



コンクリート基礎の劣化や地下埋設配管の腐食に影響をおよぼす酸性硫酸塩土の地盤工学的検討課題

田部 一 憲

はじめに

筆者は地盤工学を専門としてインドの某大学の土木工学科で教鞭をとった経験がある。当時、大学所在地グレーターノイダは人口過密都市デリーのベッドタウンとして開発中のノイダの隣地であり、新興工業教育都市として建設開発ラッシュの只中にあった。勤務していた大学や職員寮の周辺では、昼夜を問わず多くの低賃金労働者による掘削造成工事や地下水くみ上げが盛んにおこなわれていた。やがて地盤深層から掘削床付け面へと硫酸イオン溶出水が濃集してコンクリート基礎に劣化被害³⁾をもたらしたのではないかと、と思われる報告を耳にしたり、研究室の隣の工学部校舎の一部がスコールの時期に崩壊する事件も発生した。筆者はこのとき、掘削等造成工事と過剰な地下水くみ上げが地盤を酸性化させてコンクリート基礎劣化をもたらすこと、建物の倒壊被害を引き起こす要因ともなることに衝撃をおぼえた。その後、筆者は日本で貯油タンク監査業務に従事する機会を得た。コンクリート防油堤の劣化や地下埋設配管等の腐食と腐食性土壌との関係について、ここでも度々考えさせられた。

1 本論文の目的

日本には危険物施設の流出事故原因となる構造物基礎や地下埋設配管等の腐食劣化に深刻な影響を及ぼす酸性硫酸塩土地盤が全国に分布する。しかし、こうした被害と酸性硫酸塩土との関係に関する研究業績や対策事例報告は数多くない。本論文は、後述する水田ら²⁾の提言する

「土中の硫化物イオンや塩化物イオンの調査分析の必要性」について取り上げ、日本各地に分布する酸性硫酸塩土の発生機構、土質特性、構造物劣化等被害事例を紹介しながら、地盤工学的な視点から土中の硫化物イオンや塩化物イオンを含む酸性硫酸塩土の調査分析に関する具体的な提案を試みることを目的とする。

2 危険物施設の流出事故傾向

2014年版の消防白書⁴⁾によれば、1986年から28年間、日本の危険物施設に発生した事故は流出事故が毎年65%前後、火災事故が毎年35%前後の割合で推移しており、流出物は98.9%が第4類危険物であった。2013年では貯蔵タンクからの漏洩事故が全体の約49.0%、屋外タンク・屋内タンク・地下タンクからの漏洩事故だけでタンク漏洩事故全体の約7割にも及んだ。流出事故原因を見ると、物的要因(54.4%)が人的要因(35.9%)を大きく上回り、物的要因の68.8%が腐食疲労等劣化によるものであった。

(1) 地下埋設配管の被害²⁾

腐食疲労等劣化による流出は地下埋設配管において非常に高い割合で発生する。2003年、日本全国の地下貯蔵タンク(表1)は経年数26年以上が全体の半数以上、経年数が20年以上を経

表1 地下貯蔵タンクの漏えい箇所内訳⁵⁾

部位	割合%
地下貯蔵タンク	20.7%
地下貯蔵タンク及び地下埋設配管	8.9%
地下埋設配管	70.4%

過したものが73.5%であった。流出事故発生タンクの74.5%にはアスファルト塗覆装⁵⁾が施されており、地下貯蔵タンクの経年数超過やアスファルト塗覆装の問題点⁶⁾を鑑みれば、流出事故の危険性は高かった。ところが実際の流出事故発生部位は地下埋設配管からの油漏洩が7割を超えていた。

(2) 配管の疲労破壊²⁾

貯蔵タンクから燃料を供給するポンプの運転振動が、配管周辺の接合部でボルトを緩めて固定ボルト周辺の破断・欠落を引き起こし、配管の接合部周辺に金属疲労が蓄積して疲労破壊に至る。

(3) 配管の腐食²⁾

地下埋設配管で土壌接触部とタンク室コンクリートに接した部分との間に生じた電位差が、マクロセル腐食として配管を腐食させる。地上配管であっても、設備の維持管理不備による土砂や腐食土壌の配管上の堆積が配管の腐食を引き起こす。

3 筆者が貯油タンク監査業務で直面した課題

(1) 目視点検

地上タンクの場合、消防法やタンク関連協会等の基準に遵守したタンク所有者による定期的な目視点検が腐食疲労等劣化対策には非常に有効である。コンクリート製の防油堤や底板基礎、タンク脚部周辺、防油堤内の異物有無、地上配管、塗装などの項目の定期的な点検や記録保管はタンクの機械的不備による金属疲労破壊や腐食状況の経時的変化の早期把握につながる。また地下貯蔵タンクの場合、定期的な気密試験、タンク底水の抜き取り、試験結果等保管記録の点検が有効である。しかし、地下埋設配管の腐食や劣化を原因とする流出事故の有無を目視点検で事前に把握することは困難である。

(2) 周辺土壌特性の把握

土壌／コンクリート・マクロセル腐食に影響を及ぼす配管や迷走電流の伝搬状況などの周辺土壌特性の把握や適正な対策に関しては、すで

に多くの研究や対策事例が存在して法規制も整っている。しかし、コンクリート基礎の劣化やタンク等の地下埋設配管の腐食に及ぼす酸性土壌の影響に関しては、その地盤工学的課題や今後の危険物施設の流出事故防止に向けた対応策の研究や報告事例の収集を図る必要がある。

4 危険物流出事故等の調査項目³⁾

危険物規程事務処理要綱第28の2「危険物流出事故等の調査における科学的な分析による原因調査の測定項目¹⁾」(表2)に関して、水田ら²⁾は全国で発生した危険物施設等の流出事故について原因調査を実施して、分析手法や評価方法および実際の流出事故現場のサンプリング手段について検証した。その中で、筆者が注目したのは地盤工学的な調査項目に関してなされた提案、特に土壌環境成分と評価法に関する言及である。彼らは、土壌中に埋設された危険物施設の土壌環境における腐食要因として硫化物イオンの存在を挙げる。この硫化物イオンはドイツ規格 DIN(土壌の腐食性評価)による評価方法(ドイツ規格協会 DIN 50929-3)においても土壌腐食環境因子の一つとなっており、DINの腐食環境因子には該当しないが、塩化物イオンも重要な意味を持ち、塩酸やコンクリート中の塩濃度を考察し、腐食環境を調べる上で重要な分析項目となると指摘した。一般的に、腐食性土壌⁷⁾といわれるもの(表3)を見ても、酸性土壌における硫化物イオンや塩化物イオンの存在が腐食に関与していることが分かる。

表2 測定項目²⁾

No	調査項目
ア	可燃性ガス測定器等による可燃性蒸気の確認
イ	土壌の水素イオン濃度測定
ウ	土壌の地表面電位勾配、対地電位測定
エ	土壌の腐食電位の測定
オ	コンクリートの中性化状況の確認

表3 腐食性土壌⁷⁾

No	調査項目
1	酸性の工場廃液や汚濁河川水などが地下に浸透した所
2	海浜地帯、埋立地域など地下水に多量の塩分を含む所
3	硫黄分を含む石炭ガスなどで盛土や埋立された所
4	泥炭地帯
5	腐植土、粘土質の土壌
6	廃棄物による埋立地域や湖沼の埋立地
7	海成粘土など酸性土壌

5 酸性硫酸塩土⁸⁾

本章では硫化物イオンや塩化物イオンが存在するといわれる土の生成、地質的特徴、土質特性について紹介する。

(1) 硫化物の還元

土壤中に生息するバクテリア、特に嫌気性環境の中で活動する硫酸塩還元バクテリアの代謝作用が土壤中の配管腐食に大きな影響を及ぼす。このバクテリアは pH 6～8 程度の中性環境中で水素と硫酸塩を必要とし、硫酸塩を硫化物に還元するため、海水中で無限に供給される硫酸塩を多量に硫化物に還元する。この硫化物は海岸堆積物の 2 価鉄と反応して硫化鉄、硫化鉄は元素状硫黄と反応して黄鉄鉱として海底に沈殿する。だから内海の静かな海底に堆積する海成粘土には多量の黄鉄鉱が含有している。

(2) 風化作用

第四紀に生成された海成粘土は海岸線移動や地殻変動によって内陸の丘陵地にも広く分布し、風化に伴い酸性化する特徴がある。海岸線の干拓や人工的な陸化、海岸土砂堆積物の建設土工への転用、海成粘土層丘陵地の掘削整地工事によって海成粘土が水と酸素の供給を受けると、含有する黄鉄鉱が酸化してできる硫酸が配管を腐食させる。このような土を酸性硫酸塩土という。

(3) pH 低下

酸性硫酸塩土は表面が水と酸素の供給を受けると pH が 2～3 前後まで低下する。pH4 以下の酸性土では激しい腐食が進行する⁹⁾ため、この土はコンクリート基礎劣化や埋設配管の腐食を確実にもたらす。

6 酸性硫酸塩土の危険性¹⁰⁾

土木建築工事における酸性硫酸塩土の被害例が報告され始めたのは近年になってからである。本章では、さまざまな被害事例から、酸性硫酸塩土被害で取り上げられる共通の問題点を以下に紹介する。

(1) 造成工事における濃集現象

九州北西部の産炭地域の「ぼた」による造成地盤で、硫酸イオンの濃集現象によって建築物のコンクリート基礎に劣化被害が発生した。

ア 建築物の被害

「ぼた」による宅地では造成後 3 か月を経て建築された家屋が築後 8 年で床のさしみや傾きが発生し、築後 10 年で不具合を生じ、築後 15 年ほどで基礎に劣化あるいは崩壊が発生した。風化に伴う酸性化速度は、一般建築物が対応年数を迎える前に重大な劣化被害をもたらす程度であった。

イ 硫酸イオンの濃集現象

床下土は高含水比であり、塩化物イオン及び硫酸イオンの濃集現象が確認された。周辺地下水は温泉水あるいは海水に近い硫酸イオン濃度であった。この濃集現象とは下位の地盤に含まれる硫酸イオンが長期間にわたる毛細管現象により地下水分とともに上昇し、蒸発の卓越する床下表面に濃集する現象である(図3)。高濃度の硫酸イオンを含有した表層地盤が、建築家屋のコンクリート基礎の劣化や崩壊をもたらした。

(2) 日本における広範囲な分布

日本に分布する硫酸塩を含む地盤は主に「古第三紀層に属する石炭の採掘ずり(ぼた)」「新第三紀泥岩層」「第四紀洪積層」「第四紀沖積層」

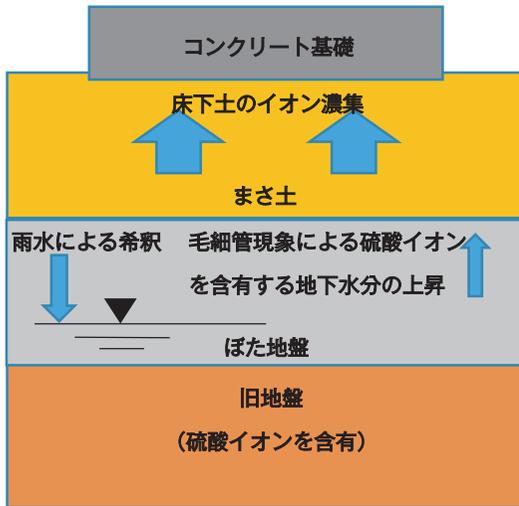


図3 硫酸イオンの濃集現象

表4 各地盤における水溶性化率¹⁰⁾

地盤	水溶性化率
ぼた地盤	7.8%
新第三紀泥岩層	2.6%
第四紀洪積固結粘土層	3.5%
第四紀沖積粘土層	34.0%

である。これらの各地質において、コンクリート劣化に影響を及ぼす水溶性硫酸イオンの濃度は、最も濃度の高い地盤から「ぼた地盤」、「沖積粘土層」、「新第三紀泥岩層」、「洪積固結粘土層」の順番になる。

ア 各地質における水溶性化率

全硫酸に対する水溶性硫酸の割合である水溶性化率は「第四紀沖積粘土層」における硫酸イオンの水溶性化率が非常に高い。

イ 水溶性化率の経時変化¹⁰⁾¹¹⁾

海上埋め立てされたぼた地盤のボーリング試料の「全硫酸から水溶性硫酸への水溶性化率」は、採取直後で7.0%、採取2か月後では18.0%に増加した。地盤に含まれている硫黄は、地盤表層の掘削や搬出工事などの人為的攪乱や乾燥、あるいは地下水低下による地盤環境の酸性化によって硫酸イオンとして溶出して、コンク

リートに硫酸塩劣化を引き起こす可能性がある。

ウ コンクリート劣化危険度

九州横断自動車道温泉地帯におけるコンクリート構造物の設計・施工指針(案)1984年、土木学会コンクリート標準示方書、ACI Standard ACI318、DIN4030 & DIN1045の各規準に照査すると「古第三紀層炭田ぼた」「新第三紀層」「第四紀洪積固結粘土層」「第四紀沖積粘土層」の各地質に含有する硫酸イオン濃度はコンクリートへの影響を考慮する必要があると想定される。特に「第四紀沖積粘土層」「第三紀泥岩層」はコンクリートにとって非常に厳しい地盤となり得る危険度に相当することが分かった。

(3) 風化作用による硫酸イオン溶出¹²⁾

島根県松江市宍道低地帯の南側に分布する第三紀布志名層と同地帯北側に分布する古江層から黄鉄鉱含有率の高い泥岩を採集して、溶出試験、乾湿繰り返し試験、10%過酸化水素水を用いた溶出試験を実施した研究報告を紹介する。

ア 軟堆積岩の風化特性

軟堆積岩の試料は1回目の乾燥後の浸水で既に土砂状となり、早い段階で表面積が増加して、岩石中からさらに硫酸塩が溶出したために吸水量と電気伝導度が急上昇し、逆に泥岩中の硫黄から硫酸が形成され溶媒中に溶出することでpHは急激に低下した。

イ 風化に伴う重金属イオンの溶出特性

全硫黄が溶出試験によって硫酸に変化して溶液中で硫酸を溶出したために、試験前後に大幅に減少した元素は全硫黄 TS のみであった。他にはPb、Zn、Cu、Ni、Crも減少した。Pbの溶出量は泥岩の表面積増加に伴って変化するものではなく、溶出液のpHが低下したことに伴うものである。

7 酸性硫酸塩土地盤の遮蔽対策事例¹³⁾

本章では、酸性硫酸塩土の対策事例として、岡山県津山市近傍の中国自動車道沿いにある新第三紀中新世勝田層群植月層で造成中の工業団

地調整池の底面から強い酸性水が発生した事例を紹介する。

(1) 時系列で見た強酸性水発生

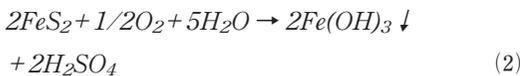
当該地に既存していた溜池の水は開発前には強酸性ではなかった。地盤調査報告では造成地の地山湧水の pH は 5.58 だが全体的には pH = 6~7 オーダーであった。地盤調査報告書提出前に調整池床付け面に泥岩露出。その約 5 か月後に強酸水を初めて確認した。強酸水確認後 1 か月して調整池の溜り水は pH = 3 程度の強酸性を示した。ただし、同じ造成地にある別の調整池の溜り水は強酸性化していなかった。

(2) 当該地域の地質概要

造成地土層は下位より礫岩主体の Kg 層、泥岩と砂互層主体の Km2 層、砂岩と礫混じり砂岩主体の Ks 層、泥岩主体の Km1 層により構成されていた。X 線回折により Km2 層でパイライト (FeS₂) のみの含有が確認された。硫酸イオンは泥岩に含まれる硫黄及び硫黄化合物を起源として以下の酸化反応により形成されたことが判明した。



(ここに FeS₂ : パイライト)



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

(3) 強酸性水の発生原因

調整池の底面に泥岩層が露出した後、雨水や地下水等が長年にわたり調整池内で溜り水となり水の交換も少なかったため、泥岩へは水と空気(酸素)が十分に供給される状態となり強い酸性を示した。採取試料は pH(H₂O₂)=2.4~2.8 と、pH3.5 以下いわゆる酸性硫酸塩土壌の堆積岩と判明した。

(4) 強酸性水への対策工法

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。調整池下の泥岩への水と酸素の供給を減じて酸性水の発生を抑制する遮蔽工法が採用された(図 4)。調整池床付け面直上に固化材 100kg/m³以上配合した透水係数 10⁻⁶cm/sec 以下の遮断層を仕上げ厚さ 30cm で施工した。

(6) 施工後

周辺地点では対策後 5 か月間は pH=5.5~9.0 まで変動、調整池水位の上昇における希釈効果と共に pH=6.5~7.0 へ収束した(図 5)。水の色も変化してアメンボなどの生物も生息が確認された。

8 建設用土や残土としての問題点

(1) 切土法面の崩壊¹⁴⁾

第三紀鮮新世後期~第四紀更新世初期にかけて堆積した大桑層下部に相当する石川県河北郡津幡町の粘性土(北中条土)上に位置する切土法

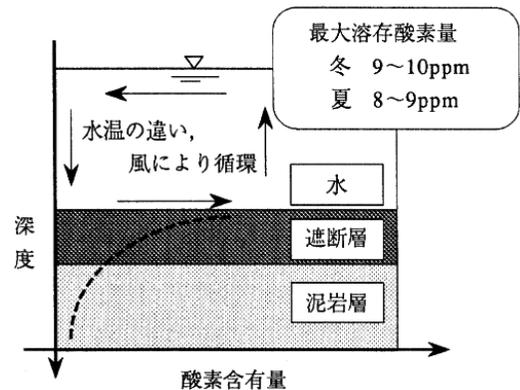


図 4 岩盤から上昇してくる硫酸塩を含有した水を遮断する対策工法の模式図¹³⁾

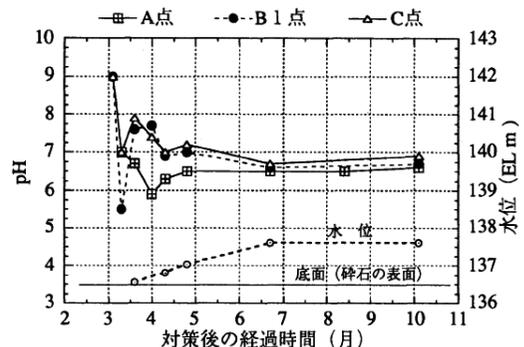


図 5 対策後の調整池の pH 測定結果¹³⁾

面にて崩壊調査が行われた事例を紹介する。崩壊原因は酸性土の切土による応力解放と法面の乾湿繰り返しに伴う風化漸進が地山強度を低下させたためであった。土法面崩壊が酸性硫酸塩土に起因する場合があるという認識は、まだほとんど周知されておらず、酸性土が関与した切土法面崩壊事例は日本各地に多数存在するにもかかわらず、単なる切土法面崩壊として報告されている可能性は高い。酸性土に対しては道路土工－法面－斜面安定解析指針等の標準的データは適応できないので、新たな設計指針を構築する必要がある。

(2) 物理及び力学特性の低下¹⁵⁾

北中条地内の土取り場で採取した粘性土の物理特性や力学特性が検証された事例を紹介する。粘性土試料は当初 pH = 5.5 前後だったが放置後 50 日で pH は 2.7 まで低下して土中に石膏 (硫酸カルシウム、CaSO₄) が析出した (図 6)。粘性土の強度や変形に及ぼす酸性化の影響を重点的に把握する目的で実施した締固め供試体を用いた一軸圧縮試験によれば、pH = 3 以下の qu 値は pH = 6 の qu 値の 2/3 まで低下した。コンシステンシー限界は粘性土試料の pH が 6 から 3 以下まで低下すると液性限界 w_L と塑性限界 w_P も共に低下した。酸性化に伴う間隙水中の各種イオン濃度測定 (図 7) では pH = 4.0 以下で土中の石膏析出により硫酸塩が急激に増加した。他に水酸化ナトリウムやカリウム濃度が微量ながら増加した。

(3) 客土によるコンクリート劣化¹⁶⁾

神奈川県茅ヶ崎市で相模川の沖積層状に建設された住宅から瀉利塩 (epsomite: MgSO₄ · 7H₂O) が確認された事例を紹介する。この瀉利塩は神奈川県鎌倉方面で建設用に採取した粗粒砂岩の土砂から成長していた。この粗粒砂岩は珪藻や有孔虫の化石の中にキイチゴ状の黄鉄鉱 (フランボイダル・パイライト) の存在が認められた (図 8)。粗粒砂岩中の黄鉄鉱が酸素と水に反応して硫酸を生成し、硫酸が岩石を溶かし

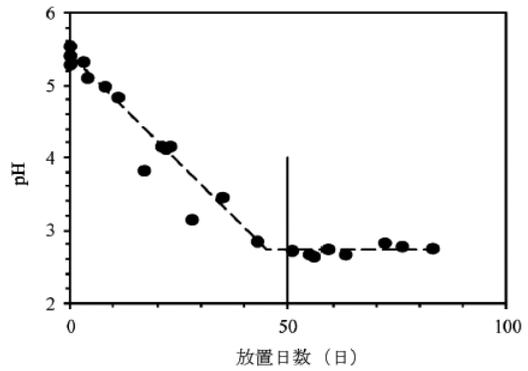


図 6 放置日数の経過に伴う採取試料の pH 変化¹⁵⁾

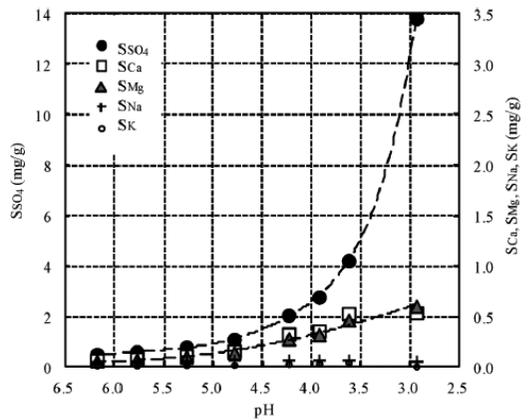


図 7 間隙水中に含まれる各種イオン濃度¹⁵⁾

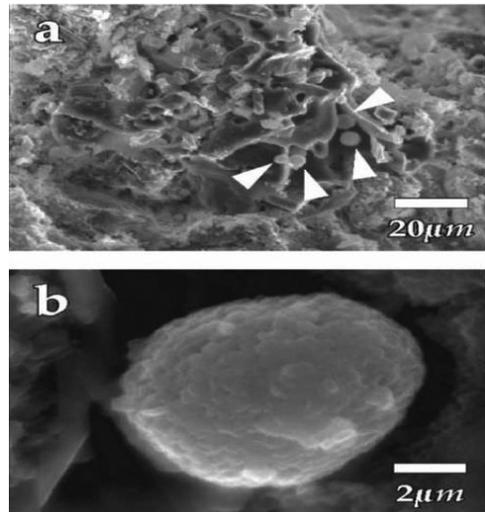


図 8 採取客土の電子顕微鏡写真¹⁶⁾
a. 微化石遺体の空隙に成長するフランボイダル・パイライト; b. フランボイダル・パイライト拡大写真

て硫酸マグネシウム（瀉利塩）を生成して、これを含んだ水が毛細管現象によって地表付近に達して、地表で水の蒸発により瀉利塩が晶出したことが判明した。瀉利塩はコンクリートのカルシウムが溶出して基礎のコンクリートが劣化している兆候であった。神奈川県東部の行政機関や工務店業者などでは瀉利塩は周知の現象だったという。神奈川県内で黄鉄鉱を顕著に含む岩石は横須賀力横浜市南部および鎌倉北部にかけての上総層群、多摩丘陵から横浜北部の上総層群、津久井地域の小仏層群で認められる。

9 酸性硫酸塩土の土質安定処理¹⁷⁾

本章では酸性硫酸塩土に消石灰を混合した安定化の事例を紹介する。

(1) 安定処理の機構

石灰系固化材は母材には石灰系固化材は生石灰もしくは消石灰を用い、調整材には石膏、スラグ微粉末、アルミナ含有物質、フライアッシュを用いる。酸性土に石灰系固化材を混ぜると、土中のアルミナが化学反応によりエトリンサイト (ettringite) という水和物として、土中の間隙を奥深くへと伸長して土を安定化させる。

(2) 酸性硫酸塩土への適応事例

酸性硫酸塩土は硫酸生成後しばらくすると石膏などの硫酸塩を生成するため、この状態の酸性硫酸塩土ならば石灰だけを添加すればエトリンサイトが土粒子と絡み合っただけで大きな安定処理効果が得られる。北中条土に消石灰を混合したら pH の著しい上昇が見られた。消石灰の混合率 5% では養生日数の経過とともに徐々に pH11 前後に収束、10% では養生 16 日以降に pH11 前後に収束、15% では養生開始時の値とほとんど変わらず pH13 強と高アルカリ雰囲気を持続した。また一軸圧縮試験結果もおおむね養生 4 日後前後に強度増加の兆候を伴い、消石灰の混合率 5% と比較して混合率 10% 及び 15% は著しく強度増加を示した。E50 値からは石灰安定処理土は脆弱的

な材料の性質を帯びることが判明した。

(3) エトリンサイトの成長

土の安定処理効果にはエトリンサイト形成が大きく貢献している。走査型電子顕微鏡 (Scanning electron Microscope, SEM) による観察では一軸圧縮試験後の供試体にはエトリンサイトが存在していた。qu 値の増加と土中間隙中へのエトリンサイトの形成には相関性があった。

10 対硫酸塩コンクリートの開発事例¹⁸⁾

硫酸塩から溶出した硫酸ナトリウム水溶液はコンクリートに接触するとナトリウムイオンや硫酸イオンがコンクリートに侵入して膨張性の鉱物を生成する。これがコンクリート劣化現象である。日本における酸性硫酸塩土表層のコンクリート基礎の劣化被害は、エトリンサイトの生成による劣化がよく知られている。これに関する事例を紹介する。

(1) 硫酸塩によるコンクリートの劣化機構

通常、セメントが硬化する過程では $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$ 系の水和物 (C-A-H) やモノサルフェート (AFm; 組成例 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) が生成する。そこに硫酸塩が侵入すると、C-A-H や AFm は水和物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と共にエトリンサイト (AFt; 組成例 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) に変化する。既にコンクリートが十分に強度に達した後に硫酸塩がコンクリート内に侵入する場合、エトリンサイトがコンクリート内部でこの化学反応によって過剰生成されて膨張破壊が発生する。巨視的な観点から見ると硬化後のエトリンサイト増加量とコンクリートの膨張率には相関性がある。

(2) エトリンサイト生成の抑制方法

セメント硬化後のエトリンサイトの生成を抑制する方法は以下の 2 つである

ア エトリンサイト生成成分を消費しておく方法

石膏などを用いて適量の硫酸塩を添加してエトリンサイトの生成を促す。あるいは石灰石微粉

末を添加して炭素塩を有するエトリンサイト関連化合物(モノカーボネートやヘミカーボネート)を生成させてエトリンサイト生成量を増加させる。

イ エトリンサイト生成成分を減らしておく方法

エトリンサイト組成中の $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 含有率を4%以下に制限してC-A-HやAFmの生成を減らすものとして耐硫酸塩セメントがすでに規格化されている。また、フライアッシュの添加で $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量が減少するとエトリンサイト生成が抑制される。

11 日本に分布する酸性硫酸塩土壌環境に関する研究や報告事例の状況¹⁹⁾

日本国内の酸性硫酸塩土壌の分布や土壌性状に関する研究報告は少ない。日本国内で近年に発表された酸性硫酸塩土の分布、性状、対策工法に関して記述された発表要旨、論文・文献等によれば、「酸性硫酸塩土壌」という名称は1967年の「中海・宍道湖」干拓に関わる一連の論文発表からはじまっている。その後、岩手県や北海道などの内陸部を含む、各地での発見事例報告が続いた。1980年代は、発見された露頭等の情報に基づく分布範囲や酸性硫酸塩土壌の性状、酸性硫酸塩土壌の判定基準に係る分析手法や定義、1990年代は、土壌改良対策・法面緑化対策、2000年代から現在は、酸性硫酸塩土壌と微生物との関係や土壌そのものの有効利用に踏み込む論文が多くなっている。

12 着眼点と提言

本論文は水田ら²⁾が提案した「土壌中の硫化物イオンや塩化物イオンの分析や測定法」の流れに則して、酸性硫酸塩土に関する地盤工学的知見と対策事例を紹介した。以下に、筆者が3つの着眼点から提案を試みる。

(1) 風化に伴う硫酸イオンの溶出

酸性硫酸塩土の酸性度測定には、過酸化水素水を用いたpH試験が酸性度の極値予測方法と

して多くの引用文献の中で使用されている。しかし、酸性硫酸塩土に埋設した配管やコンクリート基礎の劣化予測、あるいは遮蔽対策設計には、酸性硫酸塩土が水と酸素の供給を受けた時からどのようにpH変化をとげるのか、日数経過によるpH予測がより重要である。多くの文献は個別の試料や判定手法を用いた検証をしているために検証データの収集から定性的な評価はできても各検証手法に互換性が乏しいため定量的な評価は不可能である。硫化物イオンや塩化物イオンの分析手法は、酸性硫酸塩土における風化特性や濃集現象に関する研究や事例報告の蓄積を基にして、風化や濃集予測のための「試料採取方法」から「pHの経時的変化予測」までの一つのシステムととらえて、この中の1つの調査分析項目として策定・基準化して定量的評価手法とすることが必要である。

(2) エトリンサイトに関する知見

埋設配管やコンクリート基礎を建設する際、消石灰を用いた土質安定処理の必要性を判定する手法を確立する必要がある。このために電子顕微鏡のみならず示差熱分析(DTA)やX線マイクロアナライザー(EPMA)を用いたエトリンサイトの定量的な生成把握に関する研究や事例報告の蓄積、酸性硫酸塩土地盤の土質安定性と土粒子間隙中のエトリンサイト生成との相関性の明確化、各地の酸性硫酸塩土劣化危険度や地下埋設物や構造物の種別による土質安定処理基準の確立が必要である。

(3) 被害報告、研究成果、対策事例の公開と共有ネットワーク

瀉利塩(epsomite: $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)が析出した事例(8の(3)参照)に着目したい。地域の酸性硫酸塩土分布や建設用に使われた土砂の特定と安定処理の必要有無が当該建築現場の行政機関、工務店業者、建築施主の3者に共有されていなかった。日本国内に分布する酸性硫酸塩土地盤の土質特性に関する研究報告、施工事

例報告文献を各県・各地域ごとに収集して情報ネットワークを構築する必要がある。全国液状化危険度マップのような、「日本各地の硫酸イオンによるコンクリート腐食危険図」や「日本各地の酸性硫酸塩土地盤対策事例集」を発行する試みも必要である。

さいごに

本論文は、水田ら²⁾が提案した「土壌中の硫化物イオンや塩化物イオンの分析や測定法の必要性」の流れに沿って、硫化物イオンや塩化物イオンを含む酸性硫酸塩土に関する地盤工学的知見と対策事例を紹介した。その上で筆者なりの提案を試みた。本論文が次代の危険物施設の流出事故防止につながることを心から期待する。

参考文献

- 1) 危険物規程事務処理要綱第28の2
- 2) 水田亮、大熊龍也、佐藤和弘：危険物流出等の事故原因に関する検証、消防技術安全所報47号、2010年度
- 3) Vishwas Mishra, Sachin Tiwar, Shobha Ram, K Prabhakar, and RP Pathak: Possible Effect of Ground Water on Concrete Structures of Noida and Greater Noida, *International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 6, Issue 10, ISSN 2229-5518*, October, 2015
- 4) 総務省消防庁：消防白書、2014年度
- 5) (社)全国石油協会：給油所における地下タンク地下配管の漏洩対策等に関する調査報告書、2003年
- 6) 野田哲也、鈴木健司：地下タンク等の外面防食に対する漏えい危険物の影響に関する研究、消防技術安全所報42号、2005年度
- 7) 一般社団法人日本ダクタイル鉄管協会：埋設管路の腐食原因とその防食について、JDPA T 11、日本ダクタイル鉄管協会技術資料
- 8) クボタ：酸性硫酸塩土壌をめぐって、URBAN KUBOTA No.25
- 9) 日本防蝕工業株式会社：埋設鋼管（鉄）の腐食と防食について、1996
- 10) 松下博通、佐川康貴、佐藤俊幸：地盤調査結果に基づくコンクリートの硫酸塩劣化地盤の分類、土木学会論文集E Vol. 66, No. 4, 507-519, 2010
- 11) 菅伊三男、松下博通：我が国におけるリュサンエン地盤の分布について、自然環境とコンクリート性能に関するシンポジウム論文集、pp. 147-154, 1993
- 12) 上村晃一、石賀裕明：山陰地域の第三紀海成層のスレーキングに伴う硫酸酸性土の形成と」Pbの溶出、島根大学地球資源環境学研究報告、26、41～46ページ、2007
- 13) 尾崎哲二、下垣久、塩月隆久、吉田恒夫：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、土木学会論文集、No. 624/III-47、283-291, 1999
- 14) 佐野博昭、山田幹雄、出村禰典：1本のボーリングコアに残された物理・化学的不連続面の痕跡と酸性度の切土法面崩壊との関連性について、地盤工学ジャーナル、Vol.8, No.2, 285-296, 2013
- 15) 重松宏明：道路路面やトンネル掘削等で問題となる「酸性硫酸塩土」について、地盤工学会誌、No.62, Vol.4, pp.44-45, 2014
- 16) 万年一剛：鎌倉市に産する瀉利塩～住宅の床下に発生する白色毛状物質～、神奈川県温泉地学研究所報告、第36巻、57-59、2004
- 17) 重松宏明、西木祐輔、西澤誠、池村太伸：酸性硫酸塩土の石灰安定処理に関する一考察、土木学会論文集C、Vol.65, No.2, 425-430, 2009
- 18) 大脇英司、平尾宙、二戸信和：硫酸塩侵食に抵抗できるコンクリートの開発、大成建設技術センター報、第40号、2007
- 19) 石田哲也、中谷利勝、石井邦之、平野正則、片山勝、細川博明、長畑昌弘、幸田勝、西山章彦、蛭名健二：北海道で出現した酸性硫酸塩土壌の位置（緯度・経度）および参考文献の紹介、寒冷土木研究所報、No.695, 2011