

堆積性泥岩に起因する強酸性水の発生と その対策について

尾崎哲二¹・下垣 久²・塩月隆久³・吉田恒夫⁴

¹正会員 工修 株式会社青木建設 研究所 (〒300-2622 茨城県つくば市大字要36-1)

²正会員 工修 財団法人電力中央研究所 環境科学部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

³正会員 工博 株式会社青木建設 研究所 (〒300-2622 茨城県つくば市大字要36-1)

⁴株式会社青木建設 広島支店 (〒730-0012 広島県広島市中区八丁堀8-23)

工業団地造成地内の調整池の完成直後、底面のたまり水が強酸性を呈していることが発見された。調査した結果、底面に露出した泥岩層(新第三紀堆積岩)に存在するパイライト(黄鉄鉱、 FeS_2)に起因する硫酸イオンの生成によるものであった。対策工として底面に遮断層を設ける方法を提案した。具体的な工法の選定にはVE手法を用い、最終案として酸性化した表土をはぎ取り、そこに良質土(場内発生の客土)とセメント系固化材を混ぜた改良土による遮断層を設置する工法を選定した。試験施工を実施し、対策工の妥当性を確認するとともにデータをもとに施工仕様を決定した。対策工の実施後調整池は湛水されたが、5ヶ月を過ぎる頃から水のpHは安定し次第に7付近に収束していることが確認された。

Key Words: highly acidic water, sulphur ion, mud stone, intercepting layer, soil stabilizer, value engineering

1. はじめに

岡山県内の、ある工業団地の調整池の造成中、その底面に強い酸性水が発生した。調整池の水が一般河川へ排出され、農業用水としても使用されることから、緊急の対策をとる必要があった。

これまでわが国においては、浚渫¹⁾、干拓²⁾やダム法面工事³⁾に際して、また住宅の基礎岩盤⁴⁾などで酸性水の発生が見られ、その原因として対象の岩あるいは土壤に含まれるパイライト(FeS_2)が空気にさらされて酸化し、これにともなって間隙水に硫酸イオンが生じることによるものと報告されている。その対策として、上記ダム法面工事においては法面からの酸性水の浸出をシート状の暗渠排水管の設置により排水し、その上部にソイルセメントによる遮断層、植物生育基盤を順に設け植生の育成を図っている。また住宅の基礎岩盤の例では、コンクリート基礎の下にビニールシートを敷き、コンクリートと岩盤との縁を切ることにより、岩盤から上昇していく硫酸塩を含んだ水を遮断してコンクリート基礎の風化を防ぐ対策が行われている。しかし、このような対策の報告例は極めて少ないので現状である。

本論文では発生した酸性水の原因を調査し、この調整池における妥当な対策を施すことによって良好

な結果を得たので報告するものである。

2. 酸性水の発生とその原因

(1) 造成地および調整池の概況

当該工業団地の造成地は岡山県津山市近傍の中国自動車道沿いの丘陵地に位置する。造成地の全体図を図-1に示す。図-1より、造成地は標高約200mの山を取り囲むようにその東から西北にかけ標高130～150mの階段状の敷地を形成する。その面積は約30ヘクタールである。

地質は基盤岩として新第三紀中新世に堆積した勝田層群が、山頂部には新第三紀～第四紀に基盤岩に貫入した玄武岩が分布する。勝田層群⁵⁾は約300mの層厚があり、全体として海進期堆積物の性格をもつ。下位より植月層、吉野層、高倉層に分けられ、造成地の地層はこの植月層にあたる。植月層は各地で亜炭をはさみ植物化石が多く、この層の泥岩層の法面の種子吹き付け工事では発芽はするが、その後は枯れるなど発育が悪いとの事例を聞く。また地すべりが発生しやすく造成地の泥岩法面においてもその対策を行った。

造成地では下位より礫岩主体のKg層、泥岩と砂泥

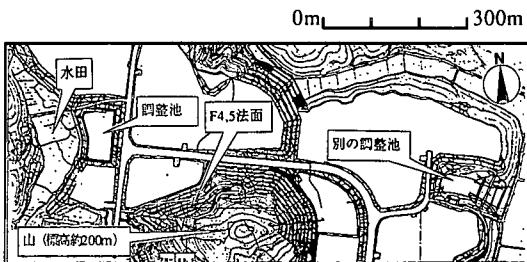


図-1 造成地平面図

瓦層主体のKm2層、砂岩と礫混じり砂岩主体のKs層、泥岩主体のKm1層の順に堆積しており、玄武岩の分布は標高190mより高い位置にある。

調整池の平面図を図-2に示す。酸性水の発生した調整池は造成地の西端にあり、もともと溜め池であった場所を利用したもので、その西側には水田が広がる。大きさは東西に約55~70m、南北に105~115mで約6300m²の面積を持つ。底面の地層はKm2層の泥岩であり、その底面の標高は136.3mである。なお図-2に示す流出地下水口とは、調整池の東側に広がる工業団地の敷地に地下水排除のための暗渠網が配備されており、その末端となる流出口である。ここから地下水が調整池へ流入する。

(2) 酸性水の発生までの経過

これまで、調整池周辺において酸性水に関して確認された事実は以下のとおりであった。

- ①当該地には開発前溜め池等が存在したが、それらの水は強酸性ではなかった。
- ②平成6年8月に提出された地質調査報告書では造成地地山の湧水のpHは5.58を示す箇所があるものの全体的には6~7オーダーを示していた。
- ③強酸性の水は、調整池のたまり水において平成6年10月21日に初めて確認された。
- ④平成6年11月15日の調査結果においても、調整池のたまり水は赤色を呈しpH3程度の強酸性を示した。
- ⑤調整池の竣工は平成6年10月末であり、工事中周辺から調整池へ入る水は底面への流入を避け迂回により側溝へ流出させていた。ただし、床付け面に泥岩が露出したのは平成6年5月頃であり、この時から雨水による底面への水の供給はあったものと判断される。
- ⑥なお造成地にあるもう一つの別の調整池（図-1）のたまり水は酸性化していない。

(3) 水質および泥岩の分析

調整池の水の水質分析および調整池と造成地の泥岩の分析を行った。

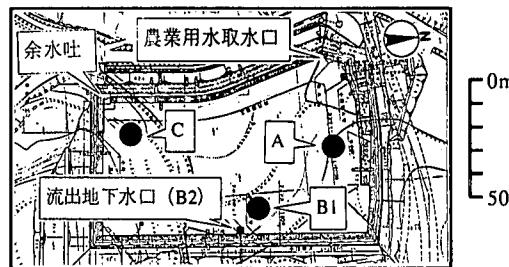


図-2 調整池平面図

表-1 水質分析結果*1 (pH以外はmg/l)

分析項目	A点	B1点	B2点	C点
pH (採水時)	3.0	6.0	6.0	3.5
pH (分析時)	3.0	5.9	6.5	3.1
SO ₃ ²⁻	<20	<10	<5	<20
SO ₄ ²⁻	5000	450	190	1100
Na ⁺	37	11	7.3	15
K ⁺	11	4.8	1.2	7.6
Ca ²⁺	340	100	77	150
Mg ²⁺	790	48	19	110

*1 pH: JISK0102.12.1ガラス電極法、ほか: JISK0102

採水は、調整池へ流入する流出地下水（図-2のB2点）およびたまり水（水深1~5cm）のある3地点（A点；農業用水取水口付近、B1点；流出地下水口付近、C点；余水吐付近）から行った。水質分析項目はpH、亜硫酸イオン（SO₃²⁻）、硫酸イオン（SO₄²⁻）、アルカリおよびアルカリ土類金属イオン（Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺）である。結果を表-1に示す。

表-1より、調整池へ流入するB2点の流出地下水のpHは6.0および6.5とほぼ中性を示し、硫酸イオンおよび金属イオンの濃度も他のたまり水に比べ低い値を示した。調整池のたまり水のうちA点、C点ではpHが3.0、3.1と強酸性を示し、硫酸イオン濃度、金属イオンとも高い濃度であった。ただしB1点ではpHが5.9を示し、硫酸イオンおよび金属イオン濃度も流出地下水に比べやや高い値を示した程度であった。全体として各濃度とpHの間には相関が見られ、硫酸イオン濃度が高い程、pHは低く金属イオン濃度は高い傾向を示した。

泥岩など土試料の採取は調整池、造成地の法面、および場内に仮置された掘削表土の計8箇所から行った。分析は土のpH試験、過酸化水素水pH試験および全硫黄、硫酸態硫黄の含有量を測定した。結果を表-2に示す。

表-2より、調整池および法面の試料では全硫黄が0.5%を越し、pH(H₂O₂)もF4法面を除き3以下の強酸性を示した。表土については、表土aがやや酸性を示したものの他の2試料ともほぼ中性を示した。

表-2 泥岩等分析結果¹

採取場所 ² (地質) ³	pH(H ₂ O)	pH(H ₂ O ₂)	全硫黄 (重量%)	硫酸態硫黄 (重量%)
1 A点	3.5	2.7	1.58	-
2 B1点	2.4	2.4	1.70	0.14
3 C点	6.9	2.8	0.65	-
4 F4法面	10.1	6.9	0.77	-
5 F5法面	9.0	2.8	0.99	-
6 表土a	5.3	4.7	0.01	<0.01
7 表土b	7.7	5.9	0.01	<0.01
8 表土c	9.4	9.3	0.01	<0.01

*1 pH(H₂O), pH(H₂O₂)：土質試験法JGST21／全硫黄、硫酸態硫黄：「地球科学的試料の化学的分析法2」⁶

*2 1～3：図-2を参照、4～5：図-1を参照、

6～8：場内に仮置された掘削表土

*3 1～3：泥岩Km2層、4～5：泥岩Km1層、

6：Km1層風化部、7：粘性土、8：真砂土

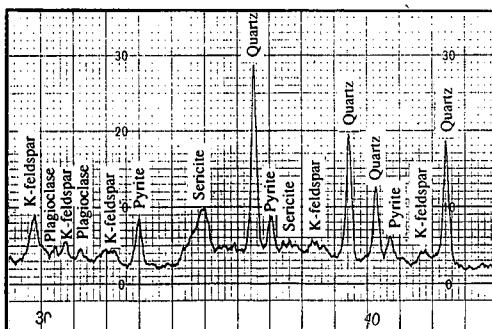


図-3 X線回折チャート

表-3 泥岩のX線回折結果

鉱物名	相対量
Quartz (石英)	◎ (多量)
Plagioclase (斜長石)	△ (少量)
K-feldspar (カリ長石)	○ (中量)
Sericite (セリサイト)	△
Kaolinite (カオリナイト)	△
Pyrite (パイライト)	△

泥岩試料をKm2層より採取し、粉末法によるX線回折を行った。X線回折チャートの一部を図-3に示し、これをもとに有意な鉱物の相対量を推定した結果を表-3に示す。

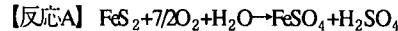
図-3および表-3より、石英、長石に次いで粘土鉱物などとともにパイライト(FeS₂)の存在が確かめられた。

(4) 酸性水の原因⁷

以上の結果により強酸性の直接の原因は硫酸イオン(SO₄²⁻)によるものであり、硫酸イオンは泥岩

に含まれる硫黄および硫黄化合物を起源として、下記に示す酸化反応(反応Aと反応B)により形成されたものと考えられる。

B1点の泥岩の分析結果より硫酸態硫黄の量は全硫黄に比べわずかの比率である。またX線回折結果における硫黄を含む主要な鉱物としてはパイライトのみが存在する。したがって泥岩中の硫黄化合物はパイライトと判断された。



ここに、FeS₂：パイライト



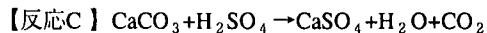
ここに、Fe(OH)₃：水酸化第2鉄(赤沈する、調整池の水の赤色はこの水酸化物)

すなわち調整池の底面は泥岩層が露出し、雨水、地下水等による調整池内の水は長期にわたりたまり水になる。このため泥岩へは水と空気(酸素)が充分に供給される状態となり、パイライトの酸化反応が継続的に進行する。さらに水の交換が少ないこともあり強い酸性を示したものと思われる。

表-1において、A点、C点で強酸性を示したのは水の交換がほとんどない場所のためであり、B1点の水が強酸性を示さなかったのはパイライトの酸化反応は進行するものの、流出地下水による希釀効果がはたらいたものと考えられる。

通常、pH(H₂O₂)が3.5以下であれば硫酸酸性塩土壤になりうる堆積岩と言われている⁸。表-2の結果は当該地の泥岩が硫酸酸性塩土壤であることを示す。

F4法面の泥岩のpH(H₂O₂)が6.9と高い値を示したのは、強酸性を示したF5法面のカルシウム量が0.86% (重量) であったのに対し、F4法面のカルシウム量は3.08%であり炭酸カルシウム(CaCO₃)の組成をもつ貝殻が多量に含まれていたためと思われる。そのため酸化反応はあるが反応Cの中和作用によってpHが下がらなかったものである。



3. 対策工の検討と選定

(1) 対策工の検討

酸性水発生に対する対策は緊急であるとともに、調整池の規模が大きいため、恒久的で処理施設等によるランニングコストの生じない方法が必要であった。前節(4)で検討された酸性水の発生原因から、泥岩への水と酸素の供給を減ずれば酸性水の発生を抑制できると推察された。

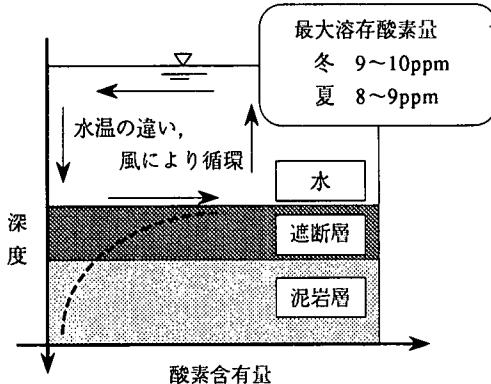


図-4 遮断層設置による酸素含有量推定図

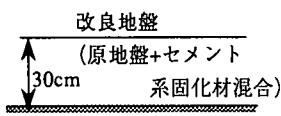


図-5 具体案1

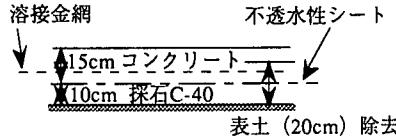


図-6 具体案2

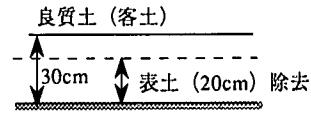


図-7 具体案3

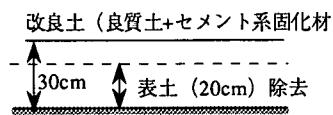


図-8 具体案4

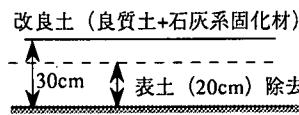


図-9 具体案5

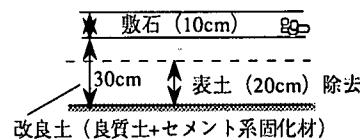


図-10 改善案

この考え方を模式図として示したのが図-4である。図中の点線は、遮断層の効果によりその低下が期待される酸素含有量を示す。将来、調整池に水が溜まると、調整池底面付近まで溶存酸素は循環・供給される。底面の泥岩層の上に遮断層を施せば、泥岩への酸素の供給は少なくなり、泥岩層中の酸素含有量は低下すると判断された。

「1.はじめに」で述べた酸性水発生に対する2件の対策例は、パイライトの酸化反応より生じた硫酸イオンの影響を防ぐために行われた対策であった。ここに提案する遮断層は、パイライトの酸化反応そのものを防ぐことを目的としたもので、もともと自然地山においてパイライトがおかれている還元状態に戻し、酸化反応を抑えようとするものである。

(2) VE手法による対策工の選定

遮断層の具体的な選定にVE (Value Engineering)手法⁹⁾を用いた。その決定過程 (VEジョブ・プラン) は以下のとおりである。

VEジョブ・プランは通常①機能の整理②機能の評価・対象分野の選定③創造・概略評価④アイデアの具体化・洗練化⑤技術性詳細評価⑥経済性詳細評

表-4 遮断層の機能の整理と評価

機能項目	優先順位
遮断層の 不透水性	1
〃 不透気性	1
〃 耐酸性	1
〃 耐久性	1
〃 耐洗掘性	1
〃 有効泥溜め深さ	2

価⑦絞り込まれた具体的対策案、の順にしたがって進められる。

まず①機能の整理において調整池の目的が流量調節と農業用水への利用にあることから、そのための機能項目を整理し、②機能の評価・対象分野の選定において機能に重みをつけた。これらを表-4に示す。

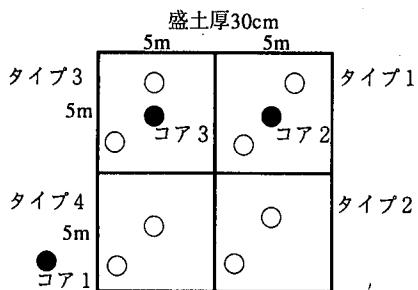
表-4で有効泥溜め深さ以外の機能の優先順位と同じ1としたのは、それぞれが優劣つけがたい機能であると判断したためである。

次に③創造・概略評価において、上記機能がよく発揮できる工法 (コンクリート、シート、客土および改良土などによる) のアイデアを出し、それぞれの案に対し評価を行った。さらに④アイデアの具体化・洗練化において、それらのアイデアを具体化させた。これらを図-5～図-9に示す。

この5つの具体案に対し、利点、欠点を検討した。結果を表-5に示す。表-5より具体案4が遮断層として比較的機能を満足していることが認められた。そのためこの案の欠点を補うべく改善案を提案した。改善案を図-10に示す。そこで以上の6案について、⑤技術性詳細評価と⑥経済性詳細評価を実施した。これらより⑦絞り込まれた具体的対策案において、改善案を対策工とした。

表-5 具体案の利点・欠点調査表

具体案	利点	欠点
1 挖削・運搬土量が少なく、施工期間が短い。	底面表土のバイライトの長期的な酸化反応の進行と、泥岩塊の混入による品質のばらつきが懸念される。	
2 品質が均一であり、遮断層厚が比較的薄層に仕上がる。	硫酸塩作用によるコンクリートの劣化が生じ易く、工費が高い。	
3 場内発生土が使用でき、工事費が安価である。	締固め不足による水密性の低下、流水による洗掘、さらに長期的飽和状態による締固め強度の低下が懸念される。	
4 遮断性に比較的信頼があり、場内発生土が使用でき、耐酸性に優れる。	流水による表面の洗掘や泥溜め深さの欠損が懸念される。	
5 遮断性に比較的信頼があり、場内発生土が使用できる。	長期的飽和状態による固結度の低下、流水による表面の洗掘、泥溜め深さの欠損などが懸念される。	



タイプ1：良質土
タイプ2：改良土（固化材50kg/m³）
タイプ3：改良土（固化材100kg/m³）
タイプ4：改良土（固化材150kg/m³）
○：透水試験用コアサンプル位置
●：酸素含有量測定用コアサンプル位置

8ヶ所 (D=30cm, φ=50mm)
●：酸素含有量測定用コアサンプル位置
3ヶ所コア1, 2, 3 (D=1m, φ=50mm)

図-1-1 試験施工平面図とコアサンプル位置

4. 対策工の評価

対策工の妥当性を評価するために試験施工を実施した。評価内容は、遮断層が泥岩層へ水と酸素の供給を減ずる機能を有し、結果として泥岩層の酸素含有量が少なくなることである。

調整池内に4区画（1区画：5m×5m）を整備し、各区画に場内発生の良質土のみ（タイプ1）およびセメント系固化材¹⁰⁾の配合比率を変えて良質土と混合した3種類の改良土（タイプ2, 3, 4）による厚さ30cmの遮断層を盛り立てた。試験施工平面図とコアサンプリング位置を図-1-1に示す。

盛り立て後気中養生2週間を経て試料をサンプリングし、透水試験および深度別の酸素含有量測定を行った。

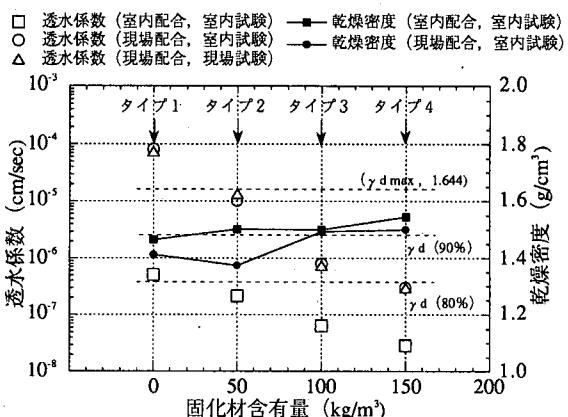


図-1-2 透水試験結果

(1) 透水試験

サンプリングした試料を用い、室内透水試験と原位置透水試験を行った。さらに比較のため室内にて試験施工と同じ試料を準備し、突き固めた試料について室内透水試験を行った。試験方法は室内では変水位法（JISA1218）により、原位置ではPipe Falling-Head透水試験¹¹⁾による方法を用いた。室内試験では密度試験も実施した。これらの結果を図-1-2に示す。ここで最大乾燥密度は、良質土におけるものである。

図-1-2より、透水係数を固化材の配合量別に比較すれば、3種類の透水係数とも良質土のみのタイプ1の透水係数が最も大きく、以下固化材が多く配合される順に、すなわちタイプ2、タイプ3、タイプ4の順に透水係数は小さくなる。室内配合と現場配合の違いに注目すれば、室内配合のすべての試料の透水係数は、 1.0×10^{-6} cm/secより小さいが、現場配合の試料ではそれよりも各配合において $1 \sim 2$ オーダー大きい値を示す。 1.0×10^{-6} cm/secより小さな値を示す配合はタイプ3とタイプ4のみである。すな

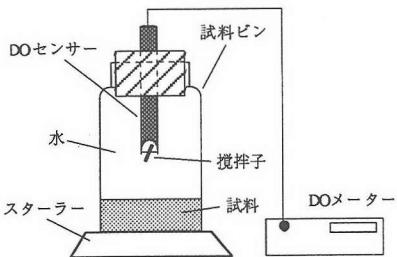


図-1 3 酸素濃度測定図

わち固化材の配合量が 100kg/m^3 （タイプ3）以上で、締固め度が90%以上であれば、 10^{-6}cm/sec オーダー以下の透水係数が期待できることがわかる。

乾燥密度に関しては、室内配合では固化材が多く配合される順に高くなる傾向を示す。現場配合でも同様の傾向を示すが、タイプ2での値が良質土の場合よりも低く、タイプ3やタイプ4の場合に比べても大きく下回る。この原因として、現場では客土された良質土に多少の土塊が混入することは避けられず、粒度調整された室内的試料と比べれば、均一性という点で劣り、加えて固化材との混合にバックホウを使用したため搅拌不足や転圧不足のあったことが考えられる。

これに対し、固化材 100kg/m^3 以上の配合（タイプ3, 4）で締固め度が90%以上であれば室内試験とほぼ同じ密度が得られている。上記施工性の問題点を克服するためには、ある程度富配合にする必要があると思われる。

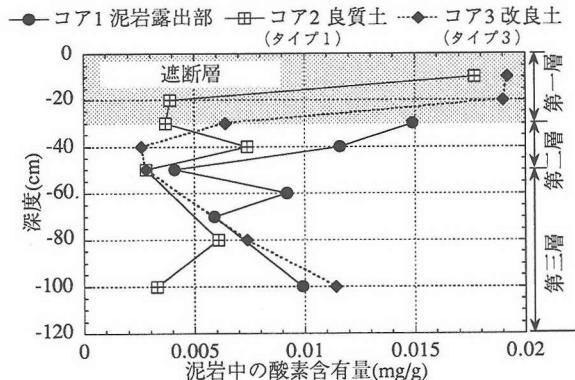
（2）酸素含有量測定¹⁾

サンプリングした試料（ $D=1\text{m}$, $\phi=50\text{mm}$ ）の深度別の酸素含有量（ mg/g ）を測定した。方法は試料をビニール袋に密閉した状態で深度別（10cm毎）に切断して、粉碎し、脱気した水の入った試料ピンにこれを投入する。水中の酸素濃度をDOセンサーにより、値が平衡に達したと見なされる120分経過まで測定した。測定図を図-1 3に、結果を図-1 4に示す。

図-1 4より酸素含有量は3試料とも表層（第一層）部分が高く、中層（第二層）では低く、下層（第三層）では再び高くなっている。

第一層は泥岩層の上の遮断層に相当する深度0~30cmの範囲である。タイプ1およびタイプ3とも下層に比べ酸素含有量が高い。地表に近く空隙率が泥岩と比べ大きいことなどがその原因と思われる。

第二層は遮断層直下深度30~50cmの範囲にある泥岩層である。泥岩露出部のものに比べ、タイプ1



$$\text{酸素含有量} = \frac{[\text{DO}^{*1} \cdot \text{DO} (\text{blank})] (\text{mg/l}) \cdot \text{水量} (\ell)}{(\text{mg/g}) \cdot \text{試料湿潤重量} (\text{g})}$$

*1 DO: 単位水量 (ℓ) に含まれる酸素量 (mg)

図-1 4 深度別酸素含有量

およびタイプ3の直下の方が酸素含有量が少ない。この層は遮断層直下にあり、遮断層によって泥岩層への空気の供給が抑制され、酸素含有量が少なくなったものと考えられる。

第三層の深度50cm以深では3タイプとも第二層と比べ酸素含有量が高い。ここでのRQDは3タイプとも10%前後と低い値を示し、泥岩層に多くの割れ目が存在する。なおRQDとは¹²⁾、岩盤のボーリングを行った際に0.1m以上の健全な部分の合計が1m当たりにどれだけの長さで存在するかを100%表示したものである。自然の地山において、この深さまで空気が供給されやすい状態にあったことや、遮断層設置後においても遮断層の領域外からの空気の供給があったことが、またこの層におけるパイライトの含有量が少なく、そのため酸素含有量が高かった可能性がその理由として考えられる。しかし、これらに関しては未調査であり判断できない。

第三層の酸素含有量は確かに第二層より高いものの、第一層の約半分の値を示す。調整池底面全域の遮断層の設置や長期的な時間の経過によって、次第に酸素含有量は低下していくものと推測される。

（3）試験施工による遮断層の評価

透水試験結果から固化材を 100kg/m^3 以上混合した改良土は、透水係数が 10^{-6}cm/sec オーダー以下の不透水性を示した。酸素含有量測定結果からは遮断層下の泥岩部では酸素含有量の減少が見られた。

これらより遮断層が水と酸素を減ずる一定の効果をもつことを確認できた。

5. 遮断層の仕様の検討

前章において、遮断層の妥当性が評価された。次に遮断層の仕様の検討を行った。

試験施工において、固化材を 100kg/m^3 以上配合した改良土の透水係数は 10^{-6}cm/sec のオーダー以下の値を示した。通常フィルダムの遮水ゾーンの透水係数は 10^{-6}cm/sec オーダー¹³⁾を要求されており、本件においてもこの値を基準値とした。上記の結果はこれを満足する。したがって固化材 100kg/m^3 以上配合するもののうち経済性も考慮し、固化材 100kg/m^3 を配合する改良土を設計値とした。

本件では、改良土に用いる場内仮置き土が粒度調整されたものでないこと、また施工面積が広範囲で遮断層の仕上り厚さが 30cm と比較的薄層であり、スタビライザーによる良質土と固化材の攪拌練混にムラが生じることが懸念された。したがって改良土の品質を確保するため、これらを考慮した現場での固化材の配合量の設計を行った。ここではレディーミクストコンクリートの配合設計¹⁴⁾の考え方を参考にした。その配合設計では強度に関し以下の条件を満足させることになっている。

①1回の試験結果は、購入者が指定した呼び強度の値の85%以上でなければならない。

②3回の試験結果の平均値は、購入者が指定した呼び強度の値以上でなければならない。

ここでは、コンクリート強度を固化材の配合量にかえて設計を行った。

まず①の条件は、固化材の配合量Mの分布を正規分布と仮定して、配合量がある基準値（設計配合量 $S_L (=100\text{kg/m}^3)$ ）の85%）を下回る確率が一定値（Pa）以下となるような平均値（Mmean）を求める問題として定式化¹⁵⁾される。これを式（1）に示す。

$$P(M \leq 0.85S_L) = Pa \quad (1)$$

式（1）は δ を変動係数として式（2）で表される。

$$\Phi\left(\frac{0.85 \cdot S_L - M_{mean}}{\delta \cdot M_{mean}}\right) = Pa \quad (2)$$

ここに Φ は標準正規確率変量の分布関数である。

式（2）より式（3）すなわちMmeanが求められる。

$$M_{mean} = \frac{0.85 \cdot S_L}{1 - \delta \cdot \Phi^{-1}(1-Pa)} \quad (3)$$



写真-1 固化材の練混と転圧状況

次に②の条件からは同様に式（4）が求められる。

$$M_{mean} = \frac{S_L}{1 - (\delta \sqrt{3}) \cdot \Phi^{-1}(1-Pa)} \quad (4)$$

ここで、Paを片側確率0.1%， δ を0.1、 S_L を 100kg/m^3 として式（3）、（4）からMmeanを求めると、 $M_{mean}=121\text{kg/m}^3$ および $M_{mean}=120\text{kg/m}^3$ となる。これらより固化材の現場配合量を 120kg/m^3 とした。

遮断層の施工管理では、上記の固化材の現場配合量管理のほかに、密度管理を行った。その基準値は、「4. 対策工の評価」で示した良質土の最大乾燥密度 1.644kg/cm^3 の90%の締固め度とした。これらにより、遮断層が要求される透水係数の基準値、 10^{-6}cm/sec オーダーを管理した。

6. 対策工とその結果

対策工は、①泥土化した調整池底盤の掘削除去②遮断層施工前の石灰散布③良質土（場内発生土）の搬入と撒き出し④セメント系固化材の練混（スタビライザ使用）⑤転圧⑥碎石敷き均し⑦完了、の工程で実施した。なお②の石灰散布は作業中において泥岩を固定して安定を図り、作業機械のワーカビリティをよくするために行った。施工中の写真を写真-1に示す。

対策後、湛水された調整池内のA点、B1点、C点のそれぞれ水面近くのpHを測定した。結果を水位とともに図-15に示す。

図-15より、各点とも対策後5ヶ月までは変動が見られる。B1点、C点ではpH 7より高い時期があるが、これは固化材に含まれるセメントの影響と思われる。5ヶ月を過ぎる頃から、水位の上昇による希釈効果もあり、3点とも安定して推移し次第にpH 7付近に収束している。

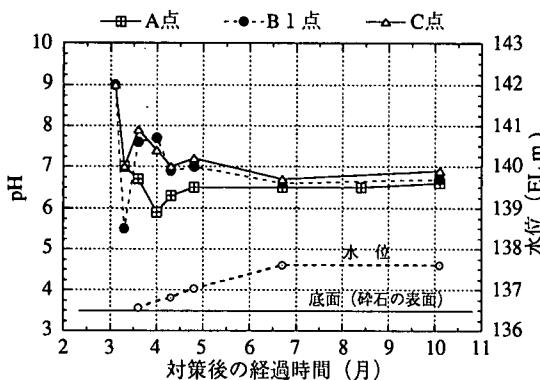


図-15 対策後の調整池のpH測定結果

調整池の水は対策前は赤色を呈し、アメンボなどの生物が生息できない状態であったが、対策後は明らかに池の水の色も異なりこれらを散見する。

今後、遮断層の劣化に伴い酸性水の再度の発生が心配されるが、調整池の水の動きは緩やかなことが予想され、洗掘による劣化の可能性は低いと思われる。また固化材の中性化などによる劣化は長期的には考えられるが、一方で土砂の堆積も進んで自然の遮断層が形成されていくこともあり、酸性水の発生があっても徐々に進む酸化反応であれば、調整池の水が問題となるpHにはならないものと推察される。

7. まとめ

①強酸性水の原因は、調整池の底面に露出した泥岩に含まれるパイライトが充分な酸素と水の供給を受けて酸化し、たまり水に高濃度の硫酸イオンが生じた結果であった。

②対策として泥岩層への酸素と水の供給を減じ、パイライトの酸化反応を抑制するため、現場発生の良質土とセメント系固化材を混合した改良土による遮断層を調整池底面に施工した。

③その後調整池は湛水されたが、その水は次第にpH 7に収束し、対策の妥当性が確認された。

8. おわりに

本件は、泥岩中に含まれるパイライトの酸化が調整池のたまり水の酸性化として現れた現象であった。この現象の間接的な原因として、広範囲の泥岩表面を短期間のうちに空気と水にさらすことになった施工法にあるとも考えられる。これは一方で近年発展した機械化施工技術の成果と評価されるものの、今

回のような問題土を対象とする場合には、十分な配慮が必要であると思われる。

今回の泥岩をはじめとする堆積性軟岩に含まれるパイライトの酸化による現象は様々に形を変え、我々の周辺に現れる。前述した例のほか、生成された硫酸イオンが岩石を溶解し強度を弱め、斜面のすべりの原因になることが議論されている¹⁶⁾。また軟岩に刻まれた石仏の遺跡¹⁷⁾や軟岩をくり抜いたトンネル壁面¹⁸⁾などでは蒸発岩が形成され、硫酸塩の析出による軟岩の風化現象が知られる。さらに都市部でのシールド工事などでは、トンネル内の空気中の酸素が軟岩中のパイライトの酸化により消費され、酸欠状態を引き起こした例もある。

本報告がパイライトの酸化現象の例として、また対策例のひとつとして参考になれば幸甚である。

謝辞：今回の酸性水発生にともなう調査や対策工の実施にあたっては多くの方々の協力を得た。地域振興整備公団所長廣島俊秀氏（現通産省）、同課長大矢芳樹氏および同課長代理清水信正氏（現岡山県）に謝意を表す。

当該地の地質に関する情報を提供していただいた基礎地盤コンサルタンツ（株）中国支社の久保田正史主任、水質や泥岩の分析結果についてご教示いただいた応用地質（株）コアラボの福田修三部長に感謝いたします。

また当社現場でデータの収集、試験施工の実施など協力をいただいた福永幸司氏をはじめとする（株）青木建設勝央作業所の方々、データの解析に協力していただいた研究所建築研究室室長田中稔氏、元同環境研究室大六野芳秀氏にお礼を申し上げる。

最後に、論文の推敲にあたりご指導いただきました埼玉大学渡邉邦夫教授に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 下垣久、大山隆弘、中川加明一郎：堆積性軟岩地帯での建設工事に伴う強酸性水生成とその挙動、電力土木、7月号、No.264, pp.60-66, 1996.
- 2) 松井佳久、寄藤信明：鳥根県中海干拓地の酸性硫酸塩畑土壤の断面形態と理化学性、日本土壤肥料学雑誌、第53巻、第3号、pp.183-189, 1982.
- 3) 富増明、水沢登：破間川ダムのり面保護工強酸性のり面の緑化、ダム技術、vol.5-3, pp.77-85, 1987.
- 4) 高谷精二：東石崩壊の発生した地域にみられる塩類集積現象について、土と基礎、Vol.31, No.1, pp.101~104, 1983.
- 5) 日本地質『中国地方』編集委員会編：日本の地質7 中国地方、共立出版、pp.124-125, 1987.

- 6) 工業技術院地質調査所:地球化学的試料の科学分析法
2,第Ⅲ部3.12,pp.319-320,1998.
- 7) 松本聰:小講座 酸性硫酸塩土壌,農業土木学会誌,第56卷,第5号,p.56,1988.
- 8) 佐々木信夫:新第三系に由来する酸性硫酸塩土壌,ペドロジスト,第22巻,第1号,pp.2~11,1978.
- 9) 産能大学総合研究所VMセンター編著:ワークショップ・セミナーVEの基本,産能大学出版部,1986.
- 10) 住友セメント株式会社:タフロックによる室内配合試験データ集,1994.
- 11) 小松田精吉:地盤の透水係数を求める方法のいくつかの問題について,社団法人地下水技術協会,平成7年秋期講習会テキスト,pp.115~131,1995.
- 12) 日本材料学会編:岩の力学,p.457,丸善,1993.
- 13) 土木学会編:ダムの地質調査,p.161,1986.
- 14) 日本コンクリート工学協会:コンクリート技術の要点'95,pp.125-126,1995.
- 15) Ang,A. H-S.and Tang,W.H. (伊藤学,亀田弘之訳):土木・建築のための確率・統計の基礎,丸善,p89,pp.97~100,1977.
- 16) 千木良雅弘:風化と崩壊,近未来社,1995.
- 17) 関陽太郎,平野富雄,渡辺邦夫:福島県小高町薬師堂石仏群の劣化と水・岩石相互作用,岩石鉱物鉱床学会誌,82巻,pp.269~279,1987.
- 18) 朽津信明,尾崎哲二:史跡・吉見百穴における蒸発岩の形成と壁面後退,日本地質学会第104年学術大会講演要旨, p. 294, 1997.

(1998.5.19 受付)

THE OCCURRENCE OF HIGHLY ACIDIC WATER IN A POND DUE TO SEDIMENTARY MUDSTONE LAYER AND MEASURES TAKEN TO STABILIZE THE PH VALUE

Tetsuji OZAKI, Hisashi SHIMOGAKI, Takahisa SHIOTSUKI and Tsuneo YOSHIDA

At the completion of a regulating pond in the land developed for an industrial complex, the water near the bed of the pond was found to be highly acidic. As a result of investigations, it was found that high acidity was attributable to the formation of sulphuric ion due to pyrite(FeS_2) contained in the mudstone layer (sedimentary mudstone layer in the Neogene period) exposed on the bed. In order to correct the situation, the construction of a cover on the bed was proposed. The VE method was used for selecting a countermeasure. A method was finally selected to remove the soil surface which had turned acidic, and then construct in its place a cover of improved soil, which is a mixture of the quality soil produced in the site and soil stabilizer. The validity of the countermeasure was verified through pilot construction, and the specification for implementation was determined based on the data obtained. The regulating pond was filled after the implementation of the countermeasure. It was confirmed that the pH of water started to stabilize in more than five months and gradually became close to 7.