

アンカー孔の自動削孔装置の開発

ー既設コンクリート構造物の補強工事に伴う削孔作業の自動化ー

Developing an Automated Drilling Hole Device for Anchors

- Automated Drilling in Reinforcement Work for Existing Concrete Structures-

三澤孝史* 川澄悠馬** 西山宏一*** 有川 健**** 山口 治*** 石井敏之**

要 旨

既設コンクリート構造物の補強工事では、あと施工せん断補強工法や増厚工法等が用いられる。その際、あと施工せん断補強鉄筋や、既設と新設のコンクリートの一体性を高めるアンカー筋の挿入孔は、通常、削岩機や電動ハンマードリル（比較的小径で削孔深さが浅い場合）等を用いて人力で削孔される。工事によっては、施工する孔数が数千以上となるため、機械化・自動化による省力化、効率化が期待されている。また、作業中の粉塵の飛散により悪化する作業環境の改善も課題であった。そこで、補強工事に伴う削孔作業を対象に、あと施工せん断補強鉄筋及びあと施工アンカー筋の挿入孔を削孔する 2 種類（大径用、小径用）の自動削孔装置を開発した。

本装置について、RC 壁試験体を用いた性能確認実験を行い、所定の性能を確認した。本報では、本装置の概要及び性能確認実験結果について述べる。

キーワード：補強工事、あと施工せん断補強、削孔、自動化、削岩機、電動ハンマードリル

1. まえがき

既設コンクリート構造物の補強工事において、あと施工せん断補強工法¹⁾及びあと施工アンカーを用いた壁等の増厚工法では、それぞれ、せん断補強鉄筋、増し打ちコンクリートを打設した際に一体性を高めるためのアンカー筋の挿入孔を既設コンクリート構造物に削孔する必要がある。挿入孔は通常、削岩機や電動ハンマードリル等を用いて人力で行われるが、削孔数が数千以上にも及ぶ場合もあり、多大な労力を要することから、作業の省力化、効率化が求められている。また、作業中の粉塵の飛散により悪化する作業環境の改善も課題であった。

今回、あと施工せん断補強工法と、あと施工アンカーを用いた壁等の増厚工法における削孔作業の自動化に取り組み、それぞれの工法に合わせて壁状部材を対象とした 2 種類の自動削孔装置を開発した。一つは、あと施工せん断補強工法における削孔作業を対象とし、比較的削孔径が大きく、深い削孔に対応する大径用自動削孔装置²⁾である。もう一つは、比較的削孔径が小さく、浅い削孔に対応する小径用自動削孔装置³⁾である。これらの 2 種類の自動削孔装置について、RC 壁を用いた性能確認実験を行い、所定の性能を有することを確認した。本報では、本装置の概要、性能確認実験結果について述べる。

2. 自動削孔装置

2.1 大径用自動削孔装置

a. 大径用自動削孔装置の概要

大径用自動削孔装置を写真-1 に、主な仕様を表-1 に示す。本装置は、あと施工せん断補強工法のせん断補強鉄筋の挿入孔（最大削孔径 $\phi 40\text{mm}$ 程度）を対象とし、空圧削岩機（以下、削岩機）を用いて自動削孔する装置である。削岩機を削孔方向に最大 1200mm フィード（前進）でき、上下方向の昇降ストローク 1750mm 及び左右方向のスライドストローク 500mm のエリア内の移動が可能である。各移動量は、装備したレーザー距離計により計測管理する。本装置本体の移動は、ペンダント操作でレール上を走行させることにより行う。

本装置は、可動範囲内を予め設定した削孔計画（削孔数、削孔位置、削孔深さ）に従って自動で削孔し、削孔位置、削孔深さ、削孔数、削孔時間等の施工結果データを自動的に記録する。削孔計画は、予めパソコンで作成し、本装置の制御装置に無線 LAN (Wi-Fi) で伝送することができる。また、施工結果データを制御装置からパソコンへ伝送することも可能である。

真空圧によりコンクリート表面に吸着するパキューム

*技術研究所 **技術研究所土木研究グループ ***東日本支社リニューアル技術部 ****東日本支東京土木第1部

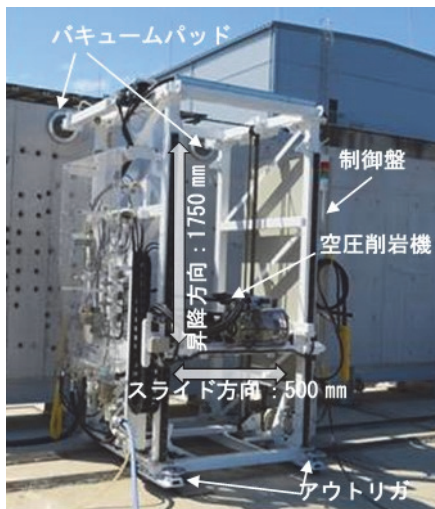
パッドを本装置上部に2基装備しており、必要に応じてバキュームパッドを使用することで削孔時の反力を確保することもできる。なお、バキュームパッドの吸着力については、事前にコンクリート表面の状態をパラメータとして、コンクリート試験体を用いた要素実験³⁾により把握した。

削孔中に生じる粉塵は、削岩機の先端部に装備した集塵カバーをコンクリート表面にエアシリンダにより押し付け、集塵機で吸引することにより飛散を防止する。

b. 大径用自動削孔装置の自動削孔時の動作フロー

図-1に、自動削孔時の動作フロー図を示す。本装置本体を削孔エリアに移動させ、自動削孔の事前準備として削孔エリア内の原点位置まで削岩機をスライド・昇降させた後、以下の手順により自動削孔するように制御している。

- ①削岩機を稼働させずに、壁にビットが当たるまでフィードさせることにより、壁までの離隔を自動計測する。
- ②削岩機をフィードさせるとともに、集塵カバーを壁面に押し付け、削孔を開始する。
- ③計画の削孔長まで削孔する。
- ④削岩機を引き戻し、次の削孔位置までスライド・昇降移動する。
- ⑤計画した全ての孔について②～④を繰り返す。



削岩機先端部

写真-1 大径用自動削孔装置

そのエリアの削孔が終了したら、本装置本体を次の削孔エリアに移動させ、同じ手順で自動削孔させる。なお、バキュームパッドを使用する場合は、自動削孔前にバキュームパッドを真空ポンプにより壁表面に吸着させ、反力を確保する。

自動削孔中に削孔速度が設定値以下となった場合、鉄筋等の障害物に接触したものと自動判定し、その孔の削孔を中止し、次の削孔位置に削岩機を移動するように制御している。これにより、事前に把握していない鉄筋に接触しても、鉄筋の損傷を抑制するように図っている。なお、施工結果データには、計画通り削孔できた場合と鉄筋等に接触して計画通りに削孔できなかった場合の判別ができる記録が残るようにしている。

2.2 小径用自動削孔装置

a. 小径用自動削孔装置の概要

写真-2に、小径用自動削孔装置を示す。本装置は、あと施工アンカーを用いた壁等の増厚工法における比較

表-1 大径用自動削孔装置の仕様

項目	仕様
外形寸法	横 1742×縦 2215×高さ 2593mm
質量	980kg
昇降範囲	1750mm
スライド範囲 (左右方向)	500mm
フィード長	1200mm
昇降速度	2.88m/min (高速モード時)
スライド速度	1.5m/min (高速モード時)
本体の走行速度	6.79m/min

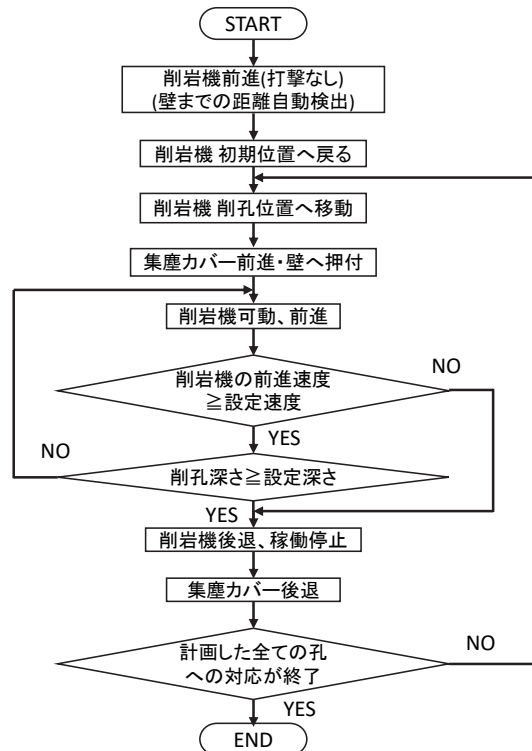


図-1 大径用自動削孔装置の自動削孔時の動作フロー

的削孔径が小さく、浅いあと施工アンカー挿入孔（最大削孔径φ25mm程度）を対象とし、電動ハンマードリル（以下、ハンマードリル）により削孔する。削孔ビットには、**図-2**に示す、削孔中の粉塵飛散を防止できる中空のホロドリルビット（ヒルティ社製）を用いる。削孔により発生する粉塵が、ホロドリルビット先端の吸引穴から中空部を通り、集塵機に吸引されることにより、粉塵の飛散を防止できる。

表-2に小径用自動削孔装置の仕様を示す。本装置はハンマードリルを昇降方向に最大1500mm移動させる昇降機と、削孔方向に最大300mmフィードさせる機構としてスライドテーブルを備えている。昇降機は電動モータにより駆動し、スライドテーブルはコンプレッサによる空気圧で駆動する。スライドテーブルと昇降機は取り付けた変位センサにより移動量を管理する。

本装置本体の移動は、装置下部に設置したキャスタにより人力で行う。なお、削孔位置の左右の微調整は、偏心機構（最大偏心量±50mm）を手動で操作することにより、ハンマードリルを搭載したスライドテーブルを左右に動かすことで対応できる。その他、本装置を水平に調整するためのアジャスタを装備している。

本装置は、大径用自動削孔装置と同様に、予め入力した削孔計画（削孔数、削孔高さ、削孔深さ）に沿って、ハンマードリルを自動で削孔位置まで昇降させ、設定した削孔深さまで、設定した削孔数を自動で連続削孔する。削孔計画及び削孔結果は、大径用自動削孔装置と同様に、パソコンと本装置の制御装置間を無線LAN（Wi-Fi）で伝送することができる。

b. 小径用自動削孔装置の自動削孔時の動作フロー

本装置は、以下の手順で自動削孔するように制御している。粉塵カバーを用いないことと、スライド（左右）方向への移動がないことを除けば、基本的に**図-1**に示した大径用自動削孔装置の動作フローと同様である。

- ①ハンマードリルを稼働させずにスライドテーブルをフィードさせ、削孔ビットを壁に当て、壁までの距離を自動測定する。

- ②ハンマードリルを設定した削孔位置まで上昇させる。
- ③ハンマードリルを稼働させ削孔を始める。削孔中に、削孔速度が設定値を下回ると鉄筋等に接触したと判断し、削孔を中断し、次の削孔位置に移動して自動削孔する。
- ④計画した削孔深さまで削孔を終えるとスライドテーブルが元の位置に戻る。
- ⑤削孔計画の全ての孔について②～④を繰り返す。

3. 性能確認実験

3.1 実験概要

開発した自動削孔装置の性能を確認するためにRC壁試験体を用いた性能確認実験を行った。

a. 実験方法

スラブ上に設置した鋼製架台の上に3基のRC壁試験体（寸法：幅2000mm×高さ2200mm×厚さ800mm）を設置し、レールとして敷設した山形鋼上に載せた大径用自動削孔装置で削孔した。小径用自動削孔装置は、直接、スラブ上に載せて実験を行った。RC壁試験体の設置状況を**写真-3**に示す。RC壁試験体の実験時のコンクリート圧縮強度は27.6N/mm²であった。

自動削孔装置は、鉄筋等に接触時には、自動的に削孔を停止し、次の削孔位置を削孔するように制御している。この機能を確認するために、RC壁試験体の前面と背面で配筋ピッチを変え、削孔可能深さが深い大径用自動削孔装置を対象として、前面の鉄筋だけではなく、削孔時に背面側の鉄筋に接触した場合も模擬できるようにした。

b. 実験ケース

大径用自動削孔装置の実験は、φ40mmのビットを用いて削孔した。実験パラメータは、削孔深さ、バキュームパッド使用の有無、単孔及び連続削孔とした。また、鉄筋接触時に計画した通りに挙動するかを確認するために鉄筋に接触させるケースも行った。実際のあと施工せん断補強を想定して、削孔深さ400～1000mmを中心に

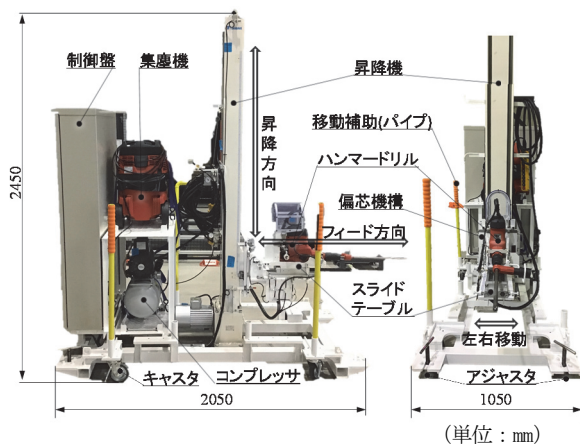


写真-2 小径用自動削孔装置

表-2 小径用自動削孔装置の仕様

項目	仕様
外形寸法	横 1050×縦 2050×高さ 2450mm
質量	650kg
昇降範囲	1500mm
フィード長 (深さ方向)	300mm
左右偏心調整量	±50mm
昇降速度	4.5m/min (高速モード時)

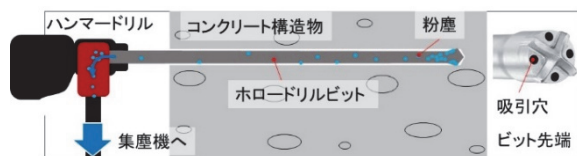


図-2 ホロドリルビットによる集塵の概念図

実験した。なお、削孔深さを 800mm 以上とした場合は、奥行き（削孔方向）が 2000mm となるように RC 壁試験体の配置を変えて実験を行った。最終的には、調整時の予備削孔も含め、100 孔以上の削孔を行った。

小径用自動削孔装置の実験では、ビット径φ20mm、φ25mmの2種類を用い、削孔深さを250mm、削孔間隔を100mmとして単孔及び連続削孔を行った。また、大径用自動削孔装置と同様に、鉄筋に接触させるケースも行った。最終的には60孔以上の削孔を行った。

3.2 大径用自動削孔装置の実験結果

実験状況を写真-4に示す。削孔中は、粉塵カバーと集塵装置により粉塵の飛散を防止できた。

a. 削孔深さ

図-3に、設定削孔深さ400~1000mmにおける、設定削孔深さに対する、削孔後にスケールにより計測した測定値との差を示す。図-4に、設定削孔深さに対する測定値の差の全データの頻度分布を示す。図-3、4より、全データは3~12mmの範囲にある。また、2点を除き、全て設定深さに対し深く（正側）削孔している。

表-3に、設定削孔深さ400~1000mmにおける、設定削孔深さに対する測定値との差の平均値、標準偏差、信頼度95%の精度($\bar{x} \pm 2\sigma$)を示す。全体の削孔深さの精度は、-1.43~10.29mmである。あと施工せん断補強の削孔長の規格値²⁾は、設定削孔長 $\pm 1/2 \times$ 既存主鉄筋（埋込み側）の直径であり、既存主鉄筋径にもよるが実施工において問題のない範囲と考える。また、バキュームパッド使用の有無による削孔深さの精度に顕著な差異はない。

b. 削孔位置

削岩機は、計画した削孔位置へ自動で移動する。この



写真-3 RC壁試験体設置状況

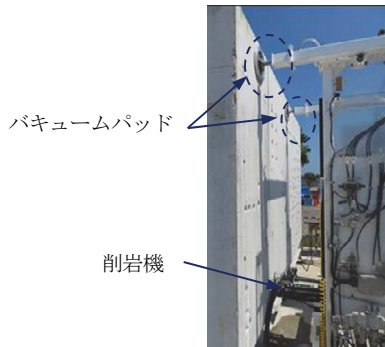
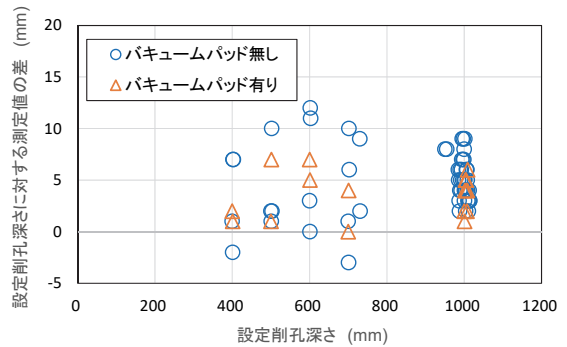


写真-4 大径用自動削孔装置の実験状況（バキュームパッド使用時）

位置精度を確認するために、昇降方向及びスライド方向の孔中心の間隔をノギスで測定した。バキュームパッドの使用有り・無しの場合における、連続削孔した場合の設定値に対する測定値の差を表-4に示す。昇降量の信頼度95%の精度($\bar{x} \pm 2\sigma$)は、-5.88~4.00mmであった。スライド量の精度は、設定スライド量200mmでは-9.40~4.04mm、設定スライド量300mmでは-8.39~4.63mmと昇降量に比べ少し大きいが、昇降量、スライド量とも、あと施工せん断補強の位置精度の規格値²⁾ ± 10 mm以内である。スライド量については、制御用のレーザー変位計の受光面に、直接、太陽光が射していたケースがあり、レーザー変位計の計測値に影響を与えた可能性がある。これについては、野外の施工では、直接



注) データが重なるため見やすいように、グラフの描画上、設定削孔深さの値を少しずらしている

図-3 設定削孔深さに対する測定値の差

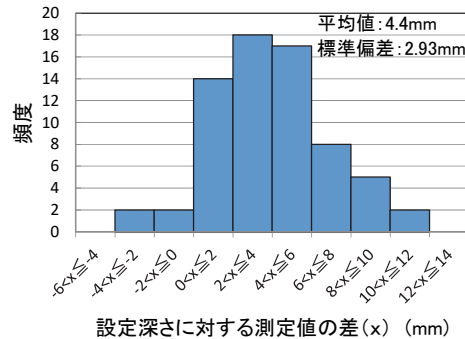


図-4 設定削孔深さに対する測定値の差の頻度分布

表-3 設定削孔深さに対する測定値の差の一覧

	バキュームパッド使用有り	バキュームパッド使用無し	全体
データ数 n(個)	18	50	68
平均値 \bar{x} (mm)	3.61	4.72	4.43
標準偏差 σ (mm)	2.15	3.13	2.93
$\bar{x} \pm 2\sigma$ (mm)	-0.69~7.91	-1.54~10.98	-1.43~10.29

表-4 昇降量及びスライド量の設定値と測定値の差の一覧

	設定昇降量		
	150mm	200mm	300mm
データ数 n(個)	40	26	4
平均値 \bar{x} (mm)	-0.94	-6.72	-6.51
標準偏差 σ (mm)	2.47	1.34	0.94
$\bar{x} \pm 2\sigma$ (mm)	-5.88~4.00	-9.40~4.04	-8.39~4.63

レーザー受光面に太陽光が射さないようにカバーを設置することで対応可能である。

c. 削孔速度及び削孔時間

図-5に、設定削孔深さ 400~1000mm における削孔速度を示す。削孔深さが 700mm までは、全てのデータが 5mm/s 以上の削孔速度を示した。削孔深さが 1000mm では、若干、削孔速度が低下した。これは、削孔深さが深くなることにより孔壁とビットとの摩擦抵抗が増加したためと考えられる。また、バキュームパッド使用の有無による平均削孔速度については、バキュームパッド使用無しの場合は 4.7mm/s、使用有りの場合は 5.0mm/s と、顕著な差異はみられなかった。

写真-5に、8孔を連続削孔したケースの削孔後の状況を示す。横方向の孔間の間隔は 200mm、上下方向は 150mm とした。設定削孔深さは 1000mm とし、このパターンの連続削孔を 2 回行った。

各孔への移動も含めた計 8 孔の全削孔時間は、平均で約 33 分であった。削孔深さ 1000mm を削孔するのに要した平均時間は約 3.9 分/孔であった。各孔への移動時間の合計は平均で約 1 分であり、削孔位置へ効率的に移動していることがわかる。

d. 鉄筋接触時の挙動

本装置は、自動削孔時には設定した削孔速度以下になると鉄筋等に接触したと自動判定し、その削孔を中止して次の孔を削孔するように制御ソフトを設定している。これを実際に確認するために、鉄筋に接触させる実験を複数回行った。一例として、手前側の鉄筋と奥側の鉄筋に接触させるように設定した削孔パターンを図-6に示す。鉄筋中心位置は、壁表面から 70mm と 730mm である。設定削孔深さを 750mm とし削孔した。

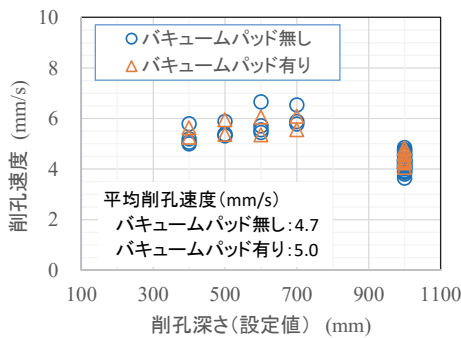


図-5 削孔速度と設定削孔深さの関係

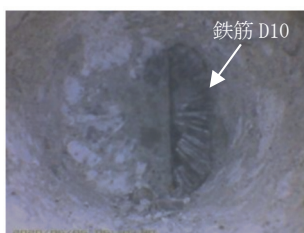
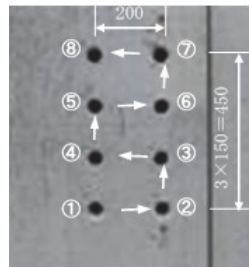


写真-6 孔内状況 (鉄筋接触位置を削孔)



※①→⑧の順番で削孔 単位: mm

写真-5 連続削孔後の状況

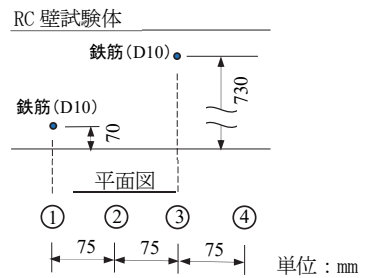


図-6 鉄筋接触時の削孔パターン



写真-7 小径用自動削孔装置の実験状況

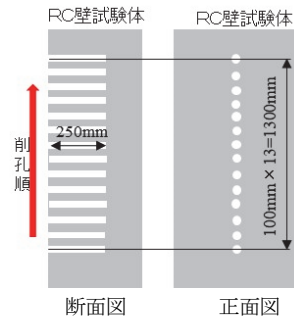


図-7 小径用自動削孔装置による連続削孔パターン

壁の奥側の鉄筋に接触する位置を削孔した孔内を CCD カメラで撮影した。写真-6に、図-6中の③位置を削孔した時の孔内状況を示す。鉄筋表面には少し傷が見られ、ビットが接触したことがわかる。手前側及び奥側の鉄筋に接触した場合、極力、鉄筋の損傷を抑えて削孔を自動で中止し、次の鉄筋に接触しない孔位置に移動し、設定深さまで削孔することを確認した。

今回の実験条件では、バキュームパッド使用の有無により、削孔深さや削孔速度に大きな差異はみられなかった。したがって、コンクリート強度等の施工条件が今回と同程度であれば、バキュームパッドを使用しなくても実施工において削孔可能であると考えられる。

3.3 小径用自動削孔装置の実験結果

写真-7に実験状況を示す。削孔中は、ホロドリルビット及び集塵機により粉塵の飛散を防止できた。

a. 削孔深さ

実験結果の一例として、図-7に示すように、14孔を連続削孔した結果について述べる。削孔深さについて、設定削孔深さに対する、ノギスによる測定値との差を図-8に示す。全てのデータは、-2.4~8.8mm の範囲にあり、設定削孔深さに対し±10mm 以下の差で施工できている。表-5に示すように、ビット径φ20mm では平均値 4.47mm、標準偏差 3.37、ビット径φ25mm では平均値 1.08mm、標準偏差 1.97mm であった。

b. 削孔位置

設定昇降量に対する、ノギスで測定した孔中心の鉛直方向の間隔の測定値との差を表-6に示す。設定昇降量 100mm に対する測定値の差は、ビット径φ20mm では平均値 0.16mm、標準偏差 1.75、φ25mm では平均値

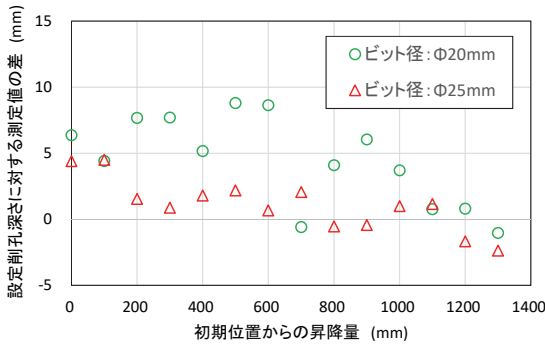


図-8 設定削孔深さに対する測定値の差

表-5 設定削孔深さに対する測定値の差の一覧

設定削孔深さ:250mm	ビット径 20mm	ビット径 25mm
データ数 n(個)	14	14
平均値 \bar{x} (mm)	4.47	1.08
標準偏差 σ (mm)	3.37	1.97
$\bar{x} \pm 2\sigma$ (mm)	-2.27~11.21	-2.86~5.02

表-6 設定昇降量と測定値の差の一覧

設定昇降量:100mm	ビット径 20mm	ビット径 25mm
データ数 n(個)	13	13
平均値 \bar{x} (mm)	0.16	0.37
標準偏差 σ (mm)	1.75	0.90
$\bar{x} \pm 2\sigma$ (mm)	-3.34~3.66	-1.43~2.17

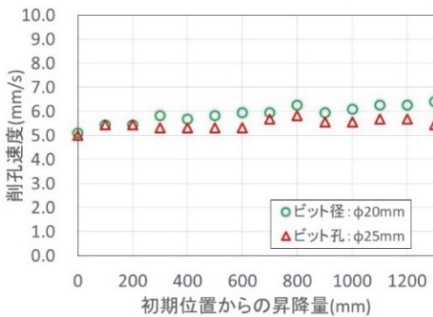


図-9 小径用自動削孔装置の削孔速度

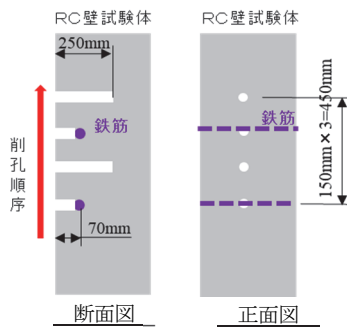


図-10 小径用自動削孔装置・鉄筋接触時の削孔パターン

0.37mm、標準偏差 0.90 と、精度良く削孔位置に移動していることがわかる。

c. 削孔速度及び削孔時間

削孔速度を図-9に示す。平均削孔速度はビット径φ20mmでは5.9mm/s、φ25mmでは5.5mm/sであり、いずれの昇降量においてもビット径によらず概ね同じ値である。

14孔の削孔及び移動時間の合計は、ビット径φ20mmでは約11分、φ25mmでは約12分であった。そのうち移動時間の合計はφ20mm、φ25mmとも約1.3分であり、短時間で移動している。また、設定削孔深さ250mmにおける1孔当たりの削孔時間はφ20mmでは43秒、φ25mmでは46秒であり、大きな差異はなかった。

d. 鉄筋接触時の挙動

大径用自動削孔装置と同様に、自動削孔中に鉄筋に接触した時に、計画通りに挙動するかを確認した。図-10に削孔パターンを示す。コンクリート表面から70mmの位置に配筋した鉄筋に接触する位置と接触しない位置の削孔を交互に実施した。その結果、大径用自動削孔装置と同様に、自動削孔中に鉄筋に接触した際は、計画通りに削孔が自動で中止し、次の孔を削孔することを確認した。このように、事前に把握していない鉄筋に接触しても、鉄筋の損傷を極力小さくすることができる。

4. まとめ

大径用及び小径用自動削孔装置について、RC壁試験体を用いた性能確認実験により、削孔位置、削孔深さは人力施工と同等の精度が確保できることを確認した。また、削孔中の粉塵の飛散が防止され、作業環境が改善されることを確認した。自動化による作業の労力軽減、作業の効率化については、計画した削孔位置に短時間で効率的に移動することを確認したが、今後、開発した2種類の自動削孔装置の現場適用を図り、実現場における歩掛を確認する予定である。実施工を通じ、適宜、自動削孔装置のブラッシュアップを図っていきたいと考える。

なお、大径用及び小径用自動削孔装置は、奥村機械製作(株)の協力を受け、開発したものである。ここに改めて深謝する。

【参考文献】

- 山口 治、松本恵美、三澤孝史、廣中哲也、「六角ナット定着型せん断補強鉄筋を用いた後施工せん断補強工法の開発」、土木学会第71回年次学術講演会概要集、pp.1017-1018、2016.9
- (一財)土木研究センター、「建設技術審査証明報告書第1506号 後施工六角ナット定着型せん断補強鉄「ベストグラウトバー」」、2018.7
- 有川 健、三澤孝史、西山宏一、石井敏之、「既設コンクリート構造物のあと施工せん断補強に伴う削孔作業に適用する自動削孔装置の開発」、令和2年度建設施工と建設機械シンポジウム、2020.12
- 川澄悠馬、三澤孝史、西山宏一、有川 健、山口治、石井敏之、栗本雅裕、「小径のアンカー孔を対象とする自動削孔装置の開発」、土木学会・土木建設技術発表会2020、2021.2