

論文 火害を受けたコンクリートの孔内局部載荷法による劣化深さ測定および他手法との比較検討

皿井 剛典*1・澤口 啓希*1・春畑 仁一*2・阪口 明弘*2

要旨:「孔内局部載荷法」は、コンクリート構造物の物性（圧縮強度、静弾性係数）を深度方向に測定することが可能な微破壊試験である。本研究では、火害を受けたコンクリートの劣化診断への適用の可否を検討するため、水セメント比、受熱温度、加熱後の冷却方法を変化させたコンクリート試験体を用い、測定を実施した。その結果、孔内局部載荷法は、受熱温度の違いにより生ずる劣化深さの違いを詳細に把握できることがわかった。また、他の非破壊・微破壊手法との比較の結果、孔内局部載荷法は、火害を受けたコンクリートの劣化診断手法として有効な手法であることがわかった。

キーワード: 火害, 孔内局部載荷法, 劣化深さ, 非破壊・微破壊試験, 受熱温度

1. はじめに

「孔内局部載荷法」は、これまで、河川樋門や砂防堰堤、橋梁、トンネルといった土木構造物の施工不良や凍害等によるコンクリート構造物の劣化深さの評価・診断に用いられてきた^{1,2)}。

本手法は、図-1に示す載荷試験装置を用い、直径42mm以上でコア削孔した孔内においてコンクリートの物性を測定する“微破壊試験”である。載荷試験装置は、直径6mm半球状の載荷先端を備えたゾンデ(直径40mm, 長さ270mm)および油圧ポンプ、データ収録装置(ノートパソコン, アンプ)からなっている。

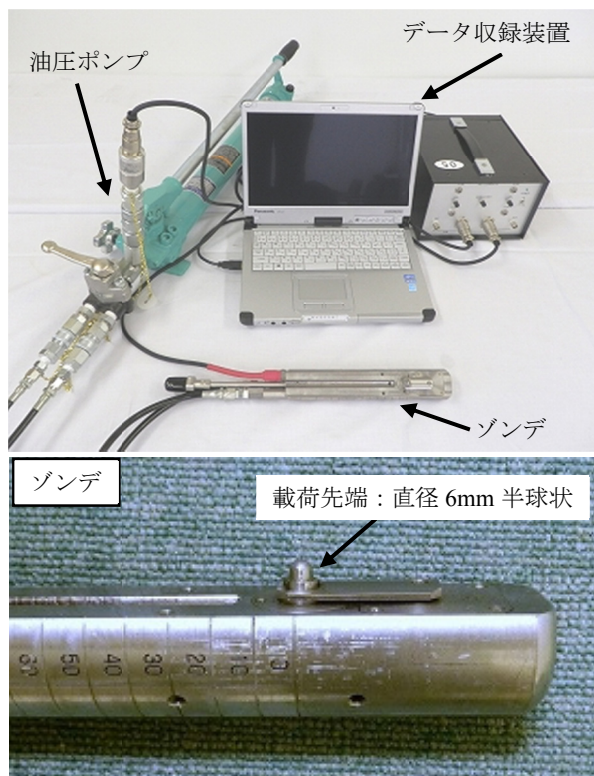


図-1 載荷試験装置

筆者らは、これまでに、水セメント比が同一で、受熱温度が異なるコンクリート試験体において測定を行い、孔内局部載荷法により試験体の深さ方向の物性変化を捉えることが可能であることを確認してきた³⁾。

本研究では、水セメント比や受熱温度、加熱後の冷却方法を変化させたコンクリート試験体において測定を実施し、孔内局部載荷試験法の火害診断への適用性について検討した。また、孔内局部載荷法の結果と、同じ試験体で実施した他の非破壊・微破壊試験の結果とを比較検討を行った。

なお、本研究では検討していないが、鉄筋位置のコンクリートの物性変化を捉えることで、間接的にコンクリート中の鉄筋への影響(受熱温度)の推定も可能となると考えられる。

2. 試験概要

2.1 試験体

試験体は、長さ1000mm×幅500mm×厚さ200mmの直方体で、かぶり厚さを50mmとして異形棒鋼D10を縦横200mm間隔で配置し、レディミクストコンクリートを打設したものを用いた。コンクリートの調合は、水セメント比63%(28日間標準養生試験体の圧縮強度29.7N/mm²), 50%(同35.5N/mm²), 38%(同54.2N/mm²)の3水準(以下, W/C:63%, W/C:50%, W/C:38%)に変化させた。

また、コンクリート表面および内部の温度を測定するため、コンクリート打設前に、コンクリート表面、深さ25mm, 50mm, 100mmの4深度×3地点の計12ヶ所にSK熱電対を埋設した。

試験体は打設から7日後に脱型後、W/C:63%およびW/C:50%は94日間、W/C:38%は95日間、室内空中に静

*1 川崎地質(株) 事業本部保全・エネルギー部 (正会員)

*2 (一財)日本建築総合試験所 試験研究センター (正会員)

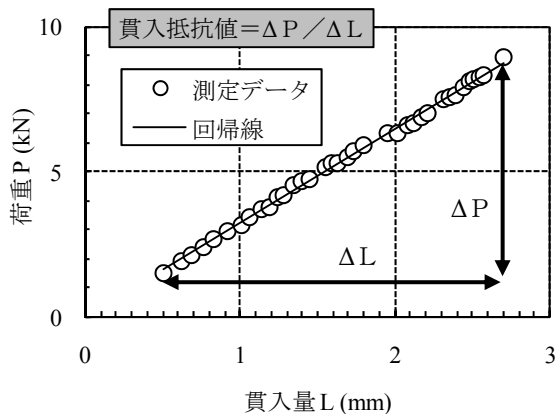


図-2 貫入抵抗値の算出方法

置した。その後、都市ガス (46090kJ/m³) を熱源とし、ISO834 に規定する標準加熱曲線に沿って炉内温度を上昇させ、コンクリート加熱面の温度が 300, 500, 750, 950℃となるまで加熱し、加熱後に気中(以下、放水なし)および放水(以下、放水あり)により冷却した。また、比較のため、未加熱の試験体についても用いた。

2.2 孔内局部載荷法

孔内局部載荷法は、各試験体に直径 42mm (直径 42mm 試験孔と呼ぶ) および直径 105mm (直径 100mm 試験孔と呼ぶ) でコア削孔した後、各孔において試験体表面から深さ 140mm まで、5~12 水準の深さについて実施した。

各測定深度では、骨材や気泡等により生ずるばらつきの影響を低減させるため、ゾンデを円周方向に回転させ、同一深度において 6 点程度の測定を行った。

測定は、i) ゾンデを測定深度に設置、ii) 油圧ポンプにより載荷先端を孔壁に載荷、iii) 載荷時の貫入量と荷重をデータ収録装置で収録、iv) 同一深度において i)~iii) を繰り返し行い 6 点程度のデータを取得、という手順で実施した。なお、直径 100mm 試験孔における測定の際には、ゾンデ下面にアタッチメントを取り付け、孔径との調整を行った。

測定結果は、各測定点の荷重-貫入量曲線の傾きから図-2 に示すように「貫入抵抗値 (kN/mm)」を算出し、測定深度ごとに平均し、各深度のコンクリート物性の評価指標とした。

2.3 他の非破壊・微破壊試験

孔内局部載荷法との比較のため、採取したコア試料の圧縮強度試験 (JIS A 1149)、試験体表面における反発度法 (JIS A 1155) および引っかき傷法を実施した。

引っかき傷法は、日本塗工床工業会の認定品である引っかき試験器を用いた直読法と、K社考案の引っかき傷試験器(機械式でハンドルを回し、秒速 1~1.2cm で引っかき傷をつけることが可能)および光学測定器 (CCD カメラで撮影し、画像処理により 0.02mm 単位で引っかき傷幅の測定が可能)を用いた光学測定法により実施した。

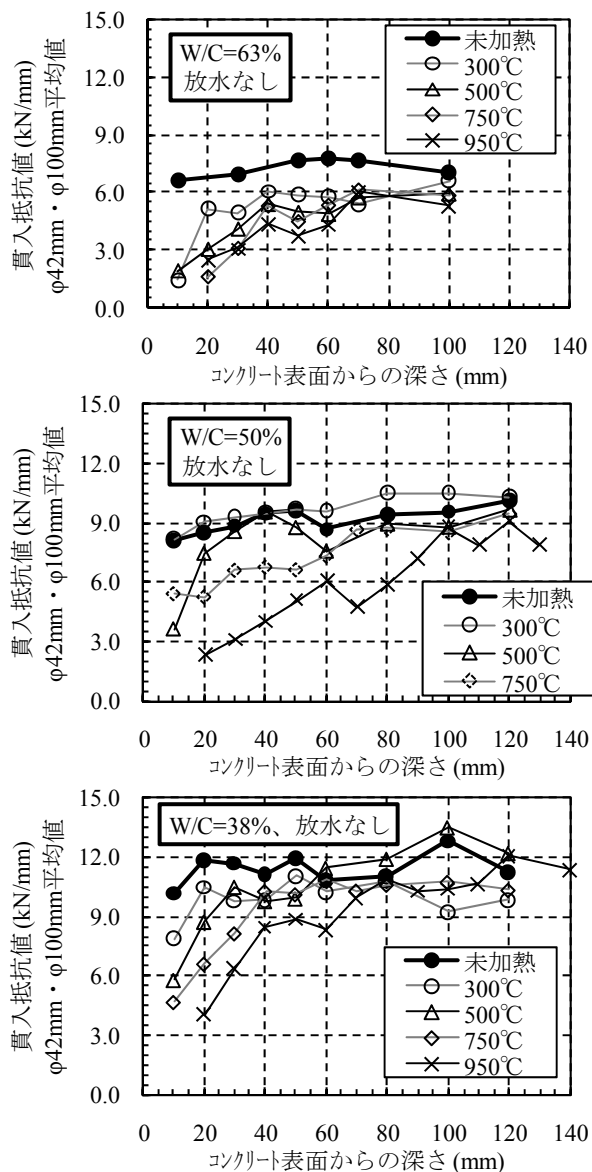


図-3 孔内局部載荷法結果 水セメント比の比較

3. 試験結果および考察

3.1 孔内局部載荷法

(1) 水セメント比 : W/C:63%, W/C:50%, W/C:38%

各水セメント比の放水なし試験体の各加熱条件における、試験体の深さ方向の測定結果を図-3 に示す。

なお、加熱の影響による貫入抵抗値の低下の判断は、本研究では、加熱による影響を受けていないと考えられる深さ 100mm 以深の値から概ね 20%低下した場合とした。ただし、本研究で設定した閾値は、今後の研究成果により再検討が必要と言える。

W/C:63%では、未加熱の貫入抵抗値は表層から深部まで 6~8 程度の値であり、深度方向の値の変化はほとんど無い。しかし、加熱条件下の試験体では、300℃では深さ 10mm、500℃および 750℃、950℃では深さ 60mm まで、表層付近の貫入抵抗値の低下が確認された。

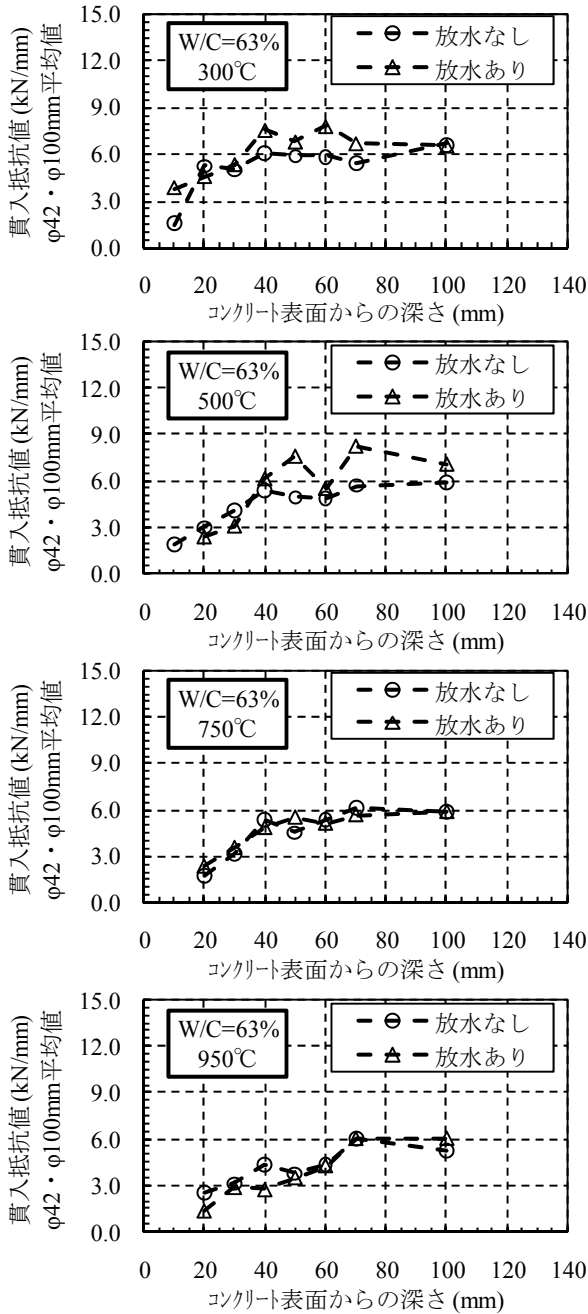


図-4 孔内局部荷重法結果 放水有無の比較

また、W/C:50%およびW/C:38%についても同様の傾向が確認されたが、300°Cは、W/C:50%では貫入抵抗値の低下が明確ではなく、W/C:38%ではW/C:63%と同様に10mmと判断された。

貫入抵抗値の低下深さは、W/C:50%の500°Cでは20mm、750°Cでは60mm、950°Cでは90mm、W/C:38%の500°Cでは20mm、750°Cでは30mm、950°Cでは60mmであり、W/C:63%と同様に加熱条件に応じて表層付近の貫入抵抗値の低下が確認された。

なお、貫入抵抗値の低下の程度の違いは、元々のコンクリート強度の違いにより生じていると考えられる。

(2) 放水の有無：放水なし、放水あり

W/C:63%試験体の各加熱条件における、放水なし・あ

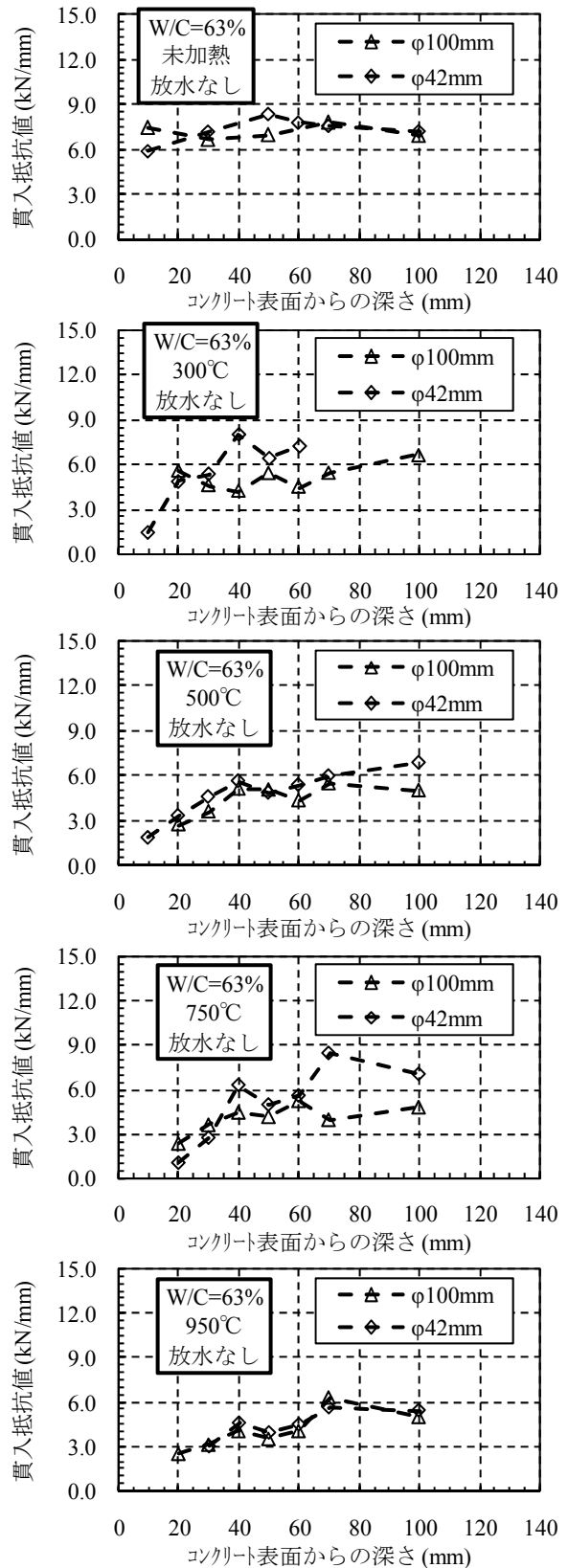


図-5 孔内局部荷重法結果 試験孔径の比較

りの各試験体の測定結果を図-4に示す。

貫入抵抗値は、いずれの加熱条件においても、放水の有無による違いは明瞭ではなく、ほとんど差が無い。このような傾向は、W/C:50%およびW/C:38%においても同

表-1 貫入抵抗値と受熱温度の関係

放水	W/C	加熱温度 ℃	測定深度							
			表面※1		25mm※2		50mm		100mm	
			コンクリート温度 ℃	貫入抵抗値 kN/mm	コンクリート温度 ℃	貫入抵抗値 kN/mm	コンクリート温度 ℃	貫入抵抗値 kN/mm	コンクリート温度 ℃	貫入抵抗値 kN/mm
なし	63	未加熱	12	6.66	12	6.93	11	7.69	10	7.08
		300	309	1.47	124	5.08	79	5.88	45	6.63
		500	507	1.92	261	3.58	118	4.98	70	5.94
		750	754	-	422	2.38	249	4.51	110	5.86
		950	950	-	671	2.78	488	3.74	211	5.25
	50	未加熱	33	8.08	33	8.67	33	9.60	33	9.56
		300	306	8.15	137	9.13	98	9.65	63	10.46
		500	504	3.58	244	7.98	166	8.74	91	8.76
		750	755	5.39	512	5.90	349	6.60	145	8.48
		950	951	-	742	2.71	526	5.09	287	8.79
	38	未加熱	29	10.15	29	11.75	28	11.96	28	12.79
		300	346	7.86	174	10.13	128	11.06	75	9.23
		500	512	5.77	261	9.60	162	9.89	95	13.49
		750	753	4.67	541	7.37	356	10.11	168	10.73
		950	951	-	743	5.18	545	8.87	284	10.37
あり	63	300	306	3.77	139	4.89	66	6.76	33	6.49
		500	510	-	213	2.70	115	7.56	49	7.06
		750	750	-	422	2.92	250	5.48	109	5.85
		950	950	-	657	2.10	488	3.49	205	6.03
	50	300	304	5.94	119	8.12	79	8.64	51	8.53
		500	517	4.19	282	5.91	157	8.12	92	7.71
		750	763	4.38	510	4.47	334	7.95	148	9.52
		950	949	-	735	3.22	560	6.20	291	7.05
	38	300	374	6.36	157	8.97	105	10.51	86	11.17
		500	509	5.67	219	9.17	158	11.29	91	10.76
		750	761	4.29	490	8.40	319	7.95	143	10.70
		950	935	-	689	2.80	525	8.69	291	9.39

※1 貫入抵抗値は、深さ10mmの値

※2 貫入抵抗値は、深さ20mmと30mmの平均値

様であった。

(3) 試験孔の孔径：直径 100mm, 直径 42mm

W/C:63%試験体の各加熱条件の各試験体の、直径 100mmおよび直径42mm試験孔における測定結果を図-5に示す。

直径 100mm と直径 42mm の各試験孔における貫入抵抗値は、いずれの加熱条件においても両者の測定値にほとんど差が無い。このような傾向は、他の試験体においても同様であった。

孔内局部載荷法は、通常、直径 42mm の試験孔において測定を行う。上記のように、本実験の結果、直径 100mm の試験孔であっても試験結果は直径 42mm と同様となるのがわかった。このため、孔内局部載荷法は、他の試験を実施するために削孔した直径 42mm よりも大きな孔径の試験孔を活用して測定を行っても問題無いと言える。

(4) 受熱温度と貫入抵抗値

各試験体では、コンクリートの受熱温度を、試験体の

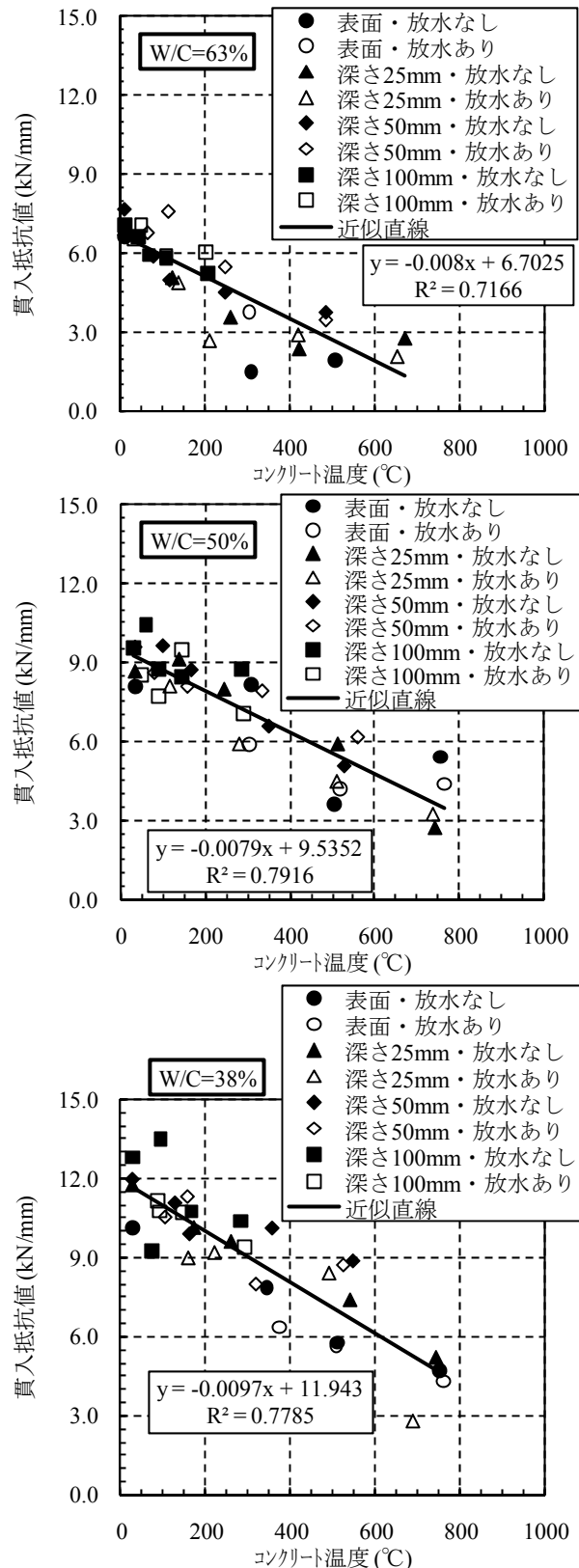


図-6 貫入抵抗値と受熱温度の関係

表面、深さ 25mm, 50mm, 100mm に熱電対を設置して測定している。

コンクリートの受熱温度と貫入抵抗値の関係を表-1 および図-6に示す。受熱温度測定値に対応する貫入抵抗値は、表面は深さ 10mm の測定値、25mm は深さ 20mm

と30mmの平均値, 50mmは深さ50mmの測定値, 100mmは深さ100mmの測定値をそれぞれ用いた。

なお, 前述のように, 放水の有無による貫入抵抗値への影響はほとんど無いことから, 放水の有無を同様に扱うこととした。また, 未加熱は, 放水あり・なしで同一試験体であるため, 放水なしとして扱っている。

各深度のコンクリート温度は, 加熱温度の違いにより異なり, 300℃では深さ25mmで120~170℃程度, 50mmでは80~130℃程度, 100mmでは30~90℃程度, 500℃では25mmで210~280℃程度, 50mmでは120~160℃程度, 100mmでは50~90℃程度, 750℃では25mmで420~540℃程度, 50mmでは250~350℃程度, 100mmでは110~170℃程度, 950℃では25mmで660~740℃程度, 50mmでは490~560℃程度, 100mmでは210~290℃程度である。

貫入抵抗値と受熱温度の関係は, いずれの水セメント比においても, 受熱温度の上昇とともに貫入抵抗値が低下する傾向であり, 強い相関が確認された。

これは, 孔内局部荷法によって, コンクリート表面の加熱温度に係わらず, 実際の受熱温度を, 精度よく捉えていることを示している。

なお, 貫入抵抗値の低下量は, W/C:63%とW/C50%が受熱温度1℃に対して-0.008程度, W/C:38%が-0.01程度であり, 水セメント比の違い(コンクリート強度の違い)によって僅かに差があるものの, 貫入抵抗値は, 受熱温度1℃に対して概ね-0.009程度の低下量である。

以上から, 孔内局部荷法は, コンクリート中の深さ方向の測定が可能だけでなく, 受熱温度を精度よく捉えることができることから, 火害を受けたコンクリートの劣化診断手法として有効な試験手法と言える。

なお, 孔内局部荷法を用いて火害診断を行う場合には, 火害を受けていない健全部または熱の影響を受けていない深部の測定を行い, コンクリート表面からの深さ方向の測定結果と比較することで, 劣化深さの特定が可能となると考えられる。

3.2 他の非破壊・微破壊試験との比較

(1) 貫入抵抗値と反発度

貫入抵抗値と反発度(Rebound)の関係を図-7に示す。反発度はコンクリート表面における測定のため, 貫入抵抗値は深さ10mmの測定値を用い, 500℃および750℃の測定値について比較を行った(950℃は試験体表面の剥離により測定不可能, W/C:63%・放水ありは500℃以上の測定値無し)。

上記条件で比較を行ったが, 貫入抵抗値と反発度には, ほとんど相関性が認められない。

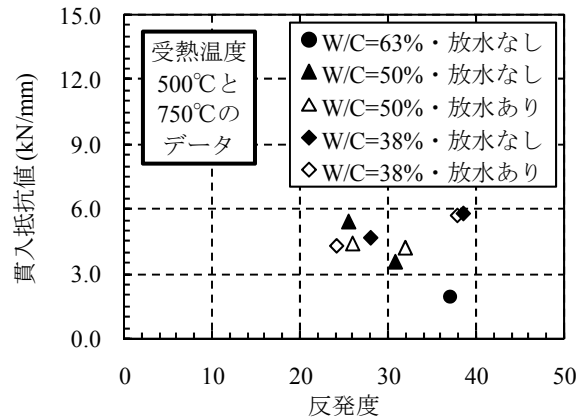


図-7 貫入抵抗値と反発度の関係

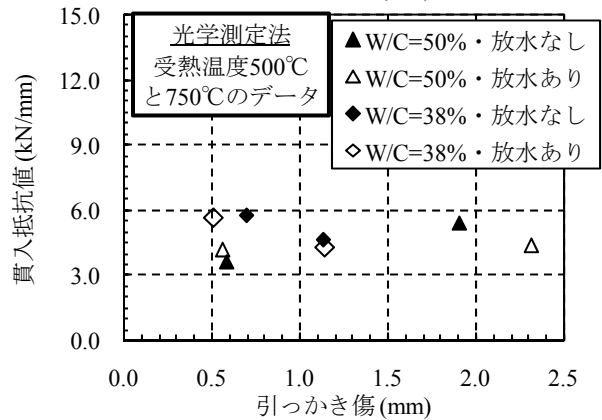
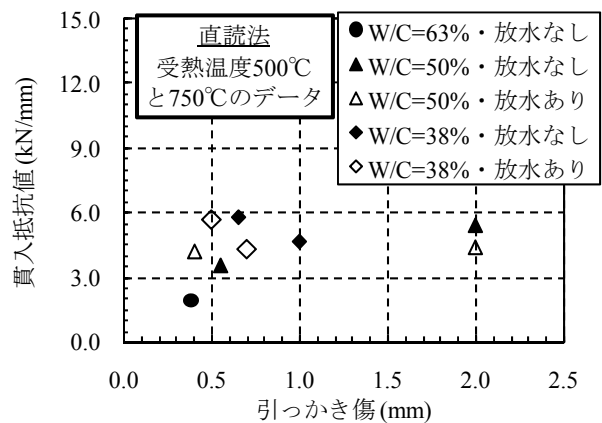


図-8 貫入抵抗値と引っかけ傷の関係

(2) 貫入抵抗値と引っかけ傷

貫入抵抗値と引っかけ傷(Chipping)の関係を図-8に示す。引っかけ傷法は手法の異なる直読法および光学測定法をそれぞれ比較した。

なお, 引っかけ傷法はコンクリート表面における測定のため, 貫入抵抗値は深さ10mmの測定値を用い, 500℃および750℃の測定値について比較を行った(950℃は試験体表面の剥離により測定不可能)。

上記条件で比較を行ったが, 貫入抵抗値と引っかけ傷には, 両方法ともにほとんど相関性が認められない。

(3) 貫入抵抗値と圧縮強度

貫入抵抗値と圧縮強度(Compressive Strength)の関係を図-9に示す。圧縮強

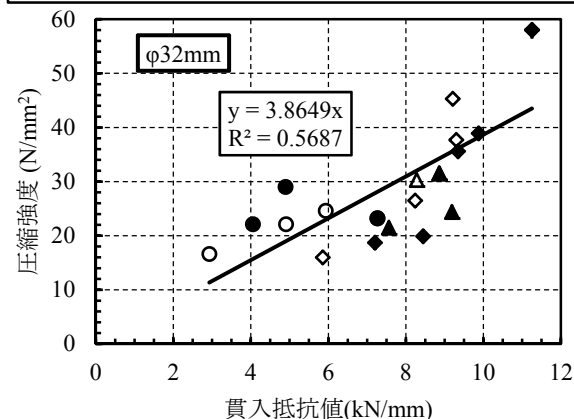
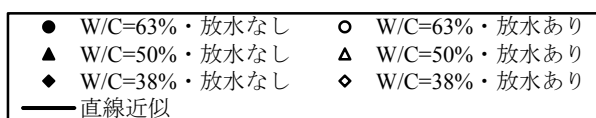
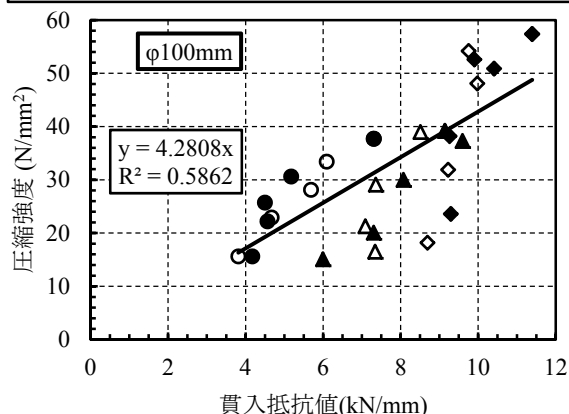
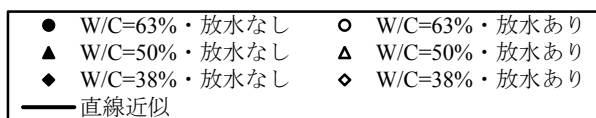


図-9 貫入抵抗値と圧縮強度の関係

度は、孔内局部載荷法の試験孔を削孔した際に採取した直径 100mm (直径 100mm 試験孔) および直径 32mm (直径 42mm 試験孔) のコア試験体の試験結果である。

なお、孔内局部載荷法は深さごとの“点”のデータであることから、“長さの平均値”として表されるコア試験体のデータとは値の意味が異なる。そのため、直接比較することはできない。そこで、孔内局部載荷法のデータを、できるだけコア試験体のデータに近づけるため、直径 100mm コアに対しては孔内局部載荷法の深さ 10～140mm の値の平均値を、直径 32mm コアに対しては孔内局部載荷法の深さ 10～60mm の値の平均値を、それぞれ比較した。

その結果、圧縮強度は、直径 100mm では貫入抵抗値の 4.3 倍、直径 32mm では 3.9 倍となり、貫入抵抗値を約 4 倍すると圧縮強度を推定できることがわかった。両者の関係は、既往の研究¹⁾²⁾においても、同様の結果が得られている。

なお、本研究における測定値は、劣化部を含んだコア試験体および、劣化部における貫入抵抗値であることから、コア試験体の圧縮強度、貫入抵抗値ともに、劣化部によるばらつきが含まれていると考えられるため、両者の相関は 0.56～0.58 程度となったと考えられる。

4. まとめ

本研究では、孔内局部載荷試験法の火害診断への適用性を検討するため、水セメント比や受熱温度、加熱後の冷却方法を変化させたコンクリート試験体において測定を実施した。また、同じ試験体で実施した他の非破壊・微破壊試験の結果との比較を行った。本研究の結果、以下の知見が得られた。

- (1) 孔内局部載荷法は、コンクリート中の深さ方向の測定が可能だけでなく、受熱温度の違いから生ずる物性低下を精度よく捉えることができる。
- (2) 孔内局部載荷法は、通常、直径 42mm の試験孔において測定を行うが、直径 100mm の試験孔であっても試験結果が同様となることがわかった。このため、他の試験を実施するために削孔した直径 42mm 以上の試験孔において測定を行っても問題無い。
- (3) 以上のことから、孔内局部載荷法は、火害を受けたコンクリートの劣化診断手法として有効な試験手法と言える。
- (4) 採取コア試験体の圧縮強度との比較から、貫入抵抗値を約 4 倍することで、φ100mm および φ32mm コア試料の圧縮強度を推定できることがわかった。これは、既往の研究¹⁾²⁾と同様の結果であるが、本研究の測定値には劣化部を含むことから相関性は低い。
- (5) 孔内局部載荷法と、反発度法、引っかき傷法との相関は認められなかった。

参考文献

- 1) 皿井剛典, 田中徹, 澤口啓希, 澤口啓希: 孔内局部載荷試験による構造物の深さ方向のコンクリート物性評価に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.34, No.1, pp.1828-1833, 2012.7
- 2) 皿井剛典, 田中徹, 澤口啓希: 孔内局部載荷試験によるコンクリート構造物の深さ方向の物性評価に関する研究, シンポジウム コンクリート構造物の非破壊検査論文集, Vol.4, pp.151-160, 2012.8
- 3) 皿井剛典, 春畑仁一, 阪口明弘: 火害を受けたコンクリート構造物の劣化診断手法の検討 (その 3 コンクリート劣化深さの微破壊試験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp.127-128, 2013.8