

報告 消火時の放水が火害を受けたコンクリートで測定された機械インピーダンス・接触時間・反発速度比に与える影響

野上 雄祐*1・内田 慎哉*2・久保 元樹*3・春畑 仁一*4

要旨: 本研究では、ガス加熱炉により火害を人工的に模擬したコンクリート試験体を作製し、この試験体を消火時の放水を模擬するために水中に浸漬させ、加熱前後・浸漬後において反発度に基づく方法および打撃試験を適用し、得られる各指標値（反発度、機械インピーダンス、接触時間、反発速度比）の変動を把握することを目的とした。その結果、いずれの指標値も、加熱前後・浸漬後において、値が変動することを確認した。特に、反発度は、著者らの研究結果と異なり、加熱により値が小さくなった。また、水分値との比較から、いずれの指標値もコンクリート表層の湿潤状態の影響を受けることが明らかとなった。

キーワード: コンクリート、火害、消火、非破壊試験、反発度、機械インピーダンス、接触時間、反発速度比

1. はじめに

コンクリートの劣化の一つに火害がある¹⁾²⁾³⁾。火害を受けたコンクリートの劣化状態を非破壊で評価する試験方法には、例えば、色彩測定や表層透気試験⁴⁾、反発度や機械インピーダンスに基づく方法⁵⁾、接触時間による方法⁶⁾、衝撃弾性波に基づく方法⁶⁾⁷⁾などがある。しかしながら、コンクリートの火害劣化に関する研究および調査事例の報告は、凍害や塩害といった他の劣化現象と比較すると極めて少ないのが現状である。また、上記に例示した既往研究は、いずれも加熱後のコンクリート試験体に対して各種非破壊試験を適用したものであり、消火活動すなわち放水の影響について検討した事例は少ない。

そこで本研究では、火害を人工的に模擬したコンクリート試験体を作製し、この試験体を消火時の放水を模擬するために水中に浸漬させ、加熱前後および浸漬後において反発度に基づく方法および打撃試験をそれぞれ適用し、得られる各指標値（反発度、機械インピーダンス、接触時間、反発速度比）の変動を把握することを目的とした。

2. 実験概要

本研究における実験の流れを表-1に示す。まず、コンクリート試験体を製作後、加熱前に非破壊試験を行っ

表-1 実験の流れ

試験 材齢*1	-	0日	1日	2日	35日	41日
項目	NDT*2	加熱	NDT	放水*3	NDT	コア*4

*1: 加熱日を試験材齢0日とする *2: 非破壊試験の実施

*3: 放水作業 *4: コア採取日

*1 富山県立大学 工学部環境・社会基盤工学科 (学生会員)

*2 富山県立大学 工学部環境・社会基盤工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*3 日東建設(株) 札幌支店技術開発部取締役部長 (正会員)

*4 (一財)日本建築総合試験所 試験・研究センター (正会員)

た。その後、加熱試験を行い、翌日に非破壊試験を適用した。同日に放水作業を行い、34日後(加熱日からは35日後)に、再度、非破壊試験を行った。コア採取日は、加熱試験日から41日後である。詳細は以下にそれぞれ示す。

2.1 コンクリート試験体

試験体の形状は図-1に示すように、長さ900mm、幅900mm、厚さ250mmの直方体であり、これを1体作製した。加熱後の試験体の移動を考慮して、加熱面から深さ165mmおよび178mmの位置に用心鉄筋(異形棒鋼(呼び径:D13))をロの字状に4本配置した(図-1参照)。コンクリートは、生コン工場で製造した呼び強度:24N/mm²を使用した。コンクリートの使用材料は、セメント:普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³)、水:

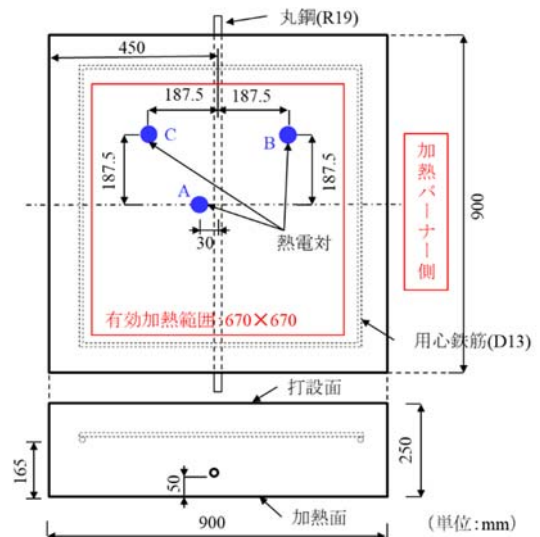


図-1 試験体の概要

地下水，細骨材：大分県津久見市産砕砂（表乾密度：2.68g/cm³，粗粒率：2.85）および京都府亀岡市産砕砂（表乾密度：2.60g/cm³，粗粒率：2.85），粗骨材：京都府亀岡市産砕石（表乾密度：2.68g/cm³，実積率：58%），混和剤：AE減水剤標準型Ⅰ種である。表-2にコンクリートの配（調）合を示す。なお，フレッシュコンクリートの性状は，スランプ9.0cm，空気量4.1%である。強度試験用の円柱供試体は，材齢28日に圧縮強度試験および静弾性係数の測定を行った結果，圧縮強度27.2N/mm²，静弾性係数29.9kN/mm²であった。加熱試験用の試験体は室内気中養生をした後，材齢7日で脱型し，加熱試験に供するまで屋内で静置した。なお，加熱時のコンクリートの温度履歴を把握するため，図-1に示す3箇所に加熱面から0，25，50，100mmの位置にK熱電対をそれぞれ設置した。

2.2 加熱試験

試験体の加熱には図-2に示すガス加熱炉を使用した。天井スラブの加熱を想定し，試験体の長さ900mm，幅900mmの型枠面（有効加熱寸法：長さ670mm×幅670mm）が炉内に接するように試験体を設置した。ガス加熱炉の熱源は都市ガス（46090kJ/m³）とし，ISO834の標準加熱曲線に沿って炉内温度を上昇させ，図-1に示すコンクリート表面から0mmにある3本の熱電対で測定した温度の平均値が500℃となるまで試験体を加熱した。この温度を本研究では加熱温度と呼ぶ。その後さらに試験体は，加熱温度で4.5時間継続して加熱された。なお，加熱試験日での試験体の養生期間は835日である。加熱終了後は，反発度に基づく方法および打撃試験をそれぞれ実施するため，加熱炉側面の炉蓋を開放し，加熱面のコ

表-2 コンクリートの配（調）合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	SI	S2	G	A
57.0	44.7	168	295	560	240	1023	2.950

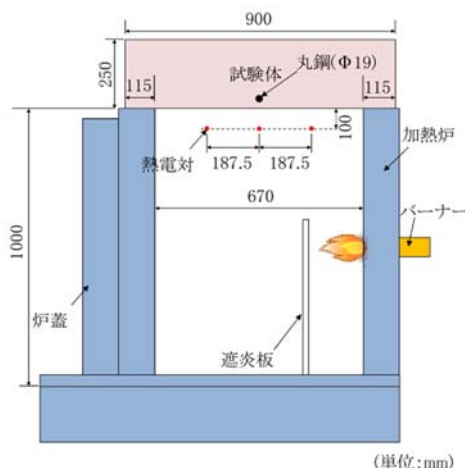


図-2 ガス加熱炉の概要

ンクリート表面温度（加熱温度を計測した3本の熱電対での平均値）が60℃になるまで加熱炉上に静置した。

2.3 放水

消火による放水を模擬するため，試験体の加熱面から鉄筋側へ80mmの高さまで水を満たした。浸漬時間は2時間に設定した。

2.4 非破壊試験

(1) 反発度に基づく方法

反発度：Rは，JISA1155「コンクリートの反発度の測定方法」に規定されているリバウンドハンマー（N型）によって測定した。打撃は，写真-1に示すように，鉛直下向きに行った。測定箇所は，加熱面の有効加熱範囲（670×670mm）内であり，写真-2に示すA～Oの15箇所とした。各箇所における反発度は，まず，互いに30mmの間隔をもった16点で測定を行った。その後，測定値を昇順に並び替え，一番大きい値から4個，一番小さい値から3個をそれぞれ棄却した。最後に，残りの9個の値の平均値を算出し，これをその箇所での反発度とした。

(2) 打撃試験

打撃試験は，NDIS3434-3²⁰¹⁷「コンクリートの非破壊試験—打撃試験方法—第3部：機械インピーダンス試験方法」⁹⁾に基づき行った。打撃試験の状況を写真-3に示す。測定に使用したハンマーの打撃体部分の質量：Mは



写真-1 反発度に基づく方法の測定状況

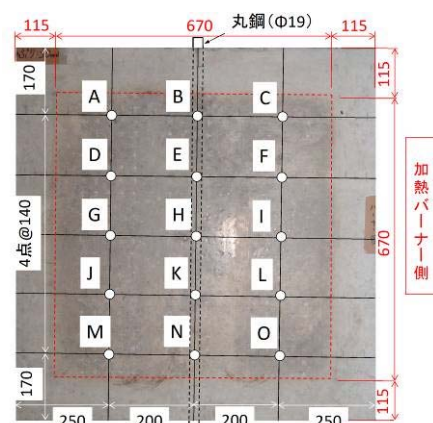


写真-2 各種非破壊試験の測定箇所

380g, 球冠半径: R は 30mm である。ハンマに内蔵した加速度センサの周波数範囲 ($\pm 1\text{dB}$) は 0.4~10000Hz である。計測におけるサンプリング時間間隔は 0.5 μs に設定した。図-3 に、ハンマでコンクリート表面を打撃した際の打撃波形の例を示す。図中に示す V_1 (打撃速度) は、ハンマがコンクリート表面に衝突した時刻: T_1 からコンクリートの抵抗を受けてハンマが停止する時刻: T_2 までの時間 (打撃時間) において加速度を打撃時間で積分した値である。一方、 V_2 (反発速度) は、 T_2 からハンマがコンクリートの反発力を受けて加速度がゼロとなる時刻: T_3 までの時間 (反発時間) において加速度を反発時間で積分した値である。コンクリートは完全弾性体ではないため、 V_1 と V_2 は異なる値となり、 V_1 には塑性変形分が含まれ、 V_2 には塑性変形後の弾性変形のみが反映された値となる。前者を用いて算出した機械インピーダンスは貫入過程の機械インピーダンス: Z_A であり、後者は反発過程の機械インピーダンス: Z_R と定義される。これらの算出式を以下にそれぞれ示す。

$$Z_A = \frac{F_{\max}}{V_1} \approx \frac{MA_{\max}}{\left(\int_{T_1}^{T_2} A(t)dt\right)^{1.2}} \quad (1)$$

$$Z_R = \frac{F_{\max}}{V_2} \approx \frac{MA_{\max}}{\left(\int_{T_2}^{T_3} A(t)dt\right)^{1.2}} \quad (2)$$

ここで、 F_{\max} : 最大打撃力、 A_{\max} : 最大加速度、 $A(t)$: 打撃力波形である。なお、式中のべき乗値 1.2 は、速度補正係数である。また本研究では、打撃波形から接触時間: T_c および反発速度比: V も指標値として算出した。これらの算出式を以下にそれぞれ示す。

$$T_c = T_3 - T_1 \quad (3)$$

$$V = V_2/V_1 \quad (4)$$

なお、打撃箇所、打撃点数、打撃方向、各指標値の算出手順は、反発度に基づく方法と同じである。

3. 実験結果および考察

3.1 加熱試験中の炉内およびコンクリートの温度履歴

炉内温度およびコンクリートの温度履歴を図-4 にそれぞれ示す。図中に示す 0, 25, 50, 100mm の温度は、図-1 に示す A, B, C の 3 箇所を設置した熱電対における同一深さで計測した温度の平均値である。

3.2 加熱後に試験体から採取したコアの圧縮強度・静弾性係数

加熱後の試験体からコア (直径 100mm) を 3 本採取した。採取日は、水中浸漬後に実施した非破壊試験の測定日から 6 日後 (表-1 参照) である。採取したコアの圧縮強度試験および静弾性係数の測定結果を表-3 に示す。表-3 と材齢 28 日との比較より、加熱により圧縮強度お

よび静弾性係数は低下していることが確認された。

3.3 非破壊試験

(1) 反発度に基づく方法

図-5 に、加熱前、加熱後の浸漬前 (加熱後) および加熱後の浸漬後 (浸漬後) で得られた反発度: R の結果を示す。図に示す反発度: R は、15 箇所 (写真-2 の A



写真-3 打撃試験の測定状況

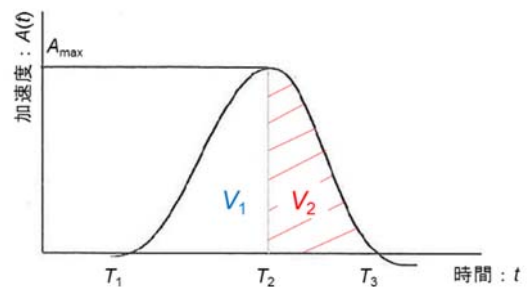


図-3 打撃波形の例

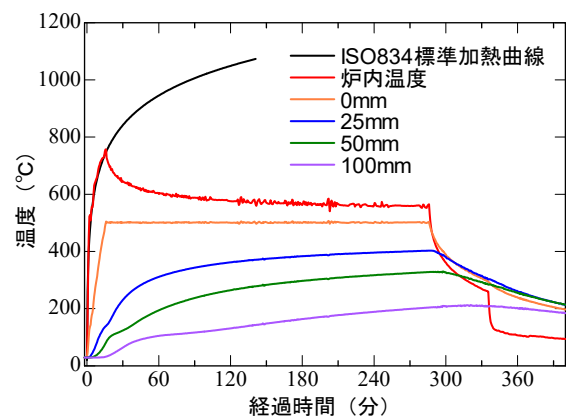


図-4 試験体の温度履歴

表-3 採取したコアの圧縮強度試験および静弾性係数

採取場所	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
炉蓋側	22.9	16.9
試験体中央	23.4	17.8
バーナー側	21.9	16.8

*加熱日を試験材齢 0 日とすると、83 日目に両試験を実施

～O) で求めた反発度: R の平均値であり, エラーバーはその不偏標準偏差を示す。図より, 加熱により反発度: R が小さくなり, 浸漬によってさらにその値が小さくなった。著者らの既往研究^{5),9)}では, 加熱により反発度: R が大きくなることを示しており, 本実験結果と異なる傾向であった。また, 特に着目すべき点としては, 今回の使用した試験体は, 著者らの既往研究⁹⁾に示す試験体と使用材料・配合・寸法・打設日などが全て同じであり, また加熱方法・加熱時間・加熱継続時間も同じであることである。相違点としては, 加熱試験日までの養生期間が107日と835日で異なり, またかぶりも30mmと50mmで異なることが挙げられるが, 加熱により反発度: R が小さくなった要因としては考えにくい。今後, 詳細に検討を重ね, 原因を解明する予定である。

続いて, 浸漬後の反発度: R が加熱後の反発度: R のそれと比較して小さくなった理由は, コンクリートの湿潤状態の影響と考察できる。一般的に, 反発度はコンクリートの湿潤状態の影響を受ける指標値であり, 表面が濡れている場合は乾燥状態のときよりも小さな値となることが知られている。この理由により, 浸漬前後で反発度: R が変化したと考えるのが妥当である。

(2) 打撃試験

図-6および図-7, 機械インピーダンス: Z_A , Z_R の結果を示す。図に示す機械インピーダンス: Z_A , Z_R は, 15箇所(写真-2のA～O)で求めた機械インピーダンス: Z_A , Z_R の平均値であり, エラーバーはその不偏標準偏差を示す。図より, 機械インピーダンス: Z_A , Z_R ともに, 加熱により値が小さくなった。この傾向は, 著者らの既往研究^{5),9)}と一致している。機械インピーダンスは, 式(5)および式(6)に示すとおり, コンクリートのバネ係数: k を反映しており, コンクリート表層部分の機械的な動きにくさを示す指標⁸⁾である。

$$Z_A = \frac{F_{\max}}{V_1} = \sqrt{Mk} \quad (5)$$

$$Z_R = \frac{F_{\max}}{V_2} = \sqrt{Mk} \quad (6)$$

通常, 打撃によりコンクリート表層部分は塑性変形をする。そのため, 機械インピーダンスとしては, 前述のとおり貫入過程および反発過程の機械インピーダンス Z_A と Z_R がそれぞれ定義され, 両者は同じ値にならない。以上より, 機械インピーダンス: Z_A , Z_R が小さくなった理由は, 加熱により静弾性係数が低下したことによる。また, 機械インピーダンス: Z_A , Z_R ともに, 浸漬により加熱後の値よりも若干ではあるが大きくなった。このことは, 両指標値は水の影響により変動することを意味している。

図-8, 接触時間: T_c の結果を示す。図に示す接触時間

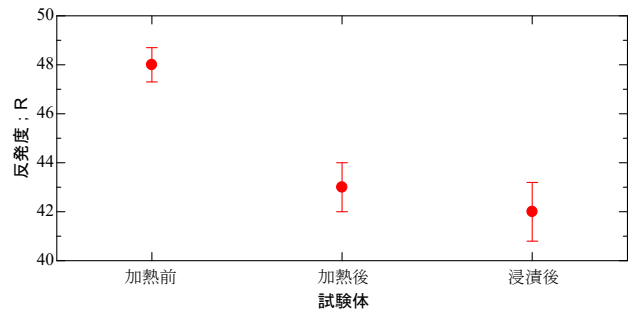


図-5 反発度: R

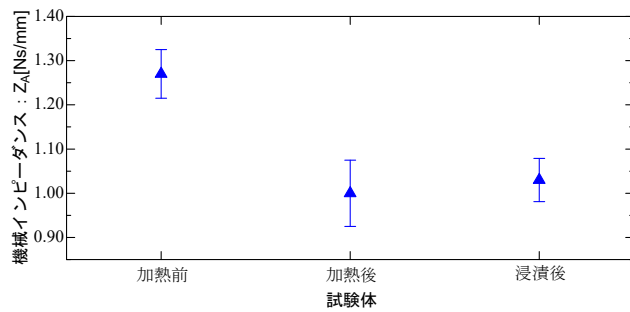


図-6 機械インピーダンス: Z_A

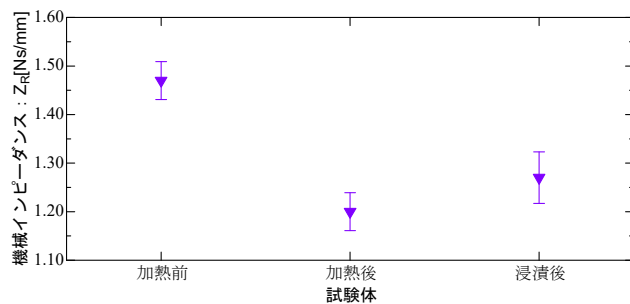


図-7 機械インピーダンス: Z_R

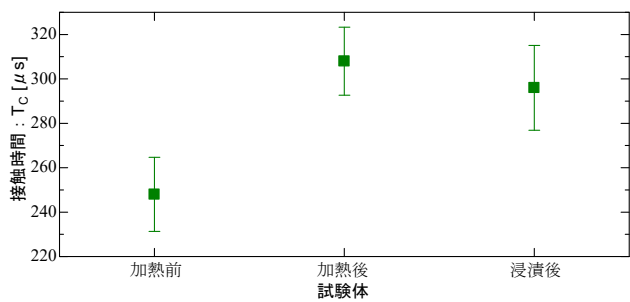


図-8 接触時間: T_c

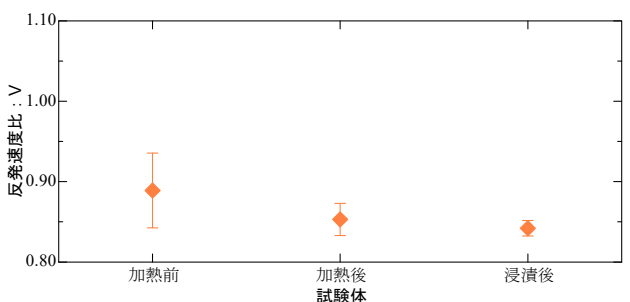


図-9 反発速度比: V

は、15箇所(写真-2のA~O)で求めた接触時間の平均値であり、エラーバーはその不偏標準偏差を示す。図より、加熱により接触時間が大きくなり、既往の研究成果⁹⁾と同じ傾向を示している。接触時間は、式(7)に示すとおり、コンクリートの弾性係数： E とブリネル硬さ： H_B を反映する指標¹⁰⁾である。

$$T_c = \sqrt{\frac{M\pi}{8RH_B}} + \frac{\pi}{4}\sqrt{2M}\left(\frac{1-\nu^2}{RE}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

ここで、 ν ：コンクリートのポアソン比である。したがって、機械インピーダンス同様、加熱により静弾性係数が低下したことにより、接触時間が大きくなったと考察できる。一方、浸漬後は、水の影響により若干ではあるが接触時間が小さくなった。

図-9、反発速度比： V の結果を示す。図に示す反発速度比： V は、15箇所(写真-2のA~O)で求めた反発速度比： V の平均値であり、エラーバーはその不偏標準偏差を示す。図より、反発速度比： V は、加熱さらにはその後の浸漬により、値が徐々に小さくなっていくことが確認できる。加熱後の反発速度比： V は、静弾性係数の影響を受け、浸漬後の反発速度比： V は水の影響を受けていると考察できる。既往の研究で用いた装置⁹⁾と本研究で使用した装置は、例えば、打撃部先端の球面半径や衝撃エネルギーなど、仕様が異なる。そのため、両装置から得られた指標値をそのまま比較することができないため、本稿での比較ならびに考察は割愛する。

図-10に、反発度： R 、機械インピーダンス： Z_A 、 Z_R 、接触時間： T_c 、反発速度比： V の変動係数を示す。いずれの指標値も変動係数は10%未満と小さく、特に反発度： R および機械インピーダンス： Z_A 、 Z_R については、著者らの既往研究⁹⁾に示す変動係数と概ね同じ値であった。

(3) 水分値

高周波容量式(20MHz)の水分計で測定した水分値と各指標値(反発度： R 、機械インピーダンス： Z_A 、 Z_R 、接触時間： T_c 、反発速度比： V)との関係を図-11~図-15にそれぞれ示す。図に示す水分値は、加熱前、加熱後および

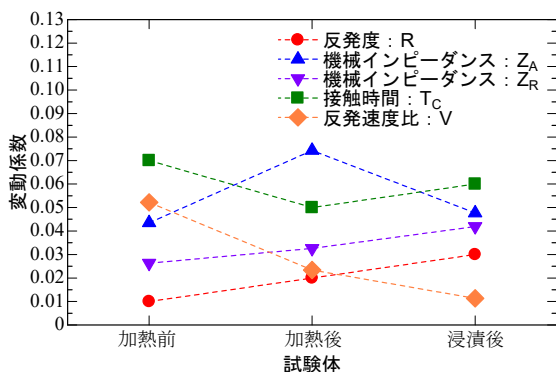


図-10 各指標値の変動係数

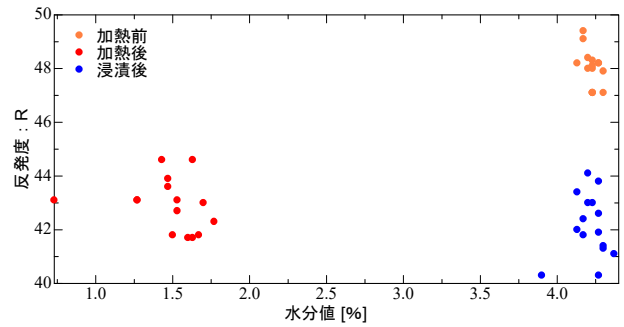


図-11 反発度： R と水分値との関係

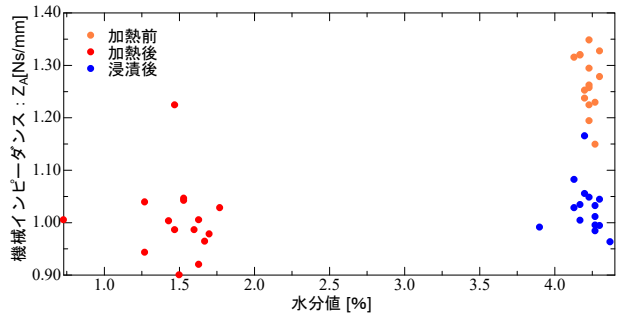


図-12 機械インピーダンス： Z_A と水分値との関係

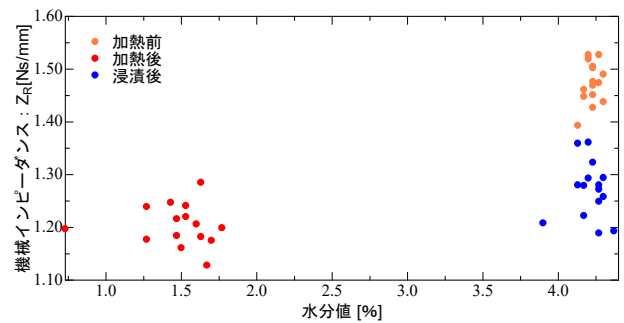


図-13 機械インピーダンス： Z_R と水分値との関係

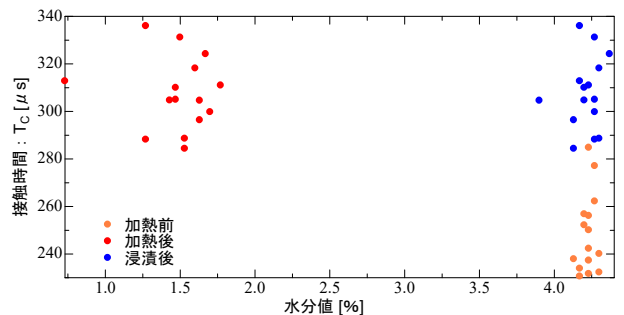


図-14 接触時間： T_c と水分値との関係

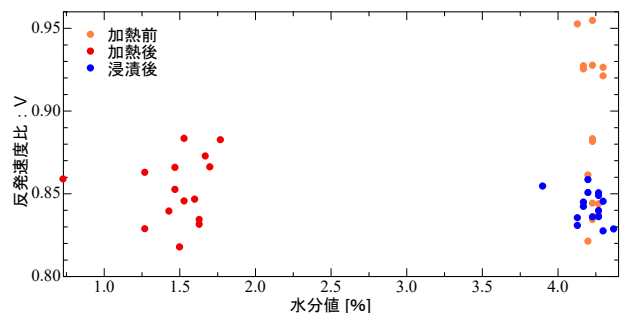


図-15 反発速度比： V と水分値との関係

び浸漬後のいずれの場合においても、15箇所（写真-2のA～O）で測定した全ての値である。ただし、1箇所あたりの水分値は、3回の測定を行った平均値を採用することにした。一方、各指標値（反発度： R 、機械インピーダンス： Z_A , Z_R 、接触時間： T_c 、反発速度比： V ）は、いずれも、15箇所（写真-2のA～O）で測定した全ての値である。図より、いずれの指標値においても、加熱前と浸漬後の水分値は概ね同じ値になっていることがわかる。また、加熱後の水分値は、加熱前および浸漬後のそれよりも小さくなっている。さらに、いずれの指標値においても、加熱後および浸漬後において、それぞれの指標値が変動しており、少なからず水分の影響を受けていると考えられる。したがって、消火活動後の火災現場において、反発度に基づく方法および打撃試験を適用する場合は、打撃するコンクリート表層の湿潤状態を考慮して、得られた指標値（反発度： R 、機械インピーダンス： Z_A , Z_R 、接触時間： T_c 、反発速度比： V ）を補正する必要がある。今後は、この補正方法について、より詳細な検討を行う予定である。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 反発度： R 、機械インピーダンス： Z_A , Z_R 、接触時間： T_c 、反発速度比： V のいずれの指標値も、加熱前、加熱後および浸漬後において、値が変動することを確認した。
- (2) 特に、反発度： R の結果は、これまでの著者らの研究結果と異なり、加熱により値が小さくなった。
- (3) 反発度： R 、機械インピーダンス： Z_A , Z_R 、接触時間： T_c 、反発速度比： V のいずれの指標値も、コンクリート表層の湿潤状態の影響を受ける。

謝辞

本研究は、(一社)日本非破壊検査協会 2019年度研究助成(研究代表者：富山県立大学 内田慎哉)の援助を受けて行った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'19 [基礎編]，pp.57-61，2019
- 2) 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，2015
- 3) 日本コンクリート工学会：高温環境下におけるコンクリートの性能評価に関する研究委員会報告書，2017.9
- 4) 春畑仁一，迫井裕樹，内田慎哉，池田憲一：表層透気試験および色彩測定による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1075-1080，2017.7
- 5) 内田慎哉，春畑仁一，小松由弥，池田憲一：反発度および機械インピーダンスによる火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1903-1908，2017.7
- 6) 岩野聡史，内田慎哉，春畑仁一，渡部 正：弾性波法で得られた接触時間・伝搬時間による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1915-1920，2017.7
- 7) 大野健太郎，前田祐輔，内田慎哉，春畑仁一：弾性波の速度構造による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1909-1914，2017.7
- 8) NDIS 3434-3^{:2017}：コンクリートの非破壊試験—打撃試験方法—第3部：機械インピーダンス試験方法，日本非破壊検査協会，2017
- 9) 春畑仁一，内田慎哉，岩野聡史，池田憲一：火害を受けたコンクリートの反発度・反発速度・機械インピーダンス・接触時間による劣化状態の評価方法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1635-1640，2018.7.
- 10) NDIS 3434-2^{:2017}：コンクリートの非破壊試験—打撃試験方法—第2部：接触時間試験方法，日本非破壊検査協会，2017