論文 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

長谷川哲也*1 · 畑中重光*2 · 三島直生*3 · 谷川恭雄*4

要旨:筆者らは,自ら開発中の削孔式表層強度試験器を用い,硬化体表層部の圧縮強度測定方法について開発研究を行っている。本報では,セメントペースト硬化体の表層部の深さ約13mmまでの測定結果を用い,硬化体の圧縮強度を推定するための検量線を作成することを試みた。その結果,本試験器の測定精度および改良点などが明らかとなった。また,削孔速度による表層部圧縮強度の推定の可能性が示された。

キーワード:表層強度,セメントペースト,強度推定,小径ドリル

1. はじめに

近年,明治から大正にかけて建設された組積 造,レンガ造および初期の鉄筋コンクリート造 建築物の経年劣化が問題となっており,これら の歴史的にも重要な構造物を保存するための診 断・補修・補強の必要性が高まっている。

建築や土木構造物の診断に際し,使用材料の 物理性能評価を行う場合,既存の非破壊試験法 では測定値に対する信頼性が低く,コア試験な どの破壊試験では,被測定体の損傷が大きいな どの問題がある。特に,歴史的建造物の場合に は,外観の保存が重要視される場合が多く,被 測定体になるべく傷を付けないことが前提とな ることが多い。

筆者らは、非破壊試験の手軽さと破壊試験の 信頼性を両立させるべく、小径のドリルを用い て被測定体を削孔し、その削孔速度から、被測 定体の強度を推定する手法を考案した¹⁾。

本報では、図-1 に示す研究ステップのうち、 「均質材料に対する試験方法の開発」に相当す る部分を取り扱う。すなわち、低強度なセメン トペーストを用いて強度と削孔速度の関係を求 め、その結果から圧縮強度を推定するための検 量線を導くことを試みる。



既往の試験方法

現場で建築物の表層部の性質を調べるための 物理試験方法としては,以前より行われている 反発度法,コアドリルの送り難易度による表層 コンクリートの圧縮強度推定法^{2),3)},引っかき 試験法^{4),5)},などがある。反発度法と引っかき 試験法は,試験機が小型で携帯が容易ではある が,評価しているのは表層部である。表層は内 部に比べ,養生条件や劣化外力の影響を受けや すく,被測定体によっては表層から内部の強度 推定が難しいものも出てくる。コアドリルの送 り難易度による表層コンクリートの圧縮強度推 定法は,表層だけで無く内部の強度も推定でき るが,コアドリルを使用するため,現場で測定 する場合には移動や設置に手間がかかり,また, 被測定体のダメージも大きい。

これらに対して本研究では、現場での計測を

*1 日本診断設計株式会社, 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)
*2 三重大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)
*3 三重大学 工学部建築学科助手 博士 (工学) (正会員)
*4 名城大学 理工学部建築学科教授 工博 (正会員)

より簡易かつ広範囲に行え,また,被測定体の 損傷がなるべく小さい試験器の開発を目的とし ている。

3. 削孔式表層強度試験器

図-2に、本試験で用いた携帯用表層強度試験 器の概要を、写真-1に試験器および現場におけ る使用状況の写真を示す。本試験器は定回転で、 ほぼ一定の押しつけ力で測定体を削孔できる装 置であり、ドリルビットにはφ3mmのダイアモ ンドビット(ダイアモンド砥粒#60)を用いた。

ドリルの回転数は4000rpmとし,ビットの押 しつけ力は(10.5-0.08x)Nとした[ここに, x (mm)は変位量]。削孔速度を測定するために内蔵 した変位計により削孔深さを1秒毎に計測した。 削孔深さは最大で約13mmとした。

ダイアモンドビットの耐久性については,別 途,10000 秒の耐久性試験を行った結果,本実 験で行った 4000 秒程度の試験では砥粒の摩耗 による削孔速度の低下は見られなかった。

4. 実験概要

4.1 供試体の作成

検量線作成用の被削孔体として4種類の強度 のセメントペースト供試体を作成した。調合を 表-1に示す。本研究では、低強度なセメントペ ーストを作成するためにセルロース系コンクリ ート用増粘剤を使用した。供試体は、各水準に つき圧縮試験用に円柱 φ 50×100 (mm)を3本、 削孔試験用に角柱 40×40×160 (mm)を4本作成 した。表中の圧縮強度は3本の平均値とした。

4.2 削孔試験

写真-2に試験の状況を示す。各強度別に13 回削孔を行い,各々1秒毎のビット先端位置を 削孔深さとして測定した。削孔は,**写真-3**に示 すように,セメントペースト試験体の側面の高 さのほぼ中央部部分で行った。

削孔時には先端ビット砥粒の摩耗抑制およ び削粉の排出を目的としてビット先端部に水滴 を垂らしながら湿式の測定を行った。







(a) 試験器

(b) 現場での使用状況

写真-1 携带用表層強度試験器

表-1 調合と圧縮強度

No.	W/C		単位量(g	養牛	圧縮	
		水 W	セメント C	増粘剤 A	方法	強度 (MPa)
C-60	0.6	655	1092	1.09		33.5
C-80	0.8	717	896	0.90	k-th	15.8
C-90	0.9	740	823	0.82	小中	11.4
C-100	1.0	760	760	0.76		7.8



写真-2 削孔試験の状況



写真-3 削孔位置(C-60)

	項目	試験回数 〔下段:ビット回転数の累計(×1000)〕												
No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		0~45	~97	~177	~214	~252	~281	~310	~ 347	~384	0~34	~82	~119	~ 155
C-100	削孔速度	0.156	0.202	0.122	0.352	0.242	0.331	0.321	0.286	0.209	0.197	0.156	0.248	0.203
	決定係数	0.879	0.962	0.936	0.927	0.967	0.938	0.894	0.985	0.991	0.935	0.953	0.992	0.957
C-90	削孔速度	0.136	0.098	0.074	0.248	0.073	0.257	0.260	0.230	0.220	0.186	0.120	0.171	0.181
	決定係数	0.916	0.929	0.877	0.963	0.817	0.979	0.977	0.984	0.991	0.977	0.942	0.980	0.965
C-80	削孔速度	0.102	0.090	0.079	0.152	0.139	0.192	0.189	0.214	0.166	0.168	0.094	0.104	0.144
	決定係数	0.942	0.903	0.913	0.974	0.966	0.933	0.924	0.953	0.929	0.937	0.979	0.997	0.973
C-60	削孔速度	0.075	0.066	0.073	0.052	0.161	0.176	0.163	0.156	0.139	0.127	0.098	0.133	0.120
	決定係数	0.946	0.975	0.929	0.825	0.991	0.987	0.997	0.995	0.998	0.995	0.997	0.993	0.997

表-2 削孔速度の算定結果および決定係数



なお、ビットの砥粒の消耗の影響を考慮して、 同一強度の試験体を連続して測るのでは無く、 毎回4種類の強度試験体について削孔試験を行い、これを13回繰り返した。

5. 実験結果とその考察

5.1 削孔試験結果

(1) 測定結果のばらつきに対する考察

図-3は C-60 試験体の全測定結果である。

図によると太線で表したデータは一般のデー タから大きく逸脱しており,深さ2~3.5mmの間 で削孔速度が極端に低下している。この測定結 果は,後述する試験結果,すなわち,硬化体の 強度が高くなると削孔速度が低下するという性 質を考慮すると,セメントペースト供試体中の 深さ3mm付近に,周囲のセメントペースト硬化 体と比べて極端に強度の高い1mm程度の大きさ の塊が存在する可能性が考えられる。例えば, 練混ぜ時に充分に分散されなかったセメントの だまがそのまま残り,低水セメント比の高強度 な硬化体となって存在していたことが推測され る。その領域を通過した後は,再び削孔速度は



回復している。

このような測定結果は他にも見られたが、本 実験の目的である均質材料の削孔速度の算定時 には誤差となるため、以降の考察からは除外す ることとする。除外する際の基準は、削孔速度 の算定時に近似する線形関数〔次項(2)で記述〕 に対する決定係数が0.90未満となった場合(表 -2参照)とした。

(2) 先端ビットの状態に対する考察

削孔深さと削孔時間の関係を,原点を通る線 形関数で近似して求めた削孔速度およびその決 定係数を表-2に,算定方法を図-4に示す。表-2 中では,決定係数が0.90未満のものを網掛けし た。また,削孔速度と試験回数の関係を図-5に 示す。図中には,決定係数0.90未満のデータを 矢印で示した。

図-5 によれば、試験回数が 1~3 回(図中の グレーで示した部分)の削孔速度が、全体的に 小さな値となっていることが分かる。削孔試験 は供試体No.を毎回順番に変えて行ったため、削 孔速度の低下が測定初期に集中して発生してい ることを示している。このことから、測定初期



に削孔速度が低下する理由として以下のことが 考えられる。すなわち,新品のダイアモンドビ ット表面には浮き石と呼ばれる突出したダイア モンド砥粒が点在している。この浮き石の影響 により,被測定体がモルタルのような硬い骨材 が入ったものの場合には削孔速度が上昇し,柔 らかい低強度セメントペーストなどの場合は削 孔速度が低下する。この削孔速度が不安定な状 態は,浮き石の突出部分が他の砥粒と同じ高さ まで削れることによって解消される。このため, これらのデータも検量線決定には不適格と判断 して,以降の考察では除外して考える。

(3) 削孔速度のばらつきに対する考察

これまでの分析において, 棄却と判断された データを除外した場合の, 削孔深さと削孔時間 の関係を図-6 に示す。棄却後のデータからは, 削孔深さと削孔時間の関係は比較的線形性が良 く, **表-2** に示した削孔速度により評価が可能で あると考えられる。



図-7に,表-2に示した削孔速度の度数分布を, また図-8には削孔速度の変動係数と圧縮強度 の関係を示す。図によれば,圧縮強度が低いほ ど,削孔速度の変動係数が大きい,すなわち, 測定値のばらつきが大きくなる傾向がある。こ れは,同一試験器を用いて同一条件で測定した 結果であるため,試験器および試験方法の影響 とは考えにくく,試料の特性によるものと考え られる。

今回用いたような高水セメント比のセメント ペーストでは一般に,供試体を作成する時点で,



図-7 削孔速度の度数分布

水とセメントの材料分離が発生し、均質な硬化 体が作成できない。本研究では、材料分離の影 響を小さくし、均質な低強度セメントペースト を作成するために、増粘剤を添加しているが、 この場合でも、高水セメント比の供試体内部の ミクロな組成には、比較的強度の高い部分と水 隙の多くなっている部分が存在し、本試験器の 対象とする比較的狭い領域の測定に影響したも のと考えられる。

5.2 圧縮強度推定のための検量線の提案

図-9 に, 圧縮強度と削孔速度の平均値の関係 を示す。同図中には, $\pm 1\sigma$, $\pm 2\sigma$ (ここに, σ :標準偏差)の領域も併示した。



図によれば, 圧縮強度が 15.8MPa 以下の範囲 では線形性が良く, 簡単な直線で近似が可能な 関係となっている。一方, 15.8MPa 以上の領域 では, 削孔速度の変化に対して圧縮強度の変化 量が非常に大きく, この範囲の強度をもつ供試 体の圧縮強度の推定は, 現在の測定条件では行 わない方がよいと判断できる。

以上より,15.8MPa 以下の結果のみで線形近 似して求めた検量線を**式(1)**に示す。

Fc = -87.6 v + 29	. 5	(1)
ここに, Fc:セメン	トペーストの圧約	宿強度
(MPa), v :	平均削孔速度(mm	/s)
検量線の適用範囲:	7.8 < Fc < 15.8	8
	(0.16 < v < 0.2)	25)

ただし,得られた検量線と測定値の変動係数 を比較すると,現状の測定方法のままでは精度 的に問題があると考えられる。このため,強度 を定量的に推定するためには,後述するような 装置および試験方法の改良などを行い,測定精 度の改善が必要となる。

6. 推定精度向上のための対策

これまでの検討結果からは、ある程度の精度 で削孔速度から測定対象物の圧縮強度が推定で きると判断できる。しかし、さらに測定精度を 上げ、測定結果を安定させるために検討すべき 点も明らかとなった。以下に、本研究で明らか となった問題点とその対策を述べる。

(1) 先端ビットの削孔能力の変動

5.1節(2)で述べたとおり,本試験結果は先端 ビットの削孔能力に大きく影響される。しかし, 本実験で問題となった使用開始時の変動,すな わち,ダイアモンド砥粒の露出状況に依存する と考えられる変動は,製造工程の改善による浮 き石の解消,もしくは先行削孔などにより,削 孔速度を安定させることが可能であると考えら れる。

(2) 供試体のばらつきへの対処

5.1節(3)で述べた,もともと被測定体が持つ ミクロな品質のばらつきの影響に関しては,先 端ビットの径を若干大きくし,測定範囲におけ る見かけ上の均質性を増す方法も考えられる。

(3) 検量線の有効範囲

5.2節で示した検量線は,低強度レベルのみで 使用が可能な式となっている。この適用範囲を 拡大させるには,先端ビットの径,回転数,押 しつけ力などを変更する方法がある。本試験器 では,上記の要因はいずれも変更可能であり, 測定対象の強度レベルに応じた測定条件を選択 するというステップを踏めば,適用範囲の拡大 は可能であると考えられる。

(4) 測定結果の分析方法の簡略化

実用化に向けて,測定結果のばらつきなども 充分に評価した上で,さらに簡略化した強度推 定システムを構築していく必要がある。

7. まとめ

本研究では、今後さらに増加するであろう既 存建造物の診断・補修・補強に不可欠な、現場 での簡易な材料強度評価手法の一つとして、削 孔式表層強度試験器を用いた評価手法に関する 基礎的な検討を行った。

本論文では、同試験器の測定結果の特徴を分 析するとともに、低強度レベルのセメントペー ストの圧縮強度を推定するための検量線を求め た。測定値の変動係数を考慮すると、現状の試 験方法のままでは圧縮強度の定量的な推定に関 しては精度の点で問題が残る。しかし、削孔速 度と圧縮強度の間には相関関係がみられること から、試験方法の改良などにより変動係数を低 減することができれば、削孔速度から圧縮強度 を推定することも可能であると考えられる。

今後は,測定精度をさらに高める方法,およ びビットの消耗に対する対応を検討していく予 定である。

謝辞

本実験を行うにあたり,嶋崎友美さん(三重 大学学生)の助力を得た。本研究費の一部は, 平成 17 年度日本学術振興会科学研究費補助 金・萌芽研究(研究代表者:畑中重光)によっ た。付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 長谷川哲也,三島直生,長谷川直司,畑中重 光,谷川恭雄:構造体の表層部強度を推定す るための携帯用測定機器の開発,日本非破壊 検査協会シンポジウム,コンクリート構造物 の非破壊検査への期待論文集, Vol.1, pp. 107-114, 2003.7
- 2)太田福男,太田則行:コアドリルの送り難易 度による表層コンクリートの圧縮強度推定 に関する実験的研究,日本建築学会東海支部 研究報告集,第37号,pp.65-68,1999.2
- 3)太田福男,太田則行:コアドリルの送り難易 度による表層コンクリートの圧縮強度推定 に関する実験的研究,日本建築学会東海支部 研究報告集,第38号,pp.53-56,2000.2
- 4) 湯浅昇: 引っかき傷によるコンクリートの表 面強度推定, 検査技術, pp. 37-42, 2001. 2
- 5) 和藤浩, 王暁梅, 畑中重光, 谷川恭雄: 劣悪 コンクリートの簡易診断方法に関する実験 的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 20, No. 1, pp. 341-346, 1998.6