

超高強度コンクリート (Ductal) の耐火性能

有機繊維混入による爆裂抑止効果と熱拡散率算定

水野敬三・小林裕・道越真太郎・田中良弘・加納宏一
下山善秀^{*1}・片桐誠^{*1}・森大介^{*1}

Keywords: fire resistance, reactive powder concrete, spalling, thermal diffusivity, organic fiber

耐火性能, R P C, 爆裂, 熱拡散率, 有機繊維

1. 序

近年, 圧縮強度が 200N/mm^2 を超えるような超高強度高靱性の RPC (Reactive Powder Concrete) [商品名: Ductal] が開発され, 実用化に向けた研究が進められている¹⁾. Ductal は極めて緻密なセメント質材料であることから, 火災のような急激な加熱を受けたときには爆裂する可能性がある. そこで爆裂対策を検討するため, 有機繊維を混入した Ductal の小型板部材の加熱実験を行った. さらに, 加熱実験データから火災時の Ductal 部材の温度予測に必要な熱拡散率を算定した.

表-1 使用材料

Using materials

材 料	種 類・性	Keywords : 状
プレミックス(PM)	$\rho=2.85\text{g/cm}^3$	
混和剤(Ad)	ポリカルボン酸系減水剤	
鋼繊維(FS)	$\phi 0.2 \times 15\text{mm}$	
有機繊維(FO)	$\phi 40 \mu\text{m} \times 6\text{mm}(150^{*1})$ $\phi 100 \mu\text{m} \times 1\text{mm}(10)$ $\phi 200 \mu\text{m} \times 6\text{mm}(30)$	PVA $\rho=1.3\text{g/cm}^3$ 融点: 約 230
水(W)	水道水	

*1) 括弧内の数値は L/d(=アスペクト比:L=長さ,d=直径)

2. 実験

表-2 調 合

Mixture proportions of Ductal

単位量(kg/m ³)				外 割
W	PM	FS	Ad(W 内割)	FO
180	2277	157	24 ~ 32	表-3 参照

2.1 使用材料と調合

試験体の製作に使用した材料を表-1, 調合を表-2, 混入した有機繊維の形状と混入量の組合せを表-3 に示す. プレミックス(PM)はセメントを主体とした珪石質微粉末と珪砂の混合粉体である. 爆裂抑止のために有機繊維(FO)を Ductal (プレミックス(PM), 混和剤(Ad), 水(W) および鋼繊維(FS)) に対し, 外割で混入した. 有機繊維の形状と混入量は $\phi 50 \times 100\text{mm}$ 試験体の予備加熱実験結果を踏まえ, 表-3 に示す 6 種類とした. なお, 調合 No.2 ~ No.5 は 2 種類の形状の有機繊維の比率と量を変えて混入した.

2.2 試験体の製作

試験体の形状を図-1, 試験体の調合と加熱条件を表-4 に示す. Ductal の練混ぜは 100 L のパン型強制練りミキサーで混練量 60 L, 混練時間 10 分で行なった. 練上がり後, 有機繊維の混入による施工性への影響を把握するためにフロー値(JIS R 5201,11.フロー試験, ただし 0 打フロー)を測定した. 試験体の寸法は W1200 × H1200

表-3 各調合の有機繊維の形状と混入量

Shape and mixture value of organic fibers

調合 No.	形 状	有機繊維(vol.%)		備 考
		混入量	合 計	
1	$\phi 100 \mu \times 1\text{mm}$	4.0	4.0	
2	$\phi 100 \mu \times 1\text{mm}$	3.2	4.0	2 種類 混合
	$\phi 40 \mu \times 6\text{mm}$	0.8		
3	$\phi 100 \mu \times 1\text{mm}$	2.0	2.5	2 種類 混合
	$\phi 40 \mu \times 6\text{mm}$	0.5		
4	$\phi 100 \mu \times 1\text{mm}$	1.0	1.5	2 種類 混合
	$\phi 40 \mu \times 6\text{mm}$	0.5		
5	$\phi 100 \mu \times 1\text{mm}$	1.2	1.5	2 種類 混合
	$\phi 40 \mu \times 6\text{mm}$	0.3		
6	$\phi 200 \mu \times 6\text{mm}$	2.5	2.5	

* 1 太平洋セメント株式会社

表-4 試験体の調合と加熱条件

Mixture proportion and heat condition of specimens

試験体 No.	調合 No.	熱電対位置(mm) (加熱面からの距離)	加熱条件
1	1	0,100 ¹	ISO834
2	2	8,22,40,50,72,90,100 ²	ISO834
2'		2,8,21,43,65,88,100 ²	急速加熱 ³
3	3	0,100	ISO834
4	4	0,100	ISO834
5	5	0,100	ISO834
6	6	0,100	ISO834

1: 100mm=裏面(熱電対は加熱直前に設置)

2: 加熱終了後試験体を解体し熱電対の設置位置を確認した.

3: [1200 /10 分加熱]-[1200 -30 分間加熱]-[自然冷却]

×D100mm とし、練上がった Ductal を鋼製型枠に打設し、20 で 48 時間湿潤養生した後に脱型、さらに 90 で 48 時間蒸気養生を行なった。試験体中央にはK型熱電対(φ0.65)を表-4 に示す位置に設置した。また、各調合φ50×100mm の試験体を同時に打設し、蒸気養生終了後に打設面を研磨し、JIS A 1108 に準拠して圧縮強度を測定した(供試体数=3)。

2.3 加熱実験

試験体は写真-1 に示すように小型壁加熱炉に設置し、ISO834(1 時間)、または RABT 加熱曲線を極力模擬した 40 分間加熱(急速加熱)をした。裏面温度は試験体裏面に貼り付けた K 型熱電対(φ0.65)を厚さ 12.5mm のケイ酸カルシウム板で覆い、裏面最高温度を確認するまで測定した。

2.4 実験結果・考察

2.4.1 フロー値と圧縮強度

フロー値と有機繊維混入量の関係を図-2、圧縮強度と有機繊維混入量の関係を図-3 に示す。フロー値は有機繊維の長さ L と直径 d の比(L/d)が大きい程、また有機繊維の混入量が多い程、小さくなった。しかし、長さ

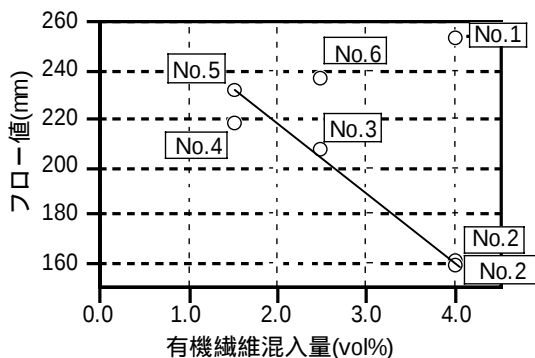


図-2 フロー値と有機繊維混入量の関係

Relationship between flow value and organic fiber mixing value

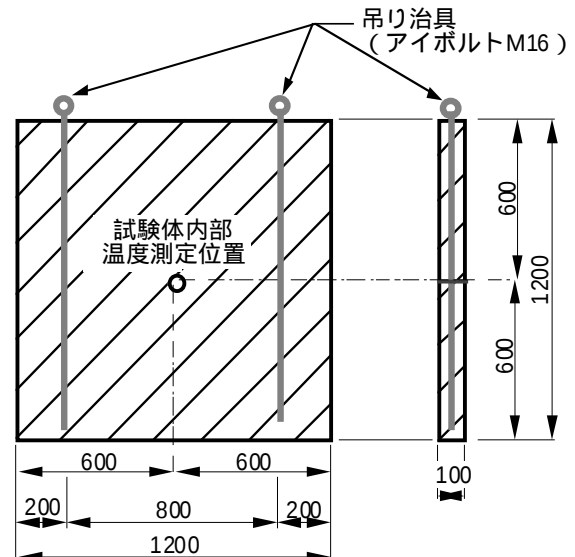


図-1 試験体の形状
Shape of specimens



写真-1 試験体加熱中の様子
Test setup

1mm の有機繊維のみを混入させた No.1 では、フロー値は小さくならなかった。圧縮強度は有機繊維の形状に関係なく混入量が多い程、小さくなった。

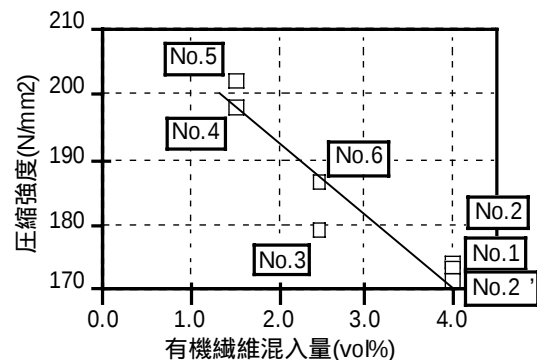


図-3 圧縮強度と有機繊維混入量の関係

Relationship between compressive strength and organic fiber mixing value

2.4.2 加熱実験

加熱実験の結果を表-5、No.2 と No.2'の温度と時間の関係を図-4、図-5、加熱後の加熱面の状況を写真-2～写真-4 に示す。試験体の加熱実験時の含水率は 4.13～4.94wt%であった。

(1) 爆裂抑止効果

有機繊維混入量が多い程、爆裂は抑止される傾向があり、混入量が 2.5vol%以上の No.2, No.2', No.3, No.6 ではほとんど爆裂しなかった。しかし、写真-2 に示すように長さ 1mm の有機繊維のみを混入した No.1 は加熱終了後 4 分 30 秒に爆裂したため温度測定を中止した。これは有機繊維が加熱されて溶融してできた空隙が連通し、マトリックス中に生じた水蒸気の逃げ道となり、マトリックス中の圧力上昇を緩和する。しかし、短い有機繊維のみを混入した No.1 では、空隙が連通しにくいいため水蒸気が逃げ切れず、マトリックス中の圧力あるいは空隙内圧力が上昇したため爆裂したものと考えられる。

また、有機繊維の混入量を 2.5vol%とした No.3 と No.6 では、写真-3, 4 に示すように加熱面のひび割れや剥離は No.3 の方が少なかった。これは、試験体表面付近の加熱による劣化に対しては長さ 1mm の有機繊維の溶融による空隙が効果的であったためと推測される。

(2) 遮熱性能

耐火構造の区画部材に要求される遮熱性能は、ISO834(1 時間)の加熱に対して裏面温度が 160 を超えないこととされている。温度測定を中止した No.1 を除く ISO834 加熱を行なった試験体の裏面最高温度は 144 ～153 となり判定基準値の 160 を超えなかった。このことから、Ductal は厚さが 100mm あれば遮熱性能を確保できると考えられる。

表-5 加熱実験結果

Test results

試験体 No.	含水率 (wt%)	重量 減少率(%)	外観 ¹	裏面最高 温度()
1	4.34	12.60	×	測定中止
2	4.94	2.48	○	148.5
2'	4.39	2.23	○	135.8
3	4.52	2.04	○	144.7
4	4.65	7.69	×	147.1
5	4.13	2.39		152.5
6	4.41	2.24	○	143.9

1) ○：ほとんど爆裂しなかった。

：軽微な爆裂が認められた。

×：著しく爆裂した。



写真-2 加熱後の加熱面の状況 (No.1: 外観 ×)
Heated surface condition after the test (No.1)

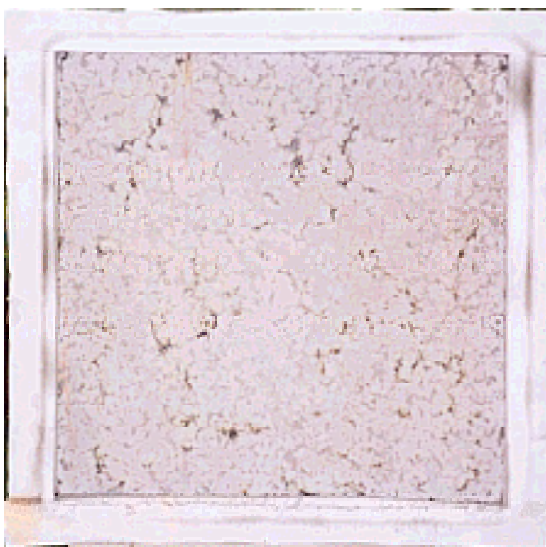


写真-3 加熱後の加熱面の状況 (No.3: 外観 ○)
Heated surface condition after the test (No.3)



写真-4 加熱後の加熱面の状況 (No.6: 外観 ○)
Heated surface condition after the test (No.6)

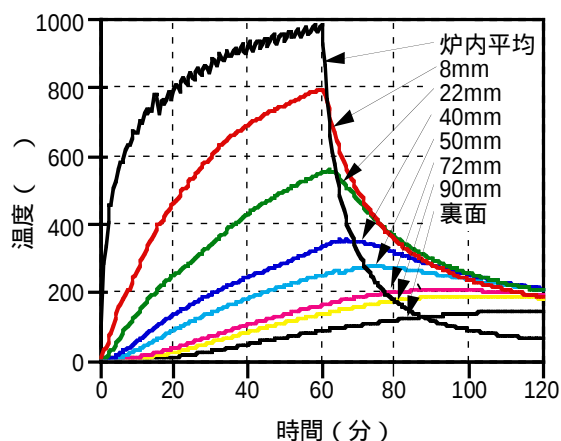


図-4 温度と時間の関係 (No.2 : ISO834 加熱)
Relationship between temperature and time
(No.2:ISO834 heating)

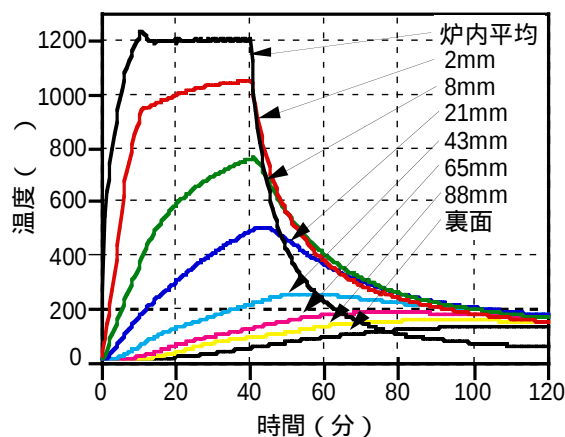


図-5 温度と時間の関係 (No.2' : 急速加熱)
Relationship between temperature and time
(No.2' : rapid heating)

3. 熱拡散率の算定

3.1 算定方法

板部材の加熱実験のように熱流が 1 方向である場合の非定常熱伝導方程式は(1)式で表される。これを Crank-Nicolson 法により差分近似すると(2)式ようになる。(2)式では材料中の水分蒸発による熱の消費等を考慮していないので、加熱実験データからは見掛けの熱拡散率 ($\alpha = \lambda / \rho c$) が算定される。

$$\rho \cdot c \frac{dT}{dt} = \lambda \frac{d^2T}{dx^2} \quad (1)$$

ここに、 T : 温度(K) t : 時間(s) x : 位置(m)

ρ : 密度(kg/m³) c : 比熱(J/kg/K) λ : 熱伝導率(W/K/m)

$$\frac{\lambda}{\rho \cdot c} = \frac{2 \cdot (x_{i+1} - x_{i-1}) \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta t}}{\left(\frac{T_{i-1,j} - T_{i,j}}{x_i - x_{i-1}} - \frac{T_{i,j} - T_{i+1,j}}{x_{i+1} - x_i} + \frac{T_{i-1,j+1} - T_{i,j+1}}{x_i - x_{i-1}} - \frac{T_{i,j+1} - T_{i+1,j+1}}{x_{i+1} - x_i} \right)} \quad (2)$$

ここに、添え字 i は空間、 j は時間を表す。(図-6)

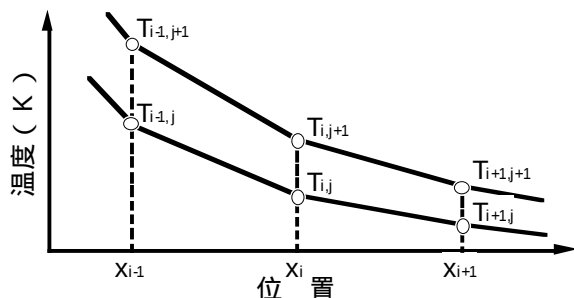


図-6 Δt 秒後の試験体の温度分布
Temperature distribution's change during the time Δt

3.2 算定結果

No.2 と No.2' の実験データ (図-4, 図-5) から熱拡散率を算定した結果を図-7, 図-8 に示す。

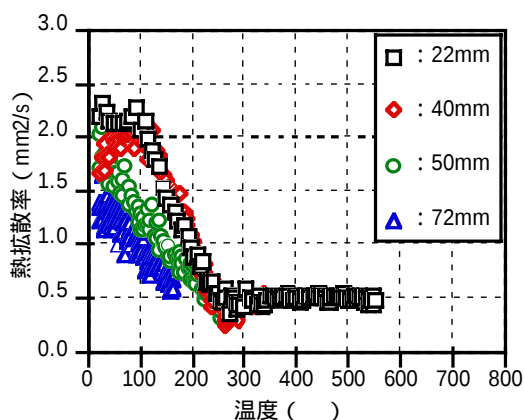


図-7 熱拡散率と温度の関係 (No.2 : ISO834 加熱)
Relationship between thermal diffusivity and temperature (No.2:ISO834 heating)

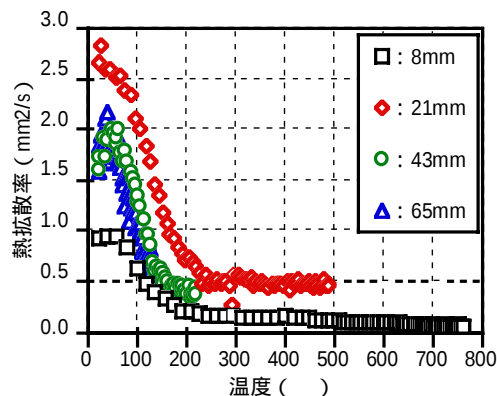


図-8 熱拡散率と温度の関係 (No.2' : 急速加熱)
Relationship between thermal diffusivity and temperature (No.2' : rapid heating)

熱拡散率は、例えば図-7 の□：22mm は断面温度データのうち、加熱面から 8mm，22mm，40mm の隣接する 3 点のデータから算定した値を算定に用いた 2 点の時刻の 22mm における温度の平均値に対してプロットしたものである。算定した熱拡散率と温度の関係は図-8 の □：8mm が他のデータよりも小さくなっているのを除けば、加熱条件が異なってもほぼ同じになった。これは、写真-5 に示すように No.2' では加熱面から約 10mm まで Ductal が層状に剥離し、多数の空隙が発生している。このため加熱面側近傍では熱が伝わりにくくなり、熱拡散率は小さくなったと考えられる。これ以外のデータでは常温～250 では算定した位置によって値が異なっているが、250 以上ではほぼ $0.5\text{mm}^2/\text{s}$ になる。常温～250 で熱拡散率の値が算定位置によって異なっているのは水分の蒸発や有機繊維のガス化による熱の消費によるものと考えられる。つまり、熱が消費されている部位の温度上昇は伝導熱量に見合った値よりも小さくなるため、見掛けの熱拡散率は小さくなる。水は 1 気圧では 100 付近で沸騰して気化するが、マトリックスが緻密な Ductal では空隙圧が 1 気圧よりも高くなれば、100 よりも高い温度で水は沸騰する。また、加熱前は一樣である試験体内の水分分布は加熱に伴い蒸気が加熱面側から非加熱面側に移動するため、非加熱面側の方が大きくなる。このため、非加熱面側程、熱拡散率算定に用いる下流位置の温度上昇が抑えられる時間が長くなり、同じ温度に対する見掛けの熱拡散率は非加熱面側程、小さくなると考えられる。

3.3 熱拡散率の妥当性

算定した熱拡散率と温度の関係の妥当性を検討するために算定結果を用いた熱伝導解析の結果と実験データの比較を行なった。解析モデルの概要を図-9 に示す。解析では熱拡散率と温度の関係を(3)式、(4)式(図-10)のように設定した。比熱は Ductal の常温時の値 0.92kJ/kgK で一定とし、密度は常温～100 では実測値の 2440kg/m^3 ，100～300 では水分蒸発量、さらに 300 以上では有機繊維のガス化量を減じた値とした。解析では水分の蒸発を考慮し、含水率は表-5 に示した実測値とした。

図-11，図-12 に ISO834 (No.2)，急速加熱 (No.2') のそれぞれを加熱条件とした実験と解析の結果の比較を示す。ISO834 を加熱条件とした解析では全ての Ductal 要素の熱拡散率と温度の関係を(3)式で与えた。また、急速加熱を加熱条件とした解析では全ての Ductal 要素の熱拡散率と温度の関係を(3)式で与えた場合(解析 A)と加熱側の 1 要素の熱拡散率と温度の関係を(4)式で



写真-5 加熱後のコアの様子 (No.2')
Core condition after heating of No.2'

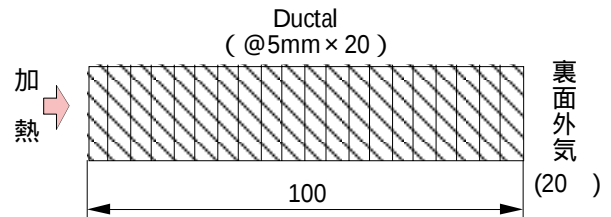


図-9 解析モデル
Analytical model

$$\alpha = \begin{cases} 2.50 & [T \leq 100] \\ 2.50 - \frac{2.03}{150}(T - 100) & [100 < T < 250] \\ 0.47 & [250 \leq T] \end{cases} \quad (3)$$

$$\alpha = \begin{cases} 0.86 & [T \leq 50] \\ 30.809T^{-0.915} & [50 < T] \end{cases} \quad (4)$$

ここに、 α ：熱拡散率(mm^2/s)、 T ：温度()

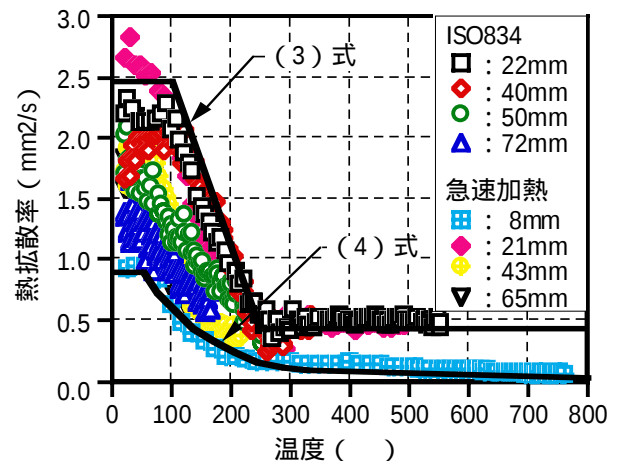


図-10 解析用の熱拡散率と温度の関係の設定
Set the relative formula between thermal diffusivity and temperature for analysis

与え、それ以外は(3)式で与えた場合 (解析 B) の 2 ケースを実施した。

図-11 に示すように ISO834 を加熱条件とした解析では、加熱 30 分では加熱面から 30mm 前後の位置における温度が実験値よりも低くなったが、加熱 60 分では解析値は実験値とほぼ一致した。また、図-12 に示すように急速加熱を加熱条件とした場合の解析 A では加熱面側で解析値が実験値よりも高温になり、加熱時間が長くなる程、その範囲が大きくなった。一方、解析 B では解析 A よりも解析値は実験値に近い温度分布を示した。これは急速加熱により部材の加熱面近傍が層状に剥離し、この部分の熱拡散率が他の部分よりも小さくなっている事を解析に反映させたことによるものと考えられる。これらのことから、加熱実験データから算定した Ductal の熱拡散率と温度の関係をを用いることで、火災時の Ductal 部材の温度予測をすることは可能であると考えられる。

4. まとめ

Ductal の爆裂対策を検討するために小型板部材の加熱実験を行ない、以下のことが分った。

- 1) 長さ 6mm の有機繊維に 1mm 程度の短いものを混合して 2.5vol.%以上混入することにより Ductal の爆裂を抑止できる。ただし、有機繊維の混入により施工性や圧縮強度が低下するので、要求性能を考慮して有機繊維の形状や混入量を決める必要がある。
- 2) Ductal は厚さが 100mm あれば、耐火構造としての遮熱性を満足することができる。
- 3) 加熱実験の測定データから算定された Ductal の熱拡散率と温度の関係をを用いて、火災時の Ductal 部材の温度を予測することは可能である。

参考文献

- 1) 鶴澤正美, 山田一夫, RPC を用いた超高強度・高靱性コンクリートの開発動向, コンクリート工学, Vol.39, No.2, pp.53-56, 2001.2

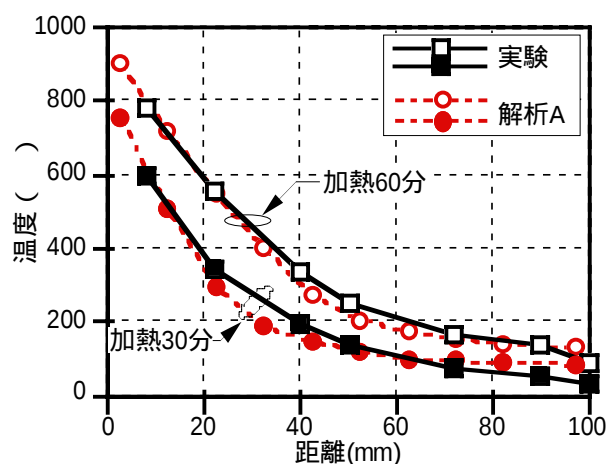
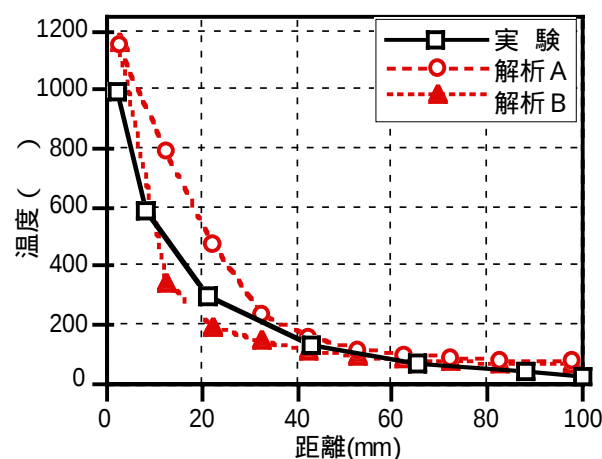
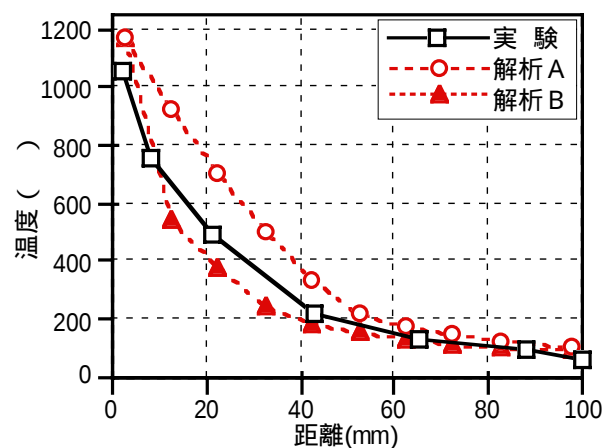


図-11 実験値と解析値の比較 (No.2: ISO834 加熱)
Comparison of experimental and analytical temperature (No.2:ISO834 heating)



(a) 加熱 20 分



(b) 加熱 40 分

図-12 実験値と解析値の比較 (No.2': 急速加熱)
Comparison of experimental and analytical temperature (No.2': rapid heating)