

粘土と粘性土の物理化学—現象とその応用—

Physical Chemistry of Clay and Clayey Soil

川 地 武 (かわち たけし)

(株)大林組技術研究所

1. はじめに

21年前、当誌は「土の物理化学的—工学へのアプローチ」というテーマで小特集号を組んだ。そこでは、森が「土の物理化学的現象の設計・施工への応用と問題点」と題する総説¹⁾を書き、この分野の総括と展望を述べた。この特集で取り上げられた地盤工学的課題は粘性土の表面化学的特性、施工法（泥水工法）への応用、土の膨潤特性、地すべりの予知と防止法などである。以来、粘土あるいは粘性土の物理化学に関する知見は増大し、その応用範囲も拡大した。その契機あるいは背景にはその後の各種建設プロジェクトの進展に伴う問題提起と研究手法の発達があった。一方、最近の地盤環境にかかわる問題の新たな発生など、地盤や粘土の物理化学的アプローチが改めて要請される状況が生まれている。

そこで、以下にこの間の粘土あるいは粘性土の物理化学に関する幾つかの話題について紹介し、今後の研究の参考に供したいと考える。これまでのこの分野に関連する話題を概括すれば、1970年代までがこの分野の揺籃期といえ、地盤工学分野の現象解明や施工に粘土の物理化学が有効との認識が生まれた。その結果として、先の特集が生まれ、また「土質工学における化学の基礎と応用」²⁾が学会から出版された。その後、土の物理化学と土の力学現象や緩衝機能とをより定量的に関連づける研究や応用がなされ、より積極的に土の物理化学的性質を活用するに至っている。また、地盤環境問題等の新たな問題への対処が迫られている。

2. 粘性土地盤の特性と物理化学

2.1 粘性土地盤の堆積環境と物理化学

1950年代にノルウェーの沖積粘土で報告^{3),4)}されたクイックレイは鋭敏比が極めて高い粘性土をさし、その原因は海底に綿毛構造の状態では堆積した粘土が干陸後の脱塩により凝集力が低減し、攪乱により液状化するといわれる。これに匹敵する鋭敏比が50以上という有明粘土⁵⁾の高鋭敏比の原因が縄文時代の海進と海退による間隙水中の塩分の溶脱現象とスメクタイトを主とする粘土鉱物組成にあることを化学分析により解明した研究^{6),7)}はこの分野の研究推進に大きな刺激となった。同様な手法によりカナダのクイックレイ⁸⁾やバンコック粘土⁹⁾との比較が行われている。一方、土の構造形成、強度発現にはセメンテーション物質が重要であるが、従来あま

り注目されていなかった炭酸カルシウムが重要なセメンテーション機能を果たしていることが東京湾の海底粘性土について中村らによって明らかにされた^{10),11)}。海底堆積物の場合、炭酸カルシウムの給源は豊富であるだけに他地域でも同様に炭酸カルシウムの寄与が考えられる。また、ほかのセメンテーション物質として酸化鉄の寄与¹²⁾も報告され、さらにこれらの研究に関する総括的な考察も報告された¹³⁾。

なお、堆積機構は異なるが、火山灰質粘性土に含まれるアロフェンに着目し、アロフェン含有量と物理・力学的性質の関連に注目した一連の研究¹⁴⁾がある。

2.2 粘性土の微細構造

粘性土の物性を論じる際に乱さない土構造の概念は重要であることは古くから指摘され、多くの構造モデル¹⁵⁾が提案されてきた。しかし、これらの多くは推定によるものであったが、最近の走査型電子顕微鏡（SEM）の普及により、乱さない土の微細構造の直接観察が可能になった。このような研究として、上部大阪洪積粘土の力学特性と構造変化¹⁶⁾に関するものやSEM写真のパワースペクトル解析による構造の数値化¹⁷⁾、SEMとポロシメーターを用いた有明粘土の構造特性¹⁸⁾、さらには高温圧密履歴を受けた粘土の過圧密挙動の解明¹⁹⁾などがある。土の比抵抗から構造を定量的に論じたもの²⁰⁾や間隙径分布の測定結果から粘土の圧縮特性を考察したもの²¹⁾も見られる。このような、最新の機器による微細構造解析は今後ますます重要性を増すものと思われる。

3. 粘土の地盤工学的利用と物理化学

3.1 廃棄物の最終処分場におけるライナー

地下水汚染に対する懸念などから、各地で最終処分場の建設計画が立往生している。このため、厚生省は廃棄物処理法の改訂を行い、「一般廃棄物の最終処分場および産業廃棄物の最終処分場に係わる技術上の基準を定める命令」（平成10年6月）により厳重な遮水構造を義務づけた。粘土、特にベントナイトはこの遮水構造の重要な資材として用いられており、その際のベントナイトの機能は止水性、膨潤シール性、耐久性などである²²⁾。ベントナイトを土と混合して用いる場合²³⁾、少量のセメントと混合する場合²⁴⁾、高密度ポリエチレンシートに挟んで用いる場合²⁵⁾などがある。焼却灰を主体とする最近の埋立て物質に応じた浸出水の浸出特性や水質変

総 説

動などを考慮した場合、ベントナイトの止水性を過信することに対する警鐘²⁶⁾や、改訂された構造基準自体、地盤工学的には不備があると指摘する見解²⁷⁾もある。今後の情報公開と地盤工学関係者の寄与が求められる分野である。

3.2 放射性廃棄物処分におけるバリア材

エネルギーの30%前後を原子力発電に頼る我が国では日々使用済み核燃料や各種レベルの放射性廃棄物が発生する。廃棄物の処分の際、一般環境への放射性物質の移行、拡散を防止するため緩衝材が用いられる^{28),29)}。高レベル廃棄物の場合にはガラス固化体を入れたキャニスターを地下深くに埋設する計画である。その際、キャニスターと周辺岩盤との間に緩衝材として圧縮ベントナイトが用いられる。圧縮ベントナイトにおけるベントナイトの機能は膨潤シール性、止水性、化学的安定性である。圧縮ベントナイトの膨潤に関する研究はスウェーデンで先行し、Puschらによる一連の研究³⁰⁾のまとめがEngineering Geology誌に特集されたのは1990年のことであった³¹⁾。我が国でもこの間研究は進展し圧縮ベントナイトの膨潤、止水性、安定性に関する知見が集積した。特に、膨潤現象を拡散二重層理論によって解明した小峰らの研究³²⁾は評価される。

4. 地盤環境の変化への対応

4.1 酸性雨

地球規模の環境問題の一つである酸性雨の実態が地盤工学分野でも問題になっている。山口らによれば、一般的には土は酸、アルカリに対して緩衝能力を有しており、現在の我が国の酸性雨は土の緩衝作用を上回るものではない³³⁾。しかし、土の緩衝能力を上回る状態になれば土のセメンテーション物質や骨格成分の溶出が始まり、土の大部分の機能が損なわれることになろう。また、このような事態に至る前にセメントや石灰による地盤改良、土質改良を行った部位ではセメント物質の溶解、流出による強度低下などが問題となろう。すでにこのような視点からの研究³⁴⁾が見られ、その成果は地盤改良部分以外にも教訓を与えると思われる。

また、土中成分の化学変化により酸性化する土が以前から注目³⁵⁾されていた。この間にも、ダム現場の調整池³⁶⁾、宅地造成現場の露出表土³⁷⁾などの酸性化が指摘されている。いずれも、洪積層や第三紀層中に含まれる硫黄化合物、パイライトの空気酸化によるものであり、対策は各様であるが、今後も注意が必要であろう。

4.2 地盤汚染

工業国を中心に工場跡地などの地盤汚染が問題化している。我が国でも平成10年に現在の地下水環境基準、土壤環境基準が設定された。地盤汚染の機構解明と対策には土の物理化学に関する知見が不可欠であり、一部で取り組みが始まっている。地盤内の汚染物質の挙動の解明とともに対策技術に物理化学の知見や手法を用いたものが見られる。例えば、VOCの気化に生石灰と水との反応熱を用いるもの³⁸⁾、あるいはVOCの脱塩素分解に鉄

粉による還元反応³⁹⁾を用いるもの、重金属汚染土からの重金属除去に電気泳動現象⁴⁰⁾を利用するもの、油汚染土からの油の除去促進に微細な気泡による界面活性作用⁴¹⁾を利用するものなどである。地盤汚染の場合、二相系あるいは三相系を構成する土中での汚染物質の存在形態に応じた対応が必要であり、この点で均一な大気や水を対象とする大気汚染や水質汚染とは異なる。この分野の問題解決のためにも土の物理化学に関する知見と手法のより一層の集積、発展が望まれる。

5. 新たな展開に向けて

5.1 新しい粘土材料

粘土科学分野の最近の進展には著しいものがある。地盤工学分野にも参考になりそうな話題として粘土の化学修飾について紹介する。粘土の化学修飾⁴²⁾にはベントナイト等の層間に各種の化合物を挿入(インターカレート)し、この層間を固定した粘土を造るものや、粘土表面の界面化学的性状を変えたものがある。前者では固定した層間にダイオキシン、PCB、VOCなどを固定させる環境浄化作用⁴³⁾が期待されている。また、後者ではベントナイトの耐塩性を格段に向上させたもの⁴⁴⁾が開発されている。廃棄物処分場の浸出水のように溶存イオンが多く、通常のベントナイトでは高い膨潤性が得られない場合にも十分な膨潤性や止水性が期待できるという。

5.2 新しい研究手法

どの分野にせよ、研究や技術の新たな発展には新しい概念や手法の提案、開発が不可欠である。20年前には、粘土鉱物の同定にX線回折装置が活躍する程度であったが、その後の粘土の集合状態、すなわち土の微細構造の解明には走査型電子顕微鏡(SEM)の普及、分解度の向上がおおいに寄与している。また、地盤環境の研究には微量の化学成分、物質の測定、分析が必要とされるが、この点で原子吸光分析、プラズマ発光分析(ICP)、ガスクロマトグラフィー(GC、GC-MS)などの普及が貢献している。機器の発達と操作性の向上、情報処理の高速化は日進月歩であり、その成果をいち早く利用することが望まれる。なお、これらの手法は一般の地盤工学関係者が気軽に用いるまでには至っていない。これらの手法や結果の評価方法の標準化が望まれる⁴⁵⁾。

なお、このような新しい研究手法の開発、普及とともに一般の土質試験方法の改良、省力化、自動化に関する検討も進んだ。なかでも、コンシステンシー測定におけるフォールコーン法⁴⁶⁾、含水比測定への電子レンジ法⁴⁷⁾については精力的な調査、研究が行われ、その成果は粒度、有機物含有量などとともに最新の「土質試験の方法と解説」⁴⁸⁾にも取り込まれている。

6. おわりに

新しい世紀が始まった現在、人間社会の持続可能な発展を支えるには資源、エネルギー、廃棄物、自然災害等の課題を複眼的に眺めながら技術の有り様を模索することになろう。地盤工学の研究や技術開発においても例外

ではありえない。そこでは、それぞれの分野の深化とともに異分野の連携が不可欠である。地盤工学の場合の土の物理化学的アプローチはまさにそのような分野である。粘性土の挙動を粒子間の結合や微細構造のような物理化学的性質に着目して解明する試みが有効であることが実証されつつあるのが研究の現状であり、今後の本格的な展開が待たれる。そのためには、土、地盤の関係者と粘土科学、物理化学、計測化学などの関係者との情報交換や共同研究がますます必要となろう。地盤工学側からの情報発信と周辺分野への接触が一層求められ、現代の研究補助メディアの多様化や高速化はこのための好適な環境を与えるものと思われる。

参考文献

- 1) 森 麟：土の物理化学的現象の設計・施工への応用と問題点，土と基礎，Vol. 28, No. 2, pp. 3~8, 1980.
- 2) 土質工学会編：「土質工学における化学の基礎と応用」，1978.
- 3) Skempton, A. W. and Northey, R. D.: The sensitivity of clays, *Geotechnique*, Vol. 3, pp. 30~53, 1952.
- 4) Rosenqvist, I Th.: Considerations on the sensitivity of Norwegian quick-clay, *Geotechnique*, Vol. 3, pp. 195~200, 1953.
- 5) 吉岡史郎・三浦哲彦・朴 永：佐賀空港建設に伴う基礎実験と地盤改良のための試験盛土，土と基礎，Vol. 42, No. 4, pp. 33~38, 1994.
- 6) 赤峰剛徳・三浦哲彦・竹辺義信：有明粘土地盤における塩分溶脱現象と土質特性への影響，堆積環境が地盤特性に及ぼす影響に関するシンポジウム発表論文集，pp. 111~114, 1995.
- 7) 三浦哲彦・赤峰剛徳・下山正一：有明粘土層の堆積環境とその鋭敏性について，土木学会論文集，No. 541/Ⅲ-35, pp. 119~131, 1996.
- 8) Torrance, J. K. and Ohtsubo, M.: Ariake bay quick clay: A comparison with the general model, *SOILS AND FOUNDATIONS*, Vol. 35, No. 1, pp. 11~19, 1995.
- 9) Ohtsubo, M., Egashira, K., Koumoto, T. and Berugado, T.: Mineralogy and chemistry, and their correlation with the geotechnical index properties of Bangkok clay: Comparison with Ariake clay, *SOILS AND FOUNDATIONS*, Vol. 40, No. 1, pp. 11~21, 2000.
- 10) 中村隆昭・福江正治・直江和之：炭酸カルシウムが海底土のせん断強度に及ぼす影響，第28回土質工学研究発表会講演集，pp. 713~714, 1993.
- 11) 中村隆昭・福江正治・加藤義久・秋元政人・八 嶽 孟：炭酸塩含有量からみた海底堆積物の2, 3の特性について，海底地盤に関するシンポジウム'94，土質工学会関西支部，pp. 51~55, 1994.
- 12) 大坪政美・江頭和彦：有明粘土における酸化鉄の生成とその過圧密特性への影響，第28回土質工学研究発表会講演集，pp. 345~346, 1993.
- 13) 嘉門雅史・大坪政美・中村隆昭：沖積層の化学的性質，土と基礎，Vol. 43, No. 10, pp. 17~20, 1995.
- 14) 宋 永混：関東ロームのアロフェン含有量がその土質工学的特異挙動に及ぼす影響，土質工学会論文報告集，Vol. 34, No. 2, pp. 141~151, 1994.
- 15) 嘉門雅史：土の構造，「土の物理学」(土壌物理研究会編)，pp. 72~96, 1979.
- 16) 八嶋 厚・重松宏明・岡二三生・長屋淳一：上部大阪洪積粘土の力学特性と構造変化，土木学会論文集，No. 624/Ⅲ-47, pp. 217~229, 1999.
- 17) 森脇武夫：粘土の微視的構造の定量化，第32回地盤工学研究発表会講演集，pp. 305~306, 1997.
- 18) 鬼塚克忠：微視的に見た有明粘土の土構造，第32回地盤工学研究発表会講演集，pp. 307~308, 1997.
- 19) Tsuchida, T., Kobayashi, M. and Mizukami, J.: Effect of aging of marine clay and its duplication by high temperature consolidation, *SOILS AND FOUNDATIONS*, Vol. 31, No. 4, pp. 133~147, 1991.
- 20) 福江正治・田屋直美・堀部 浩：粘土の微視的構造と比抵抗の関係，第33回地盤工学研究発表会講演集，pp. 385~386, 1998.
- 21) 三浦哲彦・山寺 彰・日野剛徳：間隙径分布の測定に基づく海成粘土の圧縮特性に関する考察，土木学会論文集，No. 624/Ⅲ-47, pp. 203~215, 1999.
- 22) 古賀 慎：廃棄物処分場と粘土科学とのかわり，粘土科学，Vol. 39, No. 3, pp. 142~150, 1999.
- 23) 田中俊行・平 和男・深沢栄造：れき混入粘土混合土による人工遮水材料の基礎特性，土と基礎，Vol. 44, No. 5, pp. 30~32, 1996.
- 24) 土弘道夫・高尾洋平：処分場しゃ水工への現地発生土の適用，第2回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp. 85~88, 1997.
- 25) 勝見 武・Jo, H. Y.・Benson, C. H.・Edil, T. B.: ジオシンセティッククレイライナーの無機化学物質溶液に対するしゃ水性能，ジオシンセティックス論文集，Vol. 14, pp. 360~369, 1999.
- 26) 勝見 武・Benson, C. H.・Foose, G. J.・嘉門雅史：廃棄物処分場遮水ライナーの性能評価について，廃棄物学会誌，Vol. 10, No. 1, pp. 75~85, 1999.
- 27) 嘉門雅史：廃棄物埋め立て処分場の構造基準について，廃棄物学会誌，Vol. 10, No. 2, pp. 147~155, 1999.
- 28) 高尾 肇・竹ヶ原竜大・植田浩義：高レベル放射性廃棄物処分のバリア性能に関する課題と地盤工学への期待，土と基礎，Vol. 46, No. 10, pp. 19~22, 1998.
- 29) 駒田広也・河西 基・広永道彦：低レベル放射性廃棄物処分に関する技術展望，土木学会論文集，No. 602/Ⅳ-40, pp. 1~6, 1998.
- 30) Pusch, R. and Carlsson, T.: The physical state of Na-smectite used as a barrier component, *Eng. Geol.*, Vol. 21, pp. 257~265, 1985.
- 31) Pusch, R. (Editor): Artificial clay barriers for high level radioactive waste repositories, *Eng. Geol.*, Vol. 28, pp. 231~464, 1990.
- 32) 小峰秀雄・緒方信秀：ベントナイトを含有する緩衝材の膨潤評価式と自己シール性評価，土と基礎，Vol. 46, No. 10, pp. 23~26, 1998.
- 33) 山口晴幸・鶴居正行・福田 誠・黒島一郎：酸性雨と土質，土と基礎，No. 40, No. 12, pp. 35~40, 1992.
- 34) 古河幸雄・藤田竜之・平山和雄：安定処理したまき土へ及ぼす酸性雨の影響，土質工学会論文報告集，Vol. 34, No. 3, pp. 123~135, 1994.
- 35) 林 久人：地中の還元状態の物質と地下掘削工事，アーバンポタ，No. 23, pp. 26~31, 1984.
- 36) 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, pp. 283~291, 1999.
- 37) 佐野博昭・山田幹雄・能澤真周・奥村充司・渡邊康二：酸性移行を呈する土の工学的性質に関する研究，第3回地盤改良シンポジウム発表論文集，pp. 41~48, 1998.
- 38) 檜垣貫二・岩崎孝夫・末岡 徹・長藤哲夫：生石灰混合による揮発性塩素化合物汚染地盤の浄化に関する研究，土木学会論文集，No. 546/Ⅳ-32, pp. 113~123, 1996.
- 39) 根岸昌範・李 昌珠・下村雅則・松山明人・今村 聡：鉄粉を用いた有機塩素化合物の浄化対策，第2回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp. 35~40, 1997.
- 40) 川地 武・久保 博・松本 聡：汚染土壌修復技術としての電気化学的処理の適用性検討，地下水・土壌汚染と

総 説

- その防止対策に関する研究集会第5回講演集, pp. 209~214, 1997.
- 41) 川端淳一・今立文雄・佐藤亜紀子: 油汚染土壌の浄化特性について, 第31回地盤工学研究発表会講演集, pp. 351~352, 1996.
- 42) 小川 誠: 有機修飾スメクタイトの新展開, 粘土科学, Vol. 39, No. 4, pp. 207~220, 2000.
- 43) Michot, L. T. and Pinnavaia, T. J.: Adsorption of chlorinated phenols from aqueous solution by surfactant-modified pillared clays, *Clays and Clay Minerals*, Vol. 39, No. 6, pp. 634~641, 1991.
- 44) Onikata, M., Kondo, M., Hayashi, N. and Yamanaka, S.: Complex formation of cation-exchanged montmorillonites with propylene carbonate: Osmotic swelling in aqueous electrolyte solutions, *Clays and Clay Minerals*, Vol. 47, No. 5, pp. 672~677, 1999.
- 45) 山口晴幸・馬場文啓・大高和加子・福田 誠: 機器分析を導入した地盤環境試験法の体系化, 土と基礎, No. 45, No. 7, pp. 21~23, 1997.
- 46) 風間秀雄・小田恭子・藤田龍之・古河幸雄: 液性・塑性限界に対応するフォールコーンの貫入量, 第30回土質工学研究発表会講演集, pp. 373~376, 1995.
- 47) 藤田龍之・古河幸雄: 電子レンジを利用いた土の物理試験方法に関する二, 三の研究, 土質工学会論文報告集, Vol. 28, No. 2, pp. 197~207, 1990.
- 48) 地盤工学会編: 土質試験の方法と解説 (第一回改訂版), 2000.

(原稿受理 2000.10.12)