

論文 粗骨材の混入率や溶脱が X 線造影撮影法によるコンクリートの強度推定に及ぼす影響

鴫 泰幸*1・高橋 諒*2・田村 優汰*3・武田 三弘*4

要旨：本研究では、X 線造影撮影法を用いてコンクリート内部の空隙やひび割れを定量化した値（透過線変化量）から圧縮強度を推定する手法を提案してきた。しかし、近年の研究より、実コンクリート構造物から採取したコアコンクリートと、実験室で作製された円柱供試体とでは、圧縮強度推定値に差異が生じることが示唆された。そこで本研究では、1.「粗骨材混入率の変化」と、2.「溶脱による劣化」が生じたケースの二つについて、それらの条件が強度推定に与える影響を検証する実験を行った。その結果、粗骨材の混入率の違い、溶脱による劣化のいずれの条件においても強度推定に影響を与えることが分かった。

キーワード：X 線造影撮影法、非破壊検査、強度推定、粗骨材混入率、溶脱

1. はじめに

これまで、本研究では X 線造影撮影法^{1),2),3)}という手法を用いることで、コンクリートの強度推定や劣化診断を行ってきた。この手法は、テストピースや現場から採取されたコアを厚さ 10mm にカッティングし、本研究室で開発された造影剤という密度の高い液体に浸漬させ X 線撮影を行うことによって、コンクリート中に発生した微細なひび割れや空隙を検出することが可能となるものである。この検出された微細なひび割れや空隙を定量化した値を透過線変化量と定義し、透過線変化量と圧縮強度との関係を調べたところ、両者の関係は、相関係数 $R=0.954$ と非常に良好なものであることが分かった。この手法の特徴は、発生した微細なひび割れや空隙を視覚的に確認することが出来るばかりでなく、10mm という厚さにスライスされた供試体から強度推定を実行できることである。一般のテストピースやコアでは、例えば $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の供試体で 1 つの強度が得られるだけであるが、この手法を用いれば深さ 200mm の強度分布を求めることが可能となる。従って、表層部が凍害などで劣化が生じている場合には、その劣化深さを測定することが可能となる。また、アルカリシリカ反応が生じている箇所から採取されたコアにおいては、吸水膨張によって発生したひび割れも定量化可能なため、反応による膨張分布の確認も可能となる。この様なことから、実コンクリート構造物の劣化診断方法として数多くの実績がある手法となっている。

しかしながら、本研究で作製された円柱供試体より求められた強度推定式を用いて、実コンクリート構造物から採取されたコアコンクリートの強度を推定したとき、

圧縮試験より得られた実測値と、透過線変化量から求められる強度推定値との間にはおよそ $\pm 5(\text{N}/\text{mm}^2)$ の差異が生じることが明らかとなった^{4),5),6),7),8),9),10)}。その原因として、X 線造影撮影法より求めた強度推定式は、鋼製型枠を使用して作製された $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を基準としたものであるが、実コンクリート構造物から採取されたものは、「コアコンクリート」であることをはじめ、コア穿孔方向の違いによる空隙性状の変化や、採取するコア直径が異なることなどの条件の違いが考えられたため実験的に検証^{9),10)}を行った。

その結果、圧縮強度試験においてはコア穿孔方向の違いによる影響は認められなかった。一方、透過線変化量では、約 $30\text{N}/\text{mm}^2$ 以下の水平方向から穿孔したコアの場合、ブリーディングの影響で大きくなる傾向が見られた。また、コアの直径の違いが強度推定に与える影響については、 $40\text{N}/\text{mm}^2$ 程度のコンクリートではコア直径が小さくなると圧縮強度も小さくなる傾向が見られたが、低強度ではコア直径が小さくなると透過線変化量も大きく低下する傾向が見られた。これは、骨材が占める割合が変化すると推測されたため、更なる詳細な検討が必要になった。実際のコンクリート構造物では、パイプレーターを使用したりタンピングを行ったりすることで、同一のコンクリートであっても粗骨材の分布に偏りが生じるケースが想定される。そういった事象が発生した構造物からコアを採取し、圧縮試験や透過線変化量の測定を行った場合にも、正しい評価ができるよう確認しておく必要が考えられた。

その様なことから、本研究では「コンクリートの粗骨材混入率の変化が圧縮強度と透過線変化量に与える影響」

*1 東北学院大学大学院 工学研究科 環境建設工学専攻 (学生会員)

*2 東北学院大学 工学部 環境建設工学科 (学生会員)

*3 東北学院大学 工学部 環境建設工学科

*4 東北学院大学 工学部 環境建設工学科教授 博士 (工学) (正会員)

について調べることにした。また、本研究では「長期水中浸漬が圧縮強度と透過線変化量に与える影響」についても実験を行った。これは、雨水や河川水などの影響によってコンクリートが溶脱し、ポーラス化した場合の圧縮強度と透過線変化量との関係についても検証しておく必要があると考えたためである。

2. 実験概要

2.1 供試体概要および実験方法

表-1 は示方配合に則った「コンクリートの粗骨材割合が圧縮強度と透過線変化量に与える影響」で使用したコンクリート 3 種 (W/C=90%, 71%, 55%) の配合を示したものである。この実験で使用したセメントの種類は早強ポルトランドセメント、細骨材は宮城県黒川郡大和町鶴巣産のものを、粗骨材は山形県上山市菖蒲字要の沢産で最大寸法は 20mm のものを使用した。

今回の実験では、水セメント比毎に粗骨材の割合を 3 パターン (標準配合 100% に対して 80% および 60%) に減少させた条件で検討した。供試体の作製方法として、始めに示方配合から粗骨材のみを除きモルタルを作製する。次に作製したモルタルを 3 等分し、そこで割合ごとに計量した粗骨材を投入しスコップで練り混ぜコンクリートを作製した。なお、一連の作業は合わせて 15 分程度の時間を要した。

ここで、粗骨材含有割合 100% の標準配合 (目標スランブ 8 ± 2 cm, 空気量 5 ± 1.5 %) に対して、粗骨材割合を 120% と 80% で計画していたが、120% の条件で練り混ぜた際、ワーカビリティが極端に悪くなり、ポーラスコンクリート状態になってしまった。本来は、バイブレーターや締固めの差により粗骨材割合が変化した条件における圧縮強度と透過線変化量との関係を比較することが目的であるが、本配合では締固め不良による影響の方が大きいと考え、その後の粗骨材割合は標準配合 (100%) に対して 80% および 60% の供試体を作製した条件で比較している。そのため、No.1 の配合条件 (粗骨材割合

表-1 実験 3.1 に用いたコンクリートの配合

No.	配合表 (kg/m ³)				
	W	C	S	G	混和剤 (AE 剤)
1	175	194	784	1074	0.014
2	175	246	765	1048	0.017
3	175	319	740	1013	0.022

表-2 実験 3.2 に用いたコンクリートの配合

No.	配合表 (kg/m ³)				
	W	C	S	G	混和剤 (AE 剤)
1	175	246	765	1048	0.017
2	175	382	717	982	0.027

120%) については、結果および考察に含めていない。型枠には $\phi 100$ mm \times 200 mm の円柱供試体を使用した。打設日より翌日にキャッピングを行い、4 日後脱型し、その日から 28 日間水中養生を行った。その後試験は、材齢 32 日目に行った。

作製した供試体の数は、いずれの粗骨材割合においても 5 体であり、使用用途の内訳は、3 体が圧縮試験用、残り 2 体は X 線造影撮影用とした。X 線造影撮影用のものは、供試体一体につき中心部より 3 枚のカッティングを行ったため、計 6 枚から透過線変化量の測定を行い、平均値を求めた。以上、これらの条件より作製された供試体から、圧縮強度と X 線造影撮影法による透過線変化量の関係を求め、強度推定に与える影響について検証を行った。

表-2 は、「コンクリートの溶脱による劣化が圧縮強度と透過線変化量に与える影響」で使用したコンクリート 2 種 (W/C=71%, 46%) の配合を示したものである。この実験で使用したセメントや粗骨材の最大寸法、供試体の形状、寸法、養生条件、供試体数及び使用用途は、「コンクリートの粗骨材割合が圧縮強度と透過線変化量に与える影響」の実験と同じである。

本実験の方法として、作製した供試体の標準養生終了直後から、水温を 20°C, 40°C, 60°C に設定した 3 パターンの水 (水道水) に 6 か月間水中養生し、水温の違いが圧縮強度と透過線変化量にどれほどの影響を与えるかを検証した。先述に記した 3 パターンの水温において、40°C と 60°C を設定した理由について、40°C という温度は、コンクリートの初期養生時において水和反応が促進し、28 日強度も標準養生に比べ大きくなることが明らかとなっている¹¹⁾が、長期間浸漬させた場合での圧縮強度と透過線変化量に与える影響は明らかになっていないこと、次に 60°C という温度は、夏期におけるアスファルト舗装面の温度¹²⁾であり、防水層が破壊された状況下では 60°C の温水環境下になることが想定されることから、この温度を実験で使用することにした。なお、本実験における溶脱とは、浸漬した供試体の成分 (Si, Ca など) が水溶液中に溶け込んだ状態を示しており、この水溶液は週に一回の交換を行っている。

2.2 X 線造影撮影法

図-1 は、 $\phi 100$ mm \times 200 mm の円柱供試体を例とした、X 線造影撮影法による透過線変化量の測定フローを示したものである。初めに、供試体の中心部から 3 枚、10 mm 厚にカッティングを行う。次に、供試体をスライスする際、湿式のダイヤモンドカッターを使用するため、供試体表面が水分に触れるため、湿潤状態にばらつきが生じてしまう。よって、各スライス供試体の湿潤条件を均一にするため、水中にて 24 時間給水させたのち、恒温恒湿

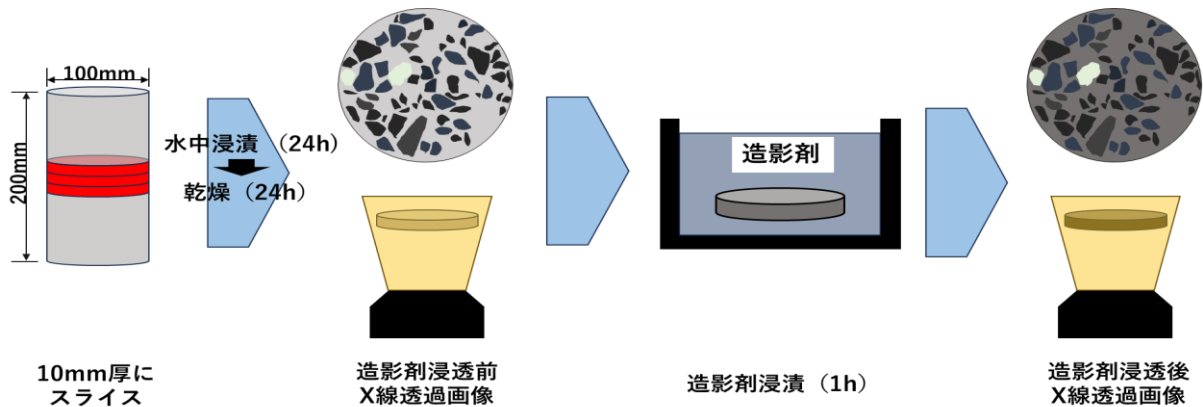


図-1 X線造影撮影法による透過線変化量の測定フロー

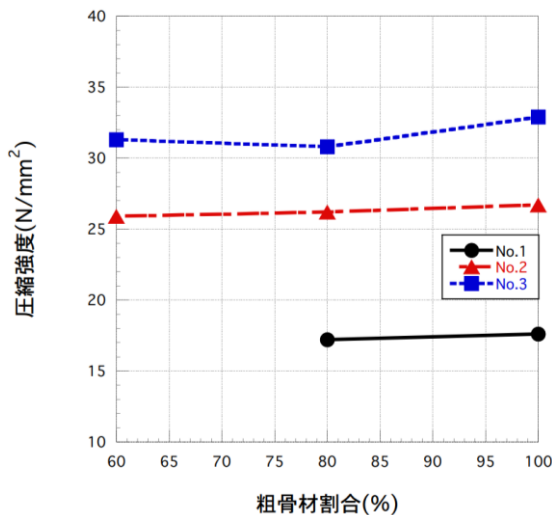


図-2 粗骨材割合の変化における圧縮強度の推移

室内（室温 20℃、湿度 60%）に設置している乾燥機（40℃）にて24時間乾燥させる。ここまでの透過線変化量測定の下準備となり、これらの手順ののち、スライスした供試体に対し、I.I. (Image Intensifier) を用いて X 線透過画像をコンピュータに取り込み、X 線透過線量を測定する。その後、本研究室より開発された造影剤（X 線を通しにくくする液体）を先ほどの供試体に 1 時間浸透させ、再度 X 線造影撮影を行う。以上の手順より、色の濃淡が異なる 2 つの画像が得られる。この造影剤浸透前後の画像の濃度差は、供試体の空隙やひび割れに造影剤が浸透することで生じる差であり、それらを定量化した値を透過線変化量と定義し、各条件における圧縮強度との関係を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの粗骨材割合が圧縮強度と透過線変化量に与える影響

図-2 は、圧縮強度と粗骨材割合との関係を示したものである。この図より、圧縮強度は粗骨材割合が大きくなると全てにおいて同等もしくは微増傾向が見られ、特に水セメント比が小さくなるほどその傾向は顕著になった。当初の想定では、粗骨材割合が大きくなることで、浮き上がってきたブリーディング水が骨材下面にたまる現象（ウォーターゲイン）による空隙も同時に増加することや施工性が悪くなることで、強度は小さく発現するものと考えていたが、それとは反する結果となった。一般に、粗骨材の割合が大きくなると粗骨材総表面積の変化に伴う粗骨材と硬化セメントペーストとの付着の変化や、粗骨材周辺での応力集中の程度の変化、粗骨材による収縮拘束の程度の変化があり、圧縮強度は変わらないか小さくなる傾向にある¹¹⁾。しかしながら、粗骨材割合の変化によるワーカビリティの変化もあるため、今回の実験ではこの影響が出たものではないかと考えている。一般的なコンクリートを打設する際、粗骨材の沈下によって、上部では粗骨材含有量が少なくなり、下部では粗骨材含有量が多くなることというのは既知であるが、粗骨材含有量の少ない供試体では、その違いが明確に現れるため、これによって圧縮強度が低下した要因の一つと考えた。これは、粗骨材含有量を変化させたコンクリートより作製された円柱供試体に対して、上面から下面まですべてを 10mm 厚にスライスし、断面に見えた粗骨材量からも裏付けることができた（写真-1 参照）。この、上部と下部とで粗骨材割合の差が圧縮強度に低下を及ぼした要因として、圧縮試験を行った際、一般的な供試体は中央部で破壊が起こるが、上部は粗で下部は密な粗骨材分布のコンクリートであると、その境界が弱点となり、圧縮強度が低下したものではないかと考えているが、今回の実験結果においては、同等もしくは微増の範囲であることから誤差の範囲とも考えられ、これに関しては更

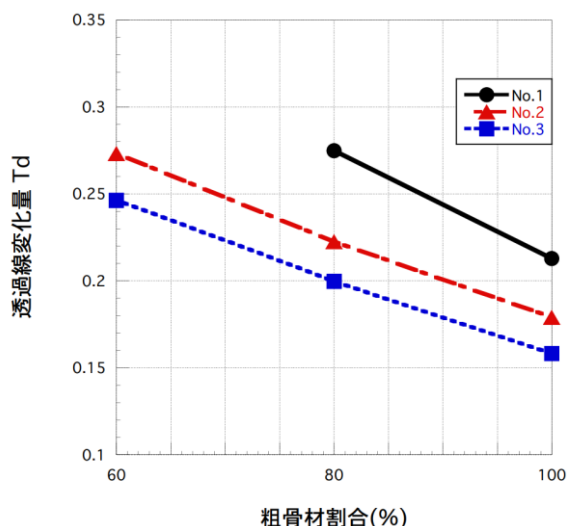


図-3 各粗骨材含有割合における透過線変化量の推移

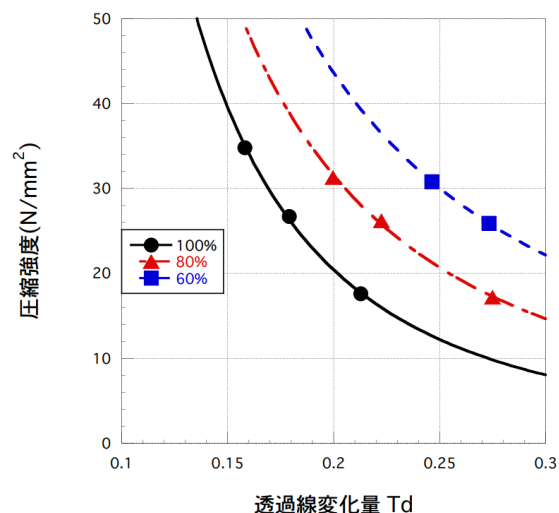


図-4 各粗骨材含有割合における圧縮強度と透過線変化量の関係

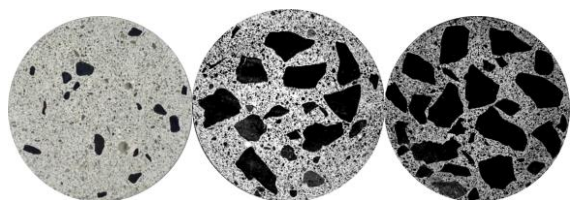


写真-1 供試体断面 (左より上部, 中部, 下部)

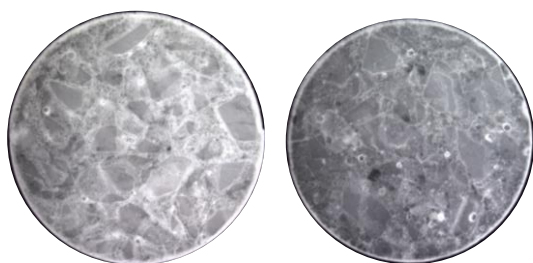


写真-2 18N/mm² (左) と 33N/mm² (右) のコンクリートのX線造影撮影フィルム画像

なる検討が必要と思われる。

図-3 は、透過線変化量と粗骨材割合の関係を示したものである。まず初めに、写真-2 は本実験より、粗骨材割合 100%における 18(N/mm²)と 33(N/mm²)の供試体を X 線造影撮影した際に得られたフィルム画像である。これら左右の写真を比較すると、圧縮強度の小さい左のものは右のものに比べ白く写っていることが見て取れるが、これは空隙量が多いほど造影剤が細部まで浸透するからである。これらの画像をもとに透過線変化量を求めた。この結果より、いずれのコンクリートも粗骨材割合が低下すると、透過線変化量は上昇する傾向が見られた。こ

れは、透過線変化量を測定する際、カッティングした供試体に対し造影剤を浸漬させるが、造影剤は緻密で強度(密度)の高い粗骨材にはさほど浸透せず、モルタルへの浸透量が多くなるため、粗骨材の割合が減少したことによって、モルタルへの造影剤の浸透量が大きくなったことによる影響と考えられる。

図-4 は、粗骨材割合毎の圧縮強度と透過線変化量の関係を示したものである。この図より、粗骨材割合が 100%から 80%、60%と減少していくにつれ、回帰曲線は右に大きくシフトしていることから、強度推定に及ぼす影響も大きいことが分かった。これは、透過線変化量が粗骨材割合の影響を強く受けることが要因である。この結果より、同一のバッチから作製されたコンクリート構造物であっても、粗骨材分布のばらつきによって強度推定値に差異が生じることが明らかとなり、推定結果に対し、補正を行う必要があることが分かった。暫定的な補正方法の検討として、10mm 厚にスライスした供試体の切断面(両面)より画像ソフトを使用し、今回使用した粗骨材割合 100%~60%の供試体面積における粗骨材の割合を数値化し、より精度の高い回帰曲線を用いて正確に補正することも可能であると考えている。プロット数は依然少ないことから、今後さらにデータの収集を行っていく予定である。

3.2 コンクリートの溶脱による劣化が圧縮強度と透過線変化量に与える影響

図-5 は、6 か月間浸漬させた円柱供試体の圧縮強度と水中浸漬時の水温との関係を示したものである。圧縮試験及び透過線変化量測定時の供試体の材齢は 172 日である。このグラフから、圧縮強度の推移について考察すると、いずれの供試体においても水温が高くなると圧縮強

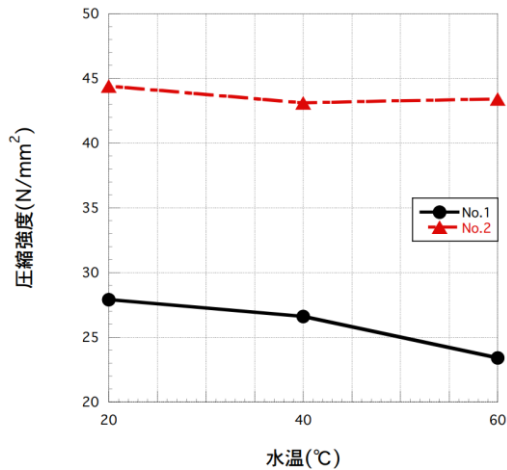


図-5 各水温における圧縮強度の推移

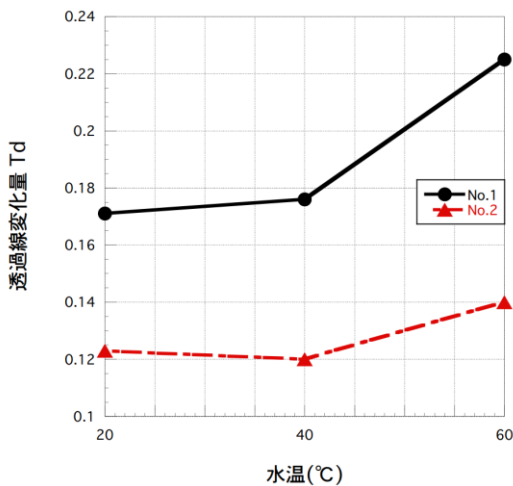


図-6 各水温における透過線変化量の推移

度には微減傾向が見られ、特に No.1 (W/C=71%) の供試体については、その傾向が顕著であった。既往の研究^{13), 14), 15)}より、初期養生時の水温が 40°C 付近である場合、短期的に強度増進が促進され 20°C 養生よりも圧縮強度が高くなり、長期的な強度では養生温度が低いものには劣ることが既知であったが、本実験では再養生期間が 6 か月という条件で行い、同様の結果が得られた。いずれの水温においても、コンクリートは水中に浸漬している限り、溶脱と強度増進が同時に生じる。しかし、水温が 40°C, 60°C となるにつれ、強度増進よりも溶脱による強度低下が上回ったことで、今回このような結果が得られたものと考えた。実際に蛍光 X 線分析装置を使用して供試体を浸漬させていた水溶液中に含まれる物質を調べたところ、コンクリートを構成する要素として大きな割合を占める Si, Ca 等が多く検出された。また、供試体を浸漬させていた水を見ても、強度の小さい No.1 の方の析出物が多いことが目視より確認できた。このことから溶脱による強度低下が生じたものと考えられる。一方、

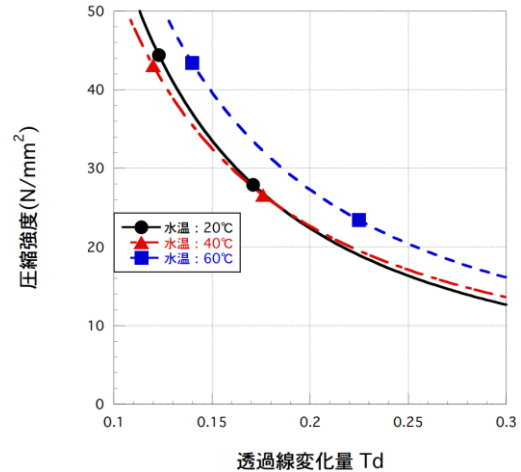


図-7 各水温における圧縮強度と透過線変化量の関係

No.2 (W/C=46%) のコンクリートについては、20°C から 40°C にかけて圧縮強度は若干低下し、その後 60°C までほぼ横ばいという結果となった。しかしながら、この圧縮強度の差はわずかであり、誤差の範囲内であるともいえる。よって、この考察については透過線変化量の測定結果を踏まえて検討する。

次に、図-6 は各温度の水中に 6 か月間浸漬させた円柱供試体の圧縮強度と透過線変化量との関係を示したものである。この図より、No.1 (W/C=71%) No.2 では、水温が上昇するにつれ透過線変化量も上昇傾向となり、特に No.1 のものでは 60°C になると顕著な増加を示した。これは圧縮強度における考察と同様のことが言える。No.2 (W/C=46%) においては、水温が 20°C から 40°C にかけては若干減少傾向であったが、60°C になると上昇するという結果となった。いずれの供試体においても、40°C までは大きな変化は無かったが、60°C では透過線変化量が急激に大きくなり、空隙化が進んでいることが分かった。この影響は 40°C までではさほど大きくないが、60°C になるとより促進されるためと考えられる。

他方、圧縮強度試験結果について考察すると、No.2 (W/C=46%) のコンクリートでは、水温が 60°C における透過線変化量 (空隙量) の値は大きくなっている状況であるが、圧縮強度の減少はほとんど見られないことから、溶脱は生じているものの、それが圧縮強度に及ぼす影響は少ないものと言える。

図-7 は、各温度条件の圧縮強度と透過線変化量との関係を示したものである。この図より、6 ヶ月における 40°C までの溶脱に関しては、圧縮強度と透過線変化量との関係には大きな影響は見られないが、60°C の条件では大きく右側にグラフがシフトする傾向が見られた。この結果より、コンクリート全体が溶脱しているコンクリートに対して強度推定を行う場合には、図-5, 6 に示されるような傾向を考慮して強度推定を行うことが必要にな

ってくると思われる。他方、実コンクリート構造物で溶脱を受ける条件は、水路管や河川中の部材などであり、一般的には表層部からの溶脱現象となることから、溶脱箇所の正確な強度推定は上記のような考慮が必要になってくるが、溶脱の深度に関しては透過線変化量から求めることが可能と考えられる。

4. まとめ

本研究では、実コンクリート構造物に対し、X線造影撮影法を用いて強度推定を行う際、強度推定結果に影響を及ぼす要因として、「コンクリートの粗骨材割合が圧縮強度と透過線変化量に与える影響」および「コンクリートの溶脱による劣化が圧縮強度と透過線変化量に与える影響」の2点について着目し実験を行った。本研究の範囲内で以下のことが言える。

(1)コンクリートの粗骨材割合を変化させた供試体によるX線造影撮影の結果、粗骨材の割合が60%から100%に増加した場合、透過線変化量は減少する傾向が見られた。その要因として、造影剤が浸透しにくい粗骨材の量が増加することによるものと考えられる。この結果より、粗骨材割合が大きく異なる場合には、その割合から補正を行うことで、強度推定精度が向上するものとする。

(2)各温度に設定した水中にて6か月間浸漬（溶脱）させた円柱供試体のX線造影撮影の結果、40℃まで浸漬した供試体の透過線変化量には大きな変化は無かったが、60℃では急激に大きくなり、空隙化が進んでいることが分かった。また、この条件から求めた圧縮強度と透過線変化量との関係からは、40℃までの関係よりも60℃における関係では同強度に対して透過線変化量が大きくなる傾向が見られたことから、強度推定を行う際には、十分考慮する必要があると思われる。

謝辞：本研究を実施するにあたり、同研究室の松田伸隆氏、海沼飛鳥氏、仙台コンクリート試験センター株式会社様には材料や機器の使用にご協力頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 武田 三弘, 大塚 浩司: X線造影撮影法によるコンクリートの性状評価手法の開発と応用, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.68, No.3, pp146-156, 2012
- 2) 武田 三弘, 大塚 浩司: X線造影撮影によるコンクリート強度の推定, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.2, pp.376-384, 2006
- 3) 大塚 浩司, 武田 三弘: X線造影撮影法によるコンクリート構造物内部のひび割れ検出技術の開発に

関する研究, 土木学会論文集 No.725/V-58, 143-156, 2003.2

- 4) 石井 暉, 武田 三弘: X線造影撮影法を用いた強度推定に影響を与える各種要因について, 日本コンクリート工学会年次学術論文集, vol.44, No.1, pp202-207, 2022
- 5) 石井 暉, 武田 三弘: X線造影撮影法による実コンクリート構造物の強度推定に影響を与える要因の基礎研究, 令和2年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, V-9, 2021.3.6, 東北学院大学
- 6) 石井 暉, 武田 三弘: X線造影撮影法における強度推定に影響を及ぼす各種要因について, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会, V-328, 2021.9
- 7) 石井 暉, 鵜 泰幸, 武田 三弘: コンクリートの乾燥状況がX線造影撮影法における強度推定に影響を及ぼす要因について, 令和3年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, V-8, 2022.3
- 8) 鵜 泰幸, 石井 暉, 武田 三弘: X線造影撮影法を用いたコンクリート強度推定結果に影響を及ぼす要因について, 令和4年度土木学会全国大会77回年次学術講演会, V-481, 2022.9
- 9) 鵜 泰幸, 武田 三弘: コンクリートのコア穿孔方向がX線造影撮影法による強度推定に及ぼす影響, 令和4年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, V-18, 2023.3
- 10) 鵜 泰幸, 石井 暉, 武田 三弘: コンクリートのコア直径がX線造影撮影法による強度推定に及ぼす影響, 令和5年度土木学会全国大会78回年次学術講演会, V-629, 2023.9
- 11) コンクリート工学ハンドブック, pp.381, 2009年
- 12) 稲葉 尚文, 和田 圭仙, 森端 洋行, 羽入 昭吉: コンクリート床版上の舗装および防水層の温度推定に関する一検討, 平成18年度土木学会全国大会62回年次学術講演会, V-85, 2006.9
- 13) 湯浅 昇, 野中英, 小山 智幸: コンクリートの標準養生強度に及ぼす材齢3日までの養生温度の影響, 日本建築学会技術報告集, 第27巻 第66号, 614-617, 2021.6
- 14) 湯浅 昇, 野中英: コンクリートの標準養生強度に及ぼす材齢3日までの温度の影響, セメント・コンクリート研究会, 第42回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, pp.113-120, 2016.10
- 15) 關 裕司, 三本 巖, 女屋 英明, 齊藤 丈士: 打込みから養生までの温度の違いが硬化コンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010