

水砕スラグの地盤工学的有効利用に関する基礎的研究

Effective utilization of granulated slag in geotechnical engineering

松田 博 Hiroshi MATSUDA (山口大学工学部)
 来山尚義 Naoyoshi KITAYAMA (復建調査設計(株))
 安藤義樹 Yoshiki ANDO ((株)フジタ)
 中野恭夫 Yasuo NAKANO (長棟興産(株))

水砕スラグをサンドコンパクションパイル工法における砂杭の代替材料として有効利用を図ることを目的として、鉄スラグ、銅スラグ、フェロニッケルスラグの締固め特性、圧縮特性、透水特性、静的強度特性、液状化強度特性を調べ自然砂と比較した。その結果、1) 鉄スラグの密度は自然砂の密度とほぼ等しい、2) いずれのスラグも、含水比の多少にかかわらず最大乾燥密度はほぼ一定値を示し、最大乾燥密度は銅スラグ>フェロニッケルスラグ>玄海砂>豊浦標準砂>鉄スラグの順に大きい、3) 各スラグの透水係数は豊浦砂及び玄海砂より大きい、4) 各水砕スラグの静的強度および液状化強度は、玄海砂および豊浦標準砂に比べて大きいことがわかった。

キーワード：地盤改良，締固め砂杭，圧縮，透水性，せん断強さ，廃棄物
 (IGC : K-3,D-9,D-6)

1. まえがき

サンドコンパクションパイル工法は安定性、耐震性に優れていることから多くの重要土木構造物基礎地盤の改良工法として用いられている。しかし、同工法では大量の良質な砂を必要とするものの、近年は海砂の採取が難しくなる等、その確保が容易ではない現状にある。

一方、鉄の生産過程に於いて生成される高炉スラグは、年間2,292万t(H8年度)生産されているが、そのうち約67%が水砕スラグとして出荷されている¹⁾。水砕スラグは粒状を呈する材料であって、その多くはセメント材料として利用されている。また、道路の路盤材料や構造物の裏込め材料として活用されている²⁾ほか、港湾構造物への適用性についても詳細に検討されている³⁾。

水砕スラグは、人工的に産出される材料であることから、均質であり、また大量に供給可能であって、サンドコンパクションパイル工法における砂の代替材料としての利用が考えられる。さらに、銑鉄の生産過程と同様、銅あるいは、フェロニッケルを製錬する際に発生する銅水砕スラグあるいは、フェロニッケル水砕スラグについても、その利用が考えられる。(本稿においては、銑鉄の生産過程において生成される水砕スラグを鉄スラグ(Fe slag)、銅及びフェロニッケルの製錬過程で発生する水砕スラグをそれぞれ、銅スラグ(Cu slag)、フェロニッケルスラグ(Ni slag)と呼んで区別する)。ところが、サンドコンパクションパイル工法への適用については、銅スラグについて施工例があるのみ^{4),5)}で、明確にされていない点が多い。

そこで、ここではこれら水砕スラグをサンドコンパクションパイル工法における砂杭の代替材料として有効利用を図ることを目的として、締固め特性、圧縮特性、透水特性、静的強度特性、液状化強度特性を調べ自然砂の

特性と比較検討したので報告する。

2. 鉄スラグ、銅スラグ、フェロニッケルスラグ

本研究では、鉄スラグ、銅スラグ、フェロニッケルスラグおよび、豊浦標準砂及び玄海灘で採取した海砂を用いて実験を行った。

このうち、鉄スラグは銑鉄と同時に生成した熔融状態の高炉スラグを圧力水(98~343kPa)で急冷粒状化したものであって、その成分としては酸化カルシウム(CaO)41.0%、シリカ(SiO₂)33.4%、アルミナ(Al₂O₃)14.5%、酸化マグネシウム(MgO)6.0%の他、少量の硫黄(S)1.0%、マンガン(Mn)0.7%、酸化鉄(FeO)0.4%を含有している³⁾。また、非結晶のガラス質粒子が大部分をしめ、一定の粒度で構成された粒子は、内外に多数の気泡を有し、角張った形状を呈している³⁾。さらに、潜在水硬性を有するため時間とともに固結する。

銅スラグは銅を精錬する際に発生し、その量は年間約200万tであって、その約40%がセメント用原料として用いられている⁶⁾。成分としては鉄(Fe)40.0%、珪酸(SiO₂)33.0%、酸化カルシウム(CaO)1.5%、酸化マグネシウム(MgO)2.0%を含有している。

フェロニッケルスラグは、ステンレス鋼やニッケル合金の製造に用いられるフェロニッケルを製錬する際に発生する粒状の副産物である⁷⁾。その成分としては、酸化マグネシウム(MgO)34.0%、珪酸(SiO₂)53.0%、鉄(Fe)7.0%、酸化カルシウム(CaO)0.5%を含有している。

3. 実験方法及び結果

3.1 密度、最大・最小間隙比

鉄スラグ(Fe slag)、銅スラグ(Cu slag)、フェロニッケルスラグ(Ni slag)、玄海産の海砂、豊浦標準砂について土粒子の密度試験および最大密度・最小密度試験を行った。各試料について得られた土粒子の密度および最大間隙比、最小間隙比を示したものが表-1である。同表より、銅スラグは他の試料に比べて密度が特に大きいことがわかる。これは先述のように銅スラグの主成分が鉄(Fe)と珪酸(SiO₂)であり、特に鉄(Fe)成分が40%を占めるためである。それに対して鉄スラグ、フェロニッケルスラグにおいては、フェロニッケルスラグの密度がやや大きい、いずれも自然砂のそれと近い値を示す。また、最大・最小間隙比については、鉄スラグが特に大きい値を示している。

表-1 粒子の密度、最大・最小間隙比

	ρ_s (g/cm ³)	e_{max}	e_{min}
Fe slag	2.695	1.302	0.844
Cu slag	3.531	1.146	0.738
Ni slag	2.991	0.899	0.599
Toyoura sand	2.638	0.970	0.608
Genkai sand	2.661	0.802	0.493

3.2 締固め特性

各試料について非繰返し法によって締固め試験(ランマー質量2.5kg、締固め層数3層、突固め回数25回/層)を行った。図-1は、含水比と乾燥密度の関係を示したものである。各水砕スラグの最適含水比を見出すことは容易ではなく、含水比の多少に関係なく最大乾燥密度はほぼ一定値を示す。これよりスラグは締固め時に含水比の影響をあまり受けないといえる。同様の結果は鉄スラグ

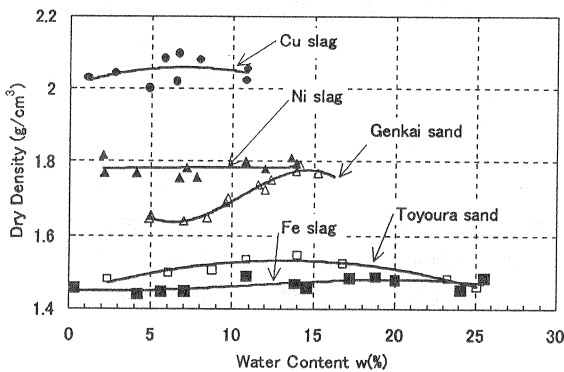


図-1 締固め特性

についてすでに得られている³⁾。また、銅スラグの最大乾燥密度は著しく大きく、約2.1g/cm³、フェロニッケルについては約1.8g/cm³であるのに対して、鉄スラグは約1.5g/cm³であって、スラグの中では特に小さく、自然砂よりもむしろ小さいことがわかる。

3.3 粒度特性

各試料の粒度試験結果を示したものが図-2である。いずれのスラグも最大粒径が4.75mm以下の粒状であって、細粒分は少なく、また粒度分布は玄海砂とほぼ類似していることがわかる。均等係数および曲率係数は、鉄スラグがそれぞれ2.9、0.8、銅スラグが2.3、0.9、フェロニッケルスラグが3.1、1.17である。

一方、サンドコンパクションパイル工法においては、砂杭は振動と突固めによって締固められることから、各水砕スラグについて粒子破碎の影響を明確にする必要がある。そこで、ここでは、特に鉄スラグについて、締固め試験前後に粒度試験を行い、締固めに伴う粒子破碎の程度について調べた。図-3はその結果を示したもので、▲印は締固め前、△印は締固め後の結果である。締固めにより若干粒径加積曲線が左方に移動しており、粒子破

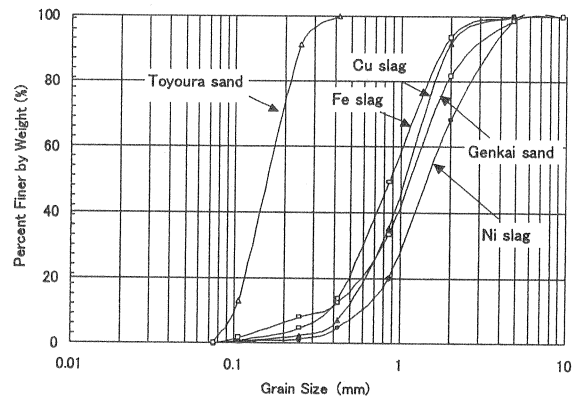


図-2 水砕スラグの粒度特性

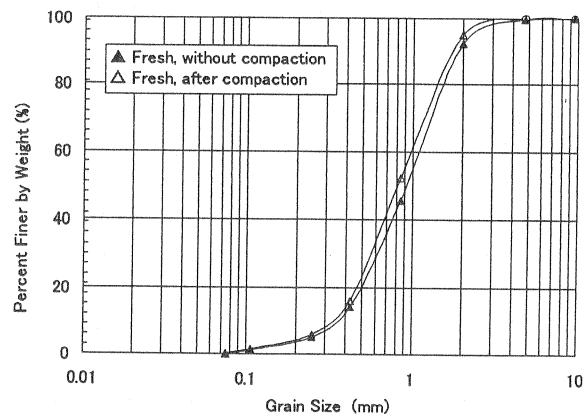


図-3 鉄スラグの締固めによって生じる粒子破碎

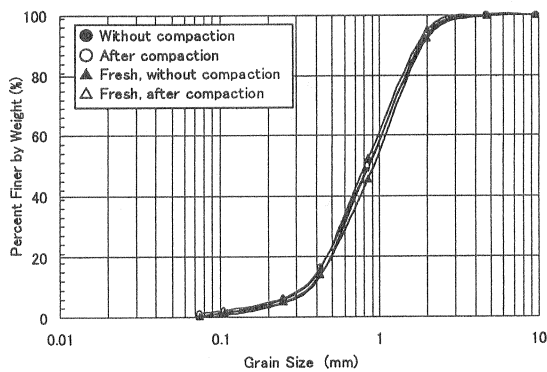


図-4 鉄スラグの締め固めによって生じる粒子破碎

砕が生じたことがわかる。同様に図-4は、製鐵所から直送した試料(Fresh)と現場で一旦撒き出しを行った後の試料についての結果である。図中の○印及び●印は現場で撒き出しを行った後の試料についての結果であり、△印及び▲印は製鐵所において生成直後の試料についての結果である。同図より撒き出し等施工に伴う粒子破碎はほとんど生じないことがわかる。これらのことより、鉄スラグにおいては、締め固めによって粒子破碎が生じることは明確であるが、その大きさは無視できる程度に小さいといえる。

3.4 圧縮特性

標準圧密試験装置を用いて、各試料について荷重を段階的に負荷して、荷重-間隙比の関係を調べた。各試料の相対密度は69%~76%の範囲にある。載荷重としては、粘土の圧密試験と同様の荷重を段階的に負荷することとし、各荷重段階の載荷期間は60分とした。各試料のe-logp 曲線を示したものが図-5である。表-1に示したように、鉄スラグ及び銅スラグの間隙比は玄海砂あるいは豊浦砂に比べて大きく、載荷に伴う間隙比の低下も比較的大きいことがわかる。したがって、サンドコンパクションパイル工法において鉄スラグ、銅スラグを砂の代替材料として使う場合、盛土等の載荷に伴う砂杭の沈下について注意が必要であろう。それに対して、フェロニッケルスラグの圧縮量は比較的小さく、自然砂のそれとほぼ等しい。図-6は鉄スラグについて初期相対密度をDr=60%、69%、84%とした場合の結果である。同図より、初期間隙比の相違が圧縮量に及ぼす影響は小さいといえる。

3.5 透水特性

各試料に対してここでは定水位透水試験(供試体直径100mm、試料高さ約85mm)を行った。透水試験は、試料の相対密度が約62±3%および82±3%となるように締め固めた上で実施した。各水砕スラグについて得られた透水係数の一覧を示したものが表-2である。いずれの相対密度についても、各水砕スラグの透水係数は $k=1.6\sim 4.1\times 10^{-1}\text{cm/s}$ であって、自然

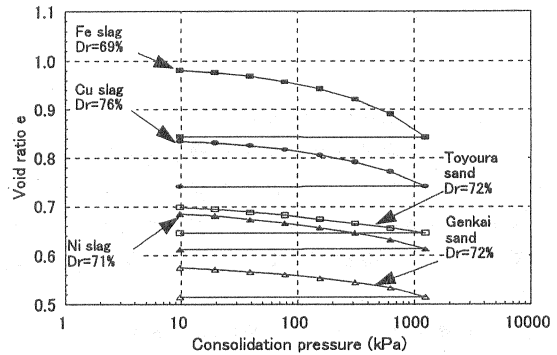


図-5 水砕スラグのe-logp 関係

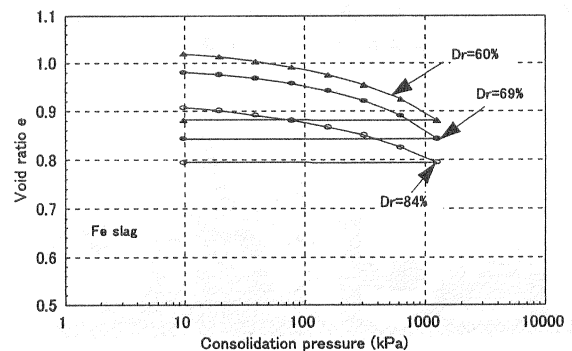


図-6 鉄スラグのe-logp 関係に及ぼす相対密度の影響

砂の透水係数 $k=1.8\sim 7.3\times 10^{-2}\text{cm/s}$ より明らかに大きい。このように、いずれの相対密度においても、スラグの透水係数は豊浦砂および玄海砂より大きいことから、サンドコンパクションパイル工法において、排水機能上からは、自然砂以上の効果を期待できる。ただ、鉄スラグについては、先述のように潜在水硬性が存在することから、硬化に伴う透水係数の低下について検討が必要である。この点については後述する。

表-2 水砕スラグの透水係数

	Dr (%)	k (cm/s)	Dr (%)	k (cm/s)
Fe slag	65	$2.5\sim 3.2\times 10^{-1}$	82	$1.7\sim 2.2\times 10^{-1}$
Cu slag	60	$2.1\sim 2.5\times 10^{-1}$	79	$1.6\sim 2.5\times 10^{-1}$
Ni slag	62	$3.5\sim 4.1\times 10^{-1}$	81	$3.2\sim 3.9\times 10^{-1}$
Toyouura sand	64	$2.5\sim 2.8\times 10^{-2}$	85	$1.8\sim 2.0\times 10^{-2}$
Genkai sand	62	$6.1\sim 7.3\times 10^{-2}$	83	$3.3\sim 3.9\times 10^{-2}$

4. 液状化特性

サンドコンパクションパイル工法において、自然砂を用いる場合には通常砂杭の液状化に対する検討は必要ない。しかし各水砕スラグに対する液状化強度と砂杭の材料として用いられている自然砂の液状化強度の関係は明確にされていないことから、ここでは各水砕スラグおよび自然砂について液状化試験を行い液状化強度の比較を行った。

液状化試験および後述する静的強度試験で用いた装置は、図-7に示した繰返し単純せん断試験装置⁸⁾である。実験では水浸した試料を真空脱気した後せん断容器に所定の相対密度(60%、80%)になるように詰め、鉛直応力 49kPa で圧密した。その後、供試体の底部は非排水、上部は排水とした上で、鉛直変位を拘束し、すなわち定体積条件のもとで応力制御繰返しせん断試験を行った。なお、こ

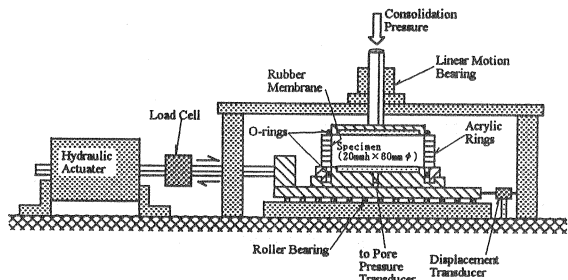


図-7 繰返し単純せん断試験装置

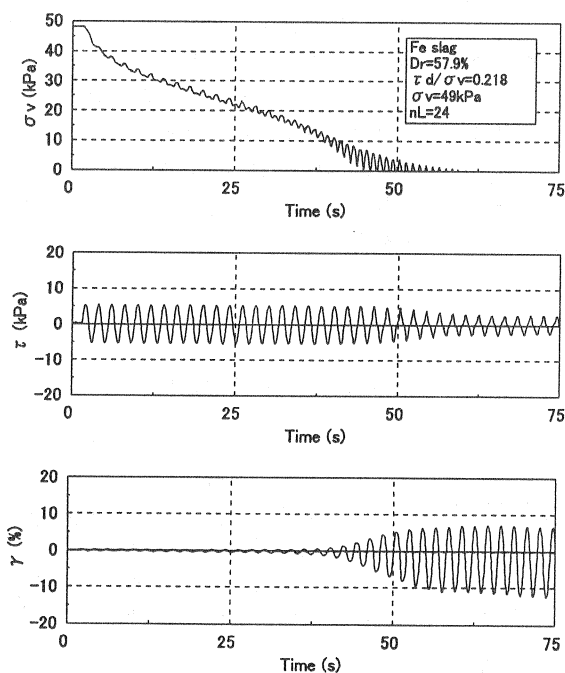


図-8 液状化試験における記録波形

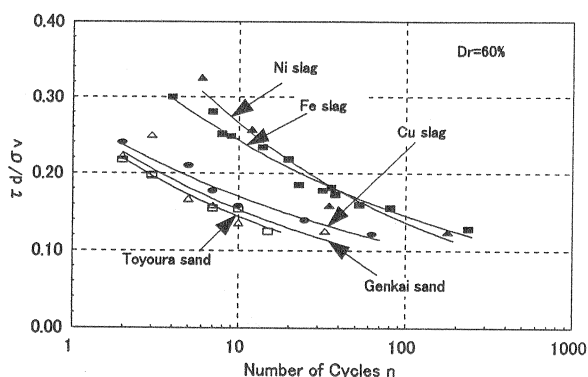


図-9 繰返しせん断強度—繰返し回数の関係 (Dr=60%)

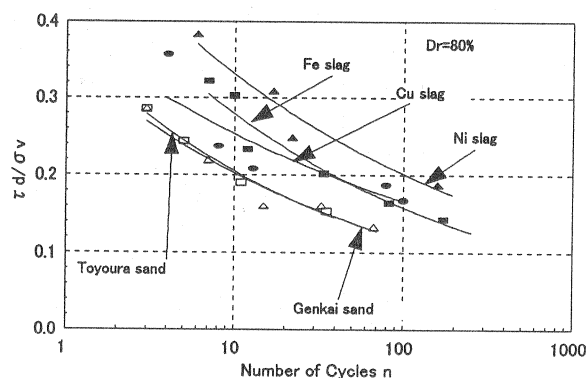


図-10 繰返しせん断強度—繰返し回数の関係 (Dr=80%)

のような定体積条件のもとで繰返しせん断試験を行うと、過剰間隙水圧の上昇を伴うことなく応力緩和によって有効応力が減少し、最終的には有効応力がゼロとなって液状化と同様な状態に至る。定体積条件下で得られる液状化強度と非排水条件下で得られる液状化強度は、有効応力の考え方によると一致することから、ここでは定体積条件下で得られる繰返し強度についても液状化強度と呼ぶことにする。ただ、厳密な意味で両者の強度の対応については明確にされていない点もあることから、ここでは豊浦標準砂についても実験を行って、自然砂および各水砕スラグの液状化強度の相対的な比較を行った。

繰返しせん断試験において、繰返しせん断の周期は、通常の地震の卓越周期および試験機の性能を考慮して 2 秒とした。

図-8は鉄スラグについて繰返しせん断中の鉛直応力、せん断応力、せん断ひずみの記録波形を示したものである。

図-9は相対密度を 60%とした試料について液状化に至るまでの繰返し回数とせん断応力比の関係を示したものである。なお、ここでは液状化の定義としてせん断ひずみ振幅 DA=5%に到達した時点とした。また、図-10は相対密度 80%の供試体についての結果である。図-9、図-10いずれにおいても、液状化強度は Ni slag > Fe

slag>Cu slag>豊浦砂または玄海砂となっており、いずれのスラグについてもその液状化強度は自然砂のそれより大きい。したがって、砂杭の液状化に対する安定性については問題はないと考えられる。

5. 静的強度特性

ここでは液状化試験と同様にして作成した供試体について静的せん断試験を行った。せん断中、供試体の底面は非排水とし、せん断中は鉛直変位を拘束することによって体積一定条件（体積変化が生じないことから供試体上面は排水とした）とし、鉛直応力の変化および供試体底部での間隙水圧を測定した。また、せん断ひずみ速度は1%/minとし、各試料とも圧密圧力は49kPa, 98kPa, 147kPaとした。そして実験は相対密度60%および80%について行った。

図-11は、単純せん断時における供試体中の応力をモール円で表示したものである。供試体はまず鉛直応力によって圧密されるが、その場合供試体はK₀状態にあることから、応力状態は図中のA, Bを通るモール円で示される。その後せん断されるが、その際主応力軸が回転することから最大・最小主応力の決定ができない。そこで、ここではせん断中は最小主応力が一定と仮定^{9), 10)}し、

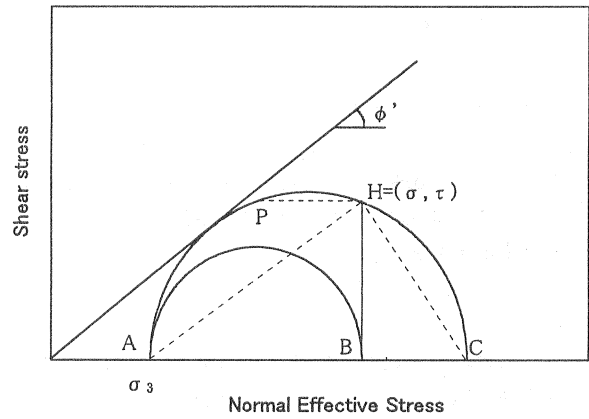


図-11 単純せん断試験時の最大・最小主応力⁹⁾

次式によって最大・最小主応力を求めることによって、せん断中の供試体内の応力をモール円表示した。

$$\sigma_1' = K_0 \cdot \sigma_v' + \frac{(1 - K_0)^2 \cdot \sigma_v'^2 + \tau^2}{(1 - K_0) \cdot \sigma_v'} \quad (1)$$

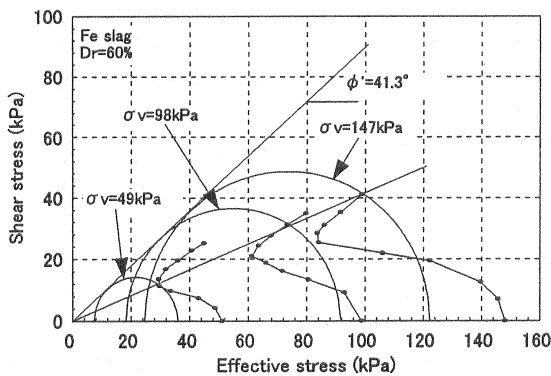


図-12(a) 鉄スラグの応力経路 (Dr=60%)

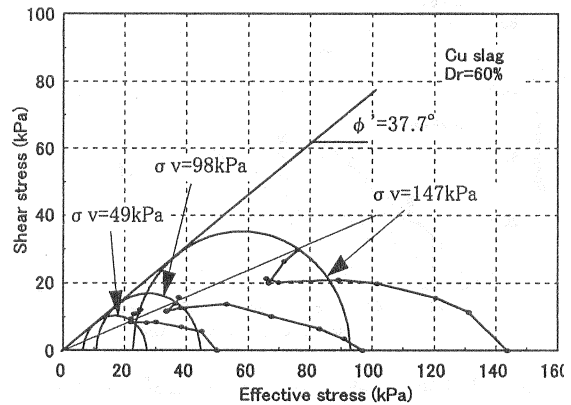


図-13(a) 銅スラグの応力経路 (Dr=60%)

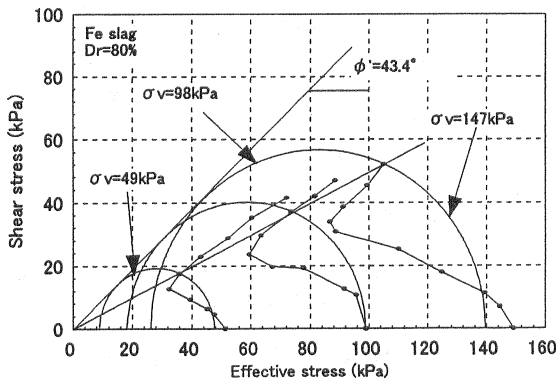


図-12(b) 鉄スラグの応力経路 (Dr=80%)

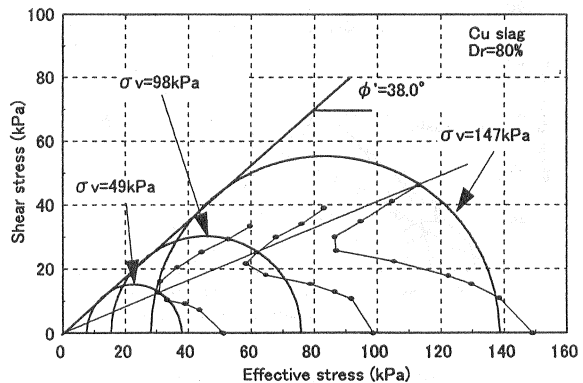


図-13(b) 銅スラグの応力経路 (Dr=80%)

$$\sigma_3' = K_0 \cdot \sigma_v' \quad (2)$$

ここに、 σ_1' 、 σ_3' は最大・最小主応力、 σ_v' は鉛直有効応力、 τ はせん断応力、 K_0 は静止土圧係数である。

したがって、圧密圧力を変化させ、同様な手法で最大・最小主応力を求めたモール円に包絡線を描くことによって内部摩擦角を得ることができる。

図-12(a)(b)、図-13(a)(b)、図-14(a)(b)は各々のスラグ(Dr=60%およびDr=80%)について、せん断中の有効応力経路およびモール円を示したものである。実験結果にばらつきがあるために破壊時の特定が容易ではないが、ここでは、各圧密圧力について破壊時の主応力方向は等しいと仮定して決定した。すなわち、各鉛直応力について得られる限界状態での応力経路を直線で近似し、この直線と各応力経路の交点を通るようにモール円を描いた。このようにして決定したモール円に対して包絡線を描き内部摩擦角を求めた結果を示したものが表-3である。ここで求められた内部摩擦角は先述のようにせん断中に最小主応力が変化しないと仮定して求めたものであることから、三軸圧縮試験での値と比較する必要がある。ここでは、後述するように鉄スラグについて

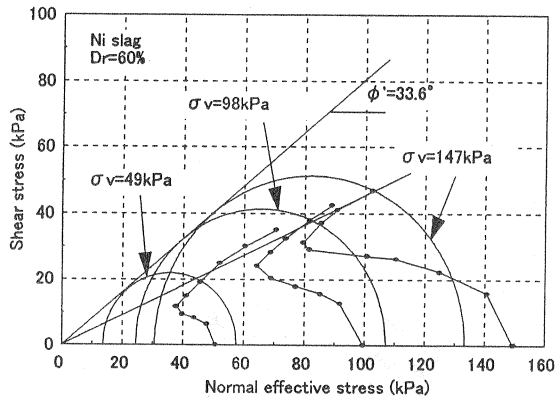


図-14(a) フェロニッケルスラグの応力経路 (Dr=60%)

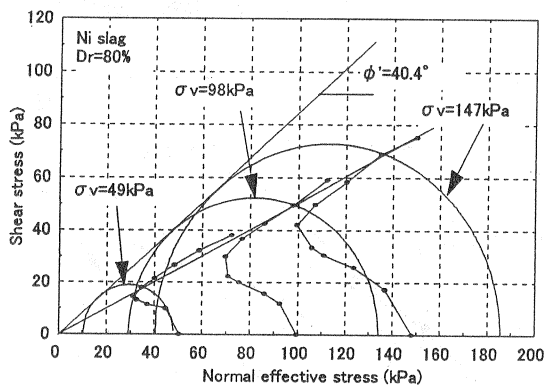


図-14(b) フェロニッケルスラグの応力経路 (Dr=80%)

表-3 水砕スラグの内部摩擦角

	Dr=60% $\phi'(^{\circ})$	Dr=80% $\phi'(^{\circ})$
Fe slag	41.3	43.4
Cu slag	37.2	42.0
Ni slag	38.7	42.5
Toyoura sand	35.7	38.7
Genkai sand	36.3	42.0

圧密排水三軸試験を行ったが、その結果と比較すると内部摩擦角は単純せん断試験による場合、大きく見積もる傾向のあることがわかる。その原因については現時点では明確ではないが、せん断中最小主応力一定という仮定によるものとも考えられる。ただ、各水砕スラグ及び自然砂の内部摩擦角を比較すると、内部摩擦角は鉄スラグが最も大きく、またいずれの水砕スラグの内部摩擦角も自然砂のそれより大きいことから、水砕スラグを砂の代替材料として用いる場合、静的強度に関しては安定性を保つことが可能であると考えられる。

6. 鉄スラグの潜在水硬性に起因した強度および透水性の変化

鉄スラグ、銅スラグ、フェロニッケルスラグのうち鉄スラグは潜在水硬性を有するために時間とともに固結する。すなわち、スラグ内に反応水が介在し、スラグ層の密度が保たれ、かつ間隙水が静止した状態にある場合に固結する³⁾。固結ともなう影響として単位体積重量の変化¹¹⁾あるいは膨張¹²⁾は生じないこと、また、アルカリ刺激剤を添加した場合一軸強度が時間とともに増加すること¹³⁾がすでに報告されている。

そこで、ここでは鉄スラグを所定の密度になるように締め、真水及び海水中にて放置した後圧密排水三軸圧

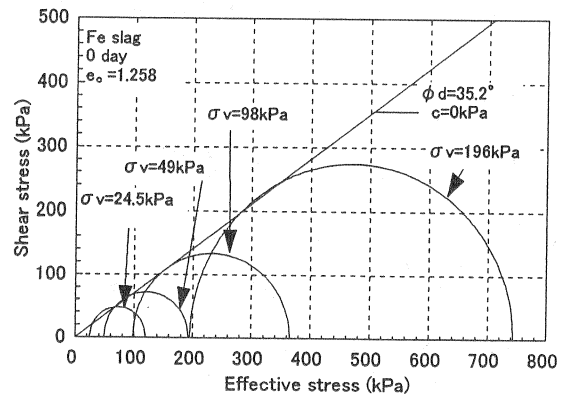


図-15 排水三軸試験によるモールの応力円 (経過日数=0日)

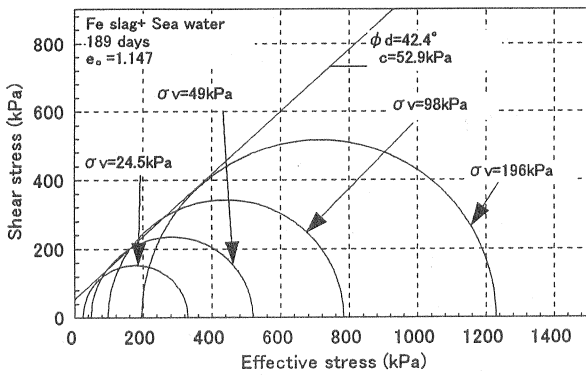


図-16 排水三軸試験によるモールの応力円
(経過日数=189日)

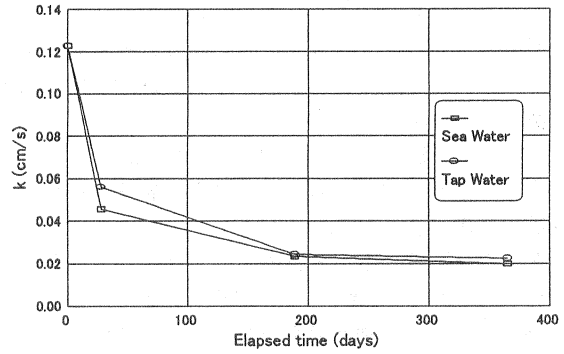


図-19 鉄スラグの潜在水硬性に起因した透水係数の変化

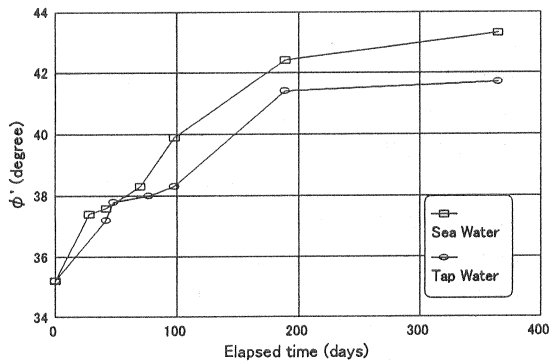


図-17 鉄スラグの潜在水硬性に起因した内部摩擦角の変化

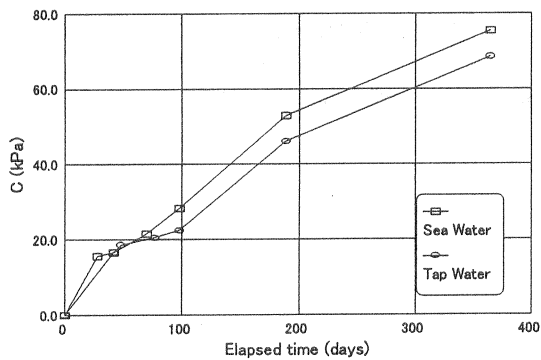


図-18 鉄スラグの潜在水硬性に起因した粘着力

縮試験および透水試験を行った。圧密排水三軸試験は放置直後および放置後28日、42日、70日、98日、189日、365日経過した供試体について行った。圧密圧力は24.5kPa、49.0kPa、98.0kPa、196.0kPaとしバックプレッシャーとして196.0kPaを負荷した。圧密後の間隙比はいずれの場合も1.1~1.2である。放置期間が0日と189日(海水)の試料について、破壊時のモール円を示したものが図-15及び図-16である。海水中において長期間放置すると明らかに内部摩擦角と粘着力

が増加することがわかる。そこで図-17は内部摩擦角の経時変化を示したものであり、図-18は粘着力の経時変化である。両図より、粘着力及び内部摩擦角いずれも時間の経過とともに増加することがわかる。また、真水と海水を比較した場合、海水環境下にある場合c、 ϕ ともに大きくなることをわかる。

一方、定水位透水試験を放置直後および28日、189日、365日経過後の供試体について実施した。試験前後の平均間隙比は1.22であって、透水係数の経時変化を示したものが図-19である。同図より、初期状態における透水係数は $1.2 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ であるが、真水あるいは海水中に放置することにより、固結が進行すると、透水性は、真水、海水それぞれに対して $2.2 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 、 $2.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ まで低下することがわかる。このような水硬性に起因した透水係数の低下については、同様の結果がすでに得られている¹⁴⁾¹⁵⁾。そこで、これらの透水係数と表-2における玄海砂についての結果、すなわち $D_r=60\%$ の場合 $6.1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 、 $D_r=80\%$ の場合 $3.3 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ を比較した場合、両者の値はほぼ等しいことがわかる。今回の実験においては、締固め時の間隙比の影響等については明確にされていないものの、サンドコンパクションパイル工法において鉄スラグを用いる場合、固結に伴う透水性の低下による影響は小さいと考えられる。

7. 結論

水砕スラグをサンドコンパクションパイル工法における砂杭の代替材料として有効利用を図ることを目的として、鉄スラグ、銅スラグ、フェロニッケルスラグの締固め特性、圧縮特性、透水特性、静的強度特性、液状化強度特性を調べ自然砂と比較した。その結果以下のことが明らかとなった。

1) 銅スラグは鉄スラグ、フェロニッケルスラグに比べて密度が特に大きい。それに対して鉄スラグの密度は自然砂の密度とほぼ等しい。

2) いずれの水砕スラグも、含水比の多少にかかわらず最大乾燥密度はほぼ一定値を示す。また、最大乾燥密度は銅スラグ>フェロニッケルスラグ>玄海砂>豊浦標準砂>鉄スラグの順に大きい。

3) いずれの水砕スラグも最大粒径が 4.75mm 以下で、粒度分布は玄海砂とほぼ一致する。また、締固めに伴う粒子破砕は無視できる程度に小さい。

4) 鉄スラグ、銅スラグの間隙比は玄海砂および豊浦標準砂に比べて大きく、載荷に伴う間隙比の低下も大きい。

5) 各水砕スラグの透水係数は豊浦砂及び玄海砂より大きい。

6) 液状化強度は、フェロニッケルスラグ>鉄スラグ>銅スラグ>玄海砂=豊浦標準砂の順に大きい。

7) いずれの水砕スラグの内部摩擦角も豊浦標準砂、玄海砂のそれより大きい。

8) 鉄スラグにおいては潜在水硬性によって、時間の経過とともに、内部摩擦角および粘着力いずれも増加する。一方固結に伴う透水性の低下の影響は、サンドコンパクションパイル工法においては小さい。

以上のことより、各水砕スラグをサンドコンパクションパイル工法における砂杭の代替材料として使用する場合、粒度特性、静的強度、液状化強度、透水性の面から考えると、自然砂に比べて同等かむしろ適している。ただ、銅スラグに関しては最大乾燥密度が特に大きいことから施工性に関する検討が必要である。一方、鉄スラグについては、本来静的強度が大きい上に、潜在水硬性によって施工後においてさらに強度増加が期待できる。したがって、たとえば低置換率サンドコンパクションパイル工法において鉄スラグを使用する場合、応力分担比が自然砂あるいは他の水砕スラグに比べて大きくなることから、施工後の沈下量が低減し盛土量の削減等の効果も期待できる。

謝辞

この研究の一部は、(財)鉄鋼業環境保全技術開発基金からの研究助成を受けて実施したものである。末筆ながら感謝致します。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報（平成8年度実績）、1997。
- 2) 長坂勇二、坂井宏行、大森啓至、平田登基男：発生土および廃棄物の地盤工学的処理と有効利用、6. 産業廃棄物の地盤工学的有効利用（その1）、土と基礎、45-5、pp.55-60、1997。
- 3) 水砕スラグ活用調査委員会：港湾工事用水砕スラグ利用手引書、沿岸開発技術研究センター、鉄鋼スラグ協会、1989。
- 4) 北詰昌樹、宮島正悟、西田義忠：銅水砕スラグを用いたSCP改良地盤の支持力について、第30回土質工

学研究発表会、824、pp.2159-2162、1994。

- 5) 北詰昌樹、高野重久：矢板の横抵抗に及ぼす銅水砕スラグを用いたSCP改良地盤の効果、第29回土質工学研究発表会、807、pp.2137-2140、1993。
- 6) 土木学会コンクリート委員会：銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針、土木学会、1998。
- 7) スラグ細骨材コンクリート研究小委員会：フェロニッケルスラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針、土木学会、1998。
- 8) Ohara S. and Matsuda H.: Study on the settlement of saturated clay layer induced by cyclic shear, Soils and Foundations, Vol.28, No.3, pp.103-113, 1988.
- 9) 大原資生、松田博：飽和粘土の動的強度について、土木学会論文報告集、第274号、pp.69-78、1978。
- 10) Oda M.: On the relation $\tau / \sigma_N = \kappa \tan \phi$ in the simple shear test, Soils and Foundations, Vol.15, No.4, pp.35-41, 1975.
- 11) 内藤和章、芳賀孝成、十河茂幸：高炉水さいによる地盤安定処理に関する基礎的実験、第11回土質工学研究発表会講演概要集、282、pp.1113-1116、1976。
- 12) 人見公一郎、二町宣洋、河野伊一郎：荷重下での水砕スラグの膨張、収縮特性の一実験、土木学会第33回講演会概要集、III-160、pp.302-303、1978。
- 13) 鉄鋼スラグ協会編：水砕スラグ「土工用材料としての技術資料」鉄鋼スラグ協会西日本支部、1983。
- 14) 佐藤康文、衣斐隆志、福田勇治：地盤改良材としての高炉水砕スラグの土質工学的性質とその経時変化について、土木学会第37回講演会概要集、III-302、pp.601-602、1982。
- 15) 西勝、中村憲正、佐藤康文、山田史郎、南部光広：鉄鋼スラグ地盤の諸特性観察結果（その2）—高炉スラグについて—、第17回土質工学研究発表会講演概要集、D-10、pp.2649-2652、1982。