論文　ドリル削孔時の消費電力を用いたコンクリート中の強度分布評価法の研究

岩城　圭介[*1]・塩谷　智基[*2]・平間　昭信[*3]・貫洞　悟[*4]

要旨：コンクリート表面からの劣化深さ評価法として，ドリル削孔時の消費電力を指標とする手法を提案した。本手法は，重力による一定の押付け力での自動削孔を特徴とする。本研究では，数水準の削孔条件・コンクリート強度においてドリル削孔時の消費電力などを検討し削孔条件を選定するとともに，物理的劣化が強度低下と関連づけられると考え消費電力と圧縮強度の関係を得た。また，コンクリート構造物の補修工事において本手法を試行し適用性を検証した。

キーワード：ドリル削孔，消費電力，劣化診断，強度分布

1. はじめに

コンクリートの劣化現象のうちスケーリング・ひび割れといった表面劣化が先行するものとしては，凍害，化学的腐食，風化・老化，火災などが挙げられる。維持管理では，通常，コンクリートの表面劣化が顕在化した後に補修が行われ，劣化部を除去し，健全なコンクリートを露出するとともに，断面修復などによる補修を行う。しかし，この場合，除去を要する劣化したコンクリートの深さ（劣化深さ）の判定が重要となる。すなわち，劣化部の除去が不十分であり，不健全な層を残し，その上層に断面修復を行うことは，構造物の一体性を損なうばかりでなく，構造物内部に潜在的な劣化要因を内在することになる。逆に，過剰な劣化部除去は，コスト高を招く可能性がある。よって，「劣化深さ」を適切に評価できれば，合理的な補修を行うための有用な情報となり得る。

「劣化深さ」の判定方法として，ドリルなどの削孔時の抵抗を利用した微破壊試験「ドリル法」が有効と考えられる。ドリル法では，ドリル削孔時の抵抗指標を得るとともに，削孔深さと抵抗指標の関係を測定し，物理的な劣化深さの推定を行う。表面からの劣化範囲では，微細なひび割れや化学的作用による多孔質化をともなうため，ドリルにより比較的容易に削孔でき，削孔時の抵抗が小さいと予想される。また，健全な深さ以深では，ドリル削孔にともなう抵抗が比較的高い値で一定値に近づくと考えられる。このような性質を利用することで，コンクリートの劣化深さを推定できると考えられる。

本研究では，重力を利用した自動削孔により人為的な操作の影響を排除したドリル法の改良を提案した。また，物理的な劣化現象が強度低下に関連づけられると考え，数水準の強度レベルでドリル法を試行し，削孔条件を選定するとともに，強度と抵抗指標の関係を得た。さらに，コンクリート構造物の補修工事において現場適用を行い適用性の検証を行った。

2. ドリル法の概要

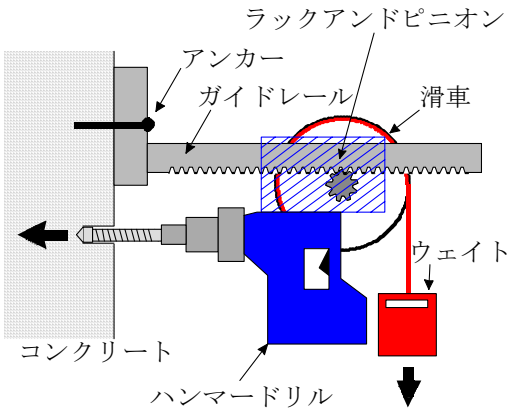
ドリル法の従来の手法としては，いくつかの方法が既に提案されている[1), 2), 3)]。ドリルとしては，小径コアドリル[1), 2)]ハンマードリル[3)]が用いられ，抵抗指標としては，一定速度削孔時の反力[1)]やコア削孔時の消費電力などから

*1　飛島建設（株）防災 R&D センター 技術研究所 第三研究室 主任研究員（正会員）
*2　飛島建設（株）防災 R&D センター 技術研究所 第一研究室 主任研究員 Ph.D.
*3　飛島建設（株）防災 R&D センター 技術研究所 第三研究室 室長（正会員）
*4　飛島建設（株）札幌支店 土木部 部長

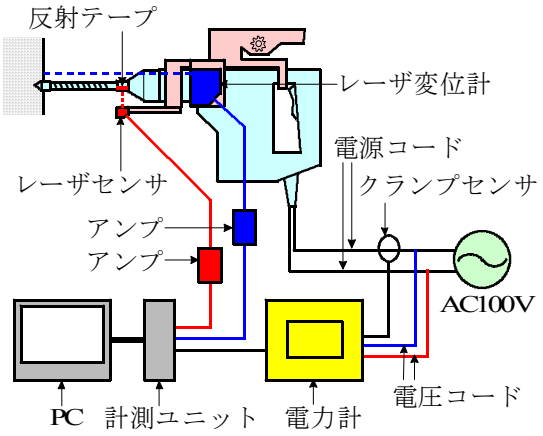
算出した抵抗指標[2), 3)]が用いられる。各手法には，試験装置の簡易さや測定値の解釈などに関し一長一短があると考えられるが，本研究では，現場への適用性を優先し，試験装置が比較的簡易である「ハンマードリルを用いて一定押付け力で削孔する方法」を採用した。

本研究で用いた試験装置の概要を**図－1** に示す。ハンマードリル（回転数 360～720 rpm，打撃数 1650～3300 回/min，AC100V 電源）は，対象とするコンクリート構造物にアンカーで固定したガイドレールに，ラックアンドピニオン式ジグを介して取り付けた。ピニオン側に固定した滑車を介してウエイトの重力による一定荷重を与えることで，押付け力一定での自動削孔を可能とした。このような装置を用いることで，人為的な操作の影響を排除し，信頼性の高い抵抗指標の取得が期待できる。また，ウエイトを調整することで，コンクリート構造物の上面，下面，側面，斜面に対して垂直な任意の方向で一定押付け力を与えることができる。

図－2 にデータ検出・収録装置を示す。取得データは，ドリル削孔時の有効電力（W），削孔深さ（mm）およびドリルビットの回転信号とし，サンプリング周期を 10 ms とした。有効電力に関しては，電力計によりハンマードリル電源の電流・電圧を取得し，各値から算出した有効電力の瞬時値を出力した。また，削孔深さは，レーザ変位計により測定した。得られた有効電力瞬時値と削孔深さから，単位削孔深さあたりの削孔に要した消費電力（J/mm）を得て，抵抗指標とした。さらに，レーザセンサにより，ドリルビットに貼り付けた反射シールからのオンオフ信号（ビット回転信号）を取得し，ビット回転数（/min）を算出して削孔作業の安定性を把握した。



図－1　試験装置の概要



図－2　データ検出・収録装置

表－1　使用材料

種類	記号	諸　元
セメント	C	普通ポルトランドセメント，密度 3.16 g/cm^3
水	W	地下水
細骨材	S1	葛生産砕砂，最大寸法 5 mm，表乾密度 2.63 g/cm^3，吸水率 1.29%
	S2	佐原産陸砂，最大寸法 1.2 mm，表乾密度 2.62 g/cm^3，吸水率 2.85%
粗骨材	G	葛生産砕石，最大寸法 20 mm，表乾密度 2.70 g/cm^3，吸水率 0.87%
混和剤	Ad1	AE 減水剤（標準形 I 種）
	Ad2	高性能 AE 減水剤（標準形 I 種）

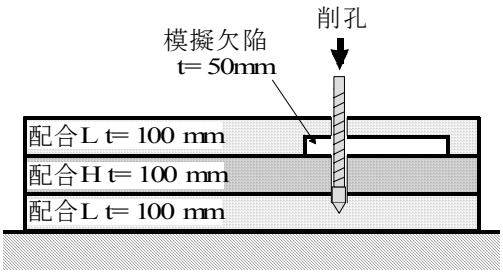
表－2　配　合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)						
			W	C	S1	S2	G	Ad1	Ad2
L	78.5	51.1	172	219	576	383	942	2.19	－
H	39.7	45.4	170	428	466	309	959	－	4.28

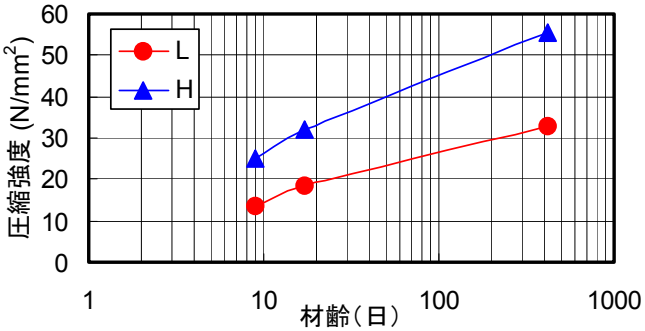
3.　供試体による検証実験

3.1 配合および供試体

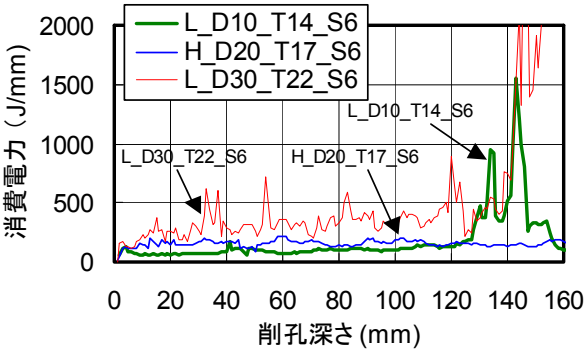
供試体による検証実験では，強度レベルが異なる 2 配合（低強度 L，高強度 H）のコンクリートを使用した。使用材料を**表－1** に，配合を**表－2** に示す。基礎データの採取を目的に，各配合で 900×1800×300 mm の供試体（L，H）を作成した。また，欠陥検出を目的として，**図**



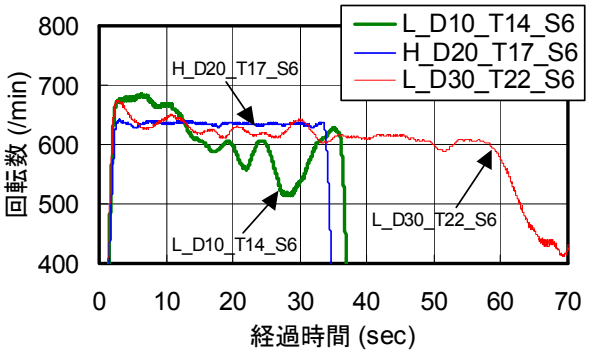
図－3　模擬欠陥供試体



図－4　圧縮強度試験結果



図－5　削孔深さと消費電力の関係の例
（ビット径の影響）



図－6　ビット回転数の経時変化の例

－3 に示すような模擬欠陥（発泡スチロール）を配置し上記 2 配合の 3 層構造とした模擬欠陥供試体（900×900×300 mm）を作成した。

これらの供試体の上面においてドリル法を適用し，鉛直下向きの削孔を行った。また，同一材齢でコアによる圧縮強度試験を行った。各配合のコア圧縮強度試験結果を**図－4** に示す。

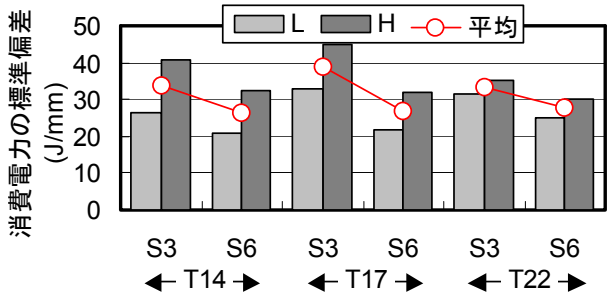
3.2 削孔条件の選定

削孔条件の選定を目的に，材齢 9 日において供試体 L，H を用いて削孔試験を行った。削孔条件は，ビット径 D を 3 水準（10，20，30 mm），押付け力 T を 3 水準（140，170，220 N），回転速度 S を 2 水準（遅 3，速 6）とした。なお，回転速度は，ハンマードリル付属の回転速度ダイヤル（1～6）より 2 水準を選定した。各削孔条件で N=3 のデータ採取を行った。以降，試験ケースを，例えば供試体 L，ビット径 10 mm，押付け力 140 N，回転速度 3 の場合，L_D10_T14_S3 と示す。

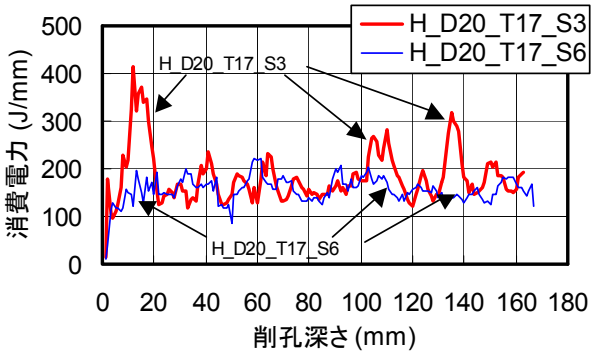
一部削孔条件における削孔深さと消費電力の関係の例を**図－5** に示す。また，ビット回転数の経時変化の例を**図－6** に示す。

ビット径 10 mm では，**図－5** に例示した L_D10_T14_S6 のように消費電力が増加する削孔状況がみられた。削孔深さに比べてビット径が小さい場合は，わずかな偏心が孔壁との摩擦やくり粉の詰まりを生じたと考えられる。また，ビット径 30 mm でも，**図－5** に例示した L_D30_T22_S6 のように，消費電力が増加するケースがみられた。ビット径が大きいため，孔壁との摩擦などによるトルクの増加が消費電力に影響したと考えられる。以上のように消費電力に急変がみられる場合，**図－6** の該当ケースにみられるような回転数の低下が散見された。一方，ビット径 20 mm（例えば，**図－5，6** の H_D20_T17_S6）では，全般的に消費電力および回転数が安定し，3 回の試験結果のばらつきも少ない結果であった。よって，ビット径 20 mm では，ビット径 10，30 mm に比べて安定的な削孔が可能であるといえる。

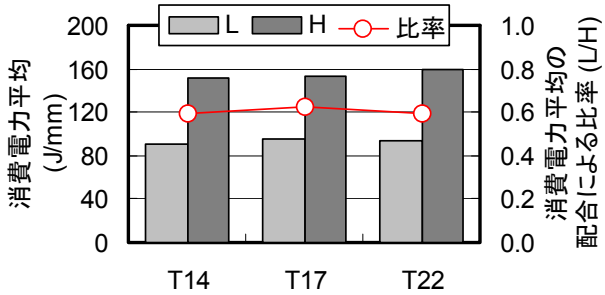
各供試体 L，H の深さ方向の強度分布が一定であると仮定すると，削孔深さに対する消費電力の変動が少ないほど削孔条件が適切であると



図－7　各削孔条件における消費電力の標準偏差



図－8　削孔深さと消費電力の関係の例
（回転速度の影響）



図－9　押付け力による消費電力平均の相違

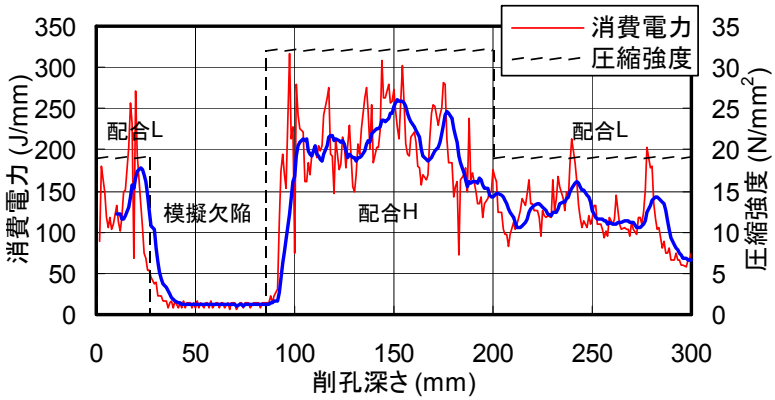
判断できる。そこで，D20 の各削孔条件において，1 mm ごとの消費電力の標準偏差を算出し削孔 3 回分の平均で表し消費電力の変動の指標とした。消費電力の標準偏差は，**図－7** に示すように，各押付け力で S3 に比べて S6 が低い傾向であり，回転速度が速いほど変動の少ない削孔が可能であったと考えられる。**図－8** には，回転速度の違いにより比較的大きい標準偏差の差を示した削孔条件 H_D20_T17 における削孔深さと消費電力の関係を示す。S3 で消費電力の急増が散見されるのに対し，S6 で変動の少ない消費電力を示すことがわかる。

また，本手法により得られる消費電力は，コンクリートの強度に応じて差異が明瞭であるほどよい。D20_S6 の削孔条件において押付け力を変化させた場合の消費電力平均の比較を**図－9** に示す。なお，消費電力平均は，削孔 1 mm ごとの消費電力平均を算出し削孔 3 回分を平均した値である。各配合 L，H の消費電力平均とその比率 L/H は，押付け力による差異を生じず，D20_S6 の削孔条件であれば，検討した押付け力の範囲（140～220 N）で同等の強度の評価が可能であると考えられる。

3.3 模擬欠陥供試体での試行

材齢 17 日において，模擬欠陥供試体を用いてドリル法による欠陥検出を試行した。D20_T17_S6 の削孔条件における削孔深さと消費電力の関係の例を**図－10** に示す。図中には，突発的な消費電力の増減を除去し大まかな傾向を得る目的で消費電力の 10 区間の移動平均と同材齢における供試体 L，H のコア圧縮強度に基づく圧縮強度の深さ分布も示した。なお，模擬欠陥の深さは，削孔後のドリル孔で実測した発泡スチロール深さ 27～85 mm に基づき図示した。

削孔にともなう消費電力は，配合 L と模擬欠陥の境界 27 mm 付近で 130 J/mm 程度から 10 J/mm 程度に急減し，さらに配合 H との境界 85 mm 付近で 200 J/mm 程度に急増した。模擬欠陥と低い消費電力の深さがほぼ対応したことから，本手法により欠陥深さの明確な検出が可能といえる。また，配合 H と配合 L の境界



図－10　削孔深さと消費電力の関係の例

200 mm 付近では，消費電力が 200 J/mm 程度から 130 J/mm 程度に低下する傾向が見られ，本手法による強度差検出の可能性も見出された。

3.4 消費電力と圧縮強度の関係

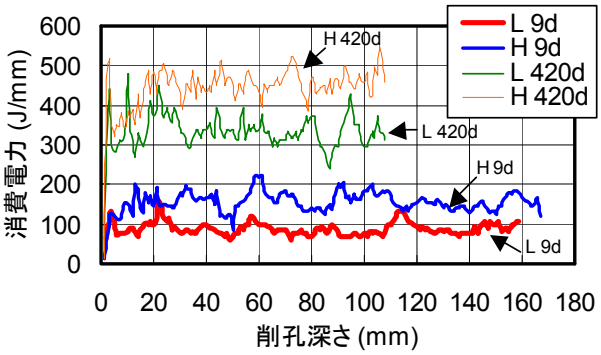
供試体 L，H を用い，D20_T17_S6 の削孔条件で材齢 9 日，420 日の試験で取得した削孔深さと消費電力の関係の例を**図－11** に示す。各ケースの圧縮強度は，配合 L，H の材齢 9 日，配合 L，H の材齢 420 日でそれぞれ 13.6，25.1，32.8，55.7 N/mm^2 であり，圧縮強度が大きいほど消費電力が大きくなる傾向であった。

上記の 2 材齢の試験結果と材齢 17 日に実施した模擬欠陥供試体の圧縮強度が一様と想定される区間ごとの試験結果から，削孔条件 D20_T17_S6 における消費電力平均と圧縮強度の関係を求めると**図－12** のようになる。配合・材齢により同等の圧縮強度に対する消費電力平均が異なるケース（配合 L 材齢 420 日，配合 H 材齢 17 日）がみられたが，全般的な消費電力平均と圧縮強度の関係は，図中に示したように 0.9 以上の高い寄与率で直線近似できることが示された。よって，本手法による消費電力から圧縮強度を推定できると考えられる。

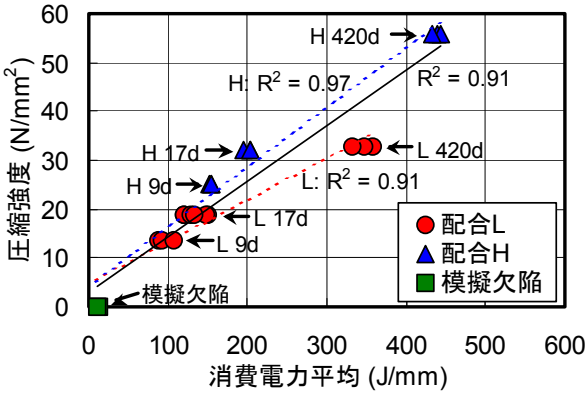
4. 現場適用

対象としたコンクリート構造物は，竣工から約 70 年経過した寒冷地のダムピアである。これまでにコンクリートによる断面修復が行われているが，ひび割れの発生が著しいため，旧コンクリート内部の空隙・ひび割れの補修と新旧コンクリートの境界部の改善を目的としたグラウト注入などの補修工事が行われた。

当該構造物の補修前において，削孔条件 D20_T17_S6 でドリル法を適用した。また，適用箇所近傍でコアを採取し，蛍光エポキシ樹脂含浸法 [4] による微細ひび割れの評価を行った。削孔深さと消費電力の関係を**図－13** に示す。図中には，模擬欠陥供試体での試行と同様に 10 区間の移動平均も示した。また，蛍光エポキシ樹脂含浸法による画像を**写真－1** に示す。



図－11　削孔深さと消費電力の関係の例（強度の影響）



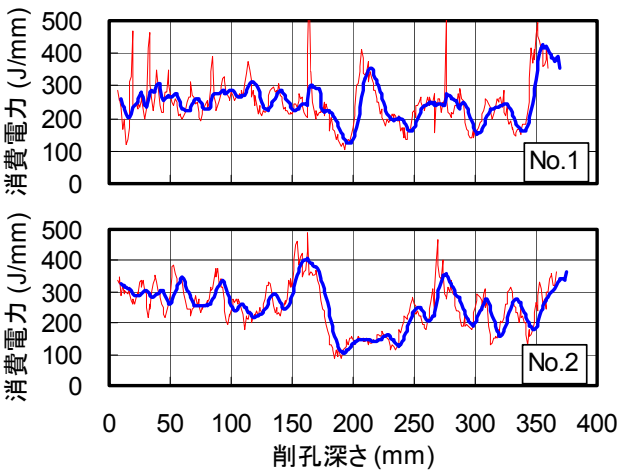
図－12　消費電力平均と圧縮強度の関係

写真中にはコンクリート表面からの深さを示した。なお，**写真－1** 下の紫外線照射下の画像では，緑色を呈する線が可視化された微細ひび割れを示す。

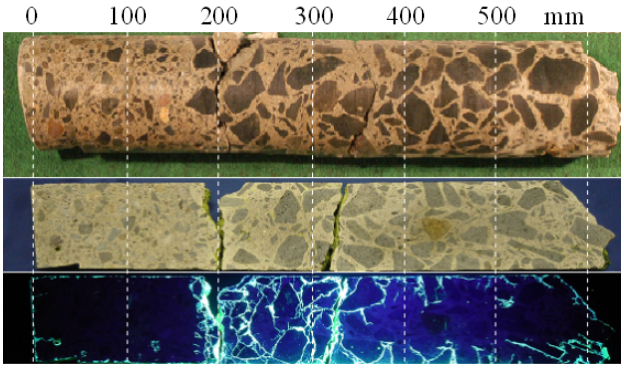
削孔深さと消費電力の関係では，No.1，No.2 ともに深さ 180 mm 付近において消費電力の急減が認められた。これは，**写真－1** の 200 mm 付近にみられる新旧コンクリートの打継ぎ部に符合すると考えられる。また，No.2 では，深さ 180～240 mm において比較的低い消費電力を示す区間が認められた。これは，**写真－1** の 200～330 mm にみられる旧コンクリート表層部に残存した微細ひび割れによる弱層に関連すると考えられる。このような旧コンクリート表層の劣化は，環境条件および補修状況から凍害，はつりに起因すると考えられる。さらに，No.1，No.2 では，ともに打継ぎ部と考えられる 180 mm を境に，以浅では消費電力の変動および周期が小さく，以深では消費電力の変動および周期が大きい傾向がみられた。この要因として，

粗骨材の最大寸法と配合が考えられる。すなわち，表層の新コンクリートでは，粗骨材最大寸法が 20 mm の一般的なコンクリートが用いられており，モルタルも高強度であったため，低変動で周期の小さい消費電力の推移であったと考えられる。一方，旧コンクリートでは，粗骨材最大寸法が 50 mm 程度と大きいため，大きな周期で消費電力が変動したと考えられる。また，比較的低強度なモルタル部分を貫通するときに消費電力が大きく減少したと考えられる。

供試体実験で得られた消費電力平均と圧縮強度の関係（**図－12**）より，新コンクリートで 30 N/mm^2 程度以上，旧コンクリートのモルタル部分で 25 N/mm^2 程度の圧縮強度が推定される。また，No.2 でみられた弱層部は，15～20 N/mm^2 程度の圧縮強度に相当すると考えられる。これらの推定結果は，他の部位で採取したコアの圧縮強度（新コンクリート；40 N/mm^2 程度，旧コンクリート；15～25 N/mm^2 程度）とほぼ同等であった。



図－13　削孔深さと消費電力の関係（現場適用）



写真－1　コアの目視評価
（上；外観，中；切断面，下；紫外線下切断面）

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

1) ドリル法による強度分布の推定に適合する削孔条件として，ビット径 20 mm，回転速度 6，押付け力 140～220 N を選定した。
2) 供試体を用いた試験から消費電力平均と圧縮強度の関係を得た。ドリル削孔時の消費電力から欠陥の検出と圧縮強度の推定が可能であると考えられる。
3) 現場適用とその検証により，微細ひび割れなどによる弱層部の検出や強度分布の推定への本手法の有効性が示された。
4) 今後のデータ蓄積により，劣化深さの評価のみならず，構造体コンクリート強度の推定にも応用が可能と考えられる。

謝辞：本手法の現場適用に際し，北海道電力株式会社 札幌水力センターの関係各位に多大なるご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1) 武田三弘ほか：コア穿孔反力を用いたコンクリート強度の測定に関する研究，土木学会第 57 回年次学術講演会概要集, V-155, pp.309-310, 2002.9
2) 太田福男ほか：コアドリルの切削効率によるコンクリートの圧縮強度推定に及ぼす骨材の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1 分冊, pp.591-592，2001.9
3) Roberto FELICETTI: The drilling resistance test for the assessment of fire damaged concrete, Cement & Concrete Composites, Vol.28, Issue 4, pp.321–329, April. 2006
4) 岩城圭介ほか：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.999-1004, 2004.7