

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

佐藤 智、松尾久幸、中籾朋己、横尾彰彦

(株) ティ・エス・プランニング 技術開発部長
(株) ティ・エス・プランニング 技術顧問 博士 (学術)
(株) 呉英製作所 技術開発部第一課 課長
ジオスター (株) 技術部技術開発チーム 工修

1. はじめに

コンクリート構造物に小口径の深い穴を穿孔し、その孔内空間を利用して劣化調査あるいは補修・補強を行うための施工技術は、構造物に与える損傷を最小限にでき機動性と経済性に優れることから早期の開発が期待されている。筆者らは、狭隘スペースでも施工可能な切削式小口径穿孔装置を考案するとともに、孔内空間の内視鏡観察やマトリックス部分のコア採取などによる劣化調査、ならびに長深度の穿孔を活用した補修・補強工法を構築してきた。すなわち、 $\phi 9.0\text{mm}$ および $\phi 15.5\text{mm}$ の小口径穿孔をベースに、ひび割れ、空隙ならびに背面空洞の内視鏡観察、計測ゲージ類の埋設、極小径コアの採取、セメント系充填材や高分子系浸透材などのひび割れ・空隙注入、穿孔や貫通孔への鋼材挿入とグラウト一体化などの方法を組合せて、劣化構造物の診断や補修・補強を実施している。しかしながら、小口径穿孔を長深度で施工する場合、切削工具（ビットおよびロッド）、穿孔治具（バキュームパッド、スライド式アーム、駆動機械保持治具ならびに駆動機械本体）、切削水循環装置などの要素を適切に組合せ、コストパフォーマンスに優れたシステムとして構築するには、検証すべき多くの課題が存在する。

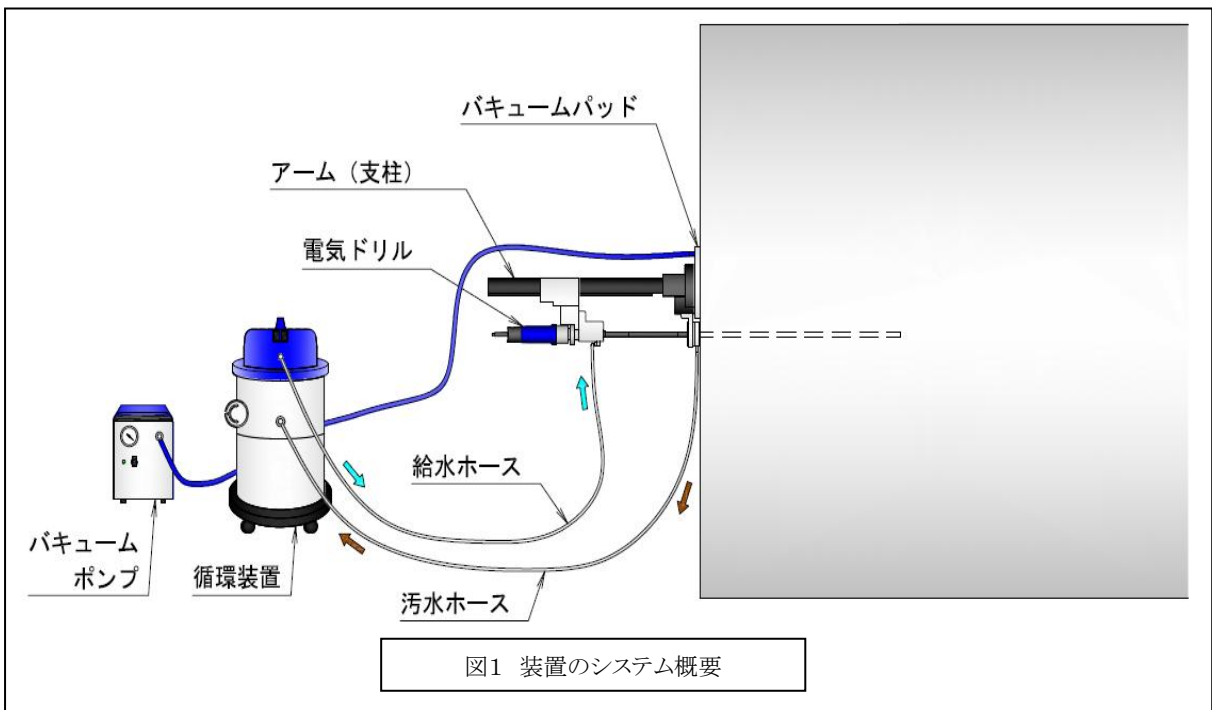
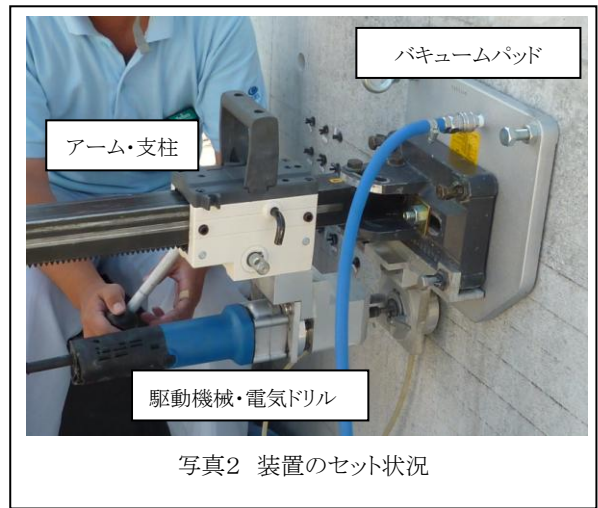
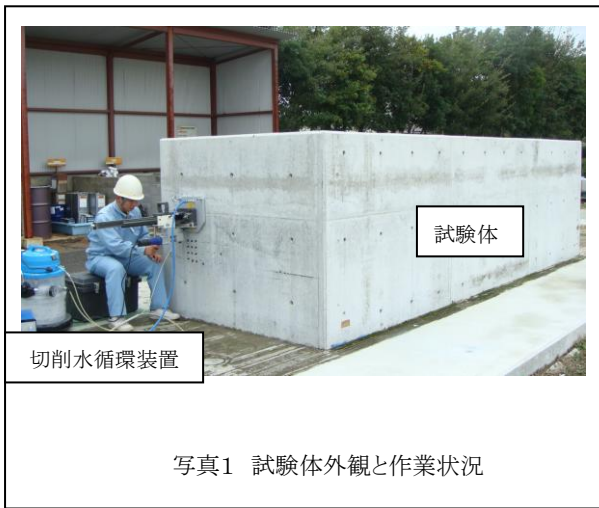
本報告は、切削式小口径穿孔装置を用いて長辺が 5.4m のコンクリート試験体を貫通したときの作業状況、精度ならびに今後の課題について報告する。

2. 実験概要

1) 実験に用いたコンクリート試験体の寸法形状は、写真1に示すように縦（長辺）×横（短辺）×高さが $5.40 \times 1.80 \times 1.50\text{m}$ で長辺側を穿孔する方法とした。試験体は、呼び強度 27、スランプ 12cm、最大骨材寸法 20mm の中庸熟セメントを用いたレディーミクストコンクリートで築造している。骨材は細・粗骨材とも東広島市黒瀬産で、密度がそれぞれ 2.58g/cm^3 （細骨材）および 2.62g/cm^3 （粗骨材）のものを使用した。穿孔作業は材齢 9～10 ヶ月の時期に実施し、作業完了後に穿孔開始側の深さおよそ 150mm の範囲からランダムに 3 個のコア（高さ調整後の寸法・ $\phi 50 \times 100\text{mm}$ ）を採取した。その平均圧縮強度は 40.9N/mm^2 である。

2) 実験に用いた装置の概要を図1、設置状況を写真2に示す。穿孔装置は、切削工具（ビットおよびロッド）、穿孔治具（バキュームパッド、スライド式アーム、駆動機械保持治具および駆動機械本体）

ならびに切削水循環装置を組合せたものである。切削工具の刃先は、孔内径が $\phi 9.0\text{mm}$ および $\phi 15.5\text{mm}$ となるように設定した粉末冶金製の長さがそれぞれ 21.8mm ($\phi 9.0\text{mm}$) と 24.0mm ($\phi 15.5\text{mm}$) のビットで、一方、ビットにネジ連結する高強度鋼を焼入れチツ化処理したロッドは1本の長さを 200mm とし、ビット外径より若干小さい径のものを準備した。穿孔治具は、切削工具に回転を与える駆動機械（市販電気ドリルでモーターの回転数：8000回転以上/分）を、全体長さ 846mm の鋼製アームに装着し、手動式回転レバーで穿孔前後方向にスライドする仕様とした。アーム全体は真空を利用してコンクリート表面にバキュームパッドを介して固定し、また、穿孔に伴って発生する振動によるロッドの破損防止対策として、駆動機械の先端と芯出しプレートとの2点で支えている。芯出しプレートには回転方向の力をフリーにする金具（ブッシュと呼ぶ）を格納するとともに、穿孔時は切削クズをフィルターで分離する水循環装置と接続し、切削水が外に漏れない対策を講じて作業環境の悪化を防いでいる。



3) 手順の概要を図2に示す。初めに、バキュームパッドを穿孔位置上方に仮固定し、アーム（支柱）を連結する。次に、駆動機械端部に取付けた芯出し棒（ガイドピン）を墨出し位置に合わせる（写真3）。微調整して位置確認ができたなら、駆動機械を後方にスライドさせ、芯出しプレートをバキュームパッドの下端に取付ける（写真4）。アームの水平度を水準器で、穿孔方向に対する平行度（コンクリート面に対しては鉛直度）を基準線からの下げふり2点でそれぞれ確認した後、芯出し棒に換えて、ブッシュの中空部を通してネジ連結したビットとロッドを機械端部に固定する（写真5）。交換終了後、推進レバーを手動で回転させ、駆動機械の無付加時電流値に対し電流計の針が+2~4アンペアの範囲に収まるスピードで、ロッド1本分の長さ200mmを穿孔する。速度の管理は電流計に目印を付けて目視観察にて行い、200mmの穿孔が終了した後、駆動機械を後方にスライドさせロッド間のネジ連結を解放して新たなロッドを追加連結する（写真6）。以上の作業を繰り返して5.4mを穿孔した。

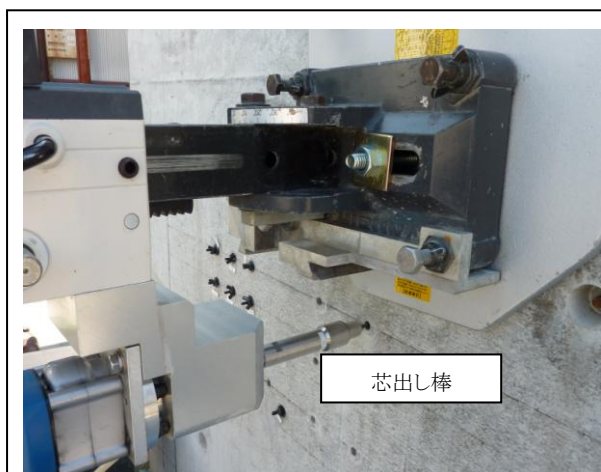


写真3 位置の確認

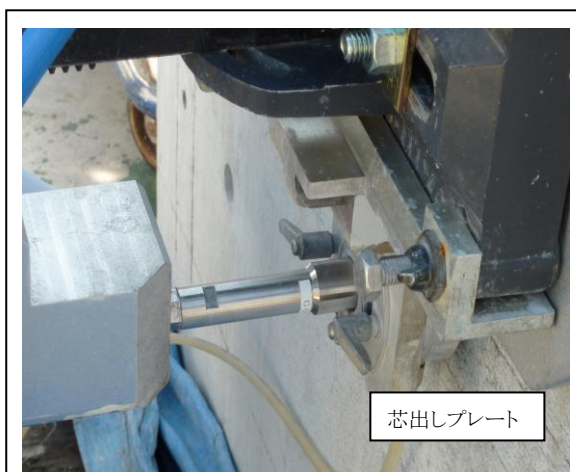


写真4 芯出しプレートの取付け

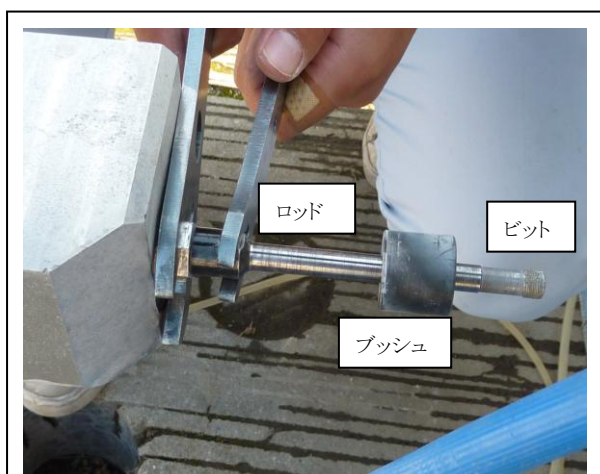
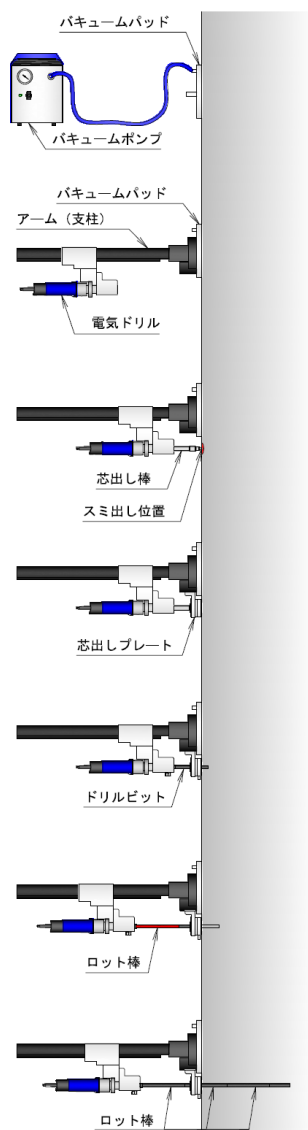


写真5 ビット取付け(芯出し棒交換)



写真6 ロッドの追加連結



①位置決め

バキュームパッドを仮固定する。

②アーム（支柱）の固定

バキュームパッドにアーム（支柱）を固定する。
駆動機械保持治具および駆動機械（電気ドリル）を取付ける。

③位置の確認（写真3）

電気ドリルに芯出し棒を取付ける。アーム固定部を微調整して、芯出し棒の先端がスミ出し位置（穿孔位置）に重なることを確認する。

④芯出しプレートの取付け（写真4）

芯出しプレート（ブッシュ格納金具）を取付ける。
アーム（支柱）の水平度と鉛直度を確認する。

⑤穴あけ

芯出し棒に換えてビットとロッドを取付ける（写真5）。
水を循環させて穿孔を開始する。

⑥ロッド棒の追加連結（写真6）

ロッド棒を追加連結し、穿孔を継続する。

⑦計画位置（深さ）まで

ロッド棒を追加し、計画位置（深さ）まで穿孔する。

図2 穿孔手順の概要

3. 結果と考察

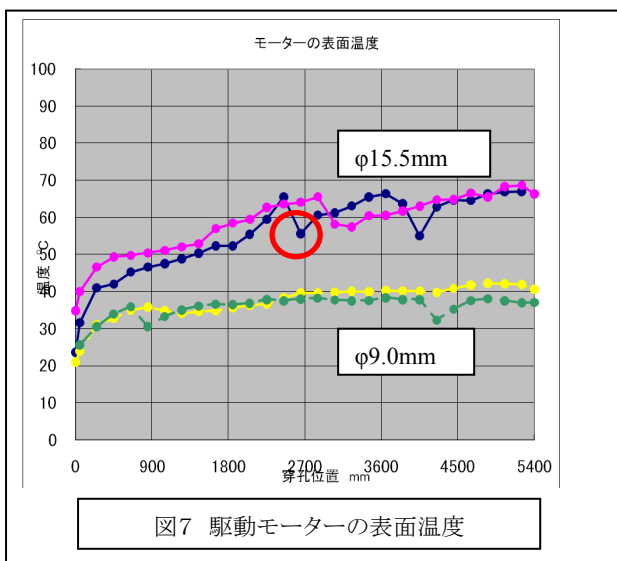
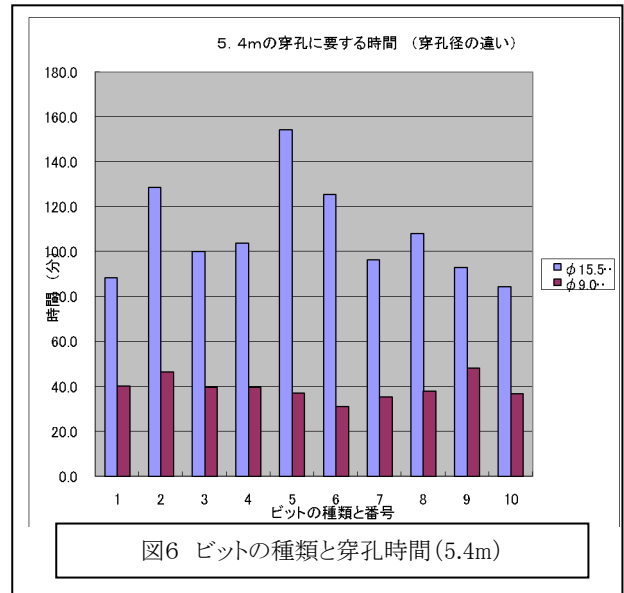
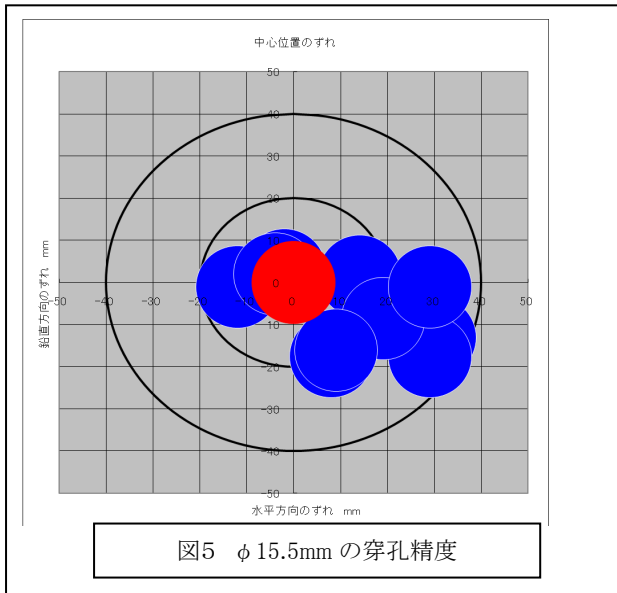
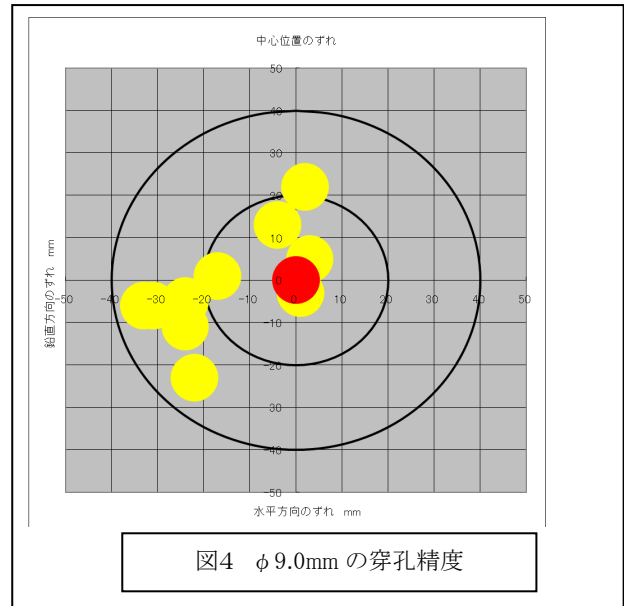
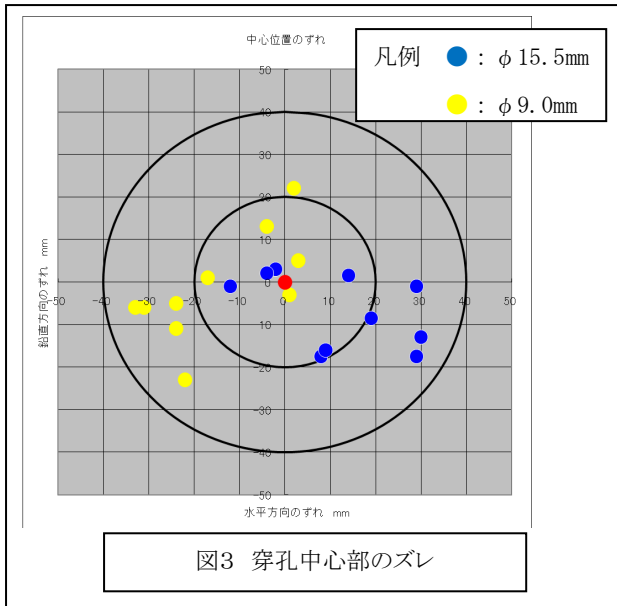
1) 図3は、コンクリート試験体の長辺側（5.4m）を貫通させた時の穿孔開始点（原点とする）に対する穿孔到達点（解放端）の中心位置について、そのズレ量をφ9.0mmとφ15.5mmの径ごとに座標で示すものである。穿孔数はそれぞれ10点とし、切削ビットはその都度新品と交換している。これによれば、5.4mの貫通孔のズレ量は全てが40mm以内で、その半数は20mm以内であった。口径がφ9.0mmの場合、中心位置の水平方向はマイナス側（左方向）、鉛直方向のズレは上下まちまちであった。それに対し、φ15.5mmでは、水平方向はプラス側（右方向）、鉛直方向はマイナス側（下方向）に移動する傾向が見られた。径の種類による中心位置のズレ傾向に差が発生した原因として、現在、検討中であるが、装置設置時のロッドとブッシュとの隙間、開始時にビットの受ける抵抗力が径によって異なるなどの要因を挙げることができる。また、穿孔作業は、駆動機械の無付加時電流値に対して+2~4アンペアの範囲を超えないよう手動で行ったが、特段の不具合は観察できなかった。

一方、図4 (φ9.0mm の穿孔精度) および図5 (φ15.5mm の穿孔精度) は、貫通孔の位置ズレについて穿孔径実寸法の大きさを反映してプロットしたものである。φ15.5mm のプロット点は全体がほぼ重なって見えるのに対し、φ9.0mm は少し拡散しているとの印象を受ける。しかしながら、φ9.0mm における中心位置のズレ量は、平均値 20.9mm、標準偏差 8.88mm、φ15.5mm では平均値 18.8mm、標準偏差 8.31mm となって、有意差のないことが判った(平均ズレ量をビット径で除した比率は φ15.5mm の方が小さい)。以上のことから、5.4m を貫通させた時の中心位置の平均ズレ量は 20mm 程度で、平均ズレ率が 0.37% ($20/5400=1/270$) に収まる本装置は、優れた穿孔精度を備えるものと考えられる。

2) 図6は、マスコンクリートの長辺側 (5.4m) を貫通するのに要した加算穿孔時間 (位置出し、水平・鉛直度の確認、ロッド連結、ならびに後片付けなどの時間は除外) を、ビット径ごとに示すものである。図中のビット番号は、同時に製造した 32 個からランダムに 10 個を抽出した順番 (穿孔順番に同じ) を示している。これによれば、φ9.0mm の穿孔時間は 31~48 分 (平均 39.3 分) の範囲に、φ15.5mm では 84~154 分 (平均 108.3 分) で、φ9.0mm (標準偏差 5.1 分) のバラツキは、φ15.5mm (標準偏差 21.7 分) と比較して小さい。また、孔内部の切削面はいずれも滑らかで、切削クズなどが孔内に残るような状況は観察されなかった。今後は、φ15.5mm のバラツキが大きくなった要因の分析と小さくする対策が必要と思われる。一方、位置出し、水平・鉛直度の確認ならびにロッド連結に要した合計時間は、径に関わらずほぼ一定の 50 分であった。

3) 図7は、電気ドリルの駆動モーター表面温度の推移 (径ごとに2回の測定) を、深さ (距離) ごとに示すものである。これによれば、φ9.0mm の場合、駆動モーターの表面温度は、25°C前後の開始から深さ 2.7m までの範囲において、上に凸の形状で徐々に上昇している。その時の温度は 40°Cで、φ15.5mm と比較して 2/3 程度の温度となった。その後、穿孔終了時まで温度の上昇は観察されなかった。それに対し、φ15.5mm では 2.7m までの範囲において上に凸の形状で徐々に増加し 60°C前後に至り、その後、貫通深さ 5.4m までほぼ直線の関係で上昇して終了時には 68°Cとなった。表面温度の上昇過程は2回繰返してもほぼ同様の傾向であるが、ドリル径と深度によって若干の違いが見られた。すなわち、φ15.5mm の 3.0m 以降では、距離の増加に伴い表面温度は上昇し安定する兆候が見られないことから、駆動モーターに想定を超える負荷が作用していることが判る。今後、10m 程度の穿孔や連続運転を想定した場合の上限温度を 60°C程度に設定するとして、現行の駆動モーターを使用する場合では冷却対策の検討、あるいは容量の大きな駆動モーターの選定が必要と考えられる。また、図中の温度が低下する箇所 (例えば、丸印で囲む) は、作業を停止 (休憩時間など) したことに起因する。

4) 図8は、φ15.5mm のビットについて、穿孔前後 (開始時と終了時) の形状を比較するものである。終了後の摩耗状況は、外周縁の角が摩耗して滑らかな円形状になり、中心部になるほど摩耗度合いが大きくなって凹状になっている。これは、円周方向の速度差が摩耗性状に影響しているもので、今後、摩耗抵抗性に優れたビットの形状等を模索する上では有用な情報と思われる。終了時の全数を比較すると、中心部の摩耗度合いに若干の差は有るものの類似した形状であった。また、φ9.0mm の摩耗度合いは φ15.5mm と比較し小さいことも判明した。

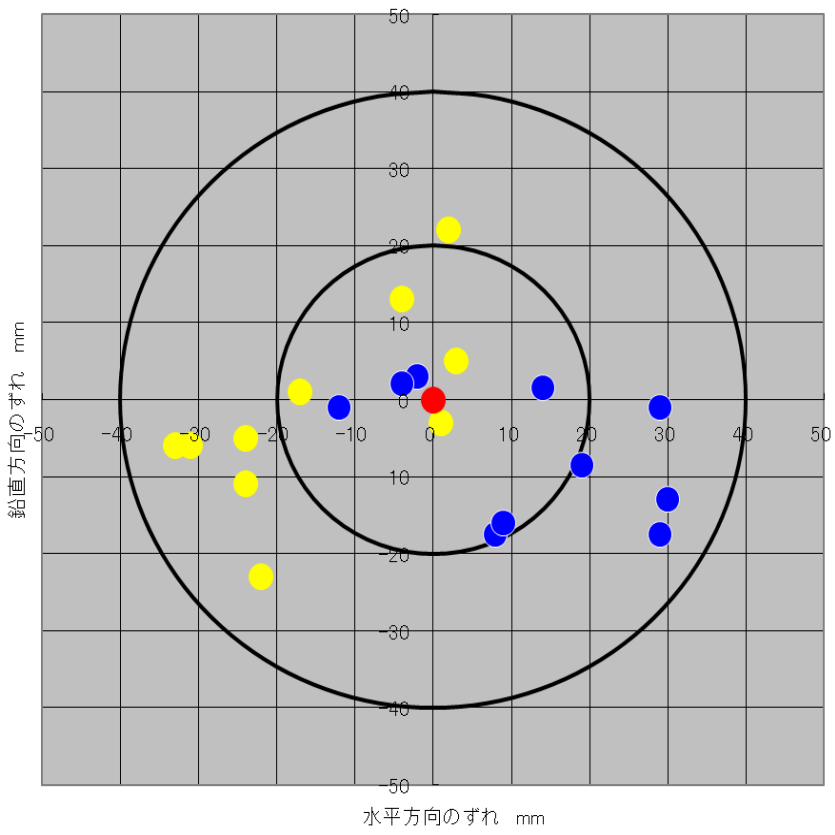


4. まとめ

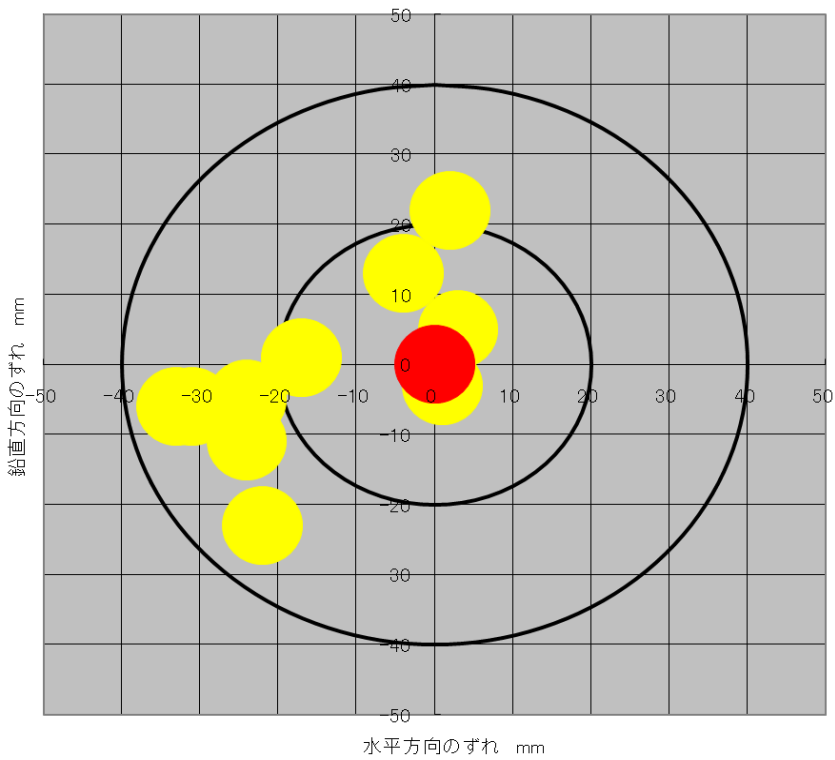
コンクリート構造物の劣化診断あるいは補修・補強を目的として、数多くの非破壊検査技術が開発されている。これらの既往技術に加え、構造物の損傷を最小限に抑えた切削式小口径穿孔技術と、内視鏡による孔内観察、計測ゲージ類の埋設、極小径コアの採取、ひび割れや空隙へのセメント系充填材や高分子系浸透材の注入技術等との組合せは、新たな補修・補強工法を提供するものと考えられる。しかしながら、工法開発を推進するうえで、コンクリート部材の長深度穿孔データが存在していないことから、実際、どの位の精度で穿孔できるかを確認しておく必要があった。本試験の結果から、以下の知見を得ることができた。

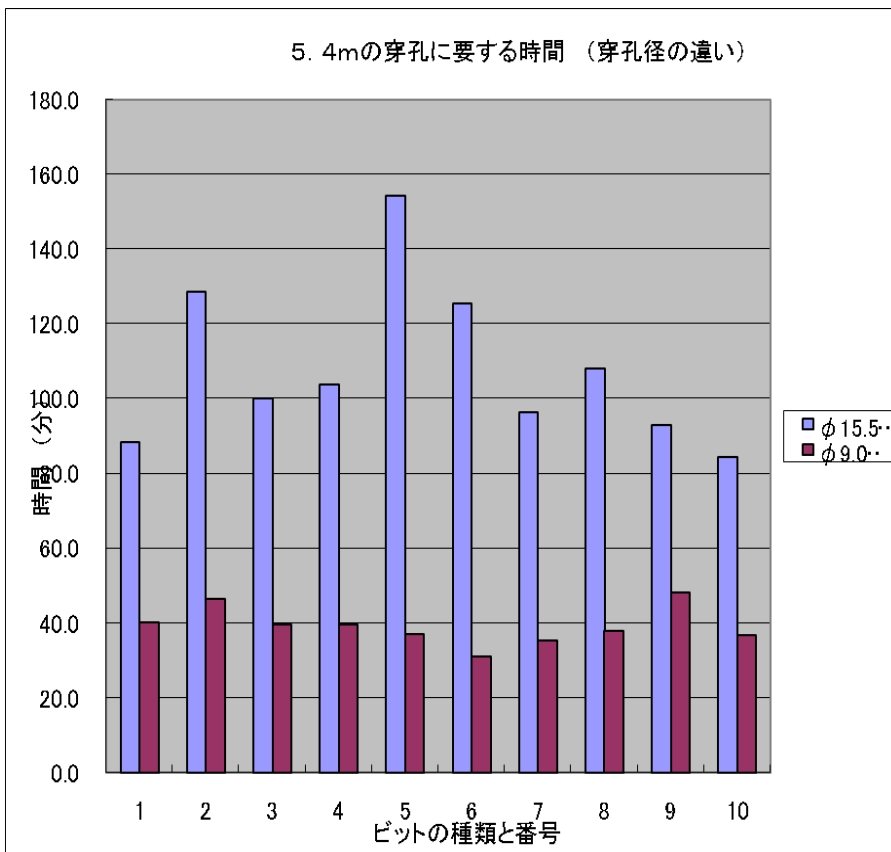
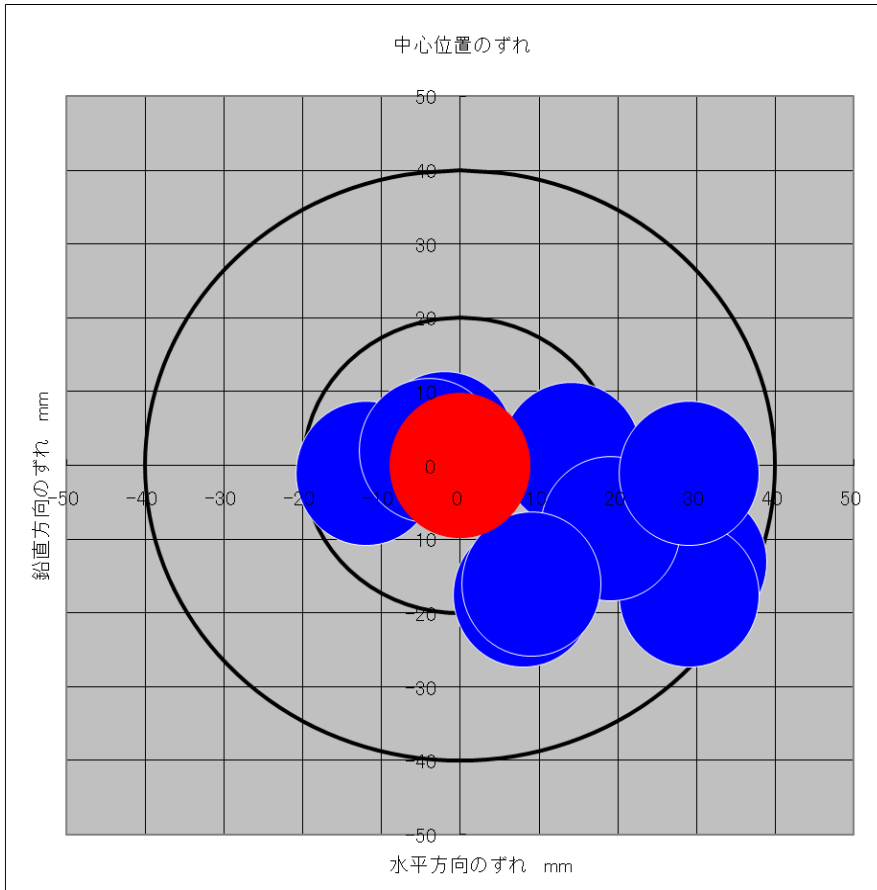
- ① コンクリート試験体の長辺側（5.4m）を貫通させた時の平均ズレ量は、 $\phi 9.0\text{mm}$ で 20.9mm、 $\phi 15.5\text{mm}$ では 18.8mm となった。 $\phi 9.0\text{mm}$ の平均ズレ量は若干大きいですが、穿孔径による有意差は検出できなかった。切削式小口径穿孔装置の穿孔精度は、平均ズレ率で 0.37% (1/270) 前後である。
- ② コンクリート試験体の長辺側（5.4m）を貫通させるのに要した時間（位置および方向性の確認、ロッド連結などの時間は除外して）は、 $\phi 9.0\text{mm}$ で 40 分前後、 $\phi 15.5\text{mm}$ では 90 分～160 分である。また、位置出し、水平・鉛直度の確認ならびにロッド連結に要した作業時間は、ビット径に関わらずほぼ一定の 50 分であった。
- ③ $\phi 9.0\text{mm}$ と比較して $\phi 15.5\text{mm}$ の穿孔には駆動モーターに大きな負荷が作用する。今後は、連続運転を想定した場合の上限温度を 60°C 程度に設定するとして、ビット径に適した駆動モーターの選定あるいは冷却方法の検討を必要とする。さらに、コストパフォーマンスに優れた小口径穿孔システムとして構築するには、穿孔面に対するアームの鉛直性を簡易に確認する方法、バラツキが大きかった $\phi 15.5\text{mm}$ ビットの形状と耐久性の見直し、穿孔精度と作業効率に関連するビットとロッドの最適バランス（長さ、質量ならびに隙間）の探求など、改善課題のあることも判明した。

中心位置のずれ



中心位置のずれ





モーターの表面温度

