

論文 粉体状産業廃棄物を用いたコンクリートの強度特性

松村勘寿*¹・丸山久一*²・木村 仁*³

要旨：粉体状の産業廃棄物である鋳物灰と還元スラグを 1000kg/m^3 程度コンクリートに用いた場合の、コンクリートの圧縮強度特性について検討した。その結果、鋳物灰は単独で使用した場合でも圧縮強度に多少寄与するが、還元スラグと混合して使用することで強度発現への寄与が大きくなることが認められた。またプラントでこのコンクリートにより消波ブロックを製作することを前提に、養生条件が圧縮強度に及ぼす影響について検討した。その結果、鋳物灰・還元スラグ混入コンクリートの積算温度の対数と圧縮強度には直線関係が確認でき、養生条件と圧縮強度との関係を明らかにできた。

キーワード：鋳物灰、還元スラグ、リサイクル、養生条件、積算温度

1. はじめに

昨今、地球温暖化やオゾン層破壊などの様々な環境問題が注目されている。そのほとんどが地球規模で取り扱う問題であるが、国や地域においても天然資源の枯渇や最終処分場の不足などの問題が表面化しており、早急に解決しなければならない問題になっている。

新潟県中越地区は製鋼業の盛んな地域であり、鋳さいは他の地域に比べ多く排出されている。本研究では、鋳さいの中でも特にリサイクル率の低い産業廃棄物として、全量最終処分されている鋳物灰と還元スラグを有効利用することを目的とする。

桜井らにより鋳物灰と還元スラグを大量に使用したコンクリート(単位鋳物灰量 = 500kg/m^3 、単位還元スラグ量 = 500kg/m^3 、以下 CAS コンクリートと略す)の施工性と有害物質の溶出に関しては、十分な結果が得られている^{1), 2)}。またコンクリートの強度に関しても、材齢 28 日で圧縮強度が 20N/mm^2 程度となり、高い要求性能を必要としない無筋コンクリート構造物ならば、十分適用可能であ

ることが確認されている^{1), 3)}。

そこで本研究では基本物性として鋳物灰・還元スラグの圧縮強度に寄与する程度を検討し、鋳物灰と還元スラグの混合比の違いが圧縮強度に及ぼす影響を検討した。

次にこのコンクリートを用いて消波ブロックを製作することを目的として、実際の施工を想定し、養生条件が圧縮強度に及ぼす影響について検討し、強度発現特性を明らかにすることとした。

2. 鋳物灰と還元スラグ

表-1, 2 に鋳物灰・還元スラグの物理・化学的性質を示す。鋳物灰・還元スラグは採取する工場や日によって性質が異なるが、本研究ではその変動をできるだけ小さくするために同一工場による鋳物灰・還元スラグを使用した。それでも採取日による変動があり、密度はその変動の範囲を、ブレン比表面積、メディアン径および化学成分は代表的な値を示している。

鋳物灰とは鋳造工場において鋳型を再利用

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

*2 長岡技術科学大学教授 工学部 環境・建設系 Ph.D. (正会員)

*3 中越環境開発株式会社 (正会員)

する際に発生する粉塵を集塵機により回収したものである。密度は $2.5 \sim 2.6 \text{ g/cm}^3$ 程度のもので、ブレン比表面積とメディアン径を見ると細骨材よりは細かく、セメントよりは粗い粉末状のものであることが分かる。また構成元素を見ると、シリカや鉄分が多く含まれている。

還元スラグとは電気炉においてスクラップ鋼材から鋼製品を製造する際の還元工程において発生する鉱さいである。密度は $2.9 \sim 3.1 \text{ g/cm}^3$ で、コンクリート材料としては重めである。還元スラグの粒度も細骨材より細かく、セメントより粗いものであり、粉末状と見ることができる。その構成元素はカルシウムが多く含まれており、またアルミニウムが若干含まれている。そのため還元スラグだけをコンクリートに混入すると瞬結や膨張を引き起こす。しかし桜井らにより、コンクリートの瞬結は石膏を添加することで、また膨張は珪物灰と混合して使用することで抑制できるとの報告がされている¹⁾。

3. 珪物灰・還元スラグの混入と圧縮強度

3.1 実験概要

本実験では、珪物灰・還元スラグの混入および混合比がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響について検討した。その実験で用いた使用材料を表-3、4に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを、骨材は信濃川産の川砂、川砂利を使用した。ここで、珪物灰と還元スラグの圧縮強度に寄与する程度を検討するために、石灰石微粉末を用いたコンクリートとも比較検討することとした。これまでの研究により、石灰石微粉末はコンクリートの圧縮強度に寄与しないことが明らかになっている。

実験は、珪物灰・還元スラグの混入が圧縮強度に与える影響と混合比が圧縮強度に与える影響の2つについて検討を行った。

実験に用いたコンクリートの配合を表-5

表-1 珪物灰・還元スラグの物性値

	密度 (g/cm^3)	ブレン 比表面積 (cm^2/g)	メディアン径 (μm)
珪物灰	2.5~2.6	1660	54
還元スラグ	2.9~3.1	1340	27

表-2 珪物灰・還元スラグの構成元素

	珪物灰 (g/kg)	還元スラグ (g/kg)
Ca	0.75	360
Mg	3.8	50
Fe	260	4.1
Al	11	62
Si	280	110
K	0.32	0.18
Na	0.56	0.49
C	0.2%	1.6%

表-3 使用した粉体の物性値

	密度 (g/cm^3)	ブレン 比表面積 (cm^2/g)
普通ポルトランド セメント(C)	3.15	3300
珪物灰	2.54	1660
還元スラグ	3.06	1340
石灰石微粉末(LP)	2.68	4000
石膏	2.41	

表-4 使用した骨材の物性値

	密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	粗粒率 (F.M)	実積率 (%)
細骨材(川砂)(S)	2.55	2.54	2.65	63.2
粗骨材(川砂利)(G)	2.72	1.49	7.08	65.1

に示す。CAS コンクリートは、桜井らの実験を参考に^{1), 2), 3)}、珪物灰・還元スラグをそれぞれ 500 kg/m^3 混入した配合とした。またLP コンクリートは石灰石微粉末を廃棄物と同量 1000 kg/m^3 用いた配合とした。それぞれのコンクリートについて単位セメント量を増

加させ、同一のスランブとするために単位水量を変化させた。コンクリートのスランブは $5 \pm 1\text{cm}$ 、空気量は $2 \pm 1\%$ 、 s/a は 25% とした。また AE 剤をセメントの 0.002% 添加した。

次に鑄物灰・還元スラグの混合比が圧縮強度に与える影響を調べるために、鑄物灰と還元スラグの混合比を $10:0 \sim 2.5:7.5$ と変化したモルタルと石灰石微粉末を廃棄物と同量用いたモルタルの圧縮強度を比較した。なお還元スラグはコンクリートに混入すると膨張するため、その上限を 75% としている。実験で使用したモルタルの配合を表-6 に示す。配合は単位水量、単位セメント量を一定とし、鑄物灰、還元スラグおよび石灰石微粉末の混入による総容積の変化を細骨材により補正した。

なお CAS コンクリート、モルタルは上述したように、還元スラグによる瞬結を抑制するため、石膏を還元スラグの $3\text{wt}\%$ 用いている。

3.2 鑄物灰・還元スラグの圧縮強度に与える影響

図-1 に CAS コンクリートと LP コンクリートの C/W と圧縮強度の関係を示す。同一の C/W の時に、CAS コンクリートは LP コンクリートと比較して圧縮強度が増加している。したがって鑄物灰・還元スラグは圧縮強度に寄与していることが分かる。

3.3 鑄物灰・還元スラグの混合比

図-2 に鑄物灰と還元スラグの混合比を変化させたモルタルの圧縮強度を示す。図中の数字は LP モルタルに対する強度比を示している。

材齢 7 日では CAS モルタルと LP モルタルに圧縮強度の差は見られなかった。しかし、材齢 28 日ではすべての混合比で CAS モルタルが LP モルタルの圧縮強度を上回り、その傾向は材齢 56 日でさらに顕著であった。石灰石微粉末をセメントの外割添加する場合、

表-5 鑄物灰・還元スラグの混入による影響の検討用配合

名称	W/C (%)	単位量(kg/m^3)						
		W	C	S	G	鑄物灰	還元スラグ	LP 石膏
CAS コンクリート	210	315	150	150	478	500	500	15
	135	338	250	115	367			
	103	361	350	80	255			
	85	383	450	45	144			
LP コンクリート	198	297	150	161	514			1000
	127	318	250	127	406			
	97	339	350	93	298			
	80	360	450	60	190			

表-6 鑄物灰・還元スラグの混合比の検討用配合

名称	W/C (%)	単位量(kg/m^3)						
		W	C	S	鑄物灰	還元スラグ	LP	石膏
CAS モルタル	136	340	250	388	1000			
				427	750	250		7.5
				466	500	500		15.0
				505	250	750		22.5
LP モルタル				452			1000	

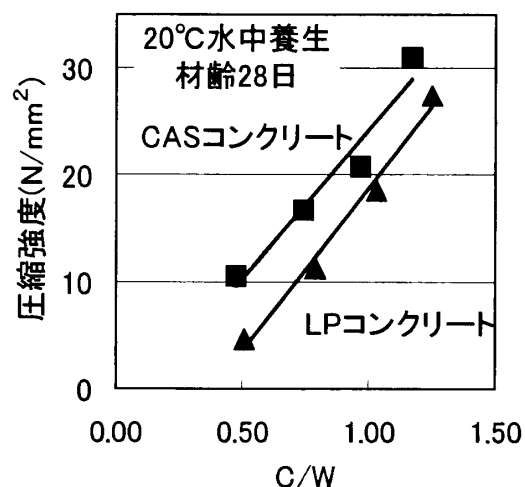


図-1 鑄物灰・還元スラグの混入の影響

材齢 7 日以降は非活性と見なせるといわれており⁴⁾、鋳物灰・還元スラグによる強度増加は材齢 7 日以降に行われていると考えられる。

また、鋳物灰を単独で使用する場合にも強度寄与効果が見られたが、還元スラグと混合して使用した場合にさらに圧縮強度が大きくなった。つまり鋳物灰・還元スラグをある程度混合して使用することで強度増加することが確認された。

4. 養生条件と圧縮強度の関係

4.1 実験概要

本実験では、養生条件が圧縮強度に及ぼす影響として、養生温度・乾湿・材齢について検討した。その詳細は表-7 に示す通りである。

また表-8 に実験で使用したコンクリートの配合を示す。使用材料は前節で示した表-3, 4 と同じ物を用いた。本実験では実際に消波ブロックを製作することを考えているため、実際に消波ブロックに用いられている配合を参考に、設計基準強度 18 N/mm^2 で、AE 減水剤をセメントの 0.5% 添加した、CAS コンクリートは桜井らの実験を参考に^{1), 2), 3)}、鋳物灰・還元スラグをそれぞれ 500 kg/m^3 混入し、AE 剤をセメントの 0.002% 添加した配合とした。なお両方のコンクリートともに実際の施工に相当である $5 \pm 1 \text{ cm}$ のスランブにしている。CAS コンクリートはそのスランブにするために単位水量が多くなっており、ペーストリッチなコンクリートとなっているのが特徴である。

4.2 養生温度の影響

生コンプラントで消波ブロックを製造する場合を考えると、養生は屋外でなされるため、温度が一定とはならない。そこで養生温度の影響について検討した。図-3 に養生温度が圧縮強度に及ぼす影響についての結果を示す。普通コンクリート、CAS コンクリートともに

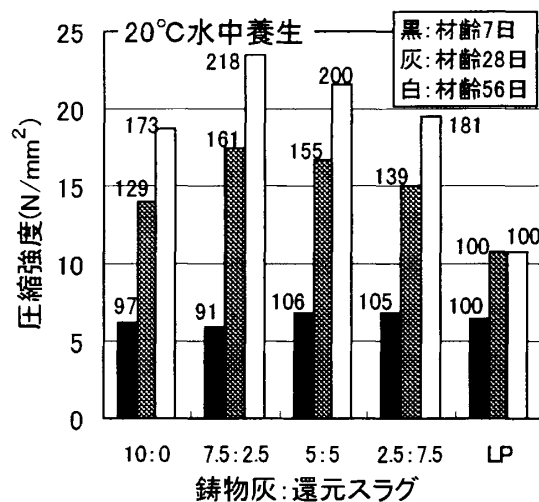


図-2 鋳物灰・還元スラグの混合比の影響

表-7 養生条件の検討項目

検討項目	詳細
養生温度	5・20・40℃
乾湿	水中・気中(55%RH)
材齢	1日～56日

表-8 養生条件の検討用配合

名称	W/C (%)	air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)						
				W	C	S	G	鋳物灰	還元スラグ	石膏
普通コンクリート	57	4.0	43	143	250	805	1151			
CAS コンクリート	134	2.0	25	334	250	117	375	500	500	15

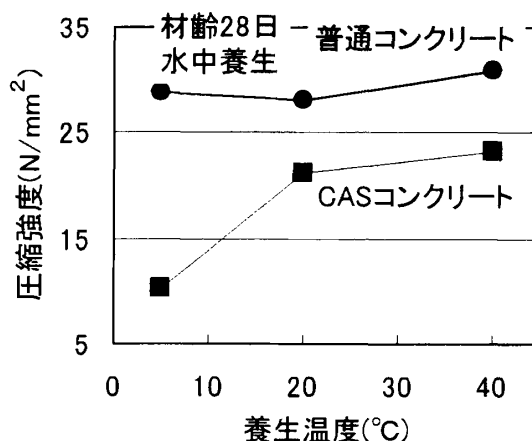


図-3 養生温度と圧縮強度の関係

養生温度が高くなるほど、圧縮強度が高くなっている。しかし普通コンクリートは 5℃～40℃の範囲で圧縮強度の変化は 2.8N/mm² 程度であるのに対して、CAS コンクリートは養生温度が 40℃から 5℃となることで、13.0N/mm² も強度低下していた。したがって製造時の気温には十分な注意が必要である。

4.3 乾湿の影響

図-4 に乾燥、湿潤養生(水中養生および 55～70%RH 気中養生)の違いが圧縮強度に及ぼす影響について示す。普通コンクリートは気中養生することで、水中養生の場合よりも、大きく圧縮強度が低下している。それに対し CAS コンクリートは気中養生の場合でも圧縮強度に明確な低下は見られなかった。したがって本実験の配合および圧縮強度レベルにおいて、CAS コンクリートは乾湿の影響を比較的受けにくいことが分かった。

4.4 材齢

図-5 に材齢と圧縮強度の関係を示す。この実験は材齢 364 日まで継続して行う予定である。

図-6 に材齢 28 日の圧縮強度を 100%とした場合の強度比を示す。CAS コンクリートは普通コンクリートに比べて、初期材齢での圧縮強度の発現性は乏しい。しかし長期的に圧縮強度が増加しているのが分かる。

4.5 積算温度と圧縮強度

これまでの結果を踏まえ、任意の養生条件における圧縮強度の予測を行うために、養生温度と材齢を統一的に評価する積算温度を用い整理した。積算温度 $M(^{\circ}\text{C}\cdot\text{day})$ は、

$$M = \sum_0^t (\theta + A) \Delta t \quad (1)$$

ここに、 θ : 養生温度(℃)

A : 10(℃)

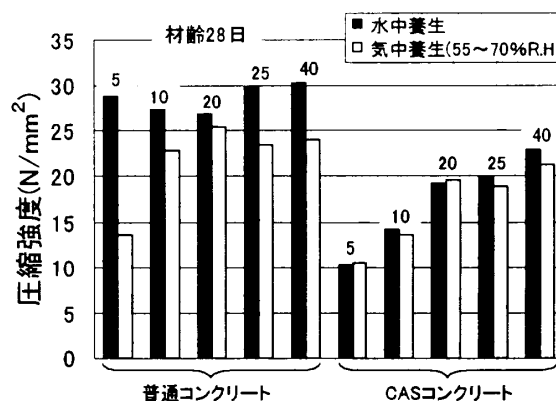


図-4 乾湿養生と圧縮強度の関係

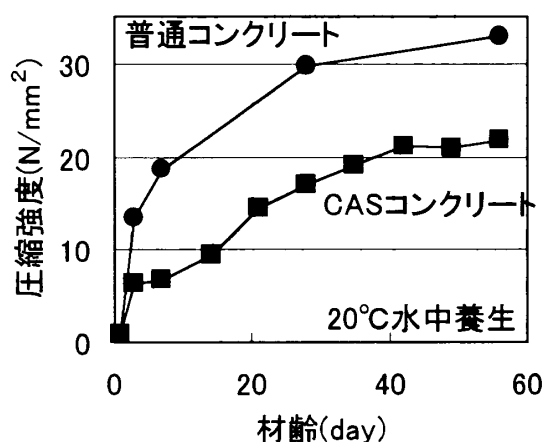


図-5 材齢と圧縮強度の関係

注) 材齢 14 日までは 10～15℃の低温水中養生

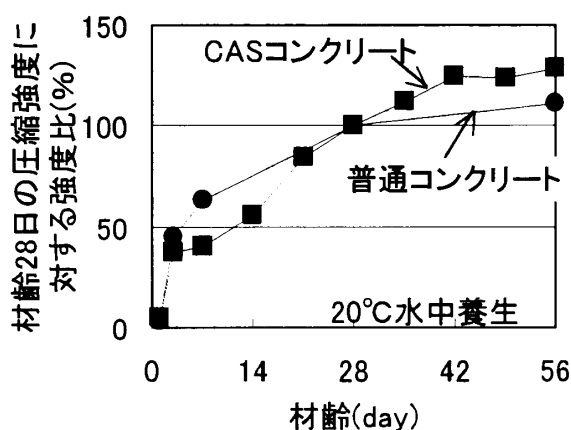


図-6 材齢 28 日の圧縮強度に対する強度比

t : 材齢(day)

で示される。

図-7 に積算温度と圧縮強度の関係を示す。普通コンクリートに比べ CAS コンクリートは相関係数こそ多少小さいが、概ね直線で近似できるものといえる。したがって CAS コンクリートも普通コンクリートのように積算温度を用いることで、任意の養生条件における圧縮強度を予測することができる。積算温度と圧縮強度の関係を求めると次のようになる。

普通コンクリート：

$$f'_c = 16.9 \log(M) - 18.5 \quad (2)$$

CAS コンクリート：

$$f'_c = 9.0 \log(M) - 12.0 \quad (3)$$

式(2)、(3)より、CAS コンクリートの傾きは普通コンクリートの傾きより小さい。したがって CAS コンクリートは、温度と湿度を同じにした場合、普通コンクリートより長期の材齢を必要とすることが分かる。

5. まとめ

鋳物灰・還元スラグを混入したコンクリート(CAS コンクリート)の混入や混合比および養生条件が圧縮強度に及ぼす影響について検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 鋳物灰・還元スラグはコンクリートに混入することで圧縮強度を増加させる。また鋳物灰を単独で使用するより、還元スラグと混合して使用することで、さらに圧縮強度を高くする。
- 2) CAS コンクリートは養生温度が 40℃から 5℃と低くなることで 13.0N/mm² 程度圧縮強度が低下する。したがって寒冷地での施工には注意が必要である。
- 3) CAS コンクリートは初期材齢における圧縮強度が低い。そのためセメントを増量する、もしくは高性能減水剤を使用して、圧縮強度を高くするか、型枠

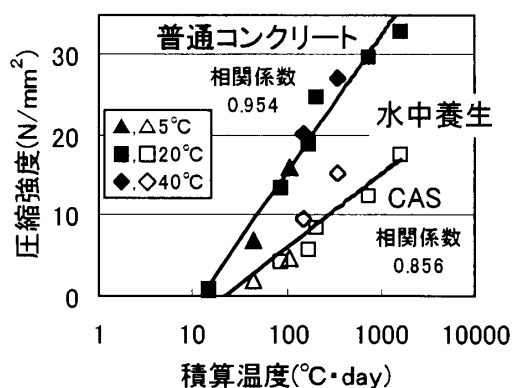


図-7 積算温度と圧縮強度の関係

の取外し時期や転置時期を普通コンクリートの場合よりも遅くさせる必要がある。

- 4) CAS コンクリートも普通コンクリート同様、積算温度で任意の養生温度と材齢における圧縮強度を予測することができる。

参考文献

- 1) 桜井 邦昭：粉体状産業廃棄物を用いたコンクリートの配合設計に関する研究，長岡技術科学大学大学院修士論文，2000.3
- 2) 桜井 邦昭ほか：粉体状産業廃棄物を多量に混入したコンクリートの配合設計方法に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp1153-1158，2000.7
- 3) 桜井邦昭ほか：鋳物灰を多量に混入したコンクリートの圧縮強度特性，土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部，pp.24-25，1999.9
- 4) 近松竜一ほか：コンクリートの品質改善のための石灰石粉の使用効果について，土木学会第 46 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部，pp.142-143，1991.9