

論文 小口径深穴穿孔機を利用した既設コンクリートの強度簡易推定法

井上 文宏*1・佐藤 智*2・渡邊 晋也*3・根間 栄順*4

要旨：橋梁床板等のコンクリート部材の強度を実現場で簡易に推定できる方法を考案するため、小口径深穴穿孔機の送り速度をトルクモータで制御し、その穿孔速度の変化からコンクリート強度を推定する方法を提案する。トルクモータを用いた穿孔速度と負荷力、回転数の関係から、コンクリート強度を推定する簡易式を誘導した。強度の異なる試験体を用いた穿孔実験より、コンクリート強度と穿孔速度は指数関数で近似でき、また簡易式と関連する関係があることを確認した。この簡易式は既設コンクリートを用いた穿孔実験のデータとも近似する傾向があり、簡易推定法の実用化に向けた可能性を得た。

キーワード：小口径深穴穿孔機、強度推定、自動送り制御、ダイヤモンドビット

1. はじめに

戦後の高度成長時代に都市部を中心とした建設された各種の土木インフラ（橋梁、トンネル、高速道路など）の多くは寿命を迎え始め、大規模な修繕やリニューアル、建て替えが必要な時期となっている。特にコンクリート構造物は経年劣化に加え、塩害や中性化などの影響によりその強度が著しく低下するケースもあり、早急な対応が迫られている。

このような修繕が必要なコンクリート構造物に対しては、まず劣化の度合いを客観的に判断できるコンクリート強度の推定が不可欠と考えられる。従来、既存のコンクリート構造物のコンクリート強度の推定する方法には、

- (1) 既設構造物からコア試験体を採取し、圧縮強度試験機で強度を測定する方法^{1), 2)}
- (2) テストハンマーでコンクリート表面を打撃し、その反発硬度から圧縮強度を測定する方法、また弾性波の伝播速度と反射時間を計測する方法（iTECS 法、2 点法）
- (3) 試験体に超音波を発信し、その伝播速度の変化から圧縮強度を計測する方法

等が実際に使用されている。しかし、圧縮強度試験機を用いる場合には、コア採取や強度試験など膨大な時間と費用が掛ること、打撃法は簡易で使いやすいが、コンクリートの比較的近い表面付近の強度計測に限られること、超音波計測では粗骨材の粒径や位置によっては散乱減衰が起こり、伝播速度の計測精度が低下することなどが考えられる。そのため、現地で簡易にコンクリート強度を測定する方法が求められている^{3), 4)}。

これまで著者の 1 人は、小口径深穴穿孔機を利用した穴の穿孔速度と穿孔機の押付け力の関係からコンクリート強度を推定する方法を考案した⁵⁾。圧縮空気ですり部を一定力で押付けてコンクリートを穿孔することで、穿

孔速度が一定となり、穿孔速度はコンクリート強度によって異なることから、穿孔速度を計測することでコンクリート強度を推定した。しかしながら、圧縮空気は穿孔面での変動を直接吸収するため、コンクリート材料（骨材やばらつき）の影響によって穿孔部が大きく変動して計測精度が低下すること、設定する圧縮空気の圧力によって穿孔速度が決まるため、実用上適切な穿孔速度を設定することができないなど、改善すべき点も残されている。

そこで、本研究では小口径深穴穿孔機に対して、穿孔部の送り速度をトルクモータで制御し、その穿孔速度の変化からコンクリート強度を推定する方法を提案する。一般に、トルクモータを用いた制御では、負荷荷重に応じたトルクが出力され、穿孔部の送り速度は常に一定の値となることが予想される。しかし、圧縮強度が高いコンクリートの穿孔では、穿孔機に設定トルク以上の負荷が作用するため、送り速度は低下してほぼ一定の固有値をとることを見出した。穿孔機全体は非常にコンパクトであり、小口径の深穴穿孔であるため、短時間での穿孔や計測が可能であるため、現地でのコンクリート強度推定を簡易に実施できる見込みがあると考えられる。

本報告では、小口径深穴穿孔機の概要と穿孔原理、コンクリート強度の推定方法、実際の穿孔実験による結果および得られた成果と考察について報告する。

2. 小口径深穴穿孔機の概要

実験に使用した穿孔機の概要を図 1 に示す。本システムは、①小口径穿孔ドリル、②スライドブロック（送り装置）、③水循環装置、④真空ポンプから構成される。各装置の仕様を表 1 に示す。

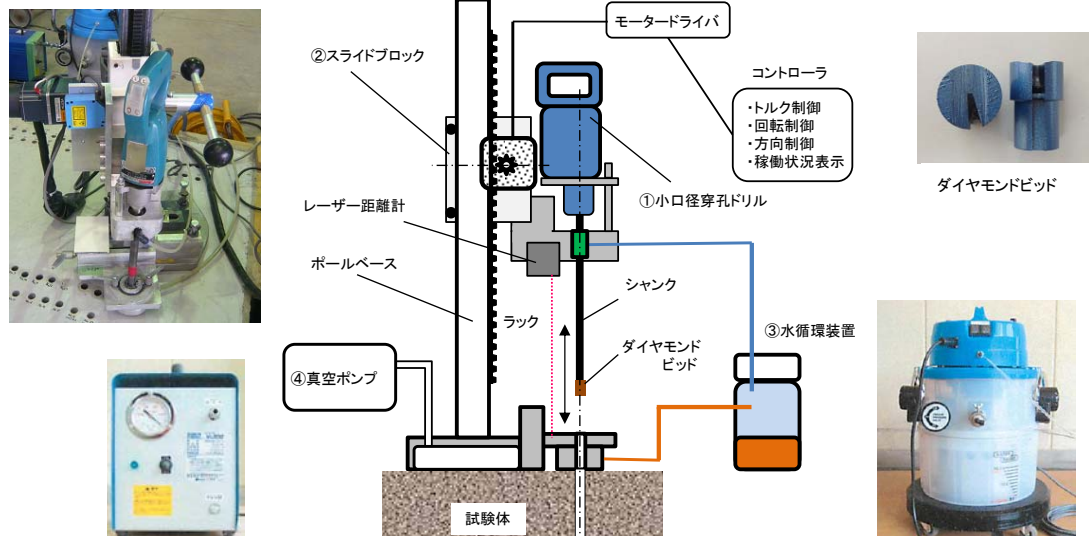
小口径穿孔ドリルは、先端にダイヤモンドビットを取り付けた研磨ドリルであり、高速回転でコンクリート面

*1 湘南工科大学 工学部機械工学科教授 工博（正会員）

*2 (株)ティ・エス・プランニング 社長（正会員）

*3 施工技術総合研究所 研究第二部 工博（正会員）

*4 (株)ティ・エス・プランニング 開発部長



図－１ 実験に使用した穿孔機の概要

を研磨しながら、深穴穿孔が可能である。

穿孔ドリルはラックとピニオンで構成されるスライドブロックに固定され、ボールベースに沿って上下に移動する。ボールとベースは傾斜させることができる機構であり、様々な角度の穿孔にも対応できる。ベース部は真空ポンプを用いて内部を負圧にすることで、試験体とベースを真空密着させて固定することができる。穿孔時には水循環装置を用いることで、ビットの冷却と潤滑、穿孔したコンクリートカスの排出を行う。また、水循環装置の内部ではフィルターを介して清水をドリル内に送り込むことができ、穿孔性能を維持させている。

3. ドリルの穿孔速度とコンクリート強度の関係

(1) 穿孔速度とトルク特性

ドリルの穿孔に対して、ドリル本体の送りを自動化するため、スライドブロック内の歯車に減速機を介してトルクモータを結合した。トルクモータは定格トルク内の負荷に対しては、設定した回転数で運転できる特性を有しており、回転数が0の状態でも連続運転が可能である。またコンクリート内部の粗骨材の影響で穿孔速度が急激に低下してもモータへの負荷は小さく抑えられる。

一般に、ラック・ピニオンを用いたドリルの穿孔速度は、図－2に示すようにトルクモータのトルクを T 、モータの回転数を N 、ドリルの穿孔速度を v 、ドリルの穿孔に対する負荷力を F とすると、式 (1) の関係がある。

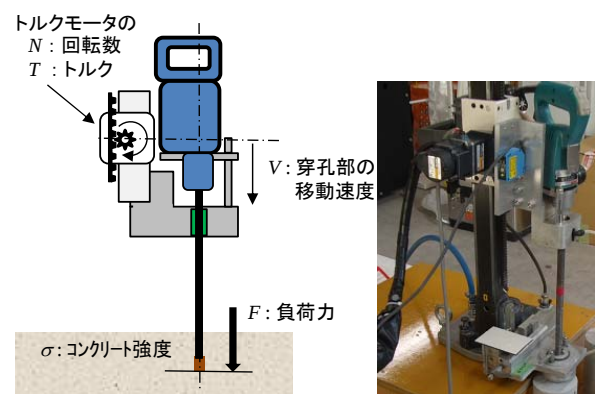
$$v = k_0 \frac{2\pi N_0 T}{F} \quad (1)$$

ただし、 k_0 はモータの効率やラック・ピニオンの摩擦係数を含む定数を表す。

トルクモータを用いた制御では、ドリルの負荷力 F が設定トルク T_0 の範囲であれば、負荷力 F に追従した

表－１ 実験に使用した穿孔機の各仕様

①小口径穿孔ドリル	(1)ドリル ・回転数:133 1/s, 電流:5.2 A, 出力:500W, 重量:1.6 kg
	(2)シャンク・ロット軸 ・長さ:400mm, 軸径:15.5mm, 材質:ステンレス製
	(3)ダイヤモンドビット: ・長さ:25mm, 軸径:15.5mm
②スライドブロック	(1)ボール ・長さ:910 mm, 断面:50×50 mm, ラック付 (2)トルクモータ: ・定格トルク:0.1 Nm, 定格回転数:4000 rpm 減速比:200, オリエンタルモータ (3)レーザ変位計 ・計測距離:250±150mm, 北陽電機
③水循環装置	・真空圧:2000 mmAq, 流量: 2.5 m ³ /min ・出力:1.1 kW, タンク容量:15 L
④真空ポンプ	・真空圧:750 mmHg, 流量: 1.5 m ³ /min ・出力:1.5 kW



図－2 移動速度とトルク特性

トルク $T = k_1 F$ (k_1 は比例定数) が出力されるため、

$$v = 2\pi N_0 \cdot k_0 \cdot k_1 \quad (T \leq T_0) \quad (2)$$

となり、穿孔速度は一定となる。

一方、コンクリート強度が高くなり、ドリルの負荷力

F が設定トルク T_0 以上であれば、トルク T_0 は一定となり、負荷力 F に応じてモータの回転数が変化するため、穿孔速度も変化する。すなわち、式(3)の関係をj得る。

$$v = k_0 \frac{2\pi N \cdot T_0}{F} \quad (T > T_0) \quad (3)$$

(2) コンクリート強度と穿孔速度の関係式

ドリルでコンクリート面を穿孔する際、ドリルの負荷力 F とコンクリート強度 σ の関係が不明であるため、負荷力 F が σ の α 乗に比例すると仮定すると、 $F = k_2 \cdot \sigma^\alpha$ (k_2 は比例定数) で表され、この関係を式(3)に代入して σ で表すと

$$\sigma = \left(\frac{k_0}{k_2} \frac{2\pi N \cdot T_0}{v} \right)^{1/\alpha} = K_0 \cdot v^{-1/\alpha} \quad (4)$$

を得る。すなわち、負荷力 F が設定トルク T_0 以上であれば、コンクリート強度 σ は v に対して冪数関数で表される曲線となることが分かる。上記の関係を模式的に示した関係を図-3に示す。

このことから、本装置を用いて穿孔実験を行い、コンクリート強度に対する穿孔速度や各種の定数を求めることで、コンクリート強度を簡易に推定できる推定式を得ることができる。次章では実験によって、上記の関係を検証する。

4. 実験概要

4.1. 試験体の作製

本研究で用いたコンクリートの基本配合を表-2に示す。水セメント比37.8%とし、セメントには早強セメントを用いた。また、本試験ではコンクリート強度をj変動させる目的で、基本配合で混練を行った後、加水を実施し、パン型ミキサーを用いて再度2分間の混練を行った試験体も作製した。加水量は 1m^3 当たり、11.6(kg)、23.2(kg)、34.8(kg)および69.6(kg)の4種類であり、加水したコンクリートの配合を表-3に示す。試験体の寸法は、基本配合試験体では長さ100(cm)×幅100(cm)×深さ20(cm)、加水試験体では、長さ100(cm)×幅50(cm)×深さ20(cm)とした。上記の配合で作製した試験体の材齢1、3、7日に対するコンクリート強度の関係を表-4に示す。

4.2. 試験方法

(1) 送り機構のパラメータ設定

送り機構のパラメータを設定するため、モータの基準トルク $T=0.1\text{ (Nm)}$ に対する設定割合 Tr を10~20(%)変化させ、穿孔時のトルクを計測した。各試験体に対し、穿孔時のトルクが設定割合と常に等しく、負荷力 F が設定トルク T_0 以上となる条件を選定した。また、モータの回転数 N は実際の現場作業に適用できる実用的な値

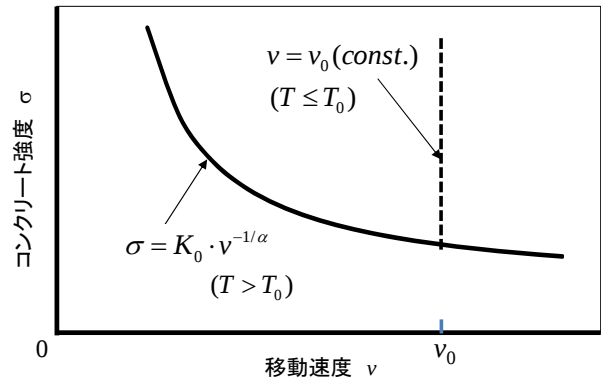


図-3 コンクリート強度と穿孔速度の関係図

表-2 コンクリート試験体の基本配合

単位量 (%)		単位量 (kg/m³)					
W/C	S/a	W	C	S		G	Ad
				S1	S2		
37.8	39.9	170	450	404	269	1024	4.5
備考							
C: 普通ポルトランドセメント(3.16g/cm³)、S1: 富士川産川砂(2.64g/cm³)、S2: 富士宮産山砂(2.62g/cm³)、G: 富士川産川砂利(2.66g/cm³)、Ad: AE減水剤							

表-3 加水したコンクリート試験体の配合

単位量 (%)		単位量 (kg/m³)							
W/C	S/a	W+	加水後	W	C	S		G	Ad
		加水	のW/C			S1	S2		
37.8	39.9	182	40.4	170	450	404	269	1024	4.5
		193	42.9	170	450	404	269	1024	4.5
		205	45.5	170	450	404	269	1024	4.5
		240	53.2	170	450	404	269	1024	4.5
									加水
									11.6
									23.2
									34.8
									69.6

表-4 材齢に対するコンクリート強度の関係

	試験体 NO.	単位量 (%)	コンクリート強度(N/m²)		
		W/C	材齢1日	材齢3日	材齢7日
基本配合	1	37.8	4.5	29.9	42.0
	2	40.4	8.1	32.4	39.7
	3	42.9	7.0	29.0	40.1
	4	45.5	5.8	27.4	37.3
	5	53.2	3.6	18.3	30.6

$N = 500\text{ (1/min)}$ を採用した。

(2) 計測装置と記録

(1) で得られたトルクの設定値を基に、各試験体を約150 (mm)の深さまで穿孔し、穿孔に掛る経緯と時間を記録した。穿孔深さは、穿孔機のスライドブロックに取り付けたレーザ変位計で計測し、合わせてモータのトルクを時系列にメモリーハイコードに記録した。

(3) 穿孔実験

各試験体に対して穿孔実験を5回j行い、実験による再現性が得られるように工夫した。写真-1に穿孔実験の様子を示す。実験開始に合わせて穿孔状態をモニターで観察し、穿孔速度の大きな変化や異常状況を確認した。穿

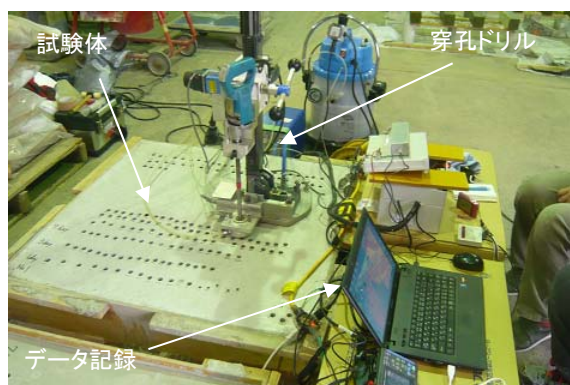


写真-1 穿孔実験およびデータ計測状況

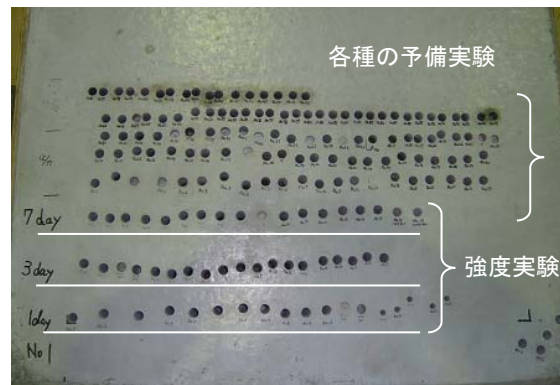


写真-2 実験で穿孔した試験体の状況

孔間隔は予備実験によって 10 (mm)間隔でも実験データには影響がないことを確認したが、粗骨材の最大寸法(25 (mm))を考慮して約 20 (mm)の間隔を開けて実施した。

なお、ダイヤモンドビットは、最初に約 400 (mm)の予備穿孔を行い、ダイヤモンドの目出しを確認してから、穿孔実験を開始した。ビットの限界穿孔長は 8~10 (m)であることを実験で確認しており、本実験では安定な性能が確保できる穿孔長 5 (m)を限界として、ビットの交換を実施した。実験に伴ってビットのダイヤモンド砥粒の消耗が生じたが、実験毎に穿孔長を記録・管理することで、穿孔性能が同じになるように考慮した。写真-2に実験で穿孔した試験体の結果を示す。試験体全範囲を使用することで、穿孔部位の違いによる影響も考慮した。

5. 実験結果とその考察

5.1 コンクリート強度と穿孔速度の測定

作製した試験体に対して、穿孔実験を行った測定結果を表-5に示す。また実際の穿孔深さと穿孔時間との関係を示すデータを抜粋して図-4に示す。なお、送り機

表-5 実験による圧縮強度と穿孔速度の測定結果

	試験体 NO.	圧縮強度 (N/mm ²)	穿孔速度 (mm/s)					
			①	②	③	④	⑤	平均
材齢1日	1	4.5	0.81	1.27	1.21	0.91	1.22	1.09
	2	8.1	0.79	1.41	1.19	1.02	1.21	1.12
	3	7.0	0.84	0.98	1.17	1.01	1.17	1.03
	4	5.8	0.83	1.37	1.07	1.05	1.23	1.11
	5	3.6	0.87	1.18	1.13	1.11	1.07	1.07
材齢3日	1	29.9	0.41	0.66	0.70	0.88	0.72	0.68
	2	32.4	0.33	0.51	0.40	0.77	0.80	0.69
	3	29.0	0.60	0.67	0.57	0.63	0.68	0.63
	4	27.4	0.56	0.72	0.73	0.70	0.69	0.68
	5	18.3	0.55	0.73	0.54	0.48	0.55	0.57
材齢7日	1	42.0	0.53	0.41	0.79	0.34	0.72	0.56
	2	39.7	0.60	0.46	0.77	0.66	0.74	0.65
	3	40.1	0.65	0.69	0.72	0.70	0.67	0.69
	4	37.3	0.69	0.74	0.69	0.66	0.72	0.70
	5	30.6	0.60	0.62	0.63	0.50	0.63	0.60

構のトルク設定割合は 10 (%)にし、ドリルへの負荷が設定トルクを超える値とした。すなわち、コンクリート強度に応じて、送り速度が変化する範囲の値を用いた。

図-4より、穿孔深さは穿孔時間に比例して増加する値となり、コンクリート強度が同じであれば、ほぼ同じ穿孔状態となることが分かる。またコンクリート強度が高いほど、穿孔速度は低下する傾向が見られる。穿孔

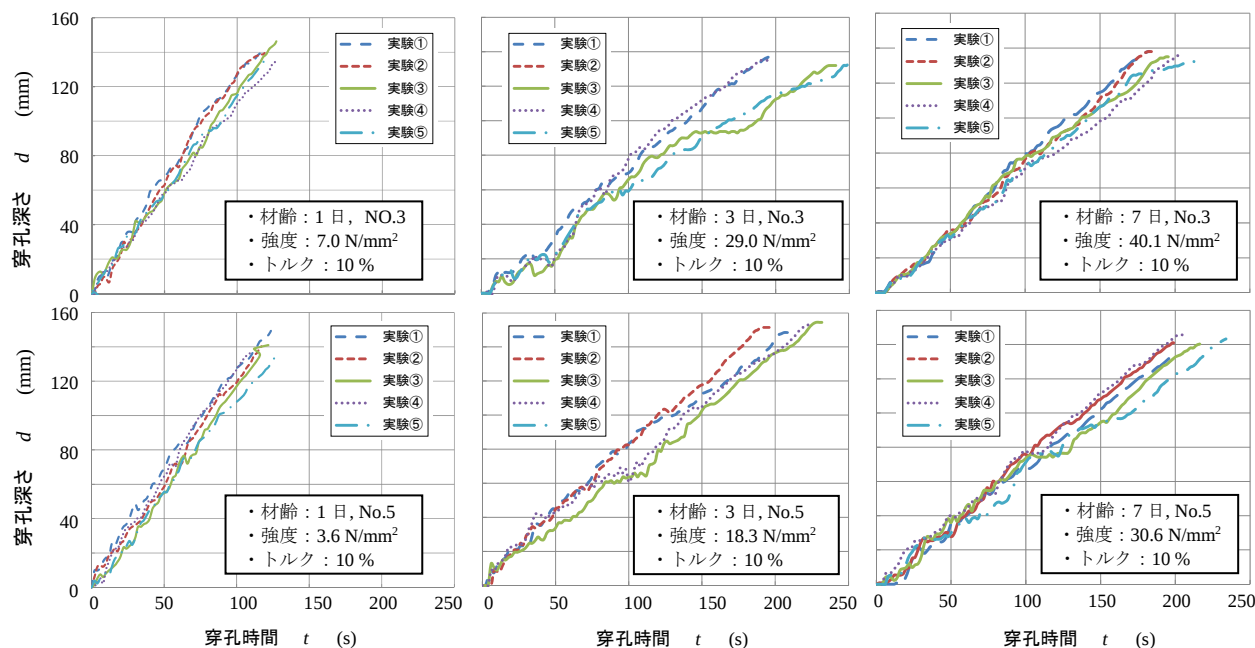


図-4 実験による穿孔深さと経過時間との関係

速度(直線の傾き)の変化は粗骨材等の影響と考えられ、粗骨材の種類によっても穿孔時間が異なるものと推定される。これは粗骨材を穿孔する部位を過ぎれば、再び穿孔速度が元の傾きになることから確認できる。そこで、明らかに粗骨材の影響による時間のロスが見られた実験では、ロス時間を全体の穿孔時間から差引き、差引いた時間と穿孔深さの関係から各穿孔速度を決定した。

穿孔実験における各穿孔速度の平均と試験体の圧縮強度の関係を図-5に示す。 σ は v に対して右下がりの分布となり、冪数関数を用いて最少二乗近似した σ の式 $\sigma = 8.1 \cdot v^{-2.8}$ は、相関係数($r = 0.86$)も1に近く、各データの相関が高いことが分かる。このことから、穿孔速度を計測して近似式に代入することで、コンクリート強度を推定することが可能となった。また、式(4)の中では、穿孔機に作用する負荷力 F が、コンクリート強度 σ の α 乗に比例する仮定をしたが、実験結果でも同様な関係が見られた。今後、各種の定数値を求めることで、精度の高い推定式が得られるものと考えられる。

5.2 トルクの設定割合

ドリルの送り機構に与えるトルクの設定割合 T_r を変えて、穿孔速度の測定を行った。その結果を表-6に示す。また、穿孔速度とコンクリート強度の関係を図-6に示す。 $T_r = 10$ (%)では、穿孔時のトルク表示は10 (%)を示し、 σ は v に対して右下がりの分布となった。一方、 $T_r = 15, 20$ (%)では、穿孔時のトルク値は、いずれも15 (%)以下となり、穿孔負荷に対して十分に余裕があることが分かる。この場合、穿孔速度はコンクリート強度に関わらず、ほぼ等しい値となっている。 T_r が15 (%)および20 (%)では与えたトルク値が異なるため、穿孔速度も異なる値になると考えられる。

5.3 既設コンクリート部材の強度推定

上記で得られたコンクリート強度と穿孔速度との関係が、既設コンクリート試験体(材齢1年程度)でも適用できるかを穿孔実験によって検証した。既設の試験体には、低強度試験体(強度:21.3 (N/mm²))と高強度試験体(強度:57.6 (N/mm²))を使用し、下向き方向と上向き方向の穿孔実験を行うことで、重力方向の違いや自重の影響なども検討した。

表-7に実験で得られた既設試験体の圧縮強度と穿孔速度の関係を示す。また、写真-3に下向き穿孔実験の様子を、図-7(a)に上向き穿孔実験における荷重とトルクの間接関係を、図-7(b)に上向き穿孔実験の様子を示す。なお、上向き穿孔ではトルク設定割合 T_r に自重を考慮した値を用いる必要があるため、 T_r を変えることで最適な値を確認した。

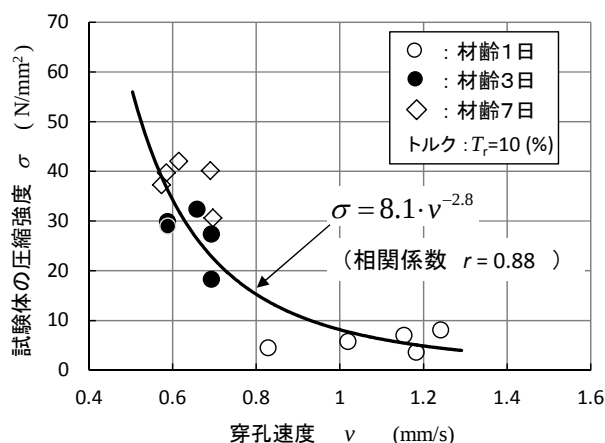


図-5 穿孔速度とコンクリート強度の関係

表-6 設定トルクに対する穿孔速度の測定結果

	試験体 NO.	圧縮強度 (N/mm ²)	トルクモータの設定割合 T_r (%)		
			10	15	20
材齢1日	1	4.5	0.83		
	2	8.1	1.24		
	3	7.0	1.15		
	4	5.8	1.02		
	5	3.6	1.18		
材齢3日	1	29.9	0.59	1.17	1.26
	2	32.4	0.66	1.05	1.25
	3	29.0	0.59	1.19	1.34
	4	27.4	0.69	1.22	1.21
	5	18.3	0.69	1.22	1.45
材齢7日	1	42.0	0.61	1.15	1.64
	2	39.7	0.58	1.22	1.44
	3	40.1	0.69	1.21	1.33
	4	37.3	0.57	1.19	1.41
	5	30.6	0.70	1.15	1.06

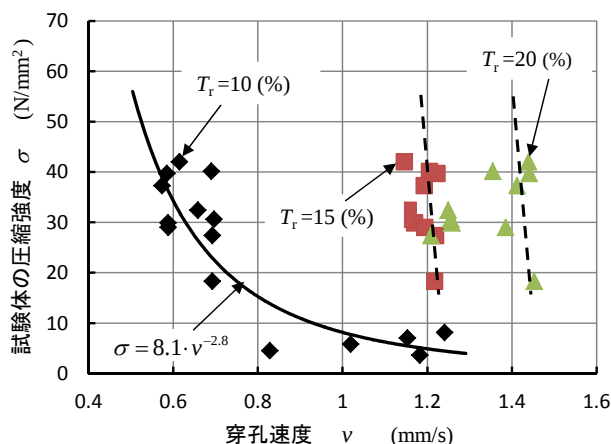


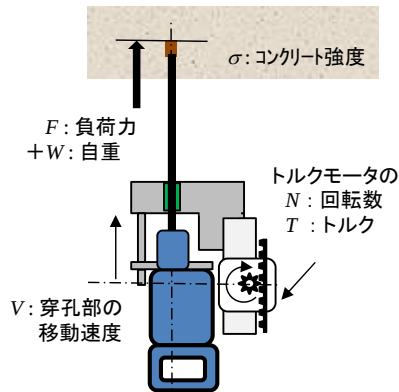
図-6 設定トルクによる圧縮強度と穿孔速度の関係

表-7 既設試験体の圧縮強度と穿孔速度の測定結果

試験体 NO.	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	穿孔速度 (mm/s)					
		Tr=10 (%)		Tr=15 (%)		Tr=20 (%)	
		下向	上向	下向	上向	下向	上向
低強度	21.6	0.90	1.38	1.22	0.57	0.84	1.35
		0.81	1.39	1.26	0.63	0.92	1.42
		0.64	1.38	1.21	0.76	0.84	1.44
		0.79	1.44	0.67	0.89		1.50
		0.63	1.52	0.61	0.85		0.96
	平均	0.71	1.42	1.00	0.74	0.87	1.33
高強度	57.6	0.54	1.01	1.08	0.38	0.88	0.93
		0.61	0.97	0.93	0.45	0.98	0.88
		0.68	0.91	1.14	0.53		0.88
		0.63	0.94	1.10	0.63		0.80
		0.58	0.86	1.13	0.50		0.97
	平均	0.64	0.94	1.07	0.54	0.93	0.89



写真-3 既設試験体における下向き穿孔実験の様子



(a) 上向き穿孔における荷重とトルク



(b) 上向き穿孔実験の状況

図-7 既設試験体を用いた上向き穿孔実験

表-8 に示した穿孔速度の平均とコンクリート強度の関係を図-8 に示す。参考として本実験で得られた近似式を記載した。下向き穿孔実験 ($T_r = 10\%$) による穿孔速度は近似式に沿う値となり、近似式が既設のコンクリートでも対応することが分かる。また、上向き穿孔実験では、自重を考慮して $T_r = 20\%$ とすることで、近似式とほぼ等しくなる。上向き穿孔では下向き穿孔に対して T_r を $10(\%)$ 増加することで、コンクリート強度推定のための設定ができるものと考えられる。その他のデータは、穿孔時のトルクが設定割合 T_r より小さいデータであり、近似式とは大きく異なることが分かる。本穿孔装置を用いて強度推定を行う場合には、下向きでは T_r を $10(\%)$ 以下、上向きでは $20(\%)$ に設定すればよいことが確認できた。

6. まとめ

本研究では小口径深穴穿孔機に対して、穿孔部の送り速度をトルクモータで制御し、その穿孔速度の変化からコンクリート強度を推定する方法を提案した。トルクモータを用いた穿孔速度と負荷力、回転数の関係から、コンクリート強度を推定する簡易式を誘導した。

穿孔実験では、強度の異なる試験体を用いた穿孔実験を行い、 σ は v に対して右下がりの分布とることを確認した。また冪関数を用いて近似した σ の式は、相関係数 ($r = 0.86$) も 1 に近く、各データの相関が高いことが分かる。このことから、穿孔速度を計測して近似式に代入することで、コンクリート強度を推定することが可能となった。この近似式は同じトルク設定の範囲（下向きでは $10(\%)$ 以下、上向きでは $20(\%)$ では、既設のコンクリート部材にも適用できることを確認した。

今後は材質や強度の異なるコンクリートに対して本推定法を適用し、精度の向上と穿孔機の改良を進めて行く。

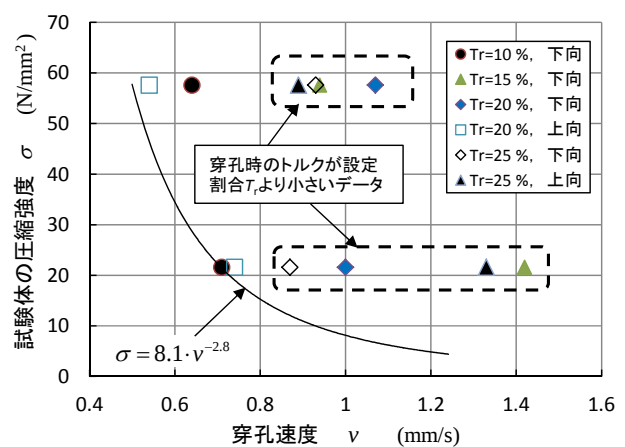


図-8 既設試験体の圧縮強度と穿孔速度の関係

参考文献

- 1) 藤倉裕介, 青景平昌: 補修・補強工事におけるコンクリート穿孔面の損傷程度が打ち継ぎ後の付着強度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1709-1715, 2006.
- 2) 岩城圭介, 加藤淳司, 平間昭信, 塩谷智基: 微視的断面観察による酸劣化したコンクリートの微細構造の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.999-1005, 2004
- 3) 長谷川哲也, 畑中重光, 三島直生, 谷川泰雄: 削孔式表層強度試験器によるセメント硬化体の強度評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1877-1882, 2006
- 4) 湯浅 昇: コンクリート構造物の非破壊試験・微破壊試験の研究と実用化, 建材試験情報, Vol.49, pp.2-8, 2013.4
- 5) 井上文宏: コンクリート強度の推定方法, コンクリート強度の推定システム, 及び穿孔装置, 公開特許公報, 特開2008-128831, 2008.