

高炉水さいによる地盤安定処理に関する基礎的実験

内 藤 和 章 十 河 茂 幸
(本社技術本部土木技術部)

芳 賀 孝 成

Studies of Stabilization with Ground Granulated Slag

Kazuaki Naito Shigeyuki Sogo
Takashige Haga

Abstract

Many institutions have recently begun to study methods for effective utilization of blast-furnace slag which is a byproduct of refining iron ore and uses for the material have been proposed in numerous fields.

This paper is concerned with a soil stabilizer of which ground granulated slag is the main material. The applicability of stabilization treatment with this material to various types of ground was investigated by laboratory tests. As a result, it was found that ample stabilization could be obtained by the addition and mixing of 5 to 20% of the material to the original soil, especially with increased long-time strengths and high resistance to freezing and thawing.

概 要

銑鉄精練の際副産される高炉スラグの有効利用のための研究が、近年各所で進められ多方面への利用が提案されている。本報告は、高炉水さいを主材とした地盤安定処理材に関するものである。安定処理の各種地盤に対する適応性を調べるために室内試験を行ったがこの結果、対象上の重量に対し本安定処理材を5～20%添加混合することにより安定処理の効果は十分に発揮されること、特に長期的な強度の増進が大きいこと、凍結融解に対する抵抗性が大きいことなどがわかった。

1. まえがき

従来よりセメントを安定処理に使用する方法は、一般によく知られておりその効果も大きい。近年になって、銑鉄精練の副産物である高炉水さいの自硬性を利用してこれを安定処理材として利用することが各所で考えられるようになったが、この方面への利用が可能ならばセメント資源の将来を問われる昨今、この方法に大きな期待を寄せることができる。このことは資源の有効的利用に対する今後の課題の一つであるといえる。

本研究では、対象土として関東ローム、マサ土、砂、粘性土をとりあげ、高炉水さい安定処理材を5～20%添加混合することによって改良効果を期待し、その物理性状の変化、強度特性、変形特性等を調べて、その適応性を検討した。以下にその結果について述べる。

2. 安定処理について

地盤の浅層安定処理工法にはいくつかの方法があるが、土に他の適当な材料を添加して安定処理するものが多く、これは力学的安定処理工法と化学的安定処理工法とに大別できる。また、安定処理材の種類によって次の様に分けられる。

- (i) 粒度調整による工法
- (ii) セメントまたは石灰による工法
- (iii) 歴青材による工法
- (iv) 化学的安定剤による工法

これらのうち、セメントによる工法は古くから行われている方法で、固結方法としてはかなり有効で、基層あるいは路盤とくに上層路盤の安定処理工法としてその価値は大きい。また、石灰による工法は主としてポゾラン反応によりかなり長い年月を経て安定化をはかるものである。

本研究における高炉水さいによる工法は、セメントによる工法の一つとみなせる。すなわち、高炉水さいにアルカリ刺激剤である石灰あるいはセメントを混入することにより、比較的短期間に強度を発現させるものである。

3. 高炉水さい安定処理材について

高炉水さいは銑鉄精練の際に熔融されるノロを急冷して得られる副産物で、その特質の一つに活性すなわち潜在水硬性があげられる。潜在水硬性のため、それ自体では硬化力は非常に小さいが、アルカリ刺激することによって急硬性を発揮する。硬化速度は粉末度とも関係が深く、本実験ではセメントの粉末度程度にまで粉碎した高炉水さいを用いた。また、アルカリ刺激剤としては消石灰あるいはセメントを用いた。

高炉水さい安定処理材としては、高炉水さいと消石灰あるいはセメントを8：2の重量比であらかじめ混合したものを用いた。なお、本実験で高炉水さいとアルカリ刺激剤の比を8：2とした理由は、マサ土に対し予備試験を行った結果が図-1に示すごとく、その配合で強度の伸びが最大であったためである。またこの処理材

は、加水しないかぎり風化することはなく、保存も十分にできる。

表-1に高炉水さい、セメントの物理化学

的性質を示す。また、消石灰は農業用のものを使用した。高炉水さいはその粉末度により高炉水さいA（ブレン値3000cm²/g）高炉水さいB（ブレン値4000cm²/g）とし以下このように表示することにする。

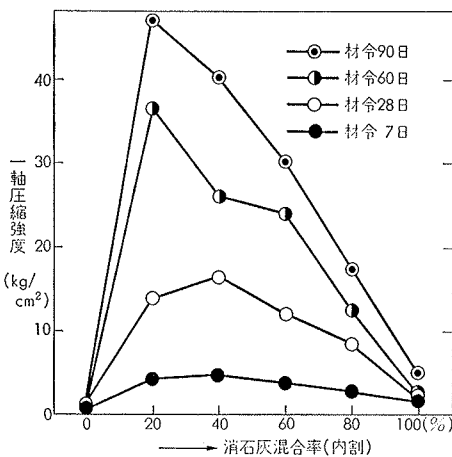


図-1 高炉水さいと消石灰の混合率と強度

材 料	比重	比表面積 (ブレン値) cm ² /g	化 学 成 分							
			Ig loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	MnO
高炉水さい(A)	2.90	3,000	0.93	31.88	18.67	0.63	39.99	6.87	—	1.26
高炉水さい(B)		4,000								
普通セメント	3.15	3,000	0.60	21.80	5.3	3.2	64.4	1.50	2.0	—

表-1 高炉水さいおよびセメントの物理、化学的性質

試 験 項 目				
対 象 土	マサ土	関東ローム	砂	
採 取 場 所	広 島	清 瀬 市	御 宿	
比 重 G _s	2.685	2.621	2.75	
最大乾燥密度 γ _{d max} (g/cm ³)	1.855	0.758	1.48	
最適含水比 ω _{opt} (%)	12.8	84.0	6.7	
粒 度 組 成	2mm以上の粒子 (%)	22.12	0.5	0
	2~0.074mmの粒子 (%)	69.87	57.5	94.0
	0.074~0.005mmのシルト分(%)	5.5	37.2	2.0
	0.005mm以下の粘土分 (%)	2.9	4.8	4.0
	最 大 粒 径 (mm)	4.76	2.0	2.0
	60% 粒 径 (mm)	0.90	0.14	0.24
	均 等 係 数 U _c	6.9	8.2	2.0

表-2 対象土の物理的性質(1)

4. マサ土の安定処理に関する実験

4.1. 実験に用いた材料

マサ土は特殊な風化現象を示し、降雨浸食に対する抵抗性がなく、山崩れなどを発生しやすい。そこで本安定処理の対象土の一つとして実験を行った。マサ土としては広島産のものを用いた。その物理的性質を表-2に示す。なお高炉水さい処理材としては高炉水さいAおよびBを用い、アルカリ刺激剤としては消石灰を使用した。

4.2. 実験方法

上記のマサ土を最適含水比程度に調整したのに対し、高炉水さいAおよびBの安定処理材をマサ土に対し5、10、15、20重量%添加し、φ5×10cm モールド内に詰めて仕事量 E_c=7.0cm³・kg/cm³で突き固め、抜取試料をパラフィンで表面被覆して水分の移動を防止した後20±3℃の恒温室で養生した。なお比較のためセメント処理および消石灰処理についても同様の試験を行った。試験材令を7、14、28、60、90日とし、所定の材令がきた供試体は自動ひずみ制御型一軸圧縮試験機により、一軸圧縮強度および変形係数等を測定した。また材令28日の供試体については凍結融解の繰り返しに対する抵抗性をも試験した。その方法は+20℃~-10℃の凍結融解を1日1サイクルの周期で0.1、3、6、10サイクル繰り返し、それぞれの凍結融解を受けた供試体の強度変形係数、単位体積重量などを測定した。なお、凍結融解の繰り返しは非水浸状態で行った。

4.3. 実験結果および考察

安定処理材の添加率が10%および20%の場合の実験結果を表-3に示す。また、図-2は各処理材の添加率と一軸圧縮強度の関係で

ある。まず、高炉水さいAで処理した供試体は材令28日では添加率10%で13.4 kg/cm²、20%で21.8 kg/cm²の強度が得られ、それぞれ材令90日において47.0 kg/cm² 76.5 kg/cm²となり、強度の増進が著しい。つぎに、高炉水さいB処理土の場合は、材令28日で添加

処理材の種類	材令	10% 添加処理		20% 添加処理	
		一軸圧縮強度 (kg/cm ²)	変形係数 (kg/cm ²)	一軸圧縮強度 (kg/cm ²)	変形係数 (kg/cm ²)
高炉水さいA 処理材	7	3.6	2.93×10 ²	9.1	4.43×10 ²
	28	13.4	3.34×10 ²	21.8	1.37×10 ³
	90	47.0	—	76.5	—
高炉水さいB 処理材	7	10.6	3.22×10 ²	55.9	2.80×10 ³
	28	40.8	1.63×10 ²	119.4	7.73×10 ²
	90	84.6	—	175.4	—
普通セメント 処理材	7	32.7	1.94×10 ²	86.0	1.86×10 ³
	28	55.7	4.52×10 ²	120.6	1.12×10 ⁴
	90	69.4	—	151.0	—
消石灰処理材	7	1.5	8.20×10	6.8	2.89×10 ²
	28	2.5	1.29×10 ²	7.3	2.50×10 ²
	90	5.0	8.74×10 ²	12.8	1.70×10 ³

表-3 マサ土の安定処理試験結果

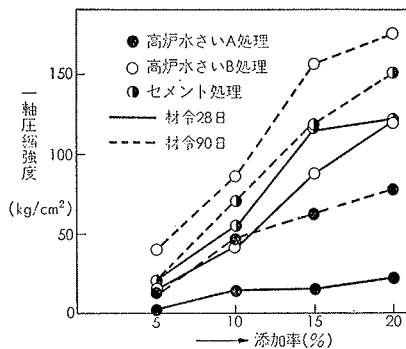


図-2 マサ土処理土の処理材添加率と強度

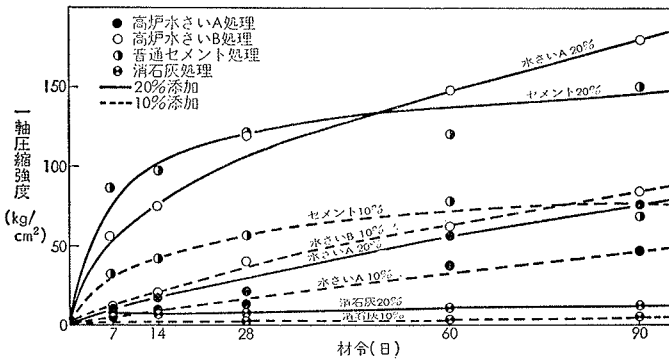


図-3 マサ土安定処理土の材令と強度の関係

率10%のとき、40.8 kg/cm²、20%の時119.4 kg/cm²のものが材令90日ではそれぞれ、84.6 kg/cm²、

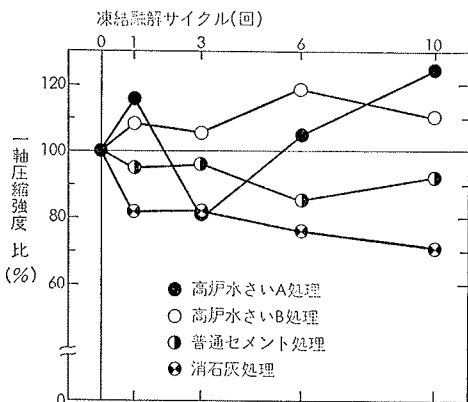


図-4 マサ土処理土の凍結融解による強度変化

175.4 kg/cm² となり、約2倍の強度の伸びがみられた。これらの処理土の各材令における強度の増進を図-3に示すが、高炉水さい処理土の長期的な強度の増進がセメント処理土に比較して優れていることがわかる。なお、処理土の単位体積重量は添加率、処理材の種類に関係なく2.10~2.24 kg/cm²であり、含水比は10~12.5%であった。

凍結融解に対する抵抗性は、図-4に示すとおり、高炉水さい処理土の強度低下はみられず、むしろ強度増加が認められた。セメント処理土の場合、高炉水さい処理土より強度は4倍程度大きい凍結融解後の強度はもとの強度に対して低下している。また、変形係数についてもこれと同様の傾向がみられた。これらの点より、高炉水さいを使用した処理土は凍結融解に対する抵抗性がすぐれていると考えられる。

以上の結果、マサ土を高炉水さいによって安定処理したものは長期における強度が大きく、凍結融解に対する抵抗性にもすぐれているので、初期に強度を要しない場合については高炉水さいの安定処理材としての適用性は充分に高いと思われる。

5. 関東ロームの安定処理に関する実験

5.1. 実験に用いた材料

対象土としては清瀬市産の関東ロームを用いた。その物性は表-2に示すとおりである。なお、高炉水さい安定処理材はあらかじめ水さいと消石灰を8:2の重量比で混合したものを用いた。

5.2. 実験方法

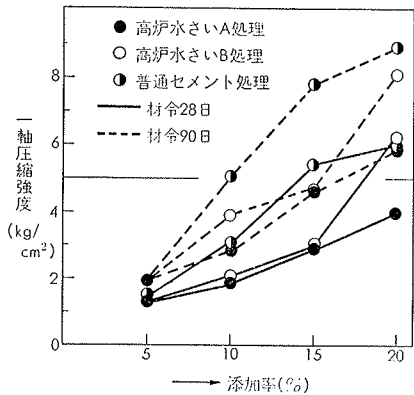
自然含水状態の関東ロームに安定処理材を添加混合し、4.2.と同様の方法で試験した。

処理材の種類	材令	10% 添加処理		20% 添加処理	
		一軸圧縮強度 (kg/cm ²)	変形係数 (kg/cm ²)	一軸圧縮強度 (kg/cm ²)	変形係数 (kg/cm ²)
高炉水さいA 処理材	7	1.63	3.50×10	3.84	1.34×10 ²
	28	1.83	4.60×10	4.00	1.09×10 ²
	90	2.72	7.90×10	5.78	2.32×10 ²
高炉水さいB 処理材	7	1.78	4.20×10	4.46	1.25×10 ²
	28	2.06	4.90×10	6.25	1.60×10 ²
	90	3.93	1.10×10 ²	8.15	4.70×10 ²
普通セメント 処理材	7	2.51	5.50×10	5.39	1.46×10 ²
	28	3.28	7.00×10	5.89	1.65×10 ²
	90	5.11	1.18×10 ²	8.85	2.91×10 ²
消石灰処理材	7	2.84	7.70×10	3.92	1.45×10 ²
	28	3.42	7.20×10	4.37	2.12×10 ²
	90	3.71	9.80×10	4.42	7.75×10 ²

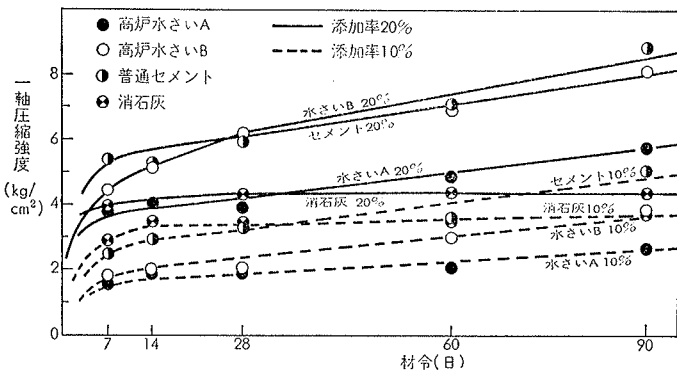
表-4 関東ロームの安定処理試験結果

5.3. 実験結果および考察

添加率10%および20%処理の場合の実験結果を表一4に示す。図一5は添加率と強度の関係であり、一軸圧縮強度は添加率にほぼ比例して増大することがわかる。また、図一6に示すようにセメント処理の場合も高炉水さい処理の場合も初期強度は大差はなく、強度の伸びにもあまり大きな差異はみられない。10%添加の場合にこの傾向は著しいが、これは添加量が少なくて処理土が不均一な混合状態となり、対象土を結合する能力が各処理材とも十分に発揮されず主に処理材の添加による含水比の変化により強度が左右されるためと考えられる。20%添加の場合



図一5 関東ローム処理土の添加率と強度の関係



図一6 関東ローム処理土の材令と強度の関係

合には各処理材は比較的均一に混合され、処理材の固結力の差があらわれ、高炉水さいBおよびセメントによる処理土がともに消石灰による処理土に比べて大きな強度をもつに至ったものと考えられる。したがって、さらに十分な混合を行えば、強度の増加も期待できるとされる。なお、本実験では凍結融解に対する抵抗性試験も行ったが、各種処理土とも大差は認められなかった。

6. 砂の安定処理に関する実験

6.1. 実験に用いた材料

本実験に作用した砂は表一2に示すとおり、非常に、均等な粒径で、締め固まりにくく、流動化が生じやすい性質をもっている。このような砂地盤では安定処理

を必要とする場合が多いので実験を行った。

安定処理材には高炉水さいAを用いて、アルカリ刺激剤としてはセメントを使用した。

6.2. 実験方法

上記の砂を最適含水比の6~7%に調整したのち、処理材を5~10%の添加率で添加混合し、4.2.と同様の方法で供試体を作成して、養生を行った。測定項目は一軸圧縮強度、変形係数、単位体積重量等である。

6.3. 実験結果および考察

表一5に実験結果を示す。

マサ土や関東ロームの場合には高炉水さい安定処理土とセメント安定処理土

処理材の種類	材令	5% 添加処理		10% 添加処理	
		一軸圧縮強度 (kg/cm ²)	変形係数 (kg/cm ²)	一軸圧縮強度 (kg/cm ²)	変形係数 (kg/cm ²)
高炉水さいA 処理材	7	1.54	—	6.01	—
	28	3.07	7.10×10 ²	13.39	2.93×10 ²
普通セメント 処理材	7	6.79	—	—	—
	28	22.37	3.27×10 ³	—	—

表一5 砂の安定処理試験結果

との強度には顕著な差はないが、本実験で用いた様な対象土に対してはセメント処理土の方が高炉水さい処理土よりかなり大きな強度を発現することが認められた。これは砂の含水量が少ないので高炉水さいの固結力を発揮させるためのアルカリ刺激が不十分になったためと思われる。実際にはのり面などのそれほど強度を要しない場合が多く、セメントよりも安価な高炉水さいを添加率を多くして使用した方が練り混ぜ効果もよくなり、効果的と思われる。特に4.3.の結果より高炉水さい処理の場合は長期的に強度を発現するため施工のやり直しの許容期間が長く、また施工後、地盤沈下、側方変位などが落ち着いてからも強度増加が見込めるので、地盤の全体の強度の点からも有利と考えられる。

7. 粘性土の安定処理に関する実験

7.1. 実験に用いた材料

対象土は羽田産の海性粘性土および朝霞浄水場の沈殿ヘドロでそ

採取場所	比重 G _s	単位体積重量 γ (g/cm ³)	含水比 ω (%)	粒度 (%)		
				砂	シルト	粘土
羽田沖	2.49	1.53	65	24	68	5
朝霞浄水場	2.98	1.20	258	1	56	43

表一6 対象土の物理的性質(2)

の物性は表一

6に示すとおりである。なお、反応助剤としてはセメントを用いた。

7.2. 実験方法

対象土の海性粘性土は一度乾燥させた試料に水道水を加えて含水比60~70%に調整し、朝霞浄水場ヘドロ

は自然含水状態の 258%で使用した。供試体は、調整された対象土に対し 5~20%の添加率で安定処理材を加え、ソイルミキサーにより 2~3 分間混合し $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の円柱型枠に空隙ができない様に軽い振動を与えながら詰めて作成した。

これらの供試体は水分の変動がない様にビニールで被覆し $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温室にて養生した。なお、試験材令は、海性粘性土の場合 7, 14, 28, 120 日へドロの場合は 28 日とした。

7.3. 実験結果および考察

実験結果を表-7, 表-8, に示す。海性粘性土の処理土の

処理材の種類	材令	10% 添加処理		20% 添加処理	
		一軸圧縮強度 (kg/cm ²)	変形係数 (kg/cm ²)	一軸圧縮強度 (kg/cm ²)	変形係数 (kg/cm ²)
高炉水さい処理材	7	3.08	4.53×10^2	28.07	1.00×10^4
	28	8.59	1.42×10^3	48.12	0.98×10^4
	120	14.79	2.11×10^3	71.98	1.29×10^4
普通セメント処理材	7	16.60	3.11×10^3	29.77	6.91×10^3
	28	29.66	5.99×10^3	43.04	7.96×10^3
	120	45.26	-	61.83	9.59×10^3

表-7 海性粘性土の安定処理試験結果

処理材の種類	材令	10% 添加処理		20% 添加処理	
		一軸圧縮強度 (kg/cm ²)	変形係数 (kg/cm ²)	一軸圧縮強度 (kg/cm ²)	変形係数 (kg/cm ²)
高炉水さい	28	0.061	3.19	0.334	4.67×10
普通セメント	28	5.35	2.15×10^3	19.5	1.30×10^4

表-8 ヘドロの安定処理試験結果

は大きな差異がある。これは海性粘性土と処理材がミキサーにより均一に混合され、処理材の固結力が十分に発揮されたためと考えられる。普通セメントを 20% 添加したものの強度は高炉水さいを同量添加したものにほぼ等しいがこれは処理材と対象土の混合状態および混合してからの時間によって決まる処理土固有の強度の上限がこの付近にあるためと推定される。

ヘドロの場合、水さい処理土はセメント処理土に対し強度が極めて小さいがこれは何らかの作用で高炉水さいのアルカリ刺激が妨げられたためと考えられる。一つの理由として粘土粒子や吸着水の電気化学的な作用を挙げることができる。

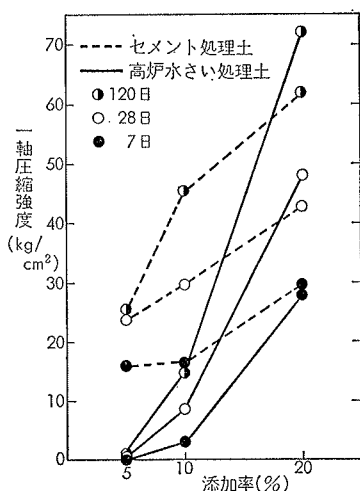


図-7 海性粘性土処理の添加率と強度の関係

図-7 に海性粘性土の場合の高炉水さい処理土およびセメント処理土の添加率と強度の関係を示した。

高炉水さい処理土の場合、添加率 5% のときはほとんど強度の発現がみられず、添加率 10% の場合にもセメント処理土に比べて約 1/3 の強度の発現しかみられなかった。ところが、添加率を 20% にすると、材令 7 日においてセメント処理土の方が強度は大きい、材令 28 日においては逆に高炉水さい処理土の方が大きくなる。上記のように高炉水さい処理土が 5~10% で強度が発現しなかったのは添加率が少ないため全体に対するアルカリ刺激剤の絶対量が少なくなり、高炉水さいへの反応刺激が十分でなく普通セメントより強度が小さくなったものと考えられる。したがってこの様な粘性土の安定処理をより効果的に行うためには、高炉水さいに対する反応助剤としてセメントにかわる強いアルカリ刺激剤を用いる事も有効と思われる。

8. あとがき

以上の高炉水さいを安定処理材として用いるための基礎的実験結果から、高炉水さい安定処理法の長所としてつぎのようなものを挙げる事ができる。

(1) 従来セメントにより安定処理ができる様な対象地盤に対しては、高炉水さい処理材を用いることができる。特に短期間に強度を要しない様な場所において、高炉水さいは長期的な強度の増進が大きい、施工後地盤が安定してから大きな強度増加が期待できるので有利である。

(2) 高炉水さいの反応助剤としては、消石灰、セメントなどがあるが、対象地盤によって高炉水さいに対するアルカリ刺激が不十分になることがあるため、このような場合は比較的強いアルカリ刺激剤を添加した方がよいと思われる。また、添加率が一定でも反応助剤の混合率を変えることによって地盤の強度を調節することができる。

(3) 高炉水さい処理材を用いた処理土はセメント処理土と同等もしくはそれ以上の凍結融解に対する抵抗性を持っている。

また、高炉水さい安定処理のその他の長所として、セメントや消石灰に比し安価であること、植生への害が少ないこと、処理土からの浸透水のアルカリ濃度が低く環境に及ぼす影響が少ないことなども挙げられ、高炉水さいの安定処理材としての適応性は充分に高いと考えられる。今後実際の適用に際しては、処理材の粉末度と添加率、アルカリ刺激剤の種類と混合率、処理土の含水比と粒度、混合方法などの相互の関係についてさらに詳細な検討を加える必要がある。