

蒸気エージングを実施した転炉スラグの有効利用

USING METHOD OF CONVERTER SLAG BY STEAM AGING TREATMENT

高山俊一*、出光隆**、橋本透***、杉正法****

By Shunichi TAKAYAMA, Takashi IDEMITSU

Tooru HASHIMOTO and Masanori SUGI

1. まえがき

資源の乏しい我国にとって、限り有る資源を有効に利用することは極めて大切な事である。北九州市内の大学および企業では、製鉄所から排出されるスラグの利用法について長年、積極的に実験・研究を行なってきた。このため、現在高炉スラグについては、ほぼ100%近くが利用されている。一方、高炉スラグと同様に潜在水硬性を有している転炉スラグについては、遊離石灰（f. CaO）の膨張現象のために未だ十分に利用されているとは考えられない。転炉スラグの膨張量を減少・抑制するためにエージングが実施されているが、これまでの屋外放置のエージングでは安定化するために少なくとも約6ヵ月ほどの長期間が必要であった。これでは次々に排出される多量のスラグを速やかに処理できない。そこで筆者らは、迅速および確実なエージング方法と考えられる蒸気エージング法に着目し、先ず、小型エージング槽を用いて転炉スラグの試験エージングを行った。次に、実用化のために作られた大型エージング設備にてエージングを行った。エージング実施後、エージング時間と転炉スラグの膨張量の関係を求めた。また蒸気エージング後の転炉スラグの一軸圧縮強度および変形係数の測定も行った。

2. 小型エージング槽を用いたエージング時間と転炉スラグの膨張量

2.1 実験方法

試料として3箇所の製鉄所で排出した11種類の転炉スラグを使用した。転炉スラグの化学分析結果の一例を表-1に示す。11種類のスラグ中の遊離石灰の量は1~9%と種々異なっている。蒸気エージングを行った容器を図-1に示す。エージング槽は鋼鉄製で一辺が40cmの正方形で、高さが82cmであり、底部の方から蒸気が継続して供給される。容器に入る前の蒸気は蒸気圧8kgf/cm²で約200℃を示した。蒸気エージング時間は6、12、24および48時間とし、所要時間ごとにスラグの一部を採取し、水浸膨張試験を行った。水浸膨張試験用の供試体の作製は、スラグをΦ15 x 17.5cmのモールド中に3層に分けて詰め、4.5kgのランマーを使用し、92回/層で自動突き固め試験機を用いて行った。作製した供試体は温水（80℃）中に1日6時間だけ浸し、この状態を10日間繰り返して膨張量を測定した。

表-1 転炉スラグの化学成分（産地：A）

	CaO	SiO ₂	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S	FeO	T-Fe	TiO ₂	f	F. CaO	CaO/SiO ₂
NO.1	50.1	16.9	3.94	8.88	1.89	2.12	0.26	10.3	7.96	0.77	1.05	1.20	2.96
NO.2	42.5	14.5	3.50	7.70	1.80	2.00	0.13	18.7	20.1	0.80	0.83	1.93	2.93
NO.3	47.9	16.7	5.00	6.00	2.07	2.03	0.41	8.62	14.1	0.66	2.40	1.23	2.87
NO.4	52.0	17.0	3.00	5.20	1.63	2.01	0.14	17.7	13.6	0.77	2.77	4.14	3.06
NO.5	50.7	18.4	3.10	5.10	2.50	2.15	0.29	6.46	12.3	0.66	1.13	3.30	2.76
NO.6	45.0	16.5	4.00	8.98	2.40	1.06	0.28	12.4	15.6	0.70	0.76	1.34	2.73

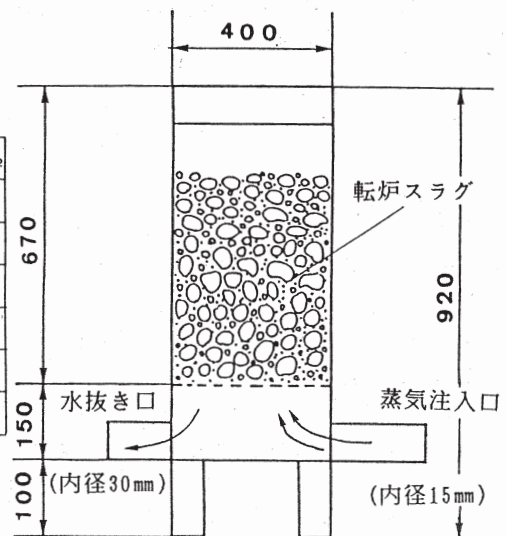


図-1 蒸気エージング槽

*九州共立大学工学部土木工学科助教授（〒807 北九州市八幡西区自由ヶ丘1-8）、**九州工業大学工学部助教授、***住友金属工業（株）小倉製鉄所、****住金小倉鉱化（株）開発室副長

2. 2 膨張量と蒸気エージング時間に関する結果
および考察

図-2は膨張量と蒸気エージング時間の関係を示す。蒸気エージング時間が0時間とはエージングを実施しなかった場合を意味している。同図によると、遊離石灰量が多いNo. 4、5の場合、エージングが0時間の場合の膨張量は2.0%および6.7%となってかなり大きい。蒸気エージング時間が長くなるにしたがって膨張量は著しく減少している。最大の膨張量を示したNo. 5のスラグの場合でも24時間のエージングを実施すると、膨張量は0.25%と著しく減少した。また、48時間のエージングを行った場合、全ての試料で膨張量は0.1%以下となり、試料No. 6の場合には、膨張量が全く観測されなかった。したがって、蒸気によるエージング処理は24時間でも十分と考えられるが、48時間のエージングを実施すれば残存膨張量はほとんど観測されなくなるものと考えられる。

図-3に3箇所の製鉄所で蒸気エージングを実施し膨張量を測定した結果を示す。同図では両軸を対数目盛りとした。同図によると、いずれの製鉄所で蒸気エージングを行っても膨張比は、エージング時間の増加と共に著しく減少している。エージング時間0時間の場合の膨張比が大きい転炉スラグは、48時間の蒸気エージング後に膨張比が著しく減少しているが、初期での膨張比が小さかった転炉スラグの場合に比較すると、わずかであるが大きい傾向を示した。

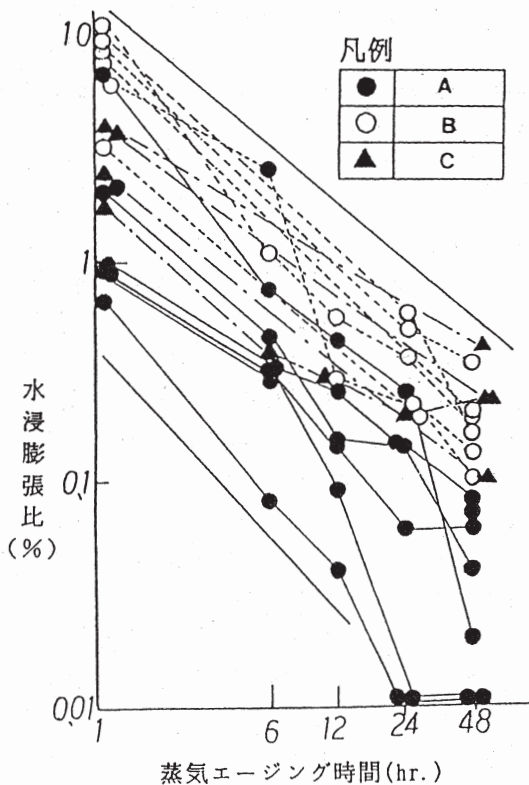


図-3 蒸気エージング時間と水浸膨張比

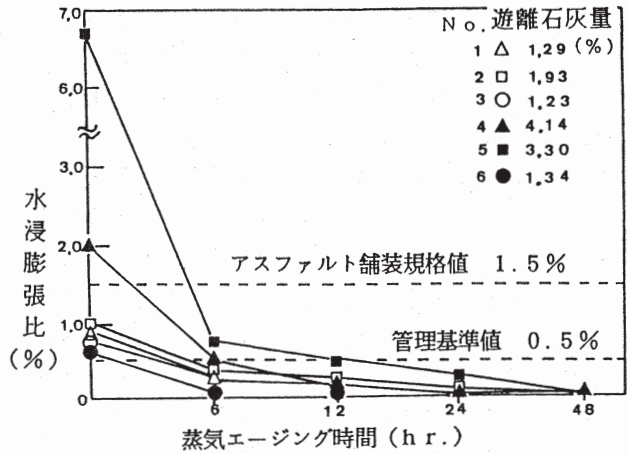


図-2 膨張量と蒸気エージング時間

図-4には転炉スラグを3箇所の製鉄所で採取し、蒸気エージング(48時間)を実施した場合と未エージングの転炉スラグの膨張量と遊離石灰量の関係を示す。白印は未エージングスラグでの膨張量の測定結果であるが、遊離石灰量が多いほど膨張量は大きくなっている。遊離石灰が約9%のスラグでは、膨張量が約11.5%にも達している。このように膨張量が大きいと、これまでに路面にひびわれや凹凸が生じた例が報告されていることがうなずける。蒸気エージングを48時間行ったスラグの膨張量は黒印で示しているが、全ての試料の膨張比は0.5%以下であり、著しく小さくなったことが認められる。

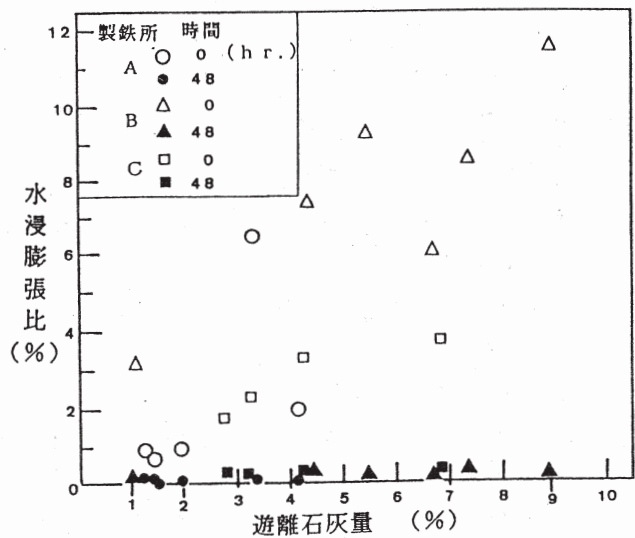


図-4 膨張量と遊離石灰量

図-5は水浸膨張比と遊離石灰量の関係に対数目盛りで示した。同図によると、48時間エージング後の膨張比はエージング前のそれに比べて1/10~1/100以下となり、膨張量が著しく小さくなったことが認められる。したがって、転炉スラグに48時間の蒸気エージングを行えば、スラグの膨張量は著しく減少するために安心して使用できるものと考えられる。

これまでの測定結果で、小型エージング槽によって転炉スラグのエージングを実施すれば、転炉スラグが安心して使用できるようになることが明らかとなった。次に実用化のために、大型エージング設備でも転炉スラグが前記と同様な結果となり得るか試験を行なった。

3. 大型蒸気エージング設備によるエージング時間と転炉スラグの諸性質

3. 1 大型蒸気エージング設備

図-6には多量の転炉スラグのエージングを行うための大型蒸気エージング設備を示す。エージング設備は幅9.0m、奥行き12.0m、高さ2.0m(内容積216m³)であり、1回の転炉スラグのエージング処理量は約280tonである。図中に示されているように、床下には蒸気を通る鋼管が配置されている。蒸気量はエージング初期の昇温時の場合が1ton/時間、試料(転炉スラグ)の上部まで一定温度(約100℃)に達した後、

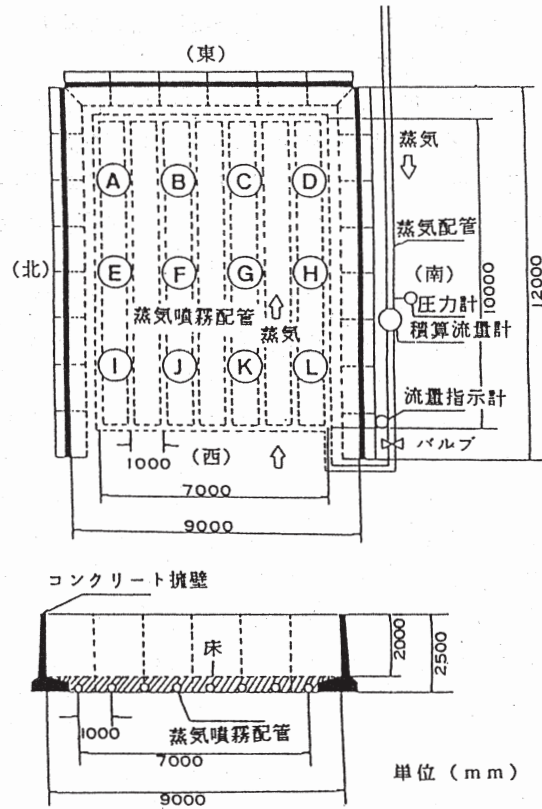


図-6 蒸気エージング設備 (A~Lは試料採取位置)

温度の保持の場合が0.5ton/時間である。転炉スラグの上部には、保温のためにシートを2枚ほど重ねた。試料の上部まで所定の温度に達する時間は、1.1~2.3時間でありかなりばらついていた。設備内の位置における蒸気の効果調べるため、A~Lまでの12箇所まで試料を採取し、転炉スラグの水浸膨張比と強度の測定をそれぞれ行った。

3. 2 水浸膨張試験結果および考察

試験エージングは合計6回行った。図中のA~Lは試料の採取位置を示す。蒸気エージング時間と膨張量との関係を図-7に示す。図中の処理後とは、蒸気エージングを48時間行った後、蒸気を停止し、試料が常温となるまで冷却する2日間静置した後に採取したものである。同図によると、小型エージング槽によるエージング結果と同様に、蒸気エージングをわずかに6時間実施した場合でも膨張比が著しく減少している。蒸気エージングを48時間実施した後の転炉スラグの最大膨張量はわずか0.18%となり、アスファルト舗装規格値の約1/10、目標としている管理基準値の1/3程度であって極めて小さくなった。したがって、大型エージング設備は、促進エージングとしての役割を十分に果たしているものと考えられる。

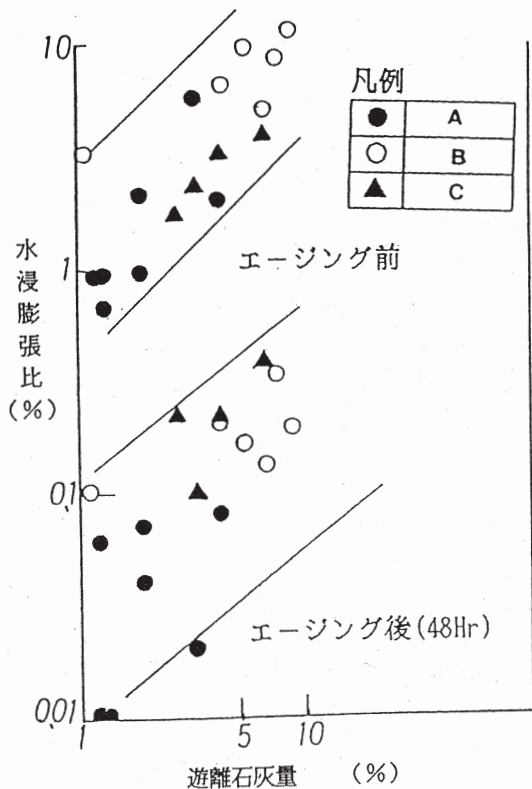


図-5 水浸膨張比と遊離石灰量

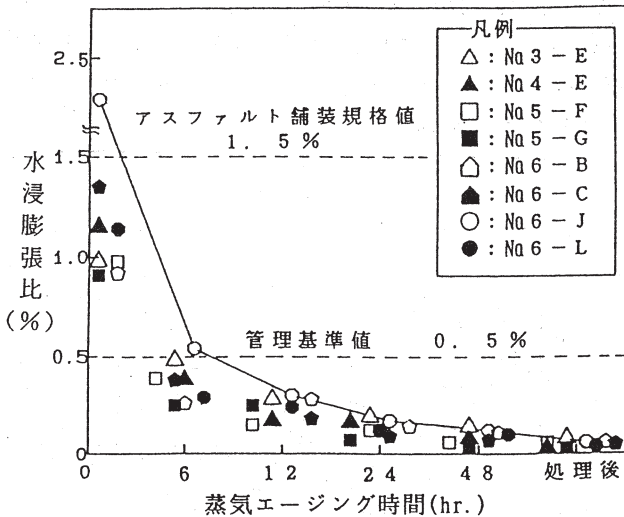


図-7 蒸気エージング時間と水浸膨張比の関係

図-8 に水浸膨張比と蒸気量の関係を示す。同図によると、エージングのためにスラグ 1 ton 当り 50 kg の蒸気を使用すれば、アスファルト舗装規格値 1.5% はもちろんのこと、筆者らが管理基準値と定めている 0.5% の値よりも充分に小さくなっている。したがって、安全を考慮してスラグ 1 ton 当り 100 kg 程度の蒸気を与えれば、転炉スラグの膨張量は著しく小さくなり、安心して使用できる材料となるものと考えられる。

図-9 は蒸気のばらつきの影響を調べるために、採取地点別の膨張量の測定結果である。同図によると、48 時間の蒸気エージング処理を実施したスラグの膨張量は多くの場合の 0.15% 以下であり、エージング処理前の膨張量が約 1.0% であるために、約 85% も減少したものと考えられる。したがって、全ての箇所蒸気効果が充分に発揮されているものと考えられる。

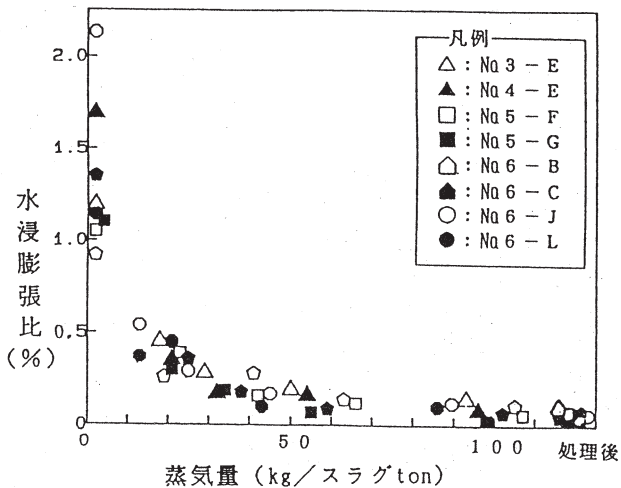


図-8 蒸気量と水浸膨張比の関係

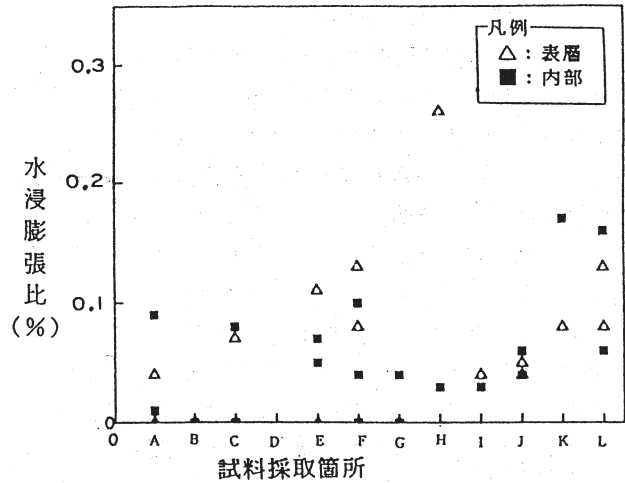


図-9 試料採取箇所と水浸膨張比

図-10 に蒸気エージング処理後の各試料採取箇所についての採取深さと水浸膨張比の関係を示す。図中の表層とは深さ約 30 cm、内部とは深さ約 100 cm の箇所から採取したものである。同図によると、表層の試料による膨張量は内部の試料のそれとほとんど相違がないものと考えられる。したがって、蒸気エージングを 48 時間実施すれば、エージング効果が充分に認められたものと考えられる。

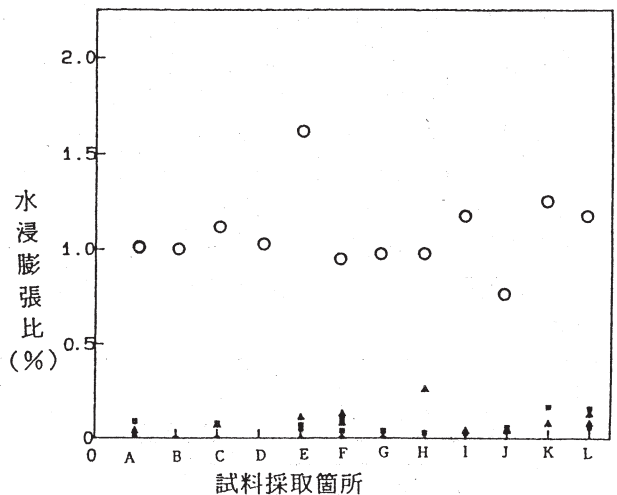


図-10 試料採取箇所・採取深さと水浸膨張比

3. 3 強度および変形係数

3. 3. 1 一軸圧縮強度用供試体の作製方法

スラグの単位重量、比重などを表-2に示す。転炉スラグは鉄分が若干含まれているために、比重が大きくなっている。一軸圧縮強度に使用した配合を表-3に示す。転炉スラグは48時間のエージングを行ったものを使用した。一軸圧縮強度用供試体はφ10cmモールドを使用し、自動ランマーで3層に分けて42回/層で突き固めた。キャッピング後、供試体をモールドから押し出し器によって取り出し、供試体をラップ(水分保持のため)で包んだ。その後、供試体を恒温恒湿室(温度20±2℃)の気中に強度試験前日まで養生した。試験前日に水に浸し、24時間水浸後に強度試験を行った。供試体は1材令につき6本作製した。変形係数は、変位計(感度1/500mm)を3方向に使用して変位を測定し、求めた応力ひずみ曲線から圧縮強度の1/2の点で傾きをそれとした。

3. 3. 2 結果および考察

図-11は材令と一軸圧縮強度の関係を示す。同図によると、材令14日の圧縮強度は15~22kgf/cm²であり、アスファルト舗装要綱で示されている材令14日で12kg/cm²以上の最小強度の規格値を上回っている。圧縮強度は材令が経過するにしたがって増加し、材令91日における強度は材令14日のほぼ2倍程度まで増加したのもみられた。図-12は材令と変形係数の

関係を示す。材令14日での変形係数は1000~2000kgf/cm²であり、材令91日になると変形係数は4000~5000kgf/cm²と著しく大きくなったものもみられた。

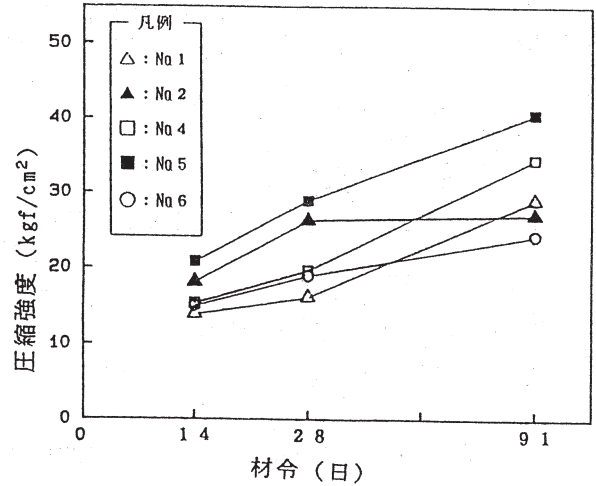


図-11 材令と一軸圧縮強度

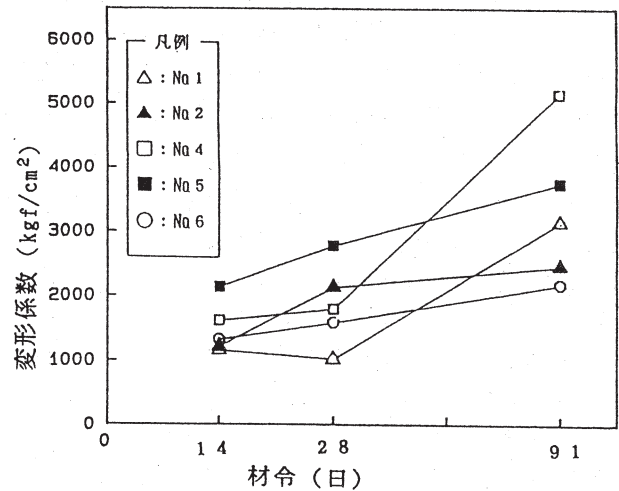


図-12 材令と変形係数

表-2 スラグの表乾比重・単位容積質量

項目/材料	高炉スラグ	転炉スラグ	水砕スラグ
表乾比重	2.4~2.6	3.1~3.3	2.3~2.5
吸水量(%)	3.0~5.0	0.5~1.5	0.7~1.5
単位容積質量 (kg/l)	1.6~1.8	2.0~2.2	1.0~1.2

表-3 圧縮強度のための配合(重量比)

材料名	重量比(%)
転炉スラグ	75
高炉徐冷スラグ	20
水砕	5

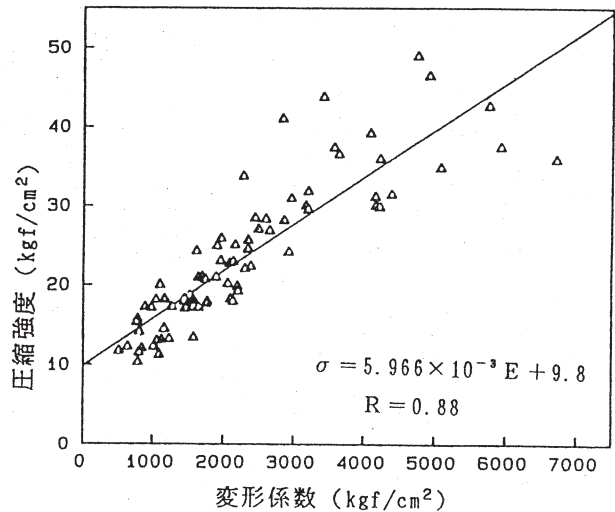


図-13 圧縮強度と変形係数

図-13は圧縮強度と変形係数の関係を示す。図中の点は、材令14日、28日および91日での測定結果である。コンクリートの弾性係数の場合と同様に、変形係数は圧縮強度の増加と共に大きくなる傾向を示している。また、相関係数が0.88であり、変形係数が圧縮強度と高い相関があるものと考えられる。

3.4 強度および変形係数のばらつき

図-14に圧縮強度の変動係数の関係を示す。同図によると、No.2材令で28日の変動係数が約40%であるが、これ以外での強度の変動係数は10~20%であった。図-15は変形係数の変動係数を示す。変形係数の変動係数は40~60%と極めて大きくなっているものもある。変形係数の変動係数は、強度のそれと比較して約2倍ほど大きい。転炉スラグの供試体はコンクリートのようにセメントペーストに相当するものがほとんどなく、大小の粒子の集合体と考えられる。したがって、強度および変形係数は、骨材の噛み合わせと水和反応による結合等によって増加するものと考えられるが、試料の採取方法、締め固めの相違および脱型時の取扱方法などによって、ばらつきがかなり生じるものと考えられる。

4. まとめ

蒸気エージング工法は、転炉スラグの遊離石灰による膨張を迅速かつ簡便に減少させることができる有効な手段と考えられる。工場における蒸気エージングの工程の概略を図-16に示す。1サイクルを6日間とし、1回の転炉スラグの処理量は300~350ton(幅9m、奥行き12m、高さ2m)と考えられる。

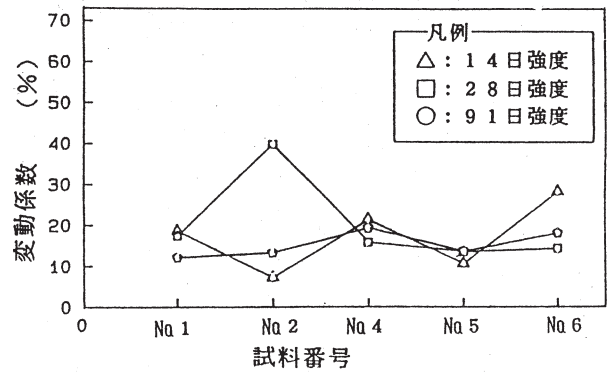


図-14 一軸圧縮強度の変動係数

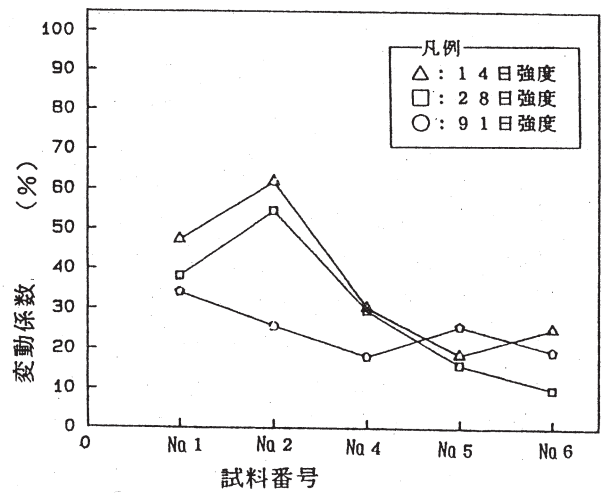


図-15 変形係数の変動係数

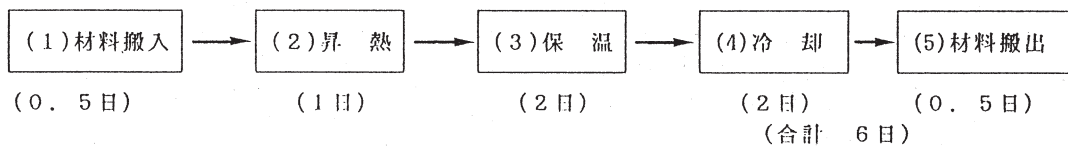


図-16 工場における蒸気エージングの工程