

一般廃棄物焼却灰の液状化特性

権藤清路¹・佐藤研一²・宮脇健太郎³・島岡隆行⁴

¹学生会員 福岡大学大学院 工学研究科建設材料工学専攻 (〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1)

²正会員 博士(工学) 福岡大学助教授 工学部土木工学科 (〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1)

³正会員 博士(工学) 福岡大学助手 工学部土木工学科 (〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1)

⁴正会員 工博 九州大学教授 工学研究院環境システム科学研究センター (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1)

近年我が国では、一般廃棄物処分場として海面埋立法が行われている。海面埋立は陸上と比べ、比較的緩い焼却灰の地盤が形成されていると考えられる。さらに陸上の埋立地と異なり、焼却灰が海面下にあるため飽和状態にある。この埋立地の跡地利用を考える場合、地震時の液状化による被害が危惧される。一方、一般廃棄物焼却灰は、カルシウム等の無機塩類を含んでおり、経時的に焼却灰に固結力が生じることが指摘されている。本研究では、まず飽和した焼却灰の液状化特性に及ぼす締固め度の影響を調べた。次に、焼却灰が有効利用される場合の環境を想定した方法によって、一定期間養生した供試体を用い、繰返しせん断試験を行った。その結果、焼却灰は十分な締固めにより液状化強度の増加が期待できると考えられる。また、養生方法の違いと時間の経過に伴って、液状化特性が異なることが示された。

Key Words : Incineration residue, Liquefaction, Cyclic shear, Curing conditions

1.はじめに

一般廃棄物焼却灰は、その大部分が直接埋立処分されている。近年、国土の狭い我が国において新たな処分場の建設は困難な状態であり、最終処分場の残余容量が逼迫した状況であることから、処分場の延命化は社会的な問題である。このような現状を打開するため、埋立地は陸上から海面へと移行している。また、国土の効率的利用を行うという観点から埋立終了後の最終処分場の合理的跡地利用開発の必要性が一層高まっている。地震国である我が国で、焼却灰のような特殊材料で作られた地盤を利用するにあたっては、地震時の挙動を知ることが大きな問題である。しかし、焼却灰は様々な物を燃やした残渣物であるために、その物性は土質材料と比較すると、焼却状態の違いによる不均一性から異なった材料特性を示す。また、焼却灰には様々な重金属類や無機塩類を含有しているため、一般の土質材料として取り扱う場合には、焼却灰の置かれる地盤環境の違いによって、焼却灰の地盤工学的な性質が経時的に変化することが考えられる。

そこで、本研究では、まず焼却灰の物理・力学特性の把握を行い、次に、海面埋立された焼却灰地盤を想定

し、供試体の密度の異なる焼却灰を用いて液状化試験を行った。また、一般廃棄物焼却灰はカルシウム等の無機塩類を含んでいるため、時間の経過に伴い焼却灰特有の固結力が生じることが指摘されている¹⁾。そこで、焼却灰地盤が将来受ける環境を想定し、その環境に対応した方法で一定期間養生した供試体を用い、液状化試験を行った結果について報告する。

2.試料及び実験概要

実験で用いた試料は、A市の一般廃棄物焼却灰を物理選別処理し、供試体作成の制約から、2mm以下に粒度調整したものをを用いた。表-1に、焼却灰の物理・力学特性を把握するために、土質試験法に基づいて行った各種試験結果を示している。

(1) 締固め度の違いによる影響

まず、締固め度の違いによる液状化特性を調べるために、直径 $d=7.5\text{cm}$ 高さ $h=15\text{cm}$ のモールドにウェットタンピング法を用い、目標締固め度になるように5層に分けて突き固め、供試体を作成した。ここで初期含水比は32%としている。また、緩く堆積していると

表-1 試料の物理・力学特性

	2mm 以下焼却灰
土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	2.57
10% 粒径 D_{10} (mm)	0.172
50% 粒径 D_{50} (mm)	0.660
均等係数 U_c	4.79
曲率係数 U_c'	1.29
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm^3)	1.235
最適含水比 w_{opt} (%)	33.3
修正 CBR 値 (%)	39.5

表-3 各養生終了後の供試体の平均含水比

	養生後の平均含水比 (%)		
	14 日養生	28 日養生	56 日養生
気中養生	32.16	32.06	28.76
暴露養生	17.60	22.71	13.13
水浸養生	45.50	47.40	45.10

考えられる海面埋立の地盤の締固め度を $D_c=0.7$ (緩詰め)と仮定し、比較対象として $D_c=0.8$ (中詰め)、 0.9 (密詰め)の供試体をそれぞれ作成した。

(2) 養生方法の違いによる影響

次に、焼却灰が有効利用される場合、将来受ける環境の違いに着目し、検討を行った。表-2 に想定した焼却灰の有効利用法とその養生条件を示す。これは、焼却灰を地盤材料や埋立用材としての有効利用策を考え、それに対応する養生方法として気中、暴露、水浸養生の3種類を採用した。供試体は $d=5\text{cm}$ 、 $h=10\text{cm}$ のモールドに、各養生方法において自立供試体が作成可能な $D_c=0.9$ となるように、3層に分けて突固め作成した。ここで初期含水比は32%で、養生日数は14、28、56日で行った。表-3 は各養生終了後における各供試体の平均含水比を示している。なお養生方法等の詳細については前報²⁾で報告しているので省略する。

(3) 繰返しせん断試験の実験条件

繰返しせん断試験は、空圧制御式三軸せん断試験装置を用い、供試体に炭酸ガスを十分に通気させた後、脱気水を通水し、背圧 $\sigma_{BP}'=196\text{kPa}$ を与え飽和供試体を作成した。B 値が0.96以上になったことを確認した上で、有効拘束圧 $\sigma_c'=98\text{kPa}$ で1時間等方圧密を行った。せん断試験は、非排水条件で任意の繰返し応力を一定振幅0.1Hzの正弦波を用いて圧縮側より载荷を行い、両振幅軸ひずみ $DA=5\%$ に達した後、実験を終了させた。

3. 実験結果及び考察

(1) 締固め度の違いによる影響

表-2 焼却灰の有効利用法と養生条件

焼却灰の有効利用法	地盤材料	土地創造の埋立用材
①路盤材②管路の環状し材③護固め材としての利用 ① ② ③ ※焼却灰は、地下水面にある。	盛土材としての利用（想定） （※十分に安定させた焼却灰） ※焼却灰は、地下水面にある。	海面埋立による地盤創造 ※焼却灰は、海水に水浸される。
養生条件 ①湿状状態 → 気中養生 ・ 締固め度：D=0.9 ・ 初期含水比：最適含水比 ・ 温度：室温（小） ・ 供試体状態：モールドの両端をラップで密封 ・ 養生方法：恒温恒湿箱（高温20℃、湿度50%一定）に設置	②暴露・乾燥状態 → 暴露養生 ・ 締固め度：D=0.9 ・ 初期含水比：最適含水比 ・ 温度：室温 ・ 供試体状態：モールドの両端をラップで密封 ・ 養生方法：屋外設置	③水浸（飽和）状態 → 水浸養生 ・ 締固め度：D=0.9 ・ 初期含水比：最適含水比 ・ 温度：20℃一定 ・ 供試体状態：水浸 ・ 養生方法：恒温箱に養生箱（水温20℃一定）に水浸させ設置

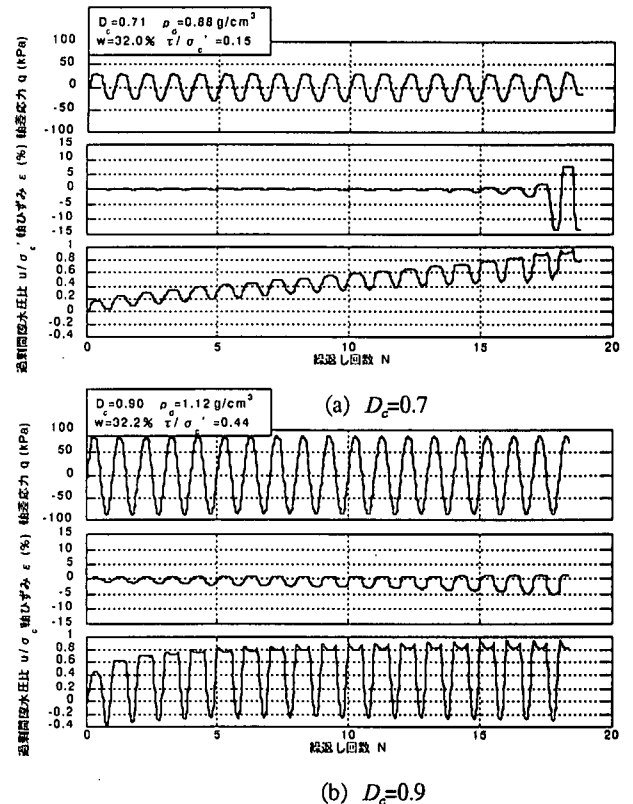


図-1 時刻歴(締固め度の違いによる影響)

図-1 に $D_c=0.7$ (緩詰め)、 0.9 (密詰め)の供試体において、ほぼ同一の繰返し回数($N=17$)で液状化に至った場合の時刻歴を示す。 $D_c=0.7$ では、载荷直後から過剰間隙水圧が徐々に上昇し、過剰間隙水圧比0.8付近から急激に上昇し、それと同時に軸ひずみも急激に発生し液状化に至っている。これに対し、 $D_c=0.9$ では、繰返し応力比が大きいことも影響していると考えられるが、せん断初期から過剰間隙水圧の急激な上昇、大きな軸ひずみ振幅の発生が顕著に見られる。しかし、直ちに液状化には至らず、過剰間隙水圧比、軸ひずみとも徐々に増し、液状化に至っていることが分かる。これは、締固めによる効果が、結果に表れたと考えられる。

図-2 は、図-1 と同じ供試体の有効応力経路図を示し

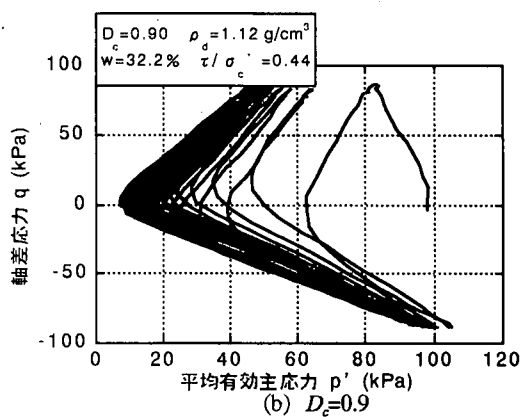
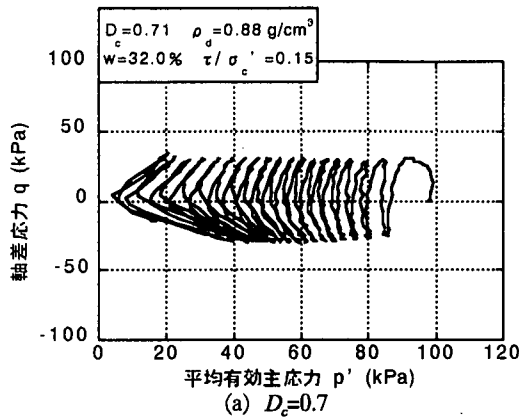


図-2 有効応力経路図

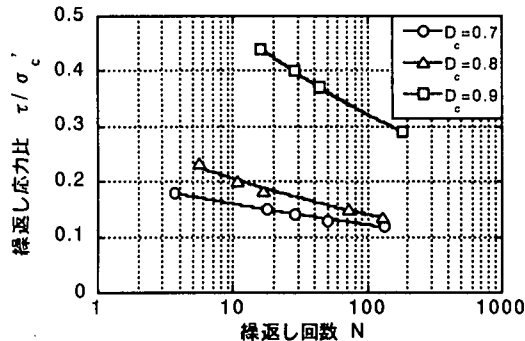


図-3 液状化強度曲線

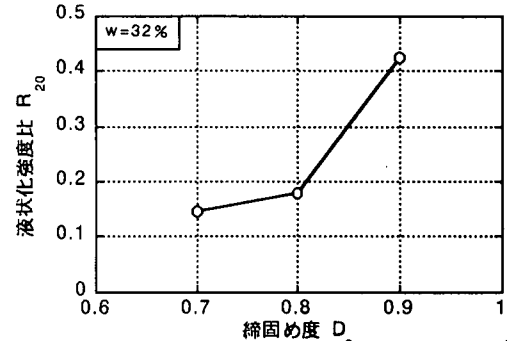


図-4 液状化強度比と締固め度の関係

ている。 $D_c=0.7$ では有効応力は徐々に減少しているのに対し、 $D_c=0.9$ では、正のダイレイタンスによって一時的に間隙水圧は負またはゼロとなり、粒子間の有効応力は初期状態まで回復を示している。この現象は、密な砂あるいは粘性土の液状化実験の時に観察されるサイクリックモビリティと同じものである。

次に、各締固め度における液状化強度曲線を図-3に示す。締固め度が大きくなるに従い、液状化強度が増加しているため、締固め度の違いが液状化特性に影響を及ぼしていることが分かる。

そこで図-4に、繰返し回数20回の時の繰返し応力比を液状化強度比 R_{20} と定義し締固め度との関係を示す。 $D_c=0.9$ の液状化強度は、 $D_c=0.8$ に対して約2.3倍、 $D_c=0.7$ にいたっては約2.9倍の強度増加を示している。このことから、焼却灰は、同一拘束圧($\sigma'_c=98\text{kPa}$)、同一含水比($w=32\%$)下において、液状化特性は初期密度の影響を受けていることが分かる。また、十分な締固めにより液状化に対する強度が期待できると考えられる。

(2) 養生方法の違いによる影響

図-5に気中、暴露、水浸56日養生における供試体の、繰返し応力比 $\tau/\sigma'_c=0.31$ における有効応力経路図を示す。いずれの養生方法の有効応力経路も、繰返し応力の载荷とともに有効応力が徐々に低下し、初期液状化状態に至った後、サイクリックモビリティを示し、有効応力の増加と減少を繰返しながら、破壊に至っている状況が分かる。また、一時的に有効応力がゼロになっても、その後せん断力を加えると負の過

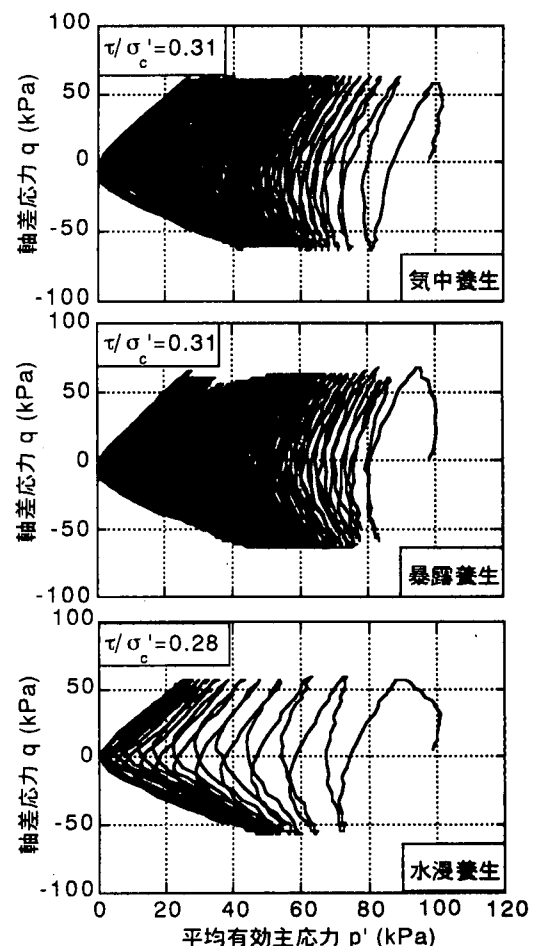


図-5 有効応力経路図

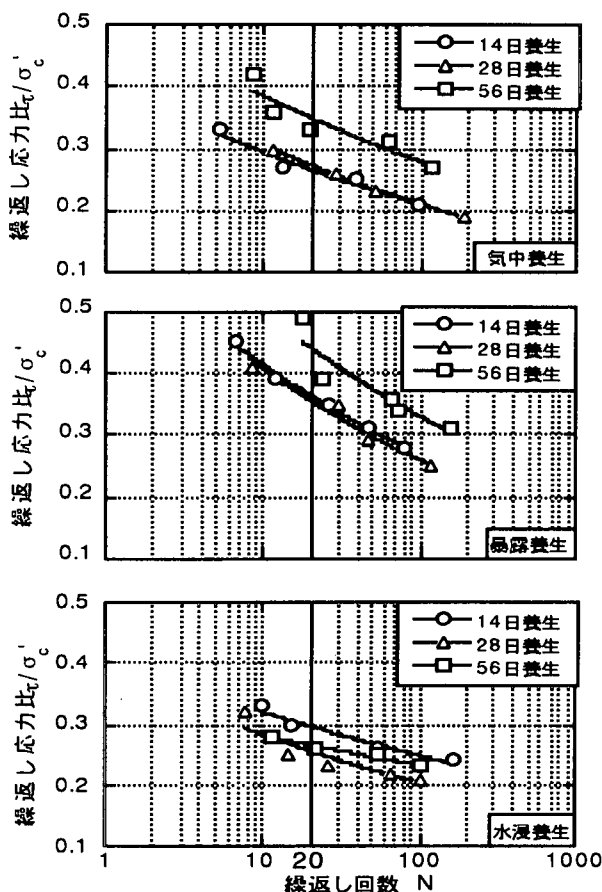


図-6 液状化強度曲線

剰間隙水圧が発生し、有効応力の回復が見られる。

図-6 に、各養生方法における液状化強度曲線を示す。含水比の変動の少ない気中養生は、28 日までの短期養生において強度変化は見られず、56 日養生での強度増加が著しい。乾燥と湿潤状態の繰返し作用を受けながら養生される暴露養生は、最も大きな強度発現を呈している。ただし、供試体の状態が天候に左右されるため、日数に伴う様な強度発現であるかは、不明である。これに対し水浸養生は、日数の経過に伴う強度発現が見られないことが分かる。このような日数の経過に伴う強度発現メカニズムは、焼却灰内に生じる固結力の発生と関係していると考えられる。この固結力は、焼却灰内のカルシウム成分と、焼却灰内に存在する水分に大きく依存していると考えられるが、今後の検討課題である。

図-7 に、各養生方法における液状化強度比と養生日数の関係を示す。気中及び暴露養生は、時間の経過に伴う養生効果が現れており、同様の傾向で強度が増している。水浸養生では強度発現は見られなかった。

表-4 に、今回行った水浸養生（飽和状態）のデータを基に海面埋立された地盤を想定し、液状化判定^{3), 4)}を行った結果を示す。判定方法は、道路橋示方書に基づき、阪神大震災と同規模な地震を仮定した。その結果、すべての養生日数において $F_L \leq 1.0$ となり、液状化が発生すると判定された。したがって、焼却灰が

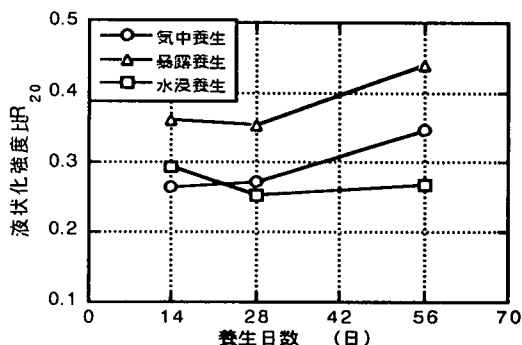


図-7 液状化強度比と養生日数の関係

表-4 繰返しせん断試験による液状化判定（水浸養生）

	14 日養生	28 日養生	56 日養生
液状化強度比 $R_L = R_{20}$	0.295	0.253	0.266
液状化に対する抵抗率 F_L	0.405	0.318	0.344

緩く堆積し、地下水位の高い焼却灰地盤を形成する海面埋立地を考えた場合、地震時の液状化対策を行う必要があることが示唆された。

4.まとめ

- ①焼却灰の液状化強度は、十分な締固めにより液状化に対する強度の改善が期待できると考えられる。
- ②焼却灰は、養生方法の違いにより、時間に伴う固結力の発生メカニズムが異なり、液状化特性に影響を及ぼすことが示された。
- ③焼却灰が緩く堆積した海面埋立処分場では、液状化が発生しやすいと考えられ、高度跡地利用をするためには、地震時の液状化対策を行う必要があることが明らかになった。

謝辞：本研究は平成 12 年度文部省科学研究助成金（基礎研究 (c) (2) 課題番号 126050501）、(財) 前田記念工学振興財団研究助成金をもとに実施したものであり、ここに感謝の意を表します。また、本研究を行うに当たりご協力頂いた地方自治体の方々、栗田工業（株）の平尾孝典氏に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 島岡ら：「埋立廃棄物の力学特性と埋立構造物の安定性に関する実験」、土と基礎、Vol.45, No.7, pp.24-26, 1997.
- 2) 佐藤ら：「一般廃棄物焼却灰の力学特性に及ぼす地盤環境の影響」、第 4 回環境地盤工学シンポジウム、2001.5.
- 3) 松井ら：「大阪フェニックス事業における埋立地盤の特性」、土と基礎、Vol.45, No.7, pp.17-20, 1997.
- 4) 「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」(平成 8 年 12 月 (社) 日本道路協会)