

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

Fire resistance tests of RC shield segments for a large section road tunnel, and use the measurement data in segment design

椎名 貴快* 山本 達也**
 Takayoshi Shiina Tatsuya Yamamoto
 坪井 広美*** 野本 雅昭***
 Hiromi Tsuboi Masaaki Nomoto

要 約

大断面道路トンネルのシールド工事において、RCセグメント自体に耐火性能（爆裂抵抗性、温度上昇特性）を持たせるため、ポリプロピレン（以下、PP）繊維を混入したコンクリートが採用された。耐火性能の検証は、小型および実大模擬試験体を用いたRABT60加熱曲線による加熱試験で行い、試験の結果、コンクリート1 m³ 当り PP 繊維を 2.0 kg 以上混入することで、RCセグメントは所要性能を確保できた。また測定温度分布や耐火代 65 mm 等を考慮したセグメント断面での応力度照査の結果、当初計画配筋の一部に補強鉄筋を配置することで、加熱後も RCセグメントは構造的に安全であることを確認できた。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 耐火性能確認実験
- § 3. 設計への反映
- § 4. まとめ

§ 1. はじめに

道路トンネル内での車両火災等により、トンネル内部が高温の火炎に曝されても、トンネル自体は所要の耐火性を有し、構造的に安全であることが求められる。

例えば、トンネルをシールド工法で施工した場合、覆工には各種セグメントが使用されるが、二次覆工を省略してセグメントの耐火性を確保するには、別途、耐火工が必要となる。従来の耐火工は、耐火パネルの設置や耐火材の吹付け等が行われてきたが、最近ではセグメント自体を耐火構造とする方法が主流である。具体的には、RCセグメントの場合、PPやPVA（ビニロン）等の有機繊維を混入した耐火コンクリートを採用する。しかし、コンクリートの耐火性能（爆裂抵抗性、温度上昇特性）は、使用材料やコンクリート強度、配筋条件等によっても異なるため、事前に加熱試験で所要の耐火性能を有しているか検証し、必要に応じて配筋の修正や耐火代の増厚等

の対策を検討する必要がある。

著者らは、セグメント外径 13 m 超の大断面道路トンネル工事に使用するシールド用 RCセグメントを対象に、有機繊維（PP、直径φ 48 μm ×長さ 20 mm）（図-1）を混入したコンクリートの耐火性能を加熱試験で検証した後、解析による構造照査を行った。まず、小型試験体による加熱試験でコンクリートの爆裂防止に必要な PP 繊維の混入量を選定した後、実大模擬試験体で所要の耐火性能を有しているか確認した¹⁾。また、セグメント内部の測定温度分布や耐火代等を考慮したセグメント断面にて応力度照査を行い、照査結果をセグメント実施設計に反映させた²⁾。

本稿では、RCセグメントの耐火試験の概要と結果およびセグメント応力度照査の結果について述べる。



組成	ポリプロピレン 100%
密度	0.91 g/cm ³
繊度	17 dtex
直径	φ 48 μm
長さ	20 mm

（備考）1dtex = 10,000m で質量 1g の糸

図-1 有機繊維

* 技術研究所土木技術グループ

** 土木設計部設計2課

*** 関東土木(支)

§2. 耐火性能確認実験

2-1 小型試験体実験（基礎実験）

(1) 概要

任意の量のPP繊維を混入し、所定のフレッシュ性状（スランプ、空気量、塩化物含有量）および圧縮強度を満足するコンクリートで小型試験体を作製する。本試験の目的は、同試験体の加熱試験を行い、加熱後もコンクリート面が爆裂しない繊維混入率を確認し、コンクリート暫定配合を選定することである。なお、本工事ではセグメント製作は2工場体制としているが、本稿では1工場のデータのみ記載した。

(2) 試験体と試験ケース

試験体の寸法は、幅300mm×高さ300mm×長さ1,200mmとした。過去の実績で、加熱面から300mm位置のコンクリート温度は加熱中にほとんど変化せず、コンクリートの爆裂現象との因果関係が認められないことから、高さ300mmの試験体とした。また耐火炉の使用上の制約条件等も考慮した。なお、試験体の製作は、実際のRCセグメントと同様の製作工程（養生条件ほか）の下で実施した。

コンクリート中のPP繊維の混入量は、工事仕様書に示された必要量(2.0kg/m³以上)を考慮して、4水準(0.0[比較用], 2.0, 2.5, 3.0kg/m³)とした(表-1)。

(3) コンクリート配合と使用材料

表-2にコンクリートの配合仕様、表-3にコンクリート配合と使用材料を示す。コンクリートは設計基準強度51N/mm²で、W/Cは若材齢時での圧縮強度の確保のため31% (≦45%)、普通ポルトランドセメントを使用し、骨材には熱変質しにくい硬質砂岩を用いた。PP繊維は製造時に水分を含んでいるため、電子レンジ法(電子レンジの出力に応じて繊維の融点を超えない範囲で乾燥時間を調整)にて水分率を確認し、繊維計量値を補正した。

表-1 試験ケース

No.	コンクリート種別	PP繊維混入量		備考
		kg/m ³	vol.%	
1	ベースコンクリート	0.0	0.00	(比較用)
2	耐火コンクリート (繊維混入)	2.0	0.22	工事仕様書で 2.0kg/m ³ 以上と 規定
3		2.5	0.27	
4		3.0	0.33	

備考) 最小混入量2.0kg/m³ (特記仕様書より)

表-2 コンクリート配合仕様

項目	仕様	備考
設計基準強度	51N/mm ²	管理材齢28日
スランプ	3.0±1.5cm	
空気量	2.0±1.5%	
水セメント比	45%以下	特記仕様書より
粗骨材の最大寸法	20mm	
粗骨材の岩種	砂岩系	熱変質を考慮

(4) 加熱条件

写真-1のように、試験体を加熱炉上部に蓋のように3体並列で設置し、試験体の下面(加熱範囲[1体当たり]:幅300mm×長さ900mm)からRABT60加熱曲線(図-2)で加熱した。

(5) 実験結果

①フレッシュ性状、繊維混入率、圧縮強度

表-4に、コンクリートのフレッシュ性状、繊維混入率および圧縮強度の測定結果を示す。フレッシュ性状は基準を満足し、繊維混入率はすべて95%以上の良好な結果であった。また圧縮強度は所定材齢で基準をクリアし、管理材齢28日では設計基準強度の1.4倍以上の値を得た。

表-3 コンクリート配合と使用材料

No.	粗骨材 最大寸法 G _{max} (cm)	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	繊維 PP	混和剤 Ad
1	20	31.0	47.5	150	484	842	942	0	4.340
2								2.0	4.340
3								2.5	4.480
4								3.0	4.600

C: 普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm³
 S: 川砂(砂岩), 表乾密度2.63g/cm³, 吸水率1.34%
 G: 玉砕石(砂岩), 表乾密度2.65g/cm³, 吸水率0.64%
 PP: ポリプロピレン繊維, 密度0.91g/cm³, 水分率35±5%(製造時)
 Ad: 高性能減水剤 標準形 (I種)
 W: 地下水
 備考) PP繊維の水分率を電子レンジ法で確認して繊維計量値を補正



写真-1 加熱試験状況 (小型試験)

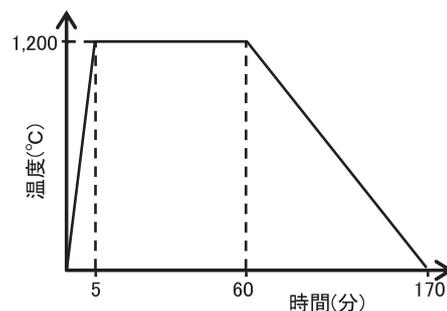


図-2 RABT60加熱曲線

表-4 フレッシュ性状, 繊維混入率, 圧縮強度

No.	フレッシュ性状			繊維混入率 (%)	圧縮強度(N/mm ²)			
	スランプ (cm)	空気量 (%)	塩化物含有量 (kg/m ³)		6.5 時間 (脱型)	4 日 (養生後)	28 日 (管理材齢)	耐火試験時
	3.0 ±1.5	2.0 ±1.5	≤0.30		規定量 ±20%	≥15	≥40.8	≥51
1	(22.0)	(1.0)	0.062	—	18.8	56.1	75.7	78.8
2	3.5	2.9	0.068	96.6	18.4	56.7	72.7	78.4
3	2.5	2.9	0.055	96.8	19.5	56.0	71.4	76.9
4	3.0	2.6	0.059	97.3	18.0	56.1	74.4	79.8

備考) 材齢4日強度は水中養生終了時で、(設計基準強度51×0.8)以上の強度が必要
No.1は繊維混入前で、()内値はコンクリートの性状を示す



(a) No.1 (繊維混入なし)



(b) No.2 (繊維混入量 2.0 kg/m³)

写真-2 試験後の加熱面状況 (小型試験)

②加熱面状況

写真-2に試験後の加熱面状況を示す。繊維混入なし (0.0 kg/m³) では加熱面に爆裂が生じ、爆裂面積率 58.4% (=爆裂面積/加熱面積) で、最大爆裂深さ 17 mmであった。一方、繊維混入率 2.0 kg/m³ 以上ではコンクリートに爆裂や剥離等は確認されなかった。以上より、爆裂防止に必要な繊維混入率は最少量 2.0 kg/m³ を選定した。

2-2 実大模擬実験

(1) 概要

小型試験体の加熱試験で選定したコンクリートの暫定配合を用いて RC セグメントの実大模擬試験体を作製し、同試験体を用いた加熱試験で所要の耐火性能を満足するか検証する。

(2) 耐火要求性能

表-5にRCセグメントの耐火要求性能を示す。コンクリート(耐火代以深)、鉄筋、継手金物および止水材(地山側)に対する許容温度がそれぞれ設定されている。この他、加熱時および加熱後に崩壊もしくは過大な変形を生じないことや、耐力に影響を及ぼすような爆裂等を生

表-5 耐火要求性能 (許容温度)

コンクリート (耐火代以深)	鉄筋	継手金物	止水材 (地山側)
350℃以下	300℃以下	350℃以下	100℃以下

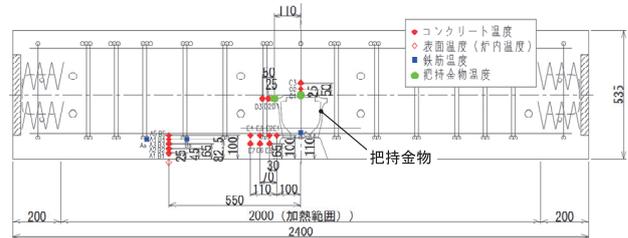


図-3 試験体 (本体部)

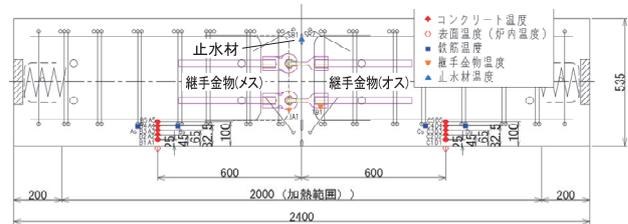


図-4 試験体 (継手部)

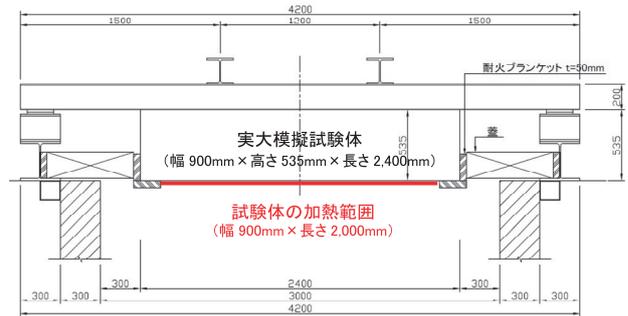


図-5 耐火炉への試験体設置

じないことが求められる。

(3) 試験ケース

試験体は、本体部と継手部の2種類とし、本体部は幅 900 mm × 高さ 535 mm (実桁高と同一) × 長さ 2,400 mm で、内面側中央に把持金物 (内部は未充填) を配置し、把持金物による周囲への温度影響についても確認した (図-3)。また、継手部は幅 900 mm × 高さ 535 mm × 長さ 1,200 mm の2体を継手金物 (上下2段配置) により連結し、連結部の断面には所定位置に止水材を設置した (図-4)。耐火代は 65 mm (当初規定) で、本体部および継手部ともに、内挿した PC 鋼棒により設計断面力を作用させた状態で加熱試験を実施した。

(4) 加熱方法

図-5に示すように、大型水平耐火炉 (幅 3 m × 奥行 4 m × 深さ 1.5 m) を使用し、耐火炉の上方に試験体を設置し、下面一方向から RABT60 加熱曲線に準じて加熱した。加熱範囲は幅 900 mm × 長さ 2,000 mm とした。



写真-3 加熱面状況 (実大実験：試験前後)

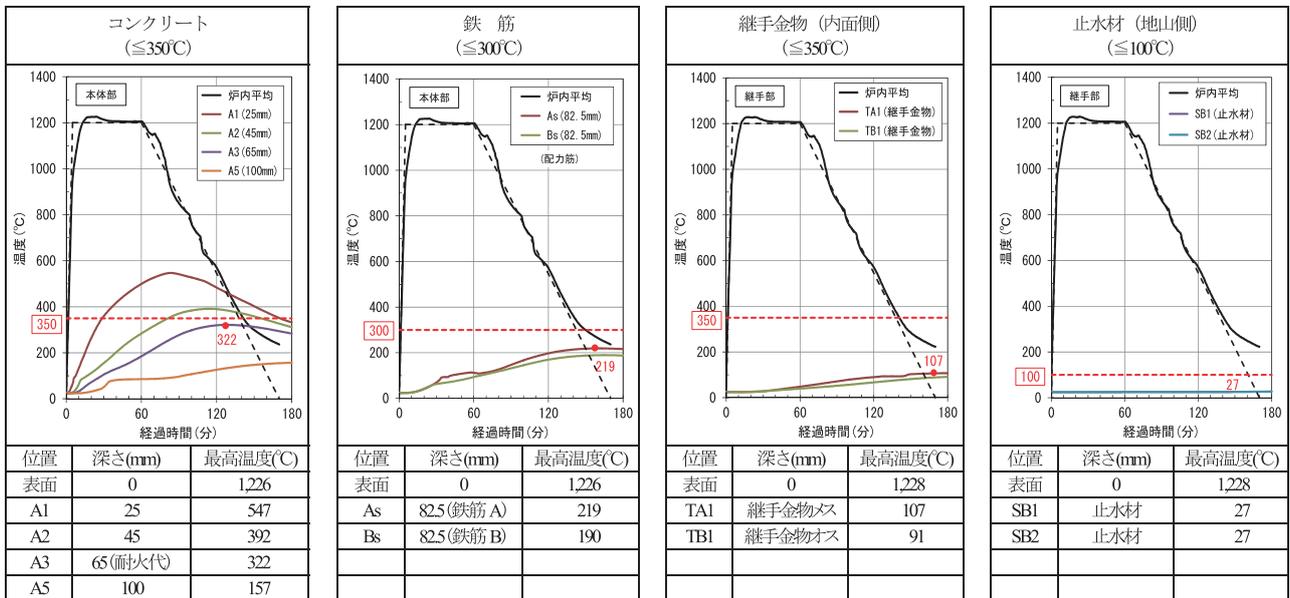


図-6 受熱温度履歴 (コンクリート, 鉄筋, 継手金物, 止水材)

(5) 実験結果

① 圧縮強度

加熱試験時におけるコンクリート圧縮強度は 76.9 ~ 83.2 N/mm² で、小型試験体を用いた事前試験の時と同程度であった。

② 加熱面状況

写真-3 に試験前後での加熱面状況を示す。本体部および継手部ともに、加熱後は薄黄色を帯びた焼色に変色しているが、コンクリートの爆裂や剥離の箇所はなく、有害なひび割れも確認されなかった。

③ 試験体内部の受熱温度履歴

図-6 に本体部および継手部におけるコンクリート、鉄筋、継手金物および止水材 (地山側) の受熱温度履歴を示す。なお、把持金物周辺の温度履歴は別途後述する。

温度履歴結果から、耐火代 65 mm 位置でのコンクリート、鉄筋、継手金物 (内面側) および止水材 (地山側) の最高温度は、それぞれ規定の許容温度 (表-5) 以下であることを確認した。

④ 中性化深さ

加熱試験後に採取したコア供試体にフェノールフタレイン 1% エタノール溶液を噴霧して中性化深さを確認した。測定の結果、加熱による中性化深さは平均 2.0 mm で、鉄筋かぶりに対して極めて小さい値であった。

§ 3. 設計への反映

3-1 耐火代の設定

火災の高熱により覆工コンクリート (RC セグメント)

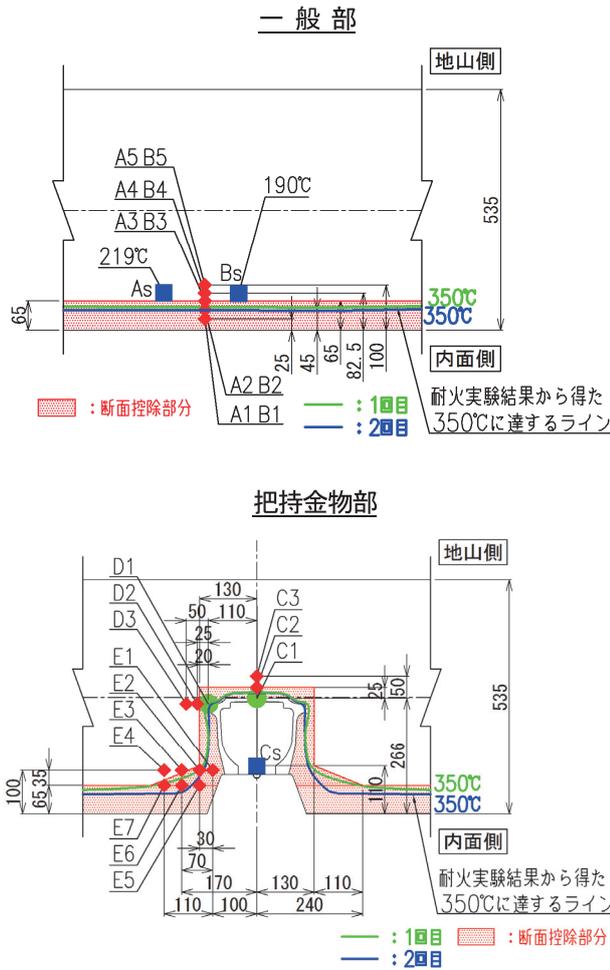


図-7 コンクリートの許容温度ライン

は、爆裂や強度低下が発生することが知られている。ここでは、耐火実験の結果をもとに、RCセグメントの構造部材であるコンクリートと鉄筋が火災時にそれぞれの許容温度（表-5参照）を超える範囲を耐火代と設定し、設計断面力に対して、耐火代分を断面控除したRC断面においても許容応力度内におさまる構造とした。

(1) コンクリート

耐火代の設定にあたり、まず、セグメント一般部（把持金物など表面に凹凸がない部分）と把持金物部とに分けて、それぞれ2回行った実大模擬実験結果の最高温度をセグメント断面図にプロットし、コンクリートの許容温度（350°C）に達した境界ラインを作画した。耐火代の設定は、その境界ラインを包括する範囲とした。一般部と把持金物部の耐火代設定範囲を図-7に示す。

(2) 鉄筋

鉄筋に関しても、コンクリートと同様に、実大模擬実験結果の最高温度プロットから、鉄筋の許容温度（300°C）に達した境界ラインを作画した（一例を図-8に示す）。全6種類のRCセグメントの配筋図に、その境界ラインを重ね合わせた結果、全てのケースにおいて把持金物に最も近接する2本の主鉄筋位置が、300°Cを超える範囲内に入ることが確認された。よって、応力度照査は、検

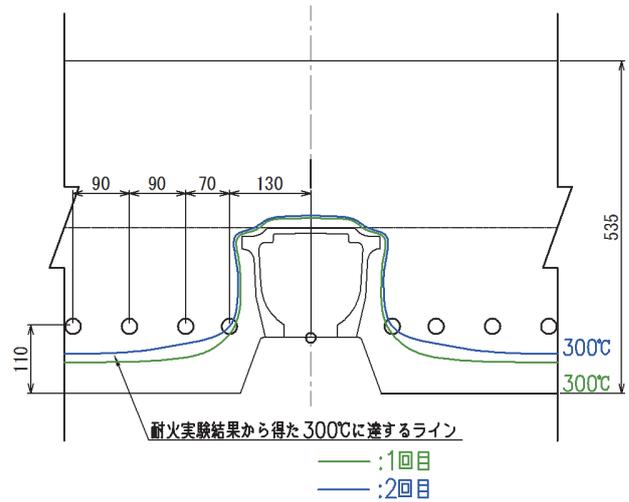


図-8 鉄筋の許容温度ライン

討断面からこの把持金物周辺の2本の主筋を省き、考慮しないものとした。

3-2 検討断面の設定

全6種類のRCセグメントの断面から、3-1節で設定した一般部と把持金物部のコンクリートの耐火代および一部の鉄筋を控除し、応力度照査断面を設定した（一例を図-9に示す）。なお、セグメントの発生断面力の計算時は、耐火代を加味した全断面の剛性にて行い、床版より上方の範囲については、応力照査時には、耐火代の欠損を考慮した。

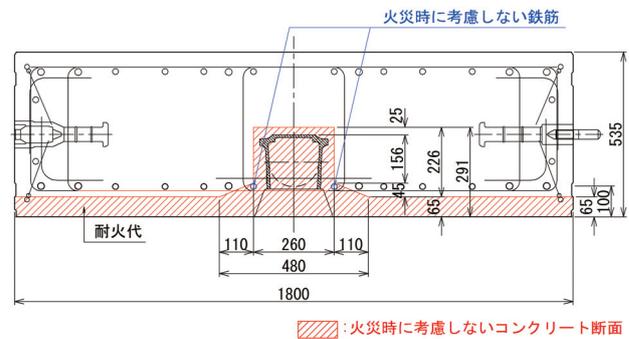


図-9 検討断面

3-3 耐火補強鉄筋

検討は、常時と地震時において行った。常時で応力度照査を行った結果、許容応力度を超過する場合においては、補強鉄筋を追加で配置し、許容応力度内におさまる断面とした。常時で決定した断面は、耐震設計においても、レベル1地震動に対しては許容応力度法で、レベル2地震動に対しては終局耐力設計法で、それぞれ許容応力および終局耐力を超過しないことを確認した。補強鉄筋の配置は、実績も考慮し、鉄筋のあき等に配慮した配筋とした。耐火補強鉄筋配置の一例を図-10に示す。

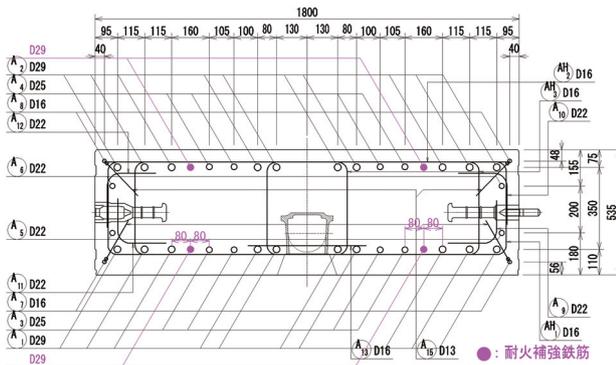


図-10 セグメント配筋図

§4. まとめ

本稿では、RCセグメントを模擬した試験体の加熱試験を実施し、以下の点が確認された。

- ・耐火用PP繊維を2.0 kg/m³混入し、耐火代65 mmを確保することで、コンクリートや鉄筋、継手金物および止水材は許容温度以下となり、コンクリートに爆裂や剥離、有害なひび割れ等は生じないことを確認した。
- ・把持金物に最も近接する主鉄筋の温度が許容温度を超えた場合の対策として、別途、補強鉄筋を配置することで、構造の安全性を確保できることが確認できた。

参考文献

- 1) 野本雅昭, 椎名貴快:RCセグメント耐火性能確認(その1:耐火実験結果), 土木学会第72回年次学術講演会, VI部門, 2017.9 (投稿中).
- 2) 山本達也, 村上初央, 坪井広美:RCセグメント耐火性能確認(その2:設計への反映), 土木学会第72回年次学術講演会, VI部門, 2017.9 (投稿中).
- 3) 例えば, トンネル構造物のコンクリートに対する耐火工設計施工指針(案), 平成26年6月, 公益社団法人土木学会.
- 4) 例えば, シールドトンネル設計・施工指針, 平成21年2月, 公益社団法人日本道路協会.
- 5) 例えば, トンネル標準示方書【シールド工法・同解説】, 2006年, 公益社団法人土木学会.
- 6) 例えば, コンクリート標準示方書【構造性能照査編】, 2002年, 公益社団法人土木学会.
- 7) 例えば, 鉄道構造物等設計標準・同解説 シールドトンネル, 平成14年12月, 鉄道総合技術研究所.
- 8) 例えば, 道路橋示方書・同解説 I 共通編 III コンクリート橋編, 平成24年3月, 公益社団法人日本道路協会.
- 9) 例えば, トンネルライブラリー23 セグメントの設計【改訂版】, 平成22年2月, 公益社団法人土木学会 トンネル工学委員会.