

# 論文 ハイブリット繊維で補強した高強度コンクリートの耐火性能

高野 智宏\*1・三宅 武史\*2・堀口 敬\*3・佐伯 昇\*4

**要旨**：海外で高強度コンクリートで施工されたトンネルの火災による損傷が発生し、耐火性能に関する研究が国内外で必要とされている。

本研究は爆裂抑制効果があるポリプロピレン繊維と残存強度保持効果がある鋼繊維を混合したハイブリット繊維を用いた高強度コンクリートの残存強度、ひび割れ抵抗性および爆裂の有無について検討を行った。その結果、ハイブリット繊維補強高強度コンクリートはプレーン高強度コンクリートより若干残存強度が大きく、ひび割れ抵抗性(破壊靱性)および爆裂抑制においてはプレーン高強度コンクリートより有効性が認められた。

**キーワード**：高温加熱、残存強度、ハイブリット繊維補強、爆裂、ひび割れ抵抗性

## 1. はじめに

1994年にドーバー海峡に作られた英仏海峡トンネル(ユーロトンネル)、また近年では2003年韓国での地下鉄火災など、コンクリート構造物に対する火災事故が発生し、コンクリートの耐火性能が注目されている。特に高強度コンクリートセグメントで施工された英仏海峡トンネル(ユーロトンネル)では火災時に爆裂現象が発生し、甚大な損傷を受けたことが報告されている<sup>1)</sup>。

海外では高強度コンクリートを用いた長大なトンネルが多く、高強度コンクリートの耐火性能に関する研究も多いが、普通強度コンクリートの耐火性に関する研究より少なく、また、高強度コンクリートの耐火挙動は普通強度コンクリートの耐火挙動と異なることも言われており、詳細な報告が必要とされている。

本研究は高温加熱を受ける高強度コンクリートに対し爆裂抑制効果があると言われているポリプロピレン繊維と冷却後の残存強度保持効果があると言われている鋼繊維を混合したハイブリット繊維を用いた高強度コンクリートの残存強度、ひび割れ抵抗性(破壊靱性)、爆裂の有無および表面のクラックの有無について検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体配合および養生方法

本研究で用いた供試体の配合を表-1に示す。

ハイブリット繊維補強高強度コンクリート(HYRHSC)1および2は繊維混合比率が異なる。HSCはプレーンの高強度コンクリートである。

設計強度約60MPaの高強度コンクリートを対象としている。このことから単位水量170kg/m<sup>3</sup>、水セメント比は0.35と設定した。セメントは普通ポルトランドセメントで密度3.15g/cm<sup>3</sup>、細骨材は洗浄海砂、密度2.7g/cm<sup>3</sup>、吸水率=0.725%を用いて表面水率=1~1.5%で使用した。

粗骨材は砂岩質5号砕石、密度2.58g/cm<sup>3</sup>、吸水率=3.39%、で、表乾状態のものを使用した。

ポリプロピレン繊維(以降PPF)は融点=160℃~170℃、密度0.9g/cm<sup>3</sup>、長さ30mm太さ20d(0.06mm)、Asp.500(図-1に示す)を、鋼繊維(以降SF)はグリップタイプで密度7.8g/cm<sup>3</sup>、長さ30mm太さ1mm、Asp.30(図-2に示す)を用いた。この他に混和剤としてポリカルボン酸系高性能AE減水剤を使用し、これに対応したAE助剤および消泡剤を適量混入した。

表-2に各供試体のフレッシュ性状を示す。

\*1 北海道大学大学院工学研究科 社会基盤工学 高性能コンクリート分野 工博 (正会員)

\*2 北海道大学大学院工学研究科 社会基盤工学 高性能コンクリート分野 工学

\*3 北海道大学大学院工学研究科 助教授 工博 (正会員)

\*4 北海道大学大学院工学研究科 教授 工博 (正会員)

表-1 供試体配合

供試体名	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	W/C	s/a (%)	空気量 (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )				繊維混入量	
						W	C	S	G	鋼繊維 (vol.%)	PP繊維 (vol.%)
HYRHSC1 (S0.8PO.2)	25	5~12.5	0.35	65	6±1	170	486	925	609	0.8	0.2
HYRHSC2 (S0.7PO.3)										0.7	0.3
HSC						941	619	0	0		

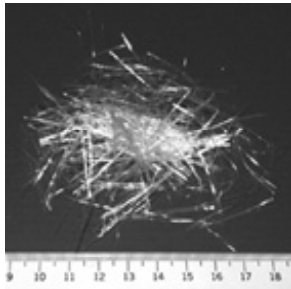


図-1 使用したポリプロピレン繊維

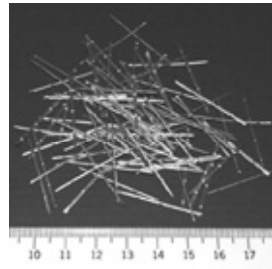


図-2 使用した鋼繊維

表-2 フレッシュ性状

供試体名	フレッシュ性状	
	空気量 (%)	スランブ (cm)
HYRHSC1 (S0.8PO.2)	6.8	13
HYRHSC2 (S0.7PO.3)	5	13
HSC	5.4	12

高強度コンクリートの場合フレッシュ性状においてスランブフローを管理するのが基本的な流れになっているが、本研究の配合のようにPPFおよびSFを混合したハイブリット繊維(HYF)を1vol. %用いる場合、材料分離の発生ならびに流動性に欠けスランブフローを管理することは難しく、本研究のフレッシュ性状はスランブおよび空気量を管理することにした。スランブは50~125mm程度、空気量は6±1%になるように配合設計を行い、表-2に示すように各設定値を満足している。

供試体養生は28日、20±2℃の水中養生を行った。供試体サイズはφ100×200mmおよび100×100×400mmを作成した。

実験は28日水中養生後すぐに各温度で加熱し実験を行った。HSC、HYRHSC1(S0.8PO.2)およびHYRHSC2(S0.7PO.3)の含水率は各5.06%、4.59%および4.61%であり、HYRHSCの含水率はHSCより若干小さかった。

## 2.2 加熱方法および加熱履歴

供試体の加熱は図-3に示す電気炉を用いて行った。加熱制御の温度は供試体表面の温度で行った。

温度履歴を図-4に示す。加熱温度は約10℃/minで温度を上昇させ最高加熱温度を200、400、600℃とし、その後2時間最高加熱温度を保つ

ている。加熱後は冷却によるクラックの進行を防ぐために時間をかけて冷却を行った。

加熱温度の設定は、既往の研究により加熱開始から200℃までは自由水が蒸発し、蒸気圧を発生させる温度領域であり、PPFの融点を少し上回る温度域であること、400℃では骨材膨張によるクラックが発生する温度領域であり、PPFが蒸発する温度範囲であること、600℃までにはCa(OH)<sub>2</sub>の脱水分解が終了し、内部構造が大きく変化する温度域で、またC-S-H硬化体の分解が始まる温度と言われており<sup>2)</sup>、これら要因が残存強度、ひび割れ抵抗性に影響を及ぼすと考えられるため、本研究では200℃ごと最高加熱温度600℃までとした。

## 2.3 試験方法

### (1) 残存強度試験

残存強度として本研究では残存圧縮強度比と残存弾性係数比を示す。残存圧縮強度比は最高温度ごとに加熱前後の各3本でJIS A 1108 コンクリートの圧縮試験方法を基に圧縮試験を行い圧縮強度を算出し平均した値から比を算定した。残存弾性係数比は圧縮試験と同時にコンプレッソメーターを用いて計測した圧縮変形から加熱前後の弾性係数を算出し、比を算定した。

### (2) ひび割れ抵抗性(破壊靱性)試験

本実験ではHillerborgらの仮想ひび割れモデ



図-3 使用した電気炉

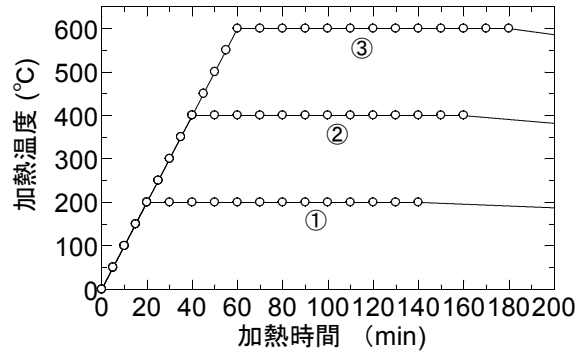


図-4 加熱温度履歴

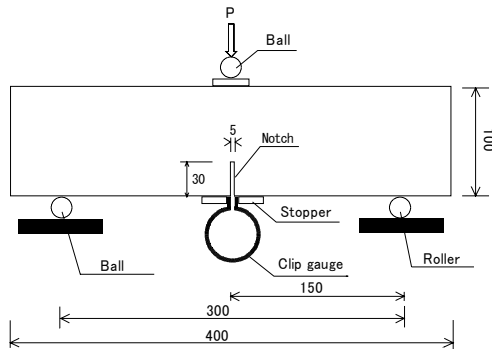


図-5 破壊靱性供試体と試験状況



ルにより算出される破壊エネルギー ( $G_f$ ) を用いて破壊靱性を把握し、ひび割れ抵抗性の検討を行った<sup>3)</sup>。

供試体は $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体を用いた。はじめに、供試体に切り欠きを入れ、各温度の加熱を行った。冷却後図-5に示すように設置した。載加速度はたわみ量を制御し毎分 $0.1 \sim 0.2\text{mm}$ である。試験結果は2本平均で算出している。

### (3) 爆裂の有無および表面のクラックの有無

供試体は1種類につき円柱12本角柱8本であり、加熱される供試体は円柱9本、角柱6本である。これら加熱される供試体は加熱温度が異なり、各温度で円柱3本、角柱2本である。

よって、ここでは各温度で加熱された各供試体の温度別の爆裂の有無、表面のクラックの有無を目視により外観観察した。

## 3. 実験結果

### 3.1 残存強度

#### (1) 加熱前後の圧縮強度と弾性係数

図-6に加熱を受けた各供試体の圧縮強度および弾性係数の変化を示す。同時に日本建築学会、CSB-FIPおよびACI363の弾性係数推定式から導き出した曲線を示す<sup>4)</sup>。

図に示す各供試体のドットの番号は加熱温度を示し、1は未加熱、2は加熱温度 $200^\circ\text{C}$ 、3は加熱温度 $400^\circ\text{C}$ 、4は加熱温度 $600^\circ\text{C}$ の値である。

各供試体1に示す未加熱の値は圧縮強度が $60\text{MPa}$ 以上の値を示し、また弾性係数は各弾性係数推定式より導き出された曲線の近傍に示された。加熱後は各供試体の値は加熱温度の上昇とともに圧縮強度および弾性係数の低下が起こり、 $600^\circ\text{C}$ の加熱まで至ると、各弾性係数算定式より導き出された曲線から大きくはずれるのが見て取れる。

#### (2) 残存圧縮強度比

図-7に残存圧縮強度比を示す。この図では同時にCEB Design CurveおよびEurocode Design Curveを示す<sup>5)</sup>。

加熱温度 $200^\circ\text{C}$ のHYRHSC1、2の残存圧縮強度比は未加熱の供試体より若干低下する結果を

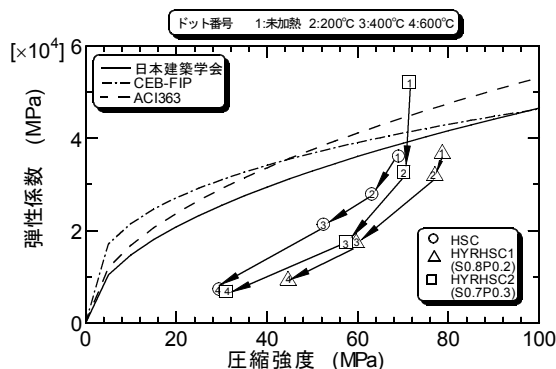


図-6 加熱を受けた静弾性係数-圧縮強度

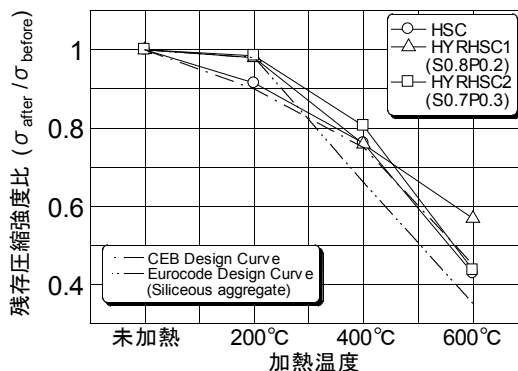


図-7 残存圧縮強度比

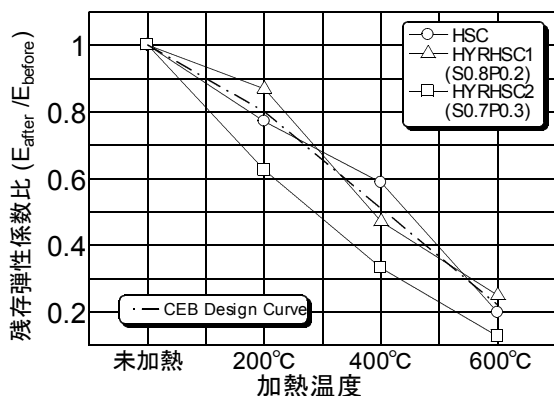


図-8 残存弾性係数比

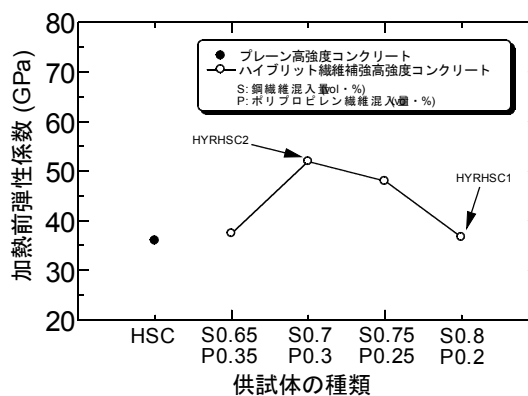


図-9 HYRHSCの弾性係数挙動

示した。しかし、HSCの残存圧縮強度比は約0.9を示し、HYRHSC1, 2の残存圧縮強度比の低下より大きくなる結果が得られた。この温度ではHYRHSC1, 2供試体中の一部のPPFが溶融し消失するが、SFのブリッジ効果もありHSCより強度低下が起こらなかったと考えられる。

加熱温度400°CのHYRHSC1, 2およびHSCの残存圧縮強度比は全て約0.8を示し、若干ではあるがHSCよりHYRHSC1, 2の残存圧縮強度が大きくなる結果が得られた。HSCは未加熱から約0.1ずつ残存圧縮強度比が低下するのに対し、HYRHSC1, 2では加熱温度200°Cから比べると残存圧縮強度比が急激に約0.2低下する結果を示した。これはPPFと粗骨材の影響が考えられる。加熱温度400°Cでは混入したPPFが全て消失するため多くの空隙を形成する。また、粗骨材(砂岩質)は加熱温度400°C近傍から大きな熱膨張を起こすと言われており<sup>9)</sup>、供試体表面には熱ひずみによるクラックが発生する。よって、HYRHSC1, 2の供試体に混入したSFのブリ

ッジ効果もあり若干ではあるがHSCより残存圧縮強度が大きくなるものの残存圧縮強度の低下が起こったと考えられる。

加熱温度600°Cではどの供試体も加熱温度400°Cと比較して残存圧縮強度比が0.2~0.4低下する結果が得られた。粗骨材(砂岩質)は400°C以上の加熱より膨張および変質することが言われており、これが影響したと考えられる。その中で、鋼繊維混入量が多いHYRHSC1は他のHSCおよびHYRHSC2より残存圧縮強度比の低下が少なくなる傾向が示された。

HYRHSC1および2はCEB Design Curve およびEurocode Design Curveと同程度か大きくなる傾向を示し、HSCは加熱温度200°CでEurocode Design Curveより大きな値を示すもののCEB Design Curveより小さくなり危険側にあることを示した。それ以上の加熱温度では両規格より同程度か大きく、安全側にある結果が得られた。

### (3) 残存弾性係数比

残存弾性係数比の結果を図-8に示す。この

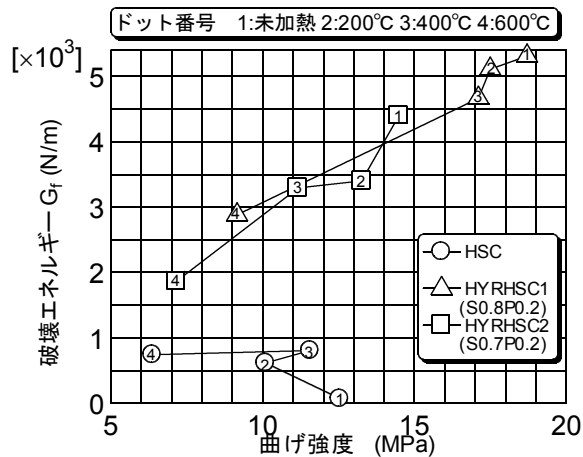


図-10 曲げ強度-破壊エネルギー関係図

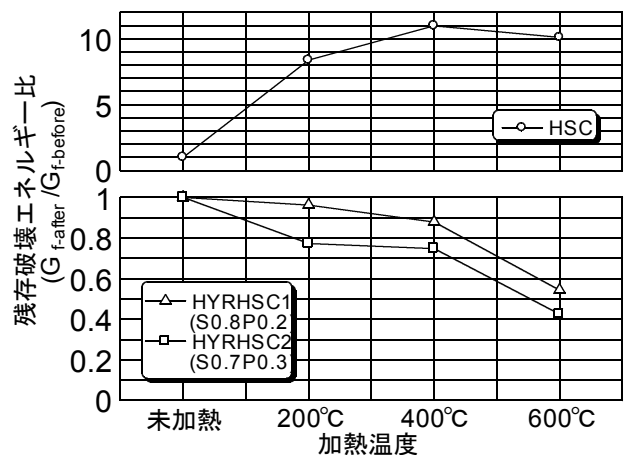


図-11 残存破壊エネルギー比

図では同時にCEB Design Curveを示す。

この図からHSCおよびHYRHSC2の残存性弾性係数比は各温度の結果に上下があるものの同程度の値と傾向が結果が示され、CEB Design Curveと大きな変化は見られない。しかし、HYRHSC1の残存性弾性係数比は他のHSCおよびHYRHSC2と異なりさらに小さくなる結果が示された。これは加熱前の弾性係数の結果が影響していると考えられる。図-9にHYRHSCの弾性係数の傾向を示す。HYRHSC1,2の他にSFおよびPPFの混入量を変えた供試体を同時に示す。この結果、HYRHSCの弾性係数はHYRHSC2をピークに大きくなる傾向が得られた。つまり、混入する繊維をハイブリット化することで、ある混入量だけ未加熱供試体の圧縮強度に対する変形が改善され弾性係数が大きくなること示唆された。そして加熱後の弾性係数はPPFの消失によりハイブリット効果を失い他の供試体と同程度になったと考えられる。このことからHYRHSCは残存弾性係数比の低下も含めさらなる物性に関する研究が必要と考えられる。

### 3.2 ひび割れ抵抗性

図-10に曲げ強度と破壊エネルギーの関係図を示す。図に示す各供試体のドット番号は加熱温度を示し、1は未加熱、2は加熱温度200°C、3は加熱温度400°C、4は加熱温度600°Cの値である。

未加熱のHYRHSC1、2の曲げ強度および破壊エネルギーはHSCより大きいことがわかる。そ

の中でHYRの合計混入量は1vol・%であるがSFの混入量が多いHYRHSC1の曲げ強度および破壊エネルギーが最も大きく、SFが曲げ強度および破壊エネルギーに影響している。この傾向は加熱後の供試体でも示されている。加熱後のHSCの破壊エネルギーの挙動はHYRHSC1、2と異なり加熱温度の上昇に伴い増加する傾向が示された。図-10に示す加熱前のHSCは曲げ強度が大きく破壊エネルギーは小さいことから、ひび割れの進展が瞬時に起こり破壊に至ることが示唆される。加熱後は曲げ強度の低下とともに破壊エネルギーは大きくなる。これは一般的に言われており<sup>7)</sup>、加熱によりコンクリートが脆くなり、ひび割れ進展速度が遅くなる。つまり加重が载荷されず、開口変位のみ計測される。このことから耐力は保持していない。

図-11に未加熱時に対する残存破壊エネルギー比を示す。

HYRHSCの残存破壊エネルギー比は加熱温度400°Cまで約0.8と高いひび割れ抵抗性を示した。加熱温度600°CのHYRHSCの残存破壊エネルギー比は約0.5であった。SFの混入量が多いHYRHSC1の残存破壊エネルギー比がSFの混入量の少ないHYRHSC2より大きいことからSFがひび割れ抵抗性に寄与すると考えられる。

HSCの残存破壊エネルギー比は加熱温度の上昇とともに大きくなる結果が得られ、曲げ強度および破壊エネルギーの挙動からひび割れ抵抗

性は期待できないと考えられる。

### 3.3 表面クラックおよび爆裂の有無

表-3に表面クラックおよび爆裂の有無を示す。この表より加熱温度200℃までは見た目に変化がない。しかし、図-12に示すように加熱温度400℃から供試体表面にクラックが発生し、図-13に示すように加熱温度600℃ではHSCの供試体に爆裂現象が見られた。

このことからハイブリット繊維補強は爆裂現象を制御するものの表面クラックの抑制に効果が見られないと考えられる。

### 4. まとめ

本研究の範囲では次のことが言える。

- 1) ハイブリット繊維補強高強度コンクリートの残存圧縮強度比は低下するもののプレーン高強度コンクリートより大きく、Eurocode Design CurveおよびCEB Design Curveの設計規格に対応していた。
- 2) ハイブリット繊維補強高強度コンクリートの残存弾性係数比はCEB Design Curveの設計規格より小さくなる可能性もある。これに対しては加熱前のハイブリット繊維補強高強度コンクリートの弾性係数が大きく影響している傾向があり、さらなる研究が必要である。
- 3) ハイブリット繊維補強高強度コンクリートの加熱後の曲げ強度および破壊エネルギーはプレーン高強度コンクリートより大きくなる。また、鋼繊維混入量が多いハイブリット繊維補強高強度コンクリートは残存破壊エネルギー比の低下が少なく、高いひび割れ抵抗性を有すると考えられる。
- 4) ハイブリット繊維補強高強度コンクリートは爆裂現象を抑制することができる。

**謝辞：** 本研究の実施にあたって、大林組技術研究所 十河茂幸氏、入矢桂史郎氏から実験の支援、有益なご意見を賜りました。また、フローリックの光石尚道氏から混和剤を提供して頂きました。厚く御礼申し上げます。

表-3 表面クラックおよび爆裂の有無

供試体名	200℃		400℃		600℃	
	表面クラック	爆裂	表面クラック	爆裂	表面クラック	爆裂
HYRHSC1 (SO. 8PO. 2)	無し	無し	有り	無し	有り	無し
HYRHSC2 (SO. 7PO. 3)	無し	無し	有り	無し	有り	無し
HSC	無し	無し	有り	無し	有り	有り

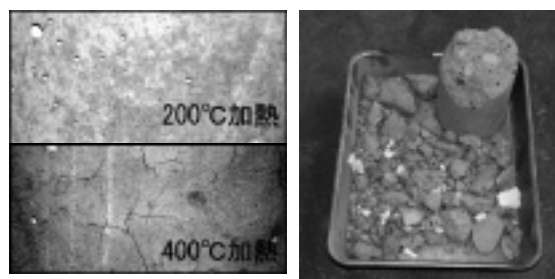


図-12 クラックの発生 図-13爆裂したHSC

### 参考文献

- 1) 森田 武 : トンネル火災におけるコンクリートの耐火性について, コンクリート工学, Vol.38, No.11, pp61-65, 2000
- 2) T.Takano ら : MECHANICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF HIGH STRENGTH CONCRETE WITH FIBER EXPOSED TO HIGH TEMPERATURE, ACMBBS, 214, CANADA, Jul.2004
- 3) Surendra P.Shah, Stuart E.Swartz, Chengsheng Ouyang.: Fracture Mechanics of Concrete, John Wiley & Sons, Inc., 1995
- 4) 笠井 芳夫 ら : コンクリート総覧, 技術書院, pp424-425, 1998
- 5) L.T.Phan.: Fire Performance of High-Strength Concrete: A report of the State-of-the-Art, NIST, NISTIR5934, 1996.11
- 6) 森永 繁 監訳, 山崎 庸行, 林 章二 訳 : U.シュナイダー著 コンクリートの熱的性質, 技報堂出版, 1983.12
- 7) B.Zhangら : Residual fracture properties of normal-and high-strength concrete subject to elevated temperatures.: Magazine of Concrete Reserch, 52, No.2, 2000.4