

超高強度 RC セグメントの開発ー耐火性能を有する大深度、大口径シールドトンネル用セグメントー

Development of Ultra-High-Strength-RC Segment

三戸 憲二*

Kenji Mito

山本 泰介*

Taisuke Yamamoto

松永 健**

Ken Matsunaga

椎名 貴快*

Takayoshi Shiina

村上 初央**

Hajime Murakami

要 約

本技術は、大深度地下使用法が適用される道路や鉄道などの大口径シールドトンネル工事において、大規模な建物荷重等が作用する条件下では適用が困難であった従来の RC セグメントに代わり、超高強度コンクリートを用いることで強度不足を解消し、コストの縮減と工事の合理化を実現するものである。コンクリート中に耐火用の pp 繊維とはく落防止用の pp 繊維の混入が要求される条件に対し、コンクリートにシリカフュームを混入することにより、低水セメント比で流動性、製作性、高強度を確保している。西松、戸田、日本コンクリート工業の3社による共同開発であり、2025年7月に、(一財)先端建設技術センターの技術審査証明を取得した。本稿では、各種試験により本技術の品質を検証した結果を報告する。

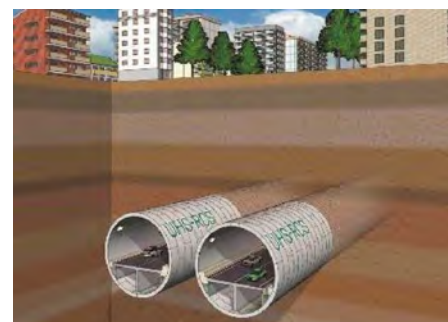
目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 技術の概要
- § 3. 製造と強度試験
- § 4. 耐火性能試験
- § 5. 耐久性能試験
- § 6. 構造性能試験（軸力を導入した継手曲げ試験）
- § 7. おわりに

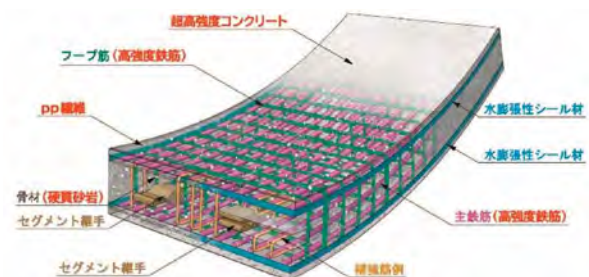
§ 1. はじめに

「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」（以降、大深度法と呼ぶ）が適用される道路などのシールド工事では、①商業地域では高層ビルを想定した大規模な建物荷重を考慮する必要があること、②併設トンネルとなる場合には近接施工の影響を考慮する必要があること、③道路トンネルでは耐火性を考慮する必要があることから、従来の RC セグメントでは構造が成立しない場合が多く、このような場合には高価な合成セグメントが適用されており、工事費が増加する大きな要因となっている。

そこで、大深度法が適用されるようなシールド工事において（図ー1 参照）、コストの縮減と工事の合理化を図る目的で、合成セグメントに比べ安価な超高強度コンクリートによる RC セグメント（図ー2 参照）の開発を行った。



図ー1 大規模な建物荷重が作用する大深度地下のシールドトンネル概念図



図ー2 超高強度 RC セグメント概要図

* 技術研究所

** 土木設計部

§ 2. 技術の概要

2-1 特徴

本技術は、一般的に用いられている RC セグメントと同様な形状寸法をもつセグメントである。本セグメントは、ポリプロピレン繊維（以降、pp 繊維と呼ぶ）とシリカフューム（以降、SF と呼ぶ）を配合した超高強度コンクリートを製造する技術と、そのコンクリートを用いた超高強度 RC セグメントを製作する技術の両方が用いられて製造される。

従来の RC セグメントのコンクリート設計基準強度は $42 \sim 60 \text{ N/mm}^2$ の範囲であるが、本セグメントのコンクリート強度は従来を超える強度を対象としている。本コンクリートは、以下の特徴を有している。

- ① 耐火およびはく落防止を目的として、コンクリートに耐火用の pp 繊維（以降、pp1 と呼ぶ）とはく落防止用の pp 繊維（以降、pp2 と呼ぶ）とを混入しているため、耐火とはく落防止が要求される道路トンネルおよびはく落防止が要求される鉄道トンネルへの適用に優位性がある。また、道路や鉄道以外の用途についても、コンクリートに高強度が求められる場合には、従来技術に比べ適用性に優れる。
- ② 従来 RC セグメントのコンクリートの設計基準強度を超える超高強度 $80 \sim 120 \text{ N/mm}^2$ を対象としている。
- ③ 通常と同様な方法でセグメントを製作するために、コンクリートの流動性と早期脱型強度を確保できる。
- ④ ①～③を同時に満足させるため、小さい水セメント比で流動性を確保できるように、SF を配合したコンクリートとしている。

2-2 経済性

シールド工法による道路トンネル（セグメント外径 $\phi 13.00 \text{ m}$ 、幅 $1.00 \sim 1.80 \text{ m}$ ）を対象に実施した試設計の結果に基づき、従来技術との経済比較を行った。試設計は、①大深度法の適用、②商業地域での大規模建物荷重、③併設トンネルによる近接施工、④道路トンネル（RABT 曲線による耐火性能を想定）への適用、を想定した検討条件にて行った。

試算結果から、本技術を適用した RC セグメントは、合成セグメントと同等の厚さで、通常の RC セグメントと同様な方法で製作できるため、製作費は合成セグメントの 60% 程度まで縮減できる。

2-3 施工性

超高強度 RC セグメントを用いたシールドトンネルの施工は、従来の RC セグメントと同様であり、特殊な組立方法や技術を必要としない。一方、従来の RC セグメントに比べてセグメントの厚さを薄くできるため、製造時や運搬時のセグメントの重量を低減でき、セグメントの幅を

表一 使用材料

材料	記号	銘柄・産地・密度
水	W	上水道水
セメント	C	シリカフュームプレミックスセメント(SFPC) 密度 3.04 g/cm^3
細骨材	S	砕砂(三重県鈴鹿市産)、表乾密度 2.65 g/cm^3
粗骨材	G	砕石 2005(三重県鈴鹿市産)、表乾密度 2.67 g/cm^3
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤 マスターグレニウム 8000S 密度 1.07 g/cm^3
	AE	AE 剤 マスターエア 404、密度 1.02 g/cm^3
混和材	EX	膨張材 30 型 太平洋 N-EX、密度 3.19 g/cm^3
繊維	PP1	ポリプロピレン繊維 PZ17dtx 繊維長 20 mm 密度 0.91 g/cm^3
	PP2	ポリプロピレン繊維 ポリスロン HS4870 繊維長 48 mm 、密度 0.91 g/cm^3

拡大したり、リング分割数を減らしたりすることが可能になる。これによって、セグメントの運搬作業が軽減され、セグメントの組立回数も減らすことができることから、シールド掘進の進捗が向上し、工期の短縮が期待できる。

本セグメントの継手面の止水性は、従来の RC セグメントと同様に継手面のシール材によって確保されるため、従来の RC セグメントと同等である。本セグメント本体の水密性および耐久性は、本セグメントのコンクリートが従来の RC セグメントのコンクリートに比べて、水セメント比が小さく密実であるため、同等以上の性能を確保できる。

§ 3. 製造と強度試験¹⁾

超高強度 RC セグメントを開発するにあたって、コンクリートに pp1、pp2 および SF を配合した場合に、コンクリートの圧縮強度が $80 \sim 120 \text{ N/mm}^2$ となるようなコンクリートが製造できるかを検討した。

3-1 超高強度コンクリートの配合検討

本試験は、超高強度コンクリートが所定の圧縮強度を確保できるか、圧縮強度試験により確認することを目的とした。表一はコンクリートの使用材料、表二は試験を実施した配合の代表例を示したものである。SF は小さい水結合材比（以降、W/P と呼ぶ）で流動性を確保し、所定の圧縮強度を確保するために使用した。 $80 \sim 120 \text{ N/mm}^2$ 相当の配合として、SF をプレミックスしたセメント（略称：SFPC²⁾）使用の W/P = 30.7～15.0%，SF を同時添加した W/P = 25.0% に設定した。骨材は、トンネル内の火災に対して爆裂を生じにくく、高強度を確保できる砂岩系を使用する方針とした。

セグメントは 1 サイクル/日の製作を前提としたため、21 時間での脱型強度を 15 N/mm^2 以上とする必要があった。しかし、SF を使用する本コンクリートは試験練りの結果、若材齢では強度が発現しにくい傾向がみられたことから、若材齢の強度を確保するため、強度発現型の

表ー2 超高強度コンクリートの代表配合例

SF 混和方式		粗骨材最大寸法	スランブ		空気量	W/P※ ¹	細骨材率	
プレミックス		20 mm	21±1.5 cm		2.0±1.5 %	25.0 %	51.5 %	
単位量 (kg/m ³)							単位量 (vol%)	
W	C※ ¹	SF	S	G	EX/DF※ ²	SP※ ²	pp1	pp2
170	680	C に含む	787	748	30/10	10.88	0.2, 0.3	0.3

※1) 結合材量 (=C+SF), C: 中熱セメントにシリカフェーム (SF) を 13% プレミックスしたセメント

※2) EX: 膨張材, DF: 消泡剤, SP: 高性能減水剤

膨張材を使用することにした。また、pp 繊維の混入により大きなスランブロスを生じるため、あらかじめフレッシュコンクリートの性状を確認する試験を行い、ベース配合に pp 繊維を混入することによるスランブロスの影響を把握して配合を決定した。試験練りの結果、pp 繊維の混入により気泡が発生しやすくなり、コンクリートのスランブや空気量に影響を与えることになるため、その対策として消泡剤を使用した。

3-2 試験項目と試験方法

フレッシュコンクリートと硬化コンクリートの試験項目および試験方法を表ー3 に示す。

練り混ぜ量は 70 l で、1 バッチ当たり 35 l として練り混ぜた。練り混ぜは、まずモルタルを先行してベースコンクリートを作製した後、耐火用繊維 (pp1) およびはく落防止用繊維 (pp2) を投入して練り混ぜて、試験用のコンクリートを作製した。

ベースコンクリートで得られた混和剤の添加率で、1 バッチ目を練り混ぜ (繊維投入を含む)、フレッシュコンクリートの試験を行った。材料分離がなければ 2 バッチ目を 1 バッチ目と同一の混和剤の添加率で練り混ぜを行い、練り混ぜ終了後に、1 バッチ目のコンクリートをミキサ内に戻し、両者を混合して作製したフレッシュコンクリートの試験を行った。フレッシュコンクリートの性状が目標値を満足することを確認した後、強度試験の供試体を作製した。

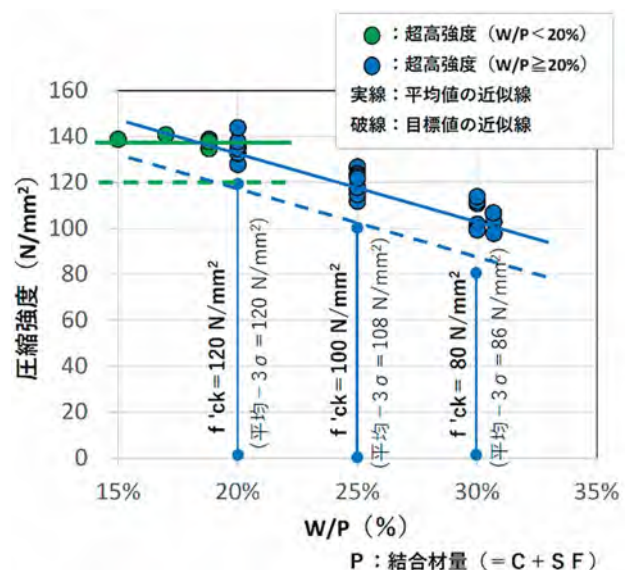
3-3 強度試験結果

図ー3 は W/P と圧縮強度との関係を、図ー4 は圧縮強度と割裂引張強度との関係を、図ー5 は圧縮強度と静弾性係数との関係を示したものである。いずれも、材齢 28 日の標準養生した供試体の試験結果である。図ー3 より、W/P が 20% 以上では W/P の低下にともない圧縮強度が直線的に増加する傾向が明らかであるのに対して、W/P が 20% 以下になると圧縮強度が横ばいになる傾向がみられた。

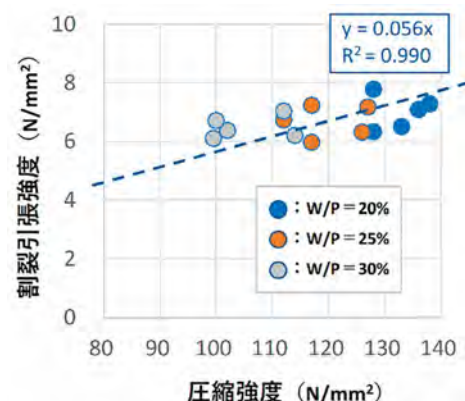
図ー3 より、標準養生の W/P と圧縮強度との関係から得られた青色の増加近似直線をもとに、強度発現のばらつきを考慮して、所定の圧縮強度 80, 100, 120 N/mm²

表ー3 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
フレッシュ コンクリート	スランブ
	空気量
	コンクリート温度
	単位容積質量
硬化 コンクリート	圧縮強度試験
	JISA1108 標準養生 鋼製型枠(中割れ式) 使用 材齢 28 日 各 3 本



図ー3 W/P と圧縮強度との関係



図ー4 圧縮強度と割裂引張強度との関係

が得られる $W/P=20\%$, 25% , 30% を設定した。圧縮試験結果を統計分析した結果、 $W/P=20\%$, 25% , 30% において、平均値 -3σ (σ : 標準偏差) でそれぞれ所定の強度 80, 100, 120 N/mm^2 を確保できることが確認された。

図-4、図-5 の近似直線はいずれも相関係数が 0.9 以上と強い相関を示している。割裂引張強度は圧縮強度の $1/18$ 程度と従来コンクリートの $1/10$ 程度よりも小さいことは、既往の高強度コンクリートの研究³⁾と同様の傾向を示している。

§ 4. 耐火性能試験⁴⁾

道路トンネルに用いられるコンクリートには、発災時に爆裂や飛散を抑え、中性化深さを鉄筋までのかぶり 10mm 以内に留め、コンクリートや鉄筋などの温度上昇を許容温度以下に抑えることが求められる。超高強度 RC セグメント¹⁾の耐火性能を確認するため、圧縮強度 100 N/mm^2 を有する超高強度コンクリートを用いて耐火試験を実施した。

4-1 耐火に対する要求性能

図-6 は耐火試験に用いた RABT60 加熱曲線である。また、表-4 は道路トンネルの耐火に対する要求性能を示したもので、コンクリート供試体が加熱によって、爆裂現象を生じないこと、中性化深さに対するかぶりが確保できること、コンクリートのかぶりおよび鉄筋が制限温度以下となる耐火代および鉄筋かぶりを有することを確認するものである。

4-2 軸力導入小型耐火試験

(1) 耐火供試体

供試体は 4 体であり、中央の 2 体を 200mm 幅、両端部の 2 体を 250mm 幅とし、高さは 300mm、長さは 1,200mm とした。このうち中央部の 2 体が軸力を導入した供試体である。図-7 は中央供試体の形状寸法と配筋、熱電対温度計の配置を示した図である。また、表-5 に示す耐火用の pp1 繊維の混入量は、事前に実施した軸力拘束耐火試験にもとづき、0.3vol% (長さ 20mm) とした。一方、はく落防止用の pp2 繊維の混入量は過去の実績より 0.3vol% とした。

コンクリートの設計基準強度は 100 N/mm^2 で、 W/P は 25%、シリカフェームをプレミックスしたセメントを使用し、骨材にはそれ自体が爆裂しない硬質砂岩を用いた。なお、耐火試験時のコンクリートの圧縮強度は、材齢 44 日で 138 N/mm^2 であった。コンクリートの含水率測定結果は 2.2% であった。

(2) 耐火試験方法

図-8 は耐火試験方法を示したもので、まず、水平炉に供試体を設置し、写真-1 に示すように、加熱開始前に中央の 2 体に PC 鋼棒により軸力を導入した。軸力導入

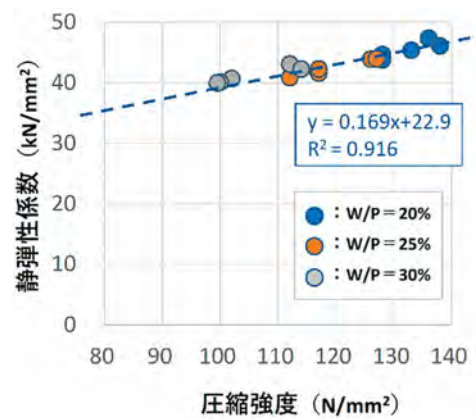


図-5 圧縮強度と静弾性係数との関係

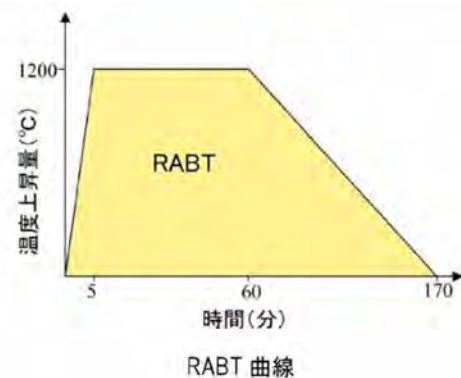


図-6 RABT60 加熱曲線

表-4 道路トンネルとしての所定の耐火性能

耐火性能 1	耐力に影響を与えるような爆裂を生じないこと
耐火性能 2	中性化深さが鉄筋までのかぶり 10mm を確保すること
耐火性能 3	耐火代以深のコンクリート温度が 350℃以下であること
耐火性能 4	鉄筋の温度が 300℃以下であること

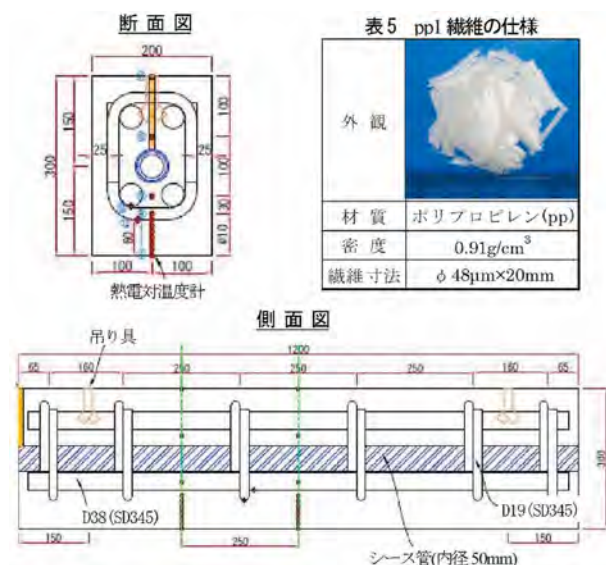


図-7 中央供試体の配筋と熱電対温度計の配置

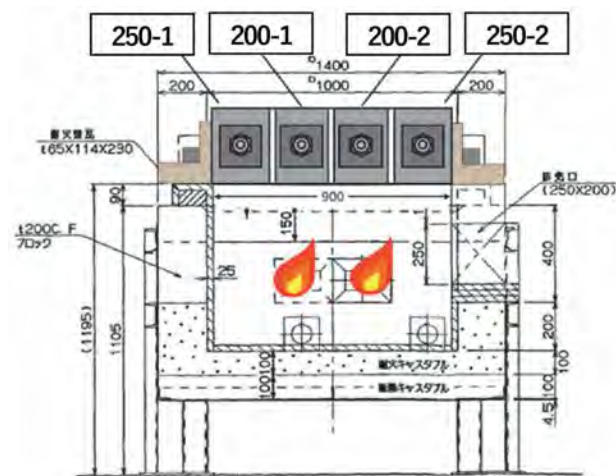


図-8 小型耐火試験方法

による圧縮応力度は、ジャッキ装備能力よりコンクリートの許容応力度である 37N/mm^2 ($\approx 100 / 2.8 + 1$) の76%に相当する 28.3N/mm^2 とした。供試体は4体同時に加熱し、各供試体の間には断熱材を配置している。

(3) 耐火試験結果

軸力を導入した供試体の耐火試験の結果を以下に示す。

① 温度測定結果

図-9～図-10は、コンクリートおよび鉄筋の温度の測定結果を示したものである。RABT60による加熱曲線が、炉内で再現されていることは確認済みである。

コンクリートの温度は、当初想定した60mmでは350℃以下の要求性能を満足せず、65mmの耐火代で要求性能を満足することが確認された。一方、鉄筋の温度は、当初設定したかぶり60mmの配筋筋の温度が229℃、かぶり75mmでのコンクリート温度が290℃と、いずれも鉄筋の許容温度300℃以下であったことから、かぶり75mmの配筋筋が要求性能を満足することが確認された。

② コンクリート加熱面の状況の観察結果

軸力を導入した供試体は、いずれも写真-2に示すように、爆裂はまったくなく平滑な状態であった。

③ 中性化深さの測定結果

耐火試験後の中性化深さは、表-6に示すように、中性化深さ計測最大値が19.1mmであり、許容値65mm以内であった。

④ 耐火試験結果にもとづく耐火性能の確認

超高強度コンクリートの軸力導入耐火試験により、表-6に示す道路トンネルとしての要求性能を満足することが確認された。なお、実物大の供試体は小型供試体に比べて熱容量が大きく、温度上昇が抑制されるため、小型供試体による耐火試験は安全側の結果になる⁵⁾。

(4) 耐火性能の評価

軸力を導入した耐火試験の結果、超高強度コンクリートはpp1繊維を0.3vol%混入することで、道路トンネルの耐火に対する要求性能1～4を満足し、従来コンクリートと同等の耐火性能を有することが確認された。



写真-1 軸力導入の状況

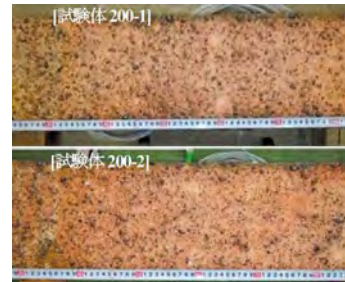


写真-2 耐火試験後の加熱面の状況

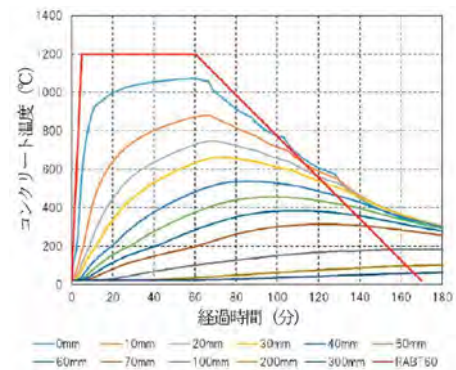


図-9 コンクリートの温度測定結果

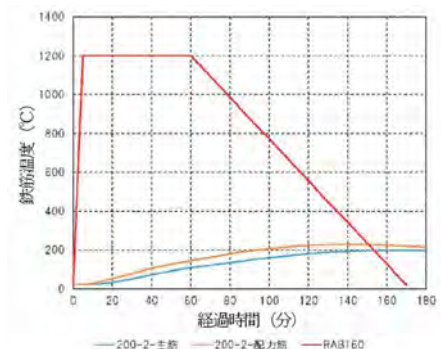


図-10 鉄筋の温度測定結果

表-6 小型供試体による耐火性能試験結果一覧

	耐火性能	試験結果	判定
1. 爆裂の状況	耐力に影響を与えるような爆裂を生じないこと ■ 数mmのはく離は問題なし	爆裂なし	○
2. 加熱面の中性化深さ	中性化深さが鉄筋までのかぶり10mmを確保 ■ $75 - 10 = 65\text{mm}$ 以下	最大19.1mm $\leq$ 65mm	○
3. コンクリートの受熱温度	コンクリート (350℃以下)	最高349℃ $\leq$ 350℃	○
4. 鉄筋の受熱温度	鉄筋 (300℃以下)	最高290℃ $\leq$ 300℃	○

§ 5. 耐久性能試験⁶⁾

超強度コンクリートの耐久性を確認するために実施した耐久性試験、およびその結果について述べる。

5-1 水セメント比による評価

既往の多数の研究において、コンクリートの耐久性に与える影響として種々の因子があげられているが、もっとも支配的になるものは水セメント比 W/C であることが明らかにされており、W/C が小さいほど耐久性が高いことが知られている。これは細孔分布が小さくなることが主要因である。

道路トンネルに用いられる従来の RC セグメントは、一般的に設計基準強度が $48 \sim 60 \text{ N/mm}^2$ 、W/C が $35 \sim 40\%$ である。これに対して、シリカフェーム混入の超強度 RC セグメントは、設計基準強度が $80 \sim 120 \text{ N/mm}^2$ 、W/P が $15 \sim 30\%$ である。

RC セグメントの耐久性にかかわる評価項目は、①中性化、②透水係数、③塩化物の浸透に対する抵抗性、④ひび割れ特性（自己収縮および乾燥収縮）、⑤クリープ変形による応力度の増加の影響（終局クリープ係数）などがあげられるが、超強度コンクリートは W/P が従来コンクリートの W/C よりも小さいため、これらの耐久性能が優れていると考えられる。超強度コンクリート ($80 \text{ N/mm}^2, 100 \text{ N/mm}^2$) と従来コンクリート (60 N/mm^2) について①～⑤の耐久性能試験を実施し、以下に示すように、超強度コンクリートの優位性を確認した。

5-2 中性化に対する評価

超強度コンクリート (100 N/mm^2) と従来コンクリートについて、中性化試験を実施した結果は図-11 に示すとおりである。超強度コンクリートは、促進期間の最終週である 26 週に至るまで中性化がまったく進行せず、従来コンクリートに比べて中性化に対する耐久性能が極めて高いことが確認された。

5-3 透水係数に対する評価

超強度コンクリートと従来コンクリートについて、インプット法による透水試験を実施した。その結果は図-12 に示すとおりである。超強度コンクリートは、供試体 3 本のうち 2 本はまったく浸透せず、従来コンクリートに比べて透水性に対する耐久性能が極めて高いことが確認された。

5-4 塩化物の浸透に対する抵抗性の評価

超強度コンクリートと従来コンクリートについて、塩化物の浸透に対する抵抗性試験を実施した結果を図-13 に示す。超強度コンクリートは、従来コンクリートに比べて塩化物の浸透に対する抵抗性が極めて高いことが確認された。

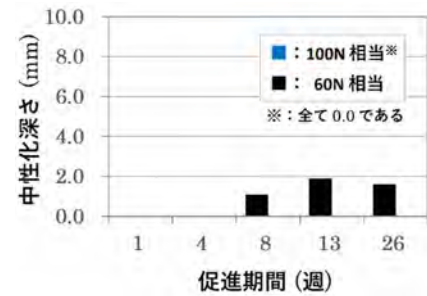
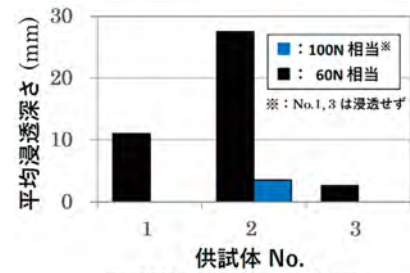


図-11 中性化促進試験の結果



注) 0.5Mpaで62日間、浸透を実施

図-12 透水試験の結果

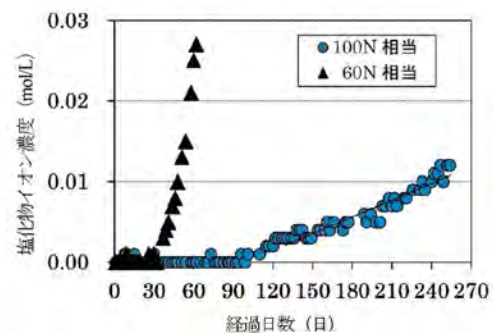


図-13 塩化物の浸透に対する抵抗性試験の結果

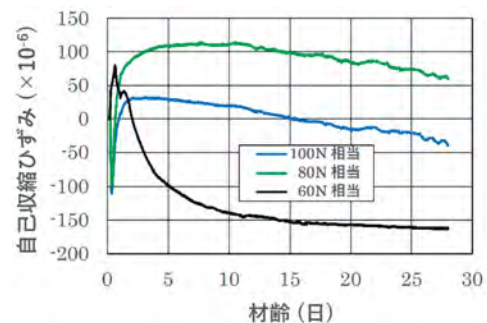


図-14 材齢と自己収縮ひずみ

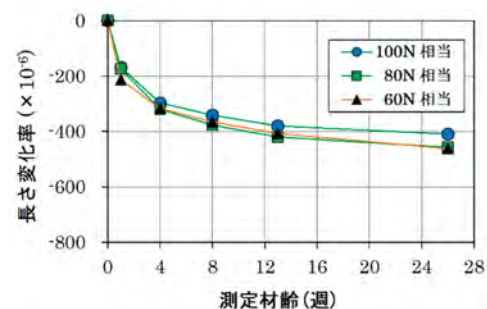


図-15 材齢と乾燥収縮による長さの変化率

5-5 自己収縮ひずみおよび乾燥収縮による長さの変化率の評価

超高強度コンクリート（80N/mm²、100N/mm²）と従来コンクリートについて自己収縮試験および乾燥収縮試験を実施した結果を図-14 と図-15 に示す。

超高強度コンクリートは、膨張材の効果により自己収縮ひずみが従来コンクリートよりも小さいこと（図-14）、乾燥収縮による長さの変化率は従来コンクリートと同等であること（図-15）から、従来コンクリートと同等以上の耐久性を有することが確認された。また、超高強度コンクリートを用いて試作した実物大の RC セグメントにおいても、継手金物周囲にひび割れなどが発生しないことを確認した⁵⁾。

5-6 クリープ特性の評価

超高強度コンクリートと従来コンクリートについて、クリープ試験および質量変化率の試験を実施した結果を図-16 と図-17 に示す。超高強度コンクリートは、クリープ係数および質量変化率について、従来コンクリートに比べて優れた性能を有していることが確認された。

5-7 DEF 発生の評価

超高強度 RC セグメントのエトリングタイトの遅延生成（DEF）によるひび割れの発生の影響を確認するため、圧縮強度 100N/mm² を有する超高強度コンクリートの硬化温度測定試験を実施した後、その試験体からコアを採取して、浸漬膨張量の計測、実体顕微鏡（BSM）、偏光顕微鏡（POM）、走査電子顕微鏡（SEM）による生成物の観察およびその定性分析を実施した⁷⁾。ここでは詳細を省略するが、エトリングタイトの生成およびそれによるひび割れの発生は確認されず、DEF の発生がないことが確認された。

5-8 耐久性能の評価

一連のコンクリートの耐久性能試験の結果、超高強度コンクリートは従来コンクリートより優れた耐久性能を有することが確認された。これは、超高強度コンクリートが従来コンクリートに比べて水結合材比が小さく、密実であることに起因するためと考えられる。

§ 6. 構造性能試験（軸力を導入した継手曲げ試験）⁹⁾

超高強度コンクリートによる RC セグメントの構造性能¹⁾を確認するため、設計基準強度 100N/mm² の超高強度 RC セグメントについて各種構造性能試験を実施した。

大深度地下を使用したシールドトンネルの試設計結果をもとに、実物大の半幅の平板型供試体を用いて以下の①～④の各種試験を行い、許容設計断面力レベルでの構造の健全性、設計の前提となる所定の耐力および継手の変形性能を確認した。また、推力試験（⑤）には、既存の型枠に超高強度コンクリートを打設したセグメントを

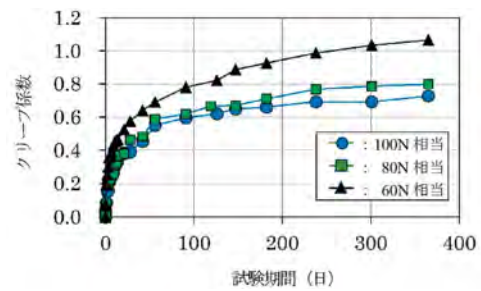


図-16 クリープ試験の結果

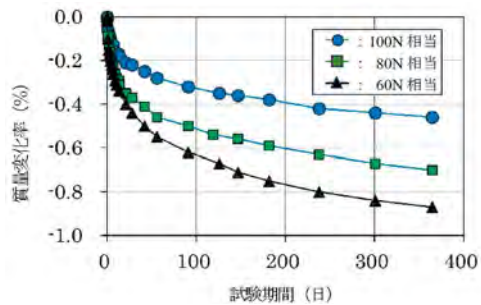


図-17 質量変化率試験の結果

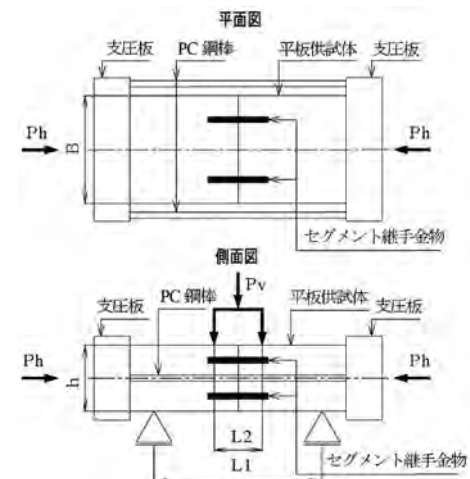


図-18 軸力を導入した継手曲げ試験の概要



写真-3 継手曲げ試験の試験状況

表-7 軸力を導入した継手曲げ試験の荷重条件

載荷方法		支持方法	支持長L1 (mm)	載荷長L2 (mm)
鉛直2点載荷	水平載荷	両端可動	4,400	1,100

表-8 供試体の断面寸法

供試体	厚さh (mm)	幅B (mm)
平板型	550	900

表－9 主鉄筋および継手の仕様

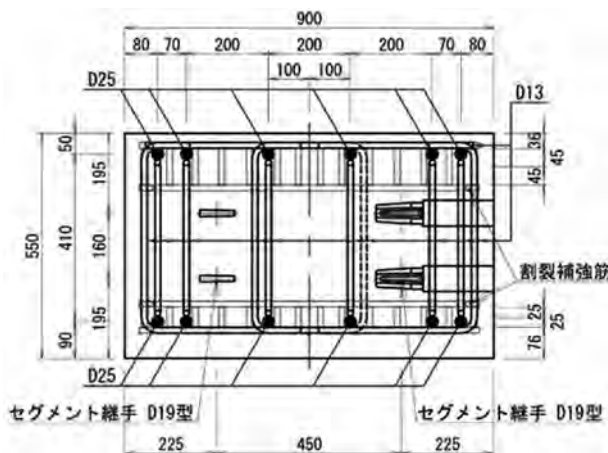
部材	仕様	配置
主鉄筋	SD490	D25×6本
コーンコネクター継手	D19型	2列×2段
アンカー筋	SD345	2本-D19

※アンカー筋断面積

D25型×1列/段: $A_s = 2\text{本-D25} \times 1\text{列/段} = 1,013.4\text{mm}^2/\text{段}$ D19型×2列/段: $A_s = 2\text{本-D19} \times 2\text{列/段} = 1,146.0\text{mm}^2/\text{段}$

表－10 継手曲げ試験の荷重手順

設定荷重状態	M_d (kN・m/幅)	N_d (kN/幅)
①大深度1 (75m)	360	5,890
②大深度2 (100m)	480	7,850
③終局	破壊まで	5,890



図－19 試験供試体の断面図

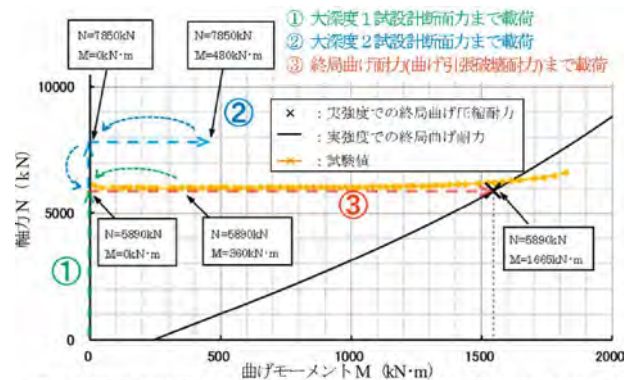
用いた。本稿では、代表例として、軸力を導入したセグメント継手の曲げ試験結果について報告する。

- ① 軸力を導入した単体曲げ試験
- ② 軸力を導入した単体せん断試験
- ③ 軸力を導入したセグメント継手の曲げ試験
- ④ リング継手のせん断試験
- ⑤ 推力試験

6－1 試験概要

図－18は継手曲げ試験の概要を、表－7は荷重条件を、写真－3は試験状況を示したものである。供試体は土被り75m(大深度1)と100m(大深度2)の深度を想定して試設計を行い、断面を設定した。供試体の断面寸法、主鉄筋および継手の仕様は、表－8と表－9および図－19に示すとおりである。

供試体の幅と主鉄筋の本数は別途実施した単体曲げ試験¹⁰⁾と同様に、実物大の設計断面の1/2とした。継手は設計断面を1/2にすると、コーンコネクター継手D25型が1列となるが、荷重時の安定性の確保の観点から、コーンコネクター継手D25型が1列と同等の断面積となるコーンコネクター継手D19型を2列とした。また、終局

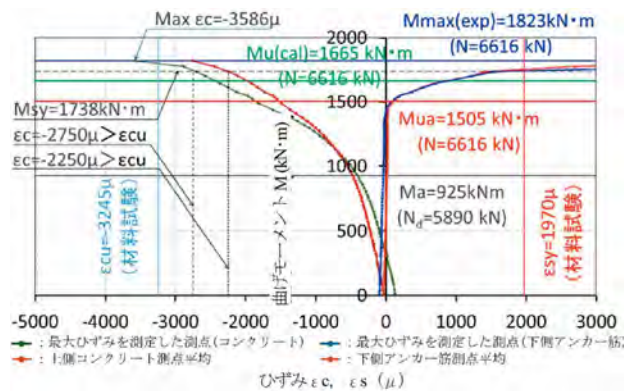


注1) 計画値 $N_d = 5890\text{ kN}$ (一定) の条件で試験を実施したが、鉛直荷重の過程で作用軸力は変化した(図4参照)
 2) 曲げモーメントには変形量と作用軸力が発生する二次曲げモーメント($8\alpha \times N_d / \lambda_d$)を付加

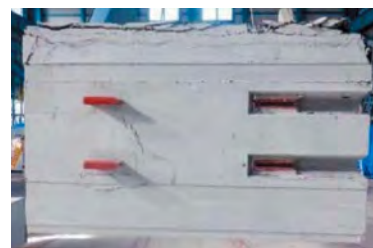
図－20 M－Nに対する荷重ステップの計画値と試験値

表－11 継手曲げ試験結果一覧表

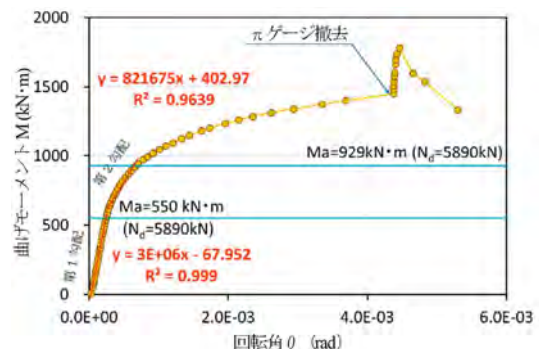
項目	強度 (N/mm ²)		M_u に対する安全率	
	コンクリート	主鉄筋		
設計基準強度	100.0	345	$1823/1505 = 1.21$	1.00
実強度	113.7	394	$1823/1665 = 1.09$	$1.0/1.1 = 0.91$



図－21 M－εの関係



写真－4 終局時のひび割れ発生状況



図－22 M－θの関係

時に継手の縁端部の圧縮応力の集中によって発生するひび割れを抑制するために、割裂補強筋を配置した。

試験では、超高強度 RC セグメントのセグメント継手の力学的特性、継手およびコンクリートのひずみの状況、および回転ばね定数の確認を行った。

載荷手順は表一10 および図一20 に示すとおりである。大深度 1 の許容断面力を用いた (①) のち、大深度 2 の許容断面力を用いた (②)。その後、軸力を一定の状態 (①) に戻して、終局曲げ圧縮耐力 (M_u) まで曲げ載荷を行った (③)。

6-2 試験結果

試験結果を表一11 に示す。終局曲げ耐力は、いずれも設計基準強度、実強度に対して所要の安全率を上回った。図一21 は M とアンカー筋のひずみ ε との関係である。引張側のアンカー筋が材料試験の降伏ひずみ $\varepsilon_{sy} = 1,970\mu$ に達したときの圧縮側コンクリートのひずみは最大でも $2,750\mu$ であり、コンクリートの圧縮強度試験の最大圧縮ひずみ $\varepsilon'_{cu} = 3,245\mu$ 以下であった。終局曲げ載荷時の圧縮側コンクリートの最大ひずみは $3,586\mu$ であり、最大圧縮ひずみ $3,245\mu$ 以上であったことから、コンクリートが圧壊に至ったものと考えられる (写真一4 参照)。

図一22 は M と継手の回転角 θ との関係である。同図より、回転ばね定数実測値は設計値と同程度 ($k\theta(\text{exp})/k\theta(\text{cal}) = 822,000/744,000 = 1.10$) であり、継手の回転ばね定数は従来と同様の方法で計算できることが確認された。

以上より、本セグメントの継手部は、高軸力下においても従来セグメントと同様に設計することが可能であり、終局耐力は理論値を上回ることが確認された。

6-3 構造性能の評価

軸力を導入した継手曲げ試験を実施した結果、超高強度 RC セグメントのセグメント継手部は、高軸力作用下において設計で要求される所要の構造性能 (曲げ耐力および回転ばね定数) を有していることが確認された。

§ 7. おわりに

超高強度 RC セグメントの開発では、超高強度コンクリートの製造と強度および耐火性能、耐久性能、DEF によるひび割れ発生、セグメントの耐力と変形性能を確認することを目的として、配合試験、圧縮強度試験、小型平板型供試体を用いた耐火試験、耐久性試験、硬化温度測定試験と浸漬膨張量試験および実物大の平板型供試体による構造性能試験を実施した。これらの試験により、以下のことが確認された。

- ① pp 繊維と SF を混入した超高強度コンクリートが、所定の強度 ($80, 100, 120\text{N/mm}^2$) を確保できる
- ② 超高強度コンクリートは、pp1 繊維を $0.3\text{vol}\%$ 混入することで、道路トンネルの耐火に対する要求性能を満

足し、従来コンクリートと同等の耐火性能を有する

- ③ 超高強度コンクリートは、従来コンクリートより優れた耐久性能を有する
- ④ エトリングタイトの生成およびそれによるひび割れは確認されず、DEF の発生がない
- ④ 超高強度 RC セグメントのセグメント継手部は高軸力作用下において設計で要求される所要の構造性能を有している

なお、本稿では記述を省略したが、上記の他、実物大の型枠を用いて本セグメントの製作性試験を実施した結果、超高強度コンクリートを用いた超高強度 RC セグメントが、従来のセグメントと同様な方法でできることが確認された。

超高強度 RC セグメントは大深度法が適用され、大規模建物荷重が作用する条件下において、シールドトンネル工事のコスト縮減と合理化を実現できる技術である。今後、同種のシールド工事に展開していく予定である。

謝辞. 超高強度 RC セグメントの共同開発者である戸田建設 (株) と日本コンクリート工業 (株) の担当の皆様、深く感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 三戸 他「超高強度 RC セグメントの開発その 1 - 超高強度コンクリートの製造と RC セグメントの製作 -」, 土木学会第 79 回年次学術講演会 VI -929 2024.9
- 2) シリカフェームプレミックスセメント (SFPC) パンフレット, 太平洋セメント株式会社 2021.3
- 3) 河上 他「高強度コンクリートの力学特性に関する実験的研究」, 三井住友建設研究所報告第 1 号 2003
- 4) 田中 他「超高強度 RC セグメントの開発その 2 - 超高強度コンクリートの耐火試験」, 土木学会第 79 回年次学術講演会 VI -930 2024.9
- 5) 椎名 他「大断面道路トンネル用 RC セグメントの耐火試験と設計への反映」, 西松建設技報 Vol40 2017
- 6) 三戸 他「超高強度 RC セグメントの開発その 4 - 超高強度コンクリートの耐久性 -」, 土木学会第 80 回年次学術講演会 VI -1014 2025.9
- 7) 田中 他「超高強度 RC セグメントの開発その 5 - 超高強度コンクリートの浸漬膨張量試験他 -」, 土木学会第 80 回年次学術講演会 VI -1015 2025.9
- 8) 川端 他「高温蒸気養生を行ったコンクリートにおける DEF 膨張に関する検討」, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.4 2011
- 9) 小嶋 他「超高強度 RC セグメントの開発その 6 - 軸力を導入した継手曲げ試験 -」, 土木学会第 80 回年次学術講演会 VI -1016 2025.9
- 10) 小嶋 他「超高強度 RC セグメントの開発その 3 - 軸力を導入した単体曲げ試験」, 土木学会第 79 回年次学術講演会 VI -931 2024.9