石炭灰の減容化方法に関する研究

秋本 哲平¹・熊谷 隆宏²・米谷 宏史³・安藤 有司⁴

¹正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)
E-mail: Teppei.Akimoto@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)
E-mail: Takahiro.Kumagai@mail.penta-ocean.co.jp

³正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)
E-mail: Hiroshi.Yoneya@mail.penta-ocean.co.jp

⁴正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)
E-mail: Yuuji.Andou@mail.penta-ocean.co.jp

2011年に発生した東日本大震災から、我が国の電力供給源は大きく変化しており、火力発電にかかる負担が大きくなっている。火力発電の主燃料である石炭は、発電のために利用された後、灰として排出される。排出された石炭灰のうち、セメントの原料等に有効利用されるものがある一方で、非常に多くの量が管理型処分場に埋立処分されている。本研究は、処分場の延命化のため、石炭灰を効果的に減容化する方法について検討した。粒度分類上、「シルト」に区分される石炭灰の特性を踏まえ、室内実験および机上検討により、効果的な減容化方法として、吸水しながら振動締め固めを行う方法、および地下水位の低下により地盤を不飽和化させた後に、フライアッシュを振動圧入する方法を提案する。

Key Words : coal ash, volume reduction, rod compaction, vacuum consolidation, dewatering

1. はじめに

我が国の電力供給源は、2011年に発生した東日本大震災から大きく変化している。2009年度の電力供給源は、火力59%、原子力34%であったのに対し、2012年度の電力供給源は、火力90%、原子力2%に変化しており、火力発電にかかる負担が大きくなっている¹⁾。

火力発電では、石炭、天然ガス、石油等を燃やして発生した蒸気を用いて電力を作り出す。このうち、総燃料比率では、安価で埋蔵量が豊富な石炭が40%を占め、天然ガスと共に主燃料となっている。石炭を燃料とした場合に排出される石炭灰は、微量であるが六価クロムやヒ素といった重金属類を含有するため、有効利用や処分は、環境の保全上の支障が生じないように適正に行われる。

石炭灰の多くは、セメント原料の製造等のために有効利用されているが、近年の公共事業の需要低迷に伴い、セメントの生産量が減少し、有効利用される量は減少傾向にある。そのため、管理型処分場への埋立処分量は今後増加することが推定される。ただし、処分場の容量は限られている一方、多大な建設費用や環境への影響の観点から、新たな処分場の確保が困難になっており、埋立処分された石炭灰の減容化が求められている。

池田ら²⁾による既往の研究において、処分場に埋め立てられた石炭灰の間隙比は1.4程度(含水比60%程度)、N

値は0~3程度であり、非常に緩い状態で堆積していることが報告されている。このため、現在の堆積状態から密な状態にすることにより、体積圧縮効果(減容化効果)は大きく現れると考えられる。

本研究は、石炭灰のうち、発生割合の高いフライアッシュに着目し、地盤改良方法として一般的に適用されている振動締め固め工法や圧密促進工法等が発揮する減容化効果を評価し、より効果的な新しい石炭灰地盤の減容化方法を提案するものである。

2. 基礎実験

(1) 石炭灰の物理特性

石炭灰処分場にて処理される石炭灰は、礫分が多いクリンカアッシュと細粒分が多いフライアッシュに大別される。これらの石炭灰に関し、物理特性を把握することを目的として、土質試験を実施した。

粒度試験より得られた粒径加積曲線を図-1に示す。クリンカアッシュの土粒子密度は2.38 g/cm³、細粒分含有率は4.9%であった。一方、フライアッシュの土粒子密度は2.23 g/cm³、細粒分含有率は84.9%であり、粒径区分上では、シルトに区分される。既往の研究²⁾で報告されている特性とほぼ一致する結果となっている。

図-1 石炭灰の粒径加積曲線

表-1 実験ケース

	減容化の促進方法	想定する地盤改良工法
ケース 1	振動	振動締固め工法
ケース 2	吸水 (負圧の作用)	真空圧密工法
ケース 3	吸水+振動 (一体型)	吸水振動締固め工法
ケース 4	吸水+振動 (分離型)	吸水部を分離した振動締固め工法

なお、細粒分が多く含まれるフライアッシュについて、液性限界、塑性限界試験を実施したが、材料は非塑性と判断され、これらの値を得ることはできなかった。

(2) 実験の概要

減容化を図る方法として、砂質土地盤に対しては、振動締固め工法、粘性土地盤に対しては、真空圧密工法が効果的である。本研究の対象であるフライアッシュは「シルト」に区分され、既往の研究において、適切な減容化方法について検討されていない。

このため、適切な石炭灰の減容化効果を検討するために、著者ら³⁾は既存の地盤改良方法を想定、また応用しながら基礎実験を行った。図-2 に実験断面を、表-1 に実験ケース一覧を示す。実験容器は、直径 0.4 m × 高さ

2.0 m の透明な円筒容器を用い、容器内に石炭灰を投入して、池田ら²⁾に示される現地含水比と同等となる含水比 57 % の石炭灰地盤を深さ 1.4 m で作成した。

ケース 1 は、振動締固め工法を模擬し、振動数 100 Hz で振動させた振動棒を地盤内に挿入するものである。振動棒の挿入速度は 0.5 m/min で、底面から 0.1 m の高さまで挿入した。ケース 2 は、真空圧密工法を模擬し、容器中央に設置した直径 40 mm の吸水管に -80 kPa の負圧を作用させた。ケース 3 は、吸水型の振動締固め工法を模擬して、振動棒の先端に吸水口を取り付け、-80 kPa の負圧を作用させて地盤に挿入した。ケース 4 は、ケース 3 と同様に吸水型の振動締固め工法を模擬したものだが、振動棒とは別に吸水管を設置し、振動機構と吸水機構を分離した。実験では、一定時間経過ごとに円筒容器側面にて 3 箇所地盤の高さを計測し、沈下量を把握した。

(3) 実験結果

減容化の促進方法として選定した 4 ケースに対し、実験で得られた地盤沈下量の時間変化を図-3 に示す。実験時間は 1 時間とした。得られた地盤の圧縮率として、ケース 1 は 4.6 %、ケース 2 は 4.2 %、ケース 3 は 8.4 %、ケース 4 は 16.4 % となり、ケース 4 の減容化効果が最も高いことがわかった。ケース 1 のように振動のみを与えても、過剰間隙水圧の消散が遅いため、所定時間内に大きな圧縮率を期待することはできない。また、ケース 2 のように負圧による吸引のみでは、地盤の圧縮性 (圧縮指数) が小さいために圧縮率は小さい。ケース 3 では、振動と吸水の機能が一体であるため、吸水効果が低くケース 4 に比べて沈下量が小さいと考えられる。ケース 4 のように、振動を与えて地盤を液状化させると同時に、別途設けた吸引装置により、過剰間隙水圧を速やかに消散させる方法が最も減容化効果が高いことがわかった。

図-2 実験断面

図-3 各ケースにおける沈下量の変化

3. 最適な減容化方法の提案

(1) 吸水型振動締め固め方法

a) 地盤の圧密係数の設定

基礎実験を行った結果、吸水用ドレーンを振動棒から分離して、過剰間隙水圧を速やかに消散させながら振動を与えて締め固めることにより、高い減容化効果が得られることが明らかとなった。

このような実験結果を踏まえ、実際に適用可能な施工方法を検討する。振動装置から分離して設置される吸水部の構成材料として、例えば、粘土地盤の圧密改良工法で用いられるプラスチックボードドレーン (PBD) が考えられる。ただし、振動工法の適用時において、過剰間隙水圧の消散速度が遅く、施工に係る時間が増加すると、施工コストの面で不利となる。このため、過剰間隙水圧の消散に要する時間を評価しながら、適切な施工方法を検討することが重要である。

過剰間隙水圧の消散に要する時間を評価するにあたり、地盤の圧密係数を評価する必要がある。前章のケース4における地盤沈下量の時間変化に対し、Barronの圧密理論解を比較し、石炭灰の圧密係数を推定した。ケース4における有孔管ドレーンの直径は0.04 m、また設置間隔は0.4 mである。

図-4に示すように、圧密係数 c_v を $1.7 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{day}$ に設定することにより、実測の沈下挙動を再現できることがわかった。

 図-4 圧密理論解による実験結果の再現
($c_v = 1.7 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{day}$ に設定)

地盤に作用する拘束圧について、今回の実験では、実験における平均有効上載圧は3.5 kPa、また、作用負圧は-60 kPa程度であるため、拘束圧は63.5 kPa程度である。一方、10~15 mの層厚となる実際の石炭灰地盤では、平均的な有効上載圧は30 kPa程度となるとともに、-70 kPaの負圧が作用し、拘束圧は100 kPa程度と大きくなることが考えられる。

採取したフライアッシュに対して行った標準圧密試験の結果において、100 kPa程度の圧密圧力では、体積圧縮係数 m_v は $1.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{kN}$ を示し、また、透水試験によって得られた透水係数 $k = 1.15 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ を用いると、圧密係数 $c_v = 8.3 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{day}$ と算定される。なお、このように圧密係数が大きい材料については、標準圧密試験で圧密係数を直接評価することは困難である。

本研究では、実地盤を想定した施工方法の検討の際に用いる圧密係数の値として、室内実験結果の再現解析で評価した値 ($1.7 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{day}$) と、現地の拘束圧条件で考えられる値 ($8.3 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{day}$) を考慮し、 $5.0 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{day}$ を用いるものとする。

b) 最適な施工方法の提案

振動装置から分離して設置される吸水部の構成材料として、まず、プラスチックボードドレーン (PBD) が考えられるが、過剰間隙水圧の消散に要する時間を短縮させる方法として、粒径が大きく透水係数の高いクリンカアッシュを大きい径で設置して吸水部を構成する方式も提案できる。

これら2つの方式に関して、過剰間隙水圧の消散速度の観点から評価を行う。

ドレーン設置間隔1.6 mで正方形配置にした条件に対して検討する。幅100 mm×厚さ3 mmのPBDの換算径は0.05 mであり、クリンカアッシュによるドレーン径は、一般のサンドドレーンで形成される径を考慮し、0.7 mに設定する。

過剰間隙水圧の消散に要する時間は、圧密に要する時間に一致する。上述の条件を用いると、圧密度と経過時間の関係は、図-5のように評価される。換算径が小さいPBDを適用する場合、圧密に要する時間が非常に長くなることがわかる。例えば、圧密度80%に達するまでに

図-5 圧密度と経過時間の関係

図-6 提案する吸水型締め固め工法における平面配置

要する時間は 57 分と評価される。一方、クリンカアッシュによるドレーンは径が大きく、集水効果が高いため、圧密度が 80 %に至る時間は 7.5 分と著しく短い。

以上より、吸水型振動締め固め方法において、粒径が大きく透水係数の高いクリンカアッシュを大きい径で設置して吸水部を構成する方式が優れていると評価できる。

実施工を想定した平面配置例として、図-6 のように提案する。直径 0.7 m のクリンカアッシュ層の中央にウェルポイントで使用する吸水管を挿入して吸水することにより、クリンカアッシュ層全体を排水層として機能させることができる。ドレーンに囲まれた中央部に振動棒を挿入して振動を与えることにより、吸水しながら振動締め固めを行う方法である。

室内実験で得られた最終的な圧縮率が 16.4 %であることから、経過時間 7.5 分における圧密度 80 %時点では、13.1 %の圧縮率を達成できる。湯浅ら⁴⁾による既往の研究において、振動棒からの振動伝達範囲は、半径 3 m 程度であることが報告されている。この結果を用いると、振動棒の引き上げ速度として、3 m / 7.5 分 = 0.4 m / 分に設定できる。圧入材料として良質砂を使用した場合の施工速度 1 m / 分と比較すると、施工速度は若干遅くなるものの、十分に施工可能な速度であると考えられる。

(2) 地下水位低下工を併用したフライアッシュ振動圧入方法

前章の基礎実験の結果より、地盤に振動を与えると同時に、速やかに過剰間隙水圧を消散させることが重要であることが明らかになっている。

効果的な減容化方法の第2の実施形態として、ウェルポイント工法の適用により地下水位を低下させた後、サンドコンパクション打設機等を用いて、フライアッシュを地盤中に振動圧入する方法を提案する。この方法は、まず、地下水位を低下させて地盤を不飽和状態にする。その後、フライアッシュを振動圧入することで、過剰間隙水圧の発生を抑制しながら、フライアッシュを圧入することができる。飽和したフライアッシュ地盤に対して圧

図-7 解析で設定したフライアッシュの不飽和浸透特性

入する場合は、フライアッシュの透水係数が低く過剰間隙水圧の消散が遅いため、地盤の隆起が顕著に発生するが、事前に地盤を不飽和化し、過剰間隙水圧の発生を抑制することで、圧入時の地盤の隆起量を低減することができる。その結果、処分場内に処分できるフライアッシュを増量できるため、処分場を減容化することと同等の効果をもつ。この方法は、減容化の主たる対象がフライアッシュの場合に用いることができる。

a) 地下水位低下効果の評価

フライアッシュ地盤に対し、ウェルポイント工を適用することによる地下水位低下効果を確認するため、不飽和浸透流解析 (AC-UNSAF2D⁵⁾) を実施する。

解析に用いるパラメータとして、フライアッシュの不飽和浸透特性を図-7に示す。ここでは、既往の研究を参照し、シルト地盤に対して代表的に使用される値を援用した。また、フライアッシュの透水係数については、透水試験で得られた 1.15×10^{-4} cm/s を与え、有効間隙率は、

(1) 地下水位分布

(2) 飽和度分布 (30 日経過後)

図-8 不飽和浸透解析結果

図-9 振動棒圧入実験の概要

一般的な0.45に設定した。

現地条件として、石炭灰地盤の層厚を15 m、地下水位をGL-1.0 mに設定し、ウェルポイントの設置深度は、揚水可能高さを6 mと考え、GL-7.0 mに設定した。また、ウェルポイント列の設置間隔を10 mに設定した。

解析結果を図-8に示す。ウェルポイント列で囲まれた範囲において、10日程度経過すると、地下水位は概ね収束することがわかる。対象範囲の中央部における地下水位低下量は、10日経過時点で4.7 m、また30日経過時点で4.4 mである。また、地下水位より上部における地盤の飽和度は、30日経過後には平均で80 %となっている。

b) フライアッシュ圧入時における隆起量低減効果

地盤を不飽和状態にした後に、フライアッシュを圧入する方法における原地盤の隆起量を低減する効果を確認するため、室内実験を実施した。

実験断面を図-9に示す。地盤条件として、飽和条件(ケース1)と不飽和条件(ケース2)を選定した。より多くのフライアッシュを処分するためには、フライアッシュの圧入を行う間隔を小さくし、圧入実施部の面積割合(地盤改良の置換率に相当)を高めることが望ましい。

したがって、圧入による置換率は、比較的大きい22.6 %に設定した。実験容器として、直径0.4 m、高さ1.0 mの透明な円筒容器を用い、その内部に厚さ0.68 mの石炭灰地盤を所定の含水比(57 %)で設置した。地盤を不飽和化させるケース2では、容器内に吸水用の有効管(直径40 mm)を設置し、真空ポンプにより吸水して、現地条件を想定した不飽和浸透流解析で得られているような平均飽和度80 %の不飽和地盤を作成した。

各ケースで所定の地盤を作成した後、地盤内に直径190 mmの振動棒を圧入して地盤の隆起量を計測した。

実験結果を表-2に示す。飽和地盤を用いたケース1で

表-2 圧入実験の結果

	圧入直後	最終状態	
	隆起量 (mm)	隆起量 (mm)	地盤の圧縮率をゼロと仮定したときの隆起量に対する比
ケース1 (飽和)	186	149	0.85
ケース2 (不飽和)	100	85	0.53

は、振動棒圧入直後に186 mm隆起し、その後、時間の経過とともに徐々に沈下した。2時間経過後には37 mm沈下して、隆起量は149 mmに減少した。このような沈下は、振動棒の圧入により上昇した過剰間隙水圧の消散に伴うものと考えられる。

なお、実験前における地盤の初期間隙比 $e_0 = 1.17$ であり、圧入を実施して過剰間隙水圧が消散した後の地盤の間隙比 $e_1 = 1.09$ であった。

ここで、式(1)を用いて、サンドコンパクションパイル工法において定義される有効締固め係数 R_c^0 を算定する。

$$R_c = \frac{e_0 - e_1}{A_s(1 + e_0)} \quad (1)$$

ここに、 A_s は置換率である。

上記の $e_0 = 1.17$ 、 $e_1 = 1.09$ および置換率 $A_s = 0.226$ より、圧入後の有効締固め係数は0.163と算定される。

また、細粒分含有率 F_c の条件が与えられると、式(2)を用いて有効締固め係数を推定すること可能である⁹⁾。

$$R_c = 1.05 - 0.46 \log F_c \quad (2)$$

粒度試験より得られているフライアッシュの細粒分含有率 $F_c = 84.9 \%$ を代入すると、 $R_c = 0.162$ と算定される。

以上より、振動棒の圧入実験で確認された有効締固め係数と、細粒分含有率 F_c から推定される有効締固め係数は、ほぼ一致することが確認された。

一方、不飽和地盤を対象としたケース2では、振動棒

図-10 地下水位低下型の振動圧入工法における平面配置

圧入直後に 100 mm 隆起し、その後、30 分経過すると若干沈下し、最終的には 85 mm の隆起量となった。

過剰間隙水圧消散後の最終的な地盤隆起量を比較すると、不飽和地盤に対して圧入したときの地盤隆起量 (85 mm) は、飽和地盤に対する圧入時の隆起量 (149 mm) の 57 % であり、隆起量が 43% 低減されたことになる。

以上の結果より、本研究で提案するフライアッシュの減容化方法、すなわち、フライアッシュ地盤を不飽和状態にした後に、フライアッシュを振動圧入する方法は、有効であると考えられる。

ただし、本実験は室内で実施したものである。現地条件では拘束圧が異なるため、地盤の不飽和化による隆起量の抑制効果は、実験結果と異なる可能性がある。また、圧入置換率の大きさに対する地盤の隆起量の大きさについても、室内実験結果と異なる可能性があるため、今後、現地スケールでの確認が必要であると考えられる。

また、実施工を想定した平面配置例として、図-10 のように提案する。

4. おわりに

石炭灰の効果的な減容化方法について、検討を行った結果、過剰間隙水圧の発生を抑制しながら、振動締固めを行うことが効果的であることが実験より明らかとなった。本研究では、実現可能な施工方法として、①吸水型振動締固め方法と、②地下水位低下工法を併用したフライアッシュ振動圧入方法を提案する。

吸水型振動締固め方法では、粒径が大きく透水係数の高いクリンカアッシュを 0.7 m の大きい径で設置して吸水部を構成する方式が優れていると評価した。また、地下水位低下工法を併用してフライアッシュを振動圧入方法では、地下水位低下工法を併用しない一般の方法と比

較して、圧入時に発生する地盤隆起を 43 % 低減することができるとを実験で確認した。

ただし、本研究で得られた実験結果は、複数回の実験で確認されたものではなく、地盤状態のバラツキ等により結果が変わる可能性がある。より多くのデータを取得し、信頼性を高めていくことが今後の課題として挙げられる。また今後、現地スケールでの試験施工や実験により以下のことを明らかにする必要がある。

- ① 吸水型振動締固め方法では、石炭灰を振動圧入する際の振動伝達距離を明確にし、施工時に必要となる引き上げ速度を確定させる。
- ② 地下水位低下工法併用型の振動圧入方法では、地下水位低下工法を適用した場合の地下水位低下挙動を確認し、解析の妥当性を検証する。また、室内実験とは拘束圧が異なる現地条件で、地盤の不飽和化による圧入時の隆起量の抑制効果、圧入置換率に対する地盤の隆起量の大きさについて確認する。

参考文献

- 1) 電気事業連合会 (<http://www.fepc.or.jp/index.html>) .
- 2) 池田浩一, 松尾憲親, 田中全, 溝上建: 急速載荷時の石炭灰地盤の変形挙動と貯炭場機器基礎の設計, 電力土木 No.291, pp.75~79, 2001.
- 3) 熊谷隆宏, 秋本哲平, 安藤有司: 石炭灰の減容化方法に関する実験的研究 (2014), 土木学会第 69 回年次学術講演会, III-120, pp.239-240, 2014.
- 4) 湯浅楠勝, 阪井田茂, 川瀬洋, 石黒健, 清水英樹, 北川吉信: 礫質地盤における吸水型振動棒締固め工法の改良効果の検証事例, 土木学会論文集 No.617, III-46, pp.261-274, 1999.
- 5) 西垣誠, 進士喜英, 岡山大学地下水研究グループ: 有限要素による飽和不飽和浸透流解析 - AC - UNSAF2D - プログラム解説及びユーザーマニュアル, 1999.
- 6) 地盤工学会: 地盤改良の調査・設計と施工-戸建住宅から人工島まで-, pp.101-104, 2013.

PROPOSITION OF BULK COMPRESSION METHOD OF COAL ASH

Teppey AKIMOTO, Takahiro KUMAGAI, Hiroshi YONEYA and Yuji ANDO

The burden of the thermal power generation for national power supply has been increasing in Japan since the Great East Japan Earthquake that occurred in 2011. The coal is used as the main fuel for thermal power generation, and ash is discharged after utilizing coal for fuel. Because a lot of coal ash has been forced to landfill to waste disposal sites, bulk compression of coal ash is urgently required to keep sufficient space of the sites for waste dumping. This paper is to propose two methods for bulk compression of coal ash. One is a vibrating compaction method by inserting a rod into the ground while excess pore-water pressure is dissipated through a drainage layer. The other is a pressure injection method of fly ash after the fly-ash ground is unsaturated by use of dewatering method. The effects of the proposed methods have been confirmed by laboratory experiments and numerical analysis.