

強熱減量と拘束圧依存性に着目したフライアッシュの自硬性

東急建設株式会社 正会員 小笠原 広志  
 北海道大学大学院 正会員 澁谷 啓  
 北海道大学大学院 フェロー 三田地 利之  
 北海道大学大学院 学生員 梶原 大輔

1.はじめに

フライアッシュの工学的特性は石炭の採取地による炭種や発電所のボイラ特性の影響を受けることが知られている。本研究では、フライアッシュ造成地盤に構造物を建設するなどその跡地利用を進めるための技術的課題の解決、およびフライアッシュの自硬性および時硬性のメカニズムを把握することを目的に、フライアッシュの工学的特性、とりわけ強度・変形特性を調べた。

2.試験概要

本試験では、北海道電力苫東厚真発電所1号機及び2号機から排出された5種類の新生灰を用いた。表1に基本物性値を示す。供試体は、最適含水比に調整した試料を  $\phi=50\text{mm}$ ,  $h=150\text{mm}$  のモールドを用いて最大乾燥密度にほぼ等しくなるように  $h=100\text{mm}$  まで静的に締固め作成した<sup>1),2)</sup>。作成した供試体はラップに包み養生させた。また、フライアッシュを電気マuffle炉にて 750 で質量が一定になるまで燃焼させ、強熱減量(li)=0%とした試料を作成した。

3.試験結果および考察

(1)材齢の影響(一軸圧縮試験)

表2に一軸圧縮試験の結果を示す。炭種によって短期間における強度増加の割合に違いがみられた。また、炭種によらず長期養生によって一軸圧縮強さの微増が確認された。一方、変形係数はliの値が大きい炭種の  $E_{50}$  値は 40MPa 前後であるのに対し、liの値が低い3種類の炭種に関しては、最も低い  $E_{50}$  値が 100MPa 程度であり一軸圧縮強さが大きい炭種ほど  $E_{50}$  値が大きくなった。これより、変形係数はフライアッシュのliの影響を大きく受けると推測できる。

(2)強度発現性に及ぼす強熱減量の影響(一軸圧縮試験)

li=0%としたフライアッシュの供試体を用いて一軸圧縮試験を実施した。図1は原灰とli=0%とした灰の一軸圧縮強さ-材齢関係の比較である。li=0%にすることによって、どの炭種においても強度の増加が見られた。また、BC/GBとMO/OBを比べた場合、一軸圧縮強さは酸化カルシウム含有量に必ずしも依存しない。これは、炭種の成分やボイラの燃焼温度の違いによる影響等によるものと考えられる。しかしながら、新生灰の品質管理においてliの大小は力学特性を支配する重要な指標と言えよう。

(3)三軸試験による強度・変形特性

TU/WE・BC/GB・MTの3種類のフライアッシュ供試体(材齢7日)を用いて等方圧密応力  $\sigma'_c$  を 100~600kPa の範囲で圧密非排水三軸試験を実施した。また、拘束圧とセメンテーションの損傷の程度との関係性を調べることを目的として、同様の範囲で拘束圧を増加させた後、低拘束圧(10kPa)まで除荷した状態にて圧縮試験を行った。なお、 $\sigma'_c=0\text{kPa}$  は一軸圧縮試験の結果を用いた。

表1 試料の基本物性値

炭種	BC/GB	TU/WE	MT	MO/OB	TU/BE/BA
	ベアキニオン(炭種)30% グレンバヤ(インドネシア)30%	ツツメ(ロシア)60% ウェストリッジ(炭種)40%	マウントオーウェン(炭種)100%	モーク(炭種)50% オベト(カナダ)50%	ツツメ(ロシア)40% ベンガラ(炭種)40% フレアール(炭種)20%
発電炉	2号機	2号機	2号機	1号機	1号機
石炭灰採取日	H11.11.18	H11.7.17	H12.6.29	H8.11.末	H13.2.15
SiO <sub>2</sub> (%)	52.6	59.1	60.3	48.5	48.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	21.9	19.2	22.3	19.1	19.1
CaO(%)	4.9	2.8	2.3	5.6	2.4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	7.6	8.0	5.0	4.6	5.6
MgO(%)	1.3	1.1	0.6	1.1	0.8
Na <sub>2</sub> O(%)	1.4	0.5	0.3	0.7	0.2
K <sub>2</sub> O(%)	2.0	1.0	1.4	0.9	1.1
SO <sub>3</sub> (%)	0.7	2.4	0.2	0.7	0.3
ig.loss(%)	2.3	1.7	2.0	14.3	11.1
w <sub>opt</sub> (%)	16.8	15.9	21.2	37.5	31.4
$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.55	1.57	1.31	1.02	1.12
$\rho_c$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.39	2.43	2.16	2.18	2.20

表2 一軸圧縮試験結果

炭種	BC/GB	TU/WE	MT	MO/OB	TU/BE/BA
	ベアキニオン(炭種)30% グレンバヤ(インドネシア)30%	ツツメ(ロシア)60% ウェストリッジ(炭種)40%	マウントオーウェン(炭種)100%	モーク(炭種)50% オベト(カナダ)50%	ツツメ(ロシア)40% ベンガラ(炭種)40% フレアール(炭種)20%
発電炉	2号機	2号機	2号機	1号機	1号機
ig.loss(%)	2.3	1.7	2.0	14.3	11.1
q <sub>u</sub> (kPa)	838.7	219.0	170.0	300.1	204.4
q <sub>u50</sub> (kPa)	1052.0	393.8	214.0	429.3	245.2
E <sub>50</sub> (MPa)	429	173	128	23	32

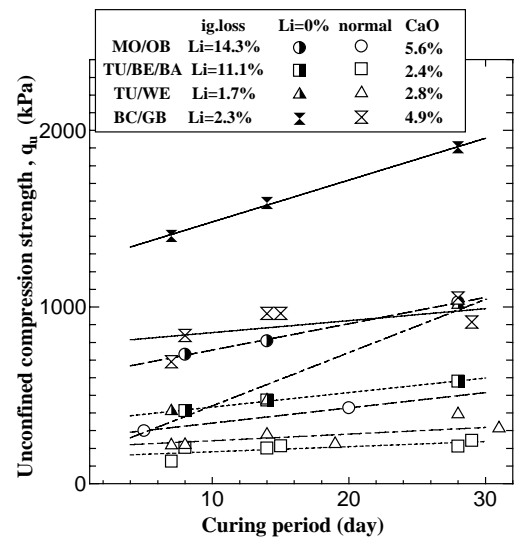


図1 強熱減量の影響による一軸圧縮強さ-材齢関係

キーワード フライアッシュ, 自硬性, 強熱減量, セメンテーション, 拘束圧履歴

連絡先 〒150-8340 東京都渋谷区渋谷 1-16-14 渋谷地下鉄ビル 東急建設株式会社 tel 03-5466-5005

図2は圧縮強さ-圧密応力関係である。BC/GBは圧密応力の増加に伴い圧縮強さ( $q_{max}$ )が増加し、 $\sigma'_c$ の増加につれ $q_{max}$ の増加の割合が減少している。TU/WEは $\sigma'_c$ が100~200kPaの間で $q_{max}$ が減少し、それ以降は $\sigma'_c$ の増加に伴い $q_{max}$ が増加している。これは拘束圧を載荷することによって供試体内のセメンテーションが損傷し、 $\sigma'_c$ が100~200kPa付近にてセメンテーションの損失による強度低下と有効拘束圧の増加による高密度化に伴う強度増加とのバランスが逆転したため $q_{max}$ が減少したのではないかと考えられる。一方MTは $\sigma'_c=100$ kPa付近では $q_{max}$ がほとんど増加していないが、それ以降は $\sigma'_c$ の増加に伴い $q_{max}$ が増加していることが見て取れる。しかしながら、MTは水中にて養生を行うと供試体が崩壊してしまうことから、通水を行うと $\sigma'_c=0$ kPaにおいては実際には $q_{max}$ が小さくなるものと予想され、 $q_{max}$ はほぼ直線的に上昇するものと考えられる。これらの結果は炭種によるセメンテーションの結合度の違いや損傷過程を鮮明に表しているのではないかと考えられる。図3は圧縮試験における $q_{max}$ を $\sigma_{ps}$ (プレストレス:せん断前に受けた有効拘束圧の最大値)に対してプロットしたものである。BC/GBの $q_{max}$ が微増しているのは、ポゾラン反応による時硬性の余地がまだ存在していたため拘束圧によって均質化した際に固化反応が起こったためと考えられる。一方セメンテーションの損傷が起きた2種類のフライアッシュは、プレストレスの影響をほとんど受けずほぼ一定の値を示した。これらの結果より、 $q_{max}$ はセメンテーションの損傷の程度や地盤の拘束圧、時硬性等の影響を複合的に受けるのではないかと考えられる。

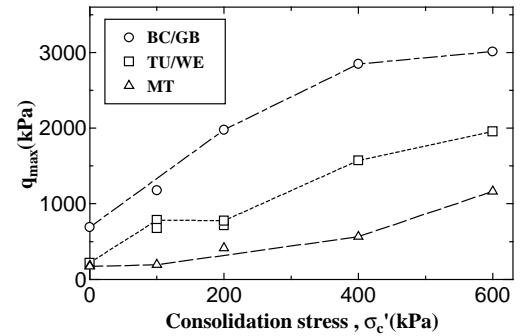


図2 圧縮強さ-圧密応力関係

図4は0.002%以下の範囲内での初期ヤング係数( $E_{initial}$ )の変化を $\sigma'_c$ に対してプロットしたものである。 $E_{initial}$ は $\sigma'_c$ の増加に伴い直線的に増加し、 $E_{initial}/\sigma'_c$ は炭種によらずほぼ一定の値を示した。図5は $E_{initial}$ の変化を $\sigma_{ps}$ に対してプロットしたものである。BC/GBは拘束圧によって均質化した際に固化反応し、そのため拘束圧を除荷しても剛性が低下しなかったため $E_{initial}$ が増加したと考えられる。しかし、セメンテーションの低いフライアッシュの $E_{initial}$ はプレストレスの影響をほとんど受けずにほぼ一定の値をとっている。このため、剛性に与える影響はフライアッシュの時硬性の強弱と現時点における拘束圧の大きさが重要であろう。

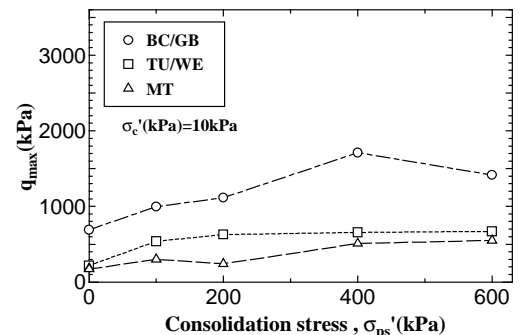


図3 圧縮強さ-プレストレス関係

4.まとめ

- (1)フライアッシュの自硬性は、微量の未燃焼分がその自硬性を妨げるためliが重要であるが、同程度のliにもかかわらずフライアッシュの強度増加発現性は大きく異なる場合がある。現実問題としてliの値を限りなく0にすることは困難であるため、有効利用を促進させるためには、その品質管理の段階にて十分な配慮が必要であろう。
- (2)フライアッシュは拘束圧の増加によりセメンテーションが損傷し、強度や変形係数の低下を引き起こす一方、有効拘束圧の増加による高密度化によって材料の均質化による強度増加が進むと考えられる。原地盤内においてはこの2つの要素が複合的に作用し、セメンテーションの強さが強度・変形特性を大きく変えるため、炭種ごとのセメンテーションの強さを把握することが、フライアッシュを有効利用するための品質管理を行う際の重要な指標の一つとなる。

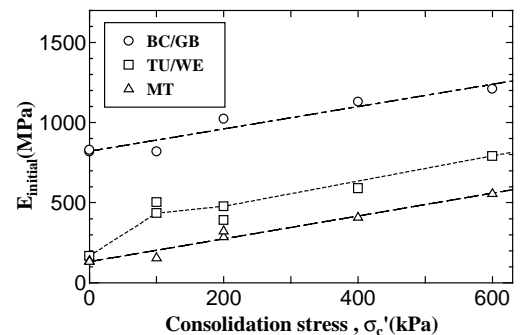


図4 初期ヤング係数-圧密応力関係

【参考文献】

1)片岡ら:締固めた石炭灰の強度特性,第26回土質工学会発表会講演集,pp.1883-1884,1991. 2)佐野ら:養生条件の違いが締固めた石炭灰供試体の一軸圧縮強さおよび体積変化に及ぼす影響,土木学会論文集 No.463/-22,pp.45-53,1993.

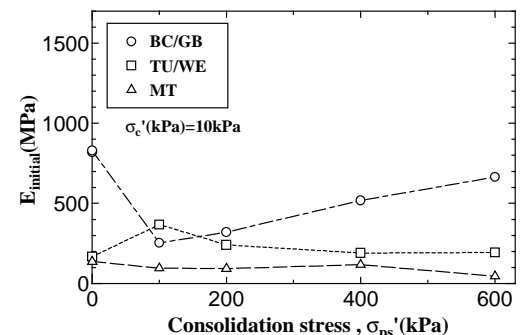


図5 初期ヤング係数-プレストレス関係