

論文 強度が異なるモルタル長尺部材に対する小口径深穴穿孔機によるモルタル強度の推定

井上 文宏*1・佐藤 智*2・渡邊 晋也*3・根間 栄順*4

要旨: 本研究では橋梁やダムなどの長尺コンクリート部材に対し、開発した長尺用の小口径穿孔機とモルタル強度の推定法を検証するため、強度の異なるモルタル試験を連続結合した長尺部材を用いて、強度と部材の穿孔速度との関係を調査した。試験体の浅部と長尺部の穿孔速度は、同じモルタルでもその強度は異なり、穿孔が深いほどその穿孔速度比は低下する。このことから、穿孔機を用いて長尺部材の強度を推定する際には、基準となる穿孔速度に穿孔長に対応した補正值（穿孔速度比）を適用し、さらに提案した強度推定式を用いることで、簡易にモルタル強度を推定することが可能となった。

キーワード: 小口径深穴穿孔機, モルタル強度推定, 自動送り制御, 長尺部材

1. はじめに

各種の橋梁, トンネル, ダムなどの土木インフラや原子力施設などでは, 大きな荷重を支えるために構造体のコンクリート厚さが数メートルに達する場合も多くある。戦後の高度成長時代に建設されたコンクリート構造物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。特にコンクリート厚さが深い場合には, 表面だけの経年劣化や塩害, 中性化等の調査だけでは内部の状態は判定し難く, 深部でのコンクリート状態の検査, 観察が必要になっている。

コンクリートの深部を計測する方法には,

- ・打診計測
- ・超音波や電磁波による特徴抽出
- ・X線透過撮影
- ・コアボーリングによる内部観察, 強度計測^{1), 2)}

が実施されている。打診計測や超音波, 電磁波では, 深部での特徴を捉えることは難しいこと, X線透過法では1 m程度の厚さが限界であるようである。コアボーリングは直接内部の状況を把握できるが, 装置が大型化して多くの時間や経費も掛かるため, 実際の現場では簡易に計測することは難しい状況と考えられる。

これまで著者らは, 小口径深穴穿孔機を利用して, 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^{3), 4)}。空気圧あるいはトルクモータでドリルの穿孔部を制御することで, コンクリートの穿孔速度は一定となり, また穿孔速度が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。開発した機械では, 1回の計測では最大穿孔深さ約200 mmが可能であ

るが, 50~100 mm程度の穿孔でもその勾配を計算できるため, 比較的浅い穿孔でもコンクリート強度を推定できる。したがって, 橋梁や港湾, ダムなど, 実現場での簡易な計測手法としては適していると考えられる。

一方, 開発した穿孔機は, 穿孔軸を連続結合することで5,000 mm以上の穿孔が可能であり, その直線性(5400 mm穿孔時のズレ率)は0.37%と非常に高く, 優れた穿孔精度を維持できることが報告されている⁵⁾。したがって, この穿孔機を用いて穿孔速度を計測し, 併せて強度推定法を適用することで, 長尺コンクリートにおける各所の強度を容易に推定することが期待できる。

そこで, 本研究では長尺部材に対し, 開発した穿孔機と強度推定法の適用性を検証するため, まずは強度の異なるモルタル試験体を連続結合した長尺部材を作製し, 連続的に長軸方向に穿孔しながら各部の穿孔速度を計測し, モルタルの強度変化を推定した。今回は基礎的実験として敢えて試験体に強度の不連続面を作り, 穿孔速度の変化やその特徴を計測した。実際の内部劣化を生じた長尺部材では強度変化は連続的に起こるもの予想されるが, こうした違いは今後の課題としたい。

本報告では, 長尺部材の穿孔を行うための穿孔機の概要と穿孔方法, 穿孔実験に伴うモルタル強度の推定結果および得られた成果と考察について報告する。

2. 実験装置および試験体の概要

2.1 実験装置

実験に用いた穿孔装置全体の概略を図-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真空ポンプと各種の付

*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) せん

*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

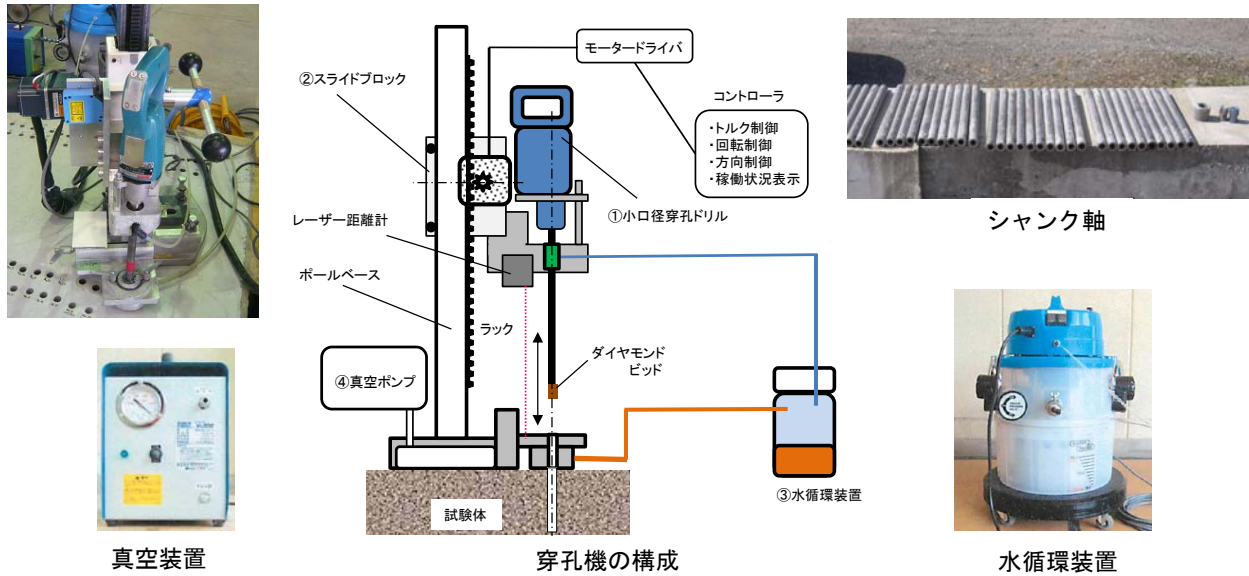


図-1 実験に使用した穿孔機の概要

属部品から構成される。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、高速回転でモルタル面を研磨しながら、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。

2.2 長尺部材の穿孔手順

穿孔機のシャンク軸は長さ 200 mm で端部にネジが切られており、連続接続することが可能である。穿孔手順の概要を図-2に示す。

- ①：最初にダイヤモンドビットとシャンク軸を接続し、穿孔位置に合わせて穿孔機を固定する。
- ②：ドリル回転させ、送り装置を始動させて自動送りで穴の穿孔を行う。同時にレーザー変位計で穿孔深さを確認しながら、200 mm に達した時点で停止させる。
- ③：シャンク軸とドリル本体を切離して、送り装置を手動で最初の位置まで引き戻す。次の軸を軸とドリル本体にネジ止めし、送り装置を再度押込んで、次の始点位置を確定する。
- ④：②と同様に自動切削を行い、上記の手順を繰り返すことで、最長深さ 3200 mm までの穿孔を行う。

今回の実験では 18 本の軸を継ぎ足すことで長尺穿孔を実施した。

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: 8,000 rpm、・電流: 5.2 A ・出力: 500 W、・重量: 1.6 kg (2) シャンク軸 ・長さ: 200 mm、・軸径: 15.5 mm ・材質: ステンレス製 (3) ダイヤモンドビット ・長さ: 25 mm、軸径: 15.5 mm
②スライドブロック	(1) ポール ・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±150 mm、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: 15L
④真空ポンプ	・真空圧: 750 mmAq、流量: 1.5 m ³ /min ・出力: 1.5 kW

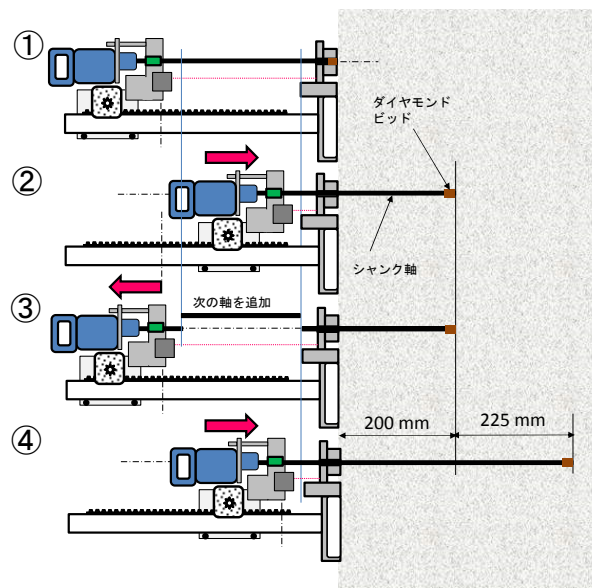


図-2 穿孔機を用いた長尺部材の穿孔手順



写真-1 強度が異なる長尺部材の外観



写真-2 長尺部材の穿孔断面

3. 実験概要

3.1 試験体の製作

本研究で用いたモルタルの基本配合を表-2に示す。試験体全体の寸法は高さ 1000 mm×幅 1000 mm×長さ 3500 mm とし、水セメント比を変えて 500 mm ごとに 6 種類の強度が異なる試験体を製作した。また強度が高い試験体 No.6 のみ 1000 mm とした。試験は材齢 10 年であり、試験直前にコア採取を行い、圧縮強度試験を実施した。その結果を表-3に示す。なお試験体 NO.1 は強度不足のため強度試験はできなかった。

3.2. 試験方法

(1) 送り装置のパラメータ設定

送り装置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 T_r を 20 % から徐々に低下させて、穿孔時のトルク割合 T_d を計測した。ここで、 $T_d < T_r$ であれば、設定トルクが負荷トルクに勝るため、ドリルの穿孔速度は一定となる。しかし、 T_r が 15 % 以下の時には、いずれの試験体に対し $T_d > T_r$ となり、各試験体の強度に応じて穿孔速度が変化することを確認した。そこで、本実験ではトルク設定割合は $T_r = 15\%$ 、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として $N = 500\text{ rpm}$ 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

表-2 モルタルの基本配合

試験体番号	呼び強度	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)			28日現場養生 (N/mm ²)
			W	C	S	
No.1	1	319	310	98	1708	0.54
No.2	2.5	225.1	300	133	1704	1.06
No.3	10	108.5	275	253	1670	7.55
No.4	20	89.5	270	302	1643	13.4
No.5	30	66.2	265	400	1574	29.2
No.6	60	43.6	265	608	1401	54.1

C: 普通ポルトランドセメント(3.16g/cm³)、S: 川砂(2.63g/cm³)、空気量1.0%

表-3 10年経過後のモルタルコアの圧縮強度試験結果

試験体番号	高さ mm	直径 mm	重さ g	最大荷重 N	圧縮強度 N/m ²	平均圧縮強度 N/m ²
No1	1	—	—	—	—	-
	2	—	—	—	—	
	3	—	—	—	—	
No2	1	100.7	49.3	403.2	16.5	8.6
	2	100.5	49.3	402.9	15.2	8.0
	3	100.2	49.3	395.5	15.1	7.9
No3	1	100	49.3	418	63	33.0
	2	100.2	49.3	420.2	60.5	31.7
	3	100	49.2	421	62	32.6
No4	1	100	49.3	423.6	85.5	44.8
	2	100.5	49.3	427.7	87	45.6
	3	99.9	49.3	425.4	80	41.9
No5	1	98.4	49.3	424.2	136.5	71.5
	2	98.3	49.4	425	132	68.9
	3	97.5	49.3	417	105	55.0
No6	1	100	49.4	429.9	170.5	89.0
	2	99.6	49.3	426.3	161.5	84.6
	3	100.1	49.3	430.3	156	81.7

150 mm の深さまで穿孔し、穿孔に関わる状況（シャンク軸の使用回数、切削時の騒音変化など）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距離計で計測し、合わせてモータのトルクを時系列にメモリーハイコーダに記録した。

3.3. 穿孔実験

(1) 強度推定のための基礎データの取得方法

穿孔機による強度推定は、使用する試験体の状況によって異なるため、写真-1で示した強度の異なるモルタル試験体を連続結合した試験体（以下、長尺部材と呼ぶ）に対して穿孔実験を行い、穿孔速度と表-3に示した圧縮強度との関係を調査した。穿孔速度は穿孔深さをレーザ変位計で計測・記録し、穿孔深さが約 150 mm に達するまでの時間を基に算出した。各試験体に対して側面（水平方向）および上部（垂直方向）から穿孔を 3 回実施し、

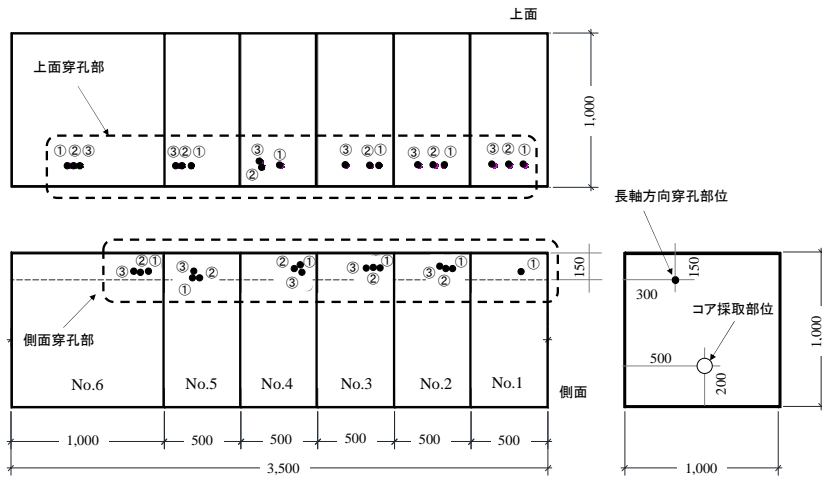


図-3 試験体の穿孔部位、位置関係



写真-3 穿孔機を用いた長尺部材の穿孔実験

実験による再現性が得られるように工夫した。図-3に穿孔部位の位置を、写真-3に穿孔実験の様子を示す。

(2) 長尺部材の穿孔実験

長尺部材の長軸方向に、穿孔機を設置して約 3600 mm までの穿孔実験を実施した。穿孔深さの計測はレーザ変位計を使用し、穿孔機の送り深さ 250 mm を調整しながら、約 150 mm の穿孔距離を 1 回の計測として行い、全部で 24 回の穿孔を実施した。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⁵⁾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 を限界とした。このため、約 3600 mm の穿孔を 1 回で実施することが可能である。写真-4に実験状況を示す。

4. 実験結果と考察

4.1 モルタル試験体の穿孔と強度推定

強度が異なる各モルタル試験体に対して、穿孔実験を

実施した。図-4に穿孔機のトルク設定割合が $T_r=15\%$ における穿孔時間に対する穿孔深さの関係を示す。穿孔方向は穿孔機の自重の影響も考慮して、垂直および水平方向から穿孔を行った。

穿孔深さは時間に対して直線的に増加し、ほぼ比例関係にあることが分かり、強度が高いほど直線の傾き（穿孔速度）は低下し、穿孔し難い傾向にあることも分かる。モルタル強度が低い No.1~3 では、穿孔方向の影響は少ないが、強度が高い No.4~6 では同じモルタル強度でも穿孔部位や方向によっては、穿孔速度は一定とはならず、速度が振ら付く様子も見られるが、その部位を除けば再び同じ勾配で変化する直線となっている。おそらく、強度が高い試験体の内部では、局所的に強度の強弱があると思われ、それが穿孔速度に影響すると予想される。今後実験データを蓄積することで、穿孔方向の影響や穿孔のふら付きの原因を検討してゆく予定である。本実験では試験体毎の穿孔速度（穿孔深さ約 150 mm を穿孔時間で割った値）を基に平均穿孔速度を算出して、圧縮強度と

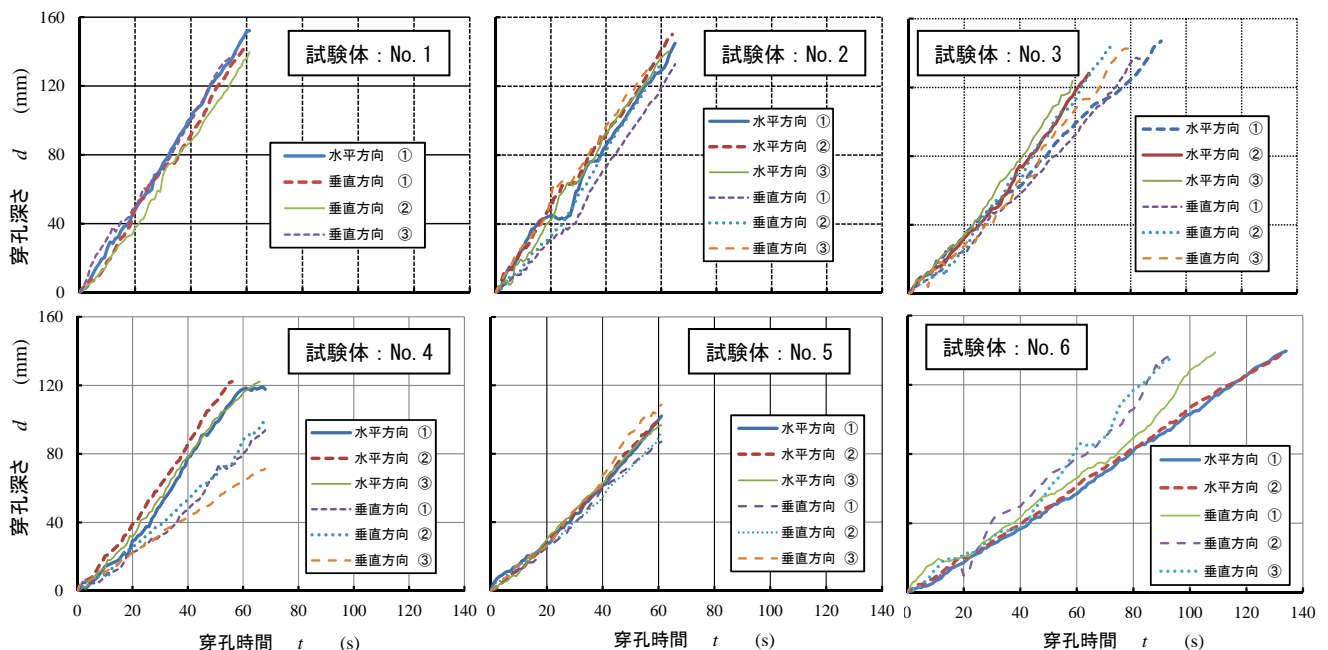


図-4 強度が異なる試験体の穿孔時間と深さの関係

表-4 各試験体の穿孔速度と圧縮強度の比較

試験体 No.	圧縮強度 N/mm ²	実験番号	水平方向穿孔		垂直方向穿孔	
			穿孔速度 mm/s	平均穿孔速度 mm/s	穿孔速度 mm/s	平均穿孔速度 mm/s
1	-	①	2.4	2.39	2.49	2.49
		②	2.27			
		③	2.49			
2	8.2	①	2.04	2.21	2.22	2.27
		②	2.23			
		③	2.35			
3	32.4	①	1.68	1.84	1.69	1.99
		②	1.98			
		③	1.85			
4	44.1	①	1.66	1.61	1.87	1.90
		②	1.65			
		③	1.51			
5	70.1	①	1.53	1.49	1.67	1.64
		②	1.52			
		③	1.43			
6	85	①	1.24	1.39	1.23	1.24
		②	1.52			
		③	1.4			



写真-4 穿孔機を用いた長尺部材の穿孔実験

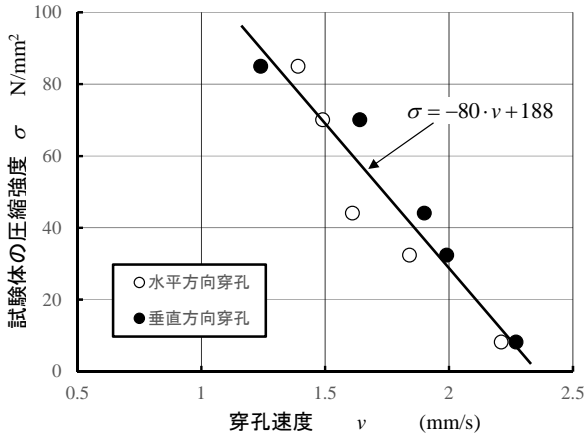


図-5 試験体の圧縮強度と穿孔速度の関係

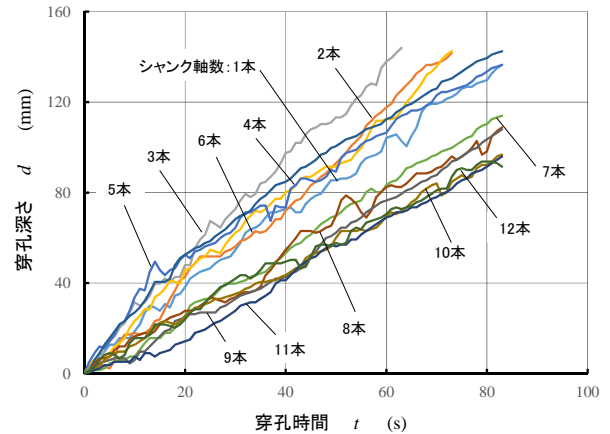
の関係を表-4に整理した。

図-5に平均穿孔速度と圧縮強度の関係を示す。圧縮強度は穿孔速度に対して、直線的に減衰する傾向があることがわかる。強度を変えたコンクリート試験体を用いた前回の実験では、コンクリート強度は穿孔速度のべき乗に逆比例 ($\sigma = 8.1 \cdot v^{-2.8}$) する結果が得られている⁴⁾。今回の川砂を用いたモルタル試験体では粗骨材の影響が少ないため、簡易な1次式 ($\sigma = -80 \cdot v + 188$) で表現できるものと予想される。したがって、穿孔速度が分かればモルタルの強度を推定できることになる。

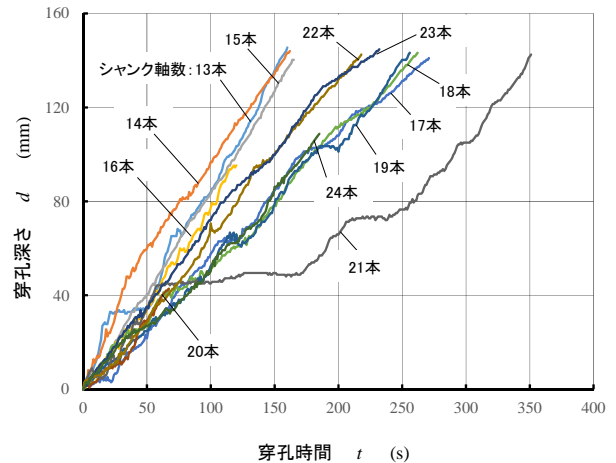
4.2 長尺部材の強度推定

写真-1に示した長尺部材に対して、その強度が低い側から長軸方向に連続穿孔を実施した。実験の様子を写真-4に示す。既に強度試験用にコア採取された部位から離れた部位で穿孔を行い、周囲の影響を受けないように配慮した。

穿孔機のシャンク軸を継ぎ足しながら穿孔を行い、結合した軸数をパラメータとした穿孔深さと時間の関係を図-6および表-5に示す。ほぼ4回分の穿孔で強度が異なる次の試験体に達している。穿孔速度のバラツキは



(1) 試験体 No. 1, 2, 3 の穿孔時

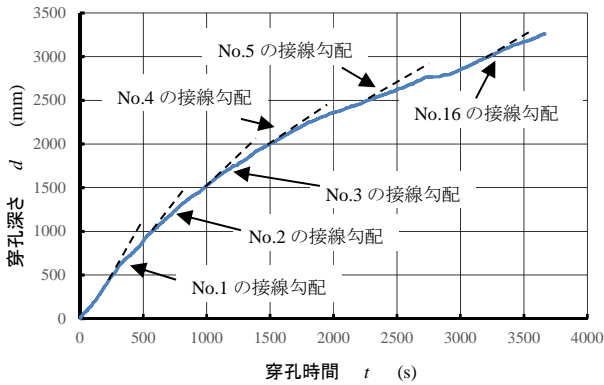


(2) 試験体 No. 4, 5, 6 の穿孔時

図-6 長尺部材の穿孔時間(各回毎)と深さの関係

あるもののほぼ試験体が変わる毎に、穿孔速度は徐々に低下することが分かる。また図-6で示した穿孔深さを時系列に沿って結合した穿孔深さと時間の関係を図-7に示す。全体的に滑らかに変化する曲線となるが、穿孔部位が試験体の境界に達する点で穿孔速度(接線の傾き)が変化する様子が見られる。このことから、長軸方向に沿って穿孔速度を計測することで、モルタルの強度変化を捉えられることが可能と思われる。

表-5に長尺部材の穿孔時における穿孔速度と平均



図—7 長尺部材の穿孔時間(全時間)と深さの関係

穿孔速度を示す。穿孔深さがあまり長くない、あるいは試験体の強度が低い場合には、穿孔速度の変化は大きいですが、穿孔深さが長くなり、強度が増すと穿孔速度の変化は小さくなる。これは穿孔軸が長くなり、軸全体の慣性モーメントが増して、モータに作用する負荷が加わるため、穿孔力が低下すると考えられる。本実験ではトルクを一定としているため、先端ビットに作用する回転力はより低下すると見込まれる。

表—6に試験体の表面で穿孔した表層穿孔速度 V_s (表—4の結果より) と長軸方向に穿孔した長軸方向穿孔速度 V_h (表—5の結果より) の比 V_s / V_h を試験毎に算出した結果を示す。モルタル強度が同じ試験体であるにも関わらず、穿孔長が長くなるほど穿孔速度比は低下することが分かる。したがって、穿孔機を用いて長尺部材の強度を推定する際には、実際の穿孔速度に対し、穿孔長に対応した補正值(穿孔速度比 V_s / V_h) を適用し、さらに図—5で示した σ と ν の関係式を用いることで、簡易にモルタル強度を推定することが可能となる。

ただし、本実験の結果は、川砂を用いた長尺のモルタル試験体に対して得られた強度推定法であり、今後実験データを蓄積することで推定法の確立を目指すと共に、強度の異なる一般のコンクリート部材の強度推定法にも適用して行きたい。

4. おわりに

本研究ではモルタルの長尺部材に対し、開発した穿孔機と強度推定法の適用性を検証するため、強度の異なるモルタル試験体を連続結合した長尺部材を作製し、長軸方向に連続穿孔しながら各部の穿孔速度を計測した。この結果、モルタルの試験体では、穿孔速度と圧縮強度の間には1次式で表現できる関係が確認された。

一方、長尺部材に対し、同じモルタル試験体でも表面付近と長軸方向に穿孔した場合の穿孔速度は異なり、穿孔が深いほど穿孔速度比 V_s / V_h が低下する。このことから、穿孔機を用いて長尺部材の強度推定を行う際には、

表—5 各試験体に対する穿孔速度と平均穿孔速度

試験体 No.	シャック軸数(本)	穿孔速度 mm/s	平均穿孔速度 mm/s	試験体 NO.	計測 No.	穿孔速度 mm/s	平均穿孔速度 mm/s
1	1	1.64	1.96	4	13	0.91	0.86
	2	1.94			14	0.88	
	3	2.28			15	0.85	
	4	1.96			16	0.82	
2	5	1.61	1.47	5	17	0.55	0.60
	6	1.41			18	0.62	
	7	1.52			19	0.58	
	8	1.36			20	0.63	
3	9	1.22	1.11	6	21	0.57	0.59
	10	1.07			22	0.62	
	11	1.14			23	0.62	
	12	1.02			24	0.54	

表—6 長尺部材穿孔時の穿孔速度比

試験体 No.	穿孔長範囲 mm	表面穿孔速度 V_s m/s	長軸方向穿孔速度 V_h m/s	穿孔速度比: V_s / V_h
1	0-500	2.39	1.96	0.82
2	500-1000	2.21	1.47	0.67
3	1000-1500	1.84	1.11	0.61
4	1500-2000	1.61	0.86	0.53
5	2000-2500	1.49	0.6	0.41
6	2500-3200	1.29	0.59	0.42

基準となる穿孔速度に穿孔長に対応した補正值(穿孔速度比 V_s / V_h) を適用し、さらに σ と ν の関係式を用いることで、簡易にモルタル強度を推定することが可能であることを確認した。

ただし、本実験の結果は、川砂を用いた長尺のモルタル試験体に対して得られた強度推定法であるため、今後は材質や強度の異なる一般のコンクリート部材にも本推定法を適用し、精度向上と穿孔機の改良を進めて行く。

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) 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.
- 4) 井上文宏, 佐藤智, 渡邊晋也, 根間栄順: 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法, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2056-2061, 2014.
- 5) 横尾彰彦, 佐藤智, 松尾久幸, 中藪朋巳: 切削式小口径穿孔装置による長尺穿孔時の精度について, 土木学会第56回年次学術講演会, V-384, pp.767-768, 2010.