

# 36. ウォータージェットによる既設杭切断処理工法

大阪市役所：高崎 肇  
（株）鴻池組：松井 和彦・\*小橋 創一

## 1. はじめに

都市部の地下工事において、既設の地中構造物が施工の障害となるケースが増加している。とりわけ、シールド工事において計画路線上に基礎杭等の障害物があると、施工の安全性や工期に重大な支障が生じる。このため、この種の工事では掘削機の通過に先立ち、その障害となる部分を安全かつ効率的に処理する技術が求められている。本工法は、地中に存置された既製杭（PHC 杭）の空孔内に切断機を吊垂挿入し、アプレシブ・ウォータージェット（研磨材添加水噴流）の高いエネルギー密度を利用して、杭体を内側からブロック状に精密切断する技術であり、アンダーピーニング工と併用することにより、既設の構造物を保全しながら効率よく施工することができる。

実際の切断処理作業は地中で行われるため、切断状態を視認することができない。このため、施工管理に不可欠なモニタリング方法として、切断機のノズル部に伝播する振動波形を測定し、この波形を解析することから切断の可否および切断状態をリアルタイムに確認する技術を併せて開発した。

今回、種々の実験を通して開発した施工システムをシールド工事に適用し、その実用化に成功した。本報告では、この既設杭切断処理工法の概要と実験結果および施工結果について報告する。

## 2. 工法の概要

大阪市地下鉄7号線の工事は、営業中の京橋～鶴見緑地間(5.2km)に引き続き、都心延伸工事の京橋～大正間と郊外延伸工事の鶴見緑地～門真南間、合わせて延長約10kmを現在施工中である。本報告の対象とする地下鉄7号線第11工区工事は、城見2丁目を起点に片町2丁目まで延長259.5mを施工するもので、そのうち207.5mを単線並列式の泥土圧シールド工法で掘削する。この路線上に既設構造物の基礎杭（PHC 杭）16本のうち8本があるため、これら杭体のGL-22m～28m付近を本工法により切断処理した。

図-1に、同第11工区工事における施工システム図を示す。施工においてはまず、リバース工法にて6本の仮受杭を打設し、仮受梁を構築後ジャッキにてビルを受け替えた。次

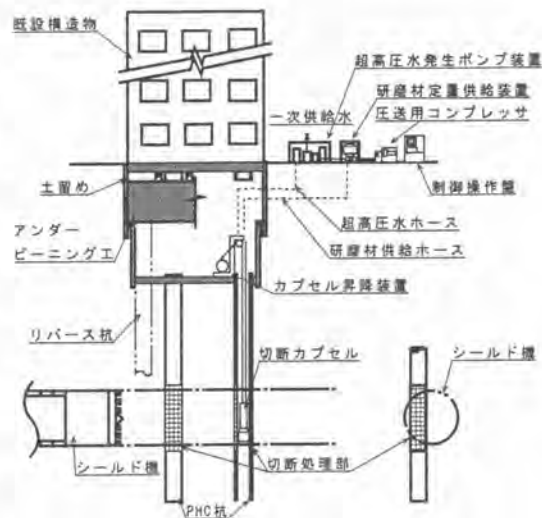


図-1 施工システム

に仮受梁下に杭切断用立坑を築造し、既設杭を部分的に切断した後、杭頭より空孔内へ切断機を挿入し、アブレシブジェットを用いて既設杭の障害となる部分をブロック状の小塊片に切断した。

本工法の特長は以下の通りである。

- ①超高压(2500kgf/cm<sup>2</sup>)のアブレシブジェット技術の導入
- ②全自動遠隔操作システムの構築(切断作業の完全自動化)
- ③任意に設定された切断パターンに沿って杭体を精密に切断(サーボ制御式切断機の開発)
- ④研磨材供給量の自動コントロール(切断能力の安定化)
- ⑤アンダーピーニング工との併用で既設構造物を保全しながら効率よく施工
- ⑥切断状態のモニタリング技術の開発(振動レベル測定システム)

### 3・施工システムの概要

#### 3・1 切断システム

切断システムは、既製杭内部の空孔から遠隔作業で杭体を切断するものであり、切断カプセル(切断機)、カプセル昇降装置、超高压水発生ポンプ装置、制御装置および研磨材定量供給装置で構成されている。切断カプセル(写真-1)は、高压水と研磨材の混合ジェットを噴射するノズルと、このノズルを旋回駆動させるサーボ駆動機構が装備されている。また、カプセル昇降装置には、カプセルを昇降させるサーボ駆動機構、ロータリーエンコーダを用いた深度計およびワイヤーロープを巻き取るワイヤードラム等が装備されている。これらのサーボ駆動機構により切断カプセルは、昇降動作と旋回動作および昇降・旋回の複合動作(斜移動)が可能となり、任意にプログラム設定されたノズルの移動パターンと移動速度に従い、多次元の移動を精密に自動制御することができる。

ウォータージェットの切断能力を保持するために、研磨材の供給量を適切にコントロールする手段として、研磨材定量供給装置を備えている。これは、研磨材供給量の計測値に基づき研磨材供給タンクの調節弁を操作して供給量



写真-1 切断カプセル

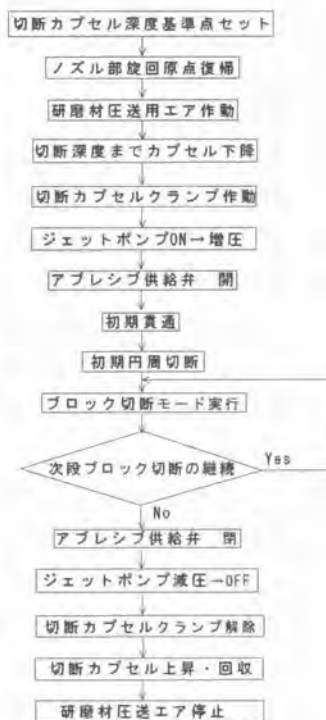


図-2 切断システム動作フロー

の自動調節を行うものであり、併せて研磨材の圧送空気の流量調節とドライヤーによる湿分除去を行っている。研磨材の供給ラインには、摩耗対策のために継手部のない一本物のホースを使用した。さらに、ノズルの旋回動作を原点より 363° の範囲で揺動する方式を採用し、ホースおよび信号ケーブル類に生ずるねじれを処理した。

切断システムを構成する各装置は、集中制御装置を用いて地上より遠隔操作される。切断システムの動作フローを図-2 に示す。

### 3・2 振動レベル測定システム

遠隔作業でウォータージェット切断を行う場合、アプレシブジェットの噴射状態や被切断物の切断状態をリアルタイムに監視し、未切断部の発生を防止するためのモニタリングが不可欠である。このため本工法では、切断状態を地上でモニタリングする方法として、振動レベル測定システムを開発した。当システムは、切断カプセルのノズル部に取り付けられた加速度ピックアップ（写真-2）、および振動レベル測定器で構成されている。まず、加速度ピックアップにより切断機ノズル部に伝播する振動波形を測定し、FFT によりこの波形のスペクトル解析を行い、切断作業に対して大きく変動する特定周波数帯域の振動波形を抽出する。そして、この特定周波数帯域の振動レベルを常時監視することで、切断の可否および切断過程の状態を確認する。すなわち、検知された振動波形の振動レベルを基準となる各振動波形（①水ジェットのみ噴射した場合の振動波形、②水ジェットと研磨材を噴射しかつ未切断状態にある振動波形、③水ジェットと研磨材を噴射しかつ切断状態にある振動波形）と比較することから、水ジェットと研磨材の噴射状態ならびに切断の可否を即時に判定し、未切断部の発生を防止することができる。

## 4・模擬切断試験および結果

アプレシブジェットによる切断方法では切断性能に及ぼす因子として、①噴射圧力、②ノズル径、③噴射水量、④研磨材の種類と供給量、⑤研磨材混合状態の良否、⑥被切断物に対するジェットの衝突角度、⑦ノズルと被切断物との離隔距離、⑧ノズルの移動速度等が重要となる。これらの因子において、ノズルと被切断物との離隔距離、ノズルの移動速度については条件設定において比較的自由度がある。すなわち、ウォータージェット切断技術を利用するに当たっては、これらの因子を被切断物に応じて適切に設定し制御することが重要となる。

PHC 杭の杭体はコンクリート部と PC 鋼棒部から成り、ジェットの切断条件はそれぞれ異なるが、切断片をシールド機に取り込み円滑に排出するためには、切断条件の厳しい PC 鋼棒部を確実に切断することが求められる。そこで、PC 鋼棒部を主体に基本的な切断条件を把握するため、地上で PHC 杭（外径約 600mm、空孔径 400~420mm、PC 鋼棒径 9mm）の模擬切断試験を行った。



写真-2 ノズルおよびピックアップ

#### 4・1 ノズルと被切断物との離隔距離

ノズルと被切断物との距離、貫通に要する時間の最適条件を決定するため、ノズル位置を固定した状態で表-1 に示す条件でジェットを噴射し、離隔距離 15～30mm の間を 5mm ピッチで変化させ、杭体を貫通するのに要した時間を測定した。

図-3 は PC 鋼棒部のある杭体部分にウォータージェットを指向させ、そのときの離隔距離と杭体の貫通時間との関係を示している。結果では、離隔距離 30mm の貫通時間にばらつきがみられる。一方、杭体の空孔の歪みや内壁面の凹凸を考慮すると、設計上の離隔距離は 20mm 以上が望ましい。従って、前述の実験結果と設計上の要請の両者を考慮して離隔距離の適正値を 25mm とした。また、貫通時間については余裕を見込み 150 秒に設定した。

#### 4・2 ノズルのトラバース速度

離隔距離 20mm、25mm、トラバース速度 60～120mm/min でノズルを円周方向および杭軸方向に移動した実験を行い、切断の良否を判定した。表-2 に示す結果によれば、ノズルのトラバース速度の限界速度は 80mm/min 程度と推定されるので、切断の確実性を得るためにトラバース速度の適正値を 60mm/min とした。

また、この実験においては研磨材としてガーネットの他に鑄鉄グリッドを使用した。ガーネットと同じ圧力条件、離隔距離では PC 鋼棒部の切断が不可能であった。

以上の試験結果に基づき、PHC 杭の切断条件を表-3 に示すとおり設定した。

### 5・現場実証試験および結果

次に模擬切断試験の結果を踏まえ、杭長 7m の PHC 杭を地中に打設（打設深度 5m）し、空孔内に注水した状態で地中切断試験を行った。

#### 5・1 切断の軌跡（ノズルの移動パターン）

当試験ではノズルの移動パターンとして図-4 に示す A および B のモードで行った。ここに、シールド機の排土可能な最大寸法 25cm を考慮して、切断ブロックの形状が 20cm 以内に収まるように規制した。

表-1 実験条件

ポンプ圧力	2320 kgf/cm <sup>2</sup>
水量	13 l/min
研磨材の種類	ガーネット#60
研磨材供給量	190 kg/h

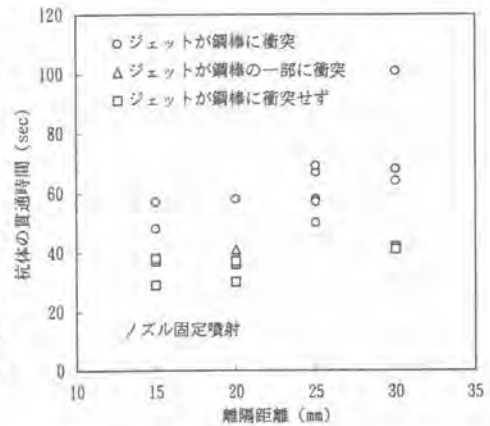


図-3 離隔距離と貫通時間

表-2 移動切断実験における切断状態の判定 (○…切断、●…切断不良)

トラバース速度	離隔距離 25mm	離隔距離 20mm
60 mm/min	○ ○	○ ○
70 mm/min	○ ○	○ ○
80 mm/min	○ ○	○ ○
90 mm/min		● ●
100 mm/min		● ●
110 mm/min		● ●
120 mm/min		● ●

表-3 PHC 杭の切断条件

超高压ポンプ吐出圧	2500 kgf/cm <sup>2</sup>
ノズルのトラバース速度	60 mm/min
研磨材供給量	200±20 kg/h
研磨材	ガーネット#60
離隔距離	25 mm
初期貫通時間	150 秒

ここで、Aモードではブロックが最終の円周切断にて杭体より離脱するが、Bモードでは縦切断しながら櫛歯状に順次離脱する。1サイクルの施工時間はAモードで63min、Bモードで70minであり、Bモードの方が施工時間がかかる。よって、両モードとも切断能力について問題はなかったが、実施工にはAモードを採用することにした。

### 5・2 切断システムの作動状況および機能確認

現場実証実験における切断状態を写真-3に示す。この結果より、切断システムの機能、すなわち旋回、昇降、旋回・昇降の複合動作（斜移動）は、プログラム設定通り精密に制御されていることが確認できた。切断ブロックの寸法については、切断溝幅は約5mm、高さ（円周切りの間隔）は計画通り20cmで切断されていた。一方、幅（縦方向の切断間隔）については計画寸法18.8cmに対して±1cmの誤差が生じた。これは、切断カプセル円周方向の回転ずれによるものであり、空孔内におけるカプセルのクランプ力をさらに高める必要のあることが分かった。

### 5・3 振動レベル測定システム

振動測定結果からは、4kHz 前後の周波数帯域において切断状態に関わる振動レベルが大きく変動し、5dB 前後の出力差が確認された。これに基づき写真-4 に示すモニタリング専用のシステムを製作した。

## 6・実施工

大阪市地下鉄7号線11工区内の計画路線上に敷設されているPHC杭を対象に本工法を適用した。現場施工条件を表-3に示す。施工状況については、杭孔底部に研磨材が予想以上に沈積し、これを適時エアリフトで処理した点を除き計画通り実施できた。切断状態のモニタリングについては、前述の実証試験とは異なり1~3kHzの振動成分に有意な信号を抽出した。図-4は実施工で得られ

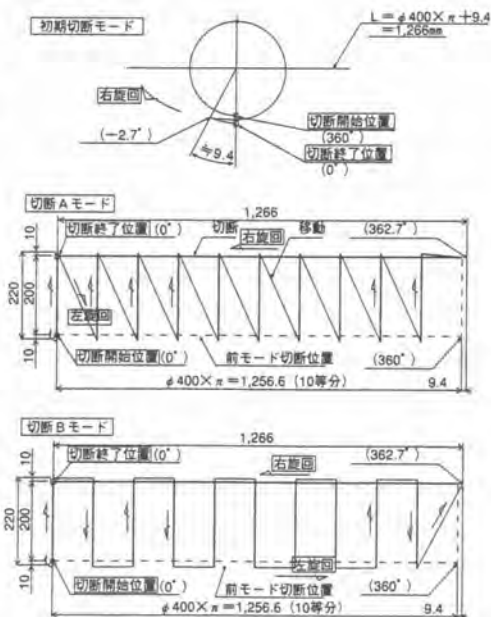


図-4 杭切断の軌跡（展開図）



写真-3 現場実証実験における切断ブロック



写真-4 振動レベル測定システム

た基準となる振動波形データを示すもので、ジェット  
の噴射状態や切断状態が振動レベル上で、それぞ  
れ明確に判別することができる。すなわち、図中  
において、切断作業中の振動レベルがbの許容範囲を  
超えてaに近づけば、ウォータージェットと研磨材  
の両方が噴射されているにも関わらず不完全な切断  
状態にあると判定できる。また、振動レベルがbの  
許容範囲を超えてcのレベルに近づけば、研磨材の  
供給量不足か閉塞トラブルが発生したものと判定で  
きる。

なお、モニタリング方法として、被切断物に伝播  
する振動波形を抽出する方法も提案されているが、本工事のように地中に拘束された長尺の杭体では  
振動伝播波形の減衰が激しく、杭天端から有意な信号を検出することは困難であった。

シールド工事においては、シールド機が杭体の存在を感知することなくスムーズに掘進し通過する  
ことができた。切断ブロックは、5%程度がスクリーコンベア後部の礫取り箱で回収され、その他は、  
15cm アンダーに小割りされた状態で圧送ポンプラインより掘削土と共に排出された。

表-3 現場施工条件

杭番号	杭切断長(m)	延べ切断長(m)	切断ブロック数
P14	6.20	122.20	310
P12	3.80	75.68	180
P10	5.60	110.64	280
P8	6.40	126.17	320
P7	6.40	126.17	320
P9	5.40	106.75	270
P11	4.40	87.33	220
P13	6.20	122.29	310
計8本	計44.40	計877.32	計2,220

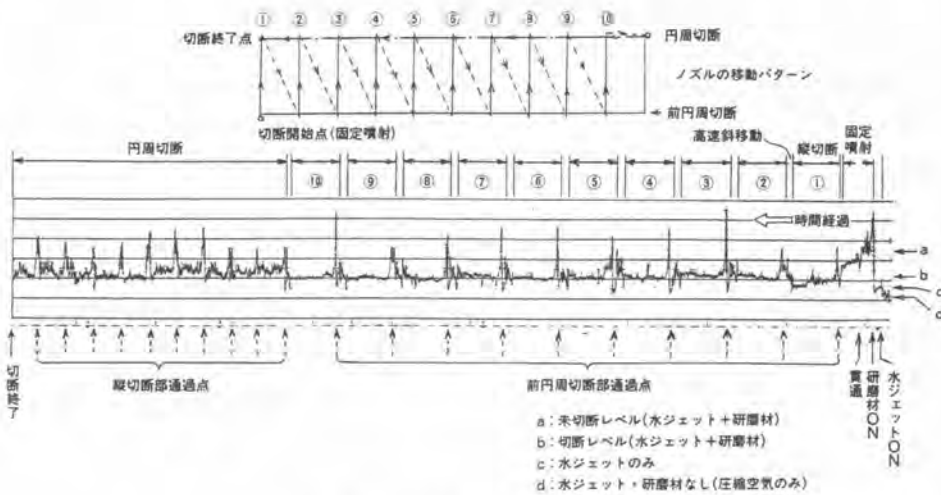


図-4 実施工における振動波形

## 7. おわりに

本切断処理工法は杭体内部の空孔を利用した技術であり、現段階では適用範囲が限定される。しかし、シールド工事の障害となる既製杭を現位置で安全かつ効率的に処理した報告事例は少なく、本工法が有力な処理手段の一つとして位置づけられるものと期待される。

本工法の開発にご指導、ご協力いただいた関係各位に謝意を表します。