

高流動コンクリートを用いた シールド工事用セグメントの品質

花見 和則¹・松裏 寛²・宇野洋志城³・小泉 淳⁴

¹正会員 東京電力(株) 銀座支店 (〒105-0011 東京都港区芝公園 2-2-4)

²正会員 工修 東京電力(株) 送変電建設部 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町 1-1-3)

³正会員 佐藤工業(株) 中央技術研究所 (〒243-0211 神奈川県厚木市三田 47-3)

⁴正会員 工博 早稲田大学 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

従来のコンクリート平板形セグメントは、硬練りのコンクリートを用い強力な振動締固めによって製造しているが、筆者らはセグメントのコスト低減を目的として、高流動コンクリートの特性すなわち型枠の中に締固めなしに充てんできる性状に着目し、振動締固めやセグメント背面の表面仕上げの省略などに伴う製造工程の効率化、および型枠構造の簡素化が図れる新しいセグメント製造システムを実用化した。

本論文は、高流動コンクリートを用いたセグメントの品質について、各種試験により従来のセグメントと比較し同等かそれ以上の性能を有していることを確認するとともに、実施工現場での量産製造に基づいて行った品質評価について述べたものである。

Key Words : shield tunnel, high flowing concrete, segment, durability, smoothness, uniformity

1. まえがき

現在、地中送電線をはじめとする都市部のライフライン構造物の構築には、輻輳する地下埋設物を避け、地上環境および地下環境に与える影響の少ないシールド工法が主に用いられている。

また近年、都市の急激な過密化により、シールドの発進および到達の基地となる立坑用地の確保難やトンネル位置の深層化など、都市トンネルを取り巻く施工環境はますます厳しくなっており、これらがトンネル工事のコスト増加を招いている。

このような背景のもとで、シールド工事費の低減を図るためには、シールドトンネルの覆工部材であるセグメントのコストダウンは大きな課題の一つであり、セグメント組立作業の効率化や継手部の合理化などを目的として、新型継手およびセグメントの形状や構造などの改良に関する技術開発が多面で進められている。

コンクリート平板形セグメントの製造は、継手面となる4面で高い寸法精度が要求されていることから、セグメント背面側をコンクリートの投入箇所としているが、曲率を持った背面に対して金ごてによる表面仕上げを容易にするため、スランプが2～3cm程度の硬練りコンクリートが用いられている。

また、コンクリートの充てんにあたっては鉄筋も密に配筋されているため、大型のテーブルパイプレータによる強力な振動締固めが必要である。したがって、セグメントの移動も含めた製造工程や製造設備は他のコンクリート二次製品に比べて複雑であり、これらがコンクリート平板形セグメントのコスト高の要因ともなっている。

筆者らは、高流動コンクリートの特性すなわち型枠の中に締固めなしに充てんできる性状に着目し、セグメントに高流動コンクリートを適用することにより、振動締固めやセグメント背面の表面仕上げの省略などの製造工程の効率化、および型枠構造の簡素化などによるコスト低減を目的とした新たなセグメントの製造システムの開発を推進してきている^{1)・2)}。

また、高流動コンクリートを用いたことによる付加的效果として、テーブルパイプレータ使用時の騒音、振動がなくなり周囲の住環境の改善も図れる利点がある。

2. 研究の目的と概要

高流動コンクリートを用いたセグメント(以下、

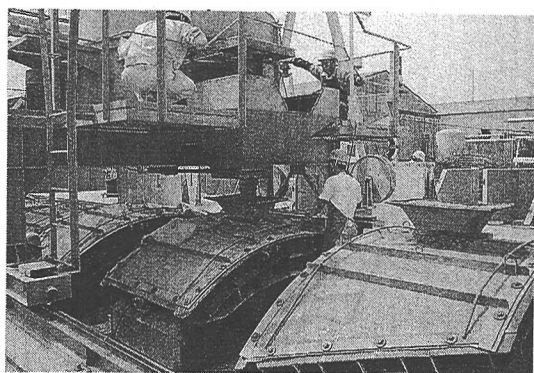


写真-1 コンクリート打込み状況

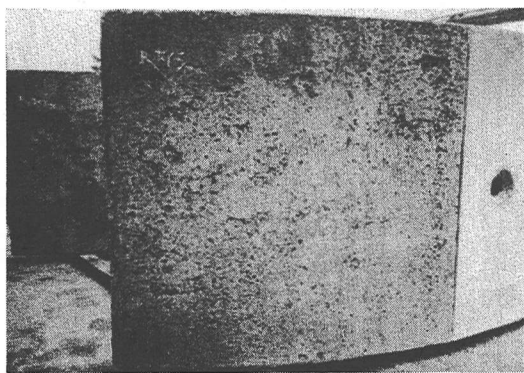


写真-2 セグメント背面の気泡あばた

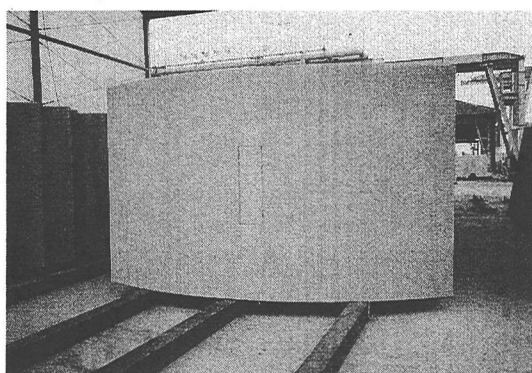


写真-3 セグメント背面の状況(有孔鋼板の蓋型枠使用)

高流動コンクリートセグメントと略称する)の製造は、写真-1 に示すようにセグメント背面側にも蓋型枠を設置し、高流動コンクリートを蓋型枠の中央部に設けた投入口から流し込む方式とした。

蓋型枠に無孔鋼板を使用した場合には、セグメント背面側に多数の有害な気泡あばた(写真-2 参照)が発生するため、有孔鋼板(孔径 6mm, 孔ピッチ 9mm)と透気性材料の織布を組み合わせることにより、写真-3 に示すように気泡あばたの発生を完全に抑えることが可能となった。

しかしながら、高流動コンクリートセグメントの背面側の表面には、織布などの跡が縞模様となって残るため、この凹凸がシールド機のテールシールの摩耗に与える影響が懸念された。

また、セグメントは鉄筋のかぶりが比較的小さいため、鉄筋の腐食に対して十分な耐久性を確保しなければならないが、高流動コンクリートセグメントの背面は従来の硬練りコンクリートを用いたセグメント(以下、従来型セグメントと略称する)のような金ごて仕上げを行わないことから、背面側の耐久性

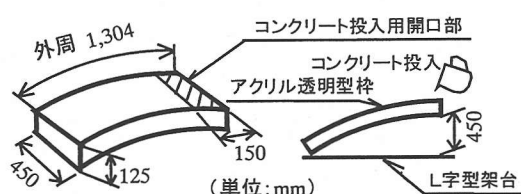


図-1 自己充てん性の実験

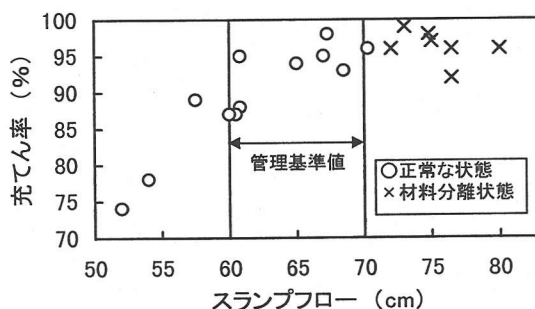


図-2 スランプフローと充てん率との関係

の検証も検討課題となった。

さらに、シールド工用セグメントは薄肉の高強度コンクリート構造物であり、セグメント組立時の衝撃力、シールド掘進時の反力および裏込め注入圧など施工時荷重も過酷であることから、弱部をつくらないことが極めて重要な品質と考え、高流動コンクリートセグメントの材質の均一性についても検証することとした。

本論文は高流動コンクリートセグメントに関して、①セグメント背面の平滑度、②セグメント背面の耐久性および③材質の均一性などの品質を各種試験により評価するとともに、実施工現場での量産製造に基づいて行った品質評価について述べるものである。

表-1 高流動コンクリートの示方配合

	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AD1,2
高流動コンクリート	20	65 ± 5	2 ± 1	31.6	53.6	187	592	846	821	10.66 ^{注2)}
(参考)従来型セグメント 用コンクリート	20	3 ± 1.5 ^{注1)}	2 ± 1	35.2	43.5	148	420	792	1150	9.49 ^{注3)}

注1)スランブ、注2)使用混和剤はAD1、注3)使用混和剤はAD2

表-2 使用材料

使用材料	記号	材 料 特 性
セメント	C	普通ポルトランドセメント
細骨材	S	栃木県葛生産硬質砂岩系砕砂 (密度 2.61g/cm ³ , 粗粒率 3.20)
粗骨材	G	栃木県田沼産玄武岩系砕石(密度 2.91 g/cm ³ , 粗粒率 6.83, 実積率 58.6%)
混和剤	AD1	高性能A E減水剤 (主成分はポリカル ボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複 合体)
	AD2	高性能減水剤 (主成分は高縮合トリア ジン系)

表-3 硬化コンクリートの品質

配 合 種 類	圧縮強度 (N/mm ²)		乾燥収縮 ひずみ(μ)
	脱型時	材齢28日	材齢52週
高流動コンクリート	24.5 ^{注1)}	61.8 ^{注2)}	565
(参考)従来型セグメン ト用コンクリート	18.4 ^{注2)}	49.1 ^{注4)}	451

注1)材齢20時間(湿潤養生)、注2)材齢5時間(蒸気養生)
注3)脱型後屋外にて気中養生
注4)脱型後材齢4日まで水中養生、以後屋外にて気中養生

3. 高流動コンクリートセグメントの製造方法

(1) 高流動コンクリートの配合と硬化コンクリートの品質

セグメントに適用する高流動コンクリートは、設計基準強度 45 N/mm²を確保することとし、表-1に示すように増粘剤系に比べ脱型時間に係わる早期強度の発現が早い、セグメントに用いるような高強度に対しては増量したセメントが有効に活用でき材料コストが安い、乾燥収縮ひずみが小さいなどで有利な粉体系の配合とした³⁾。その使用材料を表-2に示す。

配合の検討にあたっては、図-1に示すように実物の型枠の半断面を模擬した透明型枠を用いて、自己充てん性の模型実験を行った。すなわち、透明型枠内へ高流動コンクリートを5リットル/分の速度で自然流下させ、その投入量と型枠容積の比を充てん率とし、スランブフローと充てん率との関係を求めた。その結果は図-2に示すとおりで、スランブフローが70cmを越えると材料分離が認められ、60cm以下では充てん率が極端に低下しているため、スランブフローの管理基準値を65 ± 5cmと設定した。

表-1の示方配合による硬化コンクリートの品質をみる目的で、管理供試体の圧縮強度および乾燥収縮ひずみを計測した。その結果を表-3に示す。また、参考として従来型セグメント用コンクリートの

データも併せて記した。

高流動コンクリートの管理供試体は、セグメントの製造と同様に脱型まで湿潤養生、その後屋外で気中養生を行ったものである。材齢28日の圧縮強度は平均 61.8 N/mm²(試験個数 69個、変動係数 7.0%)であり、設計基準強度である 45 N/mm²を十分満足していた。また、脱型強度は 15 N/mm²を目標としたが、材齢20時間で平均 24.5 N/mm²(試験個数 23個、変動係数 23%)となり、1日1サイクルの製造が可能であることが確認できた。なお、蒸気養生を行ってもこの配合では1日2サイクルの実現は困難であることから、製造工程が効率的に行える湿潤養生を採用した。

乾燥収縮ひずみは、コンクリート表面のひび割れやセグメントの寸法許容差(幅、弧長に対して±1.0mm)の確保に影響すると考えられるが、今回配合の高流動コンクリートの乾燥収縮ひずみ(565 μ)は、一般的な乾燥収縮ひずみ 500 ~ 1000 μ程度(「コンクリート標準示方書[施工編]、土木学会」より引用)の小さい側の値であり、有害な表面ひび割れの発生はないものと思われる。また、乾燥収縮量は鉄筋による拘束のため両端部の限定された範囲となり、寸法許容差に対して十分小さいことが推定される。以上のことから、高流動コンクリートの乾燥収縮ひずみは、従来型セグメント用コンクリートに比べやや大きい値を示しているが、実用的には特に問題ないと考えられる。

表-4 高流動コンクリートセグメントの品質評価項目

品質分類	評価項目	試験方法
セグメント背面の平滑度	①セグメント背面の不陸	レーザー変位計による測定
	②セグメント背面の摩擦係数	模型実験による摩擦係数の測定
セグメント背面の耐久性	①中性化深さ	促進中性化試験(日本建築学会の方法に準拠)
	②積算細孔容積	細孔径分布の測定(日本コンクリート工学協会の方法に準拠)
	③煮沸吸水率の測定	煮沸吸水試験(ASTM C 642)
材質の均一性	①粗骨材の分布	粗骨材面積率の測定
	②強度特性の分布	圧縮強度試験(JIS A 1108), 静弾性係数試験(土木学会基準(案))
	③継手金物周辺部の充填性	継手金物位置での切断面の観察

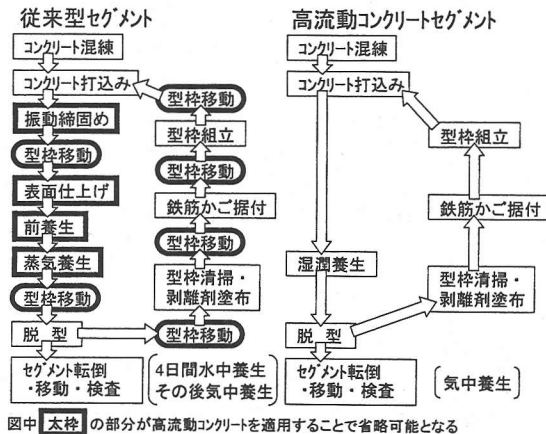


図-3 製造工程

(2) 高流動コンクリートセグメントの製造工程

高流動コンクリートセグメントの製造工程は図-3の比較に示すとおりで、従来型セグメントの製造における振動締め作業およびセグメント背面の表面仕上げ作業が省略できるとともに、型枠移動もほとんど必要なくなり、写真-4に示す定置状態での製造が可能となっている。

4. 高流動コンクリートセグメントの品質

筆者らは、高流動コンクリートセグメントの開発にあたり、既に参考文献4)においてセグメントの耐力および寸法精度については品質基準を満足していること、ならびに背面の平滑性、耐久性および均一性についても概略検討の段階では特に問題が認められないことを報告している。

しかしながら、実施現場への本格的な適用にあたり、施工中のトラブルを回避し長期的な洞道設備の信頼性を確保するため、セグメント背面の平滑性、

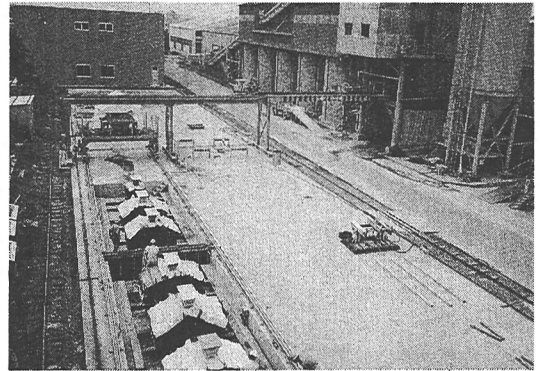


写真-4 製造ヤード

セグメント背面の耐久性および材質の均一性について、表-4に示すように複数の確認試験を組み合わせた詳細な分析と評価を行うこととした。なお、これらの品質については、従来型セグメントにおいても定量的に定められていないことから、新たに品質の評価項目およびその試験方法を選定して、高流動コンクリートセグメントの要求品質が従来型セグメントと比較し同等かそれ以上であることを基本とすることにした。

(1) セグメント背面の平滑性⁹⁾

シールドの掘進途中においてテールシールを交換した際の調査結果をみると、ワイヤブラシが摩耗し弾力性が極端に失われていたり、ワイヤブラシが裏込め注入材により固化し大部分が抜け落ちた例などが多く確認されている。

従来型セグメントでは、セグメント背面を金ごてで丹念に仕上げることににより、裏込め注入材の漏洩する原因ともなるテールシールの摩耗を極力少なくする配慮がなされている。

一方、本研究で開発した高流動コンクリートセグメントは、気泡あばたを除去するために考案した蓋型枠の構造から、セグメント背面には写真-5に示

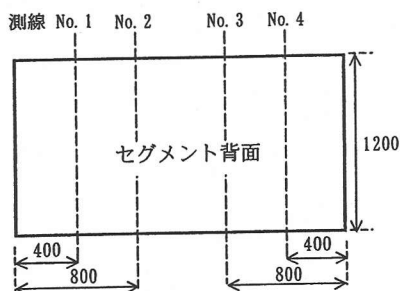
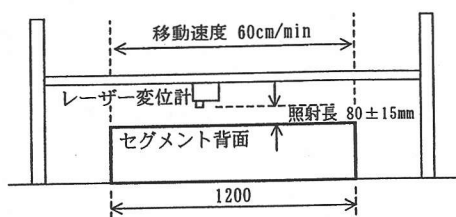


図-4 セグメント背面の不陸の測定状況

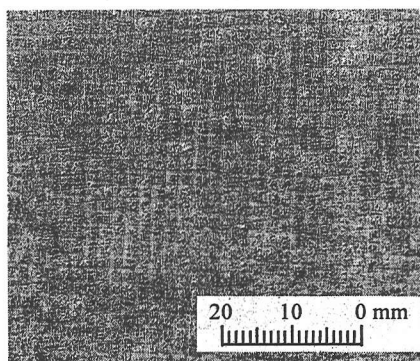


写真-5 セグメント背面の不陸の状況

ような織布の跡が縞模様(凹凸は0.3mm程度以下)となつて残るため、これがシールド機のテールシールに与える摩擦の影響が懸念された。しかし、現状ではセグメントの背面の平滑性がテールシールの摩擦にどの程度の影響を与えているかについては明確でなく、個々の現場の施工条件なども異なるために適切な評価を与えるに至っていない。そこで、レーザー変位計によるセグメント背面の不陸測定、ならびにシールド機のテールシールに対する摩擦のモデル実験を行い、高流動コンクリートセグメント背面の平滑性を評価することとした。

a) セグメント背面の不陸

セグメント背面の不陸の程度を定量的に把握するため、高流動コンクリートセグメントおよび従来型セグメントの供試体各1体について、レーザー変位計を用いて図-4に示すような4測線の測定を行った。なお、事前に滑らかな水平面を用いて測定治具

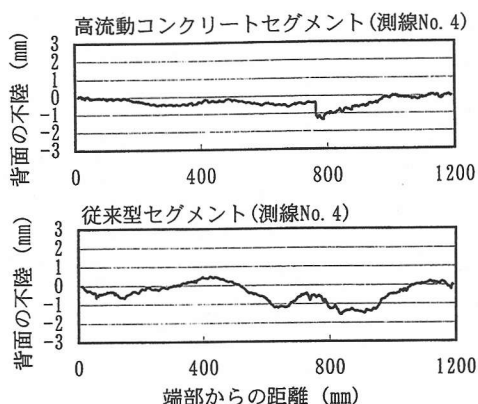


図-5 セグメント背面の不陸の測定例

表-5 セグメント背面の不陸の高低差

(単位: mm)

	測線 No. 1	測線 No. 2	測線 No. 3	測線 No. 4	平均
高流動コンクリートセグメント	2.8	2.2	2.2	1.6	2.2
従来型セグメント	4.8	3.0	2.0	2.2	3.0

の誤差を確認し、セグメント背面の実測値を補正した。

レーザー変位計による測定結果は図-5に示すとおりであり、高流動コンクリートセグメントおよび従来型セグメントとも、セグメント背面全体にわたる微小な不陸と波形状の比較的大きな不陸が認められた。

前者の微小な不陸は、レーザー変位計の測定精度とも関係しているが、高流動コンクリートセグメントと従来型セグメントとの間に明確な差異はなく、高流動コンクリートセグメントの背面の縞模様がテールシールの摩耗に与える影響はあまり大きくないものと推定された。

一方、波形状の不陸の高低差は表-5に示すように両者とも数mmのオーダーであるが、高流動コンクリートセグメントの方が従来型セグメントよりやや小さい値であった。このセグメント背面の波形状の精度は、高流動コンクリートセグメントでは蓋型枠の製作精度に起因しており、手作業で表面仕上げを行っている従来型セグメントに比べ、セグメント製造ごとのばらつきは小さいことが想定できる。今回試験体に用いた従来型セグメントの背面は、できるだけ丁寧に仕上げたものであり、大量生産における製造のばらつきを考慮すれば、実施工のセグメント背面の面精度はさらに低下することも予想される。

以上のことから、セグメント背面の面精度におい

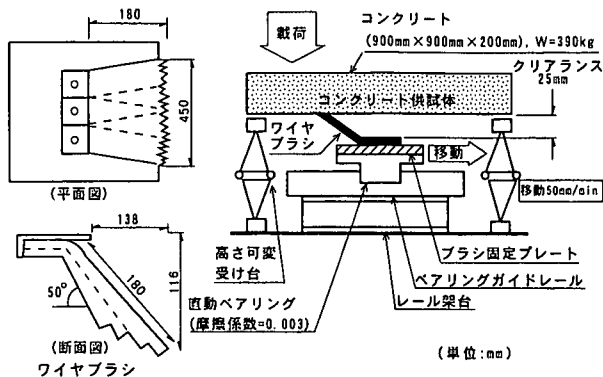


図-6 摩擦力の測定状況

表-6 摩擦力の測定結果

セグメントの種類	高流動コンクリートセグメント	従来型セグメント	セグメントの種類	高流動コンクリートセグメント
グリースの充てん	なし	あり	なし	あり
クリアランス (mm)	25	25	25	25
载荷重 (kN)	1.33	1.25	1.18	1.11
移動速度 (mm/min)	46	44	49	57
摩擦力〔ピーク〕(kN)	0.31	0.22	0.37	0.14
摩擦力〔安定時〕(kN)	0.30	0.20	0.30	0.13
静摩擦係数	0.23	0.17	0.31	0.13
動摩擦係数	0.23	0.16	0.25	0.12

ては、人的要因のない高流動コンクリートセグメントの方が優れていると考えられる。

b) セグメント背面の摩擦係数

セグメント背面の摩擦係数の測定は、セグメント背面とシールド機のテールシール部が同心円の曲面を成しそのクリアランスも一定であることから、セグメント背面とテールシール部の両方を平板に置き換えても、テールシールの移動に伴う摩擦の影響はほぼ同様であると考え、実際に現場で使用しているシールド機のテールシールを用いて図-6 に示すような方法で行った。

セグメントを模擬した供試体は長さ 900mm、幅 900mm、厚さ 200mm の平板とし、テールシールと接する面は、高流動コンクリートセグメントの背面と同様に有孔鋼板と織布を組み合わせ成形したもの、および従来型セグメントの背面と同様に金ごて仕上げをしたものの 2 種類を用いた。

実験方法は実際の施工を想定し、テールクリアランスを 25mm に保った状態で、シールド掘進速度に合わせ 50mm/min 程度でセグメントを移動させた際の摩擦力を計測するものである。実験ケースは、テールシールにグリースを充てんした場合（通常の施工条件）と充てんしない場合（グリースの補充が不完全な状態）の 2 ケースずつ合計 4 ケースである。セグメント背面の摩擦係数の測定条件および測定結果を表-6 に示す。なお、高流動コンクリートセグメントの背面を模擬した試験面の織布の跡は無数に存在していることから、製作上のばらつきを考慮する必要がないと考え試験体は 1 体とし、動摩擦係数はテールシールの移動を数回繰り返して安定した状態での最大値を示したものである。

通常の施工条件であるグリースを充てんした場合と比較すると、静摩擦係数および動摩擦係数はともに高流動コンクリートセグメントの方が従来型セグメントに比べ大きくなっていたが、その差は 0.04

程度とわずかであった。

一方、グリースを充てんしない場合には、逆に高流動コンクリートセグメントの摩擦係数が従来型セグメントのそれと比べてやや小さくなったが、これは高流動コンクリートセグメントの背面の凹凸がワイヤブラシとの接触面積を少なくしているためと考えられる。また、テールグリースの充てんの有無が、セグメント背面の摩擦係数の上昇に大きく影響しており、テールグリースの注入管理の重要性が再確認された。

以上の結果から、セグメント背面がシールド機のテールシールに与える摩擦の影響は、テールグリースの充てんの有無の方が大きく、高流動コンクリートセグメントと従来型セグメントの差異は比較的小さいものと考えられる。

(2) セグメント背面の耐久性

セグメント背面側の耐久性の評価を目的として、実物大（外径 3,600mm、厚さ 200mm、幅 1,200mm）の高流動コンクリートセグメントおよび従来型セグメントを各 3 ピースずつ製作し、①中性化抵抗性を早期に判断するための促進中性化試験、②コンクリートの耐久性に係わる微細な空隙量を求めるための細孔径分布の測定および③耐久性を左右するセグメントの水密性を評価するための煮沸吸水率の測定を行った。

a) 促進中性化試験

セグメントの促進中性化試験は、図-7 に示すようにコンクリートカッターを用いて、セグメントから厚さ 200mm × 幅 100mm × 長さ 400mm の供試体を採取し、日本建築学会の提案方法⁹⁾ に準拠して行った。すなわち、採取した供試体はセグメント背面と内面部分以外をエポキシ樹脂によりコーティングし、炭酸ガスを用いて中性化させる。所定の促進期間（1、4、8、13、26 週）に達した時点で長さ

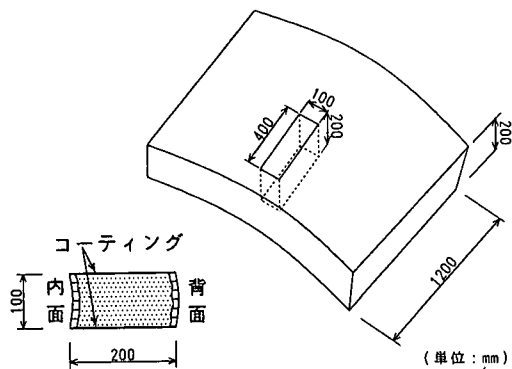


図-7 促進中性化試験の状況

表-7 中性化深さの測定結果

(単位: mm)

促進期間	4 週	8 週	13 週	26 週
測定位置	背面側 内面側	背面側 内面側	背面側 内面側	背面側 内面側
高流動コンクリート セグメント	0	0	1.0	0.8
従来型 セグメント	0	0	3.5	4.8

注) 測定結果は 3 個の供試体の平均値

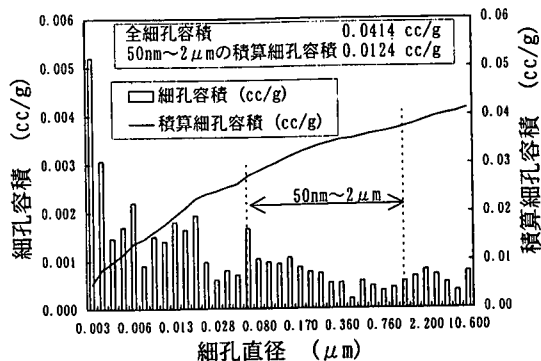
方向と直角な面で割裂し、背面および内面の割裂断面に試薬としてフェノールフタレインエタノール溶液を噴霧させ、コンクリート表面から赤着色部までの距離を 1 面につき 6 等分した 5 箇所測定し、その平均値を中性化深さとするものである。

促進中性化試験の結果は表-7 に示すとおりであり、特に促進期間 26 週における比較から以下のことが確認された。

- ①高流動コンクリートの中性化深さは、従来型セグメントに比して内面側、背面側とも小さく、特に耐久性の検証が必要と考えた高流動コンクリートセグメントの背面側は、従来型セグメントの背面側に比べ 50 % 程度の中性化深さであることから、高流動コンクリートセグメントは高い中性化抵抗性を保持しているものと評価できる。
- ②高流動コンクリートセグメントでは、背面側の中性化深さは内面側の 2 倍以上であり、内面側の方が中性化抵抗性に優れている。
- ③従来型セグメントでは、背面側の中性化深さは金こて仕上げの効果により内面側に比べ 60 % 程度と小さく、背面側の方が中性化抵抗性に優れている。

b) 細孔径分布の測定

細孔径分布の測定は、セグメント 1 体につき 1 供試体 (直径 100mm × 高さ 200mm) をコアリングし、



(高流動コンクリートセグメント: 背面から 10mm)

図-8 細孔径分布の測定結果の例

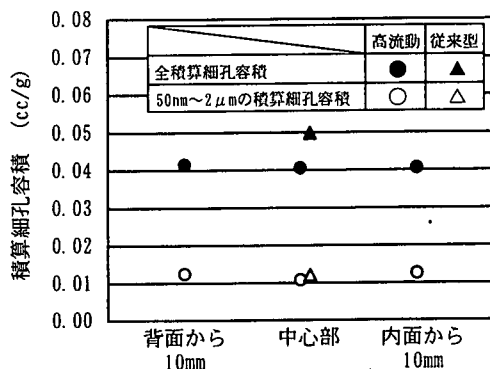


図-9 積算細孔容積

日本コンクリート工学協会の提案方法⁷⁾に準拠して実施した。すなわち、各供試体ごとに背面から 10mm、内面から 10mm および中心部 10mm の 3 箇所において、1 辺 5mm 程度の立方体に切断し、この試料を用いて、水銀圧入ポロシメーターにより細孔径 3nm ~ 10.6 μm に相当する細孔径分布を求めるものである。なお、各水銀圧力に対応する細孔径は、空隙径を円筒状に近似した以下の Washburn 式 (1) を用いて算出し、細孔径ごとの容積は各圧力に対する水銀圧入量から求めた。

$$2r = -4\gamma \cos \theta / P \quad (1)$$

ここに、

r : 円筒状細孔半径

γ : 水銀の表面張力 (484dyn/cm)

θ : 水銀と試料との接触角

P : 圧力

である。

図-8 で示される細孔径分布から、積算細孔容積 (細孔径ごとの容積の合計) として定量化した結果を図-9 に示す。図-9 は 3 供試体の平均値を図示したものであり、中心部における測定範囲内の全積算細

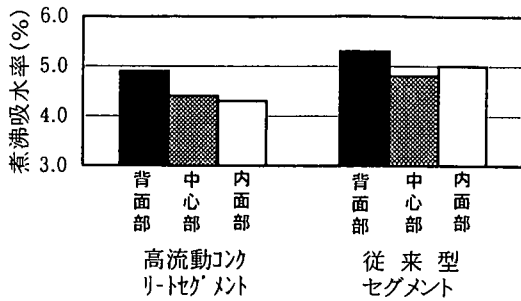


図-10 煮沸吸水率の測定結果

孔容積は、高流動コンクリートセグメントの方が従来型セグメントより小さく、高流動コンクリートセグメントは比較的密実であると考えられる。

一方、塩分浸透に対する抵抗性と密接な関係があるといわれている $50\text{nm} \sim 2\mu\text{m}$ の積算細孔容積⁹⁾は、高流動コンクリートセグメントにおいては中央部が最も小さく背面側と内面側は同程度であり、また従来型セグメントの中央部(十分な締固めによって、内面側および背面側との差は小さいものの最も高品質と考えられる)は高流動コンクリートセグメントの背面側および内面側と同程度であった。このことから、高流動コンクリートセグメントの背面側の塩分浸透に対する抵抗性は、同セグメントの内面側および従来型セグメントの背面側と比較して同程度と評価できる。

c) 煮沸吸水率の測定

硬化コンクリート中の空隙を評価するため、実物大セグメントからコア供試体(直径 100mm × 高さ 200mm)を採取し、それぞれセグメント背面部、中心部および内面部に 3 等分しその煮沸吸水率を求めた。コア供試体の採取本数は、従来型セグメントが 1 ピースから 3 本、高流動コンクリートセグメントが 3 ピースから 9 本である。

煮沸吸水率は、乾燥重量(A)と 5 時間煮沸させて自然冷却した後に表面の水分を拭き取って測定した煮沸吸水重量(B)から、 $(B - A) / A \times 100 (\%)$ として算出し平均したものである。

煮沸吸水率の測定結果は、図-10 に示すとおりである。従来型セグメントの 1 ピースから採取した 3 試料の測定結果は、背面部が $5.3 \pm 0.1 \%$ 、中心部が $4.8 \pm 0.2 \%$ 、内面部が $5.0 \pm 0.2 \%$ の範囲に入っており、煮沸吸水率の測定誤差はたかだか $\pm 0.1 \sim 0.2 \%$ 程度と推測される。一方、高流動コンクリートセグメントの 9 試料の平均値は背面部が 4.9% 、中心部が 4.4% 、内面部が 4.3% であることから、高流動コンクリートセグメントは従来型セグメントに比べ背面部、中心部および内面部とも煮沸吸水率

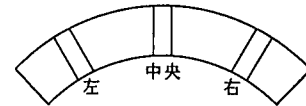


図-11 試料の採取位置

表-8 粗骨材面積率の測定結果

項目	粗骨材面積率 (%)							
試料種類	セグメント						管理供試体	
	左		中央		右		上	下
採取位置	背面	内面	背面	内面	背面	内面		
平均値	26	28	23	25	25	29	26	28
標準偏差	3.8	2.8	3.2	3.6	2.2	3.2	3.2	2.8

が小さい傾向にあり、水密性が高いことを示している。

従来型セグメントの煮沸吸水率は、中心部が最も小さく背面部および内面部はほぼ同程度の値となっている。一方、高流動コンクリートセグメントでは、背面部が中心部や内面部に比べ大きな値を示しており、蓋型枠の適用により気泡あばたの発生は抑えられたが、蓋型枠近傍は他の部分より巻き込み空気量が若干多く、その影響が煮沸吸水率の差に表れたものと考えられる。

(3) 材質の均一性

高流動コンクリートセグメントの材質の均一性を評価するため、実物大セグメント(外径 3,600mm, 厚さ 200mm, 幅 1,200mm)を 6 ピース製作し、図-11 に示すように各ピースの両端部と中央部から直径 100mm, 長さ 200mm のコア供試体を採取し、粗骨材の分布状況および強度特性の分布状況を調べた。

a) 粗骨材の分布

硬化コンクリート中の粗骨材の分布は、コア供試体を 100mm × 200mm の矩形断面となるように切断した後、セグメントの背面側と内面側に 2 等分し、以下の方法により測定範囲中の粗骨材の割合を粗骨材面積率として求めた。測定個数は、採取位置ごとに各 6 個である。なお、参考として管理供試体(直径 100mm, 高さ 200mm)の上半分と下半分においても同様な測定を行った。

- ① コア供試体を切断した断面に 5mm 方眼のシートを貼り、粗骨材をトレースする。
- ② シートにトレースされた長径 10mm 以上の粗骨材の面積を合計して粗骨材面積(S_g)とする。
- ③ 測定範囲の面積(S_o)と粗骨材の面積(S_g)とから粗骨材面積率(R_g)を $R_g = S_g / S_o \times 100 (\%)$ として算出する。

測定結果は表-8 に示すとおりで、中央部の粗骨

表-9 圧縮強度および静弾性係数の測定結果

項 目	圧縮強度 (N/mm ²)			静弾性係数 (kN/mm ²)		
	左	中央	右	左	中央	右
採 取 位 置	左	中央	右	左	中央	右
平 均 値	67.8	66.5	66.5	38.1	37.4	36.1
標 準 偏 差	3.1	1.8	4.3	1.4	2.9	1.7
変 動 係 数	4.6 %	2.7 %	6.5 %	3.7 %	7.8 %	4.7 %

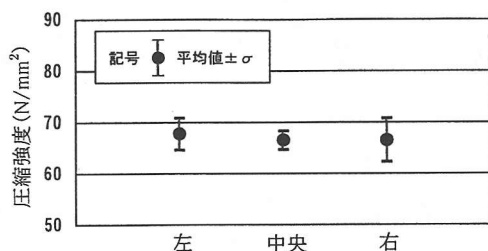


図-12 圧縮強度の分布

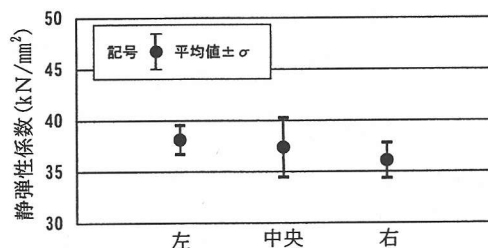


図-13 静弾性係数の分布

材面積率は両端部に比べやや低い傾向にあるがその差異は小さく、また、採取位置ごとの背面側と内面側における粗骨材面積率のばらつきは、管理供試体の上部と下部のばらつきと同程度であり、高流動コンクリートセグメントの粗骨材は均一性が十分に確保されていると評価できた。

b) 強度特性の分布

高流動コンクリートセグメントの材齢 28 日におけるコア供試体の圧縮強度および静弾性係数を求め、採取位置ごとにその分布を比較した。測定個数は、採取位置ごとに各 18 個である。

強度特性の測定結果を表-9 および図-12、図-13 に示す。圧縮強度および静弾性係数の採取位置ごとの平均値は、それぞれ 2 % および 5 % のばらつきの範囲内にありほとんど差がなかった。

また、採取位置ごとの変動係数は、圧縮強度では両端部に比べ中央部が小さく、静弾性係数では逆に両端部に比べ中央部が大きくなっており、採取位置による強度特性のばらつきに共通的な傾向は認められなかった。

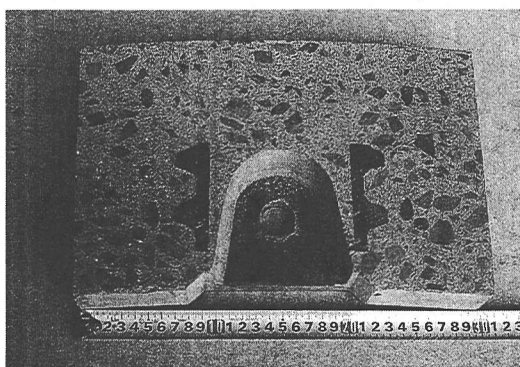


写真-6 継手金物周辺部の充てん状況

c) 継手金物周辺部の充てん性

ボルト継手構造における継手金物の定着部付近は、鉄筋が密に配置されているとともに、ボルトボックス部の型枠と継手金物との間是非常に狭くなっている。この継手金物周辺部においてコンクリートの充てんが不十分な場合には、施工時荷重などによりクラックが発生し継手機能の低下や継手部からの漏水の原因にもなりかねない。

そこで、継手金物周辺部の充てん状況を調査するため、継手金物位置での切断面を観察することとした。その結果は写真-6 に示すように、粗骨材は継手金物周辺部でもほぼ均一に分布しており、ボルトボックス部の型枠と継手金物との間の狭隘な箇所も完全に充てんされていることが確認された。

5. 実施工現場への適用に伴う品質の評価

高流動コンクリートセグメントは、各種試験結果から従来型セグメントと比較し同等かそれ以上の品質を保持しているものと判断されたため、横浜市本牧埠頭付近に建設した地中送電線用シールドトンネル(セグメントの外径 3,600mm、厚さ 200mm、幅 1,200mm)の 463 リングを対象に本格的な適用を図った。

高流動コンクリートセグメントの製造期間は、1997 年 3 月～1997 年 12 月のほぼ 1 年間を通じたものであり、この製造実績に基づいて量産時の品質の変動および管理基準値について分析を行った。なお、高流動コンクリートの現場配合は、練混ぜ時のコンクリート温度や細骨材の粗粒率の変動に対して、混和剤の添加率を調整することにより修正を行っている。また、今回の実施工現場への適用にあたって

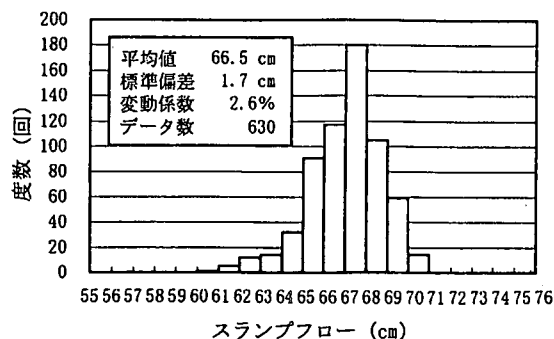


図-14 スランプフローの分布

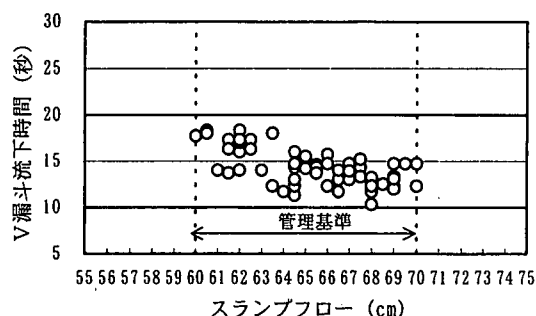


図-15 スランプフローとV漏斗流下時間との関係

は、初めての量産製造となることから養生方法を段階的に見直していくこととし、脱型後(脱型までは湿潤養生)は従来型セグメントと同様4日間を水中養生とし、その後屋外で気中養生したものである。

(1) フレッシュコンクリートの品質

高流動コンクリートのスランプフローの管理結果を図-14に示す。スランプフローの変動状況は、管理基準値の60～70cmの範囲内でほぼ正規分布を示しており、品質管理は適正に行われたものと判断できる。また、製造されたセグメントはすべてが端部まで十分に充てんされており、自己充てん性の実験から設定したスランプフローの管理基準値が、年間を通じた実物大セグメントの大量生産に対しても妥当であったことが確認された。このことから、今後同規模で行われる高流動コンクリートセグメントの製造に対しても、本研究で設定したスランプフローの管理基準値が適用できるものと考えられる。

粉体系の高流動コンクリートの配合設計にあたっては、流動性と材料分離抵抗性の組み合わせにより間接的に自己充てん性を照査することも行われおり、一般に流動性はスランプフローで評価し、材料分離抵抗性は漏斗流下試験の流下時間またはスランプフ

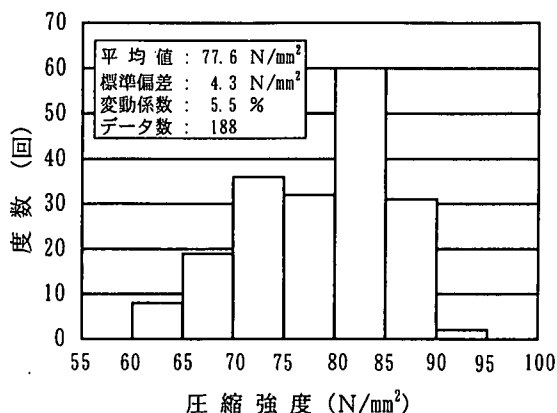


図-16 高流動コンクリートの圧縮強度の分布

ロー試験の500mmフロー到達時間で評価することが多い。そこで、フレッシュコンクリートの品質管理として、スランプフロー以外に試験的にV漏斗流下時間も測定した。その結果として得られたスランプフローとV漏斗流下時間との関係は図-15に示すとおりであり、スランプフローの変動幅60～70cmに対し、V漏斗流下時間は10～20秒の範囲に全数が入っており、土木学会「高流動コンクリート施工指針」⁹⁾における自己充てん性のランク1(今回、高流動コンクリートを適用したセグメントの鉄筋の最小あき35mm、鉄筋量約170kg/m³)の目標値とほぼ合致していた。このことから、材料分離抵抗性も適正な範囲にあったものと評価でき、同規模の高流動コンクリートセグメントの製造におけるフレッシュコンクリートの品質管理は、今回配合の高流動コンクリートではスランプフローのみで十分対応が可能であると判断できる。

(2) 硬化コンクリートの品質

図-16は、高流動コンクリートセグメントと同一な養生条件で製作した管理供試体の材齢28日における圧縮強度の分布を示したものである。水中養生の採用に伴い気中養生のみの場合に比べ、圧縮強度の平均値は61.8 N/mm²から77.6 N/mm²と約25%増加し、変動係数も年間を通じた製造にもかかわらず7.0%から5.5%に向上していた。この結果は、当初設定した設計基準強度(45 N/mm²)を大きく上回ることから、今後粉体系の高流動コンクリートセグメントの製造時に水中養生を採用した場合には、さらに設計上の効率化として設計基準強度の見直しを行うことにより、セグメント厚さの縮小化も可能と考えられる。

6. まとめ

本研究で開発した製造方法による高流動コンクリートセグメントについて、各種試験に基づく品質の評価ならびに施工現場へのその適用実績などから得られた知見を列挙すると以下のとおりである。

(1) セグメント背面の平滑性

①セグメント背面の不陸の状況をレーザー変位計によって測定した結果から、面全体にわたる大きな凹凸は、手作業で表面仕上げを行っている従来型セグメントに比べ、蓋型枠を用いた高流動コンクリートセグメントの方が小さく面精度に優れていることがわかった。

②高流動コンクリートセグメントの背面側には、蓋型枠の採用により織布の縞模様が残るが、高流動コンクリートセグメントの背面側がシールド機のテールシールに与える摩擦の影響は、従来型セグメントと比べて大きな差異はないものと考えられる。

(2) セグメント背面の耐久性

①高流動コンクリートセグメントの背面側は、従来型セグメントの背面側に比べて中性化深さが50%程度と小さく、従来型セグメントよりは高い中性化抵抗性を保持している。

②細孔径分布の測定結果から、高流動コンクリートセグメントの背面側と内面側とでは50nm～2μmの積算細孔容積に有意な差はなく、背面側の塩分浸透に対する抵抗性は内面側と同程度であることがわかった。

③煮沸吸水率の測定結果から、高流動コンクリートセグメントの背面部は、内面部や中心部に比べやや水密性に劣るが、従来型セグメントの背面部と比較した場合には同程度の水密性が確保されていることがわかった。

(3) 材質の均一性

①高流動コンクリートセグメントから採取したコア供試体の粗骨材面積率の測定結果から、背面側と内面側の粗骨材面積率のばらつきは管理供試体の上部と下部のばらつきと同程度であり、粗骨材の分布はセグメント全体にほぼ均一であることがわかった。

②高流動コンクリートセグメントから採取したコア供試体の強度特性(圧縮強度および静弾性係数)を測定した結果、採取位置による分布の差は認められず、強度特性はセグメント全体に均一性が確保されていることがわかった。

③継手金物位置での切断面の観察から、粗骨材は継手金物周辺部でもほぼ均一に分布し、ボルトボッ

クス部の型枠と継手金物との間の狭隙な箇所も完全に充てんされていることが確認された。

(4) 施工現場への適用に伴う品質の評価

- ①高流動コンクリートセグメントの製造におけるフレッシュコンクリートの品質管理は、今回配合の高流動コンクリートではスランプフローのみで十分に対応が可能であり、その管理基準値は65±5cmが適正である。
- ②粉体系の高流動コンクリートセグメントに水中養生を採用した場合には、設計上の効率化として設計基準強度の見直しを行うことにより、セグメント厚さの縮小化も可能と考えられる。

7. あとがき

本論文は、高流動コンクリートセグメントの品質が従来型セグメントと比較し同等かそれ以上であることを検証したものであるが、その製造方法はただ単にコンクリートの材料を置き換えるだけでなく、コンクリートの打込み、養生、型枠の移動ならびに型枠構造の簡素化など、製造工程全体を通して改善したものであり、これにより地中送電用洞道においてはセグメントの10%程度のコストダウンが可能となった。

高流動コンクリートセグメントは、従来のセグメント工場のような特別な設備(テーブルパイプレイアウト設備や型枠移動設備など)が不要であることから製造ヤードを縮小することができる。また、施工現場への本格的な適用の結果から適切な品質管理体制を整えれば、長期間の量産製造においても良質の製品が安定的に供給できることが確認された。このことから、品質管理体制や利用可能な設備の活用など条件を整えば、運搬費の低減を目的として建設現場近傍でセグメント製造も考えられ、さらに一層のコストダウンが期待できるものと思われる。

なお、本研究で述べた高流動コンクリートセグメントには、普通ポルトランドセメントと標準的な高性能AE減水剤を用いているため、型枠の回転数は1日1回が限界となっているが、シールド掘進工程との関係で1日2回の型枠の回転数が必要となる場合には、早強セメントの適用や適切な混和剤の選定などが考えられる。

参考文献

- 1) 花見和則, 松裏寛, 岩藤正彦, 秋田谷聡: 高流動コンクリートセグメントの開発(1), 土木学会第53回年次学術講演会, VI-25, pp.50-51, 1998.10.
- 2) 矢郷隆浩, 宇野洋志城, 花見和則, 松裏寛: 高流動コ

- ンクリートセグメントの開発(2), 土木学会第 53 回
年次学術講演会, VI -26, pp.52-53, 1998.10.
- 3) 岡村甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンスコ
ンクリート, 技報堂出版, pp.35-47, 1993.
- 4) 川村祥二, 松裏寛: 高流動コンクリートを用いたシー
ルドセグメントの開発, 電力土木, pp.29-33, 1997.11.
- 5) 土木学会: トンネル標準示方書[シールド工法編]・同
解説, pp.122, 1996.
- 6) 日本建築学会: 高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工
指針(案)・同解説, pp.179-184, 1991.
- 7) 日本コンクリート工学協会: 超流動コンクリート研究
委員会報告書(Ⅱ), pp.216-221, 1994.5.
- 8) 藤井学: 高流動コンクリートの耐久性能に関する研究,
平成 6 年度科学研究費補助金(一般研究(B))研究成果
報告書, pp.19-31, 1996.3.
- 9) 土木学会: 高流動コンクリート施工指針, pp.39-41,
1998.
- (1999. 8. 23受付)

QUALITY OF SEGMENTS MADE OF HIGH FLOWING CONCRETE FOR SHIELD TUNNEL

Kazunori HANAMI, Hiroshi MATSUURA, Yoshiki UNO and Atsushi KOIZUMI

Manufactures of the conventional reinforced concrete segment involved the application of heavy vibrating compaction to concrete with an extremely stiff consistency. Focusing on one of distinctive features of high flowing concrete, that is self-compacting into the steel form, the authors put into practice a new segment manufacturing system aimed at cost reduction through rationalization of manufacturing process by such means as omission of vibrating compaction and of surface finishing work on the back of the segment. This paper shows that the segments made of high flowing concrete proved to have an engineering performance equal to or better than the conventional one in various tests. It also describes the quality of this new type of segment under the condition of mass production.