

報告 高電圧パルス放電を利用したコンクリート表面のはつり方法の開発

木村 博^{*1}・小俣 貴之^{*2}・植村 賢介^{*3}・村上 一夫^{*4}

要旨：現在、実用化されているはつり方法は、コンクリートが乾燥した状態ではつるため、大量の粉じんが発生する。粉じんを嫌う環境でコンクリートをはつる場合など、粉じんを確実に捕集する方法が課題である。高電圧パルス放電を利用したはつり方法は、コンクリート表面に電極を当て、高電圧の電流を極短時間に流してコンクリートをはつる方法である。この方法は、はつる対象部位を水封するため、粉じんが発生しない。床面を対象とした試作機では、はつり速度が 6.5m²/時間（深さ 10mm 換算）と、これまでのはつり方法と遜色のない性能を示した。また、壁面を対象としたプロトタイプ機でも、はつれることを確認した。

キーワード：高電圧パルス放電、はつり、粉じん、高電圧、絶縁破壊、床面、壁面

1. はじめに

現在、実用化されているコンクリートのはつり方法は、コンクリートが乾燥した状態ではつるため、大量の粉じんが発生する。そのため、粉じんの発生源に集じん機を設置して、粉じんを吸引している。しかし、粉じんを嫌う環境でコンクリートをはつる場合や、汚染されたコンクリートをはつる場合、発生した粉じんを完全に捕集できるか疑問である。

今回報告する高電圧パルス放電を利用したコンクリート表面のはつり方法（以後、高電圧パルス放電はつりと表記）は、コンクリートの表面に電極を押し当て、高電圧の電流を極短時間与えることで、コンクリートをはつる方法である。この方法は、これまでの方法と異なり、コンクリートの表面を水封してはつりを行うため、粉じんが発生しない。

本報では、高電圧パルス放電はつりの基礎性状を実験で確認した後、まず床面を対象としたはつり装置を開発した。また、壁面を対象としたはつり方法についても検討したので、その経過を報告する。

2. 高電圧パルス放電はつり工法とは

図-1に、高電圧パルス放電はつり工法の原理を示す。高電圧パルス放電はつり工法とは、コンクリートに、高電圧（350kV 以上）の電流を、極短時間（300ns 以下）、繰り返し高速（10Hz 程度）で与えて、電極間のコンクリートをはつる方法である。電気を使ってコンクリート表面を除去する（はつる）工法として、コンクリート内部の鉄筋に直接電流を流し、ジュール熱で鉄筋を発熱させ、熱膨張ではつる方法、コンクリート中の鉄筋を、表面から強力な交番磁界中に置いて、誘導加熱する方法などが実用化されたり、提案されている¹⁾。

本報で報告する方法は、前述の鉄筋の加熱膨張による表面除去と異なり、コンクリート表面に極短時間、高電圧電流を流して、コンクリート中の水分や空気を膨張させて破壊するという方法である。

図-2に、水とコンクリートの絶縁破壊特性を示す。横軸は放電時間、縦軸は絶縁が破壊される電圧（絶縁破壊電圧）である。

水に高電圧パルスを負荷し、放電時間を十分長くして

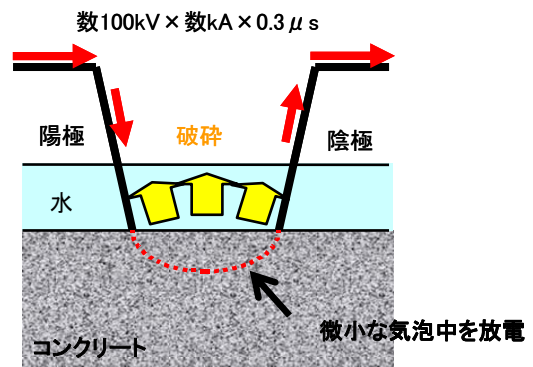


図-1 高電圧パルス放電はつり工法の原理

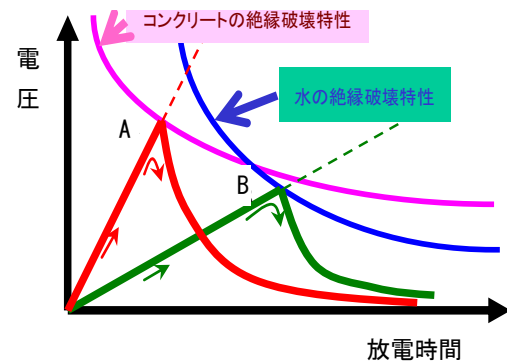


図-2 水とコンクリートの絶縁破壊特性²⁾

*1 清水建設（株） 原子力・火力本部計画部 課長 工修（正会員）

*2 日立建機（株） 建設システム・商品開発事業部 技術部 主任

*3 永田精機（株） 研究所 所長 理博

*4 清水建設（株） 原子力・火力本部計画部 部長 工修

放電した場合、水の絶縁破壊電圧は低く、水に電流が流れる。しかし、放電時間を極短時間にすると、水の絶縁破壊電圧は急激に上昇し、絶縁物のような性状を示す（**図-2**の青線で示す曲線）。

一方、コンクリートに高電圧パルスを負荷し、放電時間を十分長くして放電した場合、コンクリートの絶縁破壊電圧は高く、コンクリートに電流は流れない。しかし、放電時間を極短時間にした場合、コンクリートの絶縁破壊電圧は水の場合と同様、急激に上昇する。ただし、コンクリートの絶縁破壊電圧は、水の絶縁破壊電圧を下回るため（**図-2**のピンク色で示す曲線）、コンクリートに電流が流れる。

水の絶縁破壊電圧曲線とコンクリートの絶縁破壊電圧曲線の交点はおおよそ 300ns である。高電圧パルス放電時間が 300ns よりも長い場合は、電流は水中を流れる（**図-2**の緑色の曲線）。高電圧パルス放電時間が 300ns よりも短い場合は、電流はコンクリート中を流れる（**図-2**の赤色の曲線）。コンクリート中に放電した電流は、コンクリート中にプラズマを発生させ、電流経路にある水分や空気を急激に膨張させ、コンクリートを破壊していく²⁾などの諸説がある。

3. 高電圧パルス放電はつりの基本構成とコンクリートのはつり状況（1対電極の場合）

図-3に、高電圧パルス放電はつり装置の基本構成を示す。図は、水平部材（床面など）の上面をはつる場合

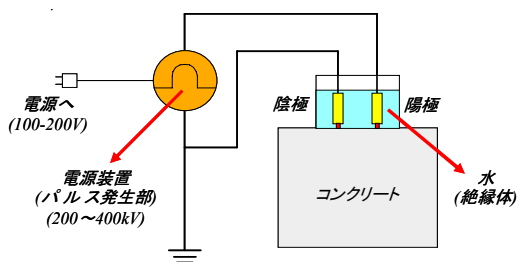


図-3 高電圧パルス放電はつり装置の基本構成



写真-1 高電圧パルス放電はつり工法によるコンクリートのはつり状況

のイメージである。

高電圧パルス放電はつり装置は、電源装置（パルス発生部）と電極で構成される。

電圧 100～200V の外部電源に接続された電源装置は、ここで電圧 200～400kV、電流数 kA まで昇圧する。放電は、300ns 程度のごく短時間で行われる。電極は、コンクリート上面に張った水中に陽極と陰極を入れ、電極の先端をコンクリート表面に軽く押し当てる。

写真-1に、高電圧パルス放電はつり工法によるコンクリートのはつり状況を示す。これは、電極が最少本数である1対の場合のはつり状況である。

はつりの形状は、両電極を結ぶ直線を長径とした円状となる。したがって、広範囲をはつる場合は、電極の本数を増やしたり、電極を移動させるなどの方法で行う。

高電圧パルス放電はつり工法は、絶縁体として水を使用する。これは、水が安価であり、水が汚染されなければ処理が容易であることによる。また、水であれば、鉱油などと違って、コンクリートを汚染しない。

なお、放電を繰り返すと、コンクリート中のアルカリ分が溶解して、絶縁抵抗が低下することが予測される。この場合は、適宜、水を交換するか、酸を添加して中和処理する。交換頻度等は、施工効率やコストに影響するため、実用化に向けて解決すべき課題である。

4. 高電圧パルス放電はつり工法の基礎性状の把握

4.1 コンクリートの空気量の影響

高電圧パルス放電はつりは、コンクリート中の空気をプラズマが通ることによって破壊することは既述した。コンクリートは、ワーカビリティの確保や凍結融解抵抗性の確保等の観点から、空気を連行するが、ここでは、コンクリートの空気量を変化させて、はつり形状のちがいを確認した。

写真-2に、空気量とはつり状況の関係を示す。

コンクリートは、設計基準強度 21N/mm² 共通、空気量

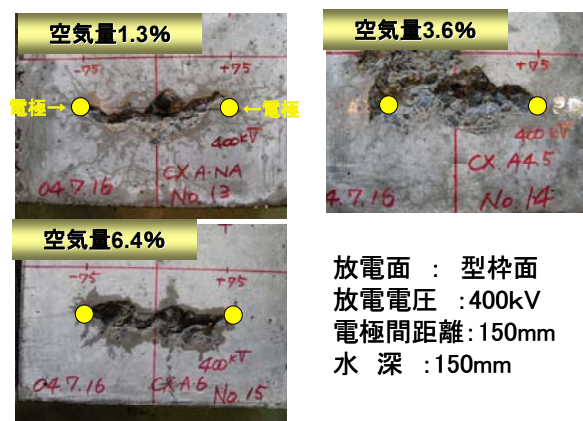


写真-2 空気量とはつり状況の関係

は3.6%を標準として、その前後として1.3%と6.4%の3水準を設定した。

放電条件は、放電電圧200kVと400kVの2水準、電極間距離150mm、水面からコンクリート天端までの深さ150mmとし、コンクリートの型枠面に放電した。

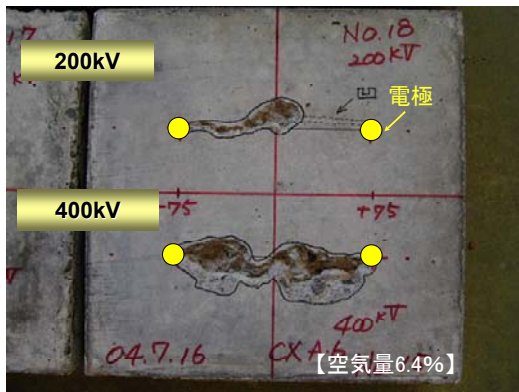
はつり長さは、各電圧とも、空気量によらず、ほぼ同程度となった。このことから、この程度の空気量の範囲であれば、高電圧パルス放電で問題なくはつれると考えられる。

4.2 放電電圧の影響

写真-3に、放電電圧とはつり状況の関係を示す。

設計基準強度21N/mm²、空気量6.4%のコンクリートに対して、電極間距離150mm、水面から試験体までの距離150mm、放電電圧を200kVと400kVの2水準として、放電した。

その結果、放電電圧400kVでは、両電極間（距離150mm）がはつれた。これに対して、放電電圧200kVでは、はつり長さは約80mmと、電極間距離の1/2であった。また、放電電圧200kVのコンクリートにおいて、はつれていない部分を注目すれば、はつれていない方の電極（写真右側の電極）と、はつり痕の端部を結ぶ線上に、



電極間距離:150mm、水深:150mm

写真-3 放電電圧とはつり状況の関係

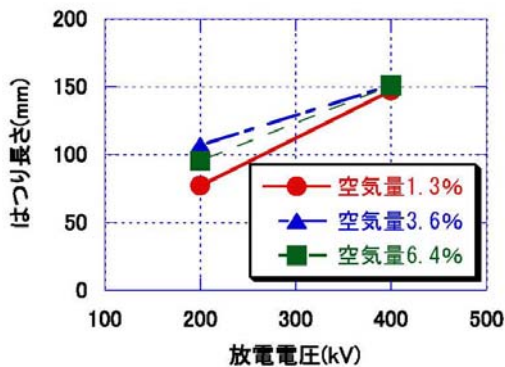


図-4 各空気量における放電電圧とはつり長さの関係

わずかではあるが、線条痕が残っていた。このことは、一方の電極からコンクリート中に入った電気が、あるところでコンクリートを抜け、その後コンクリート表面を流れて、もう一方の電極に到達したと考えられた。

図-4に、各空気量における放電電圧とはつり長さの関係を示す。空気量は、1.3%、3.6%、6.4%の3水準、放電電圧は200kVと400kVの2水準とした。

いずれの空気量においても、放電電圧とはつり長さの関係はほぼ同様であった。

このことから、電極間の全域をはつるには、電極間距離に応じた放電電圧を設定する必要があることが推察された。

4.3 電極間の距離と水深の関係

高電圧パルス放電はつりでは、コンクリート中に電気を通すため、絶縁体としての水が必要不可欠である。一方、使用する水は、廃棄物量の削減などの観点から、極力少ないことが望ましい。次に、電極間距離を固定し、水面からコンクリート天端までの深さ（＝水深）を変化させて、高電圧パルス放電はつりに必要な最小水深を確認した。

図-5に、水深とはつりの可否の関係を示す。試験は、コンクリート設計基準強度21N/mm²、放電電圧400kV、電極間距離100mmとした。

水深が電極間距離の1/2未満の時は、コンクリートをはつれなかった。しかし、水深が電極間距離の1/2以上になると、コンクリートをはつることができた。

このことから、水深は、電極間距離の1/2以上を確保する必要があることを確認した。

4.4 鉄筋コンクリートを対象としたはつり方法

高電圧パルス放電はつりは、電気を使ったはつり方法であるため、良好な導電体である鉄筋の影響を大きく受ける。

写真-4と図-6に、鉄筋の直上で放電した場合と鉄

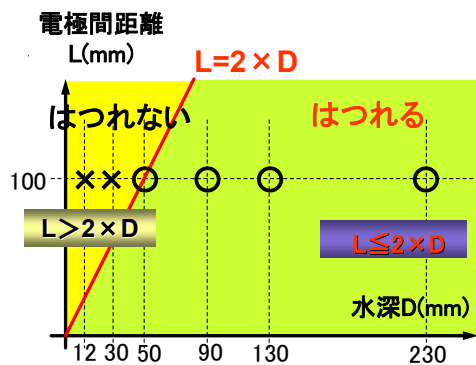


図-5 水深とはつりの可否の関係

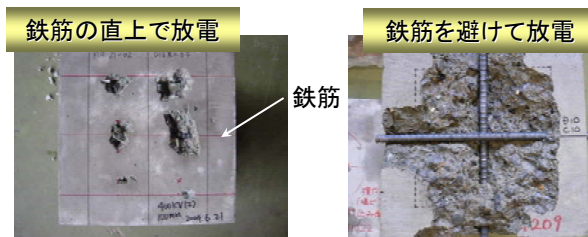


写真-4 鉄筋の直上で放電した場合と鉄筋を避けて放電した場合はつり状況

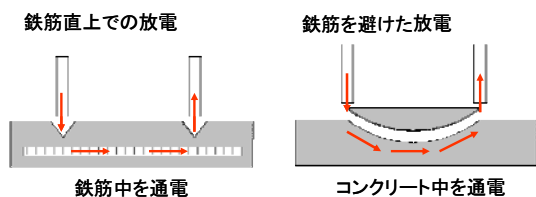


図-6 鉄筋の直上で放電した場合と鉄筋を避けて放電した場合はつり状況

筋を避けて放電した場合はつり状況を示す。

鉄筋直上で放電した場合、コンクリート中に放電した電気は、電極直下の鉄筋に流れ、他方の電極に戻る。そのため、はつり痕が、電極直下に鉄筋に向かって形成された。

これに対して、鉄筋を避けて放電した場合、無筋コンクリートに放電した時と同じように、コンクリート表面をはつることができた。また、鉄筋も、損傷させることなく、取り出すことができた。

はつる前に鉄筋の位置を確認して、鉄筋のない場所を放電することは現実的ではない。しかし、電極を多数配置して放電するか、もしくは電極を移動させながら放電することによって、鉄筋をかわした位置で放電することができ、問題なくはつれると考えられる。

5. 高電圧パルス放電はつり装置の開発

5.1 高電圧パルス放電はつり装置の試作

以上の基礎研究の成果に基づき、床面のはつりを想定した高電圧パルス放電はつり装置の試作を行った。

図-7 に高電圧パルス放電はつり装置のシステム回路図、表-1 に同装置の仕様を示す。

試作した高電圧パルス放電はつり装置は、100V の電源を 350kV に昇圧して放電する仕様とした。

はつり効率は、電極を多数配置して 1 回にはつれる面積を確保する方法と、電極を移動させて広範囲をはつっていく方法の 2 種類が考えられる。

電極を多数配置する方法は、1 回の放電での消費電力が大きく、電源装置が大きくなることが予想されるため、今回の試作では、電極移動方式を採用した。このため、

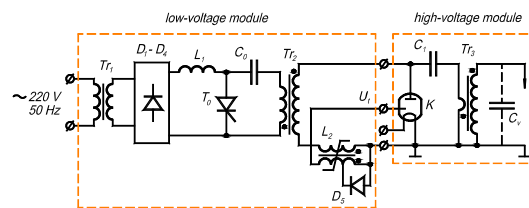


図-7 高電圧パルス放電はつり装置のシステム回路図

表-1 高電圧パルス放電はつり装置の仕様

項目	性能
放電電圧	350kV
貯蔵エネルギー	600J
放出エネルギー	300J
放電速度	0~10Hz
放電時間	0.3 μs
重量	200kg

電源装置には、放電速度を速くして、放電の繰返し回数を確保することが要求される。試作機では、電極部のサイズを考慮して、最大放電速度を 10Hz とした。

図-8 に高電圧パルス放電はつり装置の平面、図-9 に高電圧パルス放電はつり装置のカットモデル、写真-5 に電極の状況を示す。

試作機の外形寸法は直径 460mm、長さ約 1m、重量は 200kg となった。

電極はくしの歯状とし、陽極側の電極と陰極側の電極が交互に配列するように、かみ合わせて配置した。電極間の距離(写真における s の寸法)は種々の検討の結果、25mm に設定した。

5.2 試作機によるはつり性能の確認

試作機によるはつり性能の確認を行った。

写真-6 に性能確認試験の状況を示す。

試験には、設計基準強度 30N/mm² のコンクリートブロックを放電に十分な深さまで水浸させ、床面のはつりを想定して、コンクリートの天端のはつりを行った。

放電電圧 320kV、電極間距離 25mm、放電速度 8Hz、電極の移動速度は 0.28m/分とした。

写真-7 に、性能確認試験後のコンクリートの状況を示す。

コンクリートの表面は電極が通った範囲でほぼ同程度の深さ(10~15mm 程度)ではつることができた。

また、この時のはつり速度は 6.5m²/時間であった。

従来のはつり工法におけるはつり速度は 0.9~4.5m²/

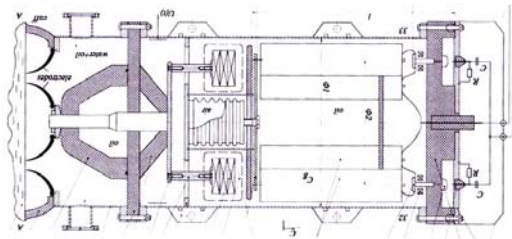


図-8 高電圧パルス放電はつり装置の平面

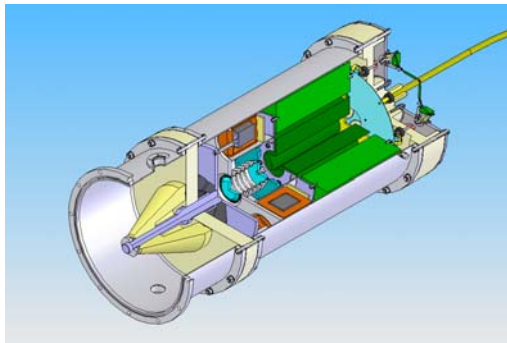


図-9 高電圧パルス放電はつり装置のカットモデル

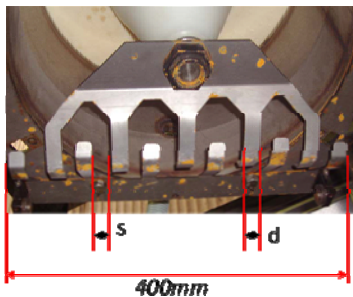


写真-5 高電圧パルス放電はつり工法の電極の状況

時間（深さ 10mm 換算）である³⁾ことから、試作機のはつり速度は従来工法の 1.5~7 倍程度の効率であることが確認された。

6. 高電圧パルス放電による横向きはつりの検討

これまでの検討は、床面を対象としたはつり装置の開発であった。これは、床面の方が、高電圧パルス放電はつりに必要な水を湛えやすいことによるものである。

しかし、はつり面については、床面だけでなく、壁面への要求もある。そこで、壁面を対象とした検討も行った。その一部を紹介する。

壁面を対象とした高電圧パルス放電はつりの課題は、いかにして電極の周囲に水を保持するかにある。

図-10 に、壁面を対象とした高電圧パルス放電によるはつり装置のイメージを示す。

壁面を対象とした場合、装置は大きな水槽を持ち、そ

の中で電極を移動させながらはつっていくというものである。

また、はつりによって生じたコンクリートの破片は水槽の下部に落下・沈降するが、それを雨どい状の場所に集め、外部に排出することを考えている。

写真-8 に、壁面はつりを対象としたプロトタイプ機の状態を示す。

水槽に相当する部分は周囲をスポンジで囲い、これをコンクリートに押し当てることによって、すでにはつられて表面が凹凸になった状態であっても、水を湛えられるようにした。

電極は、常にコンクリートに押し当てられるよう、各電極にバネを取り付けた。電極の配置は、縦 3 列、横 5 列（30mm 間隔）の配置とし、陽極と陰極を千鳥配置として、電極を移動させなくても広範囲がはつれるようにした。

写真-9 に、プロトタイプ機による壁面のはつり状況を示す。

左の写真は、コンクリートのはつり痕と電極の位置を重ね合わせたものだが、電極を押し当てられた範囲のコンクリートは、ほぼ同程度の深さではつることができた。

右の写真は、一度、高電圧パルス放電である程度の面

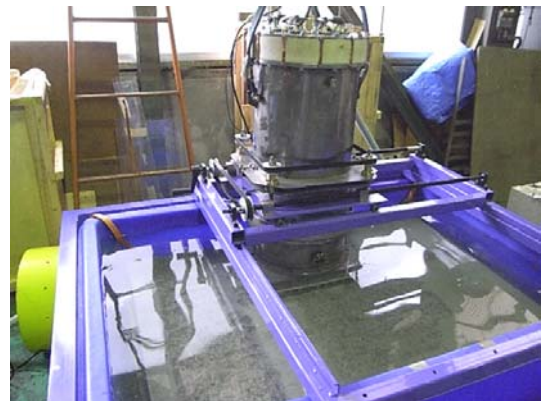


写真-6 性能確認試験の状況



写真-7 性能確認試験後のコンクリートの状況（下向きはつり）

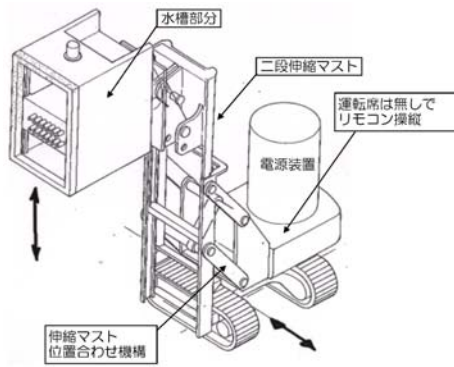


図-10 壁面を対象とした高電圧パルス放電によるはつり装置のイメージ



写真-8 壁面はつりを対象としたプロトタイプ機の状況

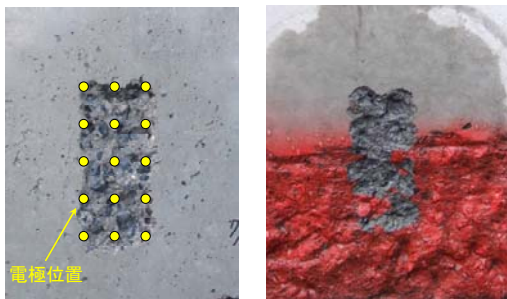


写真-9 プロトタイプ機による壁面はつり状況

積をはつた後、はつた範囲をペンキで着色し、はつた部分と、まだはつっていない部分をまたいで、電極を当て、放電したものである。

下半分が凹凸であるにも関わらず、水槽の周囲に配置したスポンジによって漏水することなく、コンクリートをはつることができた。

7. おわりに

今回、コンクリート表面に高電圧の電気を極短時間に放電してはつる高電圧パルス放電はつり方法を提案し、性能を確認した。

その結果、はつり速度については、従来のはつり工法に劣らぬ性能であることが確認された。また、水中でコンクリートをはつるため、粉じんを発生させず、クリーンなはつり工法として期待される。さらに、放電電圧が数 100kV と高電圧であるにも関わらず、装置の取扱いに対して、特段の問題は見られなかった。

現状は、床面を対象としたはつり装置となっているが、今後は壁面のはつりにも対応できる装置を構築していく予定である。

また、この方法はコンクリートのはつりだけでなく、たとえばコンクリート表面に貼り付けたプラスチックタイルなどをはがすことも可能である。水中ではつることから、石綿などの有害物質が空气中に飛散することがなく、安全に回収することができる。

今後は、壁面を対象とした高電圧パルス放電によるはつり方法の開発と、装置の安全性・耐久性等に関するデータを取得する予定である。今回の性能確認試験では、連続放電中に、電源装置に人が近づいて、電源装置の水平移動を行った。このことから、安全面で問題はないと考えるが、かなりの高圧の電流を使用することから、さらに感電面での安全性を確認していきたい。

謝辞

今回、高電圧パルス放電はつり工法の電源装置を製作するにあたり、ロシア・トムスク工科大学の Lopatin 教授・Remnev 教授ほかの多大なる協力と助言を得た。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 1) 解体工法研究会編：新・解体工法と積算，(財)経済調査会，2003
- 2) 例えば，Usov A.F. et al Nauka-Moscow, pp7-11,1995 など
- 3) 小栗第一郎ほか：汚染コンクリート除染技術の開発，デコミッションング技報，(財)原子力バックエンド推進センター，No.30, pp.42-52, 2004