

地盤改良（静的締固め工法）への適用に向けた膨張硬化性状を有するリサイクル材に関する検討

Application of Expansive and Hardening Materials for Ground Improvement (Static Compaction Method)

石井 裕 泰 (いしい ひろやす)

大成建設(株)技術研究所自然環境部土質研究室 研究員

藤原 靖 (ふじわら やすし)

大成建設(株)技術研究所自然環境部土質研究室 主任研究員

末岡 徹 (すえおか とおる)

大成建設(株)技術研究所自然環境部土質研究室 室長

立石 章 (たていし あきら)

大成建設(株)土木本部土木設計第一部解析技術室 課長

門田 誠 (かどた まこと)

大成建設(株)千葉支店 係長

1. はじめに

静的締固め工法¹⁾は、低振動、低騒音での施工が可能であることから、液状化対策として近年注目されている工法の一つとなっている。一般的には中詰め材として砂が用いられるが、リサイクル材料利用に対する社会的な要望の高まりから、建設発生土や再生コンクリートなど様々な材料を用いる試みがなされている^{2)~4)}。

著者らは、中詰め材として粒状性はもちろん、膨張性と強度発現性といった新たな性能の付与と産業副産物や建設副産物の有効利用といった環境面の配慮を狙った材料の検討を行っている。SCP工法や静的締固め工法に代表される密度増大工法では、これら材料に付与された新たな特性を設計に反映させることで打設本数を減らすことが可能であり、ひいては工費、工期の短縮につながるものと考えている(図-1)。

本報では、産業副産物として明礬石や転炉スラグを用いた配合について検討した、1) 要素試験による膨張・強度発現特性、2) 室内土槽実験による拘束圧条件下での膨張・強度発現特性、3) 材料の施工性および実地盤中での膨張性状の検証結果について報告する。

2. 使用材料

今回、1) 硬焼石灰、明礬石、二水石膏(以下明礬系配合)、2) 硬焼石灰、砂、転炉スラグ、硫酸アルミニウム(以下スラグ系配合)の2種類の配合について検討を行った。図-2に主な材料の粒径加積曲線を示す。前者の配合は参考文献5)、6)で取り扱ったもので、このうち明礬石は珪石鉱床付近で採掘されるものの実際の利用が少なく、有効利用が模索されているものである。転炉スラグは、自らが膨張性状をもつため、路盤材や農業資材としての利用などに限られ、高炉スラグに比べ需要が少ないとされている。さらに、石膏は建設副産物として廃材の再生利用が進められ安価な供給が可能とされている材料である。また、スラグ系配合で用いた砂は建設発生土、再生骨材などと置き換えることが可能である。

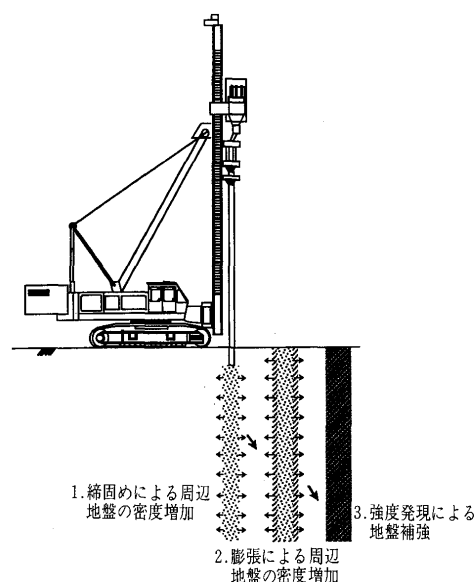


図-1 地盤改良概要

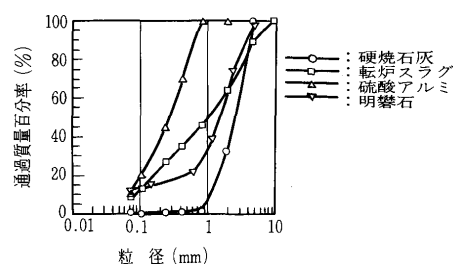


図-2 使用材料の粒径加積曲線

なお、両配合に含まれている硬焼石灰は、高温で熱処理した石灰であり、急速な水和発熱反応や湿潤材料との混合による反応を避けることができる。

それぞれの配合では、硬焼石灰の水和反応による膨張と、その他の材料から供給されるアルミニウム、イオウ、ケイ素成分によるカルシウムアルミネート水和物やカルシウムシリケート水和物の生成による強度発現が期待できる。静的締固め工法に適用した際には、材料膨張による周辺地盤の締固め、複合地盤としての強度増加効果により液状化強度を高めることができる。なお、材料の膨

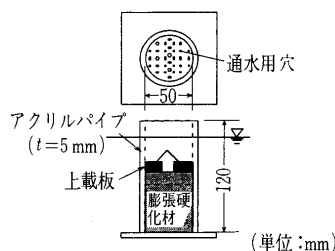


図-3 膨張量試験

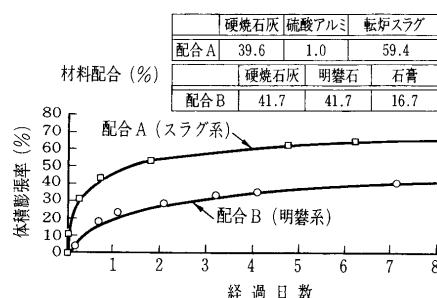


図-4 膨張量の経時変化

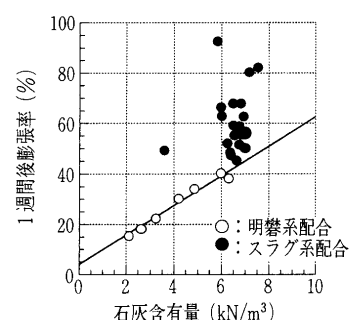


図-5 石灰含有量と1週間後膨張量の関係

張による締固め、強度発現による補強効果を利用した地盤改良は、参考文献7)でも取り扱っているが、本報では1) 中詰め材に産業副産物を積極的に利用する、2) 打設時の静的締固めと中詰め材の膨張による締固めの二つの効果を期待していることを付記する。

3. 検計方法および結果

3.1 膨張・強度発現特性

各材料の配合割合を変えて、要素レベルでの膨張試験（以下、要素膨張試験）、強度試験（以下、要素強度試験）、X線回折法による反応生成物の同定を行った。

要素膨張試験では、図-3に示す直径50 mmのアクリルパイプ内に乾燥重量に対する含水比15%の状態での膨張した試料を水槽内に設置し、スケール計測により体積変化を測定した。突固めのエネルギーは、 $0.26E_c$ ($1E_c \div 5.6 \text{ cm} \cdot \text{kgf/cm}^3$) としたが、これは供試体の初期状態を均一にする目的で行ったものである。材料表面には上載板を置き、鉛直方向膨張の均一性を保つようになっている。なお、横方向に生じようとする膨張に対しては拘束が働くため、本試験の結果は無拘束圧下における純粋な膨張性状を示すものではない。図-4は測定結果の一例である。このうち、配合A（スラグ系配合）、配合B（明礬系配合）は、それぞれ後述の円形土槽実験、現場試験施工で使用した配合である。いずれの配合についても膨張は1週間程度で頭打ちとなり、図-5に示すとおり石灰の含有量が膨張量に大きく影響することや、スラグ系配合では明礬系配合に比べて大きな膨張が生じることを確認した。

要素強度試験では、要素膨張試験と同じ配合について、 $\phi 50 \text{ mm}$ 、高さ100 mmのモールド内に同じように締固めた試料を水中養生し、各材令ごとに一軸圧縮試験を行った。強度は材令とともに増加する傾向が見られ、特に図-6に示すスラグ系配合に関しては、1) 硫酸アルミニウムの添加量により強度発現に差が見られ、反応促進材として重要な役割を果たしている（硫酸アルミを添加しなかったa3では強度が低い）、2) 硬焼石灰、硫酸アルミニウムの含有量を一定とし、砂、転炉スラグの量を変化させた場合、転炉スラグが多いほど大きな強度が得られることなどが明らかとなった。

反応生成物を同定した結果、膨張が生じている期間はボルトランタイトのみが生成し、強度発現に至るとエトリンライトが観察されるケースも見られ、以後も強度増

配合	硬焼石灰	硫酸アルミ	転炉スラグ	砂
配合 A	39.6	1.0	59.4	0.0
a1	20.0	5.0	10	65.0
a2	20.0	5.0	20	55.0
a3	20.0	0.0	20	60.0
a4	20.0	5.0	30	45.0

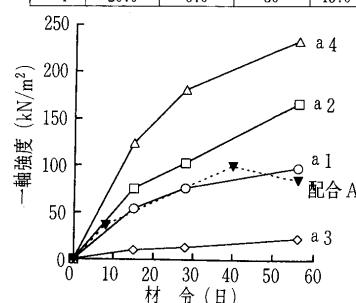


図-6 スラグ系配合の材令日数と一軸強度の関係

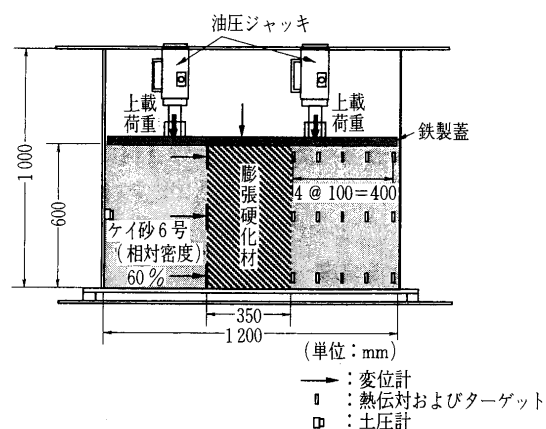


図-7 実験土槽

加が期待できることが分かった。

3.2 拘束圧条件下での材料特性

実際に静的締固め工法により本材料を打設した場合、材料は上載圧による拘束を受けた状態で膨張をする。前節では、拘束圧を作用させずに膨張性、強度発現と配合の関係を調べたが、ここでは地中における応力状態を模擬した条件での実験を行った。実験では、円形土槽内に砂地盤と中詰め材料を設置し、上載圧を加えることにより地中の応力状態を再現し、膨張・硬化特性への影響を検討した。

模型地盤は、図-7（口絵写真-21）のような直径1.2 mの円形土槽内に作成した。この土槽は肉厚5 mmのアルミ製で、変形拘束のために鉄製のバンドを取り付けてある。実験中はダイヤルゲージにより容器の変形を

測定したが、ほとんど変形しないことを確認している。また、周面摩擦低減のため、側面、底面、載荷用蓋内側のすべてにテフロンシートをあらかじめ取り付け付けた。周辺地盤を模擬した地盤は、ケイ砂6号により目標相対密度60%で作成した。この時、膨張硬化材を打設する中心付近にはあらかじめ直径350 mmのケーシングを据え付けておき、材料を打設後引き抜いた。なお、打設時には要素膨張試験、要素強度試験と同じエネルギーにより材料を締め固めている。この後、地盤表面には鉄製の蓋を設置し、四つの油圧ジャッキにより80 kN/m²、40 kN/m²、20 kN/m²（それぞれG.L. -10.0 m, -5.0 m, -2.5 mを想定）の上載圧を加えた。この荷重を保った状態で土槽下部より注水し、拘束圧条件下で材料の反応を生じさせた。上載圧が一定に保たれるようにジャッキの圧力を調整しながら、1箇月間、膨張硬化材の水平膨張量、容器側面で測定される水平方向土圧、地表面鉛直変位および地中の温度変化を経時的に測定した。ここで、水平膨張量の測定は、ワイヤー式変位計を用いた図-8の計測装置により行った。また、実験終了時には、あらかじめ設置しておいた地中ターゲットの位置を確認して、周辺地盤の変形状況を調べた。さらに、膨張硬化材を掘

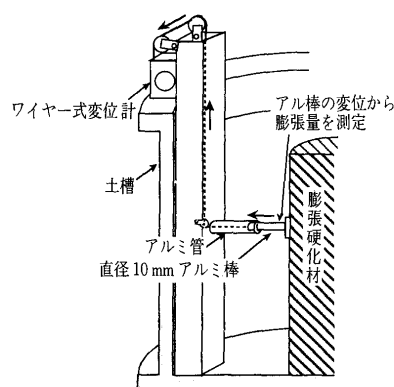


図-8 水平変位計測装置

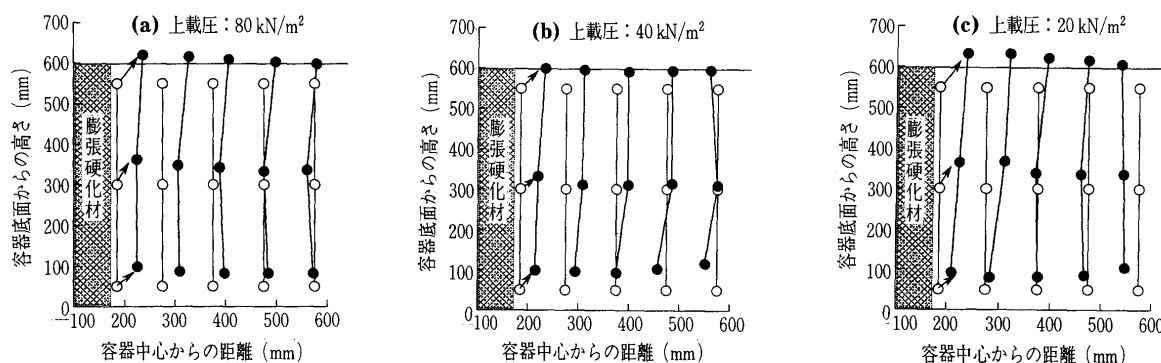


図-9 ターゲット位置測定結果 (○: 実験前, ●: 実験終了時)

表-1 膨張硬化材の体積膨張率

上載圧	ターゲット変位量 (mm) ^{注1)}	鉛直浮上り量 (mm)	膨張後半径 (mm)	膨張後高さ (mm)	膨張後体積 (m ³)	体積膨張率 (%)
80 kN/m ² ^{注1)}	43	49	218 ^{注2)}	649 ^{注2)}	0.097	68
40 kN/m ² ^{注1)}	38	51	213 ^{注2)}	651 ^{注2)}	0.092	60
20 kN/m ² ^{注2)}	—	—	223 ^{注3)}	653 ^{注3)}	0.102	76

注1) 3 深度に設置したターゲットの平均

注2) ターゲット変位量および鉛直浮上り量から算定

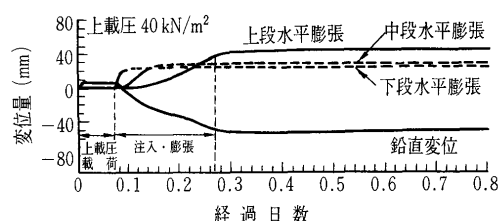
注3) 掘り出した膨張硬化材の直接測定による値

りだし (口絵写真-22), 直径50 mm, 高さ100 mm の供試体を作製し、一軸圧縮試験を行った。

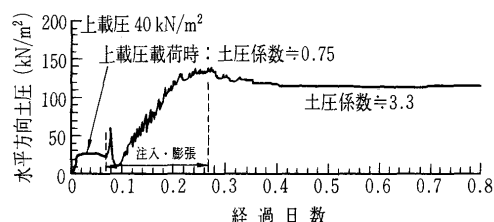
図-9 は、実験前後に測定した地中ターゲット位置を示したものである。いずれのケースも、膨張硬化材に近い位置で大きな変位が生じ、離れるほど変位が小さくなる傾向にある。つまり、膨張硬化材により、打設位置中心からの距離に応じた密度増加現象が生じていることが分かる。すなわち、材料周辺では、密度増加に伴う液状化抵抗の増加が生じているものと考えられる。表-1 に、各ケースの実験終了時における膨張硬化材の体積膨張率を示す。算定は、掘出し後の材料のスケール計測により体積を算出するか、膨張硬化材の表面に位置するターゲットの水平膨張量と鉄製蓋の浮上がり量をもとにした。この結果、すべてのケースについて、拘束圧条件下において60%以上の体積膨張が認められた。ただし、今回実施した上載圧20~80 kN/m²の範囲では、拘束圧と膨張率との間には明確な関係は見られていない。

図-10に上載圧40 kN/m²のケースについて、変位計で測定した水平膨張量と鉛直変位の経時変化を示す。水平膨張量のうち下段、中段の測定値は、他に比べて早い段階で頭打ちになっている。これは、周辺地盤で、水平方向に加えて鉛直方向の変位も大きく生じたために、図-8による水平膨張量の測定がうまく地盤に追従できなかったためである。土槽中では、水の注入に伴い膨張硬化材の下部から反応が進み、そのため上段水平変位や地表面鉛直変位は遅れて生じる。実際の施工では、地下水位以深に打設された材料はほぼ同時に反応を起こし、周辺地盤の締め固めを行うと考えられる。実験結果を適用する際はこれらの影響を考慮する必要があると同時に、より実際に近い手法の開発は今後の課題として残されている。

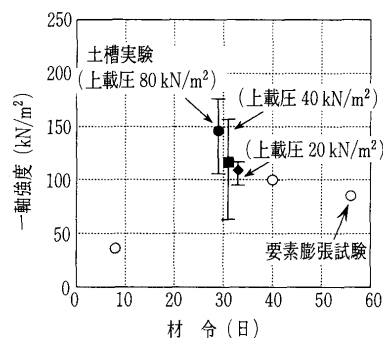
図-11に、上載圧40 kN/m²のケースについて、地盤作成前に初期値0をとった水平方向土圧の経時変化を



図一10 各変位の経時変化 (上載圧 40 kN/m²)
(水平変位：土槽外向きを正，鉛直変位：浮上がりを負，変位がうまく追従できていないと思われる部分を破線で示す)



図一11 水平方向土圧の経時変化 (上載圧 40 kN/m²)



図一12 一軸圧縮試験結果

示す。0.5日までは測定点付近でも鉛直方向変位が生じるなどして，測定結果に乱れが生じている。しかし，時間の経過とともに水平方向土圧の増加が認められ，最終的には膨張前に比べて高い土圧係数が得られている。周辺地盤の拘束圧の増加は，地盤の液化抵抗を増加させる⁸⁾が，今回の結果は既往の検討⁷⁾で示された値に比べて大きくなっている。これは，実験が剛な壁で囲まれる円形容器内で行われた影響とも考えられる。

図一12には一軸圧縮試験結果を示す。一つのケースの膨張硬化材から9供試体を対象として実施しており，図中にはそれらの平均値とばらつきの幅を示している。結果として，要素膨張試験に比べて，拘束圧の高い条件では大きな一軸強度が得られることが確認された。

3.3 実地盤中での膨張性状の確認

上記膨張硬化材の施工性および実地盤中での膨張性状の確認を目的として試験施工を実施した。

実施地点は，東京都内において，軟弱粘性土の改良を目的とした静的締固め工法の適用現場である。事前に混合した明礬系配合の中詰め材料を， N 値0の粘性土地盤中にG.L. -11.5～-0.5 mまで1本打設した。

膨張量の確認に関しては，打設から約2箇月後に一次掘削，約5箇月後に二次掘削が行われ，それぞれG.L. -1.3 m，-7.0 mにおける打設材料の径を測定することができた(口絵写真—23)。

同時に施工した膨張性状を持たない材料(参考文献9)で使用した，粘性土を石灰処理することにより粒状化した中詰め材料)についての計測結果と比較して，中詰め材の径は，一次掘削時で1.25倍，二次掘削時で1.35倍程大きく，膨張現性状を確認することができた。

また，二次掘削時に採取した試料に関しては，40～60 kN/m²の一軸強度が得られた。さらに，サンプリング試料を整形し要素膨張試験を行ったが，さらなる膨張は生じず，膨張を引き起こす反応は終了していることを確認した。

4. まとめ

今回，静的締固め工法への適用に向けて，産業副産物を利用した膨張硬化材についての検討を行い，材料配合や施工性に関する基礎データを収集した。

本検討で用いた材料は，膨張硬化性状を備えていることが確認され，この性状が，周辺地盤のさらなる密度増加や複合地盤としての強度増加に寄与するものと考えている。

今後は，様々な材料配合についての膨張，強度特性を明らかにし，利用可能な材料として種々の条件下で最適なものを見いだす。また，土槽実験結果や現場試験施工結果を踏まえた上で，より合理的な設計手法の確立を目指す予定である。

最後に，今回の一連の検討にあたって，不動建設(株)の原田健二氏，山本実氏，奥多摩工業(株)の佐藤俊治氏，後藤博樹氏には，多大なご協力をいただいた。厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大塚 誠・山田 隆・中野健二：SAVE コンポーザー—静的締固め砂杭工法—，基礎工，Vol. 26，No. 12，1998。
- 2) 松尾 稔・木村 稔・西尾良治・安藤 裕：建設発生土を利用した軟弱地盤改良工法の開発に関する基礎的研究，土木学会論文集，No. 547/Ⅲ-36，pp. 199～210，1996。
- 3) 松尾 稔・木村 稔・西尾良治・安藤 裕：建設発生土類を活用した軟弱地盤改良工法の開発，土木学会論文集，No. 567/Ⅵ-35，pp. 237～248，1997。
- 4) 山崎浩之・中里高密：建設発生土を活用した静的締固め杭工法による地盤改良工事例，基礎工，Vol. 27，No. 3，pp. 21～23，1999。
- 5) 後藤博樹・万波一朗・松原義雄・山口宗司：明礬石を利用した石灰系固化材について その1 固化メカニズムの解明，第33回地盤工学研究発表会，pp. 2299～2300，1998。
- 6) 松原義雄・山口宗司・後藤博樹・万波一朗：明礬石を利用した石灰系固化材について その2 固化性能，第33回地盤工学研究発表会，pp. 2301～2302，1998。
- 7) 日本建築センター：建築施工技術・技術審査証明報告書，硬焼石灰を用いた地盤改良工法「SLP(スーパーライムパイル)工法」，審査証明第9902号，1999。
- 8) 山下 聡・土岐祥介・三浦清一：飽和砂の液化特性に及ぼす異方圧履歴の影響，土質工学会論文報告集，Vol. 28，No. 3，pp. 185～196，1988。
- 9) 藤原斉郁・山口順子・大谷 崇・堀越研一・大磯善彦・倉田俊彦：建設発生土の粒状化処理土を用いた地盤改良工法，土と基礎，Vol. 48，No. 6，pp. 28～30，2000。

(原稿受理 2000.1.14)