

大気中二酸化炭素の溶解による アルカリ性トンネル排水の中和

学位論文内容の要旨

北海道中央部からやや東方に位置する標高約 950 m の山岳トンネルにおいて、トンネル覆工背面より湧出する地下水が、トンネル建設中はもとより完成後も継続してアルカリ性を呈することが認められており、その pH は 10~11 に及ぶ。この湧水は、トンネル底部の中央排水管に集水後、終点坑口部に送水され、トンネル排水として敷地外へ排出されている。このトンネル排水の放流先は、公共用水域となることから、放流水 pH が環境基準である pH6.5~8.5 となることが望まれる。トンネル建設期間中は、坑口付近に中和処理装置を設置し、液化炭酸ガスを中和剤とする動力を要する機械式での中和処理を行ってから放流していた。しかし、その設備や中和剤にコストを要するため、アルカリ性トンネル排水が継続的に排出される限りこのコストは常に加算される。このため、このトンネル排水がアルカリ性を呈する原因を究明するとともに、自然の浄化作用を活用する合理的な中和対策が求められている。

本研究では、地下水がアルカリ性を呈する原因を究明し、周辺沢水との混合による希釈の効果や大気中の二酸化炭素の溶解促進による pH の低減効果、すなわちこれら自然の浄化作用による中和法を構築するものである。本論文は 6 章で構成されている。

第 1 章では、本論文の序章として、本研究の背景、調査地点の概要、トンネル排水系統および地質構成について述べた。

第 2 章では、トンネル排水がアルカリ性を呈する原因を究明するため、トンネル掘削時の調査ボーリングコアから代表的な岩石を選択し、それらに対する溶出試験を実施するとともに、トンネル排水および周辺沢水の水質調査を実施した。その結果、本トンネルの主要な地質である頁岩や砂岩および礫岩中に含まれる鉱物のひとつである方解石の溶解反応がトンネル排水をアルカリ性にする主な原因と推定された。また、トンネル排水は、二酸化炭素が十分に溶存していない状態にあり、RpH の測定結果から大気中の二酸化炭素との十分な接触面積および接触時間を確保することで pH を低下させることが期待できる。

第 3 章では、トンネル排水および周辺沢水の水質調査から得られた水質データを基に、地球化学コードである PHREEQE あるいは PHREEQC による地球化学解析を行った。その結果、渇水期のような沢水の水量が少ない場合は、トンネル排水に対して沢水との希釈だけでは環境基準値を達成できないこと、トンネル排水と沢水との合流水の pH は地球化学解析によって評価できることがわかった。一方、この地球化学解析によって、大気中の二酸化炭素を十分に溶解した平衡時にはトンネル排水は環境基準値内の pH8.4 程度となることがわかった。このことは、大気中の二酸化炭素を効率的に溶解させることでアルカリ性のトンネル排水の pH を低減できる可能性を示唆する。

第4章では、大気中の二酸化炭素の溶解を促進させる方法を明らかにするために、室内基礎試験で効率的に大気中の二酸化炭素を溶解させる方法を検討し、さらに水路形式の模型を用いた室内水路試験および現地水路試験を実施した。これらの試験結果から、大気中の二酸化炭素を効率的に溶解させるためには、気液接触面積を大きくし、液境膜厚さを低下させる曝気が有効であった。また、気液接触時間を長くすることも有効であった。したがって、無動力で上記の条件とするには、現地斜面の落差を利用した越流堰方式が有望であると判断された。さらに、水路試験における pH の低減挙動は、大気と平衡状態にある炭酸と排水中の炭酸との濃度差に関する一次反応モデルで評価できた。すなわち、トンネル排水が流下する過程での大気中二酸化炭素の溶解速度は、気液接触面積、貯留容積、二酸化炭素の液境膜拡散係数、液境膜厚からなる速度定数と液境膜間の炭酸濃度差から算出できる。

第5章では、上記の結果を踏まえ pH 低減に必要な気液接触面積、貯留容積、滞留時間を決定し、それらの値を用いて中和水路構造物を設計・施工した。その結果、本水路構造物が pH 低減に対して有効であることを示すとともに、アルカリ性トンネル排水への大気中二酸化炭素の溶解モデルが検証された。

第6章では、炭酸塩の溶解を主な原因とする自然由来のアルカリ性のトンネル排水の pH を低下させるためには、大気中の二酸化炭素の溶解を促進させることが重要であり、気液の接触面積、接触時間、攪拌強度を確保することが必要であることを結論づけた。

本成果を用いることで、各地で排出されるアルカリ性を呈する地下水に対して、自然の浄化作用により中和できることが示唆された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 五十嵐 敏 文
副 査 教 授 高 橋 正 宏
副 査 教 授 米 田 哲 朗
副 査 准教授 原 田 周 作

学 位 論 文 題 名

大気中二酸化炭素の溶解による アルカリ性トンネル排水の中和

北海道中央部からやや東方に位置する標高約 950 m の山岳トンネルにおいて、トンネル覆工背面より湧出する地下水が、トンネル建設中はもとより完成後も継続してアルカリ性を呈することが認められており、その pH は 10~11 に及ぶ。この湧水は、トンネル底部の中央排水管に集水後、終点坑口部に送水され、トンネル排水として敷地外へ排出されている。このトンネル排水の放流先は、公共用水域となることから、放流水 pH が環境基準である pH6.5~8.5 となることが望まれる。トンネル建設期間中は、坑口付近に中和処理装置を設置し、液化炭酸ガスを中和剤とする動力を要する機械式での中和処理を行ってから放流していた。しかし、その設備や中和剤にコストを要するため、アルカリ性トンネル排水が継続的に排出される限りこのコストは常に加算される。このため、このトンネル排水がアルカリ性を呈する原因を究明するとともに、自然の浄化作用を活用する合理的な中和対策が求められている。

本研究では、地下水がアルカリ性を呈する原因を究明し、周辺沢水との混合による希釈の効果や大気中の二酸化炭素の溶解促進による pH の低減効果、すなわちこれら自然の浄化作用による中和法を構築するものである。本論文は 6 章で構成されている。

第 1 章では、本論文の序章として、本研究の背景、調査地点の概要、トンネル排水系統および地質構成について述べた。

第 2 章では、トンネル排水がアルカリ性を呈する原因を究明するため、トンネル掘削時の調査ボーリングコアから代表的な岩石を選択し、それらに対する溶出試験を実施するとともに、トンネル排水および周辺沢水の水質調査を実施した。その結果、本トンネルの主要な地質である頁岩や砂岩および礫岩中に含まれる鉱物のひとつである方解石の溶解反応がトンネル排水をアルカリ性にする主な原因と推定された。また、トンネル排水は、二酸化炭素が十分に溶存していない状態にあり、RpH の測定結果から大気中の二酸化炭素との十分な接触面積および接触時間を確保することで pH を低下させることが期待できる。

第 3 章では、トンネル排水および周辺沢水の水質調査から得られた水質データを基に、地球化学コードである PHREEQE あるいは PHREEQC による地球化学解析を行った。その結果、湧水期の

ような沢水の水量が少ない場合は、トンネル排水に対して沢水との希釈だけでは環境基準値を達成できないこと、トンネル排水と沢水との合流水の pH は地球化学解析によって評価できることがわかった。一方、この地球化学解析によって、大気中の二酸化炭素を十分に溶解した平衡時にはトンネル排水は環境基準値内の pH8.4 程度となることがわかった。このことは、大気中の二酸化炭素を効率的に溶解させることでアルカリ性のトンネル排水の pH を低減できる可能性を示唆する。

第 4 章では、大気中の二酸化炭素の溶解を促進させる方法を明らかにするために、室内基礎試験で効率的に大気中の二酸化炭素を溶解させる方法を検討し、さらに水路形式の模型を用いた室内水路試験および現地水路試験を実施した。これらの試験結果から、大気中の二酸化炭素を効率的に溶解させるためには、気液接触面積を大きくし、液境膜厚さを低下させる曝気が有効であった。また、気液接触時間を長くすることも有効であった。したがって、無動力で上記の条件とするには、現地斜面の落差を利用した越流堰方式が有望であると判断された。さらに、水路試験における pH の低減挙動は、大気と平衡状態にある炭酸と排水中の炭酸との濃度差に関する一次反応モデルで評価できた。すなわち、トンネル排水が流下する過程での大気中二酸化炭素の溶解速度は、気液接触面積、貯留容積、二酸化炭素の液境膜拡散係数、液境膜厚からなる速度定数と液境膜間の炭酸濃度差から算出できる。

第 5 章では、上記の結果を踏まえ pH 低減に必要な気液接触面積、貯留容積、滞留時間を決定し、それらの値を用いて中和水路構造物を設計・施工した。その結果、本水路構造物が pH 低減に対して有効であることを示すとともに、アルカリ性トンネル排水への大気中二酸化炭素の溶解モデルが検証された。

第 6 章では、炭酸塩の溶解を主な原因とする自然由来のアルカリ性のトンネル排水の pH を低下させるためには、大気中の二酸化炭素の溶解を促進させることが重要であり、気液の接触面積、接触時間、攪拌強度を確保することが必要であることを結論づけた。

本成果を用いることで、各地で排出されるアルカリ性を呈する地下水に対して、自然の浄化作用により中和できることが示唆された。

これを要するに、著者は炭酸塩の溶解を主な原因とする自然由来のアルカリ性のトンネル排水の性状を把握し、周辺河川による希釈作用および大気中二酸化炭素の溶解反応を利用した pH 低減が可能であること、大気中二酸化炭素溶解を促進させる水路構造物によってアルカリ水の環境負荷をさらに低減できることを明らかにしたものであり、水環境工学、トンネル工学に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。