

銅スラグの状況

住友金属鉱山(株) 正会員 川西政雄

1. はじめに

銅スラグは、銅の溶融製錬の際に副産され、その量は国内では年間約 200 万トン強に達している。1997 年にコンクリート用細骨材として JIS 化され、天然資源の枯渇化対策並びに自然環境保全対策としても有効活用されている。特に愛媛県では環境保全の観点から海砂採取を続けることによる環境への影響評価の結果、平成 18 年度以降海砂採取を禁止することとなった。海砂採取禁止への対応、及びゼロエミッションの観点からも産業副産物であるスラグ類の使用拡大を図ることは重要なことである。

2. 銅スラグの特徴

a. 概要

銅スラグは、自溶炉などによって、原料銅鉱石により銅を製造するときに生成された溶融スラグを、水冷却により水砕産物（グラニューウ状）とする方法で生産されている。この状態をふるい分けまたは破碎などによる粒度調整加工を行ってコンクリート用細骨材として製造されている。銅スラグ細骨材（以下 CUS という）は、絶乾密度が $3.5\text{g}/\text{cm}^3$ 程度と大きく、ガラス質であるなどの特徴を有しており、コンクリート用細骨材として単独で用いた場合には、コンクリートの単位容積質量及びブリーディングが大きくなるなどの傾向を示す。したがって、一般的な使用にあたっては他の細骨材と混合して使用するか、単独での使用にあたっては微粒分を多く含む CUS を使用するなどによりブリーディング抑制は可能である。

通常のコンクリートに使用する砂や砕砂の容積の 30% 程度を CUS で置換する範囲においては、コンクリートの単位容積質量の増加が $100\text{kg}/\text{m}^3$ を超えることはほとんどなく、コンクリートの性状および品質も通常のコンクリートと大差のないものとなる。

b. 銅スラグの化学成分

銅スラグの主要な化学成分は、表 2.1 に示すように全鉄(FeO)が約 46%、二酸化けい素 (SiO₂) が約 34% の値を示し、この両者で大半を占めている。

表 2.1 銅スラグの化学成分と塩化物量

	酸化 カルシウム (CaO)	全硫黄 (S)	三酸化 硫黄 (SO ₃)	全鉄 (FeO)	塩化物 (NaCl)	二酸化 けい素 (SiO ₂)	銅 (Cu)
銅スラグ	1.37	0.84	0.13	48.3	0.004	33.7	0.65

c. 有害物質の溶出

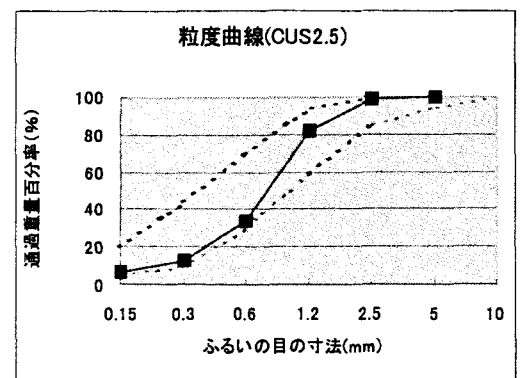
銅スラグからは、有害量の重金属の溶出は認められず、総理府令第 5 号の金属等を含む産業廃棄物に係わる判定基準（産業廃棄物の埋立処分他）に合格している。

d. 銅スラグの物理的品質

銅スラグの物理試験結果を表 2.2 に示す。

表 2.2 銅スラグの品質実績

	絶乾 比重	吸水 率 (%)	単位容 積質量 (kg/m^3)	実績 率 (%)	粗粒 率	0.15mm ふ るい通過 率 (%)
CUS2.5	3.42	0.43	2.11	62.1	2.62	6
CUS5-0.3	3.48	0.21	1.89	54.1	3.40	0.87



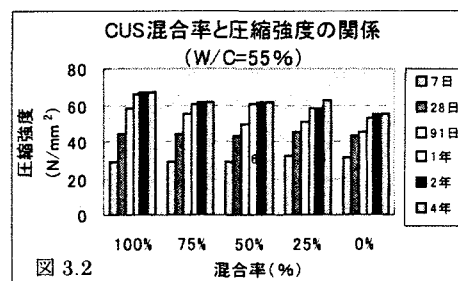
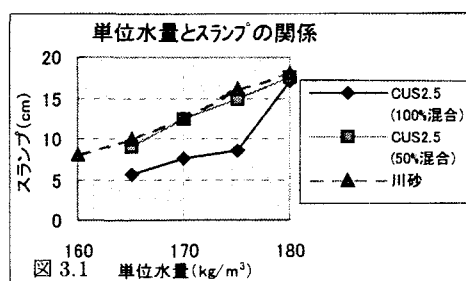
3. 川砂と混合の場合の銅スラグコンクリート

表 3.1 銅スラグコンクリートの特徴

質量	CUSの絶乾密度 (3.5g/cm ³) は自然砂 (2.6g/cm ³) に比べて大きく、CUSの混合率を100%で使用した場合、約300kg/m ³ 弱の質量増加となる。
単位水量とスランプ	CUS混合率50%以下では、単位水量の増減に伴うスランプの増減は良質の川砂のコンクリートとほぼ同程度。
空気量	CUSの使用に伴い、エントラップエアが増加する傾向がある。
ブリーディング	CUS混合率が高くなると増加。混合率の減少、減水性の良好な混和剤の使用あるいは微粒分の増加により低減可能。
圧縮強度	初期強度はやや小さいが、材齢28日では同程度、長期材齢では大きな値を示す。
引張強度・曲げ強度	川砂を用いたコンクリートと同様。
ヤング率	川砂コンクリートと比較して、銅スラグ単独使用で2割程度大きくなる傾向。
クリープ	川砂コンクリートより、やや小さい。
乾燥収縮	川砂コンクリートより、若干小さい。
中性化	川砂コンクリートより、著しく小さくなる。

表 3.1 に川砂と CUS を混合した場合のコンクリートの特徴を記載している。フレッシュコンクリートに関しては、混合率を上げて行くとブリーディングが増加

する傾向にあるが、混合率 30%程度と置換する範囲であれば、コンクリートの性状及び品質も川砂を用いたコンクリートと大差のないものとなる。一方、硬化コンクリートに関しては強度、ヤング率、クリープ、乾燥収縮、中性化等に関して銅スラグコンクリートは優位である。



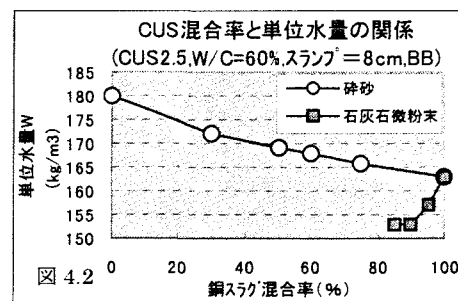
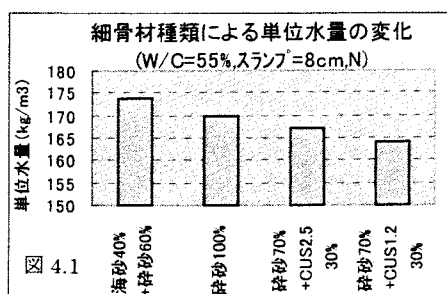
4. 砕砂と混合の場合の銅スラグコンクリート

西日本は陸地に良質な骨材の産地が少なく、粗骨材は碎石、細骨材には海砂と砕砂の混合砂の使用がほとんどである。しかし、この海砂は環境の配慮から採取を禁止する自治体が増えてきており、海砂に変わる細骨材が求められている。そこで、海砂の代わりに銅スラグと砕砂などを使用した場合の試験結果を示す。

a. 単位水量

銅スラグを使用することにより単位水量は「海砂+砕砂」を使用したコンクリートと比較して減少する。銅スラグに関しては、CUS1.2の方がCUS2.5と比較して低減していることがわかる。

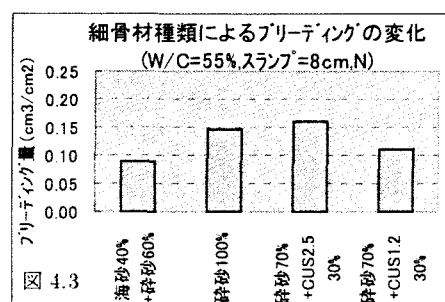
また、CUS混合率の増加に伴い単位水量は減少し、石灰微粉末の混入により単位水量は更に低減される。



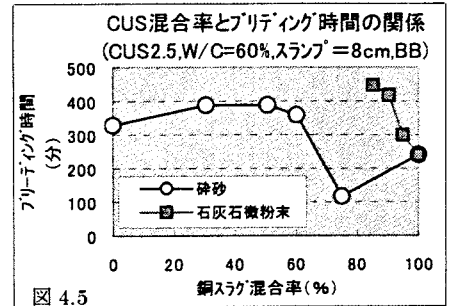
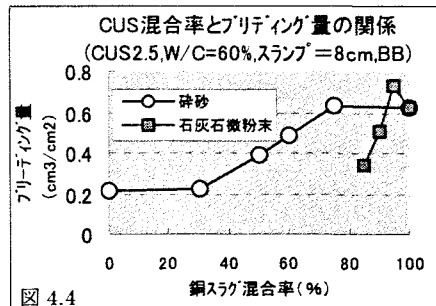
b. ブリーディング

CUS2.5を使用することにより「海砂+砕砂」を使用したコンクリートと比較してブリーディング量は増えるが、混合率 30%では砕砂 100%の場合と同程度といえる。しかし、50%を超えていくと混合率の増大に伴いブリーディング量は増加する。一方、石灰石微粉末の混合によりブリーディングは抑制され、石灰石微粉末を 15%混入すると、CUS50%の場合よりブリーディングが少なくなる。

銅スラグ (CUS2.5) の混合率が 30%程度であれば、特にブリーデ

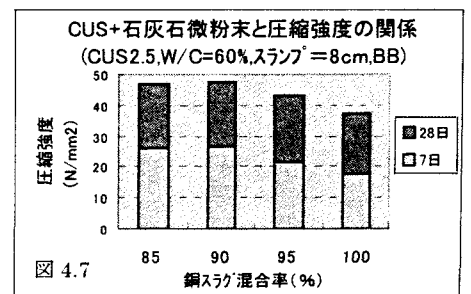
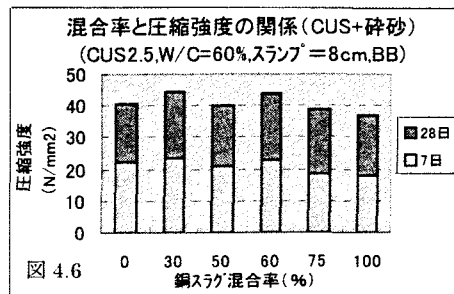


リング抑制対策をとる必要はないが、ブリーディングの発生を抑制する方法として、CUS 混合率を小さくすることのほか、微粒分多い CUS1.2、石灰石微粉末、石灰砕砂などを利用すると抑制に効果的である。石灰砕砂を使用した場合の試験結果は後述する。ブリーディング時間に関しては、CUS 混合率が 60% 以下の条件では、ほぼ同等であるが、CUS 混合率が 75% 以上になるとブリーディング時間が急激に短くなる（一気にブリーディングが浮上する）。一方、石灰石微粉末の混入によりブリーディング時間はかなり長くなる。



c. 圧縮強度試験

CUS 混合率が 60% 以下であれば、材齢 7, 28 日における圧縮強度は砕砂 100% の場合とほぼ同等であるが、CUS 混合率が 75% 以上になると圧縮強度が多少小さくなるようである。これは、川砂との組み合わせと同様に、銅スラグにおいては初期強度がやや小さい傾向にある。ただし、長期強度については現在試験中である。石灰石微粉末の混入により圧縮強度は増大するが、石灰石微粉末の混入立が 10% 以上の条件では圧縮強度はほぼ一定となる。



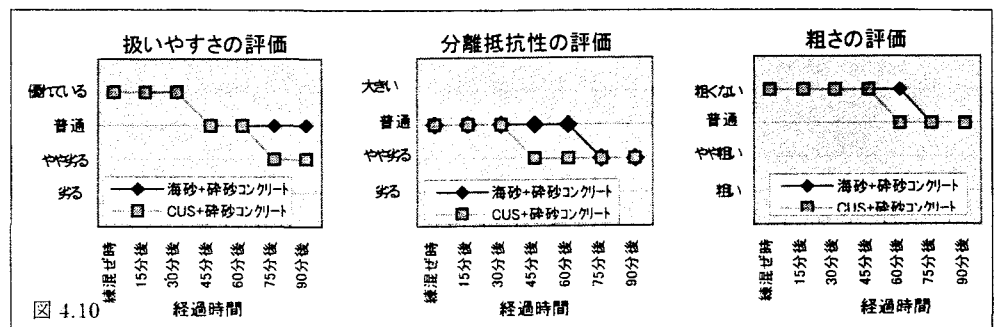
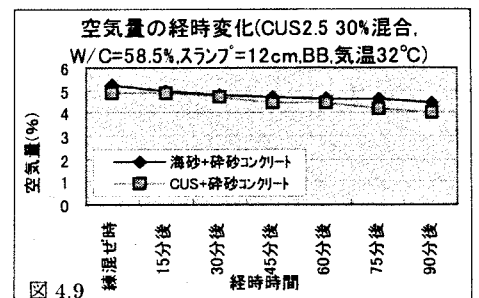
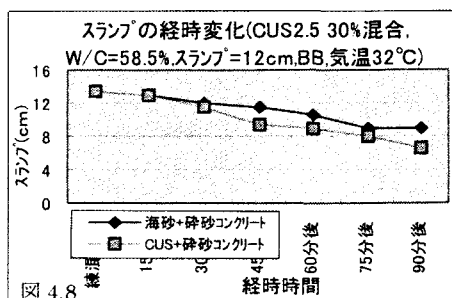
d. 実機練によるフレッシュコンクリートの性状変化

フレッシュコンクリートの性状変化を調べるために実プラントを使用したの試験を実施した。表 4.1 に配合を示す。

表 4.1 実機練りのコンクリート配合

種別	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	配合単位量 (kg/m³)						
			水	セメント	海砂	砕砂	CUS 2.5	粗骨材	混和剤
海砂+砕砂コンクリート	58.5	45.5	178	305	386	396	-	960	4.88
CUS+砕砂コンクリート	58.5	48.5	170	291	-	601	347	923	4.66

生コンプラントから現場までの運搬にともなうコンクリートの品質の変化に関する現場実験の結果を示す。運搬時間の経過に伴うスランプ及び空気量の低下は、海砂を用いたコンクリートと比較してほぼ同様か、僅かに多い傾向を示しているが、これは、銅スラグコンクリートは単位水量が海砂コンクリートよりも少ないことや、試験が真夏に行われたことなどに



よる影響によるものと思われる。コンクリートの扱いやすさ、分離抵抗性、粗さの評価等については、「海砂+砕砂」コンクリートと同様の傾向を示し、特に問題となるような評価はなかった。また、別のフィールド試験において、同様の試験データがあるが、この場合は、海砂コンクリートと銅スラグコンクリートではまったく同様の特性を示していた。

5. 石灰砕砂と混合の場合の銅スラグコンクリート

骨材として石灰砕砂

や石灰砕石を使用して
いる場合が多くあり
CUS との組み合わせに
よる試験を実施した。
石灰砕砂との組み合わ
せにより、単位水量は
大きく減少ができ、ま

たブリーディング量もかなり抑制されていることがわかる。
特に「CUS+石灰砕砂+石灰採石」を使用した場合は、単位
水量が砕砂 100%と比較して、18kg/m³ も減少となり、その
分セメント量の減少となる。また、コンクリートのワーカビ
リティ状態も大変良かった。

図 5.3 に石灰石と組み合わせによる圧縮強度試験結果を示
す。材齢は 7 日及び 28 日で試験を実施し、いずれも、「CUS
+砕砂」、「CUS+石灰砕砂」+「CUS 石灰砕砂+石灰採石」、の順でコンクリート圧縮強度が低下し、材齢 28
日の場合、約 4N/mm² づつ低くなっている。

銅スラグと石灰砕砂を使用しての実機プラントによる実績として、堰堤及び消波ブロックの例を以下に示
す。

a. 堰堤

- ・場所 : 高知県土佐郡本川村
- ・工事名称 : 平成 13 年度 長又第 2 堰堤工事 (国土交通省)
- ・打設期間 : 平成 14 年 10 月 16 日～平成 15 年 2 月 5 日 (32 回)
- ・打設量 : 2,000m³
- ・混合率 : CUS2.5 30%+石灰砕砂 70%
- ・配合実績

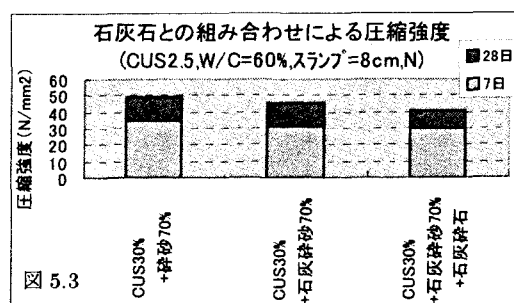
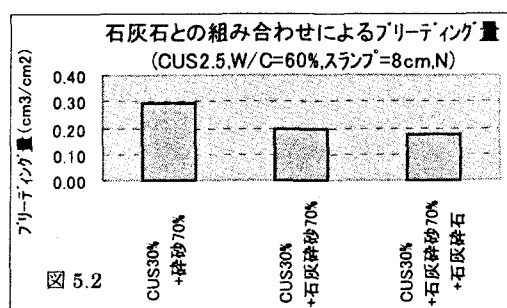
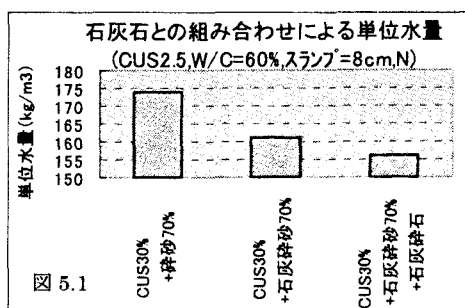
表 5.1 堰堤に使用したコンクリートの配合

呼び強度 (N/mm ²)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	スランプ (cm)	セメント BB (kg/m ³)	回収水 (kg/m ³)	細骨材(kg/m ³)		粗骨材(kg/m ³)	
						石灰砕砂	銅スラグ	2005	4020
21	60	38.4	5	235	141	531	295	616	610

- ・コンクリート打設実績値

表 5.2 フレッシュ及び硬化コンクリートの性状

スランプ (cm)			空気量 (%)			7 日圧縮強度 (N/mm ²)			28 日圧縮強度 (N/mm ²)		
平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値
5.02	6.1	3.9	4.50	5.0	4.0	15.9	19.0	13.6	29.4	33.4	24.8

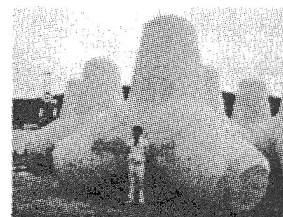


b. 消波ブロック

- ・テトラポッド 公称 80ton 型（高さ：5,000mm、幅：5,975mm） CUS2.5 混合率 70%

表 5.3 消波ブロックに使用した使用材料

	細骨材		粗骨材	
骨材の種類	CUS2.5	石灰砕砂	砕石 1	砕石 2
産地	住友サンド	津久見市	津久見市	津久見市
粒の大きさの範囲	2.5 以下	5 以下	20～5	40～20
絶乾密度 (g/cm ³)	3.49	2.63	2.68	2.68
表乾密度 (g/cm ³)	3.52	2.67	2.70	2.70
吸水率 (%)	0.51	1.52	0.74	0.74
実積率 (%)	-	-	59.0	60.5
粗粒率	2.62	2.90	-	-
0.15mm 以下	6	5～7%	-	-



- ・コンクリートの配合

表 5.4 消波ブロックに使用したコンクリートの配合

W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
		セメント	水	CUS2.5	石灰砕砂	砕石 1	砕石 2	混和剤
43.3	44.2	300	130	773	257	547	547	2.1

- ・コンクリート打設実績値

表 5.5 フレッシュ及び硬化コンクリートの性状

実測スランプ	コンクリート温度	空気量	ブリーディング		塩化物量	硬化コンクリートの性状(コア供試体)	
			量	率		比重	圧縮強度 (28 日材齢)
6.5cm	20.5℃	3.9%	0.13 (cm ³ /cm ²)	4.49%	0.042 kg/m ³	2.62	63.1N/mm ²

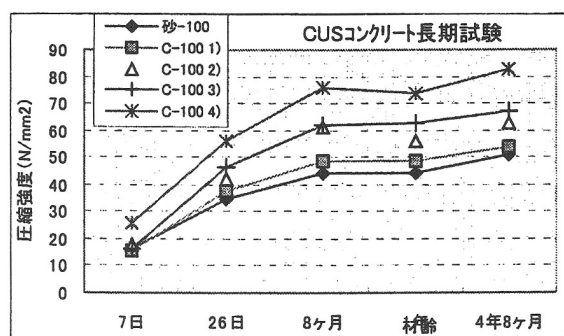
6. 長期暴露試験体による耐久性調査

表 6.1、6-2 に示す CUS を用いたコンクリート試験体が屋外暴露試験に供されている。表 6.2 の試験体については、非破壊試験やコア試料による強度特性試験、ひびわれ調査、中性化試験などが定期的に行われ、これまでの調査結果では同時に製造した普通コンクリートに比べこれらの性質は同等以上であることが報告されている。表、図からもわかるように銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの強度発現性状および耐久性は良好である。

a. 消波ブロック長期屋外暴露試験結果（日本鉱業協会にて実施）

表 6.1 フレッシュ及び硬化コンクリートの性状

番号	試験名称	試験開始年月	CUS の種類混合率 %	試験体の種類・寸法	W/C %	スランプ量 cm	細骨材率 %	セメント量 kg/m ³	単位水量 kg/m ³	スランプ/スランプロー現場 (cm)	単位容積質量 (t/m ³)	ブリーディング量 cm ³ /cm	圧縮強度	
													材齢 7 日 N/mm	26 日 N/mm
13	消波ブロック	1995 年 12 月	砂-100	テトラポッド 5t	55	8	44.3	284	156	7.5	2.265	0.13	16.3	34.6
14			C-100 ¹⁾		"	"	44.4	284	156	12	2.576	0.43	15.5	37.9
15			C-100 ²⁾		"	"	43.0	275	151	11.5	2.635	0.48	17.9	42.0
16			C-100 ³⁾		50.2	"	43.0	275	138	9.5	2.623	0.16	15.9	46.6
17			C-100 ⁴⁾		45.0	高流動	51.4	378	170	62×61	2.665	0.00	25.7	55.7



- 注 1) CUS の種類・粒度：CUS2.5S、粗粒率=2.41
 注 2) CUS の種類・粒度：粒度調整 (CUS2.5L+CUS1.2)、粗粒率=2.02
 注 3) CUS の種類・粒度：摩砕処理、粗粒率=1.97
 注 4) CUS の種類・粒度：注 1) に同じ

図 6.1 銅スラグコンクリート暴露試験体コア圧縮強度

b. 長期耐久性試験結果（住友金属鉱山株式会社にて実施）

表6.2 長期暴露試験体

No.	20	24	21	22	23
構造体種別	護岸改修	ポータブル擁壁	擁壁（スラグ置場）	護岸パラペット（磯浦バース）	研究所建屋
施工年	1989（H1）	1990（H2）	1990（H2）	1990（H2）	1995（H7）
CUS種別	5-0.3	5-0.3	5-0.3	5-0.3	2.5
CUS混合率（%）	90	100	70	50	50
設計強度（N/mm ² ）	-	-	-	21	24.5
W/C（%）	55.0	40.0	56.5	56.5	52.5
空気量（%）	-	4.5	-	-	4.5
スランブ（cm）	12	-	15	12	15
単位量 （kg/m ³ ）	セメント	360	400	350	371
	水	198	160	198	195
	CUS	912	900	767	531
	普通砂	100	0	440	394
	粗骨材	915	1140	829	796
混合剤種別	AE減水剤	高性能AE減水	AE減水剤	AE減水剤	AE減水剤

表6.3 長期暴露試験結果

No.	構造体種別	調査時期	試験材齢 （年月）	調査項目・結果			
				外観調査	中性化深さ	コア強度	
						N/mm ²	比
20	護岸改修	H4年3月	2年5ヶ月	特記すべきひび割れなし	1mm以下（表面のみ）	31	1.26
		H7年6月	5年9ヶ月	同上	1mm～2mm（表面のみ）	35.8	1.46
		H10年7月	9年6ヶ月	同上	1mm～3mm（表面のみ）	34.4	1.4
24	ポータブル擁壁	H4年3月	1年5ヶ月	特記すべきひび割れなし	1mm以下（一部2mm程度）	46.6	1.32
		H7年12月	5年2ヶ月	同上	2mm～7mm（前回より進行）	55.1	1.56
		H10年9月	7年9ヶ月	同上	5mm～8mm（前回より進行）	60.7	1.71
21	擁壁（スラグ置場）	H4年9月	2年6ヶ月	特記すべきひび割れなし	1mm以下（表面のみ）	31.6	1.26
		H8年7月	6年3ヶ月	同上	1mm程度（表面のみ）	40.6	1.62
		H11年9月	9年6ヶ月	同上	1mm～3mm（多少進行）	45	1.8
22	護岸パラペット（磯浦バース）	H4年3月	2年3ヶ月	特記すべきひび割れなし	1mm以下（一部最大2mm）	31.8	1.29
		H7年12月	5年6ヶ月	微少ひび割れ一部発生	2mm～3mm（多少進行）	28.7	1.17
		H10年9月	8年9ヶ月	前回と比較して変化なし	1mm～4mm（前回と同様程度）	29.9	1.22
23	研究所建屋ブロック	H9年7月	2年6ヶ月	特記すべきひび割れなし	0～1mm程度（表面のみ）	32.3	1.07
		H12年11月	5年11ヶ月	同上	0～1mm程度（前回と同様程度）	31.6	1.04

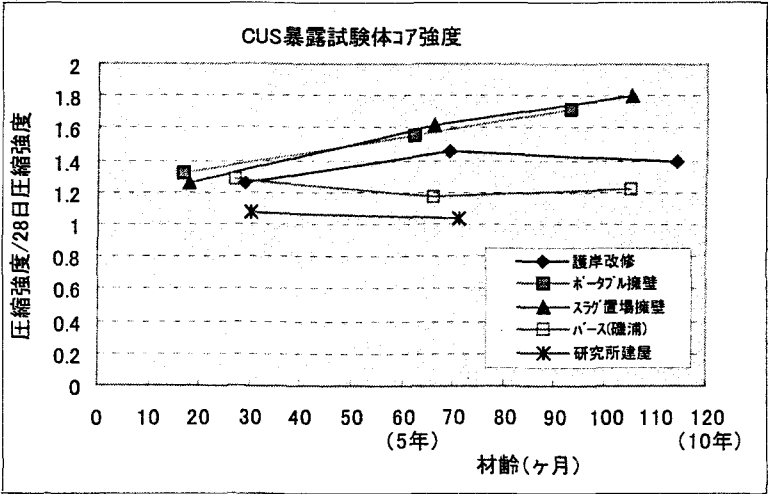


図 6.2 銅スラグコンクリート暴露試験体コア圧縮強度

以上