

ウルトラファインバブルを用いた 工事排水中和装置の開発

古賀 快尚^{*1}・上岡 亮一^{*1}・森山 恭衡^{*2}・梶谷 和志^{*2}・田川 元一朗^{*2}

Keywords : construction wastewater, neutralization treatment, carbon dioxide gas, ultra-fine bubble
工事排水, 中和処理, 炭酸ガス, ウルトラファインバブル

1. はじめに

建設工事ではコンクリートの洗浄水に代表されるように、懸濁物を含む強アルカリ性の工事排水が発生する。工事排水は、現場内に設ける濁水処理設備で中和処理と凝集沈殿処理を行い、水質汚濁防止法や自治体が独自に定める排出基準を満足することを確認した上で現場外に排出しなければならない。

工事排水の中和処理に用いる薬剤としては、希硫酸や炭酸ガスが代表的であるが、取り扱いが容易であることから炭酸ガス（「二酸化炭素」の代わりに一般的な呼称として以降用いる）が多く建設現場で採用されている¹⁾。炭酸ガスを中和剤として添加する際、気体の炭酸ガスを排水中に送り込む曝気処理が採用されているが、溶解しきれない炭酸ガスが濁水処理設備を介して大気中に放出されており、中和に際してロスが多いことが指摘されている²⁾。写真-1に曝気処理における

排水への炭酸ガス添加状況を示す。写真-1のサクションホース中に多数の気泡が確認できるが、この気泡が排水に溶解しきれないロスに相当する炭酸ガスである。このロスの削減は、排水処理コストの低減のみならず炭酸ガスの大気中への放出を抑制することから、カーボンニュートラルに貢献する効果的な取り組みの一つとして期待できる。

そこで筆者らは、有機不純物の吸着処理等で実績があるウルトラファインバブルの発生装置を中和処理に適用し、炭酸ガスのロスを削減できる工事排水中和処理技術を開発した。本稿では、工事排水中和装置の概要と濁水処理設備適用に向けた室内実験、現場実証結果について述べる。

2. 工事排水中和装置の概要

2.1 ウルトラファインバブル

炭酸ガスを効率よく溶解させる方法としては、100nm スケールの微細泡であるウルトラファインバブル技術を活用することが挙げられる。ウルトラファインバブルは微細な泡で排水に対する比表面積を増大させることができるため、気体を水に効率よく溶解させる効果が期待できる³⁾。表-1にウルトラファインバブルの発生方法を示す。ウルトラファインバブルの生成方式は、キャビテーション方式と微細孔方式の2つに大別される。キャビテーション方式は、流体中に圧力差を与えることで微細泡を発生させる方式であるが、圧力差を与える方法として流体力学的に旋回流やベンチ

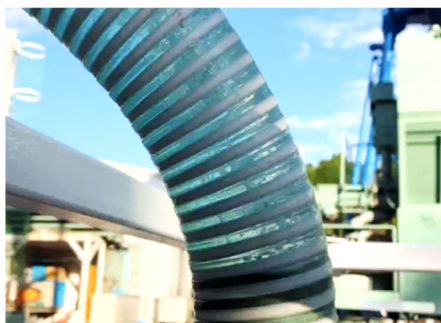


写真-1 曝気処理における排水への炭酸ガス添加状況
Photo.1 Addition of carbon dioxide to wastewater
during aeration treatment

*1 技術センター 生産技術開発部 地下空間技術開発室

*2 菅機械工業（株）

表-1 ウルトラファインバブルの生成方式
Table 1 Ultra-fine bubble generation method

方式	キャビテーション方式		微細孔方式
	流体力学式	超音波式	
概要	高圧で水を噴射や旋回流、ベンチュリー管を利用して圧力差を与え、キャビテーションにより微細泡を発生	超音波によって圧力差を与え、キャビテーションにより微細泡を発生	微細な多孔質体やハニカム構造のエレメントを通過させることで、流体をせん断し微細泡を発生

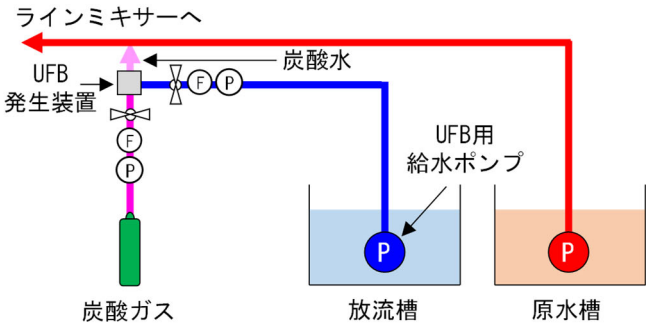


図-1 工事排水中和装置の構成

Fig.1 Construction wastewater neutralization equipment configuration



写真-2 ウルトラファインバブル発生装置
Photo.2 Ultra Fine Bubble Generator

ュリー管（管路の途中が細くなった管）を利用するか、高圧で気体を溶かし込んだ水を噴射する方法が挙げられる。また超音波を用いて圧力差を与え、キャビテーションにより微細泡を発生させる技術もあり、これは超音波洗浄などで広く知られている。微細孔方式は、微細な多孔質体やハニカム構造のエレメントを通過させることで流体をせん断し、微細な気泡を発生させる技術である。用途に応じて適切なウルトラファインバブルの発生方式が選択されており、化学工学における分離、排水処理、水質浄化、洗浄などでその有効性が確認されている⁴⁾。

工事排水の中和処理に適用した事例も報告されているが、ウルトラファインバブル発生装置に起因したバッチ処理方式の採用に伴う処理水槽の追加⁵⁾や対応可能な処理容量が限定的であるなど⁶⁾、広く普及展開する上で課題がある。

2.2 工事排水中和装置の構成

工事排水中和装置を開発するにあたり、①工事現場に広く普及している濁水処理設備に後付けが可能であること、②コンパクトで場所を取らず処理水槽等といった追加設備を必要としないこと、③ウルトラファインバブルの発生装置自体が動力を使用しないもの、を基本方針とした。図-1 に工事排水中和装置の構成、写真-2 にウルトラファインバブル発生装置を示す。工事排水中和装置は、ウルトラファインバブル発生装置、給水ポンプ、炭酸ガスラインと給水ラインの圧力、流量を確認するセンサー、流量を調整するバルブで構成

されている。ウルトラファインバブル発生装置は動力を発生しない微細孔方式で、濁水処理設備に組み込み易い配管タイプのものを選定した。このウルトラファインバブル発生装置は、配管内にハニカム構造体が仕込まれており、原水ラインに直接設置すると懸濁物が詰まって機能が損なわれることが懸念される。そのため、放流槽にウルトラファインバブル発生装置用に給水ポンプを設け、ウルトラファインバブル発生装置内で炭酸ガスと水を混合して炭酸水を生成するものとした。また生成した炭酸水を原水に添加するために、工事排水中和装置と原水ラインをチーズ配管で接続し、インライン処理方式で連続的に中和処理を行うものとした。

3. 工事排水中和装置の濁水処理設備適用に向けた室内実験

本開発は、既存の濁水処理設備に工事排水中和装置を外付けする構成としている。実機におけるウルトラファインバブル発生装置の運転方法に関する検討や排水処理への適用性を確認するために、現場適用に先立ち模擬工事排水の中和実験を行った。本章では、その内容と結果について述べる。

3.1 ウルトラファインバブル発生装置の運転方法検討実験

工事排水中和装置は、ウルトラファインバブル発生装置内で炭酸ガスと水を混合して炭酸水を生成する仕

様としたが、炭酸ガスのロス削減するためには、効率よく飽和炭酸水を生成する運転方法を見出す必要がある。そこでウルトラファインバブル発生装置の運転方法検討実験を行った。

図-2 に実験概要を示す。ウルトラファインバブル発生装置には炭酸ガスと水を供給するラインを接続し、各ラインそれぞれに圧力計と流量計、流量調整用のボールバルブを備えた。ウルトラファインバブル発生装置を通過した後に、炭酸水の入口と炭酸ガスの出口を制限した水槽を設け、炭酸水に対して pH と炭酸濃度、炭酸ガス出口で水に溶解しきれずロスとなった余剰ガス流量の計測を行った。炭酸水の飽和度を検討する上で、炭酸ガスの水中への溶解度は圧力と温度に依存するが、濁水処理設備に条件を合わせて実験条件を大気圧下であるものとし、水温を 20℃ に調整して実験を行った（炭酸水飽和時の濃度については、0.039mol/L とした⁷⁾）。実験時は炭酸ガスと水の混合比が飽和度や炭酸ガスのロスに影響を与えると考え、これをパラメータとして複数回確認実験を実施した。また炭酸ガス圧力と水圧は濁水処理設備で運用されている標準的な値を参考に、炭酸ガス圧力は 0.35MPa、水圧は 0.30MPa に設定した。

図-3 に炭酸ガスと水の混合比と炭酸水飽和度の関係を示す。図-3 より炭酸ガスと水の混合比を 0.7~1.4 で範囲で実験を行ったところ、概ね 1.0~1.4 の範囲では

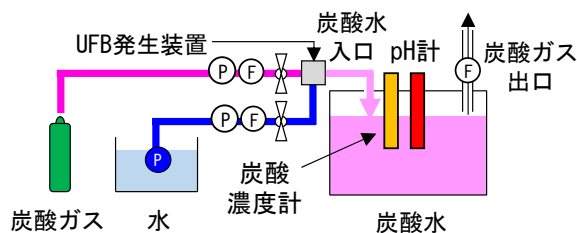


図-2 ウルトラファインバブル発生装置の運転方法検討実験
Fig.2 Experiment on how to operate an ultra-fine bubble generator

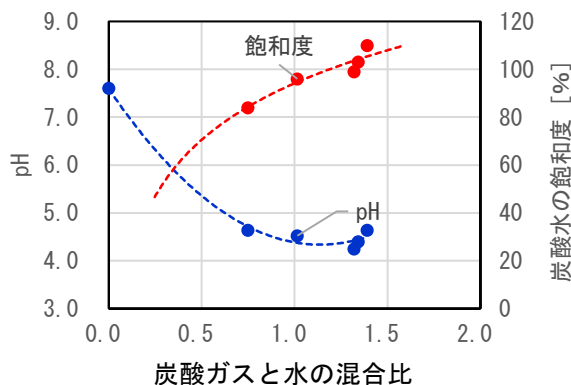


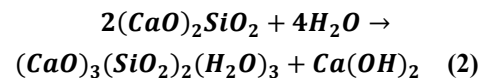
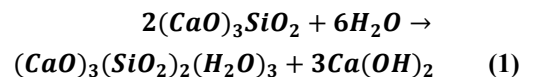
図-3 炭酸ガスと水の混合比と炭酸水飽和度の関係
Fig.3 Relationship between carbon dioxide and water mixture ratio and carbon dioxide saturation

飽和に達しているため、pH と飽和度ともに値が収束している。図-4 に炭酸ガスと水の混合比と余剰ガス量の関係を示す。炭酸ガスと水の混合比が大きいと余剰ガスの割合が増加していることから、水量に対して炭酸ガス量を増やしても水に溶解されずにロスになると解釈できる。これらの結果から、ウルトラファインバブル発生装置運転時は、炭酸ガスと水の混合比を 1.0 とすることが望ましいと言える。

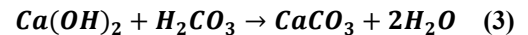
3.2 模擬工事排水の中和実験

工事排水中和装置は、ウルトラファインバブル発生装置内で炭酸ガスと水を混合して炭酸水を生成し、炭酸水を原水に添加して中和処理を行うものとしたが、標準的な手法である曝気処理と比較して本手法が有効であるのか確認するために、簡易的な検討を行った。

工事排水は、コンクリート洗浄水に起因すると考えると、セメント中に含まれるエーライト（ $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$ ）とビーライト（ $(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$ ）の水和反応はそれぞれ式（1）、式（2）で示され、いずれもアルカリ性の水酸化カルシウムを生成する。



このエーライト、ビーライトに由来する水酸化カルシウムと炭酸の反応が、式（3）の中和処理に相当する。



これら一連の反応を観察することを目的に、模擬工事排水の中和実験を行った。図-5 に実験概要を示す。ウルトラファインバブル発生装置には炭酸ガスと水を供給するラインを接続し、水供給ラインのボールバルブを開閉することで、曝気処理とウルトラファインバブル処理を切替可能とした。出口側にセメントを添加して pH を 12.4 に調整した模擬工事排水（18L）を用意

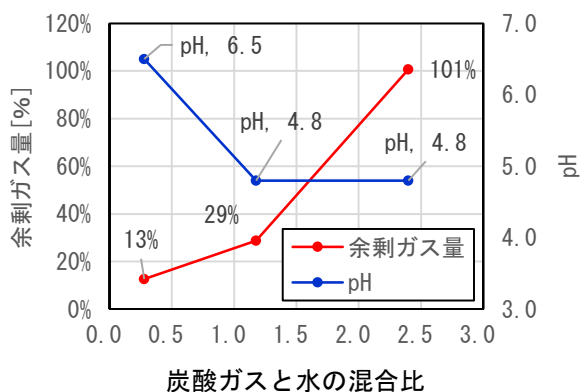


図-4 炭酸ガスと水の混合比と余剰ガス量の関係
Fig.4 Relationship between carbon dioxide and the amount of surplus gas

し、曝気処理・ウルトラファインバブル処理ともに炭酸ガスの添加量は 1.0L/min で連続的に添加を行い、模擬工事排水槽の pH の経時変化と中和処理に伴うイオン性物質の移動を観察するために、併せて導電率の経時変化を計測した。

図-6 に模擬工事排水の中和実験における pH の経時変化、図-7 に導電率の経時変化を示す。曝気処理の pH 経時変化は緩慢な曲線であり、通水時間 18 分時点で 10.6 程度に低下した。また導電率は一定の速さで線形的に低下し、通水時間が 12 分頃に収束に達している。これに対しウルトラファインバブル処理は、pH・導電率の低下速度が曝気処理と比較して顕著に早く、pH は通水時間 7 分で中性域である 8.0 まで低下、導電率は

2~3 分ほどで収束している。この結果から、ウルトラファインバブル発生装置内で炭酸ガスと水を混合して炭酸水を生成し、原水に添加する処理方法（≡ウルトラファインバブル処理）を採用することで、曝気処理と比較して炭酸ガスが中和剤としてより効率よく反応することが示唆され、中和処理時のロスを削減することが期待できると判断した。

4. 土木工事現場における現場実験⁸⁾

開発した工事排水中和装置の動作確認と炭酸ガス削減効果の検証を兼ねて、山岳トンネル工事の濁水処理設備（処理能力 50m³/h）で実験を行った。本章では実験内容とその結果について述べる。

4.1 実験方法

図-8 に濁水処理設備への工事排水中和装置の設置図、写真-3 にウルトラファインバブル発生装置設置状況を示す。図-8 中の赤字で記載した箇所が工事排水中和装置として追加設置した設備に相当する。ボールバルブを操作することで、炭酸ガスの一般的な添加方法である曝気処理とウルトラファインバブルによる処理を切り替え可能とし、それぞれの処理実績を記録した。表-2 に実験時の計測項目を示す。処理水量と中和処理に関

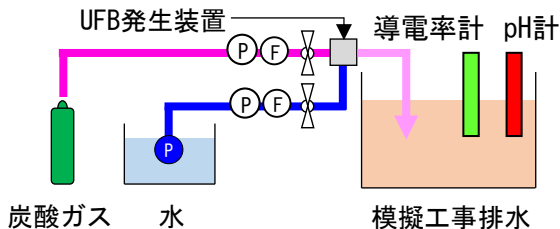


図-5 模擬工事排水の中和実験
Fig.5 Neutralization experiment of simulated construction wastewater

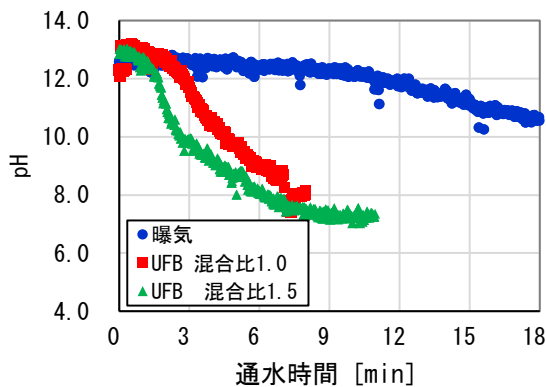


図-6 中和実験におけるpHの経時変化
Fig.6 PH change over time in neutralization experiments

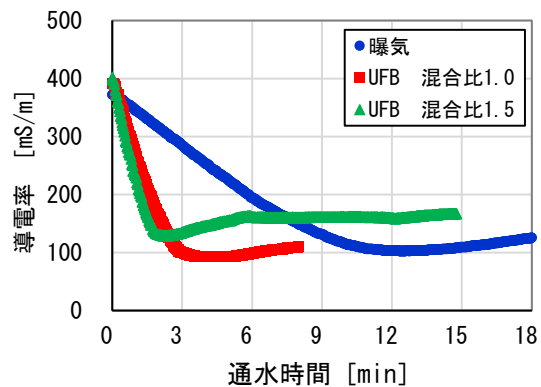


図-7 中和実験における導電率の経時変化
Fig.7 Electrical conductivity change over time in neutralization experiments

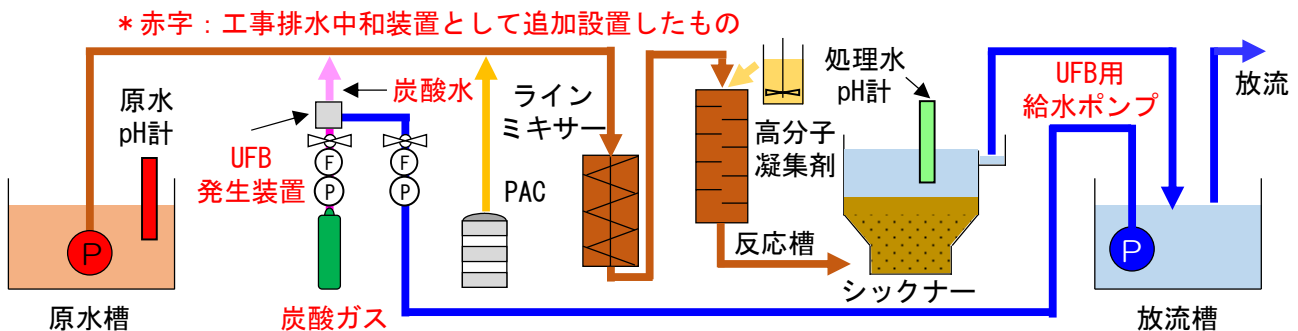


図-8 濁水処理設備への工事排水中和装置の設置図
Fig.8 Installation diagram of neutralization equipment to turbid water treatment facility

連するものを計測項目として設定した。

中和処理時の炭酸ガスの添加方法について、図-9 にコンクリート洗浄水処理時の pH 経時変化イメージを示す。コンクリート洗浄水を濁水処理設備で処理する際、中和剤である炭酸ガスはシックナーに設置した pH 計と電磁バルブによって添加の制御を行う。建設工事等に伴い発生する排水の放流基準は各自治体の条例等によって定められているが、その多くは pH で 5.8～8.6 とされている⁹⁾。実験を行った現場では、放流基準を満足

するように、中和処理においてシックナーの pH が 8.4 に達した際に電磁バルブを開いて炭酸ガスの添加を開始する、シックナーの pH が 7.0 に達したら電磁バルブを閉じて炭酸ガスの添加を停止するといった設定を行っている。コンクリート洗浄水の処理中は炭酸ガスの添加と停止を繰り返すため、図-9 のシックナー pH は経時的にジグザグ状になる。工事排水中和装置では炭酸ガスの電磁バルブの開閉とウルトラファインバブル用給水ポンプの稼働を連動させ、給水ポンプの稼働を限

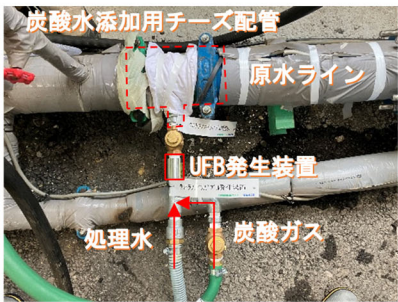


写真-3 ウルトラファインバブル発生装置設置状況
Photo.3 Ultra-fine bubble generator installation status

表-2 計測項目
Table 2 Measurement items

計測項目	計測器	設置箇所
原水のpH	pH計	原水槽
処理水のpH	pH計	シックナー
処理水量	流量計	原水ライン
炭酸ガスの添加量	流量計	炭酸ガスライン
炭酸ガスの圧力	圧力計	炭酸ガスライン
UFB用給水量	流量計	UFB用給水ライン
UFB用給水圧	圧力計	UFB用給水ライン

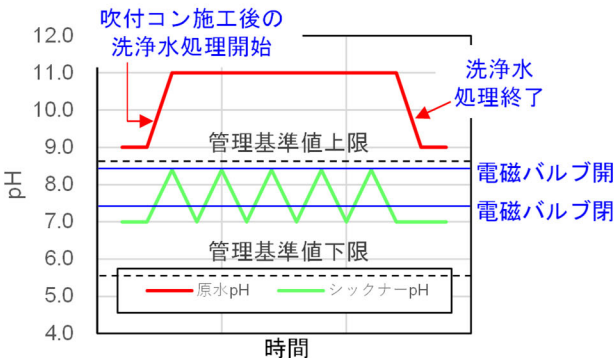


図-9 コンクリート洗浄水処理時のpH経時変化イメージ
Fig.9 Image of pH change over time when treating concrete washing water

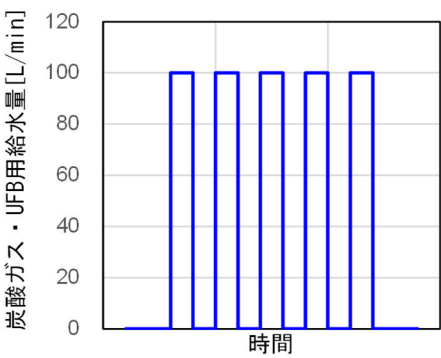


図-10 炭酸ガスとUFB用給水の添加イメージ
Fig.10 Image of carbon dioxide and UFB water addition

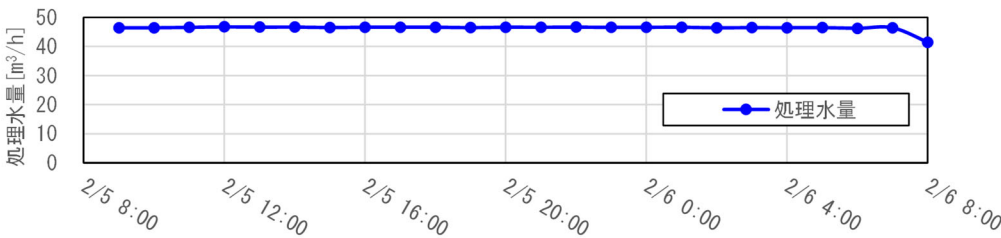


図-11 濁水処理設備の処理水量経時変化
Fig.11 Changes in the amount of treated water from turbid water treatment equipment over time

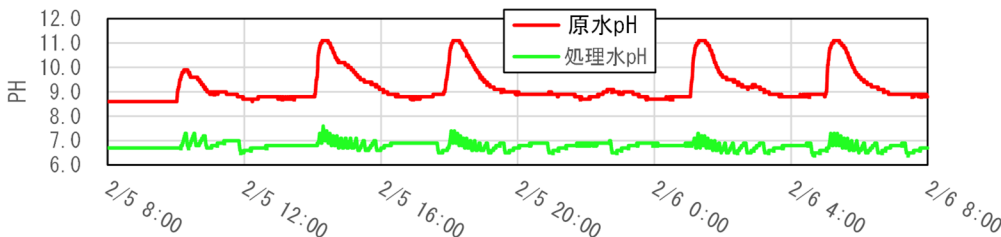


図-12 濁水処理設備のpH経時変化
Fig.12 Changes in pH over time in turbid water treatment equipment

定した。図-10 に炭酸ガスと UFB 用給水の添加イメージを示す。

4.2 実験結果

図-11 に濁水処理設備の 1 日の処理水量経時変化、図-12 に pH 経時変化を示す。実験を行った濁水処理設備は処理能力が $50\text{m}^3/\text{h}$ であるが、図-11 より実験期間中は概ね処理能力上限に近い水量を処理し続けていた。図-12 では赤線で示す原水の pH が 5 回上昇していることが確認できるが、この日はトンネル切羽を 5 サイクル分掘削を行い、吹付コンクリートの施工に伴うコンクリート洗浄水の処理を行ったものである。本稿ではコンクリート洗浄水の処理毎に処理流量や炭酸ガス添加量の整理を行った。

図-13 に曝気処理時、図-14 にウルトラファインバブル処理時の pH 経時変化と炭酸ガス添加履歴を示す。図-13 (a) と図-14 (a) の pH 経時変化図を比較すると、ウルトラファインバブル処理時は速やかに処理水の pH を低下させることができている、炭酸ガスが中和剤としてより有効に作用していることが示唆される。図-13 (b) と図-14 (b) より、この際の炭酸ガス添加量は曝気処理は $1.14\text{kg}/\text{min}$ 、ウルトラファインバブル処理は $0.35\text{kg}/\text{min}$ であり、ウルトラファインバブル処理は少ない添加量で速やかに中和処理ができることを確認した。図-15 にコンクリート洗浄水処理に伴う炭酸ガス添加量を示す。図-15 は原水の最大 pH が 11.2 のデータを抽出して曝気処理とウルトラファインバブル処理の炭酸ガス

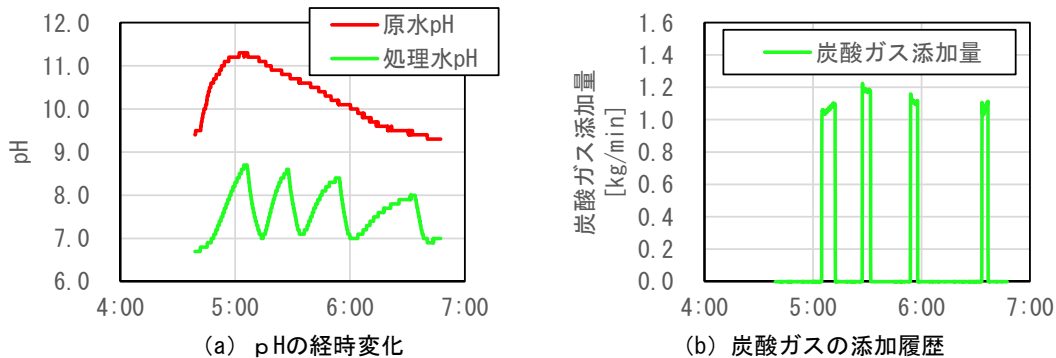


図-13 曝気処理時のpH経時変化と炭酸ガス添加履歴

Fig.13 Changes in pH over time during aeration and history of carbon dioxide addition

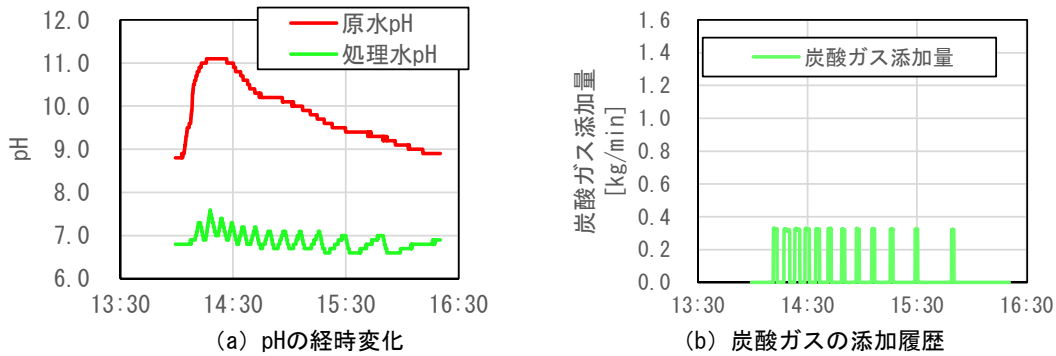


図-14 ウルトラファインバブル処理時のpH経時変化と炭酸ガス添加履歴

Fig.14 Changes in pH over time during ultra-fine bubble treatment and history of carbon dioxide addition

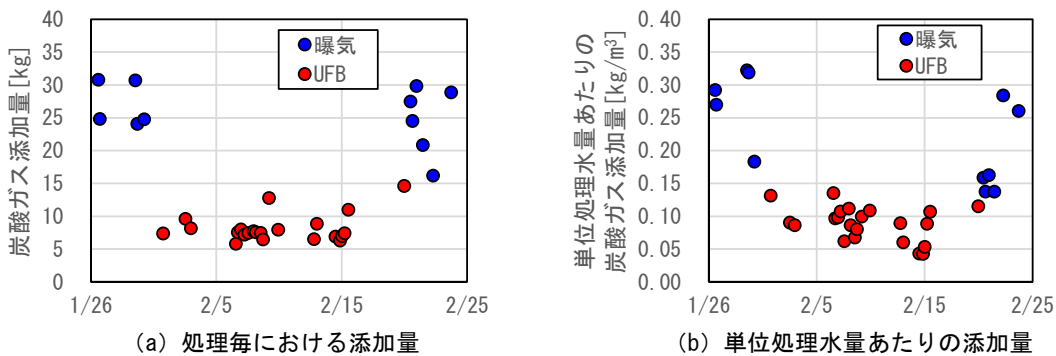


図-15 コンクリート洗浄水処理に伴う炭酸ガス添加量

Fig.15 Carbon dioxide gas added during concrete washing water treatment

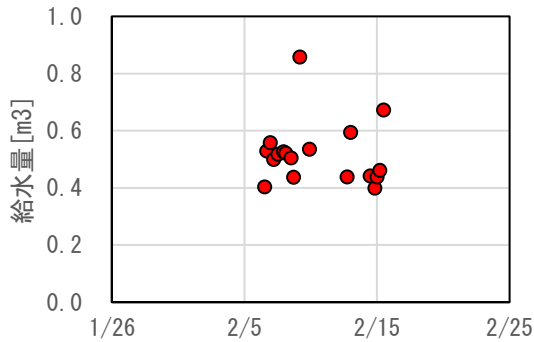


図-16 ウルトラファインバブル発生装置への給水量
Fig.16 Water supply volume to the ultra-fine bubble generator

使用量を比較したものである。図-15 (a) より曝気処理が平均 27.9kg/回, ウルトラファインバブル処理は平均 8.2kg/回を使用している。また図-15 (b) より単位処理水量あたりの添加量は, 曝気処理が平均 0.23kg/m³, ウルトラファインバブル処理は平均 0.09kg/m³ である。この結果から, ウルトラファインバブル処理は, 炭酸ガス添加時に生じるロスを削減し, 中和処理に用いる炭酸ガスを低減できることを確認した。

また今回開発した工事排水中和装置は, ウルトラファインバブル発生装置に懸濁物が詰まって機能が損なわれることを防止するために, 放流槽に給水ポンプを設け, ウルトラファインバブル発生装置内で炭酸ガスと水を混合して炭酸水を生成するものとしている。そのため, 排水処理に加えて追加で水を使うことから処理容量への影響が懸念された。図-16 にウルトラファインバブル発生装置への給水量を示す。図-16 より, 中和処理に伴うウルトラファインバブル発生装置への給水量は平均 0.5m³/回であった。これはコンクリート洗浄水の処理水量の約 1%に相当するが, 影響はあるもののその程度は微小であると考ええる。

最後に工事排水中和装置の導入効果を示すために, 中和処理に伴う CO₂ 使用量の比較を行った。図-17 に示す。ウルトラファインバブル処理の CO₂ 使用量は, 給水ポンプの稼働に伴う電力消費量に CO₂ 排出原単位 (0.451kg-CO₂/kw) を掛けた CO₂ 排出量 (0.2kg) を加味した。図-17 よりコンクリート洗浄水処理において, 1回あたりのCO₂使用量を曝気処理とウルトラファインバブル処理を比較すると 19.5kg, 割合で 70%削減できることを確認した。

5. まとめ

工事排水の中和処理に用いる炭酸ガスを削減することを目的に, 標準的な濁水処理設備に後付け可能な工

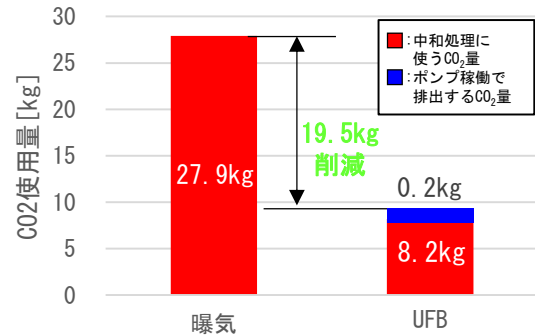


図-17 中和処理に伴うCO₂使用量
Fig.17 Amount of CO₂ used in neutralization process

事排水中和装置を開発した。

本装置はインライン処理方式で連続的に中和処理を行い, 処理容量 50m³/h に対応可能なものである。山岳トンネル現場で現場実験を行い, 動作確認と炭酸ガス削減効果を検証した結果, 今回実験を行った濁水処理設備の条件下では, 曝気処理と比較して中和処理に用いる CO₂ 量を 70%削減できることを確認した。本開発は工事排水の中和処理に用いる炭酸ガスのロスを削減するため, 中和処理に用いる排水処理コストを低減や, 炭酸ガスを大気中に排出されることを抑制し, カーボンニュートラルに貢献する効果的な取り組みの一つになると考える。今後は様々な工種の建設工事に展開し, 技術のブラッシュアップを行っていきたい。

参考文献

- 飯塚芳雄, 橋本修左, 宮路栄二: 建設工事に関連する排水処理の研究-アルカリ排水の炭酸ガスによる中和処理について-, 清水建設研究所報, 第 27 号, pp. 75-86, 昭和 51 年 10 月。
- 吉田有香: 炭酸ガスバブルを用いたアルカリ性排水の中和処理, 化学工学会年会研究発表講演要旨集, pp. 203, 2019 年
- 安井久一: ウルトラファインバブル 小特集-音波と気泡-, 日本音響学会誌, 73 巻 7 号, pp. 421-431, 2017。
- 久保和弘: ファインバブルの機能特性, 日本家政学会誌, Vol. 71 No. 2, pp. 124~128, 2020。
- 小林崇, 吉田有香, 田原賢一: 微細気泡技術を用いた中和処理装置の開発, 令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会, VII-37, 2020。
- 炭酸ガス微細気泡による中和処理 ニュートライザー, IHI 検査計測カタログ, 2022。
- 国立天文台: 理科年表 物理/化学部, 丸善出版, p. 166, 2024。
- 古賀快尚, 上岡亮一, 森山恭衡, 梶谷和志, 田川元一朗: ウルトラファインバブルを用いた工事排水中和装置の開発, 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会, 投稿中, 2024。
- 水質汚濁防止法排水基準等について: 東京都環境局, 2023。