

クリンカアッシュの性能評価と利用拡大に関する研究

若槻 好孝¹・兵動 正幸²・吉本 憲正²

¹正会員 復建調査設計株式会社 大阪支社 地盤技術課

²正会員 山口大学 大学院理工学研究科



クリンカアッシュは、石炭火力発電所のボイラー底部の水槽にたまった石炭灰を砂や礫の大きさに粉碎して生成されたものであり、利用に際して特別な処理を施す必要性がなく、かつ、軽量でせん断強度が高い。このため、クリンカアッシュの地盤材料としての利用が進められつつあるが、その特性を十分に理解した上で利用されていないのが現状である。本研究では、クリンカアッシュの粒子特性を確認するとともに、各種の物理・力学特性を検討した。その結果、クリンカアッシュは破砕性材料ではあるが粒子形状が複雑なため、高い静的せん断強度を確保できることから、盛土材や補強土壁の裏込め材への適用性が高いことを明らかにした。

キーワード：石炭灰，クリンカアッシュ，粒子特性，物理特性，力学特性，有効利用

1. はじめに

石炭は、電力を中心に世界のエネルギー源の一つとして、古くから広く利用されている。また、石油や天然ガスなどの他のエネルギーと比較して埋蔵量が豊富であるとともに、世界の広範囲に分布してことから、地域的な偏りもなく、安定的に供給が見込めるといった利点をもっている。

このようなことから、石炭は、これまで、我が国における総合エネルギー政策の中では、原子力と並ぶ石油代替エネルギーの重要な柱として位置づけられ、石炭灰の発生も年々増加してきた。石炭灰のうち、クリンカアッシュは、全石炭灰に占める割合が 5~15%と小さいこともあり、有効利用率は、2003 年時点で 67%と低い状況にある。また、中国地方における石炭火力発電所は、大崎、三隅、下関、新小野田、水島など、数多く存在するが、これらから排出される石炭灰の量は、合計 80 万トン／年にも及び、今後も増加傾向にある。

一方、「資源有効利用促進法」では、石炭灰は「特に再生資源として有効利用を促進しなければならない指定副産物」に位置付けられている。また、グリーン購入法では、有効利用率の高いフライアッシュでも「公共事業における使用実績が十分でない」とされており、クリンカアッシュは、さらに実績を上げ、有効利用を促進しなければならないものと考えられる。

クリンカアッシュは、人工的に生成された材料であり、その粒子形状や単粒子破砕強度など、自然界に存在する土と比較して異なる点も多い。しかし、これに関する研究は非常に少なく、物理特性や力学特性を概略的に求め

た事例が僅かにあるに過ぎない。また、その適用にあたっては、盛土材、路盤材、バーチカルドレーン工法、コンパクションパイル工法、凍上抑制材、岩盤緑化基材などへの適用事例が一部あるものの、既往の研究成果のみでは、クリンカアッシュの材料特性を統括的に把握し、普遍的にこれらの設計を行うことは不可能である。

本研究では、以上のような背景を踏まえ、未解明なクリンカアッシュの粒子特性、物理特性、力学特性などの材料特性を検討している。また、クリンカアッシュの地盤材料として有効利用の可能性を検討するとともに、「斜面上の盛土材料に関する適用性」および「補強土壁の裏込め材料に関する適用性」を検討し、クリンカアッシュの有効性を明らかにした。

2. 用いた試料

クリンカアッシュは、西日本において大量で安定的な発生が見込める 6 発電所から採取した C.A. a~f (C.A. : Clinker Ash) を用いている (写真-1 参照)。クリンカアッシュの粒子には、空隙が多い。これは、クリンカアッシュ粒子が約 1,500°C の高温状態からボイラー底部の水槽に落下し、急冷され硬化する際に生成されたものである。このため、外部と連結した空隙と連結していない空隙が存在する。また、クリンカアッシュの表面は、非常に角張っているが、これは、製造過程におけるハンドリング向上のため、硬化したクリンカアッシュの塊を粉碎機により、最大粒径が約 2cm になるよう粉碎していることによるものである。

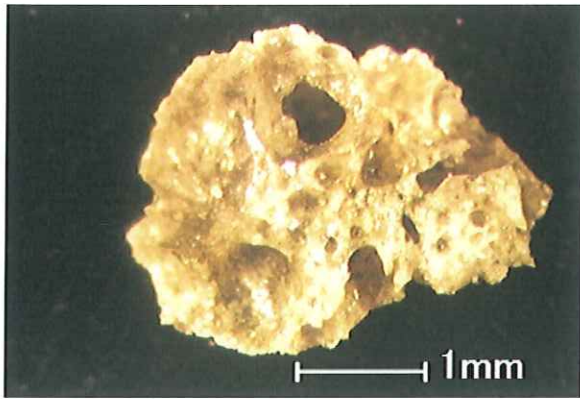


写真-1 クリンカアッシュ粒子

3. 物理特性および粒子特性

(1) 物理特性

クリンカアッシュの化学成分は、他の自然土などと大きく変わらないにもかかわらず、粒子密度は $1.95 \sim 2.24 \text{ g/cm}^3$ と、小さな値を示している。これは、クリンカアッシュ粒子の内部にある外部と連結していない閉じた空隙の影響である。

図-2に用いた試料の粒径加積曲線を示す。図中には、先に若槻・田中ら⁹⁾が全国15箇所の石炭火力発電所から収集した60試料のクリンカアッシュの粒径加積曲線の範囲を破線で示しているが、本研究で使用した試料は、この範囲内にあり、礫分を28~56%、砂分を36~63%程度含むことから礫質土や砂質土に分類される。クリンカアッシュの均等係数 U は、13~36の範囲にあり、「粒径幅の広い」材料であることがわかる。

また、C.A. bは、他の試料と比べると、細砂~中砂を多く混入しているものの、これらの試料は、全国の発電所から採取したにもかかわらず、比較的類似した粒度分布を示している。

(2) 粒子特性

図-3は、クリンカアッシュ (C.A. a~f)、造粒石炭灰 (G.C.A. A~D) と自然砂の真円度 R_c と縦横比 A_r の関係を示したものである。自然砂は、図中に示した破線の範囲内に主に分布しており、真円度が小さくなるにつれ縦横比が小さくなる傾向にある。

一方、クリンカアッシュは、縦横比が1.4~1.6の間で自然砂の分布範囲内ではあるが、真円度は1.5~2.0とかなり高い範囲にある。これは、硬化したクリンカアッシュの塊を粉砕機により、粉砕しているためであり、粒子形状が非常に複雑であることを示している。

図-4は、単粒子破砕強度 σ_m と実験時の初期粒径 d_0 の関係を示したものである。この図から、単粒子破砕強度 σ_m は、同粒径に対して自然砂では、Silica, Toyoura, U-Masado, Shirasu の順で小さくなり、次いで、クリンカアッシュ、造粒石炭灰の順となる。ここで、自然砂の中でも Shirasu は、火砕流堆積物であることから他の自

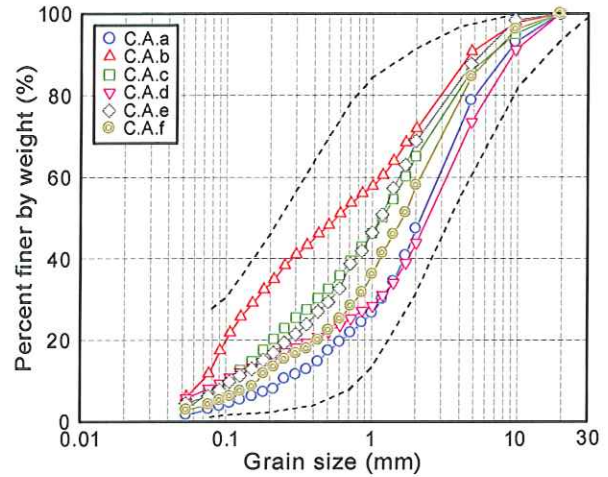


図-2 粒径加積曲線(クリンカアッシュ)

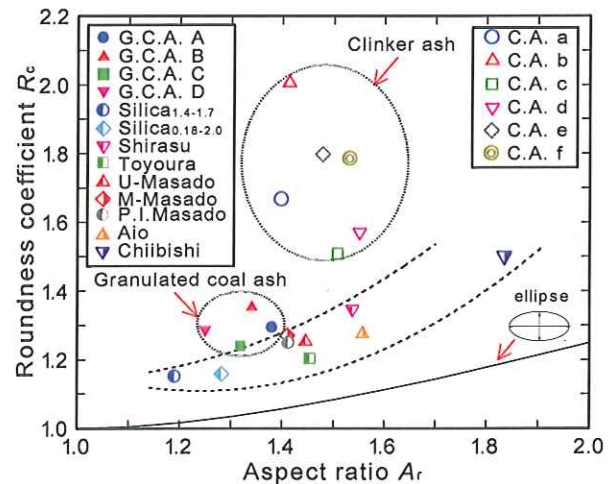


図-3 真円度 R_c と縦横比 A_r の関係

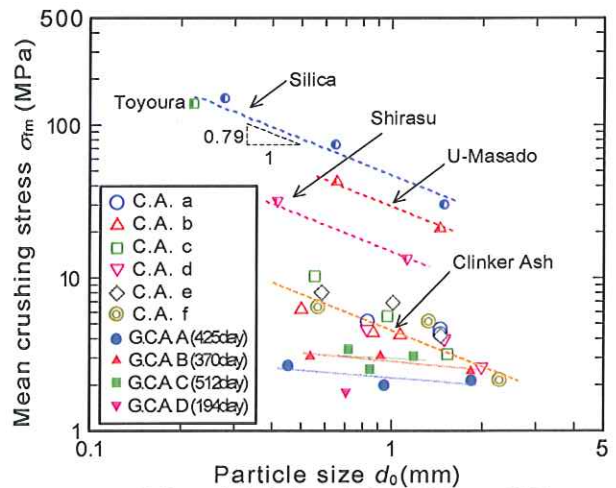


図-4 単粒子破砕強度 σ_m と初期粒径 d_0 の関係

然砂と比較して多孔質であるため、自然砂の中でも単粒子破砕強度は、小さい値を示している。また、自然砂は、試料によらず初期粒径 d_0 が大きくなるに従って単粒子破砕強度は減少する傾向がある。

クリンカアッシュは、粉砕機で強制的に粉砕されるため、バラツキが大きい。試料全体としての単粒子破砕強度 σ_m は、 d_0 が大きくなると小さくなる傾向にあり、自然砂と同様に -0.79 の勾配を持つ直線で近似することが

できる。ただし、単粒子破碎強度は、自然砂と比較して1/5~1/10程度小さく、破碎されやすい材料であることがわかる。

4. 力学特性

(1) 締固め特性

図-5 に U-Masado, クリンカアッシュおよび造粒石炭灰の締固め曲線を示す。クリンカアッシュおよび造粒石炭灰は、U-Masado や M-Masado のように締固め曲線が鋭く立ち上がることはなく、なだらかな曲線を呈している。これは、クリンカアッシュの場合、粒子形状が複雑であることから、締め固め時に粒子の再配列がされにくい材料であるためと考えられる。この現象はクリンカアッシュ (C.A.a~C.A.f) および造粒石炭灰 (G.C.A.A~G.C.A.C) の締め固めが含水比に大きく影響されないことを示しており、締め固め管理がしやすい材料と言える。

(2) 静的せん断特性

図-6 にクリンカアッシュと他の材料との比較のために、緩い状態と密な状態の造粒石炭灰, Silica_{0.18-2.0} および M-Masado のピーク応力時のセカントアングル ϕ_s と有効拘束圧 σ'_c の関係を示す。図より、クリンカアッシュは、セカントアングルが対数表示した有効拘束圧に対して直線的に低下することが確認できる。また、クリンカアッシュは、50kPa の有効拘束圧では、40°以上のセカントアングルを確保できる。最も小さなセカントアングルが得られた緩詰め供試体の C.A.d における有効拘束圧 σ'_c が 200kPa の場合でも $\phi_s \approx 34.6^\circ$ が確保されている。

これらのことから、クリンカアッシュは緩い状態であっても $\sigma'_c \approx 50 \sim 200$ kPa の範囲であれば、ほぼ 35°以上のセカントアングルが得られることがわかる。ここで、一般的な砂質土の内部摩擦角は設計上 30°程度とすることを考慮すれば、クリンカアッシュは、これに比べて最低でも 5°以上の大きな値を得ることが可能であることがわかる。また、クリンカアッシュを利用した土構造物を設計する場合には、上記のような静的せん断強度の応力依存性を考慮し、有効拘束圧に応じたセカントアングルを内部摩擦角として採用することが合理的である。

5. 地盤材料としての適用性検討

5.1 斜面上の盛土材料に関する適用性の検討

(1) 不飽和浸透特性

図-7 および図-8 に不飽和時の体積含水率 θ ~ 圧力水頭 ψ , 体積含水率 θ ~ 比透水係数 k_r の関係を示す。図中の砂質土と礫質土の曲線は、国土技術研究センター²⁾が示している一般に浸透流解析で使用される値である。図からわかるように、砂質土および礫質土は体積含水率が 0.2 で圧力水頭が 0m, 比透水係数が 1.0 となり、体積含水率が 0.2~1.0 の範囲では、飽和状態と同様な水の流

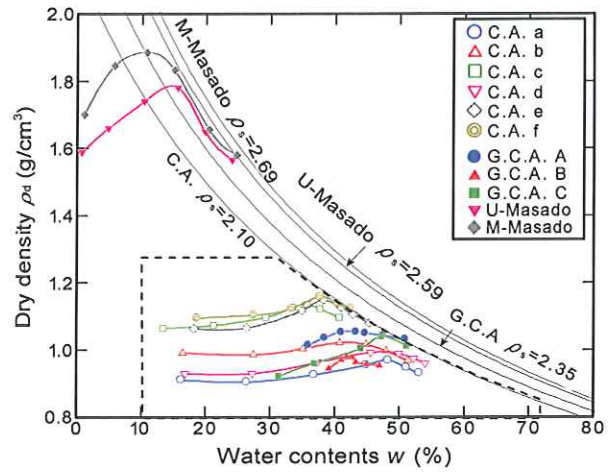
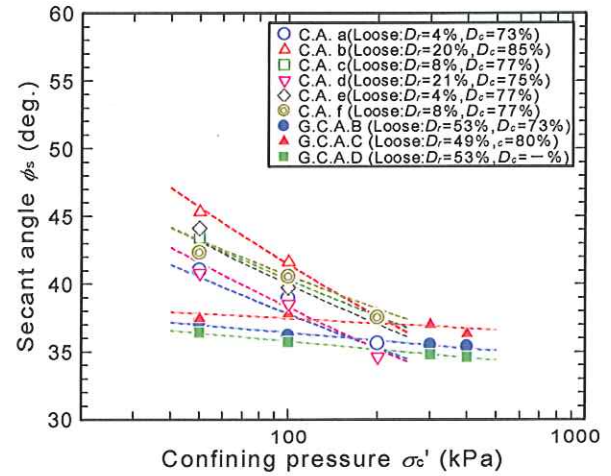
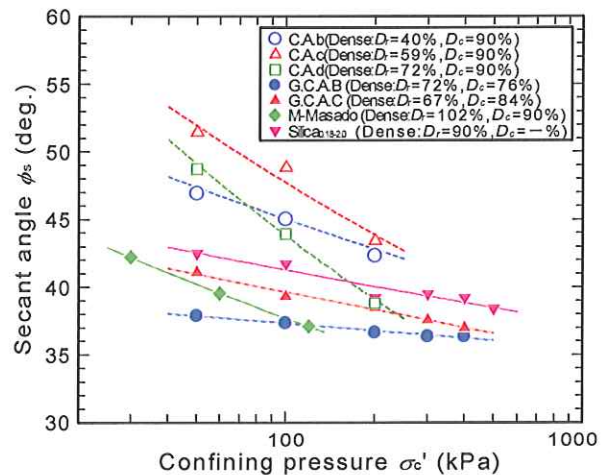


図-5 締固め曲線



(a) Loose



(b) Dense

図-6 セカントアングルと有効拘束圧の関係

れやすさとなる。これに対して、クリンカアッシュは、体積含水率が 0.10~0.20 程度の間で圧力水頭は、-1m 程度まで急激に増加するが、 θ がこれよりも大きくなると、圧力水頭の増加割合は低下し、体積含水率が 0.35~0.40 となって、圧力水頭はゼロとなる。また、比透水係数は、体積含水率が 0.10~0.20 から増加し始め、これが、0.35~0.40 で 1.0 となる。

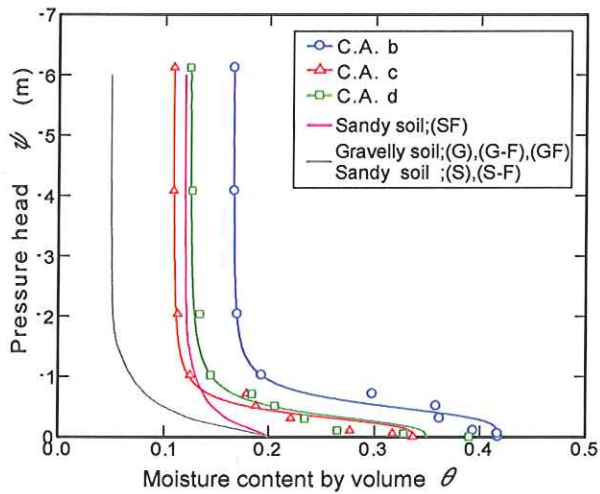


図-7 体積含水率 θ ～圧力水頭 ψ の関係

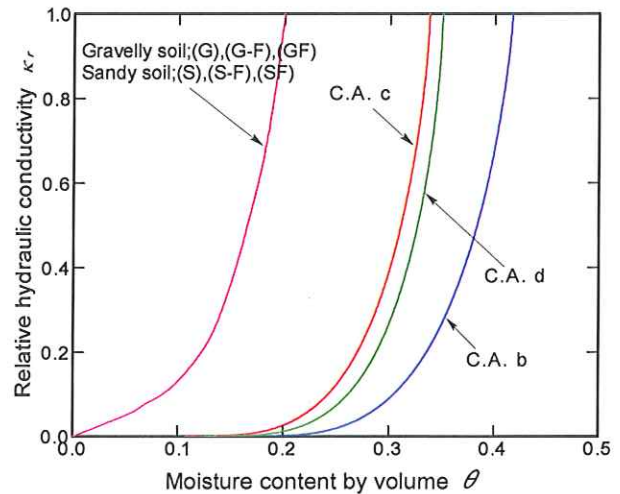


図-8 体積含水率 θ ～比透水係数 κ_r の関係

(2) 浸透流解析および安定検討

解析モデルは、図-9 に示すように盛土、崖錐性堆積物および岩盤により構成されている。図-10 には、降雨と最小安全率、地下水位の関係も合わせて示している。

クリンカアッシュを盛土材料として採用した場合には、いずれの材料でも初期水位（0 時間）で 1.5 前後の最小安全率が得られ、通常の地下水位の状況であれば、かなり安定していることがわかる。また、降雨による盛土内の地下水位の上昇は、既設盛土よりも小さく、最小安全率は、最低でも 1.3 程度は確保されている。

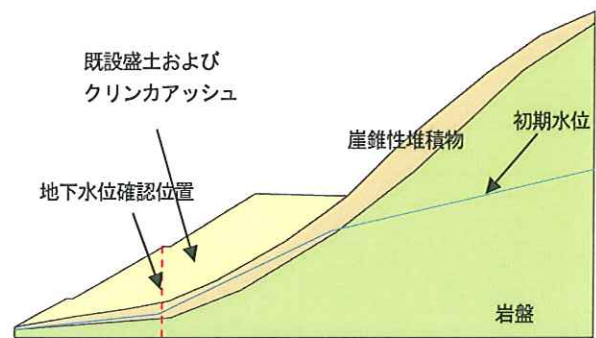


図-9 解析モデル

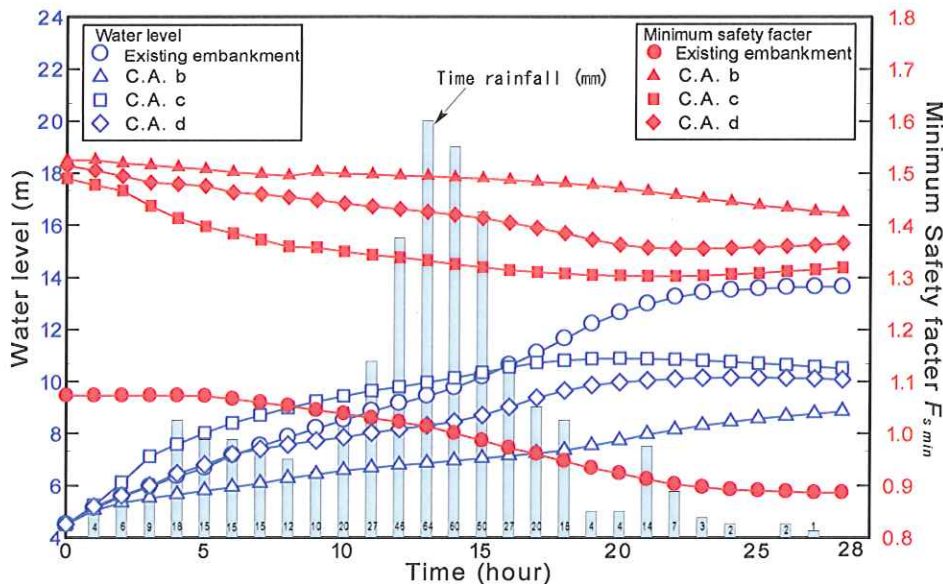


図-10 豪雨時の時間雨量、地下水位および最小安全率の経時変化

5.2 補強土壁の裏込め材料に関する適用性の検討

(1) 現場引抜き試験

クリンカアッシュを補強土（テールアルメ）壁の裏込め材料として検討する場合の補強材の補強効果は、これまで、砂質土と同様な見かけの摩擦係数を採用されてき

たが、本研究では、現場引抜き試験により、引抜き特性を確認することとした。

図-11 に試験箇所側の側面図を示す。試験箇所は、ボックスの影響を避けるとともに、土被り高さが異なる4箇所を選定した。なお、それぞれの試験箇所では、右側

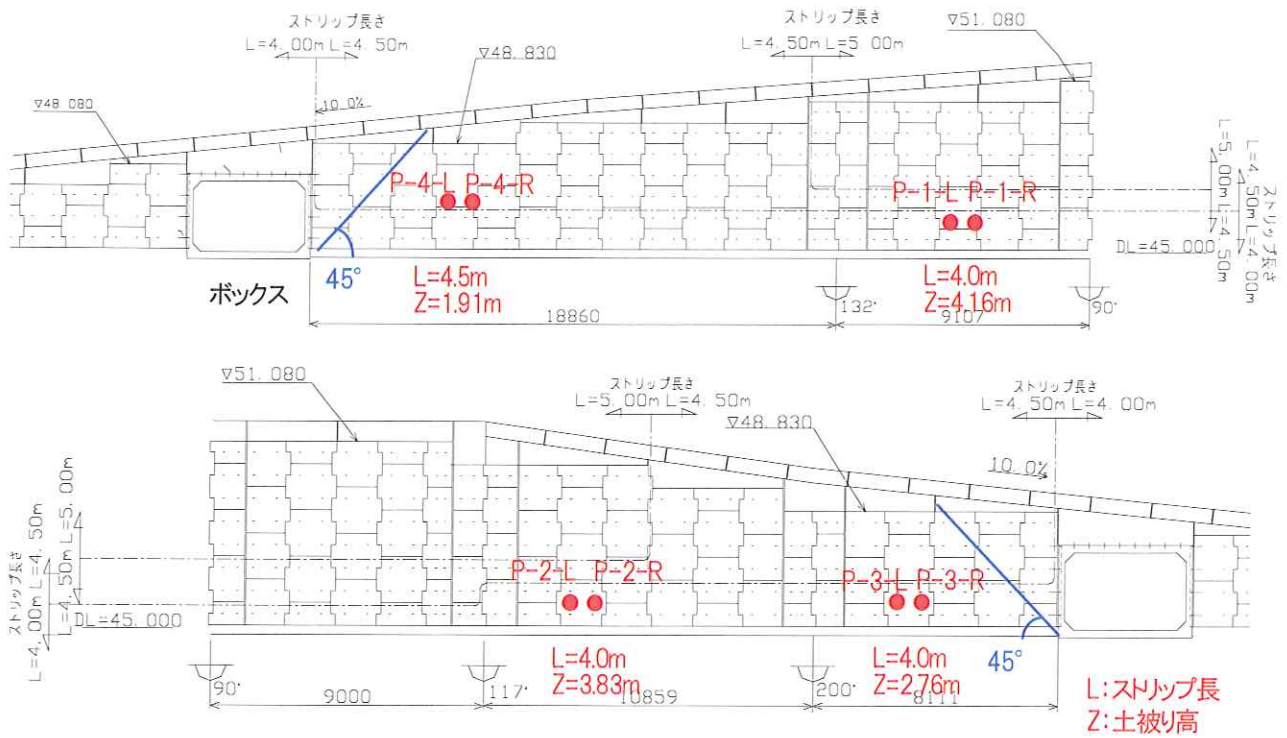


図-11 引き抜き試験位置（側面図）

(R), 左側(L)の2ポイントで試験を実施し、試験精度を高めている。当地の補強土（テールアルメ）壁は、主要道路の乗り越えを目的に構築されており、最大壁高さは6mであった。また、壁面はコンクリートスキンで、補強材は4.0~5.0mの高強度リブ付きストリップが敷設されている。この内、引き抜き試験を実施したのは、4mおよび4.5mのストリップである。ストリップの材質は、溶接構造用圧延鋼材(SM490A)である。

引き抜き試験装置の概略図を図-12に示す。試験は、油圧ジャッキにより接続治具を介してストリップを引抜くものであり、そのときの引抜き荷重をロードセルで測定した。また、引抜き時の変位は、試験用ボルト後端部に設置した変位計で計測した。なお、本補強土壁は、解体前であったことから、ストリップが引き抜けるまで試験を実施することが可能であった。

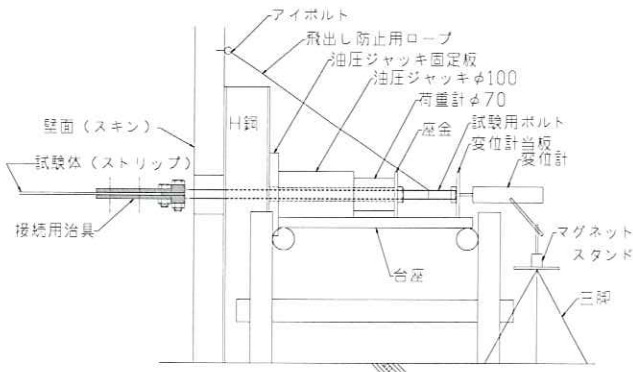


図-12 引き抜き試験装置概略図

(2) 引抜き特性

図-13にP-3の引抜き力と変位の関係を示す。図より、変位が6~8mm付近までは、引抜き力と変位は、ほぼ直線的な関係を示し、その後、明瞭な変曲点が現れ、変位が進行しても引抜き力の増加量は小さなものとなっている。これは、前半部分では、ストリップの平滑部の摩擦抵抗とリブとクリンカアッシュのかみ合わせ効果が発揮される過程にあり、その後、変曲点付近を境に平滑部がすべり始めるとともに、リブ周辺にせん断面が形成・発達する過程にあると考えられる。

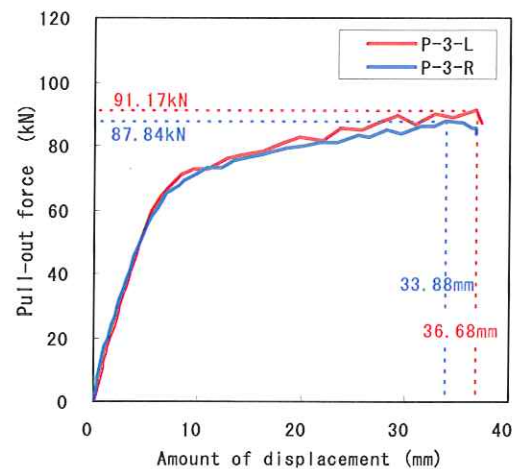


図-13 引抜き力と変位の関係(P-3)

図-14に本研究および既往研究³⁾で得られた見かけの摩擦係数と土被りの関係を示す。また、図中には文献⁴⁾

に示されている設計値も掲載している。図からわかるように、クリンカアッシュの見かけの摩擦係数は、自然土と比較して、最大 6 倍程度大きい。この要因は、クリンカアッシュの粒子形状が非常に複雑なため、ストリップとこれに付随するリブとのかみ合わせが良いこと、このかみ合わせに伴いダイレタンシーも発生し、ストリップ周辺のクリンカアッシュは膨張しようとするため、ストリップ面に作用する鉛直力が増加することが考えられる。

また、本試験で得られた見かけの摩擦係数は、文献³⁾の研究成果よりも大きめの値を示している。この原因は明確ではないが、この研究成果では、盛土直後に引抜き試験を行っているのに対して、本試験は、施工後 6 年程度経過しており、ストリップの表面が錆びていたためと考えられる。このような現象は、文献⁵⁾にも示されている。

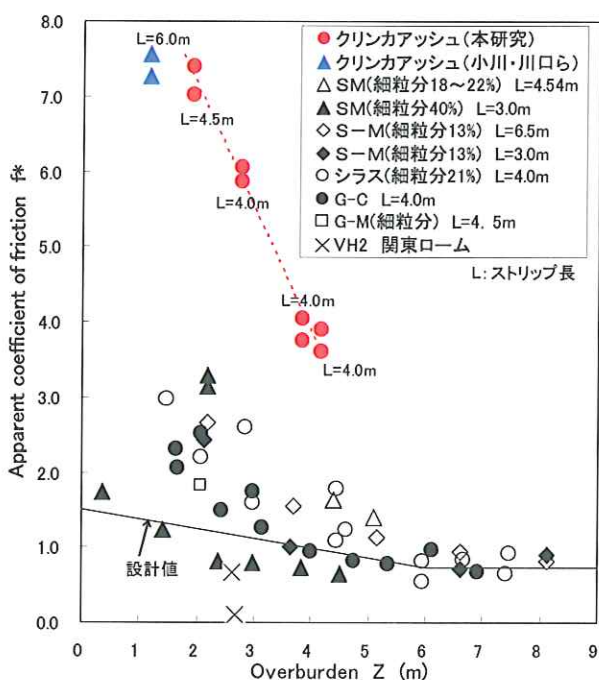


図-14 見かけの摩擦係数と土被りの関係

6. まとめ

本研究で得られた主な知見は、以下の通りである。

- (1) クリンカアッシュは、石炭燃焼時に約 1,500°C の高温状態から急冷され硬化する際に生成されるため、粒子内部には、外部と連結した空隙と連結していない空隙が存在する。また、急冷・硬化したクリンカアッシュは、粒径が約 2cm になるよう粉砕されていることから、粒子表面は、非常に角張っており、複雑な形状を呈している。
- (2) クリンカアッシュは、その粒子内部にある外部と連結していない閉じた空隙の影響により、粒子密度は小さい。また、礫分 28~56%、砂分 36~63% 程度含むことから礫質土や砂質土に分類される。単粒子破碎強度は、自然砂と比較して 1/5~1/10 程度小さく、

粒子破碎の起こりやすい材料であると言える。

- (3) クリンカアッシュの締固め曲線は、自然砂と比較してなだらかな曲線を呈しており、締固め易い材料と言える。また、粒子内部に空隙が存在すること、粒子形状が複雑で再配列されにくいことから、最大乾燥密度は非常に小さい。
- (4) クリンカアッシュは、セカントアンクルが対数表示した有効拘束圧に対して直線的に低下するが、最も緩い状態であっても $\sigma_v \approx 50 \sim 200 \text{ kPa}$ の範囲であれば、ほぼ 35° 以上のセカントアンクルが得られる。
- (5) クリンカアッシュは、自然砂と比較して体積含水率が大きくなると、不飽和浸透流が発生しない。これは、クリンカアッシュ粒子の内部に存在する空隙に保水されること、および、この空隙により毛管作用の働きが強くなっているためと考えられる。
- (6) クリンカアッシュは、降雨の影響によって、盛土内の地下水位は、上昇するものの、その上昇量は小さく、かつ、軽量で、セカントアンクル（内部摩擦角）も大きいいため、降雨の浸透が問題となる盛土を計画する場合には、非常に有効である。
- (7) クリンカアッシュの見かけの摩擦係数は、自然土と比較して、最大で 6 倍程度大きな値を示す。これは、クリンカアッシュの粒子形状の複雑さに起因するストリップおよびこれに付随するリブとのかみ合わせの良さと、これに伴い発生するダイレタンシーにより、ストリップ面に作用する鉛直力が増加するためと考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、中国電力株式会社の吉生岡一郎氏、株式会社エネルギー・エコ・マテリアの中下明文氏、中村芳弘氏には、研究に必要な試料の提供やアドバイスを頂いた。深甚なる感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 若槻好孝, 兵動正幸, 吉本憲正, 穴井隆太郎, 吉永祐二, 吉岡一郎, 中下明文: クリンカアッシュの粒子特性と緩詰め状態の強度・変形特性, 土木学会論文集 C, Vol. 65, No. 4, pp. 897-914, 2009.
- 2) 財団法人国土技術研究センター: 河川堤防の構造検討の手引き, p. 47, 平成 14 年 7 月.
- 3) 小川憲保, 川口一男, 岡野 実, 天野正道: クリンカアッシュを使用した補強土壁工の設計施工, 第 27 回土質工学研究発表会, pp. 2461-2462, 1992.
- 4) 財団法人土木研究センター: 補強土 (テールアルメ) 壁工法 設計・施工マニュアル 第 3 回改訂版, 2003.
- 5) 小川憲保: 現場引抜き試験による帯鋼補強材と盛土材との摩擦特性, 土木学会論文集, No. 568/III-39, pp. 221-226, 1997.