

論文 高温環境下におけるハイブリッド繊維補強高強度コンクリートの破壊靱性に関する研究

渡辺 一郎^{*1}・Suhaendi, S, L^{*2}・堀口 敬^{*3}・志村 和紀^{*4}

要旨：高強度コンクリートでは爆裂対策としてポリプロピレン繊維の混入が有効であることが指摘されている。しかしながら繊維の熔融のため火災時の破壊靱性向上は難しい。そのため、ポリプロピレン繊維と鋼繊維を組み合わせたハイブリッド繊維による破壊靱性の確保が提案されている。本研究では、高強度繊維補強コンクリートの破壊エネルギー試験を行い、加熱時における特性と残存特性を評価した。その結果、ハイブリッド繊維による破壊靱性の確保が確認された。

キ・ワ・ド：高強度コンクリート，破壊エネルギー，繊維補強

1. はじめに

近年，高強度コンクリートで建設されたトンネルの火災被害が発生している。高強度コンクリート構造のトンネル火災における損傷の特徴として，強度低下はもとより爆裂現象による劣化挙動があり，構造物の破壊・崩壊などをもたらす二次災害を発生させる危険性があるため重要な問題となってきた。それ故，高強度コンクリート自体の耐火性能の向上が求められている。しかし，火災被害によるコンクリートの劣化挙動については普通強度コンクリートを対象とした研究が多く¹⁻³⁾，高強度コンクリート(ここでは 50N/mm² 以上とする)の高温環境下での劣化挙動の研究では未解決な部分が多い。そのため，高強度コンクリートの耐火性能に関する詳細な検討が必要とされている。

本研究では，爆裂の防止効果が期待できるポリプロピレン繊維と⁴⁻⁶⁾，破壊靱性の保持および向上が期待できる鋼繊維をコンクリート中に混入したハイブリッド繊維補強高強度コンクリートが加熱作用を受けた際の劣化挙動および繊維特性について破壊力学の観点から検討することを目的とした。なお，破壊評価には橋高らの提

案した多直線近似解析法を用いて破壊特性の評価を行った⁷⁾。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表 - 1 に使用繊維を示す。実験には有効性の確認された直径 18 μm のポリプロピレン繊維および直径 600 μm の鋼繊維を使用した。

表 - 2 に配合を示す。セメントは普通ポルトランドセメント，細骨材として豊浦産川砂(比重：2.7)，粗骨材として小樽産 6 号砕石(比重：2.65)を使用した。混和剤としてリグニンスルホン酸系 AE 剤，ポリカルボン酸系高性能減水剤，シリコーン系消泡剤を使用した。

表 - 1 繊維の力学的性状

| | ポリプロピレン繊維 | 鋼繊維 |
|---------|-----------|-------|
| 直径 (μm) | 18 | 600 |
| 全長 (mm) | 6 | 30 |
| 形状 | フィラメント | インデント |
| 比重 | 0.9 | 7.8 |
| 融点 (°C) | 160-170 | 1370 |
| 沸点 (°C) | 341 | - |

*1 北海道大学 工学研究科 工修 (正会員)

*2 Ph. D. Student in division of built environment, Hokkaido University.(正会員)

*3 北海道大学 工学研究科 助教授 工博 (正会員)

*4 北海道大学 工学研究科 助手 工博 (正会員)

表 - 2 各供試体の配合

| 記号 | W/C (%) | s/a (%) | 繊維量 (%) | | W (kg/m ³) | Air (%) | SP ^{*1} (%×c) | AE ^{*2} (%×c) | BC ^{*3} (%×c) |
|-------|---------|---------|-----------|-----|------------------------|---------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | | ポリプロピレン繊維 | 鋼繊維 | | | | | |
| Plain | 30 | 50 | - | - | 170 | 6 | 0.8 | 0.012 | - |
| PP | | | 0.1 | - | | | 1.2 | 0.006 | 0.001 |
| HY | | | 0.5 | - | | | 1.35 | 0.008 | 0.001 |

*1SP：高性能減水剤

*2AE：AE剤

*3BC：消泡剤

2.2 供試体および養生

型枠には 100 × 100 × 400mm の角柱型枠を使用した。供試体は硬化後 20 ± 2 の水中で 28 日間養生し、養生終了後に供試体中央部に深さ 30mm、幅 5mm の切欠きをダイヤモンドカッターにて施した。その後 24 時間の気乾養生の後に各試験を実施した。なお、試験前の供試体の含水率は 3 ~ 4% であった。

2.3 破壊エネルギー - 試験

破壊エネルギー - 試験は JCI 基準に準拠し、変位制御により LPD 速度が 0.1mm/min の速度で荷重した⁸⁾。なお、試験装置の支点は水平方向に移動可能な構造とした。計測項目としては荷重荷重(P)、ひび割れ開口変位(CMOD)、鉛直変位(LPD)を測定した。試験装置および各計測位置を図 - 1 に示す。

2.4 加熱方法および加熱履歴

本研究では、冷間および熱間試験を実施した。本研究での定義としての冷間試験は高温加熱後、そこから常温にまで供試体の温度を下げた状態で実施した試験を意味する。

一方、熱間試験は高温環境下における破壊特性を評価するもので、破壊エネルギー試験時に実際に加熱を与え続けて試験を行った。

写真 - 1 に環状電気炉と加熱載荷装置を示す。供試体の加熱には、プログラム温度調節機能付き環状電気炉(冷間試験)と、同機能を有す加熱装置(熱間試験)を使用し、供試体周辺の温度を制御しながら加熱を実施した。

図 - 2 に本研究における加熱履歴を示す。供試体への加熱は冷間・熱間試験ともに 10 /min で昇温させ、最高温度を 200、400 および 600 の 3 パターンとし、各最高温度に到達後 2 時間保持

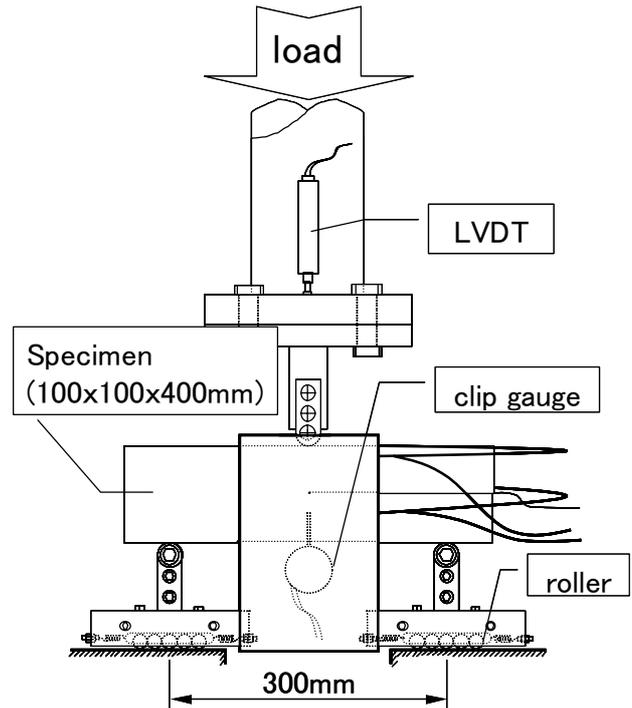


図 - 1 3点曲げ載荷試験装置



写真-1 環状電気炉(上)と加熱載荷装置(下)

するように供試体周辺の温度を制御した。また、冷間試験用の供試体は、加熱後熱収縮によるクラック貫入を防ぐため自然冷却により室温程度になるまで除冷した。

2.5 破壊エネルギー

破壊エネルギー - G_F は次式により計算した。

$$G_F = (0.75W_0 + W_1) / A_{lig} \quad (1)$$

$$W_1 = 0.75(S/L \cdot m_1 + 2m_2)g \cdot CMOD_c$$

ここに、 G_F : 破壊エネルギー(N/mm)、 W_0 : 供試体が破断するまでの荷重 - 開口変位曲線下の面積(N・mm)、 W_1 : 供試体の自重および荷重治具がなす仕事(N・mm)、 A_{lig} : リガメント面積(mm²)、 m_1 : 供試体の質量(kg)、 S : 荷重スパン(mm)、 L : 供試体の全長(mm)、 m_2 : 試験機に取り付けられておらず、破断するまで供試体に載っている治具の質量(kg)、 g : 重力加速度(9.807m/s²)、 $CMOD_c$: 破断時のひび割れ開口変位(mm)。

なお、本研究では鋼繊維を混入した供試体においては最大荷重以降も破断せずに荷重が継続されることを考え、各変位を計測するにあたり試験開始からの開口変位が2mmまでの破壊エネルギーを計算するものとした。

3. 試験結果および考察

3.1 冷間試験における残存曲げ強度

図 - 3 に冷間試験における加熱温度と残存曲げ強度比の関係を示す。この残存曲げ強度比とは、破壊エネルギー試験により得られた常温時での最大曲げ荷重を、常温時および各加熱温度

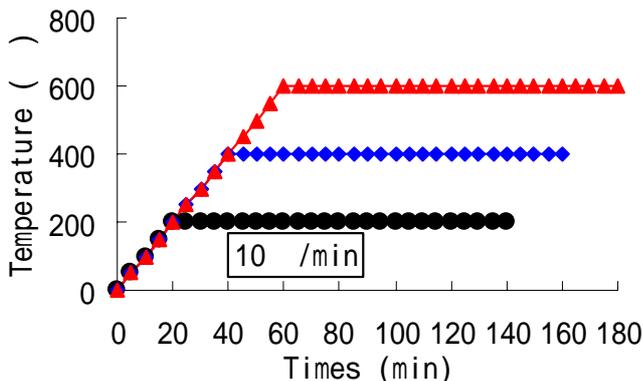


図 - 2 加熱履歴

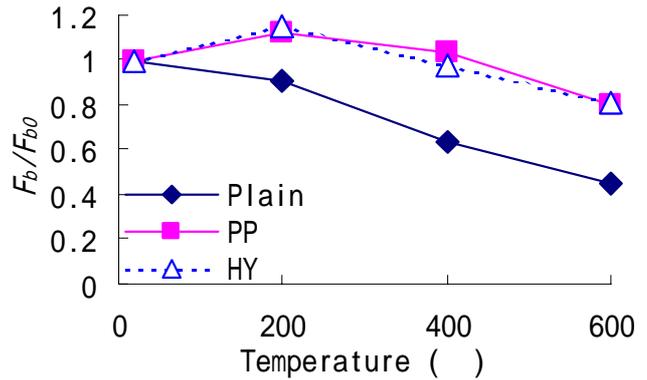


図 - 3 曲げ強度比と加熱温度(冷間)

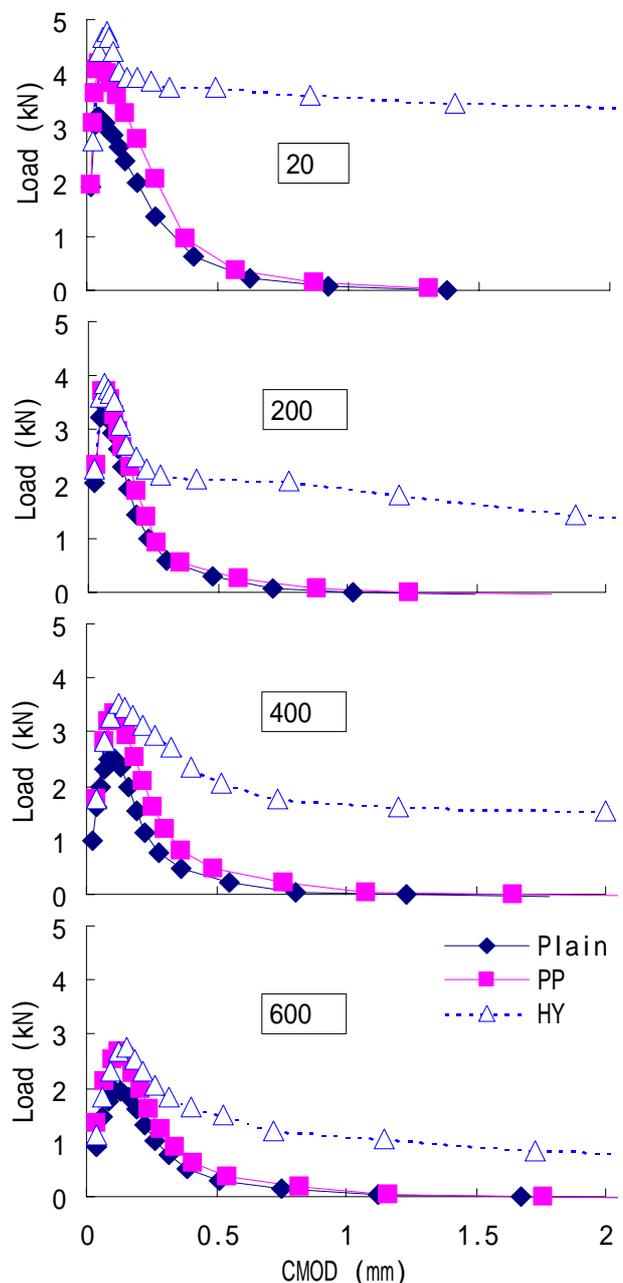


図 - 4 荷重 - 開口変位曲線と加熱温度(冷間)

における最大曲げ荷重を除算したものである。

Plain(繊維無混入)は温度上昇に伴って曲げ強度が低下したが、PP(ポリプロピレン繊維補強)およびHY(ハイブリッド繊維補強)は200での高温加熱後では加熱前の強度以上に、加熱前の強度と400では同程度に、600では加熱前の80%程度の曲げ強度を保持できることを示した。これら強度低下が緩和される原因としては、高温履歴により水和反応が進行して強度増加し、加えて繊維による架橋効果が加わったことによるものと推察される。

したがって、冷間試験と同様な条件下においては繊維の混入が曲げ強度の確保に有効であると思われる。

3.2 冷間試験における荷重 - 開口変位曲線

図 - 4 に冷間試験における加熱温度と荷重 - 開口変位曲線の関係を示す。Plain および PP は開口変位の増大に伴い、ピーク時以降は急激な荷重低下を起こす脆性的な劣化挙動を示すことを確認した。

しかし、HY はピーク時以降においても破断に至らず、Plain や PP よりも極めて大きな荷重を支え続けていることを確認した。これは鋼繊維を混入することでひび割れが発生した後も繊維が応力を伝達し、ひび割れが抑制され変形性能に富んだ挙動が得られたためと考えられる。

したがって、鋼繊維の混入により高温加熱後での急激な脆性破壊を防ぐ効果が期待できるものと思われる。

一方、PP においては高温履歴によるピーク時の強度低下は Plain ほど著しくは無いものの、ピーク以降の挙動は Plain とほぼ同様となっていることがわかる。これはポリプロピレン繊維が加熱により溶融しても完全には蒸発せず、冷却後は繊維の形状に似た状態で存在しある程度の架橋効果を保持していることによるものと思われる。そのため最大強度はある程度維持することはできるが、繊維のプルアウト性能に大きく依存する破壊エネルギーに関しては貢献してはいないものと考えられる。

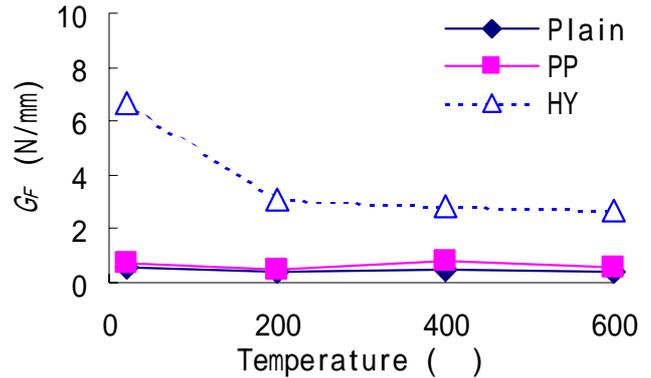


図 - 5 破壊エネルギーと加熱温度(冷間)

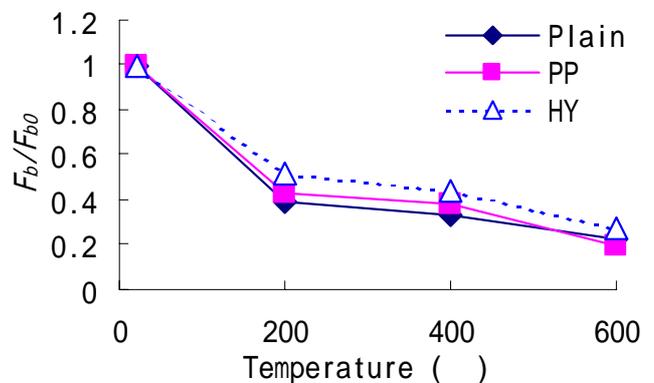


図 - 6 曲げ強度比と加熱温度(熱間)

3.3 冷間試験における破壊エネルギー

図 - 5 に冷間試験における加熱温度と破壊エネルギーの関係を示す。HY の破壊エネルギーは600の高温環境下でも Plain, PP の破壊エネルギーと比較して非常に大きく、常温時では Plain の約 11 倍、200 以上の加熱後でも約 7 倍以上の破壊エネルギーを有していることが判明した。

また、HY の破壊エネルギーは200以上の加熱で急激に減少し、その後も加熱温度の上昇に伴って減少して行くといった劣化挙動も確認された。これは高温履歴による繊維とセメントマトリクスの付着強度の低下やマイクロクラックの発生によるものと思われる。

したがって鋼繊維の混入が常温下での破壊靱性の向上および高温加熱後での破壊靱性の確保に非常に有効であることが確認された。

3.4 熱間試験における曲げ強度

図 - 6 に熱間試験における加熱温度と曲げ強

度比の関係を示す。Plain ,PP ,HY いずれも 200 以上の温度で曲げ強度の急激な低下を起こしているが ,HY は他の 2 種に比べ 10%程度低下率は少なかった。したがって ,高温環境下でも鋼繊維による強度保持の効果を若干は期待できるものと思われる。しかし ,600 ではHYでも Plainをやや上回る程度の曲げ強度しか有してしないことを確認した。これは鋼繊維とマトリクスとの付着性能やマトリクス自体の劣化によるものと思われる。

一方 ,PP においては 600 で Plain よりも低い曲げ強度となっていることを確認した。これは ,ポリプロピレン繊維が加熱により溶融・蒸発し空隙を形成するためと考えられる。したがって ,熱間試験のような 600 以上の高温環境下においてはポリプロピレン繊維による曲げ強度の保持は期待できないものと思われる。

3.5 熱間試験における荷重 - 開口変位曲線

図 - 7 に熱間試験における加熱温度と荷重 - 開口変位曲線の関係を示す。Plain および PP はピーク時以降において ,加熱温度の上昇に伴って荷重が急激に低下することを確認した。また ,開口変位の増大に伴い ,荷重低下の勾配はしだいに小さくなる傾向を確認した。このことから ,高温環境下においてはポリプロピレン繊維の効果は極めて小さなものになって行くということを確認した。

一方 ,HY においてはピーク時以降の劣化挙動として ,Plain および PP と比較して極めて緩やかに荷重が低下し ,その後も荷重を支え続けることを確認した。これも冷間試験の結果と同様に ,鋼繊維の混入によってひび割れが抑制され ,変形性能に富んだ挙動が得られたためと考えられる。したがって ,鋼繊維の混入により高温環境下での脆性破壊を防ぐ効果が期待できるものと思われる。

3.6 熱間試験における破壊エネルギー

図 - 8 に熱間試験における加熱温度と破壊エネルギーの関係を示す。HY の破壊エネルギーは Plain や PP の破壊エネルギーと比較して

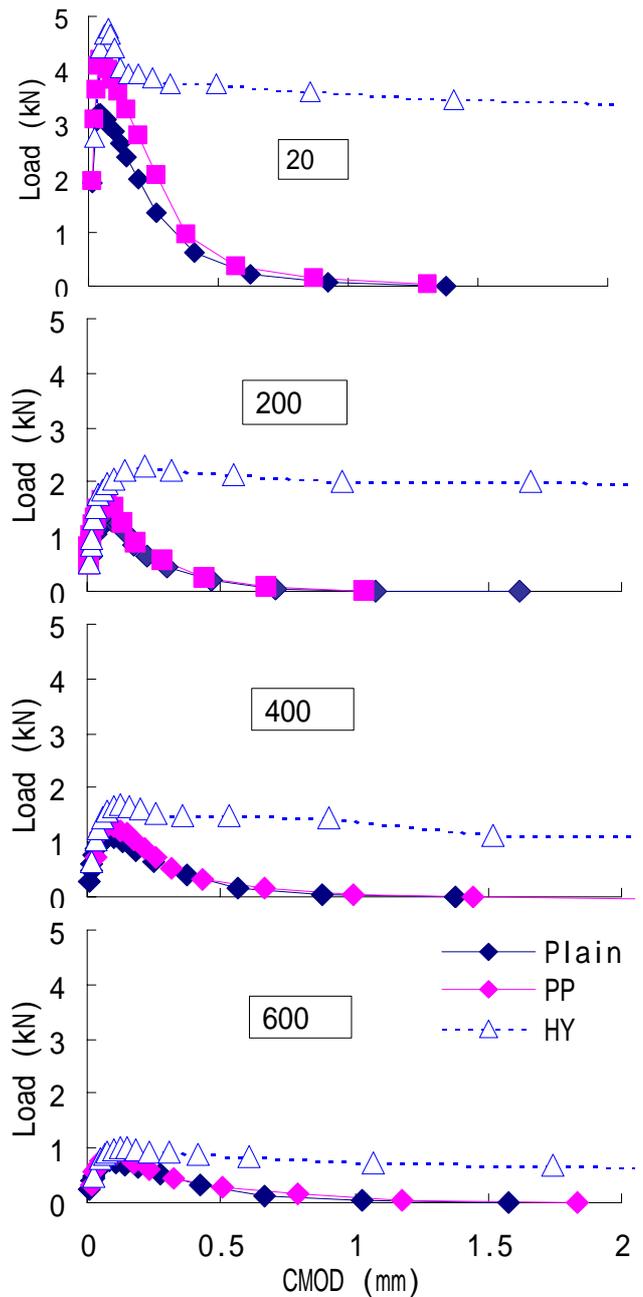


図 - 7 荷重 - 開口変位曲線と加熱温度(熱間)

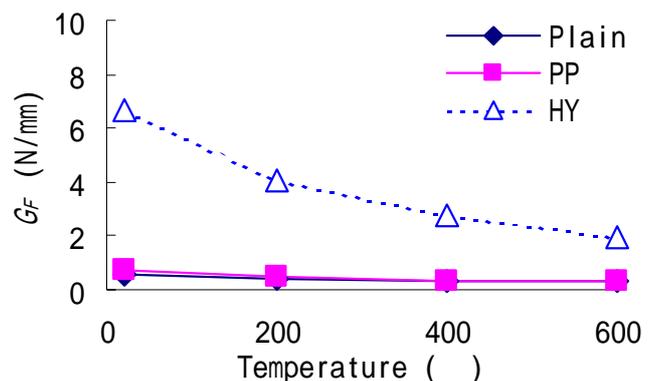


図 - 8 破壊エネルギーと加熱温度(熱間)

非常に大きく 200 で Plain の約 10 倍, 400 で約 8 倍, 600 で約 6 倍程度の破壊エネルギーを有していることが判明した。これにより, 鋼繊維の混入が高温環境下での破壊靱性の確保に非常に有効であることを確認した。

また, HY の破壊エネルギーは加熱温度の上昇に伴って直線的に減少する劣化挙動を示した。この傾向は冷間試験と異なり, 主として鋼繊維とマトリクスとの付着特性の違いに起因するものと考えられ, この他にも加熱による鋼繊維の伸び性状の変化等も影響していると思われる。

4. まとめ

冷間試験および熱間試験によるハイブリッド繊維補強高強度コンクリートへの破壊エネルギー試験を行い, 繊維の影響及び破壊挙動について検討した結果, 本研究の範囲内で以下のことが判明した。

- (1) 高温加熱後の曲げ強度の保持には繊維の混入が有効である。特に, 鋼繊維を混入することで曲げ強度を高く確保することができる。
- (2) 高温加熱後の載荷による急激な脆性破壊は, 鋼繊維の混入により防止可能である。
- (3) 高温加熱後の破壊靱性の確保および常温下での破壊靱性の向上に鋼繊維の混入が非常に有効である。
- (4) 高温環境下での曲げ強度の保持には, 鋼繊維の混入により若干強度保持の効果を期待できる。しかし, 600 以上の高温環境下では, 鋼繊維の剛性等が低下するため Plain と同程度の曲げ強度しか保持できない。
- (5) 高温環境下でも鋼繊維を混入していることで脆的な破壊を防止可能であるとともに, 破壊靱性の確保に対して非常に有効である。
- (6) 冷間試験による曲げ破壊挙動が熱間試験によるそれとは大きく異なることが判明した。本研究では両試験の試験環境が異なることもあり, 厳密な比較は難しいが, 熱間試験の重要性は少なくとも明らかになった。

参考文献

- 1) 金南旭, 佐伯昇, 堀口敬: 若材齢におけるハイブリッド繊維補強コンクリートのひび割れと強度特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.259 - 264, 1999
- 2) C. V. Nielsen and N. Bicanic: Residual Fracture Energy of High - Performance and Normal Concrete Subject to High Temperatures, Material and Structures, Vol.36, pp.515 - 521, 2003
- 3) RILEM Draft Recommendation: Determination of Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three Point Bending Tests on Notched Beams, Material and Structures, Vol.18, No.106, pp.285 - 290, 1985
- 4) S. L. Suhaendi and T. Horiguchi, "Effect of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fiber reinforced high strength concrete after heat exposition", Cement and Concrete Research, Vol.36, Issue 9, pp.1672 - 1678, September 2006
- 5) S. L. Suhaendi, M. Suto, and T. Horiguchi, "Optimization of polypropylene fibers for high strength concrete under high temperature condition", Proceedings of the 10th East Asia Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Vol.6, pp.467 - 472, 2006
- 6) S. L. Suhaendi, K. Shimura, and T. Horiguchi, "Non - destructive test of heated fiber reinforced high strength concrete", Proceedings of the Japan Concrete Institute, JCI, 28(1), pp.407 - 412, 2006
- 7) Kitsutaka, Y.: Fracture Parameters by Poly - linear Tension Softening Analysis, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.123, No.5, pp.444 - 450, 1997
- 8) (社)JCI, JCI基準, 切欠きはりを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, JCI-S-002-2003