

石炭灰を造粒した地盤改良材の開発に関する研究

友久 誠司^{*} 澤 孝平^{*} 内藤 永秀^{**} 齋藤 学^{***} 平井 裕二^{****}

Studies on the Development of Ground Improvement Material Granulated Coal Fly Ashes

Seishi TOMOHISA, Kohei SAWA, Nagahide NAITO, Manabu SAITO, Yuuzi HIRAI

ABSTRACT

Recently, the generation of coal fly ashes from many power stations and various kinds of industries has been increasing. It is difficult to reuse as construction materials due to the fine grain size and flying dust, and the disposal sites of the coal fly ashes have been decreasing. Therefore, it is very important to reuse the ash. The purpose of this study is to clarify the properties as construction material of granulated coal fly ash, which is formed by mixing coal fly ash with cement.

As a result, (1) in comparison with aggregate, the water absorption of the granulated coal fly ash has a very large value of about ten times, (2) the larger the mixing rate of cement, and the smaller the diameter of the grain of the granulated coal fly ash, the larger the single particle crush strength becomes, (3) the granulated coal fly ash of 5% cement content has the same strength in comparison with concrete, and (4) the granulated coal fly ash of a smaller mixing rate of cement has low strength. Therefore, it is considered that they can be applied as embankment materials owing to the particle crush by the compaction energy.

KEY WORDS: ground improvement material, single particle crush strength, coal fly ash, water absorption, Abrasion test

1. 緒 論

一般に、石炭は燃焼すると約12%の石炭灰が発生する。図1は近年の石炭灰の発生量と有効利用量の推移を示している¹⁾。1970年代の石油危機を契機に、エネルギー源の多様化の重要な柱であり、利用の拡大が図られてきた石炭火力発電所からの年間発生量は630万t(約75%)、また、その他の事業所からは210万tで、年々増加の一途をたどっている。現在、石炭灰は建設材料としてセメントの原料や、地盤改良の添加材、およびダム・橋の建設材料として利用されている。しかし、使用時に空中に拡散される多くの粉塵は、作業員や周辺地域の住民の健

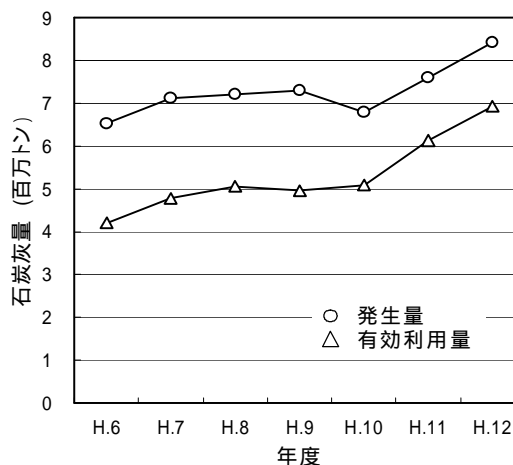


図1 石炭灰発生量と有効利用量

* 都市システム工学科

** 技術教育支援センター

*** 専攻科建築・都市システム工学専攻

**** (株)奥村組土木興業

康および環境保全に深刻な問題である。

石炭灰は今後も継続して膨大な量の発生が見込まれている。これらを改質し、盛土や地盤改良などの建設材料として有効利用が可能となれば、最終処分地の延命や資源のリサイクルおよび環境保全の観点からも大変有意義であり、これらの有効利用技術の開発が緊急の課題とされている^{2) 3)}。

造粒石炭灰は、石炭灰を直径数 mm から数十 mm に造粒したものである。造粒石炭灰の利点は石炭灰に比べて、粉塵の発生および重金属などの有害物質の溶出が抑制されること、屋外保存が可能となりハンドリングや維持管理が容易になることなどがあり、また、空隙が多いことから軽量盛土の材料としての利用が考えられる。

本研究の目的は、造粒石炭灰の工学的性質の解明であり、建設材料や土質安定材としての有効性を明らかにすることである。本論文では、単粒子破砕強度、吸水率およびすりへり減量試験を行って造粒石炭灰の工学的性質を評価する。

2. 試料および試験方法

2.1 試料

本研究に用いる造粒石炭灰は、石炭燃焼のボイラーから発生する石炭灰を造粒したものである(図2)。原料の石炭灰は、新日本製鐵(株)広畑製鐵所産の流動床灰で、固化材は普通ポルトランドセメントである。これらの配合は表1のとおりであり、石炭灰に対して質量比でセメント1%、3%、5%をそれぞれ混合する。

造粒に使用した機械は、日工(株)製の二軸ECBミキサーである。一方、比較のために用いる造粒石炭灰は、広鉦技建(株)産の路盤用の造粒石炭灰である(以後、市販品と呼ぶ)。練り混ぜ水は、造粒が可能なできるだけ少量値を設定しており、特に、市販造粒石炭灰の練り混ぜ水量が30%と少ないことがわかる。

2.2 試験方法

造粒石炭灰の工学的性質は、3種類の試験で評価する。すなわち、単粒子破砕強度試験、吸水率試験およびすりへり減量試験である。試験に用いる試料は、ふるい分けにより2~5mm、5~10mm、10~15mm、15mm以上の4種類の粒度を準備する。

2.2.1 単粒子破砕強度試験

単粒子破砕強度試験に用いる試料は、整形後1ヶ月間養生し、ふるい分けした粒径5mm以上の3種類の粒度の各々50粒であり、試験手順は以下のとおりである。

- 1) 造粒石炭灰の長辺、中辺、短辺の長さを測定する。
- 2) 圧縮試験機の載荷板に最も安定する方向に置き、初

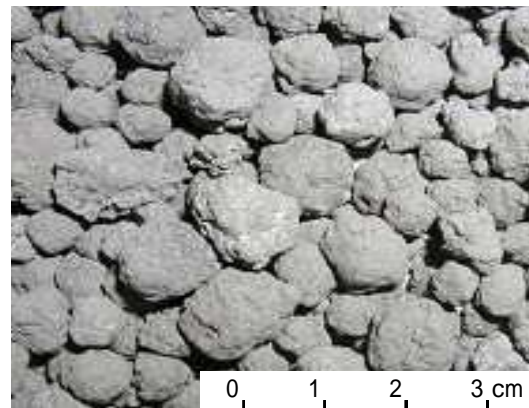


図2 造粒石炭灰

表1 造粒石炭灰の配合

試料の種類	配合(質量%)			
	1	2	3	市販造粒石炭灰
石炭灰	100	100	100	100
セメント	5	3	1	5
水	42	43	45	30

注1)セメントは石炭灰に対する百分率

注2)水は石炭灰とセメントの合計に対する百分率

期高さ(上下載荷板の距離)を測る。

- 3) 1mm/min の速度で圧縮し、破砕時の変位と荷重を読む。
- 4) 破砕後の試料を観察する。

単粒子破砕強度は、破砕荷重を供試体の面積で除して求めるが、この面積の求め方が問題となる。以下は、これまでに提案された主なものである。

- (1) 粒子を球と仮定する方法

$$\text{強度(N/mm}^2\text{)} = NP/d^2$$

ここで、P:破砕荷重(N)

d:粒子の初期高さ(mm)

N:定数で平松ら⁴⁾は0.7/($\pi/4$)としている

- (2) プロトジャコノフの方法

$$\text{強度(N/mm}^2\text{)} = P/V^{2/3}$$

ここで、V:粒子の体積(mm³)

- (3) ホップスの方法

$$\text{強度(N/mm}^2\text{)} = P/(V/d)$$

- (4) 接触面積を測定する方法

$$\text{強度(N/mm}^2\text{)} = P/A$$

ここで、A:載荷板の接触面積(カーボン紙等を粒子と載荷板の間に置き、接触面積を測る)

(5) 粒子を14面体とする方法(福本ら⁵⁾の方法)

$$\text{強度(N/mm}^2\text{)} = P/A$$

ここで、P : 破砕荷重 (N)

A : 接触面積 (ab/8)(mm²)

a : 粒子の水平長軸の長さ (mm)

b : 粒子の水平短軸の長さ (mm)

上記の式のうち、(1)の粒子を球と仮定する方法において、強度は粒子の初期高さdの1~1.24乗と相関が高いこと、および粒子の初期高さが15mmより小さい場合は、定数Nが1~5倍に変化して粒子の強度は大きめに計算されるなどの問題がある⁶⁾。(2)、(3)の方法は、造粒石炭灰粒子の体積の測定が困難である。また、(4)の方法は、載荷作業や結果の整理に手間がかかることから、本研究では、(5)の造粒石炭灰粒子を14面体とする方法を用いて単粒子破砕強度を計算する。

2・2・2 吸水率試験

吸水率試験に用いる試料は、ふるい分けした4種類の粒度の造粒石炭灰である。試験は造粒石炭灰の吸水能力を調べるものであり、JIS A 1110に準じて行う。吸水能力が高いと、これを土質安定材として高含水比泥土に混合すると、泥土の含水比が低下して強度の増加に大きく貢献する。

試験には4種類の粒度の造粒石炭灰をそれぞれ2.5kgずつ準備する。造粒石炭灰の表面に付着しているゴミ等を取り除いて24時間吸水させた後、各造粒石炭灰粒子の表面を布で丁寧に拭く。その後、乾燥炉中で24時間乾燥させ、その質量の減少量から吸水率を測定する。

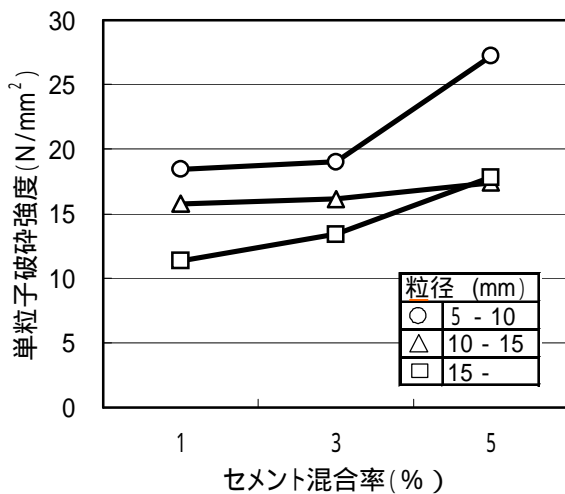


図3 単粒子破砕強度とセメント混合率の関係

2・2・3 すりへり減量試験

すりへり減量試験に用いる試料は、ふるい分けした粒径が5mm以上の3種類の粒度の造粒石炭灰である。すりへり減量試験は造粒石炭灰のすりへり抵抗を調べるものであり、運搬時の粉塵の発生や道路用材として用いる際に重要であり、JIS A 1121に準じて行う。使用した機械はロサンゼルスすりへり試験機である。試験は試料2.5kgと鋼球4個を試験機の中に一緒に入れる。33回転/分の回転速度で100回転させ、試料を取り出して1.7mmふるいでふるい、通過試料をすりへり減量として、試験前の試料の質量に対する割合を求める。この操作を累計500回転まで繰り返す。

3. 結果と考察

3・1 単粒子破砕強度試験

3・1・1 単粒子破砕強度

図3は単粒子破砕強度とセメント混合率の関係である。当然ながら、いずれの造粒石炭灰もセメント混合率が多いほど高強度を示している。その割合は、セメント混合率1%当たり約2 N/mm²である。

図4は単粒子破砕強度と粒径の関係である。いずれのセメント混合率においても粒径の小さな粒子が大きな強度を示している。この理由は、粒径の小さな粒子の方が粒子内の強度が均一で緻密な構造をもつためと考えられる。また、この傾向は、セメント混合率が1%と3%のものに比べ、セメント混合率の多い5%の粒子の方が顕著であることがわかる。

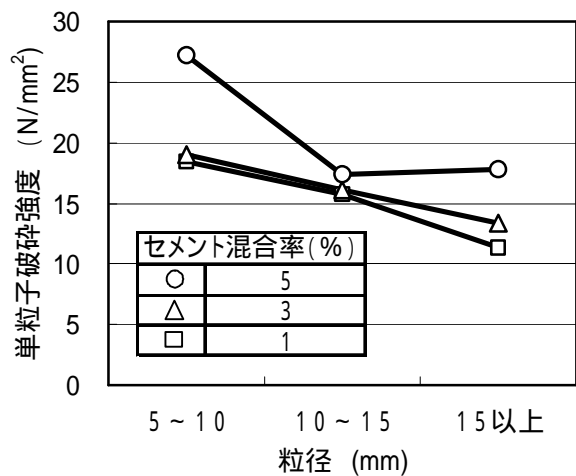


図4 単粒子破砕強度と粒径の関係

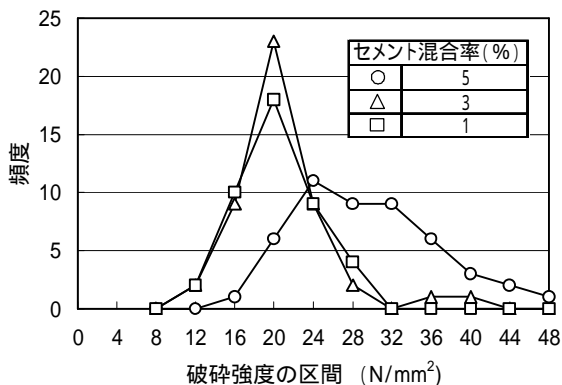


図5 破砕強度の分布 (粒径5~10mm)

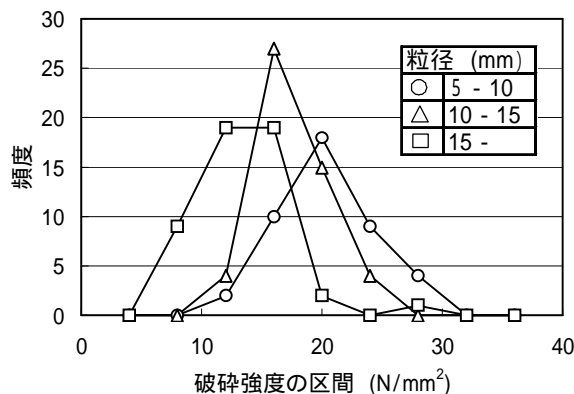


図6 破砕強度の分布 (セメント混合率1%)

図5は粒径5~10mmの造粒石炭灰のセメント混合率に対する破砕強度の分布である。セメント混合率1%と3%の造粒石炭灰は20N/mm²の区間が約20個程度の頻度であり、よく似た分布形状を示している。しかし、セメント混合率が5%に増加すると、強度のばらつきは大きくなり、頻度も24~32N/mm²の範囲が多くなっている。

図6はセメント混合率1%の造粒石炭灰の粒径の違いに対する破砕強度の分布である。いずれの粒径の造粒石炭灰とも分布の形状は良く似た形である。しかし、最頻値は粒径が15mm以上のものは14N/mm²であるのに比べ、粒径10~15mmが17N/mm²、粒径5~10mmが20N/mm²と粒径が小さくなるに従い最頻値の破砕強度は大きくなっている。

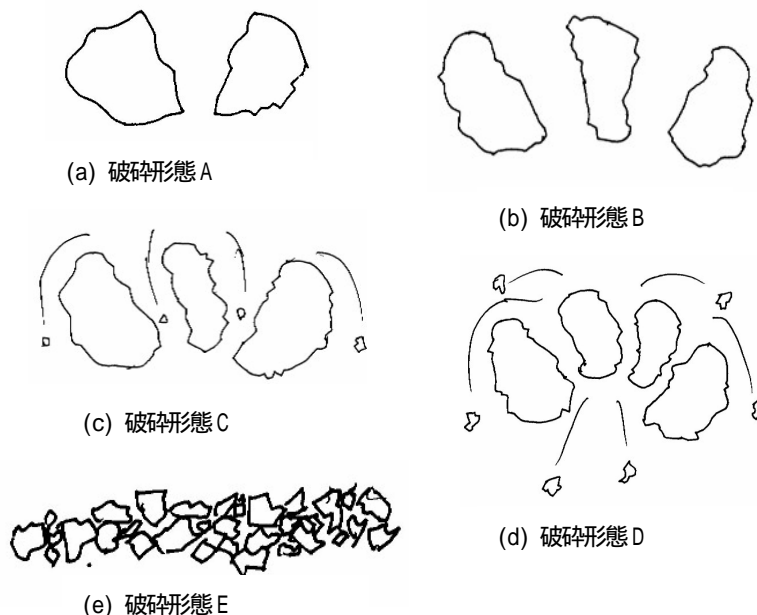


図7 破砕形態の種類

3・1・2 造粒石炭灰粒子の破砕形態

単粒子破砕強度試験を行った結果、破砕形態は図7に示すような5つに分類できることがわかった⁷⁾。それらの破砕試験時の代表的な変位と強度の関係を示したものが図8である。

(1) 破砕形態A

造粒石炭灰の変位が増加するのに伴い、強度も直線的に増加し、強度がピークに達する時点で粒子は大きく2個に割裂し破砕する。

(2) 破砕形態B

変位-強度曲線は破砕形態Aとほぼ同じであるが、粒子が破砕される直前に数箇所角が欠け、強度の増加が止まり、粒子は2~3個に割裂し、破

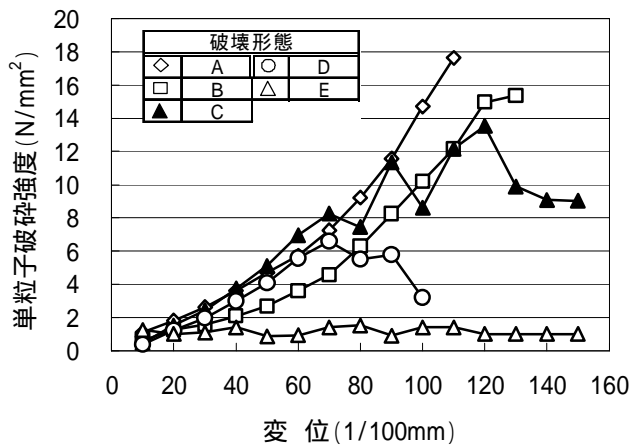


図8 単粒子破砕試験の変位と強度

砕する。

(3) 破碎形態C

試験の最初は破碎形態A、Bと同様、強度と変位が直線的に増加する。その後、数回のピークを経て粒子は小さな破片を伴って粒子は2~3個に割裂し、破碎する。この数回の強度のピークは、内部の微小なクラックの破碎、もしくは粒子表面の小さな部分の剥離によるものと考えられる。

(4) 破碎形態D

最初に強度の増加は見られるものの、数回のピークを経ながら強度は徐々に低下していく。粒子は数個の小さな破片に破碎する。この数回の強度のピークの原因は、(3)で述べたクラックや剥離と考えられる。しかし、破碎形態Cに比べて粒子内部のクラックが大きいか、もしくはクラックの数が多いために強度の増加が小さく、かつ多くの個数に割裂したのと考えられる。

(5) 破碎形態E

変位の増加に対して強度の増加はほとんど見られず、粒子表面が少しずつ、つぶれるように剥離して破碎点が特定できない。この原因は、練り混ぜ不足やセメントの水和反応が十分でなかったことが考えられる。

図9は各種の配合の造粒石炭灰の破碎形態の割合を示している。破碎形態Aは、いずれのセメントの混合率や粒径のものに関わらず20%~35%の割合で存在している。セメントの混合率が少ないほど破碎形態Aの割合が増加する傾向がある。この原因としては、強度は小さいながらも、ひとつの粒子として強度が均一でクラックが少ないことを示している。

破碎形態Bは、セメント混合率の多い3%、5%では破碎形態Aより多くなっている。しかし、セメント混合率の少ない1%では破碎形態Aより少ない。この破碎形態Bと破碎形態Aの合計で破碎形態の約半数以上を占めている。

破碎形態Cは、セメント混合率3%と5%において、粒径が大きくなるに従い減少する傾向にある。しかし、セメント混合率が1%では逆に増加している。これは、石炭灰粒子の内部での強度の不均一が原因と思われる。

破碎形態Dが、特に大きな割合を占めているのはセメント5%の粒径5~10mmと、セメント1%の粒径10~15mmと15mm以上である。この配合は最も高強度と低強度の配合および粒径であり、破碎形態Cと同様の石炭

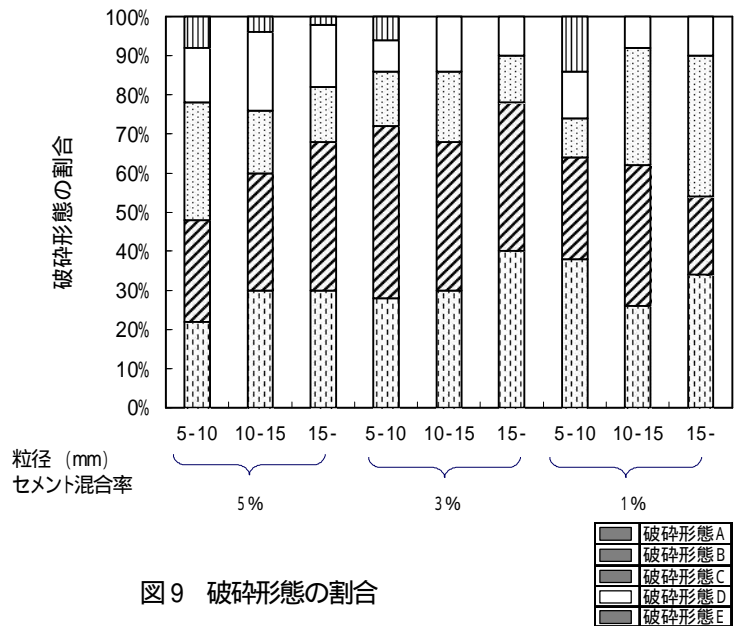


図9 破碎形態の割合

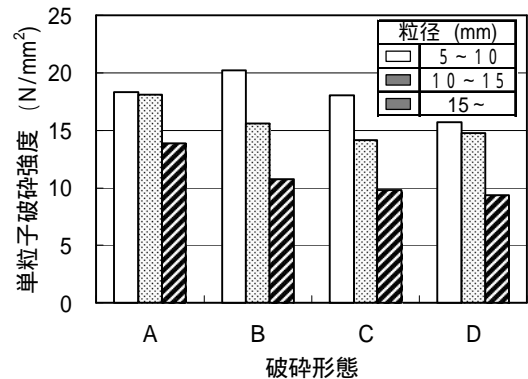


図10 造粒石炭灰の強度と破碎形態の関係 (セメント混合率1%)

灰粒子の内部での強度の不均一が原因と思われる。

最後に破碎形態Eは、事例としては大変少ない破碎形態である。セメント混合率5%と粒径の小さな造粒石炭灰で生じている。この原因はミキサーでの混合が充分行われず、セメントが石炭灰粒子にいきわたらず、粒子そのものの強度増加が見られなかった結果である。

次に、造粒石炭灰の強度と破碎形態の関係を示したものが図10である。なお、ここでは破碎形態Eの強度が求められないことから掲載していない。図によると造粒石炭灰の粒径により多少の凹凸は見られるが、全般的に破碎時に数多くの粒子に破碎される破碎形態ほど単粒子破碎強度は小さくなるのがわかる。

図11は造粒石炭灰の破碎ひずみを示している。セメント混合率が多い配合の3%と5%の造粒石炭灰は剛性が高

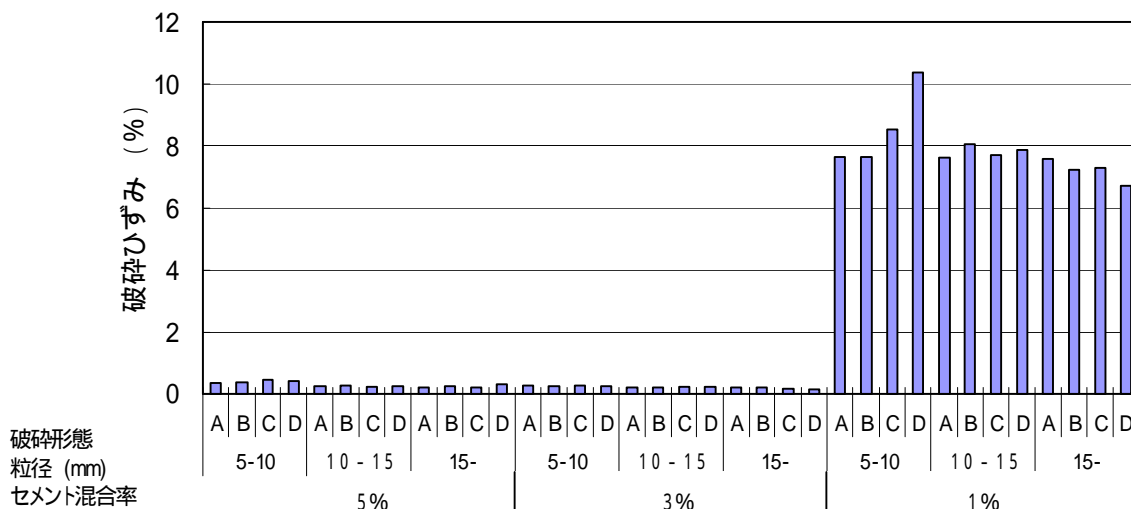


図 11 造粒石炭灰の破砕ひずみ

く、破砕ひずみは0.5%以下の大変小さな値である。しかし、セメント混合率が1%になると、破砕ひずみは約7~10%と飛躍的に増加する。このことは破砕強度が小さいにも関わらず変形が大きいことを表しており、ローラー転圧などの締固めにより造粒石炭灰粒子が破砕し、密度の増加が期待できるため、道路用材や盛土などの建設材料として適用できる可能性が高いものと考えられる。

3.2 吸水率試験

図 12 は造粒石炭灰のセメント混合率と吸水率の関係を示している。すべての粒径において、セメント混合率の増加に伴い吸水率は減少している。セメント混合率が1%と3%の造粒石炭灰の吸水率はいずれの粒径でも約40~43%のほぼ一定の値であるのに比べ、セメント混合率が5%のものの吸水率は小さくなる。

図 13 は造粒石炭灰の粒径と吸水率の関係である。セメント混合率が1%と3%の造粒石炭灰は粒径の違いによる吸水率の変化は少なく、概ね43%の一定値である。一方、セメント混合率が5%と市販の造粒石炭灰は良く似た傾向であり、細粒の2~5mmの吸水率は35%と小さいが、粒径が大きくなるに伴い吸水率が増加し、15mm以上の粒子では約8%大きな吸水率で、セメント混合率の小さいものと同じ値を示している。

この粗粒の造粒石炭灰ほど、また、セメント混合率の小さなものほど吸水率が多くなる原因は、固化の程度が小さい造粒石炭灰ほど吸水量が多いこと、および粒径の小さな粒子ほど構造が緻密でクラックが少なく、空隙が少ないためと考えられる。

造粒石炭灰の吸水率は、一般の骨材や砕石に比べると

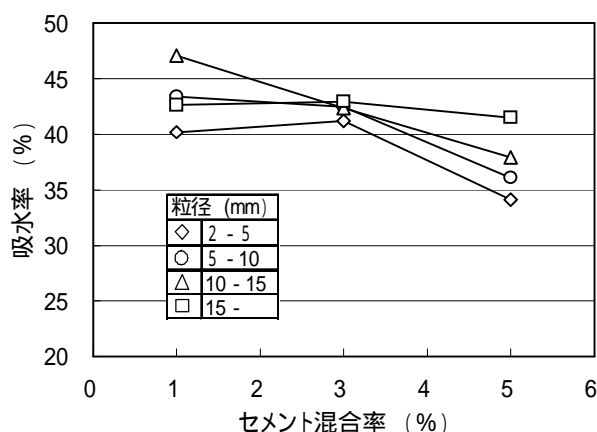


図 12 セメント混合率と吸水率の関係

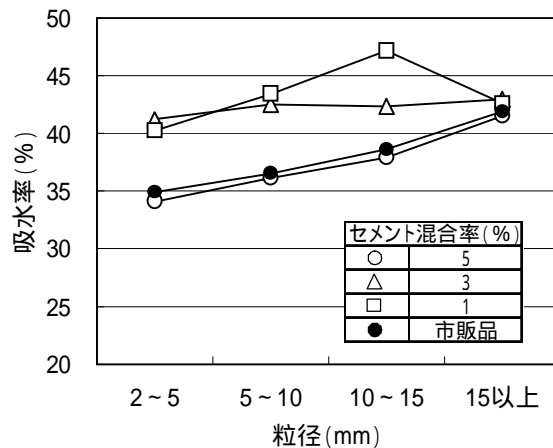


図 13 造粒石炭灰の粒径と吸水率の関係

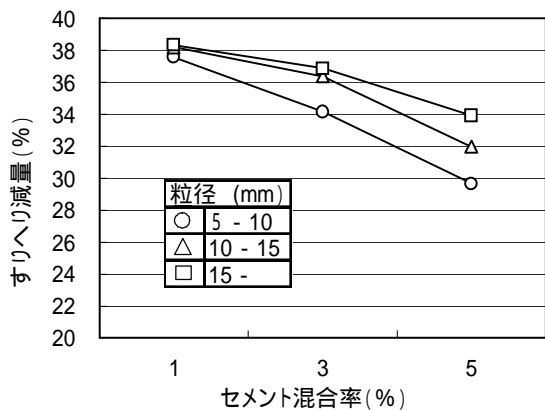


図14 造粒石炭灰のセメント混合率とすりへり減量の関係

数倍から数十倍の大きな値であり、含水比の低下を目的とする土質安定材としての適用が可能と考えられる。

3.3 すりへり減量試験

図14は造粒石炭灰のセメント混合率とすりへり減量の関係を示している。セメント混合率1%では、いずれの粒径の造粒石炭灰のすりへり減量も約38%でほぼ同じ値である。しかし、セメント混合率を3%、5%と増やすと、すりへり減量は小さくなり、5%では30~34%の値になる。

図15は造粒石炭灰の粒径とすりへり減量の関係を示している。セメント混合率が1%の造粒石炭灰のすりへり減量は約38%と大きく、いずれの粒径でもほぼ同じ値である。しかし、セメント混合率が3%、5%と増加すると、粒径によってすりへり減量が異なり、小さい粒径ほどすりへり減量は少なくなる。

一般に、低強度・多孔質で吸水率の大きい材料ほどすりへり減量は大きいことから、セメント混合率が小さい、あるいは粒径の大きな造粒石炭灰のすりへり減量が大きくなったものである。

また、同じセメント混合率5%の造粒石炭灰と市販品を比べると、1~2%ではあるが市販品のすりへり減量が小さくなっている。これは整形時の練り混ぜ水が少ない結果と考えられる。

図16は造粒石炭灰のすりへり試験の回数とすりへり減量の関係である。すりへり減量はセメント混合率に応じて、すりへり試験の回数に比例していることがわかる。すなわち、造粒石炭灰のすりへり抵抗は、粒子の表面と内部とに違いがないことを示している。

4. 結論

粉塵の発生やハンドリングなどに問題がある石炭灰をセメントの混合により固化した造粒石炭灰を建設材料と

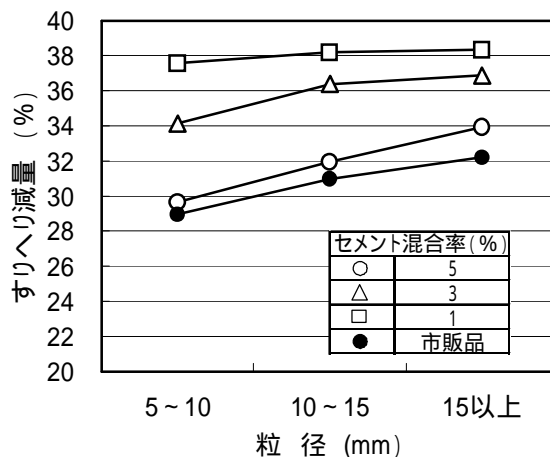


図15 造粒石炭灰の粒径とすりへり減量の関係

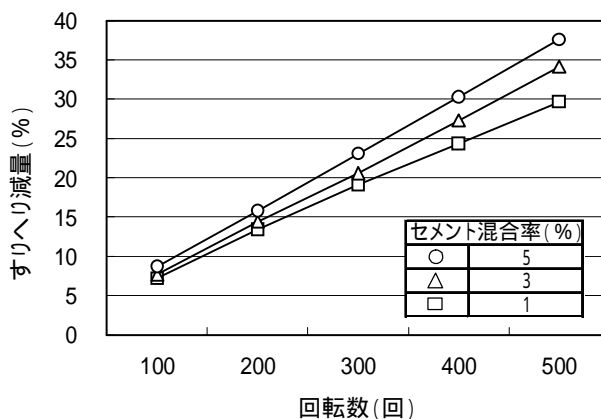


図16 すりへり試験の回数とすりへり減量の関係

して利用するために、単粒子破碎強度、吸水率およびすりへり減量試験を行って工学的性質を追究した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 造粒石炭灰の単粒子破碎強度は、セメント混合率の多いものほど、また粒径の小さいものほど大きい。
- (2) セメント混合率5%の造粒石炭灰の単粒子破碎強度は、コンクリートとほぼ同じ27N/mm²になり、路盤材のような粗粒材として適用できる。
- (3) セメント混合率1%の造粒石炭灰の単粒子破碎強度は、11N/mm²程度で小さく、締固めによる密度増加が期待できるため、道路用材や盛土などの建設材料として適用の可能性が高い。
- (4) 単粒子破碎試験では5種類の破碎形態が見られた。この破碎形態は、粒子の強度や均一性、粒径、内部クラックの有無およびセメントの水和反応などによって異なる。そして、大きく数少ない破片に割れるものほど強度は大きい。
- (5) セメント混合率1%と3%の造粒石炭灰の吸水率は約42%と大きい。一方、セメント混合率5%のものは粒

径によって異なり、35% (粒径 2~5mm) ~42% (粒径 15mm 以上) の範囲であり、一般の骨材や碎石に比べると数倍から数十倍の大きな値であり、土質安定材としての適用が可能と考えられる。

- (6) セメント混合率 1% の少量では、造粒石炭灰のすりへり減量は約 38% である。そして、セメント混合率が 5% までの増加に伴いすりへり減量は 30% 程度にまで減少する。
- (7) 造粒石炭灰のすりへり減量は、粒径が小さくなるに伴い減少する。その理由は、細粒の造粒石炭灰は構造が緻密で強度が均一で、空隙やクラックが少ないためである。

参考文献

- 1) (財)石炭利用総合センター：石炭灰全国実態調査報告書 (平成 12 年度) 2002.
- 2) (財)石炭利用総合センター：石炭灰有効利用の動向について、2002.
- 3) 土木学会エネルギー土木委員会：石炭灰有効利用技術について - 循環型社会を目指して -、2003.
- 4) 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.
- 5) 福本武明、原 健夫：粒状土の粒子強度分布に関する研究、土木工学会論文集、No. 596、/ 43、pp.91~99、1998.
- 6) 城まゆみ、里 優：点載荷試験における強度推定法の提案、土木学会第 51 回年次学術講演会、pp.700~701、1996.
- 7) 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、土木工学会論文集、No. 673、/ 54、pp.189~194、2001.