論文 小径ドリル型削孔試験機を用いたコンクリートの圧縮強度推定

朴 相俊*1・藤森 繁*2・青木 孝義*3・畑中 重光*4

要旨:筆者らは、これまでに煉瓦・石材・セメントペーストなどの比較的均質な材料に対し、小径ドリル型 削孔試験機を用いて定回転数、定圧力で被測定体を削孔し、その削孔速度から被測定体の強度を推定してき た。また、モルタルやコンクリートなどの比較的不均質な複合材料の強度推定を簡易に行うことを目的に、 表層近傍の骨材を比較的容易に避け、削孔に適した箇所を選定できる方法を考案した。本論文では、モルタ ル及びコンクリートに対して、本試験機を用いた削孔試験で得られた削孔速度との力学的性状の関係につい て検討し、小径ドリル型削孔試験機によるコンクリートの強度推定の可能性を示した。 キーワード:強度推定、非破壊試験、微破壊試験、小径ドリル型削孔試験機、コンクリート

1. はじめに

コンクリートの強度推定方法に関しては今まで数多 くの研究がなされ、その成果は各方面において実用化を 目指して来たが、構造体に打設されたコンクリートにつ いては現場にて簡易な方法で強度を確実に推定できるま でには至ってない。構造物としてのコンクリートはセメ ントペースト、粗骨材、空隙、鉄筋といった多相複合材 料であるとともに、コンクリートの養生や経年劣化そし て中性化などの外力も強度に影響を及ぼす要因となり得 る。

一方で、コンクリート構造体の物理的性能評価を現場 で行う場合、既存の非破壊試験方法は、コンクリートの 中でも不安定要素が多い表層で測定を行っているため測 定値に対する信頼性が低いこと、またコア抜きを行い室 内に運び込み圧縮強度を測定する方法では被測定体のダ メージが大きく、適用先が限られるなどの問題がある。

したがって,現代においては構造物に出来る限り損傷を 与えないか,もしくはコンクリート表面のみの小さい損 傷に留めておくことができる強度推定方法および機器の 開発が求められている。

そこで筆者らは、小型で携帯が可能な試験機とその試 験方法の開発を行ってきた^{1),2)}。この小径ドリル型削孔 試験機は、直径 2.8mmの削孔用ダイヤモンドビット(以 下ビットと言う)を用いて10mm内部まで削孔するもの である。したがって、被測定体への損傷が極めて小さく、 表層から内部の測定ができる特徴がある。これまでは煉 瓦・石材・セメントペーストなどの比較的均質な材料に 対し、その削孔速度から被測定体の強度を推定してきた。 本報では、それを発展すべく小径ドリル型削孔試験機を モルタル、コンクリートなどの比較的不均質な複合材料 の強度推定に適用することを目的に,試験機の改良と粗 骨材を避けて削孔する方法を考案した。また,コンクリ ートの圧縮強度推定は,JASS 5³⁾で水セメント比が密接 に関係していると述べられているように,硬化したコン クリート内ではセメントペースト分が強度発現を主に受 け持っている事を基本としている。そのため本試験方法 では,被測定体から粗骨材を避けて削孔し,細骨材の大 きめの粒子の強度は削孔速度選定処理の中で除去しセメ ントペースト分に近いものの測定を行う事としている。 既報²⁾以降で行った試験機の改良等を以下に示し,その 概略は本文で述べる。

(1)削孔が内部に進むにつれて削孔粉がビット先端付近 に滞留し削孔速度の低下を招いていたが、削孔ビットの 回転軸とドリルの回転軸を偏心させることによって削孔 速度の低下を抑制できた。

(2) コンクリート削孔時には、多くの場合、表面から 1mm ~3mm の間までに粗骨材を削孔してしまい、それ以上削 孔できない傾向がある。そこで市販の表面活性剤等をコ ンクリート表面に塗布することで、その乾燥にかかる時 間の違いによって表層近傍の骨材を避け、削孔に適した 箇所の特定を行う方法の可能性を示した。

本論文では、モルタル及びコンクリートに対して、圧 縮強度と本試験機を用いた削孔試験で得られた削孔速度 との関係について検討し、小径ドリル型削孔試験機によ るコンクリートの強度推定の可能性を示す。さらに、削 孔機器共通の問題点であるビットの切れ味(テスト試験 体を用いた未使用ビットの初期削孔速度、以下同様)の 違い及び使用回数に伴う削孔速度の低下についても検討 を行う。

*1 金城学院大学 生活環境学部環境デザイン学科 准教授 博士(工学) (正会員)
*2 大同大学工学部建築学科 講師 博士(工学) (正会員)
*3 名古屋市立大学大学院芸術工学研究科 教授 工博 (正会員)
*4 三重大学大学院工学研究科 教授 工博 (正会員)



2. 試験機および供試体製作方法の概要

2.1 試験機の概要

図-1 に試験機の概要を示す。本試験機は、定荷重バ ネを用いて測定部位にドリルビットを押さえ付けてから 削孔を行う。また、ビットの回転数を変えないようにす るために、定トルクで回転するモータを使用している。 削孔速度は一定時間間隔で削孔深さを測定することによ って求めた。前述した削孔深さが深くなった場合でも削 孔速度を安定させるためのビットの偏心と削孔粉排出の 関係を図-2 に示す。改良した本試験機では、ビット軸 を回転軸から 0.3mm の偏心量を与えることで、ビットと 孔壁に隙間を生じさせて削孔粉を排出することができた。 2.2 試験方法

本研究では、図-3 に示す研究フローに従って各供試体について圧縮強度と削孔速度との関係を求め、その結果から圧縮強度を推定するための検量線を作成した。

2.2.1 供試体製作(フローの(a))

表-1と表-2に本実験で用いたモルタルとコンクリー ト供試体の調合表をそれぞれ示す。削孔用供試体として, モルタル供試体(40mm×40mm×160mm), 安定した削 孔速度を得るため細骨材をふるいにかけ、0.6mm以下微 粒子のみが入ったモルタル(以下, 0.6モルタルと呼ぶ) 供試体(40mm×40mm×160mm), そしてコンクリート 供試体(幅75mm×長さ150mm×高さ875mm)をそれぞ れ水セメント比4水準で作製した。同時に, 圧縮強度試験 用の供試体を各水準に対して6本作製した。また、今回の 実験では、削孔速度に及ぼす中性化の影響を検討するた め、中性化促進養生した供試体を各水準に対して3本ずつ 併せて作製した。ここで、低強度の供試体を製作するた め、W/Cが1.6の場合のみ消石灰を混入した。また、養生 方法は気中養生とした。なお、コンクリートには高性能 AE減水剤(チューボールHP11)を使用してスランプの 調整を行った。







表-1 モルタルの調合表

供封体	W/C		質量 (kg	g/m ³)	
供訊件	w/C	水 (W)	セメント (C)	細骨材	消石灰
M-10N	1.6	308	195		280
M-20N	0.7	321	458	1325	-
M-30N	0.6	305	509	1525	-
M-40N	0.5	286	570		-
0.6M-10N	1.62	303	187		283
0.6M-20N	0.7	336	480	1265	-
0.6M-30N	0.6	320	532	1205	-
0.6M-40N	0.5	299	598		-

表-2 コンクリートの調合表

供封休	W/C	フランプ	売与≜(0/)			質量 (l	kg/m³)		
快武冲	w/C	~/~/	空刈里(%)	水 (W)	セメント (C)	細骨材	粗骨材	消石灰	混和剤
C-10N	1.6	18	4.7	205	126	828	816	189	-
C-20N	0.7	19.5	4.9	178	254	878	912	-	2.5
C-30N	0.6	18.5	4.7	180	300	808	936	-	1.8
C-40N	0.5	20.0	4.6	178	356	772	934	-	1.1

供試体の中性化には中性化促進試験装置を使用した。 供試体は材齢4週後,JISA1153:2012に準じて温度,相 対湿度,二酸化炭素濃度を調整し,材齢8週間静置した。 また,本試験機の削孔では,供試体表面から約10mm程 度を削孔するため,表面からの中性化が15mm以上であ ることを確認した。

2.2.2 削孔位置の検出 (フローの(b))

本削孔試験機を用いてコンクリートの圧縮強度を推 定する場合,粗骨材に当たると削孔が出来なくなる。し たがって,セメントペースト部分を削孔する事が必要で ある。そこで本試験方法では,骨材を避けた供試体の削 孔を可能にするため,文化財などを対象とし対塩類風化 薬剤として用いられているシラン系ポリマーER-002 の 濃度が10%になるように市販の洗浄剤を添加し,供試体 表面に塗布し,骨材が無い部分を浮かび上がらせること で削孔位置の特定を行った。写真-1 に供試体の削孔位 置特定の一例を示す。塗布から約10分後に薬剤の蒸散に よりコンクリート表面の濡れ色が消えるなか,同写真中 の表面に黒く濡れ色が残る。この部分を削孔することに より粗骨材を避けて削孔できる。

2.2.3 削孔試験機の仕様 (フローの(c))

本実験で用いた削孔試験の仕様は以下のとおりである。 ドリル先端ビットは、ダイヤモンド砥粒を接着したもの を用いた、押しつけ力28N(14N×2本)、回転数4000回 転/分で削孔を行った。また、ビット先端変位の測定は 詳細なデータの採取を行うため、動ひずみ計を用いて 1/100秒ピッチで計測した。なお、今回の削孔試験では、 削孔速度が同じビットを使用した。ビットの選定はビッ ト削孔速度計測用供試体(48MPaの0.6mm以下モルタル) を削孔時のビットの削孔速度が0.18mm/s であることを 確認して行った。これを用いてコンクリートの削孔を行 った。**写真-2**にモルタル供試体の削孔状況を示す。

2.2.4 圧縮強度試験(フローの(d))

本実験では、各供試体に対し 500kN 万能試験機を用い て JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法)に基 づいた強度試験を行った。

2.2.5 削孔データの抽出 (フローの(e), (f))

削孔速度と削孔深さの関係を図-4 に示す。図は材齢 28日の圧縮強度が 16.8N/mm²(C-20Nの No.1 削孔穴) のコンクリート供試体の例である。また,削孔断面(孔を 直径方向にカットした削孔壁)の実体顕微鏡画像を併せ て示す。同図に示すように,骨材,空隙とセメントペー スト部(図中の(1)~(6))の削孔速度は大きく異なって いる。写真の骨材部における削孔速度は極端に遅いこと がわかる。逆に空隙部とその界面を削孔した場合は速く なっているのがわかる。これらの極端に遅いもしくは速 いデータは除去するとともに,異種材料に変化(骨材か



写真-1 削孔位置の決定の一例



写真-2 供試体の削孔状況



図-4 削孔速度と削孔断面写真(C-20NのNo.1)

表-3 セメントペースト部の削孔速度抜枠の一例

/#+⇒+ /+-	削孔穴	圧縮強度		削	孔速度	(mm/	⁄s)		平均速度
供訊件	No.	(N/mm ²)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(mm/s)
	1		0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
C-20N	2	16.8	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.4	0.4
	3		0.3	0.3	0.2	0.4	0.4	0.2	0.3

らセメントペースト,空隙部からセメントペーストまた は骨材)する際の垂直に立った部分のデータは除去する。 一方,写真から特定して骨材に当たらずセメントペース トを削孔していると考えられる部分は,同図に示す赤線 間(図中の(1)~(6))である。この部分はグラフの線形 が水平でその長さが 0.3mm 以下である。つまり,図中



図-5 0.6モルタルの削孔速度と削孔深さの関係

の赤線(一)が、有効と判断されるセメントペースト部と推定できる削孔箇所である。表-3に、コンクリート供 試体(C-20N)3カ所の削孔データにおいて、セメントペースト部の削孔速度を抜枠した一例を示す。例えば、削 孔穴No.1の削孔速度は、図-4で決定したセメントペー スト部と見られる部分の(1)~(6)の削孔速度を平均して 求めている。さらに、各削孔穴(No.1~No.3)を平均し、 C-20Nの削孔速度とした。これに対し、図-5に示す0.6 モルタルの削孔速度グラフの一例では、図-4のコンクリ ートのように大きく上下しておらず比較的変化が少ない ため、その上下の平均値(赤線で示す)を削孔速度とし た。

2.2.6 検量線の作成 (フローの(g))

モルタル, 0.6モルタル, そしてコンクリートの各供試 体の圧縮強度と削孔試験の関係から近似曲線を導き出し, 検量線式の提案を行った。

2.2.7 ビットの切れ味の検証実験(フローの(h))

ビット毎による切れ味の違い及びビットの使用頻度 (回数)による削孔速度の低下を検討するため,モルタ ル供試体を製作し,検証実験を行った。

3. 削孔試験の結果および考察

表-4 に,各供試体の削孔試験結果と各供試体の圧縮 強度を示す。ここで表中の供試体名においては,モルタ ルは (M),0.6 モルタルは (0.6M),コンクリートは (C) とし,強制的に中性化させたものは,名前の前に C.を付 けた。

図-6 に、コンクリートの圧縮強度と削孔速度の関係 を示す。ここで低強度の場合は削孔速度に大きなばらつ きが見られたが、圧縮強度と削孔速度の関係について近 似式を求めたところ式(1)が得られた。式(1)は、中 性化供試体のデータも含んでいる。

$$Fc = 3.2V^{-1.4}$$
 (1)

ここで、*Fc*:コンクリートの推定圧縮強度(N/mm²)V:平均削孔速度(mm/s)である。

また,モルタルと0.6 モルタルは図-5 に示した処理に よって近似曲線を求め、コンクリートと共に近似曲線の みを図-7 に示した。これらの図によれば、3 本ともほぼ 同じ位置及び曲率となったが、低強度付近のみ近似曲線 が乖離しており、強度が同じ場合の削孔速度は、0.6 モル

表-4 削孔試験結果

⇒+#>/+	材齢	孔本数	削孔速度	標準偏差	圧縮強度
武宗14	(月)	(個)	(mm/s)	(mm/s)	(N/mm ²)
M-10N		29	0.592	0.099	6.9
M-20N	1	30	0.259	0.039	28.3
M-30N	1	25	0.252	0.058	38.1
M-40N		30	0.210	0.062	38.7
0.6M-10N		30	0.747	0.101	6.5
0.6M-20N	1	30	0.443	0.065	18.3
0.6M-30N	1	30	0.249	0.030	28.9
0.6M-40N		30	0.211	0.020	39.2
C-10N		6	0.634	0.124	6.1
C-20N	1	12	0.284	0.092	16.8
C-30N	1	19	0.213	0.076	26.3
C-40N		12	0.248	0.090	30.1
C-10N-11		13	0.630	0.268	6.3
C-20N-11	11	15	0.246	0.086	21.3
C-30N-11	11	16	0.225	0.081	28.2
C-40N-11		14	0.196	0.067	33.8
C.C-10N-11		18	0.579	0.158	4.8
C.C-20N-11	11	23	0.235	0.077	22.4
C.C-30N-11	11	27	0.199	0.077	33.8
C.C-40N-11		19	0.166	0.054	37.4



図-7 圧縮強度と削孔速度の関係の近似曲線

タル→モルタル→コンクリートの順に多くなることが原因と推察される。

また,2.2.5項で述べたように,モルタルでは容易に削 孔速度を選びだせるが,コンクリートではいくつかの手 順が必要である。しかし,いずれの方法で求めた検量線 もほぼ近似している事ことから,コンクリートの削孔速 度を抽出する手順は,ほぼ妥当なものと考えられる。

4. ビット毎の切れ味の違い及びビットの使用頻度(回

数)による切れ味の低下の検証実験

4.1 検証実験に至る経緯

図-8に、ビット軸に対する回転軸の偏心の有無による 削孔の概念図を示す。偏心がない場合には、削孔壁面は ビット外周すべての面で削られている(図-8(1))。しか し、本試験機のように回転中心とビット軸芯に偏心があ る場合には、全ての削孔壁面は図-8(2)におけるa点だけ で削られている。すなわち削孔壁面A点もB点も全てビッ ト外側a点で削られることにより偏心のない場合に比べ て、小さな部分で削孔を行っている。小さな部分のみ削 孔している場合、以下の2点の問題が考えられる。

(1)小さな部分で削孔するので、そこに埋め込まれてい るダイヤモンド砥粒の総数が少ないため使用(削孔)回 数の増加につれてその部分のダイヤモンド砥粒の劣化が 激しく、目標としているビットの切れ味が早く低下する おそれがある。

(2)ビット側面の小さな範囲のダイヤモンド砥粒の埋 め込み状況(数・突出高さ等)によって切れ味が支配され るため、大きな範囲で削孔しているものよりビット毎及 び1本のビットの取り付け位置の違いで切れ味のばらつ きが大きくなる。

そこで、任意の2本のビットについて4方向に取付け 位置を変化させ切れ味を測定した。写真-3 にビット取 付け方向の概略図を示す。写真に示すようにビット軸を 90°ずつ回転させ、それぞれ赤方向、緑方向(赤方向から 反時計回り90°)、黒方向(赤方向から反時計回り180°)、 青方向(赤方向から反時計回り270°)とした。表-5 に ビットの取付方向の違いによる切れ味の測定結果を示す。 表より、同じビットを用いた場合にもその取付け方向が 違うと切れ味が違うことが分かる。また、ビット間でも 切れ味は異なっている。そこで、本検証実験では切れ味 が違った場合でも検量線を得られる方法を検討した。

4.2 ビットの切れ味の検証

4.2.1 ビットの選定

40本の未使用ビットについてそれぞれ4方向の切れ味 を測定した。各ビットの切れ味別(0.16~0.3mm/s)に計 測された切れ味の数を出現回数とし,図-9に示す。図に 示す □ 部の切れ味が0.18mm/s, 0.22mm/sおよび 0.26mm/sの3水準のビットを以下の検討で用いた。

4.2.2 供試体製作

削孔試験に供する供試体は珪砂(5号)入りモルタル とした。その調合と圧縮強度を表-6に示す。また、W/C を3水準とし、養生期間を変えることで強度についても 4水準とした。

4.3 切れ味の異なるビットでの検量線の算出

削孔にあたり,決められた累積削孔回数毎に前述の切 れ味計測用供試体を用いて切れ味を計測した。図-10 に 切れ味と累積削孔回数の関係を示す。選定した3種類の ビット切れ味を持つビットは,削孔回数の増加にともな



図-8 ビット回転軸及び削孔断面



1	x U		>1-10		- 2 9	214 0 14 0	
供試体	ビット	軸方	削孔	速度(n	nm/s)	平均速度	標準偏差
学科学	No.	向	(1)	(2)	(3)	(mm/s)	(mm/s)
		青	0.236	0.243	0.250	0.243	0.007
		黒	0.220	0.218	0.209	0.216	0.006
	1	赤	0.257	0.261	0.164	0.228	0.055
		緑	0.243	0.257	0.266	0.256	0.012
0.6M-48N		青	0.172	0.214	0.171	0.185	0.025
	2	黒	0.223	0.222	0.283	0.243	0.035
	2	赤	0.278	0.230	0.263	0.257	0.023
		緑	0.187	0.177	0.189	0.184	0.007



表-6 モルタルの調合表と圧縮強度

試驗体	W/C		単位量 (kg/r	n ³)	JE	E縮強度	(N/mm	²)
H WORTH	we	水(W)	セメント(C)	珪砂(S)	1日	3日	7日	28 日
L.M-10N	0.5	300	600		18.0	23.2	24.5	27.3
L.M-20N	0.6	321	535	1285	9.6	12.5	14.9	16.6
L.M-30N	0.7	337	481		6.4	9.0	11.6	12.0

い,削孔速度が0.18mm/sに近づいていく傾向が見られた。 3 種類のビットの切れ味のうち,切れ味が 0.18mm/s のビットで実施した削孔試験結果を用いて圧縮強度と削



図-10 切れ味と削孔累積回数

孔速度の関係をプロットし、3 章で得られた圧縮強度と 削孔速度の関係を示す $y = aX^b$ の形の近似式を求めたと ころ、以下の式(2)が得られた。

 $y = 2.6X^{-1.4}$

(2)

ここに, y: 圧縮強度(N/mm²), X: 削孔速度(mm/s)

ここで、ビットの切れ味ごとに圧縮強度と削孔速度の 関係をプロットしその重心を求めた。求めた重心を通る ように、式(2)で得られた曲率b(=-1.4)を固定した上で、 $y = aX^{-1.4}$ からaの値を算出した。ビットの切れ味との 関係及びその近似曲線を図-11に示す。図より、係数aとビットの切れ味との間には強い相関が認められ、以下 の式(3)で示すことができる。

$a = 60.1V^{1.8}$ (6)	(3))	
-----------------------	-----	---	--

ここに、a:式(2)における係数a,V:切れ味(mm/s) 式(3)を用いれば、ビットの切れ味が異なる場合にも、 削孔速度から圧縮強度を推定するための検量線の係数a を求める事ができ、併せて、0.18mm/sのビットで得られ た式(2)、および、式(3)で得られた係数aを用いて削孔速 度から圧縮強度を推定する検量線を求める事ができる。 この方法で求めた切れ味別のaと近似式を表-7に示す。 図-12に、切れ味0.18mm/s、0.22 mm/s及び0.26mm/sの ビットを用い、珪砂モルタルを使用した実験で得られた 圧縮強度と削孔速度の関係を示し、併せて各ビットの検

5. まとめ

量線も示す。

本試験機を利用して削孔試験を行った場合,コンクリ ートの圧縮強度と削孔速度の関係式を求めることができ, それを利用すればこの試験機で削孔速度を計測したコン クリートの強度推定ができる可能性を示した。今回の実 験で以下のことが分かった。

- ビットの切れ味が0.18mm/sの場合,削孔速度と圧縮強度の検量線は, Fc = 3.2V^{-1.4}であった。これにより,本試験機によって削孔速度を求めれば強度推定ができる。
- 2)ビットの切れ味は削孔回数の増加にともない,僅かに 削孔速度が低下し,当初は遅い削孔速度であった



切れ味	計算上 a	近似式
0.14	1.7	$y = 1.7X^{-1.4}$
0.15	1.9	$y = 1.9X^{-1.4}$
0.16	2.1	$y = 2.1X^{-1.4}$
0.17	2.4	$y = 2.4X^{-1.4}$
0.18	2.6	$y = 2.6X^{-1.4}$
0.19	2.9	$y = 2.9X^{-1.4}$
0.20	3.2	$y = 3.2X^{-1.4}$
0.21	3.5	$y = 3.5X^{-1.4}$
0.22	3.8	$y = 3.8X^{-1.4}$
0.23	4.1	$y = 4.1X^{-1.4}$
0.24	4.4	$y = 4.4X^{-1.4}$
0.25	4.8	$y = 4.8X^{-1.4}$
0.26	5.1	$y = 5.1X^{-1.4}$

表--7 切れ味別近似式



0.18mm/sに近づいていく傾向が見られた。

3) ビットの切れ味が0.18mm/s以外の場合にも削孔速度 から検量線を求めることが可能である。

謝辞

本研究にあたり、ご協力頂いた国立研究開発法人建築 研究所建築生産研究グループ長の長谷川直司氏、日本診 断設計の長谷川哲也氏に感謝の意を表します。なお、本 研究はJSPS科研費16H06363の助成を受けたものである。 参考文献

- 1)長谷川哲也,畑中重光,三島直生,本多千絵美,谷川 恭雄:小径ドリル型削孔試験機によるセメントペース トの圧縮強度推定:建造物の表層強度推定手法に関 する開発研究,日本建築学会構造系論文集,Vol.72, No.621, pp.1-8, 2007.11
- 2)長谷川哲也,畑中重光,谷川恭雄,長谷川直司:歴史 的建造物の表面から内部への連続した強度評価のた めの小径ドリル型削孔試験機の開発研究,日本建築 学会技術報告集,Vol.13, No.26, pp.421-426, 2007.12
- 3)日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説JASS 5 鉄 筋コンクリート工事, p.172-174, 2009