

フレーク状 PET ボトルを添加したセメント安定処理土の一軸圧縮特性に及ぼす凍結融解作用の影響

亀井 健史, 志比 利秀

島根大学総合理工学部 地球資源環境学科

Effects of Freezing and Thawing on Unconfined Compressive Characteristics of Cement Stabilized Soil Adding Flaky PET Bottle

Takeshi KAMEI and Toshihide SHIBI

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

Abstract

The task of building economic and social systems in close harmony with the natural environment will require more efficient use of resources, reduction in the volume of waste materials generated and the recycling of materials. PET bottles are disposed of in large quantities to circulate widely in society. Therefore it is important to develop recycling methods that can use a large quantity of PET bottle waste at a time. This paper presents the unconfined compressive characteristics of cement stabilized soil adding flaky PET. Furthermore, unconfined compression tests were performed on cement stabilized soil adding flaky PET to investigate the effects of freezing and thawing on unconfined compressive strength of them. The effects of flaky PET on stress-strain behavior of cement stabilized soils are quantitatively shown. The unconfined compressive strength of cement stabilized soil adding flaky PET subjected to freezing and thawing is about 0.8 times that of specimens without freezing and thawing.

1. はじめに

北海道を始めとする寒冷地および高所山岳地域においては、冬季に気温が 0°C 以下になることもしばしば認められる。特に土の温度が 0°C 以下になると土中の水分が凍り、そのような状態の土は凍土と呼ばれる。しかしながら、春先の融解期になると、舗装道路の軟弱化やのり面崩壊などの憂慮すべき諸現象が発生する(図-1)。このような現象は、凍結融解作用に伴う土の物理的・力学的性質の変化によるものと考えられることから、凍結融解後の土の性質を把握しておくことは極めて重要である。

凍結融解土の力学的性質を明らかにするために、閉鎖系凍結融解条件下で室内実験が行われている。例えば、長澤・梅田¹⁾は、凍結 24 時間、融解 48 時間を 1 サイクルとした凍結融解作用を粘土試料に与えた後一面せん断試験等を実施している。その結果、土が凍結融解作用を繰り返す場合には、最初の凍結融解作用によってそのせん断強さが 50% 程度に低下し、さらに繰り返す凍結融解作用を与えても 40% 程度の強度を有することを報告

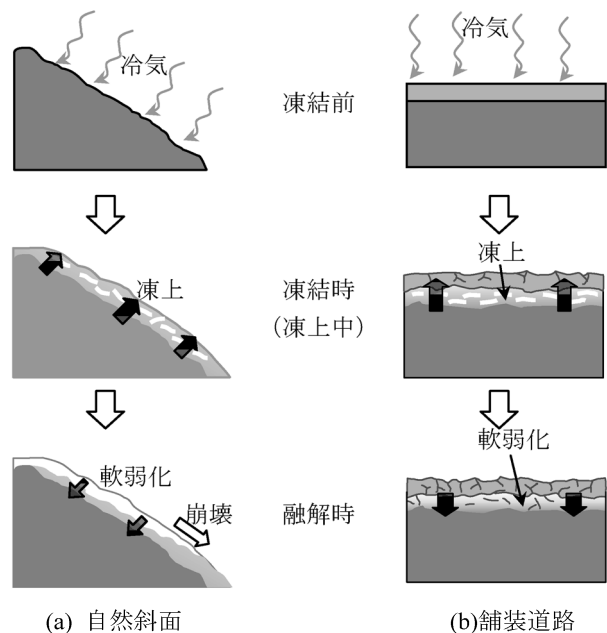


図-1 凍結融解が地盤に及ぼす影響

している¹⁾。また、凍結温度の低下に伴い -10°C まではせん断強さが急激に低下するが、 -10°C 以下においてはその強さはほぼ一定値となる¹⁾。一方、凍結融解作用が気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす影響についても検討がなされており、その一軸圧縮強さは、5サイクルの凍結融解作用を受けても70%程度の一軸圧縮強さを有することが明らかとなっている²⁾。したがって、一般の土と改良土とでは、そのせん断強さに及ぼす凍結融解作用の影響が異なることが推察される。

一方、我が国は、国土の約7割が山地であり、海、川、湖に沿った沖積平野が都市生活に便利な平野部のほとんどを占めている。このような理由から、沖積平野に多くの重要な構造物が建設されている。しかしながら、沖積平野は、その生成年代が若く、一般に軟らかい粘土、シルト、緩い砂質土あるいは有機質土等から形成された地盤であり、いわゆる“軟弱地盤”が広く分布している。そのため、軟弱地盤の問題に直面する機会が非常に多いという実情がある。

このような軟弱地盤上に構造物を建設する際の主要な問題点としては、構造物自体の安定問題、軟弱地盤の鉛直変位（沈下）、軟弱地盤の水平変位（側方流動）の3点が挙げられる。そのため、これら問題点に対して対策を講じる必要があるが、その一つの対策工法として、地盤改良工法がある。地盤改良工法には数多くの種類があり、最適な工法の選定に際しては、その目的、対象土質、改良効果、施工工期、工費、規模等を考慮した上で、さらに安全性や環境への影響にも配慮する必要がある。ここでは、工期の短縮化の要求に答えるため、化学的固化による地盤改良工法の一つであるセメント安定処理工法に着目する。この工法は、土にセメントを添加混合し、セメントの固化作用によって土の安定化をはかるもので、他の工法より比較的短期間に地盤の強度を増加できる。近年では、セメント安定処理土の強度変形特性に及ぼす配合条件および養生日数の関係についても定量的に評価されている^{3), 4)}。

近年にみる我が国の産業構造は、大量生産、大量消費、大量廃棄の上に成り立っており、その結果急激な経済成長を遂げてきた。このような産業構造が生み出した製品の典型的な例としては、PETボトルがある。この製品は、取り扱い易く安全なプラスチック容器として大量に社会に流通しており、使用後は大量に廃棄されてきた。しかしながら、天然資源に乏しくその多くを海外からの輸入に依存するとともに、国土が狭いため廃棄物処理用地の

確保が難しいなどの問題が指摘され始めている。このような現状から、これまで廃棄処分されていた廃棄物等を再生・再利用する取組みがなされるようになってきた。その一環として、1997年に容器包装廃棄物の分別回収、再商品化を促進することを目的として「容器リサイクル法」が施行され、PETボトルも分別回収リサイクルが急速に進められている。2004年度には、その回収率は、アメリカやヨーロッパの2倍以上である62.3%を達成しており、世界でも最高水準となっている⁵⁾。しかしながら、回収されても再利用されている量には限度があり、その再利用先の不足が懸念されている。一方、近年では良質な砂の枯渇に伴う地盤材料の不足も大きな問題となってきている。したがって、この再利用されていないPETボトルを地盤材料として利用することができれば、極めて有意義であると考えられる。著者らは、このような考えに基づいて、フレーク状PETボトルの気泡混合軽量土や流動化処理土への有効利用の可能性を検討してきている^{6), 7)}が、さらなる有効利用先の拡大を考えると、フレーク状PETボトルのセメント安定処理土への適用についても検討する必要がある。

本研究では、フレーク状PETボトルを異なる5種類の添加率で添加したセメント安定処理土を作成し、その一軸圧縮特性を評価することによりフレーク状PETボトルのセメント安定処理土に適用することの有用性を明らかにしている。さらに、凍結融解作用を繰り返し与えた試料に対して一軸試験試験を実施し、凍結融解作用がその一軸圧縮特性に及ぼす影響についても考察している。

2. 試料および実験方法

軟弱地盤の改良などを目的とした工法に、セメント安定処理がある。この工法は、土と安定材（セメント）を混合し、特に締固めを行わず、安定剤そのものの硬化反応あるいは土と安定材との硬化反応を利用して、土を改良する。ここでは、軟弱粘性土地盤として含水比を120%（ $W/S=120\%$ ）に調整したMCクレーを用いた。その物理的特性を表-1に、化学成分⁸⁾を表-2に示す。また、安定材には建設工事で最も一般的に用いられている普通ポルトランドセメントを使用した。その品質⁹⁾および化学成分¹⁰⁾をそれぞれ表-3、表-4に示す。セメントの混入量は、 $W/C=4.0, 5.0, 6.0$ の3通りとした。表-5はその配合条件を示している。

一方、フレーク状PETボトルは、薄片状で鋭利な切断

表-1 MCクレーの物理的特性

ρ_d (Mg/m^3)	w_L (%)	w_p (%)	I_p	砂分 (%)	シルト (%)	粘土分 (%)
2.679	73.1	36.7	36.4	0.0	35.3	64.7

表-2 MCクレーの化学成分⁸⁾

Ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
4.54	68.1	24.8	0.14	0.15	0.02	0.02	1.54	0.56

単位：(%)

表-3 セメントの品質⁹⁾

種類	品質 比表面積 (cm ² /g)	凝結		安定性	圧縮強さ (MN/m ²)			酸化マグ ネシウム (%)	三酸化 硫黄 (%)	強熱減量 (%)	全アルカリ (%)	塩化物 イオン (%)
		始発 (min)	終結 (h)		3日	7日	28日					
普通ポルトランド セメント	2500 以上	60 以上	10 以下	良	12.5 以上	22.5 以上	42.5 以上	5.0 以下	3.0 以下	3.0 以下	0.75 以下	0.02 以下

表-4 セメントの化学成分¹⁰⁾

セメントの種類	Ig.loss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	R ₂ O	TiO	P ₂ O	MnO	Cl
普通ポルトランド セメント	0.8	0.1	21.8	5.1	3.0	63.8	1.7	2.0	0.32	0.50	0.65	0.34	0.11	0.16	0.007

単位：(%)

表-5 セメント安定処理土の配合条件

W/C	W (kg/cm ³)	S (kg/cm ³)	C (kg/cm ³)
4.0	719.3	599.4	179.8
5.0	727.6	606.3	145.5
6.0	733.2	611.0	122.2

W：水 S：MCクレール C：セメント

表-6 PETボトル再商品化製品の主要な品質基準¹¹⁾

規格項目	基準値
比重	1.350 ~ 1.390
カットサイズ	8mm φスクリーン
水分率	0.6% 以下
異物混合率	1300ppm 以下

表-7 PETフレックを添加したセメント安定処理土の土粒子密度

W/C	4.0	5.0	6.0
P/C(%)			
0	2.790	2.772	2.759
5	2.773	2.758	2.748
10	2.758	2.746	2.736
15	2.741	2.732	2.725
20	2.727	2.719	2.715

単位:(Mg/m³)

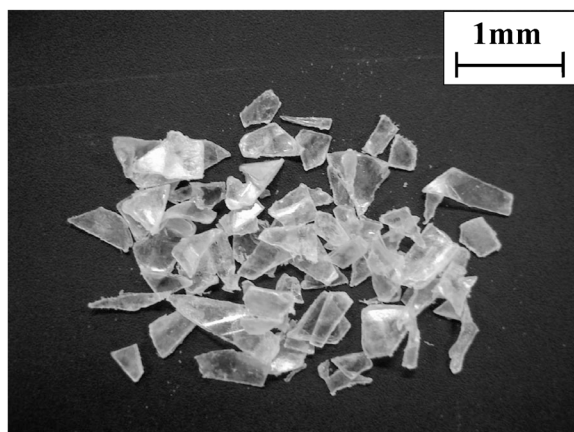


写真-1 PETフレック

面を有しており(写真-1),その再商品化製品の主要な品質基準値¹¹⁾は表-6である。本研究では,セメント安定処理土の一軸圧縮強さを更に改善するために,0~20%のペットフレックを添加した(ペットフレック添加率:P/C=0~20%)。表-7は,作成された試料の土粒子密度を示している。フレック状PETボトルの比重から計算される密度(土粒子密度に相当)がセメントやMCクレールの土粒子密度と比較して小さいことから,P/Cの増加に伴いセメント安定処理土の土粒子密度が低下し,軽量化ははかられていることがわかる。

作成した試料は,恒温室(20±2℃)で28日間養生した。W/C=4.0,6.0の試料は,養生終了後一軸圧縮試験に用いた。一方,W/C=5.0の供試体は,養生終了後さらに10

日間にわたる凍結融解作用を与えた後,一軸圧縮試験に用いた。前述したように,一般的な土では,凍結温度が-10℃以下の凍結融解作用を受けるとその一軸圧縮強さは著しく低下すること,繰返し作用する場合には,その一回目に顕著な低下が認められることから,凍結融解作用は表-8のように与えた。

本研究では,セメント安定処理土の応力-ひずみ関係を得るために,一軸圧縮試験を行った。一軸圧縮試験は,ひずみ制御方式で行い,せん断時のひずみ速度は1%/minとした。また,強度・変形特性に及ぼす端面摩擦の影響を軽減するために,一軸圧縮装置の上下加圧板の表面にシリコングリスを薄く塗布した。なお,各配合条件と養生条件において,それぞれ4供試体に対して一軸圧縮試験を実施した。

表-8 凍結融解サイクル

サイクル数 (回)	養生条件	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	20°C	→										一軸圧縮試験
	-10°C	→										
1	20°C	→										
	-10°C	→										
3	20°C	→										
	-10°C	→										
5	20°C	→										
	-10°C	→										

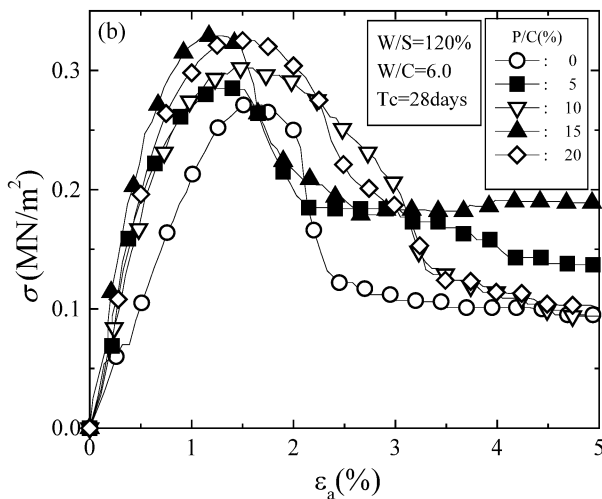
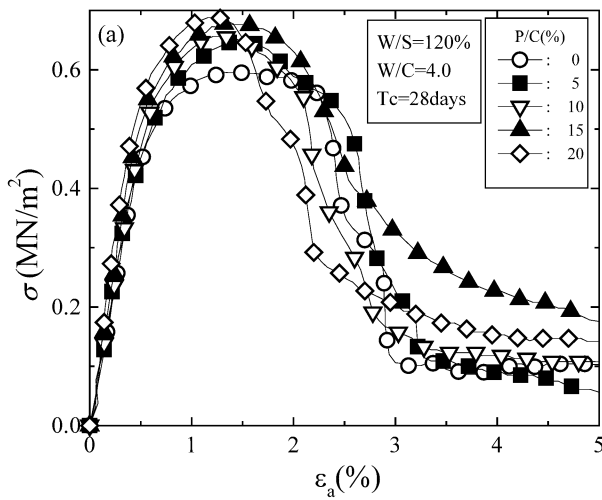


図-2 代表的な応力-ひずみ関係

3. フレーク状 PET ボトルを添加したセメント安定処理土の一軸圧縮特性

フレーク状 PET ボトルを添加したセメント安定処理土の代表的な応力-ひずみ関係を図-2 に示す。図より、

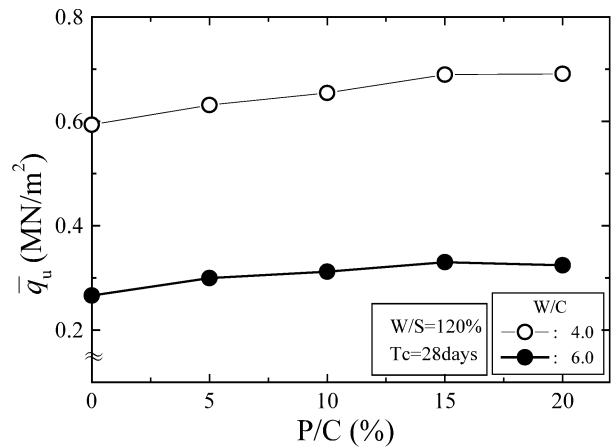


図-3 平均的な一軸圧縮強さと PET フレーク添加率の関係

応力値は、PET フレーク添加率 (P/C) によらず、軸ひずみ (ϵ_a) の増加に伴い顕著な立ち上がりを示し、軸ひずみ量 1.2~1.5%においてピーク値 (W/C=4.0 の場合には $q_u=0.6\sim0.7\text{MN/m}^2$, W/C=6.0 の場合には $q_u=0.27\sim0.33\text{MN/m}^2$) に達している。その後、応力値は荷重の継続に伴い低下し、 $0.1\sim0.2\text{MN/m}^2$ となった。また、一軸圧縮強さ (q_u) には、P/C の増加に伴って、僅かに増加する傾向が認められた。一方、変形係数 (E_{50}) や破壊ひずみ (ϵ_f) と P/C の間には明瞭な関係を認めることができなかった。

PET フレーク添加率が一軸圧縮強さに及ぼす影響を明らかにするため、平均的な一軸圧縮強さ (\bar{q}_u) と PET フレーク添加率 (P/C) の関係を図-3 に示す。図より、まず W/C 比が小さな試料の q_u 値は、W/C 比が大きな試料の q_u 値より大きいことがわかる。また、P/C の増加に伴い q_u 値には増加する傾向が認められる。この関係をより明瞭に示すために、各 P/C の q_u 値を P/C=0% の q_u 値を用いて正規化した値と P/C の関係を図-4 に示す。図より、W/C 比の違いによらず P/C の増加に伴い $q_u/q_{u(P/C=0\%)}$ 値は増加し、とくに P/C=20% の q_u 値は、P/C=0% の q_u 値と比

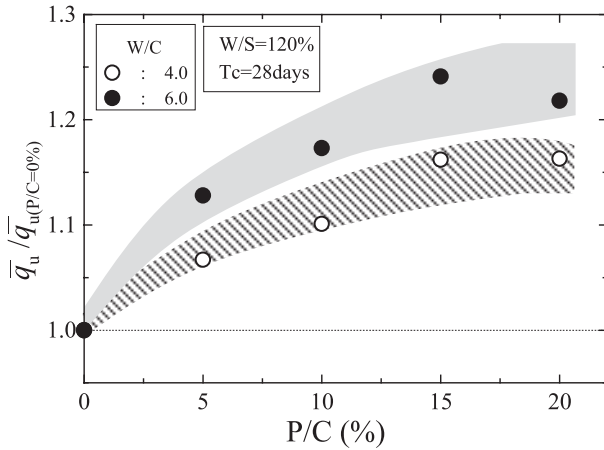
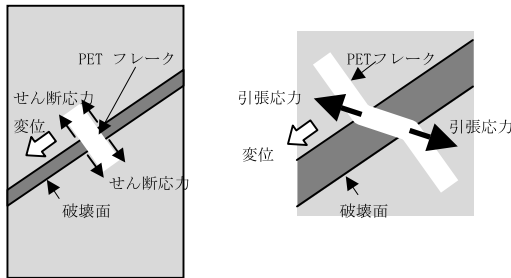


図-4 $\bar{q}_u/\bar{q}_{u(P/C=0\%)}$ 値と PET フレック添加率の関係



(a)PET フレック表面に働くせん断応力 (b)せん断変形に伴う PET フレックの伸び

図-5 PET フレックのせん断補強材としての働き

較して 15~20%程度増加することが示された。したがって、セメント安定処理土に PET フレックを添加することによって、その一軸圧縮強さを改善できることが明らかとなった。

ここで、PET フレック添加がセメント安定処理土の強度を改善するメカニズムについて考察する。PET フレックが破壊面を横切るように分布する場合には、その表面にせん断応力が働く (図-5(a))。その結果、PET フレックに受働的な引張応力が発生し (図-5(b))、セメント安定処理土の変形は拘束される。PET フレックのこのような働きは、引張補強材による強度増加メカニズムと非常に類似している。さらに、PET フレック添加率が増加することによって、PET フレックが破壊面を横切るように分布する可能性が増加するため、PET フレックが引張補強材としての働き易くなることが容易に推察できる。したがって、PET フレック添加率の増加に伴うセメント安定処理土の強度改善メカニズムは、PET フレックのせん断補強材としての働きによるところが大きいものと考えられる。

つぎに、変形係数 (E_{50}) と一軸圧縮強さ (q_u) の関係に着目する。図-6 は平均的な変形係数 (\bar{E}_{50}) と平均的な一軸圧縮強さ (\bar{q}_u) の関係を示している。図より、 E_{50} 値と q_u 値との関係は、 $E_{50} = 70q_u$ から $E_{50} = 170q_u$ の間に分

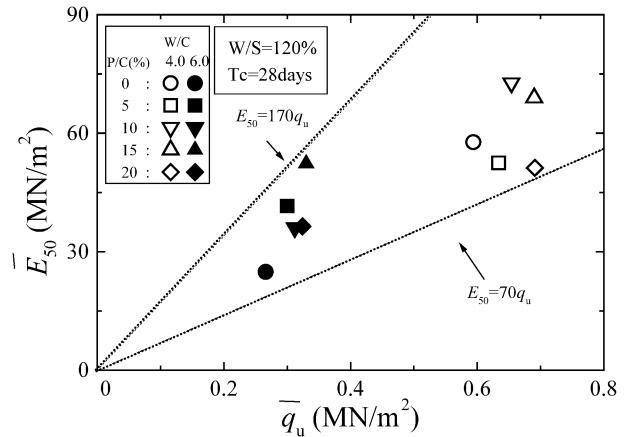


図-6 平均的な変形係数と平均的な一軸圧縮強さの関係

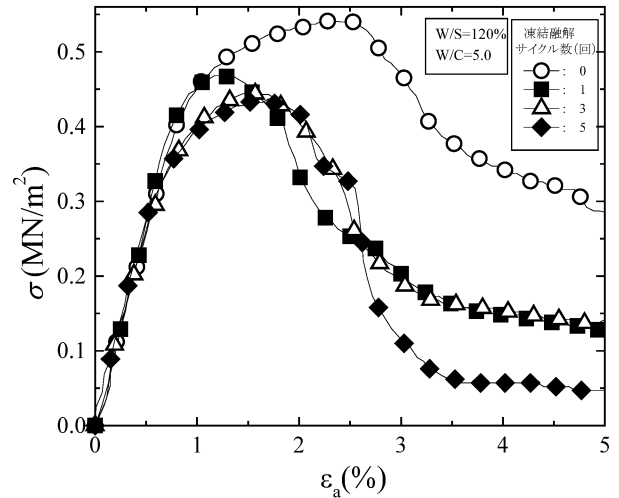


図-7 代表的な応力—ひずみ曲線に及ぼす凍結融解サイクル数の影響

布していた。既往の研究では、セメント安定処理土において $E_{50}/q_u=193^3)$ や $E_{50}/q_u=80\sim 250^{12)}$ の関係が、PET フレックを添加した流動化処理土において $E_{50}/q_u=100\sim 300^7)$ の関係が得られており、本結果より大きな値になっている。したがって、PET フレックの添加に伴う顕著な剛性の改善は認められなかった。

4. 凍結融解作用がフレック状 PET ボトルを添加したセメント安定処理土の一軸圧縮特性に及ぼす影響

フレック状 PET ボトルを添加したセメント安定処理土の応力—ひずみ関係に及ぼす凍結融解サイクル数の影響を図-7 に示す。図より、応力値は、凍結融解サイクル数によらず、軸ひずみ (ϵ_a) の増加に伴い顕著な立ち上がりを示す。凍結融解サイクルを与えていない試料は軸ひずみ量 2.5%程度でピーク値 ($q_u=0.54\text{MN/m}^2$) に達しているが、図-2 の結果を考慮すると、破壊ひずみには多少ばらつきがあったものと考えられる。一方凍結融解サイクルを与えた試料は軸ひずみ量 1.0~1.5%においてピーク値 ($q_u=0.43\sim 0.47\text{MN/m}^2$) に達している。応力値は

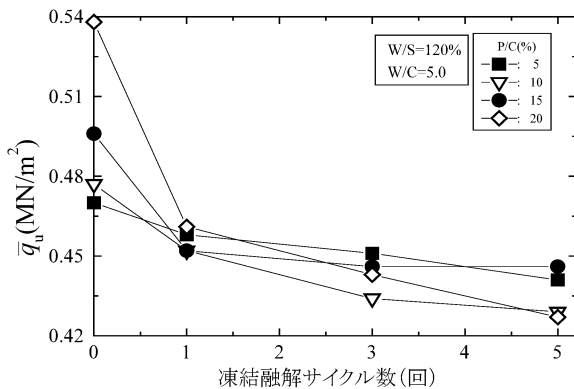


図-8 平均的な一軸圧縮強さと凍結融解サイクル数の関係

そのピーク後に急激に低下し、凍結融解サイクルを与えない場合には 0.3MN/m^2 、与えた場合には $0.05 \sim 0.15\text{MN/m}^2$ 程度となった。

PET フレークを添加したセメント安定処理土の一軸圧縮強さに及ぼす凍結融解サイクル数の影響を明らかにするために、各 P/C における一軸圧縮強さと凍結融解サイクル数の関係を図-8 に示す。凍結融解作用を与えない場合の q_u 値は、 $0.47 \sim 0.54\text{MN/m}^2$ 程度であったが、1 回目の凍結融解サイクルによって 0.45MN/m^2 となった。さらに繰り返し凍結融解作用を与えても一軸圧縮強さの大きな低下は認められず、 $0.43 \sim 0.45\text{MN/m}^2$ 程度の q_u 値を維持した。したがって、PET フレークを添加したセメント安定処理土は凍結融解サイクル数が増加してもほとんど強度低下しないことが明らかとなった。

凍結融解サイクル数に対する PET フレークを添加したセメント安定処理土の一軸圧縮強さの耐性を確認するために、本研究から得られた結果と既往の粘性土の一軸圧縮強さと凍結融解サイクル数の関係とを比較する (図-9)。図より、粘性土は 1 回の凍結融解作用によって強度が大きく低下し、その一軸圧縮強さは凍結融解作用を受けていない場合の $50 \sim 60\%$ 程度になることがわかる。凍結融解作用を繰り返し受けることによって、その一軸圧縮強さはさらに低下し、 $30 \sim 40\%$ 程度まで低下することが報告されている^{1), 14)}。

一方、PET フレークを添加したセメント安定処理土の一軸圧縮強さは、1 回の凍結融解作用を受けると $5 \sim 15\%$ 程度低下することがわかる。さらに凍結融解サイクル数が増加しても、その強度低下は $10 \sim 20\%$ 程度と非常に小さい。ここで、セメント安定処理土の一軸圧縮強さに及ぼす凍結融解サイクル数の影響に着目すると、その一軸圧縮強さは凍結融解作用の影響をあまり受けず、5 回の凍結融解サイクルを与えたとしても、凍結融解作用を受けていない場合の 90% 以上の一軸圧縮強さを維持している¹³⁾。このことから、PET フレークを添加したセメント安定処理土の凍結融解作用に対する耐性は、セメント安

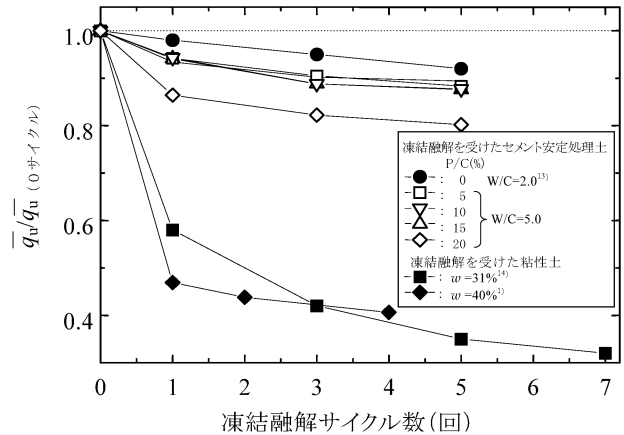


図-9 地盤材料の違いが凍結融解サイクル数と一軸圧縮強さの関係に及ぼす影響

定処理を施したことによる影響が大きいものと考えられる。

以上のことから、セメント安定処理土に PET フレークを添加することによって、その一軸圧縮強さを改善し、かつ凍結融解作用にも高い耐性を有する地盤材料を創造することが可能となる。さらに、地盤改良に PET フレークを用いることによって、これまで廃棄処分されていた PET ボトルを大量に有効利用することが可能となり、資源循環型社会の構築に多大な貢献ができるものと考えられる。

5. 結論

本研究から得られた主要な結論を以下に列記する。

- 1) セメント安定処理土に PET フレークを添加することにより、その一軸圧縮強さが増加することを示した。とくに、PET フレーク添加率が 20% の場合には、一軸圧縮強さは $15 \sim 20\%$ 程度改善された。
- 2) PET フレークを添加したセメント安定処理土の一軸圧縮強さは、凍結融解作用の繰り返しの影響をあまり受けず、その強度減少は $10 \sim 20\%$ と一般的な粘性土試料と比較して非常に小さいことが明らかとなった。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、島根大学総合理工学部元学生高野了治氏には、実験および結果の整理に多大なるご協力いただいた。また、本研究の一部は、独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C)No.17560444 (代表者亀井健史) の補助を受けて行われた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 長澤徹明, 梅田安治: 凍結融解土の諸性質について, 土と基礎, Vol.29, No.2, pp.39-46, 1981.

- 2) 亀井健史, 前川晴義, 堀切保則: 気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす凍結融解作用の影響, 土木構造・材料論文集, No.19, pp.33-39, 2003.
- 3) 亀井健史, 大本和樹, 志比利秀, 松尾和俊: セメント安定処理土の強度変形特性, 島根大学総合理工学部紀要シリーズ A, Vol.36, pp.17-24, 2002.
- 4) 亀井健史, 大本和樹, 志比利秀, 松尾和俊: セメント安定処理土の一軸圧縮強さに及ぼす配合条件の影響, 島根大学総合理工学部紀要シリーズ A, Vol.36, pp.9-15, 2002.
- 5) PET ボトルリサイクル推進協議会: PET ボトルリサイクル年次報告書 2005 年度版, pp.1-21, 2005.
- 6) 亀井健史, 松尾和俊: フレック状の PET ボトルを利用した気泡混合軽量土の一軸圧縮特性, 土木学会論文集, No.764/III-67, pp.359-366, 2004.
- 7) 亀井健史, 松尾和俊, 志比利秀, 小木曾みちる: 流動化処理土へのフレック状 PET ボトルの有効利用, 島根大学総合理工学部紀要シリーズ A, Vol.38, pp9-16, 2004.
- 8) 山陽クレー工業株式会社: MC クレー分析データ表, 2000.
- 9) 財団法人 日本規格協会: JIS ハンドブック 10 生コンクリート (第一版), p.194, 2002.
- 10) セメント協会: セメント系固化材による地盤改良マニュアル (第二版), pp1-48, 1985.
- 11) 財団法人 日本規格協会: 再生ポリエチレンテレフタレート (PET) 成形材料試験方法 TR K0001: 2000, JIS ハンドブック 54 リサイクル (第1版), pp.169-176, 2002.
- 12) 水野恭男, 苗村康造, 松本淳之介: 深層混合処理工法による山砂の改良実験, 第 23 回土質工学研究発表会発表講演集, pp.2301-2304, 1988.
- 13) 亀井健史: 個人資料, 2003.
- 14) 青山清道, 小川正二, 川澄 修, 田村富雄, 福田 誠: 凍結融解を受けた土の性質, 土と基礎, Vol.25, No.7, pp41-46, 1977.

