論文 火害を受けたコンクリートの透気性による損傷評価

赤坂 春風*1・小澤 満津雄*2・迫井 裕樹*3・鉄羅 健太*4

要旨:本研究では,火害診断の手法として,表層透気試験の有効性の検討を目的とした。そこで,一面部分加 熱試験を実施した無筋コンクリートブロックを対象とし,透気性試験(トレント法)を実施した。併せて,加熱 面と非加熱面からコンクリートコアを採取し,深さ方向の損傷状況を下記の方法により検討した。すなわち, ①超音波試験,②塩水浸せき試験と塩化物浸透深さ,③中性化深さを計測し,透気性の変化に及ぼす損傷状 況の影響を考察した。

キーワード:火害,超音波伝播速度,塩化物浸透深さ,中性化深さ,透気性

1. はじめに

火災により高温作用を受けた鉄筋コンクリート(以下, RC)構造物は、表面および内部に微細ひび割れが発生し、 さらにはセメント水和生成物の熱分解が生じる¹⁾。この 結果、圧縮強度の低下と中性化の進行および物質侵入抵 抗性が低下し、耐久性上問題となることがある。コンク リートの材料としての性能低下は, RC 構造物において コンクリートのバリア機能が低下することを意味し、外 部から鉄筋を腐食させる劣化因子、例えば、酸素と二酸 化炭素および塩化物の侵入が容易となる。その結果、内 部鉄筋が腐食し、構造部材としての耐力低下が懸念され る。現状の火害診断²⁾においては、受熱温度と残存圧縮 強度および中性化深さが主な診断指標となっているが、 物質侵入抵抗性については十分な検討がなされていると は言い難い。これまでに著者らの研究グループでは、火 害後のコンクリートの診断指標として物質侵入抵抗性を 評価することが重要であるとして、種々の報告を行って いる 3)4)。本研究では、火害診断の手法として、表層透気 試験の有効性を検討するために,一面部分加熱試験を実 施した無筋コンクリートブロックを対象とし透気性試験 (トレント法)5%を実施した。併せて、加熱面と非加熱面 からコンクリートコアを採取し、深さ方向の損傷状況を 下記の方法により検討した。すなわち,①超音波試験, ②塩水浸せき試験と塩化物浸透深さ,③中性化深さを計 測し,透気性の変化に及ぼす損傷状況の影響を考察した。

2. 実験概要

図-1 に本研究の実験フローを示す。①無筋のコンク リートブロックを作製し一面部分加熱試験を実施した。 ②加熱前後で透気性試験(トレント法)を実施した。③非 加熱面からコンクリートコアを採取した。④深さ方向の 損傷状況を超音波法で確認した。さらに⑤塩水浸せき試 験と塩化物浸透深さで物質侵入抵抗性を検討した。最後 に⑥中性化深さを計測した。

2.1 使用材料および供試体概要

表-1 にコンクリートの配合を示す。W/C は 0.53 とした。細骨材率は 48.8%とした。細骨材 S₁, S₂, S₃ は山砂, 陸砂, 砕砂(石灰石)を使用し, 粗骨材は石灰石を使用した。 表-2 にフレッシュ性状と圧縮強度を示す。図-2 に本研究で用いたコンクリートブロック供試体の概要を示す。 寸法は縦 900mm×横 1200mm×高さ 400mm とした。供 試体の底面から 20mm の位置に型枠側面に沿って D10mm の組み立て筋を設置した。加熱領域は底面部の 右端と下端からそれぞれ 200mm と 300mm 内側として,

表-1 コンクリートの配合

オレナッシュトトレ	単位量(kg/m ³)							
W/C(%)	水	セメント	細骨材	細骨材	細骨材	粗骨材	AE 減水剤	
	٧٧	U	S ₁	S_2	S_3	G	减小刑	
53.1	170	321	301	300	270	945	3.21	

表-2 フレッシュ性状と圧縮強度

	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)	圧縮強度 (N/mm ²)
NSC	20.0	5.0	25	51.1

*1 群馬大学理工学部環境創生理工学科 3年(学生会員)

*2 群馬大学大学院 理工学府 環境創生部門 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 八戸工業大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 群馬大学大学院 理工学府 環境創生理工学プログラム 修士1年(学生会員)



加熱領域は 300mm×300mm とした。供試体底面中央部 の加熱領域と非加熱領域に熱電対を配置した。熱電対は, D6 鉄筋を鉛直に設置して,底面から高さ方向へ10,20, 30, 50, 100, 200, 300mmの位置に設置した。供試体は コンクリートを打設後,室内で2ヶ月間封緘養生を行っ た。

2.2 加熱試験

図-2 に示すように供試体は、底面の 300mm×300mm の領域を加熱面とし、そのほかの部分は厚さ30mmの断 熱材ブランケットを2重にして設置し、断熱処理を行っ た。炉内温度は 600℃まで ISO834 曲線に準拠し, その後 600℃で6時間保持する設定とした。温度設定は、小中規 模火災を想定した。また,既往の知見³⁴⁾から物質侵入抵 抗性が著しく低下する温度が 500℃付近であること、お よび部分加熱による供試体周囲からの熱放射を考慮した。

供試体は水平炉の上に設置して下面からの一面加熱 を実施した。図-3に炉内温度の経時変化を示す。

加熱初期の温度は設定通りであった。その後,600℃で ホールドを試みたが、供試体の熱放射による炉内温度の 低下が確認されたため、ガス炉の出力を上げて、炉内温 度を制御した。その結果、炉内の最高温度は 650℃とな った。コンクリートの加熱方法については、今後の検討 課題としたい。





図-4 表層透気試験(トレント法)

2.3 表層透気試験(トレント法)⁵⁾⁶⁾

加熱に伴うコンクリート表面の損傷を評価するために, トレント法により、コンクリート表層の透気試験を実施 した。トレント試験は、加熱前と後で実施した。図-4に、 トレント法の概要を示す。

トレント法はコンクリート表層の透気性を評価する 手法のうち表面法に属する。コンクリート表面に減圧し たチャンバーを設置し、その内部の気圧変化から透気係 数を算出するものである。トレント試験における透気係 数と透気深さの算出方法を式(1)~(3)に示す。

$$Kt = \left(\frac{V_c}{A}\right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon Pa} \left[\frac{\log\left(\frac{Pa+\Delta P}{Pa-\Delta P}\right)}{\sqrt{tf} - \sqrt{t0}}\right]^2 \tag{1}$$

$$\Delta P = Pf - P0 \tag{2}$$

$$L = \left(\frac{2Kt \cdot Pa \cdot tf}{\varepsilon \cdot \mu}\right)^{0.5} \tag{3}$$

Kt: 透気係数(m²), L: 透気深さ(m), Vc: 内側チャン バーの体積(m³), A: 内側チャンバーの断面積(m²), P0:減圧終了時の圧力(N/m²), ff:測定終了時間(s), t0:測定開始時間=60(s), ε:空隙率=0.15, μ:空気の粘 性(N・s/m²)

図-5に表層透気係数の測定位置を示す。測定位置 は、供試体底面の25箇所とした。加熱前に25箇所と し、加熱後は加熱領域で2箇所、非加熱領域を23箇所

計測した。

2.4 供試体のコア採取

図-6 に円柱供試体のコアを採取した位置を示す。供 試体寸法は、 φ100mm×L400mmの円柱供試体として、 コア抜きを実施した。コア採取位置は、①加熱領域と② 加熱領域からコアの中心が 50mm および③加熱領域か ら 150mm と④加熱領域から 500mm の位置とした。

2.5 超音波試験

コア採取した円柱供試体を対象として、底面から深さ 方向の損傷状況を確認するため、超音波試験を実施した。 測定位置は底面から深さ方向へ 10, 20, 30, 50, 100, 200, 300mm とした。計測方法は透過法とし、供試体の 半径方向を計測方向として、計測端子で挟み込んで超音 波伝播速度を計測した。超音波の変化量とコンクリート の圧縮強度試験結果から、加熱に伴う深さ方向の強度低 下状況を確認した。

2.6 塩水浸せき試験と硝酸銀噴霧試験

採取した円柱供試体のコアの加熱に伴う物質侵入抵 抗性の変化を確認するために,塩水浸せき試験と硝酸銀 噴霧試験を実施した。試験方法は JSCE-G 572-2013⁷に一 部の項目で準拠した。供試体の加熱面以外の周囲にエポ キシ樹脂を塗布した。その後,純水に浸せきして1日吸 水させた。純水に浸せき後,濃度10%の塩化ナトリウム 水溶液に浸せきした。浸せき期間は,若林ら³⁾の研究を 参考にして7日間とした。塩水浸せき後に円柱供試体を 割裂した。割裂した供試体の片方の破断面に硝酸銀溶液 (0.1mol/L)を噴霧し塩化物浸透深さを調べた。すなわち, 黒色に変色した部分を塩化銀の生成領域と仮定し,塩化 物浸透深さを測定した。測定箇所は,中心部と右端,左 端から10mmの位置の3か所として平均値を求めた。

2.7 中性化深さ測定試験

2.6 項で採取した割裂後の片方のサンプルを用いて, 中性化深さを測定した。サンプルの破断面にフェノール フタレイン 1%溶液を噴霧し,赤色に呈する程度が小さ い領域を中性化深さとした。測定箇所は、中心部と右端, 左端から10mmの位置の3か所として,平均値を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 加熱試験

図-7 に加熱領域の供試体加熱表面からの深さにおけるコンクリート内部温度の経時変化を示す。加熱表面 10mm と 100mm の位置の温度はそれぞれ 480℃と 140℃ であった。加熱面に近いほど内部温度が高いことが分か る。また加熱表面からの深さが深くなるほど、最高温度 に達するまでの時間が長いことが分かる。

図-8 に加熱表面からの深さと内部の最高温度の関係 と加熱面の状況を示す。加熱表面からの深さが浅いほど



内部の最高温度が高いことが分かる。また加熱表面から の深さが深くなるほど、各深さにおける最高温度の差は 小さくなることが分かる。図-9に加熱面の状況を示す。 加熱領域は、加熱によって黄色に変色していることがわ かる。また、表面に微細なひび割れが生じていることが 確認できた。

3.2 透気性試験(トレント法)

図-10 に加熱前後における透気係数と加熱面縁から の水平距離の関係を示す。ここで、加熱面縁は300mm× 300mm の加熱領域の縁を示す。加熱前の透気係数は、供 試体底面全体で 0.085~0.21(×10⁻¹⁶m²)の範囲となってい る。一方、加熱後の計測した透気係数は、加熱領域では 値を得ることができなかった。これは、加熱表面の微細 ひび割れによって、計測位置を真空にすることができな ったことが原因と考えられる。加熱面縁から水平に 50mm の位置では 1.4~12(×10⁻¹⁶m²)となった。加熱面縁 から水平に 50mm の位置は、トレント法のチャンバーの 直径を100mmとして、その中心位置である(図-5参照)。 すなわち、トレント法で計測できる位置で最も加熱領域 に近い場所とした。この 50mm の位置では加熱の影響に より、加熱前よりも加熱後で透気係数が大きくなった。 このことから、加熱領域周辺でも、ひび割れや水和生成 物の熱分解等の損傷が生じたと考えられる。一方、加熱 面縁から水平距離が 100mm 以上になると加熱前後で透 気係数の差は小さく、加熱による損傷の影響は見られな かった。

3.3 超音波試験

図-11 にコア採取した円柱供試体の加熱表面から深 さ方向における超音波伝播速度(以下, US)の変化を示す。 まず、非加熱領域から採取したコア供試体④の US は深 さに関係なく 4500~4700m/s であった。一方, 加熱領域か ら採取した供試体①の US は深さ 300mm で 4600m/s であ り健全であると考えられる。一方,深さ10mmでは加熱 の影響により 3250m/s まで US が低下した。加熱面縁か ら水平に 50mm 位置より採取した供試体②も加熱の影響 を受けて、US が低下していることがわかる。加熱面縁か ら水平に 150mm 位置より採取した供試体③は加熱面か ら 30mm の深さまでは、急激な US の低下が確認できる が、30mm より深い位置では非加熱領域の US と同程度 であった。以上より、加熱の影響による US の低下は同 心円状になっていることが確認できた。図-12に、同配 合で作製したコンクリートの φ 100mm×L200 mm の供 試体(圧縮強度 51.1N/mm², US: 4618m/s)の US を 1.0 と した場合の深さ方向と加熱面縁からの US 低下率を示す。 加熱領域から採取した供試体①の加熱面から深さ 10mm の位置のUS低下率は、0.7程度であった。加熱領域面か ら深くなると、USの低下率は小さくなることがわかる。



- 1072 -

図-11,12より,火災による損傷は加熱領域のみだけで なく,温度伝導領域が加熱面縁から同心円状に広がるこ とがわかったため,火害診断時にはこの点を注意する必 要であると考える。

4 塩化物浸透深さ

図-13~15 に塩水浸せき試験後の供試体の塩化物浸 透深さ状況および塩化物浸透深さを示す。黒色に呈色し た部分は、塩化銀が生成した領域となる。図-13,14 よ り、加熱領域に近いほど深さ方向に塩化物浸透深さが大 きくなっていることが分かる。図-15 より、加熱領域の 塩化物浸透深さは 100mm であるが、加熱領域から水平 距離 50mm、150mm、500mm 位置ではそれぞれ 66mm、 21mm、16mm となり塩化物の浸透深さは小さくなること がわかった。

図-16に加熱領域から 500mm の位置の塩化物浸透深 さを基準とした場合,塩化物浸透深さより加熱による物 質侵入抵抗性の低下率計算した結果を示す。500mm 位置 を基準とした理由としては,図-10の透気係数が加熱前 と同等であり,図-11より超音波伝播速度が深さ方向で ほぼ一定のため,加熱の影響が少ないものと判断した。 加熱領域と加熱領域から 50mm と 150mm 位置では物質 侵入抵抗性はそれぞれ 0.16, 0.24 および 0.77 となった。 加熱領域に近いほど,物質侵入抵抗性は低下することが わかる。

3.5 中性化深さ

図-17~19 にフェノールフタレイン溶液を噴霧した 場合の変色状況から確認した中性化深さ状況と中性化深 さを示す。加熱領域と加熱領域から 50mm と 150mm お よび 500mm 離れた場合の中性化深さは 210mm と 170mm および 75mm と 40mm となった。図より,加熱領域に近 いほど中性化深さが大きくなっていることが分かる。

3.6 加熱損傷を受けたコンクリートの損傷評価

火害を受けたコンクリートの損傷評価について,透 気試験の適用性と内部の損傷評価を検討した。ここで は,透気試験結果とそのほかの試験方法の結果の関係に ついて考察する。表層透気試験では加熱領域と非加熱領 域において透気性を検討したが,加熱領域ではひび割れ の影響により,透気係数を計測できなかった。加熱領域 の縁でも透気係数が非加熱領域(健全部と考えるられる 領域)よりも100倍ほど大きくなった。このことから, 透気性試験の計測実施の可否および計測値の評価が損傷 評価の指標になると考えられる。

今回の試験では加熱領域の表面温度の最高値は 650℃ で、内部温度は 20mm の位置でも 400℃程度であった。 加熱した領域から採取したコアより US の残存率をみる と表面部は 0.75 となった。US の変化を圧縮強度の変化 とみると残存強度の低下はあまり大きくないことになる。



図-17 中性化深さの状況

一方,加熱領域の塩化物浸透抵抗性低下率は,0.2程度あ った。前述の US 低下率を残存強度とみると、あまり大 きく下がっていないが、塩化物浸透抵抗性は大きく低下 していることがわかる。塩化物浸透では、加熱に伴う微 細ひび割れの発生と水和生成物の熱分解等が影響してい ると考えられ、耐久性を評価する際に指標になると考え られる。一方、中性化深さをみると、加熱領域では深さ 200mm が変色の境界領域とみることができる。既往の文 献⁸⁾では、ポルトランダイトが 450~500℃で熱分解が生 じるとされているが、今回の試験では、20mmの位置が 400℃程度でありその温度領域に当たる。一方, 200mmの 位置の内部温度最高値は 66℃であったが赤色の程度は 小さい結果となった。この点については、フェノールフ タレイン溶液の発色に関して種々の要因⁹が影響するた め、今後さらに検討が必要と考えられる。通常の火災で は表面部の温度が1000℃程度を想定している。今回の試 験では、それよりも低い温度である 650℃設定としたが、 加熱領域の透気性試験は計測が難しく、コンクリートの バリア機能が低下したと考えられる。通常の RC 構造物 では,鉄筋のかぶりは 30~50mm であるが,コンクリート かぶり部分のバリア機能の評価が重要であり、評価法の ひとつとして、透気性試験は有効であると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 加熱を受けたコンクリートの損傷評価として,透気 性試験の計測実施の可否および計測値の評価が損 傷評価の指標として有効である。
- 超音波試験の結果より、加熱領域に近くなるほど加熱温度は高くなり、内部の損傷が大きくなるため、 伝播速度も低下した。
- 塩化物浸透深さは加熱領域に近いほど深さ方向に 大きくなった。
- 4) 中性化深さは加熱領域に近いほど大きくなった。一 方で、コンクリート内部温度との相関性は見られな かった。

謝辞:

本研究は、2015 年 NEXCO 東日本技術研究助成(研究代表:小澤)の支援を受けて実施した。ここに謝意を表する。 参考文献.

- 日本コンクリート工学会:コンクリートの耐火 性能に関する研究委員会報告書,2012
- 日本建築学会:建物の火害診断および補修・補強 方法 指針・同解説,2010.
- 3) 若林瑠美,小澤満津雄,迫井裕樹,川邉清伸:火 災損傷を受けた普通コンクリートの物質侵入抵 抗性の評価と補修方法に関する基礎研究,コン



図-18 中性化深さ (拡大図:加熱面から200mm)



図-19 中性化深さ分布

クリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1003-1008, 2015

- 4) 迫井裕樹,小澤満津雄,川邉清伸,若林留美:高 温加熱によるコンクリートの損傷評価に関する 基礎的研究,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,第15巻,pp.285-290, 2015.10
- R.J.Torrent : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, pp.358-365, Vol.25, Issue6, July, 1992
- 6) 権代由範,月永洋一,阿波稔,迫井裕樹:吸引鐘 を用いたコンクリートの簡易透気試験法に関す る基礎的検討とスケーリング抵抗性評価への適 用の試み,日本建築学会構造系論文集,第77巻, 第678号, pp.1193-1202, 2012.8
- 1) 土木学会:2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編],土木学会,pp.212-213,2013.3
- 8) 日本建築学会:構造材料の耐火性ガイドブック, pp.63-65, 2009.3
- 9) 佐藤周之,内田健一朗,横井克則,野中資博:フェノールフタレイン法によるコンクリート中性化の詳細評価技術に関する基礎的研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.31,No.1, pp.2023-2028, 2009