

## 杭周辺地盤改良材として適用するための鉄鋼スラグの力学的特性に関する基礎的実験

本間裕介<sup>1</sup>, 玉井智子<sup>2</sup>, 富永晃司<sup>2</sup>, 永井及<sup>3</sup>

- 1 ジャパンパイル・技術開発部
- 2 広島大学・大学院国際協力研究科・開発科学専攻
- 3 広鉦技建・技術部

## 概 要

鉄鋼スラグの有効利用法として、鉄鋼スラグの杭基礎構造物への適用を検討するため、鉄鋼スラグの力学的特性を定量的に把握しておくことは必要である。本論文は、鉄鋼スラグの力学的特性について経時的な変化を調べるため、供試体作製後の経過日数が異なる時点での膨張測定実験、透水試験および三軸圧縮実験を行った結果について報告する。また、杭基礎構造物への適用に際して、スラグの膨張が基礎スラブ等に悪影響を与える懸念があるため、スラグの膨張圧を直接測定する装置を作製し、膨張圧測定実験も行ったので報告する。

キーワード：鉄鋼スラグ，粘着力，変形係数，膨張比，膨張圧

## 1. はじめに

鉄鋼スラグは、鉄鋼の生産工程において生成させる産業副産物であり、年間生成量(平成 16 年度実績)は 3735 万 t にも及んでいる。したがって、これを再利用することは経済と環境の両面において有用となる。今までに鉄鋼スラグは、セメント原料および路盤材等で主に再資源化されているが、2000 年に施行された循環型社会形成基本法により、さらなる用途の拡大を目指して、地盤工学分野での有効利用を目的とした研究開発が求められている。

このような背景により、鉄鋼スラグの有効利方法として、筆者らは杭周辺の浅層地盤の地盤改良材として鉄鋼スラグを用いて、杭の水平抵抗の増大を図る工法(以下、鉄鋼スラグによる水平抵抗増大工法と呼称する)の研究開発を行ってきた。これらの成果として、鉄鋼スラグによる水平抵抗増大工法の効果を検討する目的で実施した実大杭の水平加力実験結果から、鉄鋼スラグによる地盤改良によって杭体の変位および応力が低減し、杭の水平抵抗が増大することを報告した<sup>1),2)</sup>。また、文献 3)~5)において、現場実験で対象とした鉄鋼スラグの物理的・力学的特性を把握しておく必要から、三軸圧縮実験、透水試験および膨張測定実験を行い、養生 180 日目までの結果について報告した。本論文では、養生 360 日目までの結果が得られたため、養生 360 日目までの鉄鋼スラグの力学的特性の経時変化について報告する。

一方、一連の現場実験から鉄鋼スラグによる杭の水平抵抗増大効果が認められた。しかし、実構造物への適用を考

えた場合、浅層地盤に用いた鉄鋼スラグの膨張が基礎スラブ等に悪影響を与えることが懸念される。そこで、鉄鋼スラグの中でも膨張性を有している製鋼スラグの膨張特性、特に膨張圧について定量的に把握しておくことが必要との結論に至った。

製鋼スラグの膨張圧の定量的な評価を試みた既往の研究としては、筆者らが知る限り文献 6)で見られる程度であり、ほとんど行われていないのが現状である。すなわち、製鋼スラグの利用にあたっては膨張圧に関する検討が不十分である。製鋼スラグは、出荷前に屋外に山積みして適当な期間大気中に保持(以降、エージング処理と呼称)し、予め膨張させ安定させた状態のものが、一般的に供用されている。したがって、鉄鋼スラグはその膨張量での管理しか行われていなく、膨張圧については関心が向けられなかったのが現状であろう。

上述した現況に鑑み、精度ある膨張圧を測定するための装置を作製し、製鋼スラグがもつ膨張圧の特性を調査した。本論文では、これらの結果から定量的な評価も試みたので報告する。

## 2. 鉄鋼スラグの種類

鉄鋼生産の過程で発生する鉄鋼スラグには、銑鉄を製造する高炉で溶融された銑鉄以外の成分として回収される高炉スラグと製鋼工程で転炉や電気炉において生成される製鋼スラグがある。高炉スラグの中でも、加圧水で急激に冷却されてできたものを水砕スラグと呼び、この水砕ス

ラグは水と反応して水和物を生成し固結する性質がある。主要な用途はセメントの原料や細骨材などである。

一方、製鋼スラグの中でも転炉で生成されたものを転炉スラグと呼び、この転炉スラグは、水砕スラグほど固結性は無いが、遊離石灰 (f-CaO) が水と反応することによって膨張する性質を有している。このため、膨張を抑えるためにエージング処理を施し、路盤材等に用いられている。水砕スラグと転炉スラグの化学組成を示す表 2-1 より、両者の主成分は、石灰 (CaO) とシリカ (SiO<sub>2</sub>) である。

表 2-1 化学組成

種類	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	T-Fe	S	MnO	TiO <sub>2</sub>	その他
転炉スラグ	11.3	37.3	3.9	15.7	20.4	0.0	6.1	1.5	3.8(f-CaO)
水砕スラグ	33.8	42.0	14.4	6.7	0.3	0.8	0.3	1.0	0.7

### 3. スラグの力学的特性把握実験

#### 3.1 実験に用いたスラグ

経時的に変化する鉄鋼スラグの力学的特性を調べるために、表 3-1 に示す 4 種類の供試体について、養生期間を 30 日から 360 日に変化させて三軸圧縮実験 (CD)、透水試験 (定水位試験) および膨張量測定実験を実施した。4 種類のスラグは、エージング処理を施す前の膨張量を有した転炉スラグ (表-1 の記号 S.S.1 に対応)、エージング処理を施した転炉スラグ (S.S.2)、エージング処理を施す前の膨張性が大きい転炉スラグと水と反応して固結する性質を有する水砕スラグを重量比 8:2 で混合した混合スラグ (M.S.1) および重量比 6:4 の混合スラグ (M.S.2) である。ここに混合スラグは、転炉スラグに含まれる遊離石灰が、混合した水砕スラグのシリカ含有物質によって消費されるため膨張量が抑えられ<sup>7)</sup>、かつ固結する性質を有している。

記号	最大粒径 (mm)	スラグの構成	最適含水比 W <sub>opt</sub> (%)	最大乾燥密度 ρ <sub>dmax</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	養生期間(day)			
					30	90	180	360
S.S.1	5	未エージング転炉スラグ100%	12.9	2.35	30	90	180	360
S.S.2	5	エージング転炉スラグ100%	12.1	2.45	30	90	180	360
	25		6.7	2.56	30	90	180	360
M.S.1	5	未エージング転炉スラグ80%+水砕スラグ20%	14.5	2.17	30	90	180	360
	25		8.9	2.34	30	90	180	360
M.S.2	5	未エージング転炉スラグ60%+水砕スラグ40%	15.9	1.95	30	90	180	360

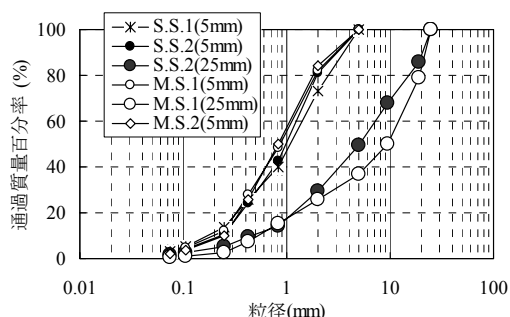


図 3-1 粒度分布

粒径は一般的に路盤材で使用されている 25 mm~0 mm 以外に、鉄鋼スラグによる水平抵抗増大工法への適用を考慮して 5 mm~0 mm のものも実験の対象とした。各スラグの粒度分布を図 3-1 にそれぞれ示す。

#### 3.2 供試体作製

表 3-1 に示す最適含水比での「突き固めによる土の締固め試験」(JIS A 1210 : 土質試験の方法と解説) に基づいて供試体の作製を行った。円柱供試体は φ100 mm×200 mm のブリキ製モールド (透水試験のみプラスチック製モールド) に最適含水比に整えたスラグを 4 層に分けて入れ、2.5kg ランマーで最大乾燥密度となるように 1 層 30 回突き固めて作製した。なお、膨張測定実験および三軸圧縮実験用のモールド内壁には、摩擦を低減させるために表面にグリスを塗り、その上にテフロンシートを貼り付けている。

前述したように水と反応することで固結や膨張が生じる性質を有しているが、今回の養生は、現場実験に対応して湿潤状態になるように密閉ビニール袋中で常温放置する方法 (以降、自然養生と呼称) で行い、密閉後の水分供給は行わないことにした。ただし、S.S.2 (5 mm) および M.S.1 (5 mm) においては、透水係数および粘着力の比較を行うため水浸養生 (20℃一定管理) の供試体を作製し、透水試験および三軸圧縮実験に供することとした。供試体の養生時間は、供試体作製後の経過 30 日、90 日、180 日および 360 日とし、透水試験においては、これらに 7 日を加えたものとした。なお、三軸圧縮実験については、表 3-1 中の○で囲まれた養生時期のみ実施している。詳細については文献 3) を参照されたい。

#### 3.3 膨張量測定実験および透水試験の概要

膨張量測定実験の概要を図 3-2 に示す。ダイヤルゲージの計測針を供試体上面中央に載せた板の真中に当て、膨張量の変化を読むこととした。

透水試験は図 3-3 に示すような装置を作製し、「土の透水試験方法」(JIS A 1218 : 土質試験の方法と解説) に準拠して定水位試験を実施した。試験時に水頭差 150 mm を与えるため、作製した供試体の上部に同型の型枠を接着し、

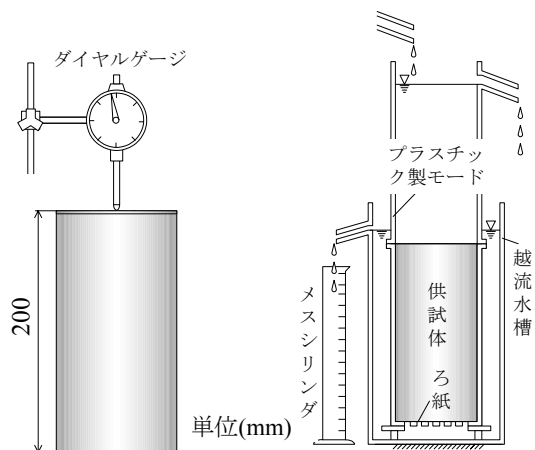


図 3-2 膨張量試験装置

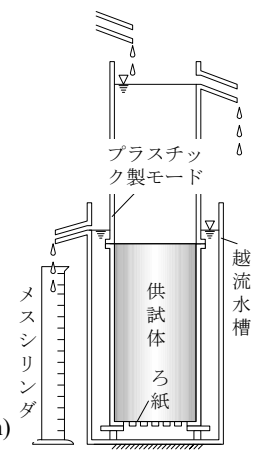


図 3-3 透水試験装置

この型枠の上部に排水溝としての穴を空けて排水する方式としている。

### 3.4 三軸圧縮実験の概要

三軸圧縮実験装置の概要を図3-4に示す。供試体のスラグは、せん断時に正のダイレイタンスを生じることが考えられるため、過剰間隙水圧が生じない条件での測定を目的とした圧密排水(CD)条件で3種類の側圧 $\sigma_3=20, 50$ および $100 \text{ (kN/m}^2\text{)}$ を作用させて三軸圧縮実験(ひずみ速度

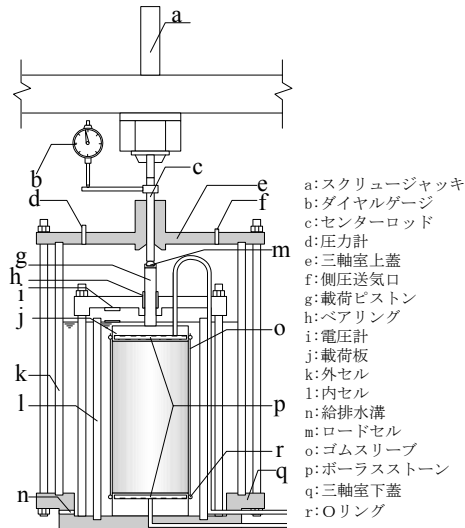


図3-4 三軸圧縮実験装置

0.15 %/min)を行った。載荷時の測定事項は、内部ロードセルによる載荷力、軸方向変位量および体積変化量である。

### 3.5 スラグの力学的特性の経時変化

膨張量測定実験の結果を図3-5にそれぞれを比較して示した。ここに、膨張比は軸方向ひずみに相当した量である。この図から以下のことがわかる。

- ① 各スラグともに、自然養生においても少ないながら膨張していく傾向がある。また、経過日数360日以後も増加し続ける傾向が読み取れ、その膨張比は $M.S.2 < M.S.1 < S.S.2 < S.S.1$ の順に大きくなっている。
- ② 未エージング転炉スラグ(S.S.1 (5 mm))に対して、水砕スラグの混合(M.S.1 (5 mm))で約65%減少、またエージング処理を施すこと(S.S.2 (5 mm))で約55%減少している。
- ③ 水砕スラグの混合率が大きいM.S.2は、殆ど膨張していない。このことは、転炉スラグの遊離石灰がほとんど水砕スラグの固結に消費されたことを示唆している。
- ④ 粒径5 mmと25 mmを比較すると、混合スラグでは、両者で大きな違いが見られないが、転炉スラグでは若干25mmの方が小さい傾向にある。

次に、透水試験の結果を図3-6にそれぞれ比較して示す。この図より以下のことがわかる。

- ⑤ いずれのスラグも、時間の経過に伴って透水係数が低下する。そして、S.S.2およびM.S.1の25mmの供試体

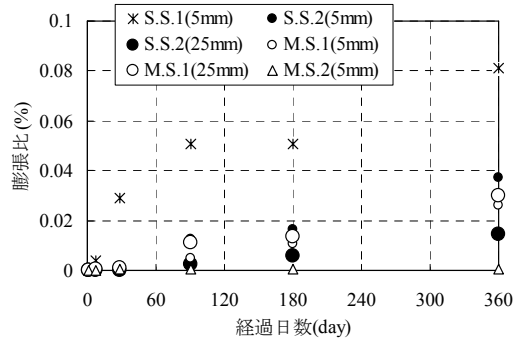


図3-5 膨張比と経過日数の関係

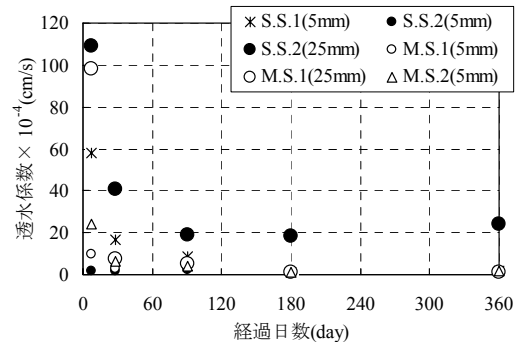


図3-6 透水係数と経過日数の関係

表3-2 粘着力、内部摩擦角の経時変化

スラグ種類	試験体名	経過日数 (day)	粘着力 $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (度)	
転炉スラグ	S.S.1(5mm)	30	32.6 (1.00)	48.9 (1.00)	
		360	68.8 (2.11)	47.4 (0.97)	
	S.S.2(5mm)	30W	51.9 -	43.9 -	
		30	44.0 (1.00)	46.5 (1.00)	
		90	49.1 (1.12)	45.6 (0.98)	
		180	30.4 (0.69)	50.4 (1.08)	
		360	44.6 (1.01)	51.3 (1.10)	
	S.S.2(25mm)	30	45.0 (1.00)	49.6 (1.00)	
		90	55.8 (1.24)	50.0 (1.01)	
360		53.2 (1.18)	50.8 (1.02)		
混合スラグ	M.S.1(5mm)	30W	225.5 -	45.0 -	
		30	127.6 (1.00)	47.4 (1.00)	
		90	136.0 (1.07)	47.4 (1.00)	
		180	145.4 (1.14)	48.0 (1.01)	
		360	145.6 (1.14)	49.7 (1.05)	
	M.S.1(25mm)	30	144.9 (1.00)	53.7 (1.00)	
		90	259.5 (1.43)	48.4 (0.91)	
		360	371.1 (2.56)	43.9 (0.82)	
		M.S.2(5mm)	30	145.4 (1.00)	52.5 (1.00)

30W: 水浸養生の結果

は、作製後7日までは透水性は高いが、その後の時間経過に伴い、これらの透水性は大きく低下する。その低下の割合は、水砕スラグを混合した供試体の方が大きい。

- ⑥ 鉄鋼スラグを地盤改良材として用いた場合、透水性はあまり期待できないことがわかる。

養生30日、90日、180日および360日目に実施した三軸圧縮実験による粘着力 $c$ および内部摩擦角 $\phi$ を表3-2に示す。なお、各表の括弧内は、養生30日に対する増加の割合を表している。また、転炉スラグおよび混合スラグの粘着力と経過日数の関係を図3-7にそれぞれ示す。これらの図表から、以下のことがわかる。

- ⑦ 粘着力 $c$ は転炉スラグより混合スラグの方が大きく、養生期間の増加に従いその傾向が顕著になる。これは、

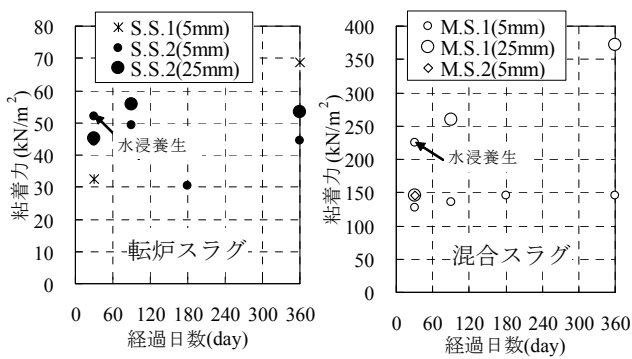


図 3-7 粘着力と経過日数の関係

混合した水砕スラグの固結の影響であると考えられる。

- ⑧ 水浸養生と自然養生を比較すると、スラグ固結の反応を促す水浸養生の方が大きな粘着力が得られている。
- ⑨ 粒径 5 mm と 25 mm を比較すると、25 mm の粘着力が大きくなる傾向がある。これは、粒径 5 mm に比べて粒径 25 mm の方が固結の起点となる粒子間の接触面積が多いためであると推測できる。
- ⑩ 両スラグとも、時間経過に伴い内部摩擦角の僅かな増減傾向は見られるが、ほぼ一定で 40 度～50 度の範囲に分布している。

三軸圧縮実験から得られた主応力差と軸ひずみの関係に基づく変形係数  $E_{50}$  と経過日数の関係、および変形係数

表 3-3 変形係数の経時変化

試料	経過日数 (day)	変形係数 $E_{50} (\times 10^4 \text{ kN/m}^2)$		
		側圧 ( $\text{kN/m}^2$ )		
		20	50	100
S.S.1(5mm)	30	1.7 (1.00)	3.0 (1.00)	4.12 (1.00)
	360	3.8 (2.24)	3.0 (1.00)	4.1 (1.00)
S.S.2(5mm)	30W	1.1 -	1.9 -	2.5 -
	30	1.2 (1.00)	3.0 (1.00)	3.2 (1.00)
	90	1.5 (1.32)	2.6 (0.86)	3.7 (1.17)
	180	1.7 (1.47)	3.4 (1.13)	3.5 (1.10)
S.S.2(25mm)	360	1.9 (1.68)	3.2 (1.07)	5.0 (1.57)
	30	1.7 (1.00)	3.4 (1.00)	5.1 (1.00)
	90	2.3 (1.40)	4.5 (1.34)	6.2 (1.22)
M.S.1(5mm)	360	3.6 (2.19)	3.5 (1.04)	6.2 (1.22)
	30W	9.9 -	8.4 -	11.0 -
	30	8.1 (1.00)	10.4 (1.00)	8.5 (1.00)
	90	7.9 (0.97)	9.5 (0.91)	12.8 (1.51)
M.S.1(25mm)	180	11.1 (1.37)	8.3 (0.80)	12.1 (1.42)
	360	8.3 (1.02)	11.5 (1.11)	11.9 (1.40)
	30	7.7 (1.00)	1.1 (1.00)	11.5 (1.00)
M.S.2(5mm)	90	13.0 (1.68)	15.0 (13.76)	12.2 (1.06)
	360	11.6 (1.50)	11.0 (10.09)	12.8 (1.11)
M.S.2(25mm)	30	10.5 (1.00)	13.2 (1.00)	14.4 (1.00)

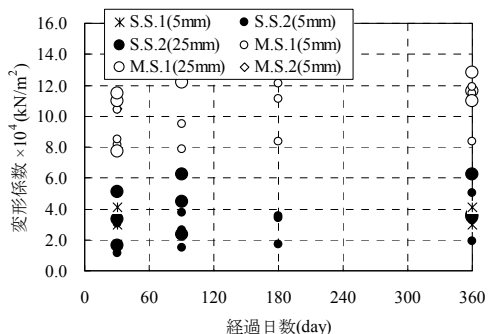


図 3-8 変形係数と経過日数の関係

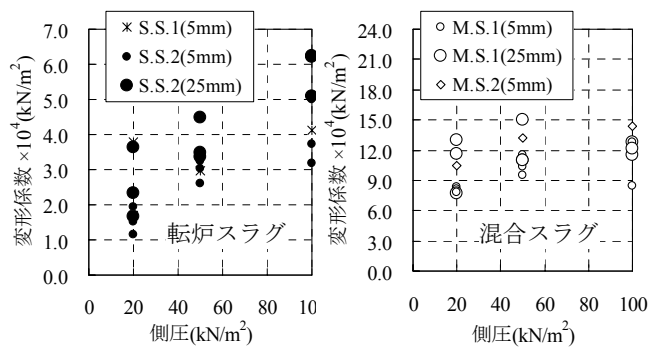


図 3-9 変形係数と側圧の関係

$E_{50}$  を側圧ごとにまとめた値を、それぞれ図 3-8 および表 3-3 に示す。さらに、転炉スラグおよび混合スラグの変形係数  $E_{50}$  と側圧の関係を図 3-9 にそれぞれ示す。これらの図表から以下のことがわかる。

- ⑪ 図 3-8 より、ばらつきはあるが、時間経過とともに変形係数  $E_{50}$  は増加しており、各スラグの固結性発現により剛性も増加する。
- ⑫ 混合スラグの変形係数  $E_{50}$  は、転炉スラグのそれより数倍大きい値を示し、かつ前者では拘束圧の違いによって余り変化しないのに対して、後者では拘束圧の増加に伴い増大する傾向が見られる (図 3-9 参照)。ここに、混合スラグでは水砕スラグの影響により固結体に近い状態となり、転炉スラグは粒子間の結合を有するものの粒状体に近い状態になっているものと推測できる。

#### 4. スラグの膨張特性把握実験

##### 4.1 はじめに

転炉スラグおよび混合スラグは自然養生においても少ないながら膨張していく傾向があることがわかったが、力学的特性把握実験では最終的な膨張比の把握まで至っていない。前述したように、鉄鋼スラグによる水平抵抗増大工法に適用した場合、浅層地盤に用いたスラグの膨張が基礎スラブ等に悪影響を与えることが懸念されるため、スラグの膨張に関する特性を定量的に調べる必要がある。そこで、最終的な膨張比を調べるために、JIS A5015「道路用鉄鋼スラグ」に示されている膨張促進を目的とした 80 °C 温水養生 (促進養生と呼称) による膨張量測定実験を行った。また、スラグの膨張に伴って発生する圧力の定量評価を目的として、精度ある膨張圧を測定するための装置を作製して、促進養生による膨張圧測定実験も同時に行った。

##### 4.2 対象としたスラグ

測定の対象としたスラグは、エージング処理前転炉スラグ S.S.3 (表 3-1 に示す S.S.1 に相当) およびエージング処理前転炉スラグと水砕スラグを重量比 8:2 で混合したスラグ M.S.3 (表 3-1 に示す M.S.1 に相当) の 2 種類であり、ともに粒径は 5 mm～0 mm とした。供試体の作製に当たり、最適含水比および最大乾燥密度を調べた結果を、表 4-1 に示してある。

表 4-1 膨張特性把握実験ケース

記号	最大粒径 (mm)	スラグの構成	最適含水比 $W_{opt}(\%)$	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(g/cm^3)$
S.S.3	5	未エージング転炉スラグ100%	10.4	2.53
M.S.3	5	未エージング転炉スラグ80% + 水砕スラグ20%	11.6	2.28

### 4.3 促進養生による膨張圧測定実験の概要

促進養生による膨張圧測定実験は、精度ある膨張圧を測定するためのステンレス製の実験装置（図 4-1、4-2 および写真 4-1 参照）を 2 体作製し行った。この装置は、拘束板と上蓋と下蓋からなる本体部から構成されており、本体部と拘束板の間にロードセルを設置し、4 本のロッドでそれらを締め付ける構造となっている。本体部のそれぞれの蓋には、半径 50mm の半球部を設けており、これらの蓋を合わせて出来る球体部に測定対象のスラグを満たすことで、球体状に押し広がりとするスラグの膨張状態を作り出すことができる。

表 4-1 に示す 2 体の供試体は、それぞれの蓋の半球部に突き棒を用いて最適含水比に整えられた最大乾燥密度の 90% に相当する量のスラグを突き固め、つづいて、上蓋内のスラグをあるガラス板で覆い、ひっくり返して下蓋と合わせて、ガラス板を取り除いて作製した。その後、4 本のロッドを用いて本体部と拘束板およびロードセルを約 500 N の力で締め付けた。

供試体の養生は、スラグの膨張を促進させるために、80℃ 温水に設定した小型温水養生槽内に約 60 日間浸す方法で行った。その間、温水は装置に設けた 8 箇所の水道（図 4-2 参照）から内部の供試体へ供給されるようになっているが、強制的な循環は行っていない。ロードセルの荷重の測定は毎日 3 回実施した。

### 4.4 促進養生による膨張量測定実験の概要

膨張量測定実験は、基本的に JIS A 5015 「道路用鉄鋼スラグ」に示されている鉄鋼スラグの水浸膨張試験法に準拠して実施した。測定装置は JIS A 1211 の 4. に規定している直径 150 mm のモールド（図 4-3 参照）を用いた。このモールドは、法線方向の膨張を極力抑えているため、体積膨張して発生したひずみが軸方向に集中して発生する構造となっている。

各スラグの供試体は、相対密度 90% と 100% の 2 種類についてそれぞれ 2 体作製した。相対密度 100% の供試体は最適含水比に整えたスラグをモールド内に 3 層に分けて入れ、1 層あたり突き棒で 15 回突き固めた後、自動落下装置を用いて 4.5 kg ランマーを落下高さ 45 cm から 92 回落下させて締め固めを行って作製した。一方、相対密度 90% の供試体は、相対密度 90% に相当する量を 3 回に分けてモールド内に入れ、圧縮装置により静的な締め固めを行って作製した。供試体の養生は 32 日間の促進養生で行っており、その間、図 4-3 に示すダイヤルゲージを用いた

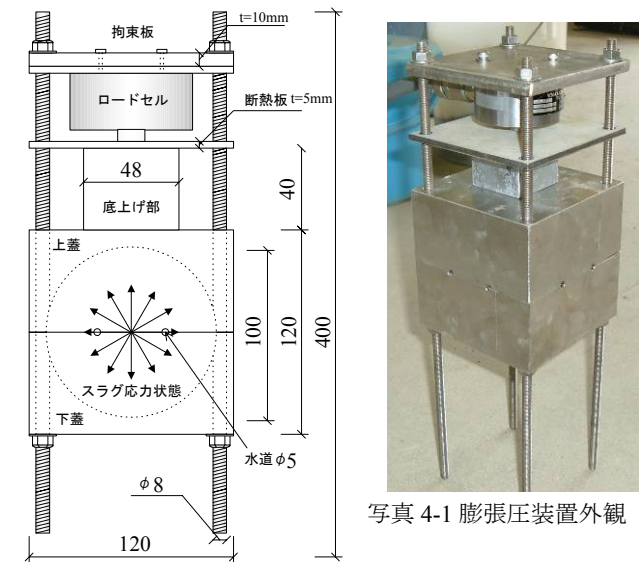


図 4-1 膨張圧測定装置：立面



写真 4-1 膨張圧装置外観

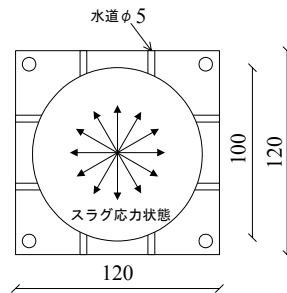


図 4-2 膨張圧測定装置：平面

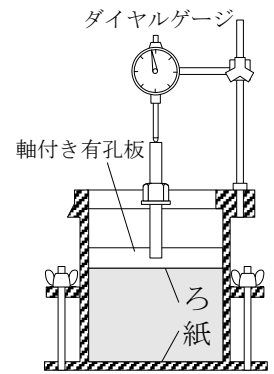


図 4-3 促進膨張量測定装置

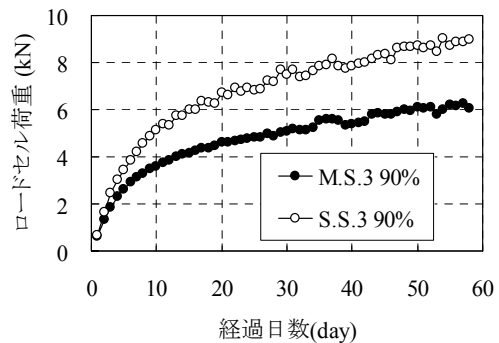


図 4-4 ロードセル荷重と経過日数の関係

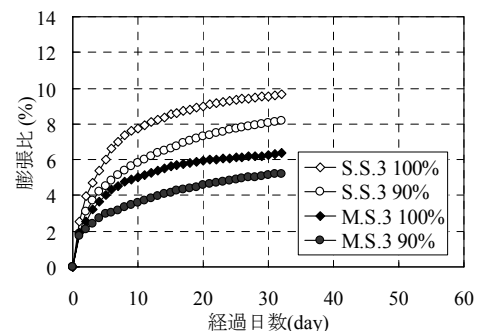


図 4-5 膨張比と経過日数の関係

表 4-2 自然養生と促進養生の比較 (膨張比)

供試体名	S.S.1	S.S.3	膨張の比 S.S.1/S.S.3	M.S.1	M.S.3	膨張の比 M.S.1/M.S.3	未エージング 転炉 <sup>9)</sup>
養生方法	自然養生 (360日)	促進養生 (32日)	-	自然養生 (360日)	促進養生 (32日)	-	水浸養生 (119日)
相対密度(%)	100	100	-	100	100	-	-
最終膨張比 $\times 10^2$ (%)	8	960	0.008	3	640	0.005	38

測定を毎日実施した。

#### 4.5 スラッグの膨張特性とその考察

ロードセルの荷重  $P$  と経過日数の関係および膨張比と経過日数の関係を図 4-4 および図 4-5 にそれぞれ示す。また、表 4-2 に、相対密度 100%の膨張比について自然養生と促進養生を比較して示す。ここに、表中に示す最終膨張比とは、各実験の終了時に発生していた膨張比を意味する。これらの図表から以下のことが言える。

- ① 図 4-4 より、転炉スラッグおよび混合スラッグの最終荷重は、9.0 kN および 6.0 kN であり、混合スラッグの方が 33% 小さな値となっている。これは、転炉スラッグに含まれる遊離石灰の絶対量の違い以外にも、遊離石灰が水砕スラッグのシリカ含有物質によって消費された影響も加味されたためであると考えられる。増加傾向に着目すると、各スラッグともに、経過日数 10 日までに全体の 6 割近くまで膨張している。すなわち、膨張に起因する化学反応が急激な速さで起きたことを示唆している。
- ② 図 4-5 より、膨張比も荷重の推移と同様な傾向を示すことが確認できる。実験終了時の S.S.3 および M.S.3 の膨張比は、相対密度 100%で 9.6%および 8.2%、相対密度 90%で 6.4%および 5.2%となっており、相対密度によって発生した膨張比が異なっている。これは、粒子間隙がスラッグ粒子に含まれる遊離石灰の膨張を吸収した量の違いによって生じたものと推測できる。
- ③ 表 4-2 より、自然養生および促進養生ともに、最終膨張比は、エージング処理前転炉スラッグの方が混合スラッグより大きいことが確認できる。また、膨張の比 (促進養生に対する自然養生の比) は、エージング処理前転炉スラッグで 0.008、混合スラッグで 0.005 であり、促進養生に比べると自然養生は非常に小さい値であることがわかる。ちなみに、図 4-3 に示す装置を用いて文献 8) で実施された 20°C水浸養生 (養生 119 日目) の結果では、エージング処理前転炉スラッグの膨張比として 0.38%が報告されている。今回行った自然養生と同様に、水浸養生の場合においても非常に小さい傾向が示されている。

#### 4.6 スラッグ膨張圧とその考察

膨張圧は、装置内で主応力として作用する膨張圧の Z 方向成分のみの総和がロードセルで読み取った荷重と等価であるとみなし (図 4-6 参照)、ロードセルの荷重値から逆算して求めることにした。以下に具体的な算出方法を示す。まず、供試体上半分を図 4-7 のように極座標上において中心を原点に持つ半径  $r$  の半球として考える。この半球

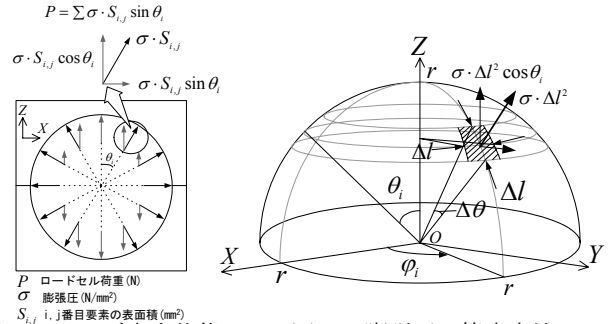


図 4-6 スラッグ応力状態

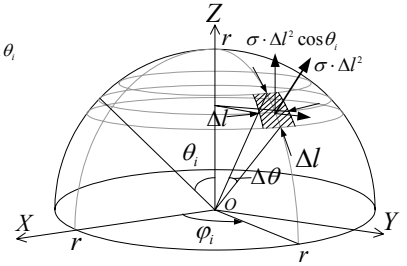


図 4-7 膨張圧の算定方法

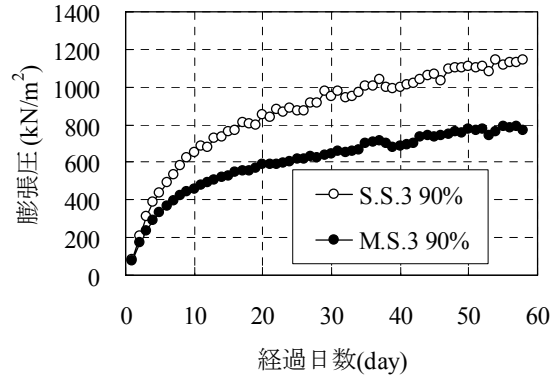


図 4-8 膨張圧と経過日数の関係

表面を緯度方向の幅  $\Delta l$  になるように XY 平面に平行な面で分割し、XY 平面から  $i$  番目のリングの面積を  $\Delta S_i$  とする。さらに、このリング中心線上の経度方向の幅  $\Delta l$  になるように Z 軸を含む平面で  $N_i$  個の面積片に分割する。このように分割した  $i$  番目リング上の  $j$  番目の面積片に作用する膨張力の Z 方向成分は  $\sigma \cdot \cos \theta_i \cdot (\Delta l)^2$  と表すことができる。膨張力の合力  $K$  は、面積片の総数をかけて次式で求めることができる。

$$K = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \sigma \cdot \cos \theta_i \cdot (\Delta l)^2 \quad (1)$$

ここに、 $K$  ; 膨張力の合力

$\sigma$  ; 膨張圧

ここで、リングの数  $n$  は  $n = \pi / 2 \Delta l$  で求められ、各リングの面積片数  $N_i$  は  $N_i = 2\pi \sin \theta_i / \Delta l$  となる。これらを式(1)に代入し、整理すると式(2)が得られる。

$$K = 2\sigma\pi \sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \theta_i \Delta l \quad (2)$$

$n \rightarrow \infty (\Delta l \rightarrow 0)$  のとき、膨張力の合力  $K$  は下式の値に収束する。

$$\begin{aligned} K &= \lim_{\Delta l \rightarrow 0} 2\sigma\pi \sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \theta_i \cdot \Delta l \\ &= \lim_{\Delta \theta \rightarrow 0} 2\sigma\pi^2 \sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \theta_i \cdot \Delta \theta \\ &= 2\sigma\pi^2 \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta = \sigma\pi^2 \end{aligned} \quad (3)$$

この膨張力の合力  $K$  が、ロードセルの荷重値  $P$  と等しいと置くことで、膨張圧  $\sigma$  を求める式(4)が得られる。

$$\sigma = P / \pi^2 \quad (4)$$

求めた膨張圧と経過日数の関係を図 4-8 に示す。同図より S.S.3 および M.S.3 の最終的な膨張圧は、1200 kN/m<sup>2</sup> および 800 kN/m<sup>2</sup> が得られている。既往の研究<sup>9)</sup>では、エージング処理前転炉スラッグの膨張圧として約 400 kN/m<sup>2</sup> が確

認されており、この値に対して、今回作製した測定装置による評価方法では約3倍大きい値となっている。この原因として、文献6)で用いられた測定装置は、図4-9に示すように円筒型装置であったため、膨張圧が異方性を有していた可能性が考えられ、等方的に膨張圧を発生させることを試みた本実験装置とは異なると推測される。

実験終了後に測定装置内の供試体の外観調査を行った結果から、膨張によって自己破壊を起こす転炉スラグにおいても、装置内で固まった状態で存在することが確認できた。これは、高い拘束力を受けていたため、スラグの膨張が逆に粒子間の接合力を強める方向に作用したためであると思われる。この傾向は混合スラグにおいても確認できたが、水砕スラグを混合した影響から、転炉スラグより固結の程度が大きかった。

経過日数30日までの膨張圧と膨張比の両対数関係について示すと図4-10のようになる。ここに、膨張圧と膨張比の関係を最小二乗法によって近似した直線も付記している。同図より、S.S.3はほぼ直線上にあるが、M.S.3では膨張比3%付近で折れ点が存在することがわかる。近似式から、自然養生で発生した膨張比(図3-5参照)における膨張圧を推定してみると、エージング処理前転炉スラグで $5.7 \times 10^{-4}$  (kN/m<sup>2</sup>)、混合スラグで $1.5 \times 10^{-4}$  (kN/m<sup>2</sup>)と非常に小さい値となることが確認できた。

## 5. まとめ

今回、鉄鋼スラグによる水平抵抗増大工法の浅層地盤改良材への適用に向けて、鉄鋼スラグの力学的特性を調べた。その結果、以下の知見が得られた。

- ① エージング処理前転炉スラグおよび混合スラグの粘着力 $c$ は時間経過とともに増加するが、内部摩擦角 $\phi$ はほぼ一定の範囲に分布する傾向が見られる。また、粘着力と同様に、スラグの固結性の発現から変形係数 $E_{50}$ も時間の経過とともに増加する傾向を示す。増加の割合は、強い固結性を有する水砕スラグを混合した方が大きい。
- ② エージング処理前転炉スラグおよび混合スラグともに、透水係数は時間の経過とともに大きく低下し、地盤改良材として適用した場合の透水性は期待できない。
- ③ 湿潤状態(自然養生)においても、エージング処理前転炉スラグおよび混合スラグは、非常に小さいながら膨張し続ける傾向を示したが、膨張を促進させた結果に比べると非常に小さい。
- ④ 80℃の温水中で養生することによって得られたエージング処理前転炉スラグおよび混合スラグの最終的な膨張圧は1,200 kN/m<sup>2</sup>および800 kN/m<sup>2</sup>であった。

鉄鋼スラグは永い歳月を要して膨張することが伺えるが、地中部での養生条件で、促進養生終了時の膨張比および膨張圧が発生するのか、また、発生する場合、どの程度の歳月がかかるのか、は定量的に把握できていないのが現

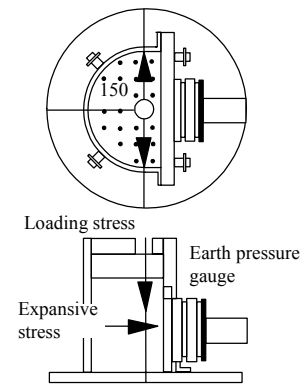


図4-9 膨張圧測定装置(文献6からの転記)

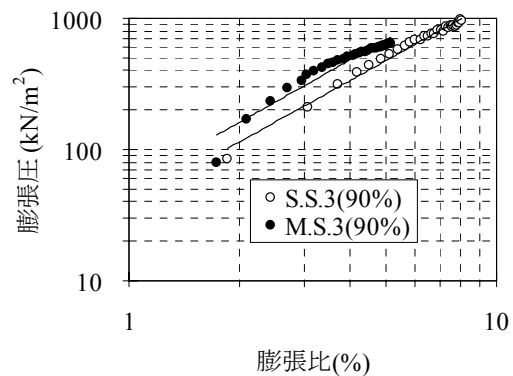


図4-10 膨張圧と膨張比の関係(両対数)

状であり、今後の課題である。

以上示したスラグの力学的性質を考慮し、鉄鋼スラグによる水平抵抗増加杭を実杭基礎として適用する設計法を確立する計画である。

### 参考文献

- 1) 本間裕介,富永晃司,小椋仁志,永井及: 鉄鋼スラグによる改良地盤中杭の水平抵抗増大効果確認実験,第49回地盤工学会シンポジウム,pp.165-172,2004.
- 2) Y.Homma,K.Tominaga,O.Nagai: Lateral Resistance of piles in Ground Improved by Compaction Method Using Iron and Steel Slag -An Experimental Study -,Geotechnical Earthquake Engineering Satellite Conference pp.228-235,Osaka,Japan, 2005.
- 3) 玉井智子,本間裕介,勘愛軍,富永晃司: 製鋼スラグの力学的性質に関する基礎的実験(その1 実験概要),日本建築学会中国支部研究報告集 第28巻,pp.145-148,2005.
- 4) 玉井智子,本間裕介,勘愛軍,富永晃司: 製鋼スラグの力学的性質に関する基礎的実験(その2 実験結果とその考察),日本建築学会中国支部研究報告集 第28巻,pp.149-152,2005.
- 5) 玉井智子,本間裕介,富永晃司: 養生期間が鉄鋼スラグの力学的性質に与える影響,日本建築学会大会学術梗概集〔近畿〕,pp.795-796,2005.
- 6) 光藤浩之,竹内徹,小林延郎,大関彰一郎: 製鋼スラグから発生する膨張圧の測定,日本鉄鋼協会,CAMP-ISIJ Vol.12(1999)-144
- 7) 松永久宏,小菊史男,高木正人,谷敷多穂: 鉄鋼スラグを利用した環境に優しい固化体の開発,コンクリート工学,Vol.41,No.4,pp.47-54,2003.
- 8) M.R.カルマチャリア,内田一郎,出光隆,高山俊一: 転炉スラグの路盤材への利用について,土木学会論文報告集,第282号,pp.101-113,1979.

---

---

## Fundamental Experiments on Steelmaking Slag to Improve Soft Ground surrounding Piles

Yusuke HOMMA<sup>1</sup>, Tomoko TAMAI<sup>2</sup>, Koji TOMINAGA<sup>2</sup>, Oyobu NAGAI<sup>3</sup>

1 JAPAN PILE CORPORATION, Engineering Development Division

2 Graduate school for IDEC, Hiroshima University

3 HIROKOU-GIKEN Co.,Ltd.

### Abstract

In order to apply the iron and steelmaking slag to improvement of the seismic safety of the pile foundation, it is necessary to understand the physical and mechanical properties quantitatively. Hence the fundamental experiments including expansion test, permeability test and tri-axial compression test were carried out on the slag-specimens with several curing period. In application to the actual pile foundations, there is great concern that the swelling of the slag would affect on pile caps. Thus, the authors performed the slag swelling tests with new device designed for measuring expansion-stress of slag. This paper presents the test results and discussions about them.

Key words: iron and steelmaking slag, cohesion, deformation modulus, expansion ratio, expansion stress