

# 土中引抜き試験によるクリンカアッシュに対する ジオグリッドの引抜き挙動・抵抗特性

鈴木素之 (創成科学研究科建設環境系専攻) 野村和樹 (創成科学研究科建設環境系専攻)

## Pullout Behavior and Resistance Characteristics of Geogrids against Clinker Ash Using Laboratory Pullout Test

Motoyuki SUZUKI (Civil and Environmental Technology for Innovation, Yamaguchi University)

Kazuki NOMURA (Civil and Environmental Engineering, Yamaguchi University)

**Abstract:** The clinker ash is a by-product of thermal power plant which has light weight and high shear strength. The use of clinker ash for backfill material of reinforced earth walls is expected instead of lacking sand. We investigated the pullout characteristics of geogrids embedded in clinker ash layer using laboratory pullout test under different conditions of overburden pressure. Six types of clinker ash with different particle size distributions were used to conduct the laboratory pullout and the direct shear tests. The pullout behavior and resistance were examined based on the pullout test results. In addition, the strength parameter obtained from pullout test was compared with that from direct shear test. As a result, it was found that the internal friction angle of clinker ash from pullout test was close to the that from direct shear test.

**Key words:** Clinker ash, Geogrids, Pullout test, Reinforced earth wall

### 1. はじめに

補強土壁は盛土材がもたらす壁面に作用する土圧合力に対して盛土材内に敷設した補強材の引抜き抵抗力によって釣り合いを保ち、土留め壁の効果を発揮するものである。代表的なものに帯鋼補強土壁工法、ジオテキスタイル補強土壁工法、アンカー補強土壁工法が挙げられる。ジオテキスタイルは合成高分子材を素材とする補強材であり、鋼材系補強材と比べて安価であり、腐食にも強い。また、ジオテキスタイルを用いた工法では、面状に敷設されるので、摩擦抵抗も得られやすく、しかも他の工法では盛土材として利用できない細粒分含有率の高い土に対しても適用可能な場合もある。著者らは、これまでにジオグリッド補強土壁の盛土材として火力発電所から産出されるクリンカアッシュの適用性について検討している<sup>1),2)</sup>。クリンカアッシュは石炭灰の一種であり、石炭灰は指定副産物に位置づけられ、有効利用が促進されている。クリンカアッシュは、一般的な土質と化学成分に差異がなく、単位体積重量が小さく、高いせん断強さを発揮する。

本研究では、クリンカアッシュに対するジオグリッド補強材の引抜き抵抗特性を明らかにするため、既報<sup>2)</sup>をふまえて、新規に追加した粒度特性の異なる6種類のクリンカアッシュに対するジオグリッドの土中引抜き試験を実施した。また、同じクリンカアッシュを用いて同じ拘束圧領域で圧密定圧一面せ

ん断試験を実施し、一面せん断試験から得られた強度定数と土中引抜き試験から得られた強度定数を比較・検討した。本論文では、その結果と考察について述べる。

### 2. 試料土および補強材

#### 2.1 クリンカアッシュの物理特性

クリンカアッシュはボイラー内で燃焼によって生じた石炭灰の塊を破砕機で粒状に砕いたものである。本研究で用いた試料土は5種類のクリンカアッシュ(以下、C.T, C.MA, C.O, C.MI, C.Hと略記)であり、それらの粒径加積曲線を Fig-1 に示す。クリンカアッシュの粒子はほとんどが粗礫と粗砂であり、物理特性は一般的な砂に近い。また、透水係数は砂と同程度で、高い透水性を有している。そのうえ、表面に多数の細孔があり、水分保持率が一般土壌に比べ高い。さらに、単位体積重量は砂よりも軽く、高いせん断強度を持っている<sup>1)</sup>。また、クリンカアッシュの化学組成は SiO<sub>2</sub>: 55%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 25%, CaO: 3%, Fe<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: 5%, その他: 12%である<sup>3)</sup>。Tab-1 に試料土の物理特性の一覧を示す。細粒分含有率 F<sub>c</sub> は C.T が 26.8%, C.MA が 7.5%, C.O が 8.3%, C.MI が 14.1%, C.H が 5.5%, C.D が 22.9%であるため、全試料土はジオテキスタイル補強土壁工法の適用範囲内<sup>4)</sup>にある。

Tab-1 Physical and compaction properties of samples used

Soil name	Density of soil $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Maximum dry density $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Optimum water content $w_{opt}$ (%)	Fine (%)	Sand (%)	Gravel (%)	Maximum particle size (mm)
C.T	2.126	1.014	38.5	26.8	53.5	19.7	4.750
C.MA	2.185	1.085	34.7	7.5	62.9	29.6	
C.O	2.160	1.140	29.6	8.3	42.3	49.4	
C.MI	2.104	1.019	37.7	14.1	60.1	25.8	
C.H	2.224	1.102	34.1	5.5	62.9	31.6	
C.D	2.222	0.948	40.2	22.9	54.1	23.0	

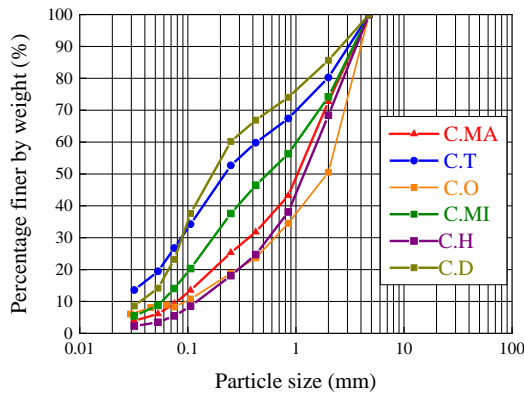


Fig-1 Particle size distribution curves of sample

2.2 ジオグリッド補強材

補強材はジオグリッドで、高強度ポリエステル繊維を芯材、ポリプロピレンを被覆材としている。補強材寸法はストランド幅 1mm、格子内寸は 30mm、補強材の引張破断強度は 187kN/m となっている。ジオグリッドの写真および模式図をそれぞれ Pic-1, Fig-2 に示す。特徴として、比較的安価であり、重量が軽く施工性がよいが、その反面、引張り力が作用した場合に補強材自身の伸張や破断、施工時の耐衝撃性に関して鋼製補強材に劣ることが挙げられる。



Pic-1 Geogrids used in this study

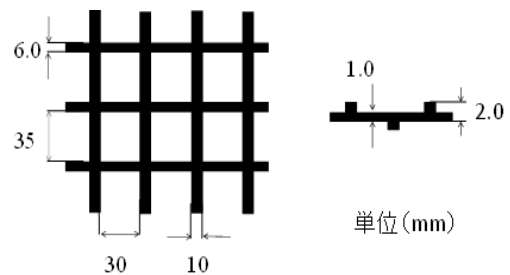


Fig-2 Schematic diagram of geogrids used

3. クリンカアッシュ単体の一面せん断試験

3.1 試験手順

試料土は最大粒径  $D_{max}=4.75mm$  になるようにふるいにかけて、せん断箱に試料を投入後、上面を均す。供試体 (直径6cm, 高さ2cm) を入れたせん断箱の上部高さを4か所ノギスで測定し、その差が1mm以内になるよう再度上面を均した後、供試体上面にろ紙およびポーラスストーンを順に置く。ベロフラムシリンダーにより所定の圧密応力を加える。圧密終了を確認した後 (圧密の打ち切り時間を  $3t$  法により決定)、直ちにせん断を開始する。初期の垂直圧を一定とした条件でせん断試験を行い、せん断変位  $D$  が 7.0mm に達した時点で試験を終了する。

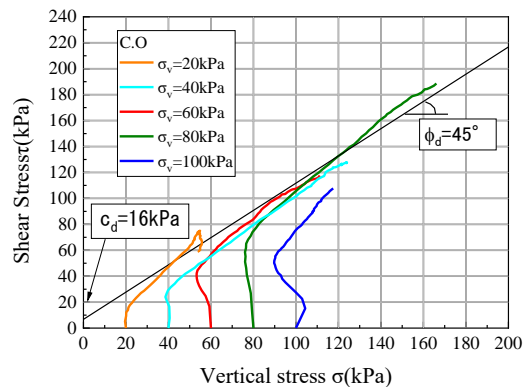


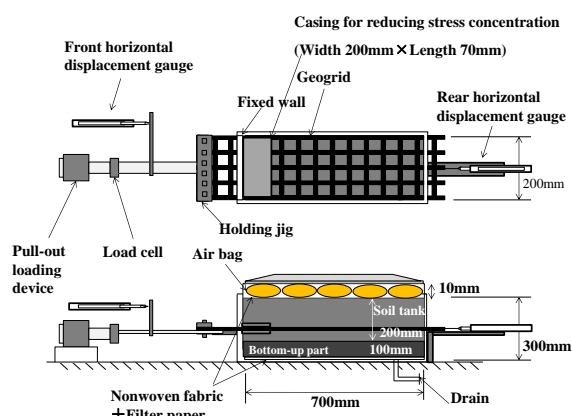
Fig-3 Stress paths mobilized on shear surface and failure line (C.T)

3.2 一面せん断試験の試験結果

一面せん断試験におけるせん断面上のせん断応力  $\tau$  と垂直応力  $\sigma_v$  の関係を Fig-3 に示す。試験は全 6 試料に対して実施したが、ここでは代表して 1 試料 (C.O) の試験結果を示す。この応力経路をもとに破壊線を引き、得られた強度定数を Tab-2 に示す。これによるとクリンカアッシュの一般的な内部摩擦角の値 ( $\phi=34\sim40^\circ$ ) と同等あるいはそれ以上の結果となっている。一面せん断試験から得られた強度定数は後述する土中引抜き試験の結果整理の際に用いる。

**Tab-2 Strength parameters determined by direct shear test**

Strength parameters	$c_d$ (kPa)	$\phi_d$ (°)
C.T	16	40
C.MA	44	39
C.O	16	45
C.MI	2	48
C.H	19	49
C.D	8	46



**Fig-4 Essential features of pullout test apparatus**

#### 4. ジオグリッド補強材の土中引抜き試験

##### 4.1 土中引抜き試験装置<sup>1),2)</sup>

**Fig-4** にジオグリッドを敷設した土中引抜き試験装置を模式的に示す. 本装置は上載圧 $\sigma_v$ の下で圧密した土槽 (長さ 700mm, 高さ 200mm, 幅 200mm) 内の試料土から所定の長さで敷設した補強材を 0.12 ~ 1.20mm/min の範囲の引抜き速度で引き抜くことが可能である.

##### 4.2 試験手順

以下に試験手順を記載する.

- ① 試料土をバットにあげ, 含水比が均一になるように十分に混合し, 各層の密度を管理するため, 試料土を 1 層ごとに小分けする.
- ② 土槽底面にろ紙, 不織布を順に敷設した後, 調整した試料土を 1 層ずつ投入し, 1 層ごとに 4kg ランマーで 1 層 42 回の突固めによる締固めを計 4 層に対して行う. 1 層目充填後に応力集中低減カバーの下蓋を設置する.
- ③ 補強材を全面に敷設し, 応力集中低減カバーの上蓋を設置する.
- ④ 残りの 3 層も同様に締固め, 4 層目まで充填する.
- ⑤ 最上面を均し, ろ紙と不織布を敷く. その後, 所定の $\sigma_v$ を載荷する.
- ⑥ 試料土を 20 分間圧密し, 圧密終了後に引抜き速度 1mm/min で引抜き変位が 100mm に達するま

**Tab-3 Test cases**

No.	Soil name	Initial water content (%)	Overburden pressure $\sigma_v$ (kPa)	Degree of compaction Dc (%)
1-1	C.MA	6.5	0	86.9
1-2		4.5	20	88.2
1-3		3.3	30	92.0
1-4		4.6	40	88.3
1-5		8.6	60	85.6
1-6		7.0	80	89.0
2-1	C.T	18.3	0	87.2
2-2		19.9	20	85.9
2-3		17.2	30	89.9
2-4		18.5	40	90.9
2-5		22.2	60	87.3
2-6		20.0	80	91.1
3-1	C.O	10.0	0	85.4
3-2		9.7	20	88.5
3-3		8.8	30	89.3
3-4		7.9	40	87.0
3-5		11.0	60	86.0
3-6		10.4	80	86.6
4-1	C.MI	43.5	0	77.8
4-2		34.0	20	81.1
4-3		38.8	30	85.0
4-4		31.0	40	82.1
4-5		40.2	60	79.3
4-6		38.7	80	82.1
5-1	C.H	19.0	0	80.3
5-2		18.9	20	79.3
5-3		21.2	30	81.1
5-4		19.0	40	82.7
5-5		22.1	60	82.9
5-6		21.9	80	82.9
6-1	C.D	39.4	0	89.5
6-2		39.9	20	86.7
6-3		38.4	30	87.2
6-4		38.7	40	85.7
6-5		41.8	60	89.5
6-6		41.4	80	87.1

で定圧条件で排水・排気引き抜きを行う.

##### 4.3 試験条件

ジオグリッドは土槽に対して全面敷設した (ストランドが 5 本). 補強材長は 630mm とした. 最大粒径は全試料一律に 4.75mm とし, 試料土の目標締固め度  $D_c$  は 90%,  $\sigma_v$  をエアバッグの空圧により載荷し, 20, 30, 40, 60, 80kPa のように変化させた. **Tab-3** に試験ケースを示している.

#### 4.4 結果の整理

測定項目は引抜き荷重，前方および，後方水平変位である．補強材が引抜き中に伸長破断を起こすケースがあったため，試験後に補強材が引抜き抵抗を發揮した引抜き抵抗長を測定したが，補強材の破断形状が様でなかった．そのため，引抜き抵抗長の精度に問題があるので，引抜き抵抗の算出に及ぼす影響が大きい．今回用いた補強材と同様の交点溶着型のものであり，既往の研究では破断を起こしたものが，引抜き力には大きな差が出ていないことが実験的に示されている<sup>6)</sup>．本研究でも同じように最大引抜き力に大きな差が生まれないケースがみられた．その典型的な結果を示したC.OのケースをFig-4に示している．このことから，補強材が破断する場合，上載圧を考慮した最大引抜き抵抗長の算定式が必要であると考え，井沢ら<sup>7)</sup>の引抜き抵抗長の算定式を参考にして，前述の一面せん断試験の結果を利用して，ジオグリッドの最大引抜き抵抗長 $L_T$ を次の式 (1) より算出した．

$$L_T = \frac{F_U}{2(c + \sigma_v \tan \phi)} \quad (m) \quad (1)$$

ここに

- $F_U$  : ジオグリッドの破断強度
- $c$  : 一面せん断試験から得られた見かけの粘着力
- $\phi$  : 一面せん断試験から得られた内部摩擦角

これより，引抜き抵抗 $\tau$ は補強材断面積 $A$ と引抜き荷重 $T$ を用いて式 (2) および式 (3) より求める．なお，補強材の破断が起きないケースについては，一般的な全面積法により求めることとし，式 (2) において $L_T$ を補強材の初期敷設長 (0.63m) とする．

$$\tau = T / (2 \cdot A) \quad (kN/m^2) \quad (2)$$

$$A = B \cdot (L_T - \Delta L) \quad (m^2) \quad (3)$$

ここに，

$\Delta L$  : 後方水平変位

#### 5. 試験結果

##### 5.1 引抜き挙動

各試料の引抜き抵抗と前方水平変位の関係をFig-5～Fig-10に示す．いずれのケースも引抜き抵抗は徐々に増加しピーク値をとり，その後減少しているのがわかる．しかし，いくつかのケースでは単調増加し，ピーク値を明確に示さないものがあった．それらのケースでは補強材の破断が見られていない．また，どの試料でも $\sigma_v$ が高いほど高い引抜き抵抗を發揮しており，拘束圧依存性が認められ

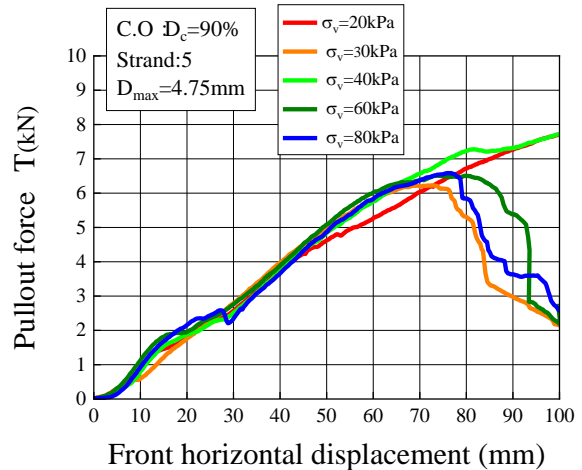


Fig-4 Relationship between pullout force and front horizontal displacement (C.O)

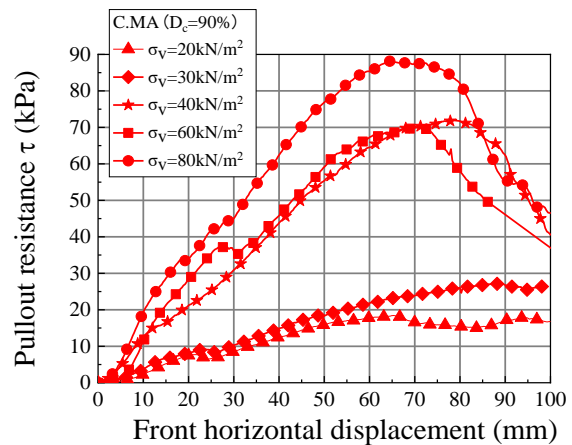


Fig-5 Relationship between pullout resistance and front horizontal displacement (C.MA)

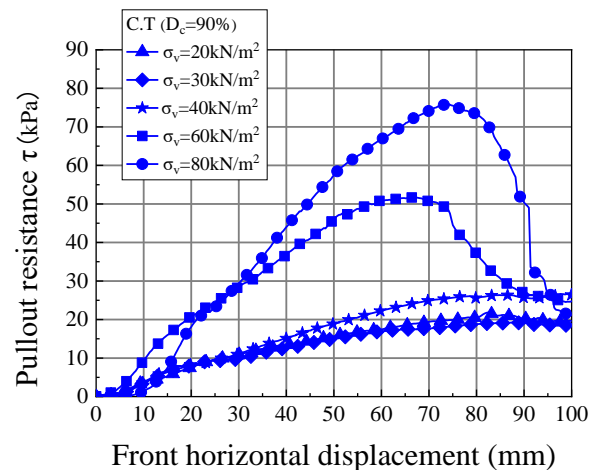


Fig-6 Relationship between pullout resistance and front horizontal displacement (C.T)

た．前方水平変位と後方水平変位の関係に関しては，先行研究<sup>2)</sup>で低い圧力領域 (0～10kPa) では後方水平変位は前方水平変位の増分とほぼ同じ分生じ，高

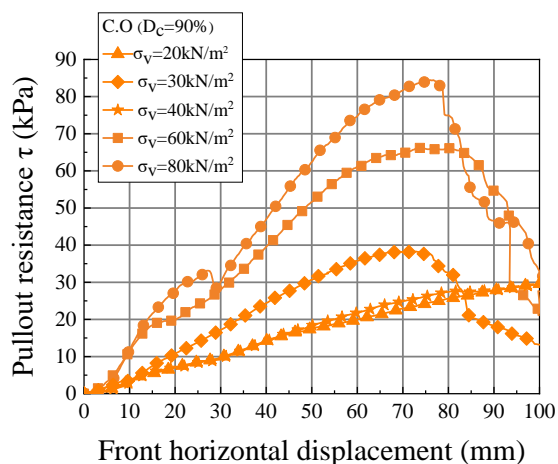


Fig-7 Relationship between pullout resistance and front displacement (C.O)

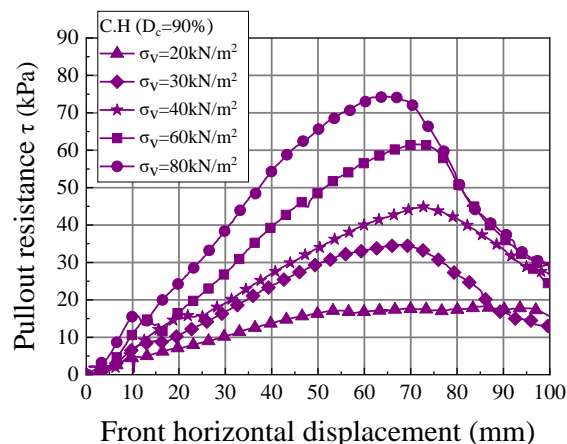


Fig-10 Relationship between pullout resistance and front displacement (C.H)

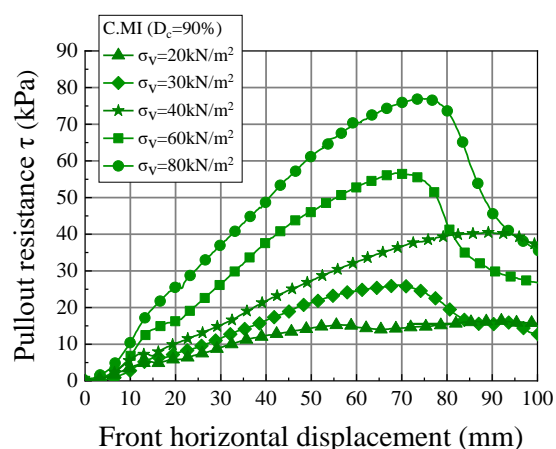


Fig-8 Relationship between pullout resistance and front displacement (C.MI)

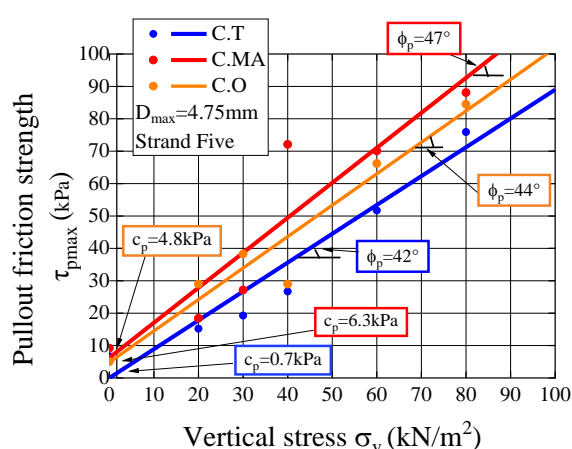


Fig-11 Relationship between pullout friction strength and vertical stress (C.T, C.MA, C.O)

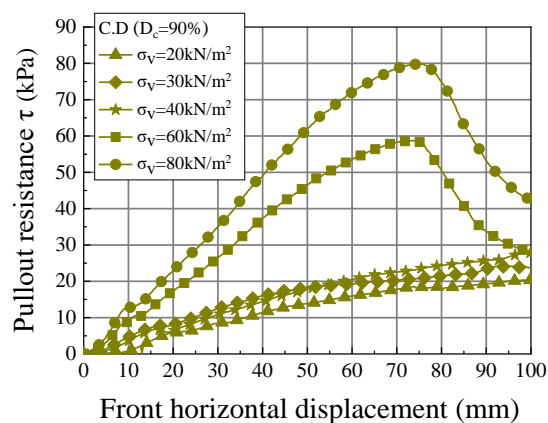


Fig-9 Relationship between pullout resistance and front displacement (C.D)

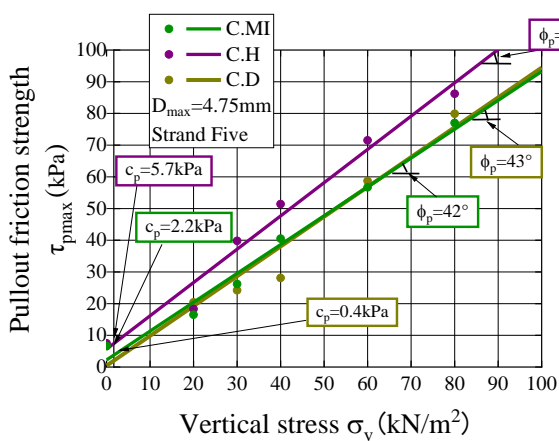


Fig-12 Relationship between pullout friction strength and vertical stress (C.MI, C.H, C.D)

い圧力領域では後方水平変位は全く生じず、補強材が土中で伸長していることがわかっている。

## 5.2 引抜き摩擦強さと垂直応力の関係

Fig-11, Fig-12 に各クリンカアッシュの引抜き摩擦強さ  $\tau_{pmax}$  と  $\sigma_v$  の関係を示す。全試料において、高

い引抜き抵抗を發揮している。各試料に対して破壊線を引き、それぞれ強度定数を得た。引抜き摩擦強さが最も小さくなったのは細粒分の最も多いC.Tであった。また、細粒分が少ないものは高い内部摩擦角を示す傾向がみられた。Tab-3 に土中引抜き試験

と一面せん断試験から得られた強度定数の一覧を示す。これより、一面せん断試験から得られた内部摩擦角の方が土中引抜き試験のそれよりも高い値を示した。なお、一面せん断試験結果において、せん断面に作用する垂直応力は周面摩擦を考慮して算出しているため、強度定数は適切に評価されている。また、両試験による内部摩擦角はクリンカアッシュの一般的な値 ( $\phi=34\sim 40^\circ$ ) よりも高い値を示す結果となった。

**Tab-3 Comparison of strength parameters obtained by pullout and direct shear test**

Soil name	Fine $F_c$ (%)	Pullout test		Direct shear test	
		$c_p$ (kPa)	$\phi$ ( $^\circ$ )	$c_d$ (kPa)	$\phi_d$ ( $^\circ$ )
C.T	26.8	0.7	41	16	40
C.MA	7.5	6.3	47	44	39
C.O	8.3	4.8	44	16	45
C.MI	14.1	2.2	42	2	48
C.H	5.5	5.7	46	19	49
C.D	22.9	0.4	43	8	46

## 6. まとめ

本研究の結果をまとめると次の通りである。

- (1) 全試料において引抜き抵抗はピーク値を迎えた後に減少する挙動を示したが、補強材が破断しないケースではピーク値を示さないものがあった。
- (2) 高い上載圧下で引き抜くと、補強材の土中の前側での伸長破断により、後方水平変位が生じなかった。
- (3) 上載圧が比較的高い領域においても、クリンカアッシュは高い引抜き抵抗を発揮した。また、一面せん断試験の強度定数は土中引抜き試験のそれよりも高く、クリンカアッシュの一般的な内部摩擦角よりも高い値を示した。
- (4) 細粒分が多いほど引抜き抵抗は低くなる傾向がみられた。

今後は、補強土壁の内的・外的安定性に対する検討を行っていきたい。

**謝辞**：本研究は中国電力(株)との共同研究として実施したものである。研究に用いたジオグリッドは岡三リビング(株)から提供いただいた。研究を遂行するにあたり、中国電力(株)エネルギー総合研究所・佃勝二氏、及川隆仁氏、渡辺健一氏から研究に対する助言・支援をいただいた。また、岡三リビング(株)・小浪岳治氏からはジオグリッド補強土壁の設計に関して、復建調査設計・若槻好孝氏からはクリンカアッシュの特性に関してご助言いただいた。ここに記して上記の方々に謝意を表すしだいである。

## 参考文献

- 1) 内川浩樹, 鈴木素之, 野村和樹, 及川隆二, 中本健二, 松尾 暢: ジオグリッド補強土壁に対するクリンカアッシュの適用性に関する実験的検討, 第12回環境地盤工学シンポジウム, pp.183-188, 2017.
- 2) 野村和樹, 鈴木素之, 内川浩樹, 及川隆二, 中本健二, 松尾 暢: 補強土壁の盛土材に用いるクリンカアッシュに対するジオグリッド補強材の引抜き抵抗特性, 第52回地盤工学研究発表会, pp.1477-1478, 2017.
- 3) 日本フライアッシュ協会: 石炭灰ハンドブック.
- 4) (一財)土木研究センター: ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル, 2000.
- 5) (公社)地盤工学会: ジオシンセティックスの土中引抜き試験方法(JGS0942-2009), 地盤材料試験の方法と解説, pp.1058-1068, 2009.
- 6) 澁谷 啓, 片岡沙都紀, 植松尚大: 格子交点溶着型および一体型ジオグリッドの土中引抜き抵抗特性の比較, ジオシンセティックス論文集, 第29巻, pp.19-26, 2014.
- 7) 井沢 淳, 木村博憲, 桑野二郎, 高橋章浩, 石濱吉郎: ジオグリッド形状が引き抜き特性に及ぼす影響, ジオシンセティックス論文集, 第15巻, pp.28-37, 2000.

(平成31年1月25日受理)