

セメントの一部を石こうで置換したモルタルおよびコンクリートの物性に関する実験的研究

建築防災研究室 中島 侑也

地球温暖化や埋立処分場の逼迫などの問題は、建設産業においても重要な課題である。年間 100 万 t 以上排出されている廃石こうボードは、排出量が増大する一方で再利用率は 1%程度に過ぎない。また、1t 製造するのに 800kg もの CO₂ を排出するセメントはそれに代わる材料も必要とされている。そこで、セメントの一部を石こうで置換したモルタル、コンクリートを作製し性状を調べた。結果、セメント容積で 10%程度の石こう置換であれば、強度は低下するものの建築基準法施行令第 74 条に規定される四週圧縮強度 12N/mm² を十分に満足できた。また、AE 剤と凝結遅延剤を用いることで通常のモルタル、コンクリートとほぼ同じ流動性を確保できた。このように本研究は、セメント使用量の減少による CO₂ の削減と、石こうの再利用による処分場問題の緩和に結びつくものである。

1. 研究目的

排出量が増大しているにもかかわらず、再利用率が約 1%に留まっている石こうを、モルタルおよびコンクリートの材料であるセメントに置換し、その性状を把握することが目的である。また、本研究では石こうによる置換と同時に、砂をスラグで置換したモルタルおよびコンクリートの実験も併せて行った。

2. 使用材料

セメント (C) は普通ポルトランドセメント、水 (W) は水道水、砂 (S) は九州の唐津産の海砂、標準砂 (H) は天然けい砂、石こう (B) は市販の石こう、スラグ (Su) は高炉スラグ細骨材 2.5mm、砂利 (G) は池田の長尾山産の碎石、混和剤は遅延剤 (RE) の変性リグニンスルホン酸化合物とオキシカルボン酸化合物の複合体および AE 剤 (AE) を用いた。

本研究で使用した材料の物性値を表-1 に示す。なお、各物性試験は JIS によった。

表-1 使用材料の物性値

	C	S	H	B	Su	G
表乾密度 (g/cm ³)	-	2.56	2.60	-	2.67	2.67
絶乾密度 (g/cm ³)	3.16	2.52	2.59	2.67	2.62	2.63
吸水率 (%)	-	1.52	0.50	-	2.00	1.58
単位容積質量 (kg/l)	-	1.65	1.75	-	1.45	1.52
実積率 (%)	-	65.5	67.6	-	55.2	57.8
粉末度 (%)	1.4	-	-	13.2	-	
粗粒率	-	2.52	2.42	-	2.35	6.83
骨材最大寸法 (mm)	-	2.5	-	-	1.2	20

3. モルタル

3.1 調合

以下にモルタルの調合方法を記す。

- 1) 基準となるモルタルの調合は、質量比でセメント:砂:水=1:3:0.65 とする。
- 2) 現在プラントで製造されているモルタル (床用) の調合で作製した試験体をプラントモルタルと称す。
- 3) 石こうあるいはスラグで置換する場合、基準となるモルタルの調合を元に容積比で置換する。
- 4) 調合名の表示方法は「(セメントの容積比) - (砂の容積比) - 遅延剤」とする。調合名の例とその調合表を表-2 に示す。

表-2 調合例 (C100+B0)-(S90+Su10)-RE

絶対質量 (kg/m ³)					絶対容積 (l/m ³)				
C	W	S	Su	RE	C	W	S	Su	RE
467	300	1262	151	4.7	148	300	493	55	4.2

(C100+B0)-(S90+Su10)-RE:セメントは石こう置換をせず、砂容積の 10%をスラグ置換し、凝結遅延剤を添加。

3.2 フロー

図-1 はプラントモルタルのフローである。フロー値が、いずれの調合・経過時間においても 200±20mm 程度に納まっていることから、現実の床モルタルのフロー値は 200mm 程度と考え、これを基準の値とした。

図-2 を見ると、遅延剤を添加しない場合、セメントの一部を石こう置換するとフロー値は急激に減少することがわかる。しかし、遅延剤を添加した場合は、石こう置換率 10%においてもモルタル製造後 30 分でフロー値 200mm を確保できていることがわかる。

図-3を見ると、砂の一部をスラグ置換した場合、フロー値は大きく減少することがわかる。これはスラグの粒度が砂よりも細かいためであると考えられる。スラグ置換では石こう置換で見られるような、時間経過によるフロー値の大きな減少は見られなかった。

図-4に示す試験体は全て遅延剤を添加しているため、石こう置換率の増加によるフロー値の低下は少なく、20~30mm程度の差となっている。スラグ置換率による違いもほとんど見られず、これも遅延剤による効果であると考えられる。

これらの結果より、セメントの石こう置換率 10%程度までであれば、遅延剤を添加することにより、モルタル製造から 30 分後においてもプラントモルタルとほとんど同じ流動性を得られることがわかった。

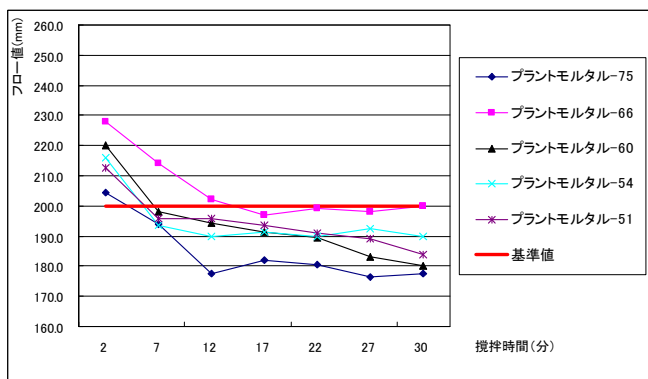


図-1 フロー プラントモルタル

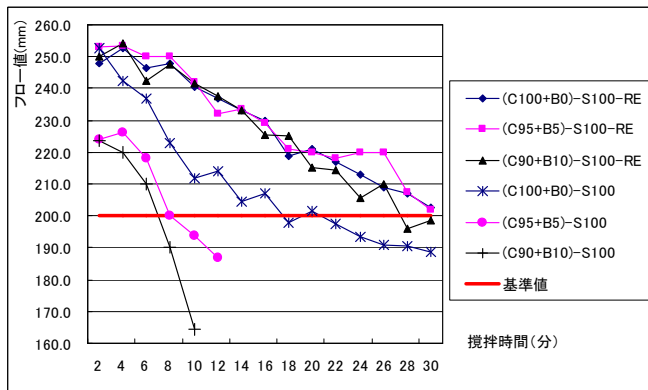


図-2 フロー Cの一部をBで置換

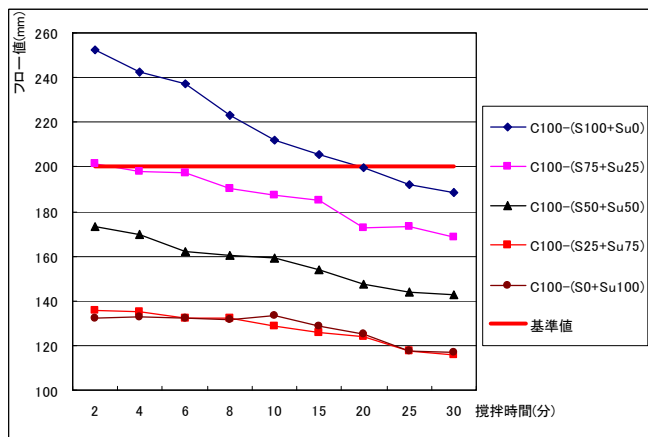


図-3 フロー Sの一部をSuで置換

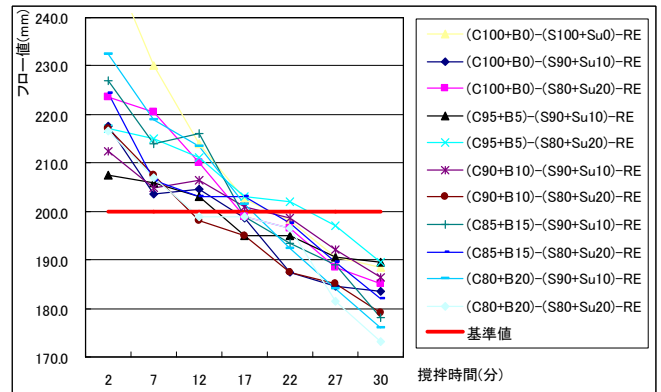


図-4 フロー Cの一部をB、Sの一部をSuで置換

3.3 圧縮・曲げ強度

プラントモルタルの圧縮強度試験結果を図-5に示す。養生期間が長いほど強度は大きくなり、水セメント比が小さくなるに連れて強度は増加していることがわかる。

図-6は標準砂を用いたモルタルにおいて、セメントの一部を石こう置換し、石こう置換率を 10%まで増加させていったときの圧縮強度の変化を表している。石こう置換率の増加に伴い強度は低下し、置換率が 5%、7.5%では、石こうで置換していない試験体の 1/2 程度、10%になると 1/3 程度にまで減少することが分かり、この後の研究にあたって、石こうをどれだけ置換するかの指針となった。ここで、遅延剤を添加することにより、モルタルの流動性を改善することは可能であるが、強度の低下は改善できないことを考慮すると、遅延剤の有無にかかわらず、石こう置換率は 10%が限界であるとした。

図-7は、セメントの石こう置換をせず、砂の一部をスラグ置換したモルタルの圧縮強度の変化を表している。多少のばらつきはあるものの、スラグ置換率が増加するに伴って強度はやや低下する傾向にある。砂を全てスラグ置換すると、スラグ置換無しの試験体と比較して 7 割程度の強度になった。

図-8はセメントの一部を石こうで、砂の一部をスラグで置換したモルタルの曲げ強度試験結果である。強度の低下にはスラグ置換率よりも、石こう置換率のほうが大きく影響していることがわかる。スラグ置換率の増加による変化は、わずかに強度が低下する程度であり、石こう置換に比べると明らかに影響は小さい。ここでは、石こう置換率が 15%、20%と、置換率が 10%を超えるモルタルもあり、石こう置換していないモルタルと比較して、これらの強度は 1/3 程度まで落ち込んでいる。特に、石こう置換率が 15%以上になると、スラグ置換率に関係なくほぼ同じ値まで曲げ強度が低下している。また、圧縮強度の試験結果においても、これらと同様の傾向が見られた。

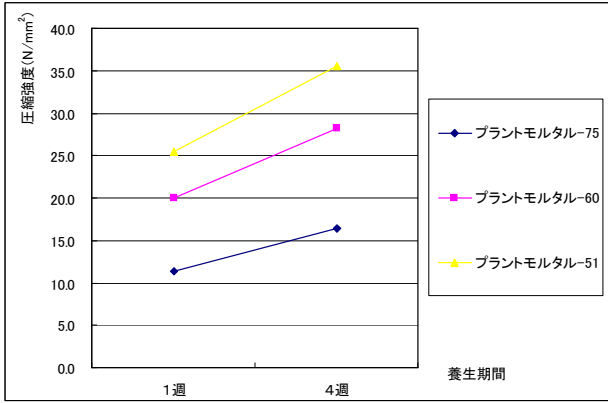


図-5 圧縮強度 プラントモルタル

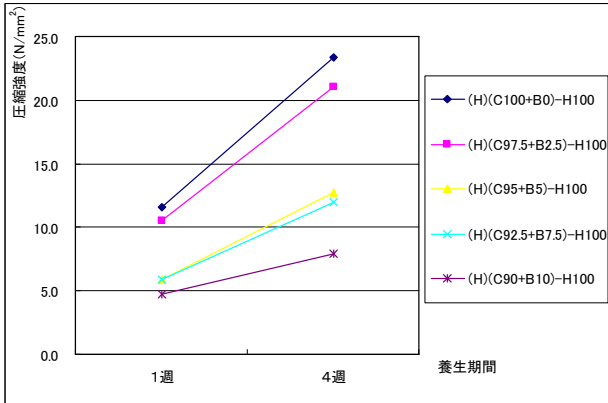


図-6 圧縮強度 Hを用いて、Cの一部をBで置換

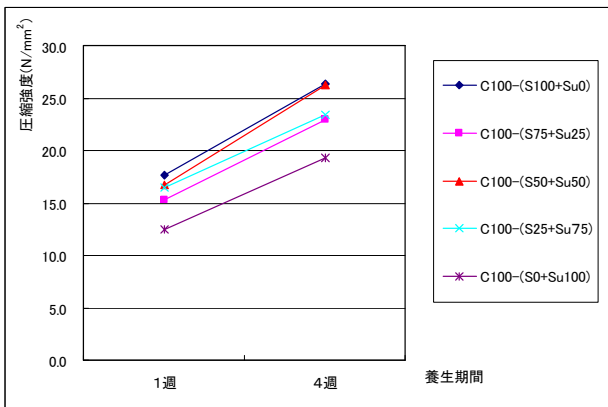


図-7 圧縮強度 Sの一部をSuで置換

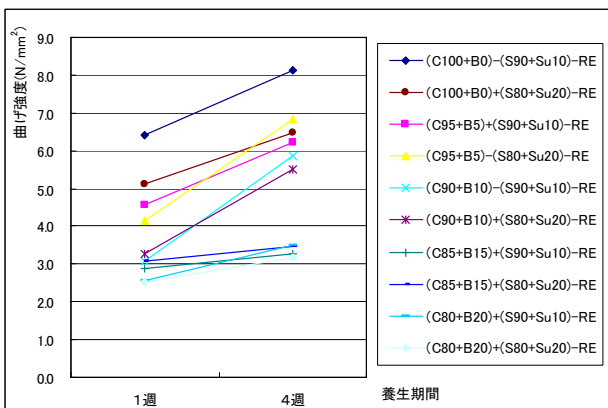


図-8 曲げ強度 Cの一部をB、Sの一部をSuで置換

4. フレッシュコンクリート

4.1 調合

JISに基づきフレッシュコンクリートのスランプ試験、空気量測定試験、温度試験を行った。セメントの石こう置換と、砂のスラグ置換を組み合わせ、表-3に示す6種類の調合を行った。調合はJASS5に順じて行い、W/C=0.55、単位水量 182kg/m³、粗骨材かさ容積 0.60、スランプ (SL) 18±2.5cm、空気量 (A) 4.5±1.5%とした。

表-3 フレッシュコンクリート調合表

試験体名	絶対質量 (kg/m ³)							
	C	W	S	G	B	Su	RE	AE
Co55 (C100+B0)-(S100+Su0)-RE	331	182	822	926	0	0	3.3	0.8
Co55 (C97.5+B2.5)-(S100+Su0)-RE	323	182	822	926	7	0	3.3	0.8
Co55 (C95+B5)-(S100+Su0)-RE	314	182	822	926	14	0	3.3	0.8
Co55 (C100+B0)-(S0+Su100)-RE	331	182	0	926	0	883	3.3	0.8
Co55 (C97.5+B2.5)-(S0+Su100)-RE	323	182	0	926	7	883	3.3	0.8
Co55 (C95+B5)-(S0+Su100)-RE	314	182	0	926	14	883	3.3	0.8

4.2 フレッシュコンクリート試験

試験結果を表-4に示す。スランプで目標値から外れたのはCo55 (C100+B0)-(S0+Su100)-REのみで、他は全て目標値に納まった。細骨材にスラグを使用した場合は、砂を使用したものより2cm程度であるがわずかにスランプ値が小さくなる傾向が見られた。ここで実積率を見ると、砂は65.5%、スラグが55.2%であり、砂に比べてスラグの粒形は悪いことがわかる。フレッシュコンクリートの流動性は、骨材の粒形に大きく左右されることから、スラグの粒形が流動性に悪影響を及ぼし、スランプ値の低下を引き起こしたと考えられる。

空気量は全て目標値 4.5±1.5%内の値を示した。石こう置換率の増加に伴い空気量は大きくなることがわかる。また、砂をスラグ置換した場合、わずかであるが空気量は小さくなることがわかる。しかし、砂を用いたものとスラグを用いたものにおいて、スランプ値、空気量がほぼ同等の値を示したことから、AE剤と凝結遅延剤を用いれば、スラグ細骨材はJASS5などに規定されたコンクリート用細骨材と同様に使用できると考えられる。

コンクリート温度では、石こう置換率、スラグ置換の有無などによって違いは見られなかった。

表-4 フレッシュコンクリート試験

試験体名	S. L (cm)	A (%)	C. T (°C)
Co55 (C100+B0)-(S100+Su0)-RE	17.5	4.2	15.9
Co55 (C97.5+B2.5)-(S100+Su0)-RE	18.5	4.5	15.7
Co55 (C95+B5)-(S100+Su0)-RE	19.5	5.5	15.7
Co55 (C100+B0)-(S0+Su100)-RE	15.0	4.0	15.7
Co55 (C97.5+B2.5)-(S0+Su100)-RE	16.5	4.2	15.5
Co55 (C95+B5)-(S0+Su100)-RE	18.0	5.0	15.5

5. 硬化コンクリート

硬化コンクリートに関して、圧縮強度 (JIS A 1142)、静弾性係数 (JIS A 1149)、中性化、質量減少率、乾燥収縮試験 (JIS A 1129-3) を行った。

5.1 圧縮強度

図-9 に圧縮強度試験結果を示す。砂を用いた試験体は1週、4週共に、石こう置換率の増加に伴って強度が低下している。一方、砂をスラグ置換した試験体は、砂を用いた試験体よりも強度が低下しているが、石こう置換率の増加に対してはわずかに低下する程度であり、Co55 (C100+B0)-(S100+Su0)-RE に対して、いずれも7~8割程度の強度となっている。

建築基準法施行令第74条で「四週圧縮強度は1mm²につき12N以上であること」とあるが、全ての試験体でその規定を十分に満足できている。また、JASS5において、調合強度を決める際のバラツキを2.5N/mm²としていることを考慮し、4週圧縮強度が15N/mm²以上必要であることを条件としても、本研究のコンクリート試験における4週圧縮強度は、最も低い試験体でも22N/mm²であり、十分それを満たせることがわかる。このことから、本研究で作製したコンクリートの調合においては、セメント容積の10%を石こう置換し、かつ砂をスラグ置換した場合においても、4週圧縮強度で15N/mm²以上の性能を確保することが十分可能であるとわかった。

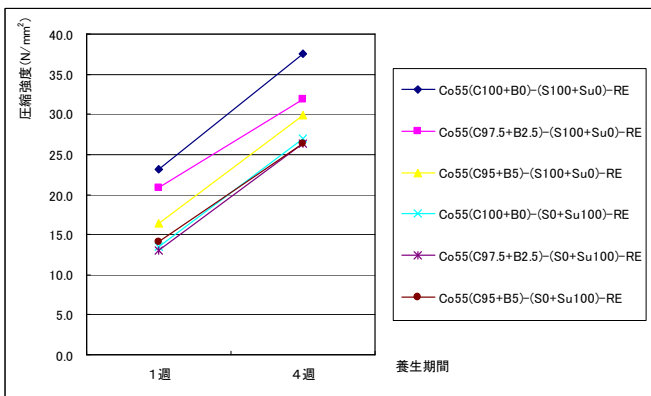


図-9 圧縮強度

5.2 静弾性係数

円柱試験体にひずみゲージを貼り付け、4週試験体について静弾性係数試験を行った。図-10 にその結果を示す。

全ての試験体で圧縮強度の増加に伴い静弾性係数も大きくなっている。砂を用いた試験体は石こう置換率の増加に伴い静弾性係数が低下している。一方、スラグを用いた試験体は、Co55 (C100+B0)-(S100+Su0)-RE と比較して、いずれも8割程度の静弾性係数である。

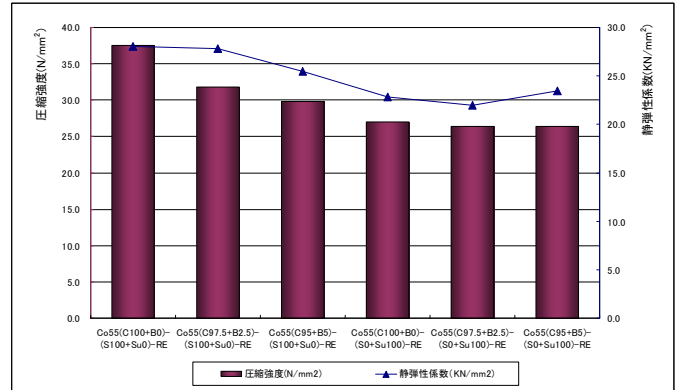


図-10 静弾性係数と圧縮強度 (4 週)

2) RC 規準式との比較

多数の実験結果によれば、コンクリートの静弾性係数は圧縮強度や密度に比例して大きくなると言われている。「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」(1991年)では、設計基準強度の単位容積質量から、以下の建築学会 RC 規準式で計算した静弾性係数を構造設計に用いることが規定されている。

$$E = 21.0 \times \left(\frac{\gamma}{2.3}\right)^{1.5} \times \left(\frac{F_c}{20}\right)^{0.5}$$

RC 規準式に静弾性係数試験の値をプロットしたものを図-11 に示す。セメントや砂などの材料、養生や締め固めなどの施工に問題がない場合、コンクリートの静弾性係数は規準式の±20%の範囲内に納まることが報告されており、本研究におけるコンクリートがそれを満たしているかどうかを確認した。

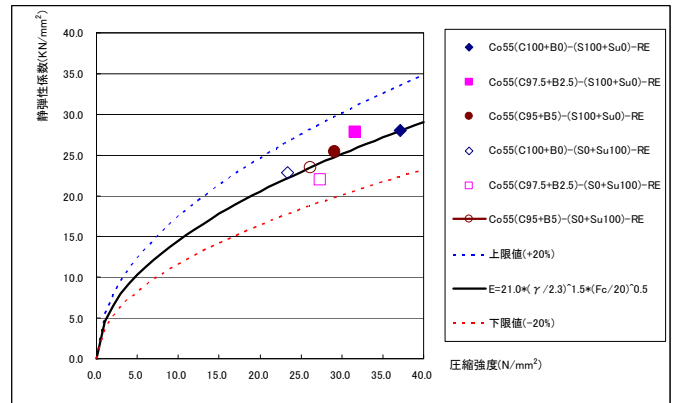


図-11 RC 規準式との比較

これらの結果より、石こうおよびスラグで置換した試験体の静弾性係数は、今回の置換率の範囲内においては、通常のコンクリートと同等と考えても良いと言える。

5.3 中性化

中性化試験は、日本建築学会の高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説に記載されている方法を基本としたが、時間的な事情を考慮し、表-5に示す工程で実験を行った。

表-5 実験工程

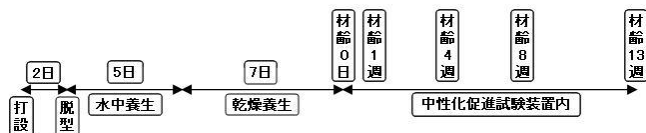


図-12 にコンクリートの中性化試験結果を示す。中性化は Co55(C95+B5)-(S100+Su0)-RE が最も大きい中性化深さとなったが、傾向としてはスラグを用いた試験体の中性化深さが大きくなっている。石こうに関しては、石こう置換率に比例して中性化深さは大きくなっていることが分かる。

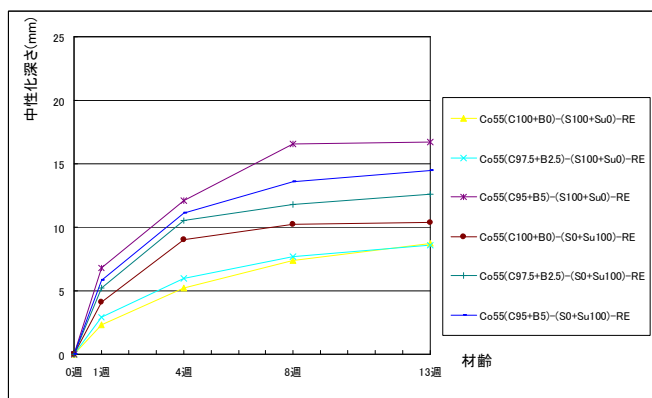


図-12 中性化深さ

2) 中性化速度係数についての考察

大気中の炭酸ガスによるコンクリート表面からの中性化の進行を、経過時間の関数として表したものが中性化速度式であり、一般的に用いられている \sqrt{t} 則は $C=A\sqrt{t}$ である。

ここで、 \sqrt{t} 則の両辺の対数をとって、

$$\log C = \frac{1}{2} \log t + \log B$$

$$\log C = P \log t + \log B$$

$$C = Bt^P$$

のように変形した。

B と P をそれぞれ中性化進行係数、中性化進行べき指数と呼び、この B と P を最小自乗法により求めることで、 $C=Bt^P$ を推測した。図-13、図-14 に中性化深さ測定結果の対数を取ったグラフを示す。

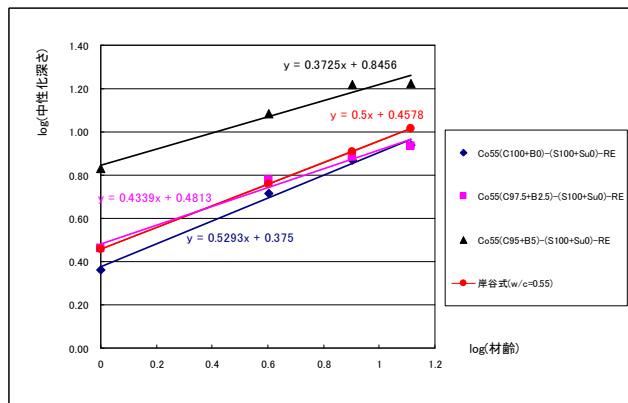


図-13 岸谷式との比較(砂)

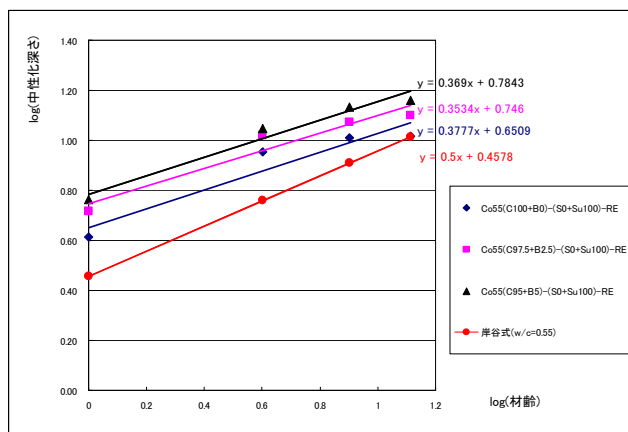


図-14 岸谷式との比較(スラグ)

これらから B と P の値を求め、中性化速度式 $C=Bt^P$ を推測した。その結果を表-6 に示す。

表-6 中性化速度式

試験体名	$C=Bt^P$
岸谷式(W/C=0.55)	$C=2.87t^{0.5}$
Co55(C100+B0)-(S100+Su0)-RE	$C=2.37t^{0.37}$
Co55(C97.5+B2.5)-(S100+Su0)-RE	$C=3.03t^{0.43}$
Co55(C95+B5)-(S100+Su0)-RE	$C=7.01t^{0.53}$
Co55(C100+B0)-(S0+Su100)-RE	$C=4.48t^{0.38}$
Co55(C97.5+B2.5)-(S0+Su100)-RE	$C=5.57t^{0.35}$
Co55(C95+B5)-(S0+Su100)-RE	$C=6.09t^{0.37}$

砂を用いた試験体では石こう置換率の増加に伴い、中性化進行係数 B、中性化進行べき指数 P がともに大きくなる傾向が見られた。石こう置換率の増加に伴う B と P の増加は、スラグを用いた試験体でも同様に見られる傾向であるが、B と P の値は砂を用いた試験体より更に大きくなっている。

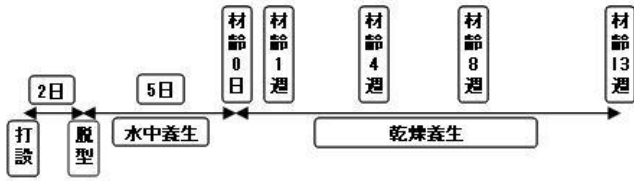
5.4 質量減少率

乾燥収縮試験用にゲージプラグを取り付けた角柱試験体を用いて質量減少率試験を行った。表-7 に実験工程を示す。

測定においては、打設から1週間後を材齢0日として、これを基準とした質量の減少量をパーセント表示

したものを質量減少率とした。質量の測定は1、4、8、13週で行った。

表-7 実験工程



結果を図-15 に示す。いずれの試験体でも材齢が大きくなるに連れて質量減少率も大きくなっている。また、測定開始直後ほど質量の減少は速く、後半になるほど減少の勾配が緩やかになり、13週を迎えると減少速度はかなり遅くなっていることがわかる。初期の急激な質量減少は、主に乾燥が原因であると考えられる。

石こう、スラグ共に置換率の増加に伴い減少率は大きくなり、石こうとスラグ両方で置換すると減少率はより大きくなった。

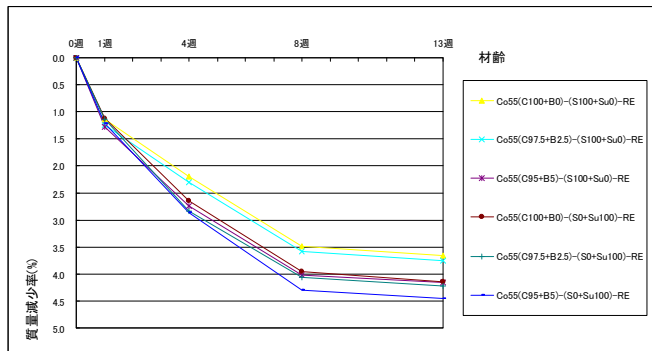


図-15 質量減少率

5.5 乾燥収縮

乾燥収縮試験は JIA A 1129-3 のダイヤルゲージ法を参考としたが、質量減少率試験と同様、実験工程を一部変更し、表-7 のようにした。図-16 に結果を示す。

砂を用いた試験体は、石こう置換率の増加に伴い収縮率は大きくなっているが、スラグを用いた試験体では、収縮率が逆に小さくなっているものも見られる。

また、スラグを用いた試験体のほうが収縮率は小さくなっている。鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・解説では、一般的な建築物において、材齢6ヶ月における乾燥収縮率を 800×10^{-6} 以下とすることにより、有害なひび割れが発生しないレベルにほぼ制御できるものとしている。

本試験において、乾燥収縮の測定は13週までしか行っていないが、結果の図の傾きから予測すると、乾燥収縮ひずみは最も大きいものでも材齢13週で 160×10^{-6} 程度であること、また材齢が長くなるに連れて傾きが小さくなっていることから、材齢6ヶ月においても乾燥収縮率 800×10^{-6} 以下を十分に満足できると考えられる。

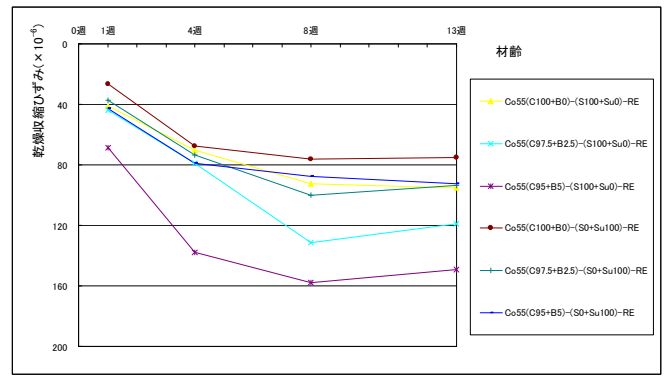


図-16 乾燥収縮

6. 結論

- 1) モルタルの流動性は、石こう置換率の増加に伴い低下するが、製造から30分程度までであれば凝結遅延剤を用いることにより流動性の低下を防ぐことができる。
- 2) モルタルにおいて、セメント容積の10%を石こう置換すると、4週の圧縮および曲げ強度は1/2から1/3程度に低下することがわかった。
- 3) フレッシュコンクリートにおいてAE剤と凝結遅延剤を添加することで、スランプ値と空気量の目標値をほぼ満足することができた。
- 4) 建築基準法施行令第74条「四週圧縮強度は、 1mm^2 につき12N以上であること」と、JASS5における調合強度を決める際のバラツキ 2.5N/mm^2 を考慮し、四週圧縮強度が 15N/mm^2 以上必要であることを条件とすると、本研究で作製したコンクリートの調合においては、セメント容積の10%を石こう置換し、かつ砂をスラグ置換した場合においても、四週圧縮強度 15N/mm^2 以上の性能を確保することが十分可能だとわかった。
- 5) 本研究におけるコンクリートの調合(W/C=0.55、単位水量 182kg/m^3)で換算すると、セメント容積の10%を石こう置換することにより、コンクリート 1m^3 あたりのセメント使用量を約33.1kg低減できることがわかった。
- 6) 中性化速度式 $C=A\sqrt{t}$ を変形することにより、新たな中性化予測式 $C=BI^p$ を作ることができた。
- 7) 乾燥収縮は結果の図から、材齢6ヶ月で乾燥収縮率 800×10^{-6} 以下を満足できると予測できる。

参考文献

- 1) 今本啓一・石井寿美江・成田瞬・磯文夫・吉葉光雄：廃せつこうボード微粉末とフライアッシュ・高炉スラグを用いた無機複合硬化体の開発、日本建築仕上学会、2006年大会学術講演会
- 2) 瀬戸隆之・小山明男・菊池雅史：再生せつこうの凝結制御に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、2007

討 議 等

◆討議 [吉中 進]

廃石こうボードはどのようなものに利用されているか。また、なぜ排出量が増加しているのか。なぜ廃石こうボードではなく市販の石こうを用いたのか。

◆回答：石こうは高い耐火性を持ち、高度経済成長期において建築物の内装材などに盛んに用いられたが近年は、当時の建築物の解体期を迎えており、排出量が増大している。また、廃石こうボードは経過年数などにより品質にばらつきがあると予測できたため、強度などの比較には向かないと判断し、市販の石こうを用いた。

◆討議 [角掛]

モルタルにおいて砂とスラグを用いた場合、スラグを用いたモルタルのほうが圧縮強度は低く出ているがこれはなぜか。また、圧縮強度の値は何本の試験体の平均か。

◆回答：一つ原因として考えられるのが、骨材の粒形の違いである。実積率を見ると砂は65.5%、スラグが55.2%であり、砂に比べてスラグの粒形は悪いことがわかり、粒形の悪さが強度の低下を引き起こしたと考えている。圧縮強度の値は試験体2本の平均とした。

◆討議 [梅宮]

石こうのリサイクルが進んでいないのはどういった背景があるのか。

◆回答：石こうボードは、固めた石こうの上に紙が貼られて作られているので、解体時に紙繊維が混入することにより分離して再利用するのが難しい点が一番の原因である。

◆討議 [松村]

石こうの配合率をどれぐらい上げたらリサイクルに貢献できるか。

◆回答：流動性と強度の面から見る限りでは、セメント容積の10%程度までなら置換が可能であると考えている。

◆討議 [角掛]

遅延剤の添加の有無によってどういう違いが見られたか。

◆回答：流動性は改善できたが、強度の低下は防ぐことができなかった。