

論文 水セメント比と粗骨材割合の変化がX線造影撮影法を用いた強度推定に与える影響について

高橋 諒*¹・武田 三弘*²・若生 陸*³・片桐 茉耶*³

要旨： 本研究室では、X線造影撮影法¹⁾²⁾³⁾を用いてコンクリート内部のひび割れや空隙量を定量化した値(透過線変化量)から圧縮強度を推定する方法を提案してきた。しかし、近年の研究より、実コンクリート構造物からコアを抜いた供試体の圧縮強度と、透過線変化量から求められる強度推定値では差異が生じることが示唆された。その要因の一つとして過度な締固めや過密鉄筋などにより粗骨材の分布が変化したことが考えられた。そこで本研究では、圧縮強度と粗骨材割合の変化が強度推定に与える影響を確認する実験を行った。その結果、特に低強度域では粗骨材割合が減少すると、強度推定に大きな影響を及ぼすことが確認された。

キーワード： X線造影撮影法, 粗骨材割合, 強度推定, 非破壊検査

1. はじめに

これまで、本研究ではX線造影撮影法を用いてコンクリートの強度推定を行ってきた。この手法は、現場からコア抜きした供試体を厚さ10mm毎にスライスし、本研究室により開発された造影剤に浸漬させX線撮影を行うことで、コンクリート内部に存在する空隙やひび割れを目視で検出することが可能である。また、この手法は空隙やひび割れの定量化も可能であり、その値を透過線変化量と定義し、圧縮強度と透過線変化量の関係を求めたところ、両者の関係¹⁾は良好であることが分かっている。さらに、この手法は採取したコアを厚さ10mm毎ごとに切断して強度推定を行うため、表層から奥行方向の強度分布や劣化深さの推定が可能となるものである。

しかし、X線造影撮影法により、求められる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るコアコンクリートの強度推定を行った際に、圧縮試験により得られる値と透過線変化量から求められる強度推定値との間に差異を生じさせる要因があることが分かった。実験室で作製されるコンクリートは、天候の影響は少なく、実コンクリートと比較して相対的に寸法が小さく、打込み量も少ないことから、打込み・締固めの管理は行いやすく、より丁寧な施工で作製が可能となる。このことから、実験室で作製されたコンクリートの品質的なばらつきは少なく、圧縮強度と透過線変化量との関係は良好であった。他方、現場から採取されたコンクリートにおいては、これらの影響を受けやすいことから、これまで差異を生じる種々の要因について検討を行ってきた。これまで著者らは、コンクリートの水分率、粗骨材最大寸法およびコア穿孔方

向の影響に関する研究⁴⁾⁵⁾やコア穿孔方法およびコア寸法の影響に関する研究⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾を行い、差異を生じさせる要因について明らかにしてきた。

今回は、低強度から高強度域を対象とした粗骨材分布の違いがコンクリートの強度推定に及ぼす影響について調べた。これは、パイプレータやタンピングによる過度な締固めが行われた箇所や、コンクリートの打込みの際、過密鉄筋の影響により粗骨材分布が均等ではなくなった箇所からコアを採取した条件について検討を行ったものである。

本研究では、同一バッチで作製されたコンクリートが、施工や締固めの条件で粗骨材分布にばらつきが生じた条件を想定するため、同一配合のモルタルに粗骨材混入量を変化させ、粗骨材分布を3通りに変化させた条件で実験を行った。また、強度も3通りに変化させ、コンクリートの強度と粗骨材割合の変化が、透過線変化量による強度推定結果に及ぼす影響について調べた。さらに、粗骨材割合が強度推定に影響を及ぼす場合、粗骨材割合から補正が行えるように検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要および実験方法

表-1は実験で使用したコンクリートの3種類(W/C=67%, 48%, 37%)の示方配合を示している。実験で用いたセメント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、粗骨材は岩手県奥州市江刺田原字横懸産で、最大寸法は20mmのものを使用した。

本実験では水セメント比毎に粗骨材割合を3種類(示

*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 環境建設工学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 東北学院大学 工学部 環境建設工学科

表-1 コンクリートの示方配合

配合表(Kg/m ³)					
No.	W	C	S	G	混和剤 (AE剤)
1	165	246	827	1066	0.017
2	167	348	718	1094	0.024
3	167	450	646	1081	0.031

方配合の粗骨材量を基準(100%)として80%および60%)に変化させた条件で検討した。なお粗骨材の混入率が変化しても水セメント比は一定である。打設の方法として、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。

供試体はφ100×200mmの円柱供試体を配合毎に5体ずつ作製し、打設翌日にキャッピングを行い、4日後脱型し、28日間標準養生を行った。その後、圧縮試験とX線造影撮影法を用いて透過線変化量の測定を行った。作製した供試体数は各条件に対して圧縮試験用3体、X線造影撮影用1体である。X線造影撮影用に関しては、ブリーディングの影響および締固めによる骨材の密集部を避けるため、打設上面と下面から20mm程度ずつ、カッティングを行い、残りの部分を、計11～12枚スライスし、その枚数分の透過線変化量を測定し、平均値を求めた。

2.2 X線造影撮影法

図-1は本実験で用いた円柱供試体(φ100×200mm)の透過線変化量の測定過程を示したものである。初めに、

10mmにスライスされた供試体を20℃の水中にて24時間浸漬させ、その後40℃の乾燥機にて24時間の乾燥を行った。これがX線撮影前の下準備となる。

X線撮影においては、スライスされた供試体のX線透過画像をI.I.(Image Intensifier)を用いてコンピュータに取り込み画像濃度を測定する。その後、本研究室によって開発された造影剤³⁾(X線を通しにくくする液体)に60分浸漬させ、再びX線透過画像を取り込み、画像濃度を測定する。

I.I.は、供試体を透過した線量(透過線量)を白黒の画像で可視化するものであり、透過線量が多い(透過しやすい)ほど白く、透過線量が少ない(透過しにくい)ほど黒く可視化される。造影剤に浸漬させることで、コンクリート内部に発生した空隙やひび割れに造影剤が浸透し、その箇所はX線を透過しづらくさせるため、画像濃度は黒く変化する。この様に、造影剤浸漬前と浸漬後の二つの画像濃度の差は、造影剤の浸透によって透過線量に変化したことによって生じたものであり、この差を透過線変化量と定義し、コンクリート中のひび割れや空隙量を意味することになる。この方法を用いて、各供試体の透過線変化量を求めた。

3. 実験結果および考察

表-2は各供試体の粗骨材割合毎の圧縮強度と透過線変化量の測定結果をまとめたものであり図-2は、圧縮強度と粗骨材面積割合比の関係を、写真-1は、W/C=67.1%の粗骨材割合毎の供試体切断面を示したものである。粗骨材面積割合比に関しては後ほど説明する。

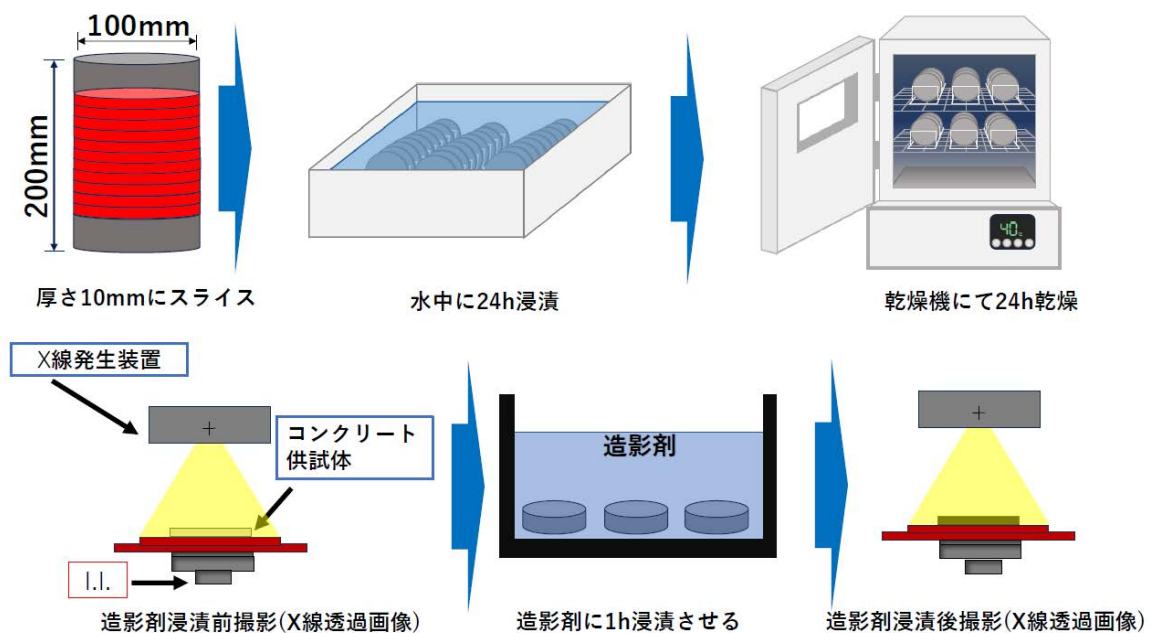


図-1 X線造影撮影法による透過線変化量を求めるフロー

表-2 各種試験結果

供試体No.	圧縮強度 (N/mm ²)	透過線 変化量Td	強度推定値 (N/mm ²)
No.1-100	28.1	0.169	30.6
No.1-80	26.0	0.202	22.5
No.1-60	24.1	0.256	15.0
No.2-100	38.3	0.146	39.4
No.2-80	37.8	0.168	30.9
No.2-60	36.7	0.179	27.7
No.3-100	49.7	0.125	51.4
No.3-80	51.1	0.135	45.0
No.3-60	50.2	0.140	42.3

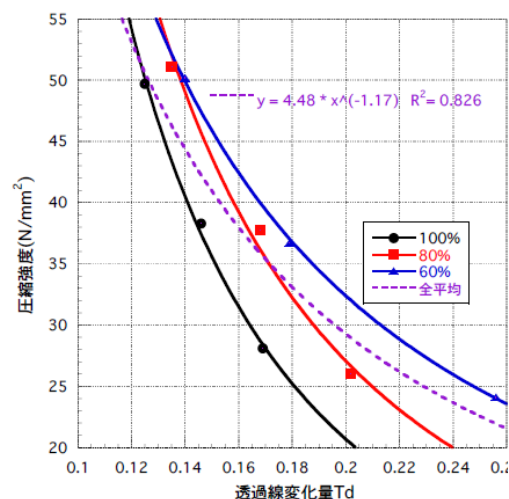


図-3 圧縮強度と透過線変化量の関係

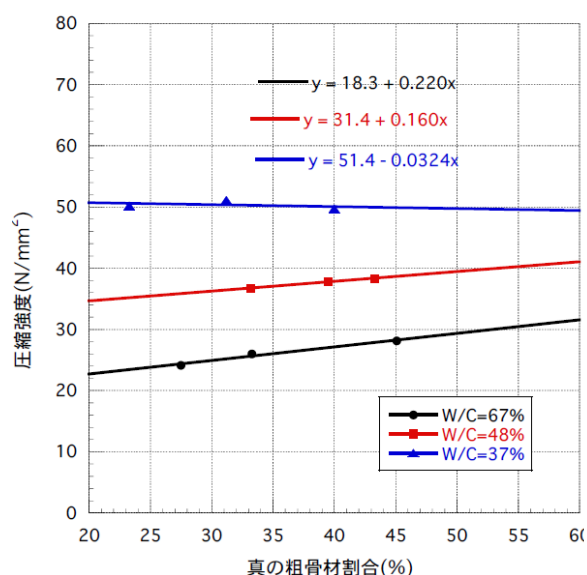


図-2 圧縮強度と粗骨材面積割合の関係

W/C=67.1%の場合、粗骨材の割合が減少すると、圧縮強度も最大4(N/mm²)程度低下し、W/C=48.0%の場合も、

僅かではあるが同様の傾向が見られた。しかしW/C=37.1%の場合、その様な傾向は見られず、水セメント比が小さくなるほど、粗骨材割合による強度低下は見られない傾向となった。この理由として、粗骨材強度が関係していると考えられる。一般に使用されるコンクリートの配合では、モルタル強度よりも粗骨材強度が大きいため、粗骨材割合が小さくなると、モルタル部での破壊が先行しやすくなるため、圧縮強度も低下する傾向になる。他方、モルタル強度が高くなり、粗骨材強度に近づくと、一体となって外力に抵抗できるため、粗骨材割合による強度低下は無くなるものと思われる。

図-3 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。全体的な傾向として、基準の粗骨材率 100%に対して粗骨材率が減少すると、右側にシフトする傾向が見られた。これは透過線変化が粗骨材割合に強い影響を受けたのが要因であると考えられる。特に、圧縮強度が高い条件よりも低い条件の方が右側へシフトする傾向が高く、低強度のコンクリ

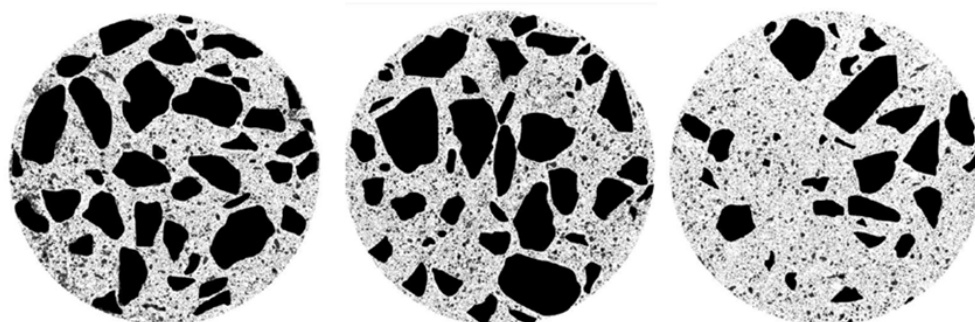


写真-1 No. 1 のスライス供試体断面の例
(左から 100%, 80%, 60%)

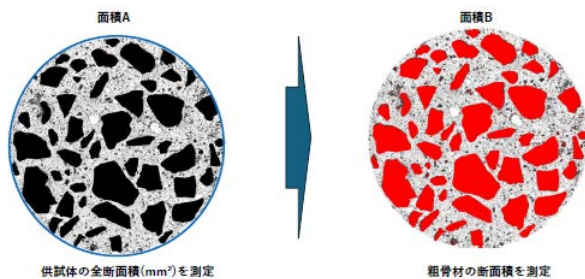


図-4 粗骨材面積割合の求め方

ートほど粗骨材割合の影響を受けていることが分かる。この理由として、造影剤は水のような性質を持っているが、緻密な粗骨材に対しては浸透しにくい。特に低強度のモルタル部には浸透しやすいため、粗骨材割合が減少した条件やモルタル強度が低下した条件では、より造影剤が浸透しやすくなったことによって、透過線変化量が増加し、図-3 の様な傾向になったものと考えられる。なお、今回使用した粗骨材の吸水率（0.17～0.37%）は低いものであることから、粗骨材による透過線変化量の影響は少ない結果となったが、吸水率が高い粗骨材を使用した条件においては、粗骨材割合による影響が考えられるため、今後検討が必要と考えている。

図-3 より、同一バッチで練られたコンクリートに於いても、粗骨材割合によつては透過線変化量が大きく影響を受けることから、圧縮強度毎に粗骨材割合による補正を行う必要が出てきた。補正方法としては、公開されている無料の画像解析ソフト（ImageJ）を用いて、スライスした供試体の断面積当たりの粗骨材割合を求めて対応することにした。

図-4 は画像解析ソフトを用いて粗骨材割合を抽出した結果の一例である。最初に粗骨材割合 100%の供試体のスライス面の画像を取り込み、面積 A（ドット）を求める。その後、濃度の境界値（閾値 15）を設定し、粗骨材を抽出（図中の赤い領域）し、その面積 B を測定する。面積 B/面積 A の除算によって求められた値が実際のコンクリート中に存在する粗骨材割合である。一つの供試体に対して上下面の 2 面の粗骨材割合を求め、その平均値を粗骨材面積割合とした。なお、閾値の設定において、画像解析ソフトはモルタルと粗骨材を区別し解析を行うが、川砂利やモルタル色に近い粗骨材を用いる場合は、モルタルと粗骨材の区別がしにくく閾値を固定してしまうと、粗骨材の箇所もモルタルと判定してしまう可能性があるため、種類によって閾値を変更する必要があると考える。しかし本研究では粗骨材とモルタルの区別がつきにくい供試体があったため差をつけるために粗骨材に色を塗布し閾値を

固定した。この方法を用いて水セメント比毎の粗骨材割合 100%～60%までの粗骨材面積割合を求めた。

図-5、図-6 および図-7 は水セメント比毎の透過線変化量と粗骨材面積割合との関係を示したものである。図-5 より、W/C=67%のコンクリートでは、粗骨材の割合が減少すると、透過線変化量が高くなる負の相関となり、決定係数は $R^2=0.84$ と良好であることが分かった。前述したように、粗骨材面積割合が小さくなるほど、造影剤の浸透の影響が大きいことがわかる。他方、図-6、7 より、W/C=48%のコンクリートでは、W/C=67%のコンクリート同様、粗骨材の割合が減少すると、透過線変化量が高くなる負の相関となるが、決定係数は $R^2=0.69$ と低くなり、さらに W/C=37%のコンクリートでは、決定係数は $R^2=0.51$ とより低くなる傾向となった。水セメント比が小さくなるほど、透過線変化量と粗骨材面積割合との関係としては悪くなるが、相関がみられることから、全部の条件に対して、補正が必要になる。

補正方法の考え方としては、図-5 を例に説明する。本来は基準となる粗骨材量の時の透過線変化量であるべきものが、粗骨材が減少する事で、透過線変化量が大きくなるため、粗骨材が減少することで大きくなった透過線変化量を補正すれば良いことになる。そこで、基準となる断面積当たりの粗骨材割合（図中では45%）の時の透過線変化量（図中では0.17）を回帰式から求めておき、粗骨材割合が45%より小さくなった条件では場合は、透過線変化量を0.17に修正すればよいことになる。

本実験では、図-5、6、7 中の 3 種類の水セメント比毎の回帰式が得られている。これらの回帰式は、いずれも式(1)の関係となっている。

$$T_d = a \cdot g^b \quad (1)$$

但し、 T_d ：透過線変化量

g ：真の粗骨材割合（%）

a, b ：係数

ここで、図-5、6、7 の回帰式の係数から、水セメント比との関係を求め、W/C=37～67%の範囲内で係数 a, b と水セメント比との関係を求めた。その結果を図-8、9 に示す。この関係から、水セメント比（又は圧縮強度）が分かれば係数 a, b が決まり、回帰曲線より粗骨材割合による透過線変化量の補正を行うことが出来ると思われる。

また、図-2 の結果より、粗骨材割合が減少すると、特に強度が低い条件では、僅かではあるが圧縮強度も

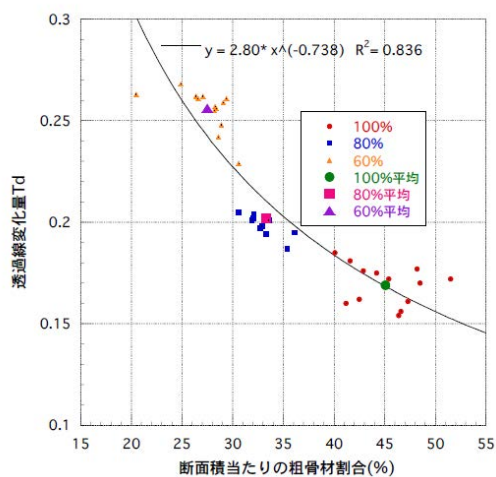


図-5 W/C=67%の粗骨材面積割合と
透過線変化量の関係

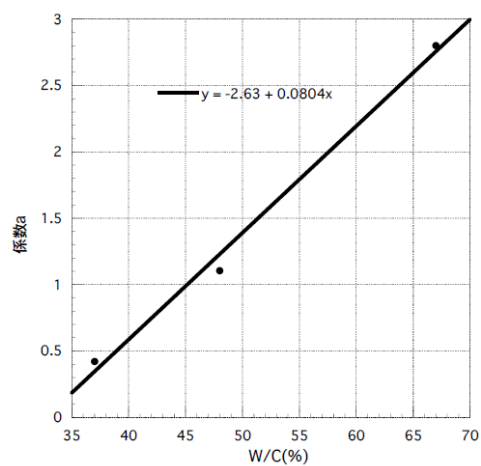


図-8 水セメント比と係数 a の関係

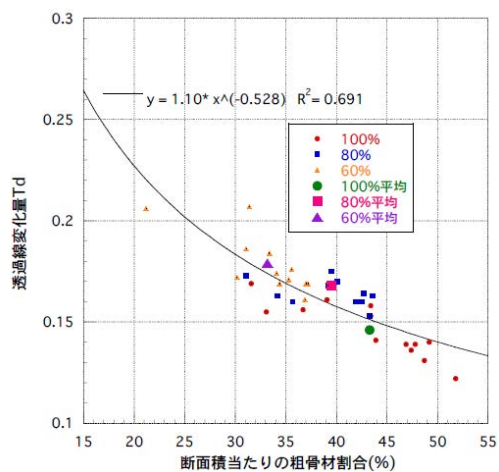


図-6 W/C=48%の粗骨材面積割合と
透過線変化量の関係

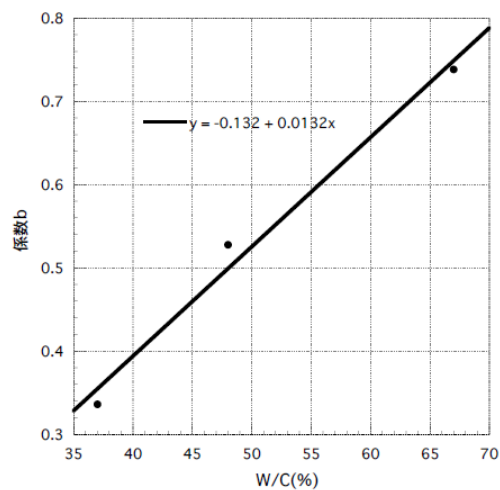


図-9 水セメント比と係数 b の関係

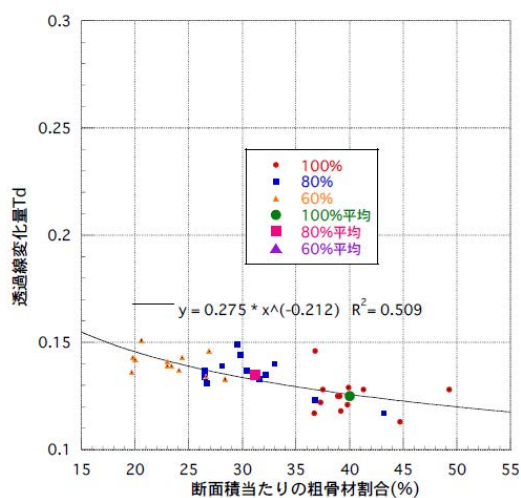


図-7 W/C=37%の粗骨材面積割合と
透過線変化量の関係

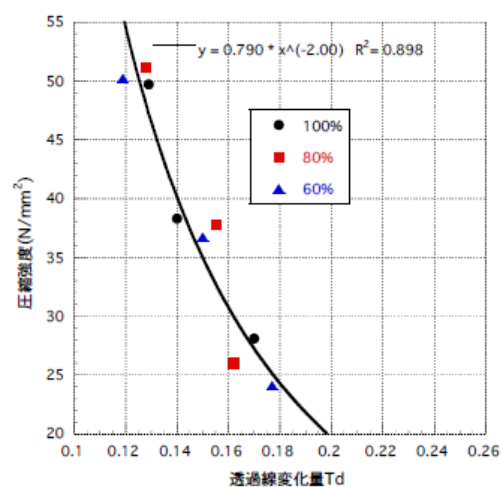


図-10 補正後の透過線変化量と圧縮強度の関係

減少する傾向が見られることから、粗骨材割合による強度補正も必要となってくる。補正方法として、前述した透過線変化量の補正と同様に、図-2の回帰式の係数と水セメント比の関係を求め、減少した粗骨材割合の強度を、基準となる粗骨材割合の圧縮強度で除した値を補正係数として、推定した圧縮強度に掛けることで、粗骨材割合を考慮した強度推定が可能となる。実際に、実コンクリート構造物の強度推定を行う際は、現場から採取したコアを10mm毎にスライスし、造影撮影を行う際、一般的なコンクリートの場合、透過線変化量は表層から奥行き方向にかけてほぼ一定の値となるが、上下するような動きがある場合には、その箇所のスライスした供試体の骨材量を目視確認し、他の箇所に比べ少ないようであれば補正をいれる形での使用を検討している。

図-10は補正後の透過線変化量と圧縮強度の関係を求めたグラフである。補正前(図-3)は粗骨材の割合が変化すると透過線変化量に大きな影響を及ぼしていたが、先ほどの補正を行うことにより、粗骨材の混入率が変化しても、示方配合に近い透過線変化量を得ることが出来た。また補正前の決定係数は約0.81であったが、補正により約0.90と良好な関係にすることが出来た。

4. まとめ

本研究では、実コンクリート構造物から、コアを採取し、X線造影撮影法を用いて、強度推定を行う際に、水セメント比と粗骨材割合の変化により、強度推定値に差異が生じるのではないかと考え、確認実験及び補正方法について検討を行った。本研究の範囲では以下のことが言える。

- (1) 基準となる粗骨材率に対して、粗骨材率が減少した場合、 $W/C=37.1\%$ の条件では圧縮強度に影響は見られなかったが、水セメント比が低下すると圧縮強度も低下する傾向が見られ、 $W/C=67.1\%$ の条件では最大 $4N/mm^2$ の強度低下が見られた。
- (2) 基準の粗骨材率に対して粗骨材率が減少すると、透過線量が増加する傾向が見られ、特に圧縮強度が低くなるほど、その傾向は強くなることが分かった。
- (3) X線造影撮影法において、低強度の試験体による強度推定を行う際は、基準となる粗骨材割合よりも低い条件では、透過線変化量が過大に評価してしまうため、誤差の原因になることが分かった。
- (4) 画像解析ソフトを用いて粗骨材割合を求めることによって、粗骨材割合の減少による透過線変化量および強度の補正を行うことで、強度推定の精度

を決定係数0.81から0.90に向上させることが出来た。

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, 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
- 6) 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
- 7) 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
- 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, 高橋 諒, 田村 優汰, 武田 三弘: 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, 日本コンクリート工学会年次学術論文集, vol.46, No.1, pp1699-1704, 2024
- 10) 高橋 諒, 武田 三弘: 粗骨材の割合がX線造影撮影法を用いた強度推定に及ぼす要因について, 令和6年度土木学会全国大会79回年次学術講演会, V-844, 2024.9