

# 報告 銅スラグ(C U S 2.5)を用いたコンクリートの特性と施工例

錦織 和紀郎<sup>\*1</sup>・谷口 昇<sup>\*2</sup>・川西 政雄<sup>\*3</sup>・松田 節男<sup>\*4</sup>

**要旨：**ブリーディングの観点から、従来銅スラグはC U S 混合率 $\leq 30\%$ の条件で使用されることが多かったが、最近ではブリーディングの少なくなるC U S 2.5が工業ベースで製造されるようになった。そこで、コンクリート試験を実施してC U S 2.5を用いたコンクリートの特性を調べ、C U S 混合率は50～60%程度まで向上できることを明らかにした。また、石灰石微粉末の混合や高性能A E 減水剤による単位水量低減によりブリーディングをかなり抑制できることを確認した。更に、我国で初めてC U S 2.5を用いた高比重消波ブロックが施工されたので、その事例を紹介する。

**キーワード：**銅スラグ、C U S 2.5、ブリーディング、強度特性、高比重消波ブロック

## 1. はじめに

銅の溶融精錬の際に副産される銅スラグの年間発生量は約200万 t に達し、1997年にコンクリート用細骨材としてJ I S 化されて以来、自然環境保全対策としても有効活用され始めている。また、銅スラグは密度が大きいことから、重量骨材としても有望な材料である。

一方、消波ブロックの安定性はコンクリートの単位容積質量の影響を大きく受けることから、近年では大水深で波浪条件の厳しい海域における防波堤を被覆する消波ブロックに高比重コンクリートを使用する例が増えてきている。したがって、高比重消波ブロックの材料に銅スラグを使うことができれば、資源の有効利用の観点からも望ましいと言える。しかしながら、銅スラグを細骨材に用いるとブリーディングが多くなり易い<sup>1)</sup>ことから、従来は細骨材中の容積割合（以下、C U S 混合率）を30%以下として使用することが多く、有効利用の観点から、C U S 混合率の増加が望まれていた。また、コンクリートの単位容積質量の増大にそれほど寄与できなかった。このため、精錬所から排出さ

れた銅スラグに破砕および粒度調整を施し、ブリーディングが抑制され易いC U S 2.5が工業ベースで製造されるようになった。

本報告では、まずC U S 2.5を用いたコンクリートに関する試験結果を示す。また、高比重コンクリートとして、粗骨材にかんらん岩を使用した場合の特性についても述べる。更に、我国で初めて本格的に施工されたC U S 2.5を使用した消波ブロックの事例を紹介する。

## 2. コンクリート試験（室内試験）

### 2.1 使用材料

コンクリート試験では、表－1に示す材料を使用した。骨材試験結果は、表－2および図－1、図－2の通りである。ここで、石灰石微粉末（以下、微粉末）はブリーディング抑制用の材料として細骨材置換で使用した。また、C U S 2.5と混合使用する普通細骨材を砕砂としたのは、C U S 2.5を今後の海砂等採取規制に伴う代替材としても位置付けたことによる。

### 2.2 試験練り目標値

ブロック製作用のコンクリートとして、スラ

\*1 (株) テトラ テトラ総合技術研究所 工修 (正会員)

\*2 国土交通省中部地方整備局清水港湾事務所下田港事務所所長

\*3 SMMプラントエンジニアリング(株) 建設管理部土建設計グループ

\*4 (株) テトラ テトラ総合技術研究所

ンプ＝8 cm，空気量＝4.5％を試験練り目標値として定めた。

### 2.3 試験配合

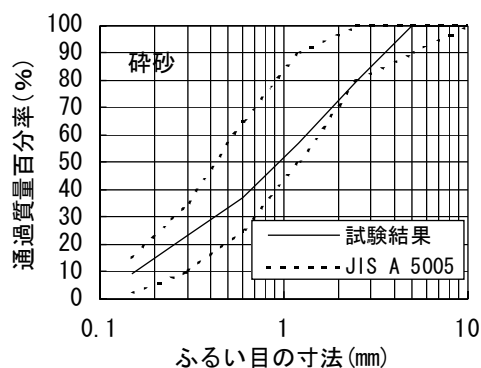
試験配合を，表－3に示す。ここで，No. 1～8はCUS混合率を変化させた配合（細骨材はCUS 2.5および砕砂），No. 9～11は砕砂を使用せずCUS 2.5の一部を微粉末に置換した配合，No.12，13は混和剤に高性能AE減水剤を使用して単位水量を減じた配合である。また，No.14～16では，粗骨材にかんらん岩を使用している（CUS混合率＝50％）。

表－1 使用材料

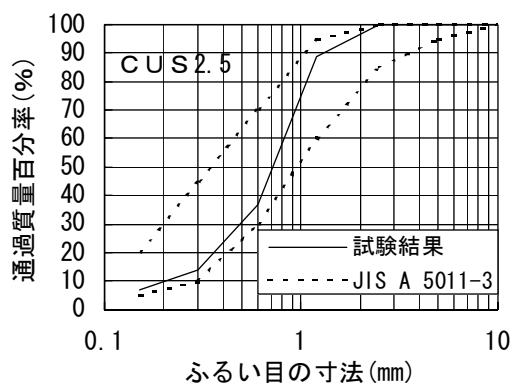
| 材 料  | 細 別      | 備 考                                                        |
|------|----------|------------------------------------------------------------|
| セメント | 高炉セメントB種 | S社製，密度3.04g/cm <sup>3</sup><br>比表面積3,970cm <sup>2</sup> /g |
| 練混ぜ水 | 地下水      |                                                            |
| 細骨材  | CUS 2.5  | S社製                                                        |
|      | 砕砂       | 愛媛産（砂岩）                                                    |
|      | 石灰石微粉末   | 密度2.71g/cm <sup>3</sup><br>比表面積4,860cm <sup>2</sup> /g     |
| 粗骨材  | かんらん岩    | 北海道産，Gmax＝40mm                                             |
|      | 砕石2005   | 愛媛産                                                        |
| 混和剤  | AE減水剤    | リガニル酸化合物とホリールの複合体                                          |
|      | 高性能AE減水剤 | ホリルホリル酸エーテル系化合物と配向ホリマーの複合体                                 |
|      | AE剤      | 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤                                        |
|      | 消泡剤      | ホリアルキレンガリコール誘導体                                            |

表－2 骨材試験結果

| 骨 材 種 別 |         | 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) |      | 吸水率 (%) | 単位容積質量 (kg/l) | 実積率 (%) | 粗粒率  |
|---------|---------|-------------------------|------|---------|---------------|---------|------|
|         |         | 絶乾                      | 表乾   |         |               |         |      |
| 細骨材     | 砕砂      | 2.56                    | 2.59 | 1.35    | 1.67          | 65.3    | 2.94 |
|         | CUS 2.5 | 3.50                    | 3.51 | 0.41    | 2.09          | 59.7    | 2.53 |
| 粗骨材     | 砕石2005  | 2.58                    | 2.61 | 1.00    | 1.49          | 57.8    | 6.74 |
|         | かんらん岩   | 3.22                    | 3.23 | 0.30    | 1.92          | 59.6    | 7.34 |



図－1 砕砂の粒度分布



図－2 CUS 2.5の粒度分布

表－3 試験配合

| No. | 粗骨材種別  | Gmax (mm) | W/C (%) | s/a (%) | CUS混合率 (%) | 微粉末置換率 (%) | 単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |     |         |     |        |       |       |
|-----|--------|-----------|---------|---------|------------|------------|----------------------------|------|-----|---------|-----|--------|-------|-------|
|     |        |           |         |         |            |            | 水                          | セメント | 砕砂  | CUS 2.5 | 微粉末 | 砕石2005 | かんらん岩 | 計     |
| 1   | 砕石2005 | 20        | 60.0    | 46.7    | 0          | 0          | 180                        | 300  | 818 | 0       | 0   | 940    | 0     | 2,238 |
| 2   | 砕石2005 | 20        | 60.0    | 46.7    | 30         | 0          | 172                        | 287  | 584 | 339     | 0   | 958    | 0     | 2,340 |
| 3   | 砕石2005 | 20        | 60.0    | 46.2    | 50         | 0          | 169                        | 282  | 414 | 562     | 0   | 973    | 0     | 2,400 |
| 4   | 砕石2005 | 20        | 60.0    | 46.0    | 60         | 0          | 168                        | 280  | 332 | 674     | 0   | 979    | 0     | 2,433 |
| 5   | 砕石2005 | 20        | 60.0    | 45.7    | 75         | 0          | 166                        | 277  | 207 | 840     | 0   | 990    | 0     | 2,480 |
| 6   | 砕石2005 | 20        | 60.0    | 45.0    | 100        | 0          | 163                        | 272  | 0   | 1,109   | 0   | 1,010  | 0     | 2,554 |
| 7   | 砕石2005 | 20        | 55.0    | 45.2    | 50         | 0          | 165                        | 300  | 404 | 548     | 0   | 990    | 0     | 2,407 |
| 8   | 砕石2005 | 20        | 65.0    | 47.2    | 50         | 0          | 171                        | 264  | 426 | 577     | 0   | 960    | 0     | 2,398 |
| 9   | 砕石2005 | 20        | 60.0    | 44.2    | 95         | 5          | 157                        | 262  | 0   | 1,050   | 43  | 1,036  | 0     | 2,548 |
| 10  | 砕石2005 | 20        | 60.0    | 43.7    | 90         | 10         | 153                        | 255  | 0   | 992     | 85  | 1,055  | 0     | 2,540 |
| 11  | 砕石2005 | 20        | 60.0    | 43.2    | 85         | 15         | 153                        | 255  | 0   | 925     | 126 | 1,065  | 0     | 2,524 |
| 12  | 砕石2005 | 20        | 56.7    | 47.0    | 100        | 0          | 153                        | 270  | 0   | 1,176   | 0   | 987    | 0     | 2,586 |
| 13  | 砕石2005 | 20        | 44.3    | 45.0    | 100        | 0          | 146                        | 330  | 0   | 1,106   | 0   | 1,005  | 0     | 2,587 |
| 14  | かんらん岩  | 40        | 55.0    | 42.0    | 50         | 0          | 152                        | 277  | 387 | 525     | 0   | 0      | 1,334 | 2,675 |
| 15  | かんらん岩  | 40        | 60.0    | 43.0    | 50         | 0          | 156                        | 260  | 398 | 539     | 0   | 0      | 1,311 | 2,664 |
| 16  | かんらん岩  | 40        | 65.0    | 44.0    | 50         | 0          | 154                        | 237  | 412 | 558     | 0   | 0      | 1,308 | 2,669 |

## 2.4 試験結果

### (1) 配合特性

C U S 混合率と単位水量の関係を図-3に示す。図-3より、砕砂使用の場合はC U S 混合率の増加、微粉末使用の場合は置換率の増加に伴い単位水量が低減されることが確認できる。一般に微粉末を細骨材置換で使用すると単位水量が増えることが多いが<sup>2)</sup>、C U S 2.5を微粉末で置換した場合には逆の傾向となった。これは、C U S 2.5が比較的単粒度であるため、微粒分が補われた効果によるものと推定される。また、表-3より、C U S 混合率=30%の場合の細骨材率は砕砂単味のそれと同等であることが判る。一方、C U S 混合率>30%の条件では、コンクリート標準示方書施工編に示される粗粒率による細骨材率の補正方法が成立つ。

### (2) ブリーディング特性

消波ブロックに使用されるコンクリートはブリーディング量が $0.5\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度となることもあるが、品質等に問題は生じていない。そこで、ここではブリーディング量の目標値を $0.5\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下に定めて検討を行う。

図-4に、ブリーディング試験結果を示す。図-4より、砕砂を使用した場合、C U S 混合率=30%の条件におけるブリーディング量はC U S 混合率=0%の場合と同等であるが、C U S 混合率>30%の場合にはC U S 混合率の増加に伴いブリーディングが多くなる。また、C U S 混合率 $\geq 75\%$ の場合にはブリーディングがか

なり多くなり、目標値を満足しないことが確認できる。したがって、特にブリーディング抑制対策を講じない場合のC U S 混合率は、50~60%以下が望ましいと考えられる。一方、微粉末は置換率=5%では効果がないが、置換率 $\geq 10\%$ とすると、ブリーディングが抑制される。また、図-5は砕砂を用いていない6配合において、微粉末の使用および高性能AE減水剤の使用(微粉末なし)による単位水量低減の効果を、水粉体容積比とブリーディング量の関係で示し

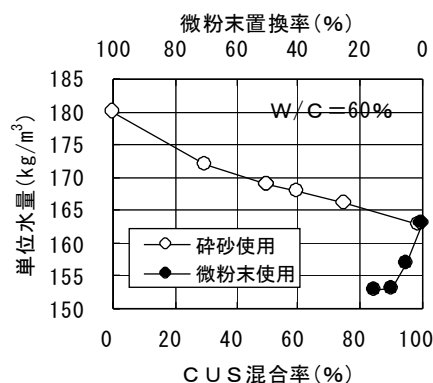


図-3 C U S 混合率と単位水量の関係

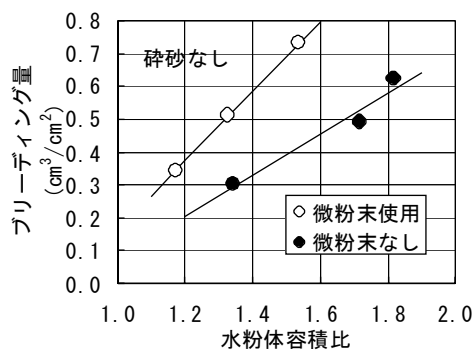


図-5 水粉体容積比とブリーディング量の関係

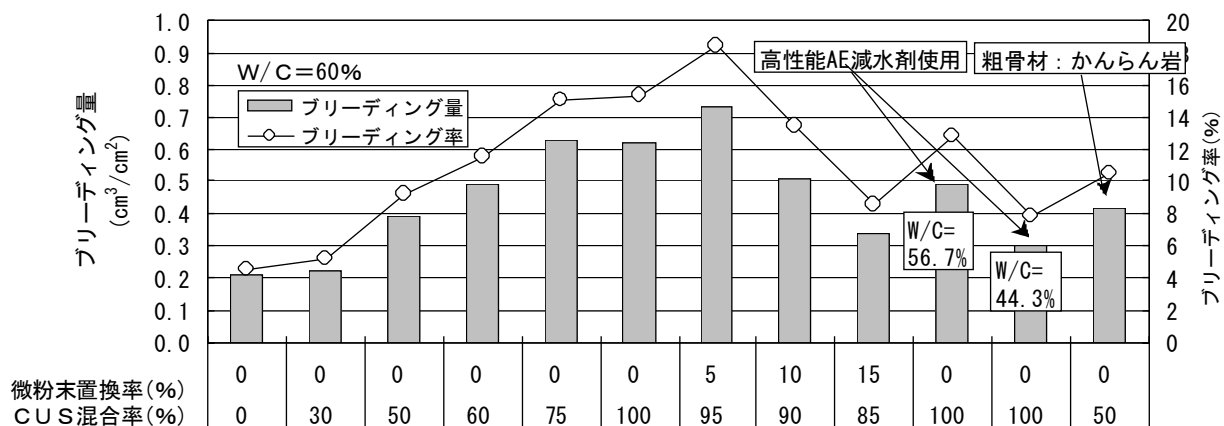


図-4 ブリーディング試験結果

たものである。図－5より、高性能AE減水剤の使用による単位水量低減は、微粉末の使用よりもブリーディング抑制に効果があることが判る。なお、同一W/CおよびC U S混合率の条件で、粗骨材種別（碎石2005およびかんらん岩）がブリーディング量に及ぼす影響は少ない。

### (3) 強度特性

セメント水比と圧縮強度の関係（C U S混合率＝50％）を図－6に示す。図－6より、C U S 2.5およびかんらん岩を用いた場合にも、圧縮強度はセメント水比とほぼ直線関係にあることが確認できる。

次に、圧縮強度と引張強度および曲げ強度の関係（C U S混合率＝50％）を図－7および図－8に、圧縮強度 $\sigma_c$ の平方根とコンクリートの単位容積質量 $\gamma$ の1.5乗の積とヤング率の関係を図－9に示す。ここで、図中の普通コンクリートは、著者らによる従来の試験結果である。これらの図より、C U S 2.5を用いた場合の圧縮強度と引張強度および曲げ強度の関係は普通コンクリートの場合とほぼ同等であるが、詳細には同一の圧縮強度に対して引張強度および曲げ強度は普通コンクリートに比べてやや大きいようである。また、粗骨材に普通碎石を用いた場合のヤング率は普通コンクリートと同様の傾向にあるが、粗骨材にかんらん岩を用いた場合はヤング率が大きくなる。これは、かんらん岩が硬質であることによるものと推定される。

## 3. 施工例（下田港防波堤消波ブロック製作）

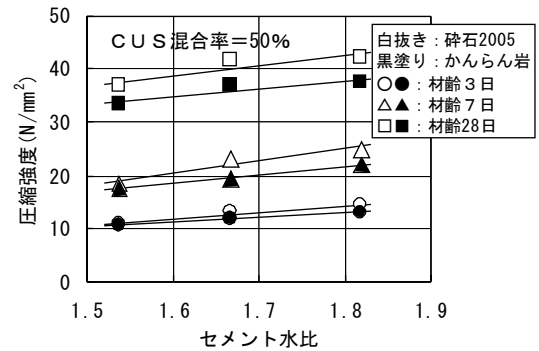
### 3.1 工事概要

#### (1) 下田港の概要

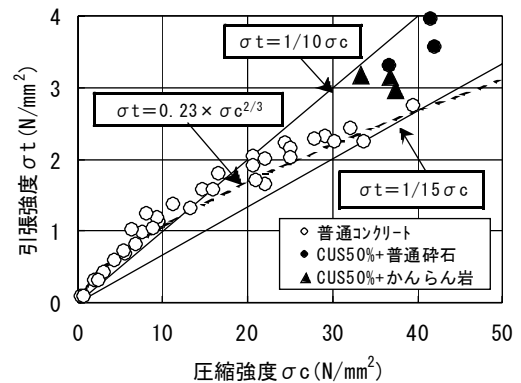
伊豆半島南端の石廊崎から北東12kmに位置する下田港は昭和26年に避難港に指定され、防波堤等の整備が順次進められてきた。また、昭和60年より国の直轄事業として津波対策を兼ねた新たな防波堤の工事が進められている。

#### (2) 防波堤の概要

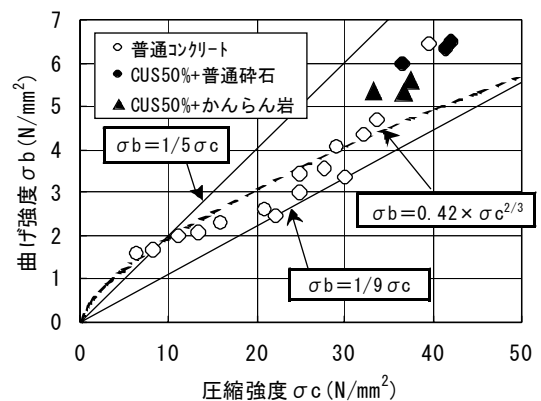
下田港の位置平面図を図－10に示す。防波堤（西）の開口部付近のケーソン4函については、



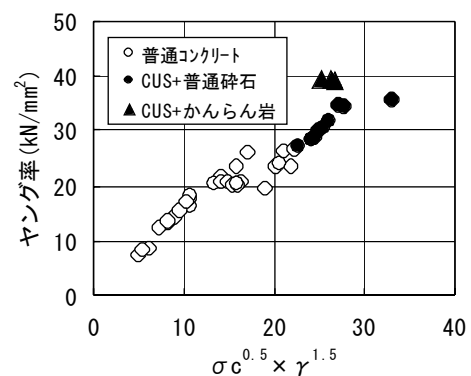
図－6 セメント水比と圧縮強度の関係



図－7 圧縮強度と引張強度の関係



図－8 圧縮強度と曲げ強度の関係



図－9 ヤング率

消波ブロック内蔵双胴型ケーソン（図－11）が用いられている。このケーソンは、消波ブロックを内蔵することにより消波機能が発揮されるものであり、経済的で消波性能に優れる等数々の特性を有している。内蔵消波ブロックのうちの上部2層については、安定性確保の観点から単位容積質量＝2.6t/m<sup>3</sup>の高比重消波ブロックが使用される。本報告では、主としてこの高比重消波ブロック製作工事について述べる。なお、製作した消波ブロックは、現在消波ブロック内蔵双胴型ケーソン内に設置済である。

### (3) 工事概要

- ・ 工事名称：平成14年度下田港防波堤消波ブロック製作据付工事
- ・ 事業主体：国土交通省中部地方整備局清水港湾工事事務所
- ・ 工事概要：普通コンクリートブロック（50 t 型）93個，高比重ブロック（単位容積質量＝2.6t/m<sup>3</sup>，50 t 型）117個製作・据付 等

### 3.2 使用材料および配合

高比重消波ブロック製作に使用された材料および配合（スランプ＝8±2.5cm，空気量＝4.5±1.5%，G<sub>max</sub>＝40mm，C U S 混合率＝48％）を，表－4および表－5に示す。ここで，要求されるコンクリートの単位容積質量は2.6t/m<sup>3</sup>であるが，空気量の変動を考慮して，配合上の単位量の合計は2,646kg/m<sup>3</sup>としている。また，C U S 混合率＝48％で所要のコンクリートの単位容積質量を確保できることから，特にブリーディング抑制対策は施していない。

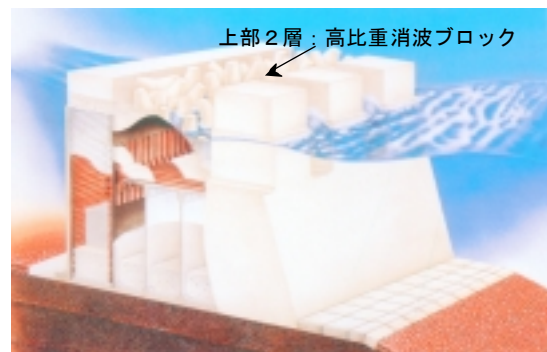
### 3.3 コンクリート試験

工事においては，コンクリートの品質確認のためスランプ，空気量，圧縮強度および単位容積質量を測定するとともに，ブリーディング試験を実施した。図－12にスランプおよび空気量，図－13に圧縮強度および単位容積質量の測定結果を示す。

まず，図－12よりスランプは7.0～9.5cm，空気量は3.2～5.2％で，概ね安定していることが判る。また，図－13より圧縮強度（33.1～



図－10 下田港位置平面図



図－11 消波ブロック内蔵双胴型ケーソン

表－4 使用材料（下田港工事）

| 材 料  | 細 別       | 備 考                                      |
|------|-----------|------------------------------------------|
| セメント | 高炉セメントB種  | U社製，密度3.04g/cm <sup>3</sup>              |
| 細骨材  | C U S 2.5 | S社製，表乾密度3.49g/cm <sup>3</sup><br>粗粒率2.58 |
|      | 川砂        | 表乾密度2.60g/cm <sup>3</sup><br>粗粒率2.79     |
| 粗骨材  | かんらん岩     | 北海道産，G <sub>max</sub> ＝40mm              |
| 混和剤  | AE減水剤     | 変性リグニンスルホン酸化合物                           |
|      | AE剤       | アルキルアミン系界面活性剤                            |

表－5 高比重消波ブロック製作工事用配合

| W/C (%) | s/a (%) | 単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |     |      |       |       |
|---------|---------|----------------------------|------|-----|------|-------|-------|
|         |         | 水                          | セメント | 川砂  | 銅スラグ | かんらん岩 | 計     |
| 54.0    | 46.7    | 153                        | 284  | 448 | 552  | 1,209 | 2,646 |

37.1N/mm<sup>2</sup>，変動係数＝2.8％）および単位容積質量（2.64～2.70t/m<sup>3</sup>，変動係数＝0.6％）も安定しており，かつ十分な強度および単位容積質量が確保された。一方，ブリーディング量は0.35cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>であり，配合条件の類似した2章表－3のNo.14（粗骨材：かんらん岩，C U S 混合率＝50％，W/C＝55％）の試験結果＝

0.32cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>とほぼ同等であった。

### 3.4 施工性

工事において製造した高比重コンクリートはワーカブルで、消波ブロックの打設は良好に行われた。また、普通コンクリートに比べてブリーディングがやや多くなるため消波ブロックの出来型への影響が懸念されたが、写真－１（写真－２は普通コンクリート消波ブロック）のように出来型も極めて良好であった。

## 4. まとめ

以上、C U S 2.5を用いたコンクリートの特性を調べた上で、我国で初めて本格的に施工されたC U S 2.5を使用した高比重消波ブロックの事例を紹介した。主要な成果は、以下の通りである。

### 4.1 コンクリートの特性

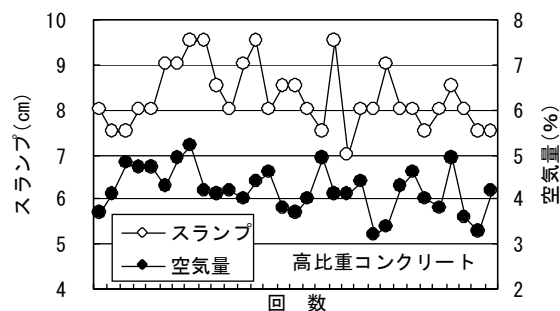
- (1) C U S 混合率の増加に伴い、単位水量は低減される。
- (2) C U S 混合率 $\geq 75\%$ とするとブリーディングがかなり多くなるため、特にブリーディング抑制対策を講じない場合、C U S 混合率は50～60%程度以下が望ましい。
- (3) 石灰石微粉末の混合や高性能A E 減水剤による単位水量低減で、ブリーディングはかなり抑制することができる。
- (4) C U S 2.5の使用が強度特性に及ぼす影響は少ない。

### 4.2 施工例（下田港消波ブロック製作）

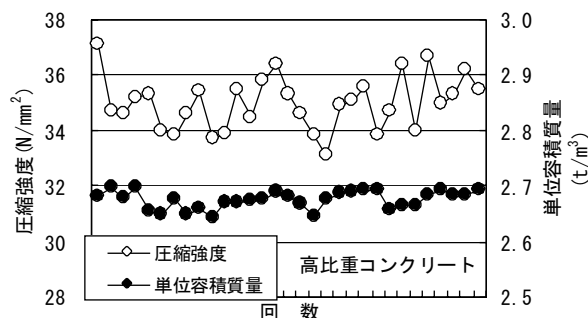
- (1) 粗骨材にかんらん岩を使用し、C U S 混合率=48%の条件で、ワーカブルかつ単位容積質量が2.6t/m<sup>3</sup>以上の高比重コンクリートが得られた。
- (2) 品質の安定した高比重コンクリートが製造でき、消波ブロックの出来型も良好であった。

## 参考文献

- 1) 土木学会：銅スラグを用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー，



図－12 スランプ，空気量の測定結果



図－13 圧縮強度，単位容積質量の測定結果



写真－１ 高比重消波ブロック出来型



写真－２ 普通消波ブロック出来型

No.92, pp.44-48, 1998.

- 2) 日本コンクリート工学協会：石灰石微粉末の特性とコンクリートへの利用に関するシンポジウム委員会報告書・論文集，pp.12-13，1998.