

高流動エコセグメントの導入 — 下水汚泥焼却灰の高流動コンクリート二次製品への適用 —

宇野 洋志城・倉木 修二・伊熊 信男

高流動エコセグメントとは、下水汚泥焼却灰を混和材に用いた高流動コンクリートにより製造したシールドトンネル用セグメントである。検証試験の結果では、強度特性や耐久性能は従来のセグメントと同等の性能を有しており、重金属等の溶出がなく環境への悪影響は認められない。

シールドトンネル工事の一部区間に導入した結果では、製造過程や品質のばらつき、施工性に関しても検証することができ、高流動エコセグメントを適用することにより工程の単純化、設備の簡素化、製造原価のコストダウン、材料使用量の抑制、廃棄物の最終処分場不足の緩和等の期待できる効果が明らかとなった。

キーワード：シールドトンネル、高流動コンクリート、二次製品、焼却灰、リサイクル、セグメント

1. はじめに

平成 15 年度実績によると、全国の下水道から発生する下水処理汚泥は、乾燥重量にして約 215 万トンであった。そのうち、有効利用されたのは約 64% にすぎず、残りは廃棄処分された。

有効利用の形態としては焼却灰での利用が 66% を占め、主にセメント原料や煉瓦・コンクリート二次製品材料等へ再利用されており、建設業界での利用がメインとなっている。

しかしながら、最近の建設需要（公共事業投資を含む）の低下に伴い、今後も下水処理汚泥の需要が拡大していくとは考え難い状況にある。

そこで、筆者らはこれまでの有効利用方法に加えて、新たに高流動コンクリートの混和材への適用を検討し、有効利用の促進に向けた開発を行うことが必要であると考えた。

ところで、横浜市では埋立処分場の延命化とともに、循環型社会形成の観点から下水汚泥焼却灰の有効利用率の向上を目指している。平成 16 年度段階では 100% を有効利用するに至ったが、昨今の建設需要の低下傾向から判断して、今後のために下水処理汚泥の有効利用の選択肢を増やすことが必要であった。

そこで、筆者らは高流動コンクリートに下水汚泥焼却灰を混入してシールド工事用セグメントを製造することを目的として、平成 13 年度から共同研究として「下水汚泥焼却灰を利用したシールド工事用セグメン

トの研究」を実施した。その成果を受け、平成 15 年度以降も共同研究である「下水汚泥焼却灰を混入した高流動コンクリートにより製造したシールド工事用セグメント（以下、高流動エコセグメントと称す）の製造、実用化を目的とした共同研究（その 2）」を継続してきた^{1), 2), 3), 4)}。

本論文は、これまでに実施した高流動エコセグメントに関する研究成果とともに実工事現場への導入状況について述べるものである。

2. 配合の特徴

筆者らは、以前より高流動コンクリートの二次製品（主にシールド工事用セグメント）への適用を目的とした研究を継続しており、高流動コンクリートセグメント（SHFC : Segment of High Flowing Concrete）に関する技術を蓄積してきた^{5), 6), 7)}。

既に電力洞道で 3 件、鉄道トンネルで 1 件、高流動コンクリートを用いて製造したシールド工事用セグメントを実用しており、セグメント製造の基本となる高流動コンクリート配合に関する知見を保有していた。

一般に、下水汚泥焼却灰を混入するとコンクリートの粘性は非常に高くなり、ワーカブルなコンクリートとはならない。通常のコンクリートであれば 30 kg/m³ 程度の混入が限界であり、二次製品の製造時に振動締固めを行っても、巻込み空気などが混入して気泡の多いコンクリート製品となる可能性が高い。

一方、高流動コンクリートであればむしろ粘性が不



写真-1 下水汚泥焼却灰

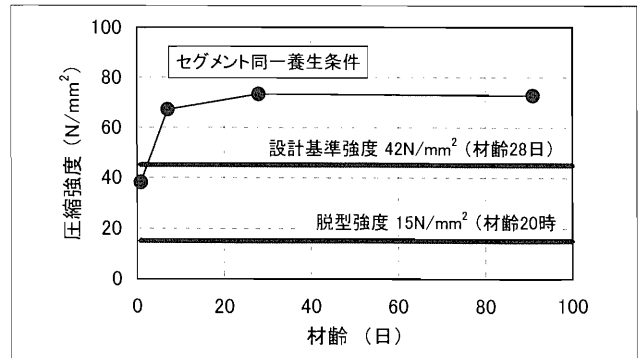


図-1 圧縮強度試験結果

表-1 示方配合表

配合種類	目標スランプフロー (スランプ) (cm)	水結合材比 W/P (%)	空気量 (%)	単位粗骨材絶対容積 (m ³ /m ³)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
						W	C	SA	S	G	Ad
高流動エコセグメント	65±5	35.0	2.0	0.299	32.1	175	500	50	877	855	6.05
従来	(2±1)	37.0	2.0	0.403	43.0	148	400	0	812	1,154	2.40

材料特性値 C: 普通ポルトランドセメント, 密度 3.16 g/cm³
 SA: 下水汚泥焼却灰, 密度 2.29 g/cm³, 比表面積 5,900 cm²/g
 S: 細骨材, 葛生産石灰岩系砕砂, 表乾密度 2.69 g/cm³, 粗粒率 2.60
 G: 粗骨材, 田沼産玄武岩系砕石, 表乾密度 2.86 g/cm³, 粗粒率 2.69, 実績率 60.2%
 Ad: 高流動エコセグメント/高性能 AE 減水剤, 主成分ポリカルボン酸エーテル系化合物
 従来/高性能減水剤, 主成分はメラミンスルホン酸系化合物

可欠であり、粘性と変形性（流動性）の相反する性能を有することで自重を利用して型枠内に充てんし、空気を巻込むような振動締固めの工程は必要ない。そのため、下水汚泥焼却灰の混入量は 50 kg/m³ でも可能となり、実験レベルでは 75 kg/m³ 程度でも可能となった。

今回は、混和材に下水汚泥焼却灰（写真-1）を用いることで、ベースとなる高流動コンクリートセグメントの配合から定めた高流動エコセグメントの配合実績を表-1 に示す。

この配合の要求品質は以下に示すとおりである。

- ①設計基準強度：42 N/mm²（材齢 28 日）
- ②脱型強度：15 N/mm²（材齢 20 時間）
- ③スランプフロー：65±5 cm
- ④空気量：2±1%

3. 高流動エコセグメントの品質

品質試験結果を以下に示す。

(1) 圧縮強度

圧縮強度発現は要求品質を満足し、長期的にも必要十分な強度を得ることができる（図-1）。

これは、配合設計時点で若材齢時の脱型強度を得るために最終的に設計基準強度を大きく上回るような低

水セメント比を設定していること、下水汚泥焼却灰の組成は代表的なコンクリート混和材である火力発電所から排出されるフライアッシュとセメントとの中間にあり、ポゾラン反応による強度増進が期待できることによるものであると考えられる。

実物大セグメントによる耐力試験も実施した結果、耐力は十分に保有していることを実証したが、配筋条件が従来セグメントと変わらないので、破壊モードは鉄筋の降伏によるものとなった。

(2) 乾燥収縮ひずみ

乾燥収縮ひずみの測定は JIS A1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」に準拠して行った。

その結果、乾燥収縮ひずみは従来セグメントを上回

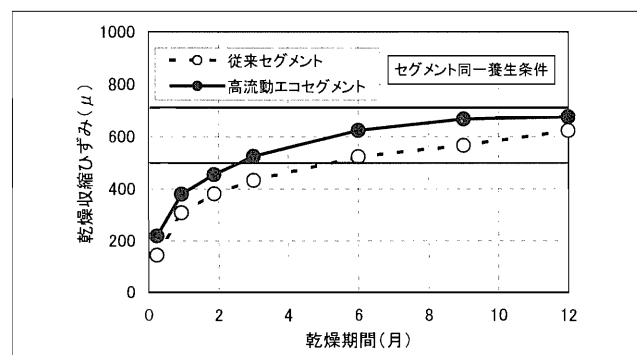


図-2 長さ変化試験結果

るものの、一般に高耐久とされる 700 μ m 程度であり、十分耐久性があると考えられる (図-2)。

これは、配合上の特徴として従来セグメント用コンクリートよりも粗骨材量が少なく、相対的に収縮成分であるセメントペースト (水+セメント+下水汚泥焼却灰) 量が多いからであるが、低水セメント比であることにより高耐久の範囲におさまっているものと考えられる。

(3) 中性化深さ

中性化試験は JIS A1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠して行った。

その結果、中性化深さは明らかに従来セグメントを下回り、より中性化し難い、つまり内部の鉄筋を発錆から保護する性能が高いことを示している (図-3)。

これは、低水セメント比の影響によるものと考えられ、かぶりの小さなコンクリート二次製品にとっては非常に望ましい性能である。

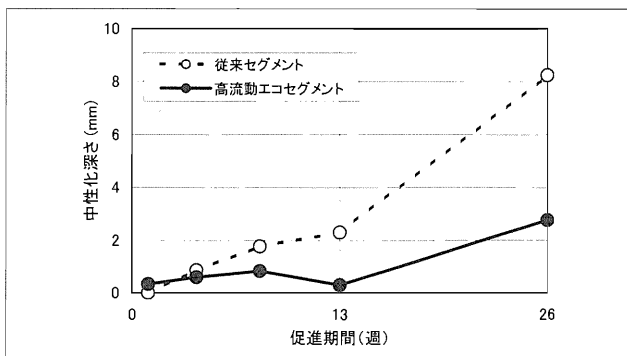


図-3 促進中性化試験結果

(4) 環境へ及ぼす影響

下水汚泥焼却灰を利用したことで、環境に及ぼす影響を確認した結果を表-2 に示す。

表-2 環境試験結果

項目	分析結果		基準値	
	溶出試験	タンクリーチング試験	土壌環境基準	産廃判定基準
カドミウム	不検出	不検出	≤ 0.01	≤ 0.3
全シアン	不検出	不検出	検出されないこと	≤ 1
鉛	0.007	不検出	≤ 0.01	≤ 0.3
6価クロム	0.029	不検出	≤ 0.05	≤ 1.5
砒素	不検出	不検出	≤ 0.01	≤ 0.3
総水銀	不検出	不検出	≤ 0.0005	≤ 0.005
アルキル水銀	不検出	不検出	検出されないこと	検出されないこと
PCB	不検出	不検出	検出されないこと	≤ 0.003
セレン	不検出	不検出	≤ 0.01	≤ 0.3
亜鉛	不検出	不検出	—	—
銅	0.07	不検出	—	—
ニッケル	不検出	不検出	—	—

コンクリート試験体を粉砕して水中に溶出する重金

属類を試験する方法 (溶出試験) と、試験体の表面から水中に溶出する重金属類を試験する方法 (タンクリーチング試験。供用時の環境はこれに近い) の両試験を実施した結果、基準値を超えることはなく、タンクリーチング試験ではすべての項目で不検出 (測定不可能) という結果が得られた。

これらの結果から、高流動エコセグメントが与える環境への影響はないものと考えられる。

4. 実工事現場への導入

それまでの成果から、実工事現場 (横浜市発注の下水道整備工事) での試験施工が決まり、平成 16 年 8 月に本製品の製造を実施した (写真-2)。

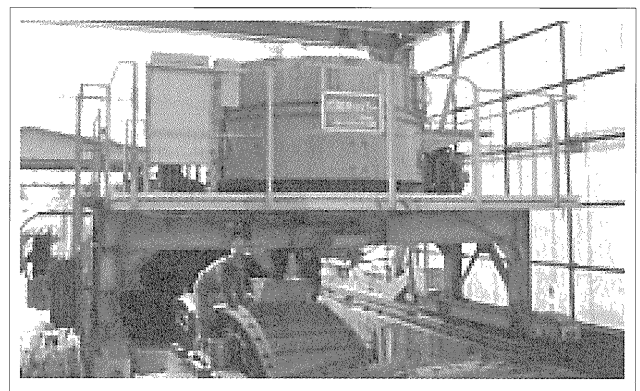


写真-2 製造状況

実際に製造する場合には、図-4 に示すように大幅に製造工程を簡素化できることが想定されており、今回の製造において実証することができた。

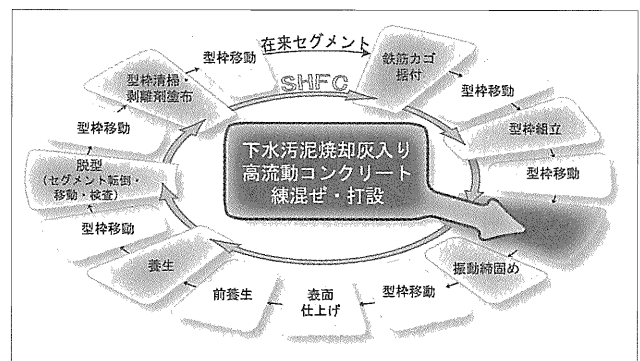


図-4 製造工程の比較

製造時における品質管理は 1 回/リングの頻度で実施され、管理項目のうちスランプフロー、空気量、圧縮強度の実績を図-5~図-7 に示す。

実物大セグメントによる耐力試験や組立て精度試験に必要なピースも含めたデータ数は $n=22$ であった。

これらデータは全て管理限界範囲内 (平均値 $\pm 3\sigma$;

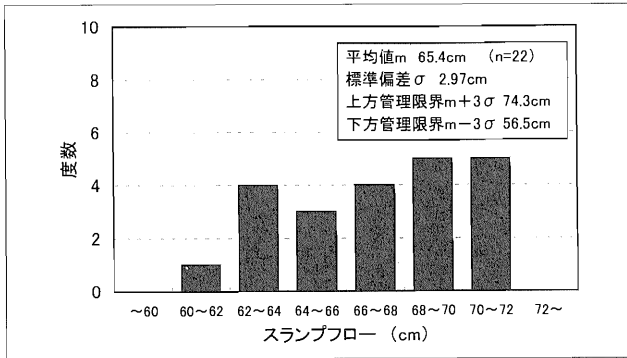


図-5 スラブフローのばらつき

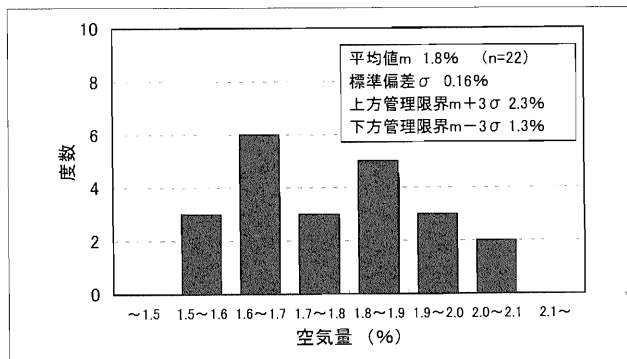


図-6 空気量のばらつき

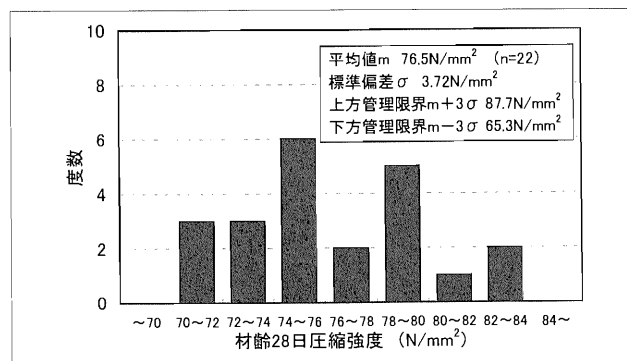


図-7 圧縮強度のばらつき

σ=標準偏差)におさまり、高流動エコセグメントの製造過程における品質のばらつきに関して問題はないことを実証することができた。

これは、高流動エコセグメントを製造する場合であっても、従来セグメントに対応した製造設備を有していれば安定した品質管理が十分可能であることを示している。

また、セグメントピース毎の寸法精度は許容範囲の±1.0mm内におさまり、平成17年2月時点でのセグメント現場搬入、ハンドリング、組立て時においてもセグメントに欠けや目違いなどはなかった(写真-3)。施工性の面で従来セグメントと変わるところはなく、十分適用可能であることを実証することができた。

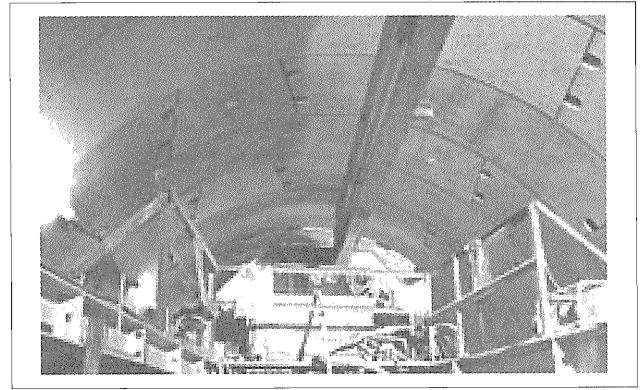


写真-3 組立て状況

5. おわりに

実工事現場への高流動エコセグメント導入以降1年以上が経過した現在、その外観・品質には問題のないことが確認されている。

今回の実工事現場への導入による成果を踏まえ、高流動エコセグメントの実用化には5つの特長があると考えられる。

①工程の省力化

振動締固め・表面仕上げ・型枠移動等省略の効果

②設備の簡素化

定置式の軽量型枠と独自の蓋型枠使用の効果

③製造原価のコストダウン

労務費・製造設備費・動力費等削減の効果

④廃棄物の最終処分場不足の緩和

廃棄処理量削減の効果

⑤コンクリートの天然材料使用量の抑制

省資源によるリサイクルの効果

これらのうち①~③の特長は、高流動コンクリートセグメントであることによるものである。

しかしながら、④、⑤の特長に関しては、下水汚泥焼却灰の有効利用によって得られたものである。

今後は、下水汚泥焼却灰の有効利用方策の一つとして高流動エコセグメントの導入を各自治体に働きかけていく所存である。

J C M A

《参考文献》

- 1) 小幡 靖, 秋田谷 聡, 弘中義昭: 下水汚泥焼却灰を利用したシールド工用セグメントの研究, 平成14年度下水道研究発表会, pp.983-985, 2002.7
- 2) 小幡 靖, 弘中義昭, 秋田谷 聡: 下水汚泥焼却灰を用いた高流動コンクリートセグメントの開発, 土木学会第57回年次学術講演会概要集, VI-10, pp.19-20, 2002.9
- 3) 秋本圭一, 倉木修二, 宇野洋志城: 下水汚泥焼却灰を利用した高流動エコセグメントの適用, 平成17年度下水道研究発表会, pp.495-497, 2005.7
- 4) 小野 崇, 倉木修二, 西山 寛, 宇野洋志城: 下水汚泥焼却灰を用い

たシールド工用セグメントの適用, 土木学会第 60 回年次学術講演会概要集, VI-117, pp.233-234, 2005.9

- 5) 伊藤伸一郎, 弘中義昭, 西本憲生, 岡村直利: 締固め不要コンクリート用いたセグメントの製造実験, コンクリート工学論文報告集, Vol. 15, No.1, pp.205-210, 1993.6
- 6) 木村定雄, 岡村直利, 宇野洋志城, 清水範幸, 小泉 淳: シールド工用コンクリート系セグメントの耐久性能と耐火性能, 土木学会論文集, No.728/VI-58, pp.107-119, 2003
- 7) 宇野洋志城, 弘中義昭, 吉成寿男: 自己充てんコンクリートのシールドセグメントへの適用, Proceedings of the 3rd Japan-China Technological Exchange of Shield-driven Tunneling in 2005, pp.81-88, 2005.8

【筆者紹介】

宇野 洋志城 (うの よしき)
佐藤工業株式会社
技術研究所
主任研究員



倉木 修二 (くらき しゅうじ)
日本コンクリート工業株式会社
セグメント営業部
セグメント技術グループ
グループリーダー



伊熊 信男 (いくま のぶお)
横浜市環境創造局
環境活動推進部
環境科学研究所
担当係長



建設工事に伴う 騒音振動対策ハンドブック

「特定建設作業に伴って発生する騒音の規制に関する基準」(環境庁告示)が平成8年度に改正され,平成11年6月からは環境影響評価法が施工されている。環境騒音については,その評価手法に等価騒音レベルが採用されることになった等,騒音振動に関する法制度・基準が大幅に変更されている。さらに,建設機械の低騒音化・低振動化技術の進展も著しく,建設工事に伴う騒音振動等に関する周辺環境が大きく変わってきている。建設工事における環境の保全と,円滑な工事の施工が図られることを念頭に各界の専門家委員の方々により編纂し出版した。本書は環境問題に携わる建設技術者にとっては必携の書です。

■掲載内容:

- 総論 (建設工事と公害, 現行法令, 調査・予測と対策の基本, 現地調査)
- 各論 (土木, コンクリート工, シールド・推進工, 運搬工, 塗装工, 地盤処理工, 岩石掘削工, 鋼構造物工, 仮設工, 基礎工, 構造物とりこわし工, 定置機械(空気圧縮機, 動発電機), 土留工, トンネル工)
- 付録 低騒音型・低振動型建設機械の指定に関する規程, 建設機械の騒音及び振動の測定値の測定方法, 建設機械の騒音及び振動の測定値の測定方法の解説, 環境騒音の表示・測定方法(JIS Z 8731), 振動レベル測定方法(JIS Z 8735)

■体 裁: B5判, 340頁, 表紙上製

■定 価: 会 員 5,880円(本体5,600円) 送料 600円
非会員 6,300円(本体6,000円) 送料 600円

・「会員」本協会の本部, 支部全員及び官公庁, 学校等公的機関

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 (機械振興会館) Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289