

論文 剛飛翔体の高速衝突を受けたコンクリート板の火災時における温度性状に関する検討

森田 武^{*1}・別府 万寿博^{*2}・鈴木 誠^{*3}

要旨：剛飛翔体の高速衝突を受けて局部破壊したコンクリート板が火災加熱を受けた場合の温度性状を把握することを目的として、コンクリート板に対する高速衝突実験、加熱実験および伝熱解析による検討を行った。実験では、剛飛翔体の衝突速度、短繊維による補強を実験パラメータとし、高速衝突実験に供したコンクリート板に対して加熱を行った。実験の結果、裏面剥離が抑制されたコンクリート板では、加熱に曝されても、ひび割れ等の損傷の拡大や遮熱性の低下は認められなかった。また、ひび割れを考慮した伝熱解析によって、コンクリート板の熱伝導特性に対する斜めひび割れの影響が大きいことが把握された。

キーワード：高速衝突、剛飛翔体、局部破壊、コンクリート板、火災、温度性状

1. はじめに

飛翔体がコンクリート構造物に高速度で衝突すると、衝突条件によって、表面破壊（衝突面の破壊）、裏面剥離（衝突面と反対面のコンクリートの剥離）、貫通（表面破壊と裏面剥離が連結して飛翔体が裏面側へ貫通する破壊）等の局部破壊が生じる¹⁾。

一方、危険物取扱い施設等での爆発にともなう飛散物の衝突、発電施設等でのタービンブレードの破損・飛散による衝突、あるいは一般の構造物への航空機や車両の衝突などが発生した場合、衝突を受けた側の空間で燃料・化学品・油といった種々の可燃物の燃焼による火災が発生し、構造物が火災外力の影響を受ける可能性がある。このような事象に対して、構造物内の人命や財産を守るためには、衝突作用とその後の火災作用に対して部材・構造体の構造安定性を確保するとともに、火災が屋内で発生した場合には隣接する室等への延焼を、屋外で発生した場合には屋内への延焼を防止する必要がある。

しかしながら、火災時における構造体の温度性状や構造挙動に関して、局部破壊がどのような影響を及ぼすかについては、これまでに検討された例が見当たらない。

このような背景から、著者らは、剛飛翔体の衝突によって損傷したコンクリート板が衝突面側から火災加熱を受けた場合の温度性状の把握を目的として、実験的・解析的検討を行い、局部破壊で生じた内部ひび割れがコンクリート板の熱伝導特性に及ぼす影響を示した²⁾。本報

では、既報²⁾で得られた知見をさらに深めることを目的として、局部破壊で生じた内部ひび割れにおける気体の熱伝導や放射熱伝達などを考慮した検討・考察を行った結果について報告する。本報は、剛飛翔体の衝突速度、ポリプロピレン短繊維による補強を実験パラメータとした高速衝突実験と加熱実験、加熱を受けるコンクリート板の温度性状に関する数値解析の概要、およびコンクリート板の熱伝導特性に及ぼす内部ひび割れの影響に関する理論的な側面からの検討で構成される。

2. 実験方法

2.1 試験体

表-1 にコンクリートの使用材料を、表-2 に調合、圧縮強度及び含水率を示す。コンクリートは、水セメント比 55%で、短繊維の混入率をパラメータとした 3 種類とした。短繊維にはポリプロピレン短繊維（以下、PP と称す。）を用いた。表-2 の調合名は、PL が PP 無混入、P05 と P10 が各々 PP 混入率（コンクリートの体積に対し

表-1 使用材料

材料	種類・物性など
セメント	普通ポルトランドセメント
粗骨材	硬質砂岩（碎石 2005, 青梅産）， 表乾密度 2.65 g/cm ³
細骨材	山砂（君津法木産），表乾密度 2.63g/cm ³
混和剤	AE 減水剤，AE 剤，空気量調整剤
短繊維	ポリプロピレン（PP）： 長さ 20mm，径 0.05mm，密度 0.91g/cm ³

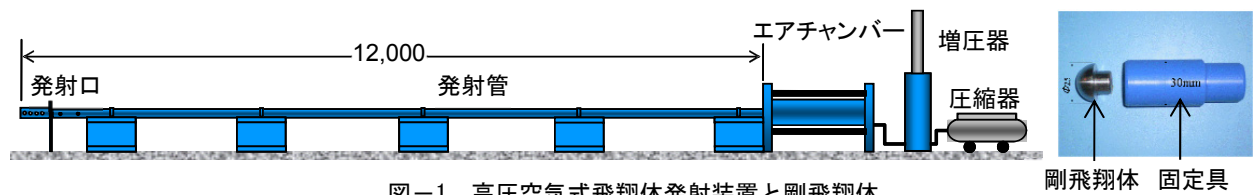
表-2 調合・圧縮強度・含水率

調合名	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				PP 混入率 (vol%)	圧縮強度 (N/mm ²)		含水率 (%)
			水	セメント	細骨材	粗骨材		材齢 28 日	実験時	
PL	55	46	175	318	817	973	0	33.1	41.0	未測定
P05							0.5	31.2	40.0	3.3
P10							1.0	28.3	34.3	3.1

*1 清水建設（株） 技術研究所 博士（工学）（正会員）

*2 防衛大学校 建設環境工学科 博士（工学）（正会員）

*3 清水建設（株） 技術研究所 工博



図－1 高圧空気式飛翔体発射装置と剛飛翔体

て外割り) 0.5, 1.0vol%のコンクリートを示す。

試験体は、寸法が(H)500mm×(W)500mm×(t)80mm の無筋コンクリート板であり、表－2 に示す割合ごとに製作した。養生方法は、コンクリート打設の翌日から 28 日間 20℃の水中で養生し、その後は気中養生とした。

2.2 高速衝突実験

高速衝突実験には、高圧空気式飛翔体発射装置を使用した。試験装置の模式図と飛翔体を図－1 に示す。装置は、圧縮器・増圧器・エアチャンバー・発射管(長さ 12m, 内径 35mm) で構成されており、圧縮空気で飛翔体を発射・加速する。衝突速度は図－1 の発射口に設置したレーザー式速度検出センサーで測定される。剛飛翔体は鋼製 (SS400) で、直径 25mm, 質量 46g, 先端形状が半球型である。剛飛翔体の衝突速度は、既往の実験結果³⁾から、PL の無筋コンクリート板で裏面剥離を生じない速度 215m/s と裏面剥離を生じる速度 315m/s の 2 水準とした。

2.3 加熱実験

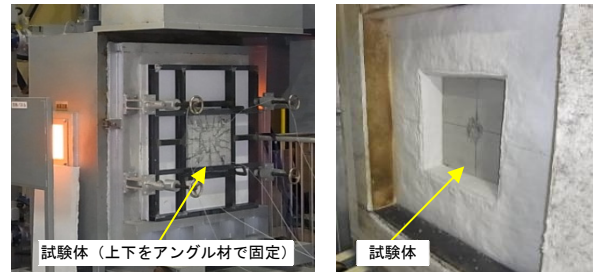
加熱実験には、都市ガスを燃料とする小型壁炉を使用した。壁炉と試験体の設置状況を写真－1 に示す。試験体加熱面の周囲 25mm は試験体設置枠に当たるため、有効加熱面積は 450mm×450mm である。本実験では、航空機衝突など、衝突側から火災加熱を受ける構造物を想定して、試験体の衝突面を加熱し、裏面(衝突面と反対側の面)は炉外の常温空気に暴露される条件とした。加熱温度は、燃料火災を想定して、炭化水素火災を模した標準加熱温度時間曲線⁴⁾に準じた。加熱時間は 2 時間加熱とした。測定項目は加熱温度と試験体の裏面温度で、裏面温度の測定には赤外線サーモグラフィを使用した。

3. 高速衝突実験結果

実験時に測定された剛飛翔体の衝突速度は、設定速度 215m/s に対して 210.6～216.0m/s, 設定速度 315m/s に対して 312.5～315.5m/s であった。以下では、設定した衝突速度を単に衝突速度と言う。

衝突実験で局部破壊した試験体の貫入深さと表面破壊の平均直径、裏面剥離深さと平均直径を表－3 に示す。また、衝突実験後の試験体の局部破壊状況の代表例として、P10-2, P10-3, P05-3 および PL-3 を後掲の写真－2 に示す。試験体名は、コンクリートの割合と衝突速度(2: 215m/s, 3: 315m/s) を示す表記とした。

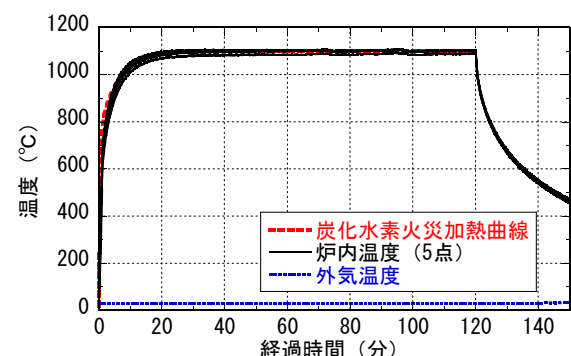
実験の結果、PL-3 のみが裏面剥離した。衝突速度



写真－1 小型壁炉外観(左)と試験体の加熱面(右)

表－3 高速衝突実験による局部破壊の状況

試験体	コンクリート	衝突速度 (m/s)	表面破壊 (mm)		裏面剥離 (mm)	
			貫入深さ	平均直径	剥離深さ	平均直径
PL-2	PL	215.9	16	96	—	—
PL-3	PL	312.5	22	109	33	230
P05-2	P05	216.0	18	81	—	—
P05-3	P05	314.7	29	117	—	—
P10-2	P10	210.6	16	86	—	—
P10-3	P10	315.0	29	95	—	—



図－2 加熱温度の測定結果 (P10-2)

315m/s における表面破壊における貫入深さは 22～29mm, 裏面剥離深さは 33mm, 平均直径は 230mm であった。今回と同条件で高速衝突実験を実施した試験体の切断面に関して、衝突速度 215m/s では視認できるひび割れはなかったが、315m/s では板内部から裏面近くまで斜め方向に生じたひび割れ(以下、斜めひび割れという。後掲の図－3 参照。)が認められた⁵⁾。本報の試験体と同条件の試験体⁵⁾のひび割れ幅は、PL-3 で 0.80～0.85mm 程度、P05-3 で 0.45～0.75mm 程度、P10-3 で 0.45～0.55mm 程度であった。

4. 加熱実験結果および考察

加熱実験時の炉内温度の測定結果の一例を図－2 に示し、P10-2, P10-3, P05-3 および PL-3 の加熱前と加熱後の状況、および加熱中の裏面の状況と赤外線サーモグラフィの熱画像を写真－2 に示す。なお、加熱中の裏面状

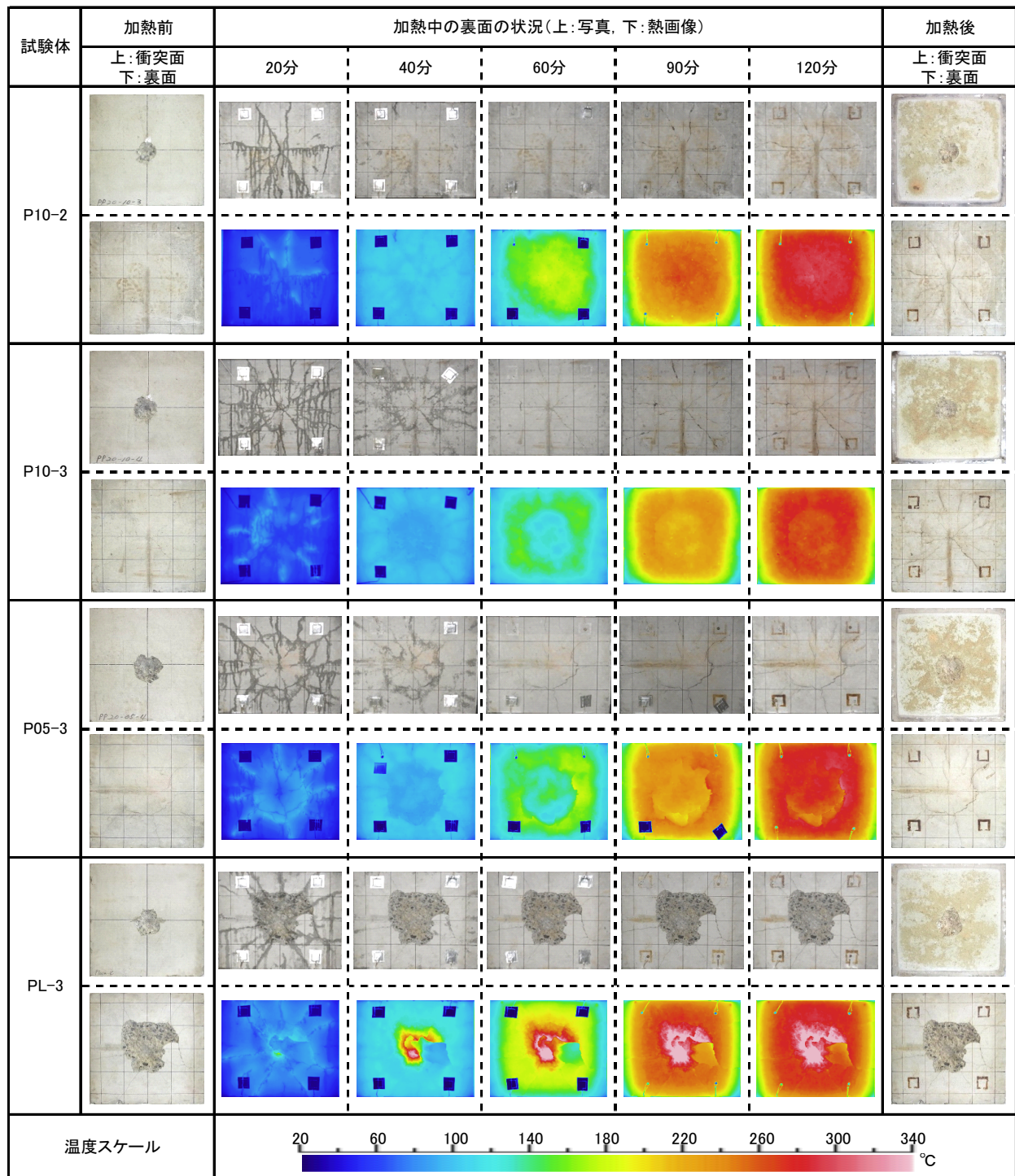


写真-2 P10-2, P10-3, P05-3 および PL-3 の加熱前・加熱中・加熱後の状況

況と熱画像は、試験体を固定したアングル（写真-1 参照）部分を除いた、高さ 40cm×幅 50cm の範囲を示した。

4.1 目視観察

写真-2 に示すように、加熱・冷却期間を通じて、裏面においてコンクリート片が剥落するなどの外見上の損傷の拡大は認められなかった。加熱面についても、コンクリートの爆裂や剥落は認められなかった。

加熱開始後約 8 分頃から、衝突速度 215m/s の P10-2 では放射状に、衝突速度 315m/s の P10-3 と P05-3 では放射

状および円状に、コンクリートの含有水が裏面に湧出し始めた（写真-2）。P10-2 では衝突位置を中心にして放射状に広がったひび割れ（以下、放射状ひび割れという。）、衝突速度 315m/s では放射状ひび割れと円状のひび割れ（斜めひび割れは立体的には円錐状に形成されており、これを裏面に正対して見ると円状のひび割れに見える。以下、円状ひび割れという。）が、裏面あるいは裏面近傍まで到達していたために、これらのひび割れを通じてコンクリート内部から含有水が湧出したものと言える。

4.2 熱画像による裏面温度

写真-2の熱画像から明らかなように、PL-3のように裏面剥離すると、裏面温度が高くなり、遮熱性における大きな弱点になると言える。

加熱開始後20分では、コンクリート表面温度よりも、ひび割れを通じてコンクリート板の高温側から低温側に移動して湧出した含有水の温度の方が20～30℃程度高い傾向を示した。しかし、湧出がなくなると、放射状ひび割れのある部分とない部分の温度差は見られない。

円状ひび割れが生じていないP10-2では板中央部の温度が周辺部よりも高くなっているが、P10-3とP05-3では円状ひび割れの外側よりも内側の方がコンクリート表面温度は低く、かつP10-2よりも低い。放射状ひび割れは加熱面から裏面への熱エネルギーの移動方向に平行な面に形成されているために熱抵抗とはならない。しかし、円状ひび割れは熱エネルギーの移動方向に対して角度を持った面に形成されているために熱抵抗となり、円状ひび割れの内側の裏面温度が低くなったと言える。

以上から、遮熱性を確保するためには裏面剥離を抑制することは必須であり、裏面剥離が抑制できれば、ひび割れ（放射状ひび割れ、斜めひび割れ）が裏面に達しても遮熱性の弱点にはならないと考えられる。

5. コンクリート板の温度性状に関する解析的検討

裏面剥離が抑制されたコンクリート板を対象に伝熱解析を行い、斜めひび割れがコンクリート板の裏面および内部の温度性状に及ぼす影響を検討し、さらに斜めひび割れの熱抵抗に関する理論的な側面からの考察を行う。

5.1 解析方法

解析には差分法を適用した非定常伝熱解析プログラム⁶⁾を用いた。コンクリートの熱物性はEUROCODE⁴⁾の温度依存性を考慮した物性値を参照した。EUROCODE 4の熱伝導率を0.8倍、比熱を1.2倍すると実験結果と解析結果が良好に一致することが報告されており⁸⁾、本解析でもこれらの倍率を乗じた物性値を適用した。また、含水率を3wt%として、含有水の潜熱による100℃近傍での温度停滞も考慮した。

5.2 解析モデルと解析ケース

(1) 解析モデル

解析モデルは、図-3に示すように、コンクリート板中央高さの微小厚さ部分について左右の対称性を考慮して1/2幅を切り出した2次元の断面とした。対称軸から10cmまでは5mm×5mmメッシュ、残りは5mm×10mmメッシュとした。表面破壊はPL-3、P05-3およびP10-3の高速衝突実験結果を概ね反映するように、表面破壊は貫入深さ25mm、半径50mmとした。また、斜めひび割れについては、図-3の試験体切断写真から、裏面剥離

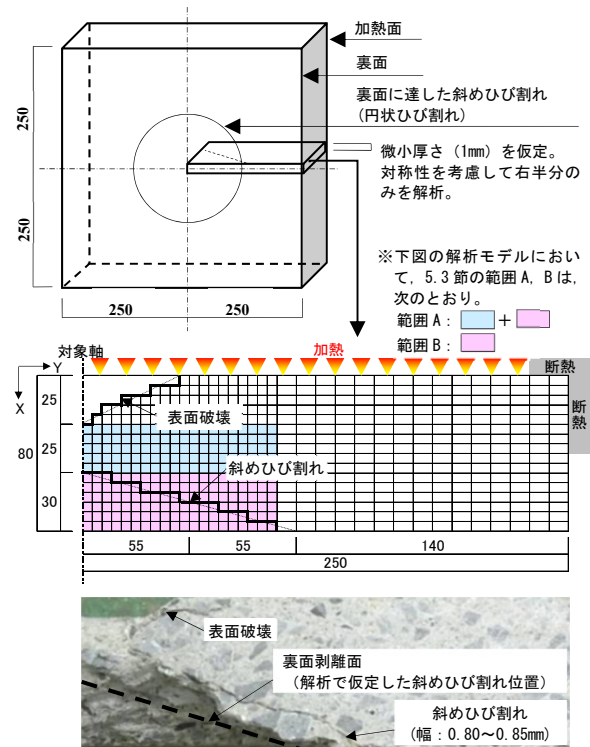


図-3 解析モデル（上）とPL-3 同等試験体⁵⁾の切断面（下）

面を含めると2箇所以上で生じていたと推察されるが、本解析ではPL-3の剥離深さ30mm、半径110mmの裏面剥離面の1箇所を斜めひび割れ位置とした。解析では、要素が四角形であることから、表面破壊と斜めひび割れを階段状にモデル化し、斜めひび割れ先端の裏面到達部の要素に対するひび割れの影響は小さいと考え、若干の誤差を許容して半径を100mmとした。

(2) 斜めひび割れの熱抵抗

互いに接触する固体内を熱が伝わる場合、一般に温度分布は接触面で不連続な温度差を生じる。これは接触面が熱抵抗となるからである。本解析では、熱伝導を計算する要素間の境界にひび割れがある場合（図-3参照）には、要素間の熱コンダクタンスに低減率を乗じることによって、疑似的に熱抵抗を考慮することにした。

本解析では、斜めひび割れを要素間の境界に階段状にモデル化しているため、X方向とY方向に対する斜めひび割れの影響を考える必要がある。そこで、参照した斜めひび割れの勾配30/110を考慮して、X方向の熱コンダクタンスの低減率に30/110を乗じた値をY方向の熱コンダクタンスの低減率とした。

(3) 解析ケース

解析は、熱コンダクタンスの低減率を0%（斜めひび割れなし）、50%、95%の3ケースについて行った。

5.3 解析結果および考察

図-4に裏面温度と対称軸からの距離の関係に関する、P10-2、P10-3およびP05-3の実験と解析の結果を示す。

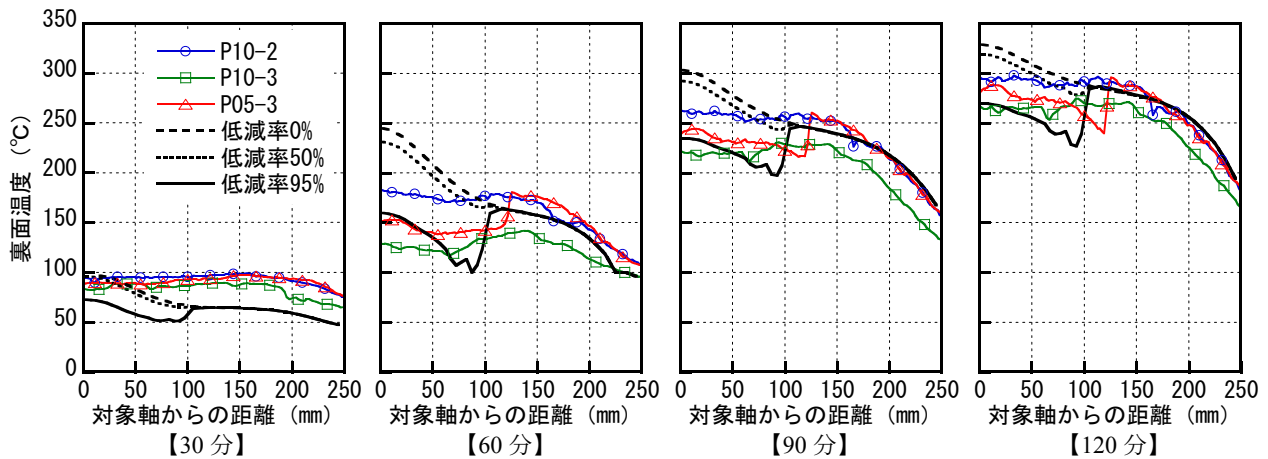


図-4 コンクリート板の裏面温度と対称軸からの距離に関する実験結果と解析結果の比較

実験値は、試験体の縦対称軸から右半分の中央高さ位置（解析断面を抜き出した位置（図-3））の温度である。

対称軸から 100mm 以上離れた位置の温度は解析と実験で概ね一致した。写真-2 から斜めひび割れの影響がほとんどないと判断できる P10-2 と低減率 0%の結果を比較すると、対象軸から 100mm 以内の温度は解析の方が高くなっており、実験では表面破壊付近でのコンクリートの損傷や応力波によって生じる裏面側の微細ひび割れによる熱抵抗の増加があるものと推察される。また、低減率 50%よりも 95%の解析結果の方が P05-3 と P10-3 の傾向に近い性状を示した。加熱面に垂直な方向の熱コンダクタンスを 95%低減させることで、より実験結果に近い解析結果が得られることが把握された。

6. 熱コンダクタンスの低減率に関する考察

5 章の解析における熱コンダクタンス 95%低減に相当するコンクリート断面内のひび割れ本数を検討する。

6.1 斜めひび割れ部分のモデル化

斜めひび割れの幅は前述したように 0.55mm~0.85mm 程度である。本実験のコンクリートに関して、プレーンコンクリートの引張破壊において結合力が零となるひび割れ幅を CEB-FIP モデルコード 1990⁹⁾で計算すると 0.21mm となる。結合力が零になると、ひび割れ面の法線方向に対してコンクリートは分離しているものと考えられる（短繊維補強コンクリートはひび割れ幅 0.21mm でも結合力があると考えられるが、これは短繊維の架橋効果によるもので、コンクリートは分離していると考える）。本実験に供した P10-3 や P05-3 は裏面剥離していないが、ひび割れ幅は 0.21mm を超えていることから、斜めひび割れ位置でコンクリートが分離していると仮定する。この仮定に基づき、コンクリート板内のひび割れ位置以外の熱移動はコンクリートの熱伝導により、ひび割れ位置の熱移動は、ひび割れ間に存在する気体による熱伝導とひび割れに面するコンクリート面間の放射によっ

て生じると考える。また、実際のコンクリート板では斜めにひび割れが入っているが、ここでは、コンクリート板の加熱面に対して平行なひび割れを仮定し、1 次元の熱伝導・放射伝熱の検討を行うこととする。

6.2 コンクリート板内の熱通過率

コンクリートと空気の熱伝導率を図-5 に示す。本検討では温度依存性を考慮した熱伝導率を適用する。コンクリート部分およびひび割れ部分（空気による熱伝導と熱放射）の単位面積当たりの熱コンダクタンスはそれぞれ式(1)~(3)で算定し、コンクリート板の熱通過率（単位面積当たりにとった熱コンダクタンスの総和）は式(4)で算定する。なお、本検討では、式(3)において $T_i \div T_j$ と仮定して、 $(T_i - T_j) = 0$ とする。

$$u_{con} = \frac{\lambda_{con}}{t}, \quad u_{air} = \frac{\lambda_{air}}{\Delta x} \quad (1), (2)$$

$$u_{rad} = \sigma \varepsilon_{con} \varepsilon_{con} (T_i + T_j) \left(4T_{ave}^2 - 2 \left(T_{ave}^2 - \frac{(T_i - T_j)^2}{4} \right) \right) \quad (3)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{u_{con}} + n \frac{1}{(u_{air} + u_{rad})}} \quad (4)$$

〔記号〕 T_i, T_j : ひび割れに面するコンクリート面の温度 [K], T_{ave} : ひび割れ部分の平均温度 ($= (T_i + T_j)/2$), U : コンクリート板の熱通過率 [$W/(m^2 \cdot K)$], n : ひび割れ本数 [本], t : コンクリートの板厚 [m], u : 単位面積当たりの熱コンダクタンス [$W/(m^2 \cdot K)$], Δx : ひび割れ幅 [m], λ : 熱伝導率 [$W/(m \cdot K)$], ε_{con} : コンクリートの放射率, σ : ステファン・ボルツマン定数 ($= 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$)
〔添字〕 con : コンクリート, air : 空気, rad : 熱放射

6.3 熱通過率の計算結果および考察

P05-3 と P10-3 を参考にしてひび割れ幅を 0.55mm, 断面温度を一様とし、図-3 の範囲 A（表面破壊最深部～裏面）について、a) ひび割れ無し, b) ひび割れを板内の 1 箇所としてその部分の熱コンダクタンスを 95%低減、

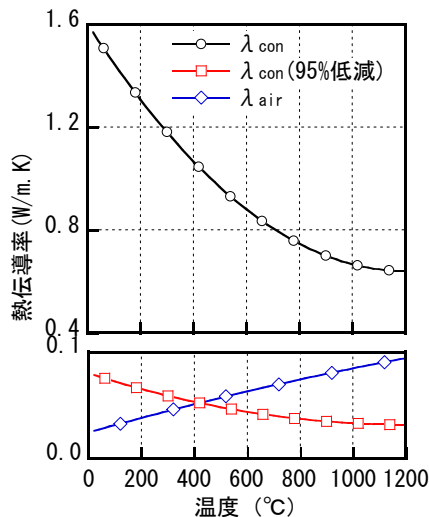


図-5 コンクリートと空気の熱伝導率

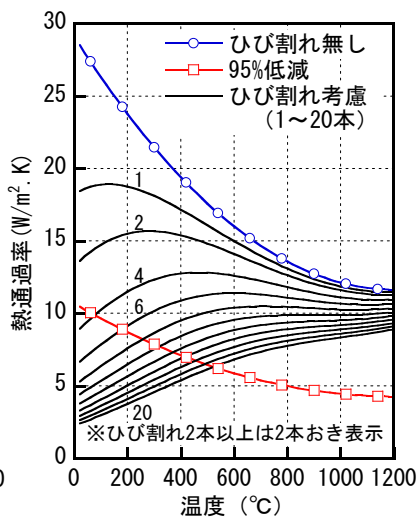


図-6 熱通過率と温度の関係

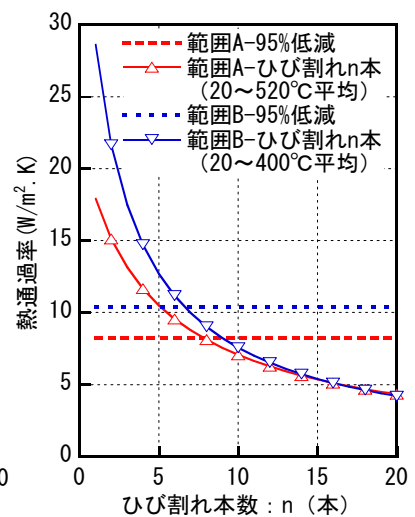


図-7 裏面 30, 55mm 厚までの平均熱通過率とひび割れ本数の関係

c)ひび割れ本数をパラメータとした 3 ケースについて、熱通過率を計算した。図-6 に示すように、b)の場合は温度とともに熱通過率が小さくなる。一方、c)の場合では、ひび割れ本数によって温度依存性の傾向が異なり、b)と一致するような熱通過率の関係は得られなかった。

熱通過率の温度依存性が b)と c)で異なるため、図-3 の範囲 A と範囲 B (裏面剥離最深部～裏面) について、伝熱解析結果から求めた 120 分時の断面平均温度における熱通過率を求めて比較した結果を図-7 に示す。ひび割れ幅 0.55mm の場合、範囲 A では 7~8 本程度、範囲 B では 6~7 本程度のひび割れが、熱コンダクタンス 95% 低減に相当すると言える。しかし、図-3 の写真に示すように、6~8 本ものひび割れは視認できない。したがって、5.章の検討結果と同様に、表面破壊付近におけるコンクリートの損傷や応力波による裏面側の微細ひび割れによる熱抵抗の増加の可能性が推察される。

7. 結論

局部破壊したコンクリート板が火災加熱を受けた場合の温度性状を検討し、以下の知見が得られた。

- 加熱によるコンクリート板の損傷の拡大はなく、裏面剥離がなければ、ひび割れは遮熱性の弱点にならない。
- 斜めひび割れを 1 箇所として解析する場合、加熱面に垂直な方向の熱コンダクタンスを 95%低減させると実験結果に近い値が得られる。
- 0.55mm 幅のひび割れを仮定して熱通過率を計算した結果、熱コンダクタンス 95%低減はコンクリート板断面に 6~8 本程度の斜めひび割れが生じていることに相当したが、表面破壊や応力波による裏面側の微細ひび割れの影響も検討する必要がある。

参考文献

- 1) 日本建築学会構造委員会応用力学運営委員会：衝

- 突・爆発などの衝撃的な外力による構造被害の低減化について考える，2009 年度日本建築学会大会 構造部門(応用力学)パネルディスカッション資料，2009.8.
- 2) 森田武，別府万寿博，鈴木誠：高速衝突を受けたコンクリート板の火災加熱に対する温度性状，日本建築学会構造系論文集，第 694 号，pp.2247-2256，2013.12.
- 3) 別府万寿博，三輪幸治，大野友則，塩見昌紀：鋼製剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊に関する実験的研究，土木学会論文集，Vol.63，No.1，pp.178-191，2007.3.
- 4) EUROCODE 1: Basics of design and actions on structures Part 2-2: Actions on structures exposed to fire, European Committee for Standardization, 1994.
- 5) 森田武，別府万寿博，鈴木誠：高速衝突を受けるポリプロピレン短繊維補強コンクリートの耐衝撃性能，日本建築学会構造系論文集，第 684 号，pp.319-327，2013.2.
- 6) Morita, T., Wakamatsu, T., Uesugi, H., and Saito, H. : Analyses of Composite Beams and Frames at Elevated Temperature, Fire Safety Science - Proceedings of the Third International Symposium on Fire Safety Science, pp.761-770, 1991.
- 7) EUROCODE 4: Design of composite steel and concrete structures Part 1-2: General rules – Structural fire design, European Committee for Standardization, 1994.
- 8) 齋藤秀人，森田武，上杉英樹：中心圧縮を受ける充填鋼管コンクリート柱の内部温度と耐火時間に関する研究，日本建築学会環境系論文集，第 582 号，pp. 9-16，2004.8.
- 9) CEB Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP Model Code 1990, Bulletin d'Information, No.203, 1991.7