環境配慮型固化材「サスティン Geo」を添加した土の締固め特性および強度発現性

Compaction Characteristics and Strength Development of Soil Treated with a Cement-Free Ground Stabilizer Sustain-Geo

内田　志春*1，サンジーワニ　ダヤニ*1，坂本　遼*1，高橋　直樹*1
MOTOHARU UCHIDA, DAYANI SANJEEWANI, RYO SAKAMOTO, NAOKI TAKAHASHI

本報では，セメントを使用しない環境配慮型固化材「サスティン Geo」（以下，STG）を添加した土の締固め特性および強度発現性を評価し，固化材無添加および高炉セメント B 種（以下，BB）を添加した条件と比較した。STG の添加により最大乾燥密度は低下したものの，養生 0 日時点の一軸圧縮強さは固化材無添加の場合を上回った。また，養生 7 日時点では BB を添加した場合を上回り，養生 28 日時点では BB を添加した場合よりやや低いものの，その差は限定的であった。以上の結果から，STG は，締固めを伴う条件下におけるセメント系固化材の代替材料として適用できる可能性が示された。

キーワード：固化材，一軸圧縮強さ，締固め特性，CO_2 削減

This study evaluates the compaction characteristics and strength development of soil treated with Sustain-Geo (STG), an environmentally friendly cement-free stabilizer, comparing its performance with untreated soil and treated soil with Blast-Furnace Slag Cement Type B (BB). Although the addition of STG decreased the maximum dry density, the unconfined compressive strength immediately after compaction exceeded that of the case without any solidifying material. Furthermore, the strength of STG-treated soil was higher than that of BB-treated soil at 7 days and slightly lower at 28 days, with only a limited difference. These results indicate that STG has the potential to serve as an alternative stabilizer to conventional cementitious stabilizers for compacted soil.

Keywords: Stabilizer, Unconfined Compressive Strength, Compaction Characteristics, CO_2 Reduction

1. はじめに

近年，我が国の建設現場では建設発生土の処理が深刻な環境問題となっている。平成 30 年度建設副産物実態調査によれば，建設工事から年間約 2.9 億 m³の建設発生土が発生しており，そのうち約 1.3 億 m³が場外に搬出されている [1)]。建設発生土の場外搬出には多大な運搬コストと CO_2排出が伴うため，その適正処理と有効利用は喫緊の課題であり，循環型社会の実現に向けた建設発生土の場内再利用促進が強く求められている。

建設発生土の場内活用の一手段として，現地で発生した土を外構部などの構成材料に利用することが考えられる。我が国では都市再開発事業が継続的に推進されており，建築物本体のみならず外構・境界壁等の附帯施設も多く建設され，外構部にはコンクリートブロックや鉄筋コンクリート造の塀が多用されている。一方，建設発生土を外構部の構成材料として利用するためには，セメント等の固化材を添加し，必要な強度を確保する必要がある。しかし，セメントは製造過程において大量の CO_2を排出する。セメントの製造に伴う CO_2排出量は，全世界の CO_2排出量の約 8 %を占めるとされ [2)]，2050 年カーボンニュートラルに向けて，その削減が重要な課題となっている。そこで，セメントを使用しない固化材と建設発生土を組み合わせた土構造物を外構部へ適用することにより，CO_2排出量削減と建設発生土の有効活用という二つの環境課題の解決に寄与できる可能性がある。

*1 技術研究所技術開発推進部

建設発生土を外構部の構造材料として活用するためには，強度および耐久性を確保するとともに，施工性を担保する必要がある。そのため，これらの性能を確保しつつ，セメント系固化材に代わる環境負荷の低い代替材料の開発が求められている。本報では，筆者らが開発したセメントを使用しない環境配慮型固化材「サスティンGeo」（以下，STG）が土の締固め特性および強度発現に及ぼす影響を把握することを目的とした実験検討結果を示す。

2. 土を用いた構造物と STG の概要

(1) 土を用いた構造物の現状

土は全世界に豊富に存在する資源で，最も原初的な建設材料である。地産地消が可能で，輸送や製造に伴うエネルギー消費および CO_2 排出量を大幅に抑制でき，使用後は自然環境へ還元できる持続可能な材料である。現在でも，土の住まいに全人口の約 8～10 %，開発途上国では約 20～25 %の人々が住んでいる [3]。近年のカーボンニュートラルへの関心の高まりとともに土材料の環境的優位性が再評価され，欧州では圧縮土ブロック（Compressed Earth Block: CEB）や版築構法（Rammed Earth：土を型枠の中に入れ繰り返し突き固めることで構造物を構築する伝統的な建築技法）の標準化が進められるなど，建築材料としての活用が国際的に広がっている。

一方，地震国である日本においては，現行の建築基準法に土構造物に関する規定が存在せず，建築物の主要構造部への適用は制度的に困難な状況にある。しかし，外構部などへの適用においては状況が異なり，法隆寺の築地塀に代表されるように，1000 年以上にわたり風雨や地震に耐えてきた事例は，土材料の長期的な耐久性を実証している。現代においては，固化材を添加することで土を容易に強化できることから，外構部への土材料の適用可能性はさらに広がると考えられる。中でも，セメントを使用しない固化材を用いることができれば，CO_2 排出量削減と土材料の活用を両立できると考えられる。

(2) STG の概要

STG は，高炉スラグ微粉末，消石灰および無水石膏を主成分とするセメントを使用しない環境配慮型固化材である（**写真-1**）。セメントを使用しないことで製造過程における CO_2 排出量を低減できるとともに，セメント系固化材で懸念される六価クロム溶出のリスクを大幅に低減できる。粉体方式による浅層改良を目的に開発され，一般的な土質に対してセメント系固化材と同等以上の強度が発現することが確認されている [4]。現在は既存杭の埋戻しや残土改良，スラリー方式による中深層改良など，幅広い用途への適用に向けた取り組みを展開している。本研究では，その一環として，締固めを伴う条件下での STG の適用可能性を検討した。



写真-1 サスティン Geo（STG）

3. 実験の概要

(1) 試料土

建設発生土は発生地点によって土質の性状が大きく異なるため，粒度分布にも大きな差異がみられる。土の締固め特性（最大乾燥密度・最適含水比）（以下，ρ_{dmax}・w_{opt}）は粒度分布の違いに大きく依存する。粒度分布の異なる試料を用いた場合，固化材による影響と粒度分布の差異による影響を分離することが困難となる。そこで本研究では，粒度分布を一定に調整した試料を用いることで，固化材の添加による締固め特性および強度発現性の評価を容易にした。具体的には，まさ土（土粒子密度：2.632 g/cm^3，自然含水比：0.8 %）を母材に砂質粘性土（土粒子密度：2.894 g/cm^3，自然含水比：28.8 %）を質量比 4：1 で混合し，粒度分布を調整した土（以下，調整土）を作製した。調整土の粒度分布は**図-1** に示すとおりであり，Peter Walker ら [5]が示す版築に適した粒度分布の範囲に収まるよう設定した。

(2) 固化材

固化材は，STG と市販の高炉セメント B 種（以下，BB）を使用した。STG の詳細については 2 章に示したと

おりであり，BB はセメント系固化材として一般的に用いられている材料であることから比較対象として選定した。BB は，高炉スラグ微粉末を 30%超 60 %以下含有する混合セメントであり，主としてポルトランドセメントクリンカー，高炉スラグ微粉末および石膏から構成される。両者の密度は STG が 2.68 g/cm^3，BB が 3.04 g/cm^3 である。

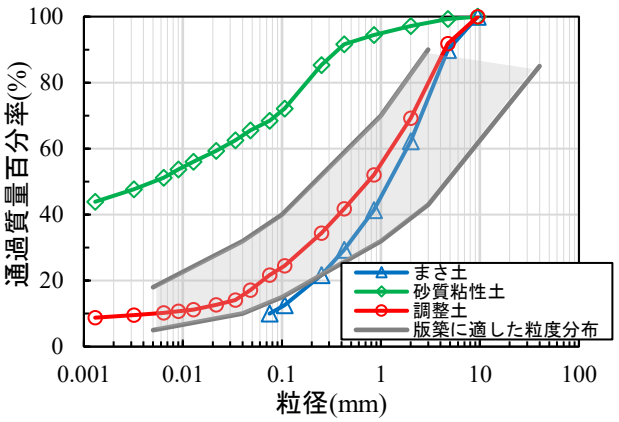


図-1　各試料土の粒径加積曲線

表-1　一軸圧縮試験の条件

固化材	固化材添加量 [%]	調整土の含水比 [%]	養生期間 [日]
なし		10	0，7，28
STG	5		
	10		
	15		
BB	5		
	10		
	15		

(3) 締固め試験

締固め試験は JIS A 1210:2020「突固めによる土の締固め試験方法」[6]に準拠し，A-c 法（湿潤法，非繰り返し法）で実施した。具体的には，φ100 mm，容積 1000 cm^3 のモールドを使用し，3 層に分け，各層を 2.5 kg のランマーで 25 回突き固め，突き固め後の湿潤密度と含水比を測定した。

締固め試験は，調整土の母材であるまさ土および砂質粘性土，調整土，調整土に STG を 10 %添加した試料の計 4 条件で実施した。まさ土および砂質粘性土は，自然含水状態の試料に適当量の水を加え，一軸ミキサーで均一になるまで攪拌したうえで締固め試験を実施した。なお，試験に用いたまさ土は風化花崗岩に由来する風化土であり，締固めによって土粒子が破砕されやすい試料であるため，非繰り返し法により試験を行った。

調整土は，自然含水状態のまさ土と砂質粘性土を一軸ミキサーで均一になるまで攪拌して作製した。この調整土に適当量の水を加え，同様に一軸ミキサーで均一になるまで攪拌したうえで締固め試験を実施した。

STG を添加した試料は，調整土に所定量の STG を添加し，一軸ミキサーで均一になるまで攪拌した後，適当量の水を加え，再度一軸ミキサーで攪拌して作製し，その後，締固め試験を実施した。

(4) 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験は JIS A 1216:2020「土の一軸圧縮試験方法」[7]に準拠して実施した。養生条件は 20 ℃封緘養生とし，養生期間は供試体作製直後（以下，養生 0 日），7 日，28 日の 3 水準とした。各条件における供試体数は 3 本とし，その平均値を各養生期間における一軸圧縮強さとした。供試体の作製は JCAS L-01:2006「セメント協会標準試験方法 セメント系固化材による改良体の強さ試験方法」[8]に準拠し，φ50 mm，高さ 100 mm の鋼製モールドを用い，落下高さ 200 mm で 3 層に分け，各層を 1.5 kg ランマーで 12 回突き固めて作製した。供試体作製に用いられた締固めエネルギーは，ランマーの質量，落下高さ，突き固め回数，層数の積で算出され，前述の「突固めによる土の締固め試験方法」と同等のエネルギーになるように設定されている。

固化材の添加量は調整土の乾燥質量に対して 5 %，10 %，15 %の 3 水準とし，STG・BB 各 3 水準に比較基準として固化材無添加を加えた計 7 条件で実験した（**表-1**）。

一軸圧縮試験に先立って締固め試験を実施し，その結果得られた調整土の w_{opt}(10 %)を供試体作製時の基準含水比とした。調整土および固化材を加えた試料の作製手順は締固め試験と同様である。この手順では，固化材の添加量の増加に伴い試料全体の含水比が低下するが，固化材無添加の調整土を基準とした相対的な強度向上効果を評価する上で，大きな影響はないと判断した。

(5) 曝露試験

曝露試験は，封緘養生 28 日経過後の固化材無添加の条件，STG および BB を 10 %添加した条件の 3 水準を対

象に実施した。供試体を屋外に静置し，経時的な表面状態の変化を目視により観察した。

4. 試験結果および考察

(1) 締固め試験の結果

図-2 に締固め試験の結果を示す。まさ土の w_{opt} は約 10 %，砂質粘性土の w_{opt} は約 22 %であり，両者の締固め特性は大きく異なる。これらを質量比 4 : 1 で混合した調整土の w_{opt} は約 10 %となり，母材であるまさ土の影響を強く受けた結果となった。調整土の ρ_{dmax} は約 1.97 g/cm³となり，砂質粘性土の混合により細粒分が補完されて粒度分布が改善されたことで，まさ土単体と比較して ρ_{dmax} が大きくなった。このことから，調整土は粒度分布が良好で締固め性能に優れた試料であるといえる。調整土に乾燥質量の 10 %の STG を添加した場合，w_{opt} はほとんど変化しなかった。一方，ρ_{dmax} は約 1.91 g/cm³へと低下した。先行研究[9]においても，固化材を添加すると ρ_{dmax} が低下する傾向が報告されており，本結果はこれと整合する。

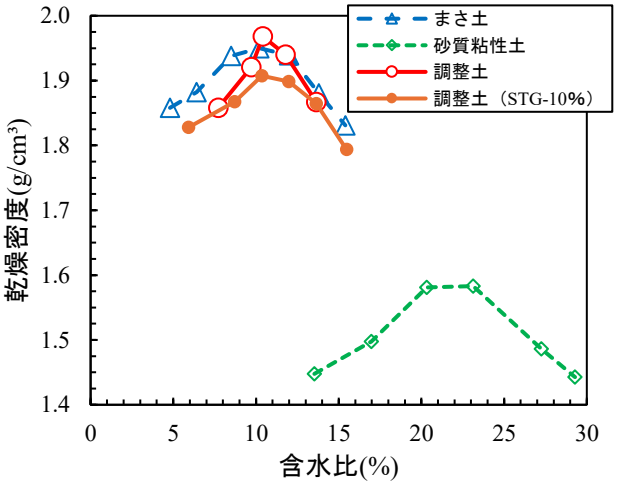


図-2 締固め試験の結果

(2) 一軸圧縮試験の結果

a) 供試体の乾燥密度

図-3 に固化材の添加量と乾燥密度（養生 0 日）の関係を示す。固化材無添加の調整土の乾燥密度が最も大きく，固化材の添加量が増加するにつれて乾燥密度は低下した。本実験では，調整土の乾燥質量に対して所定量の固化材を添加した。その後，自然含水状態の調整土の含水比が 10 %となるように加水量を算定し，加水した。なお，加水量の算定には自然含水状態の調整土の質量を用いており，固化材の質量は考慮していない。そのため，固化材の添加量が増えるほど試料全体に占める水分の割合が低下した。同一添加量で比較すると，STG の乾燥密度は BB よりも一貫して小さかった。それぞれの固化材の密度は，STG が 2.68 g/cm³，BB が 3.04 g/cm³ であり，STG は BB に比べて密度が約 12 %小さい。同質量の固化材を添加した場合，密度の小さい STG は占有体積が大きくなるため，混合物全体の乾燥密度が BB より低下したものと考えられる。

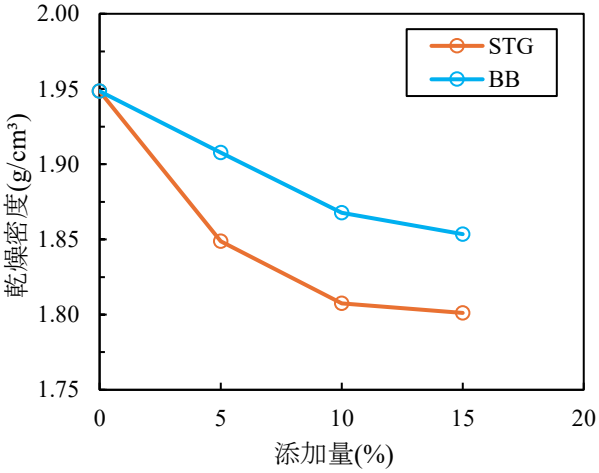


図-3 固化材の添加量と供試体の乾燥密度の関係（養生 0 日）

b) 供試体の含水比

各測定時の供試体の含水比を調整土の含水比で除した値（以下，w/w_o）を正規化した含水比とする。**図-4** に，正規化した供試体の含水比と養生期間の関係を示す。固化材を添加した全条件において，w/w_oは調整土（$w/w_o = 1.0$）より低く，添加量が多いほど低くなった。これは前述のとおり，固化材添加により試料

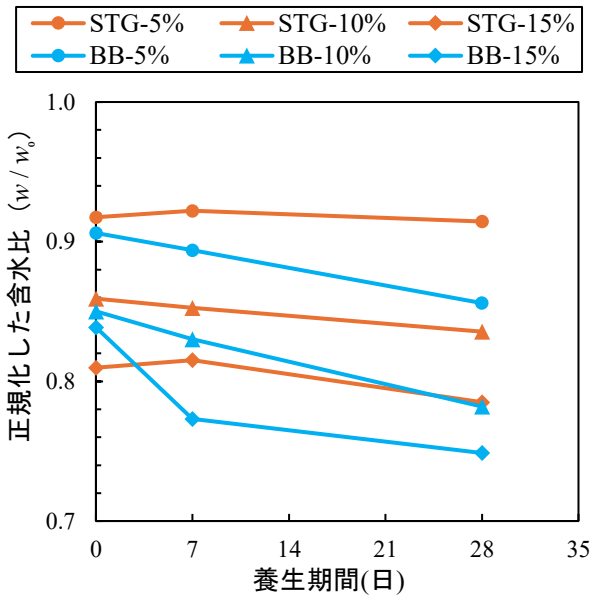


図-4 正規化した供試体の含水比と養生期間の関係

全体に占める水分の割合が低下するためである。養生期間に伴う w/w_oの変化に着目すると，STG を添加した条件では養生期間による w/w_oの低下はわずかであったのに対し，BB を添加した条件では養生期間の経過とともに w/w_oが大きく低下し，その傾向は添加量が多いほど顕著であった。一般に，セメント系固化材では水和反応の進行に伴い水分が消費されることが知られており，BB を添加した条件における含水比の低下はこれと整合する結果である。

c） 一軸圧縮強さ

図-5 に一軸圧縮強さと養生期間の関係を示す。固化材無添加の調整土の一軸圧縮強さは養生期間によらずほぼ一定であったのに対し，固化材を添加したすべての条件で養生に伴う顕著な強度増加が認められた。また，各養生期間において，固化材の添加量が多いほど一軸圧縮強さは増加した。養生 0 日の時点で，固化材無添加の条件では一軸圧縮強さが 239 kN/m^2 であった。これに対し，STG を添加した条件では 1.29～1.69 倍，BB を添加した条件では 1.42～1.71 倍の一軸圧縮強さを示した。固化材を添加した条件では，試料中の水分の割合が低下し，含水比が w_{opt} から乾燥側の条件となったため，供試体の乾燥密度は低下した。しかしながら，供試体の乾燥密度が低下したにもかかわらず一軸圧縮強さが増加したことから，固化材の添加により，締固め直後の段階から一軸圧縮強さが向上する可能性が示唆された。供試体作製直後に計測を実施しており，水和反応による強度発現は限定的であったと考えられる。したがって，養生 0 日時点における強度の増加は，固化材添加に伴う自由水の減少，細粒分の増加および粒子配列の変化などの物理的要因に起因した可能性がある。しかし，本研究ではこれらの影響を詳細に検討していないため，強度増加メカニズムの解明は今後の課題である。

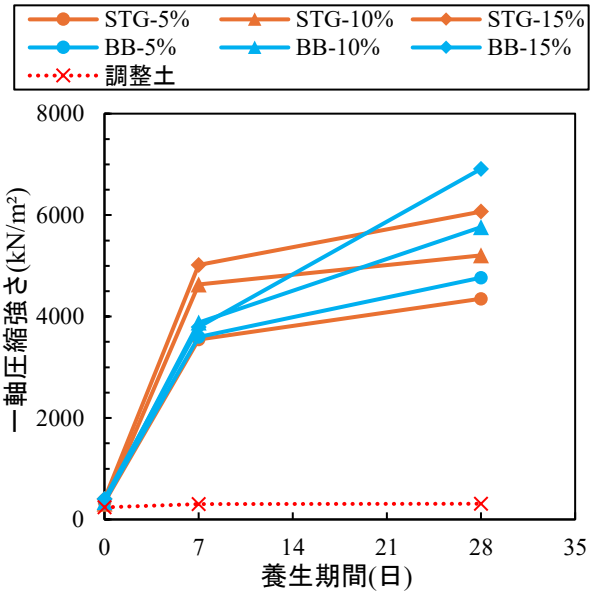


図-5 一軸圧縮強さと養生期間の関係

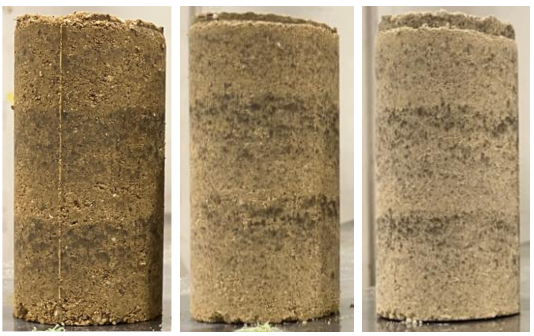
養生 7 日時点では，固化材の添加量が同一の条件で比較した場合，STG は BB を上回る一軸圧縮強さを示した。STG の主成分である高炉スラグ微粉末は消石灰をアルカリ刺激材として潜在水硬性を発現し，また無水石膏がエトリンガイトの生成を促進することで，初期段階からの強度発現に寄与すると考えられる。一方，養生 28 日時点での固化材を 10 %添加した条件では，STG の一軸圧縮強さは 5,206 kN/m²であったのに対し，BB は 5,762 kN/m² とわずかに BB が上回る結果となった。これは，中長期的な水和反応による強度発現の違いが影響した可能性がある。ただし，その差は限定的であり，STG は BB に近い強度発現性を示した。これらの結果から，STG は締固めを伴う条件下における固化材として適用できる可能性が示された。

d） 供試体の色彩

写真-2 に，STG を各添加量で添加した供試体（養生 0 日）を示す。添加量の増加に伴い，供試体は白色が強くなった。STG を 15 %添加した条件では，白色化が顕著となり，人工物を強く想起させる色合いを示した。一方，STG を 10 %添加した条件では，わずかに白色を呈するものの，土特有の色合いは維持されていた。以上のことから，土構造物としての自然な色合いを保つ観点では，固化材の添加量は 10 %程度までが適切であると考えられる。

(3) 曝露試験の経過

3 章に示した条件に従い，封緘養生 28 日経過後の供試体を屋外に曝露した。**写真-3** に固化材無添加の条件および STG を 10 %添加した条件の曝露開始時および曝露開始から 104 日後の様子を示す。なお，BB を 10 %添加した条件では STG と同様の傾向を示したため，写真は省略した。曝露期間の経過とともに，固化材無添加の条件では表面から細粒分が失われたとみられ，粒径の大きな土粒子が表面に目立つようになった。一方，STG を 10 %添加した条件では，同期間において目立った表面劣化は観察されなかった。以上の結果から，STG を添加することで，固化材無添加の条件と比べて表面劣化に対する抵抗性が向上する可能性が示された。ただし，観察期間が限られているため，今後も継続的な長期観測を実施する予定である。



(a)添加量5 %　(b)添加量10 %　(c)添加量15 %

写真-2　STG を添加した供試体（養生 0 日）



(a)曝露0日　(b)曝露104日　(c)曝露0日　(d)曝露104日

写真-3　曝露の様子
（左：固化材無添加，右：STG を 10 %添加）

5. まとめ

本研究では，セメントを使用しない環境配慮型固化材 STG を調整土に添加し，締固め試験，一軸圧縮試験および曝露試験を実施した。得られた主な知見を以下に示す。

① 締固め試験において，STG を添加した調整土の ρ_{dmax} は固化材無添加の調整土と比べて低下した。また，一軸圧縮試験用の供試体の乾燥密度は，STG の添加量の増加に伴い低下した。

② 一軸圧縮試験において，養生 0 日の時点で，STG を添加した条件で固化材無添加の調整土を上回る一軸圧縮強さを示したことから，STG の添加が締固めに負の影響を与える可能性は低く，むしろ締固め段階から一軸圧縮強さを向上させる効果を有する可能性が示唆された。

③ 一軸圧縮試験において，STG は養生 7 日時点で BB を上回る一軸圧縮強さを示し，養生 28 日時点では BB よりやや低いものの，その差は限定的であったことから，STG は締固めを伴う条件下における固化材として適用できる可能性が示された。

④ 曝露試験において，固化材無添加の条件では経時的な表面劣化が観察されたのに対し，STG を 10 %添加した条件では目立った劣化は認められなかったことから，STG の添加が耐劣化性の向上に寄与する可能性が示唆された。

以上より，STG は締固めを伴う条件下において，既存のセメント系固化材の代替材料として適用できる可能性が示された。本研究では，粒度を調整した試料を用いて検討を行ったが，今後は粒度を調整していない試料についても検討を行う必要がある。また，固化材添加後の含水比の調整や締固めエネルギーの増大によりさらなる強度向上の余地があることから，引き続き検討を進める予定である。

参考文献

1) 国土交通省：平成 30 年度建設副産物実態調査結果（確定値）参考資料，p.参考 1-10，2025
2) U.S. Department of Energy：Industry Guide to Carbon Capture and Storage at Cement Plants, p.1, 2023
3) Alastair T. M. Marsh, Yask Kulshreshtha : The state of earthen housing worldwide: how development affects attitudes and adoption, Building Research & Information, pp.491-492, 2021
4) サンジーワニダヤニ，坂本遼，内田志春，高橋直樹：セメントを使用しない地盤改良材の室内および現地における実験的研究，三井住友建設技術研究開発報告，第 23 号，pp.3-4，2025
5) Peter Walker，Rowland Keable，Joe Martin，Vasilios Maniatidis：RAMMED EARTH Design and construction guidelines, BRF Bookshop, p 38, 2005
6) 日本産業規格：JIS A 1210 : 2020「突固めによる土の締固め試験方法」，2020
7) 日本産業規格：JIS A 1216 : 2020「土の一軸圧縮試験方法」，2020
8) セメント協会：JCAS L-01 : 2006「セメント系固化材による改良体の強さ試験方法」，2006
9) ゲルノート・ミンケ：土・建築・環境　エコ時代の再発見，西村書店，pp.41-54，2010