

論文 X線造影撮影法による実コンクリート構造物を想定した強度推定に関する基礎研究

鴫 泰幸*1・武田 三弘*2

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、推定される圧縮強度値と実コンクリート構造物から採取したコア供試体の圧縮強度とでは差異が生じたため、本研究ではその差が生じる原因として考えられたコア穿孔方向、コアサイズの違いにおける強度推定への影響について確認する実験を行った。その結果、コア穿孔方向が異なることで強度推定に与える影響はわずかであったのに対し、コアサイズの違いでは、低強度の条件で小径になるほど強度推定結果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, 非破壊検査, 強度推定, コア穿孔方向, コア直径

1. はじめに

これまで、本研究ではコンクリート内部の空隙量やひび割れを、X線造影撮影法¹⁾²⁾という手法を用いて検出・定量化してきた。この手法は、10mm厚にスライスしたコンクリート供試体に対し、本研究室より開発された造影剤を浸漬させ、X線で撮影を行うことによって、コンクリート内部に発生したひび割れや空隙を検出・定量化することができるものである。その結果、圧縮強度と定量化した値（以降、透過線変化量と定義する）との関係は、相関係数 $R=0.954$ と非常に良好なものであった。この手法は、実コンクリート構造物の維持管理においても有効なものであり、これまで多様なコンクリート構造物のコアを採取し、目には見ることのできなかつた微細なひび割れや内部に潜む欠陥を、X線造影画像として目視で確認するだけでなく、表層からの強度分布や劣化深さを求めてきた。

しかしながら、実験室にて作製された円柱供試体と実コンクリート構造物から採取されたコアとでは、圧縮強度推定値と実測値の間には $\pm 5(N/mm^2)$ 程度、差異が生じることが明らかとなった。その原因として、X線造影撮影法を用いた圧縮強度推定では、標準養生されたテストピースを基準としているが、実コンクリート構造物から採取されたものでは、コアの穿孔方向やコア直径など、採取条件が異なるため、圧縮強度や透過線変化量に影響を与えることが考えられた。また、圧縮強度に与える影響については既往の研究³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾より、供試体の寸法が小さいほど強度が高くなることやコア穿孔方向が鉛直方向よりも水平方向の方が高いことなど、ある程度明らかとなっているが、コア直径が異なることによる影響については、本研究室では採取条件がこれまで鉛直方向での検討であり、水

平方方向について行った条件が、透過線変化量に与える影響については検討されていなかった。

したがって、本研究では各条件が圧縮強度と透過線変化量に与える影響を実験的に調べることで強度推定における補正の必要性や強度推定に使用するグラフから推定式を新たに算出し、上記の条件における強度推定を可能にすることを目的とする実験を行った。また、これまでの研究では $\phi 100mm$ のテストピースを用いた圧縮強度と透過線変化量との関係から推定を行っていたが、コア穿孔方向やコア直径を考慮した「コア」を用いた圧縮強度と透過線変化量との関係を求めることにより、実コンクリート構造物を対象とした精度の高い強度推定が可能になると考えた。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

表-1 は本研究で使用したコンクリートの配合を示したものである。No.1 から No.3 については、実験 3.1「コア穿孔方向の違いが強度推定に与える影響」、及び実験 3.2「水平方向にコア穿孔を行った時のコア直径の違いが強

表-1 コンクリート配合

No.	配合表 (kg/m ³)					空気量 (%)
	W	C	S	G	混和剤 (AE 剤)	
1	175	205	780	1069	0.014	6.9
2	164	304	564	1048	3.04	7.0
3	164	353	764	1048	3.53	4.7
4	175	416	712	959	0.029	5.1

*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)

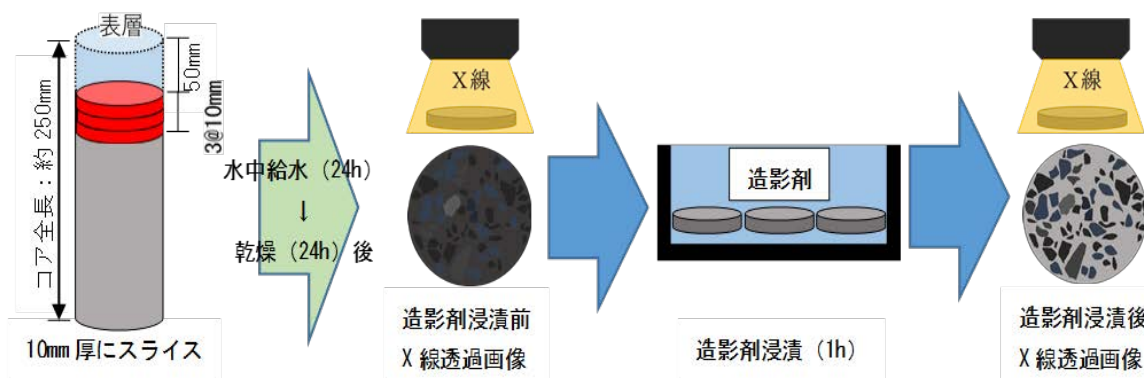


図-1 X線造影撮影法による透過線変化量の測定フロー

度推定に与える影響」の2つの実験で使用した。なお、No.2 および No.3 のコンクリートは、JIS A 5308 レディーミクストコンクリートを使用している。また、上記の実験では普通ポルトランドセメント、骨材最大寸法は20mmのものを使用している。養生条件について、打設後7日間型枠存置したのち脱型し、21日間気中放置した。上面と側面の養生条件をできる限り揃えるため、上面には打設後のブリーディングが終了する頃にならし作業を行い、その後蓋を被せるような形で養生を行っている。各実験における供試体の詳細は以下に示す。

実験 3.1 では、コアの穿孔方向（水平方向および鉛直方向）の違いによる圧縮強度及び透過線変化量の関係を求めることを目的としており、W600mm×D600mm×H500mmの矩形供試体を作製した。コアの穿孔箇所は上面と側面の2箇所であり、採取したコアの直径は100mmである。矩形供試体上面から鉛直方向に5体、側面では打ち込み面より200mmのところから5体の採取を行った。また、採取した5体の供試体の内訳として、3体を圧縮試験用、2体をX線造影撮影用に使用した。圧縮試験用供試体は直径と高さの寸法比が1:2になるよう湿式ダイヤモンドカッターを用いて切断し、両端面を研磨した。X線造影撮影用の供試体は、1体につき表層より50mmのところから3枚、厚さ10mmになるようカットしたため、計6枚のスライスから透過線変化量の測定を行い、平均値を求めた。

実験 3.2 では、水平方向にコア穿孔を行った時のコア直径の違いが強度推定に与える影響を調べるため、実験 3.1と同様の大きさ、配合のコンクリートを使用し実験を行った。ただし、本実験で使用したコンクリートは表-1よりNo.1, No.3, No.4の3種類である。採取したコアは水平方向から穿孔を行っており、コアの直径は100mm, 80mm, 60mmの計3つの寸法である。φ100mmのコアは、打ち込み面より200mmの深さの位置から、φ80mmとφ60mmについては打ち込み面より300mmの位置の側面

から採取を行った。なお、採取するコアの位置が異なることについては、既往の研究より、圧縮強度及び透過線変化量に与える影響はわずかであり、本実験では差異は生じないものと仮定し実験を進めた。いずれの寸法も5体のコア供試体を採取しており、測定に使用する供試体の用途の内訳及びカットの方法は実験 3.1と同様である。

2.2 X線造影撮影法

図-1は、φ100mmのコアを例とした、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が、コア全長はφ80mmとφ60mmではそれぞれ、230mm, 230mmとなっている。コアコンクリートを使用した本実験では、乾燥収縮などの影響を排除するため、図-1左のように、コアの表層より50mmの位置から厚さ10mmに3枚カットを行った。なお、コア直径が異なる供試体に関しても同様に表層から50mmの位置からカットしたものを使用した。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、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、恒温恒湿室内（室温20°C、湿度60%）に設置している乾燥機（40°C）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線を遮蔽する液体)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、各採取条件における圧縮強度との関係を求めた。

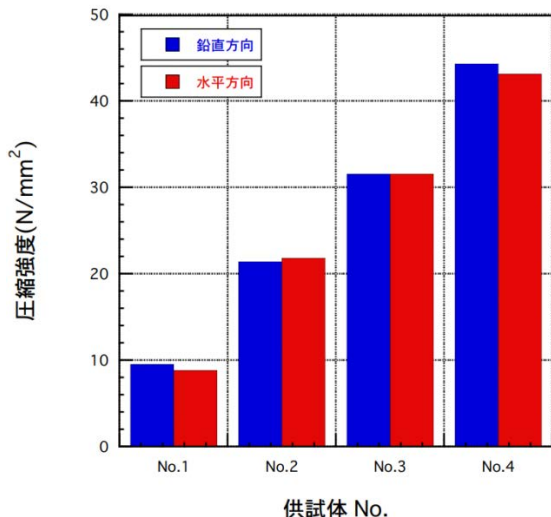


図-2 圧縮強度とコア穿孔方向の関係

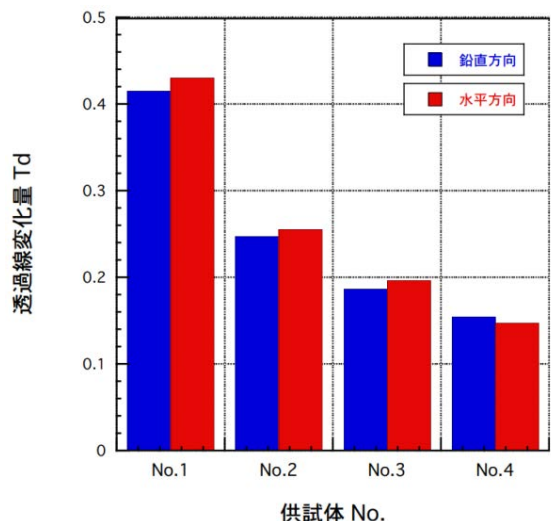


図-3 透過線変化量とコア穿孔方向の関係

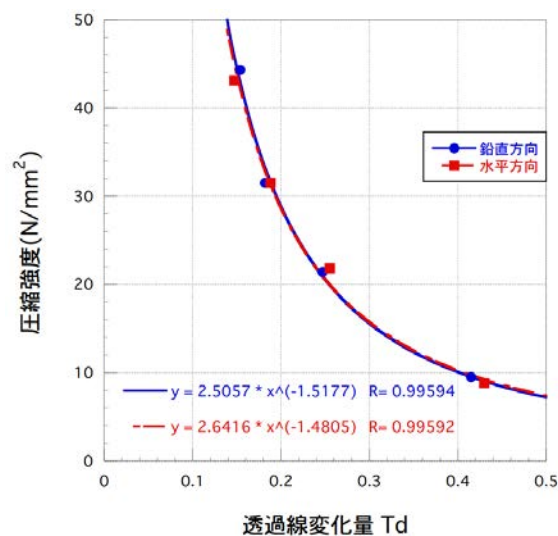


図-4 透過線変化量とコア穿孔方向の関係

3. 実験結果および考察

3.1 コア穿孔方向の違いが強度推定に与える影響

表-2 は、実験 3.1 より、矩形供試体から採取したコア供試体の試験結果をまとめたものである。また、図-2 は、コアの穿孔方向が水平方向と鉛直方向の違いによる圧縮強度を示したものである。圧縮強度のみで比較すると、穿孔方向が異なることによって、多少の差はあったものの相関はほとんど見られなかった。本論文の実験では初期養生時、上面を覆うような施工をしていたため、穿孔方向における圧縮強度の違いを乾燥による影響をある程度取り除いた状態で評価することができたとと言える。その結果、穿孔方向の違いが圧縮強度に与える影響は少ないと結論づけられた。

図-3 は矩形供試体から採取したコアの穿孔方向が、水平方向と鉛直方向の違いによる透過線変化量の関係を示したものである。透過線変化量は一点のプロットにつき計 6 枚のスライスの平均値を取っており、それぞれのばらつきについては強度によって異なる。本実験において最も高強度であった供試体 No.4 の標準偏差は 0.0137、最も低強度であった供試体 No.1 では 0.0161 となっており、いずれも強度推定におけるばらつきとしては微小である。穿孔方向における両者の透過線変化量を比較した際、No.4 以外のいずれの供試体においても鉛直方向よりも水平方向の方が高い値となっており、既往の研究⁷⁾と同様の結果が得られた。これは、ブリーディングによって骨材下面に発生した空隙の位置関係が、コアの穿孔方向によって変わるからだと考える。鉛直方向に採取したコア供試体の断面をイメージした時、骨材下面に空隙が生じるのに対し、水平方向から採取したコア供試体は空隙関係が 90 度回転した形となるため、空隙は骨材側面に生じる。そして、これらの供試体を、透過線変化量を測定する工程で 10mm 厚にスライスした際、水平方向の供試体の方がより空隙を検出しやすい状況となり、結果として透過線変化量が高くなったものと考えられる。また、圧縮強度が

表-2 実験 3.1 試験データ

供試体 No.	穿孔方向：鉛直		穿孔方向：水平	
	圧縮強度 (N/mm²)	透過線変化量 Td	圧縮強度 (N/mm²)	透過線変化量 Td
No.1	9.5	0.415	8.8	0.430
No.2	21.4	0.247	21.8	0.255
No.3	31.5	0.182	31.5	0.188
No.4	44.3	0.154	43.1	0.147

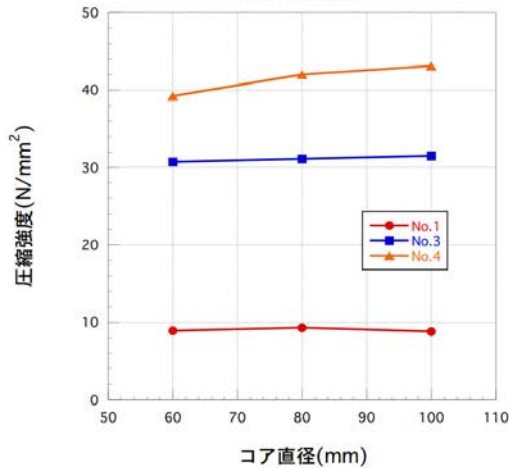


図-5 各供試体における圧縮強度とコア穿孔方向の関係

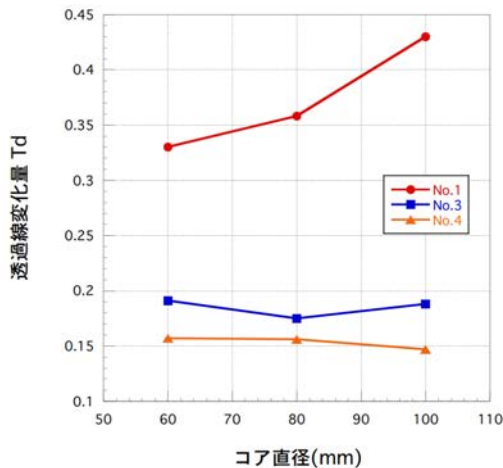


図-6 各供試体における透過線変化量とコア穿孔方向の関係

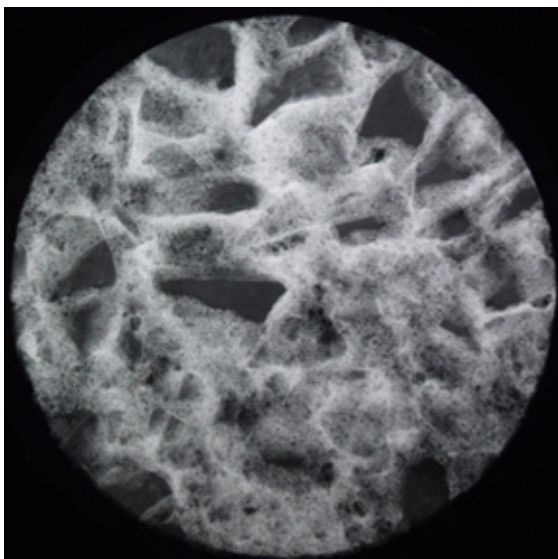


写真-1 コア直径 100mm の X 線造影写真

40N/mm²を上回った供試体の透過線変化量では、水平方向よりも鉛直方向の方が若干高い値となっている。これについては、現状、測定の際に生じる微小な誤差であると考えている。圧縮強度が上昇するにつれブリーディングが生じにくくなり、骨材下面の空隙も小さくなったため高強度域ではコア穿孔方向の違いによる透過線変化量の差異は生じにくくなる。しかしながら、いずれの供試体においても穿孔方向による透過線変化量の差は微小であると言えるため、これらの減少がばらつきによって生じた可能性も否定できない。そのため、今後も同様の実験によるデータの蓄積が必要である。

次に、図-4は表-2より試験データの圧縮強度と透過線変化量の関係をコア穿孔方向ごとにプロットしたものである。本研究の目的である、強度推定における補正の検討について、グラフより圧縮強度及び透過線変化量の関係は、回帰曲線の相関係数がR=0.99以上と、非常に良好なものであることが分かる。また、2つの回帰曲線を比較すると、両者の差はほぼ見られないことが分かった。よって、コア穿孔方向が異なる供試体をX線造影撮影法から強度推定する際の影響は小さいことが確認された。

3.2 水平方向にコア穿孔を行った時のコア直径の違いが強度推定に与える影響

表-3は実験3.2より、矩形供試体から採取したコアの寸法が異なる場合での圧縮強度と透過線変化量を測定した試験データである。また、図-5は表-3から、圧縮強度とコア直径の関係をグラフに示したものである。このグラフより、コア直径が小さくなるにつれ、圧縮強度は横ばいか低下する傾向が見られた。既往の研究⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾より、骨材の最大寸法が大きくなったり、粗骨材の占める割合が多くなったりすることで圧縮強度が低下することや、コンクリートの強度が高くなるとその影響はより大きくなるが示されている。本実験では、骨材の最大寸法は変わらないが、コア採取の直径が小さくなることで、コア直径に対するみかけの粗骨材寸法が大きくなり、同様の傾向が確認されたものと考えられた。しかしながら、既往の研究⁴⁾⁵⁾¹²⁾¹³⁾では、供試体の寸法は小さく

表-3 実験 3.2 試験データ

	圧縮強度(N/mm ²)			透過線変化量 Td		
	Φ	φ	φ	φ	φ	φ
	100mm	80mm	60mm	100mm	80mm	60mm
No.1	8.8	9.3	8.9	0.430	0.358	0.330
No.3	31.5	31.1	30.7	0.188	0.175	0.191
No.4	43.1	42.3	39.2	0.147	0.156	0.157

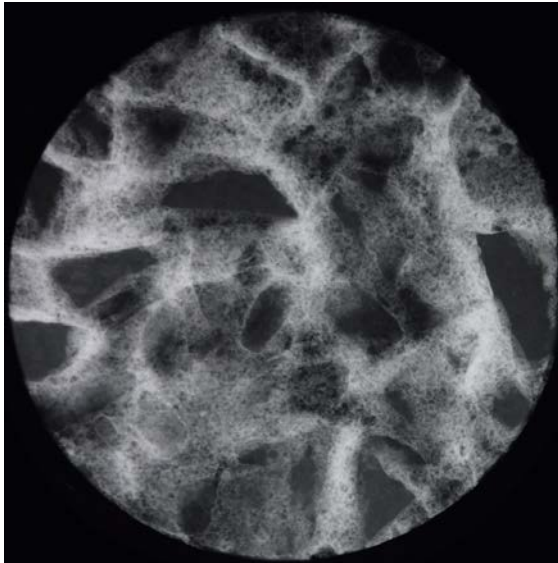


写真-2 コア直径 80mm の X 線造影写真

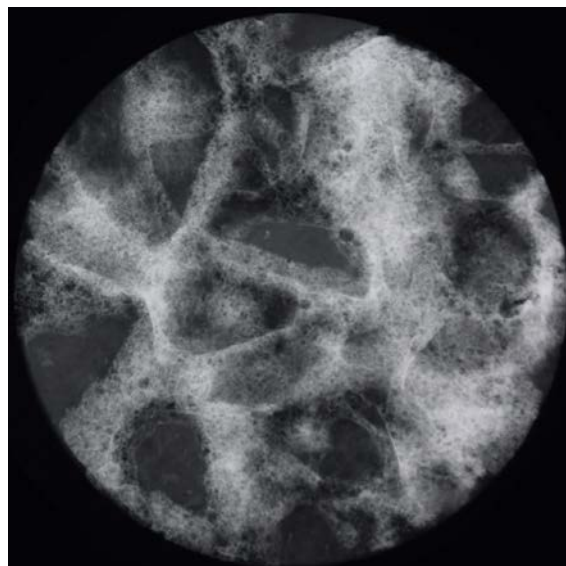


写真-3 コア直径 60mm の X 線造影写真

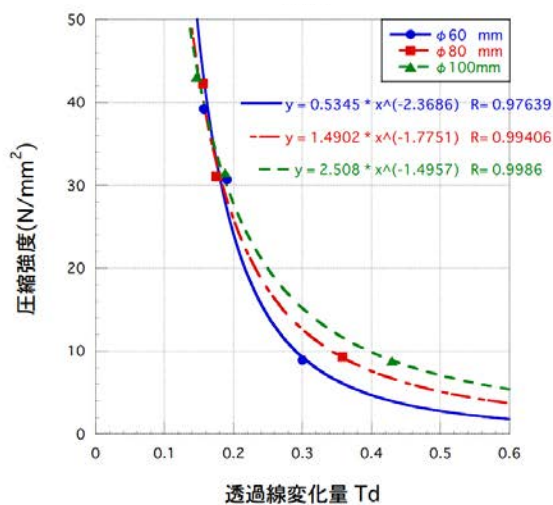


図-7 各コアの直径における圧縮強度と透過線変化量の関係

なるほど圧縮強度が高くなるのが分かっており、このような結果となった要因として、コアの穿孔方向とコア採取を行った供試体寸法が関係していると考えられる。本実験ではより寸法の大きい矩形供試体を作製し、水平方向（側面）からコアの採取を行った。水平方向から採取したコアにおいては、多少ながらゆがみが生じていたことが確認されている。また、コア採取を行う対象の供試体の寸法が小さい方が、作製時における締固めの効果は良いため、矩形供試体よりも緻密な条件であったことが考えられる。これらが影響した可能性が考えられたため、この関係については今後も検討する予定である。

図-6 は、透過線変化量とコア直径との関係を示したものである。この関係より、圧縮強度が 30N/mm^2 以上の供試体については、コア直径が変化することによる透過線変化量のばらつきは多少あるものの、おおむね横ばいとなる結果であった。しかし、圧縮強度が 10N/mm^2 を下回った供試体では、コア直径が小さくなるとともに透過線変化量も低下するという結果が顕著に表れた。このような結果となった原因は 10mm 厚にスライスした供試体中に含まれる粗骨材の割合に起因するものと考えられる。写真-1、写真-2、写真-3 は表-3 の供試体 No.1 における、それぞれ $\phi 100\text{mm}$ 、 $\phi 80\text{mm}$ 、 $\phi 60\text{mm}$ のスライスした供試体に対し X 線造影撮影を行い得られた画像である。画像の中で黒っぽく見えるのが粗骨材で、白に見えるのがモルタルである。これらから見て取れるように、コアの寸法が小さくなるとともに粗骨材の割合が増加した一方で、モルタル部分の割合が減少しているのが分かる。これはコア直径が小さくなると、コア直径に対して骨材の最大寸法 20mm の割合が $G_{\text{max}}=20\text{mm}/\phi 100\text{mm}$ 、 $20\text{mm}/\phi 80\text{mm}$ 、 $20\text{mm}/\phi 60\text{mm}$ というように増加するためである。X 線造影撮影法による透過線変化量の測定で使用する造影剤は、粗骨材よりもモルタル部分への浸透割合が高く、強度の低いコンクリートの場合、モルタルへの浸透量が多くなる。しかし、粗骨材への浸透に関しては、低品質の骨材以外は強度による影響は少ない。そのため、圧縮強度の高いコンクリートでは、コア直径による影響は小さいが、圧縮強度の低いものでは粗骨材の占める割合が変化することで透過線変化量に及ぼす影響も大きくなると考える。

図-7 は各コア直径における圧縮強度と透過線変化量の関係を示したものである。 30N/mm^2 までの強度域では、コア直径が異なることによるプロットのばらつきは小さいが、圧縮強度 10N/mm^2 のところでは透過線変化量に大きな差異が生じており、 $\phi 100\text{mm}$ を基準とした従来と同様に強度推定が行えないことが分かった。そのため、コア直径別に回帰曲線を求めることにより、 $\phi 100\text{mm}$ から $\phi 60\text{mm}$ までの強度推定を適正に行うことが可能となった。また、

いずれの直径においても相関係数は $R=0.97$ 以上となり、強度推定精度に問題がないことが確認された。

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、強度推定結果に影響を及ぼす要因として、コアの穿孔方向及びコアの直径の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. 矩形供試体からコアを採取する条件として、穿孔方向が水平方向と鉛直方向から行った条件が圧縮強度および透過線変化量におよぼす影響について確認をしたところ、穿孔方向が異なることによる圧縮強度のばらつきは確認されたものの顕著な傾向は見られないことから、穿孔方向が圧縮強度に与える影響は少ないものと思われる。一方、透過線変化量において、圧縮強度が 31.5N/mm^2 以下の供試体では穿孔方向が鉛直のものに比べ水平の方が高くなる傾向があることが分かった。要因として、X線造影撮影により空隙を検出する際、ブリーディングにより生じる骨材下面の空隙が、鉛直方向では骨材の下方向に位置するため検出しづらくなるのに対し、水平方向は、骨材の側面に位置するため、空隙の検出がしやすかったためと考えられる。また、強度が 40N/mm^2 になると、ブリーディングが生じにくくなり、穿孔方向の違いによる透過線変化量の差が小さくなったと考えている。本実験から求められた回帰曲線より、穿孔方向が圧縮強度と透過線変化量の関係に与える影響は小さいことが分かった。
2. 水平方向にコア穿孔を行った条件において、圧縮強度とコア直径との関係を求めたところ、横ばいの傾向であったが、 40N/mm^2 程度の強度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。要因として、コア採取の直径が小さくなることで、コア直径に対するみかけの粗骨材寸法が大きくなったためと考えている。透過線変化量とコア直径との関係を求めたところ、おおむね横ばい傾向であったが、圧縮強度が 10N/mm^2 を下回った供試体では、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みられた。この要因として、 10mm 厚にスライスした供試体中に粗骨材が占める割合は、コア直径が小さくなるほど大きくなることから、造影剤が浸透するモルタル領域が減少し、透過線変化量が小さくなったものと考えている。そのため、低強度のコンクリートを小径コアで強度推定する際は注意が必要となる。

謝辞：本研究を実施するにあたり、同研究室の石井暉、佐藤信倫、村岡俊太、松田伸隆、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る。

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) 大木崇輔, 他: コア採取位置および採取方法の違いが高強度コンクリートのコア強度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, 2008
- 4) 山本大介ら; 小径コアの圧縮強度の変動に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp403-408, 2013.
- 5) 片平 博ら; コア試験体の小径化が圧縮強度に与える影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp399-404, 2004.
- 6) 小林一輔 編; コア採取によるコンクリート構造物の劣化診断法 POD 版, 森北出版, 2011.
- 7) 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
- 8) 西林新蔵, 他: コンクリート工学ハンドブック, pp.364~392, 2009.10
- 9) D. L. Bloem: Effect of Maximum Size of Aggregate on Strength of Concrete. National Sand and Gravel Assoc. Circular No.4, 1959
- 10) 平井圭ら; コンクリートの圧縮破壊領域に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集 vol.17 No.2, pp339-344, 1995
- 11) 小池狭千朗・畑中重光: コンファインド超高強度コンクリートの圧縮特性の形状・寸法効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.949-954, 1992.
- 12) 金久保雅之・黒井登起雄・松村仁夫, 土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集; コンクリートの圧縮強度に及ぼすコア採取寸法の影響 vol.28, pp674-675, 2001
- 13) 疋田次峰ら; コンクリートの一軸圧縮応力-ひずみ関係に及ぼす寸法効果の影響, コンクリート工学年次論文報告集 vol.24 No.2, pp193-198, 2002