

貧配合セメント造粒砂の圧縮特性 に関する一検討

COMPRESSIVE CHARACTERISTICS OF LEAN-MIXED GRANULAR CEMENT TREATED SOIL

高橋英紀¹・市川栄徳²・大草陽太郎³・早野公敏⁴・森川嘉之¹

Hidenori TAKAHASHI, Eitoku ICHIKAWA, Yotaro OHKUSA,
Kimitoshi HAYANO and Yoshiyuki MORIKAWA

¹正会員 博(工) 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 国土交通省四国地方整備局(前・港湾空港技術研究所) (〒785-0054 須崎市多ノ郷字船着乙734)

³学生会員 横浜国立大学大学院 工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

⁴正会員 博(工) 横浜国立大学大学院准教授 工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

The granulation technique is a method of improving soft cohesive soil by converting to high-strength particles. This is one of the measures used to make efficient use of soft dredged soil. However, the high costs of admixture materials, such as polymers and cement, have inhibited its widespread adoption as a method for improvement of cohesive soil. This paper reports the fundamental properties and compressive characteristics of lean-mixed granular cement treated soil. A trial indicated that no polymer was needed to granulate cohesive soil just exceeding the liquid limit. Single particle strength tests and one-dimensional compression tests indicated that at some level lean-mixed granular cement treated soil ensured strength, stiffness and performance as subgrade soil.

Key Words : Granular cement treated soil, lean-mix, compressibility, single particle strength

1. はじめに

近年, 沿岸域において人工干潟を造成することが多くの地域で期待されており, 技術面でも国土交通省港湾局監修のマニュアル¹⁾のように開発・整備が急がれている。ただし, このマニュアルのように砂質土で人工干潟を形成することが基本とされているが, 現場では海砂の供給が困難な状況にあり, 材料が枯渇している。一方で, 港湾地域における航路浚渫土は沿岸の埋立地において多量にストックされており, ストックヤードの容量限界が近づいている現場が多い。特に粘土・シルト系の浚渫土は有効利用できる箇所が限られており, 新たな有効利用技術の開発が強く求められている。そこで, 図-1 に示すように粘土・シルト系の浚渫土を干潟のアンコ材(嵩上げ用の干潟用材)として用いることが提案されており, 実際にこのような干潟の造成が成功した事例²⁾もある。しかしながら, 浚渫土自体が長期的に大きく圧密することや砂などの表層材が潜り込むことなどの問題点が指摘されることも多く, 有効利用がそれほど進んでいないのが現状である。

このような背景の下, 筆者らは粘土・シルト系の浚渫土のような軟弱な粘性土をセメントによって造

粒固化し, 人工干潟のアンコ材としての利用拡大を目指した検討を行っている。粘性土の造粒固化技術としては, 石炭灰や水溶性ポリマーなどの含水比低減材およびセメントなどの固化材を粘性土とともに攪拌して造粒固化する方法^{3), 4), 5)}が代表的である。本研究においても, 水溶性ポリマーとセメントで造粒固化する方法を採用した。軟弱な粘性土を造粒固化することによって, 圧密や潜り込みの問題を解決でき, 単位体積重量が小さいことから人工干潟を造成する箇所の原地盤の沈下量も低減できると考えられる。さらに, 比較的粒径が大きい粒状体であるために排水性も高く, 波浪に対する表層材の安定性も高いと考えられる。このように, 軟弱な粘性土を造粒固化した土(以下, 造粒砂)は人工干潟のアンコ材として有用であると言えるが, 普及の弊害の主要

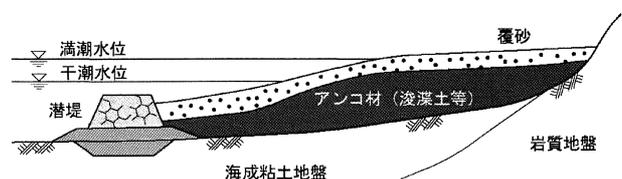


図-1 浚渫土を適用した人工干潟の概念図

因として、ポリマーとセメントなどの添加材に対するコスト高がある。今後普及を図るためにはこれらの材料コストの低減が欠かせない。

そこで本研究では、ポリマーやセメントなどの添加材の量を低減した貧配合な造粒砂について物性および圧縮特性の検討を行い、貧配合な造粒砂の人工干潟のアンコ材としての利用可能性を模索した。また、貧配合な造粒砂の物理特性・力学特性を詳細に把握することで、人工干潟のアンコ材としての精度の高い性能評価を行うことが可能となると考える。

2. 貧配合造粒砂の作製とその性状

(1) 貧配合セメント造粒砂の作製手順

造粒砂の母材として、液性限界 48.6%を少し超える含水比 60.0%に調整した粘土・シルト系の川崎粘土（川崎港で採取した海成粘土）を用いた。川崎粘土の基本的な物性を表-1 に示す。含水比低下材にはポリアクリル酸部分中和物（水溶性ポリマー）を、固化材には普通ポルトランドセメントを用いた。

ポリマーおよびセメントを用いた造粒砂の作製フローを図-2 に示す。含水比を調整して十分に攪拌した川崎粘土の表面にポリマーを粉体で撒き、直ちに土壤攪拌機（図-3 参照）で 2 分間の攪拌を行った。この攪拌機では、両刃が反対方向に回転することによって土材料にせん断力が加えられ、土壤を攪拌できる。また、ポリマーの攪拌時間を 2 分間としたのは、使用したポリマーでは吸水効果が生じて見かけ上の含水比が低下するのに約 2 分間を要したためである。ポリマーに続きセメントを粉体で添加し、5 分間の攪拌を行った。セメントの攪拌時間を 5 分間としたのは、セメントの添加効果が発揮されて土が粒状化するために約 5 分間を要し、これ以上の攪拌を行うと逆に粒状化した粒が潰れるためである。その後 60 分間気中で放置し、粒子間の付着で造粒砂が団粒化したケースについては、再度攪拌を行うことによって粒子間の付着を切った。このように作製した造粒砂を乾燥しないようにラップでくるみ、室温 20 度に保った恒温室内で 28 日以上養生した。なお、川崎粘土に対して普通ポルトランドセメントを混練した改良土のせん断強度は養生 28 日でほぼ一定で落ち着くため、養生期間を 28 日以上とした。

表-1 川崎粘土の基本的な物性

| | |
|--------------------------------------|-------|
| 土粒子密度, ρ_s (g/cm ³) | 2.676 |
| 液性限界, w_L (%) | 48.6 |
| 塑性限界, w_p (%) | 23.0 |
| 塑性指数, I_p (%) | 25.6 |
| 砂分 (%) | 14 |
| シルト分 (%) | 42 |
| 粘土分 (%) | 44 |

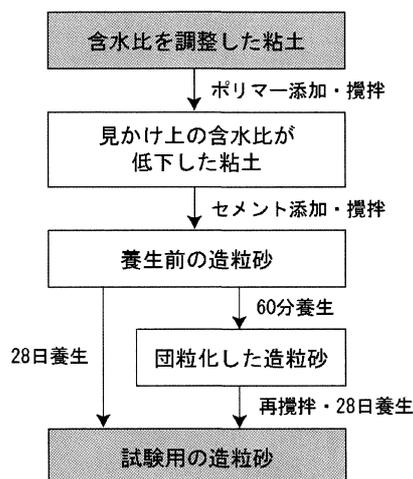


図-2 造粒砂の作製フロー

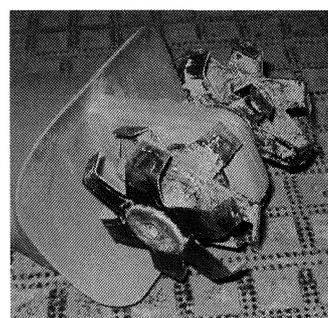


図-3 試験に用いた土壤攪拌機

(2) 添加材の配合条件と造粒化の可否

ポリマーとセメントの配合条件を表-2 にまとめている。作製した造粒砂は表中に○（造粒化のみ）あるいは◎（造粒化および単粒子強度試験）で示した 14 種類であり、ポリマーの添加率は湿潤重量比で 0.0, 0.1, 0.2, 0.3%の 4 種類、セメントの添加率は湿潤重量比で 5, 10, 15, 20%の 4 種類である。今回検討した配合条件では、いずれのケースにおいても粘性土を造粒化することが可能であった。ただし、ポリマーの配合に関しては、以下の知見が得られた。

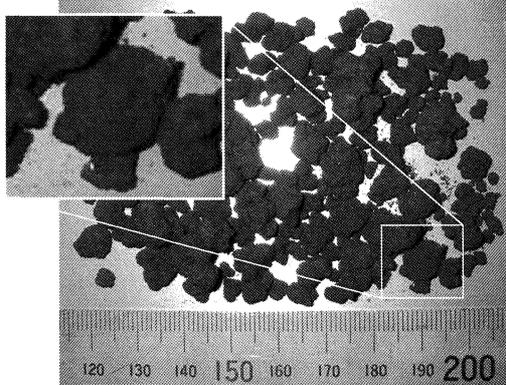
ポリマーを入れずにセメントのみで造粒化した配合ケースでは、セメント添加後の攪拌だけでは養生中に粒子間の付着で団粒化したために、60 分程度の放置によって多少の強度が出た後に再攪拌する必要がある。一方、ポリマーを少量でも混ぜた配合ケースでは団粒化は起こらず、再攪拌の必要はなかった。すなわち、ポリマーを配合させることによって、粒子間の付着を防げることが分かった。このことは、逆に再攪拌できる工法や現場条件であれば、必ずしも造粒化にはポリマーを配合させる必要がないことを示しており、材料コストを大幅に低減できる可能性を見出した。

ポリマーを添加した各ケースでは、添加率を 0.1%とした場合には攪拌中に粘性土内にポリマーはほぼ溶け込んだが、添加率を 0.3%と増やすと長時間攪拌しても塊となって残留することが目視で確認

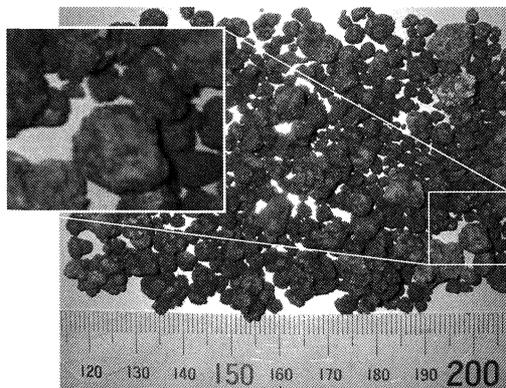
表-2 ポリマーとセメントの配合条件

| セメント添加率 | ポリマー添加率 | | | |
|---------|---------|------|------|------|
| | 0.0% | 0.1% | 0.2% | 0.3% |
| 5% | ○ | ◎ C1 | ○ | ○ |
| 10% | ○ | ◎ | ○ | ○ |
| 15% | ◎ | ◎ C3 | ◎ | ◎ C2 |
| 20% | ○ | ◎ | — | — |

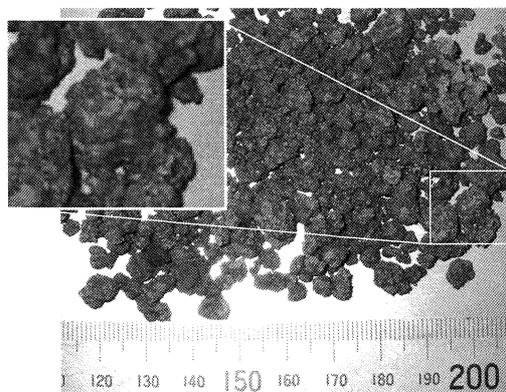
※ ◎:造粒化および単粒子強度試験, ○:造粒化のみ



(a) C1:ポリマー0.1%, セメント5%



(b) C2:ポリマー0.3%, セメント15%



(c) C3:ポリマー0.1%, セメント15%

図-4 作製した造粒砂の例

された。なお、ポリマーの添加率が0.1%と少量でも土の低塑性化が進み、見かけ上の含水比は低下していた。これから、多量のポリマーを配合させることは、溶け込めないポリマーを増やすことになり、

ここでも材料コストを低減できる可能性があった。

(3) 造粒砂の性状

種々の配合で作製した造粒砂の中で、代表的な3種類の造粒砂(配合ケースC1, C2, C3)を図-4に示す。図に示した写真の一部の拡大図も併せてしめしている。3種類の造粒砂の形状を比較すると、配合ケースC1の造粒砂はケースC2, C3の造粒砂よりも明らかに平均的に粒径が大きく、セメントの配合を少なくすることによって粒径が大きくなる傾向があった。なお、別途測定した粒度分布については次節で述べる。粒子の形状については、配合ケースC2の造粒砂は角が落ちて球形に近い形状であるのに対して、C1, C3の造粒砂は角が落ちていないことに加えて扁平した形状のものが多かった。C2のみがポリマーの添加率が大きく、ポリマーは形成される粒子の形状に影響を与える可能性が考えられた。

(4) 造粒砂の粒度分布

配合ケースC1, C2, C3の造粒砂の粒度分布を調べた。粒度試験方法は基準に定められた方法(JIS A 1204)で行った。なお、この方法では付着力による団粒化の影響を除くために、炉乾燥を行った後にフルイ分析を行うこととなっている。セメント固化処理土は乾燥劣化によって破碎しやすい特性を有しているために、造粒砂においても炉乾燥によって粒子の破碎が生じる可能性が容易に想像された。しかしながら、筆者ら⁹⁾は炉乾燥が粒度分布に与える影響を調べており、炉乾燥の影響はほぼ無いことを明らかにしている。

代表的な3種類の造粒砂と川崎粘土の粒度分布を図-5に示す。C1, C3, C2の順で粒度分布が図中で右側に位置しており、この順で粒径が大きい傾向であった。平均粒径はC1, C3, C2の順で $D_{50}=5.1\text{mm}$, 4.0mm , 2.8mm であり、C1の粒径が最も大きい。これは、図-4で示した写真での判断と整合性が取れている。次に、均等係数を求めるとC1, C2, C3の順で $U_c=3.0$, 3.1 , 3.2 であり、粒径幅の広がりには大きな差がなかった。このように、ポリマーやセメントなどの添加材の配合量の違いによって、粒子の形状や粒径が多少変化することが明らかとなった。

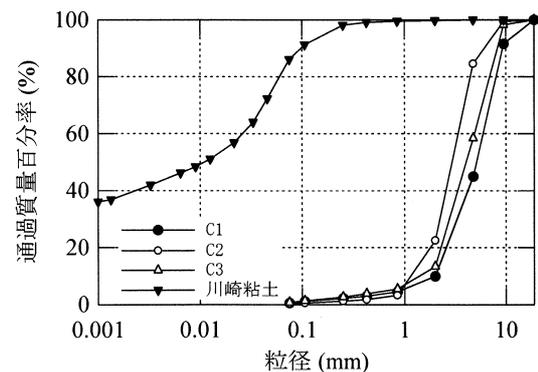


図-5 造粒砂の粒度分布

3. 造粒砂の単粒子強度

(1) 粒子強度試験方法

作製したそれぞれの造粒砂に対して、単粒子強度試験を実施した。単粒子強度試験とは、単一の造粒砂を最も安定する方向に設置し、一方向に荷重して粒子を圧縮破壊させる試験である。荷重～変位関係においてピーク強度を求めることによって、粒子単体の強度を推し量ることが可能である。ただし、単粒子強度試験には基準化された方法はなく、過去に実施されている方法^{7),8)}を参考にした。

単粒子強度試験に使用した荷重装置では一定速度(0.25mm/min)で試料を荷重することができ、変位と荷重をそれぞれ変位計とロードセルで計測した。荷重装置の変位速度については、予備的に実施した試験によって0.25mm/min以下の速度では荷重速度が単粒子強度に影響を与えないことを調べており、これに基づいて荷重速度を決定した。前掲の表-2に◎で示した7種類の配合ケースの造粒砂に対して単粒子強度試験を実施しており、試験供試体には平均粒径に近い5mm程度のものを選んだ。各配合ケースにおいて30粒ずつ強度を求めた。これは30粒以上の強度を求めても母平均の信頼区間がそれほど狭まらなかったためである。例えば、配合ケースC3について母平均に対する95%の信頼区間の幅を求めると10粒で560kN/m²、20粒で302kN/m²、30粒で268kN/m²であり、10粒と20粒では大きな差があるが20粒と30粒では差がかなり小さい。すなわち、40粒、50粒と供試体数を増やしても統計的には大幅な信頼性向上につながらないと考えられ、供試体数を30粒とした。

(2) 荷重～変位関係

図-6に単粒子強度試験で得られた荷重と変位関係の例を示している。これは、ポリマーの添加率が0.1%で、セメントの添加率が5%、15%の配合ケースC1、C3での荷重～変位関係である。両ケースにおいては、変位0.4mm程度までの初期荷重段階で荷重～変位関係はほぼ線形的であるが、ピークに達すると荷重は一時的に低下する。さらに変位させると荷重は再び増加に転じ、2度目のピークに達する。その後、繰り返しピークを示しながら、変位が増加する。このように繰り返しピークが現れるのは、粒子の一部が繰り返し破砕しているためと考えられる。

セメントの添加率の大小が荷重～変位関係に与える影響を見ると、C3よりC1の方が第1ピーク強度および第1ピークに達するまでの初期剛性が小さい。これは2粒のみの比較であるが、セメントの配合を減らすと単粒子の強度および剛性が小さくなる傾向にあることが分かった。

(3) 単粒子強度の発現特性

ポリマーやセメントなどの添加材の量を低減した場合の単粒子強度への影響を調べるために、添加材

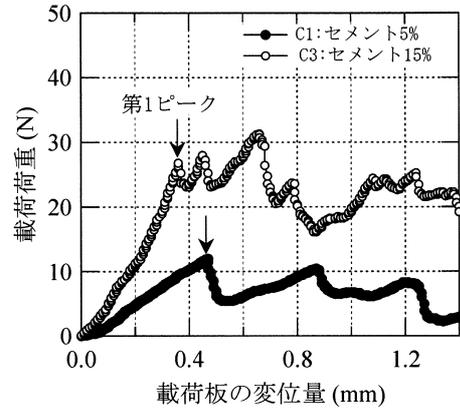
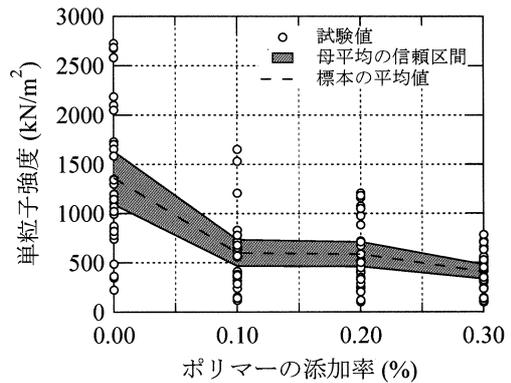
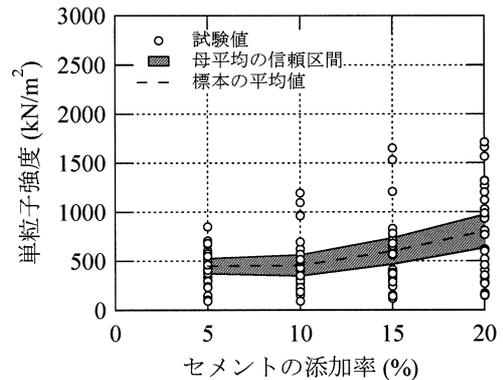


図-6 単粒子強度試験における荷重～変位関係の例



(a) ポリマー0.0～0.3%, セメント15%



(b) ポリマー0.1%, セメント5～20%

図-7 種々の添加率における単粒子強度

を貧配合とした多数の造粒砂の単粒子強度を求めた。種々のポリマーあるいはセメントの添加率に対する単粒子強度を図-7に示す。なお、式(1)に示すように、本研究での単粒子強度 σ_f は第一ピークでの荷重荷重を平均的な径から求めた断面積で除したものと定義する。

$$\sigma_f = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (1)$$

ここで、 F ：第一ピークの荷重荷重、 D ：粒子の直角3方向の径の平均値である。この単粒子強度は粒子の引張強度の程度を表すものである。なぜなら、粒子が完全な球と仮定すると、粒子の引張強度は以

下の式(2)のように表せるためである。

$$\sigma_f = \frac{XF}{\pi D^2} \quad (2)$$

ここで、 X は定数であり、Billan⁹⁾によると $X=2.0$ 、平松ら¹⁰⁾によると $X=2.8$ とされている。本研究ではケース間の強度の比較を相対的に行うことを目的としているために、係数には拘らず式(1)に示すように $X=4.0$ とした。

図-7(a)に示したポリマーの添加率と単粒子強度の関係を見ると、ポリマーの配合を増やすほど強度は減少する傾向にある。特に、ポリマーを配合しない場合と添加率 0.1%とした場合の差は大きく、ポリマーを少量でも入れると単粒子強度は大幅に低下することが分かった。ただし、この特性は今回用いた粘性土やポリマー、攪拌方法に特有の可能性もあるので、今後より一般化した条件で確認する必要がある。次に、図-7(b)に示したセメントの添加率と単粒子強度の関係を見ると、添加率が5%と10%では単粒子強度にはほとんど差がなく、15%、20%と添加率が大きいと単粒子強度も大きくなっていった。ただし、標本平均で比較すると、添加率5%の20%に対する強度比は0.56程度であり、セメントの量が4倍も異なることから考えると強度比は小さいと言える。これから、現場で要求される性能次第ではセメントの添加率を低減できる可能性が高いことが分かった。

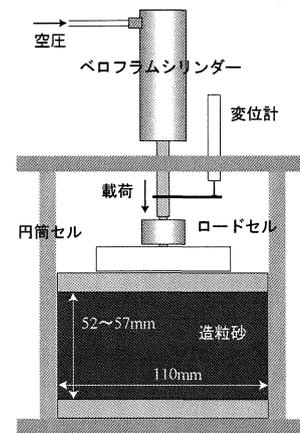


図-8 一次元圧縮試験装置の概略図

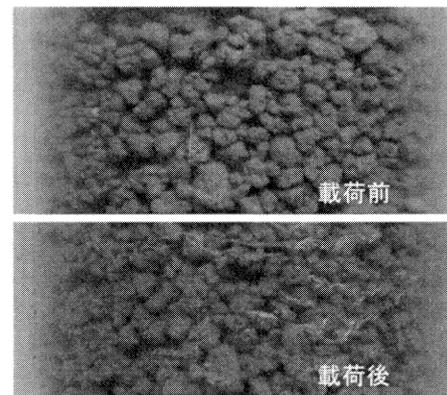


図-9 圧縮試験前後の供試体の状況 (C1)

4. 造粒砂の一次元圧縮特性

(1) 一次元圧縮試験方法

作製した造粒砂に対して、一次元圧縮試験を実施した。一次元圧縮試験とは、円筒形のセル容器に造粒砂を堆積させ、横方向への変位を拘束した状態で鉛直に荷重をかける試験である。この試験によって、造粒砂の圧縮特性を調べることができる。

試験装置の概略図を図-8に示す。試験装置は内径110mmのアクリル製の円筒セル、荷板、空圧を利用して荷重をかけるペロフラムシリンダーで構成されている。また、荷重荷重および変位量を計測できるように、ロードセルと鉛直変位計が取り付けられている。前掲の表-2にC1, C2, C3と付した3種類の配合ケースの造粒砂に対して一次元圧縮試験を実施した。以下に試験手順を述べる。造粒砂と円筒セルの摩擦を極力低減するために、グリースを塗布した透明なメンブレンシートをセル内側に貼り付けた。その中に、落下高さを0cmとして造粒砂を堆積させた。地盤の初期高さは52~57mmである。平均的な密度はC1:0.95g/cm³, C2:1.02g/cm³, C3:0.83g/cm³であり、通常の土よりも軽いことが分かる。供試体作製後に荷板とペロフラムシリンダー、鉛直変位計を設置・固定し、気中で荷重試験を行った。荷重方法は段階荷重として14段階で荷重を増加させた。各荷重は5分間隔で行ったが、一次的な圧縮は瞬時に終了することを確認している。また、荷重試験前

後でフルイ分析を実施して粒度分布の変化を調べ、一次元圧縮による粒子の破碎状況を確認した。

(2) 間隙比 e と荷重荷重 p の関係

セメントの添加率が5%と小さい配合ケースC1を一例として、図-9に一次元圧縮前と最大荷重150kN/m²下での供試体の状況を示す。図に示すように、荷重前には空隙が多いが、最大荷重下では空隙が減り、供試体が圧縮している様子が分かる。ただし、目視で粒子の状況を確認すると、全ての粒子が粉々に破碎して大きく圧縮するのではなく、変形や粒子の一部が破碎して空隙を埋めていく程度である。すなわち、セメントの添加率を5%のように大きく減らしても、圧縮に対して造粒砂としての形状を失うほど圧縮するわけではないことが分かった。

配合ケースC1, C2, C3の造粒砂に対する間隙比 e と荷重荷重 p の関係を図-10に示す。なお、ケースC1に関しては2回の試験を行ったので、2回目の試験をC1'として表している。また、各荷重段階で最終の計測値を図にプロットしている。図に示すように、いずれの造粒砂においても、荷重荷重が大きい段階ほど $e \sim \log p$ 曲線の勾配も大きくなっている。また、除荷時においては、圧縮量に比べて膨張量は極端に小さい。これらのことから、造粒砂は鉛直方向に荷重されると塑性的な変形挙動を示した。上述の図-9に示した変形状況から鑑みても、造粒砂の粒子自体が塑性的に変形することに加えて、

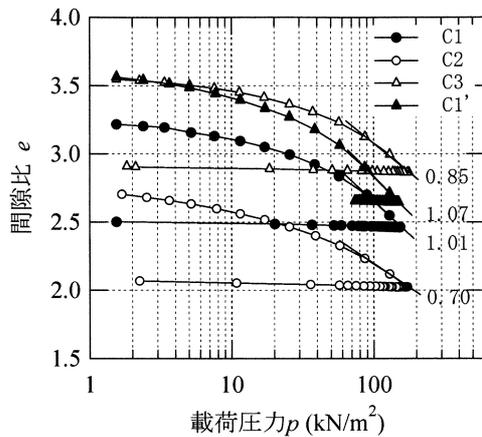


図-10 間隙比と載荷荷重の関係(e - $\log p$ 曲線)

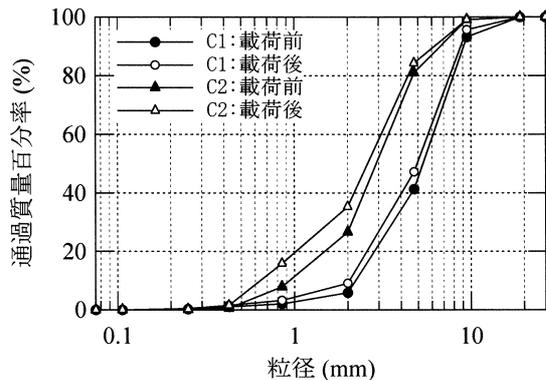


図-11 一次元圧縮試験前後の粒度分布

粒子の一部破碎による地盤全体の構造骨格の破壊も生じていると考えられる。各曲線において荷重が $87 \sim 150 \text{ kN/m}^2$ の部分に直線を当てはめ、圧縮指数 C_c を求めた。それぞれの圧縮指数は $C1:1.01$, $C1':1.07$, $C2:0.70$, $C3:0.85$ であった。セメントの添加率 15% の $C2$, $C3$ の圧縮指数に対して添加率 5% の $C1$, $C1'$ の圧縮指数は大きく、セメントの配合を減らすと一次元圧縮に対する剛性が小さくなった。単粒子強度試験でも述べたように、セメントの添加率が小さいほど粒子の剛性と強度が小さく、一次元圧縮試験における圧縮指数の違いもこの単粒子の特性差に起因するものと考えられる。ただし、セメント添加率を 5% と小さくしても、極端に圧縮性が増すわけではないことは確認された。

(3) 一次元載荷による破碎状況の確認

一次元圧縮試験前後にフルイ分析を実施し、一次元圧縮による粒子の破碎状況について確認した。配合ケース $C1$ と $C2$ における圧縮試験前後で求めた粒度分布を図-10 に示す。いずれのケースにおいても、粒度分布はグラフ上で左側にシフトしており、全体的に粒径が小さくなったことが分かる。すなわち、一次元圧縮を行うことによって、粒子が破碎することが分かった。これは、造粒砂を圧縮によって生じる塑性変形は、粒子自体の変形以外にも、粒子破碎によっても引き起こされていることを示している。破碎と圧縮変形の関係についてのメカニズムを解明

するためには、今後より詳細な検討が必要である。

5. おわりに

本研究では、添加材の量を低減した貧配合な造粒砂について物性および圧縮特性を検討した。その中で、液性限界を少し超える程度の粘性土であれば、ポリマーを配合しなくても再攪拌によって造粒化できる可能性を示した。単粒子強度試験によると、ポリマーを配合すると強度が減り、セメントの配合を減らすほど強度は低下した。ただし、セメントの添加率を $1/4$ としても平均強度は 0.56 倍程度の低減に留まっていた。一次元圧縮試験によると、セメントの配合を減らすと地盤の剛性も低減した。また、圧縮することによって粒子自体が破碎することを粒度分布の変化から確認した。ただし、貧配合の造粒砂であっても、造粒砂の形状を失う程度まで粉々になって圧縮するわけではなかった。すなわち、貧配合としても造粒砂はある程度の強度や剛性、性能を確保でき、物性や圧縮特性の面からアンコ材へ適用できる可能性が高いことが明らかとなった。今後は、より一般化した条件で貧配合造粒砂の物性を調べるとともに、強度と圧縮変形のメカニズムを検討する予定である。

参考文献

- 1) 海の自然再生ワーキング・グループ：海の自然再生ハンドブック，国土交通省港湾局，2003。
- 2) 春日井康夫，久本忠則，中山康二，松本秀雄：広島県尾道糸崎港における干潟再生事業，海洋開発論文集，Vol.19，pp.107-112，2003。
- 3) 三浦雅彦，奥田康三，近藤寛通，川崎宏二，須網功二：石炭灰固化物を用いたサンドコンパクションパイルの現場実験，土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集，pp.1528-1529，1995。
- 4) 車田佳範，中島勝治，泉雄士：石炭灰の海砂代替材への適用に関する研究，五洋建設技術年報，Vol.29，8p.，1999。
- 5) 河合優，塩田耕司，江口信也：石炭灰を用いた浚渫土の造粒固化技術の開発，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集，pp.217-218，2002。
- 6) 大草陽太郎，高橋英紀，市川栄徳，早野公敏：セメント造粒砂の粒度分布および一次元圧縮特性，第 5 回地盤工学会関東支部発表会発表講演集，pp.225-227，2008。
- 7) Nakata, Y., Kato, Y., Hyodo, M., Hyde, A.F.L and Murata, H: One-dimensional compression behaviour of uniformly graded sand related to single particle crushing strength, *Soils and Foundations*, Vol.41, No.2, pp.39-51, 2001.
- 8) 加登文学，中田幸男，兵動正幸，村田秀一：地盤材料の単粒子破碎特性，土木学会論文集，No.673/III-54，pp.189-194，2001。
- 9) Billan, J.: Some aspects of the behaviour of granular materials at high pressures, *Proceeding of the Roscoe Memorial Symposium, Cambridge*, pp.69-80, 1971.
- 10) 平松良雄，岡行俊，木山英朗：非整形試験片による岩石の引張り強さの迅速試験，日本鉱業会誌，Vol.81，No.932，pp.1024-1030，1965。