

# 石膏系中性固化材による地盤改良技術の現状と課題

THE BASIC RESEARCHES OF SOIL IMPROVEMENT  
BY NEUTRAL HARDENING MATERIALS

大澤誠司\*・佐々木謙一\*・田辺和康\*\*・富田武満\*\*・渡邊賢二\*\*

by Seiji OOSAWA, Ken-ichi SASAKI, Kazuyasu TANABE, Takumitsu TOMITA and Kenji WATANABE

## 1. はじめに

従来までの地盤改良は、現場の超軟弱粘土や特殊土を改良して利用することが主体であった。今日では建設発生土や汚泥までも改良することが求められるようになり、セメント系や石灰系は高性能な改良材を多数開発している。ところが、土壤環境基準の影響を受けて、地盤の適正強度の改良だけでなく、環境の安全性を配慮した新しい地盤改良技術の開発が求められるようになった。このような背景から、種々の研究開発が進められているが、そのなかでも中性固化材による地盤改良が着目されてきた。

本報では、発生土の現状と利用、セメント系固化材の問題点を踏まえた中性固化材の地盤改良技術の現状等についてとりまとめて報告する。

## 2. 発生土の現状とその利用

平成 14 年 5 月から建設リサイクル法の推進を図るために、発注者は都道府県知事への工事前届出の義務付けをすること等が完全施行された。また、新たに建設リサイクル推進計画 2002 を策定し、平成 17 年度を目標年度とした再資源化率の目標設定、行動計画を取りまとめており、積極的な取り組みが感じられる。

Table.1 は平成 14 年度における建設発生土の搬出・利用状況を示す。建設工事にともなう建設発生土の場外搬出量は 24,509 万 m<sup>3</sup> に達しており、新材と再生砂を含めた土砂利用量は 12,911 万 m<sup>3</sup> である。また、現場内では 2,115 万 m<sup>3</sup> が利用されている。ここで利用率をみると土砂利用は 65%、工事間利用は 30% にすぎない。さらには、内陸受入地内でストックされている 16,966 万 m<sup>3</sup> (約 61%) が有効利用されていないことが問題である。この内陸受入地内は年々逼迫した状況となっており、その対策が求められている(平成 16 年版国土交通白書参考)。

このような状況からして、これら発生土の利用促進を図るためには地盤改良材を用いて物理的または化学的に改質することが必要である。国土交通省では平成 16 年 3 月に発生土の適用用途基準の通達をした。その内容をみると、用途と土質区分を詳細に分類分けされ

\* 石原産業(株)四日市工場環境商品開発部(〒510-0842 三重県四日市市石原町 1)。

\*\* 福山大学 工学部 建設環境工学科

Table.1 建設発生土の搬出・利用状況(平成 14 年度)

単位: 万 m<sup>3</sup>

建設発生土の場外搬出量		土砂利用量		現場内利用
工事間利用(内陸部工事、海面事業等)	6,443	工事間利用(内陸部工事、海面事業等)	6,443	—
再資源化設備(土質改良プラント)	914	再資源化設備(土質改良プラント)	914	—
内陸受入地	16,966	新材(土砂等)	5,243	—
海面処分場	186	再生砂(コンクリート塊より)	312	—
合計	24,509		12,911	2,115
発生土利用率: $(6,443+914+312+2,115)/(12,911+2,115)=65\%$				
工事間利用率: $(6,443+914)/24,509 = 30\%$				

ているので、再利用しやすくなった。そのなかで、土質区分の第 4 種建設発生土と泥土は化学的な地盤改良を必要とする発生土である。従来まではセメント系や石灰系を用いた地盤改良であったが、近年は環境基準を満たすことが必要となってきた。したがって、地盤改良分野においても利用用途別の処理が必要となっており、建設発生土を積極的に有効利用するためには、この適用基準を遵守して取り組むことが望まれる。

## 3. セメント系固化材の問題

軟弱な地盤や取扱い困難な建設発生土を地盤改良してリサイクルする場合は、セメント系固化材により改良することが多い。しかし、近年は地盤環境に対する規制が厳しくなり、①セメント改良土からのアルカリ溶液の溶出、②六価クロムの溶出が環境問題として指摘されるようになった。

- ① アルカリ問題は、水和反応により生成される水酸化カルシウムが原因であり、アルカリ問題を直接的に改良することはポゾラン反応の促進を抑制することになる。
- ② 六価クロムはセメント中に含有している成分であり、この問題も直接的に改良することは困難である。
- ③ その他として、臭気発生が問題となる場合もある。

このようなことから、近年ではセメント系に変わる処理材として、古くて新しい石膏系、無機系、植物繊維系、高分子系が中性固化材として見直されるようになってきた。以下ではその詳細を述べる。

## 4. 各種中性固化材の特性

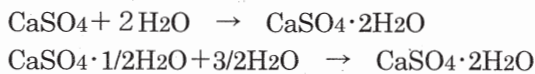
### (1) 石膏系固化材

主原料はギブスや彫刻等に使われている焼石膏で、水和反応により固化する特性を有している。

焼石膏は、焼成温度に応じて半水石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ )、Ⅲ型無水石膏(Ⅲ- $\text{CaSO}_4$ )、Ⅱ型無水石膏(Ⅱ- $\text{CaSO}_4$ )に分類される。Ⅱ型無水石膏は別名死焼石膏と呼ばれ、水和反応が起こらない。従って、半水及びⅢ型無水又はその混合物が固化材として用いられる。

結晶系には $\alpha$ 型と $\beta$ 型があるが、 $\beta$ 型の方が製造が容易で且つ低コストでもあり、 $\beta$ 型がよく用いられる。

半水及びⅢ型無水の水和反応式を以下に示す。



反応式を見ると、石膏は単位重量当りの水和量が決して多くはない。従って、これを補填する為に、各メーカーは後述する無機物や植物繊維及び高分子等を配合調整している。

又、石灰、セメント、スラグ等の水和化合物材料を配合して強度促進を図り、アルカリ問題については混合当初のpHはアルカリ性を呈するが露天にさらすことによって空気中の炭酸ガスとの反応で中性化するといった研究も見られる。

### (2) 無機系固化材

水和反応を有する無機物や、組合せにより水和やゲル化するような配合の材料もある。例えば、水和反応を有する無機物としては芒硝があるが、水への溶解度が非常に高く市場では見受けられない。又、水ガラスと硫酸物質を組み合わせる方法もあるが、強度促進の不足から強制脱水や天日乾燥等で水分を除去することが必要となる。

### (3) 植物繊維系固化材

パルプやケナフ等の乾燥粉末を泥土に添加すると、吸水作用の働きにより見掛け状態は改善される。しかし、あくまでも吸水作用によるものであり、強度は泥土の性状に大きく左右されている。又、嵩比重が非常に低く取扱いが難しい。更には、湿潤状態では腐敗が起こり、泥状に戻る可能性もある為に改良土のリサイクル時には植栽を行い地耐力の補強が必要となる。

### (4) 高分子系固化材

吸水性ポリマーは、植物繊維と同様に単なる吸水作用である。高分子凝集材は、水に溶解して粘性を上げると共に土粒子の凝集体を形成し、見掛けの改良を行

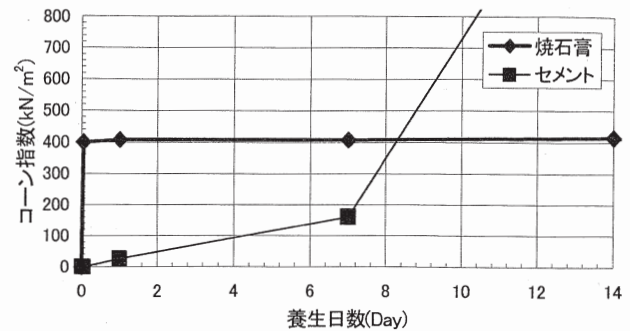


Fig.1 養生日数とコーン指数の関係

うものである。

これらは植物繊維と同様あくまでも吸水作用によるもので、強度は泥土の性状に大きく左右される。

## 5. 石膏系固化材の特徴

### (1) 固化反応速度が早い

石膏は水と接触後しばらくして水和反応が始まり、10分前後で反応は終了に近づき、約1時間で完了する。

Fig.1は、泥土に固化材を混合後、風乾しないように密閉容器に入れ、所定期間養生後に解きほぐして突き固め、コーン指数を測定したものである。添加量は泥土に対して焼石膏は20wt%、セメントはポルトランドセメントを10wt%処理した。焼石膏改良土は混合1時間後からはほぼ一定の強度を維持しているのに対し、セメント改良土は1週間養生以降から強度増加が見られる。

このことから、固化処理作業で必要となる堆積場所の確保は僅かでもよく、都市部のような限られたエリアでの作業に適している。又、1時間で最終強度が得られることから、設計強度に対する修正が適宜行える。さらには、長期的な強度増加も起こることはなく、改良地盤の再掘削に際して支障をきたすこともない。

### (2) pH値が中性

Fig.2は泥土に固化材を混合後、風乾しないように密閉容器に入れ、所定期間養生後に解きほぐしてpHを測定したものである。添加量は泥土に対して、焼石膏は20wt%、セメントはポルトランドセメントを10wt%処理したものである。その結果、焼石膏改良土はpH5.8~8.6の中性域で安定しているのに対し、セメント改良土はpH13を超える高アルカリ性を示す。

このように処理土がアルカリ性を呈している場合は、汚染防止対策としての排水処理、敷土、覆土等、利用目的に応じた様々な対策を取ることが求められる。改良を必要とする建設汚泥や残土のほとんどは中性域の状

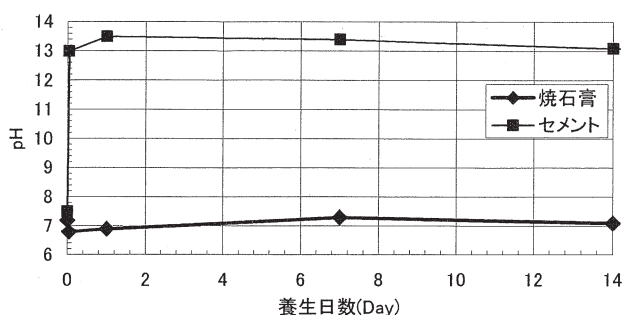


Fig.2 養生日数とpHの関係

Table.2 各種焼石膏のフッ素含有と溶出量

各種焼石膏	含有量 (mg/kg)	溶出量 (mg/L)
チタン石膏	44	0.0
天然石膏	59	1.2
排煙脱硫石膏	240	4.0
磷酸石膏	770	9.0
廃ボード回収石膏	500	3.0
土壤環境基準	4,000 ↓	0.8 ↓

態にあり、中性固化処理土の場合は中性固化体となる。従って、何ら対策を講ずる必要もなく改良土のリサイクル使用が可能となる。

### (3) 有害危険性が少ない

石膏は、一般的に食品や化粧品等に使用されていることでもわかる様に安全性の高いものである。現在使用しているチタン石膏の溶出試験の結果は、環境基準を十分に満足する分析検出精度の下限以下である。

またヒメダカの急性毒性試験では、検液の96時間LC50値(半数致死濃度)が100%以上となり1匹も死滅することなく異常行動も見られず、安全性が確認された。

しかし、石膏の中でも廃石膏ボードの回収リサイクル品等は、フッ素の溶出量が土壤環境基準を超える材料もあると言われている。Table.2は、検証の為に入手した各種石膏のフッ素含有量と溶出量の分析結果を示す。その結果、チタン石膏のみが土壤環境基準の溶出量を下回っており、その他の石膏については何れも上回った。

従って、石膏系固化材=安全という訳ではなく、使用に際しては注意が必要である。

### (4) 環境浄化材との併用が可能

Fig.3は揮発性有機化合物(VOCs)のひとつであるト

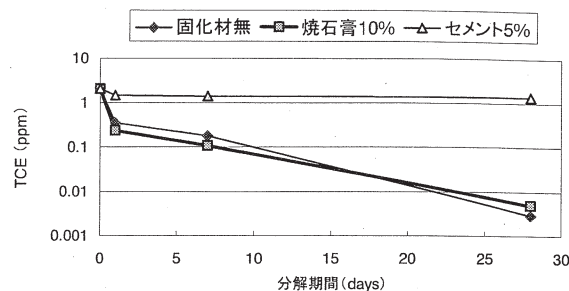


Fig.3 分解期間とTCEの関係

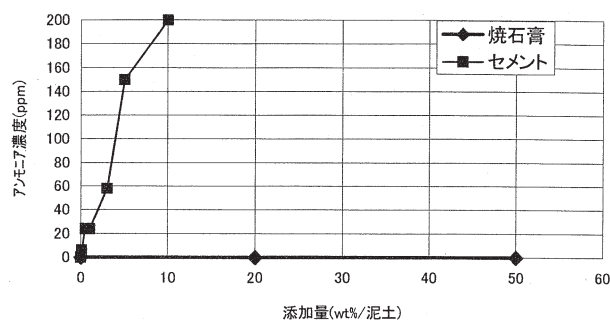


Fig.4 添加量とアンモニア濃度の関係

リクロロエチレン(TCE)汚染泥土に対し、酸化鉄系分解材と固化材を複合処理した試料の分解能を調べた結果を示す。

固化材を添加していない試料との比較では、焼石膏改良土は同等の分解能を示すが、セメント改良土は殆ど分解されず分解能を阻害していることが認められた。

この現象は、アルカリ雰囲気下では分解材表面に水酸化物の不動態が形成されることによって反応を阻害する事が原因していると考えられている。

汚染土壌は一般的に軟弱であることが多いと言われており、土壌汚染対策法に則って浄化を進める際に固化処理を必要とする場合もある。VOCsの分解浄化を固化処理と同時にを行う場合は、分解能を損なわない為にも中性固化材での改良が必要である。又、重金属の不溶化に関してもpH依存性があり、中性域では各元素とも比較的溶出が抑制され、中性固化材での改良が望ましい。

### (5) 臭気の発生を抑制する

一般的にアンモニア系物質は、pHの中性域では安定して水中に存在するが、アルカリ雰囲気になると大気に発散する性質を持つ。この原理を応用してコークス製造時に副生するアンモニアは精製されている。

Fig.4は、ダム底泥土に固化材を混合したものをガラス容器に密閉して1時間放置後、アンモニア濃度を



Table.3 酸化鉄含有量と硫化水素濃度

	硫化水素濃度 (ppm)		
	3日後	6日後	30日後
港湾浚渫土	20	20	20
酸化鉄0.5%含有	1.2	1.5	1.5
酸化鉄2.5%含有	0	0	0

検知管で測定した結果である。焼石膏改良土は50wt%添加しても検知されないのに対し、セメント改良土は添加量に比例して検知され、10wt%添加すると200ppmまで濃度が上がっている。

一般に河川や湖沼および港湾等の浚渫土は、アンモニア系の臭気を内蔵している場合が多く、アルカリ性材料で改良すると、内蔵しているアンモニアが発散して周辺環境に被害を起すことがある。これに対して石膏系中性固化材を用いた改良土は、臭気のはらぎがなく、周辺環境への影響を及ぼすことはない。

#### (6) 硫化水素発生防止対策

Table.3は硫化水素を発散している港湾浚渫土に対して、酸化鉄の含有量を変えた焼石膏を10wt%混合し、ガラス容器に密閉して30℃の恒温機で所定期間養生後、検知管で硫化水素濃度を測定したものである。その結果、石膏中に2.5%の酸化鉄が含有されていれば、硫化水素の発生を抑制することが認められた。

硫化水素対策として酸化鉄が有効であることは、旧厚生省生活衛生局水道環境部より出されている「安定型最終処分場における硫化水素対策について(生衛発第1362号)」でも取り上げられている。多くの事例から見られる硫化水素の問題に対しては、固化材に酸化鉄を複合することによって硫化鉄の形で固定化することができる。

#### (7) 強度補完方法

焼石膏は非常に短期間に固化するが、セメント・石灰系固化材の最終強度と比較すると大きく劣る。しかし、現場施工の状況や改良土の利用目的によっては、天日乾燥による水分蒸発で強度補完できる場合もある。

Fig.5は天日乾燥による強度補完について検証したものである。その結果、天日乾燥した養生後の強度発現は著しく、現場施工での養生方法の工夫次第で強度補完が可能であることが認められた。

### 6. 石膏系固化材の課題

#### (1) 添加量と単価

一般的に使われているセメント系や石灰系と比べて、添加量当りの最終強度の発現性は大きく劣る。一週間

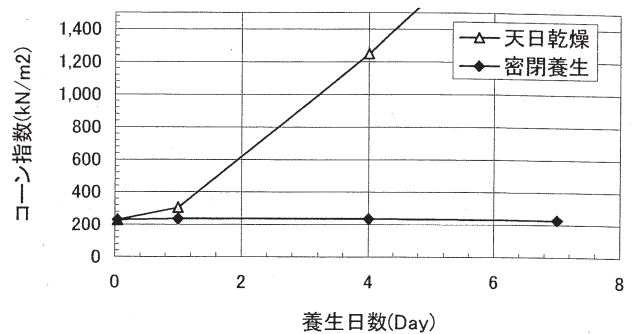


Fig.5 養生日数とコーン指数の関係

養生以降の強度特性では、その影響が顕著に認められ添加量を多く必要とする。

一方、単価については、セメントの実勢価格が10円/kgを切っているのに対し、焼石膏の一般価格は15~18円/kgプラス運賃が必要となる。添加量の多さに加えて単価も高く、施工材料費はセメントに比べて数倍となる。

この材料費の格差は、現場施工の状況や改良土の利用目的によって、事前脱水や改良後の天日乾燥等で添加量を減らして差を縮められる場合もある。

基本的には環境保全費用として換算することのメリットがある。例えば、①セメントや石灰で改良した時に必要とされる周囲へのアルカリ汚染拡散防止対策費用、②土壌を入れ替えた時に必要となる汚泥の処分費用や土壌購入費用を差し引いた上で、更に改良土壌が一般土壌と変わらぬ扱いができる、③処分場の延命や土砂採取による里山の減少に寄与できる等が考えられる。しかし、まだこのような状況は認知されておらず、今後の発展の為にこの環境保全費用の換算方法についての検討が必要である。

#### (2) 溶解度を持つ

石膏は水に対して2g/l程度の溶解度がある。このレベルはセメントよりもかなり高く、地下水面下の飽和領域では浸食による劣化問題が考えられる。この対策としては、地下水面下の使用は避けることであるが、より溶解度の低い結晶性生成物の研究開発がメーカー各社で取り組まれている。

しかしながら、実用面において経年劣化を勘案した場合、どのレベルまでが許容される範囲なのかは明らかではなく、この点についても評価方法を含めた検討が必要である。

#### (3) 評価方法

地盤工学会の安定化試験方法では、固化速度の早い

石膏系固化材の現場施工に則した評価方法となっていないことが問題である。

今後の中性固化材の展開には、この点についての試験方法の確立が望まれる。

#### (4) 行政の理解

中性固化材による地盤改良技術は、発想段階を含めても数年しか経っておらず、実績も決して多くないのが現状である。

従って、行政側の対応は、一部の自治体で取り組みを開始したところはあるものの、全国的に見るとこれからである。又、国レベルの法律や指針等はセメント・石灰系を対象に記されたものであり、中性固化処理に関する指針が必要となってきた。

この様な現状から、中性固化処理工法は環境に優しい地盤改良工法であることは認められていても、セメント系や石灰系の地盤改良工法までには至っていないのが現状である。

#### 7. おわりに

環境問題は今世紀の重要課題である中で、環境整備事業に伴う各地の処分場は収容能力が限界状態にあり、新たな処分場の建設も近隣住民の反発で容易ではなくなってきた。又、土砂の採取も同様に制限を受けるようになった。

この様な状況を打開する上でも、建設発生土のリサイクルは必須であり、とりわけリサイクルの進んでいない建設汚泥や浚渫土の利用促進が求められる。特に浚渫土に関しては、建設汚泥か否かの基準が曖昧であり、浚渫土の中性改良・周辺盛土へリサイクル使用することを突破口として泥土の利用促進に取り組む自治体も増えてきた。

このように、周辺環境に配慮した地盤改良の促進を図る為には、石膏系中性固化材がセメント系・石灰系の固化材よりも優れており利用が見込まれる。将来的には必ずある程度の規模で中性固化材の市場が構築されて、社会に貢献できることを期待している。

(2004年7月14日受付 2004年9月3日受理)