火害を受けたコンクリートの深さ方向の損傷判別決定境界に関する実験的検討

日本大学　学生会員　○林祐太　群馬大学　正会員　小澤満津雄　日本大学　正会員　子田康弘

1. はじめに

コンクリートの構造物の火害損傷は，受熱温度によって強度の低下やひび割れによる内部損傷が生じる．損傷の程度によっては，補修・補強等の対策を講じなければならない．この種の対策にあたっては，まず損傷の診断を実施することになる．火害を受けたコンクリートの損傷診断の指標としては，受熱温度と受熱時間によって変わるひび割れ量など，受熱面に変状が表れる特性が利用される．そこで本研究では，機械学習による損傷判定を可能にするため，表面損傷状態から深さ方向の損傷を判別する決定境界[1)]の検討を行った．本検討は 2020 年度から実施しており，本稿ではこれまでの課題を踏まえ供試体形状や加熱方法の改良を加えた実験を実施した．

表−1　実験条件

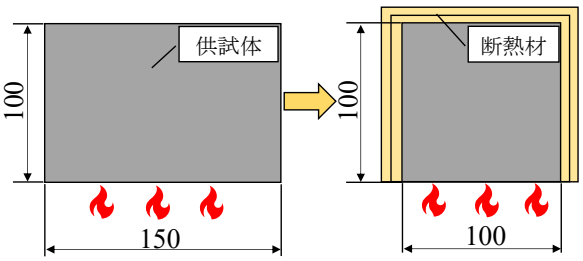
供試体名	最高温度(℃)			最高温度保持時間			供試体数
	200	400	600	1h	2h	3h	
200-1h	○			○			3
200-2h	○				○		3
200-3h	○					○	3
400-1h		○		○			3
400-2h		○			○		3
400-3h		○				○	3
600-1h			○	○			3
600-2h			○		○		3
600-3h			○			○	3

表−2　コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単水量(kg/m³) 水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤(kg) AE減水剤	AE助剤
20	12±2.5	50	4.5±1.5	46	165	330	839	1011	2.64	0.66

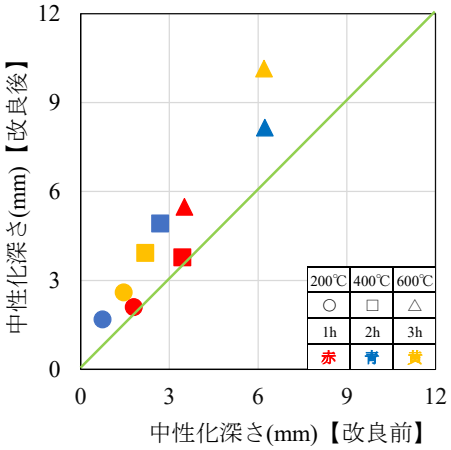
2. 実験概要

表−1 に，実験条件を示す．表より，最高温度を 200℃，400℃，600℃，最高温度保持時間を 1h，2h，3h，また水セメント比(W/C)を 50%とする合計 9 条件とし，それぞれ 3 回ずつ試験を行った．**表−2** に，コンクリートの配合を示す．使用したセメントは普通ポルトランドセメントであり，骨材の岩種は，細骨材，粗骨材ともに硬質砂岩である．**図−1** に，供試体形状の概要を示す．なお，圧縮強度は 50.6MPa であった．昨年度は直径 150mm，高さ 100mm の円柱供試体としたが，受熱効率が悪く，加熱面近傍のみ火害損傷を受ける状態であった．そこで供試体形状を直径 100mm，高さ 100mm と小さくした．加熱方法としては，熱の発散を防ぐ断熱の措置と，加熱面積を小さくし加熱効率をあげ，加えて拘束バンドにより熱による自由膨張の抑制を行った．加熱面は型枠底面とし，加熱にはガスバーナーを用いた．**図−2** に，供試体改良の評価として加熱後のフェノールフタレインによる中性化深さ測定結果を示す．図より，改良後の方が中性化深さが深く熱がより深くまで伝達していることがわかる．計測は，加熱前と加熱後の超音波伝播速度計測，加熱面のひび割れ密度の測定とした．超音波伝播速度の測定では，加熱後の供試体を熱伝達方向に切断し，深さ方向 20mm 間隔の測定も実施した．なお，供試体の含水率は加熱面付近が 2.5%程度であり，中心部(50mm)が 4.5%程度であった．



(a)改良前　　(b)改良後

図−1　供試体の改良



図−2　中性化深さの比較

キーワード　火害損傷，機械学習，決定境界
連絡先　〒963-8642　福島県郡山市田村町徳定字中河原 1 番地　ＴＥＬ024-956-8721

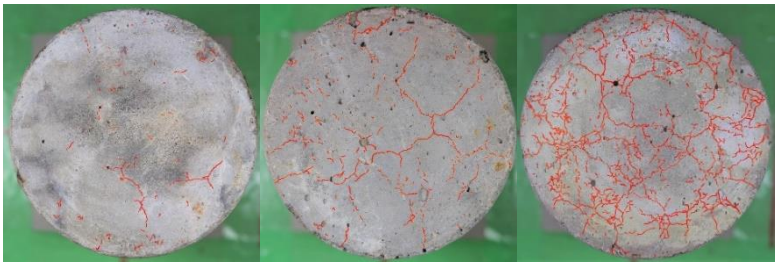
3. 実験結果及び考察

図-3 に，加熱面の損傷状態を示す．図より，ガスバーナーの熱は加熱面全体を加熱している．また，ひび割れ幅は約 0.05mm~0.1mm であった．観察より，200℃はひび割れの発生がほとんど観察されないが，400℃，600℃と受熱温度が増加するにつれ，ひび割れの本数が増加し網状に進展する傾向が見て取れた．これより，最高温度が増加することで表面の損傷の程度も大きくなると解釈された．図-4 に，超音波伝播速度とひび割れ密度の関係を示す．なお，図-4 以降には検証として加熱温度 300℃と 500℃の値(図中の 300℃◆と 500℃◇)も示している．図より，超音波伝播速度はひび割れ密度が増加するに従って減少する傾向にある．その傾向は近似直線で説明が可能であった．すなわち，ひび割れ密度の大小は内部損傷の程度を表すと考えられた．図-5 に，超音波伝播速度の深さ方向の分布を示す．図中の橙点線は加熱前の健全な状態の超音波伝播速度(4745m/s)である．図より，受熱温度が高く，その時間が長くなるに従って深部(80mm)の超音波伝播速度が遅くなる傾向にある．特に 600℃加熱においては 2 時間で 80mm 位置においても健全の 80%まで減少している．これに対して 200℃加熱の場合は，表面近くが 3 時間加熱で 4200m/s となっていた．そこで本研究の範囲では，この 4200m/s を火害損傷が生じる目安(黒点線)と位置付けた．これに基づくと 40mm 位置における 400℃の 3 時間加熱や 80mm 位置における 600℃の 1 時間加熱が 4200m/s に達していることがわかる．図-6 に，全供試体のひび割れ密度と火害損傷深さ(4200m/s 位置)の関係を示す．図より，ひび割れ密度の増加にともない 4200m/s 位置が深くなる傾向であった．そこで，図中の赤線に示すように，指数曲線による回帰式を式(1)として求めた．なお，式(1)の相関係数 R^2 は 0.863 と相関性も良いことを確認した．

$$D = 33.7In(C) - 94.6 \qquad (1)$$

ここで，D:火害を受けた面からの深さ(mm)，C:ひび割れ密度(m/m²)である．

以上より，火害を受けたコンクリートの深さ方向の損傷判別決定境界として式(1)の適用が可能と考えられた．この妥当性の検証のため，300℃と 500℃の損傷を評価した．図より，式(1)の回帰モデルに調和するようにプロットされており，表面のひび割れ密度より内部損傷の推定が可能と考えられた．



a)200-3h　b)400-3h　c)600-3h

図-3　火害による表面損傷状態

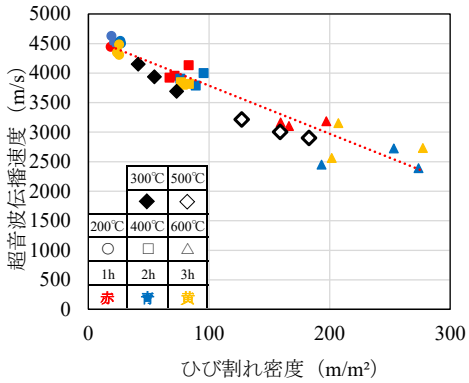


図-4　超音波伝播速度とひび割れ密度

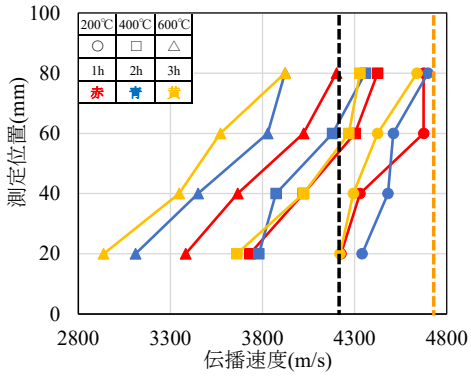


図-5　深さ方向と伝播速度

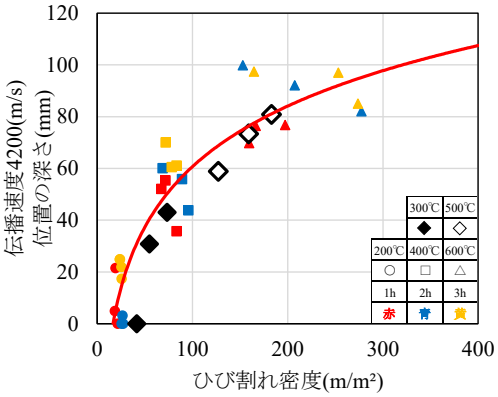


図-6　火害損傷深さと決定境界

4. まとめ

本検討より，火害による表面損傷と内部損傷を関連付けた評価が可能と考えられた．すなわち，ひび割れ密度と内部の損傷を指数関数とする回帰モデルで表すことができ，これを深さ方向の損傷判別決定境界とすることが可能という結果が得られた．今後は，学習データを増やし，得られた結果の精度検証を行うとともに，コンクリートの内部損傷を詳細に分析し補修判定の評価にも着手する予定である．

【参考文献】1)間下以大：機械学習超入門，映像情報メディア学会誌，Vol.72，No.3，pp.412-417，2018.