

マグネシウム系固化材による改良土の力学特性に及ぼす温度の影響

Influence of Temperature on the Mechanical Properties of Improved Soil by Magnesium-based Solidifying Material

福田靖	Yasushi FUKUDA	(徳山工業高等専門学校)
上俊二	Shunji UE	(徳山工業高等専門学校)
桑嶋啓治	Keiji KUWAJIMA	(徳山工業高等専門学校)
阿野憲一	Kenichi ANO	(宇部マテリアルズ(株))
中堀陽平	Youhei NAKAHORI	(宇部マテリアルズ(株))

マグネシウム系固化材を用いた地盤改良を行うにあたって、低温下では、固化材が固まりにくく、所定の強度に達しないことがある。逆に、高温下では、固化材の反応が早く施工が困難になる問題があげられる。本研究では、改良土の力学的性質に及ぼす温度の影響を明らかにするため、養生温度、養生期間を変えて実験を行い、力学特性に及ぼす温度の影響を明らかにした。実験の結果、養生温度が高いほど固化材の反応は早く、高い強度が得られた。また、気温 10℃以下では締め固めエネルギーを高くしても、強度増加は見られないことが明らかとなった。

キーワード：酸化マグネシウム、一軸圧縮強さ、養生温度、外気温、改良土 (IGC : D06)

1. はじめに

土などと固化材を混合した土系舗装が、年々増加傾向にある。用途としては、遊歩道・園路、建造物の周辺整備等があげられる。土系舗装は、自然に近い景観性に優れた舗装体を構築することが可能であり、歩きやすさなどの衝撃吸収、保水性を有するため、夏場の路面温度上昇を抑制することができる。また、現場発生土を用いて施工することが可能なため、残土処理の必要がなく合理的で、経済的にも安価である。しかし、現行の主流である、セメント・石灰系固化材は強アルカリ性であるため、環境に良いとは言えない。

近年、酸化マグネシウムを主成分とした、弱アルカリ性のマグネシウム系固化材が、地盤改良材として注目されている¹⁾。酸化マグネシウムは、食品添加物や肥料などに利用されているが、建設材料として古くは、万里の長城のレンガ目地として使用されている。特徴としては、長期間にわたって、セメントや石灰に見られる土壌とのポゾラン反応と同様の作用が起こるため、耐久性のある硬化物を得ることができる²⁾。

固化材による地盤改良を行う際、地盤材料、添加量、養生温度などが強度に影響する。特に、現場での養生温度の管理は難しく、セメント系や石灰系を用い、低温下で施工を行った場合、所定の強度に達しないことが報告されている³⁾。また、冬期は転圧不足による凍害が見られ、夏場の

高温の条件下では、固化材の反応が早く施工が困難になる問題点が挙げられる。施工中の気温は低いが、一定期間後に気温の上昇など、実際の施工条件に合わせた気温の変化が、強度に与える影響を調べた例がない。

農道や歩道、中央分離帯や路側帯などにおいて雑草が多く植生し、維持管理に多大な労力と費用をかけているため、効率的・効果的な対策が必要とされている。基盤への植物根茎の侵入困難の判定は、山中式土壌硬度計による硬度指数が 27mm 以上とされている⁴⁾。

そこで本報告では、マグネシウム系固化材による改良土の力学的特性に及ぼす温度の影響を調べるため、温度と期間を変えて一軸圧縮試験を行い、防草効果の基準として 2N/mm²を目安とし、雑草対策としての評価を行った。

2. 実験概要

2.1 実験材料

2.1.1 試料

試料は、山口県周南市で採取したまさ土を用いた。物理的特性を表-1、粒度分布を図-1に示す。

2.1.2 固化材

固化材として用いた酸化マグネシウムは、海水と石灰の反応による水酸化マグネシウムを、精製・濃縮し、高温で脱水・仮焼して製造され、汚染土壌、廃棄物、廃石膏の重金属不溶化対策にも用いられている。成分を表-2に示す。

表-1 試料の物理的特性

密度(g/cm ³)	2.645
最適含水比 w _{opt} (%)	10.66
最大乾燥密度 ρ _{dmax} (g/cm ³)	1.938
透水係数 k (cm/sec)	5.171×10 ⁻⁵

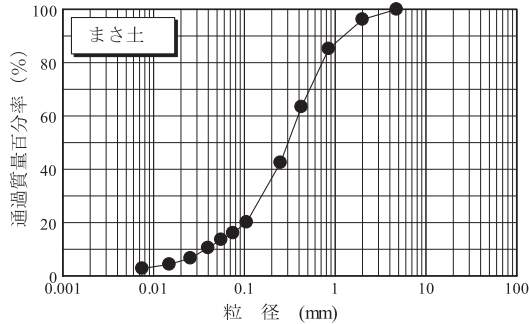


図-1 粒径加積曲線

表-2 マグネシウム系固化材の成分

成分	濃度(%)
MgO	95.1
CaO	0.54
SiO ₂	0.15
Fe ₂ O ₃	0.06
Al ₂ O ₃	0.05
SO ₄	1.55

表-3 供試体作製時の初期条件

含水比 (%)	湿潤密度 ρ _t (g/cm ³)	乾燥密度 ρ _d (g/cm ³)
7.74	2.031	1.885

表-4 シリーズ 1 における温度条件

温度(°C)	
-20	完全に凍結する温度
-5	冬場の寒冷地の気温に近い温度
5	できるだけ低い温度で、尚かつ凍結しない温度
20	基準となる温度

2.2 供試体の作製方法

固化材添加量は、1m³当り 150 kgとし、混合方法は、乾燥させたまさ土、固化材をミキサーに入れ、最適含水比 10.66%の水量を徐々に入れながら攪拌した。供試体は、高さ 10 cm、直径 5cm とし、突固めによる方法で、ランマーの質量は 1.5kg、層数は 3 層で、締固め回数は各層 12 回で作製した⁵⁾。作製時の初期条件を表-3 に示す。含水比が 7.74%であるが、これは固化材添加量を考慮せず、土の最適含水比の水量で混合したためと思われる。養生方法は気中養生とし、作製した供試体が崩れるのを防ぐため、所定の養生温度で 1 日モールドに入れたまま養生し、翌日モールドを外して養生を再開する。

2.3 実験方法

実験は以下の 3 シリーズで行った。

2.3.1 シリーズ 1

シリーズ 1 は温度の影響を把握することを目的として、一定の温度で一定期間養生。養生時の温度は 4 種類とし、温度条件を表-4 に示す。養生温度を一定に保つために恒温器を用い、材齢は 7 日および 28 日で一軸圧縮試験を行った。-20°Cおよび-5°Cで養生した供試体については、凍結しているため、試験の 24 時間前に 5°C養生した後、試験を行った。

2.3.2 シリーズ 2

シリーズ 2 は施工中・施工後の気温を考慮し、屋外において外気温で養生し、温度の測定は、温度センサとデータロガーを用いた。想定した外気温の条件は図-2、図-3、図-4 および図-5 に示す 4 種類である。気温①は夏期、気温②は秋期から冬期にかけて、気温③は冬期、気温④は春

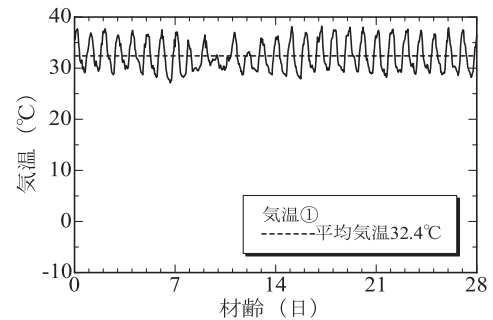


図-2 シリーズ 2 における温度条件 (気温①)

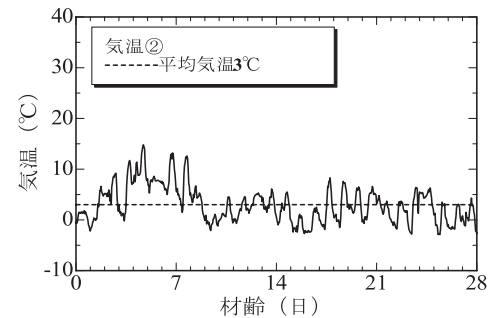


図-3 シリーズ 2 における温度条件 (気温②)

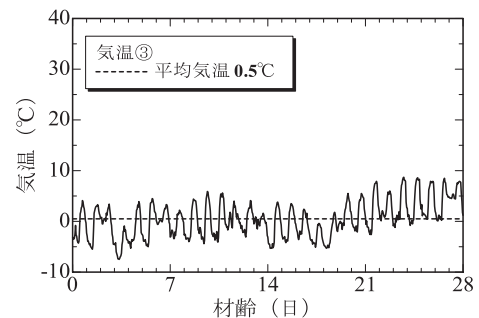


図-4 シリーズ 2 における温度条件 (気温③)

マグネシウム系固化材による改良土の力学特性に及ぼす温度の影響

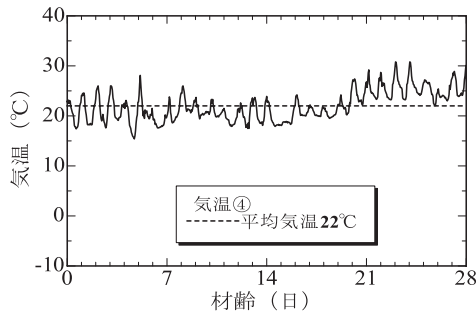


図-5 シリーズ2における温度条件 (気温④)

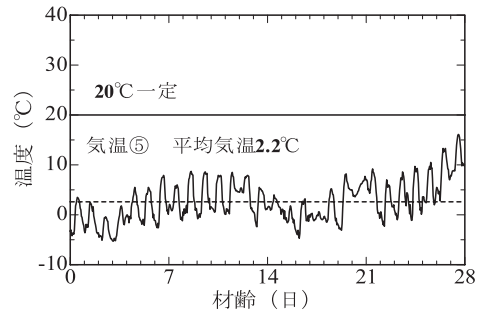


図-6 シリーズ3における温度条件

表-5 シリーズ3における供試体
作製時の締固めエネルギー

締固めエネルギー (kJ/m ³)	
20°C一定	気温⑤
150	150
330	330
539	674
674	1349
1124	
1349	
2248	

表-6 シリーズ1における養生後供試体の性状と一軸圧縮強さ

温度 (°C)	材齢7日				材齢28日			
	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	一軸圧縮強さ (N/mm ²)	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	一軸圧縮強さ (N/mm ²)
-20	5.99	2.10	1.98	0.18	2.65	2.03	1.97	0.70
-5	3.88	2.00	1.93	0.47	1.88	1.96	1.92	1.00
5	1.91	1.95	1.91	1.03	0.92	1.92	1.91	1.96
20	0.82	1.89	1.88	2.91	0.70	1.87	1.86	5.68

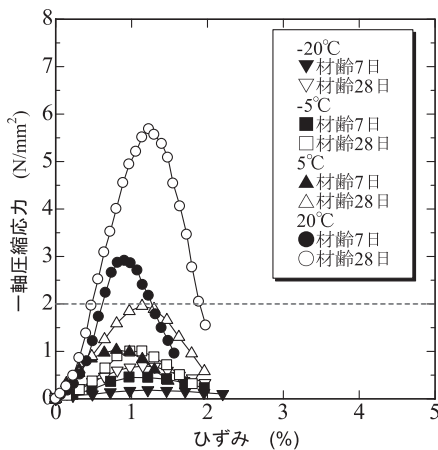


図-7 一軸圧縮試験結果

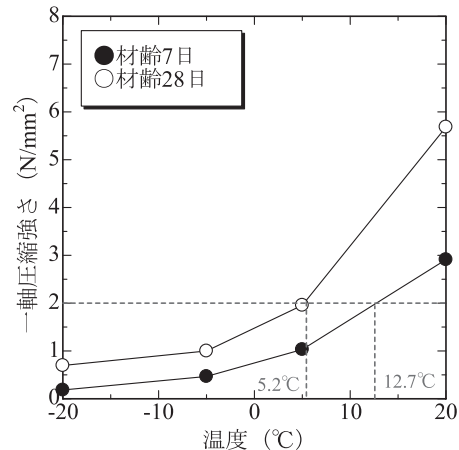


図-8 養生温度と一軸圧縮強さの関係

期から夏期にかけての外気温を想定している。材齢は、気温①と気温④が0.5日、1日、3日、7日および28日。気温②は、1日、3日、7日および28日。気温③は、3日、7日および28日で一軸圧縮試験を行った。

セメント・石灰系固化材を用いて地盤改良を行う際、混合後数時間養生を行った後、打設することがある。マグネシウム系固化材においても同様な工法が可能であるか、気温①において、混合後シートで乾燥防止を行い、3時間および4時間放置した後に供試体を作製し、材齢1日、3日、7日および28日で一軸圧縮試験を行った。

2.3.3 シリーズ3

寒冷地では、間隙水の凍結膨張によって、地盤が持ち上がり剥離が生じて軟弱化してしまうという問題がある⁶⁾。

冬期の施工においては、凍上対策が必要となる。そこで、シリーズ3は転圧の影響を考慮し、締固めエネルギーを変化させ、供試体の作製を行った。作製時の締固めエネルギーは、20°C一定の場合7種類、気温⑤は4種類とし、条件を表-5に、温度条件を図-6に示す。気温⑤は冬期から春期にかけての気温である。材齢3日、7日および28日で一軸圧縮試験を行った。

3. 実験結果

3.1 シリーズ1

養生後供試体の性状を表-6に、図-7に一軸圧縮試験結果を示す。養生温度-20°Cの場合材齢7日、28日ともに一

表-7 シリーズ2における養生後供試体の性状と一軸圧縮強さ

気温	材齢(日)	含水比(%)	湿潤密度(g/cm ³)	乾燥密度(g/cm ³)	一軸圧縮強さ(N/mm ²)
気温① 平均気温 32.4℃	0.5	2.66	2.03	1.98	1.62
	1	1.77	2.03	1.99	2.78
	3	2.05	2.10	2.05	3.21
	7	1.61	2.03	2.00	4.18
	28	1.25	2.02	1.99	7.09
気温② 平均気温 3℃	1	2.24	1.96	1.91	0.45
	3	0.53	1.94	1.93	0.98
	7	0.45	1.91	1.90	2.14
	28	1.74	1.93	1.90	3.54
気温③ 平均気温 0.5℃	3	1.89	1.98	1.95	0.36
	7	2.91	1.99	1.93	0.51
	28	0.82	1.92	1.91	1.54
気温④ 平均気温 22℃	0.5	1.56	1.94	1.91	0.75
	1	2.21	2.01	1.97	1.14
	3	1.20	2.02	1.99	2.25
	7	0.71	2.02	2.00	3.26
	28	0.62	2.02	2.01	6.04

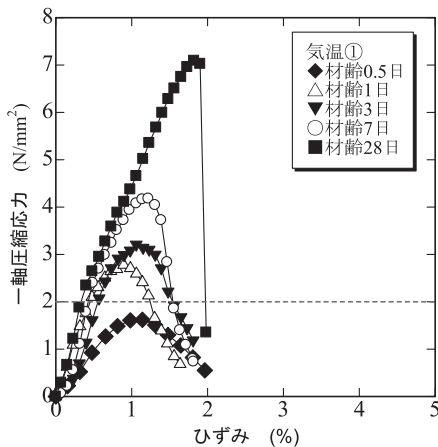


図-9 気温①における応力ひずみ曲線

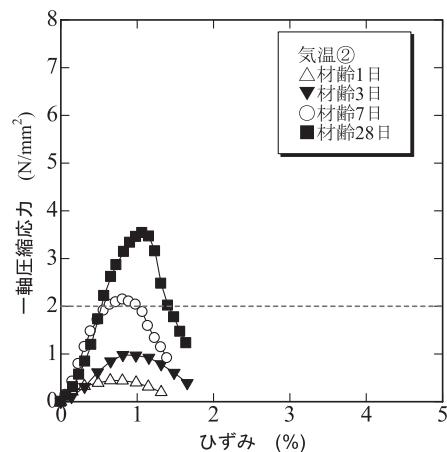


図-10 気温②における応力ひずみ曲線

軸圧縮強さが 2.0N/mm² を超えておらず、防草材としての使用は強度面からみて難しい。養生温度-5℃の場合も-20℃の結果と同様に、一軸圧縮強さが 2.0N/mm² を超えておらず、防草材としての使用は難しい。養生温度 5℃においても、材齢 28 日で 1.96N/mm² と 2.0N/mm² を超えていない。養生温度 20℃場合は、材齢 7 日で一軸圧縮強さが 2.0N/mm² を超えているため、防草材として必要とされる一軸圧縮強さを有している。

図-8 は養生温度と一軸圧縮強さの関係を示したものである。養生温度が高くなるに伴って、一軸圧縮強さは増加している。防草材として必要とされる一軸圧縮強さ 2.0N/mm² は、材齢 7 日で約 12.7℃以上、材齢 28 日においては、約 5.2℃以上の温度が必要である。

3.2 シリーズ 2

養生後供試体の性状を表-7 に示す。図-9 は気温①条件

で養生した供試体の応力ひずみ曲線である。材齢の増加に伴い一軸圧縮強さは大きくなっている。また曲線の立ち上りも急になり、脆性的なものに変化している。

気温②条件で養生した供試体の応力ひずみ曲線を図-10 に示す。材齢の増加に伴い一軸圧縮強さは大きくなっている。

図-11 は気温③条件で養生した供試体の応力ひずみ曲線である。材齢 28 日経過後も、2.0N/mm² に達しておらず、防草材としての使用は難しい。

図-12 は気温④条件で養生した供試体の応力ひずみ曲線である。材齢の増加に伴い、曲線の立ち上りも急になり、脆性的なものに変化し、一軸圧縮強さは大きくなっている。

図-13 は各気温において得られた一軸圧縮強さと材齢の関係を示したものである。気温が高いほど一軸圧縮強さは大きくなっている。気温①は材齢 1 日、気温②は材齢 7 日、

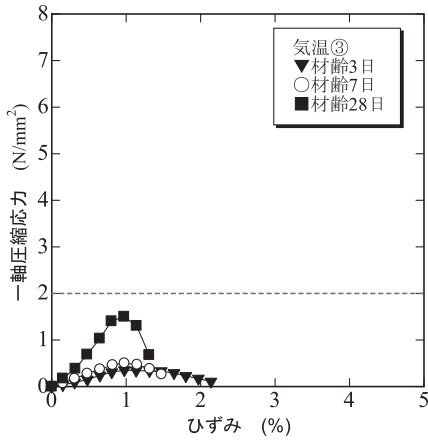


図-11 気温③における応力ひずみ曲線

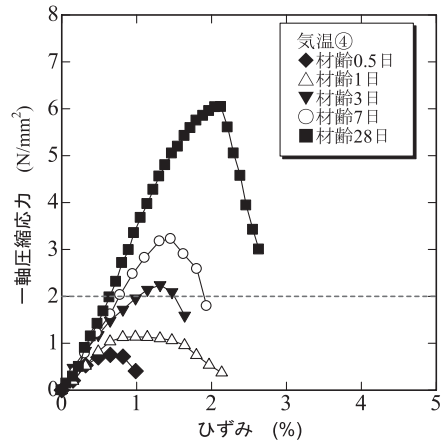


図-12 気温④における応力ひずみ曲線

表-8 気温①混合後の放置時間の違いによる供試体の性状と一軸圧縮強さ

混合後の放置時間 (hours)	材齢 (日)	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	一軸圧縮強さ (N/mm ²)
0	1	1.77	2.03	1.99	2.78
	3	2.05	2.10	2.05	3.21
	7	1.61	2.03	2.00	4.18
	28	1.25	2.02	1.99	7.09
3	1	1.23	2.02	1.99	2.43
	3	1.14	1.94	1.91	2.96
	7	0.65	1.93	1.92	3.68
	28	0.72	1.99	1.98	6.36
4	1	0.90	1.96	1.94	0.62
	3	0.67	1.95	1.94	1.45
	7	0.44	1.97	1.96	2.31
	28	0.22	1.94	1.93	3.99

気温④は材齢 3 日で、一軸圧縮強さが 2.0N/mm²を超えているため、防草材として必要とされる一軸圧縮強さを有している。しかし気温③は 2.0N/mm²に達していない。これは、図-8 からも分かるように、気温が 10℃を下回り、平均気温が 0.5℃であるためといえる。気温②は、材齢 7 日から材齢 28 日の一軸圧縮強さの増加が少ない、これは、気温が 7 日までは 10℃を上回っていたが、7 日以降の気温の低下があげられ、冬期の施工は注意が必要である。

表-8 は気温①において、混合後の放置時間の違いによる供試体の初期性状である。養生時間をおくことにより、含水比の低下が見られる。これは固化材の反応によるものと、夏期における、急激な乾燥により、ドライアウトの影響と思われる。

図-14 は気温①において、混合後の放置時間の違いによる、一軸圧縮試験から得られた、材齢と一軸圧縮強さの関係を示したものである。混合後 0 時間放置に比べ 3 時間放置は、僅かな強度の低下であるが、4 時間放置は 0 時間放置の半分となり、強度低下が著しい。夏期においては、混合後 3 時間以内の施工が望ましい。

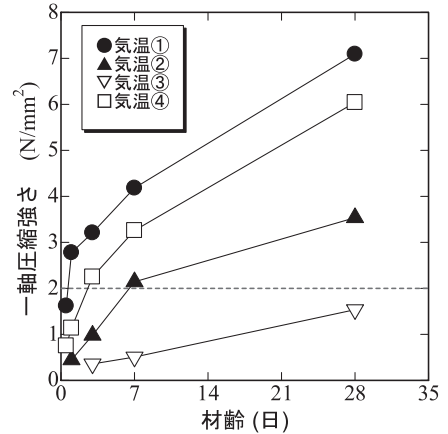


図-13 材齢と一軸圧縮強さの関係

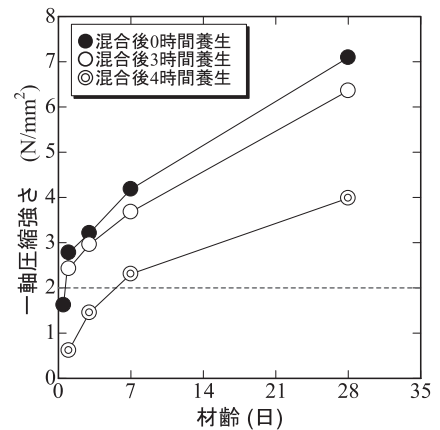


図-14 混合後の放置時間の違いによる材齢と一軸圧縮強さの関係

3.3 シリーズ 3

表-9 に 20℃一定、表-10 に気温⑤のときの供試体の初期性状を示す。材齢の増加にともない、含水比は低下している。

図-15 は供試体作製時、締固めエネルギーを変化させたときの一軸圧縮試験より得られた、乾燥密度と一軸圧縮強さの関係である。密度の増加にともない、一軸圧縮強さも大きくなっている。気温⑤において、材齢 3 日から材齢 7

表-9 シリーズ3における20℃一定供試体の初期条件と一軸圧縮強さ

材齢 (日)	締固めエネルギー (kJ/m ³)	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	一軸圧縮強さ (N/mm ²)
3	150	4.87	1.82	1.73	1.53
	330	3.91	1.85	1.78	1.79
	539	2.41	1.90	1.86	2.05
	674	3.36	1.93	1.87	2.09
	1124	4.30	1.96	1.88	2.32
	1349	3.83	2.00	1.93	2.61
	2248	3.25	2.04	1.98	2.67
7	150	3.85	1.84	1.77	2.87
	330	2.61	1.92	1.87	3.36
	539	2.29	1.95	1.90	3.85
	674	2.43	2.01	1.96	4.33
	1124	2.71	2.03	1.98	4.40
	1349	2.16	2.06	2.02	4.66
	2248	2.12	2.11	2.07	5.62
28	150	1.38	1.82	1.80	4.95
	330	1.22	1.87	1.850	7.56
	539	0.85	1.91	1.90	8.05
	674	0.99	1.97	1.95	9.81
	1124	1.38	1.99	1.96	10.41
	1349	1.43	2.01	1.98	10.79
	2248	1.63	2.08	2.05	13.42

表-10 シリーズ3における気温⑤供試体の初期条件と一軸圧縮強さ

材齢 (日)	締固めエネルギー (kJ/m ³)	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	一軸圧縮強さ (N/mm ²)
3	150	1.19	1.77	1.74	0.14
	330	1.02	1.78	1.76	0.23
	674	1.31	1.84	1.82	0.32
	1349	1.69	1.91	1.87	0.41
	2248	1.98	1.98	1.94	0.50
7	150	1.35	1.72	1.70	0.37
	330	1.01	1.80	1.78	0.48
	674	1.24	1.85	1.83	0.64
	1349	1.52	1.91	1.88	0.75
28	150	1.09	1.75	1.73	1.82
	330	0.97	1.82	1.80	2.44
	674	1.07	1.88	1.86	3.26
	1349	0.95	1.94	1.92	3.59

日は、強度増加は見られなかったが、材齢7日から材齢28日にかけて、強度が著しく増加している。これは、21日目までは気温が10℃以下であり、21日目以降急激に、気温の上昇がみられたためである。

4. まとめ

本研究では、養生時に温度の異なる改良土の一軸圧縮試験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 養生温度 20℃では、材齢7日で2.0N/mm²の一軸圧縮強さを有しているため、防草効果のある舗装材として十分使用できる。
- (2) 養生温度 -5℃以下では、すべての配合において2.0N/mm²を有していないため、防草効果のある舗装材としての使用は困難である。
- (3) 気温が10℃以下の場合、締固めエネルギーを高くしても、強度増加は見られないが、気温の上昇に伴い、強度は増加する。

参考文献

- 1) 山田哲, 西形達明, 西田一彦, 松田豊: 酸化マグネ

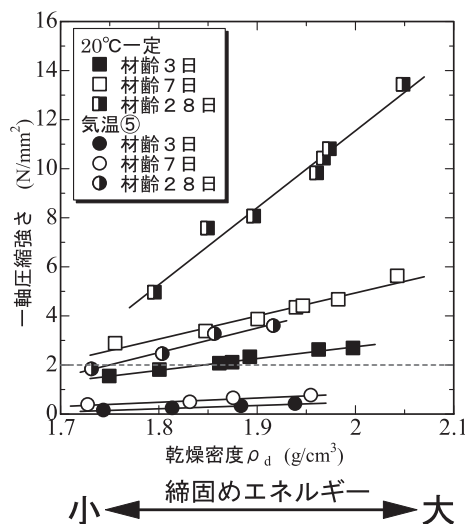


図-15 乾燥密度と一軸圧縮強さの関係

シウムの地盤改良への適応について、土と基礎、Vol.54, No.7, pp.19-21, 2006

- 2) 藤森新作, 小堀茂次: 自然環境にやさしい土壌硬化剤マグホワイトの開発, 農業土木学会誌, 第68巻, 第12号, pp.1297-1300, 2000.
- 3) 社団法人セメント協会: セメント系固化材による地盤改良マニュアル第3版, pp.40-41, 2003.
- 4) 安西徹郎, 犬伏和之編/梅宮善章, 後藤逸男, 妹尾啓史, 筒木潔, 松中照夫著, 土壌学概論, 朝倉書店, 2001.4.
- 5) セメント協会標準試験方法 JCAS L-01-2006 「セメント系固化材による改良体の強さ試験方法」
- 6) 久保裕一, 岳本秀人, 安倍隆二: 積雪寒冷地における歩道部の凍上対策, 北海道開発土木研究所月報, No.624, pp.21-30, 2005年.5月

(2014年6月23日 受付)