～BT-4, W 型の黄銅繊維補を添加した供試体をそれぞれ BW-1～BW-4 と名付けた．図-2 に示すツイスト型アルミニウム繊維補強コンクリートの変位荷重曲線では，ピーク荷重は 5.0 から 5.5kN 程度となった．ピーク荷重後，ひび割れの発生および進展によって荷重が急落し，その後わずかな荷重の回復がみられた．図-3 のツイスト型黄銅繊維補強コンクリートでは，ピーク荷重が大きいもので 12kN を超え，最も低いもので 6kN 程度となった．同形状のアルミニウム繊維に対し，黄銅繊維の方がピーク荷重は大きな値を示した．また，ツイスト型黄銅繊維補強コンクリートでは，ピーク荷重後の著しい荷重の低下は見られなかった．これらの違いは，剛性，引張強度の違いや，事前腐食の有無の違いによるものだと推察される．黄銅はアルミニウムよりも剛性が高く，架橋時のひび割れ開口抑制効果が強い．また，アルミニウム繊維補強コンクリートでは，黄銅繊維補強コンクリートよりも繊維の破断に至った本数が多く確認された．黄銅の引張強度はアルミニウムのそれより大きく，アルミニウムより破断しにくいため荷重の低下も抑制できると考えられる．以上より，同形状の繊維の場合，黄銅繊維の方がアルミニウム繊維よりも補強材として優れていることが判った．

表-4　破壊エネルギー算出結果

供試体名	破壊エネルギー（N/m）	平均値（N/m）
PT-1	2212.7	2179.0
PT-2	2495.7	
PT-3	2401.4	
PT-4	1606.0	
BT-1	5853.5	7923.0
BT-2	11905.7	
BT-3	8897.2	
BT-4	5035.4	
BW-1	6681.2	4893.7
BW-2	2984.2	
BW-3	4534.7	
BW-4	5374.7	

W 型黄銅繊維を用いた場合，ツイスト型よりもピーク荷重後の荷重低下が大きくなった．2 本で作製されたツイスト型繊維に対し，W 型繊維の剛性は低く，引き抜け易いことが原因だと考えられる．さらに W 型の繊維の引抜け後の形状は，W 型の形状が残らず，繊維が直線状に伸びきっていたため，軸力方向に対する剛性が小さかったと考えられる．

以上のことから，W 型黄銅繊維コンクリートの破壊エネルギーは，ツイスト型繊維補強コンクリートの値より小さくなっていた．よって，黄銅繊維の場合，W 型よりもツイスト型の方がひび割れ発生および進展に対する抑制効果が高いと考えられ，補強材

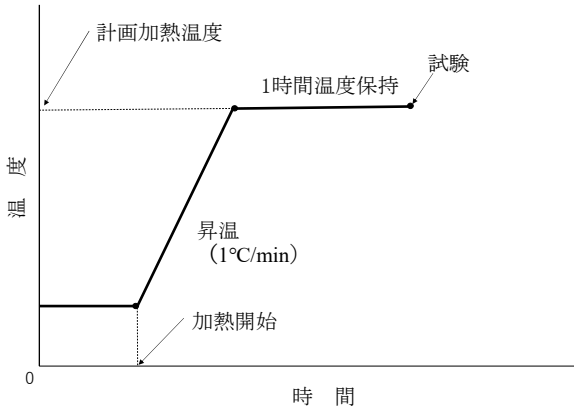

図-5　加熱工程

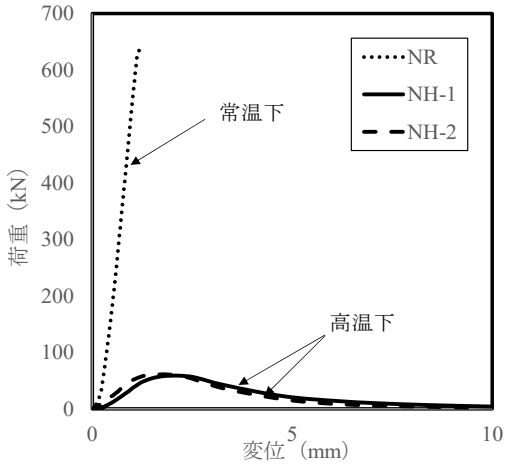

図-6　無補強コンクリートの荷重変位曲線

として優れた形状であると判明した．

3. 低融点金属補強コンクリートの高温下圧縮試験

繊維補強コンクリート材料の恒久的な再利用の実現には，繊維補強コンクリートの靭性を低下できるか否かが重要となる．そのため低融点金属の融点を超える高温下圧縮試験を行い，繊維溶融による補強効果低減の有無を確認する．

3.1　繊維

繊維の種類は，アルミニウムと黄銅の 2 種類を使用した．繊維形状は，アルミニウムと黄銅繊維ともにツイスト型を使用し，寸法，および，繊維の作製方法は 2.1 に前述した通りである．

3.2　供試体

供試体の大きさは，加熱過程で内部に発生する熱応力をできるだけ小さくし，加熱時間を長くならないように，ø100mm×150mm とし，供試体の種類は普通コンクリート，アルミニウム繊維コンクリートそして黄銅繊維補強コンクリートの 3 種類を作製した．供試体の作製は，**表-2** に記載した配合と同じモルタルを使用し，普通コンクリートはアルミニウム

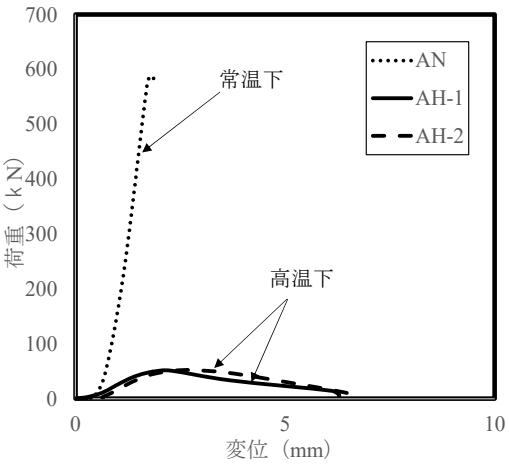

図-7　ツイスト型アルミニウム繊維補強コンクリートの荷重変位曲線

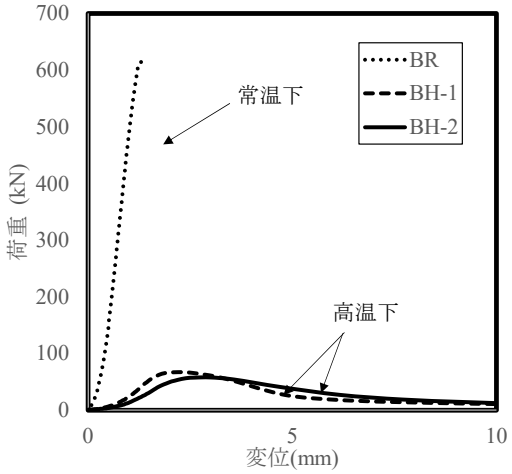

図-8　ツイスト型黄銅繊維補強コンクリートの荷重変位曲線

繊維補強コンクリートで使用したものと同じ配合で作製した．供試体数は，3 種類ごとに 3 体作製し，1 体は室温下，他 2 体は高温下の載荷試験に用いた．

3.3　実験方法

(1)　加熱過程

加熱装置は，日本電産シンポ製のプログラム調節器付き電気炉を使用した．加熱速度は，爆裂破壊を防ぐ目的から，安部 [6]や一瀬 [7]の報告を参考に 1℃/min とした．加熱パターンを**図-5** に示す．計画加熱温度は，1000℃とした．これはアルミニウムと黄銅の融点を考慮したためである．計画温度到達後は，供試体内部まで温度を均一にするため，同温度を 60 分間維持した．供試体の取り出しは，供試体の加熱終了後，電気炉内部が 1000℃の状態において行った．

(2)　圧縮試験

供試体を電気炉から取り出し，圧縮試験機に設置

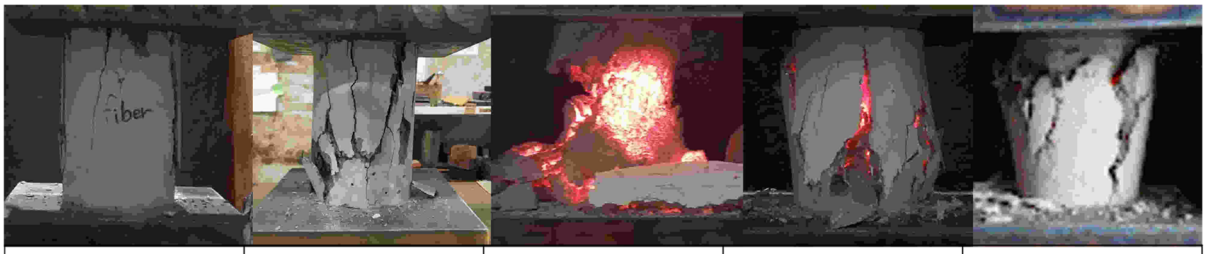

図-9　常温下および高温下載荷による供試体の破壊直後の状態

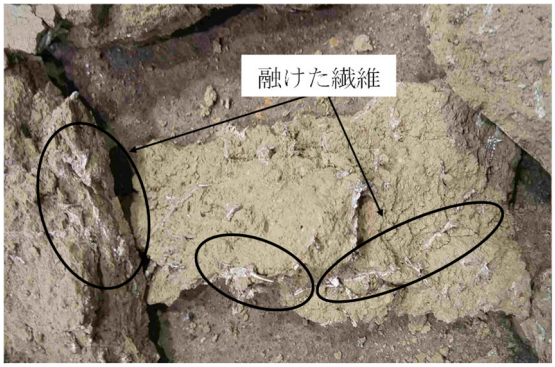

図-10　高温下載荷後のアルミニウム繊維補強コンクリート内部

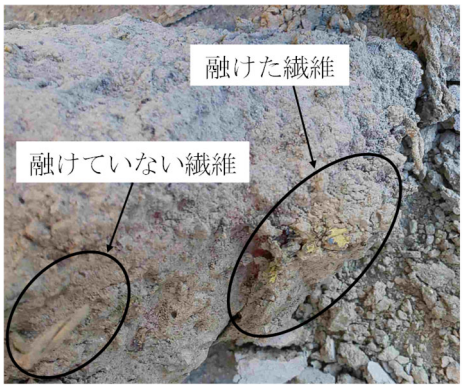

図-11　高温下載荷後の黄銅繊維補強コンクリート内部

してから 3 分以内に載荷を開始した．これは，供試体が外気に触れ，冷却される時間を短縮するためである．変位計測については、高温の供試体に計測器を取り付けることができないことから，圧縮試験機のクロスヘッドの変位を変位計で計測して代替することとした．このため変位の結果には載荷板などの試験治具などの変形なども含まれる．また，圧縮試験機への熱伝導を防止するため，供試体の上面と底面に厚さ 100mm の鉄板を載荷板として設置した．

3.4　実験結果および考察

図-6、図-7，図-8 に各繊維での試験結果を示す。NR を常温下で載荷試験を行った無補強コンクリート，NH-1, NH-2 を高温下載荷試験を行った無補強コンクリート，AR を常温下で載荷試験を行ったアルミニウム繊維補強コンクリート，AH-1，AH-2 を高温下で載荷試験を行ったアルミニウム繊維補強コンクリート，BR を常温下で載荷試験を行った黄銅繊維補強コンクリート，BH-1，BH-2 を高温下で載荷試験を行った黄銅繊維補強コンクリートとする．また，**図-9** に常温下および高温下載荷試験による供試体の破壊直後の状態を示す。コンクリートの繊維の有無および繊維の種類によらず，経験した最大温度によって最大荷重も同程度となる結果となった．

図-6 より，無補強コンクリートは，加熱後最大荷重が大きく低下している．水セメント比 20～50%のコンクリートでは，100℃および 200℃において強度低下する．これは，骨材の膨張とセメント水和物の収縮による微細ひび割れの発生やコンクリート中の水分移動が影響しているものと考えられている．また，加熱温度が 300℃を超えると，コンクリート強度は低下していくとされる．この強度低下は，脱水作用の影響，ポルトランダイトの分解による水分の蒸発によるものと推察されており [6]，本実験でも同様の事象が生じたものと考えられる．

常温下での無補強コンクリートの破壊時には，大きく破損して細かい破片が飛散したが，常温下でのアルミニウム繊維補強コンクリートの破壊は，**図-9** のように，供試体表面にひび割れが生じるだけにとどまった．これより，常温下ではアルミニウム繊維が供試体ひび割れやおよび剥離を抑制したと考えらえる．**図-7** に示すように，アルミニウム繊維補強コンクリートは，加熱後にピーク強度が大きく低下したが，強度低下幅は加熱した無補強コンクリートと同程度であった．**図-9** に示すように，アルミニウム繊維補強コンクリートは高温下載荷において上下中央部に大きな破壊が生じた．加熱による繊維溶融により，ひび割れの抑制効果が消失したためと考えられる．供試体の表面部の剥落が生じていないが，外

気によって溶融した繊維が再固化したことで，接着剤のような役割を担っていた可能性がある．アルミニウム繊維補強コンクリートの高温下載荷後の内部状態を**図-10** に示す．高温下載荷後の供試体は，常温時のものと比較して容易に破壊することができた．内部のアルミニウム繊維は，混入前のような形状を保っておらず，あらゆる箇所で破断していた．以上から，アルミニウム繊維補強コンクリートは，融点を超える高温で加熱することで，繊維が溶融し，本来の靭性が失われ破壊しやすくなることが明らかになった．

黄銅繊維補強コンクリートの常温下での載荷では，**図-9** のように，大きなひび割れは生じるものの，原形を留めた形での破壊が生じた．高温下載荷では，**図-9** のように，供試体上部が沈み込み、側面が大きく割れて外側へ傾くような変形が生じた．高温下載荷後の供試体内部では，図-11 に示すように，黄銅繊維が溶けて破断しているものと，溶融せずに原形を留めているものとが混在していた．溶融した繊維は，供試体内部に位置しており，原形を留めていた繊維は，供試体外部に位置していた．黄銅はアルミニウムよりも融点が高いため，一旦溶融した繊維が，表面側では外気によって急冷されて凝固し，外気の影響を受けにくい供試体内部にでは繊維が溶融したまま破壊に至った可能性がある．総合的にみれば，アルミニウム繊維補強コンクリートと同様に，繊維によってひび割れの進展およびコンクリートの剥離が抑制される結果となった．**図-8** に示す高温下載荷後の荷重変位曲線において，強度は常温下の結果と比較すると大きく低下している．よって，黄銅繊維補強コンクリートは，繊維の融点を超える高温で加熱により，本来の靭性を失うことが判明した．

以上から，融点の低いアルミニウム繊維の方が黄銅繊維よりも，高温の影響を受けやすく，コンクリートに対する補強効果も低下し易いことが判明した．

4. まとめ

本研究から得られた知見を以下に示す．

- 曲げ試験によって，低融点金属であるアルミニウム繊維，黄銅繊維ともにコンクリートへのひび割れ抑制，靭性強化効果が見られた．特に，ツイスト形状の黄銅繊維補強コンクリートの破壊エネルギーは 7923.0 N/m となり，一般的な FRC の破壊エネルギーの 1000～10000N/m[9]と比較し，十分な補強効果が確認された．
- 1000℃の高温下載荷では，繊維の添加の有無に関わらず，全ての供試体で強度が低下した．また，低融点金属繊維補強コンクリートでは，繊維の溶融により，本来の靭性は失われた．載荷直後の溶融した繊維に液体状のものは確認できず，ペースト部分との分離は困難な状態であった．これは，外気温の影響である可能性が有り，実験手法の改良が求められる．現時点では，熱遠心分離による繊維の分離は困難であると予想される．

今後の課題として，低融点金属繊維が容易に溶融する高温下載荷過程の検討，および金属繊維とコンクリートの分離手法の検討が求められる．

謝辞

本研究の実施にあたっては東京工業大学異分野融合研究支援による助成を受けて実施したものである．実施にあたっては東京工業大学研究・産学連携本部の井上素子博士，環境・社会理工学院の中山一秀博士には多大なご支援をいただきました．ここに感謝の意を表します．

参考文献

1) 山崎章弘：廃コンクリートのリサイクルと有効利用プロセス，化学工学会秋季大会研究発表講演要旨集，A308，2008
2) 日本コンクリート工学会　コンクリートの生産・供給・施工システムの革新に関する研究委員会　報告書，pp.107-127，2019.9
3) Minoru Kunieda, Naoshi Ueda, Hikaru Nakayama : Ability of recycling of fiber reinforced concrete, Construction and Building Materials，Volume 67, PartC，Pages315-320，2014
4) 小林一輔：繊維補強コンクリート，コンクリート工学，Vol.13，No.8，pp.24，1975.8
5) 日本コンクリート工学会 : JCI-S-001-2003，切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法，2003
6) 日本コンクリート工学会 : JCI-S-002-2003，切欠きはりを用いた繊維補強コンクリートの荷重－変位曲線試験方法，2003
7) 安部武雄，古村福次郎，戸祭邦之，黒羽健嗣，小久保勲：高温度における高強度コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，64 巻，第 515 号，pp.163-168，1999.1
8) 一瀬賢一：高温下におけるコンクリートの力学的性状，コンクリート工学，Vol.45，No.9，pp.83-86，2007.9
9) 松本高志：繊維補強コンクリートの材料特性とその利用分野，コンクリート工学，2012 年 50 巻 5 号 p.429-432