

徐冷フェロニッケルスラグの盛土材料としての性能評価

盛 健太郎[†]・橋詰 豊^{††}・金子 賢治^{†††}・荻原 正裕^{††††}Performance Evaluation of Slow Cooling Ferronickel Slag
as an Embankment MaterialKentarō MORI[†], Yutaka HASHIZUME^{††}, Kenji KANEKO^{†††} and Masahiro OGIWARA^{††††}

ABSTRACT

Ferronickel slag is a by-product when ferronickel smelted, and it is mainly used for concrete aggregate or road bed material. However, the using amount is less than the emergence amount. Therefore, it is necessary to create new uses. In this study, in addition to organizing the data of annual tests of slow cooling ferronickel slag so far, we comprehend fundamental properties. Based on the fundamental properties, we designed a virtual reinforcing soil retaining wall and we compared the case of using slow cooling ferronickel slag and the case of using a natural material. As a result, it was found that the cross section of the reinforced region can be made smaller as compared with the natural material in the case of using the slow cooling ferronickel slag, and the effectiveness as embankment material was shown.

Key Words : *slow cooling ferronickel slag, embankment material, fundamental properties of the soil, shear strength, permeability*

キーワード：徐冷フェロニッケルスラグ、盛土材料、土の基本的性質、せん断強さ、透水性

1. はじめに

フェロニッケルは、ステンレスを精錬する際の主原料となる合金であり、八戸市の大太平洋金属（株）をはじめとして国内では 3 カ所でのみ生産されている。また、八戸市での生産量は東アジアトップ・国内シェアの約 50% を占めており、地域の特徴ある産業の一つである。金属を製錬する際には、副産物としてスラグが大量に発生するが、これらを資材として有効に利

用することは、製鉄を始めとする金属製造業における重要な課題である。八戸市の大太平洋金属（株）においても、フェロニッケルを製錬する際にフェロニッケルスラグが大量に発生し、コンクリート用骨材¹⁾や路盤材などとして利用されている。また、2012 年には路床改良材としての検討²⁾も進められており、副産物としての利用量は多くなってきている。しかし、発生量に対して十分な利用量にはなっておらず、新しい用途を生み出す必要がある。なお、スラグ類は、冷却方法により風砕スラグ、水砕スラグ、徐冷スラグなどに分類されるが、それぞれの冷却方法によりコストおよび性質が異なる。本研究では、八戸市で産出するフェロニッケルスラグのうち、最も安価に製造可能な徐冷フェロニッケルスラグを対象として、盛土材として

平成 29 年 11 月 27 日受付

平成 30 年 1 月 30 日受理

[†] 八戸工業大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻
博士前期課程・1 年

^{††} 八戸工業大学工学部土木建築工学科・講師

^{†††} 八戸工業大学大学院工学研究科・教授

^{††††} 大太平洋金属株式会社

の有効利用の可能性について検討する。

徐冷フェロニッケルスラグを地盤材料として見た場合、天然の地盤材料と比較して土粒子の密度が大きいことが特徴である。これを盛土材料として利用することを考えた場合には、密度が大きいことは軟弱地盤上に構築する場合には不利になるが、自重により土圧等に抵抗するような盛土構造物である擁壁であれば、密度が大きいことを利用して盛土部分の体積を小さくすることができる。これにより盛土構築に関わるトータル・コスト（用地・材料費・工期）は低減され、フェロニッケルスラグの材料費は天然材料と同程度あるいはより高価であっても、盛土材料として有効に利用できるものと考えられる。本研究では、まず、平成 22 年から 27 年にわたり行ってきた土質試験のデータを整理して、地盤材料としての基本的性質の幅の程度等について検討する。次に、盛土材料としての性能は強度と透水性の把握が必要となるため、最大粒径が 5mm 以下の徐冷フェロニッケルスラグと最大粒径が 40mm 以下の徐冷フェロニッケルスラグ（以下本文では 5mm および 0-40mm と表記）を対象として主にこれらの定量的な把握を目的として実験的な検討を行う。さらに、基本的なデータを把握した後、それに基づいて盛土構造物の設計を行って、天然材料で設計した場合とのコスト等の比較を行い、フェロニッケルスラグの盛土材料としての適応性について示す。

2. 地盤材料としての基本的性質

フェロニッケルの原料となるニッケル鉱石自体に物性値の幅があるため、副産物であるフェロニッケルスラグに関しても物性値の幅が生じる可能性がある。そこで、徐冷フェロニッケルスラグの地盤材料としての基本的性質と、その物性値の幅の程度を調べるために、まず過去数年間の試験結果を整理する。

2.1 土壤環境基準に関わる試験データ

副産物を地盤材料として利用する場合の前提として、土壤環境基準を満たす材料である必要がある。ここでは、過去に定期的実施している試験データを整理して、その安全性について確認する。「土壤溶出量に係る測定方法を定める件（環境省告示第 18 号）」に基づく溶出量と「土壤含有量調査に係る測定方法を定める件（同第 19 号）」に基づく含有量について調べている。

表 1 に 2011 年以降のフェロニッケルスラグにおける有害物質の含有量試験結果を示す。有害物質の含有量については変動が無く、全ての物質について環境基準値の 1/10 未満となっており、基準を満たしている。次に、表 2 に 2011 年以降のフェロニッケルスラグにおける有害物質の溶出量試験結果を示す。表 2 より、フッ素などにおいて多少の物性値の幅はあるものの、全ての物質について土壤環境基準を満たしていることがわかる。

スラグ類の中には環境基準（環境省告示第 18 号、第 19 号）に適合しないものもあるが、前述のようにフェロニッケルスラグについては、過去数年間の土壤環境基準に係わる有害物質の含有量と溶出量の試験結果を整理して、環境基準（環境省告示第 18 号、第 19 号）は満足していることがわかった。フェロニッケルスラグの安全性についてはフィリピンにおいても調べられており、環境保護庁の定める基準値を超える結果は検出されず安全であるといった本研究と同様の報告がある³⁾。したがって、地盤材料として安全に利用できる材料であると言える。

2.2 土質試験データの整理

ここでは、年に 1 回の定期的な土質試験結果について 2010 年以降のデータを整理して示す。

(1) 徐冷フェロニッケルスラグ-5mm

まず、徐冷フェロニッケルスラグ-5mm について、表 3 に試験結果一覧表を、図 1 に粒度分布を示す。土粒子の密度は、2013 年を除いて概ね 3.23g/cm^3 程度である。天然の鉱物は一般に $2.5\sim 2.8\text{g/cm}^3$ 程度のものがほとんどである

表 1 含有量試験結果（単位は全て mg/kg）

物質名	Cd	Pb	Cr ⁶⁺	As	Hg	Se	F	B
2011 年	< 15	< 15	< 25	< 15	< 1.5	< 15	< 40	< 40
2012 年	< 15	< 15	< 25	< 15	< 1.5	< 15	< 40	< 40
2013 年	< 15	< 15	< 25	< 15	< 1.5	< 15	< 40	< 40
2014 年	< 15	< 15	< 25	< 15	< 1.5	< 15	< 40	< 40
2015 年 3 月	< 15	< 15	< 25	< 15	< 1.5	< 15	< 40	< 40
2015 年 8 月	< 15	< 15	< 25	< 15	< 1.5	< 15	< 40	< 40
2015 年 9 月	< 15	< 15	< 25	< 15	< 1.5	< 15	< 40	< 40
2015 年 10 月	< 15	< 15	< 25	< 15	< 1.5	< 15	< 40	< 40
2015 年 11 月	< 15	< 15	< 25	< 15	< 1.5	< 15	< 40	< 40
最小値	< 15	< 15	< 25	< 15	< 1.5	< 15	< 40	< 40
最大値	< 15	< 15	< 25	< 15	< 1.5	< 15	< 40	< 40
基準値（以下）	150	150	250	150	15	150	4000	4000
判定	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

表 2 溶出量試験結果（単位は全て mg/L）

物質名	Cd	Pb	Cr ⁶⁺	As	Hg	Se	F	B
2011 年	< 0.005	< 0.005	< 0.01	< 0.005	< 0.0005	< 0.005	0.1	< 0.05
2012 年	< 0.005	< 0.005	< 0.01	< 0.005	< 0.0005	< 0.005	0.2	< 0.05
2013 年	< 0.001	< 0.005	< 0.01	< 0.005	< 0.0005	< 0.005	< 0.1	< 0.1
2014 年	< 0.001	< 0.005	< 0.01	< 0.005	< 0.0005	< 0.005	< 0.1	< 0.1
2015 年 2 月	< 0.005	< 0.005	< 0.01	< 0.005	< 0.0005	< 0.005	0.3	< 0.05
2015 年 3 月	< 0.005	< 0.005	< 0.01	< 0.005	< 0.0005	< 0.005	0.2	< 0.05
2015 年 4 月	< 0.005	< 0.005	< 0.01	< 0.005	< 0.0005	< 0.005	0.2	< 0.05
2015 年 5 月	< 0.005	< 0.005	< 0.01	< 0.005	< 0.0005	< 0.005	0.2	< 0.05
2015 年 6 月	< 0.005	< 0.005	< 0.01	< 0.005	< 0.0005	< 0.005	0.2	< 0.05
2015 年 7 月	< 0.001	< 0.005	< 0.01	< 0.005	< 0.0005	< 0.005	0.3	< 0.05
2015 年 8 月	< 0.001	< 0.005	< 0.01	< 0.005	< 0.0005	< 0.005	0.1	< 0.05
2015 年 9 月	< 0.001	< 0.005	< 0.01	< 0.005	< 0.0005	< 0.005	0.1	< 0.05
2015 年 10 月	< 0.001	< 0.005	< 0.01	< 0.005	< 0.0005	< 0.005	< 0.1	< 0.05
2015 年 11 月	< 0.001	< 0.005	< 0.01	< 0.005	< 0.0005	< 0.005	0.1	< 0.05
最小値	< 0.001	< 0.005	< 0.01	< 0.005	< 0.0005	< 0.005	< 0.1	< 0.05
最大値	< 0.005	< 0.005	< 0.01	< 0.005	< 0.0005	< 0.005	0.3	< 0.1
基準値（以下）	0.01	0.01	0.05	0.01	0.0005	0.01	0.8	1
判定	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

が、徐冷フェロニッケルスラグはこれらに比べて約 20% 程度、密度が大きい。粒度特性については、年によって多少の粒度分布の変動が見られ、細粒分の含有率は 10～20% 程度であり、

2mm～5mm 程度の礫分が 30～50% 含まれている。粒度分布は、他の物性値に影響を与えるため、このような分布の幅を考慮した物性値の把握が必要となる。締固め試験により取得され

表 3 土質試験結果（徐冷フェロニッケルスラグ-5mm）

試験項目		2015 年	2014 年	2013 年	2012 年	2011 年	2010 年
土粒子の密度 (g/cm ³)		3.229	3.229	3.090	3.251	3.222	3.235
粒度特性	礫分 (%)	40.91	33.71	27.95	50.71	32.80	35.79
	砂分 (%)	47.44	47.32	60.28	38.66	51.41	54.02
	細粒分 (%)	11.65	18.97	11.77	10.63	15.79	10.19
	最大粒径 (mm)	9.5	9.5	19.0	19.0	4.75	4.75
	均等係数	32.46	38.24	19.17	41.54	100.00	20.00
	曲率係数	1.05	0.65	1.14	1.37	1.15	0.41
単位容積質量 (kg/L)		2.158	2.280	2.188	2.108	2.115	2.195
締固め特性	最大乾燥密度 (g/cm ³)	2.32	2.38	2.39	2.39	2.45	2.40
	最適含水比 (%)	8.15	8.28	9.03	7.23	8.32	7.54
修正 CBR	締固め度 95% (%)	89	86	121	71	102	82
	締固め度 90% (%)	31	24	38	19	31	32
凍上特性	凍上様式	1	1	1	1	1	1
	凍上率 (%)	0	0	0	0	0	0
	判定	合格	合格	合格	合格	合格	合格

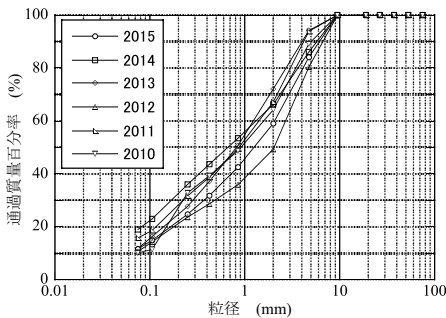


図 1 粒度分布（-5mm）

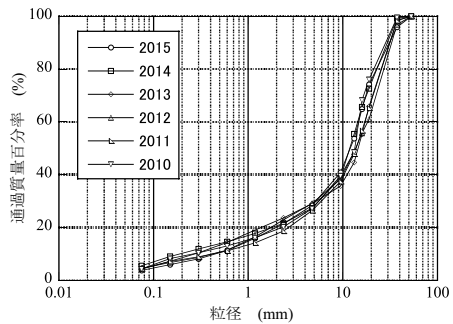


図 2 粒度分布（0-40mm）

る最大乾燥密度は、2.3～2.4g/cm³ 程度であり、砂質土と比べて 30% 程度大きい。最適含水比は毎年 8% 前後であり、ほとんど変動は見られない。修正 CBR については、締固め度 95%、90% とともに良好な結果を示しており、路盤材として有効に利用できることがわかる。また、ほとんど凍上しない材料であり、凍上抑制層としての利用も可能である。

(2) 徐冷フェロニッケルスラグ 0-40mm

徐冷フェロニッケルスラグ 0-40mm について、表 4 に試験結果一覧表を、図 2 に粒度分布を示す。なお、粒度特性については、土質用のふるい目での試験を行っていないため概算値

となっている。粒度分布は、-5mm と比較して分布の幅は小さいことがわかる。-5mm と比較して粒度が大きく礫分が多いため、最大乾燥密度が大きく、最適含水比が小さい値となる。また、修正 CBR も大きく、路盤材等として十分に使用可能である。

3. 徐冷フェロニッケルスラグの盛土材料としての基本的特性

数年間の試験結果を整理して、環境基準（環境省告示第 18 号、第 19 号）を十分満足することと基本的な物性値および物性値の幅の程度は

表 4 土質試験結果（徐冷フェロニッケルスラグ 0-40mm）

試験項目		2015 年	2014 年	2013 年	2012 年	2011 年	2010 年
粒度特性	礫分 (%)	78.6	78.5	76.4	77.1	81.4	79.8
	砂分 (%)	17.7	16.0	19.4	18.4	14.2	15.9
	細粒分 (%)	3.7	5.5	4.2	4.5	4.4	4.3
単位容積質量 (kg/L)		2.09	2.22	2.27	2.16	2.20	2.33
締固め特性	最大乾燥密度 (g/cm ³)	2.437	2.455	2.449	2.361	2.390	2.504
	最適含水比 (%)	3.96	4.91	4.90	5.04	5.37	5.05
修正 CBR	締固め度 95 (%)	109.1	140.3	130.2	97.6	91.7	137.0

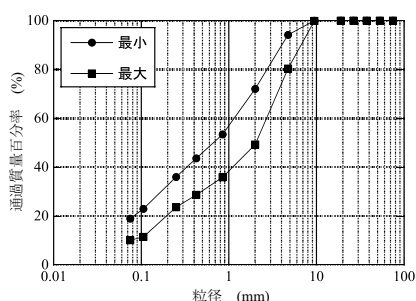


図 3 粒度分布の最大と最小（-5mm）

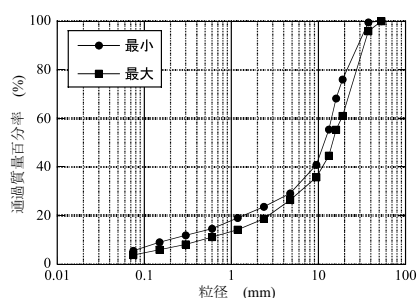


図 4 粒度分布の最大と最小（0-40mm）

概ね把握できている。ここでは、盛土材料としての利用を考える上で、定期試験では実施していない強度特性および透水性を中心として、基本的な土質試験を行って物性値の確認を行う。

3.1 実験概要

実験に用いる材料は、徐冷フェロニッケルスラグ-5mm および 0-40mm の 2 種類とする。比較のために、八戸近隣の天然材料として五戸町産出の山砂の試験データも同時に調べる。実験項目は、土粒子の密度試験、粒度試験、締固め試験、定水位透水試験、圧密排水 (CD) 三軸圧縮試験とする。

平成 22 年～平成 27 年あたり行ってきた定期試験におけるフェロニッケルスラグ-5mm の粒度分布は過去 6 年間である程度粒度分布に差がある。各粒径の最大と最小を結んだ粒径加積曲線を図 3 に示す。この図より、最大と最小の粒度分布を目標として粒度調整した試料を作成し、実験を行う必要があると考えられる。また、その中間の粒度として、現在自然に作られ

る粒度分布で実験を行う。したがって、-5mm については、3 種類の粒度の試料を準備して、各実験を行うこととする。同様に、0-40mm における最大と最小の分布について、粒径加積曲線を図 4 に示す。0-40mm の場合には比較的分布の幅が小さいため、最大と最小の 2 種類の粒度分布の試料を準備して実験を行う。以上、各試料の目標粒度の数値を表 5 に示す。

3.2 試験結果

(1) 徐冷フェロニッケルスラグ-5mm

徐冷フェロニッケルスラグ-5mm の試験結果一覧を表 6 に、粒径加積曲線を図 5 に示す。前節の図 3 における各粒度分布の幅が最も大きくなるように粒度調整したものを最大、最も小さくなるように粒度調整した試料を最小とし、その中間の粒度分布のものを中間として示している。また、表 6 には、設計で比較する際に用いた五戸町産出の山砂の試験結果も比較のため示している。土粒子の密度については、どの試料においてもほぼ等しい値となり、3.25g/cm³ 程

表5 目標粒度

粒径 (mm)	-5mm 最大	-5mm 最小	粒径 (mm)	0-40mm 最大	0-40mm 最小
53	100	100	53	100	100
37.5	100	100	37.5	99.5	95.9
19	100	100	19	76	61
9.5	100	99.89	16	68.2	55.3
4.75	94.21	80.37	13.2	55.4	44.6
2	72.05	49.3	9.5	40.9	35.7
0.85	53.45	35.88	4.75	29.1	26.4
0.425	43.63	28.66	2.36	23.6	18.6
0.25	36	23.69	1.18	19	14.1
0.106	22.98	11.51	0.6	14.6	11.1
0.075	18.97	10.19	0.3	11.8	8.1
—	—	—	0.15	9	5.9
—	—	—	0.075	5.5	3.7

表6 土質試験結果一覧（徐冷フェロニッケルスラグ-5mm）

試験項目		最小	中間	最大	山砂（五戸産）
土粒子の密度 (g/cm ³)		3.253	3.241	3.242	2.735
粒度特性	礫分 (%)	31.49	29.54	32.85	1.21
	砂分 (%)	51.67	46.21	46.48	98.43
	シルト分 (%)	13.84	19.75	16.17	0.3
	粘土分 (%)	3.00	4.50	4.50	
	最大粒径 (mm)	9.5	9.5	9.5	9.5
	均等係数	45.16	52.63	82.35	2.64
	曲率係数	1.02	0.64	1.08	0.8
締固め特性	最大乾燥密度 (g/cm ³)	2.409	2.403	2.372	1.715
	最適含水比 (%)	9.58	9.03	9.19	18.36
透水性	透水係数 (m/s)	2.33×10^{-3}	4.39×10^{-3}	2.32×10^{-3}	—
強度特性 (三軸 CD)	内部摩擦角 ϕ_d (°)	40.1	40.3	41.4	37.7
	粘着力 (kN/m ²)	33.8	27.7	31.3	6.7

表7 土質試験結果一覧（0-40mm）

試験項目		最小	最大
粒度特性	礫分 (%)	84.45	95.6
	砂分 (%)	11.86	3.17
	細粒分 (%)	3.70	1.23
	最大粒径 (mm)	37.5	37.5
	均等係数	31.25	2.18
	曲率係数	13.34	0.91
透水性	透水係数 (m/s)	2.03×10^{-3}	1.54×10^{-3}
強度特性 (三軸 CD)	内部摩擦角 ϕ_d (°)	41.4	—
	粘着力 (kN/m ²)	15.9	—

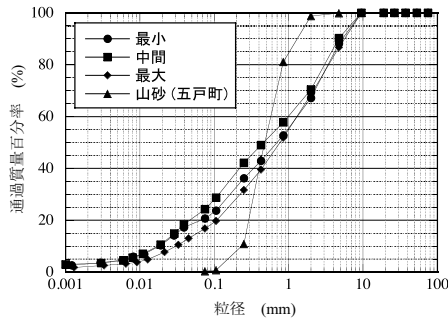


図5 粒度分布の最大と最小の分布（-5mm）

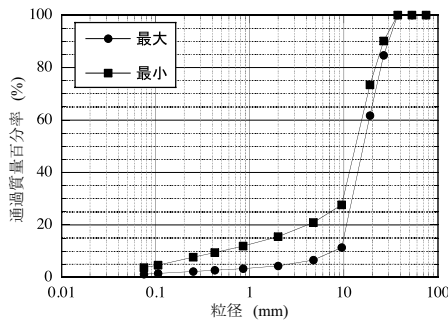


図6 粒度分布の最大と最小の分布（0-40mm）

度である。山砂は 2.73g/cm^3 程度であり、フェロニッケルスラグの方が約 20% 大きいことがわかる。

例年の定期的な試験ではふるい分析のみを行っているが、今回は沈降分析も含んだ方法で粒度試験を実施した。当初目標としていた粒度分布と若干異なり、中間の試料の粒度が最も細かく、順に、最大・最小となった。しかしながら、大きな差は無く、大まかに言えば、礫分 30%・砂分 50%・細粒分 20% 程度の分布となっている。山砂の粒度加積曲線は、粒径 0.3mm 付近で急勾配となっているが、これと比較してフェロニッケルスラグの場合には粒径が広い範囲に分布しており、締固め特性が比較的良好なものと考えられる。

締固め特性についても粒度の違いによる大きな差は無く、最大乾燥密度 2.4g/cm^3 程度、最適含水比 9% 程度となった。最大乾燥密度については、山砂に比べて約 40% 大きい値となることがわかった。これは、土粒子の密度が大きいだけでなく、粒度分布の影響も大きいためと

考えられる。

定水位透水試験を実施する際の供試体作成条件として、盛土の施工管理基準を意識して、最大乾燥密度の 95% を目標とした。どの試料においても透水係数は 10^{-5}m/s オーダーのほぼ類似した値となった。これは砂質土と同程度の透水係数である。

盛土材料として重要な強度定数の一つである内部摩擦角 ϕ_d については $40\sim 41^\circ$ 程度となり、五戸町産出の山砂で 37.7° であるため、これと比較して一割程度大きい。また、粘着力についても山砂よりも大きい値となっている。これらのことから、せん断強さについては一般的な天然の山砂より強い。これは、破碎して作られる徐冷フェロニッケルスラグは、粒子が角張っていることなどが主要因であると考えられる。

(2) 徐冷フェロニッケルスラグ 0-40mm

徐冷フェロニッケルスラグ 0-40mm の試験結果一覧を表 7 に、粒径加積曲線を図 6 に示す。ここでは、前節の図 4 における各粒径の最大・最小となる粒度を調整した試料を最大・最小として示している。土粒子の密度については、粒径によらずほぼ一定と考えられるので、ここでは省略している。また、0-40mm の三軸圧縮試験については、最大粒径が大きいことため直径 30cm × 高さ 60cm の供試体を用いた大型三軸圧縮試験装置を使用して試験を実施した。非常に大がかりな試験となるため最小の粒度分布のみで実験を行っている。通常、粒度が大きい程せん断強さも大きくなるため、本研究における補強土擁壁は厳しい条件で設計していることとなる。

0-40mm の粒度試験結果より、ほとんどが礫分であることが確認できる。

4. 徐冷フェロニッケルスラグを用いた盛土の設計

土質試験結果を基に、マニュアル⁴⁾に従って補強土擁壁の設計計算を実施し、フェロニッケルスラグの盛土材としての適応性について検討する。ただし、補強土擁壁の内的安定は満たし

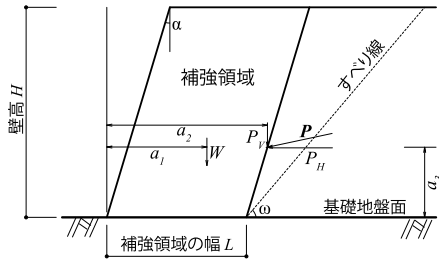


図 7 設計断面

ているとし、外的安定のうち基礎地盤は比較的
良く支持力の安定は十分満足すると仮定して、
主に滑動と転倒についての検討を行う。

4.1 設計の概要

設計の対象とした断面を図7に示す。簡単のために上載盛土や上載荷重は無いものとした。

まず、試行くさび法により、いくつかの主働すべり角 ω に対する背面土圧 P_A を、盛土材（土塊）の内部摩擦角を ϕ として、

$$P_A = \frac{\sin(\omega - \phi)}{\cos(\omega - \phi - \delta - \alpha)} W \quad (1)$$

のように求め、 P_A の最大値とそのときの ω を求める。ここで、 δ は補強土擁壁と盛土の境界の摩擦角であり、通常 $\phi/3 \leq \delta \leq 2\phi/3$ の値を選ぶ。 W は補強領域背面のくさび形土塊の自重であり、盛土材（土塊）の単位体積重量を γ として次式で表される。

$$W = \frac{1}{2} \frac{\cos(\omega - \alpha)}{\sin \omega \cos \alpha} \gamma H^2 \quad (2)$$

また、土圧 P_A の水平成分 P_H および鉛直成分 P_V は、それぞれ、

$$P_H = P_A \cos(\phi - \alpha) \quad (3)$$

$$P_V = P_A \sin(\phi - \alpha) \quad (4)$$

と書くことができる。

補強土領域背面に作用する土圧 P_A に対して、
まず、滑動に対する安全率

$$F_s = (\alpha_1 \tan \phi (\gamma H L + P_V)) / P_H \quad (5)$$

より、壁高 H は一定として補強領域の幅 L を

$$L = \left\{ \frac{F_s P_H}{\alpha_1 \tan \phi} - P_V \right\} / (\gamma H) \quad (6)$$

表 8 設計パラメータ (-5mm)

	-5mm	山砂 (五戸産)
ϕ (°)	40.1	37.7
c (kN/m ²)	0	0
γ (kN/m ³)	24.39	18.90
δ (°)	13.4	12.6

表9 設計の結果 (−5mm)

	-5mm	山砂 (五戸産)
主働すべり角 ω (°)	56.1	54.7
くさび主塊の自重 W (kN/m)	290.31	246.77
主働土圧合力 P_a (kN/m)	84.80	77.35
補強領域の幅 L (m)	1.03	1.32
補強領域の体積 V (m ³)	8.26	10.59

として求めることができる。ここで、 α_1 は摩擦補正係数であり、ここでは 1 とする。また、安全率 F_s は地震時土圧を考慮していないため大きめの $F_s = 2$ と仮定し、壁高 H と勾配は一定として補強土擁壁の幅 L を決定する。

決定した L を基に補強領域の転倒の検討を行って、転倒に対する安定性についても確認する⁴⁾。なお、本研究においては、滑動に対する安全率が転倒に対する安全率に比べていずれの場合にも小さくなるため、滑動に対する安定性を満たす場合には転倒に対する安定性も満たすことになる。そこで本文では主に滑動の安全率についてのみ述べる。

4.2 徐冷フェロニッケルスラグ-5mm を

盛土材として用いた場合

(1) 設計に用いたパラメータ

設計に用いる盛土材のパラメータは前章の結果に基づいて設定した。ここでは、徐冷フェロニッケルスラグ-5mmの最小の粒径を想定したものと、山砂（五戸町産出）の2種類の盛土材について検討する。用いたパラメータを表8に示す。粘着力は安全側として2つの盛土材ともに0とし、補強土擁壁と盛土の境界の摩擦角 δ は $\phi/3$ とした。湿潤単位体積重量 γ は、締固め試験の結果より締固め度95%、最適含水比として設定した。壁高 H は8mとし補強土擁壁の勾配を1:0.3とした。

(2) 設計の結果および考察

前節のように設計した結果、滑動の安全率を満たす場合には、転倒の安定条件についても満足する結果となった。設計の結果を整理して、表 9 に示す。フェロニッケルスラグの単位体積重量 γ が大きいため、くさび土塊の自重および主働土圧は、フェロニッケルスラグの方が大きくなり、安定性の面からは不利になる。しかし、補強領域については、フェロニッケルスラグを用いた場合の方が補強領域の幅 L が小さくなり、断面の単位幅（奥行き）当たりの体積 V は約 22% 小さくなった。滑動に対する安定性については単位体積重量と内部摩擦角が大きい方が有利となる。本研究における検討ではフェロニッケルスラグと山砂の単位体積重量の差が与える影響が大きいと考えられ、妥当な結果であると言える。

補強領域の断面積を小さくできることは、材料コストに加えて用地も小さくできることから経済性に関して非常に有利であり、フェロニッケルスラグを補強盛土の盛土材として利用することが有用であると言える。

4.3 徐冷フェロニッケルスラグ 0-40mm を盛土材として用いた場合

ここでは、徐冷フェロニッケルスラグ 0-40mm を盛土材として用いて、前節と同様の補強土擁壁の設計計算⁴⁾を実施して、盛土材としての適応性について検討する。

(1) 設計の概要

設計に用いた徐冷フェロニッケルスラグ 0-40mm と比較のために用いた碎石のパラメータを表 10 に示す。碎石のパラメータについては、文献⁵⁾を参考として一般的な値を用いた。フェロニッケルスラグの内部摩擦角は安全を考慮して 40° 、粘着力は 2 つの盛土材ともに 0° とし、補強土擁壁と盛土の境界の摩擦角 δ は $\phi/3$ とした。湿潤単位体積重量は、締固め試験の結果より締固め度 95% の乾燥密度、最適含水比として設定した。設計の対象とした断面は前節と同様とした。

表 10 設計パラメータ (0-40mm)

	0-40mm	碎石
ϕ ($^\circ$)	40	35
c (kN/m ²)	0	0
γ (kN/m ³)	21.6	20
δ ($^\circ$)	13.3	11.7

表 11 設計の結果 (0-40mm)

	0-40mm	碎石
主働すべり角 ω ($^\circ$)	56	53
くさび土塊の自重 W (kN/m)	258.85	290.27
主働土圧合力 P_A (kN/m)	75.63	97.47
補強領域の幅 L (m)	0.78	1.46
補強領域の体積 V (m ³)	5.41	11.69
転倒の安定性 e (-)	-3.15	-2.84

(2) 設計の結果および考察

前節と同様に設計した結果、滑動の安全率を満たす場合には、転倒の安定条件についても満足する結果となった。設計した結果を整理して、表 11 に示す。補強領域については、フェロニッケルスラグを用いた場合の方が補強領域の幅 L が小さくなり、断面の単位幅（奥行き）当たりの体積 V は約 46% 小さくなった。これは、滑動に対する安定性については単位体積重量や内部摩擦角が大きい方が有利となるが、本文における検討ではフェロニッケルスラグの内部摩擦角が大きいために主働土圧合力 P_A が碎石に比べて小さくなったことが影響していると考えられる。

5. まとめ

本研究では、徐冷フェロニッケルスラグを盛土材として付加価値の高い材料として有効利用するための検討を行った。

まず、過去の実験データを整理し、土壤環境基準への適合性を確認すると共に、土質試験データおよびその物性値の幅についても確認した。他のスラグ類と比べて環境面では安全であり、地盤材料として十分利用可能であることがわかった。次に、徐冷フェロニッケルスラグ 5mm と 0-40mm の粒度の異なる 2 種類の材料に対して、盛土材として把握すべき物性値を土質試験を実施して取得した。特に、0-40mm

については、これまでで初めての試みとして大型三軸圧縮試験を行い、そのせん断強度定数（内部摩擦角および粘着力）を把握した。徐冷フェロニッケルスラグの天然材料と比較した際の盛土材としての特徴としては、「土粒子の密度が大きいこと」「最大乾燥密度が大きいこと」「せん断強さが大きいこと」が挙げられる。

さらに、実験により得られた物性値を用いて、補強土擁壁の設計を行い、天然材料を用いた時との比較を行った。徐冷フェロニッケルスラグ-5mm を盛土材として設計を行った結果、五戸町産出の天然砂と比較して、補強領域の断面を 22% 小さくできること、0-40mm の場合には、碎石と比較して 46% も補強領域の断面を小さくできることがわかった。材料の単価が同等であっても、使用する材料の量が少なくなるために運搬費を含めたコストメリットは非常に大きい。さらに、必要な用地も節約できることから用地の制約が大きい場所にも利用でき、用地に係わる費用も低減できる。したがって、補強土擁壁の盛土材料として有用である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、電源開発（株）茅ヶ崎研究所に依頼して大型三軸圧縮試験を実施しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 阿波 稔, 迫井 裕樹, 庄谷 征美, 月永 洋一, 長瀧 重義: フェロニッケルスラグを粗骨材として用いたコンクリートの基礎的性質, コンクリート工学論文集, Vol.21, pp.63-75, 2010.
- 2) 庄嶋 芳卓, 秋葉 正一, 加納 陽輔, 井 真宏: 産業副産物の微粉末を用いた路床改良材に関する研究, 舗装工学論文集, 第 17 号, pp.89-95, 2012.
- 3) J. S. Demotica, R. F. Amparado Jr., R. M. Malaluan and C. G. Demayo: Characterization and Leaching Assessment of Ferronickel Slag from a Smelting Plant in Iligan City, Philippines, *International Journal of Environmental Science and Development*, Vol. 3, No. 5, pp.470-474, 2012.
- 4) (財) 土木研究センター: ジオテキスタイルを用いた補強土の設計施工マニュアル, 2013.
- 5) (社) 日本道路協会: 道路土工擁壁工指針, 2012.

要 旨

フェロニッケルを製錬する際の副産物であるフェロニッケルスラグは、主にコンクリート用骨材や路盤材などとして利用されているが、発生量に対して十分な利用量にはなっておらず、さらなる用途を生み出す必要がある。本研究では、これまで定期的の実施してきた徐冷フェロニッケルスラグの実験データを整理するとともに、物理試験により基礎的な物性値を把握した。そして、得られた物性値を基に補強土擁壁の設計を行い、天然材料を用いた場合と比較・検討を行った。その結果、徐冷フェロニッケルスラグを用いた場合では天然材料と比較して補強領域の断面を小さくできることがわかり、盛土材料としての有効性を示した。

キーワード: 徐冷フェロニッケルスラグ、盛土材料、土の基本的性質、せん断強さ、透水性