

# 締固めた石炭灰の力学的性質

亀井 健史\*, 志比 利秀\*, 松尾 和俊\*\*

\*島根大学総合理工学部 地球資源環境学科

\*\*島根大学大学院総合理工学研究科 地球資源環境学専攻

## Mechanical Properties of Compacted Coal Ash

Takeshi KAMEI\*, Toshihide SHIBI\* and Kazutoshi MATSUO\*\*

\*Department of Geoscience, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University

\*\*Department of Geoscience, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering,  
Graduate School of Shimane University

### Abstract

Utilization of coal ash as a geomaterial solves a solid waste problem and provides needed construction material. Waste disposal problems are becoming acute in the urban environment, because it is here that most coal-fired generating plants are located, and where the supply of natural construction aggregate is becoming scarce. This paper presents the mechanical properties of compacted coal ash. The samples were compacted using the JIS 1210 procedure. Sample strengths were determined by unconfined compression tests immediately following compaction. The unconfined compressive strength of the samples drops off sharply on the wet side of optimum water content, whereas on the dry side, the unconfined compressive strength is affected less by moulding water content and more by dry density (a reflection of the blow count or compactive effort used). The utilization of coal ash would help alleviate the disposal problems encountered at incineration plants, while reducing the demand for natural aggregates.

### 1. はじめに

わが国における今後の電力需要は、内需を中心とした安定的な経済成長、経済社会や国民生活の高度化等を反映して、中長期的には着実に増加していくものと考えられる。現在の電力事情を発電方法別にみると石炭火力発電の占める割合は大きく、1998年度に電力事業から発生した石炭灰の量は503万トンにも達している。今後も発電所の増設および発電量の拡大が見込まれることから、石炭灰の発生量が増大することは確実な状況と考えられている<sup>1)</sup>。

現在、わが国の石炭灰発生量の約70%は、有効利用されているが、その残りの約3割は、埋立て処分されている<sup>1)</sup>。しかしながら、今後は大規模な石炭灰の処分場の確保が困難になりつつあることや地球規模の環境問題を考慮した場合、再資源としての石炭灰の有効利用拡大が急務であるといえる。

石炭灰の有効利用としては、コンクリートへの混和材としての利用が早くから進められてきた。その結果、石炭灰の有効利用全体の約7割をセメント・コンクリート

分野が占めており、続いて土木・建築分野、農林、水産分野となっている。とくに、地球環境問題と資源リサイクルの観点から、1991年に「再生資源の利用の促進に関する法律」が制定され、石炭灰が指定副産物に定められて以来、石炭灰の有効利用の拡大・開発が進められている。

石炭灰は、通常の土質材料と比較して比重が小さく、また、自硬性を有するなどの物理・化学特性を有しており、適度な水分下で十分な締固めを行えば、日数の経過に伴ってせん断強さの増加および圧縮性や透水性の減少等の工学的特性が変化する性質を有している<sup>2)~4)</sup>。このような観点から、現在石炭灰は道路の路盤・路床材料あるいは埋立および盛土材料等として徐々に実用化されてきている。しかしながら、その締固め特性や力学的特性はまだ不明な点が多く、解明すべき点が多く残されている。

これまで、土の締固めについては、数多くの研究例が報告されている。その中でもProctor<sup>5)</sup>は、土粒子間の水の毛管作用と潤滑作用に着目して締固め曲線について説明している。すなわち、低含水比の状態では土粒子相互

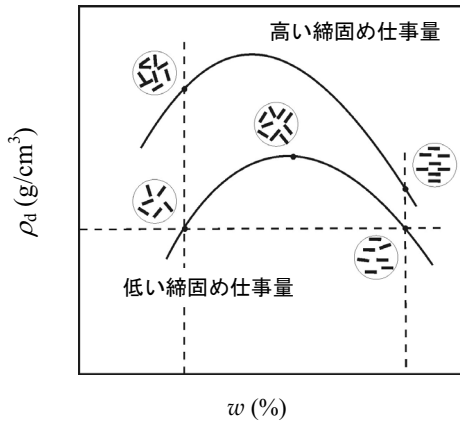


図-1 土の締めめ曲線と土構造の関係<sup>6), 7)</sup>

を取りまく薄い水膜が互いに接触した際に働く毛管張力によって、土粒子が互いに強く引きつけ合わされているため、締めめ外力に抵抗して密な状態になりやすく、密度が高くないものの締めめた土の強さは増大する。また、含水比が高まるのに伴い土粒子表面の水膜の厚みも増し、接触部の毛管張力も急激に減少し、水膜の存在が土粒子の相互の移動に対して、潤滑作用を示すようになるため、土は塑性を増し、締めめに伴う土粒子の密な状態への配置換えが容易になるものと考察している。最適含水比を超える場合には、土粒子のかわりに水を取り込むこととなるので最適含水比における最大乾燥密度を頂点として締めめ曲線は下降するものと考えている。

また、Lambe<sup>6), 7)</sup>は、細粒土の締めめ曲線の形状を粘土粒子の界面化学現象に基づいて考察している(図-1)。すなわち、低含水比領域では、粘土粒子間の電気的反発力が小さいことから、粘土粒子はランダムに結合し合っており、いわゆる綿毛構造を形成している。したがって細粒土は、締めめに際し低い乾燥密度となる。一方、含水比が増すと、間隙水の電解質濃度が低下し、それに伴い電気二重層が十分に発達すると、土粒子間の電気的反発力が高まることとなる。その場合、粘土が分散構造を呈するようになり、互いの配置換えが容易になることから、細粒土の乾燥密度が高くなると説明している。

図-2は、締めめ仕事量を変えてシルト質土程度の細粒分を含んだ土を、含水比を変えて締めめた場合の締めめ曲線、ならびに対応する強度(一軸圧縮強さ、変形係数)の変化傾向を模式的に示したものである。図-2(a)より、乾燥密度は、含水比が小さな範囲では含水比の増加に伴って徐々に増加していき、その後最適含水比近傍において最大乾燥密度となる。含水比が最適含水比を超える場合には、含水比の増加に伴い乾燥密度は低下する。一方、締めめた土の強度の極大値は、一般に図-2(b)のように最適含水比より低い、乾燥側の含水比(最適含水比の95%程度)で生じるとされている。したがって、最適含水比、最大乾燥密度の状態では、強度が既に低下傾向にあり、

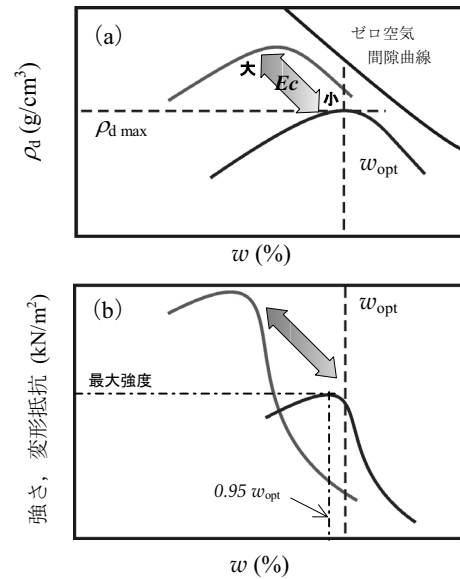


図-2 土の締めめ曲線および締めめ含水比と土の強度・変形特性の関係の概念<sup>8)</sup>

塑性を増しつつある領域であることを意味している<sup>8)</sup>。

一方、石炭灰の締めめ特性について検討した研究例として、鳥居ほか<sup>4)</sup>は、締めめた石炭灰の強度発現を検討するために、締めめた石炭灰供試体に対して一軸圧縮試験を行い、さらに供試体内の反応生成物を観察している。その結果、締めめた石炭灰の強度発現が、石炭灰中に含有されている遊離石灰および無水石膏に起因するものであり、これらの水溶性成分が間隙水中に溶出する過程で石炭灰の粒子表面においてエトリンタイトの生成反応が進行することを報告している。佐野ほか<sup>3)</sup>は、締めめた石炭灰供試体の一軸圧縮強さや体積変化率は石炭灰中の酸化カルシウム含有量によって大きく異なり、酸化カルシウム含有量が多いほど一軸圧縮強さは大きくなるものの、体積変化率も大きくなることを実験的に示している。さらに、石炭灰を締めめる場合、含水比調整の際に2回に分けて加水することによって最適含水比および最大乾燥密度が変化することも明らかとなっている<sup>9)</sup>。また、石炭灰の試料調製時のミキサーによる攪拌時間の違いも石炭灰の締めめ特性に影響を及ぼすこと<sup>10), 11)</sup>や、その排出された火力発電所ごとに締めめ特性が異なることがすでに報告されている<sup>12)</sup>。

このように石炭灰を道路の路盤・路床材料、埋立および盛土材料等として有効利用するための研究は、数多くなされている。しかしながら、石炭灰単体を用いた締めめにおいて、締めめ仕事量の違いが一軸圧縮強さに及ぼす影響を明確に示した研究例は少ない。また、締めめ特性とその強度・変形特性について定量的な評価がなされていないのが現状である。

本研究では、石炭灰試料に対して、種々の締めめ仕事量を用いて、突固めによる締めめ試験を行い、石炭灰の

表-1 石炭灰の物理的特性

| $\rho_s$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $w_L$ | $w_P$ | $I_P$ | Sand<br>(%) | Silt<br>(%) | Clay<br>(%) |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|
| 2.170                            | NP    | NP    | NP    | 6.9         | 73.1        | 22.0        |

表-2 石炭灰の化学成分

| SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | SO <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-----------------|-------------------|------------------|
| 66.9             | 22.4                           | 4.28                           | 1.96 | 1.16 | 0.29            | 0.39              | 0.86             |

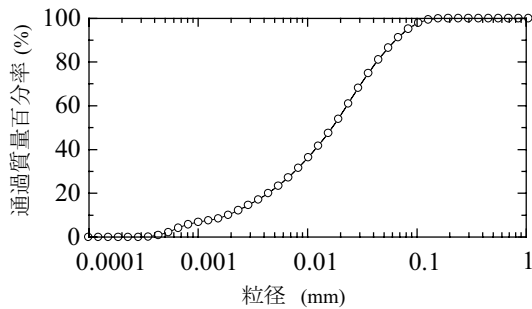


図-4 石炭灰の粒径加積曲線

締固め特性を明らかにしている。その際、得られた各締固めた石炭灰供試体に対して、一軸圧縮試験を実施することにより、石炭灰の締固め特性とその強度特性の関係も定量的に解明した。

## 2. 試料および実験方法

### 2.1 試料

石炭灰は、石炭火力発電所などで微粉炭を燃焼した後、に発生する残滓である。石炭灰は発生場所により、クリーンカーアッシュ、シンダーアッシュおよびフライアッシュの3種類に分類される。それぞれの発生比率は、クリーンカーアッシュでは2~30%、シンダーアッシュでは2~3%、フライアッシュでは70~90%である<sup>1)</sup>。

本研究では、中国電力(株)三隅火力発電所から産出したフライアッシュ(以後、石炭灰と呼ぶ)を使用した。表-1は、本研究で使用した石炭灰の物理的特性を示している。また、粒度分析結果を図-1に示す。粒径は74 $\mu$ m以下が80~90(%)を占めており、粒度による土の分類では、シルトに分類される。表-2は、石炭灰の化学成分を示している。石炭灰の主成分は、二酸化けい素(SiO<sub>2</sub>)および酸化アルミニウム(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)であり、酸化鉄(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)や酸化カルシウム(CaO)なども若干含んでいる。石炭灰は、SiO<sub>2</sub>とAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を主な組成とするポゾラン(天然産及び人工のシリカ質混合材)が、水酸化カルシウム(Ca(OH)<sub>2</sub>)と常温

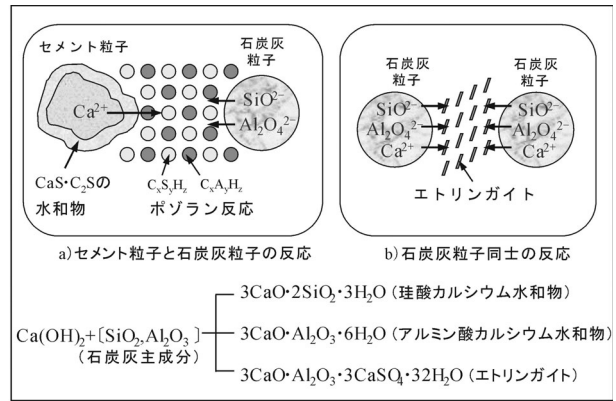


図-3 石炭灰のポゾラン反応

でゆっくり反応し、不溶性で硬化するシリカ質化合物を生成するポゾラン反応(図-3)を有する材料である。このポゾラン反応は、セメント粒子と石炭灰粒子の反応および石炭灰粒子同士の反応とがある。また、セメント水和時にSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>とH<sub>2</sub>Oが存在する場合、アルミネート相(アルミニウム酸カルシウム水和物: 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O)とこれらが反応し、針状結晶のエトリンガイトを析出する。このエトリンガイトはそれ自体で強度を発現し、セメント硬化体を膨張させる性質がある<sup>1)</sup>。

試料の含水比を調整する際、水質の違いが強度発現に悪影響を及ぼす可能性がある。本研究では、正確な石炭灰の締固め特性および力学的性質を把握するために不純物の混入していない蒸留水を使用した。

### 2.2 実験方法

供試体作製に際しては、鋳鉄製の二つ割りモールド( $\phi=50$ mm, H=100mm)を用いて、3層にわけて突固めによる締固めを行った。締固め仕事量( $E_c$ : compactive effort)の違いが石炭灰の締固め特性に及ぼす影響を明らかにするために、JIS A 1210<sup>13)</sup>およびJSF T 711<sup>14)</sup>のStandard Proctor ( $E_c \approx 0.55$ J/cm<sup>3</sup>)を基準として、その2倍(1.10 J/cm<sup>3</sup>  $\approx 2.0E_c$ )と、0.5倍(0.275 J/cm<sup>3</sup>  $\approx 0.5E_c$ )の3種類の締固め仕事量を用いて締固め試験を実施した。

試料の含水比調整方法は、本研究で使用した石炭灰の含水比が0.1%以下であることから、乾燥法を用いた。含水比調整後の石炭灰は、気密な容器に密封し、約12時間静置してから突き固めを行った。また、試料の使用方法は、石炭灰の粒子が破碎しやすいという特徴を有していることから、粒子破碎の影響が小さな非繰返し法を選択した。したがって、本研究では、突固めによる土の締固め試験法のb法(乾燥-非繰返し法)によって供試体を作製した。

作製した供試体は、モールドから丁寧に取り外し、湿潤密度を測定した。その後、自立する供試体に対して、一軸圧縮試験を実施した。一軸圧縮試験は、ひずみ制御

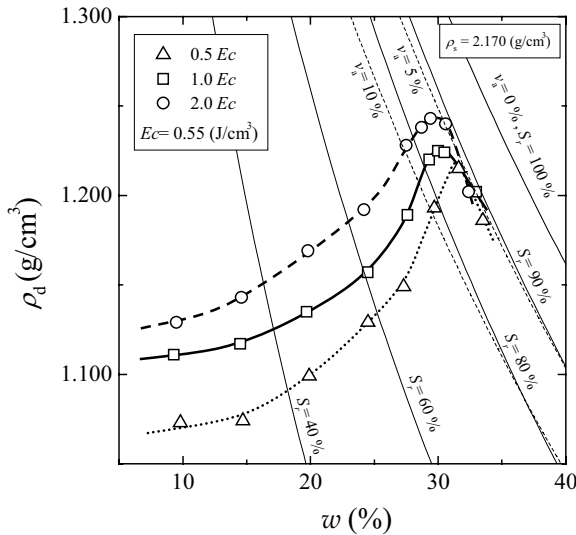


図-5 石炭灰の締固め曲線

表-3 石炭灰の最大乾燥密度と最適含水比

| 仕事量<br>$E_c = 0.55 \text{ (J/cm}^3\text{)}$ | 最大乾燥密度<br>$\rho_{dmax} \text{ (g/cm}^3\text{)}$ | 最適含水比<br>$w_{opt} \text{ (%)}$ |
|---|---|--------------------------------|
| 0.5 $E_c$                                   | 1.215   | 31.6                           |
| 1.0 $E_c$                                   | 1.225   | 30.1                           |
| 2.0 $E_c$                                   | 1.244   | 29.8                           |

方式で行い、せん断時のひずみ速度は 1%/min とした。強度変形特性に及ぼす端面摩擦の影響を軽減するため、上下加圧板の表面にシリコングリースを薄く塗布した。試験終了後、供試体の上部、中部、下部の含水比を測定し、結果の整理には、その平均値を用いた。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 締固め曲線

図-5 は、石炭灰を種々の締固め仕事量を用いて突固めた場合の締固め曲線を示している。基準の締固め仕事量 (1.0Ec) を用いて突固めた場合に注目すると、乾燥密度 ( $\rho_d$ ) は、含水比 ( $w$ ) が小さな範囲では  $w$  値の増加に伴って徐々に増加している。さらに  $w$  値が増加し、最適含水比 ( $w_{opt}=30.1\%$ ) 近傍に達すると乾燥密度は急激に増加した。そのときの最大乾燥密度 ( $\rho_{dmax}$ ) は、 $1.225\text{g/cm}^3$  であった。 $w$  値が  $w_{opt}$  値を超える場合には、 $w$  値の僅かな増加に伴い  $\rho_d$  値は急激に低下した。このような傾向は、石炭灰をいずれの締固め仕事量で突固めた場合にも認められた。なお、各締固め仕事量に対する石炭灰の  $w_{opt}$  値と  $\rho_{dmax}$  値を表-3 に示す。

各締固め仕事量条件下で得られた  $w_{opt}$  値と  $\rho_{dmax}$  値に着目すると、締固め仕事量の増加に伴って、飽和度 (Sr)

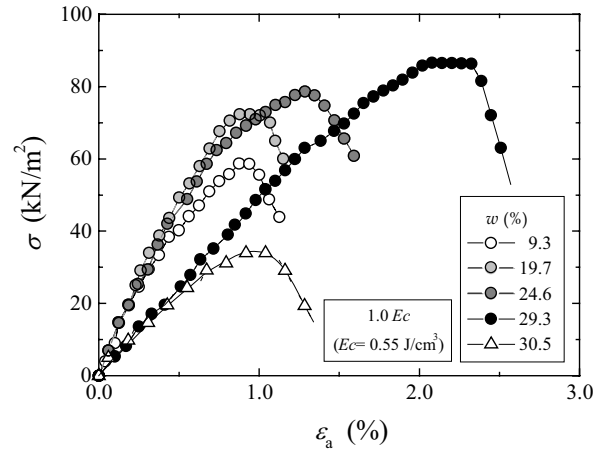


図-6 含水比の違いが応力-ひずみ曲線に及ぼす影響

が 85~90%、および空気間隙率 ( $v_a$ ) が 5% 程度の曲線に沿って  $w_{opt}$  値が減少し、 $\rho_{dmax}$  値は増加することがわかる。なお、本研究から得られた締固め曲線の傾向は、石炭灰を用いた他の報告例<sup>3), 11), 12), 15)</sup>と同様であった。以上のことから、石炭灰を締固める場合には含水比の調整や締固め密度の管理が非常に重要となるものと考えられる。

#### 3.2 含水比の違いが応力-ひずみ曲線に及ぼす影響

突固めによって作製した石炭灰供試体に対して、一軸圧縮試験を行い、締固めた石炭灰の一軸圧縮特性について検討を行った。図-6 は、種々の含水比 ( $w$ ) の試料を基準の締固め仕事量 (1.0Ec) で締固めた場合の応力-ひずみ曲線を示している。図より、応力値は軸ひずみの増加に伴って顕著な立ち上がりを示し、0.8~2.5%程度においてピーク値に達する。応力-ひずみ曲線にピークが認められた後、応力値は载荷の継続に伴い、急激に減少する。 $w$  値が最適含水比 ( $w_{opt}$ ) の 30.1% より小さな乾燥側に着目すると、 $w$  値が増加するのに伴い、一軸圧縮強さ ( $q_u$ ) も増加する傾向が認められる。また、 $w$  値が増加するのに伴い、破壊ひずみ ( $\epsilon_f$ ) も増加する傾向を示している。変形係数 ( $E_{50}$ ) は、 $w = 9.3\% \sim 24.6\%$  の試料に関しては一定値を示しているが、 $w_{opt}$  値近傍の  $w = 29.3\%$  の試料の場合には僅かな低下が認められた。

一方、 $w_{opt}$  値以上の湿潤側においては、 $q_u$  値が急激に減少しており、 $w = 30.5\%$  ( $\rho_d = 1.221\text{g/cm}^3$ ) の場合の  $q_u$  値は、乾燥側で  $\rho_d$  値がより小さな  $w = 9.3\%$  ( $\rho_d = 1.111\text{g/cm}^3$ ) の場合よりも小さな値となっている。さらに高含水比になると供試体は自立せず、一軸圧縮試験を実施できなかった。したがって、乾燥側に比べて湿潤側では、 $q_u$  値が著しく低下することがわかる。これらの要因については、高含水比になることで、供試体が軟化し、粘性が増したためであると考えられる。また、湿潤側に

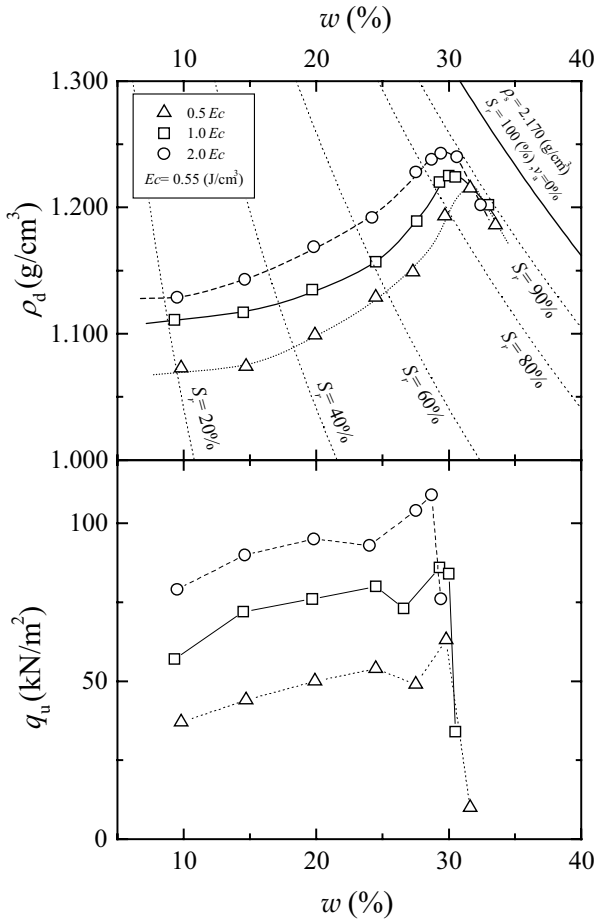


図-7 石炭灰の締固め特性と一軸圧縮強さ ( $q_u$ ) の関係

における  $E_{50}$  値は、乾燥側に比べて僅かに低下した。このような傾向は、いずれの締固め仕事量で突固めた試料においても認められた。

### 3.3 含水比と一軸圧縮強さの関係

締固め仕事量を変化させた場合の締固め曲線と一軸圧縮強さ ( $q_u$ ) の関係を図-7 に示す。図より、 $q_u$  値は、含水比 ( $w$ ) の増加に伴って徐々に増加し、最適含水比 ( $w_{opt}$ ) より僅かに小さな  $w$  値において、最大値を示している。この傾向は、締固め仕事量の違いによらず認められた。また、このような関係は、一般的な土の締固め特性と強度特性の関係<sup>16)</sup>とも一致するものである。このことは、 $w$  値の増加に伴って乾燥密度 ( $\rho_d$ ) が、増加していることが大きな要因であると考えられ、最大  $q_u$  値を与える  $w$  値より乾燥側では密な供試体ほど大きな  $q_u$  値が得られるものと考えられる。なお、 $w=25\%$  付近において、僅かな  $q_u$  値の低下が認められた。

その後、 $w$  値が  $w_{opt}$  値近傍に達すると、 $q_u$  値は急激な減少を示した。したがって、 $w_{opt}$  値および  $\rho_{dmax}$  値の状態は、既に強度が低下傾向にあり、塑性を増しつつある領域であると考えられる。なお、締固め試験では、配合含

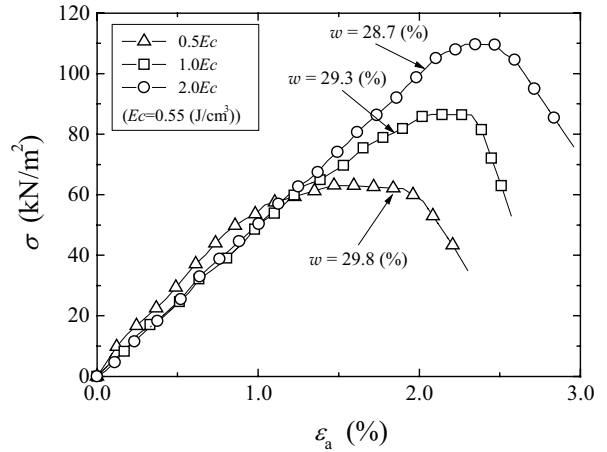


図-8 各締固め仕事量条件下で得られた最大強度時の応力-ひずみ曲線

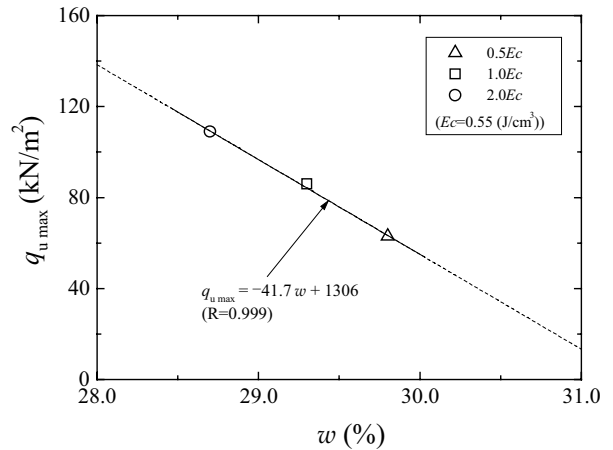


図-9 各締固め仕事量条件下で得られた最大強度と含水比の関係

水比 32%程度までの供試体に対して  $\rho_d$  値の測定が可能であったが、 $w_{opt}$  値を越えた湿潤側については自立できない供試体が存在し、一軸圧縮試験を実施できない場合も認められた。一般の土においても  $w_{opt}$  値近傍から湿潤側において、 $w$  値の増加に伴い  $q_u$  値が減少することが知られている<sup>16)</sup>。しかしながら、石炭灰を用いた場合に認められる  $w_{opt}$  値近傍での  $q_u$  値の低下は、一般の土と比べて著しくなることが明らかとなった。

つぎに、各締固め仕事量において、最大の  $q_u$  値を発現する場合の応力-ひずみ曲線について検討する (図-8)。図より、 $2.0Ec$  ( $w = 28.7\%$ ) の場合の  $q_u$  値は、 $1.0Ec$  ( $w = 29.3\%$ ) の場合の約 1.3 倍を示しており、 $0.5Ec$  ( $w = 29.8\%$ ) の場合の  $q_u$  値は、 $1.0Ec$  の場合の約 0.7 倍となっている。また、 $\epsilon_f$  値は、締固め仕事量の増加に伴い徐々に大きくなる傾向が認められた。しかしながら、 $E_{50}$  値に関しては、締固め仕事量の違いによる明瞭な差は認められなかった。上記の結果に基づき、各締固め仕事量における最大の  $q_u$  値とそのときの  $w$  値の関係を図-9 に示す。

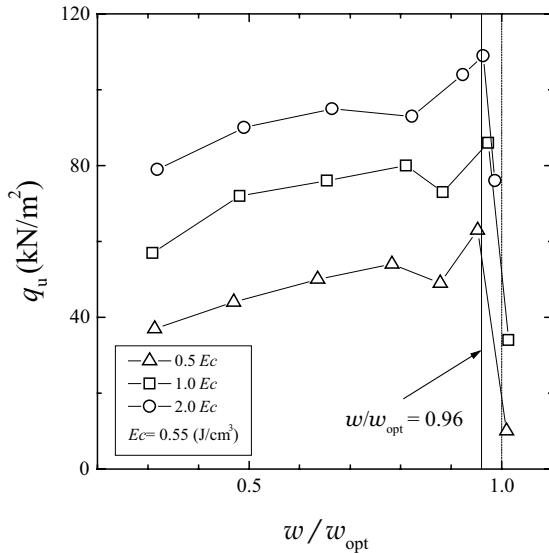


図-10 一軸圧縮強さ ( $q_u$ ) と  $w/w_{opt}$  の関係

図より、締固め仕事量が  $0.5Ec \sim 2.0Ec$  の範囲では、 $w$  値の減少に伴い、 $q_u$  値は直線的に増加しており、 $w$  値と最大の  $q_u$  値の間には、非常に高い相関関係が認められた。

とくに、各締固め仕事量の条件下で得られる最大の  $q_u$  値 ( $q_{u\max}$ ) とそのときの  $w$  値について検討するために、 $q_u$  値と  $w_{opt}$  値で正規化した  $w$  値 ( $w/w_{opt}$ ) との関係を図-10 に示す。図から、いずれの締固め仕事量で突固めた場合においても  $q_{u\max}$  値を示すのは、 $w/w_{opt} = 0.96$  程度であることが明らかとなった。このことから、石炭灰を締め固める場合には、締固め仕事量の違いによらず、 $w_{opt}$  値の 96% 程度の  $w$  値において締固めを行うことで、最も大きな強度が得られることが明らかとなった。このように  $w_{opt}$  値よりも僅かに小さな  $w$  値において、最大強度が得られるという関係は、一般的な土においても認められており<sup>16)</sup>、石炭灰においても締固めにおける  $w$  値の管理が非常に重要であることを示唆している。

### 3.4 飽和度と一軸圧縮強さの関係

図-10 は、種々の含水比 ( $w$ ) で締固めた石炭灰供試体の一軸圧縮強さ ( $q_u$ ) と飽和度 ( $S_r$ ) の関係を締固め曲線と関連付けて示している。図より、締固めた石炭灰は締固め仕事量の増加に伴い、 $q_u$  値も増加することがわかる。また、 $q_u$  値のピークは、いずれの締固め仕事量で突固めた場合においても、 $S_r$  値が 80% 程度において得られた。 $S_r = 80\%$  程度までは、 $S_r$  値の高い供試体ほど  $q_u$  値は、大きくなる傾向が確認できる。しかしながら、 $S_r = 80\%$  以上では  $q_u$  値の急激な減少が認められた。このような  $S_r = 80\%$  以上において  $q_u$  値が急激に減少する現象は、石炭灰を締め固めた後、養生した供試体においても確認されている<sup>15)</sup>。さらに、締固め仕事量の増加に伴い、 $q_u$  値が増加するという関係は、 $S_r = 80\%$  以上における急激な強度

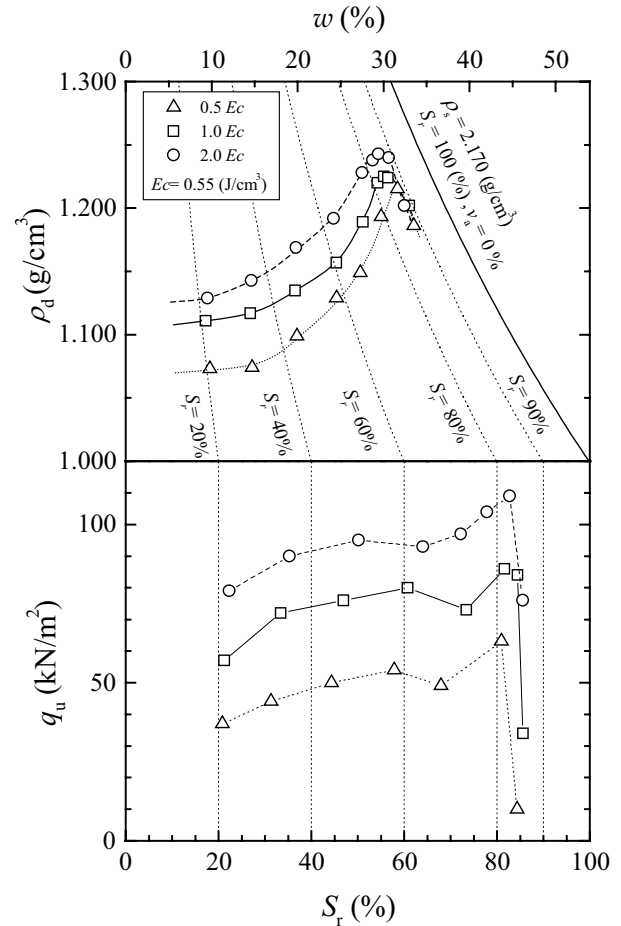


図-11 締固め曲線および一軸圧縮強さ ( $q_u$ ) と飽和度 ( $S_r$ ) の関係

低下時においても逆転しないことが認められた。

一方、 $S_r = 65 \sim 70\%$  において、 $q_u$  値の僅かな低下が認められる。これは、 $w = 25\%$  の周辺と対応しているが、 $q_u$  値の低下の明瞭な原因をつきとめることはできなかった。この  $q_u$  値の低下は、締固め仕事量の違いによらず発生しており、石炭灰自体の有する特徴であるものと考えられる。この  $S_r = 65 \sim 70\%$  付近における  $q_u$  値は、締固め仕事量の違いによらず最大  $q_u$  値の 0.8 倍程度である。 $S_r = 80\%$  以上において認められる急激な強度低下と比較すると、 $S_r = 65 \sim 70\%$  付近における  $q_u$  値の低下が締固めた石炭灰の一軸圧縮特性に及ぼす影響は、小さいものと考えられる。以上のことから、石炭灰を締め固める際には、 $S_r = 80\%$  以下において十分な管理を行うことで、目標となる強度を発現できるものと考えられる。したがって、使用する石炭灰の締固め特性および力学的性質を十分に把握し、施工することが重要となる。

## 4. 結論

本研究では、石炭灰の突固めによる締固め試験を実施し、石炭灰の締固め特性およびその強度特性について検討した。その結果、石炭灰の締固め特性とその力学的特

性の関係を定量的な観点から明らかにした。具体的には、締固めた石炭灰は、最適含水比よりも僅かに小さな含水比において、最大の一軸圧縮強さが得られ、一般的な土と同様の傾向が認められた。また、最適含水比近傍より湿潤側での一軸圧縮強さの減少は、一般的な土の場合と比べてきわめて顕著であることを実験的に示した。

### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、中国電力㈱より石炭灰を提供していただいた。また、松本麻美（元、島根大学学生）氏には、実験および結果の整理に多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 環境技術協会, 日本フライアッシュ協会編: 石炭灰ハンドブック (第3版), pp.20-36, 2000.
- 2) 土木学会・エネルギー土木委員会・新エネルギー技術小委員会: 石炭灰の土木材料としての利用技術の現状と将来展望—埋立, 盛土, 地盤改良—, 247p., 1990.
- 3) 佐野博昭, 山田幹雄, 太田 実, 山本三千昭: 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率に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.463/III-22, pp.45-53, 1993.
- 4) 鳥居和之, 川村満紀, 榎場重正: 締め固めた石炭灰における反応生成物と強度に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.372/V-5, pp.65-74, 1986.
- 5) Proctor, R. R.: Design and construction of rolled earth dams, Engineering News Record, Vol.111, pp.245-248, pp.286-289, pp.348-351, pp.372-376, 1933.
- 6) Lambe, T. W.: Structure of compacted clay, American Society of Civil Engineers, Vol.84, No.SM2, pp.1-34, 1958.
- 7) Lambe, T. W.: Structure of compacted clay, Transaction of American Society of Civil Engineers 125, pp.682-705, 1960.
- 8) 久野悟郎: 土の締固め, 土木学会誌, Vol.59, No.5, pp.18-22, 1974.
- 9) 堀内澄夫, 玉置克之, 尾上篤生, 後藤 茂: 石炭灰の土木材料としての利用に関する研究(その7)—分割添加スラリーの原理と適用性—, 第19回土質工学会研究発表会発表講演集, pp.591-592, 1984.
- 10) 堀内澄夫, 玉置克之, 尾上篤生, 後藤 茂: 石炭灰の締固め特性に及ぼす試料調製～突固め条件の影響, 土木学会第41回年次学術講演会講演概要集, pp.523-524, 1986.
- 11) 堀内澄夫, 高橋和敏, 菅野 勇: 石炭灰の締固め特性に及ぼす試料調整法の影響, 土木学会第42回年次学術講演会講演概要集, pp.702-703, 1987.
- 12) 今井五郎, 工藤正一, 片山 剛, 吉原信貴: 締固めた石炭灰の強度発現形態, 第20回土質工学研究発表会発表講演集, pp.1607-1610, 1985.
- 13) 財団法人 日本規格協会: JIS ハンドブック 12 土木 II, pp.678-681, 2002.
- 14) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説, 第5編 安定化試験, 突固めによる土の締固め試験, pp.201-210, 1990.
- 15) 三木五三郎, 今井五郎, 秋本 元, 村上一行, 土居洋一: 石炭灰の強度発現に関する実験的研究, 第19回土質工学研究発表会発表講演集, pp.1499-1500, 1984.
- 16) Seed, H. B. and Chan, C. K.: Structure and strength characteristics of compacted clays, Proceedings of American Society of Civil Engineers, Vol. 85, No.SM5, pp.87-125, 1959.